

# プレキャストコンクリート耐震壁の開発研究（その2）

—鋼管およびモルタルで被覆したブレースの部材実験—

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 2) —Experimental Study on Brace Sheathed by Square Pipe and Mortar—

Kohzoh Kimura Kenzoh Yoshioka  
Toshikazu Takeda Noriyuki Furuya  
Yasushi Takemoto

### Abstract

Experiments of steel brace sheathed by square pipe and mortar were performed. Axial force was made to be transmitted only by the steel brace and the square pipe and mortar were serving only to prevent buckling. These braces yielded under compression force before buckling occurred and indicated stable load-deflection curves showing that deflection capacity and energy absorption were sufficiently possessed. Load-deflection relationships of the specimens may be roughly estimated in accordance with the method given in this report.

### 概要

従来のブレースのように圧縮降伏以前に座屈させないために鋼管およびモルタルで補強したブレースを開発、実験を行った。その結果、鋼管およびモルタルは、最終変形まで、ブレースの座屈防止にのみ作用し、本ブレース材は変形能に富み、かつ十分にエネルギー吸収のある、安定した紡錘型の履歴特性を有することがわかった。本ブレース材の履歴特性については、本報告で述べた方法で概略を把握することができる。

## 1. 序

ブレース付鉄骨架構においては圧縮ブレースの座屈によって十分な架構の変形能を確保することはむずかしい。そのためにブレース付鉄骨架構を十分なエネルギー吸収のある耐震要素として利用するためには、前報<sup>1)</sup>で述べた様にブレースとはりとの間にシアパネルを入れ、圧縮ブレースの座屈以前にシアパネルを降伏させるなどして架構の変形能を大きくする必要がある。

本研究は架構全体の変形能を大きくするためにブレース材自身を補強し、ブレース材の圧縮降伏を座屈に先行させて、十分な変形能を有するブレース材の開発を目的としている。今回実験を行なったブレース部材は、図-1に示す様に従来の鋼板ブレース(a)の外側に角形鋼管(b)をかぶせ、鋼板ブレースと鋼管との間にモルタルを充填したものである。端部でブレース材を鋼管モルタルより少し長くし、力を鋼板ブレースからのみ伝達させることにより、鋼管およびモルタルは直接、

力を負担せずにブレース部材としての断面二次モーメントを大きくすることのみに関与させて座屈に抵抗させる。この形式では断面積と断面二次モーメントをそれぞれ独立に変化させることが出来、従来のブレースに比べて剛性・強度を自由に調節することが可能である。その上、繰返し載荷によりモルタルにひびわれが入ってもモルタルは鋼管で周囲を拘束されているために、はく落を生じず、ひびわれ後も座屈防止に役立つ。

## 2. 実験概要

### 2.1. 試験体

試験体は10体でその形状および寸法は、図-2表-1に示す通りである。各試験体のパラメータは1)コンクリートのかぶり厚さによる影響、2)注入モルタル強度による影響

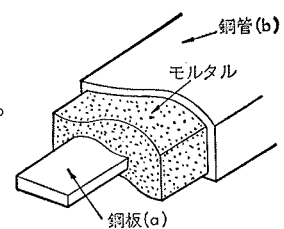
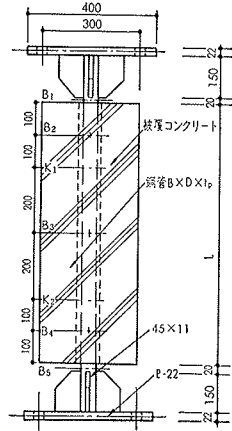


図-1

3) 鋼管の大きさによる影響。  
 4) 細長比による影響である。  
 試験体名の初めの数字は鋼管の幅 (3は30mm, 4は45mm, 7は75mm) を, 2けた目は鋼管の長さ (6は60cm, 8は80cm) 3けた目は鋼管の厚さ (1は1.6mm, 2は2.3mm), 5けた目はモルタル強度 (2は200 kg/cm<sup>2</sup>, 3は 228 kg/cm<sup>2</sup>), 6・7 けた目は壁厚を示す。使用鋼材は, 鋼管幅が30mm 以外の鋼管はSTK41, 鋼板および鋼管幅が30mmの鋼管は SS41を使用した。素材試験結果を表一2 に示す。



図一2 試験体の形状

試験体	鋼管長さ L (mm)	細長比 λ *	鋼管寸法(mm) B×D×tp	壁厚 T (mm)	モルタル強度 Om(kg/cm <sup>2</sup> )
482B310	800.3	250.20 (65.17)	75.23 ×44.65×2.23	100	227.72
BO	—	245.14	—	—	—
482B315	800.5	251.50 (65.17)	75.42 ×44.65×2.28	155	227.72
482B300	800	251.93 (65.61)	75.25 ×44.35×2.10	0	227.72
482B210	800	250.85 (65.46)	75.20 ×44.45×2.10	100	200.20
462B310	600.3	189.17 (49.68)	75.55 ×44.63×2.35	100	227.72
462B300	601.0	193.29 (49.85)	75.42 ×44.47×2.20	0	227.72
381B310	799.0	251.94 (98.15)	77.05 ×29.45×1.65	100	227.72
381B300	799.0	258.65 (103.37)	77.65 ×28.15×1.70	0	227.72
782B310	800.5	248.07 (38.67)	75.25 ×75.18×2.33	100	227.72

\*カッコ内は、全断面(モルタル・鋼管を含めた断面)で計算した場合の細長比である。  
 細長比は、すべて両端ピンとした場合の細長比である。

表一1 試験体の形状寸法

	降伏応力度 (σ <sub>s</sub> ) <sub>y</sub> (t/cm <sup>2</sup> )	降伏ひずみ (ε <sub>s</sub> ) <sub>y</sub> (×10 <sup>-6</sup> )	引張応力度 (σ <sub>s</sub> ) <sub>max</sub> (t/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (t/cm <sup>2</sup> )		
				E <sub>s</sub>	E <sub>st</sub>	E <sub>1</sub>
鋼	2.78	1508	4.54	2030	39	28
モルタル	200 228	125	(σ <sub>s</sub> ) <sub>max</sub> (σ <sub>s</sub> ) <sub>y</sub>			

表一2 素材試験結果

## 2.2. 実験方法と測定方法

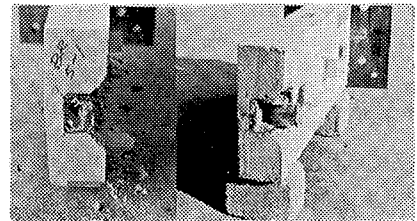
図一2 に示した試験体の一端を反力ブロックに他端を50t サーボパルサ(島津製)に固定し, 支持条件が両端固定となるようにして正負交番繰返し載荷を行なった。加力は50t サーボパルサで弾性時には荷重制御を, 降伏以降はサーボパルサの頭部に取り付けられたマグネスケールにより変形制御に切り替えて加力, 各変形段階で1回ずつ繰返し, ブレースが破壊するまで変形を増し, 座屈を起こした場合には座屈後の耐力低下をみる

ために, さらにもう1サイクル加力した。測定は, 図一2 に示す様に1方向ワイヤーストレインゲージをブレースに5個所(B1~B5), 鋼管に2個所(K1, K2)貼りつけて軸方向ひずみを測り, コンクリートで被覆したのについては, コンクリート表面のひずみの測定を行なった。変形量の測定は摺動抵抗式変位計(精度1/200, ストローク100mm, 50mm)および1/1000ダイヤルゲージ(弾性時), 1/100ダイヤルゲージ(塑性時)を用いて軸方向変形量と面外方向変形量を測定した。

## 3. 実験結果と検討

### 3.1. 破壊経過

各試験体の破壊経過は, 全体座屈を生じた鋼管幅の小さい381B310, 381B300を除いてブレースを圧縮(荷重-20.0t前後)した後, 引張時(荷重16~17t)に鋼管端部



写真一1 破壊状況

で鋼管に充填したモルタルにひびわれが入り, サイクル数の増加につれて引張時にモルタルのぬけ出し, はく落が生じてブレースは引張時にモルタルのぬけ出しとともに急激にぬけ出し, 圧縮時に写真一1に示す様にブレースの端部で局部座屈が起こり, この座屈にともない鋼管の端部が破断した。そして, 引き戻しの際にブレースと, リブプレートとのつけ根でブレースが破断した。鋼管幅が小さく, コンクリートで鋼管を被覆していないブレース(381B300)は中央で, コンクリートで鋼管を被覆したブレース(381B310)も端部より材長の1/4の所で全体座屈が生じた。コンクリートで鋼管を被覆した場合には鋼板をコンクリートで被覆した時に生じる引張によるコンクリート表面のひびわれ<sup>1)</sup>は現われなかったが, 圧縮時のかなり高い荷重時(-25.0t~-26.0t)に鋼管にそった軸方向のひびわれが見られた。最終変形時の鋼管の端部をみると写真に示す様に鋼管に充填したモルタルはぬけ出し, 鋼管は外側へふくらんでいる。

### 3.2. 荷重-変形曲線および荷重-ひずみ曲線

各試験体の軸方向変形と荷重との関係を図一3に示す。実験より得られた初期剛性・降伏荷重を表一3に, 最大荷重・最大変形を表一4に示す。又, 図一2に示したブレースの中央(B3)と鋼管の二点(K1, K2)のひずみと荷重との関係を一部の試験体について図一4に示す。図一5は試験体462B300の鋼管の円周方向に貼り付けたストレインゲージから得られたひずみと荷重と

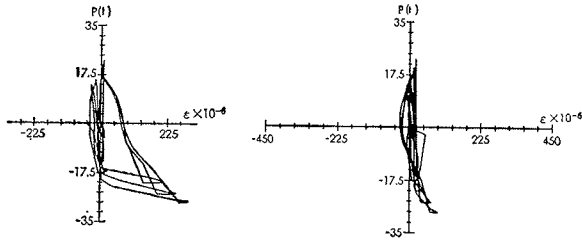


図-5 荷重—ひずみ、曲線

の関係である。

3.2.1. 初期剛性と降伏点 プレース材に圧縮力が作用した場合、プレースが膨張し、モルタルを介して摩擦力により鋼管およびコンクリートに力が流れ、素材の引張試験結果より求めたプレースだけの耐力および剛性よりも圧縮時の耐力および剛性が上昇し、コンクリートの被り厚さが大きいもの、鋼管の大きい方が圧縮時の初期剛性は大きく出ている。一方、引張時には逆にプレースとモルタルの間に、摩擦は働かず、耐力・剛性はプレース材だけの耐力・剛性に一致すると考えられる。そこで表-3の引張時の初期剛性と降伏荷重の計算値は鋼管およびモルタルを考慮せずに鋼材の素材試験結果から求めた値である。なお、圧縮時の計算値は3.2.2.に示す方法で求めた値を示す。

試験体名	初期剛性×10 (t/cm)				降伏荷重(t)						
	引張時		圧縮時		引張時		圧縮時				
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値			
482B310	10.79	1.08	10.66	13.21	0.81	16.88	14.98	1.13	-17.25	-14.98	1.15
B O	9.74	0.98	9.95	9.97	1.00						
482B315	10.96	1.10	14.02	13.29	1.05	16.20	15.05	1.08	-21.10	-15.05	1.40
482B300	12.10	1.21	13.34	12.90	1.03	16.00	14.68	1.09	-16.70	-14.68	1.14
482B210	11.55	1.16	13.78	13.11	1.05	16.00	14.90	1.07	-17.10	-14.90	1.15
462B310	11.00	1.10	11.68	17.06	0.68	16.30	15.11	1.08	-19.20	-15.11	1.27
462B300	10.63	1.07	12.16	16.80	0.72	16.00	14.90	1.07	-16.50	-14.90	1.11
381B310	10.18	1.02	13.81	13.18	1.05	15.50	14.88	1.04	-17.50	-14.88	1.18
381B300	9.58	0.96	9.61	12.41	0.77	16.00	13.95	1.15	-17.50	-13.95	1.25
782B310	11.91	1.19	14.62	13.04	1.12	16.90	15.04	1.12	-17.50	-15.04	1.16

表-3 初期剛性・降伏荷重

3.2.2. 最大荷重と最終変形

先に述べた様に圧縮時の荷重—変形関係は鋼材の素材試験結果だけからは求まらず、鋼管・モルタルを考慮する必要がある。そこで以下に示す方法で荷重—変形関係を算定する。

モルタルとプレースとの付着は切れているものとし、モルタルへの力の伝達はプレースとモルタルの摩擦によって伝達され、モルタルの負担力  $P_m$  は鋼とモルタルの摩擦係数  $\mu$  と両者の接触面積  $A$ 、側圧  $\sigma_3$  から  $P_m = \mu \cdot \sigma_3 \cdot A$  となる。従って、この時の

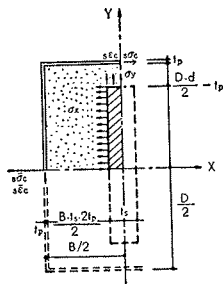


図-6 解析モデル

試験体名	最大荷重 (t)						最終変形 (cm)			靱性率 $\delta_{max}/\delta_y^{**}$
	引張時			圧縮時			最終変形 (cm)			
	実験値	計算値*	計/実	実験値	計算値	計/実	実験値	計算値	計/実	
482B310	23.00	24.55	1.07	-32.00	-23.42	0.73	2.56	1.79	0.70	20.21
B O				-6.60			0.06			0.47
482B315	21.67	24.67	1.14	-30.00	-23.47	0.78	1.85	1.78	0.96	14.60
482B300	19.10	24.07	1.26	-25.60	-23.01	0.90	1.22	1.76	1.44	9.59
482B210	21.30	24.44	1.15	-28.00	-23.32	0.83	1.70	1.78	1.05	13.42
462B310	23.80	24.76	1.04	-31.80	-24.44	0.77	2.24	1.76	0.79	23.21
462B300	22.00	24.42	1.11	-28.00	-24.00	0.86	1.64	1.69	1.03	16.99
381B310	22.70	24.38	1.07	-30.00			1.87			14.72
381B300	16.00	22.86	1.43	-17.50			0.27			2.13
782B310	21.40	24.66	1.15	-28.00	-29.10	1.04	1.59	1.44	0.91	12.51

\* 引張最大荷重の計算値は素材試験結果の最大応力度  $\sigma_{max} = 4.54 \text{ t/cm}^2$  を用いた。  
\*\* 素材試験結果より降伏時の  $\delta_y = 0.127 \text{ cm}$  を用いた。

表-4 最大荷重・最終変形および靱性率

荷重  $P$  は  $P = \sigma_3 \cdot d \cdot t_s + \mu \cdot \sigma_3 \cdot \bar{A}$  (1)となる。

今、プレース材に軸方向ひずみ  $\epsilon$  が生じた場合、図-6で  $x, y$  両方向のモルタルの縮み量  $\delta_x, \delta_y$  は、 $\sigma_x, \sigma_y$  がそれぞれプレース幅  $d, t_s$  だけについて分布するものと考えて(2)式のように仮定した。

$$\delta_x = \epsilon \cdot \nu \cdot t_s / 2 - \sigma_x \cdot d \cdot B / 4 \cdot t_p \cdot E_s$$

$$\delta_y = \epsilon \cdot \nu \cdot d / 2 - \sigma_y \cdot t_s \cdot D / 4 \cdot t_p \cdot E_s \quad (2)$$

この時のモルタル圧縮応力度  $\sigma_x, \sigma_y$  は

$$\sigma_x = \epsilon \cdot \nu \cdot t_s / \{ (B - t_s - 2 \cdot t_p) / E_m + B \cdot d / 2 \cdot t_p \cdot E_s \}$$

$$\sigma_y = \epsilon \cdot \nu \cdot d / \{ (D - d - 2 \cdot t_p) / E_m + D \cdot t_s / 2 \cdot t_p \cdot E_s \} \quad (3)$$

(3)式を(1)式および  $\sigma_3 \cdot \bar{A} = 2(d \cdot \sigma_x + t_s \cdot \sigma_y) \cdot L$  に代入すれば、荷重  $P$  は

$$P = d \cdot t_s \cdot (\sigma_s)_y + 2 \cdot \mu \cdot L \cdot \epsilon \cdot \nu \cdot t_s \cdot d / K \quad (4)$$

$$K = 1 / \{ (B - t_s - 2 \cdot t_p) / E_m + B \cdot d / 2 \cdot t_p \cdot E_s \} + 1 / \{ (D - d - 2 \cdot t_p) / E_m + D \cdot t_s / 2 \cdot t_p \cdot E_s \}$$

一方、端部のぬけ出し量  $\delta_b$  は、 $\delta_b = \epsilon \cdot L$  で局部座屈を生じる時の座屈長さは  $(\delta_b + 2) \text{ cm}$  となり、Engesserの接線係数の概念を取り入れて塑性座屈荷重  $P_{cr}$  は支持条件を一端ピン他端固定、モルタルのぬけ出しおよびはく落はなく、最終変形時までモルタルはプレースを拘束するものとして  $P_{cr} = 2\pi^2 E_1 I / (\delta_b + 2)^2$  (5)で与えられる。但し、鋼材の荷重—変形曲線は表-2の様に仮定する。従って、(4)式・(5)式より  $P = P_{cr}$  となる時の荷重および変形が最大荷重、最大変形量である。

又、鋼管の円周方向の応力度およびひずみは  $s\sigma_c = \epsilon \cdot \nu \cdot t_s \cdot d / \{ 2 \cdot t_p (B - t_s - 2 \cdot t_p) / E_m + B \cdot d / E_s \}$   
 $s\bar{\sigma}_c = \epsilon \cdot \nu \cdot t_s \cdot d / \{ 2 \cdot t_p (D - d - 2 \cdot t_p) / E_m + D \cdot t_s / E_s \}$  (6)  
 $s\epsilon_c = \epsilon \cdot \nu \cdot t_s \cdot d / \{ 2 \cdot t_p \cdot E_s (B - t_s - 2 \cdot t_p) / E_m + B \cdot d \}$   
 $s\bar{\epsilon}_c = \epsilon \cdot \nu \cdot t_s \cdot d / \{ 2 \cdot t_p \cdot E_s (D - d - 2 \cdot t_p) / E_m + D \cdot t_s \}$  (7)  
 で与えられる。

$(\sigma_s)_y$ ; 鋼材の降伏応力度,  $d, t_s$ ; プレース幅, 厚  $\nu$ ; 鋼材のポアソン比,  $L$ ; プレース材長  $\mu$ ; モルタルと鋼材の摩擦係数  $E_s, E_m$ ; 鋼材およびモルタルのヤング係数

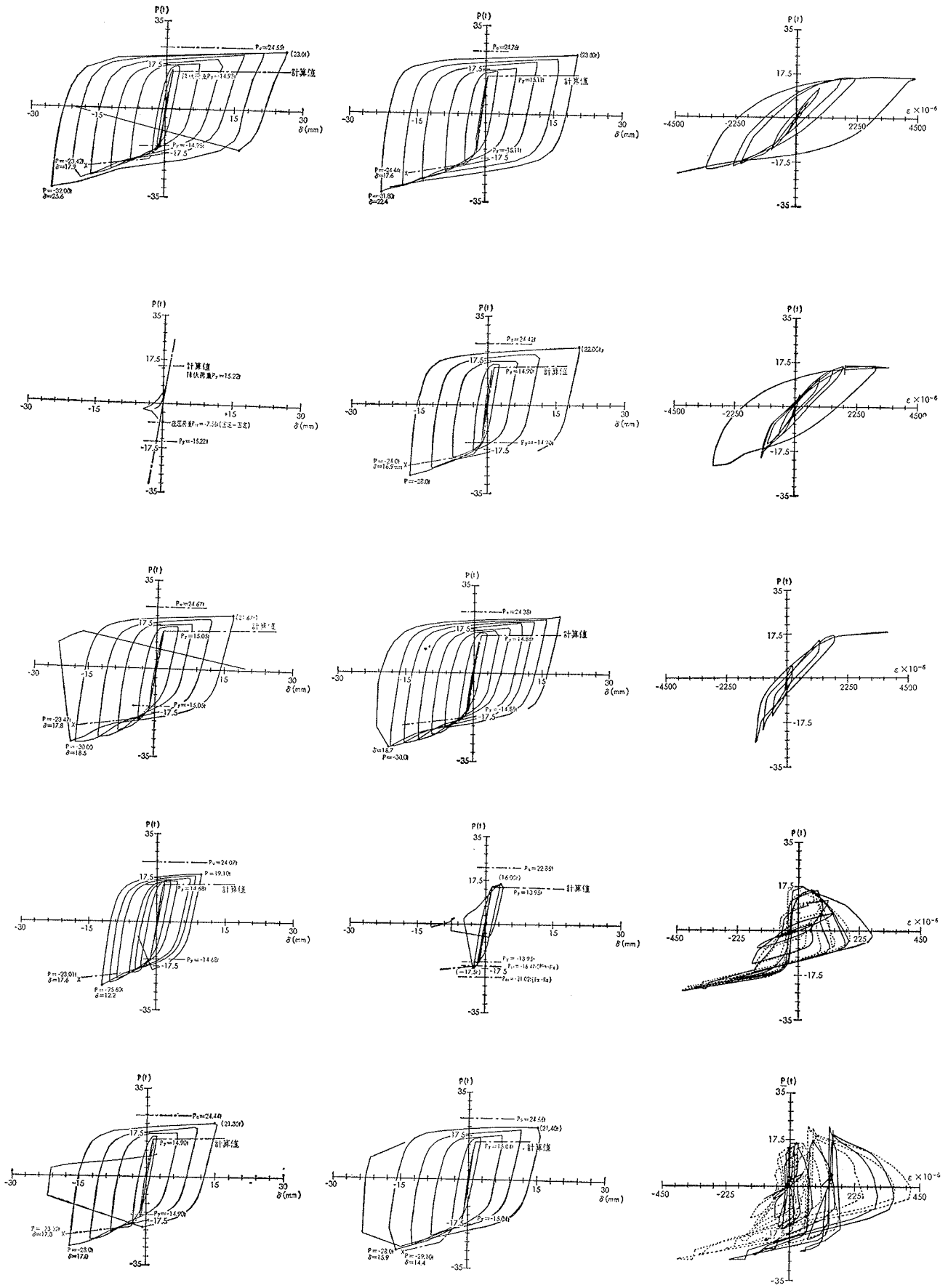


図-3 荷重—変形曲線

図-4 荷重—ひずみ曲線

$E_1$ ; 降伏後の鋼材のヤング係数

$B, D, t_p$ ; 鋼管幅, 成および厚さ

鋼の降伏応力度  $(\sigma_s)_y = 2.77t/cm^2$ , 弾性時および塑性時のポアソン比  $\nu$  をそれぞれ 0.3, 0.5, モルタルとの摩擦係数  $\mu$  は, モルタル塊を鋼板にのせて引張り, モルタル塊が動き出す時の力と自重とから得られた摩擦係数 0.31 を用いて求めた計算値を図—3, 表—4 に計算値として示した。表—4 の最大荷重および最終変形をみると, 最大荷重では計算値が実験値の 70~90% とやや小さく出ており, 最終変形では実験値の方が計算値より若干小さい。

**3.2.3. 荷重—ひずみ曲線** 図—4—1 の荷重—ひずみ曲線を見るとコンクリートで鋼管を被覆していないブレース材は引張および圧縮時に降伏ひずみに達しており, 圧縮荷重の増加とともにひずみも増え, ループは圧縮・引張側に紡錘型のよいループを示している。鋼管をコンクリートで被覆した場合(図4—2, 図4—3)には, 圧縮時に荷重の増加に対してひずみの増加は少なくなり, ループは圧縮側のみ逆S字型に, 引張側は紡錘型になっている。しかもコンクリートの被覆厚さが大きいほど同一荷重に対して圧縮時のひずみは小さい。これは変形がある程度進行し, 鋼管を介して力がコンクリートに流れたために生じたものと考えられる。しかし, コンクリート被覆の有無に関係なく, 鋼管の大きさ, モルタル強度の差による荷重—ひずみ曲線への影響はみられなかった。

一方, 鋼管の軸方向ひずみ履歴は, 図—4—4, 図—4—5 に示す様に, いずれも付着力のある初期には紡錘型のループを描いているが, 付着力がなくなると圧縮時に 17t 位から急にひずみが増し, 除荷・引張という過程でひずみは再び小さくなる。これは圧縮によりブレースが膨張し, モルタルを押し出すと同時に, モルタルとブレースとの摩擦によって鋼管に力が伝わったためであろう。図—5 の鋼管の円周方向のひずみは, 付着の効いている第 1 サイクルは引張時には圧縮ひずみが出ているが, 付着が切れると引張時には円周方向ひずみは出ず, 圧縮時にブレースの膨張にともなって鋼管の円周方向に引張ひずみが生じている。

### 3.3. 付着応力度

ブレースとモルタルとの付着応力度  $\tau_s$  は, ブレースに貼り付けたストレインゲージの二点間(図—2 の  $B_2$  と  $B_3$  および  $B_3$  と  $B_4$ ) のひずみの差より二点間(二点間距離  $s$ ) の軸力の差を求め, その軸力の差が付着によって負担されると考え, 軸力を二点間のブレースの表面積で割り, 付着応力度  $\tau_s$  は次式で算出した。

$$\tau_s = E_s \cdot t_s \cdot d \cdot (\epsilon_1 - \epsilon_2) / 2 \cdot (t_s + d) \cdot s$$

試験体名	付着応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )				計算値
	$\tau_1$	$\tau_1$ /計	$\tau_2$	$\tau_2$ /計	
482B315	16.50	2.06	18.20	2.27	8.01
482B300	7.60	0.95	6.20	0.77	
482B210	24.60	2.70	21.80	2.39	9.11
462B310	6.70	0.84	9.90	1.24	8.01
462B300	8.50	1.06	5.50	0.69	
381B310	9.50	1.19			
381B300	6.06	0.76	4.34	0.54	
782B310	19.30	2.41	22.90	2.86	

表—5 圧縮時の最大付着応力度

ここで, 最大付着応力度  $\tau_{max}$  は, 荷重の増加に対して付着応力度が減少しはじめる時の付着応力度を最大付着応力度とし, 表—5 に示す。計算値とは, 鋼管コンクリート構造設計規準による短期許容付着応力度  $4/100F_c$  の値を示している。表—5 を見ると, 鋼管の大きいほど又, コンクリートで鋼管を被覆した方が最大付着応力度は大きくなっている。

## 4. まとめ

1. 今回実験を行なった形式のブレース材は, 従来のブレースのような圧縮降伏以前に座屈することなく, 安定した履歴を示し, 十分にエネルギーの吸収あることがわかった。
2. 鋼管幅の小さなブレースについては鋼管をコンクリートで被覆することによって鋼管幅の大きいものと変らない十分にエネルギー吸収のある, よい荷重—変形曲線を示すことがわかった。
3. 本形式のブレース材の履歴特性は, 本報告で述べた方法で概略をつかむことが出来る。

## 5. 参考文献

- 1) 木村・武田・竹本・吉岡・古屋: プレキャストコンクリート耐震壁の開発研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 12 (1976), pp. 38~42
- 2) 木村・武田・竹本: プレキャスト耐震壁の実験的研究(その3), (その4), 関東支部研究報告集, (昭和51年7月) pp. 257~264
- 3) Noel J. Gardner: Structural Behavior of Concrete Filled Steel Tubes, A. C. I. Journal, (1967, July)
- 4) 山田・坂恵: コンクリート充填鋼管のボンドに関する研究, 建論, (昭和40年5月), pp. 37~39
- 5) 仲・加藤・阿部: コンクリート充填鋼管の圧縮強さ, 建論, (昭和36年10月), pp. 605~608
- 6) 日本建築学会: 鋼管コンクリート構造設計規準, 同解説