

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

RATIONALIZATION ON STIFFENING DETAILS OF WEBS IN HIGH STRENGTH
FRICTION GRIP BOLTED JOINT OF PLATE GIRDER

秋山寿行* 西村宣男** 松村達生*** 大塚勝****

By Hisayuki AKIYAMA, Nobuo NISHIMURA, Tatsuo MATSUMURA and Masaru OHTSUKA

Recently, in the steel bridge fields, the improvements of design methods, manufacturing processes and structural details have been introduced. In this study, the stiffening system in web panel of High Strength Friction Grip (HSFG) bolted joint of the plate girder is investigated as a part of the structural rationalization. The geometrical and mechanical parameters of HSFG-bolted joints are surveyed for existing plate girder bridges. And the possibility that the horizontal stiffeners can be omitted in HSFG-bolted joints is examined by the elasto-plastic finite displacement analysis from the viewpoint of limiting aspect ratio and limiting width-thickness ratio of the joint panel. Furthermore, an effective stiffening method of the joint panel with large width-thickness ratio is proposed in order to maintain enough strength capacity of the joint panel.

Key Words: plate girder, HSFG-bolted joint, horizontal stiffener, ultimate strength

1. まえがき

現在、中小スパン橋梁における鋼橋の競争力強化を目指して、積算体系、設計法の合理化や製作の自動化・省力化を可能とする構造詳細の検討など多方面にわたる調査研究が行われている。このような合理化に関する検討の一環として、本研究ではプレートガーダー橋の高力ボルト摩擦接合継手部（以下、「継手部」と略す）の腹板における局部座屈防止のための補剛構造の合理化に関する検討を行った。

最近において建設される支間長25～55mのプレートガーダー橋の腹板には水平補剛材1段または2段を配置したことが多い。また、架設現場における継手は、一般的に高力ボルト摩擦接合が用いられている。わが国のプレートガーダー腹板の構造詳細では、水平補剛材と垂直補剛材および添接板の間には、図-1に示すように30mm程度の隙間が設けられ、さらに水平補剛材端部の回し溶接を容易にするために、水平補剛材はその両端を45°にカットした台形状に加工されている。添接板と隣接の垂直補剛材との間隔が狭い場合、桁の耐荷力の観点からはほとんど効果がないと考えられる短い水平補剛材を省略し得る断面パラメータの範囲の検討が第1の検討課題である（図-2）。

* 工修 駒井鉄工（株）橋梁技術部（〒555 大阪市西淀川区中島2-5-1）

** 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科（〒565 吹田市山田丘2-1）

*** 工修 NKK 橋梁建設部（〒230 横浜市鶴見区末広町2-1）

**** （社）日本橋梁建設協会（〒104 東京都中央区銀座2-2-18）

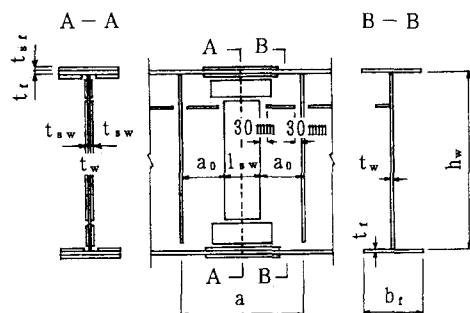


図-1 プレートガーダーの高力ボルト継手部の構造例（水平補剛材1段の場合）

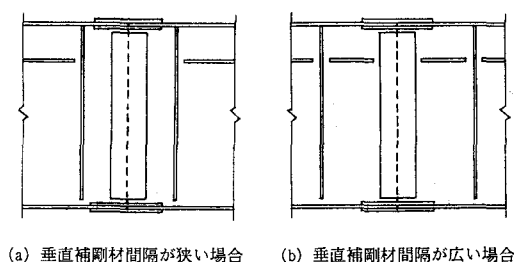


図-2 簡易形式の継手部の腹板構造

また、第1の検討において水平補剛材が必要である場合について、継手部腹板の他の合理的な補剛方法の考案が第2の検討課題である。

これらの課題は、主として立体薄板構造の弾塑性有限変位解析プログラム(NAPLAT)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う。また、継手部において確保する強度の目標値を得るために、プレートガーダーの一般部の強度解析結果についても検討を行った。

水平補剛材を有するプレートガーダーの耐荷力はCooper¹⁾・²⁾、Rockey³⁾、Ostapenko⁴⁾・⁵⁾、長谷川・西野・奥村⁶⁾・⁷⁾らによって実験的あるいは崩壊モデルを導入した簡易理論によって検討されてきた。しかし、継手部のように添接板、水平補剛材の輻輳した構造の耐荷力に関する実験的研究あるいは理論的研究はほとんど見当たらない。上記のプレートガーダーの耐荷力に関する諸研究が活発に行われた時代と異なり、今日ではスーパーコンピュータの環境の発達と有限要素法による立体薄板構造の弾塑性有限変位解析法の開発とによって、構成板要素の初期たわみや残留応力を適切に与えることができれば、多少複雑でも薄板集成部材の極限強度評価が簡単に行われるようになってきている。

プレートガーダーの高力ボルト継手は、せん断力が支配的となる端支点付近に設けられることは一般的にはない。曲げが支配的な箇所または曲げとせん断の共存する領域に設けられるのが一般的である。腹板の耐荷力に対する曲げモーメントとせん断力の相互作用は比較的僅少であることが知られていることと、ここで対象としている継手部の添接板と重なっていない部分の板パネル（図-1において、パネル高 h_w 、パネル長 a_0 ）は縦長（ $a_0/h_w < 1.0$ ）となり、そのせん断強度は一般的に高くなることより、ここでは純曲げ状態を対象とすることとした。また、継手に関しては、高力ボルト摩擦接合継手特有の限界状態、すなわち、摩擦面のすべり、ボルト孔の圧壊、引張フランジ純断面の降伏などの問題があるが、これらに関しては今回の検討対象から除外している。

2. プレートガーダー継手部の構造諸元の実績調査

(1) 継手部の強度に関する力学パラメータ

プレートガーダー継手部の腹板パネルの強度に関係する力学パラメータを明らかにするとともに、強度評価の対象とする継手部の構造モデルの範囲を特定するために、構造詳細および構造寸法を建設省や公団・公社の標準設計図を含めた設計実績より抽出し、それらの実橋における使用範囲などを調査した。

本研究の着目点は添接板と垂直補剛材の間隔 a 。（図-1 参照）の許容値である。すなわち、この部分の水平補剛材を省略しても腹板の曲げ降伏強度 M_v が確保される限界を、弾塑性有限変位解析により確定することにある。このような極限強度に関与する継手部の力学パラメータとしては以下のものが挙げられる。

— 319 —

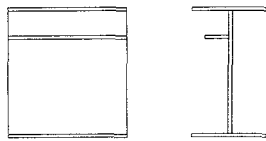
表-1 解析モデルの構造諸元

	一般部		継手部				添接板補剛タイプ ^{注3)}	
	①	②	③	④	⑤	⑥	モデル1 ⑦	モデル2 ⑧
解析モデル番号	1	2	水平補剛材を省略		1	2	水平補剛材を省略	
鋼種	SS400	SM490Y	SS400	SM490Y	SS400	SM490Y	SM490Y	SM490Y
腹板厚 t_w (mm)	9	10	9	10	9	10	10	10
腹板添接板厚 t_s (mm)	—	—	9	9	9	9	9	9
腹板幅厚比 h_w/t_w	注1) 256	260	注1) 180~256	160~240	注1) 256	260	注2) 240~294	240
アスペクト比 $\alpha=a/h_w$	1.0	0.5	0.4~1.0	0.4~1.0	1.0	0.4	0.5~1.0	0.7
断面積比 A_w/A_f	1.0~2.0	1.0~2.5	1.5, 2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
板厚比 $(t_w+2t_s)/t_w$	—	—	3.0	2.8	3.0	2.8	2.8	2.8
備考	図-5(a)	図-5(b)	図-5(c)		図-5(d)	図-5(e)	図-5(f)	図-5(g)

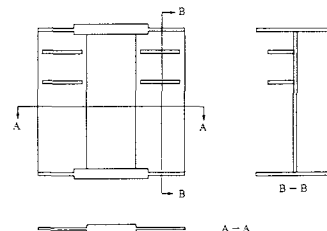
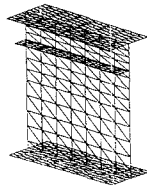
注1) SS400 で水平補剛材 1 段の場合の道路橋示方書の制限値

注2) SM490Y で水平補剛材 2 段の場合の道路橋示方書の制限値

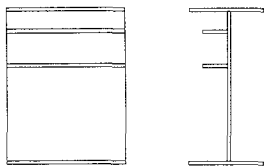
注3) 添接板補剛タイプについては 5 章にて詳述する。



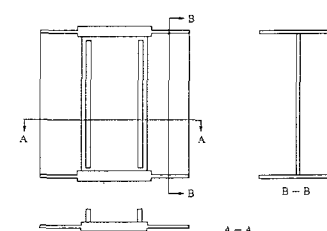
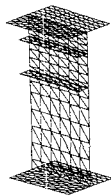
(a) 一般部(水平補剛材 1 段)



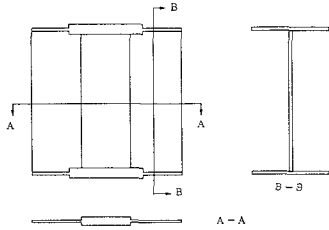
(e) 継手部(水平補剛材 2 段)



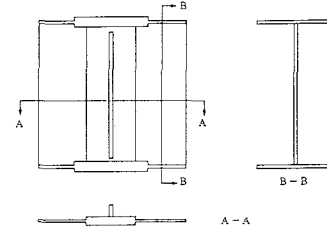
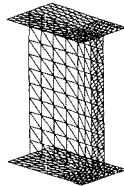
(b) 一般部(水平補剛材 2 段)



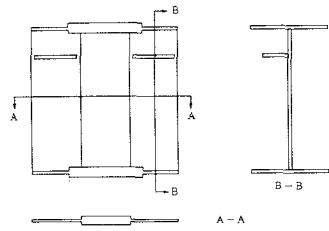
(f) 継手部(添接板補剛モデル 1)



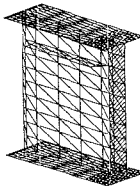
(c) 継手部(水平補剛材省略)



(g) 継手部(添接板補剛モデル 2)



(d) 継手部(水平補剛材 1 段)



注) (f), (g)については 5 章にて詳述する。

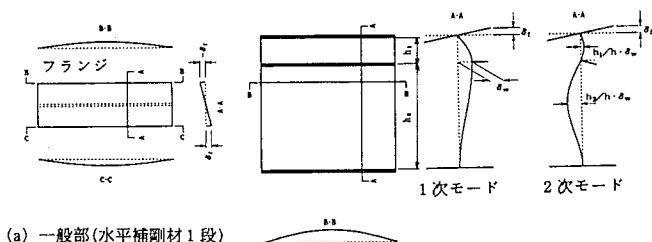
図-5 解析モデルの要素分割

よび2段の場合のプレートガーダーについてモデル化を行う。一般部の解析モデルは図-5(a)および(b)とし、力学パラメータは表-1の①および②とする。また、水平補剛材の取り付け位置は道路橋示方書の規定に従うものとする。

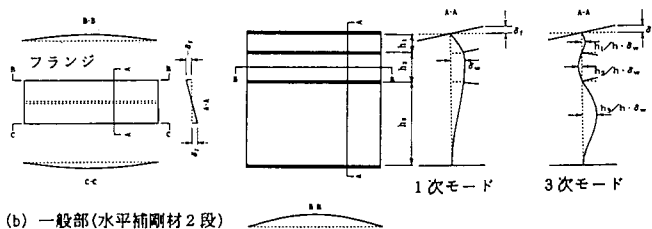
2) 継手部

継手部における腹板の添接は図-1のようにフランジ近傍のモーメントプレートと中央部のシャーププレートで構成される形式が標準的である。これに対して、継手部の簡素化による製作・架設の合理化を図るために、モーメントプレートとシャーププレートを一体化する形式が検討されている。

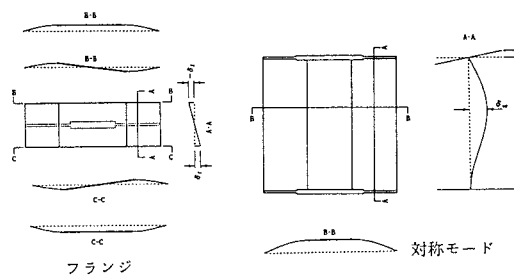
このような添接板一体形式では、腹板の継手の高力ボルトによる曲げモーメント伝達容量がボルト本数減により若干不足するが、フランジに余力がある場合、腹板の曲げモーメント伝達容量不足分をフランジに分担させることの可能性が指摘されている⁹⁾。継手部における水平補剛材省略の観点からは、腹板の圧縮領域をより広く添接板で覆う標準形式の方が優れているが、ここでは図-2(a)のような簡素化形式を対象とする。また、通常の水平補剛材を省略しない継手部に関して



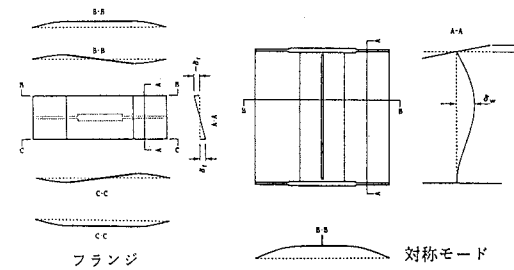
(a) 一般部(水平補剛材1段)



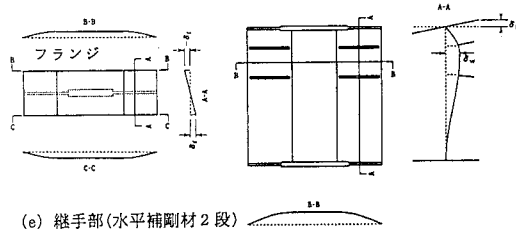
(b) 一般部(水平補剛材2段)



(c) 継手部(水平補剛材省略)

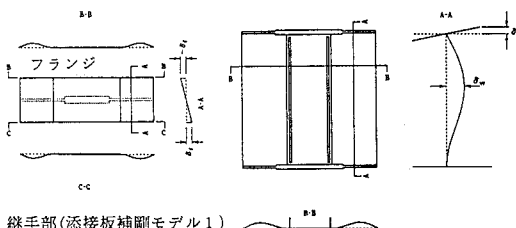


(d) 継手部(水平補剛材1段)



(e) 継手部(水平補剛材2段)

(g) 継手部(添接板補剛モデル2)



(f) 継手部(添接板補剛モデル1)

注) (f), (g)については5章にて詳述する。

図-6 解析モデルの初期たわみ

も、比較のための解析を行う。この場合、水平補剛材と添接板および垂直補剛材との間の隙間を30mmとし、水平補剛材の両端は45°にカットした台形状とする。継手部の腹板とフランジは添接板の板厚を考慮した変厚板とする。これら継手部の解析モデルは図-5(c)～(e)で、力学パラメータは表-1の③～⑥とする。

(2) 初期不整

継手部の初期たわみと残留応力に関する実測データがないので、以下の検討より初期不整を仮定する。

1) 初期たわみ

一般部について、水平補剛材1段および2段の場合の初期たわみを図-6(a)および(b)に示す。腹板に与える板ブロック内の初期たわみとして、水平補剛材1段の場合には1次モードと水平補剛材位置で節となる2次モードの2種類、水平補剛材2段の場合には1次モードと水平補剛材位置で節となる3次モードの2種類の屈座波形を考える。たわみの最大値は、様々のパネル長に対する比率として実測データの平均値¹⁰⁾を用い、また、部材としての初期たわみは、同様に平均値相当の $a/1826$ の正弦半波形とする¹⁰⁾。

継手部については、腹板のたわみ変形が添接板部以外の範囲だけではなく、添接板が重なっているパネル中央部にも広がることを予備解析により確認した。このことを考慮して、継手部における腹板の初期たわみは図-6(c)に示すように以下の2種類のモードを考える。

①対称モード：継手線を中心として左右対称である。腹板およびフランジの添接板部のたわみは部材軸方向に一定とする。

②逆対称モード：添接板部が継手線を軸にして回転し、継手線の左右で逆方向に面外たわみが現れる。

水平補剛材1段および2段の継手部に対する初期たわみ形状は対称モードとし、それぞれ図-6(d)および(e)に示す。

2) 残留応力

一般部についての残留応力分布を図-7に示す。

ここでは、はり部材の溶接断面平均値相当の分布形を用いる。補剛材に与える分布形とその大きさは文献¹¹⁾を参考とし、全体として釣り合うものとする。

継手部については、プレートガーダーの曲げ耐荷力の解析に関する研究によると、残留応力の極限強度に対する影響は以下のように評価されている。

①フランジの局部座屈強度は3辺単純支持、1辺自由の境界条件を持つ自由突出圧縮板を用いて検討されている¹²⁾。自由辺に沿って圧縮残留

応力が存在するので、残留応力の存在は極限強度を低下させる効果を与える。

②腹板の曲げ強度は面内純曲げを受ける周辺支持板について検討されている¹³⁾。圧縮縁に沿って引張残留応力が存在するので、圧縮板の場合と異なり残留応力の存在は強度を高める効果を与える。

③フランジと腹板を結合したI形断面としての曲げ解析¹⁴⁾によると、フランジおよび腹板の強度に対する残留応力の効果の相殺により、単一板のようには残留応力が局部座屈強度に影響を与えない。

ここで検討しているのは水平補剛材の省略による腹板の局部座屈強度の変動であり、フランジの局部座屈は2次的な影響と考え、継手部での残留応力は考慮しないものとする。

(3) 荷重方法

解析モデルに対する純曲げ荷重方法は以下のとおりである。

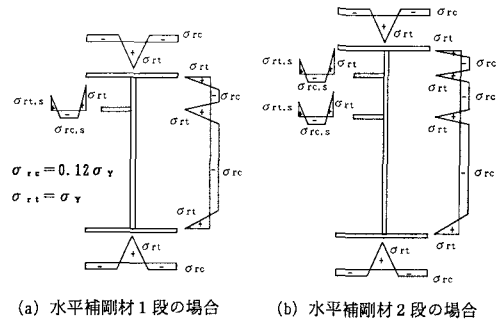


図-7 解析モデルの残留応力分布

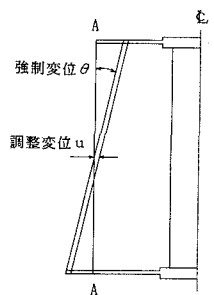


図-8 純曲げの荷重方法

①図-8 に示すように載荷辺A-Aは平面保持の仮定が成立するものとして、強制回転角 θ を与えて純曲げ状態とする。強制回転角のみでは腹板のたわみ変形が増大することにより2次的な軸方向力が発生するため、調整軸方向変位 u を与え、2次の軸方向力を解消させる。

②作用モーメント M は載荷辺上の節点の軸方向節点力に基準点からの距離を乗じ、断面について積分することにより計算される。

③水平補剛材がある場合、補剛材には直接曲げ応力が導入されないように配慮する。

(4) 解析モデルの妥当性の検討

1) 添接板の協力長

解析モデルの諸元の決定にあたって、フランジおよび腹板における添接板がどの範囲まで母材と一体となって面内力や面外曲げに対して抵抗するのかを明らかにしておく必要がある。そこで、添接板の協力長を検討するための実験を行った。

この実験は、最も施工実績の多い等級F10T、サイズM22の高力ボルト摩擦接合を再現するため、母材を2枚の添接板で高力ボルト摩擦接合し、中央部に荷重(50kgf, 100kgf, 150kgf, 200kgf)を載荷し、そのたわみを測定するものである。この実験結果を図-9に示す。この図より、添接板の協力長を280mm、すなわち添接板端部と外側ボルト列の間のほぼ中央とした場合、計算値が実験値と等しくなっていることがわかる。したがって、ボルト最外列からの縁端距離の1/2までを添接板の協力長として、解析モデルの添接板部の幅とする。

2) 腹板の添接板とフランジ面との桁高方向の隙間

腹板の添接板とフランジ面との隙間について、これを無視することの妥当性を検討する。ここでは隙間を考慮する場合と、これを無視してフランジと添接板を含む腹板とを接合した場合との強度および変形挙動を比較する。2つの解析モデルの諸元は同一であり、継手部腹板パネルでは水平補剛材を省略している。

曲げモーメントと曲げの作用面内における桁の最大たわみの関係について、両者の解析結果を図-10に示す。桁たわみは隙間を考慮した方が若干大きくなっているが、最大荷重はほとんど差がない。したがって、数多くの数値解析を効率的に処理するために隙間を無視した解析モデルを用いることとする。

4. 解析結果と考察

(1) プレートガーダー一般部の基本曲げ強度

1) 水平補剛材1段の場合

継手部腹板パネルの水平補剛材の省略を論ずる際に、水平補剛材を有するプレートガーダーの一般部における曲げ強度特性を把握しておく必要がある。そこで水平補剛材1段を有するプレートガーダーの曲げ強度を有限要素法による薄板集成構造の弾塑性有限変位解析によって求めた。初期たわみに関しては文献¹⁵⁾よ

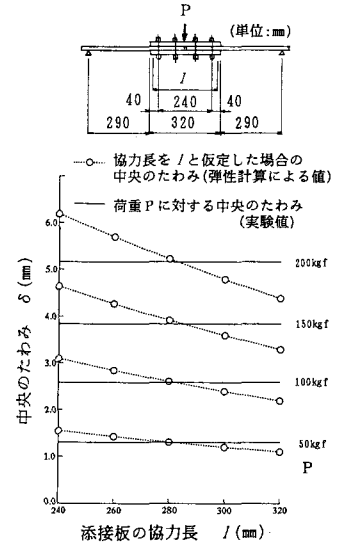


図-9 添接板の協力長の検討

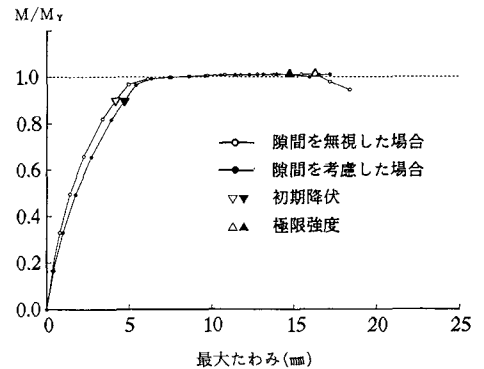


図-10 腹板の添接板とフランジ面との桁高方向の隙間の影響

り、極限強度が2次モードよりも1次モードによって支配されていることから1次モードを与える。図-11に腹板・フランジ断面積比と曲げ強度の関係を示す。数値シミュレーションにより、水平補剛材1段を有するプレートガーダーの曲げ強度に関して以下の特性が確認された。

- ①道路橋示方書のフランジの自由突出幅と腹板幅厚比を満足していれば、極限強度は断面の降伏モーメントを下回ることはない。
- ②腹板とフランジの断面積比により断面の形状係数(塑性断面係数/弾性断面係数)が異なるため、降伏強度の超過分に若干の差が現れる。
- ③残留応力を含めた曲げ圧縮応力による初期降伏荷重は降伏モーメントの60%程度であり、ほぼ設計荷重レベル(1400/2400=0.583)と対応している。

2) 水平補剛材2段の場合

水平補剛材2段の場合の耐荷力について、 $a/h_w=0.5$ 、 $h_w/t_w=260$ のモデルに対し、それぞれ1次モードおよび3次モードの初期たわみを与えて解析を行った。それにより、1次モードと3次モードの極限強度がほぼ同じであるという結果が得られた。本論文では、水平補剛材2段の場合の一般部の解析モデルに関しては、腹板の初期たわみが水平補剛材の取付位置で節となる3次モードを採用することとする。

腹板とフランジの断面積比が極限強度に及ぼす影響を調べるための解析を行い、その解析結果を図-12に示す。これより、以下に示すように水平補剛材1段の場合と同様の結果が得られた。

- ①腹板とフランジの断面積比により断面の形状係数が異なるため、極限強度に若干の差がある。
- ②曲げによる初期降伏荷重は、ほぼ設計荷重レベル(2100/3600=0.583)に対応している。
- ③構造諸元が道路橋示方書の規定を満足していれば、極限強度は降伏モーメントを上回る。

(2) 継手部腹板パネルにおける水平補剛材の省略可能範囲

道路橋示方書では鋼種別に水平補剛材のない場合、水平補剛材1段の場合、水平補剛材2段の場合の3種類について腹板の限界幅厚比が規定されている。本論文ではこの規定を基にし、一般的な鋼種であるSS400およびSM490Yの場合について、継手部における水平補剛材の省略可能範囲を検討する。

1) 水平補剛材を有する継手部の曲げ強度

a) 水平補剛材1段の場合

水平補剛材1段の場合と省略した場合との継手部の強度比較を、鋼種SS400、腹板とフランジの断面積比 $A_w/A_f=2.0$ 、腹板の幅厚比 $h_w/t_w=256$ 、アスペクト比 $\alpha=1.0$ のモデルについて行った。この解析結果を以下に示す。また、比較対象として、水平補剛材1段の場合の一般部の極限強度も併せて示す。

水平補剛材を省略した継手部 : $M_u/M_y=0.972$
 水平補剛材1段の場合の継手部 : $M_u/M_y=1.040$
 水平補剛材1段の場合の一般部 : $M_u/M_y=1.098$

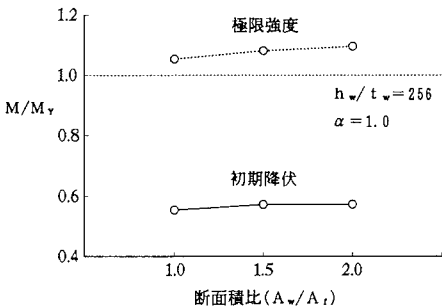


図-11 一般部の曲げ強度
(水平補剛材1段の場合)

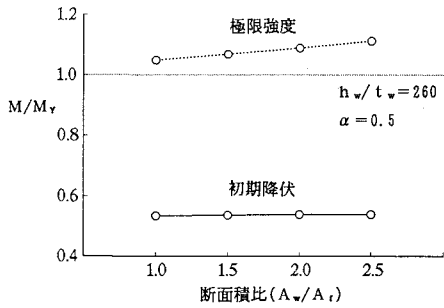


図-12 一般部の曲げ強度
(水平補剛材2段の場合)

アスペクト比が1.0 と大きいためにパネル全体に対する添接板の幅の割合が小さくなるので、極限状態において腹板添接板の外側の母材のみの部分における板たわみが増大する形状となる。解析結果より、このような崩壊モードに対して水平補剛材は有効であると考えられる。

b) 水平補剛材 2 段の場合

水平補剛材 2 段の場合と省略した場合との継手部の強度比較を、鋼種SM490Y、断面積比 $A_w/A_t=2.0$ 、腹板幅厚比 $h_w/t_w=260$ ，アスペクト比 $\alpha=0.4$ のモデルについて行った。この解析結果を以下に示す。

水平補剛材を省略した継手部 : $M_u/M_y=0.961$

水平補剛材 2 段の場合の継手部 : $M_u/M_y=0.991$

この結果より、水平補剛材が極限強度に対して影響を及ぼしていることがわかる。しかし、水平補剛材を有する場合の極限強度比が1.0 を下回っていることから、水平補剛材が曲げに対して十分に有効ではないと考えられる。アスペクト比が大きい場合と異なり、0.4 とパネル幅が狭いモデルなので、極限状態における腹板の板たわみが添接板部にも広がる形状となる。このような崩壊モードでは、水平補剛材と垂直補剛材および添接板との隙間で局所的に変形が大きくなるために、水平補剛材は有効ではないと考えられる。

2) 鋼種SS400 の場合の許容範囲

継手部腹板の水平補剛材を省略した場合の解析の結果、強度の観点から以下の特徴が明らかとなった。

- ①道路橋示方書の腹板幅厚比制限が256 の場合、腹板パネルのアスペクト比が0.5 以下であれば、腹板とフランジの断面積比が1.5～2.0の範囲で極限強度は断面の降伏モーメントを上回る。
- ②継手部腹板パネルのアスペクト比を実績調査の上限値の1.0 とした場合、腹板幅厚比が220 以下であれば、極限強度は断面の降伏モーメントを上回る。
- ③継手部の初期降伏荷重は、前述の水平補剛材 1 段の一般部に比べて20%以上大きくなっている。その理由は継手部の解析モデルにおいて残留応力を無視しているためである。

以上の検討により、極限強度について断面の降伏モーメントを確保できる腹板パネルのアスペクト比および腹板幅厚比の組合せに関して、図-13に示す範囲を推奨することができる。図-13には実績調査の実例を併せて示す。このSS400 の場合の実例は3例と少ないが、実績調査の範囲内ですべての継手部において水平補剛材を省略することが可能であることがわかる。

3) 鋼種SM490Yの場合の許容範囲

鋼種SM490Yの場合の継手部について、数値シミュレーションを行い種々の検討を行った。その結果、強度の観点から以下の特徴が明らかとなった。

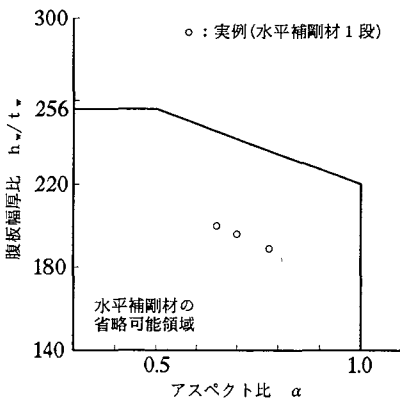


図-13 継手部水平補剛材の省略可能範囲
(鋼種SS400 の場合)

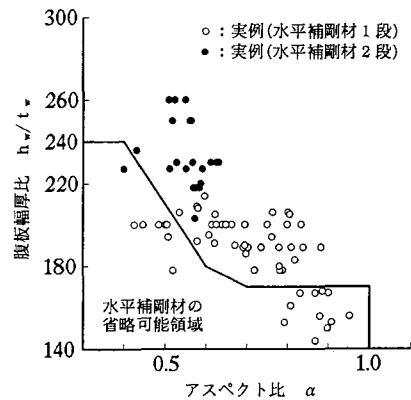


図-14 継手部水平補剛材の省略可能範囲
(鋼種SM490Yの場合)

①腹板幅厚比 h_w/t_w が160～200の範囲において、アスペクト比 α が0.7 以上になると α の変化が極限強度にあまり影響を及ぼしていない。したがって、 α が0.7～1.0の範囲では、 h_w/t_w の制限値がほぼ等しくなると考えられる。

② α が0.4 の場合は h_w/t_w が240 以下で、 α が0.5 の場合は h_w/t_w が210 以下で、 α が0.6の場合は h_w/t_w が180 以下で、 α が0.7～1.0の場合は h_w/t_w が170以下で極限強度が降伏モーメントを上回る。

③初期降伏荷重はSS400 の場合と同様に、残留応力を無視したために M/M_Y が0.7～0.9の範囲内にあるが、アスペクト比が大きくなるほど腹板幅厚比の変化に対する初期降伏荷重の変化が大きくなっている。

以上より、鋼種SM490Yの場合の継手部の水平補剛材省略可能範囲を図-14に示す。そして、この図に実績調査の実例を併せて示す。水平補剛材の省略可能範囲は鋼種SS400 の場合とは異なり、制限値を表わす線は複雑に折れ曲がった線となっている。この図より以下の結論が得られる。

①水平補剛材1 段の場合は、実績調査の実例の約1/3 が水平補剛材の省略が可能である。

②水平補剛材2 段の場合は2 例を除いて、水平補剛材を省略すると、降伏モーメントの強度確保ができなくなる。

③実績調査結果では、アスペクト比 α が0.4 以上において、腹板の幅厚比の最大が260 であり、道路橋示方書にある鋼種SM490Yで水平補剛材2 段の場合の幅厚比制限値294 を大きく下回る。

4) 腹板の座屈モード

水平補剛材を省略した継手部の解析モデル③の極限状態における崩壊モードを図-15に示す。極限状態では腹板の局部座屈が発生している。その座屈モードは、腹板のアスペクト比が大きくなるにつれて、腹板の添接板部以外の部分の板たわみが増大し、添接板部のたわみが抑制された形状になっている。また、圧縮フランジには腹板のたわみによって誘発された回転変形が生じている。

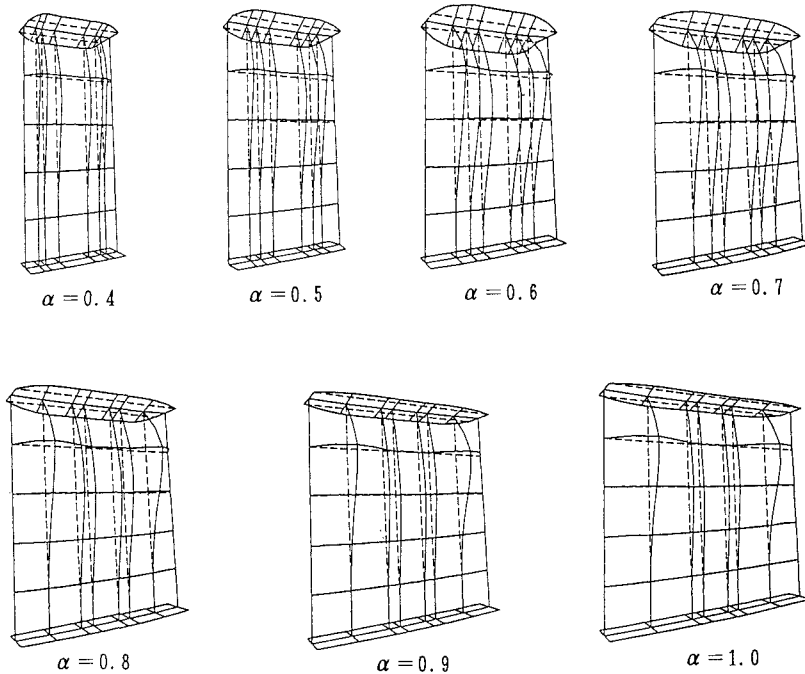


図-15 極限状態における崩壊モード ($A_w/A_t=2.0$)

5. リブ付き添接板による補剛効果

(1) 詳細構造の検討

現在、比較的長支間の桁橋では腹板幅厚比の大きなプレートガーダーが用いられる傾向にあり、道路橋示方書の規定以上の水平補剛材段数を使用している例が増えている。このようなプレートガーダーの継手部においては、水平補剛材1段または2段を用いる場合とは異なる補剛材の処理方法が必要となる。そのため、腹板幅厚比の大きい継手部において、耐荷力の観点から効果が薄いと考えられる水平補剛材の代わりに、製作および架設が容易でなおかつ耐荷力の面からも優れた新しい補剛構造が検討されている。

新しい補剛形式として、添接板にも水平補剛材を取り付けて水平補剛材の連続性を確保する方法、垂直リブとして山形鋼を添接板と共に高力ボルト締めする方法、また、予め垂直リブを取り付けた添接板を用いる方法が考えられる。このうち、水平補剛材の連続性を確保する方法は、あらゆる板たわみに対して極めて有効であると思われるが、製作がかなりめんどろである。本論文ではパネル全体、特に添接板部の板たわみを抑制すると共に耐荷力を向上させる形式として、添接板に垂直リブを直接取り付ける方法について考察する。以下に、リブ付き添接板を用いる場合の特徴を挙げる。

①従来の継手部の水平補剛材と比較して、添接板にリブを直接取り付けるため、溶接が極めて容易である。

しかし、フランジのボルトピッチの決定については垂直リブとの間隔や、また、ボルト施工については締め付け方向を考慮するなどの注意が必要である。

②継手部において最も問題となる添接板部のたわみを抑制する効果が期待できる。

③従来の継手部パネルにおいては、アスペクト比の大小によって水平補剛材の補剛効果がかなり変化するが、添接板を補剛する場合、アスペクト比の大小にかかわらず一定の補剛効果が得られると考えられる。

この方法に関しては様々な方法が考えられるが、ここでは添接板の両縁に垂直リブを取り付けて添接板全体のたわみを抑制する方法と、添接板の中央に垂直リブを取り付けてパネルのセンターのたわみを抑制する方法の2種類について検討する。

(2) 解析モデルおよび解析結果

添接板の両縁を補剛する方法を添接板補剛モデル1、添接板の中央を補剛する方法を添接板補剛モデル2とする。そして、これらの解析モデルは図-5(f) および(g)とし、力学パラメータは表-1 の⑦および⑧とする。初期たわみについては、添接板補剛モデル1は添接板全体のたわみが抑制されると考えられるので、図-6(f)のように水平補剛材省略部分のみに初期たわみを与える。また、添接板補剛モデル2は図-6(g)のように対称モードと逆対称モードを考慮する。

ここでの垂直リブの断面は、表-1の解析モデル⑦のうち最も小さい断面である腹板高2400mm、腹板厚9mm、アスペクト比0.5の場合の垂直補剛材所要剛度と同程度の断面(幅120mm、板厚10mm)とし、全ケースについて同一断面で解析を行う。

それぞれの解析モデルで $A_w/A_t=2.0$ 、 $h_w/t_w=240$ 、 $\alpha=0.7$ とした場合の極限強度を以下に示す。また、比較対象として、水平補剛材省略モデルの極限強度も併せて示す。

水平補剛材省略モデル(対称モード)	$M_u/M_y=0.924$
添接板補剛モデル1(対称モード)	$M_u/M_y=0.989$
添接板補剛モデル2(対称モード)	$M_u/M_y=0.984$
添接板補剛モデル2(逆対称モード)	$M_u/M_y=0.980$

これらより以下の結論が得られる。

①添接板補剛モデル1および補剛モデル2の極限強度はいずれも水平補剛材省略モデルを上回る。

②添接板補剛モデル2では逆対称モードの方が対称モードよりも強度的に不利といえる。これは、逆対称モードが腹板の継手線回りの回転による形状であり、リブによる補剛効果が消されるためであると考え

られる。

- ③添接板補剛モデル1の方が補剛モデル2よりも補剛効果が高い。

(3) 水平補剛材の省略可能範囲

添接板補剛モデル1の解析の結果、水平補剛材の省略可能範囲を図-16に示す。この図から、添接板に垂直リブを取り付けることによって、鋼種SM490Yの水平補剛材2段の場合の幅厚比制限値294まで水平補剛材の省略可能範囲が広がることがわかる。また、継手部の実績調査結果の実例は、水平補剛材1段および2段の場合共にすべてが可能範囲内にある。したがって、実績調査の範囲内では、継手部腹板パネルは水平補剛材を省略しても、添接板の両縁に垂直リブを取り付けることにより、極限強度が降伏モーメントを上回るということである。

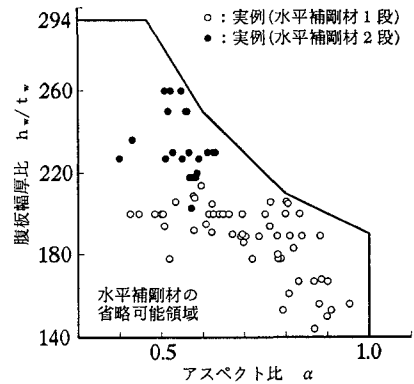


図-16 リブ付き添接板の場合の水平補剛材の省略可能範囲（鋼種SM490Y）

6. 結 論

本研究では、水平補剛材1段および2段を有するプレートガーダーの継手部腹板パネルを対象として、水平補剛材省略の可能性を弾塑性有限変位解析の数値シミュレーションにより検討した。さらに、継手部の新しい補剛構造として、垂直リブを取り付けた添接板を用いる方法に関して考察を行った。

以下にその成果を列挙する。

1) 継手部構造詳細および力学パラメータの実績に関して

- ①プレートガーダー継手部の構造詳細を実設計例より抽出し、力学パラメータの分布を調査した。
- ②プレートガーダーの継手部パネルのアスペクト比は、水平補剛材1段の場合は2/3程度が多く、水平補剛材2段の場合は0.5～0.6の範囲が最も多い。
- ③実績調査により確認した腹板幅厚比について、2ないし3の例以外のデータは道路橋示方書の制限値を満たしている。

2) 解析モデルの妥当性に関して

- ①実績調査の結果を基に、各種解析モデルの構造諸元、境界条件および考慮する初期不整を決定した。
- ②添接板の協力長およびフランジと腹板添接板との間の隙間の2つの観点から、解析モデルの妥当性を確認した。

3) 継手部における水平補剛材の省略に関して

- ①断面強度として少なくとも降伏モーメントを確保するように規範を定めると、図-13および図-14に示した範囲内で水平補剛材の省略が可能である。なお、継手部の設計作用モーメントが小さい場合は、省略可能範囲外でも設計作用モーメントのレベルに応じて水平補剛材を省略できる可能性がある。

4) 垂直リブ付き添接板による補剛効果に関して

- ①垂直リブを取り付けた添接板は、特にアスペクト比の小さい継手部において有効である。また、添接板に垂直リブを取り付けることにより、図-16に示す水平補剛材の省略可能範囲を腹板の限界幅厚比まで拡張することができる。

本論文では、水平補剛材が1段および2段の場合を対象とし、継手パネルにおいて腹板の曲げ降伏強度を確保するものとして検討している。一般的に、継手位置の断面強度は作用断面力に対して余裕がある。した

がって、水平補剛材の省略可能範囲については、断面強度と作用断面力との割合に応じて拡張することも考えられる。また、最近では腹板幅厚比が大きく、水平補剛材が3段以上の実例も増えており、3段以上の場合についても明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) Cooper, P. B., D'Apice, M. A. : Static Bending Tests on Longitudinally Stiffened Plate Girders, Fritz Eng. Lab., Report, No. 304-5, 1965.
- 2) Cooper, P. B. : Strength of Longitudinally Stiffened Plate Girders, Proc. ASCE, Vol. 93, ST2, 1967.
- 3) Rockey, K. C., Skaloud, M., Owen, D. R. J. : Behaviour of Longitudinally Reinforced Plate Girders, Publ, IABSE, 8th Congress, 1968.
- 4) Ostapenko, A., Chern, C. : Strength of Longitudinally Stiffened Plate Girders under Combined Load, Fritz Eng. Lab., Report, No. 328-10, 1970.
- 5) Schueiller, W., Ostapenko, A. : Tests on a Transversely Stiffened and Longitudinally Stiffened Unsymmetrical Plate Girder, Bull. Welding Research Council, No. 156, 1970.
- 6) 長谷川彰夫, 西野文雄, 奥村敏恵 : 水平補剛材を有するプレートガーダーの曲げ耐荷力実験, 土木学会論文報告集, No. 234, pp. 33-44, 1975.
- 7) 長谷川彰夫, 西野文雄, 奥村敏恵 : 水平補剛材を有するプレートガーダーのせん断耐荷力, 土木学会論文報告集, No. 235, pp. 13-28, 1975.
- 8) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説, 1990.
- 9) 長嶋文雄 : 摩擦接合継手のすべり問題および設計への適用, 東京都立大学学位論文, 1991.
- 10) 福本嘯士(研究代表者) : 文部省科学研究費総合研究A, 研究成果報告書—鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究, 1990.
- 11) 福本嘯士, 前川幸次, 伊藤義人, 浅里芳行 : モーメント勾配による溶接I形桁の横ねじれ座屈実験, 土木学会論文集, No. 362/I-4, pp. 323-332, 1985.
- 12) 小松定夫, 北田俊行 : 初期不整を含む自由突出圧縮鋼板の極限強度特性について, 土木学会論文報告集, No. 314, pp. 15-27, 1981.
- 13) 奈良敬, 津田真, 福本嘯士 : 面内曲げと圧縮を受ける鋼板の極限強度の評価法に関する研究, 土木学会論文集, No. 392, pp. 259-264, 1988.
- 14) 吉田信博 : 鋼薄肉部材の連成座屈強度特性と強度評価式, 大阪大学修士論文, 1990.
- 15) 松村達生, 石井晃, 西村宣男 : 水平補剛材を有するプレートガーダーの曲げ強度, 土木学会第46回年次学術講演会概要集, I-101, 1991.

(1993年 9月16日受付)