

ファイバーモデルを用いたRC非線形解析の 照査項目と限界値に関する検討

山本 義昭¹・山谷 敦²・鬼束 俊一³

¹正会員 東京電力株式会社 電力技術研究所 (〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町四丁目一番地)

²正会員 東電設計株式会社 技術開発本部 (〒110-0015 東京都台東区上野三丁目3-3)

³東電設計株式会社 技術開発本部 (同上)

近年、鉄筋コンクリート構造物の応答、耐震性能を詳細に評価するため、Fiber model が開発されてきている。本研究では、Fiber model を実務の耐震設計に適用するため、COM3Fiber (東大) により既往の単柱橋脚実験のシミュレーション解析を行って、解析手法の適用性を評価するとともに、耐震性能3の照査項目と限界値の検討を行い、以下の結果を得た。①Fiber model はRC 橋脚の非線形挙動をほぼ模擬できるが、荷重-変形関係における耐力低下点は精度良く再現できない。②基部のコンクリートの剥落により耐力低下を生じる単柱橋脚に対しては、最外縁コンクリートの圧縮ひずみを照査項目とすると耐震性能を直接照査できる。③耐震性能3を規定するひずみの限界値は 3500μ と設定できる。

Key Words : Fiber model, reinforced concrete columns, ductility evaluation, seismic performance

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、鉄筋コンクリート構造物に対する耐震性能を評価するため、動的非線形解析などを使用し、できる限り忠実に対象構造物の挙動を再現することが求められてきている。梁・柱部材を対象とした3次元Fiber model は、既に鉄筋コンクリート棒部材の曲げ理論に基づいて確立されており、解析が比較的容易であることから、今後の実務設計における耐震性能照査の有効な手段になり得ると期待されている。本研究では、COM3Fiber¹⁾ (東大) を用いて、Fiber model を実務の耐震設計に使用する立場で、その適用性評価を行い、照査項目と限界値に関する検討を行った。

2. 検討の対象とした実験

解析の対象としたのは、図-1に示すような単柱橋脚である。対象実験の寸法諸元を表-1に示す。本研究では、独立行政法人土木研究所で行われた実験データ²⁾の中から、鉄筋比、断面寸法、軸力、帯鉄筋比等が異なる8体を選定した。このうち、軸力は全て 2.0 N/mm^2 以下と、比較的小さな応力レベルにあり、また、帯鉄筋比は、ほとんどが0.2%以下で、比較的拘束が小さい。

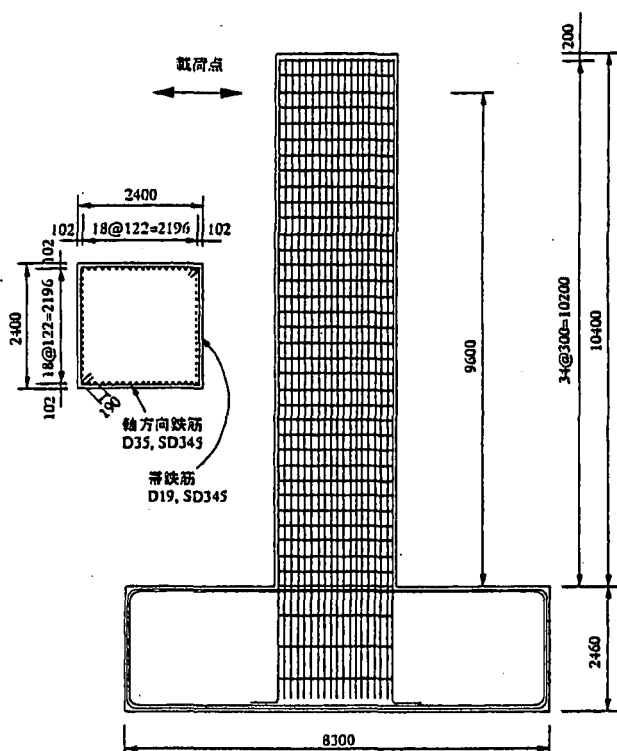


図-1 検討対象実験 (No. 7)

3. 検討の対象とする限界状態の設定

耐震設計で必要となる耐震性能と要求性能を、道路橋示方書・同解説V耐震設計編、平成8年版 (以下、「道示

表-1 検討対象とした実験

供試体	載荷高 (mm)	初期軸圧縮力 (N/mm ²)	せん断 支間比	断面寸法 (mm)	主筋		コンクリートの 圧縮強度 f'_c (N/mm ²)
					鉄筋比 ρ (%)	降伏点 f_y (N/mm ²)	
1 (P 1)	3010	1.0	5.0	600×600	0.95	368	29.6
2 (P 5)	3010	1.0	5.0	600×600	0.99	373	37.4
3 (P58)	2500	2.0	5.0	500×500	2.03	370	39.2
4 (M 2)	4800	1.0	4.0	1200×1200	0.77	377	37.6
5 (M 3)	4800	1.0	4.0	1200×1200	1.21	377	39.8
6 (M 4)	4800	1.0	4.0	1200×1200	1.75	330	33.8
7 (L 1)	9600	0.0	4.0	2400×2400	1.20	424	33.5
8 (S 1)	2400	0.0	4.0	600×600	1.20	395	39.0

耐震設計編」と称す)³⁾を参考にして表-2に示すように設定した。このうち、耐震性能2は耐震性能3に更なる安全裕度を確保することで、耐震性能1は鉄筋の降伏で、それぞれ照査できると考えられる。そこで、本研究では、耐震性能3に対する照査項目と限界値について検討を行うこととした。解析に先立って、上記の実験結果を分析したところ、すべての供試体において、被りコンクリートの剥落とほぼ同時に軸方向鉄筋が座屈し、荷重低下が生じていた。すなわち、耐震性能3に対応すると考えられる最大荷重点は、被りコンクリートの剥落で規定できる。

表-2 検討の対象とする耐震性能の設定

区分	要求性能	目標性能
耐震性能1	降伏状態を越えない	鉄筋が降伏しない
耐震性能2	限定された損傷	耐震性能3に対して更なる安全裕度を確保
耐震性能3	橋としての健全性を損なわない	水平耐力が低下しない ・被りコンクリートが剥落しない ・鉄筋が座屈しない ・鉄筋が破断しない

4. ファイバーモデルの適用性評価

(1) 耐力低下時変形量の実験と解析の比較

Fiber model の適用性を評価するために実験結果のシミュレーション解析を行った。塑性ヒンジ部については、事前に断面高さ D に対して分割数を増減させた比較解析を行い、要素寸法が $D/2$ 以下であれば、要素寸法が解析結果に及ぼす影響は小さいと判断されたことから、要素寸法を $D/2$ としてモデル化した。ただし、要素寸法に応じて応力-ひずみ関係を変えるなどの、エネルギー概念的な扱いは行っていない。

荷重-変位関係の一例を図-2および図-3に、各ケースの耐力低下時の層間変形角を表-3に示す。図より、履歴曲線の包絡線は解析と実験で比較的良好に一致しているといえるが、内部ループに関しては、図-3のようなスリップ型に近い性状は再現できていない。これは、Fiber modelに限らず、曲げ理論に基づく解析手法の問題点の一つである。

表-3 の実験と解析の耐力低下時の層間変形角を見ると、実験よりも先に解析の方が耐力低下する設計上安全側のケースと、解析よりも先に実験が耐力低下する設計上危険側となるケースがある。表中の備考に示したように、前者についてはコンクリート強度がやや小さいか鉄筋比が比較的大きいものであり、後者は鉄筋比が0.99~1.2%

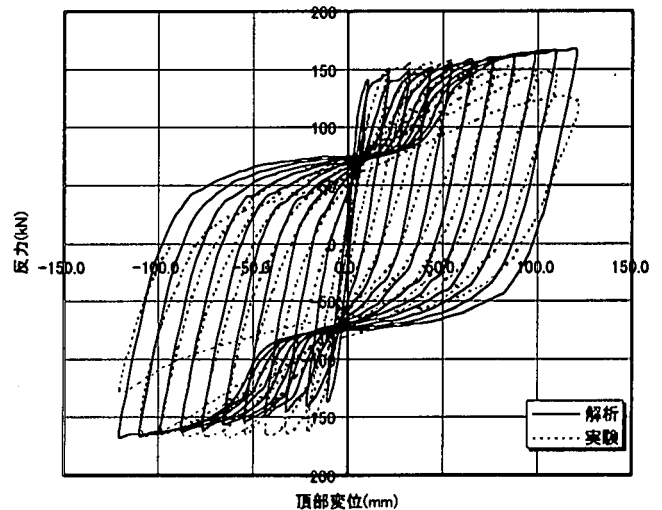


図-2 荷重-変位関係 (No. 2)

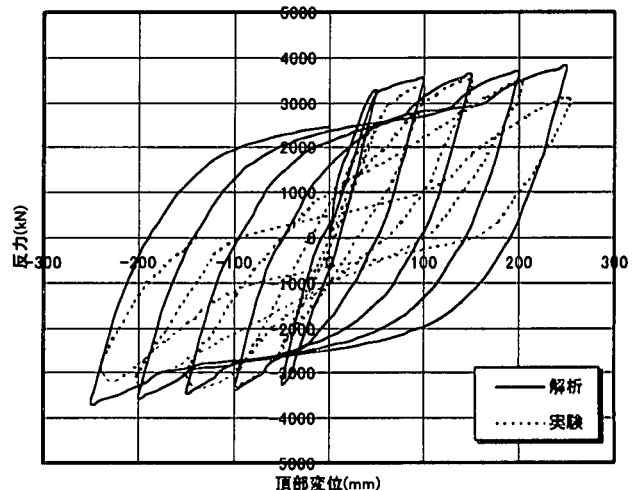


図-3 荷重-変位関係 (No. 7)

表-3 検討の対象とする耐震性能の設定

供試体	耐力低下時の層間変形角 (%)		解析値 実験値	備考
	実験値	解析値		
1	2.56	2.49	0.97	コンクリート強度小
2	3.65	4.22	1.16	
3	3.20	2.36	0.74	鉄筋比大
4	2.29	4.52	1.97	
5	2.60	3.42	1.32	
6	2.40	1.81	0.75	鉄筋比大
7	2.08	3.44	1.65	
8	2.92	4.58	1.57	

のものである。これは、本研究で対象とした供試体のほとんどが低軸力、低拘束の範疇にあると考えられることから、鉄筋比やコンクリート強度といった材料定数の影響が現れたものと考えられる。

（２）鉄筋比と寸法による影響の検討

二羽ら^④の研究によれば、コンクリートの圧縮破壊領域の挙動は断面寸法に依存することが指摘されている。

一方で、本研究の解析では、コンクリートの圧縮破壊に対してエネルギー概念を導入する等の配慮がなされていない。そこで、本研究の解析結果が、断面寸法に応じてどのように変化しているのかを検討した。層間変形角と断面寸法の関係を図-4に示す。同図より、本研究の解析結果は、断面寸法に拘わらずほぼ同様の変形性能を示しており、変形性能が断面寸法に依存しないと仮定すれば、ほぼ妥当な結果であると判断できる。参考のために、同図には実験結果を併せて示してあるが、実験の層間変形角は供試体寸法が大きくなると小さくなる傾向が見られる。これは、供試体寸法が小さいときには鉄筋の抜けだしの影響が相対的に大きくなるためと考えられる。

RC部材の変形性能には、鉄筋比、帯鉄筋比、軸力、耐力比など種々の要因が影響するが、本研究の供試体では、特に、鉄筋比による影響が示唆された。そこで、層間変形角と鉄筋比の関係を図-5に示す。これを見ると、解析結果は鉄筋比が大きな供試体ほど耐力低下時の層間変形角は小さく、傾向が表現されている。一方、実験結果からは、解析ほど明確な相関関係は見出せない。

（３）解析手法の適用性評価

実験と解析を比較した結果、耐力低下時の解析の変位は実験値を上回るものと、下回るものがあること、解析結果は鉄筋比の影響を強く受けることが分かった。そこで図-6に示すように、耐力低下時の層間変形角について解析値／実験値と鉄筋比の関係を求めた。これより、鉄筋比が小さい段階では解析値／実験値が1.0よりも大きい、鉄筋比が大きくなるにつれて解析値／実験値は

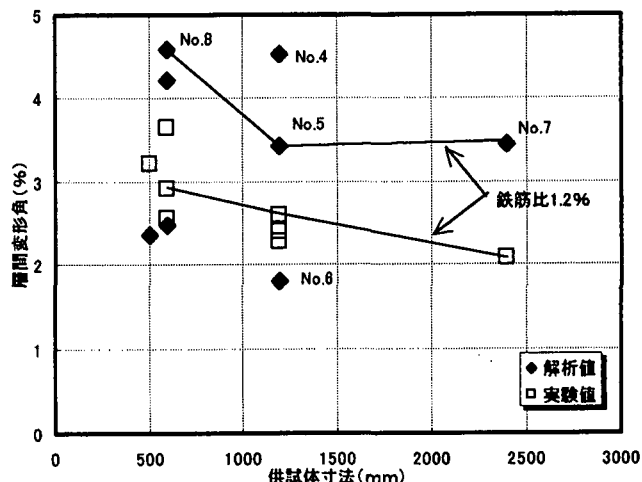


図-4 耐力低下時の層間変形角と供試体寸法の関係

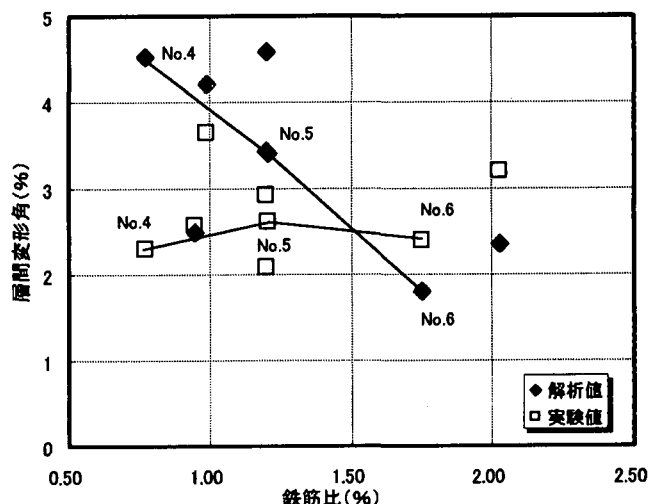


図-5 耐力低下時の層間変形角と鉄筋比の関係

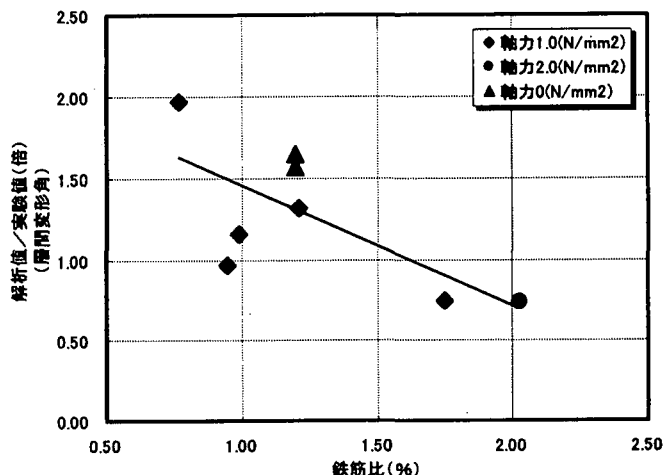


図-6 耐力低下時の解析値／実験値と鉄筋比の関係

徐々に小さくなり、鉄筋比1.5%を越えると、解析による耐力低下が実験よりも早い段階で生じる傾向にあることが分かる。これは、以下のように解釈できる。

実験結果は、鉄筋比に拘わらず、全ての供試体が被りの剥落に伴う軸方向鉄筋の座屈によって最大耐力を迎えていた。一方で、解析には座屈モデルが組み込まれていないことから、最終的な耐力はコンクリートの圧縮損傷

に依存する。このことから、解析結果は、実際には座屈を生じるような状態となっても荷重が低下せず、圧縮局所化が生じるまで変形し、その結果、鉄筋比が比較的小さいときの解析値／実験値が 1.0 を上回る傾向となったものと考えられる。しかし、解析では、鉄筋比が大きいほど圧縮側コンクリートの損傷も大きくなることから、鉄筋比が 1.5% を越える高鉄筋比では、解析の耐力低下が実験よりも早く生じたものと考えられる。

以上のことから、耐震性能 3 の限界値を耐力低下時の変位とする場合、鉄筋比をパラメータとした関数を設定する事で、解析値を一定の安全裕度に補正することができる可能性があることが分かった。

5. 照査項目と限界値の設定

(1) 照査項目の設定

鉄筋コンクリート構造物の変形性能を評価するための照査項目としては、応答塑性率、層間変形角、ひずみ等の指標が考えられる。応答塑性率を用いる場合は、道示耐震設計編やコンクリート標準示方書耐震設計編（平成 8 年制定、土木学会）などで評価式および限界値が提案されているが、解析により得られた結果を何らかの形で加工する必要がある。また、層間変形角には塑性ヒンジ部分の損傷状態が直接反映されているとは言い難い。しかし、ひずみを限界値として設定することができれば、解析結果を加工することなく塑性ヒンジ部（局部）の損傷状態を直接的に照査することができる。したがって、本検討ではひずみを照査項目として用いる場合についてその可能性を検討した。

(2) 限界値の設定

ここでは耐力低下時における断面最外縁の圧縮ひずみに着目し、図-7 に鉄筋比と圧縮ひずみの関係を示した。実験の圧縮ひずみについては、被り剥落時のコンクリートひずみが計測されていないことから、同じ変形を与える時の解析値を記入した。同図より、解析から求めた耐力低下時の圧縮ひずみは鉄筋比の増加に伴い小さくなる傾向がある。また、実験と解析の耐力低下時の層間変形角は一致していなかったが、圧縮ひずみの場合も実験値の方が解析値より小さくなる傾向にある。

現段階では実験値と解析値の差異を定量的に評価できないことから、ここで、実務に適用するひずみの限界値を以下のように設定した。すなわち、解析、実験から得られた耐力低下時の全てのひずみを設計上安全側に包絡

する値として、 3500μ を限界値として設定した。この値は、結果的に、従来の設計で用いられてきたコンクリート標準示方書の終局ひずみとも整合している。

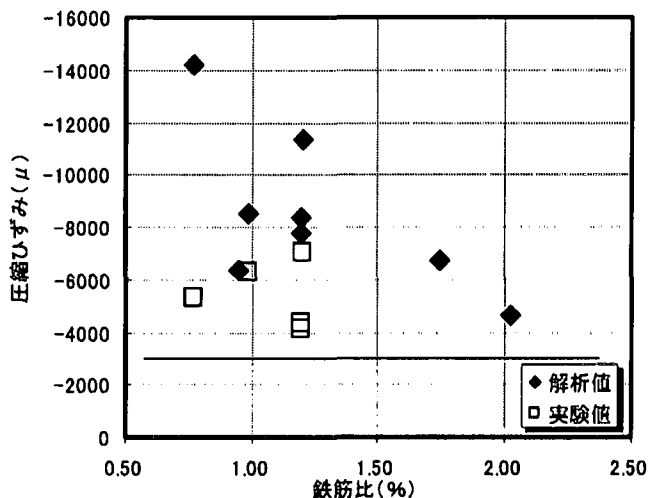


図-7 耐力低下時の圧縮ひずみと鉄筋比の関係

6. まとめ

Fiber model を用いて実験結果をシミュレートし、解析手法の適用性および照査項目と限界値について検討した結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) ファイバーモデルは RC 橋脚の非線形挙動を最大荷重点付近までほぼ再現できる。
- 2) しかし、耐力低下時の変形量に着目すると、解析は実験結果を精度良く再現できない
- 3) 橋脚のような構造では損傷が基部に集中することから、塑性ヒンジ部のひずみを照査項目とすれば、損傷が直接的に反映された照査となる。
- 4) 解析や実験のばらつきを考慮すると、耐力低下時の圧縮ひずみ 3500μ を限界値として照査できる。
- 5) RC 橋脚の終局挙動は塑性ヒンジの挙動に大きく影響されることから、今後は、塑性ヒンジ長とそこで用いる材料モデルに関する検討が必要であると考えられる。
- 6) 今回の検討は、限られた条件下の橋脚に対するものであり、ばらつきも比較的大きいことから、今後さらに実験と解析を比較しデータを蓄積していく必要があるといえる。

参考文献

- 1) FORUMU8 : COM3Fiber マニュアル
- 2) 星限順一他：鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす断面寸法の影響に関する研究，土木学会論文集 No.669/V-50 pp.215-232 2001.2
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、平成 8 年版
- 4) Torsak LERTSRISAKULRAT et al. : Experimental Study on Parameters in Localization of Concrete Subjected to Compression, *J. Mat., Conc. Struct., Pavements*, JSCE, No.669/V-50, pp.309-321, 2001