

アンボンドブレースの動的性能に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON DYNAMIC BEHAVIOR OF UNBONDED-BRACES

長谷川久巳 —*1 竹内 徹 —*1
岩田 衛 —*2 山田 哲 —*3
秋山 宏 —*4

Hisami HASEGAWA —*1 Toru TAKEUCHI —*1
Mamoru IWATA —*2 Satoshi YAMADA —*3
Hiroshi AKIYAMA —*4

キーワード：
鋼構造, 履歴ダンパー, 動的性能, 振動実験, 塑性疲労

Keywords:
Steel structure, Hysteretic damper, Dynamic behavior

In applying dampers on structures for reducing response against seismic forces, confirming dynamic performances of such dampers are essential for guaranteeing safety of whole structural system. In this paper, axial-type elasto-plastic dampers (Unbonded Braces) are examined on full-scale dynamic test-system using shaking table with real-time response against recorded earthquake shake. As a result, dynamic performances of whole system of this type of dampers, including effect of restraint encasement, welding, local buckling, local bending etc., are confirmed and reported. The test covers maximum axial stress up to 7.2%, and cumulative plastic-ratio up to 1,400.

1. 序

阪神大震災における鋼構造骨組の梁端部の損傷およびこれらの建築物の破壊形式が経済に与える損失の反省より, 地震時のエネルギーを取り替え可能な履歴ダンパーに集中させ, 建物主体構造を支持する構造をできる限り弾性域に留める設計法が一般的に使用されるようになってきている。この考え方は筆者らが提唱した柔剛構造¹⁾や損傷制御構造²⁾の一応用例と考える事ができる。

上記設計においては, 履歴ダンパーはレベル1以下の小地震から塑性化させ履歴減衰を発揮させることにより, 主構造をレベル2近くまで弾性域にとどめることが可能となる。このことにより主構造の梁端部の歪は従来構造に比べ大幅に低減され, 梁端部の損傷を回避するのに効果的となる。その一方で履歴ダンパーの塑性率・累積塑性率はレベル2入力に対しそれぞれ10~20, 40~80に達し, 平均歪速度も通常構造部の2~3倍に達するなど, 従来構造材に比較しかなり過酷な入力を受けることになる。このような構造の要となるダンパーについては, その静的性能の検証³⁾や繰返し疲労性能の確認⁴⁾等は行われてきたが, 構造物の安全性の確保のためにはその動的塑性変形能力の検証が必須である。特に履歴ダンパーに局部座屈等による応力集中や溶接部の脆性破壊の可能性が予想される場合には, 素材試験だけでなくダンパー全体の動的試験を行わなければ総合的な検証を行ったことにならない。

本論では筆者らが提案した動的実験法⁵⁾により, 軸降伏型履歴ダンパーであるアンボンドブレース(鋼管コンクリートによる座屈拘束筋違)の動的大変形実験を行い, 記録地震波応答入力に対する同履歴ダンパーの動的加力下における最大変形能力および累積変形能力の検証を行い報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体形状

試験体はブレースとして使われる原寸サイズとした。試験体に用いたアンボンドブレースは, 芯となるプレート(鋼管とコンクリート)によって拘束することにより座屈させないようにしたブレースで, その形状を図1, 写真1に示す。試験体は同一形状の2体で, No.1およびNo.2試験体とする。部材中央部の芯材断面は板厚22mm, 幅130mm, 材質は一般構造用圧延鋼材SS400で, 降伏点は274N/mm², 引張り強さは439N/mm²である。また, 試験体長さ(芯材長さ), 座屈拘束部(鋼管コンクリート)長さおよび塑性化部長さは, それぞれ2351mm, 1591mm, 1291mmである。

2.2 実験装置

本実験で用いた実験装置は文献5)で提案した大型振動台上に設置された慣性加力装置である。実験装置の略図を図2, 加力ジグを図3, 全景を写真2に示す。この装置は積層ゴムとその上に設置した合計重量220tonの重錘および加振フレームに接続した試験体によって構成され, 装置の固有周期は2.0秒, 試験体を組み込んだ時の弾性固有周期は0.2秒となっている。この実験装置の重量は, そのほとんどが重錘および加振フレームの重量であり, 積層ゴムと試験体を並列ばねとした「1質点系」と見なすことができる。

2.3 計測装置

実験装置には変位計・加速度計をはじめとする各種センサーを設置し, 試験体の変形状態や実験装置の各部分の挙動を計測する。主要計測項目はピン支持された柱の頂部に作用する水平荷重, 同加力点の水平変位およびブレースの軸変形で, それぞれ加力梁に添付された歪みゲージ, ストロークの大きなワイヤー変位計, 差動ト

*1 新日本製鐵㈱ マネジャー・工修
(〒100-8071 千代田区大手町2-6-3)

*2 神奈川大学 教授・工博(当時新日本製鐵㈱ 部長)

*3 東京工業大学 助教授・工博(当時東京大学 助手)

*4 日本大学 教授・工博(当時東京大学 教授)

*1 Senior Manager, Nippon Steel Corp., M. Eng.

*2 Prof., Kanagawa Univ., Dr. Eng. (Formerly, General Manager, Nippon Steel Corp.)

*3 Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng. (Formerly, Research Assoc., Tokyo Univ.)

*4 Prof., Nihon Univ., Dr. Eng. (Formerly, Prof., Tokyo Univ.)

ランス変位計によって計測する。これらのデータを1/1000秒刻みで計測した後、高周波ノイズを落とすために5ステップ毎の平均値を取って1/200秒刻みのデータとして収録した。

2.4 加振手順

実験においては、まず予備加振として小振幅のパルス波を入力したパルス加振を行い、試験体を含む実験装置全体を自由振動させて固有周期と減衰を計測した。次いで本加振では記録地震波に加速度倍率を乗ずることによって入力レベルを調整し、以下の順序で加振を行った。

- ①弾性加振：試験体が塑性化しない程度の入力を行い、弾性範囲での挙動を調べる。
- ②弾塑性加振：試験体が塑性化するレベルの入力を行う。
- ③終局加振：試験体の終局状態を実現するために十分な強さの波を入力する。

入力波としては、No.1試験体には兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録波(NS成分)を、No.2試験体にはEL CENTRO(1940.5.18)波(NS成分)を用いた。

加振の入力レベルを決定する際には、試験体を含む加振装置を1質点系にモデル化した応答解析を行い、試験体が目標とする状態になるように加速度倍率を設定した。また、最終破壊がNo.1試験体では圧縮側で、No.2試験体では引張り側で生じるように入力波の位相を調整した。各試験体の加振順序を以下に示す。

- No.1試験体(神戸海洋気象台波 NS成分): ①最大速度10cm/sec(引張)
→②最大速度40cm/sec(引張)→③最大速度40cm/sec(圧縮)
→④最大速度70cm/sec(圧縮)
- No.2試験体(EL CENTRO波 NS成分): ①最大速度5cm/sec(引張)
→②最大速度30cm/sec(引張)→③最大速度50cm/sec(圧縮)
→④最大速度70cm/sec(引張)→⑤最大速度90cm/sec(引張)

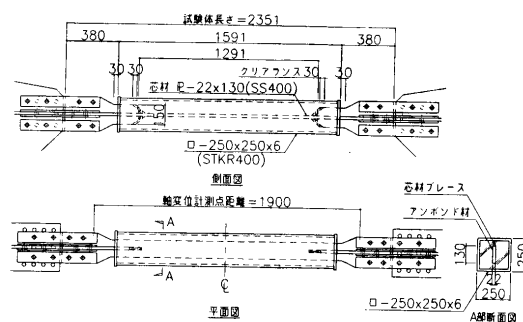


図1. 試験体形状 (単位: mm)

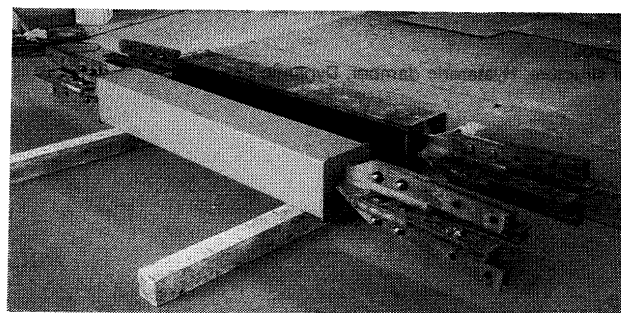


写真1 試験体外観

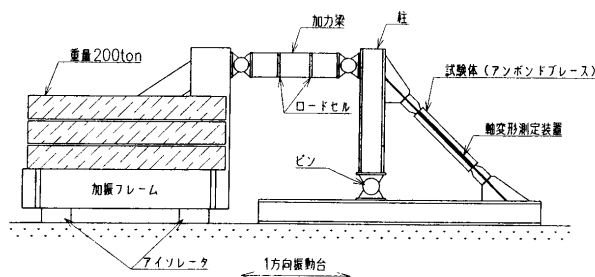


図2 実験装置の略図

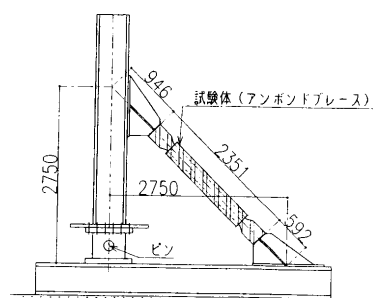


図3 加力ジグ全体図 (単位: mm)

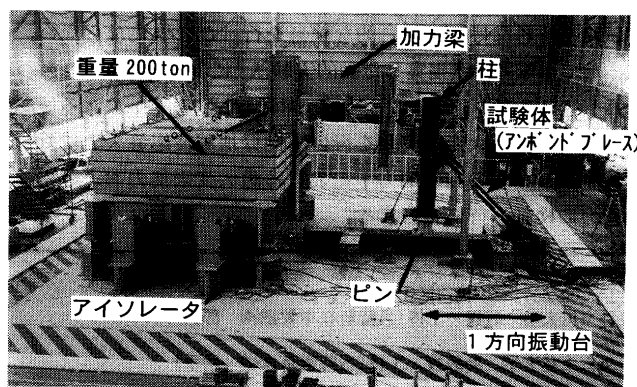


写真2 実験装置全景

3. 実験結果

3.1 荷重-変形関係と実験経過

入力レベルと最大応答値の一覧を表1に示す。また、弾性加振、弾塑性加振、終局加振の各加振ステップでのプレースの荷重-変形関係について、横軸に歪み、縦軸に応力で表し、図4および図5に示す。プレースの軸変形は、入力が40cm/secまでの変形時には差動トランス変位計による測定値を、70cm/sec以上の変形時にはワイヤー変位計による計測値を軸変形に換算して用いている。

1) No.1 試験体 (神戸海洋気象台波 NS成分)

No.1試験体は、ステップ②③の2回の40cm/sec入力に対し安定した履歴ループを示し、引張り側で最大2.6%、圧縮側で2.9%の最大歪が確認された。これらは層間変形角でそれぞれ1/57、1/52であった。

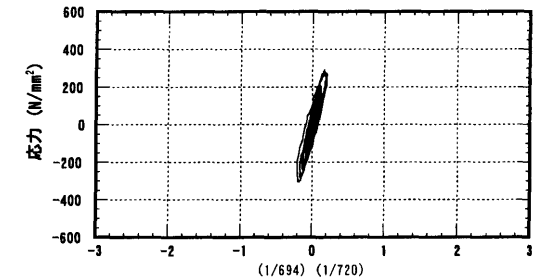
ステップ④の70cm/sec応答に関しては、本試験体の設計上の軸縮み限界値60mm(端部における補強リブと充填モルタルとのクリアランス、軸歪4.6%に相当)以上の軸縮みにおいてリブがモルタルに衝突し耐力上昇を生じさせたが、その後も履歴ループを保持し、最大7.6%の最大圧縮歪(層間変形角で1/20)が確認された。この時点でも芯材の破断や座屈拘束鋼管の局部座屈等の現象は確認されなかった。

2) No.2 試験体 (EL CENTRO波 NS成分)

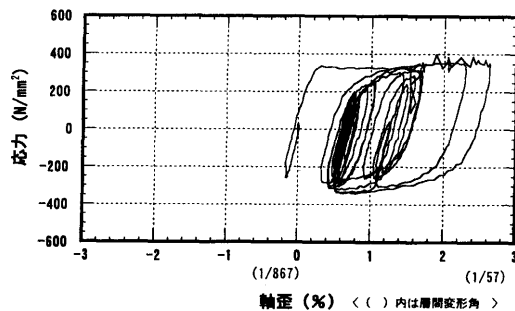
No.2試験体は、②30cm/sec、③50cm/sec、④70cm/secの応答

において安定した履歴ループを示した。

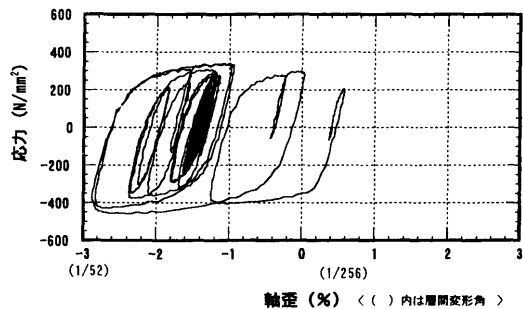
ステップ④の70cm/sec 応答時の最大歪は引張り側で4.4%, 圧縮側で3.1%を示した。層間変形角でそれぞれ1/34, 1/49であった。続く⑤90cm/secの入力に対し, 7.2% (層間変形角で1/20)の履歴ループを経た後に芯材が破断した。破断位置は試験体長さに対し柱側からほぼ1/4の部分であった。芯材破断後は, 柱側芯材が梁側に残った鋼管コンクリートの鞘の中を移動し, 圧縮変形時に破断面どうしが接触する状態が加振終了まで続いた。



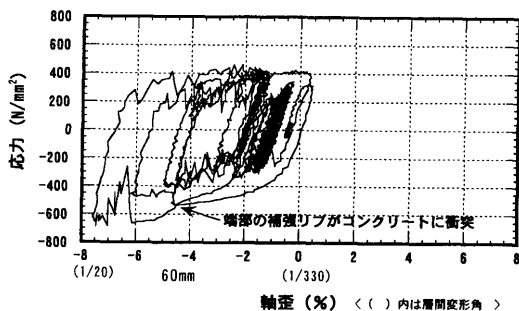
ステップ①: 1 回目加振 (弾性加振 10cm/sec)



ステップ②: 2 回目加振 (弾塑性加振 40cm/sec)

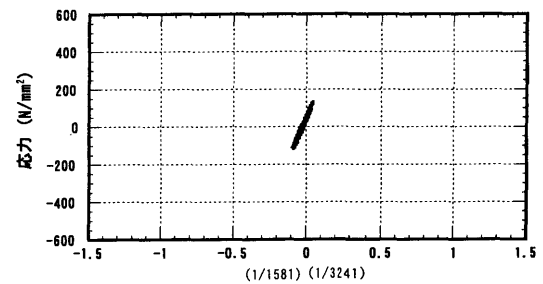


ステップ③: 3 回目加振 (弾塑性加振 40cm/sec (逆位相))

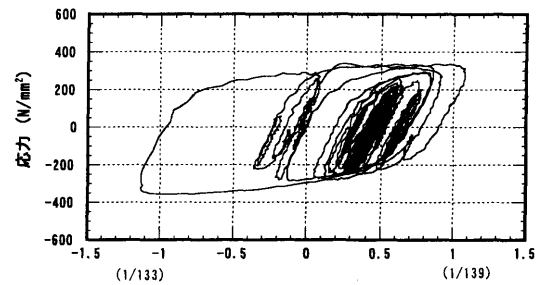


ステップ④: 4 回目加振 (終局加振 70cm/sec (逆位相))

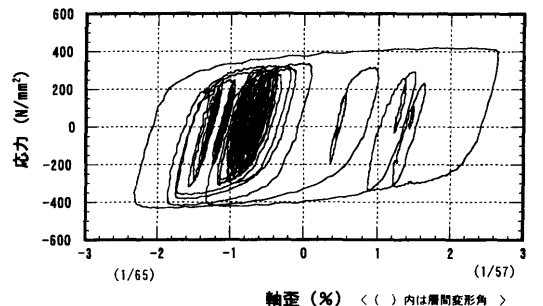
図 4 各加振レベルで得られた荷重 - 変形関係
(No.1 試験体: 神戸海洋気象台波 NS 成分)



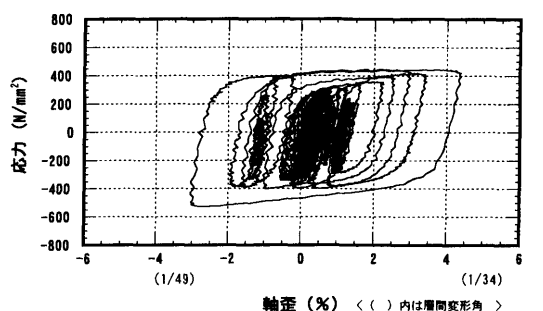
ステップ①: 1 回目加振 (弾性加振 5cm/sec)



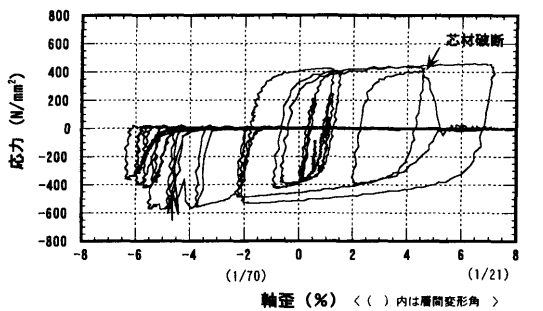
ステップ②: 2 回目加振 (弾塑性加振 30cm/sec)



ステップ③: 3 回目加振 (弾塑性加振 50cm/sec (逆位相))



ステップ④: 4 回目加振 (弾塑性加振 70cm/sec)



ステップ⑤: 5 回目加振 (終局加振 90cm/sec)

図 5 各加振レベルで得られた荷重 - 変形関係
(No.2 試験体: EL CENTRO 波 NS 成分)

3.2 試験終了後の試験体の解体状況

試験後、No. 1, No. 2 両試験体を解体し、座屈拘束鋼管内の芯材の状況を確認した。解体後の芯材の写真を写真3に示す。

圧縮で破壊させたNo. 1試験体は、70cm/sec入力時に生じた端部補強リブとモルタルの接触により、リブとの接触部分のモルタルが圧壊していた。その他の部分においては、モルタル、鋼管ともに変形等は認められなかった。

引張り側で破壊させたNo. 2試験体は、端部の補強リブ先端から5cm程度部材中央寄り（芯材長さの1/4近傍）の芯材部が破断していた。これはリブ先端における応力集中とともにフレームからの曲げが影響したものと考えられる。

両試験体とも芯材に局部座屈は認められず、目視で確認できる波打ち変形も見られなかった。

3.3 エネルギー吸収能力と塑性変形能力

それぞれの試験体の吸収した総歪エネルギー量(Wp)および等価累積塑性変形倍率(ϵ_p)を表2に示す。最終的に破断に至ったNo. 2試験体における等価累積塑性変形倍率は1420であった。

No. 2試験体の実験結果を別途行った実大アンボンドブレースの疲労実験結果⁶⁾⁷⁾上に評価したものを図6に示す。同図は横軸に塑性部最大軸歪(%), 縦軸に累積塑性軸歪量(%)をとり、さまざまな鋼種のアンボンドブレースにおける芯材破断に至るまでの累積変形能力を示す。定常振幅の疲労試験に対し、本実験結果はランダム応答中の最大値を横軸に評価したものであるが、同結果は疲労実験から得られた疲労曲線と良い対応を示しており、本形式のアンボンドブレースにおいては、動的荷重による著しい累積変形能力の低下はみられなかった。

4. 結論

軸降伏型履歴ダンパーであるアンボンドブレース（鋼管コンクリートによる座屈拘束筋違）について実大振動台実験を行った。実験結果から以下の結論を得た。

- 1) 動的な加力に対しても、引張り・圧縮ともに塑性化部における軸歪7%以上の安定した履歴性能が確認された。
- 2) 実地震応答速度加振に対しても、累積塑性率1400以上とダンパーとして十分な累積変形能力を有することが確認され、別途実施した疲労実験結果と良い対応を示した。

謝辞

本研究は、科学技術庁官民特定共同研究「阪神淡路大震災被害に基づく鋼構造建物の終局耐震性能に関する研究」により行ったものである。研究推進は下記の委員会組織により行った。

『鋼構造終局耐震性研究推進委員会』

委員：東京大学(秋山 宏(委員長)、桑村 仁、山田 哲、高橋 誠)、科学技術庁防災科学技術研究所(小川信行、箕輪親宏)、科学技術庁金属材料研究所(松岡三郎、竹内悦男)、東京理科大学(寺本隆幸)、住友金属(加藤征宏、大竹章夫、福田浩司)、清水建設(矢部善堂、真瀬信治、寺田岳彦、熊谷仁志)、大成建設(小倉桂治、泉 満、辻田 修、成原弘之)、東急建設(木村克次、公塚正行、末岡利之、小駒 勲、千葉隆史)、三菱建設(田中宏志、伊藤秀勝、時本和則、藤原秀雄)、日建設計(北村春幸、向野聡彦)、フジタ(三山剛史、佐々木聡)、日本ドライビット(矢幡秀介、村谷昌男、木村公人)、新日本製鐵(岩田 衛、竹内 徹、長谷川久巳)、大林組(高橋泰彦、杉本浩一)

また、本論文で用いた実験結果の記録・整理にあたり、東京大学学生諸氏、大学院生松本山香氏、都立氏の協力を得た。

参考文献

- 1) 秋山 宏：建築物の耐震極限設計 第2版、東京大学出版会、1987年

2) 和田 章、岩田 衛、清水敬三、安部重孝、川合廣樹：建築物の損傷制御設計、丸善、1998年

3) 佐伯英一郎、前田泰史、中村秀司、緑川光正、和田 章：実大アンボンドブレースに関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、pp149-158、第476号

4) 前田泰史、中田安洋、岩田 衛、和田 章：軸降伏履歴ダンパーの疲労特性に関する研究、日本建築学会構造系論文集、pp109-115、第503号

5) 秋山 宏、山田 哲、箕輪親宏、寺本隆幸、大竹章夫、矢部善堂：慣性加力装置を用いた構造要素の実大振動台実験方法、日本建築学会構造系論文集、pp139-146、第505号

6) 前田泰史、中村博志、竹内 徹、中田安洋、岩田 衛、和田 章：実大アンボンドブレースの疲労性能(その1：実験計画と結果概要)、1999年日本建築学会大会(中国) 学術講演梗概集C-1、pp.813-814、1999年9月

7) 中村博志、前田泰史、竹内 徹、中田安洋、岩田 衛、和田 章：実大アンボンドブレースの疲労性能(その2：実験結果)、1999年日本建築学会大会(中国) 学術講演梗概集C-1、pp.815-816、1999年9月

表1 入力レベルと最大応答値一覧

		神戸海洋気象台波 (NS成分)	EL CENTRO波 (NS成分)
①弾性加振 (レベル1)	入力レベル	Vmax=10cm/sec (Amax=91cm/sec ²) 28mm(-0.2%) 1/694	Vmax=5cm/sec (Amax=52cm/sec ²) -1mm(-0.1%) 1/1620
	軸変形(歪) 層間変形角		
	入力レベル	Vmax=40cm/sec (Amax=363cm/sec ²) 34mm(2.6%) 1/57	Vmax=30cm/sec (Amax=311cm/sec ²) -15mm(-1.1%) 1/133
②弾塑性加振 (レベル2)	軸変形(歪) 層間変形角		
	入力レベル	Vmax=-40cm/sec (Amax=-363cm/sec ²) -37mm(-2.9%) 1/52	Vmax=-50cm/sec (Amax=518cm/sec ²) 34mm(2.7%) 1/57
	軸変形(歪) 層間変形角		
③終局加振 (レベル3)	入力レベル	Vmax=-70cm/sec (Amax=-636cm/sec ²) -98mm(-7.6%) 1/20 (コンクリート圧壊)	Vmax=70cm/sec (Amax=724cm/sec ²) 57mm(4.4%) 1/34
	軸変形(歪) 層間変形角		
	入力レベル		Vmax=90cm/sec (Amax=932cm/sec ²) 93mm(7.2%) 1/21 (芯材破断)

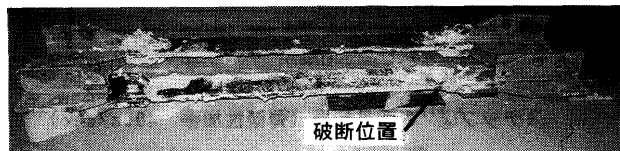


写真3 試験後の解体状況(奥：No.1試験体、手前：No.2試験体)

表2 吸収歪エネルギー(Wp)と等価累積塑性変形倍率(ϵ_p)

No.1試験体：神戸海洋気象台 NS成分

加振レベル	①10cm/sec	②40cm/sec	③40cm/sec (逆位相)	④70cm/sec (逆位相)	合計
Wp(KN・cm)	1426	19459	19477	58740	99102
ϵ_p	9	124	124	374	631

No.2試験体：EL CENTRO NS成分

加振レベル	②30cm/sec	③50cm/sec (逆位相)	④70cm/sec	⑤90cm/sec	合計
Wp(KN・cm)	19179	37257	80444	86069	222949
ϵ_p	122	237	513	548	1421

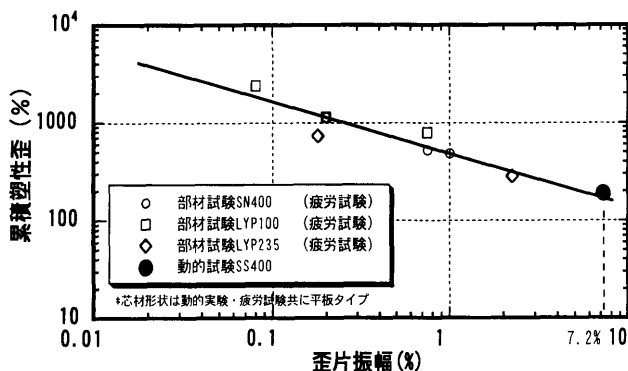


図6 歪振幅と疲労累積歪との関係

[1999年4月20日原稿受理 1999年7月27日採用決定]