

鋼製橋脚摩擦接合部の合理的設計に関する研究

STUDY ON RATIONAL DESIGN FOR FRICTION GRIP JOINT OF STEEL PIER

金治英貞* 石原靖弘** 小林秀恵***

By Hidesada KANAJI, Yasuhiro ISHIHARA, Hidee KOBAYASHI

The aim of this study is to pursue a problem which is the increasing number of bolts at the joint of steel pier. This problem, in general, tends to be a result from increase in the sectional force, but by reviewing the current design, we found that there are other factors.

So, we carried out various kind of experiments and analyses, and attempted to clarify their mechanic properties which are frictional resistance and stress distribution, etc.

From these results, we found that extreme bolt line in web bears all stress of web clearance which is outside of extreme bolt line and is made for working space of tightening bolts. So we consider the method of sharing this stress and the possibility of rationalization of friction grip joint of steel pier is in evidence. Finally we made a study which can be reflected to new design method.

1. まえがき

現在、鋼橋の現場継手には、高力ボルト摩擦接合がその施工性・信頼性から多数用いられており、今後も同様に多くの橋梁建設に用いられるものと考えられる。一方、その設計法は昭和55年の道路橋示方書¹⁾(以下道示という)の改訂時に、リベット接合の延長上の考え方から高力ボルトの特性を考慮したものへと改められたが、合理的設計を追求する上では、依然として検討の余地が残されているものと考えられる。

例えば近年、鋼製橋脚の高力ボルト摩擦接合部は、道示に示されている1列当りの望ましいボルト本数8本、さらには最大許容本数12本をも逸脱するボルト多列化という問題に直面している。従って、経済性はもとより継手内のせん断力のアンバランスから生じるすべり耐力の低下や疲労強度の低下といった観点からも、この接合部の合理化、つまりボルト本数の低減化を進める必要がある。

通常多くの橋脚継手においては、設計断面力として面外曲げに比べ面内曲げが卓越しているにもかかわらず、ボルト配列に着目するとフランジよりウェブボルト列数の方が多く、不合理な多列化配列が見受けら

*	工修 阪神高速道路公団 計画部	(〒541 大阪市中央区久太郎町4-1-3)
**	片山ストラテック(株) 橋梁設計部	(〒551 大阪市大正区南恩加島6-2-21)
***	神戸大学技官 工学部建設学科	(〒657 神戸市灘区六甲台町1)

れる。また、上部工反力の増大および省座位置、輸送を考慮したブロック割りによって継手位置が隅角部に近接するため、この多列化が顕著になっている。

これらを助長している原因を設計面から検討すると、第1点目として、作用応力が小さい場合でも母材全長の75%以上で設計すること、第2点目として、ボルト締めを考慮して生じるウェブクリアランス部（図-1参照）における曲げ応力をウェブ最外縁のボルト列で全て負担していることがその要因であると判明した。

本研究では、これらの要因のうち第2点目に焦点を当て、ボルト配列の合理化ならびにボルト本数の低減化を検討している。なお、低減化は上記曲げ応力をフランジ添接部に負担させることによって可能となることから、ここでは、I型プレートガーダーを用いた基礎実験をもとに、二軸曲げ状態を再現できるボックスガーダーによってウェブクリアランス部応力の分担状態を定量的に把握している。また、これをFEM解析により検証するとともに合理的な設計法の提案を行っている。

2. 鋼製橋脚摩擦接合部の問題点

鋼製橋脚摩擦接合継手の設計法は、面内、面外2方向の断面力に対して設計すること以外は通常のプレートガーダーと変わらない。しかし、過去に施工された鋼製橋脚梁継手部の設計断面力を調査した結果によると、面外方向よりも面内方向の曲げが卓越しているにもかかわらず、ボルト列数は面外断面力に対して有効なウェブ側の方が多くなる傾向にある。また、近年の構造物の大型化、輸送幅の制限等から現場継手を隅角部断面内に設けることが多く、この場合は母材の材質が高く、板厚も大きいことからボルト列数が道示の解説に示されている「8本以下とするのがよい」という条文を守れないこともある。

以上の原因としては、施工上の制約からボルト配置が決定されていることが考えられる。すなわち、図-1に示すようにフランジのボルトを先締めし、ウェブを締めようとする場合、ウェブ縁端のクリアランスを大きくとらないとレンチによる締め付け作業ができないからである。

このクリアランス部の応力は、現設計法ではウェブ第1列目のボルト列で全て分担することになるため多列となるわけでもあるが、実際にはかなりの応力をフランジ側で分担して

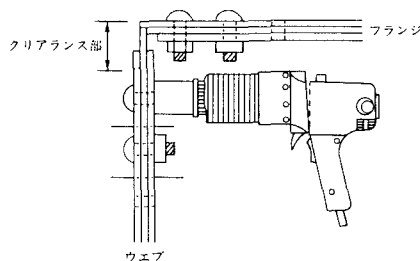


図-1 ボルトの締め付け状態

いるものと考えられる。道示ではウェブの列数が異常に多くなる場合は、その作用力の一部をフランジに受け持たせてもよいとしているが、明確な規定は示されていない。

3. プレートガーダー供試体による基礎実験²⁾

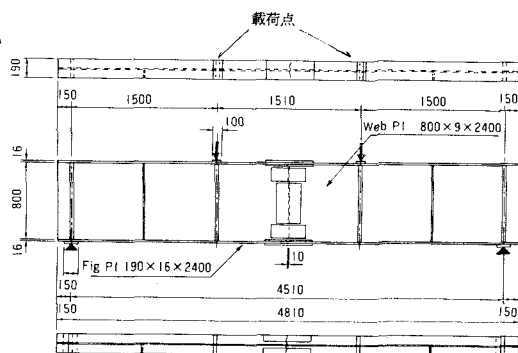
3.1 概要

前述の目的を実験的に明らかにするため、まず実構造物規模のI断面プレートガーダー供試体を用いて曲げ荷重試験を行い、基礎データを得た。

試験におけるパラメータとしては、継手形状、ウェブ最外縁ボルト列の有無、フランジボルト列数等である。

3.2 供試体の形状

供試体の形状寸法を図-2に示す。また、継手部の形状を図-3に示す。ここでは継手部の形状



(単位: mm)

図-2 供試体の形状寸法

が力学的性状に及ぼす影響を把握するため、3体の供試体（A桁、B桁、C桁）を用意した。これらは各れも試験目的から強制的にウェブクリアランス部を設けるために、ウェブ最外縁ボルト列のボルトおよび添接板を外せるようにしている。

なお、供試体の材質はSM50Aで、摩擦面は表面粗さが50S程度となるようにショットブラスト処理を施した。また、高力ボルトは材質F8T、サイズM16、で実験精度を上げるため軸力のばらつきが小さい耐力点検出法により締付けた。

3. 3 実験方法および測定項目

供試体は単純支持とし、載荷桁を用いてスパン3等分点の2点に荷重をかけ、純曲げ載荷状態とした。

また、供試体は全ボルト締結時を初期状態（試験ケース1）として、順次ボルトおよび添接板を除去して行き（試験ケース2、3）、最終的にはすべりが生じるまで荷重を増加させた（試験ケース4）。各試験ケースにおける添接板およびボルトの取付状況を表-1に示す。

測定項目としては、

- ①添接板のひずみ分布（継手中心線上）
- ②母材のひずみ分布（継手中心線から40cm離れた位置）
- ③たわみ分布
- ④母材突合せ部の相対すべり量
- ⑤すべり荷重

等である。

3. 4 実験結果

添接板のひずみ分布から作用力を求め、中立軸からの距離を乗じて各ボルト列毎のモーメント分担率を計算した。その結果の一例として50tf載荷時の状態を表-2に示す。

この表から、最外縁ボルト列を除去することにより、フランジでは10～20%程度分担率が増加し、ウェブ全体ではその分減少していることがわかる。

また、これから最外縁ボルト列が分担していたモーメントがどのように再配分されたかを計算した結果を表-3に示す。これによれば、約70%がフランジに分配され、残りの約30%がウェブの他のボルト列に分配されるということがわかった。なお、すべり音から判断したすべり荷重はA桁71.0tf、B桁67.0tf、C桁65.3tfであった。

4. 箱桁供試体による実験³⁾

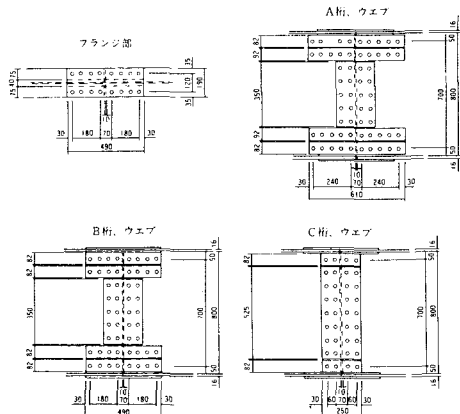


図-3 継手部の形状 (単位：mm)

表-1 試験ケースと添接板の条件

試験ケース	シャーププレート	モーメントプレート	フランジ添接板
ケース1	全点締結	全点締結	全点締結
ケース2	〃	外縁列除去	〃
ケース3	〃	〃	片側ボルト2本除去
ケース4	〃	〃	片側ボルト4本除去

表-2 モーメント分担率（%）

		フランジ	モーメントプレート (外側)	モーメントプレート (内側)	シャーププレート
A桁	ケース1	63.1	20.7	9.7	6.5
	ケース2	77.6	—	13.9	8.5
	ケース3	75.4	—	15.6	9.0
	ケース4	71.1	—	18.4	10.5
B桁	ケース1	67.8	19.4	9.3	3.5
	ケース2	81.5	—	14.0	4.5
	ケース3	79.9	—	15.3	4.8
	ケース4	76.9	—	17.7	5.4
C桁	ケース1	69.2	16.0	11.0	3.8
	ケース2	80.7	—	15.1	4.2
	ケース3	78.2	—	17.2	4.6
	ケース4	74.8	—	20.1	5.1

表-3 最外縁ボルト列モーメント分配率（%）

分配箇所	A 桁	B 桁	C 桁
フランジ	70.0	70.8	71.2
モーメントプレート	20.3	24.2	25.6
シャーププレート	9.7	5.0	3.2

4. 1 概要

前項の基礎実験により、当初の予想通りウェブクリアランス部の応力は大部分がフランジ側で分担することがわかったので、箱桁供試体を用いた本格的な実験をすることになった。実験の目的は

- ①実際の橋脚断面と同じ箱断面接合部において、ウェブ最外縁ボルト列つまりウェブクリアランス部の有無による影響を確認する。
 - ②面内、面外2方向の曲げモーメントを与え、継手部におけるその影響を確認する。
 - ③ボルト配列の相違による影響を確認する。
 - ④面内曲げモーメントを増加させて、継手部の終局状態（すべり）を確認する。
- 等である。

4. 2 供試体の形状

継手部に2軸曲げを与える方法として、

- ①鉛直曲げは通常の構造物試験機で与えるとして、水平曲げはジャッキで側面から荷重をかけて与える。
 - ②通常の構造物試験機により鉛直载荷するが、断面的に回転させてセットすることにより、結果的に2軸曲げを与える。
 - ③鉛直曲げは通常の構造物試験機で与え、水平曲げはコの字形に製作した供試体の端部にP C鋼棒を通しそれをジャッキで締め付けることにより水平曲げを与える。
- 以上3案を検討したが、①は水平反力を受けるための大規模な反力壁が必要なこと、②はすべりを発生させるには試験機の能力が不足すること、等から③の方法を採用した。

実験の状況を図-4に示す。

供試体設計上の留意点としては、

- ①箱桁内の作業空間の必要性から、箱断面は1 m×1 mの大きさとした。
- ②終局载荷時の安全性を考慮して、母材は応力的な余裕を持たせる。
- ③終局状態における面内と面外の曲げモーメント比(M_H/M_V)は、実構造物の例から1.0以下となるようにする。
- ④試験機設置スペースの関係から供試体のスパンは7 m以下とする。

等である。なお、母材の材質はSM50Y、板厚19 mmを使用した。また、ボルトは材質F8T、サイズM16で耐力点検出法により締付けた。箱桁供試体の形状寸法を図-5に示す。

スパン中央部にある試験継手の形状としては、現設計法を想定したウェブ多列型(B1供試体)とウェブクリアランス部の応力をフランジで受け持たせる設計法を想定したフランジ多列型(B2供試体)の2種類を用意した。またプレートガーダー供試体と同様、ウェブ最外縁のボルト列を外せるようにした。継手部の形状を図-6に示す。

4. 3 実験方法および測定項目

载荷方法として、水平荷重(面外载荷)は120 t f

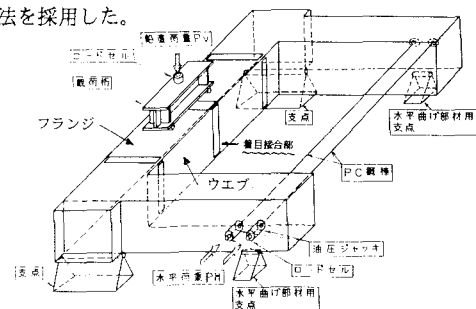


図-4 箱桁供試体の実験状況(単位:mm)

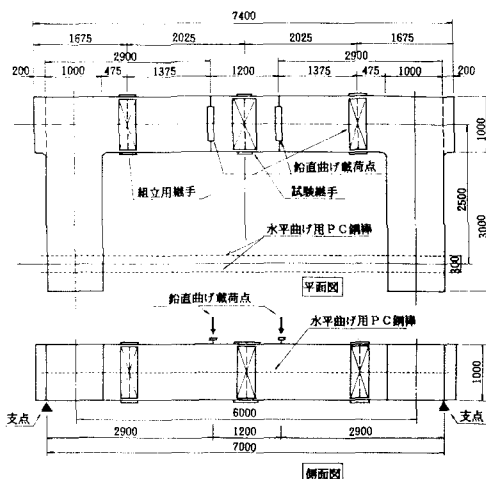


図-5 箱桁供試体の形状寸法(単位:mm)

センターホールジャッキでP C鋼棒（3 2 φ×2本）を締め付けることにより定荷重として与えておき、鉛直荷重（面内載荷）は3 0 0 t f 構造物試験機により段階的に与えた。なお、水平載荷では自重の影響を与えないよう留意した。試験ケースを表－4 に示す。

また、測定項目及び測定機器の一覧を表－5 に示す。

4. 4 実験結果

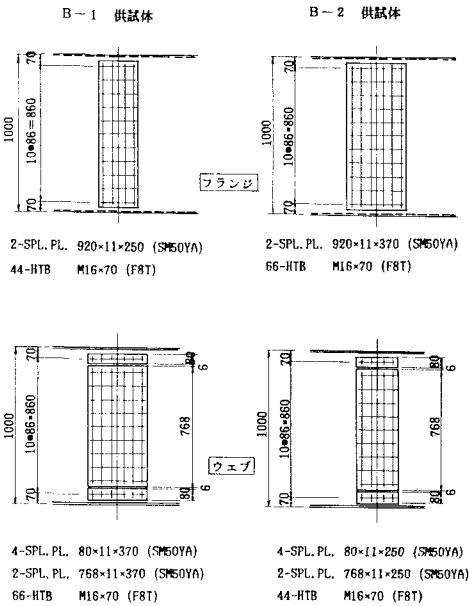
4. 4. 1 すべり荷重

すべりが発生した際の鉛直載荷荷重を表－6 に示す。設計的には応力分担範囲の大きいウェブ第1ボルト列がすべりに対しクリティカルになり、B 1 供試体より、B 2 供試体の方が設計すべり耐力は小さい。しかし、実験ではB 2 供試体の終局耐力の方がB 1 供試体のそれより大きいという結果となった。また、ボルト1本当りのすべり耐力に換算すると、B 2 供試体の方が1 割程度大きく、有効な配列と言える。なお、すべり荷重の小さいB 1 供試体でも設計耐力に比べて2 倍以上の安全率を有している。

4. 4. 2 曲げひずみ分布

継手中心線上における曲げひずみ分布の測定結果の例（B 2 供試体）を図－7 ～図－1 1 に示す。これらの図から以下のようなことが言える。

①断面隅角部（フランジとウェブの接点）近傍のひずみは、三角形分布とは異なり絶対値が若干大きめに線形状態から外れている。これは、いわゆるせん断遅れ現象に加えて、外縁ボルト列は母材断面が継手によって絞られ、かつ不連続となっているため、他のボルト列に比べて、そのボルト列断面より外に存在する母材断面力が



図－6 箱桁供試体試験継手の形状（単位：mm）

表－4 箱桁供試体の試験ケース

試験ケース	試験条件		
	水平荷重 P_H (tf)	鉛直荷重 P_V (tf)	ウェブ継手
ケース1	0	0～75	全数
ケース2	30	0～75	全数
ケース3	60	0～75	全数
ケース4	0	0～75	最外縁ボルト列除去
ケース5	30	0～75	最外縁ボルト列除去
ケース6	60	終局状態まで	最外縁ボルト列除去

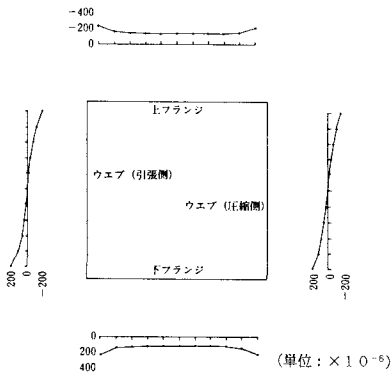
表－5 測定項目一覧表

測定項目	測定機器
添接板のひずみ分布	単軸ひずみゲージ
母材のひずみ分布	単軸ひずみゲージ ロゼットひずみゲージ
たわみ分布	棒型変位計
相対すべり量	クリップ型変位計

表－6 箱桁供試体のすべり荷重

供試体名	すべり荷重 (tf)	ボルト本数
B 1	135 (0.69)	196
B 2	160 (0.78)	204

注。（ ）内はボルト1本当りのすべり耐力



図－7 継手中心線上曲げひずみ分布
B 2 供試体、ケース1（ $P_H=0$ tf, $P_V=75$ tf）

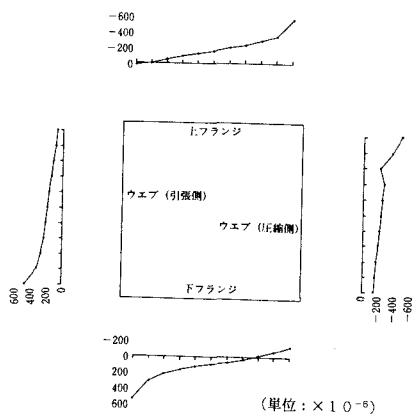


図-8 継手中心線上曲げひずみ分布
B 2 供試体、ケース 3 ($P_H=60\text{tf}$, $P_V=75\text{tf}$)

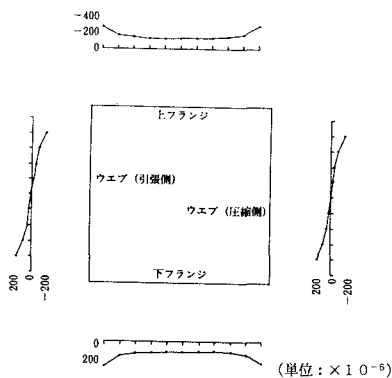


図-9 継手中心線上曲げひずみ分布
B 2 供試体、ケース 4 ($P_H=0\text{tf}$, $P_V=75\text{tf}$)

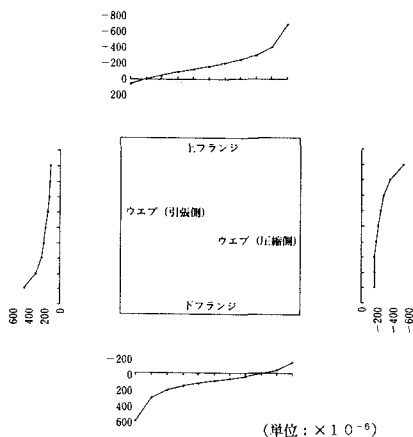


図-10 継手中心線上曲げひずみ分布
B 2 供試体、ケース 6 ($P_H=60\text{tf}$, $P_V=75\text{tf}$)

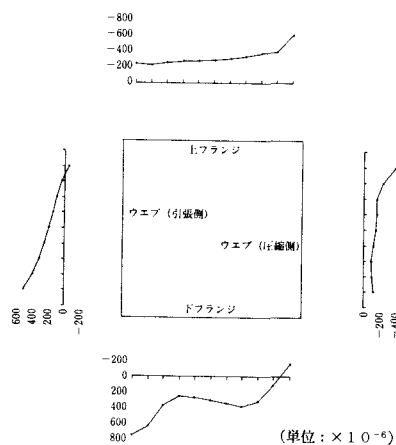
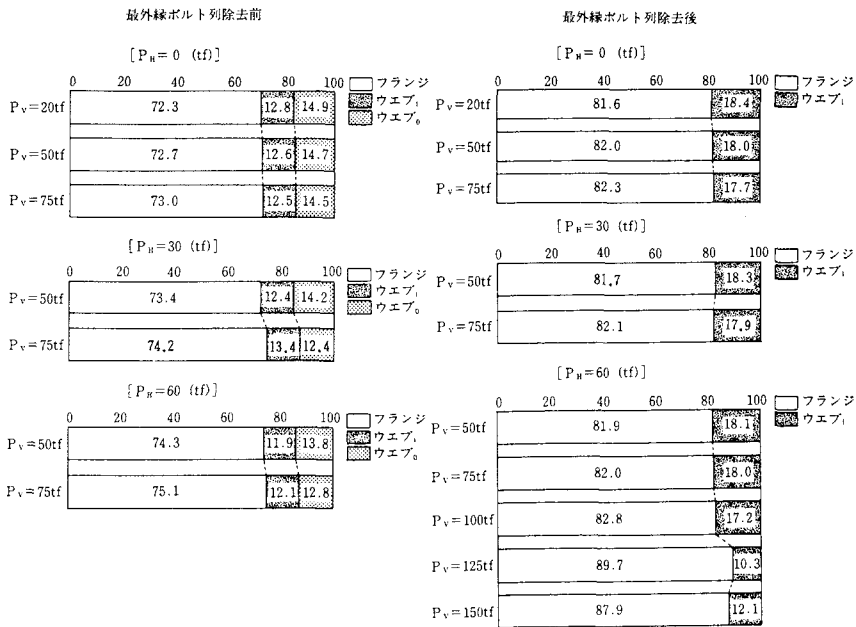


図-11 継手中心線上曲げひずみ分布
B 2 供試体、ケース 6 ($P_H=60\text{tf}$, $P_V=165\text{tf}$)

余分に荷分担されるためであろうと考えられる。

- ② ひずみは荷重レベルに応じて増大し、かつ荷重レベルが低い場合は面内、面外それぞれの単独載荷時のひずみの重ね合わせが適用できる。
 - ③ ウェブの最外縁ボルト列を除去すると、その近傍のボルト列のひずみは大きく増大する。
 - ④ 最終載荷ステップにおけるすべり発生時には、すべり発生による応力の再分配が起こり、ひずみ分布形状に乱れが生じている。
 - ⑤ 同一載荷状態で B 1 および B 2 供試体のひずみ分布を比較すると大差ないが、継手剛性の高い側 (B 1 供試体ではウェブ、B 2 供試体ではフランジ) の外縁ボルト列ひずみが大きくなる傾向にある。
- なお、面外曲げ載荷時には PC 鋼棒緊張の反力としての軸力成分が入るが、結果の整理時にはこの影響を除去した。

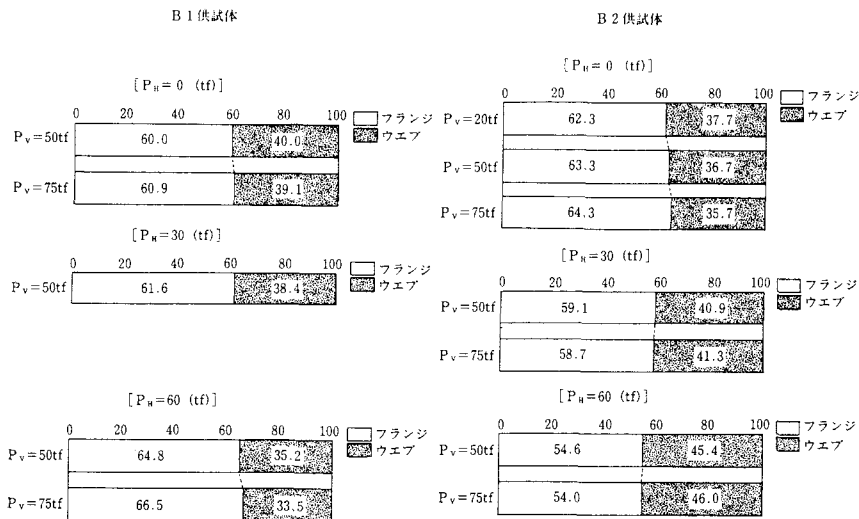


図－１２ 各ボルト列のモーメント分担率（Ｂ２供試体）

４．４．３ モーメント分担率

添接板中心の曲げひずみ分布から、各ボルト列ごとのモーメント分担率を計算した。Ｂ２供試体における計算結果を図－１２に示す。図中、ウェブ_oとは最外縁ボルト列、ウェブ_iとはそれ以外のボルト列の合計を示す。

同図から、フランジのモーメント分担率は最外縁ボルト列のある状態で７２～７５％、最外縁ボルト列を外した状態では８２～９０％と約１０％増大することがわかる。これはプレートガーダー供試体での実験結



図－１３ 最外縁ボルト列モーメントの分配率

果と同様、最外縁ボルト列のモーメント分担力がフランジに分配されていることを示すものである。なお、B1供試体も同様な傾向であった。また、 P_H と P_V の影響は $(P_H, P_V) = (60, 125), (60, 150)$ においてみられるが、これは局部的なすべりによって分担力が変化しているためと思われる。

4. 4. 4 最外縁ボルト列分担モーメントの分配率

上述の最外縁ボルト列の有無によるモーメント分担率の変化から、他のボルト列へのモーメント分配率を計算した。その結果を図-13に示す。

同図から、最外縁ボルト列の分担していたモーメントは、B1供試体では60%~67%、B2供試体では54%~64%がフランジに分配されることがわかった。ここでB2供試体の分配率は、 P_H の大きさによって漸減する傾向に見えるが、図-12の最外縁ボルト列除去後試験における $P_H = 60 \text{ t f}$ 時の $P_V = 125, 150 \text{ t f}$ のフランジ分担率を考えると、逆にその荷重状態でのフランジ分配率は増加することが予想され、一概に漸減傾向があるとは言えない。

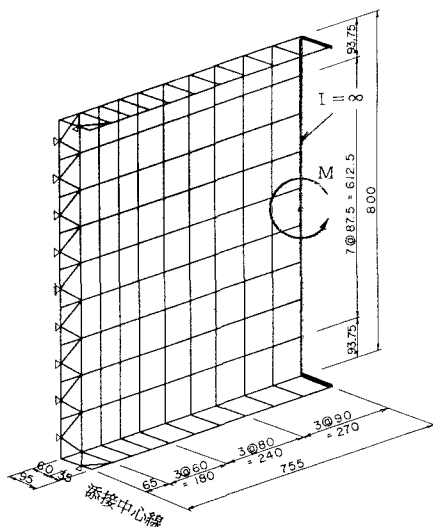
5. FEM解析

実験結果の妥当性を検証するため、3次元FEM解析を行った。解析の対象としたのはプレートガーダーモデル3タイプ(A桁、B桁、C桁)と箱桁モデル2タイプ(B1供試体、B2供試体)である。ただし、荷重ケースは各タイプ代表的なケースのみとする。

5. 1 解析モデル

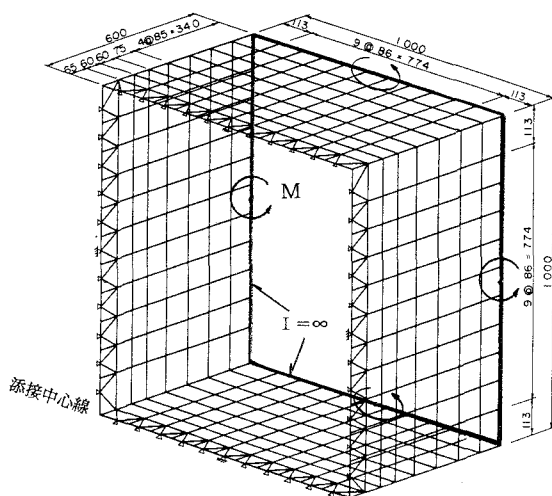
解析モデルを図-14および図-15に示す。モデル化に当り留意した点は以下の通りである。

- ①弾性範囲内における各ボルト列の分担力、およびウェブ最外縁ボルト列を外した場合のモーメント分配率に着目する。従って、ボルト列を考慮して要素幅を決めるとともに、ボルト列中心線上に支点を設け、その反力が各ボルト列の分担力を表すものとする。ウェブ最外縁ボルト列を外したケースでは、その列の支点を除去したモデルで対応させた。



(単位: mm)

図-14 プレートガーダー供試体の解析モデル



(単位: mm)

図-15 箱桁供試体の解析モデル

②荷重および構造の対称性に着目して節点数は少なくする。すなわち、プレートガーダーモデルでは添接中心線およびウェブ中心線で分割した1/4モデルとし、箱桁モデルでは添接中心線で分割した1/2モデルとした。

③フランジは平板要素、ウェブは膜要素とする。

④荷重は荷重載荷点位置にある十分剛な部材 ($I = \infty$) に曲げモーメントとして与える。荷重ケースとしてはプレートガーダーモデルでは $P_v = 50 \text{ tf}$ 載荷時 (載荷ステップ1, 2に相当)、箱桁モデルでは鉛直載荷のみのケース ($P_v = 50 \text{ tf}$, $P_H = 0 \text{ tf}$) および2軸曲げ状態のケース ($P_v = 50 \text{ tf}$, $P_H = 30 \text{ tf}$) である。

⑤継手部の剛性を評価するため、短冊型供試体を用いた引張試験により荷重と伸びの関係を求め、その直線部の傾きから弾性係数を算出し、これを解析モデルの添接部剛性に反映した。解析に用いた添接部の弾性係数を表-7に示す。

5. 2 解析結果

表-7 添接部の弾性係数

($\times 10^8 \text{ kgf/cm}^2$)

各ボルト列ごとの反力に中立軸からの距離を乗じてモーメント分担率を計算し、さらにウェブ第1列目のボルトを外した時の各ボルト列へのモーメント分配率を計算した。解析値と実験値の比較を表-8および表-9に示す。

	プレートガーダーモデル			箱 桁 モ デ ル	
	A 桁	B 桁	C 桁	B1 供試体	B2 供試体
フ ラ ン ジ	1.209	1.209	1.209	1.087	1.199
ウェブ第1列目	1.039	0.989	0.639	1.199	1.087
ウェブ第2列目	1.039	0.989	0.639	1.199	1.087
ウェブ第3列目以降	0.639	0.639	0.639	1.199	1.087

同表から、部分的に若干の相違はあるものの、傾向的には実験結果と非常によく一致した結果が得られ、プレートガーダーで約70%、箱桁で約60%がフランジに分配されることが確認できた。

表-8 プレートガーダーモデルにおける解析結果と実験値との比較

(%)

		モーメント分担率				モーメント分配率	
		ウェブ最外縁ボルト有り		ウェブ最外縁ボルト無し		実験値	解析値
		実験値	解析値	実験値	解析値		
A桁	フランジ	63.1	61.7	77.6	77.9	70.0	70.9
	ウェブ	36.9	38.3	22.4	22.9	30.0	29.1
B桁	フランジ	67.8	62.9	81.5	78.6	70.6	71.8
	ウェブ	32.2	37.1	18.5	21.4	29.4	28.2
C桁	フランジ	69.3	68.5	80.7	81.3	71.2	74.7
	ウェブ	30.7	31.5	19.3	18.7	28.8	25.3

表-9 箱桁モデルにおける解析結果と実験値との比較

(%)

			モーメント分担率				モーメント分配率	
			ウェブ最外縁ボルト有り		ウェブ最外縁ボルト無し		実験値	解析値
			実験値	解析値	実験値	解析値		
B1 供試体	$P_v = 50 \text{ tf}$ $P_H = 0$	フランジ	71.8	76.3	81.5	84.0	60.0	60.3
		ウェブ	28.2	23.7	18.5	16.0	40.0	39.7
	$P_v = 50 \text{ tf}$ $P_H = 30 \text{ tf}$	フランジ	72.4	76.4	81.7	84.0	61.6	59.9
		ウェブ	27.6	23.6	18.3	16.0	38.4	40.1
B2 供試体	$P_v = 50 \text{ tf}$ $P_H = 0$	フランジ	72.7	76.3	81.6	84.1	63.3	62.7
		ウェブ	27.3	23.7	18.4	15.9	36.7	37.3
	$P_v = 50 \text{ tf}$ $P_H = 30 \text{ tf}$	フランジ	73.4	76.3	81.7	84.1	59.1	62.7
		ウェブ	26.6	23.7	18.3	15.9	40.9	37.3

6. 考察

実験および解析結果から、現設計法においてすべてウェブに流れると仮定されているウェブクリアランス部の応力は、フランジとウェブの剛性比、ボルト本数等の形状効果により多少の影響があるとは思われるものの、その多くはフランジに流れることが確認された。

これより合理的かつ経済的なボルト配列が可能であり、具体的にはフランジの分担幅をクリアランス部の5割とするのが妥当であると考えられる（図-16参照）。これは、応力分布図からフランジ分担幅とフランジ分担率の関係を予め求めておき、実験結果のフランジ分担率を代入することによって求めたものである。なお、実橋脚に対して行った試算によれば隅角部内の一継手においてボルト本数を2割程度低減できるという結果を得ている。また、実験にみられた局所的な応力の集中は短冊継手によって明らかとなっている摩擦接合特有の微小なすべりによる応力の最分配により、平滑化傾向となるものと考えられ、滑り荷重に関して、これを考慮する必要性はないものとする。

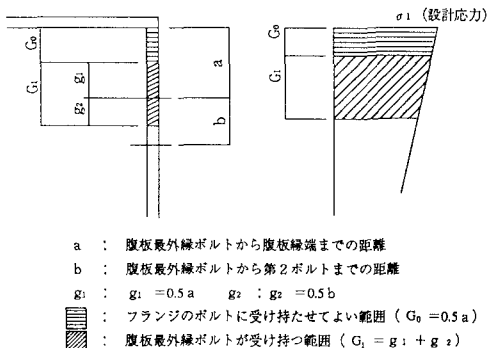


図-16 ウェブ・フランジ分担幅の定義

7. あとがき

鋼製橋脚摩擦接合部のボルト本数低減を目的とした合理的設計法提案に向けて、プレートガーダー供試体による基礎実験および箱桁供試体による2軸曲げ載荷実験を行った。また実験結果の妥当性を解析的に検討するため、FEM解析を行った。

その結果、鋼製橋脚に対応する箱断面の場合、現設計法では全てウェブ最外縁のボルト列で分担としているクリアランス部の応力が、実際は約60%フランジに流れていることがわかり、これを設計に考慮することによってボルト本数の低減が可能となった。

この研究では鋼製橋脚を対象としたが、その結果はI桁や箱桁の摩擦接合部にも適用できるものと考えられる。

最後に、本研究の総括的指導にあられた故西村昭神戸大学教授に深謝の意を表します。また、具体的な設計法提案に際し種々御検討いただいた阪神高速道路公団技術審議会鋼構造分科会（主査：福本啓士大阪大学教授）の委員各位に感謝致します。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，平成2年2月
- 2) 阪神高速道路公団，財建設工学研究所：鋼製橋脚摩擦接合部の設計法に関する調査研究報告書，平成元年3月
- 3) 阪神高速道路公団，財建設工学研究所：鋼製橋脚摩擦接合部の設計法に関する調査研究（その2）報告書，平成2年3月

(1993年9月21日受付)