複合ラーメン橋脚隅角部の曲げ応力伝達に関する３次元 FEM 解析

日本工営（株）　正会員　○友田　富雄
九州大学大学院　正会員　　日野　伸一，山口　浩平
九州大学大学院　学生会員　郭　勝華

１．はじめに

都市部の道路橋計画では，維持管理の軽減および耐震性能の向上，また桁下空間の有効利用の観点から，少主桁橋とRCラーメン橋脚が一体となった複合ラーメン橋が有効である．著者らは，これまでに図-1 に示すような新しいタイプの複合ラーメン橋脚を提案し，経済性や施工性を追求したSRC横ばりのせん断耐荷試験[1)]を行ってきた．また，SRC横ばりの鉄骨と一体となった，鋼主桁を介してラーメン橋脚隅角部に伝わる曲げモーメントに着目して，L形供試体による載荷試験[2)]で隅角部の耐荷挙動についても検討した．

そこで本研究では，橋軸直角方向の地震動が作用した複合ラーメン橋脚に着目し，隅角部の応力伝達機構を３次元 FEM 解析によって明らかにする．

２．FEM 解析モデル

隅角部の応力状態を把握するため，図-2 に示す３次元非線形解析を行った．FEM解析条件を表-1 に示す．コンクリートと鉄筋の材料特性は，載荷試験[2)]の値を使用している．

解析モデルは，鋼Ｉ桁により隅角部の補強鉄筋がないタイプ（以下，鋼板なし）と，その代替構造で横ばり－柱間の力を伝達させる，孔あき鋼板を設けたタイプ（以下，鋼板あり）の２種類を作成した．隅角部の構造詳細を，図-3 に示す．

孔あき鋼板ジベルのモデル化は，既往の研究[3)]を参考にして，３方向の線形バネを配置した．

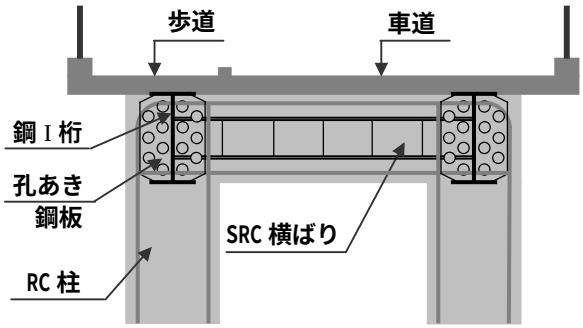
３．解析および考察

Ｌ形供試体に，閉じる方向の曲げモーメントが作用した場合に着目し，FEM 解析と載荷試験の結果を比較する．

(1) 全体の変形挙動

各部材の荷重一覧を表-2 に，荷重と載荷方向相対変位の関係を図-4 に示す．隅角部の計算値は，道路橋示方書に準じて，鋼板なしではコンクリートの割裂抵抗を，鋼板ありでは孔あき鋼板による引張抵抗を累加した値である．

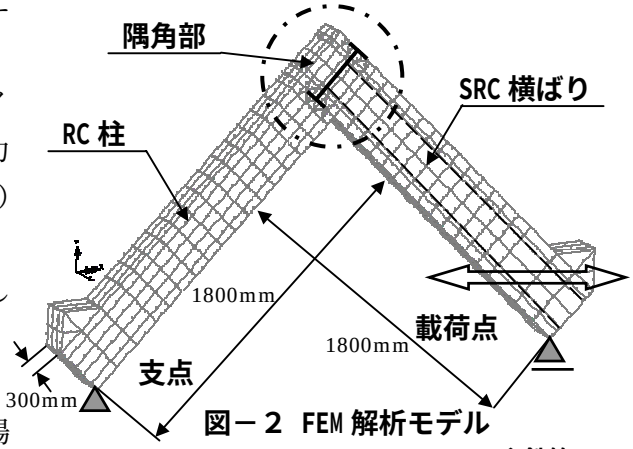
鋼板なしの FEM 解析と試験値の隅角部終局荷重は，ほぼ一致している．しかし，柱や横ばりの主鉄筋は，解析では降伏



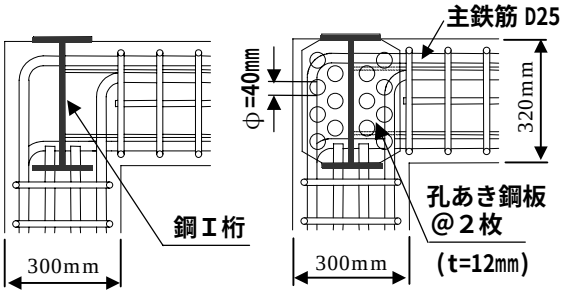
図－１　複合ラーメン橋脚の概念図

表－１　FEM 解析条件

使用プログラム		LUSAS ver. 13.5
要素	コンクリート	3D Solid Continuum Elements
	鉄　筋	Bar Elements
	鉄　骨	Thick Shell Elements
応力－ひずみ	コンクリート	マルチリニア型の曲線
	鉄筋・鉄骨	バイリニア型の曲線
構成則	鉄筋・鉄骨	von Mises の降伏条件



図－２ FEM 解析モデル



(a) 鋼板なし　(b) 鋼板あり

図－３　隅角部の構造詳細

キーワード　複合ラーメン橋脚，隅角部，孔あき鋼板，応力伝達機構，FEM 解析
連絡先　〒102-8539　東京都千代田麹町 5-4　日本工営株式会社 首都圏事業部 交通運輸部 ＴＥＬ03-3238-8347

応力に達していない．また荷重－相対変位曲線においても，主鉄筋降伏の手前から両者にずれが見られる．これは，荷重載荷ステップによる相違だと考えられる．

鋼板ありの載荷試験では，柱のコンクリートが圧縮破壊して終局状態となったが，FEM 解析でも同様な結果となった．荷重－相対変位曲線は，荷重 120kN 以下では一致しているが，終局荷重は解析値が 16%高くなる．これは，ジベルのモデル化などの影響と考えられる．

(2) 隅角部の応力状態

鋼板ありの隅角部に配置された，孔あき鋼板の応力分布を図-5 に示す．

載荷試験では，荷重の増加に比例して，隅角部の対角方向に圧縮と引張方向のひずみが計測されたが，FEM解析でも同じ結果となった．また，鋼板のひずみを比較すると，設計荷重(P_d)では解析値と試験値はよく一致しているが，柱鉄筋の降伏荷重(P_y)では，解析値が 3 割ほど低くなっている．解析モデルでは，コンクリートと鋼I桁の境界節点が共有しており，コンクリートにひび割れが発生するまで応力が伝達する．そのため，解析値の発生ひずみは，試験値より小さくなったと判断される．

また鋼板なしでは，終局時に隅角部の変形にともなう鋼 I 桁の曲げ変形が，実験および解析で確認されている．

(3) 隅角部の応力伝達機構

鋼板なしの FEM 解析結果より，隅角部に閉じる方向の曲げモーメントが作用すると，コンクリートの割裂抵抗と鋼 I 桁の変形抵抗によって応力が伝達する．一方，鋼板ありでは，前述の割裂抵抗と孔あき鋼板を介して隅角部に形成される圧縮ストラットと引張弦材によって，横ばり－柱間の応力が伝達する．

4．まとめ

(1) 隅角部に配置した孔あき鋼板ジベルは，複合ラーメン橋脚の面内曲げモーメントに対する耐荷力を上昇させ，SRC 横ばりと RC 柱の応力伝達に有効であることが，実験および解析により確認できた．

(2) 鋼板なしでは，終局時に鋼 I 桁が曲げ変形しており，下フランジや腹板が隅角部の変形に抵抗することが FEM 解析で確認できた．これより，鋼 I 桁は隅角部の曲げ耐力に影響を及ぼすと考えられる．

(3) 鋼板ありでは，孔あき鋼板を介した隅角部の応力伝達が，載荷試験と同様に解析上でも確認できた．

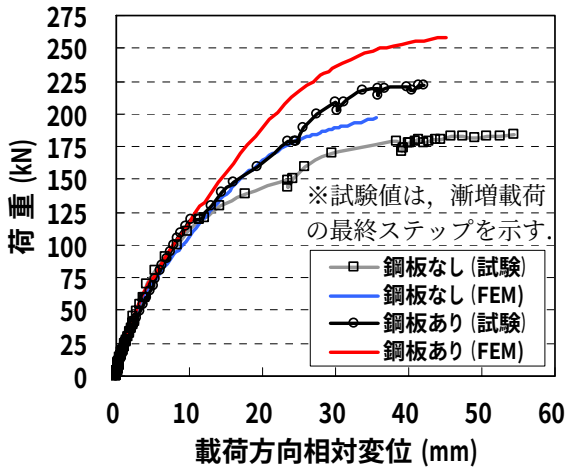
表－２　載荷試験値と FEM 解析値（閉じる方向）

（単位：kN）

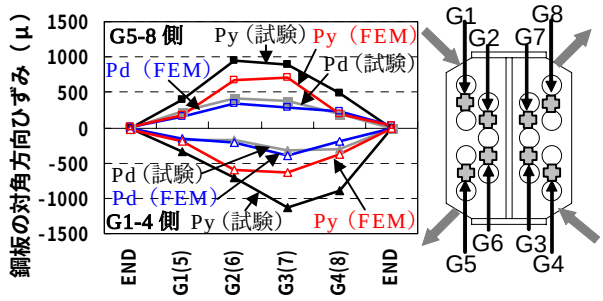
項目			ひび割れ Pcr	設計 Pd*	降伏 Py**	終局 Pmax
鋼板なし	柱	計算値	22(1.57)	64(0.94)	187(1.12)	187(1.03)
		試験値	14(1.00)	68(1.00)	167(1.00)	181(1.00)
		解析値	21(1.50)	96(1.41)	-	-
	梁	計算値	24(1.50)	67(1.14)	194(1.13)	-
		試験値	16(1.00)	59(1.00)	172(1.00)	-
		解析値	21(1.31)	110(1.86)	-	-
	隅角部	計算値	-	-	-	52(0.29)
		試験値	-	-	-	181(1.00)
		解析値	-	-	-	197(1.09)
鋼板あり	柱	計算値	22(1.83)	64(0.93)	187(0.94)	187(0.84)
		試験値	12(1.00)	69(1.00)	199(1.00)	222(1.00)
		解析値	22(1.83)	92(1.33)	220(1.11)	258(1.16)
	梁	計算値	24(1.60)	67(0.96)	194(0.96)	-
		試験値	15(1.00)	70(1.00)	203(1.00)	-
		解析値	22(1.47)	110(1.57)	248(1.22)	-
	隅角部	計算値	-	-	-	233
		試験値	-	-	-	222以上
		解析値	-	-	-	258以上

＊鉄筋の許容応力度 σ sa=140 N/mm²

＊＊鉄筋の降伏応力度 σ sy=407 N/mm²



図－４　荷重－載荷方向相対変位（閉じる方向）



図－５　孔あき鋼板の応力状態（閉じる方向）

参考文献　1)郭，日野，山口，友田，片山：複合ラーメン橋脚に用いる SRC 横ばりのせん断耐荷挙動に関する実験的研究，平成 16 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.153-154，2005.3

2)友田，日野，山口，前川：鋼 I 主桁が貫通する RC ラーメン橋脚隅角部の応力伝達機構に関する実験的研究，土木学会第 59 回年次学術講演会概要集，pp.1395-1396，2004.9

3)佐々木，平井，明橋：鋼・コンクリート複合ラーメン橋の剛結部に関する実験的研究，構造工学論文集 Vol.44A，pp.1447-1454，1998.3