

高性能硬質ポリウレタンフォームにより小型・軽量化した座屈拘束ブレース

BUCKLING-RESTRAINED BRACES USING HIGH PERFORMANCE HARD POLYURETHANE FOAM

村井正敏 —*1 金木洋平 —*2
南野 久 —*3 大石不二夫 —*4
岩田 衛 —*5

Masatoshi MURAI —*1 Youhei KANEKI —*2
Hishashi NANNO —*3 Fujio OISHI —*4
Mamoru IWATA —*5

キーワード：
耐震・制振部材, 座屈拘束ブレース, 硬質ポリウレタン, 軽量化, 性能評価

Keywords:
Seismic and vibration control members, Buckling-restrained brace, Hard polyurethane, Lightening weight, Performance evaluation

The authors developed a buckling-restrained brace for using steel framed houses. The buckling-restrained brace is small-sized and light-weighted with a restraining part of hard polyurethane or mortar. Conducting static and cyclic axial loading tests, elastoplastic and stiffening properties are defined. Specimens with the restraining parts of various restraining forces were fabricated. The authors consider the test data on cumulative ductility factors and cumulative plastic strain energy, and evaluate its performance.

1. 序

1995年の阪神・淡路大震災では、死者の多数が建築物等の倒壊による圧死であると推定され、この約8割が住宅において発生している。この主な原因として、ブレースが付いていない、または有効に機能しなかったことなどが挙げられる。

建築構造物の地震時のエネルギーを効率よく吸収する耐震・制振部材の一つに座屈拘束ブレースがある。しかし、中高層建築物には多く使用されているが、低層建築物を対象として小型・軽量化を図ったものは、まだ技術開発されていないのが現状である。この座屈拘束ブレースを住宅などの低層建築物にも適用させるため、拘束材の充填材料として、軽量で強度にすぐれ、かつ制振効果もある高性能硬質ポリウレタンフォーム(以下、ウレタンと呼ぶ)を用いることを考えた。

本研究では、座屈拘束ブレースを鉄骨住宅の耐震・制振ブレースとして実配置することを想定し、小型・軽量化した座屈拘束ブレースの試験体を製作する。この試験体に対して静的な繰返し軸方向載荷実験を行い、従来のように拘束材料にモルタルを用いた試験体との比較により、弾塑性性状、補剛性状を確認する。また、累積塑性変形倍率、累積塑性歪エネルギーなどを考察し、性能評価を行う。さらに、住宅などの低層建築物への適用性について検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体

鉄骨住宅のパネルにK形、ひし形に配置することを想定し(図1)、座屈拘束ブレース長さ1011mm(エネルギー吸収部長さ531mm)、拘

束材長さ690mmとする。試験体一覧を表1、試験体形状を図2に、断面を図3に示す。M0,M1,M2試験体は、従来のモルタル試験体で芯材にはアンボンド材に代わり0.1mm厚のテフロンを貼付する。U0,U1,U2,U3,U4試験体は、ウレタン試験体で1体を除きモルタルと同様に0.1mm厚のテフロンを貼り付ける。芯材厚4.5mmのM0,U0試験体を基本とし、M1,U1試験体を3.2mm、M2,U2試験体は6.0mmと変化させる。U3試験体はU0試験体のウレタン高さhを+2mmとして拘束力を高めた試験体、U4試験体はU0試験体のテフロン材を貼付しない試験体で、それぞれ性能比較を行う。

断面2次モーメントIの算出にあたっては、ヤング係数を比較するとモルタルは鋼の約1/10であり、これらは引張側では剛性に寄与しないことから、本論ではモルタルは1/20を乗じている。さらに、ウレタンはモルタルの約1/12を考慮して算出する。

素材試験結果、芯材の降伏荷重 P_y (断面積Aに素材試験より求めた σ_y を乗じた値)と拘束材の座屈荷重 P_E (座屈長さ l を芯材の材長1011mmとしてオイラー座屈荷重式から算出した値)の計算耐力を表2に示す。

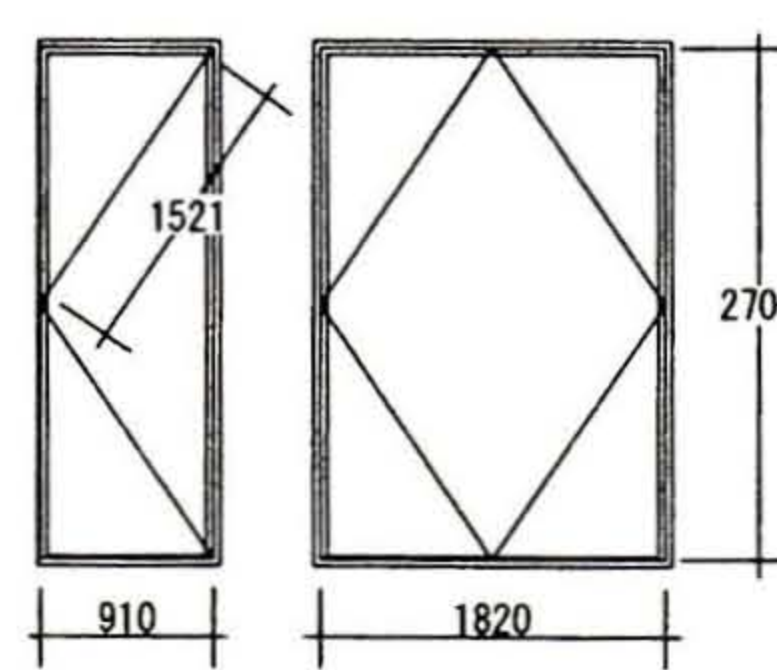


図1 鉄骨住宅パネル

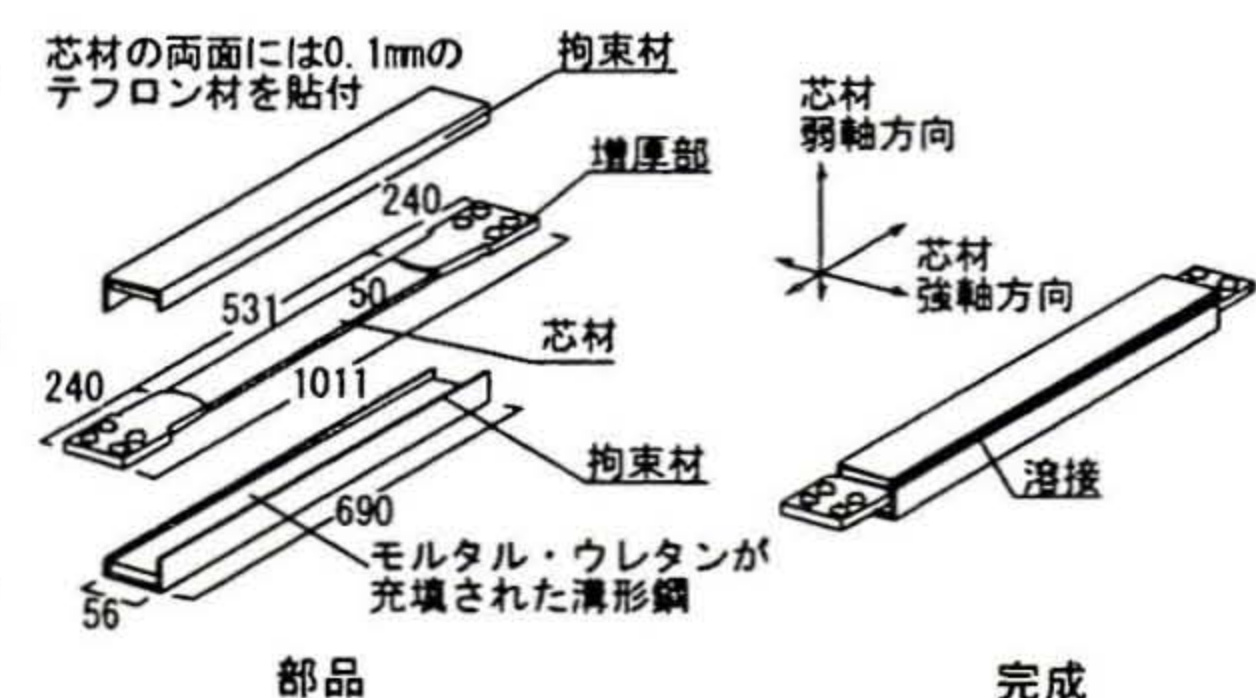


図2 試験体形状

*1 神奈川大学工学部建築学科 主任技術員
(〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋3-27-1)

*2 神奈川大学工学研究科 大学院生

*3 日本ポリウレタン工業(株) 主任研究員

*4 神奈川大学理学部化学科 教授・工博

*5 神奈川大学工学部建築学科 教授・工博

*1 Technician, Dept. of Architecture and Building Eng., Kanagawa Univ.

*2 Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Eng., Kanagawa Univ.

*3 Chief Researcher, Nippon Polyurethane Industry Co., Ltd.

*4 Prof., Faculty of Science, Kanagawa Univ., Dr. Eng.

*5 Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., Kanagawa Univ., Dr. Eng.

表 1 試験体一覧

試験体	芯材			拘束材					総重量 kg		
	寸法 mm (材質:SPHC)	断面積 mm ²	幅厚比	溝形鋼寸法 mm (材質:SPHC)	$I \times 10^4$ mm ⁴	充填材料	B mm	h mm		H mm	
M0	PL-50×4.5	225	11	[-56×20.6×32×2.0]	9.01	モルタル	58	14.0	36.7	8.45	
U0						ウレタン				7.50	
M1	PL-50×3.2	160	16	[-56×19.3×32×2.0]	8.35	モルタル			35.4	7.95	
U1						ウレタン				7.00	
M2	PL-50×6.0	300	8	[-56×22.1×32×2.0]	9.82	モルタル			38.2	8.95	
U2						ウレタン				7.90	
U3	PL-50×4.5	225	11	[-56×22.6×36×2.0]	10.65	ウレタン			16.0	40.7	7.70
U4				[-56×20.6×32×2.0]	8.23				14.1	36.9	7.40

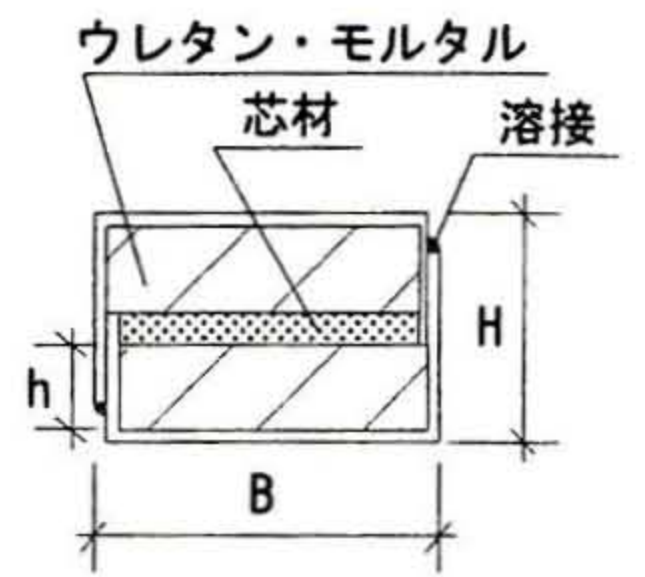


図3 試験体断面

2.2 ウレタンの特徴

ウレタンは、ポリオールとイソシアネートとの反応により生成する。イソシアネートは非常に活性が高く、速やかに水と反応し二酸化炭素を発生する。また、調整次第では、自己重合し非常に強固なイソシアヌレート構造を形成する。これら材料の構造、配合量を制御することで、硬質から軟質まで自在に調整することができ、幅広い性能・用途に使用できることが特徴である。

本研究で使用したウレタンは、ポリオール、イソシアネート及び水との反応により処方され、構造的に非常に硬質となるように物性調整(配合比:イソ/ポリ=295/100 Index=450)を行った。イソシアネートは、ジフェニルメタンジイソシアネート(MDI)とポリメリックMDI(P-MDI)の混合系を使用した。ポリオールは、末端に水素基(-OH)を2個以上有する化合物であり、ポリエーテルポリオール、ポリエステルポリオールの鎖状を変えたものを数種混合して使用した。このウレタンは、現場での反応・発泡を同時に行うことができ、硬化時間は90秒程度に調整した。このため、モルタル試験体の製作と異なり、簡単に充填することができ、短時間で期待する強度を得ることができる。また、拘束材料にウレタンを用いることにより、モルタル試験体に比べ総重量の13%程度軽減でき、制振効果も期待できる。

2.3 載荷方法

実験装置を図4、載荷パターンを表3に示す。載荷は200kN アクチュエータを使用し、柱下部をピン支持とする。試験体は芯材弱軸方向が載荷軸面内になるようにして45度方向に設置する。

実験モデルの設定に関しては既往の研究¹⁾²⁾と同様、芯材に生じる塑性歪は、骨組みに対して45度方向に座屈拘束ブレースを設置したときの層間変形角のラジアン値にほぼ等しくなるように設定している。この場合、中地震動(地動最大速度 25cm/s)に対応して想定されている層間変形角 1/200 相当の芯材の歪は0.5%となり、大地震動(地動最大速度 50cm/s)に対応して想定されている層間変形角 1/100 相当の芯材の歪は1.0%である。

載荷は正負交番漸増繰返しとし、軸方向変位により制御する。載荷パターンは芯材の降伏歪 ϵ_y の1/3、2/3を各1回、芯材の0.25%歪を1回、0.5%、0.75%歪を各2回、1.0%歪を5回、1.5%、2.0%、2.5%歪を各2回載荷し、3.0%歪を耐力低下または引張破断するまで繰返し行う。圧縮側載荷で耐力低下した場合、引張側での耐力を確認するため、再び耐力低下または引張破断するまで行う。

3. 実験結果

3.1 復元力特性

実験結果を表4に示す。モルタル M0 試験体は、3.0%歪 4 回目圧

表 2 計算耐力

試験体	芯材			拘束材 P _E kN	ウレタン・モルタル		P _E /P _y
	σ_y N/mm ²	P _y kN	ϵ_y %		圧縮強度 N/mm ²	ヤング係数 N/mm ²	
M0	243.9	54.9	0.12	179	73.4	185	3.3
U0				166	61.0	16.4	3.0
M1	205.4	32.9	0.10	166	73.4	185	5.1
U1				154	61.0	16.4	4.7
M2	248.0	74.4	0.12	195	73.4	185	2.6
U2				180	61.0	16.4	2.4
U3	243.9	54.9	0.12	212	61.0	16.4	3.9
U4				164			3.0

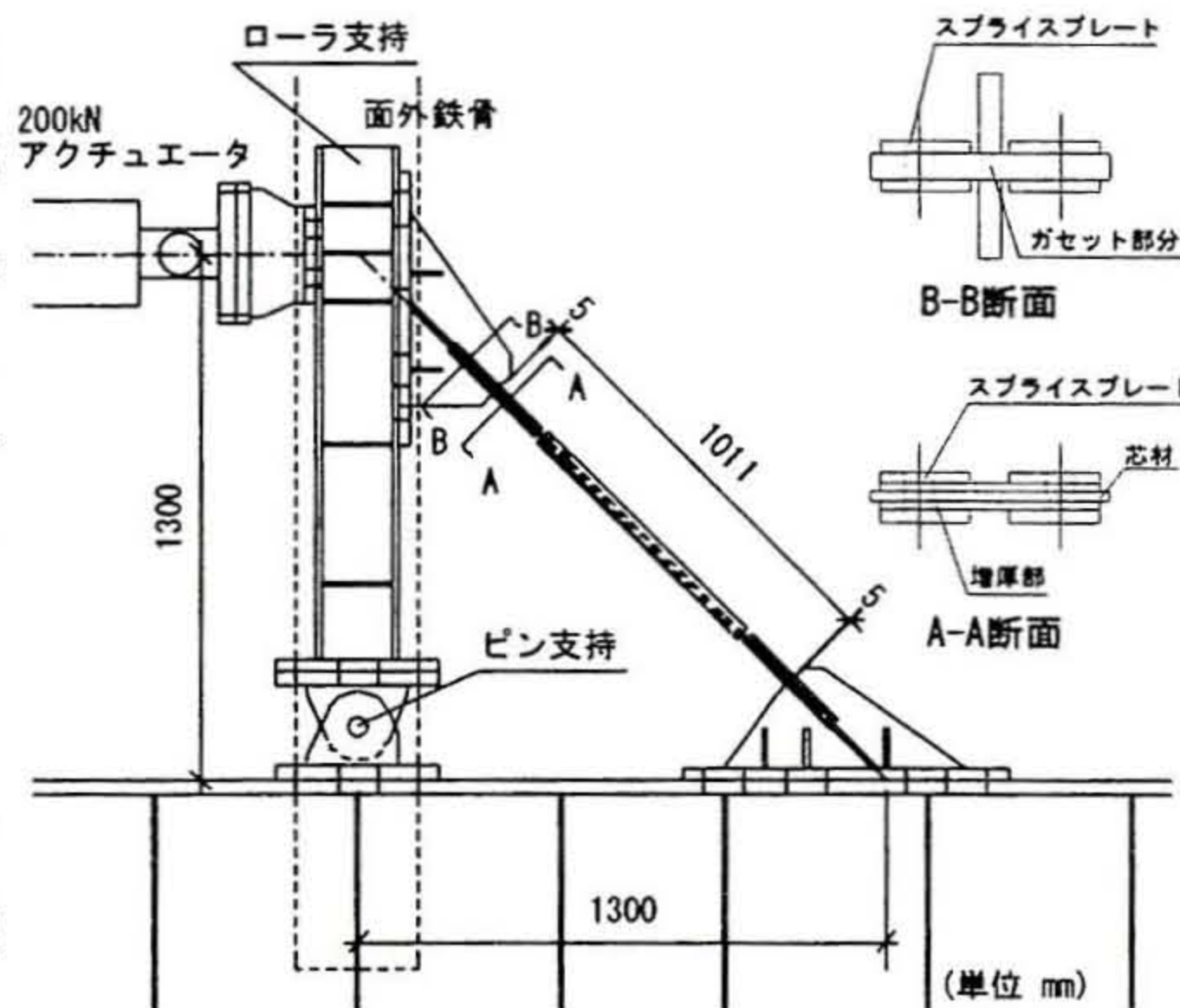


図 4 実験装置

表 3 載荷パターン

芯材の歪 ϵ [%]	回数	層間 変形角
$\epsilon_y/3$	1	
$2\epsilon_y/3$	1	
0.25	1	
0.5	2	1/200
0.75	2	
1.0	5	1/100
1.5	2	
2.0	2	
2.5	2	
3.0	-	1/33

表 4 実験結果

試験体	最大耐力 kN		実験結果				
	引張	圧縮	歪 %	回数	正負	状態	座屈モード数
M0	74.7	92.5	3.0	6	引	引張破断	10
U0	78.8	131	2.5	1	圧	部材座屈	6
	79.1	131	2.5	2	圧		
M1	51.1	60.2	3.0	1	圧	局部変形	12
	51.1	60.2	3.0	3	引	引張破断	
U1	57.2	102	2.0	2	圧	局部変形	-
	58.8	102	2.5	1	圧		
M2	115	133	3.0	6	圧	局部変形	6
	115	133	3.0	8	引	引張破断	
U2	109	157	2.0	2	圧	部材座屈	-
	112	157	2.5	1	圧		
U3	74.5	130	2.5	1	圧	部材座屈	8
	77.8	130	2.5	2	圧		
U4	75.6	133	2.5	1	圧	部材座屈	6
	76.9	133	2.5	2	圧		

M0を除く各試験体において上段が耐力低下時、下段が載荷終了時を示す

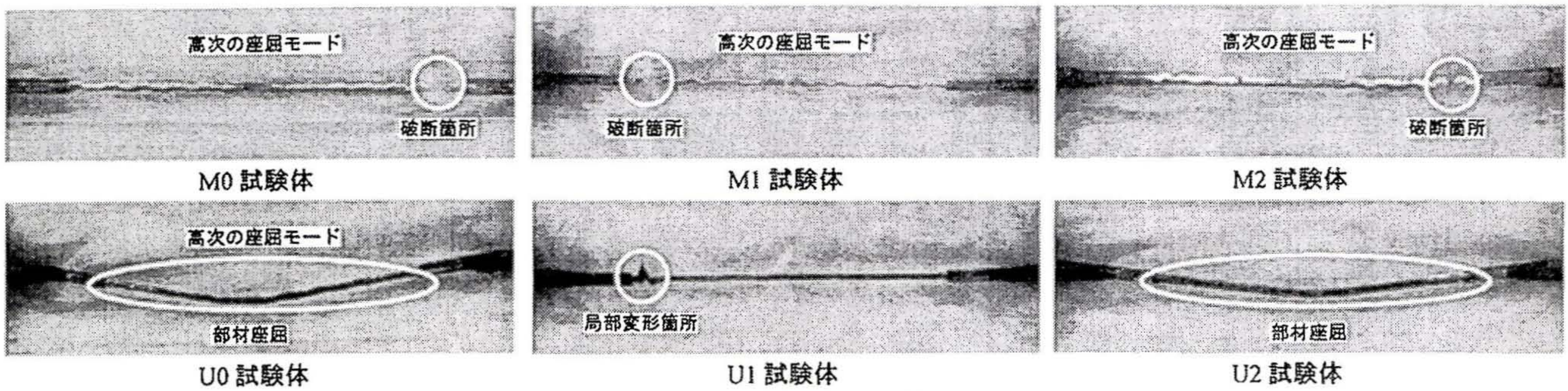


写真1 芯材の最終状態

縮側において、試験体下部で弱軸の局部変形が見られたが耐力は保持した。M1試験体は、3.0%歪1回目圧縮側において、試験体上部で弱軸方向の局部変形により耐力低下し、3.0%歪3回目引張側において引張破断した。M2試験体は、3.0%歪6回目圧縮側において、試験体下部で弱軸方向の局部変形により耐力低下し、3.0%歪8回目引張側において破断した。ウレタンU0試験体は、2.5%歪1回目圧縮側において、部材全体が「く」の字に座屈して耐力低下した。2.5%歪2回目引張側での耐力保持を確認し、圧縮側で座屈が進行して耐力が低下したため実験を終了した。U1試験体は、2.0%歪2回目圧縮側において試験体上部で局部変形し、拘束材端部の溶接に亀裂が入り耐力が低下した。2.5%歪1回目引張側での耐力保持を確認し、圧縮側でさらに変形が進み耐力が低下した。U2試験体は、2.0%歪2回目圧縮側において、部材全体が「く」の字に座屈して耐力が低下した。2.5%歪1回目引張側での耐力保持を確認し、圧縮側で再び座屈して耐力が低下した。U3、U4試験体は、ともに、2.5%歪1回目圧縮側において、部材全体が「く」の字に座屈して耐力が低下した。2.5%歪2回目引張側での耐力保持を確認し、圧縮側で再び座屈して耐力が低下した。

3.2 最終状態

実験後、各試験体の拘束材を取り除き、芯材の状態を確認した。各試験体の芯材の最終状態を写真1に示す。写真は、芯材板厚(強軸)方向から撮影し、芯材弱軸方向変形の最終状態を表している。

1. モルタル試験体

モルタル試験体は、芯材が薄いものほど高次の座屈モード(芯材の表面が緩やかに波打つ変形、写真1)が均一に確認でき、厚いものほど芯材の幅にくびれ等の変化が確認できた。いずれの試験体も載荷終了時に局部変形が見られた位置が引張破断位置となっていた。

2. ウレタン試験体

ウレタン試験体は、芯材厚さ4.5mmで部材座屈したU0試験体に座屈モードが確認できた。芯材厚さ3.2mmのU1試験体は、局部変形した箇所のみ座屈し、モルタル試験体の局部変形とは異なり他の箇所に座屈モードは見られない。また、芯材厚さ6.0mmのU2試験体は、部材全体の座屈のみで座屈モードは見られなかった。

3. 性能比較の試験体

ウレタン高さhを+2mmとしたU3試験体は、U0試験体よりも座屈モード数が多く確認できた。これはウレタン高さを増すことにより拘束力が高められた効果と見られる。

テフロン材を貼付していないU4試験体は、0.1mm厚のテフロン材を貼付したU0試験体とほぼ同じ最終状態であり、座屈モード数はともに6であった。

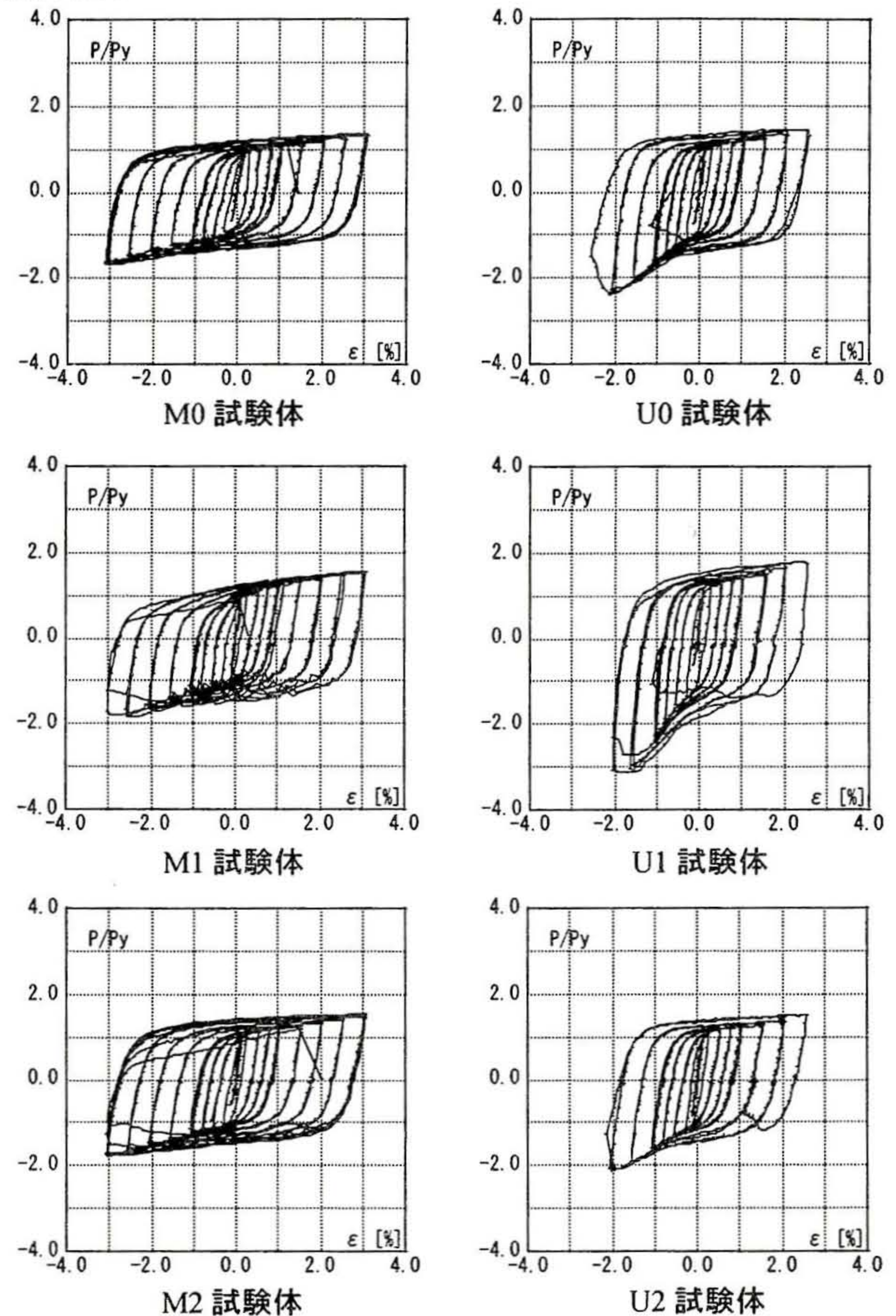


図5 P/Py-歪ε関係

4. 考察

4.1 復元力特性

各試験体のP/Py(P:芯材の軸方向荷重、Py:芯材の降伏荷重)と歪ε関係を図5に示す。モルタル試験体は、3.0%歪まで安定した履歴ループを描いており、全て芯材弱軸方向への局部変形をした後、引張破断により実験を終了をした。ウレタン試験体は、0.75%付近から圧縮側の耐力が高くなる傾向があり、U1試験体を除いて部材座屈した。これは、ウレタンがモルタルに比べて剛性が低いため、芯材が座屈するとウレタンを圧縮し、溝形鋼に接触しているものと考えられる。しかし、層間変形角1/200相当の0.5%歪載荷まで安定した復元力特性を示した。

U1試験体は、局部変形による拘束材端部の溶接部に亀裂が入ることにより耐力低下し、引張側載荷での耐力保持を確認して実験を終了しているが、部材座屈した他のウレタン試験体に比べ、徐々に圧

縮側の耐力が低下した。実験では部材座屈よりも局部変形の方が、圧縮側における耐力を保持している。M0 試験体は、局部変形が見られたが引張破断して実験を終了した。この時の復元力特性は十分安定しているが、破断前の荷重では徐々に圧縮側の耐力が高くなり、引張側の耐力は若干低下した。モルタル試験体とウレタン試験体ともに、芯材が厚くなるほど圧縮側における履歴ループが安定している。これより、芯材が厚い方が安定したエネルギー吸収となる。

モルタル M0 試験体とウレタン U0 試験体の P/P_y と歪 ε 関係を比較すると、ウレタン試験体は 0.75%歪から圧縮側において耐力が高くなる。これは、ウレタンがモルタルに比べ剛性が低く、早い段階で拘束材に接触しているものと考えられる。

U0 試験体と U3 試験体の比較では、耐力低下時と実験終了時の荷重歪回数は同じであり、明確な差がなかった。しかし、ウレタン高さ h を +2mm とした U3 試験体は、耐力低下後も再び圧縮側の耐力をやや保持し、芯材の座屈を拘束する拘束力に若干の差が出ている。ウレタン高さをさらに高く、 P_E/P_y (P_E : 拘束材のオイラー座屈荷重、 P_y : 芯材の降伏荷重) を大きくした試験体での検討が必要である。

U0 試験体と U4 試験体では、ほぼ同じ結果であった。これから、ウレタン試験体はテフロンを貼付しない場合でも、ウレタンと芯材との付着性を考慮しなくてもよいものとする。しかし、テフロンを貼付しない U4 試験体の方が、やや安定していたが、座屈後の耐力低下が早かった。M2 試験体は、局部変形により耐力低下したが、繰返し荷重歪回数が多かった。これは、芯材の最終状態において芯材幅にくびれ等の変化が見られたことから、芯材弱軸方向の変形だけでなく他の箇所でもエネルギー吸収したためであると考えられる。また、同じように局部変形した M1, U1 試験体では、この芯材幅方向の変化は見られなかった。

モルタル試験体は、ウレタン試験体に比べ、繰返し荷重歪回数が多くエネルギー吸収性能が高い。さらに、芯材が厚くなるほどこの性能の差が明瞭である。これは、モルタルがウレタンに比べ剛性が高く、芯材の座屈を拘束して、エネルギーを効率よく吸収しているからである。また、モルタル試験体は 1.0%の高歪状態の繰返し荷重まで復元力特性がほぼ同じであることが、高いエネルギー吸収と関係しているものとする。

4.2 性能評価

各試験体の累積塑性歪エネルギー E_t 、累積塑性変形倍率 η 、累積塑性歪エネルギー率 $\omega(E_t/(P_y \times \text{弾性限界変形量 } \delta_y))$ を算出し、性能評価を表 5 に示す。また、既往の座屈拘束ブレースの研究²⁾に従って、図 6 に ω - P_E/P_y 関係と性能評価式($\omega=150 \times P_E/P_y$)との関係を示す。

座屈後、荷重を繰り返した試験体は、圧縮側において耐力低下しても引張側では耐力を保持しているため、耐力低下時に比べ η 、 ω は荷重終了時の方が性能が高くなる。

モルタル試験体は、芯材が厚いほど安定した履歴ループを繰り返して高い性能が得られたが、最終的に引張破断して、芯材の弱軸方向の部材座屈・局部変形をベースとした性能評価の最小値を示す性能評価式から上に外れる結果にも準じていた。

部材座屈したウレタン試験体は、ほぼ性能評価式に近似した結果となり、これまでの部材座屈・局部変形したモルタル充填の座屈拘束ブレースと同様に性能評価することができる。

表 5 性能評価

試験体	E_t (kN・m)	η	ω	P_E/P_y
M0	41.0	450	992	3.3
U0	20.5	209	497	3.0
	23.2	236	562	
M1	15.7	342	788	5.1
	18.4	403	926	
U1	12.9	215	647	4.7
	14.6	246	733	
M2	66.2	442	1106	2.6
	72.5	494	1213	
U2	23.3	165	390	2.4
	25.9	182	433	
U3	19.5	206	472	3.9
	22.9	238	553	
U4	20.4	207	493	3.0
	22.9	232	555	

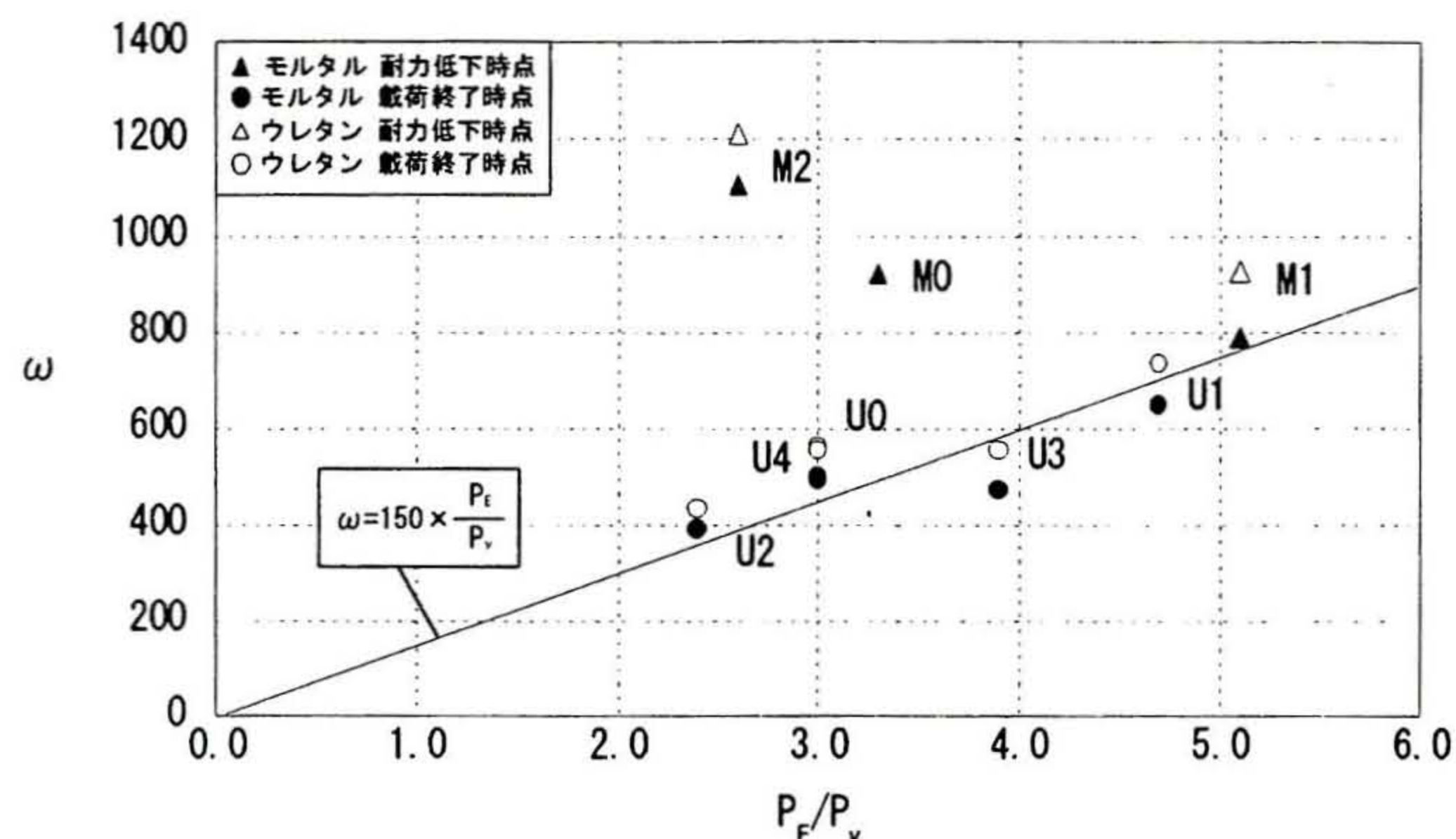


図 6 ω - P_E/P_y 関係

5. 結

本研究において、鉄骨住宅の耐震・制振ブレースとして実配置するウレタンを用いた小型・軽量の座屈拘束ブレースを製作し、繰返し軸方向荷重実験を行い、以下の結果を得た。

- 1)ウレタン試験体は、モルタル試験体に比べ、拘束材料の充填が簡単であり、短時間で期待する強度を得ることができ、また、最大で総重量の 13%程度軽量化できる。さらに、テフロン材を貼付しないことで、製作がより簡易となる可能性がある。
- 2)ウレタン試験体は、0.75%歪の荷重から圧縮側において耐力が高くなるが、0.5%歪荷重まで安定した復元力特性が確認できた。これにより、レベル 1 地震動に対応する層間変形角 1/200 相当まで、住宅などの低層建築物を対象とした座屈拘束ブレースとして適用できる可能性が高い。

謝辞

本研究を進めるにあたり、神奈川大学学部生(当時)西島菜実子氏、三谷淳氏、吉田佳緒里氏、同大学院生村瀬亮氏のご協力を得ました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 小林史典、村井正敏、和泉洋次、岩田衛：鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究—その 2 製作簡易化と芯材幅厚比の変化—、日本建築学会構造系論文集、第 586 号、pp187-193、2004 年 12 月
- 2) 岩田衛、村井正敏、小林史典：鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレース 履歴ダンパーとしての性能評価、その 2 鉄構技術、Vol.18, NO.204、pp.38-44、2005 年 5 月

[2006年10月19日原稿受理 2007年2月19日採用決定]