

応用要素法による RC 柱弱点個所の補強前後の損傷挙動解析

Simulation of Failure Mechanism of Vulnerable RC Column Before and After Seismic Strengthening

上 半 文 昭*・目 黒 公 郎**

Fumiaki UEHAN and Kimiro MEGURO

1. は じ め に

鉄筋コンクリート橋脚の中間部に定着長が不足した主鉄筋段落し部、つまり必要な高さまで段落し鉄筋が達していない段落し部が存在する場合、その橋脚中間部に著しい損傷が生じることがある。適切に帯鉄筋が配置された鉄筋コンクリート橋脚が基部で曲げ破壊する場合には、一般にねばりのある破壊性状を示すが、段落し部で破壊する場合には、曲げによる損傷から脆性的なせん断破壊に移行しやすく、橋梁の倒壊、落橋などの致命的な損傷を生じる可能性がある。新しい構造物では、これらの点を考慮した設計がなされているが、過去の基準で設計された構造物はその限りではなく、鉄筋段落し個所が地震時の弱点個所となる可能性の高い構造物が多数存在しているものと考えられる。これらの構造物については、耐震性能を正しく把握し、適切な耐震補強を施す必要がある。

著者らは、最新の非線形構造解析手法である応用要素法 (Applied Element Method, AEM)¹⁾ を用いて RC 構造物の複雑な損傷挙動を分析して、構造物の耐震性能評価、地震直後の構造物の損傷度評価、及び効果的な復旧工法の選択支援などに役立てたいと考え、実構造物の地震時損傷挙動の解析、損傷による振動特性変化の分析²⁾、補強効果を評価するための数値解析モデルの開発³⁾などを行ってきた。それらの成果を既存の構造物に適用するにあたって、RC 構造物の弱点個所の一つである主鉄筋段落し部の耐震性能を適切に評価できること、及び段落し個所を補強した際の補強効果を適切に把握できることは重要な課題の一つと思われる。すなわち、段落し鉄筋の定着長や鋼板などの補強材の巻き立て幅の微妙な違いによって、段落し部を有する部材の損傷挙動が変化する現象の把握である。

そこで、本報告では段落し部を有する橋脚模型および鋼板巻き立て補強された段落し部を有する橋脚模型の損傷挙動の AEM シミュレーションを実施し、数値解析的にどの程度までの追跡が可能であるかを検証した。段落し部の損傷挙動の分析、及び段落し部の鋼板巻き立てによる補強効果に関する実験に関しては、川島ら⁴⁾による数多くの実験成果があるので、ここではその中から、段落し部の損傷挙動に対する鉄筋定着長の影響に関する実験、及び鋼板巻き立て補強による主鉄筋段落し部の補強効果の確認に関する実験を対象として、非線形構造解析を行う。

2. 数値解析手法

本研究では、解析手法として微小変形領域から大変形崩壊領域までの構造物の挙動を解析できる応用要素法 (AEM)¹⁾を用いた。AEMでは、解析対象を仮想的に分割した要素の集合体として取り扱う。各要素は法線方向とせん断方向の2種類の分布バネでつながれている (図1)。2次元解析の場合、各要素は水平、鉛直、回転の3自由度を持っており、分布バネを介して周囲の要素と力のやり取りを行なう。各分布バネには、コンクリートまたは鉄筋の材料モデルが適用されており、コンクリートのクラック、鉄筋の降伏・破断等の RC の損傷挙動を解析可能である。

鋼板巻き立て補強された RC 柱の解析には、応用要素法を用いた鋼板補強柱の2次元解析モデルを用いた。同モデルは、鋼板内部の RC 要素 E_c 、左右両端の鋼板要素 E_{js} 、両端の鋼板をつなぐ鋼板要素 E_{jb} の3種類の要素を用い、

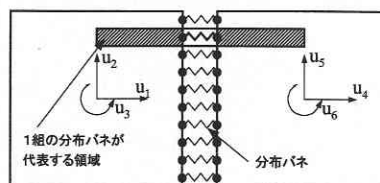


図1 AEMの要素と分布バネ

*財団法人 鉄道総合技術研究所

**東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

鋼板補強された RC 柱を 2 次元モデル化したものである³⁾ (図 2)。

3. 段落とし部を有する RC 柱の解析

3.1 実験概要

川島ら⁴⁾は RC 橋脚の主鉄筋段落し部の影響を確認するために、RC 橋脚模型の載荷実験を実施している。実験に用いた橋脚模型は図 3 の通りである。表 1 に各供試体の諸元を示す。4 体の供試体の違いは、主鉄筋の段落し状況である。供試体 3-1 は主鉄筋の段落しが行われていない。供

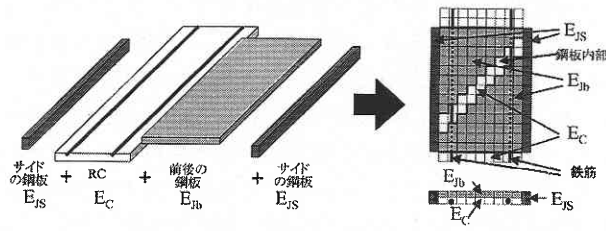


図 2 鋼板補強 RC 柱の 2 次元 AEM モデル

表 1 各供試体の諸元

	3-1	3-2	3-3	3-4
断面寸法 (cm)	50×50			
かぶり厚 (cm)	3.5			
載荷高さ (cm)	250			
せん断スパン比	5.4			
段落し高さ (cm)	無し	110	135	160
主鉄筋降伏強度 (MPa)	308			
帯鉄筋降伏強度 (MPa)	272			
鉄筋ヤング率 (GPa)	200			
コンクリート圧縮強度 (MPa)	31.3	32.0	32.5	31.9
コンクリートヤング率 (GPa)	28.0			

試体 3-2 が設計計算上段落ししても良い位置から 6 cm 低い位置で、供試体 3-3、供試体 3-4 がそれぞれ 19 cm、44 cm 高い位置で段落しされている。

実験では、これらの供試体を鉛直に立てた状態でフーチングを反力床に固定し、動的加振機により供試体頭部に正負交番水平力が加えられた。軸方向への載荷は行われていない。供試体 3-1 の降伏変位である 1.3 cm を基準変位 δ_0 として、各供試体にこの整数倍の変位 ($n \times \delta_0$, $n = 1, 2, 3, \dots$) が順次変位振幅を増加させながら載荷されている。同一の載荷変位振幅における載荷繰返し回数は 10 回である。

3.2 数値解析概要

対象となるそれぞれの供試体をサイズ 5 cm × 5 cm、要素間バネ 5 本の AEM 要素 620 個を用いて平面応力状態を仮定して 2 次元モデル化した。コンクリートの圧縮強度、鉄筋の降伏強度、段落し位置などは、すべて実供試体の値に合わせた。

モデルへの載荷方法も実験に合わせたが、実験では同一変位振幅で各 10 回繰返し載荷しているのに対し、解析では演算時間短縮のため各 1 回載荷とした。

3.3 最大耐力の比較

最大耐力の実験結果及び解析結果の比較を表 2 に示す。解析結果は実験結果の 90 ~ 97 % と、やや低めの値を示し

表 2 最大耐力の比較

供試体	3-1	3-2	3-3	3-4
最大耐力の実験結果 (kN)	167	148	161	166
最大耐力の解析結果 (kN)	154	143	145	160

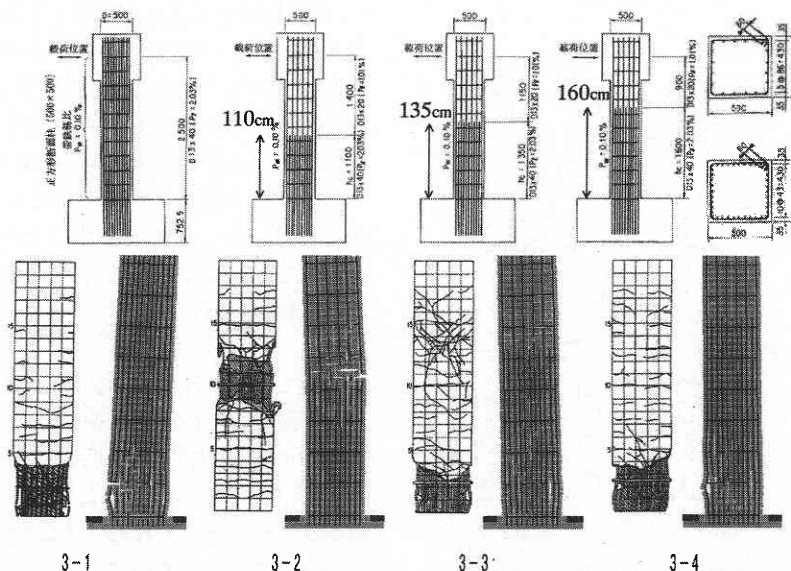


図 3 供試体諸元 (上図) と損傷状況 (下図: 各左が実験結果, 右が解析結果)

研 究 速 報

ている。解析では主鉄筋の最大強度を降伏強度の 1.75 倍と仮定したが、これが実際の値よりもやや低かったのではないかと考える。

3.4 損傷挙動の比較

図 3 に川島ら⁴⁾による実験による最終的な供試体の損傷状況図と、数値モデルの損傷状況を示す。図 4 に軸方向鉄筋のひずみ分布の実験および解析結果を示す。(本論文では、実験結果については文献 4) の図をそのまま引用させていただく。)

(a) 供試体 3-1 (段落し無し)

実験結果、解析結果ともに柱基部に損傷が集中している。鉄筋のひずみも柱基部に集中している。実験供試体が $8\delta_0$ 、数値モデルが $9\delta_0$ で、柱基部の主鉄筋が破断して最終状態に達した。

(b) 供試体 3-2 (段落し位置高さ 110 cm)

実験結果、解析結果ともに段落し部に損傷が集中しており、基部の損傷は軽微である。鉄筋のひずみも段落し部に集中している。実験供試体が $6.5\delta_0$ 、数値モデルが $6\delta_0$ で最終状態に達した。

(c) 供試体 3-3 (段落し位置高さ 135 cm)

実験結果、解析結果ともに柱基部と段落し部の 2ヶ所に損傷が分散したが、基部の損傷が顕著であった。実験供試体では、 $6\delta_0$ 載荷以降に基部に損傷が集中し、 $8.5\delta_0$ 載荷時に基部の損傷で最終状態に至った。解析モデルでは、 $6\delta_0$ で段落し部の主鉄筋が一部破断したが、その後は基部に損傷が集中した。

(d) 供試体 3-4 (段落し位置高さ 160 cm)

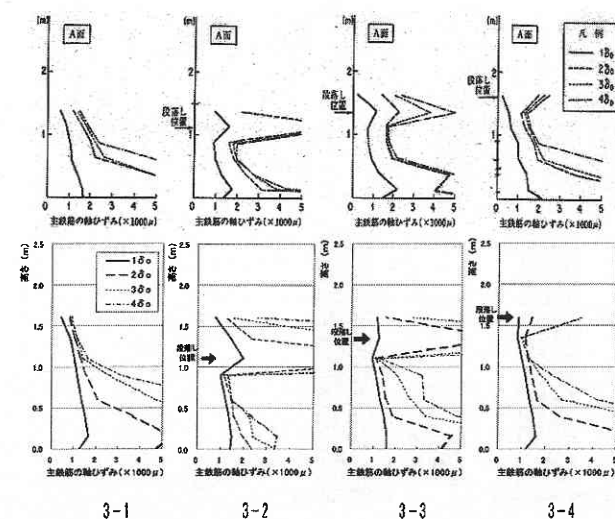


図 4 実験 (上図) および解析 (下図) による段落し供試体の主鉄筋ひずみ分布

実験結果、解析結果ともに柱基部に損傷が集中し、 $8\delta_0$ 載荷時に柱基部の軸方向鉄筋の破断により最終状態に達した。

3.5 考 察

実験結果では、設計計算上段落ししても良い高さより低い位置での主鉄筋の段落しを有する供試体 3-2 が段落し部で破壊した。段落し位置を高くするにしたがって基部に損傷が移行して、段落しの無い供試体 3-1 の損傷状況に近づくことが、主鉄筋のひずみ分布の観測結果からも確認された。

応用要素法による非線形構造解析結果は、実験結果に見られる上記の傾向をよく捕らえている。最大耐力や最終状態に至る載荷変位量なども実験結果をよく模擬できている。RC の損傷を伴う領域ではひずみの計測が困難であるため、実験結果に誤差が含まれている可能性があることを考慮して、本研究ではひずみの解析精度に関する詳細な議論は避けるが、ひずみの値は実験と解析で概ね一致しており、段落し位置の変化に伴うひずみ分布の変化の傾向をよく捕らえている。

4. 鉄筋段落し部の鋼板補強効果の解析

4.1 実験概要

川島ら⁴⁾は、主鉄筋段落し部において著しい損傷を受ける可能性を有する RC 橋脚を鋼板巻立て工法で補強する場合の補強効果について、RC 橋脚模型の載荷実験を実施して調べている。実験に用いられた供試体は図 5 の通りである。表 3 に各供試体の諸元を示す。各供試体の寸法諸元は同一であるが、鋼板の巻立て幅が異なっている。供試体 4-1 は鋼板補強を施していない供試体であり、設計計算上段落しして良い位置よりも 22 cm 低い位置で主鉄筋が段落しされている。供試体 4-2 は段落し位置の上下 25 cm ずつ (鋼板巻き立て幅 50 cm) の範囲を巻立てたものである。供試体 4-3 は鋼板の巻き立て幅を 75 cm とし、段落し位置上側、及び下側にそれぞれ 50 cm、25 cm ずつ巻立てて補強されている。鋼板の引張強さは 274 MPa で、コの字型の鋼板 2 枚が載荷方向と平行な面において溶接されている。鋼板と橋脚の間にはエポキシ樹脂が 3 mm の厚さで注入されている。

実験では、これらの供試体を横に寝かせて反力壁に固定し、供試体頭部に正負交番水平力が加えられた。正負交番水平力の載荷方法は 3 章と同じく、基準変位 δ_0 の整数倍の変位 ($n \times \delta_0$, $n = 1, 2, 3, \dots$) が順次変位振幅を増加させながら載荷された。ここでの基準変位の値は 1.5 cm である。またこのケースでは各供試体には 282 kN の軸力が載荷されている。

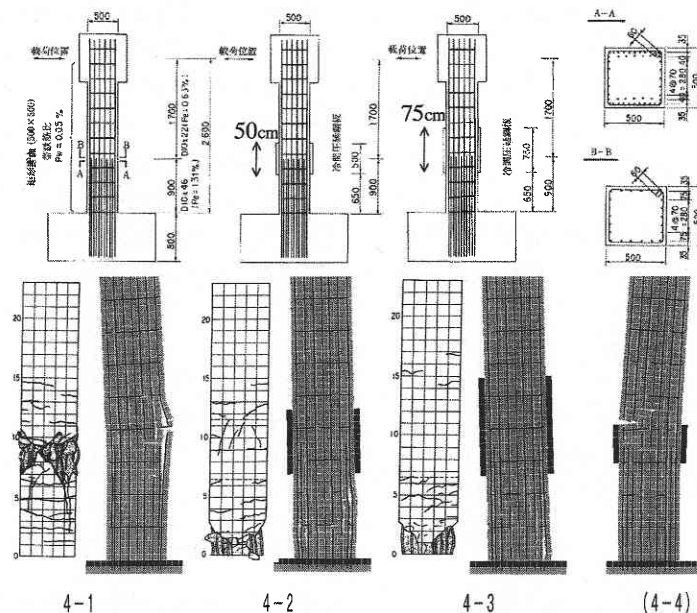


図5 供試体諸元（上図）と損傷状況（下図：各左が実験結果，右が解析結果）

表3 各供試体の諸元

	4-1	4-2	4-3	(4-4)
断面寸法 (cm)	50×50			
かぶり厚 (cm)	3.5			
載荷高さ (cm)	260			
せん断スパン比	5.6			
段落し高さ (cm)	90			
主鉄筋降伏強 (MPa)	409		357	
帯鉄筋降伏強度 (MPa)	433		245	
鋼板板厚 (mm)	—		0	
鋼板巻き立て幅 (cm)	—	50	75	30
鉄筋・鋼板ヤング率 (GPa)	200			
コンクリート圧縮強度 (MPa)	42.0	43.8	35.6	35.6
コンクリートヤング率 (GPa)	28.0			

表4 最大耐力の比較

供試体	4-1	4-2	4-3
最大耐力の実験結果(kN)	124	128	126
最大耐力の解析結果(kN)	127	129	133

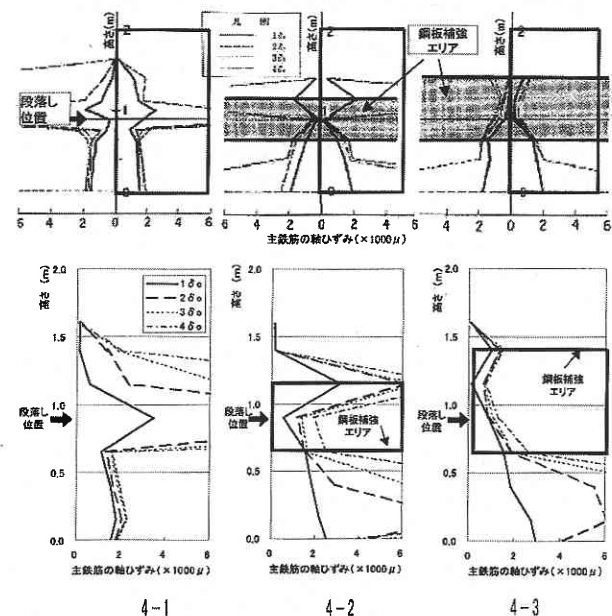


図6 実験（上図）および解析（下図）による補強供試体の主鉄筋ひずみ分布

4.2 数値解析概要

対象となるそれぞれの供試体を、サイズ5cm×5cm、要素間バネ5本のAEM要素640個を用いて2次元的にモデル化した。コンクリートの圧縮強度、鉄筋の降伏強度、段落し位置などは、すべて実験供試体の値に合わせた。

モデルへの載荷方法は実験に合わせたが、実験では同一変位振幅で各10回繰り返し載荷しているのに対し、解析では演算時間短縮のため各1回載荷とした。

4.3 最大耐力の比較

最大耐力の実験及び解析の比較結果を表4に示す。解析結果は実験結果の100～105%でやや高めの値を示した。

4.4 損傷挙動の比較

図5に川島らによる実験による最終的な供試体の損傷状況図と、数値モデルの損傷状況を示す。図6に軸方向鉄筋

のひずみ分布の実験および解析結果を示す。

(a) 供試体4-1（無補強）

実験結果、解析結果ともに損傷は段落し部に集中した。

研 究 速 報

実験供試体が $7\delta_0$ 、数値モデルが $6\delta_0$ で最終状態に達した。

(b) 供試体 4-2 (高さ 50 cm の鋼板で補強)

実験結果、解析結果ともに補強箇所よりやや上の位置および基部に損傷が分散したが、最終的には柱基部に損傷が集中した。

(c) 供試体 4-3 (高さ 75 cm の鋼板で補強)

実験結果、解析結果ともに柱基部に損傷が集中し、実験供試体が $7\delta_0$ 載荷、数値モデルが $6\delta_0$ 載荷で最終状態となった。

(d) 供試体モデル 4-4 (高さ 30 cm の鋼板で補強：数値解析のみ)

高さ 30 cm の鋼板で補強した数値モデルを作成し、不十分な巻き立て幅の鋼板で補強した場合の橋脚の損傷挙動を調べた。このモデルでは、鋼板補強部のやや上部に損傷が集中した。

4.5 考 察

実験では、無補強の供試体 4-1 は段落し部に損傷が集中して破壊すること、鋼板の巻き立て幅を大きくするにしたがって、損傷が柱基部に移行することが確認された。応用要素法による解析結果もこの傾向を捕らえており、最大耐力や最終状態に至る際の載荷変位量の計算結果も十分な精度を持っている。また、解析のみ実施した供試体 4-4 の結果は、応用要素法による非線形構造解析で、不十分な補強が施された構造物の損傷挙動を分析できることを示している。

5. ま と め

主鉄筋段落し部を有する RC 橋脚模型を対象にした加振実験結果のシミュレーションを実施し、段落し鉄筋の定着

長の変化、及び鋼板巻き立て補強時の鋼板巻き立て幅の変化による RC 橋脚の損傷挙動の変化を応用要素法を用いて十分な精度で分析できることを確かめた。今後は、数値解析モデルのよりいっそうの精度向上に取り組むとともに、ここで得られた成果を踏まえて、既存構造物の地震時弱点個所の抽出、耐震補強された実構造物の耐震性能の評価、及び既存不適格構造物の効果的かつ経済的な補強方法の開発などに取り組みたい。

謝 辞

本研究では旧建設省土木研究所において実施された実験の結果を数値解析との比較データとして引用させていただきました。同実験の関係各位に深甚の謝意を表します。

(2001 年 9 月 19 日受理)

参 考 文 献

- 1) Meguro K. and Tagel-Din H.: A new efficient technique for fracture analysis of structures, *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center*, IIS, Univ. of Tokyo, No. 30, pp. 103-116, 1997.
- 2) 上半文昭, 目黒公郎: 非線形構造解析による RC 構造物の即時地震損傷度判定法に関する一考察, 土木学会応用力学論文集, Vol. 3, pp. 621-628, 2000.
- 3) Uehara F., Meguro K.: Vulnerability assessment of jacketed viaduct using microtremor measurement & numerical simulation, *Proceedings of 12th World Conference of Earthquake Engineering (CD-ROM)*, 2000.
- 4) 川島一彦, 運上茂樹, 飯田寛之: 鉄筋コンクリート橋脚主鉄筋段落し部の耐震性判定法及び耐震補強法に関する研究, 土木研究所報告, 第 189 号, 1993.