

論文 孔明き鋼板ジベルを用いた複合ラーメン橋剛結部の水平耐力

下 藺 征史*¹・彦坂 熙*²

要旨：鋼桁とコンクリート橋脚からなる複合ラーメン橋の剛結部にせん断ずれ止めとして採用される、孔明き鋼板ジベルの力学的挙動を把握するため、有限要素解析によるアプローチを行った。孔明き鋼板のモデリングには非線形リンク要素を用いることにより、ジベルのせん断ずれ挙動をリンクバネの相対変位として表現した。この簡易モデルの妥当性は、大規模地震を想定した水平加力に対する解析値と実験値の比較を鋼2主桁橋剛結部の供試体に対して行い確認した。本モデルを用いることにより、孔明き鋼板ジベルに働くせん断力分布を把握でき、剛結部全体の破壊に至るまでの過程を解析的に説明できる。

キーワード：孔明き鋼板ジベル、複合ラーメン橋、有限要素解析、リンク要素

1. はじめに

鋼桁に RC 橋脚を剛結する複合ラーメン橋は、耐震性能とライフサイクルコストに優れた合理的橋梁形式であり、近年施工例が増えている。本研究ではそれらの中でも、構造の簡素化、工期短縮、景観性の向上などを期待できる、鋼2主桁橋を上部構造として選んだ。本橋梁の剛結部は、2本の鋼主桁と横桁を RC 橋脚柱頭部にずれ止めで接合した構造であり、鋼桁から RC 橋脚への力の伝達機構を詳細に把握して設計する必要がある。

従来、鋼板とコンクリートのせん断ずれ止めには、専ら頭付きスタッドが用いられてきた。本研究では剛結部の施工性を重視し、スタッドに優る耐疲労性を有する孔明き鋼板ジベルに着目する。孔明き鋼板ジベルは、ドイツのレオンハルトら¹⁾により提案されたせん断ずれ止めであり、鋼板面内の任意方向のずれに等しく抵抗する機構は、複雑な内力伝達が行われる本剛結部に特に適している。

本研究は2次元有限要素解析に基づき、大規模地震を想定した水平外力に対する鋼2主桁橋剛結部の内力伝達機構と破壊挙動を調べるため、孔明き鋼板要素上の節点とコンクリート

要素上の節点の間に非線形リンク要素を設け、孔明き鋼板ジベルの抵抗機構のモデル化を行う。本モデルの特徴は、鋼板面内の任意方向の相対ずれ剛性を2方向の非線形リンクバネ剛性で表現し、バネの相対変位からせん断ずれ挙動をシミュレートするところにある。横桁とコンクリート、およびフランジ下面とコンクリートの接触境界面には支圧力のみを伝えるコンタクト要素を採用する。

提案モデルの妥当性を検証するため、実験結果が報告されている鋼2主桁橋剛結部の供試体を選び、鋼桁応力分布と荷重変位関係について実験および解析結果の比較を行う。さらに実験だけでは十分把握することができない剛結部の終局破壊状態に至るまでの力学挙動を、主桁鋼板、鋼板ジベルおよびコンクリートの応力分布などを通して解析的に考察する。

2. 孔明き鋼板ジベルの非線形解析

2.1 鋼桁-RC 橋脚剛結部の概念

孔明き鋼板ジベルを用いた鋼2主桁と RC 橋脚剛結部の概念を図-1に示す。2本の鋼主桁と2本の横桁が、鉄筋コンクリート柱頭部を箱状

* 1 MSC Software 株式会社 ソフトウェア事業統括部 工修 (正会員)

* 2 九州大学 工学研究院建設デザイン部門 工博 (正会員)

に囲み、横桁間には2枚の孔明き鋼板ダイヤフラムが橋軸方向に配置される。横桁と主桁の内面には、コンクリートとの一体化を目的とするスタッドやリブは使用していない。橋脚柱頭部のコンクリートは横桁上フランジの高さまで充填される。2枚のダイヤフラムは、孔明き鋼板ジベルとして鋼-コンクリート間のずれに抵抗するとともに、柱頭部コンクリートの拘束度を高める効果がある。

2.2 孔明き鋼板ジベルの2次元リンク要素

孔明き鋼板ジベルの歴史は浅く、そのずれ特性の試験法および設計法とも、確立されていないのが現状であるが、頭付きスタッドの標準試験に準じた押抜き試験や引抜き試験の結果が既述の文献¹⁾以外にいくつか報告されている^{3), 6)}。本モデルでは、孔明き鋼板ジベル1個当たりのせん断力 Q と相対ずれ s の関係を次の2パラメータ曲線による近似式で与える。

$$Q = \frac{cs}{1+cs} Q_u \quad (1)$$

ここに、 c は実験定数であり、ジベルの最大せん断耐力 Q_u を既往の実験データ文献¹⁾に基づき以下のように与える。

$$Q_u = 1.26\phi^2\sigma_c \quad (2)$$

ここに、 ϕ は孔径、 σ_c はコンクリート圧縮強度である。

本研究の2次元有限要素解析では、孔明き鋼板ジベルをせん断力 Q_x, Q_y が同時に働く2方向リンク要素でモデル化し、鋼板とコンクリートの節点間にリンク要素が挿入される。リンク要素の x, y 方向のせん断剛性は等しく $K_{sx} = K_{sy} = K_s$ と置くことができる。 K_s は各計算ステップにおける式(1)の $Q-s$ 曲線の接線剛性である。

2.3 鋼板-コンクリート間コンタクト要素

鋼2主桁-RC 橋脚剛結部内の鋼板とコンクリートの接触境界面では、摩擦力、付着せん断力、支圧力の3種の内力が伝達される。本研究

では、摩擦力と付着せん断力を無視し、支圧力のみを以下に示す2次元有限要素解析のためのコンタクト要素により考慮する。

本解析モデルでは、横桁腹板とコンクリートおよび主桁下フランジとコンクリートの各接触領域において、鋼板要素とコンクリート要素間の共通節点を独立な2節点として与え、コンタクト要素のリンクバネを各節点間に挿入する。当初この2節点の座標は一致しており、節点が離れると伝達力が働かず、接触すれば支圧力を伝達する。コンタクト要素の圧縮バネ剛性には、接触条件を満たすよう十分大きな値を与える。

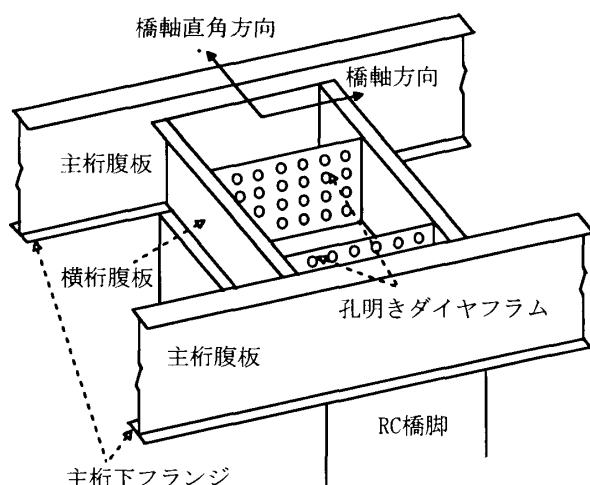


図-1 鋼2主桁-RC 橋脚剛結部の概念図

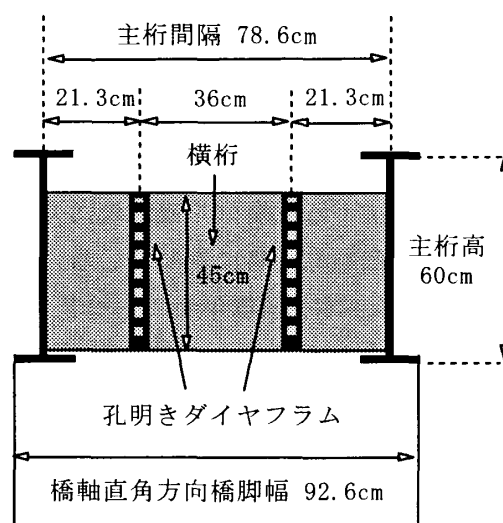


図-2 橋軸断面図

3. 剛結部供試体の構造

本研究に用いる2次元非線形有限要素解析および材料モデルの信頼性を検証するため、明橋ら^{2),3)}により載荷実験結果が報告されている2主桁桁とRC橋脚からなる複合ラーメン橋剛結部供試体を解析対象に選ぶ。供試体スケールは実構造⁷⁾の1/7モデルである。図-1の供試体立体概念図に示すように、間隔78.6cmの2主桁桁と橋軸方向に43cmの間隔を持つ2本の横桁が、鉄筋コンクリート柱頭部を箱状に囲んでおり、主桁および横桁のウェブ高はそれぞれ60cm, 45cmである。図-2は剛結部の橋軸断面図、図-3は橋軸直角断面図で、剛結部内における主桁、横桁の位置関係、配筋状況、孔明き鋼板の配置とその穿孔状況（孔径は全て30mm）を示す。2枚の孔明き鋼板ダイヤフラムは1枚につき8×8個のジベルが格子状に穿孔されており、鋼板厚は6mmである。

4. 剛結部解析モデル

本研究では実験時と同様に、図-3の天地を逆にした供試体を解析に用いた。図-4に2次元有限要素メッシュを示す。鋼主桁ウェブ、孔明き鋼板、コンクリート橋脚には弾塑性平面応力要素を用い、主桁の上下フランジ、横桁、鉄筋は何れもパイリニア弾塑性棒要素でモデル化した。コンクリートには、最大主応力が引張強度を越えると主応力直交方向にひび割れが発生し、ひび割れ垂直方向の要素剛性が低下する分布ひび割れモデルを採用する⁴⁾。

主桁ウェブと横桁で囲まれた柱頭部コンクリートは3次元拘束状態にあるが、平面応力状態に基づく本解析では主桁ウェブによる拘束を考慮できないため、横桁による2次元拘束効果のみが考慮される。ダイヤフラム要素上の節点は、主桁鋼板ウェブに設定された節点と座標が一致し重なることになるが、2つの節点番号を変えて独立の自由度を与え、コンクリート要素上の節点とそれぞれリンク要素で結ぶ。ただ

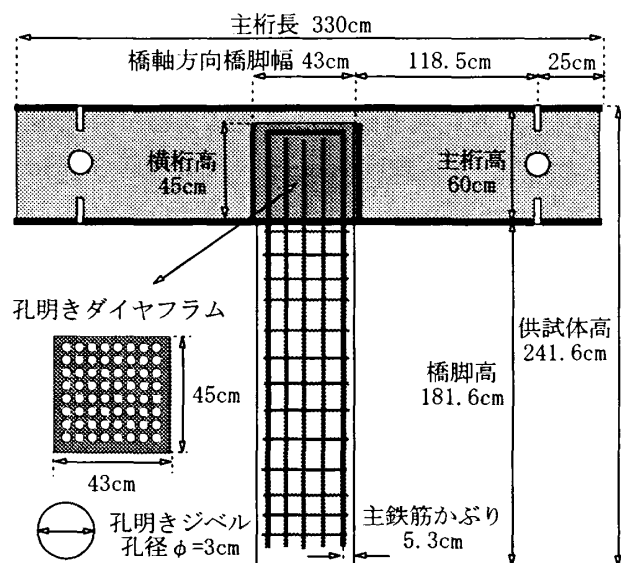


図-3 橋軸直角断面図

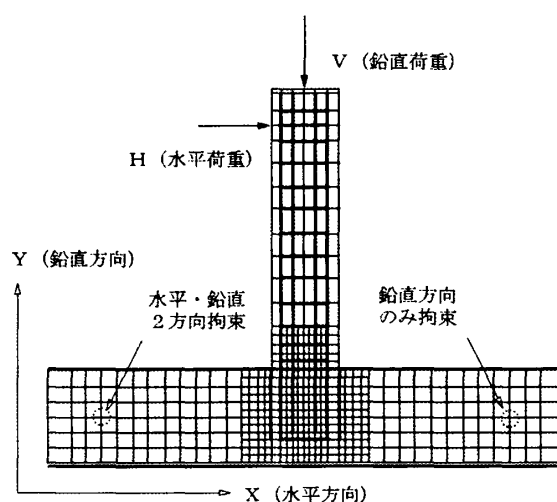


図-4 2次元有限要素モデル

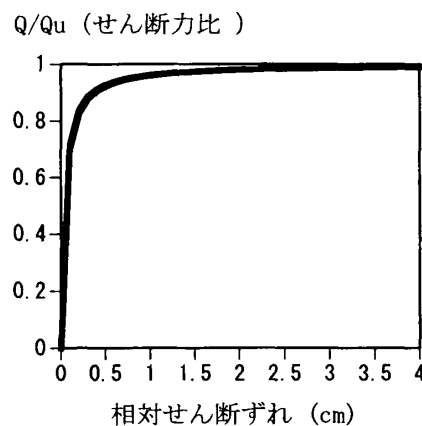


図-5 せん断力とせん断すべりの関係

しダイヤフラム端部は横桁と同じ節点番号を与え、横桁と剛結する。コンクリート柱頭部に埋設される孔明き鋼板は穿孔による材料欠損を考慮し、元の鋼板厚 6mm を換算板厚 3.8mm に変更した。

材料は、鋼主桁と横桁が SS400、鉄筋が SD345、コンクリートの圧縮強度が 36.6 MPa、引張強度が 2.1 MPa であり、解析に必要な他の材料定数は、道路橋示方書およびコンクリート標準示方書による公称値を採用した。

孔明き鋼板とコンクリートの節点間には、2 方向非線形せん断リンクバネ要素を挿入し、主鉄筋とコンクリートの節点間には、鉄筋とコンクリート間の付着すべりを考慮した付着リンク要素を、鋼桁とコンクリートの境界節点間には、接触による支圧力を考慮したコンタクト要素をそれぞれ挿入する。

ジベルは、孔径 $\phi=30\text{mm}$ 、コンクリート圧縮強度 $\sigma_c=36.6\text{MPa}$ のとき、式(2)より最大せん断力 $Q_u=41.5\text{kN}$ を得る。また、ジベル初期剛性を K_{st} とすれば、孔径 ϕ と鋼板厚 $t=6\text{mm}$ の積に初期剛性は比例すると仮定した実験³⁾から、 $K_{st}=200\text{kN/mm}$ となる。式(1)の実験定数 $c(=3K_{st}/2Q_u)=7.99/\text{mm}$ を式(2)に代入すれば図-5に示す Q/Q_u と s の関係を得る。

拘束条件は、実験でピン支持された図-4の点線の円で示す2箇所について、左点で水平・鉛直の2方向、右点で鉛直方向変位を固定する。

5. 解析結果と考察

5.1 主桁応力分布

鉛直荷重 $V=225\text{kN}$ のみおよび水平荷重 $H=49\text{kN}$ のみを載荷した場合の、各主桁鋼板断面の直応力とせん断応力分布を図-6に示す。鉛直荷重 V のみの載荷では、直応力、せん断応力の解析値と実験値は共に良く一致している。水平荷重 H のみの載荷では、剛結部の鋼主桁の応力分布が複雑になり、特に断面 (O-O) のせん断応力分布に関して解析と実験値に差が生じている。

5.2 荷重-変位曲線

図-7に荷重係数 λ の増加に伴う荷重 H の載荷点水平変位の変化を示す。実験は、一定の鉛直荷重 $V=225\text{kN}$ のもとに、漸増交番水平荷重を加える方法が採られているが、本解析では、水平荷重 $H=\lambda P$ (P は設計荷重で $P=78.4\text{kN}$ 、 λ は荷重係数) を荷重増分法により単調漸増させ、解析で得た荷重-変位曲線を漸増交番載荷実験で得た履歴曲線の包絡線と比較した。

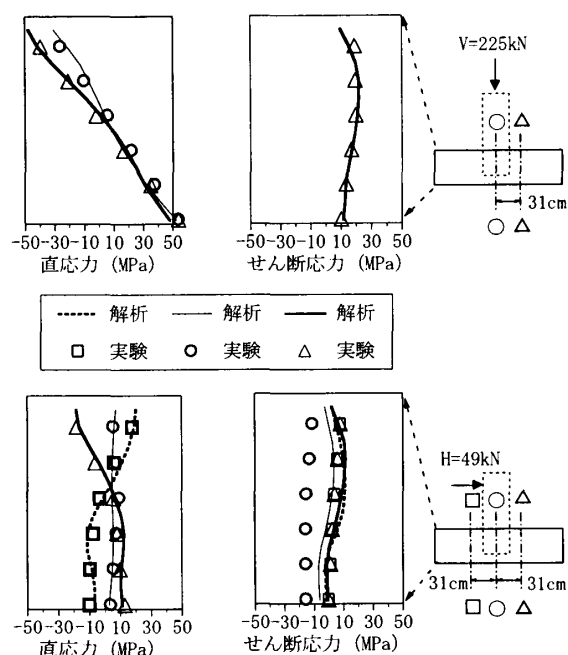


図-6 主桁鋼板直応力およびせん断応力分

荷重係数 λ ($\lambda=1.0$ のとき $P=78.4\text{kN}$)

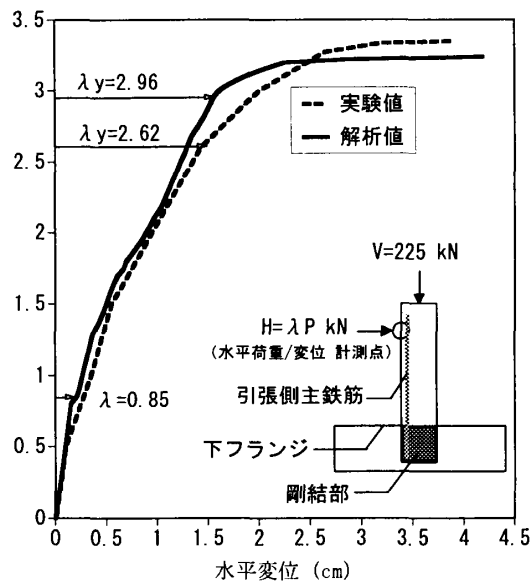


図-7 荷重-変位曲線

図中に記した荷重係数 λ_y は、各曲線における主鉄筋初期降伏（実測降伏強度 $\sigma_y=337\text{MPa}$ ）時の λ 値であり、解析は実験に比べ降伏が遅れている。実験値は正負交番荷重に対する変位の包絡線であり、解析値は単調漸増荷重に対する変位であることが遅れの一因として挙げられる。また、解析ではリンク要素による主鉄筋の付着すべりを考慮しているが、フーチングからの鉄筋拔出しが適切にモデル化されていないことも、実験結果との相違の要因になり得ると思われる。

5.3 孔明き鋼板ジベルのせん断力分布

孔明きダイヤフラムは図-1のように、剛結部内に2枚配置され、孔径3cmの孔が64個格子状に穿孔されており、本解析でも同数のリンク要素で孔明き鋼板をモデル化した。図-8は設計荷重（ $\lambda=1.0$ ）時と主鉄筋初期降伏（ $\lambda=2.96$ ）時における、孔明き鋼板ジベルの水平および鉛直方向せん断力 Q_x, Q_y の解析値を示したものである。 Q_x および Q_y の符号は、鋼板に対し右向きおよび上向きに力が作用する場合をそれぞれ正とする。

設計荷重（ $\lambda=1.0$ ）時の孔明きダイヤフラムは、その中央からやや上寄りの位置を中心として面内回転モーメントを受けている。設計荷重（ $\lambda=1.0$ ）時の水平せん断力 Q_x は、8列目（◇8）の値が最上段および最下段でそれぞれ左右逆向きの最大値をとる。鉛直せん断力 Q_y は全列においてほぼ一定値を示し、中央列付近では力を受けない。主鉄筋初期降伏（ $\lambda=2.96$ ）時の水平せん断力 Q_y は、左列（□1, ○3）上段ジベルに働く力が急増しており、この位置に入る水平ひび割れの影響が顕著に現れている。この水平ひび割れの発生は、次節5.4の図-9に示すコンクリートの応力分布からも確認できる。

ダイヤフラムには格子状に64個のジベルが配置されているものの、その中央部付近のジベルにはほとんどせん断力が働かない。なお、最大荷重（ $\lambda=3.5$ ）時においても、全ての孔明き

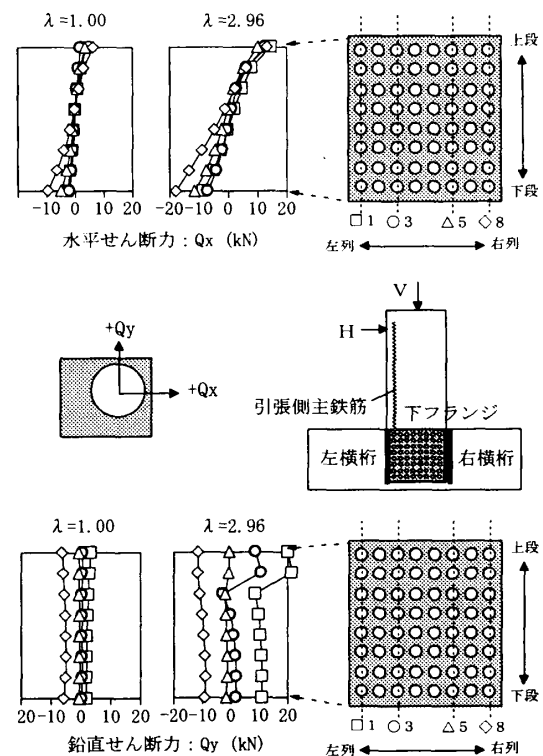


図-8 鋼板ジベル2方向せん断力分布

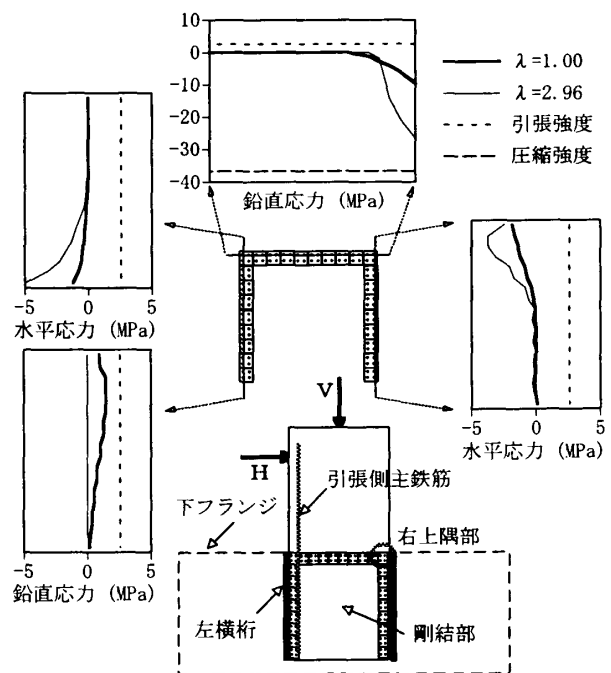


図-9 コンクリート直応力分布

鋼板ジベルの作用せん断力はその最大耐力 $Q_u=41.5\text{kN}$ には達していなかった。

5.4 コンクリートの直応力分布

RC 橋脚と鋼桁間の内力伝達に関しては、横桁および下フランジを介してコンクリート柱頭部に伝達される支圧力の影響が非常に大きい。図-9は横桁および下フランジに隣接したコンクリート要素の積分点に働く水平および鉛直方向直応力分布を表している。剛結部の右上隅部には、鋼桁下フランジの支圧による大きな圧縮力が働く。左右のコンクリートに生じる水平直応力は、横桁ウェブの支圧によるものである。左横桁に接するコンクリートの鉛直直応力は、橋脚の曲げに伴う引張応力であり、設計荷重 ($\lambda=1.0$) 時には引張強度以下であるが、荷重の増加により、主鉄筋降伏以前に引張強度に達して水平ひび割れが発生する。このひび割れのため、主鉄筋降伏 ($\lambda=2.96$) 時の鉛直直応力の解析値は0となっている。

6. まとめ

2主鉄桁とRC橋脚からなる複合ラーメン橋を対象として、材料および孔明き鋼板ジベルの非線形特性を考慮した2次元非線形有限要素解析による剛結部応力伝達機構の解析結果を述べた。

孔明き鋼板ジベルを用いた2主鉄桁とRC橋脚の剛結部は、水平載荷の実験、解析ともに鋼主桁およびRC橋脚部に先行して破壊せず、複合ラーメン橋を骨組構造とみなして設計するのに十分な剛性と終局強度を有する。また、鋼主桁下フランジ直下のコンクリートには、大きな支圧力の集中が見られることから、支圧補強鉄筋の配置とコンクリート横拘束等の補強対策が必要である。

孔明き鋼板ジベルのせん断力分布から得られた知見により、せん断力は鋼板ダイヤフラム外縁周辺部のジベルに集中的に働くため、

中央部を穿孔する効果は小さいことが分かる。

本研究で提案した2次元非線形有限要素解析により、本来3元解析を必要とする剛結部における鋼板とコンクリート間の支圧力分布、孔明き鋼板ダイヤフラムによる内力伝達機構、およびコンクリート損傷に伴う伝達力の変化を比較的容易に把握できる。

参考文献

- 1) Fritz Leonhardt et al., Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton- und Stahlbetonbau, 12/1987, pp.325-331
- 2) 明橋克良, 渡辺将之, ずれ止め形式に孔明鋼板を用いた複合ラーメン剛結部の交番繰返載荷実験, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集 I -A148, pp.296-297, 1999.9
- 3) 永田淳, 渡辺将之, 明橋克良, コンクリートの打設方向を考慮した孔明き鋼板引抜試験, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集 I -A149, pp.298-299, 1999.9
- 4) Yuqing Liu, 彦坂熙, Ling Huang, スタッドの非線形性を考慮した2主鋼鉄桁と鉄筋コンクリート橋脚の剛結部の有限要素解析, 土木学会応用力学論文 Vol.1, pp.481-488, 1998.8
- 5) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説, 1998.12
- 6) 平陽兵, 天野玲子, 大塚一雄, 孔あき鋼板ジベルの疲労特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1503-1508, 1997
- 7) Hiroshi Hikosaka, Katsuyoshi Akehashi, Yasutaka Sasaki, Kiyotaka Agawa, Construction of Steel Girder Bridge Rigidly Connected to Concrete Piers with Perfobond Plates, Proc. 2nd Intl. Conf. on Current and Future Trends in Bridge Design, Construction and Maintenance, pp.166-174, 2001