3 次元 FEM 解析によるフレキシブル RC 橋脚実験の再現性の検討

九州大学大学院　学生会員　○伊藤 耀　九州大学大学院　フェロー　大塚 久哲　九州大学大学院　学生会員　高 文君
九州大学大学院　正会員　梶田　幸秀　九州大学大学院　正会員　崔　準祜

１．目的

本研究の対象としているフレキシブル RC 橋脚は，ラーメン橋脚に薄い耐震壁を挿入した橋脚である．当該橋脚の橋軸直角方向の復元力特性を適切に評価するため，実橋脚の約 1/10 の模型供試体を作製し，一定軸力下における正負交番載荷実験を行った[1]．本稿では，その実験結果に対して，3 次元非線形有限要素解析を行い，最大耐力，ひび割れ性状，鉄筋降伏などについて解析モデルによる実験の再現性検討した．

２．供試体概要及び解析概要

実験時の供試体ケースを**表-1** に示す．鉄筋とコンクリートの材料特性に関しては参考文献 1)に表記している．本実験では軸力比を 0.05 とし，一定軸力は 156kN と設定している．水平載荷方向は水平ジャッキの押しを正，引きを負として正負交番漸増載荷を行った．

図-1 に実験供試体，**図-2** に解析モデル図を示す．FEM 解析ソフトにはコンクリート系構造を対象とした FINAL を利用した．コンクリートを solid 要素とし，梁鉄筋，柱主鉄筋，壁縦方向鉄筋をトラス要素とし，柱帯鉄筋，壁横方向鉄筋を埋め込み要素としてモデル化を行った．軸力は実験時と同様に一定軸力が四点分布となるように，四節点にそれぞれ 39kN ずつ荷重を加えている．また，3 次元解析において 1 点載荷によるコンクリートの局所的な破壊を防ぐために供試体両柱頂部に載荷板を設置し，左右の載荷板の間 PC 鋼棒をモデル化した．

コンクリートと鉄筋の材料構成則を以下に示す．材料特性は実験における材料試験で得られた値を用いた．コンクリートの圧縮応力とひずみの関係及び圧縮軟化特性は修正 Ahmadモデルを用いた．コンクリートの引張応力とひずみの関係はテンションスティフニング特性を考慮し，出雲らのモデル（c=0.6）を用いた．コンクリートのひび割れ後のせん断伝達特性はAl-Mahaidiモデルとした．

３．解析結果

3.1. 荷重-変位曲線

各供試体について有限要素解析により得られた荷重－変位曲線と実験値を比較した結果を**図-3～図-6** に示す．実験では，すべての供試体においてコンクリートのひび割れの発生により剛性が若干低下し，その後，柱主鉄筋，壁縦方向鉄筋といった軸方向の鉄筋降伏により剛性がさらに大

表-1　供試体ケース

供試体No.	鉄筋径及び配筋間隔（鉄筋比（%））柱主鉄筋	柱帯鉄筋	壁縦筋	壁横筋
K1	6-D16，2-D10 (2.67)	D6ctc120 (0.26)	5-D10 (1.19)	D10ctc120 (0.99)
K2		D6ctc40 (0.79)		D13ctc120 (1.76)
K3		D6ctc120 (0.26)		D13ctc60 (3.52)
K4		D6ctc40 (0.79)		D13ctc60 (3.52)

図-1　実験供試体

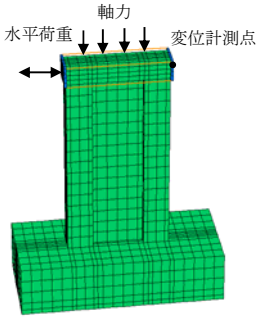

図-2　解析モデル図

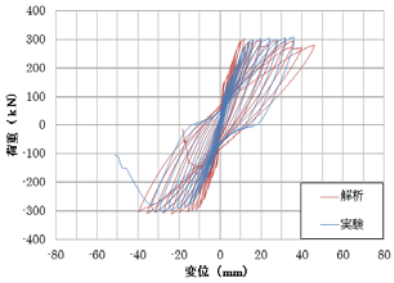

図-3　供試体 No.K1 の荷重変位曲線

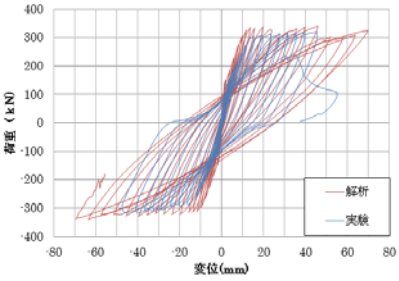

図-4　供試体No.K2の荷重変位曲線

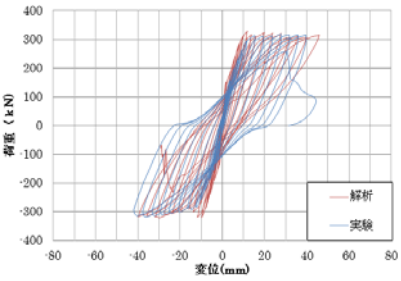

図-5　供試体No.K3の荷重変位曲線

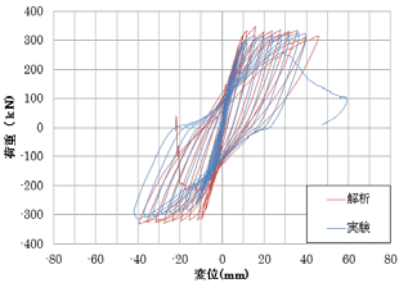

図-6　供試体No.K4の荷重変位曲線

きく低下した．3 次元有限要素解析においてもひび割れや軸方向鉄筋降伏により剛性が低下する現象が再現できた．また，**表-2** に各供試体の剛性と最大耐力に関して実験値と解析値とを比較した結果を示す．ここで，初期剛性をひび割れ発生時までの剛性，二次剛性をひび割れ発生後から軸方向鉄筋降伏までの剛性と定義する．すべての供試体において初期剛性値，二次剛性値ともに解析値が実験値を上回る結果となったが，最大耐力は概ね一致していることが確認された．

3.2. ひび割れ性状

図-7, 図-8 に供試体 No.K1 におけるひび割れ状況を示す．解析では荷重 103.9kN において柱基部に水平曲げひび割れと壁部分に斜めせん断ひび割れの発生が確認された．実験時にも荷重 110kN において両方のひび割れ発生が確認されており，ひび割れ発生事象を良好に再現できているといえる．また，実験では終局状態において圧縮側柱基部のせん断圧壊に伴い壁部分がせん断破壊し急激な耐力低下が生じたが，解析でも柱基部と壁部分全体でのひび割れやコンクリート軟化が目立つため，終局時のひび割れ性状を概ね再現できている．No.K2～No.K4 についても同様の傾向が見られた．

3.3. 鉄筋降伏状況

供試体 No.K1 における鉄筋降伏状況を**図-9**，各鉄筋の降伏時の載荷荷重を**表-3** に示す．実験と解析の鉄筋降伏荷重を比較すると，柱主鉄筋については，すべての供試体で解析結果が実験結果を上回っているが概ね再現できている．壁縦方向鉄筋については，供試体 No.K1，No.K3 では鉄筋降伏荷重をやや過小評価し，供試体 No.K2，No.K4 ではやや過大評価しているが，概ね鉄筋降伏荷重を評価できていることが分かる．また，柱帯鉄筋と壁横方向鉄筋については，実験では鉄筋降伏が確認されていない箇所において，解析では鉄筋降伏が確認されるなど，解析と実験との結果に大きな差異が生じている．このことから，解析では，柱帯鉄筋，壁横方向鉄筋のような横方向鉄筋の降伏状態の再現性は低いものの，柱主鉄筋，壁縦方向鉄筋のような軸方向鉄筋の降伏荷重を概ね再現できていることがわかる．横方向鉄筋降伏の再現度が低い理由として，横方向鉄筋を埋め込み鉄筋としてモデル化を行ったため，トラス要素としてモデル化を行った軸方向鉄筋よりも精度が悪くなったと考えられる．

4．まとめ

本稿では，フレキシブル橋脚の交番載荷実験に対して非線形有限要素解析を行い，解析モデルの妥当性を検討した．

荷重－変位曲線の比較では，初期剛性値，二次剛性値ともに解析値が実験値を上回ったが，最大耐力は概ね一致している．また，横方向鉄筋に関しては再現性が低いものの，ひび割れ発生荷重や軸方向鉄筋降伏荷重など，剛性が変化する点を解析上で概ね捉えることができている．

参考文献

1)　高文君，大塚久哲，河邉修作，今村壮宏：軸力と交番載荷を受ける I 型断面フレキシブル RC 橋脚の復元力特性とエネルギー吸収に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35, No.2, pp.397-402, 2013.

表-2　剛性と最大耐力の比較

(a) 供試体 No.K1

項目	初期剛性 (kN/mm)	二次剛性 (kN/mm)	最大荷重 (kN)
解析	75.8	18.49	302
実験	51.89	13.73	308
解析/実験	1.46	1.35	0.98

(b) 供試体 No.K2

項目	初期剛性 (kN/mm)	二次剛性 (kN/mm)	最大荷重 (kN)
解析	75.95	17.86	339
実験	57.99	14.08	321
解析/実験	1.31	1.27	1.06

(c) 供試体 No.K3

項目	初期剛性 (kN/mm)	二次剛性 (kN/mm)	最大荷重 (kN)
解析	77.08	20.21	327
実験	59.81	18.72	318
解析/実験	1.29	1.08	1.03

(d) 供試体 No.K4

項目	初期剛性 (kN/mm)	二次剛性 (kN/mm)	最大荷重 (kN)
解析	75.05	21.08	347
実験	65.35	18.31	324.5
解析/実験	1.15	1.15	1.07

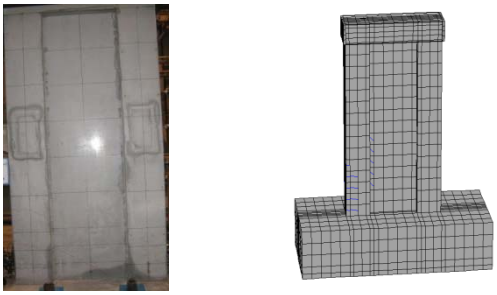

図-7　供試体No.K1における壁部分のひび割れ発生状

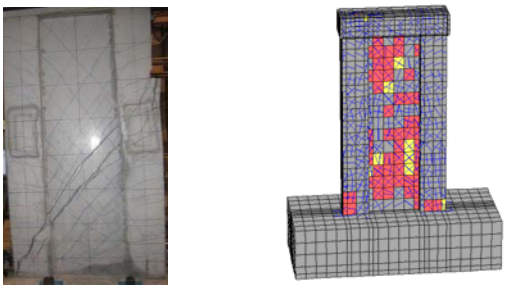

図-8　供試体No.K1における終局時のひび割れ状況

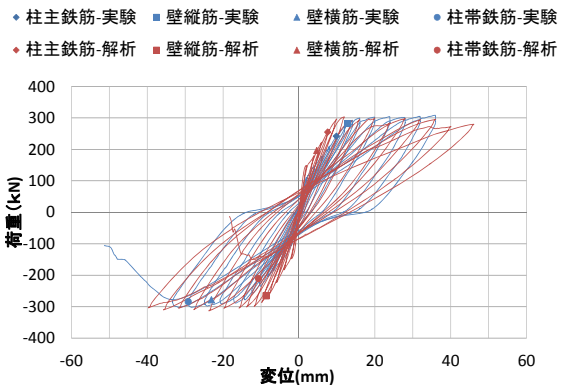

図-9　供試体No.K1における鉄筋降伏状況

表-3　各供試体の鉄筋降伏時荷重

供試体 No.		鉄筋降伏値(kN)			
		柱主鉄筋	壁縦筋	柱帯鉄筋	壁横筋
K1	実験	241.75	281.75	269.00	278.25
	解析	254.75	265.27	210.88	196.00
K2	実験	237.50	283.25	—	—
	解析	272.07	298.54	214.96	219.59
K3	実験	235.50	287.50	283.25	—
	解析	267.06	286.63	157.17	206.75
K4	実験	254.50	278.75	—	—
	解析	258.04	330.22	196.25	233.86