

# ジャッキアップ回転架設工法による宿茂高架橋の 設計，製作，架設について

## (その2．宿茂高架橋の高力ボルト・溶接併用継手)

雨 森 慶 一<sup>\*1</sup> 中 嶋 浩 之<sup>\*2</sup> 新 井 正 樹<sup>\*3</sup> 中 村 貴 史<sup>\*4</sup>

少数主桁橋は，これまで現場継手方法としては，高力ボルト継手あるいは全断面溶接継手が主に採用されてきた。高力ボルト継手は，施工が迅速に行え，施工品質が安定である反面，添接板の大型化や，孔引きによる主桁断面の増加がある。全断面溶接継手は，構造の簡素化及び景観が良くなる点が挙げられるが，溶接による施工時間を長期化，溶接による大入熱対策が問題としてある。

これらの高力ボルト継手，全断面溶接継手の欠点を補う方法としてフランジに溶接接合，ウェブに高力ボルト接合を用いた併用継手を採用した。以下にその概要及び検討を報告する。

## Design, Manufacturing and Construction of Sukumo Viaduct by the Jack-up Turn Method

### ( Part.2 Mixed Joint of a high-tensile bolt and welding of Sukumo Viaduct )

Keiichi Amemori , Hiroyuki Nakajima , Masaki Arai , Takashi Nakamura

Tension residual stress is induced to the neighborhood of a welding line due to the welding shrinkage of a flange, when a web plate is connected tightly by bolts in a mixed joint of a high-tensile bolt and welding. There is also a possibility that partial slip occurs in the joint of a web plate by the welding shrinkage. Several bolt lines in the web plate closed to a flange are preloaded after welding of flange in order to avoid above undesirable behaviors. In this report, the behavior of mixed joint at the time of the welding of a flange was clarified by FEM analysis of HSFG bolted joints, targeting mixed joint of Sukumo viaduct.

### 1．はじめに

宿茂高架橋は，四国縦貫自動道の西側に当たり伊予IC～内子・五十崎IC間に位置する。この間は最大標高が約300mに達する山岳道路となっており，本橋も標高80m～140m付近にあり急峻な峡谷部に建設される。本橋では，橋梁建設費の縮減，現場施工の省力化および工期短縮を目指した工夫を行っている。たとえば，2主桁橋の採用，上部工とRC橋脚を剛結した複合ラーメン橋の採用による基礎構造および下部構造断面のスリム化，場所打ちPC床版（全断面固定型枠），併用継手（フランジ：現場溶接，ウェブ：HTB接合），主桁フランジへのLPプレート使用，LPプレートへのHTB接合等，多くの特徴をもった橋梁である。また本橋は，架設工法に対し，契約時VE提案（施工方法等提案型指名競争入札方式）が採用された。

本報告書は，宿茂高架橋で採用された，高力ボルト・溶接併用継手における高力ボルト施工法に関する検討について述べるものである。

### 2．主桁継手方法の選定

近年，鋼橋の合理化の一環として従来の多主桁橋から大断面I桁を用いた少数主桁橋の採用が増加している。従来の多主桁橋では主に施工期間とコスト面から高力ボルト摩擦接合が有利であり多く採用されてきた。しかし，少数主桁橋においては部材の厚板化，大断面化が著しいために高力ボルト摩擦接合が必ずしも合理的とはいえなくなってきた。

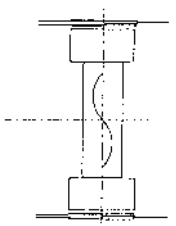
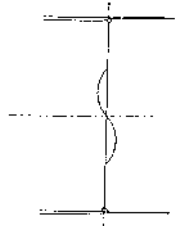
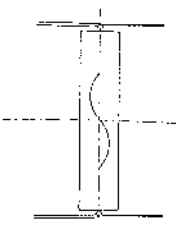
\* 1 橋梁設計部次長

\* 2 橋梁設計部主任

\* 3 橋梁設計部副主任

\* 4 大阪大学大学院

Table 1 主桁接合構造の比較一覧表

	全断面ボルト接合	全断面現場溶接	併用継手
構造図			
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 疲労に対して配慮する必要がない。</li> <li>② 現場での添接合部の施工時間が短い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>① ボルトの孔引き、添接板、ボルト等が必要となるので鋼重が減少する。</li> <li>② 添接板、ボルトが不要となるので、美観に優れている。</li> <li>③ 添接板の塗装の劣化がしにくい。</li> <li>④ コンクリート床版との取合い構造が簡素化される。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>① ウェブ部の溶接がなくなり施工時間の短縮が可能である。</li> <li>② 溶接部の検査時間の短縮が可能である。</li> <li>③ 溶接機器（自動溶接）の減少によりコストダウンが図れる。</li> <li>④ ウェブをある程度拘束可能 形状を早期に保持できることから施工速度が早くなる。</li> <li>⑤ コンクリート床版との取合い構造が簡素化される。</li> <li>⑥ ウェブのストロングバックが不要である。</li> </ul>
問題点	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 孔引きに伴うフランジ断面の増大がある。</li> <li>② フランジ厚が極厚になると施工が難しく、多列ボルトの検討も必要である。</li> <li>③ スプライスプレートの大型化がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 疲労に対して配慮（フランジギャップ部のスカートラップ等）する必要がある。</li> <li>② 鋼材の選定（予熱低減鋼，大入熱対策鋼）に配慮が必要である。</li> <li>③ 工期が長くなる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 溶収縮量に対して配慮した施工（ウェブの高力ボルト締付け範囲・方法等）が必要である。</li> </ul>

ている。Table 1 に主桁接合方法の比較表を示す。高力ボルト摩擦接合と溶接接合を比較した場合、高力ボルト摩擦接合には施工が迅速に行え、施工品質の安定性といった長所がある反面、連結板の大型化や、孔引きに伴いフランジ断面が増加するといった短所がある。一方、現場溶接接合の長所はコンクリート床版との取合い構造が簡素化できる、塗装が劣化しにくい、景観がよくなるということであり、短所は工期の長期化、ウェブのエレクトロガスアーク溶接に伴う大入熱溶接を行うにはその対策が必要ということが挙げられる。つまり、大断面 I 桁の接合に際しては、高力ボルト摩擦接合ではフランジの接合に問題があり、溶接接合ではウェブの大入熱溶接対策が問題である。これら双方の欠点を補う方法として、フランジに溶接接合、ウェブに高力ボルト摩擦接合を用いた併用継手による接合方法が大断面 I 桁では有利であると考えられた。

JH四国支社松山道大洲工事事務所管内の宿茂高架橋は合理化形式の 4 径間連続桁橋であることとジャッキアップ回転工法と称する新しい架設工法を採用したところに特徴がある。中間支点付近の主桁フランジ厚は70mmを超えるために、主桁ブロックの連結にはウェブを高力ボルト摩擦接合、フランジを溶接接合する併用継手が採用される。なお、併用継手の施工は中間橋脚に平行に主桁ジャッキアップする途中で行われる。ウェブを高力ボルトで連結した後、フランジの溶接を施工するがウェブがボルト継手により強固に連結されていると、フランジの溶収縮によりフランジの溶接線付近に引張残留応力が導入される。また溶収縮によりウェブのボルトに部分すべりが発生する可能性がある。高力ボルト摩擦接合に部分すべりが発生するとボルト軸力の低下や摩擦面の劣化により継手耐力が低減してしまうため避けなくてはならない。一般の合理化桁の併用継手は水平状態で施工され、継手には自重による曲げモーメントとせん断力が作用しているのに対し、宿茂高架橋における併用継手は主桁を縦組立てした状態で施工される。継手より上部の自重はジャッキで支持されているので、継手部に作用する断面力はほとんど零である。

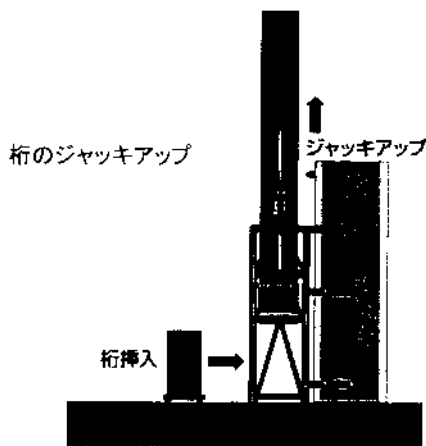


Photo .1

### 3. フランジの現場溶接

本橋では、Fig .1に示すように中間支点付近のフランジが厚板となるJ5・J12・J13及びJ20に併用継手を採用した。主桁フランジの現場溶接は、2タイプの溶接ロボットを用いて行ない、Table 2 に溶接諸元を、Table 3 に使用する溶接ロボットを示す。またFig 2に各溶接ロボットに対するフランジの開先形状を示す。

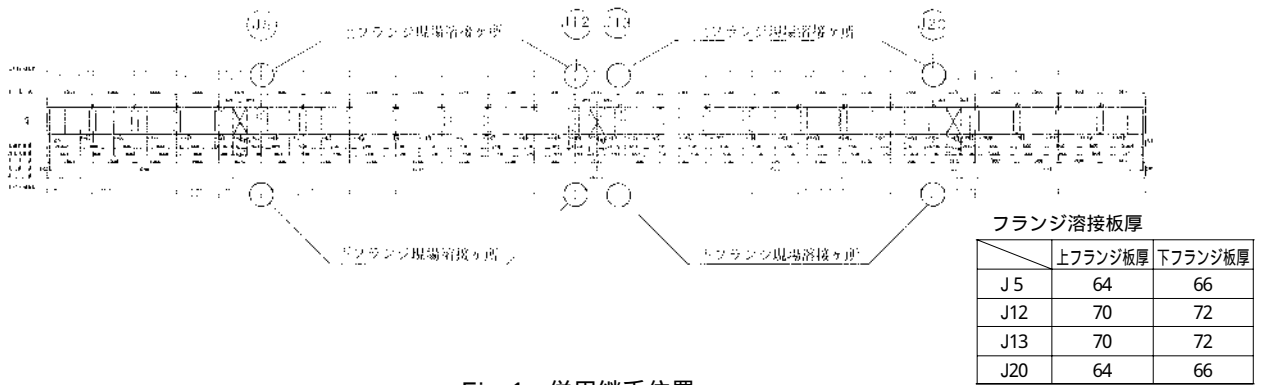


Fig. 1 併用継手位置

Table 2 溶接諸元

部位	間先形状	溶接姿勢	溶接方法
上フランジ	レ間先	横向	CO <sub>2</sub> ガスアーク溶接
下フランジ			
ウェブ	高力ボルトによる添接構造		

Table 3 使用溶接ロボット

	溶接ロボット
J5	SD ROBO 住金溶接工業(株)
J12・13・20	トモマツ (株)巴技研

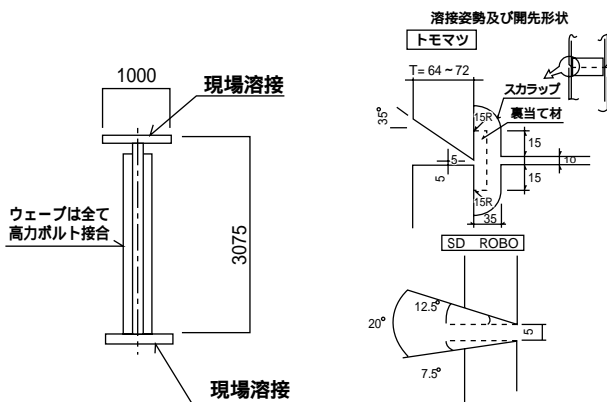


Fig. 2 フランジ開先形状

#### 4. 宿茂高架橋の併用継手

本橋の併用継手におけるウェブの高力ボルトは、主桁の計画キャンバーを保持することが主たる役割である。従ってフランジ溶接時にウェブの高力ボルトに課される条件は以下の通りである。

(1) フランジ溶接による収縮に対してフランジの溶接部に過大な引張残留応力が生じないように溶接時にフランジ近傍の高力ボルトを弛緩しておき、溶接終了後に初期ボルト軸力を導入する。

(2) 溶接前に所定の初期ボルト軸力を導入しておく高力ボルト群の最外行で、溶接による収縮によって生ずる内力によるすべりが発生して主桁のキャンバー管理を乱すことのないようにする。

これらのことを回避するためにフランジに近い数行の

ウェブボルトの初期軸力導入をフランジ溶接後とする。

本研究では宿茂高架橋の腹板連結構造を対象として、高力ボルト摩擦接合継手の有限要素解析プログラム<sup>1-3)</sup>による弾塑性解析により、フランジ溶接時の継手挙動を明らかにするとともに、併用継手における高力ボルトの施工要領を取りまとめた。

#### 5. 解析法とモデル

##### 5.1 高力ボルト摩擦接合継手の解析法

宿茂高架橋の併用継手のウェブは片側29行×6列の摩擦接合ボルト継手が用いられる。スーパーコンピュータの解析容量を考慮して解析モデルは片側29行×3列とする。フランジ溶接による収縮量は過去に行われた実験データを集計した結果、平均片側0.89mmであるが施工のばらつきなどを考慮して片側1.0mmとする。Fig. 3に宿茂高架橋併用継手の解析モデル図を示す。解析対象領域は対称性を考慮して橋軸方向、桁方向、フランジ幅方向それぞれ1/2とし全体で1/8モデルとする。Fig. 4に要素分割の概要図を示す。要素は継手部の複雑な幾何学的形状を表現するため20節点アイソパラメトリック要素を用いる。ウェブの母材・連結板、連結板・座金間の全接触面にはジョイント要素を導入する。ジョイント要素では接触面の状態を固着、すべり、剥離の3つの状態に分けて取り扱っている<sup>1-3)</sup>。継手中央部における添接板節点の部材軸方向変位、上下対称軸の部材軸直角方向変位およびウェブ板厚中央面の板面外変位を拘束する。そしてフランジ溶接線上の節点に全変位が溶接収縮量になるまで部材軸方向の強制変位増分を与える。Table 4に解析モデルの諸元を示す。解析では六角高力ボルトを使用し、実施工ではトルシア型高力ボルトを使用した。このモデルに対して、フランジ近傍の2行、4行、5行および6行に初期ボルト軸力を導入せず手締めとした合計4ケースの解析を行った。なお本締めする高力ボルトについては2度締めを行った。

##### 5.2 実験データとの比較

Fig. 5に実験モデル図を示す。Table 5に実験モデルの諸元を示す。解析対象領域、拘束条件などは宿茂高架橋モデルと同様とする。実験、解析共に六角高力ボルトを使用した。溶接施工試験ではフランジ上縁の溶接線から部材軸

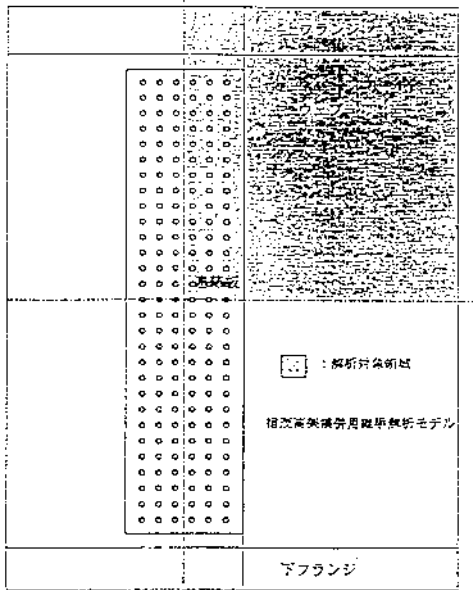


Fig 3 解析モデル

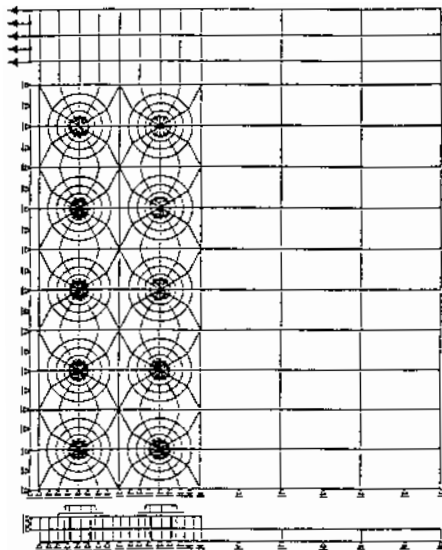


Fig 4 要素分割概要

Table 4 解析モデルの諸元

フランジ	板厚	70mm
	板幅	100mm
ウェブ	板厚	28mm
添接板	板厚	13mm
ボルト	種類	M22
	列	3
	行	29
	間隔	75mm
溶接収縮量	片側	1.0mm

方向に75mm, 112.5mmの位置で部材軸方向の直ひずみが計測されている。実測値と解析値はTable 6に掲げるようにほぼ対応している。

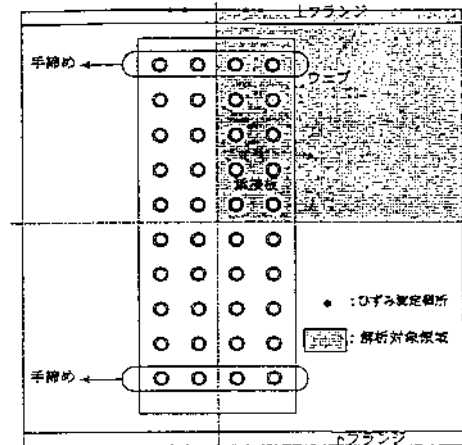


Fig 5 実験モデル

Table 5 実験モデル諸元

フランジ	板厚	16mm
	幅	200mm
	鋼種	SM490
ウェブ	板厚	12mm
	ウェブ高	800mm
	ボルト	F 8 T, M22
	行数	10行
	列数	2列

Table 6 実験との比較

	片側収縮量 (mm)	ひずみ(μ) 75mm地点	ひずみ(μ) 112.5mm地点
実験	0.5	750	480
解析	0.5	737	502

## 6. フランジ溶接によるウェブ高力ボルトのすべりと応力分布

### 6.1 フランジ溶接による残留応力

Fig 6に各ケースのフランジの板厚中央面における部材軸方向直応力分布を示す。図の値は部材軸方向直応力を降伏応力で無次元化したものである。図より手締めのボルトが増えるに従ってフランジの応力が徐々に減少しているのがわかる。各タイプともフランジ応力は継手中央から100cm程度ではほぼ消滅している。またフランジ板厚方向中央面において応力が最大となるのは溶接線のフランジ幅方向の中央で、その最大値は手締めのボルト行数を増加させるとほぼ線形的に減少している。Fig 7にフランジの最大引張応力と手締めボルト行数の関係を示す。図中の直線は値を線形近似したものである。各タイプとも継手中央部のフランジの下端とウェブが接している個所で引張応力が最大となっている。その最大値はフランジ断面中央の最大値と同様に手締め行数が増加するとほぼ線形的に減少していく傾向が見られる。

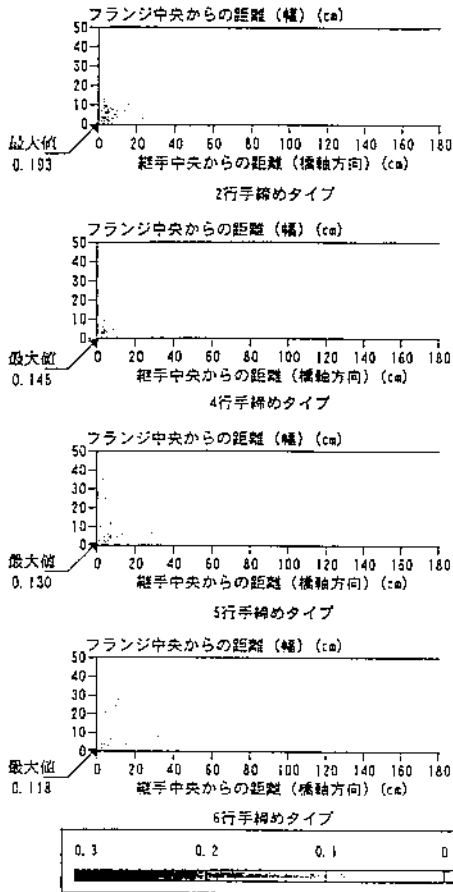


Fig. 6 応力分布

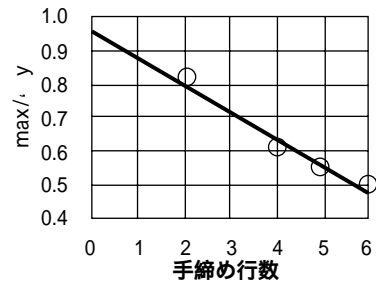


Fig. 7 最大引張応力

### 6.2 ウェブ高力ボルトのすべり

Table 7 に溶接収縮終了時の部分すべりの状況を示す。2 行手締めのタイプでは溶接収縮終了後に初期ボルト軸力を導入している 3 行目および 4 行目が部分すべりの状態となっている。4 行、5 行手締めのタイプではそれぞれ初期軸力を導入している 5 行目、6 行目が部分すべりの状態となっている。6 行手締めのタイプでは部分すべりは発生していない。このように手締め行数を増加させることにより部分すべりの発生が抑制されることが確認できる。

Table 7 部分すべり結果

手締め行数	部分すべり発生行
2 行	3 行目, 4 行目
4 行	5 行目
5 行	6 行目
6 行	なし

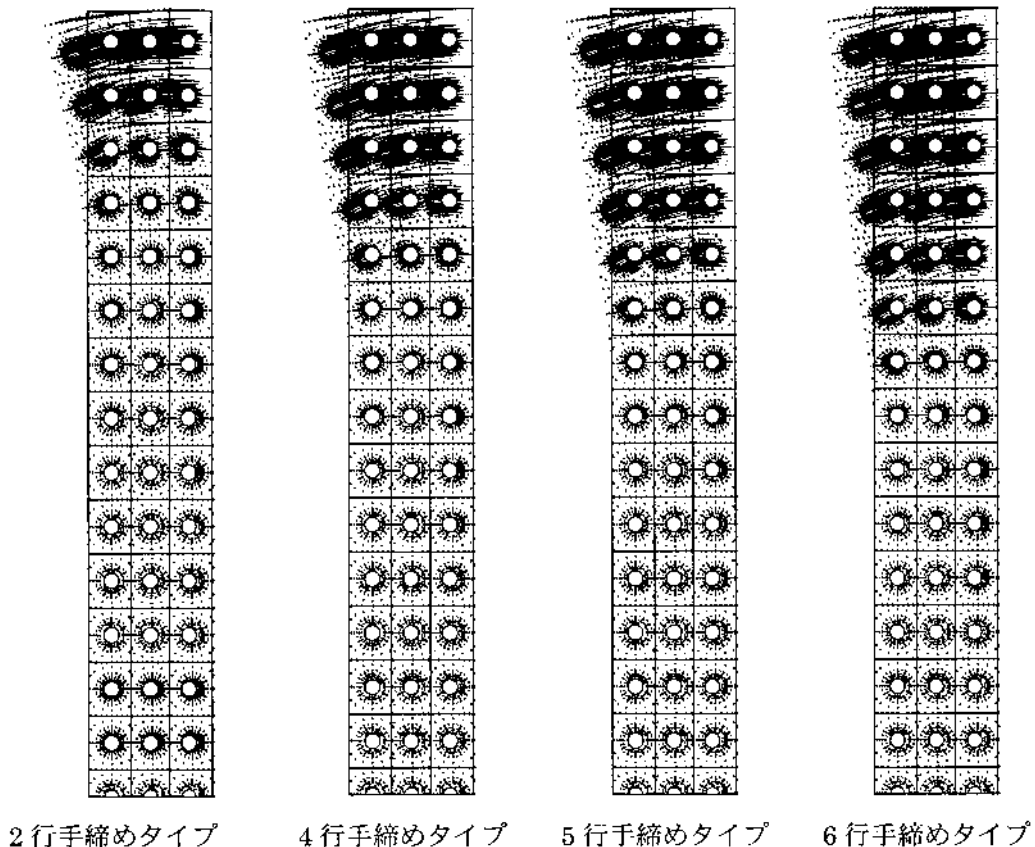


Fig. 8 ウェブ - 連結板間の相対変位

Fig 8に溶接收縮終了時のウェブと連結板間の相対変位図を示す。変位は図の継手のスケールに対して100倍に拡大している。初期軸力を導入していないボルト周辺では溶接收縮に伴うウェブと連結板の相対変位が大きくなっている。また部分すべりが発生したボルト行でも相対変位が若干生じていることが確認できる。

Fig 9に溶接收縮終了時における各ボルト行の平均相対変位と手締め行数の関係を示す。各タイプともウェブと連結板の相対変位が最大となる1行目において0.9mm以内に収まっており、ボルト孔とボルト径の差(2.5mm)に達していない。施工のばらつきを考慮しても1行目は手締めであるので支圧状態に至るまでには充分余裕がある。また6行手締めタイプの7行目ボルトの平均相対変位は0.04mm程度であり部分すべりが発生していない。その他のモデルでは初期ボルト軸力を導入している高力ボルト群の最外行において平均相対変位が大きく。そのボルト行において部分すべりが発生していることが確認できる。

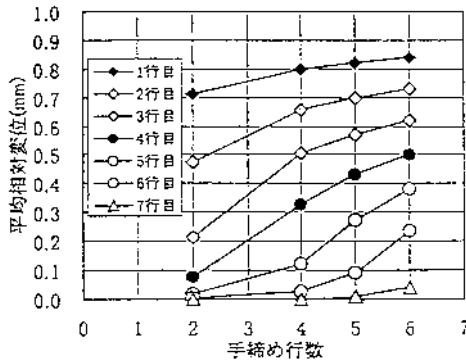


Fig 9 平均相対変位

## 7. 解析結果

宿茂高架橋の併用継手部を対象に最適手締め行数を解析的に検討した。本報告で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 既往の実験と比較を行うことにより併用継手の挙動を確認するとともに解析の妥当性を検証した。
- (2) 手締めのボルト行数を増加させるとフランジの引張応力が線形的に減少する。
- (3) 手締めの行数が2行、4行および5行では手締めボルト行に隣接する初期軸力導入行でいずれも部分すべりが発生し、6行手締めタイプでは部分すべりは発生しな

かった。

- (4) すべてのタイプにおいて手締め行のウェブと連結板の相対変位は最大で0.9mm程度であり、ボルト孔とボルト径の差(2.5mm)よりも小さく支圧状態には達していない。

本解析ではウェブのボルト配置は29行×3列であるが、宿茂高架橋併用継手ではウェブのボルト配置は29行6列である。列数が3列から6列になるとすべり強度も2倍となり部分すべりが発生しにくくなる。そのことにより若干の応力の上昇が考えられるが、フランジの引張応力は小さく問題にはならない。以上のことより、宿茂高架橋併用継手の施工においては上下フランジ近傍の5行程度を手締めとすることが妥当であると言える。

また宿茂高架橋併用継手だけに限らず自重による断面力を考慮した解析を行うことにより他の併用継手の施工要領を検討することが可能である。

## 謝 辞

本研究及び工事において種々ご指導いただきました日本道路公団の皆様方、本研究及び解析に際し貴重なご意見、ご指導をいただきました大阪大学西村宣男教授に深く感謝の意を表します。また、御協力をいただいた住友金属工業株式会社の関係者の方々に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Nishimura, N., Kamei, Y. and Ikehata, B.: Analysis of HSFG Bolted Joints Considering Local Slip, TECHNOLOGY REPORTS OF THE OSAKA UNIVERSITY, Vol 46, No 2257pp 227 ~ 236, 1996 .10
- 2) 亀井義典, 池端文哉, 西村宣男: 低材質フィラープレートを用いた高力ボルト摩擦接合の限界状態, 構造工学論文集, Vol 43A, pp 65 - 72, 1997 3
- 3) 亀井義典, 池端文哉, 西村宣男: 高力ボルト摩擦接合継手の限界状態区分に関する解析的研究, 土木学会論文集, NO 584, pp 243 - 253, 1998 .1
- 4) 合理化解析に関するデザインマニュアル(中間報告), 日本鋼構造協会
- 5) 中村, 亀井, 西村, 雨森, 新井: 高力ボルト・溶接併用継手における高力ボルト施工要領, 土木学会第54回年次学術講演会, I - A196 (1999 9)