T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	異種鋼材を用いたH形鋼柱部材の塑性変形性能に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	五十嵐規矩夫
Author(English)	KIKUO IKARASHI
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:乙第2675号, 授与年月日:1994年9月30日, 学位の種別:論文博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第2675号, Conferred date:1994/9/30, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

異種鋼材を用いたH形鋼柱部材の塑性変形性能に関する研究

建築学専攻

五十嵐　規矩夫

謝　辞

本研究を進めるにあたり，終始懇切かつ適切なる御指導，御鞭撻を賜わりました，東京工業大学教授，工学博士，鈴木敏郎先生に心から感謝の意を表します。先生には，研究に対する姿勢，工学的な論文の在り方など数多くの御教示を戴きました。重ねて御礼申し上げます。

東京工業大学教授，工学博士，小河利行先生には，学部4年生で研究室に所属した当初から御指導を戴き，研究の方法，論文のまとめ方など数々の御教示を戴きましたことを深く感謝いたします。

また東京工業大学，助手，小笠原朋隆氏ならびに福岡庸一氏には，多大な御援助を戴きましたことを心から感謝いたします。

最後に本論文をまとめるにあたり，東京工業大学工学部建築学科，鈴木研究室ならびに小河研究室の学生の方々には御協力を戴き心より感謝いたします。特に，山内輝暢氏，石田大三氏，小岩和彦氏，久芳勝行氏，牟田英児氏には，実験および解析にあたり多大なる御協力を戴きました。ここに心より感謝いたします。

平成6年9月

五十嵐規矩夫

内容梗概

本研究は，高軸力を受ける高靭性H形鋼柱部材の開発を目的として，ウエブに高張力鋼を用いたハイブリッド部材を提案し，その力学性状を検討したものである。部材の耐力を高く保ち，その塑性変形能力を向上させるために，ここでは大きく次の2つの点に着目している。第一は，部材構成板要素の連成局部座屈に対する拘束効果を高め，耐力低下要因の一つである局部座屈の発生を遅延させることであり，第二は，高軸力に対しても断面内の軸力分担部分をウエブ内，できれば中立軸近傍のみに留め，曲げ耐力の低下を防ぐことである。

このような観点に立ち，その具体的手法の一つとしてウエブの強度を上げることの効果を示し，フランジには軟鋼を使用したまま，ウエブには高張力鋼を使用したハイブリッド部材を提案している。このハイブリッド部材の力学性状を種々の載荷実験，数値解析を通して検討し，その有効性を示している。また最後に，より簡便な方法として中立軸近傍に新たな鋼板を配することを提案している。

本論文は6章より構成されており，それらの概要は以下の通りである。

第1章「序論」では，鋼構造部材の塑性変形能力を確保する際の問題点を指摘し，その一つの解答としてウエブに高張力鋼を使用したハイブリッド部材を提案するに至る経緯に触れている。また本研究に関連する既往の研究について概観し，本研究の位置づけと意義を述べている。

第2章「異種鋼材を用いたH形断面部材の曲げ変形性状」では，曲げを受ける部材を対象に耐力，塑性変形能力，耐力劣化勾配につ

いて検討している。鋼材には，軟鋼SS400，高張力鋼SM570，HT780を用い，これらを組合せることにより，単一鋼材よりなる部材，フランジが高張力鋼のハイブリッド部材，ウエブが高張力鋼のハイブリッド部材を作成して載荷実験を行っている。また併せて板要素を用いた有限要素法による弾塑性大変形解析を行い，塑性域の広がりを局部座屈性状と併せて考察している。その結果，本研究で提案するウエブに高張力鋼を使用したハイブリッド部材は安定した曲げ変形挙動を示すことを明らかにしている。この部材は，塑性変形能力を高める上で重要なフランジ塑性域の広がりも大きく，局部座屈波長も長いなどの特長を有していることを示している。

第3章「異種鋼材を用いたH形断面短柱の連成局部座屈性状」では，短柱圧縮挙動を取り扱い，構成板要素の連成局部座屈性状，各板要素の荷重分担を鋼材の組合せに注目した載荷実験，数値解析を通して検討している。鋼材の組合せは前章のものと同一とし，同時にウエブ板厚をパラメータに取り部材の力学性状に及ぼすこれらの影響を考察している。フランジに軟鋼を使用した全ての試験体は，フランジに高張力鋼を使用した試験体に比べて耐力上昇率，塑性率ともに高い値を示し，特にフランジが軟鋼，ウエブが高張力鋼である試験体の塑性率は大きく，その値はウエブ板厚が厚くなると大きくなることを示し，このハイブリッド部材の有効性を述べている。

第4章「異種鋼材を用いたH形鋼柱部材の塑性変形性状」では，前章までの知見を参考にフランジに軟鋼，ウエブに降伏応力度の高い80キロ級の高張力鋼を使用したハイブリッド柱部材を対象に載荷実験を行っている。このハイブリッド柱部材は高軸力下においても塑性中立軸をウエブ断面内に置くことが可能であり，曲げ耐力，塑性変形能力を高める要因となっており，大変形挙動も極めて安定

している。また，ウエブの板厚を通常の断面に使用されるような板厚のみでなく，フランジ板厚よりも厚くした場合も検討対象としているが，塑性変形能力を高めるという面では，この効果は大きいという結論を得ている。さらに塑性変形性能評価を試み，塑性変形能力を軸力及び幅厚比の関係で整理している。最後に数値解析を通して，ハイブリッド柱部材と低ＹＲ鋼を使用した柱部材の荷重変位関係との比較を行い，既往の鋼材を効果的に組合せる事で，鋼材に手を加えることなく部材の曲げ耐力を高く保ち，塑性変形能力を高められることを示している。

第５章「ウエブに鋼板を添接することによるＨ形断面部材の塑性変形能力改善」では，新たな断面形として中立軸近傍に鋼板を配したものを提案するに至った経緯を述べている。そして鋼板の形状と板厚を変数として，フランジ局部座屈後の応力再配分と耐力低下の機構について明らかにし，部材の塑性変形能力を向上させる鋼板の形状としては中立軸近傍にウエブせい方向の幅は狭く，板厚は厚いものがより有効であることを示している。さらに軸力比の影響に関しても検討を加えている。また添接する鋼板に高張力鋼を用いて，ウエブの一部ハイブリッド化の可能性についても示し，より高軸力を受ける柱部材の塑性変形能力を向上させることを可能にしている。

第６章「結論」では，本研究で提案するウエブに高張力鋼を使用し，フランジに軟鋼を使用したハイブリッド部材，中立軸上に新たに鋼板を配した部材の特長的な力学性状について得られた結論を総括して述べている。さらに鋼構造部材の塑性変形能力を確保する上での本研究内容の新規性及び有効性を述べている。

目　次

ページ

第１章　序論　・・・

3．3．2　耐力上昇率 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 51
3．3．3　塑性率 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 53
3．3．4　耐力劣化勾配 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 54
3．4　数値解析による純圧縮を受ける構成板要素の連成局部座屈性状 ・・・・ 55
3．4．1　数値解析概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 55
3．4．2　連成局部座屈時の各板要素の荷重分担 ・・・・・・・・・・・・・ 57
3．5　まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 60

第4章　異種鋼材を用いたH形鋼柱部材の
塑性変形性状 ・・ 72

4．1　はじめに ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 73
4．2　柱部材実験概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 75
4．2．1　試験体 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 75
4．2．2　実験装置及び使用鋼材 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 76
4．3　ハイブリッド柱部材の塑性変形性状 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 77
4．3．1　荷重変位関係における軟鋼柱部材との差異 ・・・・・・・・・・・ 77
4．3．2　P-Δ効果による耐力低下を表現した荷重変位関係 ・・・・・・・・ 79
4．3．3　軸力比の影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 80
4．3．4　ウエブ幅厚比の影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 81
4．3．5　耐力及び塑性変形性能 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 82
4．4　ハイブリッド柱部材の塑性変形性能評価 ・・・・・・・・・・・・・・ 84
4．4．1　塑性変形性能評価法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 84
4．4．2　短柱圧縮実験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 87
4．4．3　塑性変形性能 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 90
4．5　数値解析による各種単一鋼種柱部材との比較 ・・・・・・・・・・・・ 92
4．5．1　数値解析概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 92
4．5．2　荷重変位関係 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 94
4．5．3　ハイブリッド柱部材と高張力鋼柱部材との塑性変形性状の相違 ・ 95
4．6　まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 97

第5章　ウエブに鋼板を添接することによる
H形断面部材の塑性変形能力改善 ・・ 118

5．1　はじめに ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 119

5．2　中立軸上に鋼板を添接したH形断面の曲げ変形性状 ・・・・・・・・・・ 121
5．2．1　実験概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 121
5．2．2　帯板を添接した場合の曲げ変形性状 ・・・・・・・・・・・・・・・ 123
5．2．3　鋼板の形式による曲げ変形性状の違い ・・・・・・・・・・・・・・ 125
5．3　曲げ変形性状に及ぼす鋼板形状の影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 125
6．3．1　解析概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 126
6．3．2　塑性変形性状の差異 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 127
6．3．3　中立軸上に鋼板を添接した曲げ部材の塑性変形能力 ・・・・・・・ 129
5．4　中立軸上に鋼板を添接したH形鋼柱部材の塑性変形性状 ・・・・・・・ 132
5．4．1　実験及び解析概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 132
5．4．2　H形柱部材に対する鋼板添接の効果 ・・・・・・・・・・・・・・・ 134
5．5　中立軸上に高張力鋼鋼板を添接したH形鋼柱部材の塑性変形性状 ・・・ 136
5．5．1　実験概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 136
5．5．2　ウエブの一部ハイブリッド化の可能性とその効果 ・・・・・・・・ 137
5．6　まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 139

第6章　結論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 160

本研究に関連して著者の発表した論文 ・・・・・・・・・・・・ 164

参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 171

第１章　序論

１．１　本研究の背景

１．２　本研究の目的

１．３　既往の研究

１．１　本研究の背景

構造物の大型化に伴い，部材の軽量化が必要とされるようになってきており，高い降伏点を持つ高張力鋼が注目を集めている。実際，高張力鋼は橋梁などに多く使用され，建築の分野でも60キロ級までは使用されている。また最近では，経済性の面からも有利なように，溶接H形鋼などに異種鋼材を使用したハイブリッド部材の研究例もみうけられる[1)～22)]。この部材の利点は，フランジに高張力鋼を使用して曲げモーメントに対する抵抗を大きくしていることにある。しかし，部材に高張力鋼を使用した場合，普通軟鋼とは違い材料的な靭性が乏しく，塑性域の変形能力を確保するためには厳しい幅厚比制限が設けられる等，種々の問題を伴う[23)，24)，63)]。このような高張力鋼の欠点ともいうべき靭性の乏しさは，高い降伏比によるものである[24)]。そのため最近では，高張力鋼の靭性を増すために低降伏点鋼が開発され，実用化される段階にきている[25)～45)]。しかしこの場合，引張強さをそのままにして降伏点を下げることで降伏比が高くなるのを抑えているために，靭性を向上させている反面，耐力を下げている。

このように，高い耐力を有し，十分な変形性能を持たせ，部材の吸収エネルギーを大きくすることは数々の困難を伴う。しかし，現在の構造物の設計体系は，従来の弾性設計に立脚した許容応力度設計法に保有耐力・変形性能の概念を導入し，靭性能に応じた保有水平耐力の検定を行う設計方式へと移行しようとしている[88)]。このような現状を踏まえると，部材の軽量化を計った上で，高い耐力を有し，十分な変形能力を有する部材が必要となってきている。しかし，部材の塑性変形性能が構成板要素の幅厚比と材料の降伏応力度により規定され，設計に対する自由度がかなり奪われている現状においては，部材の変形性能を自由にコントロールできる全く新しい発想による手法および設計法が必要になってきていると考える。

鋼構造部材の耐力及び塑性変形能力を決定する要因の一つに，構成板要素の局部座屈現象があげられる。この構成板要素の局部座屈現象を詳細に捉えることで，部材性能へ局部座屈が如何に影響を与えているかを明確にすることができる。板要素の局部座屈現象については，M.G.Lay[46]，田中ら[47]の研究を始めとする数多くの研究により，座屈荷重と幅厚比の関係などが実験を中心に今日まで検討されてきた。また理論解析により，塑性座屈荷重値を求めようとする研究もみられるが，必ずしも実験値と一致しないなどの問題を残していた。最近では，井上[48]により，実験により得られる実態を説明しようとする理論が展開され，理論的に塑性座屈応力度が求められるようになってきた。これら既往の研究により，板要素の局部座屈現象は明らかにされてきているが，そのほとんどのものが，部材を構成する板要素の一方を中心に取り扱っている。研究対象も板要素の接合辺をバネ置換したもの[46]や十字形断面のもの[47]，[48]が大半をしめている。また現在，鋼構造部材の幅厚比制限に関しても，それぞれの板要素に対して，個別に規定が設けられている[86]，[87]。

しかし，各板要素は相互に結合されているために，お互いの局部座屈に対して，拘束および誘発の連成作用を及ぼす[49]～[51]。したがって，構成板要素の局部座屈を取り扱う場合，この連成作用を考慮することが重要である。今日では，設計段階において大変形を伴う部材の変形性能が重要視されるようになってきている。部材の大変形を取り扱うようになると，部材の挙動を把握する上で部材構成板要素の連成局部座屈は重要な要素となる。事実，フランジ局部座屈が先行する部材においても，部材としてその耐力低下をきたすのは，フランジ局部座屈に連性して生じるウエブの局部座屈以後である。このような現象を踏まえて，実際に連成作用を考慮して構成板要素の幅厚比制限を設け，設計に応用する考え方もでてきている

[88]。この連成局部座屈に注目し，それを旨くコントロールすることができるならば部材の塑性変形性能を向上させることが可能になると考えられる。

さらに近年の大型，高層建築に使用される鋼構造柱部材，特に最下層の柱部材には軸力を保持しつつ，かなりの大変形域まで耐力低下せずに安定した挙動を示すことが必要とされてきている。構造物の最下層の柱に地震等による水平荷重が作用する時，終局状態において軸力を負担するのは断面中心に位置する部位である[87]。柱部材としてH形断面を用いた場合，断面中心に位置するウエブが大変形域においても，軸力を保持し続けることが可能ならば，高軸力下においてもフランジのみならず，ウエブも曲げ応力を負担することができ，柱部材の有する曲げ耐力と塑性変形能力は耐震設計上十分な数値を確保する事が可能となる。これにより建築物の多様化にともなう柱断面の小型化等の要求を満たし，設計の自由度を増す事ができる。

本研究ではこのような背景と現状に対する要求を満たす部材として，ウエブに高張力鋼，フランジに普通軟鋼を使用したハイブリッド柱部材を提案する。そしてその力学挙動を検討し，その有効性を示すものである。さらにその柱部材の塑性変形性能評価を試みる。また，H形の断面形に関しても若干の改良を加え，部材の塑性変形性能を向上させる上でより有効な断面形の提案を行う。

１．２　本研究の目的

Ｈ形鋼部材は，フランジ，ウェブの各板要素が結合されているため，局部座屈に対し相互に拘束作用及び誘発作用を及ぼす[49)～51)]。フランジ局部座屈が先行する形で耐力低下する部材を考えた場合，フランジ局部座屈が進行する過程において，ウェブも板厚の数倍も局部座屈波形が成長する。このようにフランジ局部座屈が先行する部材の場合に対してもその耐力低下が顕著に現われるのは，フランジ局部座屈に連成して発生するウエブ局部座屈後である。つまりフランジとウエブの連成局部座屈により部材は崩壊にいたる。文献49）には，連成局部座屈に注目しフランジ局部座屈が先行する梁においても，ウェブの剛性が梁の変形能力に関与しており，変形能力確保のためには，ウェブ板厚を厚くしてある程度の剛性を有することが必要であるとしている。

局部座屈が発生するフランジ板要素に対して，それに結合されているウエブ板要素は拘束作用を及ぼすが，この拘束作用を有効に働かせるためには，そのウエブの剛性が十分に確保されていなければならない。そのためには局部座屈が発生するフランジ板要素が荷重増加に伴い塑性化しても，拘束作用を及ぼすウエブ板要素は弾性状態にあることが望ましい。この拘束作用を高める手法として，拘束作用を及ぼすウエブ板要素に降伏応力度の高い鋼材を用いることを提案する。これにより板厚を厚くすることなく，剛性を確保できる。さらに局部座屈が発生した板要素からの誘発作用にたいしても，剛性が十分であれば抵抗でき，すぐには部材全体としては崩壊にいたらず，変形性能の優れた部材を作成することが可能となる。

特に，軸力と曲げを同時に受ける柱部材を考えた場合，前節でも述べたように終局状態において軸力を負担するのはウエブである。このことからウェブに高張力鋼を使用することで，フランジ局部座屈に対する拘束効果のみならず，軸力の負担割合をも大きくするこ

とができる。これによりウエブの軸力に対する負担能力の余剰分を曲げ応力にあてる事ができる。また，塑性中立軸を断面中心近傍におくことができ，引張フランジにも十分ひずみが進展し，部材としての塑性変形能力を向上させる要因と成り得る。このようにしてかなりの高軸力下においても終局耐力・変形性能の向上が期待できる。

フランジに軟鋼を使用する理由としては，部材としての靭性を確保しておくことによるものである。つまり，局部座屈の発生するフランジに高張力鋼を使用した場合，そのフランジが局部座屈を開始する荷重が高いことにより，十分に塑性変形をしないうちに耐力低下を起こしてしまうことによる。また，その時の塑性化領域も短く，局部座屈波長も短いことから，最大モーメントを受ける近傍のみに塑性ヒンジが集中してしまうことになる。このようにフランジに高張力鋼を使用した場合の不利となる要因を軟鋼を用いることで改善することができる。また，梁－柱接合部等の部材同士の接合においてもフランジに軟鋼を使用した場合は，現行の溶接方法等の適応が可能であると考えている。

以上を要約すれば次のように言うことができる。ウエブに高張力鋼を使用することで，部材の耐力はある程度確保し，フランジの局部座屈に対しては拘束作用を及ぼし，局部座屈発生時期を遅らせることができる。またフランジに軟鋼を使用することで部材の塑性変形性能を向上させることができる。このように本研究で提案するハイブリッド部材は高い耐力を保持したまま塑性変形量を確保することを可能にできる部材と成り得る。

さらにH形鋼部材の塑性変形性能を向上させる方法を次に示す。先にも述べたように，フランジ局部座屈が先行する部材の場合に対してもその耐力低下が顕著に現われるのは，フランジ局部座屈に連成して発生するウエブ局部座屈後である。初期段階においては，耐力維持能力が低下しだすのは圧縮フランジのみであり，ウエブと引

張フランジは，いまだ健全な状態を維持している。そこで，部材の塑性変形性能を向上させるためには，圧縮フランジが耐力低下した後に，この耐力低下分を補う部位が断面内に存在すれば，部材全体としては耐力を維持しつつ塑性変形できると考えられる。また，部材の塑性変形性能を向上させるには，フランジ局部座屈に連成して起こるウエブ局部座屈を抑えることが重要な要素となってくるが，健全なウエブはフランジの局部座屈に対しても拘束効果を発揮する。このような観点に立つと，ウエブ中立軸上に新たに板要素を配した断面が考えられる。この新たな板要素により先に述べた効果が得られるばかりでなく，中立軸上に位置することで部材の初期剛性等に対する影響は少なく，初期段階の設計を複雑にすることはない。また，この板要素を配することで導入軸力を大きくすることが可能となる。

本研究では以上に述べたウエブに高張力鋼を使用したハイブリッドH形鋼柱部材と，断面中立軸上に鋼板を添接した断面形の部材を提案し，おもにそれらの塑性変形性状に対し考察を加えるものである。

第一に，ハイブリッドH形断面部材の曲げと純圧縮応力下における塑性変形性状を実験及び数値解析を通して明らかにする。ここでは，ウエブに高張力鋼を使用したハイブリッドH形断面にこだわらず，様々な鋼種の組み合わせに対して考察を加える。また，曲げを受ける部材に対しては，二通りの部材長さを設定し，せん断スパン比の影響及び応力勾配が局部座屈に対して与える影響について検討する。純圧縮を受けるH形部材に対しては二通りのウエブ板厚を設定し，同一フランジ板厚に対する効果を検討する。

次にこれらの結果を参考に定軸力を受ける柱部材の実験を計画し，その塑性変形性状について考察を加える。このときのパラメータは軸力比とウエブ板厚とし，それぞれがハイブリッド柱部材に及ぼす

影響を，普通軟鋼のみからなる柱部材との比較を通して明らかにする。さらに既往の研究を参考にしハイブリッド柱部材の塑性変形能力評価を試みる。

最後に，ウエブ中立軸上に鋼板を添接した場合の部材の塑性変形性状について検討を加え，より有効な鋼板の形状及び補強方法について実験及び数値解析を通して考察を加える。

1．3　既往の研究

塑性設計法への適用性，骨組の靭性を考慮した耐震設計法に関する資料を得ることを目的として，H形断面柱の塑性変形能力及び弾塑性変形性状に関する研究が内外で多く行われてきた。その結果，鋼構造柱部材の塑性変形能力は，フランジ幅厚比，ウエブ幅厚比，軸力比，構面内，構面外の細長比，両材端に作用する曲げモーメントの比率，鋼材の降伏応力度等，局部座屈あるいは横座屈に関わる多くの要因に支配されることが明らかにされてきた[52)～76)]。

これらのなかで局部座屈を伴うH形断面部材の挙動に関しては，現在までに数多くの研究がなされている。加藤らによる部材実験結果に基づく荷重変位関係のモデル化[58)]，牧野らによる一連の部材実験[59)～62)]，三谷らによる降伏線理論に基づいた座屈後挙動の解析[68)，69)]，興田らによるウエブ幅厚比の大きな部材に関する実験，および劣化挙動の解析[70)～72)]等が挙げられる。また近年では，短柱の圧縮挙動に基づいた略算法により決まる変形能力が予想できること[73)，74)]，純圧縮を受ける短柱の終局挙動を基に，曲げ圧縮を受ける部材の，最大耐力以降の劣化挙動が予測可能である事[75)，76)]が明かにされている。

このように，鋼構造柱部材の塑性変形能力を支配する要因が明らかにされてきている中で，部材の耐力低下を抑え塑性変形能力を向上させることを目的とした研究が見られるようになってきた。鈴木ら[77)，78)]の研究では，箱形断面柱部材の内側の材軸方向にスチフナを設けることで，局部座屈を抑え塑性変形能力の向上を図っている。松井ら[79)]の場合も箱形断面にスチフナを補強したものである。山田ら[80)～82)]は箱形断面内に材軸と直交する形で三角形の水平スチフナを設けている。

H形断面に関しては，三谷ら[83)]の研究がある。これはフランジ板の一部もしくは，ウエブ板の一部に別の板を溶接することで，そ

の部分の幅厚比を小さくしそれぞれの板要素における局部座屈を抑えようとするものである。

以上は，部材構成板要素の局部座屈に注目し，その局部座屈を抑えることで塑性変形能力を向上させようとするものである。しかし，どの場合も若干の問題点を含んでおり，画期的な塑性変形性能改善手法であるとは言いがたい。

また，高張力鋼の靭性の乏しさを改善するするものとして，低ＹＲ鋼が開発され桑村ら[25]による詳細な検討が始まるようになってきた。桑村は文献[25]～[27]において高張力鋼の降伏比を下げることで塑性変形性能が大幅に改善されることを示した。また井上，桑村らは各種鋼材の応力－ひずみ特性が短柱の座屈性状に与える影響を示した[28]～[30]。降伏点と降伏比を実験変数にとり，短柱の塑性変形性能を捉えた秋山らの研究[32]，[33]，特に降伏比に注目し部材の変形能力を捉えた緑川らによる一連の研究[34]～[36]により局部座屈性状と降伏比の関係は明らかになって来ていると言える。また，低ＹＲ鋼を使用した部材の研究としては，鈴木ら[37]，加藤ら[38]，[39]，宇田川[40]の研究により，その力学挙動は明確になりつつある。さらには，低ＹＲ鋼を骨組に用いた高梨らの研究[41]，[42]などにより多方面に渡り，低ＹＲ鋼の研究はなされている。さらに新素材としてステンレス鋼が開発され，ステンレス鋼を使用した部材の最大耐力と変形能力が検討されている[43]～[45]。

このように高張力鋼の靭性の乏しさを降伏応力度を下げることで降伏比を下げ改善しようとして，様々な検討が成されて来ており，かなりの成果を上げている。しかし，せっかく高い降伏応力度を有するという高張力鋼本来の特性を有効に利用できているとは言いがたい。そこで本研究では，この高張力鋼本来の特性を有効に利用し，部材としては十分な塑性変形能力を発揮できる部材として，ウエブに高張力鋼を使用したハイブリッド断面を提案するものである。

ところでハイブリッド断面に関する研究も1960年頃より行われ始めているが，その殆ど全てがフランジに高張力鋼，ウエブに軟鋼を使用したものである。これは曲げに対して高張力鋼を有効に活用し，部材にかかるコストを低減しようとした研究[1]から始まっている。その後，ハイブリッド梁の曲げ性状が検討され[2]，合成梁として使用した場合[3]や，ウエブのせん断座屈性状に言及した研究[4]が見られる。日本においても藤原らによるハイブリッド梁に関する一連の研究[5]~[8]では，ウエブ座屈後の性状を明らかにすることから始まり，せん断スパン比，ウエブ，フランジ幅厚比，鋼材強度，フランジ剛性等をパラメータとして崩壊形を確定し，耐力，塑性変形能力の推定を試みている。柱部材に関しても山田らの一連の実験及び解析[9]~[12]により，定軸力下での繰り返し曲げ変形性状を求めている。また辻ら[13]，[14]は，せん断スパン比，軸力比，フランジとウエブの面積比，フランジ，ウエブの降伏応力度比により，せん断降伏形か曲げ降伏形かを決定し，その性状について検討している。

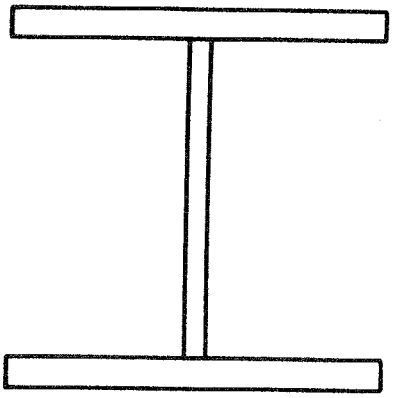
近年では，木村らによるハイブリッド梁の変形能力を実験により明らかにし，幅厚比制限を示した研究[15]，[16]や，藤原らによる統計処理結果を用いたハイブリッド梁の耐力推定，荷重変位関係のモデル化についての研究[17]，[18]が見られる。また短柱圧縮実験によるハイブリッド化の有効性を示したもの[19]や，柱梁接合部に関する研究[20]，溶接部の影響を引張試験を中心に検討した研究[21]などにより，様々な角度から検討がなされている。

これらは全てフランジに高張力鋼，ウエブに軟鋼を使用したハイブリッド部材に関するものであり，本研究で提案するようにフランジに軟鋼，ウエブに高張力鋼を使用した研究は文献22）の一部に示されている。ここでは繰返し荷重を受ける場合について示されており，ウエブに高張力鋼を用いたハイブリッド柱部材では耐力の上

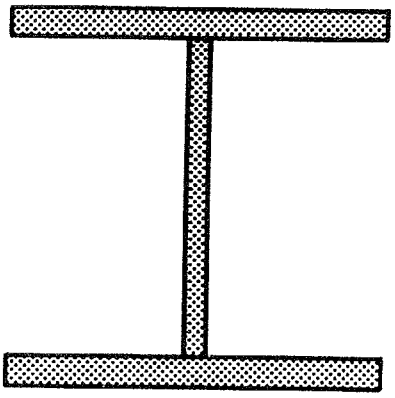
昇は大きく，ウエブの塑性蓄積ひずみは小さくなるという知見を得ている。しかし本研究で提案するようなハイブリッド柱部材に関する資料は乏しく，その力学特性などは明らかにされているとは言いがたい。また高軸力を保持し，十分な塑性変形量を確保する目的で鋼構造柱部材に対して，異種鋼材のハイブリッド化を行っている研究は著者の知る限り皆無である。

CHAPTER 1

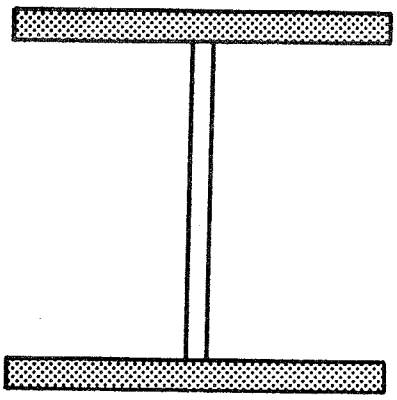
Figures and Tables



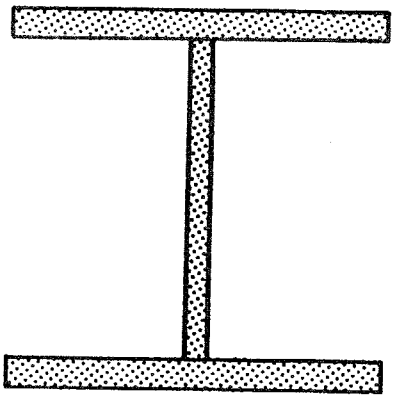
A : mild steel



B : high-strength steel

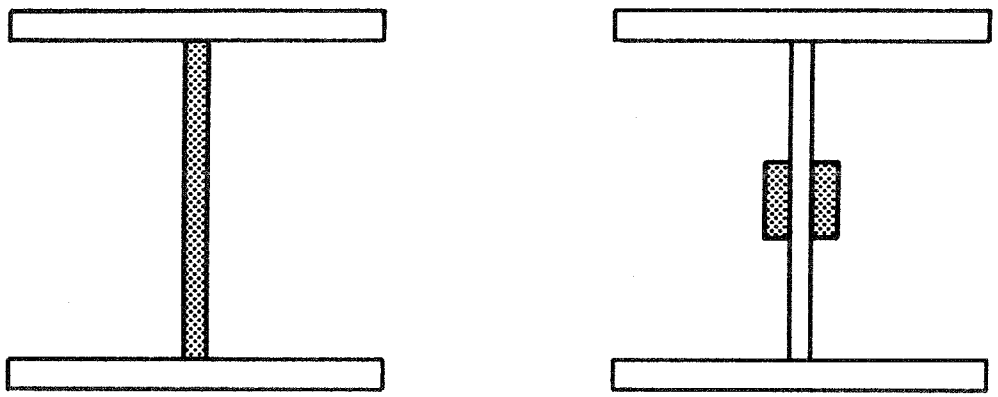


C : high-stength steel
flanges connected
by mild steel web



D : high-stength steel
with low yield ratio

Fig. 1.1 Present sections



I : mild steel flanges
connected by
high-strength steel

II : plates on web

Fig. 1.2 Proposal sections

第２章　異種鋼材を用いたＨ形断面部材の曲げ変形性状

２．１　はじめに

２．２　曲げ実験概要
２．２．１　使用鋼材
２．２．２　曲げ実験計画

２．３　曲げ実験における構成板要素相互の連成作用
２．３．１　荷重変位関係
２．３．２　圧縮側フランジの軸方向ひずみ分布及び局部座屈発生状況
２．３．３　塑性変形能力及び耐力劣化勾配

２．４　数値解析による応力勾配下での構成板要素の連成局部座屈性状
２．４．１　数値解析概要
２．４．２　連成局部座屈時変形性状

２．５　まとめ

２．１　はじめに

異種鋼材を同一部材内に用いたものとしては，先にも述べたハイブリッド部材があげられる。この場合，曲げ抵抗を大きくするためフランジに高張力鋼を使用し，ウェブに軟鋼を使用しているが，曲げ降伏よりもせん断降伏が先行した場合に利点を発揮できないなどの問題がある[8]。また，変形性能を向上させる目的で連成局部座屈に注目し，ウェブに高張力鋼を使用することで局部座屈による耐力低下を抑制しようとした研究は見受けられない。そこで本章の目的は，曲げを受ける部材を対象に，様々な鋼材を組合わせた場合の耐力，塑性変形能力，耐力劣化勾配について検討し，それぞれの基本的性状を把握する。さらに，エネルギー吸収能力の高い，力学的に優れた部材を作成する上で，有効となる鋼材を組合せた場合の部材性能について検討する。一般に，曲げ実験は，境界条件・載荷条件などが単純であり，板要素の局部座屈のみによる部材性能を端的に捉えやすい。対象とする鋼材の組合せは，ウェブのみに高張力鋼を使用したもののみでなく，様々な鋼種の組合せの場合を行ない，同一鋼種よりなる部材との比較を行なうことで，組合せの違いによる影響を把握した。さらに，これらの実験を踏まえた上で，弾塑性大変形解析を行い考察を加えた。解析では，各板要素に注目し，局部座屈性状を詳しく検討した。また，塑性域の広がりも局部座屈性状とあわせて示した。

この曲げ実験で得られた基礎的資料をもとに，よりよい鋼材の組合せを考察し，軸力を負担する柱部材についてもエネルギー吸収能力に優れた部材を構成できる。

２．２　曲げ実験概要

本実験は，部材構成板要素の鋼種の違いが，各板要素の局部座屈の連成作用に及ぼす影響について検討するものである。このため，軸力などの影響をなくし，局部座屈のみによる変形性能を検討できるように，曲げ実験を対象にしている。この実験を通して，異種鋼材を有効に使用し，部材としての変形性能を向上させるための基礎的資料を得ようとするものである。

２．２．１　使用鋼材

実験に先立ち使用鋼材の機械的性質を調べるため，鋼材種，板厚ごとの引張試験を行なった。使用した鋼材は，軟鋼（ＳＳ４００）および高張力鋼（ＳＭ５７０，ＨＴ７８０）である。引張試験において通常測定する荷重および縦ひずみの他に，材軸方向に直角な横ひずみを測定し，弾性域におけるポアソン比を算出している。引張試験片は，試験体を作製する際に用いられた板要素を切りだした鋼板より取り出し、ＪＩＳ規格１号Ａ試験片を用いた。Ｔａｂｌｅ２．１に，使用鋼材の各板厚ごとの機械的性質を示す。

２．２．２　曲げ実験計画

試験体は，組み立て溶接Ｈ形鋼であり，支点スチフナ，荷重点スチフナを溶接し，スチフナには，スカラップを設けている。断面形状は，断面せい，断面幅とも１５０ｍｍ，ウェブ厚６ｍｍ，フランジ厚９ｍｍの幅広系列の断面を選定した。本実験では，おもにフランジ局部座屈が先行する場合の塑性局部座屈を対象としているため，幅厚比は，フランジで鋼構造設計規準[86]の規定値を下回るように選定し，ウェブで鋼構造塑性設計指針[87]における規定値を大きく下回るように選定した。試験体長は，スパン長の異なる２シリーズを用意し，６００ｍｍのものをＢＳシリーズ，９００ｍｍのものをＢＬシリーズとした。異種鋼材を使用した場合，フランジとウェブに使用する鋼材の降伏応力度の比により，フランジの曲げ降伏先行か，ウェブのせん断降伏先行かの違いがあらわれる。ＢＳシリーズにおいては，フランジの降伏応力度がウェブの降伏応力度の約1.5 倍以下の範囲にあるとき，フランジでの曲げ降伏がウェブでのせん断降伏よりも先行し，ＢＬシリーズは約2.5 倍以下の範囲で先行する。ここでは，ＢＳ-４-５，ＢＬ-４-８はウェブでのせん断降伏が先行するが，それ以外はフランジでの曲げ降伏が先行するよう計画した。試験体の構成をＴａｂｌｅ２．２，形状をＦｉｇ．２．１に示す。ここで，試験体名に用いた２つの数字は前の数字がウェブ鋼種を表し，後の数字がフランジ鋼種を表している。各数字が表す鋼種は，４：ＳＳ４００，５：ＳＭ５７０，８：ＨＴ７８０である。

載荷はＦｉｇ．２．２に示すような装置を用い，両端単純支持の部材中央に載荷する中央集中載荷形式とした。

２．３　曲げ実験における構成板要素相互の連成作用

２．３．１　荷重変位関係

本実験のような単純ばりを中央集中載荷形式として加力していくと，一般に最大耐力後，左右スパンの一方の側のスパンのみが塑性変形を進行させ，他方のスパンは弾性除荷することが知られている。そこで，文献84）に示されている方法を用いることにより，耐力劣化をおこす側の片持ちばりとしての変形を求めた。

Ｆｉｇ．２．３にスパン長の短いＢＳシリーズの荷重変位関係を示す。本実験は，おもにフランジ局部座屈に注目し，それに対するウェブ鋼種の影響を検討するものである。そこで，ウェブ鋼種の影響を的確に表現する必要があり，無次元化には注意が必要である。一般的には，全塑性モーメントＭｐおよびその時の弾性回転角θｐで無次元化する。しかし，この場合ウェブ鋼種を変化させても荷重変位曲線にその影響を明確に表現できない。つまり，無次元量にウェブ鋼種の影響を含んだものを用いるのは好ましくない。よって，ここでは鋼材の影響が明確に表れるように，部材中央の載荷点におけるモーメントをフランジ縁が降伏するモーメントＭｙｆで，変形はそのときの弾性回転角θｙｆで無次元化した。鋼種の組合せによっては，Ｍｙｆに至る以前にウェブが降伏する場合があるが，この様な場合は，ウェブはＭｙｆまで塑性化しないとして計算している。θｙｆは，せん断変形も考慮して（２．３．１）式で求める。

$$\theta_{yf}=\frac{M_{yf}L}{3EI}+3(1+\nu)\frac{M_{yf}}{EA_wL} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.3.1)$$

ここにおいて，Ｅ：ヤング率，ν：ポアソン比，Ａｗ：ウェブ断面積，Ｉ：断面２次モーメント，Ｌ：スパン長である。また，図中に各試験体の最大耐力点を▽印で示している。

フランジ・ウェブの両板要素とも同一の鋼種よりなるＢＳ-４-４とＢＳ-５-５を比較すると，軟鋼を使用したＢＳ-４-４の方が耐力

上昇，変形能力とも優れている。　フランジ・ウェブの各板要素に異なる鋼種を用いて組合わせた試験体のうちで，ＢＳ-５-４をＢＳ-４-４と比較すると，ＢＳ-５-４のほうが線形関係を離れた後の最大耐力までの勾配が大きい。また，最大耐力に達した後の耐力劣化勾配は，緩やかになっている。これに対しＢＳ-４-５は，ウェブ板要素がせん断力により早期に降伏するため，Ｍｙｆに到達する以前に線形関係から離れている。しかし，その後も耐力が上昇し，フランジ板要素が降伏するまで耐力を上昇させるが，最大耐力後の耐力低下は急である。

Ｆｉｇ．２．４にスパン長の長いＢＬシリーズの荷重変位関係を示す。ウェブに降伏応力度の高い鋼材を使用したＢＬ-５-４，ＢＬ-８-４は先のＢＳシリーズの場合と同様に，ＢＬ-４-４に比べて線形関係を離れた後の勾配も高く，最大耐力後の耐力劣化勾配も緩やかになっている。この傾向は，ウェブ板要素の降伏応力度が高いほど明確である。ウェブ鋼種によらず最大耐力時の無次元回転量は，フランジ鋼種により大きな違いはみられない。また，フランジに軟鋼を用いたものが耐力上昇は大きい。

２．３．２　圧縮側フランジの軸方向ひずみ分布及び局部座屈発生状況

Ｆｉｇ．２．５に最大耐力時の圧縮側フランジの軸方向ひずみ分布を示す。横軸は，載荷点からの距離をとった。フランジに軟鋼を用いたものは，高張力鋼を用いたものより全体的にひずみ量は大きい。材端の塑性回転量は，塑性化域における塑性ひずみ量を積分することによって得られることから，塑性域の範囲が広がることも有効であるが，それと同時に塑性化域のひずみが大きいことも重要である[28]。つまり，最大耐力にいたるまでの塑性変形を大きくするためには，フランジには靭性に富んだ軟鋼を使用したものが有利となる。

フランジに高張力鋼を使用したものは，ウェブ鋼種による違いはみられないが，フランジに軟鋼を使用したものは，ウェブ鋼種によりひずみ分布に差異がみられる。フランジに軟鋼を用いたものは，ウェブに使用した鋼材の降伏応力度が大きいとひずみの値は大きくならない。これは，塑性変形の面では若干不利ではあるが，局部座屈に対する抵抗力を確保する面では有利である。

次に，フランジに軟鋼を用いた場合の，ウェブ鋼種による荷重増加に伴うひずみ分布の違いをみる。Ｆｉｇ．２．６にＢＬ－４－４，ＢＬ－５－４およびＢＬ－８－４の変形の進行に伴う圧縮側フランジの軸方向ひずみの変化を示す。ウェブの降伏応力度が高いものほど最大耐力到達前の塑性化の割合が小さく，荷重増加に伴う塑性化の進展が遅いことを表している。ＢＬ－５－４，ＢＬ－８－４を比べた場合，初期段階では違いがみられるが，最大耐力時ではほぼ同値となっている。

圧縮側フランジ裏表のひずみの差とモーメントの関係をＦｉｇ．２．７に示す。図中において，黒丸が座屈波形の凸側を，白丸が凹側を表している。黒丸と白丸のお互いに差が表れ始める時点を局部座屈が発生し始めた時点とする。ＢＬ－８－４，ＢＬ－５－４，Ｂ

Ｌ-４-４では，この順で裏表のひずみの差が生じずに最大耐力近傍までいたっている。これは，最大耐力まで座屈波形の波高が高くならず，ウェブ板要素の降伏応力度が高いものほど座屈波形の成長を抑制していると考えられる。

２．３．３　塑性変形能力及び耐力劣化勾配

Ｆｉｇ．２．８に塑性変形能力Ｒを示す。Ｒは、（２．３．２）式により求めた。

$$R = \theta max / \theta p - 1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2.3.2)$$

ここに，θmax：最大耐力点における回転角，θp：全塑性モーメントに対応する弾性回転角である。また横軸にはフランジ縁が降伏するモーメントＭｙｆをとっている。両シリーズとも鋼種の組合せの相違に伴うＲｍａｘの差異は，ほぼ同様の傾向を示す。すなわちフランジ・ウェブの両板要素に軟鋼を用いた試験体で最大値をとり，フランジ・ウェブの両板要素に高張力鋼を用いた試験体での値が小さい。また，両板要素に軟鋼を使用したものと，ウェブにのみ高張力鋼を用いたものを比較すると，後者の方が低い値を示す。これは，先の軸方向ひずみ分布でひずみ量が小さいことによるものである。

スパン長を違えたもののなかで，ＢＳ－４－５とＢＬ－４－５を比較すると，スパン長により局部座屈の先行形式が違うために，大きな差異を生じている。スパン長の短いＢＳ－４－５はウェブ座屈先行であるのに対し，スパン長の長いＢＬ－４－５はフランジ座屈先行である。先の荷重変位関係と合わせて考えて，このようにせん断座屈が先行するような場合，耐力的には不利になるが，せん断座屈後も耐力低下することなく変形性能は十分にあり，高い塑性変形能力を有する。

Ｆｉｇ．２．９に崩壊曲線の耐力劣化勾配を示す。縦軸は，劣化勾配ｋｄを弾性勾配ｋを用いて無次元化している。劣化勾配ｋｄは，最大耐力点から耐力劣化後に最大耐力の９０％まで荷重を低下した点までの勾配で定義した。横軸は，先程の場合と同様にＭｙｆをとっている。ＢＳ，ＢＬシリーズともフランジに軟鋼・ウェブに高張力鋼を用いた試験体でその値が小さい。これは，フランジ局部座屈が生じ，その面外変形を増大させることによって崩壊する過程で，ウェ

ブのフランジに対する抵抗度合が軟鋼よりも高張力鋼を使用したものが大きいことによる。耐力劣化勾配には，フランジ鋼種による差は，それほど明確には表れていないが，ウェブ鋼種により大きく影響を受ける。

２．４　数値解析による応力勾配下での構成板要素の連成局部座屈性状

２．４．１　数値解析概要

実験では，材の不均一性，初期不整，載荷条件，境界条件の不整合などの影響が避けられない。そこで本章では，実験と同一の部材を解析し，それらの影響を排除した構成板要素の局部座屈に及ぼす連成効果について検討する。特に，ここでは先の実験でその有効性が示された，フランジに軟鋼，ウェブに高張力鋼を使用したものを中心に解析する。同時にフランジ・ウェブの両板要素とも同一鋼種よりなる部材も解析し比較する。実験では得ることが困難な座屈波形に注目し，局部座屈性状を詳しく検討する。また，塑性域の広がりと局部座屈の関係なども考察する。解析は，増分理論に基づく有限要素法による弾塑性大変形解析法[51),52)]を用いる。

本解析では，弾塑性座屈現象を対象として，大変形弾塑性解析を行なうため，材料の機械的性質の評価は非常に重要である。特に，鋼材の応力－ひずみ関係をどのように仮定するかは解析結果に大きく影響を及ぼす。ここでは，Ｔａｂｌｅ２．１に示した実験での鋼材の引張試験結果を参考として，Ｔｒｉ-ｌｉｎｅａｒ型の応力－ひずみ関係を仮定する。Ｆｉｇ．２．１０に応力－ひずみ曲線を示す。ヤング率，ポアソン比はそれぞれ２１００ｔ/ｃｍ２，０．３０に固定するが，その他の降伏応力度，ひずみ硬化開始ひずみ，ひずみ硬化域における接線弾性係数は，それぞれの鋼種，板厚に対応する引張試験の結果を用いる。

解析対象は対称性を導入し，片側１スパンを対象に，両端単純支持で中央に一様変形制御により集中荷重を加えた。それぞれの部材の要素分割状態をＦｉｇ．２．１１に示す。圧縮側フランジおよびウェブで三角形平板有限要素を用い，引張側フランジで，梁有限要素を

用いたバネ剛性評価を行なった。

Fig.2.12, Fig.2.13に荷重変位関係における実験と解析との対応関係を示す。ただし，図中の線は解析結果を表しており，シンボルは実験結果を表したものである。また，図中の▽，▼はそれぞれ実験と解析での最大耐力点を示す。実験と解析の若干の違いは実験に含まれる様々な不整と，解析の理想化された条件の相違によるものであり，鋼種の組合せの相違にともなう最大耐力および変形能力の変化については，ほぼよい対応をみせている。これらの対応関係より本解析により各構成板要素の局部座屈に対する連成作用の性状を，十分に考察することが可能である。ここではおもに連成局部座屈時の座屈波形，塑性域の進展状況について検討する。

２．４．２　連成局部座屈時変形性状

板要素の面外変形状況　Fig.2.14に最大耐力時でのフランジ・ウェブ両板要素の面外変形性状を示す。面外変形は，10倍に拡大している。通常H形断面部材では，ウェブの面外変形の影響により，フランジの面外挙動がウェブとの接合線に対して対称でなくなることから，両フランジ端辺の面外変形性状を示している。上の図は，ウェブが面外変形している側のフランジ端を示し，中間の図はその反対側のフランジ端を示している。ＢＳ，ＢＬシリーズともフランジに高張力鋼を用いたＢＳ-５-５，ＢＬ-５-５は，両板要素とも面外変形が小さいうちに最大耐力に達している。フランジに軟鋼を用い，ウェブの鋼種を変化させたＢＳ-４-４，ＢＳ-５-４およびＢＬ-４-４，ＢＬ-５-４，ＢＬ-８-４とをそれぞれ比較すると，最大耐力時におけるフランジ端の面外変形は，波高が低い側では大きく異なっているが，波高が高い側およびウェブ面外変形はほぼ一致している。先に示した荷重変位関係において，荷重変位性状が類似していることを考慮すれば，波高の高い側のフランジ面外変形が最大耐力時の部材変形能力に大きく影響している。また，高い側の座屈波形はスパン長の長いＢＬシリーズのほうがその波高が高く，波長も長めになっている。これは，モーメント勾配による影響であり，モーメント勾配の緩やかな場合，波高は高く，波長が長くなると考えられる。

全体変形性状　Fig.2.15～Fig.2.21に各部材の最大耐力時における変形性状を降伏域の進展状況とともに示す。各板要素の面外変形は６倍に拡大して示している。塑性域は，それぞれの板要素に陰を付けて示している。

ＢＳ，ＢＬシリーズともフランジ・ウェブの両板要素に高張力鋼を使用したものは，座屈波形はそれほど成長していない。また，陰を付けて示した塑性域も材長方向にそれほど進展していない。これ

により，十分な塑性変形をせずに耐力低下している。これに対して，フランジに軟鋼を用いたものは塑性域も広く，十分な塑性変形をしている。塑性域の進展状況に注目すると，フランジ塑性域の進展は，フランジ鋼種によりほぼ一定であり，高張力鋼を使用したもので短く，軟鋼の場合に長い。しかし，フランジに軟鋼を使用したものでも，ウェブに高い降伏応力度の鋼材を使用しているものほど，若干ではあるが長く塑性域が進展している。またウェブ塑性域は，ウェブ鋼材の降伏応力度の高いものほど短い。このように，ウェブに高い降伏応力度の鋼材を使用し，塑性域を短くし，弾性域を広く残していることが，フランジの塑性化が進んだ場合でも，局部座屈に対して大きく抵抗しているといえる。

２．５　まとめ

本章では，同一部材内に異種鋼材を用いた場合の部材性能について基礎的資料を得ることを目的とした。そこで，Ｈ形鋼の曲げ実験および，その実験に対応した数値解析を行なうことを通して，フランジ板要素の局部座屈に対するウェブ板要素の相互作用を検討し，変形能力に対する影響について考察した。さらに，フランジに軟鋼，ウェブに高張力鋼を用いた部材が力学的に優れた部材であることを示した。以下に明らかにされた事柄を示す。

（１）せん断降伏が先行するか曲げ降伏が先行するかは，部材を構成する板要素の組合せ及びスパン長により決まる。同一鋼材を用いると曲げ降伏するスパン長の場合でも，フランジ鋼材の降伏応力度がウェブ鋼材の降伏応力度より高いものを用いると，せん断降伏が先行する場合があり，荷重変位関係に大きな影響を及ぼす。

（２）部材の塑性変形能力は，曲げ降伏が先行している場合スパン長による変化はさほど見受けられず，フランジに軟鋼を用いたもので大きく，高張力鋼を用いたもので小さい。また，せん断降伏が先行する場合，曲げ降伏が先行する場合よりも塑性変形能力は大きい。

（３）フランジ局部座屈長さは，塑性域の進展状況とほぼ一致しており，フランジに高張力鋼を用いたもので短く，軟鋼を用いたもので長い。また，ウェブ鋼種により塑性域長さに違いが表われ，ウェブに降伏応力度の高いものを用いたもので長くなる。

（４）耐力劣化勾配は，ウェブ鋼種により大きく影響を受け，ウェブに使用する鋼材の降伏応力度が高いほど勾配は小さく耐力低下を抑えている。

（５）フランジ局部座屈の発生ひずみはウェブに高張力鋼を使用することで大きくすることができ，局部座屈の発生を遅らせることが可能である。

（６）ウェブに高張力鋼を使用した場合，部材の最大耐力・変形性

能とも向上し，エネルギー吸収能力の優れた部材となる。

CHAPTER 2

Figures and Tables

Table 2.1 Material properties

Test-Piece	t (mm)	σy (t/cm²)	σu (t/cm²)	E (t/cm²)	Est (t/cm²)	εst (%)	ν	YR
SS400	6	3.47	4.09	2180	-	-	0.273	0.848
SS400	9	2.97	4.67	2200	35.5	1.7	0.275	0.636
SM570	6	5.19	5.93	2128	21.1	1.7	0.267	0.875
SM570	9	5.36	6.03	2065	22.0	1.8	0.282	0.888
HT780	6	7.00	7.70	2085	21.4	1.8	0.285	0.909
HT780	9	8.38	8.87	2095	18.6	1.5	0.279	0.945

Table 2.2 Dimensions of specimens of beam

Specimen	web plate	flange plate	L (mm)	d/tw × √σyw/E	b/tf × √σyf/E	Myf (t cm)
BS - 4 - 4	SS400	SS400	600	0.962	0.324	545.6
BS - 4 - 5	SS400	SM570	600	0.962	0.413	1072.3
BS - 5 - 4	SM570	SS400	600	1.143	0.324	553.3
BS - 5 - 5	SM570	SM570	600	1.143	0.413	1057.6
BL - 4 - 4	SS400	SS400	900	0.962	0.324	542.7
BL - 4 - 5	SS400	SM570	900	0.962	0.413	1058.3
BL - 5 - 4	SM570	SS400	900	1.143	0.324	555.3
BL - 5 - 5	SM570	SM570	900	1.143	0.413	1047.0
BL - 4 - 8	SS400	HT780	900	0.962	0.473	1788.9
BL - 8 - 4	HT780	SS400	900	1.394	0.324	549.4

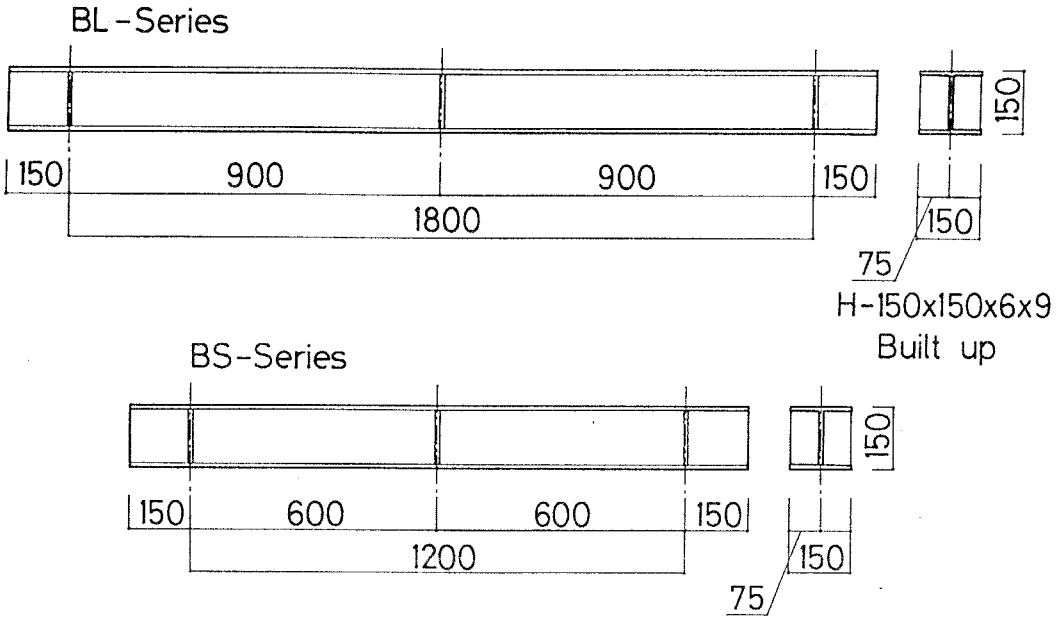


Fig. 2.1 Specimens of beam

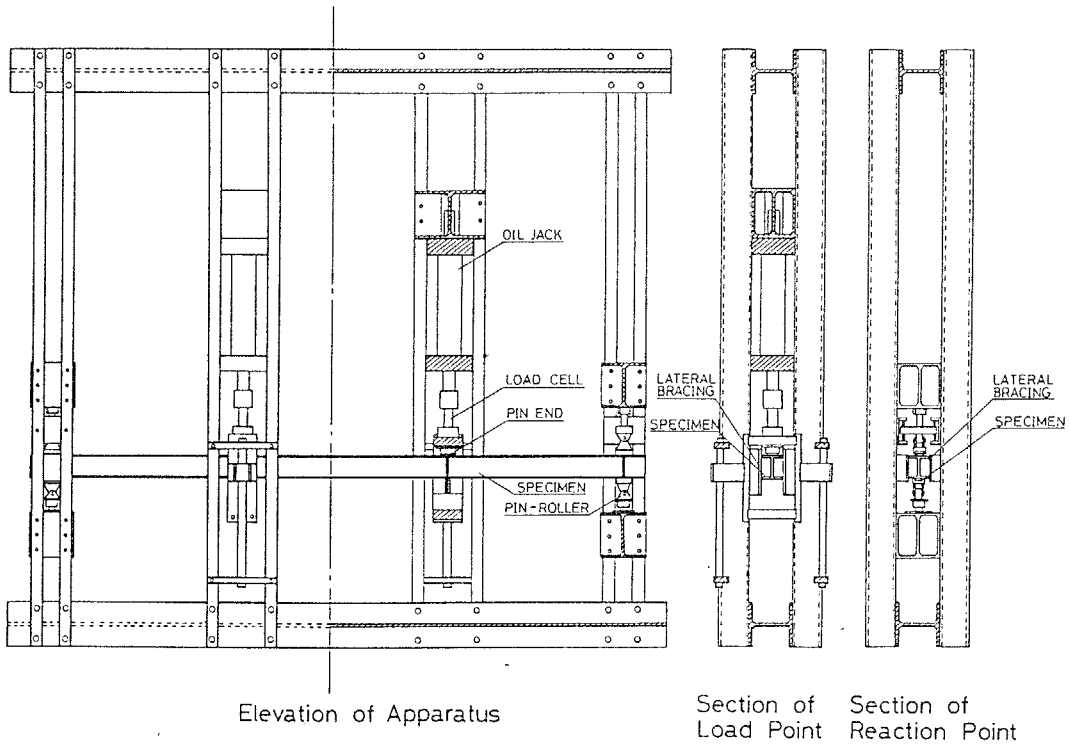


Fig. 2.2 Test setup

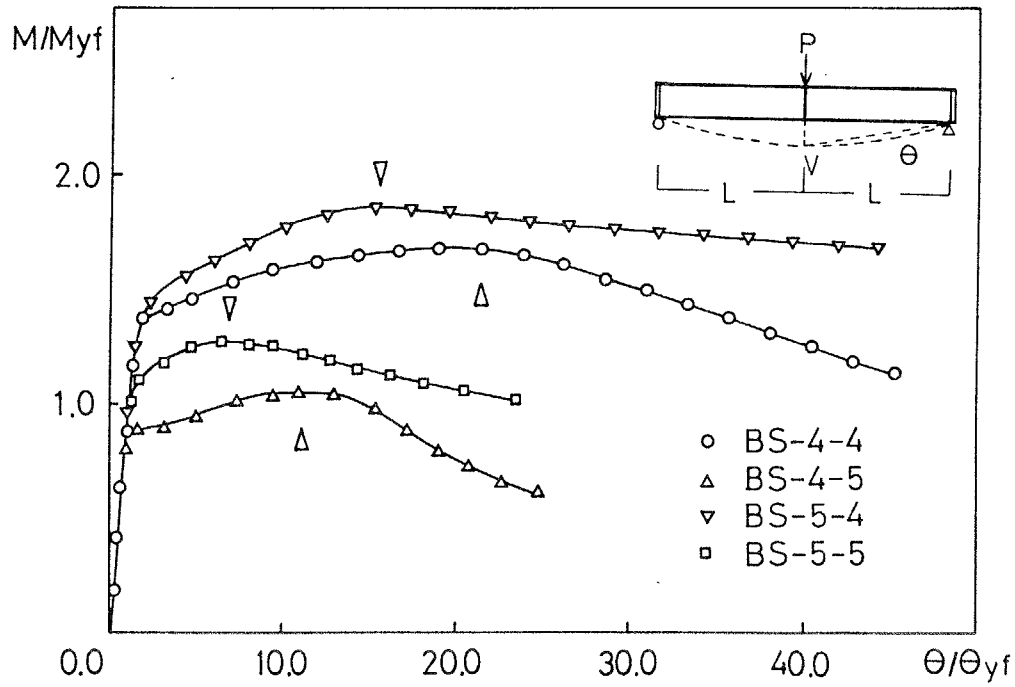


Fig. 2.3 M-θ relationships of BS series

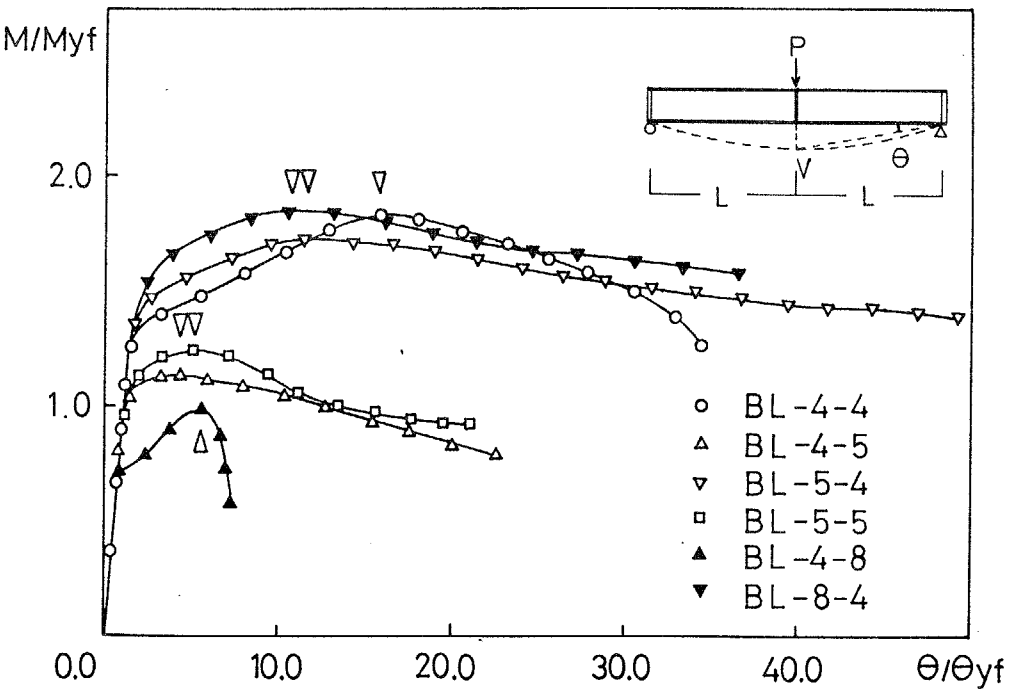


Fig. 2.4 M-θ relationships of BL series

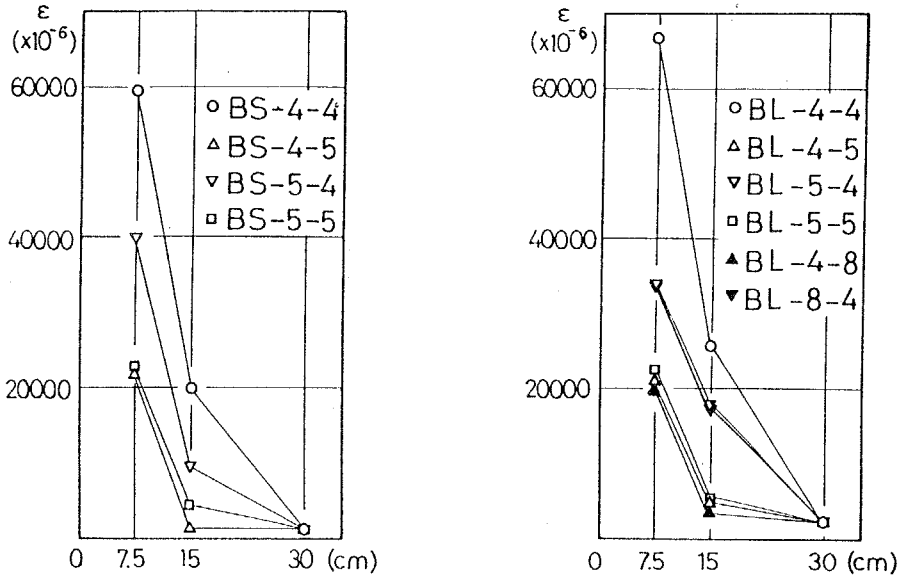


Fig. 2.5 Strain distribution of compression flange

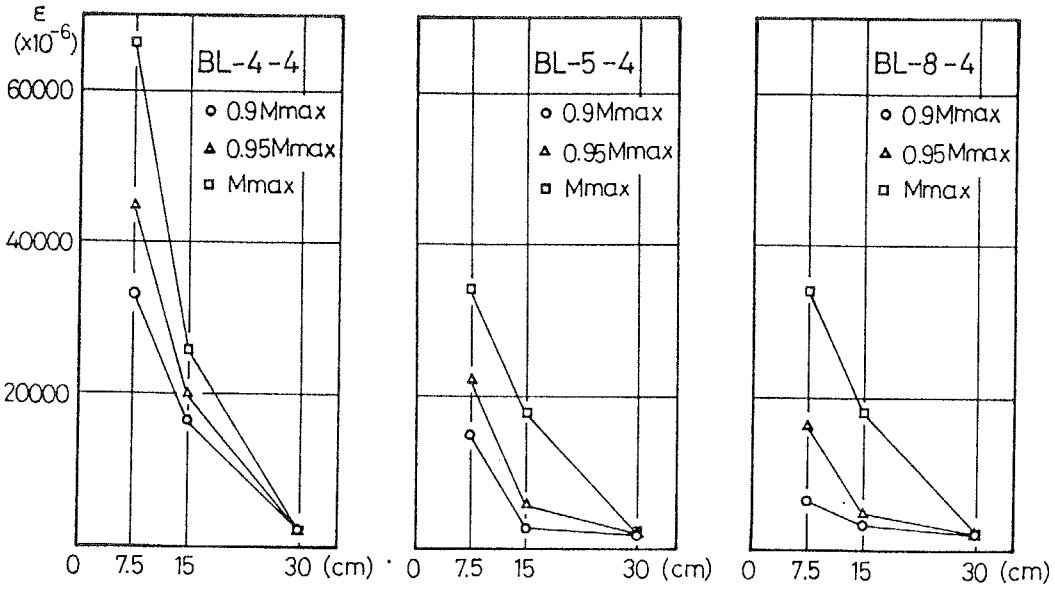


Fig. 2.6 Strain distribution of compression flange

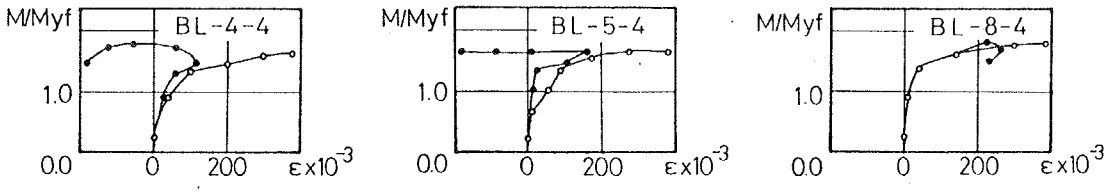


Fig. 2.7 Local buckling stain

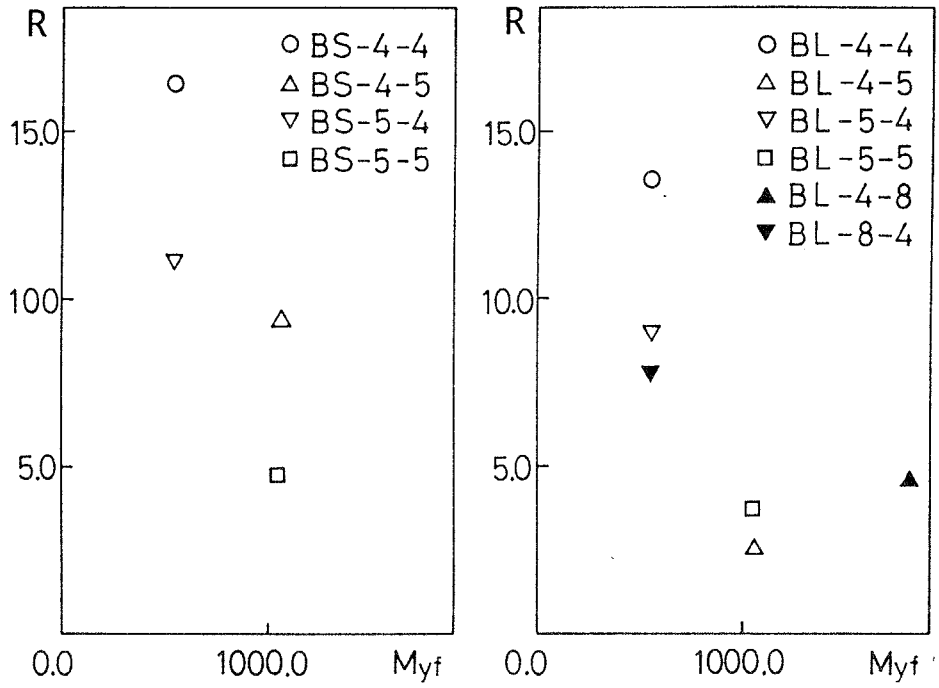


Fig. 2.8 Rotation capacity

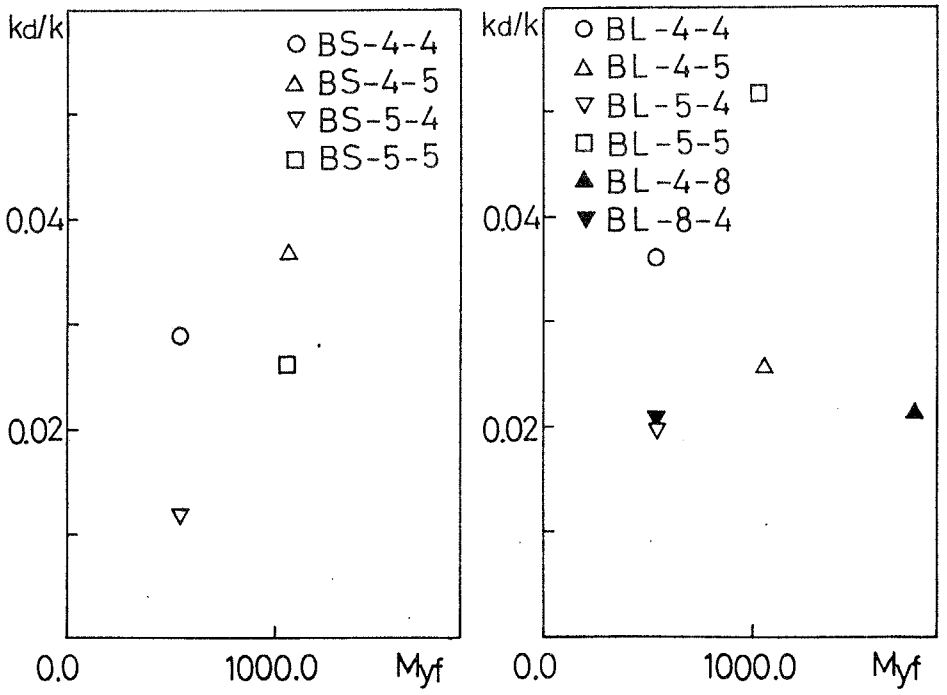


Fig. 2.9 Slope of strength inferiority

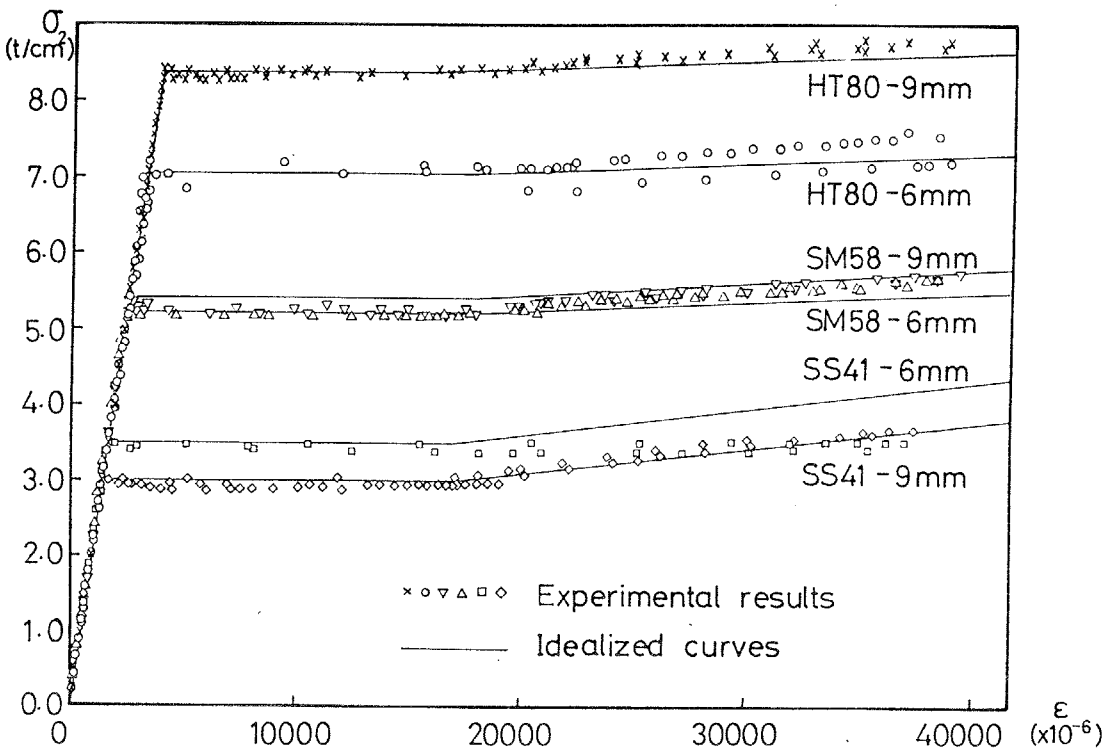


Fig. 2.10 Stress - strain relationships

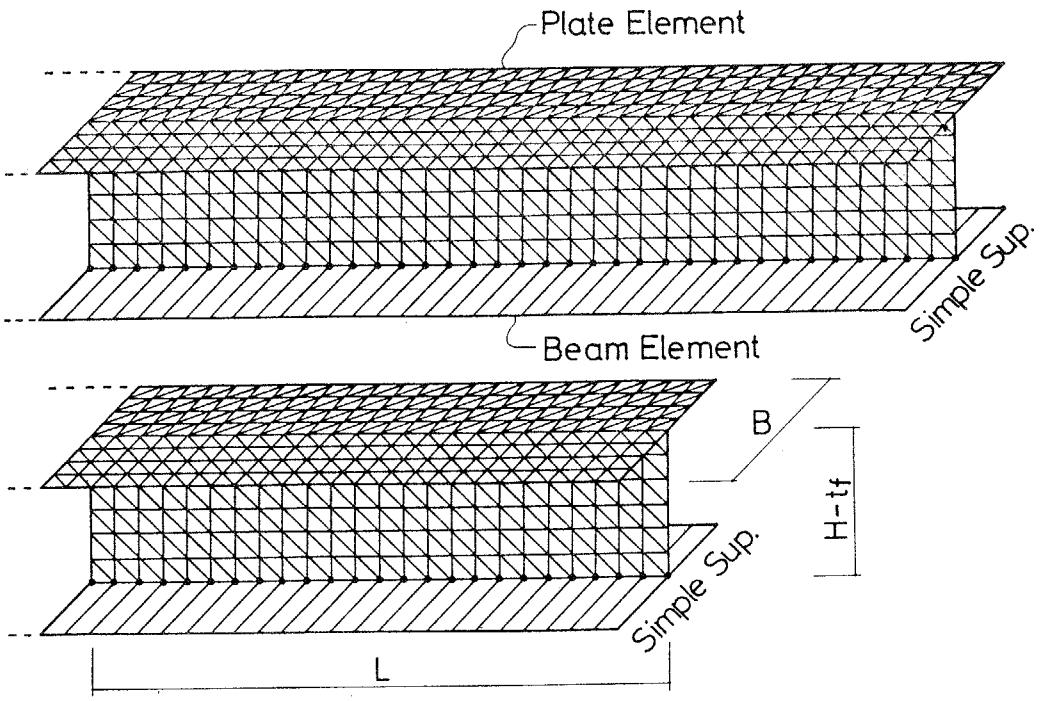


Fig. 2.11 Beam idealization

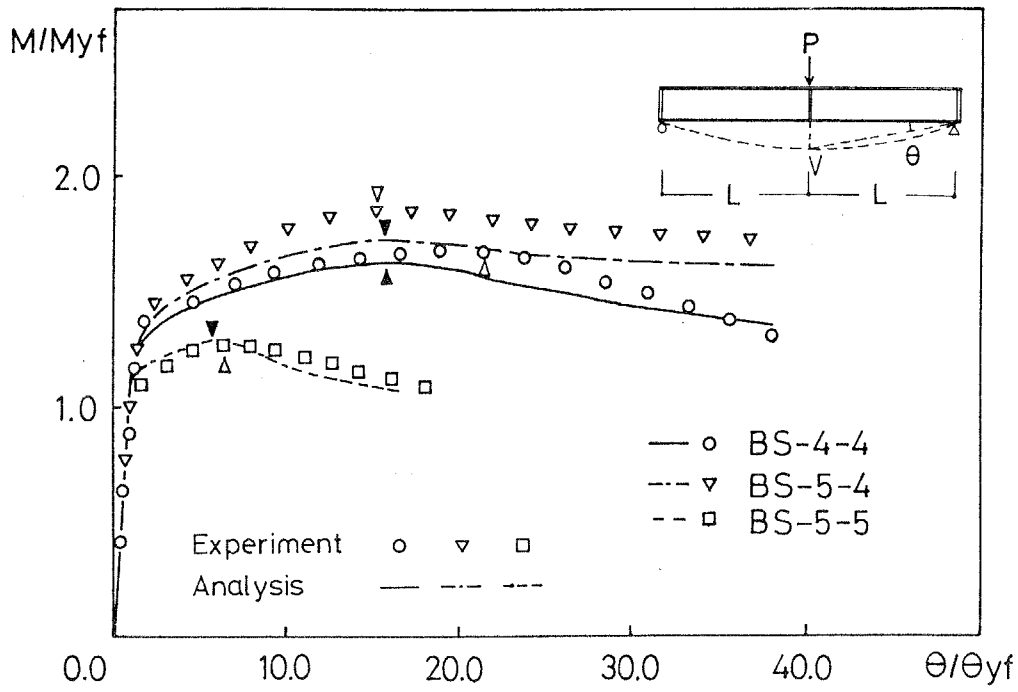


Fig. 2.12 M-θ relationships of BS series

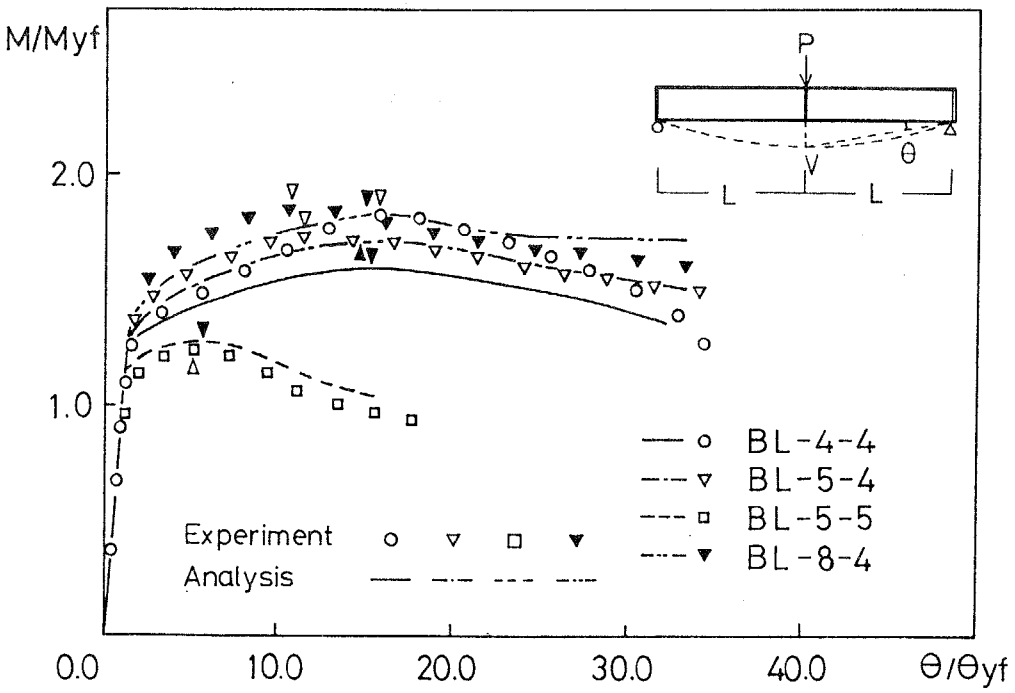


Fig. 2.13 M-θ relationships of BL series

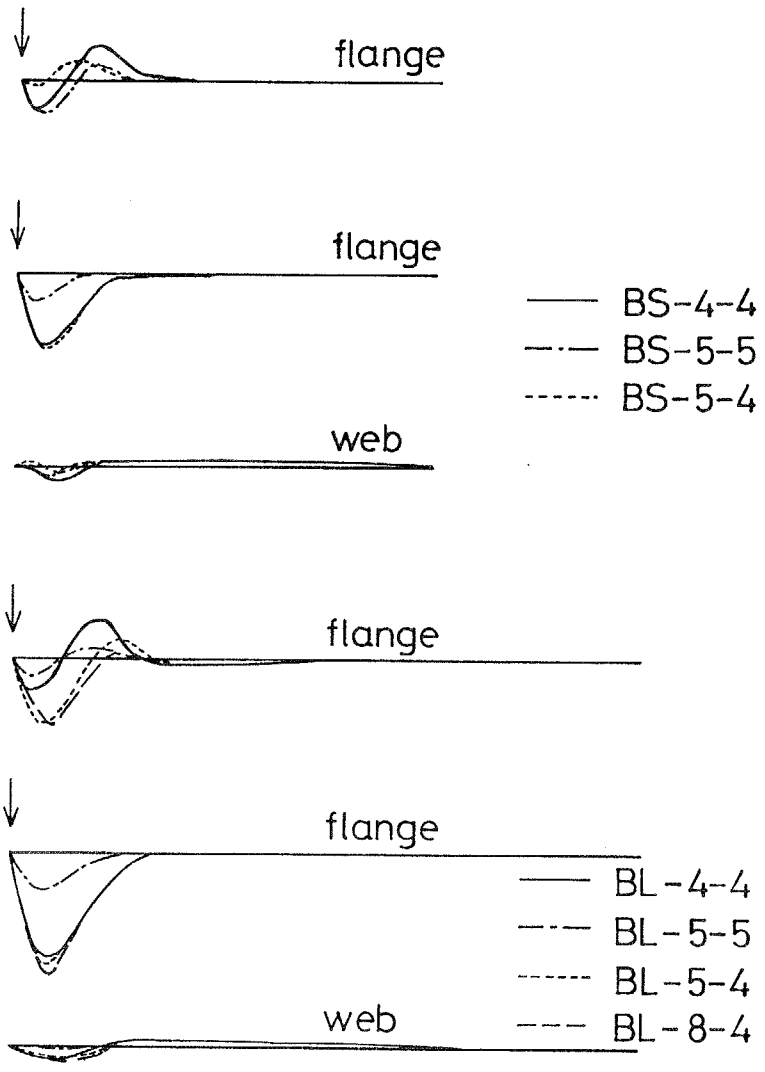


Fig. 2.14 Lateral displacement

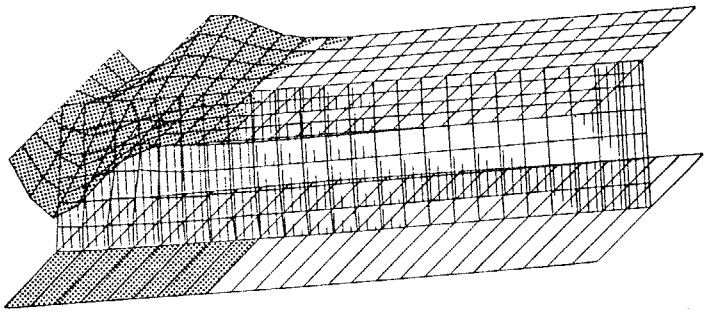


Fig. 2.15 Deformation of BS-4-4

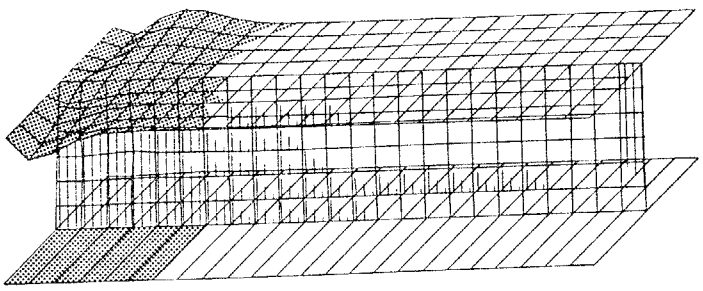


Fig. 2.16 Deformation of BS-5-5

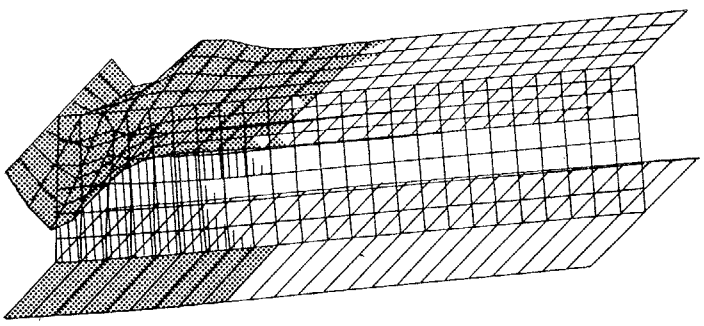


Fig. 2.17 Deformation of BS-5-4

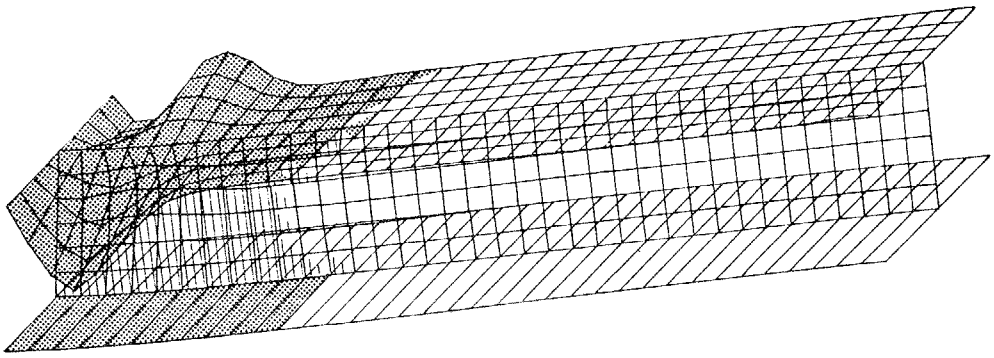


Fig. 2.18 Deformation of BL-4-4

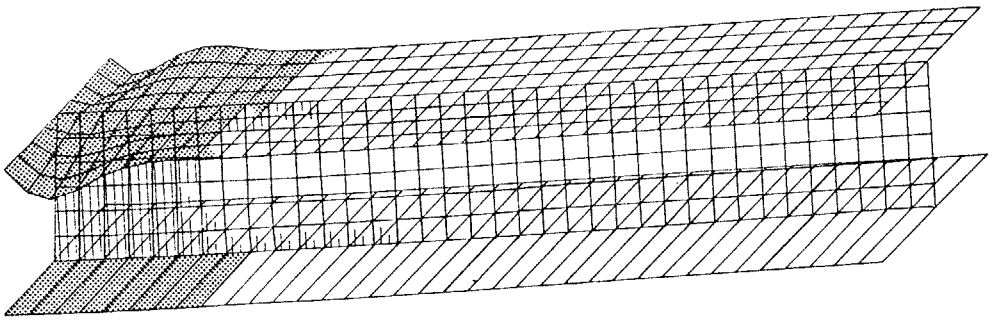


Fig. 2.19 Deformation of BL-5-5

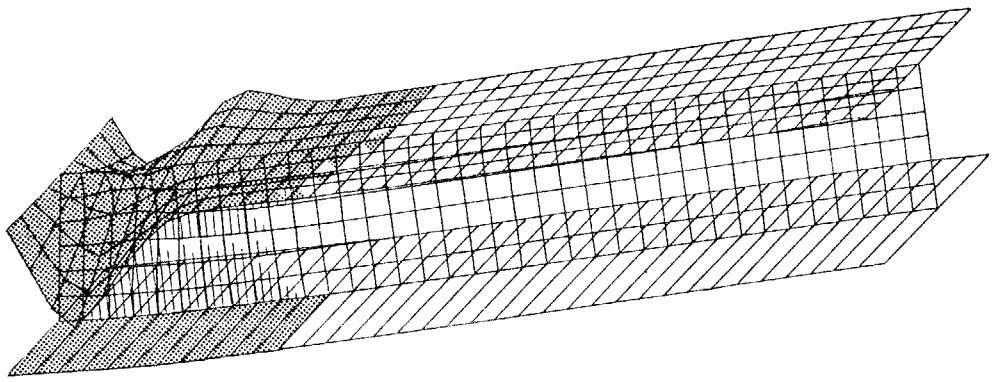


Fig. 2.20 Deformation of BL-5-4

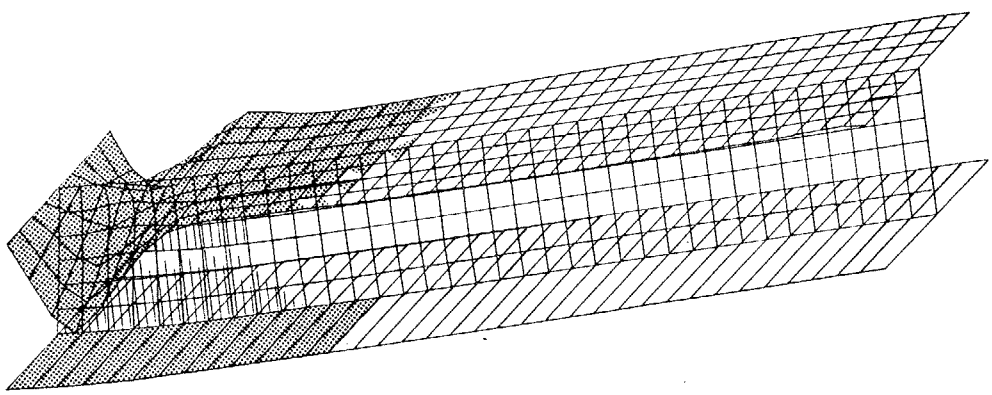


Fig. 2.21 Deformation of BL-8-4

第３章　異種鋼材を用いたＨ形断面短柱の連成局部座屈性状

３．１　はじめに

３．２　短柱圧縮実験概要
３．２．１　使用鋼材
３．２．２　短柱圧縮実験計画

３．３　短柱圧縮実験における構成板要素相互の連成局部座屈性状
３．３．１　荷重変位関係
３．３．２　耐力上昇率
３．３．３　塑性率
３．３．４　耐力劣化勾配

３．４　数値解析による純圧縮を受ける構成板要素の連成局部座屈性状
３．４．１　数値解析概要
３．４．２　連成局部座屈時の各板要素の荷重分担

３．５　まとめ

3．1　はじめに

本章では短柱圧縮挙動を取り扱い，同一部材内に異種鋼材を用いた場合の連成局部座屈性状を把握し，本研究で提案するハイブリッド断面の有効性を示し，柱部材へ応用するための基礎的資料を得ることを目的とする。短柱圧縮は，作用する荷重状態が明瞭であり，板要素の連成局部座屈性状が捉えやすい。対象とする鋼材の組合せは，三種類の鋼材を用い様々な組合せを行なった。同一鋼種よりなる部材との比較を行なうことで，組合せの違いによる影響を把握した。同時にウェブ板要素の板厚を変えることで幅厚比を変化させ，異種鋼材の組合せの違いに及ぼす影響について考察した。また，鋼構造部材は高いエネルギー吸収能力を必要とされるが，エネルギー吸収能力を決定する要因として耐力上昇率，塑性率，耐力劣化勾配があげられる。例えば，高い耐力上昇率，塑性率を有し，耐力劣化勾配が緩やかな部材がエネルギー吸収能力が高く，優れた部材といえる。この観点から3つの要因を検討することで概ね部材性能を評価できる。そのため部材性能の定量的評価として耐力上昇率，塑性率および耐力劣化勾配について検討した。さらに，これらの実験を踏まえた上で，弾塑性大変形解析を行い考察を加えた。解析では，各板要素の荷重分担に注目し，局部座屈性状を詳しく検討した。

この短柱圧縮実験および解析で得られた基礎的資料をもとに，よりよい鋼材の組合せを考察し，柱部材についてもエネルギー吸収能力に優れた部材を構成できる。

３．２　短柱圧縮実験概要

３．２．１　使用鋼材

実験に先立ち使用鋼材の機械的性質を調べるため，鋼材種，板厚ごとの引張試験を行なった。使用した鋼材は，軟鋼（ＳＳ４００）および高張力鋼（ＳＭ５７０，ＨＴ７８０）である。引張試験は，試験体を作成した同一の鋼板より取り出したＪＩＳ規格１号Ａ試験片を用いて行なった。使用鋼材の各板厚ごとの機械的性質をＴａｂｌｅ３．１に示す。表中において用いた記号は，σy：降伏応力度，σu：引張強さ，Ｅ：ヤング率，Ｅｓｔ：ひずみ硬化勾配，εst：ひずみ硬化開始ひずみ，ν：ポアソン比，ＹＲ：$\sigma y/\sigma u$ で表わされる降伏比である。

３．２．２　短柱圧縮実験計画

試験体は，組み立て溶接Ｈ形鋼であり，材長は，通常の短柱圧縮実験の例にならい，断面幅の３倍とし，端面は，耐圧板を接合せず，試験体の中心軸に直交するよう機械加工を施した。試験体はウェブ板厚を変えることにより，断面形状の異なる２シリーズを用意した。断面せい，断面幅は，それぞれ１５０ｍｍ，フランジ板厚は９ｍｍの断面を選定した。ウェブ板厚はＣＴシリーズで６ｍｍ，ＣＦシリーズで９ｍｍとした。

文献５０）には，フランジ局部座屈に対するウェブの拘束度合が，式（３．２．１）で表わされるパラメータにより影響されることが示されている。

$$K = (B/H)\cdot(tw/tf)^3 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.2.1)$$

ここで，Ｂ：フランジ幅，Ｈ：断面せい，ｔｗ：ウェブ板厚，ｔｆ：フランジ板厚である。このパラメータＫには上限値０.４０２が存在し，これ以上の値では拘束度合は等しくなるとしている。本実験においては，ＣＴシリーズはこの上限値に達しておらず，ＣＦシリーズは上限値を越えている。異種鋼材を使用すると，断面形状で表わされるパラメータがこの上限値をこえた場合でも，フランジ局部座屈に対するウェブの影響に違いがみられ，荷重変位関係に変化が表れると考える。本研究は，おもにフランジ局部座屈に対するウェブの板厚・鋼材の影響を把握することを目的としているため，フランジ板厚は一定とし，ウェブ板厚を変化させた。幅厚比に関しても，フランジで鋼構造設計規準[86]の規定値を下回り，ウェブで鋼構造塑性設計指針[87]における規定値を下回るよう設定している。

試験体の構成をＴａｂｌｅ３．２，形状をＦｉｇ．３．１に示す。なお，表中に示す幅厚比は材料定数を考慮した等価幅厚比でありＰｙは次式で表わされる降伏荷重である。

$$Pp = 2\sigma yf\cdot Af + \sigma yw\cdot Aw \quad \cdots\cdots\cdots \quad (3.2.2)$$

ここに，Pp：全塑性軸力，σyf：フランジ板要素の降伏応力度，Af：フランジ断面積，σyw：ウェブ板要素の降伏応力度，Aw：ウェブ断面積である。

試験体名に用いた2つの数字は前の数字がウェブ鋼種を表し，後の数字がフランジ鋼種を表している。各数字が表す鋼種は，4：SS400，5：SM570，8：HT780である。

3．3　短柱圧縮実験における構成板要素相互の連成局部座屈性状

3．3．1　荷重変位関係

Fig.3.2にCTシリーズの荷重変位関係を示す。荷重は，圧縮荷重を断面積によって除した平均圧縮応力度で表わし，変形は，軸縮み量を材長によって除した平均圧縮ひずみ度で表した。また，図中の各試験体の最大耐力点を▽印で示している。フランジ・ウェブの各板要素とも同一の鋼種よりなるCT-4-4とCT-5-5を比較すると，軟鋼を使用したCT-4-4では，線形関係を離れた後の最大耐力点に至るまでの間に，変形が増大している。これに対し，高張力鋼を使用したCT-5-5では，線形関係を離れた後の最大耐力点に至るまでの間の変形量が小さい。

フランジ・ウェブの各板要素に異なる鋼種を用いて組合わせた試験体については，CT-8-4，CT-5-4，CT-4-4を比べると，最大耐力値は，ウェブに高い降伏応力度のものを使用したもので高い。しかし，これらの試験体の最終的な荷重の停留値はほぼ一定である。このなかでCT-5-4は，軟鋼のみよりなるCT-4-4と類似した挙動を示している。それに対しフランジにのみ高張力鋼を使用したCT-4-5は，高張力鋼のみよりなるCT-5-5と類似している。フランジとウェブに用いる鋼材の降伏応力度にさほど大きな差がない場合は，フランジに使用した鋼材が同じ試験体同士でほぼ等しい性状を示すが，ウェブに使用する鋼材の降伏応力度が高いほど最大耐力は高くなる。さらにCT-4-8の耐力が極めて高いが，ウェブに用いた鋼材に比べて，フランジにかなり高い降伏応力度を有する高張力鋼を用いたことによるもので，ウェブの塑性化に伴う局部座屈による耐力低下を抑え，フランジが座屈するまで荷重が上昇しているためである。しかし，その後の荷重低下は急である。

Ｆｉｇ．３．３にウェブ板厚の厚いＣＦシリーズの荷重変位関係を示す。各板要素の鋼種の違いに伴う最大耐力，及び変形能力の差異は，ＣＴシリーズとほぼ同様な傾向を示している。

板要素の鋼種の組合せ毎にＣＴシリーズとＣＦシリーズを比較すると，全ての組合せにおいて，ＣＦシリーズの試験体の最大耐力時の変形量は，ＣＴシリーズの試験体の最大耐力時の変形量より増加していることが認められるが，その増加率は鋼種の組合せにより異なっている。その中でも，フランジ・ウェブの両板要素ともに軟鋼を使用したＣＴ-４-４とＣＦ-４-４との間で荷重変位性状に差が大きく表れているが，両板要素とも高張力鋼を使用したＣＴ-５-５とＣＦ-５-５では，大きな差異は認められない。両板要素に軟鋼を用いた試験体の方が両板要素に高張力鋼を用いた試験体よりも，ウェブ板厚を厚くすることによりウェブによるフランジへの拘束作用が強くなり，最大耐力時の変形量が増大するなどの違いが表れる。

また，フランジとウェブで鋼種の異なる試験体では，フランジに高張力鋼を用い，ウェブに軟鋼を用いたＣＴ-４-５とＣＦ-４-５との差が極めて大きくなっている。ＣＴ-４-５が高張力鋼のみよりなるＣＴ-５-５と類似した挙動を示し，ＣＦ-４-５が軟鋼のみよりなるＣＦ-４-４と類似した挙動を示している。この鋼種の組合せ以外では，このようなウェブ板厚の変化に伴う違いを生じず，特に，同系統の形式であるフランジに高張力鋼ＨＴ７８０を用い，ウェブに軟鋼を用いたＣＴ-４-８とＣＦ-４-８の間でも，ＣＴ-４-５とＣＦ-４-５との間に見られるようなウェブ板厚の変化に伴う荷重変位曲線の違いは生じていない。部材を構成する板要素の降伏応力度の差が小さい場合には，ウェブ板厚により荷重変位関係に大きな影響が表れる場合があるが，降伏応力度の差が大きい場合には降伏応力度の大きな鋼材を用いたフランジ板要素の影響が大きくウェブ板厚を変化させても，その効果は表れにくい。

３．３．２　耐力上昇率

Ｆｉｇ．３．４に全試験体の耐力上昇率を示す。ここでは，フランジ座屈に対するウェブの影響を検討するために，ウェブ幅厚比で整理した。なお，ウェブ幅厚比は，使用鋼材の材料定数も考慮した等価幅厚比で表わした。耐力上昇率は，実験により得られた最大耐力Ｐｍａｘを式（３．２．１）で表わされるＰｙにより除したものである。

図中，線で結んだものは，フランジに用いた鋼材が等しいものであり，実線がＳＳ４００鋼材，破線がＳＭ５７０鋼材，一点鎖線がＨＴ７８０鋼材である。本実験では，フランジ板厚は全て等しいので，使用する鋼材により次式で表わされるフランジ等価幅厚比が決定される。

$$\beta_f = b/t_f \sqrt{\sigma_{yf}/E} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.3.1)$$

ここに，βf：フランジ等価幅厚比，ｂ：フランジ幅の半分，ｔｆ：フランジ板厚，σyf：フランジ鋼材の降伏応力度，Ｅ：ヤング率である。使用鋼材がＳＳ４００，ＳＭ５７０，ＨＴ７８０の場合，βfの値はそれぞれ０．３２４，０．４１３，０．４７３である。

耐力上昇率は，フランジ・ウェブとも軟鋼であるものが各シリーズの中で最大となっている。これは，降伏比の小さな鋼材を使用しているためである。$\beta f = 0.324$の実線で結んで示したフランジに軟鋼を使用したもので高い傾向にある。その中でも，等価幅厚比約１．０以下に相当するＣＦシリーズでは，鋼種の違いによる等価幅厚比の増大に伴い耐力上昇率は急激に減少している。これに対して，等価幅厚比約１．０以上に相当するＣＴシリーズでは鋼種による違いは，さほど表れてはいない。フランジに軟鋼を用いた場合ウェブ等価幅厚比が１．０以上では，ウェブに高い降伏応力度の鋼材を使用し等価幅厚比が大きくなっても耐力上昇率はさほど低くならない。

図中に破線と一点鎖線で示すフランジに高張力鋼を使用したものでは，フランジにより降伏応力度の高い鋼材を用いた$\beta f = 0.473$

のもので耐力上昇率は大きくなっている。一般にフランジ・ウェブとも同一鋼材よりなる場合，より高い降伏応力度の鋼材を用いたものが耐力上昇率は低くなる[27]。しかし，異種鋼材を組合せ，ウェブが軟鋼で，フランジに高張力鋼を用いる場合は，ウェブに使用する鋼材とフランジに使用する鋼材で，なるべく降伏応力度の差が大きなものが効果的である。これに対して，降伏応力度にそれほど差のない鋼材を使用した場合は，耐力上昇率が 1.0を下回る場合がある。しかし，この中でもウェブに高い降伏応力度を用いて，相対的に等価幅厚比が大きくなった場合でも、等価幅厚比が約1.0以上のＣＴシリーズでは，耐力上昇率は向上している。これは，ウェブに高張力鋼を用いたことによる局部座屈に対する拘束作用が大きくなったためである。

３．３．３　塑性率

Ｆｉｇ．３．５に全試験体の塑性率を示す。塑性率は，最大耐力点における軸ひずみεｍａｘを降伏荷重Ｐｙに対応する降伏ひずみεｙで除したもので定義している。

鋼材の組合わせ方が等しく，ウェブ板厚を変えたものでは，全ての組合せにおいて，ウェブ板厚が厚いＣＦシリーズがＣＴシリーズに比べて，塑性率は上昇している。その中でも，フランジが軟鋼，ウェブが高張力鋼である試験体の塑性率は，ウェブ板厚が厚くなることで大きく上昇している。この組合せの場合，フランジ局部座屈に対するウェブの拘束効果が，ウェブ板厚により大きく変化することを示している。また，塑性率は概ねウェブ等価幅厚比の増加に伴い低下し，ウェブに使用した鋼材の降伏応力度が高いほど塑性率は低いことが分かる。これに対し，フランジが高張力鋼，ウェブが軟鋼である試験体は，全体的に塑性率は小さく，ウェブ鋼種・ウェブ板厚にほとんど影響をうけてはいないが，ＣＴ-５-５ではウェブに高張力鋼を使用することで，相対的に等価幅厚比は大きくなっているにもかかわらず，若干，塑性率は上昇している。

３．３．４　耐力劣化勾配

Ｆｉｇ．３．６に，全試験体の耐力劣化勾配を示す。耐力劣化勾配は，劣化勾配Ｅｄを弾性勾配Ｅを用いて無次元化して示している。劣化勾配Ｅｄは，最大耐力点から耐力劣化後に最大耐力の９０％まで荷重を低下した点までの勾配で定義した。

この中では，フランジにＨＴ７８０を使用したもので特に高い。ここで，特にフランジにＨＴ７８０を使用したＣＴ-４-８，ＣＦ-４-８で耐力劣化勾配が大きい。これは，ウェブの塑性化が進み，その局部座屈を進展させようとする段階において，いまだフランジは弾性域にあり十分な剛性を確保しているために，ウェブに対して大きな抵抗力を有している。しかし，その後フランジの塑性化が進み剛性が低下すると，フランジ局部座屈が発生する。この時点では，フランジの局部座屈に対しては，ウェブはすでに塑性化し剛性が低下しているために拘束作用をおよぼさない。そのためフランジに対する拘束はなく，単に帯板としての様相を呈する。そのため急激な耐力低下となっている。

これに対して，それ以外の組合せではウェブ幅厚比が小さくなるに伴って若干耐力劣化勾配は大きくなるが，それほど大きな違いはみられない。

3．4　数値解析による純圧縮を受ける構成板要素の連成局部座屈性状

3．4．1　数値解析概要

実験では，材の不均一性，初期不整，載荷条件，境界条件の不整合などの影響が避けられない。また本実験では，H形鋼をそのまま軸方向に圧縮した結果であるから，フランジ・ウェブ間の相互拘束のためフランジ，ウェブのどちらの座屈が支配的であるかを見極めることが困難である。そこで本章では，実験と同一の部材を解析し，それらの影響を排除した構成板要素の局部座屈に及ぼす連成効果について検討する。この解析においては，部材構成板要素それぞれに注目し，実験では計測することが難しい連成局部座屈時のフランジ・ウェブの荷重分担について検討を加える。解析は，増分理論に基づく有限要素法による弾塑性大変形解析法51），52）を用いる。

本解析では，弾塑性座屈現象を対象として，弾塑性大変形解析を行なうため，材料の機械的性質の評価は非常に重要である。特に，鋼材の応力－ひずみ関係をどのように仮定するかは解析結果に大きく影響を及ぼす。ここでは，Table3.1に示した実験での鋼材の引張試験結果を参考として，tri-linear型の応力－ひずみ関係を仮定する。応力－ひずみ曲線は前章のものと同じである。ヤング率およびポアソン比はそれぞれ2100.0t/cm2，0.30に固定するが，その他の降伏応力度，ひずみ硬化開始ひずみ，ひずみ硬化域における接線弾性係数は，それぞれの鋼種，板厚に対応する引張試験の結果を参考にして決定した。ただし，SS400鋼材の板厚6mmのもので値が明確に測定できなかったEst，ε stについては，SS400鋼材の板厚9mmのものを参考にした。また，2次勾配は3次勾配の1/10としている。

解析対象は公称断面とし，対称性を導入し，材長，断面せいをと

もに1/2 とした。境界条件及び要素分割状態をFig.3.7に示す。用いた要素はフランジ・ウェブの両板要素とも三角形平板有限要素を用いた。

Fig.3.8, Fig.3.9に荷重変位関係における実験と解析との対応関係を示す。ただし，図中の線は解析結果を表しており，シンボルは実験結果を表したものである。解析結果は，実験結果と多少の相違がみられるが，鋼種の組合せの相違に伴う最大耐力，変形性能の変化については，おおむね対応している。実験において避けることができない様々な不整と，理想化された解析の条件との相違を考えれば，本解析によって，構成板要素の連成局部座屈に関する一般的な性状をおおむね捉えられる。

３．４．２　連成局部座屈時の各板要素の荷重分担

Fig.3.10～Fig.3.15 にフランジおよびウェブの荷重分担を示す。縦軸は，フランジあるいはウェブの各板要素が負担している平均圧縮応力度を，各板要素の鋼材に対応した降伏応力度で無次元化したものであり，横軸は，各板要素の軸縮み量を材長で除した平均圧縮ひずみ度をとっている。

$$\sigma = Pn/An \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.4.1)$$

$$\varepsilon = \Delta/L \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.4.2)$$

ここで，Pn：フランジあるいはウェブの各板要素が負担する圧縮荷重，An：フランジあるいはウェブの各板要素の断面積，Δ：フランジあるいはウェブの各板要素の軸縮み量，L：材長である。▽印は，荷重の最初のピークを示す。この印により，各試験体ごとのフランジ・ウェブの局部座屈に伴う荷重低下がどちらの板要素において先行するかが明らかにされる。このなかで，▽印の位置から判断すると，フランジの荷重低下が先行する形式で荷重低下しているものは，CT-8-4，CF-8-4である。特にCF-8-4ではフランジ局部座屈によりフランジの荷重が一旦低下する。この間，ウェブは弾性域にあり，拘束作用をフランジに及ぼしているために，フランジの荷重は再び増加している。その後，ウェブが降伏した後に再びフランジの荷重が低下し，同時に部材全体の崩壊に至っている。

これに対して，他の試験体は全て，ウェブの荷重低下が先行する形で崩壊しているといえる。この形式の代表的なものとしては，CT-4-8があげられる。この試験体では，ウェブが降伏した後に早期に荷重を低下させる。この時点では，まだフランジが降伏応力度に至っておらず，弾性状態にある。このため，ウェブの局部座屈に伴うフランジを面外方向に変形させようとする誘発作用に対し大きな抵抗力を持ち，部材全体としての荷重も増加する。その後フランジが降伏しても，すぐには荷重低下はおこらない。しかし，平均圧

縮ひずみ度が大きくなり，部材として外力との釣り合い状態が保てなくなった後に，急激に荷重を低下させる。さらに，先に示したこの試験体の荷重変位関係とフランジだけの荷重変位関係がほぼ一致していることから，フランジの挙動がそのまま部材としての挙動として表れている。

このウェブの荷重低下が先行した試験体のなかでも，ＣＴ-４-４，ＣＴ-５-４，ＣＦ-５-４ 等は，ウェブの荷重低下は緩やかである。これは，フランジの面外変形が増大する過程においても，外力とフランジの分担する荷重が釣り合いながら変形量をのばしていったと考えられる。またＣＦ-４-５，ＣＴ-５-５，ＣＦ-５-５，ＣＦ-４-８は，ウェブの荷重低下が先行し，その後ウェブの荷重分担は減少するが，急激な減少はみられない。その後のフランジの荷重分担が減少した時点で，両板要素の荷重分担割合が逆転している。したがって，これらの試験体は，ウェブ座屈先行であるが，崩壊はおもにフランジ座屈の影響によるものである。ウェブは，フランジとの接合辺で拘束を受けているために局部座屈が発生してもすぐには荷重を低下させない。また，拘束作用により面外変形が進行しないために，ウェブはひずみ硬化に入り荷重が上昇する。フランジも高張力鋼を使用しているために，ウェブからの局部座屈を誘発させる力に対して十分な抵抗力を有するが，一旦面外変形が大きく進行すると塑性ヒンジが形成され，フランジの荷重は急激に低下する。

この様に，組み合わせる鋼種，およびウェブ板厚により連成局部座屈形式に違いがみられ，部材の崩壊形式にまで影響がみられる。さらに，先に局部座屈が発生した板要素で部材全体の荷重低下にいたるのではなく，その後もう一方の板要素の局部座屈により崩壊にいたる場合がある。

ＣＴシリーズとＣＦシリーズを比較すると，鋼種の組合せが同一の場合，荷重分担に大きな影響はみられない。しかし，先の荷重変

位関係において大きな変化がみられたＣＴ-４-５とＣＦ-４-５では，荷重分担に違いが表れている。ＣＴ-４-５はウェブが荷重低下した直後にフランジも荷重低下し始め，その後両板要素は，ほぼ同様に荷重低下している。このため，荷重変位関係において線形関係を離れた直後に最大耐力に達し，その後耐力低下している。これに対して，ＣＦ-４-５はウェブの荷重が低下してもフランジの荷重はすぐには低下せず，変形量をのばしている。その後フランジの荷重が低下し始めると同時に，ウェブの荷重は上昇している。これにより全体的に荷重は低下せず変形量をのばしていった。この種の鋼材の組合せでは，ウェブ板厚を変化させることにより，各板要素の荷重分担に変化が生じ，部材全体としての荷重変位関係に大きく影響する。この様な荷重分担の変化はＣＴ-４-８とＣＦ-４-８の間にも確認できる。しかし，これらの試験体の部材としての荷重変位関係には，大きな影響は表れていない。これは，断面積の割合が大きなフランジ板要素に高い降伏応力の鋼材を使用しているために，フランジの荷重分担性状が，部材としての荷重変位関係に強く表れており，ウェブ板厚を変化させたことによるウェブの荷重分担の変化の影響は小さいためである。

3．5　まとめ

本章では，同一部材内に異種鋼材を用いた場合の部材性能について基礎的資料を得ることを目的とし，H形鋼短柱圧縮実験および，その実験に対応した数値解析を行なうことを通して，フランジ・ウェブ板要素の局部座屈に対する相互作用を検討し，部材性能に対する影響について考察した。ここで，板要素の使用鋼材および板厚の違いが部材性能に大きく影響する事を示した。以下に明らかにされた事柄を示す。

（1）フランジに軟鋼を使用した全ての試験体は，フランジに高張力鋼を使用した試験体に比べて，耐力上昇率，塑性率ともに高い値を示す。フランジに高張力鋼を使用し，ウェブに軟鋼を使用した試験体の耐力劣化勾配は急になる傾向にあるが，ウェブに高張力鋼を使用したものでは，そのような傾向はみられない。

（2）フランジに高張力鋼を使用し，ウェブに軟鋼を使用した試験体の連成局部座屈性状は，ウェブ板厚に影響を受け，その結果荷重変位関係に大きな違いが表れる場合がある。

（3）フランジが軟鋼，ウェブが高張力鋼である試験体の耐力上昇率は，ウェブ板厚を薄くした場合，ウェブの等価幅厚比が大きくなっても影響を受けず，その値はほとんど変化しない。

（4）フランジが軟鋼，ウェブが高張力鋼である試験体の塑性率は大きく，その値はウェブ板厚が厚くなると大きくなる。しかし，フランジに高張力鋼を使用した組合せでは，塑性率は小さく，ウェブ板厚には影響されない。

（5）各板要素の荷重分担状態が全体の荷重変位関係に大きく関与し，部材の力学的性状を考察する上で板要素の荷重分担を検討することは重要である。

（6）連成局部座屈による部材の崩壊は，かならずしも局部座屈が先行する板要素の荷重低下で決まるのではなく，鋼種の組合せによっ

ては，その後のもう一方の板要素の局部座屈により決定される場合がある。

CHAPTER 3

Figures and Tables

Table 3.1 Material properties

Test-Piece	t (mm)	σy (t/cm²)	σu (t/cm²)	E (t/cm²)	Est (t/cm²)	εst (%)	ν	YR
SS400	6	3.47	4.09	2180	-	-	0.273	0.848
SS400	9	2.97	4.67	2200	35.5	1.7	0.275	0.636
SM570	6	5.19	5.93	2128	21.1	1.7	0.267	0.875
SM570	9	5.36	6.03	2065	22.0	1.8	0.282	0.888
HT780	6	7.00	7.70	2085	21.4	1.8	0.285	0.909
HT780	9	8.38	8.87	2095	18.6	1.5	0.279	0.945

Table 3.2 Dimensions of specimens of short-column

Specimen	web plate	flange plate	tw (mm)	d/tw × √(σyw/E)	b/tf × √(σyf/E)	Pp
CT - 4 - 4	SS400	SS400	6	0.962	0.324	103.4
CT - 4 - 5	SS400	SM570	6	0.962	0.413	179.2
CT - 5 - 4	SM570	SS400	6	1.143	0.324	118.4
CT - 5 - 5	SM570	SM570	6	1.143	0.413	186.5
CT - 4 - 8	SS400	HT780	6	0.962	0.473	284.2
CT - 8 - 4	HT780	SS400	6	1.394	0.324	135.1
CF - 4 - 4	SS400	SS400	9	0.611	0.324	112.9
CF - 4 - 5	SS400	SM570	9	0.611	0.413	181.0
CF - 5 - 4	SM570	SS400	9	0.783	0.324	140.8
CF - 5 - 5	SM570	SM570	9	0.783	0.413	213.6
CF - 4 - 8	SS400	HT780	9	0.611	0.473	279.9
CF - 8 - 4	HT780	SS400	9	0.862	0.324	194.2

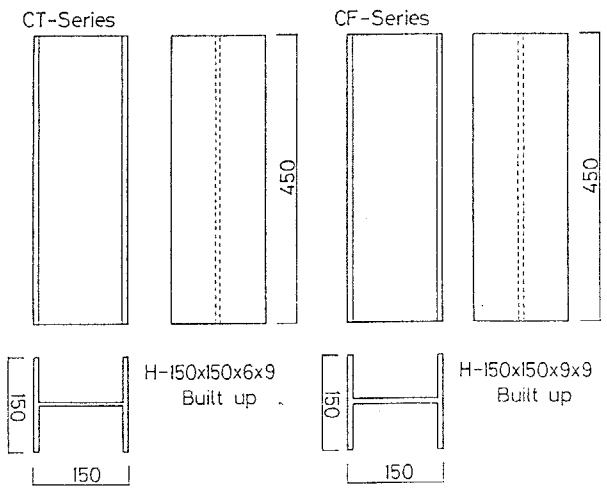


Fig. 3.1 Specimens of short-column

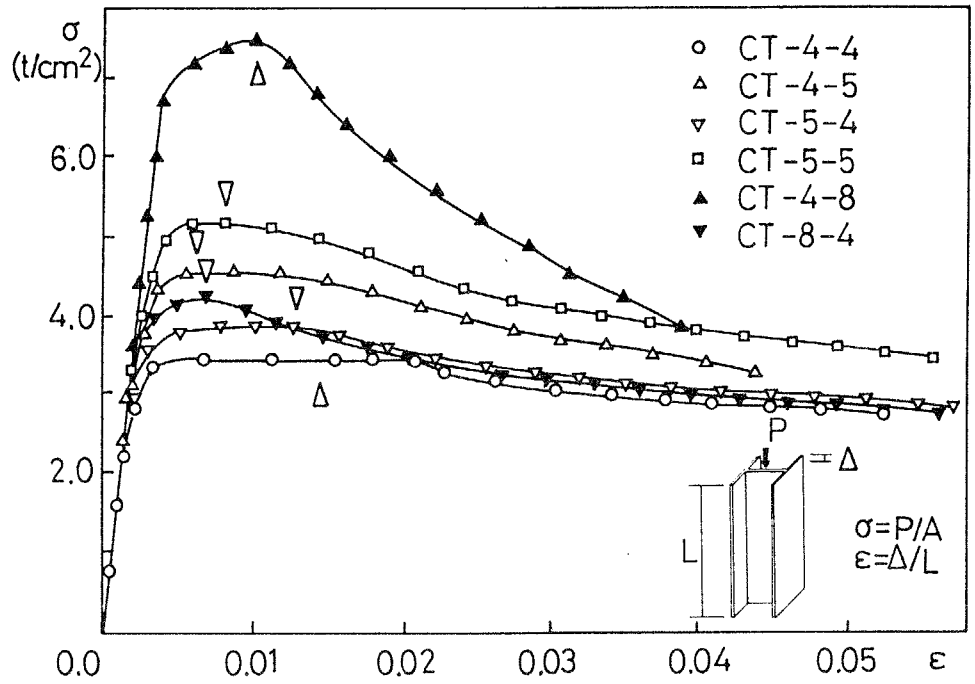


Fig. 3.2 Load - displacement curves of CT series

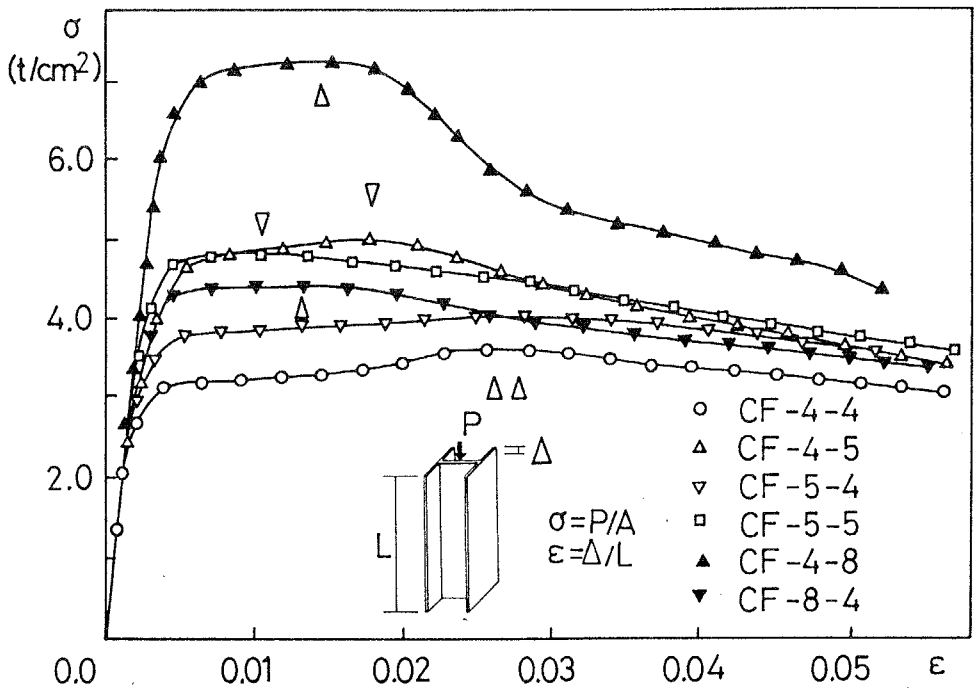


Fig. 3.3 Load - displacement curves of CF series

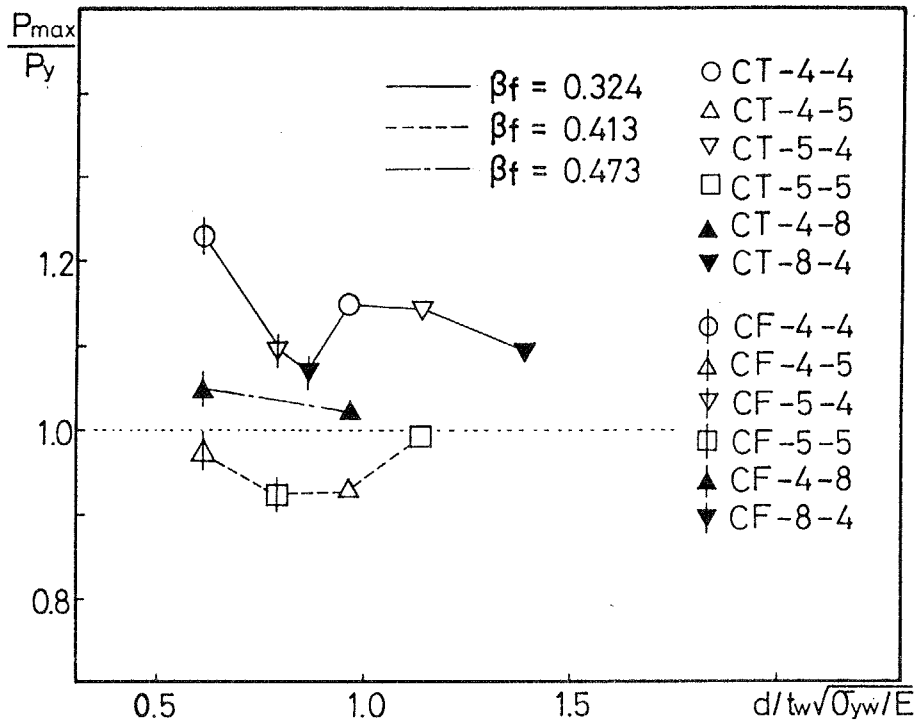


Fig. 3.4 Ultimate load ratio

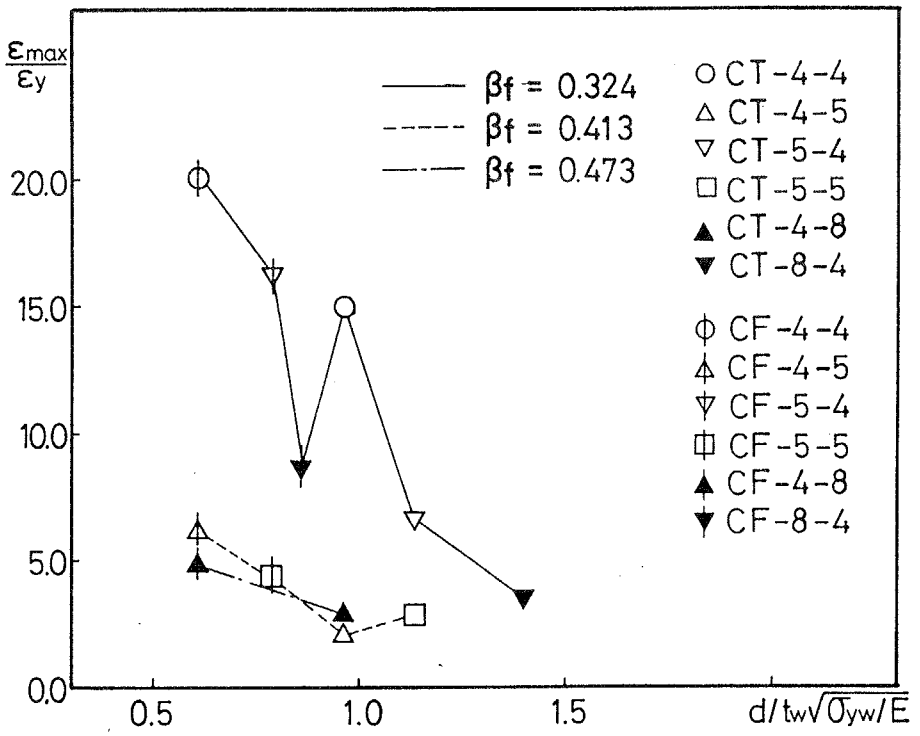


Fig. 3.5 Deformation capacity

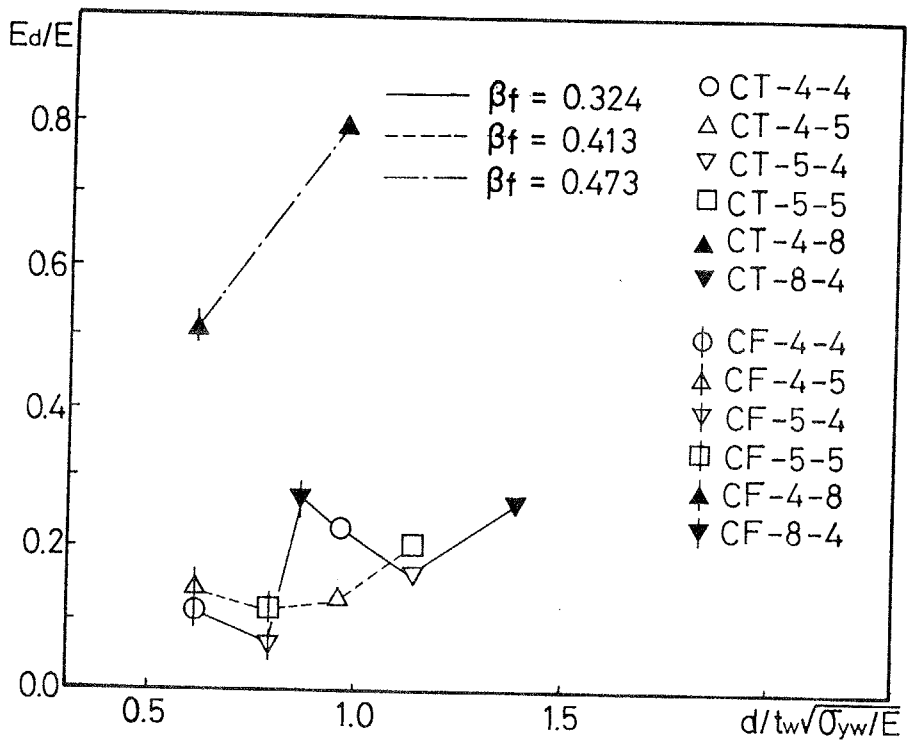


Fig. 3.6 Slope of strength inferiority

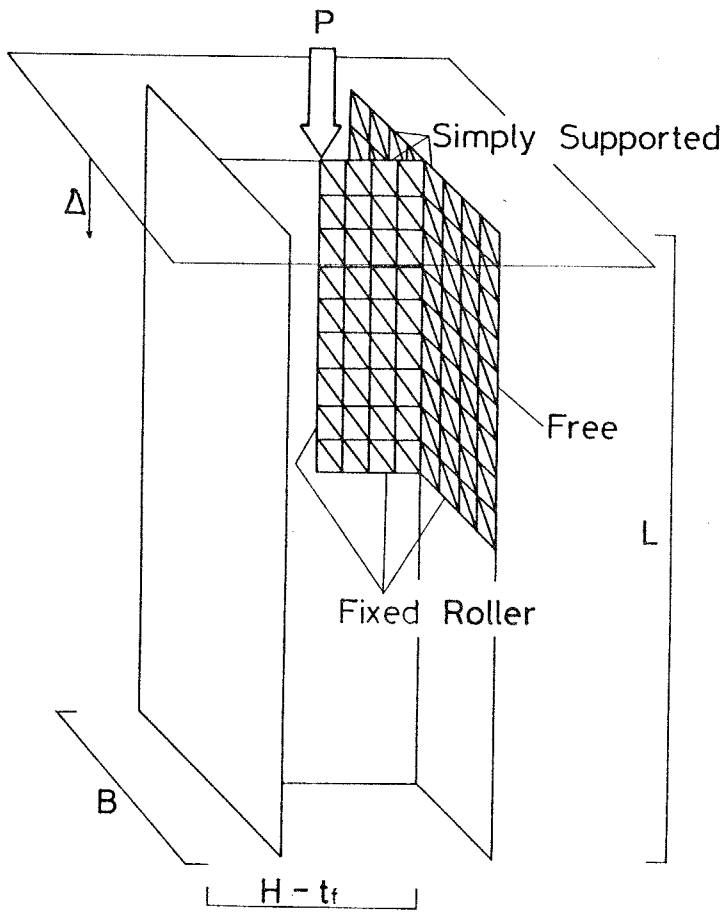


Fig. 3.7 Short-column idealization

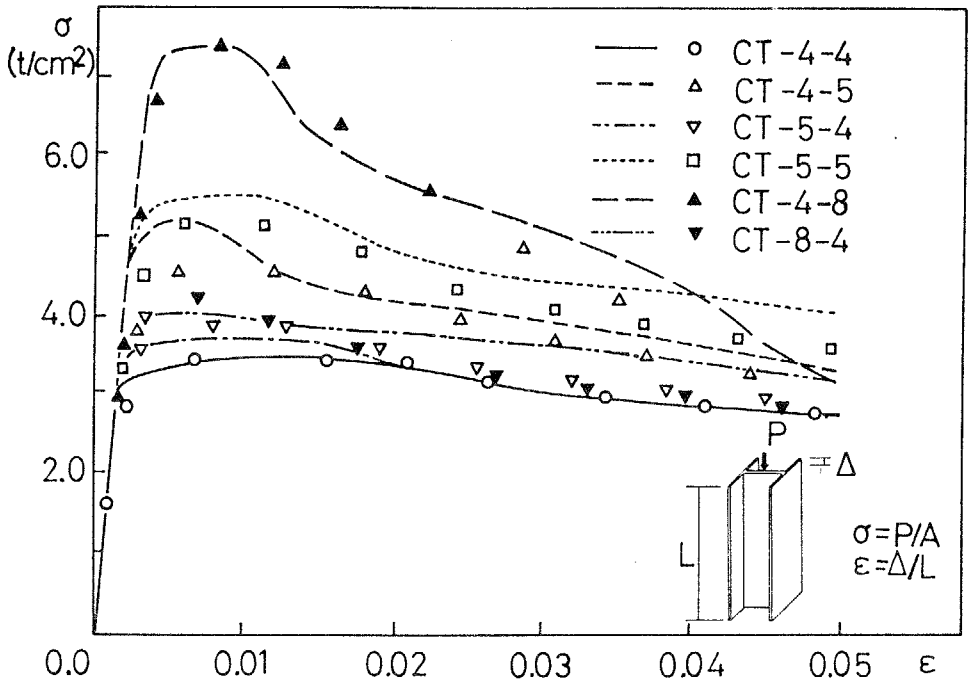


Fig. 3.8 Load - displacement curves of CT series

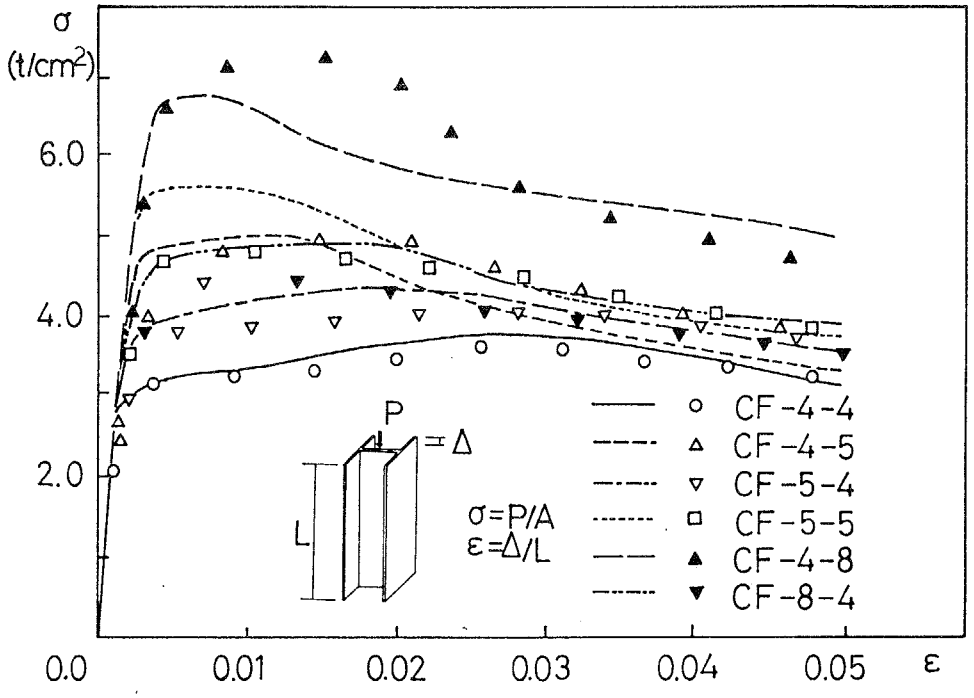


Fig. 3.9 Load - displacement curves of CF series

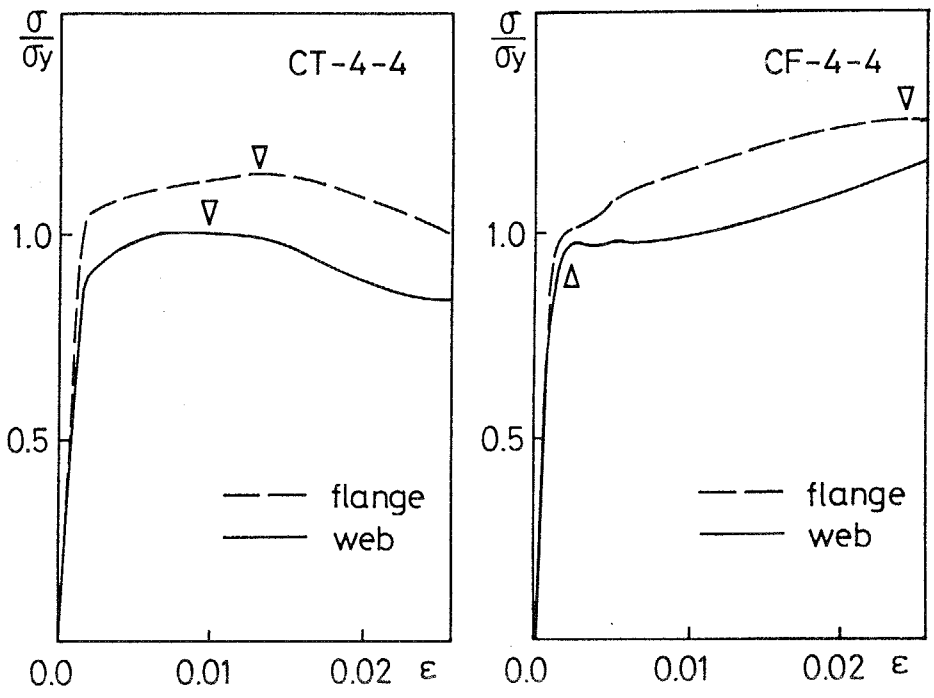


Fig. 3.10 Load - displacement curves of flange and web (CT-4-4, CF-4-4)

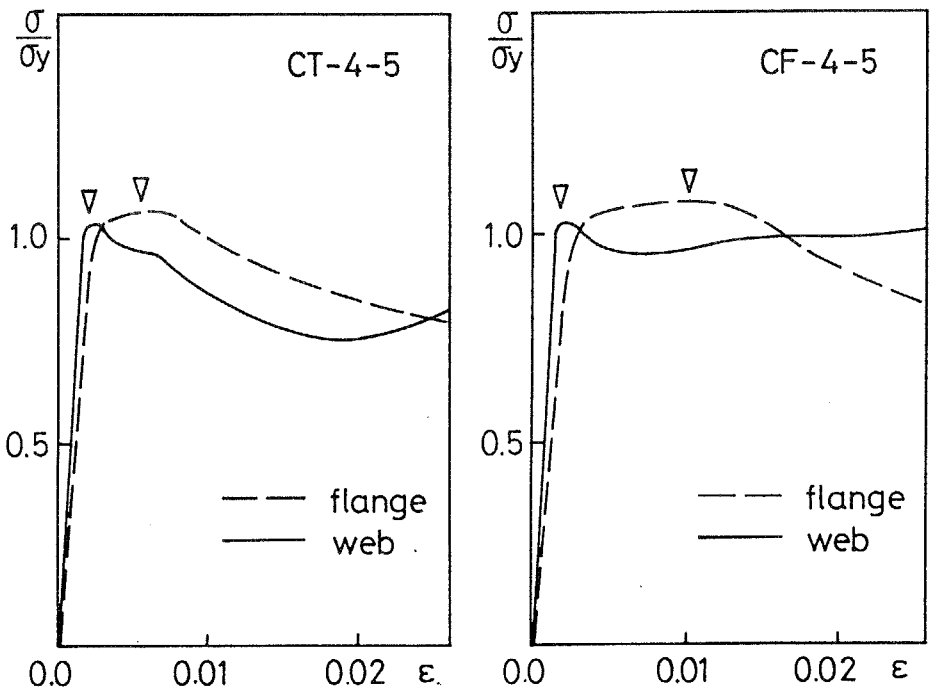


Fig. 3.11 Load - displacement curves of flange and web (CT-4-5, CF-4-5)

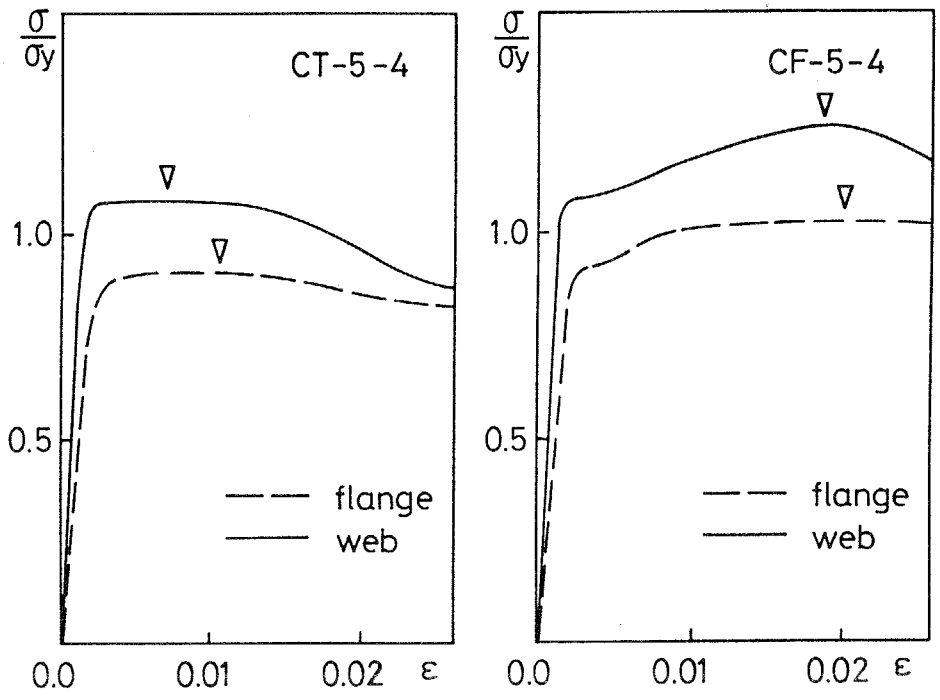


Fig. 3.12 Load - displacement curves of flange and web (CT-5-4, CF-5-4)

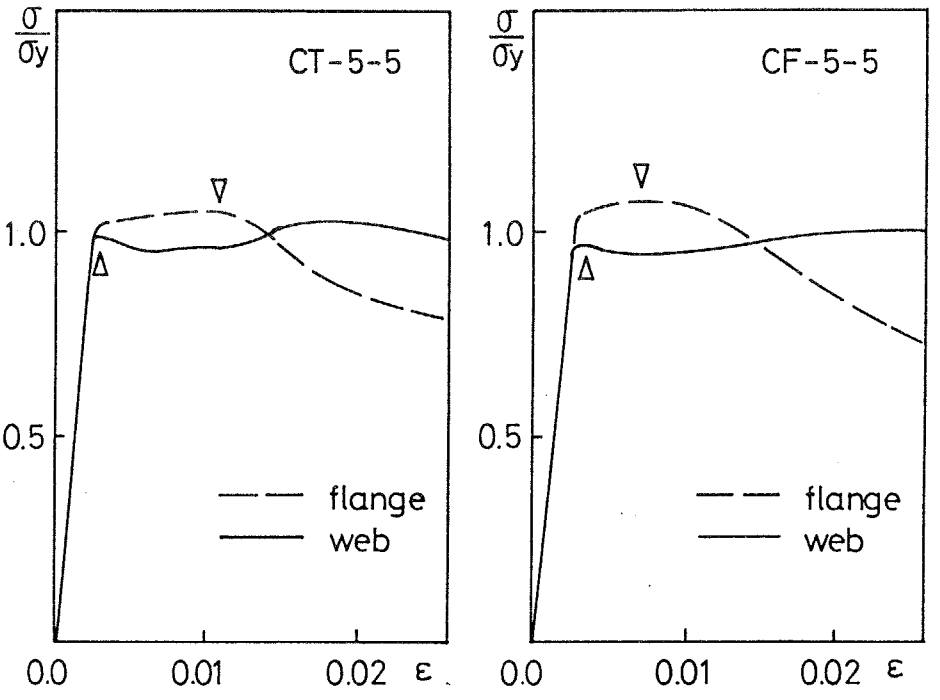


Fig. 3.13 Load - displacement curves of flange and web (CT-5-5, CF-5-5)

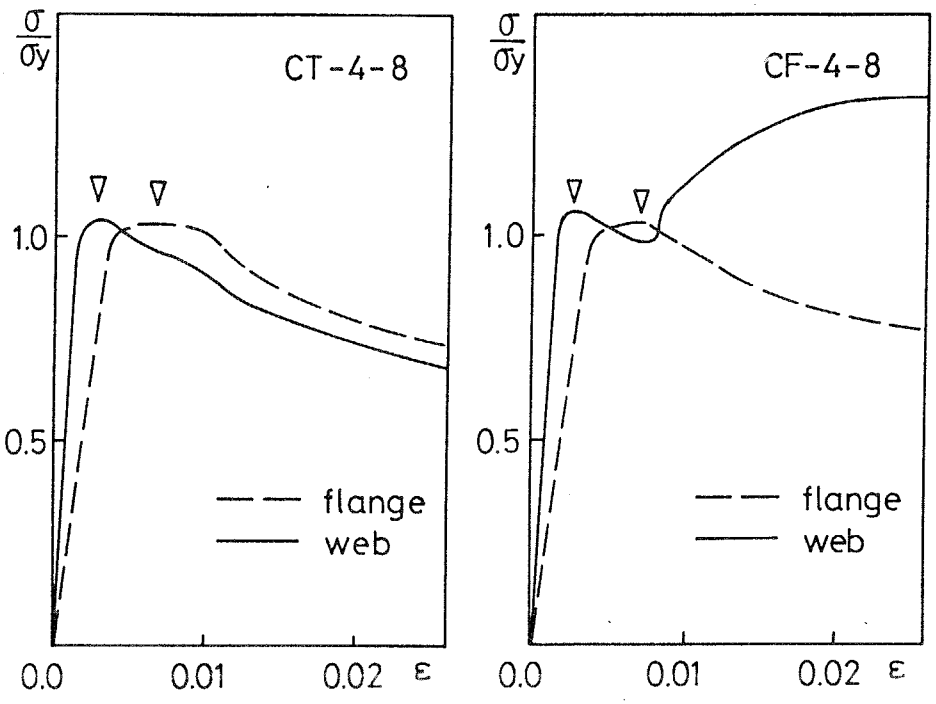


Fig. 3.14 Load - displacement curves of flange and web (CT-4-8, CF-4-8)

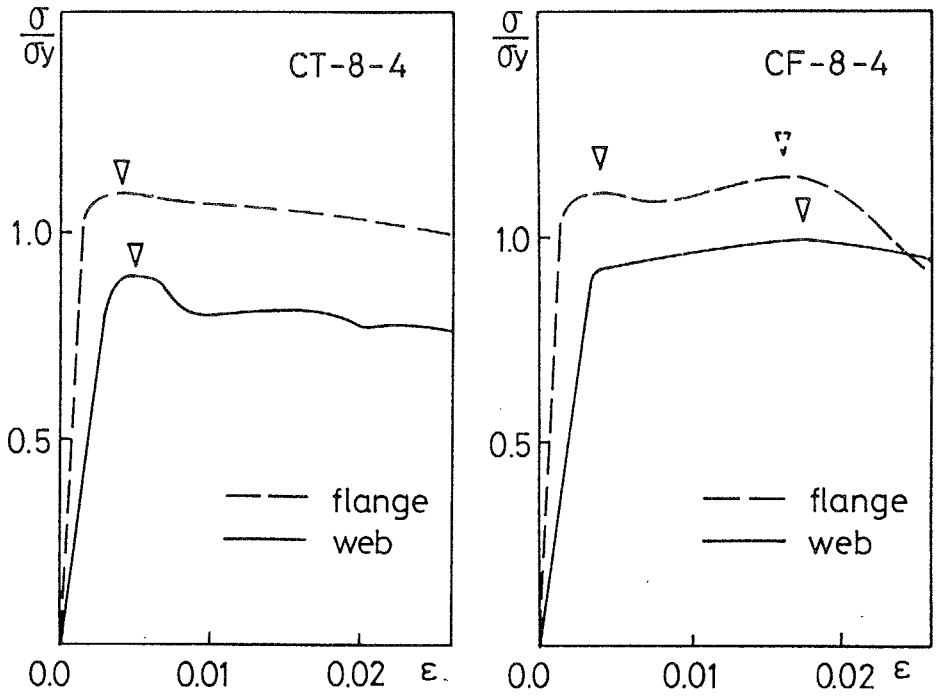


Fig. 3.15 Load - displacement curves of flange and web (CT-8-4, CF-8-4)

第４章　異種鋼材を用いたＨ形鋼柱部材の塑性変形性状

４．１　はじめに

４．２　柱部材実験概要
４．２．１　試験体
４．２．２　実験装置及び使用鋼材

４．３　ハイブリッド柱部材の塑性変形性状
４．３．１　荷重変位関係における軟鋼柱部材との差異
４．３．２　Ｐ-Δ効果による耐力低下を表現した荷重変位関係
４．３．３　軸力比の影響
４．３．４　ウエブ幅厚比の影響
４．３．５　耐力及び塑性変形性能

４．４　ハイブリッド柱部材の塑性変形性能評価
４．４．１　塑性変形性能評価法
４．４．２　短柱圧縮実験
４．４．３　塑性変形性能

４．５　数値解析による各種単一鋼種柱部材との比較
４．５．１　数値解析概要
４．５．２　荷重変位関係
４．５．３　ハイブリッド柱部材と高張力鋼柱部材との塑性変形性状の相違

４．６　まとめ

4．1　はじめに

先の第2章，第3章においては，純圧縮荷重下，せん断曲げ荷重下での各種鋼材の組合の違いが部材の荷重変位関係に与える影響について考察を加えた。その結果フランジに軟鋼，ウエブに高張力鋼を使用した部材の力学挙動は安定しており，その耐力，塑性変形能力ともに高い値を示すことが確認された。さらに，1）純圧縮荷重下における塑性率は高く，その値はウエブ板厚が厚くなるほど大きくなること，2）曲げ荷重下に於いては，その耐力劣化勾配が小さいこと，3）フランジ局部座屈の発生を遅らせることが可能になることなどを示した。

本章ではこれらの知見を参考にフランジに軟鋼，ウエブに高張力鋼を使用したハイブリッド柱部材の載荷実験を計画した。H形断面を用いた場合，断面中心に位置するウエブが大変形域においても軸力を保持するならば，高軸力下でもフランジのみならず，ウエブも曲げ応力を負担することができ，柱部材の有する曲げ耐力と塑性変形能力は耐震設計上十分な数値を確保する事が可能となる。このことを考慮に入れ，特にウエブには降伏応力度の高い80キロ級のものを使用した。また，ウエブが大変形域においても軸力を保持し続けることを可能にする目的，およびフランジ局部座屈に対する拘束効果を高める目的から，ウエブの板厚を通常の断面に使用されるような板厚にこだわることなく，あえてフランジ板厚よりも厚くした場合も検討対象とする。このハイブリッド柱部材の力学性状に対し，載荷実験を通して，導入軸力，ウエブ板厚をパラメータに取り，圧縮曲げ耐力と塑性変形性能等の関係を中心に考察し検討を加える。

つぎに，ウエブに高張力鋼，フランジに軟鋼を使用した柱部材の塑性変形能力評価を試みる。用いる評価手法は文献85）に示されているものである。この評価手法を本研究のハイブリッド柱部材に適応可能にし，その結果を先の実験値との比較を通して検討する。

またその結果をもとに，ハイブリッド柱部材の塑性変形能力をウエブ幅厚比，軸力比の関係で整理する。最後に数値解析を通して，ハイブリッド柱部材と低ＹＲ鋼を使用した柱部材の荷重変位関係の相違について考察を加える。また，高張力鋼を使用した柱部材との違いについて検討し，ハイブリッド柱部材の有効性を示す。

４．２　柱部材実験概要

４．２．１　　試験体

本章では，ウエブに高張力鋼を用い，さらにその板厚を厚くした柱部材の基本的な力学性状をＳＳ４００のみからなる柱部材と比較検討し，その特長を把握することを目的とする。実験パラメータとしては，導入軸力，ウエブ板厚に限定し，ハイブリッド柱部材６体と，比較のためのＳＳ４００のみからなる柱部材３体の計９体を計画した。試験体の形状をＦｉｇ．４．１に示す。試験体は溶接組立Ｈ形鋼であり，ハイブリッド試験体の溶接部は高張力鋼の溶接方法に準拠した方法で行っている。断面幅，断面せいは共に１５０ｍｍであり，フランジ板厚は９ｍｍで全試験体で同一とする。中央部には，２枚のスチフナを設け，片側スパンで発生した局部座屈が，他方のスパンに影響を及ぼさないよう配慮した。また，このスチフナと引張側フランジとは溶接されておらず、溶接の影響による引張破断等が発生しないようにした。

試験体の一覧をＴａｂｌｅ４．１に示す。表中Ｐｐ，Ｐｙは下式で与えられ，それぞれ全塑性軸力，降伏軸力と定義する。

$$P_p = 2\,\sigma_{yf} A_f + \sigma_{yw} A_w \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4.2.1)$$

$$P_y = \sigma_{yf} A \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4.2.2)$$

ここでσｙｆ：フランジ板要素の降伏応力度，σｙｗ：ウエブ板要素の降伏応力度，Ａｆ：フランジ断面積，Ａｗ：ウエブ断面積，Ａ：全断面積（＝２Ａｆ＋Ａｗ）である。試験体名は，ＢＣが本実験の試験体を示し，次のＴ，Ｍ，Ｆがウエブ板厚に対応しており，それぞれ６，９，１２ｍｍを表している。次の２つの数字は順にウエブ鋼種，フランジ鋼種を表わし，８がＨＴ７８０，４がＳＳ４００を表わす。最後の数字は導入軸力の全塑性軸力Ｐｐに対する比を百分率表示したものである。

４．２．２　実験装置及び使用鋼材

Ｆｉｇ．４．２に加力装置を示す。加力方法は所定軸力を導入し，両端単純支持とし，中央に加力する一方向単純載荷とした。軸力は４本のＰＣ鋼棒と油圧ジャッキを介して自己釣合的に試験体に導入される。また，この軸力導入装置は，試験体の変形を拘束しないよう配慮されている。このように試験体を内包した軸力導入装置をアムスラー型万能試験機上に置き，部材中央への加力はアムスラー型万能試験機を用いて行った。また，横座屈補剛冶具を用いて塑性化後の大変形域においても横座屈が生じないように考慮した。

本実験のような単純支持された柱に中央集中荷重を作用させた場合，最大耐力後，試験体の左側あるいは右側のどちらか一スパンのみが塑性変形を進行させ，他方は弾性除荷を起こす。このことを考慮に入れ本論文では変位量を取り扱う際，Ｆｉｇ．４．３に示すように，塑性変形を進行させる側の片持ち柱としての変位となるように補正を行っている。また耐力に関してはＰ-Δ効果を考慮した部材端モーメントを用いて考察する。

実験に先立ち使用鋼材の機械的性質を調べるため，鋼材種，板厚ごとの引張試験を行った。使用鋼材は，ＨＴ７８０，ＳＳ４００の２種類である。引張試験片は，試験体を作製した鋼板より切り出し，ＪＩＳ１号Ａ試験片を用いた。Ｔａｂｌｅ４．２に使用鋼材の各鋼種，各板厚ごとの機械的性質を示す。また応力－ひずみ関係をＦｉｇ．４．４に示す。

4．3　ハイブリッド柱部材の塑性変形性状

4．3．1　荷重変位関係における軟鋼柱部材との差異

ハイブリッド柱部材とSS400のみからなる柱部材（以下，軟鋼柱部材）との比較を通して，ハイブリッド柱部材の特長およびウエブ板厚を厚くすることの効果について考察を加える。

Fig.4.5にハイブリッド柱部材と軟鋼柱部材の荷重変位関係を示す。本図では，ウエブに使用した鋼種，板厚，導入軸力の影響が明確に表現されるように，耐力は軸力を導入しない場合の降伏モーメントMyで無次元化し，変位はそのときの部材角θyで無次元化した。図中▼は最大耐力到達点を示し，▽は目視により確認されたフランジ局部座屈発生点を示している。この記号は以下の荷重変位関係においても同様である。

降伏軸力Pyに対する軸力比，すなわち導入軸力がほぼ等しいBCM-8-4-30とBCM-4-4-45を比較するとハイブリッド柱部材BCM-8-4-30の方が最大耐力，および最大耐力時の変位量ともに大きく，その後の耐力劣化性状も極めて安定した挙動を示している。さらに，導入する軸力を上げ，全塑性軸力Ppに対する軸力比を等しくしたBCM-8-4-45においても，その最大耐力時の変位量は，BCM-4-4-45に対しても劣ることなく，最大耐力もBCM-8-4-30に比べてさほど低下していない。

ウエブ板厚の影響をみるために，軟鋼柱部材のBCM-4-4-45とBCT-4-4-45を比較すると，ウエブ板厚を厚くすることの効果はかなり良いと言える。最大耐力，その時の変位量ともにかなり向上しており，特に最大耐力以降の耐力劣化勾配においてはかなり改善されており，極めて安定した荷重変位関係となっている。またフランジ局部座屈発生時期にも差異がみられ，ウエブ板厚の厚いBCM-4-4-45試験体のフランジ局部座屈発生時期が遅くなってい

る。これはフランジ局部座屈に対するウエブの補剛効果の違いと考えられる[49]。

次にFig.4.6は，導入軸力の等しい試験体の梁せい方向のひずみ分布である。無次元化した同一変位量でのひずみ量を示している。このひずみは，ウエブ片面に貼付したひずみゲージにより計測しているため，ウエブ局部座屈による影響は排除できていないが，ひずみ分布の概略は捉えられているものと思われる。また，同図中に計算により求められる塑性中立軸を示している。これら2体に導入した軸力は，全断面がSS400からなる試験体における全塑性軸力の65%という高軸力にも関わらず，ハイブリッド柱部材の塑性中立軸はウエブ内に存在している。そのため引張フランジ側のひずみが十分に進展しており，塑性変形性能を向上させる要因の一つとなっているものと考えられる。さらに塑性中立軸がより断面中心側にあることで，圧縮力を負担するウエブ部分の幅厚比を小さくすることができ，フランジ局部座屈に対する抵抗度合を高めることが可能となる。このことから第2章で示されているようにウエブに高張力鋼を使用したことによるフランジ局部座屈に対する効果は十分期待できる。

４．３．２　P-Δ効果による耐力低下を表現した荷重変位関係

Fig.4.7，Fig.4.8にP-Δ効果による耐力低下を表現した荷重変位関係を示す。どちらの図も耐力は部材中央に作用させた水平力の半分を降伏モーメント時の水平力の半分で無次元化し，変位は無次元化された部材角を用いた。Fig.4.7は導入軸力の等しい試験体同士を比較したものであるが，本研究で提案するハイブリッド柱部材の最大耐力は，かなり高く，その時の変位量も大きくなっている。このように最大耐力が高い理由として，軟鋼のみよる柱部材は，軸力を負担する部分の面積が大きく，フランジまで軸力を負担しているのに対し，ハイブリッド柱部材は，軸力を負担する部分をできるだけ断面中立軸の近くのみに限定していることによる。そのため軸力を負担していない部分で，より多くの水平力に対して抵抗できているからである。また，このようにウエブに高張力鋼を使用して，軸力を負担する部分を断面中央部に集中させることにより，フランジに使用した軟鋼のひずみ効果，ウエブの弾性剛性を有効に利用することができ，P-Δ効果に伴う耐力の低下もしばらくは見られず，変位量を伸ばす要因となっている。

さらに，Fig.4.8は全塑性軸力比を等しくした場合のものであるが，軸力をある程度高くした場合においてもハイブリッド柱部材はかなり有効であり，水平荷重に対する最大耐力，変位量とも高い値を示す。

４．３．３　軸力比の影響

Ｆｉｇ．４．９にウエブ厚の等しい部材の軸力比変化にともなう荷重変位関係の違いを示す。また比較のために軟鋼柱部材の荷重変位関係も一部併せて示す。本図では，軸力比変化にともなう荷重変位関係の違いを明確に表現するために，耐力は全塑性モーメントＭｐで無次元化を行い，変位量はその時の弾性部材角θｐで無次元化した。軸力比の上昇にともない最大耐力，最大耐力時変位量は低下するものの，全塑性軸力に対する軸力比６０％の試験体においても，その最大耐力はほぼＭｐに達しており，θｐに対する変位量も６を十分に越えている。このような高軸力下においてもウエブ板要素に高張力鋼を使用する柱部材のハイブリッド化により，柱部材の塑性変形能力は十分に発揮でき，耐力に関しても何ら問題はない。

同図中にウエブもＳＳ４００を使用し，ウエブ板厚が等しくＢＣＭ-８-４-４５と全塑性軸力が等しいＢＣＭ-４-４-４５を併せて示す。この図はＭｐ，θｐを用いて整理されているためＢＣＭ-４-４-４５とＢＣＭ-８-４-４５はほぼ同じ挙動を示している。しかし実際はハイブリッド柱部材の軸力は高く，ウエブ等価幅厚比は大きく，塑性変形性能を確保するという面からは不利に働く要因が大きいにも関わらず，それが軟鋼柱部材とほぼ等しい挙動を示していることからハイブリッド化の有効性があると考えられる。

４．３．４　ウエブ幅厚比の影響

Ｆｉｇ．４．１０にウエブ板厚の異なるハイブリッド柱部材の荷重変位関係を示す。無次元化には軸力を考慮した全塑性モーメントＭｐｃとその時の弾性部材角θｐｃを用いた。全塑性軸力に対する軸力比が４５％でウエブ厚９ｍｍのＢＣＭ-８-４-４５は，ウエブ厚６ｍｍのＢＣＴ-８-４-４５に比べ最大耐力までの塑性変形量が大きく伸びている。特に耐力劣化勾配は極めて緩やかになっている。これはたとえ実質的な導入軸力が大きくなったとしてもウエブ板厚を上げウエブの軸力負担能力を高めることで，フランジの軸力負担分を低減することができ柱部材の曲げ耐力の向上，塑性変形能力の改善に寄与しているものと考えられる。

さらにウエブ厚を１２ｍｍとすることで全塑性軸力に対する軸力比が６０％のＢＣＦ-８-４-６０においても高い耐力上昇を保持しており，最大耐力時の塑性変形量も十分な値を保持している。塑性化後の大変形域においても高軸力下で十分な耐力と塑性変形能力を維持するためには塑性化後の軸力負担部位であるウエブ板要素の耐荷能力を高めておく必要がある。そのためには，ウエブに高張力鋼を使用し，さらにその板厚を通常の断面形状にこだわることなく上げておくことの効果は大きいと言える。

4．3．5　耐力及び塑性変形性能

Fig.4.11に降伏モーメントMyに対する最大耐力Mmaxの割合を示す。横軸には下式のγをとり整理した。

$$\gamma = \frac{P}{P_y}\left(\frac{d}{t_w}\right)^2\left(\frac{\sigma_{yw}}{E}\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.3.1)$$

ここでP：導入軸力，Py：降伏軸力，d：ウエブせい，tw：ウエブ板厚，σyw：ウエブ板要素の降伏応力度，E：ウエブ板要素の弾性係数である。γは降伏軸力比とウエブ等価幅厚比で表されるものである。軸力比は最大曲げ耐力を低減するものである。また既往の研究の多くで，部材の最大耐力，塑性変形能力は構成板要素の等価幅厚比の二乗の形で整理されている。従ってその積であるγは耐力，変形性能を捕らえる上で重要な指標となると考えられる。図中実線はハイブリッド柱部材，軟鋼柱部材のそれぞれについて，最小二乗法を用いて描いた指数曲線である。これらの式は次のように与えられる。

ハイブリッド柱部材

$$\frac{M}{M_y} = 1.30\gamma^{-0.273} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.3.2)$$

軟鋼柱部材

$$\frac{M}{M_y} = 0.848\gamma^{-0.206} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.3.3)$$

ウエブに高張力鋼を使用していることから明らかなように，同じγの値に対してはハイブリッド柱部材の方が高い耐力を示す。しかし，γの上昇にともなって最大耐力が低下し，軟鋼柱部材においてその最大耐力が降伏モーメントに到達しないと考えられるγの領域においても，ハイブリッド柱部材の最大耐力はMyを十分に確保している。また，γの上昇にともなう耐力低下の割合もハイブリッド柱部材の方が緩やかである。

次に塑性変形性能をFig.4.12に示す。塑性変形性能の評価としてここでは降伏モーメント時の部材角θyに対する最大耐力時の部材角θmaxを用い，先のものと同様にγで整理した。図中実線

はハイブリッド柱部材，軟鋼柱部材のそれぞれに対して最小二乗法を用いて描いた直線である。これらの式は次のように与えられる。

ハイブリッド柱部材

$$\frac{\theta}{\theta_y} = -13.59\gamma + 19.46 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.3.4)$$

軟鋼柱部材

$$\frac{\theta}{\theta_y} = -22.54\gamma + 15.97 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.3.5)$$

これからも分かるように $\theta max/\theta y$ と γ の関係はウエブ鋼種によりそれぞれ線形関係にある。その勾配は軟鋼柱部材のものが大きく，γ の増加にともなって，ハイブリッド柱部材との塑性変形能力の差は大きくなっており，γ の大きい領域程ハイブリッド柱部材にすることで塑性変形能力は大きく改善され，その有用性が示される。

4．4　ハイブリッド柱部材の塑性変形性能評価

4．4．1　塑性変形性能評価法

評価手法　ここではハイブリッド柱部材の塑性変形性能を文献85）に示されている評価法を用いて求める。文献85）で閉断面部材について取り扱っているが，本研究ではこれをH形断面に適応する。この場合も本質的に変わるところはない。解析の手法を以下に要約する。

まず断面を等価なパラレルフランジ断面に置き換え，このモデル化した部材の荷重変位関係を圧縮側フランジ内の応力を媒介変数として求める。また，断面構成板要素の幅厚比を変数とする一連の短柱圧縮試験を行い，局部座屈で決まる最大耐力と幅厚比の関係式を統計的手法で求める。この局部座屈最大応力度を，先の荷重変位関係式の圧縮フランジ応力度に等置することにより，局部座屈崩壊時の柱の変形を求めるものである。

またこの手法に用いられる仮定を次に示す。

1）材料の応力－ひずみ関係を剛塑性モデルで表す。

2）部材のせん断変形は考慮しない。またせん断座屈が問題とならない範囲の寸法の断面を対象とする。

3）断面をtwo-flangeモデルに置き換える。この場合全塑性モーメント，断面積は原断面との等価性を保つこととする。

以上の方法，仮定を用いて，柱部材の塑性変形能力の評価式として次式が示されている。以下のa）は鋼材の応力-ひずみ関係に降伏棚が存在する場合であり，b）は降伏棚が存在しない場合のものである。またどちらの場合も応力勾配を受ける柱部材に対するものであり，ある程度軸力の高い場合に適応するものである。

a）降伏棚-ひずみ硬化モデルの場合

$$\eta=\frac{1}{4}\left[(s-1)(2s-3\rho+1)\left(\frac{E}{E_{st}}\right)+6(s-2\rho+1)\left(\frac{\phi_{st}}{\phi_y}\right)\right]\left[\frac{(s-1)}{(1-\rho)(s-\rho)^2}\right]\left(\frac{I}{I_e}\right) \quad \cdots \quad (4.4.1)$$

b）ひずみ硬化モデルの場合

$$\eta=\frac{1}{4}\left(\frac{s-1}{s-\rho}\right)^2\left(\frac{2s-3\rho+1}{1-\rho}\right)\left(\frac{E}{E_{st}}\right)\left(\frac{I}{I_e}\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (4.4.2)$$

ここでｓ：応力上昇率，ｒ：軸力比，Ｉ：実断面の断面二次モーメント，Ｉｅ：等価断面二次モーメント，Ｅ：弾性係数，Ｅｓｔ：ひずみ硬化係数，ϕy：全塑性モーメントＭｐに対してＭｐ＝ＥＩｅϕyで与えられる曲率，ϕst：ひずみ硬化点における曲率である。

この評価方法を用いて，本研究のハイブリッドＨ形断面柱部材の塑性変形能力評価を行う。

<u>評価法概説</u>　第二章，第三章ですでに梁，短柱についての荷重変位関係を得ており，これらと第四章の柱の実験の荷重変位関係から，全体的に言えることは，フランジが降伏したのち荷重変位関係は線形関係を離れるがその後の二次勾配はかなり高く，ウエブの塑性化にともない徐々に剛性を低下させ最大耐力にいたる。これらから，ウエブに高張力鋼を用いたハイブリッド断面のものは降伏棚は存在せず，本論文においては，ひずみ硬化モデルを採用し，式（4.4.2）を用いる[44]。

また短柱の荷重変位関係をＦｉｇ．４．１３のようにモデル化する。式（4.4.2）で重要な要因をしめるＥ/Ｅｓｔとしては，初期の勾配をとらずに図中に示す点線で示すようとることとする。これはフランジ局部座屈が十分塑性化が進展した後に発生していることを考慮したことによるものである。そこで本論文では混乱を避けるためＥ/Ｅｓｔの換わりに次式のＫ/Ｋｓｔで記述する。

$$\frac{K}{K_{st}}=\frac{(\mu-1)}{(S-1)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4.4.3)$$

ここでＳ：ハイブリッド短柱の耐力上昇率，μ：ハイブリッド短柱の最大耐力時変位量の降伏変位に対する比である。

以上から式（4.4.2）を本研究のハイブリッド柱部材の場合に適応した時の式は結局以下のように記述できる。

$$\eta = \frac{1}{4}\left(\frac{S\text{-}1}{S\text{-}n_y}\right)^2\left(\frac{2S\text{-}3n_y\text{+}1}{1\text{-}n_y}\right)\left(\frac{K}{K_{st}}\right)\left(\frac{I}{I_e}\right) \quad \cdots\cdots\cdots (4.4.4)$$

ｎｙは降伏軸力に対する存在軸力の比であり次式で示される。

$$n_y = \frac{P}{P_y} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4.4.5)$$

Ｐ：存在軸力，Ｐｙ：降伏軸力である。

また式（4.4.3），（4.4.4）に用いられるＳを算出するにあたり，ウエブ等価幅厚比は，文献73）に示されているように全塑性状態における塑性中立軸に関して圧縮側になる部分をウエブの圧縮幅と考えて算出している。このウエブ圧縮幅ｄｅは次式で表される。

$$d_e = \frac{\sigma_{yf} A}{\sigma_{yw} t_w} n_y \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4.4.6)$$

Ａ：全断面積，σｙｆ：フランジ板要素の降伏応力度，ｔｗ：ウエブ板厚，σｗ：ウエブ板要素の降伏応力度，ｎｙ：降伏軸力に対する存在軸力比である。

4．4．2　短柱圧縮実験

荷重変位関係　短柱圧縮実験は，ハイブリッド柱部材と同一の断面3体について行った。試験体は，柱部材から切り取るという形ではなく，個別に板要素を切り出し溶接組立とした。その場合の溶接手順等は柱部材のものと同一である。材長は断面幅の3倍とし，端面は耐圧板を接合せず試験体の中心軸に直交するよう機械加工を施した。

実験結果としてFig.4.14，Fig.4.15に荷重変位関係を示す。Fig.4.14は，荷重を全塑性軸力で除したものを縦軸にとり，横軸は，変位をそのときの弾性変位で除したものをとっている。全ての試験体で最大耐力は1を超えている。この3本の曲線で特徴的な点としては，H-150×150×6×9の断面のものが，他の2本の試験体に比べて極めて塑性率が乏しいことである。言い換えるならばフランジ板厚に対してウエブ板厚が等しい，またはそれ以上あれば短柱の塑性率は極めて向上するということである。以上，最大耐力，塑性率ともウエブ板厚の厚いものほど大きい値を示している。

Fig.4.15に示す荷重変位関係は，先のものを本節でのハイブリッド柱部材の塑性変形能力評価に用いる形に表現し直したものである。この図は荷重を降伏軸力で除したものを縦軸にとり，横軸には変位を降伏軸力時の変位で除したものをとっている。ハイブリッド短柱の最大耐力と塑性率は，先ほどの場合よりも，ウエブ板厚が厚いものほどより大きく表される。また2次勾配（この場合，厳密には3次勾配）は，ウエブ板厚の厚いものほど高くなっている。これらの要因としては，全断面積に占める高張力鋼を使用したウエブ断面積の比率が，ウエブ板厚の厚いものほど大きいということによる。

耐力上昇率　Fig.4.16に全塑性軸力Ppに対する耐力上昇率S'とウエブ等価幅厚比β_wとの関係を示す。図中の実線は最小二乗法により求めた回帰直線である。本来ならば，H形鋼のS'はフ

ランジ等価幅厚比を考慮した式で与えられるべきであるが，本論文ではフランジ等価幅厚比をパラメータとした実験を行っていないので，ここではウエブ等価幅厚比のみをパラメータとしてS'を表現する。S'とβwの関係は下式のように表される。

$$\frac{1}{S'} = 0.0401\beta_w^2 + 0.873 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.4.7)$$

$$\beta_w = \frac{d}{t_w}\sqrt{\frac{\sigma_{yw}}{E}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.4.8)$$

ここでd：ウエブせい，tw：ウエブ板厚，σyw：ウエブ板要素の降伏応力度，E：ウエブ板要素の弾性係数である。

このようにして求められたS'を元に，部材を低YR部材としてみた場合の耐力上昇率Sは以下の式で与えられるものとする。

$$S = S'\frac{P_p}{P_y} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.4.9)$$

上式中Pp/Pyは，ひずみ硬化や局部座屈の影響を無視した場合の耐力上昇率ととらえることができる。これにひずみ硬化や局部座屈の影響による耐力上昇率を表現しているS'を乗ずることで，検討対象となる耐力上昇率Sが得られる。このようにしてウエブ等価幅厚比と全塑性軸力の降伏軸力に対する比から求められるSと実験値から求められるSeの関係を示したものが，Fig.4.17である。ここでSeは下式で求めた。

$$S_e = \frac{P_{max}}{P_y} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.4.10)$$

両者は極めて良好な対応を示しており，式（4.4.7），（4.4.9）はハイブリッド短柱の耐力上昇率を評価する上で有用な式であると言える。

<u>塑性率</u>　式（4.4.3）に用いられるμを評価するために短柱の塑性変形能力をウエブ等価幅厚比で整理したものがFig.4.18である。図中実線がμを算出するために最小二乗法により求めた指数曲線であり，次式で与えられる。

$$\mu = 21.37\beta_w^{-1.984} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.4.11)$$

またこの式を用いてμを算出する場合も先ほどのSの場合と同様に

式（4.4.11）のβwは式（4.4.6）のdeを用いて得られる値を使用することとする。

このようにして求められるS，μを式（4.4.3），（4.4.4）に代入することによりハイブリッド柱部材の塑性変形能力が算出される。

4．4．3　塑性変形性能

実験値との比較検討　以上のようにして理論から求められた塑性変形性能ηtと実験値ηeとの比較をFig.4.19に示す。実験値ηeのうち○，●は，それぞれ式（4.4.12），（4.4.13）で示されるmaxηe，95ηeである。

$$\max\eta_e = \frac{\theta_{max}}{\theta_{opc}} - 1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4.4.12)$$

$$95\eta_e = \frac{\theta_{95}}{\theta_{opc}} - 1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4.4.13)$$

ここでθmax：最大耐力時変位量，θ95：最大耐力後に最大耐力の95％まで耐力低下した時点での変位量，θopc：フランジ降伏応力度と等しい降伏応力度で全断面が構成されているとしたときの軸力を考慮した全塑性モーメントMopcに対応する弾性部材角である。塑性変形量が大きい領域では，理論値のかなり大きな値を示すが，比較的塑性変形量が小さい領域では95ηeの方がmaxηeよりも理論値とよい対応を示す。これらの要因としてE/Estの取り方によるところが大きいと考えられる。本論文ではE/EstをK/Kstとして，降伏時点から最大耐力点までの平均勾配を採用している。これに対して，実際のひずみ硬化域の初期においてはひずみ硬化係数Estは大きいであろうところに起因していると考えられる[73]。また文献85）に示されているように，理論的には軸力比が60％以上になると塑性化領域が拡大し変形能力を増大させる要因となる。これらのことを考え合わせれば，図に示すよう95ηeが理論値と良い対応を示すことから予測値は基本的な変形性能を捉える上で十分価値のあるものであると言える。

ウエブ幅厚比及び軸力比の影響　最後に式（4.4.4）よりウエブ等価幅厚比と塑性変形性能の関係を降伏軸力に対する軸力比ごとに描いた曲線がFig.4.20である。この場合，簡単のためにPp/Pyは一定値1.45を用いた。また，図中の横の一点鎖線は建築耐震設計における保有耐力と変形性能に示されているη　＝6のランク

Ｉの制限値を示している。また，縦の一点鎖線は，次式で規定されるランクＩのウエブ幅厚比制限を示している。

$$\frac{b}{t_f} + 0.16\frac{d}{t_w} \leq \frac{23}{\sqrt{F}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.4.14)$$

ここで $F = 3\ t/cm^2$ としている。この図から幅厚比の値は式（5.4.3）で規定されるものより大きくても $\eta = 6$ を確保することが可能であると言える。つまりウエブに高張力鋼を使用することで，柱部材の存在軸力を大きくすることができ，かつ塑性変形能力も十分に大きくとることが可能となる。

４．５　数値解析による各種単一鋼種柱部材との比較

４．５．１　数値解析概要

先においては，ハイブリッド柱部材の塑性変形性状を軟鋼のみよりなる柱部材のものと比較を行った。ここでは，その他の単一鋼材よりなる柱部材との比較を行う。その他の鋼材としては，60キロ級高張力鋼と低ＹＲ高張力鋼を対象とする。併せてハイブリッド柱部材の解析も行い軸力比変化に伴う塑性変形性状の違いを高張力鋼柱部材との比較を通して考察する。

本解析では使用する具体的な鋼材を通してＨＴ780，ＨＴ590，ＳＳ490及びＨＴ590に対応する低ＹＲ高張力鋼（以下，ＹＲ590と称する）の４種類を想定している。これらの応力－ひずみ関係をＦｉｇ．４．２１に示すように ｂｉ - ｌｉｎｅａｒ 型に理想化する。詳細な数値は同図中に示す通りである。また，比較を明確に行なえるように，ＳＳ490とＹＲ590の降伏応力度を等しく取り，4.5 t/cm^2 に設定した。

解析対象は，Ｔａｂｌｅ４．３に示すように７体である。内訳は，ウエブに高張力鋼，フランジに軟鋼を使用したハイブリッド柱部材（ＨＢ）４種類，低ＹＲ高張力鋼柱部材（ＹＲ）１種類，60キロ級高張力鋼柱部材（ＨＴ）２種類とする。名称の付け方は，最初の２文字が異なるだけで，その他は先の実験の場合と同じである。

断面形は，Ｈ形断面Ｈ-１５０×１５０×６×９，材長はＬ＝９００ｍｍの柱部材とし全試験体で同一としている。

加力方式はＦｉｇ．４．２２に示すように片持柱形式とする。自由端は横座屈挙動を防止するためにＨ形断面の弱軸方向の変位（Ｖ）のみ拘束し，変位制御（Ｗ）により解析を行う。解析は有限要素法による弾塑性大変形解析とし要素分割はウェブと圧縮側フランジを三節点三角平板要素，引張側フランジを二節点梁要素を用いて分割す

る。要素分割を Fig.4.23 に示す。

４．５．２　荷重変位関係

Ｆｉｇ．４．２４は材質の異なる３種類の部材に，高張力鋼のみよりなるＨＴ-６-６-３０で軸力比３０％に相当する一定軸力を導入した場合の荷重変位関係である。無次元化には軸力を考慮した降伏モーメントＭｙｃ及びそのときの弾性部材角θｙｃを用いる。ＨＴ-６-６-３０は耐力上昇率，塑性率が劣り，耐力劣化勾配が急である。低ＹＲ高張力鋼部材のＹＲ-４-４-４０は異種鋼材のＨＢ-８-４-３４と比較し最大耐力がやや劣る。ＨＢ-８-４-３４は耐力，変形性能が優れ，最大耐力までの勾配が大きく耐力劣化勾配は緩やかである。このように，高張力鋼の靭性の乏しさを改良する目的で開発された低ＹＲ鋼柱部材とハイブリッド柱部材の塑性変形挙動を比べた場合，むしろ本研究で提案するハイブリッド柱部材のほうが良い性状を示すことが確認される。つまり，部材の塑性変形性能を材料に頼るのではなく，同一部材内に異種鋼材を効果的に使用することで，部材性能をコントロールし高い耐力を維持したまま塑性変形量を延ばすことが可能になる。

Ｆｉｇ．４．２５にＨＢ-８-４シリーズ及びＨＴ-６-６シリーズそれぞれの軸力変化に伴う荷重変位関係を示す。縦軸は降伏モーメントＭｙで，横軸はその時の弾性部材角θｙで無次元化する。ＨＢ-８-４シリーズは降伏後も大きく変形量を伸ばし耐力を上昇させながら最大耐力に到達している。高軸力下においても最大耐力は高く保たれ，最大耐力到達時までの塑性変形量も十分確保できる。それに比べ高張力鋼のみよりなるＨＴ-６-６シリーズは降伏後早期に耐力の低下が始まる。ＨＴ-６-６-４５ではＭ/Ｍｙが最大０.８程度である。このように部材の最大耐力を大きくすることが可能な高張力鋼部材においても，その塑性変形能力は小さく，塑性変形能力が要求される現行の設計体系には不向きと言える。また，本研究で提案するハイブリッド柱部材は，高張力鋼のみよりなる柱部材と同レベルの軸力を導入してもその最大耐力に関して何ら問題ない。

４．５．３　ハイブリッド柱部材と高張力鋼柱部材との塑性変形性状の相違

最大耐力　Ｆｉｇ．４．２６に軸力比と最大耐力の関係を示す。縦軸は最大耐力を降伏モーメントＭｙで無次元化し，横軸は軸力比を示す。等しい軸力比を導入した場合ＨＢ-８-４シリーズはＨＴ-６-６シリーズに比べ高い耐力を示す。軸力比を０．３から０．５程度の本解析範囲においては，最大耐力は軸力比の上昇とともに線形的に低下する。

塑性変形能力　Ｆｉｇ．４．２７に軸力比の変化に伴う最大耐力到達時の変位量の変化を示す。縦軸は最大耐力到達時の変位量を降伏モーメント到達時変位量で除している。横軸は軸力比を示す。ＨＴ-６-６シリーズが軸力比０．３から０．４５の上昇に伴い著しく塑性変形を欠くのに対しＨＴ-８-４シリーズは軸力比の上昇に伴う塑性変形量の低下は少なく，安定した塑性変形性能を維持する。

塑性域　Ｆｉｇ．４．２８～Ｆｉｇ．４．３０に変位量３ｃｍでの塑性域の進展状況を示す。塑性域は陰を付けて示している。この変位は高張力鋼からなるＨＴ-６-６-４５が耐力低下している変位量である。軸力比の等しいＨＢ-８-４-４５（Ｆｉｇ．４．２８）とＨＴ-６-６-４５（Ｆｉｇ．４．２９）を比較すると，ハイブリッド柱部材であるＨＢ-８-４-４５の方が，フランジの塑性域の広がりが大きい。またウエブの引張側に弾性域が残っていることから，ウエブの圧縮力を負担する部分の幅厚比が小さくなり，ウエブの局部座屈を抑え，なおかつフランジの局部座屈に対しても拘束効果を及ぼすことになる。従って塑性域が広く進展しているにも関わらず，局部座屈の発生しにくいことからハイブリッド柱部材の塑性変位量を大きく延ばす要因となっている。

またこの傾向は，ＨＴ-６-６-４５と同じ軸力を導入したＨＢ-８-４-５１（Ｆｉｇ．４．３０）においても変わらない。従ってたとえ軸力を大きくしてもハイブリッド柱部材の塑性変形能力に対する

有利性は変わらないと言える。

変形性状　Fig.4.31～Fig.4.33に先程と同じく変位量3cmでの変形図を示す。この変形図は手前が固定端である。またその変位量は3倍に拡大して示してある。まず同じ軸力比どうしのFig.4.31に示すハイブリッド柱部材（HB-8-4-45）をFig.4.32に示す高張力鋼柱部材（HT-6-6-45）を比較検討する。同じ変位量にも関わらず高張力鋼柱部材のフランジ局部座屈波高は高くなっている。またウエブにも局部座屈が発生しており，部材端に塑性ヒンジが集中していることが分かる。これにより，塑性変位量を伸ばすことができず，耐力低下につながっているものと考えられる。これに対してハイブリッド柱部材には，いまだ目だった局部座屈は発生していないと言える。またウエブにも局部座屈は発生していない。先にも述べたようにウエブに高張力鋼を使用することで，フランジの局部座屈に対する拘束効果があるものと考えられる。さらにこのハイブリッド柱部材の変形性状はFig.4.33に示すように，たとえ軸力を大きくしても変わることがなく，ハイブリッド柱部材の有利性がうかがえる。

4．5　まとめ

本研究では，柱部材を対象に同一部材内に異種鋼材を用いた場合の基本的な力学性状を捉え，ハイブリッド柱部材の有用性を示すことを目的とした。また，その塑性変形性能評価を試みた。以下に得られた結論を示す。

（1）ウエブに高張力鋼を用いたハイブリッド柱部材は，軟鋼柱部材に比べその最大耐力，塑性変形能力ともに高い。また，高軸力下においても塑性化後の大変形挙動は安定しており，ハイブリッド柱部材は塑性変形能力を高める上で有用である。

（2）ウエブに高張力鋼を用いるハイブリッド化によりある程度の高軸力に対しても塑性中立軸をウエブ断面内におくことが可能である。これにより，引張フランジに十分塑性化領域が進展し，塑性変形量を伸ばす要因となる。

（3）ハイブリッド柱部材にし，そのウエブ等価幅厚比が0.9程度あれば，全塑性軸力に対する軸力比が60％の場合でも，その耐力はほぼ全塑性モーメントMpを確保する事が可能であり，塑性変形能力もθpに対して6程度を確保する事ができる。

（4）柱部材において，ウエブ板厚を通常のH形断面に対して厚くしておく事は，その塑性変形量を大きくするという面からは有効であり，ハイブリッド柱部材においてはその効果は大きい。ウエブ等価幅厚比が約1.4から約0.9になることでその塑性変形量は大きく向上し，優に6を確保している。

（5）最大耐力，最大耐力時塑性変形量を本文中に式（4.3.1）で示す指標γを用いて整理した。柱部材の最大耐力，塑性変形量はこのγを用いて表され，それぞれ指数曲線，直線的に表現される。最大耐力，最大耐力時塑性変位量ともγの増加にともない，ハイブリッド柱部材と軟鋼部材との開きが大きくなり，ハイブリッド柱部材の有効性がより顕著になる。

（６）ハイブリッド柱部材の塑性変形能力を評価する場合に用いる短柱のひずみ硬化勾配は，短柱の降伏時点から最大耐力点までの平均的な勾配を用いれば良い。

（７）本章で提案するハイブリッド柱部材の塑性変形能力評価式では，最大耐力から95％耐力低下した時点での塑性変形量を捉えるができる。

（８）ウエブに高張力鋼を使用することで柱部材の存在軸力を大きくすることができ，かつ塑性変形能力も建築耐震設計における保有耐力と変形性能[88]に規定される値より大きくとることが可能である。

（９）ハイブリッド柱部材と低ＹＲ鋼柱部材を比較した場合，ハイブリッド柱部材の方が耐力，塑性変位量とも大きい。このことから部材の塑性変形能力は鋼材に手を加えることなく，既存の鋼材を有効に組合わせることで向上させることが可能である。

（10）ハイブリッド柱部材は高張力鋼柱部材と同じ軸力比に対しても決して塑性変形能力を低下させず耐力に関しても何ら問題ない。またフランジの塑性域の広がりは広く，局部座屈の発生も遅い。

CHAPTER 4

Figures and Tables

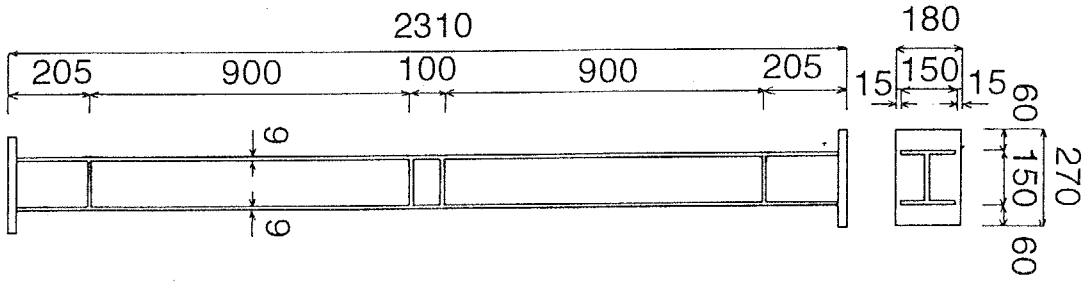


Fig. 4.1 Specimen of beam-column

Table 4.1 Dimensions of specimens of beam-column

Specimen	web plate	flange plate	t_w (mm)	t_f (mm)	$d/t_w \times \sqrt{\sigma_{yw}/E}$	$b/t_f \times \sqrt{\sigma_{yf}/E}$	P/Pp	P/Py
BCT -8-4-45	HT780	SS400	6	9	1.378	0.321	0.45	0.61
BCM-8-4-30	HT780	SS400	9	9	0.883	0.321	0.30	0.43
BCM-8-4-45	HT780	SS400	9	9	0.883	0.321	0.45	0.65
BCM-8-4-60	HT780	SS400	9	9	0.883	0.321	0.60	0.87
BCF -8-4-45	HT780	SS400	12	9	0.686	0.321	0.45	0.70
BCF -8-4-60	HT780	SS400	12	9	0.686	0.321	0.45	0.94
BCT -4-4-45	SS400	SS400	6	9	0.862	0.321	0.45	0.45
BCM-4-4-45	SS400	SS400	9	9	0.565	0.321	0.45	0.45
BCM-4-4-65	SS400	SS400	9	9	0.565	0.321	0.65	0.65

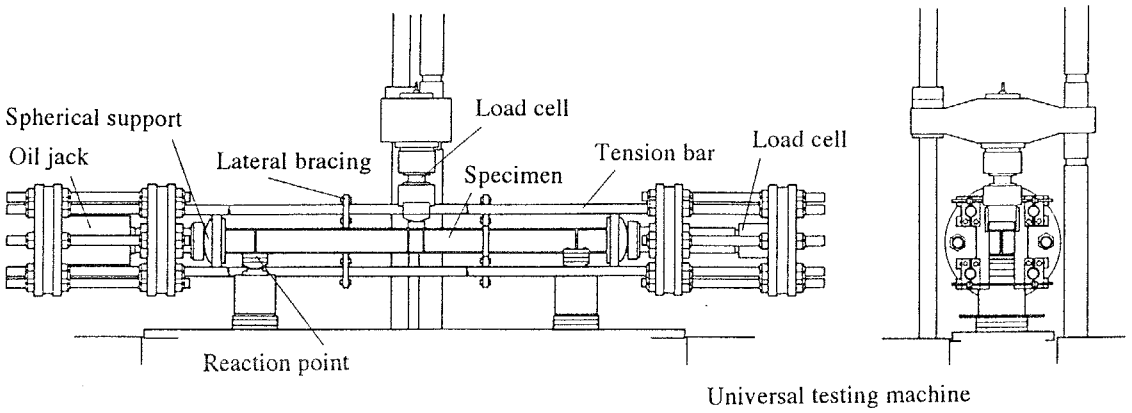


Fig. 4.2 Test setup

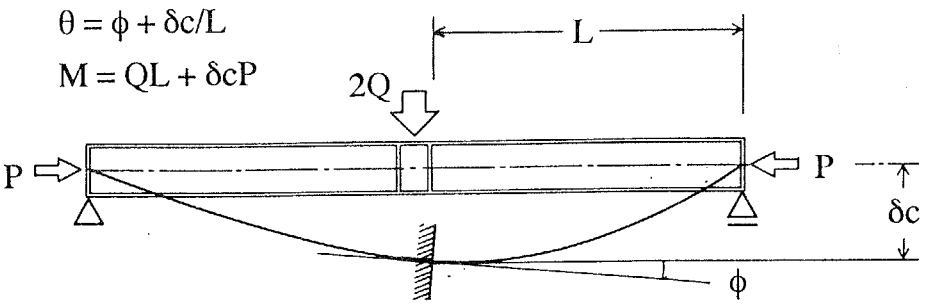


Fig. 4.3 Deflection mode

Table 4.2 Material properties

Test-Piece	t (mm)	σy (t/cm^2)	σu (t/cm^2)	E (t/cm^2)	Est (t/cm^2)	εst (%)	Elong. (%)	YR
HT780	6	8.23	8.56	2096.5	9.60	2.01	10.5	0.961
HT780	9	7.80	8.25	2152.6	11.29	1.84	14.0	0.946
HT780	12	8.05	8.54	2069.5	10.61	1.61	13.4	0.942
SS400	6	3.25	4.66	2115.5	20.05	2.11	30.9	0.697
SS400	9	3.18	4.62	2146.6	18.23	2.62	31.5	0.688

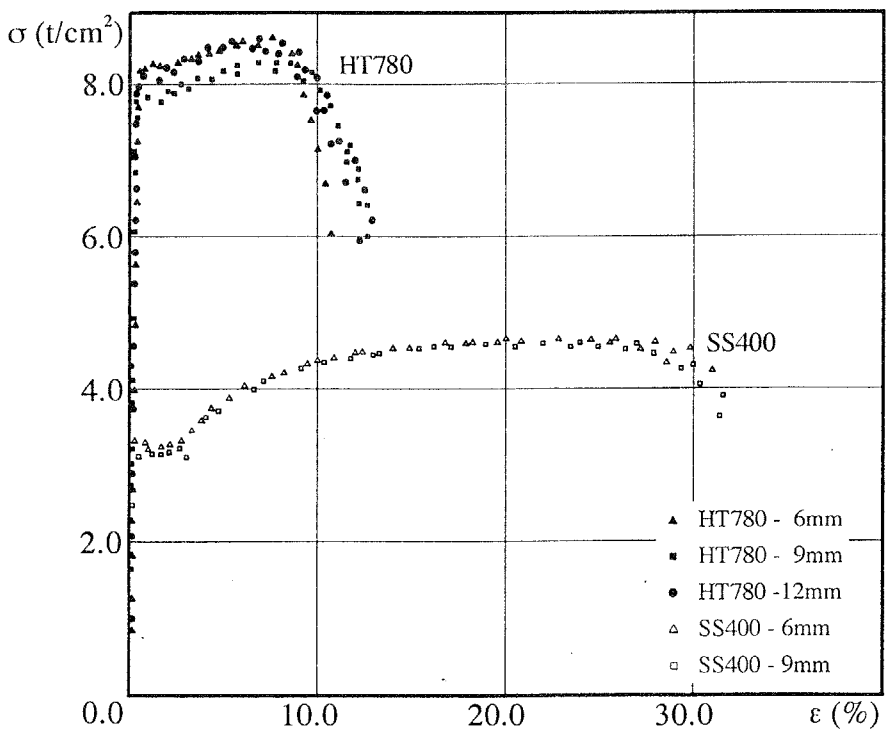


Fig. 4.4 Stress - strain relationships

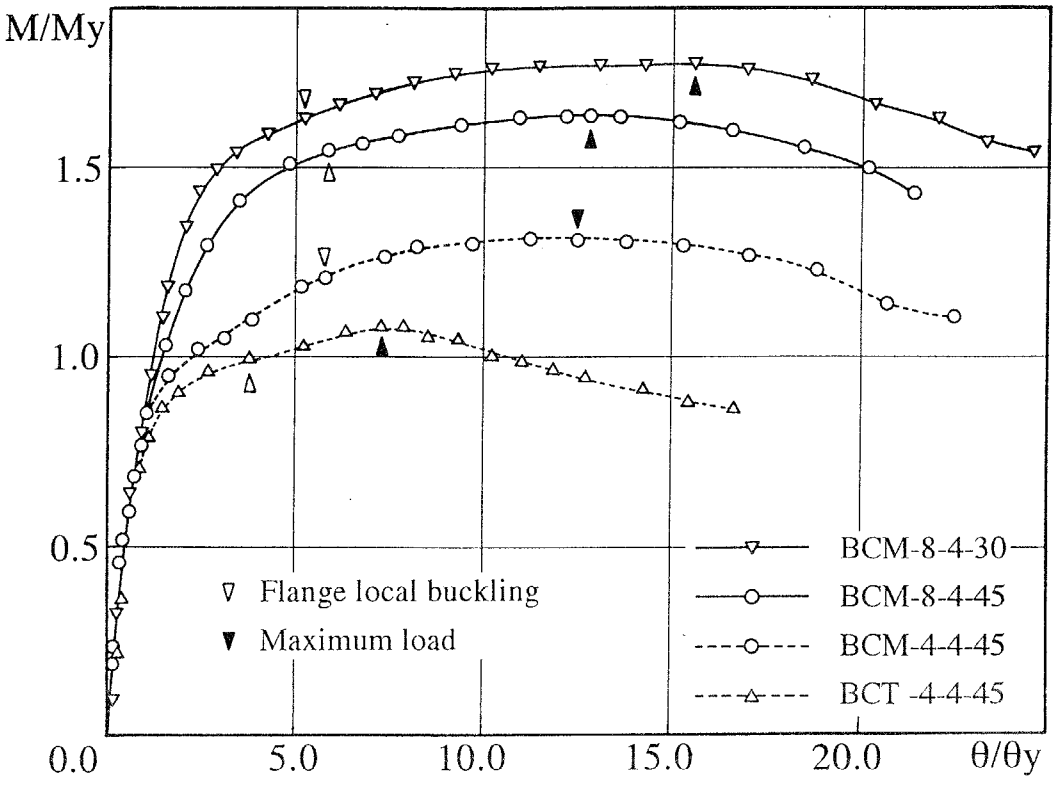


Fig. 4.5 M-θ relationships

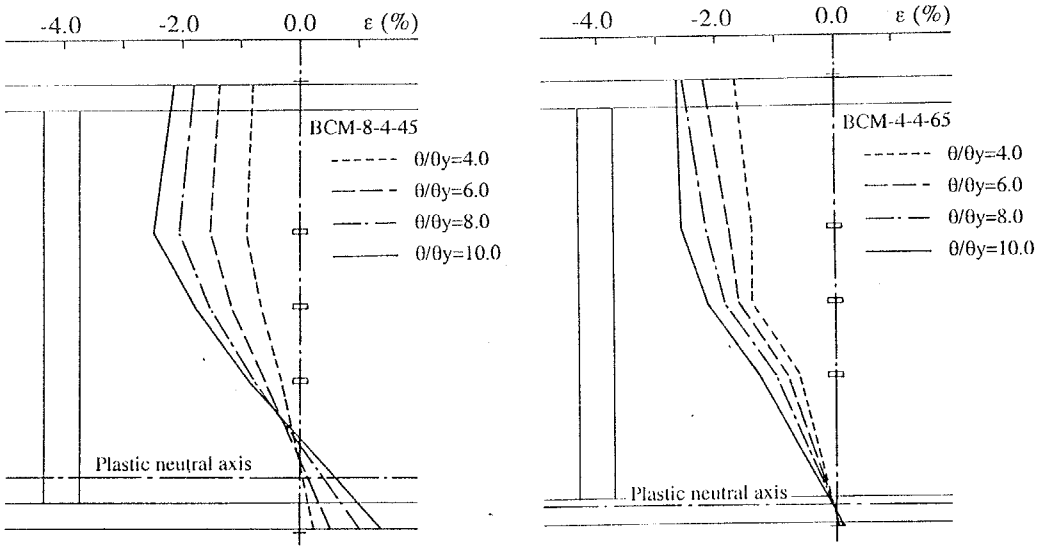


Fig. 4.6 Strain distribution of web

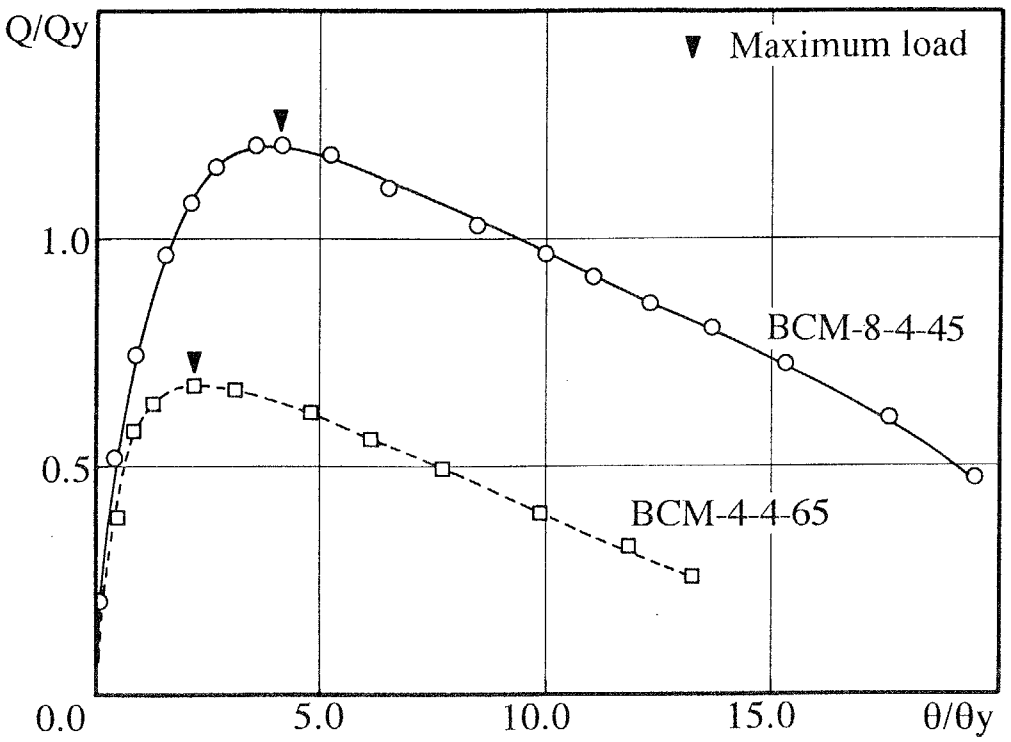


Fig. 4.7 Q-θ relationships

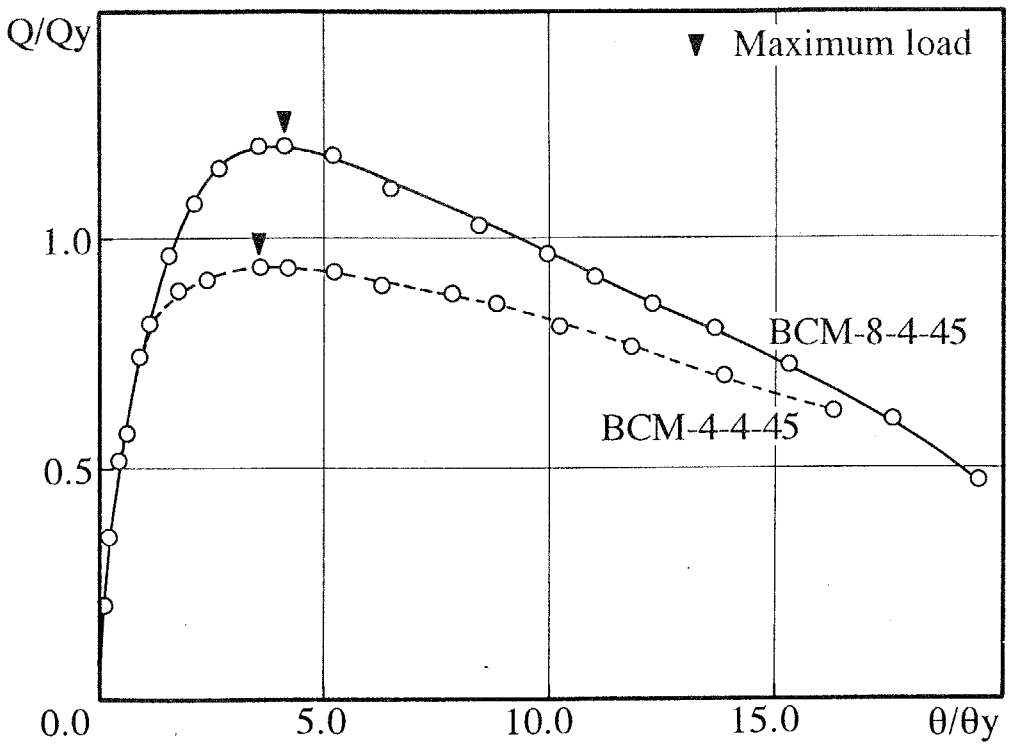


Fig. 4.8 Q-θ relationships

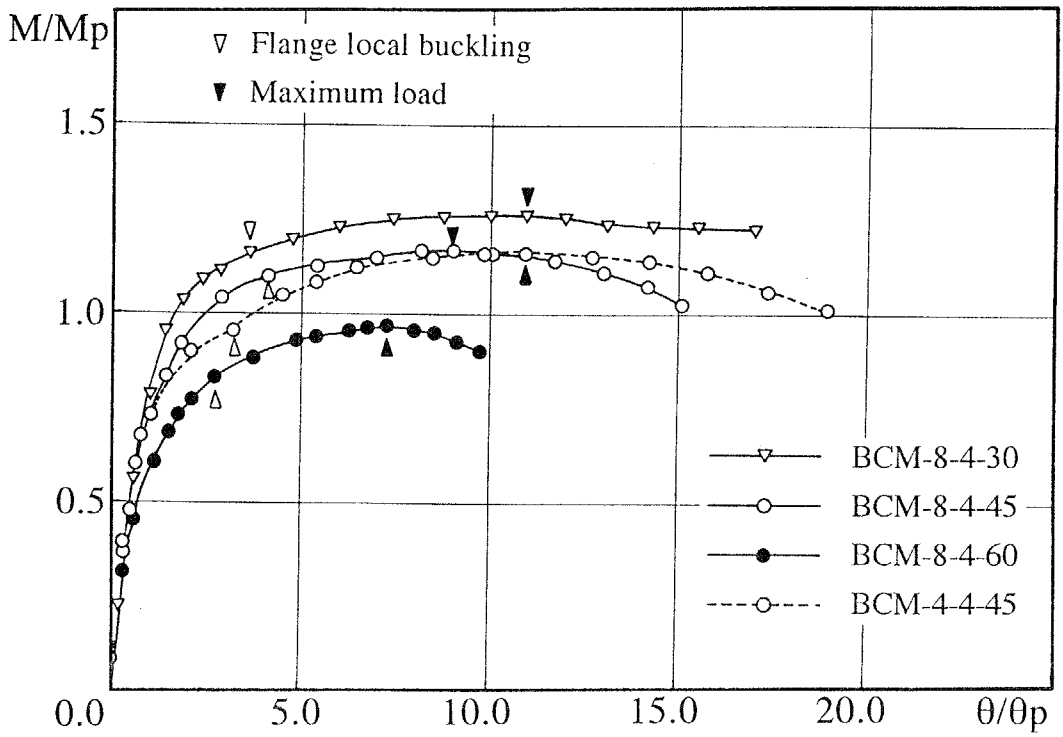


Fig. 4.9 M-θ relationships

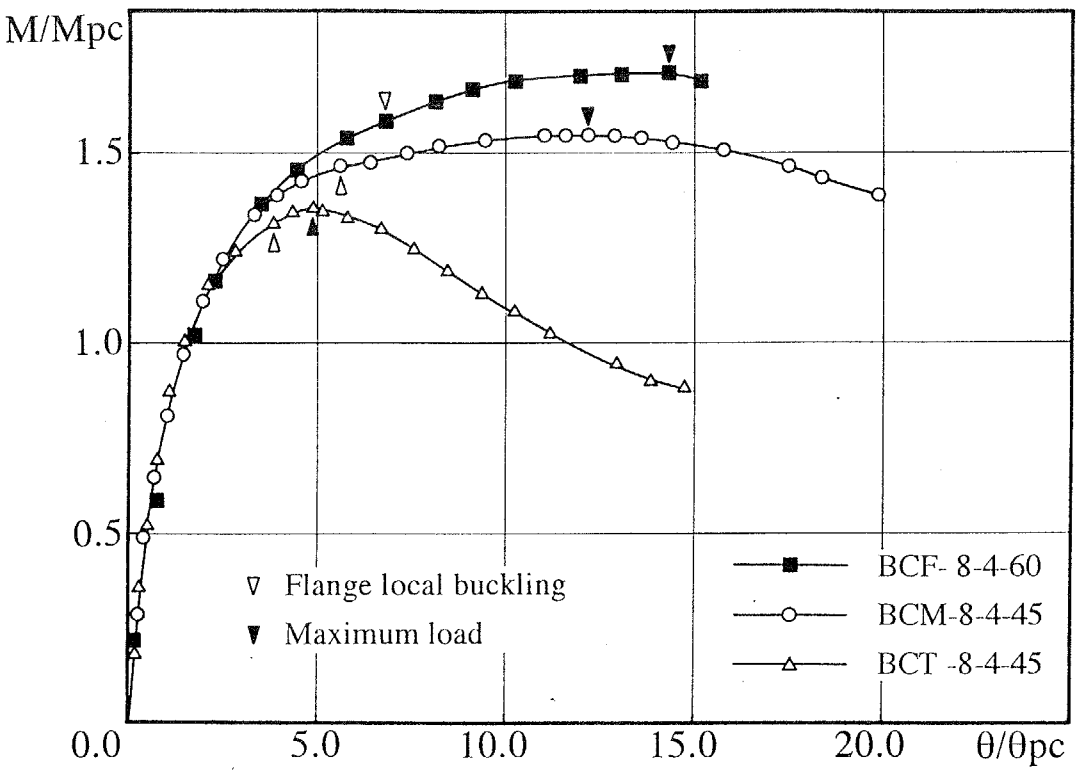


Fig. 4.10 M-θ relationships

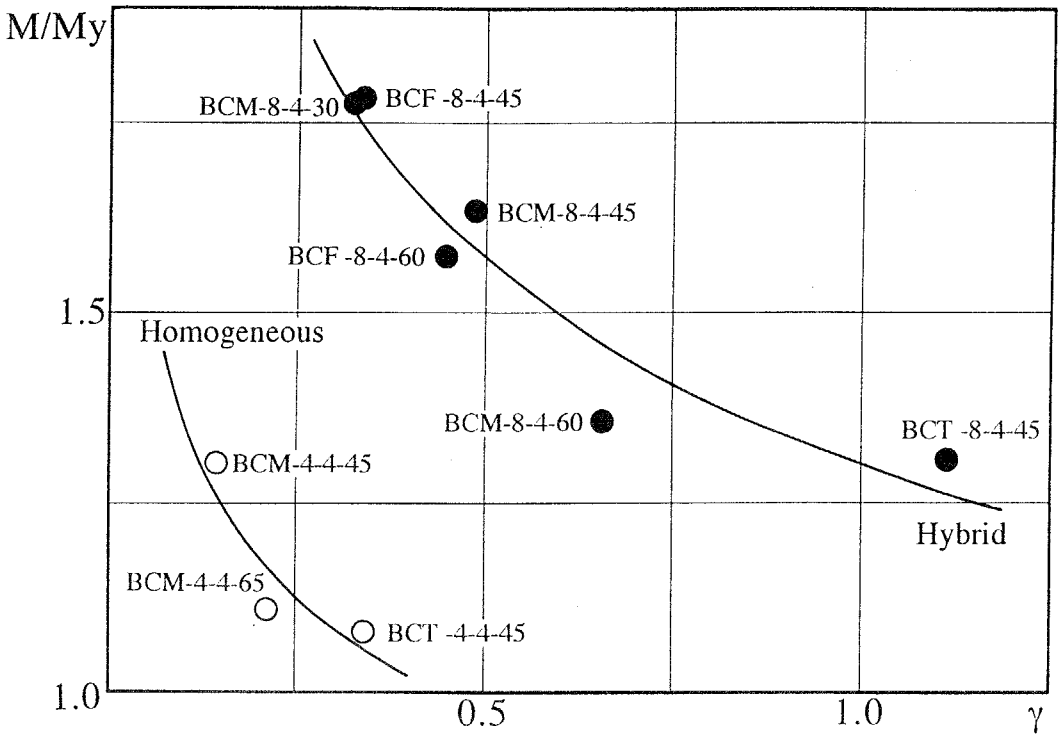


Fig. 4.11 Strength of hybrid beam-columns

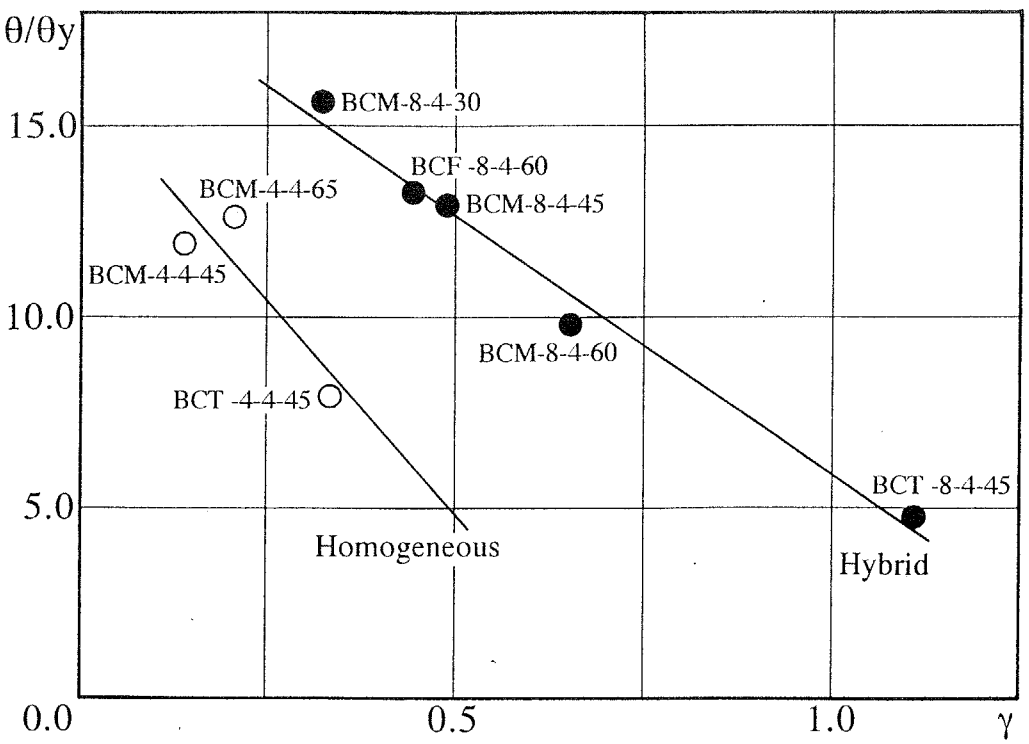


Fig. 4.12 Rotation capacity of hybrid beam-columns

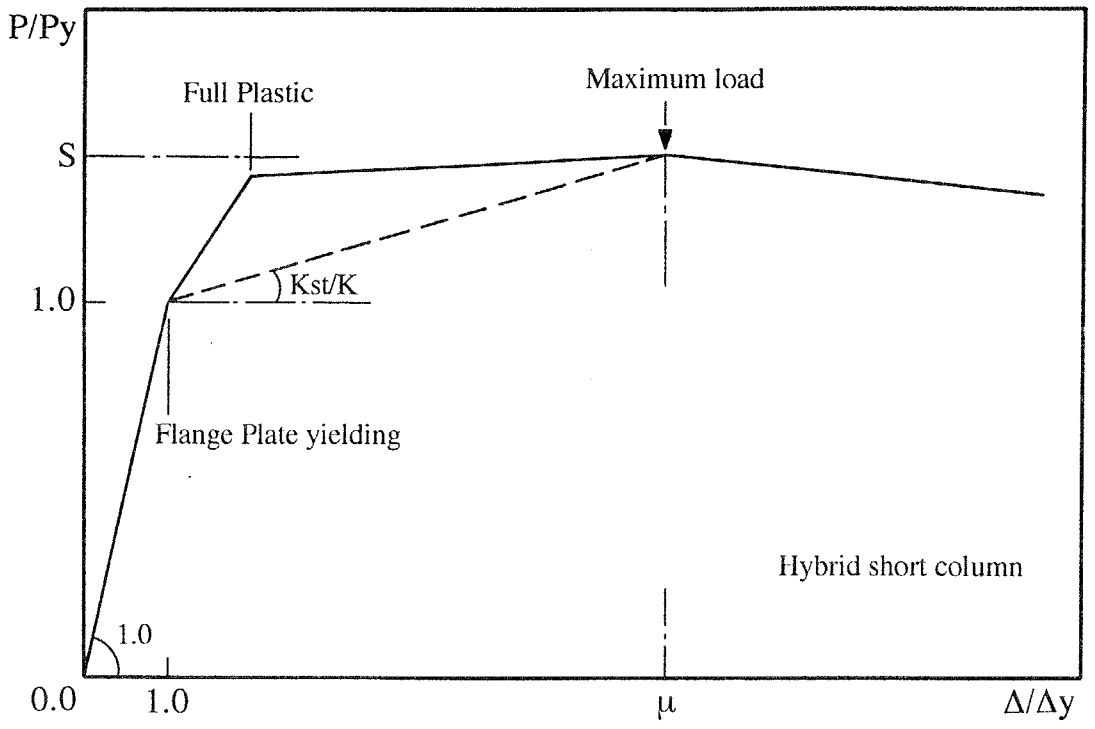


Fig. 4.13 Ideal load - displacement curve of hybrid short-column

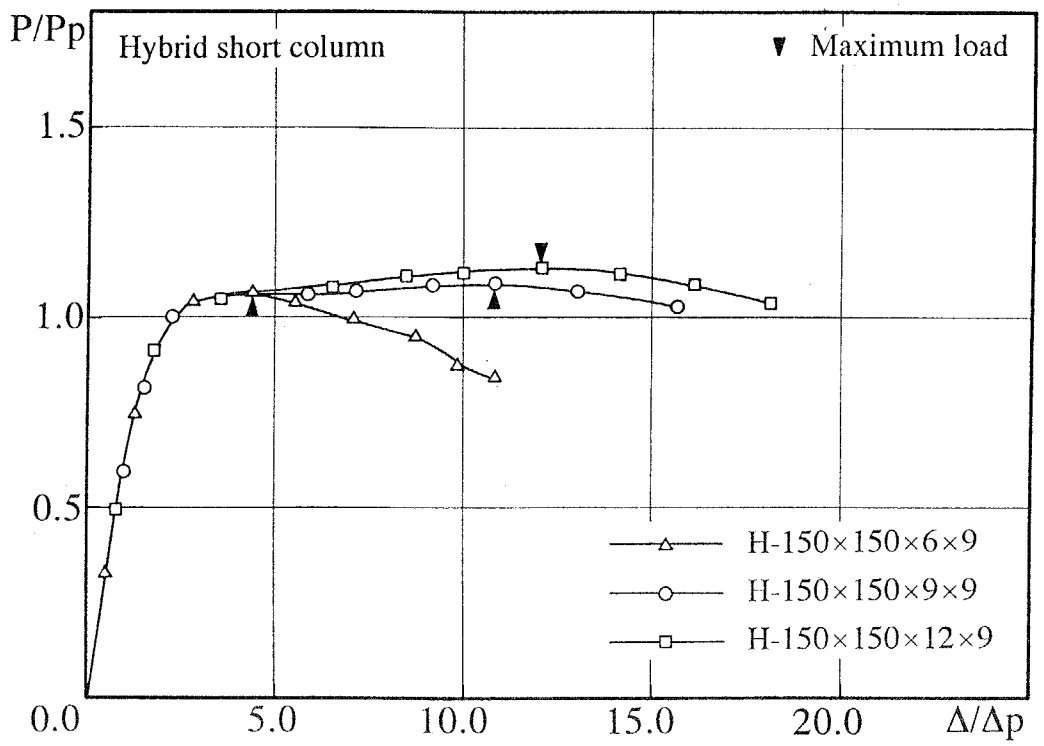


Fig. 4.14 Load - displacement curve of hybrid short-columns

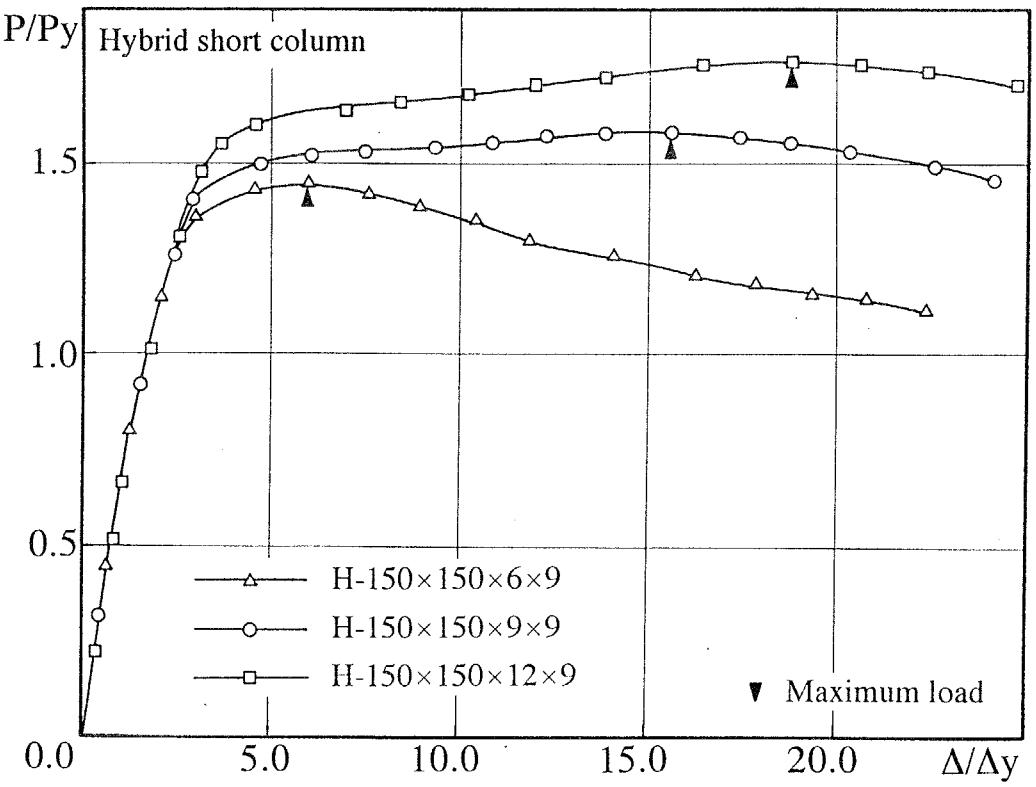


Fig. 4.15 Load - displacement curve of hybrid short-columns

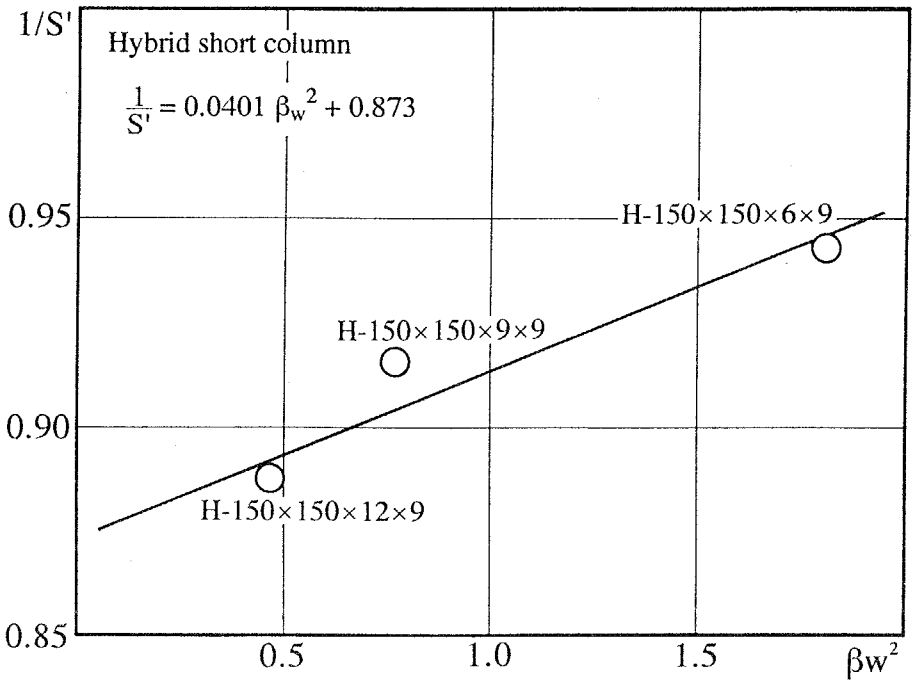


Fig. 4.16 Ultimate load ratio of hybrid short-columns

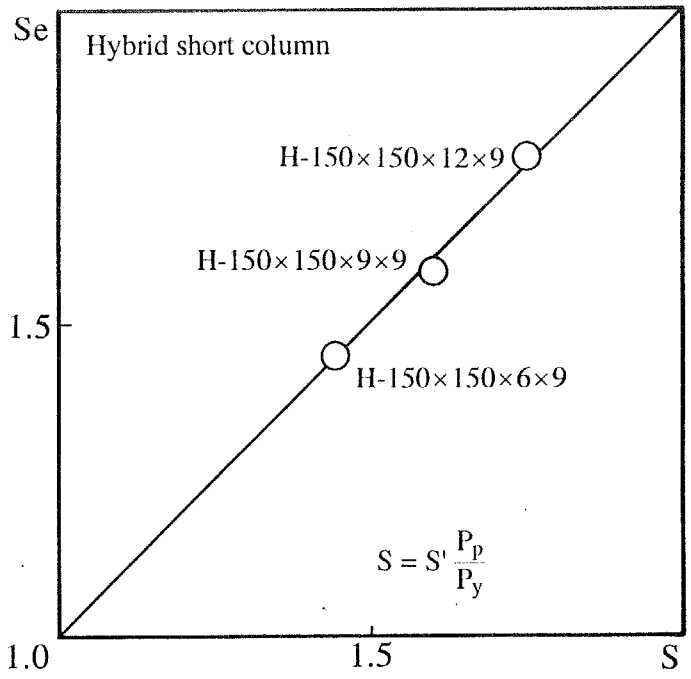


Fig. 4.17 Comparison of test and theory

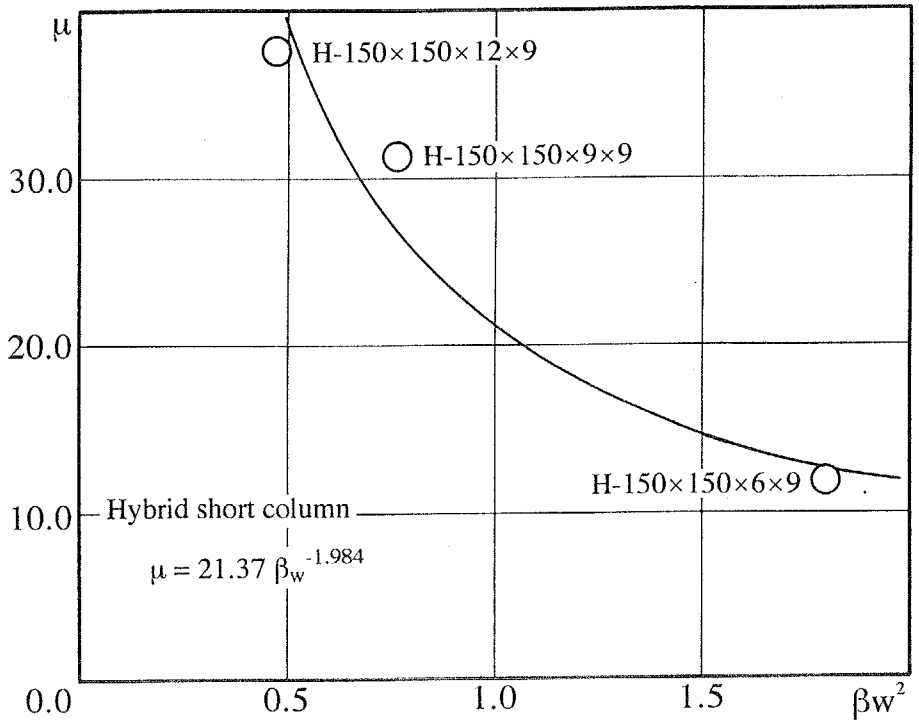


Fig. 4.18 Deformation capacity of hybrid short-columns

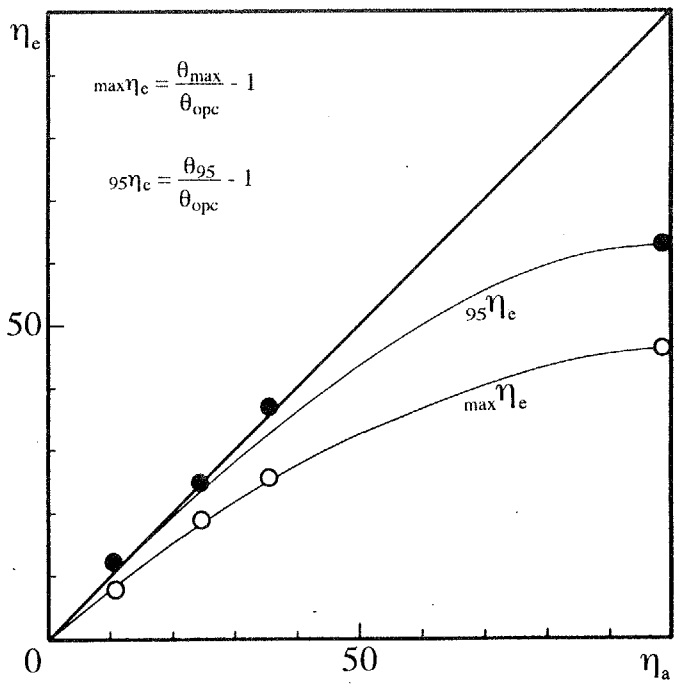


Fig. 4.19 Comparison of test and theory

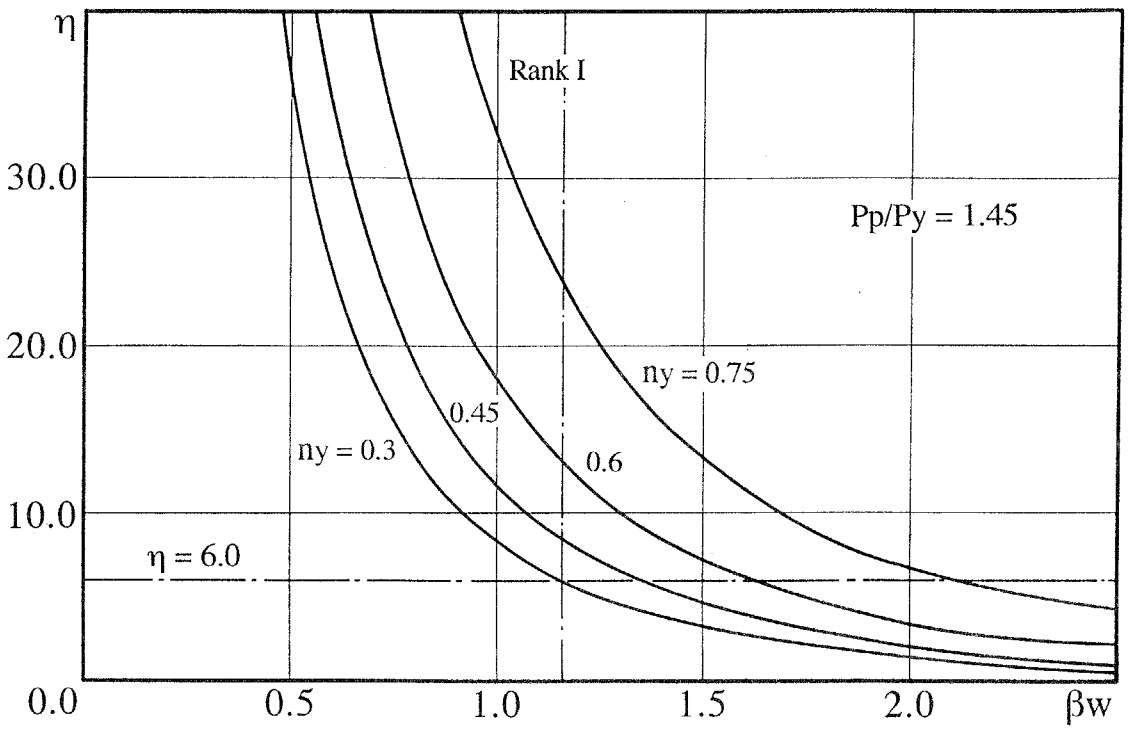


Fig. 4.20 Rotation capacity of hybrid beam-columns

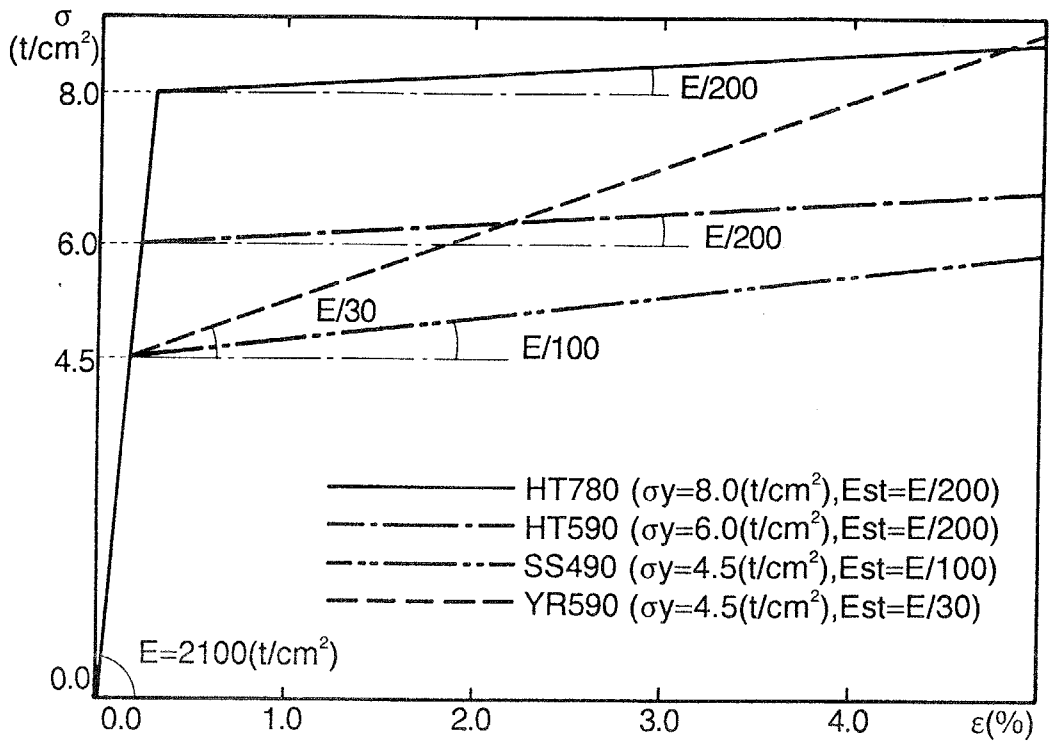


Fig. 4.21 Stress - strain relationships

Table 4.3 Dimensions of specimens of beam-column

Specimen	web plate	flange plate	tw (mm)	tf (mm)	d/tw × √σyw/E	b/tf × √σyf/E	P/Pp	P/Py
HB-8-4-30	HT780	SS490	6	9	1.358	0.386	0.30	0.35
HB-8-4-34	HT780	SS490	6	9	1.358	0.386	0.34	0.40
HB-8-4-45	HT780	SS490	6	9	1.358	0.386	0.45	0.53
HB-8-4-51	HT780	SS490	6	9	1.358	0.386	0.51	0.60
YR-4-4-40	YR590	YR590	6	9	1.018	0.386	0.40	0.40
HT-6-6-30	HT590	HT590	6	9	1.176	0.445	0.30	0.30
HT-6-6-45	HT590	HT590	6	9	1.176	0.445	0.45	0.45

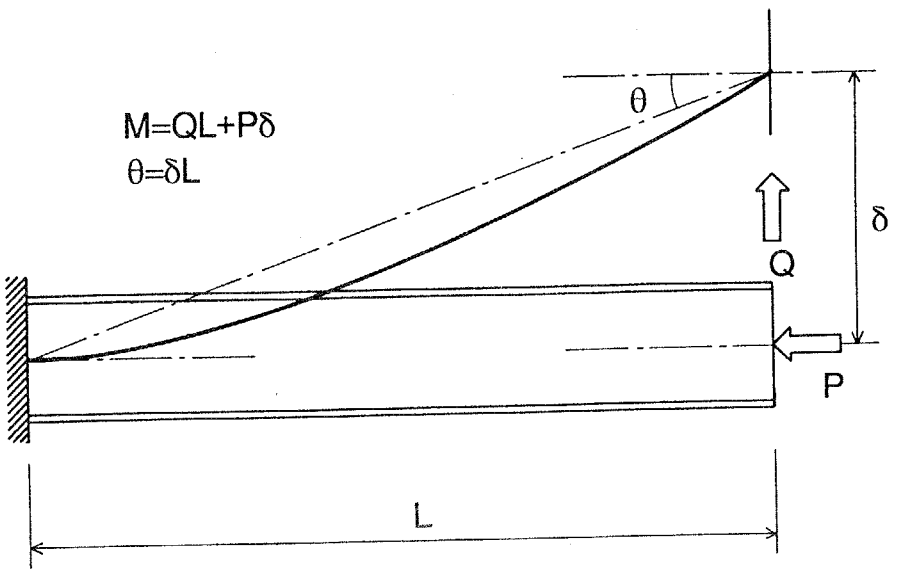


Fig. 4.22 Deflection mode

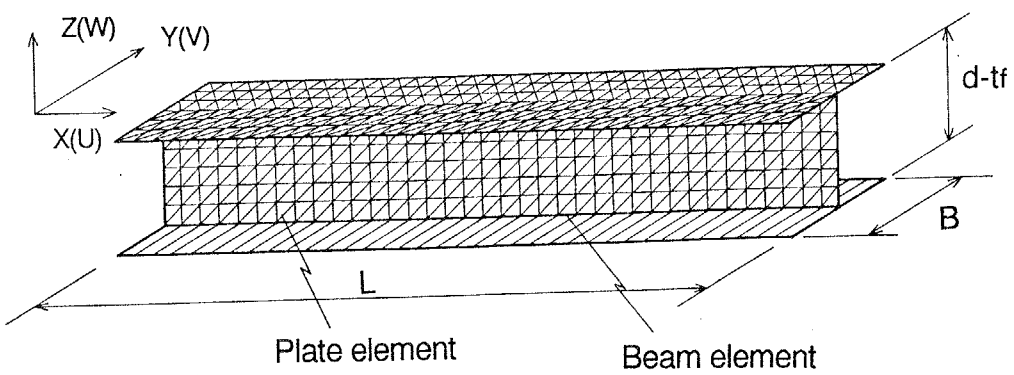


Fig. 4.23 Beam-column idealization

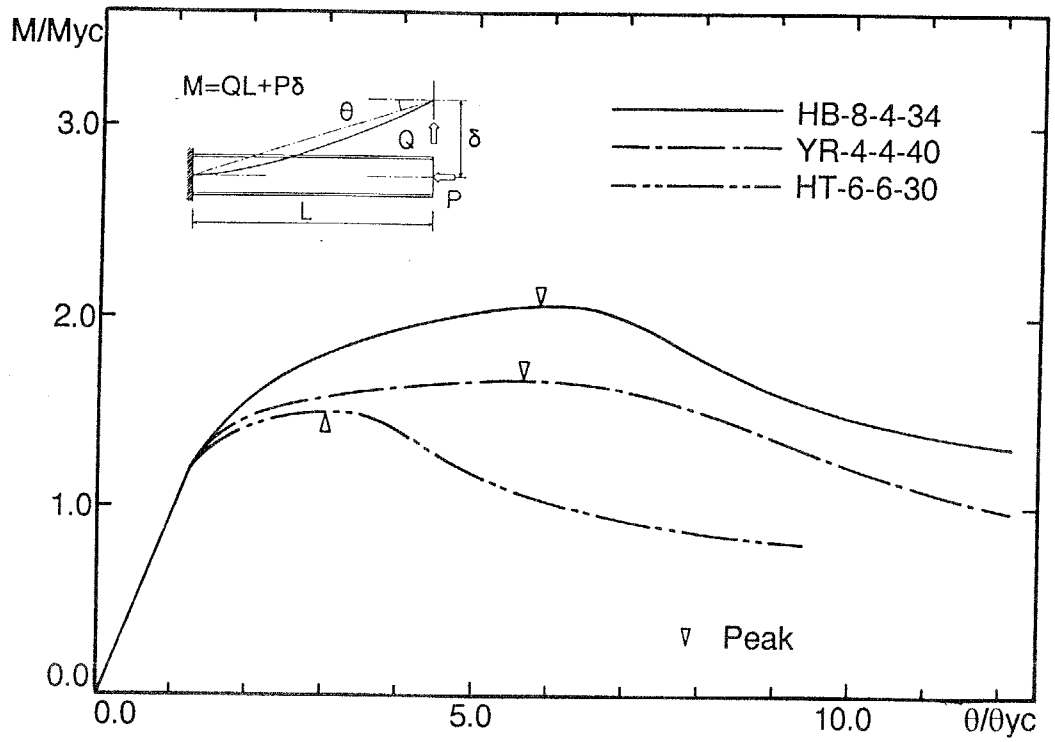


Fig. 4.24 M-θ relationships

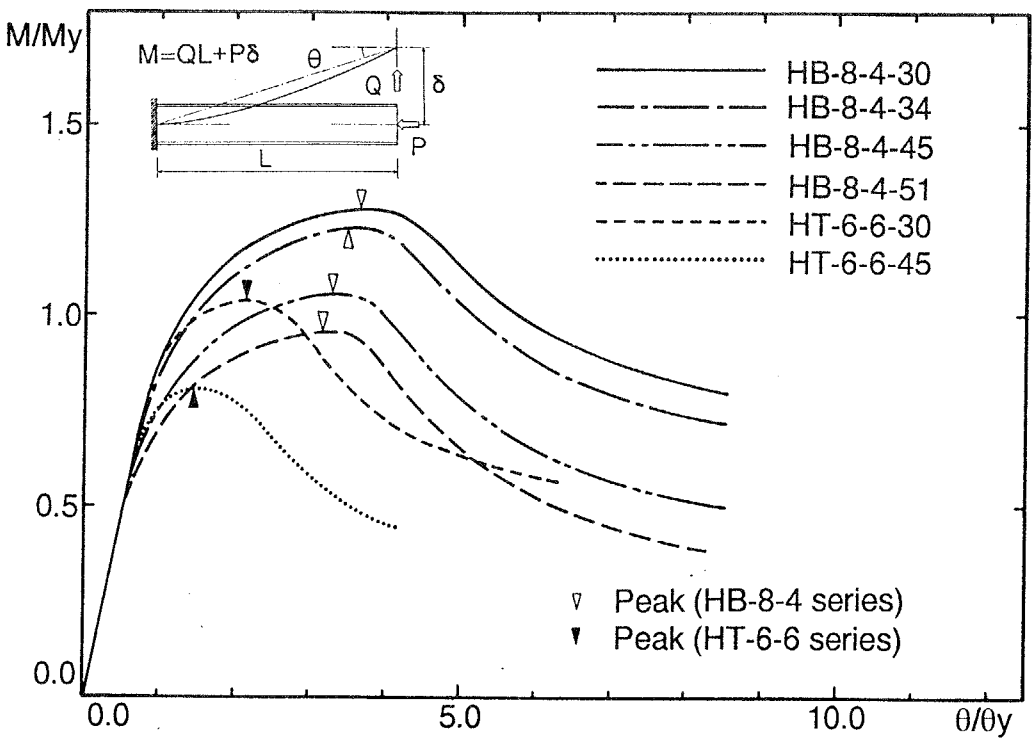


Fig. 4.25 M-θ relationships

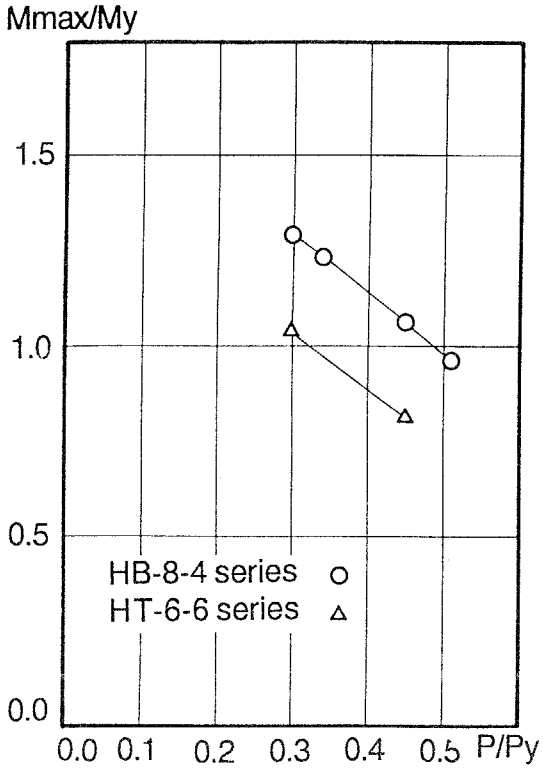


Fig. 4.26 Strength

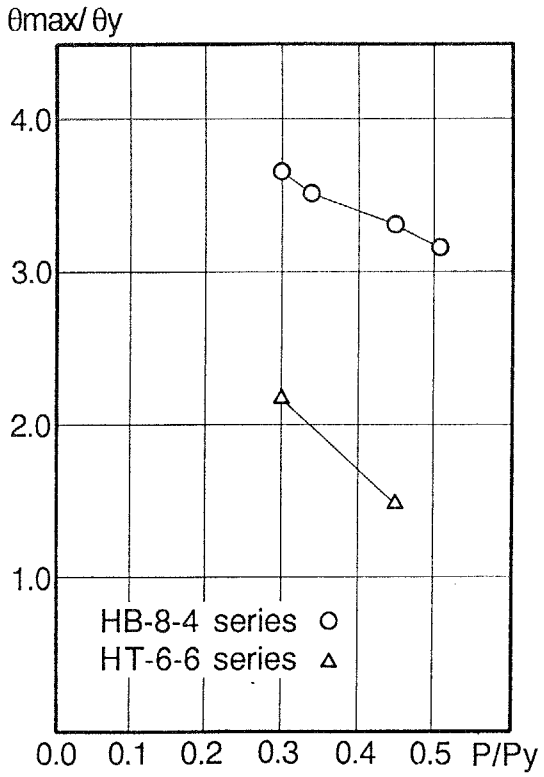


Fig. 4.27 Rotation capacity

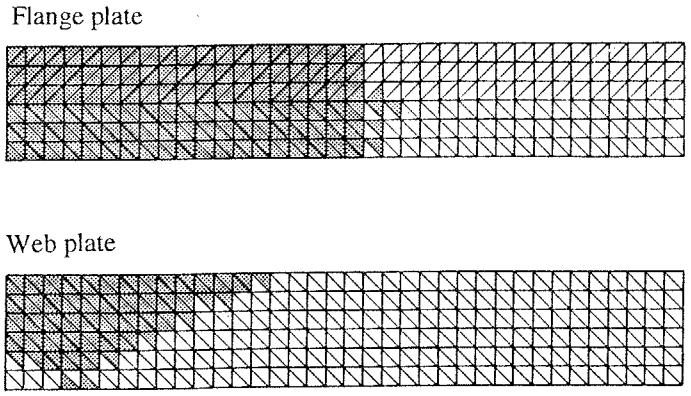


Fig. 4.28 Plastic zone of HB-8-4-45

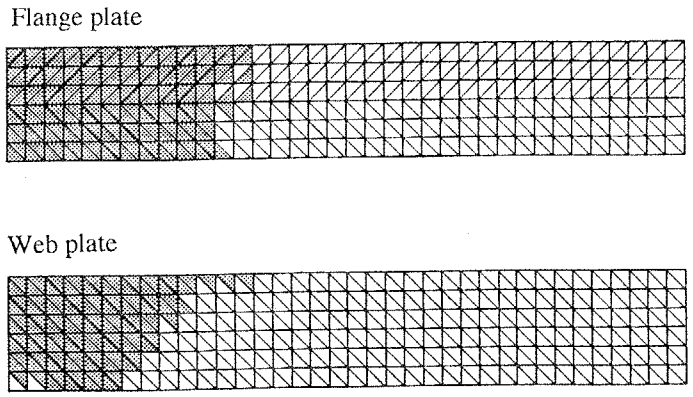


Fig. 4.29 Plastic zone of HT-6-6-45

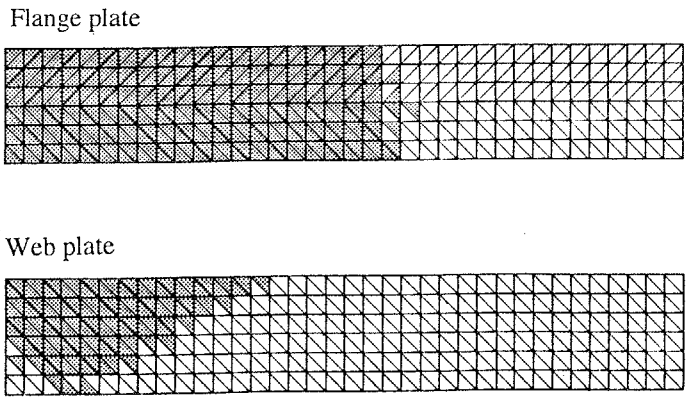


Fig. 4.30 Plastic zone of HB-8-4-51

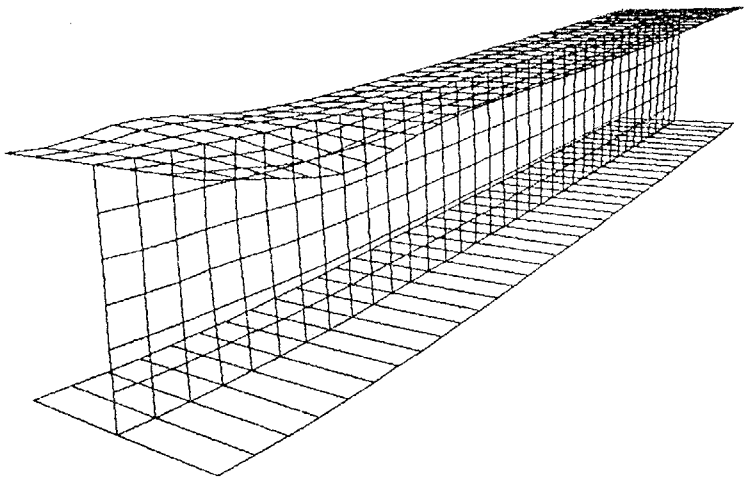


Fig. 4.31 Deformation of HB-8-4-45

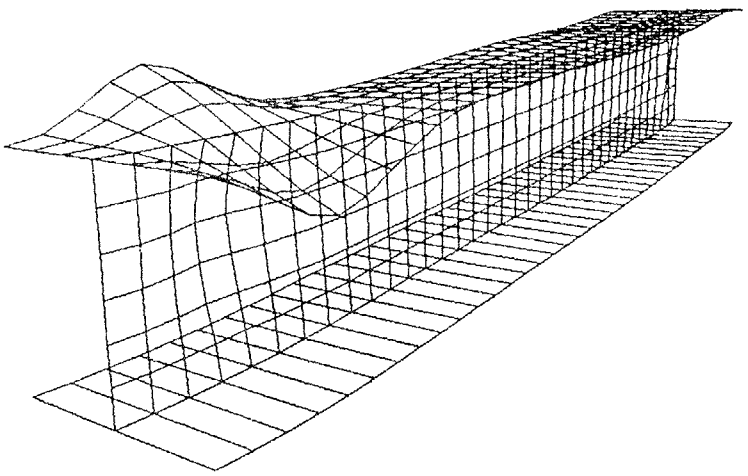


Fig. 4.32 Deformation of HT-6-6-45

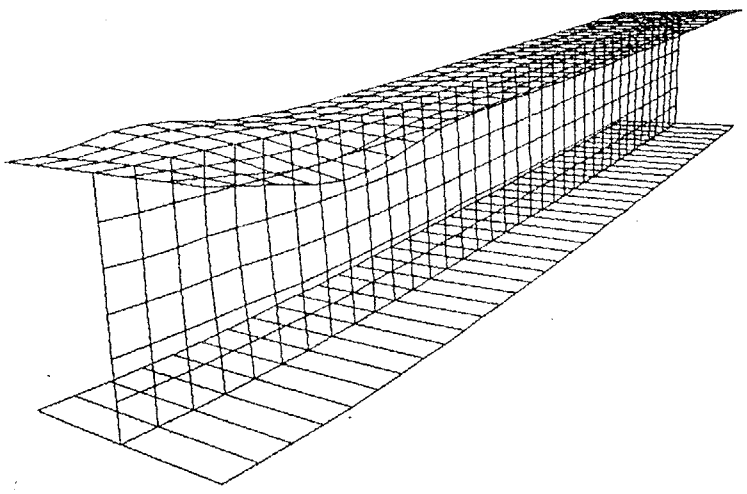


Fig. 4.33 Deformation of HB-8-4-51

第５章　ウエブに鋼板を添接することによる H形断面部材の塑性変形能力改善

５．１　はじめに

５．２　中立軸上に鋼板を添接したH形断面の曲げ変形性状
５．２．１　実験概要
５．２．２　帯板を添接した場合の曲げ変形性状
５．２．３　鋼板の形式による曲げ変形性状の違い

５．３　曲げ変形性状に及ぼす鋼板形状の影響
５．３．１　解析概要
５．３．２　塑性変形性状の差異
５．３．３　中立軸上に鋼板を添接した曲げ部材の塑性変形能力

５．４　中立軸上に鋼板を添接したH形鋼柱部材の塑性変形性状
５．４．１　実験及び解析概要
５．４．２　H形柱部材に対する鋼板添接の効果

５．５　中立軸上に高張力鋼鋼板を添接したH形鋼柱部材の塑性変形性状
５．５．１　実験概要
５．５．２　ウエブの一部ハイブリッド化の可能性とその効果

５．６　まとめ

5．1　はじめに

第1章で述べたように部材の変形性能が，構成板要素の幅厚比と材料の降伏応力により規定され，設計に対する自由度がかなり奪われている現状においては，部材の変形性能を自由にコントロールできる全く新しい発想による手法および設計法が必要になってきていると考える。再度その設計法の概念を以下に記述する。

部材の崩壊現象の一つにフランジ局部座屈現象が先行して起こるものが挙げられる。しかし，フランジ局部座屈が先行する部材の場合もその耐力低下が顕著に現われるのは，フランジ局部座屈に連成して発生するウエブ局部座屈後である。初期段階においては，耐力維持能力が低下しだすのは圧縮フランジのみであり，ウエブと引張フランジは，いまだ健全な状態を維持している。そこで，部材の塑性変形性能を向上させるためには，圧縮フランジが耐力低下した後に，この耐力低下分を補う部位が断面内に存在すれば，部材全体としては耐力を維持しつつ塑性変形できると考えられる。また，さらに部材の塑性変形性能を向上させるには，フランジ局部座屈に連成して起こるウエブ局部座屈を抑えることが重要な要素となってくる。また，健全なウエブはフランジの局部座屈に対しても拘束効果を発揮する。このような観点に立ち本章では，ウエブ中立軸上に新たに板要素を配した断面を提案する。この新たな板要素により先に述べた効果が得られるばかりでなく，中立軸上に位置することで部材の初期剛性等に対する影響は少なく，初期段階の設計を複雑にすることはない。具体的には，フランジ局部座屈が先行して崩壊する形式のH形鋼部材のウエブの両側にウエブ板厚と同程度の補強板を添接することを提案する。

先ず曲げ部材に対して鋼板を添接した場合の塑性変形性状を考察する。補強鋼材の形状と板厚を変数として，それらがH形鋼部材の変形能力に与える影響について把握する。また，フランジ局部座屈

後の応力再配分と耐力低下の機構について明らかにし，実験および数値解析を通して，どのような形式の補強方法がより有効であるかを検討する。さらに軸力を受けるH形鋼柱部材の場合に関しても考察を加え，軸力比の影響に関しても検討する。最後に添接する鋼板に高張力鋼を用いて，ウエブの一部ハイブリッド化の可能性についても触れる。

５．２　中立軸上に鋼板を添接したＨ形断面の曲げ変形性状

５．２．１　実験概要

実験には一般構造用圧延鋼材を用いたＨ形鋼を使用した。その形状はＦｉｇ．５．１に示すように断面Ｈ-２５０×１２５×６×９，材長３１００ｍｍである。両端に支持点スチフナ，中点とその両脇に荷重点スチフナを溶接している。この曲げ部材に設けた荷重点スチフナより左側を試験体とし，右側を反力梁とする。試験体側で崩壊を進行させるために，荷重点から反力梁側の上下フランジに鋼板を溶接し補強する。なお，この様な場合，変形が荷重点スチフナの左右で非対称となるためスチフナの位置においてたわみ角を計測し，試験体の変形については片持ち梁としての部材角を算定することにより評価する。この曲げ部材を基準型とし，ＳＮと称する。

この試験体のウェブ両面をＦｉｇ．５．２に示すような鋼板を用いて補強し，試験体を作成した。試験体名称は，Ｔａｂｌｅ５．１に示すように，□-ζ-η-ξ と表記する。ここで，□は，鋼板の形状を表わし，Ｓは帯板形式，ＳＸはＸ形，ＳＨはＨ形を示している。また，ζ，η，ξはそれぞれ下式によって求められる値を参考にして表わしている。

$$\zeta = ds/d \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.2.1)$$

$$\eta = ls/B \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.2.2)$$

$$\xi = 2\cdot ts/tw \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.2.3)$$

ここで，ｄ：ウェブの平行部分高さ，Ｂ：フランジ幅，ｔｗ：ウェブ板厚である。また，ｄｓ，ｌｓ，ｔｓは鋼板の形状を示すものであり，Ｆｉｇ．５．２を参照されたい。さらにＴａｂｌｅ５．１には，次章の数値解析で取り扱う試験体も同時に載せてあるが，実験を行ったものについては，最右欄に＊を記している。鋼材は，Ｈ形鋼，補強鋼材ともにＳＳ４００であり，その機械的性質をＴａｂｌｅ５．２に示す。

載荷は，載荷点に設置された油圧ジャッキにより，載荷ボックスを介して加力した。また荷重計測のためのロードセルは，試験体の自重および試験体の変形などによる影響を防ぐために，載荷ボックスと油圧ジャッキの間に取り付けた。載荷点は，ピン支承であり，試験体の材軸方向および横方向への変位がともに拘束されている。反力支持点はピン・ローラー支承となっており，材軸方向への変位は拘束していないが，横方向への変位は拘束されている。載荷装置図をFig.5.3に示す。載荷は基本的性状を把握するという意味で単調載荷のみを行う。

５．２．２　帯板を添接した場合の曲げ変形性状

Ｆｉｇ．５．４に帯板形式の補強を施した曲げ部材の荷重変位関係を示す。縦軸，横軸はＳＮの全塑性モーメントＭｐとその時の弾性部材角θｐでそれぞれ無次元化してある。また図中にはフランジ局部座屈発生時と最大耐力点をそれぞれ▼，▽で示してある。フランジ局部座屈は，フランジの表裏に貼付したひずみゲージの差が急激に増大した時をもって，局部座屈の発生としている。

ウエブせい方向の補強領域が狭いＳ-０．３-４-２は，ＳＮに比べてフランジ局部座屈の発生が遅く，最大耐力点での変形量も大きくなっている。また，その劣化勾配もかなり緩くなっており，鋼板が塑性変形能力，耐力劣化勾配を改善するのに有効に働いている。さらに，その最大耐力はＳＮとさほど違わず，鋼板が曲げ部材の耐力には影響していないことがわかる。これに対してウエブせい方向の補強領域の広いＳ-１．０-２-１．５は，ＳＮに比べて最大耐力はかなり上昇するものの，その耐力低下時期はＳＮと差異はなく耐力劣化も急激に進行する。

Ｆｉｇ．５．５にＳ-０．３-４-２，Ｓ-１．０-２-１．５の圧縮フランジのウェブ接合線上に貼付したひずみゲージの値を，荷重点スチフナからの距離と，耐力との関係で示している。これらグラフでひずみの値が大きいところで塑性ヒンジが形成され耐力低下につながったと考えられるので，その点を塑性ヒンジ形成位置と称することにする。Ｓ-０．３-４-２の場合の塑性ヒンジ形成位置は荷重点スチフナ近傍であり，補強領域内にとどまっている。また，この位置はほぼＳＮと類似していた。しかし，Ｓ-１．０-２-１．５の塑性ヒンジ形成位置は，まさに補強領域から外れたところであり，補強領域内で塑性ヒンジが形成されず，鋼板が有効に機能できなかったことを示している。

Ｆｉｇ．５．６に，Ｓ-０．３-４-２のフランジ局部座屈の進行状況と補強板の圧縮ひずみの状況を荷重変位関係と共に示す。フランジ局部

座屈発生点と最大耐力点を，それぞれ▼，▽で示している。また破線はフランジ局部座屈の進行を示すものであり，フランジの裏表に貼付したゲージの差を描いたものである。実線は図中に示した位置での補強鋼板の圧縮軸ひずみを描いたものである。また合わせてSNの荷重変位関係も点線で示してある。補強板の圧縮ひずみは，フランジ局部座屈後もしばらくは増加せず，SNが最大耐力を迎える変形量付近から増加し始め，耐力劣化とともに増大している。このことは，フランジ局部座屈に伴う耐力の低下分を鋼板により補っていることを示している。

Fig.5.7にウェブの面外変形の様子を表わすひずみの進展状況を示す。ひずみゲージは，中立軸よりも圧縮側に貼付している。縦軸は無次元化荷重で表わしている。図中において，黒丸が座屈波形の凹側を，白丸が凸側を表わしている。また，フランジ局部座屈が発生した点を▼で表わす。SNは，矢印で示したフランジ局部座屈の発生からほぼ同時にウェブも局部座屈を起こしている。これに対してS-0.3-4-2のものは，フランジが局部座屈を起こしても，ゲージ貼付位置でのウェブのひずみは両側ともほぼ等しく進行しており，ウェブには際立った局部座屈が発生していない。このことから，鋼板はフランジ局部座屈後の曲げによる圧縮応力を負担するばかりでなく，連成して発生するウェブ局部座屈を抑える効果もあることが確認出来る。

５．２．３　鋼板の形式による曲げ変形性状の違い

Ｆｉｇ．５．８に，Ｈ，Ｘ形の補強を施した場合の荷重変位関係を示す。ＳＨ-０．３-２-２は，先のＳ-０．３-４-２と同様にフランジ局部座屈の発生が線形関係を離れてからしばらく変形が進んだ後に起こっており，耐力低下時期もＳＮに比べて大きく延びている。また，耐力劣化勾配も緩やかになっている。すなわちこのＨ形は基本的に先の帯板形式の補強と同じである。しかし，補強部分の両端にウエブせい方向に伸びる部位を設けることで，材長方向の鋼板長さを短くしても，力を有効に弾性部分に伝えることが可能となったものと考えられる。

また，ＳＸ-０．３-２-２は荷重変位関係が線形関係を離れてから早期にフランジ局部座屈が発生する。しかし，耐力低下の時期はＳＮよりはもちろんのこと，ＳＨ-０．３-２-２，Ｓ-０．３-４-２よりも遅れている。さらに耐力劣化勾配は大幅に改善され，かなり緩やかになっている。これは，Ｆｉｇ．５．９に示した載荷後の写真からも分かるように，フランジ局部座屈，それに伴うウェブ局部座屈がＸ形と圧縮フランジに囲まれた三角形部分で発生したためである。つまり，ウェブ局部座屈がＸ形補強部分には及んでいないことで，フランジ局部座屈による耐力低下を補いつつ，さらに三角形部分で変形量を確保し，ウェブをある程度健全な状態で大変形域まで保つことができたことによるものである。

５．３．曲げ変形性状に及ぼす鋼板形状の影響

５．３．１　解析概要

前章で行なった実験と同様な曲げ部材を対象として数値解析を行い，鋼板を設けた曲げ部材の塑性変形性状について検討する。主に鋼板の板厚や形状をパラメータにとり荷重変位関係を中心に考察を加える。また，補強したことによる局部座屈波形，塑性域の進展状況についても考察を加える。

本解析では，弾塑性大変形解析を行なうため，Table5.2に示した実験での鋼材の引張試験結果を参考とし，Tri-linear型の応力－ひずみ関係を仮定する。ヤング率，ポアソン比はそれぞれ2100t/cm^2，0.30に固定するが，その他の降伏応力度，ひずみ硬化開始ひずみ，ひずみ硬化域における接線係数は，フランジ，ウェブ毎に引張試験の結果を用いる。

解析対象を片持梁とし，断面およびスパン長は公称値を用い，それぞれH-250×125×6×9，1250mmとする。自由端の支持条件は横座屈挙動を防止するためにH形断面の弱軸方向の変位のみ拘束する。部材の要素分割状態をFig.5.10に示す。圧縮側フランジおよびウェブには梁有限要素を用いた。鋼板で補強したことの解析上の表現は，補強領域のウェブ板厚を鋼板の板厚に応じて厚くすることで対応する。なお，実験との対応に関しては以下において随時図中にプロットで示すが，最大耐力またその時の変形量はいずれも良い対応を見せている。

５．３．２　塑性変形性状の差異

Ｆｉｇ．５．１１に先の実験で補強領域がウエブせい方向に長い形式のＳ-１．０シリーズの形状変化に伴う荷重変位関係を示す。ここで特徴的な点として同じ補強領域にも関わらず，板厚の薄いＳ-１．０-２-１が板厚の厚いＳ-１．０-２-１．５よりも塑性変形性能が良好であることが上げられる。これは，Ｆｉｇ．５．１２に示した変形図（図中の陰は，塑性域を表わす。）を見て分かるように，局部座屈発生領域が補強してある領域よりも外れているためである。このように，補強が強すぎて補強領域外で局部座屈が発生すると，その部分でのヒンジ化が進行し，鋼板を配した効果が出にくいと言える。このＳ-１．０-２-１．５に対し，材長方向の補強領域を長くしたＳ-１．０-４-１．５はその最大耐力時の変形量を大きく延ばしている。これは，材長方向長さを５００ｍｍとすることで，局部座屈発生領域を包含していることによる。（Ｆｉｇ．５．１２）しかし，その最大耐力は，他のものと比較して高く，そのため耐力劣化勾配が若干急なものとなっている。このようにウエブせい方向の補強領域が広いものは，塑性変形能力を延ばす鋼板形状としては，その鋼板形状を決定する際に幾つかの配慮が必要である。

これに対して，Ｆｉｇ．５．１３に示したウエブせい方向の補強領域の狭いものは，板厚が増しても先程のような現象は見られず，板厚の増大とともに最大耐力点までの変形量は大きくなっている。これは板厚を厚くしても補強領域で適度の局部座屈が発生し，その局部座屈の進行に伴う耐力低下分を鋼板が補いつつ効果的に変形量を確保していくためである。また，同図中に板厚９ｍｍで補強領域を材長方向に長くしたＳ-０．３-４-３を示すが，Ｓ-０．３-３-３よりもその塑性変形量を延ばしている。これは，補強領域を十分材長方向に延ばすことで，局部座屈，端部の塑性化に伴う剛性低下を抑えているためである。つまり，鋼板が弾性域にまで十分達していることで，応

力を弾性域に効果的に流しているものと考えられる。

これら板厚を上げることで曲げ部材の変形性能を延ばすことに対する効果は，実験でその有効性が示されたＸ形の鋼板形式に関しても同様な傾向にある。（Ｆｉｇ．５．１４）

5．3．3　中立軸上に鋼板を添接した曲げ部材の塑性変形能力

Fig.5.15は補強材板厚と塑性変形能力の関係を示したものである。便宜上SNの補強材板厚を0mmとしている。先にも述べたように△，▲で示す鋼板のウエブせい方向高さds の大きいものは，その材長方向長さls がフランジ幅の2倍程度の場合，塑性変形能力は板厚の増加に伴って大きくはならず，むしろ小さくなる。これに対して，□，■で示したS-0.3タイプのものは，板厚の増大と共に，その塑性変形能力を飛躍的に増大させる。その増加割合は板厚が厚いほど大きい。また，材長方向の補強領域が長いS-0.3-4タイプがS-0.3-2タイプよりも，その塑性変形能力が大きい。すなわち，帯板形式の補強方法の場合，同じ鋼材量を用いて補強するのであれば，中立軸近傍のみに材長方向に長く，板厚は厚くする方法が有効である。

また，○で示したX形鋼板形式の塑性変形能力は，その板厚の増加と共にほぼ線形的に増加する。この鋼板の板厚変化が曲げ部材の塑性変形能力の増加割合に及ぼす帯板形式との違いは，フランジ局部座屈後の鋼板の作用の違いによるものであると考えられる。そこで，S-0.3タイプとX形の鋼板形式の作用の仕方の違いを見るために，Fig.5.16とFig.5.17 を示す。

Fig.5.16 は，X 形の鋼板形式が曲げ部材の塑性変形能力にどのように影響しているかを示したものである。縦軸は，基準型SNの塑性変形能力 Roで各試験体の塑性変形能力を基準化したものであり，横軸は，式（5.3.1）で表わされる鋼板厚の断面積をフランジ断面積で基準化したものをとる。

$$\alpha = (2 \cdot ts \cdot ds)/(B \cdot tf) \quad \cdots\cdots\cdots (5.3.1)$$

ここで，tf ：フランジ板厚であり，その他は前述のものに等しい。

図中の実線は最小二乗法により回帰的に求めたものであり，次式

で表される。

$$R/Ro = 1.16\alpha + 1.0 \quad \cdots\cdots\cdots (5.3.2)$$

この図から分かるように，X形の鋼板形式は，回帰的に求めた実線で表わされるように，その鋼板の断面積に比例して大きくなっている。この鋼板形式は，フランジ局部座屈後の耐力低下分を鋼板がまさに補うことでその塑性変形能力を確保していったことが分かる。しかし，この線形関係は本研究の範囲内でいえることであり，鋼板の断面積の増加に伴う塑性変形能力の増加にはある程度の限界が存在するものと考える。

Fig.5.17は，帯板形式の補強方法が，曲げ部材の塑性変形能力にどのように関与しているのかを示したものである。縦軸は，先のFig.5.16と同じように基準化した塑性変形能力をとっており，横軸は，式（5.3.3）で表わされる基準化した鋼板の曲げ剛性をとっている。

$$\beta = (ds/d)\cdot(2\cdot ts/tw)^3 \quad \cdots\cdots (5.3.3)$$

図中の実線はβ=1.14の場合を除いて最小二乗法により回帰的に求めたものであり，それぞれ下式で表される。

S-0.3-3シリーズ

$$R/Ro = 0.216\beta + 1.0 \quad \cdots\cdots\cdots (5.3.4)$$

S-0.3-4シリーズ

$$R/Ro = 0.239\beta + 1.0 \quad \cdots\cdots\cdots (5.3.5)$$

S-0.3-2シリーズ，S-0.3-4シリーズとも，β=1.14の場合を除いたものが線形的に分布しており，その塑性変形能力は鋼板の曲げ剛性とほぼ比例関係にあることが分かる。これは，この帯板形式の補強方法が，主にフランジ局部座屈に伴うウェブの連成局部座屈を抑えることで，曲げ部材の塑性変形能力が大きくなっていることによる。この傾向は，板厚の大きい場合に顕著に表れる。板厚の薄い場合には，先程のX形の補強形式と同じように，耐力低下分を補

強部分で補う作用が支配的になる。このことは，β ＝1.14の場合が回帰直線よりも上方にあることから推察がつく。しかし，板厚が大きい場合もこの耐力低下分を補う作用がなくなるのではなく，この作用よりもウェブ局部座屈を抑制する作用の方が大きくなっているものと考えられる。

5．4　中立軸上に鋼板を添接したH形鋼柱部材の塑性変形性状

本節は，H形鋼柱部材の塑性変形能力を向上させることを目的とし，一定軸力とモーメント勾配を受けるH形鋼柱部材に対し，提案する補強方法について検討するものである。鋼板を設けた柱部材に対し載荷実験を行い，その有効性を実証すると共に，軸力，鋼板の形状を変化させ数値解析を行い，この補強方法の塑性変形性状に与える影響を考察する。

5．4．1　実験及び解析概要

実験装置をFig.5.18に示す。試験体は，Fig.5.19に示す材長1800mm，断面形状 H×150×150×6×9の溶接組立てH形鋼で，試験体の両端部にはそれぞれ加力ボックスに取り付けるための厚さ40mmの鋼板が溶接されている。試験体名は補強していないものをNormal（30）とし，鋼板を施したものをH-150-24-9(30)とする。補強形式は，厚さ9mmのH形をした鋼板を，材端のウェブ部分に裏，表2枚隅肉溶接している。鋼材の機械的性質をTable5.3に示す。載荷形式は，両端部を固定された試験体に定軸力（軸力比30%）を加え，複曲率曲げが生じるようにせん断力を加えている（Fig.5.20）。

実験結果をふまえ，実験を行った2体と同一のモデルと共に，鋼板の長さ，幅，厚さ，軸力比を変えたモデルに対し数値解析を行う。解析対象はFig.6.21，Table6.4に示す7体とする。材長は全てL=900mmとし，載荷形式は実験に対して片側だけを想定したものとする。解析は増分理論に基づく有限要素法による弾塑性大変形解析を行う。鋼材の材料定数は実験による結果を参照し，応力-ひずみ関係はbi-linear型を仮定する。要素分割は，圧縮側フランジとウェブを三節点三角形平板要素，引張側フランジを二節点梁

要素を用いて分割する（Fig.5.22）。

5．4．2　H形柱部材に対する鋼板添接の効果

Fig.5.23にNormal（30），H-150-24-9（30）の荷重変位関係を示す。また，それぞれに対応する解析による値も併せて示す。各軸は鋼板のない断面の全塑性モーメント Mpとその時の弾性部材角 θpで無次元化している。ウェブ補強したH-150-24-9（30）はNormal（30）に比べ，耐力が上昇し，最大耐力に到るまでの変位量も増大しており，塑性変形性能の向上が確認される。また，実験値と解析値を比較してみると，耐力，変形性状とも概ね良い対応を示しており，この数値解析により柱部材の塑性変形性状を追随することができる。

Fig.5.24にNormal（30），H-150-24-9（30），鋼板の厚さを2倍にしたH-150-24-18（30），長さを2倍にしたH-300-24-9（30）の荷重変位関係を示す。H-150-24-9（30）に比べ H-150-24-18（30）は僅かな耐力の上昇がみられる。H-300-24-9（30）は最大耐力に到るまでは，その性状に違いはないが，その後ほとんど耐力を低下することなく変形が進んでいる。鋼板の板厚を上げることで軸力を負担し，耐力の上昇が望めるが，このモデルの場合，耐力低下が激しくなってしまっている。鋼板の軸方向長さをフランジ幅の2倍程度にすると，ウェブの局部座屈の発生を制御することに効果的で，急激な耐力低下を抑制することが可能であるといえる。

Fig.5.25に軸力比を45％にしたタイプの荷重変位関係を示す。ここで用いている鋼板の形状は 長さ300mm，幅36mm，厚さ18mmのものである。このタイプは非常に効果的で塑性変形性能が大幅に向上していることが分かる。Normal（45）が全塑性モーメントに達する前に耐力を低下させてしまっているのに対し，H-300-36-18（45）は耐力を十分に上昇させ，最大耐力に至るまでの変位量も大幅に増大している。またNormal(30)と

Normal(45)を比較すると，その塑性変形性状には大きな違いがあるが，鋼板を施すことで軸力比が45％の場合でも30％の時と同じくらいまで塑性変形性能を伸ばすことが可能であることが分かる。高軸力下に於いても，この補強方法は有効であると言える。

5．5　中立軸上に高張力鋼板を添接したH形鋼柱部材の塑性変形性状

前節までにハイブリッド化，鋼板の添接により，ウェブが軸力を十分に負担すること及び連成局部座屈に対する拘束効果を高めることの有効性を確認している。本節ではそれらをさらに発展させ，より効果的なものとして，断面中央部のみのハイブリッド化を主目的とし，軟鋼柱部材の最大モーメントを受ける材端断面中立軸上のみに高張力鋼板を添接したものを提案する。

このような一部ハイブリッド化した柱部材の塑性変形性状を，鋼板形状をパラメータにとり，単調載荷実験を通して検討する。

5．5．1　実験概要

本実験では，Fig.6.26に示すようにSS400よりなる断面形状H-150x150x6x9，材長L＝900mmのH形鋼にFig.6.27に示すような高張力鋼板を添接した柱部材3体と，比較のために鋼板を添接しないもの1体の計4体を使用した。

加力方式は所定軸力を導入し，両端単純支持とし，部材中央部に加力する一方向単調載荷とした。

試験体名称はCLが本実験の試験体であることを示す。次の3つの数字は，鋼板形状を示し，最後の数字は軸力比を示す。添接する鋼板はHT780である。試験体名称をTable5.5に示す。使用鋼材の機械的性質をTable5.6に示す。

５．５．２　ウエブの一部ハイブリッド化の可能性とその効果

Ｆｉｇ．５．２８にＣＬＮ-４５とＣＬ-４-１-３-４５の荷重変位関係を示す。縦軸，横軸はそれぞれ軸力を導入しない場合の降伏モーメントＭｙとその時の弾性部材角θｙでそれぞれ無次元化している。高張力鋼板を添接したＣＬ-４-１-３-４５は，通常断面のＣＬＮ-４５に比べ，高い軸力を導入しているにもかかわらず，部材の最大耐力は高く，最大耐力時変位量も伸ばしている。このように応力状態の厳しい柱部材端部のみに高張力鋼板を添接することは，軸力負担能力を高め，さらには，フランジ局部座屈の発生を抑制する効果により，柱部材の塑性変形能力を向上させる要因となっている。

Ｆｉｇ．５．２９の荷重変位関係は，鋼板形状が与える影響を示したものである。耐力は軸力を考慮した全塑性モーメントＭｐｃで無次元化し，変位はそのときの弾性部材角θｐｃで無次元化している。先程のＣＬ-４-１-３-４５と断面積を等しくして，ウェブせい方向の幅ｄｓを細くしたＣＬ-２-２-３-４５はほぼ同程度の塑性変形性状を示している。つまり，幅を狭くしても，板厚を厚くしておくことでほぼ同程度の性状を示すこととなり，ある塑性変形量が要求された場合は，それに対応する鋼板形状をある程度自由に選定できる可能性を示唆している。しかし，これら両試験体は，鋼板を添接した領域外で局部座屈が発生したことにより塑性変形能力が決定されている。

これに対して，ＣＬ-４-１-３-４５よりも鋼板を材長方向に長くしたＣＬ-４-１-５-４５は，飛躍的に塑性変形量を伸ばしている。この理由については以下で考察を加える。

Ｆｉｇ．５．３０にＣＬ-４-１-３-４５とＣＬ-４-１-５-４５の柱端部から７５ｍｍの中立軸上の鋼板軸方向ひずみの推移を示す。横軸には，降伏モーメント時の弾性部材角で無次元化した部材角をとっている。どちらの場合も変形に伴いひずみの増加がみられ，軸力を負担していく様子がうかがえる。特に，鋼板長さの長いＣＬ-４-１-５-４５の鋼

板は大変形域において大きなひずみの増加がみられる。これは，鋼板がフランジの局部座屈に伴う耐力低下分を補っているためと考えられ，先の荷重変位関係の違いとなって表れてきている。

これは，Fig.5.31に示す最終変形図からもわかる。この図は，変形を3倍に拡大して示している。CL-4-1-3-45は鋼板を添接した領域では局部座屈が発生していないが，その外で局部座屈が発生し，ウェブにも連成局部座屈が生じ，耐力低下の要因となっている。これに対して部材長の半分まで鋼板を添接したCL-4-1-5-45は，フランジの局部座屈はみられるものの，ウェブの連成局部座屈の発生はみられない。

以上のことから，フランジの局部座屈により塑性変形を進行させても高張力鋼板を添接することで，ウェブの連成局部座屈を抑え，なおかつフランジ局部座屈に伴う耐力低下分を補うことができれば，部材の塑性変形能力はより向上するといえる。また，この鋼板も，大変形域において弾性状態を保っていることが重要であり，高張力鋼を使用することの効果は大きい。

5．6　まとめ

本研究では，モーメント勾配を受けるH形鋼部材の中立軸近傍に鋼板を添接することにより，その塑性変形性能の向上を目的とした。実験，数値解析を通してそのメカニズムを明らかにし，有効性を示した。以下にその結論を示す。

（1）新たに鋼板を中立軸近傍に設けることにより，H形鋼曲げ部材の断面性能，耐力を変えることなく，その塑性変形能力を向上させることが可能となる。鋼板により，フランジ局部座屈による耐力低下分を補い，部材全体としては耐力を維持しつつその変形量を延ばす。

（2）ウェブに鋼板を溶接することにより，フランジ局部座屈による耐力低下分を補うだけでなく，フランジ局部座屈に連成して起こるウェブ局部座屈に対しても拘束作用をもたせることが可能となる。

（3）有効な鋼板形状は，ウエブせい方向の高さをあまり高くすることなく，中立軸近傍に材長方向に長くすることが必要である。その長さはフランジ局部座屈発生位置よりも長くし，ある程度ウェブの弾性域まで延ばすことが有効である。

（4）補強領域を短く制限された場合は，X形，H形の鋼板形式が有効である。これは，補強領域で適度にフランジ局部座屈を発生させ，その耐力低下分を補いその力を効果的に弾性部分に流すことができるためである。

（5）中立軸近傍，X形の鋼板形式に対しては，その鋼板の板厚を厚くしたものほど塑性変形性能を延ばすことが可能である。板厚を厚くすることにより，フランジ局部座屈による耐力低下分をより多く補うことができ，ウェブ局部座屈に対してもその補剛効果は増大する。

（6）H形鋼柱部材のウェブにわずかな鋼板を設けることで，高い耐力，塑性変形性能を得ることができる。また，これは高軸力下で

も有効であり，柱部材の性能を改善することが可能である。

（７）鋼板を添接しない場合と同程度の軸力を導入する場合，Ｈ形形状の鋼板を用いればその補強長さはフランジ幅の２倍程度あれば十分である。

（８）ウェブの中心に高張力鋼板を設けることで，高軸力下での耐力，塑性変形性能を向上させることが可能にる。その形状に関しては，ある程度の自由度を持たせることができる。

（９）高張力鋼板の長さを柱部材長の1/2程度にすることによって，より効果的に鋼板添接外でのウェブ面外変形の発生を抑制し，塑性変形性能を高めることができる。

CHAPTER 5

Figures and Tables

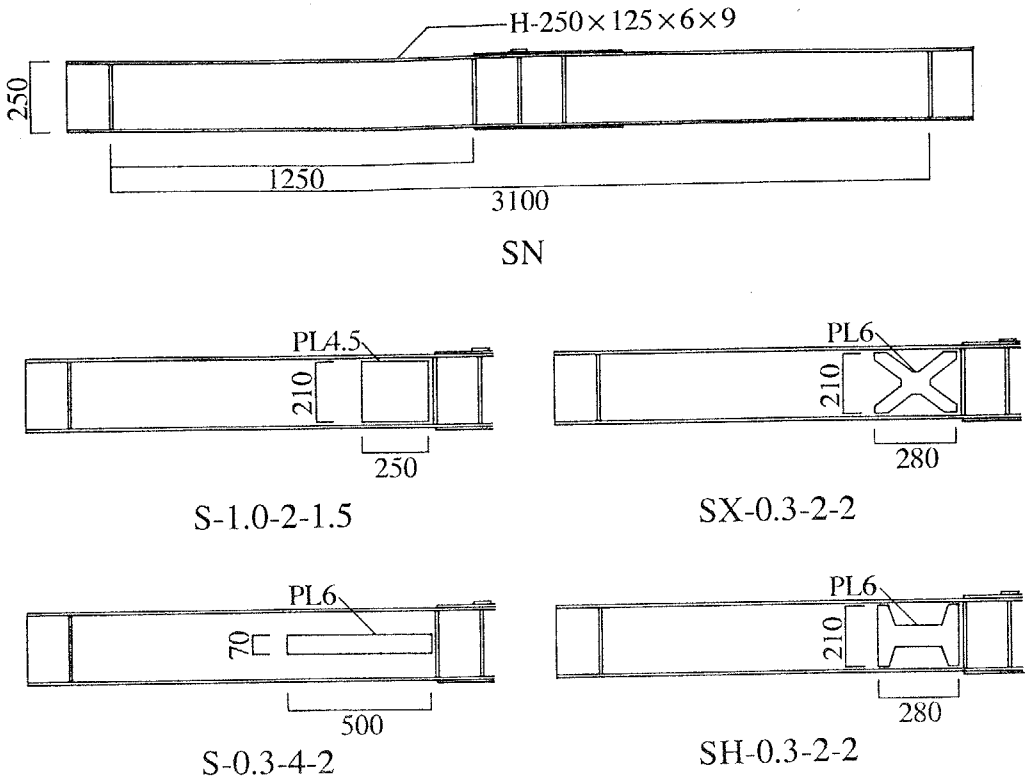


Fig. 5.1 Specimen of beam

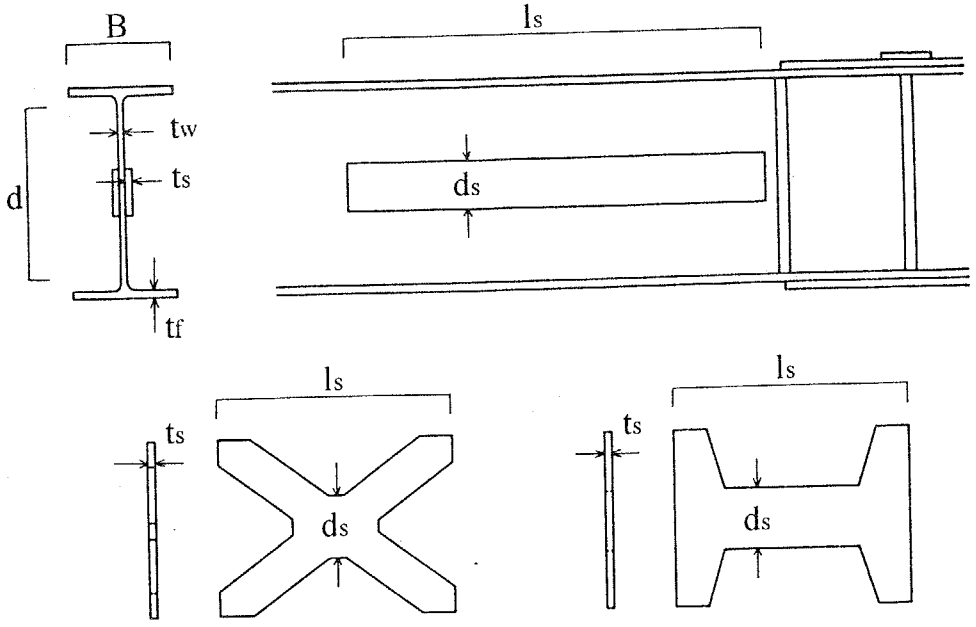


Fig. 5.2 Type of plate

Table 5.1 Dimensions of specimen

Specimen	Plate type	ds	ls	ts	Experiment
SN	-	0	0	0.0	*
S-1.0-2-1	Rectangle	210	250	3.0	
S-1.0-2-1.5	Rectangle	210	250	4.5	*
S-1.0-4-1.5	Rectangle	210	500	4.5	
S-0.3-3-1.5	Rectangle	70	375	4.5	
S-0.3-3-2	Rectangle	70	375	6.0	
S-0.3-3-3	Rectangle	70	375	9.0	
S-0.3-4-2	Rectangle	70	500	6.0	*
S-0.3-4-3	Rectangle	70	500	9.0	
SX-0.3-2-1.5	X-Shape	70	280	4.5	
SX-0.3-2-2	X-Shape	70	280	6.0	*
SX-0.3-2-3	X-Shape	70	280	9.0	
SH-0.3-2-2	H-Shape	70	280	6.0	*

Table 5.2 Mechanical properties

Test-piece (mm)	σy (t/cm^2)	σu (t/cm^2)	E (t/cm^2)	Est (t/cm^2)	εst	el. (%)
Flange-9.0	3.0	4.72	2098.0	25.1	0.018	27.7
Web-6.0	3.0	4.89	2089.0	23.8	0.020	28.6
PL-6.0	1.95	3.07	2119.3	17.8	-	38.7
PL-4.5	2.0	3.30	2032.7	16.5	0.012	53.3

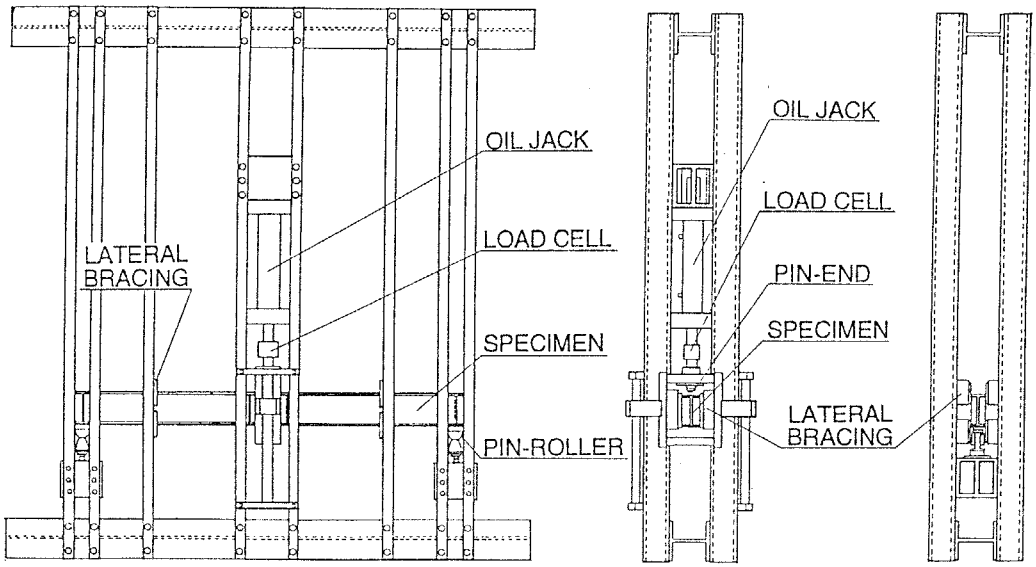


Fig. 5.3 Test setup

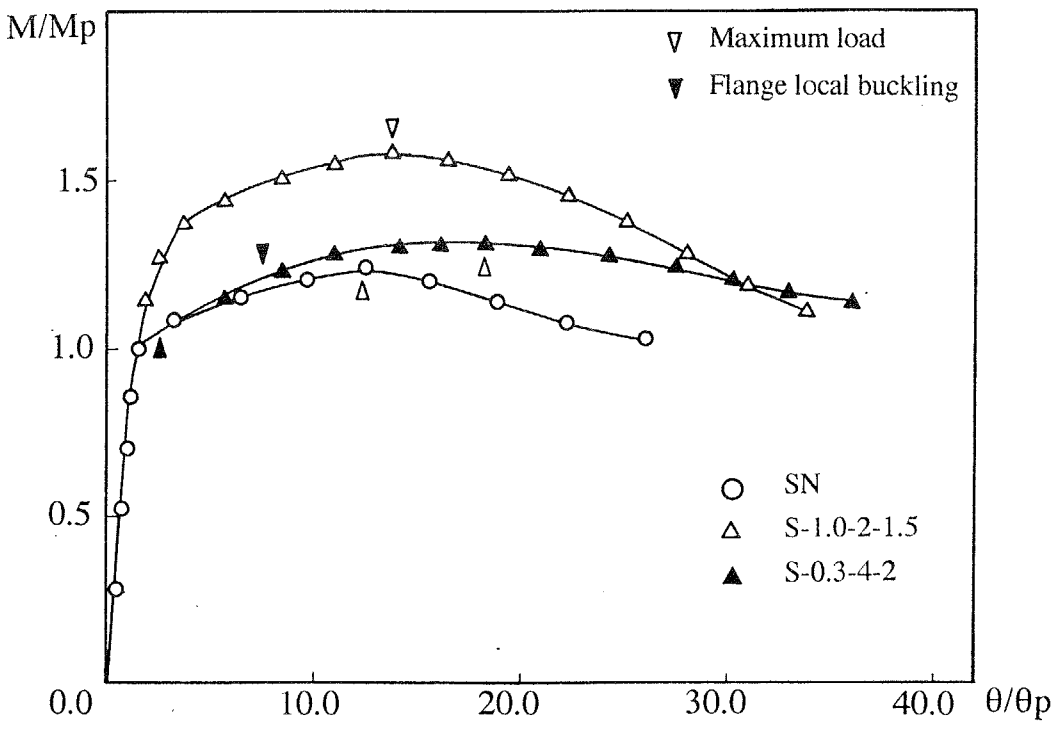


Fig. 5.4 M - θ relationships

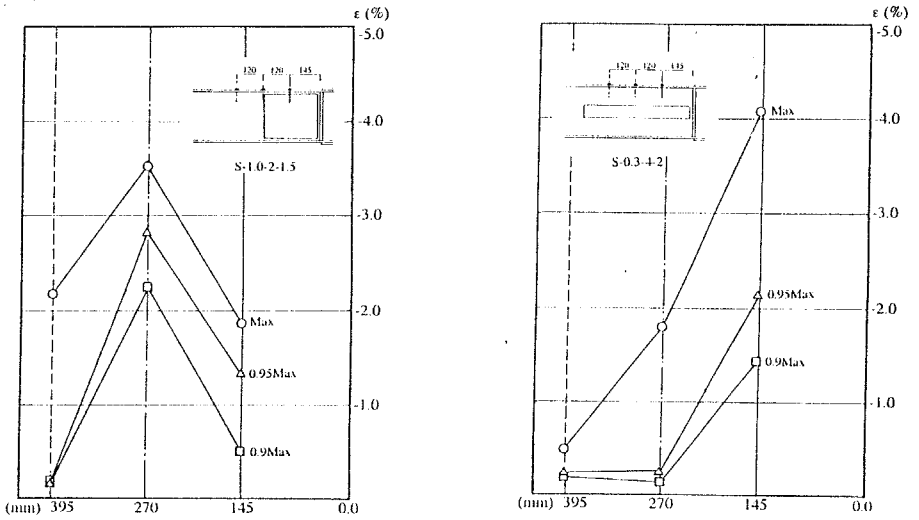


Fig. 5.5 Strain distribution of compressive flange

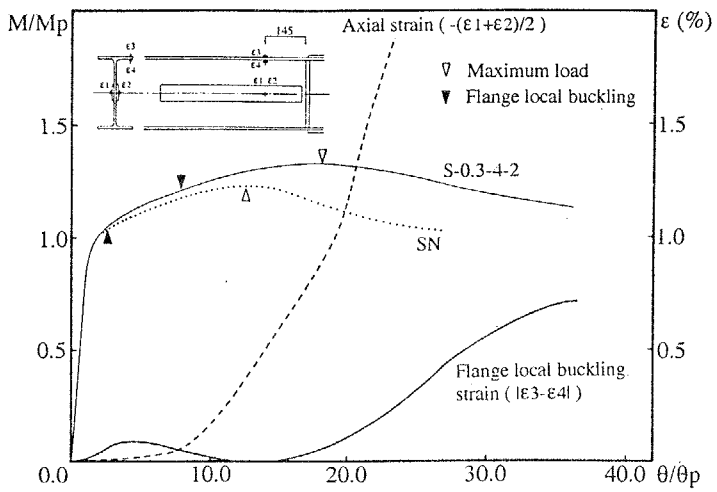


Fig. 5.6 Axial strain and flange local buckling strain

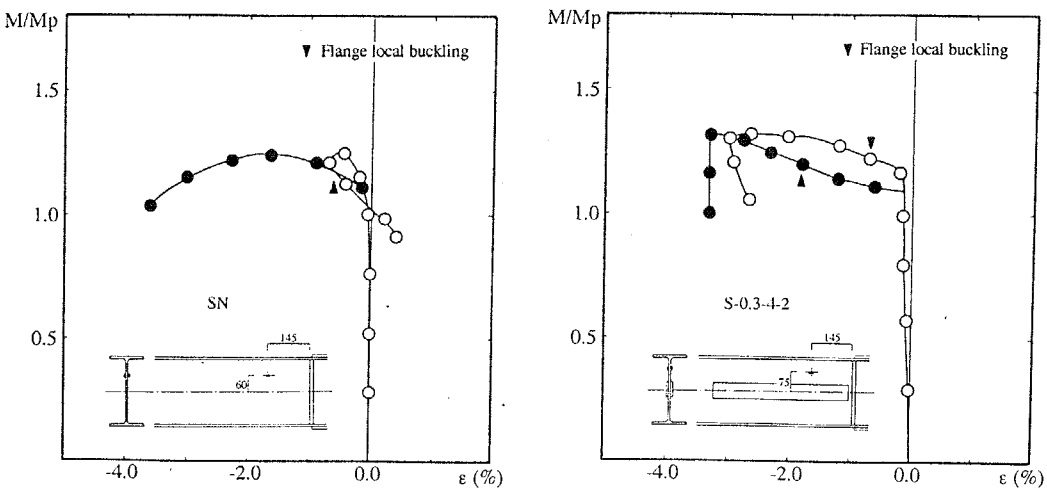


Fig. 5.7 Web local buckling strain

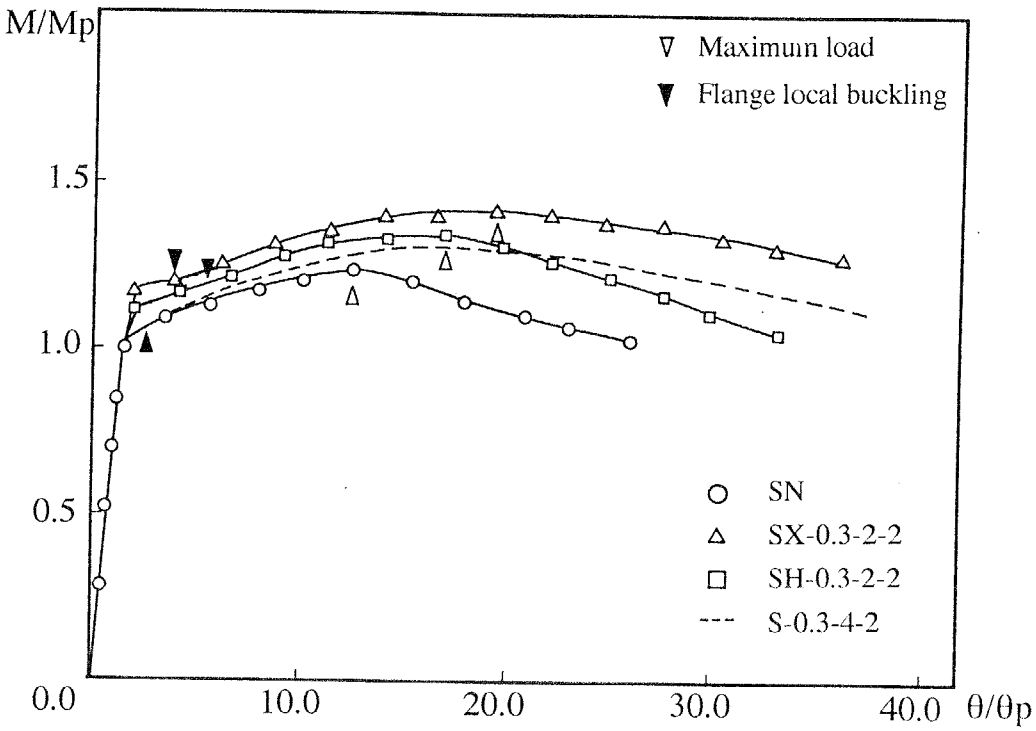


Fig. 5.8 M - θ relationships

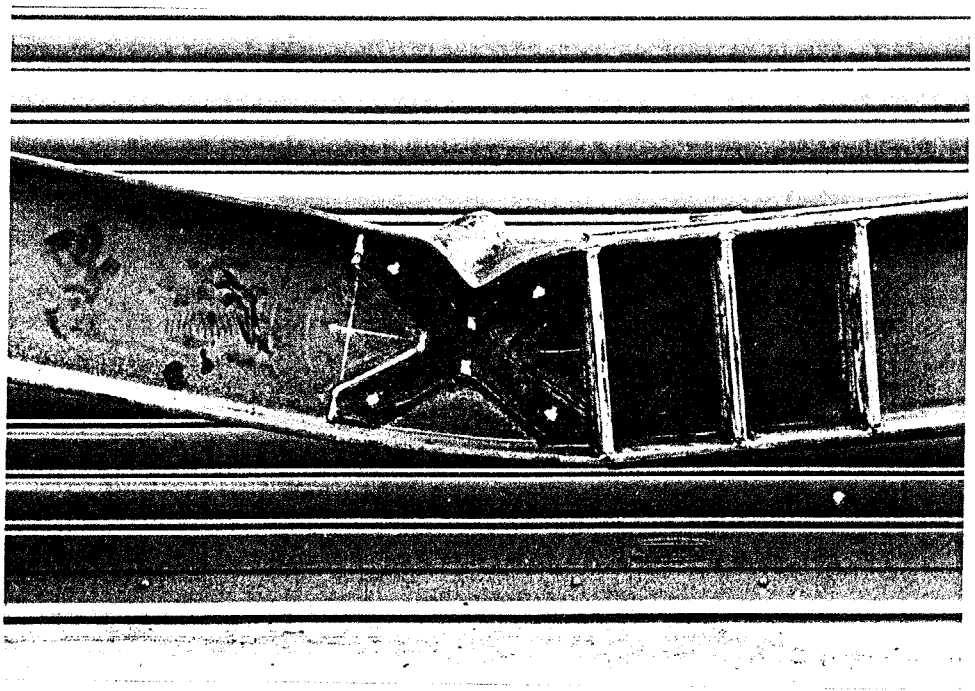


Fig. 5.9 Deformation

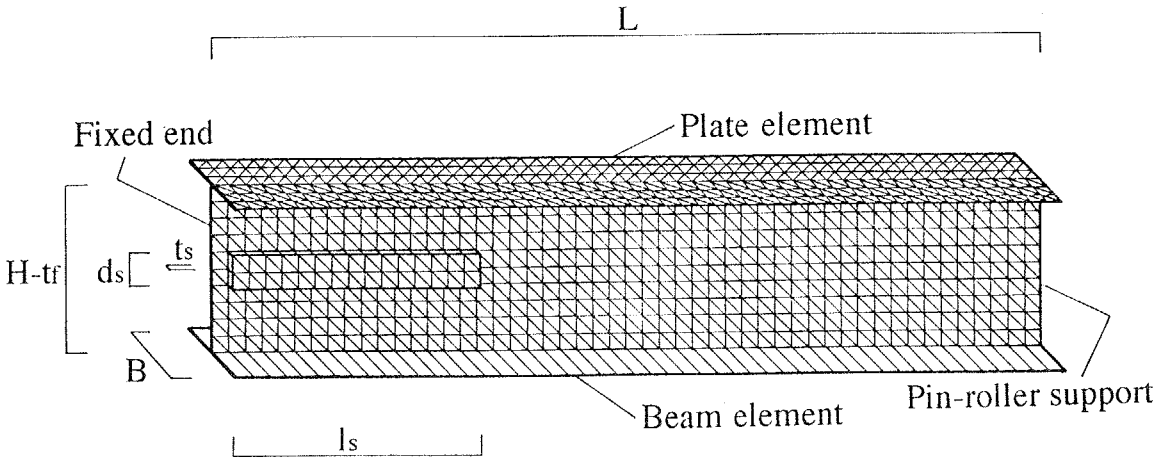


Fig. 5.10 Analytical model

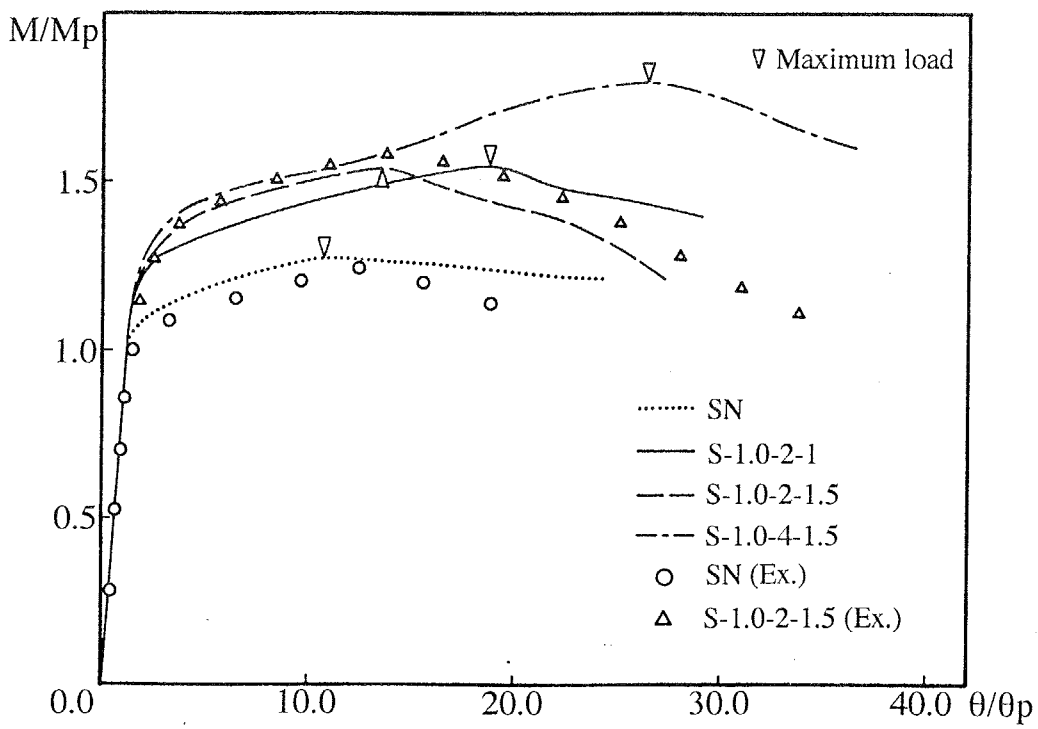
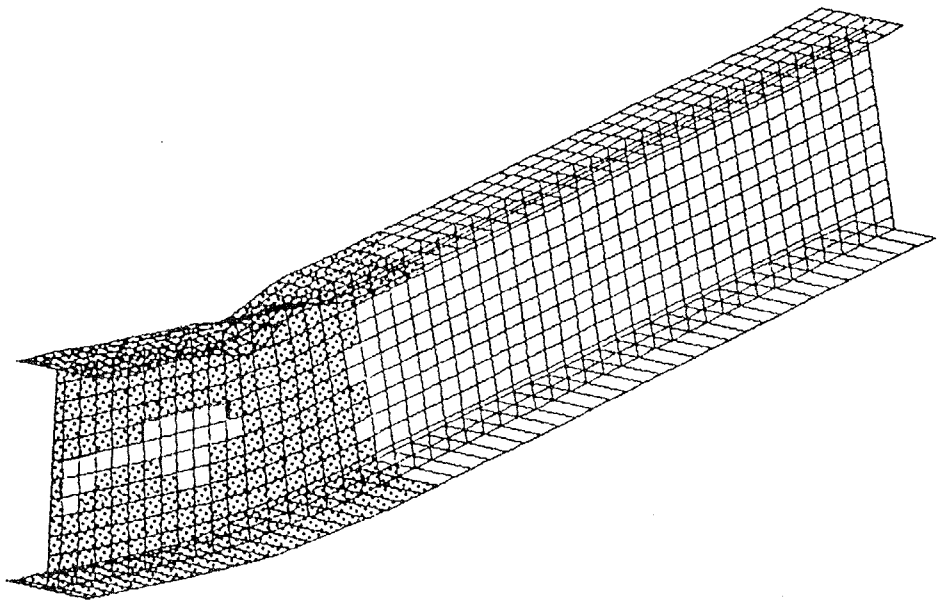
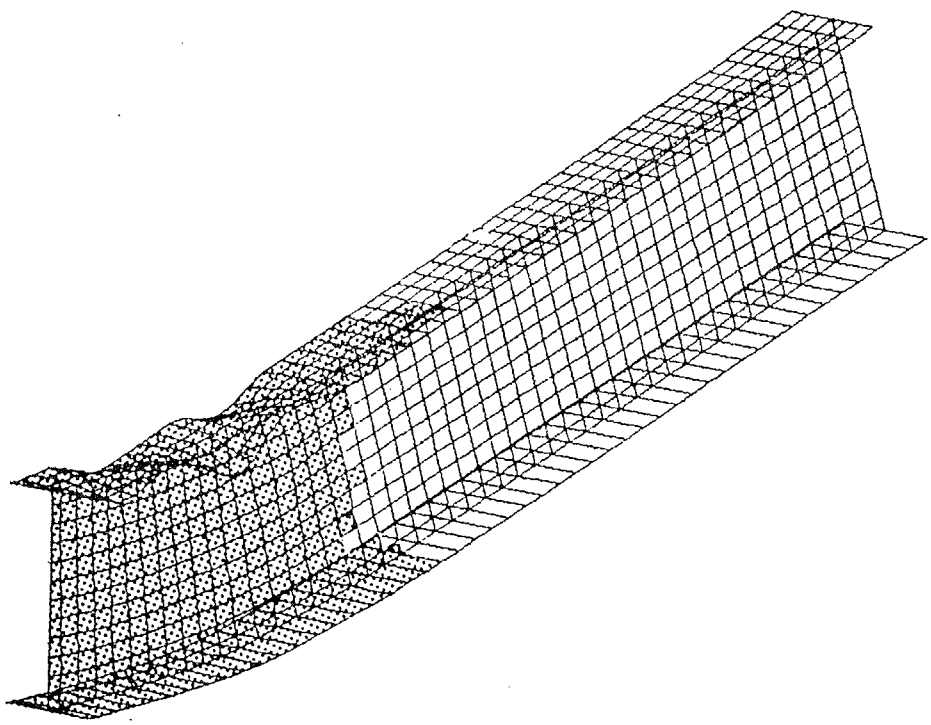


Fig. 5.11 M - θ relationships



S-1.0-2-1.5



S-1.0-4-1.5

Fig. 5.12 Deformation

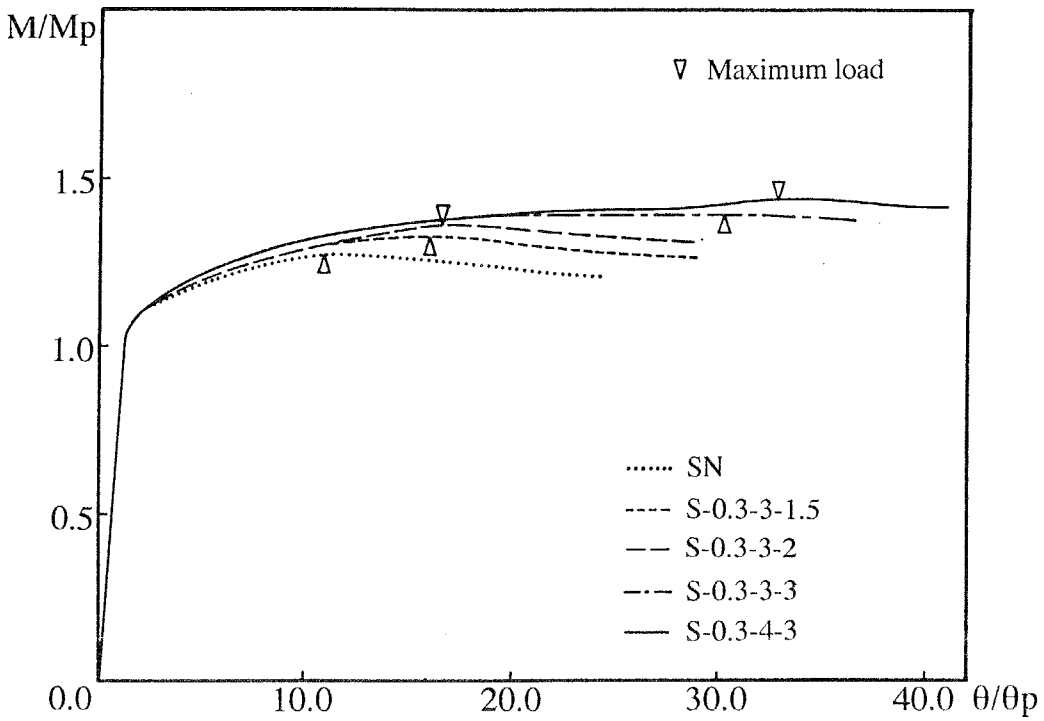


Fig. 5.13 M - θ relationships

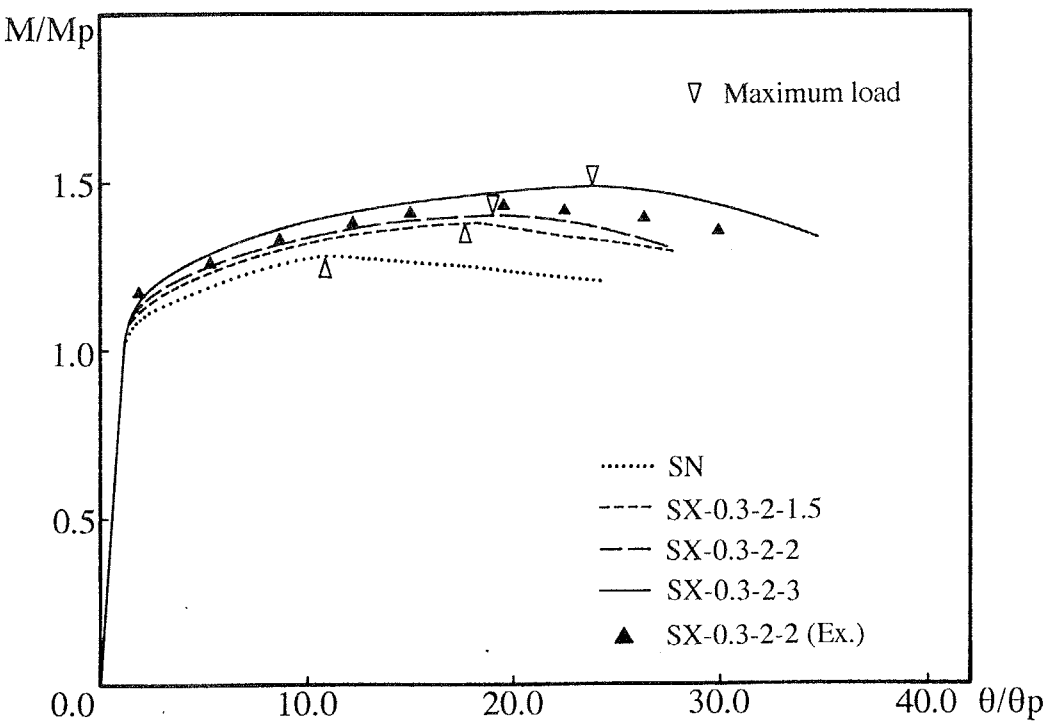


Fig. 5.14 M - θ relationships

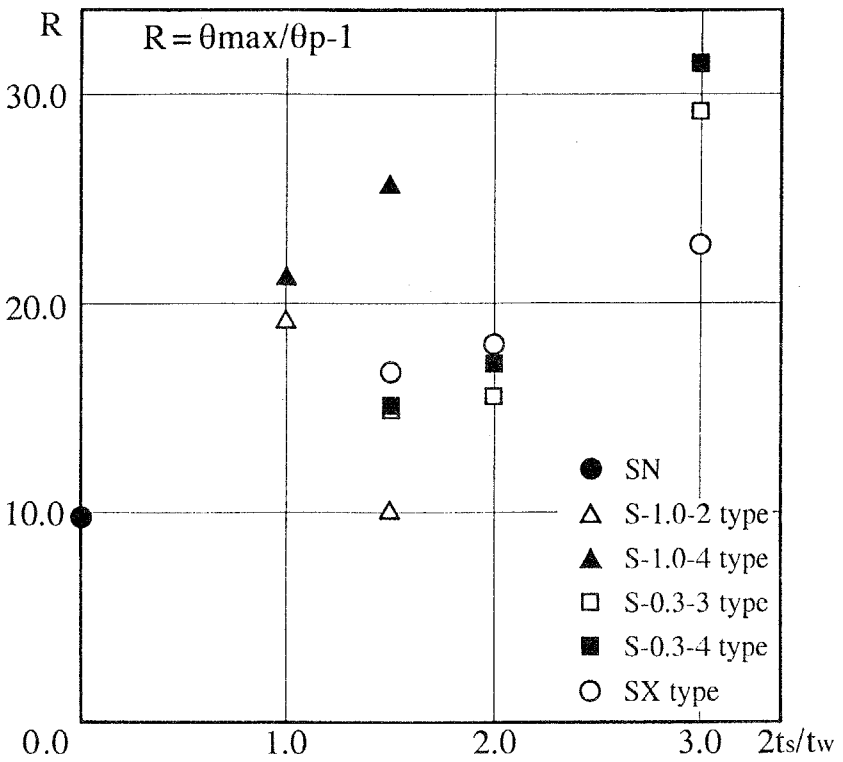


Fig. 5.15 Plastic deformation capacity

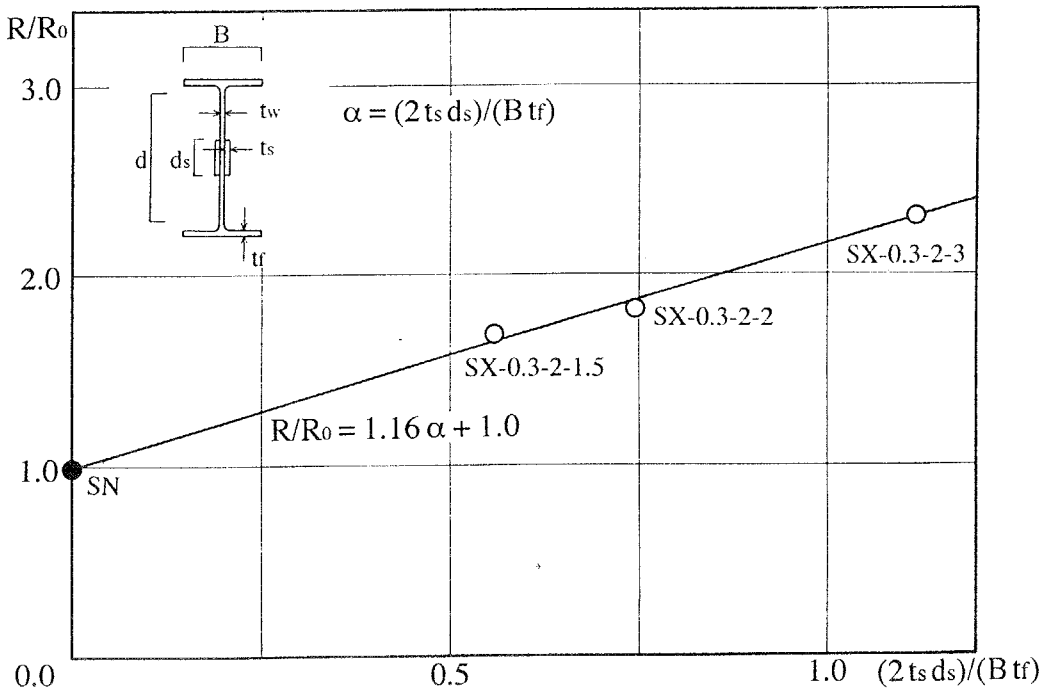


Fig. 5.16 Plastic deformation capacity

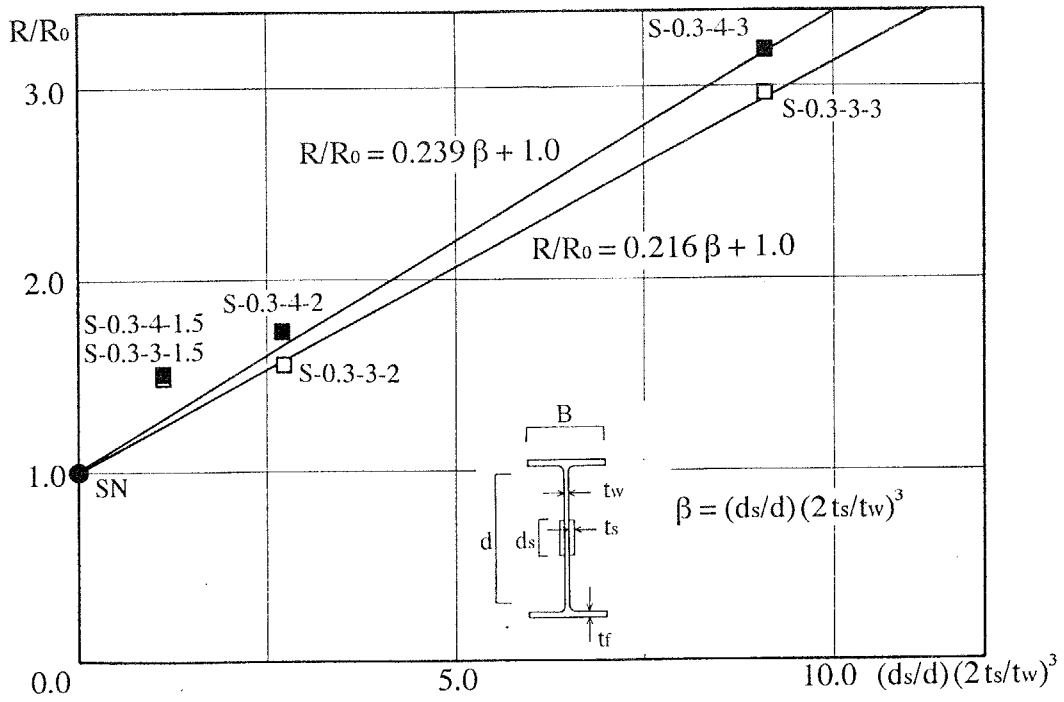


Fig. 5.17 Plastic deformation capacity

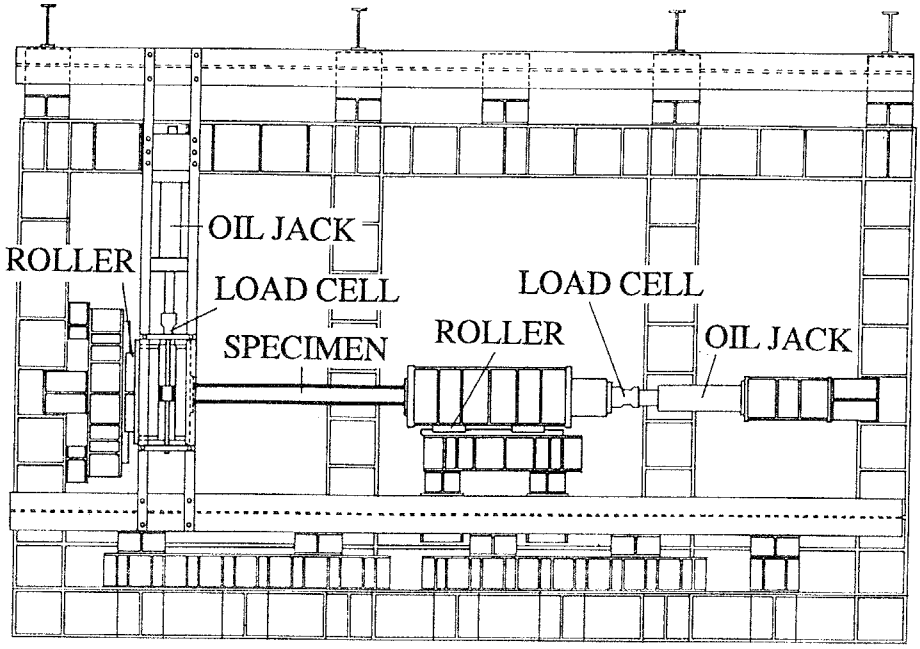


Fig. 5.18 Test setup

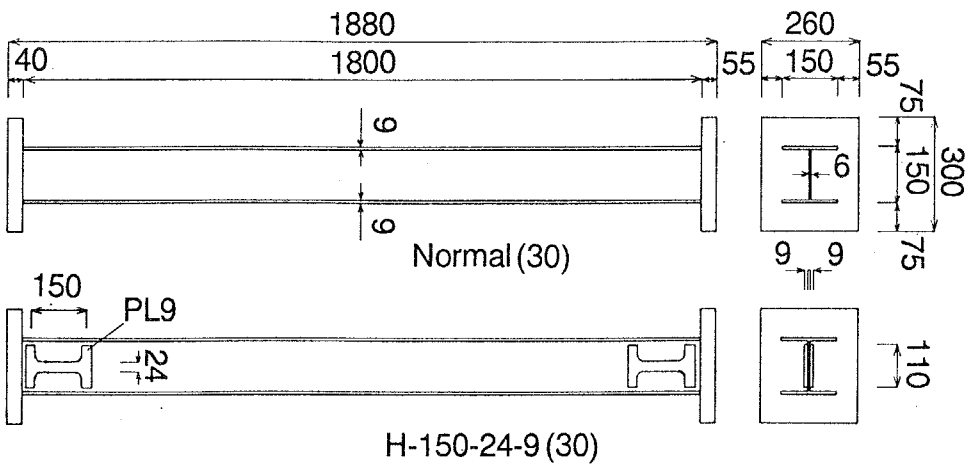


Fig. 5.19 Specimen of beam-column

Table 5.3 Mechanical properties

Test-piece (mm)		σy (t/cm^2)	σu (t/cm^2)	E (t/cm^2)	Est (t/cm^2)	εst
HT590	6	5.80	6.31	1993	26.0	0.035
HT590	9	5.40	6.15	2015	25.9	0.028

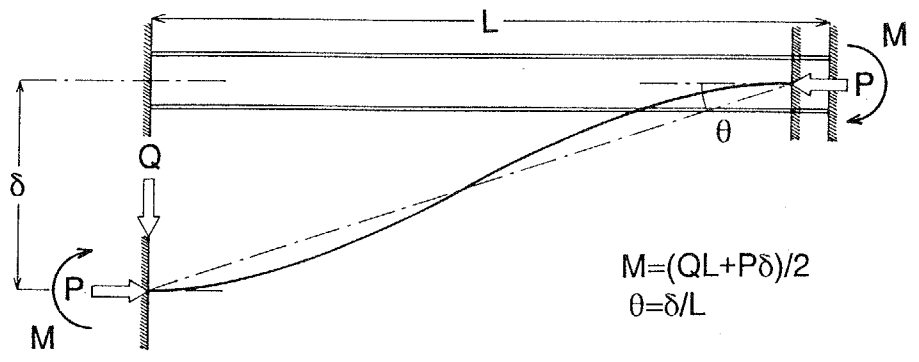


Fig. 5.20 Deflection mode

Table 5.4 Dimensions of specimen

Specimen	ls(mm)	ds(mm)	ts(mm)	P/Poy
Normal(30)	-	-	-	30
H-150-24-9(30)	150	24	24	30
H-150-24-18(30)	150	24	42	30
H-300-24-18(30)	300	24	24	30
H-300-36-18(30)	300	36	42	30
Normal(45)	-	-	-	45
H-300-36-18(45)	300	36	42	45

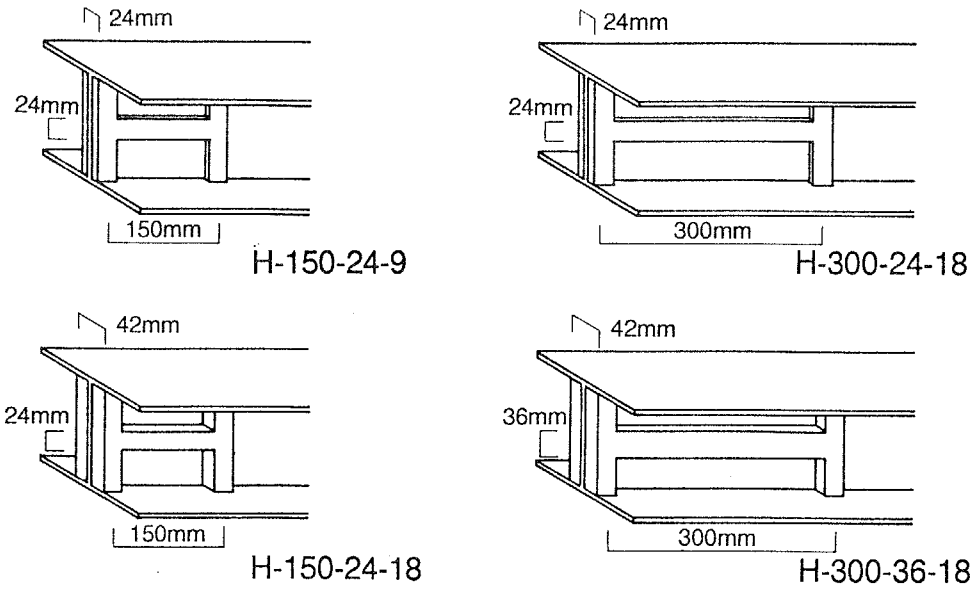


Fig. 5.21 Specimen of beam-column

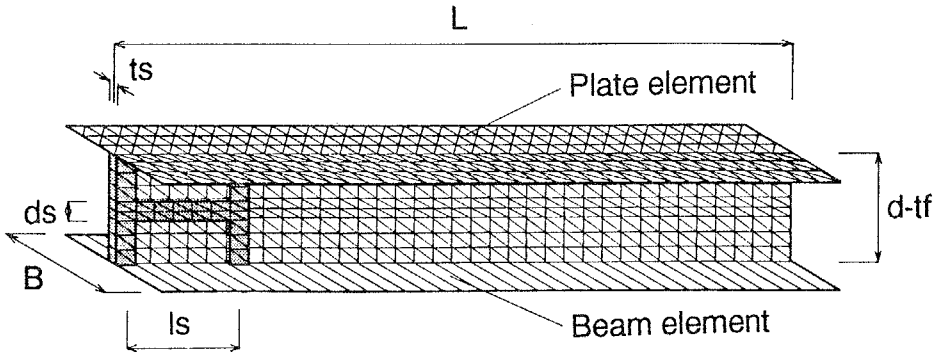


Fig. 5.22 Analytical model

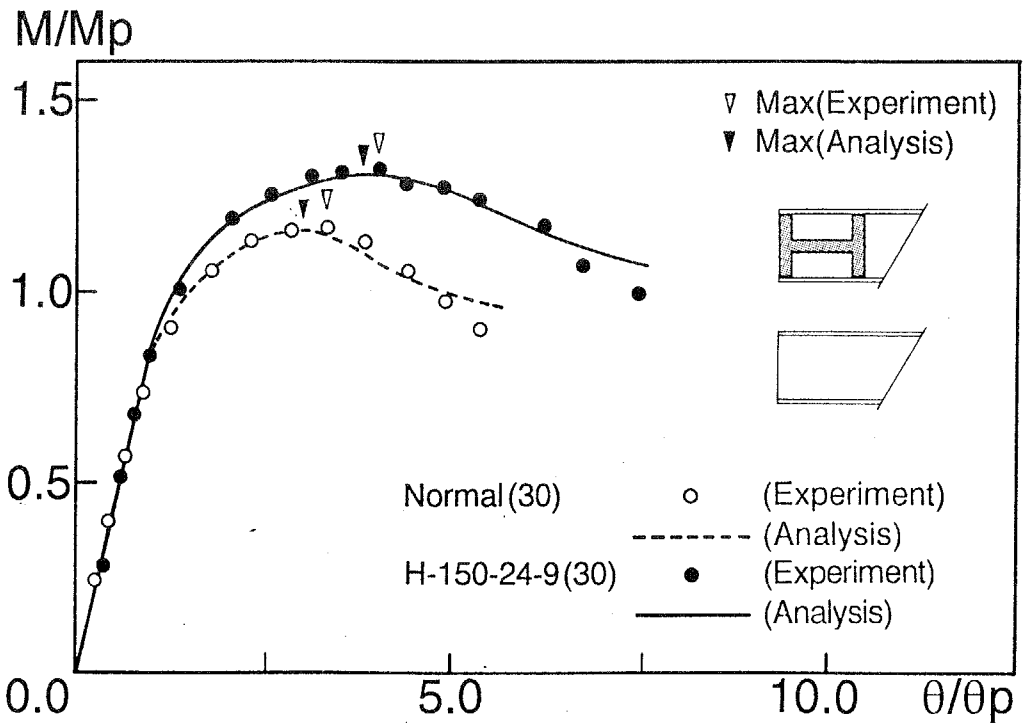


Fig. 5.23 M - θ relationships

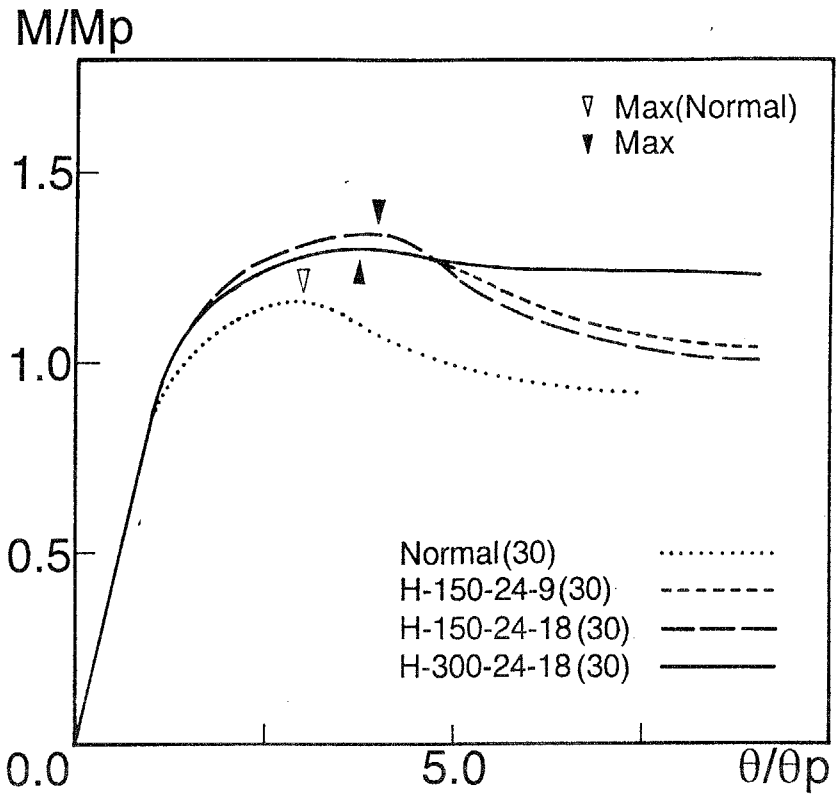


Fig. 5.24 M - θ relationships

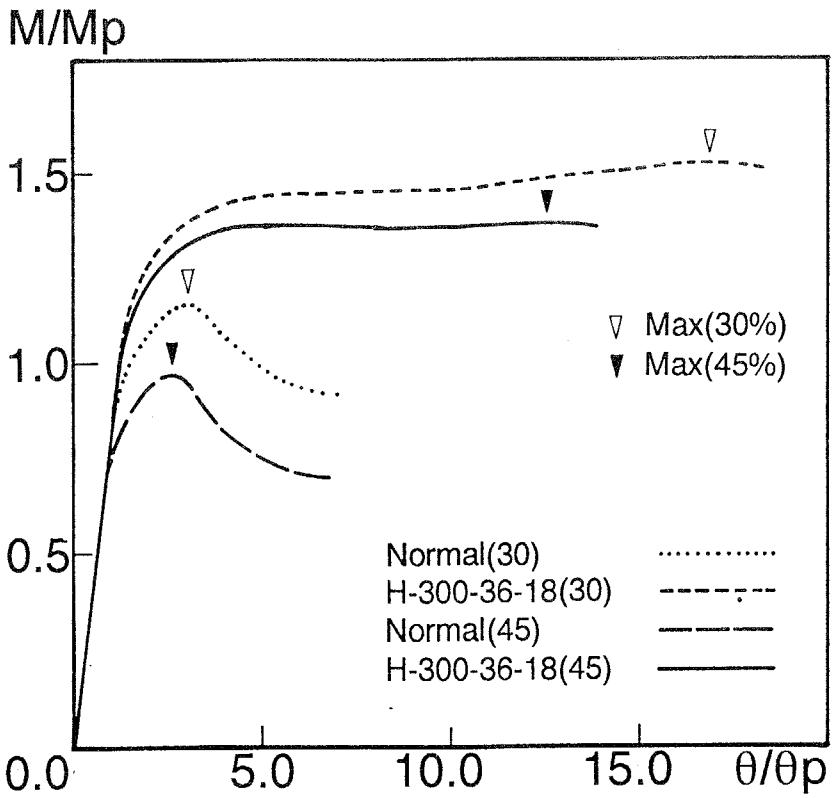


Fig. 5.25 M - θ relationships

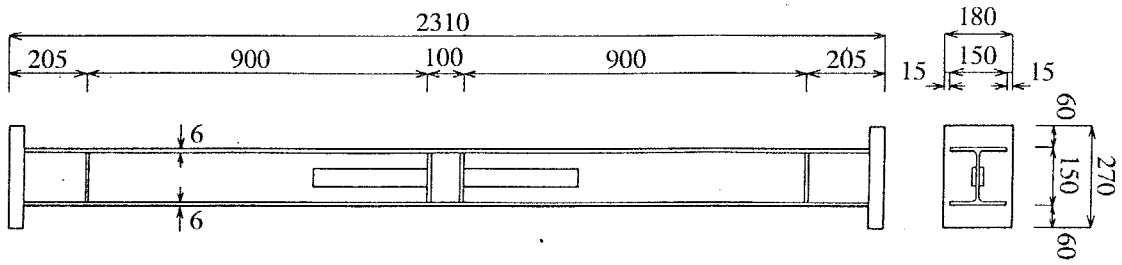


Fig. 5.26 Specimen of beam-column

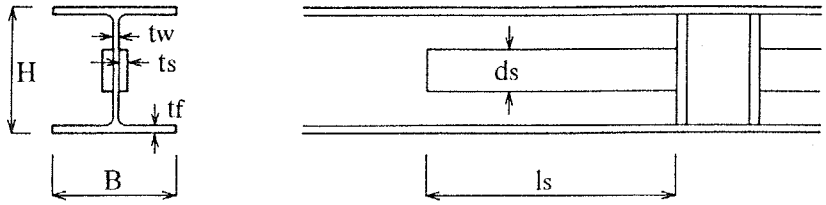


Fig. 5.27 Type of plate

Table 5.5 Dimensions of specimen

Specimen	ds(mm)	ts(mm)	ls(mm)	P/Pp	P/Poy
CLN-45	-	-	-	45	45
CL-4-1-3-45	50	6.0	300	45	62
CL-2-2-3-45	25	12.0	300	45	62
CL-4-1-5-45	50	6.0	450	45	62

Table 5.6 Mechanical properties

Test-piece (mm)		σy (t/cm^2)	σu (t/cm^2)	E (t/cm^2)	Est (t/cm^2)	εst (%)	YR	el. (%)
SS400	6	3.22	4.56	2123	25.3	2.33	0.71	27.8
SS400	9	2.87	4.55	2130	29.6	1.98	0.63	30.1
HT780	6	8.23	8.56	2097	9.6	2.01	0.96	10.5
HT780	12	8.05	8.54	2070	11.3	1.61	0.94	13.4

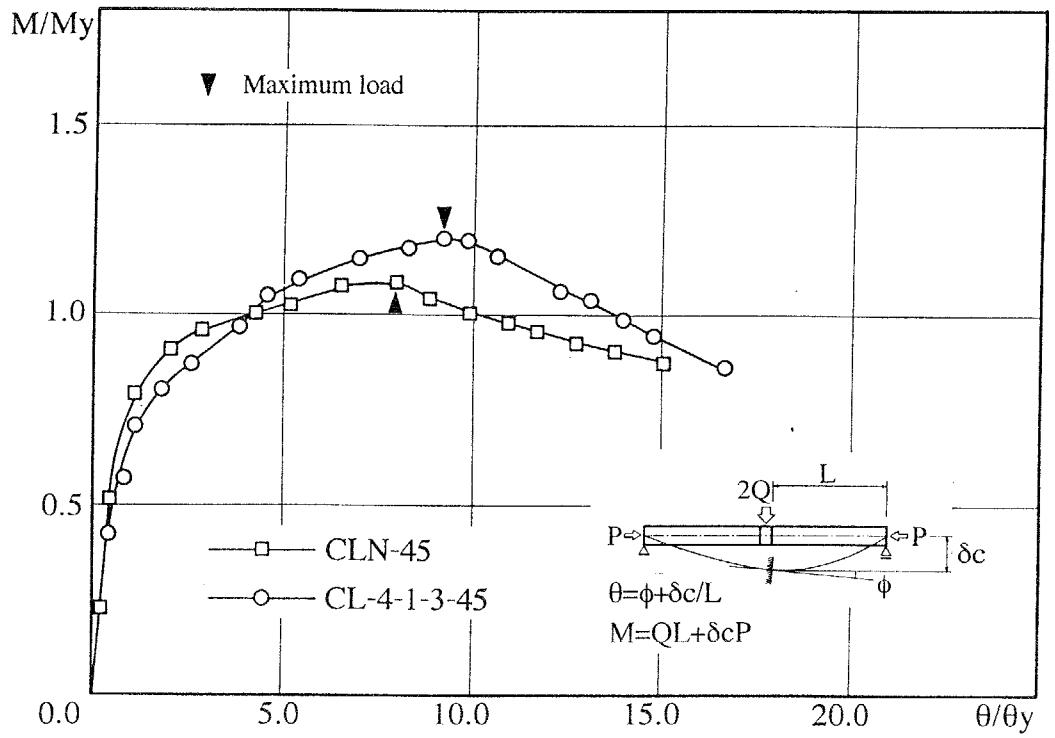


Fig. 5.28 M - θ relationships

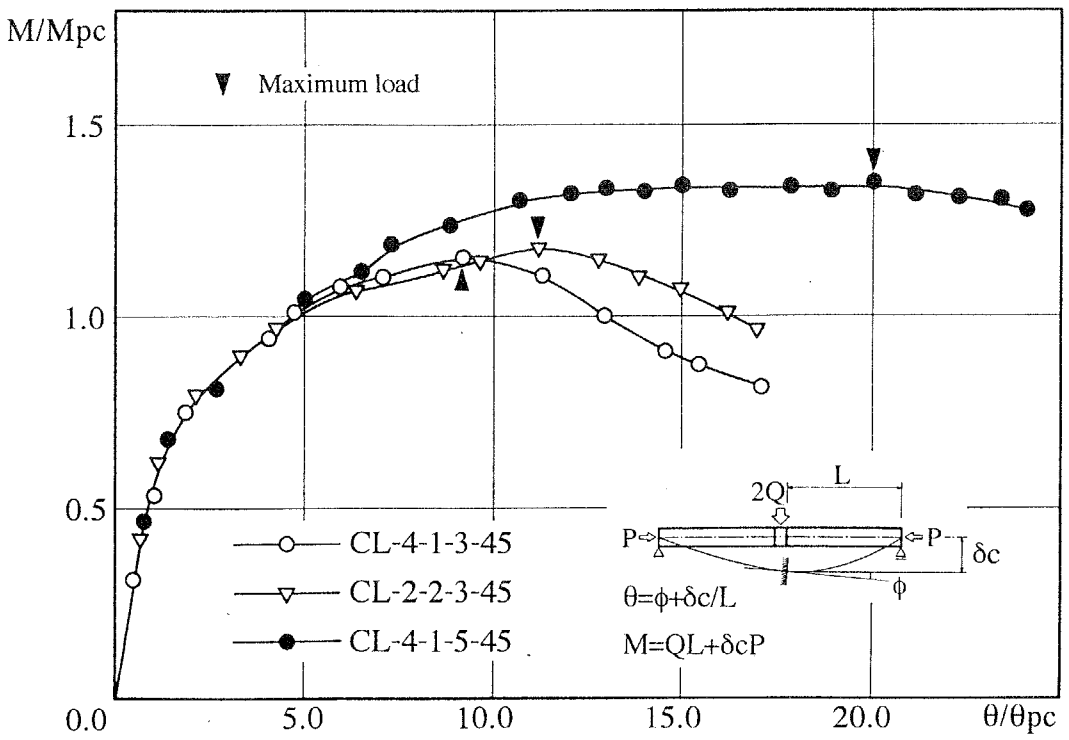


Fig. 5.29 M - θ relationships

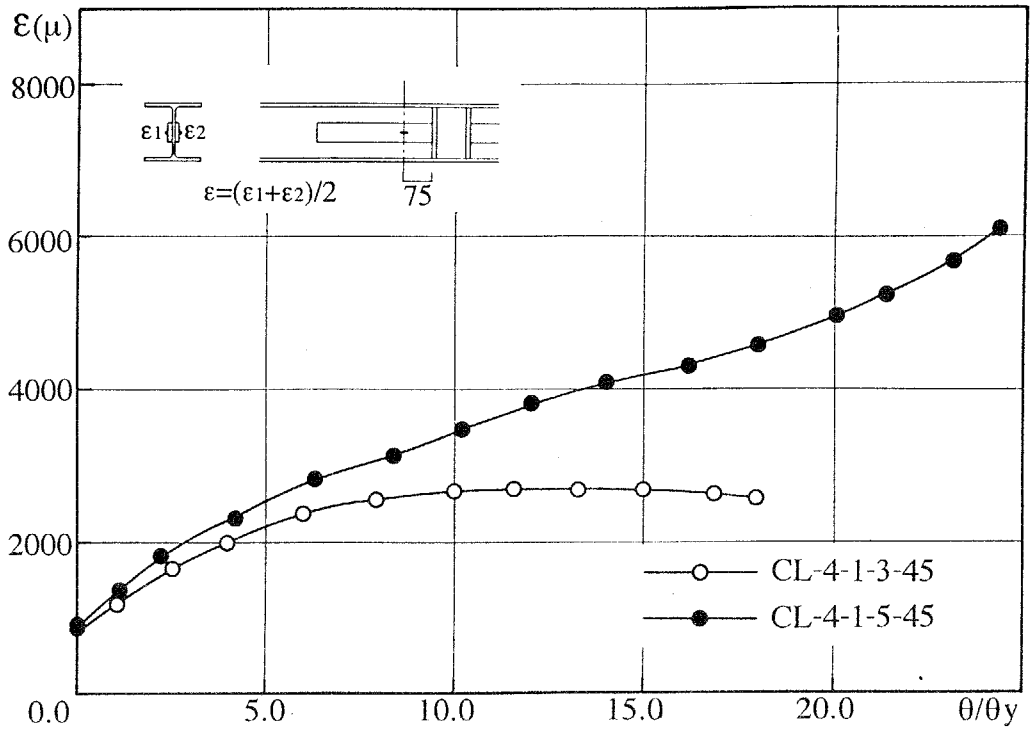


Fig. 5.30 Axial strain of the plate on neutral axis

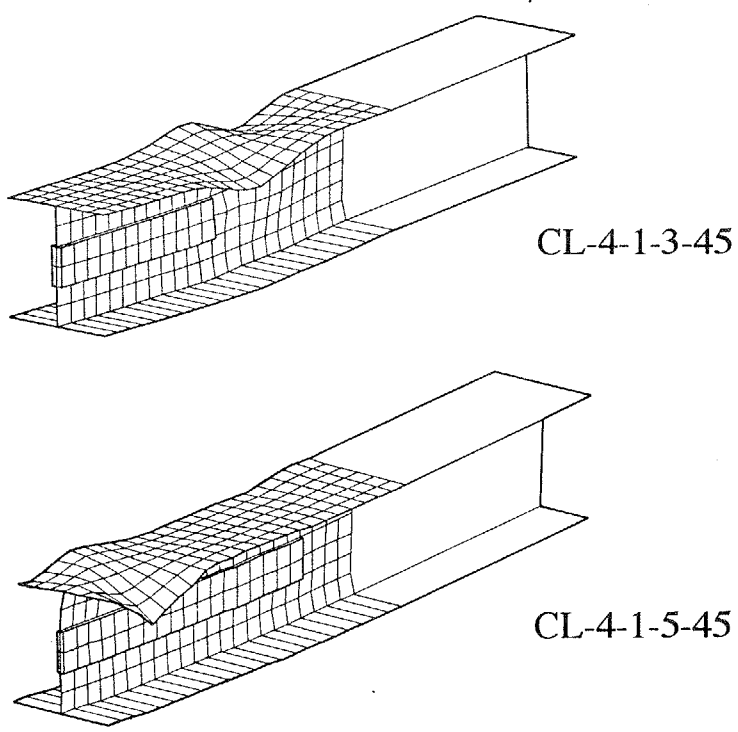


Fig. 5.31 Deformation

第 6 章　結論

本研究は，ウエブ板要素の強度を高めることにより，部材の塑性変形性能，最終的には高軸力を受けるH形鋼柱部材の曲げに対する耐力を高く保ち，その塑性変形性能を向上させることを目的とした。このウエブの強度を高めておく理由としては主に次の2つが上げられる。

1つは，鋼構造部材を構成する板要素の連成局部座屈，特にフランジ局部座屈が先行して耐力低下する部材においても，その耐力低下が顕著に現われるには連成しておこるウエブ局部座屈後であることに起因するものである。この場合，フランジの局部座屈に対してウエブが拘束作用を及ぼすことができ，同時にウエブも局部座屈しにくい状態にあれば部材としての塑性変形性能は向上することになる。

もう1つは，軸力と曲げを同時に受ける柱部材の場合，軸力を負担するのは，断面中心に位置する部位，つまりはウエブであり，これが高軸力の場合，フランジまでも軸力を負担しなければならにことである。ここで，ウエブだけで軸力を負担しきることができる，さらにはなるべく中立軸近傍のみで負担することができれば，フランジ，ウエブの一部も曲げ応力を負担することができ，柱部材の曲げ耐力は同じ軸力に対しても向上させることができ，塑性変形性能をも向上させることが可能となる。

以上のような観点に立ち，その具体的手法の1つとしてフランジには軟鋼を使用し，ウエブには高張力鋼を使用したハイブリッド断面を提案し，その力学性状を種々の載荷実験，数値解析を通して検討した。その結果，特長的な点として，曲げ耐力，塑性変形性能を向上させることはもちろんのこと，耐力劣化勾配も小さくできる等

の結論を得ている。また，フランジに軟鋼を使用していることから，その部材軸方向への塑性域の広がりが広く，塑性変形量を確保するのに有効に働いている。さらに高軸力下においても塑性中立軸をウエブ内に置くことが可能であることから，引張側フランジにも十分塑性域が進展している。また，このハイブリッド柱部材は軸力によるP-Δ効果の耐力劣化をも回復することが可能であり，最大水平耐力，最大耐力時水平変位も大きくすることが可能である。

このように現在広く使用されて，その特徴が十分に認識されている鋼材を効果的に断面内に配することにより，部材は高い耐力を有しつつもその靭性を向上させることができるようになる。このことは，近年，高張力鋼の靭性を改善する目的で開発された低ＹＲ鋼などの新素材にたよる必要性は薄いと言える。

さらにウエブの強度を上げておくという目的からすれば，通常用いられるようなウエブ板厚がフランジ板厚よりも薄いという断面形にこだわる必要もなく，ウエブ板厚を厚くしておくことは有効である。これは同一鋼種よりなる柱部材，ハイブリッド柱部材ともに変形性能に関して効果的に作用する。その板厚も本研究範囲ではフランジ板厚程度あればかなりの塑性変形性能を有することが認められた。

このウエブ板厚を厚くしておくことの必要性は，部材全体にわたるものではない。それは部材端モーメントの大きいところのみでかまわない。さらに，ウエブせい方向の幅もさほど高くしておくことは必要はない。これは，いままで述べてきたように，軸力を負担する中立軸近傍のみウエブ強度を上げておけば良いことに起因している。さらにウエブ局部座屈に対しても中立軸近傍のみで十分に対応

可能である。

このように中立軸近傍のみの板厚を厚くすることの効果は，今まで述べてきた連成局部座屈，軸力に対する効果のみではない。この新たな板要素により，圧縮フランジが局部座屈により耐力低下した後に，この耐力低下分を補うことが可能になっており，部材全体としては耐力を維持しつつ塑性変形をしつづけることができる。本研究では，この導入する板要素の形状等について検討を加え，導入方法に対して，ある程度の提案を行った。

ウエブの強度を上げるという目的からすればこの導入する鋼板は，高張力鋼を用いることが考えられるが，その効果は良好であり高軸力に対しても十分に塑性変形が可能である。

以上，本研究では，ウエブ板要素の強度，剛性を高めるということを大前提にして，ウエブに高張力鋼を用いたハイブリッド断面，さらにはウエブ中立軸上に新たな板要素を導入した断面を提案し，その部材性能を検討し，その有効性を示した。

本研究に関連して著者の発表した論文

＜本研究に関連して発表した論文＞

［　］内は共著者名を示す。

1）異種鋼材を用いたはり部材の連成局部座屈性状に関する研究
［鈴木敏郎，小河利行］
日本建築学会構造系論文報告集，第431号，1992.1，pp.25-32

2）異種鋼材を用いたH形断面短柱の連成局部座屈性状に関する研究
［鈴木敏郎，小河利行］
日本建築学会構造系論文報告集，第438号，1992.8，pp.147-155

3）異種鋼材を用いたH形鋼柱部材の塑性変形性状に関する研究
［鈴木敏郎，小河利行］
日本建築学会構造系論文報告集，（投稿中）

4）A Study on Local Buckling Behavior of Hybrid Beams
［Toshiro SUZUKI, Toshiyuki OGAWA］
Coupled Instabilities in Metal Structures, 1992.10,
pp.1-11

5）A Study on Local Buckling Behavior of Hybrid Beams
［Toshiro SUZUKI, Toshiyuki OGAWA］
Thin-Walled Structures, in press

6）鋼構造部材を構成する板要素の局部座屈に対する相互作用に関する研究（その1　概要および短柱実験）
［鈴木敏郎，小河利行，田沼良一，澤田毅］
日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），構造II，1991.9，
pp.1339-1340

7）鋼構造部材を構成する板要素の局部座屈に対する相互作用に関する

研究（その２　はり曲げ実験）
［鈴木敏郎，小河利行，田沼良一，澤田毅］
日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），構造II，1991.9，
pp.1341-1342

8）鋼構造部材を構成する板要素の局部座屈に対する相互作用に関する研究（その３　数値解析による一般性状）
［鈴木敏郎，小河利行，田沼良一，澤田毅］
日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），構造II，1991.9，
pp.1343-1344

9）高降伏点鋼はり部材の塑性変形性能改善に関する研究
［鈴木敏郎，小河利行］
日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），構造II，1992.8，
pp.1145-1146

10）鉄骨はり部材の塑性変形性能改善に関する研究（その１　実験）
［鈴木敏郎，小河利行，田沼良一，木村祥裕，石田大三］
日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），構造II，1992.8，
pp.1151-1152

11）鉄骨はり部材の塑性変形性能改善に関する研究（その２　解析）
［鈴木敏郎，小河利行，田沼良一，木村祥裕，石田大三］
日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），構造II，1992.8，
pp.1153-1154

12）ウエブ補強したH形鋼柱部材の塑性変形性状に関する研究
［鈴木敏郎，小河利行，久芳勝行］
日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），構造II，1993.9，
pp.1327-1328

13）異種鋼材を用いたH形鋼柱部材の塑性変形性状に関ヨする研究

［鈴木敏郎，小河利行，小岩和彦］
日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），構造II，1993.9，
pp.1329-1330

14）ウエブ補強したH形鋼梁部材の塑性変形性状に関する研究
［鈴木敏郎，小河利行，石田大三］
日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），構造II，1993.9，
pp.1455-1456

15）異種鋼材を用いたH形鋼柱部材の塑性変形性状に関する研究　その1　柱部材載荷実験
［鈴木敏郎，小河利行，牟田英児］
日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），構造II，1994.9，
（掲載予定）

16）異種鋼材を用いたH形鋼柱部材の塑性変形性状に関する研究　その2　塑性変形能力評価
［鈴木敏郎，小河利行，牟田英児］
日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），構造II，1994.9，
（掲載予定）

17）中立軸上に高張力鋼板を添接したH形鋼柱部材の塑性変形性状
［鈴木敏郎，小河利行，小岩和彦］
日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），構造II，1994.9，
（掲載予定）

＜その他著者の発表した論文＞

［　］内は共著者名を示す。

1）ランダムな形状初期不整を有する剛接合単層トラスドームの弾性座屈解析

［鈴木敏郎，小河利行，田中美知］

日本建築学会構造系論文報告集，第418号，1990.12，pp.109-116

2）ボール接合単層ラチスドームの座屈実験及び弾塑性座屈解析－中央集中荷重を受ける部分球形ドームについて－

［鈴木敏郎，小河利行，久保寺勲］

日本建築学会構造系論文報告集，第444号，1993.2，pp.53-62

3）Experimental and Theoretical Study of a Single Layer Reticulated Dome

［Toshiro SUZUKI, Toshiyuki OGAWA, Isao KUBODERA］

Proceedings of the International IASS Symposium, 1991.9, pp.85-92

4）Elastic Buckling Analysis of Rigidly Jointed Single Layer Reticulated Domes with Random Initial Imperfection

［Toshiro SUZUKI, Toshiyuki OGAWA］

International Journal of Space Structures, Volume 7, No.4, 1992, pp.265-273

5）Elasto-Plastic Buckling Analysis of Rigidly Jointed Single Layer Reticulated Domes

［Toshiro SUZUKI, Toshiyuki OGAWA］

International Journal of Space Structures, Volume 7, No.4, 1992, pp.363-368

6）プリズム要素による厚肉構造の解析
［鈴木敏郎，小河利行］
第39回応用力学連合講演会，平成元年12月，pp.127-130

7）Adaptive Grid Method による有限要素流れ解析
［小河利行，吉川秀章］
日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），情報システム技術，1989.10，pp.1259-1260

8）剛接合単層トラスドームの座屈実験
［鈴木敏郎，小河利行，久保寺勲，石田俊久］
日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），構造I，1990.10，pp.1269-1270

9）剛接合単層トラスドームの弾塑性座屈解析
［鈴木敏郎，小河利行，石田俊久］
日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），構造I，1990.10，pp.1285-1286

10）H形断面はり部材の横座屈耐力向上に関する研究
［鈴木敏郎，小河利行，中川治雄，岡田創］
日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），構造II，1992.8，pp.1147-1148

11）中間材を導入した鋼管トラス梁の塑性変形能力に関する実験研究
［鈴木敏郎，小河利行，本間通康］
日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），構造II，1992.8，pp.1149-1150

12）中間材を導入した鋼管トラス梁の構造特性に関する研究

［鈴木敏郎，小河利行，本間通康，山下靖彦］

日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），構造II，1993.9，pp.1367-1368

13）フランジを局部座屈補剛した鋼構造柱部材の塑性変形性状に関する研究

［鈴木敏郎，小河利行，杉野義人］

日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），構造II，1993.9，pp.1469-1470

参考文献

＜参考文献＞

1）Geerhard Haaijer：Economy of High Strength Steel Structural Members, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ST8, pp.1~23, December, 1961

2）Ronald W. Frost, and Charles G. Schilling：Behavior of Hybrid Beams Subjected to Static Loads, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ST3, pp.55~88, June, 1964

3）Charles G. Schilling：Bending Behavior of Composite Hybrid Beams, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ST8, pp.1945~1964, August, 1968

4）Phillip S. Carskaddan：Shear Buckling of Unstiffened Hybrid Beams, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ST8, pp.1965~1990, August, 1968

5）藤原勝義，高田弘志：溶接H形はりの耐力に関する研究（その３），日本建築学会近畿支部研究報告集，構造II，pp.177~180，昭和48－6

6）藤原勝義，稲継典彦，稲井田洋二：溶接H形ばりの耐力に関する研究（その４），日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.265~268，昭和52年5月

7）藤原勝義，稲継典彦，太田みほ子：溶接H形梁の耐力に関する研究（その６），日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.257~260，昭和54年6月

8）藤原勝義，薩川隆史，土壁邦雄：異種鋼材ばり設計に関する一考察，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.201~204，昭和57年6月

9）山田稔，辻文三：ハイブリッド断面材の変形硬化解析，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.289~292，昭和52年5月

10）山田稔，辻文三，村瀬欣伸：軸圧を受けるハイブリッドH形断面柱の弾塑性曲げ変形性状に関する研究，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.293~296，昭和52年5月

11）山田稔，辻文三，泉祐司：軸圧を受けるハイブリッドH形断面柱の弾塑性曲げ変形性状に関する研究（II：定変位交番繰り返し載荷実験－N＝1/3Ny），日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.293~296，昭和53年5月

12）山田稔，辻文三，泉祐司：軸圧を受けるハイブリッドH形断面柱の弾塑性曲げ変形性状に関する研究（III：定軸圧のもとでのせん断スパン比の影響－解析），日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.293~296，昭和54年6月

13）辻文三，吉田和彦：ハイブリッドH形断面柱のせん断変形挙動解析，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.269~272，平成2年度

14）辻文三，中島正愛，吉田和彦，渡辺隆：ハイブリッドH形断面柱の曲げせん断変形挙動，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.293~296，平成3年度

15）木村衛，金子洋文，大島基義：ハイブリッド梁の塑性変形能力について，日本建築学会大会講演梗概集（九州），pp.1325~1326，1989年10月

16）木村衛，金子洋文，大島基義：ハイブリッド梁の塑性変形能力について（2），日本建築学会大会講演梗概集（中国），pp.1239~1240，1990年10月

17）藤原勝義，大谷康則，郡幸雄：異種鋼材はりの耐力と変形能力に関する研究（その1）－耐力推定式について－，日本建築学会大会講演梗概集（九州），pp.1327~1328，1989年10月

18）藤原勝義，大谷康則，郡幸雄：異種鋼材はりの耐力と変形能力に関する研究（その2）－荷重－変形関係のモデル化－，日本建築学会大会講演梗概集（九州），pp.1329~1330，1989年10月

19）藤原勝義，大藤大助，郡幸雄：異種鋼材溶接H形鋼の短柱実験，日本建築学会大会講演梗概集（中国），pp.1479~1480，1990年10月

20）藤原勝義，東畑慎治：異種の鋼材を用いた溶接H形鋼の柱はり接合部に関する研究（その8），日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.269~272，昭和52年5月

21）藤原勝義，大藤大助，郡幸雄：異種鋼材溶接H形鋼の力学的特性に

基礎的実験，日本建築学会大会講演梗概集（中国），pp.1237~1238，1990年10月

22) M. Yamada, B. Tsuji: Behaviour of Hybrid Beam-Columns under Cyclic Loading, International Association for Bridge and Structural Engineering, Tenth Congress, pp.325~328, 1976.9

23) 鈴木敏郎，小野徹郎：高張力鋼梁の塑性設計に関する研究－＜塑性設計梁に関する実験的研究（5）＞－，日本建築学会論文報告集，第219号，pp.39-45，1974.5

24) 加藤勉：高張力鋼の高層建築物への利用，製鉄研究，第321号，pp.1-7，1986.4

25) 桑村仁，志村保美：降伏比の異なる高張力鋼梁の曲げ実験，日本建築学会大会講演梗概集（近畿），pp.873~874，昭和62年10月

26) 桑村仁：降伏比の異なる鋼材を用いた梁－柱の面内弾塑性挙動に関する解析，日本建築学会大会講演梗概集（近畿），pp.845~855，昭和62年10月

27) 桑村仁：降伏比の異なる高張力鋼を用いたH形断面短柱の終局強度と変形能力について，構造工学論文集，Vol.34B，pp.151-160，1988.3

28) 桑村仁：短柱の圧縮挙動に及ぼす鋼材の応力－歪特性の影響（その1．十字形断面の場合），日本建築学会大会講演梗概集（関東），pp.1099~1100，昭和63年10月

39) 桑村仁，鈴木孝彦：短柱の圧縮挙動に及ぼす鋼材の応力－歪特性の影響（その2．箱形断面の場合），日本建築学会大会講演梗概集（関東），pp.1101~1102，昭和63年10月

30) 井上哲郎，西村功，桑村仁，折原信吾：十字形断面鋼鈑の座屈性状に及ぼす鋼材質の相違の影響，日本建築学会大会講演梗概集（関東），pp.1097~1098，昭和63年10月

31) 井上哲郎，桑村仁：降伏棚のある低ＹＲ高張力鋼短柱の応力－歪特性（十字形断面），日本建築学会大会講演梗概集（九州），pp.1043~1044，1989年10月

32) 秋山宏，桑村仁，山田哲，城戸雄太，上遠野明夫：鋼素材の性質を

パラメーターとした短柱圧縮試験（その１．素材引張試験ならびに箱形断面短柱圧縮試験），日本建築学会大会講演梗概集（北陸），pp.1245~1246，1992年8月

33）秋山宏，桑村仁，山田哲，城戸雄太，上遠野明夫：鋼素材の性質をパラメーターとした短柱圧縮試験（その２．H形断面短柱圧縮試験），日本建築学会大会講演梗概集（北陸），pp.1247~1248，1992年8月

34）緑川光正，山内泰之，向井昭義，長谷川隆：鋼材の降伏比と鉄骨部材の変形能力（その１．はり単調載荷実験），日本建築学会大会講演梗概集（東北），pp.1353~1354，1991年9月

35）向井昭義，長谷川隆，緑川光正，山内泰之：鋼材の降伏比と鉄骨部材の変形能力（その２．短柱圧縮試験），日本建築学会大会講演梗概集（北陸），pp.1239~1240，1992年8月

36）向井昭義，長谷川隆，緑川光正，山内泰之：鋼材の降伏比と鉄骨部材の変形能力（その３．変断面材の変形能力），日本建築学会大会講演梗概集（関東），pp.1141~1186，1993年9月

37）鈴木弘之，近藤明洋：高性能鋼柱部部材の耐力，日本建築学会大会講演梗概集（中国），pp.1475~1476，1990年10月

38）加藤勉，中島雅躬：高性能鋼柱の耐力と変形能力に関する実験的研究－その１：実験計画および実験結果－，日本建築学会大会講演梗概集（東北），pp.1259~1260，1991年9月

39）加藤勉，中島雅躬：高性能鋼柱の耐力と変形能力に関する実験的研究－その２：実験結果の検討－，日本建築学会大会講演梗概集（東北），pp.1261~1262，1991年9月

40）宇田川邦明：60キロ級高性能鋼梁・柱の変形性能と耐力，日本建築学会大会講演梗概集（関東），pp.1325~1335，1993年9月

41）高梨晃一，孟令樺，嶋脇与助，桑村仁，鈴木孝彦：低ＹＲ高張力鋼骨組の耐力と変形性能，日本建築学会大会講演梗概集（九州），pp.1033~1034，1989年10月

42）高梨晃一，孟令樺，近藤日出夫，桑村仁，鈴木孝彦：低ＹＲ高張力鋼骨組のオンライン地震応答実験，日本建築学会大会講演梗概集（九州），pp.1035~1036，1989年10月

43) 加藤勉，山田哲，栗野治彦：H形断面ステンレス鋼部材の最大耐力と変形能力（その1：短柱の最大耐力），日本建築学会大会講演梗概集（九州），pp.1063~1064，1989年10月

44) 加藤勉，山田哲，栗野治彦：H形断面ステンレス鋼部材の最大耐力と変形能力（その2：部材の変形能力），日本建築学会大会講演梗概集（九州），pp.1065~1066，1989年10月

45) 加藤勉，松下吉男：金属系新素材・新材料の利用技術の開発（建設省総合プロジェクト・新素材）　その76「局部座屈を伴う閉断面ステンレス鋼部材の最大耐力」，日本建築学会大会講演梗概集（関東），pp.1185~1186，1993年9月

46) M. G. Lay: Flange Local Buckling in Wide-Flange Shapes, Proc. of ASCE, Vol.91 , ST6, pp.95-116, 1965

47) 田中尚，高梨晃一，角田忠之：プラスチックヒンジにおけるウェブ幅フランジ幅の制限に関する研究（6），日本建築学会論文報告集，第136号，PP.8-14，1967.6

48) 井上哲郎：十字形断面鋼板の塑性座屈，日本建築 学会論文報告集，第422号，pp.117-122，1991.4

49) 鈴木敏郎，小野徹郎，金箱温春：せん断曲げを受ける鉄骨H型断面梁の局部座屈挙動と塑性変形能力，日本建築学会論文報告集，第260号，pp.91-98，1977.10

50) 鈴木敏郎，金子洋文：有限要素法による部材構成板要素の座屈及び座屈後挙動の大変形解析，日本建築学会論文報告集，第316号，pp.9-17，1982.6

51) 鈴木敏郎，金子洋文：鋼構造部材構成板要素相互の弾塑性連成局部座屈挙動の解析法，日本建築学会論文報告集，第323号，pp.23-31，1983.1

52) G. Augusti: Experimental Rotation Capacity of Steel Beam-Columns, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.90, ST6, pp.171~188, June, 1968

53) T. V. Galambos, M. G. Lay: Studies of the Ductility of Steel Structures, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.91, ST4, pp.125~151, April,

1965

54) 加藤勉，秋山宏，内田直樹：鋼構造部材の耐力（その１），日本建築学会論文報告集，第119号，pp.22～30，昭和41年1月

55) 山田稔，坂恵一巳，田所敏幸，白川潔：軸圧を受けるH形鋼柱の弾塑性曲げ変形性状に関する研究Ⅰ：一方向載荷時における曲げモーメント曲率関係並びに曲げ変形性状，日本建築学会論文報告集，第127号，pp.8～14，昭和41年9月

56) 加藤勉，秋山宏，山崎直司：H形断面材の塑性曲げ捩れ座屈実験，日本建築学会論文報告集，第222号，pp.11~22，1974.8

57) 加藤勉，秋山宏：H形断面柱の塑性曲げ捩れ座屈解析，日本建築学会論文報告集，第264号，pp.61~71，1978.2

58) 加藤勉，秋山宏，帯洋一：局部座屈を伴うH形断面部材の変形，日本建築学会論文報告集，第257号，pp.49~57，1977.7

59) 牧野稔，松井千秋，三谷勲：H形鋼柱の局部座屈後の変形性状（その１），日本建築学会論文報告集，第281号，pp.71~80，1979.7

60) 牧野稔，松井千秋，三谷勲：H形鋼柱の局部座屈後の変形性状（その２），日本建築学会論文報告集，第286号，pp.23~28，1979.12

61) 牧野稔，松井千秋，三谷勲：H形鋼柱の局部座屈後の変形性状（その３），日本建築学会論文報告集，第288号，pp.49~58，1980.2

62) 牧野稔，松井千秋，三谷勲：H形鋼柱の局部座屈後の変形性状（その４），日本建築学会論文報告集，第290号，pp.45~55，1980.4

63) 鈴木敏郎，小野徹郎：圧縮と曲げを受ける鉄骨H形断面柱の塑性変形能力に関する研究（その１），日本建築学会論文報告集，第292号，pp.23~29，1980.6

64) M. Nakashima, T. Nakamura, and M. Wakabayashi: Post-Buckling Instability of Steel Beam-Column, Vol.109, ST6, pp.1414~1430, June, 1983

65) 松井千秋，森野捷輔，木村潤一：水平力を受けるH形鋼柱の弾塑性曲げ捩れ座屈に関する実験的研究，日本建築学会論文報告集，第344号，pp.33~42，1984.10

66) 三谷勲，山崎達司，林原光司郎，今門一弘：複曲率曲げを受けるH

形鋼柱の塑性変形能力に及ぼす軸力比および曲げモーメント比の影響，日本建築学会論文報告集，第370号，pp.69~80，1986.12

67）三谷勲，今門一弘：複曲率曲げを受けるH形鋼柱の塑性変形能力評価式，日本建築学会論文報告集，第379号，pp.71~78，1987.9

68）三谷勲，牧野稔，松井千秋：H形鋼柱の局部座屈後の変形性状に関する解析的研究，その1　単調載荷を受ける場合，日本建築学会論文報告集，第296号，pp.37～47，昭和55年10月

69）三谷勲，牧野稔，松井千秋：H形鋼柱の局部座屈後の変形性状に関する解析的研究，その2　繰返し荷重を受ける場合，日本建築学会論文報告集，第301号，pp.77～87，昭和56年3月

70）興田香二，今井克彦，黒羽啓明，小川厚治：幅厚比の大きい溶接H形鋼ばりの変形挙動，日本建築学会構造系論文報告集，第397号，pp.60～71，1989年3月

71）興田香二，今井克彦，黒羽啓明，小川厚治：幅厚比の大きいH形断面曲げ材の荷重一変形挙動に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文報告集，第402号，pp.89～99，1989年8月

72）興田香二，今井克彦，黒羽啓明，小川厚治：幅厚比の大きいH形断面曲げ材の変形挙動予測に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第411号，pp.83～96，1990年5月

73）加藤勉，井上哲郎：高張力鋼箱形断面部材の局部座屈と変形能力，日本建築学会構造系論文報告集，第444号，pp.115～123，1993年2月

74）加藤勉，中尾雅躬：局部座屈に支配されるH形断面部材の耐力と変形能力，日本建築学会構造系論文報告集，第　号，pp.　～　，
年　月

75）秋山宏，桑村仁，山田哲：局部座屈を伴う箱形断面鋼部材の劣化域を含む終局挙動，日本建築学会構造系論文報告集，第444号，pp.135～143，1993年2月

76）秋山宏，桑村仁，山田哲：局部座屈を伴うH形断面鋼部材の劣化挙動，日本建築学会構造系論文報告集，第454号，pp.179～186，1993年12月

77）鈴木敏郎，酒井新吉，鵜飼司郎，青木俊夫，木村克次：箱形断面柱

部材の弾塑性挙動に関する実験的研究（その２．リブによる補強効果について），日本建築学会大会学術講演梗概集（構造系），pp.2069~2070，1981.9

78）鈴木敏郎，酒井新吉，鵜飼司郎，青木俊夫，木村克次：スチフナ補剛箱形断面柱部材の変形性状について，日本建築学会大会学術講演梗概集（構造系），pp.1919~1920，1982.10

79）松井千秋，森野捷輔，津田恵吾，椎葉喜一：角形鋼管柱部材の局部座屈補強法に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（構造系），pp.1367~1368，1983.9，

80）山田大彦，山田聖志，木村衛，金子洋文：水平スチフナーをもつ箱形断面柱の補剛間隔に関する基礎的研究（柱要素の軸圧縮試験），日本建築学会大会学術講演梗概集（構造系），pp.1283~1284，1984.10

81）山田大彦，山田聖志，木村衛，金子洋文，平野範彰，伊藤栄俊：水平スチフナーを内蔵する箱形断面柱の変形能力に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（構造系），pp.1285~1286，1984.10

82）山田大彦，山田聖志，平野範彰，最上公章，木村衛：水平スチフナーを内蔵する角形断面柱の変形能力に関する実験的研究　その２，日本建築学会大会学術講演梗概集（構造II），pp.841~842，1987.10

83）三谷勲，林原光司郎：H形鋼柱の塑性変形能力改善に関する実験的研究（その２　実験結果の考察），日本建築学会大会学術講演梗概集（構造系），pp.1915~1916，1982.10

84）井上哲郎，秋山宏：せん断降伏型H形断面部材の荷重-変形関係，日本建築学会論文報告集，第348号，pp.52-60，1985.2

85）加藤勉：閉断面部材の局部座屈と変形能力，日本建築学会構造系論文報告集，No.378，pp.27~36，1987.8

86）日本建築学会：鋼構造設計規準，1970

87）日本建築学会：鋼構造塑性設計指針，1975

88）日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能，1990.10