

論文 載荷履歴を受けた非充腹 SRC 柱の補修後性能に関する解析的研究

藤永 隆*1・那良 幸太郎*2・神谷 悠貴*3・孫 玉平*4

要旨: 載荷履歴を受けたコンクリート系部材に対して、ひび割れへの樹脂注入による補修をした場合、その補修後の履歴挙動において、初期剛性が低下し最大耐力が上昇することが知られている。著者等の行った非充腹型 SRC 柱の補修実験においても同様の現象が観察されている。初期剛性の低下は、注入した樹脂のヤング係数の影響であると推察されており、最大耐力の上昇は鋼材の降伏応力の上昇が要因であると言われている。本論ではファイバー法による弾塑性数値解析を行い、補修後の諸現象を追跡し非充腹型 SRC 柱の補修後の性能に関して検討する。

キーワード: ファイバー法, ひび割れ, エポキシ樹脂注入, ポリマーセメントモルタル, ヤング係数

1. はじめに

1995年1月に発生した兵庫県南部地震では多くの建物が被害を受けた¹⁾。その被害は倒壊から軽微なものまで様々であり、復旧過程において土木構造物はその性質上、補修・補強による早期の復旧が選択されたが、建築物に関しては多くが解体・新築された。これは補修・補強による耐震性能の回復に関する資料が少なく、性能の回復が定量的に評価できなかつたためである。また1995年12月に「建築物の耐震改修の促進に関する法律」が施行され、それ以降、既存不適格建築物に対する耐震診断・耐震補強工事や、耐震補強に関する研究が多くなされている。しかし、その多くは既存不適格建築物を再現した健全な部材に対して補強を施した試験体に基づく知見であり、載荷履歴(地震履歴)を受けた部材に関するものは少ない^{2)~8)}。一方、鉄骨鉄筋コンクリート(以下 SRC とする)部材の補修後性能に関して、充腹型 SRC は内蔵鉄骨の剛性・耐力の負担量が比較的大きいため、内部ひび割れへの樹脂注入をしない場合でも初期剛性の低下が小さいことが確認されている⁴⁾。しかし、先の震災において大きな被害を受けた SRC 造のほとんどは非充腹型 SRC 造であり¹⁾、今後大規模地震が発生した際に損傷を受け、補修対象となる SRC 構造の内蔵鉄骨は非充腹型が主であるといえる。著者等は載荷履歴を受けた非充腹型 SRC 部材の補修後性能の確認実験を、内蔵鉄骨形式が格子型・ラチス型のものに対して行い、鉄筋コンクリート部材と同様に樹脂注入による補修をした二次載荷において、初期剛性の低下と最大水平耐力の上昇を確認している^{7),8)}。

本研究では、補修後の初期剛性の低下や最大耐力の上昇のメカニズムを検討することを目的として、ファイバー法による数値解析で一次載荷時の試験体の履歴挙動

解析を行った。さらに、ポリマーセメントモルタルにより断面修復され、ひび割れにエポキシ樹脂を注入された二次載荷試験体の履歴挙動の解析を行い、非充腹型 SRC 柱の補修後性能に関して検討している。

2. 解析対象の載荷実験^{7),8)}

解析対象とした柱試験体は、およそ 1/3 スケールを想定した非充腹形 SRC 柱で、最終破壊状態は曲げ破壊である(表-1 参照)。断面は 250×250mm の正方形断面でせん断スパン比は 3 である。主筋は D13 を主筋間距離 190mm で、帯筋は 6φ を 100mm 間隔で配置しており、主筋比および帯筋比はそれぞれ 0.81%, 0.23% である。柱の内蔵鉄骨は、溶接組立て加工により製作した非充腹型鉄骨であり、鉄骨せい 160mm, フランジ幅 100mm, フランジ板厚 $t_f=6\text{mm}$ である。ウェブ材は幅 30mm, 板厚 $t_w=4.5\text{mm}$ で、非充腹のウェブの形式は格子型 3 体およびラチス型 3 体である。今回解析対象としている 6 体の試験体は、ウェブの形式が異なるのみで断面形状は同一であり、鉄骨比は 1.92% である。様々な損傷状況における補修後の性能を調べるために、一次載荷の損傷レベルは、1) 変形量小: 降伏荷重レベル, 2) 変形量中: 最大耐力レベル, 3) 変形量大: 最大耐力後降伏荷重まで耐力低下レベル、の 3 段階で設定されている。実験においては、軸力比 $n=0.3$ に相当する軸力(軸力比算出の際には主筋は無視している)を導入し、一定に保持した後に水平力が載荷されている。

一次載荷の損傷状態に合わせて補修を行っており、主たる補修方法はひび割れへのエポキシ樹脂注入である。コンクリート断面に損傷の大きかった試験体(SRC-B3-B, SRC-L3-B 試験体)については、コンクリートの脆弱部をはつた後にポリマーセメントモルタルにより断面成

*1 神戸大学 都市安全研究センター 准教授 博士(工学) (正会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生

*3 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生 (正会員)

*4 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

表-1 解析対象試験体一覧^{7),8)}

(a) 格子型試験体

試験体名		補修方法	フランジ 降伏点 $f \sigma (\text{N/mm}^2)$	主筋 降伏点 $m \sigma (\text{N/mm}^2)$	帯筋 降伏点 $h \sigma (\text{N/mm}^2)$	コンクリート ヤング係数 $c E (\times 10^3 \text{ N/mm}^2)$	コンクリート 圧縮強度 $F_c (\text{N/mm}^2)$
一次 載荷	SRC-B3-Y	-	312.5	348.5	678.4	22.4	24.1
	SRC-B3-M	-				21.0	23.6
	SRC-B3-B	-				21.3	22.2
二次 載荷	SRC-B3-Y-R	樹脂注入				21.2	23.4
	SRC-B3-M-R	樹脂注入				20.0	23.1
	SRC-B3-B-R	断面補修 樹脂注入				19.3	22.7
						32.3*	28.8*

(b) ラチス型試験体

試験体名		補修方法	フランジ 降伏点 $f \sigma (\text{N/mm}^2)$	主筋 降伏点 $m \sigma (\text{N/mm}^2)$	帯筋 降伏点 $h \sigma (\text{N/mm}^2)$	コンクリート ヤング係数 $c E (\times 10^3 \text{ N/mm}^2)$	コンクリート 圧縮強度 $F_c (\text{N/mm}^2)$
一次 載荷	SRC-L3-Y	-	301.9	348.5	490.7	20.9	20.5
	SRC-L3-M	-				21.4	20.2
	SRC-L3-B	-				21.5	20.5
二次 載荷	SRC-L3-Y-R	樹脂注入				22.6	21.8
	SRC-L3-M-R	樹脂注入				21.6	20.6
	SRC-L3-B-R	断面補修 樹脂注入				21.7	21.0
						11.2*	31.2*

* 断面修復に用いたポリマーセメントモルタルの値

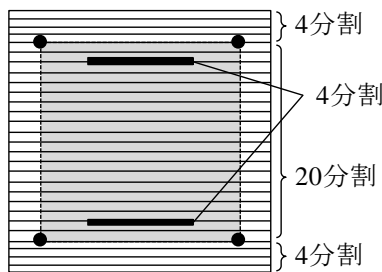


図-1 断面分割

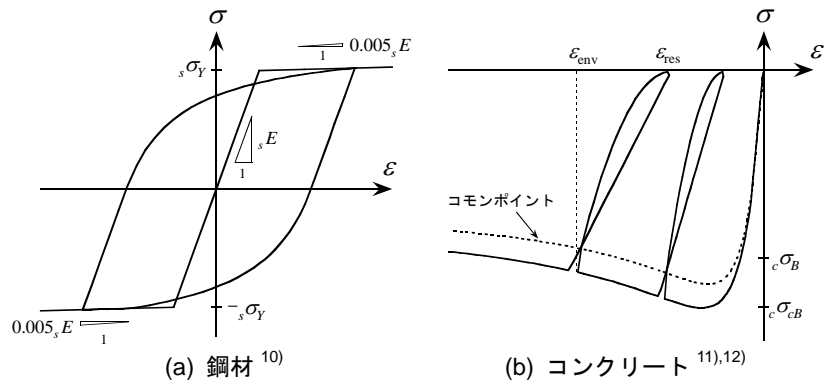


図-2 材料の応力-ひずみ関係

形補修をしている。

3. 数値解析による検討

3.1 解析概要

ファイバー法を用いて弾塑性解析を行い、断面の曲げモーメント (M) - 曲率 (ϕ) 関係を求めた。平面保持を仮定し、鋼とコンクリートは完全付着とし、コンクリートの引張強度は無視した。断面の分割を図-1 に示す。かぶりコンクリートを 28 分割、コアコンクリートを 20 分割、鉄骨フランジを 4 分割、鉄筋は集中点要素とした。文献 9 で提案されている、曲率に対する弾塑性ヒンジ部の係数から等価塑性ヒンジ長さを算出し、部材角及び水平力

を算定した。材料強度は実験値を用いた。

3.2 材料モデル

鋼材の応力-ひずみ関係には図-2(a) に示すバイリニアモデルを用いた。ひずみ硬化係数はフランジ・主筋ともに 0.005 とし、繰返し則は加藤等¹⁰⁾ のモデルを用いた。コンクリートの応力-ひずみ関係は、骨格曲線に崎野・孫のモデル¹¹⁾ を用い、繰返し則は渡辺・六車等のモデル¹²⁾ を用いた(図-2(b)参照)。補修前の一次載荷の試験体の解析においては、横拘束筋で囲まれる拘束領域をコアコンクリート部(解析上は主筋で囲まれる範囲)に拘束の効果を検討された崎野・孫モデルを、かぶりコンクリート部(コアコンクリート部の外側の領域)に拘

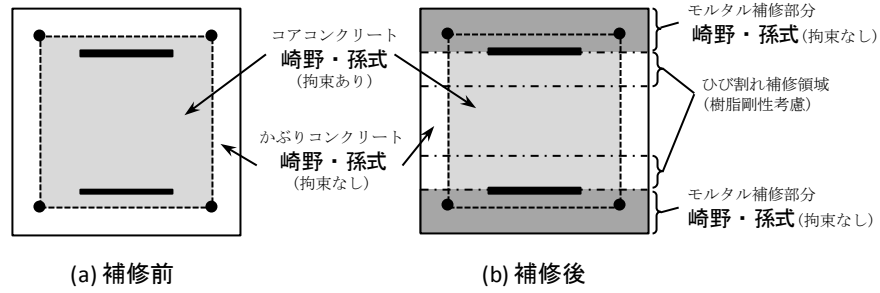


図-3 材料モデルと領域の設定

束を考慮しない崎野・孫モデルを用いた(図-3 参照)。

二次載荷の試験体の解析においては、注入したエポキシ樹脂の影響による剛性の低下分を、ヤング係数比によるコンクリートの見かけのヤング係数の低下分として考慮した解析を行った。ひび割れの深さは、一次載荷の解析においてコンクリートの引張ひずみが 100μ を超えた要素の深さまでとした。ひび割れの本数は実験において柱脚より $1D$ の間 (D : 断面せい) に発生したひび割れの本数 (柱脚端部のクラックも含む) とし、ひび割れ幅は実験で観察された最大残留ひび割れ幅の正側と負側の平均値を用いた。エポキシ樹脂のヤング係数の影響を考慮した、見かけのヤング係数と強度時ひずみは次式により算定した。

$$E_e = \frac{D}{\frac{1}{c}E(D-w) + \frac{1}{r}E \cdot w} \quad (1)$$

$$\varepsilon'_0 = \frac{\varepsilon_0(D-w) + \frac{F_c}{r}E \cdot w}{D} \quad (2)$$

ここで、 cE : コンクリートのヤング係数、 rE : エポキシ樹脂のヤング係数、 D : 断面せい、 w : $1D$ 間のひび割れ幅の合計、 ε_0 : コンクリートの強度時ひずみ

図-3 に示すように、一次載荷において引張ひずみが 100μ に達したコンクリート要素までは、上記(1), (2)式を用いて、拘束領域であるコアコンクリート部は崎野・孫モデル、かぶりコンクリート部は拘束を考慮しない崎野・孫モデルで算定した。また、一次載荷において設定したひずみ (100μ) に達していないコンクリート要素に関しては一次載荷の解析と同じ設定である。

ポリマーセメントモルタルにより断面補修をした SRC-B3-B-R 試験体と SRC-L3-B-R 試験体は、補修時にコンクリートをはつた際、その深さがフランジ外縁まで

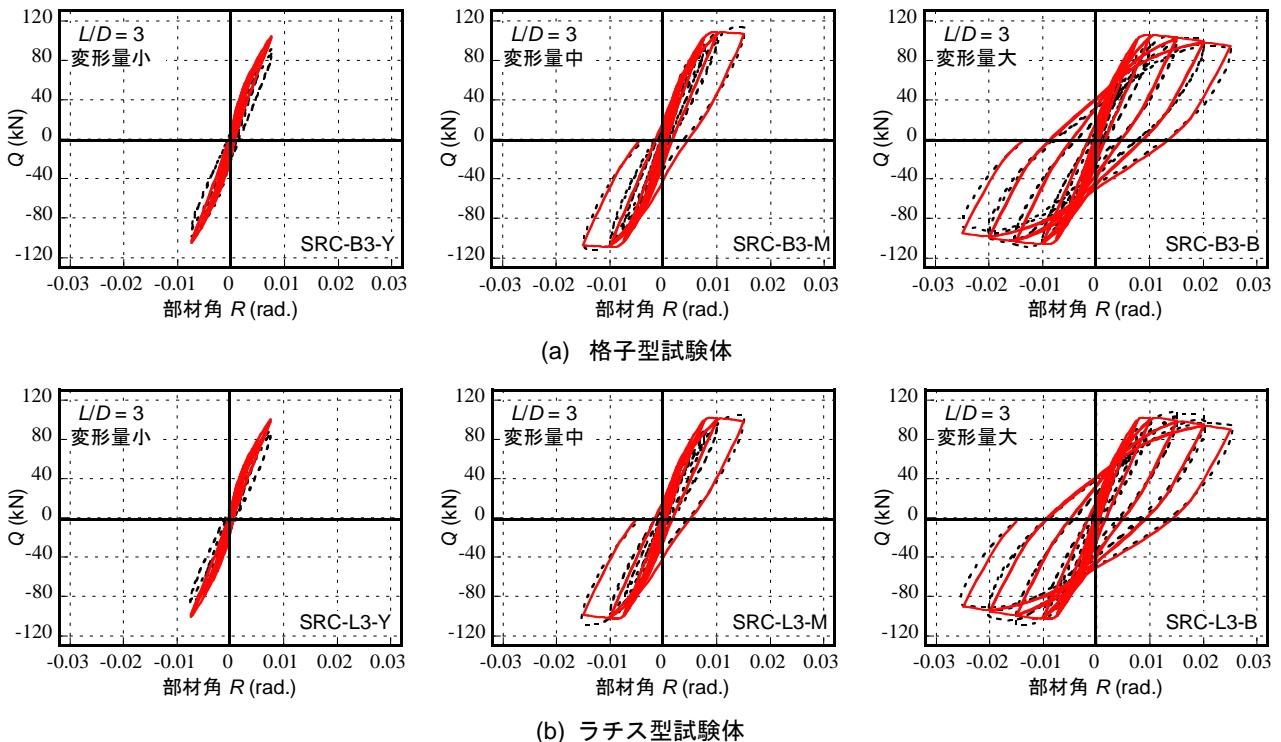


図-4 実験 (一次載荷) と解析の比較

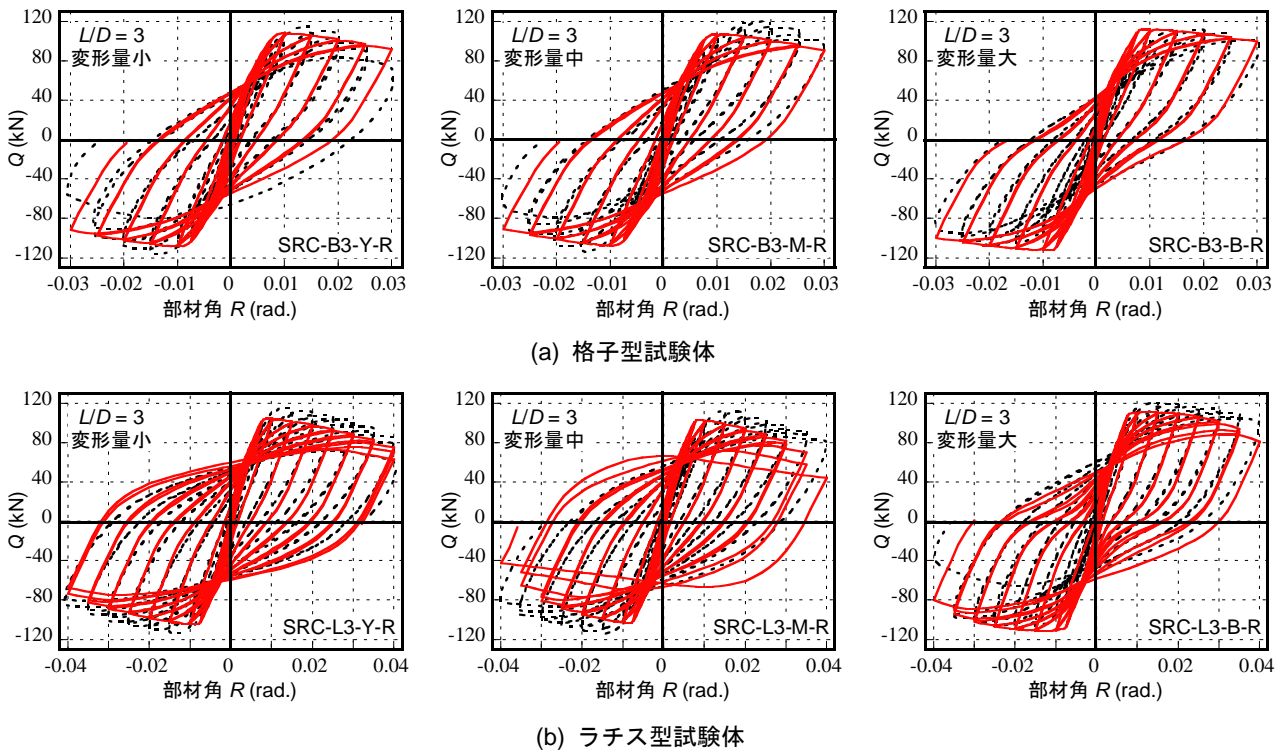


図-5 実験（二次荷）と解析の比較

達していたので、フランジ外縁までのコンクリート要素をポリマーセメントモルタル要素とし、拘束を考慮しない崎野・孫のモデル¹¹⁾を用いて解析を行った。また、二次荷荷時の解析において一次荷荷時のひずみ履歴は考慮していない。

4. 解析結果の検討

4.1 一次荷荷の試験体に対する解析

図-4 に一次荷荷の実験と弾塑性解析との比較を示す。図中黒点線が実験値、赤実線が解析結果である。図より、格子型・ラチス型ともに、初期剛性の解析値が実験値を若干大きめに評価している。また、最大耐力時の部材角を小さめに評価している。しかし、挙動全体としては前述の解析条件により実験挙動を概ね追跡できていることがわかる。

4.2 補修後の二次荷荷の試験体に対する解析

図-5 に二次荷荷の実験と弾塑性解析との比較を示す。荷荷の前後での水平耐力の上昇が数値解析では表現できていない。一次荷荷の影響により鋼材の降伏点応力の上昇が二次荷荷時の耐力上昇の一因であると推察されるが、どの程度の上昇分を考慮するかは一次荷荷時のひずみ履歴を考慮した解析が必要となる。また、初期剛性の低下量に関しても数値解析では、格子型試験体の変形量小と変形量中の試験体で約 3%初期剛性が低下しており、変形量大の試験体では断面修復に用いたポリマーセメントモルタルの影響により 10%剛性が上昇していた。

ラチス型試験体の変形量小と変形量中の試験体で剛性低下はなく、変形量大の試験体では 5%剛性が低下していた。本論ではひび割れ幅を最大限考慮し、注入した樹脂とコンクリートのヤング係数比による影響のみで解析を行ったが、初期剛性の低下量は十分再現できなかった。その他の剛性低下の原因としては、エポキシ樹脂の注入が不十分である可能性、荷荷履歴を受けたコンクリート自体が内部ひび割れによって剛性低下を起こしている可能性等が考えられる。しかし、コンクリートの応力が最大応力に達するまではコンクリート自体の剛性の低下量はあまり大きくないため、最大変形量が降伏荷重レベルの補修試験体(SRC-B3-Y-R, SRC-L3-Y-R)における実験での剛性低下量の説明にはならない。これに関しては、樹脂注入が不十分である可能性が考えられる。変形量の大きい試験体においては、一次荷荷時のひずみ履歴よりコンクリートの剛性低下分を考慮する解析の必要があろう。

4.3 鋼材の降伏点の上昇に関する検討

図-5 より、最大耐力以降の挙動において、解析値は実験値を小さめに評価していることが分かる。補修後の試験体において、鋼材に関しては、ひずみ硬化やひずみ時効の影響で降伏点応力が上昇している可能性があり、ここでは降伏点応力を一次荷荷時の 1.1 倍としたものと 1.2 倍としたものの解析を行った。同じ試験体においてはフランジ、鉄筋ともに上昇率は同倍率としている。図-6 に降伏点応力を 1.1 倍した時の解析結果、および降

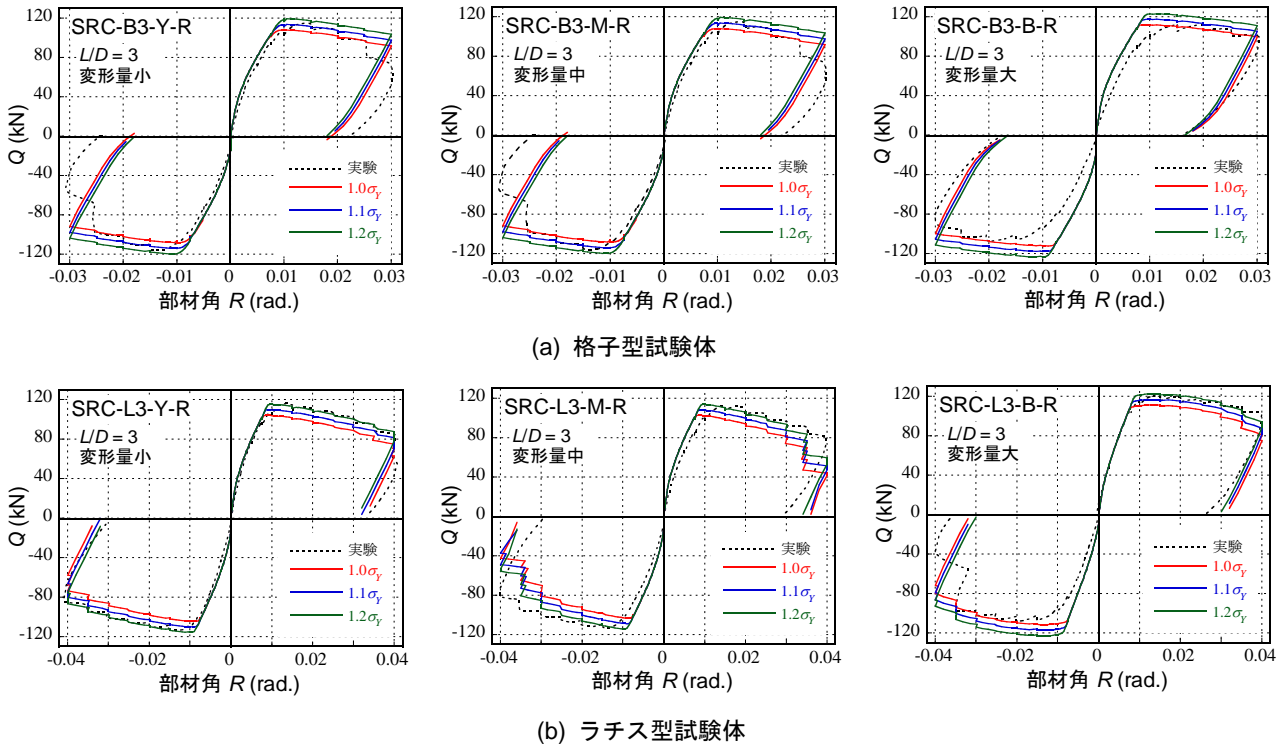


図-6 包絡線による実験（二次載荷）と解析の比較

伏点応力を 1.2 倍した時の解析結果との包絡線の比較を示す。図中黒点線が実験値で、赤実線、青実線、緑実線がそれぞれ降伏点応力 1.0 倍、1.1 倍、1.2 倍の解析結果である。また、表-2 に二次載荷の実験と解析の最大耐力の比較を示す。

格子型で一次載荷の変形量が大きい SRC-B3-B-R 試験体では耐力を大きめに評価するが、それ以外の試験体では降伏点応力の上昇を考慮することによって最大耐力や最大耐力以降の挙動を良く予測できるようになっている。これより、ひずみ効果やひずみ時効による鋼材の降伏応力の上昇が補修後の耐力上昇の要因の一つであることが推察できる。

今回の行った解析では、同じ試験体では鉄筋もフランジも同じ倍率で降伏点応力の上昇を考慮したが、鋼材に関しても一次載荷のひずみ履歴によって異なる強度上昇率となる可能性があり、一次載荷のひずみ履歴を考慮した解析が必要である。

5. まとめ

載荷履歴を受けた非充腹格子型 SRC 柱の補修後の性能において観察される剛性低下と耐力上昇のメカニズムを調べるために、ファイバー法により履歴挙動の解析を行った。得られた知見をまとめて本論の結論とする。

- 1) ひび割れに注入した樹脂の影響を、樹脂とコンクリートのヤング係数比によるコンクリートの見かけのヤグ係数の低下量として考慮した解析において、実験で観察された剛性低下量を十分再現できず、実験結果よりも低下量は小さかった。補修後性能を解析するにはコンクリートが一次載荷で受けたひずみ履歴の影響を考慮する必要があると考えられる。
- 2) 補修後の試験体で観察される耐力の上昇を、ひずみ時効やひずみ硬化の影響として、鋼材の降伏応力を変えて解析を行った。モルタルによる断面修復を伴う試験体においてはやや大きめに評価するが、鋼材の

表-2 実験（二次載荷）と解析の最大耐力比較

	実験値 $exp Q_{max}$		解析値 $cal Q_{max}$					
			$1.0\sigma_y$		$1.1\sigma_y$		$1.2\sigma_y$	
	正側	負側	正側	負側	正側	負側	正側	負側
SRC-B3-Y-R	114.9	-115.9	108.0 (0.940)	-108.1 (0.933)	113.8 (0.991)	-113.8 (0.982)	119.5 (1.040)	-119.5 (1.031)
SRC-B3-M-R	120.1	-113.6	107.2 (0.892)	-107.2 (0.943)	112.9 (0.940)	-113.0 (0.994)	118.7 (0.988)	-118.7 (1.044)
SRC-B3-B-R	112.2	-107.4	112.1 (0.999)	-112.1 (1.044)	117.7 (1.049)	-117.7 (1.096)	123.2 (1.098)	-123.2 (1.148)
SRC-L3-Y-R	116.1	-113.6	104.3 (0.898)	-104.3 (0.918)	109.9 (0.946)	-109.9 (0.968)	115.5 (0.995)	-115.5 (1.017)
SRC-L3-M-R	112.5	-113.6	103.1 (0.917)	-103.2 (0.909)	108.7 (0.966)	-108.7 (0.957)	114.2 (1.015)	-114.1 (1.005)
SRC-L3-B-R	120.8	-108.0	111.5 (0.923)	-111.4 (1.031)	117.2 (0.970)	-117.1 (1.084)	122.8 (1.016)	-122.8 (1.136)

降伏応力の上昇を考慮することにより、補修後の試験体の履歴をよく予測できるようになる。

謝辞

本研究は、文部省科学研究費補助金(若手研究(B))「載荷履歴を受けた RC・SRC 部材の補修後性能に関する研究」(研究代表者:藤永隆)の援助を受けて行った。ここに記して感謝の意を申し上げます。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会: 阪神・淡路大震災調査報告/建築編-2, 1998 年 8 月
- 2) 石橋忠良・津吉毅・小林薫・小林将志: 大変形正負交番載荷を受ける RC 柱の損傷状況及び補修効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.648/V-47, pp.55-69, 2000 年 5 月
- 3) 稲熊弘・関雅樹: 被災した鉄道高架橋柱の残存耐力に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1219-1224, 2006 年
- 4) 藤永隆・三谷勲: 載荷履歴を受けた SRC 部材の補修後の性能に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.1163-1164, 2006 年 9 月
- 5) 立花正彦ら: 非充腹型 SRC 及び RC 柱部材の力学特性と耐震補強・補修に関する実験的研究(その 1~その 16), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1997 年 9 月~2000 年 9 月
- 6) 鈴木計夫ら: PRC 梁 RC 柱接合部の補修後の耐震性能に関する基礎実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.1059-1060, 1999 年 9 月
- 7) 藤永隆, 那良幸太郎, 神谷悠貴, 孫玉平: 載荷履歴を受けた格子型 SRC 柱の補修後性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.57B, 2011 年 3 月
- 8) 神谷悠貴, 藤永隆, 孫玉平, 那良幸太郎: 載荷履歴を受けたラチス型鉄骨を内蔵する SRC 柱の補修後性能に関する実験的研究, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, 第 14 号, pp.113-122, 2010 年 3 月
- 9) 堺純一, 松井千秋: 鉄骨鉄筋コンクリート柱部材の復元力特性に関する研究-単一 H 形鋼を内蔵した SRC 柱の骨格曲線の定式化-, 日本建築学会構造系論文集, 第 534 号, pp.183-190, 2000 年 8 月
- 10) 加藤勉, 秋山宏, 山内泰之: 鋼材の応力-ひずみ履歴曲線に関する実験則, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.937-938, 1973 年 10 月
- 11) 崎野健治, 孫玉平: 直線型横補強材により拘束された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, No.461, pp.95-104, 1994 年 7 月
- 12) 鎌田圭次郎, 大住和正, 渡辺史夫, 六車熙: 各種強度の鉄筋混使用による RC 断面曲げ性能の制御, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.505-506, 1991 年 9 月