

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	コンクリート中における弾性波伝播挙動とその劣化評価への適用に関する研究
Title(English)	Propagation behavior of elastic waves in concrete and its application to evaluation of materials deterioration
著者(和文)	岩波光保
Author(English)	Mitsuyasu Iwanami
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第4028号, 授与年月日:1999年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第4028号, Conferred date:1999/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

博士論文

コンクリート中における弾性波伝播挙動と その劣化評価への適用に関する研究

平成 11 年 3 月

東京工業大学大学院 理工学研究科
土木工学専攻 96D18014

岩波 光保

コンクリート中における弾性波伝播挙動と その劣化評価への適用に関する研究

目次

第1章 序論	1
1-1 研究の背景	1
1-2 研究の目的	6
1-3 本論文の構成	7
第2章 既往の研究	10
2-1 はじめに	10
2-2 コンクリート中における弾性波伝播挙動に関する研究の現状	11
2-3 コンクリートの劣化とその評価	14
2-3-1 コンクリートの劣化	
2-3-2 コンクリートの劣化評価の現状	
2-3-3 本研究で対象とする劣化	
2-4 コンクリートの非破壊試験法と劣化評価への適用に関する研究の現状	18
2-4-1 各手法の概要とその劣化評価への適用例	
2-4-2 非破壊試験法によるコンクリートの劣化評価における問題点	
第3章 入射弾性波の特性評価と試験条件に関する検討	28
3-1 はじめに	28
3-2 入射弾性波の特性評価	30
3-2-1 概要	
3-2-2 弾性波測定システムの概要	
3-2-3 入射弾性波の周波数特性に関する検討	
3-2-4 入射弾性波の指向特性に関する検討	
3-3 試験条件に関する検討	41
3-3-1 概要	
3-3-2 コンクリート表面に対する適切なセンサ接触方法に関する検討	
3-3-3 コンクリートの表面状態が試験結果に及ぼす影響	
3-3-4 試験実施材齢が試験結果に及ぼす影響	
3-3-5 供試体形状および寸法が試験結果に及ぼす影響	
3-4 本章のまとめ	56
第4章 コンクリート中における弾性波伝播挙動に関する検討	58
4-1 はじめに	58

4-2	コンクリート構成材料単体中における弾性波伝播挙動	60
4-2-1	概要	
4-2-2	セメントペースト単体による検討	
4-2-3	骨材単体による検討	
4-2-4	まとめ	
4-3	モデル骨材を用いた弾性波伝播挙動に関する基礎的検討	73
4-3-1	概要	
4-3-2	モデル骨材の大きさおよび量が弾性波伝播挙動に及ぼす影響	
4-3-3	異なる材質のモデル骨材を用いた検討	
4-3-4	理論的検証	
4-3-5	まとめ	
4-4	コンクリート中の骨材が弾性波伝播挙動に及ぼす影響	91
4-4-1	概要	
4-4-2	骨材最大寸法に関する検討	
4-4-3	骨材形状に関する検討	
4-4-4	骨材量に関する検討	
4-4-5	骨材界面性状に関する検討	
4-4-6	まとめ	
4-5	コンクリートの配合条件が弾性波伝播挙動に及ぼす影響	117
4-5-1	概要	
4-5-2	コンクリートの W/C に関する検討	
4-5-3	空気量に関する検討	
4-5-4	まとめ	
4-6	コンクリート中のマイクロクラックが弾性波伝播挙動に及ぼす影響	128
4-6-1	概要	
4-6-2	モデルマイクロクラックを用いた検討	
4-6-3	実際のマイクロクラックに関する検討	
4-6-4	まとめ	
4-7	コンクリートの施工条件が弾性波伝播挙動に及ぼす影響	146
4-7-1	概要	
4-7-2	コンクリートの締固め条件に関する検討	
4-7-3	コンクリートの養生条件に関する検討	
4-7-4	まとめ	
4-8	本章のまとめ	158
第5章 弾性波伝播特性を利用したコンクリートの劣化評価		161
5-1	はじめに	161
5-2	先行載荷を受けたコンクリートの劣化評価	163
5-2-1	概要	
5-2-2	実験概要ならびに劣化の定量化	
5-2-3	劣化の進行とコンクリート特性の関係	
5-2-4	弾性波伝播特性を利用したコンクリートの劣化評価	
5-2-5	まとめ	

5-3	凍結融解作用を受けたコンクリートの劣化評価	175
5-3-1	概要	
5-3-2	実験概要ならびに劣化の定量化	
5-3-3	劣化の進行とコンクリート特性の関係	
5-3-4	弾性波伝播特性を利用したコンクリートの劣化評価	
5-3-5	まとめ	
5-4	アルカリ骨材反応を生じたコンクリートの劣化評価	188
5-4-1	概要	
5-4-2	実験概要ならびに劣化の定量化	
5-4-3	劣化の進行とコンクリート特性の関係	
5-4-4	弾性波伝播特性を利用したコンクリートの劣化評価	
5-4-5	まとめ	
5-5	複数の要因による劣化を受けたコンクリートに関する検討	202
5-5-1	概要	
5-5-2	実験概要	
5-5-3	実験結果および考察	
5-5-4	まとめ	
5-6	本手法の実構造物への適用に際しての課題	209
5-7	本章のまとめ	212
第6章	結論	220
	謝辞	227
	参考文献	228

第1章

序論

1-1 研究の背景

「メンテナンスフリー」であると考えられてきたコンクリート構造物の早期劣化現象が顕在化し、「コンクリート神話」は崩壊した。しかし現在のところ、コンクリート構造物の高耐久化や点検・検査技術や補修・補強技術の飛躍的な進歩により問題は沈静化している。一方で高度成長時代に大量に建造された社会資本施設の更新時期が到来しようとしている。このような状況において、すべての構造物を作り替えることは、昨今の経済状態や環境問題に対する国民意識の高揚を考えても不可能に近い。したがって、これからの時代は、既存コンクリート構造物を適切に維持管理していくことが重要となることに疑う余地はない。実際、建設省の試算¹⁻¹⁾によると、我が国の政府関連の建設投資総額に占める維持管理関連費用の割合は、1990年にはおおよそ3割ほどであったが、2010年には5割を超えるものと推測されている。またイギリスにおいては、現在建設予算の約4割が維持管理関連に使われており、その額は国内総生産（GDP）全体の約4%を占めるに至っている¹⁻²⁾。

まさに、「21世紀は維持管理の時代」であり、今後構造物の維持管理の重要性がますます高まっていくものと考えられる。しかし、これから我が国は超高齢者社会に突入することになり、財政面での制約あるいは専門技術者の不足など、多くの社会・構造的問題が生じることとなる。そこで重要となるのが、構造物の維持管理システムの合理化・省力化

である。図 1.1.1 に、コンクリート構造物の維持管理のフロー¹⁻³⁾を示す。このようにコンクリート構造物の維持管理においては、まず構造物の劣化診断を目的として点検作業を行い、その結果をもとにその後の劣化進展を予測する。そして、構造物の耐用年数、満足すべき性能・機能を考慮に入れた上で補修・補強対策の要否の判定を行い、必要であれば適切な対策工を実施する。したがって、フローのスタートである構造物の劣化診断は、適切な維持管理の鍵を握るものであり、それを的確に実施することは、システム全体の合理化をもたらすものと考えられる。

コンクリート構造物の劣化診断を的確に行うためには、診断すべき対象を明確にし、それぞれの対象ごとに適切な手法で評価を行うことが肝要である。しかしながら、コンクリート構造物においては、対象とする劣化ごとに適切な評価手法は異なることが一般的であり、それぞれの評価手法の適用対象や適用限界を的確に把握しておくことが必要となる。またコンクリート構造物の劣化診断時に評価すべき対象として、コンクリートのひび割れ発生状況、あるいは鉄筋の腐食状態などが存在するが、このような劣化が顕在化した後では補修・補強に多大なコストと労力が必要となる。したがって、このような状況に至るよりも前の段階で上記の劣化を誘発する原因となるコンクリートの劣化を適切に評価することができれば、いわゆる軽傷のうちに手を施すことが可能となり、ローコストで手間をかけずに構造物の寿命を延ばすことができ、コンクリート構造物の維持管理にとって合理的である。その概念図を図 1.1.2 に示す¹⁻⁴⁾。

現在のところコンクリートの劣化状態に関しては、構造物外観の目視観察や構造物から採取したコアの一軸圧縮試験を行うことにより評価がなされている。しかしながら、目視観察結果はあくまで主観的なものであり、また構造物表面のみの情報しか取り扱うことができず、構造物内部の劣化状態については評価することができない。またコア試験片の一軸圧縮試験を行っても、圧縮強度の評価はできるものの、コンクリート内部の劣化状態に関する直接的な情報については得ることができない。またコンクリートの圧縮強度は、コンクリート中のマイクロクラックの存在に鈍感であり、コンクリートの耐久性と関連の深い物質浸透抵抗性を評価することは難しい。

そこで、コンクリートの劣化評価に対して適切な非破壊試験法を適用すれば、圧縮試験では得られないコンクリートの劣化状態に関する補完的な情報を得られるようになり、より信頼性の高いコンクリートの劣化評価が可能となるものと考えられる。またコンクリートの劣化状態の経時変化についても追跡できるようになるため、維持管理フローにおける

劣化進展予測を行う上での有益な情報を提供できるようになると考えられる。

さらに将来的に本手法に関連する分野の研究・開発が進み、非破壊試験のみによるコンクリートの劣化評価手法が確立されれば、構造物に一切の損傷を与えずに、ローコストで効率的な構造物診断が可能となり、コンクリートの劣化状態に関する情報を客観的に、かつ定量的に得られるようになることが期待される。

このような目的を達成するために最適な非破壊試験法として、弾性波を用いた手法が考えられる。なぜなら、弾性波を用いた手法であれば、コンクリート躯体に一切の損傷を与えることなく、材料内部の劣化状態に関する詳細な情報を、弾性波伝播速度あるいは弾性波の周波数特性といった形で引き出すことができるためである。

しかしながら、コンクリート中における弾性波伝播挙動については未解明な部分が多く残されており、このことが手法自体の信頼性を損ねているといっても過言ではない。したがって、コンクリート中における弾性波伝播挙動について基礎的な検討を行い、コンクリートの劣化の進行にともなう弾性波伝播挙動の変化について、その原理を明らかにする必要がある。また弾性波を用いた手法としては、他にもコンクリートのひび割れ深さ推定法¹⁻⁵⁾、コンクリートの圧縮強度推定法¹⁻⁶⁾、AE法によるコンクリートのひび割れモニタリング手法¹⁻⁷⁾など、さまざまなものが存在するが、コンクリート中における弾性波伝播挙動が明らかになれば、これらの手法の信頼性向上にも寄与することができるものと考えられ、結果的にコンクリート構造物の劣化診断技術が飛躍的に発展するものと考えられる。

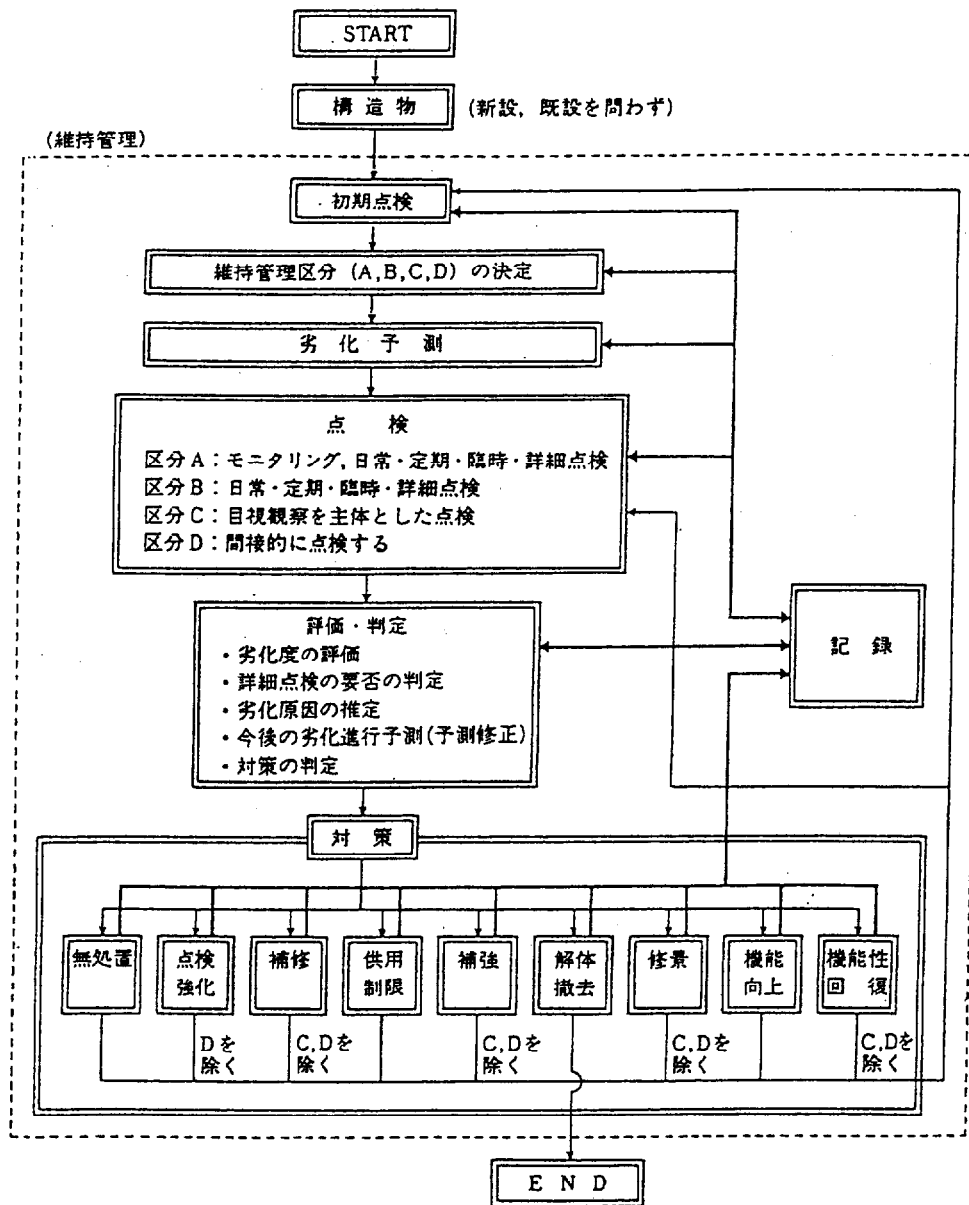


図 1.1.1 維持管理の一般的な考え方¹⁻³⁾

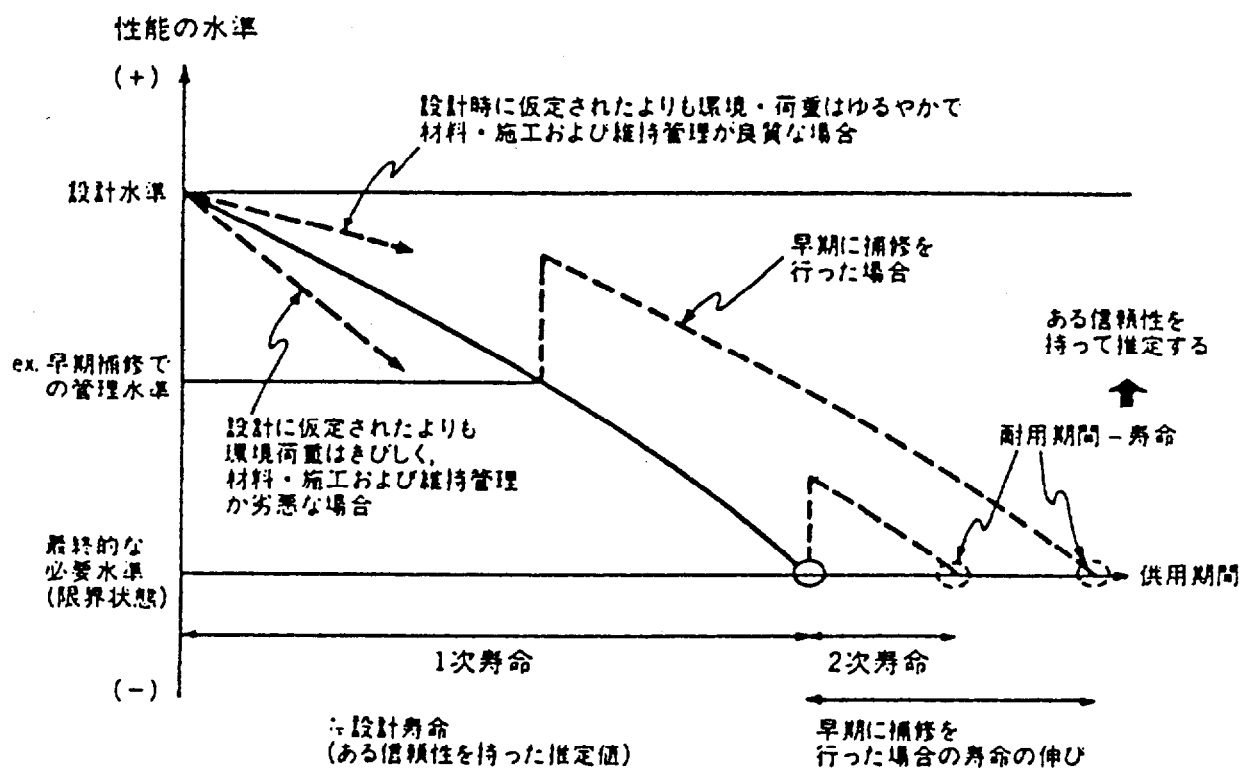


図 1.1.2 耐久性設計における性能の水準と寿命

1-2 研究の目的

以上のように、コンクリート構造物の合理的な維持管理システムを確立していくためには、その劣化診断時に有力な非破壊試験法を利用することが是非必要となる。本研究で対象とするコンクリートの劣化評価に対しては弾性波を用いた手法が有効であると考えられる。そこで本研究においては、まずコンクリート中における弾性波伝播挙動について基礎的な検討を行い、コンクリートの劣化評価に必要な知見を得た後、その結果を踏まえて弾性波を利用したコンクリートの劣化評価手法について検討を行った。弾性波伝播挙動に関する検討に際しては、コンクリート内部の不均一性と弾性波伝播挙動の関係を解明すべく、コンクリートの複合材料としての特性を十分に踏まえた上で、骨材およびマトリックスの特性、ならびにマイクロクラックの存在が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について実験的、理論的に検討を行った。この際、コンクリート中における弾性波伝播挙動については、弾性波の伝播速度および周波数特性に着目した整理を行った。次に弾性波によるコンクリートの劣化評価に関する検討においては、まずコンクリートの劣化の実現象を的確に踏まえた上で、劣化の進展にともなう弾性波の伝播速度および周波数特性の変化を明らかにし、対象とする劣化現象ごとに適切な評価指標を示した。またあわせて、そのような劣化が、強度特性、変形特性、あるいは物質浸透抵抗性といったコンクリートの諸特性に及ぼす影響についても調べ、コンクリートの劣化評価の重要性をあらためて確認した。

1-3 本論文の構成

本論文の構成を図 1.3.1 に示す。

第 1 章においては、本研究の背景および目的を示した。

第 2 章においては、コンクリート中における弾性波伝播挙動に関する現状とコンクリートの劣化評価の現状について概説するとともに、本研究で対象とするコンクリートの劣化の範囲を定めた。またコンクリートに対する各種非破壊試験法の適用に関して、コンクリートの劣化評価への適用を中心に、それぞれの原理・特徴および適用事例について概観し、課題・問題点を明らかにした。

第 3 章においては、本研究で用いる入射弾性波の特性評価と試験条件の検討を行った。試験条件の検討に際しては、コンクリート表面の粗度および含水状態、コンクリートの材齢などと弾性波透過試験結果の関係について調べ、バラツキが少なく精度の高い測定を行うための各種試験条件を決定した。

第 4 章においては、まずコンクリートを構成する各材料ごとに弾性波伝播挙動の検討を行った。すなわち、セメントペーストおよび骨材単体に関する検討を行い、それらが単体であれば、コンクリートのような不均一性は認められず、均一弾性体として扱うことができることを示した。次にコンクリートのような粒子分散型複合材料中における弾性波伝播挙動の特徴を、ガラス球をモデル骨材として用いた供試体に対する検討により明らかにした。この際には、モデル骨材の大きさ、量および材質を変化させることにより、それらの違いが弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討を行った。続いて実際の骨材を用いて、骨材径、形状、量および界面性状が異なるコンクリート供試体を作製し、それらの影響について考察した。さらに、コンクリートの配合条件、コンクリート中のマイクロクラックの存在、コンクリートの施工条件が弾性波伝播挙動に及ぼす影響についても検討を行うことにより、マトリックス部分の空隙率が弾性波伝播速度と、骨材界面性状およびマイクロクラックの存在が透過弾性波の周波数特性と密接な関連があることを示した。そしてこの知見を用いれば、コンクリート中のマトリックス部分の劣化評価および骨材境界相部分の劣化評価が可能となるものと考えた。

第 5 章においては、第 4 章で得られた知見をもとに弾性波伝播挙動を利用したコンクリートの劣化評価を試みた。まずマトリックス部分や骨材境界相部分の劣化を、先行載荷、凍結融解作用、アルカリ骨材反応といった劣化要因により生じさせた。このようなコンク

リートに対して断面観察などの直接的な手法を適用することにより、先行載荷を受けたコンクリートにおいては骨材境界相部分の劣化が、また凍結融解作用およびアルカリ骨材反応を受けたコンクリートにおいては骨材境界相部分だけでなくマトリックス部分の劣化も進行していることを明らかにした。また前者はコンクリートの物質浸透抵抗性を損ね、後者はさらに強度および変形特性にも悪影響を与えており、このようなコンクリートの劣化評価の必要性をあらためて示した。そして最終的に、これらの劣化の進行にともなう弾性波伝播特性の変化を調べ、それぞれの劣化状態に対する適切な評価指標を提案した。

第6章において、論文全体としての結論を述べた。

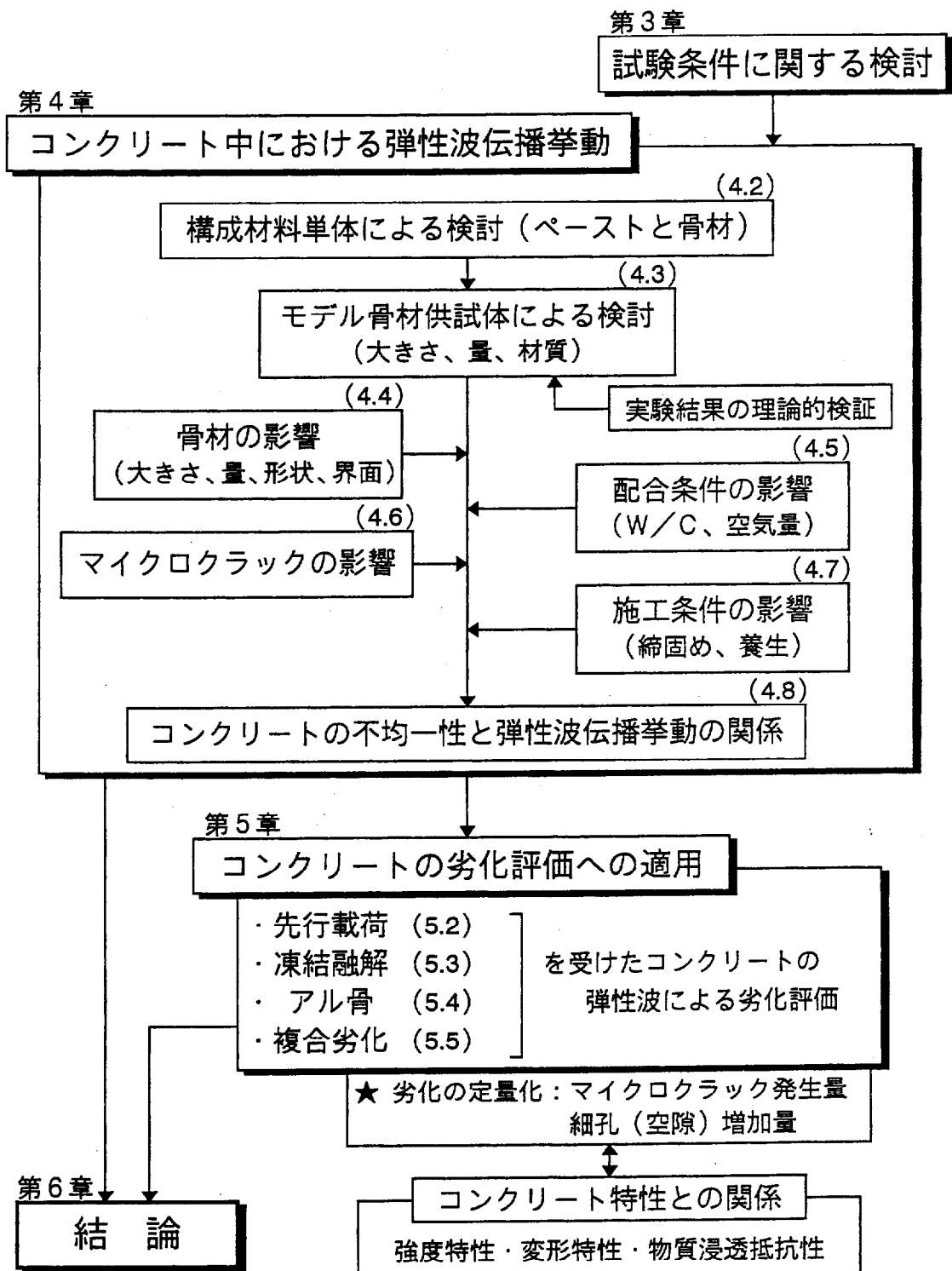


図 1.3.1 本研究のフロー

第2章

既往の研究

2-1 はじめに

本章においては、コンクリート中における弾性波伝播挙動と、コンクリートの非破壊試験法に関する研究の現状を概観し、それらが抱えている問題点を明確にすることで、今後の検討の方向付けを行った。

はじめに、弾性波を用いてコンクリートの劣化評価を行う上で把握しておかなければならないコンクリート中の弾性波伝播挙動に関する過去の主な研究成果を紹介し、それぞれの特徴と問題点を示した。次に、コンクリートの劣化現象とその評価の現状について述べることで、その非破壊的な劣化評価手法の確立の重要性を強調するとともに、本研究で対象とする劣化の範囲を定義した。続いてコンクリートの各種非破壊試験法について、特にコンクリートの劣化評価への適用性に注目して、それぞれの原理・特徴、適用事例を概説し、またそれぞれの課題・問題点を明らかにした。

2-2 コンクリート中における弾性波伝播挙動に関する研究の現況

金属材料および液体・気体中の弾性波伝播挙動については、古くから精力的に研究が進められており、その結果、体系的な理論が確立され、ほぼ解明されつつある^{2-1~2)}。そして、超音波探傷や医療診断などといった実際の応用面やセンサなどの機器開発に大きく貢献している。しかしながら一方で、コンクリート中における弾性波伝播挙動に関しては、ほとんど明らかになっていないのが現状である。これは、コンクリートが他の金属材料や水などとは異なり、極めて不均一な複合材料であることから、材料内部における弾性波の散乱・反射、あるいは回折といった現象が互いに絡み合った状態で発生し、得られる受振波の理論的解釈が困難となるためである。このような状況から、コンクリート中における弾性波伝播挙動はほとんど解明されることなく、今日を迎えている。しかしながら、コンクリートに対する弾性波法の適用は、構造物の健全性診断手法の確立という社会的要求から近年注目を浴び、理論的裏付けがないままに応用面ばかりが先行してしまっているのが現状である。このことが、弾性波を用いた手法自体の信頼性を低下させている原因であると考えられ、コンクリート中における弾性波伝播挙動の解明が待たれるところである。

コンクリート中の弾性波伝播挙動に関する萌芽的研究として、明石らの研究²⁻³⁾があげられる。これによれば、コンクリート中の弾性波の減衰には、粘性に起因するもの、粗骨材による散乱に起因するもの、気泡・空隙に起因するものが存在し、これらは弾性波の振動数の増加とともに大きくなる傾向があるとしている。特に粗骨材による散乱に起因するものは骨材径の増大とともに著しくなり、骨材量が変化してもその傾向は変わらないことも示している。

野崎²⁻⁴⁾は、コンクリートの含水率、コンクリート中のマイクロクラックの存在、粗大空隙の存在などが弾性波伝播速度に及ぼす影響について実験的に検討を行っている。含水率の変化や粗大空隙の存在の影響は大きい、マイクロクラックの影響は小さいとしている。ここで評価項目として用いているのは弾性波伝播速度のみであり、他の伝播特性については言及されていない。元来、弾性波伝播速度はミクロレベルでの組織変化には鈍感であり、周波数特性などを用いた多角的な検討が必要であるものと考えられる。

また三上ら²⁻⁵⁾は、骨材径および骨材量が弾性波の波形および周波数スペクトルに及ぼす影響について検討を行っている。しかしながら、用いた供試体形状が筒状のものである

にもかかわらず供試体側面からの反射波の影響が考慮されていないこと、また骨材に起因する散乱現象を扱うには着目している周波数範囲が低すぎることなど、検討の余地が多く残されている。

また火害（火災によるコンクリートの高温劣化）を受けたコンクリートを対象として、コンクリート表面近傍における弾性係数の分布の違いが弾性波伝播速度に及ぼす影響について検討を行った研究²⁻⁶⁾がある。これにおいては、火害による表面近傍の弾性係数分布の変化が探触子表面走査法による弾性波伝播速度を変化させることが理論的および実験的に示されている。しかしながら、コンクリート内部までもが劣化している場合には、本手法は適用不可能である。

Burr ら²⁻⁷⁾は、コンクリート中における弾性波伝播を理論的かつ数値的に解析した結果を報告している。これによれば、グリーン関数を用いた理論的解析結果から得られた減衰定数は、数値シミュレーション結果から得られたものとはほぼ同程度であり、解析結果の妥当性が示されたとしているが、対象としている周波数が MHz オーダという極めて高いものであり、解析過程における仮定に疑問が残る。

他にも、コンクリート中における弾性波伝播挙動を数値シミュレーションした結果がいくつか報告されている。例えば、伊東ら²⁻⁸⁾は、コンクリート中の粗骨材が弾性波伝播速度に及ぼす影響を明らかにするため、骨材を規則的に配置したコンクリート・モデルに対して有限要素解析を行っている。また山田ら²⁻⁹⁾は、コンクリートを等方弾性体とみなし、3次元弾性波動方程式を差分法により解くことで、コンクリート中を伝播する弾性波の波形を再現した。しかしながら、このような数値シミュレーション結果は定性的には実験結果と一致するものの、傾向を捉えているに過ぎない。これは、様々な径を有する骨材のランダムな配置、空隙・マイクロクラックの存在、あるいは材料分離などによる構成成分の空間的な偏りなどといったコンクリートの不均一性をモデル化できないためであり、このようなアプローチの限界であると言わざるを得ない。

以上のように、コンクリート中における弾性波伝播挙動に関する研究はいまだ発展途上の段階にあり、これからの成果が期待される分野である。コンクリートの諸特性が弾性波伝播速度に及ぼす影響については多くの検討がなされているが、いずれの検討結果も定性的なものであり、コンクリート内部条件と弾性波伝播速度の関係を明確に示したものは存在しない。またコンクリート中を伝播した弾性波の周波数特性に関してはほとんど検討さ

れておらず、不明確な点が多く残されている。これらの点について今後さらに検討を行っていく際には、基本的には、実験的なアプローチに頼らざるを得ないものと考えられるが、理論的あるいは数値解析的なアプローチについても適宜行うことが望まれる。この場合、種々の大きさ・形状の骨材がランダムに配置していることやマイクロクラックが少なからず存在していることなどに代表されるコンクリートの不均一性を的確にモデル化することが重要である。

2-3 コンクリートの劣化とその評価

2-3-1 コンクリートの劣化

コンクリートは、材齢の経過とともにその特性が経時的に変化する材料である。すなわち、材齢の経過とともにセメントの水和が進行し、内部の細孔構造が緻密化していくため、強度・変形特性および物質浸透抵抗性は向上する。しかしながら、コンクリートが曝される環境条件・荷重条件によっては、適切な水和の進行が妨げられたり、さらには細孔構造が破壊されたりする。

環境条件により劣化する現象として以下のようなものがあげられる。例えば、寒冷地に存在するコンクリート構造物の場合、コンクリート中の水分が凍結することにより、毛細管空隙内部の間隙圧が上昇し、周囲の水和組織に膨張圧を発生させる。これが繰り返されることにより、コンクリート内部の微細組織が破壊され、マイクロクラックが発生したり、マトリックス部分の細孔量が増加したりする²⁻¹⁰⁾。また高温環境下にあるコンクリートの場合、コンクリート内部の毛管水やゲル水の脱水、さらにはセメントペーストマトリックスと骨材の熱膨張係数の相違によりコンクリート中にマイクロクラックが発生する²⁻¹¹⁾。さらにアルカリ骨材反応性を有する骨材をコンクリートに用いた場合、生成されるアルカリシリカゲルの吸水膨張により、マイクロクラックが発生したり、マトリックス部分の微細構造が破壊されたりする²⁻¹²⁾。また、一般のコンクリート構造物の表面は乾湿繰り返し作用を受けており、その表層部には乾燥収縮ひび割れが少なからず発生している²⁻¹³⁾。

また荷重条件により劣化する現象として以下のようなものがあげられる。例えば、引張力を受けるコンクリート中の異形鉄筋近傍においては、表面からは観察できない内部ひび割れが鉄筋応力度が 100MPa に達する以前より発生していることが報告されている²⁻¹⁴⁾。またコンクリート円柱供試体の一軸圧縮試験時においても、破壊荷重の 20%の荷重レベルで既にコンクリート中の粗骨材-モルタル間にマイクロクラックが発生していることが、断面観察の結果より明らかとなっている²⁻¹⁵⁾。

このようなマイクロクラックの発生やマトリックス部分の密実性の低下は、一般的なコンクリート構造物の使用環境下、あるいはコンクリート構造物の使用応力レベル下においても生じているものと考えられる。このような劣化は、コンクリートの圧縮強度・弾性係

数を低下させ、部材耐力・剛性を低下させるばかりでなく、塩化物イオンや二酸化炭素といった有害物質の浸透を容易にし^{2-16~17)}、コンクリート中の鉄筋腐食を引き起こす誘因ともなりうる²⁻¹⁸⁾。したがって、このような劣化は構造物の健全性を低下させる「引き金」となるものであり、その程度を何らかの手段で常に把握しておく必要がある。

2-3-2 コンクリートの劣化評価の現状

上記のようなコンクリートの劣化は、現状では、構造物外観の目視観察結果や構造物から採取したコア試験片の一軸圧縮試験により得られる圧縮強度や弾性係数を用いて評価されている。しかしながら、目視観察結果はあくまで主観的なものであり、構造物内部の情報については一切提供しない。また採取したコアの一軸圧縮試験による場合、コンクリートの強度特性・変形特性については検討することができるが、構造物の耐久性と関連が深いコンクリートの物質浸透抵抗性についての情報は得ることはできない。なぜなら、圧縮強度は、物質浸透の「水みち」となるマイクロクラックの存在には鈍感な指標であるためである。物質浸透抵抗性に関する情報を得るためには、加えて塩化物イオン浸透深さ試験、透気・透水試験、あるいは細孔径分布測定試験などを行う必要があり、試験操作が煩雑となる。また構造物からコア試験片を採取することは、その構造物に多少なりともダメージを与えることは事実であり、またコア採取箇所の補修作業が必要となる。さらに、この補修箇所は、構造物の美観を損ねるだけでなく、マクロセル腐食を引き起こす誘因²⁻¹⁹⁾ともなりうる。またコンクリートの劣化状態は時々刻々と変化しているものであるが、コア採取による方法ではある評価地点の経時変化を追跡することができない。このように、コア採取による劣化評価には多くの問題点が存在しており、現在の評価手法の改善、新たな評価手法の確立が望まれるところである。

上記のような試験片採取にともなう問題点を解決するための方策として、非破壊試験法の適用が考えられる。特に弾性波を用いた手法であれば、マイクロクラックの発生量などの材料内部の劣化状態に関する情報を得ることができるため、目視観察やコア採取により得られる情報を補完する重要な情報が得られることものと期待される。例えば、主観的な目視観察結果を客観化する情報、コンクリート表面のみでなく内部の劣化状態に関する情報、コア試験片の圧縮試験結果を支持するための情報などが、弾性波試験により得ること

ができる。そこで本研究では、この弾性波によるコンクリートの劣化評価手法について検討を行うこととする。

2-3-3 本研究で対象とする劣化

コンクリートの劣化は、その原因、部位、発生時期、程度などが多岐にわたるため、極めて複雑な現象である。ここでは、コンクリートの劣化をその発生部位別に分類して整理することとした。図 2.3.1 に、発生部位ごとのコンクリートの劣化状態を示す。このように、コンクリートの劣化には大別して、表層部の劣化と内部の劣化がある。ここで、表層部の劣化は外部からの目視観察で検出が可能であり、その程度も目視等の簡単な手法で評価できるものと考えられる。しかし、コンクリート内部の劣化は外部からの目視観察では評価することができず、非破壊評価に頼らざるを得ない。さらに内部劣化は発生部位別に、マトリックス部分の劣化、骨材部分の劣化、これらの間の境界相部分の劣化に分けることができる。本研究では、骨材部分が劣化を受けることはないものと仮定し、残りのマトリックス部分の劣化および境界相部分の劣化の 2 種類の劣化を対象として、検討を進めることとした。これらのマトリックス部分の劣化および骨材境界相部分の劣化のスケールは、図 2.3.2 に示すとおりである。なおアルカリ骨材反応の場合、骨材部分も劣化を受けるが、それはマトリックス部分であるセメントペースト中のアルカリと骨材中のシリカが反応することにより生じるものであり、ここではアルカリ骨材反応を、まず境界相部分が劣化を受け、後にマトリックス部分が劣化していくものと捉えることとした。

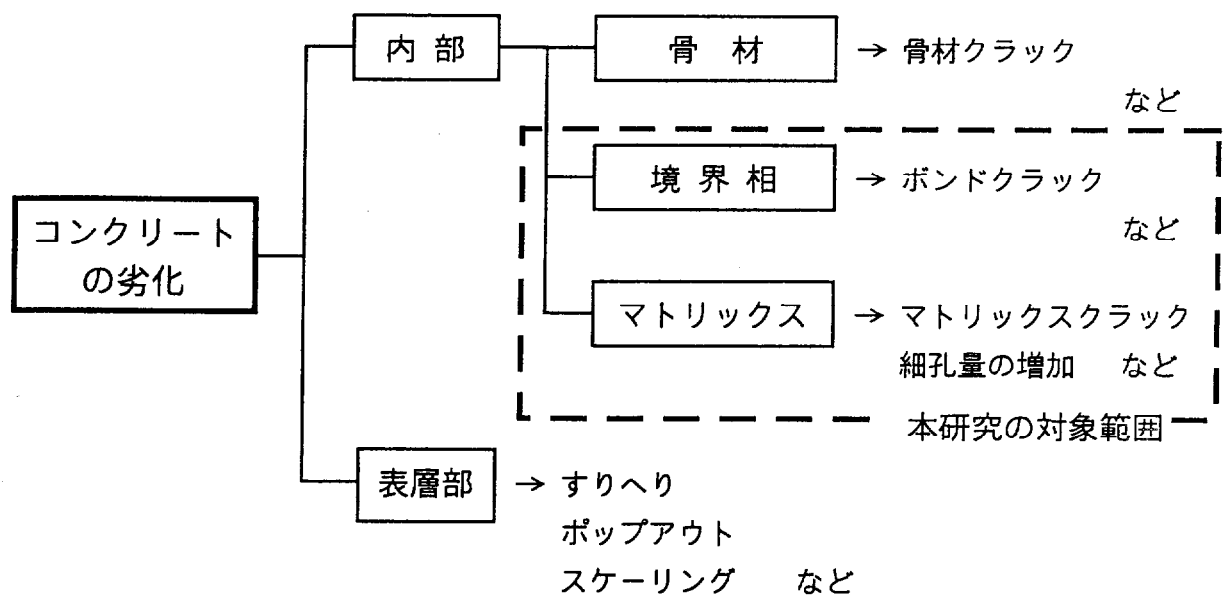


図 2.3.1 本研究で対象とする劣化の範囲

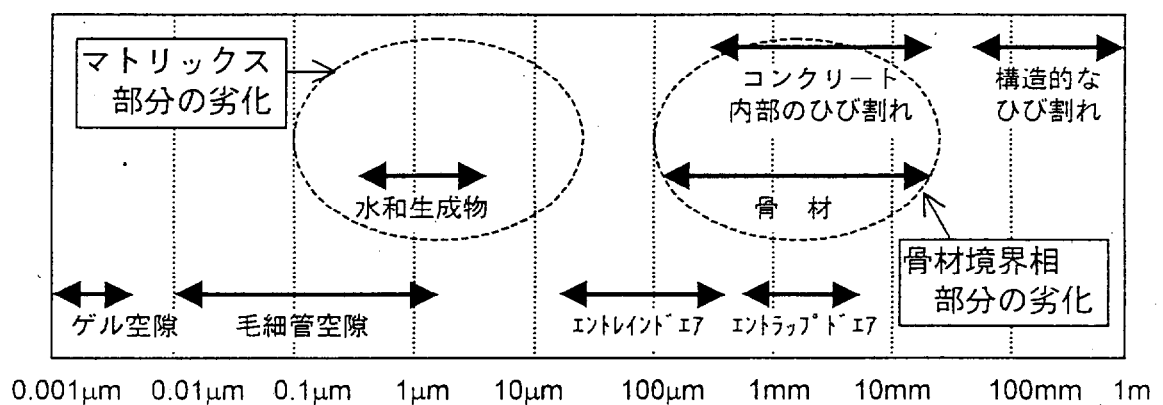


図 2.3.2 本研究で対象とする劣化のスケール

2-4 コンクリートの非破壊試験法とその劣化評価への適用に関する研究の現状

コンクリートに対する非破壊試験法に関する研究は比較的古くから行われており、その初期においては反発度法や局部破壊法などによるコンクリート強度の推定がメインテーマであった。しかしながら近年では、コンクリート構造物の早期劣化現象が顕在化し、コンクリート構造物の維持管理の重要性が認識されるようになってきたため、コンクリートの欠陥・劣化を非破壊的に評価する手法が検討されてきている。この際の評価対象としては、ひび割れ、空洞・剥離、材料劣化、グラウト充填不良などであり、その範囲は極めて多岐にわたり、また用いる手法も様々である。表 2.4.1 に、各評価対象ごとに適用可能な非破壊試験法の種類を示す。最近では我が国でも、一部標準化がはかられた手法も存在し²⁻²⁰~²⁻²³、今後さらなる発展が期待される研究分野であるといえる。ここでは、コンクリートに適用されている各種非破壊試験法の原理や特徴、ならびに適用事例について、特に本研究で対象とするコンクリートの劣化評価を中心に述べることとする。

2-4-1 各手法の概要とその劣化評価への適用例

a) 反発度法

コンクリート表面をハンマーなどで打撃したときの反発度に基づいて、コンクリートの強度および内部空隙を評価しようとするのが、反発度法である。中でも、1948 年にスイスのシュミットが考案したシュミットハンマー法が世界中で最も普及している。本手法は、コンクリート表面の硬さからコンクリート強度を推定するものであるが、定量的な強度推定は原理上不可能であり、あくまで経験式に基づいた推定法である。しかしながら、その高い簡便性により、日本をはじめ世界各国で規格化がなされている²⁻²²。

しかしながら、対象構造物の表面状態（粗度、含水状態など）や材齢などが試験結果に多大な影響を及ぼすことが知られている²⁻³が、超音波伝播速度測定との複合法²⁻²⁴によれば、より高い精度でコンクリート強度を推定できるとされている。

本手法のコンクリートの劣化評価への適用を考えた場合、圧縮強度が低下するほどの著しい劣化であれば評価可能であると考えられるが、あくまで表層部の硬さを計測している

に過ぎず、コンクリート中におけるマイクロクラックの発生に代表されるようなコンクリート内部の劣化については評価を行うことができない。またコンクリート表層部の硬さと劣化の実現象の対応関係が明確でないことから、コンクリートの劣化評価には不適當であると言わざるを得ない。

b) 局部破壊法

引抜き法²⁻²⁵⁾や貫入抵抗法²⁻²⁶⁾などの局部破壊をともなう圧縮強度推定法は、我が国ではあまり一般的でないが、欧米では標準化²⁻²⁷⁾もされているほど、ポピュラーな非破壊試験として受け入れられている。計測しているものが、引張強度、せん断強度、あるいはそれらが複合したものであり、計測結果の解釈が極めて容易である。しかし当然のことながら、対象構造物に多少なりともダメージを与えること、評価値の経時変化を追跡することができないこと、破損箇所の補修により美観が損なわれることなど、コア試験の場合と同様のデメリットが存在し、コンクリートの劣化評価には不適切である。

c) 弾性波を利用した手法

超音波法

一般に、超音波は「人間の耳に聞こえないほど周波数の高い音」と定義される。つまり人間の可聴音の限界は個人差もあるが一般に 20kHz 程度とされており、超音波はこれより高い周波数をもった音波ということになる。この超音波を利用する際には、その利用形態からみて 2 種類のものがある。1 つは、この超音波のエネルギーを利用するものであり、例えば、眼鏡などの洗浄あるいはダイヤモンドの切断といった加工などに応用されている。もう 1 つは、超音波を情報の媒体として利用するものである。この代表例としては、医療分野における CT スキャン、魚群探知機、また土木分野では鋼材探傷などがあげられ、これらは既に実用化されて多大な成果を上げている。

コンクリートに対する超音波の適用は後者に属するものであるが、現状では上記の例ほどの成果をあげるには至っていない。この理由は、以下に示すような超音波の伝播媒質の性質の違いであると考えられる。すなわち、成果を上げている代表例の場合の媒質は人体、水、鋼であり、これらは構成分子のスケールが小さくしかも高密度で均一である。しかしながら、コンクリートは多孔質でかつ不均一であることから、その超音波伝播挙動が極めて複雑であるためである。この点については、次章以降において詳細に検討することとす

る。

超音波測定の概要は以下のとおりである。すなわち、超音波探傷器本体において、探触子の圧電素子を振動させるパルス電圧を発生させる。そしてパルス電圧をケーブルを通して探触子に送り、この電気的な信号であるパルス電圧を圧電素子において機械的な振動に変換し、この振動を測定対象物に伝播させる。そしてこの超音波を探触子により受振し、発振の場合とは逆に、測定対象物表面の機械的な振動を圧電素子により電気的な信号に変換する。このようにして得られた電気信号を解析することにより、伝播媒質の特性を評価するのが超音波法である。この際に用いられる受振波の特性値として、伝播時間（伝播速度）、最大振幅値、周波数分布などがあげられる。

コンクリートに対して超音波法を適用する場合の長所としては、測定機器が比較的小型であることから機動性に優れ、測定者が携行することにより測定すべき箇所をピン・ポイントで測定することができること、また超音波法の測定方法および測定条件に関する規準・規格化の動きが進みつつあり、一部で実用化もされていることからデータの蓄積が比較的豊富であることなどがあげられる。一方、問題点としては、先にも述べたように、コンクリート中における弾性波伝播挙動が不明確であることがあげられ、このことが超音波法による試験結果に対する不信感を招いているといえる。今後、この点について検討を進め、本手法に対する不信感を払拭していく必要がある。

このように、コンクリート中における弾性波伝播挙動が不明確であるという重大な問題点が存在するにもかかわらず、超音波法によれば、外部からの目視観察では得られないコンクリート内部の様々な情報を得ることができるため、超音波法は古くから有用な非破壊試験法としてコンクリートに適用されてきた。最初にコンクリートに超音波法を適用した事例は、1949年に Leslie と Cheesman が行ったダム調査時のもの²⁻²⁹⁾である。それ以来、今日に至るまで、コンクリートの強度推定および欠陥評価を目的として、多くの研究・開発が続けられている。超音波によるコンクリートの強度推定法²⁻³⁰⁾は、コンクリート強度が大きいほど超音波伝播速度が大きいという実験的事実を利用したものである。しかしながら本推定法は、あくまで経験的なものであり、理論的根拠に欠けることが問題となっている。また超音波による欠陥評価法には、欠陥の存在により弾性波伝播時間が長くなることを利用したひび割れ深さ推定法²⁻³¹⁾ および空洞探査法²⁻³²⁾、また欠陥の存在により受振振幅が変化することに着目したひび割れ評価法²⁻³³⁾、超音波スペクトロスコピーに基づいたひび割れ評価法²⁻³⁴⁾ および空洞探査法²⁻³⁵⁾ など多くのものがあり、一部

実用化もされている。

近年、コンクリートの劣化を超音波法により評価することを試みた研究が報告されるようになってきた。凍結融解作用による劣化を動弾性係数の低下により評価する手法は古くから知られており、規格化もされている²⁻²⁰⁾。しかしながら本手法は、供試体形状・寸法の制約により実構造物への適用は不可能である。このような凍結融解作用による劣化評価に関しては、劣化の進行にともなう横波弾性波のスペクトル特性の変化に着目したものの²⁻³⁶⁾が存在するが、コンクリート表面に対する横波弾性波の入射が困難であるなどの問題点を有している。また凍害深さを超音波伝播速度により評価した事例²⁻³⁷⁾も報告されているが、劣化の進行を細孔径分布の変化を用いて捉えており、実際のマイクロクラックの発生状況との関係が明らかでない。またアルカリ骨材反応による劣化は超音波では評価が困難であるという報告²⁻³⁸⁾と評価可能であるという報告²⁻³⁹⁾が共に存在している。このような場合、コンクリート内部の実際の劣化状況を考慮して検討を進めることにより、評価手法としての有効性の可否が決定されるものと考えられる。

先行載荷を受けたコンクリートの劣化評価に関しては、Daponte ら²⁻⁴⁰⁾の研究があげられる。彼らはコンクリート供試体に対して先行載荷を行い、その先行載荷重の増加とともに超音波伝播速度、最大振幅値および周波数分布が変化することを示している。また感度分析の結果、周波数分布が最もセンシティブな指標であると結論づけている。しかしながら、この研究においては劣化の実現象を把握しておらず、劣化現象と超音波伝播特性の対応が不明確である。また用いた周波数範囲(0~100(kHz))についても、発生しているであろうマイクロクラックのスケールを考慮すると疑問が残る。

この他にも、超音波の減衰特性を用いて、火害による劣化²⁻⁴¹⁾や極低温下における劣化²⁻⁴²⁾を評価したものなどが報告されている。しかしながら、いずれの検討においても劣化の実現象を踏まえずに減衰特性を扱っているため、評価指標自体の意味付けが曖昧となっている。

AE法

Acoustic Emission (AE) とは、「固体材料内部の微小な破壊あるいはそれと同等なエネルギーの解放過程によって発生する弾性波現象²⁻⁴³⁾」と定義され、AE法はこの弾性波を検出し、その発生数あるいは波形の特徴などを解析し、これより固体内部の状態を評価しようとする手法である。

このAE法は、1960年代に金属の分野において圧力容器およびロケット本体の耐圧試験に適用されたことにより世界的に研究が進んだ。これ以降、金属および岩盤の分野において常時モニタリングなど破壊予知に広く利用されてきている。一方、コンクリートの分野においても他分野と同様に1960年代以降、種々の研究が行われたが、他分野ほどの発展はみられなかった。しかし、1980年代に入って社会資本の老朽化が報告され、その維持管理の必要性が認識されるようになると、AE法はそのための有力な手段として注目を浴びるようになり、実構造物に対するAE法の適用例も報告されるようになってきた²⁻⁴⁴⁾。しかしながら、AE法もコンクリート中における弾性波伝播挙動を利用した技術であり、前述の超音波法の場合と同様に、その解明なくしては評価手法としての信頼性の向上は期待できない。またコンクリートに対するAE法の適用に最適な測定機器の開発についても、今後の検討課題であるといえる。

超音波法と同様に、AE法をコンクリート中の欠陥、特にひび割れの評価に用いた研究は数多く報告されているが^{2-45~48)}、コンクリートの劣化評価に適用した研究は比較的小さいのが現状である。しかし近年、コンクリートの円柱供試体の一軸圧縮試験時にAE計測を行い、その際のAE発生挙動からコンクリートの劣化程度を評価しようとする動きがある。例えば大津らは、繰返し荷重を受けた床版から採取したコアの一軸圧縮载荷中に発生するAEを測定し、そのAE発生挙動を破壊の確率過程論（レートプロセス理論）で近似した場合に得られるパラメータと床版表面の目視によるひび割れ密度を対比することにより、コンクリートの劣化評価を行っている²⁻⁴⁹⁾。同様に凍結融解作用およびアルカリ骨材反応により劣化したコンクリート供試体の劣化度についても、レートプロセス解析により評価を試みている²⁻⁵⁰⁾。さらに凍結融解作用により劣化したコンクリート供試体の一軸圧縮破壊過程において、その圧縮軟化挙動を塑性理論を用いてモデル化し、この場合の各種パラメータによる劣化度評価の可能性についても示唆している²⁻⁵¹⁾。また矢村ら²⁻⁵²⁾は、凍結融解作用により劣化したコンクリート供試体の一軸圧縮载荷中に発生するAEを測定し、そのAE発生挙動と圧縮強度の関係を、水セメント比の異なる供試体の場合のAE発生挙動と比較することにより導いている。

以上のようなAE発生挙動ではなく、検出されるAE波形の周波数分布に着目して、コンクリートの劣化評価を行った事例も報告されている²⁻⁵³⁾。この場合、コンクリート供試体の圧縮载荷中に発生するAEの周波数分布をその発生源の周波数分布およびセンサを含む計測系の周波数分布を用いて補正することにより、コンクリートの伝達関数を求め、

これを利用した劣化度評価を行っている。その結果、载荷の進行とともに高周波成分が減衰するものの、载荷の初期の段階においては各成分のパワーが逆に増加している。この理由を「コンクリートの圧密」であるとしているだけでなく、実際の劣化現象との対比を行っていないなどの問題点が存在する。

このように、A E法によりコンクリートの劣化評価を試みた研究は行われているものの、そのためには一軸圧縮载荷を行うためのコア供試体が必要であり、実構造物を対象とした場合、このことが大きなネックとなる。したがって、コア供試体が得られるのであれば、その一軸圧縮試験を行うことにより、一軸圧縮強度や弾性係数といった従来からの指標だけでなく、载荷中に発生するA Eについても計測を行い、コンクリート内部の情報を得ることが望ましいものと考えられる。しかしながら、コア供試体が得られない場合には、前述の超音波法による劣化評価の方が構造物からのコアを必要としないために有利である。

衝撃弾性波法

ハンマーなどでコンクリート表面をたたくなどして衝撃波を発生させ、この衝撃波をセンサあるいはマイクロホンなどにより受振し、その受振波の特性からコンクリートの特性を評価する手法を衝撃弾性波法 (Impact Echo Method) という。

コンクリートは、金属材料と異なり、極めて不均一な材料である。したがって、弾性波の減衰が著しく、超音波法を用いる場合、数十 kHz~数百 kHz といった比較的低い周波数の弾性波を用いざるを得ない。このため、弾性波の指向性は悪くなり、また電気的信号を圧電素子により機械的信号に変換して弾性波を発生させているためそのエネルギーは小さく、マスコンクリートのように寸法の大きいコンクリートの検査には不適當である。そこで衝撃弾性波を用いることにより、入射エネルギーは大きくなり、周波数も低くなるため、寸法の大きいコンクリートを対象とした場合でも、減衰の影響をあまり受けずに検査を行うことが可能となる。

これまでに、比較的寸法の大きいコンクリート構造物を対象として、その適用が試みられている。例えば、シース管内におけるグラウト充填評価²⁻⁵⁴⁾ や床版増厚を行った場合の新旧打継目の剥離評価²⁻⁵⁵⁾ などの事例が報告されている。これらは、空隙や打継目などからの反射波の最大振幅値や周波数特性を用いて、評価対象物の位置あるいは寸法を評価したものである。

しかしながら本手法は、周波数の低い弾性波を用いているため、コンクリート内部にお

ける微細構造の変化などを評価することはできない。したがって、コンクリートの劣化評価を衝撃弾性波法により行うことは、手法の特性上、不可能であると考えられる。

d) 電磁波を利用した手法

赤外線サーモグラフィ法

コンクリート表面近傍にひび割れ、空洞あるいは剥離などが存在する場合、その部分において熱の移動が阻害され、コンクリート表面温度分布に変化が生じる。この温度変化を赤外線カメラを用いて測定し、得られる熱画像からこれらの欠陥の位置、形状、あるいは大きさを推定しようとするのが赤外線サーモグラフィ法である。

赤外線は波長が長く、空気中の微粒子による反射および吸収が少ないため、測定対象物から比較的離れた地点からでも表面温度分布の測定が可能である。その結果、一度に広範囲の検査面を非接触で評価することができ、これが本手法の最大の特徴であるといえる。

気温の日較差や日射を利用して、建築物壁面のタイルの剥離状況を検査した事例²⁻⁵⁶⁾が古くから知られているが、近年外部から人為的に熱負荷を与え、欠陥の有無により生じる温度差を大きくすることにより、精度を向上させた評価手法が提案されている。例えば、コンクリート中に挿入した棒状ヒータによる加熱を行いコンクリートのひび割れ深さを推定する手法²⁻⁵⁷⁾、液体窒素冷却を行って鋼-コンクリート間の空隙を評価する手法²⁻⁵⁸⁾などがあげられる。しかしながら、本手法により評価が可能なものは、原理上、表面近傍に存在するものに限られるため、コンクリートの劣化評価にはあまり適していない。

X線撮影法

X線には、透過物質の密度の違いにより透過する線量に変化する性質があり、この透過線量の違いは、X線フィルム上では濃度差となって表れる。この濃度差に着目して透過物質の特性評価を行おうとするのがX線法である。

X線は $10^{-14} \sim 10^{-8}$ (m) の波長をもった電磁波であり、あらゆる物質を透過する性能を有している。したがって、あらゆる物質に適用が可能であり、今日コンクリート分野においても、内部ひび割れの検出²⁻⁵⁹⁾、鉄筋位置推定²⁻⁶⁰⁾、あるいはシース管内のグラウト充填評価²⁻⁶¹⁾などに適用されている。しかしながら、原理的には密度差に起因する透過線量の違いに基づいて評価を行うものであるため、マイクロクラックの発生やマトリックス部分の密実性低下といったコンクリートの材料劣化には鈍感な手法である。また他の

非破壊試験法の場合と異なり、X線は人体に有害であり、その取扱いには十分な注意が必要であること、さらに法的にも厳しい規制が存在することからも、実用性を考えた場合に問題がある。

電磁波レーダ法

電磁波レーダ法は、誘電率や比抵抗といった電気的特性の異なる物質間の界面において電磁波が反射されることを利用して、コンクリート内部の空洞や鉄筋の探査を行うものである。すなわち、コンクリート-空洞、あるいはコンクリート-鉄筋の境界面におけるインピーダンスの違いにより生じる反射電磁波の振幅、位相情報などにより、その位置および寸法を推定する手法である。最近では、多重偏波方式のレーダを用いて、コンクリート中の空洞の体積を定量的に推定する手法²⁻⁶²⁾なども提案されており、これからの研究成果が期待される手法である。

本手法は計測が極めて容易であり、実用性に優れるため、トンネル覆工背面²⁻⁶³⁾あるいは空港エプロン舗装床版下面²⁻⁶⁴⁾の空洞探査に適用された事例が報告されている。しかしながら、コンクリートの誘電率が含水状態に大きく影響されること、鉄筋のような電磁波に対する強い反射源が存在するとそれより遠方の領域は評価できないことなど、多くの課題が残されている。また本手法は原理上、コンクリート中における空洞探査に対しては極めて有効であるが、材料的な劣化度評価にはあまり有効でないものと考えられる。

e) 光ファイバ技術を利用した手法

近年、コンクリート構造物のひび割れモニタリングに対して、光ファイバ技術の利用が検討され始めている。この光ファイバは、本来情報・通信の分野で広く用いられてきたものであるが、そのセンサとしての有効性がFRP材料の分野において確認された²⁻⁶⁵⁾ことにともない、コンクリート分野においても基礎的検討が実施されている^{2-66~67)}。現在、ひび割れ発生の検知およびひび割れ幅の拡大をそれぞれ光ファイバの破断および光ファイバ内の光量変化により推定する手法が提案されている。本手法は、コンクリート構造物のような大型構造物のモニタリングには最適であり、さらに施工時に光ファイバをあらかじめ構造物内部に埋め込んでおくことも可能であり、今後発展が期待される手法である。しかしながら、コンクリートの材料劣化評価に対する本手法の有効性については未知な状態である。

2-4-2 非破壊試験法によるコンクリートの劣化評価における問題点

ここまで述べたように、非破壊試験法によるコンクリートの劣化評価の現状はとても満足できるようなレベルには達しておらず、今後一層の検討が望まれる。2-3-3において定めたように本研究で対象とする劣化は、

①セメントペースト・マトリックス部分の劣化

②骨材境界相部分の劣化

であり、このようなコンクリート内部の劣化評価に際しては、弾性波を用いた手法が有効であると考えられる。これは、弾性波を用いた手法によれば、目視観察では得ることのできないコンクリート内部の劣化状態に関する詳細な情報をコンクリート中を伝播した弾性波の伝播速度あるいは周波数特性の形で引き出すことができるためである。またコア供試体を必要としないため構造物に一切の損傷を与えず、比較的簡便に測定を行うことも弾性波を用いた手法のメリットである。現在でも、弾性波によるコンクリートの劣化評価に関する検討は行われているが、実用に耐え得る評価手法は存在しない。これは、コンクリート中における弾性波伝播挙動については未だ明らかとなっていない部分が多く残されていることに起因するものである。このことが、弾性波を用いたコンクリートの劣化評価手法の発展を阻害している第一の原因であり、結果的に弾性波による劣化評価手法に対する不信感・不安感を招いているといっても過言ではない。また弾性波によるコンクリートの劣化評価について検討を行っている既往の研究には、コンクリート内部で生じている実際の劣化現象を的確に踏まえた上で適切な評価法を検討しているものは存在しない。したがって、弾性波の伝播速度あるいは周波数特性の変化が、コンクリート中のいかなる劣化現象に対応しているのかが不明確である。

そこで本研究においては、まずコンクリート中における弾性波伝播挙動について基礎的な検討を行うことにより、コンクリートの劣化評価に必要となるコンクリート内部状態と弾性波伝播挙動の関係を明らかにすることとした。続いてこの検討結果を十分に踏まえて、弾性波によるコンクリートの劣化評価法について検討を行い、劣化の進行にともなうコンクリート内部状態の変化と弾性波伝播挙動の変化の関係を明らかにし、実際の劣化現象を踏まえた評価法の確立を目指すこととした。

表 2.4.1 各評価対象ごとの非破壊試験法

評価の対象	非破壊試験法の種類
強度・変形特性	反発度法 超音波法 反発度法と超音波法の複合法 局部破壊法
コンクリートの材料劣化	超音波法 A E 法
ひび割れ	超音波法 A E 法 サーモグラフィ法 X線撮影法
空洞・剥離	超音波法 A E 法 衝撃弾性波法・打音法 サーモグラフィ法 電磁波レーダ法 X線撮影法
寸法：厚さ	超音波法 衝撃弾性波法 X線透過法
鉄筋位置	電磁誘導法 電磁波レーダ法 X線撮影法
鉄筋腐食	自然電位法 交流インピーダンス法 分極抵抗法

第3章

入射弾性波の特性評価と試験条件に関する検討

3-1 はじめに

ある媒質中における弾性波伝播挙動を明らかにするためには、その媒質中に入射される弾性波の諸特性、例えば、周波数特性や指向特性を十分に把握した上で検討を進める必要がある。このような基礎特性の検討なくしては、弾性波透過試験結果に対する適切な解釈を行うことはできない。またコンクリートに対して弾性波透過試験を行う場合、極めて多くの要因が試験結果に影響を及ぼすことはよく知られている³⁻¹⁾。しかしながら我が国においては、コンクリート中の弾性波伝播時間を測定するためのマニュアルの試案³⁻²⁾が検討されているものの、弾性波の減衰測定までも含めた弾性波透過試験に関する明確な規格・規準類が存在しないため、適切な試験条件をあらかじめ決定しておく必要がある。

そこで本章においては、以降の検討で用いる入射弾性波の特性評価と最適な試験条件に関する検討を行った。本章の構成を以下に示す。

「3-2 入射弾性波の特性評価」において、本研究で用いる弾性波測定システムの概要について述べ、さらにこの測定システムにより発振される弾性波の周波数特性ならびに指向特性について検討を行った。ここで得られた入射弾性波の諸特性は、以降の検討を行う上での基礎資料とした。続いて「3-3 試験条件に関する検討」において、センサのコンクリート表面に対する接触方法、コンクリートの表面状態、コンクリートの試験実施材齢、ならびに供試体寸法・形状を対象として、これらの違いが弾性波透過試験結果

に及ぼす影響について検討を行った。以上の検討結果を踏まえて、バラツキが少なく精度の高い弾性波透過試験を実施するための最適な試験条件を決定した。

3-2 入射弾性波の特性評価

3-2-1 概要

ここでは、ある媒質中における弾性波伝播挙動について検討する際に欠かすことのできない入射弾性波の特性を明らかにすることを目的として、いくつかの検討を行った。まず本研究で用いる弾性波測定システムの概要について述べ、その特徴を示した。さらにこの測定システムを用いた場合の入射弾性波の周波数特性および指向特性について検討を行った。

3-2-2 弾性波測定システムの概要

a) 弾性波発振システムの概要と特徴

本研究で用いた弾性波測定システムの概要を図 3.2.1 に示す。コンクリート供試体に対する弾性波の入射に際しては、コンクリート用マルチ超音波測定器（日本クラウトクレマ社製）により電氣的なパルス信号を発生させ、広帯域垂直型超音波探触子（ジャパンプローブ社製）中の内部振動子の圧電効果を利用して機械的な振動に変換した。ここで重要なのは、電氣的なパルスは、周波数が 240kHz の正弦波一波（印加電圧： $\pm 65\text{V}$ ）であるが、結果として、後述する図 3.2.7 に示すように、0~500(kHz)という広い周波数範囲でおおむね一様なスペクトル強度を有するホワイトノイズのような振動を発生させられることである。

用いた探触子は、図 3.2.2 に示すように、共振周波数が 500kHz となるように加工した圧電素子（直径：28mm）の共振振動を背面ダンパーで制御することにより、広帯域の弾性波が発生するように設計・製作されたものである。内部振動子に用いた圧電材料は、ジルコンチタン酸鉛（PZT）系セラミックスであり、背面ダンパーには、振動制御効果を高めるため密度の大きいタングステン粉を焼結させたもの（密度：約 13g/cm^3 ）を用いた。

b) 弾性波受振システムの概要と特徴

弾性波受振センサの特徴

一方、供試体中を伝播した弾性波の受振に際しては、広帯域変位型AEセンサ（日本フイジカルアコースティクス社製）を用いて、コンクリート表面の振動を電気的な信号に変換した。そしてこの電気信号は、信号波形にバイアスがかからないようにするため、増幅器等を一切用いずにAD変換器に直接入力された。用いた変位型センサは、以下に示すような原理で設計・製作されたものである。すなわち、表面振動の計測を図 3.2.3 に示すようなモデルを用いて表すと、静止系を基準とした変位 x に関して、式 3.2.1 の運動方程式を導くことができる³⁻³⁾。

$$m(\ddot{x} + \ddot{y}) + r\dot{y} + ky = 0 \quad (3.2.1)$$

ここで、 y ：計測系の相対変位、 m ：おもりの質量、 k ：バネ定数、 r ：ダンパーの減衰定数である。今、表面変位を正弦振動であると仮定すると、

$$\ddot{x} = j\omega x \quad ; \quad \omega = 2\pi f \quad (3.2.2)$$

となるから（ただし、 j ：虚数単位である）、式 3.2.1 は近似的に式 3.2.2 のように解くことができる。

$$\begin{aligned} f \ll f_0 : y &\cong \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 x = -\left(\frac{\ddot{x}}{\omega_0^2}\right) \\ f \cong f_0 : y &\cong -jQ\left(\frac{f}{f_0}\right) x = -\left(\frac{Q}{\omega_0}\right) \dot{x} \\ f \gg f_0 : y &\cong -x \end{aligned} \quad (3.2.3)$$

ここで、 f_0 は次式で定義される計測系の固有振動数であり、 Q は次々式で与えられる定数である。

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.2.4)$$

$$Q = \frac{\sqrt{mk}}{r} \quad (3.2.5)$$

したがって、計測系の固有振動数と比較して、対象とする振動数（周波数）が著しく小さい場合には加速度に、同程度の場合には速度に、著しく大きい場合には変位に比例した量を計測していることになる。

ここで用いた広帯域変位型AEセンサは、内部の圧電素子が小さくダンパーの質量が大

きいため、系の固有振動数 f_0 が小さい。したがって、 f_0 より大きい周波数範囲を対象とする場合、上記のように表面変位に比例した物理量がセンサにより計測されていることになる。また広い周波数帯域にわたってフラットな応答特性を示すように設計・製作されている。ASTM³⁻⁴⁾により規定された手法を用いて、この広帯域変位型AEセンサの較正曲線を求めた結果を図 3.2.4 に示す。このように、0~100(kHz)の範囲において、最大 10dB 程度の応答感度の低下が認められるが、それよりも高い周波数範囲(100~1000(kHz))においては、おおむねフラットな応答特性を示していることがわかる。したがって、このタイプのAEセンサは、受振波の周波数分析を行うような場合に適しているものといえる。

AD変換器の特徴および測定条件

AEセンサにより受振された弾性波は、AD変換器(マルチ・チャンネル波形解析装置、オートニクス社製)を介して、パソコン上で解析・記録された。AD変換器の周波数特性は、DC~7MHz であり、本研究で対象とするような数百 kHz オーダーの周波数範囲における検討に際しては特に問題はないものと考えられる。またAD変換を行う際に、設定するサンプリング周波数(AD変換を行う時間間隔の逆数)によって受振波の特性が大きく異なること(aliasing(交絡)³⁻⁵⁾)が推測される。そこで、3-2-1で述べた方法によりコンクリート中に入射された弾性波を、広帯域変位型AEセンサによりサンプリング周波数を変化させて受振した。そしてエイリアシングの発生の有無を受振波の最大振幅値の変化に着目して検討を行い、本研究における適切なサンプリング周波数の決定を試みた。その結果を図 3.2.5 に示す。このように、本研究の範囲内においては、サンプリング周波数を 1MHz 以上とすれば、エイリアシングの発生は認められなかった。したがって、これ以降のすべての検討においては、サンプリング周波数を 2MHz に設定することとした。またサンプリング点数は 2048 点とした。したがって、受振波に対して高速フーリエ変換(FFT)解析を行った場合、Nyquist 周波数は 1MHz、周波数分解能は 1/1024MHz となる³⁻⁵⁾。Nyquist 周波数とは、検出波形に対してFFT解析を行うことにより得られる周波数分布の高周波側の限界周波数のことである。なお、本研究においては、FFT解析は検出波形全体に対して行っている。これは、コンクリート中に弾性波の散乱・反射源が極めて多く、かつランダムに存在するため、それぞれの影響を個別に取り扱うことが不可能であり、コンクリート中の平均的な性質として表した方が適切であると

考えたためである。

3-2-3 入射弾性波の周波数特性に関する検討

a) 実験概要

上記のシステムにより発振される弾性波の周波数特性を調べるため、図 3.2.1 に示す供試体としてアルミニウム板を用いた実験を行った。この目的のためには、本来であれば、発振センサと受振センサを直接接触させた状態で測定を行うことが望ましいが、この場合、受振センサに過大な入力に負荷され、受振センサを損傷する可能性がある。そこで、本研究で対象としている数百 kHz オーダーの周波数範囲において、コンクリートと比較して減衰の影響をほとんど無視できるアルミニウムを用いた検討を行うこととした。アルミニウム中における弾性波伝播速度、密度および音響インピーダンスは、それぞれ 6.420km/sec 、 2690kg/m^3 、 $17.3 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{s/m}^3$ である³⁻⁶⁾。アルミニウムここで音響インピーダンスとは、弾性波伝播速度と密度の積として定義されるものであり、媒質中における弾性波や音の伝播しやすさを示す指標である。また発・受振センサの供試体表面に対する接触には、同じ金属材料である鋼材用の接触媒質（グリセリンペースト、日合アセチレン社製）を用いた。

b) 実験結果

アルミニウム板中を透過した弾性波の受振波形を図 3.2.6 に示す。この受振波形に対して、FFT解析を行うことにより得られる周波数分布を図 3.2.7 に示す。これによれば、 $50 \sim 500(\text{kHz})$ の周波数範囲において、 50dB 以上のスペクトル強度が存在していることがわかる。

3-2-2 b) で前述したように、受振センサの周波数応答特性には、 100kHz 以下の周波数範囲において最大で 10dB の感度低下が存在していたが、アルミニウム中を伝播した弾性波の周波数分布においては、 $0 \sim 50(\text{kHz})$ の範囲でおおよそ 150dB のスペクトル強度の変化が認められたことから、受振センサの 100kHz 以下における感度低下の影響はほとんどないものとして良い。

一般的なコンクリート中に存在する骨材の大きさ (20mm 以下) と同程度の波長に相

当する周波数は 200kHz 以上である。減衰の影響を無視できるアルミニウム中を伝播した弾性波に 200kHz 以上の成分が含まれていることから、その減衰程度に着目すれば、コンクリート中の骨材に起因する弾性波の散乱現象や骨材界面に存在するマイクロクラックの影響などについて検討を行うことができるものと考えられる。

ここで得られた周波数特性は、減衰の影響を無視できるとしたアルミニウム中を伝播した弾性波に対するものであり、本研究では、これを入射弾性波の周波数特性として取り扱うこととした。

3-2-4 入射弾性波の指向特性に関する検討

a) 実験概要

鋼材探傷の分野においては、指向性が鋭いビーム状の弾性波を用いて、亀裂の大きさや形状を評価している。このような指向性の鋭い MHz オーダーの高周波の弾性波をコンクリートに適用しようとする、材料内部の不均一性による減衰の影響を大きく受けしまい、実用に耐え得るレベルで弾性波を発受振することは不可能となる。したがって、コンクリートの品質・欠陥評価を適切に行うためには、より低い周波数の弾性波を用いなければならない。しかしながら、このような低い周波数の弾性波は、ビーム状ではなく球面状に材料中を伝播することとなる。このことを評価するために、直径 150mm、長さ 300mm の半円柱供試体を作製し、図 3.2.8 に示すように、平面中心部分から弾性波を入射し、伝播経路長が同一である曲面上で透過弾性波の測定を行った。このような測定を行うことにより、ある弾性波が媒質中を等距離伝播した場合に、伝播方向の違いが弾性波伝播挙動に及ぼす影響について調べることができる。用いた供試体は、水セメント比 (W/C)=0.30 のセメントペーストで作製した。本検討においては、これを等方均一弾性体とみなして、供試体内部における弾性波の散乱現象等は発生しないものと仮定した。弾性波の受振波は、中心軸からの角度を約 11 度ずつ (90 度を 8 等分した間隔) 変化させた合計 15 点で行った。この際、供試体中を伝播した弾性波を曲面上で測定するため、測定点近傍をグラインダーを用いて平滑にした。

b) 実験結果

図 3.2.9 に、各測定点において受振された弾性波の最大振幅値の分布を示す。この図における最大振幅値は、中心軸上で得られた最大振幅値により規準化してある。これによれば、中心軸からの角度が大きくなるほど、最大振幅値は小さくなっていることがわかる。また中心軸から約 60 度の方向に副極の存在も認められる。

入射センサの内部振動子の挙動をピストン運動として捉え、これにより発生する弾性波の伝播挙動を解析することにより、指向角 α (度)が次式のように定義される³⁻⁷⁾。

$$\alpha \approx 68 \times \frac{V}{f \cdot D} \quad (3.2.6)$$

ここに、 D ：振動子の直径、 V ：媒質の弾性波伝播速度、 f ：弾性波の周波数である。理論的には、弾性波のエネルギーは最大値を示す中心軸上から次第に減少していき、この指向角において 0 になる。したがって、この指向角は、値が小さいほど指向性は鋭くなりビーム状の弾性波に近づくこととなる。

本実験においては、 $D=28(\text{mm})$ 、 $V=4.33(\text{km/s})$ であることから、指向角 α は、 $f=200(\text{kHz})$ の場合、52.2 度、 $f=300(\text{kHz})$ の場合、34.8 度、 $f=500(\text{kHz})$ の場合、20.9 度となり、周波数の高いものほど指向性が鋭く、主に中心軸方向に伝播するものと考えられる。このことについて検討するため、中心軸からの角度が 0、34、68(度)の方向で受振された弾性波の周波数分析を行った。その結果を図 3.2.10 に示す。これより、高周波成分は中心軸方向で発振された弾性波に多く含まれており、中心軸方向から離れるに従って成分が減少していることがわかる。したがって、弾性波の高周波成分は主に中心軸方向に伝播するが、低周波成分は卓越した伝播方向を持たずに媒質中を全体的に伝播するものと考えることができる。

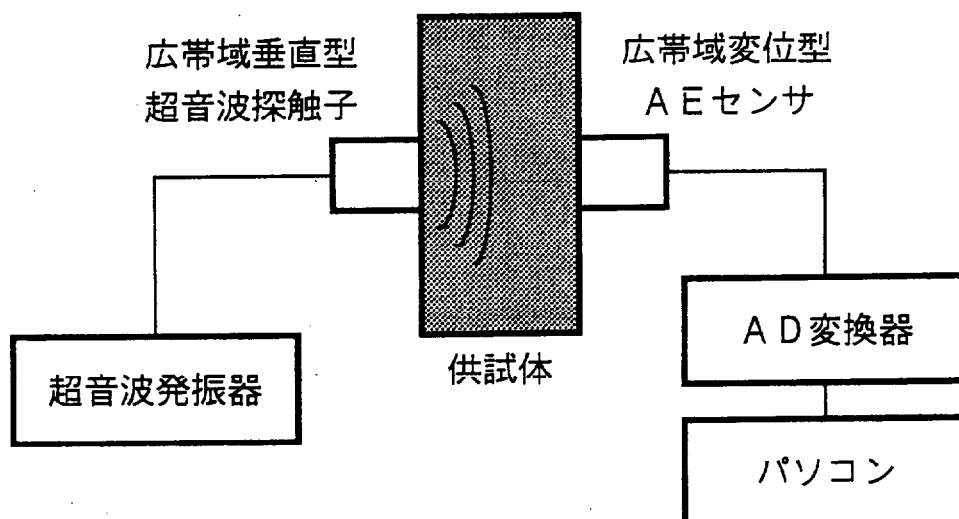


図 3.2.1 弾性波測定システム

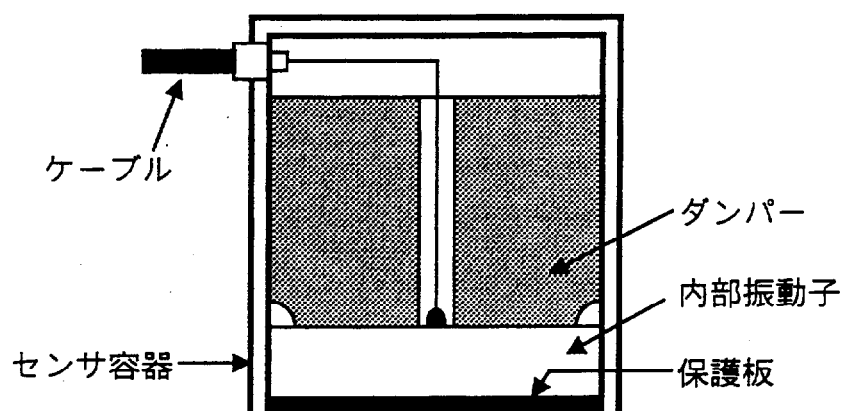


図 3.2.2 超音波探触子の構造

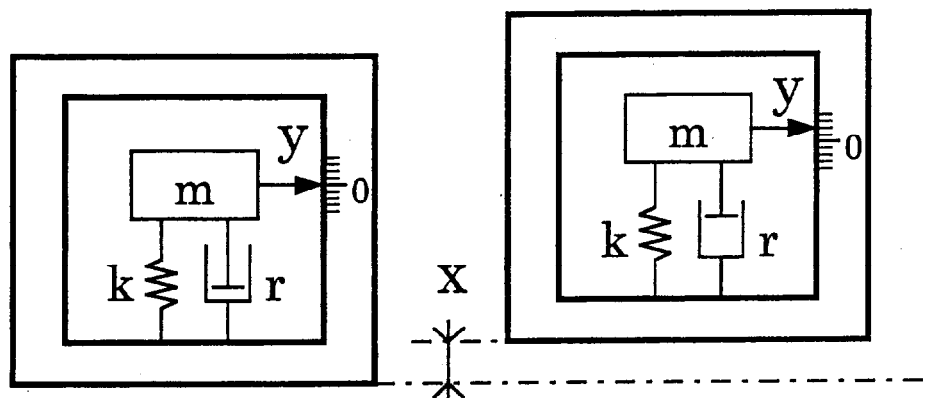


図 3.2.3 振動計測の原理

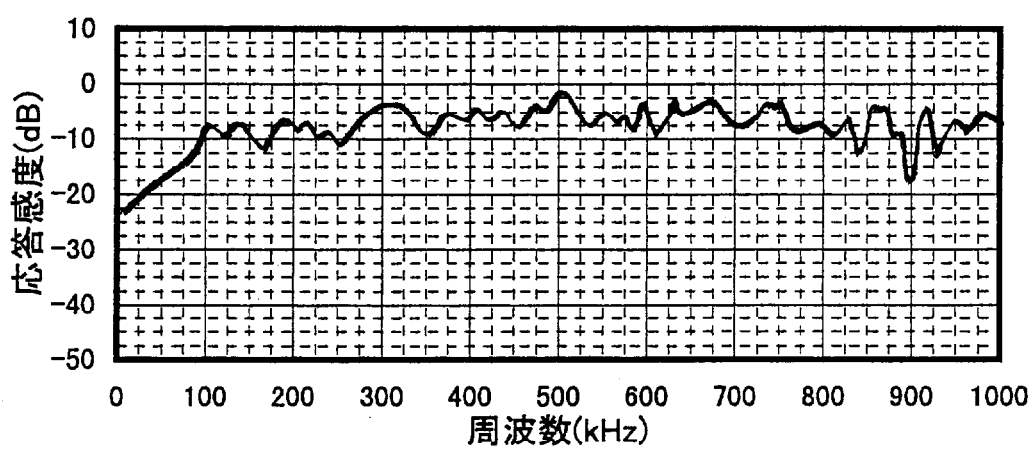


図 3.2.4 AEセンサの較正曲線

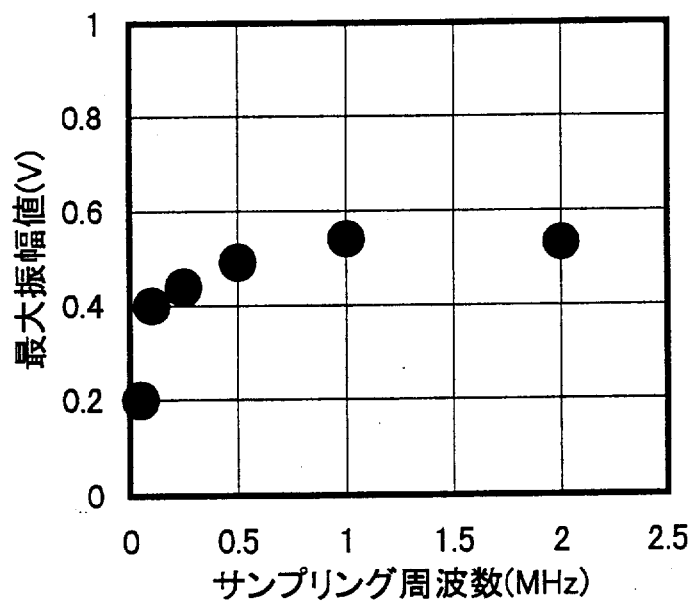


図 3.2.5 エイリアジングに関する検討結果

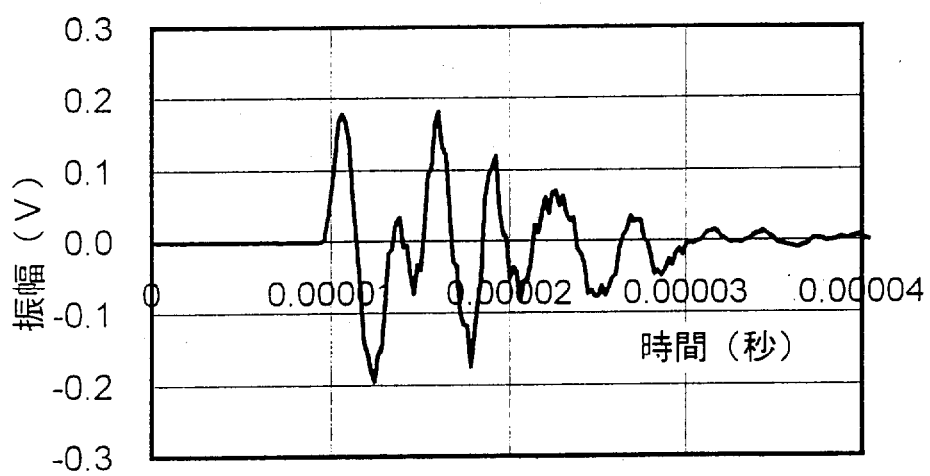


図 3.2.6 アルミニウム中を伝播した弾性波の受振波形

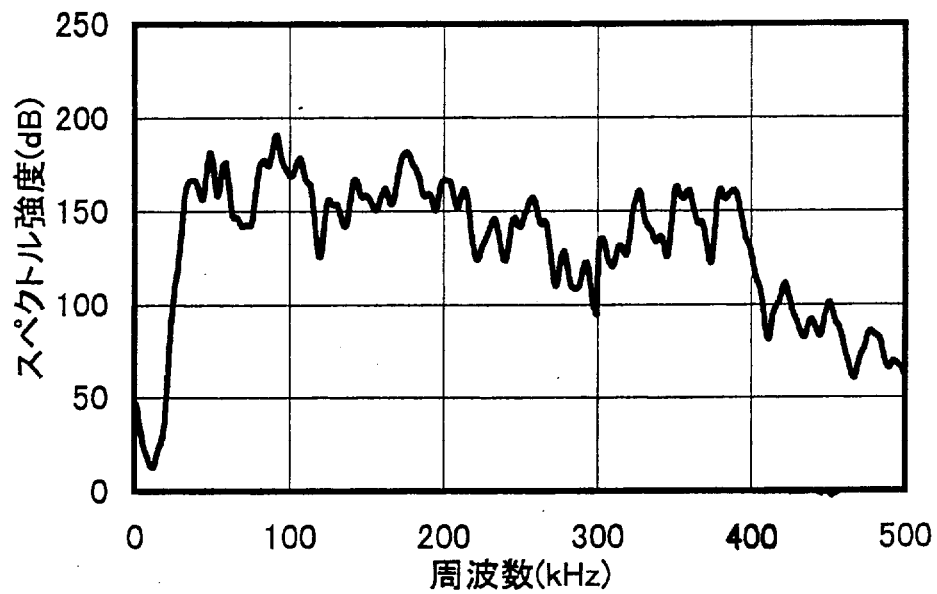


図 3.2.7 アルミニウム中を伝播した弾性波の周波数分布

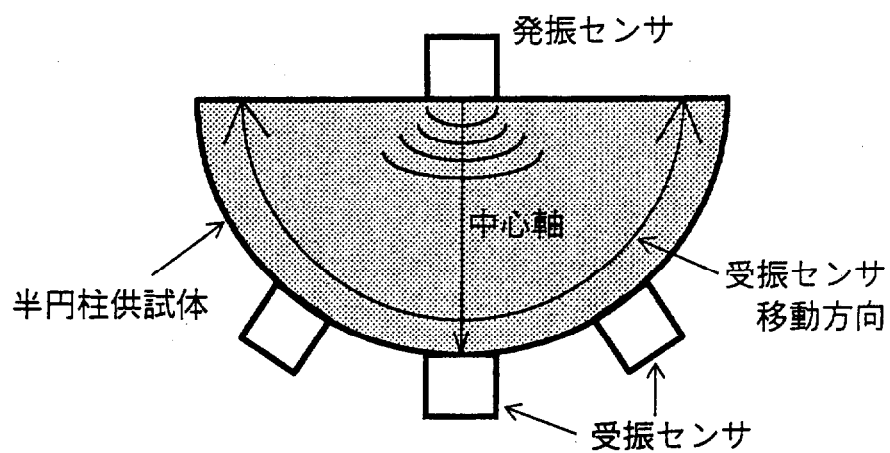


図 3.2.8 指向特性評価実験の概要

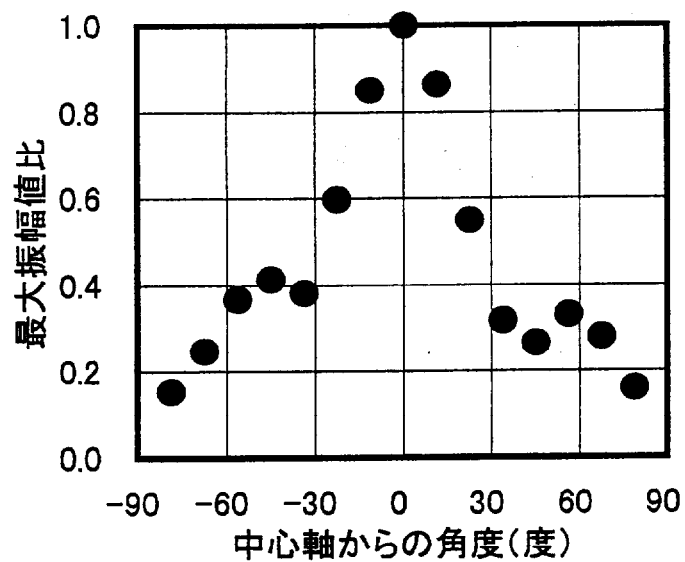


図 3.2.9 入射弾性波の指向特性

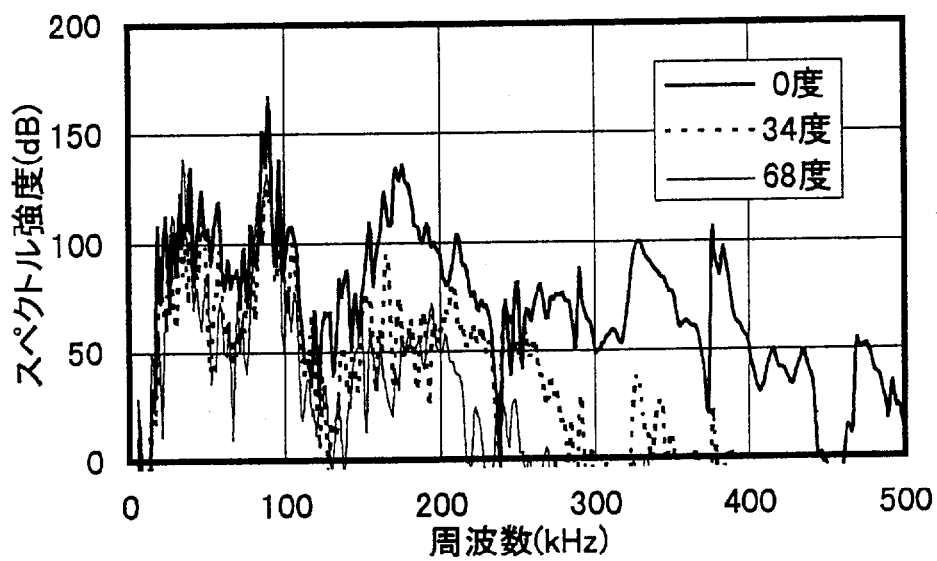


図 3.2.10 受振角度の変化にともなう周波数分布の変化

3-3 試験条件に関する検討

3-3-1 概要

ここでは、コンクリートに対して弾性波透過試験を行う場合に考慮すべき試験条件に関する検討を行い、各試験条件が試験結果に及ぼす影響について明らかにすることにより、本研究における適切な試験条件を決定した。極めて多くの要因が弾性波透過試験の結果にバラツキを生じさせることはよく知られているが、弾性波透過試験の方法に関する規格・規準類が存在しないため、適切な試験方法・条件をあらかじめ決定しておく必要がある。そこで、弾性波試験結果に多大な影響を及ぼすと考えられる、

- ①センサのコンクリート表面に対する接触方法
- ②コンクリートの表面状態
- ③試験実施時のコンクリートの材齢
- ④試験供試体の寸法および形状

を対象として、これらの違いが弾性波透過試験結果に及ぼす影響について検討を行った。①および②は、コンクリート表面とセンサの接触状態の良否に関わる検討であり、③および④は実構造物のコンクリート躯体のように十分に材齢が経過し、その寸法が大きい場合には考慮する必要がないが、試験供試体を用いた検討においてはあらかじめ考慮しておく必要があるものである。このような検討結果を踏まえて、最終的に本研究の範囲内で最適な試験条件を決定することとした。

3-3-2 コンクリート表面に対する適切なセンサ接触方法に関する検討

a) 実験概要

発・受振センサのコンクリート表面に対する適切な接触方法については、前出のマニュアル試案³⁻²⁾の中で、「振動子面とコンクリート面の間に空隙が生じないように両者を十分に密着させるため、グリース、水、油などの粘性材料を使用すること」とある。ここでは、このような接触媒質の有無が弾性波透過試験結果に及ぼす影響について検討を行った。

用いた供試体は、150×150×70 (mm)のコンクリート角柱であり、コンクリートの配

合は、W/C を 0.50、単位水量(W)を 190kg/m^3 、細骨材率(s/a)を 0.45 とした。コンクリートの練混ぜに際して、混和材料は用いていない。供試体表面の粗度が試験結果に及ぼす影響を除去するため、発・受振センサは平滑な型枠面に設置した。また供試体の含水状態を一定に保つため、試験実施直前まで水中に浸しておいた供試体の表面に付着する余分な水分をウェスで拭きとり、表面乾燥飽水状態にある供試体を用いた。なお、試験材齢は 56 日とした。

弾性波透過試験は、供試体の 70mm の方向に対して 2 探触子透過法により実施した。検討ケースとしては、接触媒質を用いずに発・受振センサを直接コンクリート表面に設置する場合、ならびに両者間に適当な接触媒質を用いた場合の 2 通りとした。接触媒質にはセンサメーカー推奨のものをを用いた。発振側センサに対しては、グリセリン系接触媒質（日合アセチレン社製）を、また受振側センサに対しては、真空用オイルコンパウンド（信越化学工業社製）をそれぞれ用いた。検討項目として、受振波の最大振幅値および周波数分布を取り上げ、接触媒質の有無がそれらに及ぼす影響について明らかにした。また測定値のバラツキについても検討を行うため、測定は各ケース 5 回行い変動係数を算出した。

b) 実験結果

接触媒質を用いた場合と用いなかった場合の受振波の最大振幅値の平均値は、接触媒質を用いた場合の方が大きく、用いなかった場合の約 3.2 倍であった。これは、接触媒質を用いることによりコンクリート表面とセンサ間がよくなじんだためと考えられる。またその際の変動係数は、接触媒質を用いなかった場合が 89%、用いた場合が 6%であった。このように、接触媒質を用いることにより、バラツキの少ない安定した測定が可能となることが示された。

図 3.3.1 に、センサを直接供試体に設置させた場合と接触媒質を用いた場合に得られた受振波の周波数分布の 1 例を示す。接触媒質を用いた場合の周波数分布においては 400kHz 付近まで周波数成分が存在しているにもかかわらず、センサを直接供試体に設置した場合には 150kHz 以上の成分がほとんど消失していることがわかる。これは、センサとコンクリート表面の密着性が不十分であったため、弾性波の発振時および受振時においてコンクリート表面の粗さに起因した損失が大きかったためであると考えられる。この表面粗さに関する詳細な検討は次項で行うこととする。

以上より、センサーコンクリート間に適切な接触媒質を用いることにより、バラツキの少ない高精度な測定を行うことができることが示された。したがって、コンクリートに対して弾性波透過試験を行う場合には、センサのコンクリート表面に対する設置方法に十分留意する必要がある。そこで本研究ではこれ以降、いずれの測定に際してもセンサと供試体の間に上記の接触媒質を用いることとした。

3-3-3 コンクリートの表面状態が試験結果に及ぼす影響

ここでは、コンクリートの表面状態が弾性波透過試験結果に及ぼす影響について明らかにし、バラツキの少ない安定した測定を行うための試験条件を決定することとした。コンクリートごとに変動するコンクリート表面状態としては、粗度、含水状態、中性化の有無、汚れなどが考えられるが、本研究においては特に影響度が高いと考えられる粗度および含水状態を対象として検討を行った。

a) 表面粗度に関する検討

実際のコンクリート構造物の表面は、その材料・配合条件、環境条件あるいは材齢などの相違により様々な粗さ状態を呈している。この粗さは弾性波透過試験結果、特に最大振幅値などの減衰に関連する試験結果には多大な影響を及ぼすものと考えられる。ここではコンクリート表面の粗さを人為的に変化させ、この粗さの違いが弾性波透過試験結果に及ぼす影響について調べることにした。この際、弾性波伝播速度については、本来材料固有の物性であり、表面粗度の影響は受けないものと考えられるが、実際に表面粗度が弾性波伝播速度に影響を及ぼさないことを確認するため、最大振幅値と同様に検討を行った。

実験概要

実験に用いた供試体は、十分な期間、屋外暴露されたことにより、コンクリート表面のセメントペースト分が洗い流され、若干の凹凸が付いたものである。この供試体表面をサンドペーパー、あるいはグラインダーを用いて研磨し、供試体表面における凹凸を平滑にした。この際、JIS B 0601「表面粗さ」³⁻⁸⁾に規定されている「中心線平均粗さ」を評

価指標として用いることにより、無処理、サンドペーパーによる研磨、グラインダーによる研磨の 3 種類の粗さ段階を定量化した。この中心線平均粗さ(Ra)は、レーザー変位計などにより計測される粗さ曲線の長さ L の部分において、その中心線を x 軸、中心軸からの変位方向を y 軸として、粗さ曲線を $y=f(x)$ として表したときに、次式で定義されるものである。

$$Ra = \frac{1}{L} \int |f(x)| dx \quad (3.3.1)$$

本研究においても、供試体表面の粗さをレーザー変位計（キーエンス社製）により計測し、得られた粗さ曲線から中心線平均粗さを算出した。算出された中心線平均粗さを粗さ曲線の 1 例とともに、図 3.3.2 に示す。このように、無処理のケース、サンドペーパーで研磨したケース、グラインダーで研磨したケースの順に中心線平均粗さが小さくなっており、供試体表面が平滑化したことを示している。

このように、3 種類の異なる粗さ段階を設定した同一供試体中の同一箇所において、弾性波透過試験を実施し、表面粗さが試験結果に及ぼす影響について検討を行った。この際、供試体表面の含水状態が試験結果に及ぼす影響を除去するため、試験実施直前まで水中に浸しておいた供試体の表面に付着する余分な水分をウェスで拭きとり、表面乾燥飽水状態にある供試体を用いた。各測定値のバラツキについても検討するため、測定は 1 つの測定ケースにつき 5 回を行った。

実験結果

図 3.3.3 に、各粗さごとの弾性波伝播速度の平均値ならびにその変動係数を示す。これによれば、粗さの程度にかかわらず、弾性波伝播速度はほぼ一定値となっており、弾性波伝播速度はコンクリートの表面粗度に依存しないことが確認できた。またこの場合の変動係数も極めて小さい値となっている。

次に、各粗さごとの透過弾性波の最大振幅値の平均値およびその変動係数を図 3.3.4 に示す。この場合、平均粗さが増大するにつれて最大振幅値の平均値は小さくなり、また変動係数は大きくなっていることがわかる。これは、表面粗度が大きい供試体においては、弾性波の入射および受振時における損失が大きくなることによると考えられ、最大振幅値などを用いて弾性波の減衰の程度を評価するような場合においては、特にコンクリート表面における粗度について考慮する必要があることといえる。

そこで本研究ではこれ以降、弾性波透過試験における測定箇所は事前にグラインダーによる研磨を行い、供試体表面粗度の違いが試験結果に及ぼす影響を可能な限り小さくした。これにより、最大振幅値の変動係数を 2%程度に抑えることができる。

b) 含水状態に関する検討

これまでの検討はすべて、一様な条件のもとで検討を行うため、試験実施直前まで水中に浸しておいた飽水状態のコンクリート供試体を用いてきた。しかしながら、実際のコンクリート構造物においては、必ずしもコンクリートが飽水状態にあるとは限らず、むしろ構造物の立地条件あるいは気候・気象条件によって、その含水状態は様々なものとなる。さらに降雨や潮位変動などにより、コンクリートの含水状態は一定でないこともある。このようなコンクリートの含水状態の変化により、弾性波透過試験結果も若干の影響を受けることが推測される。そこで、このようなコンクリートの含水状態の変化が弾性波透過試験結果に及ぼす影響について明らかにするため、以下に述べるような検討を行った。

実験概要

十分な期間水中養生を行ったコンクリート供試体に対して弾性波透過試験を行った後、気温 20℃、相対湿度 50%の実験室内に 1 ヶ月間放置して供試体を乾燥させた。そして、この乾燥させた供試体に対して弾性波透過試験を行い、飽水状態の場合の結果と比較した。コンクリートの含水状態を評価するために、コンクリート水分計（ケット社製）を用いて、供試体中心付近（表面から内部に 40mm の地点）の含水率を測定した。用いた供試体は $\phi 100 \times 200$ (mm)のコンクリート円柱であり、コンクリートの配合については、W および s/a を 190kg/m^3 、0.45 で一定として、W/C を 0.35、0.45、0.55 と変化させ、W/C の違いによるコンクリートの含水量の違いが試験結果に及ぼす影響についても検討を行った。

実験結果

図 3.3.5～6 に、コンクリートの含水率の変化にともなう弾性波伝播速度および最大振幅値の変化を示す。これらより、供試体が乾燥しコンクリートの含水率が小さくなるにつれて、弾性波伝播速度は若干ではあるが小さくなり、最大振幅値は大きくなることがわかる。また W/C の値にかかわらず同様の傾向が認められた。乾燥の進行とともに弾性波伝

播速度が低下するのは、乾燥によりコンクリートの弾性係数が減少するためである。これは、セメントゲル内に水隙、半水隙および空隙を導入したモデルを用いて、コンクリートの含水状態と弾性係数の関係を明らかにした既往の研究³⁻⁹⁾により説明することができる。一方、乾燥の進行とともに最大振幅値が増加する理由としては、同様に乾燥の進行とともに強度が増加する理由の 1 つとして考えられている「乾燥収縮によるセメントペーストの緻密化³⁻¹⁰⁾」が考えられる。またゲル空隙中における水分の存在が、弾性波エネルギーの吸収材として機能していることも考えられる。

このように、コンクリート表面の含水状態の変化は、弾性波透過試験結果に多少なりとも影響を及ぼすことがわかった。したがって実構造物に対して弾性波透過試験を実施する際には、コンクリート表面の粗さだけでなく含水状態も管理する必要があることが示された。本研究ではこれ以降、弾性波透過試験実施直前まで供試体を水中に浸し、供試体を飽水状態とした上で測定に供することとした。

3-3-4 試験実施材齢が試験結果に及ぼす影響

コンクリートは、材齢の経過とともに、その物性が大きく変化することはいうまでもない。したがって、コンクリート中における弾性波伝播挙動も材齢の経過とともに変化していくものと推測される。そこで、コンクリート練混ぜ後からの弾性波伝播挙動の変化を追跡し、コンクリートの材齢が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について明らかにすることにより、材齢の影響を受けない試験結果を得るために必要な養生期間を決定することとした。

a) 実験概要

用いたコンクリートの配合は、前述の 3-3-1 の場合と同一であり、供試体寸法は $\phi 100 \times 200(\text{mm})$ とした。コンクリート練混ぜ後 1 日で脱型を行い、水中養生を開始した。その後、材齢 7、14、28、56 日で弾性波透過試験を行い、弾性波伝播速度および最大振幅値を測定した。

b) 実験結果

図 3.3.7 に、弾性波伝播速度および最大振幅値の経時変化を示す。このように、弾性波伝播速度および最大振幅値ともに材齢の経過とともに増加傾向が鈍化している。特に弾性波伝播速度は材齢 28 日でほぼ一定値に達している。一方、最大振幅値は材齢 56 日においてもわずかながら増加している。このように、両者の増加傾向に差が生じたのは、ミクロレベルでの組織変化に対する両者の鋭敏性の違いによるものと考えられる。すなわち、比較的材齢が経過した後におけるコンクリート内部組織の変化が、ミクロレベルでのセメントの水和進行、あるいは骨材界面に存在する遷移帯の緻密化などといったものであり³⁻¹¹⁾、このようなミクロレベルでの組織変化に対して、弾性波伝播速度は鈍感であるが、最大振幅値に代表される弾性波の減衰に関する量は敏感なためであると考えられる。このようなコンクリート内部組織と弾性波伝播挙動の関係については、次章以降において詳細に検討することとする。

以上までの検討の結果、材齢 28 日以降において弾性波伝播速度はほぼ一定であり、最大振幅値は増加しているものの、その増加量は比較的小さいことが明らかとなった。したがって、これ以降の検討においては材齢 56 日を試験材齢と定義し、弾性波透過試験などの種々の試験を材齢 56 日で行うこととした。

3-3-5 供試体寸法および形状が試験結果に及ぼす影響

実構造物のようにスケールの大きいコンクリート躯体であれば、このような側面からの反射等の影響は考慮する必要がなく、弾性波入射方向に対して直角方向には無限の広がりを持つ弾性波伝播媒体として取り扱って良いものと考えられる。しかしながら実験室レベルでコンクリート供試体を作製し弾性波透過試験を行う際には、特に側面からの反射波の存在が受振波形に影響を及ぼすことが懸念されることから、供試体寸法および形状の影響を無視できない。そこで、供試体寸法および形状の異なるコンクリート供試体を用いて弾性波透過試験を行い、それらが試験結果に及ぼす影響について検討を行うこととした。ここで、弾性波伝播速度については、そもそも材料固有の物性であり、供試体寸法および形状に依存しないものと考えられるが、その影響を無視してもよいことを確認した。

a) 実験概要

用いた供試体は、 $50 \times 100 \times 100(\text{mm})$ 、 $100 \times 200 \times 200(\text{mm})$ および $150 \times 300 \times 300(\text{mm})$ のコンクリート角柱および $\phi 100 \times 150(\text{mm})$ のコンクリート円柱である。コンクリート角柱においては、弾性波伝播方向に対して直角方向の長さを弾性波伝播距離の 2 倍としてあるため、供試体側面からの反射波の影響は比較的小さいものと考えられる。一方のコンクリート円柱は、弾性波伝播距離よりもそれと直角方向の寸法の方が小さいため、供試体側面からの反射の影響が大きいものと考えられる。これらの供試体に対して弾性波透過試験を行い、弾性波伝播速度および透過弾性波の周波数分布を求めた。供試体の作製に用いたコンクリートの配合は前述の 3-3-1 の場合と同一であり、練混ぜ後 1 日で脱型し、材齢 56 日まで水中養生を行った。

b) 実験結果

図 3.3.8 に、異なる長さのコンクリート角柱供試体において得られた弾性波伝播速度を示す。これより、供試体長さにかかわらずほぼ同一の弾性波伝播速度が測定されており、弾性波伝播速度が供試体寸法に依存しないことが確認できた。図 3.3.9 に、異なる長さのコンクリート角柱供試体において得られた透過弾性波の周波数分布を示す。これより、弾性波伝播距離が長くなるほど全体的に周波数成分が減少していることがわかる。以上のことは、円柱供試体の場合においても同様に確認された。

次に弾性波伝播距離が等しいが供試体形状が異なる場合の結果について示す。図 3.3.10 に、供試体長さ 150mm の角柱供試体および円柱供試体により得られた周波数分布を示す。これより、円柱供試体の場合の低周波成分が角柱供試体のものと比較して多くなっていることがわかる。また周波数が高くなるほど両者の差が小さくなっている。これは、3-2-4でも述べたように周波数が低い成分ほど指向性が悪く、伝播媒質中に広がりやすいことから、供試体側面における反射波が生じ結果的に成分が多くなったものと考えられる。以上は、供試体長さ 150mm の場合の結果であるが、他の供試体長さの場合においても同様な結果が得られている。

以上より、弾性波伝播速度は供試体寸法や形状に依存しない材料固有の物性であることが確認できた。一方、透過弾性波の周波数分布に及ぼす供試体寸法および形状の影響は無

視できないほど大きいことが示された。供試体寸法が大きくなると周波数分布は全体的に減少していき、また円柱のように側面からの反射波の影響を受けやすい形状の供試体においては、低周波成分の増加が認められた。したがって、これ以降の検討においては、比較・検討を行う供試体の寸法および形状は同一とし、供試体寸法および形状の違いが試験結果に及ぼす影響を除去することとした。

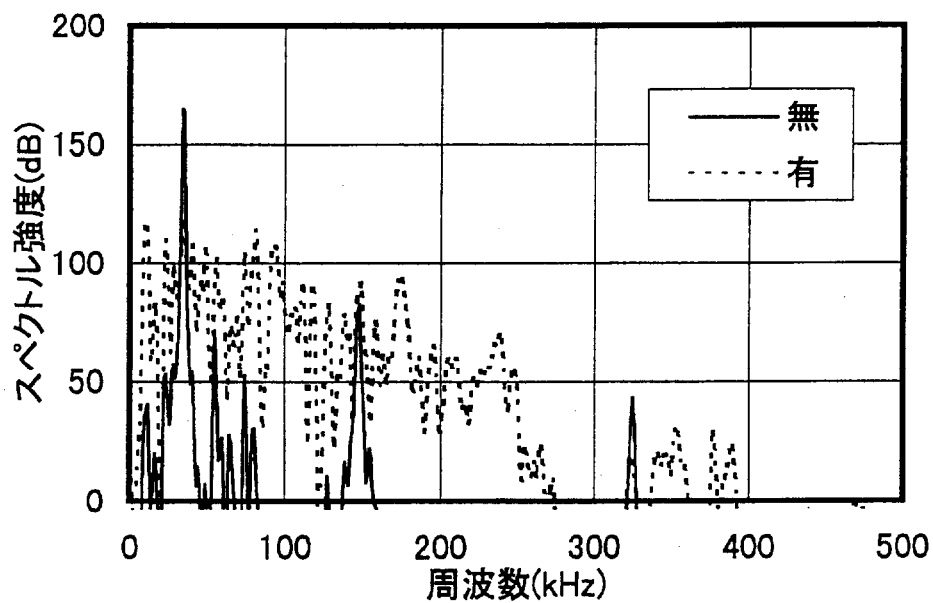
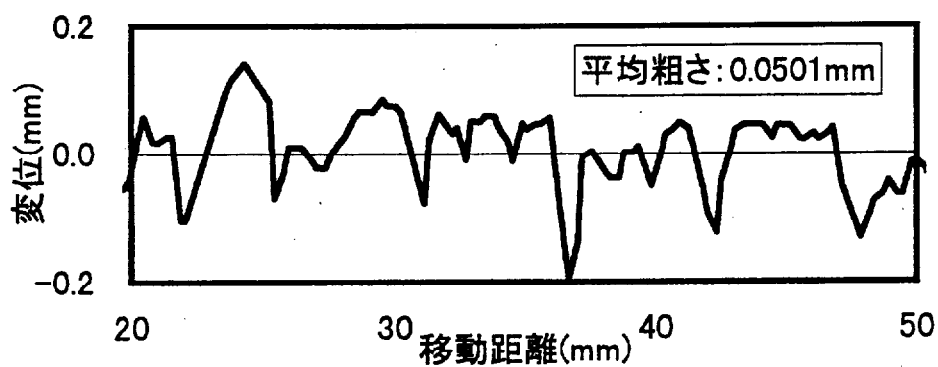
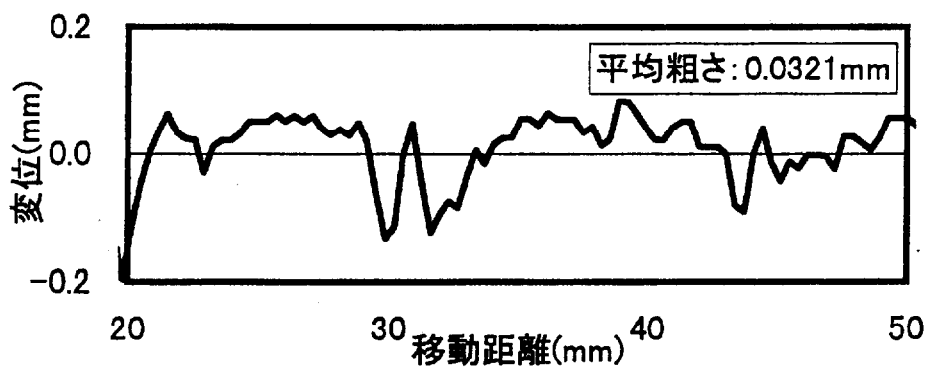


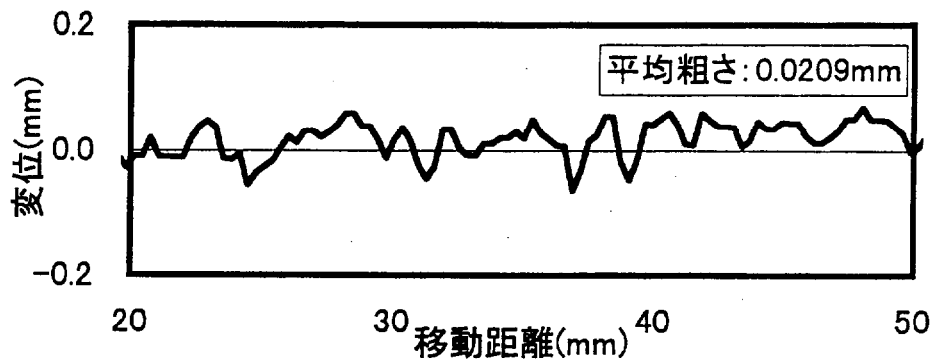
図 3.3.1 接触媒質の有無が周波数分布に及ぼす影響



(a)無処理



(b)サンドペーパーによる研磨後



(c) グラインダーによる研磨後

図 3.3.2 コンクリート表面粗度の定量化

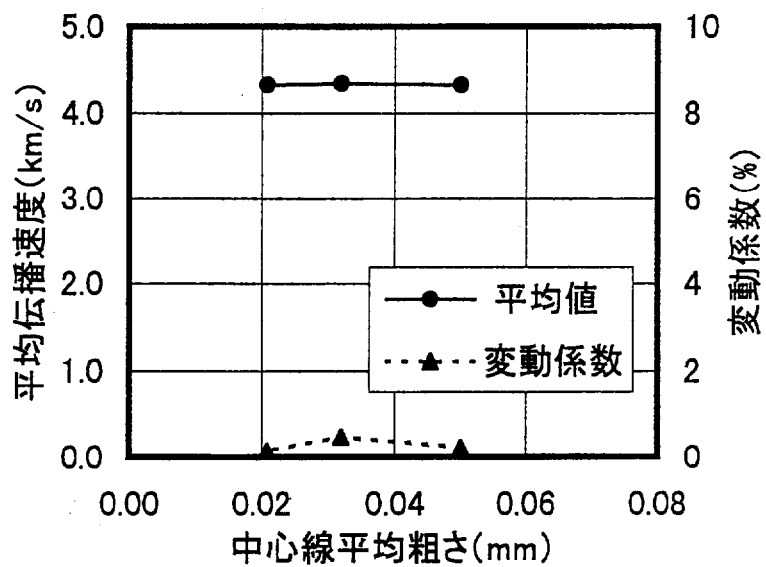


図 3.3.3 表面粗度が弾性波伝播速度に及ぼす影響

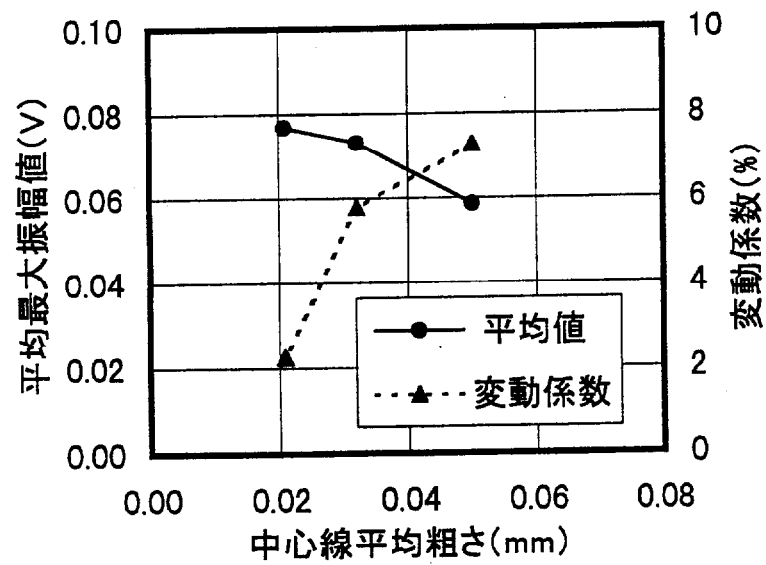


図 3.3.4 表面粗度が最大振幅値に及ぼす影響

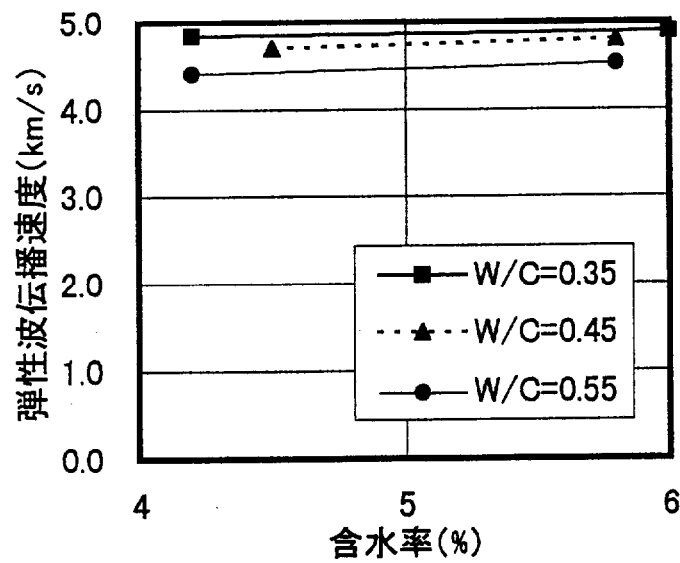


図 3.3.5 含水状態が弾性波伝播速度に及ぼす影響

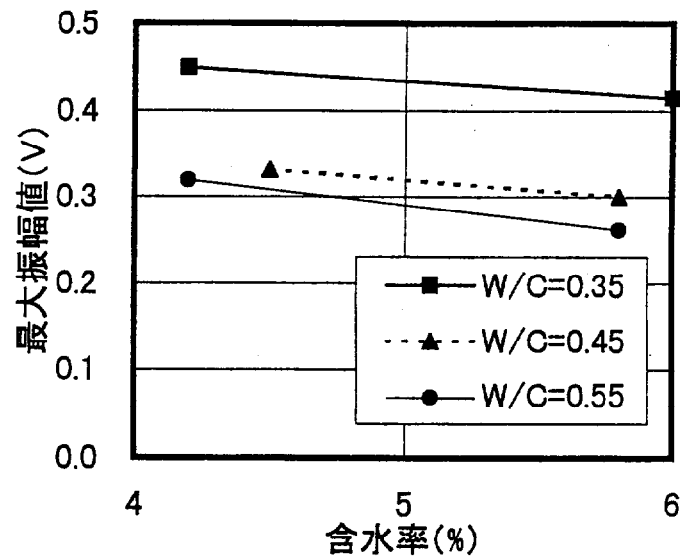


図 3.3.6 含水状態が最大振幅値に及ぼす影響

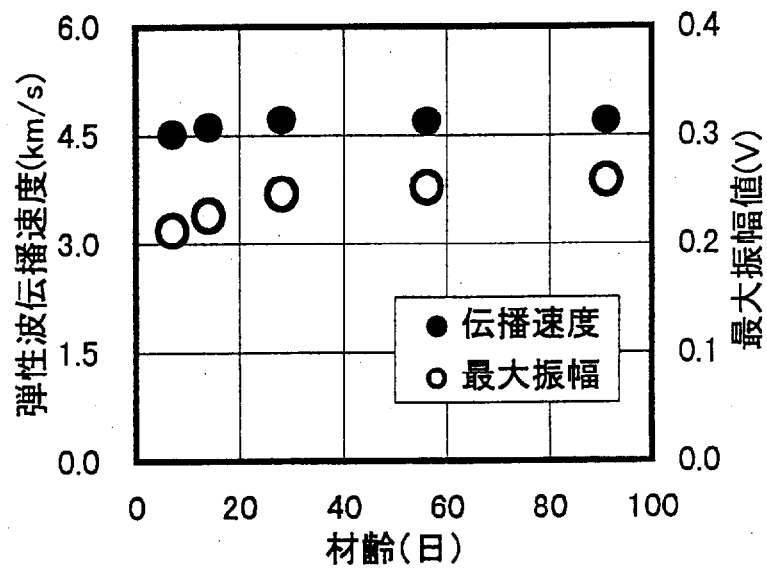


図 3.3.7 材齢の進行にともなう弾性波伝播挙動の変化

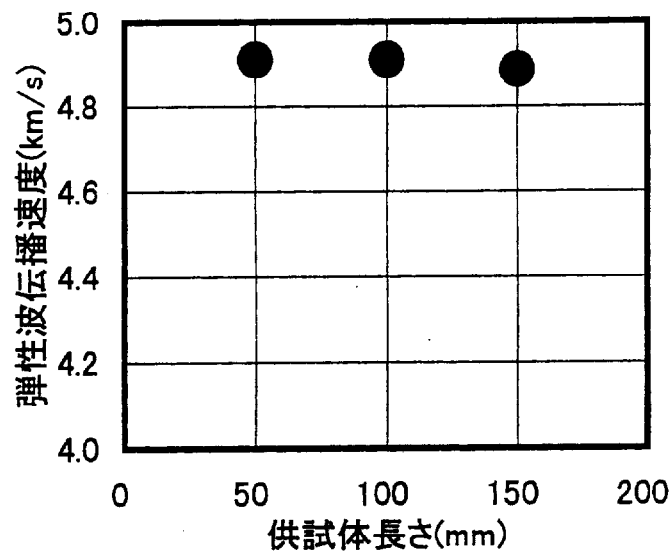


図 3.3.8 供試体長さと弾性波伝播速度の関係(角柱供試体)

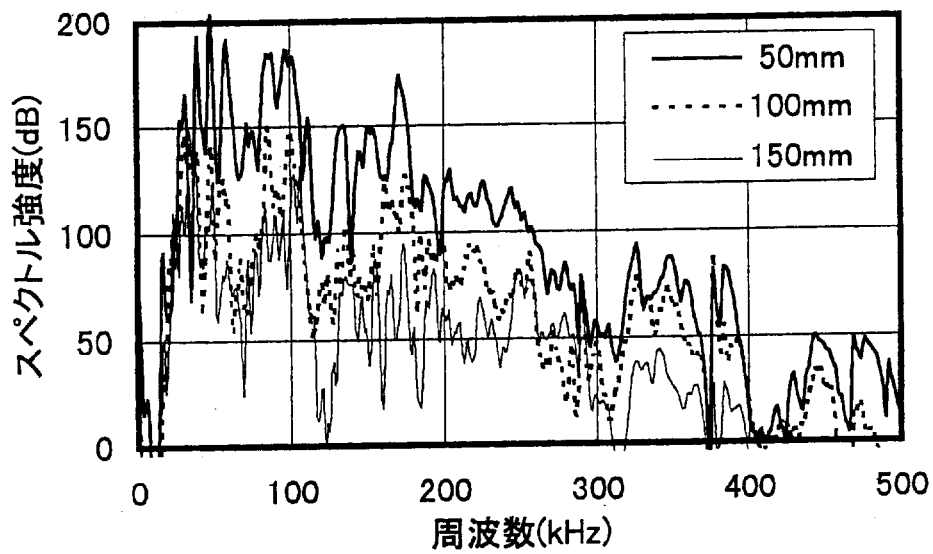


図 3.3.9 供試体長さが周波数分布に及ぼす影響(角柱供試体)

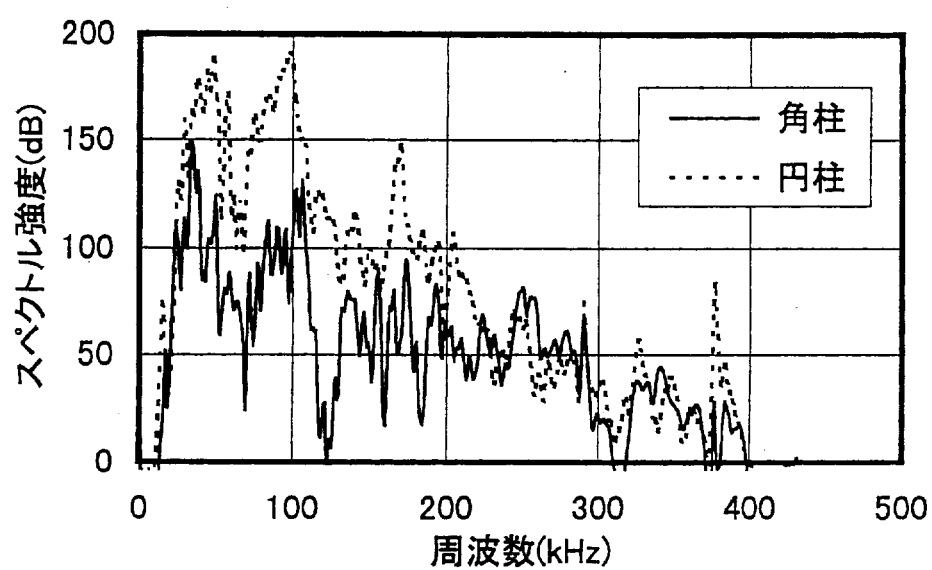


図 3.3.10 供試体形状が周波数分布に及ぼす影響
(供試体長さ: 150mm)

3-4 本章のまとめ

本章においては、本研究で用いる入射弾性波の特性評価と各種試験条件が弾性波透過試験結果に及ぼす影響について検討を行い、これ以降の検討をスムーズに進めるための適切な弾性波透過試験方法およびその試験条件を決定した。

本研究に用いる入射弾性波の特性評価を行った結果、広帯域垂直型超音波探触子により発振される弾性波は、50～500(kHz)という比較的広い範囲にわたって周波数成分を有していることが示された。一般的なコンクリートに用いられる骨材最大寸法は 20mm 程度であり、これと同等の長さの波長に相当する弾性波の周波数は 200kHz となる。したがって、骨材に起因する弾性波の散乱や骨材界面に発生するボンドクラックに関する検討を行うのに適していると考えられる。

続いて弾性波透過試験結果に多大な影響を及ぼすと考えられる各種試験条件について検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

①コンクリート表面に対する適切なセンサ接触方法

センサーコンクリート間に適切な接触媒質を用いることにより、バラツキの少ない高精度な測定を行うことができることが示された。したがって、コンクリートに対して弾性波透過試験を行う場合には、センサのコンクリート表面に対する設置方法に十分留意する必要がある、そのためには接触媒質を使用することが望ましい。

②コンクリートの表面粗度

コンクリート表面粗度が受振弾性波の最大振幅値に及ぼす影響が顕著であることが示された。したがって、伝播速度だけでなく最大振幅値や周波数特性などの弾性波の減衰に着目した検討を行う際には、コンクリート表面粗度を適切に管理しておく必要がある。例えば、測定箇所のグラインダー研磨は試験結果のバラツキを小さく抑える（変動係数 2%程度）上で有効であることが示された。また弾性波伝播速度は、材料固有の物性であるため、表面粗度には依存しないことが確認できた。

③コンクリート表面の含水状態

コンクリート表面の含水状態の変化により、弾性波透過試験結果は少なからず影響を受けることがわかった。すなわち、含水率が低下しコンクリート表面の乾燥が進行するにつれて、弾性波伝播速度は若干増加し、最大振幅値は減少する。したがって実構造物に対して弾性波透過試験を実施する際には、コンクリートの含水状態についても管理する必要がある。

④試験実施時のコンクリートの材齢

材齢 28 日を経過したコンクリートにおいては、弾性波伝播速度はほぼ一定となっており、また最大振幅値は増加しているものの、その増加量は比較的小さいことがわかった。

⑤試験供試体の寸法および形状

供試体寸法および形状が透過弾性波の周波数分布に及ぼす影響は無視できないほど大きいことが示された。供試体寸法が大きくなると周波数分布は全体的に減少していき、また円柱のように側面からの反射波の影響を受けやすい形状の供試体においては、低周波成分の増加が認められた。また弾性波伝播速度は、供試体寸法および形状には依存しないことが確認された。

以上の検討結果を踏まえて、本研究においてはこれ以降、以下に示すような試験条件のもとで弾性波透過試験を行い、コンクリート中における弾性波伝播挙動について検討を行うこととした。

- ・センサの供試体表面への設置には適切な接触媒質を用いる。
- ・センサ設置位置はあらかじめグラインダーにより研磨し可能な限り平滑にする。
- ・試験実施直前まで水中に浸しておき、供試体表面に付着する余分な水分はウェスで拭きとり、供試体は表面乾燥飽水状態とする。
- ・材齢 56 日まで水中養生を行う。
- ・比較・検討を行うシリーズ内においては供試体の寸法および形状は同一とする。

このような試験条件のもとで試験を実施することにより、バラツキの小さい安定した測定を行うことができ、弾性波伝播挙動に及ぼすコンクリート内部状態の影響のみをコンクリート表面状態等によらずに検討することができるものと考えられる。

第4章

コンクリート中における弾性波伝播挙動に関する検討

4-1 はじめに

コンクリートの劣化評価を弾性波の伝播特性を利用して行うためには、コンクリート中における弾性波伝播挙動を十分に理解した上で、劣化にともなう内部状態の変化が弾性波伝播特性にどのように影響するかを明らかにしておく必要がある。しかしながら現状においては、コンクリート中における弾性波伝播挙動には不明確な部分が多く残されており、このような状況でコンクリートの劣化評価を行ったとしても、その結果は信頼性に欠けるものと言わざるを得ない。

コンクリート中における弾性波伝播挙動は極めて複雑なものではあるが、その構成材料単体、すなわちセメントペーストと骨材は比較的均一な材料であると考えられる。このように、コンクリート中における弾性波伝播挙動という問題を単純化して扱うことにより、その解明の糸口がみえてくるものと考えられる。そのためには、モデル骨材やモデルマイクロクラックを用いたモデル試験や骨材界面性状を人為的に変化させた供試体による基礎的検討などを通じて、それらが弾性波伝播挙動に及ぼす影響を明らかにし、その特徴を捉えていくことが重要であると考えられる。また実験結果の妥当性を検証するために、適宜理論的な検討を行うことも必要である。

そこで本章においては、コンクリート中における弾性波伝播挙動の解明を目的として、

骨材やマイクロクラックなどのコンクリート内部状態の変化がコンクリート中を伝播する弾性波の速度および周波数特性に及ぼす影響について、実験的、理論的に検討を行った。本章の構成を以下に示す。

「4-2 コンクリート構成材料単体中における弾性波伝播挙動」においては、コンクリートを構成する各材料、すなわちセメントペーストおよび骨材単体中における弾性波伝播挙動について検討を行い、後のコンクリート供試体による試験結果を理解しやすくなるための基礎資料を得た。次に「4-3 モデル骨材を用いた弾性波伝播挙動に関する基礎的検討」において、コンクリートのような粒子分散型複合材料中における弾性波伝播挙動の特徴を把握するため、モデル骨材を用いて作製した供試体に対して弾性波透過試験を行い、モデル骨材の大きさ、量、ならびに材質の違いが弾性波の伝播速度および周波数特性に及ぼす影響について検討を行った。また球形粒子による弾性波の散乱を定式化した既往の研究や粒子分散型複合材料の弾性係数を理論的に算出した研究成果に基づいて、実験結果の理論的検証を試みた。続いて「4-4 コンクリート中の骨材が弾性波伝播挙動に及ぼす影響」において、上記のモデル試験の結果を踏まえて、実際の骨材を用いたコンクリート供試体に対しても同様な実験を行い、コンクリート中の骨材が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討を行った。その際には、骨材の最大寸法、形状、量および界面性状をパラメータとして、それらの違いによる弾性波伝播挙動の変化を明らかにした。さらに、コンクリートの配合条件（「4-5 コンクリートの配合条件が弾性波伝播挙動に及ぼす影響」）、コンクリート中のマイクロクラックの存在（「4-6 コンクリート中のマイクロクラックが弾性波伝播挙動に及ぼす影響」）、コンクリートの施工条件（「4-7 コンクリートの施工条件が弾性波伝播挙動に及ぼす影響」）に着目した検討を行うことにより、コンクリートの内部状態の変化が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について明らかにし、弾性波によるコンクリートの劣化評価のための基礎資料の収集をはかった。

4-2 コンクリート構成材料単体中における弾性波伝播挙動

4-2-1 概要

ここでは、コンクリートを構成する各材料、すなわちセメントペーストおよび骨材単体中における弾性波伝播挙動について検討を行い、それぞれの特徴を明らかにすることとした。これらの構成材料は、それぞれ単体においては比較的均一な材料として取り扱うことができるものと考えられ、これらが複合しコンクリートとなった場合の弾性波伝播挙動を解明する上での基礎資料となると考えられる。セメントペースト単体に関する検討に際しては、水セメント比等を変化させて物性を変化させたセメントペースト供試体を作製し、その物性の違いが弾性波伝播挙動に及ぼす影響を調べた。一方、骨材単体に関する検討に際しては、後のコンクリート供試体作製時に用いる骨材と同一の採石場から採取した供試体による検討を行った。

4-2-2 セメントペースト単体による検討

a) 実験概要

供試体概要

ここでは、 $100 \times 200 \times 200(\text{mm})$ の角柱供試体、ならびに $\phi 50 \times 100(\text{mm})$ および $\phi 100 \times 200(\text{mm})$ の円柱供試体を用いて各種の検討を行った。角柱供試体は弾性波透過試験に、 $\phi 50 \times 100(\text{mm})$ の円柱供試体は密度・空隙率試験に、 $\phi 100 \times 200(\text{mm})$ の円柱供試体は一軸圧縮試験にそれぞれ用いた。供試体ごとのバラツキを考慮して、各供試体はそれぞれ3個ずつ作製した。

硬化セメントペーストの特性を変化させるため、練混ぜ時の水セメント比(W/C)を0.30、0.40、0.50、0.60と変化させた。この際、セメントには普通ポルトランドセメント（比重：3.15）を用いた。またW/C=0.5および0.6のケースにおいては、ブリーディングによる材料分離の発生が懸念されたため、セルロースエーテルを主成分とする分離低減剤を、セメント重量に対してそれぞれ0.2%、0.35%添加した。この分離低減剤の添加は、硬化後のセメントペーストの諸特性にはあまり影響しないものと考えられる⁴⁻¹⁾。

さらに普通ポルトランドセメントを用いた場合とは異なる水和構造・組織を有するセメントペーストについて検討を行うため、セメントに超早強セメントを用いたケース、ならびにセメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換したケースを設定した。超早強セメントを用いたケースにおいては、W/C は 0.40 とし、適度な流動性および可使時間を確保するため、減水剤および凝結遅延剤をセメント重量に対してそれぞれ 1.75%、1%用いた。また高炉スラグ微粉末を用いたケースにおける W/C は 0.50 とし、高炉スラグ微粉末の置換率はセメントに対して 40%とした。用いた高炉スラグ微粉末のブレン比表面積は、約 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ である。

一軸圧縮試験

本試験における載荷は、 $\phi 100 \times 200(\text{mm})$ の円柱供試体に対して載荷速度 $0.25\text{MPa}/\text{sec}$ で行い、あわせてひずみの計測も行った。ひずみ計測は、供試体軸方向および周方向にそれぞれ 2 枚ずつゲージ長 30mm のひずみゲージ（東京測器研究所社製）を供試体表面に貼付し、荷重増分 10kN ごとにデータロガー（東京測器研究所社製）を用いて行った。この際、ロードセルにより得られる荷重データについてもデータロガーに入力した。

供試体破壊荷重より一軸圧縮強度を、ひずみ計測結果より応力～ひずみ関係を求めた。得られた応力～ひずみ曲線の最大応力点の $1/3$ の点と原点を結ぶ直線の傾きから割線弾性係数を算出し、軸方向ひずみと周方向ひずみの比よりポアソン比を求めた。なおひずみのデータは、2 枚のひずみゲージによる計測結果の平均値とした。

密度・空隙率試験

本試験においては、 $\phi 50 \times 100(\text{mm})$ の円柱供試体の「飽水質量」(m_s)、水中質量(m_w)および絶乾質量(m_d)の計測を行った。ここで、「飽水質量」は、水中養生終了後の供試体に対して脱気を行い、供試体中の空隙をすべて水で満たした状態での質量であり、水中質量は、その供試体の水中における質量で、供試体に作用する浮力の分だけ小さくなる。したがって、これらの差を求めることにより、供試体の体積を得ることができる。また絶乾質量は、飽水・水中質量を計測した供試体を 105°C の乾燥炉に入れ、一定質量になるまで乾燥させた際の質量である。 105°C で一定質量になるまで乾燥させることにより、D 乾燥と同程度の乾燥状態を得ることができる⁴⁻²⁾とされている。D 乾燥とは、ドライアイスの凝固点 -78°C の水蒸気分圧 ($4.1 \times 10^{-4} \text{mmHg}$) で乾燥させる方法であり、蒸発水と非

蒸発水をわけることができる⁴⁻³⁾。本実験において、炉乾燥開始 1、3、5、7、10、14 日後に質量計測を行った結果、セメントペーストの場合、10～14 日で質量変化がなくなった。そこで本実験においては、乾燥開始 14 日後の質量を絶乾質量とした。そして、これらを用いて密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$ 、絶乾密度 $\rho_D(\text{g/cm}^3)$ 、空隙率 $\text{VR}(\%)$ を以下の式より算出した。

$$\rho = \frac{m_s}{\frac{m_s \cdot g - m_w \cdot g}{\rho_w \cdot g}} = \frac{m_s}{V} \quad (4.2.1)$$

$$\rho_D = \frac{m_D}{V} \quad (4.2.2)$$

$$\text{VR} = \frac{\frac{m_s - m_D}{\rho_w}}{V} \times 100 \quad (4.2.3)$$

ここに、 g ：重力加速度、 ρ_w ：水の密度、 V ：供試体体積である。ここで、絶乾密度は供試体中に水分が存在しない場合の単位体積あたりの質量であり、空隙率は供試体体積に占める空隙および水隙の存在割合（体積基準）のことである。この空隙率により、セメントペーストの密実性を評価できるものと考えられる。

弾性波透過試験

本試験は、 $100 \times 200 \times 200(\text{mm})$ の角柱供試体の 100mm の方向に対して、第3章で決定した試験方法および試験条件に基づいて行った。この方向は、供試体作製時の打設方向と同一であり、これ以降の弾性波透過試験においても打設方向と弾性波入射方向は同一とした。図 3.2.1 と同一の弾性波測定システムにより測定された受振波形は、サンプリング周波数 2MHz でAD変換された後、記録・解析された。供試体表面に対するセンサの設置は、センサ接触面をあらかじめグラインダーにより研磨した後、第3章と同一の接触媒質を用いて行った。さらに供試体表面の含水状態を一定に保つため、試験実施直前まで供試体を水中に浸しておき飽水状態とした上で試験に供した。また測定時のバラツキを考慮して、1 測点につき 3 回の計測を行い、それらの平均値を測定値とした。

b) 実験結果および考察

硬化セメントペーストの諸物性

表 4.2.1 に、硬化セメントペーストの圧縮強度、弾性係数、ポアソン比、密度、絶乾密度、空隙率の計測結果を示す。これによれば、W/C の増加とともに空隙率が増加し、それとともに密度、圧縮強度、弾性係数などが低下していることがわかる。図 4.2.1～2 に、空隙率の変化にともなう圧縮強度および弾性係数の変化を示す。図中の曲線は、以下に示す Powers による実験式⁴⁻⁴⁾に基づいて本実験結果を回帰したものである。

$$\sigma(\text{or } E) = C \cdot (100 - VR)^3 \quad (4.2.4)$$

ここに、 σ ：圧縮強度、 E ：弾性係数、 VR ：空隙率(%)、 C ：実験定数（空隙が存在しない場合の圧縮強度あるいは弾性係数）である。これらによれば、圧縮強度ならびに弾性係数は空隙率の増加とともに単調に減少することがわかり、この空隙率がセメントペーストの諸特性を決定づける重要なパラメータであることが示された。また圧縮強度の場合の方が回帰曲線からのバラツキが大きくなっている。これは、強度特性というものが本質的に材料の極限状態に関する性質であり、空隙率などの材料内部の微細構造の平均的な性質よりは、むしろその極限的な性質、例えば、空隙形状、位置、幾何学的配置などに依存するものであるためである⁴⁻⁵⁾。

セメントペースト単体中における弾性波伝播挙動

図 4.2.3 に、セメントペーストの W/C と弾性波伝播速度の関係を示す。これより、W/C の増加とともに弾性波伝播速度は単調に低下することがわかる。しかしながら、W/C はあくまでも配合上の指標に過ぎず、セメントペーストの物性を的確に表しているとは言えない。そこで、上記のように圧縮強度および弾性係数と密接な関係があり、材料内部の構造・組成を的確に反映しているものと考えられる空隙率と弾性波伝播速度の関係を調べた。両者の関係を図 4.2.4 に示す。この図には、ジェットセメントを用いたケースおよび高炉スラグ微粉末を用いたケースの結果についてもあわせて示してある。このように、結合材の種類にかかわらず、空隙率と伝播速度の間には明確な対応関係が存在していることがわかる。また図中の曲線は、実験結果の回帰曲線である。この回帰曲線は、弾性波伝播速度が空隙率の 1.5 乗に比例すると仮定して求めたものである。ここで、弾性波伝

播速度が空隙率の 1.5 乗に比例するとしたのは、均一弾性体中における波動伝播速度 $V(\text{m/s})$ が、 E : 弾性係数(Pa)、 ρ : 密度(kg/m^3)、 ν : ポアソン比とすると、次式により与えられ⁴⁻⁶⁾、

$$V = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (4.2.5)$$

式中の弾性係数は、前出の Powers の実験式から空隙率の 3 乗に比例し、ポアソン比および密度は空隙率によらず一定であると仮定したことによる。この図によれば、実験値と回帰曲線はおおむね良好な対応関係を示しており、弾性波伝播速度が弾性係数と同様に材料内部構造の平均的な性質を反映した指標であることがわかる。

次に、先の式 4.2.5 の右辺に表 4.2.1 の実測値を代入することにより得られる弾性波伝播速度と実測の弾性波伝播速度を比較した結果を図 4.2.5 に示す。これより、実測の弾性波伝播速度の方が若干大きくなっているものの、両者の間には明確な直線関係が認められる。したがって、セメントペースト単体中における弾性波伝播挙動は、本研究で対象としているような周波数範囲においては、均一弾性体中の伝播挙動として扱ってもよいものと考えられる。また実測の伝播速度の方が理論式から算出した値よりも若干大きくなった理由としては、弾性係数のひずみ速度依存性が考えられる。すなわち、右辺に代入した弾性係数は静的載荷時のものであり、弾性波伝播のような高速の現象を説明するにはひずみ速度が小さすぎるものと考えられる。このように、ひずみ速度の増加とともに弾性係数が大きくなるのは、高ひずみ速度の変形が生じた場合、空隙中の自由水がその粘性のため移動できずに静水圧の形で応力を負担するためである。なお既往の研究によれば、静的載荷時の 1000 倍のひずみ速度における弾性係数は、静的載荷時のおよそ 1.2 倍になるとされている⁴⁻⁷⁾。

また式(4.2.5)が、無限媒体中における体積波に対する理論式であり、ここで用いた供試体が、その寸法を考慮すると、弾性波の無限媒体として扱えないことも、実測値と推定値に差がみられた原因の 1 つとして考えられる。

次に、供試体中を透過した弾性波の周波数分析結果について述べる。図 4.2.6 に、各 W/C ごとに得られた周波数分布を示す。このように、0~500(kHz)の周波数範囲におい

て、各 W/C 間でほとんど差違が認められず、同様な周波数分布が得られていることがわかる。このように、W/C が異なることにより空隙量に違いがあるにもかかわらず、周波数分布にあまり違いがみられなかったのは、セメントペースト中に存在する空隙は、エントラップドエアを除けば、1mm 以下⁴⁻⁸⁾の寸法であり、用いた弾性波の波長(数 cm)と比較して極めて小さいため、弾性波の散乱に起因するような減衰が生じないためと考えられる。

以上のようにセメントペースト単体中における弾性波伝播挙動について検討を行った結果、材料内部の密実性を平均的に表す空隙率と弾性波伝播速度の間には明確な対応関係が存在することがわかった。したがって、セメントペーストからなるマトリックス部分の空隙率が配合の違い、水和の進行、あるいは劣化の進行などにより変化した場合には、その弾性波伝播速度も変化することが推測される。しかしながら透過弾性波の周波数分布においては W/C の違いはあまり顕著ではなかった。これは、セメントペースト中における不均一性のスケールが、本研究で対象としているような弾性波の波長と比較して小さいため、弾性波の散乱・反射による影響が周波数分布に表れなかったためであると考えられる。したがって、本研究ではセメントペーストを弾性波の散乱等が生じない均一体として扱うこととした。

4-2-3 骨材単体による検討

a) 実験概要

骨材単体中における弾性波伝播挙動について明らかにするため、後の実験で用いる碎石の原石山より採取した岩石片を用いて検討を行った。採取した岩石は硬質砂岩であり、これを直方体状に加工し、弾性波透過試験に供した。弾性波伝播距離は、セメントペーストの場合と同じくおおよそ 100mm とした。弾性波透過試験の方法および条件については、セメントペーストの場合と同一とした。またあわせて、一軸圧縮試験および密度・空隙率試験を行った。

b) 実験結果および考察

用いた岩石供試体の一軸圧縮強度、密度、空隙率は、それぞれ 165.1MPa、2.61g/cm³、2.58%であった。これらの値は一般に用いられている密実で強固な骨材の値と同程度であり、この骨材も密実で強固な岩石であることが推測される。

また弾性波透過試験の結果、骨材単体における弾性波伝播速度は 5.63km/s であり、図 4.2.7 に示すような透過弾性波の周波数分布が得られた。この図には、第3章で得られたアルミニウム板に対する試験結果、上記4-2-2の W/C=0.30 のセメントペーストの試験結果、ならびにコンクリートの場合の典型的な試験結果もあわせて示してある。これによれば、骨材単体の周波数分布においては、セメントペーストの場合と比較して 300kHz 以上の高周波域の成分が若干少なくなっているものの、両者でほぼ同様な周波数分布が得られていることがわかる。このことから、骨材単体もセメントペーストと同様に均一な弾性体であると仮定することとした。骨材単体による場合、セメントペーストと比較して高周波域における減衰が顕著であったのは、骨材内部に潜在的に内在する微小亀裂によるものであると考えられる。両者に差違が認められた周波数範囲 (300kHz 以上) に相当する弾性波の波長は 20mm 程度以下となることから、骨材内部に潜在する微小亀裂の大きさや間隔もこの程度であるものと考えられる。なお、本骨材の音響インピーダンスは、弾性波伝播速度と密度の積より、14.7kg/m²・s となった。

さらにコンクリートの場合の試験結果と比較すると、コンクリートの周波数分布は、セメントペースト単体および骨材単体のものより、250kHz 以上の高周波域における減衰が特に著しくなっていることがわかる。このことから、コンクリートは、セメントペーストおよび骨材という構成材料単体の単なる複合体ではなく、両者がランダムにかつ複雑に混合したものであり、このランダム性・複雑性がコンクリート中における弾性波伝播挙動を極めて複雑なものにしていると考えられる。さらにコンクリート中においては、セメントペーストおよび骨材という構成材料単体の境界に、周囲よりもポーラスで脆弱な遷移帯が形成される。また外力、乾燥収縮、温度応力などの作用により、コンクリート中にマイクロクラックが少なからず存在しているのが一般的である。このような遷移帯やマイクロクラックの存在もまた、コンクリート中における弾性波伝播挙動を複雑なものにしていると考えられる。

骨材単体中における弾性波伝播挙動について検討を行った結果、300kHz 以上の高周波

域において若干の減衰が認められたものの、それ以下においてはセメントペーストと同様な周波数分布が得られた。この周波数分布は、コンクリートのものと比較すると減衰をあまり受けていないことから、骨材単体においてはコンクリートの場合にみられるような弾性波伝播挙動の複雑性は存在しないとすることができる。そこで本研究においては、骨材単体もセメントペーストと同様に均一な弾性体とみなし、骨材内部においては弾性波の散乱・反射は発生しないと考えたこととした。

4-2-4 まとめ

ここでは、コンクリートを構成する材料単体中における弾性波伝播挙動について検討を行った。その結果、セメントペースト単体については、材料内部の密実性を平均的に表していると考えられる空隙率と弾性波伝播速度の間には明確な対応関係が存在することが示された。したがって、セメントペーストからなるマトリックス部分の空隙率が配合の違い、水和の進行、あるいは劣化の進行などにより変化した場合には、その弾性波伝播速度も変化する事が推測される。しかしながら透過弾性波の周波数分布においては W/C の違いはあまり顕著ではなかった。これは、セメントペースト中における不均一性のスケールが、本研究で対象としているような弾性波の波長と比較して小さいため、弾性波の散乱・反射による影響が周波数分布に表れなかったためであると考えられる。したがって本研究では、セメントペースト単体中では弾性波の散乱減衰は生じないこととし、均一弾性体とみなすこととした。

一方、骨材単体中における弾性波伝播挙動について検討を行った結果、300kHz 以上の高周波域において若干の減衰が認められたものの、それ以下においてはセメントペーストと同様な周波数分布が得られた。コンクリートの場合の周波数分布と比較すると、骨材単体も均一な弾性体とみなすことができるものと考え、骨材内部においては弾性波の散乱減衰は発生しないこととした。

以上より、コンクリート構成材料単体、すなわちセメントペーストおよび骨材は均一な弾性体とみなすことができ、コンクリートはこれらの均一弾性体が複雑に混合した材料であると仮定することができる。コンクリートの場合にみられるような弾性波伝播挙動の複

雑性は、構成材料単体がランダムに混合すること、ならびに両者の間に境界相が発生することによると推測される。

またセメントペーストの空隙率の変化は弾性波伝播速度に反映されることから、コンクリートが劣化を受けたような場合には、弾性波伝播速度によりセメントペースト・マトリックス部分の空隙率の低下を評価できるものと考えられる。

表 4.2.1 セメントペーストの諸物性

検討 ケース	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)
W/C=0.3	89.3	26.5	0.242	2.211	1.922	22.5
W/C=0.4	47.4	21.3	0.228	2.071	1.712	26.4
W/C=0.5	44.4	16.1	0.265	1.949	1.515	30.3
W/C=0.6	32.1	11.3	0.284	1.825	1.331	33.1
ジェットセメント	53.4	20.5	0.274	1.995	1.603	28.2
高炉スラグ	22.9	18.3	0.241	1.926	1.474	31.2

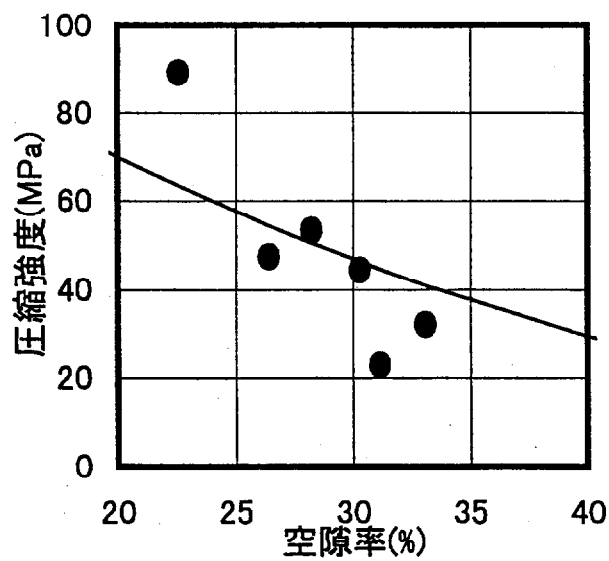


図 4.2.1 セメントペーストの空隙率と圧縮強度の関係

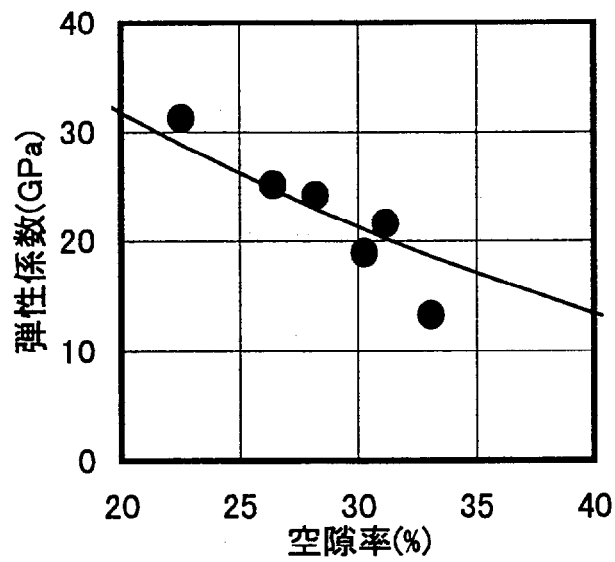


図 4.2.2 セメントペーストの空隙率と弾性係数の関係

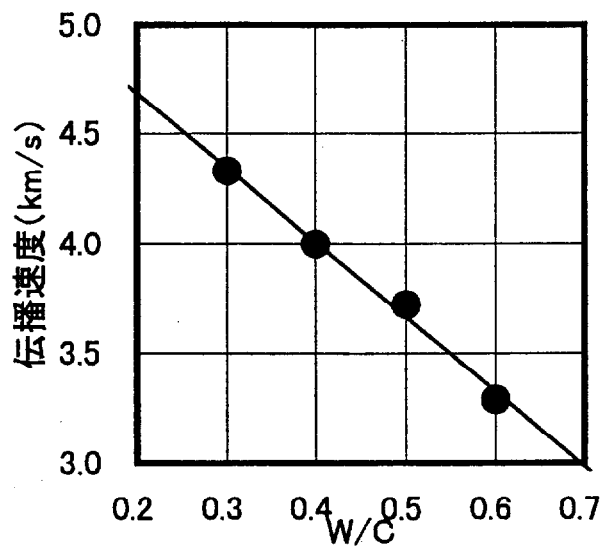


図 4.2.3 セメントペーストの W/C と弾性波伝播速度の関係

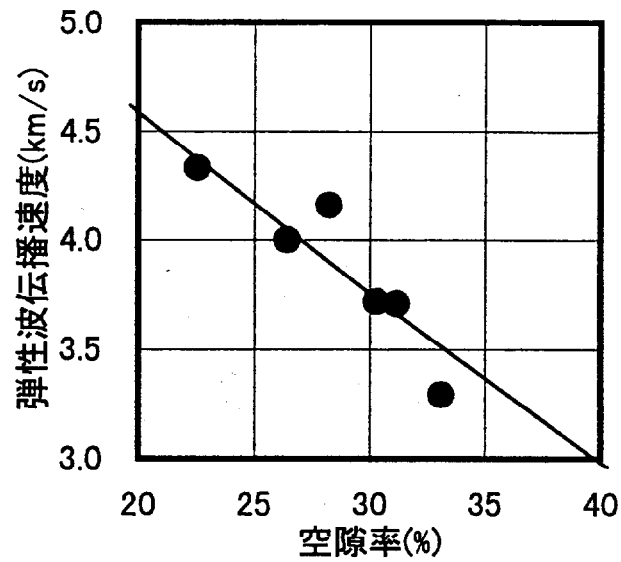


図 4.2.4 セメントペーストの空隙率と弾性波伝播速度の関係

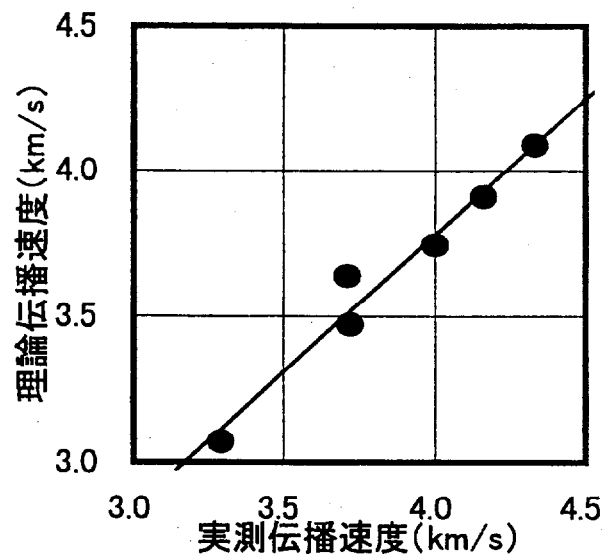


図 4.2.5 理論的に算出した弾性波伝播速度と実測値の比較

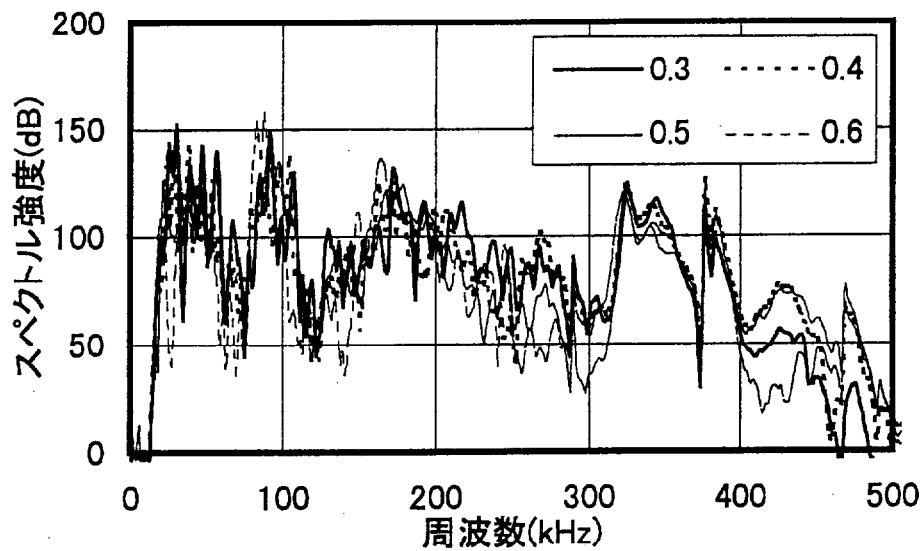


図 4.2.6 W/C の変化にともなう周波数分布の変化

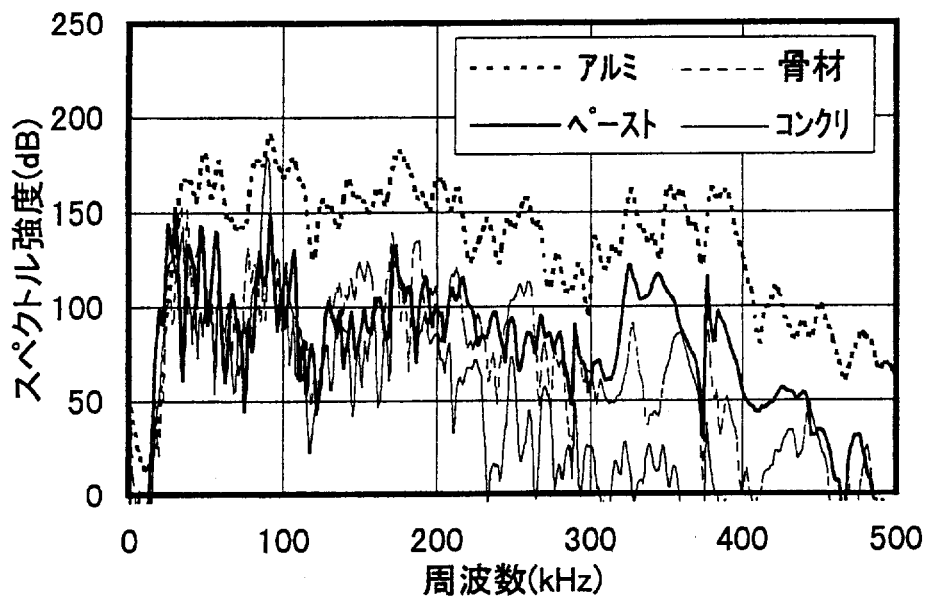


図 4.2.7 コンクリート構成材料単体中を伝播した弾性波の周波数分布

4-3 モデル骨材を用いた弾性波伝播挙動に関する基礎的検討

4-3-1 概要

コンクリートは、マトリックスとなるセメントペースト中に骨材が不規則に存在する粒子分散型複合材料であり、その内部組成は極めて複雑である。このため、コンクリートは不均一な材料であるといわれている。したがって、本研究で対象としているコンクリート中における弾性波伝播挙動も、この著しい不均一性が原因となり、極めて複雑な様相を呈することになってしまう。ここでは粒子分散型複合材料中の弾性波伝播挙動に関する基礎的な知見を得ることを目的として、コンクリート中の骨材をモデル化した供試体による検討を行った。この際、モデル骨材の大きさ、混入量および材質を変化させることにより、粒子分散型複合材料中における弾性波伝播挙動について、弾性波伝播速度および周波数特性に着目して検討を行った。この際、セメントペースト・マトリックスとモデル骨材の境界部分には、一般のコンクリートの場合にみられるような遷移帯は存在せず、両者が完全に付着しているものと仮定して検討を進めた。

さらに、粒子分散型複合材料に対する弾性定数の定式化を行った既往の研究や球形粒子による弾性波の散乱現象を表現した既往の研究に基づいて、実験結果の理論的検証を行った。ここで得られた知見は、実際のコンクリート中における弾性波伝播挙動を解明する上での重要な資料となるものである。

4-3-2 モデル骨材の大きさおよび量が弾性波伝播挙動に及ぼす影響

ここでは、セメントペースト中に混入させるモデル骨材の大きさや混入量が弾性波の伝播速度および周波数特性に及ぼす影響について検討を行った。モデル骨材には、その音響インピーダンスが実際の骨材の値とほぼ同程度のガラス球を用いた。

a) 実験概要

供試体概要

コンクリート中の骨材をモデル化するため、ガラス球をモデル骨材としてセメントペースト中に混入させた供試体を作製した。供試体寸法は、 $100 \times 200 \times 200(\text{mm})$ である。用いたセメントペーストの W/C は、供試体作製時にガラス球が沈降しない程度の粘性を確保するため、0.30 とした。ここで、モデル骨材としてガラス球を用いたのは、用いたガラス球の音響インピーダンスが $13.1\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ であり、一般的な骨材の音響インピーダンス $10 \sim 15\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ とほぼ等しいためである。なお W/C=0.30 のセメントペーストの音響インピーダンスは、 $9.58\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ である。

モデル骨材の大きさおよび混入量が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討するため、混入させるガラス球の直径を 12、20、30(mm)、骨材体積濃度を 10、25、35(%)と変化させた供試体を作製した。用いたガラス球の密度および弾性波伝播速度は、 2.50g/cm^3 、 5.60km/s である。

弾性波透過試験の概要

弾性波透過試験は、供試体の 100mm の方向に対して行った。測定は、 $200 \times 200(\text{mm})$ の供試体表面中央付近の 3 箇所で行い、各測定点においてはバラツキを考慮して 5 回の計測を行った。しかし、測定点ごとのバラツキや測定回数ごとのバラツキは非常に小さく、同一供試体内であれば、ほぼ同様の傾向を得ることができた。したがって、これ以降においては各測定値の平均値を用いて検討を行うこととした。また他の試験方法・試験条件については、前述の 4-2 の場合と同一である。

b) 実験結果および考察

モデル骨材の大きさおよび混入量が弾性波伝播速度に及ぼす影響

まずモデル骨材の大きさおよび混入量が弾性波伝播速度に及ぼす影響について述べることにする。図 4.3.1~2 に、弾性波伝播速度の計測結果を示す。図において、ガラス球の直径を変化させたシリーズにおいてはガラス球の体積濃度を 35%で一定とし、また体積濃度を変化させたシリーズにおいては直径を 20mm で一定としている。これらによれば、骨材径よりも骨材量の変化の方が弾性波伝播速度に及ぼす影響は顕著であることがわかる。これは、マトリックス部分であるセメントペーストよりもガラス球の方が単体での弾性波

伝播速度が大きく、その混入量が多いほど全体としての弾性波伝播速度が大きくなるためと推測される。

モデル骨材の大きさおよび混入量が弾性波の周波数特性に及ぼす影響

次にモデル骨材の存在が、供試体中を伝播した弾性波の周波数特性に及ぼす影響について検討を行った。図 4.3.3～4 に、セメントペースト中のガラス球の直径および量を変化させた場合の透過弾性波の周波数分析結果を示す。図において、ガラス球の直径を変化させたシリーズにおいてはガラス球の体積濃度を 35% で一定とし、また体積濃度を変化させたシリーズにおいては直径を 20mm で一定としている。これらによれば、ガラス球の直径が大きくなるほど、またガラス球の混入率が高くなるほど、周波数分布のうちで高周波成分が減衰していくのがわかる。この減衰の影響を受けている周波数範囲は 200～400(kHz) であり、ガラス球の直径と同程度の波長に相当する周波数範囲と一致している。このことから、この減衰はモデル骨材の存在に起因する弾性波の散乱によるものと推測される。また本実験の範囲内においては、モデル骨材の混入量よりも大きさの方が透過弾性波の周波数分布に及ぼす影響は大きいことがわかる。この傾向を定量化するため、以下の式により定義される周波数分布の平均周波数 f_{ave} を評価指標として導入した。

$$f_{ave} = \frac{\int f \cdot S(f) df}{\int S(f) df} \quad (4.3.1)$$

ここで、 f : 周波数、 $S(f)$: 周波数 f におけるスペクトル強度である。この平均周波数は、周波数分布の重心位置を表すものであり、図 4.3.5 に示すように、高周波成分が減衰するほど、その値は小さくなるものである。したがって、この値の大小によって、高周波成分の減衰を定量的に扱うことができる。そこで上記のモデル骨材の大きさおよび混入量を変化させたシリーズのそれぞれについて、平均周波数を算出した結果を図 4.3.6～7 に示す。このように、ガラス球の直径を変化させたシリーズの方が平均周波数の減少が顕著であり、高周波成分の減衰が著しいことを的確に表している。本研究ではこれ以降、周波数分布における高周波成分の減衰を定量化するための指標として平均周波数をしばしば用いることとする。

4-3-3 異なる材質のモデル骨材を用いた検討

ここでは、セメントペースト中に混入させるモデル骨材の材質が、その弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討を行った。用いたモデル骨材は、上記の場合と同一のガラス球と鋼球であり、その直径および混入量は等しくした。このようにモデル骨材の材質が変化することにより、周囲のセメントペースト・マトリックスとの音響インピーダンス差が異なることから、モデル骨材界面における弾性波の散乱の程度が変化するものと考えられる。

a) 実験概要

モデル骨材-マトリックス間の音響インピーダンス差が異なる場合について検討を行うため、モデル骨材としてガラス球および鋼球を用いた検討を行った。この際、マトリックス部分は、上記のものと同様に $W/C=0.30$ のセメントペーストとした。ここで、マトリックス部分を変化させずに混入させる粒子の材質を変化させたのは、供試体製作時にモデル骨材の沈降を防止するためにはセメントペーストの粘性をある程度確保する必要があり、 W/C をあまり変化させることができなかったためである。用いた鋼球の密度および弾性波伝播速度は、それぞれ 7.86g/cm^3 、 5.95km/s である。よって音響インピーダンスは、 $46.8\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$ となる。セメントペーストの音響インピーダンスを 1 とした場合のガラス球および鋼球の音響インピーダンスは、それぞれ 1.36、4.89 となり、両者を比較することにより、粒子-マトリックス間の音響インピーダンス差が異なる場合について検討することができると考えられる。供試体寸法は、上記の場合と同様に、 $100\times 200\times 200(\text{mm})$ とし、モデル骨材の直径は 12mm 、骨材体積濃度は 25% で等しくした。

b) 実験結果および考察

直径 12mm のガラス球および鋼球を $W/C=0.30$ のセメントペースト中に体積濃度 25% で混入させた場合の弾性波伝播速度は、それぞれ 4.42km/s 、 4.50km/s であった。このように鋼球を用いた場合の方が弾性波伝播速度が大きくなったのは、ガラス球よりも鋼球の方が単体としての伝播速度が大きいためである。また両供試体において得られた透過弾性波の周波数分布を図 4.3.8 に示す。これによれば、鋼球を用いた場合の方が高周波域における減衰が若干大きいことがわかる。これは、ガラス球-マトリックス間よりも鋼球-マトリックス間の方が音響インピーダンス差が大きく、そこでの弾性波の散乱が著しかった

ためであると推測される。

以上より、ある媒質中に異なる音響インピーダンスを有する粒子が混入した場合、混入粒子の音響インピーダンスが大きいほど、複合材料としての弾性波伝播速度は大きくなり、周波数分布の高周波域における減衰は著しくなることが示された。

4-3-4 理論的検証

a) 弾性波伝播速度に関する検討

上記の実験的検討により、弾性波伝播速度に及ぼす骨材径の影響は小さいが、骨材量が伝播速度に及ぼす影響は大きいことが示された。このようなマトリックス中の骨材の存在が弾性波伝播速度に及ぼす影響について理論的に検証するため、以下に示す解析を行った。すなわち、4-2で前述した弾性波伝播速度 V を算出する式 4.2.5 を、弾性係数 E およびポアソン比 ν の代わりに、体積弾性率 K および剛性率 G を用いて、次式のように書き換える。

$$V = \sqrt{\frac{K + \frac{4G}{3}}{\rho}} \quad (4.3.2)$$

ここに、 ρ は複合材料の密度であり、式の変形に際しては、次の関係⁴⁻⁶⁾を用いた。

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (4.3.3)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.3.4)$$

式 4.3.2 中の K および G には、Weng⁴⁻⁹⁾により定式化された複合材料の弾性定数を用いることとした。この定式化は、多相系の粒子分散型複合材料の弾性定数を各構成要素ごとの弾性定数から算出するものであり、ここでは、セメントペーストマトリックス中にモデル骨材が存在するモデル骨材供試体を、2 相系粒子分散型複合材料として取り扱うこととした。各構成材料の弾性定数として、マトリックスの体積弾性率および剛性率を K_0 、 G_0 、分散粒子の体積弾性率および剛性率を K_1 、 G_1 、その粒子混入率を P とすると、それらから構成される複合材料の体積弾性率 K および剛性率 G は、次式のようになる。

$$\frac{K}{K_0} = 1 + \frac{P}{\frac{3(1-P)K_0}{3K_0 + 4G_0} + \frac{K_0}{K_1 - K_0}} \quad (4.3.5)$$

$$\frac{G}{G_0} = 1 + \frac{P}{\frac{6(1-P)(K_0 + 2G_0)}{5(3K_0 + 4G_0)} + \frac{G_0}{G_1 - G_0}} \quad (4.3.6)$$

この式を利用することにより得られる K および G を式 4.3.2 に代入し、各構成材料単体の弾性定数等から理論的に弾性波伝播速度を算出した。この計算過程において、各構成要素（セメントペーストおよびガラス球）の K および G は、それぞれの弾性波伝播速度（縦波） V_P およびポアソン比 ν を用いて算出した。まず V_P と ν より横波の伝播速度 V_S を次式により求める。

$$V_S = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} V_P \quad (4.3.7)$$

これらの V_P 、 V_S および密度 ρ と K および G の間には、次式のような関係があることが知られている。

$$K = \frac{\rho(3V_P^2 - 4V_S^2)}{3} \quad (4.3.8)$$

$$G = \rho \cdot V_S^2 \quad (4.3.9)$$

これらより、各構成要素の K および G を弾性波伝播速度およびポアソン比から決定することができる。計算に用いた諸量を表 4.3.1 に示す。

以上のようにして理論的に求められた弾性波伝播速度と実測の弾性波伝播速度を比較した結果を図 4.3.9 に示す。このように、両者の関係は原点を通る傾き 45 度の直線上に分布しており、実験結果の妥当性を示している。さらにこの図によれば、骨材量を変化させたシリーズにおける弾性波伝播速度の変化の方が骨材径を変化させたシリーズより大きく、モデル骨材供試体による実験結果とよく対応していることがわかる。以上より、弾性波伝播速度は骨材量に大きく依存するというモデル試験結果の妥当性が理論的に確認された。

b) 弾性波の周波数特性に関する検討

モデル骨材供試体による検討により、透過弾性波の周波数分布において、骨材の存在による高周波域での減衰が、骨材径が大きいほど、また骨材量が大きいほど著しく、またそ

の傾向は骨材径が変化する場合の方が顕著であることが示された。これは、骨材の存在により弾性波の散乱が生じることによると考えられるため、小粒子の存在による音波の散乱現象を検討する際に適用された図 4.3.10 に示すモデルを、骨材の存在による弾性波の散乱現象を説明するために応用することとした。このモデルは、球形粒子が無限体内に 1 個存在するものであり、これによれば球形粒子に弾性波が入射したときの散乱波の強度を解析することができる。すなわち、入射波の音圧 ξ_a に対する点 P における散乱波の音圧 ξ_r の比は、Rayleigh により次式のように表されている⁴⁻¹⁰⁾。

$$\frac{\xi_r}{\xi_a} = \frac{\pi T}{r\lambda^2} \left(\frac{\Delta K}{K} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \cos \theta \right) \quad (4.3.10)$$

ここに、 λ ：弾性波の波長、 K ：マトリックスの体積弾性率、 ΔK ：マトリックスと粒子の体積弾性率差、 ρ ：マトリックスの密度、 $\Delta \rho$ ：マトリックスと粒子の密度差、 θ ：入射波と散乱波のなす角であり、セメントペーストおよびガラス球は均一な弾性体とみなしている。この際、波長は球形粒子の直径よりも小さいこととしている。

この関係を利用して、Mason ら⁴⁻¹¹⁾ は減衰定数の算出を以下のように試みている。すなわち、マトリックスと球形粒子の密度差はあまりないものと仮定すると $\Delta \rho = 0$ となり、単一粒子によって散乱されるエネルギー E_r (単位面積当たりの入射エネルギー： E_a) は、式 4.3.10 を半径 r の球面について積分すればよく、エネルギーは音圧の 2 乗に比例するため、次式が得られる。

$$\frac{E_r}{E_a} = \frac{4\pi^3 T^2}{\lambda^4} \left(\frac{\Delta K}{K} \right)^2 \quad (4.3.11)$$

次に、面積 S 、長さ dx の空間内に N 個の粒子が存在する場合について考え、多重散乱を無視し、粒子の存在が完全にランダムで、粒子体積と体積弾性率が無相関であると仮定すると、次式が得られる。

$$\frac{E_r}{E_a} = \frac{4\pi^3}{\gamma^4} \overline{\left(\frac{\Delta K}{K} \right)^2} \sum_{i=1}^N T_i^2 = \frac{4\pi^3}{\gamma^4} \overline{\left(\frac{\Delta K}{K} \right)^2} \cdot N \cdot T^2 \quad (4.3.12)$$

ここで、次式で定義される粒子混入率 P を用いて、

$$P = \frac{N \cdot T}{S \cdot dx} \quad (4.3.13)$$

さらに距離 dx における減衰が十分小さいものとすれば、

$$1 - x = e^{-x} \quad (4.3.14)$$

が成立するので、エネルギーの減衰定数 α_E が次式のようにになる。

$$\alpha_E = \frac{4\pi^3 P \cdot T}{\lambda^4} \left(\frac{\Delta K}{K} \right)^2 \quad (4.3.15)$$

また振幅に関する減衰定数 α は、エネルギーに関する減衰定数 α_E の半分であるので、次式のようにになる。

$$\alpha = \frac{2\pi^3 P \cdot T}{\lambda^4} \left(\frac{\Delta K}{K} \right)^2 \quad (4.3.16)$$

また上式を、波長 λ の代わりに周波数 f をもちいて表すと、次式のようにになる。

$$\alpha = \frac{2\pi^3 P \cdot T}{V^4} \left(\frac{\Delta K}{K} \right)^2 \cdot f^4 \quad (4.3.17)$$

ここに、 V ：弾性波伝播速度である。

式 4.3.17 に基づいて、各モデル骨材供試体に対する減衰定数を算出した。その結果を図 4.3.11～12 に、骨材径を変化させた場合と骨材の混入量を変化させた場合についてそれぞれ示す。このように、骨材径が大きくなるほど、また骨材量が多くなるほど減衰定数が増加していることがわかる。さらにその増加傾向は、骨材径が変化した場合の方が顕著であり、モデル骨材供試体による実験結果とよく対応している。

さらに、図 4.3.11 より、骨材径が著しく小さい場合、例えば 1mm 程度である場合においては、その骨材の存在に起因する弾性波の散乱により引き起こされる減衰の程度は極めて小さいことが推測される。このことから類推すると、セメントペースト単体中に存在している空隙（直径 1mm 以下）の存在は弾性波の散乱を生じさせることはなく、セメントペースト単体を弾性波の散乱が生じない均一な弾性体と仮定しても支障ないことが示唆される。

式 4.3.17 より、モデル骨材の散乱による弾性波の散乱は、周波数の 4 乗に比例して生じることがわかる。そこで、均一弾性体と考えられるセメントペースト単体において得られた周波数分布と、モデル骨材供試体において得られた周波数分布の差が、モデル骨材の存在により生じる散乱減衰であると仮定し、理論式との対応関係を調べた。図 4.3.13 に、モデル骨材径 20mm、体積濃度 35% の場合の周波数分布とセメントペースト単体の周波数分布のスペクトル強度差を示す。図中には、周波数の 4 乗に比例する関数で近似した結果もあわせて示してある。これより、散乱により生じた周波数分布の減衰は、おおむね周波数の 4 乗に比例して顕著となることがわかる。周波数が 400kHz 以上の範囲におい

て、実験値と回帰曲線の差が大きくなっているのは、用いた入射弾性波の 400kHz 以上の周波数成分が少なかったため、測定における誤差が大きくなったことによるものと考えられる。

次に図 4.3.14 に、直径 12mm のガラス球および鋼球を体積濃度 25% でセメントペースト中に混入させた供試体の減衰定数を上記と同様に算出した結果を示す。これによれば、セメントペーストとの音響インピーダンス差の大きい鋼球を用いた場合の方が減衰定数が大きくなっており、実験結果の妥当性を示している。

以上より、モデル骨材供試体の実験により得られた透過弾性波の周波数分布の変化傾向を定性的にはあるが理論的に説明することができた。コンクリート中における骨材の存在は、弾性波の散乱源となり、その大きさと同程度の波長に相当する周波数成分の減衰を引き起こすことが示された。また本実験の範囲内では、骨材量よりも骨材の大きさの方が周波数分布に及ぼす影響が大きかった。さらにマトリックス—粒子間の音響インピーダンス差が大きいほど、周波数分布における高周波域の減衰が顕著であることもわかった。

Rayleigh の式を Mason 近似に基づいて解析しても、コンクリート中における弾性波伝播挙動を完全に表すことができないのは、解析を行う際に用いた仮定と実現象との間に相違があることによるものと考えられる。例えば、弾性波の多重散乱を無視したこと、あるいは、骨材界面において弾性波の反射・透過が生じる際のモード変換の影響を考慮しきれていないことなどがあげられる。また実験上の問題として、実験で得られる透過弾性波には多少なりとも供試体側面等からの反射波の影響が含まれていることなどが考えられる。

4-3-5 まとめ

コンクリート中の骨材をモデル化した供試体を用いて、粒子分散型複合材料中における弾性波伝播挙動に関する検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- ①モデル骨材の直径が大きくなるにつれて、供試体中を伝播した弾性波の周波数分布における高周波域の減衰が顕著となった。しかしながら弾性波伝播速度にはあまり

変化がみられなかった。

②モデル骨材の混入量は、モデル骨材の大きさほどは周波数分布に影響を及ぼさないものの、弾性波伝播速度の支配的要因となる。

③異なる材質のモデル骨材を用いることで、マトリックス部分との音響インピーダンス差を変化させた場合、周波数分布における高周波域の減衰程度に変化が見られた。

また以上のことは、粒子分散型複合材料に対して定式化された弾性定数や球形粒子による弾性波の散乱現象を記述した関係式を用いた理論的検討によって、定性的にはあるがその妥当性が確認された。

表 4.3.1 解析に用いた諸量

材料種類	密度 (g/cm^3)	伝播速度 (km/s)	ポアソン比
セメントペースト(W/O=0.3)	2.21	4.33	0.242
ガラス球	2.50	5.60	0.200
鋼球	7.86	5.95	0.300
セメントペースト(W/C=0.5)	1.97	3.72	0.265
骨材	2.61	5.63	0.200

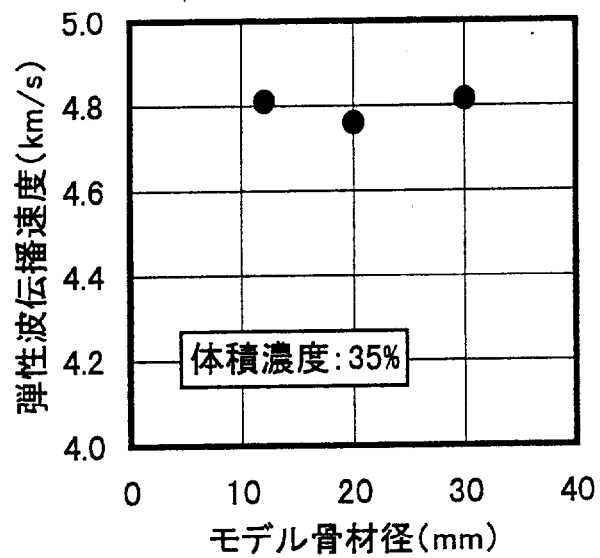


図 4.3.1 モデル骨材径が弾性波伝播速度に及ぼす影響

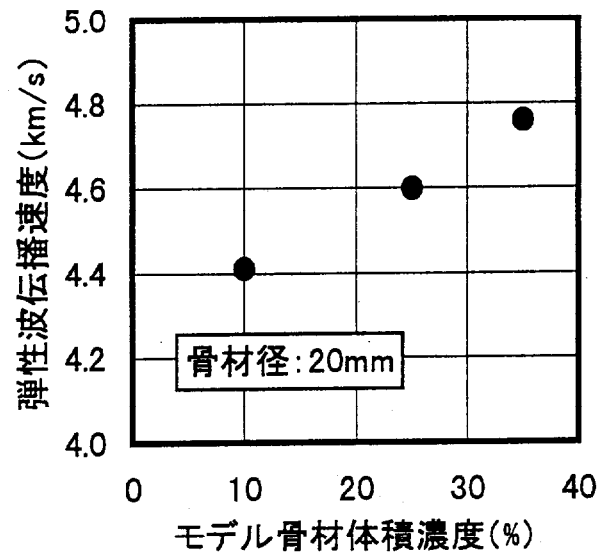


図 4.3.2 モデル骨材量が弾性波伝播速度に及ぼす影響

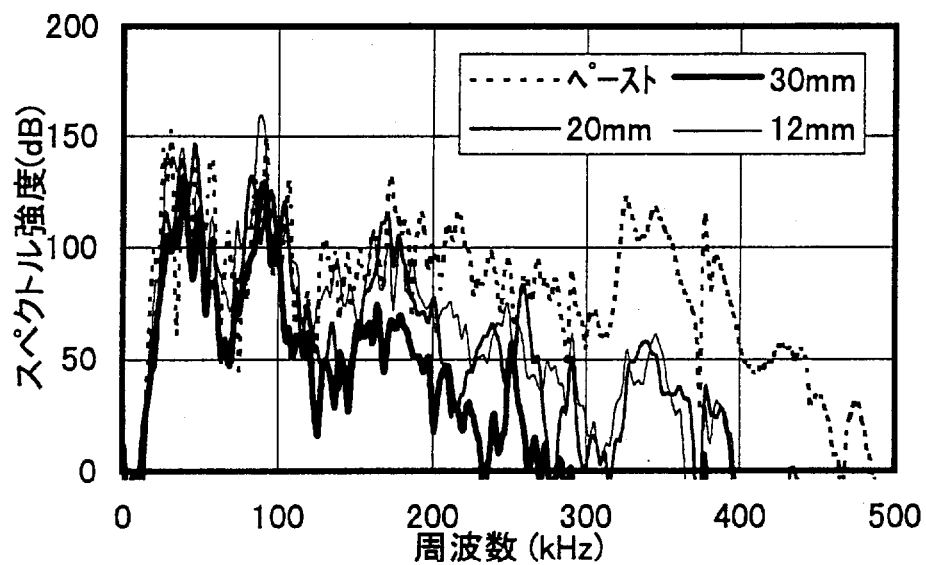


図 4.3.3 モデル骨材径が周波数分布に及ぼす影響

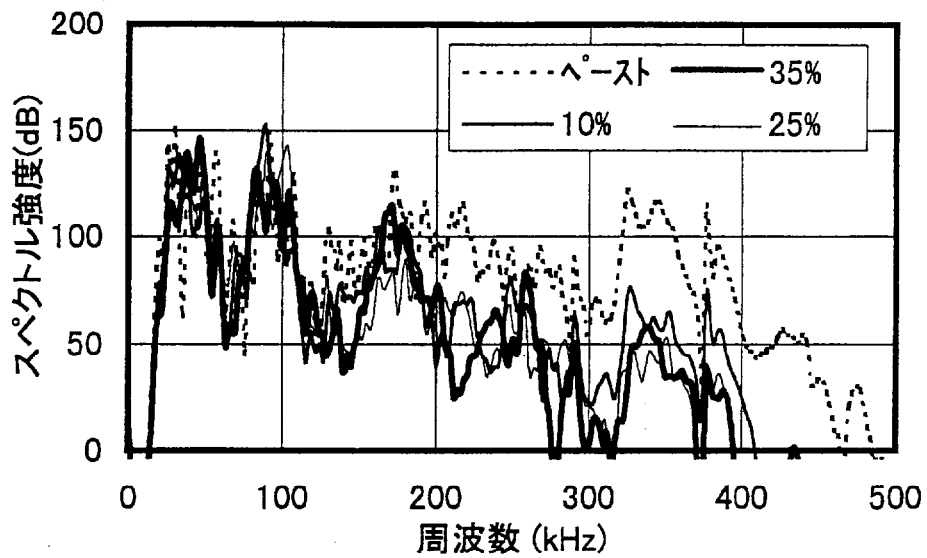


図 4.3.4 モデル骨材量が周波数分布に及ぼす影響

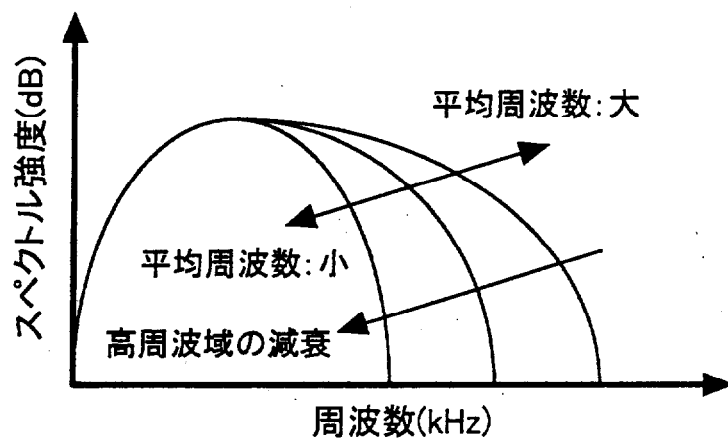


図 4.3.5 平均周波数の意義

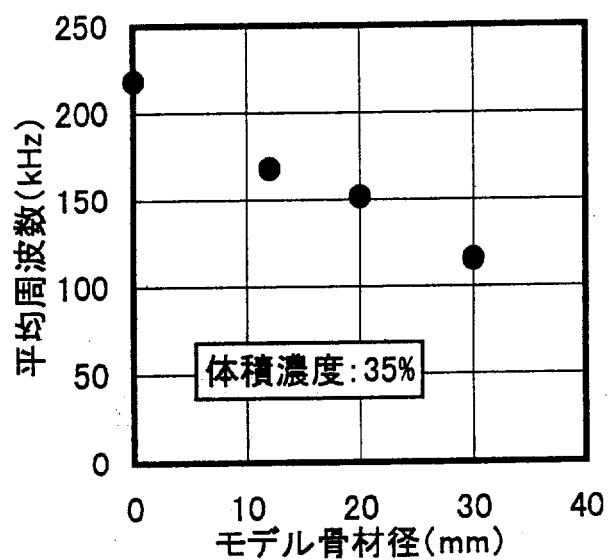


図 4.3.6 モデル骨材径と平均周波数の関係

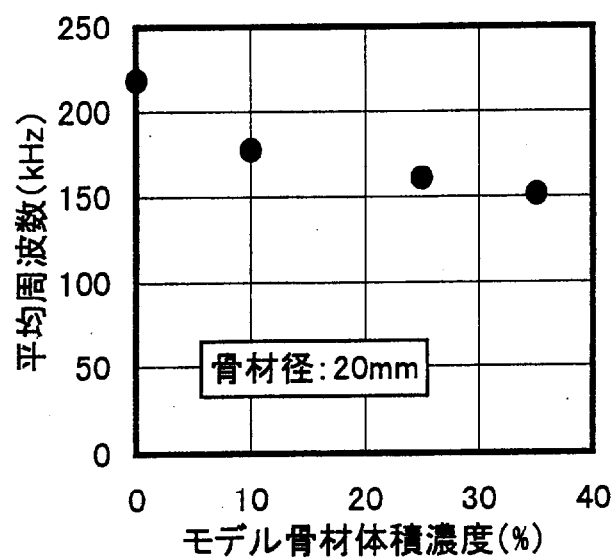


図 4.3.7 モデル骨材量と平均周波数の関係

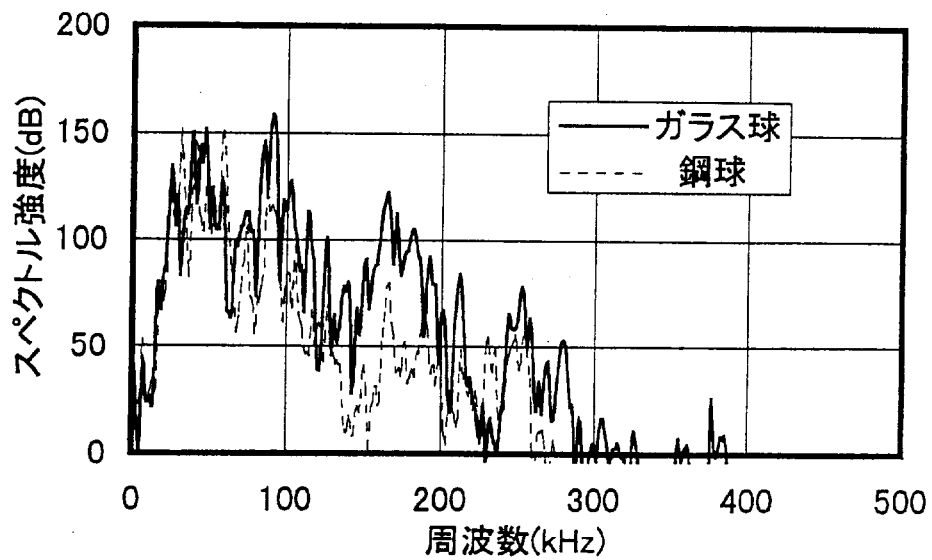


図 4.3.8 異なる材質のモデル骨材を用いた場合の周波数分布

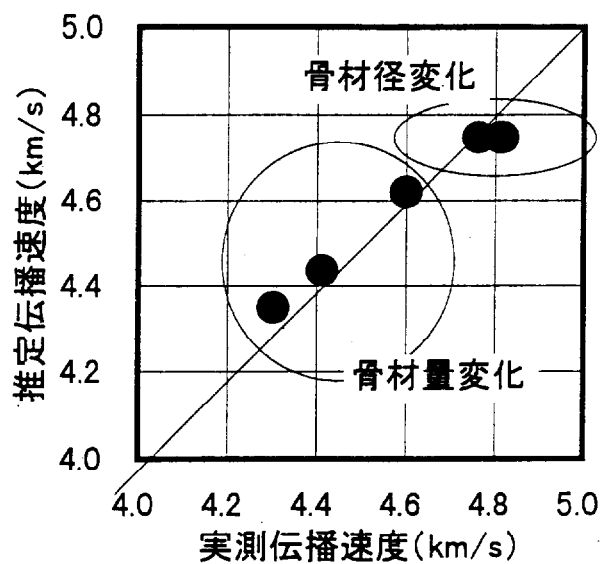


図 4.3.9 理論的に算出した弾性波伝播速度と実測値の比較

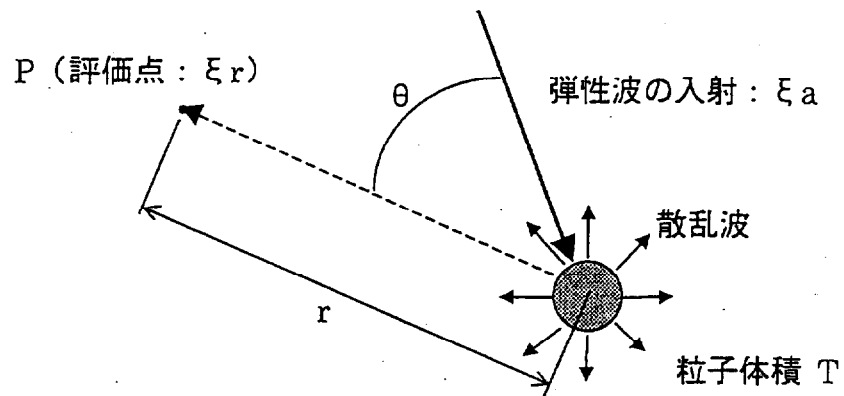


図 4.3.10 骨材による弾性波の散乱のモデル化

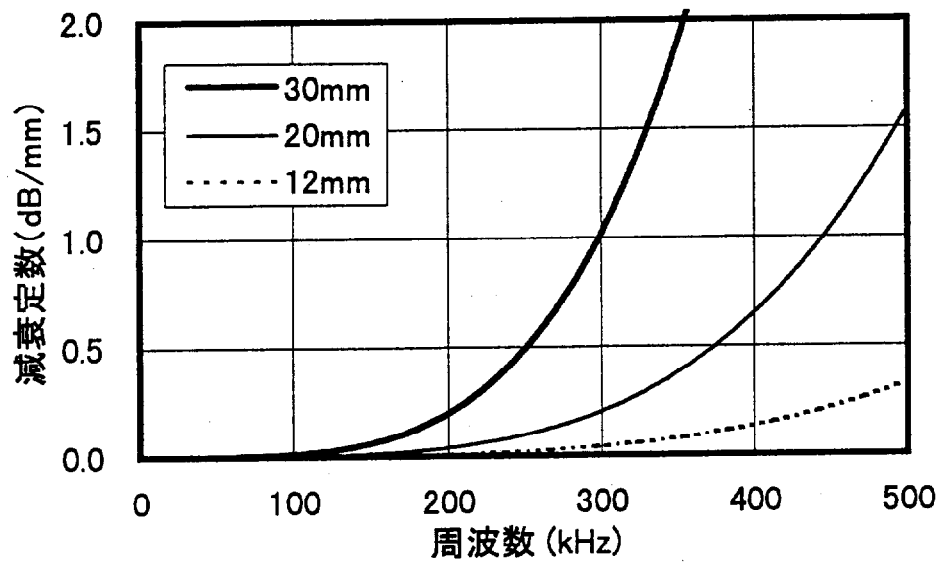


図 4.3.11 骨材径が異なる場合の減衰定数

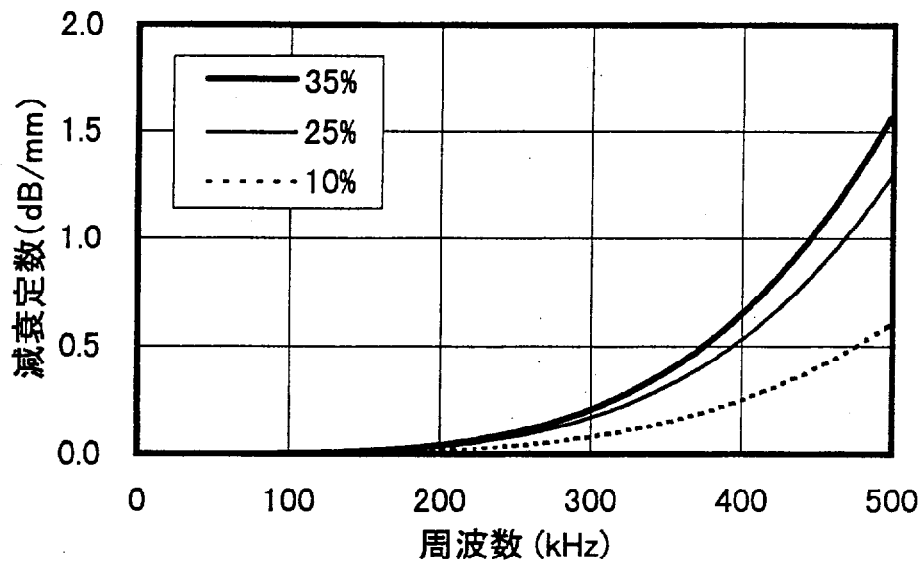


図 4.3.12 骨材量が異なる場合の減衰定数

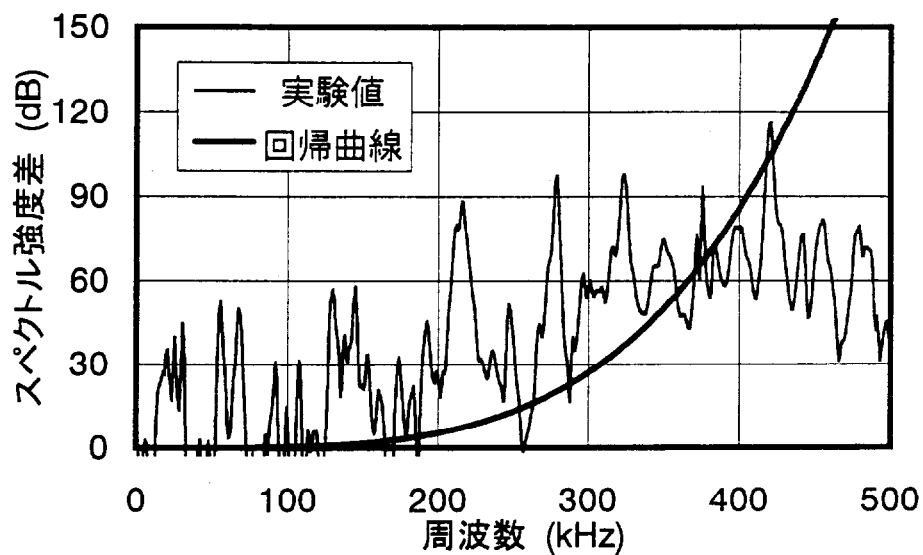


図 4.3.13 モデル骨材供試体における周波数分布とセメントペーストの場合の周波数分布の差(骨材径:20mm、体積濃度:35%)

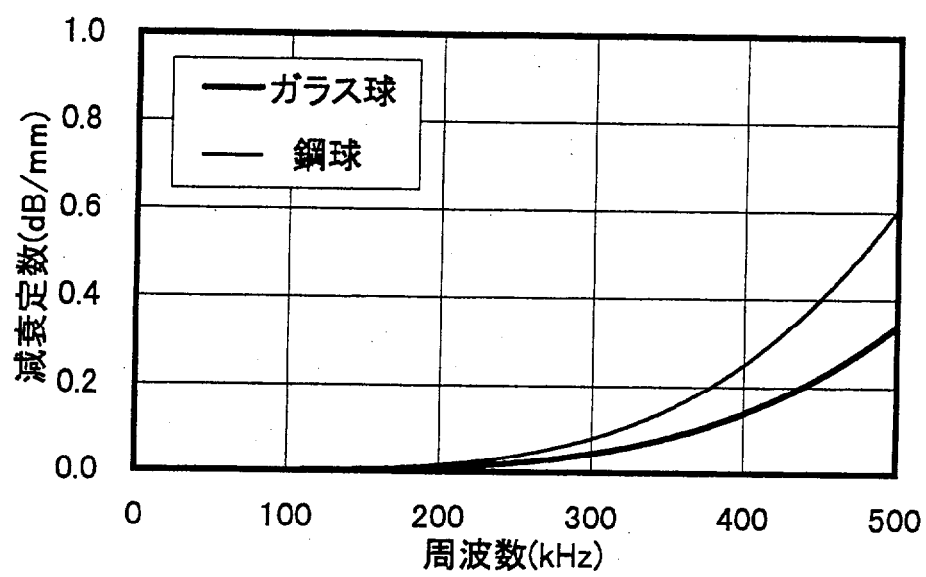


図 4.3.14 骨材の材質が異なる場合の減衰定数

4-4 コンクリート中の骨材が弾性波伝播挙動に及ぼす影響

4-4-1 概説

前節において、コンクリートのような粒子分散型複合材料中における弾性波伝播挙動に関する基礎的な検討を行ったが、あくまでモデル骨材を用いた検討結果であった。ここでは、実際の骨材を用いてコンクリート供試体を作製し、コンクリート中に存在する骨材の最大寸法、形状、量、界面性状の違いが供試体中を伝播した弾性波の伝播速度および周波数特性に及ぼす影響について検討を行った。コンクリート中における骨材の存在は、弾性波の散乱を引き起こすなど、コンクリート中における弾性波伝播挙動を複雑にしている主要な要因であり、骨材の存在が弾性波伝播挙動に及ぼす影響を明らかにしておくことは、これ以降の検討を進める上で極めて重要であるといえる。

4-4-2 骨材最大寸法に関する検討

ここでは、実際の骨材を用いて作製したコンクリート供試体により、骨材最大寸法が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討を行うこととした。モデル骨材供試体による検討結果により、骨材の大きさは弾性波伝播速度にはあまり影響を及ぼさないが、弾性波の周波数特性に多大な影響を及ぼすことがわかっている。そこで、異なる骨材最大寸法を有する供試体を作製し、モデル試験結果と比較・検討した。

a) 実験概要

供試体概要

用いた供試体は、寸法が $100 \times 200 \times 200(\text{mm})$ のコンクリート角柱であり、マトリックス部分の W/C は 0.50 で一定とした。骨材には川砂・川砂利を用いた。これらは、形状が比較的球形に近く、モデル骨材を用いた検討結果と比較するのに適している。これらの骨材に対して、所定のふるいを用いてふるい分けを行うことにより、最大寸法を 0.6、1.2、2.5、5、10、20(mm) と変化させた骨材を用意した。用いた骨材の粒度分布を表 4.4.1 に示す。またコンクリート中における骨材の量は、用いる骨材の最大寸法が 5mm

以下のものについては体積濃度で 54%、10mm 以上のものについては 68% で一定とした。コンクリートの作製に用いた材料の一覧を表 4.4.2 に、またコンクリートの配合を表 4.4.3 中の No.1～2 に示す。

弾性波透過試験の概要

上記のように作製した異なる骨材最大寸法を有する供試体に対して、弾性波透過試験を行った。試験方法・試験条件は、前述の 4-2 の場合と同一である。本試験により、各供試体の弾性波伝播速度および透過弾性波の周波数分布を求めた。

b) 実験結果および考察

弾性波伝播速度に及ぼす影響

図 4.4.1 に、骨材最大寸法と弾性波伝播速度の関係を示す。図中において骨材最大寸法が 5mm 以下と 10mm 以上で折れ線を不連続としているのは、この地点を境界として骨材体積濃度が異なり、両者を単純に比較することができないためである。また図中の 2 本の水平線は、前述の 4-3-4 の場合と同様に粒子分散型複合材料の弾性定数を用いて理論的に算出した弾性波伝播速度を各骨材体積濃度ごとに示したものである。上側の水平線 (4.80km/s) が骨材体積濃度 68% (骨材最大寸法 10mm 以上) に対応するものであり、下側の水平線 (4.44km/s) が骨材体積濃度 54% (骨材最大寸法 5mm 以下) に対応するものである。この図によれば、骨材最大寸法が 10～20(mm) の範囲においては、骨材最大寸法によらず弾性波伝播速度は一定となっているが、骨材最大寸法が 5mm 以下の範囲においては、供試体中における骨材体積濃度は一定であるにもかかわらず、骨材最大寸法が小さくなるとともに伝播速度がわずかではあるが徐々に低下していくことがわかる。これは、骨材の最大寸法が小さくなるにつれて、骨材の比表面積が大きくなり、骨材周囲に形成されるポーラスな遷移帯の量が多くなる⁴⁻¹²⁾ ことによるものと考えられる。そこで遷移帯量の影響について考察するため、骨材を球形と仮定した場合の比表面積 S を次式により算出し⁴⁻¹³⁾、それに遷移帯厚さを乗じることにより、遷移帯量を算出した。

$$S = \frac{6}{\rho \cdot d} \quad (4.4.1)$$

ここで、 ρ : 骨材粒子の密度、 d : 骨材径である。本来であれば、遷移帯厚さは骨材径の変化とともに変化するものと考えられるが、ここでは既往の研究⁴⁻¹⁴⁾ を参考にして

50 μ m で一定であると仮定した。図 4.4.2 に、骨材最大寸法の変化にともなう遷移帯占有率の推移を示す。ここで遷移帯占有率とは、供試体中における遷移帯量の供試体体積に対する百分率として定義されるものである。このように、遷移帯量は骨材最大寸法が小さくなるにつれて増加し、その傾向は特に骨材最大寸法が 5mm 以下の範囲で顕著である。この遷移帯量の増加が、弾性波伝播速度の低下をもたらしたものと考えられる。しかしながら、このような傾向は骨材最大寸法が 5mm 以下、すなわちモルタルの場合のみで顕著であって、骨材最大寸法が 10mm 以上、すなわち一般的なコンクリートにおいては、弾性波伝播速度は骨材最大寸法によらず一定であると考えることができる。

弾性波の周波数特性に及ぼす影響

次に、透過弾性波の周波数分析結果から算出される平均周波数と骨材最大寸法の関係を図 4.4.3 に示す。この図から明らかなように、骨材最大寸法が大きくなるほど平均周波数は小さくなっており、高周波成分が減衰していく傾向が捉えられている。このことは、モデル骨材を用いた試験結果とよく対応している。したがって、実際の骨材を用いたコンクリートにおいても、骨材の存在に起因する弾性波の散乱が透過弾性波の周波数分布に及ぼす影響は大きいことから、コンクリートの劣化評価を透過弾性波の周波数分布を用いて行う際にはコンクリート中の骨材最大寸法を十分に考慮すべきであるといえる。

以上のように、骨材の大きさが弾性波伝播速度および周波数分布に及ぼす影響はそれぞれ異なったものとなったが、これは、両者がコンクリート中を伝播する弾性波の異なる特性を反映したものであることを示唆している。すなわち、弾性波伝播速度は複合材料としてのコンクリートの弾性的性質を表しており、コンクリート全体としての平均的な特性を表しているものと考えられる。一方の周波数分布は、弾性波の伝播経路上における減衰の程度を、その要因となる散乱・反射源のスケールを周波数に反映させて表しているものと考えることができる。したがって、従来より広く用いられている弾性波伝播速度だけでなく、周波数分布にも着目してコンクリートの劣化評価を行えば、材料内部に関する情報をより詳細に得ることができるものと考えられる。

すなわち、コンクリート中を伝播した弾性波の、

- ①伝播速度に着目すれば、コンクリートの平均的な弾性的性質
- ②周波数特性に着目すれば、弾性波の散乱・反射源のスケールとその程度

に関する情報を得ることができることが示された。

4-4-3 骨材形状に関する検討

以上までの検討においては、モデル骨材（ガラス球および鋼球）や川砂利といった球形もしくは球形に近い骨材を用いて検討を進めてきた。しかしながら、実際に用いられている骨材は、必ずしも球形のものばかりでなく、様々な形状のものが存在する。また近年の骨材資源の枯渇問題により、粒形の良い川砂利の採取は厳しく制限され、粒形が角張った碎石の使用が余儀なくされている。そこで、このような骨材の形状の違いが弾性波の伝播挙動に及ぼす影響について検討を行うこととした。

a) 実験概要

骨材の形状が、コンクリート中における弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討するため、粗骨材に碎石を用いた供試体を作製し、4-4-2の川砂利を用いた場合と比較・検討した。碎石の最大寸法や粒度分布については、前述の4-4-2における最大寸法20mmの川砂利のものと同一となるように粒度調整を行った。この碎石の他の特性については、表4.4.2に示してある。この表より、これら2種類の骨材の密度、吸水率等はほぼ等しい値となっており、また両骨材の産地は同一水系内であり、音響インピーダンス等の音響学的特性にも大きな差はないものと考えられる。配合条件は、表4.4.3中のNo.3に示すように、粗骨材の種類を除いて、最大寸法20mmの川砂利を用いたコンクリートと同一とした。

この碎石供試体に対して、前述の4-4-2の場合と同様に、弾性波透過試験を行った。また硬化コンクリートの特性を把握するため、一軸圧縮試験および密度・空隙率試験についても、前述の4-2の場合と同様に実施した。

b) 実験結果および考察

表4.4.4に、川砂利を用いたコンクリートおよび碎石を用いたコンクリートの諸特性、ならびに弾性波伝播速度および周波数分布の平均周波数の比較を示す。骨材形状が異なることによる比表面積の変化、あるいは骨材表面状態の違いによるセメントペーストとの付

着性状の変化により、両者の弾性波伝播速度や平均周波数に差違が生じることが推測されたが、実際には明確な差違は認められなかった。これより、用いる骨材の形状は弾性波伝播挙動にほとんど影響しないことがわかる。

本研究ではこれ以降、粗骨材として碎石を用いたコンクリートにより検討を行うが、その形状が試験結果に及ぼす影響は、上記の知見に基づいて考慮しないこととした。

4-4-4 骨材量に関する検討

前節のモデル骨材供試体に関する検討結果より、骨材量は弾性波伝播速度の支配的因子であり、透過弾性波の周波数分布に対しても少なからず影響を及ぼすことがわかっている。ここでは、実際の骨材（碎石）を用いて骨材体積濃度が異なるコンクリート供試体を作製し、骨材量の変化が弾性波伝播速度ならびに周波数分布に及ぼす影響について検討を行うこととした。

a) 実験概要

ここでは、骨材体積濃度を 55、68、78(%)と変化させた供試体を作製し、コンクリート中における骨材の存在量が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討を行った。この際、細骨材率は 0.45 で一定とした。したがって、粗骨材体積濃度はそれぞれ 30、37、43(%)となる。マトリックス部分の特性を等しくするため、いずれのケースにおいても W/C は 0.50 とした。また骨材の大きさが試験結果に及ぼす影響を考慮して、骨材最大寸法は 20mm で一定とした。配合を表 4.4.3 中の No.3~5 に示す。適切な流動性と材料分離抵抗性を確保するため、体積濃度 55%のケースにおいては分離低減剤を、また体積濃度 78%のケースにおいては高性能減水剤を使用した。コンクリートの作製に用いた材料の諸特性は表 4.4.2 に示す通りである。

このように作製した供試体に対して、前述の 4-4-2 の場合と同様に、弾性波透過試験を行った。また硬化コンクリートの特性を把握するため、一軸圧縮試験および密度・空隙率試験についても、前述の 4-2 の場合と同様に実施した。

b) 実験結果および考察

硬化コンクリートの特性評価

図 4.4.4 に、骨材体積濃度が異なるコンクリートの一軸圧縮強度および弾性係数を示す。これより、骨材体積濃度が高いほど、圧縮強度は低下し、弾性係数は増加していることがわかる。一般にセメントペースト単体よりも骨材単体の方が弾性係数が大きいため、骨材体積濃度が高いほど、それらの複合材料としてのコンクリートの弾性係数も大きくなり、変形抵抗性に優れたコンクリートとなる。このことは、前出の式 4.3.2～3 から明らかである。しかしながら骨材体積濃度が高くなると、骨材-マトリックス間の境界面が増加し、マイクロクラックの潜在的な発生箇所が増加することとなる。またひとたびマイクロクラックが発生した場合、骨材間距離が近いため、それらの連結・進展が生じやすくなる。このようなことから、骨材体積濃度が高いほど圧縮強度が低下したものといえる。

骨材量の違いが弾性波伝播挙動に及ぼす影響

図 4.4.5 に、骨材体積濃度の変化にともなう弾性波伝播速度の変化を示す。図中には、前述の 4-3-4 と同様の手法で理論的に算出した弾性波伝播速度についてもあわせて示してある。これによれば、骨材体積濃度の増加とともに、モデル骨材供試体の場合と同様に弾性波伝播速度が大きくなることがわかる。また理論的に求めた弾性波伝播速度も同様に、骨材体積濃度の増加とともに大きくなっており、実験値の妥当性を示している。図中において、骨材体積濃度が低いほど、理論値と実測値の差が大きくなっているが、この原因の 1 つとして、前述の 4-4-2 の場合と同様に、遷移帯量の違いが考えられる。すなわち、骨材体積濃度が低い供試体においては、その分だけマトリックス部分が多くなるため、コンクリートの単位水量が多くなる。その結果、ブリーディングが著しくなり、脆弱な遷移帯量が多くなったためであると考えられる。

図 4.4.6 に、異なる骨材体積濃度を有する供試体を透過した弾性波の周波数分析結果を示す。これより、骨材体積濃度が高いほど、高周波成分の減衰が著しくなっていることがわかる。このことは、モデル骨材供試体に対する実験結果と同様であり、この減衰が骨材の存在による弾性波の散乱により生じたものであることが改めて確認された。この周波数分布から得られる平均周波数を各骨材体積濃度ごとに、図 4.4.7 に示す。このように、骨材体積濃度が高いほど平均周波数は小さく、高周波成分が減衰していることが的確に表されている。

以上より、コンクリート中の骨材量は弾性波伝播速度と深い関連があるばかりでなく、透過弾性波の周波数特性にも影響を及ぼすことが示された。骨材量の増加は、弾性波伝播速度を増加させ、また周波数分布における高周波域の減衰を著しくすることがわかった。このことは、4-3のモデル骨材供試体による検討結果と同様であり、実験結果の妥当性が確認できた。したがって、弾性波を用いてコンクリートの劣化評価を行う際には、コンクリート中の骨材量が評価結果に及ぼす影響についても十分留意する必要がある。

なお本研究においては、粗骨材と細骨材の比率は一定、すなわち細骨材率は一定 ($s/a=0.45$) として検討を行ったが、細骨材率の違いもまた弾性波伝播挙動に影響を及ぼす要因の 1 つであると考えられる。細骨材率が小さい、すなわち粗骨材が多い場合においては、弾性波の散乱源のスケールが大きくなるため周波数分布における減衰は顕著になると推測される。しかしながら、弾性波伝播速度は骨材の総量が一定であれば細骨材率によらずあまり変化しないものと考えられる。

4-4-5 骨材界面性状に関する検討

コンクリート中に存在する骨材界面には、遷移帯が存在することが知られている。この遷移帯は、周囲のマトリックス部分よりも脆弱でポーラスな部分であり、力学的な弱点となるばかりでなく、塩化物イオンなどのコンクリート構造物にとっての有害物質が浸透する際の「水みち」ともなるため、コンクリートの耐久性を考える上で重要なものである。このようなマトリックス実体部よりも密実性に劣る遷移帯の存在は、弾性波伝播挙動にも少なからず影響を及ぼすものと考えられる。ここでは、コンクリート中の骨材-マトリックス間の界面性状が弾性波伝播挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、骨材界面性状を変化させた供試体を用いて検討を行った。

a) 実験概要

供試体概要

用いた供試体は、 $100 \times 200 \times 200(\text{mm})$ のコンクリート角柱および $\phi 100 \times 200(\text{mm})$ のコンクリート円柱である。前者は弾性波透過試験および簡易透気試験に、後者は一軸圧縮

試験および微小硬度試験にそれぞれ用いた。供試体数は、以下に述べる各検討ケースにつき 3 個ずつとした。

検討ケース

コンクリート中の骨材マトリックス間の界面性状を変化させるため、次の 4 種類の検討ケースを設定した。すなわち、①粗骨材として碎石を用いた普通コンクリートのケース、②セメントの 40%を高炉スラグ微粉末で置換したケース、③セメントペーストでプレコーティングした碎石を粗骨材として用いた⁴⁻¹⁵⁾ ケース、④鉱油を塗布した碎石を粗骨材として用いたケースである。①のケースを基準として、②および③は界面性状が改善された場合であり、④は逆に界面性状が悪くなった場合である。②の高炉スラグ微粉末を用いたケースにおいて界面性状が改善されるのは、高炉スラグ微粉末の潜在水硬反応により、骨材界面に集中的に存在する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が消費され、骨材マトリックス間に遷移帯が形成されにくい⁴⁻¹⁶⁾ ためである。

①の普通コンクリートの配合は、表 4.4.3 中の No.3 に示すように、 $W/C=0.50$ 、 $s/a=0.45$ であり、粗骨材として最大寸法 20mm の碎石を用いた。

②の高炉スラグ微粉末（以降、BFS と呼ぶ）を用いたケースにおいては、BFS の混和によりマトリックス部分の空隙率も変化してしまい、骨材マトリックス界面のみの影響を適切に評価できなくなる。そこで、マトリックス部分の特性を他のケースと同様なものとするため、両者のセメントペースト単体での圧縮強度を等しくすることとした。予備実験の結果、BFS を用いない $W/C=0.50$ のセメントペーストと等しい圧縮強度を有する BFS 混和セメントペーストを得るためには、 $W/C=0.55$ とすればよいことがわかった。したがって、BFS を混和したコンクリートの作製に際しても、 $W/C=0.55$ とした。用いた材料および配合を表 4.4.2 および表 4.4.3 中の No.6 にそれぞれ示す。

③のケースにおいては、 $W/C=0.40$ のセメントペーストを用いて碎石周囲を厚さ 0.25mm でプレコーティングした。コーティング骨材の作製に際しては、まずコーティング厚と球形を仮定した場合の骨材表面積の積から必要セメントペースト量を算出し、セメントペーストの練混ぜを行った。そして、そのセメントペーストと粗骨材を練混ぜ、互いの粒子が触れ合わないよう広い平面上に拡げ、温度 20℃、相対湿度 50%の実験室内に 3 時間放置した。この 3 時間は、セメントの凝結時間に相当するものである。このようにして作製されたコーティング骨材を粗骨材としてコンクリートを練混ぜ、供試体を作

製した。コンクリートの練混ぜに際しては、プレコーティングに用いた量のセメントペーストをあらかじめ差し引いて配合計算を行い、コンクリート中における骨材の量を他のケースと等しくした。用いた材料および配合を表 4.4.2 および表 4.4.3 中の No.7 にそれぞれ示す。

④のケースにおいては、コンクリートの作製に必要な量の粗骨材を 105°Cの乾燥炉中で 1 日間乾燥させ、粗骨材内部の空隙に存在する水分を蒸発させた。その後、その粗骨材を鉱油に浸漬し、骨材内部の空隙を鉱油で満たした。そして、コンクリート打設直前に粗骨材を鉱油中から引き上げ、余分な鉱油をふりうで落とし、練混ぜに供した。用いた鉱油は、マシンオイル No.10 である。用いた材料および配合を表 4.4.2 および表 4.4.3 中の No.3 にそれぞれ示す。

骨材界面性状の評価

上記のような 4 通りの検討ケースを設定することにより、骨材-マトリックス間の界面性状を人為的に広い範囲にわたって変化させたが、実際の界面性状の差違を定量化するため、界面近傍における微小硬度（ビッカース硬さ）を計測した。 $\phi 100 \times 200(\text{mm})$ の円柱供試体の中央付近からダイヤモンドカッターを用いて 10mm 角程度の小片を取り出した。そして、低速高精度切断機により観察面を切り出し、研磨機で観察面が十分に平滑になるように研磨した。その後、試験実施までの期間はアセトン中に浸漬し、水和反応を停止させた。ビッカース硬さの計測は、ブリーディングにより界面性状の違いが最も顕著に表れると推測される骨材-マトリックス下面において、界面から 10、30、50(μm)の地点で行った。ここで、50 μm まで計測を行ったのは、一般に遷移帯厚さは、50 μm 程度である⁴⁻¹⁴⁾とされているためである。なお試験箇所の骨材下面においては、ブリーディングによる空隙は存在していなかった。用いた荷重および荷重保持時間は、それぞれ 0.01N、10 秒である。

表 4.4.5 に、骨材-マトリックス界面から 10、30、50(μm)において計測されたビッカース硬さの平均値を各ケースごとに示す。これによれば、基準ケースのコンクリートと比較して、BFS を用いたケースおよびプレコーティングを施した碎石を用いたケースでは界面近傍におけるビッカース硬さは増加しており、界面性状が改善されたことを示している。特にプレコーティングを行ったケースにおいて、顕著なビッカース硬さの増加が認められた。一方、油を塗布した碎石を用いたケースにおいては、逆にビッカース硬さが低下

しており、界面性状が悪くなっていることがわかる。以上より、本研究で対象とした 4 通りの実験ケースによれば、それぞれ異なる界面性状が得られることがわかった。

b) 実験結果および考察

骨材界面性状の違いがコンクリートの諸特性に及ぼす影響

骨材マトリックス間の界面性状の違いが、硬化コンクリートの諸特性に及ぼす影響について調べた。円柱供試体の一軸圧縮試験を、前述の 4-2 の場合と同様に行うことにより、圧縮強度および弾性係数を計測した。その結果を表 4.4.5 に示す。これより、先のビッカース硬さが大きく骨材界面性状が良いケースほど、圧縮強度や弾性係数が大きくなっており、骨材界面性状がコンクリートの強度特性および変形特性に影響することがわかる。

また骨材界面性状の相違は、コンクリート中における物質移動に多大な影響を及ぼすものと考えられるため、以下に述べる簡易透気試験により得られる簡易透気速度を用いて、骨材界面性状の違いが物質浸透抵抗性に及ぼす影響について検討を行った。Figg により提案された簡易透気試験⁴⁻¹⁷⁾においては、図 4.4.8 に示すように、コンクリート表面に直径 10mm、深さ 40mm の小孔を切削し、その開口部にゴム栓をすることによりコンクリート内部に密閉空間を設ける。この際、コンクリート表面におけるゴム栓とコンクリートの接合部にはエポキシ樹脂を塗布し、内部の気密性を保った。そして、密閉空間内部における圧力を大気圧に対して -55kPa になるまで真空ポンプを用いて減圧し、その圧力が -50kPa に回復するまでに要する時間 t を計測した。そして、式 4.4.2 により算出される簡易透気速度 V_{air} (Pa/s) を用いて、コンクリートの透気抵抗性の評価を行った。この簡易透気速度は、単位時間当たりに回復する圧力量を表した指標であり、物質浸透抵抗性に劣るコンクリートほど、圧力は回復しやすくなるため、簡易透気速度は大きくなる⁴⁻¹⁸⁾。

$$V_{\text{air}} = \frac{\{(-50) - (-55)\} \times 1000}{t} = \frac{5000}{t} \quad (4.4.2)$$

また本手法は、岩盤掘削時に懸案となる岩盤のゆるみ領域評価にも応用され、実施工でも用いられている⁴⁻¹⁹⁾。本手法をコンクリートの透気性評価に適用しようとした場合、コンクリートの含水状態が試験結果に多大な影響を及ぼす⁴⁻¹⁷⁾。そこで本研究では、「実構造物のコンクリート表面における吸水性能を評価する試験は、2 日間降雨がなく乾燥状態が保たれていれば実施してもよい」というイギリスの規格⁴⁻²⁰⁾を参考にして、弾性波透過試験を行った供試体に小孔を切削し、その後 2 日間気温 20°C、相対湿度 50%の

実験室内に放置し、供試体を十分に乾燥させた後、本試験を行った。試験結果を表 4.4.5 に示す。このように、骨材界面性状が悪くなるほど簡易透気速度は大きくなっており、特に油を塗布した碎石を用いたケースにおいて著しく大きい簡易透気速度が計測されている。これより、骨材マトリックス間の界面性状が悪いほどコンクリートの物質浸透抵抗性が低下することが示された。したがって、何らかの原因により骨材界面が劣化を受けたような場合には、コンクリートの物質浸透抵抗性が著しく損なわれるものと考えられ、コンクリートの劣化評価に際して評価すべきポイントであるといえる。

骨材界面性状が弾性波伝播挙動に及ぼす影響

弾性波透過試験は、 $100 \times 200 \times 200(\text{mm})$ のコンクリート角柱に対して行った。試験方法および試験条件については、前述の 4-2 と同一とした。

図 4.4.9 に、各ケースの弾性波伝播速度の計測結果をビッカース硬さの計測結果とあわせて示す。これによれば、基準ケースと比較して骨材界面性状が悪い場合には、弾性波伝播速度は小さくなり、界面性状が良い場合には弾性波伝播速度は大きくなることがわかる。これは、骨材界面に存在する遷移帯性状の違いによるものと考えられる。この遷移帯部分は、周囲のマトリックス部分の実体部と比較して、脆弱でポーラスとなっており、その部分の弾性波伝播速度も小さいものと考えられる。したがって、遷移帯性状の変化とともにコンクリートの弾性波伝播速度が変化したものと考えられる。逆にプレコーティングを施した碎石を用いたケースのように、骨材界面に周囲よりも密実な部分が存在すると弾性波伝播速度はさらに増加する。これは、コンクリート中のセメントペースト部分の約 10% が $W/C=0.40$ のセメントペースト（コーティング材）であるためである。

次に、透過弾性波の周波数分析結果を図 4.4.10 に示す。これより、油を塗布した碎石を用いたケースのように、界面性状が著しく悪い場合には、 300kHz 以上の高周波成分はほとんど減衰していることがわかる。一方、界面性状が良い場合の高周波成分は、基準ケースよりも若干増加していることがわかる。このような相違は、油を塗布した碎石を用いたような場合には、骨材界面において弾性波の散乱・反射が卓越して生じ、その減衰作用を大きく受けるが、界面性状が良い場合には、界面における散乱・反射の程度は小さいことによると考えられる。また、これらのケースにおいて顕著な差が生じている周波数範囲は、 $200 \sim 400(\text{kHz})$ であり、これに対応する波長範囲は、およそ $10 \sim 20(\text{mm})$ である。これは、粗骨材の寸法範囲と一致しており、このことから、骨材界面性状が異なる

場合の周波数分布の差違は、骨材界面における散乱・反射によりもたらされたものであると考えられる。

c) 二重の骨材界面を有するコンクリート（再生骨材コンクリート）に関する検討

上記のように骨材界面性状が大きく異なり、かつ二重の界面を有するコンクリートとして、再生骨材を使用したコンクリートがある⁴⁻²¹⁾。この再生骨材は、地球環境問題に対する国民意識の高揚とともに近年特に注目を集めているものであり、コンクリート構造物の解体時に発生するコンクリート塊に対して、破碎・分級処理を施すことにより得られる骨材のことである。図 4.4.11 に示すように、再生骨材コンクリート中の骨材近傍には、境界面が 2 箇所存在している。これは、再生骨材周囲に付着している原コンクリートのモルタル分（付着モルタル）の存在に起因するものであり、付着モルタルの特性が弾性波伝播挙動に影響を及ぼすものと推測される。この付着モルタルの特性は、原コンクリートの強度特性ならびに再生骨材作製時における破碎処理の程度により変化する。すなわち、原コンクリートの強度特性は付着モルタルの強度特性に、また破碎処理の程度は付着モルタルの量に影響を及ぼすものと考えられる。このような付着モルタルの存在も骨材界面性状が変化したもの捉えることができることから、a) で得られた知見をもとに整理できるものと考え、以下に示す検討を行った。

実験概要

用いた再生骨材は、56.1、40.5、24.4(MPa)の 3 通りの圧縮強度を有する原コンクリートを破碎処理して作製されたものである。その破碎処理の程度を変化させ、それぞれの原コンクリート強度のケースに対して、3 通りの付着モルタル量のケースを設定した。表 4.4.6 に、各再生骨材の物性値を示す。これによれば、原コンクリート強度の高いものほど、また付着モルタル量が少ないものほど、表乾比重は大きく、吸水率は小さくなっていることがわかる。これは、原骨材周囲の付着モルタルの特性を反映したものであり、これらを粗骨材として用いれば、二重の骨材界面を有するコンクリートを作製することができる。

この 9 種類の再生骨材を用いて、 $\phi 100 \times 200(\text{mm})$ のコンクリート円柱供試体を作製した。付着モルタル量が中程度のものについては $W/C=0.40$ 、 0.55 、 0.65 、それ以外のものについては $W/C=0.55$ のコンクリートのみを作製した。

このようにして作製したコンクリート内部の骨材マトリックス間の界面性状を把握するため、a)の場合と同様に骨材界面におけるビッカース硬さを計測した。そして、骨材界面から 10、30、50(μm)の地点における計測値の平均値を評価指標として用いた。計測結果を図 4.4.12 に示す。これより、原コンクリート強度の高いものほどビッカース硬さは大きくなっており、界面性状が良いものと判断される。

またこれらの再生骨材を用いたコンクリートの力学特性について検討するため、上記 a)と同様に、円柱供試体の一軸圧縮試験を行い、一軸圧縮強度および弾性係数を算出した。その結果を、図 4.4.13 にあわせて示す。これによれば、原コンクリート強度が大きいほど、また破碎処理程度の高いものほど、圧縮強度および弾性係数は大きくなる傾向にあり、骨材界面性状がコンクリートの力学特性に影響しているものと考えられる。

弾性波透過試験結果

上記のように二重の骨材界面を有するコンクリート（再生骨材コンクリート）を対象として、弾性波透過試験を行った。そして原コンクリート強度および破碎処理程度の違いにより生じる骨材界面性状の違いが弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討を行った。本試験は、a)の場合と同様に実施した。

図 4.4.14 に、原コンクリート強度の変化にともなう弾性波伝播速度および周波数分布の平均周波数の変化を各処理程度ごと、ならびに各 W/C ごとに示す。いずれのケースにおいても、原コンクリート強度が低いほど、すなわち界面近傍におけるビッカース硬さが小さく界面性状が悪いものほど、弾性波伝播速度は小さく平均周波数は低くなる傾向が認められた。そして、これは、上記 a)における骨材界面性状を人為的に変化させた供試体による検討結果と同様の傾向であった。このことから、骨材マトリックス間の界面性状の違いが弾性波伝播速度に若干の変化を生じさせ、また透過弾性波の周波数分布における高周波域の減衰程度の違いをもたらすことが示された。

4-4-6 まとめ

ここでは、コンクリートの弾性波伝播挙動を解明する上で欠かすことのできない骨材の影響について検討を行った。その結果、4-3におけるモデル骨材供試体による検討結果とほぼ同様な傾向を得ることができた。したがって、実際の骨材を用いたコンクリートにおいてもモデル骨材供試体による検討結果の妥当性が示されたといえる。検討に際しては、骨材の最大寸法、形状、量、ならびに界面性状を対象として、これらの変化が供試体中を伝播した弾性波の伝播速度および周波数特性に及ぼす影響を明らかにした。以下に得られた知見を示す。

①骨材最大寸法の影響

骨材最大寸法が弾性波伝播速度および周波数分布に及ぼす影響について検討した結果、それぞれ異なった傾向が認められた。弾性波伝播速度は骨材最大寸法にあまり影響されない指標であるが、透過弾性波の周波数分布は骨材最大寸法に大きく依存する特徴を示した。骨材最大寸法が大きくなるにつれて周波数分布における高周波域の減衰が顕著となった。これは、骨材界面において弾性波の散乱が卓越したことによると考えられる。弾性波伝播速度については、一般的なコンクリートのように骨材最大寸法が10~20(mm)程度であれば、骨材最大寸法によらずほぼ一定であるとみなすことができた。

②骨材形状の影響

粒形が比較的球形に近い「砂利」と粒形が角張っている碎石を用いたコンクリート供試体による検討結果により、骨材形状の違いは弾性波伝播挙動にほとんど影響しないことが明らかとなった。

③骨材量の影響

コンクリート中の骨材量は弾性波伝播速度と深い関連があるばかりでなく、透過弾性波の周波数特性にも影響を及ぼすことが明らかとなった。骨材量の増加は、コンクリート全体としての弾性係数を増加させるため、弾性波伝播速度は増加する。さらに、弾性波の散乱・反射源の増加をもたらすことから周波数分布における高周波域の減衰

を激しくすることがわかった。

④骨材界面性状の影響

骨材界面性状の違いは、弾性波伝播速度にはあまり影響を及ぼさないが、透過弾性波の周波数分布を大きく変化させることが明らかとなった。これは、骨材界面性状が異なることにより、骨材界面における弾性波の散乱・反射が著しくなり、結果的に周波数分布における高周波域の減衰が引き起こされたものと考えられる。減衰を受ける周波数範囲が、骨材寸法と同程度であることから結果の妥当性が示される。

表 4.4.1 用いた骨材の粒度分布

ふるい目 (mm)	通過量(%)	
	細骨材	粗骨材
25	—	100
20	—	100
15	—	76
10	—	29
5	100	0
2.5	85	—
1.2	78	—
0.6	70	—
0.3	38	—
0.15	4	—

表 4.4.2 使用材料の諸特性

材料	種類	特性
セメント	普通ポルトランドセメント	比重: 3.15、等価アルカリ量: 0.67%
水	水道水	
細骨材	川砂	千葉県小櫃川産、比重: 2.59、吸水率: 1.41%、粗粒率: 2.26
粗骨材	川砂利	東京都多摩川産、比重: 2.60、吸水率: 1.67%、粗粒率: 6.68
	碎石	東京都青梅市産、比重: 2.61、吸水率: 0.98%、粗粒率: 6.68
混和材	高炉スラグ微粉末	ブレーン比表面積: 8000cm ² /g
混和剤	高性能減水剤	主成分: ポリカルボン酸グラフトコポリマー、抑泡剤併用
	分離低減剤	主成分: セルロースエーテル
	減水剤	主成分: リグニンスルホン酸塩およびホリオール複合体
	AE剤	主成分: 特殊非イオン界面活性剤

表 4.4.3 コンクリートの配合

番号	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C	s/a	骨材濃度 (%)	単位量(kg/m ³)					
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材	混和剤
No.1	—	6±1	0.50	—	54	258	515	1288	—	—	—
No.2	8±2.5	1±1	0.50	0.45	68	190	380	783	980 ^{*1}	—	—
No.3	8±2.5	1±1	0.50	0.45	68	190	380	783	984	—	—
No.4	8±2.5	1±1	0.50	0.45	55	272	544	636	783	—	2.72 ^{*2}
No.5	8±2.5	1±1	0.50	0.45	78	127	254	911	1122	—	2.10 ^{*3}
No.6	8±2.5	1±1	0.55	0.45	68	197	215	783	984	143 ^{*4}	—
No.7	8±2.5	1±1	0.50	0.45	68	107	214	783	1247 ^{*5}	—	—
No.8	8±2.5	1±1	0.30	0.45	68	151	503	783	984	—	1.38 ^{*6}
No.9	8±2.5	1±1	0.65	0.45	68	209	321	783	984	—	1.76 ^{*2}
No.10	8±2.5	6±1	0.50	0.45	68	160	319	783	984	—	0.32 ^{*7}
No.11	8±2.5	6±1	0.42	0.45	68	148	352	783	984	—	0.35 ^{*7}
No.12	—	—	0.65	0.45	68	209	321	783	984	—	—

* 1: 川砂利使用(他の配合はすべて碎石使用)

* 2: 分離低減剤、* 3: 高性能減水剤、* 4: 高炉スラグ微粉末

* 5: コーティング材を含む、* 6: 減水剤、* 7: AE剤

表 4.4.4 骨材形状が異なるコンクリートの諸特性

骨材種類	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)	伝播速度 (km/s)	平均周波数 (kHz)
川砂利	45.6	33.4	2.42	13.6	4.66	164.2
碎石	47.3	34.9	2.42	13.2	4.69	165.6

表 4.4.5 骨材界面性状の異なるコンクリートの諸特性

界面状態	ビッカース 硬さ	強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	簡易透気 速度 (Pa/s)
油塗布	43.1	34.4	30.0	14.9
普通	55.5	43.2	34.2	4.0
BFS	60.5	51.6	32.2	3.8
コーティング	88.4	54.8	35.7	1.4

表 4.4.6 再生骨材の諸特性

記号	原コンクリート強度 (MPa)	付着モルタル量 (%)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
A1	56.1	39.0	2.43	5.03
A2	56.1	26.0	2.47	4.38
A3	56.1	22.2	2.52	3.40
B1	40.5	39.3	2.42	5.96
B2	40.5	30.2	2.46	4.96
B3	40.5	23.8	2.49	4.30
C1	24.4	38.1	2.40	5.95
C2	24.4	30.1	2.43	5.08
C3	24.4	19.2	2.47	4.35

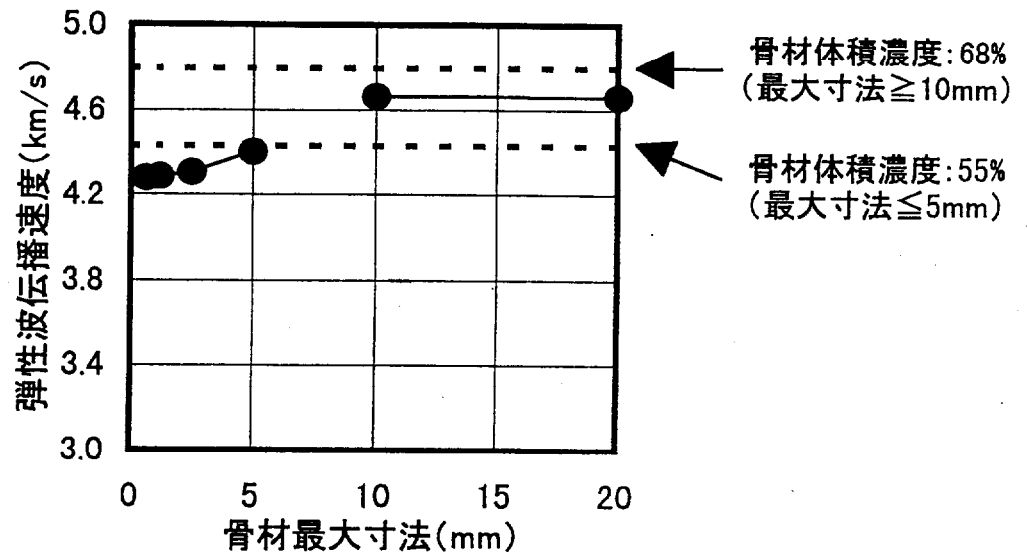


図 4.4.1 骨材最大寸法と弾性波伝播速度の関係

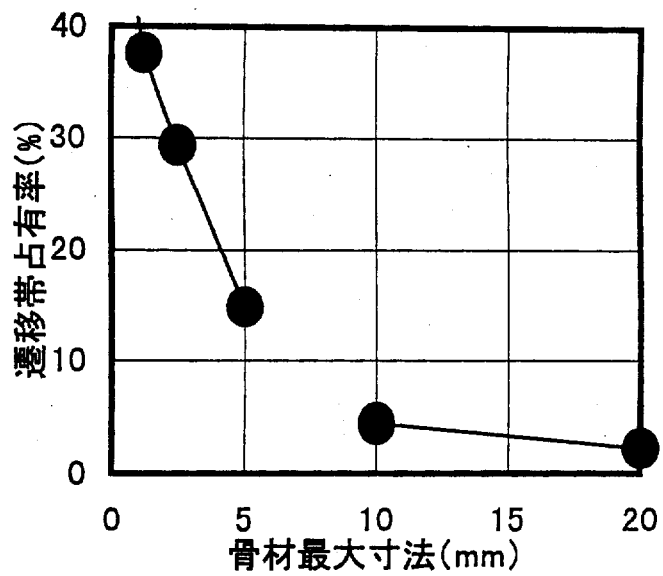


図 4.4.2 遷移帯量の推計結果

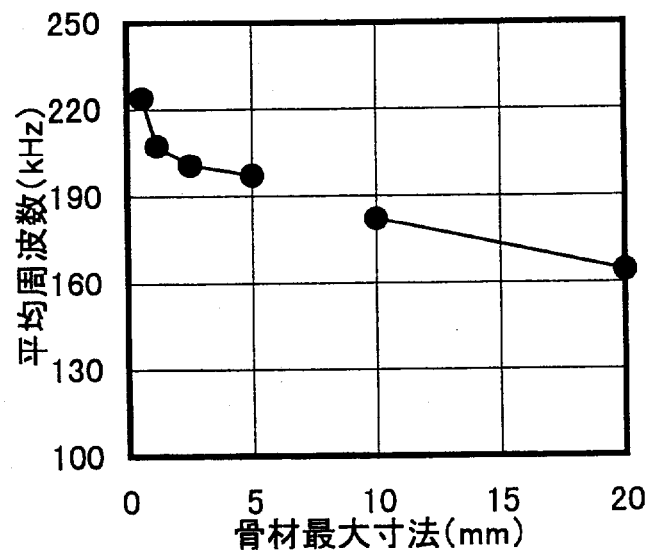


図 4.4.3 骨材最大寸法と平均周波数の関係

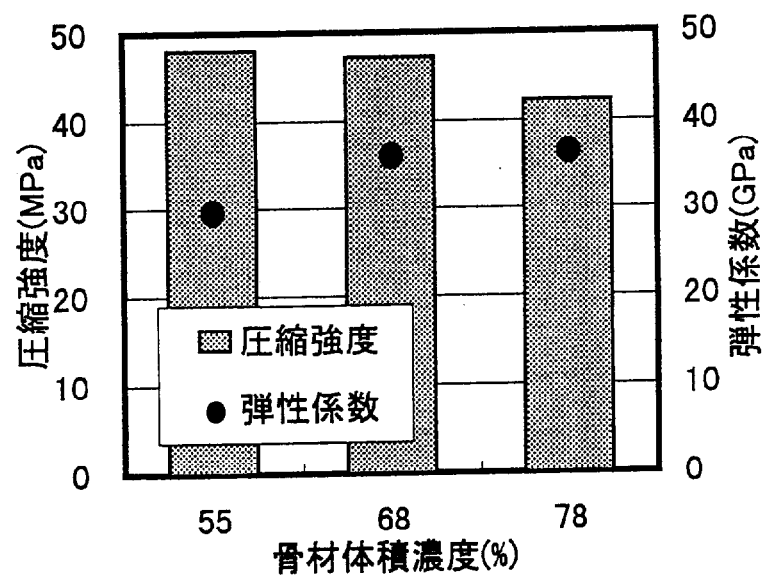


図 4.4.4 骨材量の変化にともなう力学特性の変化

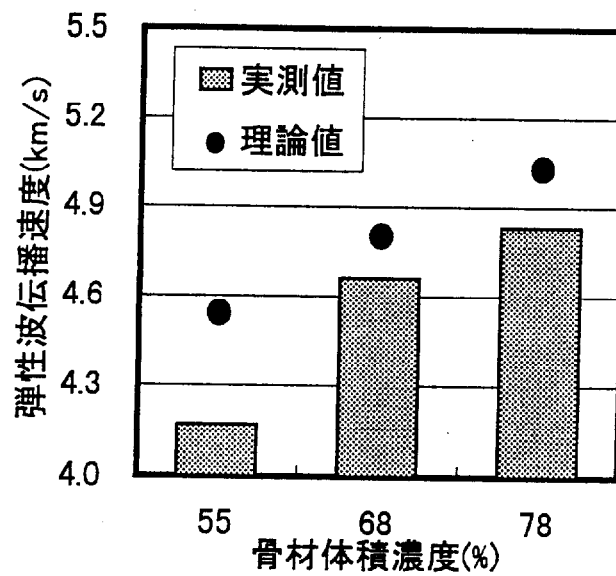


図 4.4.5 骨材量の変化にともなう弾性波伝播速度の変化

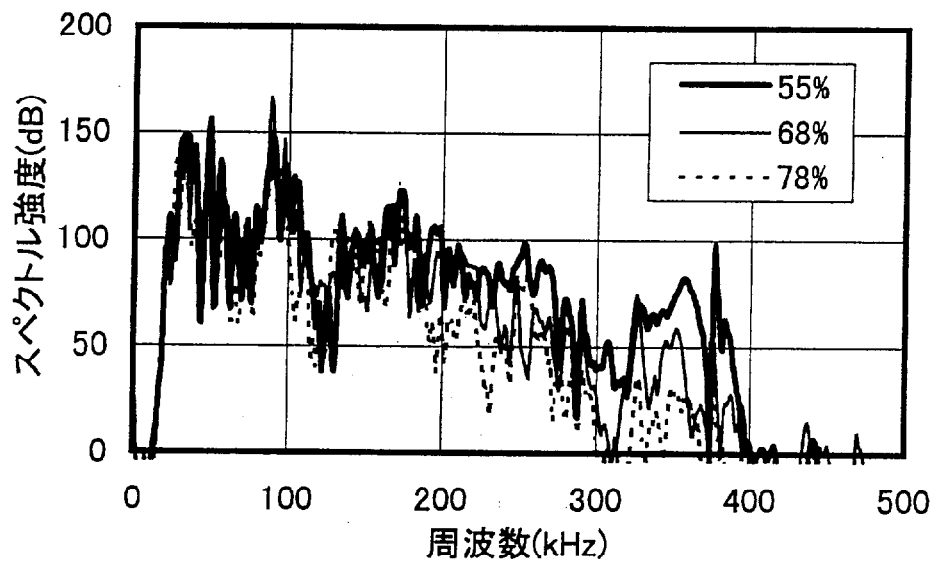


図 4.4.6 骨材量の異なるコンクリートを伝播した弾性波の周波数分布

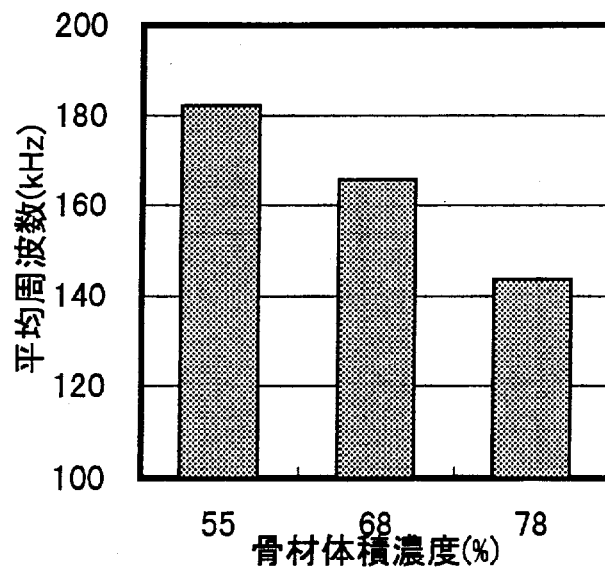


図 4.4.7 骨材量の変化にともなう平均周波数の変化

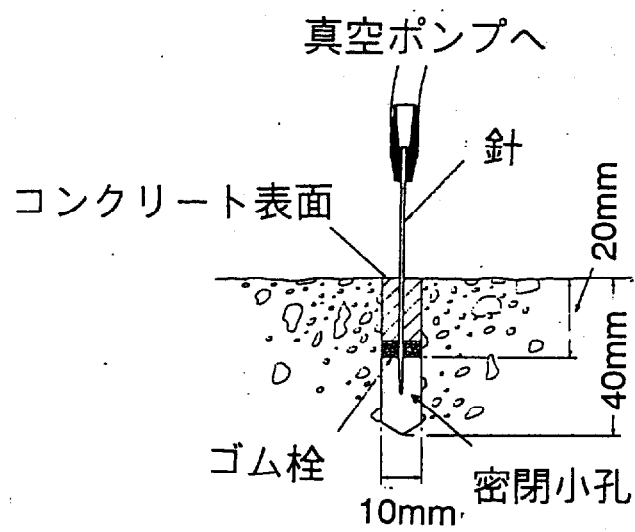


図 4.4.8 簡易透気試験の概要

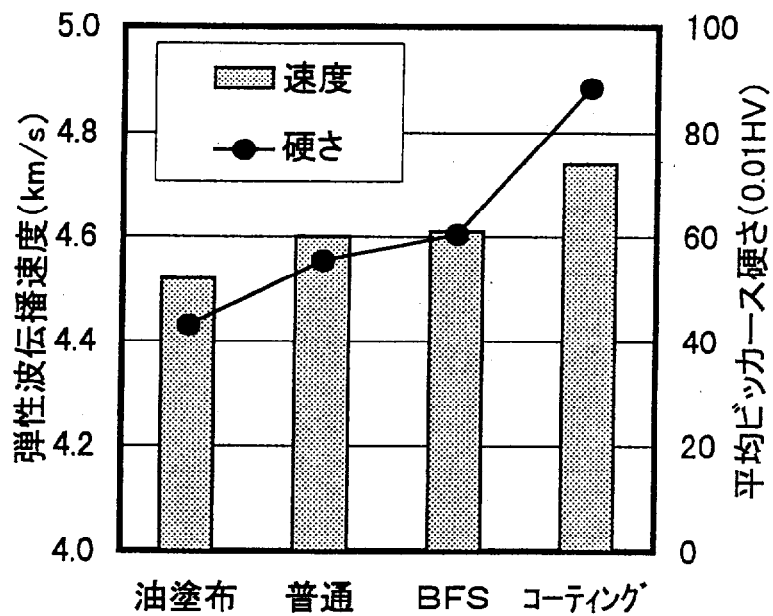


図 4.4.9 骨材界面性状と弾性波伝播速度の関係

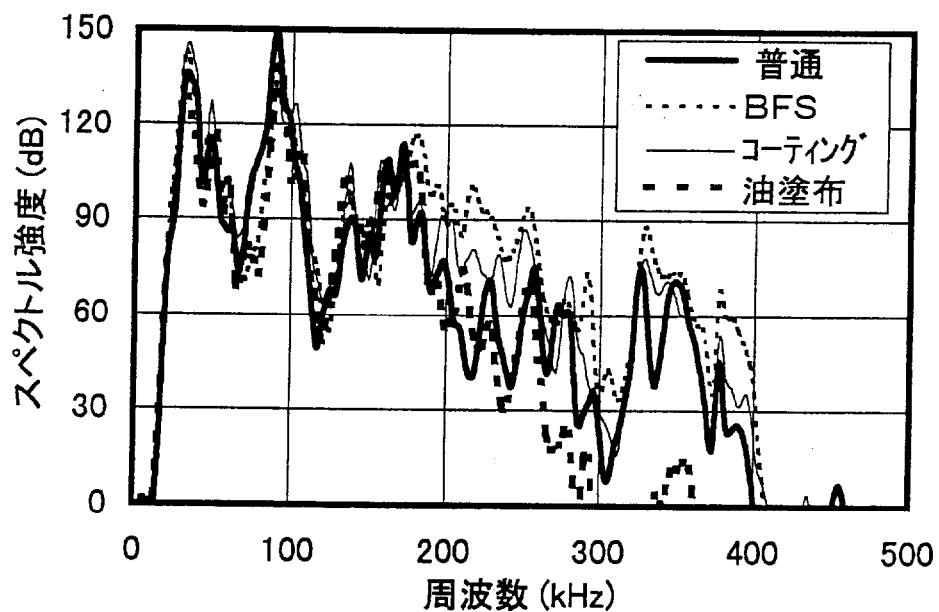


図 4.4.10 骨材界面性状の異なるコンクリートにおいて得られた周波数分布

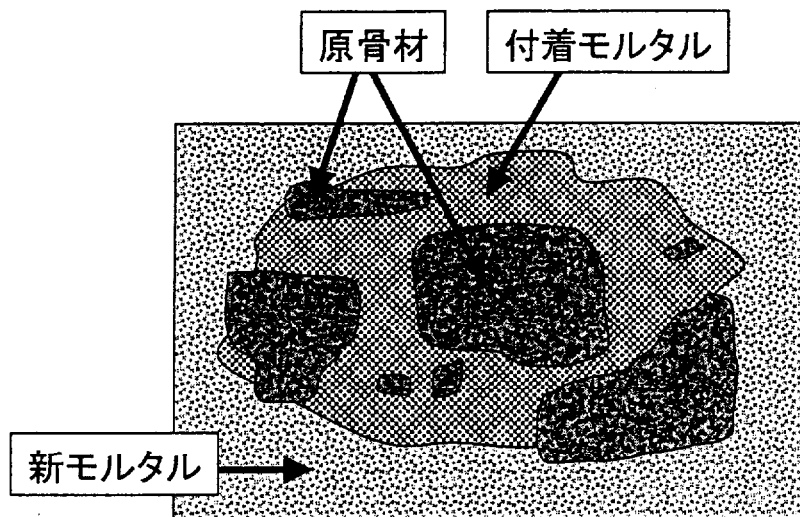


図 4.4.11 再生骨材コンクリートにおける骨材界面状態

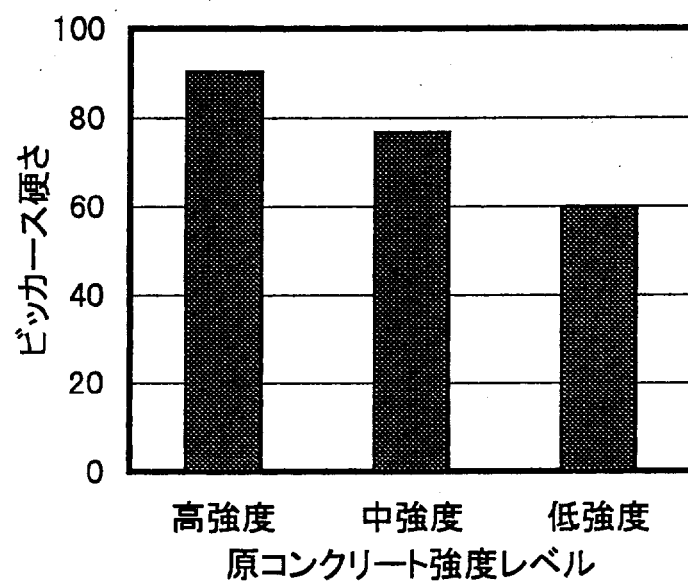
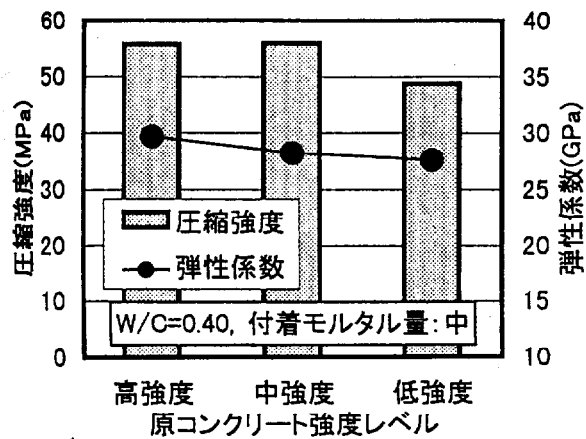
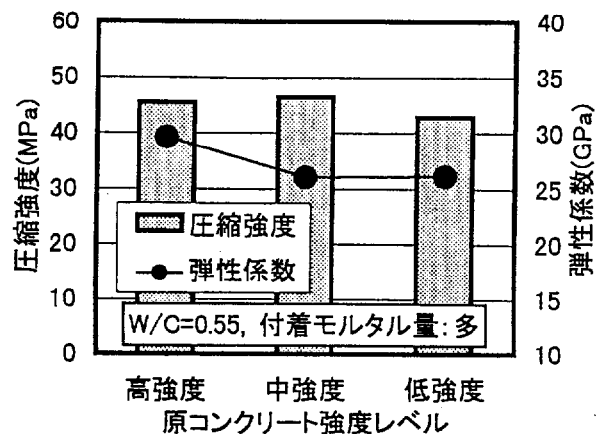


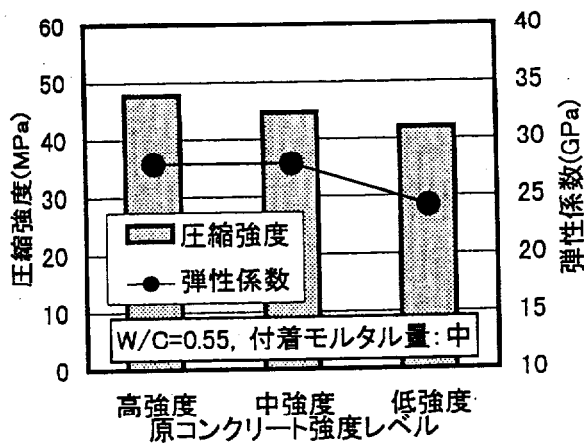
図 4.4.12 再生骨材の付着モルタルのビッカース硬さ



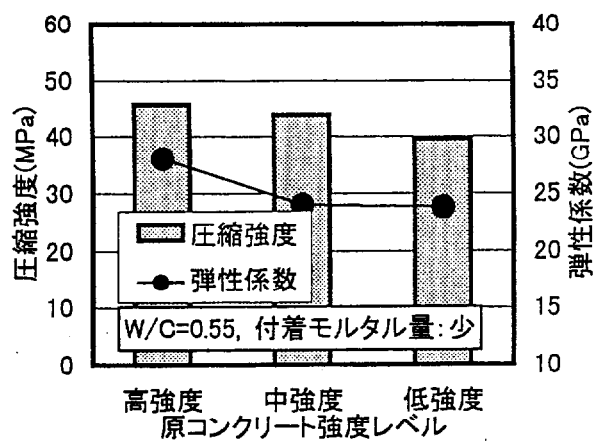
(a) W/C: 0.40, 付着モルタル量: 中程度



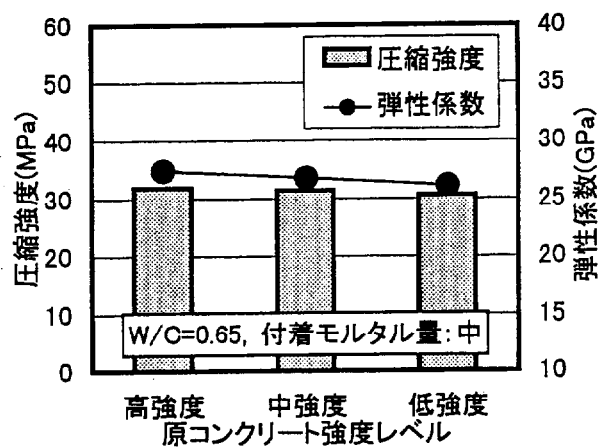
(b) W/C: 0.55, 付着モルタル量: 多



(c) W/C: 0.55, 付着モルタル量: 中程度

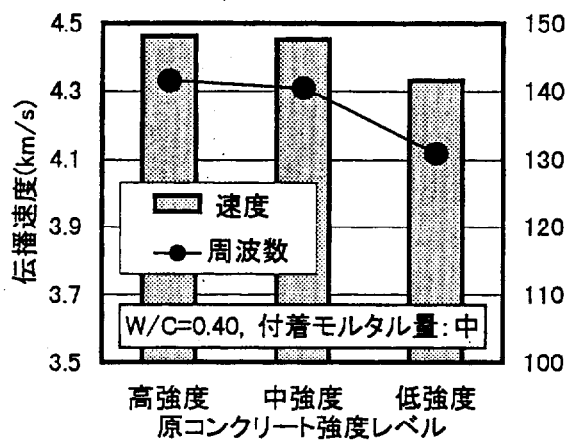


(d) W/C: 0.55, 付着モルタル量: 少

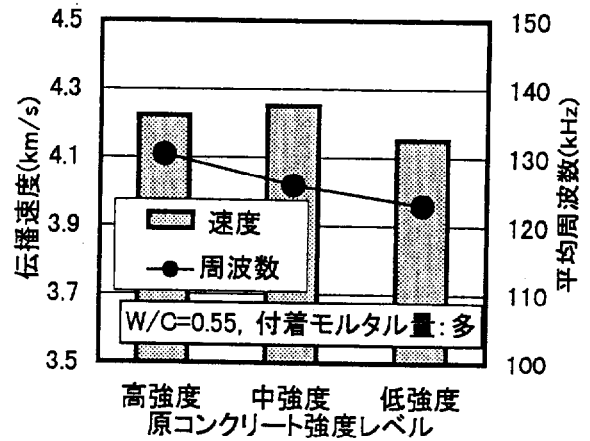


(e) W/C: 0.65, 付着モルタル量: 中程度

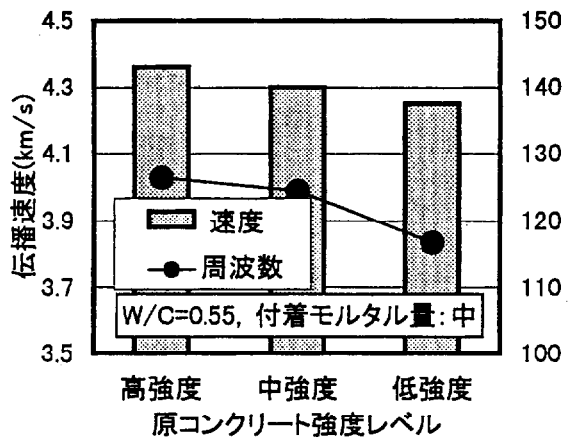
図 4.4.13 再生骨材コンクリートにおける原コンクリート強度レベルと力学特性の関係



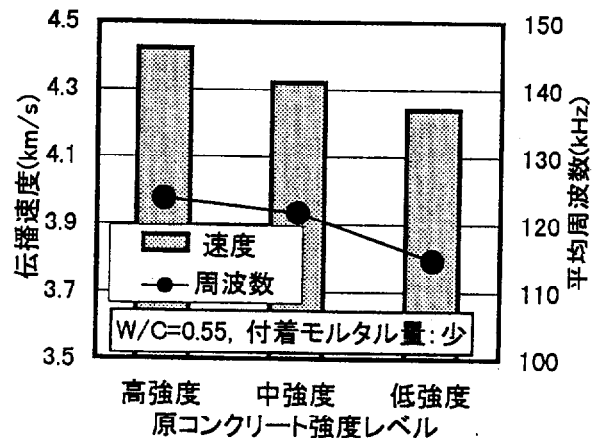
(a) W/C: 0.40, 付着モルタル量: 中程度



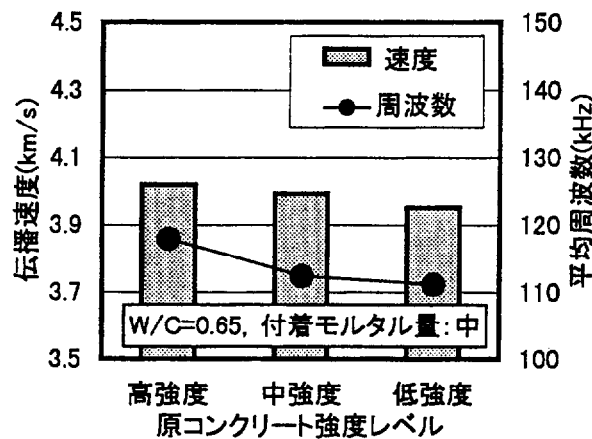
(b) W/C: 0.55, 付着モルタル量: 多



(c) W/C: 0.55, 付着モルタル量: 中程度



(d) W/C: 0.55, 付着モルタル量: 少



(e) W/C: 0.65, 付着モルタル量: 中程度

図 4.4.14 再生骨材コンクリートにおける原コンクリート強度レベルと弾性波伝播挙動の関係

4-5 コンクリートの配合条件が弾性波伝播挙動に及ぼす影響

4-5-1 概要

コンクリートは、その配合条件によってフレッシュ時および硬化時の特性が大きく変化する。このことは、様々な要求性能に応じたコンクリートを容易に作製することができるという建設材料としては欠かすことのできない特徴となるが、一方でコンクリートの多様性を顕著なものにし普遍的な理論体系の確立を困難にしていることも事実である。コンクリート中における弾性波伝播挙動も例外に漏れず、配合条件によって大きく変化するものであり、伝播挙動の複雑性を増大させている原因の 1 つであるといえる。ここでは、コンクリートの配合条件が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について明らかにするため、異なる配合条件のもとで作製したコンクリート供試体を用いて種々の検討を行った。コンクリートの配合条件には、スランプ、空気量、骨材最大寸法および量、あるいは W/C など様々なものが存在するが、ここでは W/C と空気量について取り上げることとする。スランプについては、それが適切な範囲内にあれば硬化コンクリートの性質に及ぼす影響は小さいものと考えられ、また骨材に関する条件については 4-4 で既に述べているので、これらについては検討しないこととした。

4-5-2 コンクリートの W/C に関する検討

コンクリートの W/C は、その強度を決定するパラメータであり、硬化コンクリートの特性を大きく左右する配合条件の 1 つである。ここでは、コンクリートの W/C を変化させて作製した供試体を用いて、W/C の違いによるコンクリートの物性変化が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討を行った。

a) 実験概要

コンクリートの W/C が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討するため、骨材量を一定として、W/C を 0.30、0.50、0.65 と変化させたコンクリート供試体を作製した。こ

の範囲は、一般に用いられているコンクリートの W/C の範囲をほぼ包含しているものと考えられる。この W/C の相違は、セメントペースト・マトリックス部分の空隙率の変化をもたらすものである。コンクリートの配合は、表 4.4.3 中の No.3、8～9 であり、用いた材料の特性を表 4.4.2 に示す。コンクリートの練混ぜにあたっては、適切な流動性と材料分離抵抗性を確保するため、W/C=0.30 のケースにおいては減水剤を、W/C=0.65 のケースにおいては分離低減剤をそれぞれ使用した。作製した供試体は、 $100 \times 200 \times 200(\text{mm})$ の角柱、 $\phi 100 \times 200(\text{mm})$ および $\phi 100 \times 50(\text{mm})$ の円柱であり、各ケースにつきそれぞれ3個ずつ作製した。角柱は弾性波透過試験に、長さ 200mm の円柱は一軸圧縮試験に、長さ 50mm の円柱は密度・空隙率試験に用いた。なお、これらの弾性波透過試験、一軸圧縮試験および密度・空隙率試験は、前述の4-2と同様に行った。

b) 実験結果および考察

硬化コンクリートの物性把握

各 W/C ごとに得られた一軸圧縮強度、弾性係数、密度および空隙率を表 4.5.1 に示す。これより、当然のことながら、W/C の増加とともに、圧縮強度、弾性係数および密度は低下し、空隙率は増加していることがわかる。これは、W/C の増加がコンクリート中のマトリックス部分の空隙率を増加させていることによるものと考えられる。このような空隙率の増加にともなう圧縮強度等の低下傾向は、前述の4-2のセメントペースト単体の場合と同様である。

異なる W/C を有するコンクリート中における弾性波伝播挙動

続いてこのように空隙率が異なるコンクリートの弾性波伝播挙動について検討を行った。まず図 4.5.1 に、W/C と弾性波伝播速度の関係を示す。これより、W/C の増加とともに伝播速度が低下していることがわかる。このことも、W/C の増加にともなうマトリックス部分の空隙率の増加により説明することができる。このことについて検討するため、コンクリート中のマトリックス部分の空隙率を以下のように算出し、それと弾性波伝播速度の関係について検討を行うこととした。すなわち、コンクリート中における空隙量は、飽水状態から絶乾状態に変化するまでに消散する水分量により求められる。この消散水分量のうち、一部はセメントペースト部分の水分であり、残りの部分は骨材部分の水分である。この際、骨材部分に存在する水分量は、骨材単体による空隙率測定を行うことにより求め

ることができるため、コンクリートとしての消散水分量から骨材部分の消散水分量を差し引くことにより、セメントペースト部分から消散する水分量を求めることができる。このような考え方により、セメントペースト・マトリックス部分の空隙率 VR_P を算出する式が以下のように得られる。

$$VR_P = \frac{M_w - (V_s \cdot VR_s + V_G \cdot VR_G)}{V_P} \quad (4.5.1)$$

ここで、 M_w ：単位体積のコンクリートから消散する水分量（=VR）、 V_s 、 V_G 、 V_P ：コンクリート中における細骨材、粗骨材、セメントペーストの体積割合、 VR_s 、 VR_G ：細骨材および粗骨材の空隙率（本実験においてはそれぞれ 3.71、2.58(%)）である。このマトリックス部分の空隙率には、骨材界面における遷移帯の影響も含まれている。

式 4.5.1 から算出されるマトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の関係を図 4.5.2 に示す。このように、前述の 4-2 のセメントペースト単体による検討結果と同様に、マトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の間により対応関係が存在していることがわかる。

図 4.5.3 に、各 W/C ごとの透過弾性波の周波数分布を示す。これより、W/C の増加とともに高周波域における減衰が著しくなっていることがわかる。これは、W/C の増加によりセメントペーストの空隙率が増加し、その音響インピーダンスが小さくなることにより、骨材との音響インピーダンス差が大きくなり、骨材界面における弾性波の散乱が著しくなったことによると考えられる。このことは、前述 4-3-3 の異なる材質のモデル骨材を用いた場合の検討結果と一致している。

さらに W/C が大きくなるにつれてブリーディングが著しくなり、骨材界面に存在する遷移帯や空隙のスケールが大きくなったことも原因の 1 つとして考えられる。この点については、前述の 4-4-5 における検討結果からも容易に推測できる。

4-5-3 空気量に関する検討

コンクリートの空気量は、その 1% の違いが圧縮強度を 4~6(%) 変化させる⁴⁻²²⁾ ことなど、硬化コンクリートの諸特性に大きく影響を及ぼすものである。コンクリート中における弾性波伝播挙動もまた、空気量の変化に強く依存すると考えられるため、異なる空気

量を有するコンクリート供試体を作製し、その空気量の相違が弾性波の伝播速度および周波数特性に及ぼす影響について検討を行った。

a) 実験概要

空気量の変化は、前述の4-5-2の W/C の変化と同様に、マトリックス部分の空隙率を変化させるものと考えられる。検討ケースとして、4-5-2における $W/C=0.50$ のコンクリート（空気量：1%）を基準として、W/C を変化させずに空気量を 6%としたもの、ならびに W/C を変化させて強度レベルを同程度とした上で空気量を 6%に調整したケースを設定した。この空気量 1~6(%)の範囲は、我が国で一般に用いられているコンクリートの空気量の範囲をほぼ包含しているものと考えられる。コンクリートの配合は、表 4.4.3 中の No.3、10~11 であり、用いた材料の特性を表 4.4.2 に示す。ここで、骨材量はいずれのケースにおいても一定とした。コンクリートの練混ぜに際しては、コンクリートの空気量を所定の値に調整するため、混和剤として AE 剤を用いた。

作製した供試体は、 $100 \times 200 \times 200(\text{mm})$ の角柱、 $\phi 100 \times 200(\text{mm})$ および $\phi 100 \times 50(\text{mm})$ の円柱であり、各ケースにつきそれぞれ3個ずつ作製した。角柱は弾性波透過試験に、長さ 200mm の円柱は一軸圧縮試験に、長さ 50mm の円柱は密度・空隙率試験に用いた。なお、これらの弾性波透過試験、一軸圧縮試験および密度・空隙率試験は、前述の4-2と同様に行った。

b) 実験結果および考察

硬化コンクリートの物性把握

各ケースごとに得られた一軸圧縮強度、弾性係数、密度および空隙率を表 4.5.2 に示す。これより、W/C が同一であれば、空気量の増加とともに、圧縮強度、弾性係数および密度は減少し、空隙率は増加していることがわかる。これは、空気量の増加にともなうマトリックス部分の空隙率の増加によるものと考えられる。また空気量が異なる場合においても、空隙率が同程度であれば、他の諸特性はほぼ同様なものとなっている。したがって、空気量が異なるコンクリートにおいても、その空隙率がコンクリートの諸特性の支配的要因であるといえる。

異なる空気量を有するコンクリート中における弾性波伝播挙動

前述の W/C が変化した場合と同様に、セメントペースト・マトリックス部分の空隙率を算出し、弾性波伝播速度との関係について調べた。その結果を図 4.5.4 に示す。これより、空気量が異なる場合においても、W/C が異なる場合と同様にマトリックス部分の空隙率が増加すると、弾性波伝播速度が減少する関係が存在することがわかる。以上より、セメントペースト単体の場合と同様に、マトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の間には密接な関係があり、コンクリートの劣化評価において、マトリックス部分の空隙率の変化を調べようとする場合には弾性波伝播速度を用いることが有効であることが示された。

次に、図 4.5.5 に、各ケースごとの透過弾性波の周波数分布を示す。これによれば、マトリックス部分の空隙率の変化と対応して、高周波成分の減衰が生じていることがわかる。この相違は、前述の W/C が変化した場合と同様に、骨材-マトリックス間の音響インピーダンス差に起因したものであると考えられる。

4-5-4 まとめ

以上のように、コンクリートの配合条件のうちで、W/C および空気量の変化がコンクリート中における弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討を行った結果、W/C および空気量の違いはコンクリート中のマトリックス部分の空隙率の変化をもたらし、結果的に弾性波伝播速度や透過弾性波の周波数分布が変化することが示された。

そこで図 4.5.6 に、① W/C 変化シリーズおよび②空気量変化シリーズにおけるマトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の関係をあわせて示す。これによれば、W/C や空気量といった配合条件にかかわらず、マトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の間には密接な関係があることがわかる。また本研究の範囲内においては、マトリックス部分の変化により約 1km/s の弾性波伝播速度の変化が生じた。そして、このマトリックス部分の空隙率は、図 4.5.7~8 に示すように、圧縮強度や弾性係数といったコンクリートの力学的性質とも深く関連するものである。これらの図は、① W/C 変化シリーズおよび②空気量変化シリーズの結果をまとめて示したものである。

また W/C や空気量の変化によりマトリックス部分の空隙率が増加すると、マトリックス部分の音響インピーダンスが減少し、骨材との音響インピーダンス差が大きくなる。そ

の結果、骨材界面における弾性波の散乱が著しくなり、周波数分布において骨材の大きさとほぼ同程度の波長に相当する周波数範囲の減衰が顕著となった。このことは、前述の4-3-3のモデル骨材供試体による検討結果と同様である。

弾性波を用いてコンクリートの劣化評価を行う際に、弾性波伝播速度や透過弾性波の周波数分布に着目することにより、圧縮強度や弾性係数などの力学的特性値と関連の深いマトリックス部分の空隙率を評価することができる。ただし、このことは、コンクリート中の骨材に関する条件（骨材種類、骨材量など）が同一の場合においてのみ成立するものであり、骨材に関する条件が異なる場合には、4-4でも述べたように、その影響について別途考慮する必要がある。

表 4.5.1 W/C の異なるコンクリートの諸特性

ケース	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)
W/C=0.30	73.5	38.5	2.44	11.7
W/C=0.50	43.2	32.6	2.40	14.1
W/C=0.65	24.1	25.1	2.27	16.3

表 4.5.2 空気量の異なるコンクリートの諸特性

ケース	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)
W/C=0.50 Air=1%	43.2	32.6	2.27	14.1
W/C=0.50, Air=6%	21.3	24.1	2.16	16.5
W/C=0.42, Air=6%	43.9	35.0	2.34	12.8

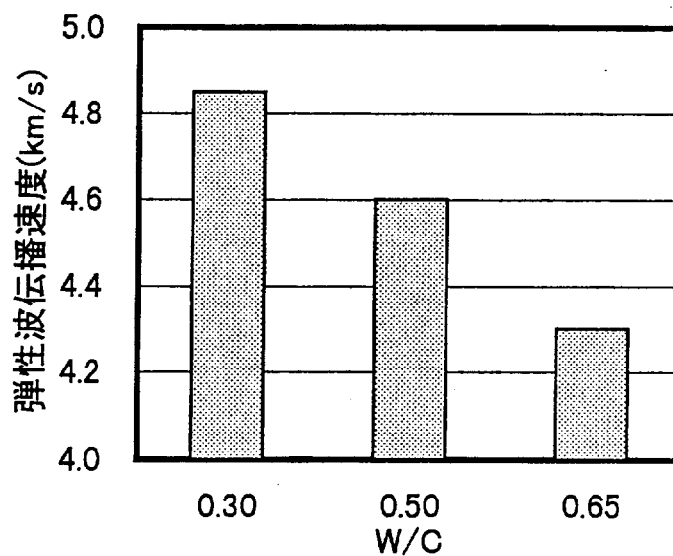


図 4.5.1 コンクリートの W/C と弾性波伝播速度の関係

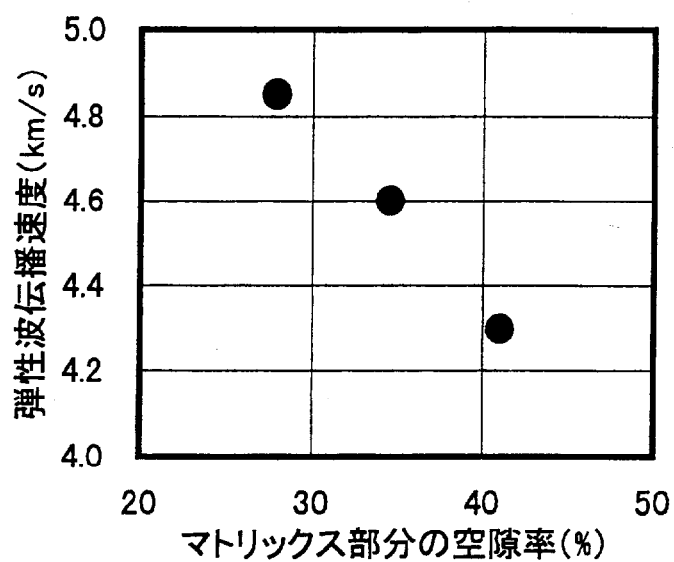


図 4.5.2 マトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の関係
(W/C が異なる場合)

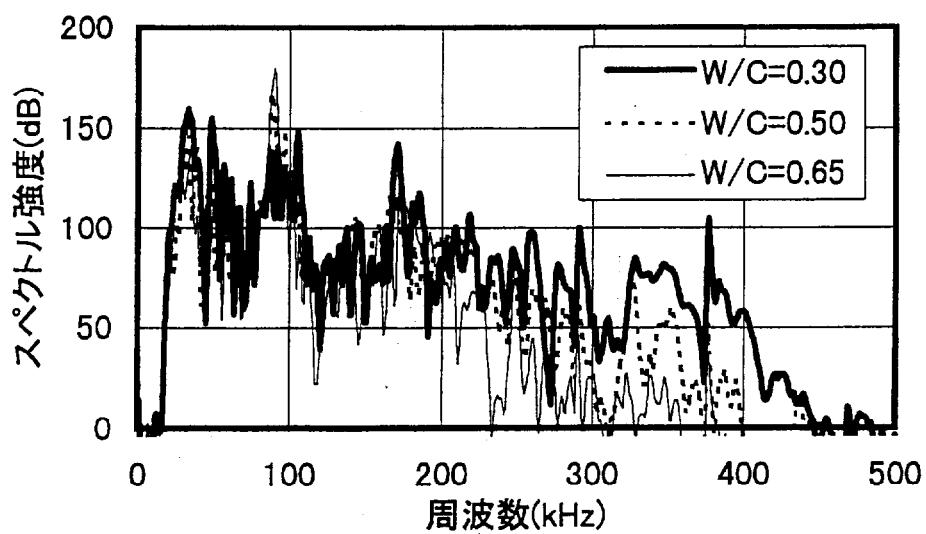


図 4.5.3 コンクリートの W/C の変化にともなう周波数分布の変化

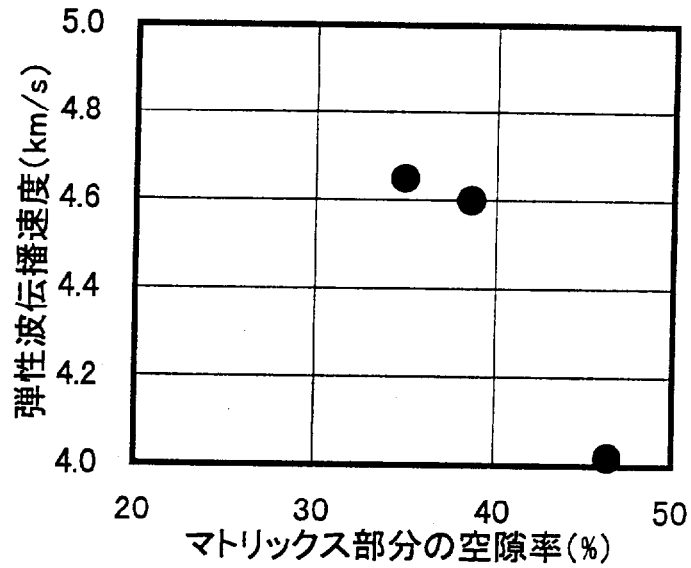


図 4.5.4 マトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の関係
(空気量が異なる場合)

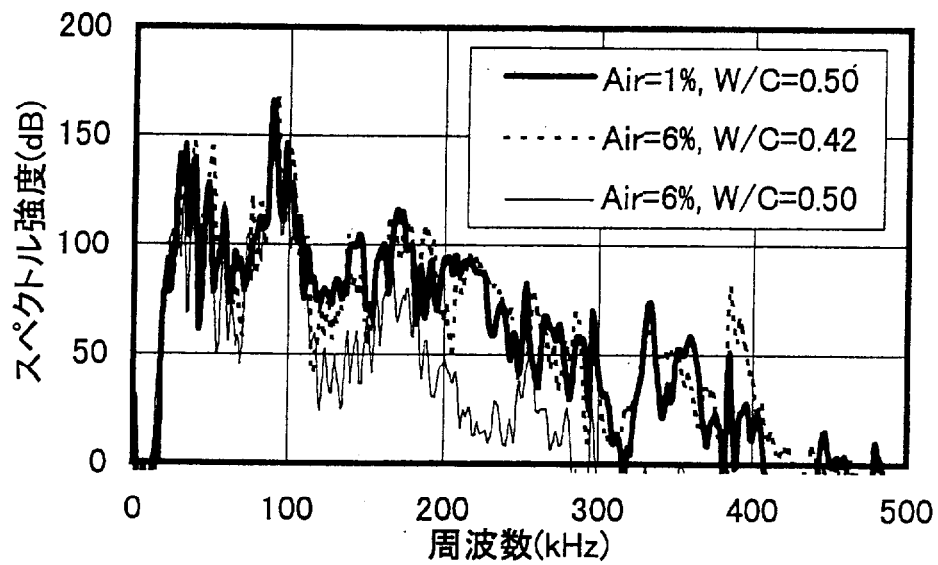


図 4.5.5 空気量の異なるコンクリートにおいて得られた周波数分布

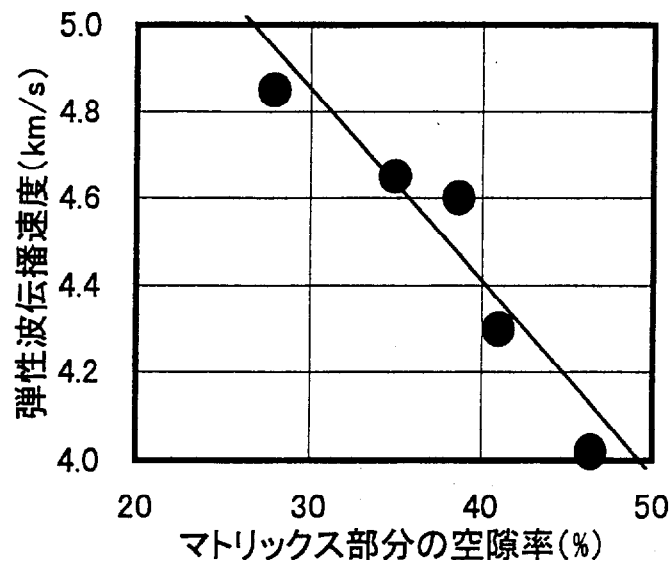


図 4.5.6 マトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の関係

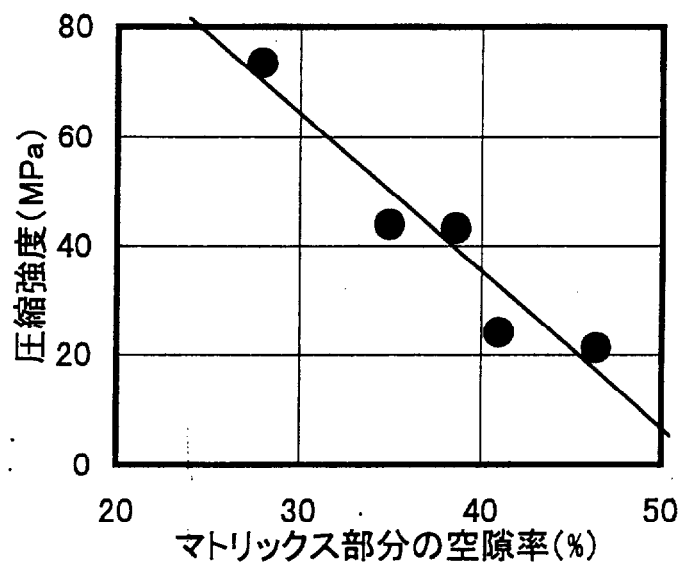


図 4.5.7 マトリックス部分の空隙率と圧縮強度の関係

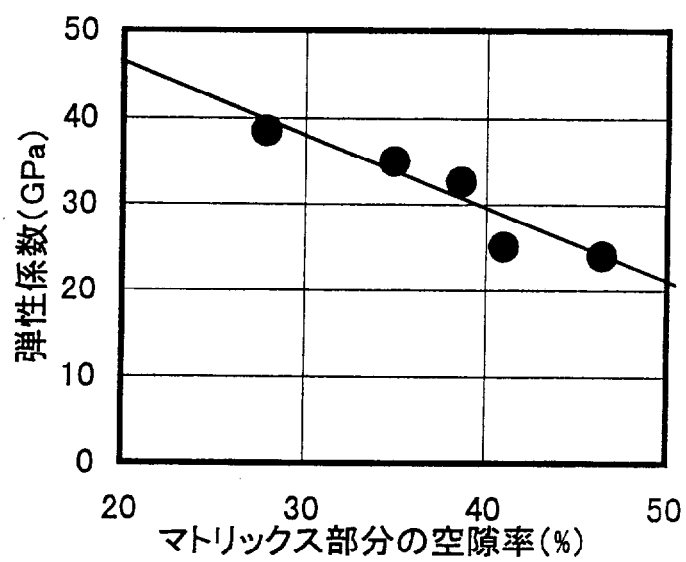


図 4.5.8 マトリックス部分の空隙率と弾性係数の関係

4-6 コンクリート中のマイクロクラックが弾性波伝播挙動に及ぼす影響

4-6-1 概説

コンクリート中には、乾燥収縮、温度応力あるいは外力などの作用により、多かれ少なかれマイクロクラックがランダムに分散して存在している。本研究におけるマイクロクラックとは、破壊力学などの分野で対象としている「マイクロクラック」とは異なり、コンクリート表面にまでは現れてこない内部クラックのことである。したがって、破壊力学の分野における「マイクロクラック」よりもスケールは大きく、マイクロスコープによりその幅を計測したところ、おおよそ0.01mm程度であった。

本研究では、曲げひび割れやせん断ひび割れのようにコンクリート表面に開口部を持った局所化したクラックではなく、コンクリート中にランダムに分散して存在しているマイクロクラックを対象とすることとした。このようなマイクロクラックの存在は、一般に圧縮部材として用いられるコンクリート中においてしばしば確認できるものであり、外部からの目視観察では評価できないものである。マイクロクラックのような不連続面の存在は、コンクリートにとっての有害物質が浸透する際の「水みち」となるばかりでなく、より重大な劣化を引き起こす誘因ともなりうる。したがって、コンクリート中のマイクロクラックの存在はコンクリートの劣化評価を行う際には欠かすことのできない評価項目であり、その弾性波伝播挙動に対する影響を把握しておくことは重要である。このようなマイクロクラックの存在は、弾性波の散乱・反射源となることが考えられるため、ここではコンクリート中にランダムに分散して存在するマイクロクラックの存在が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について明らかにし、後述するコンクリートの劣化評価の基礎資料とすることとした。

4-6-2 モデルマイクロクラックを用いた検討

コンクリート中にランダムに分散して存在するマイクロクラックが弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討するため、モデルマイクロクラックとしてプラスチック（ポリ塩

化ビニル) 小片をコンクリート中に混入させた供試体を作製した。このような供試体に対して弾性波透過試験を行うことにより、コンクリート中に存在するマイクロクラック量が弾性波の伝播速度および周波数特性に及ぼす影響について明らかにすることとした。

a) 実験概要

供試体形状は、 $\phi 100 \times 200(\text{mm})$ の円柱形であり、用いた材料および配合は、表 4.4.2 および表 4.4.3 中の No.3 に示すとおりである。なお作製した供試体数は各検討ケースに対して 3 本とした。

供試体に混入させたプラスチック小片の寸法は、 $15 \times 15 \times 0.3(\text{mm})$ であり、混入させる量は体積割合で 0.5% および 1.0% とした。小片の大きさを $15 \times 15(\text{mm})$ としたのは、コンクリート中に存在するマイクロクラック、特に骨材-マトリックス間の境界相部分のマイクロクラック (ボンドクラック) を対象とした検討を行うためである。ここで用いた骨材の最大寸法が 20mm であり、直径 20mm の円に包含される最大の正方形の一辺の長さが約 14mm であることを考慮して小片の大きさを決定した。このプラスチック材料の音響インピーダンスは $1 \sim 2 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ であり⁴⁻²³⁾、コンクリートの 10% 程度である。したがって、このプラスチック小片とコンクリートの界面においては、弾性波の散乱・反射が卓越することとなり、コンクリート中にマイクロクラックのような不連続面が存在する場合の弾性波伝播挙動が模擬されていると考えることができる。

これらの供試体に対して、弾性波透過試験および一軸圧縮試験を行った。弾性波透過試験は 4-2 の場合と同様に行い、弾性波伝播速度および透過弾性波の周波数分布を算出した。一軸圧縮試験もまた 4-2 の場合と同様に行い、一軸圧縮強度および弾性係数を求めた。

b) 実験結果および考察

モデルマイクロクラックを含むコンクリートの諸特性

図 4.6.1 に、モデルマイクロクラック量を変化させた場合の一軸圧縮強度および弾性係数の変化を示す。これより、本実験で対象とした程度のモデルマイクロクラック量であれば、モデルマイクロクラックのような不連続部分の存在は、圧縮強度や弾性係数といった力学特性値に影響しないことがわかる。これまでの検討結果より、圧縮強度や弾性係数はセメントペースト・マトリックスの空隙率と深い関連があることが示されており、ここで

行ったようなモデルマイクロクラックの混入は、マトリックス部分の空隙率を変化させないことから、圧縮強度や弾性係数は変化しなかったものと考えられる。この場合の供試体においてはマトリックス部分の空隙率が変化していないことから、弾性波伝播速度に変化がみられないことが推測される。

モデルマイクロクラックの存在がコンクリート中の弾性波伝播挙動に及ぼす影響

図 4.6.2 に、モデルマイクロクラック量の変化にともなう弾性波伝播速度の変化を示す。これによれば、モデルマイクロクラックの存在量が 1.0%までであれば、弾性波伝播速度にほとんど変化がみられないことが確認できる。

次に、モデルマイクロクラック量を変化させた場合の透過弾性波の周波数分析結果を図 4.6.3 に示す。これによれば、弾性波の散乱源となるモデルマイクロクラックが増加するにつれて、高周波成分が減衰していくことがわかる。混入させたモデルマイクロクラックの大きさが 15×15(mm)であるため、その程度の波長に対応する周波数（およそ 300kHz）以上における減衰が顕著になっている。このことから、ここで生じた減衰がモデルマイクロクラックの存在に起因したものであることが推測される。この減衰傾向を平均周波数を用いて評価すると、図 4.6.4 に示すように、モデルマイクロクラック量の増加とともに平均周波数は減少する。

Martin⁴⁻²⁴⁾らは、均一弾性体中に存在する Penny 型クラックによる弾性波の散乱現象を理論的に説明している。ここで、Penny 型クラックとは、図 4.6.5 に示すような弾性体内の不連続面であり、上記のプラスチック小片と類似したものと考えることができる。Martin らによれば、Penny 型クラックに対して垂直に弾性波が入射した場合、クラックの存在により散乱される弾性波エネルギーは、図 4.6.6 のようになることが示されている。図中の縦軸の散乱断面積比は、散乱体による弾性波の散乱の程度を表す指標であり、値が大きいほど散乱が著しいことを意味している。また横軸 kD は、波数 k と Penny 型クラックの直径 D の積であり、次式で表されるように、波長の逆数、あるいは周波数に比例した量である。

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{V} \quad (4.6.1)$$

ここで、 λ ：波長、 f ：周波数、 V ：伝播速度である。この図より、 $kD=4$ を境に弾性波の散乱現象が大きく異なっていることがわかる。 $kD \leq 4$ であれば、クラックの直径に対

して弾性波の波長が比較的長いため、クラックによる弾性波の散乱はあまり顕著ではないが、 $kD \geq 4$ の場合には、クラックの直径に対して弾性波の波長が著しく短いため、波長の大きさにかかわらず弾性波の散乱が顕著である。本実験の場合、プラスチック小片の1辺の長さは14.1mm、弾性波伝播速度は4.9km/sであるから、 $kD=4$ に相当する弾性波の周波数は、約220kHzとなる。実験結果においても、200kHz以上の周波数範囲において、周波数分布の減衰傾向がプラスチック小片の混入量ごとに大きく異なっており、実験結果の妥当性を示すことができる。

以上より、プラスチック小片のような不連続部分がコンクリート中にランダムに分散して存在すると、弾性波伝播速度はあまり変化しないものの、周波数分布における高周波域の減衰が著しくなることが明らかとなった。これは、コンクリート中の不連続部分において、弾性波の散乱・反射が発生し、その不連続部分のスケールに相当する周波数範囲において弾性波の減衰が生じるためと考えられる。したがって、コンクリート中におけるマイクロクラックの存在は、透過弾性波の周波数特性に反映されるものと推測される。

4-6-3 実際のマイクロクラックに関する検討

ここでは、上記のモデルマイクロクラックによる検討結果の妥当性について検証するため、実際にコンクリート中に発生したマイクロクラックを対象として、マイクロクラック発生量と弾性波伝播挙動の関係について検討を行った。本研究では、コンクリート中にランダムに分散したマイクロクラックを発生させるため、コンクリート円柱供試体に対して一軸圧縮荷重を行った。荷重により発生したマイクロクラック量を断面観察を行うことにより定量化し、それと弾性波伝播速度および周波数特性の関係について調べた。さらに、コンクリート中の骨材量、マイクロクラックの方向性およびマイクロクラックの開閉状態についても検討を行った。

a) 一軸圧縮荷重により発生するマイクロクラックと弾性波伝播挙動の関係

実験概要

4-6-2においては、コンクリート中のマイクロクラックをプラスチック小片によ

りモデル化して供試体により検討を行ったが、ここでは実際のマイクロクラックが弾性波の伝播挙動に及ぼす影響について調べた。コンクリート中にランダムに分散したマイクロクラックを発生させるため、円柱供試体に対して一軸圧縮载荷を行った。あらかじめ計測した破壊荷重 (420kN) の 20、40、60、80%まで载荷を行った供試体と载荷を行っていない供試体の弾性波透過試験結果を比較した。コンクリートの練混ぜに用いた材料および配合は、表 4.4.2 および表 4.4.3 中の No.3 に示すとおりである。

コンクリート中におけるマイクロクラックの発生量を評価するため、以下に述べるような断面観察を行った。すなわち、载荷を行った供試体を軸方向にダイヤモンドカッターで切断し、その切断面を十分に水洗いした。次に切断面を乾燥させた後、その周囲にガムテープを数層重ねて貼ることにより「土手」を作り、その内部に赤色インクを注ぎ、切断面にインクを浸透させた。そして、再び切断面を十分乾燥させインクを定着させた後、その表面全体を電動カップブラシを用いて研磨することにより、周囲よりインクが深く浸透しているマイクロクラック部分を浮き出させた。この観察面の 1 例を写真 4.6.1 に示す。これは、破壊荷重の 80%まで载荷を行った供試体の断面写真である。このようにして得られるマイクロクラック発生状況を OHP フィルムに写し取り、画像解析装置を用いてマイクロクラック総長を、ボンドクラック (骨材-マトリックス間) およびマトリックスクラックにわけて算出した。最終的に、これらの総延長を観察面の断面積で除することにより得られる「クラック密度」を用いて、マイクロクラック発生量を定量化し、それと弾性波伝播挙動の関係について検討を行った。なお弾性波透過試験は、4-6-2 の場合と同様に行った。

実験結果および考察

先行载荷を受けたコンクリート中におけるマイクロクラック発生量を図 4.6.7 に示す。これより、先行载荷荷重の増加にともなって、ボンドクラックの発生量は単調に増加しているが、マトリックスクラックの発生量にはあまり変化がみられないことがわかる。したがって、これらの供試体中においては、骨材-モルタル間にマイクロクラックが発生しているものの、マトリックス部分はあまり変化していないといえる。この結果は、4-6-2 におけるモデルマイクロクラックの場合と同様であり、コンクリート中における弾性波伝播挙動もモデルマイクロクラックを含むコンクリートと同様なものとなることが推測される。

図 4.6.8 に、先行載荷荷重の増加にともなう弾性波伝播速度の変化を、図 4.6.9 に、同じく周波数分布の変化を示す。このように、先行載荷荷重が増加し、コンクリート中におけるマイクロクラック発生量が増加しても弾性波伝播速度は変化しないが、周波数分布における高周波成分が減衰していくことがわかる。この高周波成分の減衰を平均周波数を用いて定量化すると、図 4.6.8 のようになり、高周波成分の減衰を的確に捉えることができる。またモデルマイクロクラックの場合と比較して平均周波数の変化量が小さいのは、実際のマイクロクラックにはクラック面が部分的に接触している箇所が存在することや、その厚さがモデルマイクロクラックよりも薄いためであると考えられる。

以上より、実際のマイクロクラックが発生している場合においても、4-6-2 のモデルマイクロクラックの場合と同様な結果が認められ、本実験結果の妥当性が確認できた。

b) 骨材量の異なるコンクリートを用いた検討

上記 a) より、マイクロクラックの存在は透過弾性波の周波数分布における高周波域の減衰をもたらすことが示された。しかしながら、マイクロクラック、特にボンドクラックの発生量は、コンクリート中の骨材量に依存する可能性がある。そこで骨材量を変化させた供試体を作製し、4-6-2 の a) の場合と同様な検討を行うことにより、骨材量の違いが高周波成分の減衰程度に及ぼす影響について検討を行った。

実験概要

コンクリートの練混ぜに際しては、表 4.4.2 に示す材料を用いて、表 4.4.3 中の No.4 の配合条件を採用した。コンクリートの W/C は、4-6-2 の a) と同様に 0.50 とし、骨材体積濃度を 55% (粗骨材体積濃度 : 30%) とした。このような条件で作製した円柱供試体 ($\phi 100 \times 200(\text{mm})$) に対して、あらかじめ計測した破壊荷重の 20、40、60、80(%)まで載荷を行い、上記 a) の場合と同様に弾性波透過試験を行った。

実験結果および考察

図 4.6.10 に、骨材体積濃度が 55% の場合の弾性波伝播速度および周波数分布の平均周波数の変化を示す。骨材体積濃度が 68% の場合の上記 a) の結果を比較すると、4-4-4 でも述べたように、骨材量の減少により、無載荷の場合の弾性波伝播速度は増加し、平均周波数は減少している。しかしながら、載荷を受けた後の挙動については、骨材量に

かわらず同様な傾向を示している。すなわち、載荷荷重の増加とともに平均周波数は低下するものの、弾性波伝播速度には変化がみられない。これは、上記a)の場合と同様に、骨材体積濃度が55%の場合においても、載荷によりマイクロクラックが発生したことによると考えられる。また先行載荷荷重の増加にともなう平均周波数の変化量に着目すると、上記a)の場合（骨材体積濃度：68%）が初期値の18%であるのに対し、骨材体積濃度が55%の場合には13%となり、骨材量が多いものほど平均周波数の変化量が大きかった。これは、骨材量が多いものほど、骨材の存在自体による散乱程度が著しくなることに加えて、弾性波の散乱・反射源となるコンクリート内部のマイクロクラックの潜在的な発生源が多くなるためと考えられる。

以上より、骨材量の多少にかかわらず、マイクロクラックの存在により周波数分布の高周波域が減衰するものの、その変化量は骨材体積濃度に依存することが示された。また弾性波伝播速度はマイクロクラックの存在には鈍感であることがわかった。

c) マイクロクラックの方向性に関する検討

コンクリート供試体に対して一軸圧縮載荷を行うことにより、ランダムに分散したマイクロクラックが発生させた場合、載荷方向とマイクロクラックが卓越して発生する方向に何らかの相関があることが推測される。もし何らかの相関が存在した場合、弾性波伝播挙動も伝播方向ごとに変化することが考えられる。以上までの検討においては、弾性波の伝播方向と載荷方向は同一であったが、ここでは立方体供試体を作製し、載荷方向に対して直角方向にも弾性波透過試験を行い、マイクロクラックを含むコンクリート中の弾性波伝播挙動の方向依存性について検討を行った。

実験概要

コンクリートの使用材料および配合は、表 4.4.2 および表 4.4.3 中の No.7 に示すとおりであり、作製した供試体の形状は $150 \times 150 \times 150(\text{mm})$ の立方体である。この供試体に対して、あらかじめ計測した破壊荷重 (750kN) の 20、40、60、80(%)まで一軸圧縮荷重を加え、コンクリート中にマイクロクラックが発生させた。その後、載荷方向に対して同一方向と、それと直角方向に弾性波を伝播させ、その伝播速度および周波数分布の平均周波数を算出した。なお弾性波透過試験の概要は、4-6-2のa)の場合と同一である。

実験結果および考察

図 4.6.11～12 に、立方体供試体の載荷方向とそれに直角方向に対して弾性波を伝播させた場合の、先行載荷荷重の増加にともなう弾性波伝播速度および周波数分布の平均周波数の変化を示す。これより、先行載荷荷重の増加にともなってコンクリート中のマイクロクラックが増加しても、弾性波の伝播方向にかかわらず伝播速度はあまり変化しないことがわかる。また周波数分布の平均周波数についても、弾性波の伝播方向によらず同様な減少傾向を示していることがわかる。このことは、載荷により生じたマイクロクラックの発生状況に載荷方向に対する顕著な依存性が存在しないことによると考えられる。写真 4.6.1 に示す断面観察の結果からみても、コンクリート中におけるマイクロクラックの発生状況は極めて複雑であり、その方向もランダムで不規則である。これは、コンクリートが不均一な材料であるがゆえに、たとえ一方向載荷を行ったとしても、ある特定の方向のみにマイクロクラックが進行しないためである。すなわち、マイクロクラックは一般に、粗骨材下面のブリーディングによる脆弱層を起点に発生するといわれているが、粗骨材の形状および配置が不規則なためにマイクロクラックの発生方向は必ずしも定まらない。さらに発生したひび割れが進展する際にも、その進展方向は載荷の方向により定まるというよりは、むしろ周囲に存在する粗骨材あるいは粗大空隙などとの相互的な位置関係により定まる。このため、圧縮力を受けるコンクリート内部に発生するマイクロクラックの方向は、載荷方向に対してあまり依存しなくなるものと考えられる。

以上より、圧縮力を受けることにより、コンクリート中にランダムに分散して発生したマイクロクラックが弾性波伝播挙動に及ぼす影響を検討する際には、その方向性について特に考慮する必要はないものと考えられる。

d) マイクロクラックの開閉状態に関する検討

以上までの検討により、コンクリート中におけるマイクロクラックの存在は透過弾性波の周波数分布における高周波成分を減衰させることが明らかとなった。しかし、これまでの検討においてはすべて荷重が作用していない状態、いわばマイクロクラックが「閉合した」状態を対象としたものであった。しかしながら、荷重が作用しマイクロクラックが「開口した」状態では、その部分における弾性波の散乱・反射が著しくなり、高周波成分の減衰がさらに顕著なものとなると考えられる。そこで荷重が作用した状態で弾性波透過試験を行い、その際の弾性波伝播挙動と除荷後に得られる弾性波伝播挙動を比較すること

により、マイクロクラックの開閉状態が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討を行った。

実験概要

用いた供試体は、載荷中においても弾性波透過試験を行えるようにするため、コンクリート直方体（100×100×200(mm)）とした。コンクリートの練混ぜに用いた材料および配合は、表 4.4.2 および表 4.4.3 中の No.3 に示すとおりである。この供試体に対してあらかじめ計測した破壊荷重の 80%の荷重を負荷した状態で、供試体側面から反対側の側面に対して弾性波を透過させ、マイクロクラックが開いた状態での弾性波伝播速度および透過弾性波の周波数分布を計測した。そして除荷後、同一箇所において弾性波透過試験を行い、マイクロクラックが閉じた状態での計測を行った。なお弾性波透過試験に関する条件等は、4-6-2のa)の場合と同一である。

実験結果および考察

載荷中および除荷後に計測された弾性波伝播速度ならびに透過弾性波の周波数分布の平均周波数を図 4.6.13 に示す。これによれば、弾性波伝播速度には差違が認められないものの、平均周波数においては、載荷中すなわちマイクロクラックが開いた状態の方が小さくなっており、マイクロクラック部分における弾性波の散乱が著しくなっていることを示している。このように、コンクリート中におけるマイクロクラックの開閉状態は透過弾性波の周波数分布に影響を及ぼすため、外力が作用しているコンクリートに対して弾性波透過試験を行う際には注意が必要である。

4-6-4 まとめ

以上のように、コンクリート中にランダムに分散して存在するマイクロクラックは、コンクリート中を伝播する弾性波の伝播速度にはほとんど影響しないものの、周波数特性を大きく変化させることが示された。コンクリート中におけるマイクロクラック、特に骨材-マトリックス間のボンドクラックの存在は、マトリックス部分の空隙率に影響しないため、弾性波伝播速度に変化をもたらさなかった。しかしながらマイクロクラックの存在は、

弾性波の散乱・反射源となるため、マイクロクラックを含むコンクリート中を透過した弾性波の周波数分布の減衰を生じさせた。マイクロクラックの存在量の増加とともに周波数分布における高周波域の減衰が顕著となった。その影響を大きく受ける周波数範囲は、マイクロクラックのスケールに相当する範囲と一致していた。

以上より、コンクリートの劣化評価を弾性波伝播特性を利用して行う際に、透過弾性波の周波数分布に着目すれば、コンクリート中に存在するマイクロクラックに関する情報を得ることができるものと考えられる。

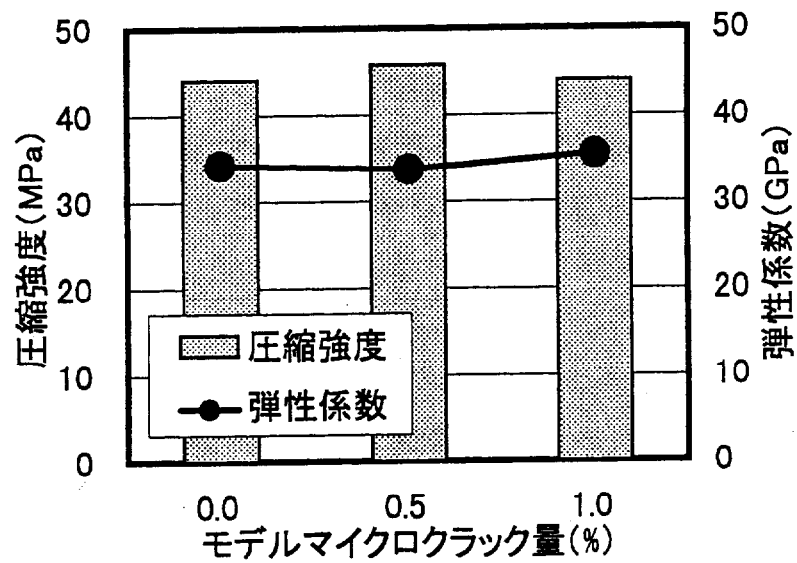


図 4.6.1 モデルマイクロクラック量の変化に伴うコンクリートの力学特性の変化

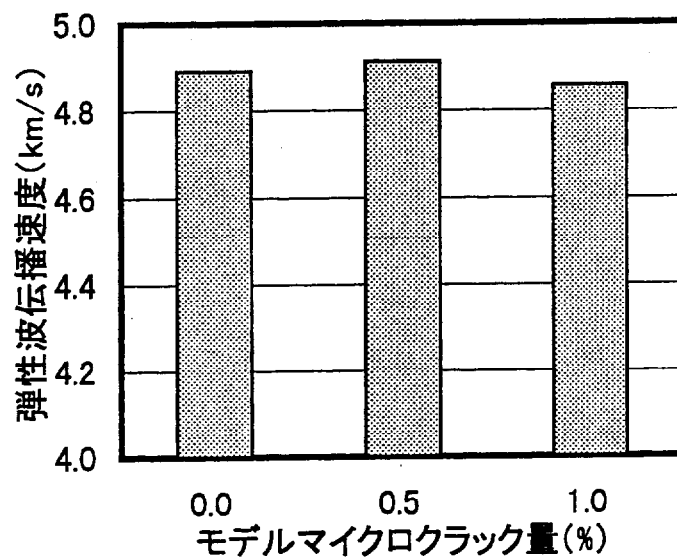


図 4.6.2 モデルマイクロクラック量の変化に伴う弾性波伝播速度の変化

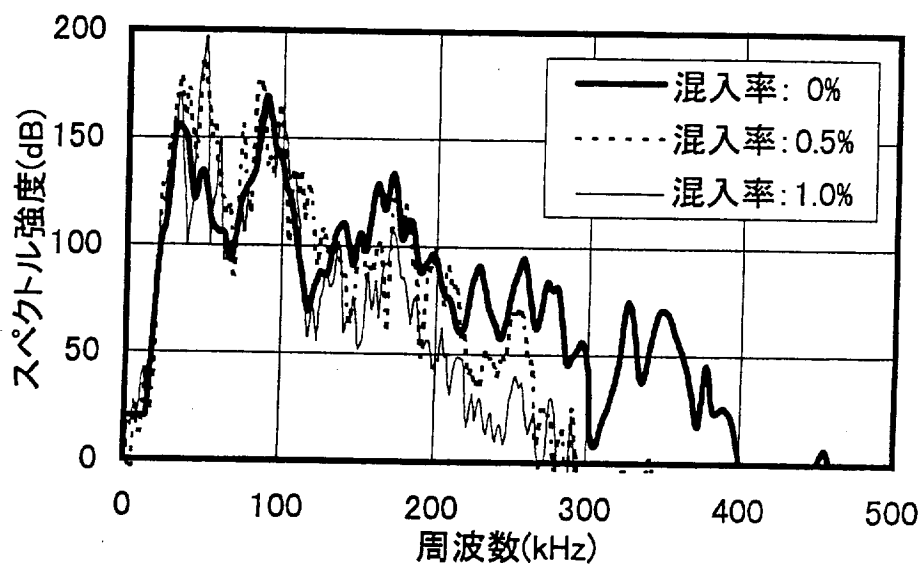


図 4.6.3 モデルマイクロクラック量異なる場合の周波数分布

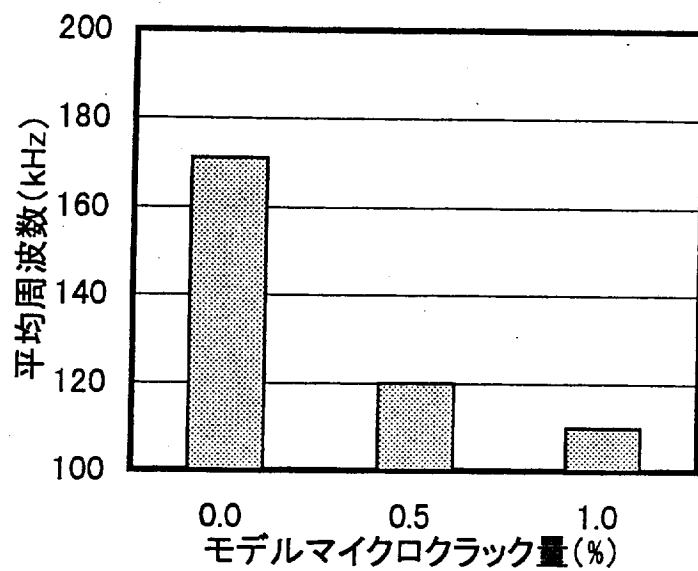


図 4.6.4 モデルマイクロクラック量の変化にともなう平均周波数の変化

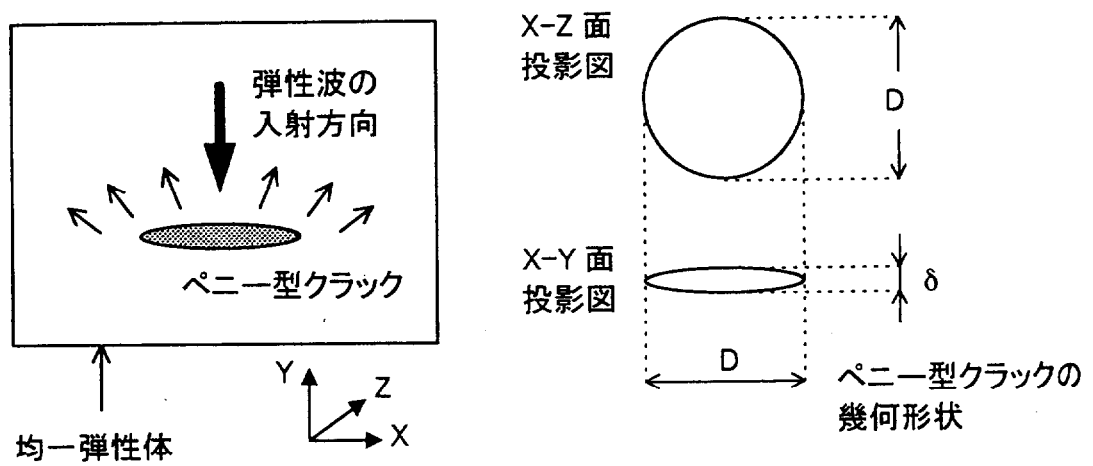


図 4.6.5 ペニー型クラックに対する弾性波の入射

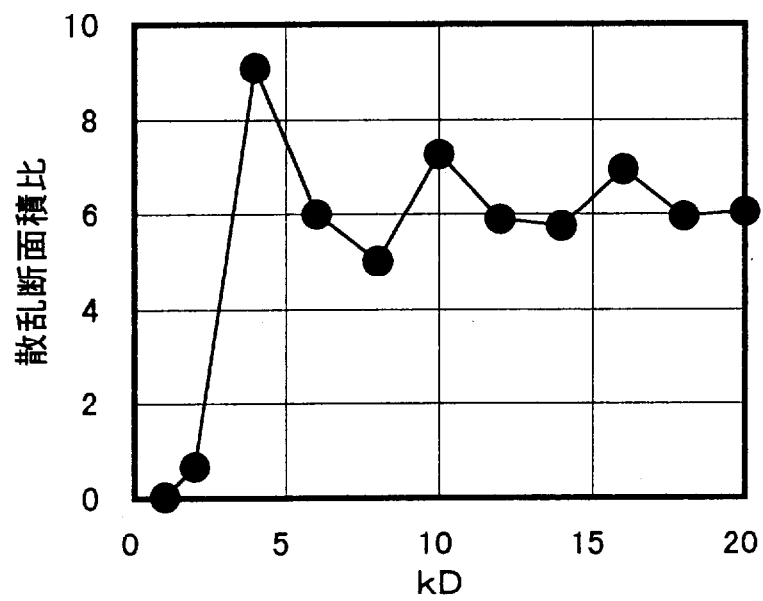


図 4.6.6 ペニー型クラックによる弾性波の散乱⁴⁻²⁴⁾

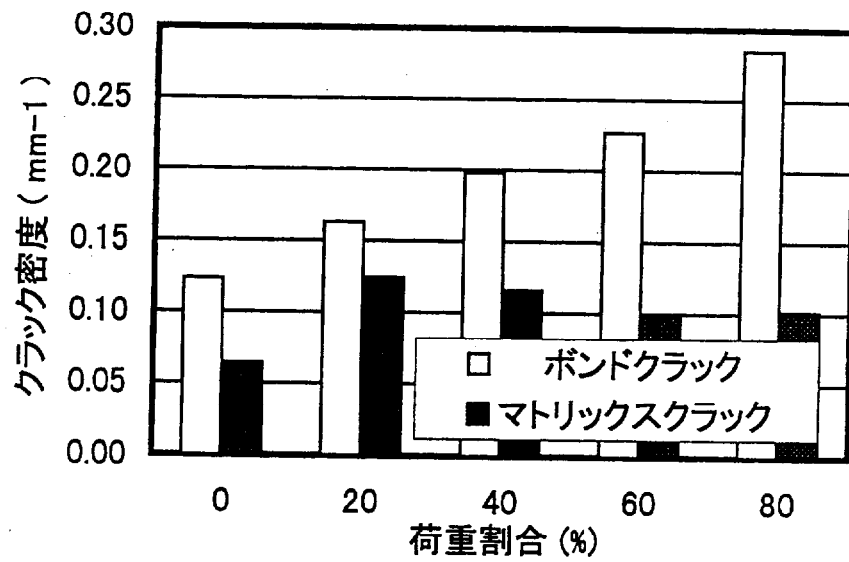


図 4.6.7 先行載荷荷重の増加に伴うマイクロクラック量の変化

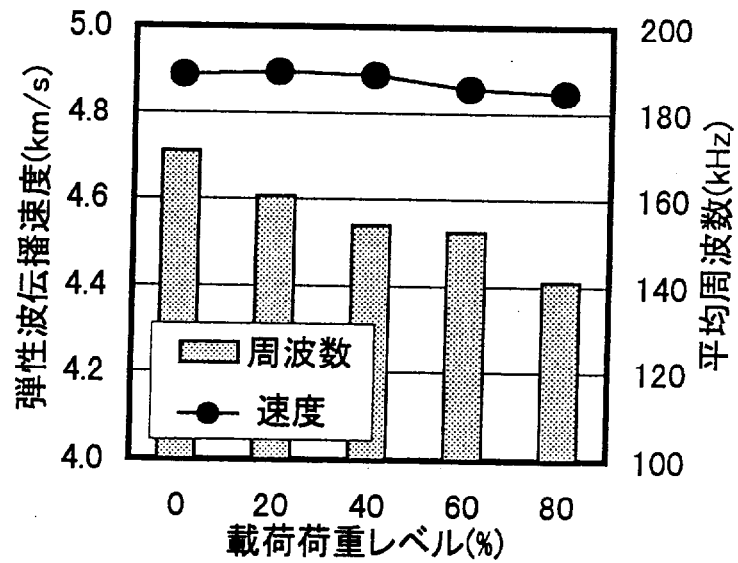
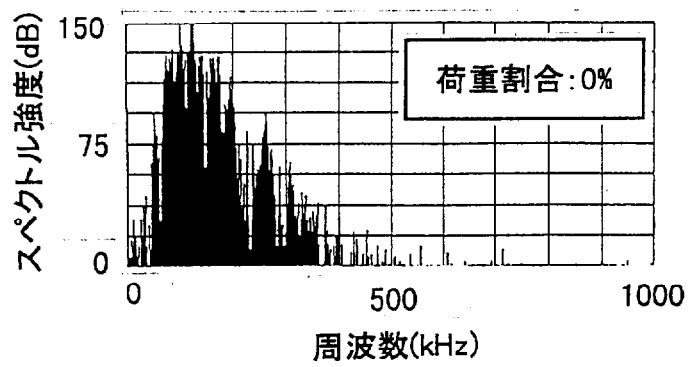
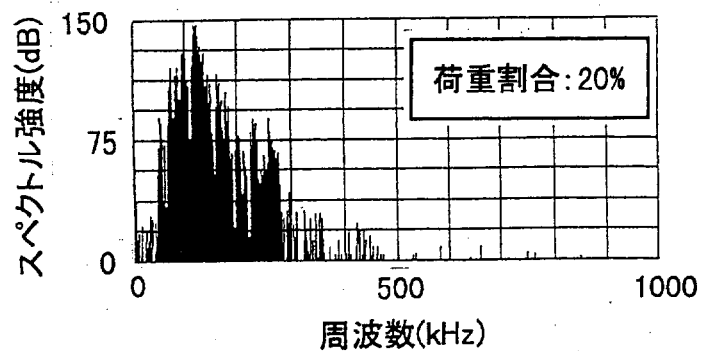


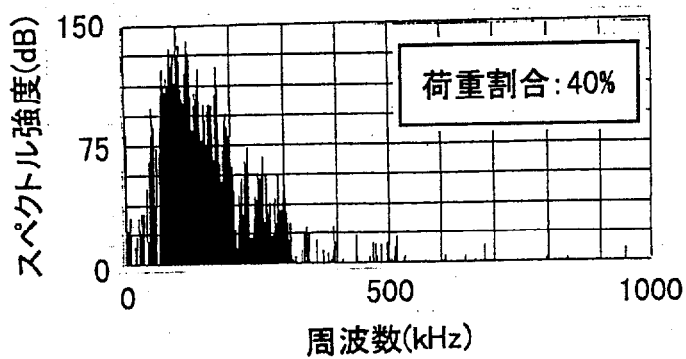
図 4.6.8 先行載荷荷重の増加に伴う弾性波伝播挙動の変化



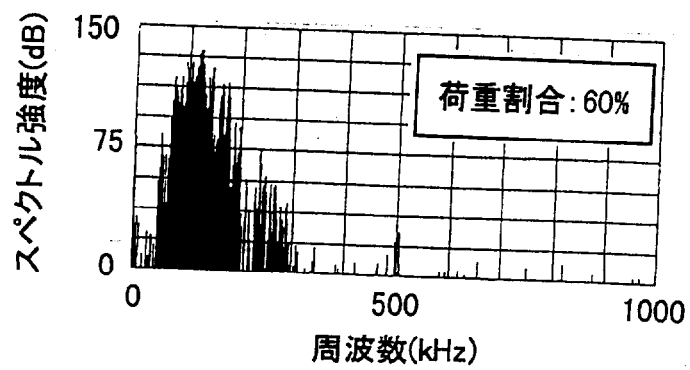
(a)先行載荷荷重レベル:0%



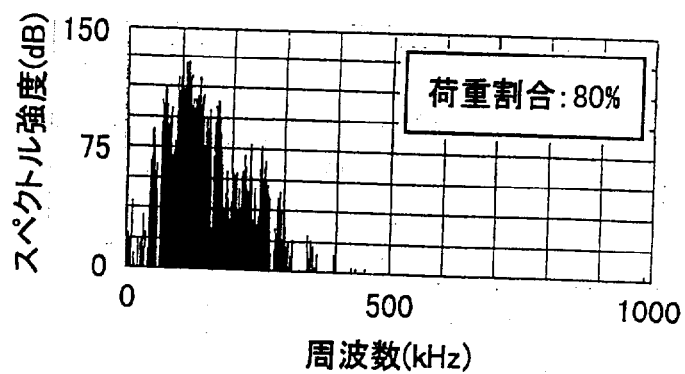
(b)先行載荷荷重レベル:20%



(c)先行載荷荷重レベル:40%



(d) 先行載荷荷重レベル: 60%



(e) 先行載荷荷重レベル: 80%

図 4.6.9 先行載荷荷重の増加にともなう周波数分布の変化

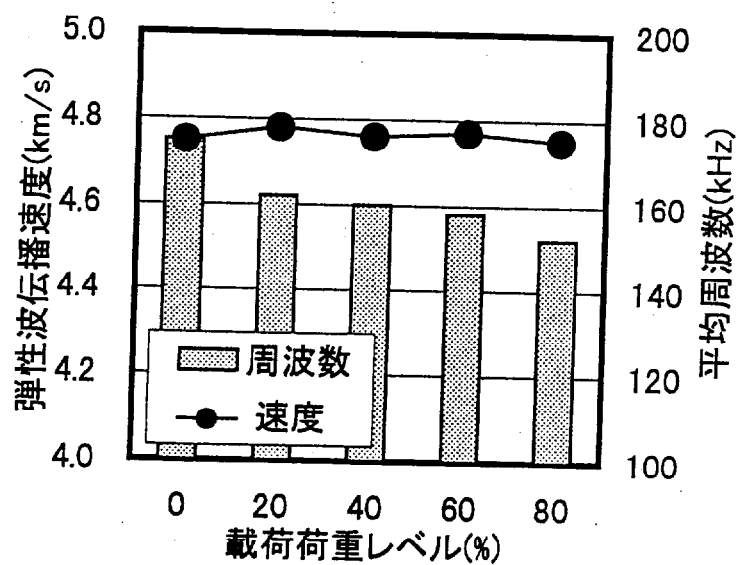


図 4.6.10 骨材量が異なる場合の弾性波透過試験結果(体積濃度: 55%)

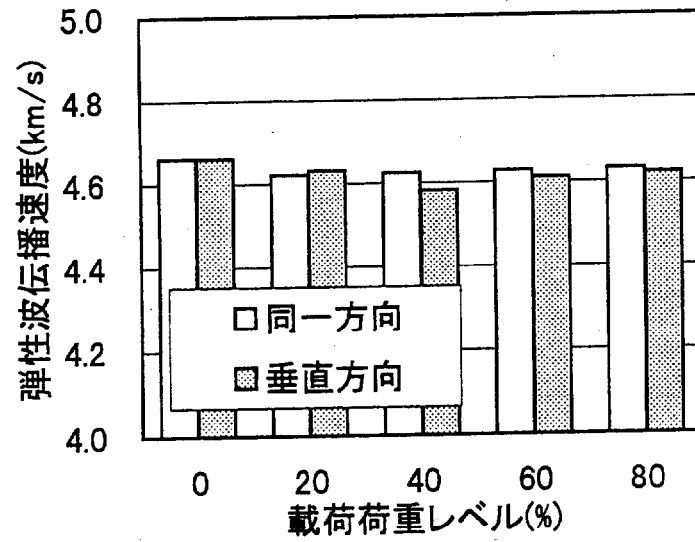


図 4.6.11 弾性波の伝播方向が伝播速度に及ぼす影響

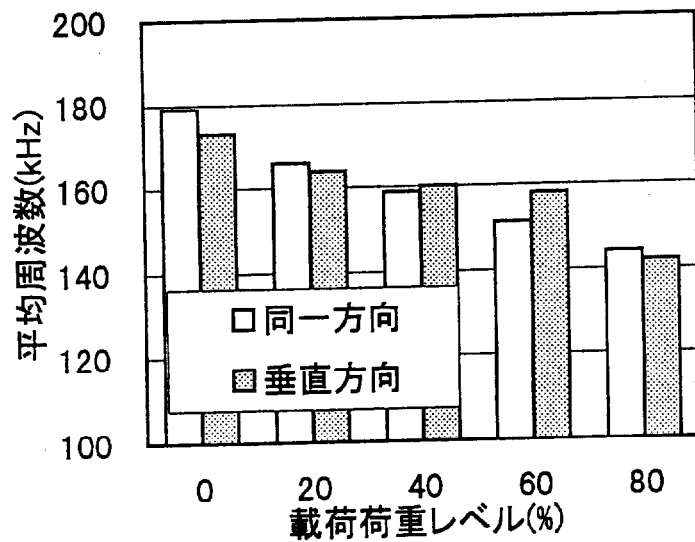


図 4.6.12 弾性波の伝播方向が平均周波数に及ぼす影響

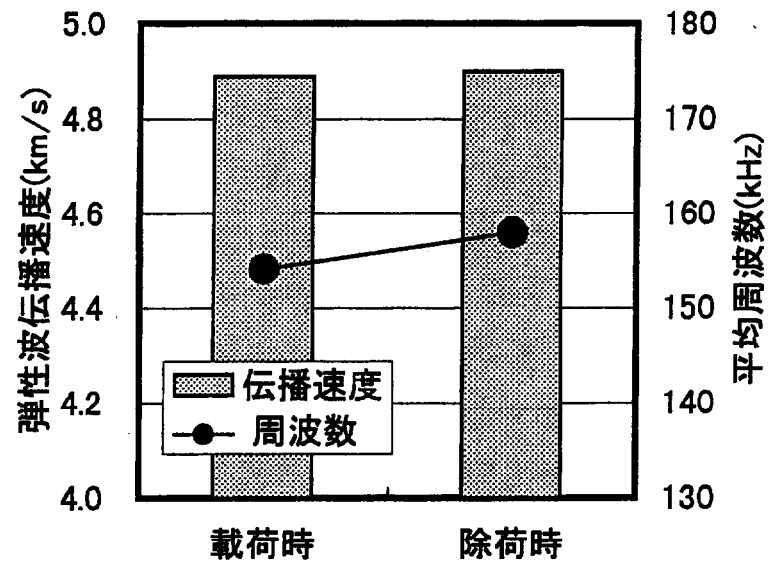


図 4.6.13 マイクロクラックの開閉状態が弾性波伝播挙動に及ぼす影響

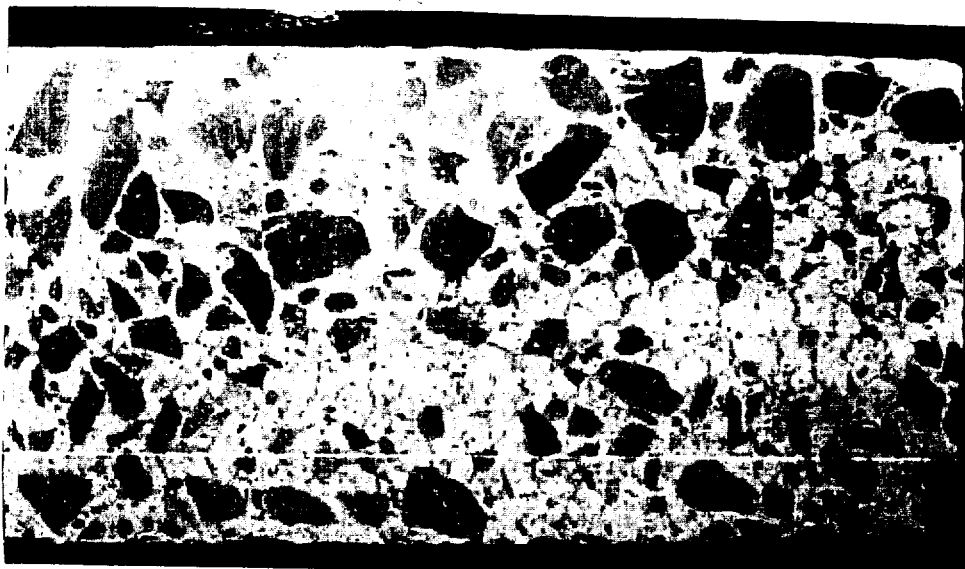


写真 4.6.1 コンクリート断面に現れたマイクロクラックの状況
(先行載荷荷重 80%の場合)

4-7 コンクリートの施工条件が弾性波伝播挙動に及ぼす影響

4-7-1 概説

コンクリートの施工に際しては、適切な使用材料・配合条件のもとで、計量、練混ぜ、運搬（ポンプ圧送）、打設、締固め、表面仕上げ、養生の各工程が行われる。これらを的確に実施することは、所要の力学特性を有し、耐久性に優れたコンクリートを製造する上で欠かすことができない。これらの施工条件の中でも、特に締固め条件および養生条件は、硬化コンクリートの材料特性に多大な影響を及ぼす。適切な締固めが行われていない場合には、硬化コンクリート内部にエントラップドエアなどの粗大空隙が存在することとなり、また過剰な締固めは材料分離を生じさせる。この材料分離は、コンクリートの耐凍害性を損ねたり⁴⁻²⁵⁾、塩化物イオンの浸透を容易にしたりする⁴⁻²⁶⁾と言われている。また外力作用時においては、内部応力分布の偏りや応力集中を引き起こすことも懸念される。

また養生条件は、セメントの水和に必要な水分の供給条件を決定するものであり、また過度に乾燥した条件下においては乾燥収縮ひび割れを生じさせるなど、硬化コンクリートの性質を大きく左右するものであり、使用セメントの種類および用途に応じて標準的な養生期間が示されている⁴⁻²⁷⁾。ここでは、硬化コンクリートの材料特性に多大な影響を及ぼす締固め条件および養生条件を取り上げ、それらの違いが弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討を行うこととした。

4-7-2 コンクリートの締固め条件に関する検討

ここでは、過剰な締固めによる粗骨材の沈降がコンクリートの弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討を行うこととした。過剰な締固めによるブリーディングの影響については、ブリーディング水により骨材下面に脆弱層が形成されるものと考えられるため、4-4-5で述べた骨材界面性状の影響として捉えることができる。粗骨材の過度な沈降により、粗骨材の鉛直方向分布に不均一が生じると、4-4-4で述べたように弾性波伝播挙動に多大な影響を及ぼす骨材量が部分的に変化することとなる。このことについて検討を

行うため、人為的に材料分離を生じさせたコンクリート供試体を用いて、以下に示す検討を行った。

a) 実験概要

用いた供試体は、 $\phi 100 \times 200(\text{mm})$ のコンクリート円柱であり、W/C は材料分離のしやすさを考慮して 0.65 とした。検討ケースは、材料分離抵抗性を向上させるため分離低減剤を用いたケース（配合は表 4.4.3 中の No.9）、ならびに分離低減剤を用いずに棒状パイププレートによる締固め時間を 0、5、10(sec)と変化させたケース（配合は表 4.4.3 中の No.12）の 4 通りとした。いずれのケースにおいても、エントラップドエアを除去するために型枠側面を木づちで叩いた。コンクリートの作製に用いた材料を表 4.4.2 に示す。

材料分離による粗骨材の沈降程度を評価するため、図 4.7.1 に示すように、各供試体をダイヤモンドカッターを用いて軸方向に切断し、切断面における粗骨材の分布状況を画像解析装置により解析した。この際、粗骨材含有量の鉛直方向分布について検討を行うため図 4.7.1 に示すような画像解析範囲を設定した。この範囲において粗骨材断面が占める面積を算出し、計測範囲の面積（ $40 \times 100(\text{mm})$ ）で除することにより得られる「粗骨材占有率」を用いて粗骨材の分布状況を評価した。

これらの供試体に対する弾性波透過試験は、供試体軸方向およびそれと直角方向に行った。供試体軸と直角方向の計測に際しては、弾性波伝播速度の鉛直方向分布について検討するため、上記の画像解析範囲ごとに弾性波伝播速度の計測を行った。なお弾性波透過試験に関する諸条件は、前述の 4-2 の場合と同一とした。

b) 実験結果および考察

図 4.7.2 に、各検討ケースごとに得られた粗骨材占有率と弾性波伝播速度の鉛直方向分布を示す。これらより、分離低減剤を用いて材料分離抵抗性を高めたケースにおいては、粗骨材の沈降は認められず、また弾性波伝播速度も鉛直方向にわたってほぼ一様となっていることがわかる。一方、分離低減剤を用いていないケースにおいては、締固め時間の増加にともなって粗骨材の沈降が著しくなり、供試体上部において極端に粗骨材占有率が小さくなっている。それにともなって鉛直方向の弾性波伝播速度分布にも変化が生じており、供試体下部ほど弾性波伝播速度が大きくなっている。これは、マトリックス部分よりも弾性波伝播速度の大きい粗骨材の含有量が伝播経路内で増加したことによるものである。こ

の傾向は、前述の4-4-4の骨材量を変化させたコンクリートを用いた検討結果とよく対応していることから、前述の4-4-4場合と同様に、骨材量と弾性波伝播速度の関係について検討を行った。各検討ケースの結果を、弾性波伝播速度とそれに対応する粗骨材占有率の関係として整理したのが、図 4.7.3 である。これによれば、骨材量の増加とともに弾性波伝播速度が増加することが示されている。そこで、画像解析により得られた粗骨材占有率を粗骨材含有率として、4-3におけるモデル骨材供試体の場合と同様に、粒子分散型複合材料に対して定式化された弾性係数を用いて弾性波伝播速度を理論的に算出した。ここでは、コンクリートをモルタル・マトリックス中に異なる含有率で粗骨材が存在しているものとして捉えて解析を行った。用いた材料定数を表 4.7.1 に示す。このようにして算出された弾性波伝播速度と実測の弾性波伝播速度の対応関係を図 4.7.4 に示す。このように、両者の関係を示す点が原点を通る傾き 45 度の直線近傍に分布しており、材料分離を生じたコンクリートは骨材量が異なるコンクリートとして取り扱うことができることがわかった。また実測値の方が若干小さくなった原因としては、4-4-4と同様に、骨材界面に存在する遷移帯の影響などが考えられる。

一方、供試体軸方向（図 4.7.1 において上下方向）の弾性波伝播速度は、図 4.7.5 に示すように、材料分離の影響をあまり受けていなかった。これは、供試体全体としての粗骨材量がいずれのケースにおいても同一であり、供試体全体としての弾性係数にあまり違いがないことによると考えられる。また打設方向（図 4.7.1 中の上から下）およびそれと反対方向（同、下から上）の計測により得られた弾性波伝播速度にも、ほとんど差違は認められなかった。この際の透過弾性波の周波数分布を図 4.7.6 に示す。この図は、最も材料分離が著しかった締固め時間 10 秒の場合の計測結果であるが、両者の間に顕著な違いは認められなかった。したがって、締固め条件に違いによりコンクリート中における粗骨材の分布状況が変化しても、骨材の総量が同じであれば、その弾性波伝播挙動はあまり変化しないものと考えられる。

以上より、過剰な締固めにより生じるコンクリートの材料分離は、骨材含有量の鉛直方向分布に偏りを生じさせることから、その弾性波伝播挙動も鉛直方向に変化することが示された。本研究の範囲内で得られた鉛直方向の弾性波伝播速度の変化量は、おおよそ 0.5km/sec と比較的大きいものであった。したがって、弾性波を用いてコンクリートの劣化評価を行う場合には、この点について考慮する必要があるといえる。このような骨材含

有量の偏りは、骨材量の異なる場合の検討結果を参考にして取り扱うことができると考えられる。

4-7-3 コンクリートの養生条件に関する検討

以上までの検討においては、いずれのケースにおいても打設直後より水中養生を 56 日間行った供試体を用いてきたが、実際の構造物を考えた場合、その養生条件はさまざまであり、弾性波を用いてコンクリートの劣化評価を実施するためには、コンクリートの養生条件が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について明らかにしておく必要がある。そこで、実構造物において最も一般的に実施されている気中養生と本研究で主に実施している水中養生を対象として、これらの違いによる硬化コンクリートの諸特性の変化を踏まえた上で、それが弾性波伝播速度および透過弾性波の周波数分布に及ぼす影響について検討を行った。

a) 実験概要

用いた供試体は、 $\phi 100 \times 200(\text{mm})$ のコンクリート円柱であり、使用材料および配合を表 4.4.2 および表 4.4.3 中の No.3 に示す。作製した供試体は、気温 20°C 、相対湿度 50% の実験室内において水中養生あるいは気中養生を 56 日間行った。供試体数は各ケース 3 本ずつとした。養生終了後、弾性波透過試験および一軸圧縮試験を実施した。またあわせて、 $\phi 100 \times 50(\text{mm})$ の円柱供試体を作製し、密度・空隙率試験を行った。これらの試験の詳細は、前述の 4-2 の場合と同一である。なお気中養生を行った供試体については、各種試験実施前に 24 時間水中に浸漬し、コンクリート表面の含水状態を水中養生供試体と同一とした。

b) 実験結果および考察

表 4.7.2 に、硬化コンクリートの諸特性を各養生条件ごとに示す。これより、水中養生を行ったコンクリートの圧縮強度、弾性係数および密度は気中養生を行ったものより、大きく、空隙率は小さいことがわかる。気中養生の場合においては、セメントの水和過程において水分の供給が不十分であったこと、あるいは乾燥により微細な乾燥収縮ひび割れが発生していたことなどにより、硬化コンクリートの空隙率が大きくなったものと考えられ

る。そしてこの空隙率の増加が、これまでの検討結果からも明らかなように、セメントペースト・マトリックス部分の空隙率を増加させ、結果的にコンクリートの圧縮強度および弾性係数を低下させたものと推測される。

図 4.7.7 に、弾性波伝播速度の計測結果を示す。これによれば、これまでの検討結果と同様に、空隙率が小さいほど弾性波伝播速度が大きくなる傾向が認められる。そこで、前述の 4-5 におけるマトリックス部分の空隙率が異なるコンクリートによる検討と同様に、マトリックス部分の空隙率を算出し、これと弾性波伝播速度の関係について検討を行った。図 4.7.8 に、養生条件を変化させた場合の実験結果を前述の 4-5 の結果とあわせて示す。これより、養生条件にかかわらず、マトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の間には高い相関関係が存在することがわかる。

図 4.7.9 は、養生条件の違いが透過弾性波の周波数分布に及ぼす影響について示したものである。これによれば、気中養生を行ったコンクリートの方が高周波部分における減衰が顕著になっていることがわかる。これは、マトリックス部分の空隙率に違いにより、骨材との音響インピーダンス差が変化し、骨材界面における弾性波の散乱・反射の程度が異なったことによると考えられる。この場合の周波数分布の平均周波数を図 4.7.7 にあわせて示す。

以上より、養生条件の相違によるコンクリート内部状態の変化は、マトリックス部分の空隙率の変化として捉えることができることがわかった。これは、養生条件によりセメントの水和の進行速度に差違が生じ、マトリックス部分の空隙率が異なったものと考えられる。その結果、前述の 4-5 の場合と同様に、コンクリート中における弾性波伝播挙動にも変化が生じることがわかった。したがって、コンクリートの劣化評価を弾性波の伝播特性を利用して行う際には、コンクリートの養生条件を十分考慮する必要があるといえる。

4-7-4 まとめ

以上のように、コンクリートの施工条件のうちで締固め条件および養生条件の違いが弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討を行った結果、以下に示す知見が得られた。

①締固め条件の影響

過剰な締固めにより骨材含有量の鉛直方向分布に偏りを生じた場合、弾性波伝播挙動も鉛直方向に変化することが示された。骨材の沈降により供試体下部ほど骨材含有量が増加し、弾性波伝播速度も大きくなった。本研究の範囲内で得られた鉛直方向の弾性波伝播速度の変化量は、おおよそ 0.5km/sec と比較的大きいものであった。またコンクリートの打設方向と同一の方向に対して弾性波透過試験を行った結果、骨材の分布状況が異なっても骨材の総量が同じであれば、同様な弾性波伝播挙動が認められた。

②養生条件の影響

養生条件の相違によるコンクリート内部状態の変化は、マトリックス部分の空隙率の変化として捉えることができ、その結果、前述の4-5の場合と同様に、コンクリート中における弾性波伝播挙動にも変化が生じることがわかった。セメントの水和に必要な水分の供給が不十分である気中養生を行った場合、水中養生の場合と比較してマトリックス部分の空隙率が大きくなるため、弾性波伝播速度は小さく、また周波数分布における高周波域の減衰も顕著であった。

このように上記のようなコンクリートの施工条件の違いが弾性波伝播挙動に及ぼす影響は無視できないほど大きいため、弾性波伝播特性を利用してコンクリートの劣化評価を行う場合には、この点について十分に考慮する必要があるといえる。

表 4.7.1 解析に用いた諸量

材料種類	密度 (g/cm^3)	伝播速度 (km/s)	ポアソン比
モルタル	2.15	3.70	0.250
粗骨材	2.61	5.63	0.200

表 4.7.2 養生条件の異なるコンクリートの諸特性

養生条件	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	密度 (g/cm^3)	空隙率 (%)
水中	49.9	34.9	2.365	14.1
気中	43.1	32.4	2.281	15.7

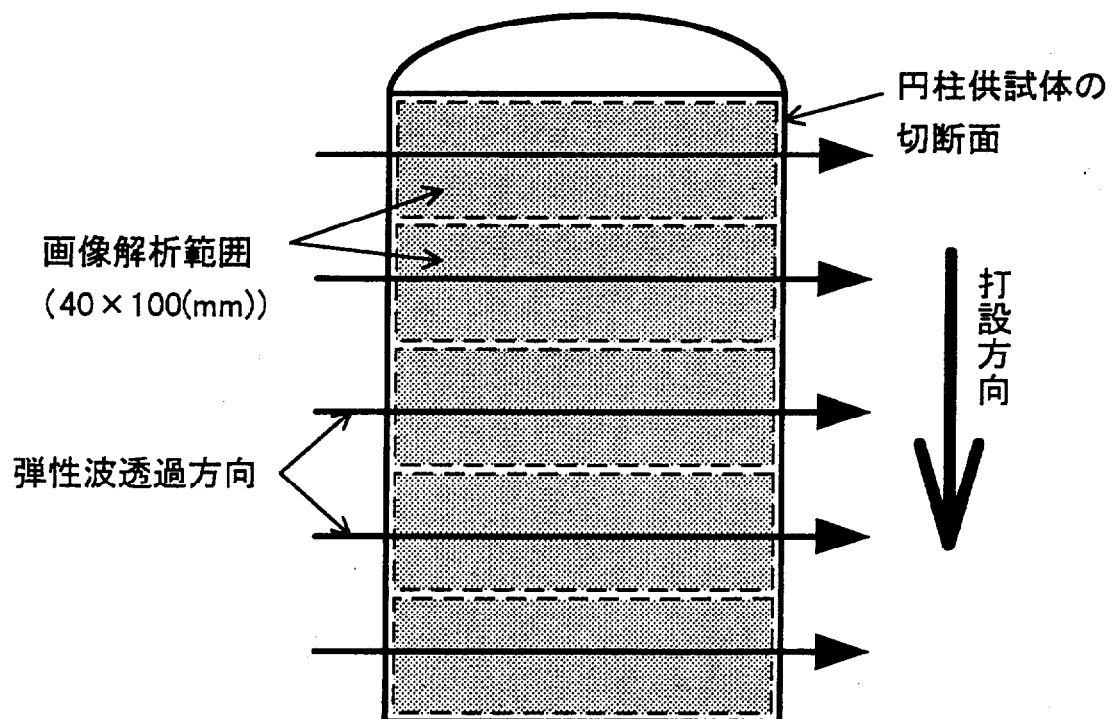
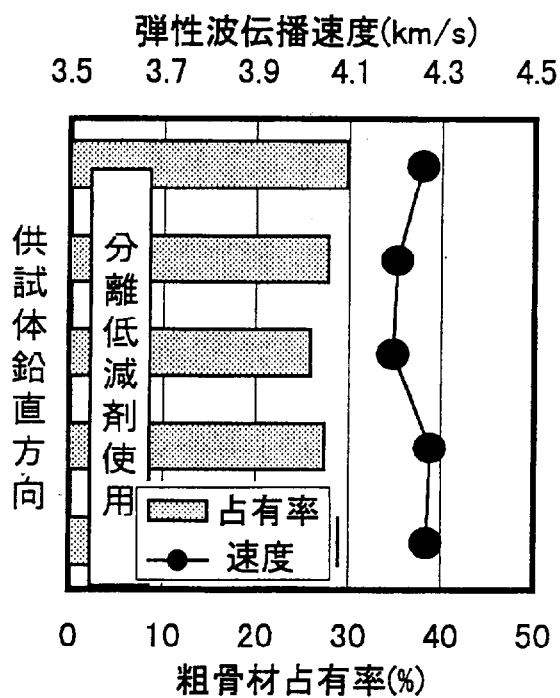
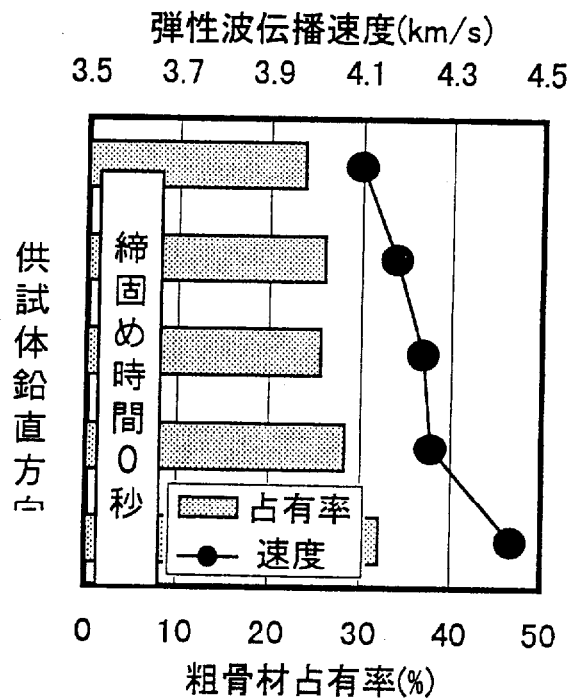


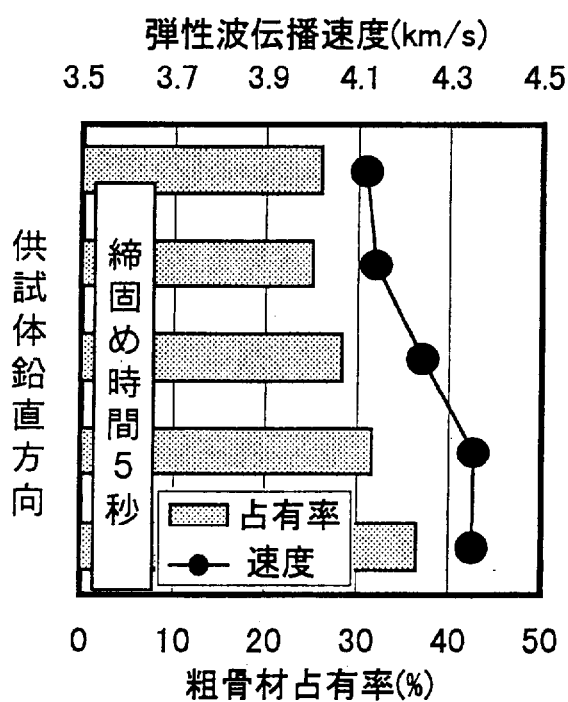
図 4.7.1 供試体切断方向および画像解析範囲



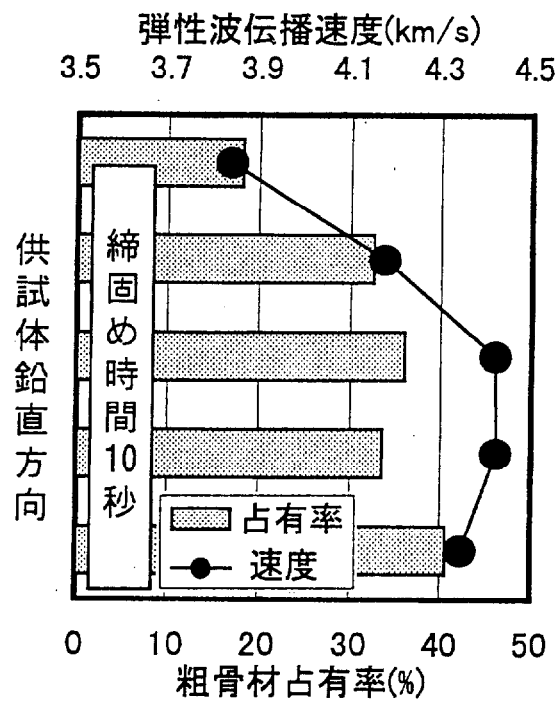
(a)分離低減剤使用



(b)締固め時間0秒



(c)締固め時間5秒



(d)締固め時間10秒

図 4.7.2 材料分離と弾性波伝播速度の関係

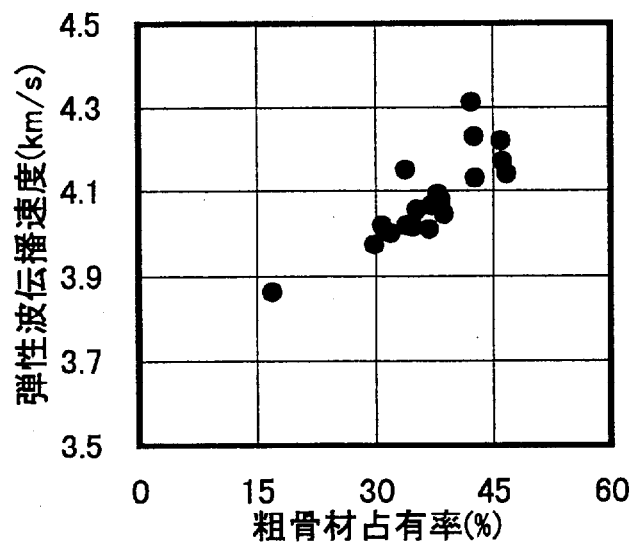


図 4.7.3 粗骨材占有率と弾性波伝播速度の関係

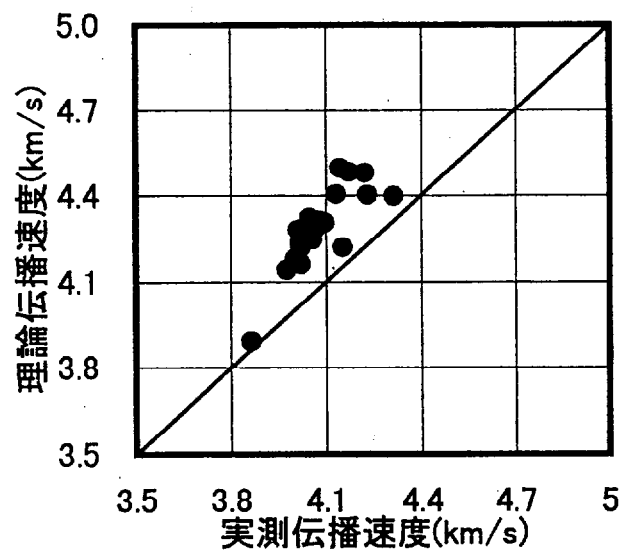


図 4.7.4 理論的に算出した弾性波伝播速度と実測値の比較

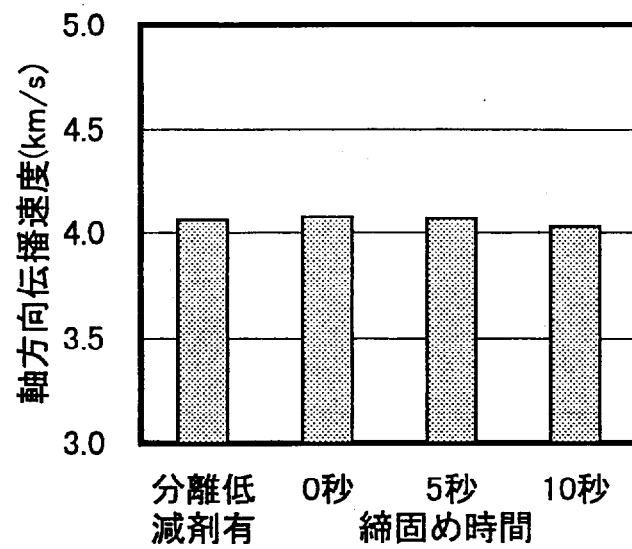


図 4.7.5 供試体軸方向の弾性波伝播速度

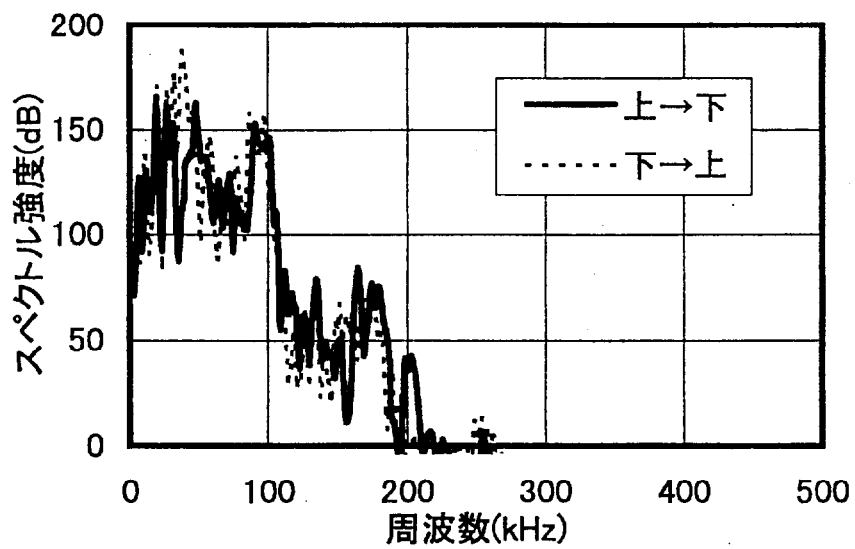


図 4.7.6 骨材の分布状況が周波数分布に及ぼす影響

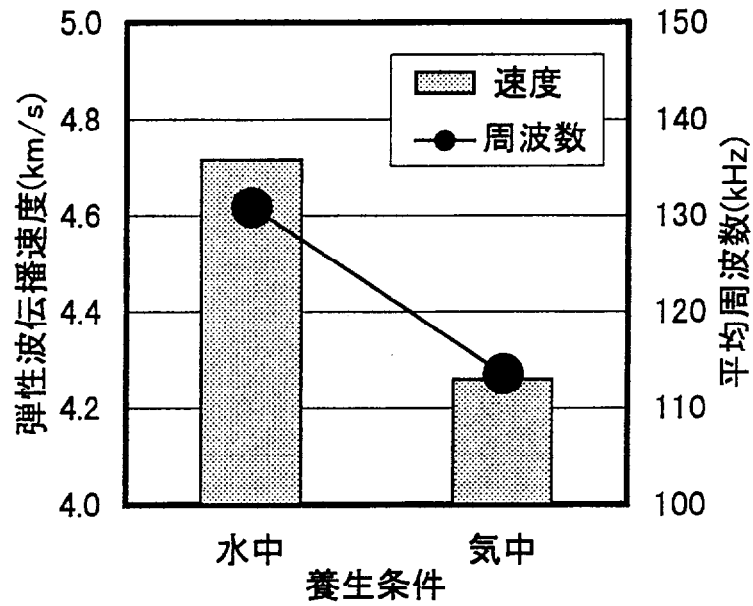


図 4.7.7 養生条件の違いが弾性波伝播挙動に及ぼす影響

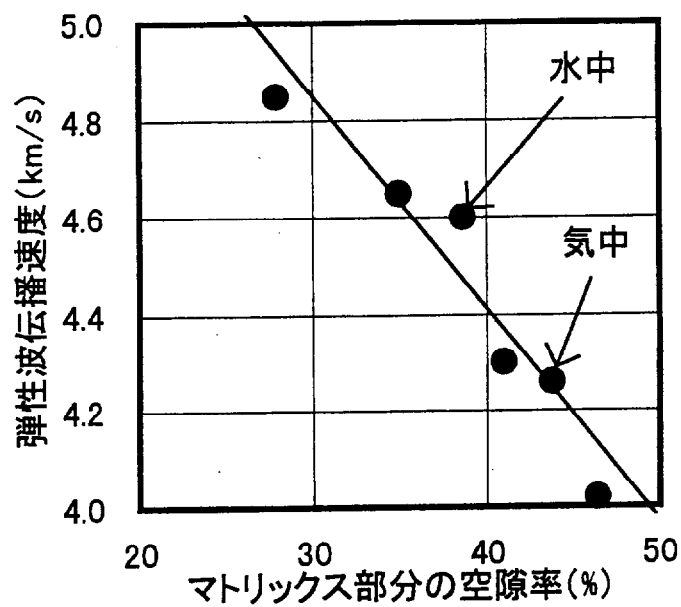


図 4.7.8 マトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の関係

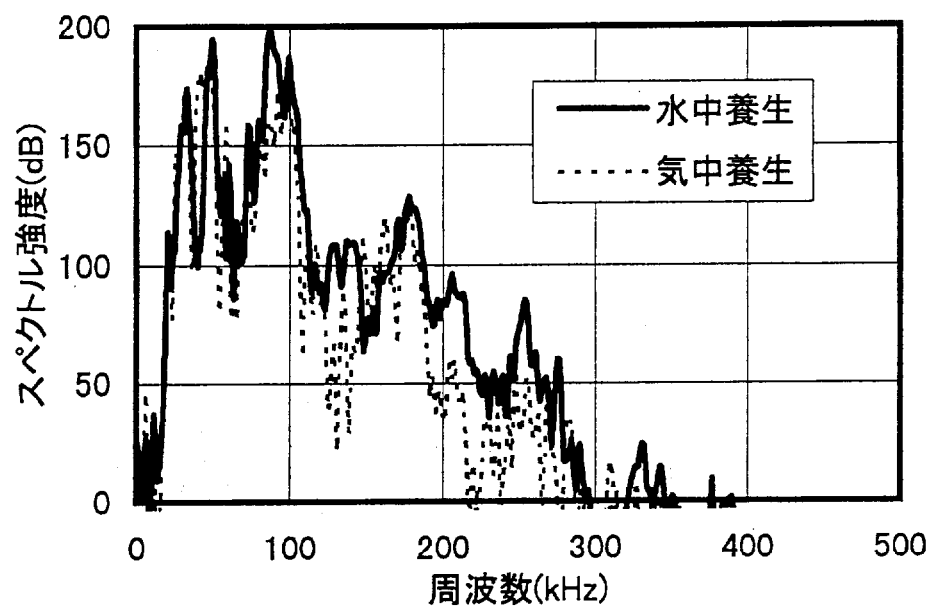


図 4.7.9 養生条件の異なるコンクリートにおいて得られた周波数分布

4-8 本章のまとめ

本章では、コンクリートの劣化評価を弾性波伝播特性を利用して行うための基礎資料を得ることを目的として、コンクリート中における弾性波伝播挙動について検討を行った。この際には、コンクリートを構成材料単体にわけて、それぞれにおける弾性波伝播挙動について検討を行い、続いてこれらが複合してコンクリートとなった場合の基本的な弾性波伝播挙動を明らかにするため、モデル骨材供試体による検討を行った。以上の検討結果を踏まえて、実際のコンクリート供試体を作製し、コンクリートの内部状態の変化と弾性波伝播挙動の関係を明らかにすべく種々の検討を行った。本章で得られた結果を以下に示す。

①コンクリート構成材料単体による検討

- a) セメントペースト単体において、材料内部の密実性を平均的に表していると考えられる空隙率と弾性波伝播速度の間には明確な対応関係が存在することが示された。しかしながら透過弾性波の周波数分布には、W/C の違いによる変化は認められなかった。
- b) 骨材単体中を透過した弾性波の周波数分布は、300kHz 以下においてはセメントペーストとほぼ同様なものであった。
- c) コンクリート構成材料単体、すなわちセメントペーストおよび骨材は均一な弾性体とみなすことができ、コンクリートはこれらの均一弾性体の複雑な複合体であると仮定できることが示された。

②モデル骨材供試体による検討

- a) モデル骨材の直径が大きくなるにつれて、弾性波の周波数分布における高周波域の減衰が顕著となるが、弾性波伝播速度はあまり変化しなかった。
- b) モデル骨材の混入量は、モデル骨材の大きさほどは周波数分布に影響を及ぼさないものの、弾性波伝播速度の支配的要因となる。
- c) 異なる材質のモデル骨材を用いることで、マトリックス部分との音響インピーダンス差を変化させた場合、透過弾性波の高周波域における減衰特性に変化が見られた。
- d) 上記の結果について、粒子分散型複合材料に対して定式化された弾性定数や球形

粒子による弾性波の散乱現象を記述した関係式を用いた理論的検討を行うことにより、定性的にはあるがその妥当性が確認できた。

③コンクリート中の骨材の影響

- a) 弾性波伝播速度は骨材最大寸法の変化にあまり鋭敏ではないが、透過弾性波の周波数特性に関しては、骨材最大寸法が大きくなるにつれて高周波域の減衰が顕著となった。
- b) 骨材形状の違いは、コンクリート中を透過した弾性波の伝播速度および周波数特性にほとんど影響しなかった。
- c) コンクリート中の骨材量は弾性波伝播挙動と深い関連があった。骨材量の増加により、弾性波伝播速度は増加し、周波数分布における高周波域の減衰を激しくすることがわかった。
- d) 骨材界面性状の違いは、弾性波伝播速度にはあまり影響を及ぼさないが、透過弾性波の周波数分布を大きく変化させることが明らかとなった。骨材界面性状が異なることにより、骨材界面における弾性波の散乱・反射が著しくなり、結果的に周波数分布における高周波域の減衰程度が変化した。

④コンクリートの配合条件の影響

- a) W/C や空気量といった配合条件にかかわらず、マトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の間には密接な関係があることがわかった。本研究の範囲内においては、マトリックス部分の変化により約 1km/s の弾性波伝播速度の変化が生じた。
- b) マトリックス部分の空隙率の変化は骨材-マトリックス間の音響インピーダンス差が変化させることから、骨材界面における弾性波の散乱程度が変化し、結果的に周波数分布における高周波域の減衰が生じた。

⑤コンクリート中に存在するマイクロクラックの影響

- a) コンクリート中にランダムに分散して存在するマイクロクラックは、コンクリート中を伝播する弾性波の伝播速度にはほとんど影響しないものの、周波数特性を大きく変化させることが示された。これは、マイクロクラックの存在が弾性波の散乱・反射源となり、その大きさに対応した波長を有する弾性波の減衰を引き起こす

ためである。

- b) 本研究で対象としたマイクロクラックは、その存在状況がランダムで不規則であるため、弾性波の伝播方向にかかわらず上記a)の傾向が認められた。また外力を受けてマイクロクラックが開口した状態になると弾性波の減衰が著しくなることがわかった。

⑥コンクリートの施工条件の影響

- a) 過剰な締固めにより骨材含有量の鉛直方向分布に偏りを生じた場合、弾性波伝播挙動も鉛直方向に変化することがわかった。骨材の沈降により供試体下部ほど骨材含有量が増加し、弾性波伝播速度も大きくなった。
- b) 養生条件の相違によるコンクリート内部状態の変化は、マトリックス部分の空隙率の変化として捉えることができ、その変化に対応してコンクリート中における弾性波伝播挙動に変化が生じた。

本研究の範囲内では、マトリックス部分の空隙率の変化により弾性波伝播速度がおおよそ 1km/s 変化した。一方、骨材界面性状の変化により弾性波伝播速度は 0.2km/s 程度しか変化しなかった。このように骨材界面性状が弾性波伝播速度に及ぼす影響はマトリックス部分の空隙率の変化よりも小さいといえる。さらに本実験で設定した骨材界面性状の範囲は、実際のコンクリート中において存在する範囲よりも広いものであり、実際の骨材界面性状の影響程度はさらに小さくなるものと考えられる。したがって、弾性波伝播速度によりマトリックス部分の空隙率の変化については感度よく捉えることができるが、骨材界面性状の変化については評価することが困難である。

しかしながら骨材界面性状の変化やマイクロクラックの発生については、その部分が弾性波の散乱・反射源となることから、コンクリート中を透過した弾性波の周波数特性に変化が生じることとなる。この周波数特性の変化を、例えば周波数分布の平均周波数に着目することにより、骨材境界相部分の劣化やマイクロクラックの発生量を評価できる。

またコンクリート中の骨材最大寸法や存在量、あるいはコンクリートの施工条件などがコンクリート中における弾性波伝播挙動に及ぼす影響は無視できないほど大きいと、弾性波伝播特性を利用してコンクリートの劣化評価を行う場合には、この点について十分に考慮する必要があるといえる。

第5章

弾性波伝播特性を利用したコンクリートの劣化評価

5-1 はじめに

前章までの検討により、コンクリート中におけるマトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度には密接な関係があり、また骨材界面性状やマイクロクラックの存在は弾性波伝播速度にはあまり影響しないが、透過弾性波の周波数特性に反映されることが示されている。これらのことを応用すれば、2-3で前述したような本研究で対象とするコンクリート内部の劣化、すなわち、

①マトリックス部分の劣化

②骨材境界相部分の劣化

を評価できるものと考えられる。本章においては、このような劣化を弾性波伝播特性を利用して評価することを試みた。本章の構成を以下に示す。

「5-2 先行載荷を受けたコンクリートの劣化評価」においては、一軸圧縮を受けることにより劣化したコンクリートを、「5-3 凍結融解作用を受けたコンクリートの劣化評価」においては、凍結融解の繰返し作用により劣化したコンクリートを、さらに「5-4 アルカリ骨材反応を生じたコンクリートの劣化評価」においては、アルカリ骨材反応による膨張圧により劣化したコンクリートをそれぞれ対象として、適切な劣化評価手法について検討を行った。実験においては、まず上記要因により生じたコンクリート内部の

劣化を、マトリックス部分の劣化と骨材境界相部分の劣化にわけて取り扱うため、マトリックス部分の空隙率および骨材－マトリックス間におけるボンドクラックの発生量の計測を行い、コンクリート内部の劣化程度を定量化した。続いてそのような劣化が強度特性、変形特性、あるいは物質浸透抵抗性といったコンクリート特性に及ぼす影響を把握した上で、弾性波透過試験を行い、劣化によるコンクリート内部状態の変化と弾性波伝播特性の関係を明らかにした。最終的に上記要因による劣化の程度を適切に評価できる指標を検討した。

一般に、構造物において発生する劣化の要因は必ずしも 1 つではなく、いくつかの要因が複合して劣化が生じていることが多い。そこで、「5－5 複数の要因による劣化を受けたコンクリートに関する検討」において、上記要因が複合して発生する場合について若干の検討を行った。さらに「5－6 本手法の実構造物への適用に際しての課題」において、このような弾性波によるコンクリートの劣化評価手法を実構造物に適用する場合の課題を明らかにし、今後行うべき検討の方向性を示した。

5-2 先行載荷を受けたコンクリートの劣化評価

5-2-1 概要

既に2-3でも述べたように、コンクリートに外力が加わると内部にマイクロクラックが発生し、コンクリートの物質浸透抵抗性が損なわれたり、より重大な劣化を引き起こす「引き金」となったりすると考えられる。ここでは、このような先行載荷を受けて劣化したコンクリートを対象として、弾性波による劣化評価手法について検討を行った。実験においては、まず一軸圧縮載荷により生じたコンクリート内部の劣化状態を、マトリックス部分の空隙率および骨材-マトリックス間におけるボンドクラックの発生量を計測することにより把握した。続いてこのような劣化がコンクリートの諸特性（強度特性、変形特性および物質浸透抵抗性）に及ぼす影響を踏まえた上で弾性波透過試験を行い、劣化によるコンクリート内部状態の変化と弾性波伝播特性の関係を明らかにした。以上の検討結果より最終的に、先行載荷を受けたコンクリートの劣化程度を非破壊的に的確に評価できる指標を示した。

5-2-2 実験概要ならびに劣化の定量化

ここでは、はじめに供試体の作製方法ならびに劣化方法について述べた後、空隙率計測や断面観察といった直接的手法により得られるマトリックス部分の空隙率および骨材-マトリックス間のボンドクラック発生量に着目して、先行載荷によるコンクリートの劣化状態の特徴を明確にした。

a) 供試体概要

供試体概要

用いた供試体は、 $\phi 100 \times 200$ (mm)のコンクリート円柱であり、コンクリートの作製に用いた材料および配合を表 5.2.1 および表 5.2.2 中の No.1 に示す。供試体数は、各検討ケースに対して3本ずつとした。

劣化方法

コンクリート供試体に対して所定のレベルまで載荷を行い、コンクリート内部に劣化を生じさせた。この際、載荷荷重レベルは、あらかじめ計測したコンクリート供試体の圧縮破壊荷重（420kN）の 20、40、60、80%とした。一般に、破壊荷重の 30%程度からボンドクラックの発生・進展が開始し、破壊荷重の 80%を超えるとマトリックスクラックが発生し、ボンドクラックと連結するようになるといわれている⁵⁻¹⁾。なお一軸圧縮載荷時の載荷速度は、いずれのケースにおいても 0.25MPa/sec で一定とした。

b) 劣化の定量化

劣化定量化のための直接的手法の概要

このような先行載荷を受けたコンクリート供試体を目視観察した結果、いずれの供試体においても表面ひび割れ、スケーリングなどといった著しい劣化は認められなかった。したがって、ここで対象とする劣化は材料内部で生じており、目視による外観検査では評価することができない。そこで、コンクリート中に弾性波を透過させ、材料内部の劣化状態に関する情報を弾性波伝播特性として引き出すことにより、コンクリート内部の劣化評価を非破壊的に行うこととした。さらにコンクリート内部の劣化を、マトリックス部分の劣化と骨材境界相部分の劣化にわけて取り扱うこととし、それぞれマトリックス部分の空隙率および骨材界面におけるボンドクラックの発生量を評価指標として劣化程度を把握した。

マトリックス部分の空隙率については、4-5で述べた手法により、また骨材界面におけるボンドクラックの発生量については、4-6で述べた手法により、それぞれ計測を行った。なおマトリックス部分の空隙率計測に際して、コンクリートの絶乾質量が得られるまでに要した乾燥日数は 21 日であった。

先行載荷によるコンクリートの劣化の特徴

図 5.2.1 に、各載荷荷重レベルまで先行載荷を行った供試体に対するマトリックス部分の空隙率の変化を示す。これより、破壊荷重の 80%程度の荷重レベルの載荷によってはコンクリート中のマトリックス部分の空隙率は変化していないことがわかる。したがって、先行載荷によりコンクリート中のマトリックス部分の劣化は生じないものと考えられる。

次に骨材-マトリックス間のボンドクラックの発生量の計測結果を図 5.2.2 に示す。このように、既往の報告と同様に破壊荷重の 20%の載荷段階からボンドクラックの発生が

確認でき、その後荷重レベルの増加とともにボンドクラックの発生量が単調に増加し、荷重レベル 80%の時点でその発生量は約 0.25mm^{-1} に達していることがわかる。この値は、同一配合の供試体切断面に現れた粗骨材の全周長をその断面積で割った値と同程度であり、荷重レベル 80%の時点でボンドクラックの発生がほぼ飽和状態に達していたことを示している。またマトリックス-骨材間にボンドクラックが発生しても、マトリックス部分の空隙率に変化がみられないことが示された。

以上より、先行荷重を受けたコンクリートにおいては、そのマトリックス部分はあまり劣化を受けていないものの、骨材界面における境界相部分における劣化が生じ、ボンドクラックが発生していることが示された。

5-2-3 劣化の進行にともなうコンクリート特性の変化

ここでは、上記のような劣化がコンクリートの諸特性に及ぼす影響について検討を行うこととした。まず劣化コンクリート供試体に対する一軸圧縮試験を行うことにより、先行荷重による劣化の進行がコンクリートの力学特性、すなわち強度特性および変形特性に及ぼす影響を調べた。さらに劣化コンクリート供試体に対して簡易透気試験および吸水試験を行うことにより、上記の劣化の進行がコンクリートの物質浸透抵抗性に及ぼす影響についても検討を行った。

a) 実験概要

一軸圧縮試験

前述の 4-2 の場合と同様に、一軸圧縮試験を行うことにより、各供試体の一軸圧縮強度および弾性係数を算出した。本研究においては、コンクリートの強度特性を一軸圧縮強度により、コンクリートの変形特性を弾性係数により評価した。

簡易透気試験

前述の 4-4-5 の場合と同様に簡易透気試験を実施し、簡易透気速度を算出した。これより、先行荷重により劣化を受けたコンクリートの物質透過浸透性を評価することとし

た。

吸水試験

コンクリートの劣化による内部状態の変化は、コンクリートの吸水特性を変化させるものと考えられる。この吸水特性はコンクリートの物質浸透抵抗性と関連するものであり、コンクリートの耐久性に多大な影響を及ぼすものと考えられる^{5-2~3)}。そこで、弾性波透過試験を行った供試体を温度 20℃、相対湿度 50%の実験室内で 2 日間乾燥させた後、側面および端面の一方をエポキシ樹脂でコーティングし、残りの端面をバケツに溜めた水中に浸漬した。この際、供試体を水面下 1cm まで埋没させた。その後、吸水にともなう供試体の質量変化から吸水量を算出し、それを浸漬面積で除した単位面積当たりの吸水量に着目して、劣化の進行にともなう吸水特性の変化について検討を行った。なお吸水試験開始前の供試体乾燥期間を 2 日間としたのは、前述の 4-4-5 における簡易透気試験の場合の理由と同一である。

b) 先行載荷による劣化がコンクリート特性に及ぼす影響

各荷重レベルまで先行載荷を行った供試体に対する一軸圧縮試験により得られた一軸圧縮強度および弾性係数を図 5.2.3 に示す。これによれば、先行載荷重が増加しても圧縮強度および弾性係数にほとんど変化がみられないことがわかる。これは、図 5.2.1 に示すマトリックス部分の空隙率試験結果からも明らかなように、圧縮強度や弾性係数と深い関連があるマトリックス部分の空隙率が変化していないためであると考えられる。

図 5.2.4 に、各荷重レベルごとの簡易透気速度の計測結果を示す。これによれば、荷重レベルの増加につれて透気速度が増加し、コンクリートの物質浸透抵抗性が低下していることがわかる。これは、図 5.2.2 に示すように、先行載荷によりコンクリート中の骨材-マトリックス間にボンドクラックが発生したため、コンクリート中を物質が移動する際の「水みち」が形成されたことによると考えられる。図 5.2.5 に、吸水試験開始後 28 日における吸水量を各荷重レベルごとに示す。試験開始後 28 日においては、供試体質量に変化がなくなっており、この値は当該コンクリートの吸水性能を表す指標であるといえる。この図より、先行載荷の荷重レベルが大きくなるほど吸水試験開始後 28 日における吸水量は大きくなっており、コンクリート中のマイクロクラック発生量を反映した結果となっている。

以上より、先行載荷による劣化は、コンクリートの強度・変形特性などの力学特性には影響しないものの、物質浸透抵抗性を損なわせることが示された。これは、先行載荷により発生するマイクロクラックの存在によるものであると考えられ、コンクリートの耐久性を考える上で考慮すべきものであるといえる。

5-2-4 弾性波伝播特性を利用したコンクリートの劣化評価

a) 実験概要

上記のように、先行載荷を受けて骨材境界相部分が主に劣化したコンクリートの劣化程度を非破壊的に評価する手法について検討を行うため、前章までと同様に弾性波透過試験を行った。劣化の進行にともなう弾性波伝播速度および透過弾性波の周波数分布の変化を明らかにし、このような劣化に対する適切な評価指標について検討を行った。

b) 実験結果および考察

図 5.2.6 に、先行載荷重の増加にともなう弾性波伝播速度の変化を示す。これより、先行載荷重が増加しても弾性波伝播速度に変化がみられないことがわかる。前章までの検討結果より、弾性波伝播速度とマトリックス部分の空隙率の間には高い相関性が存在するが、コンクリート中のマイクロクラックの存在には鈍感であることが示されている。本実験のように、先行載荷による劣化を受けた場合においては、骨材-モルタル間にボンドクラックは発生するが、マトリックス部分の空隙率は変化しないことから、弾性波伝播速度に変化がみられなかったものと考えられる。

次に、各載荷荷重レベルごとに得られた透過弾性波の周波数分析結果から、平均周波数を求めた結果を図 5.2.6 に示す。このように、先行載荷重の増加とともに平均周波数は小さくなっており、周波数分布の高周波域における減衰が顕著になっていることが示される。この減衰は、4-6でも前述したように、コンクリート中のマイクロクラックの増加によるものと考えられる。そこで、断面観察により得られたボンドクラック密度と平均周波数の関係を調べた。その結果を図 5.2.7 に示す。このように、ボンドクラック量と平均周波数の間には密接な関連があることから、この周波数分布の平均周波数を用いることにより

骨材－マトリックス間の境界相部分の劣化は評価できるものと考えられる。

続いて先行載荷荷重レベル 20、40、60(%)のケースについて、繰返し載荷を行った。この場合の繰返し回数は、10 回および 30 回とした。図 5.2.8～9 に、繰返し回数の増加にともなう弾性波伝播速度の変化および周波数分布の平均周波数の変化を示す。これらによれば、繰返し載荷の影響は弾性波伝播速度においては認められなかったが、平均周波数には顕著に現れた。繰返し回数の増加とともに平均周波数は減少しており、ボンクラックの発生量が増加していることが推測される。また弾性波伝播速度に変化が見られなかったことから、この程度の繰返し載荷ではマトリックス部分の劣化は生じないものと考えられる。

以上より、先行載荷による劣化のように、コンクリート中における骨材－マトリックス間の境界相部分が主に劣化を受けている場合には、透過弾性波の周波数分布の変化に着目することが有効であることが明らかとなった。境界相部分のボンクラックの発生量が増加するにつれて、透過弾性波の周波数分布において高周波成分の減衰が著しくなり、周波数分布の平均周波数が小さくなる。したがって、この平均周波数が骨材－マトリックス間の境界相部分の劣化を評価する上で有効な評価指標であると考えられる。一方、先行載荷を受けたコンクリートのマトリックス部分は劣化していないため、弾性波伝播速度には変化が認められなかった。

しかし、ここで行った先行載荷は 30 回までの繰返し載荷であり、実際の構造物を対象とした場合あまり現実的でない。しかし、過大な地震力を受けた構造物などにおいては、ここで取り上げたような劣化が生じていることが推測される。また静的破壊荷重に対して 30%繰返し載荷を 200 万回行った場合においては、コンクリート中のマトリックス部分の細孔量が増加するという報告⁵⁻⁴⁾があり、その場合、弾性波伝播速度に変化が生じることが推測される。実際、繰返し荷重を受けて疲労劣化を生じたコンクリートにおいては、繰返し載荷のサイクル数の増加とともに弾性波伝播速度が低下することが報告されている⁵⁻⁵⁾。したがって、疲労劣化を受けたコンクリートの内部状態は次に述べる凍結融解作用を受けたコンクリートと同様なものとなっていると考えられ、その場合の劣化評価は弾性波伝播速度に着目して行うことができると考えられる。

また本研究においては、破壊荷重に対して 80%までの載荷しか行っていないが、現実的ではないものの破壊荷重に達するまで載荷を行った場合においては、既往の研究⁵⁻⁵⁾に

より供試体内部の細孔量が著しく増加するといわれている。本実験においても、最大荷重到達直後に除荷したコンクリート供試体において計測された弾性波伝播速度は載荷前より5%程度低下していた。このことから、破壊荷重に近い荷重レベルで先行載荷を受けた場合においては、マトリックス部分の劣化も進行していることが推測される。

5-2-5 まとめ

ここでは、先行載荷を受けた劣化コンクリートを対象として、その劣化程度を弾性波伝播特性を利用して評価する手法について検討を行った。先行載荷を受けたコンクリート内部においては、骨材-マトリックス間の境界相部分にボンドクラックが発生していることが断面観察の結果から示された。このような骨材境界相部分の劣化は、圧縮強度や弾性係数といった力学的特性には影響しないものの、コンクリートの耐久性と関連の深い物質浸透抵抗性を低下させることが確認された。

このような骨材境界相部分の劣化を弾性波伝播特性を利用して評価する際には、透過弾性波の周波数分布の変化に着目することが有効であることが明らかとなった。これは、マイクロクラックの存在が弾性波の散乱源となり、300kHz 付近の周波数成分が減衰するためである。例えば、この減衰を周波数分布の平均周波数を用いて定量化することにより、境界相部分の劣化を的確に評価できることがわかった。一方、弾性波伝播速度は、マトリックス部分の空隙率が変化しない骨材境界相部分の劣化評価に対しては不適切であることが示された。

表 5.2.1 使用材料の特性

材料	種類	特性
セメント	普通ポルトランドセメント	比重:3.15、等価アルカリ量:0.67%
水	水道水	
細骨材	川砂	千葉県小櫃川産、比重:2.59、吸水率:1.41%、粗粒率:2.26
	パイレックスガラス	比重:2.32、粒度:川砂と同一に調整
粗骨材	普通碎石	東京都青梅市産、比重:2.61、吸水率:0.98%、粗粒率:6.68

表 5.2.2 コンクリートの配合

番号	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C	s/a	単位量(kg/m ³)					
					水	セメント	川砂	パイレックス	普通碎石	添加アルカリ
No.1	8±2.5	1±1	0.50	0.45	190	380	783	—	984	—
No.2	8±2.5	1±1	0.50	0.45	190	380	587	175	984	6.72
No.3	8±2.5	1±1	0.50	0.45	190	380	392	351	984	6.72

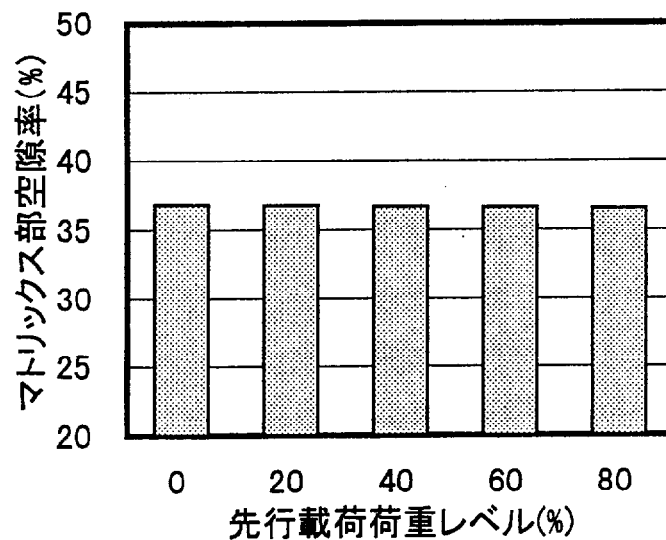


図 5.2.1 先行載荷荷重レベルの増加にともなうマトリックス部分の空隙率の変化

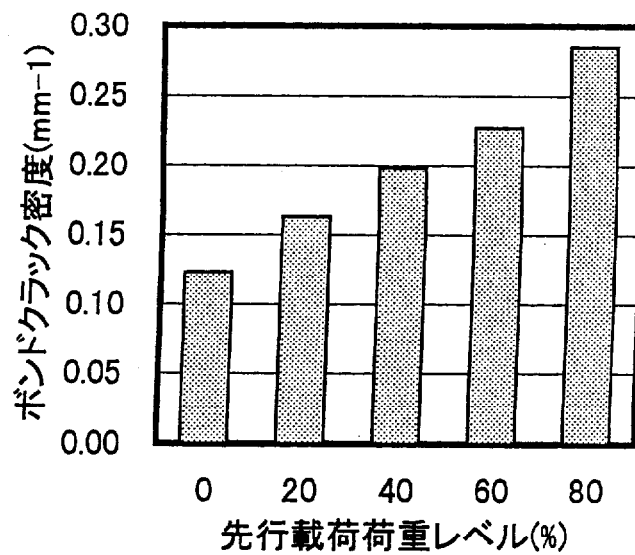


図 5.2.2 先行載荷荷重レベルの増加にともなうボンドクラック発生量の変化

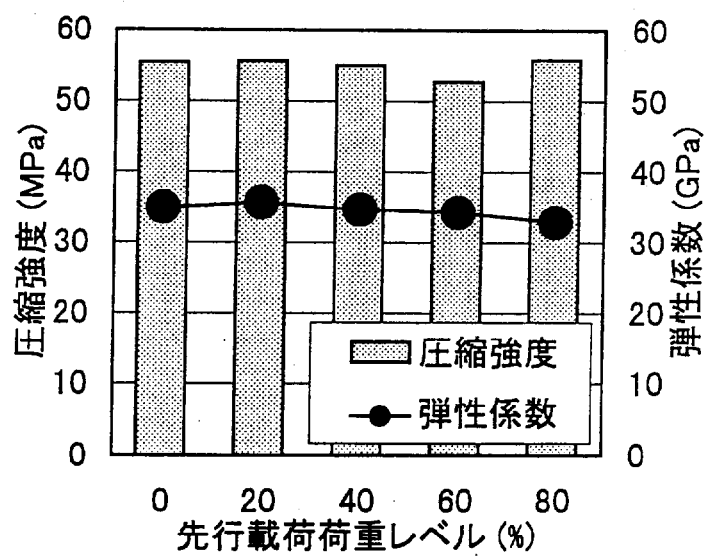


図 5.2.3 先行載荷による劣化がコンクリートの力学特性に及ぼす影響

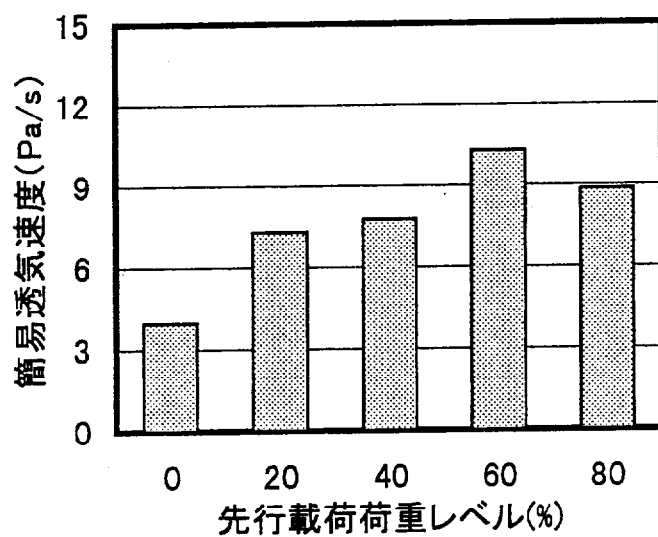


図 5.2.4 先行載荷による劣化がコンクリートの透気性に及ぼす影響

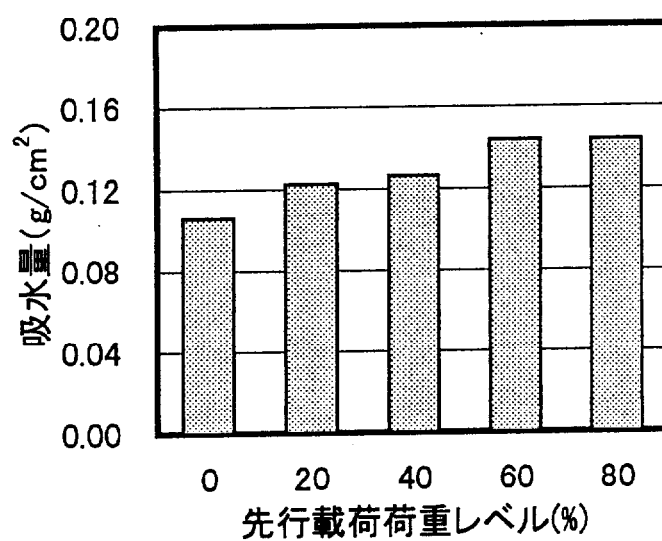


図 5.2.5 先行載荷による劣化がコンクリートの吸水性能に及ぼす影響

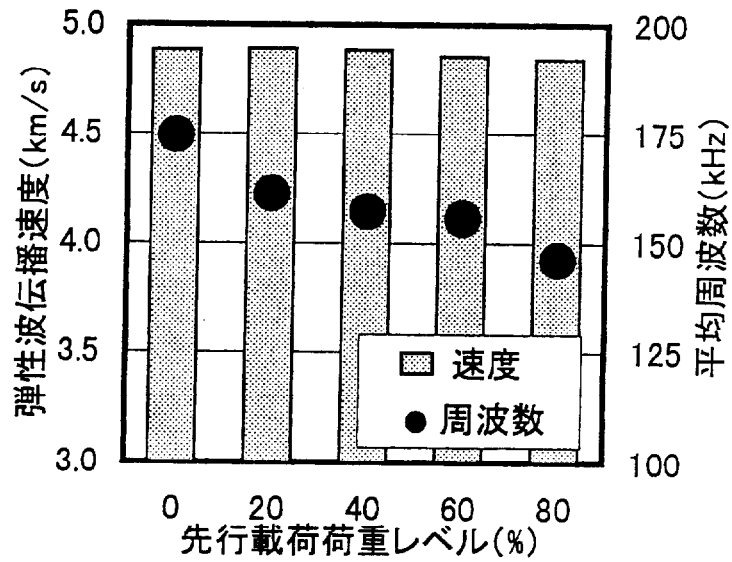


図 5.2.6 先行载荷による劣化の進行にともなう弾性波伝播挙動の変化

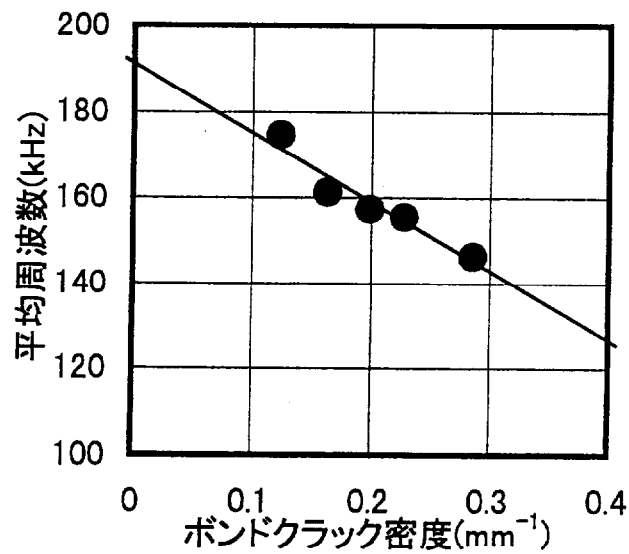


図 5.2.7 ボンドクラック発生量と平均周波数の関係

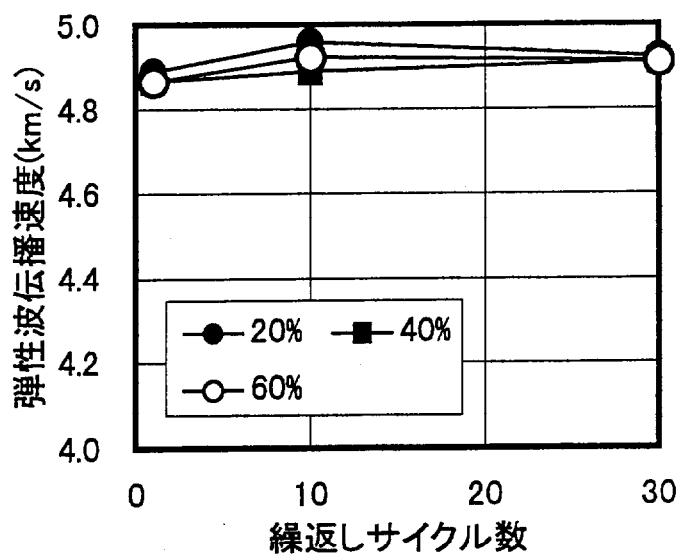


図 5.2.8 繰返し载荷による弾性波伝播速度の変化

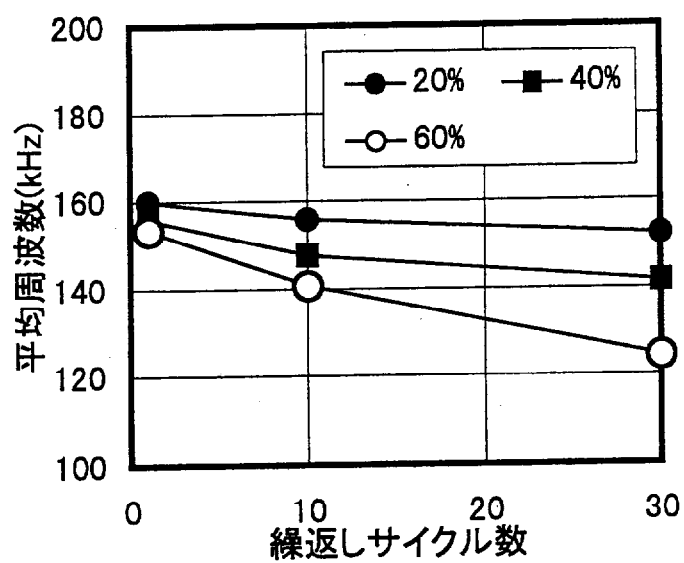


図 5.2.9 繰返し载荷による平均周波数の変化

5-3 凍結融解作用を受けたコンクリートの劣化評価

5-3-1 概要

2-3でも述べたように、コンクリートが凍結融解作用を繰返し受けると、毛管空隙水の凍結による膨張圧が発生し、コンクリートの内部組織が破壊される。このような現象はコンクリートの凍害と呼ばれ、寒冷地においては免れることのできない重大な劣化現象の1つである。さらに凍害によるコンクリートの劣化は極めて激しいものであり、スケーリング、ポップアウト、あるいは表面ひび割れを引き起こし、コンクリート構造物・部材の耐力・剛性の低下を招くものである。ここでは、このような凍結融解作用を受けて劣化したコンクリートを対象として、弾性波による劣化評価手法について検討を行った。実験においては、まず凍結融解作用を繰返し受けたコンクリート内部の劣化状態を、マトリックス部分の空隙率および骨材-マトリックス間のボンドクラック発生量を計測することにより把握した。続いてこのような劣化がコンクリートの諸特性（強度特性、変形特性および物質浸透抵抗性）に及ぼす影響を踏まえた上で弾性波透過試験を行い、劣化によるコンクリート内部状態の変化と弾性波伝播特性の関係を明らかにした。以上の検討結果より最終的に、凍結融解作用を受けたコンクリートの劣化程度を非破壊的に的確に評価できる指標を示した。

5-3-2 実験概要ならびに劣化の定量化

ここでは、はじめに供試体の作製方法ならびに劣化方法について述べた後、空隙率計測や断面観察といった直接的手法により得られるマトリックス部分の空隙率および骨材-マトリックス間のボンドクラック発生量に着目して、凍結融解作用によるコンクリートの劣化状態の特徴を明確にした。

a) 供試体概要

供試体概要

用いた供試体は、 $\phi 100 \times 200(\text{mm})$ のコンクリート円柱であり、コンクリートの練混ぜ

に用いた材料および配合は、表 5.2.1 および表 5.2.2 中の No.1 に示すとおりである。供試体数は、各検討ケースに対して 3 本ずつとした。ここで、空気量を 1%と小さく設定しているため、このコンクリートが凍結融解作用を受けた場合、少ないサイクル数でもある程度の劣化が生じることが期待できる。また材齢 56 日まで水中養生を行っているため、初期凍害は生じていない。

劣化方法

凍結融解作用を受けて劣化したコンクリート供試体を作製するため、促進凍結融解試験を行った。所定の材齢まで水中養生を行った供試体の相対動弾性係数および質量を試験開始前の初期値として計測した。そしてこれらを内部寸法が $109 \times 109 \times 450(\text{mm})$ のゴム製の容器に入れ、供試体上面から約 20mm 上側まで水を注いだ後、促進凍結融解試験機の試験槽にセットした。この際、比較のために劣化を受けていない「健全」供試体を作製するため、全供試体 18 本のうち 3 本については水中養生を継続した。促進凍結融解試験は、凍結時間 4.5 時間および融解時間 1.5 時間、基準供試体中心温度 $-18.0^{\circ}\text{C} \sim -6.0^{\circ}\text{C}$ (試験槽内温度 $-32.0^{\circ}\text{C} \sim -22.0^{\circ}\text{C}$)、融解水温度 25.0°C の条件のもとで水中凍結水中融解を繰り返した。図 5.3.1 に、基準供試体中心温度および試験槽内温度の経時変化を示す。また凍結融解繰り返し 10 サイクルごとに計測した相対動弾性係数および質量減少率を図 5.3.2 に示す。このような促進凍結融解試験を、相対動弾性係数が初期値の約 60%に低下するまで、すなわち本実験においては 50 サイクルまで継続した。

b) 劣化の定量化

劣化定量化のための直接的手法の概要

凍結融解作用を受けた供試体を目視観察した結果、凍結融解の繰り返しサイクルが多い供試体では、表層のごく薄い部分が剥がれ落ちていたものの、いずれの供試体においても表面ひび割れ、ポップアウトなどといった著しい劣化は認められなかった。したがって、本実験で対象とした凍結融解作用による劣化は主にコンクリート内部で生じており、外部からの目視観察のみでは、その劣化程度を判断することができない。そこで、コンクリート中に弾性波を透過させ、材料内部の劣化状態に関する情報を弾性波伝播特性として引き出すことにより、コンクリート内部の劣化評価を非破壊的に行うこととした。さらにコンクリート内部の劣化を、マトリックス部分の劣化と骨材境界相部分の劣化にわけて取り扱う

こととし、それぞれマトリックス部分の空隙率および骨材界面におけるボンドクラックの発生量を評価指標をして劣化程度を把握した。これらの試験は、前述の5-2の場合と同様に行った。

さらにマトリックス部分の密実性の低下を、空隙率という全体的・平均的な指標だけでなく、よりミクロな視点から詳細に検討するため、細孔径分布計測を行った。本計測においては、まず所定のサイクル数まで促進凍結融解試験に供したコンクリート供試体を、5mm 角程度の小塊になるまでハンマーで粉砕した後、105℃の乾燥炉中で約 2 週間乾燥させた。そして水銀圧入方式の細孔径分布計測装置（細孔直径測定範囲：0.006 μm ～500 μm ）を用いて、凍結融解作用による劣化を受けたコンクリート内部の細孔径分布を計測した。

凍結融解作用によるコンクリートの劣化の特徴

図 5.3.3 に、凍結融解の繰返しサイクル数の増加にともなうマトリックス部分の空隙率の変化を示す。これより、繰返しサイクル数の増加とともに空隙率は増加し、マトリックス部分の密実性が低下していることがわかる。これは、マトリックス内部に存在している空隙の自由水が凍結融解の繰返しを受けることにより、周囲のマトリックス実体部分に膨張圧を発生させ、微小破壊が進行することによるものと考えられる。

図 5.3.4 に、各凍結融解繰返しサイクル数ごとの細孔径分布測定結果を示す。図中の細孔容積比とは、それぞれの細孔径区間に対する細孔容積の全細孔容積に占める割合のことである。これによれば、繰返しサイクル数の増加とともに、細孔径が 0.01～0.1(μm)の細孔容積比が減少し、細孔径が 0.1～500(μm)の細孔容積比が増加していることがわかる。このように、凍結融解作用による劣化の進行にともない、セメントペースト・マトリックス部分の細孔径が粗大化している。特に 40 サイクル以降において、既往の研究⁵⁻⁷⁾と同様に、細孔径が 1 μm 以上の細孔容積比が増加しており、この段階における劣化の進行が著しいものと推測される。

次に骨材-マトリックス間のボンドクラック発生量の計測結果を図 5.3.5 に示す。このように、繰返しサイクル数が 10 サイクルの時点で、ボンドクラックの発生量は約 0.25mm¹ に達し、それ以降変化していないことがわかる。この値は、同一配合の供試体切断面に現れた粗骨材の全周長をその断面積で割った値とほぼ同程度であり、凍結融解サイクル数が非常に少ない段階から、ボンドクラックの発生がほぼ飽和状態に達していたも

のと考えられる。

以上より、凍結融解作用によるコンクリートの劣化は、コンクリート中の間隙中に存在する自由水が凍結することにより生じる高い間隙圧により、マイクロクラックの発生やマトリックス部分の細孔の粗大化が引き起こされるものであることが確認できた。また骨材境界相部分のボンドクラックの発生は、少ないサイクルの凍結融解繰返しにより飽和状態に達してしまい、その後はマトリックス部分の劣化が集中的に起こることがわかった。

5-3-3 劣化の進行にともなうコンクリート特性の変化

a) 実験概要

ここでは、上記のような劣化がコンクリートの諸特性に及ぼす影響について検討を行うこととした。劣化コンクリート供試体に対する一軸圧縮試験を行うことにより、凍結融解作用による劣化の進行がコンクリートの力学特性、すなわち強度特性および変形特性に及ぼす影響を調べた。この際、評価指標として一軸圧縮強度および弾性係数を用いた。また簡易透気試験および吸水試験を行うことにより得られる簡易透気速度および吸水量に着目することにより、上記の劣化の進行がコンクリートの物質浸透抵抗性に及ぼす影響についても検討を行った。各種の試験は、前述の5-2の場合と同様に実施した。

b) 凍結融解作用による劣化がコンクリート特性に及ぼす影響

所定のサイクル数まで凍結融解を繰返した供試体の一軸圧縮強度および弾性係数を図 5.3.6 に示す。これによれば、50 サイクル終了時までには、圧縮強度は健全供試体の約 50%、弾性係数は同じく約 20%にまで低下していることがわかる。これは、上記a) で述べたように、マトリックス部分の空隙率が繰返しサイクル数の増加とともに増加したためである。図 5.3.7~8 に、マトリックス部分の空隙率と圧縮強度および弾性係数の関係を示す。このように、マトリックス部分の空隙率はコンクリートの力学特性と密接な関係があることが改めて確認できた。

図 5.3.9 に、各繰返しサイクル数ごとの簡易透気速度の変化を示す。これによれば、繰返しサイクル数の増加とともに透気速度が増加し、コンクリートの物質浸透性が損なわ

れていくことがわかる。これは、図 5.3.5 に示すような骨材－マトリックス間のボンドクラック発生量の増加だけでなく、マトリックス部分における空隙率の増加によりもたらされたものであると考えられる。また吸水試験開始後 28 日における吸水量の計測結果を図 5.3.10 に示す。この結果も、凍結融解作用による劣化の進行にともなって吸水量が増加し、コンクリートの物質浸透抵抗性が低下していることを示している。

以上より、凍結融解作用による劣化は、物質浸透抵抗性を損なわせるだけでなく、強度特性や変形特性にも悪影響を及ぼすことが確認できた。これは、凍結融解作用により、コンクリート内部における毛細管間隙圧が増加するため、マトリックス部分の水和組織が破壊され、骨材－マトリックス間にマイクロクラックが発生したためである。このような劣化は、構造物・部材の耐力あるいは剛性を直接的に低下させる要因となるため、コンクリートの劣化評価においては特に重要な評価対象である。

5－3－4 弾性波伝播特性を利用したコンクリートの劣化評価

a) 実験概要

上記のように、凍結融解作用を受けて、骨材境界相部分だけでなくマトリックス部分までもが劣化したコンクリートの劣化程度を非破壊的に評価する手法について検討を行うため、前章までと同様に弾性波透過試験を行った。劣化の進行にともなう弾性波伝播速度および透過弾性波の周波数分布の変化を明らかにし、このような劣化に対する適切な評価指標について検討を行った。

b) 実験結果および考察

図 5.3.11 に、繰返しサイクル数の増加にともなう弾性波伝播速度の変化を示す。これより、繰返しサイクル数の増加とともに弾性波伝播速度が低下していることがわかる。特に、図 5.3.6 において圧縮強度の変化が顕著であった箇所において弾性波伝播速度の変化も著しくなっている。前章までの検討結果より、弾性波伝播速度はマトリックス部分の空隙率と高い相関があることがわかっているが、この場合のマトリックス部分の空隙率は、図 5.3.3 に示すように、繰返しサイクル数の増加とともに大きくなっており、その結果、

弾性波伝播速度も低下したといえる。図 5.3.12 に、マトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の関係を示す。このように、両者の間には密接な関係があり、マトリックス部分の劣化を評価するためには、弾性波伝播速度が極めて有効であることが示された。

次に、凍結融解作用による劣化にともなう透過弾性波の周波数分布の変化について述べる。図 5.3.11 に、繰返しサイクル数の増加にともなう周波数分布の平均周波数の変化を示す。凍結融解作用による劣化の進行とともに、コンクリート中のマイクロクラック発生量が増加することにより弾性波の散乱・反射源が増加し、またマトリックス部分の空隙率が増加することにより骨材との音響インピーダンス差が大きくなることにより弾性波の散乱・反射の程度が顕著になる。その結果、周波数分布のうちで高周波成分から減衰していき平均周波数が小さくなったものと考えられる。

以上より、凍結融解作用による劣化の進行にともなって、弾性波伝播速度と平均周波数はいずれも低下することが示された。凍結融解作用によるマトリックス部分の劣化を弾性波伝播特性を用いて評価する際には、平均周波数の変化に着目してもよいが、実用性を考慮に入れると、コンクリートの表面状態などの影響をあまり受けない弾性波伝播速度の変化に着目した方が適切であると考えられる。

5-3-5 まとめ

ここでは、凍結融解作用を受けたコンクリートを対象として、その劣化程度を弾性波伝播特性を利用して評価する手法について検討を行った。凍結融解作用を受けたコンクリート内部においては、骨材-マトリックス間の境界相部分だけでなく、マトリックス部分においても劣化が生じていることが示された。その結果、コンクリートの物質浸透抵抗性が低下するだけでなく、圧縮強度や弾性係数といった力学的特性にも悪影響があることが確認できた。

凍結融解作用を受けたコンクリートの劣化評価に際しては、骨材境界相部分だけでなくマトリックス部分までもが劣化を受けているため、前章までの検討結果からも明らかなように、弾性波伝播速度に着目することが有効であると考えられる。本実験においても、凍結融解作用による劣化の進行にともないマトリックス部分の空隙率が増加し、それに対応

して弾性波伝播速度も低下していく傾向が認められ、マトリックス部分の劣化評価指標としての弾性波伝播速度の有効性が示された。また周波数分布の平均周波数に関しても、劣化の進行とともに低下していく傾向が明確に確認できたが、実際のコンクリートへの適用を想定した場合、簡易な機器で測定が可能で、かつ、コンクリートの表面状態などの影響を受けにくい弾性波伝播速度により劣化評価を行う方が望ましいものと考えられる。

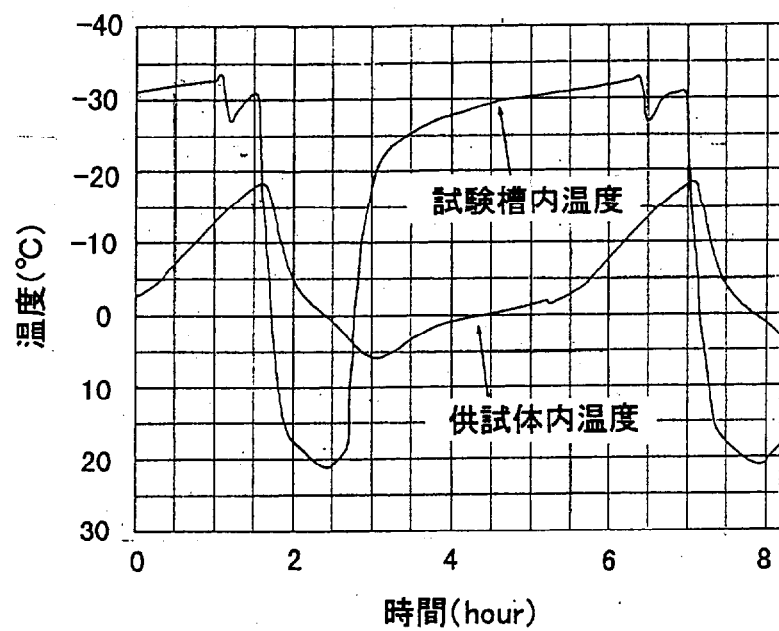


図 5.3.1 温度管理図

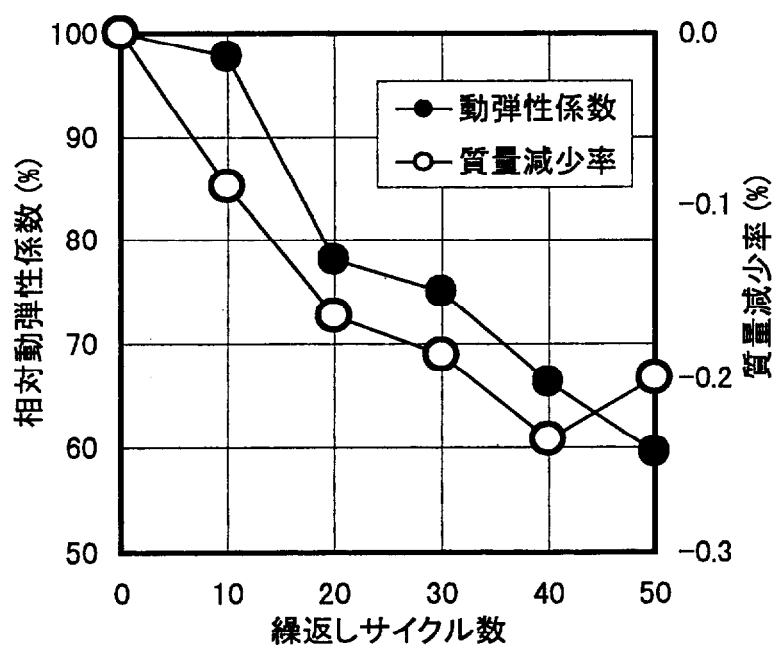


図 5.3.2 促進凍結融解試験結果

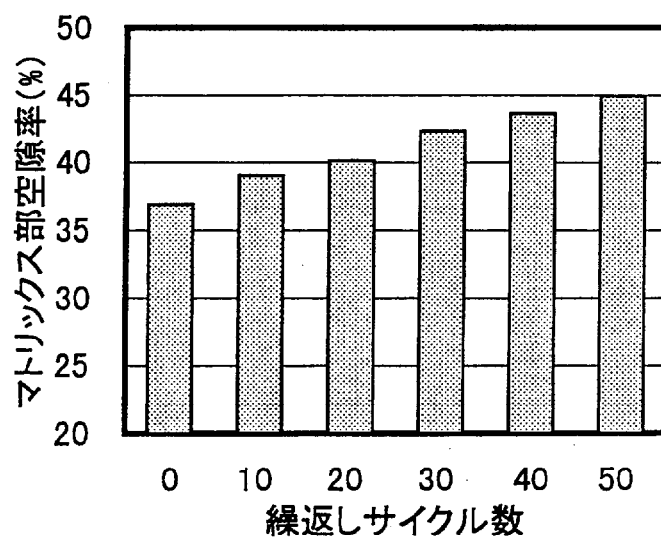


図 5.3.3 凍結融解繰返しサイクル数の増加にともなうマトリックス部分の空隙率の変化

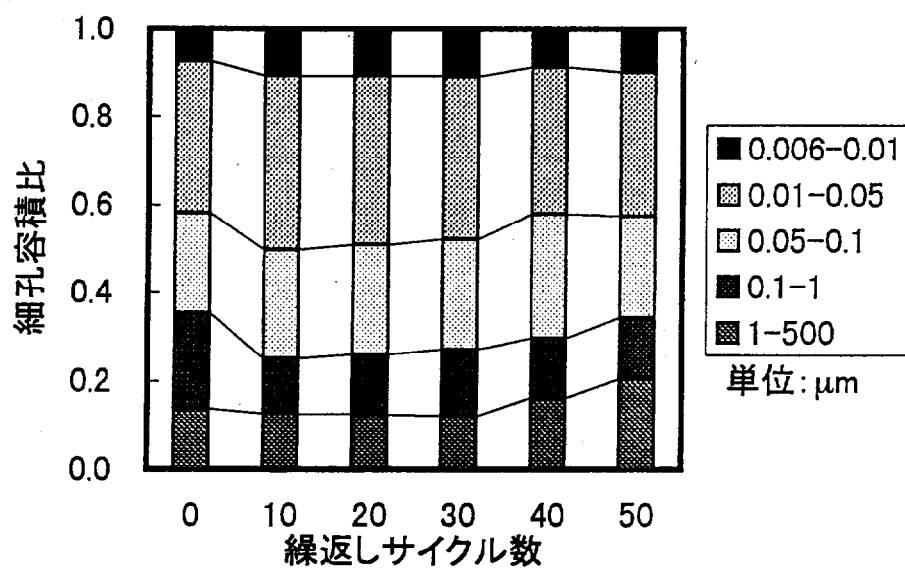


図 5.3.4 凍結融解繰返しサイクル数の増加にともなう細孔構造の変化

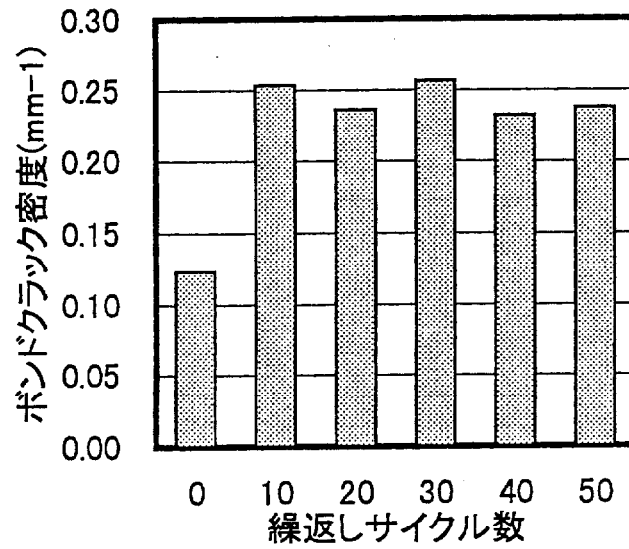


図 5.3.5 凍結融解繰返しサイクル数の増加にともなうボンドクラック発生量の変化

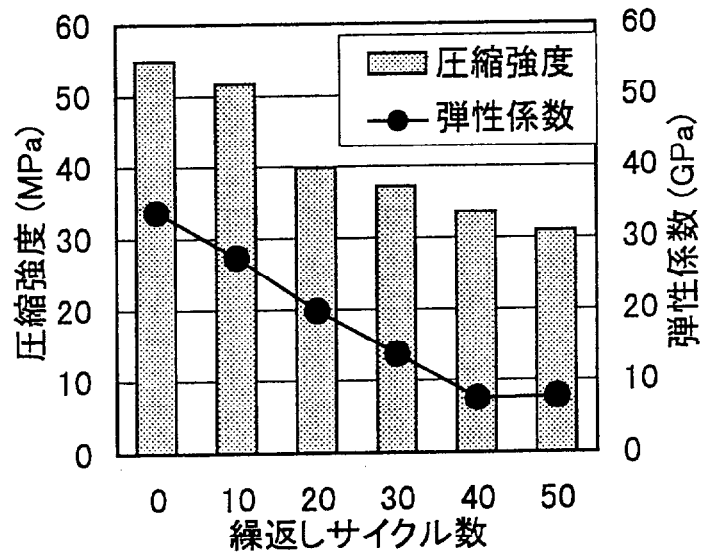


図 5.3.6 凍結融解作用による劣化の進行にともなうコンクリートの力学特性の変化

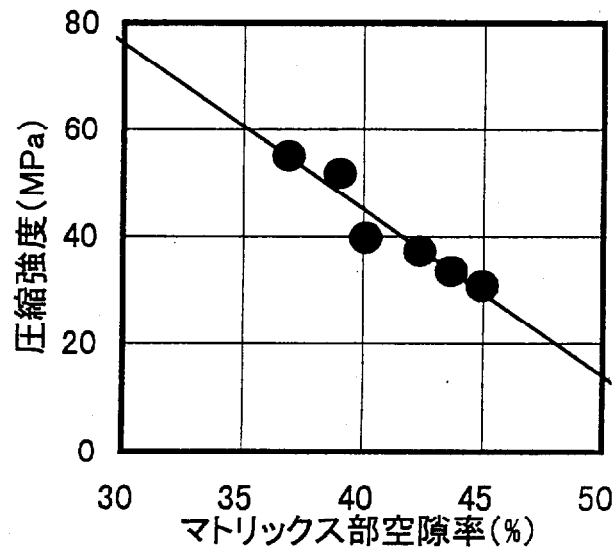


図 5.3.7 マトリックス部分の空隙率と圧縮強度の関係

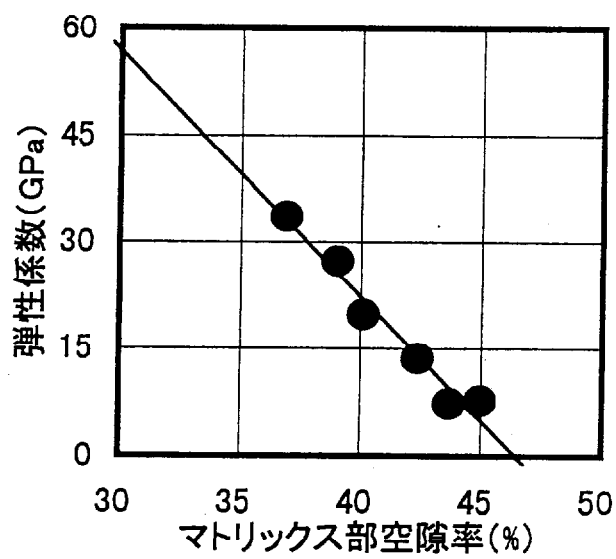


図 5.3.8 マトリックス部分の空隙率と弾性係数の関係

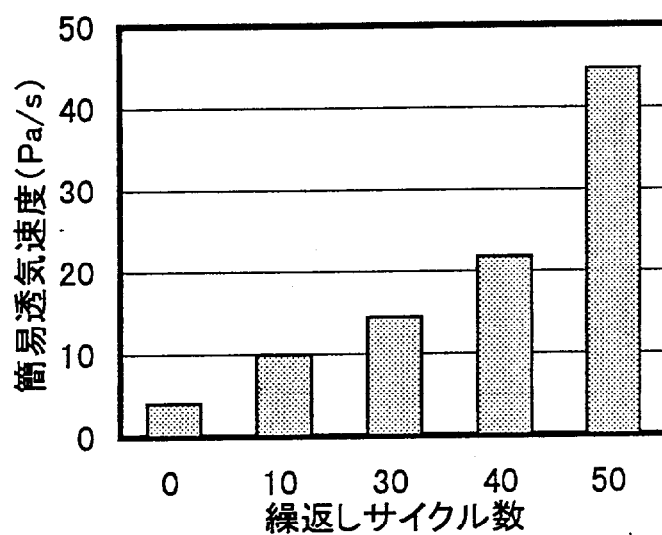


図 5.3.9 凍結融解作用による劣化の進行にともなうコンクリートの透気性の変化

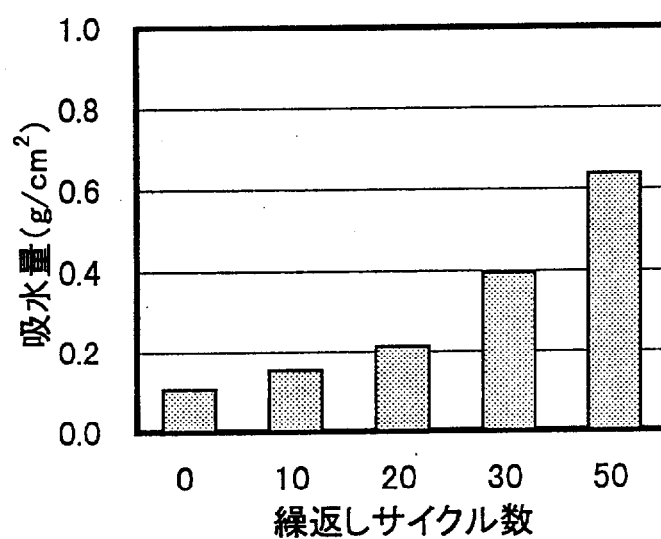


図 5.3.10 凍結融解作用による劣化の進行にともなうコンクリートの吸水性能の変化

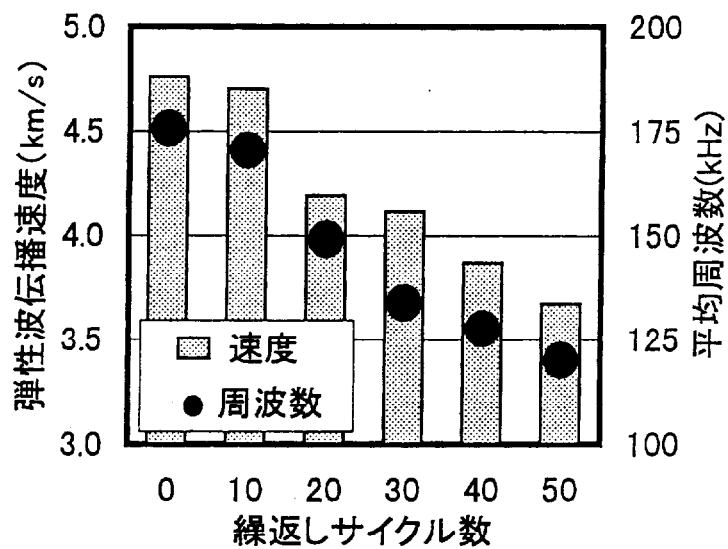


図 5.3.11 凍結融解作用による劣化の進行にともなう弾性波伝播挙動の変化

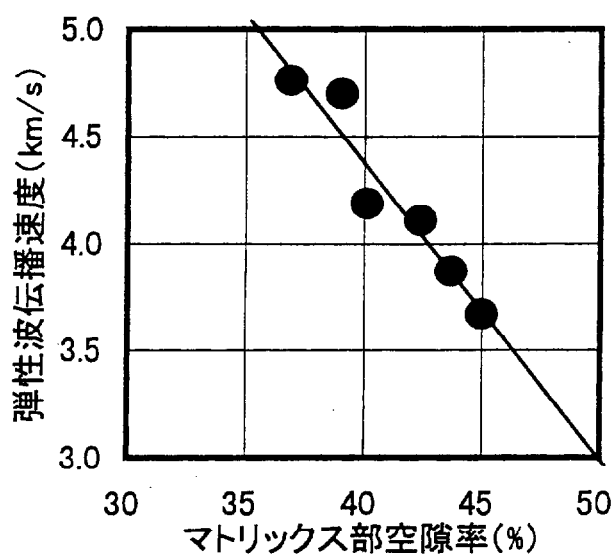


図 5.3.12 マトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の関係

5-4 アルカリ骨材反応を生じたコンクリートの劣化評価

5-4-1 概要

2-3でも述べたように、コンクリート内部にアルカリ骨材反応が生じると、反応過程で生成するアルカリシリカゲルの吸水膨張により、コンクリート内部組織が徐々に破壊され、コンクリートの強度・弾性係数が低下する。さらに亀甲状のひび割れがコンクリート表面に発生することからかぶりコンクリート中の物質移動が容易となり、鉄筋の腐食も誘発されることとなる。ここでは、このようなアルカリ骨材反応を生じたコンクリートを対象として、弾性波による劣化評価手法について検討を行った。実験においては、細骨材の一部をパイレックスガラスで置換した供試体を作製し、アルカリシリカゲルを材齢初期から生成させた。さらに湿空養生を行うことによりアルカリシリカゲルの吸水膨張を促進させ、アルカリ骨材反応による劣化を早期に生じさせた。この膨張圧により劣化したコンクリートの内部状態を、マトリックス部分の空隙率および骨材-マトリックス間におけるボンドクラック発生量を計測することにより把握した。続いてこのような劣化がコンクリートの諸特性（強度特性、変形特性および物質浸透抵抗性）に及ぼす影響を踏まえた上で弾性波透過試験を行い、劣化によるコンクリート内部状態の変化と弾性波の関係を明らかにした。以上の検討結果より最終的に、アルカリ骨材反応を生じたコンクリートの劣化程度を非破壊的に的確に評価できる指標を示した。

5-4-2 実験概要ならびに劣化の定量化

ここでは、はじめに供試体の作製方法ならびに劣化方法について述べた後、空隙率計測や断面観察といった直接的手法により得られるマトリックス部分の空隙率および骨材-マトリックス間のボンドクラック発生量に着目して、アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化状態の特徴を明確にした。

a) 供試体概要

供試体概要

用いた供試体は、 $100 \times 100 \times 200$ (mm)のコンクリート角柱であり、コンクリートの練混ぜに際しては、表 5.2.2 中の No.1 を基準配合とし、その細骨材の一部をパイレックスガラスで置換した。置換率は、体積割合で 25、50(%)とした。この場合の配合を表 5.2.2.の No.2 ~3 にそれぞれ示す。ここで用いたパイレックスガラスの粒度については、その粒度分布が普通細骨材のものと同一となるように調整を行った。またアルカリ骨材反応による膨張を促進させることを目的として、セメントから供給されるアルカリ量を補うため、アルカリ添加剤として水酸化ナトリウム特級試薬を練混ぜ水に溶解させた。本研究で用いたセメントの等価アルカリ量 (Na_2O 換算) は 0.67%であるが、これを 2.0%にするため、セメント 1kg あたり 17.69g の水酸化ナトリウム特級試薬を使用した。この算出過程においては、 Na_2O および NaOH の分子量をそれぞれ 62、40 とし、水酸化ナトリウム試薬の純度を 97%とした。

作製したコンクリート供試体は打設後 1 日で脱型を行い、その際にコンクリートの膨張量を計測するためのコンタクトチップを、図 5.4.1 に示すように、供試体表面に 100mm 間隔で 2 枚貼付した。このコンタクトチップ間の距離をコンタクトゲージ（最小測定可能長：0.001mm）を用いて計測することにより、コンクリートの膨張量の計測を経時的に行った。

また供試体の養生については、供試体からのアルカリ溶出を避けるため、湿空養生とした。この際、養生温度は 20°C および 40°C の 2 通りとした。養生温度 40°C のケースについては、アルカリ骨材反応の速度を増加させることを目的として設定した。この湿空養生には、図 5.4.2 に示すような湿気箱を用いた。このように、その底部に水を溜めたプラスチック容器の内側壁面に十分湿らせたろ紙を貼り付け、コンテナ容器の相対湿度が常に 95%以上になるように配慮した。

したがって、検討ケースとしては、パイレックスガラスを用いていない健全なケース（基準ケース）、パイレックスガラス置換率が 25%で養生温度が 20°C および 40°C のケース、パイレックスガラス置換率が 50%で養生温度が 20°C および 40°C のケースの合計 5 通りであり、各検討ケースごとの供試体数は 3 本とした。

劣化方法

供試体中のパイレックスガラスとセメントおよび添加アルカリ剤から供給されるアルカリ分が反応することにより、アルカリシリカゲルが形成される。そして、そのゲルが周囲の水分を吸収して膨張することにより、コンクリート中にマイクロクラックが発生したり、マトリックス部分の細孔構造が破壊されたりする⁵⁻⁷⁾。このような反応は、パイレックスガラスの置換率が高いほど、また養生温度が高いほど顕著であるものと考えられる。

供試体表面に貼付したコンタクトチップ間の距離変化から算出した膨張量の経時変化を図 5.4.3 に示す。図中の凡例は、各検討ケースごとの「(パイレックスガラスの置換率)ー(養生温度)」を示している。これ以降、同様な表記法を用いることとする。この図によれば、養生温度が高いほど、パイレックスガラスの置換率が高いほど、コンクリートの膨張量は大きくなっていることがわかる。試験実施材齢 56 日の時点で、異なる 5 つの膨張程度が得られていることがわかる。

b) 劣化の定量化

劣化定量化のための直接的手法の概要

本実験におけるアルカリ骨材反応を受けた供試体を目視観察した結果、いずれの供試体においても表面ひび割れ、スケーリングなどの著しい劣化は認められなかった。したがって、ここで対象とする劣化はコンクリート内部で発生しているものであり、目視による外観検査では評価することができない。そこで、コンクリート中に弾性波を透過させ、材料内部の劣化状態に関する情報を弾性波として引き出すことにより、コンクリート内部の劣化評価を非破壊的に行うこととした。さらにコンクリート内部の劣化を、マトリックス部分の劣化と骨材境界相部分の劣化にわけて取り扱うこととし、それぞれマトリックス部分の空隙率および骨材界面におけるボンドクラックの発生量を評価指標として劣化程度を定量化した。これらの試験は、前述の 5-2 の場合と同様に行った。

アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化の特徴

図 5.4.4 に、各ケースごとのマトリックス部分の空隙率を示す。これより、養生温度が高いほど、またパイレックスガラスの置換率が高いほど、マトリックス部分の空隙率が大きくなっていることがわかる。これは、アルカリ骨材反応の結果として生じたアルカリシリカゲルの吸水膨張により、マトリックス部分の微細構造が破壊され細孔構造が粗大化し

たためである。しかし、「置換率 25%－養生温度 20℃」のケースにおいては、マトリックス部分の劣化はあまり顕著ではない。図 5.4.5 に、各検討ケースごとの膨張量とマトリックス部分の空隙率の関係を示す。これによれば、膨張量が大きいほどマトリックス部分の空隙率は大きくなっており、アルカリ骨材反応による膨張劣化によりマトリックス中の細孔構造が破壊され、密実性が低下したことが示される。

次に、骨材－マトリックス間のボンドクラックの発生量の計測結果を図 5.4.6 に示す。このように、基準ケースと「置換率 25%－養生温度 20℃」のケースを除いて、ボンドクラックの発生量はほぼ 0.25mm^{-1} に達しており、前述の凍結融解作用を受けたコンクリートの場合と同様に、ボンドクラックの発生はほぼ飽和状態となっているものと推測される。また「置換率 25%－養生温度 20℃」のケースにおいては、ボンドクラックの発生量は飽和状態には達していないものの、およそ 0.20mm^{-1} であり、健全供試体 (0.12mm^{-1}) と比較して多くのボンドクラックが発生しており、アルカリ骨材反応により骨材－モルタル間の劣化が進行したことを示している。また図 5.4.7 に、各検討ケースごとの膨張量とボンドクラック発生量の関係を示す。これによれば、コンクリートの膨張量が 0.1%を超えるとボンドクラックの発生量が飽和していることがわかる。したがって、膨張量が 0.1%を超えるコンクリートにおいては、骨材境界相部分だけでなくマトリックス部分までもが劣化を受けているものと考えられる。

以上より、アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化は以下のようなことが確認できた。すなわち、アルカリ骨材反応の過程で生成されたアルカリシリカゲルの吸水膨張により、骨材境界相部分だけでなくマトリックス部分の劣化も進行する。劣化の初期の段階では骨材境界相部分のみの劣化が卓越するが、劣化の進行とともにマトリックス部分の密実性が著しく低下していく。このような劣化過程は、劣化要因こそ異なるが前述の凍結融解作用による場合と同様である。

5－4－3 劣化の進行にともなうコンクリート特性の変化

a) 実験概要

ここでは、上記のようなアルカリ骨材反応による劣化がコンクリートの諸特性に及ぼす

影響について把握することを目的として、前述の5-2の場合と同一の実験を行った。コンクリートの圧縮強度、弾性係数、簡易透気速度、吸水量をそれぞれ計測することにより、アルカリ骨材反応による劣化がコンクリートの強度特性、変形特性および物質浸透抵抗性に及ぼす影響について検討を行った。

b) アルカリ骨材反応による劣化がコンクリート特性に及ぼす影響

各検討ケースごとに行った一軸圧縮試験により得られた一軸圧縮強度および弾性係数を図5.4.8に示す。これによれば、図5.4.3に示す膨張量の大きいケースほど圧縮強度および弾性係数の低下傾向が著しく、最大で基準ケースのおおよそ40%、10%までそれぞれ低下していることがわかる。これは、マトリックス部分の細孔構造がアルカリシリカゲルの膨張作用により破壊され、その空隙率が増加したためである。そこで、マトリックス部分の空隙率と圧縮強度および弾性係数の関係について調べた結果を図5.4.9~10に示す。これより、マトリックス部分の空隙率の増加がコンクリートの力学特性に悪影響を与えることが、アルカリ骨材反応を受けたコンクリートにおいても確認された。

図5.4.11に、各検討ケースごとの簡易透気速度の計測結果を示す。これによれば、膨張量が大きく劣化が著しいものほど透気速度は大きく、コンクリートの物質浸透抵抗性の低下が認められる。このような物質浸透抵抗性の低下は、図5.4.6に示すような骨材-マトリックス間のボンドクラック発生量の増加だけでなく、マトリックス部分の空隙率の増加によっても引き起こされたものと考えられる。また吸水試験開始後28日における吸水量の計測結果を図5.4.12に示す。この結果からも、アルカリ骨材反応による劣化が著しいほど、コンクリートの物質浸透抵抗性が低下していることがわかる。

以上より、アルカリ骨材反応による劣化は、物質浸透抵抗性を損なわせるだけでなく、強度特性や変形特性にも悪影響を及ぼすことが確認できた。これは、アルカリ骨材反応により生じたアルカリシリカゲルの吸水膨張により、マトリックス部分の細孔構造が破壊されたり、骨材-マトリックス間にマイクロクラックが発生したりするためである。このような劣化は、構造物・部材の耐力あるいは剛性を直接的に低下させる要因となるため、コンクリートの劣化評価においては特に重要視すべきものである。

5-4-4 弾性波伝播特性を利用したコンクリートの劣化評価

a) 実験概要

上記のように、アルカリ骨材反応を生じたコンクリートの劣化程度を非破壊的に評価する手法について検討を行うため、前章までと同様に弾性波透過試験を行った。劣化の進行にともなう弾性波伝播速度および透過弾性波の周波数分布の変化を明らかにし、このような劣化に対する適切な評価指標について検討を行った。

b) 実験結果および考察

図 5.4.13 に、各検討ケースごとに得られた弾性波伝播速度および平均周波数を示す。マトリックス部分の空隙率は変化していないが、ボンドクラックの発生が認められている「置換率 25%－養生温度 20℃」のケースにおいては、弾性波伝播速度にあまり変化がみられないものの、平均周波数は健全供試体と比較して低下していることがわかる。これは、先行載荷を受けて劣化したコンクリートの場合と同様な弾性波伝播挙動である。

「置換率 25%－養生温度 20℃」以外の他の検討ケースにおいては、マトリックス部分の空隙率が増加しているため、弾性波伝播速度の減少が認められる。図 5.4.14 に、マトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の関係を示す。このように、両者の間には密接な関係があり、マトリックス部分の劣化を評価するためには、弾性波伝播速度が極めて有効であることが示された。この傾向は、前述の凍結融解作用を受けたコンクリートの劣化評価の場合と同様であり、劣化要因によらずマトリックス部分の劣化は弾性波伝播速度により評価できるものと考えられる。

以上より、アルカリ骨材反応による劣化の進行にともなって、弾性波伝播速度と平均周波数はいずれも低下することが示された。アルカリ骨材反応によるマトリックス部分の劣化を弾性波伝播特性を用いて評価する際には、平均周波数の変化に着目してもよいが、実用性を考慮に入れると、コンクリートの表面状態などの影響をあまり受けない弾性波伝播速度の変化に着目した方が適切であると考えられる。

なお、本研究においてはアルカリ骨材反応を生じさせるため、細骨材の一部にパイレックスガラスを用いた検討を行ったが、実際の反応性骨材を用いた場合においても劣化の形態は同様のものであると考えられるため、本評価手法の有効性は損なわれることはないも

のと考えられる。

5-4-5 まとめ

ここでは、アルカリ骨材反応を生じたコンクリートを対象として、その劣化程度を弾性波伝播特性を利用して評価する手法について検討を行った。この際、コンクリート供試体作製時に細骨材の一部にパイレックスガラスを用いることによりアルカリ骨材反応を促進させた。アルカリ骨材反応を生じたコンクリート内部においては、前述の凍結融解作用を受けたコンクリートと同様に、骨材-マトリックス間の境界相部分だけでなく、マトリックス部分においても劣化が生じていることが示された。その結果、物質浸透抵抗性が低下するだけでなく、圧縮強度や弾性係数といった力学的特性も悪影響を受けることが確認できた。

アルカリ骨材反応を生じたコンクリート劣化評価に際しては、骨材境界相部分だけでなくマトリックス部分までもが劣化を受けているため、凍結融解作用を受けたコンクリートと同様に、弾性波伝播速度を評価指標とすることが有効である。また周波数分布の平均周波数も劣化の進行とともに低下することから劣化評価指標として用いることができるが、実構造物に対する適用時の簡便性等を考慮すると弾性波伝播速度による劣化評価が望ましいものと考えられる。

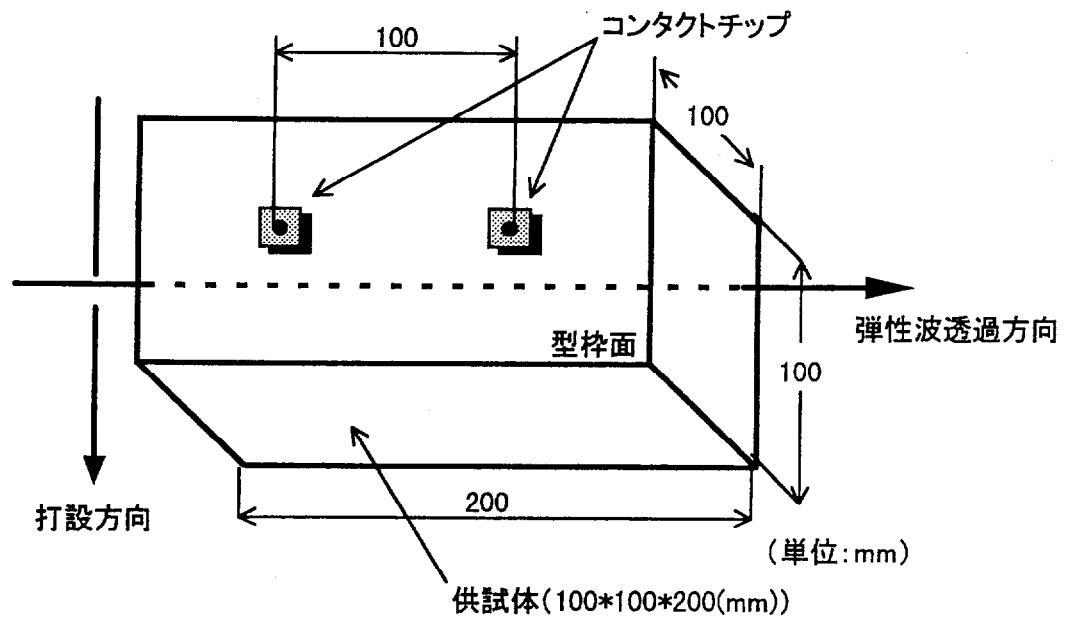


図 5.4.1 供試体概要

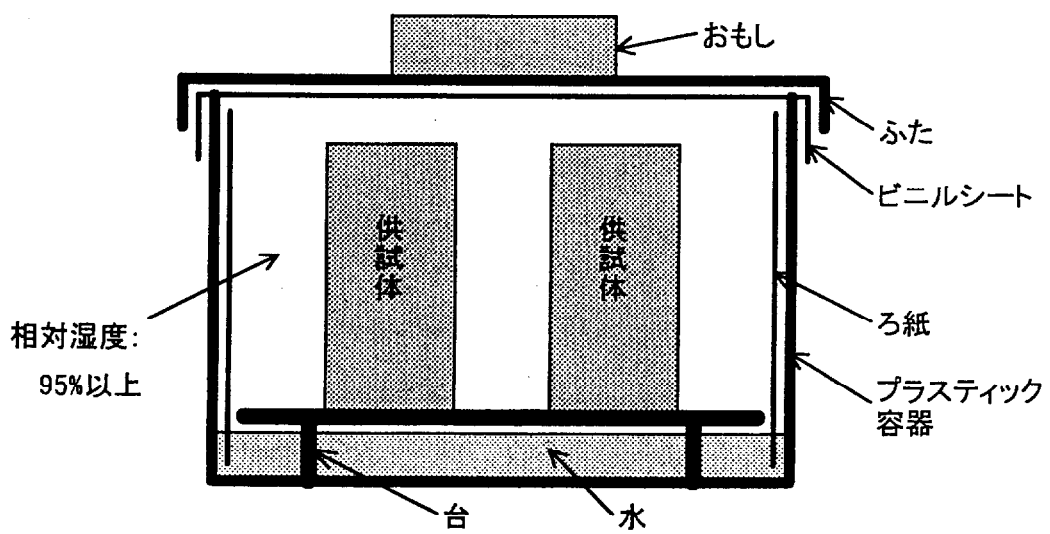


図 5.4.2 湿気箱の概要

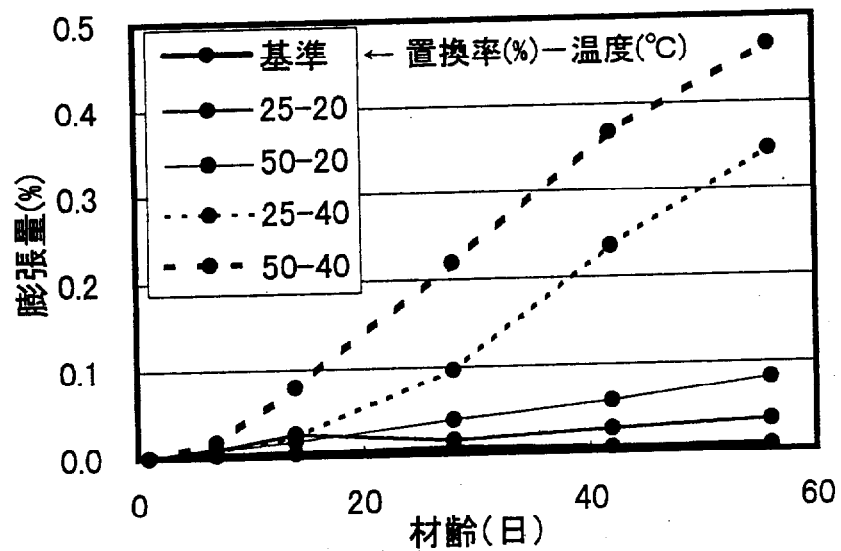


図 5.4.3 膨張量の経時変化

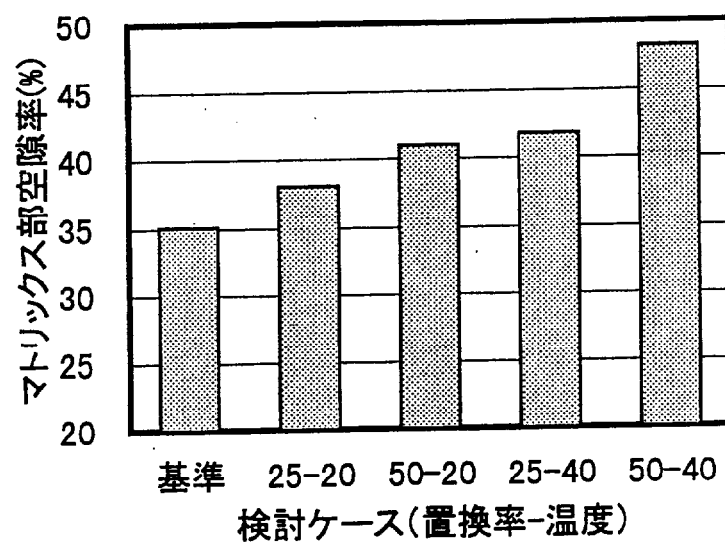


図 5.4.4 アルカリ骨材反応を生じたコンクリートにおけるマトリックス部分の空隙率

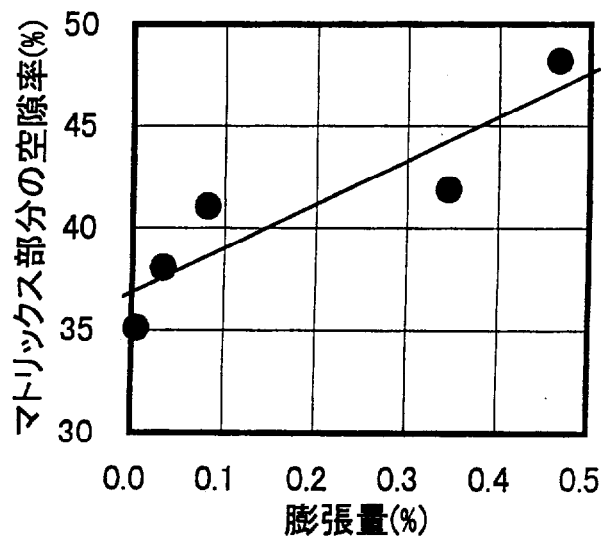


図 5.4.5 膨張量とマトリックス部分の空隙率の関係

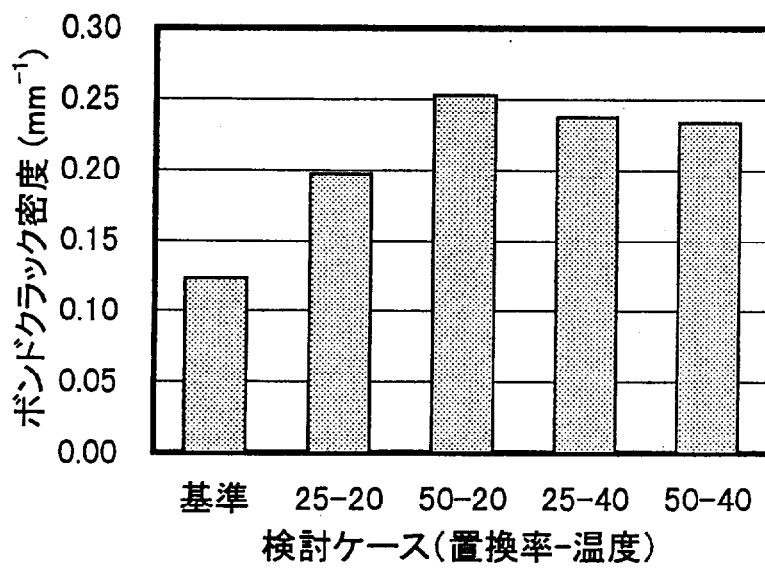


図 5.4.6 アルカリ骨材反応を生じたコンクリートにおけるボンドクラック発生量

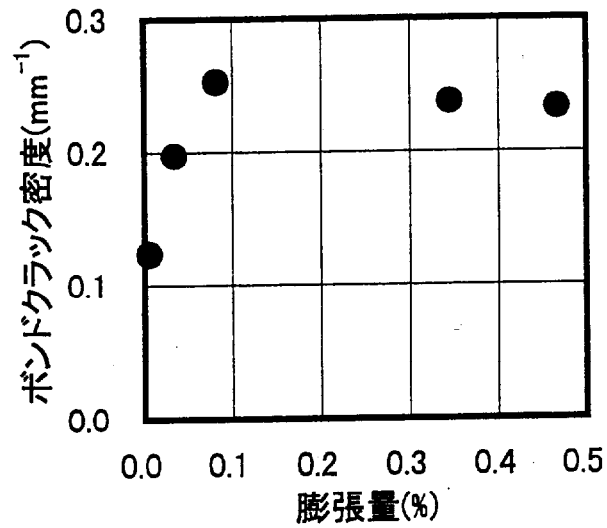


図 5.4.7 膨張量とボンドクラック密度の関係

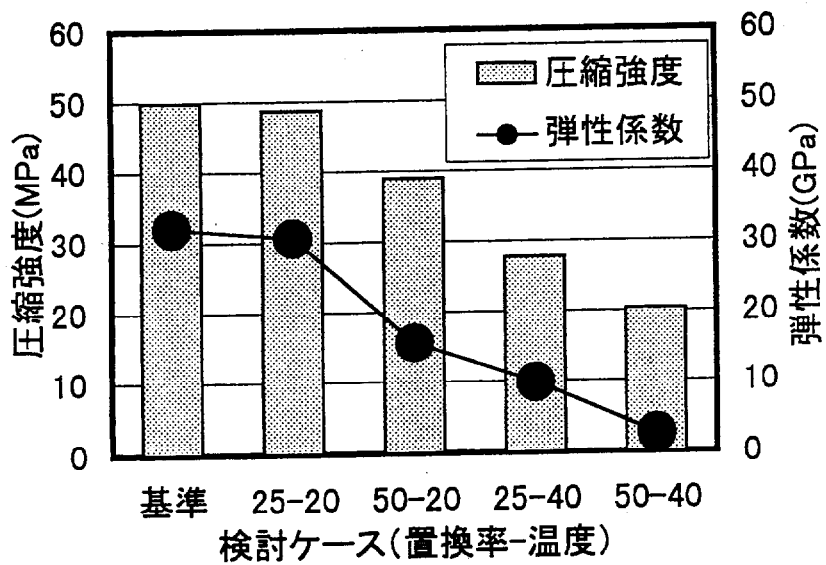


図 5.4.8 アルカリ骨材反応による劣化がコンクリートの力学特性に及ぼす影響

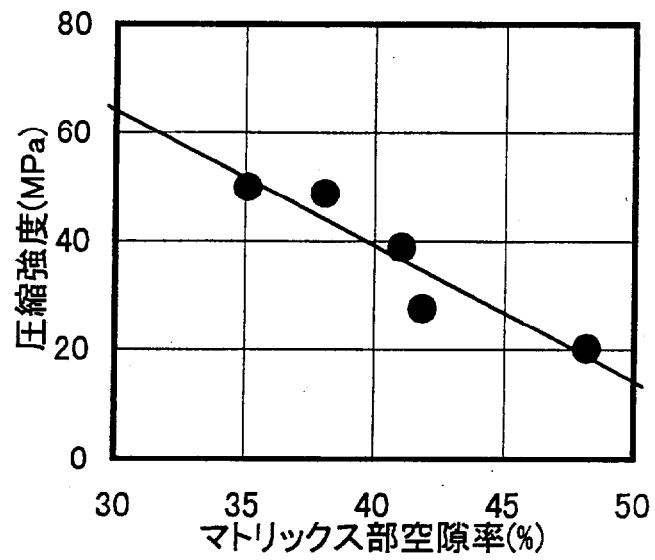


図 5.4.9 マトリックス部分の空隙率と圧縮強度の関係

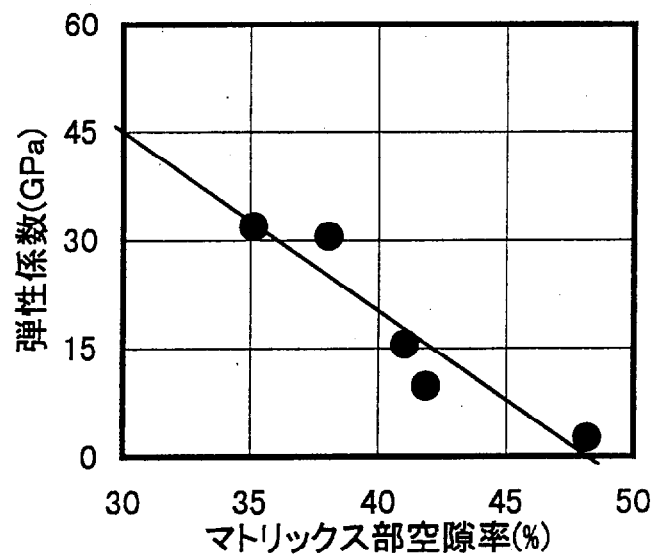


図 5.4.10 マトリックス部分の空隙率と弾性係数の関係

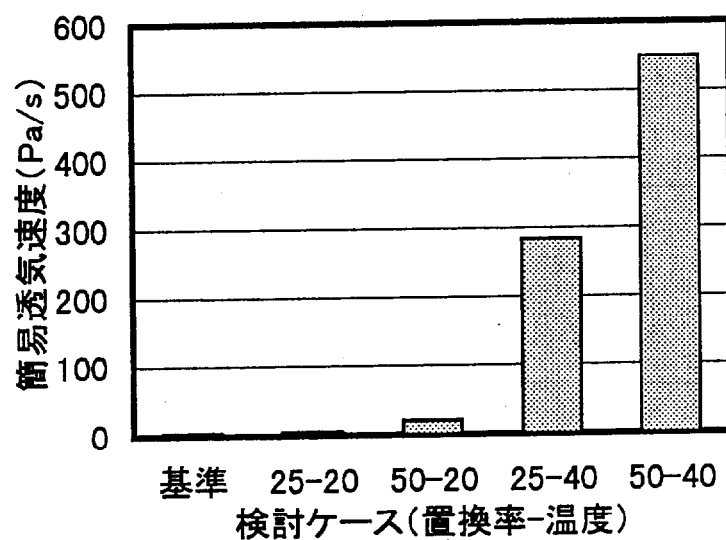


図 5.4.11 アルカリ骨材反応を生じたコンクリートの透気性

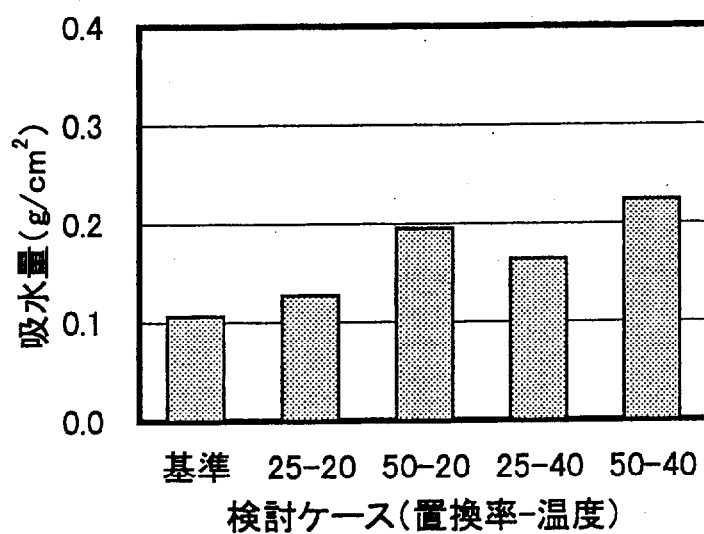


図 5.4.12 アルカリ骨材反応を生じたコンクリートの吸水性能

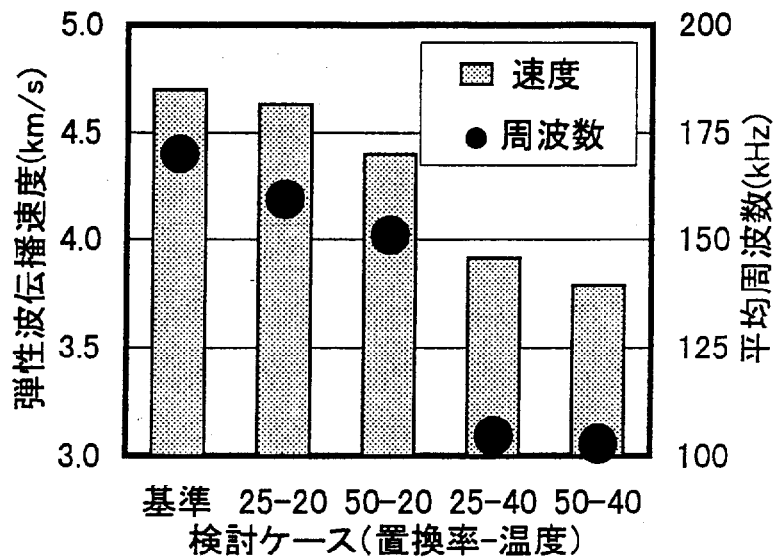


図 5.4.13 アルカリ骨材反応を生じたコンクリートにおける弾性波伝播挙動

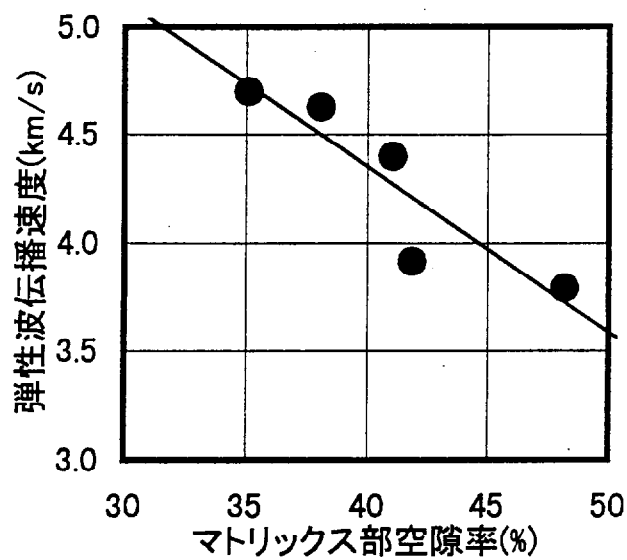


図 5.4.14 マトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の関係

5-5 複数の要因による劣化を受けたコンクリートに関する検討

5-5-1 概要

以上までに、先行載荷、凍結融解作用およびアルカリ骨材反応を受けたコンクリートの弾性波による劣化評価手法について検討を行ってきたが、一般のコンクリート構造物においては、その劣化要因は必ずしも 1 つではなく、複数の劣化要因が存在していることがしばしばである。例えば、寒冷地の港湾構造物の場合、冬期に凍結融解作用を受けるだけでなく、海水および飛沫塩分により塩害が発生する。このような複数の要因によるコンクリートの劣化現象に関しては未だ不明な点が多く残されており、今後の研究成果が望まれるものである。ここでは、複数の要因により劣化を受けたコンクリートを対象として、前節までで示した弾性波によるコンクリートの劣化評価手法の有効性について検討を行った。実験においては、凍結融解作用と先行載荷による複合劣化を受けたコンクリート供試体に対して弾性波透過試験を行い、その弾性波伝播速度および周波数分布の平均周波数を算出した。この際には、凍結融解作用を受けたコンクリートに対して異なる荷重レベルの先行載荷を行ったケース、ならびに異なる荷重レベルまで載荷を受けたコンクリートが凍結融解作用を受けたケースを対象として、劣化の進行にともなう弾性波伝播速度および透過弾性波の周波数分布における平均周波数の変化を調べた。

5-5-2 実験概要

用いた供試体は、前述の 5-2 と同一の材料および配合で作製した $\phi 100 \times 200(\text{mm})$ のコンクリート円柱である。このコンクリート供試体に対して、以下の 2 通りの複合劣化を生じさせた。

- ①凍結融解作用により劣化させた後、先行載荷により劣化させる
 - ②先行載荷により劣化させた後、凍結融解作用により劣化させる
- ①においては、促進凍結融解試験を 50 サイクルまで行ったコンクリート供試体に対して、凍結融解後のコンクリートの破壊荷重に対して、その 20、40、60、80(%)まで一軸

圧縮荷重を加えた。一方、②においては、あらかじめ計測した破壊荷重の 20、40、80(%)まで一軸圧縮载荷を行ったコンクリート供試体に対して促進凍結融解試験を 30 サイクルまで行った。このようにして劣化させたコンクリート供試体に対して弾性波透過試験を行うことにより、劣化供試体の弾性波伝播速度および透過弾性波の周波数分布を算出した。その後、一軸圧縮試験を行い劣化供試体の圧縮強度を求め、劣化の進行にともなうコンクリートの力学特性の変化を評価した。これらの試験は、前述の 5-2 の場合と同様に行った。

5-5-3 実験結果および考察

a) 凍結融解作用後に先行载荷を受けた場合

図 5.5.1 に、50 サイクルの凍結融解繰返しを受けたコンクリート供試体に対して、所定の段階まで先行载荷を行った場合の一軸圧縮強度の変化を示す。これによれば、凍結融解作用を受ける以前よりは圧縮強度は低下しているものの、凍結融解試験後の先行载荷によっては圧縮強度は変化していないことがわかる。このことは、前述の 5-2 の場合と同様であり、先行载荷によりマトリックス部分の空隙率に変化が生じないものと考えられる。

図 5.5.2~3 に、50 サイクルの凍結融解繰返しを受けたコンクリート供試体に対して、所定の段階まで先行载荷を行った場合の弾性波伝播速度および透過弾性波の周波数分布における平均周波数を示す。これらによれば、前述の 5-3 の場合と同様に凍結融解作用により、弾性波伝播速度および平均周波数が低下するものの、凍結融解後に先行载荷を受けても弾性波伝播速度に変化が生じないことがわかる。これは、上記のようにマトリックス部分の空隙率が変化していないことによると考えられる。一方の平均周波数は、凍結融解後の载荷荷重レベルの増加とともに徐々に低下していることがわかる。これは、凍結融解作用を受けて劣化したコンクリートにおいても、先行载荷により内部にマイクロクラックが発生しているものと考えられる。このようなマイクロクラックの増加は、前述の 5-2 の場合と同様に、弾性波伝播速度や圧縮強度には影響しないものの、コンクリート中における弾性波の散乱・反射源の増加をもたらすため透過弾性波の周波数分布に減衰を生じさせ、結果的に平均周波数を低下させるものと考えられる。

以上より、凍結融解作用などにより既に劣化が生じているコンクリートにおいても、先行載荷によるコンクリート中のマイクロクラックの増加を透過弾性波の周波数分布を用いて評価できることが示された。

b) 先行載荷後に凍結融解作用を受けた場合

次に図 5.5.4 に、所定の荷重レベルまで載荷を行ったコンクリート供試体を凍結融解作用により劣化させた場合の圧縮強度を示す。これによれば、既往の研究⁵⁻⁸⁾と同様に、凍結融解作用を受ける前に存在しているコンクリート中のマイクロクラック量が多いほど、凍結融解作用を受けた後の圧縮強度が低下していることがわかる。したがって、高い荷重レベルの先行載荷を受けたコンクリートほど、そのマトリックス部分の空隙率が増加しやすいものと考えられる。これは、マイクロクラックの存在により物質浸透抵抗性が低下し、凍結融解作用による劣化が進行する上で欠かすことのできない水分の移動が容易になったためであると考えられる。

図 5.5.5～6 に、先行載荷を受けたコンクリート供試体を凍結融解作用により劣化させた場合の弾性波伝播速度および平均周波数を示す。前述の 5-2 の場合と同様に、事前の先行載荷により弾性波伝播速度には変化がみられないものの、平均周波数は荷重レベルの増加とともに減少している。さらに、これらの供試体が凍結融解作用を受けることにより、弾性波伝播速度および平均周波数はいずれも減少することがわかる。またその減少傾向は、事前の先行載荷が大きいほど、すなわちコンクリート中に存在するマイクロクラック量が多いほど顕著であることもわかる。このことは、上記の圧縮強度の計測結果を裏付けるものであり、コンクリート中にマイクロクラックが多く存在するほどマトリックス部分の劣化が進行しやすいものと考えられる。このことから、コンクリート中のマイクロクラック存在量を把握しておくことが、コンクリートの耐久性を評価する上で重要であることが改めて確認できた。

以上より、先行載荷と凍結融解作用の複合的な劣化を受けたコンクリートにおいても、圧縮強度と関連の深いマトリックス部分の劣化を弾性波伝播速度により評価できることが示された。

5-5-4 まとめ

ここでは、複数の要因により劣化を受けたコンクリートを対象として、その劣化程度を弾性波伝播特性を利用して評価することを試みた。凍結融解作用と先行載荷による複合劣化を受けた場合においても、マトリックス部分における空隙率の増加は弾性波伝播速度により、またコンクリート中におけるマイクロクラック量は透過弾性波の平均周波数により評価できることが明らかとなった。また本手法により、現在生じている劣化が、複数の劣化要因のうちいずれの劣化要因によるものであるかを断定することはできないが、構造物が置かれている条件、環境・荷重条件なども視野に入れた総合的な検討を行うことで、劣化要因をおおよそ推定することは可能であると考えられる。

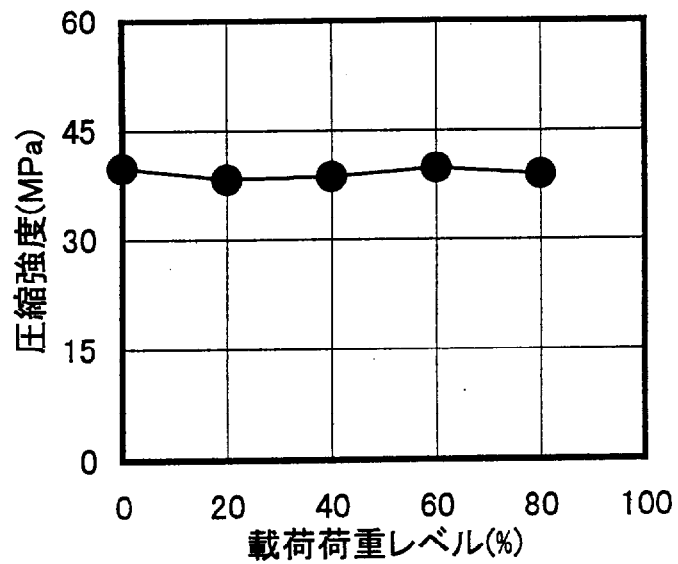


図 5.5.1 凍結融解作用後に先行載荷による劣化を受けた場合の圧縮強度の変化

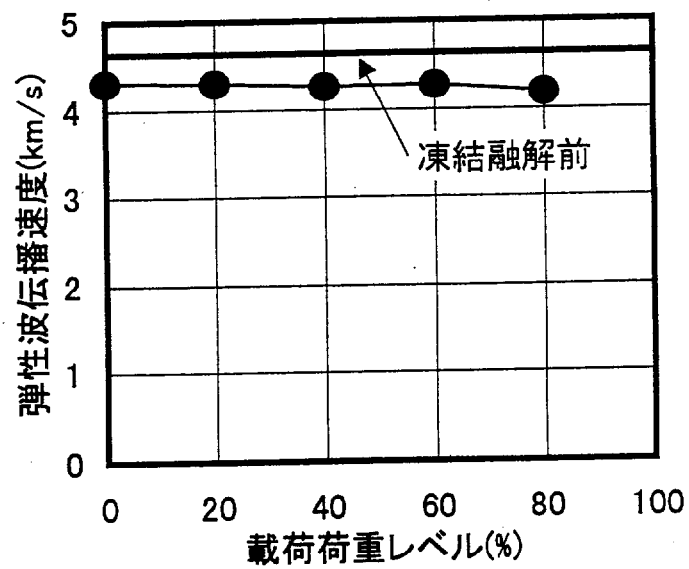


図 5.5.2 凍結融解作用後の先行載荷の荷重レベルが弾性波伝播速度に及ぼす影響

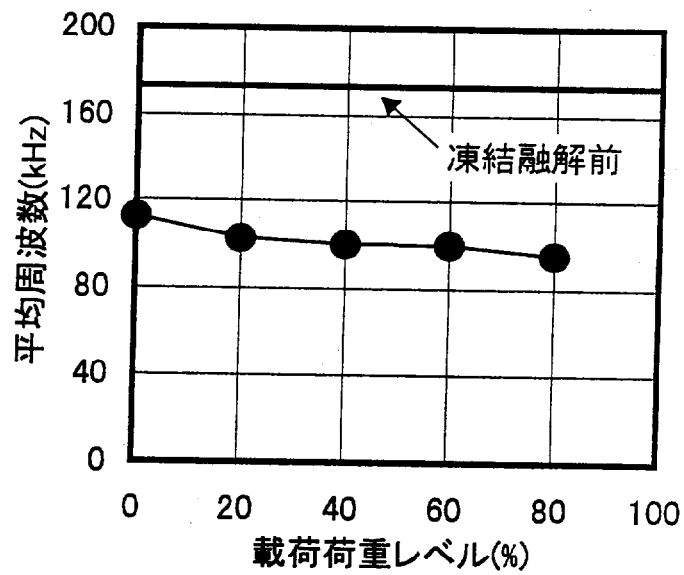


図 5.5.3 凍結融解作用後の先行载荷の荷重レベルが平均周波数に及ぼす影響

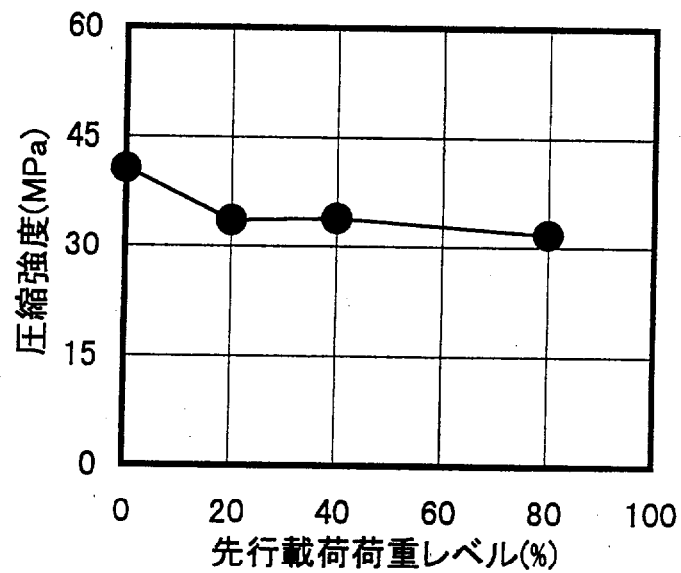


図 5.5.4 先行载荷後に凍結融解作用による劣化を受けた場合の圧縮強度の変化

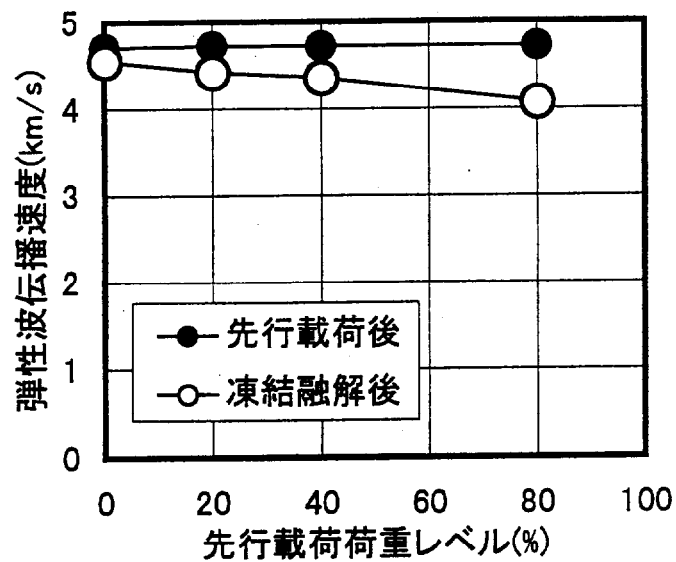


図 5.5.5 凍結融解作用を受ける前の先行載荷荷重レベルが弾性波伝播速度に及ぼす影響

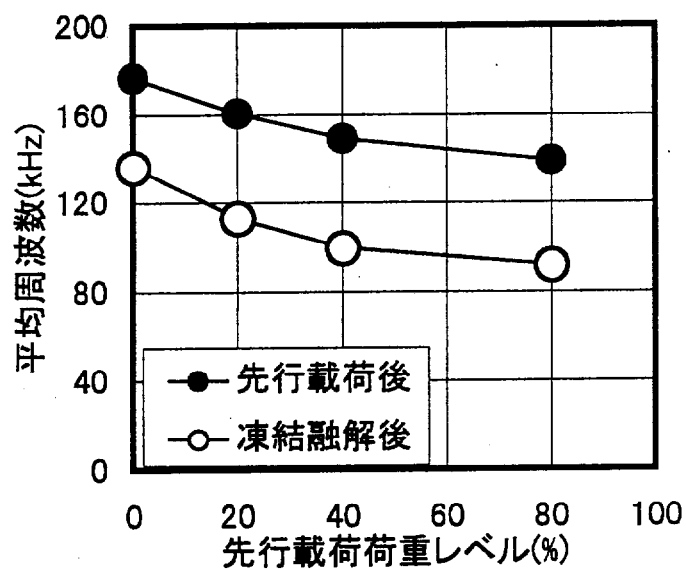


図 5.5.6 凍結融解作用を受ける前の先行載荷荷重レベルが平均周波数に及ぼす影響

5-6 本手法の実構造物への適用に際しての課題

以上のようなコンクリートの劣化評価手法を実構造物に適用する場合には、若干の留意点が存在する。それらのうち代表的なものについて、いくつか言及することとする。

<本手法の適用対象・限界>

本手法の適用対象であるが、コンクリート中における弾性波の減衰は、第4章でも述べたように極めて著しく、その現象は複雑であるため、あまりスケールの大きい構造物・部材に対しては本手法は適用することができない。したがって、コンクリート中における弾性波の限界伝播距離を考えると梁やスラブへの適用が適切であると考えられる。また管理供試体に対する適用も当然のことながら可能である。

さらに構造物の詳細検査の際に実施される局部破壊をとまなう試験（コア試験片の一軸圧縮試験）の際に、その補完的な手法として、本手法を適用すれば、一軸圧縮試験等では得ることのできないコンクリート内部の情報を得ることができ、試験結果の信頼性がさらに向上するものと考えられる。

<発・受振センサの配置>

本研究においては、コンクリート供試体を2つの異なるセンサで挟み込んで弾性波を透過させて測定を行っているが、実構造物においては、このようなセンサ配置が不可能な場合も考えられる。しかしながら、原理上、本研究のような2探触子透過法ではなく、弾性波の発振および受振を同一のセンサを用いて行う1探触子反射法によっても、本研究で提案するようなコンクリートの劣化評価は可能であると判断される。このような場合には、弾性波の反射面に関する検討が追加的に必要であると考えられる。

<コンクリートの表面状態>

第3章でも述べたように、弾性波透過試験結果はコンクリートの表面状態、例えば粗度、含水状態の影響を受けるため、これらに対する配慮が必要である。そのため、センサ接触面の研磨や散水などの事前準備を行い、表面状態を管理した上で弾性波透過試験を行うことが望ましい。また弾性波伝播速度はコンクリート表面状態の影響をあまり受けずに測定することができるので、表面状態の管理が困難な場合には特に有効な指標であるといえる。

<鉄筋の存在>

本研究においては、無筋コンクリートを対象として検討を行ったが、鉄筋の存在は弾性波透過試験結果に幾分かの影響を及ぼす⁵⁻⁹⁾ことが報告されている。したがって、本手法を実構造物に適用する際には、あらかじめ設計図面や鉄筋探査計などを用いて鉄筋配置位置を推定し、鉄筋が存在しない箇所を選択的に測定しなければならない。

弾性波の伝播経路上に鉄筋が存在しなくても、その近傍に鉄筋が存在し、鉄筋の配置方向に弾性波伝播速度を測定した場合においては、鉄筋中における伝播速度の方がコンクリートより大きいと、適切な測定結果を得ることができない。一方、鉄筋の配置方向と直角方向に弾性波透過試験を行った場合、鉄筋の存在は音響インピーダンスの異なる骨材の存在と同様に見なすことができ、その存在数を考慮すれば、鉄筋の存在が弾性波透過試験結果に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

<劣化原因の推定>

コンクリートの劣化原因をあらかじめ把握しておくことは、その後の対策を講じる上で極めて重要である。本手法によれば、骨材境界相部分およびマトリックス部分の劣化の有無、ならびにその程度を評価することができるが、その原因までは推定することはできない。しかしながら、劣化原因については、その構造物がおかれている状況、環境、あるいは使用条件によって、おおそ見当を付けることが可能であるのが一般的である。また本手法により許容できないコンクリートの劣化が発見されれば、局部破壊をとまなう詳細な調査が必要となることから、その際に劣化原因についても検討すればよいものと考えられる。

<初期値問題>

本手法は現状では、当該試験箇所における弾性波伝播特性に関する初期値（あるいは基準値）を必要とするものである。したがって、これから新設される構造物に対しては、竣工時点あるいは竣工後一定期間経過後に初期値を測定しておくことが望まれる。また既設構造物については、現段階における劣化程度を他の直接的な手法（例えば、コア供試体の一軸圧縮試験）により明らかにした上で、当該地点における弾性波伝播特性に関する基準値を測定し、それ以降の劣化進展状況を弾性波伝播特性の経時変化から追跡することができる。さらに今後、本手法を多くのコンクリート部材・構造物に対して適用していくことに

より、弾性波伝播特性に関する測定データを蓄積しデータベース化を図ることも初期値問題解決のための有力な方策の1つである。その際には、使用材料・配合、使用環境条件、コンクリート表面状態などが弾性波の伝播速度および周波数特性に及ぼす影響に関するデータを多く収集し、それらの影響程度を考慮したコンクリートの劣化評価手法の構築を行うことが望ましい。

5-7 本章のまとめ

本章においては、前章までに得られたコンクリート中における弾性波伝播挙動に関する知見に基づいて、弾性波によるコンクリートの劣化評価手法について検討を行った。実験においては、先行載荷、凍結融解作用およびアルカリ骨材反応により劣化したコンクリート供試体を用いて、これらの劣化がコンクリート特性に及ぼす影響を把握した上で、それぞれに適切な弾性波による評価指標を検討した。本研究では、コンクリート内部の劣化を、

①骨材境界相部分の劣化

②マトリックス部分の劣化

に着目して取り扱ってきた。前節までの検討結果を各劣化要因ごとに、表 5.7.1 に示す。ここでは、以上までの検討結果を踏まえて、総合的な考察を行うこととする。

<劣化の進行にともなうコンクリート特性の変化>

図 5.7.1~6 に、①の評価指標であるボンドクラック密度および②の評価指標であるマトリックス部分の空隙率と、コンクリートの圧縮強度、弾性係数および簡易透気速度の関係を示す。図 5.7.1~3 によれば、②の骨材境界相部分の劣化は、圧縮強度や弾性係数には影響を及ぼさないものの、物質浸透抵抗性を低下させる。ボンドクラック密度が 0.25mm^{-1} 程度で限界値となっているのは、ボンドクラックの発生が飽和状態に達しているためである。ボンドクラックの発生が飽和状態に達した以降は、①のマトリックス部分の劣化が進行するものと考えられる。図 5.7.4~6 によると、マトリックス部分の劣化は物質浸透抵抗性を低下させるだけでなく、圧縮強度あるいは弾性係数の低下をも引き起こすことがわかる。この傾向は、劣化要因の違いにかかわらず認められた。

<弾性波伝播特性を利用したコンクリートの劣化評価>

第4章の検討結果より、マトリックス部分の空隙率は弾性波伝播速度と、またマイクロクラックや遷移帯の存在は弾性波の周波数特性と相関があることが示されていることから、①の骨材境界相部分の劣化については弾性波の周波数特性により、また②のマトリックス部分の劣化については弾性波の伝播速度により評価できるものと考えられる。

①骨材境界相部分の劣化評価

図 5.7.7~8 に、①の評価指標であるボンドクラック密度と弾性波伝播速度および平均

周波数の関係を示す。これらによれば、骨材境界相部分の劣化は弾性波伝播速度では評価できないが、平均周波数の変化に着目すれば評価可能であることが示されている。これは、第4章においても述べたように、マイクロクラックの存在により弾性波の散乱・反射が顕著となり、周波数分布における高周波域の減衰が生じたためである。本研究の範囲内においては、健全な状態からボンドクラックの発生が飽和するまでに、平均周波数が 180kHz から 140kHz まで低下した。この場合、コンクリートの簡易透気速度は 5 倍程度まで上昇し、コンクリートの物質浸透抵抗性が損なわれる。

②マトリックス部分の劣化評価

次に、②の評価指標であるマトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度および平均周波数の関係を図 5.7.9～10 に示す。これらより、マトリックス部分が劣化を受け、その空隙率が増加することにより、弾性波伝播速度が低下することがわかる。マトリックス部分の空隙率が 35% から 45% まで変化することにより、弾性波伝播速度はおおよそ 1.5km/s 変化した。この場合、コンクリートの圧縮強度は初期の 1/3 まで、弾性係数は 1/5 まで低下する。また図 5.7.10 から明らかなように、マトリックス部分の劣化は平均周波数を用いても評価できる。しかしながら、弾性波の周波数特性はコンクリートの表面状態などの測定条件の影響を大きく受けるため、実用性を考慮すると、測定条件等の影響をあまり受けない弾性波伝播速度をマトリックス部分の劣化評価指標とすることが望ましいといえる。また弾性波伝播速度の変動範囲は、0.01km/s のオーダーであったが、劣化による弾性波伝播速度の変動幅はそれを大きく上回るものであり、弾性波伝播速度はマトリックス部分の劣化に鋭敏な指標であるといえる。

このように、コンクリート内部で生じる劣化のうちで、マトリックス部分の劣化評価に対しては弾性波伝播速度が、また骨材境界相部分の劣化評価に対しては透過弾性波の周波数特性が有効であることが示された。この劣化評価手法は、凍結融解と先行載荷の複合作用を受けたコンクリートの劣化評価に対しても有効であった。しかしながら、本劣化評価手法は、現状では、弾性波伝播特性に関する初期値（あるいは基準値）を必要とするものであり、新設構造物に対しては初期値の収集が、また既設構造物に対しては劣化状態を踏まえた上での基準値の計測が望まれる。将来的には弾性波伝播特性に関する基礎データの蓄積を図り、コンクリートの劣化程度と弾性波伝播特性の関係についてのデータベースが構築されることが期待される。

表 5.7.1 コンクリートの劣化状況と弾性波伝播挙動のまとめ

劣化要因	劣化部位		コンクリート特性			弾性波伝播挙動	
	骨材境界	マトリックス	強度特性	変形特性	浸透抵抗性	伝播速度	平均周波数
先行載荷	○	×	→	→	↓	→	↓
凍結融解作用	○	○	↓	↓	↓	↓	↓
アルカリ骨材反応	○	○	↓	↓	↓	↓	↓

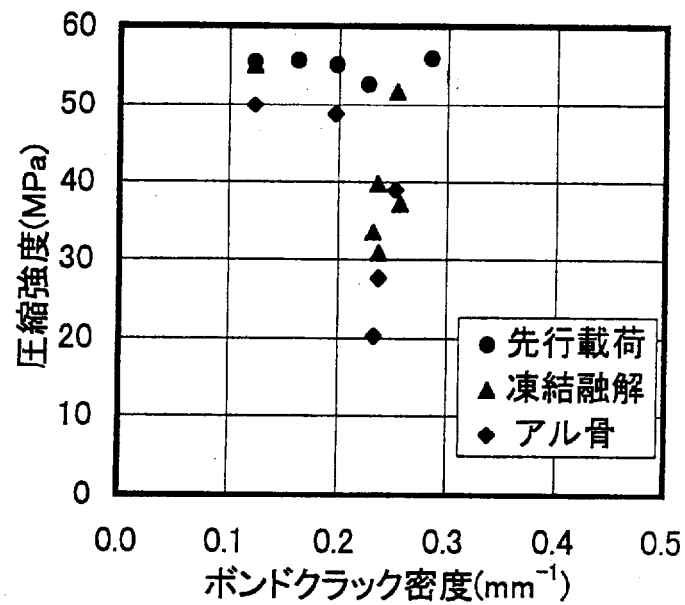


図 5.7.1 ボンドクラック密度と圧縮強度の関係

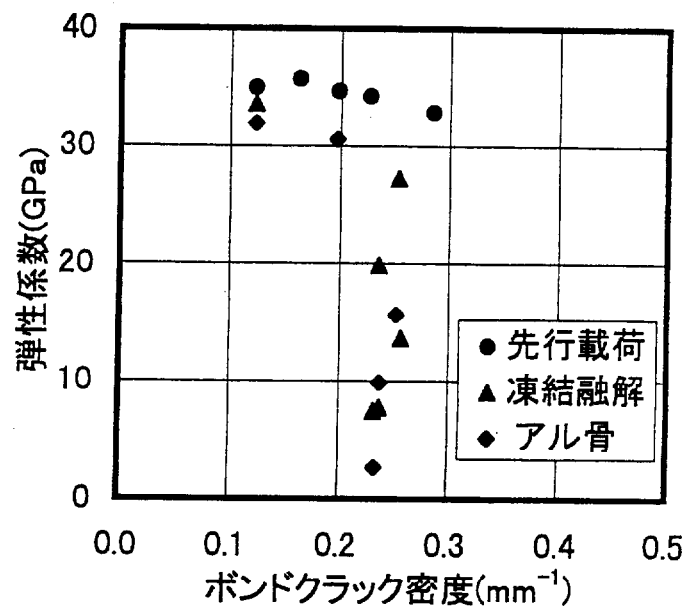


図 5.7.2 ボンドクラック密度と弾性係数の関係

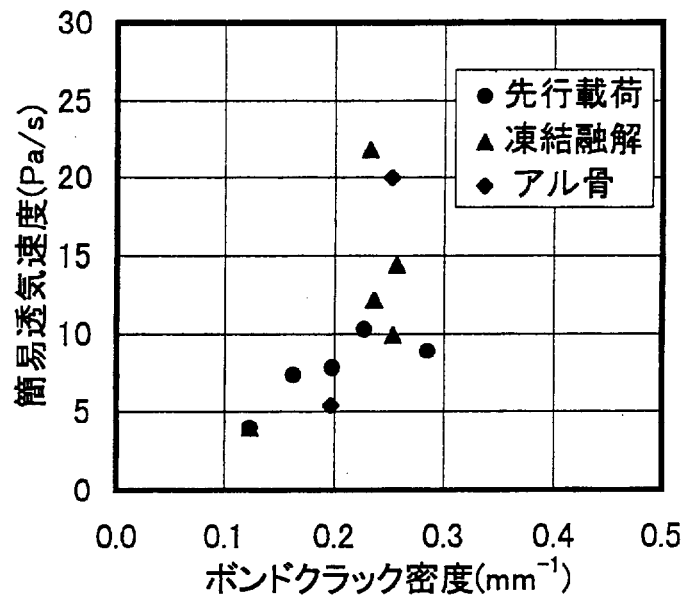


図 5.7.3 ボンドクラック密度と簡易透気速度の関係

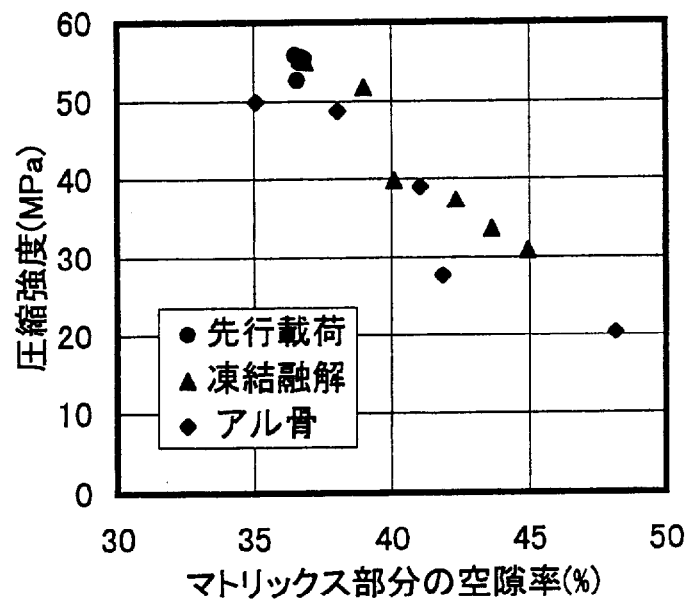


図 5.7.4 マトリックス部分の空隙率と圧縮強度の関係

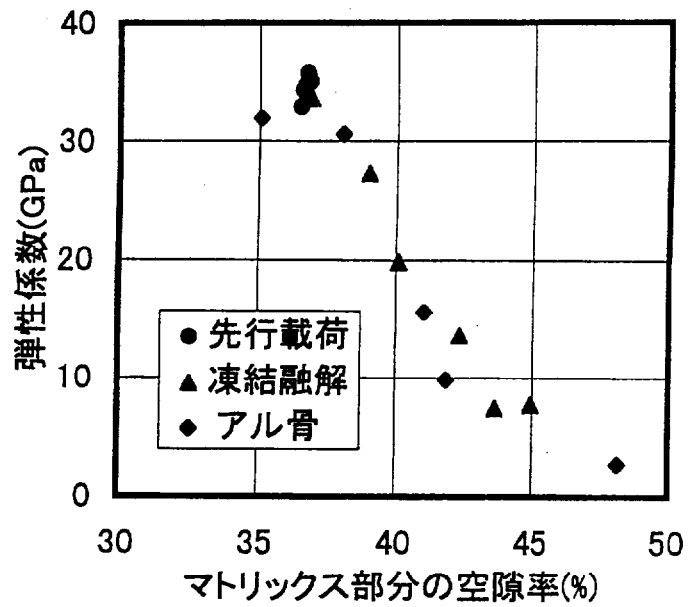


図 5.7.5 マトリックス部分の空隙率と弾性係数の関係

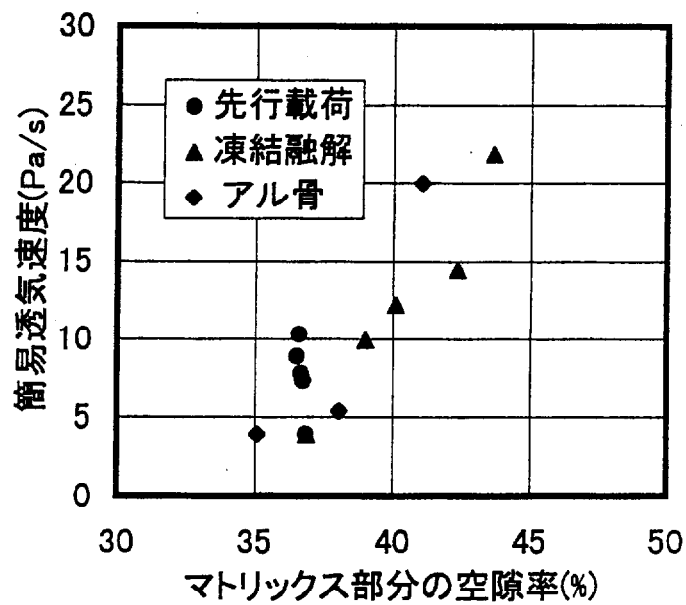


図 5.7.6 マトリックス部分の空隙率と簡易透気速度の関係

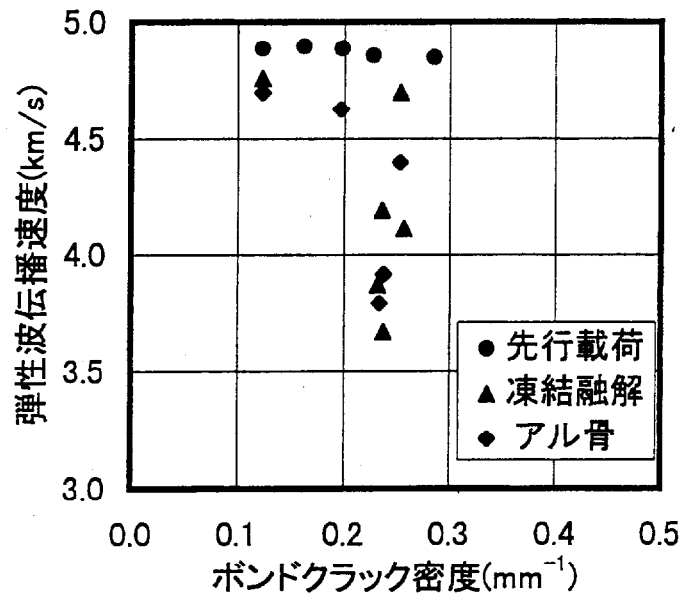


図 5.7.7 骨材境界相部分の劣化が弾性波伝播速度に及ぼす影響

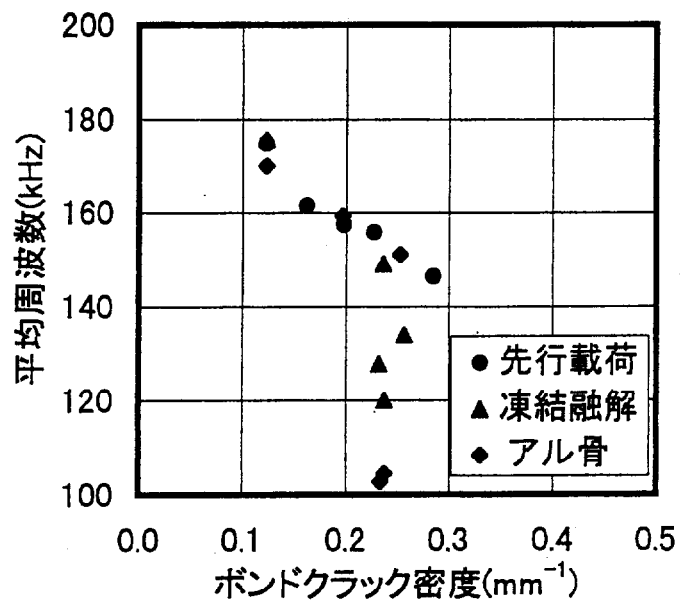


図 5.7.8 骨材境界相部分の劣化が平均周波数に及ぼす影響

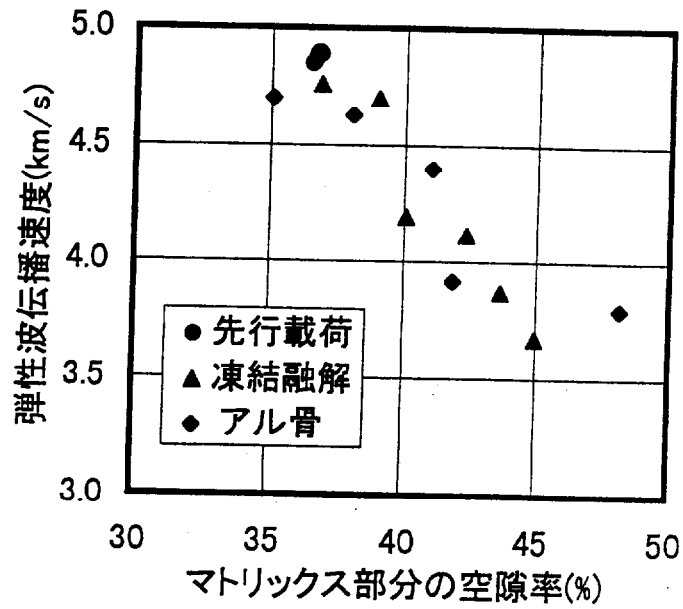


図 5.7.9 マトリックス部分の劣化が弾性波伝播速度に及ぼす影響

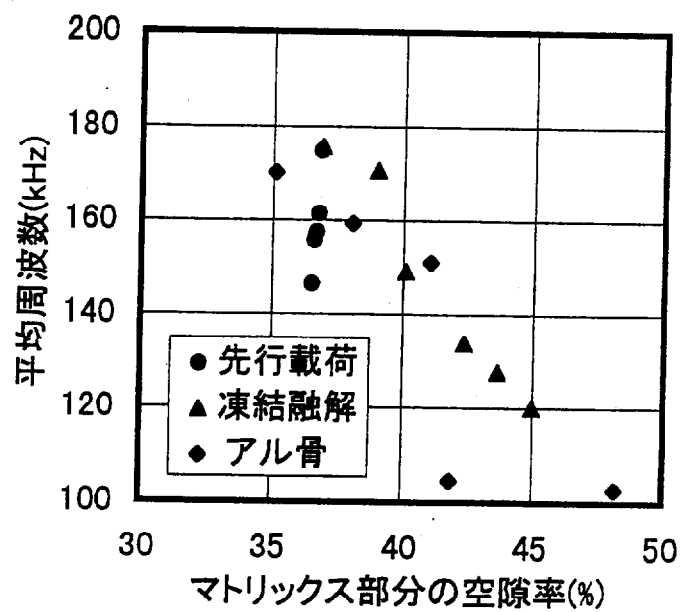


図 5.7.10 マトリックス部分の劣化が平均周波数に及ぼす影響

第6章

結論

本研究は、コンクリート中における弾性波伝播挙動について基礎的かつ本質的な検討を行った上で、その知見をもとに、構造物の維持管理システムの構築に欠かすことのできないコンクリートの劣化評価手法を提案することを目的として行ったものである。本研究全体を通じて得られた総合的結論を以下に示す。

<総合的結論>

コンクリート中における弾性波伝播挙動の複雑性は、それぞれ単体としては均一弾性体とみなすことのできるセメントペーストおよび骨材がランダムに混合し、不均一な複合体となること、ならびに両者の間に境界相が発生することによりもたらされることが示された。セメントペースト中に存在する骨材の大きさ、量、界面性状が、弾性波伝播挙動に複雑に影響を及ぼしあっているが、これらの影響要因を別個に取り扱うことにより、その影響を明らかにすることができた。また骨材の大きさおよび量が弾性波の伝播速度および周波数特性に及ぼす影響を、定性的にはあるが、理論的に説明することができた。

さらに、セメントペースト・マトリックス部分の空隙率やマイクロクラックの存在が弾性波伝播挙動に及ぼす影響についても検討を行った結果、マトリックス部分の空隙率は弾性波伝播速度に、マイクロクラックの存在は弾性波の周波数特性に反映されるものであることが明らかとなった。

これらの知見に基づいて、弾性波によるコンクリートの劣化評価の可能性について検討

を行った結果、先行載荷等により骨材境界相部分が劣化を受けボンドクラックが発生しているような場合においては、弾性波の周波数特性の変化に着目することにより、また凍結融解作用やアルカリ骨材反応により骨材境界相部分だけでなくマトリックス部分までもが劣化を受けているような場合においては、弾性波伝播速度の変化に着目することにより評価できることが示された。またあわせて上記のような劣化が、コンクリートの強度特性、変形特性および物質浸透抵抗性に及ぼす影響についても明らかにした。本研究で対象としたすべての劣化状態は、外観の目視観察では評価することができないレベルのものであり、本手法の有効性が示されたといえる。

以上のように本研究により、弾性波伝播特性を利用したコンクリートの劣化評価が可能となることが示された。今後は、実構造物への適用に対する問題点についてさらに検討を進める必要があり、将来的にはコンクリートの劣化程度と弾性波伝播特性の関係に関するデータベースの構築が望まれる。

各章ごとに得られた結果を以下に示す。

<第3章で得られた結果>

本章においては、本研究で用いた入射弾性波の特性評価と各種試験条件が弾性波透過試験結果に及ぼす影響について検討を行い、第4章以降の検討をスムーズに進めるための適切な弾性波透過試験方法およびその試験条件を決定した。

①本研究で用いた入射弾性波の特性

本研究に用いる入射弾性波の特性評価を行った結果、広帯域垂直型超音波探触子により発振される弾性波は、0~500(kHz)という比較的広い範囲にわたって周波数成分を有していることが示された。一般的なコンクリートに用いられる骨材最大寸法は20mm程度であり、これと同等の長さの波長に相当する弾性波の周波数は200kHzとなる。したがって、骨材に起因する弾性波の散乱や骨材界面に発生するボンドクラックに関する検討を行うのに適していると考えられる。

②試験条件に関する検討

- a) センサーコンクリート間に適切な接触媒質を用いることにより、バラツキの少ない高精度な測定を行うことができることが示された。したがって、コンクリートに対して弾性波透過試験を行う場合には、センサのコンクリート表面に対する設置方法に十分留意する必要がある、そのためには接触媒質を使用することが望ましい。
- b) コンクリート表面粗度が弾性波の受振振幅に及ぼす影響が顕著であった。したがって、伝播速度だけでなく最大振幅値や周波数特性などの弾性波の減衰に着目した検討を行う際には、コンクリート表面粗度を適切に管理しておく必要がある。例えば、測定箇所のグラインダー研磨は試験結果のバラツキを小さく抑える上で有効であることが示された。また弾性波伝播速度は弾性波の媒体特有の物性であり、表面粗度には影響しないことが確認された。
- c) コンクリート表面の含水状態の変化により、弾性波透過試験結果は少なからず影響を受けることがわかった。すなわち、含水率が低下しコンクリート表面の乾燥が進行するにつれて、弾性波伝播速度は増加し、最大振幅値は減少する。したがって実構造物に対して弾性波透過試験を実施する際には、コンクリート表面の含水状態についても管理する必要があることが示された。
- d) 材齢 28 日を経過したコンクリートにおいては、弾性波伝播速度はほぼ一定となっており、また最大振幅値は増加しているものの、その増加量は比較的小さいことがわかった。
- e) 供試体寸法および形状が弾性波伝播速度に及ぼす影響は小さいが、透過弾性波の周波数分布に及ぼす影響は無視できないほど大きいことが示された。供試体寸法が大きくなると周波数分布は全体的に減少していき、また円柱のように側面からの反射波の影響を受けやすい形状の供試体においては、低周波成分の増加が認められた。

<第4章で得られた結果>

本章では、コンクリートの劣化評価を弾性波伝播特性を利用して行うため基礎資料を得ることを目的として、コンクリート中における弾性波伝播挙動について検討を行った。この際には、コンクリートを構成材料単体にわけて、それぞれにおける弾性波伝播挙動について検討を行い、続いてこれらが複合してコンクリートとなった場合の基本的な弾性波伝播挙動を明らかにするため、モデル骨材供試体による検討を行った。以上の検討結果を踏

まえて、実際のコンクリート供試体を作製し、コンクリートの内部状態の変化と弾性波伝播挙動の関係を明らかにすべく種々の検討を行った。

①コンクリート構成材料単体による検討

- a) セメントペースト単体においては、材料内部の密実性を平均的に表していると考えられる空隙率と弾性波伝播速度の間には明確な対応関係が存在することが示された。しかしながら透過弾性波の周波数分布には、W/C の違いによる変化は認められなかった。
- b) 骨材単体中を透過した弾性波の周波数分布は、300kHz 以下においてはセメントペーストとほぼ同様なものであった。
- c) コンクリート構成材料単体、すなわちセメントペーストおよび骨材は均一な弾性体とみなすことができ、コンクリートはこれらの均一弾性体の複雑な複合体であると仮定できることが示された。

②モデル骨材供試体による検討

- a) モデル骨材の直径が大きくなるにつれて、弾性波の周波数分布における高周波域の減衰が顕著となるが、弾性波伝播速度はあまり変化しなかった。
- b) モデル骨材の混入量は、モデル骨材の大きさほどは周波数分布に影響を及ぼさないものの、弾性波伝播速度の支配的要因となる。
- c) 異なる材質のモデル骨材を用いることで、マトリックス部分との音響インピーダンス差を変化させた場合、透過弾性波の高周波域における減衰特性に変化が見られた。
- d) 上記の結果について、粒子分散型複合材料に対して定式化された弾性定数や球形粒子による弾性波の散乱現象を記述した関係式を用いた理論的検討を行うことにより、定性的にはあるがその妥当性が確認できた。

③コンクリート中の骨材の影響

- a) 弾性波伝播速度は骨材最大寸法の変化にあまり鋭敏ではないが、透過弾性波の周波数特性に関しては、骨材最大寸法が大きくなるにつれて高周波域の減衰が顕著となった。
- b) 骨材形状の違いは、コンクリート中を透過した弾性波の伝播速度および周波数特性にほとんど影響しなかった。

c) コンクリート中の骨材量は弾性波伝播挙動と深い関連があった。骨材量の増加により、弾性波伝播速度は増加し、周波数分布における高周波域の減衰を激しくすることがわかった。

d) 骨材界面性状の違いは、弾性波伝播速度にはあまり影響を及ぼさないが、透過弾性波の周波数分布を大きく変化させることが明らかとなった。骨材界面性状が異なることにより、骨材界面における弾性波の散乱・反射が著しくなり、結果的に周波数分布における高周波域の減衰程度が変化した。

④コンクリートの配合条件の影響

a) W/C や空気量といった配合条件にかかわらず、マトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の間には密接な関係があることがわかった。本研究の範囲内においては、マトリックス部分の変化により約 1km/s の弾性波伝播速度の変化が生じた。

b) マトリックス部分の空隙率の変化は骨材-マトリックス間の音響インピーダンス差を変化させることから、骨材界面における弾性波の散乱程度が変化したし、結果的に周波数分布における高周波域の減衰が生じた。

⑤コンクリート中に存在するマイクロクラックの影響

a) コンクリート中にランダムに分散して存在するマイクロクラックは、コンクリート中を伝播する弾性波の伝播速度にはほとんど影響しないものの、周波数特性を大きく変化させることが示された。これは、マイクロクラックの存在が弾性波の散乱・反射源となり、その大きさに対応した波長を有する弾性波の減衰を引き起こすためである。

b) 本研究で対象としたマイクロクラックは、その存在状況がランダムで不規則であるため、弾性波の透過方向にかかわらず上記a)の傾向が認められた。また外力を受けてマイクロクラックが開口した状態になると弾性波の減衰が著しくなることがわかった。

⑥コンクリートの施工条件の影響

a) 過剰な締固めにより骨材含有量の鉛直方向分布に偏りを生じた場合、弾性波伝播挙動も鉛直方向に変化することがわかった。骨材の沈降により供試体下部ほど骨材含有量が増加し、弾性波伝播速度も大きくなった。

b) 養生条件の相違によるコンクリート内部状態の変化は、マトリックス部分の空隙率の変化として捉えることができ、その変化に対応してコンクリート中における弾

性波伝播挙動に変化が生じた。

<第5章で得られた結果>

本章においては、第4章までに得られたコンクリート中における弾性波伝播挙動に関する知見に基づいて、弾性波によるコンクリートの劣化評価手法について検討を行った。評価の対象としては、

①マトリックス部分の劣化

②骨材境界相部分の劣化

とし、それぞれの評価に適切な指標について検討を行った。このような劣化を生じさせるため、劣化要因として、先行載荷、凍結融解作用、アルカリ骨材反応、ならびに先行載荷と凍結融解作用の複合作用を取り上げ、これらにより劣化したコンクリート中の弾性波伝播挙動を調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。

①マトリックス部分の劣化評価

凍結融解作用およびアルカリ骨材反応を受けたコンクリート内部においては、そのマトリックス部分が劣化を受け空隙率が増加することが示された。このような劣化は、コンクリートの物質浸透抵抗性を損ねるだけでなく、強度特性および変形特性にも悪影響を及ぼすものであることが確認された。したがって、マトリックス部分の劣化は、コンクリート部材・構造物の耐力および剛性を低下させるものであり、コンクリートの劣化評価を行う上で重要な評価対象であることがあらためて示された。

このようなマトリックス部分の劣化を弾性波伝播特性を利用して評価する場合、弾性波伝播速度に着目することが有効であることがわかった。これは、マトリックス部分の劣化にともなう空隙率の増加と弾性波伝播速度の関係を利用したものである。この弾性波伝播速度に着目することにより、凍結融解作用による劣化およびアルカリ骨材反応による劣化のいずれについても的確に評価することができた。また透過弾性波の周波数特性もマトリックス部分の劣化の進行とともに変化することから劣化評価指標とすることもできるが、弾性波の周波数特性はコンクリートの表面状態などの測定条件の影響を大きく受けるため、実用性を考慮すると、測定条件等の影響をあまり受けない弾性波伝播速度を評価指標とすることが望ましいといえる。

②骨材境界相部分の劣化評価

先行載荷を受けたコンクリート内部においては、主に骨材－マトリックス間の境界相部分が劣化を受けボンドクラックが発生していることが示された。このような劣化は、コンクリートの力学的特性にはあまり影響しないものの、コンクリートの物質浸透抵抗性を損ねることが確認された。したがって、このような骨材境界相部分の劣化はコンクリート中の物質移動を容易にするため、鉄筋の腐食を誘発するなど、コンクリート構造物の耐久性を考える上で重要なものである。

このような骨材境界相部分の劣化を弾性波伝播特性を利用して評価する場合、透過弾性波の周波数特性に着目することが有効であることがわかった。これは、骨材境界相部分の劣化により発生したボンドクラックが弾性波の散乱・反射源となり、周波数分布における高周波域の減衰が卓越するためである。この高周波域に減衰を例えば、平均周波数により定量化し、評価指標とすることで、骨材境界相部分の劣化を的確に評価できることが示された。また弾性波伝播速度は、コンクリート中のマイクロクラックの存在には鈍感であり、骨材境界相部分の劣化評価指標としては適切でないこともわかった。

このように、コンクリート内部で生じる劣化のうちで、マトリックス部分の劣化評価に対しては弾性波伝播速度が、また骨材境界相部分の劣化評価に対しては透過弾性波の周波数特性が有効であることが示された。この劣化評価手法は、凍結融解と先行載荷の複合作用を受けたコンクリートの劣化評価に対しても有効であった。しかしながら、本劣化評価手法は現状では、弾性波伝播特性に関する初期値（あるいは基準値）を必要とするものであり、新設構造物に対しては初期値の収集が、また既設構造物に対しては劣化状態を踏まえた上での基準値の計測が望まれる。将来的には弾性波伝播特性に関する基礎データの蓄積を図り、コンクリートの劣化程度と弾性波伝播特性の関係についてのデータベースが構築されることが期待される。

謝 辞

本研究の取りまとめにあたり、研究全般にわたりまして、常に高い見地からの御指導、御鞭撻を賜りました東京工業大学教授 大即信明先生に、心より感謝の意を表します。また東京工業大学教授 二羽淳一郎先生には、本研究の内容につきまして多くの貴重な御助言を頂きました。心より感謝いたします。

東京工業大学教授 三木千壽先生、同教授 川島一彦先生、同助教授 廣瀬士一先生には、御多忙の中、本論文の審査を行っていただき、研究の内容ならびに取りまとめに関し、多くの御指導を頂きました。深く感謝いたします。

また東京工業大学名誉教授 長瀧重義先生には、本研究の着手当初から、研究の内容のみならず、研究に対する姿勢などについて、数々の懇切な御助言を頂きました。心より感謝の意を表します。元東京工業大学助手 鎌田敏郎氏には、公私にわたり有益な御助言を頂くとともに、常に暖かい激励の御言葉を頂戴いたしました。ここに厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、五年間の大学院在籍中には、東京工業大学コンクリート研究室の皆様をはじめとして、いくら紙面があっても書き切れないほど多くの方々の御世話になりました。現在の自分があるのも、そのような多くの方々のお力添え、ならびに励ましがあったからであります。お世話になったすべての方々に、心から感謝するとともに、ここに厚く厚く御礼申し上げます。本当にありがとうございました。

平成11年3月

岩波 光保

参考文献

第1章

- 1-1) 2010 建設市場予測研究会 編 (建設省建設経済局調査情報課 監修) : 建設市場 2010 年までの展望, ぎょうせい, 1994.
- 1-2) A.Neville : Maintenance and Durability of Structures, Concrete International, Vol.19, No.11, pp.52-56, 1997.
- 1-3) 土木学会 : コンクリート構造物の維持管理指針 (案) , コンクリートライブラリー, No.81, pp.7-9, 1995.
- 1-4) 岡田清 : コンクリート構造物の寿命, セメント・コンクリート, No.470, pp.2-7, 1986.
- 1-5) 尼崎省二, 明石外世樹 : 超音波法によるコンクリート部材のひび割れ深さ測定に関する基礎的研究, 第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.133-136, 1980.
- 1-6) British Standards Institution : Recommendations for Measurements of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete, BS 1881, Part 203, pp.618-619, 1986.
- 1-7) 岩波光保, 鎌田敏郎, 長瀧重義 : 鉄筋コンクリート梁のひび割れモニタリングにおけるA E法の適用, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.192-197, 1997.

第2章

- 2-1) 佐藤泰夫 : 弾性波動論, 岩波書店, 1978.
- 2-2) 伊藤毅 : 音響工学原論, コロナ社, 1955.
- 2-3) 明石外世樹 : コンクリートの非破壊試験に関する研究, 土木学会論文集, No.390/V-8, pp.1-22, 1988.
- 2-4) 野崎喜嗣 : コンクリートの内部条件が弾性波伝播に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文報告集, No.425, pp.9-17, 1991.
- 2-5) 三上修一, 大島俊之, 村丸清英, 角田典史雄 : 不均一性材料の超音波伝播と減衰特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.515-524, 1995.
- 2-6) A.Benedetti : On the Ultrasonic Pulse Propagation into Fire Damaged Concrete, ACI Structural Journal, Vol.95, No.3, pp.259-271, 1998.
- 2-7) E.Burr, N.Gold, and U.Werner : Wave Propagation in Concrete: Theoretical and Numerical Results for Meanfield Attenuation, Acoustical Imaging, Vol.22, pp.805-810, 1996.
- 2-8) Y.Ito, and T.Uomoto : Effect of Coarse Aggregates on Velocity of Elastic Waves Through Concrete, Proceedings of the 1994 Far East Conference on NDT, pp.291-298, 1994.
- 2-9) 小阪義夫, 山田和夫, 土屋宏明 : コンクリートの超音波波動伝播特性に関する解析的検討, セメント・コンクリート論文集, No.43, pp.226-231, 1989.
- 2-10) 長谷川寿夫, 藤原忠司 : コンクリート構造物の耐久性シリーズ 凍害, 技報堂出版, 1988.

- 2-11) 野尻陽一, 田沢雄二郎, 山下茂: 高温時におけるコンクリートの力学的性質に関する実験, セメント・コンクリート, No.307, pp.2-8, 1972.
- 2-12) 小野紘一, 川村満紀, 田村博, 中野錦一: コンクリート構造物の耐久性シリーズ アルカリ骨材反応, 技報堂出版, 1986.
- 2-13) 柿崎正義, 吉信正弘, 五十嵐力, 笹川和郎: 収縮ひびわれの実態調査と頻度分析, コンクリート構造物のひびわれに関するシンポジウム発表報文集, pp.71-74, 1977.
- 2-14) 後藤幸正, 大塚浩司: 引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No.294, pp.85-100, 1980.
- 2-15) 長瀧重義, 大即信明, 鎌田敏郎, 岩波光保, 黒坂基: A E法によるコンクリートの品質評価に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, No.49, pp.546-551, 1995.
- 2-16) M.Saito, M.Ohta, and H.Ishimori: Chloride Permeability of Concrete Subjected to Freeze-Thaw Damage, Cement & Concrete Composites, Vol.16, pp.233-239, 1994.
- 2-17) M.Saito, and H.Ishimori: Chloride Permeability of Concrete under Static and Repeated Compressive Loading, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.4, pp.803-808, 1995.
- 2-18) 大即信明, 樫野紀元, 片脇清士, 小林明夫, 宮川豊章: コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害 (I), 技報堂出版, 1986.
- 2-19) 長瀧重義, 大即信明, 守分敦郎, 宮里心一: 鉄筋コンクリート部材の断面修復部における腐食形成に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.544/V-32, pp.109-119, 1996.
- 2-20) 日本規格協会: 共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数, 動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法, JIS A1127, 1976.
- 2-21) 日本材料試験協会・実施コンクリート強度判定委員会: シュミットハンマーによる実施コンクリートの圧縮強度判定方法 (案), 材料試験, Vol.7, No.59, pp.426-430, 1958.
- 2-22) 土木学会: 硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法 (案), コンクリート標準示方書 (平成3年版) 規準編, pp.293-298, 1991.
- 2-23) 日本建築学会: コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル, 丸善, 1983.
- 2-24) 尼崎省二, 明石外世樹: シュミットハンマーと超音波法によるコンクリートの非破壊試験, セメント・コンクリート, No.385, 1979.
- 2-25) V.M.Malhotra, and G.Garette: Comparison of Pullout Strength of Concrete with Compressive Strength of Cylinders and Cores, Pulse Velocity, and Rebound Number, ACI Journal, Vol.77, No.3, pp.161-170, 1980.
- 2-26) K.W.Nasser, and A.A.Al-Manasser: New Nondestructive Test, ACI Concrete International, pp.41-44, 1987.
- 2-27) ASTM: Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete, ASTM C900-82, 1983.
- 2-28) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書, pp.251-269,

1992.

- 2-29) J.R.Leslie, and W.J.Cheesman : An Ultrasonic Method of Studying Deterioration and Cracking in Concrete Structures, ACI Journal, Vol.46, 1949.
- 2-30) 谷川恭雄, 小阪義夫 : コンクリートの非破壊試験法に関する研究の動向, コンクリート工学, Vol.18, No.1, pp.38-50, 1980.
- 2-31) 参考文献 1-4)に同じ
- 2-32) 津島聰, 吹上紀夫 : 超音波画像化によるコンクリート内部の欠陥検出, コンクリート工学論文集, Vol.1, No.2, pp.51-58, 1990.
- 2-33) 鎌田敏郎, 岩波光保, 長瀧重義, 大即信明 : 超音波によるコンクリートのひび割れ高さ推定法に関する一提案, 土木学会論文集, No.538/V-31, pp.81-93, 1996.
- 2-34) 中川照久, 上杉真平, 大津政康 : 超音波スペクトロスコピー法によるRC部材のひびわれ検査法に関する考察, 土木学会論文集, No.442/V-16, pp.53-60, 1992.
- 2-35) 坂田康徳, 大津政康 : 超音波スペクトロスコピーを用いたコンクリート構造物の欠陥評価法の研究, 土木学会論文集, No.442/V-16, pp.71-80, 1992.
- 2-36) 上杉真平, 大津政康, 福本進也, 門司唱 : 横波弾性波のスペクトルによる凍結融解劣化の定量評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.583-588, 1993.
- 2-37) 山下英俊, 堺孝司, 佐伯昇 : 超音波伝播速度を用いた凍害深さの推定, コンクリート工学論文集, Vol.7, No.2, pp.179-186, 1996.
- 2-38) 尼崎省二 : 超音波法によるアルカリシリカ反応の非破壊評価に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.751-756, 1990.
- 2-39) 小林一輔, 森弥広 : アルカリシリカ反応によって劣化したコンクリートの品質判定に対する超音波伝播速度の適用性, 生産研究, Vol.42, No.5, 1990.
- 2-40) P.Daponte, F.Maceri, and R.S.Olivito : Ultrasonic Signal-Processing Techniques for the Measurement of Damage Growth in Structural Materials, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, pp.1003-1008, 1995.
- 2-41) 山田和夫, 小阪義夫 : 火害を受けたコンクリート中を伝播する超音波の減衰特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.361-366, 1988.
- 2-42) 山田和夫, 小阪義夫 : 極低温下に曝されたコンクリート中を伝播した超音波の減衰特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.331-336, 1989.
- 2-43) 大津政康 : アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版, pp.1-4, 1988.
- 2-44) 鎌田敏郎, 岩波光保, 長瀧重義, 大即信明 : AE法による港湾コンクリート構造物の健全度評価, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, 第V部門, pp.1194-1195, 1996.
- 2-45) 長瀧重義, 岡本享久, 曾我寿孝, 湯山茂徳 : 補修した鉄筋コンクリートはりのAE特性, 土木学会論文集, No.426/V-14, pp.75-80, 1991.
- 2-46) 長瀧重義, 岡本享久, 綾田隆史, 湯山茂徳 : AE法による鉄筋コンクリート部材のひびわれ進

- 展状況の把握, 土木工学における非破壊評価シンポジウム講演論文集, pp.139-144, 1991.
- 2-47) 丹羽義次, 小林昭一, 大津政康: アコースティック・・エミッションによる破壊源探査, 土木学会論文報告集, No.276, pp.135-147, 1978.
- 2-48) S.Yuyama, T.Okamoto, M.Shigeishi, and M.Ohtsu : Quantitative Evaluation and Visualization of Cracking Process in Reinforced Concrete by a Moment Analysis of Acoustic Emission, Materials Evaluation, Vol.53, No.6, pp.751-756, 1995.
- 2-49) 大津政康: コンクリート・コア試験におけるAE発生特性のレートプロセス解析, 土木学会論文集, No.442/V-16, pp.211-218, 1992.
- 2-50) 油野邦弘, 井上芳樹, 大津政康: AE発生挙動の確率過程論解析によるコンクリートの劣化度評価研究, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.13-23, 1995.
- 2-51) 藤岡泰作, 日高英介, 友田祐一, 大津政康: 劣化したコンクリートの圧縮挙動のAE法と塑性理論による評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.1215-1220, 1995.
- 2-52) 矢村潔, 長井吾郎: 劣化したコンクリートのAE特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.853-858, 1993.
- 2-53) 山田和夫, 小阪義夫: コンクリート内部で発生したアコースティック・・エミッションの伝播特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.499-504, 1987.
- 2-54) B.J.Jaeger, M.J.Sansalone, and R.W.Poston : Detecting Voids in Grouted Tendon Ducts of Post-Tensioned Concrete Structures Using the Impact-Echo Method, ACI Structural Journal, Vol.93, No.4, pp.462-473, 1996.
- 2-55) C.Hemriksen : Impact-Echo Testing, Concrete International, Vol.17, No.5, pp.55-58, 1995.
- 2-56) 新井洋一: タイル仕上げ等のはく離検知器の開発と実用化, 防水ジャーナル, No.154, pp.116-121, 1984.
- 2-57) 長瀧重義, 鎌田敏郎, 松本充生: コンクリートのひび割れ評価におけるサーモグラフィ法の適用, 材料, Vol.46, No.2, pp.198-203, 1997.
- 2-58) 岩波光保, 鎌田敏郎, 長瀧重義, 大即信明: 赤外線サーモグラフィ法による鋼・コンクリート間の空隙評価, 非破壊検査, Vol.47, No.11, pp.825-829, 1998.
- 2-59) 大塚浩司: X線造影撮影による鉄筋コンクリート内部の微細ひびわれ検出に関する研究, 土木学会論文集, No.451/V-17, pp.169-178, 1992.
- 2-60) 鶴飼司郎, 加藤潔: X線透過撮影法によるコンクリート構造物内の埋設物位置解析方法, 施工, No.11, pp.43-50, 1984.
- 2-61) 藤井学, 宮川豊章: PCグラウト充填状況の非破壊探査法, 土木学会論文集, No.402/V-10, pp.15-26, 1989.
- 2-62) 朴錫均, 魚本健人: 多重偏波方式のレータによるコンクリート背面空隙の体積推定, 土木学会論文集, No.592/V-39, pp.13-24, 1998.
- 2-63) 中野繁弘, 大沼博志, 金津努, 早川悌二, 木村憲明: 導水路トンネル健全度診断への電磁波探

査法の適用, 電力土木, No.209, pp.85-98, 1987.

- 2-64) 坂井功, 磯上知良: 東京国際空港における空洞探査技術の開発, 第 25 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.860-861, 1998.
- 2-65) 福田武人, 逢坂勝彦, 北出真太郎: 光ファイバによる CFRP 積層板の内部ひずみの測定およびクラックの検出, 材料, Vol.42, No.474, pp.269-275, 1993.
- 2-66) 鈴木英世, M. Q. Feng: 構造物の計測のための光ファイバを用いたセンサの開発について, 土木学会論文集, No.528/VI-29, pp.7-15, 1995.
- 2-67) 山路徹, 濱田秀則, 伊藤正憲, 山下裕康: コンクリート構造物のモニタリングのための新型光ファイバセンサの開発, コンクリート構造物のリハビリテーションに関するシンポジウム論文集, pp.61-66, 1998.

第3章

- 3-1) 参考文献 2-3)に同じ
- 3-2) 参考文献 2-58)に同じ
- 3-3) 五十嵐寿一 編: 音響と振動, 実験物理学講座 9, pp.326-327, 1968.
- 3-4) ASTM: Standard Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors, ASTM E 1106-86, 1986.
- 3-5) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, pp.37-46, 1994.
- 3-6) 国立天文台 編: 理科年表, pp.494-495, 1995.
- 3-7) J.クラウトクレマー, H.クラウトクレマー: 超音波試験技術—理論と実際—, 日本能率協会, pp.54-66, 1980.
- 3-8) 日本規格協会: 表面粗さ—定義及び表示, JIS B 0601, 1994.
- 3-9) 岡島達雄, 遠藤充彦, 鈴木誠: 水和過程におけるコンクリートの弾性係数の変動, セメント技術年報, Vol.38, pp.234-237, 1984.
- 3-10) G.E.Troxell, and H.E.Davis, and J.W.Kelly: Composition and Properties of Concrete, McGraw-Hill, pp.254-255, 1956.
- 3-11) 大門正機 編訳: セメントの科学—ポルトランドセメントの製造と硬化—, 内田老鶴圃, 1995.

第4章

- 4-1) 芳賀孝成, 十河茂幸, 三浦律彦, 玉田信二: 分離低減剤を用いた水中コンクリートに関する研究, 第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.45-48, 1984.
- 4-2) 羽原俊祐: 硬化コンクリートの組織及び空隙構造と物性の関係に関する研究, 慶應義塾大学学位論文, pp.78-85, 1992.
- 4-3) 参考文献 3-11)の pp.76-77.
- 4-4) T.C.Powers: The Physical Structure of Portland Cement Paste, 1965.

- 4-5) 後藤孝治：セメントコンクリートの反応モデル解析の研究について，コンクリート工学，Vol.35, No.2, pp.3-8, 1997.
- 4-6) 参考文献 2-1)の pp.20-38.
- 4-7) H.W.Reinhardt：Simple Relations for the Strain Rate Influence on Concrete, Darmstadt Concrete, Vol.2, pp.203- 211, 1987.
- 4-8) 長瀧重義 監修：コンクリートの高性能化，技報堂出版，pp.14-15, 1997.
- 4-9) G.J.Weng：Some Elastic Properties of Reinforced Solids, with Special Reference to Isotropic Ones Containing Spherical Inclusions, International Journal of Engineering Science, Vol.22, pp.845-856, 1984.
- 4-10) L.Rayleigh：The Theory of Sound, Vol.II, p.152, 1929.
- 4-11) W.P.Mason, and H.J.McSkimin：Attenuation and Scattering of High Frequency Sound Waves in Metals and Glasses, Journal of Acoustical Society of America, Vol.19, No.3, pp.464-473 1947.
- 4-12) 加藤佳孝，魚本健人：細骨材の量と比表面積が遷移帯形成に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.2, pp.775-780, 1998.
- 4-13) 三輪茂雄：粉体工学通論，日刊工業出版社，pp.5-10, 1991.
- 4-14) S.Mindess：Interfaces in Concrete, Materials Science of Concrete, pp.163-180, 1989.
- 4-15) 黒田正和，寺師成明，渡辺智秀：コンクリート塊の再利用に関する基礎的研究，土木学会第50 回年次学術講演会講演概要集，pp.198-199, 1995.
- 4-16) 小林孝一，服部篤史，宮川豊章，藤井学：微粉末混和剤を用いたセメントペーストと骨材の界面性状，材料，Vol.45, No.9, pp.1001-1007, 1996.
- 4-17) J.W.Figg：Methods of Measuring the Air and Water Permeability of Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.25, No.85, pp.213-219, 1973.
- 4-18) R.Cather, J.W.Figg, A.F.Marsden, and T.P.O'Brien：Improvements to the Figg's Method for Determining the Air Permeability of Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.36, No.129, pp.241-245, 1984.
- 4-19) 中山昭彦，山田文孝，打田靖夫，川谷健，櫻井春輔：岩盤ゆるみ領域評価のための真空透気試験，土木学会論文集，No.575/III-40, pp.9-24, 1997.
- 4-20) British Standards Institution：Test for Water Absorption, BS 1881, Part 5, pp.35-37, 1970.
- 4-21) 阿部道彦：コンクリート用再生骨材，コンクリート工学，Vol.35, No.7, pp.42-48, 1997.
- 4-22) 村田二郎，長瀧重義，菊川浩治：土木材料 コンクリート，共立出版，pp.99-100, 1996.
- 4-23) 参考文献 3-6) に同じ
- 4-24) P.A.Martin, and G.R.Wickham：Diffraction of Elastic Waves by a Penny-shaped Crack：Analytical and Numerical Results, Proceedings of the Royal Society of London, No.A390, pp.91-129, 1983.

- 4-25) 大原功, 岳上広光, 竹内昭治, 鈴木誠: コンクリートの分離が耐凍害性におよぼす影響, セメント技術年報, vol.29, pp.142-143, 1975.
- 4-26) 山本明雄, 本橋賢一, ミスラ・スディール, 堤知明: コンクリートの塩化物浸透性に及ぼす施工条件の影響, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, 第V部門, pp.312-313, 1991.
- 4-27) 土木学会: コンクリート標準示方書 平成8年版 施工編, pp.95-98, 1996.

第5章

- 5-1) 岡田清編: 最新コンクリート工学, 国民科学社, pp.18-31, 1986.
- 5-2) D.W.S.Ho: Quantifying the Quality of Concrete, Proceedings of Shigeyoshi Nagataki Symposium on Vision of Concrete: 21st Century, pp.15-25, 1998.
- 5-3) S.E.Chidiac, P.E.Grattan-Bellew, T.J.Hoogeveen, and A.G.Razaqpur: Effects of Stress Induced Damages on the Permeation Properties of Concrete, Proceedings of the International Conference on Engineering Materials, pp.283-292, 1997.
- 5-4) 李在春, 田中享二: 低応力で繰り返されたコンクリートの耐久性に関する研究—細孔構造の変化と中性化—, 1997年度日本建築学会関東支部研究報告集, 1997.
- 5-5) 石橋忠良, 児島孝之, 阪田憲次, 松下博通: コンクリート構造物の耐久性シリーズ 疲労, 技報堂出版, pp.53-55, 1987.
- 5-6) 羽原俊祐, 平尾宙, 内川浩: 圧縮応力下における硬化モルタルおよび硬化セメントペーストの組織および空隙構造の変化, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.134-139, 1996.
- 5-7) 多田浩治, 堀宗朗, 斉藤裕: コンクリートの劣化と細孔分布に関する基礎的研究, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, 第V部門, pp.278-279, 1990.
- 5-8) 参考文献2-12) のpp.49-56.
- 5-9) 岡本修一, 魚本健人: 凍結融解による劣化への初期ひび割れの影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.913-918, 1998.
- 5-10) 参考文献2-3) に同じ