フレキシブルRC橋脚交番載荷実験に対する 3次元有限要素解析の再現性

大塚 久哲1·伊藤 耀2·高 文君3·梶田 幸秀4·崔 準祜5

¹フェロー会員 九州大学大学院工学研究院 社会基盤部門(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744) E-mail:otsuka@doc.kyushu-u.ac.jp'

2.3学生会員 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

²E-mail: ito@doc.kyushu-u.ac.jp

³E-mail: gao@doc.kyushu-u.ac.jp

4.5正会員 九州大学大学院工学研究院 社会基盤部門(〒819-0395福岡県福岡市西区元岡744)

⁴E-mail:ykajita@doc.kyushu-u.ac.jp

⁵E-mail:choi @doc.kyushu-u.ac.jp

本研究の対象としているフレキシブルRC橋脚は、山間地の高速道路高橋脚などに用いられ、橋軸方向にフレキシブルで橋軸直角方向に耐震壁を有する橋脚である。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。本論文では、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、最大耐力やひび割れ性状を概ね再現できるということが確認された。

Key Words: flexible RC pier, cyclic loading, finite element analysis, restoring force characteristic

1. はじめに

山間地の高速道路高橋脚などに用いられ、橋軸方向にフレキシブルで橋軸直角方向に耐震壁を有するフレキシブルRC橋脚は、橋軸直角方向地震力に対して両側柱と耐震壁により地震動のエネルギーを吸収することができる。既往の研究では¹⁾、フレキシブルRC橋脚供試体の水平耐力と破壊メカニズムを知るため、当該橋脚を模擬した縮小模型供試体を作製し、橋軸直角方向に水平単調漸増載荷を行い、各供試体の破壊性状について観察・計測を行った。また、引き続き、一定軸力下における正負交番載荷実験を行い、横方向鉄筋の補強効果を明らかにすると共に、エネルギー吸収量、等価減衰定数、最大塑性率を定量的に評価した²⁾。

また、単調載荷におけるフレキシブルRC橋脚の橋軸 直角方向水平載荷実験の結果を対象に、2次元・3次元非 線形有限要素解析を行い、解析結果と実験結果とを比較 検討し、解析モデルおよび材料構成則の妥当性や実験事 象を解明した³. その結果、鉄筋全体を埋め込み要素と 考えた2次元の解析ケースが最も実験の再現性が良かっ た、実験では載荷ジャッキと供試体は200mm×200mmの 面接触であったが、3次元解析では、載荷点を1点として解析を行ったため、載荷点においてコンクリートの局所的な破壊がみられており、3次元解析モデルについて再検討しなければならないことがわかった.

そこで本研究では、一定軸力下における正負交番載荷 実験の結果を対象に、3次元非線形有限要素解析を行い、 軸力と交番載荷を受ける状態の実験事象を再現した.後 述するが、荷重載荷部のモデル化については、文献3の モデル化から変更を行っている.

2. 実験概要

(1) 実験ケース

表-1に実験ケースを示す.供試体No.K1を標準断面とし、供試体No.K2は柱の帯鉄筋を3倍、壁横方向鉄筋を約2倍に増加させた供試体、供試体No.K3は壁横方向鉄筋のみを約4倍に増加させた供試体、供試体No.K4は柱の帯鉄筋を3倍、壁横方向鉄筋を約4倍に増加させた供試体である.壁横方向鉄筋は供試体No.K2~No.K4ではNo.K1と比べて鉄筋径を変えており、鉄筋比は必ずしも整数値となっていない.

表-1 実験ケース

供試体	鉄筋径及び配筋間隔(鉄筋比(%))			
No.	柱主鉄筋	柱帯鉄筋	壁縦筋	壁横筋
K1		D6ctc120 (0.26)		D10ctc120 (0.99)
K2	6-D16, 2-D10 (2.67)	D6ctc40 (0.79)	5-D10 (1.19)	D13ctc120 (1.76)
К3		D6ctc120 (0.26)		D13ctc60 (3.52)
K4		D6ctc40 (0.79)		D13ctc60 (3.52)

表-2 各鉄筋の材料特性

鉄筋径	降伏応力 (N/mm2)	降伏ひずみ (μ)	ヤング係数 (N/mm2)
D6	409	2045	2.00×10 ⁵
D10	363	1994	1.82×10 ⁵
D13	345	2193	1.79×10 ⁵
D16	385	2152	1.84×10 ⁵

表-3 供試体のコンクリート材料特性

供試体 No.	圧縮強度 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)	ヤング係数 (N/mm²)	材齢 (日)
K1	35.2	3.3	2.32×10 ⁴	22
K2	35.3	3.3	2.35×10 ⁴	22
K3	38.2	3.3	2.44×10 ⁴	30
K4	37.6	3.2	2.48×10 ⁴	23

(2) 供試体概要

本実験の供試体は既設のフレキシブルRC橋脚の平均高さや断面寸法を参考に約1/10の縮尺模型として製作したものである。各供試体の橋脚部の高さは2000mm,横方向幅は1000mmである。壁部分の内法高さは1800mm,内法長さは500mm,厚さは60mmである。両側柱の断面寸法は200×250mmの矩形断面である。表-2,表-3にコンクリートと鉄筋の材料特性を示す。コンクリートは設計基準強度24N/mm²で配合し、鉄筋はSD345を用いた。

(3) 載荷方法

載荷装置の概要を図-1に示す. 載荷に関しては基礎フーチングをPC鋼棒 (8\phi32mm) で反力床に緊結し,500kNオイルジャッキを反力壁に固定させ,一定軸力下における正負交番の漸増載荷とした. 水平方向のジャッキは反力壁に固定させ,供試体梁部を載荷点とし,ジャッキの押し引きにより正負交番を漸増載荷した. 鉛直方向のジャッキはラーメンフレームに設置し,ジャッキの先端をユニバーサルジョイントとして,載荷中の一定軸力が四点分布となるようにした. また,実橋における例では軸力比が0.02であったが,軸力による荷重一変位曲線



(a) 載荷装置全体図



(b) 載荷部拡大図 図-1 載荷装置概要

への影響を見るため、本実験では軸力比を0.05とし、一定軸力は156kNと設定し、水平載荷方向は水平ジャッキの押しを正、引きを負とした.

水平方向には変位制御により押しから引きの順に,供 試体頂部の水平変位を2mm刻みで,軸方向鉄筋の降伏を 確認するまで各1回交番載荷し,鉄筋降伏後は,4mm刻 みで各1回交番載荷し,供試体の耐力が急激に低下した ステップで実験を終了した.

3. 解析概要

(1) 解析モデル

図-2に3次元モデル図を示す. FEM解析ソフトとしてコンクリート系構造を対象としたFINALを利用した. 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. なお, コンクリートと柱主鉄筋, 壁縦方向鉄筋は完全付着とした. 軸力は実験時と同様に一定軸力が四点

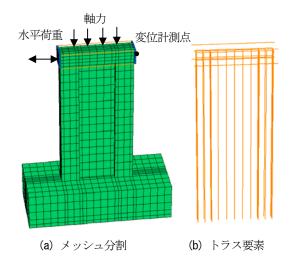


図-2 3次元モデル化

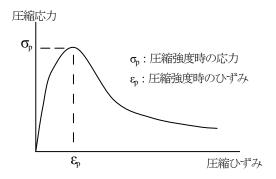


図-3 圧縮側コンクリートの応力-ひずみ関係

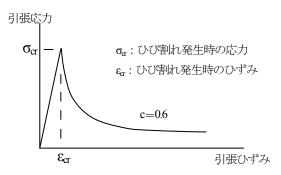


図-4 引張側コンクリートの応力-ひずみ関係

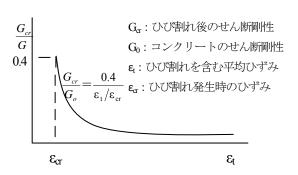


図-5 コンクリートのひび割れ後のせん断伝達特性

分布となるように、四節点にそれぞれ39kNずつ荷重をかけている。また、第1章で述べたとおり、既往の研究³⁾ における解析では載荷点においてコンクリートの局所的な破壊がみられており、3次元解析のモデル化について再検討する余地があった。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、実験事象の状況を正確に再現するために左右の載荷板の間に実験時のようなPC鋼棒をモデル化した。

(2) 材料構成則

コンクリートと鉄筋の材料構成則を図-3~5に示す. 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⁹により、テンションスティフニング特性は出雲らのモデル⁵⁾(c=0.6)により、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⁹を考慮してモデル化を行った. また、材料特性は表-2、表-3で示した実験における材料試験で得られた値を用いた.

4. 解析結果

(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一変位曲線と実験値とを比較した結果を図-6~9に示す.また,表-4~7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,初期剛性とはひび割れ発生時までの剛性,二次剛性とはひび割れ発生後から壁縦方向鉄筋降伏までの剛性をである.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できる.初期剛性に関して解析値の方が大きい理由として,乾燥ひび割れなどの初期ひび割れを解析では考慮していないことが原因として挙げられる.

履歴のループ形状が実験では逆S字型を描くのに対して解析では特に変形量の大きいループで楕円形状を描いており、実験と解析で差異がみられる。このことに関しては、主鉄筋とコンクリートの間に付着ーすべり関係を考慮していないことが原因だと考えられる。今後、履歴ループ形状の精度を向上させるため、コンクリートと鉄筋の付着関係については再検討が必要であると思われる。

また、実験での荷重-変位曲線では、最終ステップの履歴ループは著者らのRC柱部材の交番載荷の履歴曲線と異なり、前ステップの最終変位に達する前に早い段階で耐力を失っている。有限要素解析では終局段階の数値計算が不安定となって解析を終えたため、実験の終局ステップにおける本現象を精度よく再現できなかった。

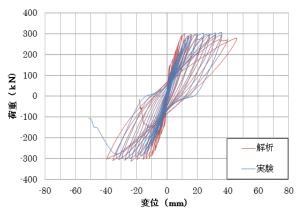


図-6 供試体No.K1の荷重-変位曲線

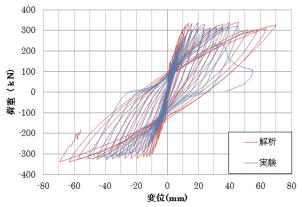


図-7 供試体No.K2の荷重-変位曲線

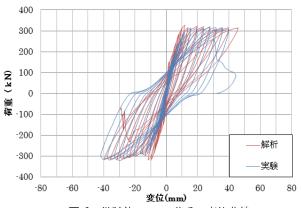


図-8 供試体No.K3の荷重-変位曲線

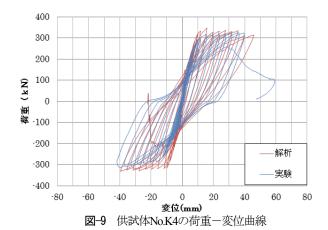


表-4 供試体No.K1の剛性と最大耐力

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

表-5 供試体No.K2の剛性と最大耐力

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

表-6 供試体No.K3の剛性と最大耐力

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		

表-7 供試体No.K4の剛性と最大耐力

2					
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		

(2) ひび割れ性状

図-10~12に供試体No.K1におけるひび割れ状況を示す. 図-10では、壁部分のひび割れ発生状況、図-11では柱へ 斜めせん断ひび割れが進展するひび割れ状況、図-12で は終局時におけるひび割れ状況を示している. なお、図 -12における黄色要素は軟化したコンクリート要素を表 しており、赤色要素は軟化を経験したコンクリート要素 を示している. 図-10において解析では荷重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たので、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、図-11 において解析では荷重222.6kN,変位6mmのステップで 圧縮応力状態時に斜めせん断ひび割れが進展している. それに対して、実験時は圧縮側柱への斜めせん断ひび割 れ発生は変位20mmのステップにおいて確認された。こ のことから柱基部への斜めひび割れ発生現象は再現性が 乏しいといえる. 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



図-10 供試体No.K1における壁部分のひび割れ発生状況

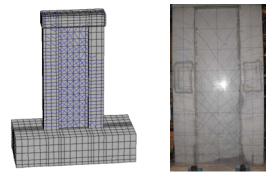


図-11 供試体No.K1における柱の斜めせん断ひび割れ進展状況



図-12 供試体 No.K1 における終局ひび割れ状況

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。ほかの供試体にお いても同様の結果が得られた。柱基部への斜めせん断ひ び割れ発生については実験と解析とで差異が見られるが、 初期剛性が低下する点である柱への水平曲げひび割れ発 生や壁部分のひび割れ発生状況、また終局時のひび割れ 性状など、骨格曲線に影響を与えるイベントの再現性は 高いため、解析では各供試体のひび割れ性状をよく再現 できているといえる。

(3) 鉄筋降伏

次に、実験と解析の鉄筋降伏状態の比較検討を行った。 図-13~16に実験と解析から得られた荷重 - 変位曲線の 上でそれぞれの供試体における鉄筋降伏状況をプロット

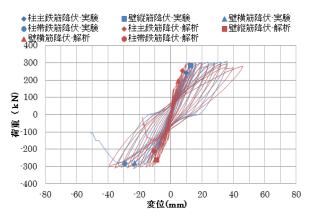


図-13 供試体 No.K1 における鉄筋降伏状況

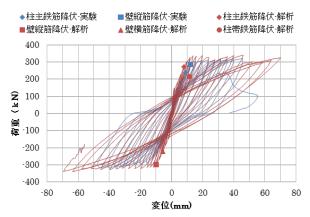


図-14 供試体 No.K2 における鉄筋降伏状況

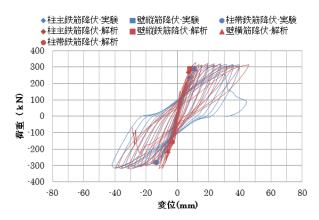


図-15 供試体 No.K3 における鉄筋降伏状況

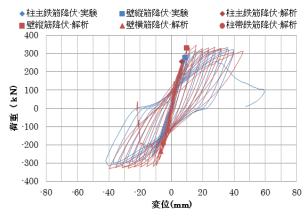


図-16 供試体 No.K4 における鉄筋降伏状況

表-8 各供試体における実験と解析の鉄筋降伏状況

供試体 No.		鉄筋降伏值(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
KI	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
К3	実験	235.50	287.50	283.25	_
K	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

した結果を示す. ここで、検討対象となる鉄筋は、柱主 鉄筋、柱帯鉄筋、壁縦方向鉄筋、壁横方向鉄筋である. その各鉄筋の降伏時の載荷荷重を表-8に示す.

実験と解析の鉄筋降伏状態を比較すると、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. 壁縦方向鉄筋については、供試体No.K1, No.K3ではやや過小評価し、供試体No.K2、No.K4ではや や過大評価している. 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、柱主鉄筋、壁縦方向鉄筋といった軸方向鉄筋 の降伏状態を概ね再現できているが、柱帯鉄筋、壁横方 向鉄筋といった横方向鉄筋の降伏状態を再現できていな いことがわかる. これは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. 今後、横方向鉄筋もトラス要素としてモデル化するなど の工夫が必要であると思われる.

5. まとめ

本研究では、一定軸力下におけるフレキシブル RC 橋脚の正負交番載荷実験の結果を対象に、3 次元非線形有限要素解析を行い実験結果と比較検討して、有限要素モデルの妥当性を検討した.以下に得られた知見を示す.

- (1) 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ため、本有限要素解析は、概ね実験結果を評価できているといえる。ただし、初期剛性の解析値が大きい理由として、解析では乾燥ひび割れなどの初期ひび割れを考慮していないことが原因として考えられる。
- (2) 履歴のループ形状が実験では逆S字型を描くのに対して解析では特に変形量の大きいループで楕円形状を描いており、実験と解析で差異がみられる.この

- ことに関しては、主鉄筋とコンクリートの間に付着 ーすべり関係を考慮していないことが原因であると 思われ、履歴ループ形状の精度を向上させるため、 材料間の境界条件などの再検討が必要である.
- (3) 解析では、実験のひび割れ経過を精度よく再現できている。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全体でのひび割れやコンクリート軟化によって、終局時のひび割れ性状を概ね再現できている。
- (4) 解析では、柱主鉄筋、壁縦方向鉄筋といった軸方向 鉄筋の降伏時荷重を概ね再現できているが、柱帯鉄 筋、壁横方向鉄筋といった横方向鉄筋の降伏時荷重 を再現できていない.これは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.

今後,有限要素解析の材料構成則の修正,鉄筋とコンクリートの間に付着一すべり関係を考慮するなどの工夫を施し,解析の履歴のループ形状および鉄筋降伏状況の精度を向上させたい.

謝辞:本実験に協力いただいた九州大学技術職員山崎智 彦氏および研究室諸兄に謝意を示す。また、本研究は日 本学術振興会科学研究費補助金24360181 (基盤研究 (B);代表者:大塚久哲)を得て行われた。

参考文献

- 1) 高文君, 大塚久哲, 福永靖雄, 川崎啓史: I 型断面フレキシブル RC 橋脚の水平耐力に及ぼす横方向鉄筋の効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.439-444, 2011.
- 2) 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.
- 3) 高文君, 大塚久哲, 新谷勇士, 今村壮宏: 2 次元· 3 次元 有限要素解析によるフレキシブル RC 橋脚水平載荷実験結 果の再現性, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.61-66, 2012.
- 4) 長沼一洋: 三軸応力下のコンクリートの応力~ひず み関係,日本建築学会構造系論文報告集第 474 号, pp.163-170, 1998.8
- 5) 出雲淳一,他:面内力を受ける鉄筋コンクリート板 要素の解析モデル,コンクリート工学論文,No.87.9-1,pp.107-120,1987.9
- 6) Al-Mahaidi,R.S.H.:Nonlinear Finite Element Analysis of Rein forced Concrete Deep Members,Report 79-1,Dep.of Structural Engineering, Comell Univ.,Jan. 1979

REPRODUCIBILITY OF THREE-DIMENTIONAL FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR CYCLIC LOADING TESTS OF FLEXIBLE RC PIER

Hisanori OTSUKA, Yo ITO, Wenjun GAO, Yukihide KAJITA and Joon-Ho CHOI

The target pier in this study is a high rigid-frame RC pier with an earthquake-proof wall. As the characteristic of this pier, this pier has the flexibility in the bridge axis direction and the earthquake-proof wall can absorb the seismic energy. To clarify the restoring force characteristic, the cyclic horizontal loading test has been carried out. In this paper, three-dimentional analysis is conducted to simulate the test result. From the numerical simulation, it is found that the maxmum load and crack distribution are mostly simulated.