

◆ 報 文 ◆

# 曲線斜張橋に用いるスプリングダンパーに関する性能検証実験

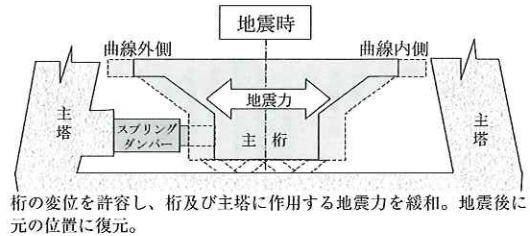
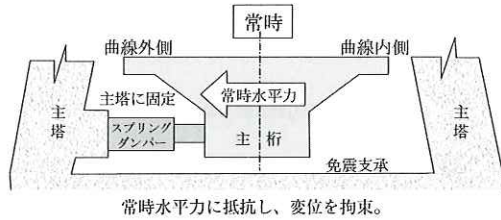
横峯正二\* 運上茂樹\*\* 遠藤和男\*\*\* 貴志友基\*\*\*\*

## 1. はじめに

(仮称) 矢部川橋は、地域高規格道路の有明沿岸道路の一部として、福岡県内で建設が進められている3径間連続PC斜張橋である。本橋は、図-1に示すように、平面に曲線を有する斜張橋として計画されていることから、ケーブル張力の橋軸直角方向成分により、上部構造からの水平力が主塔部に常時作用する構造となっている。常時においてはこの水平力に対して抵抗する構造が必要とされるが、大規模地震時に橋全体として耐震性能を向上させるためには、図-2に示すように、主塔部において上部構造の変位を許容する構造の方が有利となる。このため、常時の水平力に対して抵抗するとともに、大規模地震時にある一定以上の水平力が作用した場合に変位可能なトリガー機構を有するスプリングダンパーの採用が計画されている。

図-3はその構造概念を示したものである。充填材をピストン・シリンダー内部に封入したもので、充填材の体積圧縮性を利用して復元性能を発揮するものであり、プレス装置などの機械部品としては実績を有するものである。充填材の初期封入圧相当荷重まではピストンは動かず、初期封入圧相当以上の荷重が作用するとピストンがシリンダー内に進入し、除荷されると初期位置にピスト

ンが復元するというトリガー機能及び自己復元機能を有するデバイスである<sup>1)</sup>。



曲線外側移動時：スプリングダンパー+免震支承にて地震力に抵抗  
曲線内側移動時：免震支承にて地震力に抵抗

図-2 主塔部における主桁の挙動

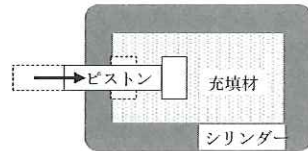


図-3 スプリングダンパー構造概念図

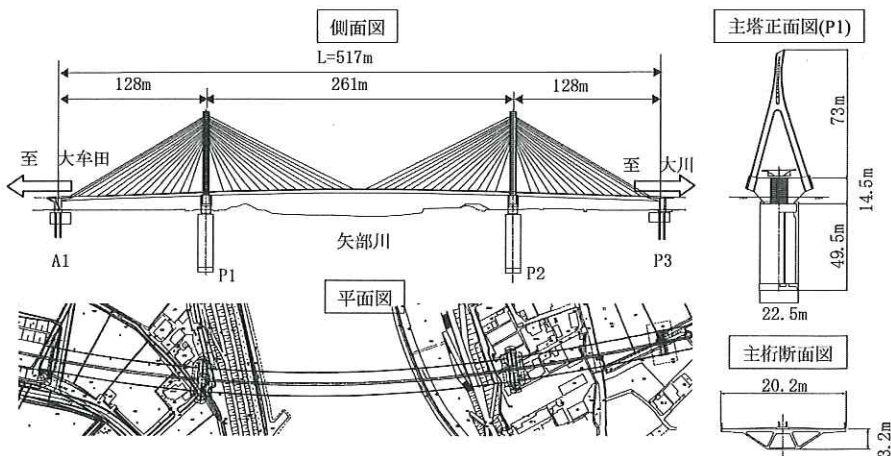


図-1 (仮称) 矢部川橋一般図

このようなデバイスはこれまでに橋梁での採用事例がない新しい構造であることから、現場での使用環境条件に応じた実験的な性能検証を実施することを目的として模型供試体の載荷実験を行い、スプリングダンパーの力学特性に関するデータを取得した。ここでは基本的な荷重—変位特性、その温度・載荷速度依存性及び繰返し耐久性に関する結果を報告する。本実験は、国土交通省九州地方整備局福岡国道事務所からの受託業務の一環として土木研究所が実施したものである。

## 2. 要求性能及び抵抗力発生機構

図-2に示すように常時及び地震時において主桁の挙動を制御するため、主塔—主桁間に設置するデバイスに対して以下の要求性能を設定した。(図-4参照)。

- (1) 一定荷重以下での変位は微小であること。
- (2) 一定荷重を超えると変位が発生し、荷重—変位の骨格線を描くこと。
- (3) 一定荷重を超えて大きな変位を生じた後に除荷されると一定荷重までは荷重—変位の骨格線を描き、一定荷重以下になると変位が初期変位に戻る。
- (4) 荷重—変位特性が、温度変化(おおよそ $-10^{\circ}\text{C}$ ～ $+40^{\circ}\text{C}$ )及び載荷速度に依存しないことが望ましいが、依存しても想定範囲内であること。
- (5) 動的な繰返し荷重に対しても特性が殆ど変化しないこと。変化しても想定範囲内であること。
- (6) 耐久性を有すること。

以上の条件のもと、図-3に示した機構を有するスプリングダンパーを用いることとした。なおデバイス構造の選定にあたっては、プレストレスを与えた鋼コイルスプリングとの比較検討を実施した。設計上要求される条件(トリガー荷重、地震時荷重、地震時変位)を満足させるためには、鋼コイルスプリングでは線径 $\phi 58\text{mm}$ ×中心径 $\phi 410\text{mm}$ ×自由長 $1210\text{mm}$ のコイルスプリングを112基/主塔設置する必要があり構成が不可能となったが、スプリングダンパーであれば、性能設定に関する自由度が高く、4基/主塔で構成可能となったことから同構造を採用するに至った。

本スプリングダンパーの抵抗力発生メカニズムは図-5に示す通りであり、ロッドに作用する抵抗力(F)は、以下のように算出される。

$$F = P \cdot (A_1 - A_2) = P \cdot A_r \quad (1)$$

ここで、

- P : 充填材圧力
- A<sub>1</sub> : ヘッド部断面積
- A<sub>2</sub> : ヘッド部ロッド側加圧面積
- A<sub>r</sub> : ロッド部断面積

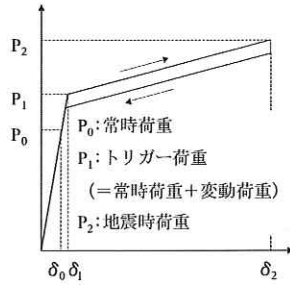


図-4 荷重—変位特性 (要求性能)

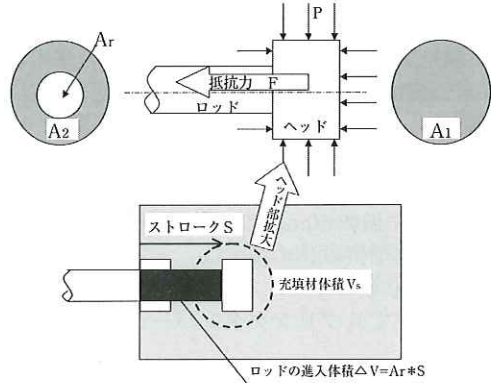


図-5 抵抗力と圧力の関係

また、抵抗力の変化 ( $\Delta F$ ) は、(1) より以下のよう算出される。

$$\Delta F = \Delta P \cdot A_r \quad (2)$$

ここで、

$\Delta P$  : 充填材圧力変化

さらに、充填材圧力変化 ( $\Delta P$ ) に関しては以下のような関係式が成り立つ。

$$\Delta P = R \Delta v \cdot K \quad (3)$$

$$R \Delta v = \Delta V / V_s \quad (4)$$

$$\Delta V = A_r \cdot S \quad (5)$$

ここで、

R $\Delta v$  : 充填材の体積変化率

K : 充填材の体積弾性率

$\Delta V$  : ロッド進入体積

V<sub>s</sub> : (S = 0時の) 充填材体積

S : ストローク

## 3. 模型供試体の設計

本デバイスは、上記のようにシリンダーに進入するロッド体積と充填材の圧縮性を利用したもので、充填材の圧力状況(初期封入圧、最大封入圧及び圧縮過程)によって抵抗特性が決まる。従って模型供試体の設計は、充填材の圧力状況に着目し、模型供試体(縮尺モデル)の圧力状況が実橋デバイスと等価になるように行った。模型供試体

の縮尺の考え方を表-1に示す。この考えに従い設定した模型供試体の変位及び充填材圧力状況は図-6に示す通りであり、変位は1/Nの縮尺となるが、圧力状況は実橋と等価になる。

縮尺率 (1/N) は、試験機の载荷限界性能から1/5とした。模型供試体の基本性能を表-2に、模型供試体の外観を写真-1に示す。

#### 4. 载荷実験

##### 4.1 基本特性試験

図-7に示す試験装置を用いて、载荷速度および模型供試体の温度を変化させた計20ケースの载荷実験を実施し、スプリングダンパーの基本特性(荷重-変位特性及びその温度・载荷速度依存性)を確認した。载荷速度は、静的試験として0.5mm/s、1mm/sで60mmまでの片押し载荷(三角波1波)と動的試験として0.1Hz、0.3Hz、0.65Hzで片振幅60mmの正弦波载荷(3波)の5ケース、模型供試体の温度は、+30℃、+15℃、室温、-10℃の4ケースとした。正弦波载荷は、実橋においてスプリングダンパーが受ける作用を

表-1 模型供試体の縮尺の考え方 (1/N モデル)

項目	縮尺	設定の考え方
充填材の圧力状況 (P)	1/1	実橋と同等
初期・最大封入圧力	1/1	実橋と同等
抵抗力 (F)	1/N	試験機能力の上限により決定
トリガー荷重	1/N	抵抗力と等価
寸法	-	設計は、容量によるものであり外観寸法における相似は未成立
ロッド面積 (A <sub>r</sub> )	1/N	充填材の圧縮過程 (=体積変化率) を実橋と同等とすれば抵抗力の縮尺と等価
ストローク (S)	1/N	充填材容量を抑えるため抵抗力縮尺と等価
充填材容量 (V <sub>s</sub> )	1/N <sup>2</sup>	充填材の圧縮過程 (=体積変化率) を実橋と同等とすれば、ロッド面積比*ストローク比
振動数	1/1	充填材の圧縮過程 (=体積変化率) を実橋と同等

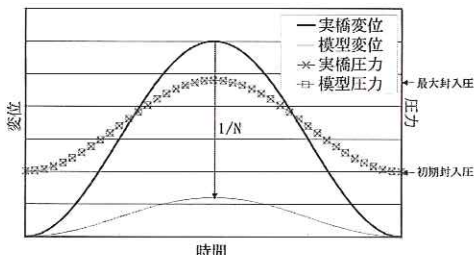


図-6 実橋と縮尺模型における変位・圧力状況

想定し、図-8に示すように模型供試体に対して押し込み側にもみ作用するようにしている。この

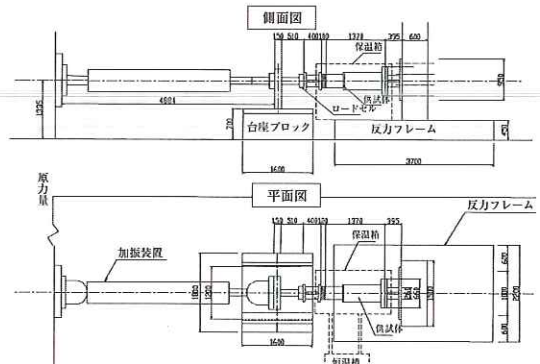


図-7 試験装置

表-2 模型供試体の基本性能

項目	実橋 (設計値)	模型供試体
常時荷重 (P <sub>0</sub> )	1,150KN	230KN
トリガー荷重 (P <sub>i</sub> )	1,650KN	330KN
地震時荷重 (P <sub>2</sub> )	3,300KN	660KN
地震時最大変位 (δ <sub>2</sub> )	300mm	60mm

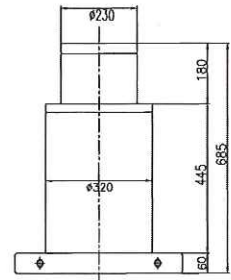


写真-1 模型供試体

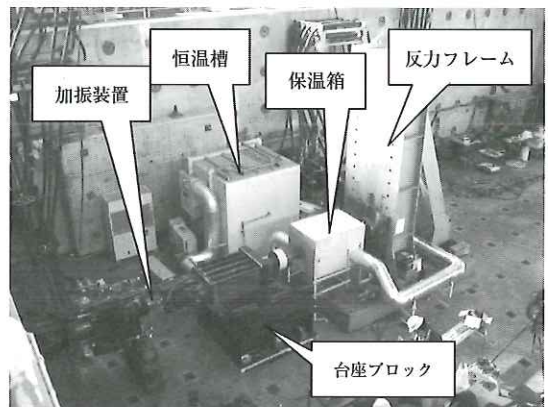


写真-2 試験状況

ため、加振機が供試体を押し込み、一旦離れた後に再度供試体と接触して押し込むように载荷した。载荷速度及び模型供試体の温度は、レベル2地震動に対する地震応答解析結果、現地気温条件（-10℃～+40℃程度）及び試験機の限界性能（恒温槽：±30℃）より設定した。模型供試体は、試験前に恒温槽内で48時間程度放置し、温度が安定した後に試験を行った。また、载荷実験中も模型供試体は保温箱内に設置し、恒温槽の空気を循環させながら試験を行った。試験状況を写真-2に示す。

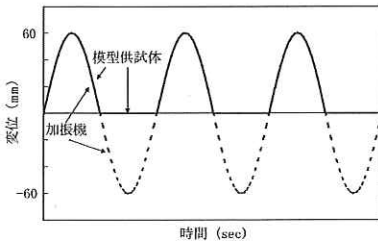


図-8 正弦波载荷変位

#### 4.2 繰返し耐久性試験

耐久性としては、常時荷重が長期間作用する条件下での耐久性（変位発生・その他変状の有無）と、大規模地震による動的な繰返し荷重が作用する条件下での耐久性（荷重—変位特性の安定性、変状の有無）を保持することが求められる。今回の実験では後者に着目し、1回の大規模地震時の繰返し载荷による荷重—変位特性の変化・その他変状の有無を確認した。

試験条件は、模型供試体の温度：室温、载荷速度：0.65Hz、振幅：60mm、载荷回数：50回とした。载荷回数については、道路橋示方書<sup>2)</sup>に示されている免震支承の安定性に要する繰返し载荷回数の目安（タイプI地震動：50回程度、タイプII地震動：15回程度）に準じて、ここでは安全側に50回を設定した。

### 5. 実験結果

#### 5.1 基本特性試験結果

図-9に荷重—変位曲線の代表的な例を示す。なお図中の凡例における各性能指標の定義は以下の通りである。

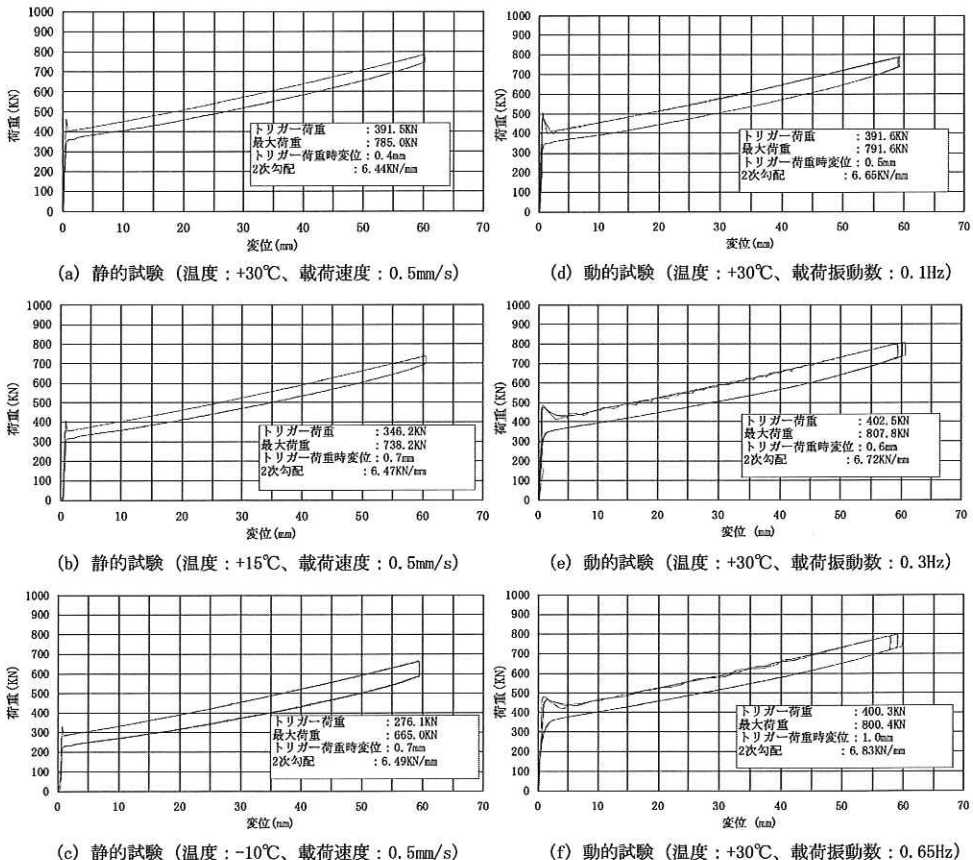


図-9 荷重—変位特性（基本特性試験）

- ・トリガー荷重 ( $P_1$ ) : 1次勾配と2次勾配と交点をトリガーポイントとし、そのトリガーポイントにおける荷重。正弦波載荷 (3波) の場合は平均値。
- ・最大荷重 ( $P_2$ ) : ロードセル測定値における最大値。正弦波載荷 (3波) の場合は最大値。
- ・2次勾配: 最大変位の10%及び90%の2ポイントから算出した線形勾配。
- ・トリガー荷重時変位 ( $\delta_1$ ) : トリガーポイントにおける変位。

これらの結果より以下のことが確認できた。

- (1) トリガー荷重時の変位は、最大でも1mm程度であり、一定荷重 (トリガー荷重) 以下での変位は微小である。
- (2) 一定荷重を超えると変位が増大し、荷重-変位の骨格曲線を描く。
- (3) 一定荷重を超えて変位が増大する直前に荷重の上昇がある。これはデバイス摺動部の静摩擦及び慣性力の影響等によるものと考えられるが、その荷重自体は最大でもトリガー荷重の1.4倍程度、最大荷重の0.5倍程度と大きなものではない。
- (4) 荷重が除荷されると変位はゼロに戻る。除荷時の2次勾配直線は載荷時の2次勾配直線を下回り、履歴ループを描く。これはデバイス摺動部の摩擦抵抗力及び充填材の流動抵抗力等によるものと考えられる。
- (5) 再載荷しても、既載荷とほぼ同一の荷重-変位特性を描き、繰返し載荷による安定性は良い。

トリガー荷重、最大荷重と載荷速度、模型供試

体の温度の関係をまとめたものを図-10に示す。これらの結果より以下のことが確認できた。

- (1) トリガー荷重及び最大荷重は、温度上昇とともに比例的に上昇するという温度依存性があることが確認された。これは、本デバイスは充填材の圧縮性を利用しており、温度上昇に伴う充填材の体積膨張により、充填材圧力が上昇することに起因するものと考えられる。但し、その変化率 (約3kN/℃) は安定しており、設計時に変動荷重として考慮することにより実橋での対応は可能である。
- (2) トリガー荷重及び最大荷重は、速度の増加とともに若干上昇する傾向があるが、その差は最大で8%程度と小さく、トリガー荷重、最大荷重に関して速度依存性は小さい。

### 5.2 繰返し耐久性試験結果

図-11は50回の繰返し載荷をした内の載荷回数1~10回目及び41~50回目の荷重-変位曲線を、図-12はトリガー荷重、最大荷重と載荷回数の関係を、それぞれ示したものである。これらの結果より以下のことが確認できた。

- (1) 荷重-変位特性は、載荷回数に対して安定している。なお、図-11 (a) に示した荷重-変位特性では、最大荷重時の載荷変位にばらつきが見られるが、これは加振装置の影響を受けたものであり、模型供試体に起因するものではない。
- (2) トリガー荷重、最大荷重ともに載荷回数の増加に伴い若干上昇する傾向が見受けられる。これは繰返し載荷による充填材の温度上昇によるものと思われる。しかしその程度は最大

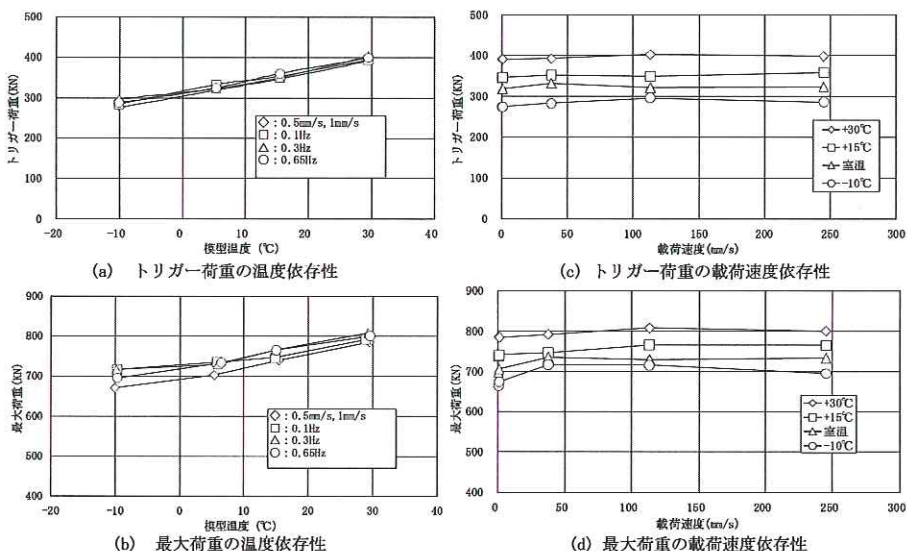
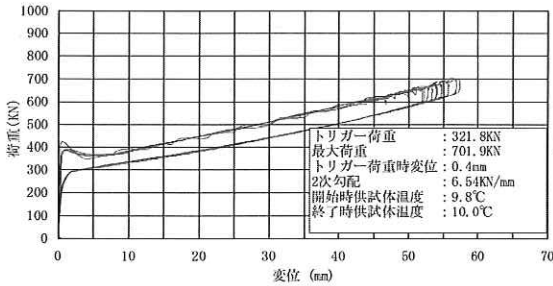
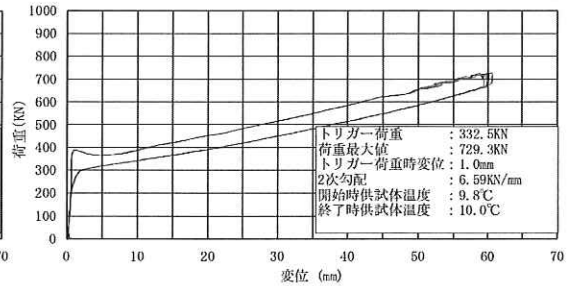


図-10 トリガー荷重、最大荷重の温度・載荷速度依存性



(a) 温度：室温、载荷振動数：0.65Hz、1~10回载荷



(b) 温度：室温、载荷振動数：0.65Hz、41~50回载荷

図-11 荷重-変位特性 (繰返し耐久性試験)

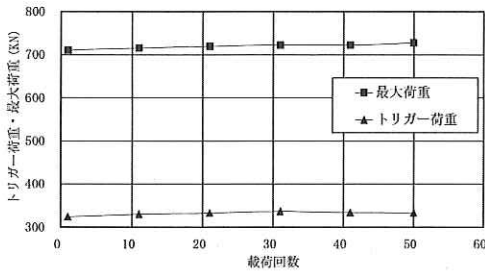


図-12 トリガー荷重・最大荷重-载荷回数関係

で5%程度と小さい。

- (3) 50回の繰返し载荷試験終了後に外観の変状は確認されていない。

## 6. まとめ

トリガー機能を有するスプリングダンパーの模型供試体を用いて、現場での使用環境条件に応じた各種载荷実験を行い、スプリングダンパーの荷重-変位特性、温度・载荷速度依存性及び繰返し耐久性に関する性能検証を実施した。その結果以下のことが明らかになった。

- (1) 载荷速度および模型供試体温度を変化させた何れのケースにおいても、トリガー機能及び自己復元機能を有する荷重-変位特性を描く。
- (2) トリガー荷重・最大荷重に若干の温度依存性が確認されたものの、その程度は想定可能で

ある。

- (3) 大規模地震による動的な繰返し荷重が作用する条件下でも荷重-変位特性は変化せず、十分な繰返し载荷耐久性を有している。
- (4) 本デバイスは、現場での使用環境条件下において、2. に示した要求性能を実現可能であることが確認された。

なお、常時荷重が長期間作用する条件下での耐久性確認試験を現在実施中であり、今後明らかにしていく予定である。

## 参考文献

- 1) 横峯正二、運上茂樹、遠藤和男、貴志友基：(仮称) 矢部川橋のストッパー構造性能検証試験、第59回土木学会年次学術講演会講演概要集、I-410, 2004.9
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、2002.3

横峯正二\*



国土交通省九州地方整備局  
福岡国道事務所有明海沿岸  
道路出張所所長  
Masaji YOKOMINE

運上茂樹\*\*



独立行政法人土木研究所耐  
震研究グループ耐震チーム  
上席研究員、工博  
Dr. Shigeki UNJOH

遠藤和男\*\*\*



独立行政法人土木研究所耐  
震研究グループ耐震チーム  
主任研究員  
Kazuo ENDO

貴志友基\*\*\*\*



(財) 海洋架橋・橋梁調査会調  
査役 (有明海沿岸道路橋梁  
担当CMR)  
Yuuki KISHII