

プレキャストコンクリート耐震壁の開発研究（その4）

——鋼管およびモルタルで被覆したブレースの実大実験——

木村 耕三
武田 寿一

Research and Development on Precast Concrete Shear Walls (Part 4)

——Experimental Study on Full-Size Brace Sheathed by Square Pipe and Mortar——

Kohzoh Kimura
Toshikazu Takeda

Abstract

Experiments were performed on full-size steel braces sheathed by square pipe and mortar. For the brace size used in the experiments, when the ratio of strength (P_{\max}/P_E) was less than 0.4, the ratio of (Depth of Pipe/Width of Pipe) less than 2.5, and the ratio of (Length of Pipe/Width of Pipe) less than 13, the braces indicated stable load-deflection curves showing that deflection capacity and energy absorption were sufficiently possessed. It was recognized that it was better for deflection capacity to provide less bond between steel and mortar than to make slits in the steel braces. The load-deflection relationships of the specimens may be roughly estimated in accordance with the method described in Reference 4).

概 要

鋼管およびモルタルで被覆したブレースの実大実験を行なった。その結果、今回実験を行なった程度の規模のブレースでは鋼板の引張強度 P_{\max} の耐力比 (P_{\max}/P_E) が 0.4 以下で、(鋼管せい)/(鋼管幅) の比が 2.5 以下、かつ、(鋼管長さ)/(鋼管せい) の比が 13 以下であれば全体座屈を生じることなく、変形能に富み、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。また変形能をよくするためには、鋼板にスリットを設けるよりも、鋼板とモルタルとの付着力を少なくする方が良いことがわかった。履歴特性については、文献 4) で述べた方法で概略を把握できる。

1. 序

前報¹⁾ (その 2) において鋼板を鋼管およびモルタルで被覆した小型のブレースは、ブレース材単体としての性状が、また (その 3)²⁾ では壁体内に埋込み、耐震壁として用いた場合の壁体の性状が、ともにエネルギー吸収、変形能の面において優れていることが確認された。しかし、既応の実験結果には、モルタルと鋼板との付着力による変形能への影響や、弾性時と塑性時でのポアソン比の変化にともなう摩擦力の違いなど応力伝達機構で不明確な点が残されており、小型模型実験の結果だけで実際のブレースの挙動を推測することは難しい。今回の実験は、既応の小型模型実験結果をふまえてパラメータを設

定し、実大寸法の部材での弾塑性挙動を把握することを目的とした。

2. 実験概要

2.1. 試験体

今回の実験では、鋼板の一部だけでなく、材全体を伸縮させることにより、変形能を改善することを主眼においてパラメータを選定した。つまり、(1) モルタルと鋼板との付着を少なくする、(2) 鋼板の中央にスリットを設けて端部だけでなく、材の中央も降伏させる、(3) 鋼管による周囲からの拘束を少なくする、という 3 点から、モルタル強度、鋼板中央のスリットの有無、鋼管せいをパラメータとした。

本形式のブレースを実際に用いる場合には、鋼管のシーすがあるためV字型に架構に配置することになる。そこで、階高2.7M、スパン6.0M程度の架構を想定しブレース長さを3.93M、(鋼管長さ3.84M)とした。鋼板ブレースの断面は、壁体の耐力からB-25×80(断面積20cm²)とした。したがって、鋼板のみの細長比(両端ピン支持)は、545である。また、鋼管の幅は、壁体に埋込む場合の壁厚を考慮して全試験体で12cmとした。試験体は6体で、その形状、寸法およびパラメータを図-1、表-1に、使用材料の材料特性を表-2に示す。

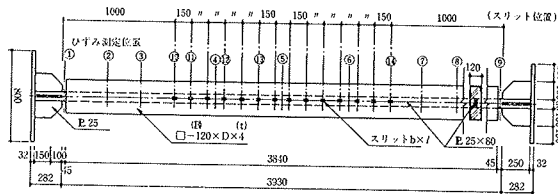


図-1 試験体の形状寸法

試験体	鋼管寸法 B(幅)× D(せい)×t(厚)	等価細 長比 Ae*	スリットの 大きさ b(幅)×l(長さ)	モルタル 強度 Fc(kg/cm ²)	付着の有無	面外方向 のふれ止め の有無
No.1	120×160×4	112	12×50	150	有	無
No.2	120×200×4	108	12×50	150	有	無
No.3	120×300×4	102	—	166	有	無
No.4	120×160×4	56	—	150	有	有
No.5	120×300×4	96	—	39	無**	無
No.6	120×300×4	96	10×50	39	有	無

* 両端ピンとして鋼管およびモルタルを考慮した細長比
** 鋼板の表面にワックスをぬり付着を完全になくした。

表-1 試験体の形状寸法

鋼材	板厚	降伏応力度 (σ _s)(t/cm ²)	降伏ひずみ ε _s (×10 ⁻³)	引張強度 (σ _t) _m (t/cm ²)	硬化開始 ひずみ ε _h (×10 ⁻³)	ヤング係数	
						E _s (t/cm ²)	E _m (t/cm ²)
鋼材	B-25	2.71	1.458	4.63	12.092	2.156	60
	"*	3.41	1.754	5.29	15.964	2.112	53
	B-4	2.34	1.292	3.94	—	1.924	—
普通モルタル	圧縮強度 f _c (kg/cm ²)	引張強度 f _t (kg/cm ²)	ヤング係数 Em(t/cm ²)				
	166	—	191 ²²				
	150	13	182 ²²				
気泡モルタル	39	—	20 ²³				

*1 No.4に使用 *2 Em = 2.1×10³ × √(Fc/200) より算出
*3 公称値

表-2 使用材料の材料特性

2.2. 実験方法と測定方法

図-1に示した形状寸法の試験体を前報(その2)で述べた様に、試験体の両端を反力ブロックおよびサーボパルサに取り付け、両端固定の状態で正負交番繰返し載荷を行なった。なお、載荷ステップは、次のとおりである。第1サイクルは弾性範囲内での挙動の把握を対象として荷重30tまで加力し、第2サイクルでは降伏荷重近傍の挙動の把握を対象に全体変形量で0.45cmになるまで加力した。それ以降のサイクルでは、変形量を、0.8cmずつ増し、ブレースが座屈するまで、載荷した。載荷荷重は、サーボパルサ内蔵のロードセルにより検出した。

鋼材のひずみは、鋼板に貼りつけた(スリットのない場合には、図-1に示す①~⑨の9カ所、スリットのある場合には、図-1に示す①~⑭の14カ所)、塑性ひずみゲージ(ゲージ長5MM)によって軸方向のひずみを測定した。鋼管の表面では、端部および中央で、鋼管のふくらみをみるために軸方向と直交方向および、軸方向の2方向のひずみを測定した。

変形は、部材の全材長の材軸方向の変形をはかるとともに、鋼管内の鋼板に直接、変形測定用のボルトを溶接して各測定区間での軸方向変形を測定した。軸方向変形量の測定は1/100ダイヤルゲージで行なった。面外方向の変形は、摺動抵抗式変位計を用いて、鋼管の中央と端部で測定した。

3. 実験結果と検討

3.1. 破壊状況

鋼管せいが、16cm、20cmの試験体No.1、No.2は、材の中央より少し反力ブロック寄りの位置で全体座屈を生じた。しかし、鋼管成が30cmの試験体No.3、No.5、No.6は、図-2のように反力ブ

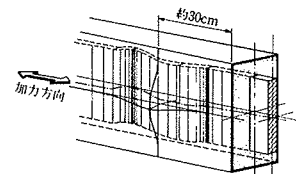


図-2 局部座屈状況

ロック側の鋼管端部より30cm位内側で局部座屈が生じ、鋼管が外側にふくらんだ。

3.2. 荷重-変形曲線

各試験体の軸方向変形(δ)と荷重(P)との関係を図-3に示す。また、文献4)による解析値も、図-3に記入した。

3.2.1. 初期剛性 図-3に示した荷重-変形曲線より、引張および圧縮時の初期剛性を求め、表-3に示す。表中のKculは、素材試験結果(表-2)を用い、スリット、充填モルタルおよび鋼管を無視した場合の初期剛性である。実験で測定された軸方向変形は、鋼板自身の軸方向伸縮量と面外たわみによる軸方向成分の和として表われている。しかし、ブレース材の中央で測定した面外方向のたわみ量は、荷重40.0t(圧縮時)で4~8×10⁻³cm程度で、これによる軸方向変形への影響は少ないと思われる。

この表から、スリットの有無による初期剛性への影響はみられないが、充填モルタル強度が大きいほど圧縮時の初期剛性が、また鋼管せいが小さいほど圧縮時・引張時とも初期剛性が高くなっている。

3.2.2. 降伏荷重と降伏後の挙動 スリットのある場

合にもモルタルや鋼管の影響により、スリット部よりも端部の方が早く降伏している。降伏荷重は鋼板の両端部(図-1のゲージ位置①または②)の平均軸方向ひずみが素材試験での降伏ひずみをこえた時の荷重で定

義し、表-3に示した。表中の計算値は、素材試験による降伏応力度から算出したものである。

荷重-変形曲線をみると降伏荷重後、圧縮側では耐力が上昇している。これは鋼材の一部がひずみ硬化域に入ると(平均軸方向ひずみがひずみ硬化以下でも)それ以降の耐力が上昇し、さらにその材の細長比が小さいほどひずみ硬化による耐力上昇の時期が早くなるためであろう。今回の試験体では、両端ピン支持と考えて、両端部のモルタルで包まれていない鋼板の細長比は6と非常に小さいため、ひずみ硬化による耐力上昇の時期が、降伏

試験体	剛 性					強 度		
	実験値 $K_{exp}(\times 10t/cm)$		計算値 $K_{cul}(\times 10t/cm)$	K_{exp}/K_{cul}		降伏荷重 $P_v(t)$	計算値 $(P_v)_{cul}(t)$	$P_v/(P_v)_{cul}$
	引張時	圧縮時		引張時	圧縮時			
No. 1	15.0	26.0	11.0	1.36	2.36	54.0	54.2	1.00
No. 2	16.3	24.0	11.0	1.48	2.18	51.0	54.2	0.94
No. 3	11.6	15.6	11.0	1.05	1.42	57.8	54.2	1.07
No. 4	15.5	21.2	10.7	1.45	1.98	62.0	68.2	0.91
No. 5	10.9	11.2	11.0	0.99	1.02	54.5	54.2	1.01
No. 6	11.2	11.9	11.0	1.02	1.08	53.8	54.2	0.99

表-3 初期剛性と降伏荷重

荷重後すぐに表われたと思われる。この現象を図-3の試験体 No. 1 について具体的に述べると、荷重-54.0t で B①~B④(右図参照)の4点の平均軸方向ひずみが降伏ひずみを越えた(B②, B④は降伏ひずみ以上で、B①, B③は降伏ひずみに達していない)。そして、荷重-56.0t で全点が降伏ひずみを越え、1サイクル目の荷重-58.0t では4点ともひずみ硬化域に入っていないために耐力の上昇はなく、変形のみが進行している。そして、第2サイクルの荷重-58.0t 時にB②

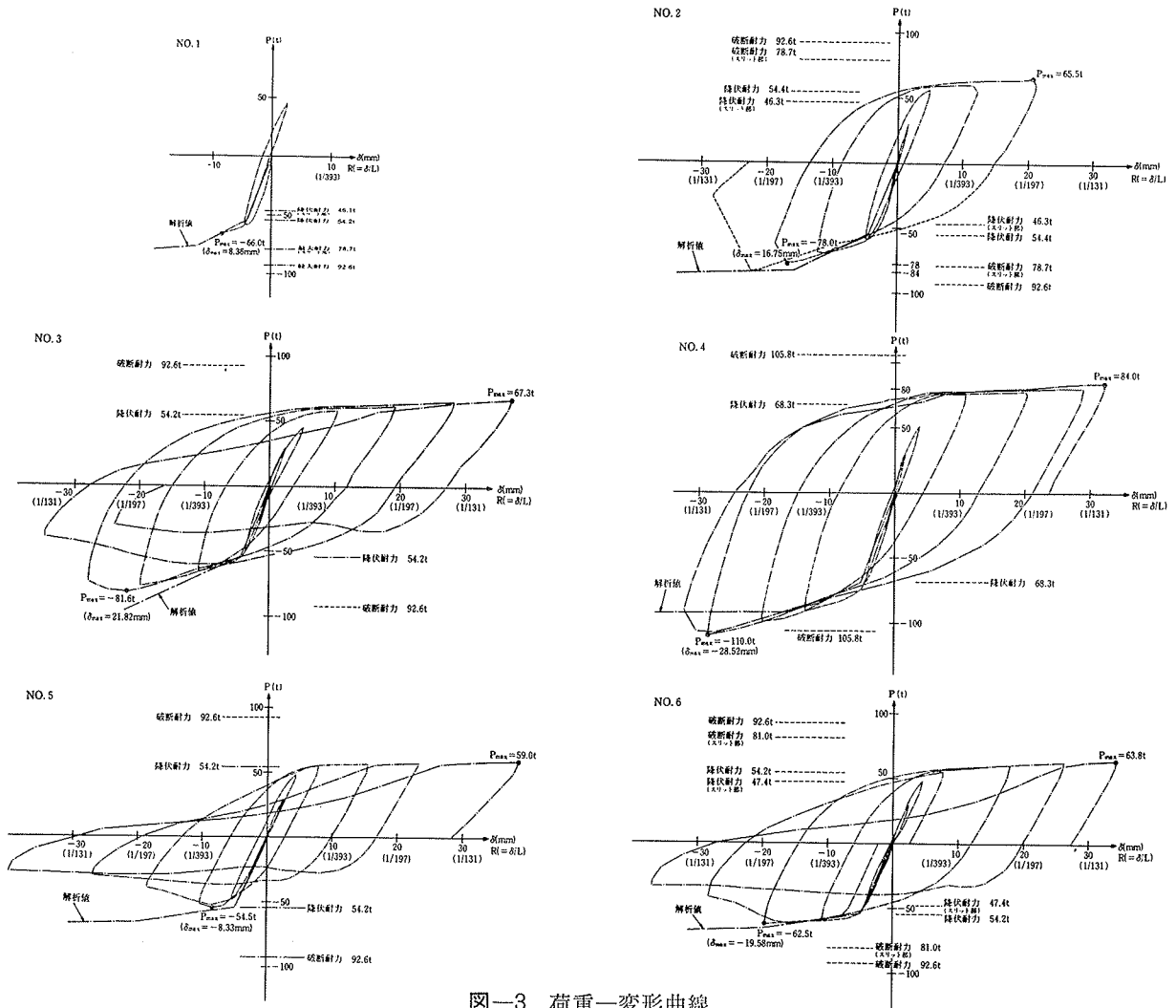
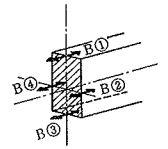


図-3 荷重-変形曲線

がひずみ硬化域に入ったために第2サイクル目では、耐力上昇が生じている。この現象は、試験体 No. 2 でも同じように見られる。

試験体 No. 5, No. 6 をみると、降伏域は広がっているが、その反面、鋼板の一部分あるいは全体が、ひずみ硬化域に入るまでに変形が増大し、その結果、耐力上昇時期よりも局部座屈が先行する結果となっている。

3.2.3. 最大荷重と座屈荷重 実験で得られた各試験体の引張、圧縮側の最大荷重を降伏荷重、引張強度と比較して表-4を示す。これらの最大荷重は、いずれも鋼板の降伏荷重をこえて、全体座屈又は、局部座屈で決まっている。一方、後述するように、全体座屈を防止し、局部座屈を先行させると変形能のよいブレースが得られる。そこで、前報¹⁾の小型実験の結果も含めて、全体座屈と局部座屈を生じる場合のブレースの形状について検討する。

鋼管とモルタルを考慮した等価細長比 λ_e と、 λ_e から求めたオイラー荷重 (P_E) に対する最大荷重の耐力比 $[(P_{exp})_c/P_E]$ との関係を図-4に示す。また、ブレースの形状と耐力比との関係を図-5に示す。この結果、全

体座屈が生じないためには、等価細長比が110程度では、耐力比が0.5以下で、鋼管の形状が、次の関係を満足することが望ましい。(鋼管せい)/(鋼管幅) <2.5 , かつ、(鋼管長さ)/(鋼管せい) <13

3.3. 荷重-ひずみ曲線

図-6①~⑥に試験体 No. 2 の鋼板に貼りつけたひずみゲージより得られた荷重-ひずみ曲線を示す。荷重-ひずみ曲線をみると鋼板の端部(図-6①)では、圧縮側に片寄ったループを、鋼管端部より少し内側(図-6②)では、圧縮、引張両側に広がったよいループを示している。しかし、スリットのある部分(図-6③)では引張側に片寄っている。鋼板の中央部では、図-6④、図-6⑤を比べるとスリットの有無で圧縮ひずみには共に差がなく、その値は降伏ひずみ程度であるが、スリットのある位置(図-6⑥)では引張ひずみが大きくなっている。従って、スリットを設けた目的からみて今回程

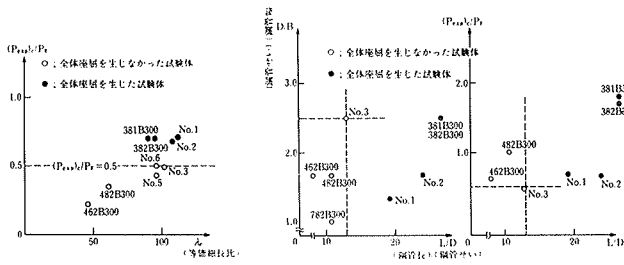


図-4

図-5

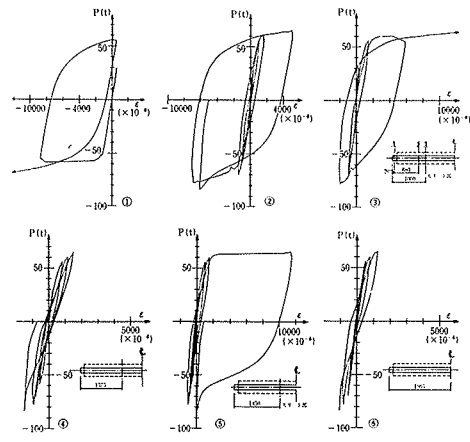


図-6 荷重-ひずみ曲線

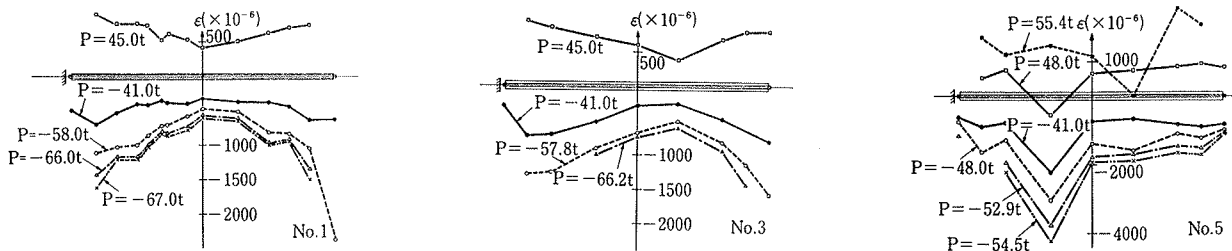


図-7 ひずみ分布

試験体	実験値 (t)			降伏荷重 P_y^{*2} (t)	(最大荷重)/(降伏荷重)		引張強度 P_{max}^{*3} (P_{max}) (t)	耐力比		P_E^{*4} (t)	$(P_{exp})_c/P_E$
	$(P_{exp})_t^{*1}$	$(P_{exp})_c^{*1}$	$(P_{exp})_t/(P_{exp})_c$		$(P_{exp})_t/P_y$	$(P_{exp})_c/P_y$		$(P_{exp})_t/P_{max}$	$(P_{exp})_c/P_{max}$		
No. 1	—	67.0	—	54.0	—	1.24	78.7 (92.6)	—	0.72	98.9	0.68
No. 2	65.5	78.0	0.84	51.0	1.28	1.53	78.7 (92.6)	0.83	0.84	120.3	0.65
No. 3	67.3	81.6	0.83	57.8	1.16	1.41	92.6	0.73	0.88	173.8	0.47
No. 4	84.0	110.0	0.76	62.0	1.35	1.77	105.8	0.79	1.04	395.4	0.28
No. 5	59.0	54.5	1.08	54.5	1.08	1.00	92.6	0.64	0.59	173.8	0.31
No. 6	63.8	62.5	1.02	53.8	1.19	1.16	81.0 (92.6)	0.79	0.67	173.8	0.36

*1 $(P_{exp})_t$ は引張荷重, $(P_{exp})_c$ は圧縮荷重を示す。

*2 P_y は実験による降伏荷重(表-3参照)

*3 P_{max} は素材試験の引張強度より求めた値で、スリットは考慮しているが P_{max} はスリットを無視した値である。

*4 $P_E = \pi^2 E_s A e / \lambda_e^2$ { λ_e : 等価細長比
 E_s : ヤング係数

表-4 最大荷重

度のスリットでは、ひずみ履歴の面で十分な効果は期待できないと思われる。

図一7は、軸方向ひずみ分布の一例 (試験体 No. 1, No. 3, No. 5), を示したものである。

3.4. 変形能

試験体 No. 1~No. 4 では、図一7に示した様に変形を生じる領域が、引張時には材全体に広がっているが、圧縮時には材の両端部近傍に集中している。したがってひずみ分布から判断して、鋼板に今回程度の大きさのスリットをあけても変形能は向上されず、スリットを設けるならば、かなり幅の広いスリットが必要となる。このことは逆に、引張耐力の低下につながるので結果的にはスリットを設けて変形能をよくすることは難しいと判断される。

最終破壊パターンから変形能の良否をみると、全体座屈を生じさせるよりも局部座屈を生じさせた方が変形能が良くなると思われる。

表一5は、最大荷重時での両端部近くの変形量と全体変形量 (最大変形量 δ_{max}) との割合を示したものである。これによると、普通モルタルを充填した場合には両端部近くでの変形が全体変形の70~80%を占め、気泡モルタルを充填した場合には、50~60%となっている。これは、モルタルと鋼板との付着力、モルタル強度の差によるものと思われる。そこで、付着力と変形量との関係を見るために、試験体 No. 3, No. 5, No. 6 でほぼ同じ変形時における両端部近傍の変形量が全体変形に占める割合を表一6に示す。この結果、鋼板とモルタルとの付着力が少ないほど材全体にわたって変形し、変形能がよくなると思われる。一方、全体座屈をさせないために鋼板の拘束効果という面から、気泡モルタルは付着力は小さいが好ましくない。従って、充填材としては、低強度モルタルなど、鋼板の拘束効果が十分にあり、かつ、付着力の小さいものが望ましい。

試験体	最大荷重 Pmax (t)	最大変形 δ_{max} (cm)	端部近傍 の変形 δ_o (cm)	δ_o/δ_{max}	降伏変形 δ_y (cm)	δ_{max}/δ_y
No. 1	-67.0	-0.836	-0.675	0.81	-0.243	3.44
No. 2	-78.0	-1.675	-1.322	0.79	-0.321	5.22
No. 3	-81.6	-2.182	-1.362	0.62	-0.535	4.08
No. 5	-54.5	-0.878	-0.369	0.42	-0.406	2.16
No. 6	-62.5	-1.958	-1.160	0.59	-0.527	3.72

表一5 変形能

試験体	荷重 P (t)	全体変形 δ (cm)	端部近傍の変形量 δ_o (cm)	δ_o/δ
No. 3	-64.2	-0.885	-0.587	0.66
No. 5	-54.5	-0.833	-0.397	0.48
No. 6	-57.0	-0.866	-0.392	0.45

表一6

降伏荷重時の変形量 δ_y と、この変形量に対する最大荷重時の変形量 δ_{max} との比を塑性率として表一5に示した。表より、本形式のブレースでは降伏時の変形量 δ_y の3~5倍程度の変形能は期待できる。

4. まとめ

鋼板をモルタルおよび鋼管で被覆したブレースの実大実験を行なった結果、以下のことがわかった。

(1) 初期剛性は、鋼板のスリットの有無に関係なく、充填モルタル強度および被覆鋼管せいに影響される。鋼板の両端部が最初に降伏するので、降伏荷重にはパラメータによる差はなく、また、両端部の細長比が小さいために、両端部は降伏後すぐに歪硬化域に入り、耐力は降伏荷重後も上昇する。変形性状は、前報の解析方法による結果とよく合っている。

(2) 今回の実験では、鋼管およびモルタルを含めた等価細長比 λ_e を用いたオイラー荷重 $P_E (= \pi^2 EA_o / \lambda_e^2)$ が、鋼板の引張強度 P_{max} の2.5倍以上あれば全体座屈は生じない。また、被覆鋼管の形状は、

$$(\text{鋼管せい})/(\text{鋼管幅}) < 2.5 \text{ かつ}$$

$$(\text{鋼管長さ})/(\text{鋼管せい}) < 13 \text{ を満足することが望ましいと思われる。}$$

(3) (2)の条件を満たし、普通モルタルを充填した場合には、部材の最大変形は、降伏荷重時の変形の3~5倍程度期待できる。

(4) 鋼板の荷重一ひずみ曲線は、材端より少し内側では、圧縮側・引張側に広がった紡錘型を示すが、それ以外の部分では、引張側、又は、圧縮側に片寄った履歴を示している。

(5) 材全体の変形量に対する、鋼板の両端部近くでの局部変形量の割合は、付着力の大きい普通モルタルを充填した場合より、気泡モルタルを充填した場合の方が、小さいが、気泡モルタルは圧縮強度が低く、鋼板の拘束効果という面から充填材として好ましくない。

参考文献

- 1) 木村, 武田, 他: プレキャストコンクリート耐震壁の開発研究 (その2), 大林組技術研究所報, No. 14, (1977), pp. 14~18
- 2) 木村, 武田, 他: プレキャストコンクリート耐震壁の開発研究 (その3), 大林組技術研究所報, No. 18, (1979), pp. 6~10
- 3) B. Yanev and A. Gjelsivik: Buckling of short steel columns, A.S.C.E. ST11, (1977. 11)
- 4) 木村, 武田: プレキャスト耐震壁の実験的研究 (その4), 日本建築学会関東支部51年度研究発表会研究報告集, pp. 261~264