

(42) 開断面箱桁複合ラーメン橋の隅角部の力学特性に関する基礎的研究

Fundamental study on mechanical characteristics of rigid connection in hybrid rigid frame bridge with sloped webs

○森 圭司¹⁾, 中村 聖三²⁾, 高橋 和雄³⁾, 呉 慶雄⁴⁾,
Keiji MORI, Shozo NAKAMURA, Kazuo TAKAHASHI, Qingxiong WU
上村 明弘⁵⁾, 神田 恭太郎⁶⁾
Akihiro UEMURA and Kyotaro KANDA

¹⁾長崎大学大学院 生産科学研究科博士前期課程(〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

²⁾長崎大学助教授 工学部社会開発工学科(〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

³⁾長崎大学教授 工学部社会開発工学科(〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

⁴⁾長崎大学助手 工学部社会開発工学科(〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

⁵⁾川鉄橋梁鉄構(株) 技術部 開発技術室(〒111-0051 東京都台東区蔵前 2-17-4 リバー蔵前ビル)

⁶⁾川鉄橋梁鉄構(株) 技術部 開発技術室(〒111-0051 東京都台東区蔵前 2-17-4 リバー蔵前ビル)

Hybrid rigid frame bridges have good seismic performance and economical advantage because they do not have expensive bearings and expansion joints. The adoption of this type bridges has been increasing in recent years due to such advantages. In this study, rigid connections of a hybrid rigid frame bridge which has buried steel girder with sloped webs in the reinforced concrete pier were analyzed by finite element method. The load transmission system between the steel girder and RC pier of the structure under the horizontal shear force and in-plane bending moment was examined through the analysis.

Key Words: hybrid rigid frame bridge, stud, rigid connection, open cross section box girder bridge

キーワード: 複合ラーメン橋, スタッド, 剛結構造, 開断面箱桁橋

1. はじめに

複合ラーメン橋は耐震性に優れ、高価な支承や伸縮装置がないため経済的であり、維持管理が簡単であるなどの利点から、近年採用実績が増加している構造形式¹⁾である。そのような長所をもつ合理的な橋梁形式であるが、異種材料を剛結するため応力伝達機構は複雑で、普遍的に捉えることが困難であることから、明確な剛結部の設計法は未だ確立されていない。橋梁ごとに実験やFEM解析を用いて、当該部の安全性照査を行っているのが現状であり、検討結果は多くの論文・報告として発表されている。

それらによると、これまでに架設された複合ラーメン橋の大部分は鉸桁形式である。佐久間ら²⁾は日本で最初に採用された複合ラーメン橋である山形自動車道の阿古耶橋(鋼3径間連続ラーメン5主鉸桁橋)について模型実験を行い、PC剛結方法を用いた剛結部の安全性について検討している。中村ら³⁾は孔あき鋼板ジベルをずれ止めとした今別府川橋(鋼3径間連続ラーメン2主鉸桁橋)の設計や解析結果および上部構造の施工概要について報告し、また小幡ら⁴⁾は同橋に関して減衰性能、固有振動数、固有モード等の基本的な振動特性を調査し、風洞実験で仮定した構造減衰の妥当性を検証している。さらに、水木ら⁵⁾は今別府川橋と同様、孔あき鋼板ジベルを用いた鯉川橋(鋼6径間連

続ラーメン2主鉸桁橋)の剛結部における力の伝達機構の解明を目的とした、実験的および解析的検討を行っている。

箱桁形式の採用事例は少なく、森田ら⁶⁾はずれ止めとしてスタッドを用いた千曲川橋(鋼4径間連続ラーメン1室箱桁橋)の隅角部複合剛結構造について、設計手法の検討を行っている。

実橋を対象としない剛結部設計法の検討としては、長谷ら⁷⁾が鋼桁とRC橋脚の剛結部に関して、横桁構造および横桁ウェブのスタッドに着目した比較供試体による交番載荷実験およびFEM解析を実施し、各部材の役割と耐荷機構を検証している。また松井ら⁸⁾は、ずれ止めスタッドを用いたモデルを用いて実験、FEM解析を行い隅角部における力学特性について検討している。

このように、箱桁形式の複合ラーメン橋に関する研究は少なく、特にウェブが傾斜した鋼箱桁とコンクリート橋脚の剛結構造について報告した事例は著者らの知る限り見当たらない。そこで本研究では、ウェブが傾斜した鋼箱桁を上部構造とし、埋め込み桁方式を採用している複合ラーメン箱桁橋の隅角部を対象とし、立体FEM解析により上下部構造間の力の伝達機構について検討する。その際、比較のため垂直ウェブの場合についても解析するとともに、スタッド剛性の影響についても検討する。

2. 対象とする構造

2.1 対象構造物の形状・寸法

本研究で対象とする構造は、実在する橋梁を参考に設定した図-1に示す2径間連続複合ラーメン橋であり、鋼桁と橋脚の剛結部付近を解析対象とする。実橋では、鋼桁の大部分は橋脚に埋め込まれ、下フランジ、ウェブ、および支点上ダイヤフラムに溶接されたスタッドにより、両者の一体化が図られている。また橋脚、鋼桁、ダイヤフラムに囲まれた部分には高強度コンクリート(桁内コンクリート)が充填されており、床版には厚さ217mmの鋼・コンクリート合成床版が用いられている。橋長は92.0m、支間割は48.4m+42.4mであり、橋脚基部から鋼桁下フランジまでの高さは26.5mである。図-2に桁断面図を示す。

2.2 剛結部の設計

本研究で着目する断面力は、面内曲げモーメント(M_y)と橋軸方向水平せん断力(S_z)である。実橋では図-3に示すように、面内曲げモーメントはダイヤフラムに配置したスタッドで抵抗し、橋軸方向水平せん断力は主桁下フランジに配置したスタッドで抵抗すると仮定して、剛結部が設計されている。

3. 解析モデル

3.1 解析モデルの諸元

今回対象とした解析モデルでは、スタッドを鋼桁の下フランジ、ウェブおよび支点上ダイヤフラムに設置している。スタッドの寸法は軸径22mm、全高150mmを基準としたが、鋼桁からコンクリート橋脚への力の伝達機構に及ぼすスタッドの剛性の影響を調査するため、断面二次モーメントを基準値の2倍および0.5倍とした場合についても解析を行った。スタッドの形状を表-1、解析モデルの種類を表-2に示す。垂直ウェブモデルのウェブ間隔については、図-4に示すように斜めウェブモデルのウェブ高さ方向の中央点におけるウェブ間隔とし、床版幅は両モデルで同一の7400mmとした。鋼板の厚さは8mmとし、合成床版についてはヤング係数比を用いて等価な鋼板(厚さ37.86mm)に置き換え、シェル要素としてモデル化した。コンクリート橋脚と鋼桁の節点は分離し、はり要素としてモデル化したスタッドにより両者を結合させた。使用材料とそのモデル化を表-3に、解析モデルを図-5に示す。

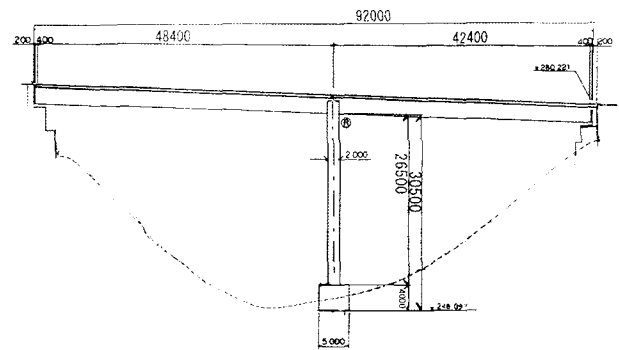


図-1 対象橋梁側面図

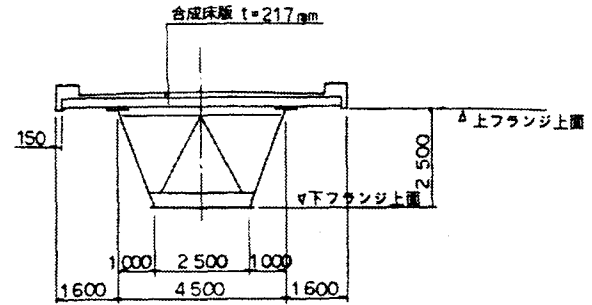


図-2 桁断面図

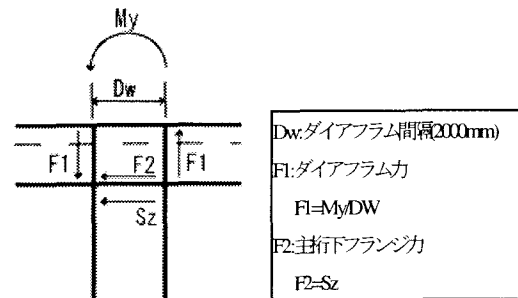


図-3 剛接部の力の伝達機構

表-1 スタッドの形状

	スタッド1	スタッド2	スタッド3
軸径(mm)	18.5	22	26.2
断面積(mm ²)	268.795	380.122	537.55
断面2次モーメント(mm ⁴)	5749.338	11498.675	22997.35

表-2 解析モデルの種類

	スタッド1	スタッド2	スタッド3
斜めウェブ	model-1-1	model-1-2	model-1-3
垂直ウェブ	model-2-1	model-2-2	model-2-3

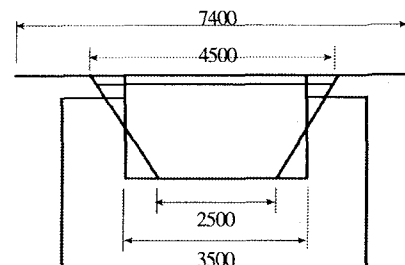


図-4 FEM 解析モデル桁断面図

表-3 使用材料とそのモデル化

使用材料	使用要素	ヤング係数(N/mm ²)
橋脚コンクリート	8 節点ソリッド	24500
桁内コンクリート	8 節点ソリッド	27400
鋼板	4 節点厚肉シェル	200000
スタッドジベル	2 節点はり	200000

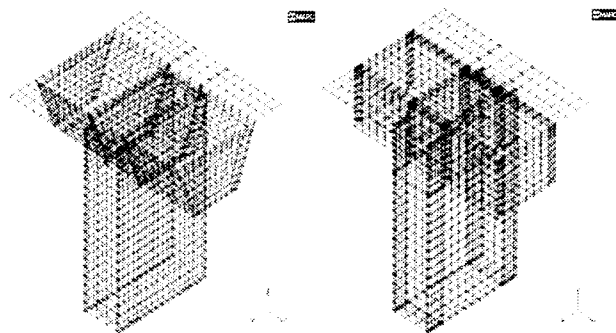


図-5 解析モデル

3.2 解析条件

橋脚基部を完全固定とし、荷重条件については図-6 に示す2種類、すなわち正負の鉛直荷重および橋軸方向水平荷重とした。鉛直荷重は鋼桁端部のウェブ天端に、水平荷重は鋼桁端部ウェブ図心高さに載荷した。解析には汎用ソフトウェア MARC を用いた。

4. 解析結果と考察

4.1 水平荷重載荷時

4.1.1 斜めウェブモデル

図-7 に示す各スタッドについて、model-1-1, 1-2, 1-3 における橋軸方向せん断力を図-8, 9 に示す。フランジに設置したスタッドの橋軸方向せん断力の分布は、図-8 からわかるように列の中央付近で高くなり、列の端部で低くなっている。またスタッドの剛性を高くすると、各列における最大値と最小値の差が大きくなり、列の中央付近におけるスタッドのせん断力の分担が大きくなっている。一方、スタッドの剛性を低くすると、フランジに作用する水平荷重を、設置してあるスタッドでほぼ均等に橋軸方向せん断力として分担する傾向にある。

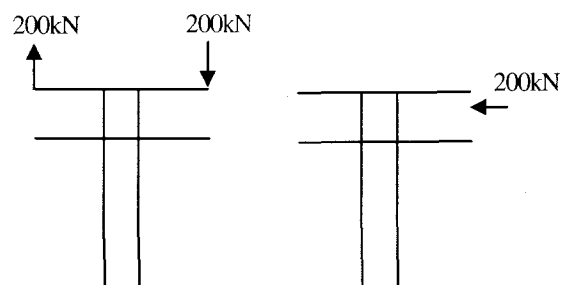


図-6 荷重条件

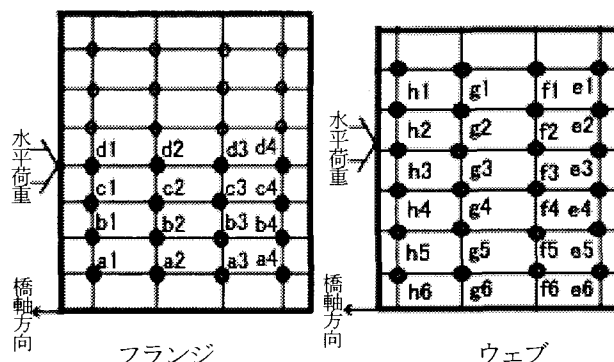


図-7 斜めウェブモデルスタッド観測位置

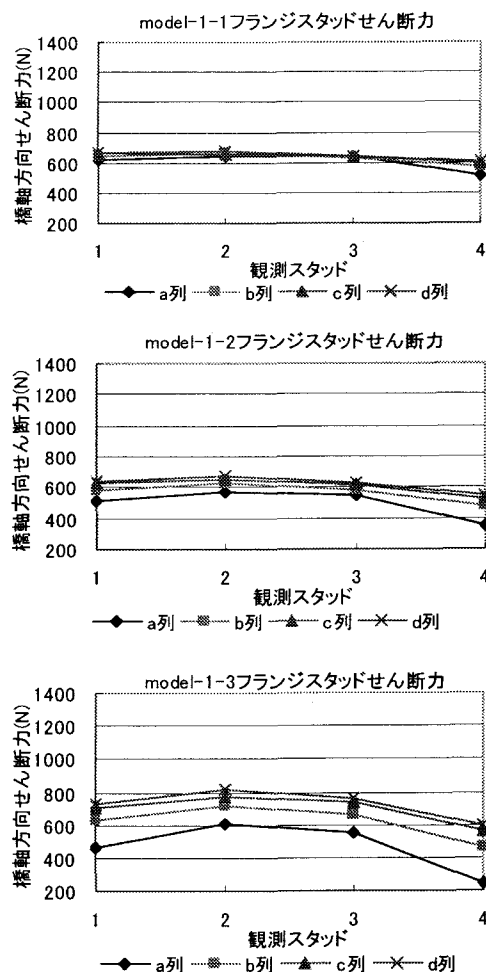


図-8 フランジ設置スタッド橋軸方向せん断力

図-9 に示すウェブ-橋脚間スタッドの橋軸方向せん断力の分布から、最上段のスタッド(e1, f1, g1, h1)のせん断力の値が最も高く、最下段のスタッド(e6, f6, g6, h6)において最小値となり、その間は直線的に値が変化していることがわかる。図-8 のフランジ-橋脚間スタッドの橋軸方向せん断力の結果と合わせて考察すると、橋軸方向水平力により剛結部に面内曲げモーメントが作用するため、スタッドのせん断力がウェブ高さ方向に直線的に大きくなり、その影響によりフランジに設置したスタッドの橋軸方向せん断力が列中央付近で高くなるものと考えられる。

フランジ、ウェブそれぞれに設置されたスタッドの橋軸方向水平力の分担率を表-4 に示す。なお、これらの橋軸方向せん断力の合力は載荷荷重の大きさと等しくなっている。分担率には各モデルで大きな差異はなく、フランジ-橋脚間スタッドで分担する水平力は全体の 8~9%程度で、残りはウェブ-橋脚間スタッドで分担されている。このことから実橋の剛結部の設計における「水平荷重は全てフランジ-橋脚間スタッドで抵抗する」という仮定は、フランジ側にとっては安全側の設計であるものの、より合理的なスタッド配置とするためには、ウェブに設置されたスタッドの寄与も考慮すべきであると言える。

4.1.2 垂直ウェブモデル

図-10 に示す各スタッドについて、model-2-1, 2-2, 2-3 における橋軸方向せん断力を図-11, 12 に示す。

フランジに設置したスタッドの橋軸方向せん断力は、図-11 からわかるように、列の中央付近で高く端部で低くなっており、全体的にウェブが傾斜した場合よりもせん断力が高い値を示している。またスタッドの剛性が高くなるにしたがって、各列において観測スタッドごとのばらつきが大きくなるとともに、フランジに設置したスタッドで受け持つ水平力が大きくなっている。また、剛性が高いスタッドを用いたモデルほど、列の中央付近のスタッドでのせん断力の分担が大きくなり、剛性の低いスタッドを用いたモデルは、フランジ下面に作用する水平荷重を、設置してあるスタッドでほぼ均等に受け持っている。

ウェブに設置したスタッドでは、各列ともにほぼ等しいせん断力の分布を示している。また、スタッドの剛性が高くなるにしたがって、若干ではあるがせん断力の最大値は大きく、最小値は小さくなっている。すなわち、ウェブに設置したスタッドのせん断力は、スタッドの剛性の影響を若干受けていると言える。

フランジに設置したスタッドの橋軸方向せん断力とウェブに設置したスタッドの橋軸方向せん断力の合力は載荷した水平力に等しく、その分担率は表-5 に示すように、フランジに設置したスタッドで 11~15%、ウェブで 85~89%である。

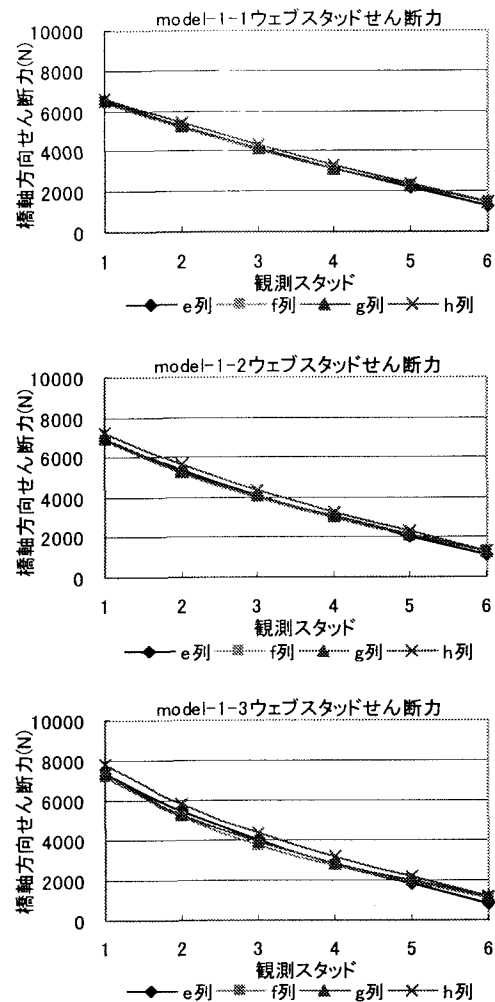


図-9 ウェブ設置スタッド橋軸方向せん断力

表-4 スタッド水平荷重分担率

	model-1-1	model-1-2	model-1-3
フランジ	8.8%	7.9%	8.6%
ウェブ	91.2%	92.1%	91.4%

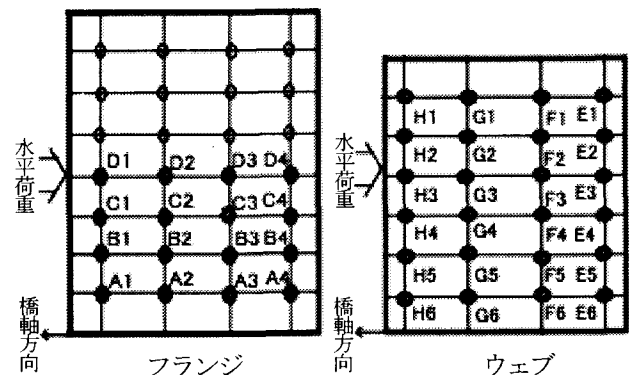


図-10 垂直ウェブモデルスタッド観測位置

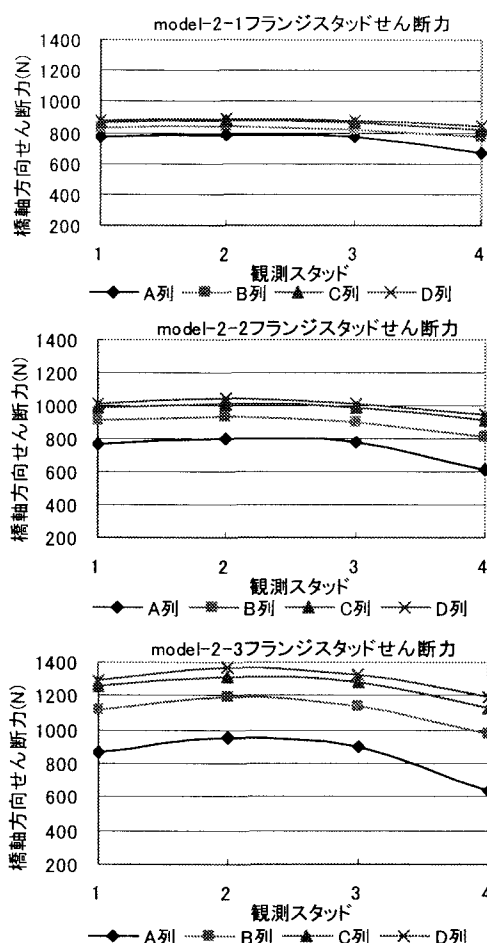


図-11 フランジ設置スタッド橋軸方向せん断力

4.1.3 両モデルの解析結果の比較

水平荷重載荷時における斜めウェブモデルと垂直ウェブモデルの大きな違いは、フランジに設置したスタッドとウェブに設置したスタッドの水平荷重分担率にある。すなわち、斜めウェブモデルにおいては、フランジに設置したスタッドによる荷重分担率が8～9%であったのに対し、垂直ウェブモデルにおいてはその値が11～15%であり、垂直ウェブモデルの方がフランジにおける荷重分担率が高い。また、スタッドの剛性による荷重分担率の変化も垂直ウェブモデルにおいて大きい。このことから、同じ剛性を有するスタッドを用いてもウェブが斜めか垂直かで荷重分担率が異なり、またスタッド剛性が荷重分担率に及ぼす影響度もウェブが斜めか垂直かで異なるといえる。スタッド剛性とウェブ形状とで荷重分担率に対する影響を比較すると、後者の方が大きいように思われる。

一方、フランジ、ウェブに設置したスタッド橋軸方向せん断力の分布については、斜めウェブモデル、垂直ウェブモデルで類似しており、ウェブ形状によらずスタッドの剛性によって異なると言える。またスタッド本数と設置位置によってもせん断力の分布が変化すると推測される。

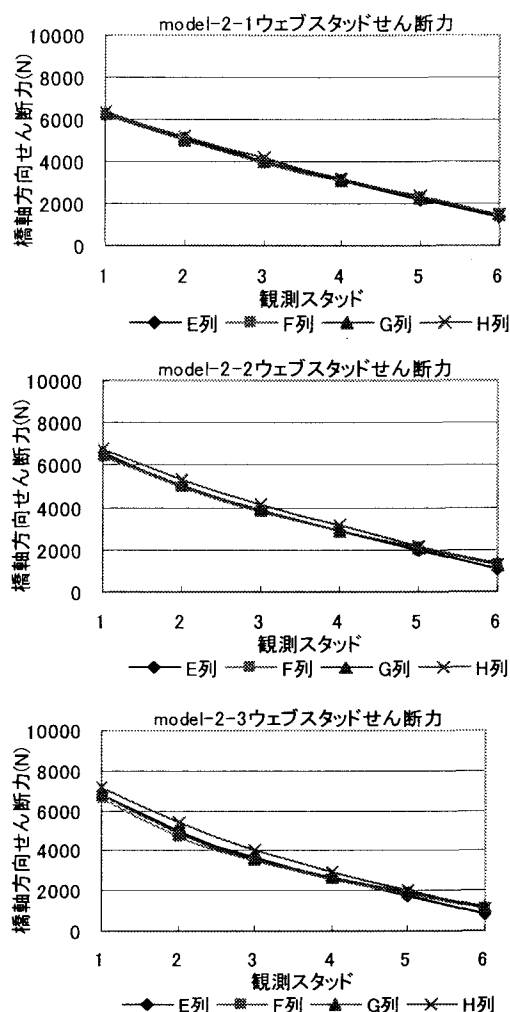


図-12 ウェブ設置スタッド橋軸方向せん断力

表-5 スタッド水平荷重分担率

	model-2-1	model-2-2	model-2-3
フランジ	11.40%	12.40%	15.30%
ウェブ	88.60%	87.60%	84.70%

4.2 鉛直荷重(面内曲げモーメント)載荷時

本構造では、ダイアフラム設置スタッドは、鋼桁→ダイアフラム設置スタッド→桁内コンクリート→下フランジ設置スタッドへと続く力の伝達経路の一部であると考えられ、鋼桁から橋脚への力の伝達に直接影響するものではないと考えられる。そのため、フランジ、ウェブ、橋脚間のスタッドのみに着目し、面内曲げモーメントに対する耐荷機構について検討する。その際、モデルの対称性から、橋脚高さ方向直応力圧縮側のデータを用いる。

4.2.1 斜めウェブモデル

斜めウェブモデルでは、ウェー橋脚間スタッドせん断力の鉛直成分と軸力の鉛直成分の和をウェブスタッドに作用する力の鉛直成分とした。なおフランジ設置スタッドはその軸力の対称性から図-13 に示すもののみを対象とした。

model-1-1, model-1-2, model-1-3におけるフランジ設置スタッドの軸力を図-14 に示し、図-15 にウェブ設置スタッドの軸力およびせん断力の鉛直成分を示す。図-14 のフランジ設置スタッド軸力からわかるように、i 列スタ

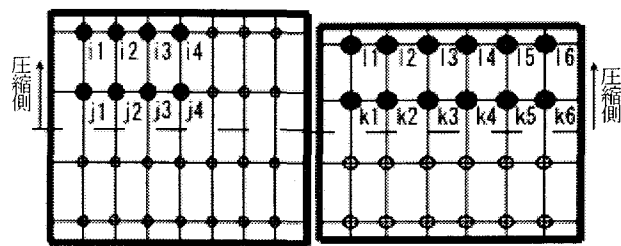


図-13 斜めウェブモデルスタッド観測位置

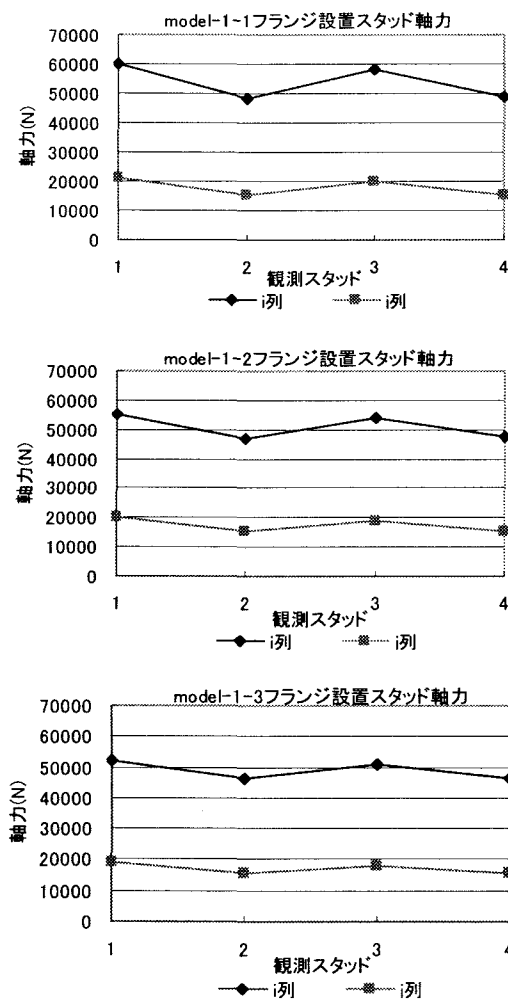


図-14 フランジ設置スタッド軸力

ッドの軸力の値が j 列スタッドよりも高い。またスタッドの剛性を高くしても、j 列スタッドの軸力の値にはほとんど影響を及ぼさないが、i 列スタッドの軸力値の分布のばらつきが少なくなっている。

図-15 のウェブ設置スタッドの軸力およびせん断力鉛直成分の分布からは、スタッドの剛性による大きな差異は認められず、k 列スタッドの軸力およびせん断力鉛直成分が i 列スタッドより小さい値をとっていることがわかる。

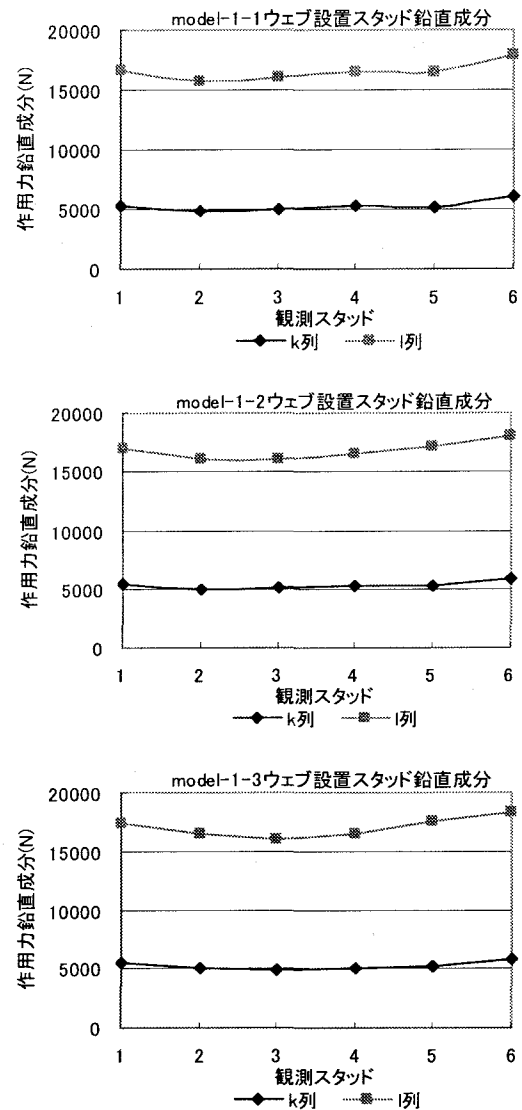


図-15 ウェブ設置スタッド作用力鉛直成分

4.2.2 垂直ウェブモデル

垂直ウェブモデルでは、ウェブ橋脚間スタッドせん断力の鉛直成分をウェブスタッドに作用する力の鉛直成分とした。なお、フランジに設置したスタッドの軸力の対称性から、観測スタッドは図-16に示すものとする。

model-2-1, model-2-2, model-2-3におけるフランジ設置スタッドの軸力を図-17に示し、ウェブスタッドの軸力、およびせん断力の鉛直成分を図-18に示す。

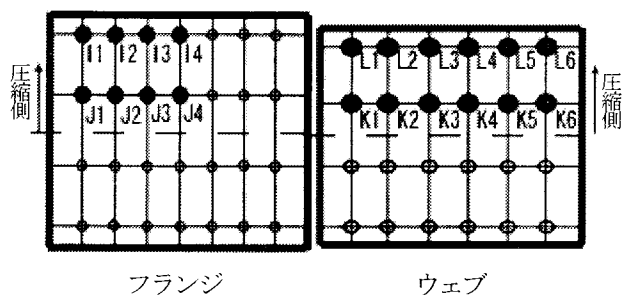


図-16 垂直ウェブモデルスタッド観測位置

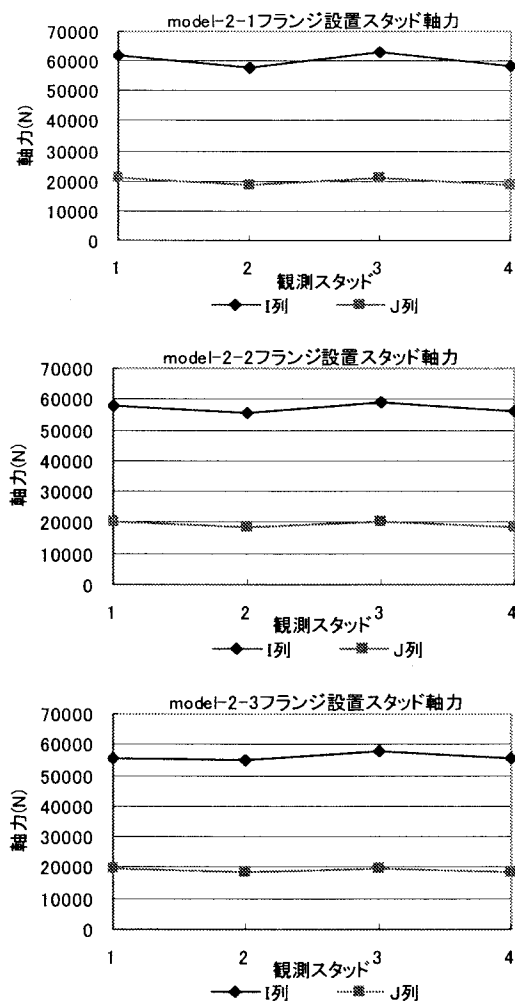


図-17 フランジ設置スタッド軸力

図-17 のフランジ設置スタッド軸力からわかるように、J列スタッドの軸力はスタッドの剛性に関係なくほぼ同じであり、I列のスタッドは剛性が高くなるとその軸力が低くなっている。また、I列スタッドの軸力の値がJ列スタッドの軸力の値よりも高いことから、I列スタッドでより鉛直方向の力に抵抗していると言える。

図-18 のウェブ設置スタッドのせん断力の値には各モデルで大きな違いは見られないが、スタッドの剛性が高くなるにつれて若干L列スタッドのせん断力が高くなっている。

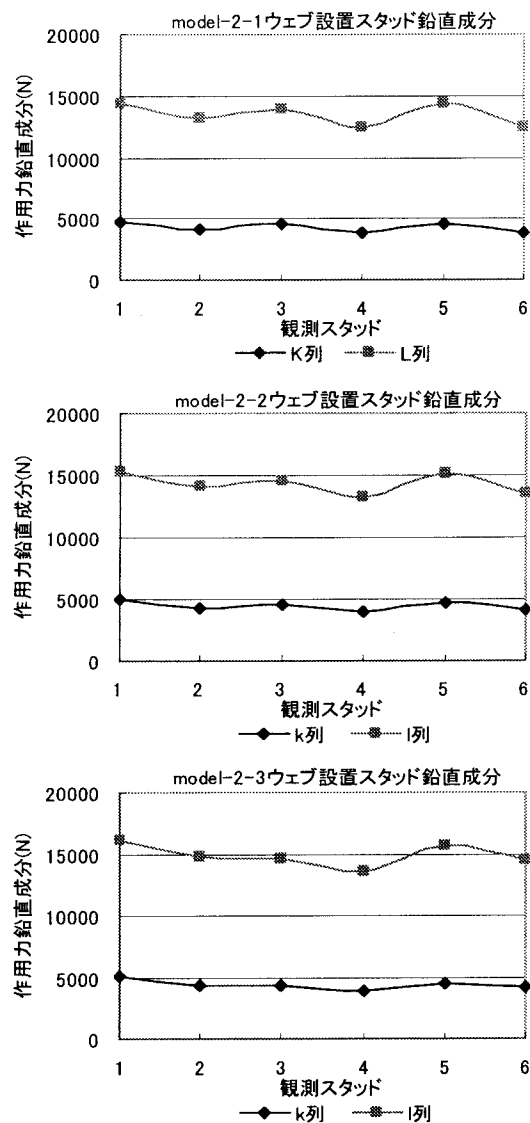
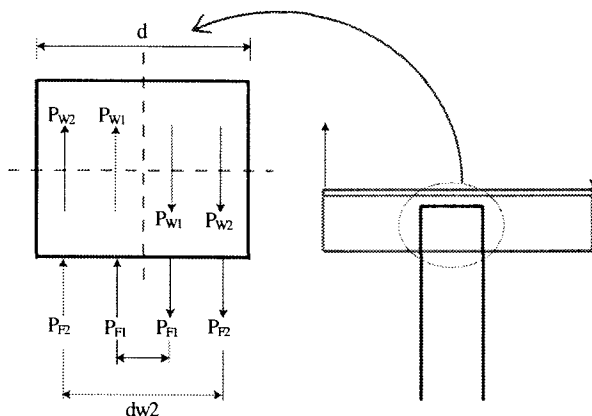


図-18 ウェブ設置スタッド作用力鉛直成分

表一6 各モデルの $dW1/dW2$, P_k/P_l , P_j/P_i , P_k/P_L , P_j/P_I

model-1-1		model-1-2		model-1-3	
dW1/dW2	0.333	dW1/dW2	0.333	dW1/dW2	0.333
P _k /P _l	0.319	P _k /P _l	0.316	P _k /P _l	0.309
P _j /P _i	0.335	P _j /P _i	0.343	P _j /P _i	0.349

model-2-1		model-2-2		model-2-3	
dW1/dW2	0.333	dW1/dW2	0.333	dW1/dW2	0.333
P _K /P _L	0.319	P _K /P _L	0.309	P _K /P _L	0.296
P _J /P _I	0.329	P _J /P _I	0.337	P _J /P _I	0.342



図一19 剛結部耐荷機構

4.2.3 両モデルの解析結果の比較

斜めウェブモデルにおけるフランジ設置スタッドの軸力とウェブ設置スタッドの鉛直方向分担力は、多少のばらつきはあるものの、いずれも列ごとにほぼ一様分布している。垂直ウェブモデルについても、同様な分布形状が確認できる。また、スタッド剛性による軸力および鉛直方向分担力の変化は、ウェブ形状によらず小さい。

表一6 には各列分担力の平均値の比を示した。ここで P_{w1} , P_{w2} はウェブの各列スタッドに作用する力の鉛直成分, P_{f1} , P_{f2} はフランジの各列スタッドの軸力である。また $dwi(i=1, 2)$ はスタッド列の間隔である(図一19 参照)。この結果から今回検討した範囲では、スタッドに作用する力の鉛直成分はおおよそスタッド位置に依存すると考えることができ、次式が成立することがわかる。

$$P_{w1} : P_{w2} = dW1 : dW2$$

$$P_{f1} : P_{f2} = dW1 : dW2$$

上式において、スタッド列の間隔は既知であるため、フランジとウェブに作用する力の鉛直成分の値をそれぞれ1つずつ知ることができれば、他の列のスタッドに作用する力を知ることが可能である。

5. まとめ

本研究では、開断面鋼箱桁を有する複合ラーメン橋の剛結部について、橋軸方向水平荷重および面内曲げモーメン

ト載荷時のFEM解析を行い、当該部の合理的な設計法を確立するために必要な荷重伝達機構に関する基本的な知見を得た。

今後の課題としては、コンクリート橋脚と鋼桁の接触の問題、鉄筋の配置などを考慮した、より実構造に近い解析を行うこと、本研究では考慮しなかった面外曲げモーメントやねじりモーメントに対する荷重伝達機構を明らかにすることなどが挙げられる。

参考文献

- 1) 岩立次郎, 忽那幸浩: 剛結構造, 橋梁と基礎, Vol.8, pp40~44, 2002.8
- 2) 佐久間聡, 柴田清: 鋼・コンクリート複合ラーメン橋—山形自動車道阿古耶橋, プレストレスト・コンクリート, Vol.37, No2, pp79~86, 1995-3
- 3) 中村和典, 今泉安雄, 兼重寛, 中東剛, 佐々木保隆, 小川尊直: 今別府川橋の設計・施工—張出し架設工法を用いた鋼2主桁複合ラーメン橋, 橋梁と基礎, Vol.34, No12, pp2~9, 2000-12
- 4) 小幡大輔, 佐々木保隆, 今泉安雄, 兼重寛: 鋼2主桁複合ラーメン橋「今別府川橋」の実橋振動実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集共通セッション, Vol.56, pp136~137, 2001
- 5) 木水隆夫, 松田健治, 西根正義, 春文吉, 沼田克, 山田岳史: 2主桁ラーメン橋(鯉川橋)の設計と施工, 橋梁と基礎, Vol.36, No.10, pp11~18, 2002-10
- 6) 森田浩隆, 角昌隆, 森山陽一, 檜作正登, 中嶋博功, 館浩司: 千曲川橋の複合剛接部の設計について, 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部(A), Vol.51, pp224~225, 1997
- 7) 長谷俊彦, 井ヶ瀬良則, 清水功雄, 田中祐人, 小林潔, 大久保宣人: 鋼桁とRC橋脚の剛結部応力伝達機構に関する実験的考察, 複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, Vol.4, pp207~212, 1999-11
- 8) 松井繁之, 湯川保之, 和田信良, 石崎茂, 田中俊彦: 複合ラーメン橋・鋼桁—RC脚剛結部の構造と力学性状について, 構造工学論文集, Vol.43-3, pp1367~1374, 1997