

PDF issue: 2025-06-13

載荷履歴を受けたラチス型SRC柱の補修後性能に関す る実験的研究

神谷, 悠貴 藤永, 隆 孫, 玉平 那良, 幸太郎

(Citation) 神戸大学都市安全研究センター研究報告,14:113-122

(Issue Date) 2010-03

(Resource Type) departmental bulletin paper

(Version) Version of Record

(JaLCDOI) https://doi.org/10.24546/81011318

(URL) https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011318



載荷履歴を受けたラチス型 SRC 柱の 補修後性能に関する実験的研究

Experimental Study on Behavior of Damaged SRC Beam-columns with Open-web Type of Lattice Plates after Retrofitting

> 神谷 悠貴¹⁾ Yuki Kamitani 藤永 隆²⁾ Takashi Fujinaga 孫 玉平³⁾ Yuping Sun 那良 幸太郎⁴⁾ Kohtaro Nara

概要:本研究では、ラチス型鉄骨を内蔵する SRC 柱について、様々な損傷状況における補修後性能を明らかにした. 一定軸力下で繰り返し水平力を受ける非充腹型ラチス SRC 柱について、一次載荷として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低下レベルの3 段階の変位振幅を設定し、載荷後は軽量ポリマーセメントモルタルおよびエポキシ樹脂で補修を行い、再載荷(二次載荷)を行った.本実験により、非充腹ラチス型 SRC 柱において、補修前の損傷状況に関わらず、補修後の初期剛性が低下し、最大耐力が上昇することが確認できた.

キーワード:非充腹型 SRC 柱, ひび割れ, エポキシ樹脂注入, ポリマーセメントモルタル, 初期剛性

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, 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, 建築物に関しては復旧過程に おいてその多くが解体・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ったためである.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,その研究の多くは既存不適格建築物をモデル化した健全な部材に対して補強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)~9)}.一方,鉄骨鉄筋コンクリート(以下 SRCとする)部材の 補修性能に関して, 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,先の震災において被害を受けた SRC 部 材のほとんどは非充腹型 SRC 部材であり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 の内部鉄骨は非充腹型が主となるといえる.またその場合には鉄筋コンクリート(以下 RC)部材と同様に、樹脂注入後 の初期剛性の低下は無視できない可能性がある.本研究では、補修による耐震性能の回復に関する基礎資料を得る ことを目的として、載荷履歴を受けた非充腹型 SRC 部材が、補修後にどのような特性を示すか明らかにする. なお、非 充腹型 SRC の内蔵鉄骨には格子型やラチス型といった形式があるが、本実験における内蔵鉄骨はラチス型とした.ま た、様々な破壊状況における補修後の性能を調べるために、損傷レベルを複数設定し、それぞれの損傷レベルの変 位振幅までの載荷(一次載荷)を行った. その後, それぞれの損傷状態に合わせて補修を行い, 再度大変形域までの 繰り返し載荷実験(二次載荷)を行い、その修復性能に関して検討した.

2. 実験概要

(1) 実験計画

一定軸力 N と繰り返し水平力 Q を受ける非充 腹ラチス型 SRC 柱の変形性能,補修後性能を調 べるために,図-1 に示すような一端固定,他端自 由の片持柱を想定し,曲げせん断実験を計画した. まず健全な部材を載荷し(一次載荷),載荷後の損 傷レベルに応じた補修を行い,再度載荷実験を行 った(二次載荷).実験変数として一次載荷の損傷 レベルを,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 降伏荷重まで低下レベル の3 段階で設定した.

コンクリート断面に関する軸力比 0.3 に相当する 軸力を導入し,一定に保持した後に以下の載荷プ ログラムにより水平力を載荷した.正載荷・負載荷 を1サイクルとして柱の部材角 R(= &L, S:柱頭の 水平変位, L:せん断スパン=750mm)を 0.0025rad. を初期値として 0.0025rad.刻みで 0.01rad.まで増加 させ, それ以降は 0.005rad.刻みで漸増させた. 各



変位振幅において2サイクルの繰り返し載荷を行っている.一次載荷の損傷レベルの設定については,主筋のひずみ が降伏ひずみに達した時点を降伏荷重レベル(本論では 0.0075rad.),水平耐力が最大を示した時点を最大荷重レ ベル(本論では 0.015rad.)とした.補修後の二次載荷試験体は軸力が保持できなくなる状態まで変位振幅を増加させ た.

(2) 試験体

試験体一覧を表-1 に, 試験体の形状および寸法を図-2 に示す. 断面せい・幅が 250mm, せん断スパン比 3.0 の 柱試験体である. 試験体下部には, 試験体を載荷床版に固定するため, 断面せい 400mm, 幅 300mm の充腹型 SRC のスタブを設けている. 内蔵鉄骨は, 溶接組立て加工により製作した非充腹型のラチス型鉄骨で, 鉄骨せい 160mm, フランジ幅 100mm, 板厚 t_{f} =6mm, ラチス材が幅 30mm, 板厚 t_{L} =4.5mm の, どちらも SS400 相当材である. 主筋は D13 を主筋間距離 190mm で, 帯筋は ϕ 6 を 100mm 間隔で設置した. 上部のエンドプレートにはコンクリート充填用に ϕ 90 の孔を開けている.

(3) 材料特性

鉄骨,鉄筋,コンクリートそれぞれの材料特性を調べるため,鋼材の引張試験およびコンクリートシリンダの圧縮試験, 割裂試験を行った.鉄骨および鉄筋の引張試験は,鉄骨より切り出した JIS1 号試験片(フランジ部 PL6)と JIS5 号試 験片(ラチス材 PL4.5)と鉄筋を,それぞれ3片ずつ行った.コンクリートの材料試験は試験時材齢のコンクリートシリン ダを圧縮.割裂それぞれ3体行い,その平均を圧縮強度,割裂強度とした.表-1にコンクリートの圧縮試験,割裂試験 の結果を,表-2 に鉄筋および鉄骨の引張試験結果を示す.帯筋の /6 は明確な降伏棚が観察されなかったので, 0.2%オフセット法による降伏点応力を示している.また,試験体に使用したコンクリートの調合を表-3 に示す.コンクリ ートの設計基準強度は18N/mm²,粗骨材の最大粒径は15mm,スランプは18cm(実測値 19.3cm)である.

(4) 実験方法

載荷装置を図-3 に示す.リニアスライダーを介した 1000kN 油圧ジャッキにより所定の軸力を載荷した後,押し 500kN 引き 300kN の油圧ジャッキで水平力を加えた. 試験体上部にかまぼこ型球座を設置し,軸力と水平力の載荷 点が一致する(水平力載荷治具ピン位置)ようにしている. 変位計取付位置を図-4 に示す. 柱頭の水平変位&は変位 計①で,試験体の縮み量は変位計②~④で測定した. また,スタブの変位を確認するために変位計⑤~⑦を設置し た. 変位計測の基準点は,変位計①~④は試験体スタブ,変位計⑤~⑦は載荷床版である. 試験体に貼り付けたひ ずみゲージは鉄骨 18枚,鉄筋 18枚,コンクリート6枚の計 42枚で,各部のひずみを測定した. 図-5 にゲージ貼付位 置を示す.

表-1	試験体	一覧
-----	-----	----

試	験体名	補修方法	最大変形量 (rad.)	コンクリートヤング係数 $_{c}E$ (kN/mm ²)	コンクリート圧縮強度 F_c (N/mm ²)	コンクリート割裂強度 F_t (N/mm ²)	軸力比 $n = N/N_0$	
	SRC-L-Y		0.0075	20.8	20.5	2.05	0.3	
一次載荷	SRC-L-M	(.	0.015	21.2	20.2	2.03	0.3	
	SRC-L-B		0.025	21.3	20.5	2.05	0.3	
二次載荷	SRC-L-Y-R	樹脂注入	0.04	22.5	21.8	1.92	0.3	
	SRC-L-M-R 断面補修 樹脂注入		0.04	21.7 15.9*	20.7 31.6*	1.90 2.74*	0.3	
	SRC-L-B-R	断面補修 樹脂注入	0.04	21.7 11.2*	21.0 31.2*	1.76 3.38*	0.3	

*:ポリマーセメントモルタルの強度

試験体	ヤング係数 E (kN/mm ²)	降伏点応力 σ_{γ} (N/mm ²)	降伏点ひずみ ε _γ (%)=σ _γ /E	引張強さ σ_U (N/mm ²)	降伏比 σ _Y /σ _U (%)	ひずみ硬化開始時 ひずみ度 ε (%)	破断伸び EL (%)
フランジ	205	302	0.147	435	69,4	2.21	28.9
ラチス材	212	371	0.175	486	76.3	-	35.5
主筋D13	193	349	0.181	497	70.2	2.09	25.3
帯筋∅6	206	491*	0.28 (0.44)	535	91.8	(e)	620
	試験体 フランジ ラチス材 主筋D13 帯筋ø ⁶	対験体 ヤング係数 E (kN/mm ²) フランジ 205 ラチス材 212 主筋D13 193 帯筋 Ø6 206	試験体ヤング係数 E (kN/mm²)降伏点応力 σγ(N/mm²)フランジ205302ラチス材212371主筋D13193349帯筋 Ø6206491*	試験体ヤング係数 $E (kN/mm^2)$ 降伏点応力 $\sigma_{\gamma} (N/mm^2)$ 降伏点ひずみ $\varepsilon_{\gamma} (\%) = \sigma_{\gamma} / E$ フランジ2053020.147ラチス材2123710.175主筋D131933490.181帯筋 $\phi 6$ 206491*0.28 (0.44)	試験体ヤング係数 $E (kN/mm^2)$ 降伏点応力 $\sigma_Y (N/mm^2)$ 降伏点ひずみ $\varepsilon_Y (%) = \sigma_Y / E$ 引張強さ $\sigma_U (N/mm^2)$ フランジ2053020.147435ラチス材2123710.175486主筋D131933490.181497帯筋 $\phi 6$ 206491*0.28 (0.44)535	試験体ヤング係数 $E(kN/mm^2)$ 降伏点応力 $\sigma_Y(N/mm^2)$ 降伏点びずみ $\varepsilon_Y(%)=\sigma_Y/E$ 引張強さ $\sigma_U(N/mm^2)$ 降伏比 $\sigma_Y/\sigma_U(%)$ フランジ2053020.14743569.4ラチス材2123710.17548676.3主筋D131933490.18149770.2帯筋 $\phi6$ 206491*0.28 (0.44)53591.8	試験体ヤング係数 $E(kN/mm^2)$ 降伏点応力 $\sigma_Y(N/mm^2)$ 降伏点ひずみ $\varepsilon_Y(%)=\sigma_Y/E$ 引張強さ $\sigma_U(N/mm^2)$ 降伏比 $\sigma_Y/\sigma_U(%)$ $U ずみ硬化開始時U ずみ度\varepsilon (%)フランジ2053020.14743569.42.21ラチス材2123710.17548676.3-主筋D131933490.18149770.22.09帯筋 \phi 6206491*0.28 (0.44)53591.8-$

表-2 引張試験結果

*:0.2%オフセット法により算出した値、()内は0.2%オフセット法による降伏点応力時のひずみの値

表-3 引張試験結果コンクリート調合(設計基準強度 18N/mm²)

水セメント比	セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤	スランプ
(%)	(kg/m ³)	(cm)				
68	290	197	530	812	2.90	18



図-3 載荷装置



図-4 変位計取付位置





(b)鉄筋(記号 R)

図-5 ひずみゲージ貼付位置

3. 補修方法

試験体の補修は,主としてエポキシ樹脂のひび割れ注入により行った. 試験体 SRC-L-M, 試験体 SRC-L-B は損傷 が激しく, コンクリートの剥落もあったため, 樹脂注入前に軽量ポリマーセメントモルタルにより断面修復を行った.

ひび割れへの樹脂注入の方法は,膨らんだゴムチューブの内部圧力により,時間をかけてひび割れの深部まで樹脂を注入していく工法を用いた.各試験体の樹脂注入位置および断面修復状況を図-6 に示す.図中の塗りつぶされた箇所は断面修復を施した部分,●は樹脂注入位置を示す.また,断面修復の手順を写真-1に,樹脂注入の手順を写真-2 に示す.



(c)SRC-L-B 試験体

図-6 樹脂注入位置および断面修復状況







①コンクリートの浮き, 脆弱部分等の除去

②下地処理用プライマーの塗布

写真-1 断面修復手順

③ボリマーセメントモルタルの上塗り,断面の 補修整形後4週間ほど養生



①表面のレイタンスや塵埃の除去,樹脂注入 ②ゴムチューブ取付用座金をシール材で接 ③シール材でひび割れ部のシーリング(断面 位置の決定(クラック幅の大きな部分、ひび の交点を目安とする)



着(断面補修を行った場合,断面修復材と コンクリートの境界部分にも座金を接着)



修復材とコンクリートの境界部分にもシーリ ング),硬化まで2~3日養生



割れ部へ樹脂を注入



④樹脂を充填したゴムチューブを座金に装 ⑤樹脂の硬化まで2~4日養生、目視で確認 ⑥ゴムチューブ、座金、シーリング材を取り除 着、ゴムチューブの内部圧力により、ひび できない微小なひび割れからも樹脂が染 み出していることを確認



き、表面仕上げ

写真-2 樹脂注入手順

4. 実験結果

(1) 荷重一部材角関係

図-7に荷重 O-部材角 R 関係を示す. 図中に、〇印で載荷正側、負側における最大耐力点を示し、上段の一次載 荷試験体には、□印で主筋が初めて降伏ひずみに達した点を示している.図中の点線は、鋼材の降伏点応力とコン クリートの圧縮強度を用いて算定した塑性崩壊機構直線である. コンクリートの強度低減係数 0.85 を考慮している.

いずれの試験体も紡錘形の履歴ループを描いており、一次載荷の試験体3体を比較すると、その再現性が確認で きる. 今回の実験では、いずれの補修試験体においても各部材角における最大耐力が 0.035rad.までは概ね全塑性 耐力直線に沿って低下していっているため、耐力低下は P-δ効果によるものが主たる要因であると判断できる。

図-8 に各試験体の包絡線を示す.一次載荷における変形量の大小に関わらず,3 体ともに補修の前後で初期剛 性が低下していることがわかる.また、試験体 SRC-L-B と二次載荷の試験体 SRC-L-B-R を比較すると、試験体 SRC-L-B は 0.02rad.以降に耐力の低下が見られるが、補修後は最大耐力に達した後も耐力を保持しており、最大耐 力値と最大耐力後の挙動が向上していることが確認できる.

表-4 に,各試験体の初期剛性および各部材角における耐力を示す.初期剛性の値は,部材角 0.0025rad.の状態 での割線剛性とした.

補修後の試験体の初期剛性は補修前の 80~90%に低下していた.一方,各部材角における最大耐力は,部材角が小さい時は一次載荷試験体の方が高い耐力を示しているが,0.0075rad.を過ぎたあたりから二次載荷の試験体が一次載荷試験体の耐力を上回っている.補修の前後での正側最大耐力を比較すると,大変形域まで載荷した試験体 SRC-L-B と比べて,試験体 SRC-L-Y-R では 5%,試験体 SRC-L-M-R では 2%,試験体 SRC-L-B-R では 9%耐力が上昇している.

また, 試験体 SRC-L-B は-0.025rad. で塑性崩壊機構直線を下回るような履歴ループを描いているが, 補修後の試験体3体は0.025rad. でも耐力が塑性崩壊機構直線を下回っていない. 試験体SRC-L-Y-R, 試験体SRC-L-B-R では, 部材角が 0.03rad に達しても最大耐力の 90%程度を保持していた.



表-4 実験結果一覧

試験体名	初期剛性 (kN/mm)	1性 剛性低下率 m) (%)	最大耐力		最大耐力	時部材角	各部材角での耐力 (kN)									
			(kN)			(rad.)		0.0025rad.		0.005rad.		0.01rad.		0.02rad.		
			I	E側	負	側	正側	負側	正側	負側	正側	負側	正側	負側	正側	負側
SRC-L-Y	25.9	8 2 0	(89)	-	(-88)	323	(0.75)	(0.75)	51	-50	75	-71	2	- 5	121	- 540 C
SRC-L-M	26.3		105		-109		1.39	-1.36	50	-51	73	-75	97	-101	1000	2.00
SRC-L-B	26.0	(R)	109	(1.00)	-109	(1.00)	1.45	-1.4	52	-51	76	-74	100	-103	106	-104
SRC-L-Y-R	23.3	90.0	114	(1.05)	-111	(1.02)	1.34	-1.37	46	-43	76	-73	108	-107	111	-108
SRC-L-M-R	21.2	80.6	110	(1.02)	-111	(1.02)	1.47	-1.44	40	-41	65	-66	100	-101	110	-109
SRC-L-B-R	21.7	83.5	119	(1.09)	-106	(0.97)	1.34	-1.95	49	-34	80	-63	113	-95	117	-106

(2) 軸方向変位

軸方向変位δ_rと部材角 Rの関係を図-9に示す. 各試験体について, 試験体の柱脚から1D(250mm)の位置の西側 と東側それぞれ1箇所ずつ測定した鉛直変位(変位計③④, 図-4 参照)の平均値を用いた.

ー次載荷試験体と二次載荷試験体における,最大変位振幅 0.02rad.終了時の軸方向変位を比較すると,試験体 SRC-L-B では-1.03mm であるが,二次載荷試験体では-0.5mm を超えていない.また,二次載荷試験体同士を比較 すると,試験体 SRC-L-Y-R,試験体 SRC-L-M-R が試験体 SRC-L-B-R と比べて各部材角における軸方向変位が大き くなっていることが分かる.このことから今回の実験では,損傷状況が小さいものよりもある程度の損傷を受けた方が, 補修後の軸縮みを抑えられていた.これは,補修に用いたポリマーセメントモルタルの圧縮強度がコンクリートの圧縮 強度の約1.5倍であることが一因と考えられる.また,試験体 SRC-L-Y のひび割れが少なく,目視で確認されたひび割 れ幅も試験体 SRC-L-B に比べ小さかったため,樹脂が細部まで注入されず,コンクリート強度および主筋との付着が 十分に回復できなかった可能性もあげられる.



図-9 軸方向変位一部材角関係

(3) 損傷状況

図-10 に, 各試験体のひび割れ破壊状況を示す. 図中, 黒く塗りつぶしている部分はコンクリートが圧壊または剥落 した部分を示している.

ー次載荷と二次載荷を比較すると、二次載荷によるひび割れは一次載荷によるひび割れとは違う位置に発生して いることから、樹脂注入によるひび割れの補修効果は十分に発揮されていると判断できる.また、いずれの損傷レベル の試験体についても、補修前の試験体よりも補修後の試験体の方が、同じ変位振幅時の損傷量が少なくなっているこ とがわかる.



図-10 損傷状況(つづく)



図-10 損傷状況(つづき)

5. まとめ

本実験により、様々な損傷状況における非充腹型 SRC 柱の補修後性能を明らかにした. そこで得られた知見をまとめて本論の結論とする.

- ・補修後の非充腹型 SRC 柱は、補修前の損傷状況に関わらず剛性が 8~9 割程度に低下することが確認された.
- ・補修後の非充腹型 SRC 柱は、補修前の損傷状況に関わらず最大耐力が上昇することが確認された.また、二次 載荷によるひび割れが一次載荷によるひび割れとは違う位置に発生していたことからも、今回採用したエポキシ樹 脂ひび割れ注入工法は有効な補修方法であったといえる.

謝辞:本実験は文部科学省科学研究費(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)の補助を受けて行った.ここに記して感謝の意を表します.

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8), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.1107-1122, 1997 年 9 月
- 6) 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9~その15),
 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.1089-1102, 1998 年 9 月
- 7) 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16),日本建築学会大会学術講演梗概集(東北),pp.1117-1118,2000 年 9 月
- 8) 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
- 9) 那良幸太郎ら: 載荷履歴を受けた格子型鉄骨を内蔵する SRC 柱の補修後性能に関する実験的研究(その1, その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.1143-1146, 2009 年 9 月

筆者:1) 神谷 悠貴:工学部建設学科,学生;2) 藤永 隆:都市安全研究センター,准教授;3) 孫 玉平:工学研究 科建築学専攻,教授;4) 那良 幸太郎:工学研究科建築学専攻,大学院生

Experimental Study on Behavior of Damaged SRC Beam-columns with Open-web Type of Lattice Plates after Retrofitting

Yuki Kamitani Takashi Fujinaga Yuping Sun Kohtaro Nara

Abstract

In this paper, structural performance of damaged steel encased reinforced concrete (SRC) beam-columns with open-web type of lattice plate after retrofitting was investigated. Three open-web type of SRC beam-column specimens were tested under combined constant axial load and cyclic lateral load. Experimental parameter is the maximum tip displacement of the columns in the first loading, three ranges were set: 1) the yield displacement, 2) the displacement corresponding to maximum strength, and 3) the displacement where the lateral load drops to the yield strength. At first, each column was loaded to the targeted displacement. After the first loading, the test columns were retrofitted and reloaded. The damaged portions of each column were retrofitted with the polymer cement mortar, and the resin of epoxy injected into the cracks.

All of the retrofitted columns have shown higher load carrying capacity and lower stiffness, while the experienced displacement in each column was different.