

実大アンボンドブレースの疲労性能に関する研究

Fatigue Properties of Practical-Scale Unbonded Braces

中村 博志 ^{*(1)} Hiroshi NAKAMURA	竹内 徹 ^{*(1)} Toru TAKEUCHI	前田 泰史 ^{*(1)} Yasushi MAEDA	中田 安洋 ^{*(1)} Yasuhiro NAKATA
佐々木 孝雄 ^{*(2)} Takao SASAKI	岩田 衛 ^{*(3)} Mamoru IWATA	和田 章 ^{*(4)} Akira WADA	

抄 録

阪神・淡路大震災における鋼構造の梁端損傷などの被害に伴い、履歴型制振ダンパーを低い入力レベルから塑性化させ主体構造を弾性域にとどめる制振構造(損傷制御構造)が注目されつつある。本研究では実大のアンボンドブレースにおける疲労特性について実験的に検討し、履歴型制振ダンパーとして使用したときの限界性能を明らかにすることを目的とする。実験結果より、破断繰り返し回数は相当層間変形角1/100に対して200回程度となり、累積塑性変形倍率からも十分な疲労性能を有していることがわかった。また鋼種(SN400B, LYP100, LYP235)が異なっても同等の疲労性能であることを示した。素材疲労実験や芯材部分モデル実験と比較し、実大アンボンドブレースの疲労性能は芯材局部座屈等の影響により低下することを示した。歪集中を考慮した疲労曲線式を提案し、疲労寿命を概ね推定できることを示した。

Abstract

Damages inflicted on beam ends of steel constructions during the big earthquake in the Hanshin-Awaji area in January, 1995 aroused interest in a damping method (damage controlling method) whereby the main structure portion is kept at the elastic region by use of hysteresis dampers acting plastically from low force input levels. This paper describes studies on performance limits of unbonded braces as hysteresis dampers based on tests on fatigue properties of practical-scale unbonded braces. Tests showed that the number of cycles for causing material failure was approximately 200 when the equivalent story drift angle was 1/100, which result was proof enough that the braces have good fatigue properties in consideration of accumulated plastic deformation factor. This paper also shows that the same fatigue properties can be obtained when different steel grades (JIS SN400B, and Nippon Steel's specifications LYP100 and LYP235) are used for the cores of the braces. From comparative studies with material fatigue tests and model tests of the brace core, the fatigue properties of the practical-scale unbonded braces were found to decrease due to factors such as local buckling of the brace core. A formula is proposed herein for expressing a fatigue curve in consideration of strain concentration and it is demonstrated that the proposed formula can roughly estimate fatigue life of the braces.

1. はじめに

従来の建築物の耐震設計法は、建物の柱や梁の塑性変形による地震エネルギー吸収により耐震性能を確保してきた。しかしながら阪神・淡路大震災においては、人命の損傷を免れても主体構造の残留塑性変形、梁端溶接部の損傷等の被害を受ける例が多発し、被災後の補修の困難さ、財産の損失が問題点として指摘されるようになった。このため、最近では履歴型制振ダンパーなどを主体構造に組み込み、低い入力レベルから塑性化させることによりダンパーに地震エネルギーを集中させ、主体構造は弾性域に留める損傷制御設計(制振設計)が多く採用されるようになってきている¹⁻⁴⁾。本設計により、被災後もダンパーを交換するだけで主体構造を再利用できる可

能性が高くなる。

その一方で、ダンパーは通常の構造部材に比べ、はるかに過酷な条件の繰り返し塑性歪を受けることになる。したがって、塑性領域における履歴型制振ダンパーの低サイクル疲労特性は、最大塑性変形能力とともにダンパーの耐用期間を判定する上で主要な性能となる。これらに関し、これまでに材料レベルから部材レベルにわたり多くの研究成果が報告されている⁵⁻¹⁰⁾。

筆者らは、これまで耐震部材として開発されたアンボンドブレースを履歴型制振ダンパーとして使用する場合の性能に関する研究を行ってきた。本研究では、素材としての疲労実験¹⁾、及びアンボンドブレース芯材についてリブ端溶接部の応力集中を考慮した疲労実

^{*(1)} エンジニアリング事業本部 建築事業部 建築鉄構部 マネジャー
東京都千代田区大手町2-6-3 ☎100-8071 ☎(03)3275-6871

^{*(2)} エンジニアリング事業本部 開発推進部 マネジャー

^{*(3)} 神奈川大学 工学部建築学科 教授・工博

^{*(4)} 東京工業大学 建築物理研究センター 教授・工博

験²⁾に続く最終ステップとして、芯材の拘束材内での局部座屈による歪集中をも考慮したアンボンドプレースの部材としての疲労特性について実験的に検討する。これにより、アンボンドプレースを履歴型制振ダンパーとして使用したときの限界性能が明らかになるものとする。

本報告では、実大のアンボンドプレースについて疲労実験を行うことにより、累積塑性変形性能、破断繰り返し回数及び破断状況について実験的に確認し、プレースの履歴安定性及び疲労破壊性状を明らかにする。また、本実験結果と文献^{1, 2)}の結果との対応関係についても考察する。

2. 実験概要

2.1 鋼材材質

履歴型制振ダンパーとしての性能に優れている鋼材として、芯材には建築構造用圧延鋼材 (SN400B) と 2 種類の低降伏点鋼材 (BT-LYP100, BT-LYP235) の 3 種類を選択した (以下BT-LYPはBTを省略しLYPと称する)。それぞれの鋼材の機械的性質と化学的性質を表 1, 2 に示す。

2.2 試験体の形状

試験体の形状は実際に使用されるアンボンドプレースとほぼ同程

表 1 材料の機械的性質

シリーズ	鋼材質	板厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
TP-1, 2	LYP100	25	95	249	84
TP-3	SN400B	25	259	426	35
TP-4	LYP235	16	239	334	60
TP-5	LYP235	28	222	324	69

表 2 材料の化学的性質

シリーズ	鋼材質	板厚 (mm)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
TP-1, 2	LYP100	25	0.001	0.01	0.07	0.009	0.004
TP-3	SN400B	25	0.16	0.17	0.67	0.020	0.007
TP-4	LYP235	16	0.01	0.01	0.49	0.023	0.010
TP-5	LYP235	28	0.01	0.01	0.49	0.023	0.010

度のサイズとする。試験体詳細図を図 1 に示す。TP-1, 2は芯材にLYP100を、TP-3は芯材にSN400Bを使用している。また、芯材にLYP235を使用しているTP-4, 5は変断面型アンボンドプレースであり、みかけ上の剛性を高めるために部材が塑性化する部位を限定 (通常約1/3)した形状となっている。

2.3 実験パラメーター

試験体の諸元を表 3 に示す。ここで芯材はアンボンドプレースの塑性化する部分を、歪 (ϵ) とはこの芯材の歪を指し、歪振幅 ($\Delta \epsilon$)

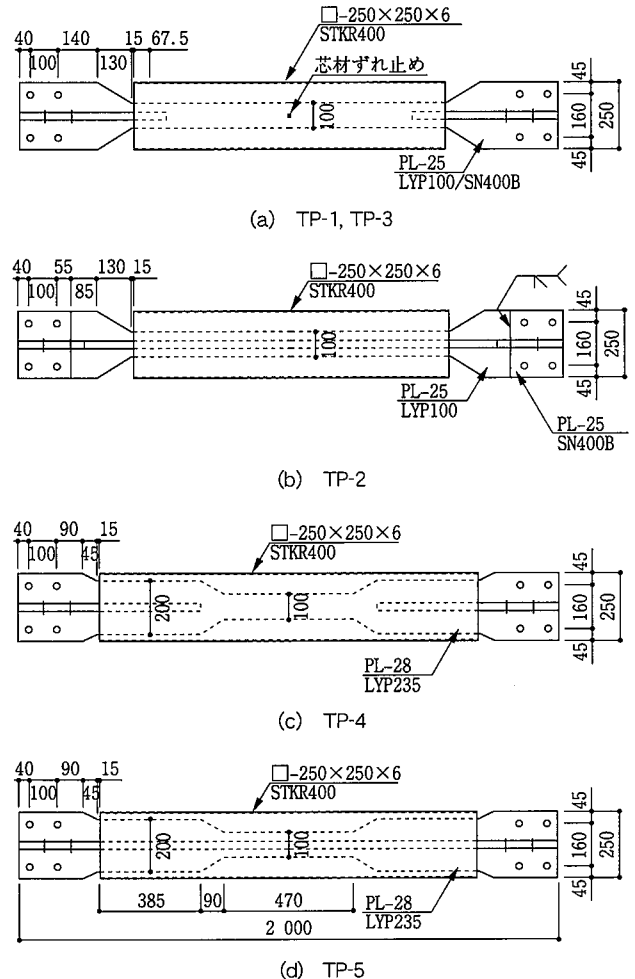


図 1 試験体詳細図 (単位: mm)

表 3 試験体諸元

シリーズ	試験体名	鋼材質	芯材断面形状	芯材板厚 (mm)	芯材幅 (mm)	芯材面積 (cm ²)	部材長 (mm)	芯材長 (mm)	平均歪区 間長(mm)	集中率 α	降伏軸力 (kN)	歪振幅 (%)	歪速度 (%/s)	制御変位 (mm)	相当層間 変形角
TP-1	100-150	LYP100	-	25	100	25	2 000	960	960	1.0	320	1.5	0.1	±7.3	1/100
	100-040	LYP100	-	25	100	25	2 000	960	960	1.0	320	0.4	0.1	±2.0	1/375
	100-016	LYP100	-	25	100	25	2 000	960	960	1.0	320	0.16	0.1	±0.8	1/938
TP-2	100+150	LYP100	+	25	100	44	2 000	1 180	1 180	1.0	563	1.5	0.1	±8.9	1/100
TP-3	400-200	SN400B	-	25	100	25	2 000	960	960	1.0	665	2.0	0.1	±9.8	1/75
	400-150	SN400B	-	25	100	25	2 000	960	960	1.0	665	1.5	0.1	±7.4	1/100
	400-040	SN400B	-	25	100	25	2 000	960	960	1.0	665	0.4	0.1	±2.0	1/375
TP-4	235+150	LYP235	+	16	100	29	2 000	470	1 450	3.1	693	4.3 (1.5)	0.29(0.1)	±10.9	1/100
	235+016	LYP235	+	16	100	29	2 000	470	1 450	3.1	693	0.26(0.16)	0.16(0.1)	±1.2	1/938
TP-5	235-150	LYP235	-	28	100	28	2 000	470	1 450	3.1	669	4.5 (1.5)	0.3 (0.1)	±10.9	1/100
	235-016	LYP235	-	28	100	28	2 000	470	1 450	3.1	669	0.36(0.16)	0.23(0.1)	±1.2	1/938

注: TP-4, 5の()内の値は平均歪振幅, 平均歪速度である。相当層間変形角は、芯材長さが柱・梁交点間距離の1/1.5, プレース角度45°に対応する値である。

は図2に示すように芯材の圧縮歪と引張歪の和をそれぞれ示すものとする。また、端部接合部を除いた部分の軸歪を平均歪(ϵ_a)、平均歪振幅($\Delta \epsilon_a$)と呼ぶものとする。したがって、表3に示すようにTP-1~3では芯材長と平均歪区間長が等しいため歪振幅($\Delta \epsilon_t$)と平均歪振幅($\Delta \epsilon_a$)は等しいが、TP-4, 5では芯材長が短いため歪振幅($\Delta \epsilon_t$)が平均歪振幅($\Delta \epsilon_a$)より大きくなる。表3において制御変位は芯材に所定の歪振幅($\Delta \epsilon_t$)が与えられるように端部の弾性変形を考慮して設定しており、集中度(α)は芯材長に対する平均歪区間長の割合である。

各アンボンドプレースは鋼材材質及び芯材断面形状が異なっているが、これは歪振幅($\Delta \epsilon_t$)を変化させたときの疲労特性を調べるためである。本実験で設定した歪振幅は図3に示す建物の層間変形角(δ/H)に対応させると表3に示すように最大でほぼ1/75に相当する。なお、アンボンドプレースの歪振幅は、端部接合部の影響を考慮し、節点間距離に対し1.5倍の歪集中があるものとして、層間変形角と関連付けている。

2.4 実験方法

140t反力フレームを使用し、200tアクチュエーターにより試験体に軸方向交番荷重を行う。このとき荷重は所定の軸方向変位(軸歪)が生ずるように変位制御しながら作用させる。試験体の下部は反力フレームに完全固定し、試験体上部の水平方向変位は拘束する。荷重状況を写真1に示す。

2.5 荷重計画

荷重サイクルを図4に示す。まず、1ループ目で降伏軸力の50%程度の軸力を荷重させて治具と試験体のならしを行った後、表3に

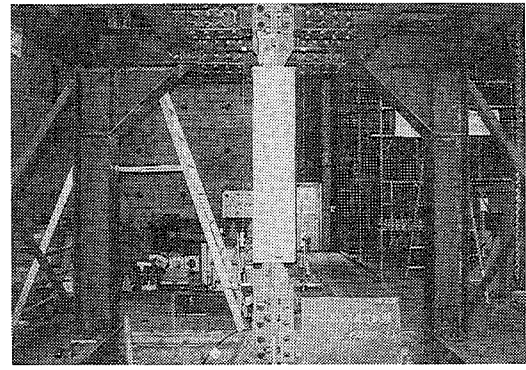


写真1 荷重状況

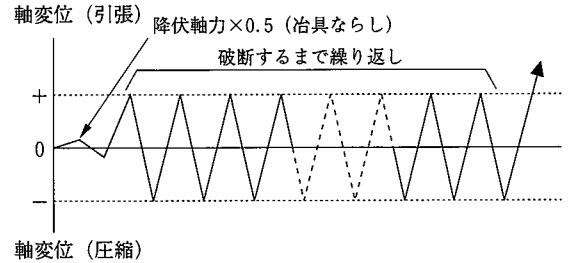


図4 荷重サイクル

示す制御変位を変位制御(歪速度一定)で繰り返し与え、芯材が破断するまで続ける。このとき荷重開始時には徐々に軸変位を増加させて目標とする制御変位に到達させているため、繰り返し回数は、制御変位が目標とする所定の値に到達したサイクルから計算するものとする。

3. 実験結果と考察

3.1 軸力の推移

TP-1~5の各シリーズにおいて、応力範囲($\Delta \sigma$)と繰り返し回数(N)の関係を図5(a)~(d)に示す。何れの実験結果においても、繰り返し荷重中において極端な応力変動を生じていないことがわかる。なお、各試験体とも1サイクル目から歪硬化した応力になっているのは、目標とする所定の制御変位に到達する以前に数回の繰り返し増分荷重を行い、目標変位に到達させているためである。また、目標とする制御変位に到達する以前の回数は、破断繰り返し回数には考慮していない。

3.2 復元力特性の推移

試験体100-150について、最大軸力時及び破断繰り返し回数(N_f)時の応力(σ)–歪(ϵ)関係を図6に示す。同図より最大軸力付近と破断繰り返し回数時の応力–歪関係がほぼ同形状のループを示していることがわかる。この傾向は他の試験体についても同様であった。これは、破断繰り返し回数が、荷重を保持できなくなった時点(ループが極端に変形し、閉曲線とならなくなった回数)で決定されているためである。筆者らの報告²⁾においてみられた破断繰り返し回数(N_f)が最大荷重の75%で決定されるケースは3ケースのみであった(表4参照)。

3.3 破断繰り返し回数

各試験体の破断繰り返し回数(N_f)を表4に示す。ここで N_f は最大軸力の75%まで軸力が低下したサイクル数、あるいは破断によって復元力特性が不安定になったサイクル数のうち小さいサイクル数とした。

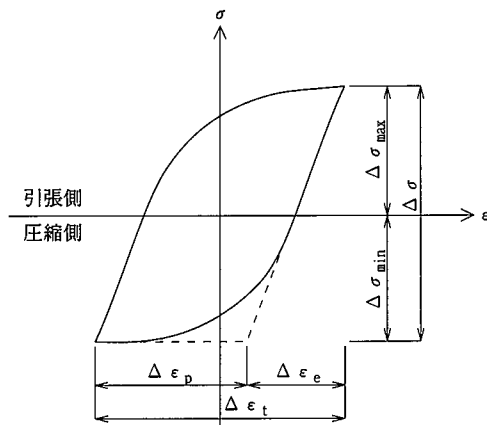


図2 記号の定義

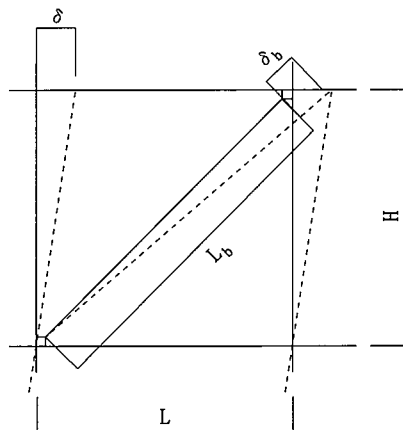


図3 フレームの変形

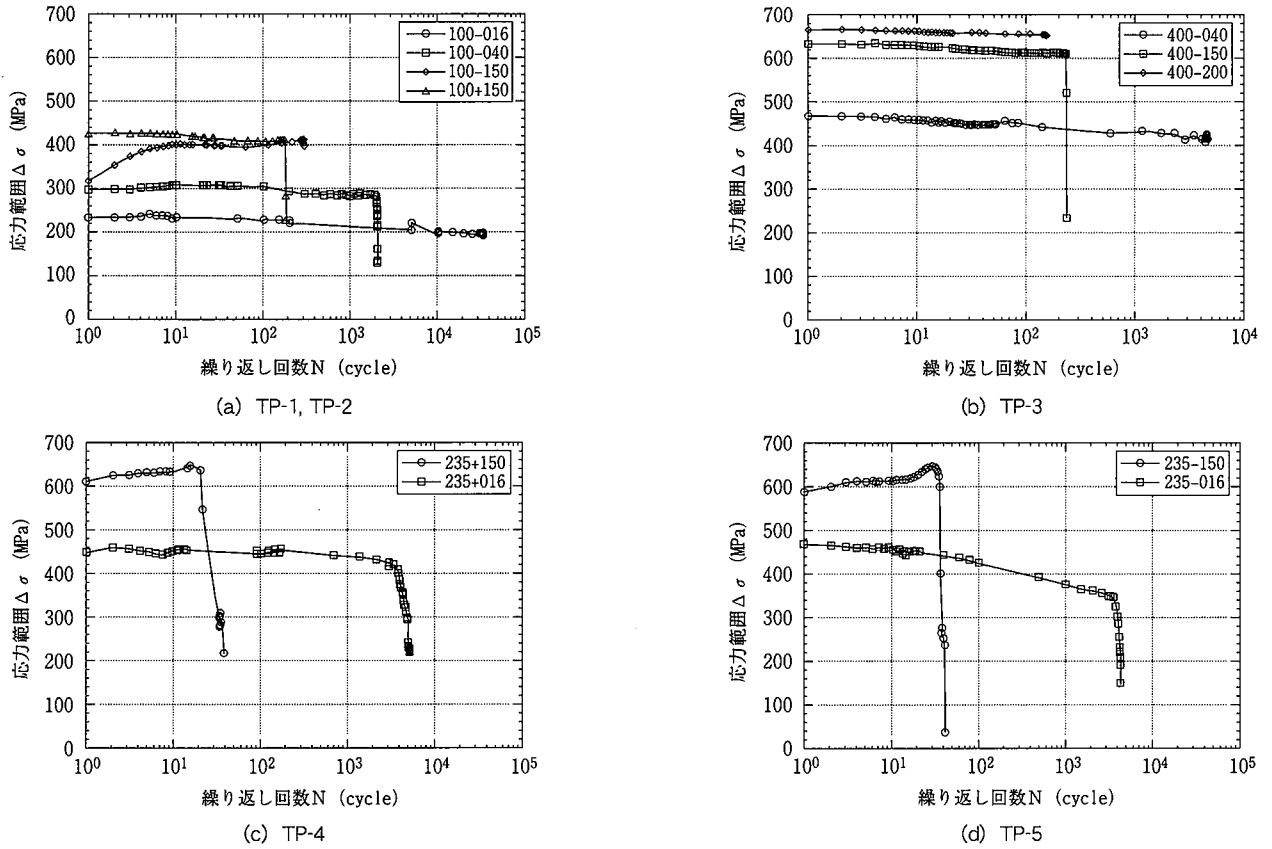


図5 応力範囲(Δσ)と繰返し回数(N)の関係

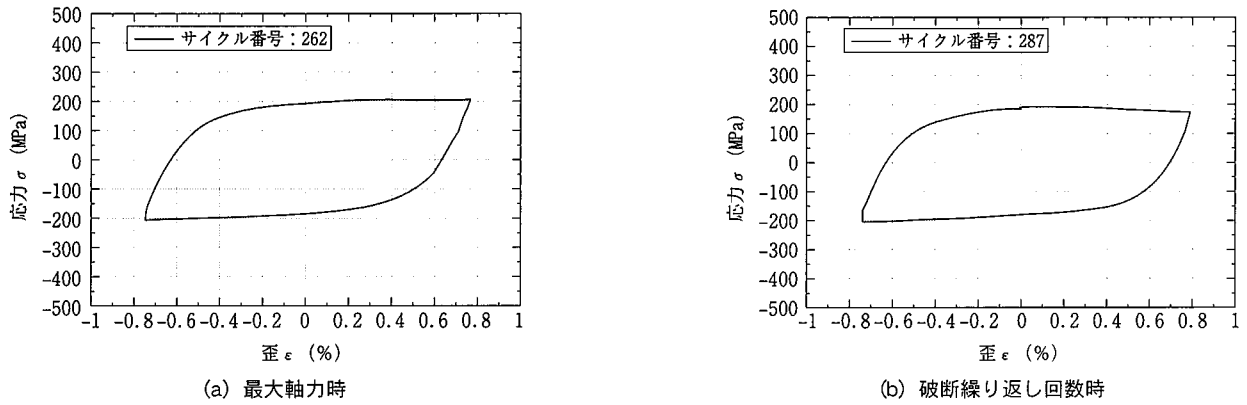


図6 応力(σ)-歪(ε)関係(100-150)

表4 破断繰返し回数一覧

シリーズ	試験体名	鋼材質	芯材断面形状	集中率 α	歪振幅 Δε _t (%)	相当層間変形角	破断繰返し回数 N _f (cycle)	破断位置	累積塑性変形倍率 η _f
TP-1	100-150	LYP100	-	1.0	1.5	1/100	287 (ループ)	ずれ止め	17 504
	100-040	LYP100	-	1.0	0.4	1/375	2 041 (75%耐力)	リップ先端	27 208
	100-016	LYP100	-	1.0	0.16	1/938	33 451 (ループ)	中間	98 085
TP-2	100+150	LYP100	+	1.0	1.5	1/100	176 (ループ)	中間	10 734
TP-3	400-200	SN400B	-	1.0	2.0	1/75	140 (ループ)	ずれ止め	3 890
	400-150	SN400B	-	1.0	1.5	1/100	211 (ループ)	ずれ止め	4 186
	400-040	SN400B	-	1.0	0.4	1/375	4 050 (ループ)	中間	9 545
TP-4	235+150	LYP235	+	3.1	4.3 (1.5)	1/100	18 (ループ)	中間	1 261 (393)
	235+016	LYP235	+	3.1	0.26 (0.16)	1/938	4 150 (75%耐力)	リップ先端	1 982 (0)
TP-5	235-150	LYP235	-	3.1	4.5 (1.5)	1/100	33 (ループ)	中間	2 621 (786)
	235-016	LYP235	-	3.1	0.36 (0.16)	1/938	2 520 (75%耐力)	リップ先端	6 740 (0)

注：TP-4, 5の()内の値は平均歪振幅、平均歪速度である。相当層間変形角は、芯材長さが柱・梁交点間距離の1/1.5、プレース角度45°に対応する値である。

表4より、3.2節においても述べたように75%耐力で破断しているのは3体であり、試験体のほとんどが荷重を保持できなくなり破断していることがわかる。また同程度の歪振幅では、試験体の芯材断面形状が-タイプの方が+タイプに比べ高い疲労性能を示している。回数としては1/100の相当層間変形角に対して約200回(変断面型で30回)と十分な累積変形性能を有している。またTP-1~3について1/1000の相当層間変形角に対し、 10^4 程度以上の疲労性能を有していることから、風に対する制振ダンパーとしても適用の可能性が考えられる。

3.4 破断状況

破断位置の一覧を表4に示し、破断位置の説明を図7に示す。歪

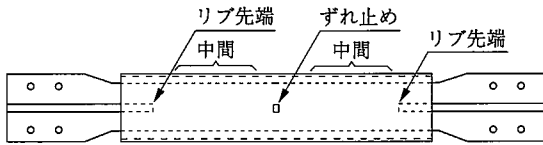


図7 破断位置の説明

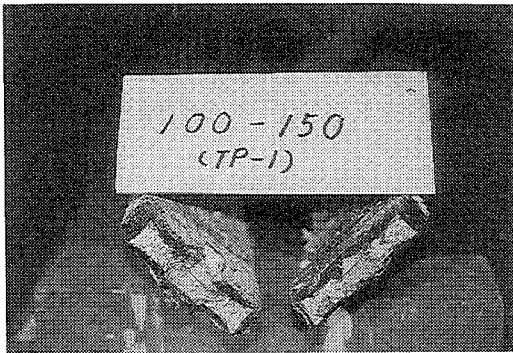


写真2 100-150の破断面

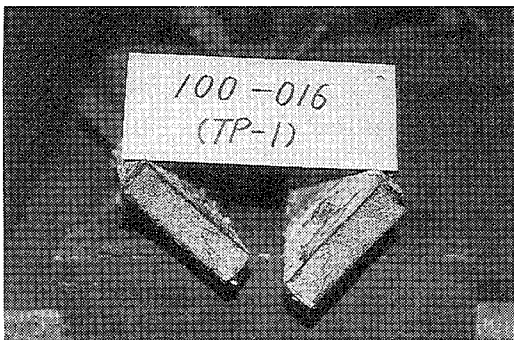


写真3 100-016の破断面

振幅の比較的大きな試験体(100-150, 400-200, 400-150)はブレース芯材の中央に設けたずれ止め近傍で破断している。これはずれ止め溶接部分での応力集中によるものと考えられる。これに対しその他の歪振幅の比較的小さい場合はブレース両端の補強リブ先端か、あるいは補強リブ先端とずれ止めの間で破断している。また歪振幅の大きな試験体の破断面は粒子が非常に粗く、亀裂が急激に進展した痕跡が見られ、典型的な低サイクル疲労破断面となっている(写真2参照)。一方、歪振幅の小さい場合の破断面は粒子が細かく、亀裂の進展が緩やかであったことを示している(写真3参照)。

3.5 累積塑性変形倍率

累積塑性変形倍率(η_f)を表4に示す。ここで η_f は降伏歪(降伏点/弾性係数)に対して累積された塑性歪の割合である。

表4より、累積塑性変形倍率(η_f)は各試験体とも十分な変形性能を有していることが分かる。TP-4,5の変断面型アンボンドブレースにおいて、平均歪振幅で $\eta_f=0$ となっているが、これはTP-1~3のような標準型では降伏しないほど軸変形が小さかったためであり、このような場合でも断面を調整することで履歴型制振ダンパーとして機能していることがわかる。

3.6 素材、芯材部分モデル実験結果との比較

図8(a), (b)に本実験結果(TP-1~3)と素材、芯材部分モデル実験結果²⁾の破断繰り返し回数(N_f)と歪振幅($\Delta \epsilon_t$)の関係を鋼種毎(LYP100, SN400B)に示す。破断繰り返し回数(N_f)について比較すると、素材試験に対し、芯材部分モデルで1/2~1/5、実大ブレースで1/6~1/10に低下しており、補強リブ端や局部座屈による応力集中の影響と考えられる。またLYP100とSN400Bの鋼材材質による塑性疲労性能はほぼ同等であった。

3.7 歪集中を考慮した実大アンボンドプレースの疲労特性

芯材の歪振幅($\Delta \epsilon_t$)と破断繰り返し回数(N_f)の実験結果及びその

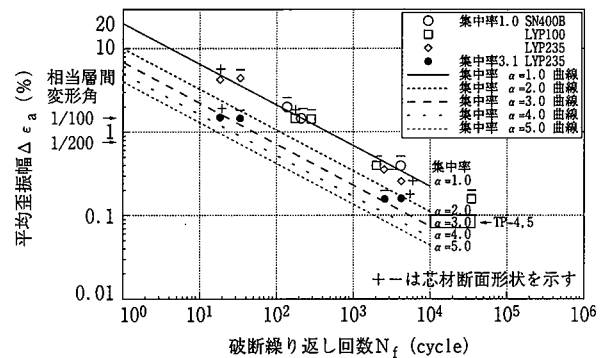
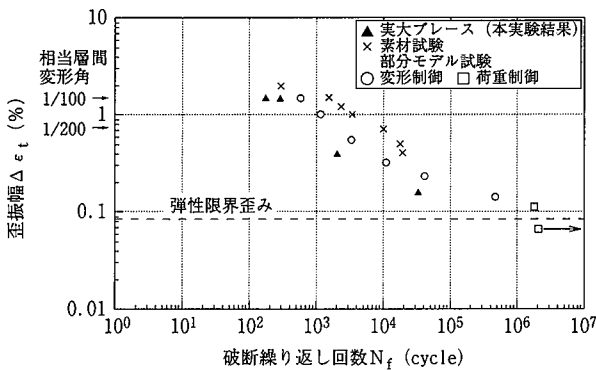
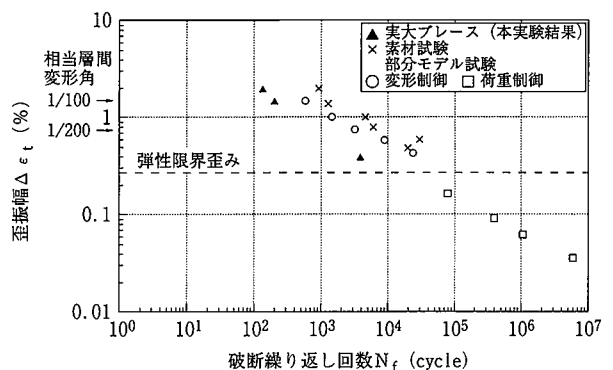


図9 歪集中を考慮したアンボンドプレースの疲労曲線



(a) LYP100



(b) SN400B

図8 破断繰り返し回数(N_f)と歪振幅($\Delta \epsilon_t$)の関係

回帰曲線($\alpha=1.0$)を図9に示す。また、TP-4, 5については平均歪振幅($\Delta \varepsilon_a$)と破断繰返し回数(N_f)の実験結果(●印, $\alpha=3.1$)もあわせて示す。実験結果の回帰曲線に、平均歪振幅($\Delta \varepsilon_a$)と芯材の歪振幅($\Delta \varepsilon_f$)の関係を考慮すると次式が得られる。

$$\Delta \varepsilon_a(\%) = (20.48/\alpha) \cdot N_f^{-0.49} \quad \dots\dots(1)$$

ただし、集中度(α)は各試験体の平均歪区間長を芯材区間長で除したものであり表3, 4に示す。したがって、 $\alpha=1$ の時は $\Delta \varepsilon_a = \Delta \varepsilon_f$ である。また、式(1)では平均歪区間長から芯材区間長を除いた部分の剛性の影響は無視している。図9には、式(1)に基づいて集中度(α)に応じた疲労曲線も破線で示している。

本実験結果よりSN400B, LYP100及びLYP235について、鋼種による疲労寿命に顕著な差異は認められず、ほぼ同一の疲労曲線で表現できることがわかる。また、LYP235の実験結果(●印)は、集中度 α が大きくなるに従い疲労寿命の低下する傾向が見られ、式

(1)の疲労曲線により概ね推定できると考えられる。

4. 最大及び累積変形記録装置

本実験では、アンボンドプレースが過去において受けた最大変形及び累積変形を計測できる写真4, 5に示すような最大変形記録装置(試験体上端部)及び累積変形記録装置(試験体下端部)を試験体100-150, 400-040に装着し、実験した結果を表5に示す。同表中の予想値は各記録装置が理想的に動作したときの値であるが、実験結果と比較すると最大圧縮変形については一致しているものの、最大引張変形及び累積変形についてはやや異なる結果となった。これは屈曲拘束材が繰返し载荷により、わずかながら下側へ移動しており、これにより差異を生じたものと考えられる。

5. まとめ

本研究において、実大アンボンドプレースの疲労特性について明らかにし、履歴型制振ダンパーとして十分な性能を有することが確認された。特に、

- (1) 芯材軸歪 $\pm 0.75\%$ (層間変形角にして1/100相当)に対して約200回の破断繰返し性能を有し、
- (2) 歪集中度(α)が3倍の変断面型アンボンドプレースでは1/100相当層間変形角に対し、約30回の破断繰返し性能を発揮する、

ことがわかった。したがって、1回の地震によるエネルギー入力は最大軸変形の履歴ループに換算して約2ループに相当することがわかっている¹³⁾ことから、

- (3) 建物が瞬間最大1/100程度の層間変形角が生じる大地震(最大速度40~50kine程度)に対して、その階のダンパーは変断面型アンボンドプレースで15回、通常では100回経験しても疲労性能上は交換する必要がない、

と予想されることがわかった。地震終了後、主体構造の残留変形は極めて小さいと予想されるが、これはアンボンドプレースを取り外す(交換あるいは再利用)ことで除去することができ、主体構造は継続して使用できる可能性の高いものと考えられる。

参考文献

- 1) 岩田衛, 黄一華, 川合廣樹, 和田章: 被害レベル制御構造"Damage Tolerant Structure"に関する研究, 日本建築学会技術報告集, (1), 82-87(1995-12)
- 2) 林賢一, 海野敏夫, 岩田衛: 被害レベル制御構造の斜め格子チューブ架構を有する高層ビルへの適用, 日本建築学会技術報告集, (6), 65-69(1998-10)
- 3) 松岡祐一, 岩田衛, 川合廣樹, 和田章, 黄一華: 被害レベル制御構造に関する研究(その1)耐震部材の降伏せん断力レベルと地震応答の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 22072, 1995-8, p.143-144
- 4) 松岡祐一, 岩田衛, 川合廣樹, 和田章, 黄一華: 被害レベル制御構造に関する研究(その2)降伏開始点を制御できる履歴ダンパーの研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 22073, 1995-8, p.145-146
- 5) 山口種美, 中田安洋, 竹内徹, 池辺卓, 長尾年通, 南見, 鈴木孝彦: 極低降伏点鋼, 低降伏点鋼を使用した制震技術の開発, 新日鉄技報, (368), 61-67(1998)

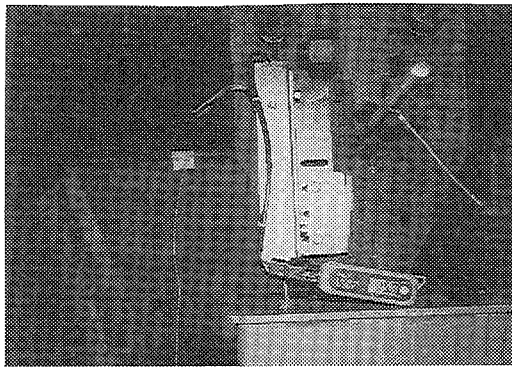


写真4 最大変形記録装置

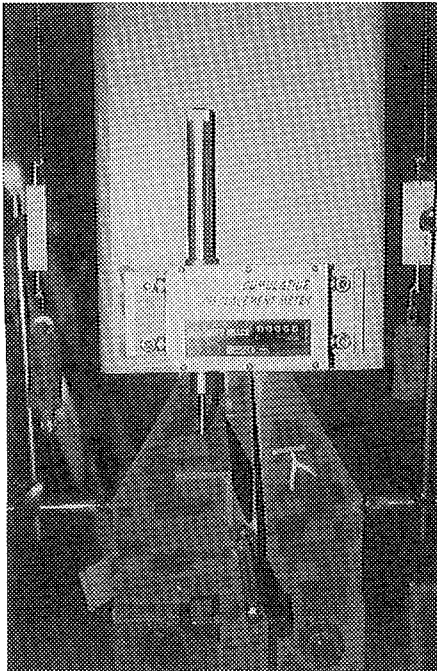


写真5 累積変形記録装置

表5 最大及び累積変形記録装置結果

シリーズ	試験体名	制御変位 (mm)	予想値(mm)		最大変形記録装置の結果		累積変形記録装置の結果	
			最大変形	累積変形	引張側(mm)	圧縮(mm)	カウンター値	変形(mm)
TP-1	100-150	±7.3	±3.0	2 161	15	3	999	1 998
TP-3	400-040	±2.0	±1.0	8 086	3	1	3 160	6 320

- 6) 佐伯英一郎, 杉沢充, 山口種美, 望月晴雄, 和田章: 低降伏点鋼のヒステリシス及びヒステリシスエネルギー特性に関する研究. 日本建築学会構造系論文集, (473), 159-168(1995)
- 7) 佐伯英一郎, 前田泰史, 中村秀司, 緑川光正, 和田章: 実大アンボンドプレースに関する実験的研究. 日本建築学会構造系論文集, (476), 149-158(1995)
- 8) 藤本盛久, 和田章, 佐伯英一郎, 竹内徹, 渡辺厚: アンボンドプレースの開発. 季刊カラム, (115), 91-96
- 9) 前田泰史, 中村博志, 竹内徹, 中田安洋, 岩田衛, 和田章: 実大アンボンドプレースの疲労性能, その1: 実験計画と結果概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 1999-9
- 10) 中村博志, 前田泰史, 竹内徹, 中田安洋, 岩田衛, 和田章: 実大アンボンドプレースの疲労性能, その2: 実験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 1999-9
- 11) 佐伯英一郎, 杉沢充, 山口種美, 望月晴雄, 和田章: 低降伏点鋼の低サイクル疲労特性に関する研究. 日本建築学会構造系論文集, (472), 139-147(1995)
- 12) 前田泰史, 中田安洋, 岩田衛, 和田章: 軸降伏型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, (503), 109-115(1998)
- 13) 原田幸博, 秋山宏: エネルギー集中型柔剛混合骨組の耐震設計. 日本建築学会構造系論文集, (472), 57-66(1995)