

無溶接接合工法による鋼構造物の耐震補強に関する実験的研究

植木 理枝子* 都祭 弘幸**
細井 泰行**

要 旨

薄肉・小断面の鋼材から構成されるトラス梁による構造は現行の耐震基準を満足しない鋼構造の生産施設などに多く存在する。その中で稼働中の工場など火災リスクの軽減が要求される建物の耐震補強を対象として、無溶接かつ母材への穿孔無しに補強部材を接合できる工法(Penta-ocean Non-Welding:PNW工法)を開発した。要素実験では母材の表面処理状態やボルト本数など数種類のパラメータを用いてすべり試験および引張試験を行った結果、いずれの条件においても接合部のすべり耐力はすべり係数を用いて安全側に評価できること、上側添板の曲げ変形を抑制することが離間耐力を高めるのに有効であることなどを確認した。また実大 1/2 スケールの構造実験では、母材の降伏まで接合部にすべりが生じないこと、接合部の設計方法が妥当であることを確認した。

1. はじめに

昭和40年以前に建設された鋼構造物には、薄肉小断面の鋼材を組み合わせた組立部材で構成されたものが多い。これらの建物に方杖や火打ち等の耐震補強部材を接合する際、一般的には高力ボルトによる摩擦接合あるいは溶接接合が用いられる。しかし、高力ボルト摩擦接合ではボルト孔による断面欠損が大きいばかりでなく、既存部材への孔明け作業自体も困難である。また、使用可能なボルト径に限界があるため小径ボルトを多数用いることから補強部位の納まりが悪くなる。一方、溶接接合の場合には薄肉断面に対する溶接に高度な施工技術を要することや、可燃物の多い工場やプラントなどでは火災のリスクが高いことが問題となっている。このような背景から無溶接かつ母材への穿孔無しに補強部材を接合できる工法(PNW工法)を開発した。図-1に本工法の適用部位を、図-2に在来工法との比較をそれぞれ示す。本論ではPNW工法の基本的な構造性能の確認を目的とした要素実験および実構造物への適用可能性を検討するために実施した構造実験について報告する。

2. 工法概要

本工法は、一般的な高力ボルト摩擦接合を応用した挟み込み接合工法である。母材の上下に設置した添板に母材およびスペーサーを挟み込んで、高力ボルトまたは超高力ボルトで締め付けることによって補強部材を接合する。母材加工を行わずに補強部材を接合できることから、以下の特徴を有する。

- ①母材にボルト孔の穿孔が無く、断面欠損が生じない。
- ②溶接熱による母材の材料特性劣化が生じない。
- ③火災発生リスクを除去し、施工時の養生が大幅に軽減できる。
- ④建物を使用しながらの施工が可能である。
- ⑤単純作業なので施工性の向上、工期短縮が図れる。
- ⑥ボルト接合であるため、目視による施工管理が可能。

図-3に本工法の基本ディテールを示す。既存部材の縁とスペーサーの内側とのクリアランスを2.0mmとし、スペーサーの板厚を母材よりも0.5mm薄くすることによって、ボルト軸力から発生する摩擦力を確実に母材に伝達できるようにしている。なお、ボルトのピッチや端あきについては一般的な高力

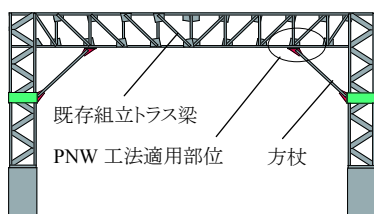


図-1 PNW工法の適用部位

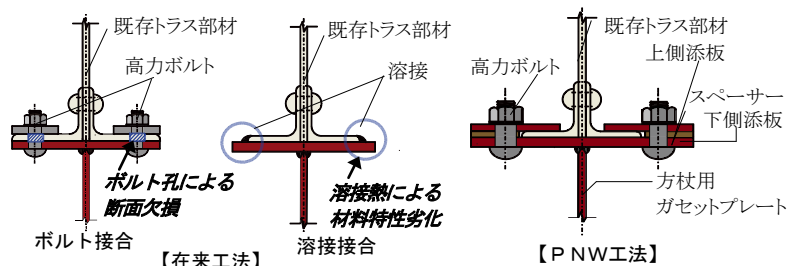


図-2 在来工法との比較

*建築設計部

**技術研究所 建築技術開発部

ボルト摩擦接合に準じて定める。

3. 要素実験

図-1 に示すように補強部材として方杖を接合する際、挟み込み接合部にはせん断力および引張力の 2 種類の力が作用する。そこで各作用力に対する破壊性状と耐力を確認するために数種類のパラメータを用いて要素実験を実施した。表-1 に要素実験で使用した鋼材の材料特性を示す。

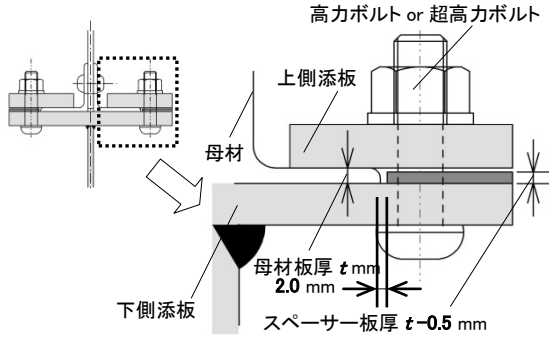


図-3 PNW工法ディテール

3.1 すべり試験

挟み込み接合形式におけるすべり耐力およびすべり係数を把握するため、指針¹⁾に示されるすべり試験用標準試験体などを参考にして試験体を製作した。

3.1.1 すべり試験概要

試験体一覧および後述する試験結果の概要を表-2 に示す。

パラメータは以下の 6 水準とした。

表-1 要素実験 材料試験結果

断面	鋼材	使用部位	σ_y	σ_u	YR	EL
L-50×50×6	SS400	母材	333.0	450.0	74.0	32.0
PL-6	SS400	母材	314.0	450.0	69.8	27.0
PL-9	SS400	補強板	301.0	464.0	64.9	31.0
PL-19	SM490A	上側添板	382.5	524.3	73.0	25.8
PL-22	SM490A	下側添板	370.0	518.6	71.3	28.8
S14T-M20	-	挟み込み接合部	1367.0	1470.0	93.0	17.0
S10T-M20	-	挟み込み接合部	1035.0	1095.0	94.5	18.0
F10T-M12	-	トラス梁綴り材	1001.0	1064.0	94.1	21.0

σ_y : 降伏応力 (N/mm²), σ_u : 引張応力 (N/mm²), YR: 降伏比 (%), EL: 伸び (%)

表-2 すべり試験 試験体一覧
G G N 1 0 1 (L , F)

[摩擦面処理] GG: 塗料塗布、NN: 黒皮状態		[ワッシャー] N: 通常円座金、R: 大型角座金		[ボルト強度] 10: S10T、14: S14T		[ボルト列数] 1: 1列、2: 2列、3: 3列		[母材形状、フィラープレートの有無] L: L形鋼、F: フィラープレート有							
試験体名	母材	母材 表面処理	添板 表面処理	座金	高力 ボルト	ボルト列数 (列)	フィラー 有無	すべり耐力 (kN)	最大耐力 (kN)	すべり 係数*2	破断状況				
GGN101	PL-6	黒皮除去後 塗料塗布	黒皮除去後 塗料塗布	通常	S10T	1	無	—	79.0	0.133	中板抜け				
GGN102						2		—	173.1	0.146	中板抜け				
GGN103						3		—	237.8	0.135	中板抜け				
GGN141					1	—		108.0	0.129	中板抜け					
GGN142					2	—		227.0	0.138	中板抜け					
GGN143					3	—		249.8	0.127	中板抜け					
GGR141				大型角	黒皮除去後 塗料塗布	大型角		S14T	1	—	134.7	0.127	0.127	中板抜け	
GGR142									2	—	242.2	0.130	0.130	中板抜け	
GGR143									3	—	256.5	0.126	0.126	中板破断	
GGR143F				黒皮状態*1	黒皮状態*1	黒皮状態*1		通常	S10T	3	有	—	253.8	0.129	中板破断
NNN101										1	無	96.0	108.3	0.154	中板抜け
NNN102										2	無	—	249.5	0.229	中板破断
NNN103									3	無	—	248.7	0.144	中板破断	
NNN103F									3	有	—	250.8	0.131	中板破断	
NNN141	1	無	—				175.0		0.175	中板抜け					
NNN141F	1	有	151.7				155.3	0.173	中板抜け						
NNN142	2	無	—				251.4	0.137	中板破断						
NNN142F	2	有	233.1				233.1	0.127	中板抜け						
NNN143F	3	有	—				250.7	0.129	中板破断						
NNR141	大型角	黒皮除去後 塗料塗布	大型角				S14T	1	無	—	189.1	0.193	0.193	中板抜け	
NNR142								2	無	—	252.3	0.129	0.129	中板破断	
NNR143F								3	有	—	255.4	0.127	0.127	中板破断	
NNN101L	2L- 50×50×6	黒皮除去後 塗料塗布	黒皮除去後 塗料塗布				通常	S10T	1	無	81.4	82.0	0.125	主すべり+弦材抜け	
NNN102L				2	無	236.5			237.5	0.185	主すべり+弦材抜け				
NNN102L				2	有	179.0			183.0	0.136	主すべり+弦材抜け				
NNN103L				3	無	338.0			338.0	0.196	主すべり+弦材抜け				
NNN143L				3	有	—			325.5	0.125	0.125	固定側中板破断			
NNN143L				3	無	—			325.5	0.125	0.125	固定側中板破断			

*1 浮き錆、油分は完全に撤去した状態とする。 *2 明確な主すべりが見られなかった試験体は最大耐力からすべり係数を算出した。

- ①母材断面・・・板厚 6mm の鋼板および L 形鋼 (L-50×50×6) による組立材の 2 種類
- ②摩擦面処理・・・浮き錆や油分を完全に撤去した黒皮状態のものとしショットブラスト処理後、塗料(ジンクリッチペイント)を刷毛で塗布したもの 2 種類
- ③ワッシャー・・・通常のボルトセットで用いられる円座金と上側添板の曲げ変形を抑制する効果を高めた大型角座金 (PL-9×50×65) の 2 種類
- ④高力ボルト強度・・・トルシア形の高力ボルト(S10T)および超高力ボルト(S14T)の 2 種類
- ⑤ボルト本数・・・1 列、2 列および 3 列の 3 種類
- ⑥フィラープレートの有無・・・母材と添板とのはだすき解消のためのフィラープレートを挿入する場合としない場合。フィラープレートは板厚 1mm のガルバニウム鋼板とし、母材と

上側添板との間に挿入した。

試験体形状の一例を図-4 に示す。試験体は下部を通常の高力ボルト摩擦接合、上部を挟み込み接合としてアムスラー試験機に固定し、上部の中板を掴んで単調引張加力を行った。実験状況を写真-1 に示す。すべり変位 (δ_i) は写真-1 に示すように挟み込み接合部の両側に設置した変位計によって計測し、その平均値を用いた。フィラープレートを挿入した試験体については写真-1 に示すようにクリップゲージを用いて中板のずれ変位 (δ_2) も計測した。試験終了の判断は、すべりの発生または母材の降伏により荷重が著しく低下したとき、あるいは母材破断が発生したとき、のいずれかとした。

3. 1. 2 すべり試験結果

写真-2 にすべり試験後の破壊状況の一例を示す。荷重変形関係については、各パラメータとすべり性状との関係を把握するために試験体シリーズごとにまとめたものを図-5～図-9 に示す。

図-5 は摩擦面処理を黒皮状態とし、S10T のボルトと通常の円座金を用いた試験体で、母材が鋼板のもの (試験体 NNN10 シリーズ) と L 形鋼による組立材のもの (試験体 NNN10L シリーズ) の比較である。実線が試験体 NNN10 シリーズを示し、点線が試験体 NNN10L シリーズを示している。母材が鋼板の場合、表-2 に示すようにボルト列数が 2 列および 3 列の試験体 (試験体 NNN102 および試験体 NNN103) は母材破断で最大耐力に達しているため、両者の荷重変形関係はほぼ重なっている。ボルト列数が 1 列のもので比較すると、試験体 NNN101L は主すべりの後、荷重の低下が見られるのに対して試験体 NNN101 は試験終了時まで荷重は緩やかに増加し続けた。なお、両者のすべり耐力および最大耐力は同程度であった。

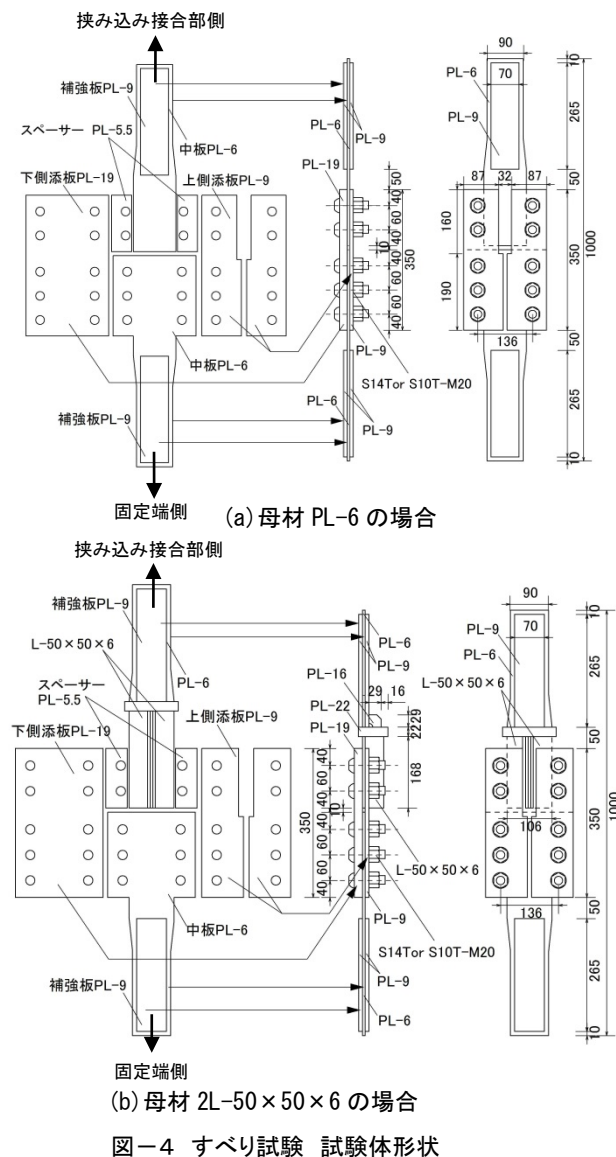


図-4 すべり試験 試験体形状

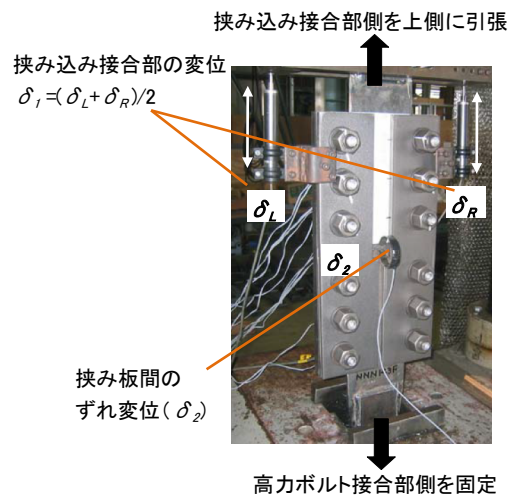


写真-1 すべり試験状況

図-6 は母材が鋼板で S10T のボルトと通常の間座金を用いた試験体で、摩擦面を黒皮状態とした試験体 NNN10 シリーズと塗料塗布面とした GGN10 シリーズの比較である。実線が試験体 NNN10 シリーズを示し、点線が試験体 GGN10 シリーズを示している。なお、他の試験体シリーズの摩擦面処理の比較においても同じ傾向が見られたが、詳細については省略する。図-6 において同じボルト本数で比較した場合、摩擦面が塗料塗布面の試験体の方が黒皮状態の試験体よりもすべり耐力または最大耐力が小さいことから、塗料塗布面の方がややすべりやすい傾向が認められる。

図-7 は母材が鋼板で摩擦面を塗料塗布面とし、S14T の

ボルトを用いた試験体で、通常の間座金を用いた試験体 GGN14 シリーズと大型角座金を用いた試験体 GGR14 シリーズの比較である。実線が試験体 GGN14 シリーズを示し、点線が試験体 GGR14 シリーズを示している。なお、摩擦面処理が異なる場合においても同様の傾向が見られたが、詳細については省略する。図-7 においては大型角座金を用いた試験体の方が間座金を用いた試験体よりもすべり耐力が増加しているが、ボルト列数が増えるにつれて座金による違いは小さくなる傾向が見られる。これはすべり耐力が高くなるほど、母材の降伏または破断がすべりよりも支配的挙動となるためである。



試験体 NNN103
(中板が破断)

試験体 GGN103
(中板の抜け出し)



試験体 GGR143
(中板が破断)

試験体 NNN103L
(主すべりと弦材の抜け出し)

写真-2 すべり試験破壊状況
()は破壊の要因を示す。

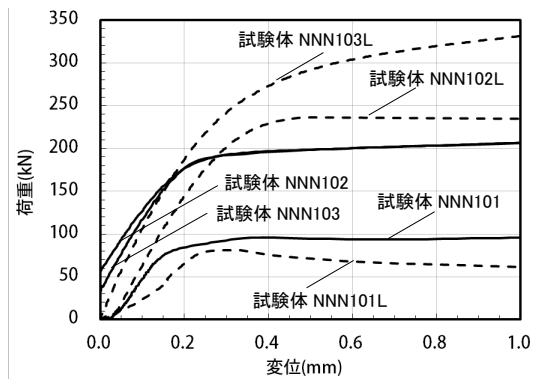


図-5 すべり試験荷重変形関係(母材形状による比較)

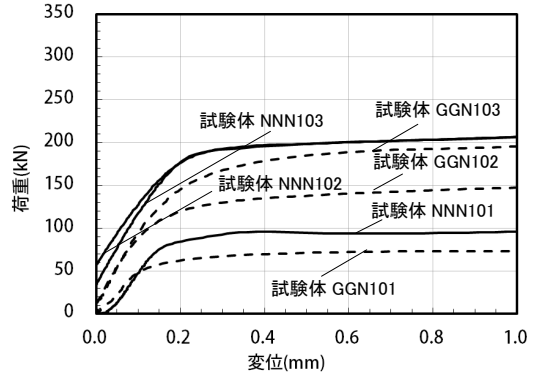


図-6 すべり試験荷重変形関係(摩擦面による比較)

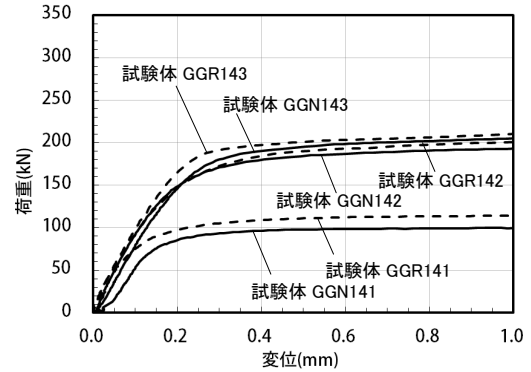


図-7 すべり試験荷重変形関係(座金による比較)

図-8 は母材が鋼板で摩擦面を塗料塗布面とし、通常の円座金を用いた試験体で S10T を用いた試験体 GGN10 シリーズと S14T を用いた試験体 GGN14 シリーズの比較である。実線が試験体 GGN14 シリーズを示し、点線が試験体 GGN10 シリーズを示している。S14T を用いた試験体の方が S10T を用いた試験体よりもすべり耐力が増加しているが、ボルト列数が増えるにつれボルト強度による違いは小さくなる。これは前述の通り、すべり耐力が高くなるにつれ母材の降伏または破断が支配的挙動となっているためである。

図-9 は母材が鋼板で摩擦面を黒皮状態とし、S14T のボルトと通常の円座金を使用した試験体でフィラープレート有りの試験体 (NNN141F および NNN142F) と無しの試験体 (NNN141 および NNN142) を比較したものである。実線がフィラープレート無しの試験体を示し、点線がフィラープレート有りの試験体を示す。同じボルト本数で比較すると初期の挙動は若干異なるものの、最大耐力はほぼ同程度となっており、フィラープレートの有無による違いはほとんど認められない。また、同図中一点鎖線で試験体 NNN142F の中板間のずれ変位 (写真-1 における δ_j) を示している。これより中板間のずれ変位は非常に小さいことが分かる。

これらの結果より、挟み込み接合部のすべり性状は通常の高力ボルト摩擦接合同様、ボルト本数およびボルト強度が高いほどすべり耐力が増加すること、摩擦面の状態がすべり

易さに影響することなどが確認できた。そこで、高力ボルト摩擦接合同様にすべり係数 μ を用いて挟み込み接合部におけるすべり耐力を評価する。すべり係数は式 (1) により算出した。なお、主すべりが見られなかった試験体については最大耐力を用いて算出した。

$$\mu = \frac{P_s}{m \cdot \sum N} \quad (1)$$

μ : すべり係数

P_s : すべり耐力または最大耐力 (kN)

m : 摩擦面の数 (= 2)

$\sum N$: 各ボルトの初期導入軸力の和 (kN)

表-2 に各試験体のすべり耐力または最大耐力およびすべり係数を示している。この中ですべり係数 μ の最小値は 0.125 となっている。これより、挟み込み接合部では摩擦面が黒皮状態または塗料塗布面のいずれかであるとき、すべり係数 $\mu = 0.125$ とすればすべり耐力を安全側に評価できると考えられる。

3.2 引張試験

3.2.1 引張試験概要

補強部材である方杖に引張力が作用した際の挟み込み接合部の離間耐力を把握するために、組立トラス梁の下弦材およびガセットプレートの部分を模擬した試験体を用いて引張試験を行った。試験体一覧および後述する試験結果を表-3 に示す。パラメータは①摩擦面処理、②ワッシャー、③高力ボルトの強度、④下側添板の板厚の 4 水準とした。①～④のパラメータの諸元についてはすべり試験と同様である。

表-3 引張試験 試験体一覧

T G G N 1 0 1 9			
[摩擦面処理]	[ワッシャー]	[ボルト強度]	[下側添板板厚]
TGG: 塗料塗布	N: 通常円座金	10: S10T	19: 19mm
TNN: 黒皮状態	R: 大型角座金	14: S14T	22: 22mm

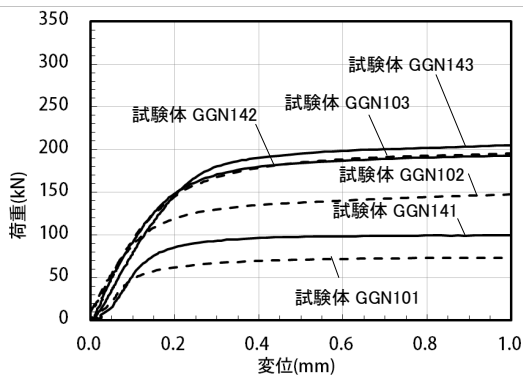


図-8 すべり試験荷重変形関係 (ボルト強度による比較)

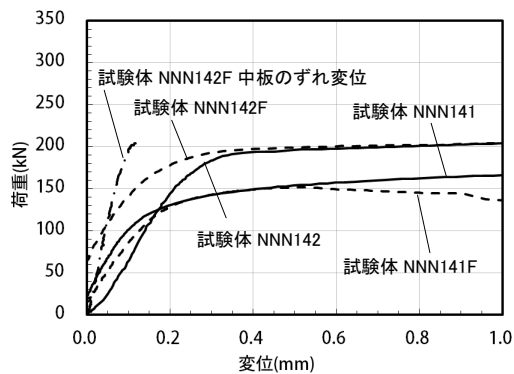


図-9 すべり試験荷重変形関係 (フィラーPL による比較)

試験体名	母材表面処理	添板表面処理	座金	高力ボルト	最大耐力 (kN)	破壊状況
TGGN1019	黒皮除去後 塗料塗布	黒皮除去後 塗料塗布	通常	S10T	140.3	添板大変形、 L形鋼破断寸前
TGGN1419				S14T	142.8	添板大変形、 L形鋼破断寸前
TGGR1419			大型角座金		208.0	添板大変形、 L形鋼破断
TNNN1019	黒皮状態*1 (PL-19)	黒皮状態	通常	S10T	139.9	添板大変形、 L形鋼破断寸前
TNNN1419					136.7	添板大変形、 L形鋼破断寸前
TNNR1419			大型角座金	S14T	216.1	添板大変形、 L形鋼破断
TNNR1422					227.3	添板および角座金 大変形、L形鋼破断

*1 浮き錆、油分は完全に撤去した状態とする。

④下側添板の板厚に関しては19mmと22mmの2種類とした。試験体形状を図-10に示す。母材はいずれもL-50×50×6を板厚6mmのガセットプレートに綴り合せた形状とした。綴り材にはリベットの代用として高力ボルトF10T-M12を用いた。計測項目は離間距離とし、図-10に示すように下側添板と母材との間にクリップゲージを設置して測定した。また、挟み込み接合部に用いたボルトの全数にひずみゲージを貼付し、ボルトの軸力変動を測定した。実験を終了する判断は母材か上側添板のいずれかが大きく曲げ変形し、最大耐力の90%まで耐力が低下したときとした。

3.2.2 引張試験結果

写真-3および図-11に引張試験後の破壊状況の一例および各試験体の荷重変形関係をそれぞれ示す。実線が試験体TGGシリーズを示し、点線および一点鎖線が試験体TNNシリーズを示している。いずれの試験体においても引張力の増加とともにトラス梁下弦材および上側添板の曲げ変形が顕著になり、最終的には下弦材の抜け出しまたは破断により破壊に至った。

摩擦面処理の異なる試験体TGGシリーズと試験体TNN

シリーズを比較すると、試験体TGGシリーズはややばらつきのある挙動を示すものの、同条件下の最大耐力は同程度となっている。また、大型角座金を用いた試験体TGGR1419および試験体TNNR1419をそれぞれ試験体TGGN1419および試験体TNNN1419と比較すると、前者の方が高い最大耐力となっていることから、大型角座金が上側添板の曲げ変形を抑制し、離間耐力の向上に寄与していることが分かる。ボルト強度の異なる試験体TNNN1019および試験体TGGN1019をそれぞれ試験体TNNN1419および試験体TGGN1419と比較すると最大耐力はほぼ同じとなっている。これは本実験では上側添板および下弦材が変形して抜け出すことによって離間耐力が決定しているためであり、ボルト軸力がキャンセルされることによって離間が生じているのではないことを示している。下側添板の板厚が22mmの試験体TNNR1422と19mmの試験体TNNR1419を比較すると離間耐力は多少異なるものの、ほぼ同じ挙動を示している。

図-12に試験体TNNR1419の挟み込み接合部に使用した各ボルトの軸力低下率を示す。軸力低下率はひずみゲージから測定されたボルト軸力の変動量の導入軸力に対する

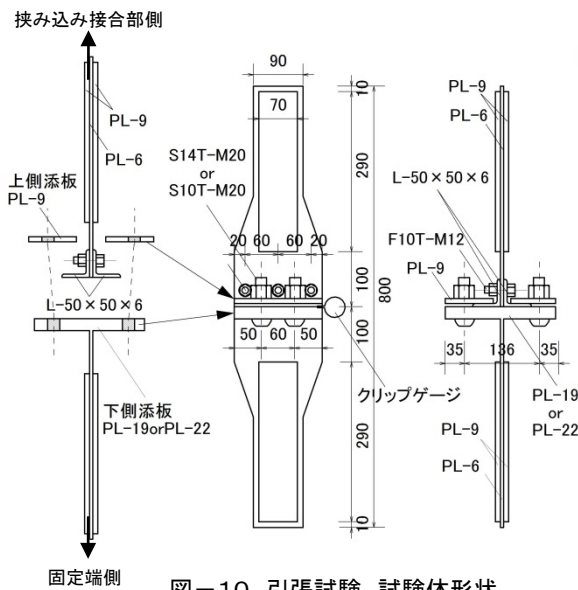


図-10 引張試験 試験体形状

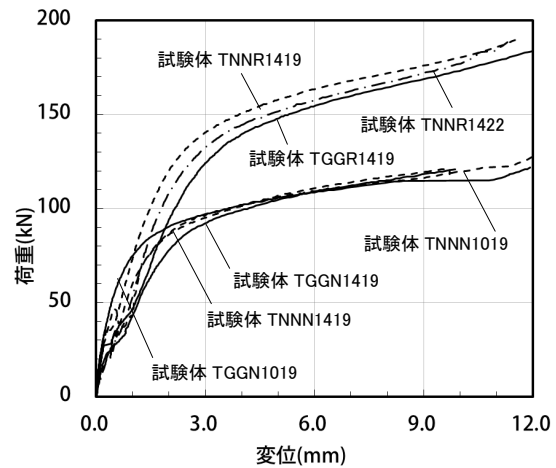


図-11 引張試験 荷重変形関係



試験体 TNNR1419



試験体 TNNR1422



試験体 TNNN1419

写真-3 引張試験破壊状況

比率(%)で示している。図-12 から軸力低下率は下弦材が抜け出す直前まで試験体に作用する引張力に比例して増加し、最大で約 13%となっている。他の試験体についても同様の傾向が見られ、最大軸力低下率はいずれも 20%程度に収まっている。この結果からも、ボルトの軸力が終局時まである程度維持されていることが分かる。なお、後述する接合部の設計においては一般的な高力ボルト摩擦接合と同様に、外力として作用する引張力の分だけ設計ボルト軸力を低減してすべり耐力を求めることとする。

以上のことから、本実験の範囲では挟み込み接合部に引張力が作用する場合には、摩擦面の状態およびボルトの強度によらず、下弦材の抜け出しまたは破断により最大耐力が決定されることが確認できた。また、大型角座金の使用は上側添板の曲げ変形を抑制し、離間耐力の向上に寄与することが確認できた。

4. 1/2モデル実験

要素実験の結果から挟み込み接合部におけるすべり性状は摩擦面処理やボルト本数などの要因に影響されるが、いずれの場合においてもすべり係数 $\mu = 0.125$ としてすべり耐力を安全側に評価できることが分かった。そこで、実際の鋼構造建物の方杖接合部を模擬して設計した試験体を用いて加力試験を行い、設計方法の適否について検討した。

4.1 試験体

試験体形状および試験体一覧を図-13 および表-4 にそれぞれ示す。試験体は 4 体とし、図-13 に示すように組立トラス梁に対して方杖が接合される部分を模擬した実大約 1/2 スケールのものでした。実験のパラメータは①摩擦面処理、②上側添板、の板厚の 2 水準とした。摩擦面処理については黒皮状態のものと黒皮を除去して鋼材の素地を露出した状態の 2 種類とした。これは実際の建物に適用する際、既存部材の黒皮を全て除去することは困難であることを考慮して黒皮

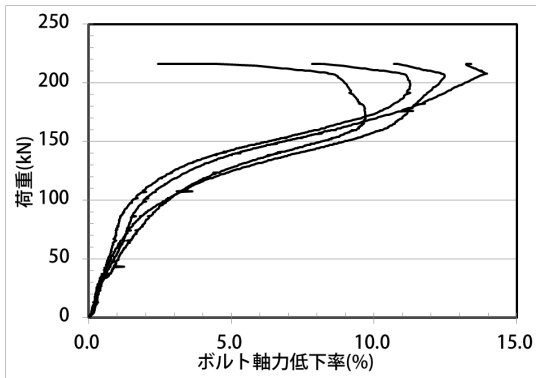


図-12 試験体 TNNR1419 ボルト軸力低下率

表-4 1/2スケール実験試験体一覧

試験体名	ディテール				
	高力ボルト	摩擦面	上側添板	座金	スペーサー
N25R	S14-M20 6本	黒皮	PL-25	大型角座金 + 円座金	PL-3 + PL-2.5 (t=5.5mm)
N32			PL-32	円座金	
NC25		黒皮除去 (鋼材素地)	PL-25		
NC32		PL-32			

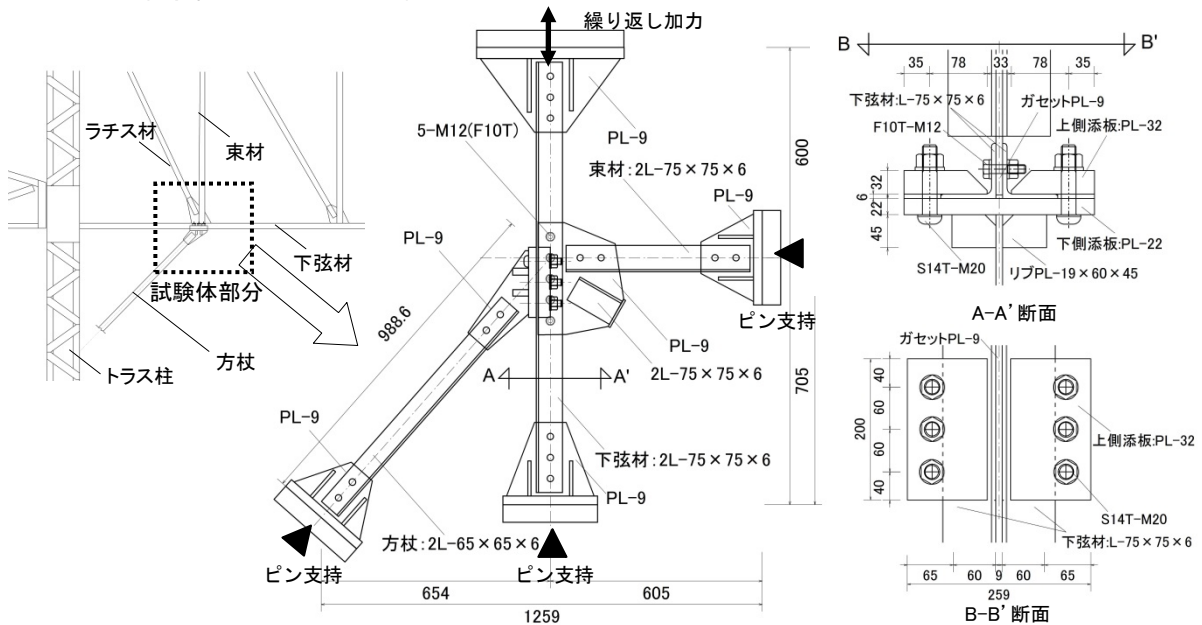


図-13 1/2スケール実験試験体

の有無によるすべり性状の違いを確認することを目的としたものである。上側添板は板厚25mmおよび32mmの2種類とし、板厚が25mmで摩擦面が黒皮状態のもののみ、上側添板の曲げ変形を抑制するためにPL-6×50×103からなる大型角座金を併用した。接合部各部分のディテールは図-14に示すフローに従って設計した。まず、図-13に示すような実在する架構をモデルとして、耐震改修指針²⁾に基づき架構のメカニズム時に方杖に作用する軸力を求める。なお、組立トラス梁の下弦材および東材の断面はいずれも2L-75×75×6で、鋼材はSS400とした。モデルとした架構では図-14(b)に示すように方杖両端部に塑性ヒンジが形成され、このときに方杖に作用する軸力 N_0 は約85kNとなる。これに対して圧縮・引張とも許容応力度以内となるように方杖の断面を2L-65×65×6(SS400)とした。挟み込み接合部は方杖が降伏するまですべりを生じないようにするために、方杖の降伏軸力 N_y を水平方向(${}_hN_y$)および方杖軸方向(${}_vN_y$)に分割した荷重をそれぞれせん断および引張に対する設計荷重とする。これに対して接合部のすべり耐力 ${}_Tq_{by}$ および離間耐力 ${}_Tp_{by}$ は式(2)および式(3)によって算出する。

$${}_Tq_{by} = n \cdot m \cdot \mu ({}_T N_0 - T_b) \quad (2)$$

$${}_Tp_{by} = n \cdot 0.9 {}_T N_0 \quad (3)$$

${}_Tq_{by}$: 挟み込み接合部のすべり耐力 (kN)

${}_Tp_{by}$: 挟み込み接合部の離間耐力 (kN)

n : ボルト本数 (本)

m : 摩擦面の数 (=2)

μ : すべり係数 (=0.125)

${}_T N_0$: 設計ボルト張力 (kN)

T_b : ボルト1本あたりに作用する引張力 (=vNy/n) (kN)

以上の値を用いて ${}_Tq_{by} > {}_hN_y$ かつ ${}_Tp_{by} > {}_vN_y$ であることを確認する。上下添板については ${}_vN_y$ および ${}_hN_y$ に対してそれぞれ断面が許容応力度以内となるように板厚を決定した。鋼材はいずれもSM490Aを使用した。なお、下側添板は全試験体とも板厚22mmとし、面外曲げ剛性を高めるために図-13に示すようにガセットプレートとの接合部にリブPL-19×60×45を溶接した。ボルトはトルシア形超高力ボルトのS14Tを使用した。また、各部材の配置寸法は図-3に示すディテールとなるように決定した。使用材料の材料特性を表-5に示す。

4.2 加力方法及び計測方法

加力は図-13に示すように下弦材の下端、東材および方杖材の端部をピン支持とし、下弦材の上端をジャッキで押し引きすることによって静的漸増繰り返し荷重を作用させた。加力サイクルを図-15に示す。加力の制御は前節で述べた架構のメカニズム時の方杖軸力 N_0 を基準として、 $\pm 0.5N_0$ 、 $\pm 1.0N_0$ 、 $\pm 2.0N_0$ をそれぞれ2回ずつ繰り返した後、ジャッキ

表-5 1/2スケール実験材料試験結果

断面	鋼材	使用部位	σ_y	σ_u	YR	EL
L-65×65×6	SS400	方杖	344.7	457.6	75.3	33.8
L-75×75×6	SS400	下弦材、東材	349.3	464.4	75.2	33.2
PL-6	SS400	スパーサー	314.0	450.0	69.8	27.0
PL-9	SM490A	ガセットPL	382.5	524.3	73.0	25.8
PL-19	SM490A	リブPL	375.8	527.3	71.3	33.8
PL-22	SM490A	下側添板	370.0	518.6	71.3	28.8
PL-25	SM490A	上側添板	371.8	518.8	71.7	30.7
PL-32	SM490A	上側添板	373.5	531.9	70.2	29.9
S14T-M20	-	挟み込み接合部	1367.0	1470.0	93.0	17.0
F10T-M12	-	トラス梁綴り材	1001.0	1064.0	94.1	21.0
S10T-M16	-	方杖/ガセット綴り材	1037.0	1090.0	95.1	19.0

σ_y : 降伏応力 (N/mm²), σ_u : 引張応力 (N/mm²), YR: 降伏比 (%), EL: 伸び (%)

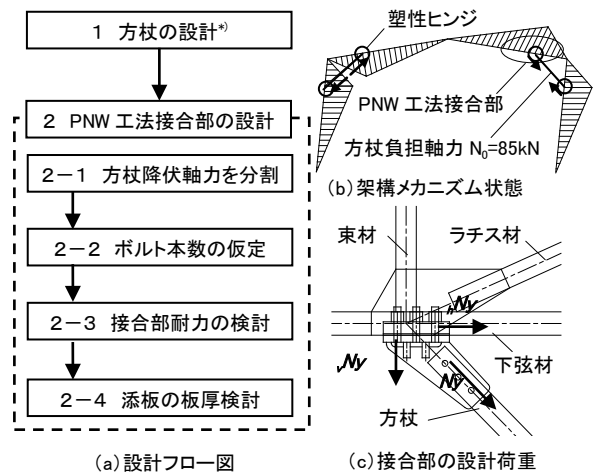


図-14 挟み込み接合部設計フロー

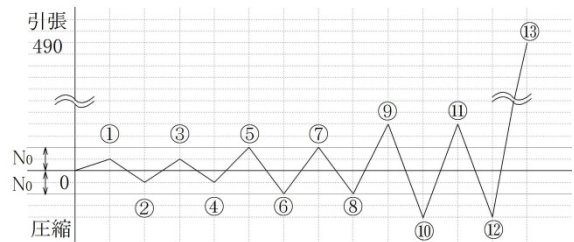


図-15 加力サイクル

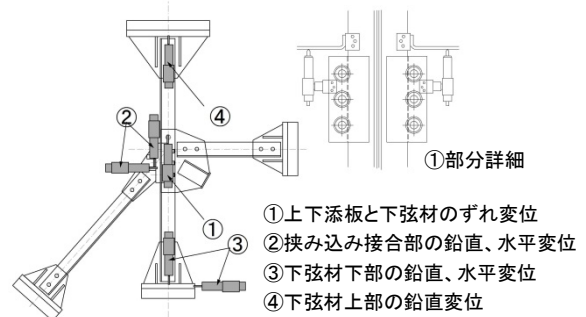


図-16 変位計測位置

の上限荷重(490kN)まで引き切りとした。2.0 N_o を超える圧縮荷重が作用した場合、試験体が座屈する恐れがあったため、圧縮側の最大荷重は 2.0 N_o としている。変位の計測位置を図-16 に示す。上下添板と下弦材のずれ変位のほか、挟み込み接合部全体の変位と下弦材上下端の変位を計測した。ひずみは下弦材の上下、束材および方杖それぞれの中央部にひずみゲージを貼付して計測した。また、挟み込み接合部に使用した高力ボルト全数にひずみゲージを貼付し、加力中のボルト軸力の変動を計測した。

4.3 実験結果

実験結果および破壊状況を表-6 および写真-4 にそれぞれ

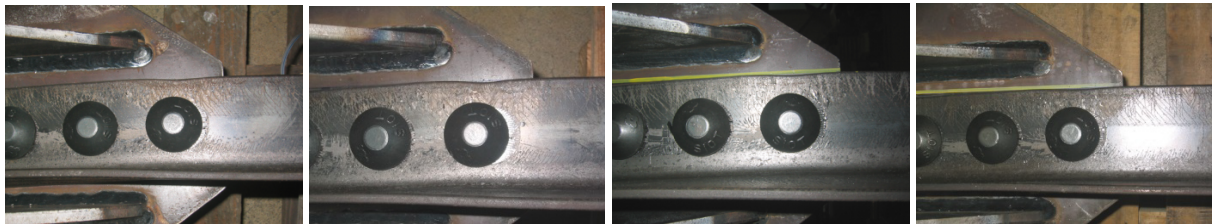
れに示す。試験体はいずれも加力端側の下弦材のボルト孔欠損部の降伏によって破壊した。これは実験の最大荷重が下弦材のボルト孔欠損部を考慮した降伏耐力とほぼ等しいことから確認できる。方杖の作用軸力は199~245kNとなっており、方杖の設計荷重 N_o (=85kN) に対して約 2.4~2.9 倍の荷重となっている。また、挟み込み接合部のずれ変位は最大で 0.98mm と微小な値であったことが分かる。

図-17 に各試験体の荷重変形関係を示す。実線は図-16 に示す①の変位、点線は②の鉛直変位、一点鎖線は④の変位をそれぞれ示す。上側添板の板厚が 32mm の試験体 N32 および試験体 NC32 においては 300kN 近傍で急激に耐力が

表-6 1/2スケール実験結果

試験体名	実験値			計算値		
	最大荷重 (kN)	方杖最大軸力 (kN)	最大ずれ変位 (mm)	下弦材・束材降伏軸力 ¹⁾ (kN)	方杖設計軸力 N_o (kN)	方杖降伏軸力 ²⁾ (kN)
N25R	487.0	244.8	0.71	84.6	244.8	0.71
N32	488.0	199.2	0.74			
NC25	488.0	209.0	0.80			
NC32	477.6	206.0	0.98			

- 1) L-75×75×6 のボルト孔欠損を考慮した有効断面に材料試験結果の降伏応力度を乗じた値
- 2) L-65×65×6 のボルト孔欠損を考慮した有効断面に材料試験結果の降伏応力度を乗じた値



試験体 N25R

試験体 N32

試験体 NC25

試験体 NC32

写真-4 1/2スケール実験破壊状況

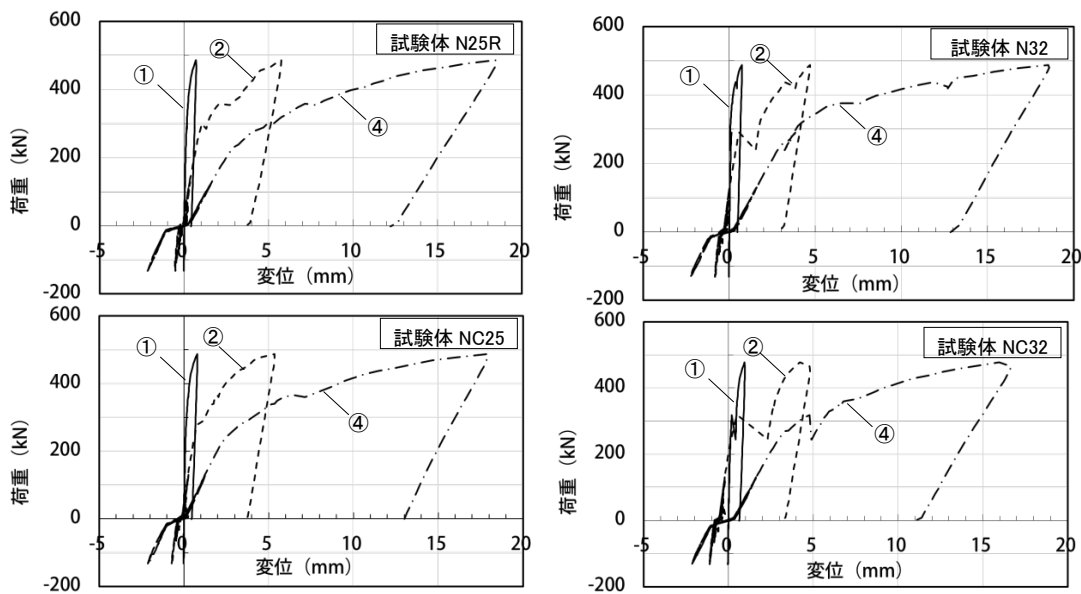


図-17 1/2スケール試験荷重変形関係

低下している。これは上側添板の剛性が周辺部材の剛性よりもかなり高いため、上側添板の曲げ変形に先行して下弦材と束材を接合しているガセットプレート部分においてすべりが生じたためである。摩擦面の状態のみ異なる試験体 N32 と試験体 NC32 を比較した場合、耐力および破壊性状に大きな違いは認められない。また、挟み込み接合部のずれ変位に関しても黒皮の有無に関わらず同程度の値となっている。図-18 に試験体 N25R の挟み込み接合部に使用した各ボルトの軸力低下率と荷重の関係を示す。個々のボルト軸力の変動にはばらつきがあるが、軸力低下率は最大でも5%以内となっており、すべり耐力に対する影響は小さいと考えられる。なお、ほかの試験体についても同様の傾向が見られたが、詳細については省略する。図-19 に試験体 NC25 および試験体 NC32 の挟み込み接合部変位(図-16 に示す②)と下弦

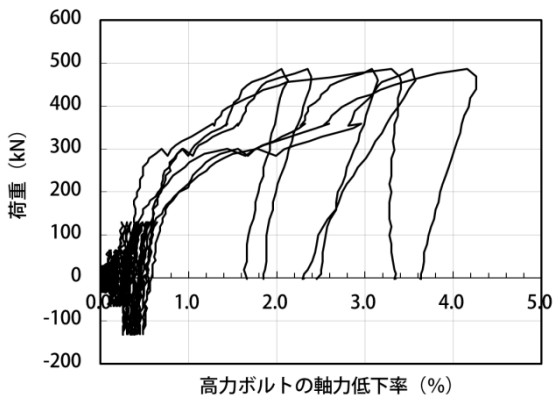


図-18 試験体 N25R ボルト軸力低下率

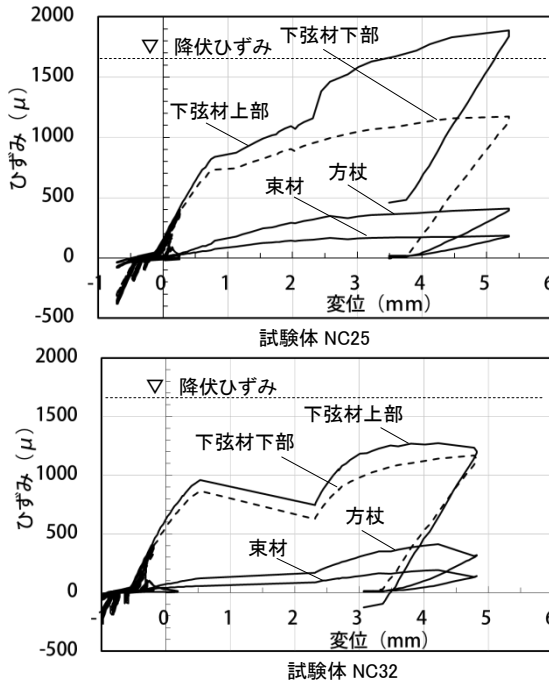


図-19 下弦材、束材、方杖のひずみ履歴

材(上端:実線、下端:点線)、束材および方杖のひずみ履歴との関係を示す。上側添板の板厚が 25mm の試験体 NC25 は下弦材上部のひずみが終局時に降伏域に達している。一方、上側添板の板厚が 32mm の試験体 NC32 では下弦材上下のひずみは終始ほぼ弾性範囲となっているが、1000 μ 付近で一旦ひずみが低下している。これは前述のように下弦材と束材を接合しているガセットプレート部分ですべりが生じ、下弦材に作用する軸力がキャンセルされたためであると考えられる。なお、摩擦面処理が異なる場合においても同様の傾向が見られたが、詳細については省略する。

5. まとめ

要素実験および 1/2 スケール実験から得られた知見を以下にまとめる。

- ①挟み込み接合部のすべり性状は摩擦面の状態、ボルトの強度および本数などの条件によって決まるが、すべり係数 $\mu \geq 0.125$ とすることによってすべり耐力を安全側に評価することができる。
- ②大型角座金を使用し、上側添板の曲げ変形を抑制することによって、引張力作用時の離間耐力を高めることができる。
- ③実在する構造物をモデルにして補強部材の接合部を設計し、1/2 スケール実験を行った。その結果、母材の黒皮の有無に関わらず、ずれ変位は微小であることを確認した。これより要素実験の結果に基づいた挟み込み接合部の設計方法の妥当性が確認できた。
- ④なお、添板の板厚によっては周辺部材と剛性が不連続になり急激な耐力低下を引き起こす可能性があるため、周辺部材とのバランスを考慮して適切な板厚を選択する必要がある。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会:高力ボルト接合設計施工ガイドブック、2003.12
- 2) 日本建築防災協会 耐震改修促進法のための既存鉄骨造建築物の耐震診断および耐震改修指針・同解説、1996.9
- 3) 平井敬二、加藤政利、植木理枝子:無溶接工法による鋼構造物の耐震補強に関する実験的研究 その1 およびその2、日本建築学会九州支部研究報告第 48 号、pp.341-348、2009. 3

【謝辞】

本研究は、西日本工業大学 平井教授との共同研究により実施したものです。実験にあたって多くのご助言およびご指導をいただきました。ここに記して謝意を表します。