

(39) 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

Experimental Consideration for Stress Transfer Mechanism at Joint Section
Between Steel Girder and Reinforced Concrete Pier

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*****

Toshihiko Nagatani, Yoshinori Igase, Isao Shimizu, Sachito Tanaka, Kiyoshi Kobayashi and Nobuhito Okubo

- * 日本道路公団, 試験研究所 (〒194-0035 東京都町田市忠生 1-4-1)
- ** (株) 宮地鐵工所, 技術部 (〒290-8580 千葉県市原市八幡海岸通 3 番地)
- *** 川崎製鉄 (株), 建材センター鋼構造研究所 (〒267-0005 千葉市稲毛区長沼町 351 番地)
- **** 三井造船 (株), 鉄構建設事業本部技術部 (〒104-8439 東京都中央区築地 5-6-4)
- ***** 片山ストラテック (株), 技術開発部 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島町 6-2-21)

A hybrid rigid-frame bridge is a promising bridge structure to save the construction cost as well as its durability and seismic safety. Although, establishment of the design method is the subject to develop this type of bridge.

Authors were performed experimental and analytical studies with six types of specimens to clarify the stress transfer mechanism and to suggest the rationalized design method for joint section between a steel girder and a reinforced concrete pier. In this paper, the stress transfer mechanism is discussed on the basis of experimental results. And knowledge and problems about the role of stud shear connectors and cross girders to achieve the stress transfer mechanism are described.

Key Words: hybrid rigid-frame bridge, stress transfer mechanism, design method, cyclic loading test

1. はじめに

鋼桁とRC橋脚を剛結した複合ラーメン橋は、上部工のたわみを低減し、かつ耐震性に優れた構造を備えながら、なおコストの縮減を図ることができる新しい構造形式として注目されている。日本道路公団においては既に数橋が建設されており¹⁾、現在も施工中あるいは計画中の橋梁が多く存在する。このほか、建設省や地方自治体においても計画が進められているなど、近年大きな関心が示されている橋梁構造である。

日本道路公団では今後の鋼橋の標準形式を2主桁橋とするため、鋼2主桁橋への剛結構造の適用へ向けた取り組みとして、剛結部構造の標準化や設計要領²⁾の見直しを検討しているところである。

複合ラーメン橋の設計において、特に鋼とコンクリートとの剛結部は、設計されたディテールについての模型実験あるいはFEM解析などにより、その都度安全性の照査を行っているのが現状である³⁾。今のところ実験結果やFEM解析結果を反映させた、十分に信頼できる設計方法が一般化されているとは言いがたく、鋼とコンクリートとの応力伝達機構を反映した設計手法の確立が課題となっている。

筆者らはこれまでに報告された研究成果⁴⁾などを基に、剛結部の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実験を計画し、交番載荷実験およびFEM解析を実施した。本研究では以下の項目に着目して検証を行った。

- ①横桁の応力伝達に果たす役割。
- ②横桁スタッドの応力伝達に果たす役割。
- ③鋼とコンクリート間の応力伝達経路と耐荷機構。
- ④剛結部の標準構造の提案。

本論文では上記の項目について実験および解析結果を比較検討することにより、鋼主桁、横桁、スタッドおよびコンクリートについて、それぞれの役割と耐荷機構を検証する。また、今回の実験と解析により、さらに施工性も考慮した合理的な剛結部の構造と設計の可能性を示唆するとともに、残された課題について言及する。

2. 剛結部に関する実験的検討

2.1 実験の概要

JHの高速道路鋼橋の標準形式となる鋼2主桁橋において、RC橋脚との剛結構造を採用する場合の設計上の課題に、剛結部の接合材であるスタッドの最適本数決定方

法および配置方法がある。解析等での検討によれば、剛結部に作用する断面力に対しては、主桁近傍に配置したスタッドのみが有効となるなど、特殊な応力伝達特性が現れており、現状では断面力の伝達機構が十分解明されているとは言えない。また、剛結部構造と応力伝達機構との関連性の解明も合わせて、これらを解決する設計法の確立を目指した試験研究を計画した。

2.2 実験供試体

本実験は横桁と、横桁に設けたスタッドの機能を明確にするための要素実験と位置づけており、実験供試体はスタッド本数、横桁の有無による違いを確認できるように計画した。このため、橋脚の主鉄筋は横桁～スタッド～コンクリート～主鉄筋という応力伝達がより明確となるように、主桁フランジ幅内には配置しないものとしている。また、横桁は標準形式としてRC柱を取り囲む構造を想定しているが、横桁を橋脚面に設置した場合、橋脚の主鉄筋が横桁下フランジを貫通することになるなど、横桁下フランジの向きが架設作業性に影響を及ぼすことも予測される。そこで、現場での施工性を考慮した横桁構造にも着目し、橋脚内にフランジを向ける内向き構造、鉄筋と干渉ないようにフランジを主桁側へ向ける外向き構造、および横桁を橋脚中心部に完全に埋め込む構造の3種類を比較対象とした。表-1に比較供試体の種類を示し、図-1に供試体の基本形状寸法、横桁構造および代表例としてTYPE-1Cの概念図を示す。

表-1 実験供試体の種類

供試体 番 号	横 桁	横桁ウェブの スタッド本数	横桁下フランジ の向き
TYPE-1A	有	標準 (30本)	外向き
TYPE-1B	有	少数 (16本)	外向き
TYPE-1C	有	少数 (16本)	内向き
TYPE-1C'	有	無し (0本)	内向き
TYPE-1D	無	—	—
TYPE-2	有	無し (鉄筋貫通)	完全埋め込み

2.3 実験方法

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-2）。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 = 24 tf, コンクリート応力度 = 5 kgf/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3800 kgf/cm²）に達するまでを1サイクルとした単調荷重増分法で行い、このときの荷重載荷位置の水平変位を降伏変位 δy と定義し、それ以降 $-\delta y$, $+2\delta y$, $-2\delta y$, $+3\delta y$, $-3\delta y$, ... という順序で、破壊に至るまで変位制御による交番載荷を行った。

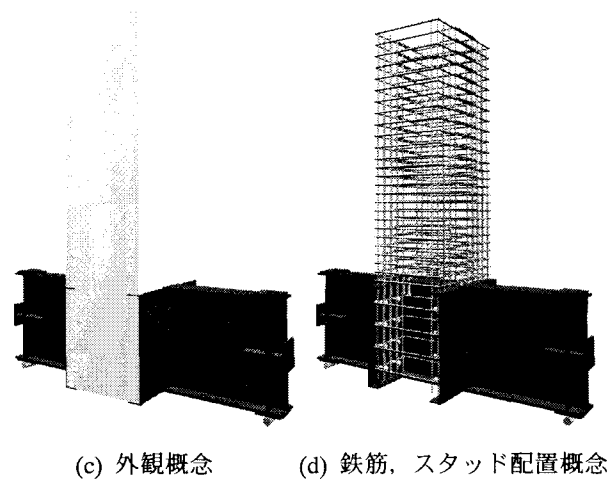
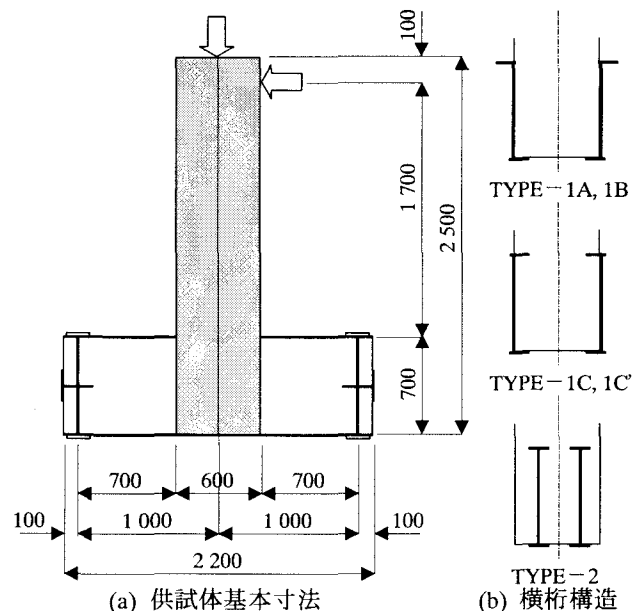


図-1 供試体形状図

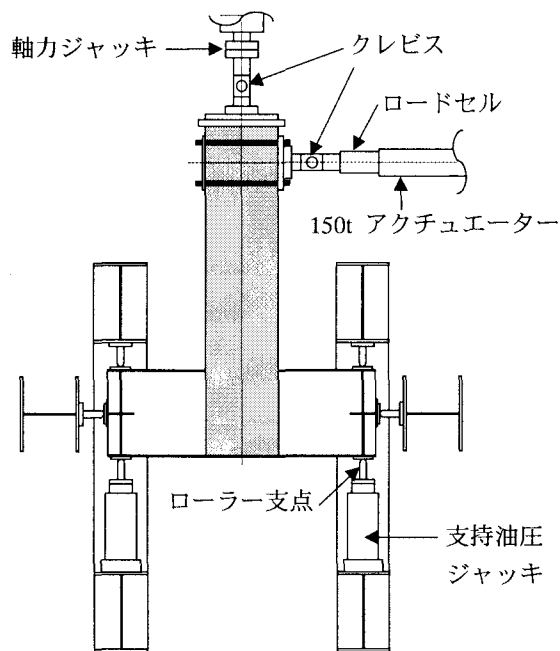


図-2 載荷要領図（平面図）

3. 実験結果と考察

3.1 水平荷重－載荷点変位

単調荷重における各供試体の水平荷重と荷重載荷位置の水平変位との関係を図-3に示す。

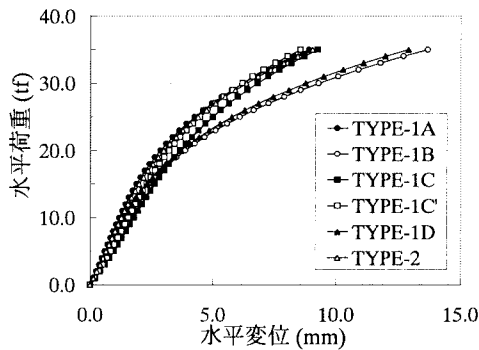
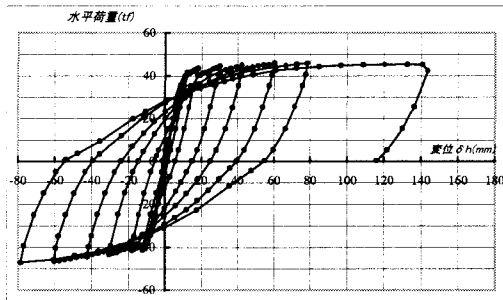


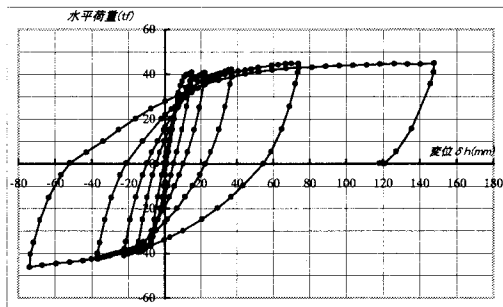
図-3 単調荷重実験における各供試体のP-δ関係

主鉄筋降伏時のRC柱の変位は、供試体のタイプによって約20%の差が生じた。これに比べて降伏荷重に大きな違いはなくほぼ同程度であるため、供試体のタイプによる差違は変位勾配として現れている。このことから横桁が構造全体の耐力力には大きく影響しないものの、剛結部の剛性には影響を及ぼしていると考えられる。

単調荷重実験に引き続き、破壊に至るまで交番荷重実験を行った。標準的な供試体であるTYPE-1Cでは終局変位 $23\delta y$ まで、荷重が下がることなく変形が増加した(図-4 (a))。スタッドの無いTYPE-1C'でも変形量はやや大きめであるものの、図-4 (b) に示すように $20\delta y$ まで十分な耐力力を保持している。



(a) TYPE-1C



(b) TYPE-1C'

図-4 交番荷重実験によるP-δ履歴曲線

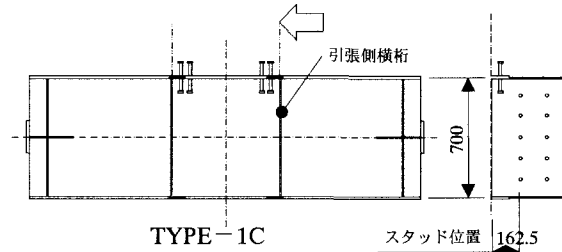
その他の比較供試体でもTYPE-1Dを除いて、 $20\delta y$ まで荷重低下が生じずに耐力力が維持されることが確認されている。交番荷重時の履歴曲線にも特に有意差は現れず、破壊形態も全ての供試体でほぼ一様に、剛結部直下のRC柱の曲げ破壊であった。それぞれの供試体は横桁構造およびスタッド本数にかかわらず、耐力力はほぼ同等であると判断される。

3.2 横桁ウェブのスタッドに生じるひずみ

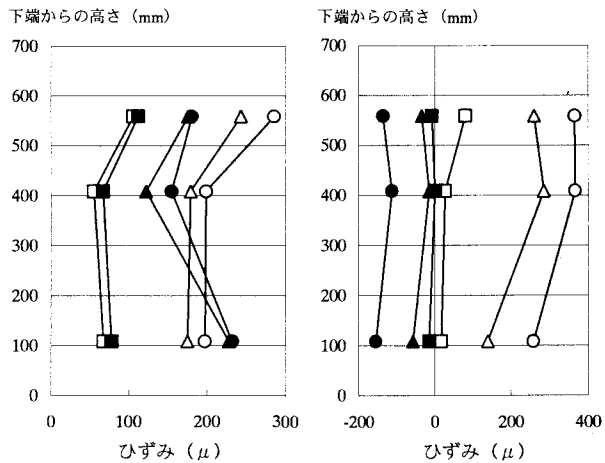
現行の設計法においては、剛結部に作用する曲げモーメントを偶力換算し、その引張力を横桁からスタッドへせん断力として伝え、コンクリートを介して剛結部内コンクリートに定着された主鉄筋へ伝達するとしている。

実験結果によれば、スタッドに生じるひずみは応力を直接的に伝達していると考えられるレベルにはなく、交番荷重によって剛結部のコンクリートにひびわれが生じ、鋼板とコンクリートとの付着が切れた状態でも、図-5のとおりスタッドのひずみは降伏には至らなかった。さらに、前項で述べたとおり、スタッドの有無による供試体の耐力力の差も確認されていないことから、スタッドを介して鋼とコンクリート間の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。

しかし、スタッドが鋼とコンクリート間の剥離を拘束し、付着性能を低下させない機能を有しているため、この観点からの検討は必要である。スタッドによる剛結部耐力の評価については、今後の課題である。



□: + δy ■: - δy △: + $2\delta y$ ▲: - $2\delta y$ ○: + $3\delta y$ ●: - $3\delta y$



(a) 軸ひずみ

(b) 曲げひずみ

図-5 引張側横桁スタッドのひずみ分布

3.3 剛結部内のひずみ分布と応力伝達

スタッドを取り付けていない TYPE-1C' について、鋼主桁と横桁のウェブ、およびコンクリートの主ひずみ分布から、剛結部内の応力伝達を分析する。

主桁ウェブでは柱側のコーナーから圧縮応力、引張応力が、それぞれ対角のコーナーに向かって伝達されている様子がわかる(図-6)。このとき、剛結部外ウェブの圧縮側下フランジ近傍では既に降伏ひずみに達しているが、剛結部内のひずみは比較的小さい。横桁ウェブの主ひずみも同様で、初等理論による計算値に対し実験値は20%程度であり、さらに引張側ウェブが圧縮側より相対的に小さい値となっている。

TYPE-1C' 主ひずみ分布図(単面載荷 $P = 30.1 \text{ tf}$)

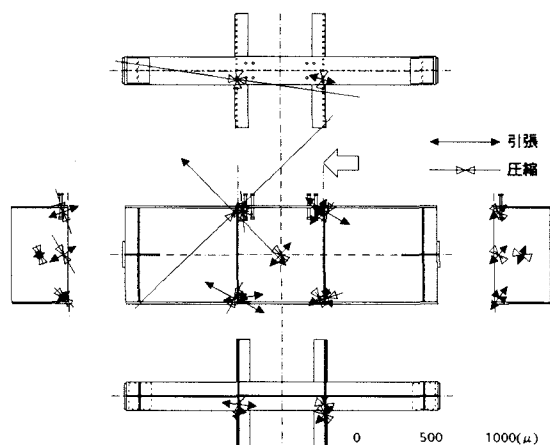


図-6 鋼桁の主ひずみ分布

剛結部内コンクリートも、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。なお、B断面の引張側コーナー部のひずみが大きい、この位置でひびわれが生じているためと思われる。

TYPE-1C' コンクリートモールドゲージ
ひずみ分布図(単面載荷 $P = 30.1 \text{ tf}$)

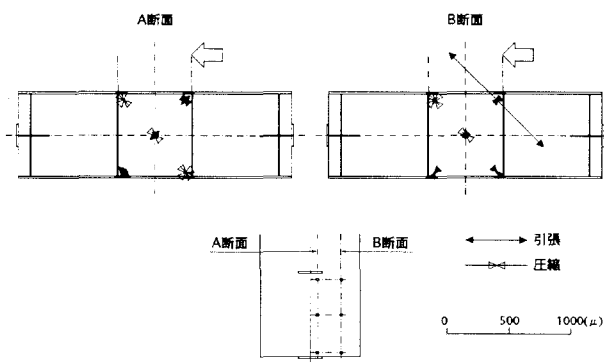


図-7 剛結部コンクリートの主ひずみ

剛結部内では主桁、横桁構造およびスタッド本数など、鋼材配置による拘束の違いがひびわれ発生に影響を及ぼし、剛結部の剛性の差として現れているようである。剛結部の剛性を確保できれば、鋼とコンクリートが一体化して耐荷機構を形成すると考えてよいと思われる。

4. FEM 解析

4.1 解析の概要

供試体の主桁ウェブ中心線上で対称とした 1/2 モデルを使用した 3 次元 FEM 解析により、実験結果を検証した(図-8)。

鋼板は 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数と降伏応力度を用い(表-2)、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-9 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。

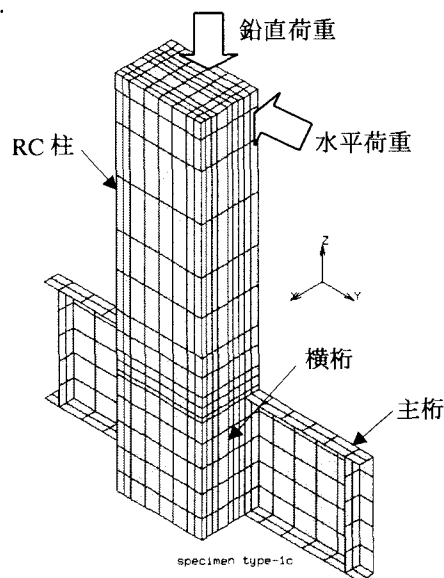


図-8 解析モデル (TYPE-1C)

表-2 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	3 026
鉄筋	1.917×10^6	3 807

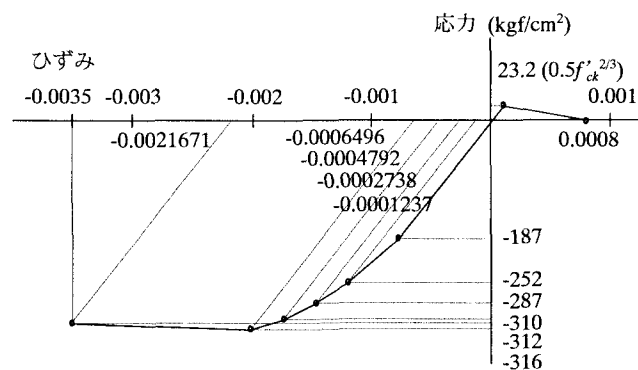


図-9 コンクリートの構成曲線

4.1 解析結果および考察

解析はTYPE-1B, 1C, 1DおよびTYPE-2の4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（＝24 tf）を与え、次に水平荷重を漸増させる方法とした。解析結果の一例として、標準的な供試体であるTYPE-1Cを取り上げ、実験における鉄筋の降伏荷重に近い水平荷重＝30 tf を作用させた場合について整理する。

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よく一致している（図-10）。

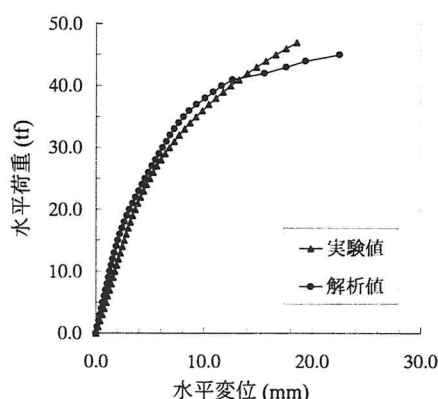
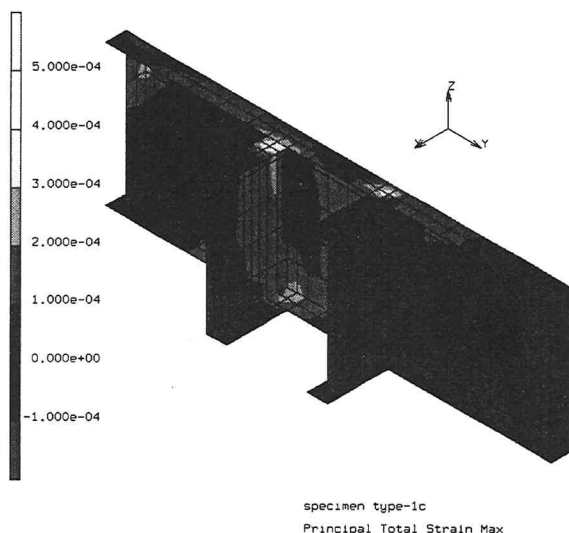


図-10 TYPE-1CのP-δ関係

次に、ひずみ性状について考察する。鋼部材に生じるひずみは図-11に示すように、剛結部内では主桁近傍にひずみが集中し、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。



(鉛直荷重＝24 tf, 水平荷重＝30 tf)

図-11 鋼要素最大主ひずみコンター

この主ひずみを平面的な分布として表わしたものが図-12で、実験結果と同じように剛結部内のひずみは比較的小さく、パネルのコーナーから対角方向への伝達経路が確認できる。

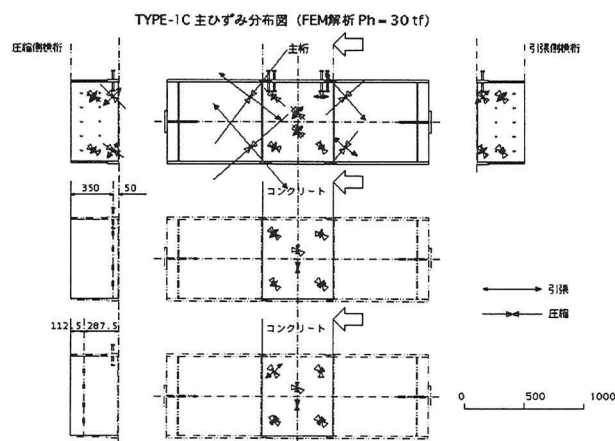


図-12 解析による主ひずみ分布

5. 剛結部設計法の考え方

5.1 設計の基本

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、剛結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、剛結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。

5.2 各要素部材の役割

剛結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剛結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、剛結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、終局時に剛結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TYPE-1Cを標準と考えた。このタイプのよう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った結果、他のタイプと比較してひびわれの発生が抑制されたものと思われる。横桁構造は剛結部で破壊を生じさせないために、フランジを剛結部内へ向けて剛性を高める構造とすることが基本になると思われる。

②横桁ウェブのスタッド

横桁ウェブのスタッドは剛結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。

スタッドによって剛結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、耐久性を保証することが妥当であると思われる。

③剛結部のコンクリート

鋼とコンクリートが一体となって挙動する剛結部では、パネルの対角方向へ圧縮、引張応力を伝える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、剛結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の役割が明確になった。

6. まとめ

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「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、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行ったものである。この一連の研究には埼玉大学工学部 町田 篤彦 教授から、多大なご指導を戴きました。ここに深謝いたします。

参考文献

- 1) 小川, 寺田: JH日本道路公団における複合構造橋梁, 橋梁と基礎, 1997, Vol. 31, No. 8, pp. 48~55
- 2) 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
- 3) 望月, 花田, 釜井, 蘇我: 川之江東JCT・Cランプ橋の鋼桁-RC橋脚剛結部の載荷実験, 土木学会第52回 年次学術講演会 講演概要集, 1997, I-A140, pp. 278~279
- 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, 1999, Vol. 45A, pp. 1431~1438