

論文 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

高 文君*1・大塚 久哲*2・新谷 勇士*3・今村 壮宏*4

要旨： 既往のフレキシブル RC 橋脚の橋軸直角方向水平載荷実験の結果を対象に、2次元及び3次元非線形有限要素解析を行い、荷重－変位曲線、鉄筋降伏順序、鉄筋ひずみコンターの解析結果と実験結果とを比較検討し、解析モデル及び材料構成則の妥当性や実験事象の解明を行った。各解析モデルにより、フレキシブル RC 橋脚水平載荷実験の有限要素解析結果は、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よく、次いで柱と梁の主鉄筋及び壁の縦方向鉄筋をトラス要素と仮定した3次元の解析ケースがよい精度を示した。

キーワード： フレキシブル RC 橋脚、有限要素解析、破壊性状

1. はじめに

フレキシブル RC 橋脚とは、山間地の高速道路高橋脚などに用いられる、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のことである。本橋脚の橋軸直角方向水平せん断耐力の評価に関し、著者らは文献 1) において、慣行のせん断耐力算定式に従えば、例えば後述の標準断面では実験値の 60%程度しかせん断耐力を評価できないことを示し、有効 RC 断面の取り方や評価対象鉄筋に関して、改良の余地があることを指摘した。また、文献 2) において、耐力算定式及びせん断耐力に影響を与えるパラメータ、有効断面の設定を検討し、精度の良い算定式の提案を行った。

一方、文献 3)、4) において、既設の I 型断面フレキシブル RC 橋脚の縮尺模型による水平加力実験から、本橋脚はこれまでのせん断破壊や曲げ破壊となる橋脚とは異なる、両破壊モードの中間的な破壊性状を呈することを指摘した。すなわち、本橋脚は、橋軸直角方向地震力に対して両側柱と耐震壁により、地震エネルギーを十分に吸収することができる。

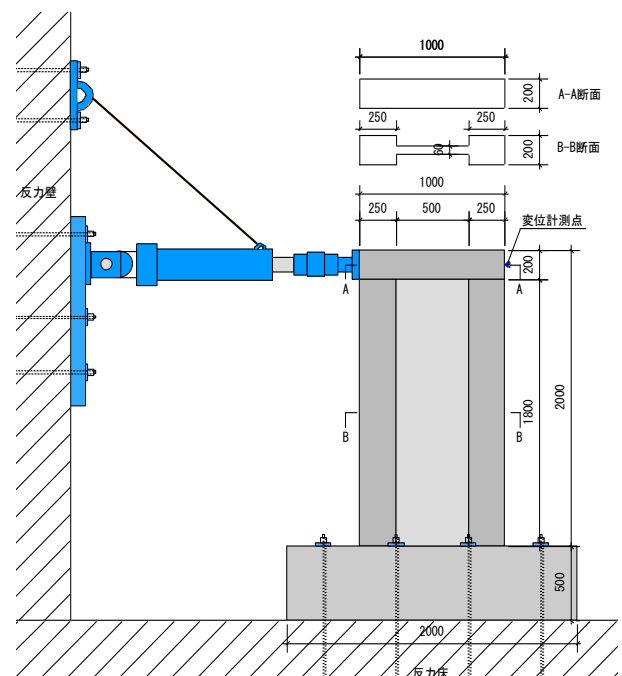
本研究は、既往のフレキシブル RC 橋脚の橋軸直角方向水平載荷実験の結果を用いて、2次元及び3次元非線形有限要素解析を行い、荷重－変位曲線、鉄筋降伏順序、鉄筋ひずみコンターの解析結果と実験結果とを比較検討し、解析モデル及び材料構成則の妥当性や実験事象の解明を行った。

2. 水平載荷実験の概要

水平載荷実験の載荷装置の概要及び配筋図は文献 3) において既に報告しているが、3 章の供試体の有限要素解

析と比較する際に明確にしておいた方がよいので、ここで改めて図－1 に実験供試体と載荷装置を示す。

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形式を参考に約 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。基礎フーチングは 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して載荷装置とし



図－1 実験供試体と載荷装置

*1 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻修士課程 (正会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

*3 九州大学 工学部地球環境工学科建設都市工学コース学士課程

*4 西日本高速道路(株)九州支社 保全サービス事業部 改良グループ

た。地震時の慣性力は同一方向と考え、実験における載荷は一点集中荷重とし、その作用位置は供試体頂部の梁部とした。水平単調漸増載荷としたのは、損傷を受けていない本供試体の水平耐力と破壊メカニズムを知るためである。また、今回の実験では軸力の影響を無視したが、このことは一般に水平耐力に対して安全側の評価となると思われるが、軸力の影響の詳細は別途明らかにする必要がある。

表－１に実験ケースを示す。鉄筋は SD345 を用いている。各鉄筋材料特性を表－２に示す。コンクリートは設計基準強度 24N/mm^2 で配合している。材料試験から得られた各供試体のコンクリート材料特性を表－３に示す。

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
1	6-D16, 2-D10 (2.67)	D6ctc120 (0.26)	5-D10 (1.19)	D13ctc120 (1.76)
2	6-D16, 2-D10 (2.67)	D6ctc60 (0.53)	5-D10 (1.19)	D13ctc120 (1.76)
3	6-D16, 2-D10 (2.67)	D6ctc40 (0.79)	5-D10 (1.19)	D13ctc120 (1.76)
4	6-D16, 2-D10 (2.67)	D6ctc120 (0.26)	5-D10 (1.19)	D13ctc60 (3.52)
5	6-D16, 2-D10 (2.67)	D6ctc120 (0.26)	5-D10 (1.19)	D10ctc120 (0.99)

表－２ 各鉄筋の材料特性に関する試験値

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 コンクリートの材料特性に関する試験値

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)
1	34.4	3	2.49×10^4	18
2	36.7	3.3	2.59×10^4	22
3	31.5	3	2.32×10^4	20
4	35.7	3.1	2.35×10^4	14
5	30.3	3	2.27×10^4	17

3. 供試体の有限要素解析

3.1 解析モデル

解析には、コンクリート系構造を対象とした非線形 FEM 解析ソフト「FINAL⁵⁾」を使用した。コンクリート

と鉄筋をモデル化することにより、2 次元・3 次元の解析モデル（図－3 参照）を 6 ケース考えた。以下に各ケースの番号と、モデル化について述べる。

ケース 2－1：コンクリートは四辺形要素に置換し、鉄筋は全て要素内埋め込み鉄筋として扱った 2 次元解析モデルである。

ケース 2－2：コンクリートは四辺形要素に置換し、壁の鉄筋及び帯鉄筋は要素内埋め込み鉄筋として扱い、柱と梁の主鉄筋はトラス要素に置換し、付着すべりを考慮した 2 次元解析モデルである。

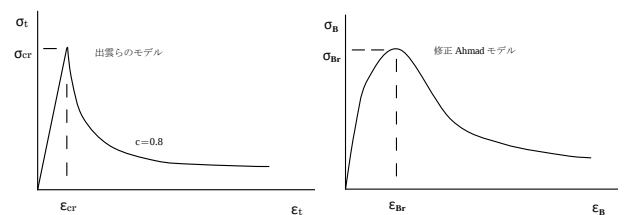
ケース 2－3：コンクリートは四辺形要素に置換し、壁の横方向鉄筋及び帯鉄筋は要素内埋め込み鉄筋として扱い、柱と梁の主鉄筋及び壁の縦方向鉄筋はトラス要素に置換し、付着すべりを考慮した 2 次元解析モデルである。

これに対して、ケース 3－1、3－2、3－3 は、コンクリートは六面体要素に置換し、鉄筋を 2 次元解析モデルと同様に考えた 3 次元解析モデルである。

要素内埋め込み鉄筋とは、鉄筋配置面内に鉄筋が一樣に分布していると仮定して、層状に剛性を考慮し、コンクリートの平面応力要素に重ね合わせたモデルである。

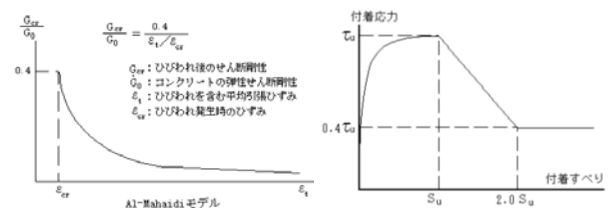
3.2 材料構成則

コンクリートと鉄筋の材料構成則を図－2 に示す。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た出雲らのモデル⁶⁾ ($c=0.8$) により表現し、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には修正 Ahmad モデル⁷⁾を用いた。また、コンクリートのひび割れ後のせん断伝達特性には Al-Mahaidi モデル⁸⁾を用いた。さらにコンクリートと鉄筋の付着応力－すべり量関係は Elmsori らのモデル⁹⁾を



(a) コンクリートの応力－ひずみ関係

(左：引張側、右：圧縮側)



(b) せん断伝達特性 (c) 付着応力－すべり関係

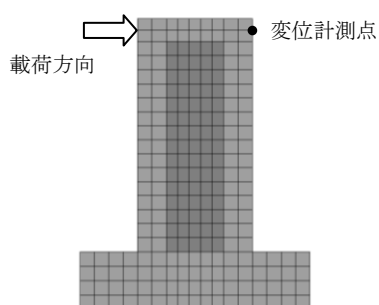
図－2 材料構成則

用いた。また、各供試体の配筋状況とコンクリートの圧縮強度により、モデル係数が異なる。

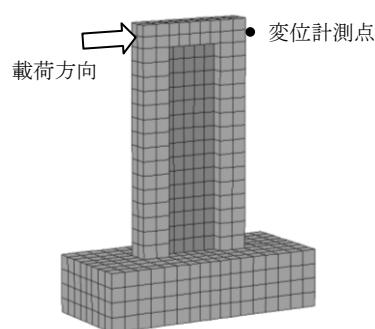
材料特性は実験における材料試験で得られた値を用いた（表-2、表-3 参照）。

3.3 荷重方法

図-3 に 2 次元及び 3 次元解析モデルに対する加力方向と変位計測点を示す。解析では、せん断耐力実験³⁾と同様に、水平荷重を解析モデルの頂部の一点（実験の荷重中央点に対応）に漸増荷重して、プッシュオーバー解析を行った。フーチング下面の節点が変位拘束面と設定した。



(a) 2次元解析モデル



(b) 3次元解析モデル

図-3 解析の荷重方法

4. 解析結果と実験値との比較

4.1 荷重-変位曲線

各供試体について FEM 解析により得られた荷重-変位曲線と実験値とを比較した結果を図-4 に示す。各供試体に対して 2 次元解析ケースと 3 次元解析ケースの両方を示している。

標準断面である供試体 No.1³⁾に対しては、全体鉄筋を要素内埋め込み鉄筋として扱った 2 次元解析のケース 2-1 の結果は実験曲線の第 2 折点近傍を除いて、精度よく表現している。特に最大耐力をほぼ適切に評価しており、終局変位も安全側に評価している。主鉄筋をトラス要素に置換した 2 次元解析のケース 2-2（柱+梁部分）とケース 2-3（柱+梁+壁部分）の結果は第 2 折点前後までケース 2-1 の結果と一致しているが、主鉄筋降伏後（詳細は 4.2 に記述）の結果が不安定となり、実験値

と大きな差異を生じた。一方、3 次元解析では、主鉄筋をトラス要素に置換したケース 3-2（柱+梁部分）とケース 3-3（柱+梁+壁部分）が全体鉄筋を要素内埋め込み鉄筋として扱ったケース 3-1 より精度がよいが、いずれの解析ケースも最大耐力と終局変位の評価に課題が残っている。

柱の帯鉄筋を 2 倍に増やした供試体 No.2 に対しては、2 次元解析の各ケースは精度よく、かつ安全側に評価しているが、ケース 2-2、2-3 は終局変位の評価が不安定となっている。一方、3 次元解析の結果は供試体 No.1 と同様に、主鉄筋をトラス要素に置換したケース 3-2 と 3-3 が全体鉄筋を要素内埋め込み鉄筋として扱ったケース 3-1 より精度がよく、終局変位も安全側に評価している。

柱の帯鉄筋を 3 倍に増やした供試体 No.3 に対しては、どのケースとも耐力を過大に評価している。供試体 No.3 のコンクリート強度は他の供試体より 10%ほど低く、これが実験の耐力低下に現われていると考えられるが、解析値はこれを反映できていないことが一因と考えられる。

壁の横方向鉄筋を 2 倍に増やした供試体 No.4 に対しては、供試体 No.1 に対する考察とほぼ同様である。ただし、2 次元解析のケース 2-3 の精度が向上していることが No.1 と異なっている。

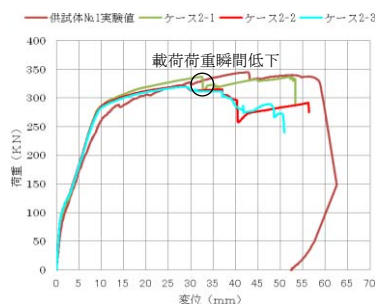
壁の横方向鉄筋を 1/2 倍に減らした供試体 No.5 に対しては、2 次元・3 次元の各解析ケースとも、耐力の評価が過大になっている。供試体 No.5 もコンクリート強度が低く、これが解析値には適切に反映されていないことが原因と思われる。しかし、図-4 の (e) から 2 次元のケース 2-1 と 3 次元のケース 3-3 が実験結果と近いことがわかる。

以上の考察のように、2 次元解析ケースでは、鉄筋を全て要素内埋め込み鉄筋として扱ったケース 2-1 の結果の精度がよい。また、3 次元解析ケースでは、鉄筋をトラス要素に置換したケース 3-2 と 3-3 の結果が相対的に実験値に近いことがわかる。コンクリート強度の違いが実験値には明確に現われているのに対して、解析値ではこれを反映できていない課題が認識できた。

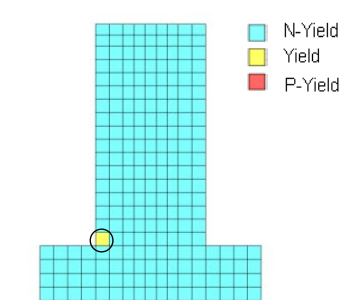
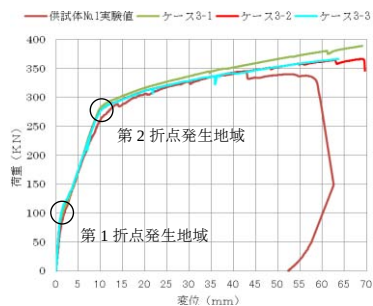
4.2 鉄筋降伏順序

荷重-変位曲線と実験値との比較により、2 次元解析のケース 2-1 が相対的に実験値をよく表現できたといえる。従って、実験の発生事象を厳密に把握するため、同解析ケースにおける鉄筋降伏状態を検討した。

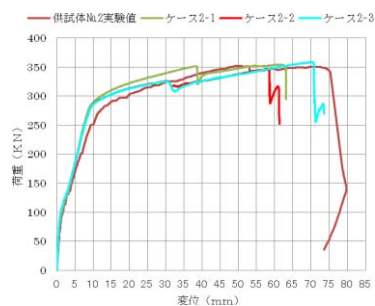
図-5 に FEM 解析のケース 2-1 から得られた供試体 No.1 の鉄筋降伏順序を示す。ここで対象としている鉄筋は、(a) 引張側柱の主鉄筋（荷重=236.8kN、変位=7.1mm）、(b) 壁の縦方向鉄筋（荷重=281.7kN、変位=9.4mm）、



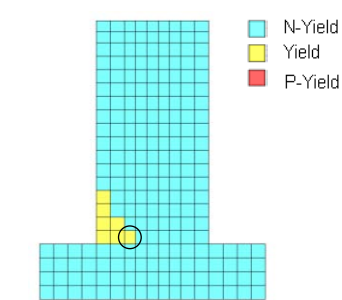
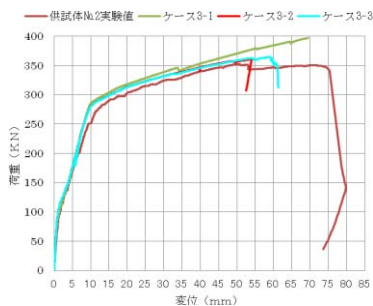
(a) 供試体 No. 1



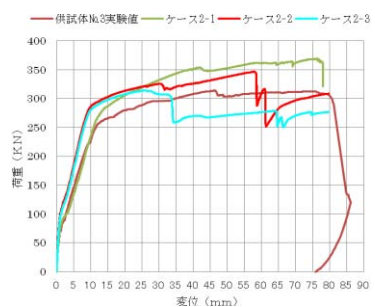
(a) 引張側柱の主鉄筋降伏



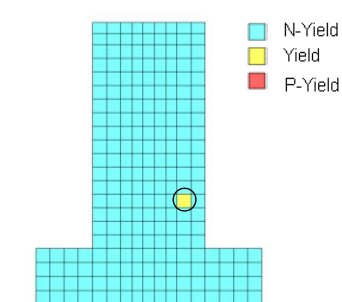
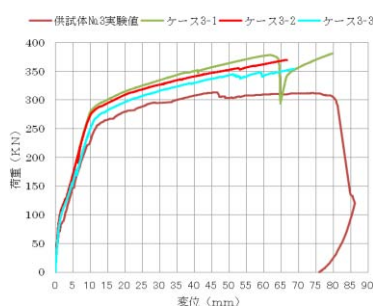
(b) 供試体 No. 2



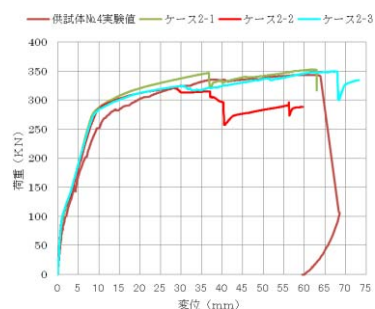
(b) 壁の縦方向鉄筋降伏



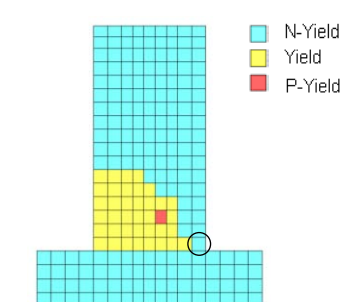
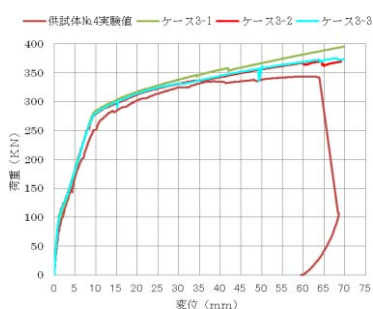
(c) 供試体 No. 3



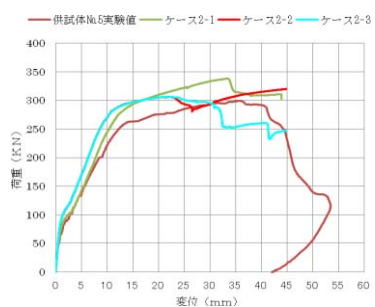
(c) 圧縮側柱の帯鉄筋降伏



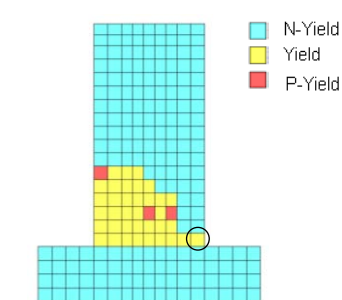
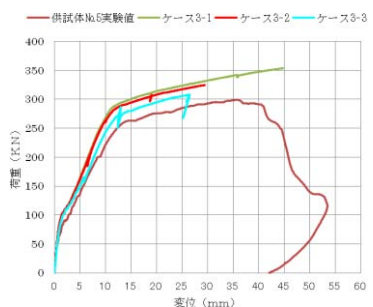
(d) 供試体 No. 4



(d) 載荷荷重瞬間低下前 (柱主鉄筋非降伏)



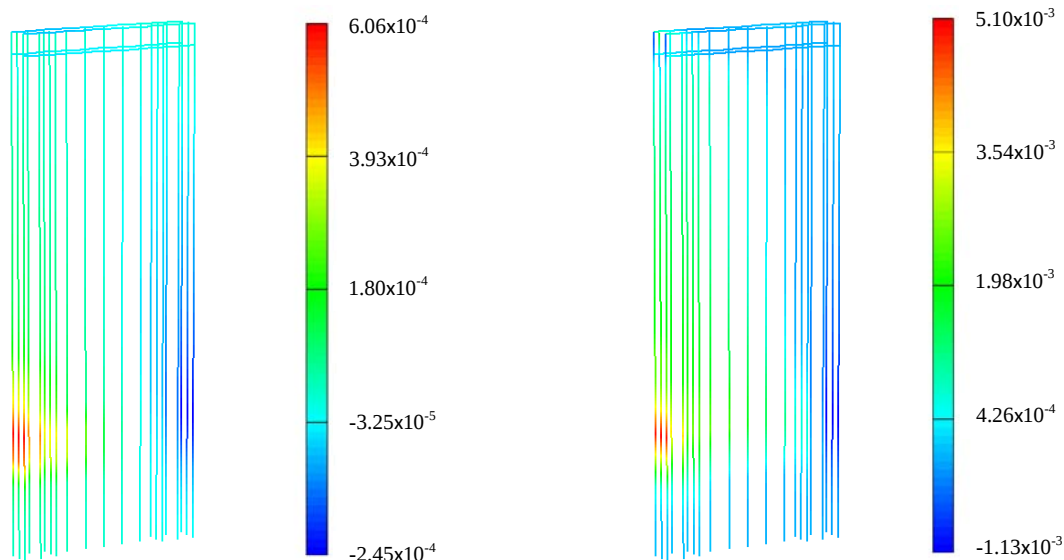
(e) 供試体 No. 5



(e) 載荷荷重瞬間低下後 (柱主鉄筋降伏)

図-4 各供試体荷重-変位曲線の比較

図-5 解析ケース 2-1 により得られた
供試体 No. 1 の鉄筋降伏



(a) 第1折点発生点（荷重 102.1kN）

(b) 第2折点発生点（荷重 279.3kN）

図-6 解析ケース 3-3 により得られた供試体 No. 1 の線要素（主鉄筋）のひずみコンター図

(c) 圧縮側柱の帯鉄筋（荷重=328.5kN, 変位=25.9mm）である。実験値³⁾は、(a)引張側柱の主鉄筋（荷重=112kN, 変位=2.5mm）、(b)壁の縦方向鉄筋（荷重=133kN, 変位=3.4mm）、(c)圧縮側柱の帯鉄筋（荷重=317kN, 変位=24.6mm）であり、降伏順序は一致しているが、主鉄筋の降伏荷重は過大に評価する傾向にある。また、図-4 (a) の左側図に示している丸印は、載荷荷重が瞬間的に低下しているところであるが、この前後における主鉄筋降伏状況を図-5 の (d), (e) に示す（「N-Yield」は降伏してない要素、「Yield」は降伏した要素、「P-Yield」は降伏後に、直前ステップより鉄筋応力が低減した要素）。荷重低下したときに、橋脚基部の主鉄筋が降伏状態に達し、断面内の鉄筋が全て降伏する。他の供試体に対してもケース荷重が瞬間的に低下しているところは、全主鉄筋降伏となっている。

図-6 に FEM 解析のケース 3-3 から得られた供試体 No.1 の線要素（主鉄筋部分）ひずみコンター図を示す。ここで対象としている解析ステップは、図-4 (a) の右側図に示している丸印の付いた第1折点発生点と第2折点発生点である。図-6 の (a) からは引張側柱の主鉄筋は降伏していないことがわかる。図-6 の (b) からは引張側柱の主鉄筋が降伏し、壁の縦方向鉄筋が降伏値付近となっている。これにより、第2折点は引張側柱の主鉄筋が降伏し、壁の縦方向鉄筋も降伏状態にあることがわかる。

4.3 解析モデルの考察

本節では、荷重-変位曲線及び鉄筋降伏状態に基づいて、実験供試体に適用する解析モデルを提案する。2次元及び3次元の解析モデルを6ケース検討した結果は、コンクリートを四辺形要素に置換し、全体鉄筋を要素内

埋め込み鉄筋として扱った2次元解析モデルが、水平単調漸増載荷実験の状況を最も精度よく表現しているため、当該フレキシブル RC 橋脚の解析モデルとして最も相応しいと考える。解析の第2折点発生点及び載荷荷重瞬間低下（図-4 の (a) 参照）などの評価が実験より早過ぎる傾向がある。これは、実験は解析よりヒステリシス現象があると思われる。

また、図-7 に示すように、3次元解析モデルは、ひび割れのシミュレーションに、得意なところがあるが、精度を向上させるため、材料構成則などの再検討が必要であると考えている。

一方、参考文献 10), 11)では、実験供試体の主鉄筋をトラス要素に置換した有限要素解析を用い、精度よい結果を得ているが、筆者らの知見と異なっている。これは軸力の有無が関係しているかも知れない。今後の課題としたい。

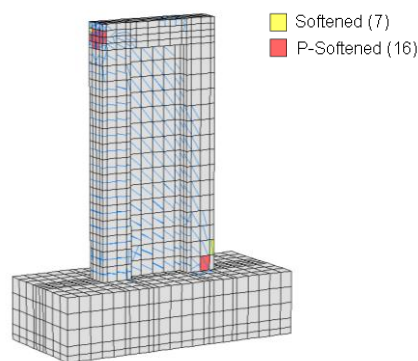


図-7 3次元解析モデルのひび割れ図

5. まとめ

著者らによる既往のフレキシブル RC 橋脚の橋軸直角

方向水平載荷実験³⁾に対して、2次元・3次元非線形有限要素解析を行った。得られた主な知見を以下に示す。

(1) コンクリートと鉄筋をモデル化し、2次元・3次元の解析モデルを6ケース作成し、検討を行った。その結果は、本実験供試体に対して、鉄筋を全て要素内埋め込み鉄筋として扱った2次元解析モデル(ケース2-1)が、実験結果をよく評価することがわかった。ただし、コンクリート強度を反映した実験結果を十分に再現できなかった。

(2) 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、エネルギーを吸収できる特徴があり、市販の有限要素解析ソフトでもこの靱性性能を評価できた。また、当該橋脚の設計に関しては、安全性を考慮して、載荷荷重が瞬間低下(図-4の(a)参照)したところを終局変位とすることが適当であると考ええる。

(3) 本実験供試体に対して、2次元解析モデルの方が3次元解析モデルより精度よい評価しているが、今後、コンクリートは六面体要素とし、壁の横方向鉄筋及び柱の帯鉄筋は要素内埋め込み鉄筋、柱と梁の主鉄筋及び壁の縦方向鉄筋はトラス要素に置換し、付着すべりを考慮した3次元解析モデルも検証する予定である。

(4) 解析結果により、鉄筋の降伏順序は、実験と一致しているが、主鉄筋の降伏荷重は過大に評価する傾向にある。実験の発生事象を厳密に把握するため、今後、各供試体の配筋状況と材料特性により、材料構成則及びモデル化係数の修正を行い、解析精度を向上させ、当該橋脚の靱性性能を適切に評価した解析手法を構築することを目指したい。

参考文献

- 1) 川崎・大塚・福永・今村・山崎：耐震壁を有する門型RC高橋脚の水平せん断力向上に関する研究，土木学会第65回年次学術講演会講演概要集V，2010.9
- 2) 高・大塚・川崎・今村：耐震壁を有する門型RC橋脚の橋軸直角方向の水平せん断耐力に関する検討，第20回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，2011.10
- 3) 高・大塚・福永・川崎：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.2，2011.7
- 4) 山崎・大塚・高・今村：CFRPシートによるI型断面フレキシブルRC橋脚模型のせん断補強実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，2011.7
- 5) 伊藤忠テクノソリューションズ(株)：FINAL/V11 HELP
- 6) 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
- 7) 長沼一洋：三軸圧縮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集，第474号，pp.163-170，1995.8
- 8) 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
- 9) Elmsori, M., Kianoush, M.R. and Tso, W.K. : Modeling bond-slip deformations in reinforced concrete beam-column joints, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.27, pp.490-505, 2000
- 10) 中谷好志，他：RC造耐震壁のせん断強度と壁板の拡がりに関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，2011
- 11) 遠山誉，他：枠柱が耐震壁のせん断性状に与える影響に関する有限要素法解析による検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，2011