

# 圧縮型鋼製ダンパー・ブレースによる RC ラーメン高架橋の耐震補強工法

Seismic retrofitting method for railway viaducts using compression type steel damping braces

吉田幸司\*, 喜多直之\*\*, 岡野素之\*\*\*, 関 雅樹\*\*\*\*

Koji YOSHIDA, Naoyuki KITA, Motoyuki OKANO, Masaki SEKI

\*工修, 東海旅客鉄道 総合技術本部 技術開発部 構造物チーム研究員 (〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545-33)

\*\*工修, 大林組 土木技術本部 設計第一部 副主査 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟)

\*\*\*大林組 技術研究所 土木構造研究室 構造性能グループ長 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640)

\*\*\*\*博(工), 東海旅客鉄道 総合技術本部 技術開発部 チームマネージャー (〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545-33)

Seismic retrofitting for the existing railway viaducts against large-scale earthquakes is a pressing problem. One of the counter measures is to put steel damping braces. The method is effective in improving seismic performance of whole viaduct block even when adopted only for a few sections of the viaduct. Therefore, this method is very useful when the space under the viaduct is used as warehouses or shops and usual method such as steel jacket can not be applied.

We newly propose the compression type steel damping braces that have a distinctive feature. With this method, tensile anchors at the end of the braces are not required because appropriately placed shear panels, which can be deformed, cause only compression forces on braces.

This paper describes the concept of this damping brace, the results of FEM analysis carried out in advance and the results of cyclic loading test using 1/2.5 scale model.

*Key Words: railway viaduct, seismic retrofitting, steel damper, FEM analysis, model experiment*

## 1. はじめに

兵庫県南部地震での鉄道高架橋の被害に鑑み, RC ラーメン高架橋柱のせん断先行型に対する補強工事が実施された. これらの耐震補強には, 施工が簡易でコストが比較的安く, その効果が明確であることから, 鋼板巻き補強工法が主要な工法として採用されている. また, 一般に, せん断破壊を防止するための耐震補強としては, 不足するせん断補強鉄筋を補う対策が採られている. 鋼板巻き補強もその一つであるが, アラミド繊維シートや炭素繊維シートなどの新材料を巻き立てる工法など, 種々の補強工法が提案されている<sup>1)</sup>.

一方, これら高架橋区間の内, 特に駅部付近など高架下空間が店舗や事務所, 倉庫等に有効活用されている高架橋では, 鋼板巻き補強工法を採用することが難しい場合がある. これは, 鋼板巻き補強を施工する際に, 十分な施工スペースを確保する必要性や重量物である補強鋼板の搬入等施工上の制約があること, また, 支障移転が多く, 営業補償などの問題もあるためである.

しかしながら, 地震時の被害を最小限に留め, 長期不通防止を図る上では, 高架下利用のある高架橋についても対策を推進していかなければならない. また, 耐震補強工法

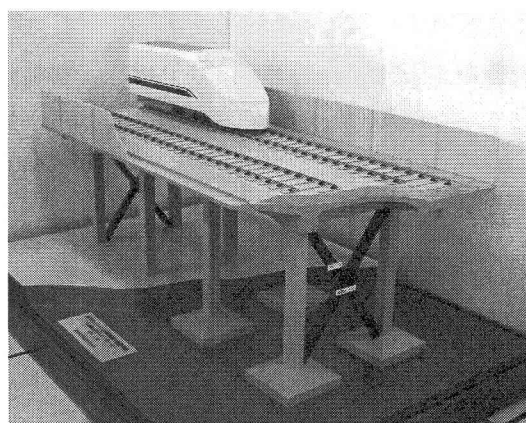


写真-1 圧縮型ダンパー・ブレースの鉄道高架橋への適用イメージ

の選択にあたっては, 補強効果はもちろんのこと, より経済的な工法を選択していく必要がある.

それには, 柱部材を巻き立てるような耐震補強工法だけでなく, 新たな観点から補強工法を開発していくことも必要である. 巻き立てる以外の有力な工法として, 鋼製ダンパー・ブレースによる耐震補強工法が挙げられる. この工法は建築分野で先行して研究され, 実用化されているものであり<sup>2)</sup>, 最近では Y 型ダンパー・ブレースの土木分野

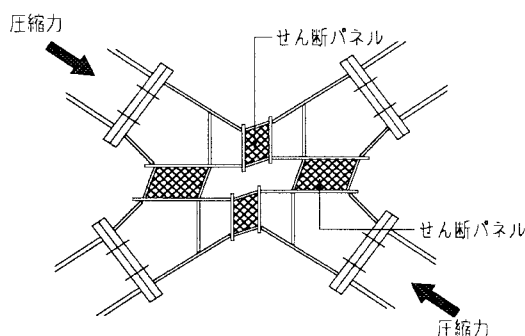


図-1 圧縮型ダンパーの変形概要

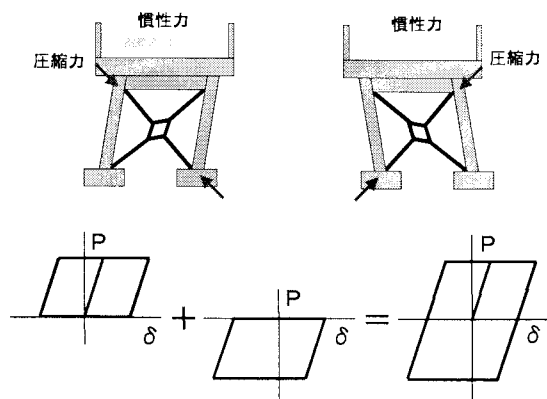
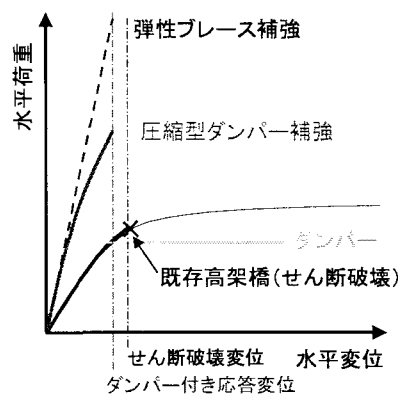
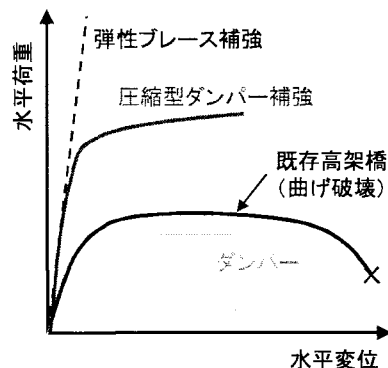


図-2 ダンパー・ブレースの変形方向と履歴則



(a) せん断破壊型の場合



(b) 曲げ破壊型の場合

図-3 耐震補強の概念

への適用も検討されている<sup>3)</sup>。しかし、一般的に、ブレースを高架橋本体に固定するために引張定着用のアンカー筋が必要であり、配筋が密な箇所での適用が難しいこと、また、特に、既設構造物の耐震補強への適用には、技術的、経済的に不利であることが課題となっている。

そこで、これらの課題を解決するため、ブレースの交差部に鋼製のせん断パネルを配置したダンパーを有する新しいタイプの鋼製ダンパー・ブレース（圧縮型鋼製ダンパー・ブレース：写真-1）を提案する。本稿では、このダンパー・ブレースの概念について概説し、FEM解析及び静的繰返し载荷試験による圧縮型鋼製ダンパー・ブレースの機能確認結果について述べる。

## 2. 圧縮型鋼製ダンパー・ブレース

### 2.1 基本的特性

提案するダンパー・ブレースは、X型鋼製ブレースの交差部に図-1に示すようなダンパーを備えている。ダンパーは中央に開口部を持つ長方形で、開口部の上下左右部材の一部に鋼製のせん断降伏部材（せん断パネル：図中のメッシュ部）を組み込んでいるのが特徴である。地震による慣性力が作用したとき、高架橋本体からブレースを介してダンパーに圧縮力が作用し、せん断パネルがせん断降伏してエネルギーを吸収する構造となっている。なお、せん断

パネルはフランジ補強され、曲げ降伏しない設計である。

図-2に地震時慣性力に対するダンパー・ブレースを設置したRCラーメン高架橋の変形方向と履歴則を示す。地震による慣性力がある方向から作用した場合、高架橋の変形に伴い、ブレースに圧縮力が作用する。この圧縮力によりダンパー内のせん断パネルが変形し、長方形のダンパー全体が平行四辺形に拉げられるように変形する。この変形により、他方のブレースは外方向に押し出されることになる。一方、慣性力の作用方向が変わった場合も同様である。その結果、ブレース端部がRC高架橋隅角部の変位に追随するとともに、ブレース材には曲げや引張力が働かず、地震時には常に圧縮力のみが作用することになる。そのため、ブレースの鋼材量を減らすことができるとともに、高架橋本体との取り付けに引張定着用のアンカー筋が不要となる。これにより、従来課題となっていた点を克服できるとともに、コストダウンを図ることが可能となる。

このダンパー・ブレースの挙動を同じく図-2の履歴則で説明する。外力がある方向に作用しているとき、片方のブレースには圧縮力が生じ、他方のブレースには軸力が生じない。このときの荷重変位関係は正側のみのループを描く。外力が反転して水平変位が逆方向に生じた状態では、逆にこれまで軸力が作用していなかったブレースに圧縮力が作用し、荷重変位関係は負側のみのループを描く。したがって、正負交番荷重を受けたとき、ダンパー・ブレース全体としてはバイリニア型の履歴減衰特性を示す。

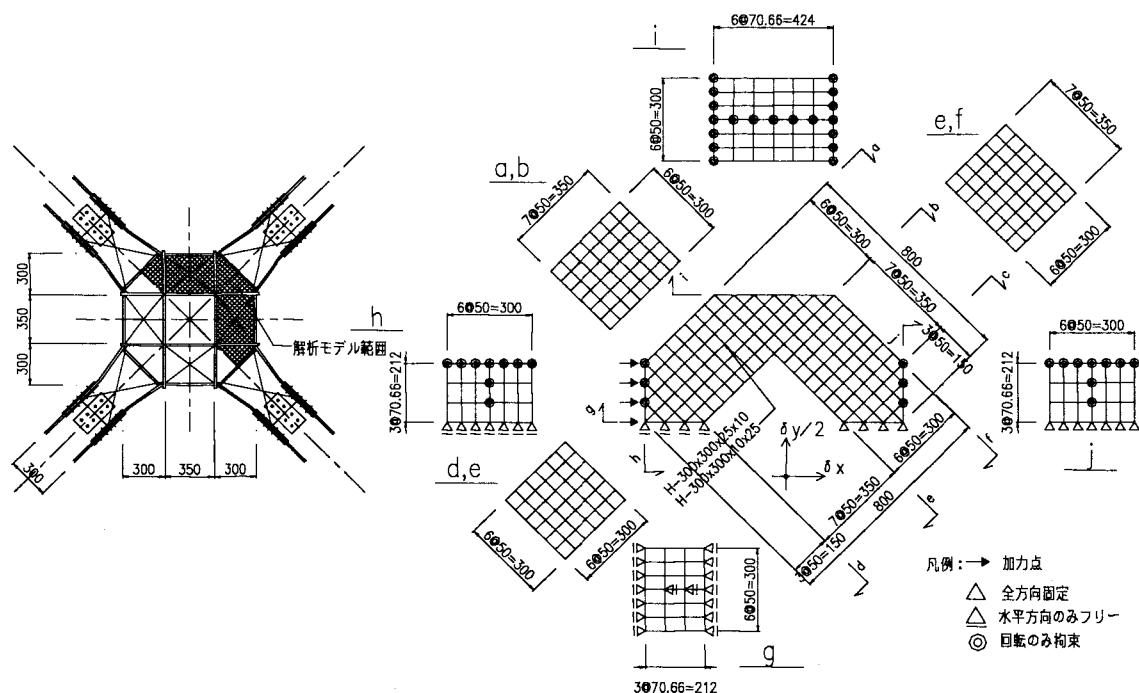


図-4 圧縮型ダンパーのFEM解析モデル概要

表-1 材料特性

| 材質     |       | SM490                               |
|--------|-------|-------------------------------------|
| 弾性係数   | E     | $2.0 \times 10^5$ N/mm <sup>2</sup> |
| 降伏点強度  | $f_y$ | 315 N/mm <sup>2</sup>               |
| ポアソン比  | $\nu$ | 0.3                                 |
| 非線形モデル |       | バイリニアモデル                            |
| 2次勾配   |       | 1 %                                 |

表-2 解析ケースと断面特性

| ケース | 部材               | 断面積<br>mm <sup>2</sup> | 断面係数<br>mm <sup>3</sup> | 断面二次モーメント<br>mm <sup>4</sup> |
|-----|------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------|
| ①   | BH-300x300x25x10 | $1.30 \times 10^4$     | $1.15 \times 10^6$      | $1.72 \times 10^8$           |
| ②   | BH-300x300x10x25 | $1.75 \times 10^4$     | $1.98 \times 10^6$      | $2.97 \times 10^8$           |

## 2.2 耐震補強の概念

本研究で提案する圧縮型ダンパー・ブレースは、せん断破壊型の高架橋、曲げ破壊型の高架橋の両タイプに適用することが可能であると考えている。図-3に高架橋の破壊タイプ別の考え方を示す。

既設高架橋がせん断破壊型（図-3(a)）であるとき、ダンパー・ブレースの剛性の高さを利用して、地震時の高架橋本体の応答変位を柱がせん断破壊に至る変位以下に抑え、せん断破壊を防止し、所要の耐震性能を確保することができる。また、圧縮型ダンパー・ブレースを用いることで、ダンパーでのエネルギー吸収性能も期待でき、弾性ブレースを用いるよりも全体系が負担する水平荷重を低く抑えることができる利点もある。このことは、基礎等の他部位への影響が相対的に小さくなることにつながると考える。

一方、既設高架橋が曲げ破壊型（図-3(b)）で、降伏震度が低く、曲げ耐力が不足する場合には、大変形まで追従できるダンパー・ブレースを適用することによって、曲げ耐力ならびにエネルギー吸収性能を改善することで、所要の耐震性能を確保することが可能である。

このように、補強目的に応じてダンパー・ブレースを設計し、適用することが可能と考える。

## 3. 非線形静的FEM解析

### 3.1 解析モデル

圧縮型ダンパー・ブレースに組み込むダンパーの変形機構を確認するため、積層シェル要素を用いた三次元非線形静的FEM解析を実施した。解析モデルを図-4に示す。

解析モデルは、対称性を考慮してダンパーの1/2を取り出している。ダンパーを構成する鋼材はシェル要素によりモデル化し、解析メッシュの1単位は50mm程度とした。鋼材の材料特性を表-1に示す。骨格曲線はバイリニアモデルとした。

载荷は、解析モデルに対して片側からウェブ線上で水平方向に与える（図-4中の矢印で示す）ことにより、ブレースからの軸力を表現した。拘束条件は、载荷側の支点は水平方向をフリーとし、ブレースとの接合部は回転を拘束した。

解析は表-2に示す2種類の部材を対象とした。解析ケース①は、せん断パネルのウェブ厚が大きく、フランジの曲げ降伏が先行するタイプである。これに対し、解析ケース②は、ウェブ厚が小さく、ウェブのせん断降伏を先行させることを意図したものである。

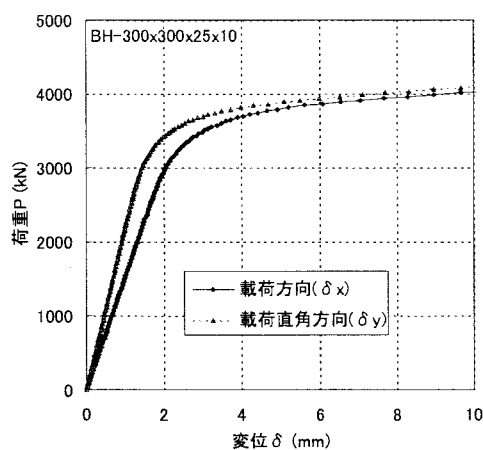


図-5 荷重－変位関係（解析ケース①）

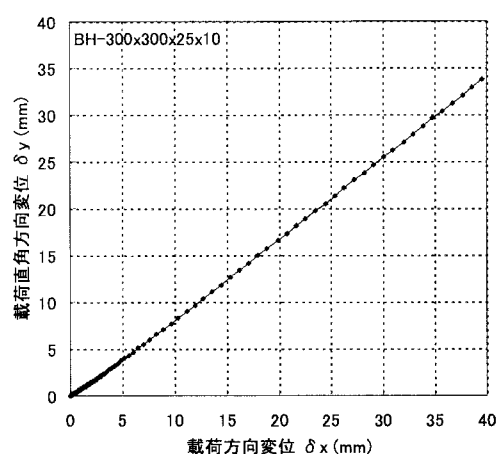


図-7 ブレース方向変位（解析ケース①）

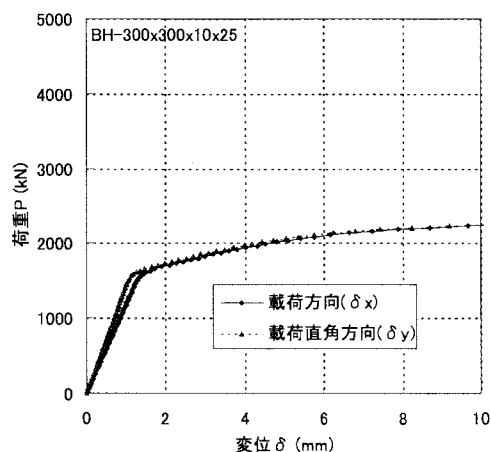


図-6 荷重－変位関係（解析ケース②）

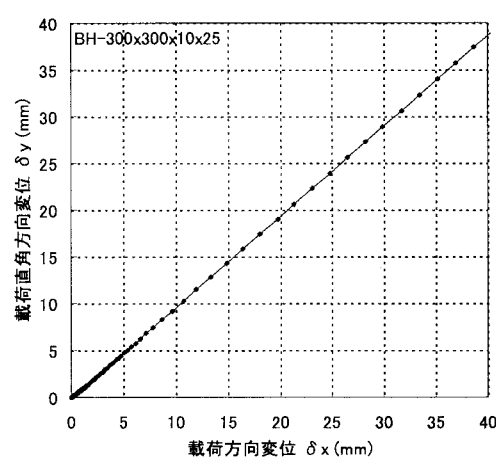


図-8 ブレース方向変位（解析ケース②）

### 3.2 解析結果

図-5、図-6 に解析ケース①および②の荷重－変位関係をそれぞれ示す。荷重－変位関係は、ブレース軸方向荷重  $P$  に対して、同じ軸方向（載荷方向）の変位  $\delta x$  と直角方向（他方のブレース軸方向）変位  $\delta y$  との関係を併記している。なお、モデルの対称性から、解析による直角方向変位は全直角方向変位  $\delta y$  の 1/2 に相当する。両解析ケースの荷重変位関係を比較すると、荷重はウェブ厚の大きい解析ケース①の方が大きくなっており、フランジ厚を大きくするよりもウェブ厚を大きくする方がダンパーの耐力向上に有効であることがわかる。したがって、ダンパーの設計はウェブ材の耐力を基本とするのが妥当と考えられる。

図-7、図-8 に解析ケース①および②の載荷方向変位  $\delta x$  と載荷直角方向変位  $\delta y$ （両ブレース方向変位）の関係をそれぞれ示す。 $\delta x$  に対する  $\delta y$  の比率は、ダンパー・ブレースに正負交番荷重が作用した際の挙動（圧縮側のブレースが縮み、それに対応して他方のブレースが外側に押し出される）を示しており、100%であればブレース端部が常に構造隅角部に一致する理想的な挙動ということになる。

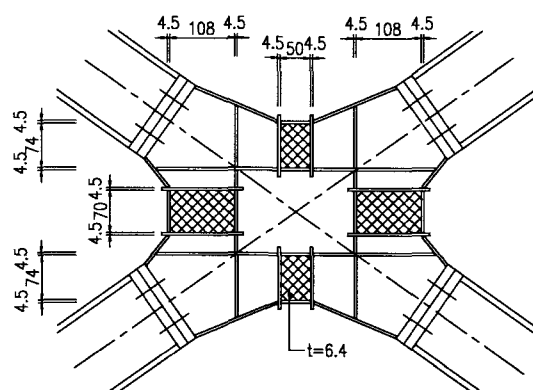
解析の結果、解析ケース①が 85%、解析ケース②が約 95%であり、100%ではないものの、高い追従性を示している。また、解析ケース②の追従性がより高いことから、ダンパーとしてより効果的に機能させるにはウェブのせん断破壊を先行させるのがよいと考えられる。

## 4. 静的交番載荷実験

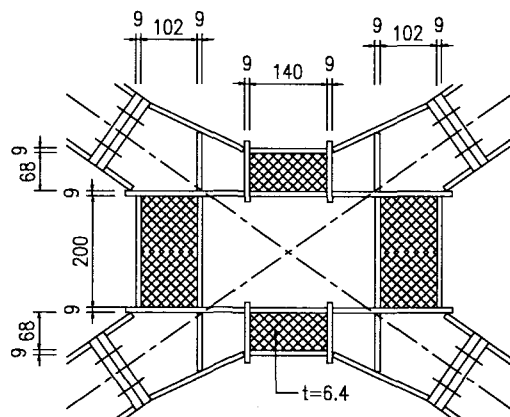
### 4.1 実験方法

提案する圧縮型ダンパー・ブレースの機構が実際に成立することを確認するため、縮尺 1/2.5 のモデルにより静的交番載荷試験を実施した。実施ケースは、ダンパーのせん断パネル寸法・配置が異なる 2 ケースとした。

実験ケース(1)はせん断破壊対応型であり、ダンパーは既設 RC ラーメン構造がせん断破壊する時点まで機能させるものとして、柱高さの 1/250 に相当する変位量がせん断パネルの許容せん断部材角 9%となるように設計した。ここで 1/250 とは壁部材のせん断破壊変形角であり、高架橋の一構面に設置するダンパー・ブレースのせん断変形がこれに対応するものとする。



(a) ケース(1)



(b) ケース(2)

図-9 せん断パネルの配置概要

表-3 材料特性

| 使用部位 | 厚さ<br>mm | 材質    | (下)降伏点<br>$f_y$<br>N/mm <sup>2</sup> | 引張強度<br>$f_u$<br>N/mm <sup>2</sup> | ヤング係数<br>$E_s \times 10^5$<br>N/mm <sup>2</sup> |
|------|----------|-------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|
| ダンパー |          |       |                                      |                                    |                                                 |
| フランジ | 4.5      | SM490 | 453                                  | 520                                | 2.08                                            |
| ウェブ  | 9.0*     | SM490 | 406                                  | 540                                | 2.03                                            |
| ブレース | 10.0     | SM490 | 340                                  | 515                                | 2.07                                            |

\*:ダンパーウェブ(t=6.4)はt=9から切り出した

一方、実験ケース(2)は曲げ破壊対応型であり、既設 RC ラーメン構造のせん断破壊変位の 3 倍程度までダンパーを機能させるために許容せん断部材角を 3%として設計した。

両実験ケースにおけるダンパーのせん断パネル配置を図-9に示す。ダンパー変形の幾何学的整合をとるため、各せん断パネルの中心線の交点をブレース軸線に一致させている。せん断パネルの厚さはすべて 6.4mm である。また、表-3に使用材料を示す。

実験は図-10に示すように門形の鋼製フレームにダンパー・ブレースを取り付けて行った。また、実橋をある程度想定して、ブレース端部を直接フレームと溶接あるいはボルト接合するのではなく、ブレース端部とフレーム間に間詰材 (DEVCON-B) を充填した。なお、ブレース端部が面外方向に外れるのを防ぐためのガイドを設置している。

図-11に各実験ケースの荷重パターン方法を示す。ここで、 $\delta_y$ はダンパーのせん断パネルが降伏したときの全体

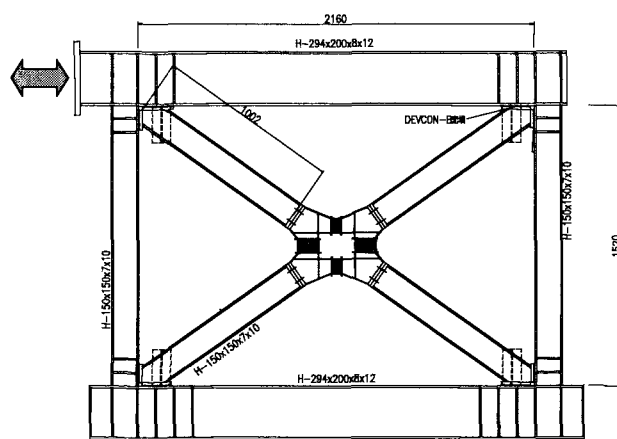
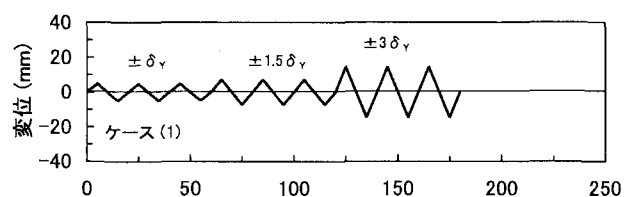
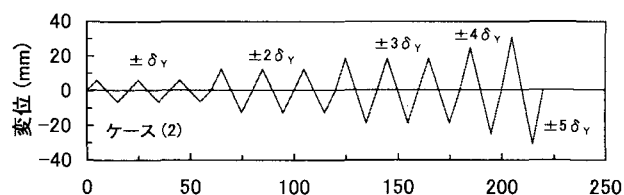


図-10 荷重試験方法



(a) 実験ケース(1)



(b) 実験ケース(2)

図-11 荷重パターン

水平変位である。また、実験ケース(1)における  $1.5\delta_y$  は水平変位 (ブレースと架構間の間詰材の圧縮変位を除く) が柱高さ 1520mm の  $1/250$  に達したときの全体水平変位である。繰り返し回数は各変位ステップについて 3 サイクルであり、図-11に示す変位ステップで荷重を終了している。

## 4.2 実験結果 (ケース(1))

### (1) 荷重-変位関係

図-12にダンパー・ブレースの荷重-変位関係を示す。ここで、縦軸の荷重はブレースに作用する軸力の水平成分  $P_{bh}$ 、横軸の変位は全体水平変位からブレース端部の間詰材の圧縮変形分を除いた水平変位  $\delta_{bh}$  である。ブレース軸力は対角 2 方向の軸力を組み合わせている。なお、全体水平変位が生じる方向によって圧縮力が働いているブレースが異なるため、両ブレース軸力の接続点では若干の段差が生じている。さらに、図中には、せん断パネルの計測ひずみより判定したダンパーの降伏点、柱高さの  $1/250$  に相当する許容変位 (せん断破壊防止の許容変位)、せん断パネルの降伏および終局耐力を併記している。

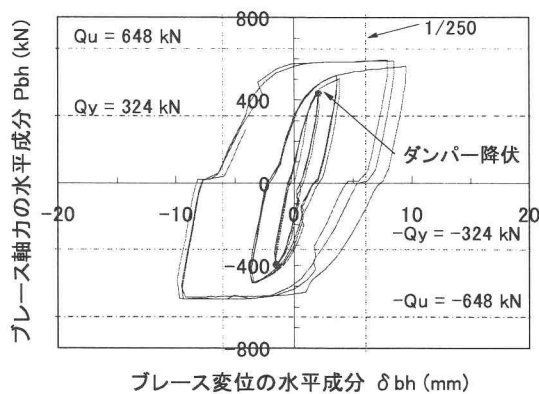


図-12 ダンパー・ブレースの荷重-変位関係  
(実験ケース(1))

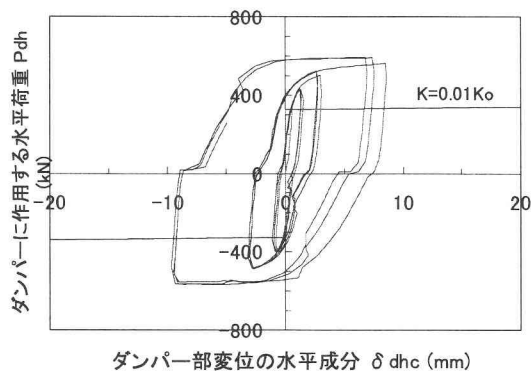


図-13 ダンパーの水平荷重-水平変位関係  
(実験ケース(1))

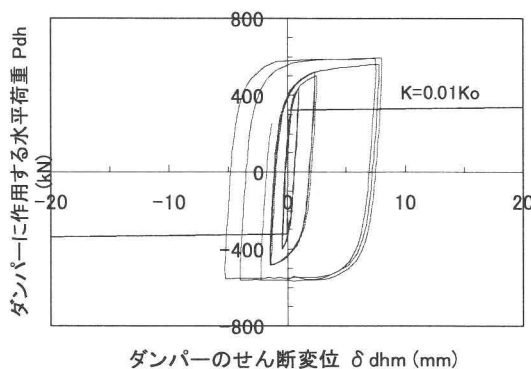


図-14 ダンパーの水平荷重-せん断変位関係  
(実験ケース(1))

ダンパーの降伏は、架構の柱高さから決まるせん断降伏点（柱高さの 1/250 変位）よりも十分に小さな変位で生じていることがわかる。また、ダンパー・ブレースの履歴は十分なエネルギー吸収のある紡錘型となっている。

次に、ダンパー部に着目する。ダンパー部に伝達された荷重の水平成分  $P_{dh}$  ( $=P_{bh}$ ) と、図-12 の変位  $\delta_{bh}$  からブレースの軸圧縮変位量分を差し引いて求めたダンパー部変位の水平成分  $\delta_{dhc}$  の関係を図-13 に示す。また、同様に、横軸をせん断パネル部のせん断変形による水平変位

表-4 水平変位の内訳（実験ケース(1)）

| 項目         | 初降伏時    |        | +1.5 $\delta_y$ 時 |        | +3 $\delta_y$ 時 |        |
|------------|---------|--------|-------------------|--------|-----------------|--------|
|            | 変位 (mm) | 比率 (%) | 変位 (mm)           | 比率 (%) | 変位 (mm)         | 比率 (%) |
| ダンパーブレース変形 | 3.681   | 100    | 5.906             | 100    | 12.618          | 100    |
| ブレース圧縮     | 0.979   | 26.6   | 1.147             | 19.4   | 1.291           | 10.2   |
| ダンパー変形     | 0.965   | 26.2   | 2.460             | 41.7   | 7.625           | 60.4   |
| その他        | 1.737   | 47.2   | 2.299             | 38.9   | 3.702           | 29.3   |

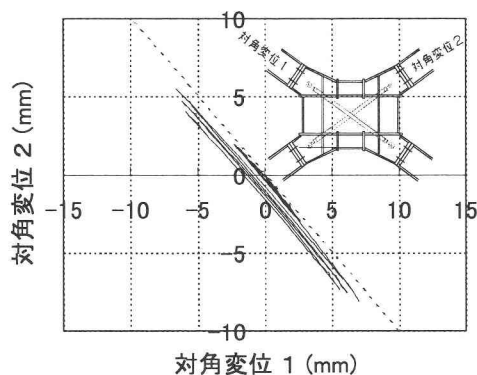


図-15 対角変位（実験ケース(1)）

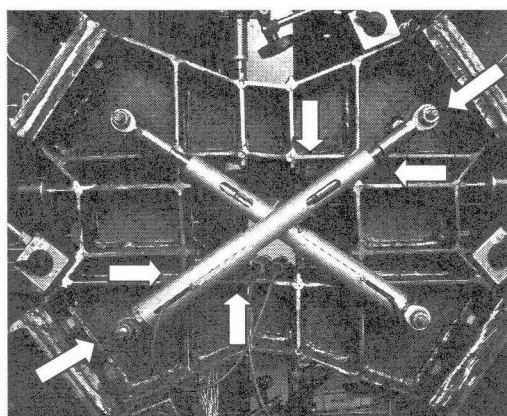


写真-2 ダンパーの変形状況（実験ケース(1)）

（せん断パネル部で直接計測した水平変位） $\delta_{dhm}$  としたものを図-14 に示す。両者を比較すると、 $-3\delta_y$  での挙動にやや差が見られるが、全体的にはよい対応を示している。したがって、水平変位は主に間詰材の圧縮、ブレースの軸方向圧縮、せん断パネルのせん断変形から構成されていると言える。表-4 に各変位レベルにおけるダンパー・ブレース変位の内訳を示す。変位の進行とともにダンパー変形の寄与率が卓越し、その他の部材の変形は相対的に小さくなることがわかる。なお、今回の実験に用いた間詰材は圧縮量が比較的大きかったが、無収縮モルタルを用いれば変形を小さくすることができ、より理想的な挙動を示すと考えられる。以上より、圧縮型ダンパー・ブレースにおけるせん断パネルは想定通りに変形し、ダンパーとして有効に機能している。

## (2) 対角変位の関係

本補強工法の特徴であるダンパーの挙動として、交番荷重に対するダンパー変形の追従性を確認するため、ダンパー部で計測したブレース軸線 2 方向の対角変位の関係を図-15 に示す。図中には 100% 対応のライン（45° ライン）

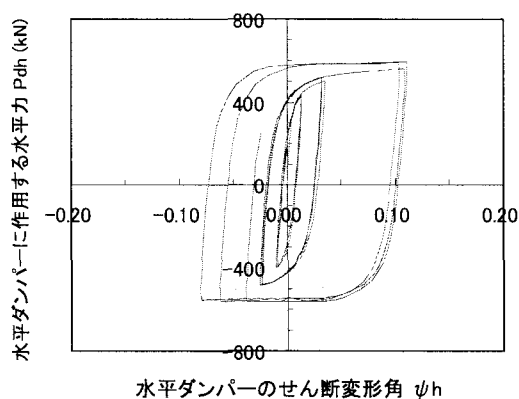


図-16 水平パネルの履歴曲線 (実験ケース(1))

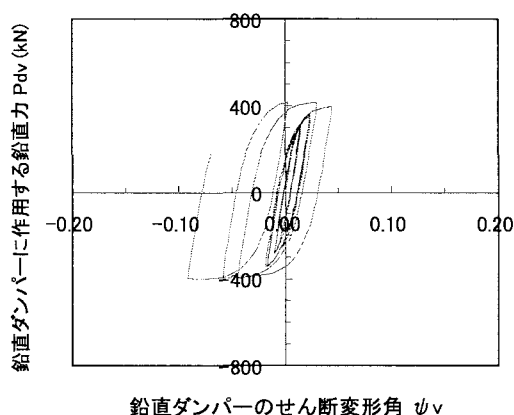


図-17 鉛直パネルの履歴曲線 (実験ケース(1))

を併記している。対角変位の履歴は、変位レベルが大きくなると若干の偏りが見られるものの、ほぼ 100%対応ラインに沿って挙動しており、両対角方向の変形がバランスよく生じている。すなわち、一方のブレースからの圧縮力によるダンパー部の縮みに対して、他方のブレース側に、ほぼ同じ変位量だけ軸方向外側に伸びていることを示している。このことから、想定したダンパーの変形機構が成り立っていることが実験的に確認できた。

### (3) セン断パネルの挙動

ダンパーの変形機構を詳細に見るため、せん断パネルのみに着目する。写真-2 に、変位  $-3\delta_y$  の 3 サイクル目におけるダンパーの変形状況を示す。ブレースに作用する圧縮力によって、水平方向および鉛直方向に配置したせん断パネルがそれぞれせん断変形している様子がよくわかる。

次に、水平および鉛直方向せん断パネルに作用する力とせん断変形角の関係をそれぞれ、図-16、図-17 に示す。いずれの方向のせん断パネルも紡錘型の履歴ループを描いており、効率よくせん断パネルがエネルギー吸収していることが確認できた。

## 4.3 実験結果 (ケース(2))

### (1) 荷重－変位関係

実験ケース(2)についても、実験ケース(1)と同様に整理

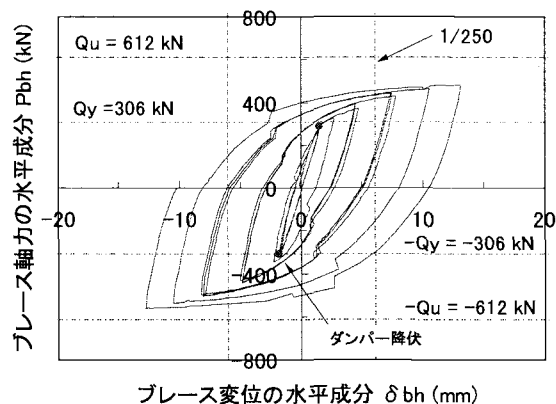


図-18 ダンパー・ブレースの荷重－変位関係 (実験ケース(2))

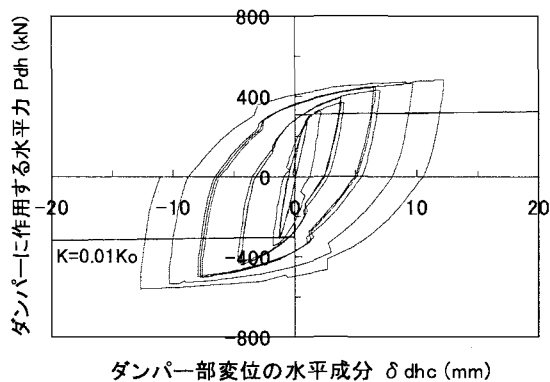


図-19 ダンパーの水平荷重－水平変位関係 (実験ケース(2))

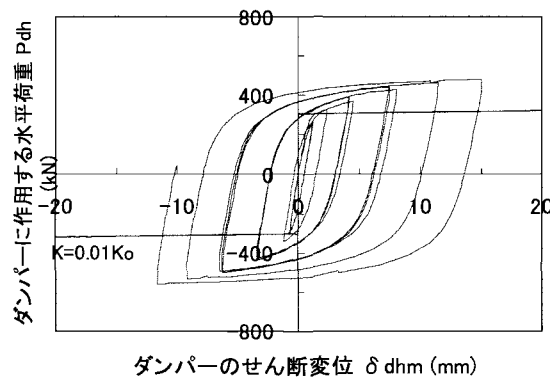


図-20 ダンパーの水平荷重－せん断変位関係 (実験ケース(2))

する。図-18 にダンパー・ブレースの荷重－変位関係を示す。また、ダンパー部に着目した水平変位、せん断変位の関係をそれぞれ、図-19、図-20 に示す。各図より、全般的にケース(1)と同様に圧縮型ダンパー・ブレースの基本特性が成立している。また、想定したとおり、実験ケース(2)では、より大きな変位レベルまでダンパーが機能しており、曲げ破壊型の高架橋本体の変形に対応することが可能であると考える。

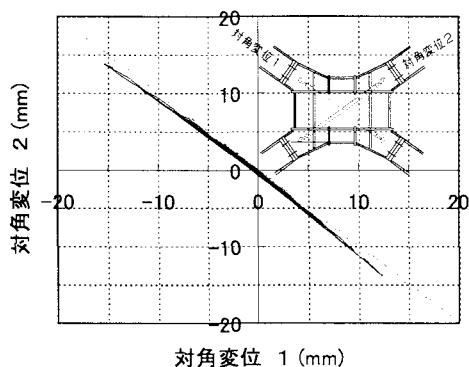


図-21 対角変位（実験ケース(2)）

## (2) 対角変位の関係

交番荷重に対するダンパー変形の追従性を確認するため、ダンパー部で計測したブレース軸線2方向の対角変位の関係を図-21に示す。対角変位の履歴においても、実験ケース(1)と同様に、両対角方向の変形がバランスよく生じており、想定したダンパーの変形機構が成り立っている。

## (3) セン断パネルの挙動

水平および鉛直方向せん断パネルに作用する力とせん断変形角の関係をそれぞれ、図-22、図-23に示す。いずれの方向のせん断パネルも紡錘型の履歴ループを描いており、せん断パネルによるエネルギー吸収が確認できた。

## 5. 結論

鉄道 RC ラーメン高架橋の新しい耐震補強工法として、今回提案する X 型配置の圧縮型鋼製ダンパー・ブレースに関する解析、実験の結果から以下の知見を得た。

- (1) 中央部に配置するダンパーのせん断パネル変形を利用したエネルギー吸収と、ダンパー全体の幾何学的特徴からブレースに圧縮力のみが作用する機構が成立することを確認できた。このことから、従来のダンパー・ブレース構造での課題が克服できると考える。
- (2) ダンパー降伏時における水平変位は許容せん断変形角 1/250 に相当する変位内に収まっており、せん断補強用として想定どおりの性能を有する。
- (3) 全体荷重-変位関係におけるループ形状は、十分なエネルギー吸収のある紡錘形を示す。また、外力によって生じる全体水平変位は、ダンパーのせん断変形、ブレース材の圧縮、間詰材の圧縮変形からなり、多くの部分をダンパーが分担することを確認した。
- (4) ダンパーの変形は、両ブレース方向にほぼ同等（90%程度）とバランスよく機能し、全体としてバイリニア型の履歴特性を有する。また、左右および上下方向のダンパーがともに外力に対する吸収材として有効に作用し、十分なエネルギー吸収性能を有する。
- (5) ダンパーの変形性能を変え、曲げ破壊型の補強用として用いる場合にも、せん断破壊型と同様に、想定どおりの変形機構と性能を有することが確認できた。

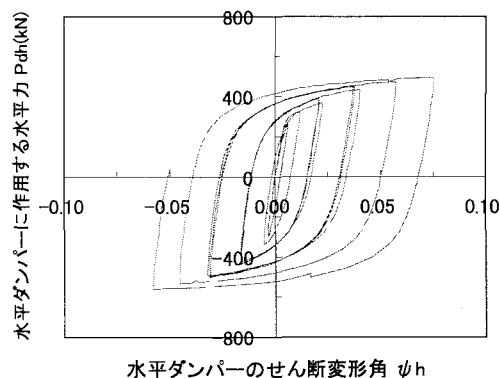


図-22 水平パネルの履歴曲線（実験ケース(2)）

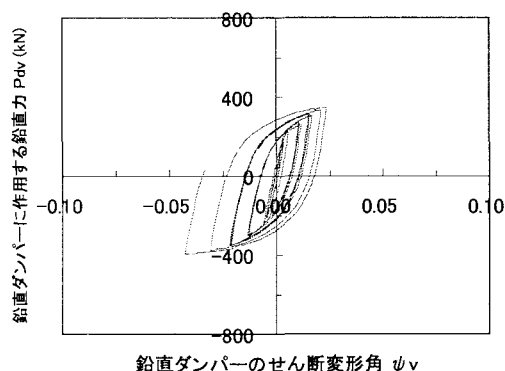


図-23 鉛直パネルの履歴曲線（実験ケース(2)）

今後は、RC ラーメン高架橋（1 層 2 柱式 3 径間ラーメン高架橋）1 ブロック全体系の縮小モデルを用いた振動台実験を行い、全体構造系に対する圧縮型鋼製ダンパーの適用性を確認する予定である。さらに、これらの結果を詳細に分析し、圧縮型鋼製ダンパー・ブレースの設計手法を整備していく。また、従来の鋼板巻き工法の適用が難しい箇所を中心に本工法の展開を図っていく方針である。なお、せん断破壊先行型への耐震補強工法としてだけではなく、曲げ破壊型への適用も含めてまとめていく方針である。

謝辞：本研究を進めるにあたって、埼玉大学工学部建設工学科町田篤彦教授には貴重な助言を賜りました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の震災復旧・耐震補強技術と事例，1998.8
- 2) 武田寿一：耐震診断と補強法－設計・施工の実務－，理工図書，1996
- 3) 岡野素之，松本信之，曾我部正道，室野剛隆，大内 一，大野 了：振動台実験による鋼製ダンパー・ブレース付き高架橋の地震応答性状，構造工学論文集 Vol.49(1)，pp.963-970，2003

（2003 年 9 月 12 日受付）