

## せん断型ダンパー・ブレースを有する 鋼上部構造縮小試験体の载荷実験

岩田 隆弘<sup>1</sup>・木下 幸治<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 岐阜大学大学院博士課程 工学研究科工学専攻（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）

<sup>2</sup>正会員 岐阜大学准教授 工学部社会基盤工学科（同上）

### 1. はじめに

大規模地震において、これまでに橋梁構造物における主構造の橋脚や鋼桁、二次部材の対傾構や横構など、橋梁構造物全体における損傷が報告<sup>1)</sup>されてきており、橋梁構造物全体の高耐震性能化が求められ、国内外において研究が進められている。例えば、ネバダ大学リノ校の既往の研究<sup>2,3)</sup>では、鋼上部構造の対傾構を地震エネルギー吸収部材である軸降伏型のダンパー・ブレースとすることで、下部構造への地震力が低減可能であることが示されてきている。

著者らは、既往の研究を基に鋼上部構造の対傾構をダンパー・ブレースに取り替える効果に関する検討を進めてきた。まず、本検討を進める上で必要不可欠な縮小試験システムを実験的並びに解析的手法により構築した<sup>4,5)</sup>。その中では、対傾構の有無による比較検討も行ってきた。

本研究では、構築した縮小試験システムを用いて対傾構をダンパー・ブレースに取り替える効果に関する検討を行う。具体的には、軸方向の小さい変形から大きなエネルギー吸収を期待できると考えられるせん断型ダンパーの要素試験を行い、パラメータ解析を基に決定した補正係数を考慮したせん断型ダンパーの初期剛性、降伏強度の計算式を提案した。その上で、提案計算式に基づき設計したせん断型ダ

ンパーを対傾構と取り替えた実験・解析を行い、せん断型ダンパー・ブレースの効果に関する検討を行った。本論文では、提案計算式および実験・解析結果を報告する。

### 2. せん断型ダンパーの要素試験

#### (1) 実験概要

図-1にせん断型ダンパーを示す。せん断型ダンパーは既往の研究<sup>6)</sup>を参考に製作した。せん断型ダンパーは、軸方向力が作用した時に、スリットによって鋼板中央に設けられたせん断面でせん断変形する構造となっている。図-1のせん断型ダンパーはLY225材よりなる鋼板を用いて製作した。本研究でせん断型ダンパーに使用する材料と同じ鋼板から引張試験片を3体製作し、引張試験により求めた材料定数を表-1に示す。

要素試験には、200kN材料試験機を使用し軸方向力を作用させた。载荷方法は単調に引張軸力を作用させる引張せん断载荷試験と、両振で引張圧縮軸力を作用させる繰返し载荷試験を実施した。繰返し载荷試験では、引張せん断試験で得た降伏変位を $\delta_y$ とし、 $\pm 1\delta_y$ ずつ増加させた（図-2）。

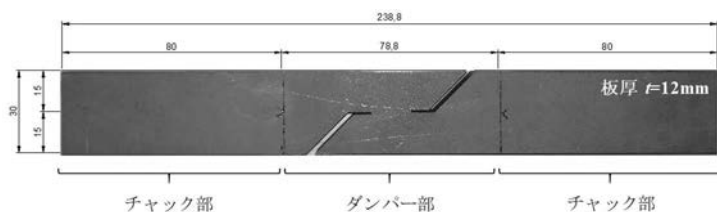


図-1 せん断型ダンパー（単位:mm）

表-1 材料定数

|                                  | No.1 | No.2 | No.3 | Average |
|----------------------------------|------|------|------|---------|
| Modulus of Elastic $E$ [GPa]     | 207  | 208  | 207  | 207     |
| Yield Stress $\sigma_y$ [MPa]    | 235  | 239  | 236  | 237     |
| Ultimate Stress $\sigma_u$ [MPa] | 308  | 307  | 309  | 308     |
| Ultimate Elongation [%]          | 40.9 | 42.0 | 44.3 | 42.4    |

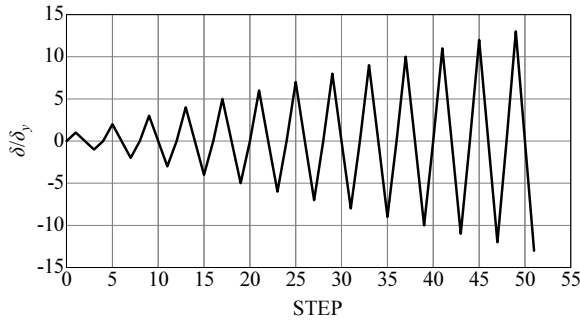
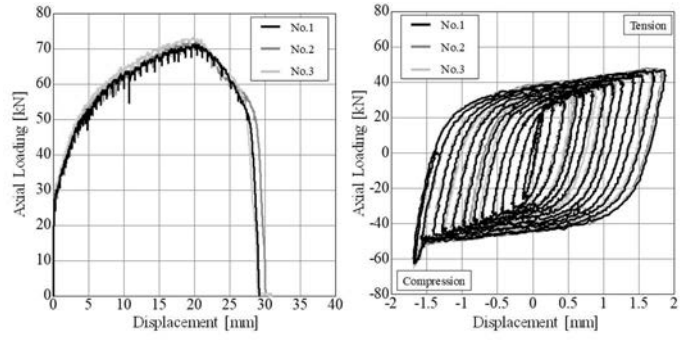


図-2 要素試験の荷重ステップ



(a) 引張せん断試験

(b) 繰返し試験

図-3 要素試験結果

## (2) 試験結果

図-3に要素試験結果の荷重変位関係を示す。引張せん断試験の結果、降伏変位は0.14mm、降伏強度は24kNとなり、最大強度は変位20mmのところで72kNとなった。繰返し荷重では安定した履歴曲線を描いたが、圧縮側の変位で $-12\delta y$ となったところで、変形に伴うスリット部の接触により急激な荷重上昇を示したため試験を終了した。

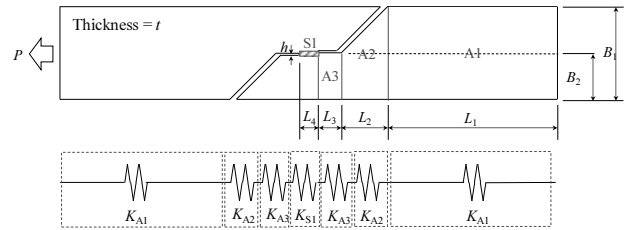


図-4 剛性計算の概念図

## 3. せん断型ダンパーの初期剛性・降伏強度の計算式の提案

### (1) せん断型ダンパーの初期剛性計算式

図-4にせん断型ダンパーの初期剛性の計算式を提案する上での概念図を示す。これは、せん断型ダンパーを断面変化ごとに7分割し、それぞれ分割した要素を1つのばね要素として考えている。分割した要素ごとに剛性式を決定し、せん断型ダンパー全体を直列ばねで表現している。この時A1, A2およびA3は軸剛性で考え、S1はせん断剛性で考える。

#### a) A1部の剛性

A1部は軸剛性で考える。A1部の軸応力 $\sigma_{A1}$ は次式で示される。

$$\sigma_{A1} = E\varepsilon_{A1} = E \frac{\Delta L_{A1}}{L_1} = \frac{P}{B_1 t} \quad (1)$$

このとき、 $E$ は鋼材のヤング係数、 $\varepsilon_{A1}$ はA1部の軸ひずみ、 $\Delta L_{A1}$ はA1部の軸変形量である。(1)式より、A1の軸剛性は次式で示される。

$$K_{A1} = \frac{P}{\Delta L_{A1}} = \frac{EB_1 t}{L_1} \quad (2)$$

#### b) A2部の剛性

A2部の剛性もA1部と同様に軸剛性で考えるが、図-4に示すように断面変化を有するため、断面変化を考慮した軸剛性式となる。まず、軸方向の任意点

$x$ における断面積 $A_x$ は次式で求められる。

$$A_x = \left( B_2 + \frac{B_1 - B_2}{L_2} x \right) t = \frac{B_1(L_2 + x)}{2L_2} t \quad (3)$$

次に、任意点 $x$ における微小変位量 $d\lambda$ は次式で求められる。

$$d\lambda = \frac{\sigma_x}{E} dx = \frac{P}{A_x E} dx = \frac{P}{\frac{B_1(L_2 + x)}{2L_2} t E} dx \quad (4)$$

このとき、 $\sigma_x$ は任意点 $x$ における軸応力である。A2部全体の軸変形量 $\Delta L_2$ は、微小変位量 $d\lambda$ をA2区間で積分することで求めるため、次式で求められる。

$$\begin{aligned} \Delta L_2 &= \int_0^{L_2} d\lambda \\ &= \int_0^{L_2} \frac{P}{\frac{B_1(L_2 + x)}{2L_2} t E} dx \\ &= \frac{2PL_2}{RB_1 t} \int_0^{L_2} \frac{1}{L_2 + x} dx \\ &= \frac{2PL_2}{EtB_1} \ln(2) \end{aligned} \quad (5)$$

(5)式より、A2部の軸剛性は次式で示される。

$$K_{A2} = \frac{P}{\Delta L_2} = \frac{EtB_1}{2L_2 \ln(2)} \quad (6)$$

#### c) A3部の剛性

A3部の軸剛性は、A1部と同様に考えられるため、次式で示される。

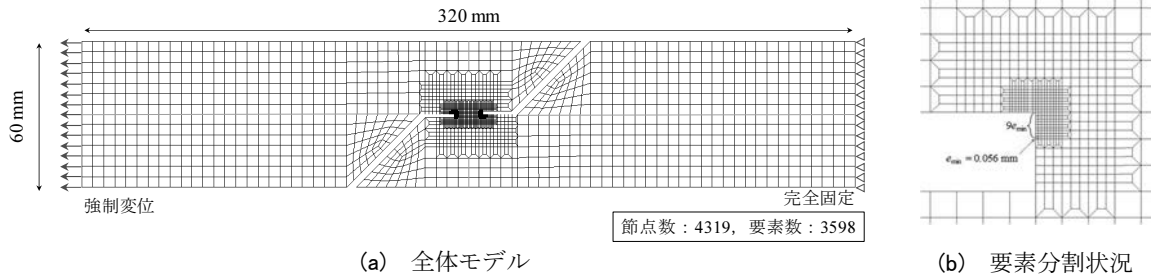


図-5 セン断型ダンパーの解析モデル

$$K_{A3} = \frac{EB_2t}{L_3} = \frac{EB_1t}{2L_3} \quad (7)$$

#### d) S4部の剛性

S4部はせん断剛性で考える．S4部のせん断応力は次式で示される．

$$\tau_{S1} = G\gamma_{S1} = G \frac{\Delta d}{\ell} = \frac{P}{L_4t} \quad (8)$$

このとき， $G$ は鋼材のせん断弾性係数， $\gamma_{S1}$ はS1部のせん断ひずみ， $\Delta d$ はせん断変形量， $\ell$ はせん断高さ（ $\ell=2h$ ）である．(8)式より，S1のせん断剛性は次式で示される．

$$K_{S1} = \frac{P}{\Delta d} = \frac{GL_4t}{2h} \quad (9)$$

#### e) セン断型ダンパー全体の剛性

図-4に示すように，直列ばねで表現するため，せん断型ダンパーの全体の剛性は(2, 6, 7, 9)式より次式で示される．

$$K_d = \frac{1}{\frac{1}{K_{S1}} + \frac{2}{K_{A1}} + \frac{2}{K_{A2}} + \frac{2}{K_{A3}}} \quad (10)$$

#### (2) セン断型ダンパーの降伏強度計算式

せん断型ダンパーは，図-4に示すS1区間のせん断面で降伏する構造となっている．すなわち，降伏強度はせん断部の断面積 $A_{S1}$ と鋼材のせん断降伏応力 $\tau_y$ で決定するため次式で求められる．

$$P_y = \tau_y A_{S1} = \tau_y L_4t \quad (11)$$

#### (3) FEM解析による計算式の妥当性の確認

初期剛性計算式並びに降伏強度計算式の妥当性をFEM解析との比較を通して検討する．図-5に本検討で用いる解析モデルを示す．本解析では，既往の研究<sup>6)</sup>で検討された試験体寸法を基にモデル化している．FEM解析には，非線形汎用コードであるABAQUS<sup>7)</sup>を用いた．図-5に示す様に，スリット部の応力集中箇所を最小要素寸法とし，その寸法を0.056mmとした．要素寸法は応力集中箇所から離れるに連れて段階的に大きくした．

表-2 計算式と解析の比較

|                  | 計算式    | 解析     | 解析/計算式 |
|------------------|--------|--------|--------|
| $K_{S1}$ [kN/mm] | 6307.7 | 3000.0 | 0.476  |
| $K_{A1}$ [kN/mm] | 2246.6 | 2093.0 | 0.932  |
| $K_{A2}$ [kN/mm] | 5915.0 | 2571.4 | 0.435  |
| $K_{A3}$ [kN/mm] | 8482.8 | 1578.9 | 0.186  |
| 全体 [kN/mm]       | 616.3  | 300.7  | 0.488  |
| 降伏強度 [kN]        | 12.5   | 12.3   | 0.984  |

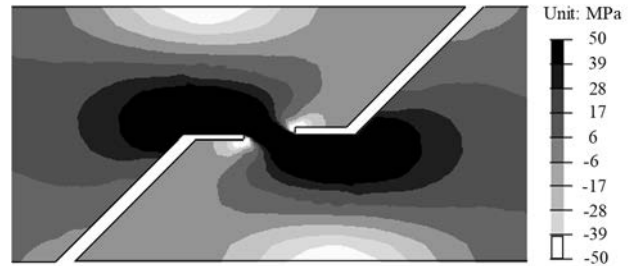


図-6 セン断型ダンパーの応力分布

表-2に計算式を用いた計算結果と解析結果の比較を示す．初期剛性計算式は解析結果と比較すると，A1部は同等であるがそれ以外の要素は計算式では剛性を過大評価しており，特にA3部では80%以上の差がある．一方で，降伏強度については解析結果と同等の値となっている．ここで，図-6に30kNの引張力を与えた時FEM解析で得られたせん断部付近の応力分布を示す．応力分布よりA3部周辺では引張方向の応力のみならず，圧縮方向の応力も作用していることが確認できる．これは，荷重作用軸と断面の図心軸の偏心による曲げの影響と考えられる．さらに，スリットの角部には，当然ながら応力集中が生じていることが確認できる．

以上より，せん断型ダンパーの初期剛性の計算式では，実際に生じている曲げ応力や応力集中が考慮できていないため再現性が低いことから，それらの影響を加味した設計計算式にする必要がある．ただし，実際の設計計算を想定し，できる限り簡単な計算式とすることが望ましい．そこで，ここでは各種影響因子に関する補正係数を提示し，それら係数を用いた計算式の適用性について検討した．

#### (4) パラメータ解析による補正係数の決定

各種影響因子に関する補正係数を決定するために、パラメータ解析を実施した。表-3にパラメータ解析ケース一覧を示す。パラメータ解析に用いるモデルは、3.(3)で示した解析モデルを基本系として、せん断型ダンパーの板厚、相似則（板厚、長さ、幅の全て）、長さ、幅をパラメータとした。パラメータ量は、基本モデル（図-5）から各パラメータを0.6, 0.8, 1.2, 1.4倍とした。

図-7にパラメータ解析の結果、表-4にパラメータ解析より得られた補正係数を示す。なお、補正係数は、解析で得られた初期剛性を提案計算式より得られた剛性で除した値となっている。

以上の補正係数を考慮したせん断型ダンパーの初期剛性計算式は、以下ようになる。

$$K'_{A1} = \frac{EB_1t}{L_1} C_{1A1} C_{2A1} C_{3A1} \quad (12)$$

$$K'_{A2} = \frac{EtB_1}{2L_2 \ln(2)} C_{1A2} C_{2A2} C_{3A2} \quad (13)$$

$$K'_{A3} = \frac{EB_1t}{2L_3} C_{1A3} C_{2A3} C_{3A3} \quad (14)$$

$$K'_{S1} = \frac{GL_4t}{2h} C_{1S1} C_{2S1} C_{3S1} \quad (15)$$

$$K'_d = \frac{1}{\frac{1}{K'_{S1}} + \frac{2}{K'_{A1}} + \frac{2}{K'_{A2}} + \frac{2}{K'_{A3}}} \quad (16)$$

#### (5) 補正係数を考慮した剛性計算式の妥当性の確認

本節では、前章で行った要素試験で使用した寸法のせん断型ダンパーの実験結果と提案計算式より求まる初期剛性および降伏強度との比較を通して、補正係数を考慮した剛性計算式の妥当性を検討する。図-8に実験結果と計算値を示す。両者の比較の結果、計算式より求めた初期剛性並びに降伏強度は要素試験結果と良く一致しているといえる。以上より、補正係数を考慮した計算式は、妥当であると言える。

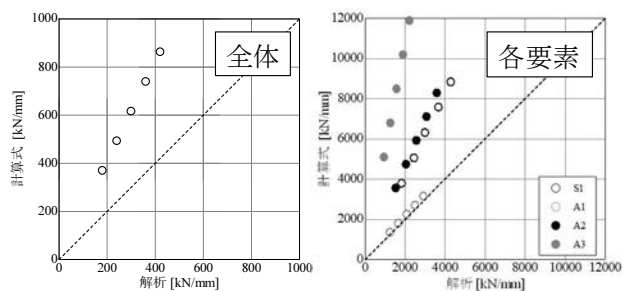
### 4. せん断型ダンパーを設置した鋼上部構造の載荷実験

#### (1) 実験概要

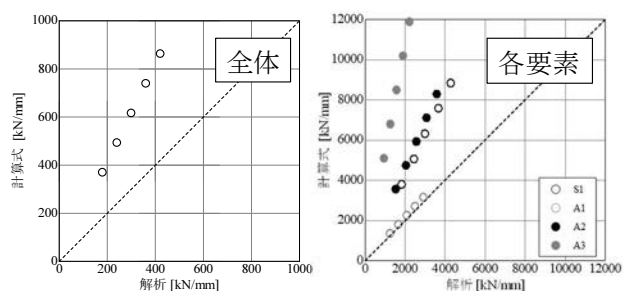
図-9に試験システムを示す。載荷試験には、これまでに著者らが構築した大型試験体の荷重変位関係を再現可能な縮小試験体<sup>4)</sup>（以下、対傾構無試験体）に対してダンパー・ブレースを組み込んだ縮小試験体を用いた。試験体はコンクリート床版を有する鋼

表-3 解析一覧

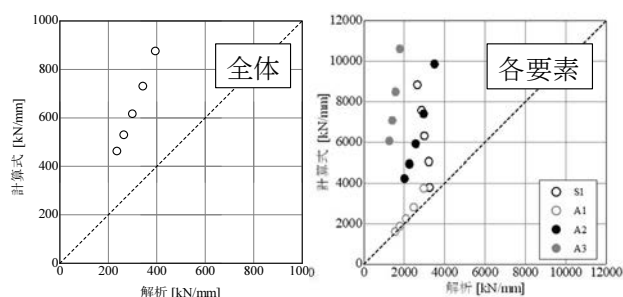
|     |       | $t$  | $B_1$ | $B_2$ | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $L_4$ | $h$ |
|-----|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| 基本形 |       | 20.0 | 60.0  | 30.0  | 109.5 | 30.0  | 14.5  | 12.0  | 1.5 |
|     | T-0.6 | 12.0 | 60.0  | 30.0  | 109.5 | 30.0  | 14.5  | 12.0  | 1.5 |
|     | T-0.8 | 16.0 | 60.0  | 30.0  | 109.5 | 30.0  | 14.5  | 12.0  | 1.5 |
|     | T-1.2 | 24.0 | 60.0  | 30.0  | 109.5 | 30.0  | 14.5  | 12.0  | 1.5 |
|     | T-1.4 | 28.0 | 60.0  | 30.0  | 109.5 | 30.0  | 14.5  | 12.0  | 1.5 |
| 相似則 | S-0.6 | 12.0 | 36.0  | 18.0  | 65.7  | 18.0  | 8.7   | 7.2   | 0.9 |
|     | S-0.8 | 16.0 | 48.0  | 24.0  | 87.6  | 24.0  | 11.6  | 9.6   | 1.2 |
|     | S-1.2 | 24.0 | 72.0  | 36.0  | 131.4 | 36.0  | 17.4  | 14.4  | 1.8 |
|     | S-1.4 | 28.0 | 84.0  | 42.0  | 153.3 | 42.0  | 20.3  | 16.8  | 2.1 |
|     |       |      |       |       |       |       |       |       |     |
| 長さ  | L-0.6 | 20.0 | 60.0  | 30.0  | 65.7  | 18.0  | 8.7   | 7.2   | 1.5 |
|     | L-0.8 | 20.0 | 60.0  | 30.0  | 87.6  | 24.0  | 11.6  | 9.6   | 1.5 |
|     | L-1.2 | 20.0 | 60.0  | 30.0  | 131.4 | 36.0  | 17.4  | 14.4  | 1.5 |
|     | L-1.4 | 20.0 | 60.0  | 30.0  | 153.3 | 42.0  | 20.3  | 16.8  | 1.5 |
|     |       |      |       |       |       |       |       |       |     |
| 幅   | B-0.6 | 20.0 | 36.0  | 18.0  | 109.5 | 30.0  | 14.5  | 12.0  | 0.9 |
|     | B-0.8 | 20.0 | 48.0  | 24.0  | 109.5 | 30.0  | 14.5  | 12.0  | 1.2 |
|     | B-1.2 | 20.0 | 72.0  | 36.0  | 109.5 | 30.0  | 14.5  | 12.0  | 1.8 |
|     | B-1.4 | 20.0 | 84.0  | 42.0  | 109.5 | 30.0  | 14.5  | 12.0  | 2.1 |
|     |       |      |       |       |       |       |       |       |     |



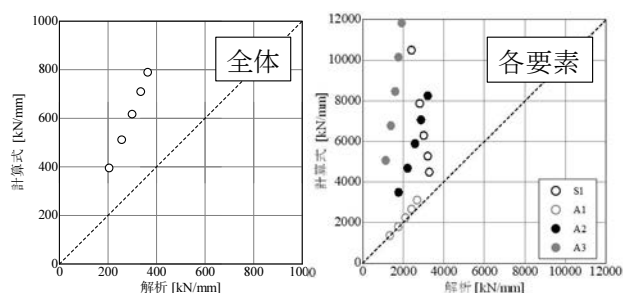
(a) 板厚変化



(b) 相似則変化



(c) 長さ変化



(d) 幅変化

図-7 パラメータ解析結果

表-4 補正係数

|    | $C_1$ (板厚・相似則) | $C_2$ (長さ $L$ ) |       |       |       |       | $C_3$ (幅 $B$ ) |       |       |       |       |
|----|----------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|
| 倍率 | 全倍率            | 0.6             | 0.8   | 1.0   | 1.2   | 1.4   | 0.6            | 0.8   | 1.0   | 1.2   | 1.4   |
| S1 | 0.485          | 1.775           | 1.317 | 1.000 | 0.779 | 0.620 | 0.472          | 0.734 | 1.000 | 1.256 | 1.493 |
| A1 | 0.928          | 0.855           | 0.949 | 1.000 | 1.029 | 1.046 | 1.059          | 1.035 | 1.000 | 0.960 | 0.916 |
| A2 | 0.434          | 0.820           | 0.926 | 1.000 | 1.057 | 1.102 | 1.148          | 1.070 | 1.000 | 0.940 | 0.886 |
| A3 | 0.187          | 0.765           | 0.904 | 1.000 | 1.069 | 1.120 | 1.169          | 1.084 | 1.000 | 0.923 | 0.852 |
| 全体 | 0.488          | 0.923           | 0.966 | 1.000 | 1.028 | 1.049 | 1.071          | 1.034 | 1.000 | 0.972 | 0.949 |

注) 長さ、幅が等倍時の補正係数は板厚・相似則の補正係数に従う。

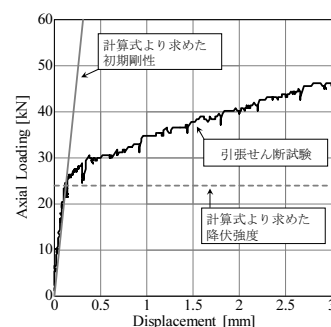


図-8 実験と計算値の比較

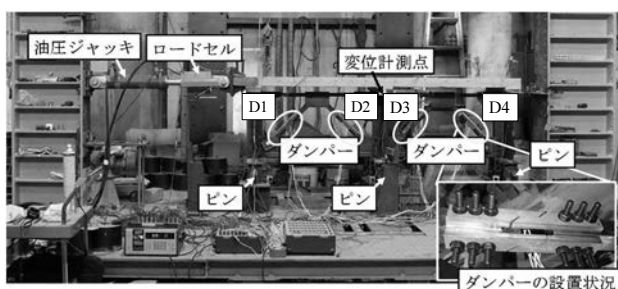


図-9 試験システム

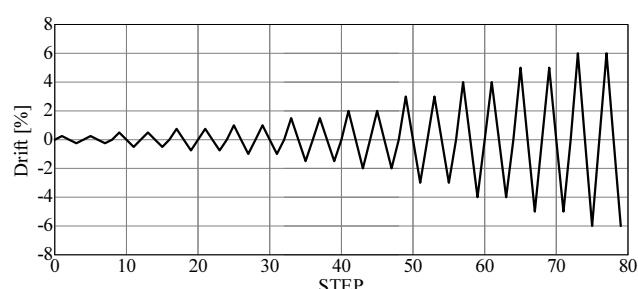
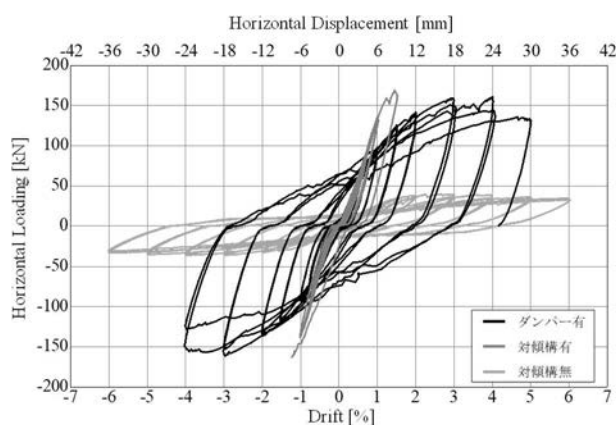
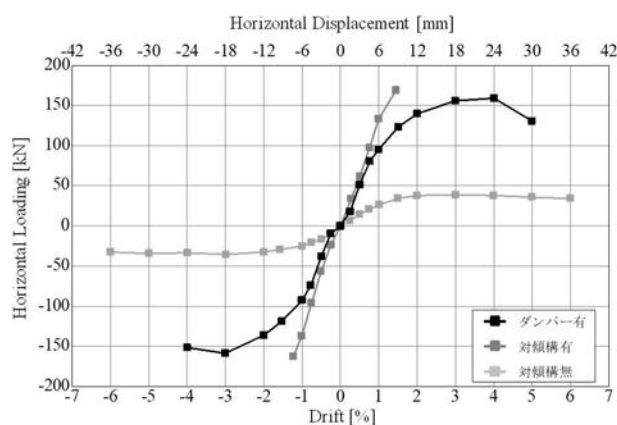


図-10 荷重実験の荷重ステップ



(a) 履歴曲線



(b) 包絡線

図-11 試験結果の比較

I桁断面3主桁の橋軸方向から一部を抜き出したものである。試験体下端はピン構造とされ、主桁上部とコンクリート床版の結合部にずれ止めとしてスタッドを用いた。

縮小試験体は対傾構を有する鋼上部構造縮小試験体（以下、対傾構有試験体）に対傾構の降伏程度まで荷重した試験体<sup>5)</sup>に対し、対傾構の一部を切り出して新たにせん断型ダンパーを設置した。せん断型ダンパーと対傾構の接続は摩擦接合継手とし、山形鋼に対してL字となるようにそれぞれ2基ずつ設置した。また、対傾構に設置するせん断型ダンパーは、対傾構有試験体の初期剛性、降伏強度となるように、前章で提案した計算式を基に設計した。なお、せん断型ダンパーの寸法は図-1と同じである。

荷重試験は、油圧ジャッキにより繰返し水平力を与えた。繰返し荷重は、漸増型繰返し荷重で、各2

サイクル荷重を行った。試験中の荷重は、変位制御で行い、主桁高さに対する水平変位 $\delta$  (mm) の割合をDrift率 (%) とし、1.0%までは $\pm 0.25\%$ ずつ、1.0%から2.0%までは $\pm 0.5\%$ ずつ、それ以降は $\pm 1.0\%$ ずつ変動させた（図-10）。

## (2) 実験結果

### a) 荷重変位関係

図-11に実験結果の荷重変位関係を示す。図-11の荷重実験結果は、これまでに著者らの研究で行ってきた、対傾構無試験体の荷重実験結果<sup>4)</sup>、対傾構有試験体の荷重実験結果<sup>5)</sup>も示す。

ダンパー有試験体の結果は、Drift率が0.75~1.0%の時に水平荷重80kNで降伏し、対傾構無試験体と同様にDrift率が3.0%の時に水平荷重が155kNで最大耐力を迎えた。その後、コンクリート床版の浮き上が

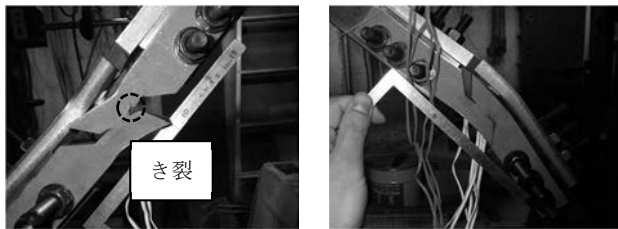


図-12 試験終了後のダンパーの損傷状況

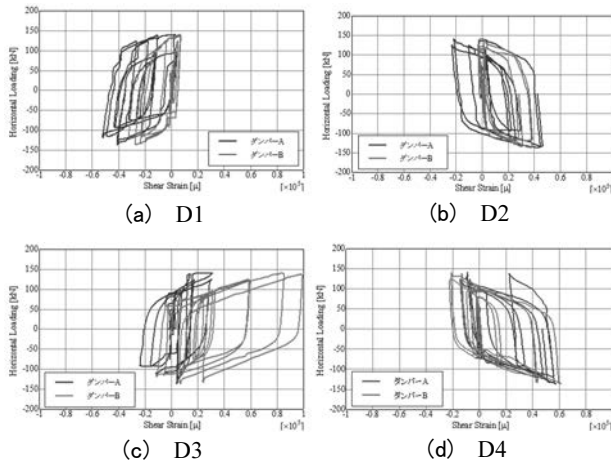


図-13 ダンパーのひずみ



図-14 試験終了後の床版の損傷状況

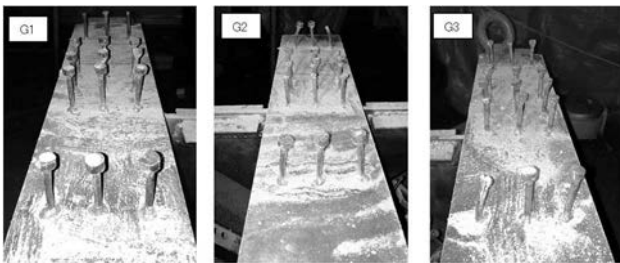


図-15 試験終了後のスタッドの損傷状況

りにより著しい耐力低下を示したため実験を終了した。対傾構有試験体と比較すると、初期剛性はおおむね一致しており、取替え後でも評価可能である。一方で、降伏強度は対傾構有試験体では120kN、ダンパー有試験体では80kNと30%程度低く、前述した設計の降伏強度を満たしていない。

#### b) せん断型ダンパーの損傷

図-12に試験終了後のせん断型ダンパーの損傷状況を示す。試験終了時に圧縮力が作用していたせん断型ダンパーは曲げ変形、引張力が作用していたせん断型ダンパーは、スリット部からのき裂の発生が確認された。

図-13にせん断型ダンパーのひずみ計測結果を示

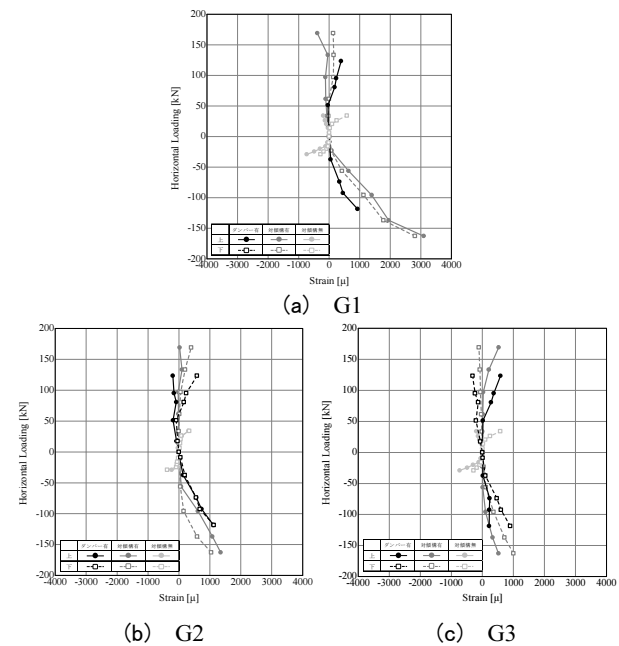


図-16 鉄筋ひずみ

す。せん断型ダンパーのひずみは、せん断部中央に貼付けた3軸ゲージによって計測した最大せん断ひずみを示している。なお、せん断ひずみはせん断型ダンパーの変形が過大となり計測が不能となる以前のDrift $\pm 2.0\%$ までの結果を示している。この結果より、上部構造の変形が比較的小さい段階から、せん断型ダンパーがエネルギー吸収していることがわかった。

#### c) コンクリート床版およびスタッドの損傷

図-14に試験終了後のコンクリート床版の損傷状況を示す。G1（載荷部近傍桁）上ではハンチ部から横方向のひび割れ、G2（中央桁）上ではG1同様の横方向のひび割れと床版の浮き上がり、G3（最外桁）上では上フランジに溶接されたスタッドが確認できる程度の床版の浮き上がりが確認された。

図-15にスタッドの損傷状況を示す。スタッドの変形は、中央に設けられたスタッド群に比べ、上フランジ外側のスタッドの変形が著しい。また、床版の浮き上がりが最も顕著であったG3桁のスタッドは、他の桁に比べて中央のスタッド群の変形が著しい。

図-16に床版内の主鉄筋のひずみ計測結果を示す。なお、結果はDrift $\pm 1.5\%$ までの結果を示している。ダンパー有試験体の床版鉄筋のひずみは、最大で1000 $\mu$ 程度となり、G2で1500 $\mu$ 程度を示した対傾構有試験体の実験結果と比較して同等、あるいはそれ以下の結果となっている。

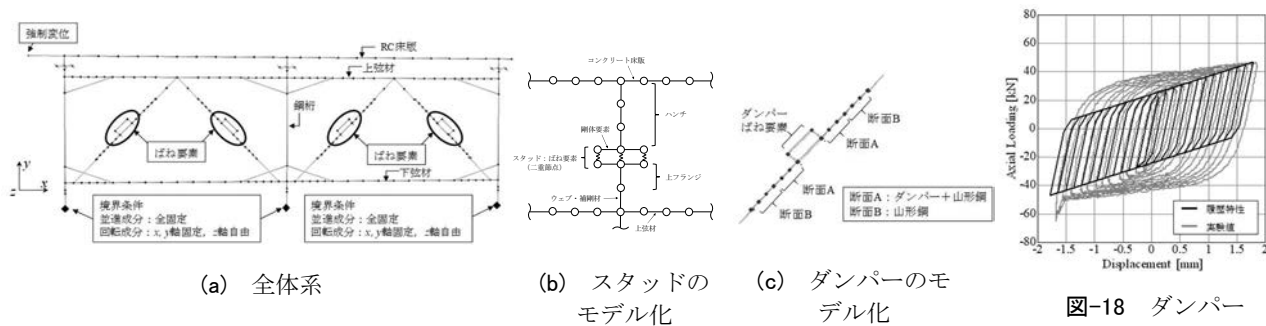


図-17 上部構造の解析モデル

図-18 ダンパーの履歴特性

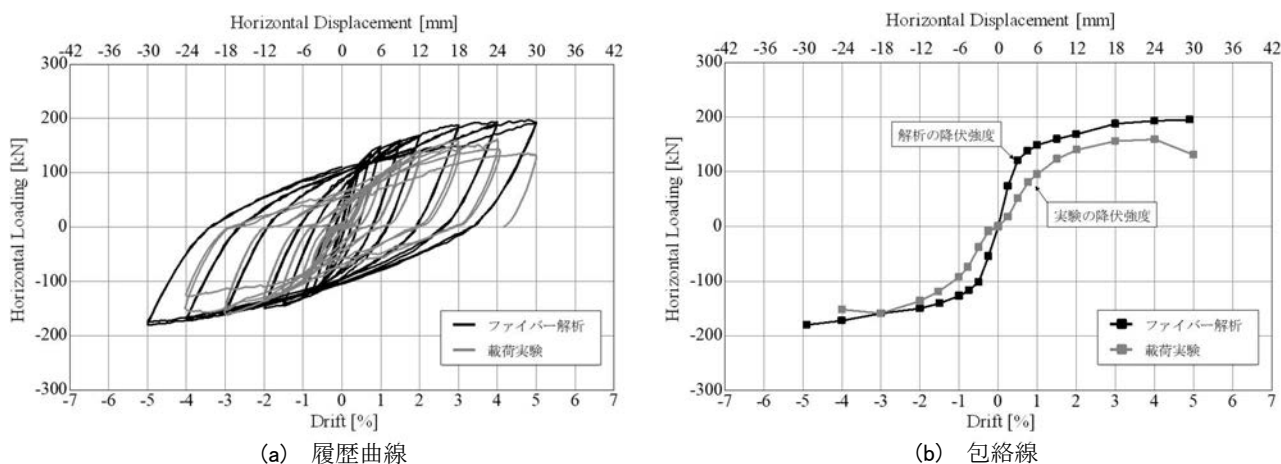


図-19 解析結果と実験結果の比較

## 5. せん断型ダンパーを設置した鋼上部構造のファイバー解析

前章の荷重実験より、せん断型ダンパーを設置した上部構造の降伏強度が設計値を満足しなかった。ここでは、せん断型ダンパーを上部構造に設置した解析を行い、設計値と実験値の降伏強度の差異について解析的な検討を加えた。

### (1) 解析モデルの概要

図-17に解析モデルを示す。解析モデルは、著者がこれまでにUC-win/Frames(3D)<sup>8)</sup>を用いて構築した鋼上部構造のファイバー要素解析モデル<sup>4),5)</sup>をベースとした。一般的にファイバー要素で上部構造をモデル化する場合、橋軸方向にファイバー要素を用いる<sup>9),10)</sup>が、本解析では、ダンパー・ブレースを直接的にモデル内に考慮するために、橋軸直角方向にファイバー要素を用いた。コンクリート床版のファイバー断面の要素分割は、床版厚および床版幅ともに30分割とした。また、コンクリート床版内の鉄筋は、主鉄筋のみモデル化し、配力鉄筋についてはモデル化を行っていない。

図-17(b)に示すように、スタッドのモデル化には既往の文献<sup>11),12)</sup>を参考にばね要素を使用し、コンクリート床版の下面と鋼桁上フランジ上面の間に取り

付けられた水平ばねと鉛直ばねでモデル化した<sup>4)</sup>。スタッドは鋼桁ひとつあたりに対して、橋軸方向に3列で配置されているため、コンクリート床版の下面のノードおよび鋼桁上フランジのノードから左右に剛体要素を設け、ひとつあたりの鋼桁に3つのばね要素でモデル化した<sup>4)</sup>。コンクリートの材料特性は、圧縮側にJSCEの非線形モデル<sup>12)</sup>を用い、引張側は考慮せずゼロとした。鋼材はバイリニアモデル<sup>13)</sup>とし、二次勾配を弾性係数 $E_s$ の1.0%とした。

対傾構のモデル化は、文献4)で構築したXブレースが設置された鋼上部構造の解析モデルと同様に、ガセットプレートと対傾構の接合部を剛体要素としてモデル化した。図-17(c)に示すように、ダンパー部のモデル化は、ばね要素でモデル化し、履歴特性は要素試験より得られた荷重変位関係を近似したバイリニアモデルとした(図-18)。

### (2) 解析結果

図-19に解析結果と実験結果の比較を示す。図-19より解析結果の最大耐力は198kNとなり、実験結果と比べて25%程度高い値を示した。また、解析結果の降伏強度は120kNとなり、実験結果と比較して30%程度高い値を示した。一方で、初期剛性は荷重初期のスリップ挙動により一致しないが、除荷時の剛性は概ね一致している。図-20にダンパー有試験

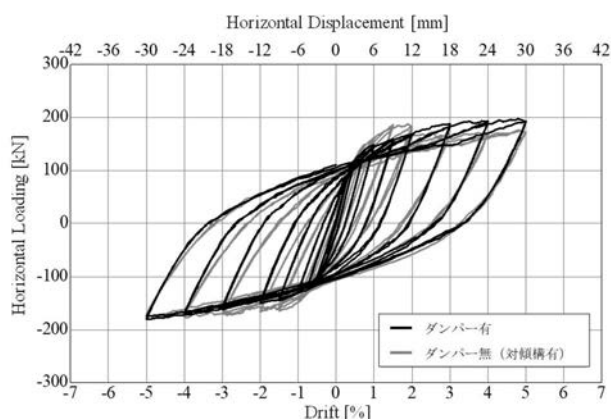


図-20 ダンパー有無による解析結果の比較

体と対傾構有試験体の解析結果の比較を示す。図-20よりダンパー有試験体の解析結果の初期剛性および降伏強度は、対傾構有試験体の初期剛性および降伏強度と同等であり、前述した設計時の条件を満足している。

以上より、本解析では、せん断型ダンパーをばね要素でモデル化しているため、実際の試験体にみられた曲げの影響は考慮されていないが、せん断型ダンパーを用いた本研究では図-12に示すような試験体の曲げの変形が見られており、曲げの影響があるのではないかと推察できる。

## 6. まとめ

本研究では、軸方向の小さい変形から大きなエネルギー吸収を期待できると考えられるせん断型ダンパーの要素試験を行い、パラメータ解析を基に決定した補正係数を考慮したせん断型ダンパーの初期剛性、降伏強度の計算式を提案を試みた。その上で、提案計算式に基づき設計したせん断型ダンパーを対傾構と取り替えた実験・解析を行い、せん断型ダンパー・ブレースの効果に関する検討を行った。本研究で得られた成果を以下に示す。

- 1) せん断型ダンパーの初期剛性を軸剛性とせん断剛性からなる基本式に対し、パラメータ解析を基に決定した補正係数を考慮した計算式を提案した。さらに、降伏強度計算式も提案し、これら計算式の妥当性を示した。
- 2) せん断型ダンパーを設置した上部構造の載荷実験を実施し、せん断型ダンパーが上部構造内でも安定したエネルギー吸収能力を有していることを示した。一方で、対傾構有試験体の実験と比較して降伏強度が30%程度低く設計条件を満

足しなかった。

- 3) 設計値と実験値の降伏強度の差異について解析的に検討を行った結果、対傾構に設置したせん断型ダンパーには曲げの影響をも加味されているのではないかと考えられる。引き続き、降伏強度に差異が生じた理由について検証を進めたい。

## 参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所：平成28年熊本地震土木施設被害調査報告，国総研資料 第967号，2017。
- 2) Carden, L. P., Itani, A. M. and Buckle, I. G. : Seismic performance of steel girder bridges with ductile cross frames using single angle X braces, Journal of Structural Engineering, ASCE, pp. 329-337, March 2006.
- 3) Bahrami, H., Itani, A. and Buckle, I. : Guidelines for the seismic design of ductile end cross frames in steel girder bridge superstructures, Center for Civil Engineering Earthquake Research, UNR, Report No. CCEER 09-04, July 2010.
- 4) 木下幸治，岩田隆弘，井上一磨：鋼上部構造へのダンパー・ブレースの適用性を検討可能な縮小試験体と解析手法の構築，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 74, No. 4, I\_941-I-954, 2018。
- 5) 岩田隆弘，木下幸治：対傾構を有する鋼上部構造縮小試験体の静的載荷実験，第21回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 5-12, 2018。
- 6) 古庄龍悟，休場裕子，三木千壽：極低降伏点鋼のせん断特性に関する研究，土木学会第55回年次学術講演会，I-B164-165, 2000。
- 7) Habbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. : ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.14
- 8) FORUM8: UC-win/Frames(3D), ver. 3.0, 2014.
- 9) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書（耐震設計編），丸善，pp.50-63, 2008。
- 10) 日本鋼構造協会：ファイバーモデルを用いた鋼橋の動的耐震設計の現状と信頼性向上，JSSC テクニカルレポート No.93, 2011。
- 11) 中島章典，池川真也，山田俊行，阿部英彦：ずれ止めの非線形性を考慮した不完全合成桁の弾塑性解析，土木学会論文集，No. 537/I-35, pp. 97-106, 1996。
- 12) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書〔耐震性能照査編〕，pp. 23, 2002。
- 13) 堺淳一，川島一彦：部分的な除荷・載荷を含む履歴を表す修正 Menogotto-Pinto モデルの提案，土木学会論文集，No. 738/I-64, pp. 159-169, 2003