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荷力

下薗 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.

$$Q = \frac{cs}{1 + cs} Q_u \tag{1}$$

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.

$$Q_u = 1.26\phi^2 \sigma_c \tag{2}$$

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



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 主鈑桁と 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 主鈑桁と橋軸方向に 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 30 mm)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 筋は何れもバ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









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 ϕ =30mm, コンクリート圧縮 強度 σ_c =36.6MPaのとき,式(2)より最大せん断 カ Q_u =41.5kN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=6mmの積に 初期剛性は比例すると仮定した実験³⁾から, K_{st} =200kN/mmとなる.式(1)の実験定数 $c(=3K_{st}/2Q_u)$ =7.99/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 =225kN のみおよび水平荷重 H =49kN 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(-)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 = 225kN 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 = 78.4kN, 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 (=1.0 のときP=78.4 kN)



図中に記した荷重係数 , は,各曲線におけ る主鉄筋初期降伏(実測降伏強度 ,=337MPa) 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 の鉄筋抜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(λ =1.0)時と主鉄筋初期降伏 (λ =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(λ =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 (λ =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(λ =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(λ=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



鋼板ジベルの作用せん断力はその最大耐力 *Q*_u=41.5kN 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 (λ = 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(λ =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 主鈑桁と 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主鈑桁と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

- Fritz Leonhardt et al., Neues, vorteilhaftes Verbundmittel fur 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 -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 -A149, pp.298-299,1999.9
- Yuqing Liu, 彦坂熙, Ling Huang, スタッドの非線形性を考慮した2主鋼鈑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,pp1503-1508,1997
- 7) Hiroshi Hikosaka, Katsuyoshi Akehashi, Yasutaka Sasaki, Kiyotaka Agawa, Construction of Steel Girder Bridge Rigidly Connected to Concrete Piers with Perfobond Plates, Proc. 2nd Intnl. Conf. on Current and Future Trends in Bridge Design, Construction and Maintenance, pp.166-174, 2001