

橋梁における新しい高力ボルト接合の設計

紫桃 孝一郎*・鈴木 永之*

A New Design for Bridge Joints Using High Strength Bolts

Koichiro SHITO and Noriyuki SUZUKI

Synopsis : For the purpose of reduction of construction cost, the minority steel plate girder bridges with large section main girder has been constructed in JH. In those bridges, the rationalization of field joints shall be required. The hybrid joints which are made welded flanges and bolted web, is considered one type of rational field joints. The loading experiments and FEM analysis using I-section girder, were carried out. As those research results, the performance of hybrid joints were cleared. With these results, the hybrid joints were applied in two expressway steel bridges.

Key words : minority steel plate girder bridge; hybrid joint; welded joint; high strength bolt; welding shrinkage; total sliding moment.

1. はじめに

鋼橋の現場における主な作業は、コンクリート床版などコンクリート関連作業を除けば架設である。鋼橋の継手構造には、高力ボルト接合や溶接接合が一般に用いられるが、これらは現場でのコストや工程、品質管理、施工性などに多くの影響を与える。

本稿では日本道路公団（以下「JH」）で実施している、最近の高速道路の鋼橋におけるフランジを溶接接合、ウェブを高力ボルト接合とした継手（以下「併用継手」）の適用について述べる。

2. 鋼橋における鋼少数主桁形式

昨今の経済社会情勢から、高速道路建設にあたってコスト縮減と耐久性向上が益々重要な課題となっており、JHにおいては様々な取組みを行っている。

このうち鋼橋の分野においては、大断面I桁を用いて鋼部材の加工工数の低減を図り、同時に耐久性に優れたPC床版を組合せて主桁本数を減らすことによってコスト縮減と耐久性向上を実現させた「PC床版を有する鋼少数主桁橋」を開発し、第二東名神等で大規模に採用してきている (Fig. 1)。この場合、床版支間が6m程度であれば主桁本数は、2本となる。

鋼少数主桁橋では必然的に従来の多主桁橋に比べると鋼板の寸法は大きくなる。フランジでは幅800mm程度、板厚は最大で100mm程度、ウェブは高さ3m程度、板厚は20~30mm程度の鋼板が用いられている。

3. 鋼少数主桁橋における併用継手の採用

鋼少数主桁橋の部材の継手には、全断面溶接継手や高力ボルト継手を用いることになるが、全断面溶接継手を用いる場合の主な理由は、①高力ボルトの締付け長さの制限による継手位置のフランジ板厚の制約、②孔引き断面向上による引張フランジの厚板化と鋼重増の回避、③添接板の厚

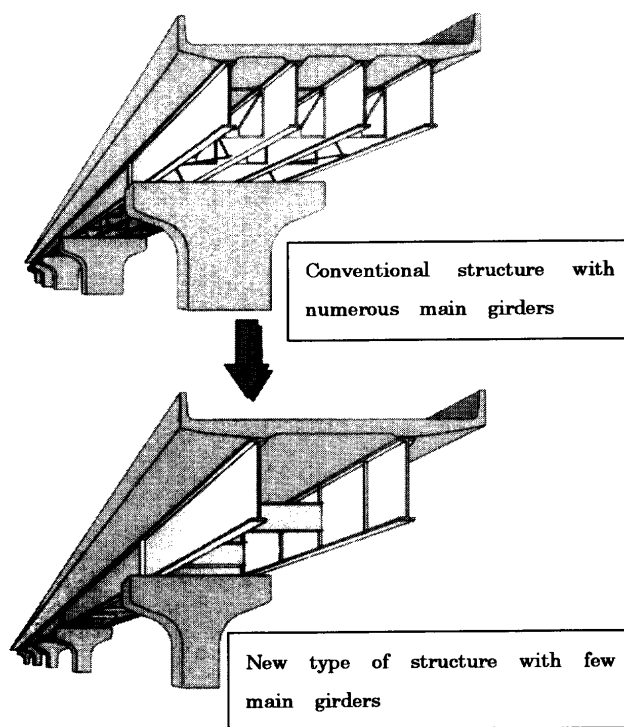


Fig. 1. Illustration of a minority steel plate girder Bridge.

板化による現場の作業性低下の防止, ④上フランジ高力ボルトとコンクリート床版との取合いの簡素化 (特にプレキャスト床版の場合), ⑤部材表面の凹凸減少による景観性や維持管理性の向上, などである。

しかし, 全断面溶接継手には以下のような課題も存在する。①溶接作業による架設期間の長期化 (高力ボルト継手に比べ全体架設工程で約3割程度長期化), ②現場溶接の品質管理の困難性, ③開先精度の確保のためのエレクションピースなど架設部材の増加やこれに伴う施工性の低下など。

溶接継手のメリットが大きいのは比較的板厚が厚く, 溶接延長の短いフランジであり, 課題が大きいのはフランジに比べて板厚が薄く溶接延長が長くなるウェブである。従って, フランジを溶接, ウェブを高力ボルトとした併用継手 (Fig. 2) を採用することによって, 合理的な継手構造とすることが考えられた。

4. 併用継手の課題と検討

4.1 併用継手の課題

併用継手は, フランジ, ウェブそれぞれに適した接合方法を用いた合理的な継手の1つと考えられるが, 併用継手の利点を活かすため, 架設時においてウェブの高力ボルトをフランジの溶接に先立って締付けて, フランジ溶接時における開先精度確保など形状保持の架設部材の役割を分担させることが考えられる。しかし, ウェブの高力ボルトをすべて先締めした場合, 溶接収縮により高力ボルト位置の摩擦面にすべりが発生し, 継手の耐荷力または高力ボルト

接合の摩擦面がすべり始める荷重 (以下「すべり荷重」) に影響を及ぼす可能性がある。

従って併用継手を用いる場合は, 高力ボルト締付けと溶接の施工順序を考慮し, 継手に悪影響のない高力ボルト締付け方法を考える必要がある。

4.2 併用継手に関する検討

併用継手の課題を解決するため, 模型実験およびFEM解析を行い, 高力ボルトの締付け方法と継手の耐荷力やすべり荷重の関係について検討した¹⁾。以下にその概要につ

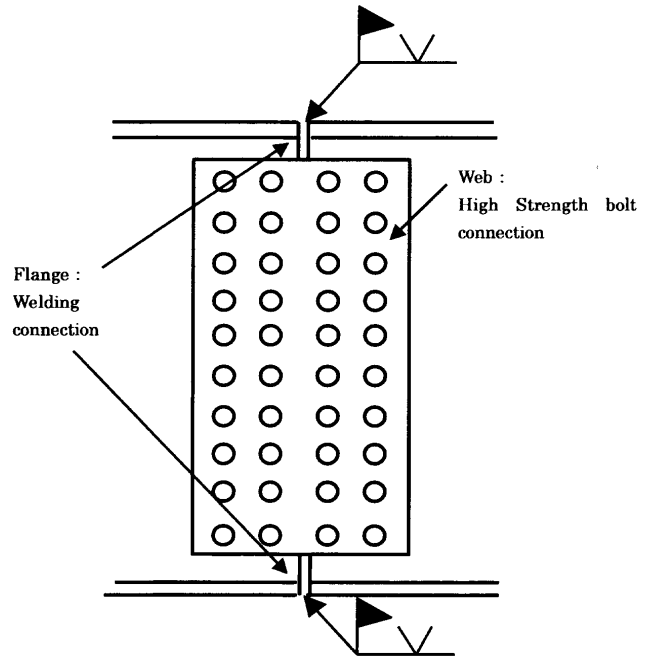


Fig. 2. Schematic of a hybrid Joint.

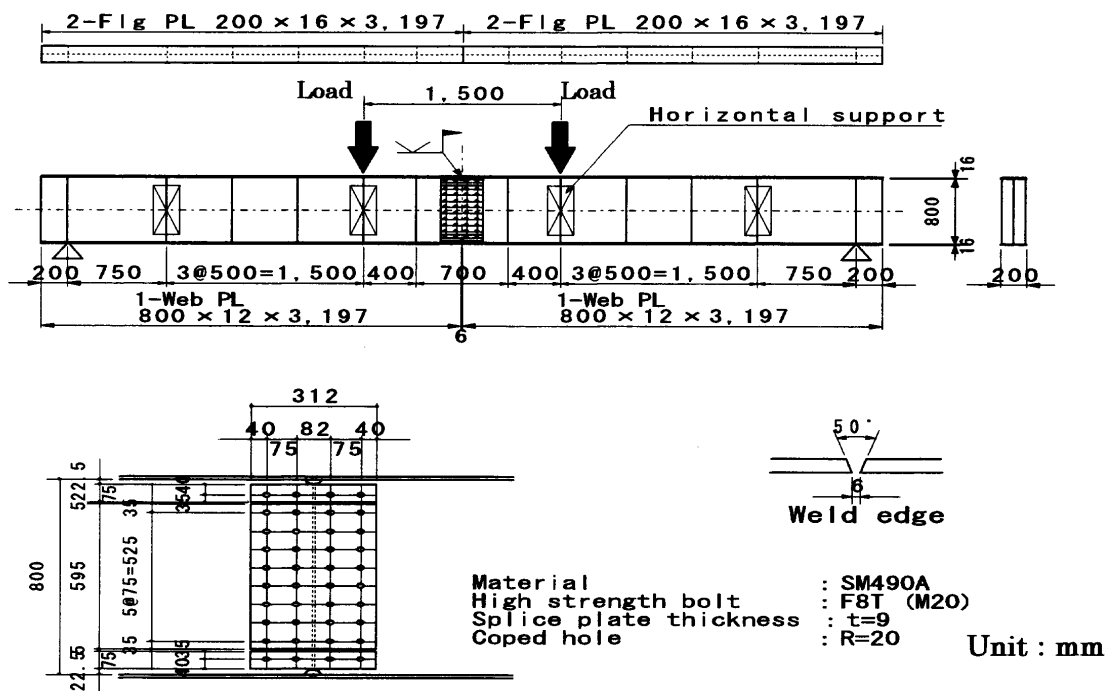


Fig. 3. Test specimen and loading position.

いて述べる。

4.2.1 併用継手の実験

(1) 供試体

実験に用いた供試体はスパン6m、桁高800mmのI桁であり、支間中央部に継手を設けた (Fig. 3)。継手の種類は全断面高力ボルト継手と併用継手とし、併用継手においてはウェブ高力ボルトの締付け時期を全数フランジ溶接の前とする先締めタイプ、10行あるウェブ高力ボルトのうちフランジ近傍1~2行の高力ボルト締付けをフランジ溶接の後とする後締めタイプなど、条件を変えて耐荷力、すべり荷重等を比較した。

(2) 溶接収縮量

実験の結果、まずフランジ溶接による収縮量は、ウェブ高力ボルトの締付け時期に関わらず、上下フランジともフランジ位置で約1mm、フランジから離れるに従い急激に減少し、ウェブ中心ではほとんど発生しなかった (Fig. 4)。また、ウェブ高力ボルトの先締め範囲がフランジの溶接収縮量に及ぼす影響は小さいといえる。

(3) 継手の耐荷力とすべり荷重

全断面高力ボルト継手と併用継手の代表的な供試体の荷

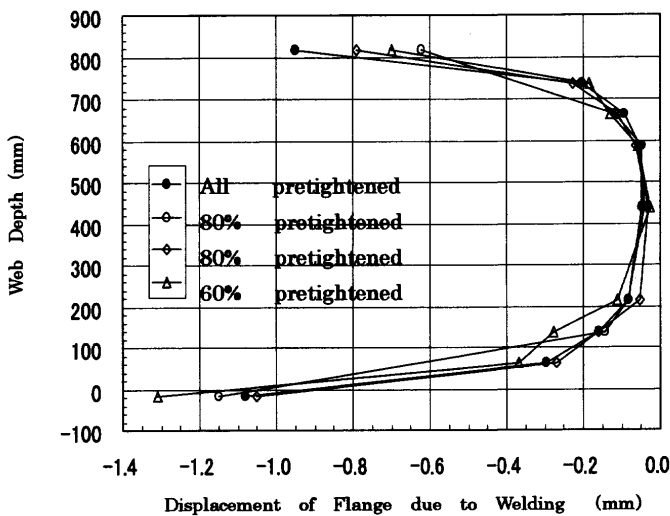


Fig. 4. Amount of flange contraction and distribution of web.

重一たわみ関係を Fig. 5 に示す。なお、荷重は、Fig. 3 に示す2箇所の載荷点の荷重を合計したものである。この例に示した併用継手は、フランジ側1行の高力ボルトを後締めしたものである。

全断面高力ボルト継手では設計荷重を越え、摩擦面のすべりが発生した時点で明瞭な変曲点が認められた。その後高力ボルトは支圧状態となり荷重が増加していき、最終的には載荷点付近の上フランジが座屈により破壊状態となった。一方併用継手ではフランジが溶接で連続化されているため、ウェブ部分の摩擦面がすべり始めた後も継手全体すべりによる明瞭な変曲点はみられずに荷重が増加する性状を示した。これらより、たわみ (継手のすべり) 性状は異なるものの、最終的な継手の耐荷力は両者とも大差ないことがわかる。

すべり荷重について、荷重とクリップゲージで測定したウェブ添接板とウェブ間の相対変位の関係を Fig. 6, 7 に示す。Fig. 6 の添接板を3分割した全断面高力ボルト継手では、すべり荷重は約900kNの荷重で明確に現れたが、Fig. 7 に示す上下フランジ溶接前に全ボルト先締めした併用継手では明確でなかった。そこで、Fig. 7 に示す併用継手のすべり荷重は、荷重-相対変位関係で傾きが急変し線形関係が失われる荷重と判断するものとした。Fig. 7 に示す併用継手では、約700kNがすべり荷重と考えられる。この際、すべりは最外縁の高力ボルトから発生するが、すべり荷重としては最初にすべりが認められたときの荷重の値とするものとした。

(4) すべり荷重の計算値と実験値の比較

高力ボルト継手および締付け順序を変えた併用継手における実験で得られたすべり荷重と、すべり係数 $\mu=0.4^2$ と仮定した併用継手の計算上のすべり荷重を比較した (Fig. 8)。なお、すべり荷重の計算はフランジとウェブの協同作用を考慮して、中立軸から各高力ボルトまたは溶接断面までの距離と各高力ボルトのすべり耐力または溶接断面の降伏耐力の積で評価する“総すべりモーメント法”に準じた方法で算定した^{3,4)}(Fig. 8)。

この結果、全断面高力ボルト継手では計算値との比が平

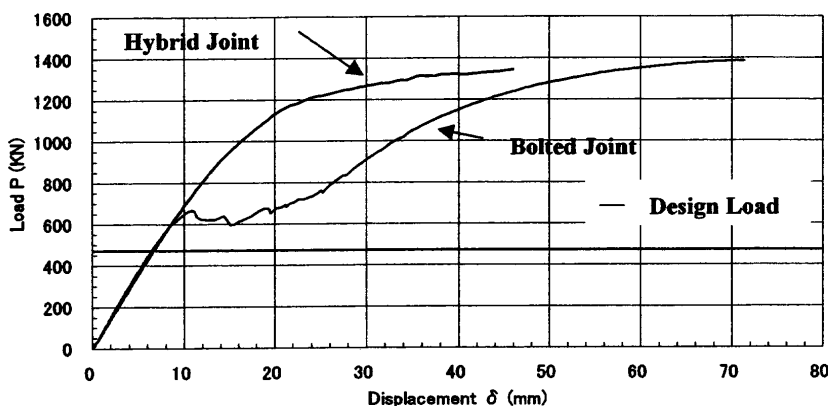


Fig. 5. Load and displacement curves for bolted joint and the hybrid joint.

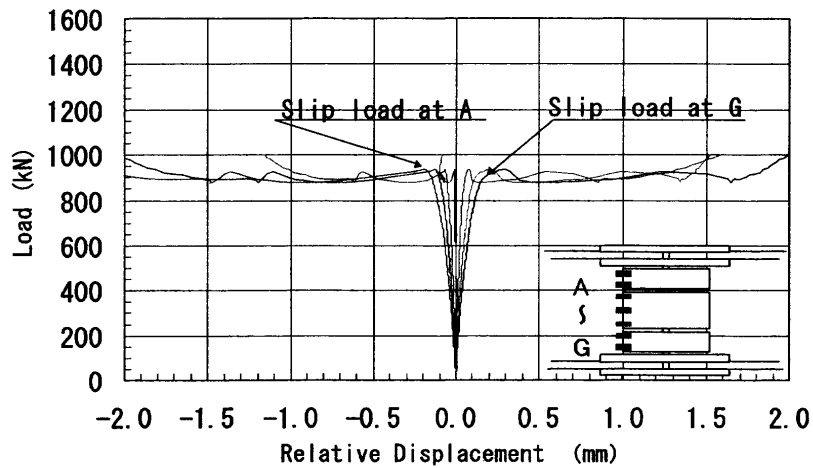


Fig. 6. Relative displacement between web and splice plate. (Bolted Joint)

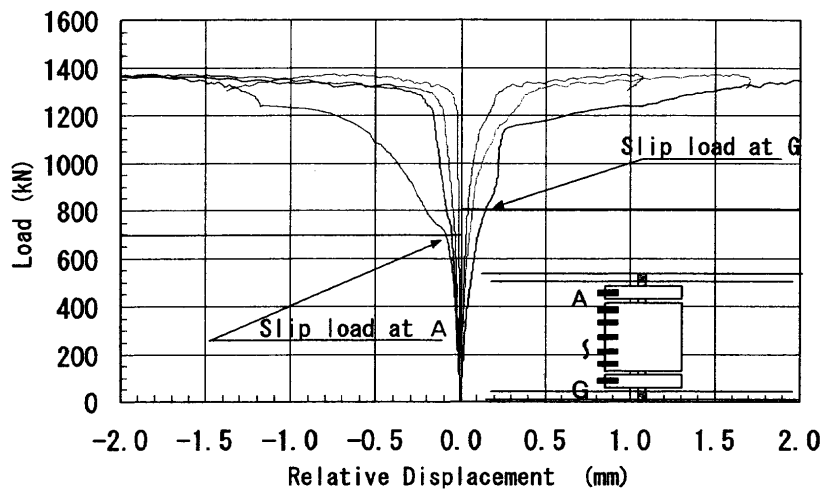


Fig. 7. Relative displacement between web and splice plate. (Hybrid joint)

均1.04, 併用継手でウェブ高力ボルトを1~2行後締めした供試体は計算値との比が0.89~0.96, 平均0.93に対して, ウェブ高力ボルトを全数先締めした供試体は平均0.65であり, 全数先締めした供試体はすべり荷重の計算値との比が最も小さくなっていた。

これは併用継手において, フランジ近傍の高力ボルトを先締めする割合が高いものほどフランジ溶接時の収縮によりフランジ近傍の高力ボルト位置で摩擦面がすべり, 継手全体のすべり荷重が小さくなったものと考えられる。

4.2.2 FEM解析

併用継手における高力ボルトの先締め行数とすべり荷重の関係について, FEM解析を行った。解析モデルは実験に用いた供試体と同じ大きさで, 10行あるウェブ高力ボルトのうち, 上下フランジ溶接後に締付ける範囲を上下フランジ側の1~3行(ウェブ先締め範囲80%~40%)および全数後締めと変化させた。(Fig. 9) この際, 添接板と主桁の力の伝達は, Fig.10 に示すばね要素とし, これを高力ボルト1本につきばね要素1つで定義した。これはすべり係数 $\mu=0.4$ 相当の荷重までは高力ボルトのせん断剛性である

が, それを越えてすべりが生じた後は $\mu=0.25$ に低下し, 変位がボルト孔に達した後はせん断剛性を元通りとするものである。フランジ溶接による収縮量として, 片側に0.5 mmの強制変位による収縮を与えている。

解析の結果, 併用継手の高力ボルト先締め行数とフランジ溶接によるウェブ添接板の相対変位の関係について Fig.11に示す。これよりフランジ側の2行以上(ウェブ先締め範囲を60%以下)を後締めとすることで, フランジ溶接時の高力ボルト位置でのすべりはなくなることがわかる。また, 全数後締め時のすべり荷重に対し, 高力ボルトの先締め行数により低下する割合を Fig.12に示す。これより, フランジ側2行以上の高力ボルトを後締めとすることにより, 全数後締めとのすべり荷重の比は90%以上となる結果であった。

4.2.3 実験および解析結果からの考察

併用継手の実験および解析結果から, 併用継手は耐荷力上の問題は少なく, フランジの溶接収縮による摩擦面のすべりに関しても, 溶接するフランジ側の2割程度以上のウェブ高力ボルトを後締めとすることで, すべり荷重の低

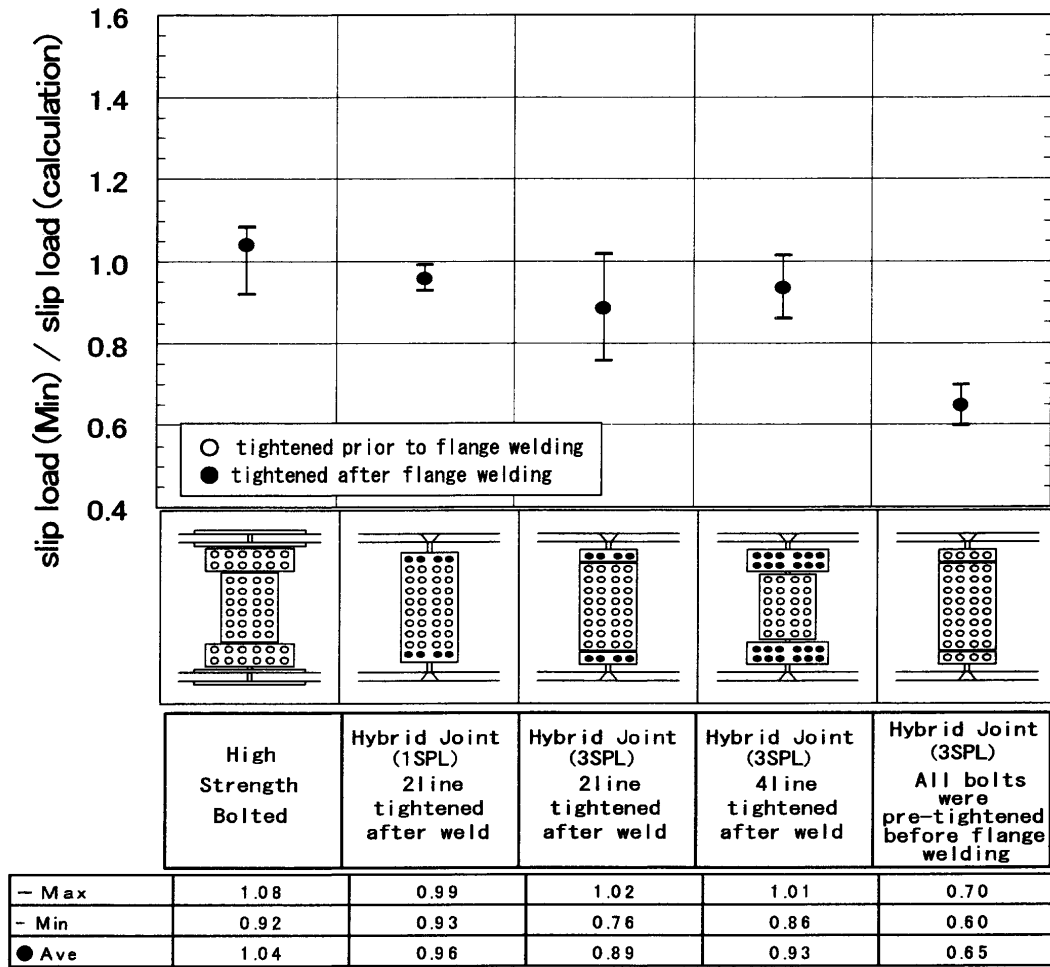


Fig. 8. Comparison of calculated values and experimental results. (Hybrid joint)

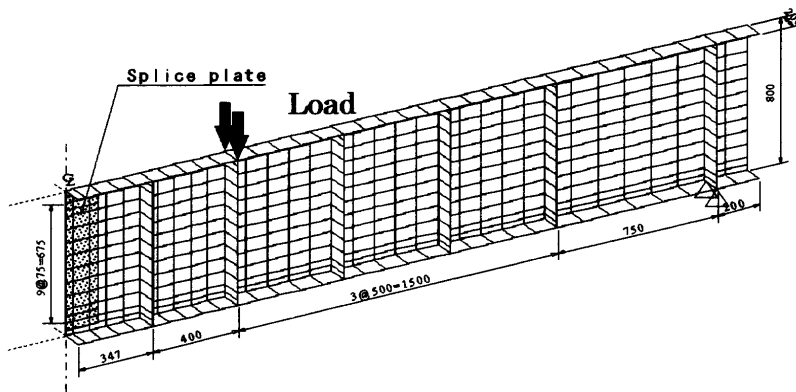


Fig. 9. Analytical model for FEM simulation.

下を最小限とすることができると考えられる。設計にあたってはウェブ高力ボルトの先締め範囲を制限するとともに、多少のすべり荷重の低下を考慮した補正係数を用いて、継手の必要ボルト本数等を定めることが望ましいと考えられる。

5. 併用継手の実施例

JHにおいて併用継手を採用した2つの橋梁に関して、それらの採用理由や施工上の配慮等について以下に記す。

5.1 東九州自動車道 今別府橋

東九州自動車道 今別府橋 (Fig.13) は、主に床版の施工合理化を目的として現場ヤードで製作するプレキャストPC床版を採用することになった。このため、現場継手は当初

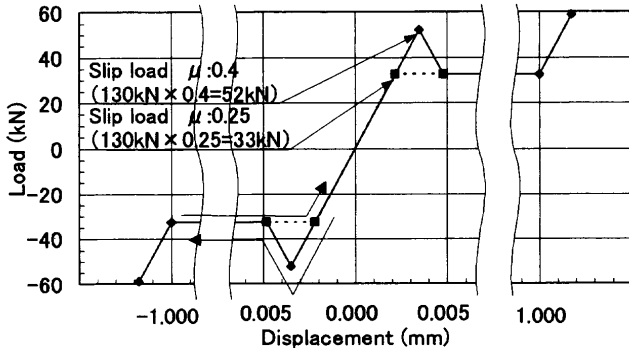


Fig. 10. Characteristics of spring element on friction surface.

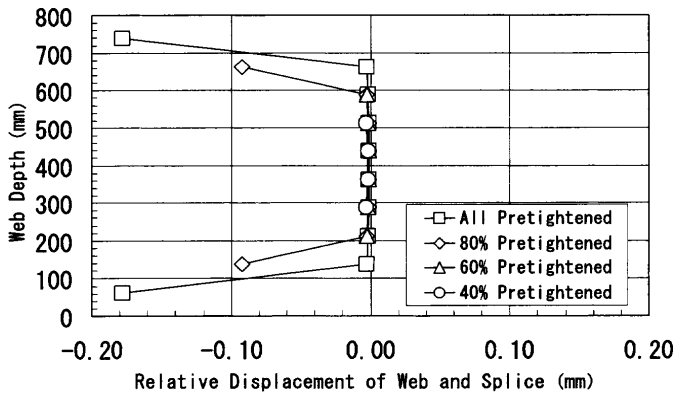


Fig. 11. Relative displacement at bolted joint on the web.

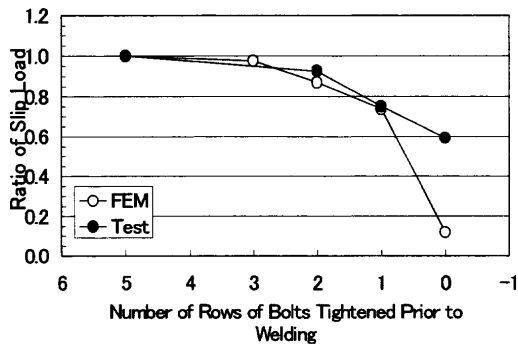


Fig. 12. Slip load and the number of rows of pre-tightened bolts.

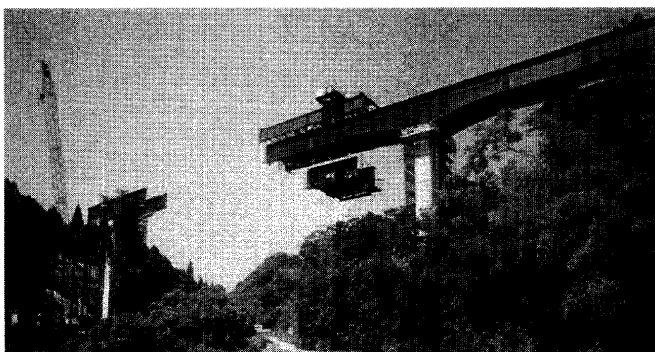


Fig. 13. Imabeppu river bridge.

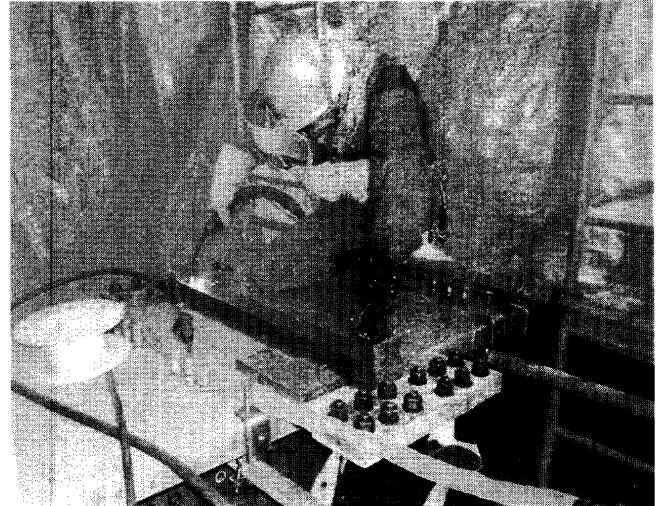


Fig. 14. Welding work situation. (Upper flange)

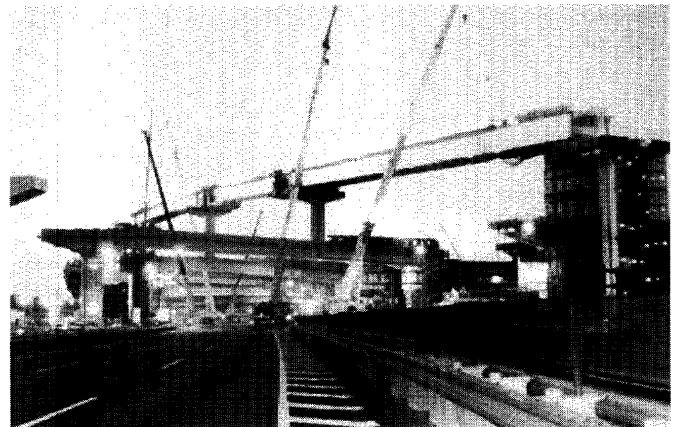


Fig. 15. Nagoyaminami IC N ramp bridge.

全断面高力ボルト継手で計画されていたが、プレキャスト床版と上フランジとの取合い、プレキャスト床版敷設時の仮設備（レール等）設置のため、上フランジ面を平坦にすることが望ましく、上フランジのみ溶接接合とし下フランジおよびウェブは高力ボルト接合とする併用継手とした（Fig.14）。

本橋では上フランジのみ溶接接合のため、上下フランジを溶接とした併用継手と同様に、上フランジのみ溶接接合とした供試体を用いて継手の耐荷力を確認した。その結果、全断面高力ボルト継手と同等以上の性能が確認された。実施工における施工手順は、ウェブ下側2/3、下フランジおよび上フランジの架設用プレートの高力ボルトを本締めした後、上フランジの現場溶接を行い、その後ウェブの残り上側1/3の高力ボルトの本締めを行った。

5・2 第二東名高速道路名古屋南IC Nランプ橋

第二東名高速道路名古屋南IC Nランプ橋は基本的に全断面溶接継手としているが、重交通道路との交差部（スパン約70m）の継手は道路直上での長期間の作業が安全性

から望ましくなく、作業期間の短縮を目的として併用継手を採用した (Fig.15)。架橋地点の条件によりフランジ溶接前にペントを撤去し、先締めするウェブ高力ボルトとエレクションピースで、架設時の断面力を伝達している状態でフランジ溶接を行うため、静荷重および動荷重作用下でのフランジの溶接施工性を検証している⁵⁾。

この結果、架設時断面力相当の静荷重が作用した状態でのフランジの溶接には問題がないことを確認している。また、鉛直たわみ30mm相当の荷重変動下では溶接に支障が生じるため、たわみ振幅を20mm以下で管理しながら現場溶接を実施することとしている。

ウェブの高力ボルトは、中央部の約1/3を先締めした後、上下フランジ側の2/3を後締めとした。

6. おわりに

鋼橋の併用継手に関して、採用の背景、課題と検討内容、実施例等について述べた。鋼橋における継手構造の考え方としては、条件に応じて、溶接、高力ボルトそれぞれの特徴を活かし、トータルとして合理的とすることが重要であると考えるものである。

また、本稿においては割愛したが、摩擦接合の接触面について塗布材料を変化させるなどによりすべり係数を変化させた実験も実施している¹⁾。すべり係数を大きくすることにより高力ボルトの必要本数が減少し、コスト縮減の1つの方策になると考えられる。今後、摩擦面のすべり係数に関して、摩擦面に用いる塗布材料、品質管理、検査等とすべり係数の設定等に関する課題を解決して、さらに合理的な継手の開発を行うことが望まれる。

本実験を遂行するに際しては、大阪大学の堀川浩甫名誉教授、明星大学の鈴木博之教授には有益なご助言を頂いた。ここに記し、深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) K.Shito, Y.Kamihigashi, T.Nagatani and M.Chimiya: *J. Structural Mechanics Earthquake Engineering*, No. 675, I-55, (2001), 343.
- 2) 道路橋示方書・同解説II鋼橋編, 日本道路協会, 東京, (2002), 144.
- 3) Y.Akiyama and N.Nishimura: *J. Constructional Steel*, 4 (1996), 287.
- 4) Y.Suzuki, K.Mizuguchi, H.Mochizuki and S.Miyaji: Proc. 53rd Annual Conf. Jpn. Soc. Civil Eng., I-A156, (1998), 312.
- 5) K.Nisih, N.Kiji, T.Kawakami, Z.Syaura, O.Azumaya and I.Imoto: Proc. 56th Annual Conf. Jpn. Soc. Civil Eng., I-B169, (2001), 338.