Architectural Institute of Japan

【カテゴリーⅡ】

日本建築学会構造系論文集 第73巻 第633号, 2027-2036, 2008年11月
J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol. 73 No. 633, 2027-2036, Nov., 2008

ガセットプレートの存在が周辺部材の力学挙動に及ぼす影響

ダンパーを組み込んだ靭性骨組の総合的な耐震性能の向上　その2

EXPERIMENTAL EVALUATION OF STRUCTURAL BEHAVIOR OF STEEL MEMBER AFFECTED BY THE PRESENCE OF GUSSET PLATE

Global enhancement of seismic performance of passive-controlled structures　Part 2

吉敷祥一*, 植草雅浩**, 和田　章***

Shoichi KISHIKI, Masahiro UEKUSA and Akira WADA

The majority of experimental studies on damage-controlled structures have tested isolated dampers or simple subassemblages which neglect the influence of the framing components and the gusset-plate on the system performance. In this paper, cyclic loading tests of six frame subassemblages with the gusset-plate connection to investigate effects of the presence of the gusset-plate on structural behavior of the beam. The gusset-plate led to increase in initial elastic stiffness and yield strength of the beam. Meanwhile, damage to beam-column joint panel subjected to high shear stress was decreased by the gusset-plate. Finally, based on the cyclic loading tests of the beam with the gusset-plate connection, the simplified analysis model considering the gusset-plate working as a knee brace was proposed.

Keywords : *damage-controlled structure, buckling-restrained brace, gusset-plate, steel beam, cyclic loading test*

損傷制御構造，座屈拘束ブレース，ガセットプレート，鋼製梁，繰り返し載荷実験

1. 序

損傷制御構造は地震時のエネルギー吸収を座屈拘束ブレースに代表されるダンパーに期待し，柱梁からなる主架構を弾性または限定された塑性変形の範囲に留めようとするものである[1]．エネルギー吸収を期待するダンパーについては実大部材を含めた数多くの実験が行われ，その性能が確認されてきた[2]．しかし，これらは理想的な条件の下で検討されたものが多く[3]，接合部における応力伝達や，接合部の存在が周辺部材に及ぼす影響についてはほとんど議論されていない．近年，米国で行われた部分架構の実験においてはガセットプレート溶接部近傍からの破断が報告され[4),5]，国内では接合部であるガセットプレートやK形ブレースの交叉部分の梁を含めた座屈拘束ブレースの構面外座屈問題が指摘されている[6)~9]．損傷制御構造の耐震性能は，優れたダンパーを架構内にバランスよく設置するだけでなく，接合部やその周辺部材を含めて総合的に検討されるべきである．

著者ら[10]はダンパーとして座屈拘束ブレースを組み込んだ部分架構の載荷実験を行い，接合部であるガセットプレートにおける応力伝達や周辺部材の力学挙動に関する基礎データを得た．この実験ではガセットプレートの存在によって架構の剛性・耐力の上昇が確認できたが，これらの影響を部材レベルで定量的に評価するには至っていない．そこで本論文ではまず座屈拘束ブレースからの軸力伝達の影響を排除し，柱梁交叉部に取り付けたガセットプレートの存在が周辺部材の力学挙動に及ぼす影響を明らかにする．ガセットプレートを柱梁交叉部に取り付けることで柱梁の見かけの断面は大きくなるが，これは梁せいを端部で意図的に大きくした鉛直ハンチ[11]や三角リブ補強[12),13]，あるいは造船や機械分野で古くから検討されてきた補強方法[14),15]などと類似する効果が予想される．従来の補強部では円滑な応力伝達が行われるように応力勾配に沿って緩やかに断面を大きくすることが意識されるため，例えば鉛直ハンチを簡易に取り付けようとする場合[16]には補強部における応力伝達の検討が重要となる．しかし，ガセットプレートは主架構にブレースあるいはブレース型ダンパーを設置するための接合部であるため，これまでは周辺部材の力学挙動に及ぼす影響は検討されていない．

本論文ではガセットプレートの存在が周辺部材の力学挙動に及ぼす影響を把握するため，柱梁交叉部にガセットプレートを取り付けた鋼部材の繰り返し載荷実験を行う．またガセットプレートの形状をパラメータとした実験[17]などは少なく，ここではガセットプレートの形状の違いによる影響に関して基礎データを得る．さらにガセットプレートの存在が周辺部材に及ぼす影響を反映できる力学モデルを構築し，実験結果との比較から有効性を確認する．なお，本論文で得られる知見はブレース型ダンパーからの軸力伝達や床スラブの存在が及ぼす影響を含めて議論されるべきであり，これらの検討は稿を改めて報告する．

* 東京工業大学建築物理研究センター　助教・博士(工学)
Assistant Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

** 元東京工業大学大学院　修士課程
Former Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

*** 東京工業大学建築物理研究センター　教授・工博
Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

NII-Electronic Library Service

2．ガセットプレートを有する鋼部材の繰り返し載荷実験

2.1. 実験計画

2.1.1. 試験体

本研究ではまず，ガセットプレートの存在が周辺部材の力学挙動に及ぼす影響を把握するため，鋼部材の繰り返し載荷実験を行った．試験体の概要を図1に示す．試験体は柱・梁からなるト字形の部分架構であり，柱梁交叉部分にガセットプレートを有する．試験体の寸法はスパン6.4m，階高4.4mの実大中層鋼構造建物の一部分を想定し，その寸法を1/2に縮小した．

実験は主に梁の力学挙動に着目し，実験の目的によってAシリーズ，Bシリーズに大別される．試験体一覧を表1に示す．試験体に取り付けたガセットプレートとその周辺部の詳細を図2(a)～(f)に示し，それぞれのガセットプレートの特徴を表2にまとめる．部材のせいと幅といった基本寸法は統一し，梁断面をAシリーズでは圧延H形鋼H-300x150x6.5x9(SS400)，Bシリーズでは溶接組立H形鋼H-300x150x9x12(SS400)とした．柱断面には冷間成形角形鋼管□-250x250x12(BCR295)あるいは圧延H形鋼H-250x250x9x14(SM490)を用いた．なお，柱をH形断面とした場合には柱梁接合部パネルの塑性化を回避するためにダブラープレート(2×PL-6(SM490))による補強を施した．試験体に使用した主な鋼材のJIS-1A号引張試験片による素材試験結果を表3に示す．以下では，シリーズごとに実験の目的とガセットプレート周辺部の詳細を示す．

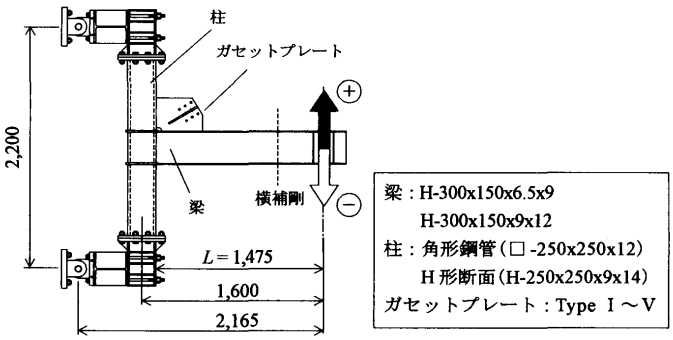


図1　試験体の概要

【A シリーズ】

このシリーズは，ガセットプレートの存在そのものが周辺部材の力学挙動に及ぼす影響を考察するための試験体群である．実験パラメータは，柱断面(角形鋼管，H形)，ガセットプレートの有無とし，これらを組み合わせた計4体の試験体を用意した．また，ガセットプレートに対する周辺部材の拘束に差を付ける目的で柱梁への補強についてもパラメータとした．すなわち，柱を角形鋼管とした試験体(BOX_G)では柱梁にスチフナ補強を一切施さず，柱をH形断面とした試験体(H_G)ではガセットプレート先端部の柱と梁にそれぞれのウェブプレートと同厚の鋼板を用いてスチフナ補強を施した．なお，これらの試験体は前報[10]で行った架構実験と同様の詳細を有するものであり，同一ロットの鋼材によって製作した．

【B シリーズ】

このシリーズは，ガセットプレートの形状の違いが周辺部材の力学挙動に及ぼす影響に着目した試験体群である．基準となる試験体WELDのガセットプレートは，ガセットプレート端部のまわし溶接を行わなかった点を除けば柱をH形断面としたAシリーズの試験体(H_G)とほぼ同様の詳細を有する．この試験体は2体用意し，載荷開始方向を変えることで履歴挙動に及ぼす載荷方向の影響を考察した．さらにガセットプレートの板厚を16mmか

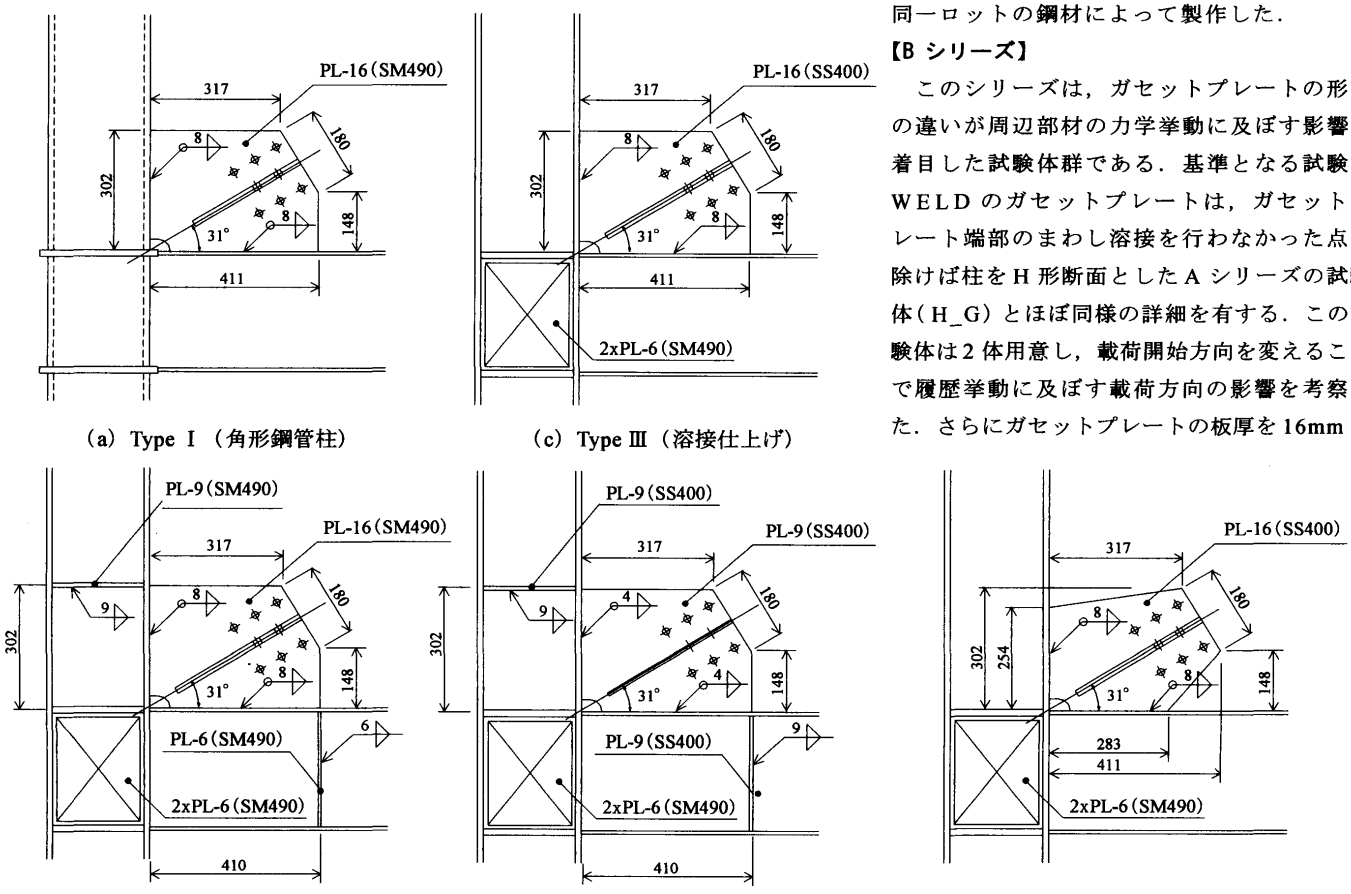


図2　ガセットプレートとその周辺部分の詳細

NII-Electronic Library Service

ら9mmに薄くした試験体THIN，ガセットプレートの形状を変化させた試験体TAPERの2体を用意した．試験体TAPERの形状は，ブレース軸力の拡がりをガセットプレート先端の接合ボルトから60°とした[18]際に必要な溶接部を確保した形状となっている．後者の2体では，Aシリーズの試験体群と同様にガセットプレート端部のまわし溶接を行って製作した．またBシリーズではガセットプレートが薄く面外座屈が生じると予想された試験体THINのみに柱梁のスチフナ補強を施した．

2.1.2. 載荷方法

実験は図3に示すように試験体の柱両端部をピン治具で支持し，梁の自由端に接続したオイルジャッキにより強制変位を与えて行った．梁の載荷点位置と柱のピン支持位置は，想定したスパンと階高の中央を反曲点として定めた．なお，載荷中は図1中の破線位置で梁の横補剛を施した．載荷は弾性載荷（±30～40kN）を行った後，図3に示す載荷プログラムに従って行った．載荷プログラムは梁の変形δ_Bをせん断スパンLで除した梁の部材角Rによって制御し，目標変形を±1/200，±1/100，±1/50，±1/33，±1/25，±1/20rad.とする正負交番の漸増変位振幅載荷とした．なお，ここで用いた梁のせん断スパンLは，ガセットプレートの有無に関わらず，載荷点位置から梁端部までの1475mmとした．試験体によっては同一振幅で2回の繰り返し載荷を行ったものもあるが，同一振幅での繰り返し数は1回を基本とした．載荷開始方向をパラメータとした試験体WELDについては，正側から載荷を開始したWELD(+)では±1/50rad.終了後にストローク限界まで負側に一方向載荷を行い，負側から載荷を開始したWELD(−)では正負を反転させた上記の載荷プログラムに従った．試験体の荷重と変形の正負は，図1に示すようにガセットプレート側が曲げ圧縮となる時を正方向と定義した．

2.2. ガセットプレートの存在が力学挙動に及ぼす影響

2.2.1. 実験結果の概要

Aシリーズの試験体について，実験より得られた梁の全体挙動をせん断力ー部材角関係（$Q-R$）として図4に示す．せん断力Qはジャッキに取り付けたロードセルによる計測値であり，部材角Rは制御に用いた値である．図は柱断面ごとにガセットプレートの有無による違いを比較できるように示した．また，梁の横座屈が顕著となった±1/25rad.載荷以降は実験を中止した試験体があるため，履歴挙動は参考値として破線で示した．いずれの試験体も±1/50rad.までは安定した紡錘型の履歴曲線を示し，それ以降は梁のフランジとウェブに発生した局部座屈の進展に伴う耐力劣化が見られた．実験前に試験体に塗布した消石灰は±1/100rad.載荷時に梁フランジで剥離し始め，塑性化の開始が確認できた．さらに±1/50rad.載荷時では梁ウェブの消石灰が剥離し始め，梁フランジの局部座屈も観察された．これら塑性化に伴う消石灰の剥離や局部座屈の発生は，純鉄骨梁では梁端部に，ガセットプレートを付与した梁ではガセットプレート先端部近傍において観察された．ガセットプレートを取り付けた梁の上フランジと，ガセットプレート先端部にスチフナ補強を施した梁の下フランジではガセットプレート先端部より載荷点側に局部座屈が発生したが，スチフナ補強を施していない梁の下フランジでは座屈波形の中心がガセットプレート先端部の直下となる位置に局部座屈が発生した．この局部座屈の発生位置の違いにより，スチフナ補強を施した試験体H_Gの最大耐力が無補強の試験体BOX_Gよりも7%程度大きくなっている．なお，ガセットプレートを付与した梁のフランジに発生した局部座屈の座屈波1波分は，純鉄骨梁の局部座屈と同様にフランジ幅とほぼ等しい長さであった[19]．また，ガセットプレートを付与することによる弾性剛性と耐力の上昇は，載荷初期からの繰り返し履歴挙動において顕著に現れている．

2.2.2. 接合部近傍における応力伝達

次いでガセットプレート近傍における応力伝達を考察する．ガセットプレート近傍の主応力分布と，柱梁の負担曲げモーメント分布を図5に示す．主応力分布はガセットプレートあるいは梁ウェブに貼付した三軸ひずみゲージより算出した．柱梁の負担曲げモーメントについては，柱と梁に貼付した一軸ひずみ

表1　試験体一覧

試験体名		梁断面	柱断面	ガセットプレート
A	BOX_B	H-300x150x6.5x9	□-250x250x12	なし
	BOX_G	〃	〃	Type Ⅰ
	H_B	〃	H-250x250x9x16	なし
	H_G	〃	〃	Type Ⅱ
B	WELD	H-300x150x9x12	H-250x250x9x16	Type Ⅲ
	THIN	〃	〃	Type Ⅳ
	TAPE	〃	〃	Type Ⅴ

表2　ガセットプレートの特徴

試験体			板厚(鋼種)	柱梁へのスチフナ補強	G.PLの特徴
A	BOX_G	Type Ⅰ	PL-16 (SM490)	×	標準
	H_G	Type Ⅱ	〃	○	〃
B	WELD	Type Ⅲ	PL-16 (SS400)	×	標準(回し溶接なし)
	THIN	Type Ⅳ	PL-9 (SS400)	○	板厚がうすい
	TAPER	Type Ⅴ	PL-16 (SS400)	×	形状が異なる

表3　使用鋼材の素材試験結果

使用部位(鋼種)				降伏点 [N/mm²]	引張強さ [N/mm²]	降伏比 [%]	破断伸び [%]
A	梁	H-300x150x6.5x9 (SS400)	flange	342	461	74	29
			web	406	490	83	22
	G.PL	PL-16 (SM490A)		400	536	75	27
B	梁	H-300x150x9x12 (SS400)	flange	257	387	66	30
			web	282	430	66	28
	G.PL	PL-9 (SS400)		〃	〃	〃	〃
		PL-16 (SS400)		287	438	66	31

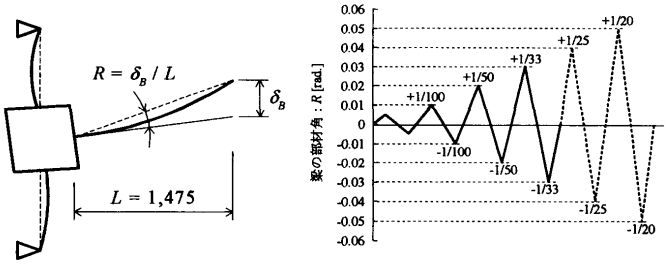
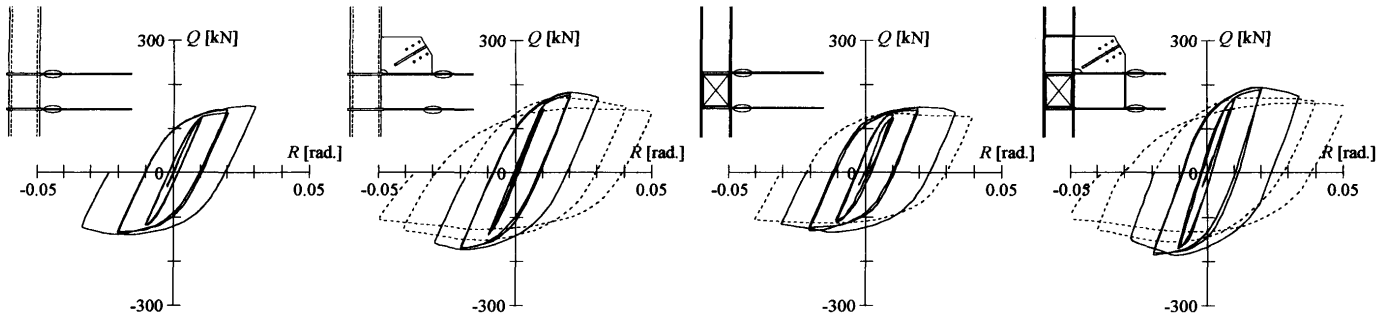


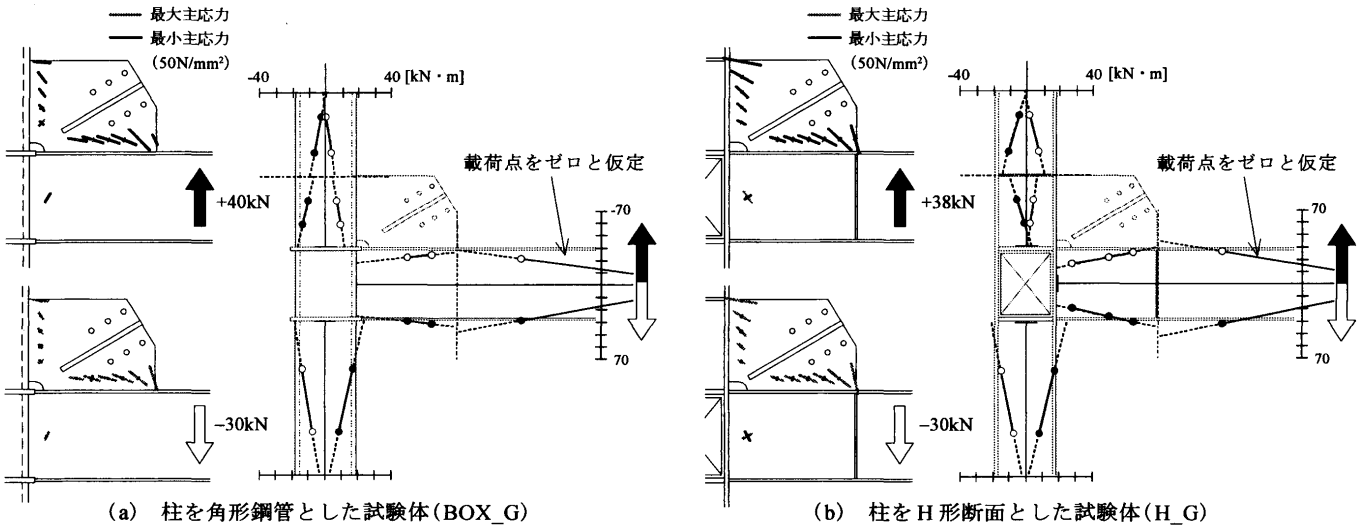
図3　制御変形の定義と載荷プログラム

NII-Electronic Library Service



(a) 柱を角形鋼管とした試験体(BOX_B, BOX_G)　　(b) 柱をH形断面とした試験体(H_B, H_G)

図4　Aシリーズ試験体群の履歴挙動(梁のせん断力(Q)－部材角(R)関係)



(a)　柱を角形鋼管とした試験体(BOX_G)　　(b)　柱をH形断面とした試験体(H_G)

図5　ガセットプレート近傍の主応力分布と柱梁部材の負担曲げモーメント分布

ゲージを用い，前報[10]と同様に柱梁断面内の平面保持を仮定して得た曲率から求めた．また，曲げモーメントの分布はひずみゲージの貼付位置におけるプロットを線形補間するとともに，その勾配をガセットプレート先端部まで延長して破線で示した．この際に載荷点位置の曲げモーメントはゼロとした．なお，いずれの図もひずみゲージが使用鋼材の降伏ひずみ以下であることが確認できた弾性載荷における分布を示した．ガセットプレート近傍の主応力分布に着目すると，ガセットプレートと柱梁の接合面において先端部にいくほど主応力が大きくなっている．また，主応力方向は柱梁接合部近傍では柱梁の材軸方向とほぼ一致しているが，先端部にいくほど主応力方向と材軸方向のなす角度が大きい．これらの応力分布はガセットプレート先端部において柱梁とガセットプレートの間で応力伝達が行われていることを示している．また，このガセットプレート先端部における柱梁との応力伝達は，柱梁の負担曲げモーメント分布においても顕著に現れている．すなわち，柱梁の負担曲げモーメントの勾配はガセットプレート先端部を境に反転し，柱梁に作用するせん断力の方向が逆転している．ガセットプレート直下に作用しているせん断力が載荷方向と異なることは梁端ウェブの主応力方向からも確認できる．また，実験より得られた柱梁の負担曲げモーメントの勾配をガセットプレート先端部まで延長して求めた曲げモーメントを見ると，ガセットプレート先端部の曲げモーメントが釣り合っていないことが分かる．これ

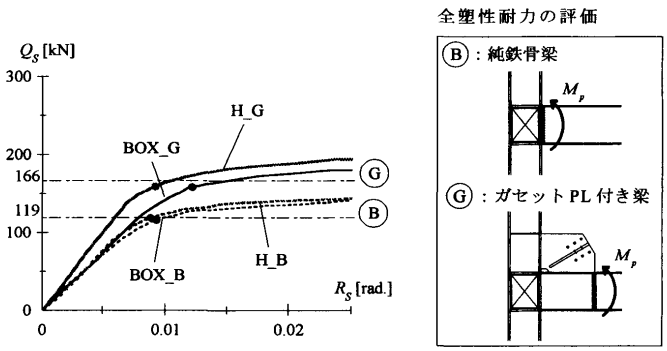


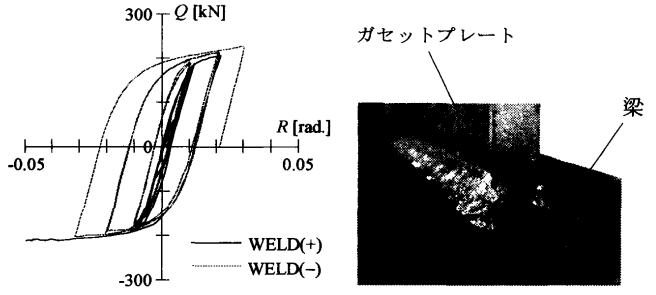
図6　Aシリーズ試験体群の正側骨格曲線の比較

表4　弾性剛性と全塑性耐力(Aシリーズ)

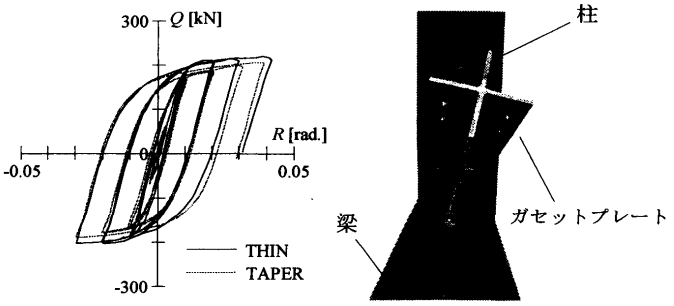
試験体	弾性剛性※1 [kN/rad.]	剛性上昇※3	全塑性耐力※2 [kN]	耐力上昇※3
BOX_B	16000	—	117	—
BOX_G	17000	1.06	158	1.35
H_B	17500	—	119	—
H_G	22000	1.26	159	1.34

※1　正側骨格曲線における初期剛性
※2　正側骨格曲線における接線剛性が弾性剛性の1/3となる点の荷重
※3　純鉄骨梁にガセットプレートを付与したことによる上昇
(＝ガセットプレート付き梁／純鉄骨梁)

NII-Electronic Library Service



(a) まわし溶接を行わなかった試験体(WELD(+), WELD(−))



(b) 形状をパラメータとした試験体(THIN, TAPER)

図7 Bシリーズ試験体群の履歴挙動(梁のせん断力(Q)ー部材角(R)関係)と損傷状況

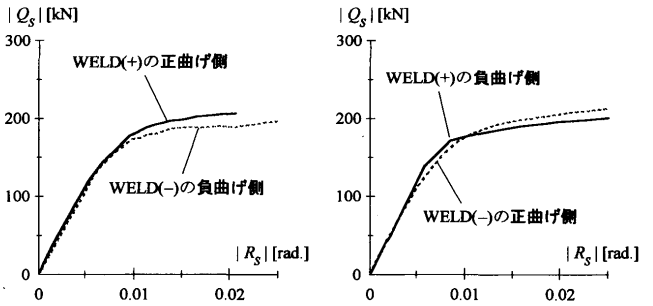
はガセットプレート先端部における応力伝達に伴って柱梁に偏心曲げが作用したためであると考えられる.

次いで柱断面の違いによる応力伝達を比較すると,柱を角形鋼管とした試験体ではガセットプレートの柱側接合面における主応力が小さく,角形鋼管柱の負担曲げモーメントはガセットプレートの存在に関わらず,ほぼ直線的に変化している.これは文献10)の架構実験においても観察されたように,無補強の角形鋼管にガセットプレートを接合したことで柱スキンプレートの面外曲げ変形が生じ,柱のせん断力がガセットプレートにほとんど伝達されなかったためである.

2.2.3. ガセットプレートの存在が剛性と耐力に及ぼす影響

ガセットプレートが存在することによる弾性剛性と耐力の上昇について考察する.ここでは主に試験体の初期降伏時を比較するため,繰り返し履歴曲線より抽出した正側骨格曲線[20]に着目する.試験体の正側骨格曲線の比較を図6に示す.図中の一点鎖線は,素材試験結果の下降伏点に基づいて求めた梁の全塑性モーメント${}_bM_p$を用い,危険断面位置を純鉄骨梁(B)では梁端部,ガセットプレートを付与した梁(G)ではガセットプレート先端部として求めた全塑性耐力(せん断力)の計算値である.また,正側骨格曲線より評価した弾性剛性,全塑性耐力の実験値を表4にまとめる.弾性剛性は正側骨格曲線における初期剛性であり,全塑性耐力は正側骨格曲線における接線剛性が弾性剛性の1/3となる点の荷重[21]として評価した.ガセットプレートを付与することによる弾性剛性の上昇は,柱を角形鋼管とした試験体ではわずか6%であったが,柱をH形断面とした試験体では26%となっている.一方,全塑性耐力は柱断面に依らず,ガセットプレートを付与することで純鉄骨梁から35%程度上昇している.消石灰の剥離や局部座屈が観察された位置から危険断面はガセットプレートを付与することでガセットプレート先端部に移動すると考えられ,この断面が全塑性モーメント${}_bM_p$に達した時を全塑性耐力とすることで耐力の上昇を評価することができている.また,危険断面が梁の降伏モーメント${}_bM_y$に達した時の降伏耐力(せん断力)についても付録1に示すように,実験結果における弾性限耐力を概ね評価できている.

例えば本実験の柱をH形断面とした試験体H_BとH_Gを比較すると,ガセットプレートを取り付けることで弾性剛性は26%,降伏耐力は35%(付録1)上昇しており,弾性限変形は7%程度大きくなる結果が得られた.しかし,実際には柱や柱梁接合部パネルの剛性も上昇するため,付録2で示すように柱梁断面やスパンによっては弾性限変形が小さくなる可能性がある.また弾性限変形に関わらず,柱梁とガセットプレートの応力伝達に伴って先端部に大きな応力が生じるため(図5),米国の部分架構実験[4),5)]で見られたような溶接部近傍からの破断が生じないようにガセットプレート接合部の設計には注意が必要である.



(a) 初期降伏側　(b) 初期降伏の反対側

図8 載荷開始方向による影響

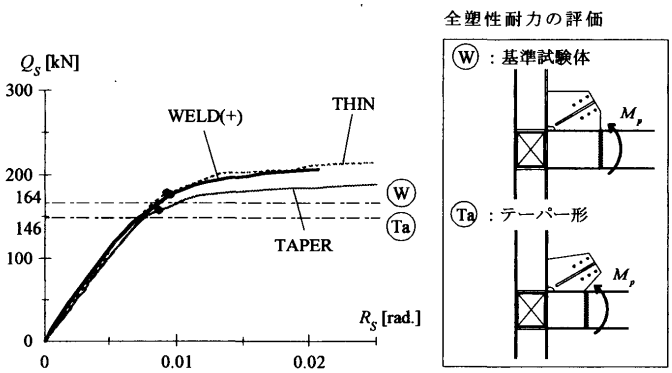


図9 ガセットプレートの形状による影響

表5 弾性剛性と全塑性耐力(Bシリーズ)

試験体	弾性剛性※1 [kN/rad.]	剛性比較※3	全塑性耐力※2 [kN]	耐力比較※3
WELD(+)	30000	−	177	−
WELD(−)	29000	0.97	170	0.96
THIN	28000	0.93	178	1.01
TAPER	25000	0.83	155	0.88

※1 骨格曲線における初期剛性
※2 骨格曲線における接線剛性が弾性剛性の1/3となる点の荷重
※3 基準試験体(WELD(+))との比較(=実験結果/WELD(+))

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

2.3. ガセットプレートの形状が力学挙動に及ぼす影響

2.3.1. 実験結果の概要

Bシリーズの試験体群について，実験より得られた梁の全体挙動をせん断力－部材角関係（$Q-R$）として表し，試験体の損傷状況と併せて図7に示す．図(a)には載荷開始方向の違いを，図(b)にはガセットプレートの形状の違いを示した．なお，梁の横座屈が顕著となった大振幅での挙動は比較対象から除外した．いずれの試験体も耐力劣化は見られず，載荷終了時まで安定した紡錘型の履歴曲線を示している．これはAシリーズよりも梁フランジの幅厚比を小さくしたためであり，±1/50rad.載荷時においても局部座屈による撓みはわずかであった．基準となる試験体WELDでは負曲げを受ける-1/100rad.載荷時にまわし溶接を行っていない梁側のガセットプレート先端部に亀裂が観察された（図7(a)の写真）．この亀裂は振幅が大きくなると梁端部に向かって成長したが，耐力の喪失を引き起こすような急激な破断には至らなかった．次いでガセットプレートの板厚を薄くした試験体THINではガセットプレートが柱梁の変形によって圧縮を受ける正側の+1/50rad.載荷時にガセットプレートが面外に大きく変形した（図7(b)の写真）．しかしながら，柱梁に施したスチフナ補強により梁の捩れが抑えられたため，履歴挙動にガセットプレートの面外変形の影響は見られない．最後にガセットプレートの形状を変えた試験体TAPERでは他の試験体と同様にガセットプレート先端部より載荷点側に局部座屈の発生が確認された．また，この試験体はガセットプレートの形状を変えたことで先端部が梁端部に近づいたため，繰り返し履歴挙動における耐力は基準試験体WELDと比べて低くなっている．

2.3.2. 載荷方向が剛性と耐力に及ぼす影響

試験体WELDの実験結果より載荷方向が弾性剛性と耐力に及ぼす影響を考察する．繰り返し履歴曲線より抽出した骨格曲線の比較を図8に示す．図(a)では初期降伏側，図(b)では初期降伏の反対側の骨格曲線を比較した．いずれの試験体も弾性限までの履歴曲線はほぼ一致しており，載荷方向の違いが弾性剛性に及ぼす影響は小さい．塑性域においては載荷方向による違いが見られるが，正曲げ時と負曲げ時の耐力差はわずか5%程度である．ガセットプレートを片フランジだけに取り付けると梁端部は非対称断面となるが，載荷方向の違いがガセットプレートを取り付けた梁の弾塑性挙動に及ぼす影響は小さいと言える．

2.3.3. ガセットプレートの形状が剛性と耐力に及ぼす影響

ガセットプレートの板厚や形状が異なることによる弾性剛性と耐力の変化について考察する．繰り返し履歴曲線より抽出した骨格曲線の比較を図9に示す．図中の一点鎖線は2.2.3.と同様に危険断面をガセットプレート先端部として求めた全塑性耐力の計算値である．また，骨格曲線より評価した弾性剛性，全塑性耐力の実験値を表5にまとめる．ガセットプレートが薄い試験体THINと基準試験体WELD(+)を比べると，弾性剛性は7%程度低下しているが，全塑性耐力にほとんど差は見られない．一方，ガセットプレートの形状を変化させた試験体TAPERでは，弾性剛性は17%，全塑性耐力は12%低下している．形状を変化させることで危険断面となるガセットプレート先端部は梁端側に移動するが，この危険断面の移動を考慮して全塑性耐力を計算すると基準試験体よりも耐力が11%低下することになり，実験結果における変化をよく評価できている．したがって，ガセットプレートの形状を変化させても先端部を危険断面とすることで耐力の変化を評価できると言える．

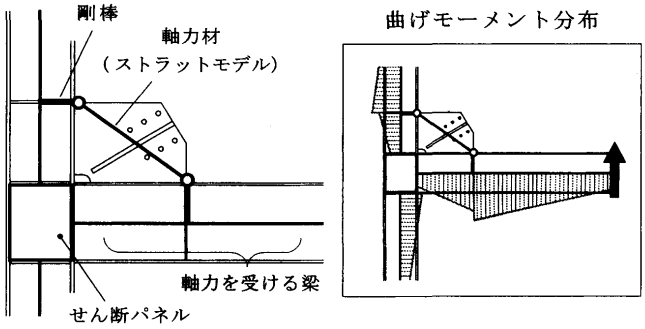


図10　ガセットプレートの存在を反映した力学モデル

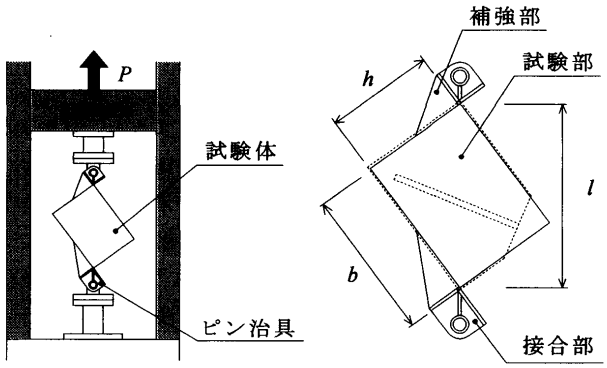


図11　試験装置と試験体の概要

表6　要素実験の試験体一覧

試験体名	t [mm]	h [mm]	b [mm]	h/b	l [mm]
G.PL	16	302	411	0.73	510
standard					
thin	9				
large	16	400	540	0.74	672
slender		302	530	0.57	610
square		411	411	1.00	581

※G.PLは切り欠きとリブを再現した（図11中の破線）

3. ガセットプレートの存在を反映した力学モデル

3.1. 力学モデル

ガセットプレートの存在を反映できる簡易な力学モデルを提案し，実験結果との比較からモデルの有効性を確認する．前章の載荷実験よりガセットプレートと柱梁の応力伝達によって，ガセットプレート先端部を境に柱梁の負担曲げモーメントの勾配が反転することが分かった．また，この応力伝達に伴って先端部直下の柱梁断面には偏心曲げが作用すると考えられる．これらガセットプレートが周辺部材に与える影響を反映できる力学モデルを図10に示す．ガセットプレートは柱梁との応力伝達が行われる柱側と梁側の先端部を結んだ軸力材としてモデル化する（以後，ストラットモデル）．また，ストラットモデルを柱

NII-Electronic Library Service

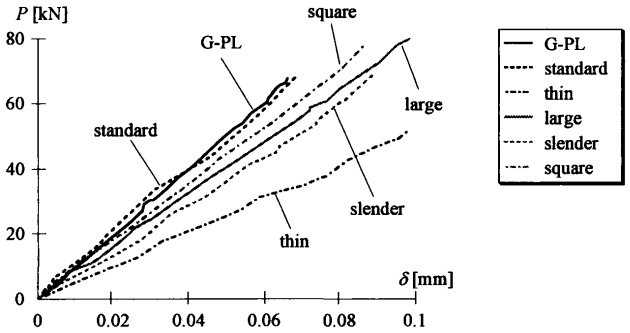
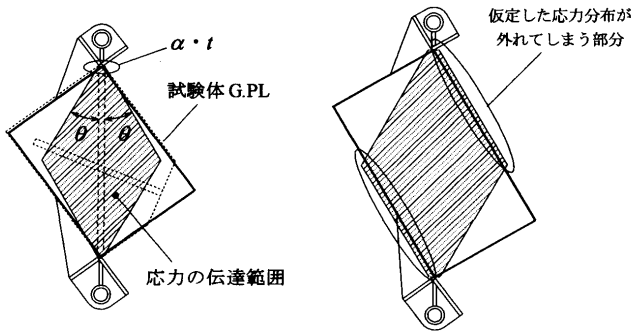


図12　ガセットプレート要素の荷重－変形関係



(a) 試験体standard　　(b) 試験体slender

図13　ガセットプレート要素における応力伝達

表7　ガセットプレート要素の弾性剛性

試験体名	t [mm]	k_e [$\times 10^3$ kN/m]	k_c [$\times 10^3$ kN/m]	k_e / k_c
G.PL	16	950	970	0.98
standard		1000	970	1.03
thin	9	470	430	1.09
large	16	810	860	0.94
slender		740	900	0.82
square		890	915	0.97

梁から張り出した剛棒に接続することで，柱梁はガセットプレート先端部におけるストラットの反力を受け，柱梁の負担曲げモーメントの勾配は先端部を境に反転し，さらに先端部直下の柱梁断面には偏心曲げが作用する．

3.2. ガセットプレート要素の引張実験

3.2.1. 実験計画

このガセットプレートの存在を反映した力学モデルを数値解析に適用するためには，モデル化する軸力材としての剛性が必要となる．そこでガセットプレートを模した矩形鋼板を対象とした対角線方向の載荷実験によって弾性剛性の算出方法を検討する．実験装置と試験体の概要を図11に示す．試験体はガセットプレートを模した矩形の試験部，載荷装置との接合部，および補強部からなる．実験パラメータは矩形鋼板の板厚と寸法とした．寸法は前章のガセットプレートを基本とし，縦横比 h / b を0.5，0.75，1.0と変化させた．また，図11中の破線で示すような実際のガセットプレートと同様に切り欠きやリブを有する試験体も用意した．試験体一覧を表6に示す．実験は試験体と載荷装置をピン治具を介して接合し，引張力を与えて行った．

3.2.2. 実験結果の概要

実験より得られた試験体の荷重－変形関係（$P - \delta$）を図12に示す．荷重Pは載荷装置に内蔵されたロードセルによる計測値であり，変形δは試験部の偶角部間で計測した相対変形である．相対変形は最大でも0.1mmと小さく，計測には1/1000mmの精度をもつ高感度のひずみゲージ式変位計を用いた．なお，ガセットプレートの0.1mmの変形量は，後述する数値解析によれば試験体H_Gの部材角でおおよそ1/500rad.（せん断力40kN）に相当する．この範囲ではいずれの試験体も弾性的に挙動しており，実験パラメータによって弾性剛性に差が現れている．ガセットプレートを模擬した試験体G.PLの弾性剛性は同じ寸法の矩形鋼板である試験体standardとほぼ等しく，切り欠きやリブの影響は小さい．また，板厚の薄い試験体thinと縦横比の小さい試験体slenderを除くと，対角線の距離lが長いほど弾性剛性は小さくなっている．

3.2.3. 弾性剛性の評価

柱梁からガセットプレートに伝達される応力の拡がりを仮定することでストラットとしての弾性剛性を導く．本研究ではガセットプレートにおける応力伝達を図13（a）のように仮定する．すなわち，応力が伝達され始める先端部では板厚tのα倍の幅が抵抗し，その後は片側θずつの拡がりをもって伝達する．このような応力の拡がりを仮定することでストラットとしての弾性剛性k_cは，ガセットプレートの対角線の距離l，板厚t，ヤング係数E，応力の拡がりθ，実験係数αを用いて以下のように表せる．

$$k_c = t \cdot E \cdot \tan\theta \cdot \frac{1}{\ln \dfrac{l \cdot \tan\theta + \alpha \cdot t}{\alpha \cdot t}} \qquad \cdots (1)$$

ここで応力の拡がりθは，鋼構造接合部設計指針のブレース接合部における有効幅の算出方法[18]を参考に，$\theta = 30°$とする．また，実験係数αについては，(1)式による計算値と試験体standardの実験結果が一致するように定め，$\alpha = 3$を得た．

実験より得られたガセットプレート要素の弾性剛性k_eと，(1)式による計算値k_cを表7に示す．過大評価となっている試験体slenderを除けば，(1)式による評価は実験結果の弾性剛性とよく対応している．試験体slenderの弾性剛性が過大評価されたのは，仮定した応力の拡がりに基づけば図13（b）に示すように試験体の大きさによって応力の拡がりが制限されたためであると解釈できる．また同様に，試験体G.PLと試験体standardの弾性剛性がほぼ等しく，切り欠きの影響が小さかったのは図13（a）に示すように応力の拡がりが切り欠きによって制限されないためである．

3.3. ストラットモデルを適用した数値解析

3.3.1. 解析方法

ガセットプレートの存在を反映したストラットモデルを用いた数値解析を行い，実験結果との比較からモデルの有効性を確認する．解析は柱をH形断面とした試験体H_G，WELD，THIN，TAPER，の4体について行った．柱梁は軸変形，せん断変形，曲げ変形を考慮した線材，柱梁接合部パネルはせん断パネルとしてモデル化した．ガセットプレートは先端部を結んだ偶角部間をストラットとしてモデル化し，弾性剛性を(1)式から求めた．

NII-Electronic Library Service

解析は梁の載荷点位置に荷重を与えて行った．なお，現段階では，柱梁とガセットプレートがともに弾性範囲であることが本解析モデルの適用条件である．

3.3.1. 解析結果と実験結果

【弾性剛性と曲げモーメント分布】

解析より得られた梁の弾性剛性と実験結果の比較を表8にまとめる．また解析結果の一例として試験体H_Gの柱梁が負担する曲げモーメント分布を図14に示す．数値解析における梁の弾性剛性は，実験と同様に載荷点位置の鉛直変位から柱梁接合部パネルにおける鉛直変位，節点回転角，せん断変形角による寄与分を差し引いて求めた．解析結果と実験結果の弾性剛性を比較すると，やや過大評価の傾向にあるが，弾性剛性の実験結果を概ね評価できている．また柱梁の負担曲げモーメント分布については，ガセットプレート直下における勾配，先端部直下の柱梁断面に作用する偏心曲げを含めて実験結果とよい対応を示しており，力学モデルの有効性が確認できる．

【柱梁接合部パネルに入力されるせん断力】

柱梁の負担曲げモーメントの勾配はガセットプレート先端部を境に反転するため，ガセットプレートが存在することで柱梁接合部パネルに入力されるせん断力は小さくなると考えられる．ガセットプレートの存在を柱梁の剛域として表現せずに柱梁に取り付くストラットとしてモデル化したことで，柱梁の負担曲げモーメントだけでなく，柱梁接合部パネルへの影響も再現できるものと考えられる．柱梁接合部パネルの挙動を，見かけのパネルモーメント－せん断ひずみ関係（${}_pM_e-\gamma$）として図15に示す．図中には解析結果を破線，実験結果を実線で示した．パネルモーメントの算出方法は文献18）に従ったが，実験ではガセットプレートを取り付けた場合に梁端部に作用する曲げモーメント${}_bM$を正確に求めることができないため，${}_bM$は実験，解析ともにガセットプレートの存在を無視して載荷点位置のせん断力Qにせん断スパンLを乗じて求めた．したがって，本論文では“見かけの”パネルモーメント${}_pM_e$と呼ぶ．せん断ひずみについては，実験では柱梁接合部パネル中央に貼付した三軸ひずみゲージより算出し，解析ではH形断面における平均せん断ひずみと最大せん断ひずみの比を考慮し，せん断パネルに生じるせん断ひずみを1.1倍した．まず，実験結果においてガセットプレートの有無を比較すると，見かけのパネルモーメント${}_pM_e$を用いるとガセットプレートを付与することでせん断ひずみは1/2程度にまで低下し，柱梁接合部パネルに入力されるせん断力が小さくなっている．解析結果はガセットプレートを付与した柱梁接合部パネルのせん断ひずみをやや過小評価しているが，ストラットモデルを適用した数値解析によって柱梁接合部パネルに入力されるせん断力の低減をよく評価できている．一方，試験体THINと試験体TAPERでは柱梁接合部パネルの挙動にあまり差が見られず，ガセットプレートの形状が及ぼす影響は小さい．柱梁接合部パネルに入力されるせん断力については，ストラットモデルを適用した数値解析と実験結果は対応しており，ガセットプレートの形状が柱梁接合部パネルに入力されるせん断力の低減に対する影響をよく評価できている．したがって，ガセットプレートの存在を剛域としてではなく，ストラットモデルとして数値解析に反映することによって柱梁接合部パネルに入力されるせん断力を評価できると言える．

表8　解析結果と実験結果の比較（弾性剛性）

試験体	弾性剛性 [kN/rad.]		
	解析結果	実験結果	解析／実験
H_G	26000	22000	1.18
WELD	32000	30000	1.07
THIN	30000	28000	1.07
TAPER	28000	25000	1.12

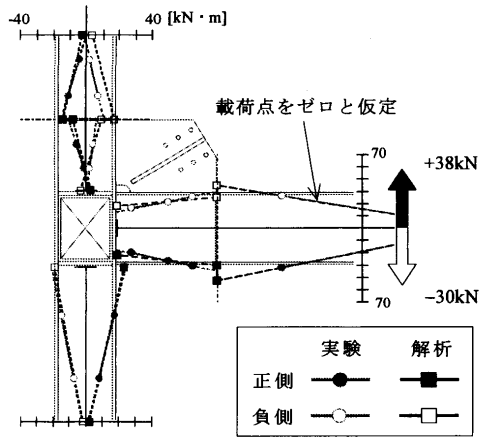
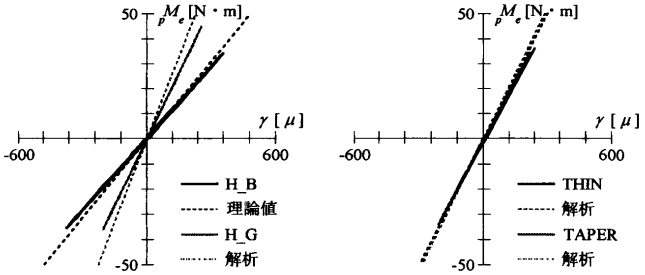


図14　解析結果と実験結果の比較（曲げモーメント分布）



（a）ガセットプレートの有無　（b）ガセットプレートの形状

図15　解析結果と実験結果の比較（柱梁接合部パネルの挙動）

4. 結

本研究ではガセットプレートの存在が周辺部材の力学挙動に及ぼす影響を明らかにするため，柱梁交叉部にガセットプレートを取り付けた鋼部材の繰り返し載荷実験を行った．さらにガセットプレートの存在が周辺部材に及ぼす影響を反映できる力学モデルを構築し，実験結果との比較からその有効性を確認した．本研究より得られた知見を以下にまとめる．

1）ガセットプレートの存在によって周辺部材の弾性剛性は上昇する．ただし，柱を無補強の角形鋼管とした場合など，ガセットプレートが取り付く面の面外剛性が低いと弾性剛性の上昇はあまり期待できない．

2）梁の降伏で決まる架構の耐力は柱断面に依らず，ガセットプレートの存在によって上昇する．また，ガセットプレー

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

トを付与することで危険断面はガセットプレート先端部に移動し，この断面が梁の全塑性モーメント${}_bM_p$（降伏モーメント${}_bM_y$）に達した時を全塑性耐力（降伏耐力）とすることで耐力の上昇を評価できる．

3) ガセットプレートが片フランジだけに取り付くと梁端部は非対称断面となるが，弾性剛性や耐力の上昇は正曲げ時と負曲げ時でほぼ等しい．

4) 柱梁とガセットプレートの応力伝達は，ガセットプレート先端部において行われる．この応力伝達に伴ってガセットプレート先端部直下の柱梁断面には偏心曲げが作用し，柱梁が負担する曲げモーメントの勾配はガセットプレート先端部を境に反転する．

5) ガセットプレートを柱側と梁側の先端部を結んだストラットとしてモデル化することで，ガセットプレートの存在が周辺部材の力学挙動に与える影響を数値解析に反映できる．また，ストラットとしての弾性剛性は，ガセットプレートにおける応力伝達を仮定して導いた（1）式より算出できる．なお，現段階では柱梁とガセットプレートがともに弾性範囲であることが本解析モデルの適用条件である．

6) 本論文の範囲ではガセットプレートの板厚が薄い場合や形状が異なる場合にも，弾性剛性ついてはストラットの軸剛性として反映することで評価でき，耐力についてはガセットプレート先端部の位置を危険断面とすることで評価できることを示した．ただし，フィンスチフナを梁まで延長した場合やサイドスチフナ補強を施した場合を含め，形状の違いが及ぼす影響については更に検討が必要である．

7) ガセットプレートが存在することで柱梁接合部パネルへの入力せん断力は低減される．また，ガセットプレートの存在をストラットとしてモデル化することで，柱梁接合部パネルへの入力せん断力の低減も表現できる．

最後に本論文で得られた知見の範囲で検討できる損傷制御構造の弾性限変形に関する一例を参考として付録2に示す．この例で示すように実際の部材断面を用いた架構ではガセットプレートが存在することで弾性限変形が小さくなる結果が得られており，損傷制御構造の弾性限変形が小さくなる可能性があることが分かった．また序文で述べたようにブレース型ダンパーからの軸力伝達や床スラブの存在が周辺部材の力学挙動に及ぼす影響は解明すべき残された課題であり，損傷制御構造が有する弾性限変形について更に検討を進める必要がある．なお，ブレース軸力がガセットプレートを介して周辺部材にどのように伝達されるかについてはすでに実験による検討を進めており，次報（その3）以降で報告したいと考えている．

謝辞

本研究は，（社）日本鉄鋼連盟　2007年度「鋼構造研究・教育助成事業による一般研究助成」（課題名：「ブレース型ダンパー接合部を含めた鋼部材の力学挙動」，研究代表者：吉敷祥一）による成果です．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1) 和田　章，岩田　衛，清水敬三，安部重孝，川合廣樹：建築物の損傷制御設計，丸善，1998.
2) 例えば，日本鋼構造協会，鋼材倶楽部：履歴型ダンパー付骨組の地震応答性状と耐震設計法，pp.73-74，1998.9
3) 高橋聡史，吉敷祥一，和田　章：座屈拘束ブレースに関する実験研究の傾向調査，日本地震工学会大会－2007梗概集，pp.208-209，2007.11
4) Stephen Mahin, Patxi Uriz, Ian Aiken, Caroline Field, and Eric Co : Seismic Performance of Buckling Restrained Braced Frame Systems, 13th World Conference on Earthquake Engineering (13th WCEE), DVD, 2004.8
5) Charles W. Roeder, Dawn E. Lehman, and Adam Christopulos : Seismic Performance of Special Concentrically Braced Frames with Buckling Restrained Braces, 8th National Conference on Earthquake Engineering (8th NCEE), CD-ROM, 2006.4
6) 竹内　徹，山田　哲，北川まどか，鈴木一弁，和田　章：構面外剛性の低い接合部により接合された座屈拘束ブレースの座屈安定性，日本建築学会構造系論文集，第575号，pp.121-128，2004.1
7) 天鼻秀秋，聲高裕治，井上一朗：接合部を含む座屈拘束ブレースの構面外座屈荷重，日本建築学会構造系論文集，第581号，pp.127-134，2004.7
8) 木下智裕，聲高裕治，井上一朗，飯谷邦祐：接合部を含む座屈拘束ブレースの構面外座屈防止条件，日本建築学会構造系論文集，第621号，pp.141-148，2007.11
9) 木下智裕，聲高裕治，井上一朗，石井　匠，加村久哉，飯谷邦祐：座屈拘束ブレース接合部の構面外曲げ剛性と降伏耐力，日本建築学会近畿支部研究報告集，第47号・構造系，pp.185-188，2007.6
10) 吉敷祥一，市川　康，山田　哲，和田　章：ガセットプレート接合部に着目した部分架構の実験（ダンパーを組み込んだ靭性骨組の総合的な耐震性能の向上　その1），日本建築学会構造系論文集，第620号，pp.133-140, 2007.10
11) 鈴木敏郎，木村　衛，金子洋文，源　淳一：鉄骨テーパーばりの塑性変形性状に関する実験研究，日本建築学会構造系論文報告集，第358号，pp.43-51，1985.12
12) 河田　彰，田川健吾：ハンチ付き柱・はり接合部の実験的研究（その1　実物大接合部の加力実験），日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）構造系，pp.1163-1164，1969.8
13) 岡崎梨恵，尾熊政男，石原節夫，大垣克己，山口清司，高松隆夫，南　宏一：既存鉄骨造屋内運動場の耐震性能に関する研究（その11），日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）C-1分冊，pp.661-662，2004.8
14) 井口常雄，山口勇男：肘板を有する骨組構造物の曲げモーメント分布について，造船協会論文集，第103号，pp.189-201，1958.8
15) 西岡邦夫，久光脩文：リブ補強に関する研究（第3報，直交する部材の剛性が互に異なる場合の三角形リブすみ肉部の応力集中），日本機械学会論文集（第1部），29巻203号，pp.1161-1170，1963.7
16) 西村勝尚，藤田佳広，福元義之，益尾　潔，向出静司：高力ボルトによる外ダイアフラム形式の角形鋼管柱－鉛直ハンチ梁接合部に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第591号，pp.137-144，2005.5
17) 加藤　勉，森田耕次，田沼吉伸，高橋良明：筋違付骨組の挙動に与える筋違接合部の影響に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）構造系，pp.1293-1294，1980.9
18) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2006.3
19) 山田　哲：局部座屈を伴う鋼部材の劣化挙動と剛接骨組の終局耐震性，東京大学学位論文，p.44，1994.
20) 加藤　勉，秋山　宏，山内泰之：鋼材の応力－ひずみ履歴曲線に関する実験則，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）構造系，pp.937-938，1973.10
21) 建築研究所，日本鉄鋼連盟：鋼構造建築物の構造性能評価試験法に関する研究　委員会報告書，pp.83-85，2002.4

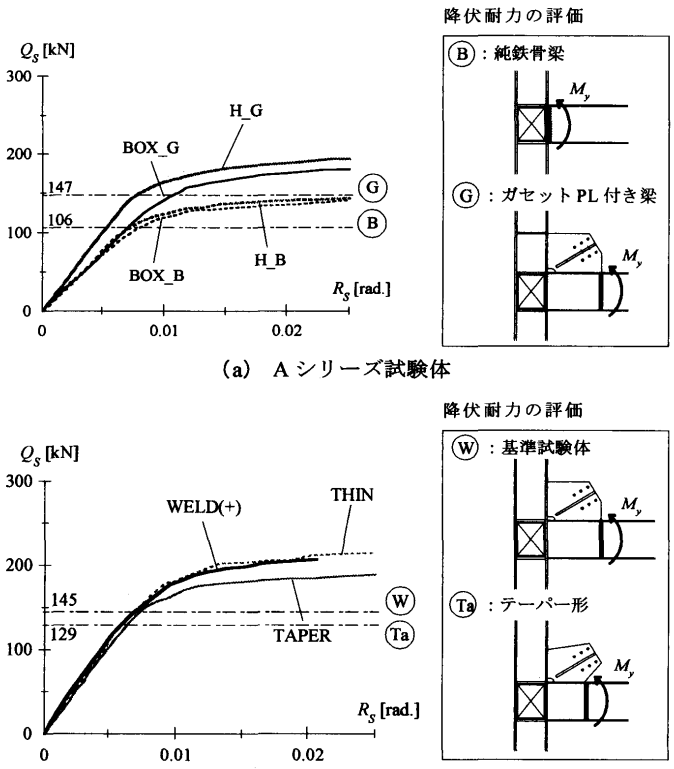
NII-Electronic Library Service

付録1：部材実験における弾性限耐力の評価

本文2章の部材実験では，ガセットプレートを取り付けることにより梁の弾性剛性と耐力の上昇が確認できた．ここでは本文中で示した全塑性耐力と同様に重要な耐力の指標である降伏耐力について検討する．繰り返し履歴曲線より抽出した正側の骨格曲線の比較を付録図1に示す．また素材試験結果の下降伏点に基づいて求めた梁の降伏モーメント${}_bM_y$を用い，純鉄骨梁（B）では梁端部を，ガセットプレートを付与した梁（G）またはガセットプレートの形状を変化させた試験体TAPER（Ta）ではガセットプレート先端部を危険断面として求めた降伏耐力（せん断力）を一点鎖線で示す．降伏耐力の評価値と実験より得られた履歴挙動の弾性限耐力は良い対応を示しており，ガセットプレートを付与することで危険断面位置がガセットプレート先端部に移動するとして弾性限耐力を評価できることが分かる．

付録2：ガセットプレートの存在が弾性限変形に与える影響

実在する損傷制御構造の部材断面を対象とし，ストラットモデルを適用した数値解析からガセットプレートの存在が損傷制御構造の弾性限変形に及ぼす影響を例示する．対象とした建物はスパン8.0m，階高4.3mの架構に，座屈拘束ブレースをK形に配置した損傷制御構造である．梁には溶接組立H形鋼B.H-650x250x16x22（SN490），柱には組立箱形断面B.Box-600x600x32（SN490）を用いている．座屈拘束ブレースの心材はPL-32x250（LY225）であり，梁の降伏軸力に対して18%程度の水平耐力${}_BQ_y$を有する．ガセットプレートは座屈拘束ブレースの心材より薄いPL-28を用い，柱側870×梁側900の接合面を有して柱梁交叉部に取り付けられている．



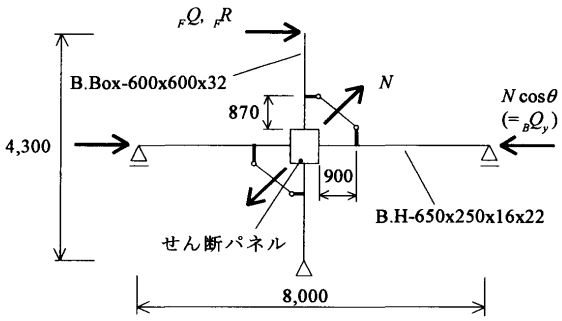
(a) Aシリーズ試験体

(b) Bシリーズ試験体

付録図1　降伏耐力（弾性限耐力）の評価

解析モデルを付録図2に示す．解析モデルは無限均等ブレース骨組を対象とし，主架構のスパンと階高の中央を部材の反曲点位置として取り出した．柱梁は軸変形，せん断変形，曲げ変形を考慮した線材，柱梁接合部パネルはせん断パネルとしてモデル化した．座屈拘束ブレースからの軸力は柱梁接合部パネル中央に水平力が${}_BQ_y$になる斜め方向の外力Nを解析初期から一定値として与え，梁のピンローラー支持位置にその水平反力となる${}_BQ_y$を与えた．主架構の弾性限変形${}_FR_y$は，梁の危険断面が軸力を考慮した降伏モーメントに達した時の層間変形角とし，柱上部に水平荷重${}_FQ$を与えることで主架構を弾性限変形に至らしめた．解析結果を付録表1に示す．解析は，(1)純鉄骨架構，(2)ブレース軸力を与えた場合，(3)ガセットプレートの存在をストラットモデルとして反映した場合の3種類について行った．純鉄骨架構では1/124rad.と大きな弾性限変形を有しているが，ブレース軸力を与えることで1/151rad.となり，さらにガセットプレートの存在を考慮することで1/205rad.まで弾性限変形は小さくなった．

ここでは損傷制御構造の一例について数値解析を行い，ガセットプレートの存在が弾性限変形に及ぼす影響を示した．なお，ブレース軸力がガセットプレートを介して周辺部材にどのように伝達されるかについては本検討では反映できていない．今後は損傷制御構造に用いられる部材断面の傾向を調査するとともに，接合部近傍で周辺部材に伝達されるブレース軸力や床スラブの存在が及ぼす影響について更に検討を進める．



付録図2　損傷制御構造の部分架構モデル

付録表2　解析結果一覧

	解析結果		
	純鉄骨	軸力考慮	ガセット考慮
弾性限変形 R_y [rad.]	1/124	1/151 (82%)	1/205 (60%)
弾性限耐力 ${}_FQ_y$ [kN]	69.6	56.9 (82%)	75.1 (108%)

※（ ）内は純鉄骨架構からの変化

（2008年4月8日原稿受理，2008年8月4日採用決定）

NII-Electronic Library Service