

(17) 震災を受けたRC建物のエポキシ樹脂注入による  
補修効果に関する解析的研究

○山本芳栄\* 今井 弘\*\*

§ 1. はじめに

地震によって被災した鉄筋コンクリート建物を補修する方法として、エポキシ樹脂注入工法がある。この工法は、過去においても、建物の補修にかなり広範囲にわたって利用されてきたが、ひびわれ口の密封や鉄筋の防錆など、主に耐久性の補修のためになされ、破壊した鉄筋コンクリートの耐震性の補修に積極的に利用されるようになってからはまだ年月が浅い。

最近では、1978年宮城県沖地震で大破した宮城県泉高等学校が、エポキシ樹脂注入工法によって補修され、耐震壁が増設され再使用されている(文献①)。このように、本工法は震災した鉄筋コンクリート建物の有力な補修方法として注目されているが、エポキシ樹脂注入によって補修した部材の剛性、強度、靱性などの耐震性能がどの程度回復できるのか、明らかでなかったために、多くの建物の場合、補修と同時に耐震壁を増設するなどの補強もなされてきた。

現在では、エポキシ樹脂注入による補修に関する実験が各方面でなされ、論文も多数出ており(文献②～⑩)、それらの多くが、補修した構造物は補修前と比較して耐震的であるという結論を得ている。特に文献⑩では、一度降伏以後まで破壊した鉄筋コンクリート柱にエポキシ樹脂を注入して補修した後、再度加力した実験により、せん断耐力は元の試験体の実験値に対して約1.3～1.5倍に、また曲げ耐力は約1.1～1.2倍に上昇することが確認された。そのため元の建物では柱のせん断破壊型であったものが、補修後にははり降伏型に変化することなどが予想されるようになり、エポキシ樹脂注入を施すだけでも、補修後の建物の耐震性は元の建物よりかなり向上するのではないかと考えも生れてきた。

もし、補修と補強がエポキシ樹脂注入を施すだけで済まされるならば、建物の使用性が低下することもなく、復旧工期が大幅に短縮され、復旧工費も少なくてすむことになる。しかしながら、このような場合には、個々の柱の復旧程度についてだけでなく、建物全体の耐震性に、個々の柱の補修効果がどのように現われるのかを検討する必要がある。

本報では、宮城県泉高等学校のうち最も被害の激しかったC棟と、被害程度はC棟に比べて軽かったが建物規模が類似しているB棟の2棟を例にとり、耐震壁を増設しないでエポキシ樹脂注入工法による補修だけを行なった場合を想定し、補修前後の耐力や破壊形式を解析し、耐震診断法(文献⑩)によって、補修前後の建物の耐震性能を比較し検討した。

§ 2. 建物の概要

2.1 建物の概要

宮城県泉高等学校は、1978年宮城県沖地震で大被害を受けた建物の一つである。本高校の構造様

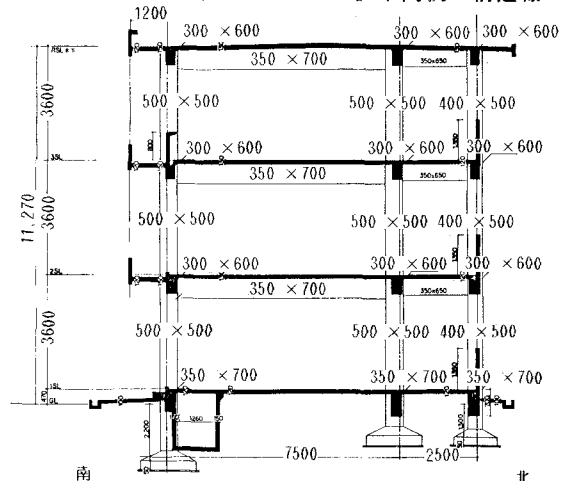


図 1 宮城県泉高等学校の断面図(普通教室)

\* 筑波大学工学研究科

\*\* 筑波大学構造工学系助教授

式は日本の学校建築の典型的なものであり、図-1に示すように南側に教室を、北側に廊下を配した一文字状平面プランである。また、敷地地盤は硬質な砂岩の切り土である。本高校は図-2~4に示すようにA、B、Cの3棟とふたつの渡り廊下からなっており、それらは4か所のエクステンション・ジョイントによって構造的に分離されている。建物3棟は同時に同じ構造計画に基づいて設計されており、各棟の柱、はりの構造断面はそれぞれほぼ同じである。

## 2.2 被害の概要

被害の特徴のうち本解析に関係の深いものを次に述べる。

- [1] 各棟とも桁行方向の柱の被害が激しかったが、はり間方向の被害は軽微であった。
- [2] 特に北側の柱のせん断破壊が激しく、その次に南側の柱の破壊が大きく、中通りの柱はほとんど無被害であった。
- [3] 被害は1階で最も激しく、上階になるに従い軽かった。
- [4] 全体的にみてA、B棟に比較してC棟の被害が激しかった。
- [5] はりと腰壁の被害は両方向とも軽微であった。

構造的な被害は主に柱に集中しているので、補修方法を定めるため、すべての柱に対し被害の程度を診断し、表-1に示す5段階に分類した。各階の柱の被害の状況を図-2、3、4に示す。

表-1 柱の被害程度分類

被害段階	被害の内容
0	無被害
1	小さい曲げひびわれ
2	大きい曲げひびわれ、又は小さいせん断ひびわれ、仕上げモルタルが部分的に剥離、ひびわれ幅3mm以下
3	激しいせん断ひびわれ、仕上げモルタルが全面的に剥離、ひびわれ幅3mm以上
4	激しいせん断破壊、コアのコンクリートも破壊され、鉛直荷重の負担能力も激減したものと推定される。

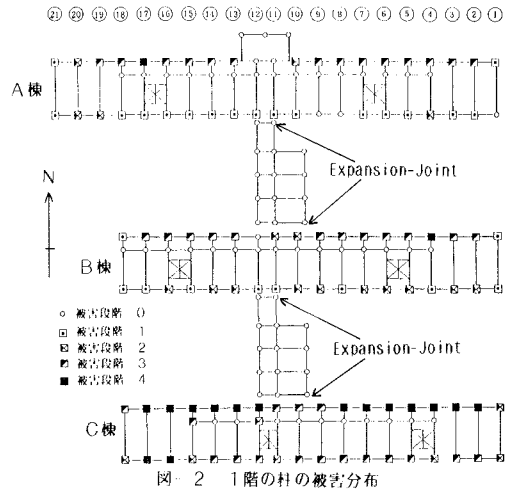


図-2 1階の柱の被害分布

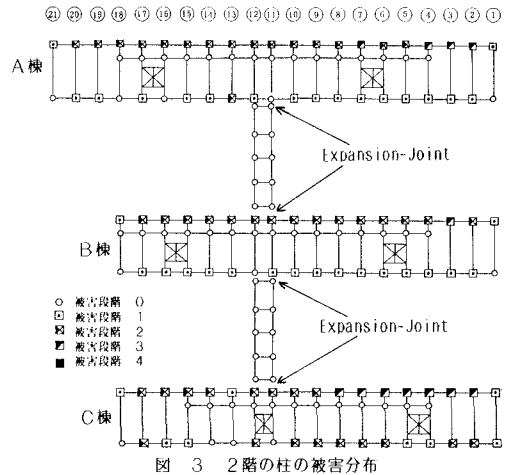


図-3 2階の柱の被害分布

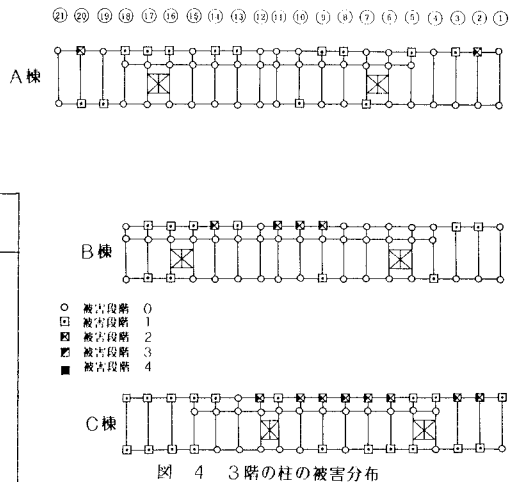


図-4 3階の柱の被害分布

### § 3. 解析方法

#### 3. 1 解析モデルの設定

桁行方向の構造は耐震壁のない純ラーメン構造であるので、水平力を受けた時、はり中央部で反曲点が生じると仮定し、図-5に示すようにはりの中央で各柱を分離して解析モデルを作り、各モデル間では各階の水平変位のみが等しいと仮定した。

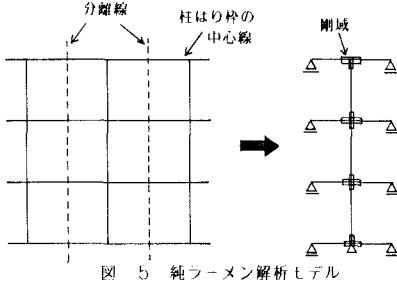


図 5 純ラーメン解析モデル

解析モデルを作る際、考慮した事項は次の通りである。

- [1] 柱とはりは、それぞれ柱枠とはり枠の図心に線材として置換する。
- [2] 腰壁付きのはり、スラブ付きのはり、及び雑壁付きの柱も、それぞれ、はり枠と柱枠の図心に線材として置換する。
- [3] 床スラブ、南側のベランダ、腰壁、及びはり間方向の壁が、柱やはりの曲げ耐力とせん断耐力に与える影響も考慮に入れる。
- [4] 北構面の外にある水飲み場の壁、及びダストシュートとダムウェーダー付近の壁は、開口部分が大きく、配筋も少ないので、計算に入れない。
- [5] 階段室の南構面にあるガラスブロック、及び便所、準備室等のコンクリートブロックの影響は計算に入れない。
- [6] 柱とはりの交差部分は剛域と見なし、それぞれの表面で、曲げひびわれ及び曲げ降伏するものとし、片側だけに腰壁が付いている柱に対しても、腰壁の高さまでを剛域とする。
- [7] 柱とはりの交差部分のせん断変形は考慮しない。
- [8] 各部材に対し、図-6に示すように、Tri-linear型の曲げ変形とせん断変形を考慮に入

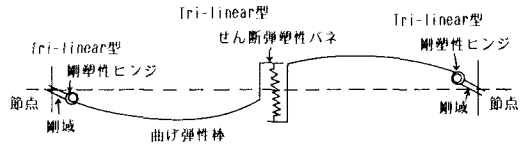


図 6 各部材に考慮されている変形

れる。ただし、降伏後の各剛性は、それぞれの弾性剛性の1/10000とする。

- [9] 柱の曲げ耐力を算出する時の軸力は鉛直荷重によるものとし、水平力による軸力の増減は考慮に入れない。
- [10] 固定荷重は、設計図に基づいて、なるべく実状に合せて算出する。その際、パントハウスはR階の固定荷重と見なす。
- [11] 床の積載荷重は鉛直荷重の軸力、及びはり端部の曲げモーメントの算出に対しても地震用のものとする。
- [12] 鉄筋の降伏強度 $\sigma_y$ とコンクリートの圧縮強度 $F_c$ は、それぞれ表-2、3に示す値とする。これらは各棟、各階で補修工事に採取された鉄筋とコア・コンクリートの強度である。

表 2 鉄筋の降伏強度 (ton/cm<sup>2</sup>)

	B棟	C棟
1 筋	4.08	3.64
せん断筋	3.33	3.23

表 3 コンクリートの圧縮強度 (kg/cm<sup>2</sup>)

	柱	はり	B棟	C棟
1	F	2	277	187
2		3	224	200
3	R		343	210

表 3の左2列は階数を示す。

- [13] 水平力は逆三角形分布とし、一方向の荷重増分法を用いた。
- [14] 部材の耐力を算出する時に用いた基本的な式は次の通りである(文献⑩)。

曲げひびわれモーメント

$$M_c = (1.8 \sqrt{F_c} + \sigma_0) Z_e$$

( $\sigma_0$  : 鉛直荷重による軸力  
はりの場合は $\sigma_0 = 0$ )

曲げ降伏モーメント

$$M_y = 0.9 a t \sigma_y d \quad (\text{はり})$$

$$M_y = 0.8 a t \sigma_y D + 0.5 N D (1 - N / b D F_c) \quad (\text{柱})$$

$$\alpha y = (0.043 + 1.64 n p t + 0.043 \varnothing / D) \cdot (d / D)^2$$

せん断ひびわれ耐力

$$Q_c = 0.7 \cdot (500 + F_c) \cdot \frac{0.085}{\varnothing / d + 1.7} \cdot b e j$$

せん断降伏耐力

$$Q_u = \left( \frac{0.092 \cdot 0.7 \cdot 0.82 p t^{0.23} (180 + F_c)}{\varnothing / d + 0.12} + 2.7 \sqrt{\rho_w \sigma_y} \right) b e j$$

$$\gamma_u = 4 / 1000$$

### 3.2 エポキシ樹脂注入による補修効果の見込み方

復旧工事では、表-1に示す被害段階4まで破壊した柱は、撤去し新しく配筋して打ち直しをした。新しく打設するコンクリートは、既存のコンクリートよりも高強度なので、前の柱より耐力が上昇することが考えられる。被害段階1~3については被害程度が激しくなるに従ってエポキシ樹脂注入量が増加するため、文献⑧の実験結果と照らして考えると、耐力の上昇分もかなり大きくなると期待できる。

本解析では、打ち直すコンクリートの強度を、 $F_c = 240 \text{ kg/cm}^2$ 程度と想定し、せん断強度が1.1倍になるものと仮定した。また被害段階に対応したエポキシ樹脂注入による耐力上昇率を、文献⑧から見積もった。ただし、上昇する耐力は、図-7に示すように降伏時の荷重のみとし、ひびわれ荷重や変形、および降伏変形やその後の剛性には

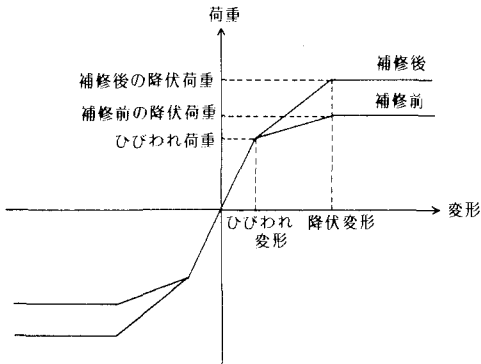


図-7 補修による耐力の上昇

変化はないと仮定した。

表-4に各段階に対応して見積もった耐力上昇率を示す。ここでは、2つの場合を想定し、Case 1では耐力上昇を低めに、Case 2では高めに見積もった。文献⑧の実験結果はCase 2に近いものである。なお、はりについては実際に補修が行われなかったため、耐力上昇は生じないものとした。

表 4 柱の耐力上昇率（補修後の耐力/補修前の耐力）

被害段階	Case 1		Case 2	
	曲げ	せん断	曲げ	せん断
0. 1	1	1	1	1
2	1	1.1	1	1.2
3	1.1	1.3	1.1	1.5
4	1	1.1	1	1.1

### 3.3 モデル柱の分類

解析を行なうにあたり、建物を構成する解析モデルを腰壁の配置や基礎の大きさによって分類した。表-5にその一例を示す。ただし、Type番号は各棟固有のものであり、B、C棟で同じ番号のものがあったとしても必ずしも同型式のモデルであると限らない。

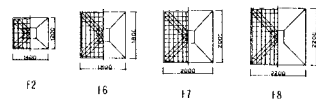
このようにして分類したモデルでは、各Typeごとに被害段階が類似しているため、各階ごとに被

表 5 C棟のモデル柱の分類

位置及び 腰壁の 配置	断面							
	東隅	一般部	大教室	西隅	一般部	一般部	一般部	一般部
北	12		C2 [8]		C5 [2]	C6 [2]		
	17	C1 [1]		C3 [4]	C4 [1]			
中	16	C17 [1]			C20 [1]			C18 [7]
	18							C19 [3]
南	16		C8 [4]		C12 [1]	C13 [3]	C15 [1]	
	17	C7 [1]		C10 [4]	C11 [1]			
	18		C9 [1]				C14 [1]	C16 [1]

\*1) C17, C20 は腰壁を有さない。  
\*\*1) 基礎平面図リストをトに示す。

[ ]内は本数



害段階の値の平均値を取り、端数がある場合には耐力上昇率が小さい側に丸め、そのTypeの被害段階とした。表-6、7に各棟の代表的な柱の被害段階を示す。

表-6 B棟の代表的な柱の被害段階

	北構面			南構面				中構面
	東隅	一般部	大教室	一般部	大教室	片側腰壁なし		
Type	B1	B2	B3	B5	B6	B8	B14	B20
3階	0	0	1	1	2	1	1	0
2階	1	2	2	2	2	1	1	0
1階	1	3	3	3	4	1	2	0

表-7 C棟の代表的な柱の被害段階

	北構面			南構面				中構面
	東隅	一般部	大教室	一般部	大教室	片側腰壁なし		
Type	C1	C2	C3	C5	C6	C8	C14	C18
3階	1	1	1	1	2	0	0	0
2階	1	3	2	2	2	1	2	0
1階	2	4	4	3	4	3	3	0

(注) ○曲げひびわれ ●曲げ降伏  
□せん断ひびわれ ■せん断降伏

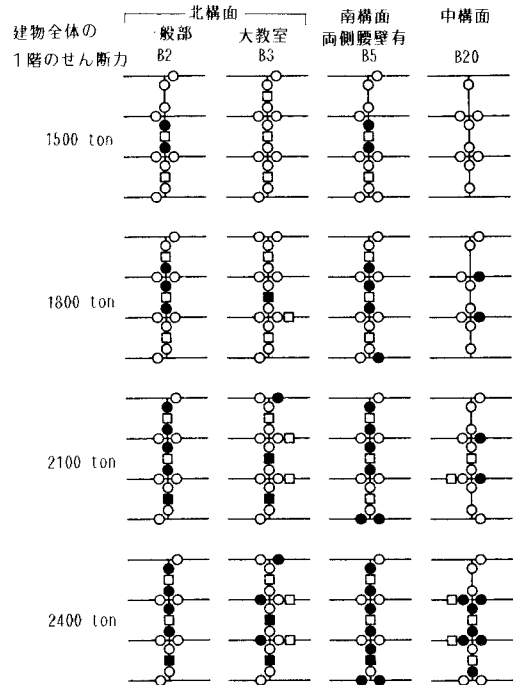


図-9 B棟の破壊過程(補修後Case 1)

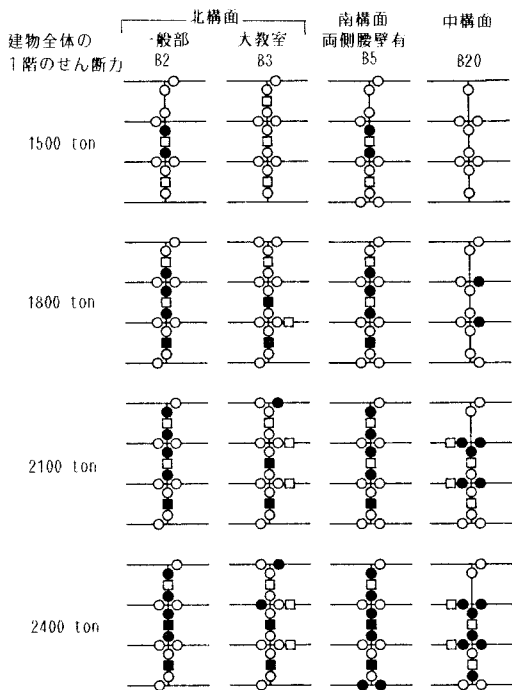


図-8 B棟の破壊過程(補修前)

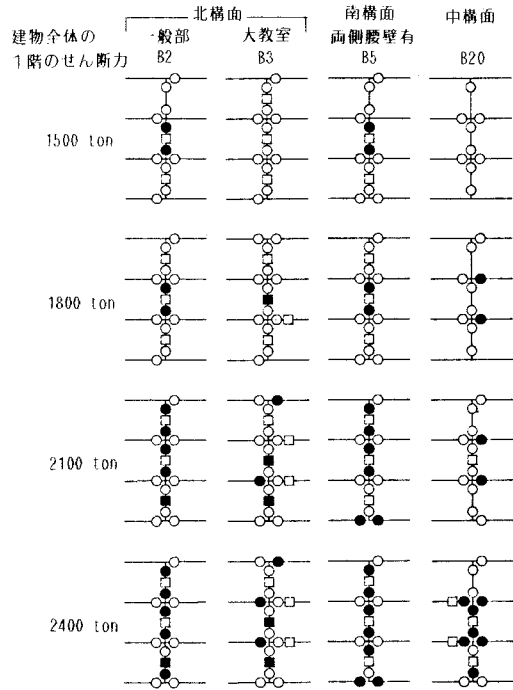


図-10 B棟の破壊過程(補修後Case 2)

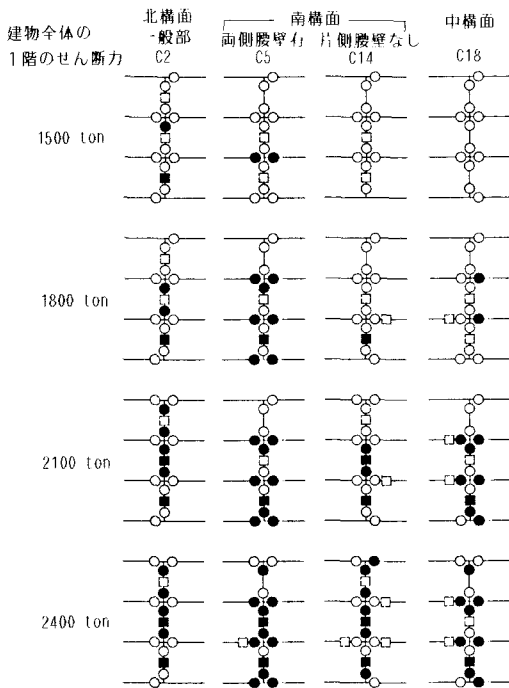


図 11 C棟の破壊過程（補修前）

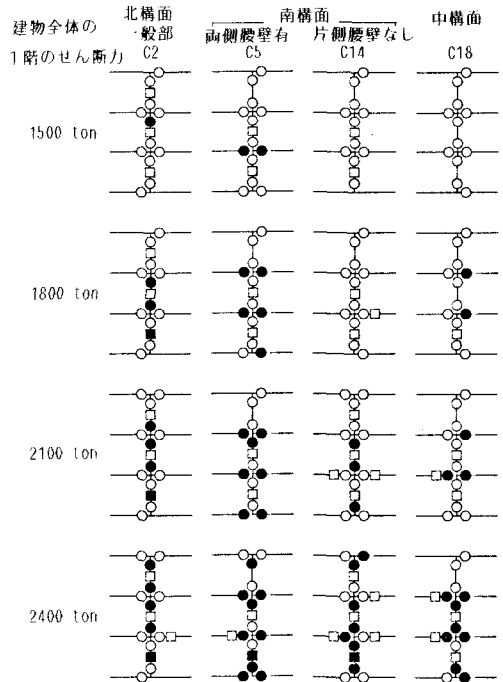


図 13 C棟の破壊過程（補修後Case 2）

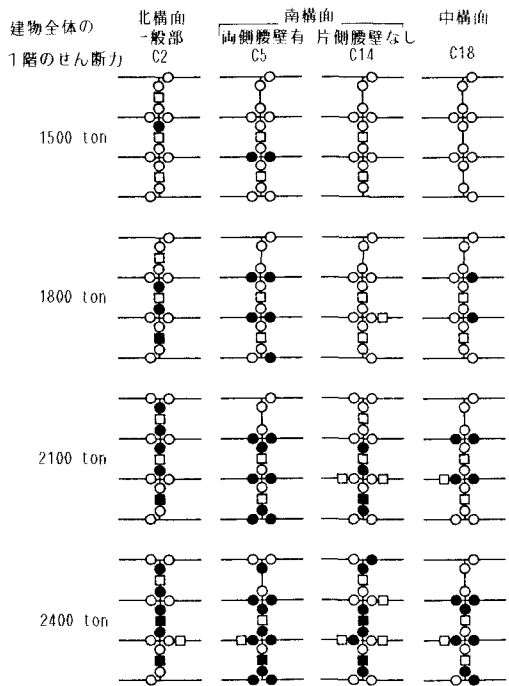


図 12 C棟の破壊過程（補修後Case 1）

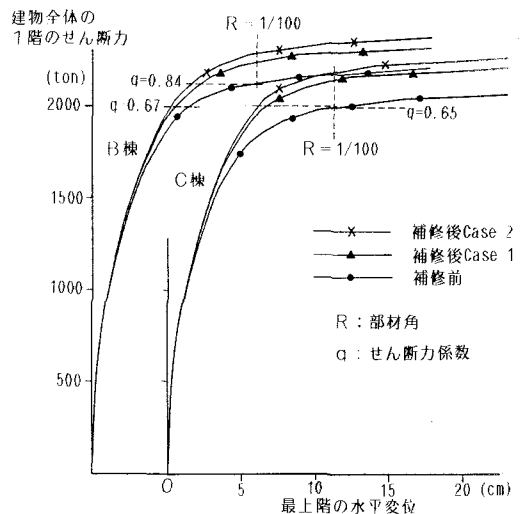


図 14 1階のせん断力と最上階の水平変位の関係

## § 4. 解析結果

### 4. 1 解析結果

B, C棟の補修前、補修後Case 1, 2の破壊過程を各棟の代表的なものだけ取出し、図-8～13に示した。また、各棟の一階のせん断力と最上階

の水平変位の関係を図-14に示した。

B棟の場合、表-6に示すようにType B2、(北側一般柱)、B3(北側大教室柱)、B5(南側一般柱)では被害段階3の柱が多く、樹脂注入量が多いため、耐力上昇分が多い。これらの破壊過程を図-8~10で見ると、B5の破壊型式は、補修前後で「柱のせん断破壊型」から「基礎ばりの曲げ降伏型」へと変化していることが認められる。これに対し、B2、B3の柱の降伏機構には変化はないが、建物全体の1階のせん断力にして、補修前よりも300tonほど後の荷重段階で降伏している。このことはおおむね他の柱についても言え、補修前の建物の耐力は約1800tonであったが、補修後では1割強上昇し、補修の効果を低めに見積もったCase 1の解析でも、図-14に示すように耐力で約1.1倍に増大する。

C棟の場合、表-7に示すようにType C5(南側一般柱)、C14(南柱片側腰壁なし)の柱で樹脂注入量が最も多い。図-11~13より、C5の破壊型式は、補修により「柱のせん断破壊型」から「1階柱脚部の曲げ降伏型」へと移行しているのがわかる。また、C14も、補修前はせん断破壊した柱が、Case 2では曲げ降伏が先行している。他の柱はB棟と同じように、降伏機構には変化はないが、耐力が上昇しており、建物全体としての耐力は、図-14からも認められるように、補修前より約20%上昇している。

本解析では、破壊型式の著しい変化は見られなかったが、これは、補修を受けた大部分の柱の可撓長さが短く、もともとのせん断耐力が曲げ降伏によって決まるせん断耐力よりもかなり低かったためと考えられる。

#### 4.2 耐震診断

本項では4.1の解析結果に基づいて、文献⑨に従い、第3次耐震診断を行なった結果について述べる。文献⑨の仮定と異なるものについて次に示す。なお、地動指標、形状指標、経年指標などの副指標値はすべて1.0とした。

[1] 長期荷重による材端モーメントへの影響は

考慮したが、せん断力への影響は無視した。

- [2] 骨組の破壊型式の決定は、原則として4.1の解析結果によって行なったが、柱とはりが同時に降伏する場合などのように、解析結果だけでは判別不可能な場合には、いわゆる接点振分け法を用いて破壊型式を決定した。
- [3] 柱の終局時保有せん断耐力は、[2]により決定した破壊型式に該当する終局状態のせん断力とした。この際、破壊型式がはりの破壊を含む場合には、接点振分け法を用いてせん断力を算出するが、算出されたせん断力が柱自身のせん断終局強度  $cQ_{su}$ を上回る場合には、じん性指標は変えずに、柱のせん断力は柱の保有せん断耐力  $cQ_{su}$ に等しいとした。

表 8 耐震指標値  $I_s$  の比較

棟	階	$I_s$ 値		
		補修前	補修後Case 1	補修後Case 2
B	1	0.67	0.72	0.73
	2	0.57	0.69	0.90
	3	1.63	1.63	1.63
C	1	0.54	0.64	0.64
	2	0.55	0.57	0.79
	3	0.89	1.01	1.15

診断結果として、各棟各階の補修前後の  $I_s$  値を表-8に示す。

第3次診断の基準  $I_s$  指標値  $I_{so}$  を  $0.65 \pm 0.05$  とすると、 $I_{so}$  よりも低い  $I_s$  値が得られたのは、補修前ではB棟2階の0.57、C棟1階の0.54と2階の0.55である。これらの値から本建物、特にC棟の補修前の耐震性能はあまり良くなかったと推測できる。

補修前後の  $I_s$  値を比較すると、ほとんどの階で0.1以上の上昇が見られ、補修によって耐震性が向上すると判断することができる。ただし、B棟の3階とCase 1のC棟の2階は耐力や破壊型式にほとんど変化が見られず、 $I_s$  値の変化も認められなかった。その理由として、まずB棟の3階は補

修前から1.63という高いIs値を有しており、被害が軽微であったため、補修量が著しく少なかったことがあげられる。また、C棟の2階は、Case 1では破壊型式にほとんど変化がなかったのに対し、Case 2ではやはり破壊型の柱が増え、その結果Is値が著しく上昇している。このことから、Case 1では補修による部材の耐力上昇を低めに見積っていたうえ、C棟2階は比較的補修量が少なかったため、破壊型式にほとんど変化がなく、Is値の変化が少なかったものと考えられる。

## § 5. まとめ

本建物は高い腰壁を有するため南北構面の柱の可撓長さが短く、ほとんどの柱がせん断破壊型であった。そのためエポキシ樹脂注入による南北構面の柱の補修によってせん断耐力が上昇しても、あまり破壊型式は変わらなかった。

しかし、Case 1のように補修効果を低めに見積もった場合でも、B、C棟とも補修によって耐力が20%近く上昇しており、補修前よりも耐震的になることがわかった。

また耐震診断を行なった結果を見ても、補修によって各棟各階のIs値は約0.1増加し、エポキシ樹脂注入による補修を施すことによって、補修前に比べてかえって耐震性が向上するという結果が得られた。

この結果をこのまま一般の建物に適用するには問題があると思われるが、一般に鉄筋コンクリート建物では、エポキシ樹脂注入による補修を施すことによって、同時にかなり補強もしたことになる。しかしながらC棟程度の建物であれば（Is値が1階で0.54）、補修を施した上に、耐震壁等の増設を行なった方が、より耐震的に信頼性が高まると判断される。

## 謝辞

本研究はショーボンド建設株式会社からの研究助成金によって行われました。研究全般に対し筑波大学 園部泰寿教授に御指導いただきました。また、本論文をまとめるに際し、筑波大学大学院生 村上雅英氏より御助言をいただきました。ここに記して感謝致します。

## 参考文献

- ① 今井 弘、近藤 実、横山晶好 : 地震を受けた宮城県泉高等学校の補修・補強とその裏付け、コンクリート工学Vol. 17, No. 10, Oct. 1979
- ② 清水 泰、東 洋一、遠藤利根穂 : 初期ひびわれや打ち継ぎ面等を有する鉄筋コンクリート造壁の耐震補修に関する実験的研究、第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1980
- ③ 戸塚 学、篠原敬治 : 過大ひびわれを生じた鉄筋コンクリート構造物の補修に関する実験的研究（その1、はりのせん断実験）、日本建築学会大会、昭和54年9月
- ④ 戸塚 学、篠原敬治 : 鉄筋コンクリート構造物の微小ひびわれに対する樹脂補修効果の実験的研究 — 100万回疲労実験 —、日本建築学会大会、昭和57年10月
- ⑤ 藤井忠義 : RCはりの樹脂注入による補修効果、日本建築学会大会、昭和57年10月
- ⑥ 田才 晃、佐藤直昭、柳川 悟、小谷俊介、青山博之 : RC部材の補修に関する実験的研究（腰壁付きはり柱接合部の場合）、日本建築学会大会、昭和57年10月
- ⑦ 関口秀治、中田慎介、川島俊一 : RCはり柱部材のエポキシ樹脂注入による補修効果に関する実験的研究、日本建築学会大会、昭和57年10月
- ⑧ 潘 文和、今井 弘、村上雅英、木村英夫、山本芳栄 : 補修前後の実大RC柱の弾塑性に関する実験的研究 — 総合プロジェクト 鉄筋コンクリート造震災構造物の復旧技術の開発（その6～8） —、日本建築学会大会、昭和58年9月
- ⑨ 日本建築防災協会 : 既存鉄筋コンクリート造建物の耐震診断基準
- ⑩ 日本建築学会 : 鉄筋コンクリート構造計算規準、昭和57年



A Case Study on Repair Effect of a Earthquake-Damaged R/C Structure  
Repaired by Injecting Epoxy Resin

by Yoshie YAMAMOTO (1) and Hiroshi IMAI (2)

The epoxy resin injection technique is one of repairing methods of reinforced concrete structures damaged by earthquakes. The past experiments show that the ultimate bending and shearing strengths of columns repaired by epoxy resin injection technique became 10-20% and about 50% larger than the original ones, respectively. It gives an idea that epoxy resin injection may play roles not only to repair but also to strengthen structures damaged by earthquakes.

In the present paper, the ultimate horizontal strengths and yielding mechanisms in the longitudinal direction of both original and repaired Izumi-High-School, seriously damaged by Miyagi-ken-oki Earthquake in 1978 and repaired by epoxy resin injection technique, are analyzed. Besides, "the earthquake-proof diagnosis method of reinforced concrete structures" was applied to check the repair effect of the technique.

The important assumptions in the analyses are as follows:

1. The structure is repaired only by epoxy resin injection, though it was actually strengthened by adding shear walls newly.
2. Inflection points of beams for the horizontal forces are produced at the centers of all beams, so all the columns with beams can be modeled, as presented in Fig. 5.
3. Bending and shearing behaviors of members are idealized into tri-linear models, as shown in Fig. 6.
4. Repair effect appears only in increase of yielding strengths of members. Cracking loads, displacements of cracking and yielding, and stiffnesses after yielding have no change.

As results of analyses, no great change has been found in yielding mechanisms between original and repaired structures. But it increased 20 % in ultimate strengths and 0.1 in "Is" values, that is the indexes of "the earthquake-proof diagnosis method of reinforced concrete structures", over original.

Even though, "Is" values of the original structure were so low that it seems necessary for this structure not only to be repaired but also to be strengthened by adding shear walls.

---

(1) Graduate Student, University of Tsukuba

(2) Associate Professor, Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba