

# 論文 鋼製ダンパー・ブレースを用いた RC 鉄道高架橋の水平交番载荷試験

松本 信之<sup>\*1</sup>・岡野 素之<sup>\*2</sup>・大内 一<sup>\*3</sup>・在田 浩之<sup>\*4</sup>

**要旨:** RC ラーメン架構内部に、逆V型の鋼製ブレースと鋼製せん断パネル型ダンパーを配置した新型鉄道高架橋に関し、ダンパーの形式に着目した2模型試験体で水平交番载荷試験を実施した。本構造は、ダンパーの減衰による耐震性能の向上だけでなく、高剛性化による地震時の列車走行性の向上を目的としている。ダンパーが曲げ降伏する場合損傷が局所化するが、曲げ降伏しない場合には損傷がダンパー全長に分散することが実験により得られた。これらの結果からダンパーと全体架構の評価モデルを提案した。

**キーワード:** 鉄道高架橋, 混合構造, ダンパー, ブレース, 水平交番载荷試験, 履歴減衰

## 1. まえがき

兵庫県南部地震での被害経験を踏まえて、性能設計の考え方を取り入れた「鉄道構造物等設計標準」(耐震設計)が策定され<sup>1)</sup>、耐震安全性の照査の他、列車走行上の必要性能として地震時に所定の水平剛性を確保することが盛り込まれた。

この背景の下、RC 高架橋内部に鋼製ダンパー・ブレースを有する混合構造形式の新型高架橋を提案した<sup>2)</sup>。構造概要を図-1に、設計概念と性能の考え方を図-2にそれぞれ示す。ダンパーが弾性領域では水平剛性が高いため列車走行性が確保され、塑性領域ではダンパーとRC架構の減衰効果により高い耐震性能が確保される。

また、本構造は耐震要素として線路方向、線路直角方向ともに適用可能であり、被災後のダンパー取り替えによる性能復旧や、耐震補強への適用性など利点も多い。この鋼製ダンパー・ブレースは建築の鉄骨構造では利用<sup>3)</sup>されているが、RC 架構への適用に関しては未解明の部分が多い。これまで基本的性能に関して载荷試験を行い適用性を確認した<sup>2)</sup>。本報告では、ダンパーの設計思想の違いによる挙動の差に着目し実施した模型実験の概要と、ダンパー及び全体架構の評価モデルについて概説する。

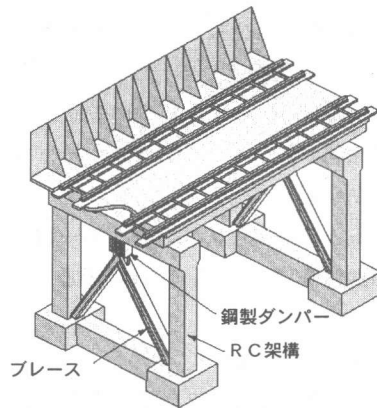


図-1 構造概要<sup>2)</sup>

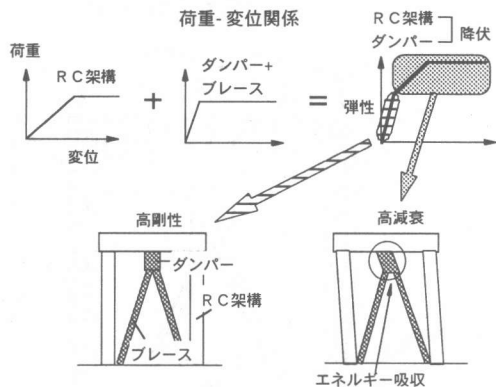


図-2 設計概念と性能

\*1 (財) 鉄道総合技術研究所構造物技術開発事業部主任技師 M.S. (正会員)

\*2 (株) 大林組技術研究所土木第4研究室主任研究員 (正会員)

\*3 (株) 大林組技術研究所土木第4研究室室長 工博 (正会員)

\*4 東日本旅客鉄道(株) 東北工事事務所 (正会員)

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体は実構造物の1/2.5モデルで、図-3に示すようにRC架構にダンパーとブレースが付加された構造（合計2体）である。

RC架構は共通で、降伏震度は0.40とし、以下の仕様とした。柱部分：断面 $280 \times 280 \text{mm}$ ，引張鉄筋比 $p_t=1.1\%$ ，せん断補強筋比 $p_w=0.30$ （柱中間部）， $0.50\%$ （柱端部1.5D区間）。はり部分：断面 $800 \times 360 \text{mm}$ ，引張鉄筋比 $p_t=1.0\%$ ，せん断補強筋比 $p_w=0.40\%$ 。

ダンパーの詳細は以下のように決めた。その他の鋼材も既報<sup>2)</sup>に比較し経済性を考慮した。

**試験体M**：降伏震度0.35。フランジ断面が小さく，せん断パネル（ウェブ）のせん断降伏後，RC架構が降伏する前にダンパーが曲げ降伏する。 $D/t_w=30$ 。

**試験体S**：降伏震度0.40。ダンパーは架構の終局まで曲げ降伏しない。 $D/t_w=50$ とし，せん断座屈を早める<sup>3)</sup>。

ここに， $D/t_w$ ：幅厚比

$D$ ：補強板に囲まれたせん断パネルの幅  
 $t_w$ ：ウェブの厚み

架構には上部構造と列車荷重に相当する荷重として各柱の直上位置に $154 \text{kN}$ （柱単位断面積当たり $2.1 \text{N/mm}^2$ ）ずつ鉛直荷重を載荷した。使用材料の性質を表-1，2に示す。ダンパーのウェブには低降伏点鋼材BT-LYP235を用いた。コンクリートには，呼び強度 $18 \text{N/mm}^2$ ，スランプ $12 \text{cm}$ ，粗骨材最大寸法 $13 \text{mm}$ のレディーミクスコンクリート（普通ポルトランドセメント）を用いた。

表-1 鋼材の性質

使用部位	降伏点 ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	ヤング係数 ( $\text{kN/mm}^2$ )	
鉄筋	D6	371	509	201
	D13	345	514	198
	D19	384	582	195
アンカー ボルト	M18	552	787	211
	M20	483	692	210
	M25	638	847	212
ダンパーウェブ	225	331	205	
ダンパー フランジ	M-type	310	460	211
	S-type	374	531	210
ブレース	356	560	209	

表-2 コンクリートの性質

使用部位	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	ヤング係数 ( $\text{kN/mm}^2$ )
はり	3.18	35.1	25.8
柱	2.99	34.6	27.1

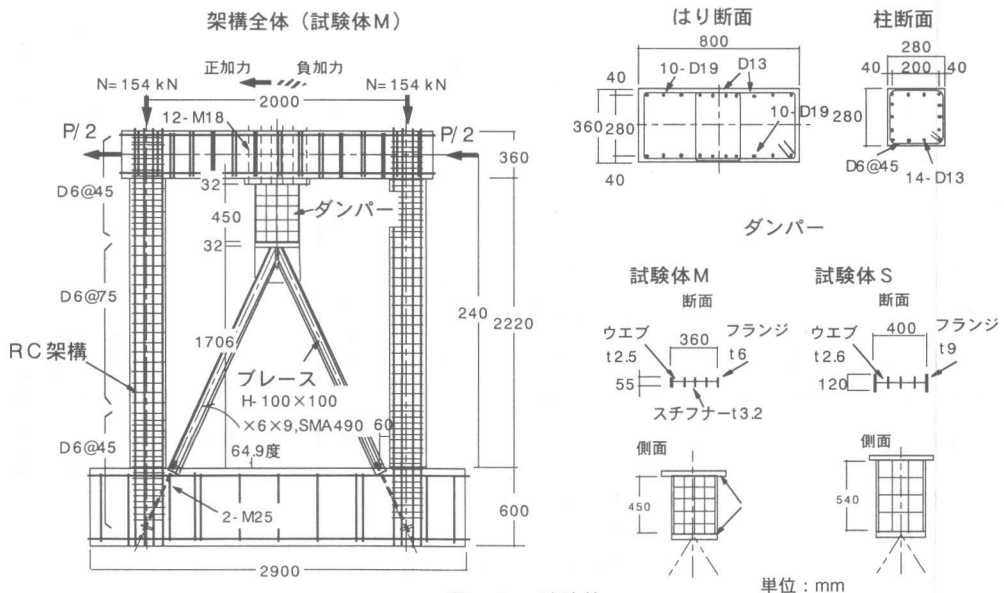


図-3 試験体

## 2.2 加力方法

載荷装置を図-4に示す。鉛直荷重を一定に保持した状態で、水平方向に試験体の左右から押・引の2台の静的ジャッキにより均等に水平力を加え正負交番に載荷した。載荷履歴は、柱上下端部すべての最外縁鉄筋が降伏した変位を降伏変位 $\delta y$ と定義し、変位制御により $\delta y$ の整数倍の各変位で各3回繰返した。ダンパーの負担する水平荷重は、左右のブレースの平均ひずみから各軸力を求め、水平成分の和とした。

## 3. 実験結果

### 3.1 破壊性状

#### (1) ダンパー

破壊状況を写真-1に示す。

試験体Mは、 $2\delta y$ の1サイクルでウェブと

フランジが座屈し、 $3\delta y$ の3サイクルでウェブとフランジが上端部で一部破断した。その後両破断箇所が次第に進展し、 $4\delta y$ の2サイクルにダンパー全体が破断し荷重が急激に低下した。

試験体Sは、 $1\delta y$ の3サイクルでウェブが座屈し、 $3\delta y$ の2サイクルで、補強板で囲まれたウェブが×状に破断し始めた。その後破断箇所が増え、荷重が次第に低下した。

#### (2) RC架構

両試験体とも、 $3\delta y$ 程度で柱端部のコンクリートが圧壊し、また $5\delta y$ で主筋の座屈に起因するはらみ出しがみられた。はりには両試験体とも曲げひび割れが発生したが、試験体Sでは $3\delta y$ で一部が曲げせん断ひびわれに移行した。最終的には柱端部がせん断ずれを起こし終局に至っている。

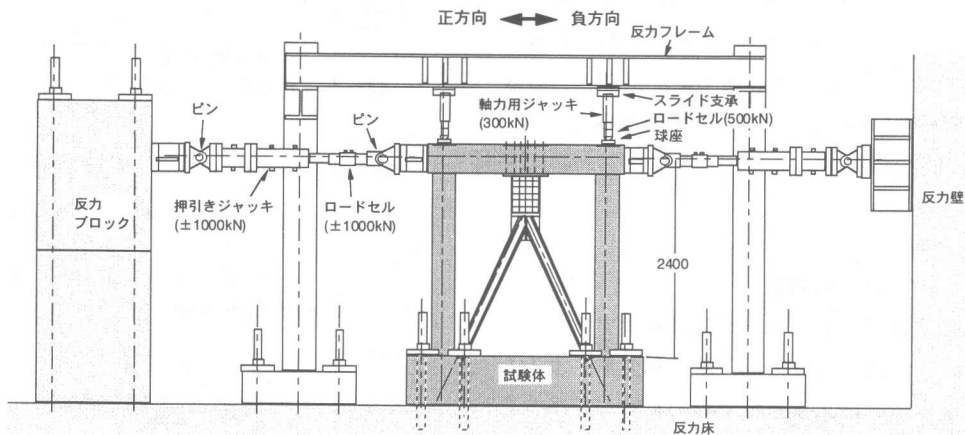
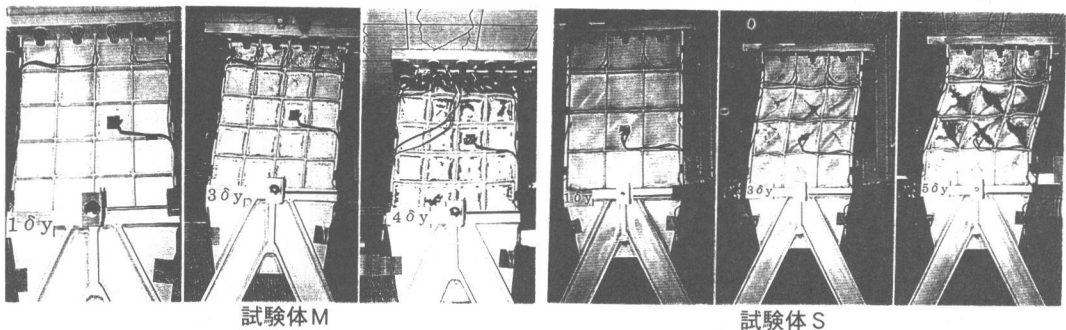


図-4 載荷装置

単位: mm



試験体M

試験体S

写真-1 ダンパーの破壊性状

### 3.2 変位性状

全体架構の履歴曲線を、水平荷重 (P) と頂部変位 ( $\delta$ ) の関係で図-5に、ダンパーの履歴曲線を、作用する水平力 (Hb) とダンパー上下端の相対水平変位 ( $\delta_{rs}$ ) との関係で図-6にそれぞれ示す。

**試験体M**：ダンパーのウェブがせん断降伏した後、 $1\delta y$  へ向かう途中 ( $P = 179\text{ kN}$ ,  $\delta = 3.63\text{ mm}$ ) でダンパーのフランジ上端が引張降伏した。架構の降伏変位は  $\delta y = 18.8\text{ mm}$  であった。全体の履歴 (図-5 (a)) は、フランジとウェブの座屈後損傷が拡がりながらも、紡錘型の安定した履歴を示した。ダンパーの全体破断後はその作用力はゼロ (図-6 (a)) となり、RC 架構だけで水平力を受けていることがわかる。

**試験体S**：せん断降伏後の架構の降伏変位は  $\delta y = 18.7\text{ mm}$  であった。全体の履歴 (図-5 (b)) は、ダンパーのウェブの破断 ( $3\delta y$ ) 後、荷重が次第に低下するとともに、ダンパーの履歴 (図-6 (b)) は、次第に紡錘型から逆S型に変化していった。

## 4. 考察

### 4.1 ダンパーの回転

試験体Mは、ダンパーが曲げ降伏するため、ダンパーの水平変位には、せん断変形によるもの他、曲げによる回転変形の影響が相当含まれると考えられる。そこでダンパーの曲げによる回転部材角を図-7のように考え、式(1)で評価し、試験体Sと比較した。ダンパー上下の固定度は上側 (はり) が非常に高いので、はりに固定された片持はりとしてモデル化した。

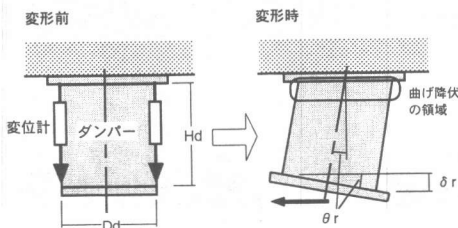


図-7 試験体Mにおける曲げによる回転部材角

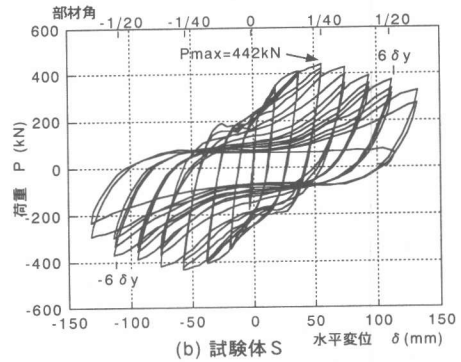
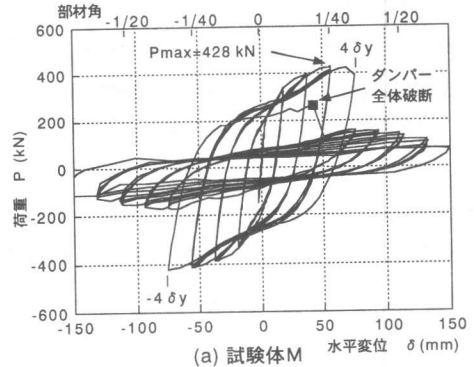


図-5 水平荷重と頂部変位との関係

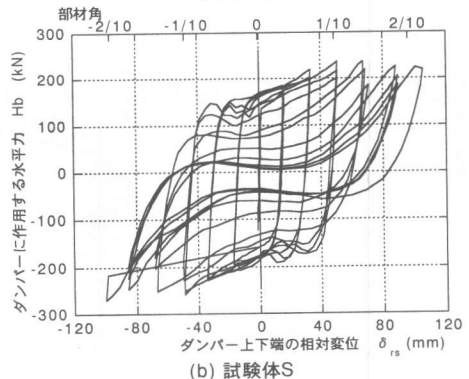
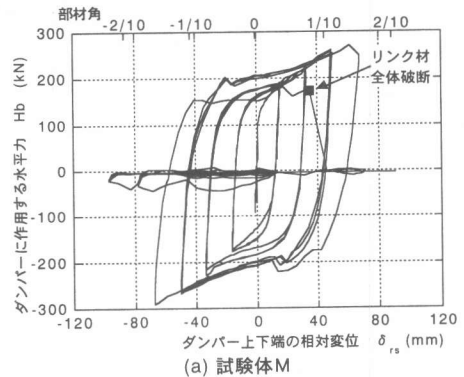


図-6 ダンパーの履歴

$$\theta_r = \delta_r / Dd \quad (1)$$

ここに、 $\theta_r$ : 曲げによる回転部材角

$\delta_r$ : ダンパー両端の軸方向変位

$Dd$ : ダンパーの水平方向長さ

ダンパーの全体部材角は式(2)で評価する。

$$\theta_d = \delta_{rs} / Hd \quad (2)$$

ここに、 $\theta_d$ : ダンパーの全体部材角

$\delta_{rs}$ : ダンパーの水平相対変位

$Hd$ : ダンパーの鉛直方向長さ

両試験体の曲げによる回転部材角とダンパーの全体部材角の関係を図-8に示す。試験体Mにおいて、概ね各ピークを結んだ曲線を引くとその勾配が0.2程度であり、曲げによる回転部材角のダンパーの全体部材角に対する割合が20%を占めている。これはダンパーが上端で曲げ降伏し大きな曲げ変形が発生するためである。試験体Sでは、同割合は3.8%程度で、残り95%以上をせん断変形が占めていると言える。このようにダンパーの基本的な変位性状が両者で違うため、評価法の立案には留意する必要がある。

#### 4.2 せん断型ダンパーの評価

せん断変形だけで評価可能と判断できる試験体Sにおけるダンパーの評価法を、以下の条件に基づいて提案した。

- 1) ウェブと補強板の和で評価する。
- 2) ウェブは既往の研究成果<sup>3)</sup>に従う。
- 3) 補強板は図-9に示すモードで変形するものとし、各水平補強板間で固定された逆対称曲げをうけるはりとする。

図-10に上記評価法と実験値の比較を示す。実験値は累加経験則<sup>4)</sup>により繰り返し載荷を単調載荷モデルに置き換え、縦軸はウェブのせん断降伏応力度で除し無次元化した。評価式は大きな部材角の領域で実験値よりも低い傾向があるが、降伏以降の勾配を評価している事を考慮すれば概ね評価できていると言えよう。

#### 4.3 全体架構の解析

全体架構の静的非線形解析を実施した。解析モデルを図-11に示す。各部材は、それぞれRC架構をファイバーモデル、ブレースをはり

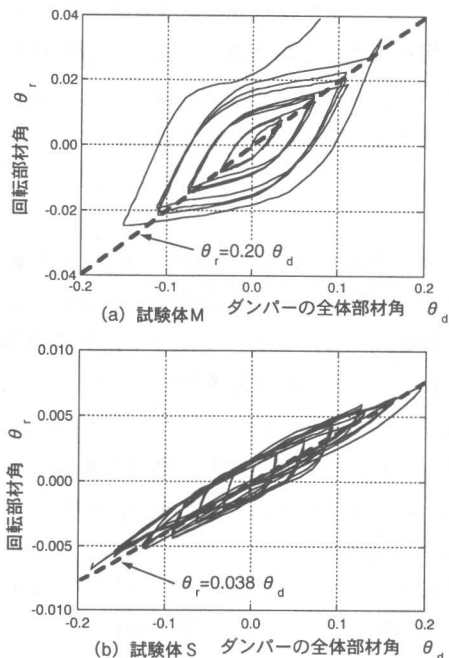


図-8 曲げによる回転部材角とダンパーの全体部材角の関係

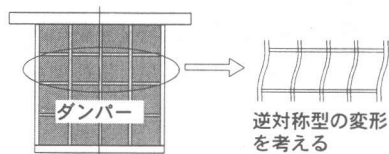


図-9 補強板の変形モード

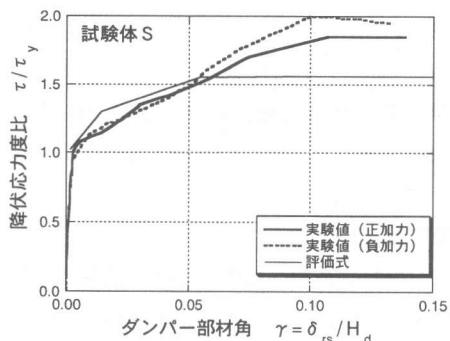


図-10 ダンパーの評価式と実験値の比較

要素, ダンパーはせん断モデルを前節の評価法による非線形バネ, 軸方向は全断面有効のトラス要素とし, 柱の上下端に主筋の抜け出し<sup>5)</sup>を

考慮した。また幾何非線形を考慮している。

図-12に全体架構の実験値と解析値の比較を示す。ダンパーのウェブが座屈する最大荷重付近まで、精度よく表すことができた。

## 5. まとめ

設計思想の違いによるせん断パネル型ダンパーの挙動について、全体架構の正負交番荷重試験を実施し、ダンパー及び全体架構の評価法を検討した。知見を以下にまとめる。

(1) せん断降伏後、曲げ降伏するダンパーは、上端に損傷が集中し、曲げ変形が大きくなり、最終的にはダンパー全体が破断する。

(2) フランジが大きく曲げ降伏しないせん断降伏型ダンパーは、ダンパー全長で変形を吸収し全体破断に至らない。また曲げの影響は非常に少なく相対水平変位の4%程度である。

(3) せん断降伏型ダンパーは、ウェブを既往の評価式、補強板を水平補強板で拘束された逆対称曲げ部材の和として評価できた。

(4) せん断降伏型ダンパーを用いた全体架構は、ダンパーを前記評価法、RC架構を一般のファイバーモデルによることで評価できた。

これらに基づきダンパー・ブレースを有する架構の設計を行えるように指針化<sup>6)</sup>しているが、今後モデルの妥当性をさらに検証する予定である。

謝辞：低降伏点鋼材は新日本製鐵（株）よりご提供頂きました。ここに深謝します。

## 参考文献

- (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説，耐震設計1999.10
- 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，土木学会構造工学論文集Vol.45A, pp.1411-1422.1999.3
- 高橋泰彦，品部祐児：せん断降伏型薄鋼板の復元力特性に関する実験的研究，日本建築学会構

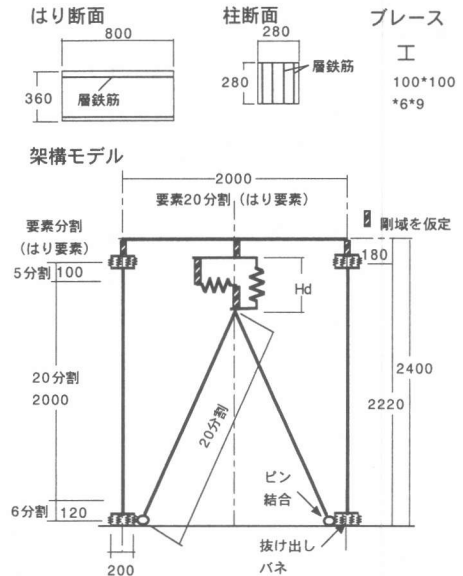


図-11 全体架構の解析モデル

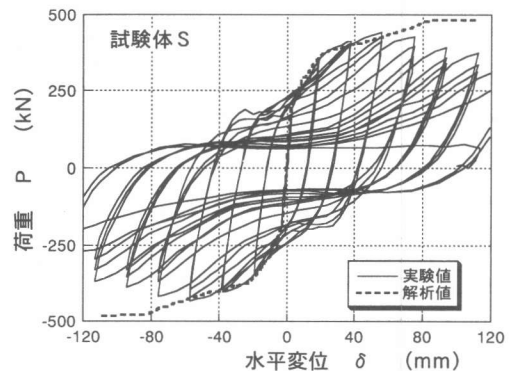


図-12 実験と解析の比較

造系論文集，第494号，pp.107-114，1997.4.

4) BEN KATO : Beam-To-Column Connection Research In Japan, Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 108, No. ST2, pp.343-360, Feb. 1982

5) 石橋忠良，吉野伸一：鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形能力に関する研究，土木学会論文集，第390号/V-8, pp.57-66, 1988.2.

6) (財) 鉄道総合技術研究所，(株) 大林組：ダンパー・ブレースを用いた鉄道高架橋の設計指針，2000.1