

鋼桁とRC橋脚の剛構造に関する研究(第5報)

Rigid Structure for Joining Steel Girder to RC Pier (Part 5)

清水 功 雄* 佐藤 徹**
Isao SHIMIZU Toru SATO

Summary

A hybrid rigid-frame bridge, with the steel girders rigidly joined to the piers, is attracting attention as a rational bridge structure. Hence, numerous new bridges of this type are currently being planned. The view held by the Japan Highway Public Corporation is that a standard steel bridge in the future should have two main girders. Therefore, we should established a design method that is available and can be applied to rigid structures on a bridge with two main girders. Because of this, we did loading tests and FEM analysis of rigidly joined sections on a model bridge. Based on the experimental and analytical results, this paper discusses how to establish a design method and what tasks remain to be done.

キーワード：複合ラーメン橋，2主桁橋，載荷実験，FEM解析

1. はじめに

鋼桁とRC橋脚とを剛結する複合ラーメン橋は、耐震性に優れ、かつライフサイクルコストの縮減を図ることができる合理的な構造形式であることから、これまでに数橋の複合ラーメン橋を建設している日本道路公団をはじめとして、建設省や地方自治体においても新設橋の計画が進められており、大規模な多径間の高架橋のみならず中小支間橋梁への適用も検討されている。このように、複合ラーメン橋は今後さらに建設数が増加していく有望な鋼橋の構造形式の一つである。

このような状況に加え、日本道路公団では鋼橋の標準形式を2主桁橋と考えていることから、2主桁橋への剛結構造の適用と、様々な橋脚形状に対応するための剛結部基本構造の考え方をまとめることなどが当面の課題となっている。現行設計法¹⁾は2主桁剛結構造を考慮したものでないため、2主桁橋への剛結構造の適用を検討するに当たり、現状の問題点を整理し応力伝達と耐荷機構を明らかにして、将来の設計法に反映させるための要素実験を行うこととなった。ここでは載荷実験および実験の検証のために実施したFEM解析について、研究の概要と結果について報告し、将来の合理的な設計法の確立へ向けた課題について述べるものとする。

2. 載荷実験

(1) 実験供試体

日本道路公団の現行設計法による多主桁橋に対応した基本的な応力伝達の考え方は、主桁から横桁および横桁に設けたスタッドを介しRC橋脚へと伝達するというものである。今回の実験ではこのような考え方にに基づき、主桁からRC橋脚への応力伝達経路を確認するとともに、横桁および横桁に設けたスタッドの機能を明確にすることを主な着目点とした。

横桁は橋脚の外面に配置する構造を標準と考え、横桁下フランジの向きをパラメータとした。横桁標準配置の供試体は、橋脚内にフランジを向ける内向き構造(TYPE-1C, 1C')、主鉄筋と横桁下フランジが干渉することを避け、下フランジを橋脚の外側へ向ける外向き構造(TYPE-1A, 1B)、および内向き構造でかつ横桁フランジが橋脚幅のさらに外側へ位置する構造(TYPE-3)の3種類である。また、横桁が橋脚内部に完全に埋め込まれる構造(TYPE-2)、横桁を設けず主桁フランジと同幅の補剛材のみを取り付ける構造(TYPE-1D)も合わせ、5種類のモデルを比較対象としている。

またスタッドに関しては、スタッドの許容せん断力を道路橋示方書²⁾により設計した場合(TYPE-1A)、鋼構造物設計指針³⁾による場合(TYPE-1B, 1C, 3)と設置本数を変化させ、スタッドを取り付けない場合(TYPE-

* 技術本部技術部長

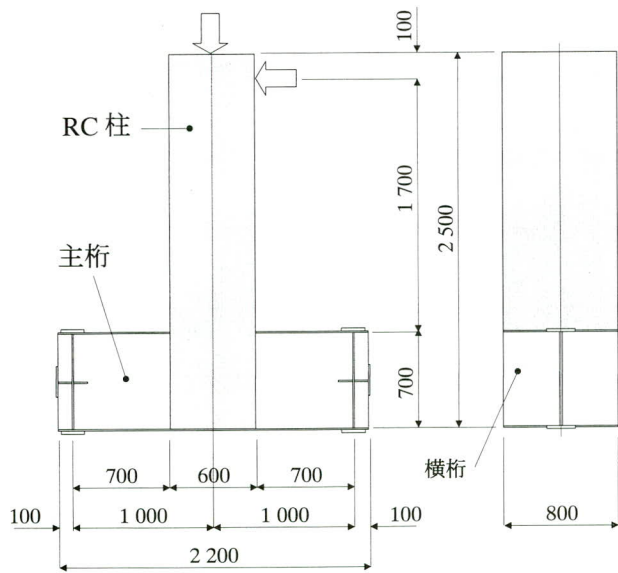
** 技術本部技術部技術開発課

表-1 実験供試体の構造概要

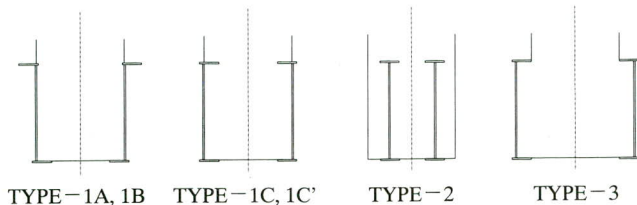
供試体番号	横桁	横桁ウェブのスタッド本数	横桁構造
1A	有	標準 (30本)	外向き
1B	有	少数 (16本)	外向き
1C	有	少数 (16本)	内向き
1C'	有	無し (0本)	内向き
1D	無	—	補鋼材のみ
2	有	無し (帯鉄筋貫通)	完全埋め込み
3	有	少数 (16本)	外向き

表-2 使用材料の材料特性

コンクリート	早強コンクリート 圧縮強度： $f'_c=316\text{kgf/cm}^2$ 弾性係数： $E_c=2.34 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$
鋼板	SM400A材 降伏強度： $f_{sy}=3046\text{kgf/cm}^2$ 引張強度： $f_{su}=4578\text{kgf/cm}^2$ 弾性係数： $E_s=2.121 \times 10^6\text{kgf/cm}^2$
主鉄筋	SD345材 降伏強度： $f_{ry}=3807\text{kgf/cm}^2$ 引張強度： $f_{ru}=5572\text{kgf/cm}^2$ 弾性係数： $E_r=1.917 \times 10^6\text{kgf/cm}^2$

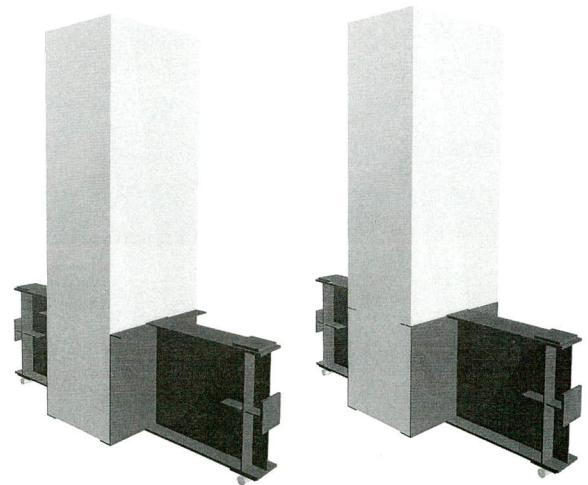


(a) 基本寸法



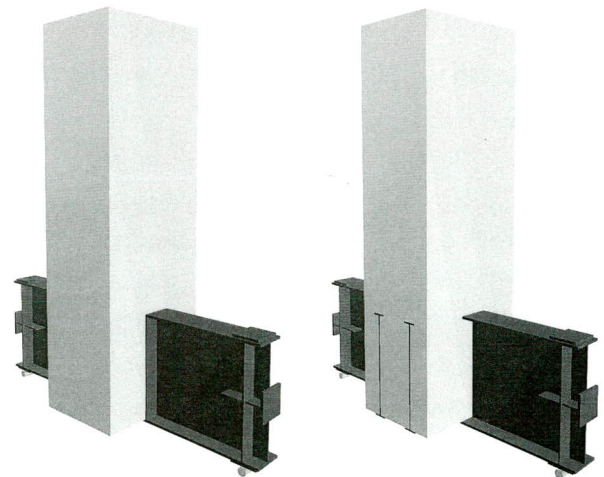
(b) 横桁構造

図-1 供試体形状寸法



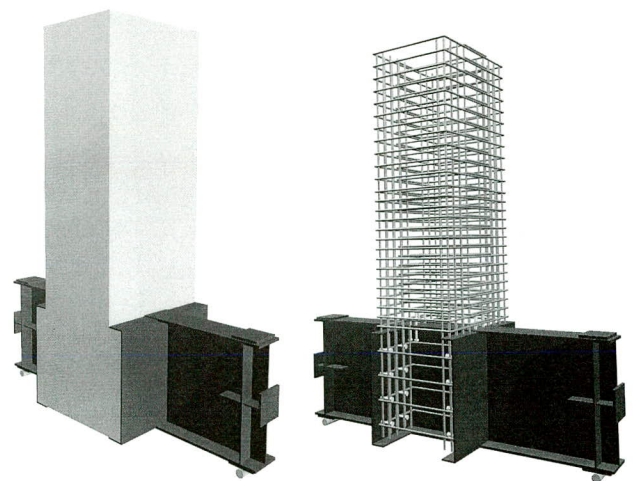
(a) TYPE-1A, 1B

(b) TYPE-1C, 1C'



(c) TYPE-1D

(d) TYPE-2



(e) TYPE-3

(f) 鉄筋配置 (TYPE-1C)

図-2 供試体構造概念

1C', 2)との比較により、応力伝達への影響を確認することにした。

供試体の鉄筋配置は原則として全て同一であるが、横桁をコンクリート内に埋め込んだTYPE-2のみは、横桁ウェブを貫通して帯鉄筋を配置している。なお、主鉄筋は横桁とスタッドの応力伝達に果たす役割がより明確となるよう、主桁フランジ幅内には配置しないものとしている。

表-1に供試体の構造概要、表-2に使用材料の材料特性を示し、供試体の基本形状寸法および横桁構造を図-1に、供試体の全体構造の概念を図-2に示す。

(2) 実験要領

供試体は実験設備の関係から水平に支持し、鋼桁端部に支点(片側固定、片側可動)を設け、RC柱端部に荷重を載荷する方法とした(図-3および写真-1)。荷重は実際の構造物と同様に、上部工の自重に相当する鉛直方向の圧縮力を柱の軸方向力として与え(柱軸方向荷重=24tf、コンクリート応力度=5kgf/cm²)、軸方向力一定下で水平荷重を与えることにより接合部に曲げモーメントを生じさせている。載荷要領は、はじめに主鉄筋に貼り付けたひずみゲージの最大ひずみが、鉄筋の降伏応力度(約3800kgf/cm²)に達するまで単調載荷を行い、このときの荷重載荷位置の水平変位を降伏変位 δ_y と定義し、 $\pm\delta_y$ を1サイクルとして $\pm 2\delta_y, \pm 3\delta_y, \pm 5\delta_y \dots$ という順序で、変位制御による交番載荷を行った。

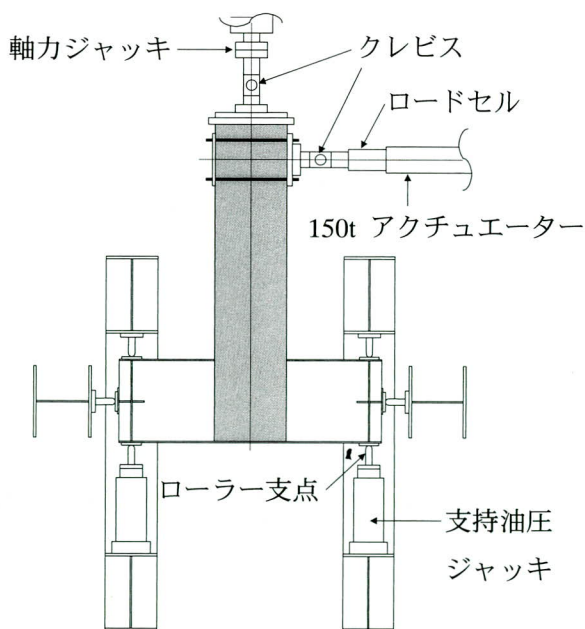


図-3 載荷要領図(平面図)

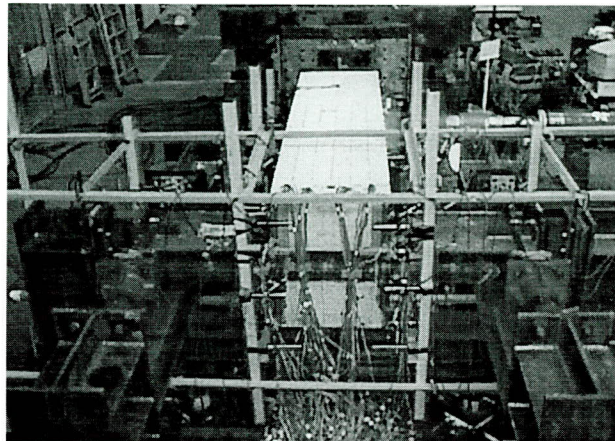


写真-1 実験状況

(3) 実験結果および考察

1) 供試体の荷重-変位関係

単調載荷実験結果から、主鉄筋降伏時の水平荷重と荷重載荷位置での水平変位量をまとめ、表-3に示す。

表-3 単調載荷実験結果

供試体番号	主鉄筋降伏荷重 (tf)	降伏変位 (mm)
TYPE-1A	28.90	5.77
TYPE-1B	29.85	7.61
TYPE-1C	28.30	5.97
TYPE-1C'	32.35	7.37
TYPE-1D	29.75	7.89
TYPE-2	31.10	7.99
TYPE-3	34.95	7.85

また、このときの各供試体の近似曲線により補正したP- δ 関係を図-4に示す。

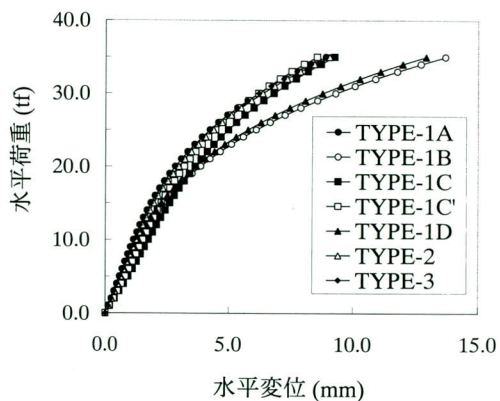


図-4 各供試体のP- δ 関係

表-3によれば、主鉄筋降伏時のRC柱の単位荷重当たり変位量は、供試体のタイプによって若干の差が生じており、スタッドを多数用いたTYPE-1Aと横桁フランジ内向き構造でスタッドを少数用いたTYPE-1Cが、他の供試体より若干小さい値であり、横桁フランジ外向き構造でスタッド少数のTYPE-1B、横桁のないTYPE-1Dおよび横桁埋め込み構造のTYPE-2が若干大きい値となっている。また図-4によれば、各供試体の初期変位勾配に大きな違いは見受けられないが、TYPE-1BとTYPE-1Dでは荷重20tfあたりから、他の供試体と比較して水平変位が増大する傾向が表れている。降伏までの荷重-変位関係を接合部の剛性と評価すれば、横桁構造やスタッド本数が接合部の剛性に影響を及ぼし、横桁フランジ内向き構造とスタッドを多数用いた場合に、剛性が高くなる傾向が窺える。

単調載荷実験に引き続き行った交番載荷実験の結果から、最大荷重と最大変位を表-4に、各供試体のP- δ 履歴曲線を図-5に示す。

表-4 交番載荷実験結果一覧

供試体番号	最大荷重 (tf)	最大変位
TYPE-1A	45.90	24 δy
TYPE-1B	48.95	20 δy
TYPE-1C	45.85	23 δy
TYPE-1C'	44.90	20 δy
TYPE-1D	35.20	3 δy
TYPE-2	46.35	20 δy
TYPE-3	46.65	20 δy

横桁の無いTYPE-1Dを除く供試体は、最大変位20 δy 以上と十分なじん性を有しているが、横桁が無い構造でも3 δy までは他の供試体と同様の性状を示していることから、接合部内の配筋を適切に行うことで実橋に適用できる可能性は十分期待できると思われる。また、スタッド本数の違いによる影響に関しては、20 δy 以上については実験装置の許容変位量からの最大値であることから、供試体構造による有意差はなく、耐荷性能はほぼ同等と考えて良いと思われる。

2) 供試体の破壊形態

交番載荷実験中に生じたひびわれと、実験終了時の状況から各供試体の破壊モードを分析し、以下に整理する。

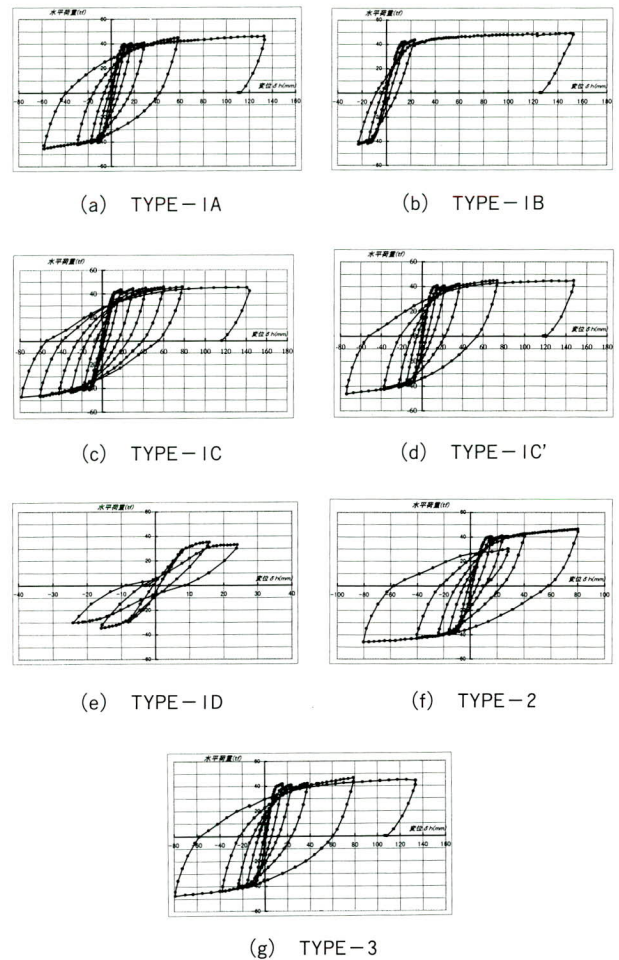


図-5 交番載荷実験によるP- δ 履歴曲線

表-5 供試体の破壊形態

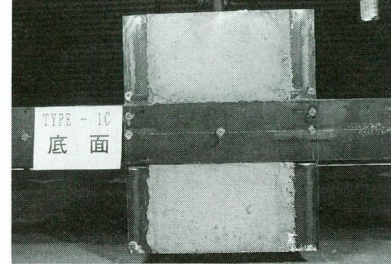
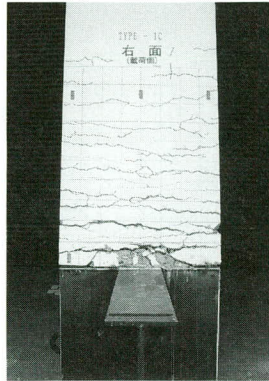
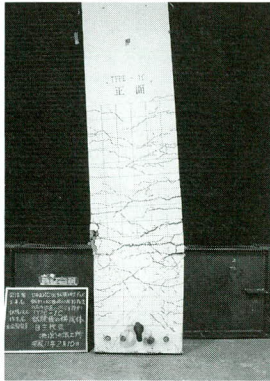
供試体番号	破壊モード	備考
TYPE-1A	RC柱曲げ破壊	
TYPE-1B	RC柱曲げ破壊	
TYPE-1C	RC柱曲げ破壊	鉄筋座屈
TYPE-1C'	RC柱曲げ破壊	せん断ひびわれ
TYPE-1D	剛結部せん断破壊	
TYPE-2	RC柱曲げ破壊	コンクリート剥落
TYPE-3	剛結部せん断破壊 RC柱曲げ破壊	3 δy 時せん断破壊 20 δy 時曲げ破壊

①RC柱曲げ破壊モード

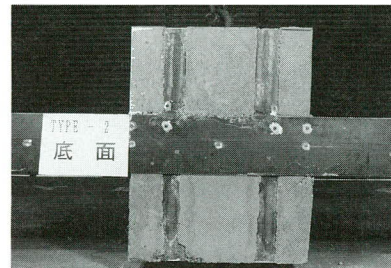
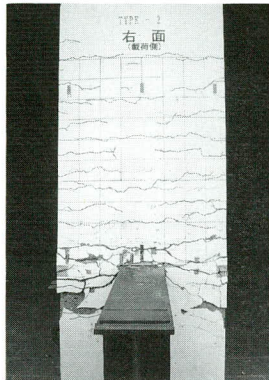
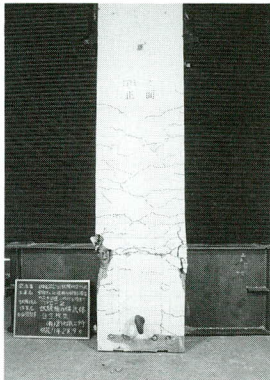
TYPE-1A, 1B, 1C, 1C'およびTYPE-2の5体の供試体は、柱部材に曲げ破壊が生じた。これは接合部の耐荷力が柱の耐荷力を上回っているためであり、横桁によって接合部の耐荷力が向上したものと考えられる。

②接合部せん断破壊モード

TYPE-1DとTYPE-3は接合部内のコンクリートにせ

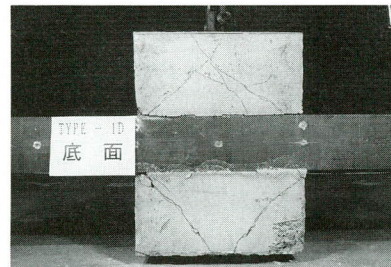
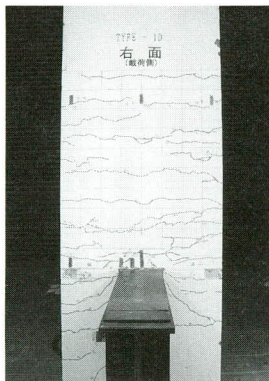
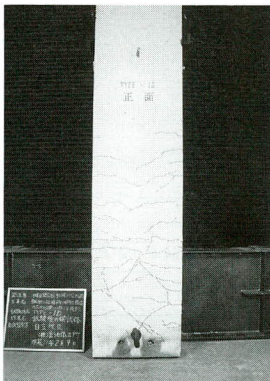


(a) TYPE-1C

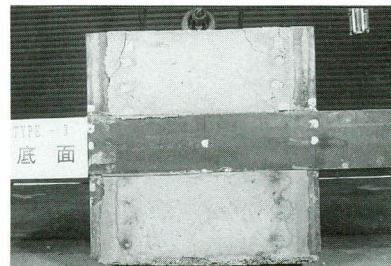
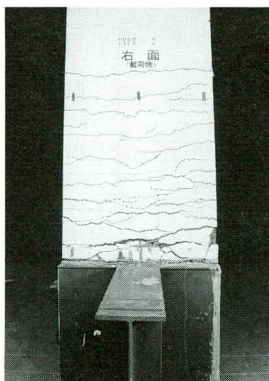


(b) TYPE-2

(A) 曲げ破壊モード



(c) TYPE-1D



(d) TYPE-2

(B) せん断破壊モード

写真-2 供試体のひびわれ性状

せん断破壊を生じた。横桁の無いTYPE-1Dは、補剛材部と外側のコンクリート間にずれが生じ、RC部材の端面には斜めひびわれが発生した。TYPE-3は横桁がRC柱厚に対してフランジ幅分外側に位置する構造であり、横桁フランジ先端位置で柱部材方向の破壊が生じた。これらは主桁または横桁によって拘束された領域と、拘束されないRC部材との耐力の差によるせん断破壊であると思われる。

以上のことから、横桁を設けた場合には接合部の耐荷力が向上することがわかった。しかしながら、TYPE-3

では横桁およびスタッドを設けたにもかかわらず、橋脚の破壊に先行して接合部内のコンクリートにせん断破壊が生じている。接合部の設計に際しては、適切な接合部構造の選定とともに、横桁およびスタッドを介した応力伝達ばかりでなく、コンクリートの破壊を予測して耐力を評価することが重要であると言える。

供試体の交番荷重によるひびわれ発生状況の代表例として、曲げ破壊モードからTYPE-1CとTYPE-2、せん断破壊モードのTYPE-1DとTYPE-3のひびわれ性状を写真-2に示す。

- ◆ ◇ V = 24 tf
- □ ひび割れ時
- ▲ △ 設計荷重時
- ○ 降伏荷重時

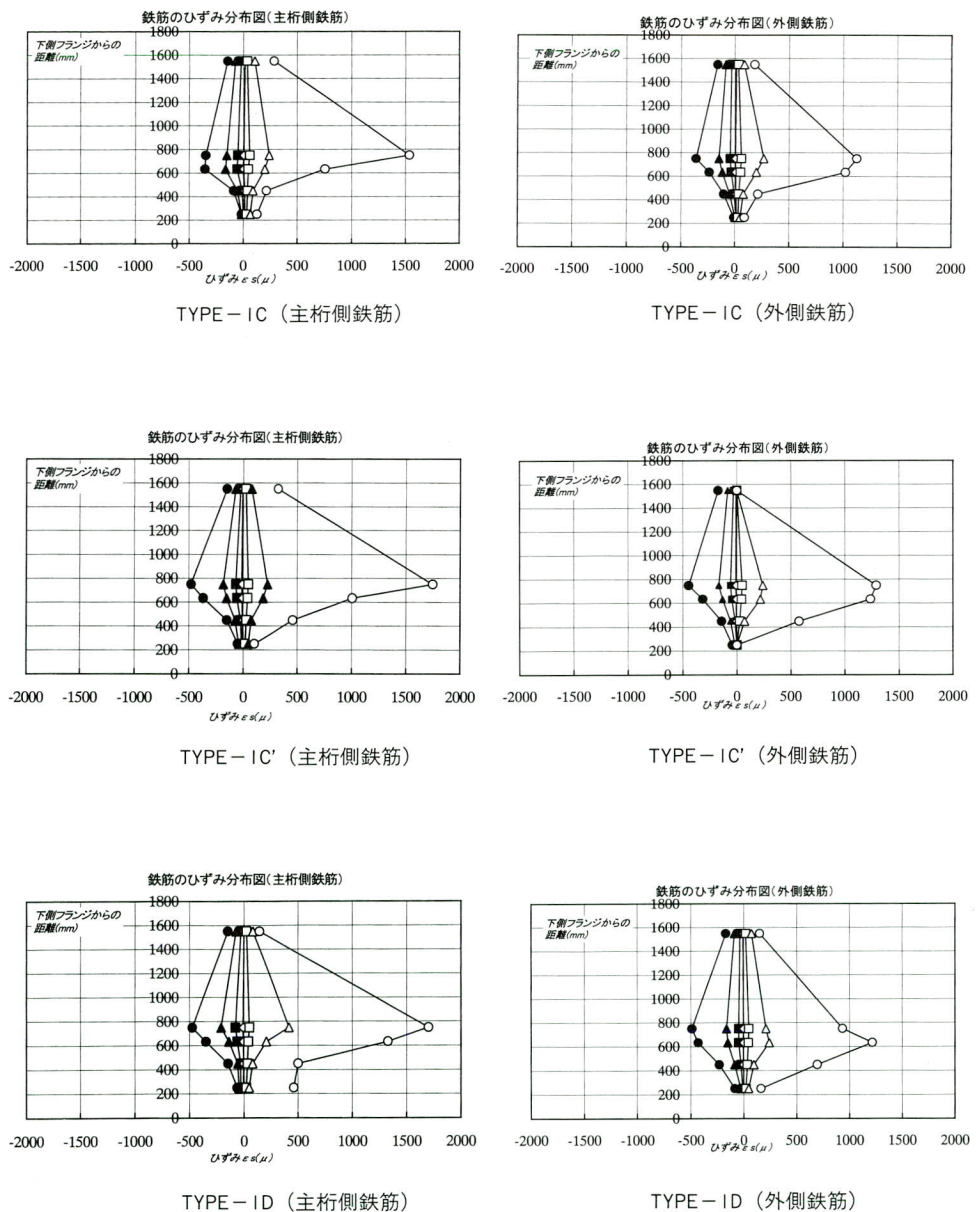
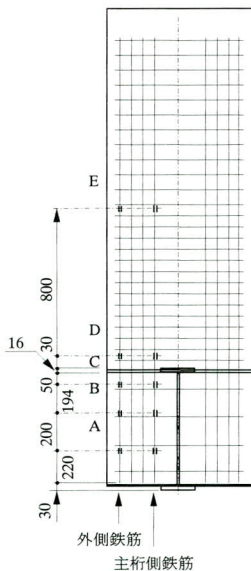


図-6 主鉄筋のひずみ分布図(単調荷重実験)

3) 主鉄筋のひずみ分布

主桁からの応力は横桁およびスタッドをRC柱へ伝達されるとした場合、主鉄筋に生じるひずみは、横桁の無い構造に比べて横桁を有する構造の方が相対的に大きな値となる。スタッドに関しても同様で、スタッドを多数用いたモデルでは少数のモデルより応力伝達が効率的に行われると考えることができる。この点に着目して、各供試体の主鉄筋ひずみ分布を比較する。代表的な結果として、同一構造でスタッド有無の違いがあるTYPE-1C、1C'と、横桁の無いTYPE-1Dのひずみ分布図を図-6に示す。

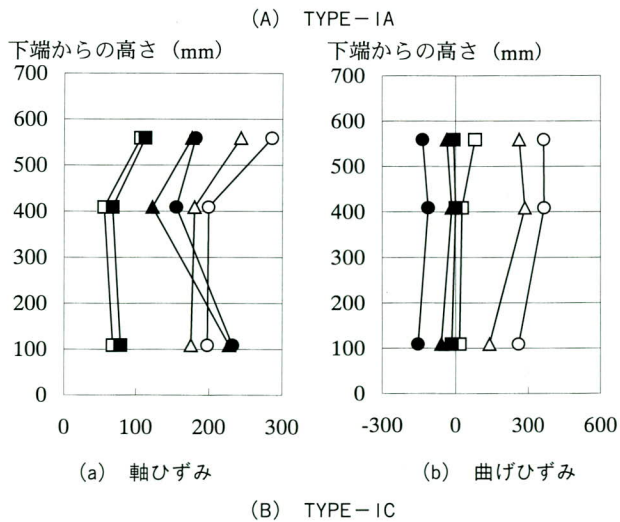
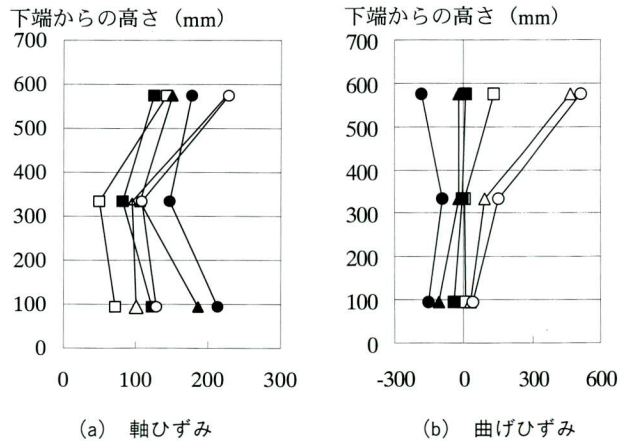
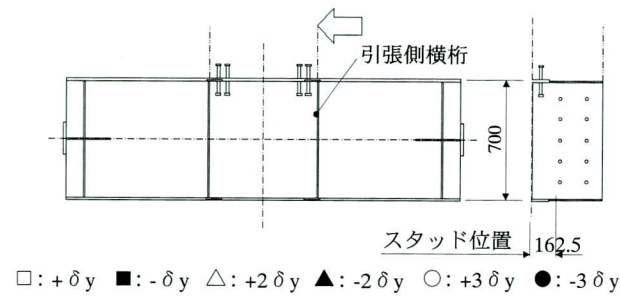


図-7 引張側横桁スタッドのひずみ分布

TYPE-1CとTYPE-1C'の比較においては、接合部内下フランジ側でのひずみ分布に差が認められ、スタッドを用いたTYPE-1Cが接合部内で急激にひずみが減少している様子が表れている。これはスタッドを用いた効果により、接合部内での応力伝達がより円滑に行われているためと思われる。横桁のないTYPE-1Dでは、接合部内主桁側鉄筋先端でひずみが残留し、外側主鉄筋では最大ひずみの発生位置が下フランジ位置より接合部内に寄っている。これは横桁およびスタッドがないために、

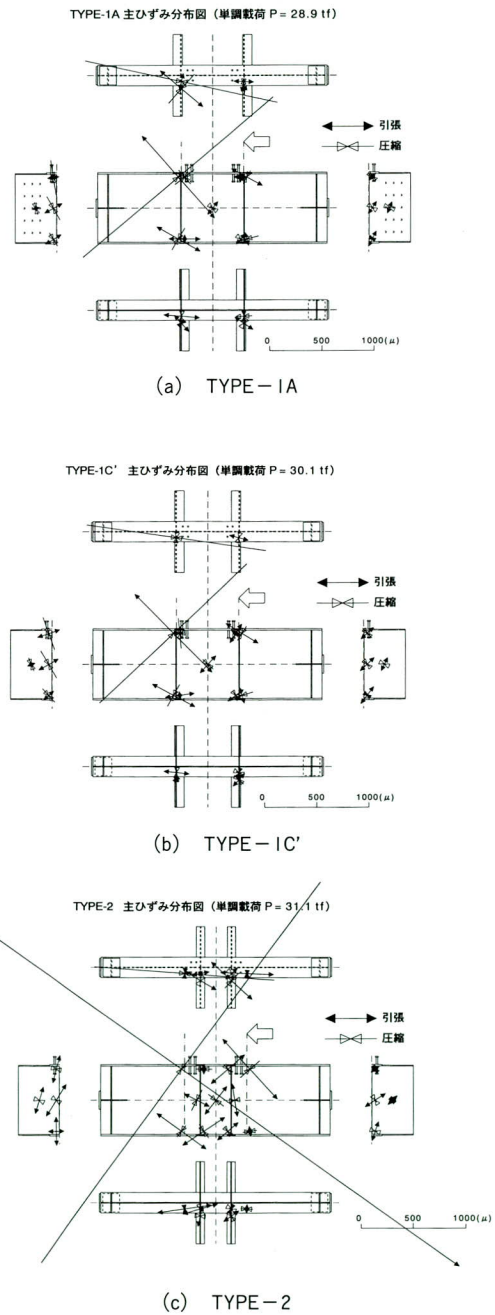
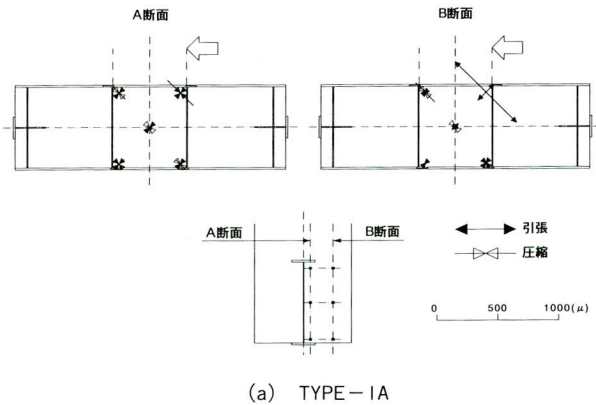


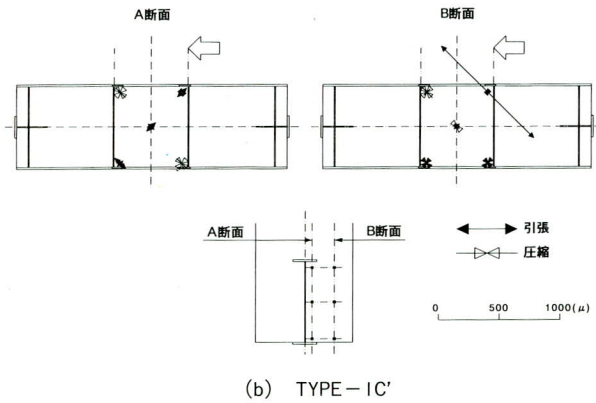
図-8 鋼桁の主ひずみ分布

接合部内での応力伝達が効率的に行われていないことを示している。ただし、横桁のない構造においても、主鉄筋ひずみは主鉄筋側、外側とも、横桁を有する構造と大差ないことから、横桁およびスタッドを介しての応力伝達ばかりでなく、主桁からコンクリートへ直接的に伝達されていると考えられる。

TYPE-1A コンクリートモールドゲージ
ひずみ分布図 (単調載荷 P=28.9tf)



TYPE-1C' コンクリートモールドゲージ
ひずみ分布図 (単調載荷 P=30.1tf)



TYPE-2 コンクリートモールドゲージ
ひずみ分布図 (単調載荷 P=31.1tf)

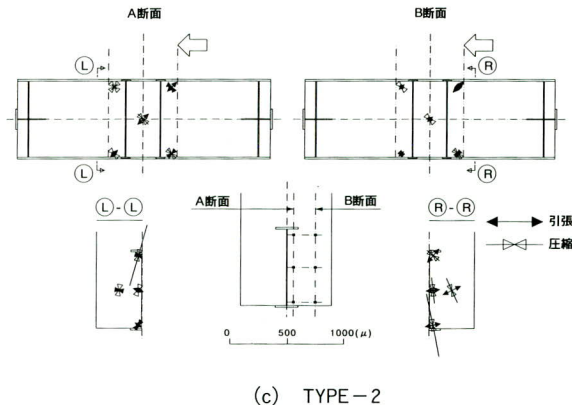


図-9 接合部コンクリートの主ひずみ分布

4) スタッドのひずみ

スタッドに生じるひずみは計算値に対して概ね小さく、交番載荷によって鋼板とコンクリート間に剥離が生じた後もひずみは増大せず、降伏するまでには至らなかった。スタッド本数による影響を比較した場合でも、供試体によって特に有意差は表れておらず、実験ではスタッドを介して応力伝達を行うという考え方の裏付けを得ることはできなかった。

スタッドのひずみ分布の例として、TYPE-1AおよびTYPE-1Cの引張側横桁での実験結果を図-7に示す。

5) 鋼桁の主ひずみ分布

主鉄筋が降伏荷重に達した時の、接合部内の主桁および横桁の主ひずみ分布を図-8に示す。標準的な横桁配置構造では、接合部内の主ひずみの方向は柱側のコーナーから圧縮応力、引張応力とも、それぞれ対角のコーナーに向かっており、接合部パネルの斜め方向に応力が伝達されている。このとき、接合部外圧縮側下フランジ近傍では既に降伏しているが、剛結部内のひずみは比較的小さい。また横桁埋め込みの場合は、接合部パネルが小さいためひずみが比較的大きく、主ひずみの方向も複雑である。

6) コンクリートの主ひずみ分布

接合部内コンクリートも鋼桁と同様に、主ひずみの方向はパネルのコーナーから対角方向へと向かっている。コンクリートひずみは相対的に小さいが、これは接合部内では鋼とコンクリートが一体化して挙動しているためであると考えられる。TYPE-1A、TYPE-1CおよびTYPE-2の主ひずみ分布図を以下に示す。

3. FEM解析

(1) 解析概要

FEM解析は当社の所有する汎用有限要素解析プログラム「MARC」を用い、図-10に示す供試体の主桁ウェブ中心線上で対称とした3次元の1/2形状モデルにより行った。

材料要素は鋼板が4節点平面シェル要素、鉄筋はトラス要素、スタッドは3次元はり要素、コンクリートは8節点ソリッド要素を用い、鋼板とコンクリートとの接合には、接触/摩擦要素を用いて面接触方向への圧縮力のみを伝達し、引張力と摩擦力は無視する条件とした。

要素の材料特性は、鋼材は素材引張試験による弾性係

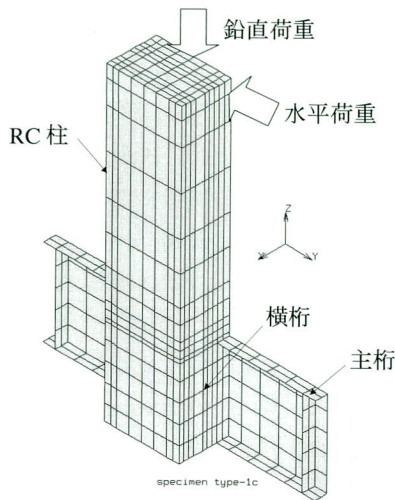


図-10 解析モデル (TYPE-1C)

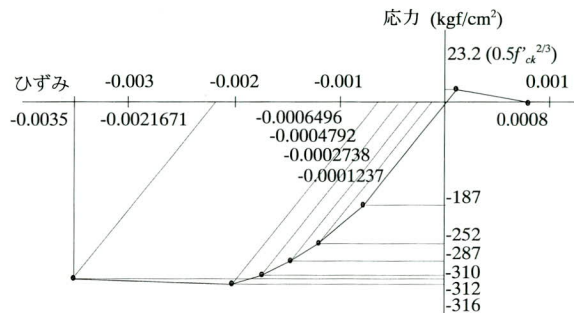


図-11 コンクリートの構成曲線

数と降伏応力度を用い (表-6)、von Misesの降伏条件による完全弾塑性体とした。コンクリートの弾性係数と強度は、圧縮試験の結果から図-10に示す応力-ひずみ構成関係を与え、Mohr-Coulomb則による破壊基準を適用した。

表-6 鋼材の材料特性

	弾性係数 (kgf/cm ²)	降伏応力度 (kgf/cm ²)
鋼板、スタッド	2.121×10 ⁶	3026
鉄筋	1.917×10 ⁶	3807

(2) 解析結果および考察

解析はTYPE-1B、1C、1D、2およびTYPE-3の5種類のモデルについて行った。載荷荷重は実験に合わせて、はじめに柱に鉛直荷重 (=24tf) を与え、次に水平荷重を漸増させる方法とした。まず、水平荷重と荷重載荷位置の水平変位との関係は、終局時に解析結果の剛性が若干低下する傾向にあるが、鉄筋降伏荷重程度までは実験値とよく一致している (図-12)。

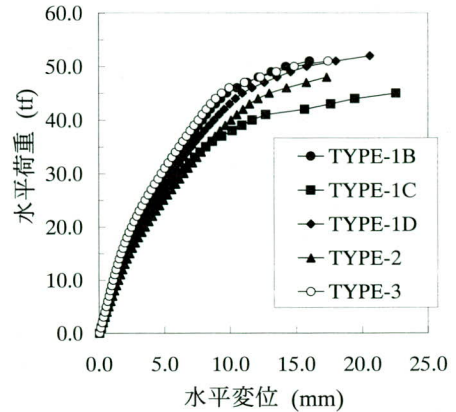


図-12 各供試体のP-δ関係

解析結果の一例として、実験における鉄筋の降伏荷重に近い水平荷重=30tfを作用時の、要素全体と鋼板要素のみを取り出した状態の主ひずみコンターを図-13に示す。

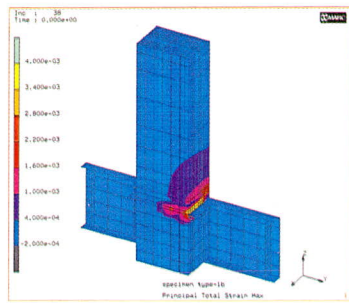
要素全体においては、接合部下フランジ近傍のコンクリートに大きなひずみが生じていることがわかる。特にTYPE-2では外側のコンクリートに高いひずみの領域が表れているが、実験ではこの位置でコンクリートの剥落が生じており (写真-2)、解析結果が実際の挙動と良く合っている。鋼部材に生じるひずみでは、全体的には主桁近傍に高いひずみの領域があり、横桁には特に大きなひずみは生じておらず、横桁部材方向への広がりもあまり見受けられない。また接合部内の分布では、パネルの右上と左下に大きなひずみが表れており、実験での主ひずみと同様、パネルのコーナー部から対角方向へ応力伝達経路が確認できる。

4. まとめ

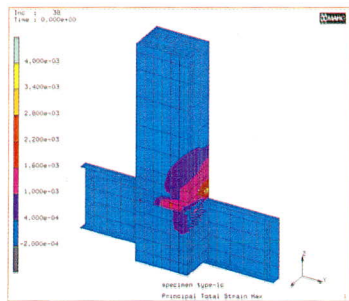
(1) 設計の基本的な考え方

今回の比較供試体を用いた載荷実験およびFEM解析の成果により、接合部における応力伝達はこれまでのような考え方に依らず、鋼とコンクリートが一体となって応力伝達機構を形成するとの知見を得た。したがって、「鋼とコンクリートそれぞれの特性を評価し、予測される破壊形態に対して着目した部材の耐荷性能を照査する」ことが、設計の基本的な考え方であろうと思われる。

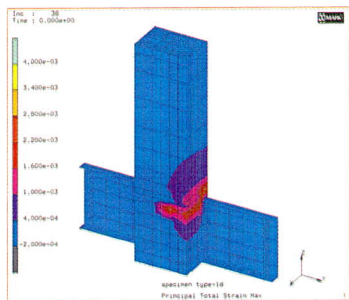
複合ラーメン橋は、RC橋脚と鋼桁断面の様々な組み合わせにより、接合部もまた多様な構造形態となり得るが、この考え方は構造に依存しない基本的な設計理念であると考えている。



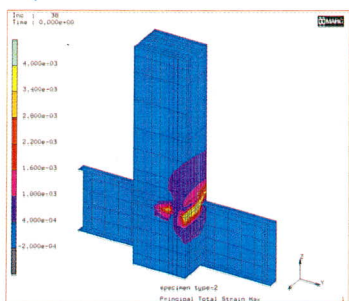
(a) TYPE-1B



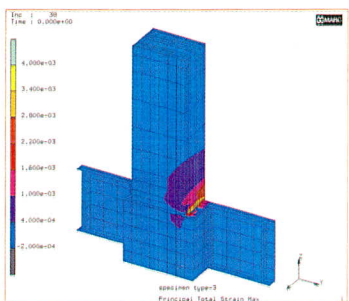
(b) TYPE-1C



(c) TYPE-1D

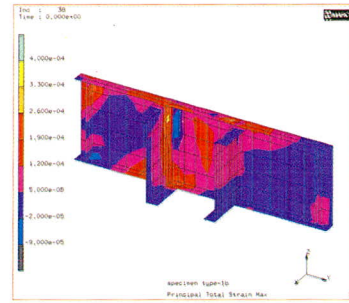


(d) TYPE-2

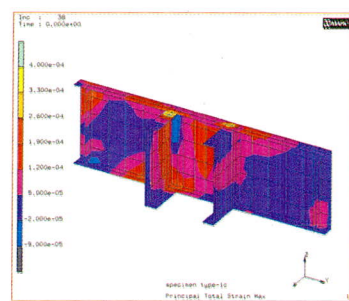


(e) TYPE-3

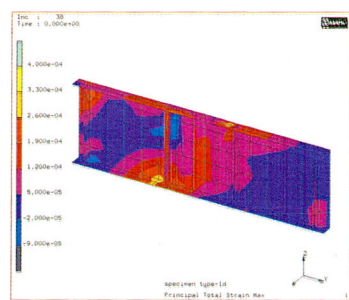
(A) 全体要素コンター



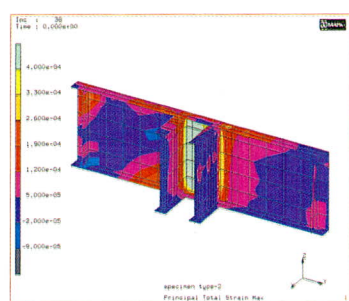
(a) TYPE-1B



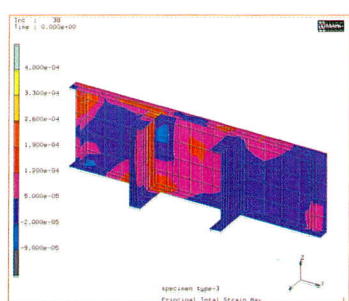
(b) TYPE-1C



(c) TYPE-1D



(d) TYPE-2



(e) TYPE-3

(B) 鋼要素コンター

図-13 最大主ひずみコンター図

(2) 各要素部材の役割

接合部の耐荷性能の評価を検討するにあたり、本研究により明らかになった接合部を構成する要素部材の役割を述べる。

1) 横桁

横桁に生じるひずみは相対的に小さく、接合部の主要な応力伝達部材としては機能していないようである。ただし、鋼とコンクリートを一体化し剛性を高めることで、結果的に耐荷機構の一部となる要素である。

また横桁構造に関しては、終局時に接合部コンクリートのひびわれが最も少なく、性状が安定していた横桁を橋脚外面に配置する構造を標準と考えた。さらに下フランジを橋脚側に向けた場合、鋼材によるコンクリートの拘束が強まり剛結部の剛性が高まる結果、他のタイプと比較してひびわれの発生が抑制されるものと思われる。したがって下フランジの向きは、施工性との兼ね合いを検討して決定すべきと思われるが、接合部の剛性を高めてより破壊を生じさせないためには、フランジを剛結部内へ向けた構造が有効である。

2) 横桁ウェブのスタッド

横桁ウェブのスタッドは接合部の応力伝達において、横桁と同様に主要な役割を果たしているとは考え難い。スタッドによって接合部の剛性を高める効果は認められるが、スタッドを用いないTYPE-1C'でも十分な耐荷性能が発揮されていることから、設計においては鋼とコンクリート間の付着を確保し、剛性を保証する機能によって応力伝達に貢献する部材と考えることが妥当であると思われる。

3) 接合部のコンクリート

鋼とコンクリートが一体となって挙動する接合部では、パネルの対角方向へ圧縮、引張応力を伝えるというトラス機構による応力伝達経路が確認された。これにより、接合部のコンクリートは、コンクリートストラットを考えたモデル化により、圧縮力を伝達する部材として設計することが可能となる⁴⁾。

鋼2主桁橋の複合化対応を考慮し、2主桁構造の実モ

デルを取り上げる前段の研究として、主桁がRC橋脚の中央に位置する基準モデルでの実験研究を実施した。2主桁橋を剛結する場合、橋脚幅と主桁間隔の関係により、必ずしも標準的な構造とはならないが、応力伝達機構および設計法に対する基本的な考え方は、複合ラーメン橋を計画する上で重要であり、その他各種の複合構造を設計する上でも有効なものであると考えている。

なお、本研究は日本道路公団試験研究所「鋼げたとコンクリート橋脚の剛結構造の応力伝達に関する検討」として行ったもので、実験計画の段階から橋梁研究室の安松前室長、紫桃室長、井ヶ瀬主任、長谷技師には多大な御指導をいただきました。また同時に「鋼橋の経済性に関する研究委員会」(委員長・西川 和廣 建設省土木研究所橋梁研究室長)の上下部一体W/Gとの共同研究としてW/Gのメンバーである川崎製鉄：田中氏、三井造船：小林氏、片山ストラテック：大久保氏とともに、実験を実施して頂いた川崎製鉄：熊野氏、川鉄テクノリサーチ：金子氏ら多くの御協力を得ました。また、この一連の研究には埼玉大学工学部町田篤彦教授から、多くの御助言をいただきました。ここに記して深謝いたします。

〈参考文献〉

- 1) 日本道路公団：設計要領第二集 橋梁建設編 9章 複合構造，平成10年7月
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II鋼橋編，9章 合成げた、平成8年12月
- 3) 土木学会：鋼構造物設計指針・PART B・合成構造物，平成9年版
- 4) 佐藤，清水，太田，町田：複合ラーメン橋の接合部設計法に関する一提案，構造工学論文集，Vol. 45A，1999. 3，pp.1431~1438
- 5) 長谷，井ヶ瀬，清水，田中，小林，大久保：鋼桁とRC橋脚の鋼結部応力伝達機構に関する実験的考察，第4回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，1999年11月，pp.207~212

1999.11.1 受付