

ラーメン形式構造の耐震性能向上に関する基礎的研究

Improving Seismic Resistant Performance Test on Rahmen

安藤 裕之†, 鈴木 森晶††, 青木 徹彦†††
Hiroyuki ANDO, Moriaki SUZUKI, Tetsuhiko AOKI

Abstract Recently, Energy absorption members, such as buckling-restrained brace, friction damper and oil damper, are used for seismic retrofit of steel arch bridges. However, seismic resistant performance researches which have energy absorption member in the structure, are not carried out enough. In this study, cyclic loading tests of rigid frames, which is a part of arch bridge, and the element tests of energy absorption members are performed to obtain seismic resistance capacities. And, the important informations to develop the seismic resistant performance in the longitudinal direction of arch bridge are shown in this study.

1. 序論

1.1 背景

我が国だけではなく国際的に見てもアーチ橋が現在までに地震被害を受けた事例は極めて少ない。このため、1995年兵庫県南部地震以前には、アーチ橋は耐震性に富む橋梁構造の1つとして考えられていた。しかし、兵庫県南部地震を契機として導入された地震時保有耐力法¹⁾に基づく耐震設計によれば、アーチ橋はアーチリブ等の主要構造部材に塑性ヒンジを導入しにくい構造でありながら、震度法で設計されただけの断面ではアーチリブに塑性ヒンジが生じることは避けられないことが知られるようになった。このため、道路橋示方書では、動的解析を必要とする橋梁形式の一つに指定されている。したがって、兵庫県南部地震以前の基準で耐震設計されたアーチ橋の中には耐震補強を必要とするものも少なくない。耐震補強法は上路橋鋼製アーチを例にとれば、アーチリブの断面補強や両端での桁の移動拘束、上路構面とアーチ構造間の免震化などが候補として取り上げられている。しかしながら、これらのいずれの方法も一般には施工しにくいことから適切な耐震補強法の開発が求められている^{2)~4)}。

上路アーチ構造に対し現在有効として考えられている耐震補強法の1つとして、上路構面とアーチ主構との間の鉛直支持フレーム構造の斜材にエネルギー吸収部材を設置する方法がある^{5)~11)}。エネルギー吸収部材には座屈拘束ブレース、摩擦ダンパー、オイルダンパーなどがあるが、それぞれを構造内に取り込んだ耐震性能については十分研究されているとは言い難い。

1.2 研究目的と本研究の位置付け

本研究は、写真-1に示す上路アーチの鉛直支持トラス構造の一部を斜材ダンパー付ラーメンに置換え、アーチ全体の耐震性向上を最終目標とする。研究を進めるに当たり、以下の3段階の流れに沿って行う。

- Step1 ラーメン構造の基本性能試験および制震部材の要素試験
- Step2 制震部材を取り入れたラーメン構造形式の耐震性能試験
- Step3 制震部材付大型アーチ構造の動的解析

今年度は、これらの中で、Step1で挙げられている、ラーメン構造の基本性能試験および制震部材の要素試験を行う。そこで、本研究では、まず鋼アーチ橋などのラーメン形式構造を有する構造物の耐震性を調査するために、基本的性能について調査する。また、新たな制震部

† 愛知工業大学 工学研究科 建設システム工学専攻
†† 愛知工業大学 都市環境学科 土木工学専攻(豊田市)
††† 愛知工業大学 都市環境学科 土木工学専攻(豊田市)

材を提案し, それらについて繰り返し載荷実験を行いエネルギー吸収性能についてまとめ, 実際に制震部材として使用できるかを検討する. これらのことから, 制震部材を導入して, 橋軸方向に対する耐震性能向上を図る際の基礎的情報の提供を目的とする.

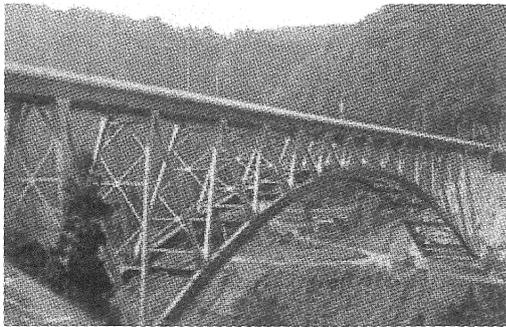


写真-1 上路アーチ橋

2. ラーメン供試体基本性能試験

2.1 実験目的

ブレース部材を導入するラーメン供試体の基本性能を知るために, ラーメン供試体単体の試験を行う. 得られた結果をもとに, 実際にブレース部材を導入する時の, ブレース部材などの強度決定の参考資料とする.

2.2 実験計画および実験方法

2.2.1 実験供試体

本研究で用いる供試体は, 鋼製アーチ橋の鉛直支持フレームの基礎的耐震性能を把握するために, 鋼製アーチ橋の1径間を取り出した, 縮尺1/6程度の一層一スパンの鋼製ラーメンモデル3体を用いて載荷試験を行う. 鋼種はSM490, 供試体寸法は供試体幅2250mm, 供試体高さ2269mm, 供試体骨組寸法2000mm×2000mmである. 実験対象橋梁の構造モデルを図-1に, 鋼アーチ橋の1径間を取り出した供試体概要図および断面図を図-2に, 供試体寸法を表-1に示す. これらの供試体のうち, 1体は単調載荷(RM-T6-P), 他の1体は漸増変位繰り返し載荷(RM-T6-C)を行う. また, 基部から520mmまでおよび頂部から475mmの所までの部分をテーパ状にしたものを漸増変位繰り返し載荷(RM-TR-C)による載荷試験を行った. なお, 制震ブレースは図-2(a)の斜線で示す位置に設ける予定である.

表-1 供試体寸法

鋼種		SM490
供試体骨組寸法	h×b(mm)	2000×2000
供試体断面幅	W×B(mm)	250×300
供試体板厚	t (mm)	6
リブ幅	bs (mm)	50
リブ板厚	ts (mm)	6
断面二次モーメント	I (mm ⁴)	8.33×10 ⁷
断面二次半径	r (mm)	98.3
幅厚比パラメータ	R _R	0.371

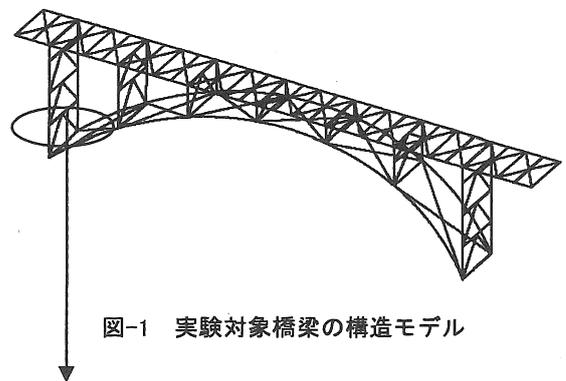


図-1 実験対象橋梁の構造モデル

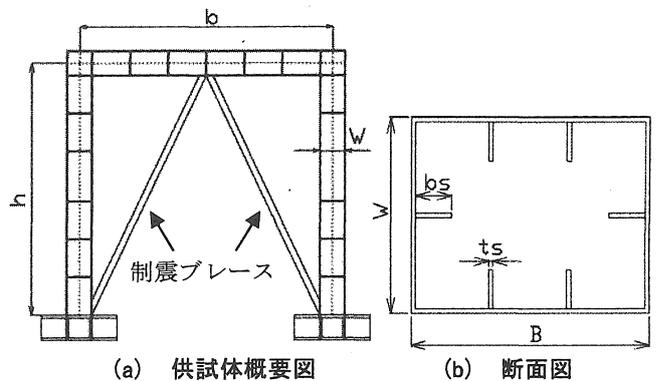


図-2 供試体概要図

2.2.2 降伏水平荷重H_y、降伏水平変位δ_y

以下の式(1)によって求められた値を降伏水平荷重H_yとする. 試験においては, 降伏水平荷重の値を, 正負方向に載荷し, その時の水平変位の平均値を降伏水平変位δ_yとする. その結果, δ_y=16.5mmが得られた.

$$H_y = \frac{7 AI \left(\sigma_y - \frac{P}{A} \right)}{2 LYA - 5 I} \quad (1)$$

ここで, A: 供試体断面積, I: 断面二次モーメント, σ_y: 降伏応力, P: 鉛直荷重, L: ラーメン供試体の中立軸長さ, Y: 部材の中立軸までの距離

2.2.3 実験載荷装置

上部構造荷重を考慮した鉛直荷重は供試体上部にラーメンを設け、その間に梁を伸ばし供試体の柱の中心に載荷点に来るように 1000kNアクチュエータ 2 基を鉛直方向に取り付け、供試体に圧縮力が作用するように載荷した。また、地震時の慣性力を考慮した水平荷重には 2000kN アクチュエータ 1 基を用いて図-3(a)のように載荷した。なお、実験中は鉛直力が一定となるように制御しながら実験を行った。実験載荷装置概略図を図-3に示す。

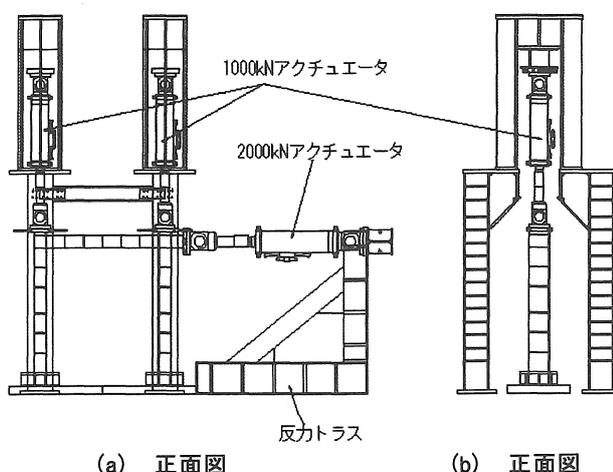


図-3 実験装置概略図

2.2.4 鉛直載荷荷重

上部構造重量に相当する鉛直荷重 P は、式(2)に示すように柱の降伏荷重 $P_y (=A\sigma_y)$ の 15%に相当する荷重を載荷する。本実験では、鉛直荷重は 814kNになった。

$$P = 0.15A\sigma_y \quad (2)$$

ここで、 P ：鉛直荷重、 A ：供試体断面積、 σ_y ：降伏応力

2.2.5 水平載荷荷重

単調載荷試験においては、供試体が破壊するまで載荷を行う。また、漸増変位繰り返し載荷試験においては、図-4に示すように 1 サイクル目の変位 δ_y を基準とし、 $\pm 1\delta_y, \pm 2\delta_y, \pm 3\delta_y, \dots$ と漸増させながら載荷を行う。なお、試験は最大荷重を超えて、降伏水平荷重の値まで荷重が低下した所で終了とする。

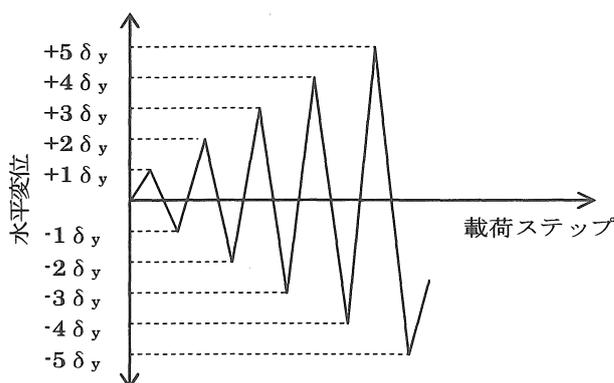


図-4 載荷パターン

2.3 実験結果

2.3.1 材料引張試験結果

実験に使用する橋脚本体と同じ鋼材の JIS1 号試験片を 3 体用意し、引張方向と引張直角方向のひずみを測定できるようにひずみゲージを試験片の表裏に貼付して、引張試験を行い、その材料特性を求めた。引張試験結果の平均値を表-2に、応力-ひずみ曲線の一例を図-5に示す。

表-2 引張試験結果

ヤング率	(kN/mm ²)	202
ポアソン比		0.280
降伏応力	(N/mm ²)	345
降伏荷重	(kN)	87.8
降伏ひずみ	(μ)	1705
ひずみ硬化係数	(kN/mm ²)	7.74
硬化開始ひずみ	(μ)	17682
最大応力	(N/mm ²)	521
最大荷重	(kN)	132.8
最大応力点ひずみ	(μ)	150286
伸び率	(%)	21.7

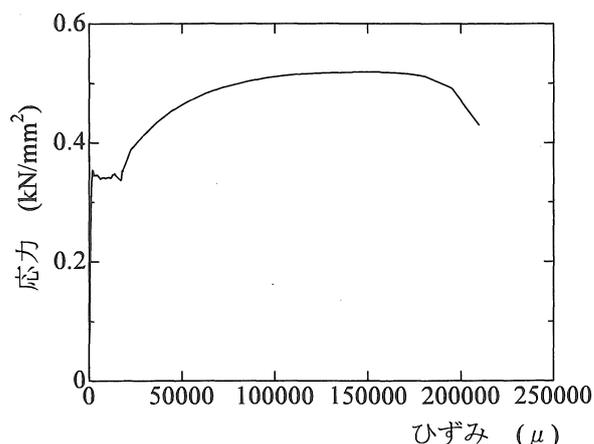
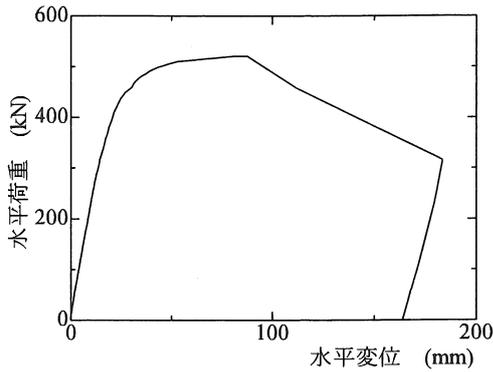


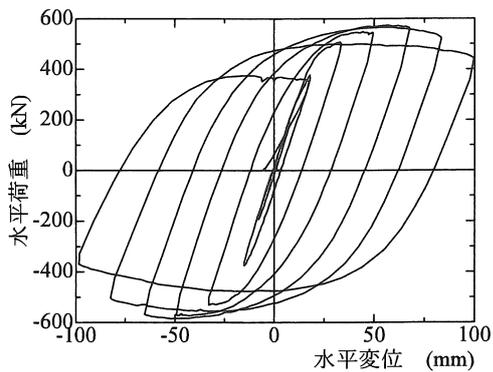
図-5 応力-ひずみ曲線

2.3.2 水平荷重-水平変位履歴曲線

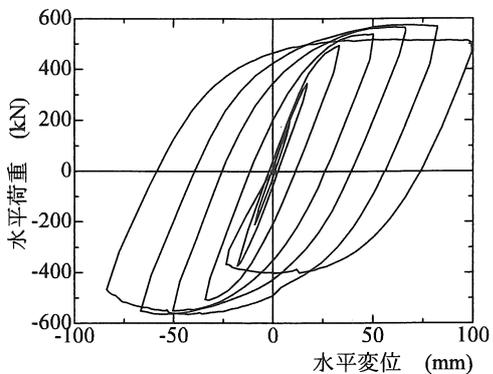
縦軸に水平荷重, 横軸に水平変位をとり, RM-T6-Pを図-6(a)に, RM-T6-Cを図-6(b)に, RM-T6-Pを図-6(c)に示す. RM-T6-Pにおいては $5\delta_y$ 付近で最大荷重 521kN, RM-T6-Cにおいては $+4\delta_y$ 付近で最大荷重 568kN, RM-TP-Cは $+4\delta_y$ 付近で最大荷重 558 kNに達した.



(a) RM-T6-P



(b) RM-T6-C



(c) RM-TP-C

図-6 水平荷重-水平変位履歴曲線

2.3.3 包絡線

図-7に降伏水平荷重および降伏水平変位で無次元化を行った包絡線を示す. 全体を比較すると, 弾性域内においては, どれも荷重-変位関係は一致しているが, それ以降においては, 差が見られ, とくに最大荷重以後は顕著な差が見られた. また, RM-TP-CはRM-T6-Cと比較すると, 最大荷重に達するまでの水平変位は同じだが, 最大荷重以後の荷重低下量が緩やかであるため, 供試体の一部をテーパ状にしたRM-TP-Cは, 変形性能に優れているといえる.

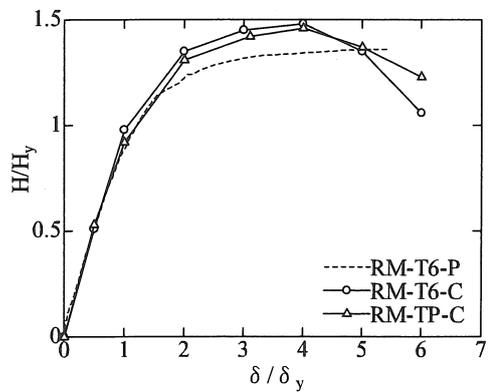


図-7 包絡線

2.3.4 塑性率

構造物の変形性能を評価する指標の 1 つに塑性率 μ_{95} がある. 塑性率は式 (3) によって求められる.

$$\mu_{95} = \frac{\delta_{95}}{\delta_y} \quad (3)$$

ここで, δ_{95} : 最大荷重の 95%に達した時の水平変位, δ_y : 降伏水平変位である.

一般的に塑性率は, 最大荷重に達した時の水平変位を降伏水平変位で除したものであるが, 最大水平変位に達した時の水平変位を決定することが困難であるために, 水平荷重が最大荷重に達した後 95%まで低下した時の水平変位 δ_{95} を降伏水平変位 δ_y で除する. 表-3 にRM-T6-CおよびRM-TP-Cにおける漸増変位繰り返し载荷による実験結果の一覧を示す. RM-T6-Cを基準とすると, RM-TP-Cの塑性率は, 約 8%上昇していることが分かる. このことにより, 供試体をテーパ状にすることは, 変形性能の向上に有効な手段であると考えられる.

表-3 漸増変位繰り返し载荷実験結果

供試体名称		RM-T6-C	RM-TP-C
降伏水平荷重	H_y (kN)	376	354
降伏水平変位	δ_y (mm)	16.6	16.9
最大水平荷重	H_{max} (kN)	568	558
最大水平荷重時の変位 δ_{max}	(mm)	65.7	66.3
塑性率	μ_{95}	4.6	5.0

2.3.5 供試体損傷状況

実験終了後の供試体の基部における座屈状況の一例を写真-2(a), (b)に、頂部における座屈状況の一例を(c), (d)に示す。RM-T6-CおよびRM-TP-Cは、 $4\delta_y$ 付近から局部座屈による凹凸が見られた。しかし、凹凸が見られた場所は、RM-T6-Cは基部付近に発生したのに対して、RM-TP-Cはテーパ部直上に発生していた。図-8 にひずみ分布を示す。これらの図は、フランジ面における最大荷重時の各高さごとのひずみの平均値(横軸)と基部からの高さ(縦軸)の関係を示したものである。RM-T6-CとRM-TP-Cを比較すると、ひずみ値はRM-T6-Cにおいては基部に最も近い所で約18000 μ 、RM-TP-Cにおいては、テーパ部において約12000 μ であり、それ以外においては、平均1000 μ 前後のひずみ量であった。しかし、RM-TP-Cにおいては、隅角部のひずみが、RM-T6-Cに比べて、大きく出ていることが分かる。これは、この部分がテーパ状になっているため、発生する曲げモーメントに対して効率よくエネルギーを吸収しているためと考えられる。

3. ブレース部材要素試験

3.1 実験目的

前項までのラーメン供試体試験をふまえ、新たなブレース部材の提案をし、要素試験を行う。以下に挙げる2種類のブレース部材について耐震性能を調べた。なお、ブレース部材の強度は既存の研究によってラーメン供試体の降伏水平荷重 H_y の1/4~1程度が適当とされている。

3.2 ブレース部材概要

3.2.1 蛇腹鋼管型ブレース

蛇腹鋼管型ブレースは、ラーメン供試体降伏荷重の1/4程度を分担すると想定し断面を決定した。供試体寸

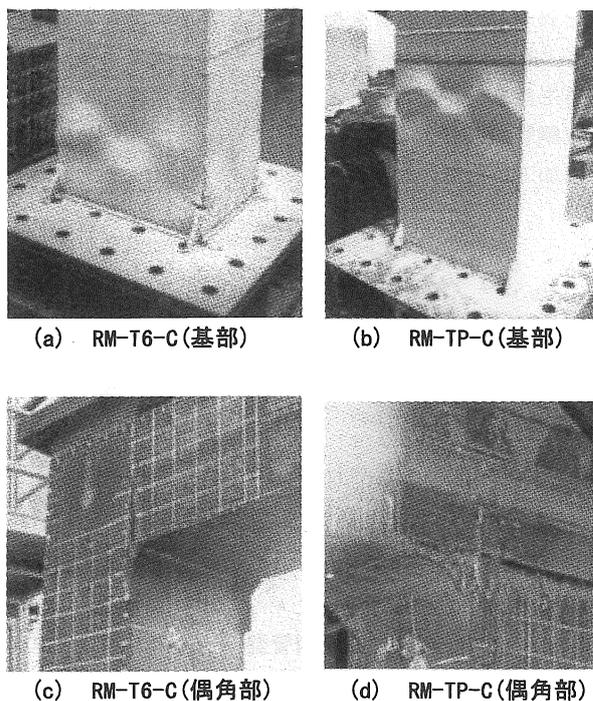


写真-2 供試体損傷状況

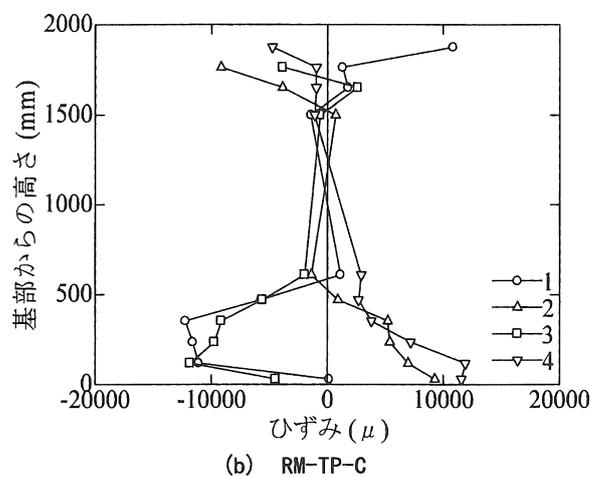
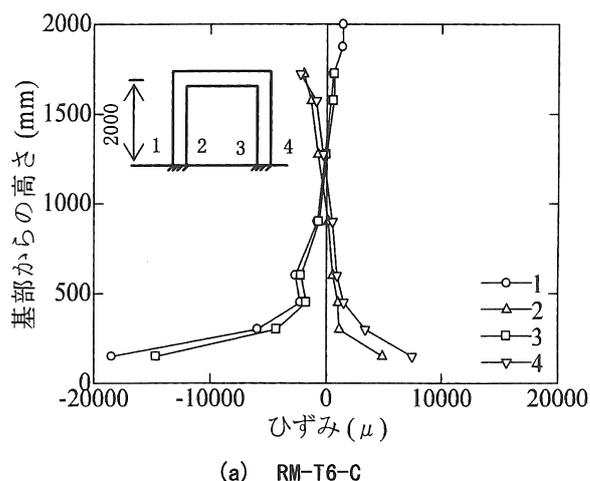
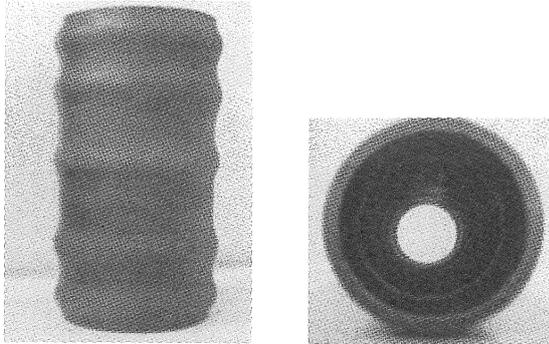


図-8 ひずみ分布図

法を表-4に示す. 芯管を拘束管で被い圧縮载荷を行うことにより, 芯管に座屈を生じさせる. 拘束管によって座屈の発生量を一定に止められるため座屈が連続的に生じた蛇腹鋼管が製作できる. 蛇腹鋼管を写真-3に, 部材試験用に加工したものを写真-4に示す.



(a) 全体図 (b) 断面図
写真-4 蛇腹鋼管型ブレース

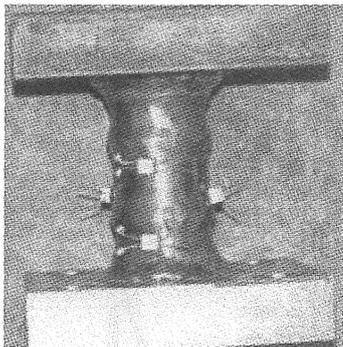


写真-5 部材試験用に加工した蛇腹鋼管

表-4 供試体諸元

	芯管	拘束管
鋼種	STK400	
直径 D (mm)	48.6	60.5
板厚 t (mm)	2.3	3.2

3.2.2 摩擦ダンパーブレース

摩擦ダンパーで使用する磨き鋼板は, 板厚 10mm, 長さ 600mm, 幅 125 mm, 鋼板の勾配を 0, 1/300, 2/300 で与えテーパ状にした. なお, 磨き鋼板の傾斜は 2 枚の鋼板の間に板を挟むことで任意の傾斜を与えることができる. 摩擦用のパッドには, 一個当りの摩擦係数が 0.117 の普通自動車のブレーキパッドを用いた. また, 締め付けるために皿バネを複数個使用した. 摩擦ダンパーブレース概略図を図-9に示す.

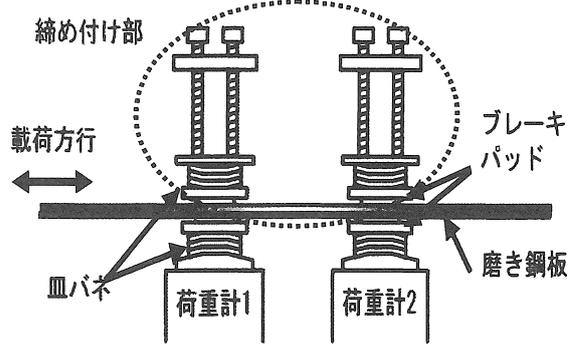
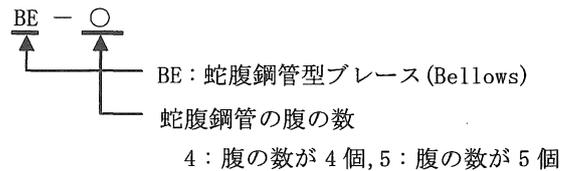


図-9 摩擦ダンパーブレース概略図

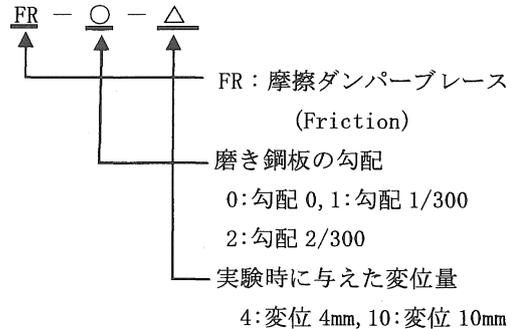
3.2.3 供試体名称

蛇腹鋼管型ブレースおよび摩擦ダンパーブレースの供試体名称を以下に示す.

(a) 座屈鋼管型ブレース



(b) 摩擦ダンパーブレース



3.3 载荷計画

繰り返し载荷においては, 式(4)により降伏水平変位の補正を行い, その値を基準として $\pm 1\delta_y'$, $\pm 2\delta_y'$, $\pm 3\delta_y'$... と漸増させながら载荷を行う. また, 圧縮载荷においては, 図-10 に示すように, 目標変位まで载荷を行ったのち, 一度荷重を 0 に戻してから, 次の目標変位まで载荷を行っていく.

$$\delta_y' = \sqrt{L^2 + \left(\frac{L}{2} + \delta_y\right)^2} - \frac{\sqrt{5}L}{2} \quad (4)$$

ここで, δ_y は公称値を用いて求めたものである.

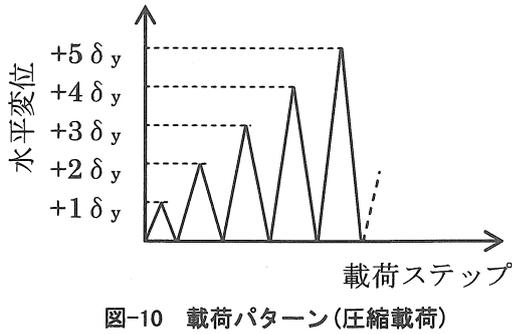


図-10 载荷パターン(圧縮载荷)

3.4 実験载荷装置

MTS250kN 動的アクチュエータを1基用いて、ブレース部材の軸方向に対して载荷を行う。なお、実験供試体が偏心しないようにリニアレールを用いて、軸方向のみに荷重が载荷される機構になっている。実験载荷装置概略図を図-11に示す。

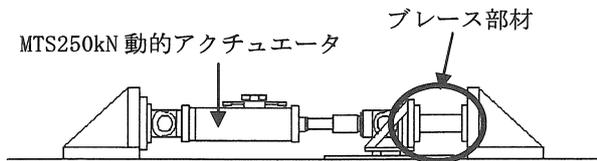


図-11 実験载荷装置概略図

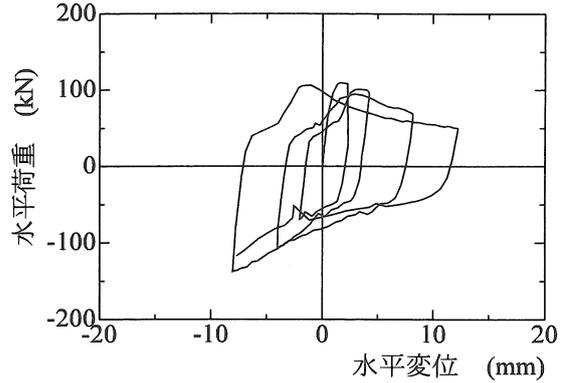
3.5 実験結果

3.5.1 水平荷重-水平変位履歴曲線

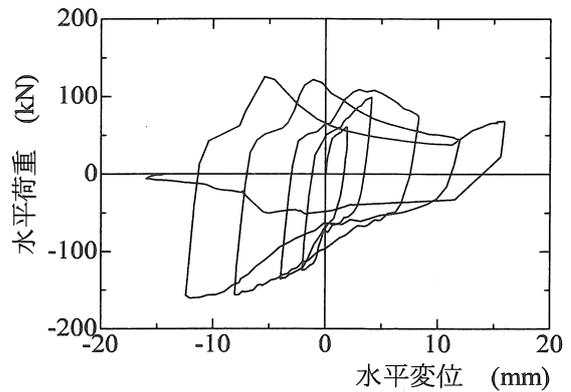
図-12, 13 に各部材の水平荷重-水平変位履歴曲線を示す。図-12 から蛇腹鋼管は圧縮方向の荷重に弱いことがわかる。また、図-13 では履歴曲線の両端が膨れ上がり磨き鋼板をテーパ状にした効果がみられる。

3.5.2 エネルギー吸収量

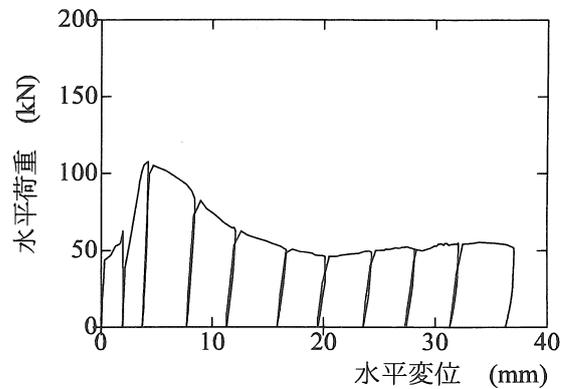
図-14 に各部材の累積エネルギー吸収量を示す。部材種ごとに比較すると、蛇腹鋼管型ブレースにおいては、腹の数には関係なく同程度のエネルギー吸収量であった。摩擦ダンパーブレースにおいては、载荷履歴の異なる FR-2-4 と FR-2-10 を比較すると、累積エネルギー吸収量が約2倍になっており一回の変位が大きいほどより多くのエネルギー吸収が行われていることがわかる。また、鋼板をテーパ状にしたことによるエネルギー吸収量の差が明確に出なかった。その原因として、実験载荷装置に設置する際の部材の固定が不十分であった、パッドの固定が不十分であり、締め付け力が不安定であったなどが考えられる。



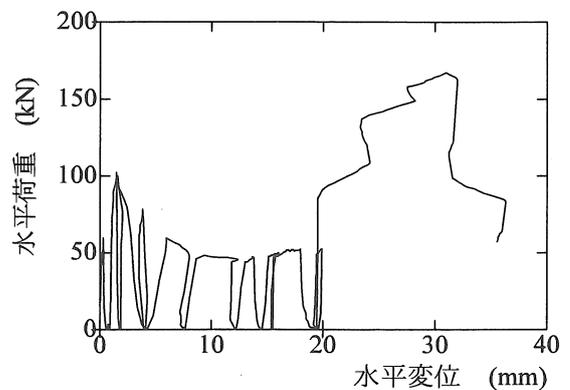
(a) BE-4(繰り返し载荷)



(b) BE-5(繰り返し载荷)

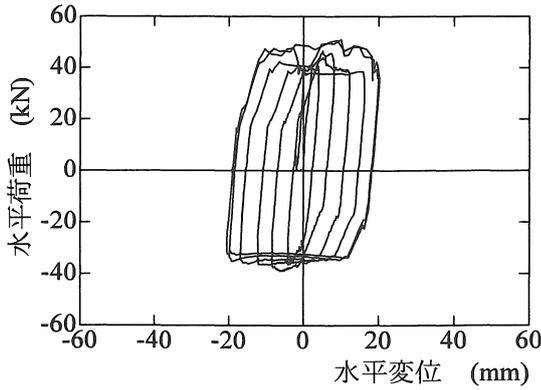


(c) BE-4(圧縮载荷)

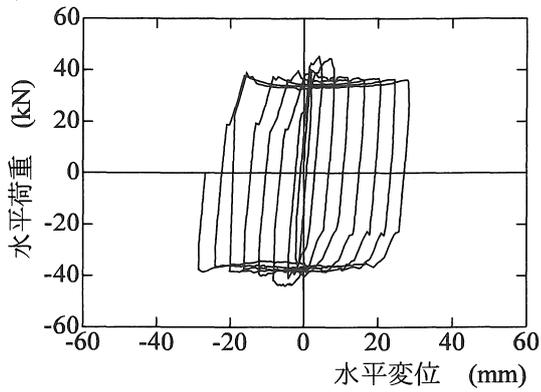


(d) BE-5(圧縮载荷)

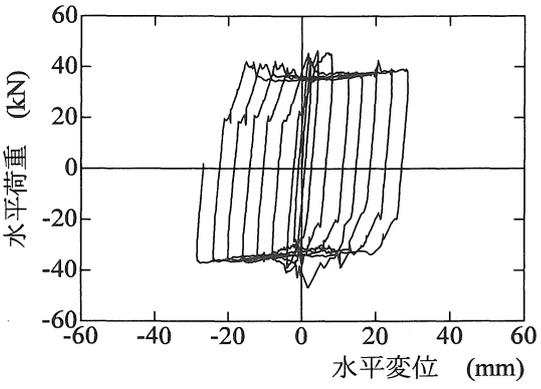
図-12 水平荷重-水平変位履歴曲線(蛇腹鋼管)



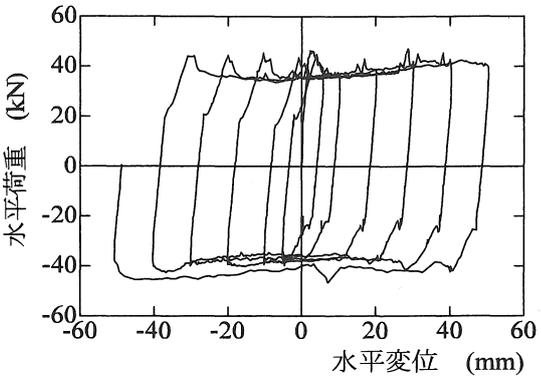
(a) FR-0-4



(b) FR-1-4



(c) FR-2-4



(d) FR-2-10

図-13 水平荷重-水平変位履歴曲線(摩擦ダンパー)

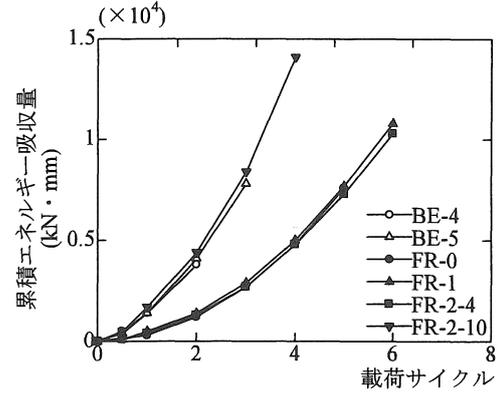


図-14 累積エネルギー吸収量

4. 数値解析

ラーメン供試体基本性能試験によって得られた包絡線の再現および検討を行うため, Visual Basic6.0 を用いて数値解析を行った. 解析プログラムは, 独自に開発した 2 次元ラームプログラムを用いた. このプログラムは, 部材を有限個の要素に分割し, 材料係数などの条件を入力すれば, 各節点ごとの変位および回転角が求められ, これらに対応する部材の軸力, 曲げモーメントが求められるようになっている.

4.1 数値解析方法

死荷重に相当する鉛直荷重 ($P=814\text{kN}$) を載荷した後, 水平荷重を単調増加させるモデルを考える. 解析モデルは, 図-15 に示すように, ラームの梁部は横方向に, 柱部は縦方向にそれぞれ 10 分割している. また, 解析時の水平荷重の変化量は, 降伏水平荷重を迎えるまでは 100kN ずつ増加させ, それ以後は 20kN ずつ増加させて解析を行った.

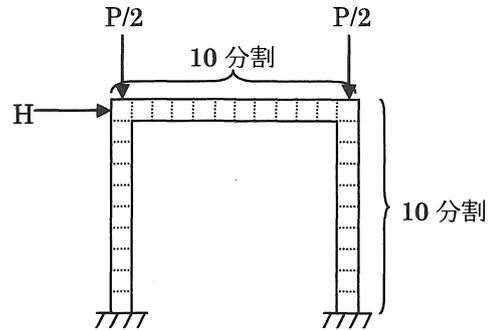


図-15 解析モデル概略図

4.2 数値解析結果

単調載荷試験の結果と解析結果の比較を図-16 に示す. 実験供試体には, 初期変形, 残留応力などの不整がある

ため、図中の破線のように、解析結果よりも変形量が大きくなる結果となった。さらに数値解析の精度を上げるには、初期変形および残留変位などを考慮した補正を行えばよいと考えられるため、今後は、これらの要因も数値解析プログラムに取り入れる必要がある。

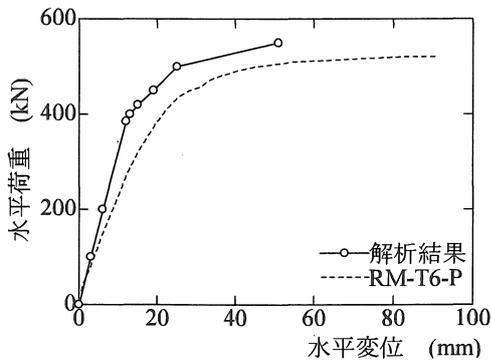


図-16 解析結果の比較

5. 結論

本研究ではラメン構造の基本性能実験と新たな制震部材の提案を行った。ラメン実験では基本性能を調査したに留まったが、制震部材については繰り返し載荷実験などを行い変形性能やエネルギー吸収量について検討した。本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) ラメン供試体基本性能試験の結果より、実際にブレース部材を導入する場合、最大荷重に達するまでの変位および変形性能の向上の面から RM-TP-C に導入した方がより効果があると考えられる。
- (2) 蛇腹鋼管のエネルギー吸収性能は、腹の数に依存しないが、腹の数が減少することで伸びに対してのエネルギー吸収性能が若干低下することが分かった。
- (3) 蛇腹鋼管は圧縮力に弱いいため、圧縮力に対して補強する必要がある。
- (4) 磨き鋼板をテーパ状にすることにより、履歴曲線の両端に傾斜が発生し、エネルギー吸収量が增大する結果が得られた。
- (5) 蛇腹鋼管、摩擦ダンパーともに、最大荷重の値が小さかったためラメン内部に導入するためには部材数を増やす必要がある。
- (6) 数値解析の精度をあげるためには、初期変位および残留応力などを考慮した補正を行えるプログラムにする必要がある。

謝辞

本研究は、愛知工業大学耐震実験センターで行い、耐震実験センター研究費を使用して行いました。ここに深くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・V耐震設計編，2002. 3.
- 2) 宇佐美勉，加藤基規，葛西昭：制震ダンパーとしての座屈拘束ブレースの要求性能，構造工学論文集，Vol. 50A，pp. 527-538，2004. 3.
- 3) 岩田衛，竹内徹，藤田正則：建築鋼構造のシステム化，鋼構造出版，2001. 2.
- 4) 松本信之，曾我部正道，岡野素之，涌井一，大内一：鋼製ダンパー・ブレースを用いた鉄道高架橋の振動性状改善に関する研究，構造工学論文集，Vol. 46A，pp. 547-554，2000. 3.
- 5) 野中哲也，宇佐美勉，坂本佳子，岩村真樹：上路式鋼トラス橋の大地震時弾塑性挙動および耐震性向上に関する研究，構造工学論文集Vol. 49A，pp. 531-542，2003. 3.
- 6) 葛西昭，木戸健太，宇佐美勉，渡辺尚彦：多径間連続高架への制震ブレースの導入効果，構造工学論文集 Vol. 51A，pp. 827-838，2005. 3.
- 7) 松本信之，曾我部正道，岡野素之，涌井一，大内一：鋼製ダンパー・ブレースを用いた鉄道高架橋の振動性状改善に関する研究，構造工学論文集 Vol. 46A，pp. 547-554，2000. 3.
- 8) 松本信之，岡野素之，在田浩之，曾我部正道，涌井一，大内一，高橋泰彦：鋼製ダンパー・ブレースを有する RC 鉄道高架橋の耐震性能，構造工学論文集 Vol. 45A，pp. 1411-1422，1999. 3.
- 9) 加藤其規，宇佐美勉，葛西昭：座屈拘束ブレースの繰り返し弾塑性挙動に関する数値解析的研究，構造工学論文集 Vol. 48A，pp. 641-648，2002. 3.
- 10) 永谷秀樹，栗太繁実，森信行：座屈拘束ブレースを変位制限構造に用いた上部構造の耐震補強，宮地技報 No20，pp. 56-66，2005. 2.
- 11) 犬塚吉宣：鋼圧縮部材の軸力-曲げ-曲率関係とその応力に関する解析的研究：平成 4 年度愛知工業大学修士論文
- 12) 陳珉：ラメン構造物の弾塑性耐震解析に関する研究，平成 12 年度愛知工業大学修士論文

(受理 平成 18 年 3 月 18 日)