

繰返し荷重を受ける RC 柱の損傷領域評価と補修効果に関する解析的検討

Analytical Study on Evaluation of Damage Region and Repair Effect of RC Column subjected to Cyclic Loading

上田尚史*・張永興**・中村光***・国枝稔****

Naoshi UEDA, Yongxing ZHANG, Hikaru NAKAMURA and Minoru KUNIEDA

*正会員 博(工) 名古屋大学大学院助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町 1)

**工修 名古屋大学大学院博士後期課程 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町 1)

***正会員 博(工) 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町 1)

****正会員 博(工) 名古屋大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町 1)

In this study, damage evaluation of RC column subjected to cyclic loading and evaluation of retrofitting effect were conducted by means of 3 dimensional finite element analysis. Damage area of RC column was evaluated by using averaged compressive strain which was calculated by average of strain within certain area. Bond deteriorated area, in which concrete and rebar behave independently, could also be considered as the damage index of RC column. By comparing with the test result, both averaged compressive strain and bond deteriorated area corresponded to repaired area. Structural behavior of repaired RC column was simulated. As the results, it was confirmed that the damage evaluation method and repairing procedure in this study were suitable to simulate the repaired RC column.

Key Words: Damage Evaluation, Maximum Averaged Strain, Bond Deterioration Area

1. はじめに

現在, RC 構造物の耐震設計においては, 大地震に対し構造物にはある程度の損傷は許容し, 損傷を受けた後に補修・補強して使用し続けるという考え方が一般的となってきた。例えば, 土木学会コンクリート標準示方書¹⁾では, RC 構造物の耐震性能は, 早期の機能回復を目標とし, 復旧性を考慮して定義されている。そのため, 損傷を受けた RC 構造物の補修・補強後の性能評価手法の確立が重要となってきた。

損傷を受けた構造物に補修・補強を施す場合, まず構造物がどの程度の損傷を受けたのかを客観的な指標によって適切に評価する必要がある。また, 土木構造物は供用期間が長期に渡るため, 補修・補強後にも再度地震動等の外力によって損傷を受けることは大いに考えられる。したがって, 補修・補強によってどの程度性能を回復させるのか, また, 補修・補強後に構造物がどのような力学特性を持つのかを検討する必要もある。

本研究では, 解析的な手法により損傷を受けた構造物に対する補修後の性能評価を行うことを目的とし, 3次元有限要素解析により, 繰返し荷重を受ける RC 柱の損傷評価と, 損傷後の補修効果の解析的な評価を試みた。損傷評価の方法としては, コンクリートの最大主圧縮平

均化ひずみと鉄筋とコンクリートの付着劣化領域に着目し, 実験結果と比較することで, 手法の妥当性について検討した。また, 超高強度ひずみ硬化型モルタル(UHP-SHCC)により補修された RC 柱を対象として, 補修後の力学挙動の評価を行うとともに, 力学特性の異なるセメント系材料を用いた断面修復を想定した解析を行うことで, より効果的な補修材について考察した。

2. 解析手法

2.1 コンクリートモデル

本研究では, 8 節点アイソパラメトリック要素を用いた 3次元有限要素解析を行った。構成則には, 名古屋大学で開発された格子等価連続体モデル²⁾を用いた。格子等価連続体モデルは, コンクリートおよび補強筋の耐荷機構と, ひび割れ面におけるせん断伝達を等価な格子成分によりモデル化し, 各格子成分に一軸の応力-ひずみ関係を用いることで構築される構成則である。

圧縮ならびに引張を受けるコンクリートに仮定した応力-ひずみ関係を図-1に示す。圧縮を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係には, 圧縮強度までは Saenz の式を用い, 強度以降は応力が直線的に減少するものとし, 軟化域には Nakamura and Higai³⁾が提案する圧縮破壊エネ

ルギーを考慮することで解の要素寸法依存性の低減を図った。引張を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係には、引張強度までは線形弾性体と仮定し、引張強度以降には破壊エネルギーを考慮した1/4モデルを用いた。

繰り返し応力場におけるコンクリートの履歴挙動は、図-1に示すようにモデル化した⁴⁾。引張軟化域における除荷勾配は、初期勾配と等しいものとし、応力がゼロに達した後は、ひずみの履歴中に圧縮側の過去最大となったひずみ・応力点に向かって直線的に変化するものとした。ただし、引張ひずみがある程度軟化してから除荷する場合は、応力がゼロに達した後の図中の点Aまで、圧縮応力持たないものとした。再载荷の場合、応力は履歴中に引張側の過去最大となったひずみ・応力点に向かって変化すると仮定した。圧縮領域で除荷する場合、除荷勾配は初期勾配と等しいと仮定し、再载荷パスは圧縮ひずみ履歴中に過去最大となったひずみ・応力点に向かうものとした。ただし、圧縮ひずみ領域では、引張応力を持たないと仮定した。

2.2 鉄筋モデルおよび付着モデル

鉄筋は、トラス要素により離散的にモデル化し、バイリニア型の応力-ひずみ関係を適用した。降伏後の剛性は、初期剛性の1/100とした。また、鉄筋の繰返し履歴モデルには、図-2に示すCEBモデル⁵⁾を用いた。なお、本研究では、鉄筋の座屈挙動は考慮していない。

コンクリートと鉄筋要素の節点間には、付着応力-すべり関係を導入した付着要素を考慮することで、鋼材とコンクリートとの付着挙動をモデル化した²⁾。図-3および式(1)に付着応力-すべり関係を示す。このモデルは、付着強度までは、菅ら⁶⁾がRC部材解析への適用のために提案した、島らのマッシュピコンクリートに対するモデルの付着強度⁷⁾を0.4倍し曲率を変化させたモデルである。また、付着強度以降は、直線的な軟化挙動を仮定し、軟化後は付着強度の0.1倍で一定とした。

$$\tau = \begin{cases} 0.4 \times 0.9 \times (f'_c)^{2/3} (1 - \exp(-40(s/D)^{0.5})) & 0 \leq s \leq s_1 \\ \tau_{\max} - (\tau_{\max} - 0.1\tau_{\max})(s - s_1)/(s_2 - s_1) & s_1 \leq s \leq s_2 \\ 0.1\tau_{\max} & s_2 \leq s \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 f'_c はコンクリートの圧縮強度(MPa)、 D は鉄筋径(mm)、 s_1 、 s_2 はそれぞれ0.2(mm)、0.4(mm)である。

繰返し作用における内部履歴は、Tassiosら⁸⁾のモデルを参考にして、図-3に示すように、除荷・再载荷時の剛性は初期剛性と等しいものとし、付着強度の0.1倍の付着応力ですべりが変化するものと仮定した。

3. 繰返し荷重を受けるRC柱の損傷評価

3.1 解析対象および損傷状況

解析は、梅田らが行ったRC柱の繰返し载荷試験⁹⁾を

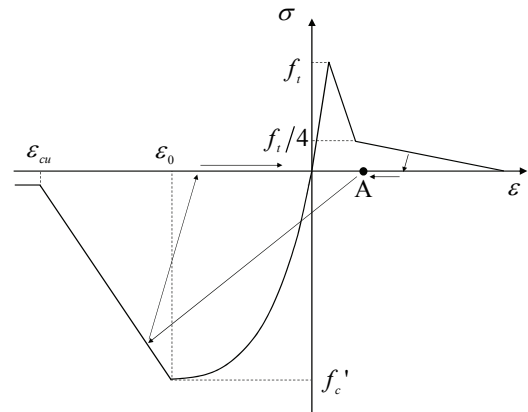


図-1 コンクリートの応力-ひずみ関係

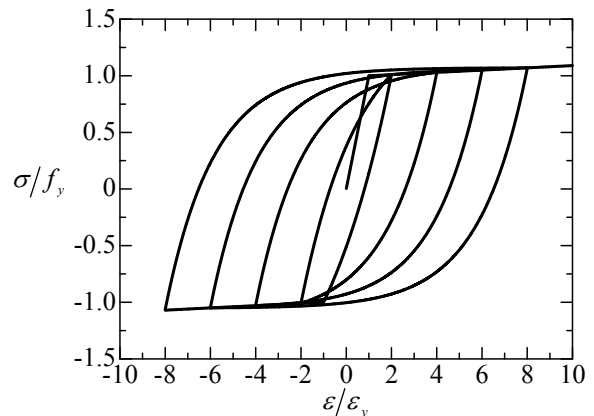


図-2 鉄筋の繰返しモデル (CEBモデル)

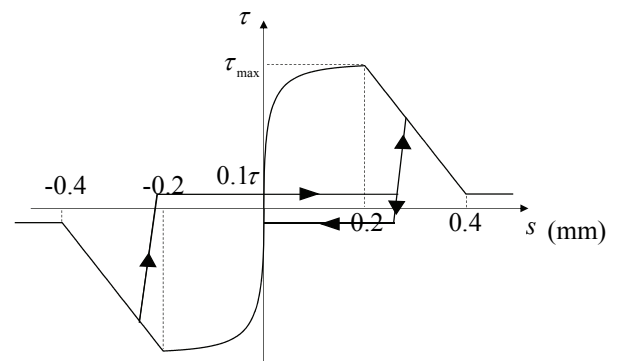


図-3 付着応力-ひずみ関係

対象とした。図-4に供試体の概略図を示す。供試体は、上下にスタブを有したRC柱であり、断面600×600mm、高さ1700mmである。軸方向鉄筋にはD13(降伏強度368N/mm²)を計16本配置し(引張鉄筋比0.44%)、帯鉄筋にはD13(降伏強度360N/mm²)を80mmピッチ(帯鉄筋比0.79%)で配置した。

载荷は、軸力160kN(1.0N/mm²)を一定とした静的正負交番载荷であり、境界条件として上下端の回転変形を固定した逆対象モーメントを受ける柱である。载荷履歴は、降伏変位6.9mm(以下、 δ_y)を基準として、 $8\delta_y$ まで δ_y の整数倍で载荷され、 $8\delta_y$ 以降は δ_y の偶数倍で载荷が行われた。

図-5(a)に実験より得られた荷重-変位関係を破線で示す。 $3\delta_y$ 以降に水平荷重180~200kN程度でほぼ一定

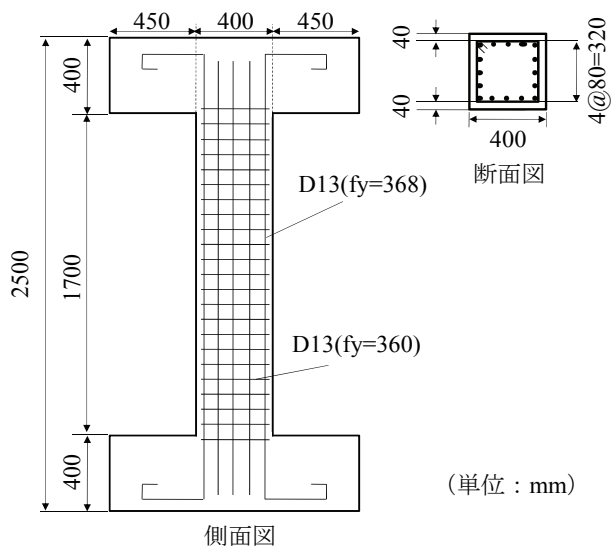


図-4 供試体概要

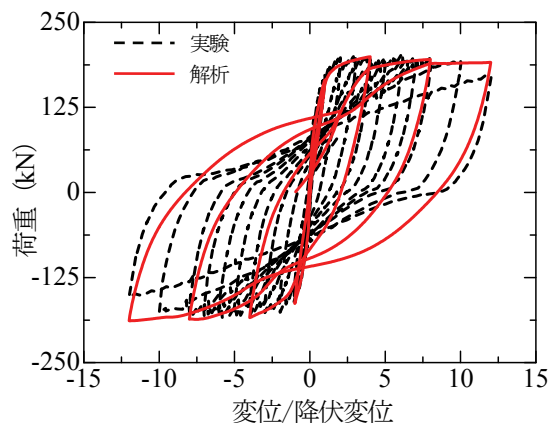
となった後、 $8\delta_y$ 以降において、かぶりの剥落、鉄筋の座屈が生じ荷重低下を示したと報告されている。ただし、図-5(b)の水平変位-鉛直変位関係からは、終局に至るまで、鉛直変位の大きな低下は見られないことから、座屈の影響がそれほど顕著に生じる前に载荷が終了したものと推察される。また、復元力特性が大きく低下しないことや、鉄筋の座屈が生じるまで鉛直変位が増加していることから、曲げが卓越した挙動であったものと考えられる。なお、かぶり剥落やコンクリートの圧壊等による柱の損傷領域は、およそ1D (Dは有効高さ)であったと報告されている。

3.2 解析モデル

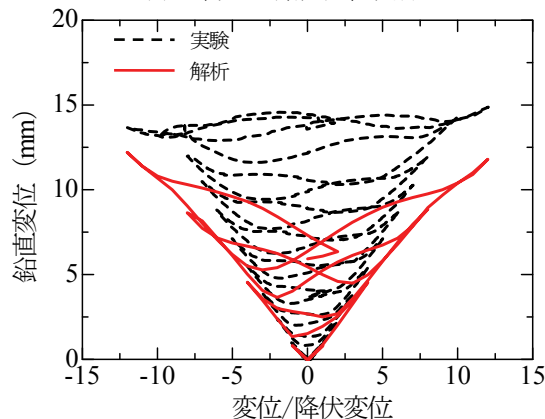
図-6に解析モデルを示す。上下基部より400mmの高さまでは $40\times 40\times 40\text{mm}$ の立方体要素とし、中央部は、 $40\times 40\times 60\text{mm}$ の直方体要素とした。前述のように鉄筋は、軸方向鉄筋、帯鉄筋ともに離散的にモデル化し、それぞれ付着要素を考慮することでコンクリートとの付着挙動をモデル化した。

解析に用いた材料特性は、実験より得られた値⁹⁾を用いた。コンクリートの圧縮強度、弾性係数には、それぞれ 29.3N/mm^2 、 32.0kN/mm^2 を用い、鉄筋の降伏強度、ヤング係数は、軸方向鉄筋に対して、 368N/mm^2 、 186kN/mm^2 を、帯鉄筋に対して、 360N/mm^2 、 190kN/mm^2 を用いた。なお、コンクリートの圧縮強度時のひずみは、一般的な値である -0.002 とした。

解析は、鉛直方向に所定の軸力を与えた後、上スタブの載荷面を変位制御することにより、正負交番载荷を行った。なお、急激な荷重低下以前では、実験における繰返し载荷の影響は少ない¹⁰⁾ことから、本解析では载荷履歴として、 δ_y 、 $4\delta_y$ 、 $8\delta_y$ 、 $12\delta_y$ とした。解析における境界条件は、下スタブ下面を完全固定とした。



(a) 荷重-鉛直変位関係



(b) 水平変位-鉛直変位関係

図-5 荷重-変位関係

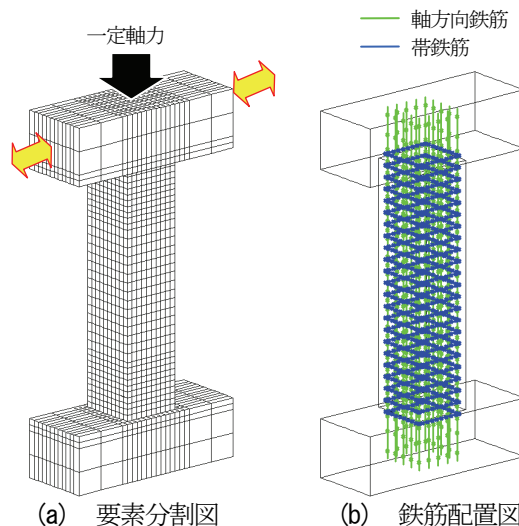


図-6 解析モデル

3.3 荷重-変位関係の比較

図-5に、解析より得られた荷重-変位関係ならびに水平変位-鉛直変位関係を赤線で示す。図-5(a)より、包絡線に着目すると、降伏荷重から最大荷重まで、解析は実験を妥当に評価できていることが分かる。一方、解析では、座屈挙動をモデル化していないため、 $+12\delta_y$ 、 $-12\delta_y$ においても荷重の低下は見られず、荷重を保持したままであった。

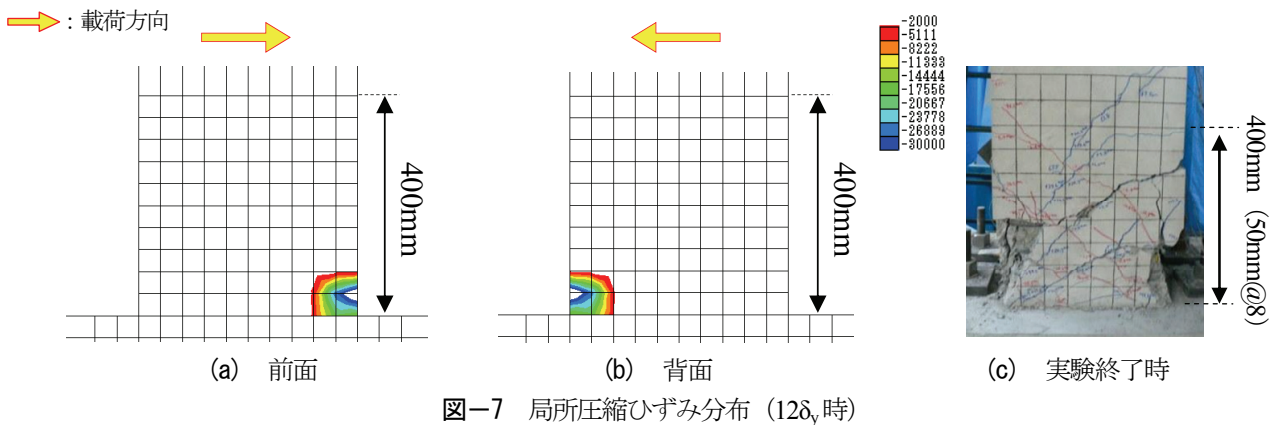


図-7 局所圧縮ひずみ分布 (12 δ_y 時)

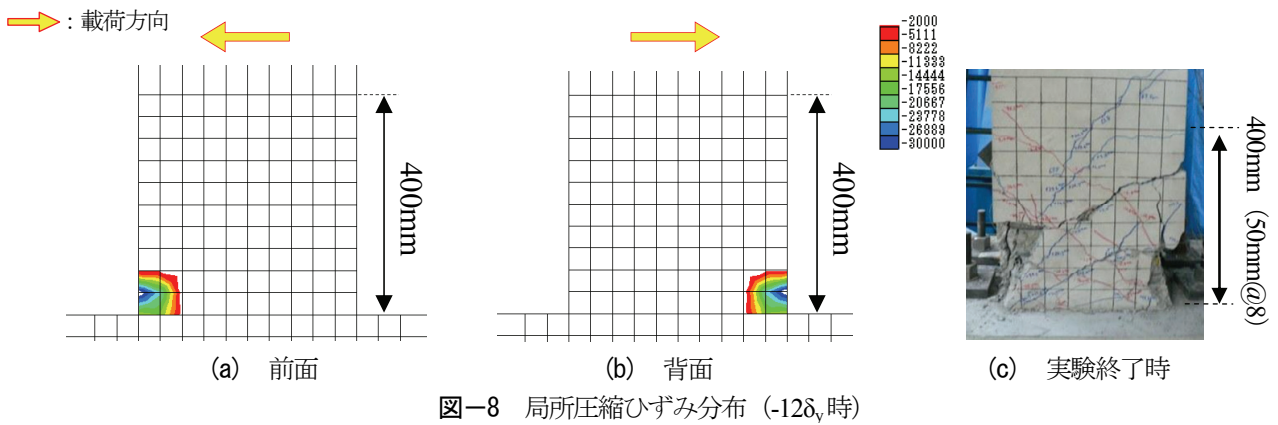


図-8 局所圧縮ひずみ分布 (-12 δ_y 時)

内部履歴に着目すると、実験では、5 δ_y あたりから若干のピンチング挙動が生じて入るのに対して、解析では、12 δ_y まで紡錘形の挙動を示しており、エネルギー吸収を過大に評価する結果となった。

図-5(b)の水平変位-鉛直変位関係より、大変位領域では、解析は鉛直方向の伸び量を若干低く評価する結果となっているものの、荷重初期においては実験を概ね妥当に評価できていることが分かる。

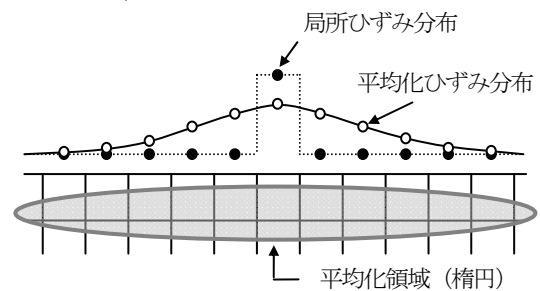


図-9 平均化ひずみ算出の模式図

3.4 最大平均化ひずみを用いたRC部材の損傷評価

図-7, 8に、解析において12 δ_y , -12 δ_y 時の柱基部における軸方向の圧縮ひずみ分布(以下、局所圧縮ひずみ)を示す。図中には、実験終了時の損傷性状を併記している。図において、ひずみの表示範囲は-2000 μ 以下の領域のみとして示している。また、青色で囲まれた白色の領域は、-30000 μ より小さな圧縮ひずみが生じていることを示している。図より、局所圧縮ひずみ分布は、基部の2要素(高さ80mm)において局所化しており、明らかに実際の損傷状況を表していないことが分かる。ひずみ軟化材料に破壊エネルギーを考慮した解析においては、この種の問題は避けられず¹¹⁾、損傷評価を行うためには、別途適切な指標が必要である。

著者らは、これまでに破壊エネルギーを考慮した解析の結果に対して、平均化ひずみを用いることで損傷を適切に評価できる可能性を示している^{12), 13)}。図-9に平均化ひずみの概念図を示す。平均化ひずみは、局所ひずみ

を要素寸法とは別の寸法により領域平均して算出される。その結果、図に示されるように、1要素で局所的に生じたひずみは、平均化領域に依存してある領域内で均されることになる。本研究では、平均化するひずみとしては、各ガウス点のひび割れ座標系におけるひずみを対象とした。また、既往の研究に基づき過去に受けた損傷の履歴を考慮して、各時点までに経験した平均化ひずみのうちの最大値(最大平均化ひずみ)を損傷評価の指標とした¹³⁾。なお、平均化領域は、圧縮・引張ひずみが混在する3次元ひずみ場を考慮して、平均化長さ l^* を示すように、圧縮ひずみ下の平均化長さ l^*_c と、引張ひずみ下の平均化長さ l^*_t を範囲とし、着目点のひずみの大きさにより変化する楕円体(図-9中では楕円形)とした。すなわち、図-11に各ひずみ状態における平均化領域の概念図を示すが、平均化領域はひずみ状態によって変化し、引張-引張、圧縮-引張、圧縮-圧縮のような異なるひずみ状態に対し、長径・短径が変化する楕円体とな

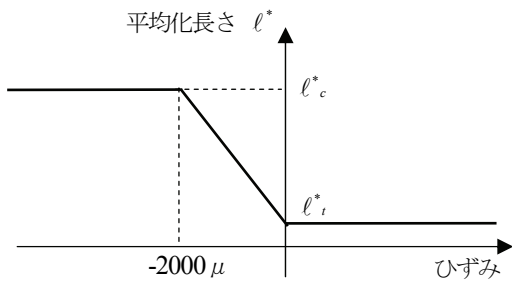


図-10 ひずみの大きさに応じた平均化長さの変化

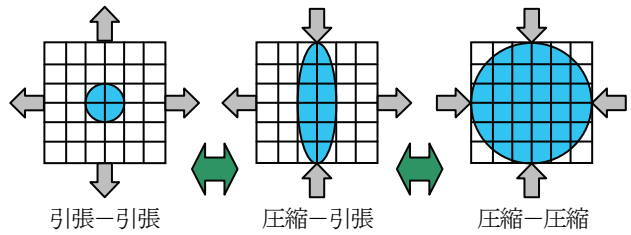


図-11 平均化領域概念図

→ : 荷重方向

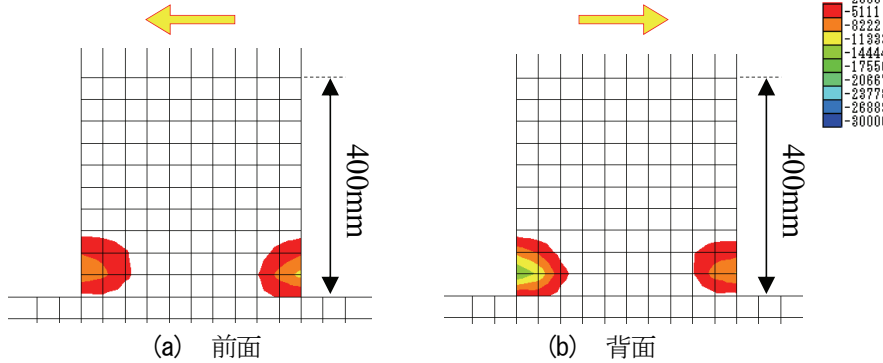
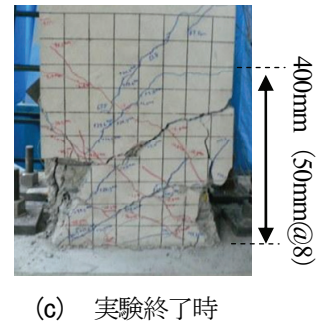


図-12 最大主圧縮平均化ひずみ分布 (-12 δ_y 時)



(c) 実験終了時

る。本研究では、 l_c^* 、 l_i^* をそれぞれ 250mm、50mm と仮定した¹¹⁾。

図-12 に、柱基部の-12 δ_y における最大主圧縮平均化ひずみの分布を実験終了時の損傷性状と併せて示す。図-7、8 同様に、-2000 μ 以下の領域のみ示している。図より、平均化圧縮ひずみ分布は、局所圧縮ひずみ分布と異なり、-2000 μ 以下の領域は、高さ方向で3要素、深さ方向に2あるいは3要素に広がっていることが確認できる。ひずみの大きさについても、-30000 μ を下回る領域はなく、領域内で緩やかに変化していることが分かる。実験終了時の損傷状態と比較すると、かぶりが剥落している領域（基部より高さ150~200mm）と概ね対応しており、最大主圧縮平均化ひずみが-2000 μ 以下の領域を損傷領域として評価することは妥当であるといえる。ただし、実験終了時において、ハンマーによりかぶりを除去した後の状態を図-13 に示すが、およそ350mm程度であることから、かぶり剥離領域に対しては、最大主圧縮平均化ひずみが-2000 μ 以下の領域では評価できないといえる。

3.5 付着劣化領域からみた損傷領域の評価

図-14(a)、(b)に解析において12 δ_y 時および-12 δ_y 時における鉄筋のすべり分布を示す。なお、圧縮鉄筋、引張鉄筋それぞれの断面幅中心位置（図中の赤丸）を代表して示している。2.2節で述べたように、すべりが0.2mmのときに付着強度に達し、その後は付着軟化挙動を示す。ここで、すべりが0.2mm以上の領域を付着劣化

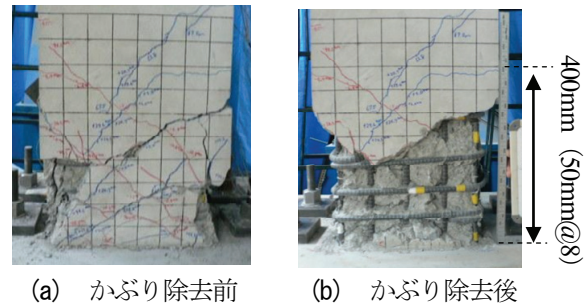


図-13 かぶり除去前後の領域の比較

領域とすると、図-14(a)では、上下スタブからおよそ300mmの領域が、図-14(b)では、上下スタブからおよそ350mmの領域が付着劣化領域となることが確認できる。図-14(c)には、-12 δ_y 時における側方鉄筋のすべり分布性状を示すが、側方鉄筋においても、付着劣化領域が存在していることが確認できる。付着軟化挙動を示すということは、コンクリートと鉄筋との力の伝達が行われなくなることであるため、付着劣化領域ではコンクリートと鉄筋は一体性が失われていると考えることができる。

図-13(b)のかぶり除去後の状態と比較すると、付着劣化領域は、かぶり剥離領域と概ね対応している。とりわけ、鉄筋位置による付着劣化領域の大きさに着目すると、断面の圧縮縁側になるほど領域は長くなっており、側面中央部で最も短いことが分かる。これは、実験における側面のかぶり剥離領域と同様の傾向であるといえる。

以上のことから、付着劣化領域に着目することで、コ

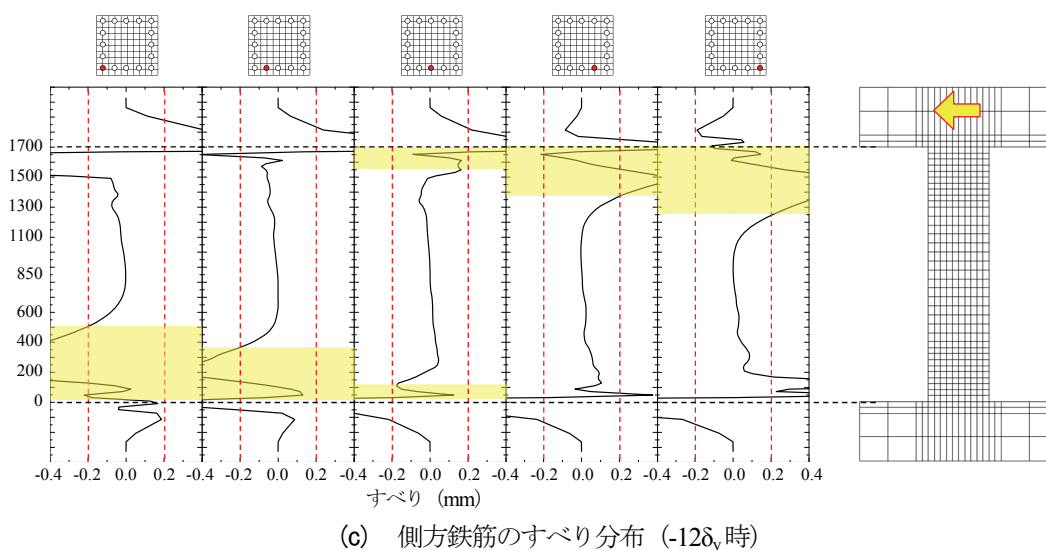
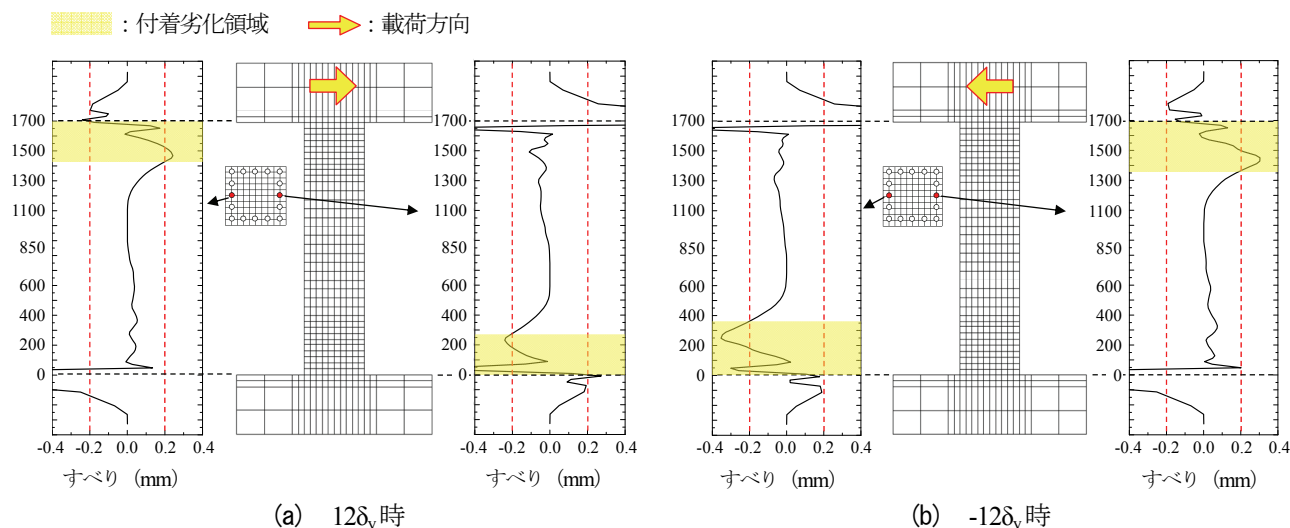


図-14 鉄筋のすべり分布

ンクリートのかぶり剥離領域を評価することができる
考えられる。

4. 損傷したRC柱の補修後の力学性能評価

4.1 実験における補修後挙動

実験では、損傷後の供試体に対して、セメント系材料を用いて補修を行った後、再度荷重することで補修後のRC柱の挙動が検討されている⁹⁾。図-15に補修後の荷重-変位関係を補修前の結果と併せて示す。図のように、補修材に高強度かつ高靱性な繊維補強セメント系複合材料（超高強度ひずみ硬化型モルタル，UHP-SHCC）を用いることで、主鉄筋の座屈が生じたまま補修した場合であっても、初期の剛性は低下するものの最大荷重や変形性能は初期のRC柱と同程度であることが示されている。また、補修材に損傷が進展することで荷重が低下したが、終局に至るまで補修材が母材コンクリートから剥離することは認められなかったと報告されている。本章では、そのような補修後のRC柱部材の性能を解析的に評価す

ることを試みる。

4.2 補修材料の力学特性とモデル化

図-16に、実験で用いられたUHP-SHCCの一軸引張下の応力-変位関係を示す。ひび割れ強度は5.0～6.0N/mm²、引張強度は7.0～9.0N/mm²であり、強度時のひずみは1.0～2.0%の高強度かつ高靱性な材料であることが分かる。

本研究では、UHP-SHCCの応力-ひずみ関係のモデル化として、引張側では図-16の赤線および表-1で示すように、材料のばらつきを考慮して実験結果の概ね下限値となるようにモデル化した。なお、要素寸法依存性を低減するために破壊エネルギーを考慮して引張軟化曲線をモデル化した。圧縮側の応力-ひずみ関係は、Saenzの式でモデル化し、弾性係数、圧縮強度、強度時のひずみを、それぞれ23.7kN/mm²、79.7N/mm²、-0.004とした。圧縮軟化挙動については、実験結果を参考に、圧縮破壊エネルギーとしてNakamura and Higaiの式³⁾から得られる値の2倍を仮定した。除荷勾配は、圧縮側、引張側の

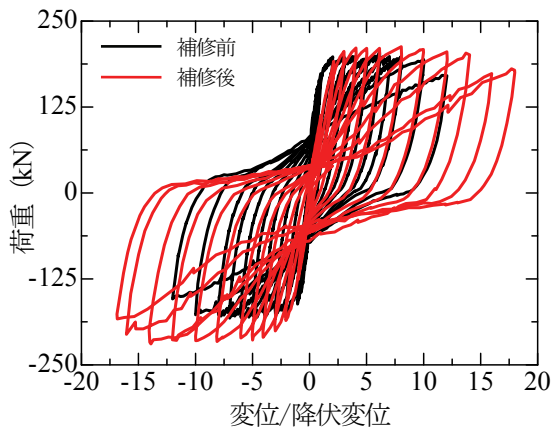


図-15 UHP-SHCCによる補修後の荷重-変位関係

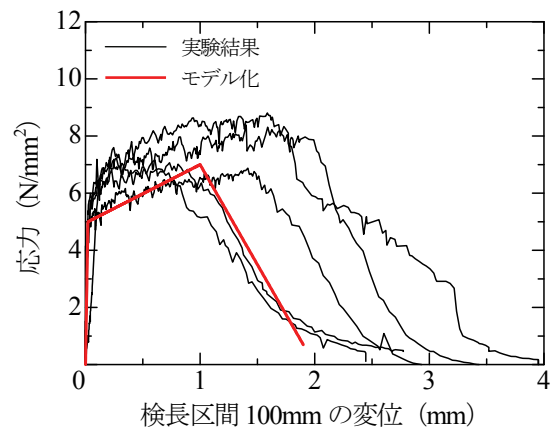


図-16 一軸引張下のUHP-SHCCの応力-変位関係

表-1 補修材の材料特性

材料*	弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度時 ひずみ	ひび割れ強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張強度時 ひずみ
UHP-SHCC	2.37	79.7	-0.004	5.0	7.0	0.01
仮想材料1	1.41	26.5	-0.004	3.0	3.5	0.015
仮想材料2	1.92	23.2	-0.002	—	2.0	0.00012

*UHP-SHCCと仮想材料1は疑似ひずみ硬化材料、仮想材料2はひずみ軟化材料

どちらにおいても初期勾配と等しいものとした。

4.3 解析上の補修領域と補修方法

実験における補強は、かぶりコンクリートを除去した後に、UHP-SHCCを吹き付けることにより行われた。この時、座屈した鉄筋に対する補修は施されず、また、追加の補強筋による補強も行われなかった。UHP-SHCCの吹付けは、元の断面形状(400×400mm)を復旧するのみ行われ、増し厚はされていない。

解析では、前章で示した最大主圧縮平均化ひずみならびに付着劣化領域を用いた損傷評価の結果を参考にして、図-17に示すように上下スタブから400mmまでの高さにおける断面最外縁要素を解析上の補修領域と仮定した。解析では、初期の载荷により母材コンクリートに生じた損傷履歴を考慮するために、補修領域の要素を補修材要素へと置き換えることにより補修をモデル化した。すなわち、補修領域におけるコンクリートの残留応力や残留ひずみ、鉄筋との残留すべりは全て強制的に0として健全な状態をモデル化した。ただし、スタブと補修材の界面は付着が十分でないことを考慮して、境界にあたる要素の引張強度を普通コンクリートの100分の1とした。また、補修材と母材コンクリートとの界面は、十分に付着しているものとして、完全付着を仮定した。

なお、本研究では、補修後の剛性の回復性状に着目することを目的とし、補修後の解析では一方向载荷を行った。

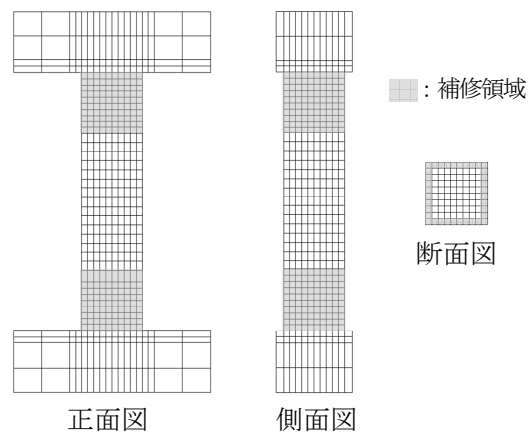


図-17 解析における補修領域

4.4 補修後の力学挙動の評価

図-18に、解析より得られた補修後供試体の荷重-変位関係を実験結果と併せて示す。実験結果としては、正負の包絡線を破線で示している。図には、局所圧縮ひずみが -2000μ 以下の領域、ならびに最大主圧縮平均化ひずみが -2000μ 以下の領域を補修領域とした場合の解析の結果を併せて示す。図より、初期の剛性は、補修領域の違いにより大きく異なることが分かる。すなわち、局所圧縮ひずみや最大主圧縮平均化ひずみが -2000μ 以下となる領域を補修領域と仮定した場合には、十分な剛性の回復が見られないことが分かる。一方、図-17に示す補修領域を仮定した場合は、実験と同様に剛性が回復していることが認められる。このことは、通常の有限要素解析において、局所ひずみを指標として補修領域を決定し

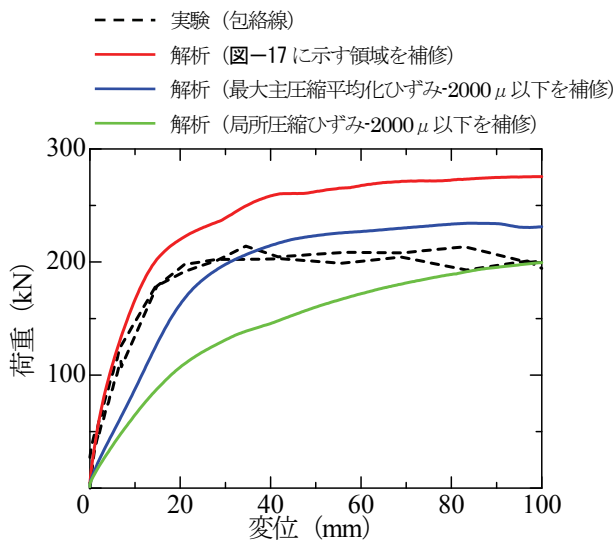


図-18 補修後の荷重-変位関係

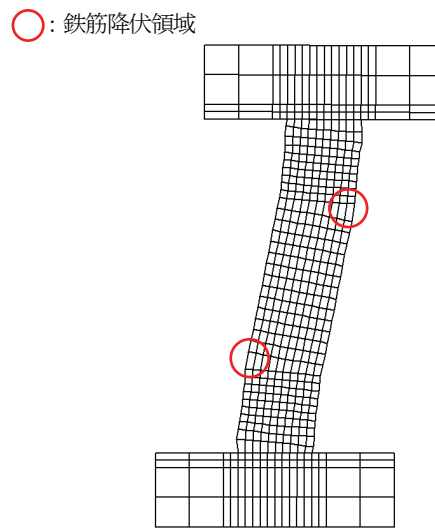
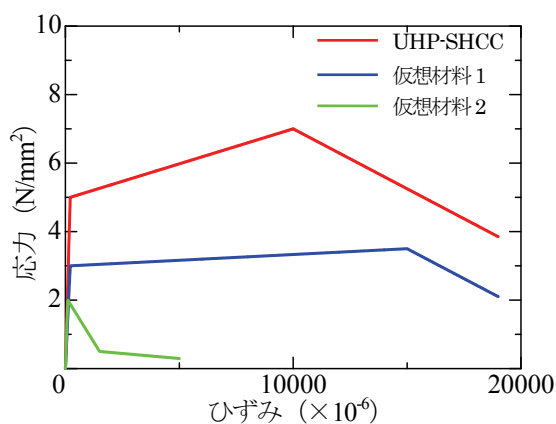
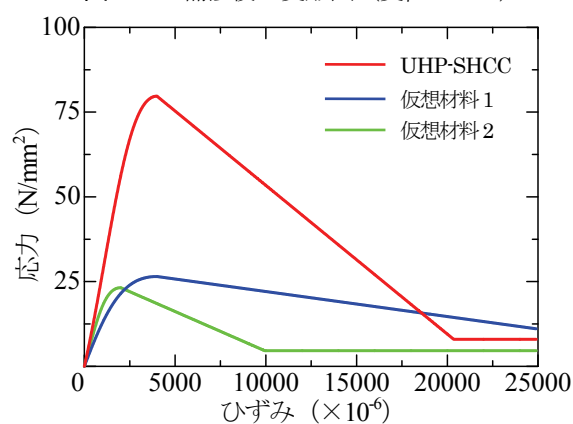


図-19 補修後の変形図 (変位 40mm)



(a) 引張側



(b) 圧縮側

図-20 仮想材料の応力-ひずみ関係 (要素寸法 100mm の場合)

た場合には補修の効果を適切に評価できないことを表わしている。また、今回対象とした RC 柱では、最大主圧縮平均化ひずみが -2000μ 以下となる領域のみを補修領域とすることも十分ではなく、付着劣化領域を考慮して補修領域とすることが望ましいといえる。剛性の回復の程度が同程度であったことから、図-17 に示す補修領域は実験の補修領域を妥当に評価しているものと考えられる。

なお、解析において最大荷重が実験よりも増加した理由としては、実験ではスタブと柱の境界における開口変位が顕著であったのに対して、解析では図-19 に示すように、補修領域の上部の母材コンクリート部において鉄筋が降伏したためであると考えられる。補修後の RC 柱の挙動をより妥当に評価するためには、補修後における損傷の進展する順序や損傷領域の評価等、更なる検討が必要であると考えられる。

なお、今回の解析では、補修材と母材コンクリートとの界面を完全付着と仮定しているが、界面の付着性状を脆弱化させた解析を別途行った結果、今回対象とした RC 柱においては、補修材と母材コンクリートとの界面の付着性状が RC 柱の力学挙動に及ぼす影響は、ほとんどな

いことを確認している。

4.5 補修材料の違いが補修後の RC 柱の力学挙動に及ぼす影響

補修材料の力学特性の違いが補修後の RC 柱の力学挙動に及ぼす影響を検討するために、図-20 および表-1 に示す異なる特性を有する 2 つの仮想的な材料 (仮想材料 1 および 2) を想定した。仮想材料 1 は、UHP-SHCC よりも強度は低いに変形性能がある材料である。一方、仮想材料 2 は、強度と変形性能がともに小さい材料である。

図-21 に、解析の結果を示す。図より、補修材として仮想材料 1、2 のいずれの材料を用いた場合であっても、初期の剛性はそれほど変わらず、補修により剛性は十分回復しているといえる。補修材の引張特性が大きく異なるにもかかわらず補修した後の RC 柱の力学挙動にあまり差が生じない理由としては、今回対象とした部材が、材料の引張特性の影響を受けにくい曲げが卓越する部材であったためであると考えられる。また、既往の研究⁹⁾より、主鉄筋が座屈している場合には、補修材料の力学特性により補修後の挙動が大きく異なることが明らかに

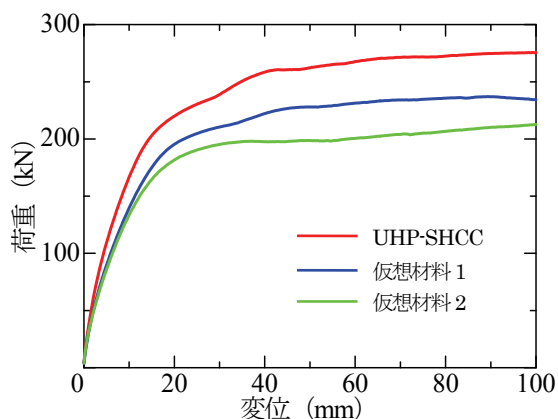


図-21 補修材料の違いによる力学挙動の比較

されている。本解析では、主鉄筋の座屈挙動をモデル化していないことも補修後の挙動に差が出なかった要因の一つであると推察される。

5. 結論

本研究では、3次元有限要素解析により、繰返し荷重を受けたRC柱の損傷評価を行うとともに、損傷したRC柱の補修後の力学挙動の評価を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 有限要素解析から直接得られるひずみは、繰返し荷重下においても実際の損傷領域を評価できず、損傷評価を行うための指標として適切ではないことを改めて確認した。
- 2) 要素寸法とは異なる領域で平均化して得られた最大平均化ひずみを指標とした損傷評価により、繰返し荷重を受けるRC柱の損傷状態を評価できることを示した。本研究で対象としたRC柱においては、最大主圧縮平均化ひずみが 2000μ 以下の領域は、実験におけるかぶり剥落領域と概ね対応することを示した。
- 3) 鉄筋とコンクリートの付着の状態に着目して損傷評価を行った結果、付着劣化領域を指標とすることで、かぶり剥離領域を評価できる可能性を示した。また、付着劣化領域を指標とすることで、最大平均化ひずみでは評価することのできない、側方かぶりの剥離領域を表現できることを示した。
- 4) 最大主圧縮平均化ひずみと付着劣化領域を指標とした損傷評価に基づき補修領域を仮定することで、補修後のRC柱の剛性の回復を解析的に概ね評価可能であることを示した。
- 5) 損傷したRC柱の補修後の挙動を評価可能な解析手法を構築し、補修材料が異なる場合のRC柱の力学挙動の違いを解析的に評価できることを示した。本解析手法を用いることで、合理的な補修方法、補修材料の選定に際して、有益な情報を与えることができるものと考えられる。

謝辞：本研究の一部は、国土交通省道路局新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発（緻密でよく曲がるセメント系材料を用いた補修・補強工法の開発、代表：中村光）」により実施されたものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書耐震性能照査編，2002.
- 2) 田辺忠顕編著：初期応力を考慮したRC構造物の非線形解析法とプログラム，技報堂出版，2004.
- 3) H.Nakamura and T.Higai：Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, *Modeling of Inelastic Behavior of RC Structure under Seismic Load*, ASCE, pp.471-487, 2001.
- 4) Kongkeo PHAMAVANH, 伊藤陸, 中村光, 田辺忠顕：RC構造の繰返し及び動的解析における格子等価連続体化法の適応性，土木学会論文集，No.767/V-64, pp.161-176, 2004.
- 5) CEB：RC Elements under Cyclic Loading, *Bulletin*, pp.58-69, 1996.
- 6) 菅満宣, 中村光, 檜貝勇, 斉藤成彦：RCはりの力学的挙動に及ぼす付着特性の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No.3, pp.295-300, 2001.
- 7) 島弘, 周礼良, 岡村甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係，土木学会論文集，Vol.378/V-6, pp.165-173, 1987.
- 8) Tassios, T.P. and Yannopoulos, P.J.：Analytical Studies on Reinforced Concrete Members Under Cyclic Loading Based on Bond Stress-Slip Relationships, *ACI Journal*, pp.206-216, 1981.
- 9) 梅田靖司, 国枝稔, 中村光, 玉越隆史, 森井直治：超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料で補修されたRC柱の補修効果，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.10, pp.349-356, 2010.
- 10) 滝本和志：エネルギー的考察による鉄筋コンクリート部材の損傷度評価とその適用方法に関する研究，名古屋大学博士論文，2004.
- 11) 権庸吉, 上田尚史, 中村光, 国枝稔：積分型非局所構成則の2次元RC部材への適用に関する基礎的研究，応用力学論文集，Vol.8, pp.413-422, 2005.
- 12) 上田尚史, 権庸吉, 中村光, 高木康宏, 国枝稔：非線形有限要素解析による曲げ破壊するRC部材の損傷指標の検討，構造工学論文集，Vol.42A, pp.925-934, 2006.
- 13) 河合真樹, 中村光, 上田尚史, 国枝稔：RCはりの曲げ圧縮損傷領域と断面修復後性能の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.3, pp.1627-1632, 2008.

(2012年3月8日 受付)