

# [183] 震害を受けた鉄筋コンクリート造耐震壁の補修ならびに補強効果に関する実験的研究

正会員 本岡順二郎 (日本大学理工学部)  
 正会員 小野 新 (日本大学理工学部)  
 正会員 ○安達 洋 (日本大学理工学部)  
 大森健太郎 (日本大学大学院)

## 1. はじめに

構造物の地震に対する対応策は 1)新たに建設される構造物の設計方法の確立, 2)既存構造物の耐震性の判定法と補強方法の確立, 3)震害を受けた構造物の被害度の判定法と復旧工法の確立, の三つに要約できよう。これらの項目の内1), 2) は建設省の総プロをはじめとする多くの関連研究がなされており, これらの研究成果と過去の地震の経験より得られた教訓に基づいた規準が明文化されている。

これに対して, 3)の被害度の判定法と復旧工法の確立については, 関連研究の事例が少ないこともあって, 現時点では不明な点が少なくない。大地震に際して, 総べての構造物を無被害に収めることは, ほとんど不可能であること, さらに東海地震の発生が危惧される昨今の状況を考えた場合, 構造物の被害度の判定法と復旧工法を確立させることは研究上の急務であると言えよう。

本研究は震害を受けた鉄筋コンクリート造耐震壁の補修および補強効果に対して検討を加えることを目的とした一方向加力実験の報告である。試験体は処女加力実験で曲げ破壊からせん断破壊までの多様な破壊形式を示した単独壁に対して, エポキシ樹脂による補修, およびこれに加えて壁板を増し打ち補強したものである。

## 2. 試験体概要と補修, 補強方法

処女加力時の試験体(以後, 処女試験体と略称する。)はシアスパン比, 壁厚比, 壁筋比を要因とする総計12体である。表1は各試験体の一覧を処女試験体と対比して示したものである。

図1に試験体の形状を示す。

これらの試験体の補修, 補強は同表に示すように, 各壁厚比, 壁筋比別に異った方法を採用した。これは以下に示すように, 処女加力実験結果に基づいて決定されたものである。

1) BE04S5 ( $t/b_c = 0.4, P_s = 0.43\%$ ) : こ

これらの処女試験体の破壊モードは総べて壁板のスリップ破壊と周辺柱のせん断破壊が変形能力の支配要因となっている。また, シアスパン比が0.44のもの以外は総べて曲げ降伏し, じん性は比較的高かったことから, 処女試験体の性能に回復させることを目標に, ひびわれおよび壁板部のスリップ破壊, 圧縮側柱脚のせん断破壊にともなう圧壊部分を全面的に補修した。(以後, 全補修と略称する)

2) BE02S10 ( $t/b_c = 0.4, P_s = 0.43\%$ ) : これらの処女試験体の変形能

力支配要因は総べて曲げ降伏に至る前の壁板部のスリップ破壊であり, 耐力,

じん性は極めて低かった。このような試験体は単に処女試験体の性能を回復させるだけでは耐震上, 好ましくないと考えられるため, ひびわれ, および壁板部のスリップ破壊にともなう圧壊部分に全面的な補修を施した後, 増し打ち壁による補強を行った。(以後, 補修・補強と略称する。)

表1 試験体一覧

補修・補強方法	シアスパン比				壁厚比 ( $t/b_c$ )	壁筋比 (%)
	0.44	0.67	0.89	1.11		
オリジナル	SR05BE04S5	SR075BE04S5	SR100BE04S5	SR125BE04S5	6 (0.4)	4 0.43
全補修	SR05BE04SSR	SR075BE04SSR	SR100BE04SSR	SR125BE04SSR		
オリジナル	SR05BE02S5	SR075BE02S5	SR100BE02S5	SR125BE02S5	3 (0.2)	4 0.87
増し打ち補修	SR05BE02SSR	SR075BE02SSR	SR100BE02SSR	SR125BE02SSR		
オリジナル	SR05BE02S10	SR075BE02S10	SR100BE02S10	SR125BE02S10	3 (0.2)	4 0.43
補修・補強	SR05BE02S10R	SR075BE02S10R	SR100BE02S10R	SR125BE02S10R		

試験体名の最後のはは補修後の試験体を示す。

共通因子

断面寸法:  $b_c \times t = 15 \times 15 \text{ (cm)}$ ,  $b_c \times D = 15 \times 20 \text{ (cm)}$ ,  $b_c = 135 \text{ (cm)}$ ,  $l = 120 \text{ (cm)}$

柱脚筋:  $D9 \times 3$  (2)(16-013), 柱脚上筋:  $D9 \times 1$  (6)(16-013)

柱脚筋:  $D9 \times 0.553$  (2)(0.4-0.50), シアスパン比: 1/0.0

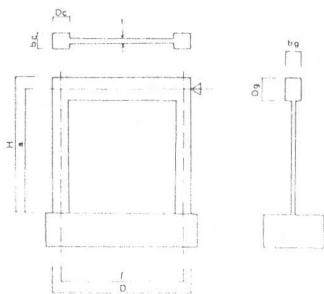


図1 試験体形状

3) BE02S5 ( $t/bc=0.2$ ,  $Ps=0.87\%$ ) : これらの処女試験体はBE02S10同様, 変形能力の支配要因が壁板部のスリップ破壊であり, 耐力, じん性はあまり高くなかった。これらの試験体は局所的な補修の効果を調べる事を目的として, 限界ひびわれ, および壁板部のスリップ破壊にともなう圧壊部分のみを補修し, 他のひびわれには補修を施さなかった。(以後, 局部補修と略称する。)

上記の1)~3)で述べた補修, 補強の具体的な方法は以下に示す通りである。

1) ひびわれ部分の補修: エポキシ樹脂を注入した。(12体の注入総量 3ℓ) 注入に際し, 比較的幅の広いひびわれ(0.25mm 以上)には手動ポンプを, 狭いもの(0.25mm 以下)には自動注入機を用いた。

2) 壁板部のスリップ破壊, 柱のせん断破壊にともなう圧壊部の補修: 手で剥せる部分を取り除き, 掃除機で清掃した後, エポキシ樹脂系モルタルを充填した。

3) 増し打ち壁補強: 全補修を施した後, 壁片面に厚さ3cmのモルタルを水平打ちした。図2, 3に示すように, 増し打ち壁の補強筋は既存壁と同じ配筋(4φ-@100,  $Ps=0.43\%$ )とし, 既存部との一体化を計るため, 周辺骨組と既存壁にエポキシ樹脂で接着した山型鋼(L=50×50×4)に溶接されたアンカー筋(4φ-@100,  $ℓ=160mm$ )と重ね継ぎした。

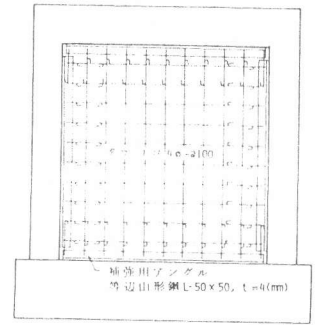


図2 補強壁配筋

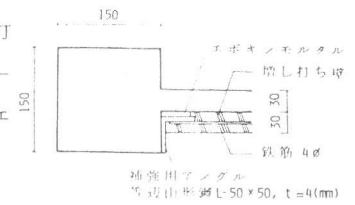


図3 補強詳細

### 3. 使用材料

補強用増し打ち壁に用いたモルタルの材料試験結果を処女試験体の結果と対比して表2に示す。表3に鉄筋の材料試験結果を示す。なお, 既存部と補強部の壁筋(4φ)は同一ロットのものが用いられているため, 処女試験体, 補強試験体別には示していない。表4, 5にそれぞれ補強材料の力学的, 物理的性質を示す。

表2 モルタルの材料試験結果

	試験体	圧縮強度 ( $kg/cm^2$ )	引張強度 ( $kg/cm^2$ )	モルタル係数 $\frac{f_t}{f_c} \times 10^3$ ( $kg/cm^2$ )
処女前	BE04S5	270.6	31.1	1.83
	BE02S5	304.7	32.8	2.17
	BE02S10	370.0	38.0	2.31
補強後	BE02S10R	287.8	29.6	2.00

### 4. 実験方法

水平力は図4に示すような片持ちばり形式の荷重方法を採用し, 軸方向力は加えなかった。試験体は鉄筋コンクリート製の固定ブロックを介し, 反力床に固定した。水平力は反力壁に取り付けた両動油圧ジャッキ(容量±50t, ストローク±300mm)を用い, はりの軸心レベルで一方向に単調荷重した。

表3 鉄筋の材料試験結果

径	断面積 ( $cm^2$ )	降伏強度 ( $kg/cm^2$ )	引張強度 ( $kg/cm^2$ )	伸び率 (%)	モルタル係数 $\frac{f_t}{f_c} \times 10^3$ ( $kg/cm^2$ )
4φ	0.13	4200	5700	14.2	1.99
D13	1.27	3570	5330	20.7	2.05

表4 補修材料の力学的性質

補修材料	圧縮強度 ( $kg/cm^2$ )	引張強度 ( $kg/cm^2$ )
エポキシ樹脂	870	350
エポキシモルタル	1081	388

表5 補修材料の物理的性質

補修材料	配合比(モルタル) 主剤:硬化剤	比重 ( $g/cm^3$ )	乾燥
エポキシ樹脂	2 : 1	1.10	—
エポキシモルタル	2 : 1	1.09	850

本実験で実施した測定項目とその方法は以下の通りである。

- 1) 水平荷重: ロードセル(容量: ±50t)で検出した。
- 2) 水平変位と鉛直変位: 左右の柱, はり仕口部の midpoint 位置で電気式変位計によって測定した。使用した変位計の検長, 精度は以下に示す通りである。

水平変位: 検長 = 100mm, 精度 = 200μ/mm

鉛直変位: 検長 = 50mm, 精度 = 100μ/mm

- 3) 曲率: 両側柱を5区間(シアスパン比が0.44の試験体のみは4区間)に等分し, 各区間の伸縮量を電気式変位計(検長 = 25mm, 精度 = 500μ/mm)により測定し, この値を用いて試験体の各区間における曲率を求めた。

- 4) ひびわれ幅: クラックスケールによって測定した。

なお, 2), 3)の測定装置の詳細は文献1に掲載されているので参照されたい。

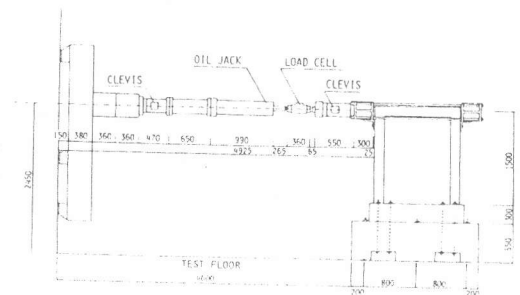


図4 加力装置

5. 実験結果

表6に全試験体の初期剛性、最大耐力の実験値、せん断終局強度<sup>\*2</sup>、曲げ終局強度<sup>\*2</sup>の計算値(cQ<sub>MU</sub>, cQ<sub>SU</sub>)、および最大荷重の実験値に対するこれらの計算値の比、限界変形の実験値、破壊モードの一覧を処女試験体の結果と対比して示す。

表中、限界変形は耐力が急激に低下する時、または耐力の低下が緩やかな場合は荷重が最大耐力の75%に低下した時の変形として定義した。また破壊モードの略符号は以下のような意味を持つものである。

F: 曲げ降伏, WS: 壁板スリップ破壊, CcDT: 圧縮側柱脚せん断破壊, CtDT: 引張側柱頭せん断破壊

なお、補修、補強を施した試験体の終局強度算定に際しては処女試験体の材料データを用い、補修・補強材の影響は考慮しなかった。

6. 実験結果の考察

6-1 破壊性状 本実験で採用したひびわれ補修方法は現在、一般に広く用いられているものである。この方法はエポキシ樹脂を完全に注入することが、かなり困難であり、処女加力時のひびわれが再び開口した。このため、圧縮側柱脚のせん断破壊が処女試験体の変形能力支配要因の1つとなっているBE04S5Rシリーズの試験体は、処女試験体より早い段階に同部位せん断ひびわれが開口し、後述するように、補修後のじん性<sup>\*3</sup>がかなり低下した。したがって、周辺架構のせん断破壊箇所の補修は低速、低圧の注入方法を用いるなど、十分な配慮を払う必要がある。

これに対して、処女載荷時の変形能力支配要因が壁板スリップ破壊で、周辺架構は比較的健全なBE02S10Rシリーズの試験体には上述の傾向は見られず、増し打ち壁の効果により、目標とするBE04S5シリーズとほぼ同様な破壊性状を示した。スリップ破壊箇所と限界ひびわれのみを補修したBE02S5Rシリーズの試験体はスリップ破壊箇所がその補修効果により、処女試験体とは異なったことを除くと、処女試験体との間に本質的な違いは見られなかった。

図5-a)~c)に以上述べた事の一例としてシアスパン比が0.88(SR100シリーズ)の各試験体の最終破壊状況を処女試験体と対比して示す。

6-2 初期剛性、最大耐力、じん性に対する検討

図6-a), b)はそれぞれ全補修および局部補修を施した試験体(BE04S5R, BE02S5R)の初期剛性、強度、限界変形の処女試験体に対する回復率を示したものである。図7-a)~c)は補修・補強を施した試験体(BE02S10R)の処女試験体に対する回復率と補強目標とした試験体(BE04S5)に対する達成率を、それぞれ初期剛性、強度、限界変形別に示したものである。

表6 実験結果一覧

試験体	初期剛性		最大耐力		計算値		算/計		限界変形		破壊モード
	K(c/cm)	Δx(t)	Δx(m)	Δx(t)	cQ <sub>MU</sub> (t)	cQ <sub>SU</sub> (t)	Δx(t)	Δx(m)			
SR125BE04S5	160.5	33.8	33.6	26.6	32.4	1.27	1.05	31.9	38.0	F, WS, CcDT	
SR125BE04S5R	79.0	33.8	12.9	26.6	32.4	1.27	1.05	33.5	14.3	F, WS, CtDT, CrDT	
算/計比	0.49	1.0	0.38					1.05	0.38		
SR125BE02S5	41.7	25.9	10.3	26.6	26.9	0.97	0.96	24.4	10.9	F, WS	
SR125BE02S5R	35.6	27.0	13.8	26.6	26.9	1.01	1.01	27.0	14.8	F, WS	
算/計比	0.85	1.04	1.34					1.11	1.36		
SR125BE02S10	166.7	22.5	9.59	24.5	27.1	0.92	0.83	20.4	11.0	WS	
SR125BE02S10R	400.0	28.7	19.2	26.6	32.4	0.93	0.89	22.8	32.6	F, WS, CtDT	
算/計比	2.40	1.28	2.00					1.12	2.96		
SR100BE04S5	106.0	35.8	16.1	33.3	34.8	0.93	1.03	32.4	20.5	F, WS, CtDT	
SR100BE04S5R	39.3	37.5	14.0	33.3	34.8	1.13	1.08	37.1	14.8	F, WS, CtDT, CrDT	
算/計比	0.37	1.05	0.87					1.15	0.72		
SR100BE02S5	44.2	29.0	10.2	33.3	28.8	0.87	1.01	28.3	11.6	F, WS	
SR100BE02S5R	51.3	27.7	6.88	33.3	28.8	0.83	0.96	27.7	6.88	F, WS	
算/計比	1.16	0.96	0.67					0.98	0.59		
SR100BE02S10	54.2	24.8	8.77	30.6	29.4	0.81	0.84	24.6	9.40	WS	
SR100BE02S10R	135.5	33.5	9.69	33.3	34.8	1.01	0.96	27.7	18.6	WS, CtDT, CrDT	
算/計比	2.50	1.35	1.10					1.13	1.98		
SR075BE04S5	221.8	43.2	10.8	44.4	38.2	0.97	1.13	42.1	1.11	F, WS, CtDT	
SR075BE04S5R	231.9	40.1	5.86	44.4	38.2	0.90	1.05	40.1	5.86	F, WS, CtDT, CrDT	
算/計比	1.05	0.93	0.54					0.95	0.53		
SR075BE02S5	80.4	31.8	5.73	44.4	31.6	0.72	1.01	31.8	5.73	WS	
SR075BE02S5R	50.5	32.9	6.79	44.4	31.6	0.74	1.04	32.8	7.14	WS	
算/計比	0.63	1.03	1.18					1.03	1.25		
SR075BE02S10	147.5	24.3	4.12	40.8	32.5	0.60	0.75	24.3	4.12	WS	
SR075BE02S10R	298.8	39.8	8.37	44.4	38.2	0.90	1.04	39.1	9.30	WS, CcDT	
算/計比	2.03	1.64	2.03					1.61	2.26		
SR05BE04S5	493.9	50.7	5.73	66.6	43.4	0.76	1.17	50.0	6.07	WS, CtDT, CrDT	
SR05BE04S5R	140.0	38.0	6.15	66.6	43.4	0.57	0.88	37.8	6.93	WS, CcDT	
算/計比	0.28	0.75	1.07					0.76	1.14		
SR05BE02S5	172.3	40.9	3.79	66.6	35.9	0.61	1.14	38.8	3.87	WS, CtDT, CrDT	
SR05BE02S5R	202.0	34.8	2.91	66.6	35.9	0.52	0.97	33.2	3.49	WS, CcDT	
算/計比	1.17	0.85	0.77					0.86	0.90		
SR05BE02S10	273.3	26.5	3.16	61.2	37.4	0.43	0.71	26.5	3.16	WS, CcDT, CrDT	
SR05BE02S10R	266.0	42.0	5.68	66.6	43.4	0.63	0.97	31.5	12.1	WS, CcDT, CrDT	
算/計比	0.97	1.58	1.80					1.19	3.83		

$$cQ_{MU} = [0.9 \alpha_1 \sigma_c \cdot D + 0.4 \alpha_2 \sigma_c \cdot d_w \cdot D + 0.5 N D (1 - N^2 / b D^2)] / h \cdot \lambda^2$$

$$cQ_{SU} = [0.0679 \rho_c \cdot \sigma_c^{0.5} \cdot (F_c + 180) + 2.7 \sqrt{\rho_c \cdot \sigma_c \cdot h + 0.1 d_w}] \cdot h_c \cdot \lambda^2$$

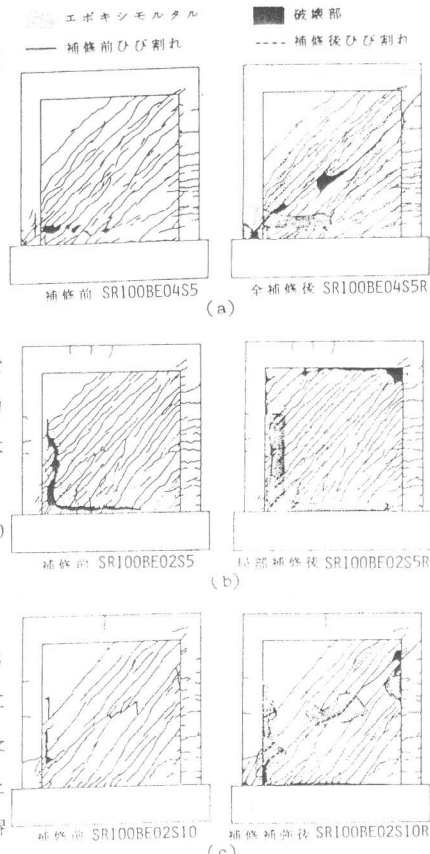


図5 最終破壊図

図6-a)より変形能力の支配要因が周辺柱せん断破壊と壁板スリップ破壊の試験体の補修効果について次のことが指摘できる。

- 1)初期剛性の回復率：SR075を除くと平均40%とかなり低い。
- 2)強度の回復率：SR075が75%と幾分低いが、他の試験体はほぼ処女試験体の耐力を回復した。
- 3)限界変形の回復率：SR05を除くと38~72%と低く、じん性の回復率はあまり高くない。

以上から、本実験で採用した全補修方法によると強度はほぼ回復できるが、じん性の回復率が低い。これは6-1でも述べたように、周辺柱の補修が完全ではなかったことに起因しているものと考えられる。

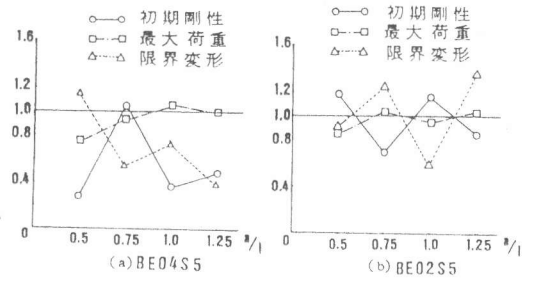


図6 回復率

図6-b)より変形能力の支配要因がスリップ破壊の試験体に対する局部補修効果について次のことが指摘できる。

- 1)初期剛性の回復率：SR075は63%と低いが他の3体は87~117%と良好である。
- 2)強度の回復率：85~104%とほぼ処女試験体の耐力を回復した。
- 3)限界変形の回復率：SR100が50%であることを除くと、他の3体は90%以上の回復率を示し、じん性の回復率は比較的良好であった。

以上から壁板のスリップ破壊が生じるのみで周辺柱は比較的健全な耐震壁は局部補修のみでもある程度の効果が期待できる。

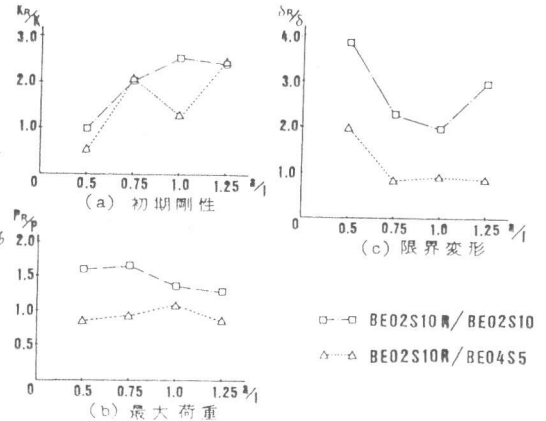
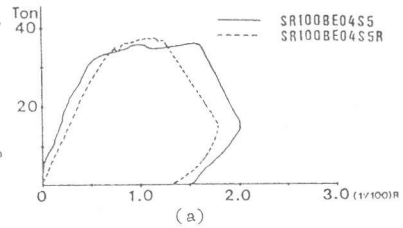


図7 回復率・達成率

図7-a)~c)より、ぜい性的な壁板スリップ破壊が変形能力支配要因である試験体の補修、補強効果について以下のことが言える。

- 1)初期剛性の回復率と目標達成率：回復率は97~250%と非常に高く、達成率もSR05以外は高い。
- 2)強度の回復率と目標達成率：回復率は130~160%と高く、達成率も83~107%と良好である。
- 3)限界変形の回復率と目標達成率：回復率は200%以上、達成率は86%以上と良好である。



以上より壁板のスリップ破壊によるぜい性的な挙動を示す耐震壁に全補修と増し打ち壁による補強を施すと、初期剛性、強度、じん性のいずれの項目に対しても良好な結果を得ることができ、2で述べた補強方法の有効性が検証できた。

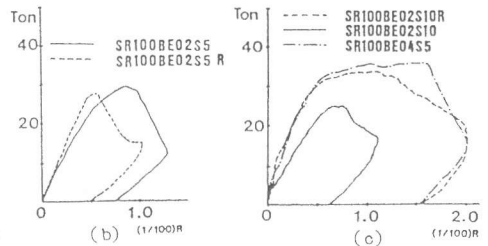


図8-a)~c)に以上述べたことの一例としてSR100シリーズの試験体の荷重-変形関係を補修または補強前後で比較したものを示す。

図8 荷重-変形曲線

## 7. まとめ

以上の実験結果に対する考察および検討を要約すると、1)周辺架構せん断破壊箇所の補修には十分な配慮が必要である。2)壁板のスリップ破壊のみが変形能力支配要因で周辺架構が比較的健全な耐震壁に対しては簡便な局部補修のみでもある程度の効果が期待できる。3)前述2で提案した補強方法の有効性が検証できた。

謝辞： 試験体の補修・補強にあたっては東京樹指工事株式会社に、また実験に際しては、本学の清水五郎、末次宏光、岡田満、浜原正行の諸先生方に多大な協力をいただきました。感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 本園順二郎他「鉄筋コンクリート造耐震壁の破壊機構に関する実験的研究」(その1)~(その2) 日大理工学術講演会 昭和58年11月
- 2) 弘洲雅也「既存の鉄筋コンクリート造耐震壁に関する実験資料とその解析」建築研究所建築研究資料NO. 6 1975
- 3) 志賀敏男他「曲げ破壊型RC造耐震壁の被災度及び補修効果に関する研究」(I-III) 建築学会北陸大会 昭和58年9月