

# プレキャストコンクリート耐震壁の開発研究 (その 1)

——シアパネルを有する繊維入り発泡モルタル壁およびコンクリート壁の実験報告——

木村 耕三      吉岡 研三  
武田 寿一      古屋 則之  
竹本 靖

## Research and Development on Precast Concrete Shear Walls (Part 1) —Experiments on Fiber-Reinforced Foamed-Mortar and Concrete Walls with Shear Panels—

Kohzoh Kimura      Kenzoh Yoshioka  
Toshikazu Takeda      Noriyuki Furuya  
Yasushi Takemoto

### Abstract

It is the aim of this report to present the test results of the precast concrete shear walls strengthened by steel braces. The specimens provided with a shear panel and two steel braces formed Y-shape braced frame. They were designed to yield at shear panels before buckling of the compression braces. The shear walls were deformed up to the rotation angle of member  $R = 1/50$  and stable load-deflection curves were obtained. In spite of very little differences in the ultimate strength between specimens with and without shear panels, there were much differences in the deflection capacity. Load-deflection and load-strain relationships of the specimens were successfully predicted by the use of F.E.M. analysis. It was ascertained consequently that shear walls strengthened by steel braces and shear panel have large load-carrying capacity and high ductility.

### 概 要

ブレースに内蔵するプレキャストコンクリート耐震壁の実験を行った。試験体はブレース下端にシアパネルを有するY字型でブレースの座屈以前にシアパネルをせん断降伏させ、安定した履歴曲線を得るよう設計したものである。その結果シアパネルを設けることにより、部材角 $R=1/50$ まで変形能を有し、安定した良い履歴が得られた。終局耐力の面では、シアパネルの有無による差は見られず、従って、シアパネルを設けることによって架構の耐力を下げることなく靱性を増し、地震時のエネルギー吸収をよくすることができた。なお、ブレースは繊維入り発泡モルタル、あるいはコンクリートで被覆されているものである。コンクリート壁については、F.E.M弾塑性解析によって荷重～変形関係、荷重～ひずみ関係を把握することができる。

## 1. 序

高層建物における耐震要素は、建物の機能をそこなわない程度に剛性が低く、しかも耐力は余り低下しないで靱性が十分にあり、強震時のエネルギー吸収が大きいことが望ましい。本研究は、これらを満たす鉄骨ブレース入りプレキャスト耐震壁の実用化を目的とするものである。

本報告は、繊維入り発泡モルタルおよび普通コンクリート壁内に鉄骨ブレースを内蔵するプレキャスト耐震壁の実験に関するものである。

## 2. 実験概要

### 2.1. 試験体

試験体は、四体でその形状および寸法は、図1～図4に示す通りである。試験体 ABY-2, ABY-4は、シアパネルを有するY字型ブレース入り鉄骨架構を繊維入り発泡モルタルで被覆したものである。ABY-2では板状ブレース面を壁体と平行に入れ、ABY-4では、ABY-2よりも面外に座屈しにくいようにブレース面を壁体に垂直に入れた。繊維入り発泡モルタルを用いた主な目的は、耐力・剛性の面では多くを期待せず、

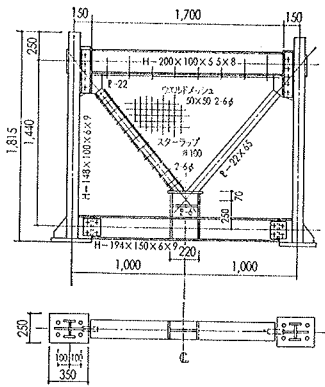


図-1 試験体 ABY-2

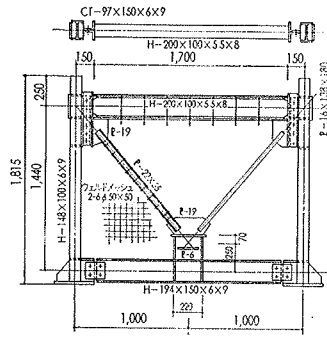


図-2 試験体 ABY-4

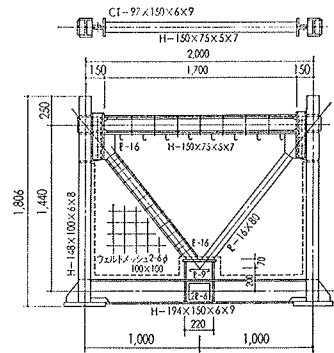


図-3 試験体 CBY-1

		発泡モルタルおよびコンクリート			鋼板			
		圧縮強度 $\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強度 $\sigma_t$ (kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数( $\times 10^{-4}$ kg/cm <sup>2</sup> ) cE1/3      cEa/s	降伏応力度 $\sigma_y$ (t/cm <sup>2</sup> )	最大応力度 $\sigma_{max}$ (t/cm <sup>2</sup> )		
発泡モルタル	ABY-2	28.28		1.60	圧-6 (柱)	3.34	4.65	
		21.40		1.66		3.31	4.57	
	16.05		1.38	圧-6 (シアパネル)	3.63	4.66		
					3.54	4.55		
ABY-4	19.11		1.18	圧-9 (シアパネル)	3.19	4.55		
	29.81		1.16		3.06	4.49		
		19.11		1.35				
コンクリート	CBY-1	197.3	14.26	18.7	15.9	圧-16 (ブレース)	2.91	4.37
		211.3	12.90	18.4	15.7			
		231.7	13.22	19.8	17.1			
	CBY-2	186.8	13.55	1.76				
	207.8	14.87	1.80					
	205.4	17.23	1.78					

コンクリート割合(1㎡当り) 水セメント比 73% スランプ 20cm  
 水 205kg セメント 280kg 砂 801kg (砂径) ≤ 1.2mm  
 砂利 960kg 10.0mm ≧ (砂利径) ≧ 2.5mm ホンリス No.5L 518g

表-1 使用材料と材質

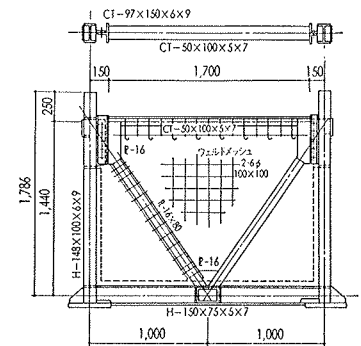


図-4 試験体 CBY-2

ブレースの座屈を極力押え、安定した履歴曲線を得ようとするものである。試験体 CBY-1 は、シアパネルを有する Y 字型ブレース入り鉄骨架構を、CBY-2 はシアパネルのない V 字型ブレース入り架構をそれぞれ普通コンクリートで被覆したものである。コンクリート壁は、柱および下端ばりと壁体との間に間隙を設け、コンクリートに耐力、剛性の面で余り寄与させず、ブレースの座屈を極力押えつつ、シアパネルの降伏およびブレースの圧縮降伏によりそれぞれの試験体の耐力が決まるように設計したものである。なお、使用材料の性質は、表 1 に示す。

### 2.2. 実験方法と測定方法

試験体は、両柱脚を加力用フレームに H. T. ボルト 8 本で締めつけて固定した。そして、柱頭に 100 t ジャッキで交番水平荷重を加え、層間変形が 1/500, 1/250, 1/125, 1/75, 1/50 でそれぞれ 2 サイクル経過させた後、大変形をさせた。尚、荷重制御は 100 t ロードセルにより行なった。又、試験体の水平変位は、スパンの中央に取り付けた摺動抵抗式変位計(精度 1/200, ストローク 100mm)および 1/1000 ダイアルゲージを用いて、上下ばりの水平変位を求め、それらの差とした。はり・柱・ブレースおよびシアパネルのひずみ度は、ワイヤストレインゲージ(W. S. G)により測定した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1. 破壊経過

破壊状況を図 5 ~ 図 8 に示す。

**ABY-2** 壁面には最初から収縮ひびわれが入っていた。部材角  $R=1/500$  でせん断ひびわれが壁面に分散して生じ、シアパネル近傍には垂直なひびわれが生じた。 $R=1/250$  でシアパネルが降伏した。壁面のひびわれの本数は荷重の増加につれてふえたが  $R=1/125$  以降は新しいひびわれは生じなくなった。荷重 42.3 t で柱脚フランジ外縁が降伏した。 $R=1/125$  で柱と壁パネルとが少しずれ出し、 $R=1/75$  で壁面の中央部下側(シアパネルの下あたり)が両面共外側に、はらみ出した。そして、 $R=1/50$  第 2 サイクル正荷重で圧縮ブレースに沿ってしわが入り、荷重の増加につれて目に見えるほど除々に外側にはらみ出して後、圧縮ブレースが座屈を起した。 $R=1/50$  第 2 サイクル負荷重の時シアパネルの下部が破断して破壊した。最終的には壁面のひびわれは、壁面の中央部に集中していた。

**ABY-4** ABY-2 と同様に最初から収縮ひびわれが入っていた。 $R=1/500$  第 2 サイクルでひびわれが分散して壁面に生じ、 $R=1/125$  第 1 サイクル、荷重 53.3 t で柱脚のフランジが降伏、 $R=1/75$  第 1 サイクル、荷重 60.0 t の時、載荷側柱脚部の柱フランジが局部座

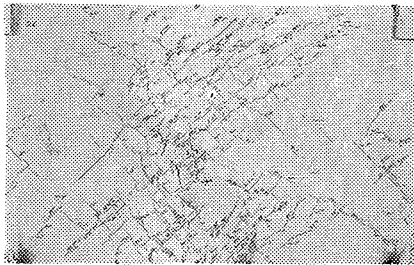


図-5 ABY-2 破壊状況

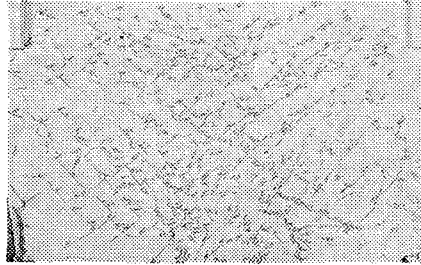


図-6 ABY-4 破壊状況

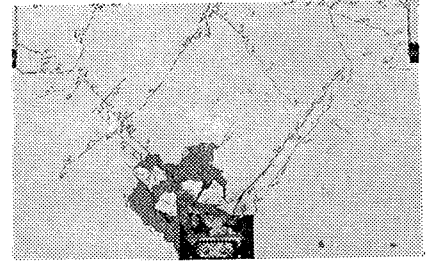


図-7 CBY-1 破壊状況

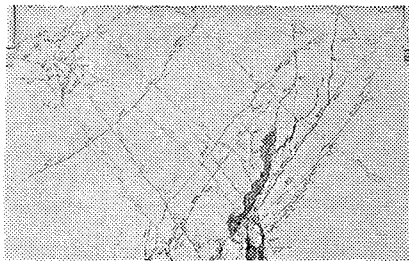


図-8 CBY-2 破壊状況

屈を生じた。柱脚フランジを補強後  $R=1/75$  で壁パネルの中央下部のはりと壁面との取りつき部分が外にはらみ出し始め、 $R=1/50$  で壁面と柱との間にすき間が見られた。 $R=1/30$  で再び柱が局部座屈を起した。最終的にはシアパネルのウェブがせん断破壊を起した。

**CBY-1**  $R=1/400$  で引張ブレースの中央でブレースに垂直にひびわれが入り、荷重の増加とともに大きく進展した。 $R=1/250$  でブレースの上より  $\frac{1}{4}$  の所にひびわれが入った。 $R=1/125$  第1サイクルで圧縮ブレースと壁パネルとの付け根の所で圧縮ブレースに沿ったひびわれが生じ、荷重50.3 tで柱脚フランジ外縁が降伏した。 $R=1/125$  以降は、圧縮ブレースに沿ったひびわれが進展していき、 $R=1/75$  第1サイクル、荷重52.0 tでシアパネルのフランジ部の溶接部に亀裂が入り、 $R=1/75$  第2サイクル、荷重58.0 tでシアパネルのフランジ部が引張破断、除荷後、シアパネルのフランジ部を溶接し、再び載荷したところ、 $R=1/50$  で圧縮ブレースの下部にひびわれが集中し、コンクリートがはく落、シアパネルのフランジに再び生じた亀裂がウェブにまで進行していった。荷重44.0 tで圧縮ブレースが座屈、除荷の際36.2 tでシアパネルのウェブ部が破断した。

**CBY-2**  $R=1/500$  で引張ブレースの中央部よりやや上にかかなり長いひびわれがブレースに垂直に入った。又、圧縮ブレースに沿ったひびわれも入った。 $R=1/250$  でひびわれがさらに進み、圧縮ブレースに沿って、さらに細かいひびわれが生じ、圧縮ブレース下端部にも細かいひびわれが多く現われた。 $R=1/250$  第1サイ

クル正荷重、荷重51.5 tで柱脚のフランジの外縁が降伏し、壁面の中央に大きなひびわれが入った。 $R=1/125$  で圧縮ブレースの下端部に細かいひびわれが集中し、一部で、コンクリートのはく落が生じた。又、引張ブレースの上端部にもかなりのひびわれが集中した。 $R=1/125$  第1サイクル負荷重で、はりと壁のつけねの部分にひびわれが生じた。 $R=1/125$  第2サイクル正荷重、荷重46.0 tで圧縮ブレースが下端で座屈、同サイクル負荷重-51.0 tで圧縮ブレースが座屈した。

### 3.2. 荷重～変形曲線

図9～図13に各試験の荷重～変形曲線を示す。

発泡モルタル壁 (ABY-2, ABY-4) については、発泡モルタルそのものの性質がまだ十分に把握できていないために、過去の実験結果<sup>1)</sup> から発泡モルタル壁の  $\tau$ ～ $\gamma$  曲線を図14の様に仮定し、発泡モルタル壁の剛性に鉄骨ブレース付フレームの解析値を重ね合せた結果を計算値として図中に示した。弾性剛性は、ABY-2では鉄骨架構の剛性とほぼ一致し、ABY-4では鉄骨架構の剛性の方が実験値より少し小さく出ているが、ともに発泡モルタルの弾性剛性の影響は少なく、無視することが出来ると考えられる。終局耐力では、ブレース面を壁体に平行に入れた場合 ABY-2とブレース面を壁体に垂直に入れた場合 ABY-4とでは大きな差は見られなかった。鉄骨架構の解析結果と発泡モルタル壁の実験値を重ね合せた計算値では、終局耐力は実験値の65%程度であった。履歴曲線は ABY-2では  $R=1/75$ 、ABY-4では  $R=1/50$  まで良いループを示している。

普通コンクリート壁 (CBY-1, CBY-2) の F. E. M による解析結果と鉄骨フレームのみの解析結果を図11、図12に示す。コンクリート壁の場合には、ひびわれが入るまでは、実験値と F. E. M弾性解とは一致する。さらに CBY-1については、F. E. Mによる弾塑性解析を行い、その結果を図11、図13に示す。図13は、CBY-1のシアパネル部の上端と下端部の変形量の差から求めたシアパネル部の荷重～変形曲線である。CBY-1の F. E. Mによる弾塑性解析結果については、

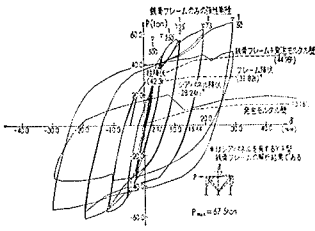


図-9 ABY-2 P~δ 曲線

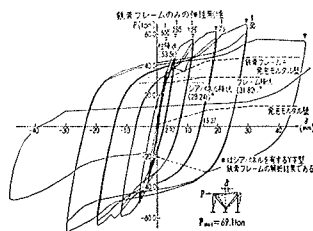


図-10 ABY-4 P~δ 曲線

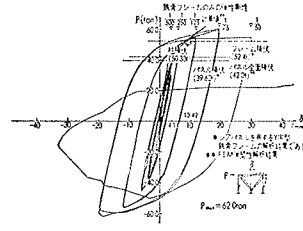


図-11 CBY-1 P~δ 曲線

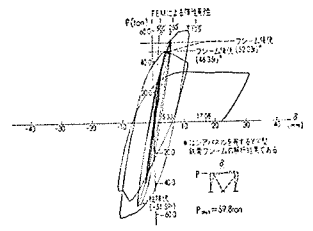


図-12 CBY-2 P~δ 曲線

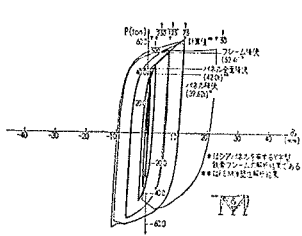


図-13 シアパネル部 P~δ 曲線

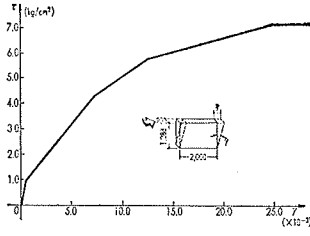


図-14 τ-γ 曲線

試験体	実験値		計算値			
	① 最大荷重 (t)	② 柱・全塑性 時荷重 (t)	③ シアパネル 最大荷重(t)	④ ブレース降 伏荷重 (t)	⑤ (①-②-③) (①-②-④)	⑥ 平均せん断応 力度 (kg/cm <sup>2</sup> ) (⑤/Av)
ABY-2	67.5	6.13	37.69	—	23.68	15.05
			—	57.04	4.33	2.47
ABY-4	69.1	6.13	37.69	—	25.28	16.07
			—	57.04	5.93	3.38
CBY-1	62.0	6.13	55.43	—	—	—
			—	46.77	9.10	6.50
CBY-2	59.8	6.13	—	—	—	—
			—	46.77	6.90	4.93

シアパネル最大荷重は、シアパネルフランジの中心間距離にて求めた。

3.5で述べる。

シアパネルを有しない壁 CBY-2 については、三辺において柱・はりとは壁体と縁を切っているために終局時の部材角が 1/125 と、四辺を拘束された一般の鉄骨鉄筋コンクリート耐震壁よりも大きい靱性をもっている。又、シアパネルを有する壁では終局時の部材角が 1/50 と一般の耐震壁よりもかなり大きい靱性を有している。この両者の終局耐力を比較するとシアパネルのある場合とない場合とでは、その差はほとんど表われていない。

### 3.3. 柱・ブレースの降伏荷重および最大荷重

表 2 に実験から得られた柱・ブレース・シアパネル降伏荷重および最大荷重を示す。

試験体	柱脚部 降伏荷重 P <sub>col</sub> (t)	引張ブレース 降伏荷重 P <sub>b</sub> (t)	シアパネル 降伏荷重 P <sub>s</sub> (t)	最大荷重 P <sub>max</sub> (t)
ABY-2	42.3	46.0	21.0	67.5
ABY-4	53.3	45.0	29.8	69.1
CBY-1	50.3	52.0	—	62.0
CBY-2	51.6	53.0	—	59.8

表-2 柱、ブレース、シアパネル降伏荷重、最大荷重実験値

### 3.4. 壁体の終局時の平均せん断応力度

CBY-1 の下部(シアパネル部)で水平方向の力の釣合を考えると、水平力を負担するのは、柱およびシアパネルのみである。終局時には、柱頭・柱脚とはともに全塑性モーメントに達していると仮定し、シアパネルも全面降伏しているとして、柱・シアパネルの水平方向の負担力を求めると計算値と実験値がほぼ等しい。

ABY-2, ABY-4 については、柱およびシアパネルの負担力の合計と全水平荷重との差を発泡モルタルが負担していることになる。発泡モルタルの負担分を全

表-3 終局時の各部耐力と平均せん断応力度

断面積で割って平均せん断応力度を求めた。又、発泡モルタルの負担分をシアパネル部の支圧で負担すると考えると、この時の圧縮強度は  $F_c = 120 \sim 128 \text{ kg/cm}^2$  となる。算出結果は表 3 に示す。

### 3.5. 有限要素法による弾塑性解析

コンクリート壁 CBY-1 については、F. E. M による弾塑性解析<sup>2)</sup>を行った。この解析では壁体をコンクリート要素数206、鋼板要素数254、鉄筋要素数145で、各要素はその要素を形成する節点において変形が適合しているものとする。すなわち、破壊にいたるまでコンクリートと鋼は完全付着であるとする。又、鋼板要素および鉄筋要素は共に座屈しないものとし、さらに初期残留ひずみはないものとする。コンクリートおよび鋼の応力~ひずみ関係、解析に用いた材料特性は、図15、表 4 に示す。

3.5.1. 破壊経過 解析によって得られた荷重~変形曲線は、図11、図12に、破壊経過を図16に示す。荷重 42.0 t でシアパネルが全面にわたり降伏し、44.0 t ~50.0 t にかけて柱脚部が降伏し、62.0 t でシアパネ

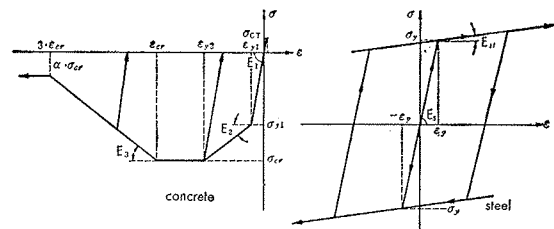


図-15 材料の応力~ひずみ関係のモデル

	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	σ <sub>cr</sub>	σ <sub>y1</sub>	σ <sub>cr</sub>	ν
コンクリート	162.0	85.0	-40.6	0.0135	0.122	0.203	0.167
	E <sub>s</sub>	E <sub>st</sub>	σ <sub>y</sub>	ν	(単位 t/cm <sup>2</sup> )		
鋼板	2100.	10.5	3.19	0.3			
鉄筋	2100.	0.01	2.81				

表-4 材料の力学的諸性質

ルのフランジ部分が降伏する。荷重～変形曲線を見ると42.0 t以降で剛性（接線勾配）が初期剛性の64%に低下している。図16で荷重12.0 tで引張ブレースに直角なひびわれがかなり入っているが、荷重～変形曲線には明確に剛性変化が表われていない。

**3.5.2. 荷重～ひずみ曲線** 図17～図19に柱脚・ブレースの中央における荷重～ひずみ曲線を示す。これらを見ると実験値と解析値とがほぼ一致している。ブレースのひずみ（解析値）が42.0 tで減少しているのは、シアパネルが降伏し、力が壁パネル部に流れたためであろう。逆に柱脚部のひずみは、壁体の変形の増大によって増加している。

**3.5.3. 柱およびブレースの負担力** 柱およびブレースの水平負担力をみると、弾性時には荷重8.0 tで柱が1.42 t（負担率 18%）、ブレース0.97 t（同12%）、塑性に入って荷重52.0 tで柱が7.81 t（同15%）ブレースが17.7 t（同34%）となっている。これから考えると壁はあまりひびわれが入っていない弾性時には水平力の70%を負担し、この時の壁体のせん断応力度は4.01 kg/cm<sup>2</sup>、塑性時では、50%の水平力を壁が負担し、平均せん断応力度で 18.93 kg/cm<sup>2</sup>である。3.4で求めたせん断応力度と比較すると塑性時において大きく異なっている。この原因として、先に述べた仮定のうちコンクリートと鋼が完全付着であるとしたことによるものであろう。つまり圧縮ブレースの水平力が壁に流れ、しかも壁体は三辺において柱・はりとの縁を切っているためひびわれが入りにくく、高い荷重になっても鋼とコンクリートが完全に一体となってコンクリートが圧縮に効いているためであろう。実際には、繰返し载荷により、ブレースとコンクリートの付着が

切れているため、ブレースからコンクリートへ力が余り伝わっていないと思われる。

#### 4. まとめ

1. 発泡モルタル壁の実験から得られた初期剛性は鉄骨フレームの解析に近く、発泡モルタルの初期剛性は無視しうる。終局耐力においては、鉄骨フレームの終局耐力と発泡モルタルの終局耐力の和として求めた計算値は、実験値の65%程度で、残りの35%を壁が負担していると考えられる。

コンクリート壁の場合には、初期ひびわれが入るまでの剛性は、壁体を考慮したF. E. Mによる弾性解と一致する。CBY-1 についてのみの解析結果ではあるが、ひびわれ後は、コンクリートのひびわれを考慮し、コンクリートと鋼とが完全付着であるという仮定によった二次元弾塑性解析によって概略を把握することができる。

2. シアパネルを有しない壁では、終局時の部材角で普通の壁よりも大きな靱性をもっているが、まだ十分とは言えない。一方、シアパネルを有する壁は、終局時の部材角で一般の耐震壁よりかなり大きい靱性をもっている。又、終局耐力の面では、シアパネルの有無によって大きな差は見られなかった。従って、シアパネルによって架構の耐力を下げることなく靱性を増し、地震時の架構のエネルギー吸収をよくすることが出来る。

3. 壁の終局時での平均せん断応力度は、発泡モルタル壁のシアパネル部で15～16 kg/cm<sup>2</sup>となっている。又コンクリート壁では、壁の高さの中央で 5～7 kg/cm<sup>2</sup>程度になっていると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 尾路・古屋「合成繊維入り発泡モルタルで被覆したブレース」昭和48年 学会大会梗概集
- 2) 武田・井元「有限要素法によるRC部材の弾塑性解析（その1～その3）」大林組技研所報 No. 7, No. 8

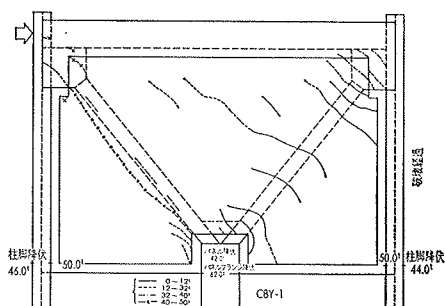


図-16 破壊経過

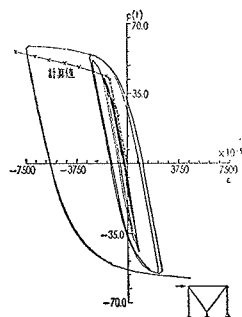


図-17 柱脚部 P-ε 曲線

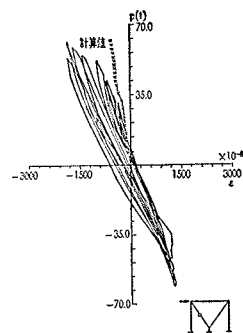


図-18 圧縮ブレース P-ε 曲線

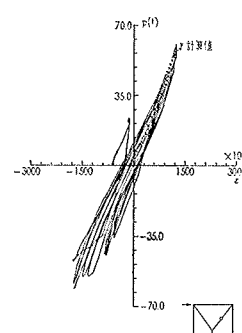


図-19 引張ブレース P-ε 曲線