

## 鋼管を用いたねじりダンパーの開発および性能に関する実験的研究

### An experimental study on development torsional dampers using steel tube

青木徹彦<sup>†</sup>、鈴木森晶<sup>††</sup>、遠藤輝好<sup>†††</sup>

Tetsuhiko AOKI, Moriaki SUZUKI, Kiyoshi ENDOH

Abstract : Constructing the structure antiseismic experiment center in Aichi Institute of Technology is to introduce the seismically isolated device the seismic isolation bearing of rubber and the damper of torsion make used of steel tube. In the results of experiment, we gave a cyclic experiment of the damping part of the seismically isolated device. In result, we obtained large the deformation ability and the wave damping ability.

#### 1. 序論

現在、本学に建設中の構造物耐震実験センターは、兵庫県南部沖地震以後重要視されている耐震に関する大規模実験センターとして、その役割が期待されている。

構造物試験体を支持する反力床は 1000tf もの非常に大きな質量があるため、地震時に支持基礎壁に過大な作用力を与えるものと思われる。また、実験中の振動が周囲へ及ぼす影響が心配されるため、反力床を地盤などから切り離す必要がある。そこで、微小振動および地震動に対応できる免震構造を採用することとなり、免震ゴム支承と鋼管を用いたねじりダンパーからなる免震装置を導入することになった<sup>1)</sup>。

本研究では、電縫鋼管を用いたねじりダンパーを開発するとともに、極低降伏鋼材を用いた鋼管を製作し、より高性能なねじりダンパーに発展させることを目的とし、静的繰返し載荷実験を行った。実験結果より、変形性能、エネルギー吸収性能などの免震性能の確認、および問題点についての検討をおこなう。

#### 2. 実験計画および実験方法

##### 2・1 実験供試体材料

<sup>†</sup>愛知工業大学教授 土木工学科 (豊田市)

<sup>††</sup>愛知工業大学講師 土木工学科 (豊田市)

<sup>†††</sup>愛知工業大学院 建設システム工学専攻

実験供試体の鋼管の材料には、電縫鋼管 STK400、および、新日本製鐵(株)製の弾塑性履歴型ダンパー用鋼材 BT-LYP100, BT-LYP235 (極低降伏鋼材)を用いる。極低降伏鋼材の特徴は、以下の通りである。

- 降伏点が低い。
  - 伸び性能が 40% 以上であり、非常に大きな変形性能を有する。
  - 一般構造用鋼材と同等以上の溶接性があり、一般的な溶接が可能である。
- というものである。

##### 2・2 鋼管の弾塑性ねじりダンパーの設計

Fig. 1 のように鋼管の一方を固定し、他方に片持ちばりを結合し、ねじりモーメント  $T$  を与えたとき、ねじり角  $\theta$  が生じたとすると、 $T$  と  $\theta$  の関係はそれぞれ

弾性域では、

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

塑性域では、 $T$  と  $\theta$  の関係が Fig. 2 に示す直線関係になると仮定すると、降伏ねじりモーメント  $T_y$  以上では以下の式(2)の関係となり、

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

で求めることができる<sup>2)3)</sup>。

ここで、 $D$  : 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,  $\nu$ :ポアソン比,  $\theta_y$ :降伏ねじり角,  $\tau$ :せん断応力,  $G'$ :降伏後のせん断弾性係数,  $\theta$ :ねじり角である。

予想降伏応力を  $\sigma_y$  とすると、降伏せん断応力  $\tau_y$  は次式のように表わされる。

$$\tau_y = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

これを式(1)に代入すると、降伏トルク  $T_y$  が得られる。

降伏トルク  $T_y$  を鋼管の中心から水平荷重を与える点までの距離で割ったものが、実験時の降伏載荷荷重である。また、この時の降伏ねじり角は  $\theta_y = 4h T_y / (\pi G D^3 t)$  で表される。

2・3 実験供試体

ダンパー側面図、正面図を Fig. 3 に、実験供試体(鋼管部材)を Fig. 4 に示す。鋼管部分は電鍍鋼管 STK400 ( $t=4.5\text{mm}$ ) を用いたものと、極低降伏鋼材 BT-LYP100, 235 ( $t=6\text{mm}$ ) を直径 114.3mm、高さ 120mm (実験時の有効高さ: 90mm) の鋼管に

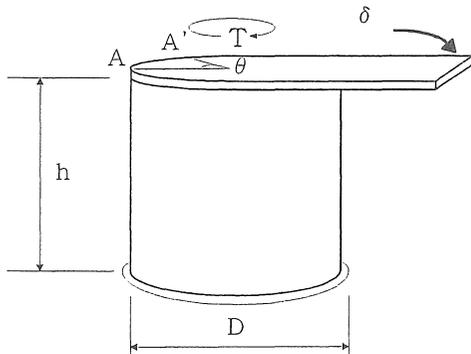


Fig.1 ねじり関係図

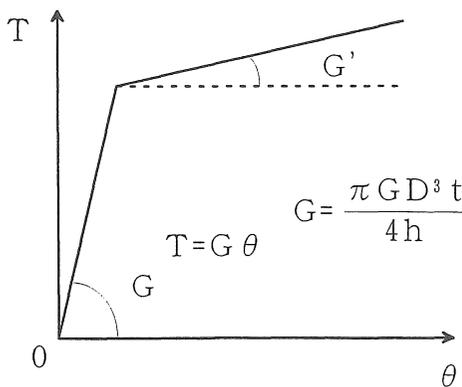


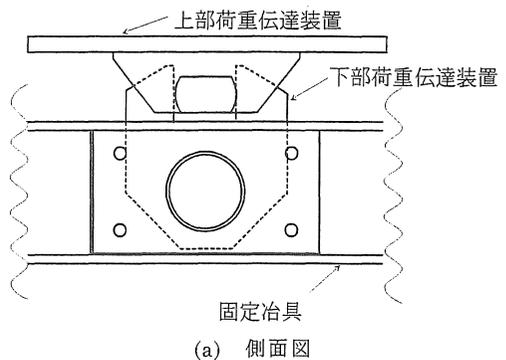
Fig.2 T- $\theta$  理想関係図

半割曲げ加工したものである。鋼管は、Fig. 4 のように  $t=15\text{mm}$  の鋼板を溶接し、固定治具とボルト結合する。上部荷重伝達装置の鋼棒と下部荷重伝達装置には S35C、その他の部分については SS400 の鋼材を使用する。上部荷重伝達装置を Fig. 5、固定治具を Fig. 6、下部荷重伝達装置を Fig. 7 に示す。

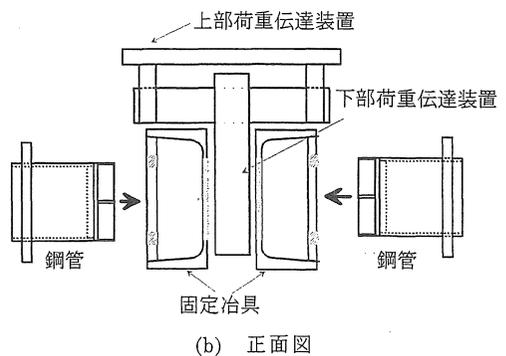
実験は、コンクリート充填による絞り座屈の抑制効果<sup>2)</sup>を視野に入れ、鋼管にコンクリートを充填するものと充填しないものについて行う。

2・4 実験方法

実験装置の全体図を Fig. 8 に示す。アクチュエータに接続した載荷アームにより水平方向の繰返し載荷を行う。水平荷重を荷重伝達装置により、鋼管をねじる力へと変換する。また、変位 90mm で上部荷重伝達装置と下部荷重伝達装置が外れてしまうため、最大変位 80mm を目標とし、載荷経路は① $\pm Qy/2$ 、② $\pm Qy$ 、③ $\pm 20\text{mm}$ 、④ $\pm 40\text{mm}$ 、⑤ $\pm 60\text{mm}$ 、⑥ $\pm 80\text{mm}$  とする。すなわち、降伏荷重  $Qy$  まで荷重で制御し、以降は変位制御とする。 $\pm 80\text{mm}$  に達したあとは、破断が起こるまで  $\pm 80\text{mm}$  を繰り返す。



(a) 側面図



(b) 正面図

Fig.3 ダンパー側面図・正面図

2・5 変位計取り付け位置および計測

変位計取り付け位置は Fig. 5 に示した上部荷重伝達装置と Fig. 6 に示した固定治具との相対変位

により水平変位を測定する。変位計は 2ヶ所取り付け付けた。

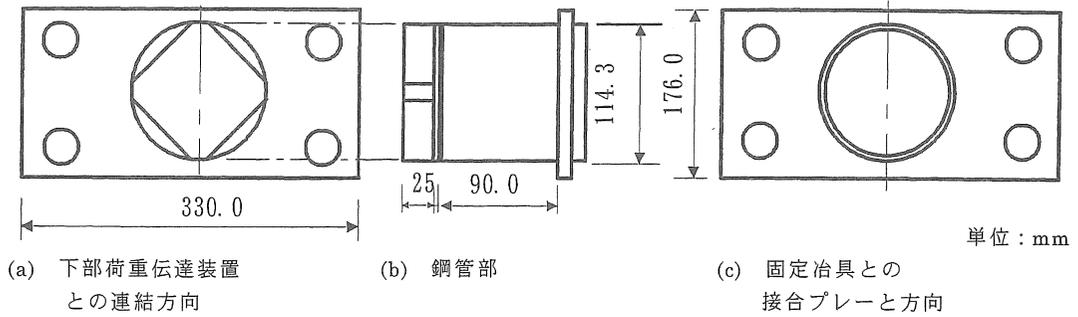


Fig.4 鋼管部

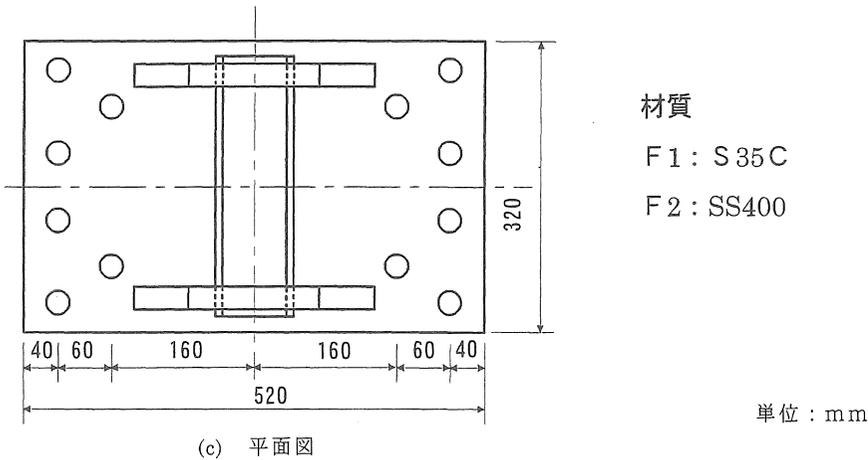
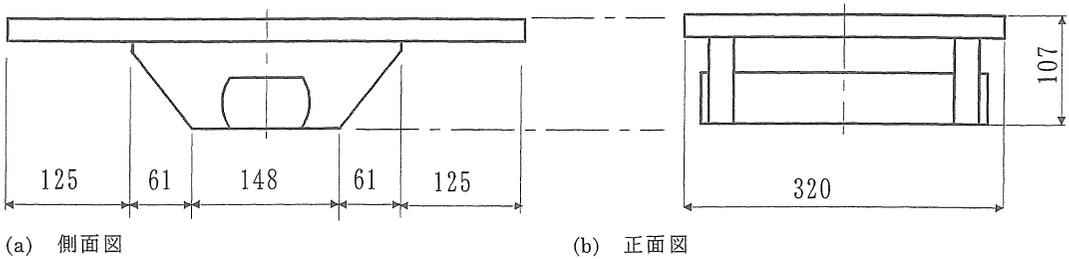


Fig.5 上部荷重伝達装置

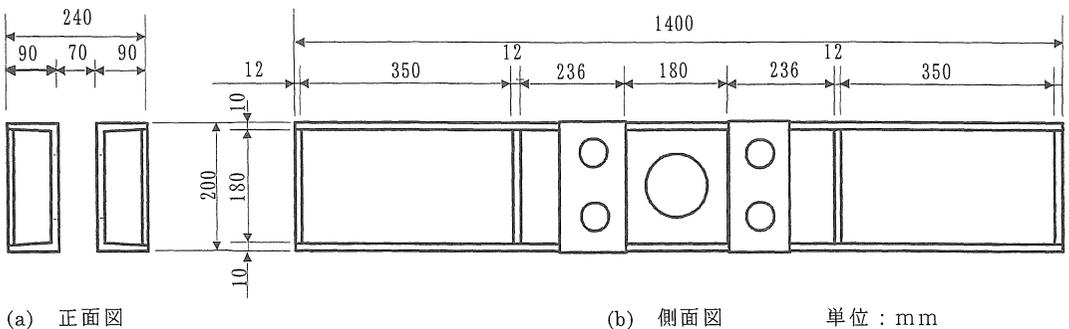


Fig.6 固定治具

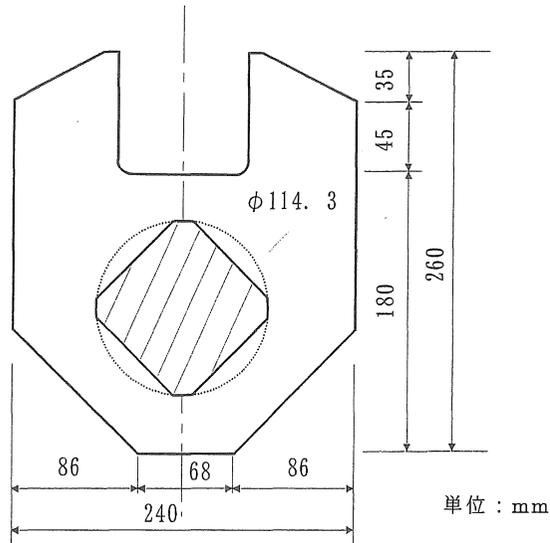


Fig.7 下部荷重伝達装置

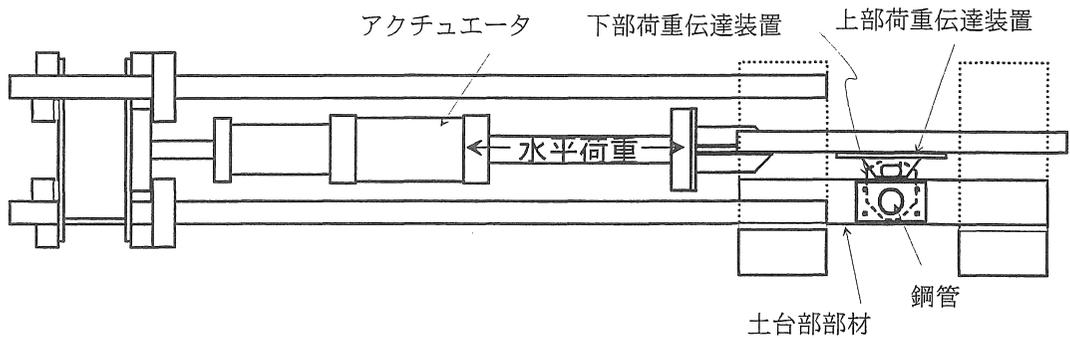


Fig.8 実験装置全体図

### 3. 実験結果および考察

#### 3・1 素材引張試験

実験供試体に使用した BT-LYP100、BT-LYP235 の鋼管、および STK400 より取り出した板材を、JIS 12 号 B 試験片 (JIS Z 2201, 標点距離 50mm) に加工した。

素材引張試験の結果、応力とひずみの関係は明瞭な降伏棚を示さなかったため、0.2% 応力を降伏応力とした。

実験により得られた諸値を Table. 1 に示す。以後の実験データの無次元化にはこれらの Table. 1 の値を用いた。

極低降伏鋼材は、 $\sigma_{0.2}$  で STK400 の 40%~60%、伸び率は 45~60% の値が得られ、この鋼材の特徴である低降伏、および非常に大きな変形性能を

示した。

#### 3・2 繰り返し水平荷重載荷実験結果

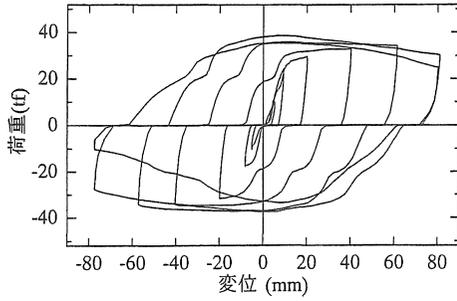
各供試体の水平荷重-水平変位曲線 (履歴曲線) を Fig. 9(a)~(f) に示す。各供試体を比較すると、荷重があがるとき段差が現れているが、これは鋼管が固定治具の中心を丸くカットしている部分に接触しはじめるときに荷重が上昇するためと思われる。以下、各供試体ごとに考察する。

##### 3・2・1 STK400

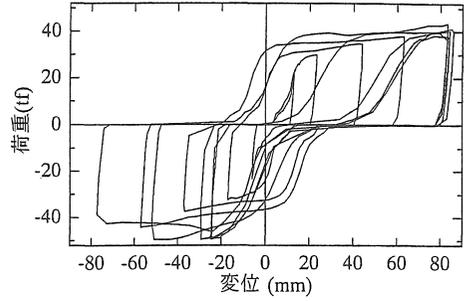
STK400 の水平荷重-水平変位曲線 (履歴曲線) を Fig. 9(a) に示す。4 サイクル目以降座屈が徐々に生じ始めた。5 サイクル目に最大荷重 38.7tf に達した。7 サイクル目に鋼管の座屈変形に耐えられず、鋼管の先端に溶接した部品と鋼管との接

Table.1 素材引張り試験

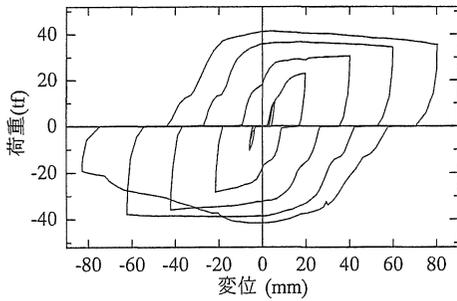
	$E(\text{kgf/cm}^2)$	$\sigma_{0.2}(\text{kgf/cm}^2)$	$\sigma_u(\text{kgf/cm}^2)$	伸び率(%)	$\nu$
STK 400	$2.12 \times 10^6$	3556	4820	39.9	0.25
BT-LYP 100	$2.16 \times 10^6$	1474	2636	57.4	0.30
BT-LYP 235	$2.18 \times 10^6$	2288	3375	46.2	0.29



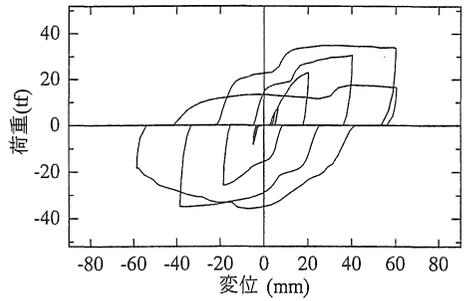
(a) STK400



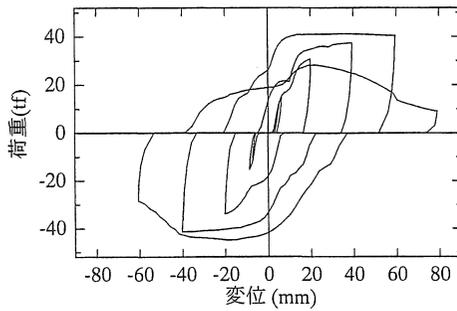
(b) STK400-C



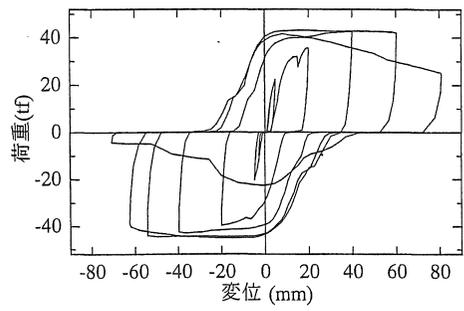
(c) BT-LYP100



(d) BT-LYP100-C



(e) BT-LYP235



(f) BT-LYP235-C

Fig.9 履歴曲線

合部の溶接に亀裂を生じ破壊した。最大荷重 38.7tf 最大変位 80.11mm を記録している。

### 3・2・2 STK400-C (STK400 のコンクリート充填)

STK400-C の水平荷重-水平変位曲線(履歴曲線)を Fig. 9(b)に示す。6 サイクル目の負方向で、最大荷重 49.45tf (アクチュエータの限界)に達した。以後、正方向は、80mm で繰り返し、負方向は変位制御ではなく、49.45tf のアクチュエータの限界に達した時点で除荷する方法で行った。最大荷重 49.75tf、最大変位 83mm を記録している。

ほかの供試体と比較して履歴曲線の形状が異なっている。この実験のみ下部荷重伝達装置に SM490 を使用したため、下部荷重伝達装置の切り欠き部分が実験前 88mm だったものが、実験後 118mm まで広がってしまった。また同時に、鋼管を差し込む部分に変形が生じた。そのため荷重 0tf 付近での遊びが大きくなったと考えられる。下部荷重伝達装置に遊びが生じなければ安定した履歴曲線が得られたと思われる。

### 3・2・3 BT-LYP100

BT-LYP100 の水平荷重-水平変位曲線(履歴曲線)を Fig. 9(c)に示す。3 サイクル目に鋼管に変形が生じ始めたが以降明瞭な変形は見られなかった。6 サイクル目の負方向時に最大荷重 41.55tf に達し、鋼管腹部の溶接に亀裂を生じ破壊した。最大荷重 41.55tf、最大変位 80.11mm を記録している。

### 3・2・4 BT-LYP100-C (BT-LYP100 のコンクリート充填)

BT-LYP100-C の水平荷重-水平変位曲線(履歴曲線)を Fig. 9(d)に示す。3 サイクル目にコンクリートが出はじめ最大で、6.0mm 近く押し出されている。5 サイクル目の負方向時に最大荷重 35.17tf に達したが、充填コンクリートにより変形が拘束され、溶接部に大きな力が作用したため、鋼管の先端に溶接した部品と鋼管との接合部の溶接に亀裂を生じ、6 サイクル目の変位 +60mm で実験を終了した。鋼管に明瞭な座屈変形は見られなかった。最大荷重 35.17tf、最大変位 60.18mm を記録している。

### 3・2・5 BT-LYP235

BT-LYP235 の水平荷重-水平変位曲線(履歴曲線)を Fig. 9(e)に示す。3 サイクル目に鋼管に

変形が生じ始めたが以降明瞭な変形は見られなかった。5 サイクル目の正方向時に最大荷重 44.85tf に達した。5 サイクル目の負方向時(荷重 42.15tf、変位 39.43mm)に鋼管腹部の溶接に亀裂が生じ、6 サイクル目の正方向時に、荷重が上がらなかったため実験を終了した。鋼管に座屈変形は見られなかった。最大荷重 44.85tf、最大変位 60.35mm を記録している。

### 3・2・6 BT-LYP235-C (BT-LYP235 のコンクリート充填)

BT-LYP235-C の水平荷重-水平変位曲線(履歴曲線)を Fig. 9(f)に示す。3 サイクル目にコンクリートが出はじめ最大で、7.0mm 近く押し出されている。4 サイクル目に最大荷重 43.65tf に達した。5 サイクル目の負方向時(荷重 43.01tf、変位 2.0mm)に鋼管腹部の溶接に亀裂が生じ、6 サイクル目で目立った鋼管の劣化が見られたため実験を終了した。最大荷重 43.65tf、最大変位 62.08mm を記録している。

各供試体を見ると、鋼管の先端に溶接した部品と鋼管との接合部の溶接に亀裂を生じ破壊するのは、その部分が固定治具に接触して圧縮力が加えられ、弱くなっているためと思われる。

## 3・3 エネルギー吸収性能

各供試体の各変位におけるエネルギー吸収量を Fig. 10 に示す。これは各載荷変位ごとの履歴曲線の面積を表したものである。各供試体とも変位が増すごとにエネルギー吸収量が増加していることが分かる。

STK400, STK400-C のエネルギー吸収量は鋼管に絞り座屈が生じたため、これ以上のエネルギー吸収量は望めないが、そのほかの供試体は溶接の亀裂、破損がなければ STK400 程度、もしくはそれ以上のエネルギー吸収性能を示すと思われる。

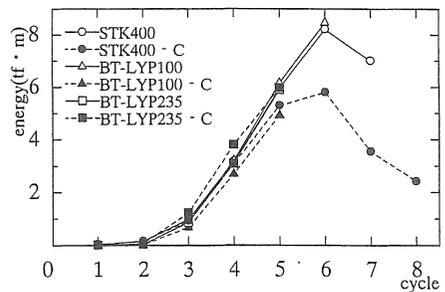


Fig.10 エネルギー吸収量

3・4 等価剛性と等価減衰定数

等価剛性・等価減衰定数を表す非線型復元力特性の等価線形化モデルの図を Fig. 11 に示す。ヒステリシスループを描く、免震部材の特性を表すパラメータとして等価剛性と等価減衰定数が用いられる。等価剛性とは、免震部材の弾塑性特性などの非線形復元力特性を、等価な線形の復元力と減衰力に置き換えたときの剛性で、Fig. 13 の直線 OA の傾き  $k$  をいう。また、等価減衰定数とは、減衰を粘性減衰に等価に置き換えて減衰定数として表現したもので、

$$h = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\Delta w}{w} \right) \quad (4)$$

で表される<sup>4)</sup>。

ここで、 $w$  は半サイクルの間に受渡されるエネルギーで三角形 OAB の面積に相当する。 $\Delta w$  は半サイクルの間のエネルギー損失であり、履歴ループの CAD によって囲まれる面積である。

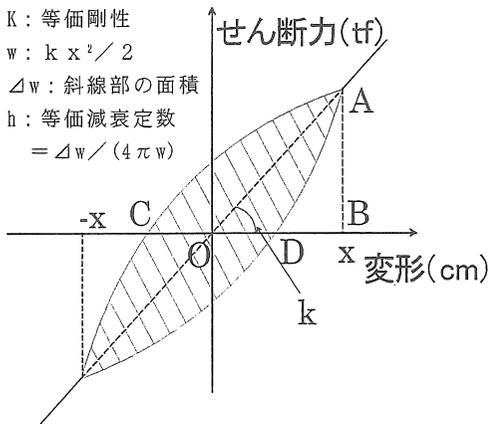


Fig. 11 非線形復元力モデルの等価線

Fig. 9(a)～(f)の荷重と水平変位をそれぞれ降伏荷重、降伏変位で割ることにより無次元化し、等価剛性と等価減衰定数を5サイクル目のデータを用いて算出した。結果を Table. 2 に示す。等価剛性について、それぞれのコンクリート充填ありとなしでは、約 1.06 倍となり、コンクリート充填の効果がわずかにでている。BT-LYP100-C については、コンクリートを充填してあるので、等価剛性が BT-LYP100 より高くなると思われるのだが、低くなっているのは、5 サイクル目で鋼管に損傷があったためと思われる。

一方、等価減衰定数は、他の供試体が約 38% 程度であるのに比べ、STK-400 と BT-LYP100 は、50% 近くを示し非常に優れた減衰性能を持つことがわかる。

以上よりコンクリート充填型供試体は、強度を増した結果伸び性能が失われたと考えられ、減衰性能が低下した。しかし、コンクリート充填型供試体の破断はいずれも溶接部でおきているため、溶接方法の善し悪しによって減衰性能の変化があると思われる

Table.2 等価剛性・等価減衰定数

鋼材の種類	等価剛性 (tf/mm)	等価減衰定数
STK400	0.0220 $Q_y/H_y$	51%
STK400-C	0.0238 $Q_y/H_y$	35%
BT-LYP100	0.0173 $Q_y/H_y$	47%
BT-LYP100-C	0.0169 $Q_y/H_y$	38%
BT-LYP235	0.0199 $Q_y/H_y$	38%
BT-LYP235-C	0.0208 $Q_y/H_y$	37%

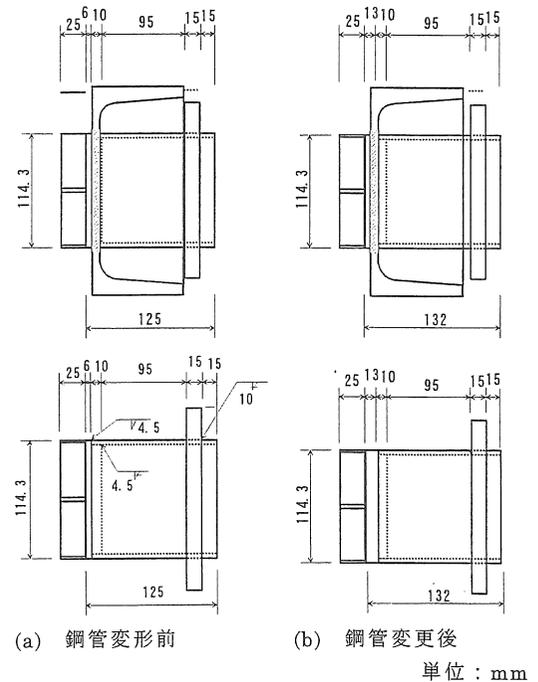


Fig. 12 鋼管部材の改善点

3・5 問題点および改善点

加工された製品が無く、板厚 6mm(極低降伏鋼材の中では最小板厚)の鋼板から半割曲げ加工を

し、それを溶接接合により鋼管を作成したが、極低降伏鋼材に適合する溶接材料がなく、予想より早く溶接に破断が生じてしまった<sup>5)</sup>。そのため、極低降伏鋼材の特性をいかしきれていない。この改善策として鋼管の作成方法を変えるなどがあげられる。

固定治具と鋼管の溶接部分とが接触するため、鋼管に付加的なねじり力と圧縮力が加わる。そのため、鋼管に座屈が生じる前に、鋼管の先端に溶接した部品と鋼管との結合部の溶接に亀裂を生じやすいと思われる。この改善策として、固定治具と接触する部分を鋼管の溶接部分ではなく、鋼管の先に溶接した鋼材ブロックに直接接触するように改良するとよい (Fig. 12)。

#### 4. 結論

本研究は、鋼管を用いた弾塑性ねじりダンパーの免震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) 素材引張試験では STK400 と比べ、BT-LYP100 で最大応力は約 70%、伸びは約 150%、また、BT-LYP235 で最大応力は約 90%、伸びは約 125%の値を示し、大きな伸び性能があることを示した。
- (2) 繰り返し水平荷重載荷実験について、STK400 と STK400-C を比較すると、STK400 の最大荷重 38.7tf に対し、コンクリート充填の供試体は、49.45tf となった。コンクリートを充填することにより、鋼管の強度を増すことができる。また、極低降伏鋼材にコンクリートを充填したもの (BT-LYP100-C、BT-LYP235-C) は、コンクリート充填により変形が拘束され、溶接部に

大きな力が作用したため、溶接部での破損が早期に起こる。

- (3) 伸び性能については、BT-LYP100 が非常にすぐれた伸び性能を有しているものの、極低降伏鋼材の溶接部における破損が早いという問題がある。
- (4) 等価剛性において、STK400 のコンクリート充填ありとなしとを比較すると、5 サイクル目のとき等価剛性が約 1.06 倍となった。となり、コンクリート充填により絞り座屈による鋼管の劣化を防ぎ、安定した変形能力を示した。一方、等価減衰定数は、STK400、BT-LYP100 は、約 50%と優れた減衰性能を示した。

#### 謝辞)

本研究は、卒研究生、白神君、鈴木君、丸尾君の協力により行われた。ここに感謝を表する。

#### 参考文献

- 1) 鈴木森晶、青木徹彦、遠藤輝好：免震支承と鋼管ねじりダンパーを有する実権床に最大応答変位設計；構造工学論文集 Vol. 45A/1999. 3
- 2) 青木徹彦、鈴木森晶：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；構造工学論文集 Vol. 44A/1998. 3
- 3) 村上正、吉村虎蔵、彦坂照：改訂構造力学；コロナ社/1983. 2
- 4) 土岐憲三：新体系土木工学 11 構造物の耐震解析；技報堂出版/1982. 6
- 5) 遠藤輝好、鈴木森晶、青木徹彦：鋼管を用いたねじりダンパー性能に関する実験的研究；土木学会中部支部研究発表会/1999. 3

(受理 平成11年 3月20日)