

鋼管を用いた弾塑性ねじりダンパー特性に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON CHARACTERISTICS OF ELASTO-PLASTIC
TORSIONAL DAMPER USING STEEL TUBES

青木徹彦*

鈴木森晶**

By Tetsuhiko AOKI, Moriaki SUZUKI

*正会員 工博 愛知工業大学教授 工学部土木工学科 (〒470-03 豊田市八草町)

*正会員 工博 愛知工業大学講師 工学部土木工学科 (〒470-03 豊田市八草町)

Steel shows predominant material characteristics in the ductility capacity when tensile or shearing force is applied. This characteristics is utilized efficiently to a damper as a small and economic device. In this study, elasto-plastic behavior of steel tubes subjected to repeated torsional load, is investigated experimentally. When torsional load is applied to thin walled steel tubes up to a large plastic strain range, torsional shear buckling may be caused and the ductility capacity being significant to a damper, is no more expected. So, three sorts of test specimens preventing torsional shear buckling are proposed and the energy dissipation capacities of these steel tubes are studied by the cyclic loading test.

Key words: damper, steel tube, torsion, shear buckling, cyclic loading test

1. はじめに

巨大地震から構造物を守る最も効果的な方法は地盤と構造物を適切な方法で切り離すことである。そのためにゴム支承、滑り支承等の免震構造が、特に兵庫県南部地震以来、多く用いられるようになった。橋梁構造物では過去の使用実績等からゴム支承が多いが、現段階で高価なこと、経年変化について未だ十分なデータが得られていない等の問題がある。

ダンパーそのものについての研究は、最近では多機能、高機能型のものが見られる¹⁾²⁾。

一方、鋼材料は 20-30%程度の大きな塑性変形能力があり、安価で、加工容易である。これを用いた免震装置は特殊な設備を有する工場でなく、鉄工所等でも容易に製作可能である。経年変化は塗装が十分であれば鋼製橋梁本体と同等である。したがって鋼材料を滑り支承等と組み合わせてダンパーとして利用すれば、既存のゴム支承に比べ極めて安価で、信頼性の高い免震装置ができる可能性がある。また既存のゴム支承との組み合わせも考えられる。

鋼材料の延性特性の利用としては軸方向力（引張り、圧縮）、曲げ、せん断力、およびこれらの組み合わせがあるが、繰り返し加力の場合、圧縮は鋼材に座屈を生じやすく、また曲げでは中立部付近の材料が塑性域まで利用されておらず、材料の有効な利用という意味では効果的とはいえない。せん断力を作用させた場合、鋼材の全容

積を利用でき、また座屈が生じにくい点で最も合理的であろう。ここでは薄肉鋼管に繰り返しねじり力を与え、せん断塑性変形させて、地震外力によるエネルギーを吸収、発散させることを考える。

鋼管を使用する利点は、円筒シェルとなっているために、平板に比べ、比較的大きなひずみが生じて座屈しにくい点である。一方鋼管のねじり方向は円弧となるから、これを直線運動にするために滑りないし、ピン等の付加装置を必要とする問題はある。

鋼材のせん断塑性変形を利用するダンパーに関する研究には文献 3)等多くがあり、文献 4) では本研究と同様、鋼管のねじれを利用している。しかし、ねじれに伴い生じる鋼管のねじれ座屈とその防止策を提案し、実験的にそれらの性能を明らかにした研究は著者らの知る限りないようである。鋼材はゴム材料も同様であるが、繰り返しによる低サイクル疲労があり、累積塑性ひずみに限界がある。これは応力集中や座屈変形等の破壊変形モードとも関係する。これらを数値解析的に精度良く求めることは現段階では困難で、これを実験的に明らかにすることも本研究の目的の一つである。

2. 実験計画および実験方法

2.1 実験計画

(1) 鋼管の弾塑性ねじりダンパーの設計

鋼製耐震ダンパーの設計では、設計条件として一般に作用外力と最大変位が与えられる。たとえば橋脚上にこのダンパーを設置するとき、この橋脚の頂部の最大限界水平力を設定し、この荷重を超えたとき、ダンパーとなる鋼管が塑性変形し、変形の許容範囲内で繰り返し外力によるエネルギーを吸収してくれることが要求される。すなわち鋼材を用いた弾塑性ダンパーでは、ダンピング効果と同時に、ある一定作用力値以上でスイッチ反応するブレーカーの役割を持たせることができる。

ここでは Fig. 1 に示すように、単純に鋼管の一方を固定し、他方に片持ちばりを結合したダンパーを考える。この鋼管の一方の端にねじりモーメント T を与えたとき、ねじり角 θ が生じたとすると、弾性域では T と θ の間に式 (1) に示す関係がある（せん断剛性 G ）。塑性域での T と θ の間の関係（せん断剛性 G' ）が Fig. 2 に示すような直線関係になると仮定すると、降伏ねじりモーメント T_y 以上では式 (2) の関係となる。

$$\text{弾性域: } T = \frac{\pi G D^3 t}{4h} \theta = \frac{\pi D^2 t}{2} \tau \quad (1)$$

$$\text{塑性域: } T = \frac{\pi D^3 t}{4h} [G' \theta + (G - G') \theta_y] \quad (2)$$

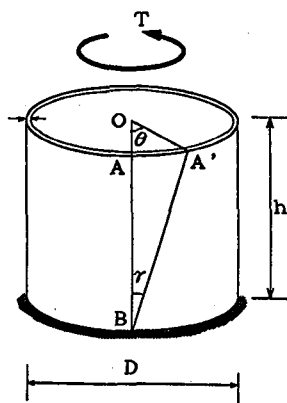


Fig. 1 Steel Tube subjected Torque at an End

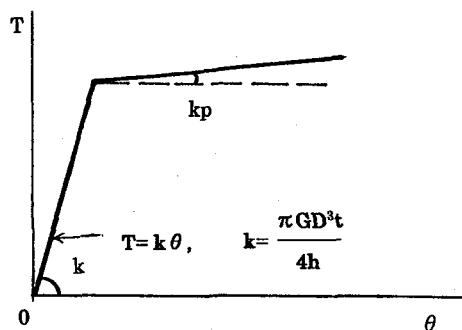


Fig. 2 Idealized Relationship between Torque T and Twisting Angle θ

ここに、 D : 鋼管の直径、 h : 高さ、 t : 板厚、 G : せん断弾性係数 $[=E/2(1+\nu)]$ 、 E : ヤング係数、 ν : ポアソン比。
 θ_y : 降伏ねじり角

今回は設計降伏作用力 $20tf$ とし、鋼管端部につける片持ちばりのアーム長 $135cm$ 、力の作用点までの繰り返し最大変位 $40cm$ を基本設計条件とした。これは片振り角度約 16.5° に相当し、円運動の影響を受けにくい小さな角度と考えられる。また $D/t \leq 50$, $h/D \leq 1$, 10 回以上の繰り返し外力に対して、塑性率 $\mu = \theta_{\max}/\theta_y = 100$ 程度を目標とした。

鋼管は材質 STK400 の電縫鋼管とし、カタログから $D=355.6mm$, $t=7.9mm$ ($D/t=45$) を選んだ。高さは $h=350mm$ ($h/D=0.98$) とした。電縫鋼管は一般に降伏点が公称値よりかなり上昇することが知られている。そこで予想降伏応力度 $\sigma_y = 3.2 tf/cm^2$ ($\sigma_y/\sigma_F=1.33$, 公称降伏応力 $\sigma_F=2.4 tf/cm^2$) と仮定すると、 $\tau_y = \sigma_y/\sqrt{3} = 1.85 tf/cm^2$ となる。これを式 (1) に代入すると、降伏トルクは $T_y = 27.7 tf \cdot m$ 、降伏載荷荷重 $Q_y = T_y/1.35 = 20.53 tf$ となる。またこのとき降伏ねじり角は $\theta_y = 4h T_y / (\pi G D^3 t) = 0.0046 rad$ である。以上設計の手順を示した。

(2) 実験供試体

鋼管をねじると座屈を生じることが予想されるため、実験供試体は鋼管のみのもの（試験体記号 ERT-NO）以外に、座屈防止のために鋼管の内部に別の鋼管（外径 $343mm$, $t=8mm$, 隙間 $2.5mm$ ）を入れた試験体（ERT-ST）、コンクリートを部分的に充填した部材（ERT-CP）、鋼管内部すべてにコンクリートを充填したもの（ERT-CF）の 4 種をそれぞれ各 1 体用意する。これを Fig. 3 に示す。鋼管の両端は Fig. 4 に示すように厚板のフランジが溶接されている。

コンクリートを鋼管内部に全充填した場合、ねじりにより鋼管両端部が中央部に近づくのを内部コンクリートが拘束し、鋼管の軸方向に引張りが生じて材料の劣化を早めると考えられたため、コンクリートを部分充填した試験体（ERT-CP）を用意した。これは底部を $2cm$ 底上げして、コンクリートを打ち込み、上部に約 $5cm$ の空隙を設けたものである。

2.2 実験方法

(1) 載荷方法

ねじり載荷実験装置を Fig. 5 に示す。これを $300 tf$ 長柱試験機（圧縮 $300tf$ 、引張り $100tf$ ）内にセットし、静的に繰り返し載荷を行う。供試体（図中塗りつぶし部）は、一端をベースフレームにはめ込んで固定し、他端は載荷ドラムに高力ボルトで結合して、ねじり力のみ作用させる。鋼管供試体の軸方向縮みは拘束しない。載荷ドラムは回転できるように、ベースフレームに固定した 2 枚

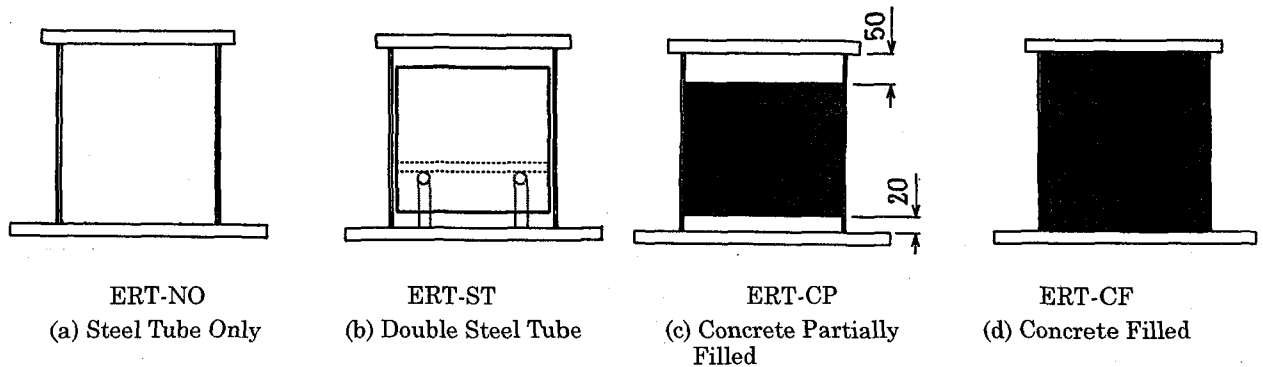


Fig. 3 Test Specimens

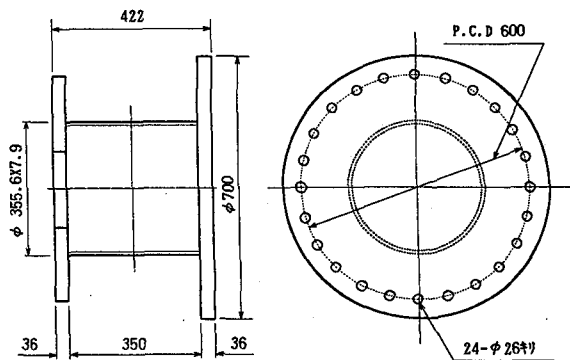


Fig.4 End Plate of the Test Steel Tube

の穴あきプレートに通し、載荷アームを溶接で固定している。

繰り返し載荷の載荷経路は ① $P/2$ 、② $P=\pm P_y$ 、③ $\delta=\pm 10\text{cm}$ 、④ $\delta=\pm 25\text{cm}$ 、⑤ $\delta=\pm 40\text{cm}$ で、以降、供試体が破壊するまで ⑤を繰り返す。ここに、 P_y は予想降伏荷重、 δ はアーム先端の載荷点の変位とする。

(2)測定方法

Fig. 5 に示す載荷装置の載荷アーム、ベースフレーム間ABの変位、および試験体のねじり回転角の測定のために糸巻き式変位計を使用した。ねじり回転角は供試体端部のエンドプレート（円形フランジ）の円周に沿って変位計の糸を巻いて測定を行う。

3. 実験結果とその考察

3.1 鋼材の引張試験結果

鋼材(STK400)の素材引張り試験の結果、応力とひずみ関係は明瞭な降伏棚を示さなかったため、0.2%オフセット応力 $\sigma_{0.2}$ を降伏応力とした。実験結果より、ヤング係数 $E=2.11 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_{0.2}=3556 \text{ kgf/cm}^2$ 、最大引張応力 $\sigma_u=4820 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.28$ が得られた。また、コンクリートの最大圧縮強度は $\sigma_{cu}=317 \text{ kgf/cm}^2$ であった。 $\sigma_{0.2}=3556 \text{ kgf/cm}^2$ を用いてせん断降

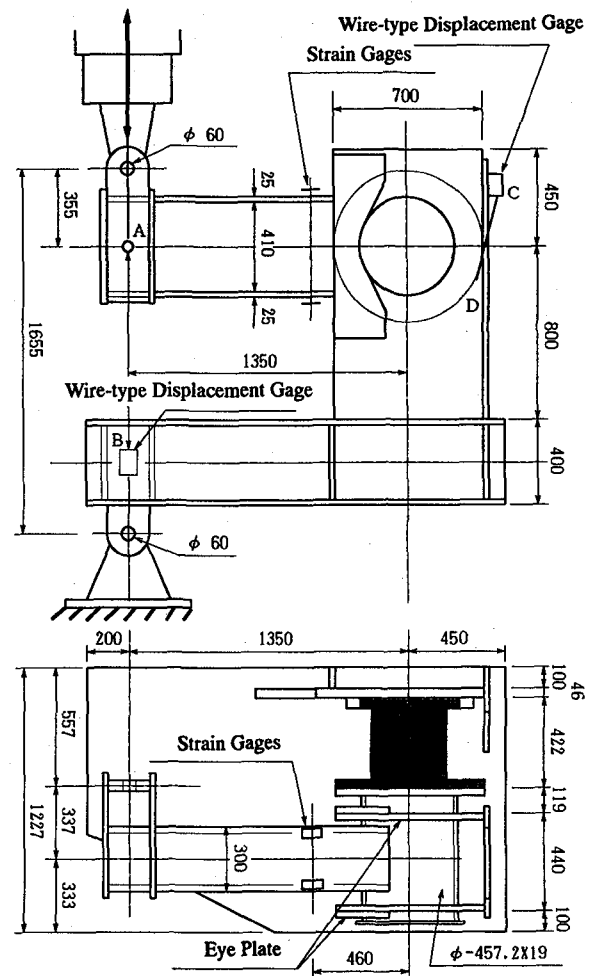
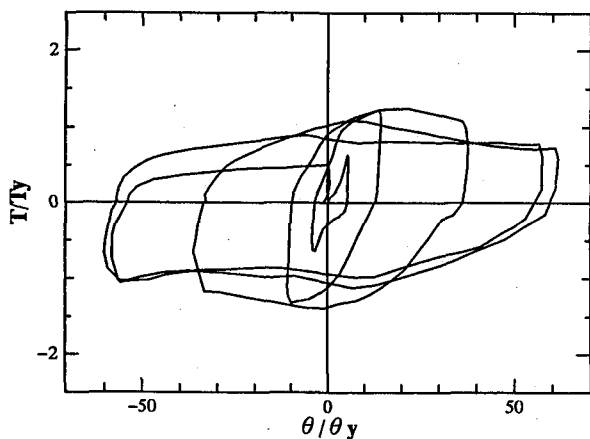


Fig.5 Torsion Loading Device

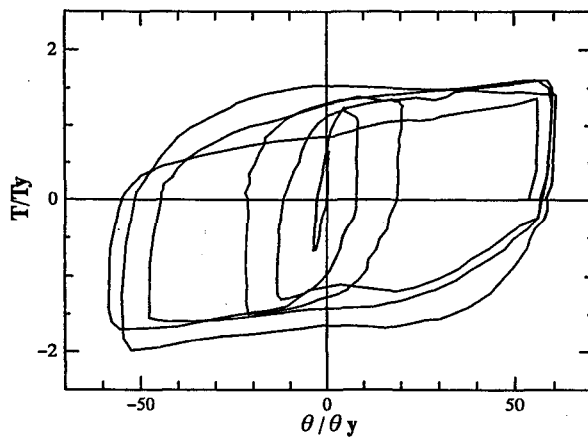
伏応力 $\tau_y = \sigma_{0.2}/\sqrt{3} = 2053 \text{ kgf/cm}^2$ を求め、式 (1) に代入して降伏ねじりモーメントを求めたところ $T_y = 30.8 \text{ t} \cdot \text{m}$ となった。またこのときの降伏ねじり角は $\theta_y = 0.0051 \text{ rad}$ となる。以後の実験データの無次元化にはこれらの値を用いた。

3.2 繰り返しねじり載荷試験結果

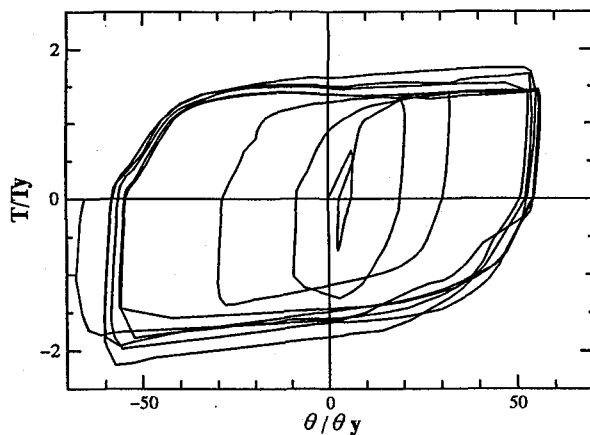
(1) 繰り返しねじり－変形特性



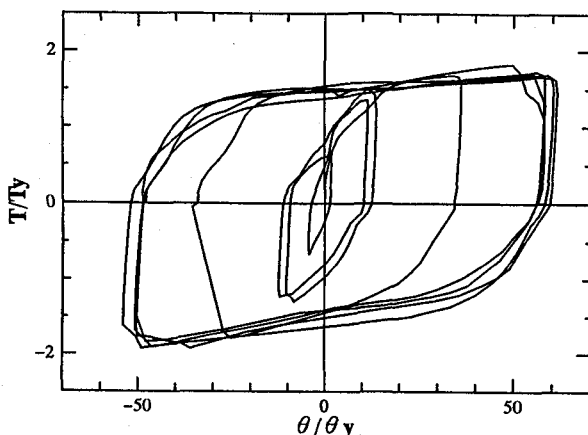
(a) Steel Tube Only (ERT-NO)



(b) Double Steel Tube (ERT-ST)



(c) Concrete Partially Filled (ERT-CP)



(d) Concrete Filled (ERT-CF)

Fig. 6 Relationship between Torque T/T_y and Twisting Angle θ/θ_y

各供試体のねじり外力 T とねじり角 θ の関係を Fig. 6 (a)-(d) に示す。 T および θ はそれぞれ降伏モーメント T_y と降伏ねじり角 θ_y で無次元化している。

鋼管のみの部材 (ERT-NO) は3サイクル目で最大荷重に達し、以後はその 70% の荷重を2サイクル繰り返して鋼管中央部に亀裂を生じて破壊した。

2重鋼管部材 (ERT-ST) では内部の鋼管が座屈防止として働き、変形特性は鋼管のみの部材より4サイクル目での吸収エネルギーで約1.5倍の値に改善されている。

コンクリートを部分充填した部材 (ERT-CP) では最も

大きな繰り返し回数が得られた。すなわち $\mu = \theta/\theta_y = \pm 50$ もの大きな塑性率で、6回の繰り返しに対しても安定したヒステリシス曲線が得られた。

コンクリートを全充填した試験体 (ERT-CF) でも鋼管のみ、あるいは2重鋼管に比べ、安定した繰り返しループを描いたが、コンクリート部分充填部材よりは繰り返し回数で約2割劣った。

最大ねじりモーメントはコンクリート部分充填部材 (ERT-CP)、コンクリート全充填部材 (ERT-CF)、二重鋼管部材 (ERT-ST)、補強なし部材 (ERT-NO) の順に大きく、降伏ねじりモーメント T_y の約1.3~2.0倍の範囲にあった。実験で得られた主な数値を Table 1 にまとめる。

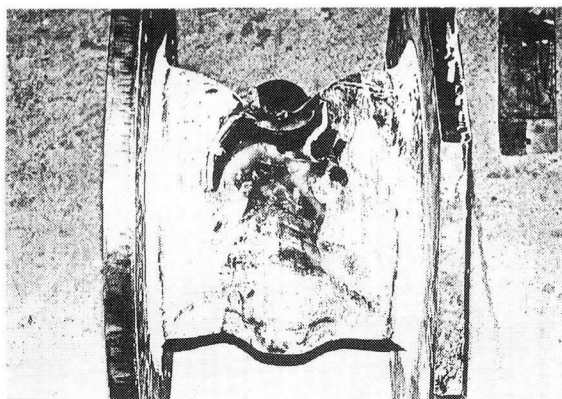
なお Fig. 6 の2サイクル $\pm P_y$ で、既に塑性履歴を描いているように見えるのは 3.1 の引張り試験結果で述べたように、素材の応力ひずみ関係が明瞭な降伏棚を示さず、0.2% オフセット応力を降伏応力として用いたためである。

(2) 変形—破壊モード

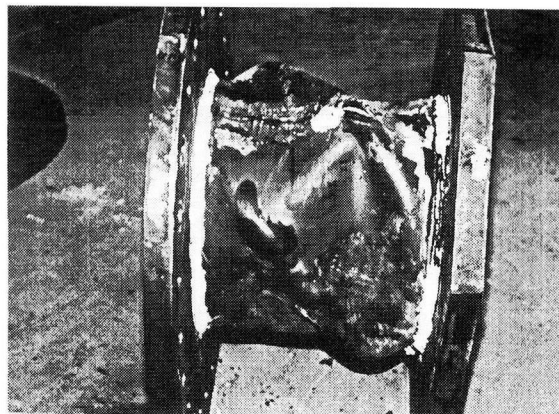
a. 鋼管のみの試験体

Table 1 Torsion Test Results

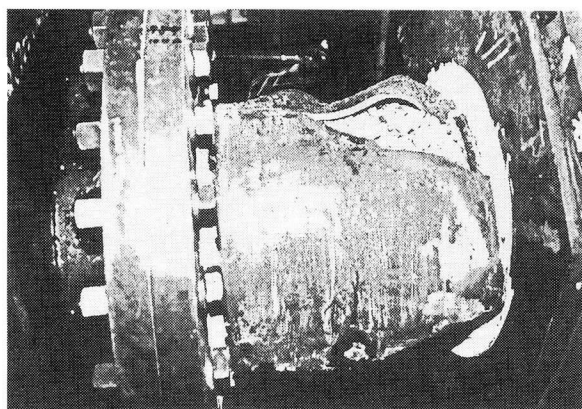
Test Specimen	Maximum Torque T_u (tfm) (T_u/T_y)	Repeated Number at $\delta=40$ cm
ERT-NO	40.3 (1.31)	2.25
ERT-ST	54.8 (1.78)	3.50
ERT-CP	60.1 (1.95)	6.00
ERT-CF	57.3 (1.86)	4.75



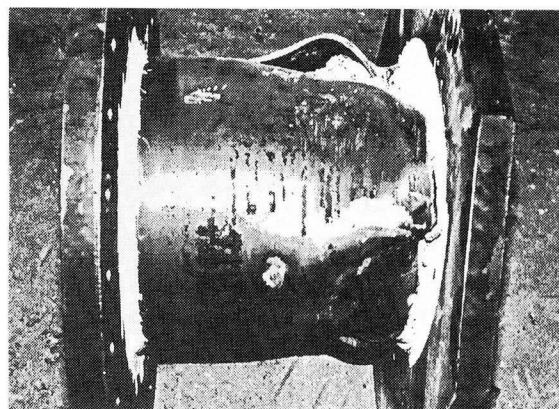
(a) Steel Tube Only (ERT-NO)



(b) Double Steel Tube (ERT-ST)



(c) Concrete Partially Filled (ERT-CP)



(d) Concrete Filled (ERT-CF)

Photo 1 Test Specimens after Test

鋼管のみの試験体（ERT-NO）は3サイクル目で最大荷重に達した後、鋼管腹部で半径が小さくなるよう、斜め方向にしわが寄る形で座屈を生じ、最終的に管の中央部が破れて破壊した（Photo 1(a) 参照）。

極めて薄い管のねじりでは純粋なせん断座屈を生じることが考えられるが、今回の実験のような材料の塑性化に伴う大きなねじり変形のもとでは、鋼管が絞り込まれ、径の小さくなるような座屈モードが観察された。このような座屈様式は構造部材では一般的には現れないものであり、パイプおよびシェルの座屈に詳しい座屈設計のガイドライン⁶⁾ 他の座屈関係参考書⁷⁾⁸⁾ にも示されていない。せん断座屈に加え、この種の座屈変形を生じさせる圧縮力の発生は以下のように説明できる。

Fig. 7 (a) は管の一部を切り出したもので、はじめに軸方向にあった線素 AB がねじられて A' B' になったとする。同図 (b) はこれを横から見たもので、比較的大きなねじれ変形が生じた後は、線素の端 A' B' は斜め下方に力 T で引張られ、線素にはこれにつり合う分布反力 q が発生する。これと大きさ等しく逆向きの力が管全体に中心に向かう力として作用する。

このようなねじりに伴う中心方向への圧縮力は、水を含んだタオルを絞ることなどによって、我々は日常的に経験していることで目新しいことではない。しかし構造部材の座屈という観点から分類されたものは著者の知る限り見たことはなく、ここでは「管の絞り座屈 (Wring out Buckling)」と呼ぶことにする。

開断面部材等の曲げねじり座屈、純ねじり座屈ではねじり変形そのものが座屈モードであるのに対し、「絞り座屈」では比較的大きな塑性ねじり変形に伴って生じた中心方向への圧縮力とせん断力とによる複合せん断座屈といえる。鋼管のねじりダンパーではこのような座屈変形に伴う繰返し耐力、または変形能の低下防止が重要となる。

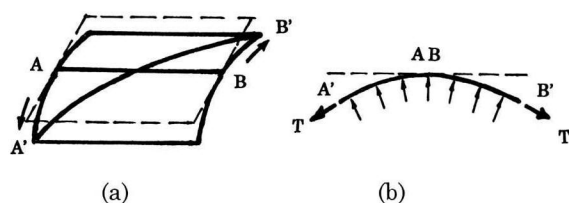


Fig. 7 Wring out Force in the Tube

b. 二重鋼管

二重鋼管部材の利点はコンクリート詰めにくらべて軽いことであるが、座屈変形が局部的に内側鋼管に作用するため、内部鋼管も変形しやすく、単管に比べればかなり改善されるものの、変形防止効果は十分とは言えない(Fig. 6 (b) 参照)。今回の実験でも繰り返し載荷に従い、大きなしわが生じて耐力を失った(Photo 1 (b))。

c. コンクリート充填管

コンクリートを部分的に充填したERT-CPは座屈変形が最も効果的に防止され、端部から鋼管に向かって割れが生じるまで、局部的な座屈は見られなかった。コンクリートを全充填したERT-CFは内部コンクリートによって、ねじりに伴う両端部の縮みが拘束され、最終的に鋼管とフランジの溶接部が割れを生じて破壊した。

これらの結果より、コンクリートを部分的に充填した部材が最も優れた変形能力を与えることが実験的に確かめられた。

(3) エネルギー吸収能力

累積エネルギー吸収量AEを Fig. 6 の荷重—変形量関係から計算し、累積ねじり角 θ ⁹⁾ との関係を図示すると Fig. 8 を得る。同図より、すべての供試体において累積エネルギー量は累積ねじり角と比例関係にあったが、単管部材のみ勾配が小さい。累積エネルギー吸収量は最大トルクと同じく、コンクリート部分充填管 (ERT-CP)、コンクリート全充填管 (ERT-CF)、二重鋼管 (ERT-ST)、鋼管のみ (ERT-NO) の順に大きかった。特にコンクリート部分充填管では破壊までの累積エネルギー吸収量は311tf・m、累積ねじれ角は7.4 rad (424°) にも達した。これは予想以上の変形量で、せん断ひずみの累積値では735% になる。

単位ねじり角あたりの累積エネルギー吸収量 AE / θ_{un} を1サイクル毎に求め、累積ねじり角 θ との関係

を図示するとFig. 9 になる。単位ねじり角あたりの累積エネルギー吸収量は、単管および二重鋼管ではそれぞれ 0.9 rad, 1.4 radで最大に達し、その後鋼管に座屈変形を生じたため減少したが、コンクリートを充填した部材 ERT-CP, ERT-CFでは 2rad 以降もほぼ一定の安定した値を示した。

(4) 等価剛性と等価減衰

一般的な免震装置の減衰性能評価に用いられる等価剛性と等価減衰定数を Fig.6 のねじり外力 T とねじり角 θ の関係 ($\delta = \pm 40\text{cm}$ でのヒステリシスの平均値) から算出した結果を Table 2 に示す。ただし、ここではアイソレーターのパネ定数が非常に小さい弾塑性ダンパーを想定した。したがって、等価剛性および等価減衰定数はアイソレーターを有している一般的な免震装置と同様の算出方法を用いている。これより、等価剛性については、鋼管のみの場合(ERT-NO)を基準に比較すると、2重鋼管部材の場合(ERT-ST)では約1.9倍、コンクリートを充填した場合(ERT-CP, ERT-CF)で約2.3倍となり、それぞれの効果が現れているといえる。

一方、等価減衰定数は、鋼管のみの場合(ERT-NO)を他の供試体と比較すると約1割程大きくなっているが、どの供試体についてもほぼ50%程度の値と非常に優れた減衰性能を示した。

4. まとめ

本研究は市販の電縫鋼管を利用した弾塑性ねじりダンパーの性能実験を行ったものである。実験による結果は以下のようにまとめられる。

(1) 鋼管は塑性域での大きなねじり変形によって「絞り座屈」を生じることがある。

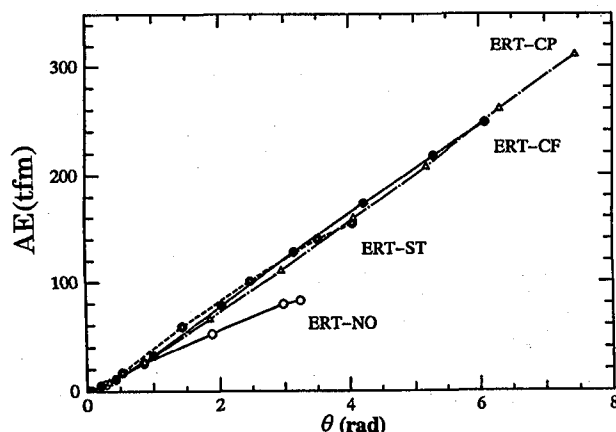


Fig. 8 Accumulate Dissipating Energy and Accumulate twisting Angle

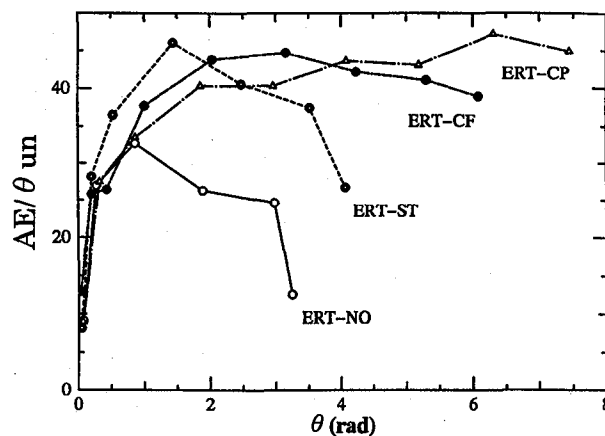


Fig. 9 Accumulate Dissipating Energy per unit Twisting Angle and Accumulate twisting Angle

Table 2 Damping Capacity

Test Specimen	Equivalent Stiffness At $\delta=40\text{cm}$ (tf·m/rad)	Equivalent Damping Coefficient at $\delta=40\text{cm}$
ERT-NO	0.0146 T_y / θ_y	52 %
ERT-ST	0.0283 T_y / θ_y	47 %
ERT-CP	0.0335 T_y / θ_y	49 %
ERT-CF	0.0341 T_y / θ_y	47 %

(2) 鋼管のみの試験体 (ERT-NO) では座屈変形が早期に起こるため、0.9rad で累積エネルギーの最大値に達し、最大ねじりモーメント T_u および変形能力は他の部材に比べて著しく低い値となった。二重鋼管は単管より性能向上の効果がかなりあったが、1.4 rad 累積エネルギーの最大値に達し、その付近で明瞭な座屈変形が現れ、変形能力が低下した。

(3) コンクリートを部分充填した試験体 (ERT-CP) と全充填した試験体 (ERT-CF) では破断まで座屈変形は見られず、最大ねじりモーメントは降伏ねじりモーメント T_y の約1.5倍もの高い値となった。またコンクリートを充填しない部材に比べ、耐力の安定した繰り返し変形特性が得られた。

(4) コンクリートを部分的に充填した部材の方が全充填した部材より累積ねじり角が約 20% 大きかった。したがって、コンクリートは全充填ではなく部分的に充填するのがよい。

(5) コンクリートを部分的に充填した部材では累積エネルギー吸収量は $311\text{tf}\cdot\text{m}$ (単位重量あたり $13.1\text{tf}\cdot\text{m}/\text{k}\cdot\text{gf}$)、累積ねじり角は 7.4rad (424°)、せん断ひずみの累積値 735% もの極めて大きな変形能力が得られた。

(6) 累積ねじり角に対する単位ねじり角あたりのエネルギー吸収量の変化は、単管および二重鋼管ではエネルギー吸収量の最大点以降、鋼管部の座屈変形によりエネルギー吸収量の低下がみられるが、コンクリートを充填した部材ではエネルギー吸収量は最大時以降も比較的安定した性状を示した。

(7) 等価剛性に関しては、鋼管のみの場合 (ERT-NO) を基準とすると二重鋼管部材の場合 (ERT-ST) で約1.9倍、コンクリートを充填した場合 (ERT-CP, ERT-CF) で約2.3倍となりそれぞれの効果を示した。等価減衰定数に関しては、供試体の違いによる顕著な差は見られず、約50%の値を示し、非常に優れた減衰性能を有することが分かった。

謝辞

本研究での実験は宮崎和彦君 (現建設省土木研究所構造橋梁部研究員) ほかの卒研究生によって行われたものである。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 川島一彦・運上茂樹：バリアブルダンパーを用いた道路の地震応答制御、土木学会論文集、第501号 / I-29, pp143-152, 1994-10
- 2) 佐藤忠信・土岐憲三・佐藤誠：可変減衰装置の開発と減衰力の制御システムの構築、土木学会論文集、第570号 / I-40, pp203-215, 1997-7
- 3) Masayoshi Nakashima, Satoshi Iwai et al: Energy Dissipation Behaviour of Shear Panels Made of Low Yield Steel, Earthquake Engr., and Structural Dynamics, Vol. 23, No.12, 1299-1313, 1994
- 4) 中村庄滋・寺田岳彦他：鋼管のねじれ降伏を利用した弾塑性ダンパーに関する研究 (その1. 弾塑性ダンパーの低サイクル疲労特性)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp1227-1228, 1993年9月
- 5) 秋山 宏：建築物の耐震極限設計、東京大学出版会、1987
- 6) 土木学会鋼構造委員会：座屈設計のガイドライン、土木学会、鋼構造シリーズ2、pp.315-346, 1987, 10月
- 7) T.V. Galambos edit: Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, John Wiley & Sons, 4th Edition, 1988.
- 8) 土木学会鋼構造委員会：構造力学公式集、土木学会、昭和61年
- 9) 秋山 宏：鉄骨柱脚の耐震設計、技報堂出版、p129, 1996

(1997年9月26日受付)