

[143] 被災した柱に袖壁を付加して復旧させた場合の復旧効果

正会員 大久保全陸（九州芸術工科大学芸術工学部）
 正会員 塩屋 晋一（九州芸術工科大学芸術工学部）
 正会員 ○重松 和憲（九州芸術工科大学大学院）

1. はじめに

現在、建築構造の耐震設計に於いては、一般に「いわゆる中地震程度では、構造体に顕著な破壊を許さず、大地震に際しても、人命にかかわる様な崩壊は防ぐべく、構造体に適度な耐震性能を保有させる」ことが目標とされている。従って、中地震を超えるある程度の地震が起きれば、構造体に何らかの損傷が起こることは、当然予測できることであり、被災建物が継続使用される場合は、構造体損傷部に対して何らかの補修・補強を施すことになる。

本研究は、上記の被災建物の復旧技術の開発に関する基礎的資料の収集を目的とするものであり、本報告は、被災柱に袖壁を付加して補修・補強した場合の復旧効果について実験的に検討したものである。

2. 実験計画

昭和43年十勝沖地震以降の我が国における主要な地震で被害を受けたRC造建物の復旧実施例を見ると、被災柱に袖壁を付加して強度増加をねらった例が少なくなく（文献1）、復旧実施例に見られる袖壁付加復旧のディテールは、次の3つに大別することができる。

- Aタイプ：被災柱のコンクリートを解体除去し、配筋を修正して新設袖壁と柱部分のコンクリートを一体的に再打設する方法（主として、大破柱に適用）
- Bタイプ：被災柱に樹脂注入補修を行い、更にダボ筋を介して袖壁を新設する方法（中破柱）
- Cタイプ：柱はそのままにして袖壁をダボ筋を介して新設する方法（被害軽微柱及び耐震補強）

本研究では、上記のA及びBタイプを対象として実験計画を立案した。

2.1 試験体の種類

試験体は、 h_o/D （ h_o :柱高さ、 D :柱せい）が2と4の柱各4体、計8体とした。試験体名は、表1に示す様にNo.1~No.8とし、各試験体に対して2度実験を行うため、1回目の実験は「被災実験」とし番号の後にOを付けて示し、2回目の実験は「復旧後の実験」としてRを付けて区別する。

被災実験時の形状・配筋等は、図1~図2の上半分に示す通りであり、

表1. 試験体の種類と復旧計画

	試験番号		断面形状	破壊程度	復旧計画	復旧後の配筋	
	被災時	復旧後				$P_v(\%)$	$P_{sh}(\%)$
$h_o/D=2$	No.10	No.1R		中破	Bタイプ両側袖壁付加	0.26	0.60
	No.20	No.2R		大破	Aタイプ両側袖壁付加	0.26	0.60
	No.30	No.3R		大破	Aタイプ両側袖壁付加	0.26	0.60
	No.40	No.4R		大破	原形と同形に復旧	0.96	0.60
$h_o/D=4$	No.50	No.5R		大破	Aタイプ両側袖壁付加	0.58	0.60
	No.60	No.6R		大破	原形と同形に復旧	0.58	0.96
	No.70	No.7R		中破	Bタイプ片側袖壁付加	0.24	0.60
	No.80	No.8R		大破	原形と同形に復旧	0.58	0.96
主筋	$h_o/D=2$ は、 $P_t=0.63(\%)$			$h_o/D=4$ は、 $P_t=0.84(\%)$			

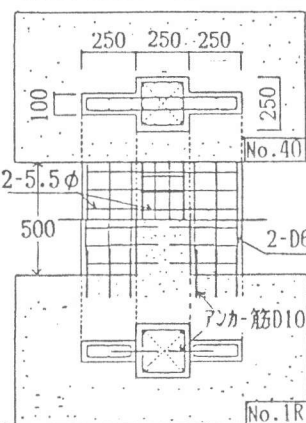


図1. $h_o/D=2$ 配筋図

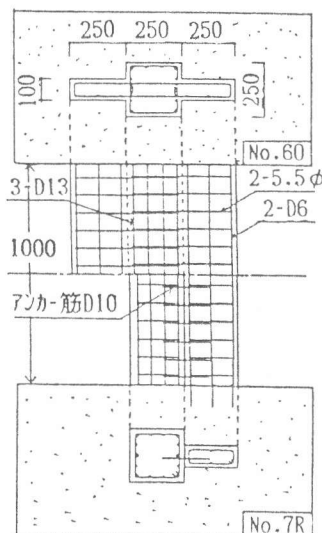


図2. $h_o/D=4$ 配筋図

No.10～No.30はNo.40の柱部分のみと、No.50, No.70は、No.60の柱部分と同配筋であり、せん断破壊先行型として設計されたものである。

また、被災実験時の袖壁付き柱のNo.40とNo.60とNo.80の3体は、柱と袖壁が一体打ちされたもので、復旧後の比較用としての意味を持っている。復旧後の試験体は、図1～図2の下半分に示す様に被災時の袖壁付き柱と同形に復旧しているが試験体によっては表1の復旧後の配筋の欄に示す様に、柱帯筋や袖壁横筋量を増加している。

表2～表4に使用材料の試験結果を示す。

2.2 復旧方針と各試験体の復旧方法

袖壁付加による柱の復旧は、建物の強度増加を目的とするものと考えられるので、最終的には骨組全体に対する視点に基づいて復旧方針を立てる事が必要となるが、今回は特に、柱部分のみの復旧効果に注目して以下の復旧方針に基づいて復旧することとした。

- 1) 被災実験終了後、変位を0に戻し復旧工事を行う。
- 2) 袖壁の中心と柱心は一致させる。また、腰壁やたれ壁等の存在は考えない。
- 3) コンクリートは膨張材を混入し、且つ横打ちとし、施工上の問題はここでは一切考えない。
- 4) 新設袖壁の接合される既存コンクリート部分は、手はつりによる目荒らしを行う。
- 5) コンクリートを再打設する部分の鉄筋は、柱主筋を除き原則として新しく配筋し直すものとする。
- 6) 新設される袖壁の鉄筋は、既存部分に打設される樹脂アンカー筋と重ね継手する。

尚、個々の試験体の復旧方法は、大略は表1に示す通りであり、No.10及びNo.70は中破（前者は $R=1/200$ 、後者は $R=1/100$ ）を目標とし、他はすべて大破（ $h_o/D=2$ では $R=1/50$ 、 $h_o/D=4$ では、 $R=1/30$ ）の後に復旧する事とした。また、復旧の際の柱帯筋量は袖壁を無視した時に柱頭・柱脚が曲げ降伏先行型となる様に決定した。尚、各試験体とも袖壁は横筋をclosed-hoop型とし、縦筋はダブル配筋で、スタブとの接合部は前記6)の方法とした。

2.3 加力方法

加力には、建研式加力装置を用い、変位制御による正負交番変位漸増加力とした。また、軸力は各試験体とも $N=12.5\text{ton}$ ($\sigma_o = N/bD=20\text{kg/cm}^2$)である。

3. 破壊状況

図3～図5に、荷重変形曲線の一例を示す。図中の実線は、袖壁付加復旧柱の履歴曲線を、その他の線は図中に示す通りである。

被災実験では、正方形断面柱（単柱）はいずれも設計で予測した通りの破壊性状を示し、袖壁付柱ではNo.40は上下圧縮ゾーンのせん断圧縮破壊により大破に至った。また、No.60、No.80は柱頭・柱脚の主筋降伏後に袖壁曲げ圧壊により最大耐力となり、最終的には両者ともせん断破壊であったが、No.80は柱脚部分の局所的なスライド破壊であった。

復旧後の破壊性状は、 $h_o/D=2$ のNo.1R～No.4Rでは、変形 $R=1/100$ 前後で袖壁圧縮ゾーンがせん断圧壊して耐力低下を示す復元力特性を示し、巨視的には、ほぼ4体とも被災実験時のNo.40と同様であったが、柱帯筋を密に配筋したNo.3Rでは、最大耐力経験後も変位漸増の繰り返し可能な程の粘りを示し他と異なる性状を示した。

$h_o/D=4$ の試験体では両側袖壁付加のNo.5R、No.6Rは、袖壁上下端の曲げ圧壊により最大耐力に達し、ここまではNo.60と同様な性状を示したが、大変形時には復旧の際に柱帯筋を増加した効果が表れ、No.60の場合よりも柱部分の損傷は著しく軽微であった。なお、No.5RとNo.6Rとの間に大差はなく、袖壁横筋量の違いは明瞭に表れなかった。

表2. コンクリートの力学的特性

	コンクリート	$F_c(\text{kg/cm}^2)$	$E_c(\text{kg/cm}^2)$	$c \leq B(\%)$	$F_{sp}(\text{kg/cm}^2)$
$h_o/D=2$	被災時	219	1.74	0.22	15.9
	復旧時	275	2.22	0.22	19.5
$h_o/D=4$	被災時	277	2.45	0.22	23.7
	復旧時	267	2.73	0.22	23.0

表3. 鉄筋の力学的特性

	鉄筋	D13(t/cm^2)	D10(t/cm^2)	D6(t/cm^2)	5.5 ϕ (t/cm^2)
$h_o/D=2$	$\sigma_y(\text{kg/cm}^2)$	3.90	4.17	4.22	2.54
	σ_{max} (〃)	5.88	5.98	5.54	4.21
$h_o/D=4$	$\sigma_y(\text{kg/cm}^2)$	3.81	3.92	4.24	2.50
	σ_{max} (〃)	5.80	5.78	5.81	3.74

表4. エポキシ樹脂の力学的特性 (kg/cm^2)

		粘度 (cP)	圧縮強度	引張強度	弾性係数
$h_o/D=2$	1411189%	グレ認めず	761	285	62700
	亀裂注入用	640	617	385	19000
	70h-筋接着用	—	702	248	54100
$h_o/D=4$	亀裂注入用	650	606	361	20000
	70h-筋接着用	—	720	267	53000

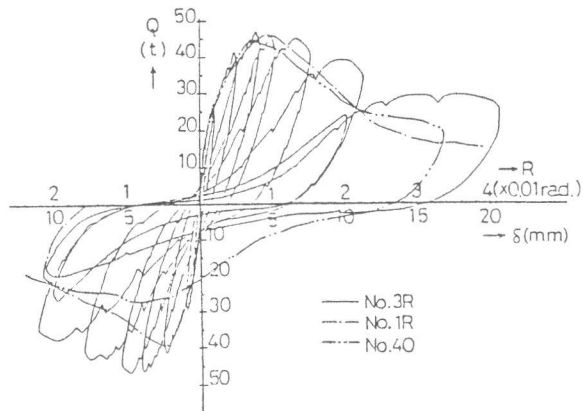


図3. No.3Rのp-δ曲線

また、片側袖壁付加のNo.7R, No.8Rは、 $R=1/100$ までは被災実験時のNo.80とほぼ同様であったが、大変形時には両者の破壊性状は異なり袖壁をアンカー筋を介して付加したNo.7Rでは、柱・袖壁一体打ちの試験体と異なり、袖壁上下端の圧壊と柱部分のみの対角線方向のせん断亀裂の拡大により大破に至り復旧方法の違いによる差が見られた。

4. 復旧効果

4.1 初期剛性

表5に被災実験時及び復旧後の初期剛性、諸強度、変形等を一覧して示す。

実験値及びFEM値は、柱上下端からスタブ内にそれぞれ20cm入った区間の相対水平変位を基にして算出した値であり、両者にはかなり差がある。この原因としては収縮ひび割れの影響も考えられる。また、計算値2は、柱の可とう長さを h_0+2S (h_0 は柱内法長さ、 S は柱上下端から剛域までの長さ)として線材置換して求めた値であり、FEM値と比較すると、単柱では S を柱せい D の $1/4$ として計算し、袖壁付加柱の場合は S を全幅の $1/4$ とした時にFEM値と比較的近い。

表5. 実験結果一覧

Qmax: 最大荷重 Rmax: 最大荷重の変形 Qbu: 曲げ終局強度 Qsu: せん断終局強度

	初期剛性 Ke (t/cm)			R Ke 被災時 復旧後	Qmax (ton)	Rmax ($\times 10^4$ rad)	Qbu e関数 (ton)	Qbu 略算式 (ton)	Qsu (ton)	R Qmax 被災時 復旧時	R Rmax 被災時 復旧時	R Qbu 実験値 e関数	R Qbu 実験値 計算値	R Qsu 実験値 計算値
	実験値	FEM値	計算値.2											
No.10	152.0	225.3	225.2	—	13.9	5.2	—	—	14.4	—	—	—	—	0.97
No.20	153.0	↓	↓	—	12.8	4.4	—	—	↓	—	—	—	—	0.89
No.30	123.0	↓	↓	—	15.0	5.7	—	—	↓	—	—	—	—	1.04
No.40	373.0	494.9	586.6	—	43.7	8.2	—	—	29.6	—	—	—	—	1.48
No.50	40.2	73.7	72.9	—	12.1	11.4	11.5	10.9	10.7	—	—	1.05	1.11	1.13
No.60	138.3	↓	242.9	—	31.1	9.8	35.8	32.1	21.5	—	—	0.87	0.97	1.44
No.70	42.1	↓	72.9	—	12.1	10.3	11.5	10.9	10.7	—	—	1.09	1.11	1.13
No.80	82.9	153.3	154.2	—	22.4	10.4	23.1	20.5	15.7	—	—	0.97	1.09	1.43
No.1R	361.0	631.4	741.5	2.38	47.0	10.1	—	—	32.2	3.37	1.94	—	—	1.46
No.2R	373.0	↓	↓	2.44	48.6	10.3	—	—	↓	3.87	2.06	—	—	1.51
No.3R	387.0	↓	↓	3.15	47.0	8.0	—	—	35.6	3.13	1.40	—	—	1.32
No.4R	321.0	↓	↓	0.86	51.2	9.0	—	—	32.2	1.17	1.10	—	—	1.59
No.5R	154.0	273.2	281.4	3.83	31.9	10.6	35.4	32.0	23.5	2.64	0.81	0.90	1.00	1.36
No.6R	161.4	↓	↓	1.17	34.8	10.1	35.4	32.0	24.3	1.12	1.03	0.98	1.09	1.43
No.7R	82.8	170.8	169.6	1.97	22.0	10.3	22.9	20.4	15.5	1.76	1.00	0.96	1.08	1.42
No.8R	78.1	↓	↓	0.95	24.8	9.9	22.9	20.4	17.8	1.11	0.95	1.08	1.22	1.39

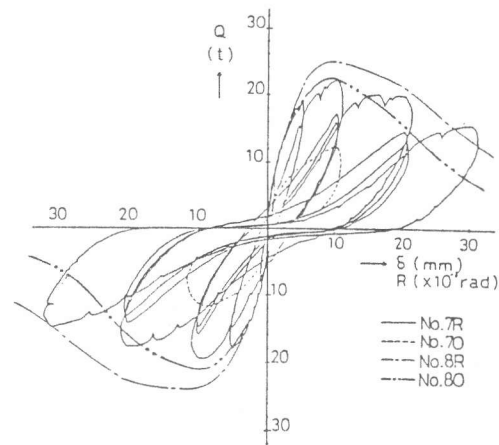


図4. No.7Rのp-δ曲線

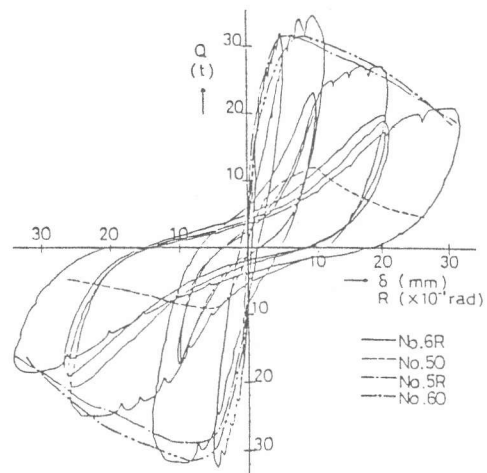


図5. No.6Rのp-δ曲線

実験による袖壁付加復旧後の剛性増加率は、両側袖壁付加の場合、 $h_o/D = 2$ では約2.4倍、 $h_o/D = 4$ では約3.8倍で、片側袖壁の場合約2.0倍である。FEM値による剛性増加率は、両側袖壁の場合、 $h_o/D = 2$ では2.8倍、 $h_o/D = 4$ では3.7倍、片側袖壁では2.3倍となり、実験値の方がFEM値より幾分増加率は小さい。尚、復旧工法別に見ると、柱にエポキシ樹脂を注入しダボ筋を介して袖壁を接合したNo.1R及びNo.7Rと復旧の際に柱・袖壁を一体打ちしたものと、ほぼ同等であり、これらは始めから一体打ちしたもの（No.40, No.60, No.80）とも大差ない値となっており初期における一体性は、かなり高い様であった。

4.2 復旧前後の終局強度

袖壁付加復旧後の耐力の増加は、両側袖壁では $h_o/D = 2$ の場合、約3.1倍であり、 $h_o/D = 4$ の場合約2.7倍であった。また、片側袖壁では約1.9倍である。この増加率は、初めから一体打ちした袖壁付き柱と単柱との強度比とほぼ同様である。

尚、被災実験時の袖壁付柱と復旧後の各試験体を比較すると、復旧後の方が1割前後高い値を示している。この原因としては、 $h_o/D = 2$ の場合、復旧後のコンクリート強度が被災時のものより2割強高くその影響もあるのではないと思われるが、復旧に際して帯筋を増加したこと及び復旧期間中の主筋の時硬効果や被災実験による主筋の歪み硬化の影響も含まれるものと考えられる。

次に、袖壁付柱について提案されている略算式2を用いた計算値と実験値を比較すると、せん断破壊した $h_o/D = 2$ の試験体では実/計は約1.3~1.6と実験値は計算値よりかなり高い。また、最大耐力時は曲げ破壊であると見なし得る $h_o/D = 4$ の試験体では、実験値はe関数法及び曲げ終局強度略算式1を用いた計算値と比較的近い値を示している。

$$M_u = (g_1 + \beta) a_t \sigma_y D + \left\{ 1 + 0.5(\beta_c + \beta_t) \right\} \sum a_{tw} \sigma_{yw} D + 0.5ND \left[1 + 2\beta_c - \frac{N}{\alpha b F_c} \left\{ 1 + (1 - \gamma) \frac{a_t \sigma_y}{N} \right\}^2 \right] \quad \text{----- (1)}^{2)}$$

$$Q_{su} = \left\{ k_u k_p \frac{0.092(F_c + 180)}{M/Qd_e + 0.12} + 2.7 \sqrt{p_w \left(\frac{b}{b_e} \right) + p_s \left(\frac{t}{b_e} \right)} \right\} b_e j_e + 0.1N \quad \text{----- (2)}^{2)}$$

5. 既存部分と後打ち部分の一体性について

図6は柱と袖壁との間の付根の垂直方向のずれ変形を測定し、試験体の水平変形との関係で示したものである。柱と袖壁をアンカー筋を介して接合したNo.7Rと一体打ちしたNo.80 No.8Rでは、 $R = 1/200$ を超えると他よりもずれ変形が大きく表れる傾向を示し、柱と袖壁の一体性が低下していくことを示しており、この様にミクロに見た場合初期剛性や最大耐力等に見られない復旧方法による違いがあることを確認した。

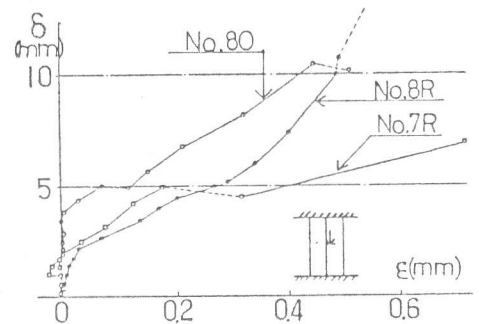


図6. 柱と袖壁付け根の挙動

6. 結び

1) $h_o/D = 2$ 及び $h_o/D = 4$ の被災柱に袖壁を付加して復旧した結果、被災実験時より耐力は上昇するものの変形性能面では、前者の場合は若干向上が見られたが、後者では被災実験時の柱とほぼ同程度であり、改善までにはいたらなかった。

復旧後の力学的特性は、マクロにみた場合、最初から一体打ちして造られた袖壁付き柱の場合とほぼ同等であり、本実験では、復旧工法の違いによる差も顕著には表れなかった。

2) 袖壁増設によって耐力は曲げに対しても、せん断に対しても増加する。しかし、最大耐力を超えて変形が進むと、曲げ系の破壊であっても袖壁圧壊によって荷重・変形曲線は負勾配となる。

3) 復旧に際して柱帯筋を増加すると、袖壁が圧壊あるいはせん断破壊しても、柱部分の破壊は軽減されるため、袖壁増設柱では柱のせん断補強が肝要である。

【謝辞】 本研究は、総合プロジェクト「震災構造物の復旧技術の開発」の一環として、鉄筋コンクリート造分科会（委員長 岡田恒男東大教授）の研究計画に基づいて行われたものである。

【文献】 1) 広沢雅也，他：コンクリートジャーナル，1968.PP.45

2) 大久保全陸：建築雑誌，昭和55年5月号PP105~107,6月号PP79~82