

論文 耐震壁を有する実大 RC ラーメン橋脚の水平耐力に関する検討

梶田幸秀*1・伊藤耀*2・高文君*3・大塚久哲*4

要旨：橋脚高が高いラーメン橋脚に耐震壁を挿入した橋脚を研究対象とし、当該橋脚の橋軸直角方向の耐力を適切に評価するため、すでに実施した当該橋脚の 1/10 縮尺模型における正負交番載荷実験のシミュレーション解析を実施し、主鉄筋の降伏荷重や最大荷重をシミュレートできることを確認し、構成則の違いによる履歴曲線の違いなどについて考察を行った。続いて実物大の橋脚に対して数値解析を行い、降伏荷重や最大耐力、ひび割れ分布などの検討を行った。

キーワード：有限要素解析 RC 橋脚 交番載荷

1. はじめに

本研究では、橋脚高が高いラーメン橋脚に耐震壁を挿入した橋脚を研究対象とした。当該橋脚は、主に山間地の高速道路橋脚などに用いられている。耐震壁を有しているため、当該橋脚の橋軸直角方向耐力については、明確な算定式は現時点では存在しない。そのため、著者らは既往の研究において、当該橋脚の縮小模型供試体を作成し、橋軸直角方向に水平単調漸増載荷実験を行い、帯鉄筋量などを変化させた各供試体の耐力や破壊性状に関する知見を得た¹⁾。また、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⁾。また単調漸増載荷実験をシミュレートするために数値解析を実施したが³⁾、その際、載荷点のモデル化において、水平荷重を1つの節点に集中載荷したため、載荷部でコンクリートの局所的な破壊が見られ、解析精度を向上させる上で、載荷部のモデル化の見直しや、正負交番載荷実験をシミュレートするために、材料構成則についての考察が必要であるなどの課題が残されていた。

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結果をシミュレートするために、載荷部のモデル化を実験状況に近いモデルとするとともに、コンクリートのひび割れ後のせん断剛性（せん断伝達剛性）の構成則を2つ用意し、構成則の違いによる履歴曲線の違いなどについて考察を行った。その後、実物大の橋脚に対して、数値解析を実施し、当該橋脚の橋軸直角方向耐力やひび割れ分布などの検討を行うことを目的とした。

2. 実験概要

実験に関する詳細については、文献1, 2を参考にしていたくとして、シミュレーション解析を行うために必要な情報を再掲する。供試体の寸法は高さ 2m、橋軸直角方向幅 1m、橋軸方向幅 0.2m、耐震壁の部分は高さ 1.8m、橋軸直角方向

幅 0.5m、橋軸方向幅 0.06m である。表-1 に実験ケース（供試体の配筋状況）を示す。供試体 No.K1 を標準断面とし、柱の帯鉄筋、耐震壁の横方向（水平方向）鉄筋を変化させた供試体を3つ用意した。各供試体の鉄筋およびコンクリートの材料特性値を表-2 および表-3 に示す。

載荷装置の概要を図-1に示す。載荷部付近の拡大図を図-2に示す。載荷に関しては基礎フーチングをPC鋼棒（8φ32mm）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。図-2に示す通り水平ジャッキは両端がピンとなっている。供試体への荷重の与え方については、供試体頂部の両側に鋼板を置き、PC鋼棒を用いて、供試体頂部を鋼板で挟み込み、鋼板と水平ジャッキの先端の載荷治具をボルトで結合することで、ジャッキの押し引きにより、正負交番載荷を実現している。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、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

表-1 実験ケース

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)

*1 九州大学 工学研究院社会基盤部門 准教授 博士(工学) (正会員)

*2 九州大学 工学府建設システム工学専攻 (学生会員)

*3 九州大学 工学府建設システム工学専攻 (学生会員)

*4 (株)大塚社会基盤総合研究所 工博 (正会員)

表-2 各鉄筋の材料特性

鉄筋径	降伏応力 (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	ヤング係数 (N/mm ²)
D 6	409	2045	2.00×10^5
D 10	363	1994	1.82×10^5
D 13	345	2193	1.79×10^5
D 16	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/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	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

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. 正負交番載荷実験のシミュレーション解析

3.1 解析概要

(1) 解析モデル

図-3に3次元解析モデルを示す。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を用いた。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、コンクリートと梁鉄筋、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、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図-3 (b) に示すように、載荷板を剛要素でモデル化し、左右の載荷板の間に実験時のようなPC鋼棒をトラス要素によりモデル化した。

(2) 材料構成則

コンクリートの材料構成則を図-4から図-7に示す。コンクリートの圧縮応力とひずみ関係及び圧縮軟化特性は修正 Ahmadモデル⁴⁾を用いた。引張に関しては、ひび割れ発生までを線形とし、ひび割れ発生後のデテンションスティフニング特性を出雲らのモデル⁵⁾($c=0.6$)によりモデル化を行った。また、

コンクリートのひび割れ後のせん断伝達特性に関して Al-Mahaidiモデル⁶⁾を考慮してモデル化を行ったものをモデル



図-1 載荷装置概要

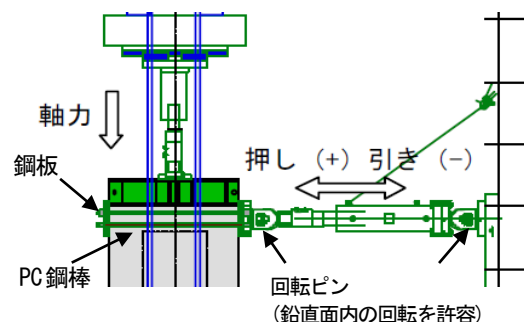


図-2 載荷部付近の拡大図

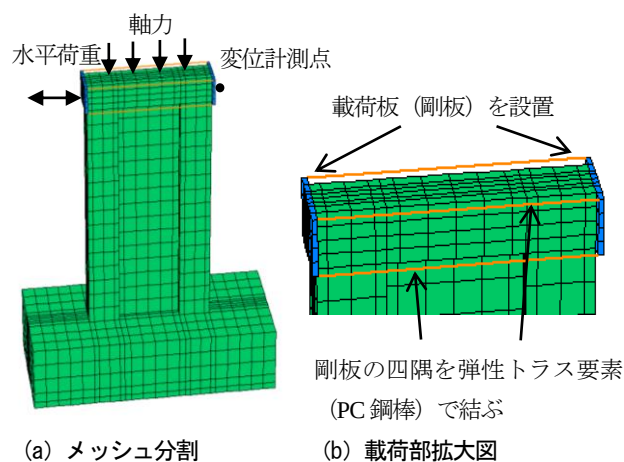


図-3 3次元モデル図

ル1、長沼モデル⁷⁾を考慮してモデル化を行ったものをモデル2とし、実験結果と比較した。Al-mahaidiモデルでは、ひび割れ直交方向の引張ひずみの関数としてせん断剛性の低下を表現するが、除荷後の対応を定義しておらず、解析上では載荷時と除荷時で同じせん断剛性式を用いて計算を行っている。

また、長沼モデルでは、通常の鉄筋コンクリートに対して、

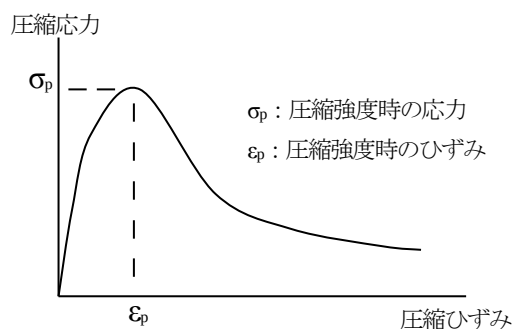


図-4 圧縮側コンクリートの応力-ひずみ関係

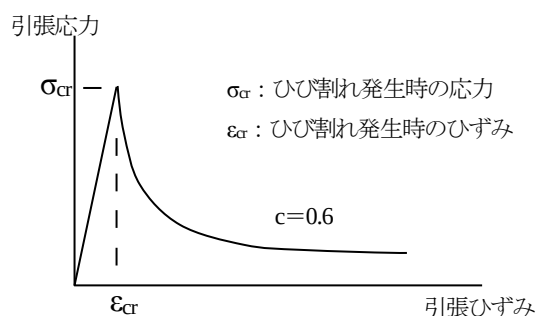


図-5 引張側コンクリートの応力-ひずみ関係

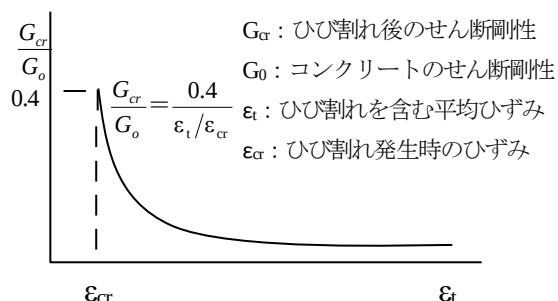


図-6 コンクリートのひび割れ後のせん断伝達特性 (Al-Mahaidiモデル)

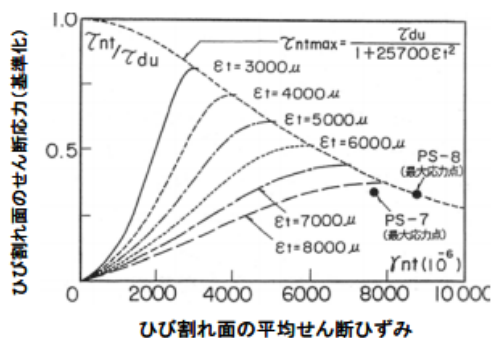


図-7 コンクリートのひび割れ後のせん断伝達特性 (長沼モデル)

ひび割れ面の平均せん断応力～平均せん断ひずみの関係を、コンクリート強度、ひび割れを横切る鉄筋量・強度、及びひび割れ直交方向ひずみの関数で表現し、骨材のかみ合いと鉄筋のダボ効果を考慮した材料モデルである。また、鉄筋に関して、移動硬化型の Bi-linear でモデル化し、降伏後の剛性は初期剛性の 0.01 倍とした。

材料特性は表-2、表-3 で示した実験時における材料試験で得た値を用いた。また、水平力を受ける耐震壁のように、ある程度の縦横筋が存在し、面内せん断により、鉄筋を斜めに横切るひび割れが生じる場合にはひび割れ後の強度低減を考慮する必要がある。本研究では、長沼らの提案式 7)による圧縮強度低減を考慮している。

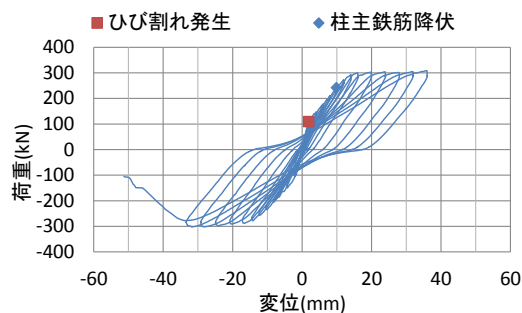
3.2 解析結果

(1) 荷重-変位曲線

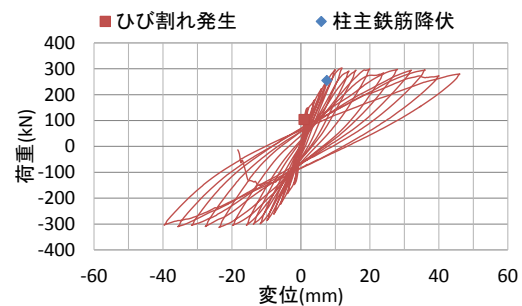
図-8に供試体No.K1の荷重-変位曲線を図-9に供試体No.K1の包絡線を示す。図中にはひび割れ発生点、柱主鉄筋降伏点を合わせて示している。図-10～12に各供試体における荷重-変位曲線を、表-4にそれぞれのひび割れ荷重、降伏荷重、最大荷重に関して、実験値を解析値で除した値を示す。表-4及び図-9より、両モデルにおいて、ひび割れ荷重、降伏荷重、最大荷重に関して、解析値と実験値とで誤差は少なく、概ね再現できていることがわかり、最大荷重までの骨格曲線という点で、数値解析は実験をシミュレートできているといえる。

しかし、図-8より、履歴曲線、特に1つずつのループ（載荷-除荷）形状を見ると実験とAl-Mahaidiモデルを用いた解析モデル1では少し形が異なっている。これは、ひび割れ後のせん断剛性を等価線形で表現するAl-Mahaidiモデルでは除荷時と載荷時で剛性が同じであり、本解析結果では、履歴ループが実験時のような逆S字型ではなく、紡錘型になっている。一方の長沼モデルを用いた場合は、1ループで描く荷重-変位曲線の形状はAl-Mahaidiモデルよりは逆S字型になっている。しかし、最大荷重後に徐々に荷重が低下していく現象が図-9より確認できる。これは、長沼モデルでは、ひび割れ幅の増大とともにひび割れ面に相対すべりが生じる場合を対象とした実験結果をもとに定式化を行っているが、本研究の実験においてはひび割れ面の相対すべりは確認されておらず、柱基部のコンクリート圧縮破壊が顕著であったため、長沼モデルでは、最大荷重以降から終局にかけて、耐力が実験結果とは異なり低下していくことが確認された。

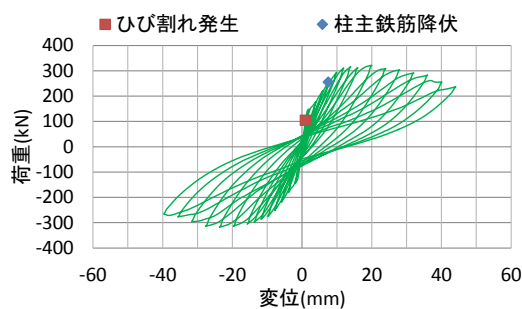
エネルギー吸収等の履歴を求めるなら、除荷時の剛性を定義していないAl-Mahaidiモデルは吸収エネルギーを正しく評価できないが、最大耐力以降も比較的良好に荷重をシミュレーションできていることがわかった。



(a) 実験結果



(b) 解析モデル1 (AI-Mahaidi モデル)



(c) 解析モデル2 (長沼モデル)

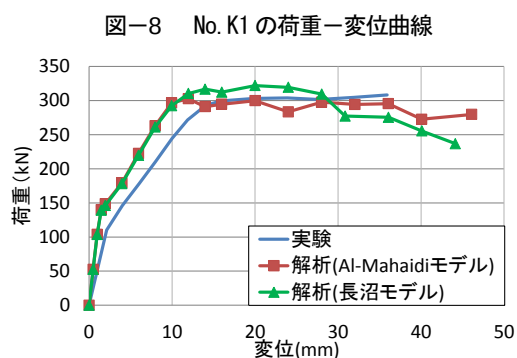


図-9 No. K1 の包絡線

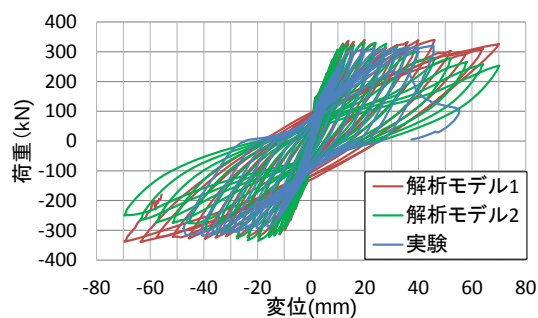


図-10 No. K2 の荷重-変位曲線

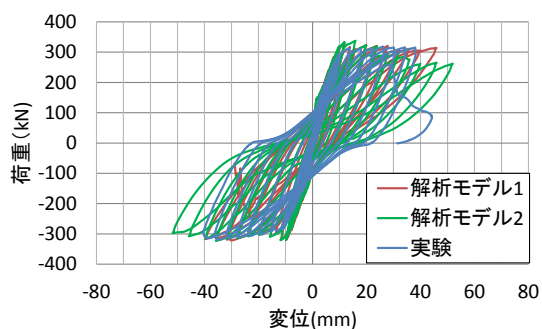


図-11 No. K3 の荷重-変位曲線

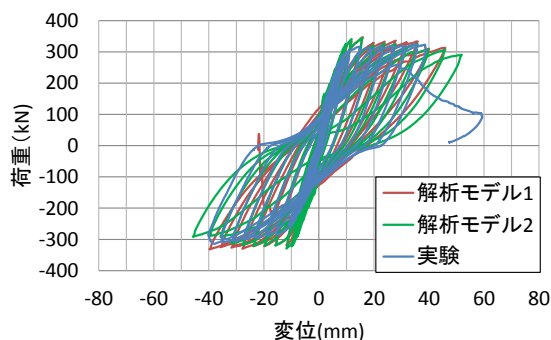


図-12 No. K4 の荷重-変位曲線

表-4 各供試体の解析値と実験値の比較

(a) AI-Mahaidi モデルの場合

モデル1	ひび割れ荷重	降伏荷重	最大荷重
No.K1	0.94	1.05	0.98
No.K2	0.93	1.14	1.06
No.K3	0.97	1.13	1.03
No.K4	0.91	1.01	1.07

分子を解析値, 分母を実験値として算出

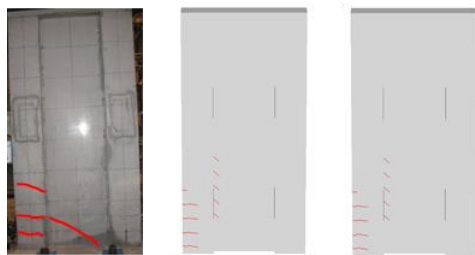
(b) 長沼モデルの場合

モデル2	ひび割れ荷重	降伏荷重	最大荷重
No.K1	0.94	1.05	1.05
No.K2	0.93	1.07	1.03
No.K3	0.97	1.03	1.06
No.K4	0.91	0.99	1.06

分子を解析値, 分母を実験値として算出

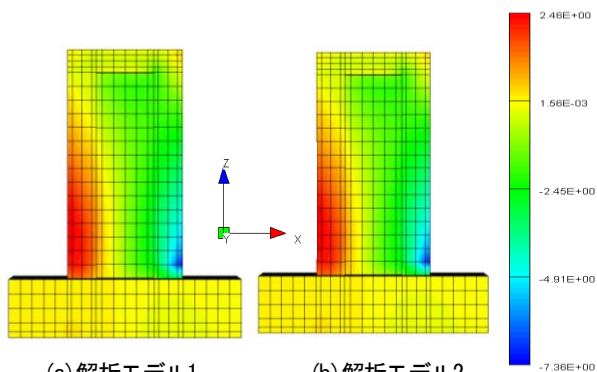
(2) ひび割れ性状

図-13に供試体No.K1におけるひび割れ状況を示す。図-13において解析ではモデル1で荷重103.9kN, モデル2も荷重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いるため、両モデルにおいてひび割れ発生荷重を概ね再現できていると考えられる。また、図-14にひび割れ発生時のZ方向の垂直応力分

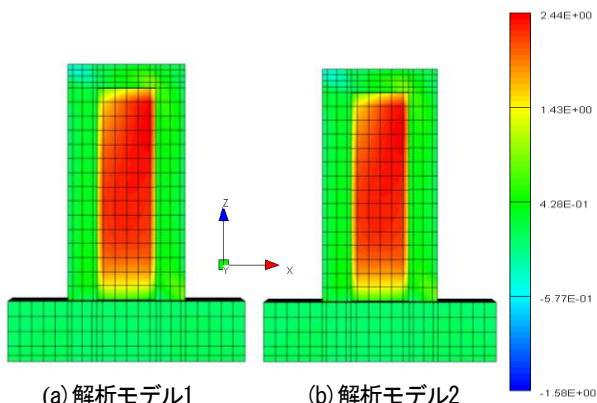


(a) 実験 (b) 解析モデル1 (c) 解析モデル2

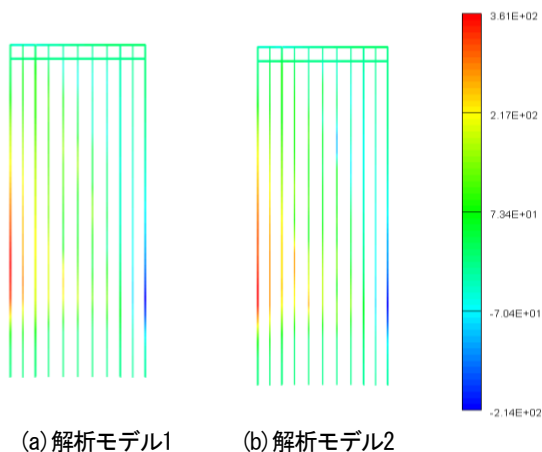
図-13 供試体No. K1におけるひび割れ発生状況



(a) 解析モデル1 (b) 解析モデル2
図-14 K1における Z方向の垂直応力分布図



(a) 解析モデル1 (b) 解析モデル2
図-15 K1における ZX方向せん断応力分布図



(a) 解析モデル1 (b) 解析モデル2
図-16 鉄筋降伏時のZ方向の垂直応力分布図

布図を、図-15にひび割れ発生時のZX方向せん断応力分布図を示す。図-14、図-15より柱では垂直応力が大きく作用しており、壁においてはせん断応力が大きく作用していること

がわかる。このことから柱において曲げ応力により曲げひび割れが発生し、壁においてはせん断応力によりせん断ひび割れが発生したと考えられる。図-13ように実験時のひび割れ状況に関して、ひび割れ本数は厳密には再現できていないが、ひび割れ発生箇所やひび割れ方向を精度よく再現できており、実験時には計測ができなかった内部の応力状態を把握できた

(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-7で示した通り、柱主鉄筋降伏時の荷重と変位を良好に再現できており、主鉄筋降伏が発生したループ以降で剛性値が低下し耐力が頭打ちになる現象を捉えることができた。また、図-16に鉄筋降伏時のZ方向垂直応力分布図を示す。図-16より、柱の主鉄筋についてZ方向に発生した引張力により主鉄筋が引張降伏したことが確認できた。

4.実橋規模での解析

(1) 解析モデル

今回の実大規模での解析では部材降伏や最大耐力を把握するため、軸力の影響は考慮せず単調漸増のプッシュオーバー解析を変位制御により行った。

図-17に解析モデル図を示す。橋脚高20m、横方向幅は10mである。壁部分の内法高さは18.0m、内法長さは5.0m、壁厚0.6mである。両側柱の断面寸法は2.0×2.5mである。材料構成則は実験シミュレーション解析時と同じものを用いた。コンクリートは設計基準強度の24N/mm²を用いており、鉄筋の降伏応力は使用している鉄筋がSD345であるため、345 N/mm²として解析を行った。実橋梁の鉄筋配置図を参考にして柱の主鉄筋をD25、壁縦方向鉄筋D25、柱帯鉄筋と壁横方向鉄筋をD19とし、鉄筋配置間隔は、柱の主鉄筋、壁縦方向鉄筋を約300mm間隔、柱帯鉄筋、壁横方向鉄筋を約250mm間隔として解析モデルを作成した。また、拘束条件は橋脚基部の全節点を全方向に固定としている。

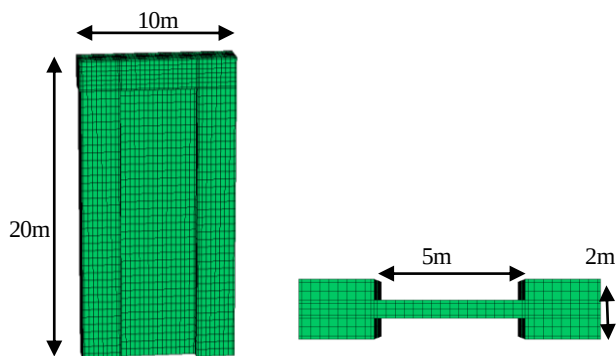


図-17 実橋規模の解析モデル図

(2) 解析結果

図-18にコンクリートひび割れ後のせん断伝達特性としてAl-Mahaidiモデルを用いた場合の解析結果の荷重変位曲線と鉄筋降伏点を示す。ひび割れ発生荷重は3204kN、降伏荷重

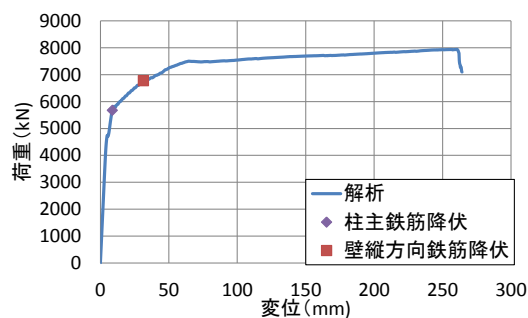
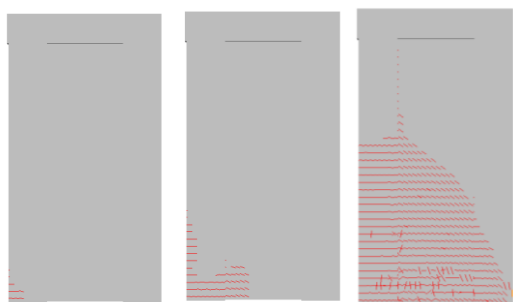


図-18 解析における荷重変位曲線



(a) 柱ひび割れ状態 (b) 壁ひび割れ状態 (c) 終局時ひび割れ
(荷重 3204kN 時) (荷重 4720kN 時)

図-19 解析結果のひび割れ状況

は5676kN, 最大荷重は7936kNという結果となった。図-18より, 実大規模における解析において主鉄筋降伏, 壁縦方向鉄筋降伏により剛性が大きく低下していることがわかる。また, 変位260mm付近において圧縮側の柱基部において最外縁のひずみが終局ひずみに到達したため, コンクリートの圧縮破壊によって耐力低下したことが解析において確認された。図-19に解析結果のひび割れ状況を示す。模型実験時や再現解析時と同様に実大規模における解析においても柱部材への水平曲げひび割れから, 壁部材に斜めせん断ひび割れが進展していく状況を確認できた。

また, 長沼モデルを用いた解析も行ったが, ひび割れ荷重は3200kN, 降伏荷重は5460kN, 最大荷重は8197kNという結果が得られAl-Mahaidiモデルと類似する結果となった。

5. まとめ

本研究では, 一定軸力下における耐震壁を有するRCラーメン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, その解析モデルを用いて実大規模における数値解析を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 荷重-変位曲線の比較では, ひび割れ荷重, 降伏荷重, 最大荷重は概ね一致しているため, 本有限

要素解析は実験結果を評価できているといえる。

- (2) ひび割れ後のせん断剛性について, Al-Mahaidiモデルの場合, 除荷時の剛性を正しく評価していないため, 履歴曲線(履歴ループ)という点では本実験結果を再現できず, 本実験供試体に対してはエネルギー吸収量を正しく評価できないことが分かった。一方, 長沼モデルの場合, 最大荷重までは履歴曲線も概ね再現できたが, 終局状態においては, 本実験供試体の破壊形態がひび割れ面の相対すべり量の増大ではなく, 柱基部コンクリートの圧壊が顕著であったため, 最大荷重以降の体力評価に関しては, シミュレートできなかった。
- (3) ひび割れ本数の厳密な再現はできていないが, ひび割れ発生箇所, ひび割れ方向を捉えることができています。
- (4) シミュレーション解析手法を用いて, 実物大対象橋脚の降伏荷重, 最大耐力を評価し, 実大橋脚でも模型実験と同様に軸方向鉄筋の降伏により剛性が低下すること, 圧縮側柱基部のコンクリートの圧壊によって終局状態に至ることが確認できた。

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, 河邊修作, 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 Reinforced Concrete Deep Members, Report 79-1, Dep. of Structural Engineering, Cornell Univ., Jan. 1979
- 7) 長沼一洋: 平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル 鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究(その1), 日本建築学会構造系論文報告集, 第 421号, pp.39-48, 1991.3