

## 鋼材のせん断破壊を利用したロックオフ機構

平田寛<sup>1</sup>・武田篤史<sup>2</sup>・鈴木雄吾<sup>3</sup>・金田和男<sup>4</sup>

<sup>1</sup>非会員 工修 株式会社大林組 技術研究所（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）

<sup>2</sup>正会員 工博 株式会社大林組 技術研究所（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）

<sup>3</sup>正会員 工修 東日本高速道路株式会社 関東支社水戸工事事務所（〒311-4152水戸市河和田1-1814-1）

<sup>4</sup>正会員 工修 東日本高速道路株式会社 関東支社管理事業部（〒330-0854さいたま市大宮区桜木町1-11-20）

### 1. はじめに

橋梁における制震ダンパーの減衰力容量は、一般にL2地震動に対して効率よくエネルギー吸収できるように定めるのが望ましい<sup>1)</sup>。しかし、そのように定めた減衰力容量では常時やL1地震時に発生する荷重に対しても制震ダンパーが作動してしまうことから適切な設計が困難となる場合がある。このような場合には、常時やL1地震時に発生する荷重には固定条件を実現させるものの、一定以上の荷重が入力されると抵抗しなくなるロックオフ機構が利用できる。

また、免震橋梁においても、同様にロックオフ機構は有効である。この場合、常時及びL1地震時には伸縮装置などを破壊させない移動制限装置として機能し、L2地震時には免震構造としての挙動を阻害しないために変形に抵抗しない。

ロックオフ機構については、様々な形式が提案されている。吉田ら<sup>2)</sup>は、サイドブロックにスリットを入れたロックオフ機構を提案している。また、清水ら<sup>3)</sup>はサイドブロックにねじれ破断部を設けたロックオフ機構を提案している。しかし、これらのダンパーは、破断までの変形が大きいため、大変位を想定した免震橋梁へは適用可能であるが、変形を小さく抑えようとする制震構造には必ずしも適しているとは言えない。また、破断部への断面力が、前者は曲げとせん断のカップリングであり、後者はねじれとせん断のカップリングであることから、破断荷重の制御が複雑となる。本荘ら<sup>4)</sup>は、すべり支承への取付けを想定して、ノッチ付きボルトのせん断破壊によるロックオフ機構を提案している。しかし、ロックオフボルトを複数本用いるときにすべてのノ

ックオフボルトが同時に破断するようにするためには、相当な加工精度が要求されることが想定される。

このような中、著者らは、制震構造にも用いることができるように破断時の変形が小さく、さらに、精緻な加工精度を必要とせずに取り付けることが可能なロックオフ機構を考案した。

本論文においては、考案したロックオフ機構に対して行った静的載荷実験の結果を示し、その結果得られた破断荷重の計算方法について示す。さらに、破断面におけるメカニズムを明らかにする目的で、非線形FEM解析を行った。

### 2. ロックオフ機構

本論文で対象としたロックオフ機構を、図-1に示す。母材に摩擦接合で取り付けられたロックオフ部材の凸部を相手鋼材の母材凹部にはめ込んだものであり、ダンパー作動時にロックオフ部材凸部の根元（ロックオフ部）がせん断破壊するものである。

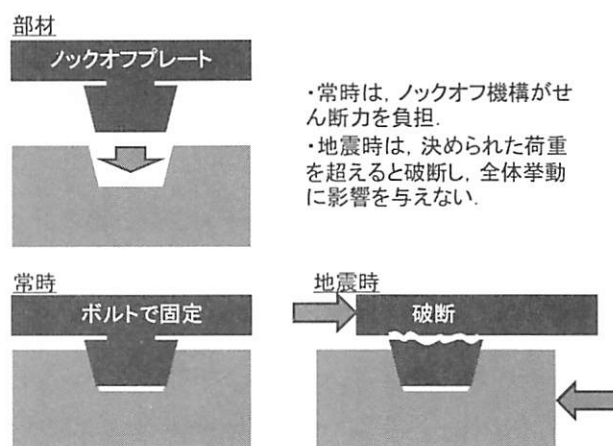


図-1 ロックオフ機構

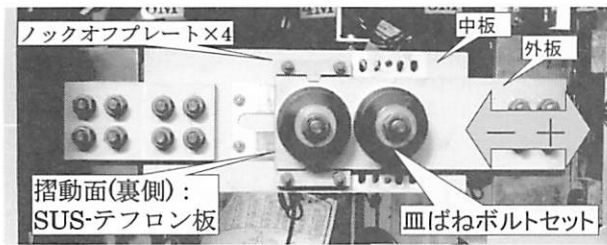


図-2 载荷装置

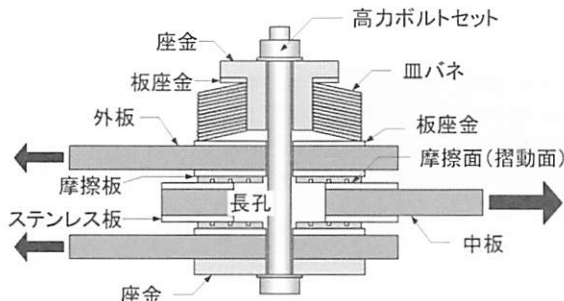


図-3 摩擦型ダンパーの基本構成

ノックオフ部の断面積を制御することで、破断荷重を制御することができる。嵌め合い部がテーパ形状となっているとともに、ノックオフ部材を摩擦接合で取り付けるため、若干の製作誤差があったとしても、取付け時に調整することで、凸部と凹部が接触した状態とすることが可能である。

また、本機構におけるノックオフ部へ生じる断面力は純せん断に近いため、破断荷重の計算も容易である。

### 3. 実験方法

#### (1) 実験方法

実験は図-2に示す通り、摩擦型ダンパー<sup>5)</sup>にノックオフ機構を取付けて行った。

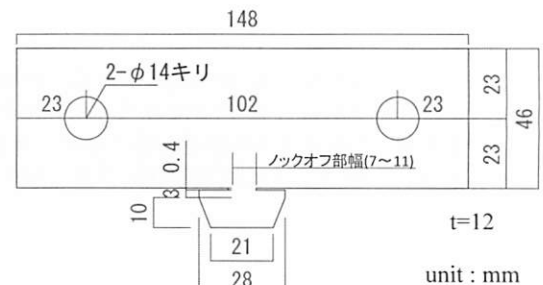
摩擦型ダンパーは、図-3に示すように、摩擦板とステンレス板の間で摩擦摺動挙動を発生させて、エネルギー吸収を図るものである。皿ばねを介して高力ボルトで締め付けることで摩擦面垂直抗力を発生させるものである。ただし、摩擦面には、摩擦の影響をできるだけ小さくするために本来の摩擦板を用いずにテフロン板を用いた。

ノックオフ機構は試験体の上下および表裏の計4か所に設置した。外板側には直接切れ込みを入れ、中板側にはノックオフプレートをそれぞれ2本の高力ボルトを用いて摩擦接合により取り付けた。摩擦接合箇所の塗装は無機ジンクリッチペイントとした。

载荷は、油圧ジャッキおよび摩擦型ダンパーを鋼製フレーム内にセットし、図-2の方向に静的に载荷

表-1 摩擦型ダンパーの基本構成

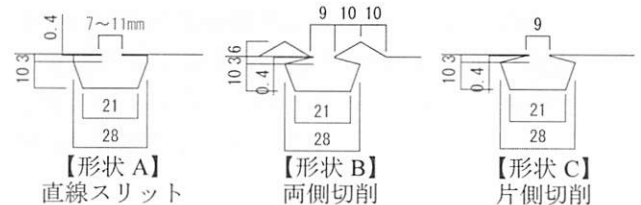
| No.  | 試験体名   | ノックオフ部    |    |
|------|--------|-----------|----|
|      |        | 断面        | 形状 |
| No.1 | T-07-A | 7mm×12mm  | A  |
| No.2 | T-09-A | 9mm×12mm  |    |
| No.3 | T-11-A | 11mm×12mm |    |
| No.4 | T-09-B | 9mm×12mm  | B  |
| No.5 | T-09-C | 9mm×12mm  | C  |



a) ノックオフプレート



b) 取合い部



c) ノックオフ部

図-4 試験体形状寸法

表-2 鋼材材料試験結果

| 使用部位                     | 板厚<br>$t$<br>mm | 降伏点<br>$f_y$<br>N/mm <sup>2</sup> | 引張強さ<br>$f_u$<br>N/mm <sup>2</sup> | 降伏比<br>Y.R<br>% | 伸び率<br>% | 試験体名             |
|--------------------------|-----------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------|----------|------------------|
| ノックオフ<br>プレート<br>(SS400) | 12              | 301                               | 445                                | 67.6            | 31.4     | T-**-A           |
|                          | 12              | 299                               | 439                                | 68.1            | 30.7     | T-09-B<br>T-09-C |
| 外板<br>(SS400)            | 19              | 263                               | 418                                | 62.9            | 32.4     | 全ケース             |

※試験片はJIS1A号とし、3体実施した平均値とした

した。

#### (2) 実験パラメーターと試験体

試験体は、外板側の切込みを全ケース同一とし、ノックオフプレート側のノックオフ部の断面幅（7～11mm×12mm）および、スリット形状（A：直線，B：両側切削，C：片側切削）をパラメーターとした。表-1に試験体一覧を、図-4に試験体寸法を示す。

試験体数は、ばらつきを見るために、各パラメーターにつき3体づつとした。

表-3 実験結果一覧

| No.  | 試験体名       | 計算値                                       | 実験値                |                       |      |                                 |      | ノックオフ耐力<br>実験値/計算値 |
|------|------------|-------------------------------------------|--------------------|-----------------------|------|---------------------------------|------|--------------------|
|      |            | ノックオフ耐力<br>$Q_{nc}$ (kN)<br>(引張強さ×断面積/√3) | 最大耐力(kN)<br>※試験体全体 | ノックオフ耐力<br>$Q_n$ (kN) |      | 最大耐力時の変位<br>$\delta_{max}$ (mm) |      |                    |
|      |            |                                           |                    | 各試験体                  | 平均   | 各試験体                            | 平均   |                    |
| No.1 | T-07-A-(1) | 21.6                                      | 164.1              | 37.0                  | 37.5 | 2.18                            | 2.18 | 1.74               |
|      | T-07-A-(2) |                                           | 162.6              | 36.7                  |      | 2.00                            |      |                    |
|      | T-07-A-(3) |                                           | 171.0              | 38.8                  |      | 2.37                            |      |                    |
| No.2 | T-09-A-(1) | 27.7                                      | 206.7              | 47.7                  | 47.5 | 2.74                            | 2.77 | 1.71               |
|      | T-09-A-(2) |                                           | 207.9              | 48.0                  |      | 2.84                            |      |                    |
|      | T-09-A-(3) |                                           | 203.0              | 46.8                  |      | 2.72                            |      |                    |
| No.3 | T-11-A-(1) | 33.9                                      | 242.8              | 56.7                  | 57.5 | 3.46                            | 3.40 | 1.70               |
|      | T-11-A-(2) |                                           | 249.6              | 58.4                  |      | 3.47                            |      |                    |
|      | T-11-A-(3) |                                           | 245.6              | 57.4                  |      | 3.26                            |      |                    |
| No.4 | T-09-B-(1) | 27.3                                      | 179.9              | 41.0                  | 40.8 | 3.85                            | 3.87 | 1.49               |
|      | T-09-B-(2) |                                           | 178.8              | 40.7                  |      | 4.09                            |      |                    |
|      | T-09-B-(3) |                                           | 178.8              | 40.7                  |      | 3.68                            |      |                    |
| No.5 | T-09-C-(1) | 27.3                                      | 184.6              | 42.1                  | 41.9 | 4.09                            | 4.19 | 1.53               |
|      | T-09-C-(2) |                                           | 180.6              | 41.1                  |      | 3.80                            |      |                    |
|      | T-09-C-(3) |                                           | 185.8              | 42.4                  |      | 4.68                            |      |                    |

切込み深さについては、テーパ面の支圧に対して設計した。テーパ面の角度は、形状の製作誤差を±0.5mmと考えて決定した。なお、位置の製作誤差は、ノックオフプレートを取付ける際の摩擦接合ボルトにより調整できるため、ノックオフ部の設計には考えていない。

ノックオフプレートの加工はレーザー加工による切り出しで行った。

鋼材の材質は、ノックオフプレート、外板ともSS400とした。表-2に使用鋼材の材料特性を示す。

#### 4. 実験結果

##### (1) 実験結果一覧と破壊状況

表-3に実験結果の一覧を示す。ノックオフ耐力の計算値は、純せん断を仮定し、材料試験における引張強さ $f_u$ とノックオフ部断面積 $A_n$ を用いて、

$$Q_{nc} = A_n f_u / \sqrt{3} \quad (1)$$

として求めた。ノックオフ耐力の実験値は、荷重装置全体の荷重からテフロン-SUS間のすべり荷重やその他摩擦等を取り除き、ノックオフ機構の箇所数(4箇所)で除して求めた。テフロン-SUS間のすべり荷重やその他摩擦等は、ノックオフ機構がない場合の試験を行って求めた。なお、このとき、テフロン-SUS間のすべり荷重やその他摩擦等の値は、荷重回数などに寄らず非常に安定していた。

各ケースにおける3体は、ノックオフ耐力 $Q_n$ 、最大耐力時変位 $\delta_{max}$ とも、ばらつきが小さく安定して性能を発揮したことがわかる。一方で、全てのケースにおいて、ノックオフ耐力 $Q_n$ は純せん断を仮定し

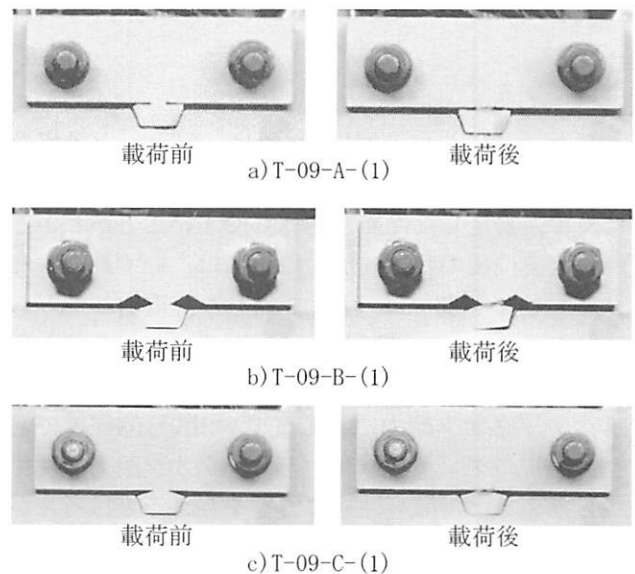


図-5 ノックオフ部の破断状況

て求めた計算値 $Q_{nc}$ に比して大幅に大きくなった。この原因については5章で考察する。

図-5に破断状況の例を示す。いずれの試験体も想定した最小断面で破壊していることがわかる。また、その後の挙動に影響を与えるバリなども発生しなかった。

##### (2) 荷重変位関係

図-6に荷重－変位関係を示す。荷重は全体の荷重である。

変位3mm程度で荷重のピークに達した後は、荷重が大幅に低下し、概ね一定の荷重になっていることがわかる。この荷重は、テフロン-SUS板間のすべり荷重などであり、この荷重が一定であるということから、実験の成立性が確認できる。

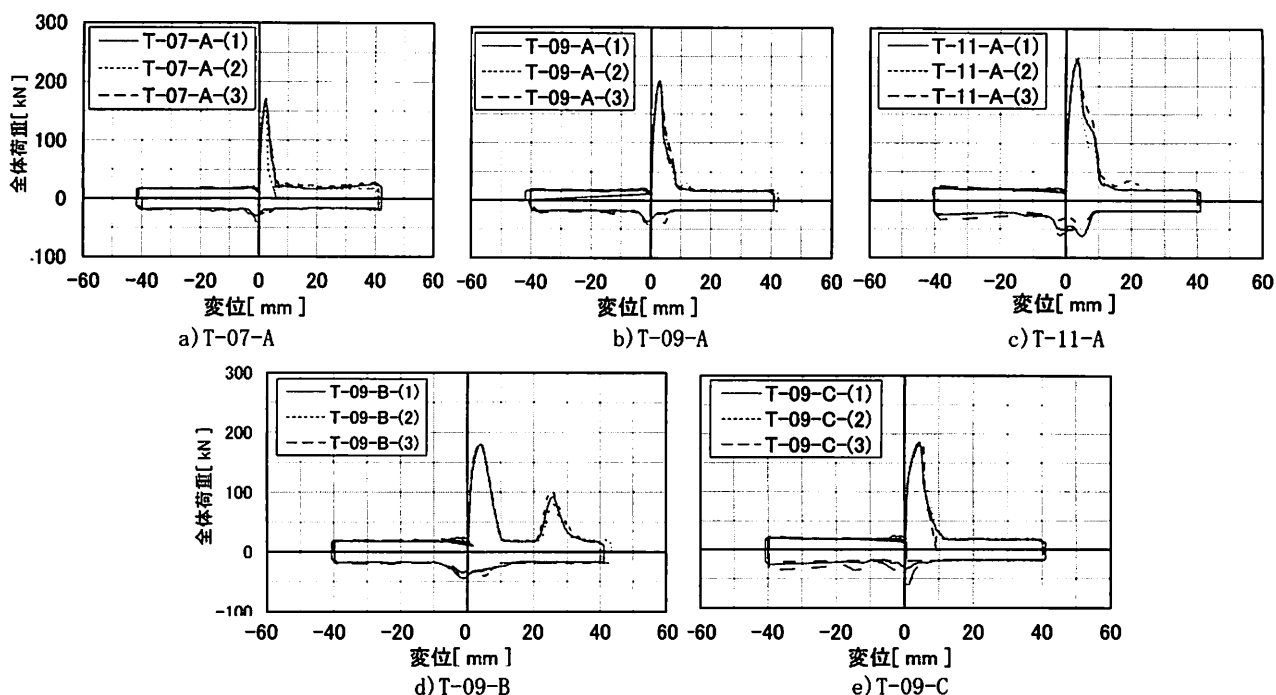


図-6 荷重－変位関係

各ケースにおける3体の挙動は、ほとんど差がなく、本ロックオフ装置が製作精度などの影響を受けにくく、安定した性能を発揮しやすいことがわかる。

最大変位後の負方向加力の際には、いずれのケースにおいても変位0mm付近で若干の荷重増加がみられるが、これは、破断したロックオフ部材凸部が引っ掛かったものである。しかし、その荷重の大きさは、ロックオフ耐力に対してせいぜい10%程度であり、通常のダンパー減衰力とロックオフ耐力の関係から考えると、減衰性能に影響を与えるとは考えがたい。

また、ロックオフ部の形状をBとしたNo.4(T-11-B)に関しては、最大耐力後の変位20mm程度で荷重の増加がみられる。これも、破断したロックオフ部材凸部が、切削した部分に引っ掛かったものである。ただし、こちらの荷重は、ロックオフ耐力に対して50%程度あるため、何らかの影響を与える場合も考えられるため、この両側を切削した形状は適切とは言えない。

### (3) ロックオフ断面と破断荷重の関係

図-7 にロックオフ断面と耐力の関係を示す。縦軸のロックオフ耐力は、材料のばらつきの影響をなくするために、材料試験から求めたせん断強さ  $\tau_u$  ( $\tau_u = f_u \sqrt{3}$ ) で除している。図-7 より、ロックオ

フ部の形状を B(両側切削)や C(片側切削) とすることによるメリットはなく、却ってロックオフ耐力

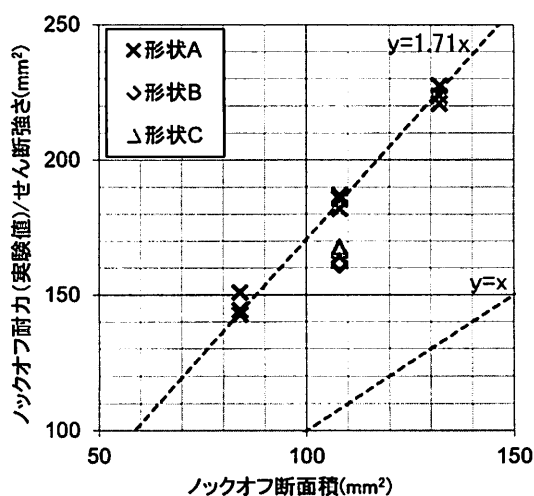


図-7 ロックオフ部断面積と耐力の関係

の低下を招くことがわかる。これは、形状 B、C は形状 A と比較して曲げ変形に対する拘束が小さく、破壊時に曲げモーメントの影響を受けたためだと考えられる。

そこで、ロックオフ部の形状 A のみを用いて、原点を通る直線に最小二乗近似を行うと、ロックオフ耐力は、

$$Q_{nc} = \alpha A_n f_u / \sqrt{3} \quad (2)$$

ここに、 $\alpha$ : 係数で、形状 A の時 1.71 と表せることがわかる。

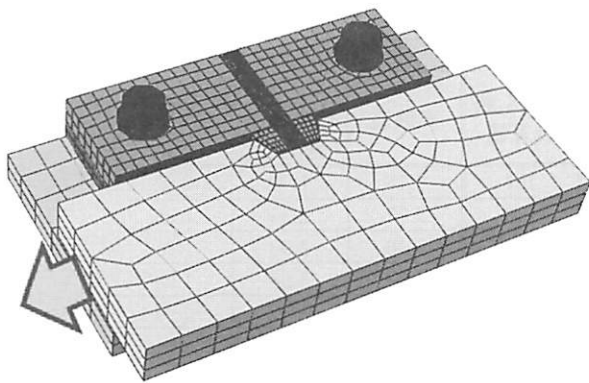
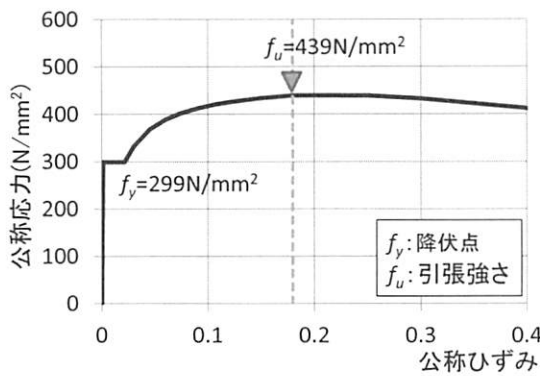
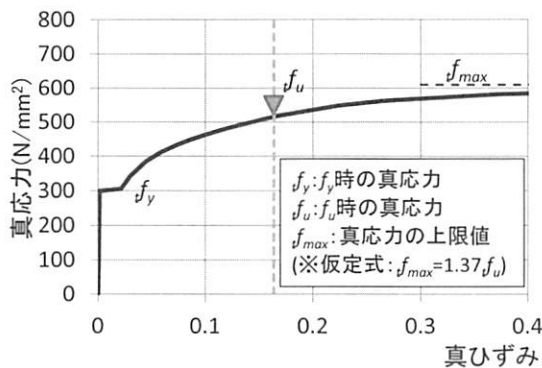


図-8 解析モデル



a) 公称応力－公称ひずみ関係 (T-09-B, T-09-C)



b) 真応力－真ひずみ関係 (T-09-B, T-09-C)

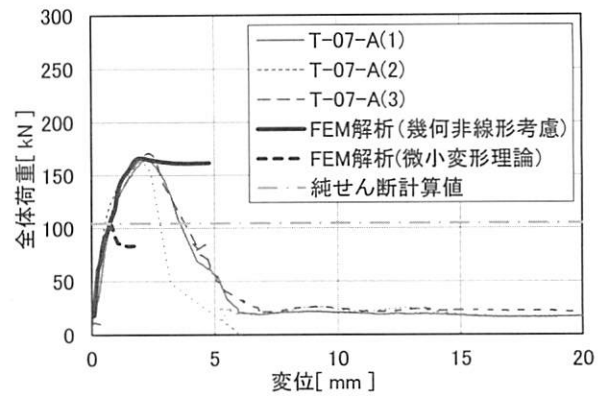
図-9 材料構成則

## 5. 非線形 FEM による検討

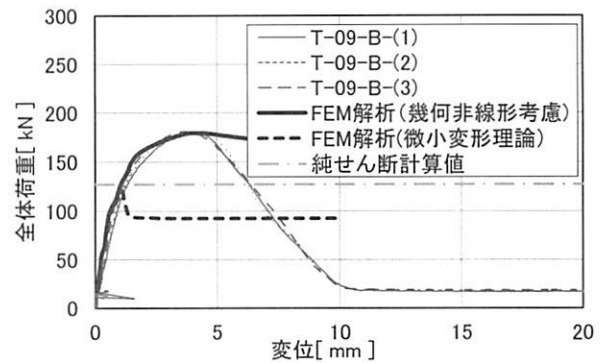
### (1) 検討方法

3章において、ロックオフ耐力は、純せん断を仮定した計算値の1.71倍であった。そこで、破壊性状及びメカニズムを把握する目的で、詳細なFEMによる検証を行った。

解析モデルを図-8に示す。解析コードには、ABAQUS ver.6.12<sup>6)</sup>を用いた。要素は全て1次の6面体要素とした。境界条件は、中板の外周節点の全自由度および外板の外周節点の加力方向以外自由度を固定とした。また、鋼材同士の接触面については、



a) T-07-A



b) T-09-B

図-10 荷重－変位関係の解析値

ペナルティ法<sup>6)</sup>により要素の接触を考慮し、無機ジンクリッチペイント塗装されていることから、摩擦係数 $\mu=0.45$ とした。

本解析検討では、微小変形理論に基づいた（幾何非線形を考慮しない）解析と、幾何非線形を考慮する解析の2種類を行った。

図-9に鋼材モデルの材料構成則の例を示す。微小変形理論に基づいた場合は、図-9a)に示す公称応力－公称ひずみ関係を用い、幾何非線形を考慮する場合は、図-9b)に示す真応力－真ひずみ関係を用いた。なお、鋼材モデルの降伏点 $f_y$ 及び引張強さ $f_u$ は、鋼材の引張試験結果を用いた。真応力－真ひずみ関係における勾配は、鋼材引張強さまでは統計値<sup>7)</sup>を用いて推定し、引張強さ以降は、実験値を参考に推定した。

载荷は、外板の外周節点に強制変位を与えることにより行った。

### (2) 検討結果

図-10に解析結果の例として、No.1(T-07-A)およびNo.4(T-09-B)の荷重変位関係を実験結果と合わせて示す。

いずれのケースにおいても、幾何非線形を考慮し、真応力－真ひずみ関係を用いることで、耐力のみな

表-4 解析結果一覧

| No.  | 試験体名   | 最大耐力 |             |            |             | 最大耐力時変位 |             |            |
|------|--------|------|-------------|------------|-------------|---------|-------------|------------|
|      |        | 実験値  | FEM解析       |            | 純せん断<br>計算値 | 実験値     | FEM解析       |            |
|      |        |      | 幾何非線<br>形考慮 | 微小変形<br>理論 |             |         | 幾何非線<br>形考慮 | 微小変形<br>理論 |
| No.1 | T-07-A | 168  | 166         | 103        | 104         | 2.18    | 1.99        | 0.82       |
| No.2 | T-09-A | 208  | 207         | 125        | 129         | 2.77    | 2.34        | 1.06       |
| No.3 | T-11-A | 248  | 243         | 145        | 154         | 3.40    | 2.99        | 1.26       |
| No.4 | T-09-B | 181  | 178         | 122        | 127         | 3.87    | 3.68        | 1.08       |
| No.5 | T-09-C | 186  | 179         | 123        | 127         | 4.19    | 3.79        | 0.97       |

※実験値は、それぞれ3体の平均を示した。

らず、剛性や最大荷重時変位も整合することがわかる。

一方、微小変形理論に基づき、公称応力-公称ひずみ関係を用いた場合は、初期剛性はほぼ実験値と整合するが、式(1)に示す純せん断の計算値とほぼ同様の耐力となる。

このことは、表-4 の解析結果一覧に示す通り、図-10に例示していないケースも含む全てのケースで同様であった。

以上より、鋼材が破断するときには、幾何非線形の影響が大きいため、公称応力-公称ひずみに基づいた計算値ではロックオフ耐力を算定できないことが分かった。

## 5. 結論

破断時の変形が小さく、精緻な加工精度を必要とせずに取り付けることが可能なロックオフ機構を考案し、静的載荷実験を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1)本機構は、非常に安定した耐力を発揮することがわかった。
- 2)本機構において、破断時の変形は2～4mm程度である。
- 3)本機構におけるロックオフ耐力は、材料試験から求めたせん断強さと破断部断面積の積の1.71倍として求められる。
- 4)ロックオフ部の形状は、直線スリット型とするのが良い。

さらに、上記結論3)の理由を検討するために、非線形3次元FEMを行った。非線形3次元FEMでは、微小変形理論に基づき鋼材の構成則として公称応力-公称ひずみ関係を用いたケースと、幾何非線形を考慮して鋼材の構成則として真応力-真ひずみ関係を用いたケースを行った。解析の結果、以下の結論

を得た。

- 5)微小変形理論に基づき、構成則として公称応力-公称ひずみ関係を用いたときの最大耐力は、材料試験から求めたせん断強さと破断部断面積の積に一致し、実験値とは整合しなかった。
- 6)幾何非線形を考慮し構成則として真応力-真ひずみ関係を考慮することで、ロックオフ装置の破壊性状、荷重変形関係を精度よく把握することができる。

## 参考文献

- 1) 武田篤史，尹元彪，鈴木 基行：履歴型ダンパーを用いた橋梁の設計におけるダンパー減衰力の選定に関する解析的検討，構造工学論文集A Vol. 60A，pp.349-359，2014。
- 2) 吉田雅彦，松村政秀，坂井田実，北田俊行，森田征樹，浅田直宏：免震橋梁用ロックオフ型サイドブロックの提案，鋼構造論文集，第15巻第59号，pp.45-56，2008。
- 3) 清水和弘・鶴野禎史・池田 学・豊岡亮洋・家村浩和：鉄道橋免震支承用緩衝型移動制限装置の開発，土木学会第59回年次学術講演会，pp.785-786，2006。
- 4) 本荘清司，横山和昭，前原直樹，田崎賢治，姫野岳彦：ロックオフ機能付き支承構造を用いた既設橋梁の耐震補強対策，構造工学論文集Vol.55A，pp.506-514，2009。
- 5) 武田篤史，佐野剛志：皿バネボルトセットを用いた摩擦型ダンパーの性能評価，構造工学論文集，Vol. 58A，pp.492-503，2012。
- 6) Abaqus/Standard User's Manual Version 6.12，2012。
- 7) 日本建築学会：建築構造用鋼材特性の現状とその活用，2013年度日本建築学会大会パネルディスカッション資料，2013.9