要約版

川崎製鉄技報
KAWASAKI STEEL GIHO
Vol.30 (1998) No.1

極軟鋼を用いた制震ダンパーの構造性能

Performance of Hysteretic Dampers Using Low Yield Stress Steel

藤澤　一善(Kazuyoshi Fujisawa)　清水　孝憲(Takanori Shimizu)　上村　健二(Kenji Uemura)

要旨：
兵庫県南部地震以降，建築物の耐震性向上のために制震ダンパーを採用する事例が増えている。川崎製鉄ではこのダンパー用の鋼材として，従来鋼と比較して降伏点が著しく低い極低降伏点鋼（極軟鋼）を開発した。この極軟鋼は降伏点が 100 N/mm2 前後で，伸び性能も良好であり，疲労特性や溶接継手特性も従来鋼と比べて遜色がない。さらにこの極軟鋼を使用した制震壁や制震ブレースの開発も推進しており，制震ダンパーに要求される大変形領域での安定した履歴特性と十分なエネルギー吸収能力を実験的に確認している。これらの制震ダンパーは川崎製鉄新神戸本社ビルをはじめ，中層から超高層までの建築物に採用されている。

Synopsis：
Low yield stress steel (LYS) has a yield stress of about one-third of that of conventional building structural steels (e.g., JIS SN400) and an excellent ductility. LYS is a superior material for hysteretic dampers which are used in order to absorb seismic response of buildings. Kawasaki Steel has developed LYS and LYS-made dampers, such as, a shear wall and a steel brace. These dampers have a high energy absorption capacity, encompassing from low to high strain amplitudes, and are effective in reducing the seismic response of buildings.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

極軟鋼を用いた制震ダンパーの構造性能*

川崎製鉄技報
30 (1998) 1, 1-6

Performance of Hysteretic Dampers Using Low Yield Stress Steel

藤澤 一善
Kazuyoshi Fujisawa
建材センター 建材事業企画部 主査(課長補)

清水 孝憲
Takanori Shimizu
建材センター 建材事業企画部

上村 健二
Kenji Uemura
建材センター 建材事業企画部

要旨

兵庫県南部地震以降，建築物の耐震性向上のために制震ダンパーを採用する事例が増えている。川崎製鉄ではこのダンパー用の鋼材として，従来鋼と比較して降伏点が著しく低い極低降伏点鋼（極軟鋼）を開発した。この極軟鋼は降伏点が 100 N/mm² 前後で，伸び性能も良好であり，疲労特性や溶接継手特性も従来鋼と比べて遜色がない。さらにこの極軟鋼を使用した制震壁や制震ブレースの開発も推進しており，制震ダンパーに要求される大変形領域での安定した履歴特性と十分なエネルギー吸収能力を実験的に確認している。これらの制震ダンパーは川崎製鉄新神戸本社ビルをはじめ，中層から超高層までの建築物に採用されている。

Synopsis:

Low yield stress steel (LYS) has a yield stress of about one-third of that of conventional building structural steels (e.g., JIS SN400) and an excellent ductility. LYS is a superior material for hysteretic dampers which are used in order to absorb seismic response of buildings. Kawasaki Steel has developed LYS and LYS-made dampers, such as, a shear wall and a steel brace. These dampers have a high energy absorption capacity, encompassing from low to high strain amplitudes, and are effective in reducing the seismic response of buildings.

1 はじめに

昭和 56 年に施行された，いわゆる新耐震設計法は，構造骨組の塑性変形能力に期待した設計法である。基本理念が人的被害の防止であることはいうまでもないが，構造骨組の塑性化を許容することで，建設コストも比較的低く抑えることができ，合理的な設計法といえる。兵庫県南部地震においても，新耐震設計による建築物の被害は少なく，この設計法の妥当性が実証されたといわれている[1]。ただ，建築物の再使用のためには，被災した構造骨組を適切に補修する必要があるが，これに要する費用が予想以上になることもまた今回の大震災で認識された。

一方，兵庫県南部地震以降，地震に対する新しい構造形式として制震構法が注目されている。なかでも，極低降伏点鋼（以下，極軟鋼）を利用した履歴型ダンパーが，低コスト，安定した品質，さらには高耐久性という特徴から，多数商品化されている[2]。その原理は，ダンパーが早期に降伏することにより，地震による振動エネルギーを鋼材の塑性エネルギーに変換することで，振動応答を抑えるというものである。

川崎製鉄では，上記の機能を満足するダンパー用厚板ならびに鋼管を開発した。同時に，これら鋼材を使用した制震壁と制震ブレースの開発も行ってきた。以下に，これら極軟鋼の材料特性と制震ダンパーの構造性能について詳述する。

* 平成 9 年 9 月 30 日原稿受付

2 制震ダンパー用極軟鋼の材料特性

2.1 機械的性質

鋼製制震ダンパーは，前述のとおり，柱や梁などの主要構造部材よりも先行して降伏することで，地震エネルギーを吸収し，振動応答を抑えるものである。そのため，使用する鋼材は，従来から用いられている構造用鋼材と比べて，低降伏点であることが望ましい。さらに，設計で想定した荷重レベルで確実に降伏するために，降伏点レンジが狭いことも要求される。加えて，制震ダンパーの機能上，部材に塑性変形を集中させるので，変形能力が大きいことも必要である。

川崎製鉄は，これらの要求を満足する制震ダンパー用の鋼材として，**Table 1** に示す化学成分および機械的性質の規格を満足する極軟鋼板[3]と極軟鋼管[4]を開発した。化学成分としては，従来の構造用鋼材と比較して，添加元素を極力低減した純鉄に近いものであり，規格降伏点（0.2% オフセット耐力）は 100 N/mm² 前後と，従来鋼材と比較して約 1/3 の低降伏点化を達成している。また，降伏点レンジも建築構造用新 JIS である SN 材の 120 N/mm² よりも小さい 50 N/mm² とし，伸びも 50% 以上を確保しており，ダンパー用鋼材としての機能を十分に満たしている。

極軟鋼の製造実績の一例を Table 1 に，応力－歪関係を **Fig. 1** に示すが，鋼板，鋼管とも規格値を満足している。また，極軟鋼の応力－歪関係は，ラウンドハウス型の形状となる。

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of low yield stress steel

	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	YP (N/mm²)	TS (N/mm²)	El (%)
Standard	≦0.02	≦0.02	≦0.20	≦0.030	≦0.015	70–120	200–280	50≦
Plate (t = 25 mm)	0.0015	Tr	0.08	0.008	0.008	75*1	247*1	53*1
Pipe (ϕ101.6 × 12)	0.0013	Tr	0.08	0.007	0.005	89*2	250*2	67*2

*1JIS Z 2201 No. 1A, *2JIS Z 2201 No. 12B

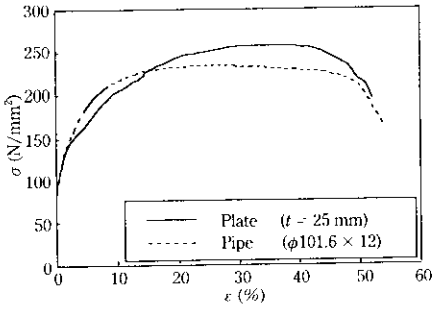


Fig. 1 Stress-strain curve of low yield stress steel

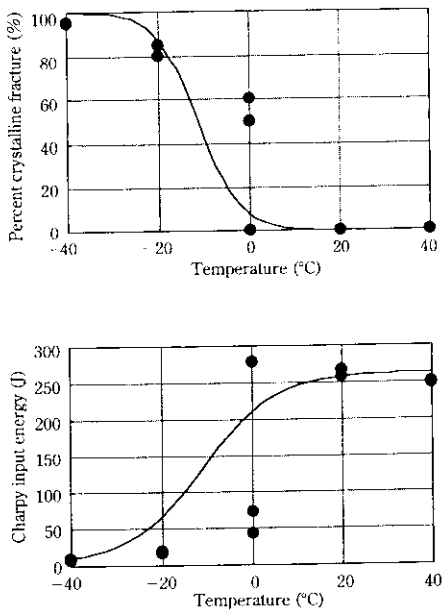


Fig. 2 Results of Charpy impact test of low yield stress steel

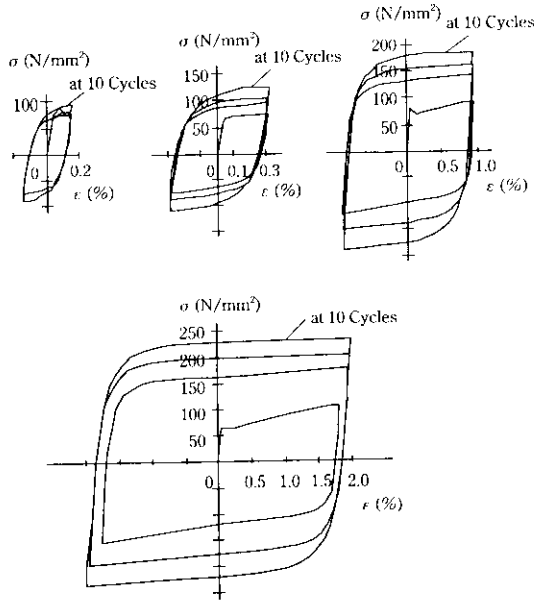


Fig. 3 Cyclic stress-strain curve

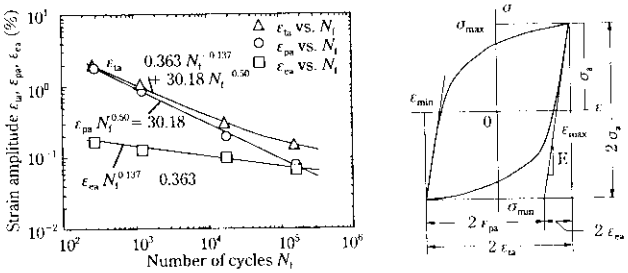


Fig. 4 Results of fatigue test of low yield stress steel

次に，鋼材の靭性指標に用いられるシャルピー衝撃試験結果を **Fig. 2** に示すが，L方向における0°Cのシャルピー吸収エネルギーが，試験片3本の平均値で131J，破面遷移温度も－11°Cとなっており，従来鋼と比較しても遜色のない衝撃特性を有している。

これらの素材試験の他，鋼材の曲げ試験を行ったところ，割れ発生は認められず，断面内の硬さ分布も均一であった。さらに，25°Cで実施した斜めy形溶接割れ試験でも割れは発生しなかったことから，溶接加工性も良好といえる[3]。

2.2 疲労特性

鋼製制震ダンパーは，地震時に塑性域で多数回の繰り返し載荷を受ける。そのため，繰り返し載荷時の履歴特性や疲労特性の情報は設計面あるいは構造信頼性の観点から重要となる。そこで，制震ダンパーの繰り返し載荷挙動の基礎資料を得る目的で極軟鋼板の低サイクル疲労試験を実施した。

試験体には，平行部を有する直径10 mmの丸棒試験片を用いた。供試材の降伏点は83 N/mm²，引張強さは237 N/mm²，伸びは61%であった。載荷には5tサーボ油圧式疲労試験機を用い，試験片の軸歪制御による一定歪振幅を与えた。また，歪速度は0.1%/s，波形は対称三角波とし，室温大気中で試験を行った。

Fig. 3 は，0.15%，0.3%，1%，2%の各歪振幅下における最初の10サイクルまでの応力－歪関係であるが，歪振幅が大きくなるにしたがって硬化の度合いが大きくなっている。ただし，10サイクル以降，破断前までは安定した履歴ループとなった。

Fig. 4 に，歪振幅と破断までの繰り返し回数の関係を回帰式とともに示す。制震ダンパーの繰り返し時の構造信頼性は，設計で想定する歪レベルや繰り返し回数をもとに，最終的には部材レベルでの試験などで評価する必要があるが，本データは疲労特性推定のための基礎資料として有効である。

2.3 継手特性

鋼製制震ダンパーにおいても，通常の建築構造物と同様，溶接接合や高力ボルト接合が多用される。そこで，極軟鋼の溶接継手の強度特性や衝撃特性，そして高力ボルト摩擦接合部のすべり挙動について調査した[3]。

まず，**Table 2** に示す溶接条件でのレ形突合せ溶接継手（板厚 25 mm，開先角度 35°，ルートギャップ 5 mm）を対象として，引張試験，曲げ試験，衝撃試験および硬さ分布測定を行った。

Fig. 5 は，シャルピー衝撃試験結果であるが，いずれの部位でも 0℃ のシャルピー吸収エネルギーは 100 J 以上あり，十分な衝撃特性を有している。継手引張試験では母材と同等の引張強さが確保されており，曲げ試験でも割れは生じていない。熱影響部では硬化が認められるものの，180 HV 程度であり，溶接時の割れ発生もないものと考えられる。

以上の結果から，極軟鋼の溶接に関しては，従来鋼と同様の溶接管理を行うことで，良好な品質が確保できると結論づけられる。

次に，高力ボルト摩擦接合部すべり試験結果について報告する。試験体は **Fig. 6** に示す標準試験片を 2 体用意した。供試材の降伏点は 81 N/mm², 引張強さは 236 N/mm² であり，摩擦面はグラインダーがけの後赤錆面とした。また，継手の左右でボルト導入軸力を変化させて，それぞれ母板の降伏前後ですべりが発生するように計画した。

試験結果より，母板の降伏前にすべる場合はすべり係数 0.58, 0.65 となり，それぞれ基準値である 0.45 を上回った。ただし，降伏後にすべる場合は，母板のやせによる影響で，すべり係数は 0.46, 0.52 と，それぞれ 20% 程度減少した。

鋼製制震ダンパーは部材の降伏が前提であるので，極軟鋼をそのまま高力ボルト摩擦接合部に用いる場合は，有効断面積を増して降伏を防いだり，すべり係数の減少を考慮してボルト本数を決定するなどの工夫が必要である。

これらの継手試験の他に，極軟鋼と SS400 のすみ肉溶接継手の強度試験を実施したが，各々の引張強さの平均値を用いて継手強度を計算すれば十分安全側の評価ができることを確認している[3]。

Table 2 Butt welding conditions

Welding method	Wire	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)
CO_2 gas metal arc welding	KC-45 (1.2 ϕ)	300	32	30	19.2

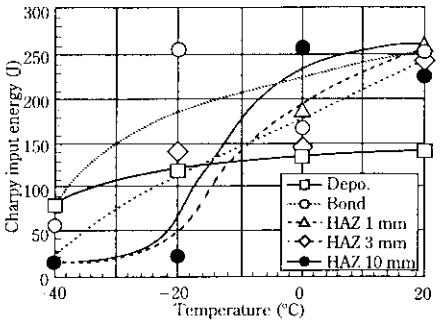


Fig. 5 Results of Charpy impact test of butt welded joint

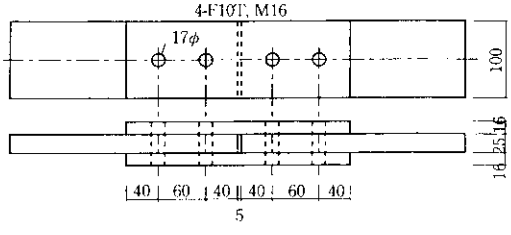


Fig. 6 Specimen of slip test of high-strength bolted joint

3 極軟鋼制震ダンパーの構造性能

3.1 極軟鋼制震壁

3.1.1 極軟鋼せん断パネル試験

極軟鋼制震壁は，在来の鋼板耐震壁の母材に極軟鋼を用いたものであり，設置工法などは在来技術を利用することができる。この制震壁の開発にあたって，まずせん断力を受ける極軟鋼板の基本性能を調査し，制震ダンパーとしての可能性を検証するためにせん断パネル試験を行った。極軟鋼制震壁が弾性座屈を生じると安定した履歴性状が得られなくなる恐れがあるので，この試験では座屈に対するリブ補強の効果を確認するとともに，基本的な弾塑性履歴性状を明らかにした。

試験体は **Table 3** に示す計 5 体で，リブ配置（表中記号 Grid：両面とも格子状，Non grid：片面一方向格子状），リブ区画内幅厚比 d/t, そしてリブ剛性 I (No. 3 試験体のみ全体座屈先行形）である。また，極軟鋼の板厚は 4.5 mm，リブには板厚 6 mm の SS400 を使用した。

載荷は，**Fig. 7** に示す四隅が完全ピンの剛性の高い加力フレームに試験体を取り付けて，1 対角方向に圧縮と引張の交番荷重を与え，繰り返しせん断力を作用させる方法である。

No. 2, 3, 5 試験体のせん断応力 τ—せん断変形角 γ 関係を **Fig. 8** に示す。各試験体とも低歪領域から高歪領域までの広い範囲で安定した紡錘形のエネルギー吸収能力に富むループであり，結果的には

Table 3 Parameter of shear panel

Specimen	Rib arrangement	d/t	I (cm⁴)
NO. 1	Grid	110	10
NO. 2	Non grid	110	10
NO. 3	Non grid	110	2
NO. 4	Non grid	170	10
NO. 5	Non grid	250	10

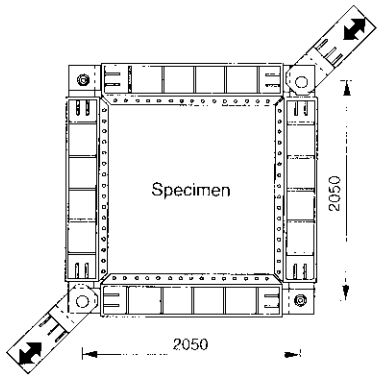


Fig. 7 Loading frame

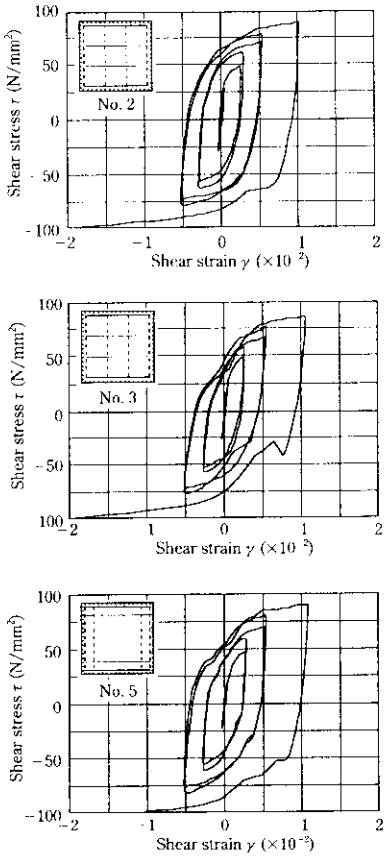


Fig. 8 Shear stress and share strain relationship of shear panel

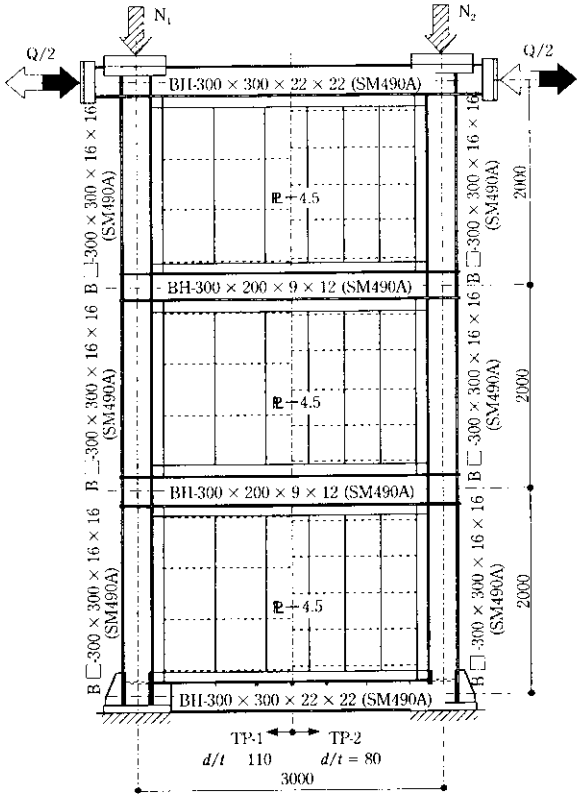


Fig. 9 Three-story frame with low yield stress steel plate walls

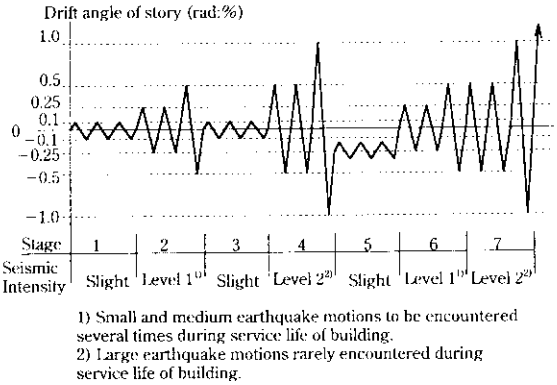
そのループ面積の累積値などにも大きな違いは認められない。ただし，リブ剛性が小さく，リブ補剛内での局部座屈に先行して全体座屈が生じた No. 3 試験体では，最終サイクル負側でいったん耐力が低下したが，直ちに上昇に転じている。

このように，本試験範囲では，全体座屈が先行する場合を除いて，履歴特性に大きな差異は認められなかったが，リブで区画された部分の幅厚比が大きくなるにしたがい，面外変形も大きくなった。多数回の繰り返し載荷時の構造安定性を考慮すれば，幅厚比は小さくすることが妥当であり，本試験での最小幅厚比である 110 以下とすることが望ましい。なお，リブの配置方法による挙動の差異は認められなかったため，実用上は加工工数が少ない片面一方向格子状が推奨される。

3.1.2 制震壁を有する骨組試験

骨組に組み込まれた状態での制震壁の履歴特性を調査するために骨組試験を行った。まず，1 層 1 スパン骨組試験では，リブで区画された部分の幅厚比が 110 の制震壁を取り付けた骨組に，一定軸力を与えた状態で正負交番繰り返しせん断力を作用させて，骨組からの長期軸力や曲げによる付加軸力作用下での制震壁の履歴挙動について調査した。実験では，前述のリブ配置方法と周辺骨組への制震壁の取付方法（溶接接合と高力ボルト摩擦接合）を変化させたが，いずれの試験体も，安定した紡錘形の履歴ループとなり，十分なエネルギー吸収能力を発揮した[5]。

次に，実建物に近い 3 層 1 スパン骨組試験により，連層形式の場合の影響を確認した。3 層骨組試験体は **Fig. 9** に示す実大の約 1/2 スケールの試験体である。幅厚比は 110（試験体名 TP-1），80 (TP-2) の 2 種類とし，骨組との接合は高力ボルト摩擦接合とした。試験体へは水平力及び鉛直力を載荷しており，水平力は第 2 層の層間



1) Small and medium earthquake motions to be encountered several times during service life of building.
2) Large earthquake motions rarely encountered during service life of building.

Fig. 10 Loading pattern of three-story frame

変形角を基準として，**Fig. 10** に示す載荷サイクルとした。鉛直力は水平力による各柱への付加軸力を相殺するように制御したが，合力は 200 tf で一定とした。

各試験体の第 2 層の層せん断力 Q と層間変形角 R の関係を **Fig. 11** に示す。幅厚比が 110 の TP-1 試験体では，目視によると Stage 2 の最初の 1/400 変形角で塑性座屈が発生した。しかし，履歴ループではこの影響は見られない。その後，Stage 4 までは履歴曲線は制震壁の歪硬化によって徐々に耐力が増加しつつ，安定した紡錘形のループを描いた。Stage 5 以降では，Stage 4 の 1/100 変形角で発生した大きな座屈変形の影響で履歴ループは完全な紡錘形とはならないが，しわの反転後には斜張力場が速やかに形成され，耐力は再び上昇に転じた。リブについては最終状態でもパネル面外への変形を抑えており，片面一方向格子状でも十分な剛性を有していることが確認された。

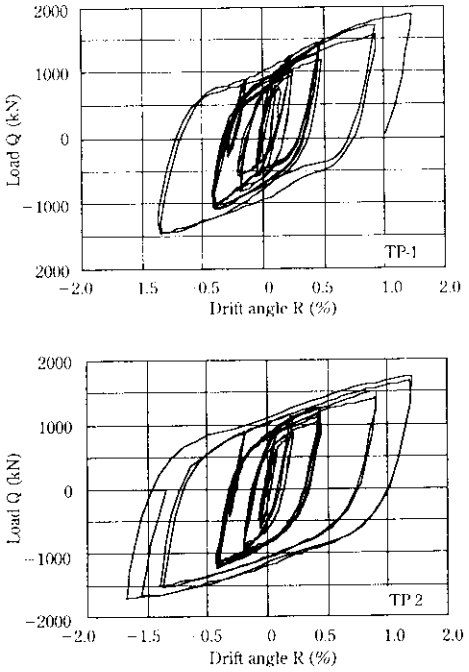


Fig. 11　Q-R relationship of story 2

幅厚比の小さな TP-2 試験体では，最終 Stage までほぼ完全な紡錘形の履歴ループを保ち，幅厚比が小さいことの効果が表れている。

以上の結果より，極軟鋼制震壁は，高変動鉛直荷重を受けるラーメンフレーム内において繰り返し載荷を受けても，十分なエネルギー吸収性能を有しているといえる。

3.2　極軟鋼制震ブレース

鋼製制震ダンパーとしてブレース形式を用いる場合，全体座屈による構造不安定を避ける必要がある。川鉄建材(株)では，全体座屈を防止し，引張圧縮載荷時にも安定した履歴挙動を示す二重管 FLD 部材（force limitting device，応力制限機構）を開発しており，川崎製鉄は川鉄建材(株)と共同で，本機構を利用した極軟鋼制震ブレースを開発した。

ここで対象とした制震ブレースは，**Fig. 12** に示すように，内管を軸力材である極軟鋼管，外管を STK400 などの座屈拘束管とし，また端部接合部にはクレビスを用いた両端ピン接合形式の制震ブレースである。二重管 FLD 部材は，軸力管の座屈を拘束管の曲げ抵抗で防止するものである。

この制震ブレースの構造性能を確認するために，**Fig. 13** に示す試験体を用いて引張圧縮繰り返し載荷試験を実施した。ここで，座屈拘束の判定は文献[6]に従い，最大耐力時にも全体座屈が生じないように拘束管を選定した。試験体端部はピン－ローラー支持されており，500 t 油圧ジャッキにより引張圧縮の繰り返し荷重を与えた。載荷サイクルは，極軟鋼管の塑性率を基準として，塑性率 2, 5, 10 でそれぞれ 5, 15, 10 回ずつ繰り返した後，圧縮側への一方向載荷で終了させた。

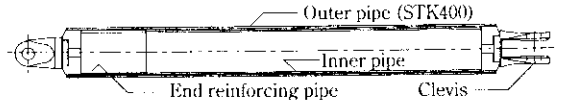


Fig. 12　Outline of double tube bracing

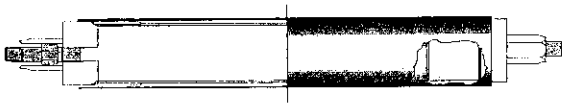


Fig. 13　Specimen of double tube

細長比 120 の軸方向応力－歪関係を，座屈拘束していない細長比 40 の単鋼管の試験結果とともに **Fig. 14** に示す。この結果からわかるように，座屈を拘束しないと細長比が 40 でも塑性率 10 の繰り返しでは耐力低下を生じている。この一方，適切な座屈拘束を実施することによって，細長比 120 という非常にスレンダーな場合においても安定した履歴特性を示し，制震ブレースとして十分なエネルギー吸収能力を発揮できることがわかる。また，当然ながら引張側，圧縮側での履歴特性に関する非対称性も認められない。

このように，二重管 FLD 部材を利用したブレースは，制震ダンパーとして有効であることが確認できた。

次に，定歪振幅状態での疲労特性を実験的に調査した[7]。**Fig. 15** は極軟鋼管端部の補強方法を 2 種類変化させた制震ブレースの，塑性率 20 での軸方向応力－歪関係である。補強部を長くすることで，耐力低下が生じる繰り返し回数が，4 回から 8 回へと倍増した。これは，補強部分の許容回転角が小さくなることで，補強部近傍の極軟鋼管の局部座屈による亀裂発生を遅らせることができたためと考えられる。

このように，ピン形の二重管 FLD 部材による制震ブレースでは端部補強が重要である。塑性率 20 は，建物の層間変形角が 1/100 を超えるような大地震時の最大歪振幅に相当する。この歪振幅に対して，疲労寿命 N = 8 回というのは十分と考えられるが，現状では，Fig. 13 に示すように極軟鋼管の端部に補強管を取り付けるディテールを採用している。本処置により，極軟鋼管端部の許容回転角をさらに小さくでき，この結果，疲労寿命はさらに改善されると推定している。

また，疲労試験で用いた鋼管の径厚比は公称値で 31.8 であるが，極軟鋼管の局部座屈発生後の繰り返しによる亀裂発生で疲労寿命が

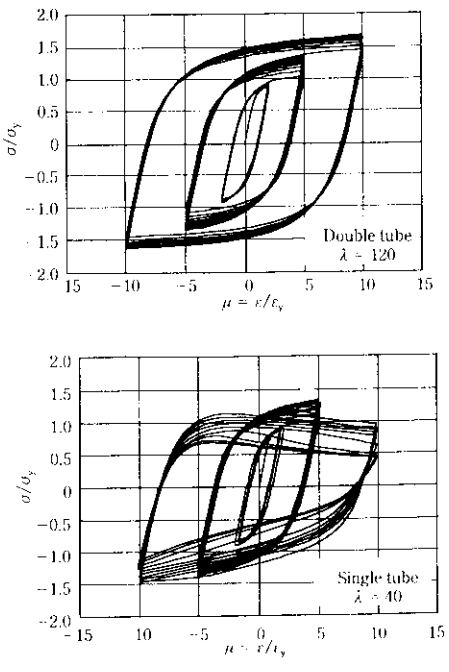


Fig. 14　Stress-strain curve of double tube and single tube

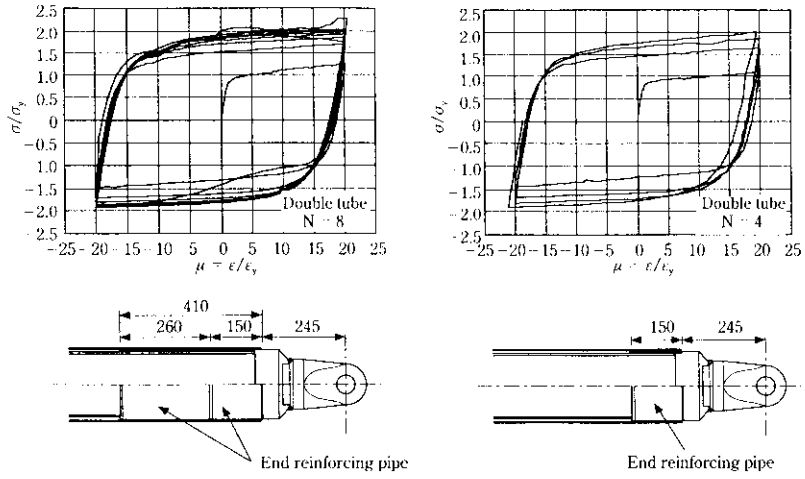


Fig. 15 Results of fatigue test of double tube bracing

決まっていることから，径厚比を小さくすることによっても疲労寿命は改善され得る。

二重管 FLD 部材を利用した制震ブレース以外でも，細長比が 20 でフランジ幅厚比が 8.5 という両端ピンの H 形断面材では，塑性率 20, 10, 7 での疲労試験で，疲労寿命は 5, 42, 190 回を得ている[8]。したがって，H 形鋼単一断面部材といった簡易な制震ダンパーも，断面形状次第では十分に実用に供しうると考えられる。

4 まとめ

以上，制震ダンパー用鋼材としての極軟鋼の材料ならびに継手に関する基本性能から，川崎製鉄が開発した制震壁，制震ブレースの構造特性について報告した。

ここで報告した制震ダンパーは，川崎製鉄神戸本社ビルをはじめとして，すでに数件の新築建物に採用されている。また，既存建築物の耐震改修用途にも用いられている。これらの採用事例では，最大応答層せん断力や最大応答層間変形角が 20% 程度減少しており[2,9]，高い制震効果を発揮している。

極軟鋼などを使用した制震ダンパーの需要は，今後とも拡大していくものと考えられるが，川崎製鉄では，前述の他に二重管 FLD 部材の端部接合形式を，高力ボルトによる摩擦接合とした剛接合型制震ブレース[10]や，梁や柱の端部に取り付けるダンパー[11]などの開発も鋭意推進している。

現在は，極軟鋼などを利用した制震ダンパーは，その採用に当たっての設計上あるいは行政上の面倒さゆえ，一部の超高層ビルに限って使用されているが，建築物の耐震安全性の向上には，有効な手段である。今後，建設省の総合技術開発プロジェクトなどでの研究の推進につれ，さらに普及するものと期待される。

最後に，前述の制震壁の開発は(株) 日建設計，新日本製鐵(株)，住友金属工業(株) と，また，制震ブレースの開発は (株)竹中工務店との共同研究であることを記して本稿を終える。

参 考 文 献

1) 日本建築センター：「建築物耐震基準・設計の解説」, (1995)
2) (株)建築技術：「特集制震・免震構造の設計」, 建築技術, **59**(1996)5, 51–151
3) 川崎製鉄(株)：「川鉄の建築構造用極低降伏点鋼（極軟鋼）RIVER FLEX100 の特性」, (1996)
4) 藤澤一善, 山本健一, 今井克彦：「制震用極軟鋼管」, 川崎製鉄技報, **29**(1997)2, 123-125
5) 中川郷司, 藤澤一善, 清水孝憲, 鳥井信吾, 岩田 衛, 飯田伸男：「極軟鋼制震壁の開発（その 3 1 層 1 スパン骨組実験）」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1996), 827–828
6) 今井克彦, 脇山広三, 多田元英, 桑原 進, 米山隆也：「二重鋼管の補剛効果に関する研究（その 1）軸方向加力実験方法」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1991), 1281–1282
7) 安井信行, 今井克彦, 藤澤一善, 清水孝憲, 中山信雄, 田渕勝道, 金子洋文：「極軟鋼を用いた制振ブレースの低サイクル疲労実験－その 2. 二重鋼管ブレース」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1996), 761–762
8) 櫛部淳道, 金子洋文, 宇佐見徹, 太田道彦, 井ノ上一博, 藤澤一善, 清水孝憲：「極軟鋼を用いた制振ブレースの低サイクル疲労実験－その 1. H 形鋼ブレース」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1996), 759–760
9) 森田昌敏, 福知潤一, 梅宮良之：「新神戸本社ビルに用いられた川鉄の耐震技術」, 川崎製鉄技報, **30**(1998)1, 27–32
10) 上村健二, 藤澤一善, 清水孝憲, 井上一朗：「極軟鋼管ブレースの接合部を含む座屈拘束設計法」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1997), 781–784
11) 藤澤一善, 橋本順次, 稲岡真也, 清水敬三, 高橋泰彦, 亀井 功, 小泉達也：「部材端取付方式履歴ダンパーの実用化に関する研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1997), 703–706