

鋼 I 桁の高力ボルト摩擦接合継手部腹板の補剛構造の合理化に関する実験

秋山 寿行¹⁾

鋼桁橋の設計法や製作法における合理化に関する検討の一環として、高力ボルト摩擦接合継手部の腹板において水平補剛材の省略が可能となる構造パラメータの範囲や、継手部において水平補剛材に代わる補剛方法について既に提案している。本研究は、この提案した水平補剛材の省略が可能な構造パラメータ範囲および水平補剛材に代わる補剛方法について、3種の供試体を対象として実証実験を行ったものである。その結果、水平補剛材省略可能範囲については数値解析による提案が妥当であること、また、補剛リブ付き添接板による補剛方法については終局強度を高める効果があるが、腹板の添接板と圧縮フランジとの間のすきまが変形性能に影響を及ぼすことがあることを明らかにした。

まえがき

近年、中小スパン鋼桁橋の設計法の合理化や製作の自動化・省力化に関して、多方面にわたる調査研究が行われている。著者ら^{1), 2)}は、鋼桁橋のこのような合理化に関する検討の一環として、鋼 I 桁の高力ボルト摩擦接合継手を対象とし、継手部の腹板パネルにおける補剛構造の合理化に関する検討を進めてきた。そこでは、水平補剛材を有する I 桁に対し、

- ① 高力ボルト摩擦接合継手部の腹板パネルにおける水平補剛材の省略の可能性
- ② 高力ボルト摩擦接合継手部において水平補剛材に代わる補剛法

について、立体薄板構造の弾塑性有限変位解析プログラムを用いた耐荷力の数値シミュレーションにより検討を行っている。そして、実橋を対象とした構造パラメータの実績調査に基づき、継手部の構造詳細に関する数多くのパラメータ解析を行っている。その結果、水平補剛材を省略しても、I 桁断面の終局強度として曲げ降伏強度の確保が可能な腹板の幅厚比およびアスペクト比の範囲を明らかにしている。さらに、水平補剛材を省略すると曲げ降伏強度を確保できない I 桁断面に対し、腹板の添接に補剛リブ付き添接板を用いることにより、水平補剛材を省略しても曲げ降伏強度の確

保が可能となる範囲も明らかにしている (図-1)。

本研究は、これらの数値解析結果による高力ボルト摩擦接合継手部の耐荷力特性および補剛構造の合理化に関する提案を実験的に検証することを目的とした。そして、3種の I 桁供試体を対象とし、高力ボルト継手部の曲げ実験を行った。本文では、この実験結果より、水平補剛材の省略による耐荷力特性および腹板の添接に補剛リブ付き添接板を用いることによる耐荷力特性などについて述べる。そして、継手部の水平補剛材の省略が可能な構造パラメータの範囲について、数値解析結果による推定の妥当性を明らかにする^{3), 4)}。

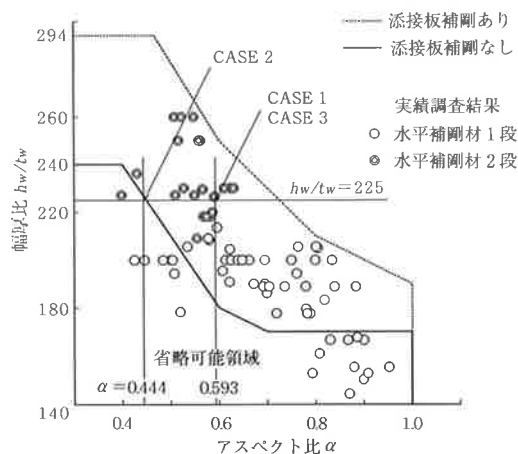


図-1 水平補剛材省略可能範囲 (SM490Yの場合)^{1), 2)}

1) 橋梁技術部技術課課長

1. 実験結果

(1) 供試体

実験供試体は、支間中央に高力ボルト摩擦接合継手を設けた鋼I桁である。そして、継手部の構造パラメータが異なる3種類とする。ここでは道路橋示方書⁵⁾に基づき、鋼種がSM490Y、水平補剛材が2段のI桁を対象とし、曲げ降伏強度が確保されるI形断面を決定した。また、高力ボルト摩擦接合継手はI桁の曲げ降伏強度以上の強度を有するものとし、継手部の腹板には水平補剛材を取り付けないものとした。その際、継手パネルの構造パラメータは、次の3ケースを想定して、図-1を基に設定した。

- CASE1：水平補剛材を省略すると曲げ降伏強度が確保されないケース
- CASE2：水平補剛材を省略しても曲げ降伏強度が確保されるケース
- CASE3：水平補剛材を省略すると曲げ降伏強度が確保されないが、補剛リブ付き添接板を用いることにより曲げ降伏強度が確保されるケース

これら3ケースの継手パネルの構造パラメータを表-1に示す。腹板の幅厚比およびアスペクト比について、提案済みの水平補剛材省略可能範囲における位置付けは図-1のとおりである。供試体の形状を図-2および写真-1に示す。

高力ボルトは等級F10T、サイズM20とし、初期導入軸力は18.2tf（設計軸力16.5tfの1割増し）とした。

(2) 荷重載荷および測定方法

荷重載荷方法は図-3に示すように、単純支持装置により供試体の桁を支持した。そして、油圧ジャッキ（載荷能力200tf）により2点の集中荷重を

表-1 供試体継手パネルの構造パラメータ

項目	CASE 1	CASE 2	CASE 3
鋼種	SM490Y		
降伏応力度 σ_y^* (kgf/cm ²)	3600 (公称値)		
腹板 断面 $h_w \times t_w$ (mm)	1350 × 6		
断面積 A_w (cm ²)	81.0		
フランジ断面 $b_f \times t_f$ (mm)	290 × 14		
断面積 A_f (cm ²)	40.6		
曲げ降伏強度 M_y^* (tf·m)	261.6 (公称値)		
垂直補剛材間隔 a (mm)	800	600	800
腹板の幅厚比 h_w/t_w	225.0	225.0	225.0
アスペクト比 $\alpha = a/h_w$	0.593	0.444	0.593
断面積比 A_w/A_f	2.00	2.00	2.00

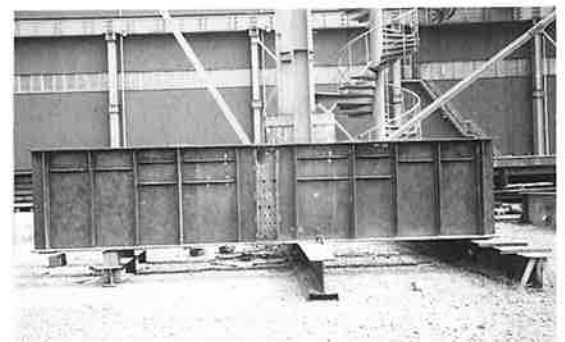


写真-1 実験供試体

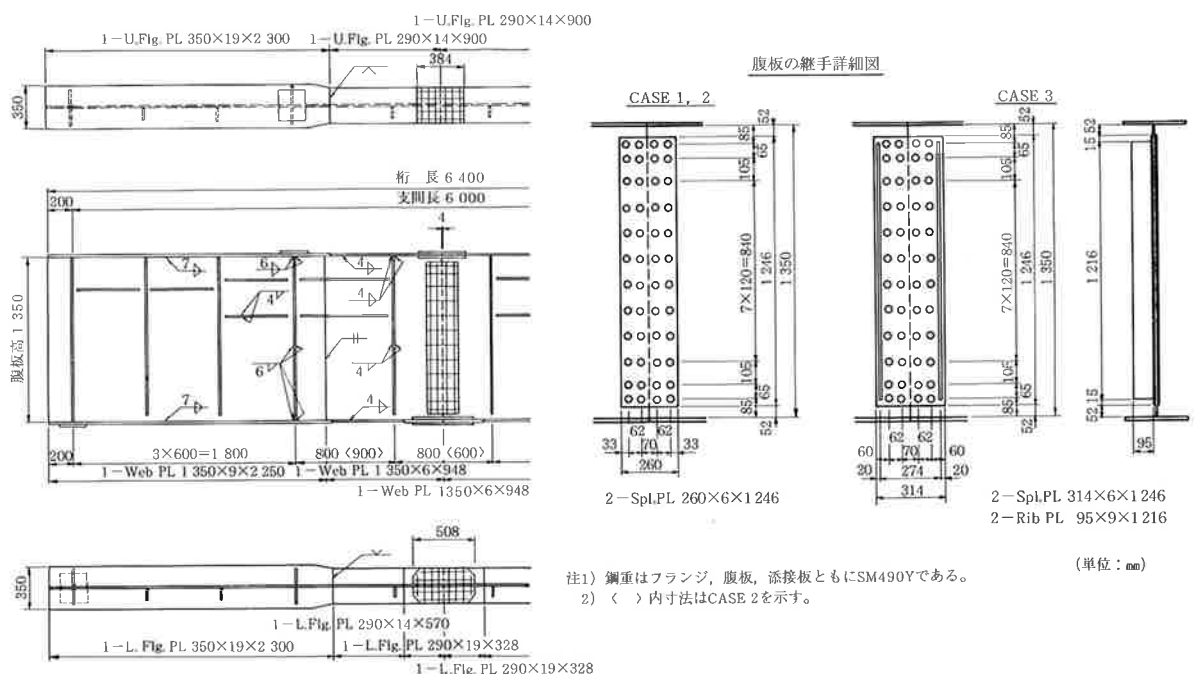


図-2 供試体の形状

注1) 鋼種はフランジ、腹板、添接板ともにSM490Yである。
 2) < > 内寸法はCASE 2を示す。

(単位: mm)

載荷し、継手パネルを含む中央部分を等曲げ状態とした。継手部断面の降伏後も、桁全体の耐力が低下するまで徐々に荷重を加えた。また、断面が終局強度に達する前に横倒れ変形が生じないように、横倒れ防止枠を設置した。実験の様子を写真-2に示す。

荷重載荷中の測定項目は以下のとおりである。

- ①最大荷重
- ②桁の鉛直たわみ
- ③フランジおよび腹板の面外たわみ
- ④フランジ、腹板および添接板のひずみ
- ⑤フランジ継手部のすべりの有無

載荷荷重は油圧ジャッキと供試体との間にロードセルを挿入して測定した。桁の鉛直たわみおよびフランジと腹板の面外たわみは変位計により、また、フランジ、腹板および添接板のひずみは各表面に貼付したひずみゲージにより測定した。フランジ継手部のすべりについては、荷重載荷前にフランジ継手部の側面にけがき線を書き込み、このけがき線のずれの有無を観察した。

実験終了後に供試体を解体し、継手部のすべり面やボルト孔の状況を観察した。

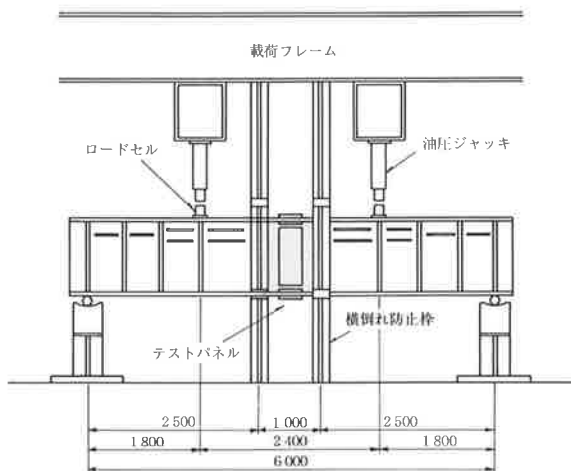


図-3 荷重載荷方法

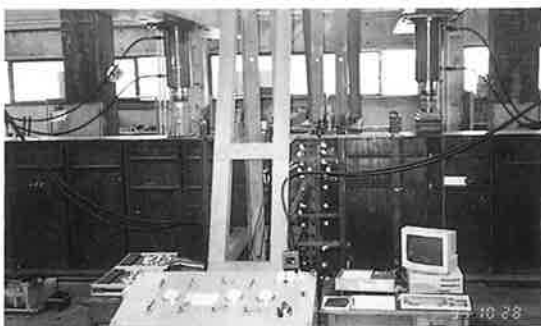


写真-2 実験状況

2. 実験結果および考察

(1) すべり挙動

供試体の高力ボルト継手は、道路橋示方書⁵⁾に基づく高力ボルトの必要本数および母材の必要断面積を確保している。その結果、いずれのケースもすべり音は発生せず、フランジ継手部の側面のけがき線についても、フランジと添接板とのずれは見られなかった。継手部のフランジおよび腹板の挙動については、添接板がそれぞれの母材と一体となって変形を示した。

(2) 終局強度

実験より得られた終局強度 M_u を表-2に示す。また、断面寸法および鋼板の降伏応力度に対して、実測寸法および引張試験値($\sigma_y=4396\text{kgf/cm}^2$)を用いて算出した曲げ降伏強度 M_y 、設計寸法および公称応力度($\sigma_y=3600\text{kgf/cm}^2$)を用いて算出した曲げ降伏強度 M_{y^*} も併記する。

表-2 終局強度(M_u :実験値)

項目	CASE 1	CASE 2	CASE 3
実験値 M_u (tf·m)	315.0	321.9	324.2
計算値 M_y (tf·m)	322.9	324.1	324.0
	M_{y^*} (tf·m)	261.6	261.6
M_u/M_y	0.976	0.993	1.001
M_u/M_{y^*}	1.204	1.231	1.239

注) M_y : 断面は実測寸法、降伏応力度は引張試験値を用いて算出した曲げ降伏強度
 M_{y^*} : 断面は設計寸法、降伏応力度は公称値を用いて算出した曲げ降伏強度

終局強度 M_u について、継手パネルのアスペクト比が異なるCASE1とCASE2とを比較すると、アスペクト比の小さいCASE2の方が終局強度が大きい。このことより、終局強度に及ぼすアスペクト比の効果が確認された。また、腹板の添接板の構造が異なるCASE1とCASE3とを比較すると、補剛リブ付き添接部を用いたCASE3の方が大きい。このことより、補剛リブ付き添接板を用いることにより終局強度が高まることが確認された。

終局強度 M_u と曲げ降伏強度 M_y との比較について、CASE1では $M_u/M_y=0.976$ で、水平補剛材の省略により、耐荷力の曲げ降伏強度 M_y からの低下は2.4%である。一方、文献1)での数値解析結果による M_u/M_y の推定値は0.959で4.1%の低下であり、実験における耐荷力の低下は数値解析による推定値より小さい。これは、主に継手パネルの初期たわみ

の形状の違いによるものと思われる。CASE2では強度が若干小さくなったが、 $M_u/M_y=0.993$ で曲げ降伏強度 M_y をほぼ確保している。また、CASE3では $M_u/M_y=1.001$ で、終局強度は曲げ降伏強度 M_y とほぼ一致し、曲げ降伏強度 M_y を十分上回るというものではない。いずれのケースについても、数値解析結果による提案をほぼ満たしてはいるが、特にCASE3の場合、腹板の添接板上端と上フランジ（圧縮フランジ）とのすきま部において局部座屈が発生し、この影響により極限強度が低下したと思われる。したがって、このすきま高さに注意することにより、極限強度に対する補剛リブの効果がさらに発揮されたものと考えられる。

すきまの影響については、次章において数値シミュレーションにより検討する。

(3) 継手パネルの面外たわみ

最大荷重とその前後の荷重レベルにおける継手パネルの腹板および上フランジの面外たわみを図-4に示す。各ケースの結果について以下に述べる。

1) CASE1

最大荷重に達するまでは、腹板の面外たわみはあまり顕著に現れていない。このたわみモードは、腹板の添接板部が継手線位置の鉛直軸回りに回転する1次の逆対称モードとなっている。また、上フランジの鉛直たわみはフランジ面に

ほとんど平行である。

最大荷重時には、腹板の面外たわみが顕著に現れ、添接板部が鉛直軸回りに大きく回転している。そして、上フランジの添接板部が、腹板線を中心にして回転し始めている。

最大荷重に達した後、上フランジの添接板部が大きく回転し、この回転変形により、腹板の添接板上端と上フランジとの間のすきま部において、局部的な板曲げ変形が生じている。このため、腹板の面外たわみが急激に大きくなり、その結果、1次の対称モードに近づいている（写真-3(a)）。

2) CASE2

腹板の面外たわみはCASE1とは異なり、垂直補剛材間において1次の対称モードとなっている。最大荷重に近づくにつれて腹板の面外たわみが大きくなっているが、腹板の添接板部以外の無補剛部分では、アスペクト比が小さいため面外たわみはわずかである。また、最大荷重に達した後の面外たわみの増加は、CASE1に比べ急激ではない。

上フランジについては、最大荷重に達するまではCASE1と同様に、回転することなく鉛直方向に変位している。最大荷重に達した後は添接板部がわずかに回転したが、CASE1ほど顕著で

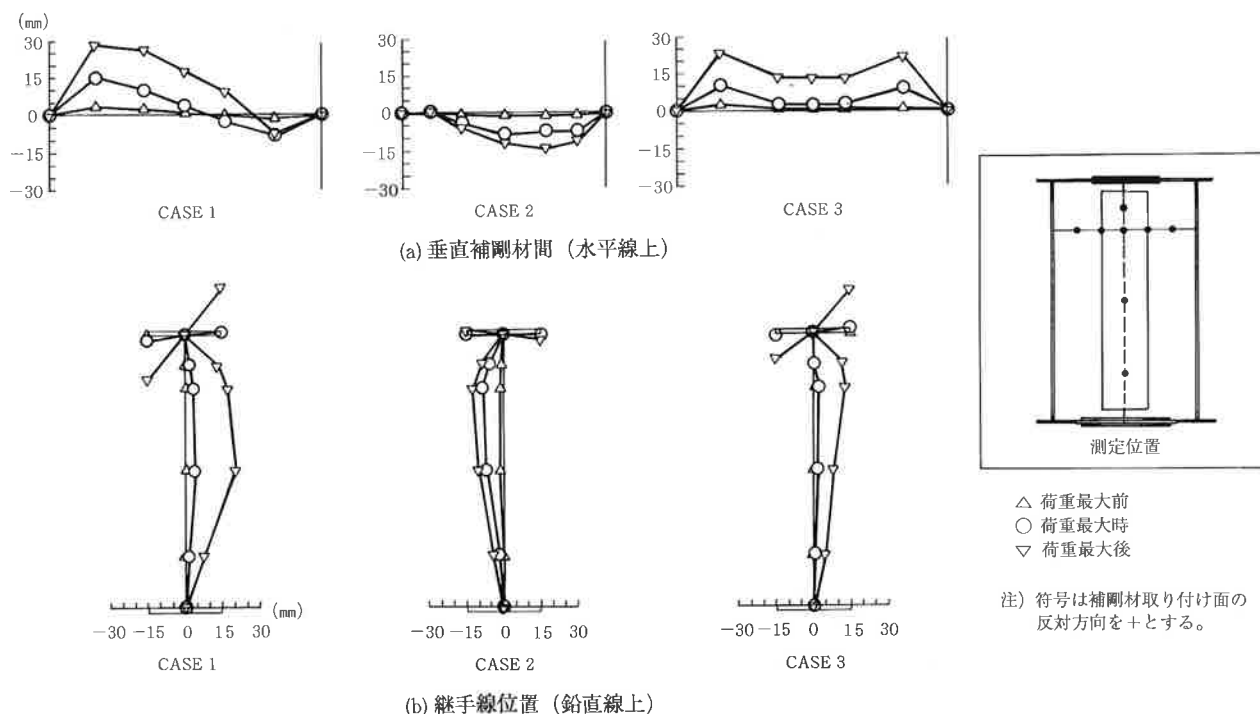


図-4 腹板および上フランジの面外たわみ

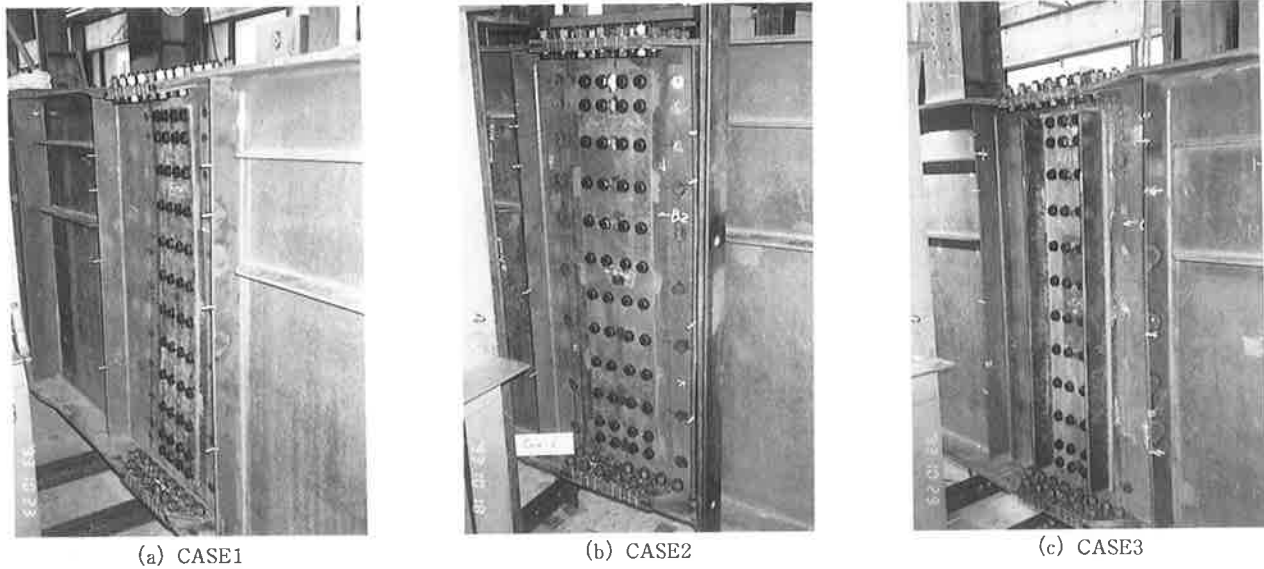


写真-3 継手パネルの変形状況

はない(写真-3(b))。

3) CASE3

最大荷重に達するまでは、腹板の面外たわみはあまり顕著ではない。上フランジの鉛直たわみは、CASE1およびCASE2と同様にフランジ面にはほとんど平行である。

最大荷重時には、腹板の面外たわみは添接板部では小さく、添接板部以外の無補剛部分で顕著に現れている。このことより、腹板の面外変形に対する補剛リブの効果が現れているといえる。

最大荷重に達した後はCASE1と同様に、上フランジの添接板部が大きく回転している。そして、この回転変形により、腹板の添接板上端部のすきま部において局部的な板曲げ変形が生じている。このため、腹板の添接板部も面外たわみが大きくなっている(写真-3(c))。

この結果について次のように考えられる。腹板の添接板部は補剛されているが、添接板上端部のすきま部は母材のみである。したがって、このすきま部の剛性が添接板部と極端に異なり、面外変形の影響がすきま部に集中することになる。このため、すきま部に局部的な板曲げ変形が生じ、腹板の面外たわみが添接板部を含め急激に大きくなったと考えられる。

3. 継手部の構造法に関する解析検討

(1) 検討内容

実験の結果、補剛リブ付き添接板を用いるケー

ス(CASE3)は補剛リブのないケース(CASE1)に比べると、腹板の板たわみ、特に腹板の添接板部の板たわみがかなり抑制されることが確認できた。しかし、前章でも述べたように、腹板の添接板上端と上フランジ(圧縮フランジ)とのすきま部で局部的な板曲げ変形が発生したため、終局強度に対する補剛リブの効果の度合いを明確にすることはできなかった。そこで、終局強度に対するすきま部の影響を検討するため、立体薄板構造の弾塑性有限変位解析プログラムを用いて耐荷力解析を行った。

(2) 解析方法

実験供試体の全ケースについて、腹板の添接板上端と上フランジとのすきまに関し、以下の3つのモデルを対象とする(図-5)。

- モデル1：すきまがある(供試体にあるすきま高さを考慮)
- モデル2：すきまがある(供試体にあるすきま高さの1/2を考慮)
- モデル3：すきまがない(腹板の添接板上端を上フランジにまで伸ばす)

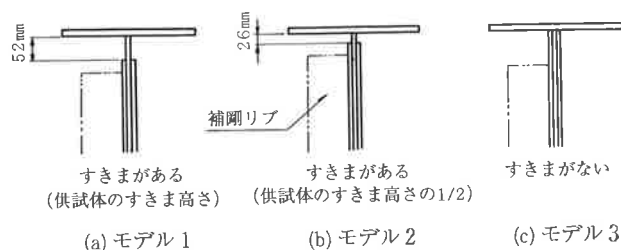


図-5 腹板添接部のすきまの検討モデル

ただし、モデル2の解析はCASE3についてのみ行った。

解析方法については文献2)に詳述しているが、その概略は以下のとおりである。

- ①解析モデルは垂直補剛材間の継手パネルを対象とし、腹板およびフランジは添接板の板厚を考慮した変厚板とする。
- ②初期不整として腹板およびフランジの初期たわみを考慮する。
- ③荷重は継手パネルの両側端において強制回転角を与え、純曲げ状態とする。
- ④腹板およびフランジの添接板についてはその協力幅を考慮する。

(3) 解析結果および考察

耐荷力解析の結果、各モデルの終局強度を表-3に示す。CASE1ではすきまの影響による終局強度の低下はわずかであり、CASE2ではすきまの有無による終局強度の差はほとんど見られない。そして、CASE3についても終局強度に対するすきまの影響はわずかであり、すきまを無くしても終局強度はそれほど大きくならない。

表-3 終局強度
(実験値および弾塑性有限変位解析による値)

		(単位: tf・m)		
項	目	CASE 1	CASE 2	CASE 3
実験値		315.0	321.9	324.2
解析値	モデル 1	302.8	317.8	338.6
	モデル 2	—	—	342.4
	モデル 3	305.4	317.6	347.4

次に、CASE3の解析結果による崩壊モードを図-6に示す。ただし、この図では継手部の1/2パネル、すなわち継手線と垂直補剛材との間のパネルを示している。CASE3ではすきまがある場合は、ない場合に比べ、上フランジの添接板部の回転変形が大きい。しかし、腹板については、添接板部の変形はすきまの有無に係わらずかなり抑制されており、添接板部以外の無補剛部分の変形が顕著である。一方、CASE1およびCASE2ではすきまの有無による差はほとんどない。以上の崩壊モードは実験結果と同様であり、これらの解析が正しく行われたものと考えられる。

耐荷力解析による荷重-強制回転角の結果を図-7に示す。この結果より、終局強度以降の除荷域の傾向がケースによって異なっている。CASE3で

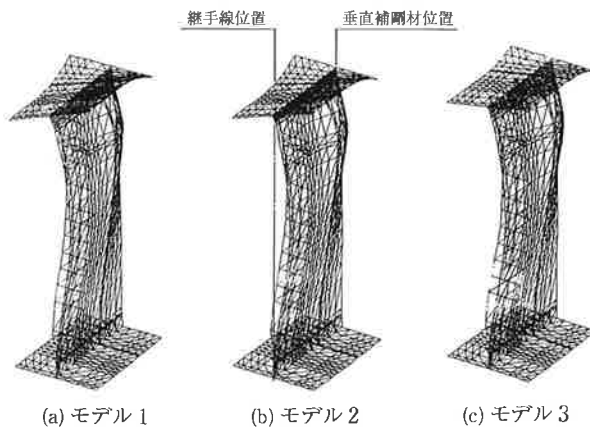


図-6 継手パネルの崩壊モード(CASE3)

は、終局強度以降の荷重-強制回転角曲線の傾向が、すきまの有無によって異なっている。すなわち、すきまがない場合は最大荷重に達した後、荷重がほとんど低下することなく強制回転角が増加している。すきまがある場合は、すきま部に腹板の変形が集中し局所的な板曲げが生じ、最大荷重に達した後の除荷域の勾配がすきま量とともに大きくなっている。

これらの結果より、終局強度および終局強度以降の挙動に及ぼすすきまの影響について、CASE1およびCASE2ではすきまの有無の差はほとんどないと思われる。CASE3では終局強度以降の変形に対して、すきまの高さが影響するものと考えられる。実橋の構造においては、腹板厚に対するすき

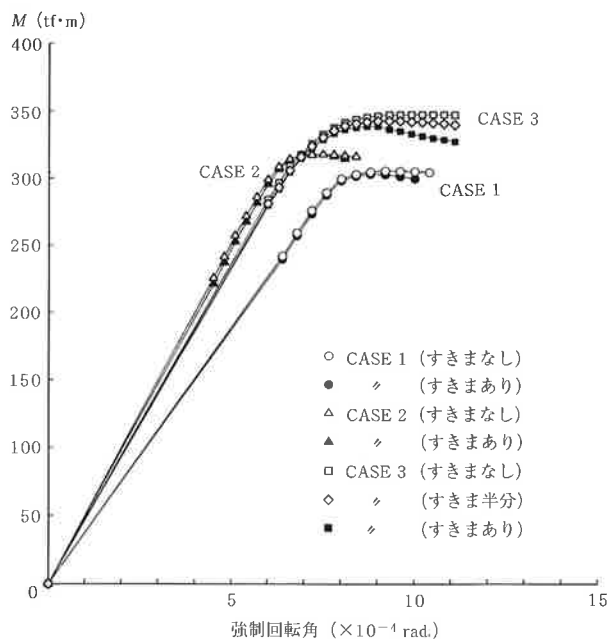


図-7 荷重-強制回転角

ま高さの割合が本供試体より小さいので、すきまの影響は本解析結果に比べて小さいものと思われる。

4. まとめ

本研究では、水平補剛材2段を有する鋼I桁の高力ボルト継手部を対象として、継手部腹板における水平補剛材省略の可能性と、腹板において水平補剛材を省略し補剛リブ付き添接板を用いる場合の補剛効果を検証するため、3種の供試体による実験および耐荷力解析を行った。以下にその結論を述べる。

- 1) 水平補剛材が必要な鋼I桁の高力ボルト継手部において、腹板パネルのアスペクト比が小さい場合、この部分における水平補剛材を省略しても継手部の曲げ降伏強度を確保することができる。そして、曲げ降伏強度の確保が可能な腹板パネルのアスペクト比および幅厚比の範囲は、数値解析結果(図-1)による推定が妥当である。
- 2) 水平補剛材を省略すると継手部の曲げ降伏強度の確保ができない場合でも、腹板において補剛リブ付き添接板を用いることにより、水平補剛材を省略しても曲げ降伏強度を確保することができる。そして、前記1)と同様に、曲げ降伏強度の確保が可能な構造パラメータの範囲は、図-1による推定が妥当である。
- 3) 腹板において補剛リブ付き添接板による補剛方法は終局強度を高める効果があるが、添接板上端と上フランジとのすきまの高さが終局強度以降の変形に対して影響を及ぼすことがある。したがって、このすきま高さをあまり大きくしないように注意する必要がある。

あとがき

本研究は、高力ボルト摩擦接合継手部の限界状態に関する研究の一環として行っているものである。今後は、これまでの実験的研究成果を基に継手部の限界状態設計法について検討する予定である。本実験の結果が、鋼構造を対象とした限界状態設計法の導入に際してのデータとして参考になれば幸いである。

最後に、終始懇切なご助言、ご指導をいただいた西村宣男 大阪大学教授をはじめ、お世話にな

った亀井義則 大阪大学助手、高木優任君(当時、大阪大学大学院生)、大松彰吾君(当時、大阪大学学部生)、そして関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大阪大学工学部土木構造研究室・日本橋梁建設協会：プレートガーダーの高力ボルト摩擦接合現場継手部における腹板の補剛方法の合理化に関する研究，OUCS9305，1993.3.
- 2) 秋山寿行・西村宣男・松村達生・大塚勝：プレートガーダー高力ボルト継手部腹板の補剛方法の合理化，構造工学論文集，Vol. 40A，pp. 317-329，1994.3.
- 3) 大阪大学工学部土木構造研究室・駒井鉄工(株)：プレートガーダーの高力ボルト摩擦接合継手部の耐荷力に関する実験的研究，OUCS9335，1994.3.
- 4) 秋山寿行・西村宣男・亀井義典・大松彰吾：鋼I桁の高力ボルト継手部腹板の補剛構造の合理化に関する実験，鋼構造年次論文報告集，Vol. 2，pp. 179-186，1994.11.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（I 共通編，II 鋼橋編），1990.2.