

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	鋼製下地在来工法天井の野縁方向における力学的特性に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	佐藤恭章
Author(English)	Sato Yasuaki
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9850号, 授与年月日:2015年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:元結 正次郎,翠川 三郎,笠井 和彦,坂田 弘安,佐藤 大樹
Citation(English)	Degree:., Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9850号, Conferred date:2015/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

鋼製下地在来工法天井の野縁方向における
力学的特性に関する研究

2015年 3月

佐藤 恭章

謝辞

本研究において、終始懇切かつ並々ならぬ御指導、御助言ならびに熱き激励を賜りました恩師 東京工業大学教授 元結正次郎博士には、研究に対する姿勢のみならず、今後の人生を歩んでいく中で大切なことを多く御教示いただきました。心より感謝申し上げます。

本論文の審査の際に、本論文の全体を通して懇切丁寧なご指導と貴重なご助言を多く賜りました東京工業大学教授 笠井和彦博士に心から御礼申し上げます。

東京工業大学教授 翠川三郎博士には、本論文の意義に関して懇切丁寧なご指導と貴重な御助言をいただきました。心より厚く御礼申し上げます。

東京工業大学教授 坂田弘安博士には、本論文に関して戴いた貴重なご指摘とともに、大学院生活において日頃より温かい御助言をいただき心から御礼申し上げます。

東京工業大学准教授 佐藤大樹博士には、温かい激励と貴重な御助言をいただきましたこと、厚く御礼申し上げます。

東京工業大学教授 盛川仁博士には、確率論を用いた分析に関して経験の浅い筆者に対し、懇切丁寧なご指導とご助言を賜りました。心から御礼申し上げます。

筆者が天井の耐震性に関する研究を始めたころから、共同の研究活動を通して長い間お世話になりました東京工芸大学教授 水谷国男博士、国土技術政策総合研究所 脇山善夫博士、独立行政法人建築研究所 石原直博士からは実験や研究に取り組む基本的な姿勢や知識を学ぶとともに、懇切丁寧に御指導ならびに御助言いただきました。心から御礼申し上げます。

本論文の振動台実験による実験データと分析は、共同研究で大変お世話になりました工学院大学教授 山下哲郎博士、同大学准教授 西川豊宏博士による御助力と御指導をいただいたことに加え、実験を遂行するにあたり多大なるご協力をいただいた元工学院大学大学院生 坂本有奈利氏、武田和也氏により実現したものです。心より厚く御礼申し上げます。

共同研究を兼ねた海外インターンシップの際に、ニュージーランド カンタベリー大学准教授 グレゴリー・マックレイ博士、同大学教授 ラジェッシュ・グカール博士から海外における非構造部材の研究の実態を御教示していただいたとともに、研究における討論やコミュニケーションの大切さを学びました。心より厚く御礼申し上げます。

本論文を作成するにあたり、多くのご助言とご指導を頂きました東京工業大学大学院 助教 金子健作氏に心から御礼申し上げます。

特に、東京工業大学元結研究室の博士課程3年寺西正輝氏、同課程1年沖佑典氏には本論文を作成する過程で多くの議論を共有していただいたことを大変感謝しております。また、修士生の方々には本論文の執筆への御協力を心から感謝いたします。秘書 松山宣子氏および卒業生には、研究のみならず長年の大学院生活を送るにあたり精神的な支えとなり、数々の困難や楽しみを共有していただいたことを心より感謝しております。

また本論文を進めるにあたり、広く有益な御助言ならびに実験に関する多大なご協力を頂きました、八潮建材工業株式会社 吉川昇社長および日本建工株式会社 丸山誠二氏には厚く御礼申し上げます。

最後に、自分の進む道を長い間陰ながら支えていてくれた両親、友人達に深く感謝しております。

内容梗概

天井の落下対策に関わる技術基準告示が施行された現在、今後新たに作られていく天井については地震応答解析等の構造計算が行われ、また構造計算が容易な仕様で耐震性の高い天井が作られていくことは確かである。しかし一方で、既存の鋼製下地在来工法天井においては、力学的に整合性のとれた方法で天井の耐震性を捉えた実績は数少なく、耐震改修の必要性や落下の危険性に関する議論を満足に行えない重大な問題が残されている。

一般に構造物の安全性を検討する上で、対象物に作用する外力の設定、各部位に発生する応力の算定、各部位の耐力などの許容値の設定が必要とされる。このうち天井面に作用する慣性力を求める際に必要となる天井の固有周期すら精度よく推定することは困難な状況にある。この理由は、鋼製下地在来工法天井においては上述したように接合状態が曖昧な特有の接合金物を用いているためである。

そこで本研究では、天井が水平力を受ける際の鋼製下地材、とりわけ曖昧な接合状態にあるハンガーおよびクリップ接合部に生じる非線形挙動および応力状態に注目し、これらを詳細に分析するための数値解析を構築することで、水平力に対する天井システムの挙動を力学的に捉えることを目的とする。

第1章「序論」では、本研究の背景および目的について述べている。建築の室内空間における安全性と機能性を提供する役割を担っている非構造部材の中で、鋼製下地在来工法天井は地震時に損傷・落下することで人命に関わりかねない被害に及んでいる例が近年でも多々発生している。これに対し、現時点では天井の落下対策に関わる技術基準告示により、新築の限られた天井については地震応答解析等の構造計算が求められるようになっている。しかし、既存の鋼製下地在来工法天井においては、力学的に整合性のとれた方法で天井の耐震性を捉えた実績は数少なく、満足以設計行為が行えないという重大な問題が残されている。この問題に対し、天井を構成する主要な部位および天井システムの力学的特性を実験および数値解析を通じて明らかにすることで、天井を力学的に捉える際に必要な基本情報と解析手法を確立することを本研究の目的としている。

第2章「接合部の力学的特性」では、鋼製下地在来工法天井に特有なハンガーおよびクリップと称する金物による接合部の力学的特性を検討している。部材と接合金物の嵌合より形成される両接合部

は、部材間に不可避的な偏心も含んでおり、ピンや剛接合といった明解な接合条件として扱うことが難しい。そこでまず、接合部の要素実験により水平力および鉛直力に対する接合部の挙動を確認している。実験により部材間で接触・離間が生じ、クリップにおいてはすべり・脱落といった複雑で不安定な非線形挙動が生じることを確認している。次に、各接合部の実験を再現する数値解析モデルを構築することで部材に生じる応力を詳細に検討している。解析モデルには、梁要素の材端条件に接触・離間および摩擦の判定を考慮した接触要素を導入し、接合方式に由来した部材間の偏心距離を考慮している。この解析によって得られる接合部の応力状態をもとにハンガー接合部の力学モデルを導出するとともに、クリップ接合部の最大耐力および脱落条件を明らかにしている。

第3章「最小ユニット天井を用いた天井システムの力学的特性」では、鋼製下地材が実際に組み立てられた天井システムに水平力が作用した場合を想定し、最小ユニットの天井試験体を用いた実験ならびに数値解析により天井システムの水平剛性と水平耐力について検討している。まず、2章で構築したハンガー接合部の力学モデルを吊ボルトを含めた力学モデルに拡張し、吊ボルト1本あたりの水平剛性評価式を導出している。この評価式により天井面の剛床仮定のもとで天井システムの水平剛性を評価する手法を提案している。次に、最小ユニット天井の静的漸増载荷を実施し、弾性域を超えた際の天井の挙動および復元力特性について検討している。また、2章で構築した接合部の数値解析モデルを用いて試験体全体の数値解析を行い、各部材に生じる応力を分析することで、天井システムの損傷メカニズムおよび復元力特性を明らかにしている。

第4章「天井の地震応答解析に関する検討」では、地震時における天井を想定して、振動解析の基本的なプロセスにもとづいて動的な外乱に対する天井の応答を具体的に評価している。まず、典型的な平面の天井を対象に振動台実験を実施している。3章で提案した天井の水平剛性評価法により求めた試験体の固有周期をもとに応答スペクトルを用いて弾性域における天井面の応答値を推定し、推定値と実験値との比較により複雑な力学特性を有する天井を1質点系振動モデルとして扱えられることの可能性を示している。また、3章で明らかとなった天井水平耐力の考えにもとづいて、天井の復元力特性にバイリニア型の復元力特性を適用することで弾塑性応答解析を行っている。これにより得られた結果を実験と比較することで妥当性を示し、鋼製下地在来工法天井における応答評価の一連のプロセスを明らかにしている。

第5章「天井の損傷評価に関する検討」では、耐震性の面で力学的かつ定量的に管理・整理されてこなかった鋼製下地在来工法天井に内在している様々な不確定要素を想定して天井の耐震性を確率論的に捉えていくことの必要性について述べている。天井における不確定要素とは、施工誤差による接合部耐力のバラつき、吊ボルトの固定方法、設備関連機器との関係による寸法・部材配置の不均一さ、製造会社の違いによる部材の形状や機械的性質の違い等が考えられる。ここでは初歩段階として、天井落下の主要な要因であるクリップのすべりおよび脱落耐力について施工誤差等で生じるバラつきを考慮することで、天井システムの水平耐力をモンテカルロ法により fragility 曲線として表すことで天井の耐震性について検討している。未だ天井に関わる統計データが非常に少ないため、本章の研究は今後の展開の布石としている。

第6章では、各章で総括するとともに今後の課題について述べている。要素実験と天井システムの実験間における整合性について検討し明確にすることで、小規模な天井の弾性限界さえ定量的に把握できていない現状の重要課題を克服するための成果を提示した。一方、実際被害にあっている鋼製下地在来工法天井はより大面積であり、形状もさまざまに存在する。こうした天井に対する本論文の妥当性は現段階では未知数であるが、本論文の成果をこうした天井の検討に応用・拡張することによって、既存天井に対するスクリーニングに対して有効であることを、今後検討と実績を重ねていくことで示していく必要がある。

目次

第1章 序論	1
1.1節 本研究の背景	2
1.2節 既往の研究	6
1.3節 本研究の目的	9
第2章 接合部の力学的特性	14
2.1節 はじめに	15
2.2節 ハンガー接合部およびクリップ接合部の要素実験	16
2.2.1項 クリップ接合部の鉛直および水平力に対する挙動	16
2.2.2項 ハンガー接合部の水平力に対する挙動	18
2.3節 接触・離間、クーロン摩擦すべり現象に対する数値解析手法	19
2.3.1項 数値解析手法の概要	19
2.3.2項 数値解析手法の妥当性の検証	26
2.4節 ハンガー接合部およびクリップ接合部の再現解析	27
2.4.1項 クリップ接合部の数値解析	27
2.4.2項 ハンガー接合部の数値解析	31
2.4.3項 力学モデルの構築	33
2.5節 まとめ	35
第3章 最小ユニット天井を用いた天井システムの力学的特性	58
3.1節 はじめに	59
3.2節 天井の水平剛性に関する検討	60
3.2.1項 弾性域における静的載荷実験	60
3.2.2項 吊材の水平剛性	62
3.2.3項 水平剛性推定法とその妥当性の検証	66
3.3節 天井の水平耐力に関する検討	68
3.3.1項 繰返漸増載荷実験	68
3.3.2項 数値解析の概要	69
3.3.3項 水平耐力の評価方法とその妥当性検証	70
3.4節 まとめ	72
第4章 1質点系モデルによる天井の簡易非線形応答解析	88
4.1節 はじめに	89
4.2節 天井の振動台実験	90
4.2.1項 実験概要	90
4.2.2項 固有周期の評価と応答スペクトルによる応答評価	92

4.3 節 一質点系振動モデルを用いた天井の振動解析	95
4.3.1 項 天井の復元力特性の概要	95
4.3.2 項 解析結果の妥当性検証	98
4.4 節 まとめ	100
第5章 クリップ接合部の耐力のばらつきを考慮した天井システムの損傷評価	115
5.1 節 はじめに	116
5.2 節 天井の簡易解析モデルの構築	117
5.2.1 項 接合部強度の不確定性	117
5.2.2 項 簡易解析モデルの構築	119
5.3 節 モンテカルロ法を用いた天井の損傷評価	120
5.3.1 項 損傷評価の手順	120
5.3.2 項 解析結果とその妥当性	122
5.4 節 まとめ	124
第6章 結論	134
本研究に関連して著者が発表した論文	138
その他のテーマに関連して著者が発表した論文	143
参考文献	146
付録	175

第 1 章 序論

1.1 本研究の背景

1.2 既往の研究

1.3 本研究の目的

1.1 本研究の背景

建築物を構成する要素のうち、屋根ふき材、外装材、内装材、帳壁(耐力壁以外の壁)、床、天井などは、従来から慣用的に非構造部材と総称されることが多い(非構造部材を広義にとらえた場合には、家具や什器なども含める場合もある)。これら非構造部材には、耐震や耐風あるいは耐火といった構造的性能(安全性)のほか、美観、気密、断熱、遮音・吸音などの様々な性能が要求される。すなわち、非構造部材には建築の基本要素である「強・用・美」すべてが求められており、美しく安全で機能的な空間を継続的に提供する役目がある。一方で、非構造部材は、同様に建築物を構成する柱や梁といった主要構造部を力学的に設計する際には、その剛性や耐力が考慮されない要素としてみられている。こうした非構造部材は、近年においてもなお地震や強風による被害を受けており、特に東日本大震災では東北地方のみならず関東地方においても非構造部材の被害が発生した。被害を受けた非構造部材は多種に亘るが、その中でも吊り天井の落下被害は顕著であった。

近年の吊り天井被害では、天井板が比較的大きな塊となって落下する例¹⁾²⁾が目立っており、なかでも芸予地震(2001年)、十勝沖地震(2003年)(図1.1)、宮城県沖を震源とする地震(2005年)(図1.2)で、体育施設や空港ターミナルビル、屋内水泳場といった大空間な室内で大きな面積の天井が落下した例がよく知られている。幸いにして、上記の地震では人命に関する被害はなかったものの、天井などの比較的重量のある物体の高所からの落下は室内にいる人々の命をも脅かす要因となる。さらに、地震時には避難場所として機能する空間や避難経路で落下した天井が避難行為の障害になる場合も多く、地震後に観られた2次的災害として軽視することはできない。こうしたリスクに対して、国土交通省は「大規模空間を持つ建築物に対する天井-壁間のクリアランス確保や振れ止めの設置」および「これに準じた対策の徹底」を促す技術的助言³⁾⁴⁾⁵⁾を上記の地震後ごとに発表した。この助言では、以下のような対策内容が示されている。

○ 天井と壁間の隙間(クリアランス)の確保、および天井下地には振れ止めの設置

○ 局所的に応力が集中するおそれのある部分の補強または隙間(クリアランス)の確保

また、非構造部材の地震に対する安全性に関する設計施工指針⁶⁾が日本建築学会から刊行されており、天井に関する記述も盛り込まれている。しかしながら、両者の内容はいずれも注意喚起のための定性的な情報提供にとどまっており、現実的な対処法が提示されていなかったことから、実際の現業に及ぼす影響は小さかった。

天井落下に対する具体的な対策がなされない中、2011年3月11日に発生したM9.0の東北地方太平洋沖

地震では、東北地方から関東地方にかけての広範囲の地域で様々な室内空間における天井落下が多数発生した⁷⁾ (図1.3)。この時の地震被害で特に注視すべき点として、

1. 計測震度が4～5程度の首都圏でも大規模な天井落下が発生したこと
2. 深刻な損傷が発生した天井が図1.4に示す鋼製下地在来工法天井として全国で広く用いられている仕様であったこと
3. 天井落下が原因で死者を含む人的被害が発生したこと
4. 天井落下被害によって執務室や作業場の機能が低下し、地震後の機能回復に時間を要したこと

という事項が挙げられる。最初の2つの事項は、前述の芸予地震、十勝沖地震、宮城県沖を震源とする地震などによる被害事例でも共通している事項であり⁸⁾、主要構造体には損傷が発生しない程度の地震動によって損傷する可能性を有する天井が日本各地に極めて多数存在していることが図らずしも実証されたことになった。特に、天井落下に代表される非構造部材の損傷によって地震時の人的被害や地震後の経済的損失が生じることが再確認された社会的意味は極めて大きく、建築に携わる者はこれらを真摯に受け止めなければならない。

これまで非構造部材の安全性に関して、建築基準法施行令第39条（屋根ふき材等の緊結）に、「屋根ふき材、内装材、外装材、帳壁その他これらに類する建築物の部分及び広告塔、装飾塔その他建築物の屋外に取り付けるものは、風圧並びに地震その他の震動及び衝撃によって脱落しないようにしなければならない。屋根ふき材、外装材及び屋外に面する帳壁の構造は、構造耐力上安全なものとして国土交通大臣が定めた構造方法を用いるものとしなければならない。」という記述があった。上記の国土交通大臣が定めた構造方法は1971年の建設省告示第109号に記載されているが、当時課題とされた非構造部材の被害は外装材等の主要構造体への変形追随性の欠如による脱落被害であり、天井に関する記載は一切なかった。なお、上記告示は時代とともに改正されてきたが（最終改正2000年）、1978年に生じた伊豆大島近海地震・伊豆半島近海地震・宮城県沖地震の後にも行われている。それまでの地震被害では建築物の主要構造体の被害が顕著であったために非構造部材の被害は軽視されていたのに対して、上記の地震では非構造部材の被害が著しかったため¹²⁾、日本建築学会の「非構造部材の耐震安全性に関する委員会」の発足のきっかけにもなっている。

こうした天井の安全性に関してとりわけ曖昧だった状況に対して、2011年の東北地方太平洋沖地震をきっかけに2014年に建築基準法施行令が改正⁹⁾¹⁰⁾されたことで、大臣が指定する「特定天井」（具体的には天井面積が200m²以上かつ天井高さ6m以上の天井）については、技術基準にしたがった脱落防

止対策を講じ、地震応答解析等の構造計算の基準に天井の脱落防止の計算を追加することが求められるようになった。特に重要な点は、告示では鋼製下地間の接合金物が緊結状態を維持することが要求されている点である。しかしながら、このような法規制は告示以降に新設される天井に適用されるものであり、現存する鋼製下地在来工法天井においては、従来のJIS A 6517 建築用鋼製下地材（壁・天井）¹¹⁾（以下、JIS A 6517）で規定されている力学的性状が不明な接合金物（図1.4）が一般に用いられたままとなっている。こうした既存天井に対しては、ネットやワイヤー等による落下防止措置を施すように記載されているが、既存天井の耐震性を定量的に検討する手段がないため、落下の危険性を有する天井を識別することができない上に、有効な落下防止措置法の検討が現状では困難となっている。天井の耐震性を定量化する手段を構築することで、次の大地震の前に落下の危険性が高い天井のスクリーニングが可能になることが求められている。

こうした非構造材の耐震性に対する関心は、今や日本だけにとどまらない。2007年に米国において非構造要素耐震性能に対するプロジェクト「NEESR-GC : Simulation of the Seismic Performance of Nonstructural Systems (主査：ネバダ大学 Maragakis 教授)」が採択されている。Grand Challenge に採択されたことは米国においても非構造要素の耐震性能について重要視されていることを意味する。また、2010年9月にクライストチャーチ（ニュージーランド）で発生した地震で生じた天井落下被害を受けて、カンタベリー大学を中心に天井を含めた非構造要素に関する研究が本格化している¹²⁾¹³⁾。

<鋼製下地在来工法天井について>

天井には大きく分けて直天井と吊り天井がある。直天井はスラブのような上部の構造躯体に仕上げ材を直接吹き付けまたは貼り付けているもので、戸建て住宅で広く利用されている。吊り天井は、野縁や野縁受けといった部材を格子状に組んだ骨組みを主要構造躯体から吊る構造になっており、不燃化・軽量化の要求が伴うRC造やS造などの高層建築や体育館、商業施設等で幅広く用いられている。この吊り天井は、薄肉な軽量鉄骨下地によるものが現在では主流であり、システム天井と在来工法天井の種類がある。両者とも、過去の地震で天井面が損傷・落下する被害が報告されているが、とりわけ在来工法天井は構法上（構法の詳細は後述する）、比較的大きな質量・面積の天井面が落ちる傾向にあり、落下した際の危険性が極めて高いものと考えられている。そこで本研究では鋼製下地を用いた在来工法天井（以下、鋼製下地在来工法天井と記す）を主な対象とする。鋼製下地材には、主に吊ボルト、ハンガー、野縁受け、クリップ、野縁と呼ばれる要素がある。吊ボルトの上端は埋め込みイ

ンサートなどを用いて躯体に取り付けられ、その下端にはハンガーと呼ばれる金物が付けられる（図1.4）。吊ボルトは、天井面の高さをハンガーの高さ方向の位置で調整しやすいように、全ネジのボルトであることが多い。ハンガーには野縁受けが嵌め込まれ、この野縁受けにクロスするように野縁がクリップと呼ばれる金物で接続される。最後に、野縁に石膏ボードをビス止めすることで天井面が形成される。ボードの目地部では隣り合うボードをつなぐために幅の広いダブル野縁が使用され、それ以外ではダブル野縁の半分の幅をしたシングル野縁が配置される。この工法で作られる天井面は、鋼製下地材と天井板がビスで一体となるため、最終的に一枚の大きな面となる。これらの鋼製下地材は JIS A 6517 に規定されている。この規格では天井面が満たすべき構造的性能およびこの確認実験方法も記載されている。その実験は、指定された規模の天井面に上下の静的荷重をある時間与えた後、荷重を取り除いた際に生じるたわみ量を測定する形式で天井下地材の強度を確認するというものである。このことから理解されるように、従来は自重や風圧力などの鉛直荷重に対する性能しか要求されておらず、地震時に天井面に作用する水平力に対する性能は考慮されていない。

1.2 既往の研究

鋼製下地在来工法天井の耐震性に関わる初期の研究の中で、比較的軽微な天井の地震被害をきっかけに、渡辺、寺村が天井と建物の共振現象の可能性に着目して研究¹⁵⁾した例がある。今日でも天井と建物の共振は、天井の耐震性を考える上で最初に挙がる関心事の一つとなっており、最も基礎的な研究として位置づけられる。しかし、このときは近年問題視されているような天井落下被害に関する言及はなく、比較的軽微な損傷を想定した研究だったと考えられる。鋼製下地在来工法天井に関して初めてその地震被害の重要性を記述したものとしては深尾による報告が挙げられる¹⁶⁾。これは1978年伊豆大島近海地震による体育館の天井落下に焦点を当てたものであり、このとき既に典型的な鋼製下地の損傷形式であるクリップの損傷が報告されている。ただし、被害事例の紹介的なものとなっており、力学的側面からのクリップ損傷の説明はなされていない。1978年にはさらに宮城県沖地震でも天井落下の被害を受けており、後に大規模な振動台実験による天井の耐震性を向上させる対策の模索が行われている¹⁷⁾⁻²⁵⁾。ここではシステム天井を対象に実験を行っているが、天井板のズレや点検口の落下といった部分的損傷が観測された程度であり、実際の地震による天井落下のような深刻な損傷の考察には至っていない。

天井落下被害が広く注目されるようになったのは、芸予地震における天井落下被害以降である。国土交通省は体育館等の大空間建築物における天井に対する地震対策を促すため、過去3度にわたり技術的助言³⁾⁴⁾⁵⁾を発表した。また、日本建築学会も非構造部材の地震に対する安全性に関する設計施工指針⁶⁾を刊行した。これらの中で天井に対する構造的観点に基づく記載は、西山らの研究成果²⁶⁾を拠り所としている。西山らによる研究は鋼製下地在来工法天井に関する構造的観点からの先駆的研究として極めて意味のあるものである。その中では、鋼製下地在来工法天井について振動実験の結果に基づき、鋼製下地在来工法天井の固有周期評価法およびブレース負担水平力の検討法を提示している。しかしながら、天井の固有周期に関しては吊ボルトの支持条件をピンと固定の組み合わせによって固有周期の存在範囲を求める方法となっており、鋼製下地在来工法天井の力学的特性に大きな影響を及ぼす特有の接合金物の影響が表現されていないことから、提示された固有周期評価法の汎用性は曖昧である。また、ブレース負担水平力の検討法においては、ブレースの損傷に限定されており、他の部位の損傷は検討項目の内に含まれていない。既往の地震被害報告によれば、落下した天井の特徴として野縁受けから上のブレースを含む下地は主要構造体から吊られた状態のままになっており、野縁と石膏ボードがクリップ金物と一緒に落下している点が挙げられる。野縁と石膏ボードが構成する天井

面を支えていたクリップが損傷し野縁受けから脱落したことで天井が落下したと考えられることから、クリップ孫種の影響を考慮していない彼らのブレース負担水平力評価法は実体と乖離しているといえる。西山らが実被害に観られる接合金物の損傷について考慮しなかった大きな理由のひとつとして、彼らが実施した振動台実験では天井の落下現象が確認できなかったことが関係していると思われる。

西山らの行った実験を含め複数の天井落下再現実験^{17)~26)}が行われているが、室内実験によって実被害に観られるような悲劇的な落下現象を確認することはできていなかった。室内実験において初めて実被害と同様な落下現象を確認した実験的研究として、元結らによる釧路空港ターミナルビル天井落下再現実験をはじめとする一連の研究が挙げられる^{27)~33)}。この中で、室内実験でも実被害同様の天井落下現象が確認されたこと、および落下への過程として段差部やブレース近傍など水平剛性が不連続な箇所水平力が集中し、その水平力伝達経路上に存在するクリップが脱落し、その後、脱落したクリップ周辺のクリップが連鎖的に脱落することで天井面の全面的落下現象が生じること、を示した。室内実験により実被害と同様の落下現象が確認されたことは、それまで過度な施工不良が原因と思われがちであった天井の大規模落下が必然的に生じる現象であることを示したことを意味しており、極めて重要な成果であった。ただし、クリップ自体の性能およびこれを踏まえた被害発生メカニズムに対する定量的な分析はなされておらず、鋼製下地在来工法天井の耐震化という観点からは課題が多く残されていた。

上述した天井の耐震性を考えるための力学的な情報・データが乏しい状況を改善するために、これまで様々な研究が行われてきた。クリップおよびハンガー接合金物に関する要素実験を最初に本格的に行った研究は文献(34)~(36)であり、それ以降各メーカーや研究機関にて精力的に行われて来ている^{37)~53)}。厳密には接合金物はメーカーによって形状や断面が異なるが、巨視的にみれば各々の接合金物の挙動は概ね類似しており、接合部の崩壊形状は天井落下被害現場に散乱していたものとほぼ同様であることが確認されている⁵¹⁾。ただし、接合金物に関して重要な知見を示したものとしては文献(34)~(36)が挙げられる。この研究では、それまでクリップの脱落現象は鉛直荷重によるものと考えられていたのに対して、水平力が作用した場合にもクリップの脱落現象が発生しうることを実験結果により明らかにしており、その後の天井落下被害に関する方向性を変えたものとして位置づけられる。

一方で、天井システムの解析を通して過去の天井落下被害の原因を探っている研究もなされている^{30)31)54)~69)}。数値解析から得られる接合部の応力とクリップの耐力の比較により天井落下の原因を明らか

にすることを試みているが、主に天井が周囲の壁に衝突したことに落下の原因を見出す結果となっている。ただし、この周囲の壁と天井の衝突現象が天井落下の原因とする考えは曖昧な部分が残されており、これを明らかにする研究は続いている^{70)~95)}。近年では、1自由度系衝突解析により天井に作用する衝突力を巨視的に評価する方法^{91)~93)}が提案されるようになってきているが、クリップ接合部の耐力や剛性、ビスの頭抜け耐力などの部位の物理量から天井システムの耐力を推定する点においては未だ課題は残っている。天井の解析を難しくしている独特の接合方式に対し、文献 96)~102)に見られるような力学的に明快な接合条件を用いて数値解析的に天井の耐震性に関わる項目・要素を考察した例もあるが、天井下地の各部位における許容値をある程度理論的に定義できていないために、落下原因を特定することは難しい状態である。

また、1978年から今日に至るまでに地震で発生した天井落下被害に関する調査報告は数多くなされており、それらは被害報告的な内容のもの^{103)~120)}から原因解明を試みるもの^{121)~169)}まで多種にわたる。しかし、被害調査から実験的・数値解析的検討まで行い、客観的に天井落下被害を説明しているものは僅かである。2005年以降では、耐震性に優れた鋼製下地材の新しい仕様開発とその有効性を示すために、企業の研究機関により在来工法天井の振動実験も膨大に行われているが^{170)~304)}、既存の鋼製下地在来工法天井に対する落下メカニズムを定量的に解明する結論は導かれていない。

このように各々の実験で定性的に研究された例は数多くみられるが、各部位要素のデータから天井全体の挙動を定量的に評価することについて議論されている例が少ない。いまだ要素実験と天井システムの実験の間で整合性がとれておらず、天井の弾性限界さえ定量的に把握できていないため、天井の耐震性について理論的に検討することが困難な状態である。

1.3 本研究の目的

天井の落下対策に関わる技術基準告示が施行された現在、今後新たに作られていく天井については地震応答解析等の構造計算が行われ、また構造計算が容易な仕様で耐震性の高い天井が作られていくことは確かである。しかし一方で、既存の鋼製下地在来工法天井においては、力学的に整合性のとれた方法で天井の耐震性を捉えた実績は数少なく、耐震改修の必要性や落下の危険性に関する議論を満足に行えない重大な問題が残されている。

一般に建造物の安全性を検討する上で、対象物に作用する外力の設定、各部位に発生する応力の算定、各部位の耐力などの許容値の設定が必要とされる。このうち天井面に作用する慣性力を求める際に必要となる天井の固有周期すら精度よく推定することは困難な状況にある。この理由は、鋼製下地在来工法天井においては上述したように接合状態が曖昧な特有の接合金物を用いているためである。

そこで本研究では、天井が水平力を受ける際の鋼製下地材、とりわけ曖昧な接合状態にあるハンガーおよびクリップ接合部に生じる非線形挙動および応力状態に注目し、これらを詳細に分析するための数値解析を構築することで、水平力に対する天井システムの挙動を力学的に捉えることを目的とする。

まず、本研究では一貫して野縁方向に限定して論じる。これは、以下に述べることに由来している。天井におけるほとんどの質量は天井面に分布しているために、地震時の慣性力は天井面に作用することは容易に考えられる。この慣性力は主要構造部分に伝達されるまで、天井面→野縁→クリップ→野縁受け→ハンガー→吊ボルト→定着金物→主要構造部分といった経路をたどる。この経路は野縁方向、野縁受け方向のどの方向に慣性力をうけても同様である。しかし、「クリップ→野縁受け→ハンガー」の間で、各部材が野縁方向の慣性力に対して弱軸の曲げ剛性で抵抗する傾向にあることは、部材の形状および取り付け状態から考えられる。一方、野縁受け方向の慣性力に対してはその逆の強軸であると考えられる。つまり、野縁方向に対してクリップやハンガーといった接合金物に変形しやすいあるいは接合部が緩みことが考えられ、接合部としての機能が損なわれる危険性が考えられる。このため、本研究では野縁方向における接合部および天井システムの力学的特性に関する検討を最優先に行うこととしている。また、この野縁方向とは野縁の材軸に平行な水平方向を意味する。今後、水平方向と記している場合も、野縁の材軸に平行な水平方向の意味であることをここに記す。

天井を構成する鋼製下地材に発生する応力の検討を難しくしている要因として、部材と接合金物の

嵌合により形成されるハンガーやクリップ接合部が、ピンや剛接合といった明解な接合条件として扱うことが困難であることが挙げられる。そこで第一に、力学的に曖昧な接合部に対する解析手法および解析モデルを構築する。接合部の要素実験と比較することで、解析モデルの妥当性を検証するとともに、ハンガーおよびクリップ接合部の応力状態から力学的特性を検討する。

次に、先に構築された接合部の解析モデルを用いて、天井全体の解析モデルを作成し、漸増载荷に対する天井システムの復元力特性を実験結果と比較することで、数値解析モデルの妥当性と整合性を検証する。また、数値解析によって得られる各部材に生じる応力情報をもとに、復元力特性を特徴づける初期の水平剛性および水平耐力のメカニズムについて検討する。

さらに、地震時の天井の応答および損傷を巨視的に捉えることが求められるような場合を想定して、天井を一質点系とみなして振動解析するための力学モデルを提案する。振動台実験により得られる天井の応答加速度と応答変位波形および斜め振れ止めによる復元力をもとに、提案モデルの妥当性の検証を行う。

最後に、耐震性の面で力学的に管理・整理されてこなかった鋼製下地在来工法天井に内在している様々な不確定要素を想定して、天井の耐震性を確率論的に捉えていくことの必要性について検討する。ここでは初歩段階として、天井落下の主要な要因であるクリップのすべりおよび脱落耐力について施工誤差等で生じるバラつきを考慮することで、天井の耐震性を統計的に捉えることを試みる。

Chapter 1
Figures,Photos



図 1.1 十勝沖地震被害例（2003年 空港ターミナルビル）

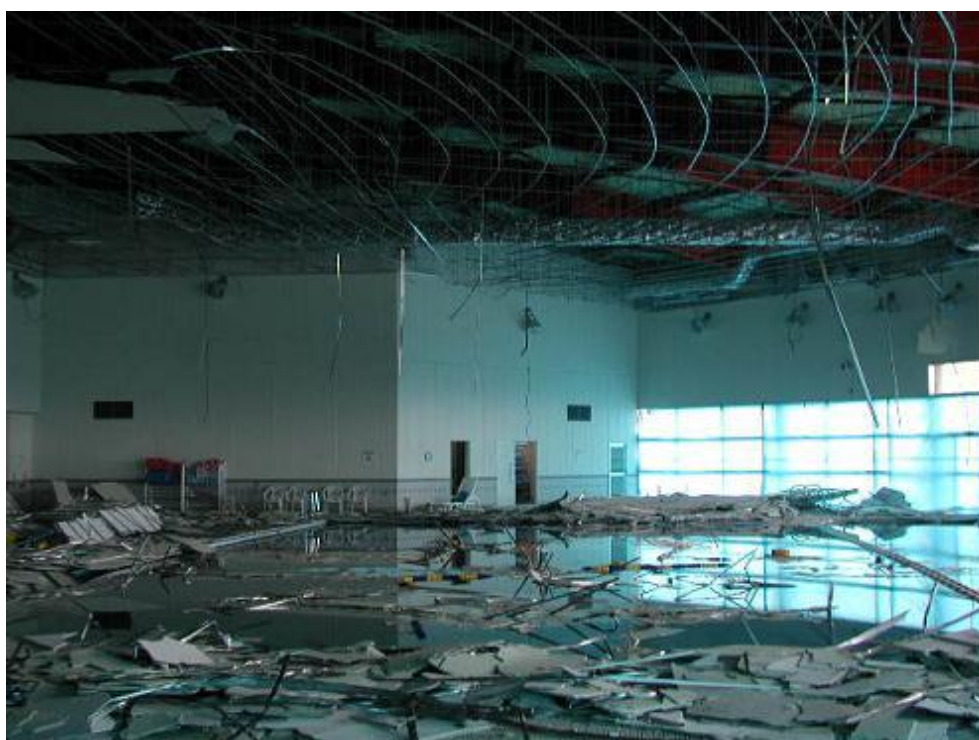


図 1.2 宮城県沖の地震被害例（2005年 室内プール）

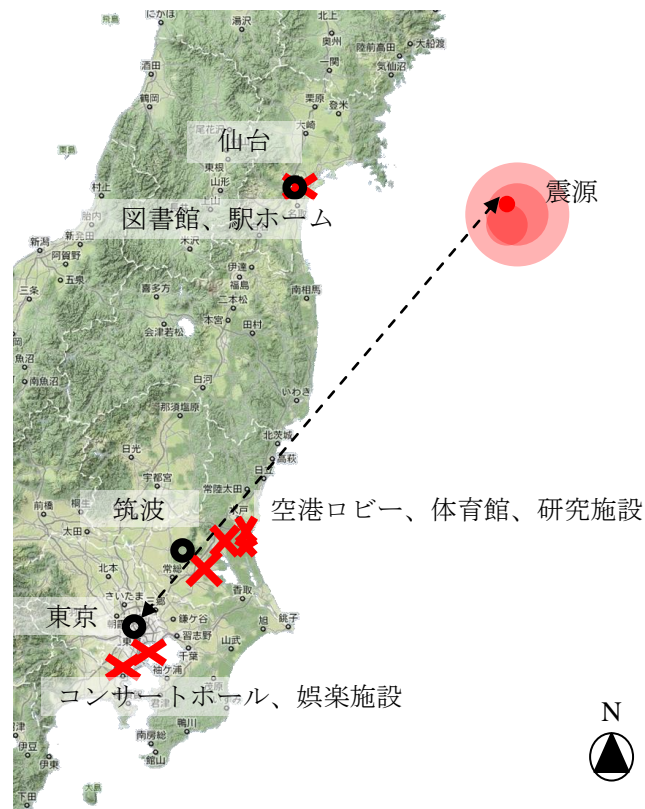


図 1.3 東北地方太平洋沖地震による天井落下被害例

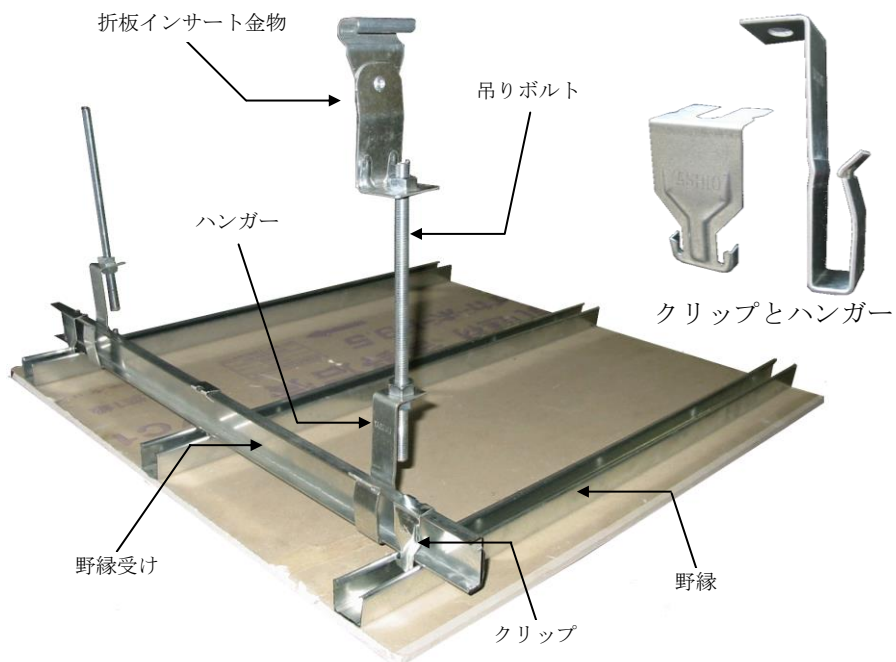


図 1.4 在来工法天井の鋼製下地材 (JIS A6517)

第 2 章 接合部の力学的特性

- 2.1 はじめに

- 2.2 ハンガー接合部およびクリップ接合部の要素実験
 - 2.2.1 クリップ接合部の鉛直および水平力に対する挙動
 - 2.2.2 ハンガー接合部の水平力に対する挙動

- 2.3 接触・離間、クーロン摩擦すべり現象に対する数値解析手法
 - 2.3.1 数値解析手法の概要
 - 2.3.2 数値解析手法の妥当性の検証

- 2.4 ハンガー接合部およびクリップ接合部の再現解析
 - 2.4.1 クリップ接合部の数値解析
 - 2.4.2 ハンガー接合部の数値解析
 - 2.4.3 力学モデルの構築

- 2.5 まとめ

Figures and Tables

2.1 はじめに

建築の主要構造躯体では、力の伝達が明解となるように接合部における部材間の偏心は極力避け、溶接や高力ボルトを用いて剛接合やピン接合の力学的に明解な接合条件を採用する。しかし、天井下地材では事情が全く異なってくる。

JIS A6517で規定されている既存の鋼製下地在来工法天井には、主にハンガーとクリップと呼ばれる特殊な形状した接合金物がある。この金物を用いて部材同士を嵌合させるように接合するため、部材間の力の伝達は各接触面における接触力および摩擦力によって行われる。また、部材同士を単純に交差させて複雑な形状をした金物で交点を接合するため、部材間に不可避的な偏心が生じてしまう。このように、天井下地材では力の伝達が非常に不明瞭な状態にある。

そこで本章では、鋼製下地在来工法天井の主な接合部であるハンガーおよびクリップ接合部を取り出して、各接合部における力学的特性について検討を行う。

2.2 ハンガー接合部およびクリップ接合部の要素実験

2.2.1 クリップ接合部の鉛直および水平力に対する挙動

クリップは野縁と野縁受けを連結する金物であり、野縁には天井板がビス留めされている。つまりこのクリップが天井面を支えている金物であり、この金物の損傷・脱落が天井落下の重要な部位であるということになる。実際に天井が落下した現場でも、天井面とともに多数のクリップが下に落下していた事からもわかる。そのため、クリップの損傷・脱落のメカニズムを解明することは、天井落下を考える上で非常に重要である。

そこで、クリップ接合部の鉛直力および水平力に対する挙動を検討する要素実験を行う。図 2.1 に示すような野縁受けと野縁をクリップで嵌合させて構成される接合部を試験対象とする。一般的にクリップにはシングルとダブルという幅の異なるものが存在するが、本章ではシングルクリップを基にしてクリップ接合部の力学的特性について検討を行う。また、クリップの装着方法には背掛けと腹掛けの2種類(図 2.2a,b))があるが、この違いに関しては対象とする。なお、クリップの損傷状態を説明するために、本章ではクリップの各部位を図 2.2c)のように称することとする。各部材は一般的に用いられている野縁受け C-38×12×1.2×1.2 (JIS CC-19)、野縁 C-25×19×0.6×0.6 (JIS CS-19)、板厚 0.6mm のクリップを使用する。野縁受けおよび野縁の材長 L_{ch} , L_m はボルト支持間で 240mm, 260mm とする。この試験体を図 2.3 に示すような加力システムに取り付ける。フレーム A に野縁を、フレーム B に野縁受けの両端をそれぞれボルトで固定する。鉛直力および水平力に対するクリップ接合部の挙動を各々検討できるように、試験体を 90 度回転させて取り付けられるようなフレームとなっている。

計測項目は、野縁両端の変位 u と野縁受け両端に生じる反力の総和 V (鉛直力) または H (水平力) である。载荷パターンは、鉛直载荷では野縁を下向きに引くような静的単調载荷、水平载荷では野縁を材軸方向に 1 サイクルの静的繰返载荷とする。

<実験結果>

図 2.4 に実験で得られた腹掛けおよび背掛けクリップの鉛直荷重—鉛直変位関係図を示す。腹掛けは最大耐力 350N 程度を示した後に耐力が劣化し、ツメおよび肩部が開くことで完全に野縁受けから脱落した。脱落したクリップはツメから肩部にかけて塑性変形を起こしていた (図 2.5a))。一方、背掛けは 2 つピークを有す形になっており、1 つ目のピークは 400N 程度、2 つ目のピークは 550N を示し、ツメで開かずに根元が野縁から抜けるように脱落した。脱落后、クリップは根元で、野縁はリップ部

で塑性変形が確認された(図 2.5b))。このように、クリップの掛け方によって崩壊形が異なることがわかる。この腹掛けと背掛けの各々の崩壊形を比較すると、クリップには上部(ツメおよび肩部)と下部(根元)にそれぞれ耐力があり、両者の耐力は上部<下部の関係にあることがわかる。ただし、背掛けではツメが野縁受けの内側に巻き込まれているため、ツメが開きにくい状態にあり、上部>下部の耐力関係になっていると考えられる。

ここで、クリップ1個あたりが負担する質量を4.8kg(2枚分の石膏ボードと野縁1本を含めた単位面積質量17.78kg/m², 負担面積=0.3×0.9=0.27m²)と考えると、腹掛けおよび背掛けは自重に対してそれぞれ約7倍、11倍(背掛けは2つ目のピーク値)の安全率があることになる。鉛直力に対しては、比較的耐性があると考えられる。

次に水平載荷で得られた水平荷重-水平変位関係を図 2.6 に示す。クリップが野縁受けに押し当てられる方向(①)に野縁を強制変位させると、クリップは変形せずに根元と野縁の間ですべる挙動を示した。これはクリップの掛け方によらずほぼ70N程度のすべり耐力を示した。一方、逆方向(②)に野縁を変位させると、クリップは野縁受けから離れるように変形し、最終的に腹掛けは最大水平力約150Nでツメおよび肩部が開いて完全に野縁受けから脱落し、背掛けは最大水平力300Nを示した後、野縁受けにツメが引っかかったまま根元と野縁の間ですべりと引っかかりを繰り返した。特に背掛けは120N程度で根元が折れる様子を目視でも確認できた。背掛けは脱落することはなかったが、最大耐力以降の+40mmから原点に戻る際の荷重がなく、接合部としての機能が消失していることが考えられる。各々のクリップの崩壊形は図 2.7 に示すように、鉛直載荷におけるそれとほぼ同様であったが、背掛けはクリップの根元の他に肩部の塑性変形が確認された。

このように、クリップ接合部は120~150N程度の比較的小さな水平力を受けただけで損傷または脱落が発生することが確認された。また、クリップ接合部は水平載荷する向きによってすべる方向と損傷・脱落する方向があることがわかった。これはクリップと野縁受けの間で生じる接触・離間状況が変化することに由来していると考えられる。

2.2.2 ハンガー接合部の水平力に対する挙動

水平力に対するハンガー接合部の力学的特性について検討するために要素実験を実施する。試験体の対象部分は、図 2.8a)に示すような野縁受けとハンガーで構成される接合部とする。野縁受けは C-38×12×1.2×1.2 (JIS CC-19) の断面形状、ハンガーは全長 100mm 板厚 2mm のものとし、ともに一般的に用いられているものを使用する。野縁受けの材長 L_c は 240mm (固定支持間) とする。

この試験体に野縁方向の水平力に相当する外力 H を与えるために、クリップの実験で用いた図 2.3 に示す加力システムを用いる。ハンガーの上端をフレーム A に、野縁受けの両端をフレーム B にそれぞれ固定支持となるようにボルトで緊結する。フレーム A・B をそれぞれオートグラフに固定し、オートグラフにより両者の間に相対的な強制変位を加えることで加力する。フレーム A はハンガーごと上下に変位し、オートグラフに内蔵された変位計で変位 u を計測する。荷重は、フレーム B の上部にあるロードセルで野縁受け両端に生じる反力の総和 H を計測する。载荷パターンは 5mm 間隔の静的な繰り返し漸増载荷とし (図 2.8b))、正方向および負方向から载荷開始する 2 パターンを行う。

実験から得られた荷重変位関係を図 2.9 に示す。载荷パターンの大きな差異は見られないが、正負载荷の向きによって明らかに初期剛性および耐力が異なっている。正载荷時ではハンガーが野縁受けに押し当てられるように変形し、負载荷時ではハンガーは野縁受けから離れるように変形する。ハンガーと野縁受けの接触離間が明確に表れる部分 A (図 2.10) に着目すると、前者をハンガーが閉じる状態 (Close)、後者を開く状態 (Open) と表すことができる。ハンガーと野縁受けの接触状態が载荷の向きによって変化するため、ハンガーの応力状態に違いが生じていることが考えられる。このようなことから、ハンガー接合部は幾何学的な非線形性を有していると言える。

2.3 接触・離間、クーロン摩擦すべり現象に対する数値解析手法

2.3.1 数値解析手法の概要

＜梁要素間の接触問題＞

クリップおよびハンガー接合部の要素実験から、両接合部では部材同士ならびに部材と接合金物が接触・離間する現象が生じることが明らかとなった。クリップ接合部に至っては、クリップの根元が野縁に沿ってすべる現象が存在する。両接合部の数値解析を可能にするためには、これらの現象を再現する解析手法を導入する必要がある。そこで、上記の点を比較的簡便に評価することができる解析モデルとして、Crisfield らによるマスター節点とスレーブ節点の幾何学的非線形関係を考慮した梁要素を採用する。以下に定式化の概要を示す。

接合状態を表現するためにマスター節点とそれに付随するスレーブ節点を考える。Crisfield らが直接対象としている問題は「要素の材端における接合条件」である。図 2.11 に示したマスタースレーブモデルの概念図のように、所定の要素の端部において、所定の材端力が解放されるような問題に対してスレーブ節点を導入し、マスター節点とスレーブ節点の相対変位を考慮することにより、材端力の解放を扱うようにするものである。Crisfield らによる接合条件は一義的なものであるが、本論文では条件に応じて接合条件を変化させるように拡張して用いる。

マスター節点の変位および正規直交基底とスレーブ節点の変位および正規直交基底には次のような関係があるものとする。

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_M + \mathbf{u}_R \quad (2-1)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_R \mathbf{Q}_M \quad \mathbf{Q}_R = \mathbf{Q}_R(\boldsymbol{\beta}_R) \quad (2-2)$$

ここに、 $\mathbf{u}, \mathbf{u}_M, \mathbf{u}_R$ はスレーブ節点の変位、マスター節点の変位、接合条件により解放される変位（スレーブ節点とマスター節点の変位の差異）、 \mathbf{Q}, \mathbf{Q}_M はスレーブ節点及びマスター節点の正規直交基底に対する回転マトリクス、 \mathbf{Q}_R は接合条件により解放される回転 $\boldsymbol{\beta}_R$ により形成される回転マトリクスである。もし、 \mathbf{u} および \mathbf{Q} を求められたならば、接合条件の影響を考慮した要素本体端部の節点変位が分かるので、通常の梁要素と同じ取り扱いが可能となる。ただし、 \mathbf{u}_R および \mathbf{Q}_R を考える場合、特に非線形問題においては、マスター節点における正規直交基底 $(\mathbf{m}_r, \mathbf{m}_s, \mathbf{m}_t)$ にて定義される局所座標系成分により記述することが望ましい。すなわち、

$$\mathbf{u}_R = \{\mathbf{u}_R\}_X \mathbf{e}_X + \{\mathbf{u}_R\}_Y \mathbf{e}_Y + \{\mathbf{u}_R\}_Z \mathbf{e}_Z = \{\mathbf{u}_R\}_r \mathbf{m}_r + \{\mathbf{u}_R\}_s \mathbf{m}_s + \{\mathbf{u}_R\}_t \mathbf{m}_t \quad (2-3)$$

$$\boldsymbol{\beta}_R = \{\boldsymbol{\beta}_R\}_X \mathbf{e}_X + \{\boldsymbol{\beta}_R\}_Y \mathbf{e}_Y + \{\boldsymbol{\beta}_R\}_Z \mathbf{e}_Z = \{\boldsymbol{\beta}_R\}_r \mathbf{m}_r + \{\boldsymbol{\beta}_R\}_s \mathbf{m}_s + \{\boldsymbol{\beta}_R\}_t \mathbf{m}_t \quad (2-4)$$

ここに、

$$\mathbf{Q}_M = [m_r \ m_s \ m_t] \quad \text{または} \quad \mathbf{Q}_M = m_r \mathbf{e}_X + m_s \mathbf{e}_Y + m_t \mathbf{e}_Z \quad (2-5)$$

上記の局所座標系成分と全体座標系成分間の関係は、

$$\mathbf{u}_R = \langle \mathbf{e}_X \ \mathbf{e}_Y \ \mathbf{e}_Z \rangle \begin{Bmatrix} \{\mathbf{u}_R\}_X \\ \{\mathbf{u}_R\}_Y \\ \{\mathbf{u}_R\}_Z \end{Bmatrix} = \langle m_r \ m_s \ m_t \rangle \begin{Bmatrix} \{\mathbf{u}_R\}_r \\ \{\mathbf{u}_R\}_s \\ \{\mathbf{u}_R\}_t \end{Bmatrix} \quad (2-6)$$

であり、各正規直交基底間の関係が、

$$\langle m_r \ m_s \ m_t \rangle = \langle \mathbf{Q}_M \mathbf{e}_X \ \mathbf{Q}_M \mathbf{e}_Y \ \mathbf{Q}_M \mathbf{e}_Z \rangle \quad (2-7)$$

と表わされるので、局所座標系成分と全体座標系成分間の関係は

$$\mathbf{Q}_M \begin{Bmatrix} \{\mathbf{u}_R\}_r \\ \{\mathbf{u}_R\}_s \\ \{\mathbf{u}_R\}_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\mathbf{u}_R\}_X \\ \{\mathbf{u}_R\}_Y \\ \{\mathbf{u}_R\}_Z \end{Bmatrix} \quad \text{あるいは、} \quad \begin{Bmatrix} \{\mathbf{u}_R\}_r \\ \{\mathbf{u}_R\}_s \\ \{\mathbf{u}_R\}_t \end{Bmatrix} = \mathbf{Q}_M^T \begin{Bmatrix} \{\mathbf{u}_R\}_X \\ \{\mathbf{u}_R\}_Y \\ \{\mathbf{u}_R\}_Z \end{Bmatrix} \quad (2-8)$$

となる。同様に \mathbf{Q}_R を考える場合にもこれに対応する回転軸ベクトルの関係は、

$$\mathbf{Q}_M \begin{Bmatrix} \{\boldsymbol{\beta}_R\}_r \\ \{\boldsymbol{\beta}_R\}_s \\ \{\boldsymbol{\beta}_R\}_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\boldsymbol{\beta}_R\}_X \\ \{\boldsymbol{\beta}_R\}_Y \\ \{\boldsymbol{\beta}_R\}_Z \end{Bmatrix} \quad \text{あるいは、} \quad \begin{Bmatrix} \{\boldsymbol{\beta}_R\}_r \\ \{\boldsymbol{\beta}_R\}_s \\ \{\boldsymbol{\beta}_R\}_t \end{Bmatrix} = \mathbf{Q}_M^T \begin{Bmatrix} \{\boldsymbol{\beta}_R\}_X \\ \{\boldsymbol{\beta}_R\}_Y \\ \{\boldsymbol{\beta}_R\}_Z \end{Bmatrix} \quad (2-9)$$

となる。なお、当然ながら \mathbf{u}_R および \mathbf{Q}_R の成分のうち解放しない自由度に対応する成分は $\mathbf{0}$ である。

ここで、マスター節点及びスレーブ節点における変位ベクトルおよび直交基底の変化率関係について示す。まず、両節点における変位ベクトルの変化率の関係を求める。式(2-8)を式(2-1)に代入する。

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_M + \mathbf{u}_R = \mathbf{u}_M + \mathbf{Q}_M \bar{\mathbf{u}}_R \quad (2-10)$$

ここに、 $(*)$ は (m_r, m_s, m_t) 基底に対する成分からなるベクトルであることを示す。これより、スレーブ節点の変位ベクトル \mathbf{u} の微小変化は次のように表わされる。

$$d\mathbf{u} = d\mathbf{u}_M + d\mathbf{u}_R = d\mathbf{u}_M + d\mathbf{Q}_M \bar{\mathbf{u}}_R + \mathbf{Q}_M d\bar{\mathbf{u}}_R \quad (2-11)$$

ここで、 $d\mathbf{Q}_M$ は、 $d\mathbf{Q}_M = \mathbf{W}(d\boldsymbol{\beta}_M) \mathbf{Q}_M$ (\mathbf{W} は反対称テンソル) として表わされるので、上式は、

$$d\mathbf{u} = d\mathbf{u}_M + \mathbf{W}(d\boldsymbol{\beta}_M) \mathbf{Q}_M \bar{\mathbf{u}}_R + \mathbf{Q}_M d\bar{\mathbf{u}}_R = d\mathbf{u}_M + \mathbf{W}(\mathbf{Q}_M \bar{\mathbf{u}}_R) d\boldsymbol{\beta}_M + \mathbf{Q}_M d\bar{\mathbf{u}}_R \quad (2-12)$$

これから、スレーブ節点における変位ベクトルの変化率はマスター節点における変位ベクトルと解放変位ベクトルの変化率により次のように表わされる。

$$du = \begin{bmatrix} I & W(Q_M \bar{u}_R) & Q_M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} du_M \\ d\beta_M \\ d\bar{u}_R \end{Bmatrix} \quad (2-13)$$

次に、両節点における直交基底の変化率の関係を求める。まず、式(2-2)を次のように書き直す。

$$Q = Q_R(\beta_R) Q_M = \exp W(\beta_R) Q_M \quad (2-14)$$

これに式(9)を代入する。

$$\begin{aligned} Q &= Q_R(\beta_R) Q_M = \left\{ \exp W(Q_M \bar{\beta}_R) \right\} Q_M = \left[\exp \left\{ Q_M W(\bar{\beta}_R) Q_M^T \right\} \right] Q_M \\ &= Q_M \exp W(\bar{\beta}_R) Q_M^T Q_M = Q_M \exp W(\bar{\beta}_R) = Q_M Q_R(\bar{\beta}_R) \end{aligned} \quad (2-15)$$

これより、スレーブ節点の直交基底 Q の微小変化は次のように表わされる。

$$dQ = Q_M dQ_R(\bar{\beta}_R) + dQ_M Q_R(\bar{\beta}_R) \quad (2-16)$$

ここで、 dQ, dQ_R および dQ_M は $dQ = W(d\beta)Q$, $dQ_R = W(d\bar{\beta}_R)Q_R$, $dQ_M = W(d\beta_M)Q_M$ であり、上式は

$$W(d\beta)Q = Q_M \left[W(d\bar{\beta}_R)Q_R(\bar{\beta}_R) \right] + \left[W(d\beta_M)Q_M \right] Q_R(\bar{\beta}_R) \quad (2-17)$$

となり、さらにこの式を次のように変換する。

$$W(d\beta) \left[Q_M Q_R(\bar{\beta}_R) \right] = Q_M W(d\bar{\beta}_R) Q_M^T \left[Q_M Q_R(\bar{\beta}_R) \right] + W(d\beta_M) \left[Q_M Q_R(\bar{\beta}_R) \right] \quad (2-18)$$

これから、

$$W(d\beta) = Q_M W(d\bar{\beta}_R) Q_M^T + W(d\beta_M) \quad (2-19)$$

という表現が得られる。上式の右辺第1項は $Q_M W(\bar{\beta}_R) Q_M^T = W(Q_M \bar{\beta}_R)$ であるので、

$$W(d\beta) = W(Q_M d\bar{\beta}_R) + W(d\beta_M) \quad (2-20)$$

となり、結局スレーブ節点の回転は、マスター節点および解放回転により次式で表わされる。

$$d\beta = Q_M d\bar{\beta}_R + d\beta_M \quad d\beta = \begin{bmatrix} I & Q_M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\beta_M \\ d\bar{\beta}_R \end{Bmatrix} \quad (2-21)$$

以上から、スレーブ節点の変位ベクトル変化率は、マスター節点の変位ベクトル変化率および解放変位ベクトル変化率により次のように表わされる。

$$\begin{Bmatrix} du \\ d\beta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I & W(Q_M \bar{u}_R) & Q_M & 0 \\ 0 & I & 0 & Q_M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} du_M \\ d\beta_M \\ d\bar{u}_R \\ d\bar{\beta}_R \end{Bmatrix} = h \begin{Bmatrix} du_M \\ d\beta_M \\ d\bar{u}_R \\ d\bar{\beta}_R \end{Bmatrix} \quad (2-22)$$

これより、スレーブ節点における平衡方程式を導出する。同方程式は通常の梁要素の平衡方程式として表わされる。仮想仕事の原理より、

$$\delta U^T q = \delta U^T (F_{ext} - F_{int}) = 0 \quad (2-23)$$

$$U^T = \langle u_I \quad v_I \quad w_I \quad \theta_{XI} \quad \theta_{XI} \quad \theta_{XI} \quad u_J \quad v_J \quad w_J \quad \theta_{XJ} \quad \theta_{XJ} \quad \theta_{XJ} \rangle \quad (2-24)$$

ここに、 F_{ext} F_{int} q は U (スレーブ節点での全自由度変位ベクトル) に対応する外力ベクトル、内力ベクトルおよび不平衡力ベクトルである。なお、そり変形を考慮する場合には、振り率などを含めることになるが、その場合も同様に定式化することができる。

式(2-22)から、

$$dU = \begin{Bmatrix} du_I \\ d\beta_I \\ du_J \\ d\beta_J \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I & W(Q_{MI} \bar{u}_{RI}) & 0 & 0 & Q_{MI} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 & Q_{MI} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & W(Q_{MJ} \bar{u}_{RJ}) & 0 & 0 & Q_{MJ} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 & Q_{MJ} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} du_{MI} \\ d\beta_{MI} \\ du_{MJ} \\ d\beta_{MJ} \\ d\bar{u}_{RI} \\ d\bar{\beta}_{RI} \\ d\bar{u}_{RJ} \\ d\bar{\beta}_{RJ} \end{Bmatrix} = [H \quad G] \begin{Bmatrix} dU_M \\ dU_R \end{Bmatrix} \quad (2-25)$$

(2-25)式を要素平衡方程式(2-23)に代入する。

$$\delta \langle U_M^T \quad U_R^T \rangle \begin{Bmatrix} H^T q \\ G^T q \end{Bmatrix} = 0 \quad (2-26)$$

この式から、マスター節点の全自由度ベクトル U_M に対する平衡方程式が $H^T q = 0$ となり、解放変位に対する平衡方程式が $G^T q = 0$ となることが解かる。次に増分形の平衡方程式を求めるためにこれらの式を Taylor 展開して、変位について1次の項まで考える。

$${}^{t+dt} H^T q - {}^t H^T q + \frac{\partial (H^T q)}{\partial U_M} dU_M + \frac{\partial (H^T q)}{\partial U_R} dU_R + \frac{\partial (H^T q)}{\partial U} dU \Rightarrow 0$$

ここで H は U_M 及び U_R のみの関数なので、

$$\frac{\partial (H^T q)}{\partial U} = \frac{\partial H^T}{\partial U} q + H^T \frac{\partial q}{\partial U} = H^T \frac{\partial q}{\partial U} \quad \left(\frac{\partial H}{\partial U} = 0 \right)$$

となる。 $\partial \mathbf{q} / \partial \mathbf{U}$ は slave 節点の全自由度変位ベクトルに対する接線剛性を意味するのでこれを $\partial \mathbf{q} / \partial \mathbf{U} = \mathbf{K}$ とおくことにより、

$${}^{t+dt} \mathbf{H}^T \mathbf{q} - {}^t \mathbf{H}^T \mathbf{q} + \frac{\partial (\mathbf{H}^T \mathbf{q})}{\partial \mathbf{U}_M} d\mathbf{U}_M + \frac{\partial (\mathbf{H}^T \mathbf{q})}{\partial \mathbf{U}_R} d\mathbf{U}_R + \mathbf{H}^T \mathbf{K} d\mathbf{U} \Rightarrow 0 \quad (2-27)$$

となる。ここで $d\mathbf{U}$ は式(25)で表わされるから、これを上式に代入する。

$${}^{t+dt} \mathbf{H}^T \mathbf{q} - {}^t \mathbf{H}^T \mathbf{q} + \frac{\partial (\mathbf{H}^T \mathbf{q})}{\partial \mathbf{U}_M} d\mathbf{U}_M + \frac{\partial (\mathbf{H}^T \mathbf{q})}{\partial \mathbf{U}_R} d\mathbf{U}_R + \mathbf{H}^T \mathbf{K} [\mathbf{H} \quad \mathbf{G}] \begin{Bmatrix} d\mathbf{U}_M \\ d\mathbf{U}_R \end{Bmatrix} \Rightarrow 0 \quad (2-28)$$

となり、 $\mathbf{G}^T \mathbf{q}$ についても同様に展開を行うと、次式に示す増分量に対する線形方程式が得られる。

$$\left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{H}^T \mathbf{K} \mathbf{H} & \mathbf{H}^T \mathbf{K} \mathbf{G} \\ \mathbf{G}^T \mathbf{K} \mathbf{H} & \mathbf{G}^T \mathbf{K} \mathbf{G} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial (\mathbf{H}^T \mathbf{q})}{\partial \mathbf{U}_M} & \frac{\partial (\mathbf{H}^T \mathbf{q})}{\partial \mathbf{U}_R} \\ \frac{\partial (\mathbf{G}^T \mathbf{q})}{\partial \mathbf{U}_M} & \frac{\partial (\mathbf{G}^T \mathbf{q})}{\partial \mathbf{U}_R} \end{bmatrix} \right\} \begin{Bmatrix} d\mathbf{U}_M \\ d\mathbf{U}_R \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} {}^t \mathbf{H}^T \mathbf{q} \\ {}^t \mathbf{G}^T \mathbf{q} \end{Bmatrix} \quad (2-29)$$

これを次のように書き改める。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{MM} & \mathbf{K}_{MR} \\ \mathbf{K}_{RM} & \mathbf{K}_{RR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\mathbf{U}_M \\ d\mathbf{U}_R \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_M \\ \mathbf{q}_R \end{Bmatrix} \quad (2-30)$$

解放変位ベクトルは要素ごとに定義されるものであるから、全体剛性に組み込む前に縮約することが可能である。つまり、上式の第2式から、

$$d\mathbf{U}_R = \mathbf{K}_{RR}^{-1} (\mathbf{q}_R - \mathbf{K}_{RM} d\mathbf{U}_M) \quad (2-31)$$

であるので、これを第1式に代入する。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{MM} & \mathbf{K}_{MR} \mathbf{K}_{RR}^{-1} \mathbf{K}_{RM} \end{bmatrix} d\mathbf{U}_M = \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_M \\ \mathbf{K}_{MR} \mathbf{K}_{RR}^{-1} \mathbf{q}_R \end{Bmatrix} \quad (2-32)$$

このようにして得られる有効剛性および有効内力ベクトルを全体マトリクスおよびベクトルに組み込むことで、通常の梁要素と同様に取り扱うことができる。

部材間に生じる不可避的な偏心はマスタースレーブ間の相対変位に対して初期値を設定することで表現することが可能である。この相対変位は全体座標系成分ではなく、マスター節点において定義される直交基底に対する成分にて記述される。

マスター節点に対するスレーブ節点の配置および相対変位を記述するための局所座標系の設定方法について、野縁受けと野縁間の接触を評価するためのダミー要素を例に説明する。図2.12において、M-Node1は野縁受け、M-Node2は野縁のマスター節点であり、それぞれに対応するスレーブ節点を

S-Nodel、S-Node2として表示している。相対変位を記述するための局所座標系の設定方法は以下のとおりである。

まず、入力データとしてマスター・スレーブ間の偏心を全体座標系成分で与える。マスター節点の位置ベクトルと入力された偏心ベクトルからスレーブ節点の位置ベクトルが求められ、算定された位置ベクトルと入力データであるコードアングルなどを用いて要素本体の局所座標系 (r,s,t) ならびにこれに対応する正規直交基底 (e_{Sr} , e_{Ss} , e_{St}) が決定される。本章では、この直交基底をマスター節点における直交基底 (e_{Mr} , e_{Ms} , e_{Mt}) の初期値として用いている。また、スレーブ節点の位置は、相対変位を記述するための局所座標系 (直交基底 (e_{Mr} , e_{Ms} , e_{Mt})) の設定方法を踏まえて、r軸が接触面の法線方向となるように決定する。このようにして決定された直交基底 (e_{Mr} , e_{Ms} , e_{Mt}) を用いて、相対変位 u_R および相対回転 β_R は次式により記述される。

$$u_R = u_{Rr} \cdot e_{Mr} + u_{Rs} \cdot e_{Ms} + u_{Rt} \cdot e_{Mt} \quad (2-33)$$

$$\beta_R = \beta_{Rr} \cdot e_{Mr} + \beta_{Rs} \cdot e_{Ms} + \beta_{Rt} \cdot e_{Mt} \quad (2-34)$$

ここに、 u_{Rr}, u_{Rs}, u_{Rt} および $\beta_{Rr}, \beta_{Rs}, \beta_{Rt}$ は相対変位または相対回転の直交基底 (e_{Mr}, e_{Ms}, e_{Mt}) に対する成分である。

次に、接触問題に対して、相対変位をマスター節点の直交基底により記述することの意義について図2.13を例に述べる。この例では、節点1 に対するマスター・スレーブ節点間ではモーメント3 成分のみを、節点2 に対する同節点間ではt 軸方向力およびr 軸方向力（ただし、r軸方向力については図中上向きで示す離間方向のみ）を解放することとしている。変形後のマスター節点における直交基底は、系全体の平衡方程式から求められるマスター節点での回転軸ベクトルによって逐次更新される。その結果、図2.13右のように節点1 および2 のr,s,t軸が回転したものとする。節点1 においては上記の条件から相対回転は発生するものの、偏心ベクトルはM-Nodel における (r,s,t) 座標系を基準座標系としているためにその成分は変化しないことから、スレーブ節点は常に野縁受けのコーナー部に位置する。節点2 では変形後のt 軸方向およびr 軸負方向に沿って相対位置ベクトルは変化するが、相対回転は発生しないためにスレーブ節点における正規直交基底はマスター節点でのものと同一となる。さらに、節点1 および節点2 の両条件、すなわち、一端におけるモーメントの解放および他端のせん断力 (t 軸方向力) の解放という条件から、要素本体には軸方向力しか生じず、特に離間状態では無応力状態となる。したがって、野縁とチャンネルが一旦離間した状態から再接触状態となるときの判定は相対変位のr 軸方向成分 (u_{Rr}) のみで行うことが可能となる。図2.14 に軸力の許容存在空間を示す。

＜マスター・スレーブモデルのクーロン摩擦への拡張＞

前述したすべり耐力の変化を考慮するために、マスター・スレーブモデルにおける応力解放にあたって次式に示すクーロン摩擦条件を導入し、垂直力の変化に応じてすべり耐力が変化するようにマスター・スレーブモデルを拡張した。

$$\Phi^{\pm}=|T|+\mu N+c=0 \quad \text{for } N<0 \quad (2-35)$$

$$\Phi^0=T=0 \quad \text{for } N\geq 0 \quad (2-36)$$

ここに、 T および N は接触面に対して接線方向または法線方向の力であり、 μ, c は摩擦係数および粘着力である。なお、上式において c を考慮した理由は原点近傍での解の発散を防止するためである。

2.3.2 数値解析手法の妥当性の検証

ここでは、本数値解析手法による接触・離間現象およびクーロン摩擦すべり現象の妥当性を検証する。図 2.15 に示すような梁 A と梁 B から成る単純なモデルを考える。

梁 A と梁 B は節点 B にて接合されており、梁 B の節点 C における接合条件は、X 方向：一方向拘束、Y 方向：クーロン摩擦すべり、Z 方向：拘束としている。なお、回転についてはすべての成分を解放としている。载荷条件は、節点 A に X 方向強制変位を、節点 C および D に Y 方向強制変位を与えるものとして、それぞれを図 2.16 の裁荷プログラムに従い作用させている。解析によって得られた Y 方向に関する荷重変位関係を図 2.17 に示す。H は H_1 と H_2 の和としている。図 2.18 は梁 B の節点 B における材軸方向力 N と横方向力 T の関係を示したものであり、クーロン摩擦条件の式 (2-3) を実線にて併せて示してある。また、両図において点 A-F は対応する点となっている。点 A 以降クーロン摩擦条件のもとすべりが発生し、点 C にてすべりが終了する。点 E 以降は梁 B が梁 A から離間した状態となり、点 F で再接触状態へと移行する様子が適切に計算されていることが確認できる。

2.4 ハンガー接合部およびクリップ接合部の再現解析

2.4.1 クリップ接合部の数値解析

<解析モデルの概要>

クリップ接合部の要素実験から、水平力および鉛直力に対する接合部の挙動を確認し、部材間および部材接合金物間で接触・離間が生じることによって、すべり・脱落現象といった複雑で強い非線形挙動が生じることを明らかにした。天井落下を構造力学的に検討する際には、損傷・脱落する可能性のあるクリップ接合部を見極める必要があるが、そのためにはクリップ接合部のすべり挙動および脱落挙動のメカニズムを把握しておく必要がある。そこで、数値解析を用いてクリップの損傷・脱落する条件について詳細に検討を行う。

野縁および野縁受け、クリップは全て梁要素で構築する(図 2.19)。野縁および野縁受けは薄肉開断面部材であるため反り変形を考慮する。野縁受けの端部は材軸方向 (X 方向) 以外をすべて拘束し、中央で材軸方向の変位を拘束する。野縁の端部は固定ローラー支持とし、Y 方向および Z 方向に強制変位を与えることで水平および鉛直載荷する。載荷パターンは実験と同様である。材料特性および降伏応力度は、付表 B1 および付図 B6 に示した値にしたがったバイリニア—型を採用した。

クリップは野縁受けに対して接触・離間し、野縁方向に根元ですべる。そこで、図 2.20 に示すような想定される部材同士の接触箇所に接触要素を導入する。また、クリップ根元と野縁間の接触要素ではクーロン摩擦条件を導入する。また、クリップ接合部では、クリップの寸法がわずかに小さく作られているため、装着時にクリップに引張方向のプレストレスが入る仕組みになっている。そこで、載荷前に野縁とクリップ根元の接触要素が軸方向に膨張するように軸力を与えることで、クリップに初期張力を与える。

<解析結果>

図 2.21 に腹掛けの鉛直荷重—鉛直変位関係図を示す。最大値が最初に明確に表れている 0~5mm の範囲を拡大して示している。実線は実験結果を、シンボルは解析結果である。数値解析結果が実験結果と概ね対応している。数値解析は実験の最大値付近で終了しているが、これは図 2.22 に示すように最終的にクリップの肩部と根元で塑性ヒンジが発生したことで、クリップ金物が不安定構造になったためである。これ以降の挙動は、クリップが接合金物としての機能を失うことが明らかであるため、それ以前の結果に注目して検討する。腹掛けの鉛直載荷実験では、クリップがツメおよび肩部が開くよ

うに脱落する崩壊形式であったが、根元も全塑性化間近までモーメントが発生していたことが鉛直荷重—鉛直変位関係から考えられる。しかし、図 2.22 で肩部の全塑性化が先行して起きている点と、クリップの各部材角—鉛直変位関係図からツメと肩部の部材角がほぼ等しく両者がともに剛体的に変形している様子から、腹掛けの鉛直耐力は概ね肩部の全塑性化で決まっていると考えられる。

また、最大耐力までの間に 2 種の剛性が確認できるが、これは鉛直外力（図 2.21 中○印）がクリップに生じている初期張力（図 2.21 中●印）を上回ることがきっかけとなっている。このとき、野縁と野縁受けが離間（図 2.21 中△印）し始め、野縁とクリップ根元間の相対変位（野縁のリップの変形に相当）が生じ始めている。そのために剛性が変化していると考えられる。この考えによれば、実験結果から実際に生じている初期張力が同定できる。実験結果では、約 150N 程度で剛性が変化していることから、これが初期張力であると考えられる。

次に、腹掛けクリップの水平荷重に関して検討する。図 2.25 に水平荷重—水平変位関係を示す。実線は実験結果を、シンボルは解析結果である。すべり挙動から転じてクリップが野縁受けから離間して開いていく挙動が再現できており、数値解析結果が実験結果とよく対応している。実験結果では、すべり時の動摩擦力がおよそ 70~80N であり、初期張力は鉛直荷重の結果から 150N 程度であったことから、動摩擦係数は 0.5~0.55 であると推定される。数値解析では、動摩擦係数 0.55 を野縁とクリップ根元間の摩擦係数に採用しており、その結果が図 2.25 であるので妥当な値であると考えられる。

一方、鉛直荷重のときと同様に、数値解析は実験の最大値付近で終了している。これは図 2.26 に示すようにクリップの肩部とツメ部で塑性ヒンジが発生したことで、クリップ金物が不安定構造になったためである。肩部の全塑性化は早い段階で発生しているが、耐力の劣化には関与していないことがわかる。最大耐力に達すると同時にツメ部が全塑性モーメントに達していることから、腹掛けの水平耐力はツメの全塑性モーメントでほぼ決まっていると考えられる。ここで、ツメ部の材端モーメントは、接触力 N_{cont} と接触点からモーメント対象点までの距離 l の乗算によって求められるモーメントと等価である(図 2.27)。ツメの全塑性モーメントは、全塑性断面係数 $Z_p=1.53\text{mm}^3$ ($B=17\text{mm}, t=0.6\text{mm}$) と降伏応力度 $\sigma_y=310[\text{N/mm}^2]$ から $M_p=474\text{Nmm}$ と算定でき、接触点からモーメント対象点までの距離 $l=3.3\text{mm}$ で除すことで水平耐力 $H_{max}=144\text{N}$ が得られる。数値解析結果と実験結果における水平耐力は 145N と 151N（平均）であり、10%以下の精度で捉えられている。なお、クリップ胴部の軸力(図 2.28)を見てみると、水平力の倍以上の軸力が生じており、最大水平耐力を示す時点では鉛直荷重時とほぼ同じ程度の軸力が生じていることがわかる。最大水平耐力は、ツメの全塑性モーメントでほぼ定まっ

ていると考えられるが、水平力を受けたまま鉛直力が作用するような状況下では、肩部にすでに塑性ヒンジが形成されているため、直ちにクリップが脱落する可能性が考えられる。図 2.29 には根元に生じる鉛直力と水平力の関係を示している。クーロンの摩擦条件によりすべり発生の有無が適切に判定されている。

一方、背掛けにおいても概ね実験結果と対応した数値解析結果が得られた。図 2.30 に背掛けクリップの鉛直荷重—鉛直変位関係を示す。腹掛けクリップの鉛直载荷時にみられた初期張力による剛性の変化はここでは見られないが、初期張力の影響により载荷以前（変位がゼロの時点）に野縁受けに反力がわずかに生じている。これは実験結果でも同様の傾向が現れている。数値解析で導入する初期張力は、野縁受けに生じる反力が実験結果と同程度になるときの値を用いることとする。結果として 140N 程度の初期張力を入力すると図 2.30 のように実験結果に近い反力が生じることがわかった。また、同定された背掛けクリップの初期張力は腹掛けクリップのものと同程度であることがわかった。図 2.30 中、灰色●印はクリップの胴部に生じる軸力である。鉛直変位がゼロの時点で最大 140N あり、これが初期張力を表している。

図 2.30 で、鉛直変位 1.0mm 程度に見られるピークは、クリップの根元に生じるモーメントが全塑性モーメントに達して、根元の折れ曲がり(図 2.32)が発生した点である。クリップの各部位に生じる材端モーメントと鉛直変位の関係(図 2.31)から、鉛直変位 1.0mm 付近で根元が全塑性モーメントに達している様子がわかる。根元の全塑性後もモーメントが上昇しているのは、根元の材料特性にバイリニア型を適用した際に、塑性域における 2 次勾配を $1/20E_o$ (E_o : ヤング係数) と大きく設定したために、ひずみ硬化の影響が大きく表れているためである。この 2 次勾配を大きくしている理由として、クリップ根元の断面形状が一様でなく、塑性化する部分が下方に向かって面内に広がっており、徐々に塑性化している様子が伺えたためである。

ただし、上記の方法でクリップ根元の塑性化の進展を模擬することで耐力の劣化が再現されているが、実験結果との差異が観られる。本来は加工硬化も含まれると考えられる複雑な断面形状をしたクリップの根元を梁要素で単純化しているため、劣化挙動の再現に限りがあると考えられる。しかし、クリップの根元が折れることにより野縁と野縁受けの間には隙間が生じることになり、もはやクリップは本来の接合能力を失っていると状態にあると考えられる。そのため、背掛けクリップにおいては根元折れまで解析が可能であることに意味があると考えられる。なお、耐力の劣化後に再び耐力が上昇しているが、これはクリップの最下端が野縁と新たに接触するためである。

次に、背掛けクリップの水平荷重—水平変位関係を図 2.33 に示す。実線は実験結果を、シンボルは解析結果である。すべり挙動およびクリップが野縁受けから離間して開いていく挙動もよく再現できしており、数値解析結果が実験結果とよく対応している。摩擦係数および初期張力は鉛直荷重のときと同様の値を用いており、整合性が保たれている。

腹掛けのときのように肩部の全塑性化が先行して起きている(図 2.34)。腹掛けでは、このあとツメの全塑性化で最大耐力を迎えるが、背掛けではツメに生じるモーメントは腹掛けに比べて増加しにくい。背掛けではクリップのツメを野縁受けの内側に折り込むことができるため、ツメを折り曲げてできる角にフランジの縁が納まるようになっている。これにより接触点との距離が小さくなり、ツメにモーメントが生じにくい状況になっていると考えられる。一方で、数値解析における水平荷重でもクリップの根元が折れる結果となっている(図 2.35)。根元が全塑性モーメントに達したのを機に根元の部材角が増加している様子が図 2.35 からわかる。根元に生じる鉛直力はクリップ胴部の軸力とほぼ等しいことが図 2.36 からわかる。この状況は鉛直荷重の状況に似ており、鉛直荷重時のクリップ胴部の軸力と比較してみると、水平荷重時の方が 15%大きいが比較的近い値となっている。腹掛けクリップの水平荷重の時も同様に軸力が大きかったが、この理由は、野縁と野縁受けの接触があるためにクリップの上部と下部の鉛直方向の変位が拘束されることで、クリップに軸ひずみが生じやすい境界条件になっているためであると考えられる。背掛けにおいてもクーロンの摩擦条件ですべり挙動が再現できている(図 2.37)。

2.4.2 ハンガー接合部の数値解析

ハンガー接合部の応力状態について具体的に検討するために、ハンガー接合部の要素実験を再現する解析モデルを作成して数値解析を行う。

図 2.38 に解析モデルを示す。ハンガーと野縁受けはともに梁要素とし、野縁受けは薄肉開断面であることから反り変形を考慮する。野縁受けの両端は、材軸方向（Y 方向）の変位以外を全て固定とし、Y 方向変位の拘束は野縁受け中央の節点で行う。ハンガーは、上端で X 方向変位を許容する固定ローラーとし、X 方向に強制変位を与える。载荷パターンは実験と同様である。材料特性および降伏応力度は、表 2.1 に示すように付録 B で得られた数値を用い、混合硬化則を採用した。実験結果から解るように、ハンガーと野縁受け間の接触・離間を考慮する必要がある。解析モデルでは、両者の接触する箇所に接触を判定するための要素（接触要素）を導入することで、部材間の接触・離間を考慮する。

数値解析により得られた荷重変位関係を実験結果と比較したものを図 2.39 に示す。図 2.39 中の○は解析結果、実線が実験結果である。太実線は後述する理論解による結果である。正負の初期剛性値に加え除荷時の挙動も両結果が精度よく一致していることから、本数値解析モデルが妥当であることが解る。

ここで、実際はハンガー接合部に天井の重量が作用していることから、天井の重量に相当する鉛直力を作用させた場合について解析を行った。ハンガー1 個当たりにかかる天井の重量は約 150[N/本]（天井ボード 2 枚貼、吊ボルト間隔 900mm、野縁シングル 2 本、野縁ダブル 1 本を想定）とし、ハンガーに鉛直力 150N が生じるまでハンガー頂部を Z 軸の正方向に強制変位を与えた後、X 方向の強制変位を与える。このとき得られた水平剛性は $(K_{open}, K_{close})=(16, 49)$ [N/mm]であった。これは、天井の重量を考慮していない結果（図 2.39 中に記載）とほぼ等しいことから、水平剛性に対する天井重量の影響は小さいと考えられる。以後、天井の重量は無視して検討を行うこととする。

数値解析によって求められたハンガー金物に生じるモーメント分布を変形状態ごとに図 2.40 に示す。ただし、この図は弾性域内の分布で、最大のモーメントが生じる B 点を基準とした場合の各点におけるモーメント比を表している。変形状態によって、ハンガーの境界条件が変化しており、モーメントの分布が明確にこなっていることが解る。ハンガーの Open 時では、点 A～E で概ね等しい材端モーメントが生じており、点 C で反曲点が生じている。要素 AB および DE のモーメントにわずかな勾配が生じている。これは点 E に生じる鉛直の接触力に応じて点 A で鉛直方向に反力が生じているためであるが、モーメント勾配が緩く鉛直反力によるモーメント分布への影響は小さい。一方、Close 時では、

要素 AB にモーメント勾配がなく鉛直反力および接触力が生じていないことが解る。また、D 点以降のモーメントが小さくほぼ曲げ変形せずに、野縁受けのねじれ変形と共に剛体的に変位していることが考えられる。

2.4.3 力学モデルの構築

数値解析によって明らかになったハンガー金物のモーメント分布を考慮して、ハンガー接合部を図 2.41 に示すような力学モデルとして考える。要素 AB~DE はハンガーに相当する。この要素 AB~DE 間はすべて剛接合とし、曲げ変形のみを考慮する。要素 EF は、ハンガーと野縁受けが一体となって剛体的に振る舞う部分である。点 F の回転バネ剛性 k_θ は野縁受けのねじれ剛性を、水平バネ K_c は野縁受けの曲げ剛性をそれぞれ表す。ハンガー接合部の解析結果から、鉛直反力による曲げモーメント分布への影響が小さかったことを受けて、鉛直反力をここでは考慮しないこととする。また、ハンガーは载荷する方向によって、点 C でハンガーが野縁受けに接触・離間するため、点 C における境界条件が変わる。そこで +H の外力を受けて点 C が接触状態の時は、要素 BC と要素 CD 間の点 C で剛体にピンローラー接合されているとみなす。-H を受けて点 C が離間状態ではこの境界条件を無効とする。各要素のヤング係数 E およびポアソン比 ν は全て等しいものとし、要素 AB~DE ならびに野縁受け(弱軸曲げ)の断面 2 次モーメントを I_h, I_c とする。要素 AB~DE の材長は、距離 BD を基準とした長さ L_h に比率 α, β, γ を乗じて表し、野縁受けの材長は L_c とする。なお、野縁受けのねじれ剛性は、サンブナンねじりと反りねじりを含めたねじりの一般方程式¹⁴⁾を用いて求められる。本試験体では、野縁受け材端のウェブを金属板と治具フレームで挟むように固定したため(図 2.8a)、材端条件にねじり回転を拘束するが反りは自由とする単純支持を採用する。また、野縁受けの弱軸曲げに対しては、両端固定支持とみなす。最終的にハンガー接合部の水平剛性を求める際には、表 2.2 に示した試験体の情報を各変数に与える。以上、このモデルの点 A に荷重 H が作用する場合についてたわみ角法により解く。ハンガー接合部の水平剛性式の導入過程は付録 B に記し、得られた水平剛性式を次に示す。

$$\begin{aligned} \text{Open } K_s &= \left\{ \frac{1}{K_{h1}} + \frac{1}{K_{h2}} + \frac{1}{K_{h3}} + \frac{1}{K_c} \right\}^{-1} \\ \text{Close } K_s &= \left\{ \frac{1}{K_{h1}} + \frac{1}{K_{h3}} + \frac{1}{K_c} \right\}^{-1} \end{aligned} \quad (2-37a,b)$$

ここで、

$$K_{h1} = \frac{12EI_h}{(\beta L_h)^3}, \quad K_{h2} = \frac{12EI_h}{\{(1-\beta)L_h\}^3}, \quad K_{h3} = \frac{4EI_h}{L_h^3} \frac{A_1}{B_1}, \quad K_c = \frac{\lambda EI_c}{L_c^3} \quad (2-37c,d,e,f)$$

λ は野縁受けの材端条件で定まる係数であり、ここでは $\lambda=192$ である(両端単純支持の時 $\lambda=48$)。 A_1, B_1 は回転バネ k_θ および α, β, γ により構成されており、詳細は付録 B に記した。式 (2-37-a-f) からハンガー接合部の水平剛性 K_s は、主にハンガーの要素 BC, CD の材端条件が固定-固定ローラーの曲げ剛

性 K_{h1} および K_{h2} 、野縁受けのねじれ剛性を含む K_{h3} 、野縁受けの曲げ剛性 K_c の直列関係から表される。式 (2-37-a) は式 (2-37-b) と異なり K_{h2} が存在する。これは Open 時に点 C で離間状態にあるため、要素 CD の曲げ変形が生じることに由来している。式 (2-37-a~f) により計算されるハンガー接合部試験体の水平剛性は $Open K_s=21\text{N/mm}$ 、 $Close K_s=46\text{N/mm}$ となり、図 2.39 に理論値（太実線）を反映させると、実験および解析値によく対応している。また、図 2.39 の耐力の理論値は、ハンガーのモーメント分布を考慮してハンガーの崩壊形が図 2.39 のようになると考え、全塑性モーメントを M_p として終局耐力 H_u を Open 時は $H_u=2M_p/L_h$ 、Close 時は $H_u=2M_p/(\beta L_h)$ と計算した結果である。実験および解析では、ひずみ硬化の影響で理論値を上回っていると考えられるが、およその耐力を捉える意味では十分に有効的であると考えられる。そのため、野縁受けと野縁を留めるクリップが強固（耐風圧用、耐震用等）な場合に、本評価方法が有効であると考えられる。

2.5 まとめ

本章では、力学的に明解な接合条件とみなすことが難しい鋼製下地在来工法天井のハンガーおよびクリップ接合部に対し、要素実験を実施することにより、水平力および鉛直力に対する挙動の検討を行った。また、マスター・スレーブモデルを拡張することで、接触・離間現象およびクーロン摩擦に基づくすべり現象を考慮した数値解析手法を導入し、ハンガー接合部の強非線形性およびクリップ接合部のすべり挙動と脱落挙動のメカニズムについて検討を行った。

以下に結果をまとめる。

- 1) ハンガー金物と野縁受けの間で接触・離間現象がある。
- 2) 非対称な形状をしたハンガー金物と野縁受けの接触する箇所は载荷の向きにより異なるため、ハンガー接合部の水平剛性も载荷の向きにより異なる。
- 3) クリップは掛け方によって崩壊形が異なる。クリップは鉛直力に対して、腹掛けではツメが野縁受けから脱落し、背掛けでは根元が野縁から抜ける。
- 4) クリップは天井板の自重に対して腹掛けで約7倍、背掛けで11倍の安全率があり、鉛直力に対しては比較的耐性がある。
- 5) クリップは、野縁方向に水平力を受ける時、载荷の向きによって挙動が異なる。クリップが野縁受けに押し当てられる方向には根元ですべる。野縁受けから離れる方向には、腹掛けはツメから脱落し、背掛けは根元が塑性変形する。
- 6) ハンガーおよびクリップ接合部の数値解析を行うには、部材間および接合金物と部材の間の接触・離間現象を考慮した接触要素を導入する必要がある。
- 7) 提案した力学モデルから求められる水平剛性式によりハンガー接合部の水平剛性が算定できる。また、ハンガー金物の崩壊形式を考慮することで、ハンガーの終局耐力を評価できる。
- 8) クリップの根元と野縁の間に、クーロン摩擦条件を考慮することで、すべり現象を再現できる。両者間に想定される動摩擦係数は0.5~0.55程度である。
- 9) クリップ設置時の初期張力は、腹掛けで150N、背掛けで140N程度である。
- 10) 腹掛けクリップは野縁受けからツメが脱落する崩壊形式だが、僅かに崩壊形が異なる。鉛直力に対しては肩部で塑性ヒンジ発生、水平力に対しては肩部とツメで塑性ヒンジが生じることで崩壊する。
- 11) 背掛けクリップは鉛直および水平力のどちらに対しても根元が全塑性化する。
- 12) クリップは水平力を受けただけでも、クリップに大きな軸力が生じる。

Chapter 2
Figures and Tables

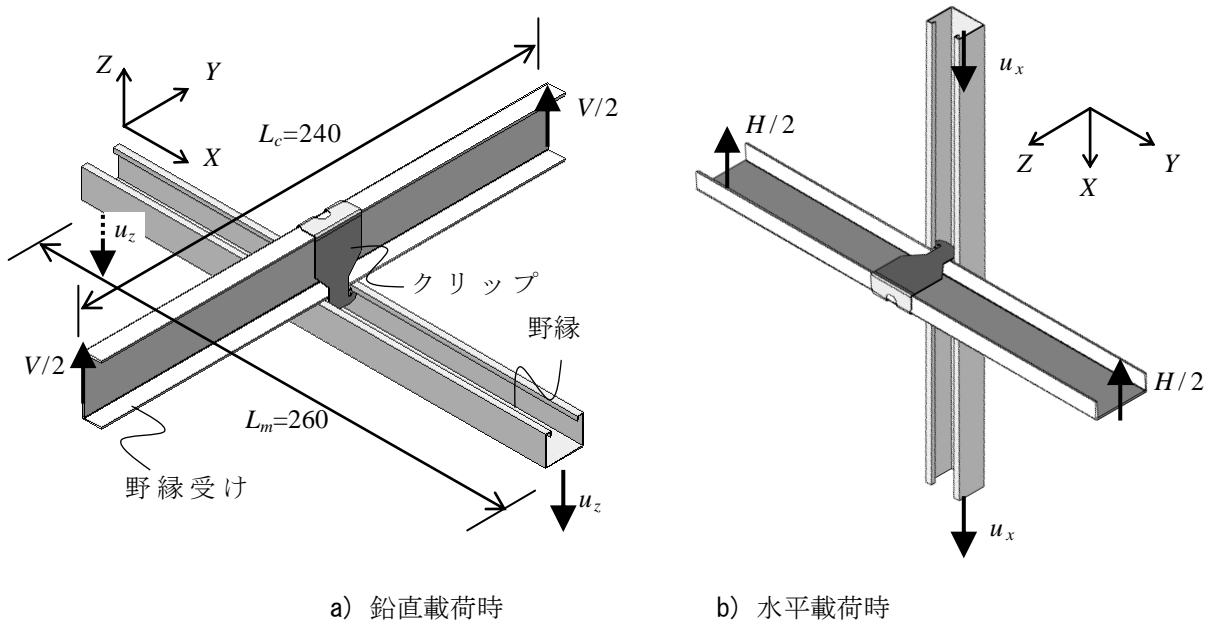


図 2.1 試験体図

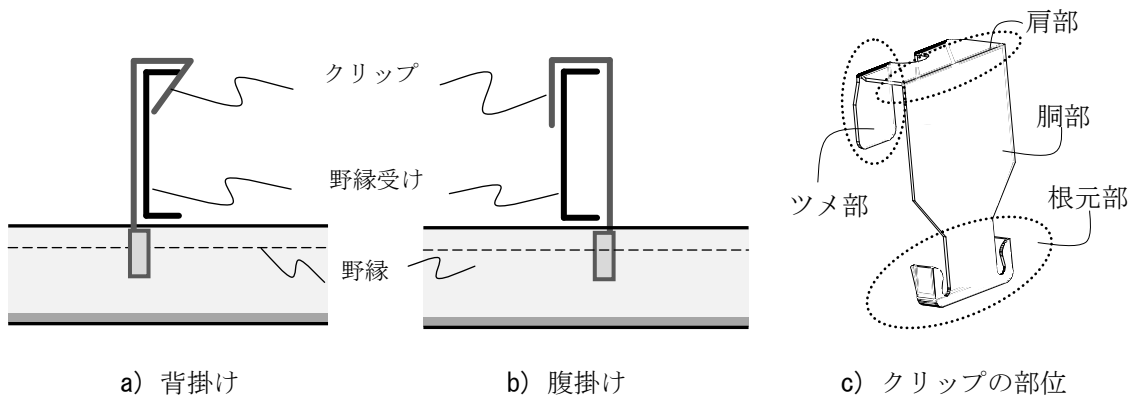


図 2.2 クリップの掛け方の種類とクリップの部位の定義

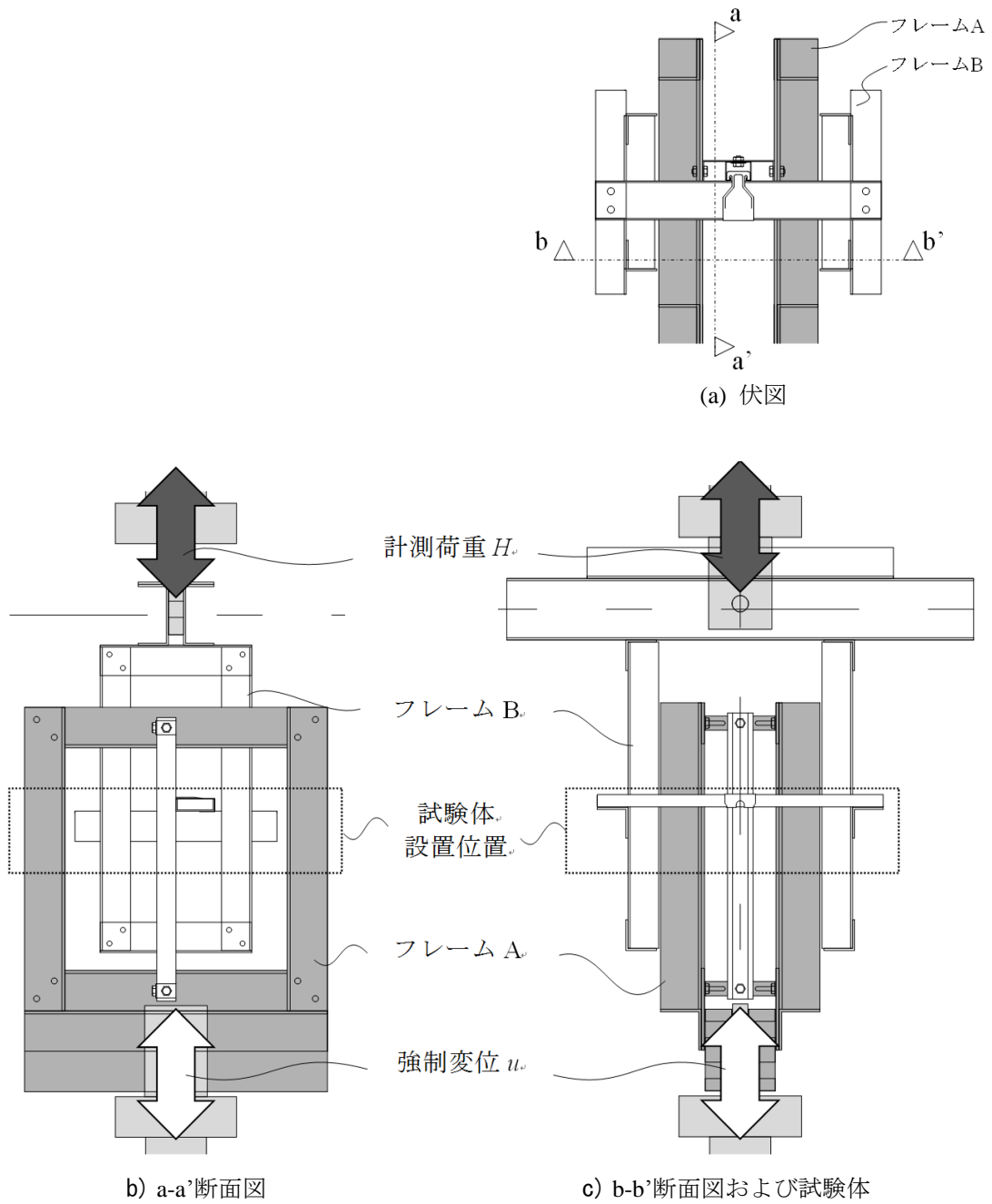
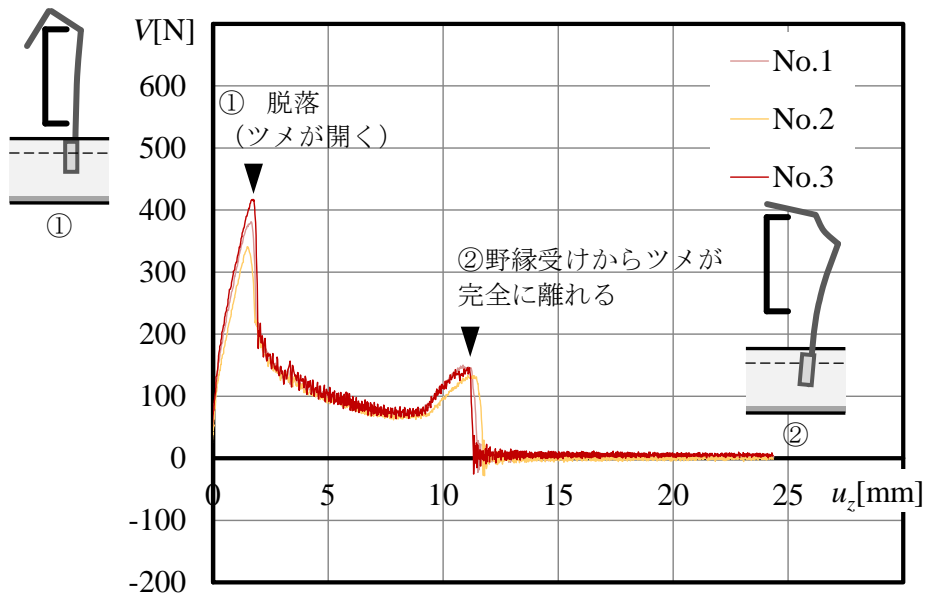
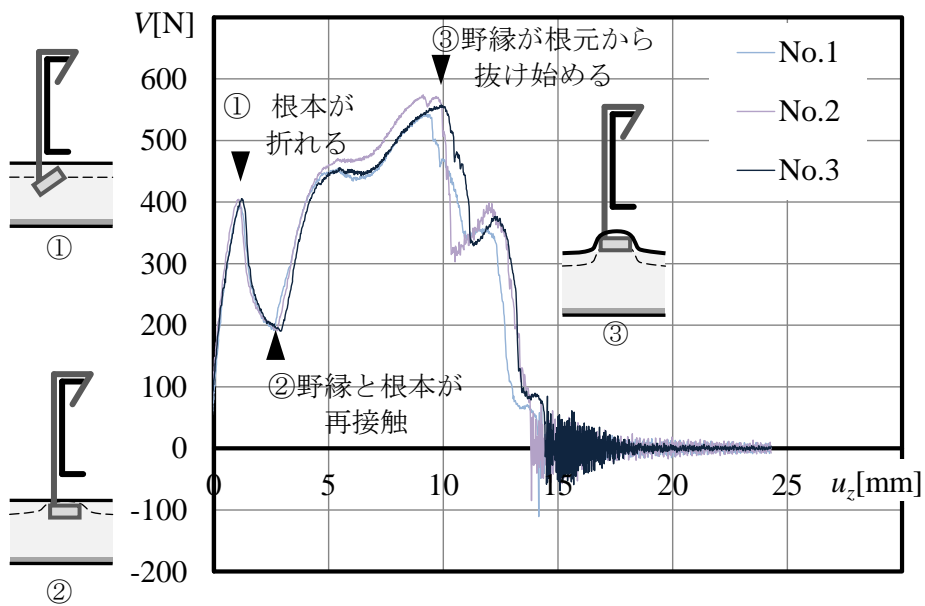


図 2.3 加力装置と試験体



a) 腹掛け



b) 背掛け

図 2.4 荷重変位関係図

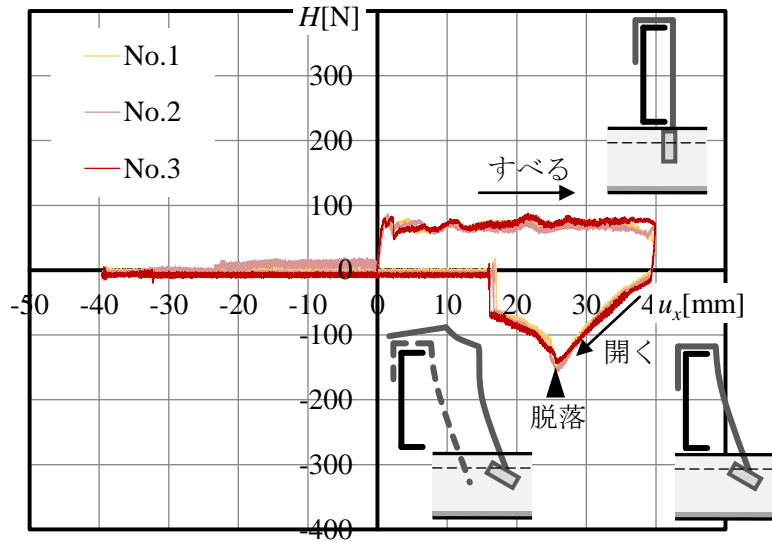


a) 腹掛け

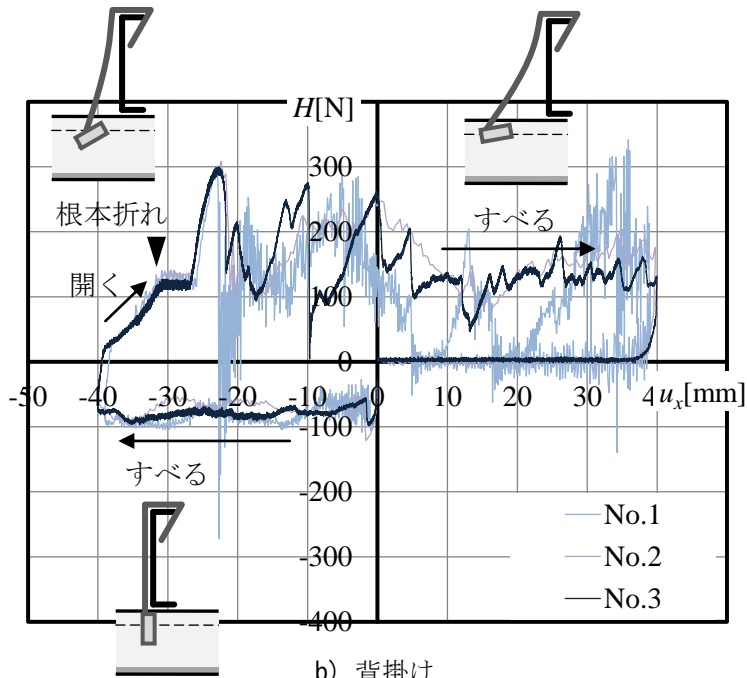


b) 背掛け

図 2.5 鉛直载荷後のクリップ崩壊形

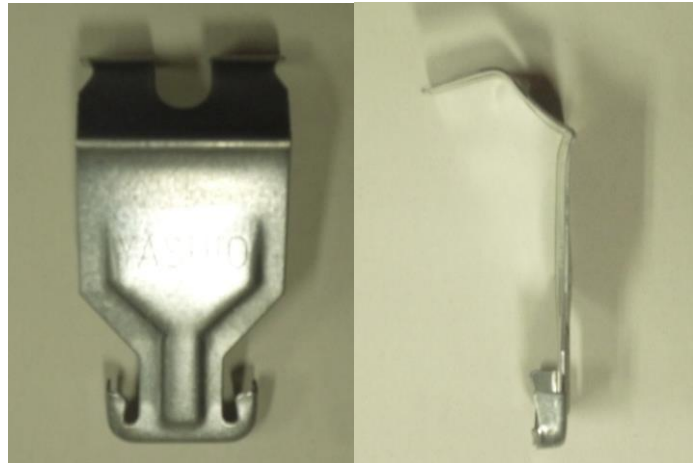


a) 腹掛け



b) 背掛け

図 2.6 荷重変位関係



a) 腹掛け



b) 背掛け

図 2.7 水平載荷後のクリップ崩壊形

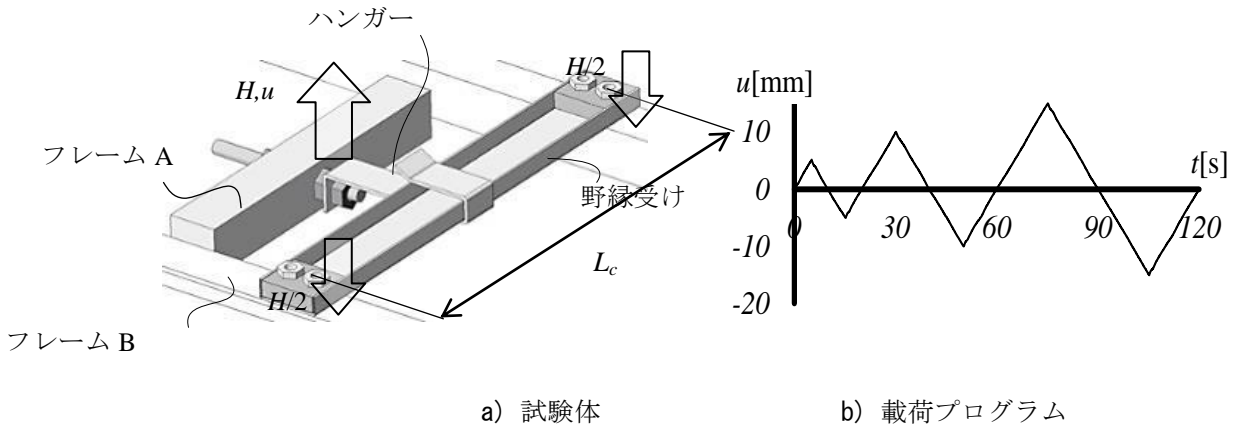


図 2.8 試験体と载荷プログラム

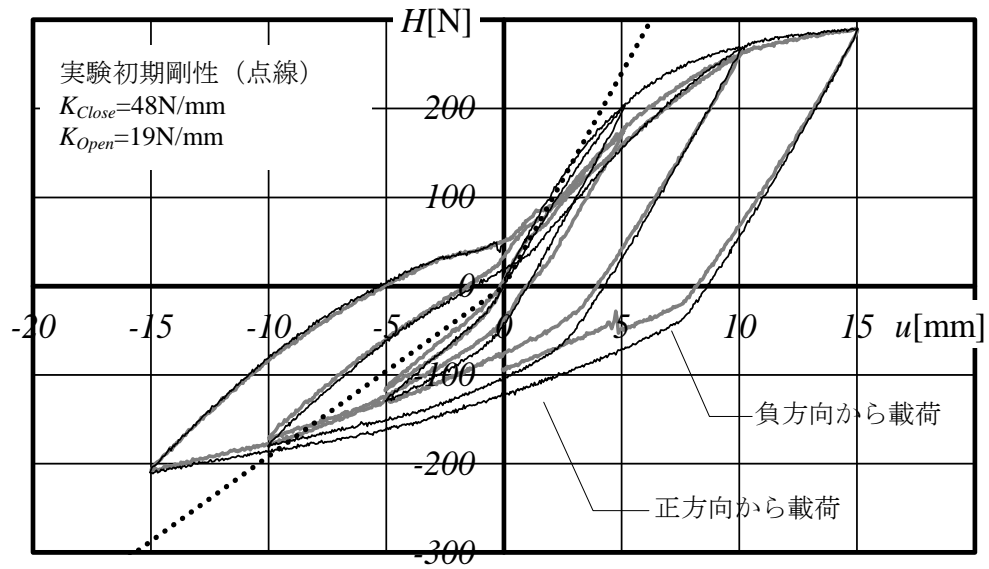


図 2.9 ハンガー接合部の荷重変位関係図

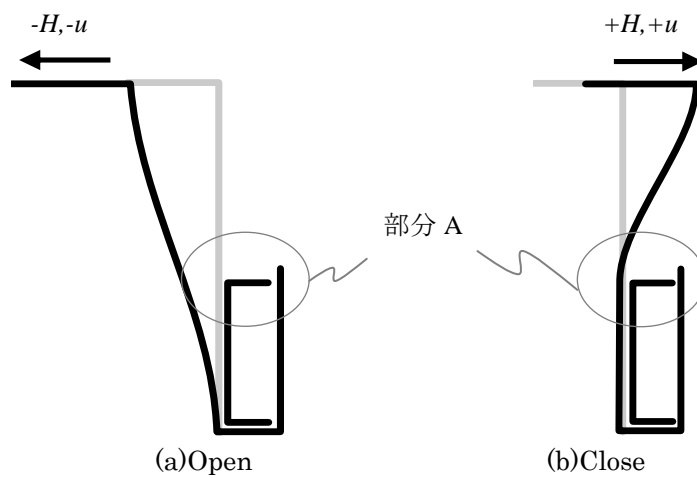


図 2.10 ハンガー接合部の変形図

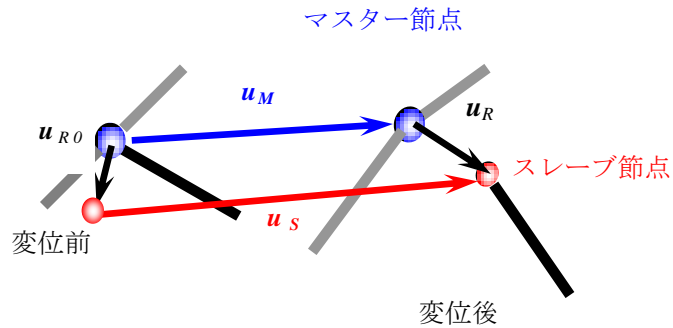


図 2.11 マスタースレーブモデルの概念図

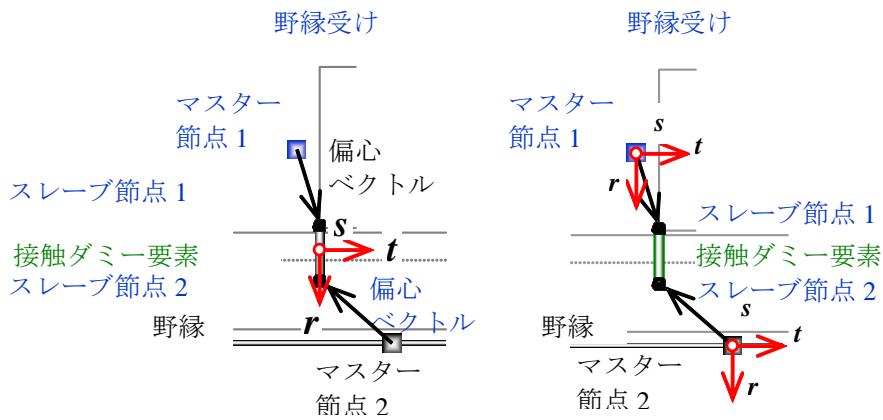


図2.12 野縁-野縁受け間の接触ダミー要素

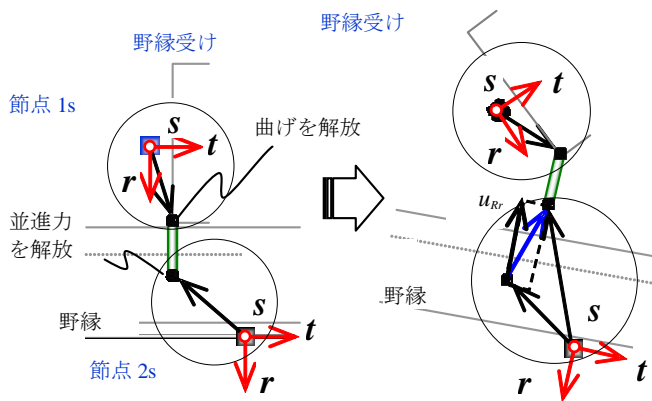


図2.13 変形後の相対変位

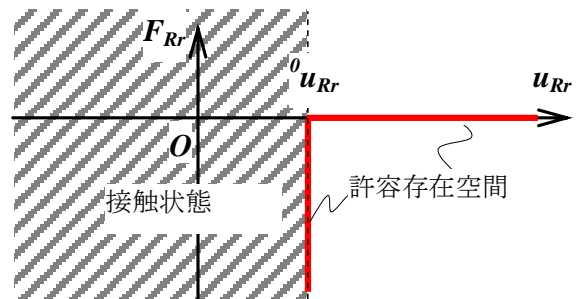


図2.14 接触要素の許容存在空間

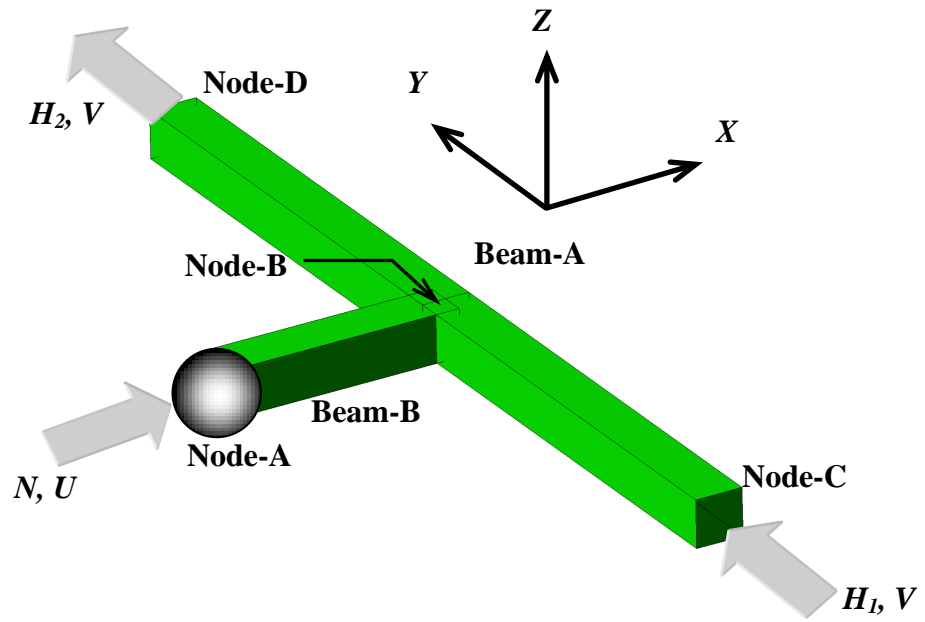


図 2.15 解析モデルの概要

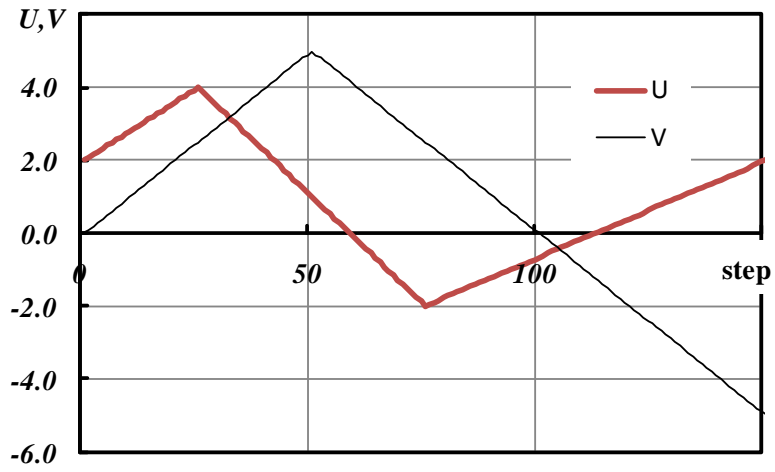


図 2.16 载荷プログラム

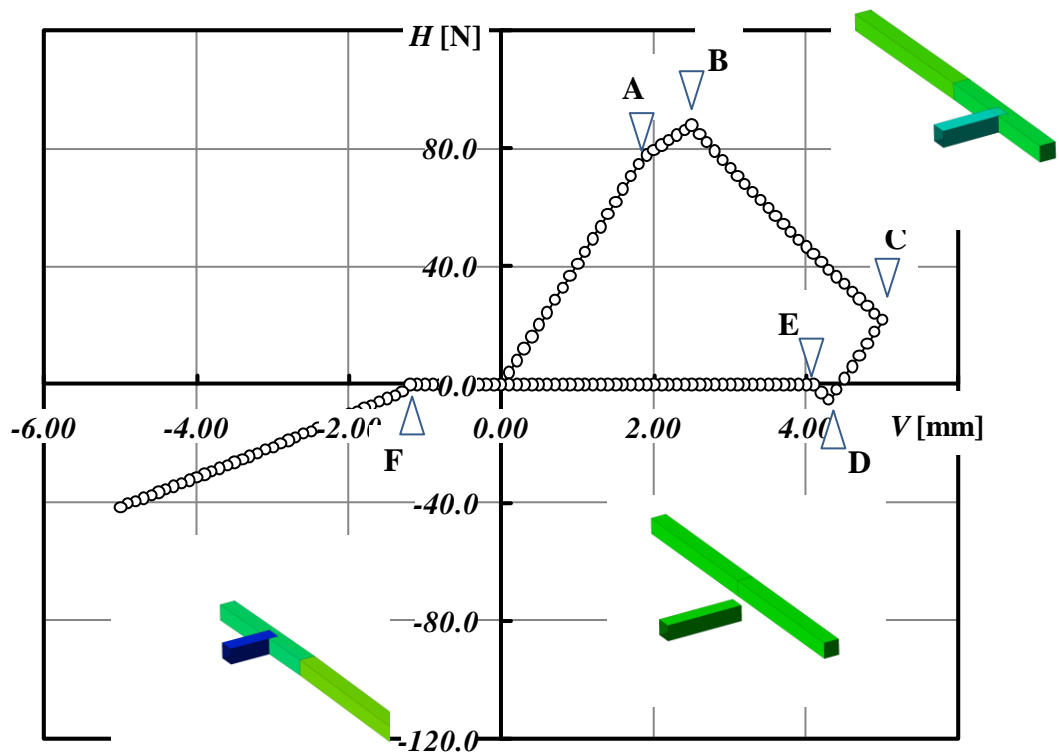


図 2.17 荷重変位関係

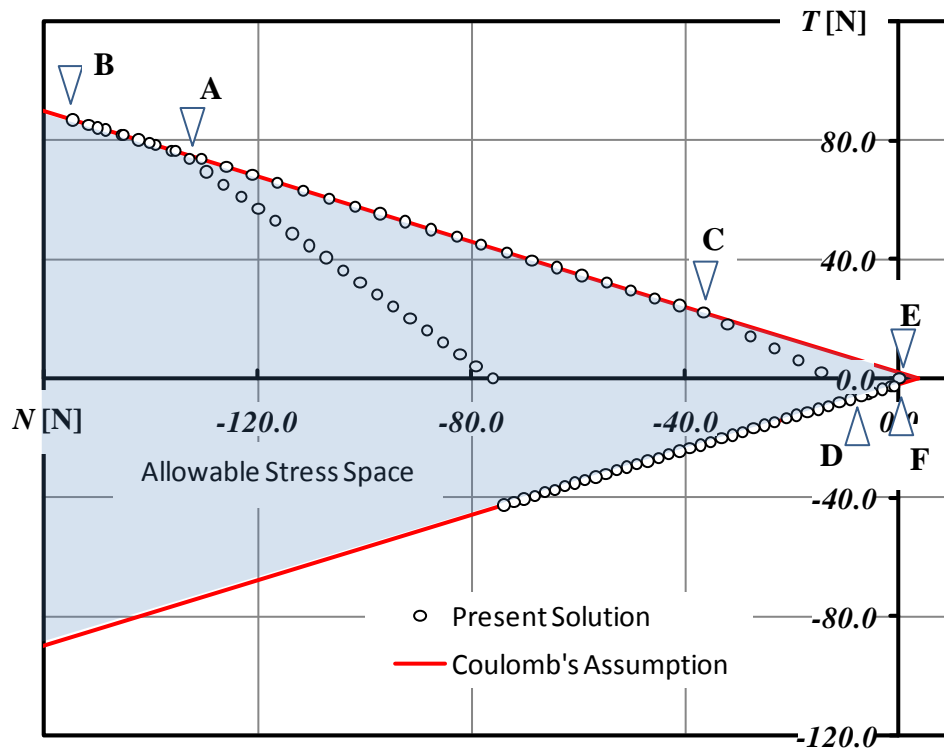


図 2.18 接線方向力－法線方向力関係

<解析モデルの概要>

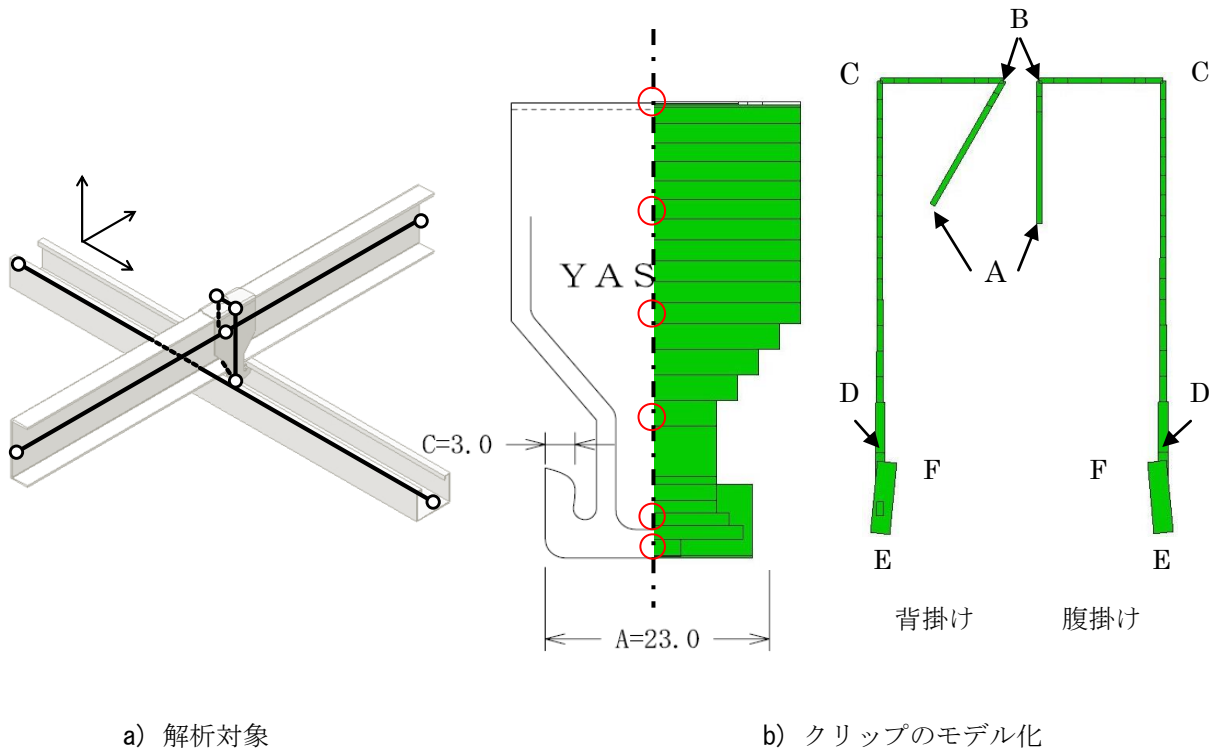


図 2.19 解析モデル図

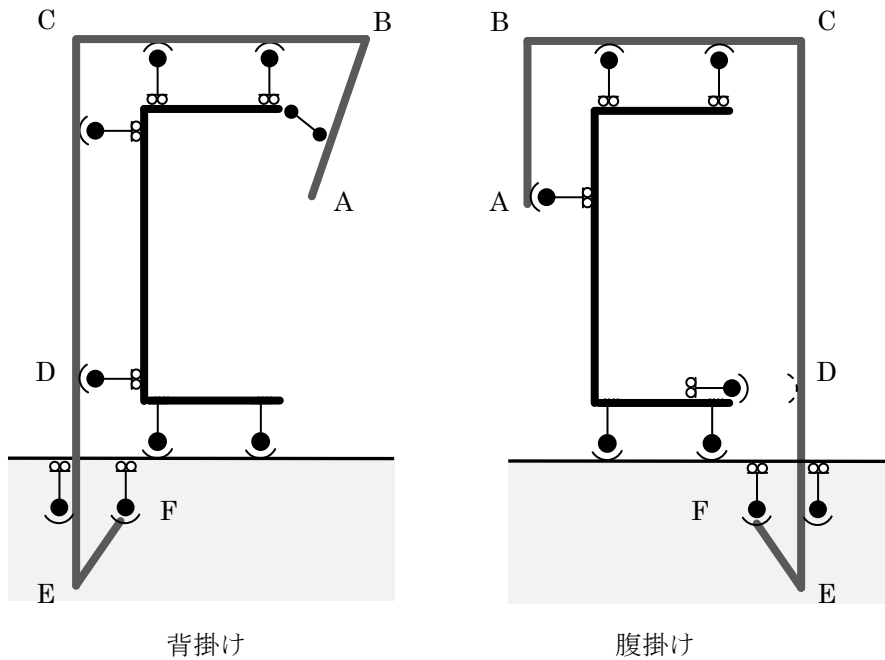


図 2.20 接合部の詳細図

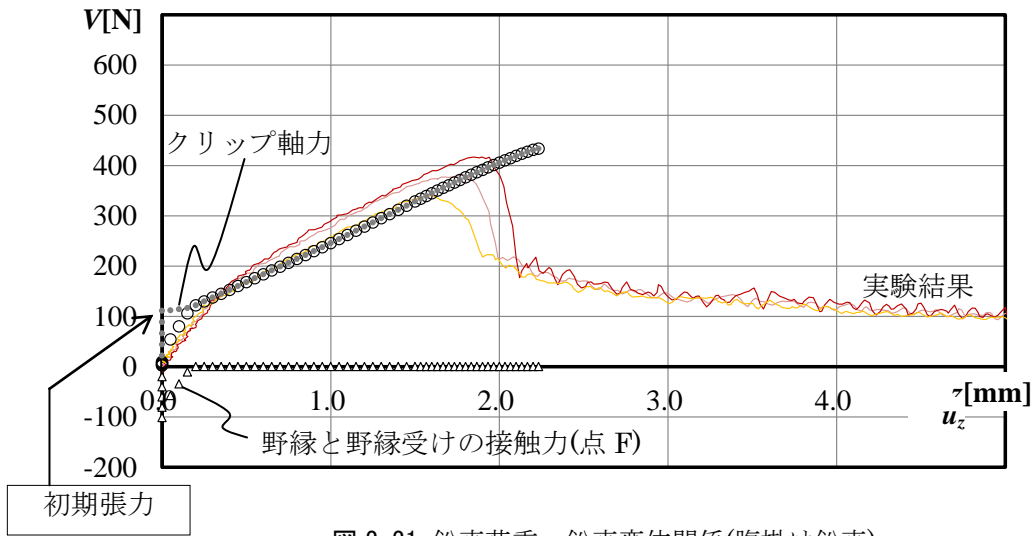


図 2.21 鉛直荷重—鉛直変位関係(腹掛け鉛直)

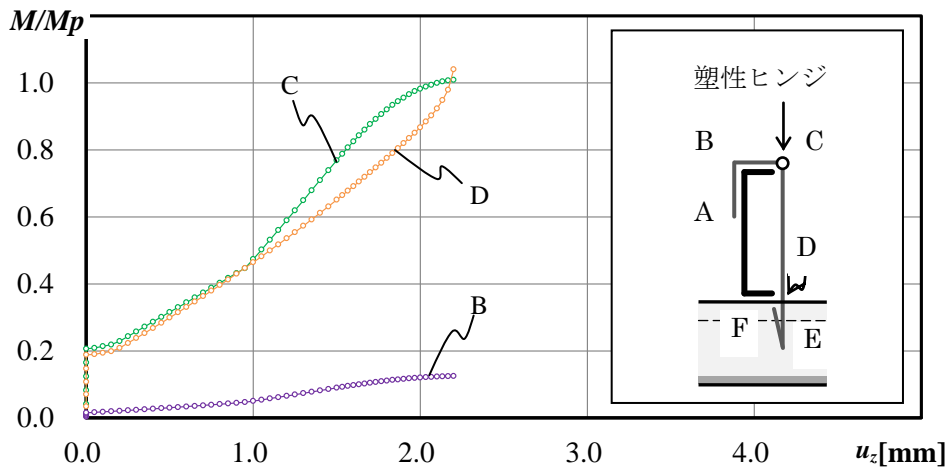


図 2.22 材端モーメント—鉛直変位関係(腹掛け鉛直)

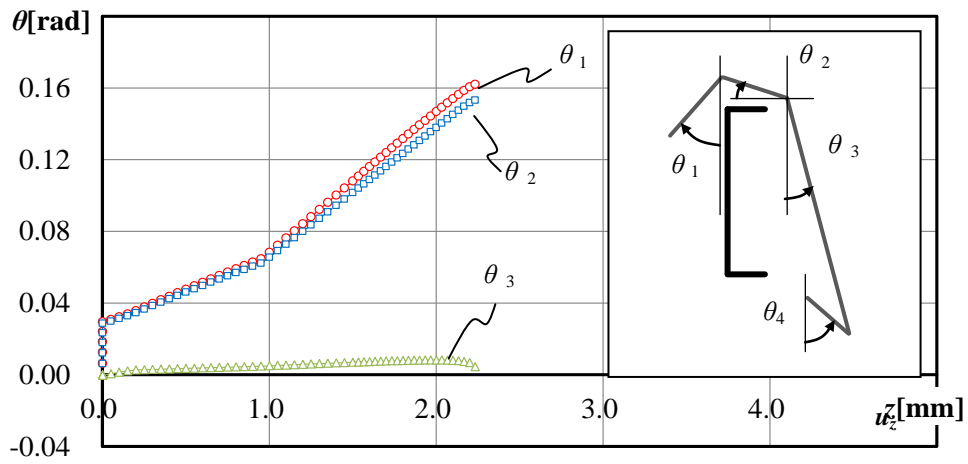


図 2.23 各部位の部材角—鉛直変位関係(腹掛け鉛直)

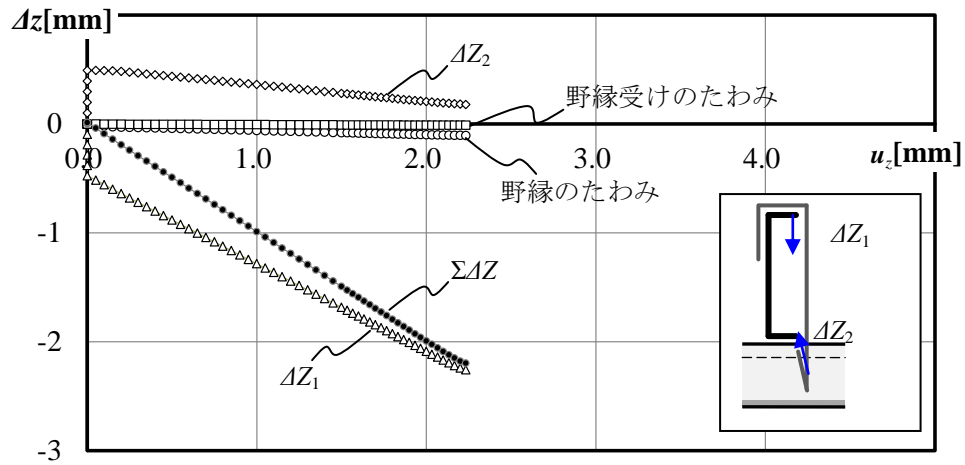


図 2.24 各部位の変位—鉛直変位関係(腹掛け鉛直)

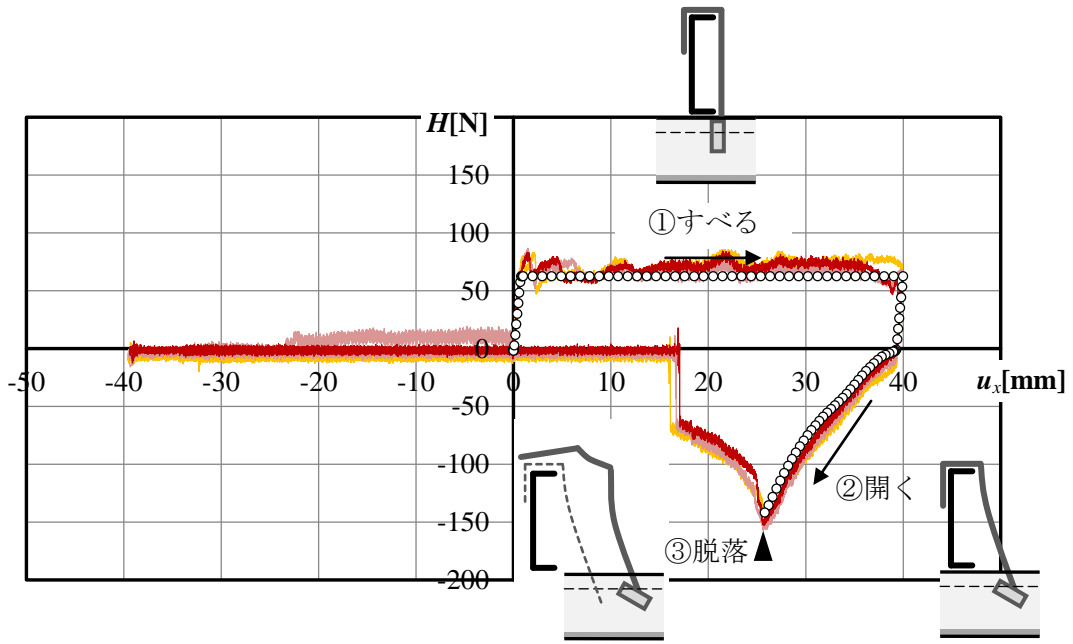


図 2.25 水平荷重—水平変位関係(腹掛け水平)

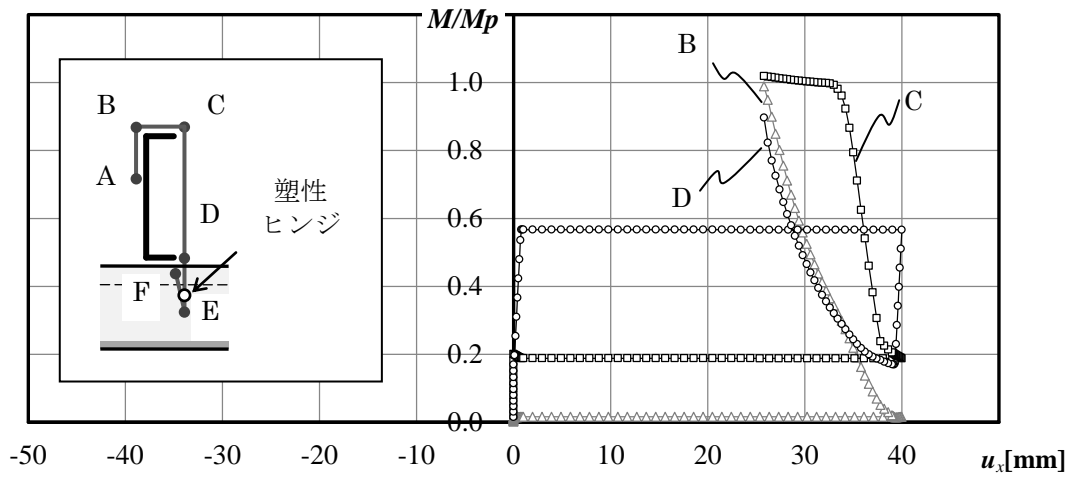


図 2.26 材端モーメント—鉛直変位関係(腹掛け水平)

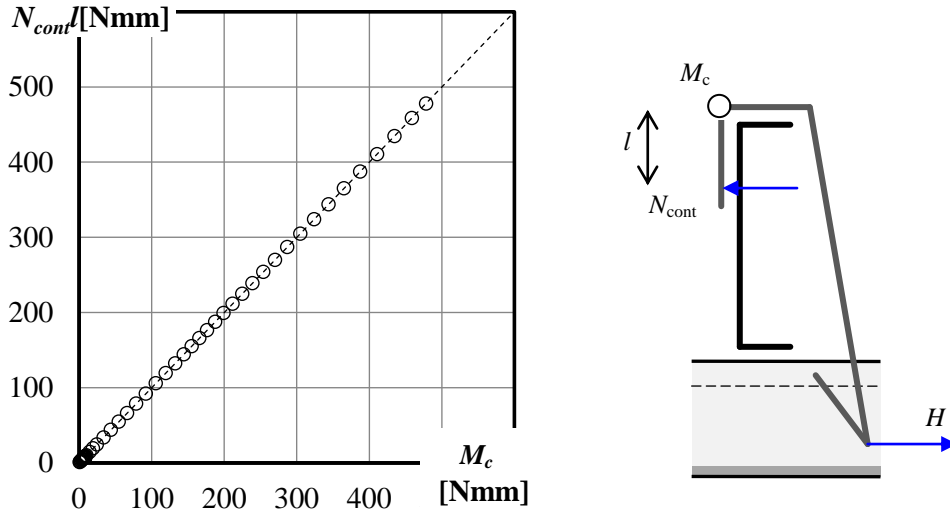


図 2.27 ツメ部の材端モーメント(腹掛け水平)

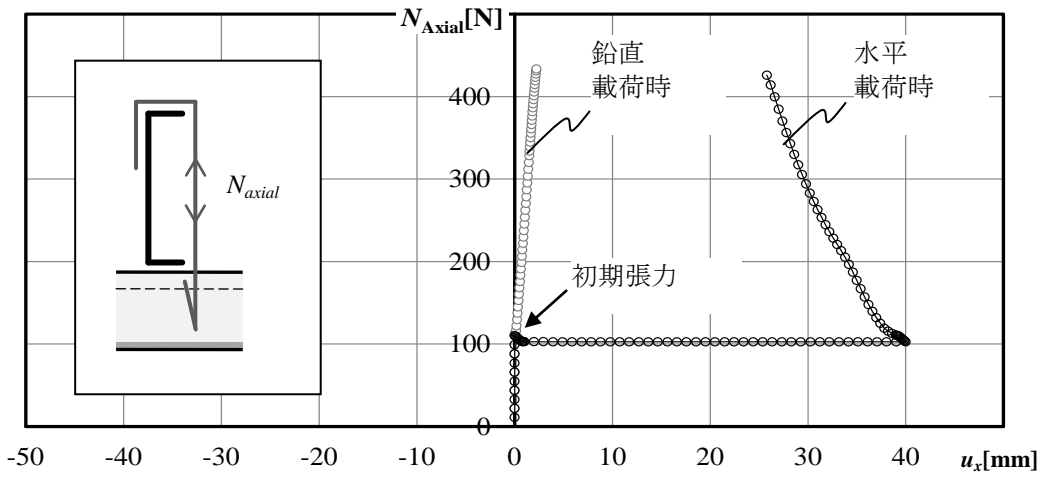


図 2.28 クリップ胴部に生じる軸力(腹掛け水平)

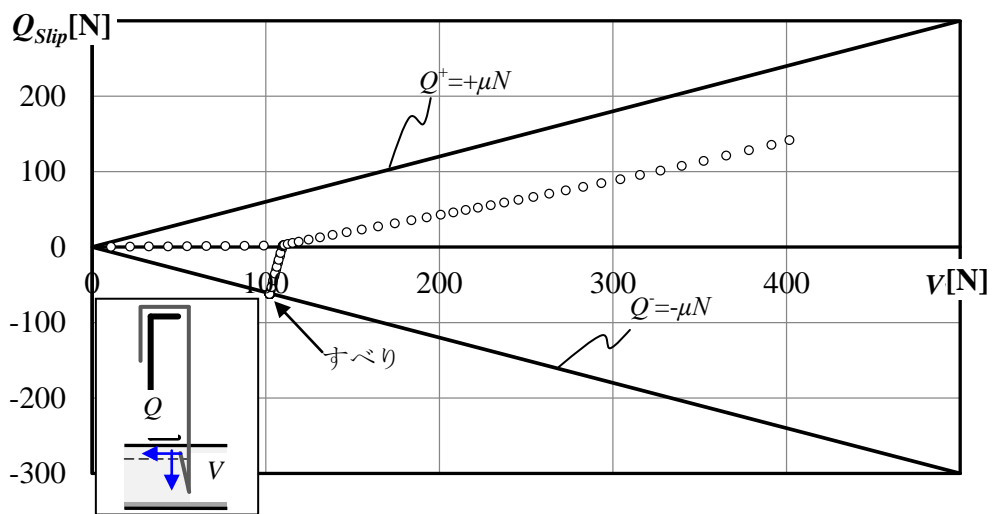


図 2.29 根元に生じる鉛直力と水平力の関係(腹掛け水平)

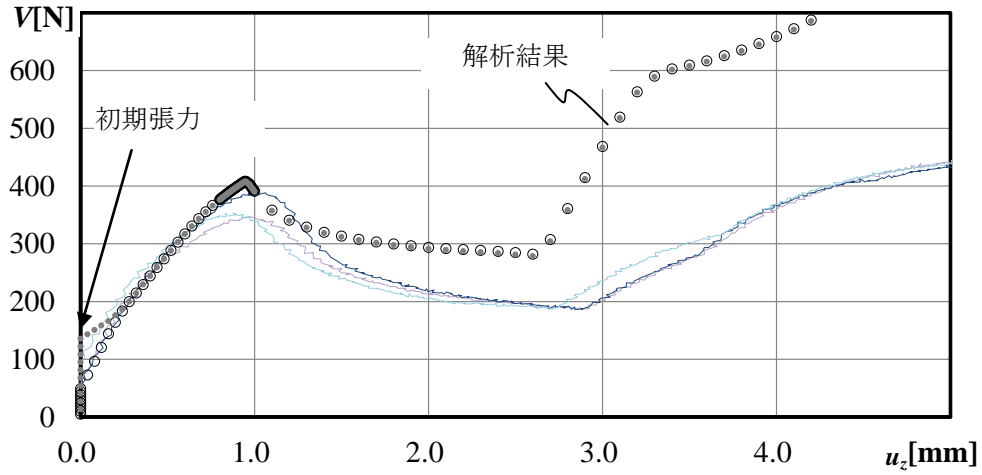


図 2.30 鉛直荷重—鉛直変位関係(背掛け鉛直)

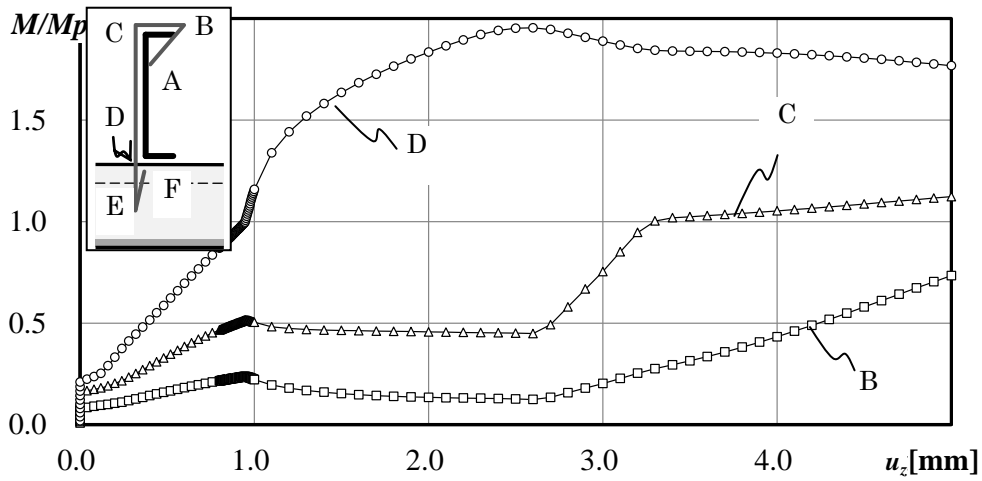


図 2.31 各材端モーメント—鉛直変位関係(背掛け鉛直)

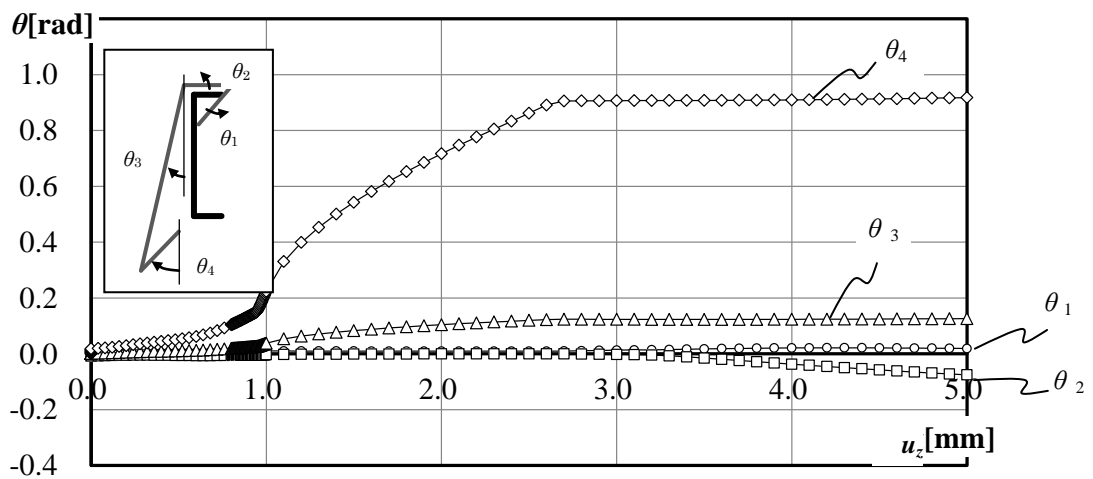


図 2.32 各部位の部材角—鉛直変位関係(背掛け鉛直)

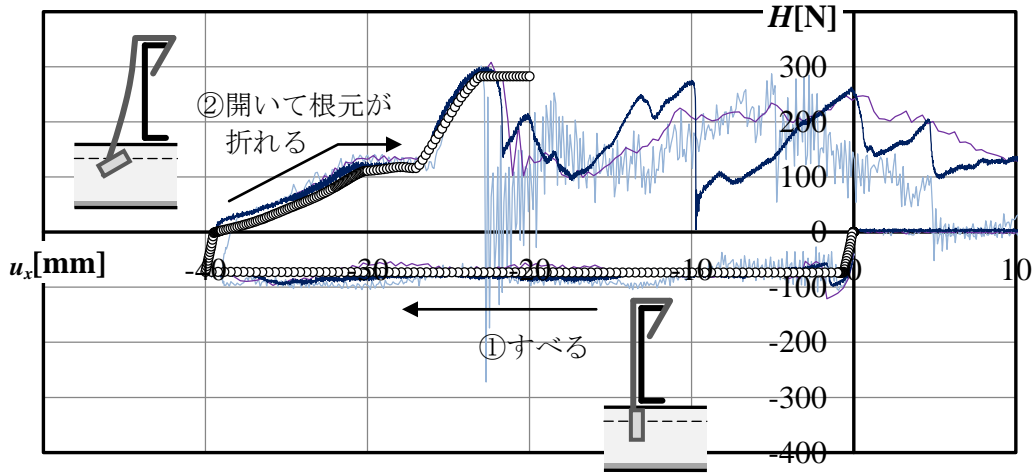


図 2.33 水平荷重—水平変位関係(背掛け水平)

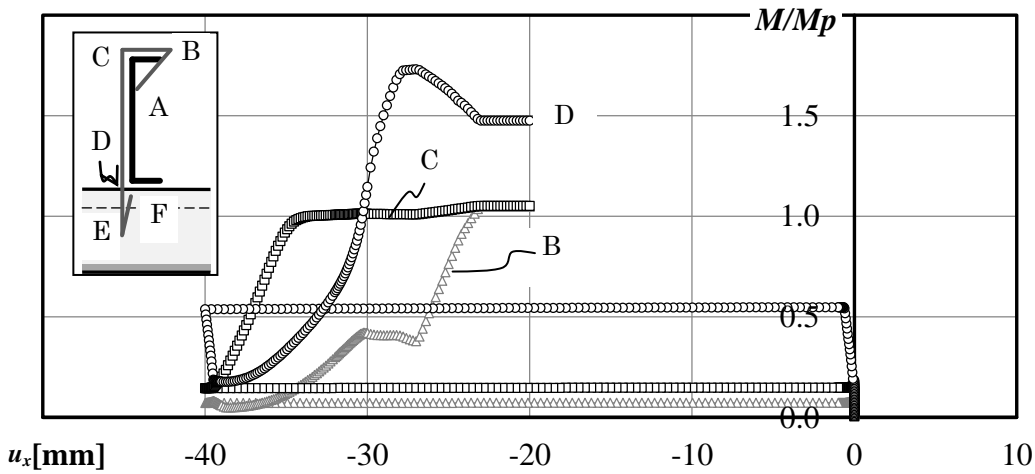


図 2.34 材端モーメント—水平変位関係(背掛け水平)

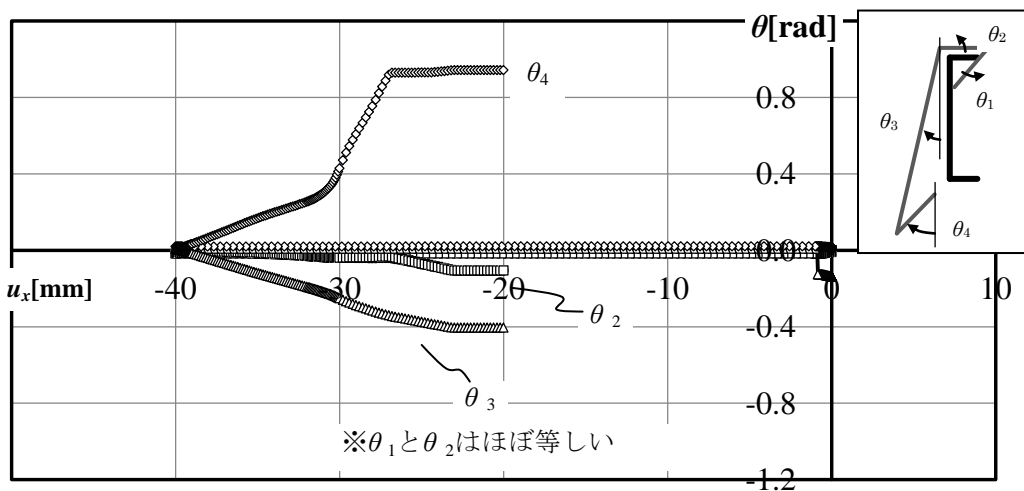


図 2.35 各部位の部材角—水平変位関係(背掛け水平)

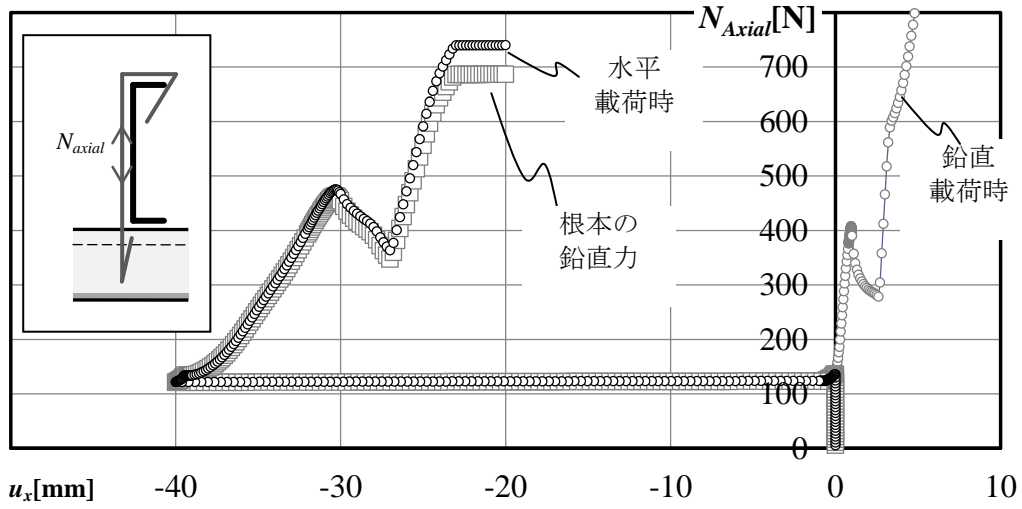


図 2.36 クリップ胴部の軸力ー水平変位関係(背掛け水平)

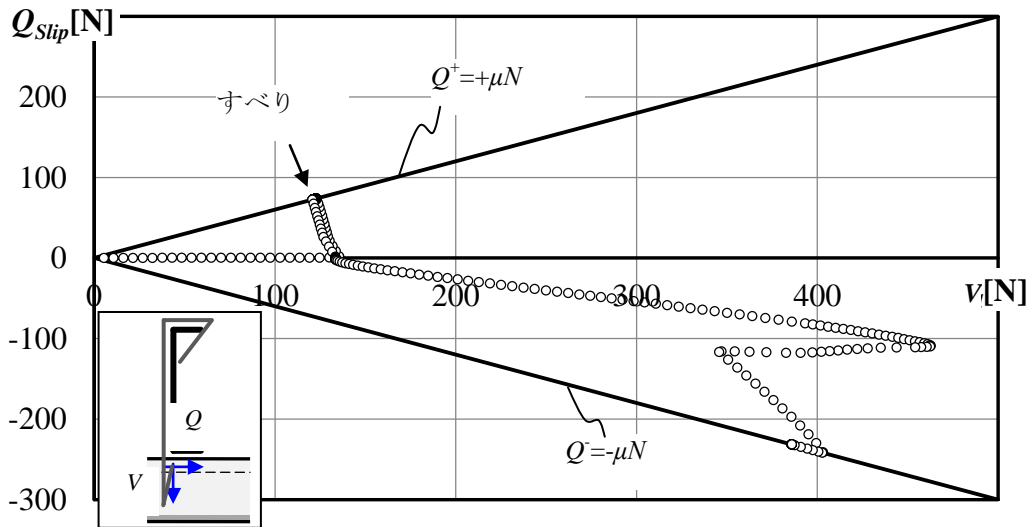


図 2.37 根元に生じる鉛直力と水平力の関係(背掛け水平)

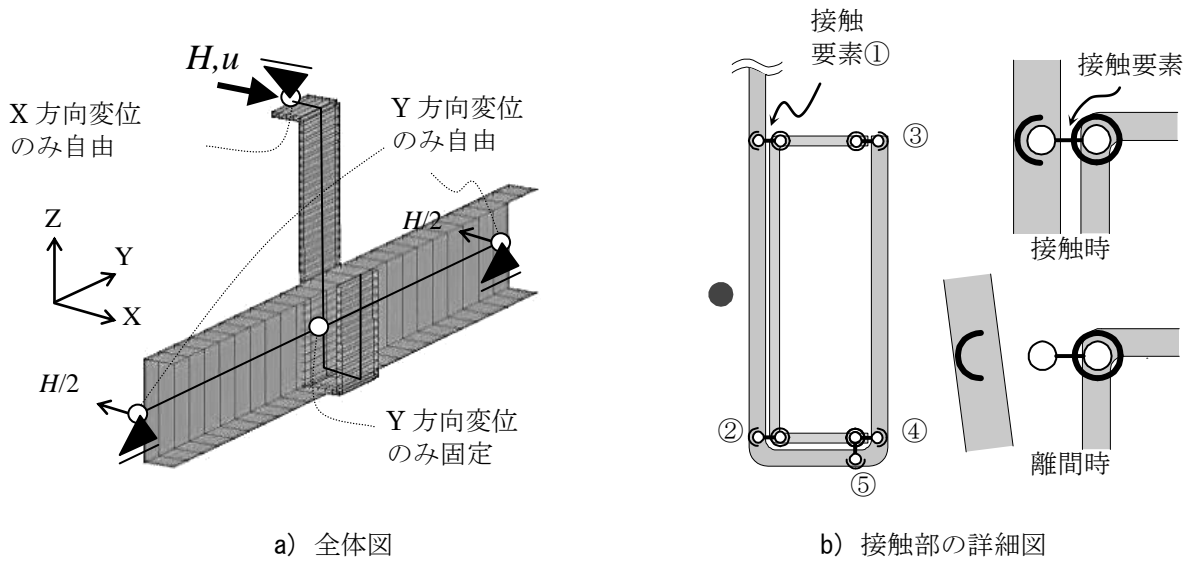


図 2.38 解析モデル

表 2.1 材料特性

ヤング係数 E [N/mm ²]	降伏応力度 σ_y [N/mm ²]	等方硬化係数 E_i [N/mm ²]	移動硬化係数 E_k [N/mm ²]
205000	310	$E/100$	$E/100$

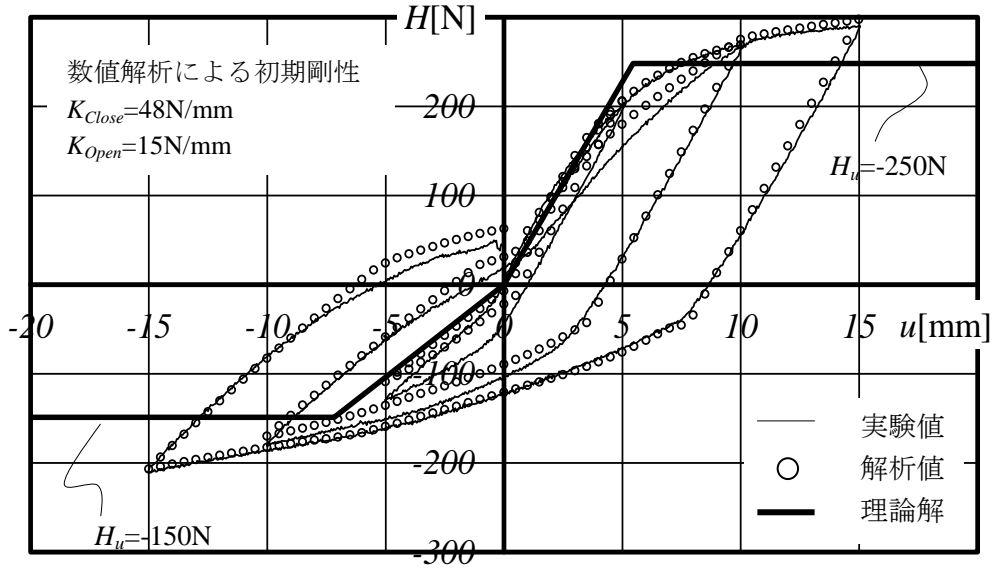


図 2.39 実験と解析結果の比較

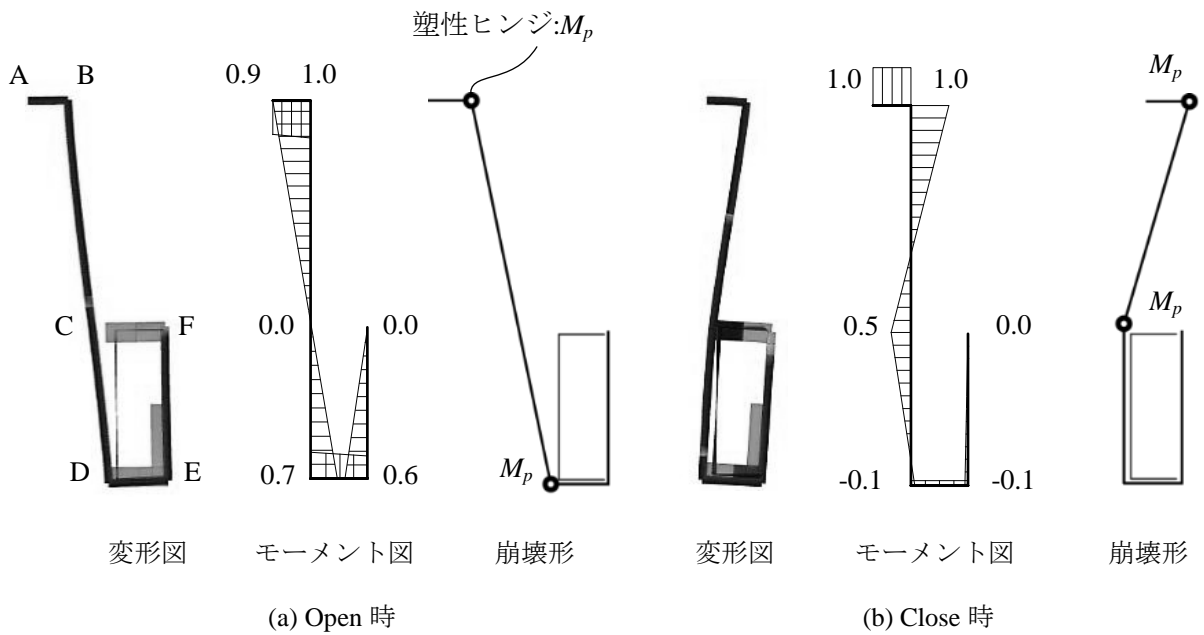


図 2.40 変形図とモーメント分布図

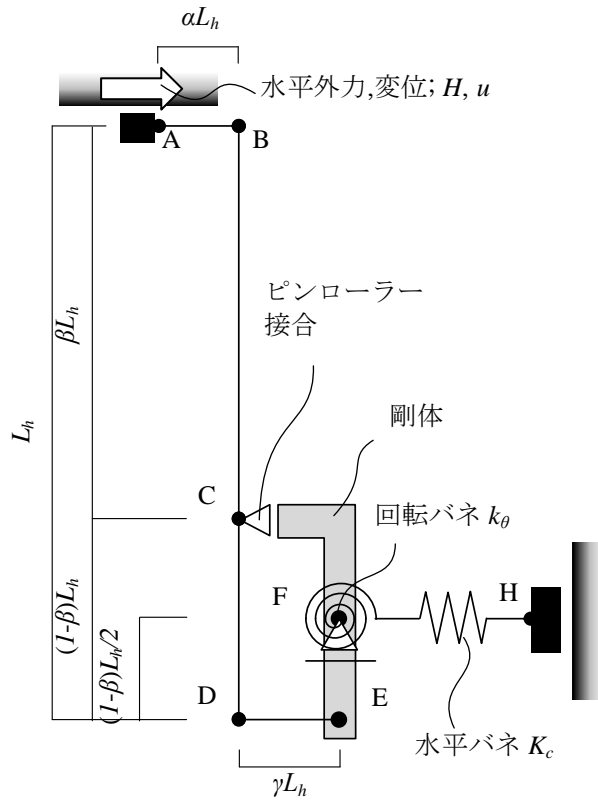


図 2.41 ハンガー接合部の力学モデル図

表 2.2 力学モデルの部材諸元

部位	物理量		
全体	ヤング係数 E [N/mm ²]	2.05×10^5	
	ポアソン比 ν	0.30	
ハンガー	断面2次モーメント I_h [mm ⁴]	16	
	基準材長 L_h [mm]	100	
	材長比	α	0.10
		β	0.60
γ		0.15	
野縁受け	断面2次モーメント I_c [mm ⁴]	852	
	材長 L_c [mm]	240	
	サンブナンねじれ定数 J [mm ⁴]	34.33	

第3章 最小ユニット天井を用いた 天井システムの力学的特性

3.1 はじめに

3.2 天井の水平剛性に関する検討

3.2.1 弾性域における静的載荷実験

3.2.2 吊材の水平剛性

3.2.3 水平剛性推定法とその妥当性の検証

3.3 天井の水平耐力に関する検討

3.3.1 繰返漸増載荷実験

3.3.2 数値解析の概要

3.3.3 水平耐力の評価方法とその妥当性検証

3.4 まとめ

Figures and Tables

3.1 はじめに

一般に構造物の安全性を検討する上で、対象物に作用する外力の設定、各部位に発生する応力の算定、各部位の耐力などの許容値の設定が必要とされる。しかし、鋼製下地在来工法天井に対して許容応力度設計法のような弾性域における検討ですら十分に行うことが困難な状況にある。この理由は、鋼製下地在来工法天井においては、2章で示したように力の伝達の仕組みが複雑な接合部を用いているため、外力を受けて天井下地材に生じる応力の定量的な把握を困難にさせているところにある。

そこで本章では、2章で明らかにした天井下地材特有の接合部の力学的特性および構築した解析モデルを用いて、実際に下地材が天井として組まれた状態（以後、天井システムと称す）における力学的特性について定量的に検討する。

3.2 最小ユニット天井試験体の水平載荷実験

3.2.1 弾性域における静的載荷実験

<実験概要>

水平力に対する天井システムの挙動を検討するために静的載荷実験を行う。鋼製下地在来工法の天井面は石膏ボードが野縁に複数のビスで固定されてきているため、天井面の面内剛性が鋼製下地材の剛性に比べて高く概ね剛床として成立することが考えられる。そこで、ある規模の天井から 2m×2m の面積で取り出した部分天井を最小ユニットの天井とし、これを試験体として用いる。図 3.1 に試験体を示す。試験体は表 3.1 に示す部材で構成されており、吊ボルト間隔 900mm、野縁間隔 330mm、天井懐 1500mm で組まれている。天井面は、厚さ 12.5mm の石膏ボード 1m×2m (8.4kg/m²) を 4 枚用いて捨貼り(ボード 2 層貼)とした。試験体の総質量はおおよそ 92kg である。載荷方法は、試験体の天井面にワイヤーを取り付け、滑車を通した先に重りを載せていく方法とした。載荷点は図 3.1 に示す点 A、B の 2 点で、両点に交互に錘を載せていくことで野縁方向に 1 サイクルの繰返載荷を行った。

また、自由振動も行うことで試験体を 1 質点系の振動モデルとして見た場合の水平剛性の同定も行う。自由振動の際では、天井面と錘を繋ぐワイヤーを糸系に換え、糸を焼切ることで試験体を振動させた。計測項目は、主に天井面の変位と加速度とした。天井変位はレーザー変位計により天井面上の点 A の水平変位、加速度は天井面の点 C で加速度計を用いて計測した。

この実験では、ハンガー上面から斜め振れ止めの取付け金具までの距離 L_b (図 3.1) を変化させて、試験体の水平剛性の変化を検討した。なお、斜め振れ止めの上端の取付け位置は、 L_b のような吊ボルトの余長が生じないように設置した。 L_b は、斜め振れ止めを取り付けない状態の $L_b=1370\text{mm}$ から 500, 400, 300, 200, 100, 0 の 7 パターンを対象とした。ここでは、主に試験体の弾性範囲を対象とし、それぞれの L_b において天井面変位を L_b+L_h (L_h :ハンガー全長) で除した層間変形角が 1/200 になるように最大変位を決めた。自由振動で与える初期変位もこの最大変位を採用する。

<実験結果>

図 3.2 に各 L_b に対する静的水平加力実験の結果を示す。ここでは、 $L_b=1370\text{mm}$, 400, 200, 0 を代表として示している。 L_b が大きくなるにつれて、剛性が低下していることが確認できる。これは吊ボルト部分の L_b が長くなるに伴い、吊ボルトの曲げ変形が支配的になっていることが要因である。このことは、 L_b が天井の水平剛性に大きな影響を及ぼす重要な値であり、天井の設計・施工過程において管理されるべき内容であることを示唆している。図 3.2 では L_b の値に関わらず、それぞれの結果はほぼ線形となっているように見えるが、図 3.3 に示すように $L_b=0$ の荷重変位関係は、载荷の向きによって剛性が異なっている様子が解る。この特徴は、2 章で明らかになったハンガーの挙動とよく似ている。つまり、吊ボルトの曲げ変形がほぼない状態になり、ハンガー以下の部位の変形が支配的になっていることが考えられる。ハンガー接合部が天井の水平剛性に影響を及ぼす要素であることがわかる。

ここで、天井を 1 質点系とみなして、両剛性(- K ,+ K)の相加平均値 K_{Ave} を水平剛性とすることを考える。平均剛性 K_{Ave} と自由振動から同定される天井の水平剛性 K_{fv} の相関関係を図 3.4 に示す。なお、 K_{fv} は固有振動数と天井質量から求められる値である。同図によると K_{Ave} と K_{fv} の相関が高く、 K_{Ave} を 1 質点系の水平剛性として適用できることが解る。

3.2.2 吊材の水平剛性

天井面が剛床で、下地材が弾性かつクリップが損傷なく天井面と等しく変位すると考えた場合、天井面を支持している各々の吊ボルトの水平剛性は並列関係となり、天井システムの水平剛性はこれら吊ボルトの水平剛性を総和したものに相当することになる。したがって、1本あたりの吊ボルト水平剛性を求めることが、天井システムの水平剛性の算出に繋がる。しかし、前節で、ハンガー接合部が天井の水平剛性に深く関わっている要素であることが明らかとなった。

そこで、2章で構築したハンガー接合部の力学モデルを用いて、ハンガー接合部を含めた吊ボルト（吊ボルトからハンガー接合部を含めた系を吊材と称すこととする）の水平剛性について検討を行う。特に、実際の天井では野縁受けおよび吊ボルトの各材長 L_c, L_b が、天井が設置される空間状況によって多様に存在する可能性があるため、野縁受けおよび吊ボルトの各材長 L_c, L_b が吊材の水平剛性に及ぼす影響について検討する。

<野縁受け材長の影響>

吊ボルトの材長は $L_b=0$ に固定して、野縁受けの材長 L_c が吊材の水平剛性 K_s に及ぼす影響について検討する。検討には、付録 B に示した式 (B.3-a,b) を用いる。 L_c をパラメーターに吊材の水平剛性 K_s の変化を表したもの図 3.5 に示す。ここで、最終的に天井が組まれた状態を想定して、 L_c はハンガーから直ぐ左右にある 2 つのクリップの距離（クリップ間隔）に相当するものとする。また、本節の検討では、野縁受けの弱軸曲げを単純梁として扱うこととする。図中の□○△は、図 2.41 の数値解析モデルに吊ボルトに相当する梁要素を付加して水平剛性を得た結果、線は式 (B.3-a,b) による結果である。両者はよく一致しており、本剛性式から数値解析モデルとほぼ同等な結果が得られることを示している。この図から、 L_c が長くなるほど剛性が低下し、载荷の向きによる剛性の差異が小さくなる傾向にあることが解る。全体の水平剛性 K_s に占める各剛性 $K_i(i=h1,h2,h3,c)$ の割合を図 3.6 に示す。 K_s は各剛性 K_i の直列関係で表されるため、 K_s に占める K_i の割合（図 3.6 の縦軸）は、式 (B.3-a,b) において両辺を左辺で除すことで得られる右辺の各項 K_i / K_s で表されることになる。 L_c が短いときは、 K_{h3} が支配的になっている。 L_c の増加に伴って、野縁受けの弱軸の曲げ剛性 K_c の割合が増加するが、ねじれ剛性低下の影響を受けて K_{h3} が占める割合も依然として大きい。一方、Close 時において要素 BC の曲げ剛性 K_{h1} も全体の水平剛性に大きく寄与していることが解る。Open 時では要素 CD の曲げ剛性 K_{h2} の割合が最大で 3% と小さいことから、この項を無視した剛性式でも有効であることが考えられる。次に、野

縁受けのねじれ剛性が水平剛性 K_s に及ぼす影響について検討する。式 (2.37-a~f) を用いて、野縁受けのねじれ変形を無視した水平剛性 K_s' とねじれ変形を考慮した水平剛性 K_s とを比較した結果を図 3.7 に示す。ねじれ剛性を考慮しない場合、 K_s は過大に評価される。しかし、Open 時の K_s'/K_s は最大でも 1.2 倍で、ねじれ剛性の影響が小さい。一方、Close 時では最大 2.2 倍まで過大になり、ねじれ剛性の影響を受けやすいことが解る。特に、実際の天井で使用される可能性がある $L_c=200\sim 400\text{mm}$ の範囲で剛性が過大になる傾向にあるため、野縁受けのねじれ剛性を考慮して剛性評価することは重要である。

<吊ボルト材長の影響>

次に、式 (B.3-a,b) を用いて吊ボルトの材長が吊材の水平剛性に与える影響について検討する。なお、先程と同様に野縁受けは $L_c=300\text{mm}$ の単純梁として扱い、吊ボルトはハンガーや野縁受けと同様の材料とする。吊ボルトの材長 L_b をパラメーターに吊材の水平剛性 K_s を求めたものを図 3.8 に示す。数値解析結果 (図中の□○△) と理論解 (曲線) がよく一致している。吊ボルトが長くなるほど剛性が低くなり、载荷の向きによる剛性の違いがなくなる傾向にある。図 3.6 と同様に全体の水平剛性に占める各剛性項の割合を図 3.9 に示す。 L_b とともに吊ボルトの曲げ剛性 K_b の割合が大きくなる様子が解るが、 K_{b3} の割合はそれ以上に大きく重要な要素であることが解る。一方、他要素の剛性の割合は概ね $L_b \geq 300\text{mm}$ で 1% 以下とほぼ無視できるまで小さくなることが解る。

<斜め振れ止め上部の吊ボルト余長の影響>

著者らが行ってきた実験では斜め振れ止めの上部における吊りボルトの余長 L_t はゼロとしているが、実際に天井に斜め振れ止めを設置する際には、現場における様々な理由からこの余長 L_t がゼロとならない状態も考えられる。そこで、この L_t が斜め振れ止め構面の水平剛性に及ぼす影響について検討する。

著者らの実験で用いた試験体では、図 3.10b) のような取付金具を用いて斜め振れ止めを設置している。この取付金具により斜め振れ止めの端部は吊ボルトに対してボルト A でピン接合のような形となる。しかし実際は、電動ドライバーによりボルトを締め付けるため、取付金具を構成する 3 つのプレート間に比較的大きな摩擦力が生じ、ボルト A 材軸まわりの曲げモーメントに対して比較的抵抗が可能であることが考えられる。そこで、斜め振れ止めの両端は剛接合として扱うこととする。

一例として、 $L_t=L_b=400\text{mm}$ の斜め振れ止め構面の水平剛性 K_{Br} を数値解析により求めると、 $(K_{open}K_{Br})$

${}_{close}K_{Br}=(1.04, 1.12)[N/mm]$ と得られる。このときの斜め振れ止め構面のモーメント分布は図 3.11 のようになる。この分布は、斜め振れ止め下端の取付金具と吊ボルトの境で生じるモーメント値を基準としたモーメント比で表している。図 3.10(a)の部位②③に相当する部位で、吊ボルトの境界条件を固定—固定ローラーとした曲げモーメントに類似している。ここで、取付金物周りの回転角が水平剛性に及ぼす影響も考えられるが、水平剛性 K_{Br} を図 3.10(a)のような部位①～③の各水平剛性で簡易的に表すと以下のようなになる。

$$K_{Br}(L_t, L_b) = \frac{I}{K_s(L_b)^{-1} + \{K'_s(L'_b) + K_t(L_t)\}^{-1}} \quad (3-1a)$$

$$K_s(L_b) = {}_{Open}K_s \quad or \quad {}_{Close}K_s, \quad K'_s(L'_b) = \frac{12EI_b}{L_b^3}, \quad K_t(L_t) = \frac{12EI_b}{L_t^3} \quad (3-1b,c,d)$$

ここで、 $K_{Br}(L_t, L_b)$ は斜め振れ止め構面の水平剛性、 $K_s(L_b)$ 、 $K'_s(L'_b)$ 、 $K_t(L_t)$ はそれぞれ部位①～③の水平剛性、 L'_b は部位②の吊ボルトの材長である。なお、 $K_s(L_b)$ は付録 B の式 (B-3a,b) に等しい。式(3.1-a)では、 $L_t=L_b=400mm$ のとき $({}_{open}K_{Br}, {}_{close}K_{Br})=(0.98, 1.13)[N/mm]$ となり、先程の数値解析で得られる値を概ね捉えている。この種の斜め振れ止め取付金具に関しては、取付金物周りの回転角の K_{Br} への影響を無視した式(3-1a)でも概ね有効であることがわかる。

L_t が K_{Br} に及ぼす影響について検討するために式 (A-1a~d) を用いて、 $K_{Br}(L_t, L_b)$ が一定となる L_t と L_b の平面における等値線を図 3.12 に点線(Open)と実線(Close)で示した。なお、部位②は部位①と③に比べて剛性が低い傾向にあるため $K'_s=0$ とした。図 3.12 には、 $K_{Br}(L_t, L_b)$ が $K_{Br}(0,100)$ 、 $K_{Br}(0,200)$ 、 $K_{Br}(0,400)$ 、 $K_{Br}(0,600)$ の場合について示している。

次に以下で定義される $K_{Br}(L_t, L_b)$ と $K_s(L_b)$ の誤差 e を導入する。

$$e = 1 - \frac{K_{Br}(L_t, L_b)}{K_s(L_b)} \quad (3-2)$$

上式に式 (3-1d) を代入して、 L_t について解くと次式が得られる。

$$L_t = \sqrt[3]{\frac{12EI_b}{(e^{-1} - 1) \cdot K_s(L_b)}} \quad (3-3)$$

$e=0.10$ の時、式 (3-3) を用いて L_t と L_b の関係を求めた結果を付図 3.12 の▲印で示す。ただし、Open と Close で差が小さいために、ここでは両者の平均値を採用した。この結果において、例えば $L_t=395$ 、 $L_b=500$ のとき、 $K_{Br}(395,500)$ は $K_{Br}(0,500)$ と誤差 10%になる。このとき $K_t(L_t)/K_s(L_b)=8.98$ で、 $K_t(L_t)$ は $K_s(L_b)$ に比べて剛性が高く、 L_t の $K_{Br}(L_t, L_b)$ への影響が小さい傾向にある。また、 L_t と L_b

の組合せが図 3.12 の灰色で塗潰した領域にあるとき、誤差が 10%以下となる。この付図 3.12▲印を直線で近似すると、以下のようになる。

$$L_t = 0.63L_b + 80 \quad (3-4)$$

式 (3-4) は、部位③の影響を無視できる最長の L_t を求める際の簡易式となる。以上から、斜め振れ止め構面の水平剛性へ及ぼす影響は、 L_b に比べて L_t の方が小さい傾向にあり、概ね L_t を無視できる領域があることがわかった (図 3.12)。しかし、もしこの L_t が存在する場合には剛性低下よりも局部的な偏心曲げによる吊りボルトの疲労破壊が深刻な問題となることから、 L_t は小さくするべきであると考えられる。

3.2.3 水平剛性推定法とその妥当性の検証

ここでは、実際に 3.2.1 節で用いた天井試験体の水平剛性を算定し、剛性の評価方法の妥当性について検討する。

天井面が剛床かつ下地材が弾性でクリップが損傷なく天井面と等しく変位するという前提のもとで、天井面を支持している吊ボルトが互いに並列関係にあると考え、天井システムの水平剛性を求める。

試験体の吊ボルトの状況の概念図を図 3.13a)として改めて示す。吊ボルト長さ 1370mm のもの 12 本で吊られており、その内 2 本には斜め振れ止めが設けられている。吊ボルトは全て吊元で固定支持されており、振れ止めの付く吊ボルトは振れ止めの取付け金具位置で固定支持されるとみなす。吊ボルトの曲げ剛性 K_b に有効な直径は、内径 7.5mm ($I_b=155\text{mm}^4$ 相当) とする。 L_c は図 3.1 から 330mm とし、野縁受けのねじれならびに曲げに対する材端条件は単純支持とする。その他の必要な諸元は表 2.2 と同様とする。

ここで具体的に $L_b=200$ の試験体を例に剛性評価を行う。3.2.1 節で述べたように 1 質点系とみなした天井の初期剛性は、各変形状態 (Close, Open) における両剛性の平均値で概ね表せる。振れ止めあり ($L_b=200\text{mm}$) および振れ止めのなし ($L_b=1370\text{mm}$) の水平剛性を $Ave K_s^{200}$, $Ave K_s^{1370}$ とする。右上添え字は L_b の値を示す。式 (B.3-a,b) から各吊材の水平剛性を求めると以下のようなになる。

$$\begin{aligned} Ave K_s^{200} &= \frac{Open K_s + Close K_s}{2} = \frac{4.64 + 5.95}{2} = 5.30 [N/mm] \\ Ave K_s^{1370} &= \frac{Open K_s + Close K_s}{2} = \frac{0.052 + 0.058}{2} = 0.055 [N/mm] \end{aligned} \quad (3-5)$$

これらの剛性に各本数を乗じることで天井全体の剛性となるが、天井は吊構造であるため振り子のみかけ剛性が存在する。この振り子剛性は吊ボルトに生じる引張軸力および振り子長さにより求められる。本試験体の総質量(92kg)は、中央の 6 本の吊ボルトに概ね集中していると考えられる。したがって、中央の 2 本分の $Ave K_s^{200}$ および 4 本分の $Ave K_s^{1370}$ は振り子剛性を考慮し、周囲(図 18a)の点線枠内の 6 本の $Ave K_s^{1370}$ は振り子剛性を考慮しないものとする。1 本辺り負担する質量を $m \doteq 15$ [kg/本]とし、振り子長さ $L_p = L_b + L_h$ と考えて振り子剛性を求める。振り子剛性は吊ボルト水平剛性と並列関係にあるとみなして、天井全体の水平剛性 K_{theory} を以下のように算定する。

$$\begin{aligned} K_{theory} &= \left(Ave K_s^{200} + \frac{mg}{L_p^{200}} \right) \times 2 + \left(Ave K_s^{1370} + \frac{mg}{L_p^{1370}} \right) \times 4 + Ave K_s^{1370} \times 6 \\ &= 12.24 [N/mm] \end{aligned} \quad (3-6)$$

ここで、 g は重力加速度、 L_p の右上添え字は L_b をそれぞれ示す。自由振動から実際に同定された水平剛性は $K_{fv}=10.44[\text{N/mm}]$ であり約 20% の誤差で評価されたことになる。他の試験体についても同様な方法で計算した計算結果を K_{theory} とし、実験値 K_{fv} との相関を図 3.13b) の灰色の●で示す。本評価手法による計算値 K_{theory} と実験値 K_{fv} の間に相関があるが、どの L_b の試験体においても概ね等しく 20% 程度の誤差があることが伺える。通常、組まれた天井では野縁受けはクリップで野縁に連結されるが、クリップおよび野縁は野縁受けの変形を完全に拘束する剛性は有していないことが考えられる。そのため、クリップ間隔を直接 L_c に採用し、野縁受けのねじれ剛性 k_θ をねじれ回転拘束の単純支持とした場合、実際より k_θ が過大に評価されることが考えられる。そこで、 L_c を実際より ζ 倍長く見積もることで、クリップによる不完全な支持を考慮する。 K_{theory} と K_{fv} の誤差が最小となる際の ζ を最小二乗法により求めると $\zeta=1.22$ が得られ、両者の誤差は 10% 以下となった (図 3.13b) の白色○)。なお、本章で先述したように、式 (B.3-a,b) において影響が小さい剛性を除いたもので評価した結果を黒色の● (K_{h2} のみ無視) および Δ (K_{h3}, K_b のみ考慮) で示した。同図の○と比較して K_{h2} の影響が小さいことが解る。同図の Δ の結果から、 $L_b=300$ 以下では誤差が大きいことが解る。

3.3 天井の水平耐力に関する検討

3.3.1 繰返漸増载荷実験

前節では弾性範囲内にとどめて実験を行った。天井の耐震性を議論する際には、天井システムの弾性限界を把握する必要がある。そこで、前節で使用した最小ユニット試験体に対し、繰返し漸増载荷を行うことで、天井システムの弾性以降の挙動を検討する。

試験体は前節とほぼ同様のもので、振れ止めの設置位置 $L_b=0$ の試験体を用いる。異なる点は、損傷が顕在化することを図り、加力点側の野縁受けでは最外縁の2つの背掛けクリップだけ除いたものになっている点である。それ以外のクリップは、腹掛けと背掛けが交互に取り付くものとなっている。試験体への载荷は、図 3.14 に示す点にロードセル(容量 $\pm 2\text{kN}$)を搭載した加力治具を取り付け、加力治具の端部にあるナットを人力で徐々に締めて静的な繰返漸増载荷を行う。また加力治具の不動箇所から天井面の変位をレーザー変位計にて計測している。载荷プログラムは、図 3.15 に示すような 0.2mm/s の速度を目標に 5mm 毎に漸増载荷するものとした。

2 回行った。目視により $+10\text{mm}$ 付近で背掛けクリップの根元が折れた。これを以降、正方向の剛性が変化している様子がわかる。(バイリニア型の復元力特性でよくみられるような除荷時に弾性勾配で戻る現象ではない) 負方向の剛性は正方向程変化していない。また、次第に履歴ループの面積が拡大してバイリニア型の復元力特性になってきている。 $+10\text{mm}$ で腹掛けクリップ根元と野縁受け下フランジの間で相対変位が生じ始めた。その他の目立った損傷は見られなかった。実験結果で得られる限られた情報で、部材に生じる応力を分析することは困難であるため、数値解析により詳細な検討を行う。

3.3.2 数値解析による実験の再現解析

2章で構築した接合部の数値解析モデルを用いて、試験体を可能な限り忠実にモデル化する。斜め振れ止めの偏心も考慮する。図 3.17 に解析モデルを示す。図 3.18 には接合部の状態を示す。吊ボルト、野縁受け、野縁、クリップの材料特性は全て2章で用いたものと同様である。石膏ボードの材料特性は文献 305), 306)を参照する。試験体が野縁受け方向に変位しないように天井面を拘束する。載荷する前に、接合部に初期張力の導入ならびに自重を想定した鉛直荷重 (18kg/m^2 ; 12.5mm 厚の石膏ボード2層貼りと野縁および野縁受けの質量を考慮) を天井面に作用させる。実験と同様の箇所を野縁方向に水平な強制変位を与えた。漸増載荷の他に、単調載荷も行った。

3.3.3 水平耐力の評価方法とその妥当性検証

図 3.19 に数値解析により得られた水平荷重と天井変位の関係を示す。各強制変位時の荷重変位関係を a)~d) に示している。解析結果が実験結果をよく捉えていることがわかる。水平力が要素実験のときより小さいうちに、大きな鉛直力が生じて背掛けクリップの根元が折れている。これは次に示すような背掛けクリップに生じる野縁受けのねじりモーメントが関わっていると考えられる。ねじりモーメントが大きい理由として、背掛けに対するハンガー腹掛けの水平力のかかる位置の違いが考えられる。正方向載荷時（根元が折れる時点）の各接合部に生じる水平力の分布を示した概念図を図 3.20, 図 3.23 に示す。腹掛けとハンガーで生じる水平力（接触力）は、野縁受けのせん断中心に対して偏心して作用するため、野縁受けを図に示すような方向に回転させるように作用するが(図 3.20a)c, 図 3.23)、背掛けはそれらとは反対に作用するために、背掛け位置で野縁受けのねじりモーメントが集中していると考えられる。このねじりモーメントに対して、背掛けクリップはこの作用で抵抗しようとするため(図 3.20b))、軸力が生じやすい状態にあると考えられる。一方、負方向載荷時では、各クリップが野縁受けに作用するねじりモーメントをハンガーが負担する形になっている。正方向載荷時と比べてハンガーと野縁受けの接触が 2 点になっており、野縁受けのねじりモーメントに対して安定して抵抗できる状態にあると考えられる。鉛直力はクリップに生じる軸力とほぼ等価であったことを考えると、クリップに致命的な損傷を与える要因がクリップの軸力であることが考えられる。したがって、天井の設計を行う際、クリップの要素実験で得られる鉛直耐力をクライテリアとして、クリップに生じる軸力を検討する方法が 1 つの有効な手段として考えられる。

弾性勾配が背掛けの根元折れ(+10mm 以降)を機に変化している。これについて、クリップが負担する水平力と野縁受けの曲げ変形を基に検討する。根元が折れる±15mm の前後の±10mm, ±20mm の載荷サイクルにおいて、クリップが負担する水平力を天井水平変位との関係で示したものを図 3.26 に示す。根元が折れる前についてみると、+10mm ではクリップの掛け方によらず、クリップは概ね等しく水平力を負担している。-10mm では、振れ止め直近の背掛けと腹掛けが主な水平力を負担している。

一方、根元が折れた後、+15mm では腹掛けの水平力負担が劣化し、背掛けの水平力が上昇している。このとき、背掛けでは折れた根元が野縁に再接触することによる急激な軸力の発生でハードニングを起こしている。そのため、腹掛けが負担していた水平力が背掛けに水平力が集中するようになっていると考えられる。また、その後の 0~-20mm の負方向では、根元が折れたことで背掛けはすべり挙動が顕在化している。そのため、背掛けが負担する水平力は低下し、代わりに腹掛けが水平力を負担す

る形に変化している。根元折れ以降、背掛けが野縁受けに接触する方向に対しては、水平力の負担は期待できないと考えられる。

このように、背掛けの根元が折れた後では、正載荷の時は背掛けクリップが、負載荷の時は腹掛けが主に水平力を受けるようになる。そのため、クリップが野縁受けに与える水平力（せん断力）の分布および野縁受けの曲げ変形が変化し(図 3.27)、剛性が低下したと考えられる。ここで、背掛けの根元折れ後の各載荷方向におけるクリップ状態を単純化して水平剛性を求めた。正載荷時では、背掛けクリップを無視した状態、負載荷時では腹掛けクリップを無視した状態で数値解析により単調載荷の荷重変位関係を得た。それを図 3.28 に示す。正負で水平剛性がよく似ている。載荷の方向によってクリップの状態は異なるが、ほぼ同程度の剛性になっている。これは背掛けあるいは腹掛けがない極端な状態である。そのため、完全にクリップが脱落しないうちは、図 3.17 の試験体では背掛けクリップの根元折れ以降は、各々の状態に漸近することになると考えられる。

3.4 まとめ

ハンガー接合部を含めた吊ボルトの力学的モデルを用いて、野縁方向における天井の水平剛性を検討した。天井の水平剛性を評価し実験値と比較することで、本研究で提案した天井の水平剛性評価法の妥当性を示した。また、最小ユニット試験体の静的漸増載荷実験により得た復元力特性について、接触・離間現象およびすべり現象を考慮した試験体の詳細な数値解析モデルを構築することにより、天井の復元力特性について詳細な検討を行った。

検討によって得られた知見を以下に示す。

- 1) 天井の野縁方向において、天井の水平剛性は载荷の向きによって異なる。これはハンガー接合部の特徴と一致する。吊ボルトの曲げ変形が小さい (L_b が短い) とき、ハンガー接合部の変形が支配的になる。
- 2) クリップは野縁受けの変形を完全に拘束する剛性を有していないため、水平剛性 K_s を評価する際は L_c を $\zeta=1.22$ 倍して評価する必要がある。
- 3) 実際の天井で採用される可能性がある $L_c=200\sim 400\text{mm}$ において、野縁受けのねじれ剛性が吊材の水平剛性に及ぼす影響が大きい。また、 $L_c=300\text{mm}$ において、 $L_b \geq 300\text{mm}$ では吊材の水平剛性 K_s に占める K_{h1} , K_c の割合がほぼ無視できる程度まで小さくなる。この条件下であれば、 K_{h3} と K_b だけ考慮した吊材の水平剛性でも概ね対応可能である。
- 4) 振れ止めが取り付けあるいは吊長さが短く水平剛性の高い吊ボルトの近傍では、背掛けクリップの根元が折れる現象が初期の段階で発生する。
- 5) 背掛けクリップでは、この作用により特に軸力が発生しやすい状態にある。
- 6) 背掛けクリップの根元折れ後は、水平力を負担するクリップが载荷の向きによって変化する。正方向（ハンガーが閉じる方向）では背掛けクリップ、負方向（ハンガーが開く方向）では腹掛けクリップが水平力を負担する。

Chapter 3
Figures and Tables

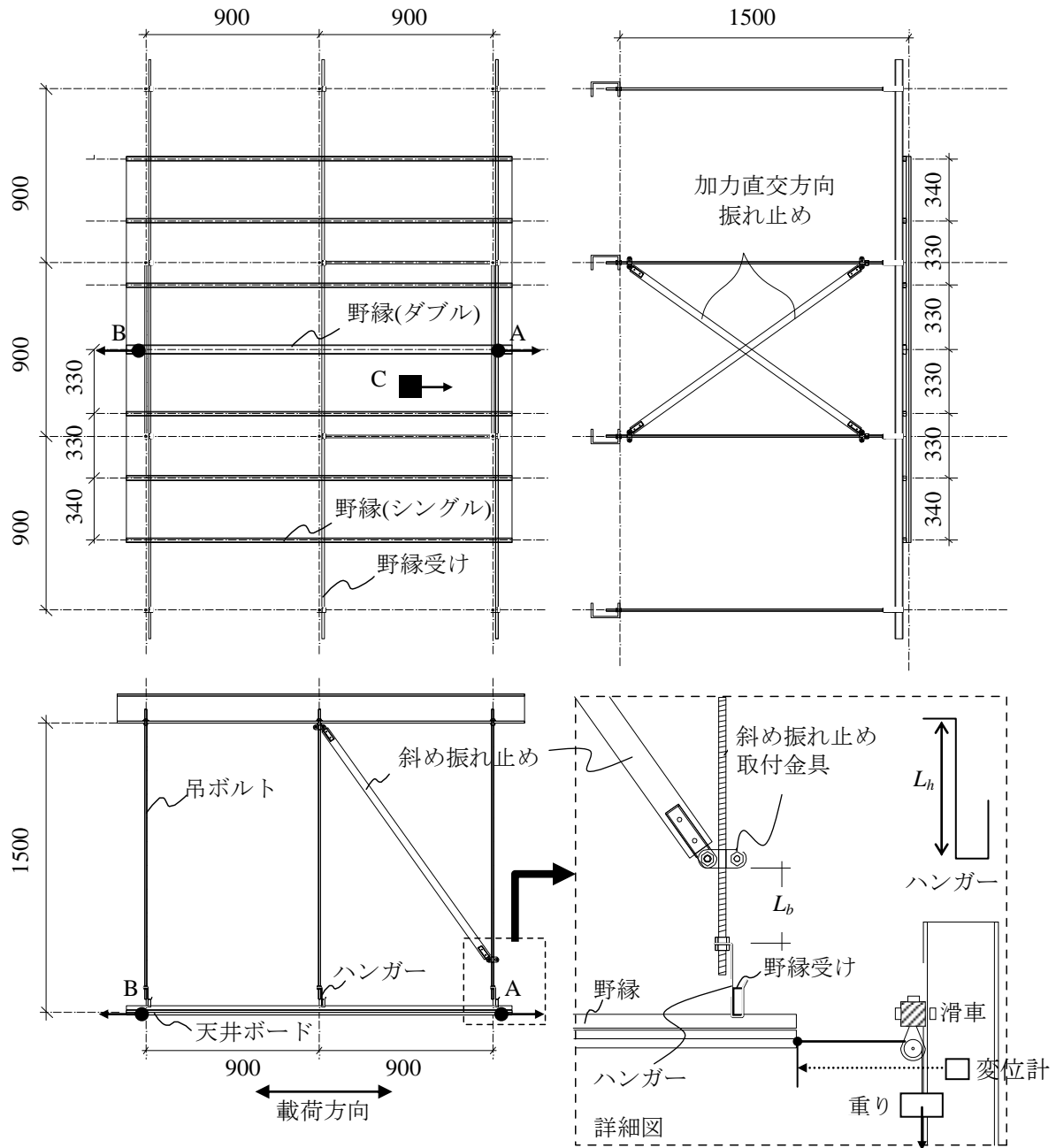


図 3.1 天井ユニット試験体の概要図

表 3.1 使用部材

天井部材名	断面公称寸法 [mm]	天井部材名	断面公称寸法 [mm]
吊ボルト	φ 9	クリップ(シングル)	23×0.6
斜め振れ止め	38×12×1.2	クリップ(ダブル)	46×0.6
ハンガー	24×2.0	野縁 (シングル)	25×19×0.6
野縁受け	38×12×1.2	野縁 (ダブル)	50×19×0.6

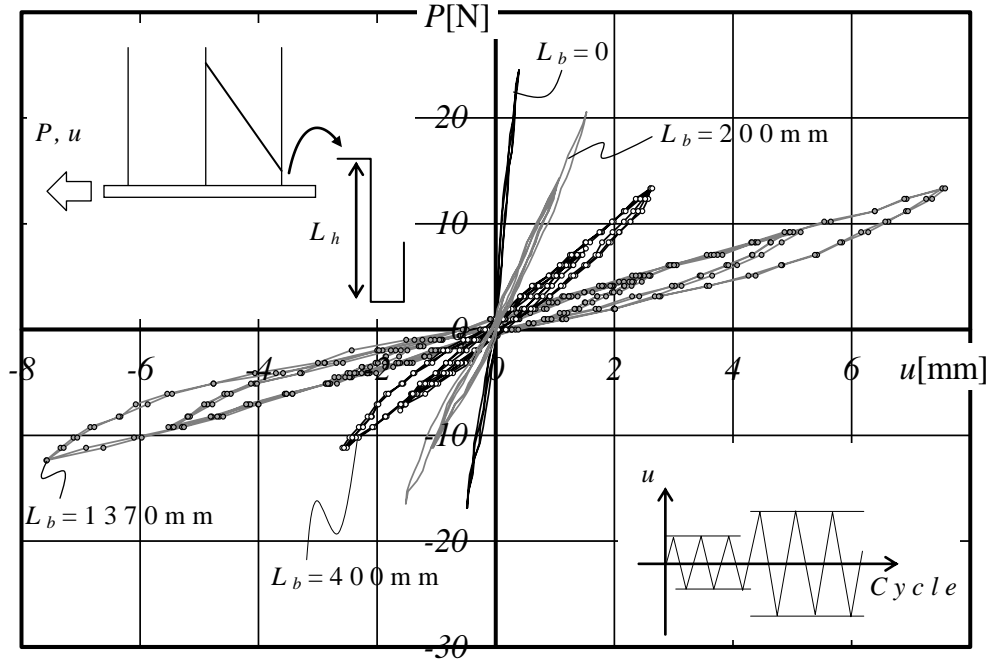


図 3.2 各 L_b における天井の荷重変位関係図

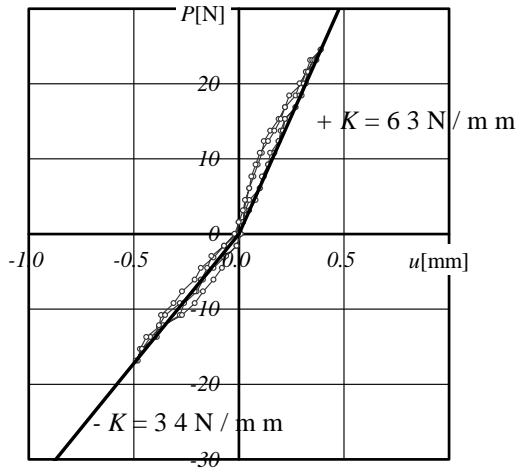


図 3.3 $L_b=0$ の荷重変位関係図

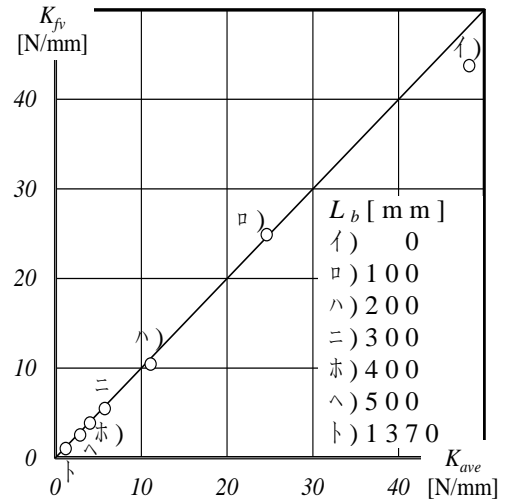


図 3.4 K_{Ave} と K_{Fv} の相関図

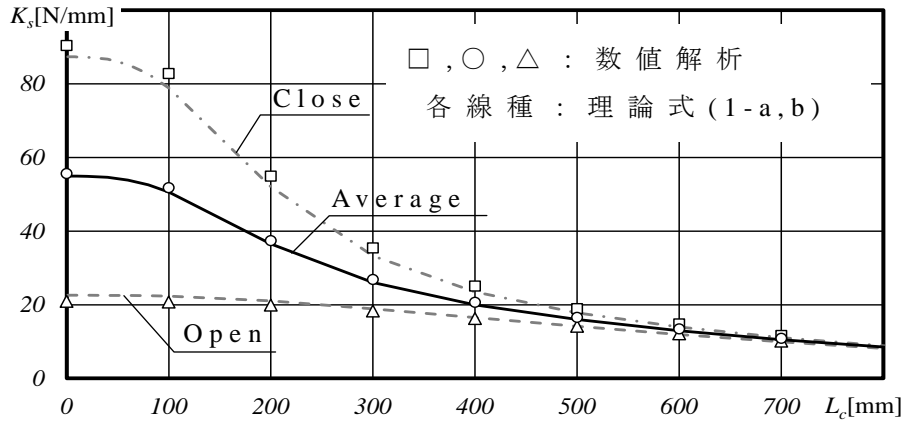


図 3.5 野縁受け材長 L_c と吊材水平剛性 K_s の関係

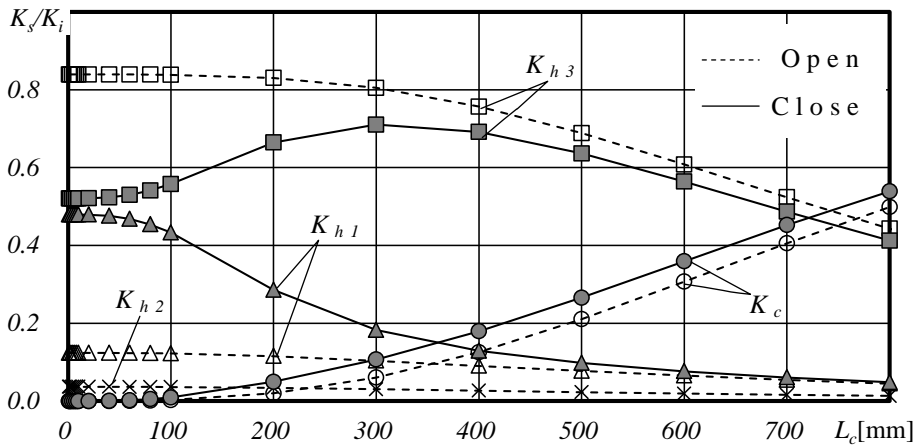


図 3.6 L_c と吊材水平剛性 K_s に占める各剛性の割合の関係

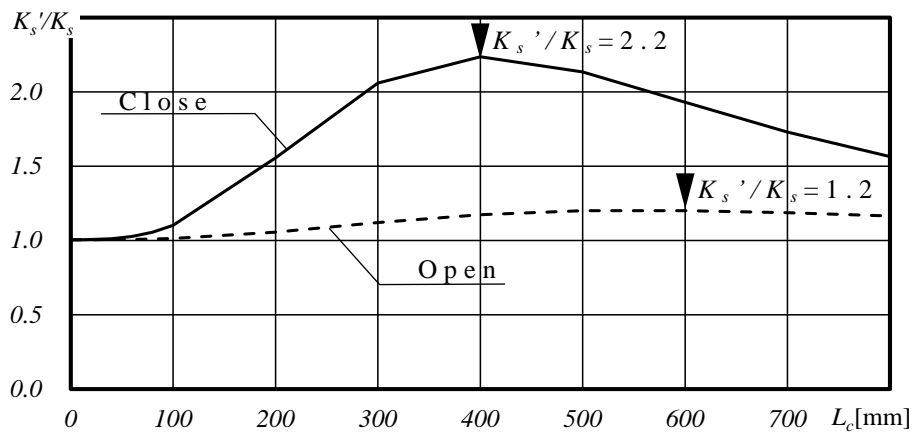


図 3.7 野縁受けのねじれ剛性が吊材水平剛性 K_s に及ぼす影響

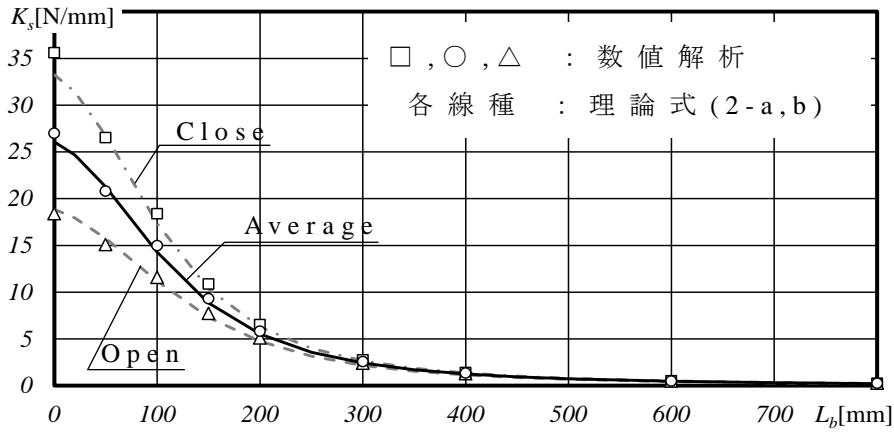


図 3.8 吊ボルト材長 L_b と吊材水平剛性 K_s の関係

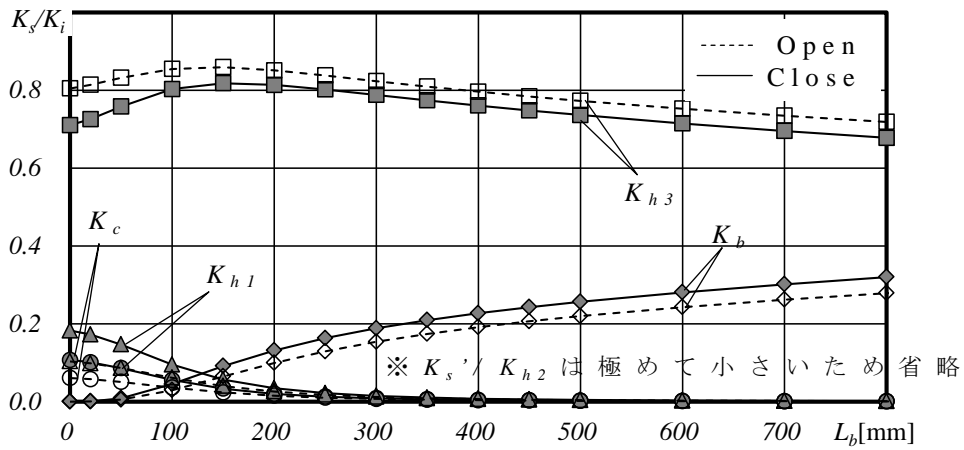


図 3.9 L_b と吊材水平剛性 K_s に占める各剛性の割合の関係

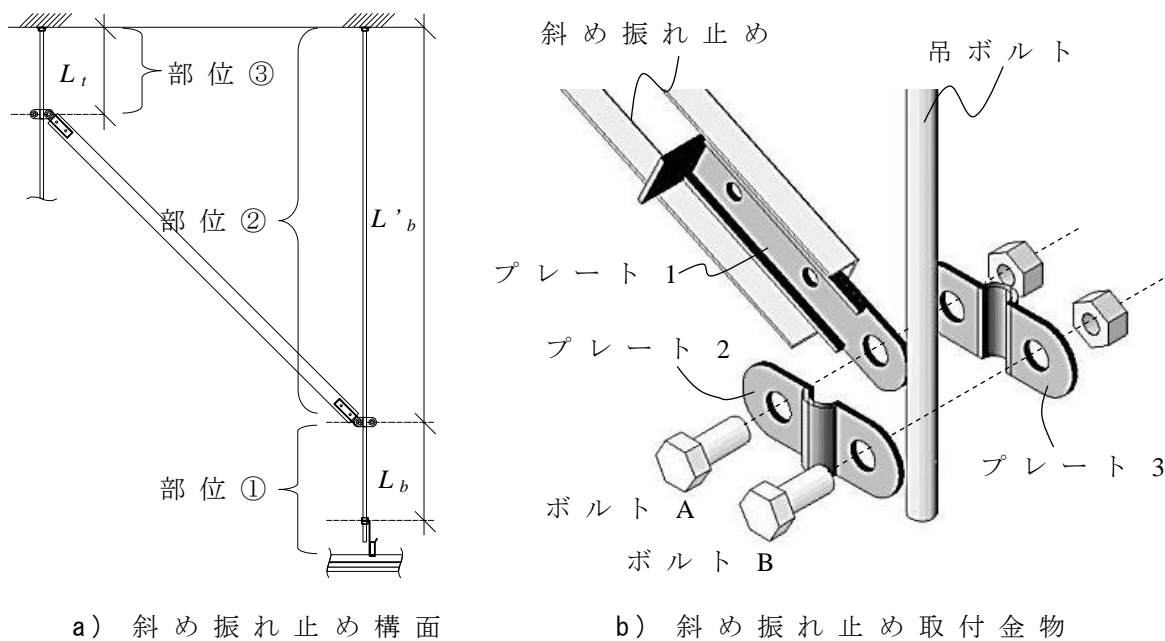


図 3.10 斜め振れ止め構面の概要

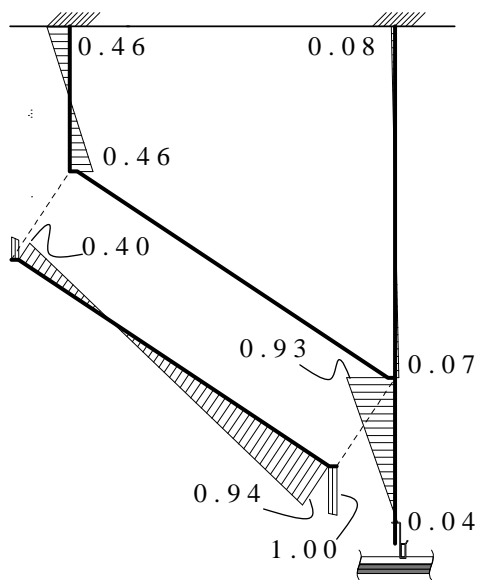


図 3.11 モーメント分布図

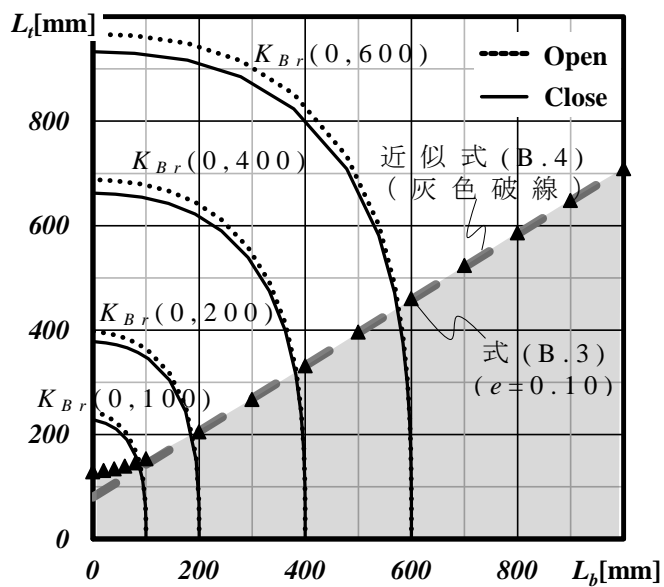
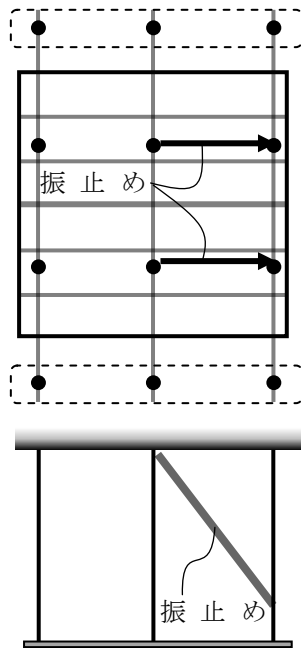
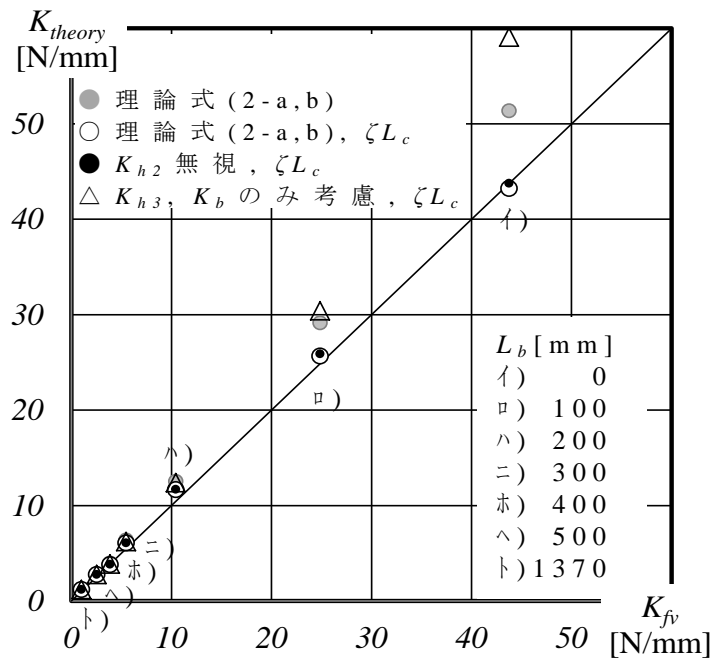


図 3.12 L_t-L_b 相関関係図



a) 吊ボルトの状況



b) 相関図

図 3.13 水平剛性の推定値と実験値の比較

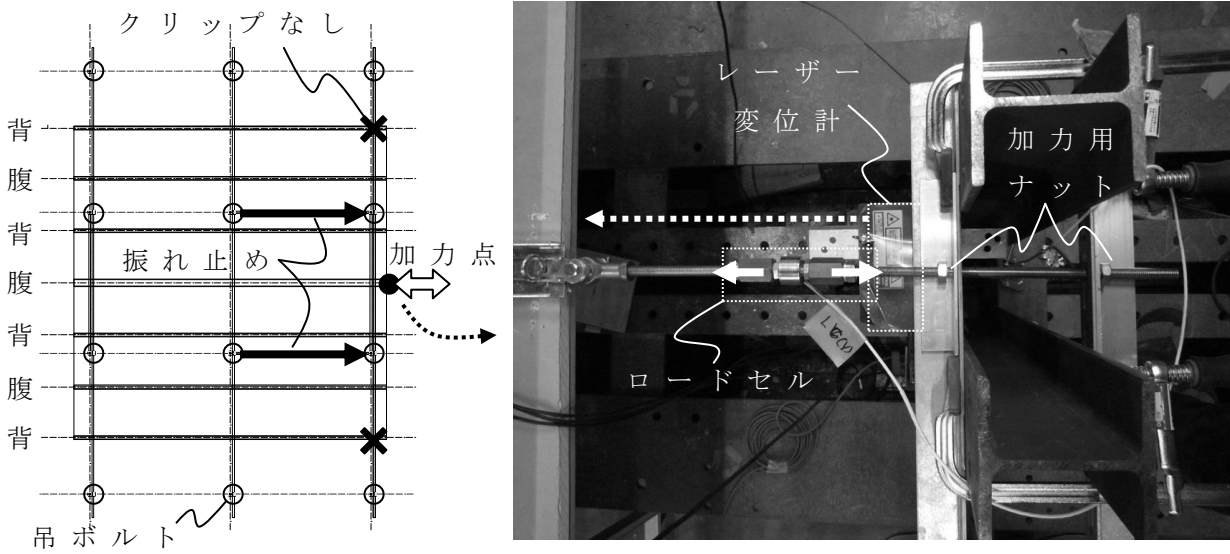


図 3.14 試験体平面図と加力装置

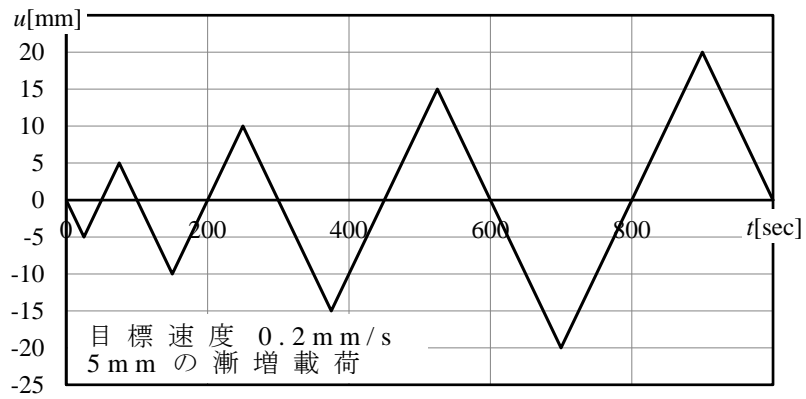


図 3.15 载荷プログラム

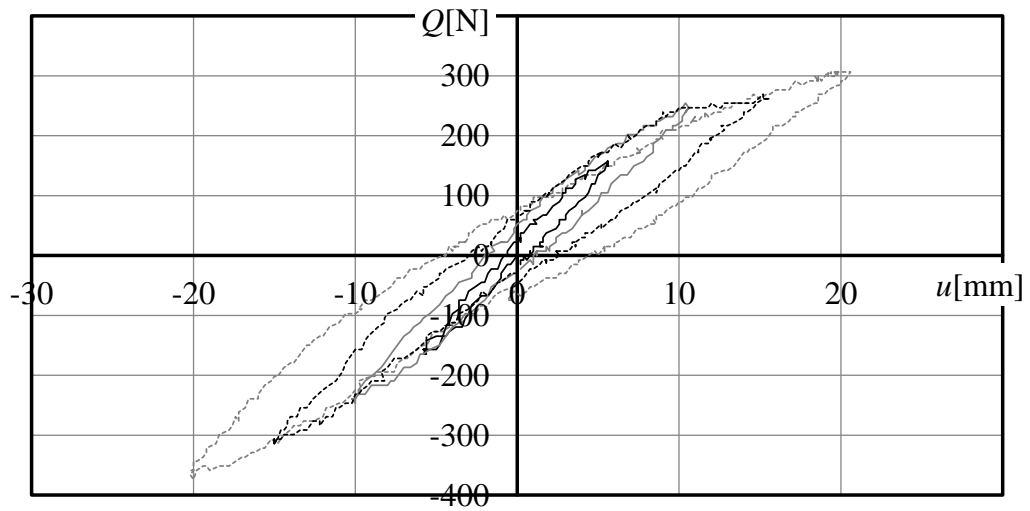


図 3.16 水平荷重 - 天井変位関係図

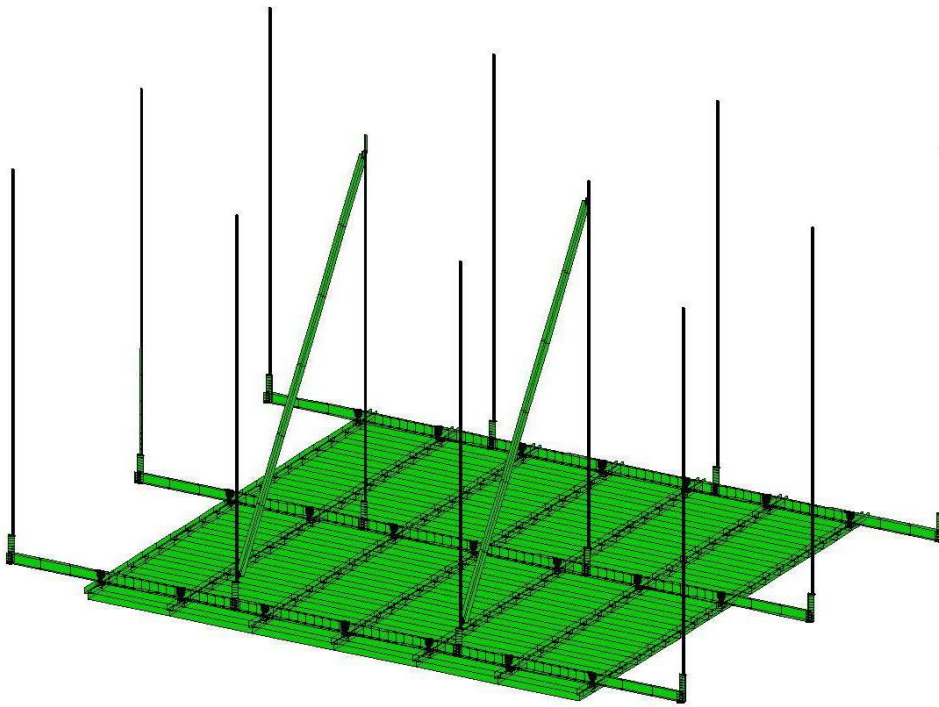


図 3.17 試験体の数値解析モデル（全景）

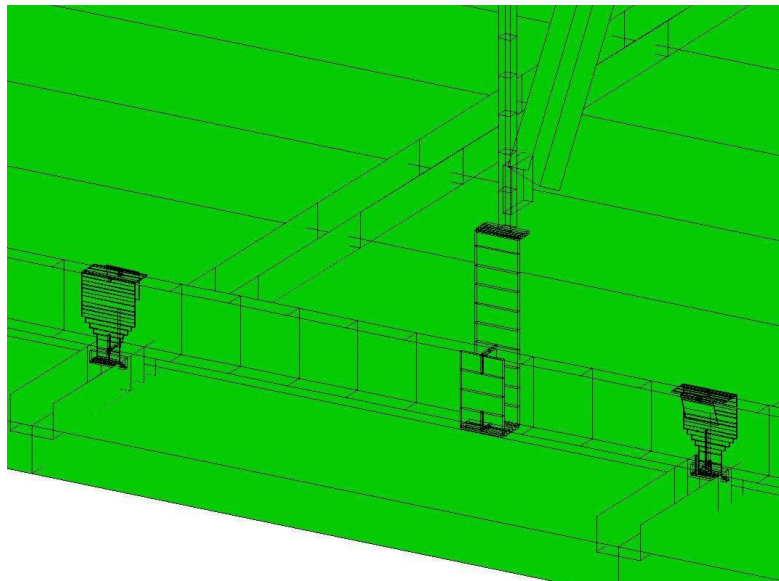
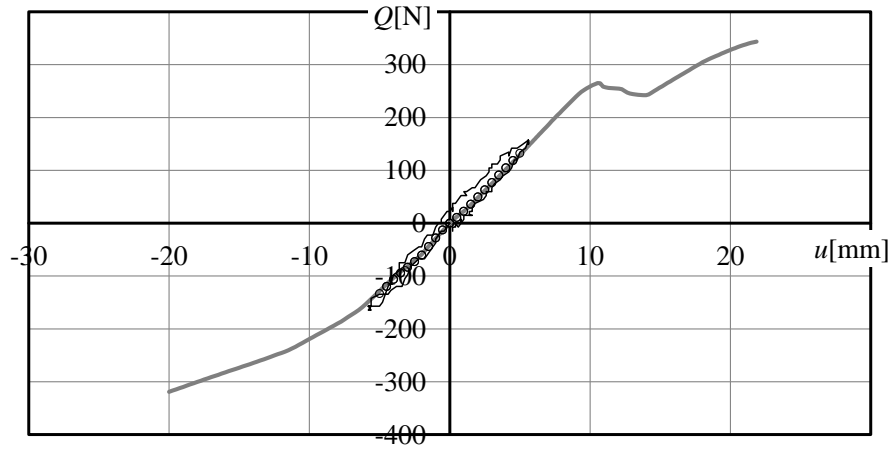
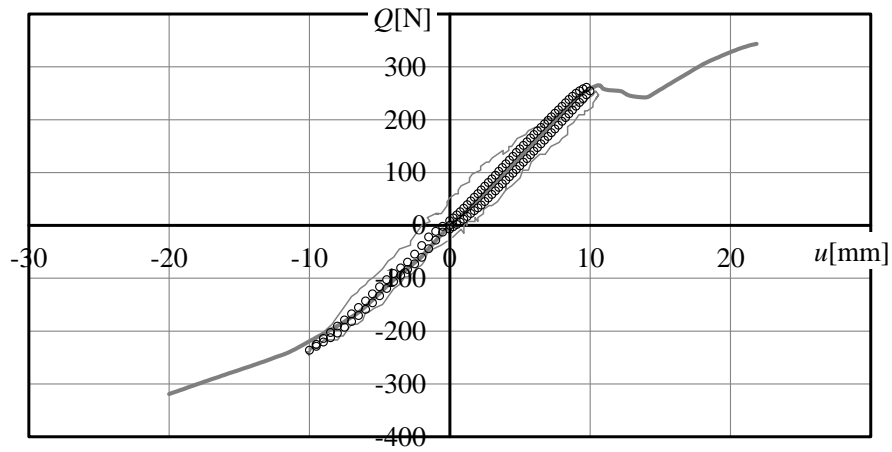


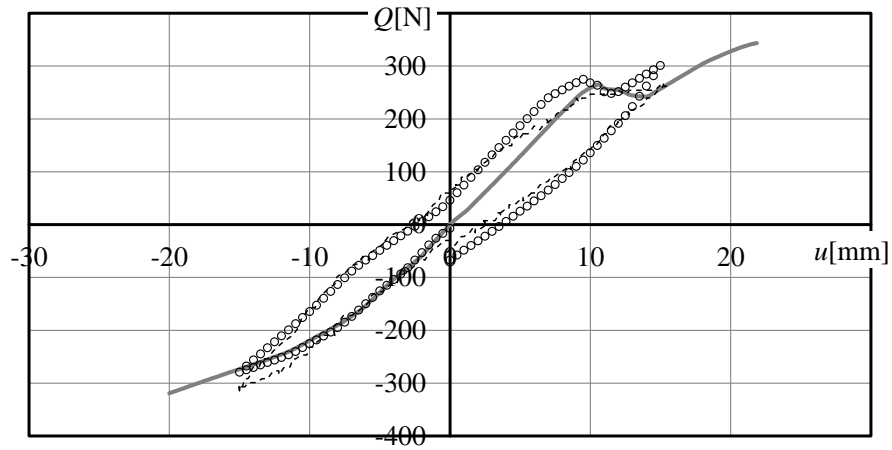
図 3.18 接合部の様子



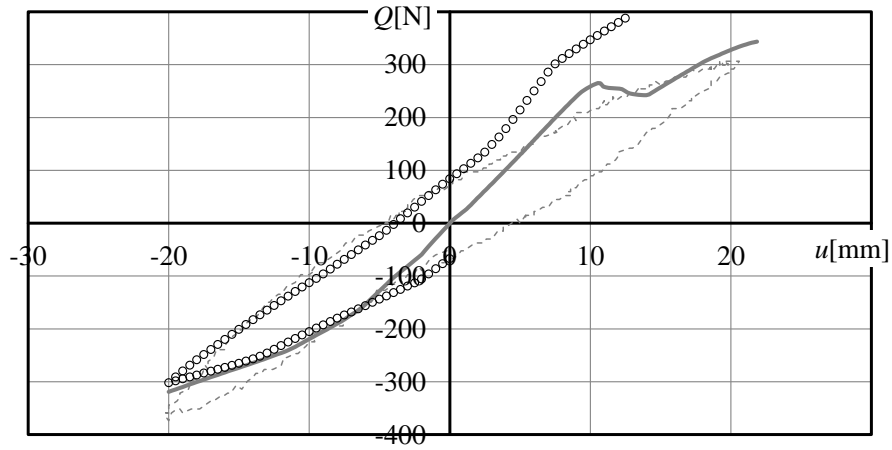
a) 強制変位 ± 5 mm



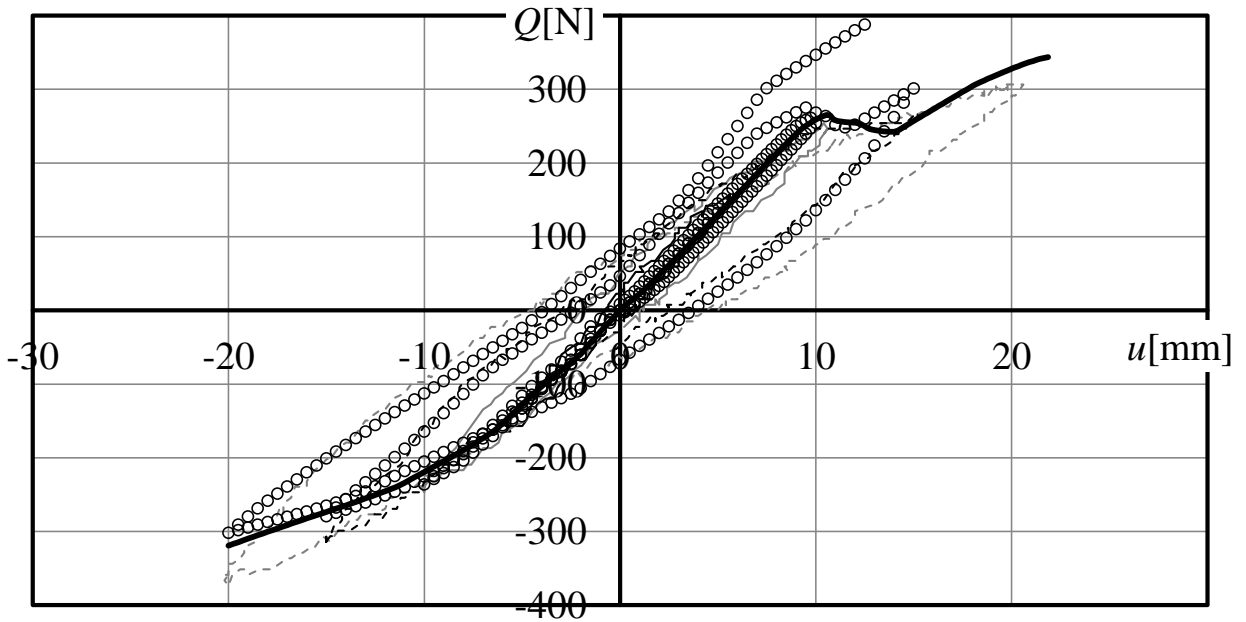
b) 強制変位 ± 10 mm



c) 強制変位 ± 15 mm



d) 強制変位 ± 15 mm



e) 全過程

図 3.19 数値解析と実験の比較 (水平荷重 - 天井変位関係)

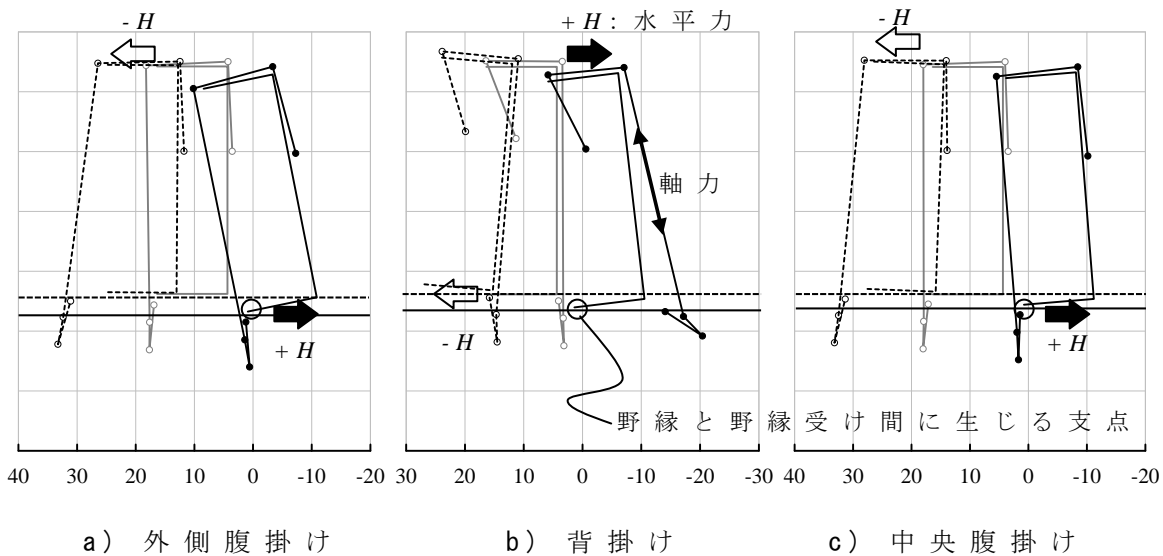


図 3.20 ±15 mm におけるクリップの変形図

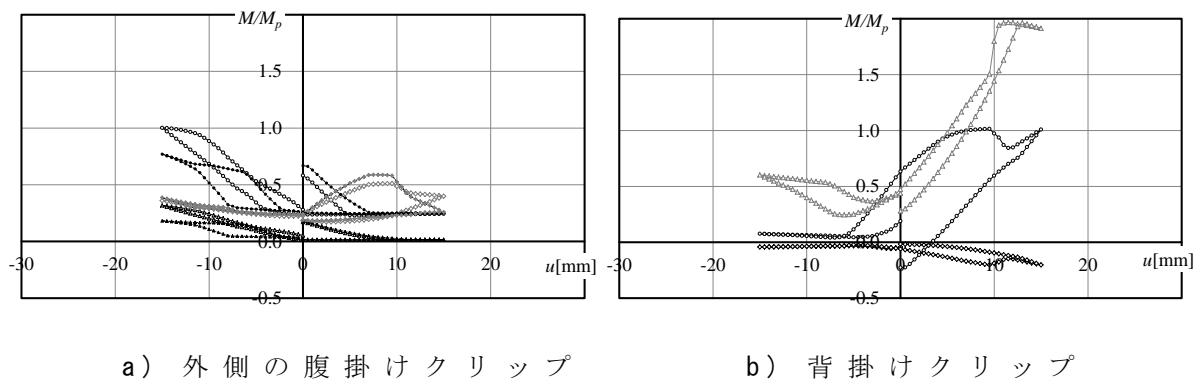


図 3.21 クリップに生じる曲げモーメントと天井変位関係

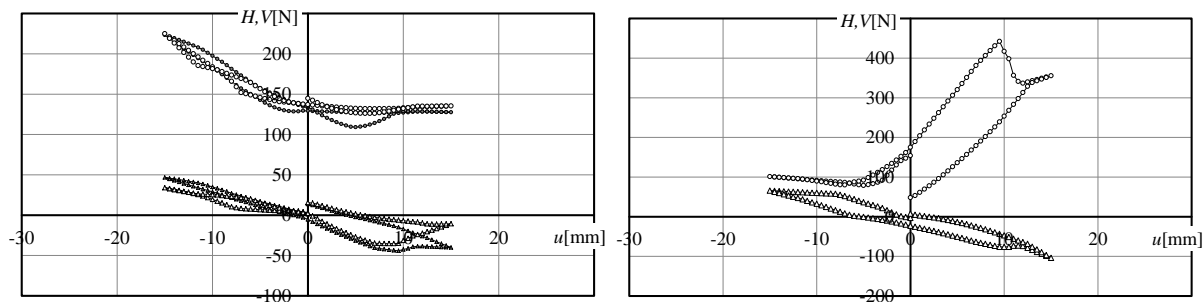


図 3.22 クリップに生じる水平力・鉛直力と天井変位関係

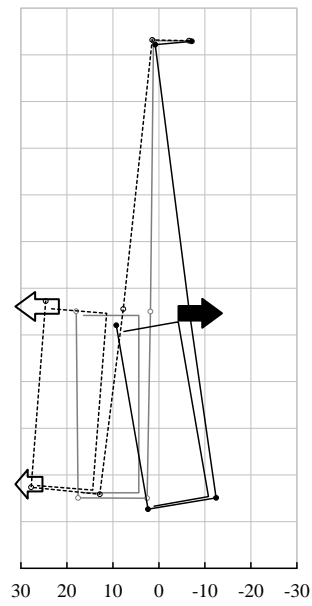


図 3.23 ±15 mm におけるハンガーの変形図

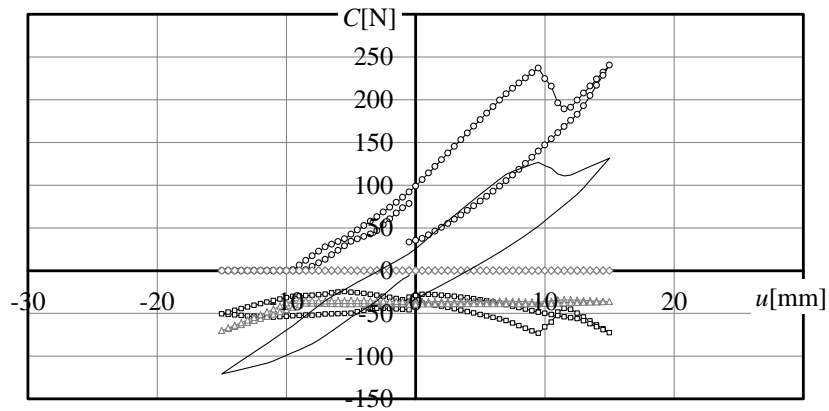


図 3.24 ハンガーと野縁受け間の接触力と天井変位関係

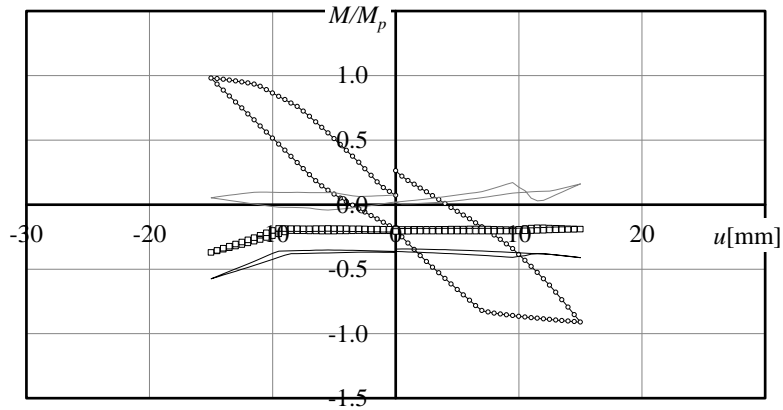
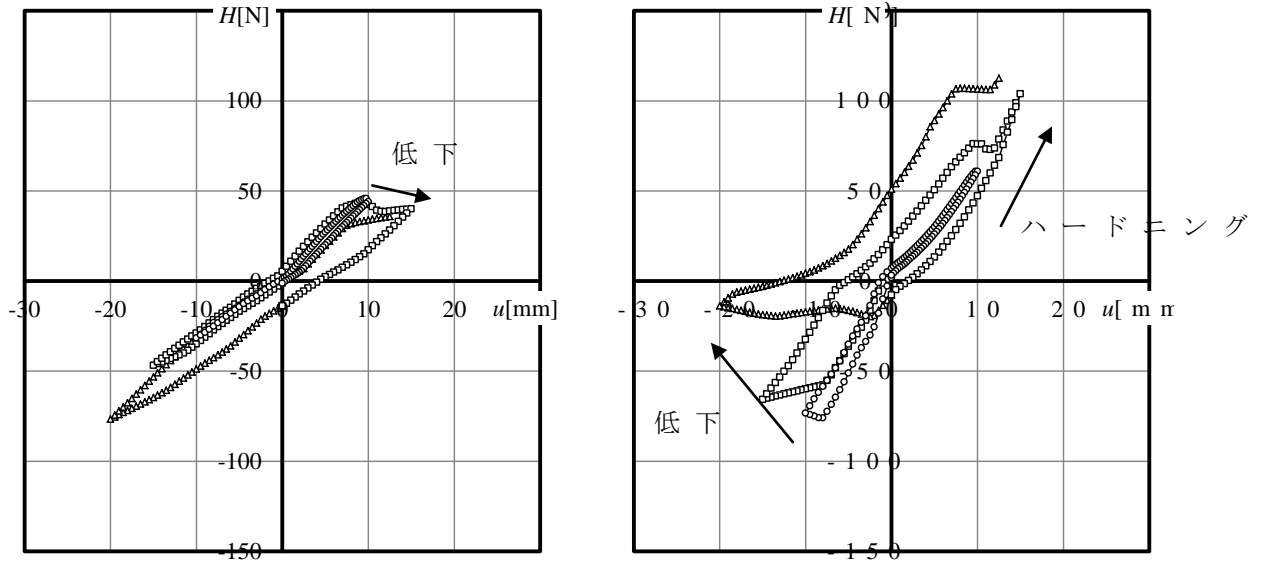
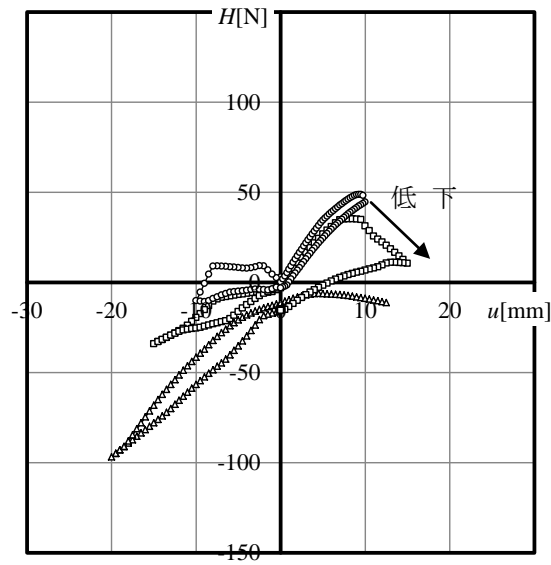


図 3.25 ハンガーに生じる曲げモーメントと天井変位関係



a) 外側の腹掛けクリップ

b) 背掛けクリップ



c) 試験体中央腹掛けクリップ

図 3.26 クリップに作用する水平力と天井変位関係図

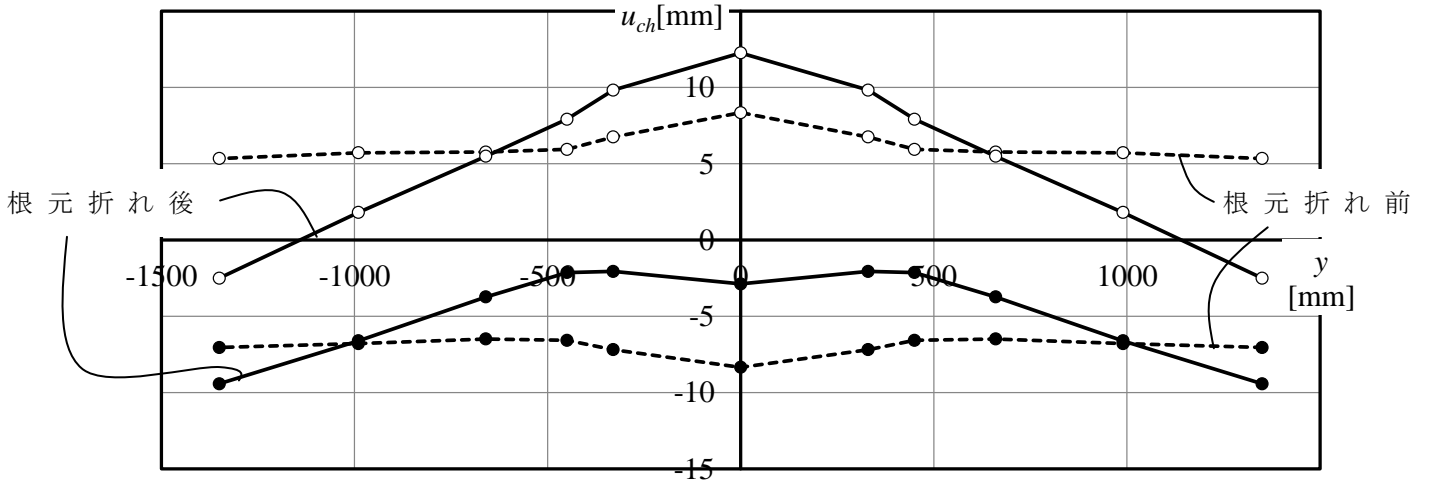


図 3.27 野縁受けの曲げ変形

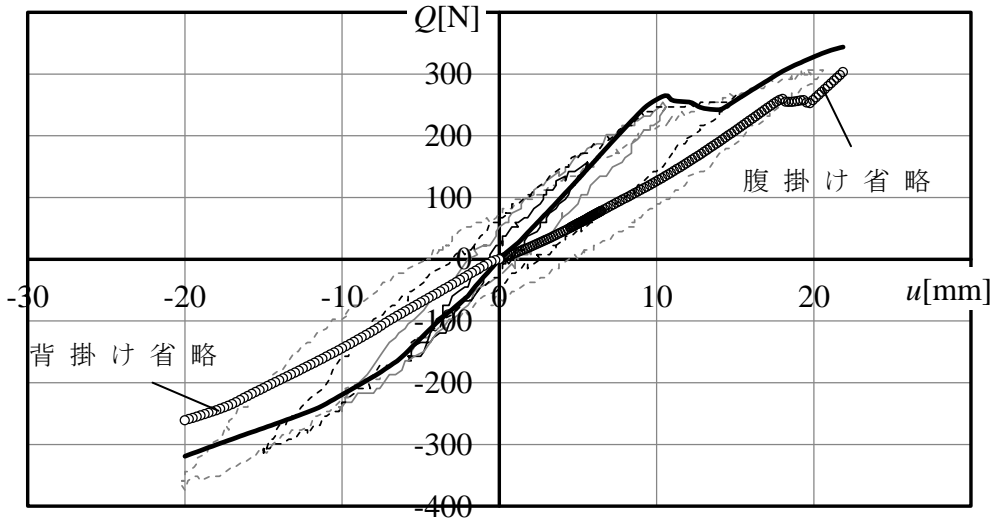


図 3.28 天井システムの復元力特性

第4章 1質点系モデルによる天井の簡易非線形応答解析

4.1 はじめに

4.2 天井の振動台実験

4.2.1 実験概要

4.2.2 固有周期の評価と応答スペクトルによる応答評価

4.3 一質点系振動モデルを用いた天井の振動解析

4.3.1 天井の復元力特性の概要

4.3.2 解析結果の妥当性検証

4.4 まとめ

Figures and Tables

4.1 はじめに

これまで構築してきたような鋼製下地在来工法天井に対する複雑な解析手法は、天井の挙動および損傷を中実再現する上では不可欠であり有意義なものである。しかし、実際の設計では想定される地震に対して天井の応答および損傷を巨視的に捉えることが求められることから、詳細な解析モデルを用いた検討は非現実的である。こうした課題は、建築の主要構造体においても同様に考えられるが、建築の主要構造体の振動を巨視的に考える際には、一質点あるいは多質点の質点とバネから成る力学モデルが一般的によく用いられる。実際に被害のあった天井に対して、一質系モデルを用いて地震時における天井の応答解析を行い、被害との関連性について論じた例がある。しかし、対象としている天井は約2mの吊長さで、ほぼ振り子として振る舞っていた可能性が高く、すでに一質系モデルとして十分扱える対象であったことが考えられる。斜め振れ止めや短い吊ボルトを含む天井においては、接合部の強非線形性が弾性域から現れる可能性があることは、前章までの成果から推測される。こうした鋼製下地在来工法天井に対して、上記のような振動解析の基本的なプロセスにもとづいて動的外乱に対する天井の応答を評価することが可能かどうかについて研究された例は未だない。

そこで、鋼製下地在来工法天井の動的応答に関して論じるために、典型的な平面の天井を対象に振動台実験を実施する。弾性域においては、3章で提案した天井の水平剛性評価法により試験体の水平剛性および固有周期が算定できるため、応答スペクトルを用いて天井面の応答値を推定する。また、3章で明らかとなった天井水平耐力の考えにもとづいて、天井の復元力特性にバイリニア型の復元力特性を仮定し弾塑性応答解析を行う。これにより得られた結果を実験と比較することで妥当性を示す。

4.2 天井の振動台実験

4.2.1 実験概要

鋼製下地在来工法天井の振動台実験を行うにあたり、工学院大学所有の油圧ジャッキ(振幅:±50cm、最大速度 50cm/s、最大荷重:200kN)と「てこの原理」を利用した1方向加振の振動台(図中の青色鉄骨フレーム)を用いた(図4.1)。振動台の上には、鋼製下地在来工法天井試験体を支持するための黒色の鉄骨フレームを設置してある。鉄骨フレーム上部には鋼製下地在来工法天井の吊りボルトを取り付けるための溝形鋼が900mm間隔で井桁状に組まれている。溝形鋼には900mm間隔で吊りボルトが設置できるようにフランジに10φの穴が開いている。鉄骨フレームの固有振動数は、設計段階で1次モード:加振直交方向33Hz,2次モード:鉛直方向33Hz,3次モード:加振方向43Hzとなっており、天井試験体の水平剛性に比べて十分大きく剛とみなせるように配慮している。

<試験体設置状況>

試験体は JIS で規定されている下地材を用いるものとし、標準施工要領書に従って製作される。各部分材断面は、3 章の静的加力実験で用いた試験体と同様の断面である。天井面は 5.7m×3.67m の規模で、厚さ 12.5mm の石膏ボード 2 層貼りである(図 4.2a)。天井の総質量は下地材を含めて 383kg であった。吊ボルト間隔は 900mm、野縁間隔は 300mm として配置され、天井懐は約 1500mm である。また吊ボルトの吊元は、鉄骨治具フレームの溝形鋼の上下フランジにナットで完全固定支持されている。斜め振れ止めの取り付け方法は、3 章の静的加力実験と同様に振れ止めの取付け金物を用いるものとする。試験体には 10 本の斜め振れ止めを設置した。

計測項目は、図 4.2 に示すように加速度として振動台および鉄骨フレーム(試験体吊元)の加振方向の絶対加速度 X ならびに試験体の天井面における絶対加速度 X, Y 、変位として鉄骨フレームと天井面間の相対変位、さらに斜め振れ止めの材軸方向ひずみである。斜め振れ止めの材軸方向ひずみは、斜め振れ止め中央の図心位置(図 4.2c)の材軸方向ひずみをひずみゲージの 4 ゲージ法により計測する。ひずみゲージの添付後、10kg 程度の錘を用いて斜め振れ止めの材軸方向に加力することでキャリブレーションを行った。

目標とする入力波(目標入力波)は、1995 年兵庫県南部地震 JR 鷹取駅記録の地動加速度 20%を入力した際に R 階で計測された床応答加速度と、最大加速度を 20%,50%,100%とした加速度波形を用いた(図 4.3)。ただし、振動台の加振システム上、入力波の完全な再現性は保証されていないため、鉄骨フレーム中央の絶対加速度を直接計測(図 4.4)し、これを天井の入力加速度とみなすこととする。入力波は表 4.1 の順に入力した。

4.2.2 固有周期の評価と応答スペクトルによる応答評価

<固有周期の評価>

3章で提案した天井の水平剛性評価法を用いることで天井の固有周期を算定することが可能である。そこで、本評価式により算定される天井の固有周期を実験から同定されるものと比較する。

試験体の固有周期を求めるにあたり、まず、試験体内にある吊ボルトの分類を確認し、各吊ボルトの水平剛性を算出する。本試験体の吊ボルトは「斜め振れ止めの有無」と「設置位置」の2項目から4種に分類される。

- ・斜め振れ止めがあり ($L_b=0$) 試験体の四隅に位置する4本 (図4.2aの吊ボルトの凡例で B_a)
- ・斜め振れ止めがあり ($L_b=0$) 試験体の内側に位置する6本 (図4.2aの吊ボルトの凡例で B_b)
- ・斜め振れ止めがない ($L_b=1370$) 試験体の外側に位置する10本 (図4.2aの吊ボルトの凡例より B_c)
- ・斜め振れ止めがない ($L_b=1370$) 試験体の内側に位置する15本 (図4.2aの吊ボルトの凡例より B_d)

各吊ボルトの L_b と L_c を用いて式 (B.3-a,b) から水平剛性 K_s を各々求める。ここで、吊ボルト B_b と B_d では、ハンガーが $L_c=300\text{mm}$ (野縁間隔) の中間に位置していることから、野縁受けの曲げ剛性 K_b およびねじり剛性 k_θ は単純梁 (図4.5a) とみなし、 $\zeta=1.22$ を考慮した L_c を用いて吊ボルトの剛性 K_s を計算する。一方、残りの吊ボルト B_a と B_c では、クリップはハンガーを中心に片側だけにあり、野縁受けが片持梁状態になっている。したがって、この部分の野縁受けに対しては図4.5bに示すような境界条件にあると考えることにする。本試験体で図4.5bに相当する部分は $L_c=435\text{mm}$ 、 $l=300\text{mm}$ となっており、両者に $\zeta=1.22$ を乗じたものを用いて K_s を計算する。

吊ボルトは内径 7.5mm ($I_b=155\text{mm}^4$ 相当) およびヤング係数は一般鋼材の 20500N/mm^2 とし、野縁受けおよびハンガーの諸元は表2.2と同様のものとする。3章の評価方法により各吊ボルトの1本あたりの水平剛性を求めると、表4.2のようになる。表4.2中の L_b, L_c は吊ボルトおよび野縁受けの長さで単位は[mm]、 $openK_s$ 、 $closeK_s$ は载荷の向きによって異なるハンガーの水平剛性値、 $AveK_s$ は $openK_s$ と $closeK_s$ の平均値、 K_p は振り子剛性であり、いずれも吊ボルト1本辺りの水平剛性値[N/mm/本]である。これらを総じて、試験体全体の水平剛性 K_{theory} を求めると約 $187[\text{N/mm}]$ (表4.2中の下) が得られる。試験体の総質量 383kg を用いて固有周期 T_{theory} を求めると約 $0.28[\text{sec}]$ と求められる。

次に、実際に試験体の固有振動数を自由振動により同定する。試験体中央を野縁方向に手で押し引きすることで水平に定常応答させ、途中で手を離すことで試験体を自由振動させた。振幅は天井面で 2mm 程度の小さな変位で、初期における天井システムの固有周期を対象に実施した。自由振動で得ら

れる応答加速度を用いて、以下に示す減衰自由振動の理論式

$$u'' = u_0 \cdot e^{-h\omega t} \cdot \cos(\omega\sqrt{1-h^2}t - \phi) \quad (4-1)$$

を最小二乗法により、計測された天井面の応答加速度波形に近似させることで同定した。その結果、図 4.5 に示すように試験体の固有振動数は 3.72Hz と同定された。固有振動数の逆数から固有周期 T_{test} を求めると $T_{test} = 0.27$ となり、評価式により得られた T_{theory} との差は 6% とよく一致している(表 4.3)。本水平剛性評価式による固有周期の推定が妥当であることがわかる。また、図 4.6 から試験体の減衰定数 h が 0.013 と同定された。

<応答スペクトルによる応答評価>

弾性域における構造物の動的な応答は、一般的に質量・水平剛性・減衰定数をもとに応答スペクトル法を用いて評価することが可能である。ここでは、天井における動的な弾性応答を評価する際の応答スペクトル法の有効性について検討する。

応答スペクトル法の有効性について検討するにあたり、最大入力加速度が小さい入力波 No.1 (最大 0.59m/s^2) に対する天井面の応答について検討する。まず、天井に対する真の入力波は吊元の絶対加速度 (実際の建物では床応答加速度) であることから、実験で計測された鉄骨フレームの絶対加速度を用いて応答スペクトルを得る。得られた入力波 No.1 の加速度および変位応答スペクトルを図 4.7 及び図 4.8 に示す。減衰定数は、自由振動から同定した天井の減衰定数 $h=0.013$ を用いた。天井試験体の固有周期として先に求めた評価値を用いると、応答スペクトルから天井面の絶対加速度と変位はそれぞれ 1.07m/s^2 、 2.2mm と得られる。次に、これらを実験値と比較することで妥当性を検証する。

実験で計測された天井面の絶対加速度と鉄骨フレームと天井面の相対変位の時刻歴応答波形を図 4.9 に示す。なお、両応答波形は 15Hz のローパスフィルターにより高周波のノイズを除去している。図 4.9 は両者とも最大値を示す時刻付近を取り出して示している。この図から最大値はそれぞれ 1.02m/s^2 、 2.4mm と得られ、応答スペクトルから得られた評価値との差はそれぞれ 4%、7% 程度であった。このことから応答スペクトル法による天井の応答評価が十分可能であることがわかる。また、天井を一質点系とみなしてニューマーク β 法により求めた天井の弾性な時刻歴応答波形を図 4.9 に○印で示す。ニューマーク β 法による結果を実験結果と比較すると、最大応答値のみならず振幅や位相もよく捉えていることが確認できる。このことは、一方で、入力波 No.1 に対して天井は弾性応答していた

ことも示している。この入力波による目立った損傷も目視では確認されなかった。

以上のことから、本剛性評価手法および吊元（実際は上階の床スラブ）の加速度から求めた応答スペクトルを用いることで、天井の応答加速度および変位を比較的精度よく予測することが可能であることを示している。一般的に、このような応答予測が可能であるのは天井システムが弾性である場合に限定される。天井システムが弾性である条件が明らかになれば、応答予測した結果がこの条件を満足しているか否かにより、入力波に対する天井システムの状態を判断することが可能となる。そこで、次の節において、天井システムの弾塑性応答解析を可能とする塑性域を含めた天井システムの復元力特性を持つ力学モデルについて検討する。

4.3 一質点系振動モデルを用いた天井の振動解析

4.3.1 天井の復元力特性の概要

天井における一質点系の弾塑性応答解析を行うにあたり、3章で数値解析を用いた検討により明らかになった天井システムの復元力特性のような特性をもった復元力バネが必要とされる。その天井システムの復元力特性には大きく分けて、以下のような2つのフェーズがあった。

フェーズ1：背掛けクリップの根元が健全なとき、先行してハンガーが上端で曲げ降伏する。降伏後は塑性ヒンジ形成までひずみ硬化による2次勾配が生じる。一般的によく用いられるバイリニア型の復元力特性で表すことができると考えられる。

フェーズ2：背掛けクリップの根元が折れた後、荷重の向きによって背掛けクリップと腹掛けクリップが水平力を交互に負担するようになり、すべり挙動が明確に現れてくる。この状態になると、野縁受けに作用する水平力の位置間隔が広がるため、野縁受けの曲げ剛性が軟化し、天井システムの剛性も軟化する。この挙動は、バイリニア型復元力特性の降伏点以降に現れるとともに剛性が軟化するため、バイリニア型復元力特性だけでは再現することができない。

以上のようなハンガーとクリップ接合部および野縁受けの非線形挙動を反映させた復元力バネを構築するために、まず各部位を単純なバネモデルに置き換えて各部位間の関係性を明確にすることを考える。その上で、天井システムの水平剛性を求める際に適用した吊ボルトの並列な関係性に準じて、吊ボルト1本分の復元力特性について検討する。

天井下地の各部位を野縁方向に対する水平バネモデルに置き換えると図4.10aのようになり、これを概念的に整理すると図4.10bのようになる。ここで、本来なら野縁受けはクリップやハンガーによって連続梁状態にあるため、単純にクリップ間で分割して考えることは安易ではあるが、概ね図4.10a,bのように考えることができる。基本的に吊ボルト・ハンガー・野縁受け・クリップは直列関係にあるが、クリップと野縁受けは直列と並列の組み合わせにより階段状に連なっていると考えられる。これらのバネに各々の部位の復元力特性を与えることで、吊ボルトの復元力特性が構築される。

この概念図をもとに、実際に本振動台実験の天井試験体にある各吊ボルトの復元力特性を定義する。まず始めに、斜め振れ止めがある吊ボルト ($L_b=0$) のうち内側に位置するもの (図4.2中の吊ボルト B_a, B_b) について考える。1列の野縁受けに取り付く吊ボルト (例えば軸力ひずみ No.1,2,9,6,5) において吊ボルト間隔の中間で分割して考えると、吊ボルトから左右に2つ目のクリップまでを1つのユニ

ット（概念図中のユニット A）と考えることができる。このユニットについて各バネの復元力特性を定義するために、3章で構築した詳細な数値解析モデルを用いてこのユニットの静的解析を行い、各バネの復元力特性を検討する。

その詳細な数値解析によって得られた各部位の復元力特性を図 4.11a~d に示す。ハンガーの復元力特性を図 4.11a 中の黒線で示す。初期剛性は、2章で示したハンガー接合部の力学モデル（図 2.41）を用いてと野縁受けの曲げ剛性を除いたハンガーの水平剛性（ $closeK_s$ と $openK_s$ の平均値 $aveK_s$ ）に近いことがわかる。また、降伏耐力 Q_y はハンガーの上端で塑性ヒンジが形成される時点を想定して、同様の力学モデルから求めた値（ $openQ_y$, $closeQ_y$, $aveQ_y$ ）と概ね対応していることがわかる。したがって、ハンガーの復元力特性は概ねバイリニア型として考えると、理論的に復元力特性を定めることが可能である。

次に、野縁受けの復元力特性を図 4.11b に実線で示す。ハンガーを中心にみて、背掛け側（図 4.10 中の Ch1）を黒線、腹掛け（図 4.10 中の Ch2）を灰線で示している。両者とも、初期剛性は単純梁とみなした野縁受けの曲げ剛性の半分（図 4.11b 中の黒色点線）に近く、大局的にケース①の状態とみなして評価できることが考えられる。一方、腹掛け側（Ch2）の復元力特性は、途中で剛性が軟化している。このとき、後に示す背掛けクリップの根元折れによって、背掛けが野縁受けを拘束する効果が低下（具体的にはすべり耐力の劣化）するために、野縁受けの曲げ剛性が変化していることが解析的にみることができる。そこで、背掛けの根元折れ後の野縁受けが図 4.11b 中のケース②の状態にあると考え、そのときの曲げ剛性を求めたものが K_{c2} である。詳細な解析モデルによって得られた Ch2 に相当する復元力特性に見られる軟化した剛性とほぼ一致している。Ch2 では、背掛けの根元折れによって生じる野縁受けの剛性軟化を考慮することとする。

最後にクリップの復元力特性を図 4.11c,d に示す。縦軸はクリップに作用する野縁方向の水平力、横軸は野縁と野縁受けの相対変位である。Clip-H2 と Clip-S2 に対する相対変位は、それぞれ Ch3 と Ch4 を直列関係として含めて Clip-S1 と Clip-H1 の相対変位と等しいものを適用している。実線は詳細解析の結果、点線は詳細解析の結果を抽象化して示したものである。図 4.11c,d は、それぞれハンガーを中心にみて腹掛け側（図 4.10 中 Clip-H1 と Clip-S2）と背掛け側（図 4.10 中 Clip-S1 と Clip-H2）に分けて示している。図 4.11c において、Clip-H1 と Clip-S2 とともに概ね弾性的に挙動していると考えられるが、解析の結果から Clip-H1 は正方向で 88N の頭打ちが見られ、すべりが生じることがわかった。したがって Clip-H1 のすべり耐力 $Q_{slip}=88N$ とする。また、Clip-H1 の剛性は正方向で $+_cK_{H1}=46N/mm$ 、負方向で $-_cK_{H1}=10N/mm$ と異なっている。一方、Clip-S2 は概ね弾性的挙動とみられ、その剛性は $_cK_{S1}=5N/mm$

程度であった。腹掛け (Clip-H1) は野縁受けから離間する方向 (図 4.11c では負方向) に変位を受けた場合、脱落する可能性があるが、本詳細解析では Clip-S1 の根元が十分に折れ曲がった後の除荷中に不安定構造となったため、脱落耐力に達する前までの結果となっている。少なくとも 2 章で示したような 150N 程度で脱落すると考えた場合、Clip-H1 の復元力特性は図 4.11c 中の黒色点線のように考えられる。次に、図 4.11d に示した背掛けクリップ (Clip-S1) の復元力特性についてみる。Clip-H1 と同様に正負方向で剛性が異なっている (正方向: $+_{cl}K_{H1}=20\text{N/mm}$ 、負方向: $-_{cl}K_{H1}=58\text{N/mm}$)。また、約 100N で根元が折れる現象のあとにすべり耐力が約 80N から約 30N と半分以下まで劣化している。根元が折れると野縁と野縁—野縁受け間に隙間ができるため、背掛けクリップに生じていた軸力の低下にともなって摩擦力が低下することが原因である。このことを受けて一質点系の振動モデルにおいては、背掛けは根元折れ以降で正負方向の水平抵抗力がすべり耐力 $Q'_{slip}=30\text{N}$ 以上は期待できないとして考えることにする。一方、Clip-H2 は概ね弾性的挙動とみられ、その剛性は Clip-S2 とほぼ等しく $_{cl}K_{S1}=5\text{N/mm}$ 程度であった。したがって、Clip-H2 と Clip-S2 は同様の復元力特性を持つものとみなし、両者はそれぞれ Clip-S1 と Clip-H1 の復元力特性に並列的に統合して考えることにする。

内側の吊ボルトの復元力特性は、上記の各要素の復元力特性を用いて図 4.10b に示した力学モデルで構築する。外側の吊ボルトは、内側の吊ボルトの力学モデルにおける背掛けおよび腹掛けクリップのどちらか一方を除いた力学モデルとする。最終的に各吊ボルトの本数を考慮して天井システムの復元力特性とする。

4.3.2 解析結果の妥当性検証

前節で構築した吊ボルトの復元力特性を用いて、加振 No.2 と加振 No.3 における本試験体の弾塑性応答解析を行った。なお、実際の解析では、安定して解を得るために主要でない節点に微小な質量（ここでは 0.1kg 程度）を与えて解析を実行している。

解析によって得られた応答加速度と応答変位波形を図 4.12,4.13 に示す。まず、加振 No.2 の結果についてみる。図中では灰色実線が実験結果、マーカー（○印）が弾性解析結果、黒色実線が新たに構築した力学モデルを用いた場合の結果である。弾性解析結果に比べて実験の最大応答値との誤差が改善されており、本モデルによる解析結果が実験値とよく対応していることがわかる。図 4.14 に天井システムの復元力特性を示す。本モデルが実験結果と概ね対応している。図 4.15 に斜め振れ止めがある吊ボルト 1 本あたりの復元力特性を示す。弾性剛性の変化がないため、背掛けクリップの根元折れは生じておらず、ハンガー上端の降伏が生じていることがこの結果から判断できる。実験後の目視でも、クリップの脱落や背掛けの根元折れ等の損傷は確認されなかった。また、外側の振れ止めありの吊ボルトでは、解析結果では線形状態にあることになるが、実験では負方向で非線形な応答をしており、解析と実験の間に差が観られる。しかし、試験体全体に作用する慣性力に対して、外側に配置されている振れ止めありの吊ボルトが負担する水平力は、約 2 割程度と比較的小さいため、この差の影響も小さいと考えられる。加振 No.2 では、ハンガーの降伏でとどまっており、この程度の入力波であれば一般的なバイリニア型の復元力特性で応答解析が可能であることが考えられる。

次に、加振 No.3 について検討する。先程と同様に、図 4.16,4.17 に天井面の応答加速度と応答変位波形を示す。弾性解析結果は 11sec 以降で実験結果と異なっているが、本モデルによる解析結果は概ね対応している。実験の最大応答値との誤差も弾性解析に比べて本モデルによる解析で改善されている。実験では 13.5sec 以降、正方向に大きく変位したのち残留変位が生じている。加振中に複数のクリップが脱落・損傷し、野縁受けに残ったクリップがすべったためと考えられる。目視により、複数のクリップが損傷・脱落した様子は確認されている。本モデルにおいても、実験のような正方向に大きくすべる挙動が現れており、13.5sec 以降の応答も概ね捉えられている。図 4.18,4.19 の天井システムおよび各吊ボルトの復元力特性から、特に図 4.19a において吊ボルト一本当たり+100N 程度で背掛けクリップの根元折れが発生直後に腹掛けのすべりも発生していることがわかる。図 4.19b では外側の吊ボルトで -200N 程度受けたときに腹掛けクリップの脱落が生じていることが解析の結果からわかる。なお、本モデルでは 11sec 以降に実験結果から正側にずれて応答しているが、位相が概ね一致している。実際のク

リップのすべり耐力や脱落耐力等は、リップによってバラつきがあることが考えられ、すべるリップのタイミングがそれぞれ異なっていることが関係していると考えられる。本モデルではこのリップの各種耐力のバラつきは考慮していないため、実験結果からずれた結果になったと推測される。

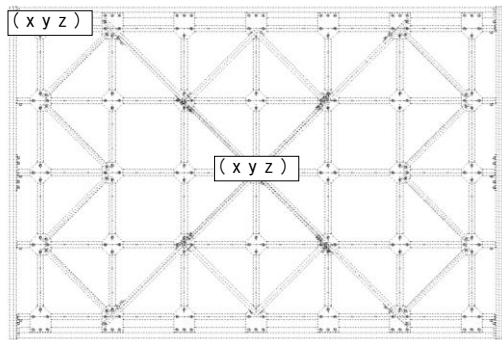
以上の結果から、非線形領域を含めた応答解析において、本力学モデルが妥当であることがわかる。また、天井下地の損傷は、ハンガーの塑性化→背掛けリップの根元折れ→腹掛けリップのすべりといった順で発生する可能性が考えられる。特に、腹掛けリップのすべりが生じると天井が片側に大きく変位する可能性があるため、その前の損傷である背掛けリップの根元折れは、重要なクライテリアとして考えることができる。

4.4 まとめ

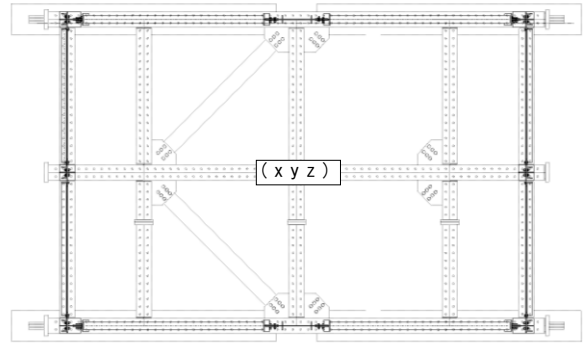
本章では、鋼製下地在来工法天井の動的応答に関して論じるために、典型的な平面の天井を対象に振動台実験を実施した。3章で提案した天井の水平剛性評価法により推定される試験体の水平剛性および固有周期を用いて、応答スペクトル法による天井面の応答評価を行った。また、3章の詳細解析モデルを用いて各部位の復元力特性を定義することで非線形応答解析を行った。数値解析結果を振動台実験の結果と比較することで、本モデルの妥当性を示した。以下に結果をまとめる。

1. 比較的大きな天井においても前章で提案した水平剛性評価法が適用できる。
2. 吊ボルトの復元力特性は、天井下地における各部位の復元力特性を定義し、並列と直列の関係をを用いた水平バネの組み合わせによって表すことができる。
3. ハンガーおよび野縁受けの復元力特性は、理論的に定義することが可能である。背掛けおよび腹掛けクリップに関しては、詳細解析の結果に寄るところが大きいですが、脱落耐力およびすべり耐力は要素実験のそれと概ね対応していると考えられる。なお、クリップのすべり耐力には動摩擦力の適用が考えられる。
4. 本力学モデルによる応答解析結果が実験結果をよく捉えていたことから、本力学モデルによる非線形応答解析の有効性を示した。
5. 背掛けクリップの根元折れは、複数のクリップが損傷・脱落するような悲劇的な状態に繋がる重要なクライテリアである。

Chapter 4
Figures and Tables



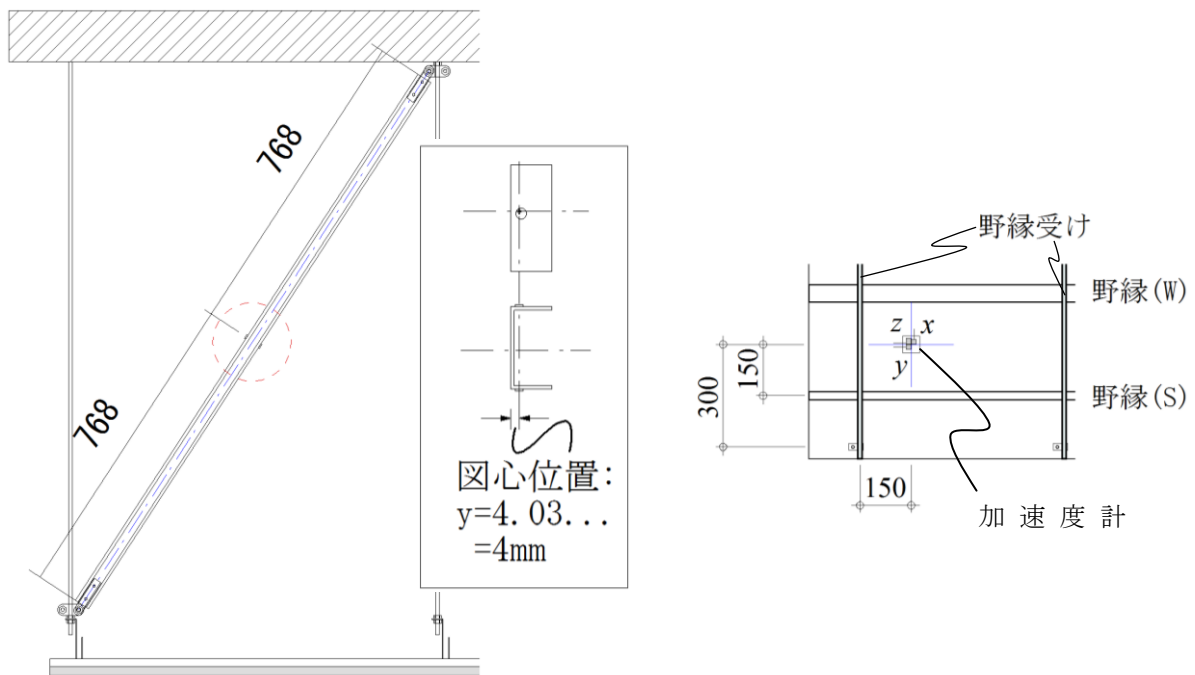
振動台フレーム上部



振動台フレーム底部

計測器 凡例	
■	ブレース軸力(ひずみゲージ)
SE (x y z)	加速度計(カッコ内は計測方向)
↔	ワイヤー変位計(矢印は計測方向)

b) 振動台および鉄骨フレームの加速度計測位置



c) 振れ止めの軸ひずみ計測と天井面の加速度計位置

図 4.2 試験体図と計測器配置

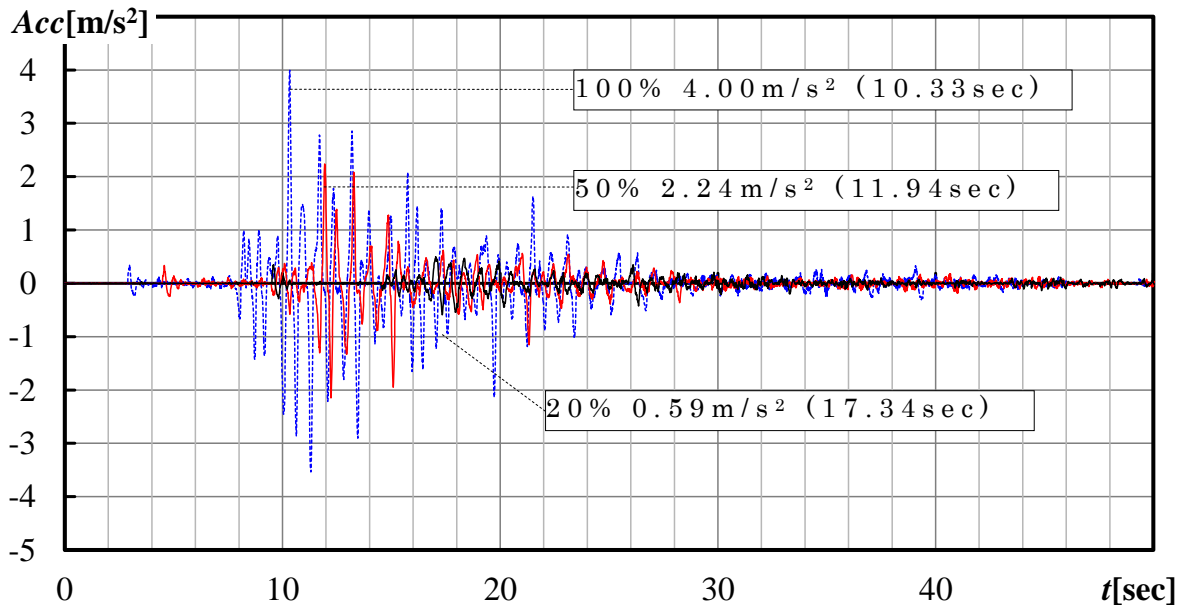


図 4.3 振動台フレーム底部 x 方向 計測加速度波形

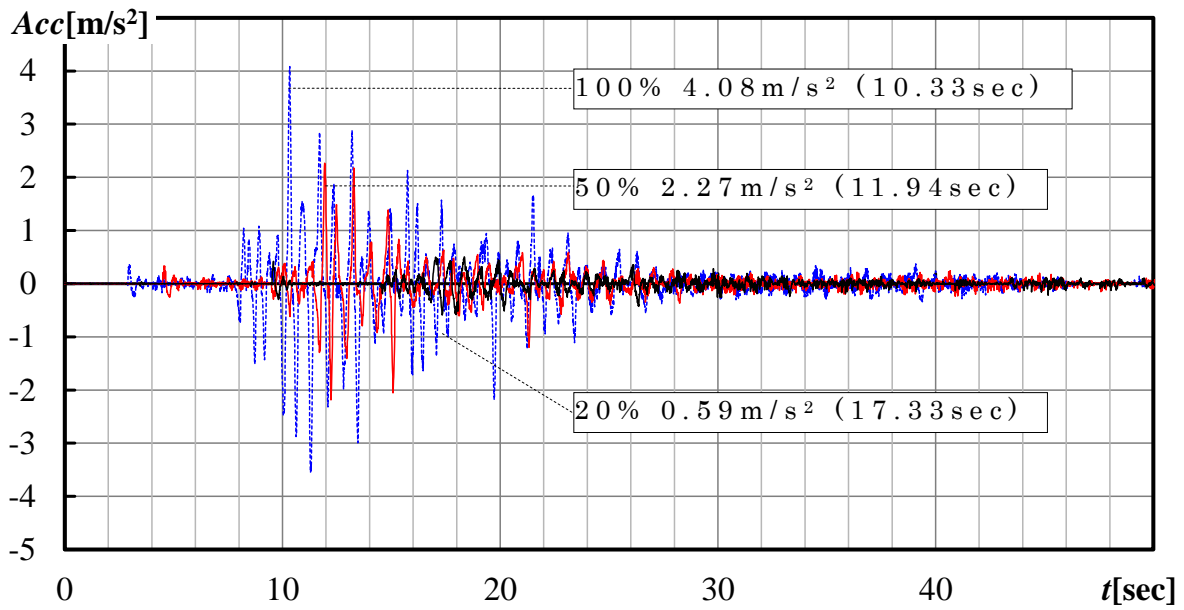


図 4.4 振動台フレーム頂部 x 方向 計測加速度波形

表 4.1 加振スケジュール

加振 No.	入力波	メモ
1	E-defense 2009 5層鋼構造建物実大振動 実験 非制振 鷹取波 20%時 R階床応答 加速度波形 20%	
2	E-defense 2009 5層鋼構造建物実大振動 実験 非制振 鷹取波 20%時 R階床応答 加速度波形 50%	
3	E-defense 2009 5層鋼構造建物実大振動 実験 非制振 鷹取波 20%時 R階床応答 加速度波形 100%	クリップの脱落 (北側ブレース近傍)

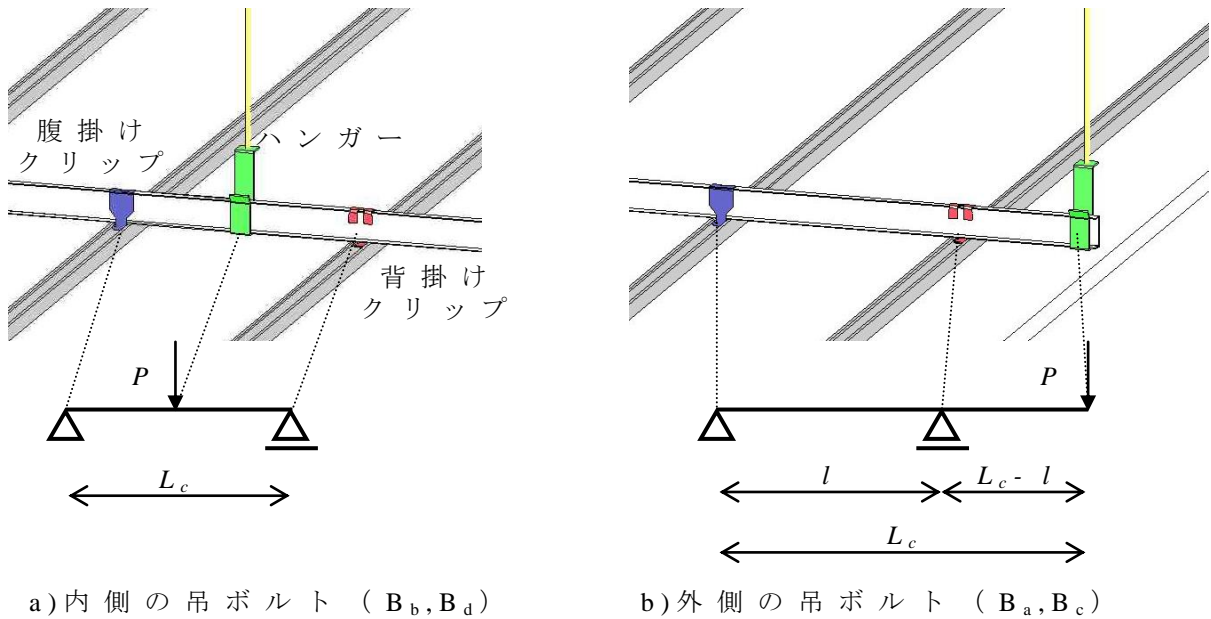


図 4.5 野縁受けの境界条件および L_c の定義

表 4.2 各吊ボルトの水平剛性および試験体の水平剛性

記号	B _a	B _b	B _c	B _d
位置	外側	内側	外側	内側
L_b	0		1370	
L_c	435	300	435	300
$Open K_s$	10.37	17.30	0.04	0.05
$Close K_s$	10.85	26.18	0.04	0.06
$Ave K_s$	10.61	21.74	0.04	0.05
K_p	1.07	1.07	0.07	0.07
本数	4	6	10	15
K_{theory}	186.60			
T_{theory}	0.28			

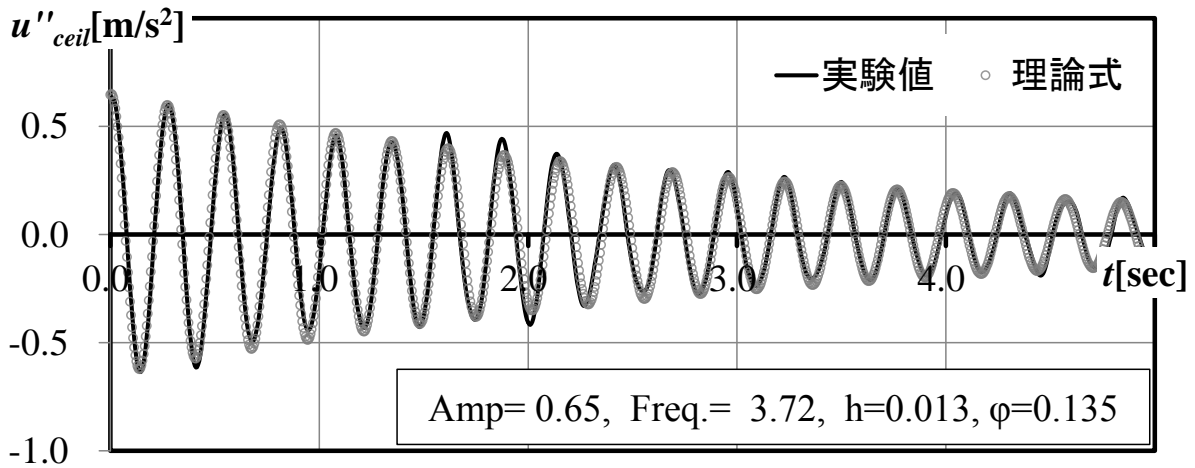


図 4.6 自由振動の応答加速度波形を用いた固有周期の同定

表 4.3 固有周期の推定値と実験値の比較

	推定値[sec]	実験値[sec]	誤差[%]
固有周期	0.28	0.27	6

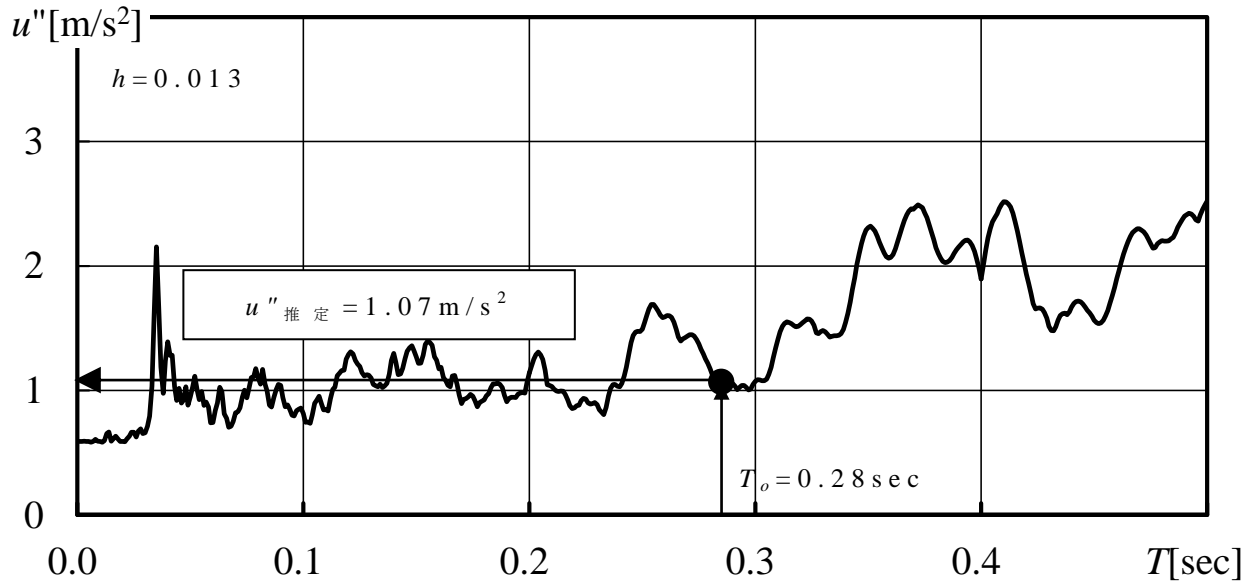


図 4.7 加速度応答スペクトル(加振 No.1)

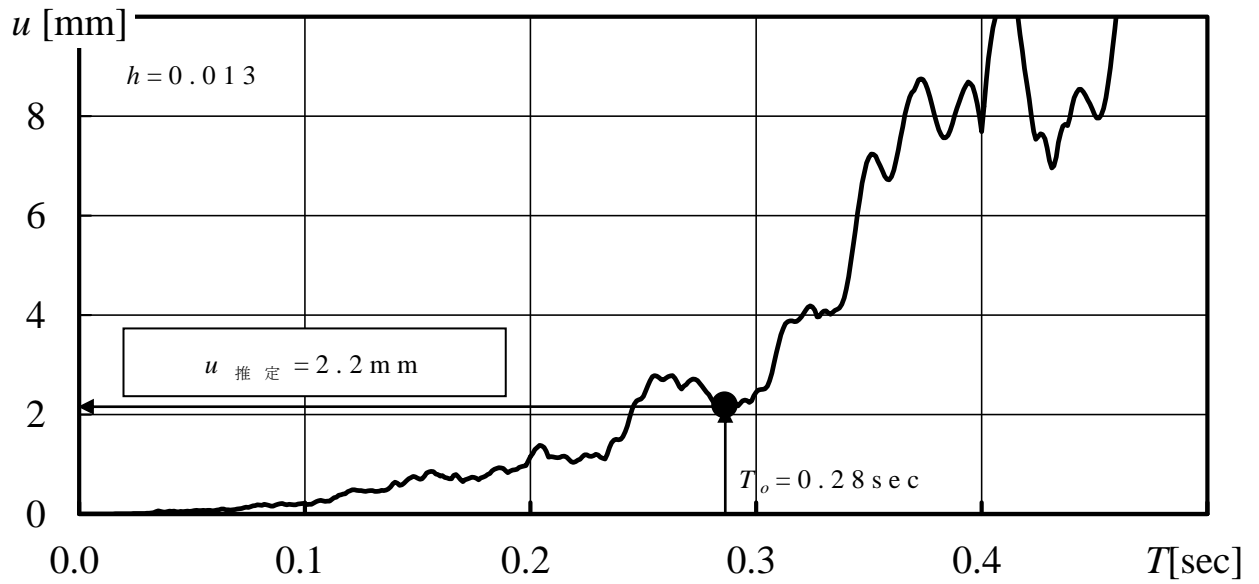
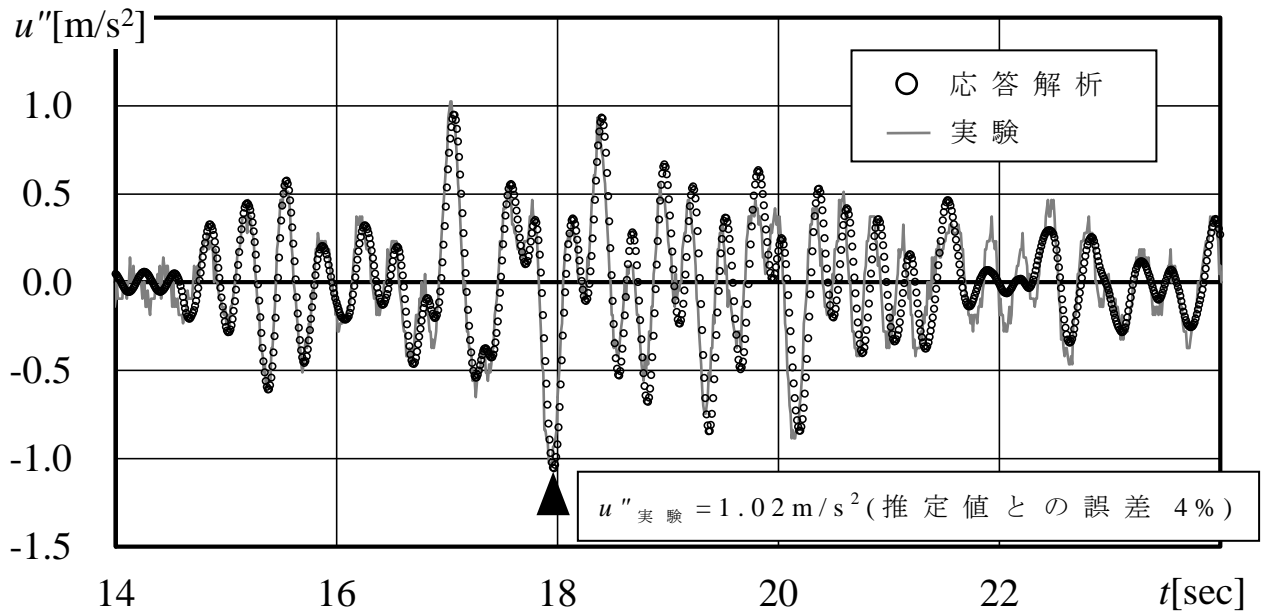
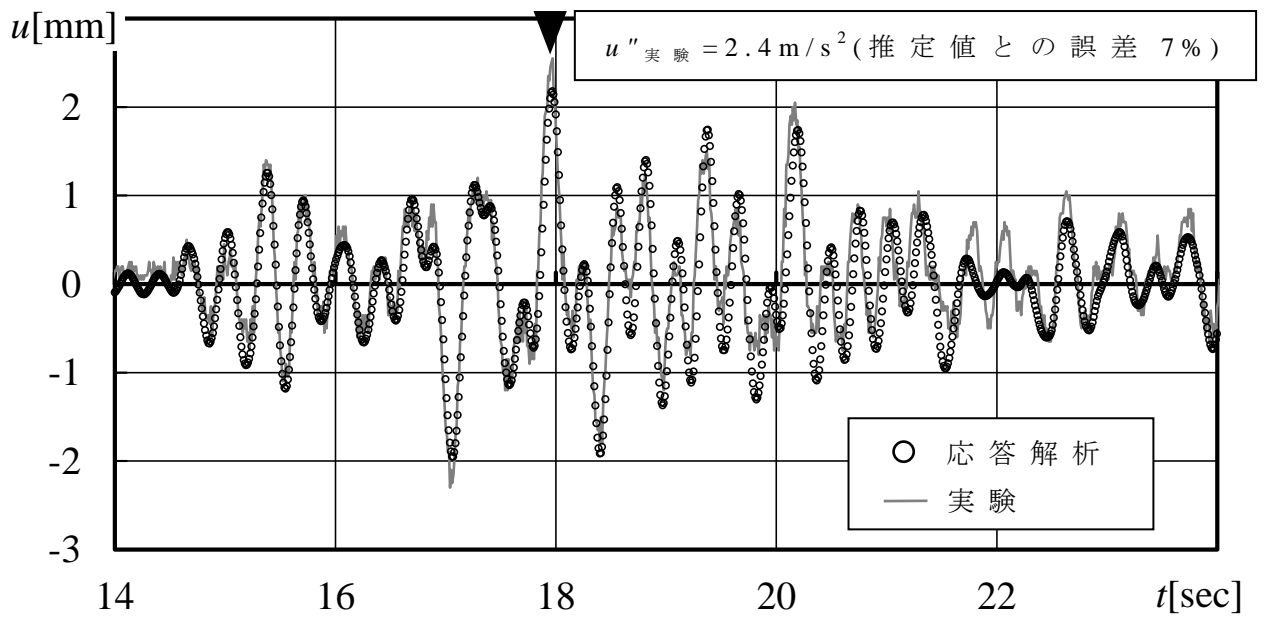


図 4.8 変位応答スペクトル(加振 No.1)

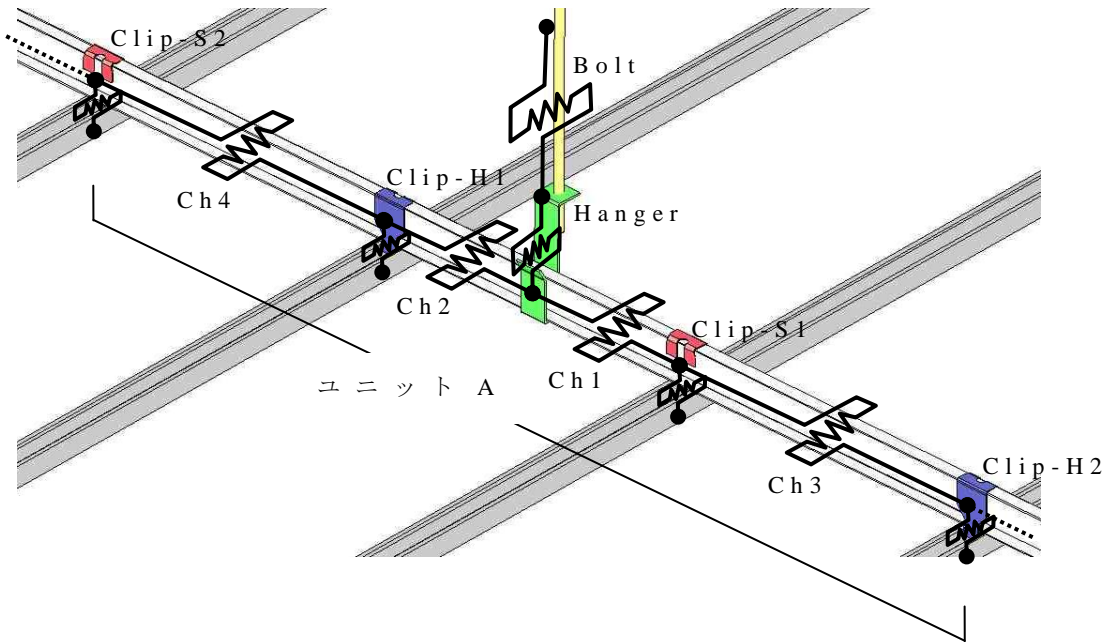


a) 天井面応答加速度

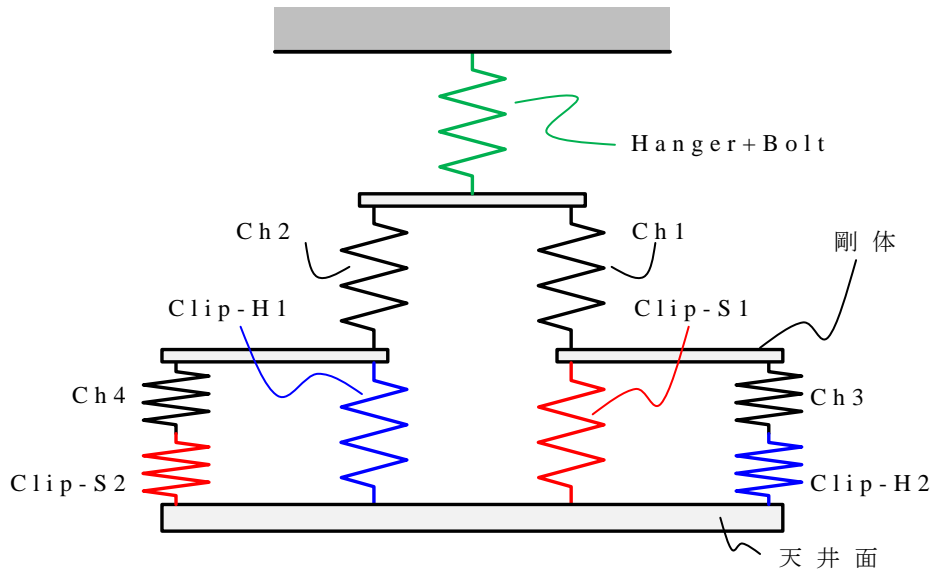


b) 天井面応答変位

図 4.9 弾性応答解析結果と実験結果の比較

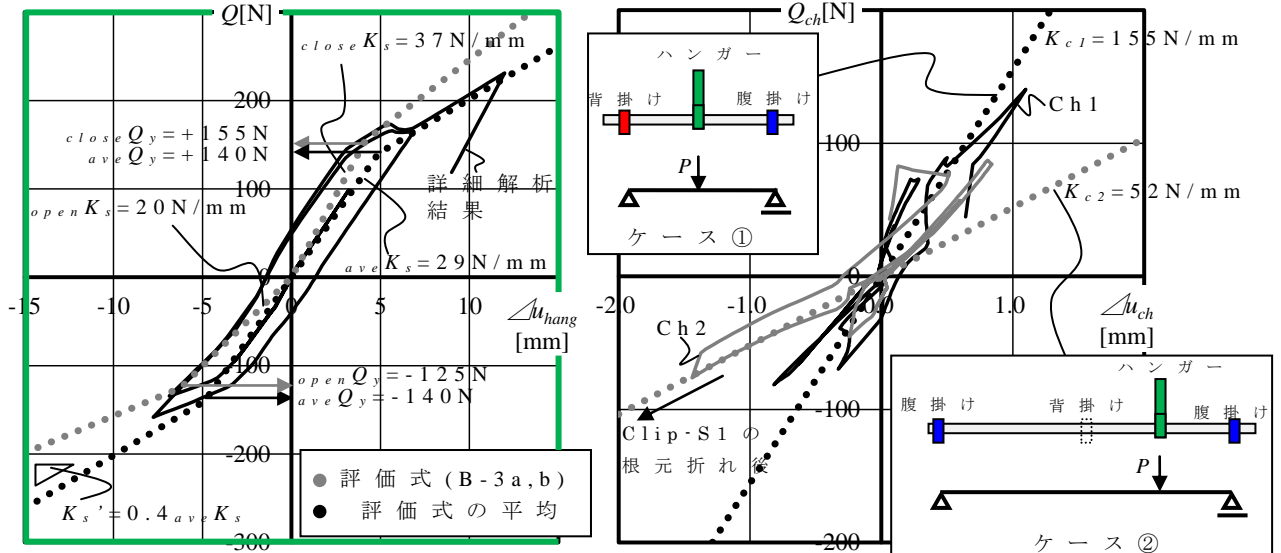


a) 天井下地の各部位を水平バネに置換



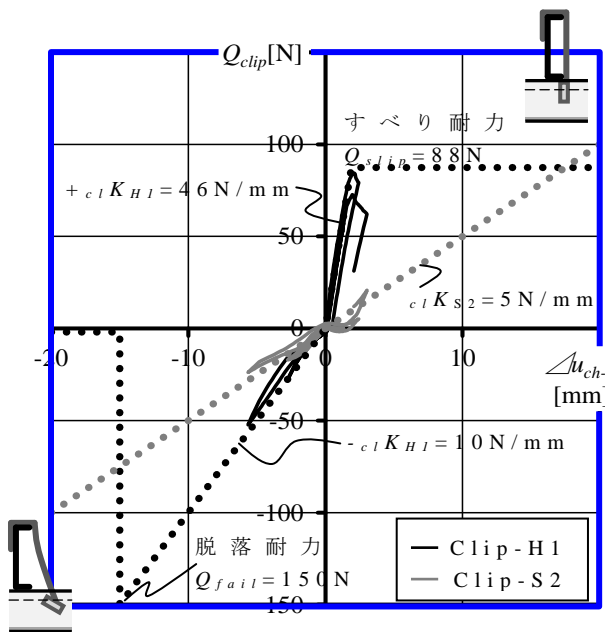
b) 力学モデル概念図

図 4.10 吊ボルト 1 本の復元力特性に対する力学モデル

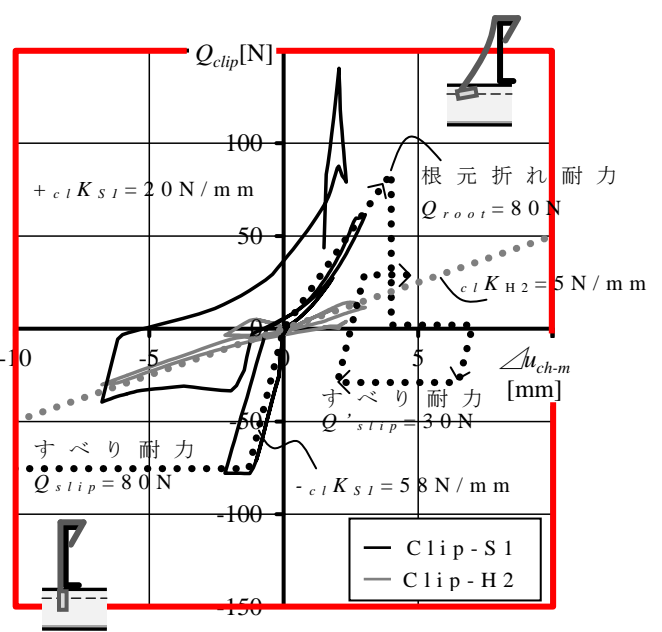


a) ハンガー

b) 野縁受け



c) 腹掛けクリップ



d) 背掛けクリップ

図 4.11 吊ボルト B_b における各部位の復元力特性

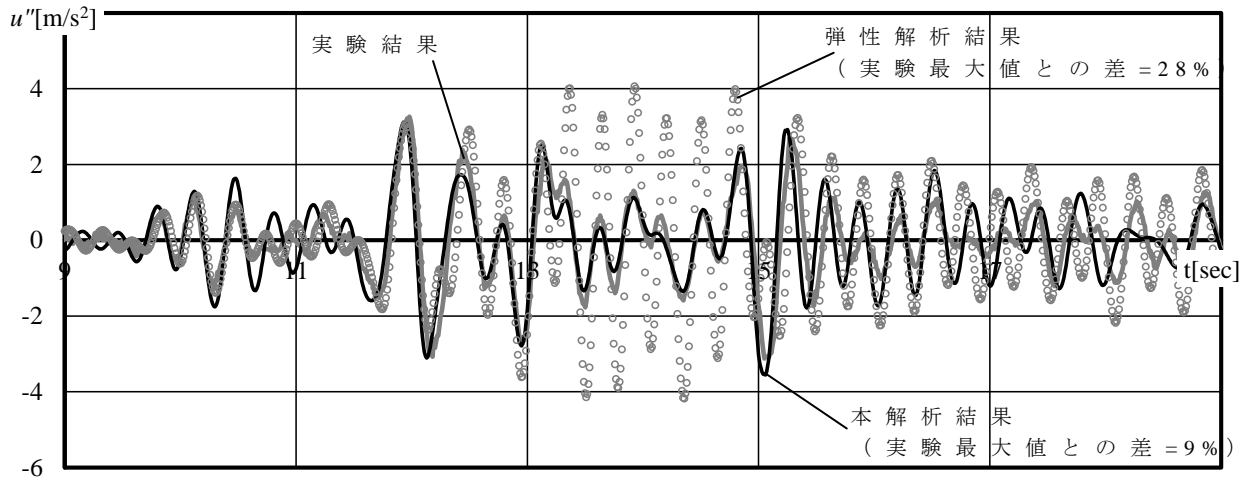


図 4.12 天井面の応答加速度波形 (加振 No.2)

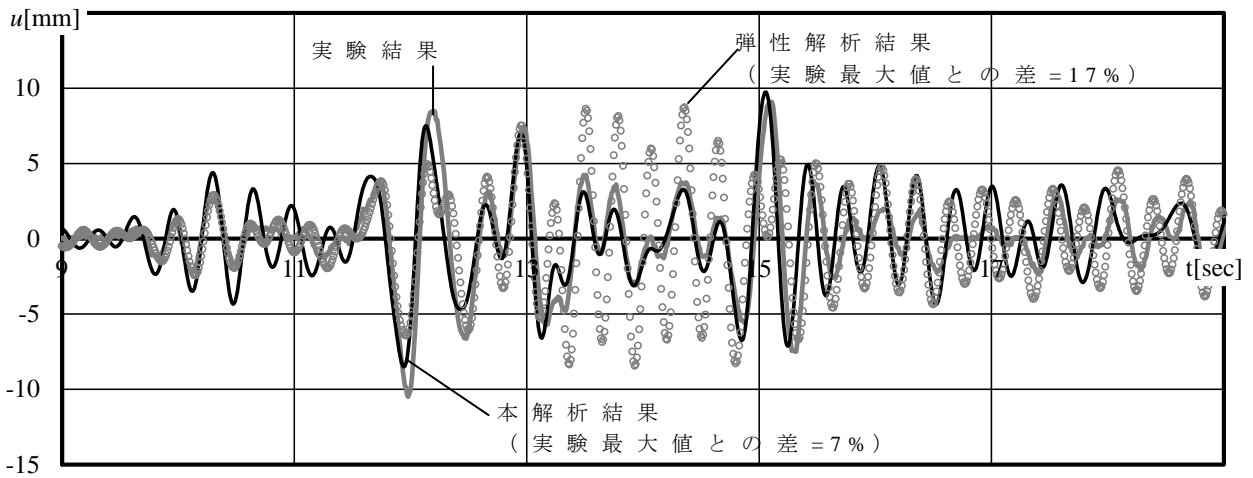


図 4.13 天井面の応答変位波形 (加振 No.2)

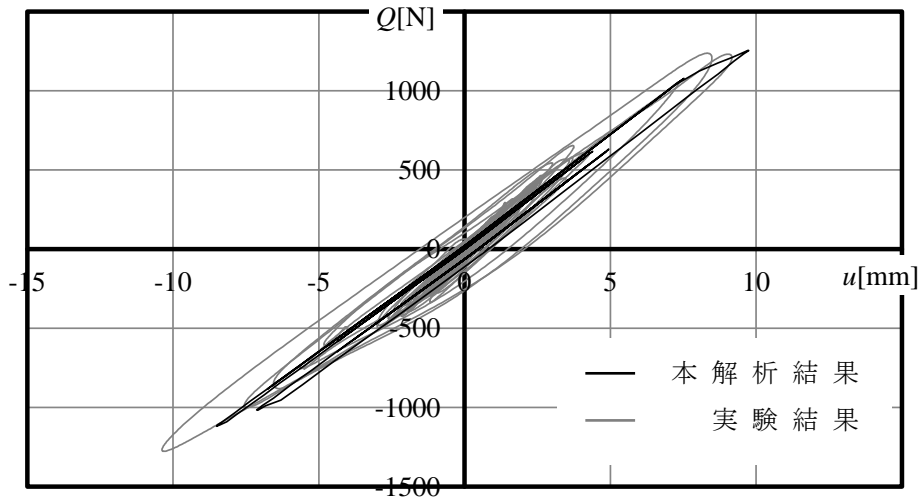
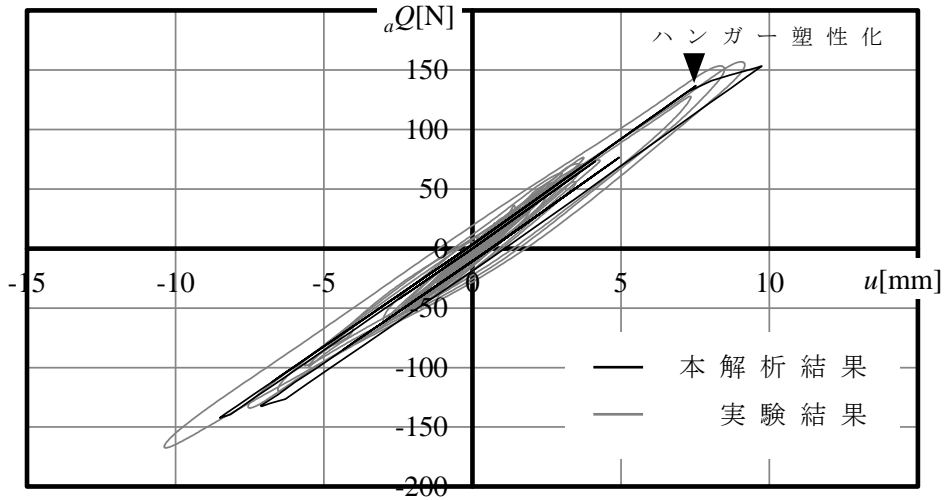
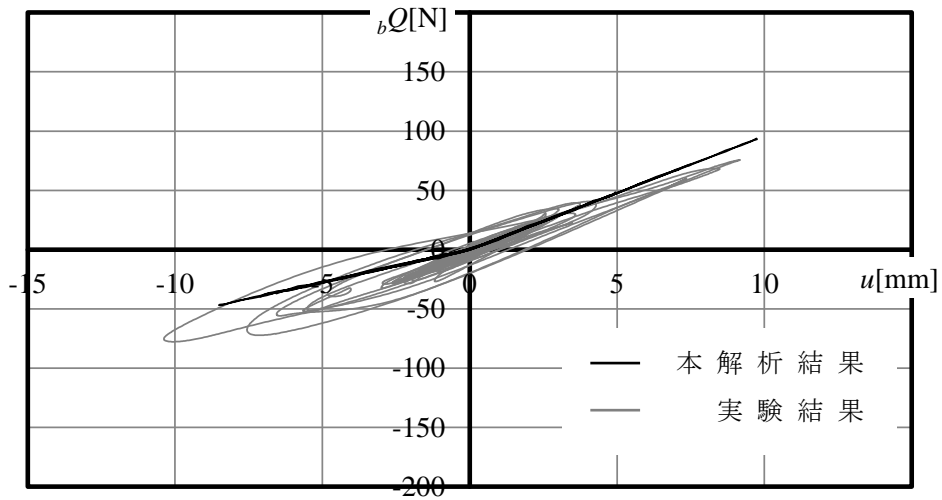


図 4.14 天井システムの復元力特性 (加振 No.2)



a) 内側の吊ボルト (図 4.2 中 B_b の 1 本分)



b) 外側の吊ボルト (図 4.2 中 B_a の 1 本分)

図 4.15 振れ止めのある吊ボルトの復元力特性 (加振 No.2)

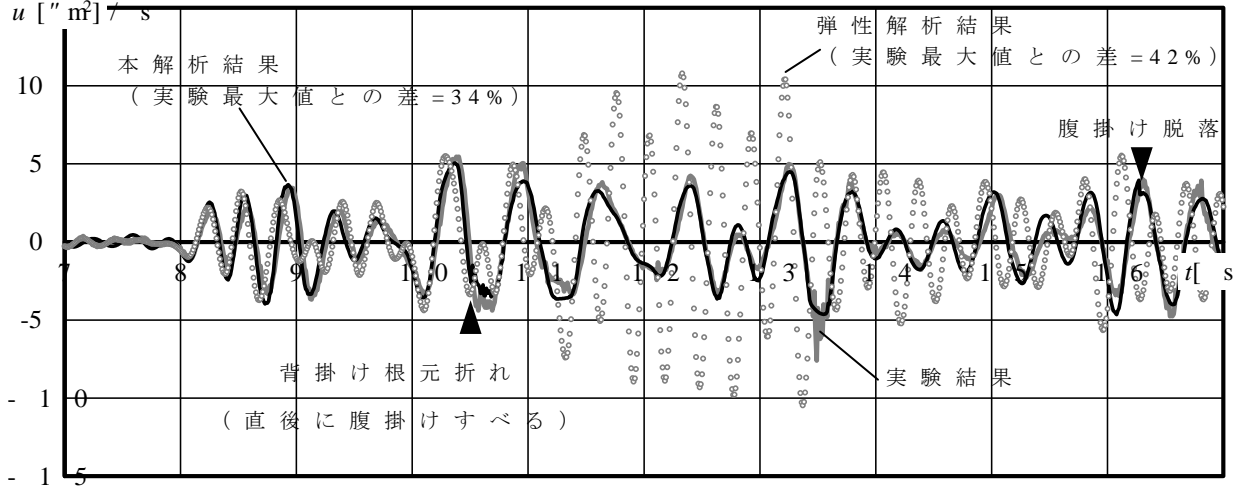


図 4.16 天井面の応答加速度波形 (加振 No.3)

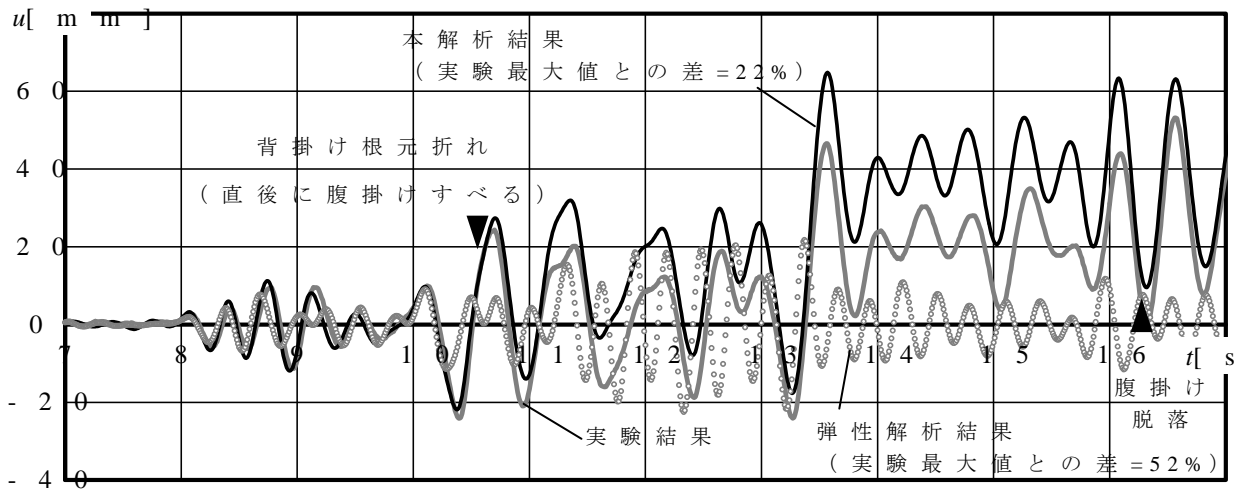


図 4.17 天井面の応答変位波形 (加振 No.3)

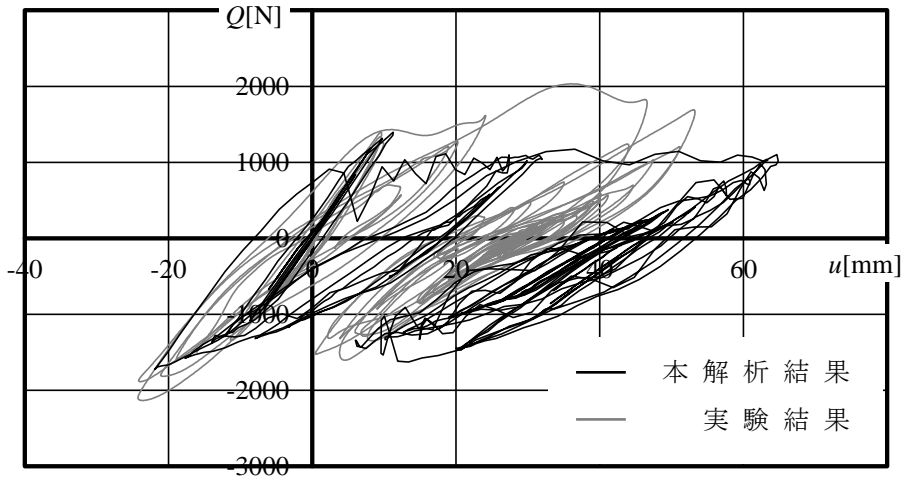
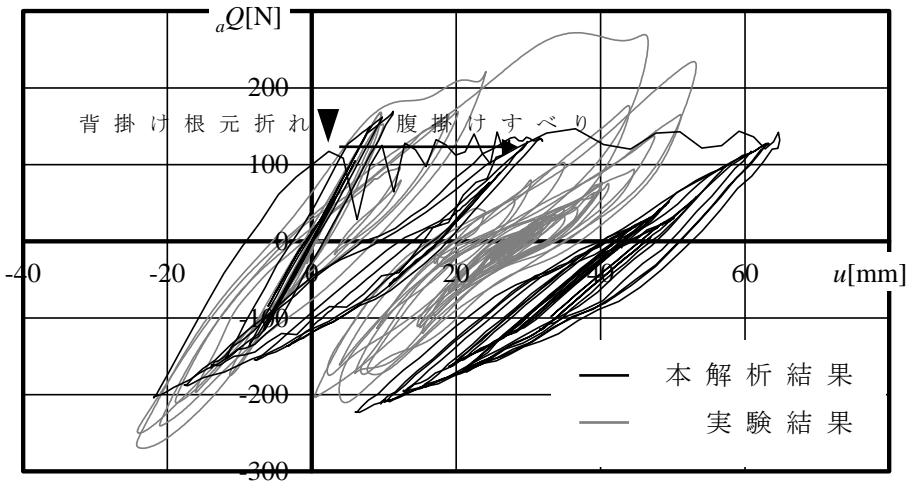
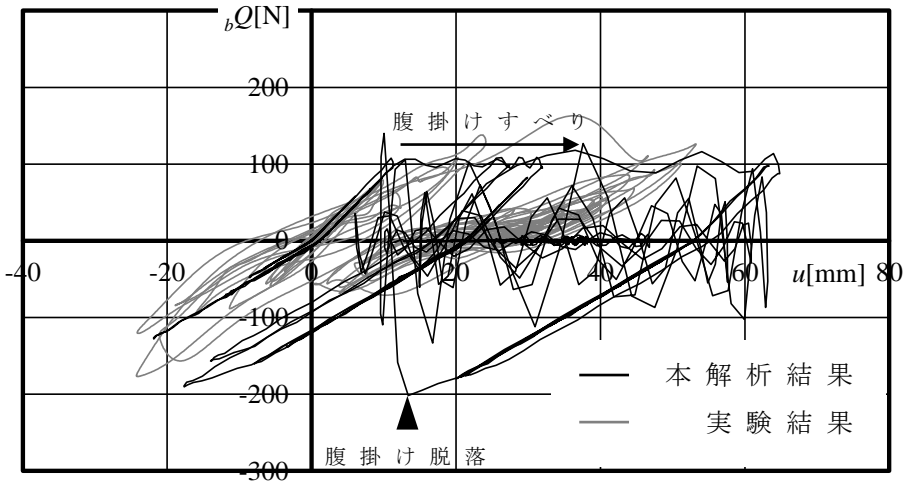


図 4.18 天井システムの復元力特性 (加振 No.3)



a) 内側の吊ボルト (図 4.2 中 B_b の 1 本分)



b) 外側の吊ボルト (図 4.2 中 B_a の 1 本分)

図 4.19 振れ止めのある吊ボルトの復元力特性 (加振 No.3)

第5章 クリップ接合部の耐力のばらつきを考慮した 天井システムの損傷評価

5.1 はじめに

5.2 天井の簡易解析モデルの構築

5.2.1 接合部強度の不確定性

5.2.2 簡易解析モデルの構築

5.3 モンテカルロ法を用いた天井の損傷評価

5.3.1 損傷評価の手順

5.3.2 解析結果とその妥当性

5.4 まとめ

Figures and Tables

5.1 はじめに

建物の主要構造体を被覆するように存在する非構造物は、地震による建物の応答次第で剥離や脱落、落下といった様々な損傷が発生し、最悪な場合には落下物による人命損失も考えられる。非構造物の損傷程度が大きい建物が多い場合には、崩壊した非構造部材の瓦礫により都市機能の低下および経済的損失といったリスクも考えられる（図 5.1）。こうしたリスクはニュージーランドの地震被害⁸⁾⁹⁾でも顕在化し、日本だけでなく世界共通の問題となりつつある。

4章で明らかにしてきた天井の耐震性を定量的に検討できるような方法が重要になってくるが、実際の鋼製下地在来工法天井では、様々な不確定要素が考えられる。施工誤差による接合部耐力のバラつき、吊ボルトの固定方法、設備関連機器との関係による寸法・部材配置の不均一さ、製造会社の違いによる部材の形状や機械的性質の違い等、これまで天井は非構造材であったことから建築の主要構造体のような耐震性配慮した管理体制がなかったため、設計図や部位の耐力などについての統計データは非常に少ない³⁰⁷⁾³⁰⁹⁾。

そこで初歩段階として、天井落下の主要な要因であるクリップの損傷に注目し、鋼製下地在来工法天井の耐震性を確率的にまた巨視的に捉えることを試みる。ここでは、天井の機能維持を第一の目標として、天井の落下過程で初期に見られる斜振れ止め直近のクリップの損傷を天井のクライテリアとする。天井の耐震性は、クリップの水平耐力のばらつきを考慮することで、モンテカルロ法によりフラジリティ曲線として表すことで検討される。

5.2 天井の簡易解析モデルの構築

5.2.1 接合部強度の不確定性

<実験概要>

2章ですでに行ったクリップ接合部の要素実験をもとにクリップの耐力のばらつきについて検討する。対象とする要素実験は野縁方向に水平に正負1サイクル載荷する実験である。鋼製下地天井の在来工法で用いられるクリップには腹掛けと背がけの2種類の掛け方があるので、その両方についてそれぞれ検討を行う。平均的な耐力に対するばらつきを明らかにすることに主眼を置き、試験体数は背掛け・腹掛け各々30体ずつの計60体とした³⁰⁸⁾。

<実験結果>

図5.2にクリップ接合部の荷重変位関係を、腹・背掛けクリップで各々30体あるうち一例として5体ずつの実験結果を示す。クリップは載荷する方向によって異なる最大耐力を示す。クリップが野縁受けに接触する方向に野縁が変位するとき、クリップは約0.08kNのすべり耐力を保つようにして野縁上をすべる(図5.2中の①)。この値は背掛け腹掛けともに概ね等しい。もう一方は、クリップが野縁受けから離間する方向に野縁が変位するとき、腹掛けはおよそ0.20kNで脱落し、背掛けはおよそ0.30kNを最大耐力に脱落せずにクリップが野縁ー野縁受け間に残る(図5.2中の②)。本研究では、対象とする天井に対してどの程度の損傷が発生するのかを巨視的に検討することに主眼を置いているため、天井の損傷・落下の主な原因であるクリップの明確な耐力として、背掛けと腹掛けのすべり耐力 F_{slip} 、最大耐力 $F_{failure}$ を採用する。 $F_{failure}$ 以降クリップの接合能力が著しく低下するため、 $F_{failure}$ はクリップの脱落耐力を意味する。また、繰り返し載荷の履歴によるクリップ接合部の剛性や耐力への影響などの他の作用については、ここでは考慮しないものとする。

実験結果より得られた各最大耐力(F_{slip} , $F_{failure}$)を表5.1に示す。観測された各耐力のバラつきに対して、工学的によく用いられる対数正規分布の適合検定を X^2 検定により行った。有意水準を5%として検定を行った結果を表5.2に示す。観測と対数正規分布による近似値から得られる X^2 値は表中で「 X^2 合計」と示し、 X^2 分布表から得られる指標値を表中で「 X^2 理論値」と示している。各耐力において X^2 理論値より X^2 合計が小さいことから、概ね対数正規分布で近似できると判断してもよいことがわかる。また、この検定にともなって得られた各耐力の対数正規分布における平均値と標準偏差も表5.2中に示してある。掛け方によらず、すべり耐力はおよそ0.08kN程度で標準偏差が非常に小さく、概ね決定的な耐

力であると考えられる。最大耐力は背掛けが腹掛けに比べて約 1.4 倍あり、標準偏差はすべり耐力に比べて大きい。以上の結果を用いて、各耐力の分布を累積分布で示したものが図 5.3 である。実験で観測された分布（図 5.3 中の△または○印）に対して、近似線である対数正規分布（点線または実線）が概ね一致している。以上から、クリップ接合部の各耐力は対数正規分布に従うものとして後述のモンテカルロシミュレーションに用いることとする。

5.2.2 簡易解析モデルの構築

モンテカルロシミュレーションによる解析では、様々な不確定要素の組み合わせを乱数により生成しては数値解析を実行する工程を多数回繰り返す。このような解析に対して、3章で提案したような複雑な数値解析モデルを使った天井の数値解析を行えば長時間を要することは必至であり、実用的とは言い難い。そこで、天井の簡易な数値解析モデルを考える。はじめに述べたが、実際の鋼製下地在来工法天井では様々な不確定要素が考えられる。クリップや振れ止めの位置関係、野縁および吊ボルトの間隔など天井下地の寸法に関するだけでも複数考えられる。こうした項目にも対応する数値解析モデルとして、後の図 5.8 で示すことになるが、天井を2次元の平面なモデル（以下、平面モデルと称す）として扱うことが最初に考えられる。この平面モデルによる数値解析を可能なものとするために、クリップ接合部を図 5.4 に示すような2次元の平面なモデルで巨視的に表現することを提案する。ただし、本章では不確定要素を含めた天井の耐震性を考えるための枠組みを構築することを主な目的としているため、ここからは初歩的ではあるがクリップの耐力の不確定性のみを考慮して検討を行う。

図 5.4 に示すモデルは野縁と野縁受けを結ぶ2つの梁要素 A,B で構築される。両要素とも、圧縮のみに抵抗する完全弾塑性型の梁要素である。降伏点には、要素 A においてはすべり耐力を、要素 B においては最大耐力を採用している。要素 A では要素 A の野縁受け側端部と野縁受け間の相対変位を考慮することで接触および離間を判定する。この解析モデルによって得られた荷重変位関係を実験のものと比較した結果を図 5.5 に示す。ここでの解析モデルの耐力には表 5.1 に示した平均値を採用している。このモデルでクリップ接合の挙動を概ね再現できることが分かる。解析の結果が、最大耐力以降で一部実験の挙動と異なっているが、クリップ接合が接合部としての支持機能を保持する限界点が把握できれば、初期状態の天井システムがどの程度の水平力ですべり出し、クリップが脱落し始めるのかということを確認できるので、今回はこれ以降の劣化挙動は対象外としている。

5.3 モンテカルロ法を用いた天井の損傷評価

5.3.1 損傷評価の手順

モンテカルロシミュレーションによって対象とする天井の損傷評価を行う手順を図 5.6 に示す。まず始めに、(1) 1つ1つのクリップ接合部のすべりおよび最大耐力 (F_{slip} , $F_{failure}$) が、要素実験で取得したクリップの各耐力の平均値および標準偏差に基づく対数正規分布に従うとし、各耐力を乱数により生成する。このとき、生成するものは耐力のみで剛性は変動させずに一定なものとして扱う。(2) 次に、生成されたクリップ耐力を持つ天井の 2 次元解析モデルを用いてプッシュオーバー解析を実行する。ここで、クリップのすべりおよび最大耐力時を限界状態として定義し、各状態で天井全体に作用する水平力 Q_{limit} を算定する。(3) 最後に、水平力 Q_{limit} を静的な地震力(慣性力)として考え、これを天井質量 m および重力加速度 g で除すことで震度 k_{limit} ($k_{limit} = Q_{limit} / (mg)$) を算出する。震度 k_{limit} に重力加速度 g を乗じたものは天井の応答絶対加速度に相当する。天井の下地に作用する慣性力は天井面の応答絶対加速度に天井質量 m を乗算することで得られるが、天井面の応答絶対加速度は天井の固有周期と応答スペクトルによって評価することが可能であるため、加速度で天井の耐震性を考えることは 1 つの方法である。この(1)~(3)の過程を多数回試行し、(4)得られた震度 k_{limit} を累積密度関数として集計することで、天井の fragility 曲線を得る。

損傷評価の対象とする天井は、2009 年 E-defense で行われた 5 層実大鋼構造建物非制振実験の際に R 階スラブから吊られた天井¹³⁹⁾である(図 5.7)。この試験体の規模は 4500mm×6500mm で、質量はおおよそ 585kg である。今回、天井の損傷評価を行うにあたり、クリップの損傷が顕著に現れる野縁方向(X 方向)に限定して検討を行う。評価検討用の解析モデルは、この天井対象に 2 次元の平面モデルとして構築される(図 5.8)。このモデルでは、野縁および野縁受けに梁要素を、石膏ボードにはシェル要素を適用しており、野縁—野縁受けの交差する箇所には先述した簡易的なクリップモデルが設置されている。また、本モデルでは、斜め振止めが取り付けられている吊ボルトの位置で、野縁受けがピン支持されている(図 5.8 中▲の箇所)。以上の解析モデルを用いてモンテカルロシミュレーションで試行を行う。天井は非線形システムであるため多数回の試行が求められるが、ここでは震度 k_{limit} の平均値に対するばらつきを明らかにすることに着目しているため、試行回数は 500 回程度とする。天井が弾塑性挙動を呈するために、損傷評価過程で震度を算出する方法がいくつか考えられる。まず、プッシュオーバー解析で得られた天井システムの荷重変位関係の一例を図 5.9 に示す。天井は正方向载荷において、まず 6 箇所の斜振れ止め近傍で腹掛けクリップがすべり(図中 e1)、次にすぐ隣の背掛クリップが最大

耐力に達する(e2)。同様に負方向载荷時には、まず斜振れ止め近傍の背掛クリップがすべり(e3)、次にすぐ隣の腹掛クリップが最大耐力に達して脱落する(e4)。ここで、すべりおよび脱落時の震度を求めるとき、各水平力 Q_{slip} , Q_{fail} を mg で直接除して求める方法と、一定則に基づき等価な震度 $k_{eq}=Q_{eq}/(mg)$ を求める方法が考えられる。本研究では、直接除す方法(A)とエネルギー一定則(B)に基づいて震度を求める。

5.3.2 解析結果とその妥当性

モンテカルロシミュレーションによって得られた鋼製下地在来工法天井のフラジリティ曲線を実験結果と比較することで、本評価法の妥当性について検討する。

まず実験結果について簡単に述べる。各加振時の天井の平均応答加速度波形を図 5.10 に示す。入力波は兵庫県南部地震 JR 鷹取駅記録の 5,20,30,40%である。各加振時の天井の損傷状態および最大平均応答加速度波形は、5%時；無損傷(Max. $x''_c=0.15G$)、20%時；ほぼ損傷だがシステムは非線形化(Max. $x''_c=0.70G$)、30%時；クリップの脱落発生(Max. $x''_c=1.48G$)、40%時；天井全体落下であった。

この実験結果を方法 A による天井のフラジリティ曲線(図 5.11)と比較する。縦軸は各損傷が生ずる確率を表し、横軸は天井の応答加速度を表す。天井下地では、背および腹掛けクリップが交互に設置されているため、载荷の向き（正負）によって結果は異なる。天井の最大耐力のバラつきはすべり耐力のバラつきに比べて大きい。この傾向はクリップの各耐力のバラつきの傾向と一致していることから、天井の最大耐力のバラつきはクリップの $F_{failure}$ の標準偏差による影響が大きいことが伺える。図 5.11 で解析結果（点線および実線の曲線）と実験結果（一点鎖線）を比較する。図 5.11 中の実験結果は、図 5.10 に示した最大応答加速度値をもとに一点鎖線で示している。解析結果と実験結果の比較から、入力波が 5%鷹取波のときすべりが、20%鷹取波のとき既にクリップの脱落が生じる結果となっている。5%鷹取波および 20%鷹取波のとき、実験では目視による天井下地の変化が見られなかったことから、解析結果による損傷評価は保守性が高い結果となることが考えられる。

次に、方法 B の妥当性について検討する。方法 B では天井システムは常に弾性として考えているため、比較する実験結果も弾性な情報で扱う必要がある。そこで、天井が弾性応答していると考えられる 5%鷹取波の結果を整数倍することで、20%鷹取波および 30%鷹取波の応答加速度値を得ることにする。なお、5%鷹取波に対する天井の応答加速度が弾性かどうかについては、天井吊もとで計測された床応答加速度を用いた応答スペクトル（図 5.12）によって検討される。初期状態における天井の固有周期(0.31sec)および減衰定数($h=0.03$)は既往の研究¹⁴⁰⁾よりすでに得られている。図 5.12 から得られる 5%鷹取波の最大応答加速度 0.14G が実際に計測された最大応答加速度 0.15G とほぼ等しいことから、5%鷹取波のとき天井は弾性応答していることが考えられる。一方で、20%鷹取波および 30%鷹取波についても同様に検討すると、20%鷹取波の時点で応答スペクトルによる最大応答値と差が生じていることから、20%鷹取波から天井システムは非弾性になっていることが考えられる。結果として、実験における弾性な情報（5%鷹取波の応答値を整数倍したもの）として、5%鷹取波：0.15G、20%鷹取波：0.60G、

30%鷹取波：0.90G と得られる。これら応答値を方法 B と比較したものを図 5.13 に示す。なお、すべりが生じるまでは天井は線形システムであるため、すべり耐力に関する曲線は図 5.11 のそれと同様である。図 5.13 によると、20%鷹取波では脱落が生じている可能性はあるが方法 A（図 5.11）のときより可能性が低く、30%鷹取波で脱落が生じると評価される。実際、30%鷹取波では複数個のクリップの脱落が観測されたことから、方法 A よりも実験結果と概ね対応していると考えられる。このことから方法 B によって得られた解析結果を応答スペクトルと併用することで、簡便に天井の損傷評価が行える可能性を示唆している。

5.4 まとめ

本研究では、2次元解析モデルとモンテカルロシミュレーションを用いて、巨視的に鋼製下地在来工法天井の fragility 曲線を示した。接合部要素実験から、クリップのすべり耐力および損傷耐力の平均値ならびに標準偏差を得た。震度の算出には2つの方法を用いたが、これらはそれぞれ異なった保守性および精度を有することがわかった。床応答スペクトルの併用により、巨視的にかつ簡便に天井の損傷評価を行うことができる可能性を示した。

本来、地震に対する構造物の耐震性の検討には時刻歴応答解析が要求される。今後、地震波の不確定性および主要構造体を考慮し、動的解析によって、天井の損傷評価をより具体的に検討する必要がある。また、本章では初歩的な天井の不確定要素としてクリップの耐力のばらつきのみを考慮したが、実際は、クリップや振れ止めの位置関係、野縁および吊ボルトの間隔などの天井下地の寸法に関する複数の要素に加え、今回は考慮に含めなかったハンガーや吊ボルトの剛性などが考えられる。こういった要素の不確定性を本章で構築した天井の平面モデルに導入すれば、より実用的な評価が可能になると考えられる。この点については、今後さらなる検討と実績を重ねる必要がある。

Chapter 5
Figures and Tables

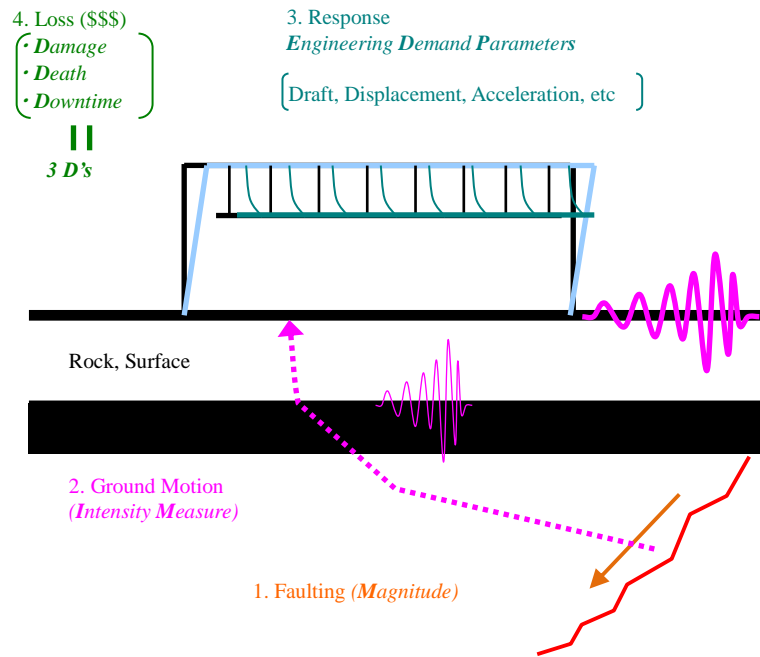


図 5.1 地震が建物に与える影響（リスクの発生過程）

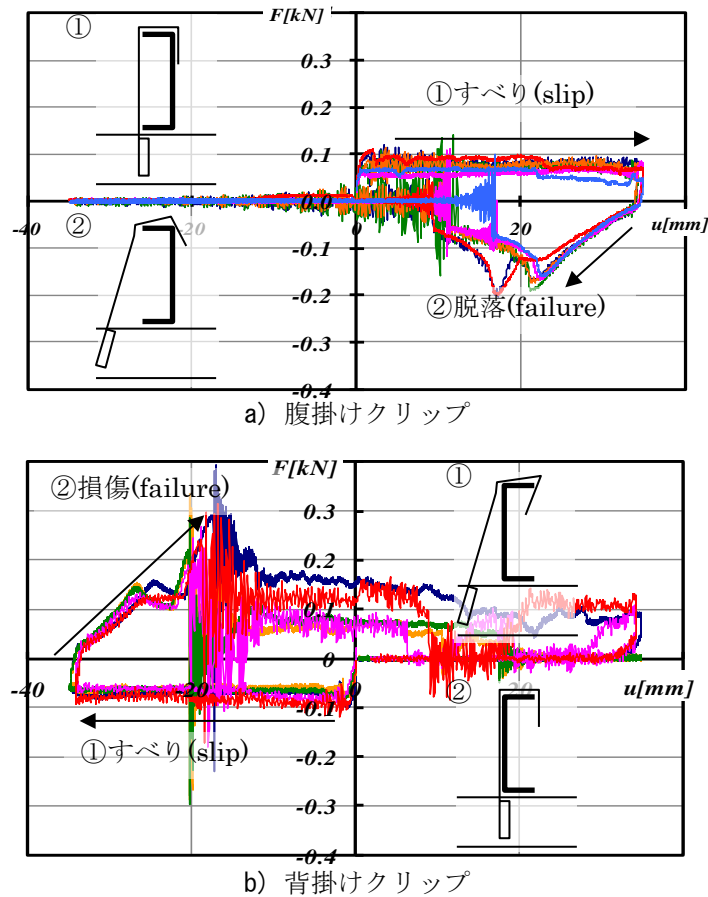


図 5.2 クリップ接合部の荷重変位関係

表 5.1 クリップ接合部の耐力

No.	腹掛け		背掛け	
	F_{slip}	$F_{failure}$	F_{slip}	$F_{failure}$
1	0.051	0.194	0.053	0.259
2	0.077	0.197	0.078	0.287
3	0.085	0.211	0.081	0.272
4	0.077	0.195	0.088	0.241
5	0.092	0.247	0.079	0.248
6	0.083	0.143	0.084	0.271
7	0.087	0.157	0.076	0.281
8	0.081	0.153	0.077	0.230
9	0.087	0.185	0.089	0.234
10	0.093	0.217	0.090	0.258
11	0.090	0.187	0.081	0.259
12	0.092	0.167	0.076	0.141
13	0.088	0.161	0.087	0.256
14	0.081	0.176	0.074	0.249
15	0.078	0.175	0.092	0.307
16	0.094	0.152	0.077	0.219
17	0.098	0.151	0.090	0.216
18	0.090	0.165	0.088	0.264
19	0.088	0.178	0.095	0.224
20	0.094	0.192	0.087	0.188
21	0.113	0.203	0.074	0.248
22	0.087	0.193	0.104	0.243
23	0.086	0.175	0.085	0.217
24	0.067	0.167	0.085	0.220
25	0.113	0.200	0.079	0.212
26	0.068	0.160	0.100	0.292
27	0.083	0.118	0.075	0.265
28	0.080	0.159	0.085	0.220
29	0.104	0.146	0.081	0.273
30	0.097	0.152	0.075	0.214

表 5.2 各耐力分布に対する X^2 検定

a) 腹掛け F_{slip}

階級	期待度数		X^2 値
	実験値	理論値	
0.000-0.040	0	0	0
0.040-0.076	3	6	1.38
0.076-0.082	6	8	0.37
0.082-0.088	8	8	0.02
0.088-0.094	7	6	0.15
0.094-0.106	4	2	1.36
0.106-0.118	2	1	4.49
X 2合計			6.39
X 2理論値			9.49
平均値*			0.087
標準偏差*			0.012

※ 対数正規分布における値

b) 腹掛け $F_{failure}$

階級	期待度数		X^2 値
	実験値	理論値	
0.000-0.144	2	7	3.14
0.144-0.166	10	10	0.00
0.166-0.188	8	8	0.01
0.188-0.210	7	5	1.26
0.210-0.254	3	1	8.56
X 2合計			1.27
X 2理論値			5.99
平均値*			0.177
標準偏差*			0.031

※ 対数正規分布における値

c) 背掛け F_{slip}

階級	期待度数		X^2 値
	実験値	理論値	
0.000-0.070	1	3	1.77
0.070-0.076	4	7	1.27
0.076-0.082	10	8	0.42
0.082-0.088	7	6	0.10
0.088-0.094	5	3	0.80
0.094-0.100	2	1	0.29
0.100-0.106	1	0	0.69
X 2合計			3.57
X 2理論値			11.07
平均値*			0.083
標準偏差*			0.009

※ 対数正規分布における値

d) 背掛け $F_{failure}$

階級	期待度数		X^2 値
	実験値	理論値	
0.000-0.215	4	6	0.76
0.215-0.238	8	10	0.27
0.238-0.261	9	8	0.11
0.261-0.284	6	4	0.77
0.284-0.307	2	2	0.14
0.307-0.330	1	0	0.79
X 2合計			2.09
X 2理論値			9.49
平均値*			0.248
標準偏差*			0.031

※ 対数正規分布における値

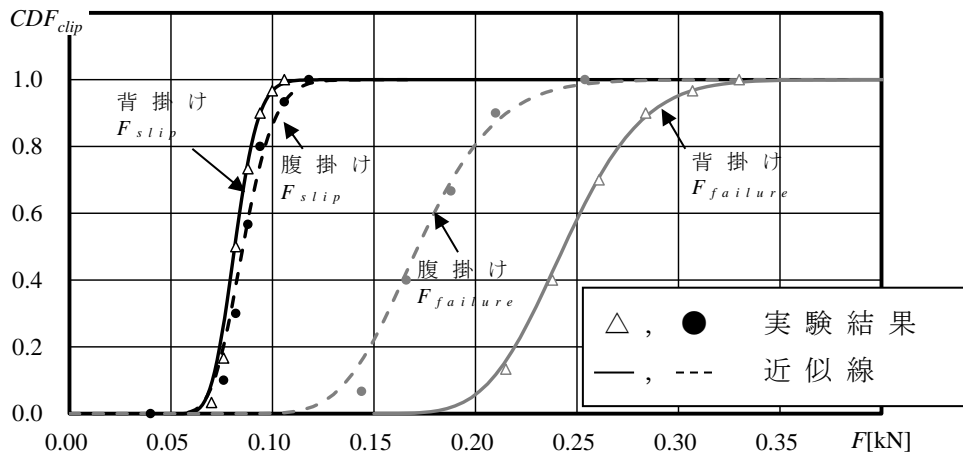


図 5.3 クリップの各耐力の累積分布図

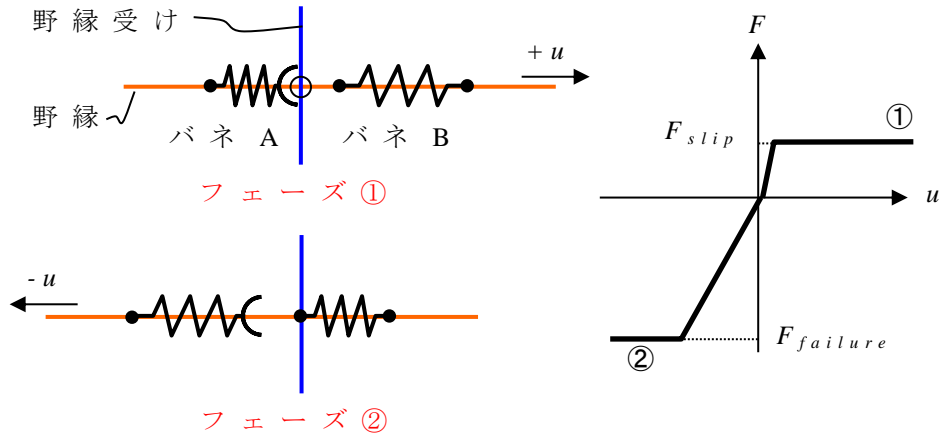
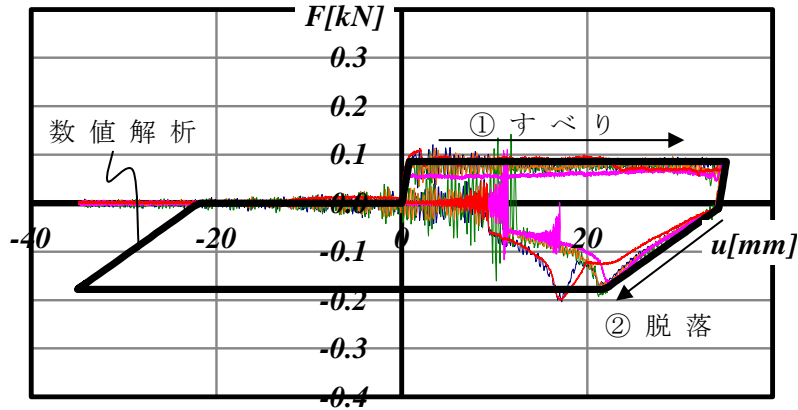
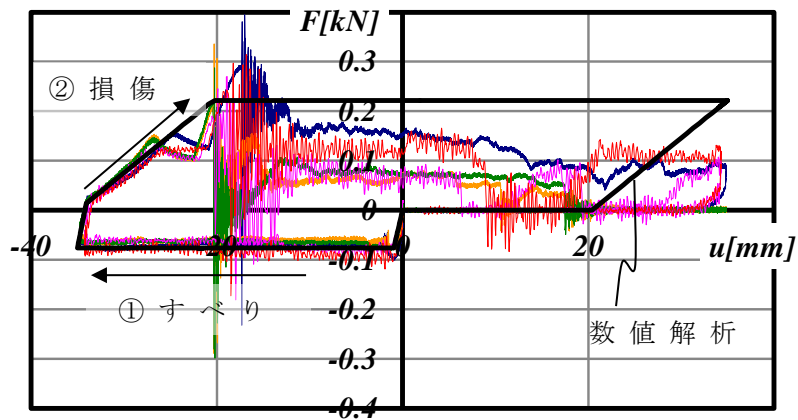


図 5.4 クリップの簡易的解析モデル



a) 腹掛けクリップ



b) 背掛けクリップ

図 5.5 解析結果と実験結果の比較

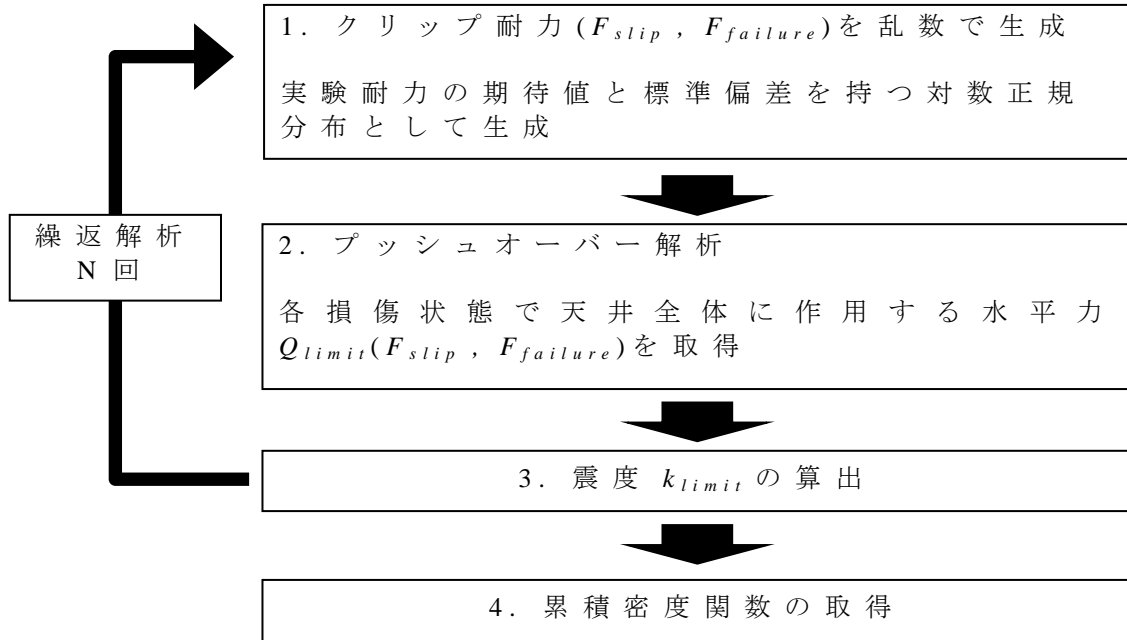


図 5.6 損傷評価の手順

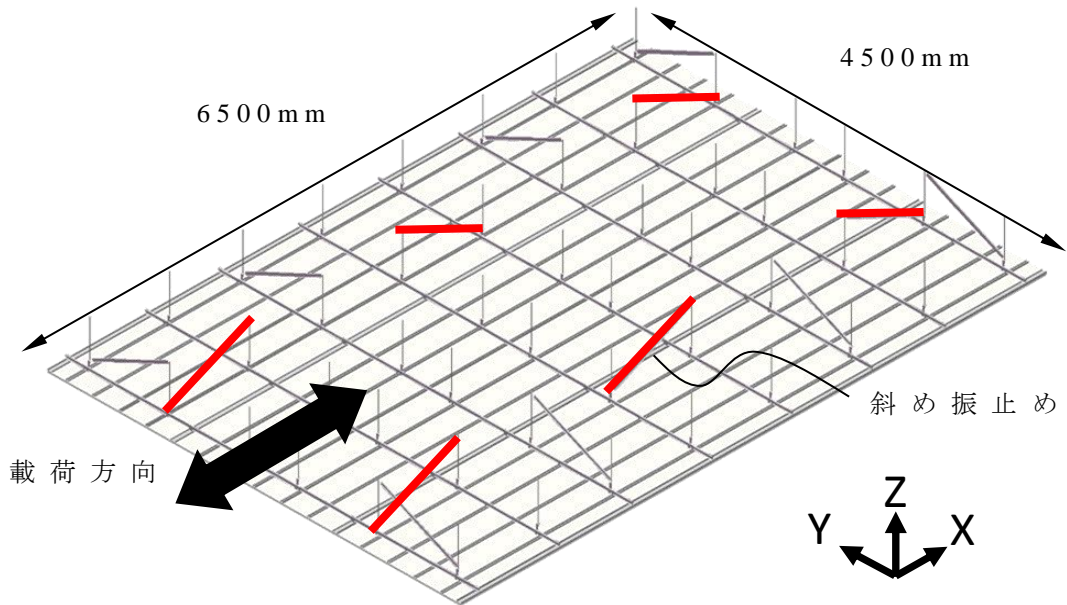


図 5.7 評価対象の天井

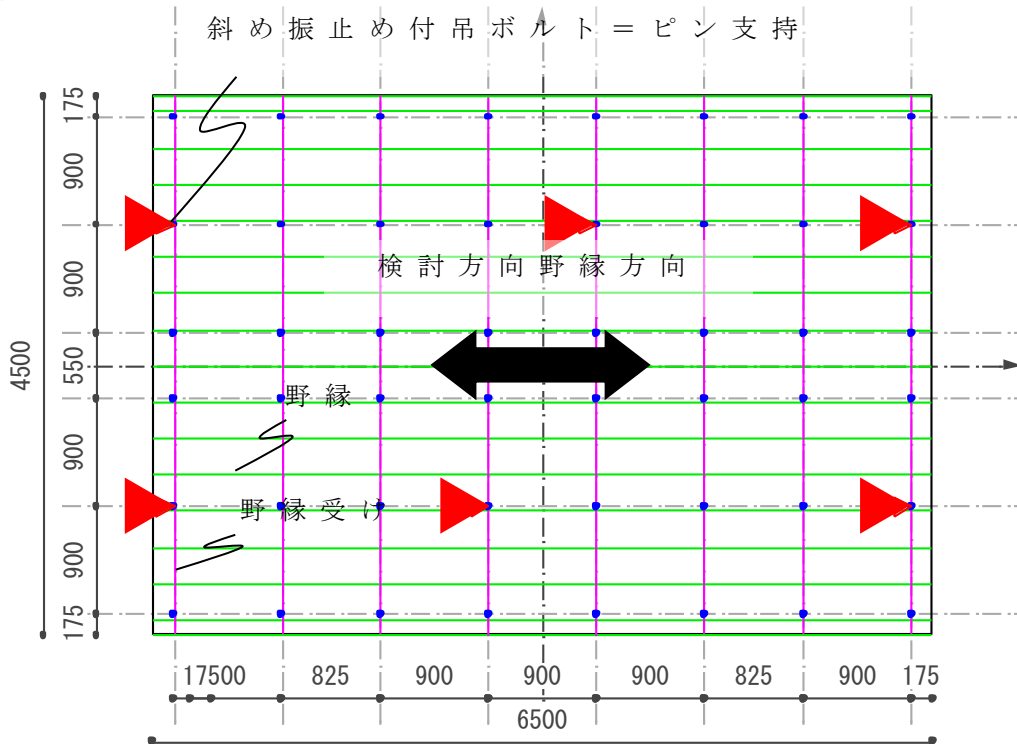


図 5.8 2次元解析モデル

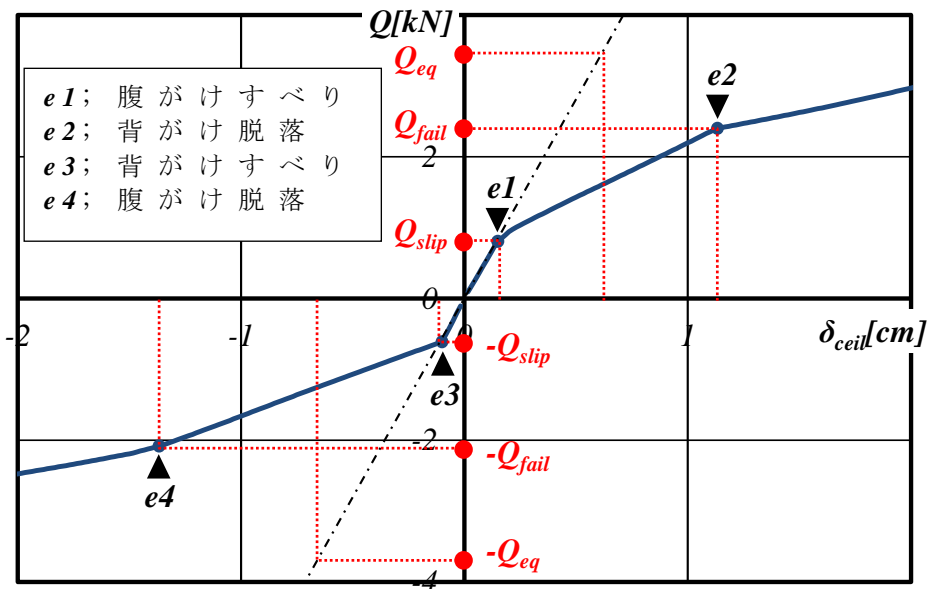


図 5.9 天井の荷重変位関係

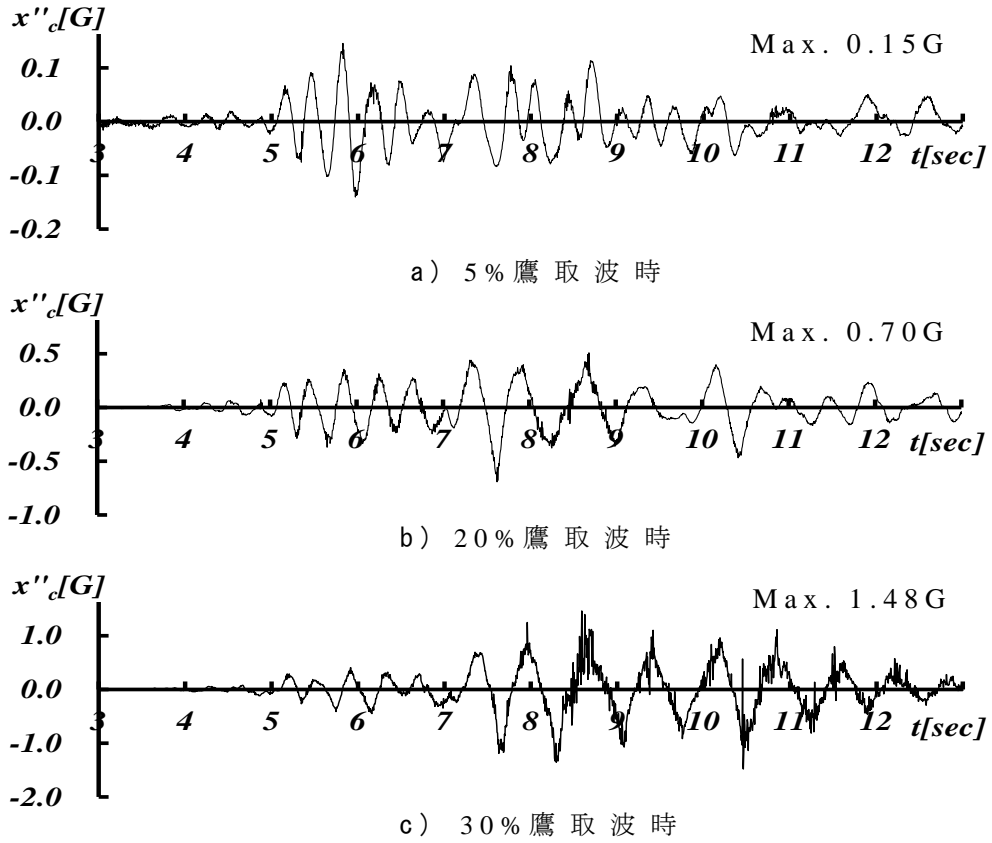


図 5.10 天井の応答加速度波形

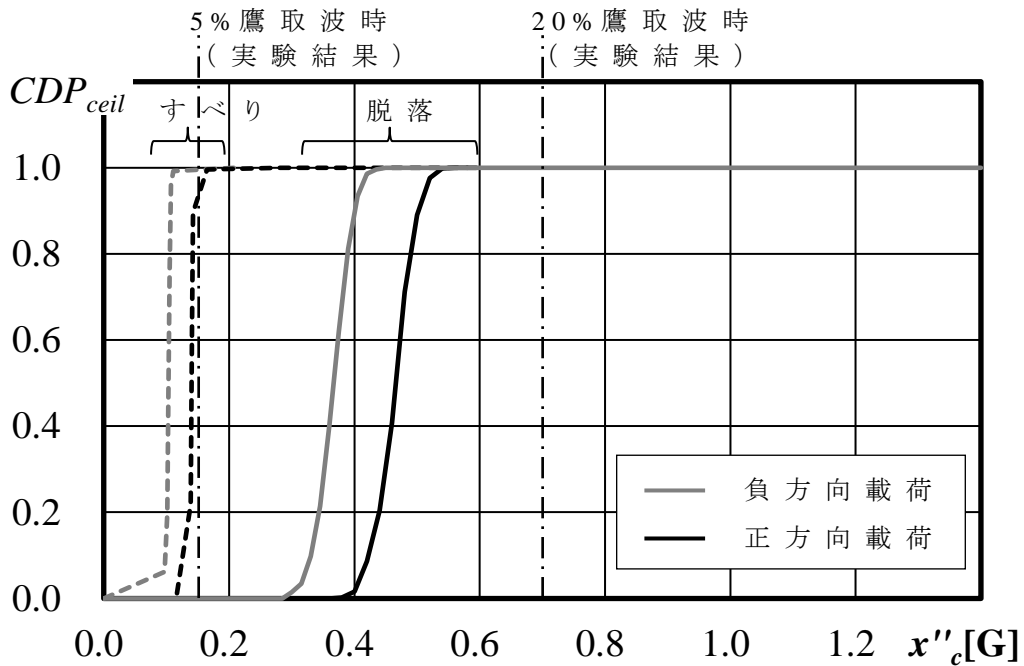


図 5.11 方法 A により得られた天井のフラジリティ曲線

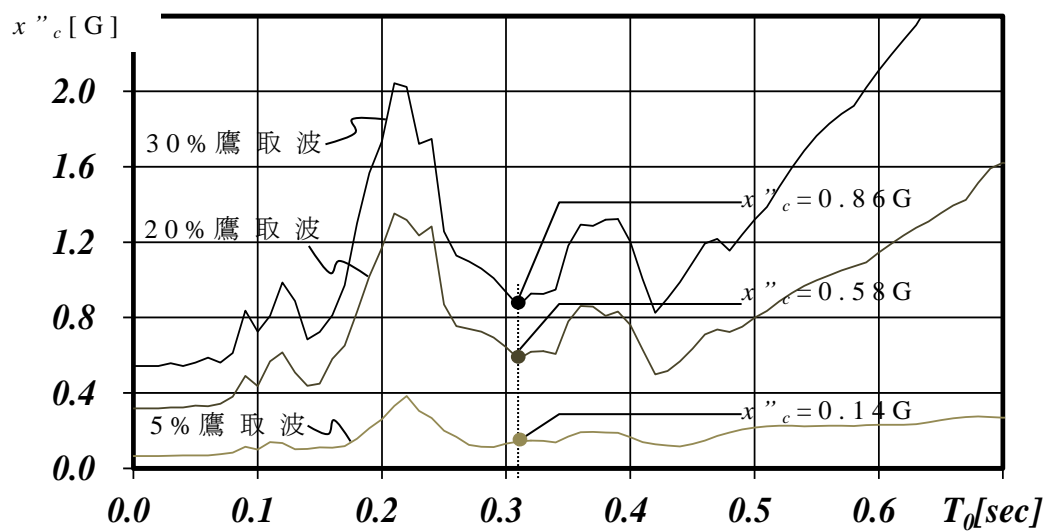


図 5.12 応答スペクトル (減衰定数 $h=0.03$)

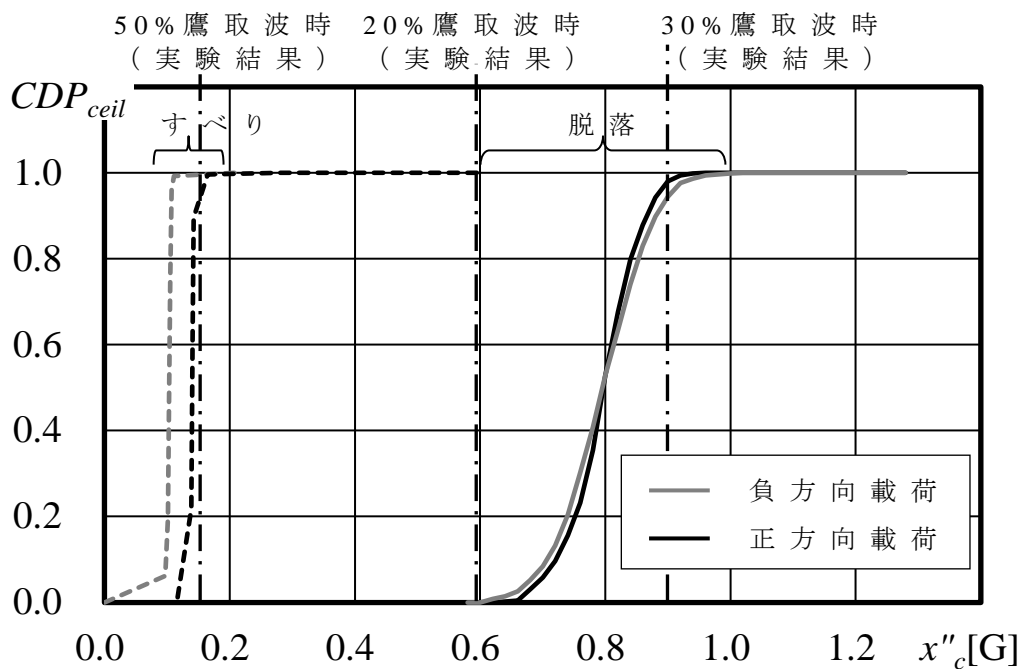


図 5.13 方法 B により得られた天井のフラジリティ曲線

第 6 章 結論

本論文は、鋼製下地在来工法天井において明解な接合条件として扱うことが難しい接合部の詳細な数値解析モデルを構築することにより、力学的に整合性のとれた方法で実際に組み立てられた状態の天井システムの力学的特性を定量的に捉えられることを示した。本研究により得られた結論を以下に示す。

1. 第2章「接合部の力学的特性」では、鋼製下地在来工法天井に特有なハンガーおよびクリップ接合部の水平力および鉛直力に対する要素実験を通じて、部材間および部材接合金物間で接触・離間が生じることによって、すべり・脱落現象といった複雑で強い非線形挙動が生じることを明らかにした。これらの挙動に対して、クリスフィールドらによるマスター・スレーブモデルを拡張した数値解析手法を導入することで、梁要素の材端における接触・離間現象およびクーロン摩擦に基づくすべり現象、接合方式に由来した部材間の偏心距離を考慮した数値解析が可能となる。本数値解析手法を用いたハンガーおよびクリップ接合部の数値解析から、実挙動を良く捉える結果を得ることができる。また、数値解析により求められた応力状態からハンガー接合部に関する力学モデルを構築したことでハンガー接合部の水平剛性および終局耐力を評価することが可能である。一方、クリップは天井板の自重に対して比較的耐性がある鉛直耐力を有しているが、水平力を受けただけでクリップに大きな軸力が生じるため、この軸力が鉛直耐力を上回ることで損傷・脱落することが明らかになった。
2. 第3章「最小ユニット天井を用いた天井システムの力学的特性」では、鋼製下地材が実際に組み立てられた天井システムに水平力が作用した場合を対象に、水平剛性および復元力特性について論じた。吊ボルト1本あたりの水平剛性評価式を導出し、天井面の剛床仮定のもとで用いることで、天井システムの水平剛性を評価する手法を提案した。この手法を通して、実際の天井で採用される可能性がある $L_c=200\sim 400\text{mm}$ において、野縁受けのねじれ剛性が吊材の水平剛性に及ぼす影響が大きいことを示した。また、天井全体の数値解析結果から、振れ止めが取り付けあるいは吊長さが短く水平剛性の高い吊ボルトの近傍では、この作用により背掛けクリップに軸力が発生しやすい状態にあり、背掛けクリップの根元が折れる現象が初期の段階で発生することを明らかにした。この背掛けクリップの根元折れは、水平力を負担するクリップの分布を変化させるきっかけとなり、天井システムの水平剛性の軟化を引き起こすことを示した。

3. 第4章「1質点系モデルによる天井の非線形応答解析」では、地震時における天井を想定して、振動解析の基本的なプロセスにもとづいて動的外乱に対する天井の応答を具体的に評価することについて論じた。典型的な平面の天井を対象に、3章で提案した天井の水平剛性評価法により求めた試験体の固有周期をもとに応答スペクトルを用いて弾性域における天井面の応答値を推定し、推定値と振動台実験で計測された実験値との比較により複雑な力学特性を有する天井を1質点系振動モデルとして扱えることを示した。また、非線形応答解析における天井システムの復元力特性を考える上で、吊ボルトの復元力特性は天井下地における各部位の復元力特性を定義し、並列と直列の関係を用いた水平バネの組み合わせによって表すことができることを示した。特に、ハンガーおよび野縁受けの復元力特性は、理論的に定義することが可能である。背掛けおよび腹掛けクリップに関しては、詳細解析の結果に寄るところが大きいが、脱落耐力およびすべり耐力は要素実験のそれと概ね対応していると考えられる。鋼製下地在来工法天井における応答評価の一連のプロセスを示した。
4. 第5章「クリップ接合部の耐力のバラつきを考慮した天井システムの損傷評価」では、耐震性の面で力学的かつ定量的に管理・整理されてこなかった鋼製下地在来工法天井に内在している様々な不確定要素を想定して天井の耐震性を確率論的に捉えていくことの必要性について指摘した。初歩段階として、天井落下の主要な要因であるクリップのすべりおよび脱落耐力について施工誤差等で生じるバラつきを対象とし、天井システムの水平耐力をモンテカルロ法によりフラジリティ曲線として表すことで天井の耐震性を定量的に示すプロセスを提案した。一方、クリップ接合部の耐力のバラつきを検討する上で、本来なら実際建築現場で施工する施工者により製作されたクリップ接合部試験体を用いて検討されるべきである。この点に関しては、今後企業と連携して対応していく必要がある。

本論文では、要素実験と天井システムの実験間における整合性について検討し明確にすることで、小規模な天井の弾性限界さえ定量的に把握できていない現状の重要課題を克服するための成果を提示した。これらの成果をもとに、本論文で扱ってきたような規模の天井に対しては、非線形な静的および動的解析がある程度可能なことが明らかとなった。一方、実際被害にあっている鋼製下地在来工法天井はより大面積であり、形状もさまざまに存在する。こうした天井に対する本論文の妥当性は現段

階では未知数であるが、本論文の成果をこうした天井の検討に応用・拡張することによって、既存天井に対するスクリーニングに対して有効であることを、今後検討と実績を重ねていくことで示していく必要がある。

本研究に関連して著者が発表した論文

[]内は共著者名を示す。

【査読有】

- 1) Collapse Analysis of Structures in Nonstructural Component-Ceiling system in Japan
[元結正次郎, 川西拓人]
2nd International Workshops on Advances in computational Mechanics, March 29-31, 2010,
Yokohama, Japan
- 2) Ceiling Fragility of Japanese Ceiling Systems
[元結正次郎, MacRae G.A, Dhakal R.P]
Proceedings of 9th Pacific Conference on Earthquake Engineering, pp.086, 1-7, 14-16, April,
2011, University of Auckland, New Zealand
- 3) モンテカルロシミュレーションを用いた鋼製下地在来工法天井の損傷評価
[元結正次郎, グレゴリー マックレイ]
構造工学論文集 Vol.58B, pp527-531, 2012年3月
- 4) Ceiling Anchorage Loads During Shake Table Tests of a Full-Scale Five-Story Building
[Hoehler, M. S., Motoyui, S., Kasai, K., Hikino, T. & Hirase, K.]
Earthquake Spectra, EERI, 28(4), pp.1447-1467, 2012.
- 5) 鋼製下地在来工法天井における野縁方向水平剛性評価法
[元結正次郎]
日本建築学会構造系論文集 第79巻, 第703号, pp.1395~1403, 2014年9月

【国際学会】

- 6) Dynamic Characteristics of Japanese Style of Ceiling
[元結正次郎, 川西拓人]
Joint Conference Lectures and Abstract Volume 7CUEE and 5ICEE, Center for Urban
Earthquake Engineering, Paper-ID 09-392, March, 2010, Tokyo Institute of Technology,
Japan

7) Ceiling Damage by the Great East Earthquake and Its Restoration

[元結正次郎, Go Tabuchi, Miyuki Kobayashi, Yukihiro Sato]

Joint Conference Lectures and Abstract Volume 9CUEE and 4ACEE, Center for Urban Earthquake Engineering, March 6-8, 2012, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan

8) Fragility Curve of Japanese Ceiling with Steel Furring

[元結正次郎, MacRae G.A, Dhakal R.P]

The International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management, p079, 5-8, August, 2012, Kanagawa University, Yokohama, Japan

【国内発表】

9) クリップの素材試験およびクリップ接合実験概要 鋼製下地在来工法天井におけるクリップ接合の力学的性状その1

[森田祐輔, 元結正次郎, 吉川昇]

日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊, pp.807-808, 2008年7月

10) クリップの取付状態が脱落耐力に及ぼす影響 鋼製下地在来工法天井におけるクリップの力学的特性に関する研究 その2

[元結正次郎, 吉川昇]

日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊, pp.809-810, 2008年7月

11) クリップ接合部に対する力学モデルの提案 鋼製下地在来工法天井におけるクリップ接合の力学的性状 その3

[船積宏彰, 元結正次郎]

日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊, pp.811-812, 2008年7月

12) クリップ接合部に対する力学モデルの解析手順および妥当性検証 鋼製下地在来工法天井におけるクリップ接合の力学的性状 その4

[元結正次郎, 船積宏彰]

日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊, pp.813-814, 2008年7月

13) 最小ユニット試験体による鋼製下地在来工法天井の固有周期に関する一考察 鋼製下地在来工法天井の動的性状 その1

[後藤裕晃，元結正次郎，船積宏彰]

日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊， pp.875-876， 2009 年 8 月

- 14) 鋼製下地在来工法天井の水平剛性に及ぼすハンガーの影響 鋼製下地在来工法天井の動的性状 その 2

[船積宏彰，元結正次郎，後藤裕晃]

日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊， pp.877-878， 2009 年 8 月

- 15) 鋼製下地在来工法天井の水平剛性に対する簡易算定法 鋼製下地在来工法天井の動的性状 その 3

[元結正次郎，後藤裕晃，船積宏彰]

日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊， pp.879-880， 2009 年 8 月

- 16) 鋼製下地在来工法天井におけるクリップ接合の非線形力学的特性に関する研究 鋼製下地在来工法天井の動的性状 その 4

[元結正次郎，川西拓人，水谷国男]

日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊， pp.881-882， 2009 年 8 月

- 17) 鋼製下地在来工法天井の固有周期と安定領域での応答予測 鋼製下地在来工法天井の動的性状 その 5

[大谷友香，元結正次郎，川西拓人，水谷国男，石原直]

日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊， pp.883-884， 2009 年 8 月

- 18) 鋼製下地在来工法天井に対する部分試験体による振動台実験 鋼製下地在来工法天井の動的性状 その 6，

[川西拓人，元結正次郎，水谷国男，石原直]

日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊， pp.885-886， 2009 年 8 月

- 19) 天井およびスプリンクラーに関する大規模振動台実験:E-ディフェンス鋼構造建物実験研究その 70

[越川智也，元結正次郎，水谷国男，川西拓人，笠井和彦，引野剛]

日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊， pp.829-830， 2010 年 9 月

- 20) 鋼製下地在来工法天井の剛性評価と応答予測に関する検討 E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その 71

[清水雄一郎，元結正次郎，水谷国男，川西拓人，笠井和彦，引野剛]

日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊， pp.831-832， 2010 年 9 月

- 21) 安定状態における天井の動的性状に関する検討 E-ディフェンス鋼構造建物実験
研究 その 72

[川西拓人，元結正次郎，水谷国男，笠井和彦，引野剛]

日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊， pp.833-834， 2010 年 9 月

- 22) 損傷を受けた天井およびスプリンクラーの動的性状に関する検討 E-ディフェンス鋼
構造建物実験研究その 73

[元結正次郎，川西拓人，水谷国男，笠井和彦，引野剛]

日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊， pp.835-836， 2010 年 9 月

- 23) 各種クリップの要素実験による力学的特性の検討 鋼製下地在来工法天井の耐震性能
向上手法に関する研究 その 1

[三浦彰一，元結正次郎，仲川勇誠]

日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊， pp.777-778， 2011 年 7 月

- 24) 天井システムの性能維持を目的とした最適クリップ耐力の検討 鋼製下地在来工法天
井の耐震性能向上手法に関する研究 その 2

[仲川勇誠，元結正次郎，三浦彰一]

日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊， pp.779-780， 2011 年 7 月

- 25) クリップ接合部の最大耐力および簡易 2 次元解析モデルの検討 鋼製下地在来工法天
井の損傷評価に関する研究 その 1

[國崎洋，元結正次郎]

日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊， pp.781-782， 2011 年 7 月

- 26) モンテカルロシミュレーションを用いた在来工法天井の損傷評価 鋼製下地在来工法
天井の損傷評価に関する研究 その 2

[元結正次郎，國崎洋]

日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊， pp.783-784， 2011 年 7 月

その他のテーマに関連して著者が
発表した論文

- 1) 各種クリップの要素実験による力学的特性の検討 鋼製下地在来工法天井の耐震性能向上手法に関する研究 その1
[三浦彰一, 元結正次郎, 仲川勇誠]
日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊, pp777-778, 2011 年 7 月
- 2) 天井システムの性能維持を目的とした最適クリップ耐力の検討 鋼製下地在来工法天井の耐震性能向上手法に関する研究 その2
[仲川勇誠, 元結正次郎, 三浦彰一]
日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊, pp.779-780, 2011 年 7 月
- 3) 鋼製下地在来工法天井の野縁受け方向加振時の動的性状 野縁受け方向の振動特性に関する研究 その1
[寺西正輝, 元結正次郎, 清水雄一郎]
日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊, pp.785-786, 2011 年 7 月
- 4) 部分天井試験体を用いた動的および静的実験 強化されたクリップを用いた在来工法天井に関する研究 その1
[金井崇紘, 元結正次郎]
日本建築学会大会学術講演梗概集 2014(構造 I), pp.877-878, 2012 年 9 月
- 5) 施工誤差を考慮した天井システムの性能評価 強化されたクリップを用いた在来工法天井に関する研究 その2
[元結正次郎, 金井 崇紘]
日本建築学会大会学術講演梗概集 2014(構造 I), pp.879-880, 2012 年 9 月
- 6) 天井の動的性状を踏まえた設計地震力について クリアランスを有さない天井の動的挙動 その1
[元結正次郎]
日本建築学会大会学術講演梗概集 2014(構造 I), pp.1043-1044, 2013 年 8 月
- 7) 天井の動的性状を踏まえた設計地震力について クリアランスを有さない天井の動的挙動 その1
[元結 正次郎]
日本建築学会大会学術講演梗概集 2014(構造 I), pp.1043-1044, 2013 年 8 月
- 8) 天井ボードの衝突実験および解析的検討 クリアランスを有さない天井の動的挙動 その2
[角 友太郎, 元結 正次郎, 沖 佑典]

日本建築学会大会学術講演梗概集 2014(構造 I), pp.1043-1044, 2013 年 8 月

- 9) 弾性体への衝突を考慮した中規模天井の衝突実験 クリアランスを有さない天井の動的挙動 その 3

[沖 佑典, 元結 正次郎, 角 友太郎]

日本建築学会大会学術講演梗概集 2014(構造 I), pp.1043-1044, 2013 年 8 月

- 10) 天井の衝突振動解析と実験結果との比較 クリアランスを有さない天井の動的挙動 その 4

[元結 正次郎, 角 友太郎, 沖 佑典]

日本建築学会大会学術講演梗概集 2014(構造 I), pp.1043-1044, 2013 年 8 月

- 11) 非構造部材に用いられる要素の力学的性状 その 1 仕上げボードの材料特性

[天野聡志, 元結正次郎, 金子健作, 湊川諒, 佐藤幸博, 佐々木康人, 田原健一]

日本建築学会大会学術講演梗概集 2014(構造 I), pp.935-936, 2014 年 9 月

- 12) 非構造部材に用いられる要素の力学的性状 その 2 セン断ずれ耐力および頭抜け耐力の検討

[湊川諒, 元結正次郎, 金子健作, 天野聡志, 佐藤幸博, 佐々木康人, 田原健一] 日本建築学会大会学術講演梗概集 2014(構造 I), pp.937-938, 2014 年 9 月

- 13) ラインタイプシステム天井の動的性状に関する検討 その 1 ラインタイプシステム天井の動的実験概要と損傷状況

[森大, 元結正次郎, 山下哲郎, 中西規夫, 末岡利之]

日本建築学会大会学術講演梗概集 2014(構造 I), pp.973-974, 2014 年 9 月

- 14) ラインタイプシステム天井の動的性状に関する検討 その 2 ラインタイプシステム天井におけるすべり挙動と復元力特性に関する考察

[元結正次郎, 森大, 山下哲郎, 中西規夫, 末岡利之]

日本建築学会大会学術講演梗概集 2014(構造 I), pp.975-976, 2014 年 9 月

参考文献

- 1) 日本建築学会：1974年伊豆半島沖地震・1978年伊豆大島近海地震災害調査報告, 1980年6月
- 2) 日本建築学会：1978年宮城県沖地震災害調査報告, 1980年2月
- 3) 国土交通省：国住指第357号－芸予地震被害調査報告の送付について(技術的助言), 2001年6月
- 4) 国土交通省：国住指第2402号－大空間を持つ建築物の天井の崩壊対策について(技術的助言), 2003年10月
- 5) 国土交通省：国住指第1427号－地震時における天井の崩落対策の徹底について(技術的助言), 2005年8月
- 6) 日本建築学会：非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領, 2006年4月
- 7) 日本建築学会：2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報, 2011年7月
- 8) 日本建築学会 非構造部材（屋根,外壁,天井）の地震・風による被害の軽減化特別研究委員会：非構造部材（屋根,外壁,天井）の地震・風による被害の軽減化の研究, 2008年
- 9) 文部科学省：学校施設における天井等落下防止対策のための手引, 2013年8月
- 10) 国土交通省国土技術政策総合研究所他：建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説, 2013年10月
- 11) 日本工業規格：建築用鋼製下地材（壁・天井）JIS A6517 用准施工要領書 平成17年版
- 12) G. Paganotti, G.A. MacRae, R.P. Dhakal : Ceiling Fragility of Japanese Ceiling Systems, Proceedings of 9th Pacific Conference on Earthquake Engineering, pp.116, 1-8, 14-16, April, 2011, University of Auckland, New Zealand
- 13) J. Singh, G.A. MacRae, R.P. Dhakal, S. Building Seismic Ceiling Fragility using Spectral Acceleration, Proceedings of 9th Pacific Conference on Earthquake Engineering, pp.063, 1-8, 14-16, April, 2011, University of Auckland, New Zealand
- 14) 桑村仁：鋼構造の性能と設計, 共立出版株式会社, 2002年11月
- 15) 渡辺清治, 寺村彰：天井下地の振動解析, 日本建築学会関東支部 学術研究発表会梗概集 構造系(43), pp.149-152, 1973年
- 16) 深尾精一：1978年伊豆大島近海地震による体育館の天井落下について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造系(53), pp.541-542, 1978年8月
- 17) 加藤宜彦, 渡辺清治, 島口正三郎, 寺村彰：システム天井の耐震実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造系(54), pp.675-676, 1979年

- 18) 沢辺幸夫, 大石正太郎, 上仲茂生: 筋違付システム天井の耐震実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造系(57), pp.927-928, 1982 年
- 19) 広田敬治, 阿部恵悦, 児房良和, 伊藤弘, 西田和生, 坂本功: 日米共同大型耐震実験研究(鉄骨造)45: 鉄骨造実大 6 層建物による非構造部材の耐震実験(その 4.システム天井の実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 C, pp.803-804, 1985 年
- 20) 児房良和, 佐藤宣夫, 広田敬治, 伊藤弘, 西田和生, 坂本功: 日米共同大型耐震実験研究(鉄骨造)62: 鉄骨造実大 6 層建物による非構造部材の耐震実験(その 13.システム天井(2)), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.323-324, 1986 年
- 21) 佐藤宣夫, 広田敬治, 児房良和, 伊藤弘, 西田和生, 坂本 功: 日米共同大型耐震実験研究(鉄骨造)63: 鉄骨造実大 6 層建物による非構造部材の耐震実験(その 14.システム天井(3)), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.325-326, 1986 年
- 22) 広田敬治, 児房良和, 佐藤宣夫, 伊藤弘, 西田和生, 坂本 功: 日米共同大型耐震実験研究(鉄骨造)64: 鉄骨造実大 6 層建物による非構造部材の耐震実験(その 15.システム天井(4)), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.327-328, 1986 年
- 23) 河村博之, 船越正義, 浜田公也: システム天井の耐震性能実験: その 1 システム天井の剛性実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.353-354, 1987 年
- 24) 船越正義, 河村博之, 浜田公也: システム天井の耐震性能実験: その 2 システム天井剛性評価法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.355-356, 1987 年
- 25) 浜田公也, 船越正義, 西村博之: システム天井の耐震性能実験: その 3 システム天井パネルの水平振動時挙動について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.357-358, 1987 年
- 26) 西山功, 伊藤弘, 西田和生, 梁一承: 芸予地震による体育館天井の落下被害の調査とその対策, 日本建築学会技術報告集 第 16 号, pp.367-372, 2002 年 12 月
- 27) 中本康, 北川則昭, 中野雅敏: 釧路空港ターミナルビル天井材落下に関する研究: その 1:天井材落下被害状況, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.883-884, 2004 年
- 28) 豊嶋学, 北川則昭, 仁科雄太郎: 釧路空港ターミナルビル天井材落下に関する研究: その 2:振動台実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.885-886, 2004 年
- 29) 仁科雄太郎, 豊嶋学, 中本康: 釧路空港ターミナルビル天井材落下に関する研究:その 3:実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.887-888, 2004 年

-
- 30) 船積宏彰, 元結正次郎, 仁科雄太郎: 釧路空港ターミナルビル天井材落下に関する研究: その 4: 天井材解析モデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.889-890, 2004 年
 - 31) 元結正次郎, 仁科雄太郎, 船積宏彰: 釧路空港ターミナルビル天井材落下に関する研究: その 5: 天井材の振動特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.890-891, 2004 年
 - 32) 森田佑輔, 元結正次郎, 中川祐介: 天井の動的特性およびすべり発生条件: 小規模天井試験体による鋼製下地在来工法天井の動的実験 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.865-866, 2007 年
 - 33) 中川祐介, 元結正次郎, 森田佑輔: クリップの脱落および連鎖脱落発生条件: 小規模天井試験体による鋼製下地在来工法天井の動的実験 その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.863-864, 2007 年
 - 34) 中本康, 元結正次郎, 吉川昇, 中川祐介: 鋼製下地在来工法天井におけるクリップの力学的特性に関する研究 その 1: 研究の背景および目的, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.843-844, 2006 年
 - 35) グェンタンサン, 元結正次郎, 中川祐介: 鋼製下地在来工法天井におけるクリップの力学的特性に関する研究 その 2: 鉛直荷重を受ける場合, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.845-846, 2006 年
 - 36) 中川祐介, 元結正次郎: 鋼製下地在来工法天井におけるクリップの力学的特性に関する研究: その 3: 水平荷重および複合荷重を受ける場合, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.847-848, 2006 年
 - 37) Ferdy Ferdian Sodik, 元結正次郎, 吉川昇: クリップの力学的特性に関する実験的検討: 鋼製下地在来工法天井のクリップによる接合特性 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.859-860, 2007 年
 - 38) 大矢俊治, 川口健一, 服部真子, 大塚彩: 鋼製下地在来工法のクリップ金具の水平繰り返し載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.861-862, 2007 年
 - 39) 高橋智秀, 諸岡繁洋: 天井材に用いられるクリップの破断・すべり実験と評価式の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.319-320, 2007 年
 - 40) 森田佑輔, 元結正次郎, 吉川昇, 佐藤恭章: クリップの素材試験およびクリップ接合実験概要: 鋼製下地在来工法天井におけるクリップ接合の力学的性状 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.863-864, 2007 年

- 概集 B-1, pp.807-808, 2008 年
- 41) 佐藤恭章, 元結正次郎, 吉川昇: クリップの取付状態が脱落耐力に及ぼす影響: 鋼製下地在来工法天井におけるクリップの力学的特性に関する研究 その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.809-810, 2008 年
 - 42) 元結正次郎, 佐藤泰章, 船積宏彰: クリップ接合部に対する力学モデルの提案: 鋼製下地在来工法天井におけるクリップ接合の力学的性状 その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.811-812, 2008 年
 - 43) 船積宏彰, 佐藤泰章, 元結正次郎: クリップ接合部に対する力学モデルの解析手順および妥当性検証: 鋼製下地在来工法天井におけるクリップ接合の力学的性状 その 4, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.813-814, 2008 年
 - 44) 杉山達也, 貫井泰, 柏崎琢也, 藪内彰夫, 小林俊夫: 在来工法天井の構成部材および実大天井の力学的特性に関する実験研究: その 1: 全体計画およびハンガーの要素試験, 日本建築学会学術講演梗概集 B-1, pp.227-228, 2009 年
 - 45) 柏崎琢也, 貫井泰, 杉山達也, 横沢秀夫, 野曾原瑞樹: 在来工法天井の構成部材および実大天井の力学的特性に関する実験研究 その 2 クリップの要素試験(鉛直引張り試験), 日本建築学会学術講演梗概集 B-1, pp.229-230, 2009 年
 - 46) 小林俊夫, 貫井泰, 杉山達也, 柏崎琢也, 横沢秀夫: 在来工法天井の構成部材および実大天井の力学的特性に関する実験研究 その 3 クリップの要素試験(せん断試験), 日本建築学会学術講演梗概集 B-1, pp.231-232, 2009 年
 - 47) 野曾原瑞樹, 貫井泰, 杉山達也, 柏崎琢也, 藪内彰夫: 在来工法天井の構成部材および実大天井の力学的特性に関する実験研究 その 4 クリップの要素試験(曲げ試験), 日本建築学会学術講演梗概集 B-1, pp.233-234, 2009 年
 - 48) 大矢俊治, 川口健一, 熊谷祥吾, 新谷真人: 鋼製天井下地材の斜め方向静的載荷時の挙動に関する実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.877-878, 2010 年
 - 49) 元結正次郎, 佐藤恭章, 川西拓人, 船積宏彰: クリップ接合部の解析モデルにおけるマスター・スレーブ節点の設定 鋼製下地在来工法天井の数値解析 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.889-890, 2010 年
 - 50) 船積宏彰, 佐藤恭章, 川西拓人, 元結正次郎: クリップ接合のクーロン摩擦を考慮した数値解析

-
- 鋼製下地在来工法天井の数値解析 その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.891-892, 2010 年
- 51) 稲井慎介, 渡壁守正, 脇山善夫, 石岡拓, 飯塚信一, 高井茂光, 金川基, 石原直: 天井脱落被害に関する実験的検討 その 1 クリップ単体の材料性能, 日本建築学会学術講演梗概集 B-2, pp.395-396, 2011 年
- 52) 金川基, 飯塚信一, 脇山善夫, 高井茂光, 渡壁守正, 稲井慎介, 石岡拓, 石原直: 天井脱落被害に関する実験的検討 その 2 小規模試験体実験, 日本建築学会学術講演梗概集 B-2, pp.397-398, 2011 年
- 53) 金井崇紘, 湊川諒, 元結正次郎: 鋼製下地在来工法天井におけるクリップの挙動に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1051-1052, 2013 年
- 54) 船積宏彰, 元結正次郎, 仁科雄太郎, 吉川昇: 在来工法による鋼製下地天井の力学的特性に関する研究 その 1 天井各構成部位の力学的特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.911-912, 2005 年
- 55) 中本康, 元結正次郎, 豊嶋学, 相原正史: 在来工法による鋼製下地天井の力学的特性に関する研究 その 2 天井システムの力学的特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.913-914, 2005 年
- 56) 服部真子, 川口健一, 吉中進, 片山慎一郎: 2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震時に発生した大型天井面の落下事故に関する基礎的考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.857-858, 2007 年
- 57) 永井拓生, 川口健一, 安藤顕祐, 新谷真人, 熊谷祥吾: 大面積吊天井の地震時応答解析 その 1 天井の弾性変形を考慮した解析手法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.795-796, 2008 年
- 58) 安藤顕祐, 川口健一, 永井拓生, 新谷真人, 熊谷祥吾: 大面積吊天井の地震時応答解析 その 2 山形屋根体育館における吊天井の応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.797-798, 2008 年
- 59) 宮村正光, 小鹿紀英, 鈴木芳隆, 阿部雅史, 田上淳, 引田真規子: 重要施設の機能維持評価を目的とした天井・設備機器の振動台実験と解析 その 1 振動台実験の概要と位置付け, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.747-748, 2008 年
- 60) 引田真規子, 田上淳, 小鹿紀英, 鈴木芳隆, 阿部雅史, 宮村正光: 重要施設の機能維持評価を目的とした天井, 設備機器の振動台実験と解析 その 2 天井の振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.749-750, 2008 年

-
- 61) 鈴木芳隆, 小鹿紀英, 阿部雅史, 宮村正光, 引田真規子, 田上淳: 重要施設の機能維持評価を目的とした天井, 設備機器の振動台実験と解析 その 3 天井材の地震時挙動のシミュレーション解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.751-752, 2008 年
 - 62) 阿部雅史, 宮村正光, 鈴木芳隆, 小鹿紀英, 引田真規子, 田上淳: 重要施設の機能維持評価を目的とした天井・設備機器の振動台実験と解析 その 4 設備配管を対象とした振動台実験とシミュレーション解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.753-754, 2008 年
 - 63) 小鹿紀英, 鈴木芳隆, 阿部雅史, 宮村正, 引田真規子, 田上淳: 重要施設の機能維持評価を目的とした天井・設備機器の振動台実験と解析 その 5 シミュレーション解析手法の実建物への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.755-756, 2008 年
 - 64) 熊谷祥吾, 川口健一, 他: 2005 年宮城県沖の地震で天井落下被害の起きた建物の数値解析による基礎的考察 吊り天井の振動性状についての考察, 構造工学論文集 B, pp.453-458, 2009 年
 - 65) 井原和弘, 杉山達也, 柏崎琢也: 新潟県中越沖地震における鉄骨造建物の天井被害シミュレーション解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.399-400, 2011 年
 - 66) 原口圭, 阿部亮, 山中祐一: 仙台駅新幹線ホームの天井材落下に関する研究: その 6 天井立ち上がり部の落下メカニズムの推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.989-990, 2013 年
 - 67) 谷口与史也, 吉中進, 鈴木秀明: 地震による吊天井落下原因の数値シミュレーションによる一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.991-992, 2013 年
 - 68) 山中祐一: 仙台駅新幹線ホームの天井材落下に関する研究: その 7 天井全体の 3 次元挙動を考慮した解析的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.911-912, 2014 年
 - 69) 山本卓也, 田川浩之, 山下拓三, 磯部大吾郎: 大空間建築物の地震時における天井落下に関する数値解析的研究 その 1 基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 II, pp.1107-1108, 2014 年
 - 70) 松岡祐一, マコーミック ジェイソン, 吹田啓一郎, 中島正愛: 軽量鉄骨下地間仕切壁とそれに囲まれた鋼製下地天井の耐震性能, 日本建築学会構造系論文集 第 73 巻, 第 632 号, pp.1857-1864, 2008 年
 - 71) 杉山達也, 貫井泰, 他: 在来工法天井の下地ボードと野縁のビス止め接合部のせん断試験: その 1: 試験計画および要素試験の結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.871-872, 2010 年

-
- 72) 小林俊夫, 貫井泰, 他: 在来工法天井の下地ボードと野縁のビス止め接合部のせん断試験 その 2 部分モデル試験の結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.873-874, 2010 年
 - 73) 藪内彰夫, 杉山達也, 他: 在来工法天井の下地ボードと野縁のビス止め接合部のせん断試験 その 3 試験結果の考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.875-876, 2010 年
 - 74) 中西敦士, 元結正次郎, 國崎洋: 野縁方向における天井面圧縮時の挙動に関する検討 鋼製下地在来工法天井における天井面の安定性に関する研究 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.881-882, 2012 年
 - 75) 國崎洋, 元結正次郎, 中西敦士: 野縁方向における天井面の圧縮性能に吊りボルトが与える影響: 鋼製下地在来工法天井における天井面の安定性に関する研究 その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.883-884, 2012 年
 - 76) 元結正次郎, 船積宏章: 野縁受け方向圧縮時の基本的特性 鋼製下地在来工法天井における天井面の安定性に関する研究 その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.885-886, 2012 年
 - 77) 元結正次郎, 佐藤恭章: 天井の動的性状を踏まえた設計地震力について クリアランスを有さない天井の動的挙動 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1043-1044, 2013 年
 - 78) 角友太郎, 元結正次郎, 佐藤恭章, 沖佑典: 天井ボードの衝突実験および解析的検討 クリアランスを有さない天井の動的挙動 その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1045-1046, 2013 年
 - 79) 沖佑典, 元結正次郎, 佐藤恭章, 角友太郎: 弾性体への衝突を考慮した中規模天井の衝突実験 クリアランスを有さない天井の動的挙動 その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1047-1048, 2013 年
 - 80) 佐藤恭章, 元結正次郎, 角友太郎, 沖佑典: 天井の衝突振動解析と実験結果との比較 クリアランスを有さない天井の動的挙動 その 4, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1049-1050, 2013 年
 - 81) 湊川諒, 元結正次郎, 佐藤幸博, 佐々木康人: 軽量鉄骨下地間仕切壁における面外構造特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1053-1054, 2013 年
 - 82) 富岡裕一, 岡本肇, 高橋拓, 山本正人, 嶺脇重雄, 鴨下直登: 在来天井の耐震性に関する研究 その 1 せっこうボードと野縁で構成された単純要素試験体の静的載荷試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 材料施工, pp.1103-1104, 2013 年

-
- 83) 岡本肇, 富岡裕一, 高橋拓, 山本正人, 嶺脇重雄, 鴨下直登: 在来天井の耐震性向上に関する研究 その 2 複合要素試験体の静的載荷試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 材料施工, pp.1105-1106, 2013 年
- 84) 山本正人, 岡本肇, 高橋拓, 嶺脇重雄, 富岡裕一, 鴨下直登: 在来天井の耐震性に関する研究 その 3 ドリリングタッピングねじの挙動とせっこうボード耐力との関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 材料施工, pp.1107-1108, 2013 年
- 85) 高橋拓, 岡本肇, 山本正人, 富岡裕一, 嶺脇重雄, 鴨下直登: 在来天井の耐震性に関する研究 その 4 傾斜したドリリングタッピングねじの野縁からの引抜強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 材料施工, pp.1109-1110, 2013 年
- 86) 二木秀也, 嶺脇重雄, 岡本肇, 高橋拓, 山本正人, 富岡裕一, 鴨下直登, 青井淳: 在来工法天井を対象とした地震時の落下に関する研究, 日本建築学会技術報告集 第 20 巻, 第 44 号, pp.149-152, 2014 年
- 87) 石原直, 稲井慎介, 森田泰弘, 渡壁守正, 脇山善夫, 喜々津仁密: 周囲の壁等に慣性力を負担させる水平な在来工法天井の耐震性に関する実験的研究 その 1 全体計画と天井面の曲げ実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.977-978, 2014 年
- 88) 脇山善夫, 石原直, 稲井慎介, 森田泰弘, 渡壁守正, 喜々津仁密: 周囲の壁等に慣性力を負担させる水平な在来工法天井の耐震性に関する実験的研究 その 2 静的面内圧縮実験及び動の実験の試験体及び実験方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.979-980, 2014 年
- 89) 森田泰弘, 石原直, 稲井慎介, 渡壁守正, 脇山善夫, 喜々津仁密: 周囲の壁等に慣性力を負担させる水平な在来工法天井の耐震性に関する実験的研究 その 3 静的面内圧縮実験の結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.981-982, 2014 年
- 90) 渡壁守正, 石原直, 稲井慎介, 森田泰弘, 脇山善夫, 喜々津仁密: 周囲の壁等に慣性力を負担させる水平な在来工法天井の耐震性に関する実験的研究 その 4 振動台実験の結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.983-984, 2014 年
- 91) 稲井慎介, 石原直, 森田泰弘, 渡壁守正, 脇山善夫, 喜々津仁密: 周囲の壁等に慣性力を負担させる水平な在来工法天井の耐震性に関する実験的研究 その 5 大規模加振実験の結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.985-986, 2014 年
- 92) 角 友太郎, 元結正次郎, 金子健作, 菅野嵩晃: 衝突に関わる基本特性および解析手法の検討 その

- 1 不可避的な隙間を有する天井の地震時衝突挙動に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.987-988, 2014 年
- 93) 菅野 嵩晃, 元結正次郎, 角友太郎, 金子健作: 地震時を想定した繰返し衝突実験およびその再現解析 その 2 不可避的な隙間を有する天井の地震時衝突挙動に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.989-990, 2014 年
- 94) 佐々木康人, 元結正次郎, 田原健一, 佐藤幸博, 佐々木聡: クリアランスを有さない天井の振動台実験 その 1 実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.993-994, 2014 年
- 95) 田原健一, 元結正次郎, 佐々木康人, 佐藤幸博, 佐々木聡: クリアランスを有さない天井の振動台実験 その 2 実験結果の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.995-996, 2014 年
- 96) 熊谷祥吾, 川口健一, 永井拓生, 新谷真人, 安藤顕祐: 吊り長の異なる大面積吊天井の振動性状に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp. 793-794, 2008 年
- 97) Vu Le Bich Phuong, 元結正次郎, 石原直: 吊り長さが異なる懸垂物の応答に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.819-820, 2008 年
- 98) VU Le Bich Phuong, 元結正次郎: 鋼製下地在来工法天井の力学的性状に及ぼす吊りボルト長の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.893-894, 2009 年
- 99) 永井拓生, 川口健一: 在来工法吊天井の面内剛性の評価と振動性状に及ぼす影響について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.883-884, 2010 年
- 100) 諸岡繁洋: 斜めの屋根に吊られた天井材の挙動について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.889-890, 2012 年
- 101) 野田茂, 詫間智也: 吊り天井地震応答に及ぼすブレース配置の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 II, pp.1081-1082, 2013 年
- 102) 瀧本雅人, 野田茂, 岡崎真友子: ピン結合構造に注目した吊り天井の耐震解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 II, 1109-1110, 2014 年
- 103) 石川浩一郎, 川口健一, 田川健吾, 酒井達矢: 兵庫県南部地震による学校体育館及び公共スポーツホール等の被害調査報告, 日本建築学会技術報告集 Vol.5, pp.96-101, 1997 年
- 104) 辻岡静雄, 石川浩一郎, 磯雅人, 松本芳紀, 小林克巳: 新潟県中越地震による川口町・魚沼市地区の S 造建物被害(新潟県中越地震), 日本建築学会北陸支部研究報告集 Vol.48, pp.9-12, 2005 年
- 105) 脇山善夫, 清家剛, 名取発: 平成 16 年新潟県中越地震における非構造部材の被害概要に関する報

- 告, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.247-248, 2005 年
- 106) 西田和生, 向井昭義, 長谷川隆, 石原直: 新潟県中越地震における鉄骨造体育館被害調査 その 2 非構造部材の被害状況の分析(新潟県中越地震(1)), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.571-572, 2005 年
- 107) 大矢俊治, 川口健一, 服部真子: 2005 年福岡県西方沖の地震による公共ホール等の被害状況に関する報告, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.835-836, 2006 年
- 108) 大塚彩, 川口健一, 吉中進: 2007 年能登半島地震における体育館施設の被害調査報告, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.855-856, 2007 年
- 109) 大矢俊治, 川口健一, 吉中進, 大塚彩, 片山慎一郎: 新潟県中越地震と同中越沖地震における大規模集客施設内部の吊り天井被害の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.815-816, 2008 年
- 110) 内田拓見, 川口健一, 吉中進, 大塚彩, 片山慎一郎: 大規模集客施設内部の非構造材に関する基礎的調査研究 その 1 フロア面積と天井設置高さに関するアンケート調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.209-210, 2008 年
- 111) 川口健一, 吉中進, 大塚彩[他]: 新潟県中越地震と同中越沖地震における大規模集客施設内部の非構造材(吊り天井)被害の比較(構造), 日本建築学会技術報告集 14(27), pp.73-78, 2008 年
- 112) 大矢俊治, 川口健一[他]: 2008 年岩手・宮城内陸地震における大規模集客施設の非構造材被害, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.899-900, 2009 年
- 113) 荻芳郎, 川口健一[他]: 2008 年岩手県沿岸北部地震による大規模集客施設の非構造材被害, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.901-902, 2009 年
- 114) 立道郁生[他]: 東北地方太平洋沖地震による体育館の地震被害に関する調査: その 1 震災後 2 週間までの報道・報告データの概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.755-756, 2011 年
- 115) 藤村真子[他]: 東北地方太平洋沖地震による体育館の地震被害に関する調査 その 2 震災後 2 週間までの報道・報告データに基づく分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.757-758, 2011 年
- 116) 大場康史, 川口健一: 2011 年東北地方太平洋沖地震による空港ターミナルビル内天井落下に関する調査速報 その 1 被害概要と考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.759-760, 2011 年
- 117) 中楚洋介, 川口健一, 大場康史: 2011 年東北地方太平洋沖地震による空港ターミナルビル内天井落下に関する調査速報 その 2 ビデオ映像と落下実験結果を用いた天井材落下衝撃力の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.761-762, 2011 年

-
- 118) 川口健一, 荻芳郎, 中楚洋介, 上村一貴, 大場康史: 東北地方太平洋沖地震により日本科学未来館で発生した非構造材等落下被害に関する調査速報 その1 建物概要とエントランスホール天井等の落下被害, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.763-764, 2011 年
- 119) 荻芳郎, 川口健一, 中楚洋介, 上村一貴, 大場康史: 東北地方太平洋沖地震により日本科学未来館で発生した非構造材等落下被害に関する調査速報 その2 シンボルゾーンの被害とエントランスホール天井の余震観測の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.765-766, 2011 年
- 120) 加藤大介: 東北地方太平洋沖地震で被災した郡山市の RC 造学校建物の非構造部材の被害, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 IV, pp.65-66, 2014 年
- 121) 金子美香, 神原浩, 田村和夫: 1995 年兵庫県南部地震の被害調査に基づく非構造部材の耐震性評価, 日本建築学会技術報告集(17), pp.563-566, 2003 年
- 122) 金子美香, 神原浩, 田村和夫: 非構造部材の耐震実験結果に基づく耐震性能の整理(材料施工), 日本建築学会技術報告集(21), pp.39-44, 2005 年
- 123) 守研二, 阿部良洋, 鈴谷二郎, 小野瀬順一: 地震で吊天井が落下したスポパーク松森の振動特性調査 その1 水平振動特性についての検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.331-332, 2006 年
- 124) 阿部良洋, 守研二, 鈴谷二郎, 小野瀬順一: 地震で吊天井が落下したスポパーク松森の振動特性調査 その2 上下振動特性についての検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.333-334, 2006 年
- 125) 脇山善夫, 奥田泰雄, 長谷川隆: 在来工法天井およびシステム天井の実大振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.219-220, 2008 年
- 126) 熊谷祥吾, 川口健一, 他: 2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震時に発生した大型天井面の落下事故に関する基礎的考察(2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.903-904, 2009 年
- 127) 後藤裕晃, 元結正次郎, 佐藤恭章, 船積宏章: 最小ユニット試験体による鋼製下地在来工法天井の固有周期に関する一考察 鋼製下地在来工法天井の動的性状 その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.875-876, 2009 年
- 128) 船積 宏章, 元結正次郎, 後藤裕晃, 佐藤恭章: 鋼製下地在来工法天井の水平剛性に及ぼすハンガーの影響 鋼製下地在来工法天井の動的性状 その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.877-878, 2009 年

-
- 129) 元結正次郎, 後藤裕晃, 佐藤恭章, 船積宏章: 鋼製下地在来工法天井の水平剛性に対する簡易算定法 鋼製下地在来工法天井の動的性状 その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.879-880, 2009 年
- 130) 佐藤恭章, 元結正次郎, 川西拓人, 水谷国男: 鋼製下地在来工法天井におけるクリップ接合の非線形力学的特性に関する研究 鋼製下地在来工法天井の動的性状 その 4, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.881-882, 2009 年
- 131) 大谷友香, 元結正次郎, 川西拓人, 佐藤恭章, 水谷国男, 石原直: 鋼製下地在来工法の固有周期と安定領域での応答予測 鋼製下地在来工法天井の動的性状 その 5, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.883-884, 2009 年
- 132) 川西拓人, 元結正次郎, 佐藤恭章, 水谷国男, 石原直: 鋼製下地在来工法天井に対する部分試験体による振動台実験 鋼製下地在来工法天井の動的性状 その 6, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.885-886, 2009 年
- 133) 菊地原雅則, 水谷国男, 元結正次郎, 石原直: スプリンクラー設備を有する鋼製下地在来工法天井の動的性状 鋼製下地在来工法天井の動的性状 その 7, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.887-888, 2009 年
- 134) 飯塚信一, 脇山善夫, 他: 地震被害を受けた体育館の天井脱落挙動に関する実験的研究 その 1 屋根勾配を有する天井試験体の振動台実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.49-50, 2010 年
- 135) 高井茂光, 稲井慎介, 桑素彦, 他: 地震被害を受けた体育館の天井脱落挙動に関する実験的研究 その 2 振動特性実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.51-52, 2010 年
- 136) 脇山善夫, 渡壁守正, 他: 地震被害を受けた体育館の天井脱落挙動に関する実験的研究 その 3 実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.53-54, 2010 年
- 137) 石岡拓, 石原直, 他: 地震被害を受けた体育館の天井脱落挙動に関する実験的研究 その 4 山形ラーメンの小模型振動台実験および解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.55-56, 2010 年
- 138) 熊谷祥吾, 川口健一, 新谷真人, 大矢俊治, 櫻井重喜: 2005 年宮城県沖の地震で天井落下被害の起きた建物の応答解析結果と衝突痕および斜交した下地材に対するクリップ金物の固定度に関する基礎的検討, 日本建築学会構造工学論文集 Vol.56B, pp.389-394, 2010 年
- 139) 越川智也, 元結正次郎, 水谷国男, 佐藤恭章, 川西拓人, 笠井和彦, 引野剛: 天井およびスプリンク

- ラーに関する大規模振動台実験 E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その 70, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp.829-830, 2010 年
- 140) 清水雄一郎, 元結正次郎, 笠井和彦, 水谷国男, 佐藤恭章, 川西拓人, 引野剛: 鋼製下地在来工法天井の剛性評価と応答予測に関する検討 E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その 71, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp.831-832, 2010 年
- 141) 川西拓人, 元結正次郎, 佐藤恭章, 水谷国男, 笠井和彦, 引野剛: 安定状態における天井の動的性状に関する検討 E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その 72, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp.833-834, 2010 年
- 142) 佐藤恭章, 元結正次郎, 川西拓人, 水谷国男, 笠井和彦, 引野剛: 損傷を受けた天井およびスプリングラーの動的性状に関する検討 E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その 73, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp.835-836, 2010 年
- 143) 鈴木秀明, 谷口与史也, 吉中進: 天井重量に着目した兵庫県南部地震以降の天井落下被害分類, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.851-852, 2012 年
- 144) 富樫秀行, 他: 仙台駅新幹線ホームの天井材落下に関する研究 その 1 仙台駅天井材の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.861-862, 2012 年
- 145) 阿部照芳, 他: 仙台駅新幹線ホームの天井材落下に関する研究 その 2 天井材落下被害状況と落下メカニズムの推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.863-864, 2012 年
- 146) 山中祐一, 他: 仙台駅新幹線ホームの天井材落下に関する研究 その 3 高架橋の振動特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.865-866, 2012 年
- 147) 大庭章, 他: 仙台駅新幹線ホームの天井材落下に関する研究 その 4 線路並行方向の動特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.867-868, 2012 年
- 148) 原口圭, 他: 仙台駅新幹線ホームの天井材落下に関する研究 その 5 線路直行方向の動的載荷による再現実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.869-870, 2012 年
- 149) 大蔵勇太, 他: 東北地方太平洋沖地震によって落下被害を受けた天井下地組の強度と剛性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 IV, pp.61-62, 2012 年
- 150) 佐々木晴夫, 他: 天井落下・崩落の要因分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 材料施工, pp.1283-1284, 2012 年
- 151) 芦川雄郁: 大規模地震による鋼製下地材を用いた在来工法天井の被害状況に関するアンケート調

- 査, 日本建築学会関東支部研究報告集 82(I), pp.161-164, 2012 年
- 152) 荻芳郎, 川口健一, 他: 日本科学未来館における地震被害を受けた吊り天井の余震時挙動の観測調査と基礎的考察, 構造工学論文集 Vol.58B, pp.519-526, 2012 年
- 153) 渡壁守正, 飯塚信一, 稲井慎介, 石岡拓, 高井茂光, 金川基: 大規模空間を有する在来工法天井の耐震対策工法の開発, 日本建築学会技術報告集 第 18 巻, 第 39 号, pp.465-470, 2012 年
- 154) 荻 芳郎, 川口 健一, 清本 莉七, 中楚 洋介, 新谷 真人, 大場 康史, 上村 一貴: 日本科学未来館での吊り天井の地震時挙動に関する基礎的調査研究 その 1 余震時観測データを用いた地震被害後の振動性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.853-854, 2012 年
- 155) 清本 莉七, 川口 健一, 新谷 真人, 荻 芳郎: 日本科学未来館での吊り天井の地震時挙動に関する基礎的調査研究 その 2 本震時の振動性状の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.855-856, 2012 年
- 156) 大月拓也, 東大功, 鈴木和英, 作間隆幸: K 駅における天井落下被害とその要因 3次元曲面形状の天井における落下メカニズム, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 II, pp.293-294, 2013 年
- 157) 梶原浩一, 佐々木智大, 青井淳, 田川浩之, 壁谷澤寿海, 清家剛, 山田哲, 福山洋: E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発 その 1 プロジェクト概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.997-998, 2014 年
- 158) 佐々木智大, 青井淳, 田川浩之, 梶原浩一, 荒井智一, 金井貴浩, 高岡昌史, 岩下裕樹: E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発 その 2 試験体構造設計および未対策天井の設計, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.999-1000, 2014 年
- 159) 金井貴浩, 白崎了悟, 佐々木智大, 青井淳, 田川浩之, 梶原浩一, 荒井智一, 高岡昌史, 岩下裕樹: E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発 その 3 1.1G 耐震天井の設計, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1001-1002, 2014 年
- 160) 梅野友里, 荒井智一, 佐々木智大, 青井淳, 田川浩之, 梶原浩一, 金井貴浩, 高岡昌史, 岩下裕樹: E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発 その 4 2.2G 耐震天井の設計, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1003-1004, 2014 年
- 161) 増田寛之, 吉澤睦博, 梶原浩一, 佐々木智大, 青井淳, 田川浩之: E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発 その 5 実大鉄骨造体育館試験体の構造特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1005-1006, 2014 年

-
- 162) 田川浩之, 佐々木智大, 青井淳, 梶原浩一: E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発 その 6 構造躯体の応答, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1007-1008, 2014 年
- 163) 岩下裕樹, 佐々木智大, 青井淳, 田川浩之, 梶原浩一, 荒井智一, 金井貴浩, 高岡昌史: E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発 その 7 未対策天井の損傷, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1009-1010, 2014 年
- 164) 白崎了悟, 金井貴浩, 佐々木智大, 青井淳, 田川浩之, 梶原浩一, 荒井智一, 高岡昌史, 岩下裕樹: E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発: その 8 1.1G 耐震天井の応答, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 1011-1012, 2014 年
- 165) 荒井智一, 小林俊夫, 佐々木智大, 青井淳, 田川浩之, 梶原浩一, 金井貴浩, 高岡昌史, 岩下裕樹: E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発: その 9 2.2G 耐震天井の応答, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 1013-1014, 2014 年
- 166) 青井淳, 佐々木智大, 田川浩之, 梶原浩一, 荒井智一, 金井貴浩, 高岡昌史, 岩下裕樹: E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発: その 10 各天井の脱落被害メカニズムの分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 1015-1016, 2014 年
- 167) 佐々木智大, 清家剛, 石川種俊, 磯部孝行, 高岡昌史, 青井淳, 梶原浩一, 荒井智一, 金井貴浩, 岩下裕樹: E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発: その 11 大規模空間における吊り天井の施工調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 1017-1018, 2014 年
- 168) 佐々木智大, 橋口寛史, 青井淳, 梶原浩一: E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発: その 12 フェイルセーフ機能の設計とその有効性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 1019-1020, 2014 年
- 169) 井上貴仁, 吉澤睦博, 佐々木智大, 青井淳, 田川浩之, 梶原浩一: E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発: その 13 天井脱落被害再現実験を目視調査した学校施設管理者へのアンケート調査結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 1021-1022, 2014 年
- 170) 高井茂光, 武内義夫, 浅沼裕之, 三橋建: グリッドシステム天井の耐震安全性に関する振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.845-846, 2002 年

-
- 171) 小林俊夫, 五十嵐克哉, 黒川泰嗣: グリッドシステム天井の耐震実験, 日本建築学会技術報告集 (15), pp.83-88, 2002 年
- 172) 佐々木晴夫, 大喜多一晃, 井上 和夫, 成原弘之, 日比野浩, 出雲洋治: 耐震システム天井の開発: その 1 概要および静加力試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.883-884, 2004 年
- 173) 出雲洋治, 佐々木晴夫, 井上和夫, 高木政美, 成原弘之, 日比野浩: 耐震システム天井の開発: その 2 動的解析による成立検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.885-886, 2004 年
- 174) 高木政美, 日比野浩, 成原弘之, 井上和夫, 佐々木晴夫, 出雲洋治: 耐震システム天井の開発: その 3 振動台による耐震性能確認試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.887-888, 2004 年
- 175) 小林俊夫, 由利隆行, 荒井智一: 天井の耐震性に関する研究: その 1 耐震天井の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp.837-838, 2006
- 176) 由利隆行, 荒井智一, 小林俊夫: 天井の耐震性に関する研究: その 2 グリッドシステム天井用ハンガー補強金具, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp.839-840, 2006
- 177) 荒井智一, 由利隆行, 小林俊夫: 天井の耐震性に関する研究: その 3 在来鋼製下地天井の静的水平加力実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp.841-842, 2006
- 178) 倉本真介, 高山正春, 木村雄一, 佐々木晴夫, 欄木龍大, 原史彦, 小竹達也, 糸井達哉: 耐震性に優れた大規模在来天井工法の開発: その 1 開発および実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-2), pp.503-504, 2006
- 179) 欄木龍大, 糸井達哉, 高山正春, 佐々木晴夫, 木村雄一, 原史彦, 小竹達也, 倉本真介: 耐震性に優れた大規模在来天井工法の開発: その 2 実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-2), pp.505-506, 2006
- 180) 金子美香, 神原浩, 小川雄一郎, 菅谷善昌: グリッド天井の耐震性能確認実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-2), pp.507-508, 2006
- 181) 嶺脇重雄, 久家英夫: 直吊りクロス方式システム天井の限界状態について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-2), pp.509-510, 2006
- 182) 日野永, 稲田達夫, 門河直実, 永山憲二, 岩下洋: 天井崩落対策に関する実験と設計への適用: その 1. 研究の目的と実験概要 (計画), 日本建築学会大会学術講演梗概集(C-1), pp.1031-1032, 2006
- 183) 岩下洋, 稲田達夫, 門河直実, 日野永, 永山憲二: 天井崩落対策に関する実験と設計への適用: その 2. 実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(C-1), pp.1033-1034, 2006

-
- 184) 永山憲, 稲田達夫, 門河直実, 日野永, 岩下洋: 天井崩落対策に関する実験と設計への適用: その 3 実験結果の考察と設計仕様, 日本建築学会大会学術講演梗概集(C-1), pp.1035-1036, 2006
- 185) 小林俊夫: 天井の耐震性に関する研究: その 4 組合せブレースの座屈耐力評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp.205-206, 2007
- 186) 由利隆行, 関口治, 荒井智一, 小林俊夫: 天井の耐震性に関する研究: その 5 パイプハンガーを用いたグリッドシステム天井, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp.207-208, 2007
- 187) 荻原健二, 細岡正樹, 佐々木朗, 小林俊夫, システム天井面の静的水平荷重試験: その 1 プロジェクトの概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp.209-210, 2007
- 188) 細岡正樹, 荻原健二, 佐々木朗, 小林俊夫: システム天井面の静的水平荷重試験: その 2 グリッドタイプシステム天井, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp.211-212, 2007
- 189) 佐々木朗, 荻原健二, 細岡正樹, 小林俊夫: システム天井面の静的水平荷重試験: その 3 クロスタイプ ライントイプシステム天井, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp.213-214, 2007
- 190) 星川努, 大迫勝彦, 九野修司, 吉田宏一, 小林俊夫, 渡辺恵介, 荒井智一, 荻原健二: 金属パネル天井の耐震性に関する研究: その 1 静的水平加力実験 実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp.215-216, 2007
- 191) 九野修司, 大迫勝彦, 星川努, 吉田宏一, 小林俊夫, 渡辺恵介, 荒井智一, 荻原健二: 金属パネル天井の耐震性に関する研究: その 2 静的水平加力実験 実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp.217-218, 2007
- 192) 荒井智一, 大迫勝彦, 星川努, 吉田宏一, 九野修司, 渡辺恵介, 小林俊夫, 荻原健二: 金属パネル天井の耐震性に関する研究: その 3 天井面内剛性試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp.219-220, 2007
- 193) 金川基, 中原理揮, 松本喜代隆, 稲井慎介, 桑素彦, 飯塚信一, 鹿籠泰幸: 在来天井の耐震対策に関する振動台実験: その 1 実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.867-868, 2007
- 194) 桑素彦, 飯塚信一, 中原理揮, 松本喜代隆, 鹿籠泰幸, 金川基, 稲井慎介: 在来天井の耐震対策に関する振動台実験: その 2 在来天井の落下検証実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.869-870, 2007
- 195) 稲井慎介, 中原理揮, 松本喜代隆, 桑素彦, 飯塚信一, 鹿籠泰幸, 金川基, 在来天井の耐震対策に関する振動台実験: その 3 制震天井の性能検証実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1,

- pp.871-872, 2007
- 196) 木村雄一, 高山正春, 小竹達也, 欄木龍大, 佐々木晴夫:耐震性に優れた大規模在来天井工法の開発: その3 要素実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp. 873-874, 2007
- 197) 中本康, 元結正次郎, 豊島学, 船積宏彰:耐震補強を目指した在来型天井の振動台実験: その1 実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp. 875-876, 2007
- 198) 小林俊夫, 由利隆行:天井の耐震性に関する研究: その6 グリッドシステム天井の面内変形, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp. 81-82, 2008
- 199) 野曾原瑞樹, 小林俊夫, 荒井智一:天井の耐震性に関する研究:(その7)繰り返し水平載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp. 83-84, 2008
- 200) 星川努, 大迫勝彦, 九野修司, 吉田宏一, 小林俊夫, 渡辺恵介, 荒井智一, 荻原健二, 野曾原瑞樹: 金属パネル天井の耐震性に関する研究:(その4)防振天井の静的水平加力実験 実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp. 85-86, 2008
- 201) 九野修司, 大迫勝彦, 星川努, 吉田宏一, 小林俊夫, 渡辺恵介, 荒井智一, 荻原健二: 金属パネル天井の耐震性に関する研究:(その5)静的水平加力実験 実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp. 87-88, 2008
- 202) 荒井智一, 大迫勝彦, 星川努, 吉田宏一, 九野修司, 渡辺恵介, 小林俊夫, 荻原健二: 金属パネル天井の耐震性に関する研究:(その6)防振天井の振動絶縁効果現場測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp. 89-90, 2008
- 203) 豊田将文, 中本康, 船積宏彰, 吉川昇:在来工法天井における耐震補強に関する実験的研究:(その1)実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp. 799-800, 2008
- 204) 中本康, 豊嶋学, 竹田史朗, 豊田将文:在来工法天井における耐震補強に関する実験的研究:(その2)実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp. 801-802, 2008
- 205) 稲井慎介, 中原理揮, 松本喜代隆, 桑素彦, 飯塚信一, 鹿籠泰幸, 金川基:在来天井の耐震対策に関する振動台実験: その4 ポストタイプ制震天井の性能検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp. 803-804, 2008
- 206) 金川基, 飯塚信一, 鹿籠泰幸, 中原理揮, 松本喜代隆, 稲井慎介, 桑素彦:在来天井の耐震対策に関する振動台実験:その5 段差天井での性能検証実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp.805-806, 2008

-
- 207) 小澤祐周, 川口健一: 非構造材(天井材)落下防止ネットの力学に関する基礎的考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp.817-818, 2008
- 208) 小林 俊夫, 由利 隆行, 荒井 智一: 鋼製天井下地を用いた吊り天井の耐震性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 73(630), 1295-1302, 2008 年
- 209) 吉兼比呂志, 星川努, 九野修司, 渡辺恵介, 山田眞左和, 荒井智一: 金属パネル天井の耐震性に関する研究:(その 7)在来鋼製下地天井の静的水平加力実験, 日本建築学会学術講演梗概集 B-1, pp.219-220, 2009 年
- 210) 星川努, 九野修司, 渡辺恵介, 吉田宏一, 小林俊夫: 金属パネル天井の耐震性に関する研究:(その 8)特殊な在来鋼製下地天井の静的水平加力実験, 学術講演梗概集 B-1, pp.221-222, 2009 年
- 211) 渡辺恵介, 大迫勝彦, 星川努, 九野修司, 荒井智一: 金属パネル天井の耐震性に関する研究:(その 9)設備等により部材が切断された在来鋼製下地天井の水平加力実験, 日本建築学会学術講演梗概集 B-1, pp.223-224, 2009 年
- 212) 荒井智一, 星川努, 九野修司, 渡辺恵介, 大庭章, 小林俊夫: 金属パネル天井の耐震性に関する研究:(その 10)プレースを設置せず壁に突きつけた在来鋼製下地天井の耐震性に関する基礎的実験, 日本建築学会学術講演梗概集 B-1, pp.225-226, 2009 年
- 213) 由利隆行, 小林俊夫, 細岡正樹, 荒井智一: 天井の耐震性に関する研究:(その 8)グリッドシステム天井の振動台実験, 日本建築学会学術講演梗概集 B-1, pp.215-216, 2009 年
- 214) 細岡正樹, 小林俊夫, 由利隆行: 天井の耐震性に関する研究:(その 9)クロス天井の水平加力試験, 日本建築学会学術講演梗概集 B-1, pp.217-218, 2009 年
- 215) 横沢秀夫, 赤瀬竜也, 寺山武志, 井原和弘, 荒井智一: 在来工法天井の構成部材および実大天井の力学的特性に関する実験研究: その 5:実大天井モデルの静的加力実験の概要と実験結果, 日本建築学会学術講演梗概集 B-1, pp.235-236, 2009 年
- 216) 藪内彰夫, 赤瀬竜也, 寺山武志, 井原和弘, 荒井智一: 在来工法天井の構成部材および実大天井の力学的特性に関する実験研究: その 6:実大天井モデルの静的加力実験の結果(T-3~T-6 試験体)とまとめ, 日本建築学会学術講演梗概集 B-1, pp.237-238, 2009 年
- 217) 寺本翔史, 永野康行, 辻岡静雄: 耐震設計された天井の水平加力実験, 日本建築学会大会, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.859-860, 2010 年
- 218) 由利隆行, 小林俊夫, 荒井智一, 荻原健二: 天井の耐震性に関する研究:(その 10)グリッドシステム

-
- ム天井における施工誤差の影響, , 日本建築学会大会, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.861-862, 2010 年
- 219) 高木圭一郎, 渡辺恵介, 大迫勝彦, 吉田宏一, 大庭章, 小林俊夫, 荒井智一: 金属パネル天井の耐震性に関する研究 その 11 吊り下げ設備を含む天井の水平加力試験, , 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.863-864, 2010 年
- 220) 吉田宏一, 渡辺恵介, 仲川ゆり, 大迫勝彦, 大庭章, 小林俊夫, 荒井智一: 金属パネル天井の耐震性に関する研究 その 12 動的振動台実験実験概要および実験結果, , 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.865-866, 2010 年
- 221) 渡辺恵介, 進藤隆之, 大迫勝彦, 吉田宏一, 大庭章, 小林俊夫, 荒井智一: 金属パネル天井の耐震性に関する研究 その 13 動的振動台実験実験結果, , 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.867-868, 2010 年
- 222) 荒井智一, 渡辺恵介, 大迫勝彦, 吉田宏一, 大庭章, 小林俊夫, 荻原健二: 金属パネル天井の耐震性に関する研究 その 14 吊り下げ設備と天井との連成効果, , 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.869-870, 2010 年
- 223) 小林俊夫, 荻原健二: システム天井の静的鉛直荷重試験 その 1 実験の概要とその結果, , 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.767-768, 2011 年
- 224) 荒井智一, 星川努, 吉田宏一, 小林俊夫: 金属パネル天井の耐震性に関する研究 その 15 在来鋼製下地天井の野縁受け方向水平加力実験, , 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.769-770, 2011 年
- 225) 石渡康弘, 大迫勝彦, 大庭章, 小林俊夫, 荻原健二: 大規模空間の天井の耐震化に関する研究, , 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.771-772, 2011 年
- 226) 和田泰典, 渡辺恵介, 進藤隆之, 荒井智一, 仲川ゆり, 大森直樹: ブレースを用いない在来鋼製下地天井の耐震性に関する研究 その 1 実験概要と野縁受け方向の試験結果, , 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.773-774, 2011 年
- 227) 渡辺恵介, 和田泰典, 進藤隆之, 小林俊夫, 仲川ゆり, 大森直樹: ブレースを用いない在来鋼製下地天井の耐震性に関する研究 その 2 補強金具と野縁受け方向の試験結果, , 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.775-776, 2011 年
- 228) 吉川昇, 岩下裕樹, 渡壁守正, 稲井慎介, 石岡拓, 飯塚信一, 高井茂光, 金川基: 耐震クリップ工法

- の開発 その1 材料実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.391-392, 2011 年
- 229) 岩下裕樹, 吉川昇, 渡壁守正, 稲井慎介, 石岡拓, 飯塚信一, 高井茂光, 金川基: 耐震クリップ工法
の開発 その2 振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.393-394, 2011 年
- 230) 佐藤良介, 中本康, 他: 耐震補強された鋼製下地在来工法天井の吊りボルトにおける吊り元の耐震
性: その1 金物を介して振れ止めブレースが接合される部位の耐力確認のための静的加力実験,
日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD.構造 I, 873-874, 2012
- 231) 川崎健二郎, 中本康, 他: 耐震補強された鋼製下地在来工法天井の吊りボルトにおける吊り元の耐
震性: その2 吊りボルトを対象とした解析的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD.構造
I, 875-876, 2012
- 232) 芦川雄郁, 他: 東北地方太平洋沖地震による吊り天井の耐震性の検証と改修方法に関する研究:
その1 鋼製下地材を用いた在来工法天井の被害状況に関するアンケート調査, 日本建築学会大会
学術講演梗概集 DVD.構造 II, pp.43-44, 2012
- 233) 柳崎尚輝, 他: 東北地方太平洋沖地震による吊り天井の耐震性の検証と改修方法に関する研究:
その2 吊り天井の被害状況及び実大振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD.構造 II,
pp.45-46, 2012
- 234) 稲毛康二郎, 他: 東北地方太平洋沖地震による吊り天井の耐震性の検証と改修方法に関する研究:
その3 粘弾性ゴムを用いたダンパーによる制震改修方法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概
集 DVD.構造 II, pp.47-48, 2012
- 235) 大蔵勇太, 他: 東北地方太平洋沖地震によって落下被害を受けた天井下地組の強度と剛性に関す
る研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD.構造 IV, pp.61-62, 2012
- 236) 金井崇紘, 元結正次郎, 佐藤恭章: 部分天井試験体を用いた動的および静的実験: 強化されたク
リップを用いた在来工法天井に関する研究 その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD.構造
I, 877-878, 2012
- 237) 佐藤 恭章, 元結 正次郎, 金井 崇紘: 施工誤差を考慮した天井システムの性能評価 強化され
たクリップを用いた在来工法天井に関する研究 その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD
構造 I, pp.879-880, 2012 年
- 238) 渡壁 守正, 飯塚 信一, 高井 茂光, 稲井 慎介, 金川 基, 宅間 真: システム天井の耐震対策
に関する性能検証実験 その1 実験概要と損傷状況, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構

- 造 II, pp.1059-1060, 2012 年
- 239) 飯塚 信一, 渡壁 守正, 高井 茂光, 稲井 慎介, 金川 基, 宅間 真: システム天井の耐震対策に関する性能検証実験 その 2 耐震対策に対する実験的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 II, pp.1061-1062, 2012 年
- 240) 鈴木 健司, 金子 美香, 半澤 徹也, 神原 浩, 櫻庭 記彦: 鋼製下地在来工法天井の耐震性検討のための振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 II, pp.1063-1064, 2012 年
- 241) 宅間 真, 渡壁 守正, 飯塚 信一, 稲井 慎介, 高井 茂光, 金川 基: 耐震クリップ工法の開発 その 4 段差天井, 斜め天井, フラット天井の実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 II, pp.1067-1068, 2012 年
- 242) 金川 基, 渡壁 守正, 飯塚 信一, 稲井 慎介, 高井 茂光, 宅間 真: 耐震クリップ工法の開発 その 5 段差天井, 斜め天井, フラット天井の実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 II, pp.1069-1070, 2012 年
- 243) 藤井孝晏, 林茂樹, 小林俊夫, 相原正史, 荒井智一: 鋼製天井下地材の強度, 剛性に関する研究 (その 1) 概論および試験方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 材料施工, pp.1287-1288, 2012 年
- 244) 荒井智一, 藤井孝晏, 安酸將城, 相原正史: 鋼製天井下地材の強度, 剛性に関する研究 (その 2) 吊りボルトの圧縮強度試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 材料施工, pp.1289-1290, 2012 年
- 245) 大森直樹, 藤井孝晏, 安酸將城, 荒井智一, 相原正史: 鋼製天井下地材の強度・剛性に関する研究 (その 3) 天井面の鉛直載荷試験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 材料施工, pp.1291-1292, 2012 年
- 246) 相原正史, 三隅哲志, 藤井孝晏, 荒井智一: 鋼製天井下地材の強度・剛性に関する研究 (その 4) 天井面の水平載荷試験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 材料施工, pp.1293-1294, 2012 年
- 247) 中楚洋介, 川口健一, 荻芳郎, 大矢俊治, 小澤雄樹, 森雄矢, 佐藤大輔: 既存天井におけるケーブルを用いた制震システムに関する基礎的研究, 構造工学論文集 B 59B, 489-495, 2013-03-25
- 248) 今泉佳祐, 本杉省三, 勝又英明: 東日本大震災における震災復旧・震災対策及び客席天井の修繕改修工事について: 劇場・ホールにおける震災対応に関する調査(その 3), 日本建築学会大会学術講

- 演梗概集 DVD 建築計画, pp.245-246, 2013 年
- 249) 大月拓也, 東大功, 鈴木和英, 作間隆幸: K 駅における天井落下被害とその要因: 3次元曲面形状の天井における落下メカニズム, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 II, pp.293-294, 2013 年
- 250) 宅間真, 渡壁守正, 飯塚信一, 高井茂光, 金川基, 稲井慎介: システム天井の耐震対策に関する性能検証実験: その 3 耐震ハンガーの性能検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 II, pp.679-680, 2013 年
- 251) 金川基, 渡壁守正, 飯塚信一, 稲井慎介, 高井茂光, 宅間真: システム天井の耐震対策に関する性能検証実験: その 4 振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 II, pp.681-682, 2013 年
- 252) 稲井慎介, 渡壁守正, 飯塚信一, 高井茂光, 金川基, 宅間真, 岩下裕樹: 耐震クリップ工法の開発: その 6 耐震クリップ水平載荷試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 II, pp.683-684, 2013 年
- 253) 永井拓生, 川口健一: 切妻屋根の吊天井における吊長分布および補強による地震応答への影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.993-994, 2013 年
- 254) 坂本有奈利, 小泉秀斗, 山下哲郎, 久田嘉章: 振動台を用いたシングルライン天井の天井板落下実験: その 1 実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.999-1000, 2013 年
- 255) 小泉秀斗, 坂本有奈利, 久田嘉章, 山下哲郎: 振動台を用いたシングルライン天井の天井板落下実験: その 2: 天井落下と加速度の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1001-1002, 2013 年
- 256) 小林俊夫: 天井の耐震性に関する研究:(その 11) 中央を弾性支持されたブレースの座屈耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1009-1010, 2013 年
- 257) 瀬本侑輝, 林篤, 荒井智一, 山高円: 在来鋼製下地天井に用いる高耐力耐震ブレースの開発:(その 1) 開発の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1011-1012, 2013 年
- 258) 山高円, 星川努, 有山伸司, 岡田健吾, 小林俊夫, 荻原健二: 在来鋼製下地天井に用いる高耐力耐震ブレースの開発:(その 2) 高耐力耐震天井の静的水平加力試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1013-1014, 2013 年
- 259) 和田泰典, 瀬本侑輝, 山高円, 荻原健二, 進藤隆之: 在来鋼製下地天井に用いる高耐力耐震ブレース

- スの開発 : (その3)防振天井の静的水平加力試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1015-1016, 2013 年
- 260) 高石幸寿, 小林俊夫, 荒井智一: 大きな外力を想定した天井の耐震性に関する研究 : その 1 研究概要および静的加力試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1017-1018, 2013 年
- 261) 荒井智一, 小林俊夫, 高石幸寿: 大きな外力を想定した天井の耐震性に関する研究 : その 2 動的振動台実験 実験概要および実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1019-1020, 2013 年
- 262) 荻原健二, 奥村彰啓, 小林俊夫: システム天井面の静的水平荷重試験 : その 4 天井懐寸法の大きな試験計画の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1021-1022, 2013 年
- 263) 奥村彰啓, 荻原健二, 小林俊夫: システム天井面の静的水平荷重試験 : その 5 天井懐寸法の大きなグリッド工法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1023-1024, 2013 年
- 264) 植原均, 田上淳, 小林俊夫, 荒井智一, 梅野友里: 吊り長さ 3m の天井の耐震性能に関する研究 : その 1 研究概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1025-1026, 2013 年
- 265) 大森直樹, 穂山靖司, 田上淳, 引田真規子, 小林俊夫, 梅野友里: 吊り長さ 3m の天井の耐震性能に関する研究 : その 2 2 段斜め部材付天井 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1027-1028, 2013 年
- 266) 梅野友里, 植原均, 引田真規子, 小林俊夫, 荒井智一, 大森直樹: 吊り長さ 3m の天井の耐震性能に関する研究 : その 3 2 段斜め部材付天井 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1029-1030, 2013 年
- 267) 穂山靖司, 引田真規子, 緒方誠二郎, 小林俊夫, 荒井智一, 大森直樹: 吊り長さ 3m の天井の耐震性能に関する研究 : その 4 通し斜め部材付天井, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1031-1032, 2013 年
- 268) 山上聡, 茂木正史, 岸本剛: 天井の耐震補強に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1033-1034, 2013 年
- 269) 稲毛康二郎, 秦一平, 柳崎尚輝: 天井板を TMD として利用した新しい吊り天井システムの開発 : その 1 最適設計方法と制震部材の単体試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1035-1036, 2013 年
- 270) 柳崎尚輝, 秦一平, 稲毛康二郎: 天井板を TMD として利用した新しい吊り天井システムの開発 :

- その2 実大モデルによる振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1037-1038, 2013 年
- 271) 小林隼人, 文野正裕, 山中祐一, 山高円, 中内正人, 阿部亮: スパンドレル天井の落下防止構法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1039-1040, 2013 年
- 272) 佐藤拓人, 川口健一: 非構造材落下防止ネットの初期形状に関する基礎的考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, pp.1041-1042, 2013 年
- 273) 村上和広, 佐々木晴夫, 尾方大輔, 樋口憲助, 吉川昇, 岩下裕樹, 森田仁彦, 高井賢, 欄木龍大, 杉山智昭: 耐震天井の剛性に関する研究: その1 実大実験の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 材料施工, pp.1095-1096, 2013 年
- 274) 樋口憲助, 佐々木晴夫, 尾方大輔, 村上和広, 吉川昇, 岩下裕樹, 森田仁彦, 高井賢, 欄木龍大, 杉山智昭: 耐震天井の剛性に関する研究: その2 実大実験の試験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 材料施工, pp.1097-1098, 2013 年
- 275) 尾方大輔, 佐々木晴夫, 村上和広, 樋口憲助, 吉川昇, 岩下裕樹, 森田仁彦, 高井賢, 欄木龍大, 杉山智昭: 耐震天井の剛性に関する研究: その3 改良天井の性能確認試験の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 材料施工, pp.1099-1100, 2013 年
- 276) 岩下裕樹, 佐々木晴夫, 村上和広, 樋口憲助, 吉川昇, 尾方大輔, 森田仁彦, 高井賢, 欄木龍大, 杉山智昭: 耐震天井の剛性に関する研究: その4 性能確認試験結果と考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 材料施工, pp.1101-1102, 2013 年
- 277) 内田郁子, 佐藤孝典, 米谷壮央: 大規模天井の摩擦ダンパーによる制震補強の開発: その1 摩擦ダンパーの要素実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 II, 843-844, 2014 年
- 278) 佐藤孝典, 米谷壮央, 内田郁子: 大規模天井の摩擦ダンパーによる制震補強の開発: その2 摩擦ダンパーによって制震補強された天井の2軸加振実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 II, 845-846, 2014 年
- 279) 手塚純一, 相原正史, 荒井智一: 東府中駅駅舎における既存特定天井落下防止措置の計画および確認実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 913-914, 2014 年
- 280) 松浦将一, 難波清孝, 持田泰秀: 既存体育館の特定天井規定を考慮した天井改修に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 915-916, 2014 年
- 281) 廣玉拓也, 川口健一: 非構造材(天井材)落下防止ネットと補強ケーブルの力学に関する基礎的考察,

- 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 917-918, 2014 年
- 282) 荒井貴浩, 飯沼輝人, 福田久雄, 高谷真実, 荻原健二: 金属系パネル天井に対するワイヤーを用いた落下防止措置に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 919-920, 2014 年
- 283) 野々村巧, 石川 1 浩一郎: 学校体育館の鋼製下地在来工法天井の弾性地震応答性状と部材耐力余裕度, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 931-932, 2014 年
- 284) 中村志帆, 吉中進, 谷口与史也: 吊り天井の振動応答に及ぼす減衰効果に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 933-934, 2014 年
- 285) 櫻庭記彦, 鈴木健司, 金子美香: クリップを用いない軽量鉄骨下地耐震天井の開発: その 1 天井の基本構成と静的加力試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 939-940, 2014 年
- 286) 鈴木健司, 櫻庭記彦, 金子美香: クリップを用いない軽量鉄骨下地耐震天井の開発: その 2 動的加振試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 941-942, 2014 年
- 287) 楫田祐也, 小林俊夫, 野曾原瑞樹, 荒井智一: 天井面構成部材等の耐震性に関する研究: (その 1) 天井ユニット試験 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 943-944, 2014 年
- 288) 野曾原瑞樹, 小林俊夫, 荒井智一, 楫田祐也: 天井面構成部材等の耐震性に関する研究: (その 2) 天井ユニット試験 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 945-946, 2014 年
- 289) 田中 栄次, 半澤徹也, 鈴木健司, 櫻庭記彦, 金子美香: 部分補強された在来工法天井の力学特性に関する研究: その 1. 静的繰り返し加力実験と履歴特性モデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 947-948, 2014 年
- 290) 小林 俊夫: 天井の耐震性に関する研究: (その 12) ルーバー天井の面内変形評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 953-954, 2014 年
- 291) 本田 信一, 高岡昌史, 伊賀広之, 湯地智聖: 天井面の水平応力の伝達に関する研究 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 955-956, 2014 年
- 292) 湯地 智聖, 高岡昌史, 本田信一, 伊賀広之: 天井面の水平応力の伝達に関する研究 その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 957-958, 2014 年
- 293) 五十嵐泰二, 橋爪隆一, 原基, 小林隼人, 中内正人, 阿部亮: スパンドレル天井の落下防止対策に関する研究: その 1 構法の概要と保持部材の性能確認, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 961-962, 2014 年
- 294) 岩崎和明, 山高円, 和田泰典, 星川努, 林篤: スパンドレル天井の落下防止対策に関する研究: そ

- の2 振動台実験による検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 963-964, 2014 年
- 295) 山高円, 岩崎和明, 和田泰典, 星川努, 林篤: スパンドレル天井の落下防止対策に関する研究: その3 振動台実験の解析的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 965-966, 2014 年
- 296) 田中健一, 小泉秀斗, 山下哲郎, 久田嘉章: シングルライン天井の耐震性と落下防止対策に関する研究: その1: 天井板の接着による落下防止対策の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 967-968, 2014 年
- 297) 鱒沢曜, 小泉秀斗, 金井貴浩, 久田嘉章, 山下哲郎: シングルライン天井の耐震性と落下防止対策に関する研究: その2: 補強金物による落下防止対策の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 969-970, 2014 年
- 298) 小泉秀斗, 鱒沢曜, 金井貴浩, 久田嘉章, 山下哲郎: シングルライン天井の耐震性と落下防止対策に関する研究: その3: 補強金物による落下防止対策の性能確認実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 971-972, 2014 年
- 299) 高橋聖子, 小林久良雄, 富高隆, 佐々木晴夫, 尾方大輔, 岩下裕樹: 耐震性を有する防振天井の開発: その1 防振天井の仕様, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 環境工学 I, 157-158, 2014 年
- 300) 富高隆, 佐々木晴夫, 尾方大輔, 高橋 聖子, 小林久良雄, 岩下裕樹: 耐震性を有する防振天井の開発: その2 防振性能試験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 環境工学 I, 159-160, 2014 年
- 301) 船越 広行, 多賀謙蔵, 高岡昌史, 湯地智聖: 耐震性に配慮した在来鋼製下地天井の水平剛性評価に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 951-952, 2014 年
- 302) 大森 直樹, 植原均, 小林 俊夫, 穂山 靖司, 荒井 智一, 田上 淳, 梅野 友里, 金子 貴司: 懐寸法の大きな天井を対象とした振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 959-960, 2014 年
- 303) 森大, 元結正次郎, 佐藤恭章, 山下哲郎, 中西規夫, 末岡利之: ラインタイプシステム天井の動の実験概要と損傷状況: ラインタイプシステム天井の動的性状に関する検討 その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 973-974, 2014 年
- 304) 佐藤恭章, 元結正次郎, 森大, 山下哲郎, 中西規夫, 末岡利之: ラインタイプシステム天井におけるすべり挙動と復元力特性に関する考察: ラインタイプシステム天井の動的性状に関する検討

- その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 975-976, 2014 年
- 305) 天野聡志, 元結正次郎, 金子健作, 湊川諒, 佐藤恭章, 佐藤幸博, 佐々木康人, 田原健一: 仕上げボードの材料特性: 非構造部材に用いられる要素の力学的性状 その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 935-936, 2014 年
- 306) 湊川諒, 元結正次郎, 金子健作, 天野聡志, 佐藤恭章, 佐藤幸博, 佐々木康人, 田原健一: せん断ずれ耐力および頭抜け耐力の検討: 非構造部材に用いられる要素の力学的性状 その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 I, 937-938, 2014 年
- 307) 瀧ヶ崎進, 貫井泰, 笹嶋健, 上山等, 青柳隆之: 建築物の非構造部材及び設備の総合的な耐震性評価手法に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.1035-1036, 2004 年
- 308) 佐藤恭章, 元結正次郎, グレゴリーマックレイ: モンテカルロシミュレーションを用いた鋼製下地 在来工法天井の損傷評価, 構造工学論文集 B 58B, pp.527-531, 2012 年
- 309) 青井淳, 恒川裕史: 多質点系建物モデルの地震応答解析結果を用いた在来工法天井の被害推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 DVD 構造 II, pp.1207-1208, 2012 年

付録

付録 A

A2.1 はじめに

クリップは JIS G 3302 にて規定される溶融亜鉛めっき鋼板を素材とし、この鋼板が押し型成形過程を経て製作される。すなわち、押し型成形によりクリップは当初から塑性履歴を受けた状態にあり、加工後の特性は処女時の特性とは異なっていると考えられる。このことを確認するために、接合部の力学的特性に特に大きな影響を及ぼすと考えられるクリップ肩部を考える。

A2.2 試験片の説明

クリップの肩部を抽出した試験体を作製した。加工前の素材に対する引張試験結果を付表 A1 に、試験体の形状・寸法を付図 A1, 付図 A2 に示す。実験は、山形部斜辺領域の曲げモーメント分布が付図 A3 に示す状態となるように、支持台に載せた試験体頂部に鉛直方向集中荷重を加力する曲げ実験とした。支持部はローラー支持となるように、油膜層を挟んだ 2 枚の板ガラスを用いて、板ガラス①を加力装置に固定し、板ガラス①にはゴムを介して試験体を配置する方法を採用している(付図 A4)。変位計測は、付図 A3 に示す頂点鉛直変位 w を接触型変位計、支点部水平変位をレーザー変位計にて計測している。実験風景を付図 A5 に示す。

A2.3 実験結果

実験結果を付図 A6 に示す。なお図中には、実験結果から加工後の応力ひずみ関係を推定するために、降伏応力を変化させて行った数値解析も併せて示してある。この図から、曲げ加工後の見かけ上の降伏応力は、処女時のおよそ 1.09 倍に上昇していることが解る。

付録 B ハンガー接合部の力学モデルにおける条件式と剛性式 K_s の詳細

ハンガー接合部の力学モデルにおいて成立する釣合式および適合条件式について述べる。なお、ここでは図 2.41 のハンガー接合部の力学モデルに吊ボルトに相当する要素 OA を点 A から上に付加したモデルで式を展開していく。吊ボルトの材長を $L_b = \eta L_h$ で表し、吊ボルトの断面 2 次モーメントを I_b で表す。吊ボルトの上端（点 O）を固定ローラー支持とし、点 O に荷重 H が作用する場合について釣合条件式および適合条件式を立て、たわみ角法により解く。各材端モーメントの式はここでは省略する。各要素の材端モーメントおよびせん断力を M_{ij} , $Q_{ij}(i,j=O\sim E)$ で示すと、このモデルにおける各節点方程式および各部材のせん断力は以下ようになる。

$$M_{oa} + M_{ab} = 0, M_{ba} + M_{bc} = 0, M_{cb} + M_{cd} = 0, M_{dc} + M_{de} = 0 \quad (\text{B-1a,b,c})$$

$$Q_{ab} = Q_{de} = 0, Q_{oa} = Q_{bc} = H, Q_{cd} = \begin{cases} H & (\text{Open}) \\ \text{Unknown} & (\text{Close}) \end{cases} \quad (\text{B-1e,f,g})$$

次に、剛体上の点 F におけるモーメントの釣合式ならびにハンガー要素と剛体の間に成立する適合条件式を、ハンガーの各変形状態に対して考える。

$$\text{Open 時: } H \frac{(1-\beta)L_h}{2} + M_{ed} + k_\theta R_{ef} = 0, \theta_e = R_{ef} \quad (\text{B-2a,b})$$

$$\text{Close 時: } (Q_{cb} + Q_{cd}) \frac{(1-\beta)L_h}{2} - Q_{dc} \frac{(1-\beta)L_h}{2} + M_{ed} + k_\theta R_{ef} = 0, R_{cd} = R_{ef} \quad (\text{B-2c,d})$$

θ_e は要素 DE の回転角、 R_{cd} , R_{ef} は要素 CD および剛体の部材角、 k_θ は回転バネ剛性をそれぞれ示す。

以上の条件式から、たわみ角法により導かれる水平バネ FG を含めた水平剛性式を以下に示す。

$${}_{open}K_s = \left\{ \frac{1}{K_{h1}} + \frac{1}{K_{h2}} + \frac{1}{K_{h3}} + \frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_b} \right\}^{-1} \quad (\text{B-3a,b})$$

$${}_{close}K_s = \left\{ \frac{1}{K_{h1}} + \frac{1}{K_{h3}} + \frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_b} \right\}^{-1}$$

ここで、

$$K_{h1} = \frac{12EI_h}{(\beta L_h)^3}, K_{h2} = \frac{12EI_h}{\{(1-\beta)L_h\}^3}, K_{h3} = \frac{4EI_h}{L_h^3} \frac{A_1 + \mu A_2}{B_1 + \mu B_2}, \mu = \frac{\eta I_b}{\beta I_h} \quad (\text{B-4a,b,c,d})$$

$$K_c = \frac{\lambda EI_c}{L_c^3}, K_b = \frac{12EI_b}{(\eta L_h)^3} \quad (\text{B-4e,f})$$

$$A_1 = \begin{cases} k_\theta L_h (\alpha + \gamma + 1) + EI_h \\ k_\theta \{4(\beta + \alpha)(3\gamma + 1 - \beta) + (1 - \beta)(4\gamma + 1 - \beta)\} L_h + 4EI_h (3\gamma + 1 - \beta) \end{cases} \quad (\text{B-5a,b})$$

$$A_2 = \begin{cases} k_\theta \beta L_h \\ 4k_\theta (3\gamma - \beta + 1) \beta L_h \end{cases} \quad (\text{B-6a,b})$$

$$B_1 = \begin{cases} k_\theta L_h \{ \alpha + 4\alpha\gamma + \gamma + \beta(1-\beta)(\alpha + \gamma + 1) \} \\ \quad + EI_h \{ \beta + \gamma(1-\beta)^2 + \alpha(1+\beta)^2 \} \\ k_\theta \{ 12\alpha\gamma + 4\alpha(1-\beta)(\gamma + 1) + \beta(1-\beta)(4\gamma + 1 - \beta) \} \beta^2 L_h \\ \quad + EI_h \left[(4\gamma + 1 - \beta)(1-\beta)^3 + 4(3\gamma + 1 - \beta) \{ \beta + \alpha(\beta + 1)^2 \} \right] \end{cases} \quad (\text{B-7a,b})$$

$$B_2 = \begin{cases} k_\theta \beta L_h \{ \alpha \eta^2 + (1-\beta)\beta + (\eta + 1)^2 + \gamma(\eta + 2)^2 \} + \beta EI_h (\eta + \beta + 1)^2 \\ k_\theta \beta L_h \left[(4\gamma + 1 - \beta)(1-\beta)(\eta + 2\beta)^2 + 4(3\gamma + 1 - \beta) \{ \beta(\eta + \beta)^2 + \alpha \eta^2 \} \right] \\ \quad + 4EI_h \beta (3\gamma + 1 - \beta)(\eta + \beta + 1)^2 \end{cases} \quad (\text{B-8a,b})$$

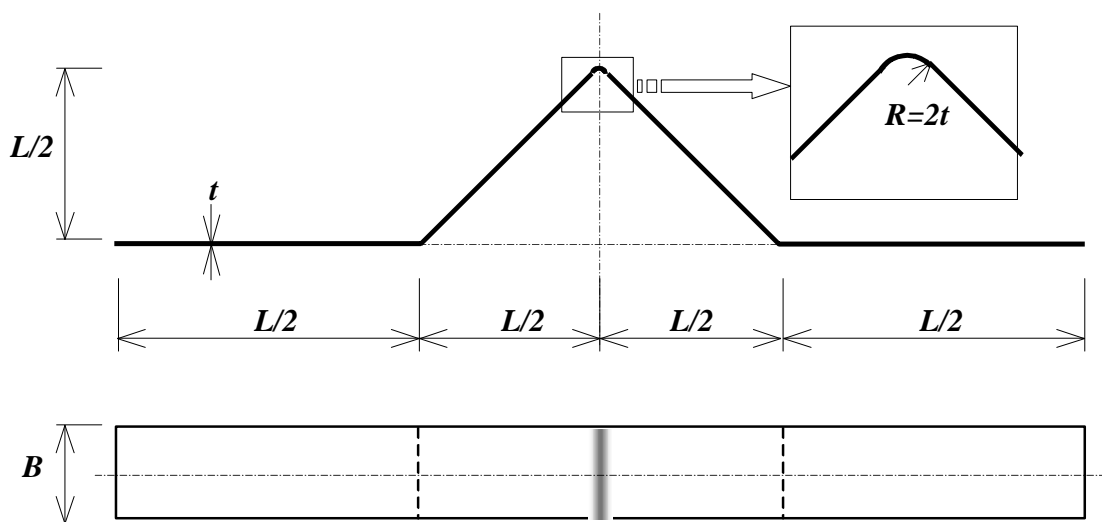
${}_{Open}K_s, {}_{Close}K_s$ はそれぞれ Open 時および Close 時の水平剛性を示す。 A_i, B_i ($i=1,2$) において、ハンガーの Open 時の水平剛性には式 (B-5~8a) を、Close 時には式 (B-5~8b) を用いる。吊ボルトの材長が $L_b=0$ のとき、式 (B-3a,b) の $1/K_b=\mu=0$ となり、吊ボルトを除いたハンガー接合部の水平剛性が得られる。

付録

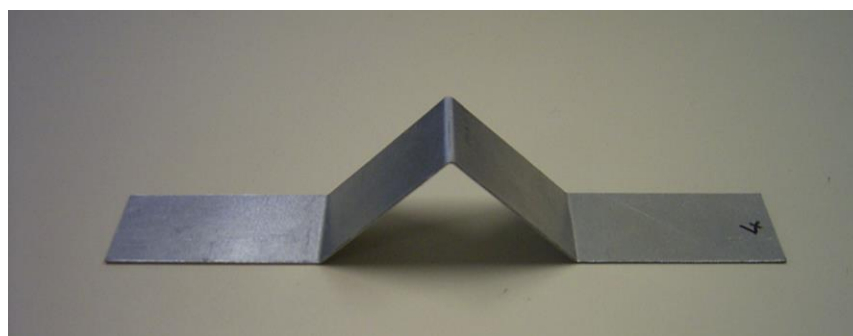
Figures and Tables

付表 A1. 素材の機械的性質

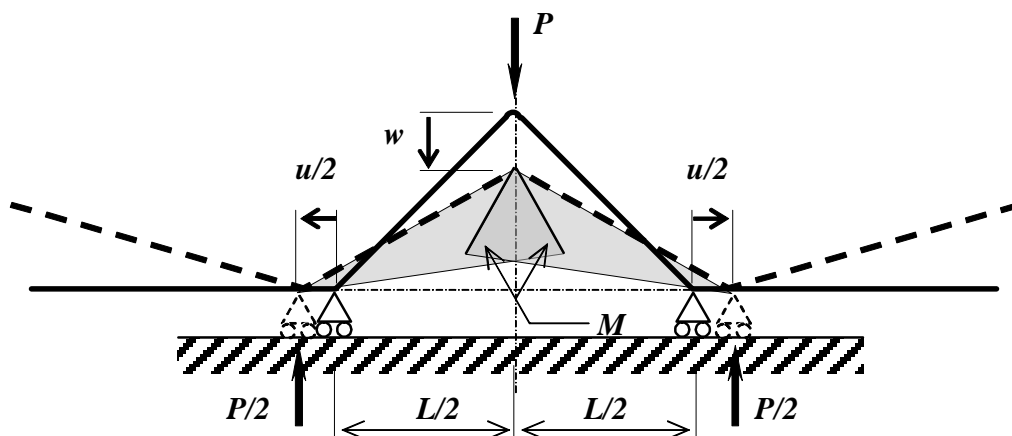
ヤング係数 E	降伏応力 σ_y	ひずみ硬化係数 E_t
185000 N/mm ²	285 N/mm ²	1503 N/mm ²



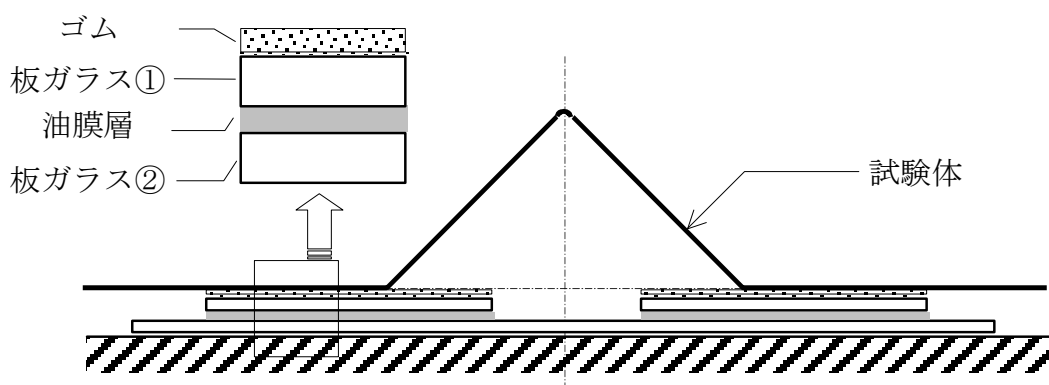
付図 A1. 山形曲げ試験体



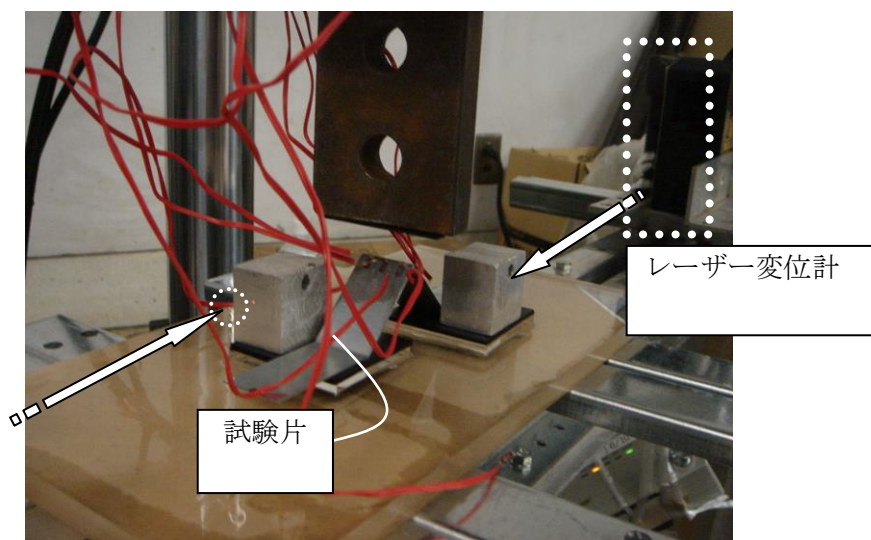
付図 A2. 試験片



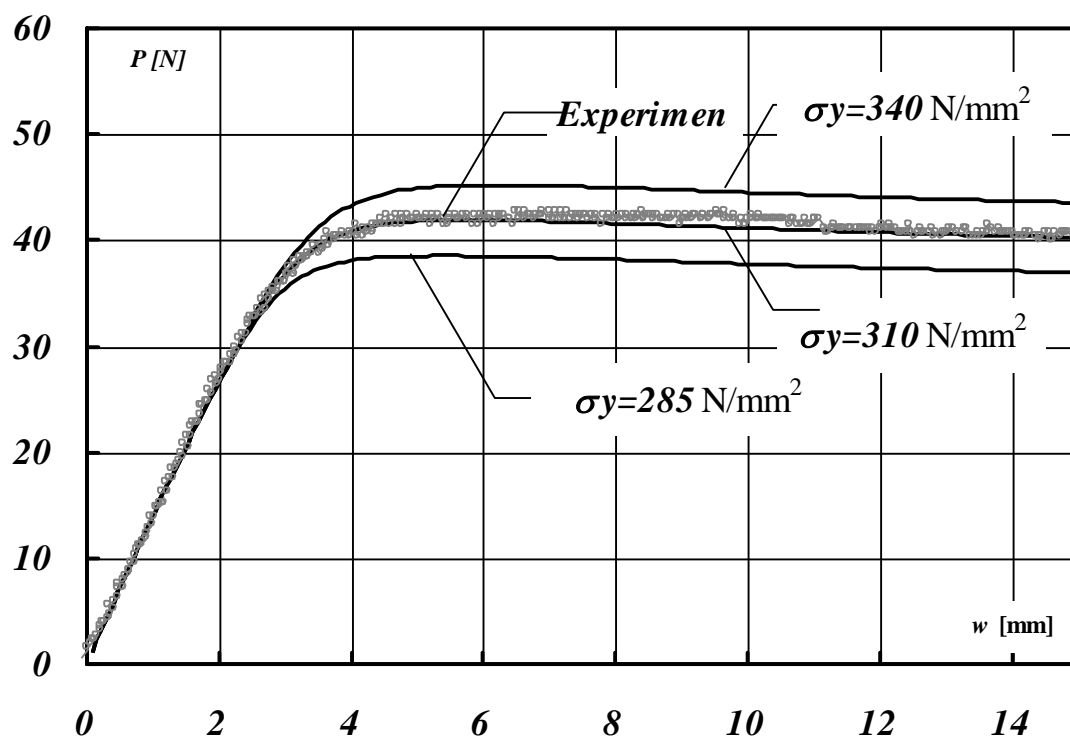
付図 A3. 山形試験概念



付図 A4. 支持部詳細



付図 A5. 実験風景



付図 A6. 鉛直荷重-変位関係