

極低降伏点鋼鋼管の塑性ねじりを利用した 吸振装置の橋梁システムへの適用

木村 充*, 西村宣男**, 池内智行***

*大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻博士前期課程(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

**工博 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

***博士(工学) 鳥取大学工学部土木工学科(〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

阪神大震災などの巨大地震による鋼製高架橋橋脚の応答を抑制する方策として降伏点が低く塑性化しやすい極低降伏点鋼鋼管の塑性ねじりを利用する吸振装置の利用が考えられる。吸振装置を高架橋の可動支承部に導入し、上部工と橋脚上端部との橋軸方向の相対変位を極低降伏点鋼鋼管のねじりに変換する。極低降伏点鋼鋼管が塑性履歴ループを形成することで入力地震波のエネルギー吸収を行い、橋脚の地震応答変位が抑制させる。温度変化による上部工の伸縮による影響を回避する構造詳細の採用を考慮したうえで極低降伏点鋼鋼管の繰返しねじり載荷による塑性履歴ループの定式化を行い、吸振装置の諸元を変化させることで橋脚上端部と上部工の応答変位を抑制する最適な諸元を検討した。

Key words : energy absorber, low yield steel, hysteresis loop, steel pier bridge

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震により、多くの土木構造物が大きな被害をこうむった。道路橋示方書¹⁾では、従来の震度法では大地震には対応できないので、地震時水平保有地震耐力法による耐震設計と免振・制振の新しい技術の導入の必要性が挙げられている。現在、免振・制振装置として使用されているものとして積層ゴム支承がある。積層ゴム支承^{2), 3)}は、構造物の固有周期を地震動の持つ周期より長周期にシフトし地震動の入力を低減させようとするものである。ところが積層ゴム支承はせん断剛性が弱いため、上部工の変位を抑制できないという短所がある。その積層ゴムの短所を補うために考えられたのが鋼材の塑性変形によって地震入力エネルギー吸収させることである。土木学会により発表された『土木構造物の耐震基準等に関する「第2次提言」』によると、道路橋示方書¹⁾における留意事項と研究・開発課題の1つとして制振構造について取り上げられている。制振構造を実現するためには、構造物に地震応答を制御するような性質または装置を付与することが必要となり、以下の5つ条件のうちいずれかを満たさなければならない。(1)地震動のエネルギー伝達経路自体の遮断、(2)地震動のもつ振動数帯から構造系の固有振動数帯をずらす、(3)非線形特性を与えて非定常共振系とする、(4)制御力の付加、(5)エネルギー吸収機構の利用が挙げられる。本研究では、上記の条件のうち(5)をとりあげて、鋼管の塑性ねじり履歴ループを利用したエネルギー吸収機能を持つ吸振装置を使用する。鋼管には降伏点が普通の

鋼材より低く塑性領域の大きい極低降伏点鋼を用いることで地震エネルギーの吸収をさらに期待することが可能となる。

吸振装置を橋梁の可動支承部に取り付ける。応答特性の異なる橋梁システム間では可動支承における相対変位が大きくなるので良好な吸振効果を得る可能性がある。橋梁モデルは復元力特性の異なるコンクリート橋脚と鋼製橋脚に支えられた単純桁橋を対象とする。吸振装置を用いることによって、鋼製橋脚が非線形領域に入っても適切な靱性を保ち構造部材に生じる損傷を最小限度にとどめ、構造系全体の崩壊を防止することが重要である。

2. 吸振装置

吸振装置を図-1のように橋梁の可動支承部付近に設置するものとする。吸振装置は鋼管部分とアーム部分に分けられる。鋼管部分には降伏点が低く塑性化し易い極低降伏点鋼^{4), 5)}を導入した。鋼管の繰返し塑性ねじりによるエネルギー吸収を利用するもので以下のような特徴がある。

- (1) ひずみエネルギー吸収効果を発揮できる。
- (2) 巨大地震のときに吸振装置に損傷が生じてでも簡単に取り替え可能である。
- (3) 適切な径厚比の範囲で使用すればねじりを受ける極低降伏点鋼鋼管は大きな塑性変形に対しても座屈が生じにくい。
- (4) 装置は極めて簡単な構造であり、メカニカルな吸振装置と比較して格段に廉価である。

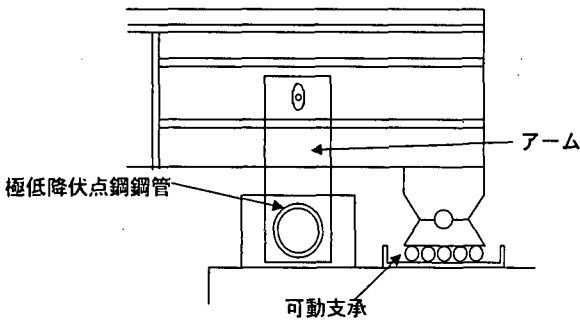


図-1 吸振装置

本研究では、橋軸方向の制振を対象として吸振装置の構造寸法を設計する。吸振装置の設計を行う際、以下の項目を基本条件とする。

- ・吸振装置の設置位置は端可動支承部分とする。
- ・日周期の温度変化に対しては装置の大きな応力変化を生じない構造物とする。
- ・地震動により大きなひずみ履歴を受けた場合、鋼管を容易に取り替えられる構造とする。

3. 解析モデル

3.1 吸振装置のせん断応力-せん断ひずみ関係

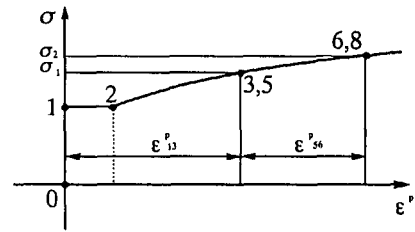
(1) 極低降伏点鋼鋼管のモデル化

本研究では吸振装置の鋼管部分に極低降伏点鋼をもちいる。極低降伏点鋼は大きな伸びと顕著なひずみ硬化によるエネルギー吸収に優れた材料特性を示している。極低降伏点鋼はこのような特殊な鋼材であるが、材料特性に関してのデータは少ない。繰返し塑性履歴については本研究室で開発された構成式を用いることとし、材料実験により定数を定めた。

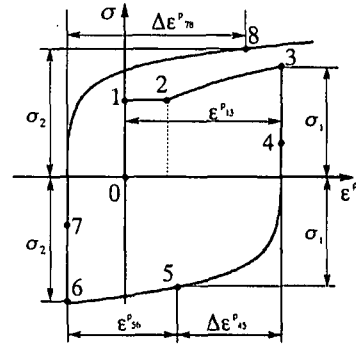
本研究室の構成式⁶⁾では図-2(a)、図-2(b)のように0-1、3-4、6-7領域では弾性領域、2-3、5-6、8-では単調荷重領域、4-5、7-8では単調荷重領域以外の非線形的な挙動を示す遷移領域に分かれる。単調領域を求める単調荷重実験と非線形遷移領域を算定するためのせん断ひずみ1%~4%の漸増繰返し荷重実験を行い、極低降伏点鋼の材料定数を定めた。極低降伏点鋼の塑性履歴特性では単調荷重は図-3(a)、漸増荷重は図-3(b)のようになっている。図-3(a)に見られるように極低降伏点鋼には明確な降伏点が存在しない。また、極低降伏点鋼は塑性領域におけるひずみ硬化が非常に大きいために繰返し硬化の影響が顕著に現れる。一般鋼の漸増繰返しループが幅の狭い紡錘型になるのに対して図-3(b)にみられるように極低降伏点鋼はそのためエネルギー吸収に優れた安定した繰返し繰返し塑性履歴曲線を描く。

(2) アーム部分の隙間の取り扱い

極低降伏点鋼鋼管は繰返し荷重によって疲労亀裂が生じないようにするために図-4に示すようにアーム部分に一定の隙間を開けることにした。また、地震時に桁側のピンがアームに接触する時に大きな衝撃力が発生する可能性があるため接触部分に緩衝材を取り付けること

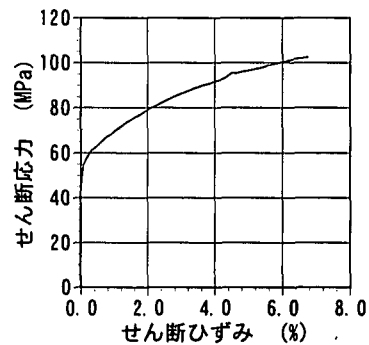


(a) 単調荷重

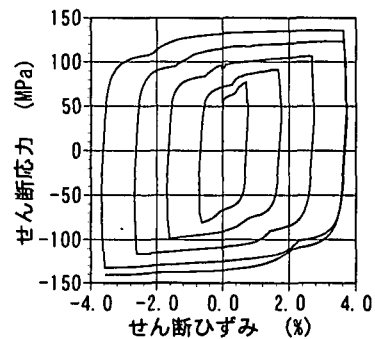


(b) 繰返し荷重

図-2 鋼材の構成式



(a) 単調荷重実験



(b) 繰返し漸増荷重実験

図-3 極低降伏点鋼鋼管の荷重実験

とした。図-5のように数値シミュレーションで隙間部分を表現している。アームがピンに当たっていない段階では実際の鋼管の塑性履歴曲線が1点で止まっているものとみなし、復元力が0になったところで鋼管の見かけの塑性履歴曲線を復元力が負の値なら $-X_1$ 、正の値なら X_2 シフトさせることでアームの隙間部分を表現している。ここでは橋桁の長さが50mで温度差を $\pm 20^\circ\text{C}$ であると

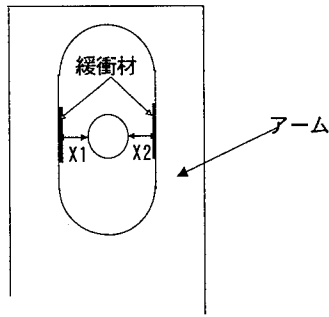


図-4 吸振装置の隙間部分

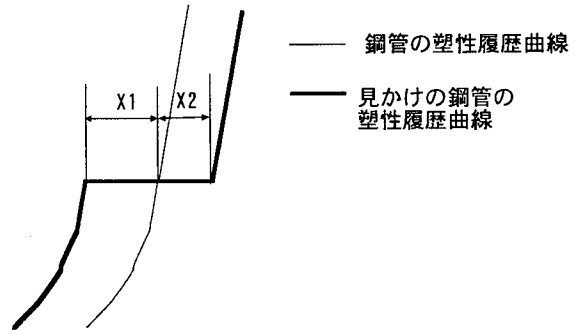


図-5 隙間を考慮した鋼管の塑性履歴曲線

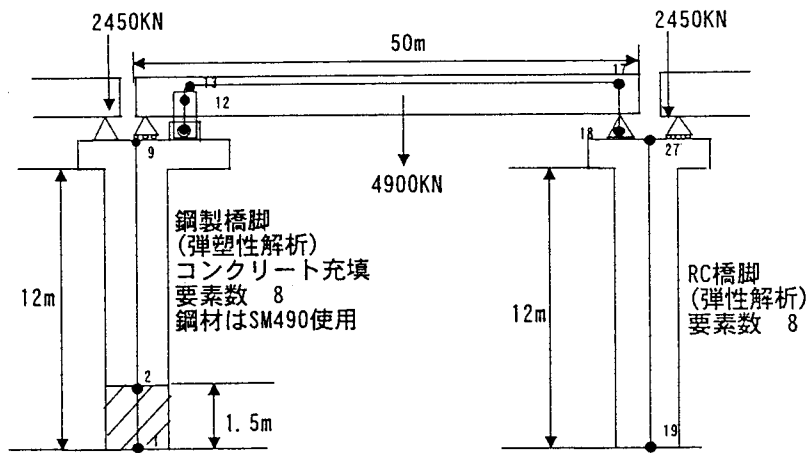


図-6 橋梁モデル

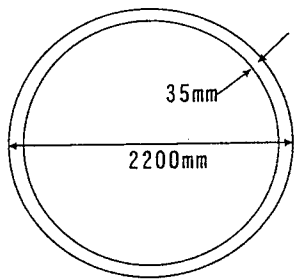


図-7 鋼製橋脚

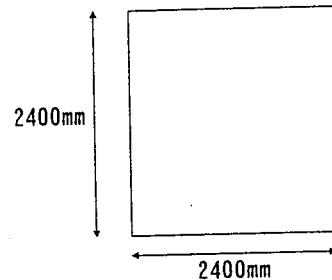


図-8 コンクリート橋脚

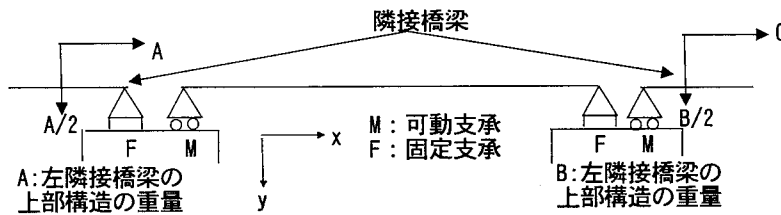


図-9 隣接橋梁の影響

すると $X_1=1.5\text{cm}$ 、 $X_2=1.5\text{cm}$ とすることができる。

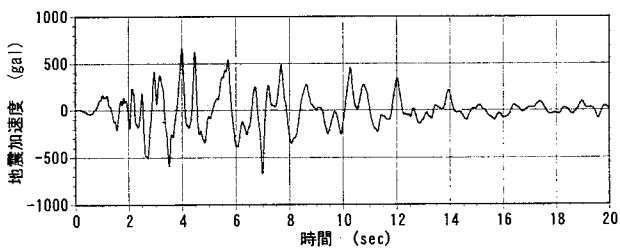


図-10 J R 鷹取駅 EW成分

3. 2 橋梁システムのモデル化

橋梁の可動支承部に生ずる相対変位を極低降伏点鋼鋼管のねじりに変換し塑性履歴ループを発生させてエネルギー吸収効果を期待する。そこで相対変位の生ずる可能性のあるコンクリート橋脚と鋼製橋脚を対象とする。解析モデルは図-6 のようになっている。上部工の支間長 50m、橋脚高は鋼製、コンクリートともに 12m とした。

橋脚は阪神淡路大震災以前の道路橋示方書に基づいて設計された橋脚を対象にした。これは吸振装置を設置することで橋脚の補強がなくとも、システム全体の応答変位や橋脚にかかる負担を減少させるかを検討するためである。鋼製橋脚は円柱で図-7のように直径2.2m、厚さ3.5cm、鋼材はSM490を用いている。高さ1.5mまではコンクリート充填された状態になっている。鋼製橋脚については弾塑性有限解析を用いている。コンクリート橋脚は図-8のように長さ2.1mの正方形断面を用いている。コンクリート橋脚は弾性域上で挙動しているものとして弾性有限解析を用いている。支承条件は鋼製橋脚上では可動支承を、コンクリート橋脚上では固定支承とした。隣接橋梁の影響を図-9に示している。解析モデルは単純桁橋であり可動支承を支持する構成橋脚では隣接する橋梁は固定支承になって鉛直方向(Y軸方向)には隣接橋梁の半分になっているが、橋軸方向(X軸方向)には隣接橋梁全体の慣性がかかっている。一方、固定支承部分では隣接した橋梁は可動支承になっており、この時はY軸方向では可動支承部分と同様になっているが、X方向は橋梁全体の質量に負担がかからないようにしている。また、入力地震波は図-10で示すようなJR鷹取駅で観測されたEW成分を20秒間の地震応答解析を行った。

4. 解析結果

4.1 吸振装置の諸元

本研究では吸振装置の最適諸元を見出すために表-1のように吸振装置を設置しない時をCASE0としCASE1~4の4ケースの吸振装置を導入した。

ここではCASE1の諸元を基準として、CASE2では鋼管の厚さが変化させた場合、CASE3ではアームの長さを変化させた場合、CASE4では鋼管の長さを変化させた場合について解析を行った。吸振装置の剛性Kは次式のように与えられる。

$$K = \frac{GJ}{LR^2}$$

G: 極低降伏点鋼の弾性係数(t/cm)

J: 鋼管のねじりモーメント(cm⁴)

L: 鋼管の長さ(cm) R: アーム長(cm)

4.2 応答特性

コンクリート橋脚と鋼製橋脚の応答変位は吸振装置を設置しないケース(CASE0)について応答変位は図-11(a)、鋼製橋脚の応力-ひずみ関係図を図-12(a)に示す。応答変位を図-11(b)~(e)に、鋼製橋脚の応力-ひ

ずみ関係図を図-12(b)~(e)に、吸振装置の相対変位-復元力図を図-13(b)~(e)に示す。また、吸振装置の剛性Kと降伏復元力H_y、最大復元力H_{max}を表-2に掲げる。

鋼製橋脚の許容残留変位については道路橋示方書より橋脚高の1/100である。よって、鋼製橋脚の許容残留変位は12cmとなっている。吸振装置を設置しなかった時の残留変位は図-11(a)よりCASE0では17.9cmで許容残留変位を越えている。吸振装置を設置したCASE1~CASE4でCASE2以外の残留変位は許容残留変位以下になっていることがわかる。これは図-13(b)~(e)に示すように吸振装置が塑性履歴ループを描くことで地震力のエネルギー吸収を行っているため残留変位がCASE0のときと比較して抑制されている。

CASE1では、図-11(b)より鋼製橋脚の最大応答変位が低減されていないが、残留変位はほとんど生じていない。しかし、鋼製橋脚にかかる最大応力は図-12(b)よりCASE0のとき(図-12(a))と比較して大きくなっていることがわかる。これは吸振装置の復元力が大きくなっており、鋼製橋脚の負担が大きくなったためである。

CASE2では図-11(c)より、鋼製橋脚の最大変位がある程度減少し、残留変位は13.5cmとなった。これは吸振装置の剛性Kが大きくなりH_{max}/H_yが小さいため、吸振装置の効果が発揮できなかったからである。

CASE3とCASE4では応答変位は図-11(d)、(e)より挙動はほとんど変化がない。鋼製橋脚については最大変位がCASE0、CASE1と比較して減少している。図-12(d)、(e)の塑性履歴ループが狭くなることによりCASE1(図-12(b))よりCASE3、CASE4(図-12(d)、(e))のほうが鋼製橋脚の負担が減少していることがわかる。これは吸振装置の剛性に最適値があり、応答変位、残留変位ともに抑制できていることが分かる。

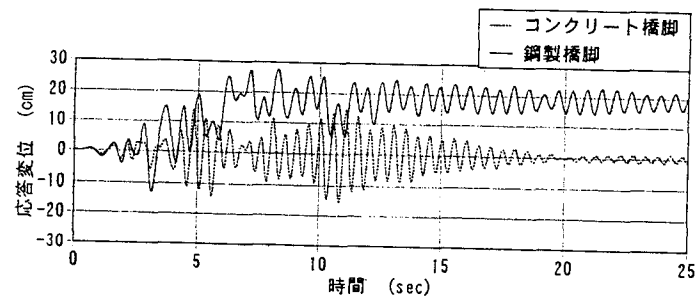
また、コンクリート橋脚についてはいずれも応答変位は抑制されているが、剛性Kが大きくなっているほど図-12(b)~(e)から応答変位は小さくなっていることがわかる。これは吸振装置による影響でその剛性が大きくなるほどコンクリート橋脚の負担が小さくなるからである。したがって最大応答変位、残留変位の低減、図-12(d)、(e)と比較して鋼製橋脚の最大応力がCASE4の方がCASE3より小さいため橋脚にかかる負担が小さくなっていることがわかる。今回解析を行った4ケースの中で最適なものにはCASE4であることがわかる。したがって、吸振装置の適切な諸元は2.0 < H_{max}/H_y < 2.3になるように剛性Kを定める必要がある。

表-1 吸振装置の諸元

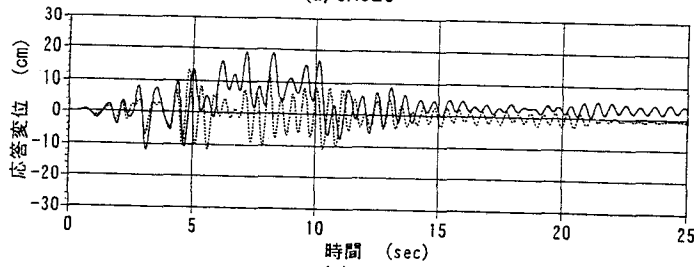
	管径(cm)	管長(cm)	管厚(cm)	アーム長(cm)
CASE0	0	0	0	0
CASE1	50	80	1.25	200
CASE2	50	80	1.00	200
CASE3	50	80	1.25	150
CASE4	50	120	1.25	200

5. まとめ

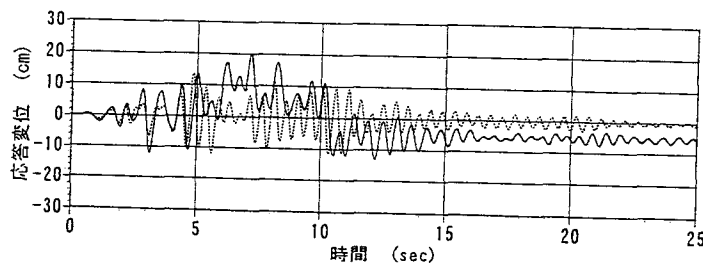
- 1) 吸振装置が塑性履歴ループを描くことにより地震力のエネルギー吸収を行うことにより鋼製橋脚の残留変位が設置しない時より抑制できることが明らかになった。
- 2) この橋梁システムで吸振装置の効果すなわち最大応答変位、残留変位、鋼製橋脚負担する応力の低減が発揮さ



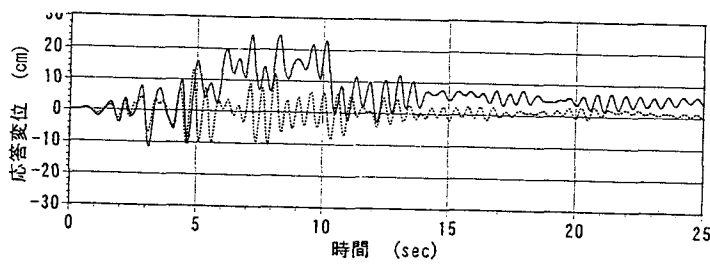
(a) CASE0



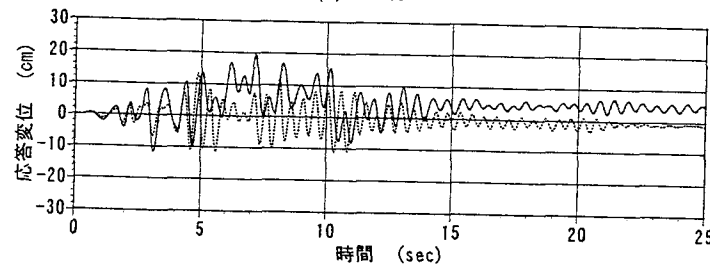
(b) CASE1



(c) CASE2



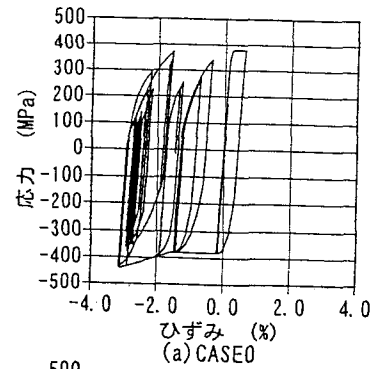
(d) CASE3



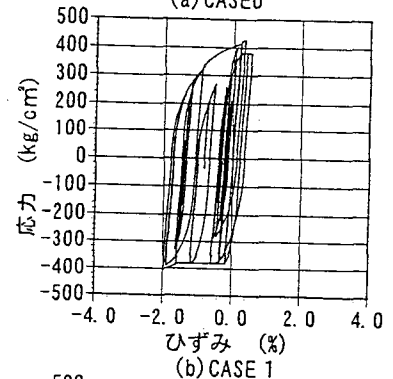
(e) CASE4

図-11 応答変位
吸振装置の復元力と剛性

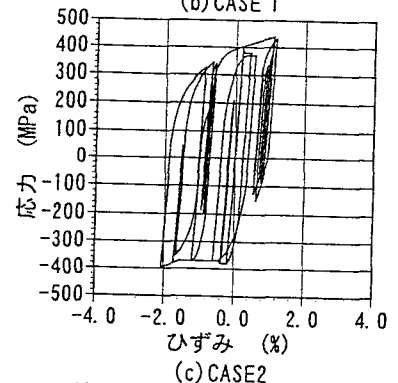
	H_y (KN)	H_{max} (KN)	H_{max}/H_y
CASE0	0	0	0
CASE1	134.8	276.9	2.05
CASE2	107.8	228.1	2.12
CASE3	179.7	400.0	2.23
CASE4	134.8	310.0	2.30



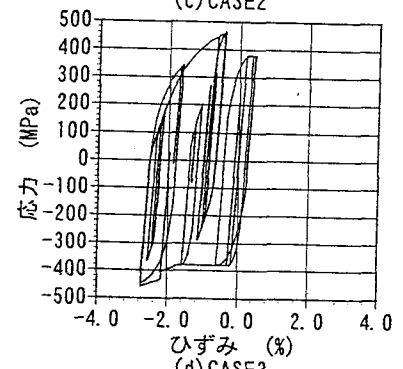
(a) CASE0



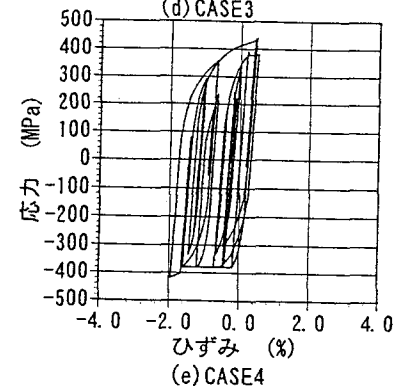
(b) CASE1



(c) CASE2



(d) CASE3



(e) CASE4

図-12 鋼製橋脚の応力-ひずみ関係

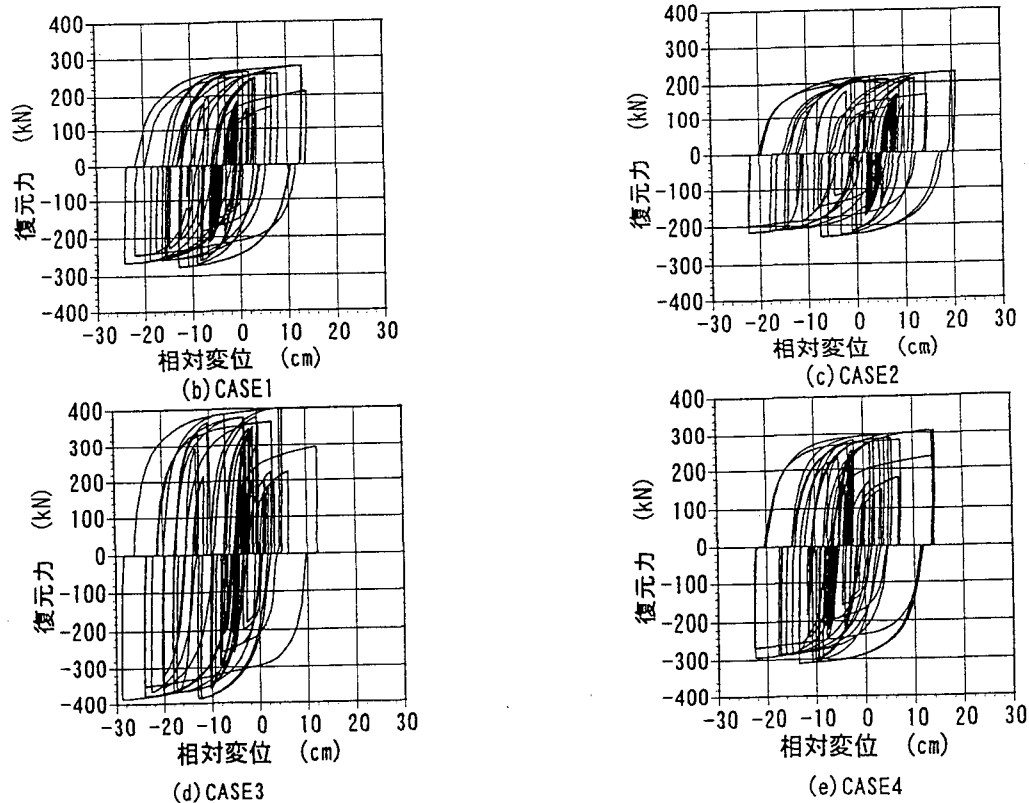


図-13 吸振装置の相対変位-復元力

れる $2.0 < H_{max}/H_y < 2.3$ になるように吸振装置の剛性 K を定める必要がある。

3) 橋梁システムの地震応答を検討する際に地震波にⅡ種地盤の JR 鷹取駅地震波を用いているが、その他の地震波についても効果が発揮されるかを検討する必要がある。また、今回の橋梁モデルだけではなく別の橋梁モデルについて最適剛性の決定法を検討する。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、1996
- 2) 嶺脇重雄他：多段積層ゴムを用いた免震構造システム、日本建築学会大会学術梗概集 1990.10

- 3) 宇野裕恵、金治英貞、鈴木章雄：既設 PC 桁に適用する免震構造の開発、土木学会第 51 回年次学術講演会、1996.9
- 4) 細川治他：極低降伏点鋼材の履歴減衰による制振システム、日本建築学会関東支部研究報告集、1990
- 5) 三山剛史、田中清、平澤光治：極低降伏点鋼を用いた制振構造に関する研究、日本建築学会大会学術梗概集、1993.9
- 6) 西村宣男、小野潔、池内智行：単調載荷曲線を基にした繰り返し塑性履歴を受ける鋼材の構成式、土木学会論文集、第 513 号、pp27-38、1994
- 7) 道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編、1996

(1999 年 11 月 19 日受付)

APPLICATION OF PLASTIC-TORSION OF LOW YIELD STEEL PIPE TO BRIDGE DAMPER SYSTEM

Mitsuru KIMURA, Nobuo NISHIMURA, Tomoyuki IKEUCHI

The dynamic damper-system is considered which plastic-torsion of low yield steel pipe is used to control the response of steel pier bridges since the Hyogo-Ken Nanbu earthquake. Introducing the dynamic damper-system at roller-bearing of steel pier, the torsion of low yield steel pipe occurs by relative displacement between super structure and pier. As the acceptance of the structure details that the influence due to the expansion of super structure for a temperature variation is avoided was taken into consideration, a hysteresis loop for cyclic torsion of low yield steel pipe is shown. Considering the various types of the dynamic damper system, the most suitable model cause to control response displacement of superstructure and pier was examined in this paper.