

## 高じん性鉄鋼を用いた支承部損傷制御装置DCストッパーの開発

篠原 聖二<sup>1</sup>・八ツ元 仁<sup>1</sup>・福嶋 孝啓<sup>2</sup>・安積 恭子<sup>2</sup>  
石山 昌幸<sup>3</sup>・朝倉 康信<sup>3</sup>・山崎 信宏<sup>4</sup>・染谷 優太<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 阪神高速道路株式会社 (〒530-0005大阪市北区中之島3-2-4)

<sup>2</sup>正会員 修士(工学) 阪神高速道路株式会社 (〒530-0005大阪市北区中之島3-2-4)

<sup>3</sup>正会員 日本鑄造株式会社 (〒210-9567川崎市川崎区白石町2-1)

<sup>4</sup>正会員 博士(工学) 日本鑄造株式会社 (〒210-9567川崎市川崎区白石町2-1)

<sup>5</sup>非会員 日本鑄造株式会社 (〒210-9567川崎市川崎区白石町2-1)

### 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降、橋脚の耐震補強や上部構造の落橋防止対策が進められてきており、落橋などの致命的な被害に対しては一定の対策がなされている。2016年熊本地震においても、橋脚の耐震補強や上部構造の落橋防止対策の効果もあり、落橋などの致命的な被害は限定的であった。一方、落橋は免れたものの、支承が破壊し、上部構造が支承から脱落した橋梁については、復旧に時間を要し、地震後の速やかな機能回復に支障を来すケースが見受けられた。

道路橋の支承部については、レベル2地震（以下、L2地震）に抵抗できない旧タイプA支承が残置されており、地震後に速やかに機能回復するためには、タイプA支承部の耐震性を向上させることが求められる。タイプA支承部の耐震性を向上させるためには、タイプB支承への取替が考えられるが、既設の支承を取り替えるためには、大規模な仮設工が必要となり、多大なコストと時間を要する場合が多い。

また、近年、ゴム支承が地震により破断やき裂等の損傷が生じるという事象が発生している。2011年東北地方太平洋沖地震では、平成8年道路橋示方書V<sup>1)</sup>（以下、道示V）に基づいてL2地震動に対して設計や照査がなされたゴム支承に破断やき裂等の損傷が生じた。仙台東部道路の東部高架橋では、地震時水平力分散型ゴム支承18基が破断した。また、仙台北部道路の利府高架橋では、3月11日の本震時に地震時水平力分散型ゴム支承3基が破断し、さらに5基にき裂が生じた。さらに4月7日の余震で、8基が破断し、その他9基が損傷を受けた<sup>2,3)</sup>。東水戸道路の

新那珂川大橋では、地震時水平力分散型ゴム支承9基にき裂が発生し、国道6号バイパスの旭高架橋においても、鉛プラグ入り積層ゴム支承4基にき裂が発生した<sup>4)</sup>。2016年熊本地震でも、平成8年道示Vに基づいてL2地震動に対して設計や照査がなされたゴム支承に破断やき裂等の損傷が生じた。俵山大橋では、ゴム支承の破断、脱落、残留変形といった損傷が生じた。大切畑大橋でもゴム支承の破断が生じた<sup>5,6)</sup>。これらのゴム支承の破断の原因のひとつとして、ゴム支承の劣化が考えられており、各機関でその劣化メカニズムの研究が進んでいる<sup>7-13)</sup>。ゴム支承は内部で劣化が進行していてもただちに常時の鉛直力支持機能を失うことは考えにくい。ただし、地震時の水平力分担機能については、その機能を代替えるものが必要と考えられる。

このような旧タイプA支承の耐震性向上やゴム支承の劣化といった課題に対して、既設支承を存置したまま、その機能を補完する水平力分担構造等を追加する方法も考えられる。水平力分担構造については、既存のデバイスとして、RCブロック、鋼製ブロック、せん断パネル型ダンパー、シリンダー型ダンパー等がある。RCブロックについては、2016年熊本地震において、府領第一橋の横変位拘束構造として設置されていたが、取付け部の脆性的な破壊によって落橋に至っている<sup>14)</sup>。取付け部を破壊させないためには、RCブロック本体と取付け部の耐力の階層化が必要になると考えられる。しかし、支承部周辺の狭隘な空間においてRCブロックを設計する場合、耐力のコントロールは容易ではないと考えられる。鋼製ブロックについても、RCブロック同様に、取付け部との耐力の階層化が課題になると考え

られる。さらに、鋼製ブロックは板組構造となるため、地震による繰返し作用を受けた場合の溶接部の低サイクル疲労についても課題となる。せん断パネルダンパーについては、比較的耐力をコントロールしやすいと考えられる<sup>15-17)</sup>。ダンパーとして機能する方向が1方向のみであり、2方向に機能させる場合は、さらに大きな設置空間を要するため、維持管理の容易さに支障を来すことが懸念される。また、鋼製ブロック同様に、地震による繰返し作用を受けた場合の溶接部の低サイクル疲労や面外座屈の進展の課題がある。シリンダー型ダンパーについては、せん断パネルダンパー同様に、ダンパーとして機能する方向が1方向のみである。また、経年による機能の低下が外観から確認できないという課題もある。以上のような既存の工法の課題を解決するためには、(1)コンパクトであり、維持管理の容易さの妨げにならず、(2)耐力のコントロールが容易で、望ましい損傷形態への誘導が可能であり、(3)指向性が小さく、ひとつのデバイスで上部構造の面的な挙動に追随するデバイスが望まれる。さらに、支承部の耐震性を向上させるためには、水平力分担構造、落橋防止構造、段差防止構造などの複数のデバイスを設置する必要がある。道路橋示方書Vによれば、ひとつのデバイスがこれらの機能を兼ねてはならないという規定はある一方、既設の支承部の周辺にこれらの構造をすべて独立して設置することは困難なケースが多い。そこで、(4)多機能かつ各機能を段階ごとに確実に発揮させることで、ひとつのデバイスで、水平力分担、落橋防止、段差防止を担えるような構造も望まれる。

本検討では、以上のような(1)~(4)の設計コンセプトを実現するために、筆者らは、支承部を壊れにくく、また仮に壊れたとしても粘り強く壊れていく

ようにコントロールする支承部損傷制御装置DC (Damage Control) ストッパーを開発した。本稿では、従来の水平力分担装置の課題を踏まえたDCストッパーの開発コンセプト、形状の検討、および性能検証実験の結果について述べる。

## 2. 従来の水平力分担装置の課題を踏まえた開発コンセプト

既設の支承部の耐力を向上させるためには支承本体を交換する方法と、既設支承とは別に水平力分担装置を設置する方法がある。支承本体を交換する方法については、支承部周辺の空間の狭さや取付け部の耐力向上が難しいために交換できないケースがある。一方、既設の支承とは別に水平力分担装置を設置する場合については、表-1に示すように耐力のコントロールに課題がある。従来の水平力分担装置はL2地震動に対して耐力を確保するように設計されているが、水平力分担装置の最大耐力が確認されていないため、L2地震動を超える状況になった場合、荷重が取付け部の耐力を上回り、上部構造や下部構造を損傷させる可能性がある。実際に2011年東北地方太平洋沖地震<sup>4)</sup>や2016年熊本地震では後で設置した耐震補強部材の取付け部の損傷がみられた<sup>5)</sup>。

従来の水平力分担装置の課題を踏まえ、新たなデバイスの開発コンセプトを表-1に示す。水平力分担装置が担うべきL2地震力以上の耐力を確保しながら、DCストッパーの変形能により取付け部の設計力を超えないような挙動を実現できれば、L2地震力を超える状況において取付け部の損傷を防ぎつつ、上部構造と下部構造をできるかぎり長く接続させておくことができる。

表-1 従来の水平力分担デバイスの事例と課題の比較

	従来の水平力分担装置	開発コンセプト
耐力のコントロール		
挙動	終局状態に至る最大耐力が確認されていない従来の水平力分担装置は、L2地震力を超える状況において取付け部の耐力を上回り、上部構造や下部構造を損傷させる可能性がある	水平力分担装置が担うべきL2地震力以上の耐力を有しながら、取付け部の設計力を超えないように挙動することで、L2地震力を超える状況において取付け部の損傷を防ぎ、上部構造と下部構造をできるかぎり接続させておくことができる

### 3. 支承部損傷制御装置DCストッパーの提案

前述の開発コンセプトを実現するために、任意の成型ができる鋳物でありながら、一般的な鋳鋼材と比べて非常に高いじん性を有する高じん性鋳鋼という材料に着目し、支承を取り替えることなく、また維持管理空間を確保したまま、支承部の耐震性を向上させる新たなデバイスとして支承部損傷制御装置DCストッパーを開発した。DCストッパーの構造を図-1に示す。DCストッパーは高じん性鋳鋼を用いた本体部分と一般的な鋳鋼材や鋼材の上杓・下杓から構成される。DCストッパーの荷重-変位関係のイメージを図-2に、地震時の作動プロセスを図-3に示す。①常時・L1地震時には既設支承が機能しているため、DCストッパーは作動しない。②レベル1地震動を超えると、上部構造の変位により上杓側がDCストッパー本体に接触し、水平力分担機能を発揮する。③L2地震動を超えると、DCストッパー本体が変形し、じん性的に抵抗しながら変位拘束機能を発揮する。④さらに大きな作用力を受けると、DCストッパーは機能を失うが、上杓あるいは下杓の構造高さによって段差防止機能を発揮する。DCストッパーは④の段階に至るまで上部構造と下部構造を接続し続け、上部構造を桁かかり長上にソフトランディングさせることを狙うものである。

DCストッパーの橋梁への設置イメージを図-4に示す。橋脚の梁前面にブラケットを設置し、ブラケ

ット上にDCストッパーを設置することで、維持管理の容易さを損なうことなく支承部のじん性を向上することができる。

### 4. 形状検討

#### (1) 高じん性鋳鋼

高じん性鋳鋼は、図-5に示すように、一般的な鋳鋼材と比較して引張強さが低く、かつ伸び性能に優れた新しい鋳鋼材である。表-2は、高じん性鋳鋼の機械的性質を示している。表中には、一般的な鋳鋼材として知られる溶接構造用鋳鋼(SCW480)の機械的性質も比較のために記載している。高じん性鋳鋼は、降伏点と引張強さの上限値と下限値を限定しているところにも特徴がある。このような材料をDCストッパーの本体に用いることで、デバイスの変形性能を確保するとともに、上杓や下杓などとの保有耐力の階層化をより明確に実現させている。

#### (2) DCストッパー本体の形状検討

DCストッパー本体の形状は、先に述べたコンセプトのとおり、指向性が小さく、ひとつのデバイスで上部構造の面的な挙動に追随するデバイスが望まれる。そのため、円筒形を基本としたうえで、表-3に示す検討手順で決定した。まずSTEP1の静的設計では、照査する断面とその照査方法の検討し、DC

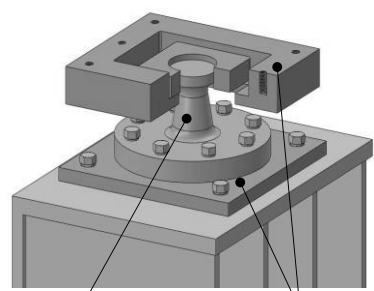


図-1 DC ストッパーの構造概要

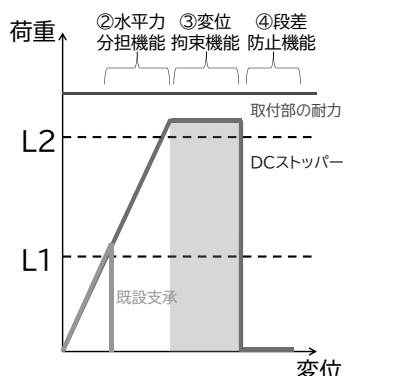


図-2 DC ストッパーの荷重-変位関係

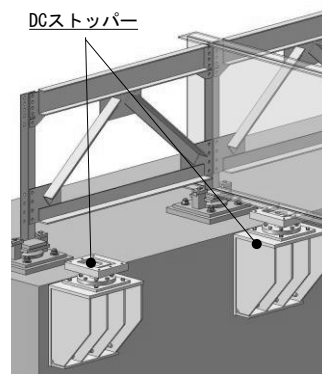


図-4 橋梁への設置イメージ

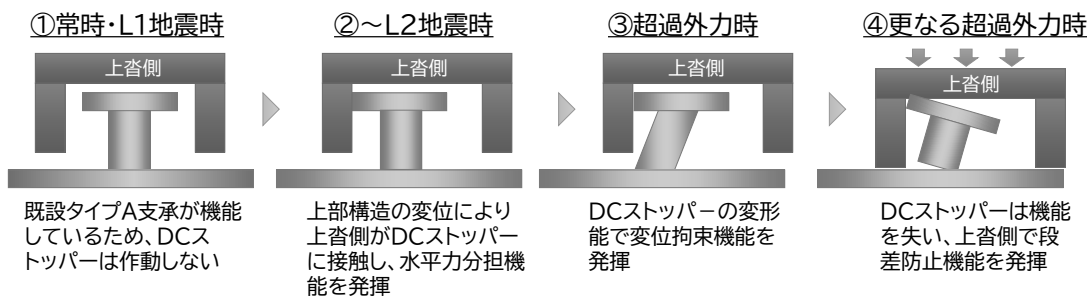


図-3 地震作用に応じた DC ストッパーの作動プロセス

ストッパー本体の断面設計を梁計算に基づき行った。ここで、DCストッパー本体の断面設計では、L2地震動により生じる外力に対して高じん性鋳鋼の降伏点以下とした。STEP2の静的線形解析は、静的設計で定めたいくつかのDCストッパー本体形状に対し、応力分布の均等性を確認するために実施した。そしてSTEP3の静的非線形解析は、静的線形解析で優位性が見られた形状を対象として、力学的特性（降伏比）と変形状況を把握するために実施しており、それらの結果から、図-6に示すDCストッパー本体の

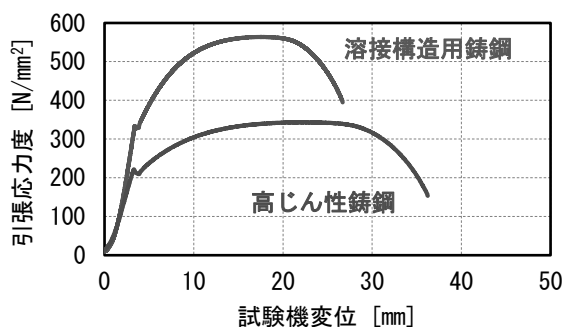


図-5 材料引張試験結果

表-2 高じん性鋳鋼の機械的性質

材料	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏比 (%)	伸び (%)	吸収エネルギー(J)
高じん性 鋳鋼品	200~260	300~400	55以上	35以上	47以上
溶接構造用 鋳鋼品	275以上	480以上	—	20以上	27以上

最終形状を選定した。

DCストッパー本体は、上フランジと下フランジ、そして変形部からなる。常時からL2地震動までは、DCストッパー本体に塑性変形は生じない。さらに、上巻を介して上フランジに作用する水平力がL2地震動を超えると、主に変形部において塑性変形を生じる。高じん性鋳鋼は、伸び性能に優れた材料であるものの、局部的に応力が集中してしまえば、比較的小さな変形でもき裂を生じる可能性がある。このことから、DCストッパー本体の断面設計は、変形部に生じる塑性変形ができるだけ均一となるように(1)式を用いて行っている。σとτは照査断面の直応力度(N/mm<sup>2</sup>)とせん断応力度(N/mm<sup>2</sup>)であり、σ<sub>y</sub>とτ<sub>y</sub>は、高じん性鋳鋼の降伏点(N/mm<sup>2</sup>)と降伏点から求めた降伏相当のせん断応力(N/mm<sup>2</sup>)である。Uは合成応力度であり、変形部の高さ方向でいくつかの階層に断面を区切り、それぞれの断面で合成応力度が1.0以下であることを照査し、断面寸法を設定した。なお、上フランジの厚みと直径は、L2地震動で生じる水平力に対して、降伏相当の支圧応力度以下となるように断面を設定している。

$$U = \left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_y}\right)^2 \leq 1.0 \quad (1)$$

### (3) 静的非線形解析

静的非線形解析は、図-7に示す水平力400kNタイプのDCストッパー本体を対象として行った。解析

表-3 DCストッパー本体形状検討手順

	内容	目的
STEP1	静的設計	梁計算に基づいた断面設計の検討とデバイスの断面設計
STEP2	静的線形解析 (予備解析)	静的設計で定めた断面形状での応力分布性状の把握と非線形解析を実施する形状の選定
STEP3	静的非線形解析	STEP2で選定した断面形状での降伏比と変形状況の把握

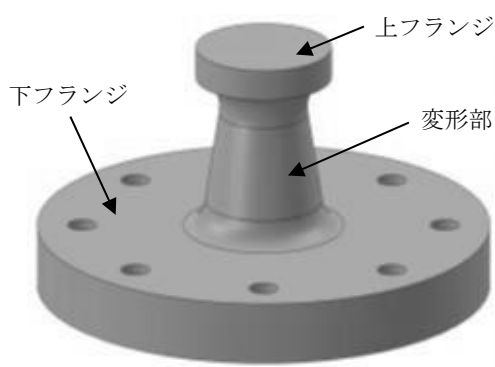


図-6 DCストッパーの形状

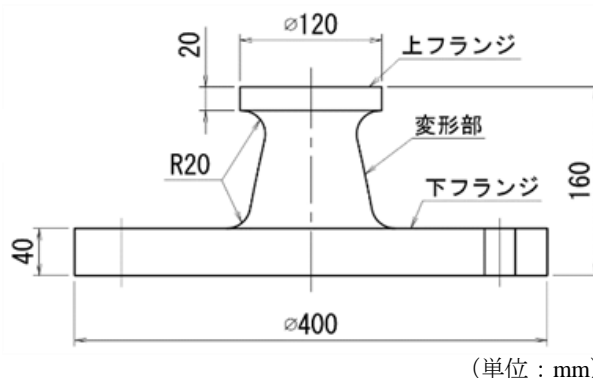


図-7 400kNタイプのDCストッパーの形状寸法

モデルの要素分割図を図-8に示す。DCストッパー本体の材料特性は非線形性を考慮して、図-5に示した高じん性鋳鋼の引張試験結果から求めた真応力-真ひずみ関係を与えた。上沓と下沓の材料特性は線形とした（弾性係数： $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ，ポアソン比：0.3）。ソリッド要素の寸法は主要部で3~5mmとした。上沓とDCストッパー本体上フランジ部，または下沓とDCストッパー本体下フランジ部との接触にはペナルティ法<sup>18-20</sup>を適用し，貫入は許容していない。それぞれの接触面の摩擦係数 $\mu$ は0.3とした。これらの条件により上沓に強制変位を与えることで解析を行った。なお，上沓は加力方向の面内のみに変位し，面外方向への変形は生じないように境界条件を設定した。解析は汎用有限要素解析ソフトABAQUS ver.6.14.5で行い，DCストッパー本体の下フランジ部を除いた高さに対して50%程度の水平変位が生じたとき，あるいは荷重変動の生じない場合に終了とした。

図-9は，静的非線形解析で得られたミーゼス応力のコンター図（水平変位70mm，解析終了時）を示している。図中には，加力方向正面，加力方向側面，そして加力方向側面の中央断面におけるミーゼス応力の分布を示している。加力方向正面と背面側の広い範囲で応力の分布が確認できるとともに，高じん性鋳鋼の引張強さの上限値である $400 \text{ N/mm}^2$ を上回

っていることが分かる。特に変形部と下フランジ境界部付近の応力が卓越していることから，き裂は，変形部と下フランジとの境界部から生じると考えられる。なお本解析で得られた荷重-変位関係は，後述する実験結果と合わせて記す。

## 5. 性能確認実験

### (1) 実験条件

性能確認実験は，静的非線形解析を行った水平力400kNタイプのDCストッパー本体で行った。荷重ケースを表-4に示す。試験体数は，静的漸増荷重実験（以下，漸増荷重）で2体，静的正負交番繰返し荷重実験（以下，正負交番荷重）で4体とした。漸増荷重では，確実にDCストッパー本体の終局状況を把握するため，DCストッパー本体の変形部高さに上フランジ高さを含めた値を荷重変位とした。正負交番荷重では，DCストッパー本体の降伏相当のせん断変形( $\delta$ )をパラメータとして荷重を行った。正負交番荷重の実験状況を図-10に示す。

実験は，下側固定板にDCストッパー本体，上側固定板に加力板を取付け，試験機鉛直方向の制御を変位ゼロとして，DCストッパー本体にき裂が生じるまで水平変位制御（加力速度 $1 \text{ mm/sec}$ ）で荷重し

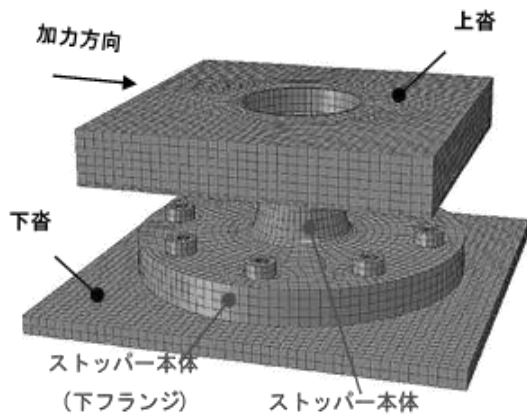
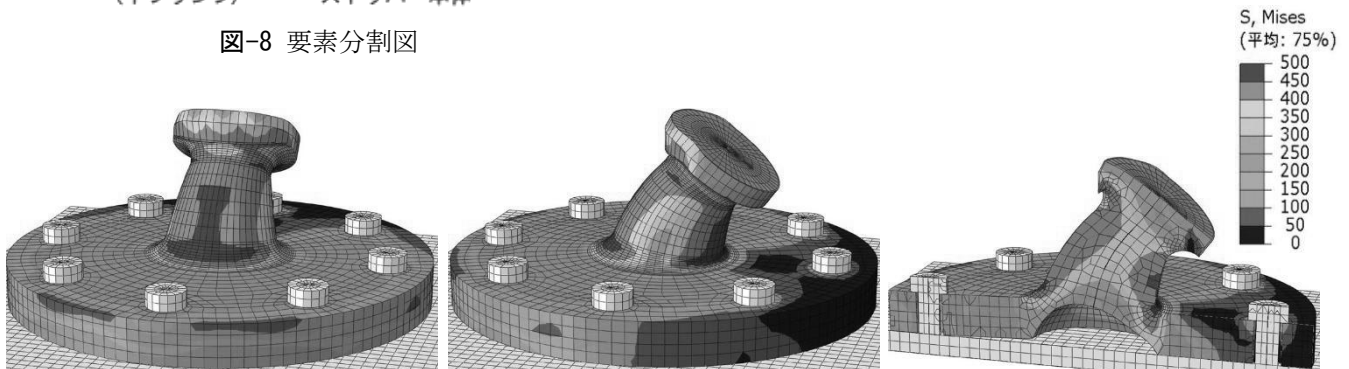


図-8 要素分割図

表-4 荷重ケース

荷重ケース	荷重条件	荷重変位 (試験機変位)	荷重速度
A-1	静的漸増荷重	120mm	1mm/sec
A-2			
B-1	静的正負交番繰返し荷重	$\pm\delta, \pm 2\delta, \pm 3\delta,$	
B-2		$\pm 4\delta, \pm 5\delta, \dots$	
B-3		$\pm\delta, \pm 1.5\delta, \pm 2\delta,$	
B-4		$\pm 2.5\delta, \pm 3\delta, \dots$	



(a) 加力方向正面

(b) 加力方向側面

(c) 加力方向側面の中央断面

図-9 ミーゼス応力のコンター図（水平変位70mm，解析終了時）

た。変位測定位置を図-11に示す。DCストッパー本体の水平変位は図中のd2とd3の測定結果から求めた。水平荷重は試験機内蔵のロードセルで測定した。

## (2) 実験結果

漸増载荷により得られた水平荷重とDCストッパー本体の水平変位の関係を図-12に示す。A-1とA-2試験体の結果はほぼ一致している。漸増载荷の水平荷重は、DCストッパー本体の降伏後、変形部がじん性的に変形することで徐々に大きくなる傾向を示した。それぞれの試験体の最大荷重は、A-1試験体で704.4kN（塑性率21.3），A-2試験体で688.8kN（塑性率18.2）でありおおむね等しい。ここで塑性率とは、実験により得られたDCストッパー本体の塑性後の水平変位をそれぞれの試験体の降伏変位( $\delta y$ )で除した値である。また図中には、先に述べた静的非線形解析で得られた結果を破線で示している。各実験で得られた降伏荷重と最大荷重とは、多少の差異がみられるものの、静的非線形解析により得られた荷重-変位関係とおおむね近似する傾向といえる。これらのことから、DCストッパー本体は、水平力分担機能に加え、じん性的な変形能による変位拘束機能を有するとともに、耐力コントロールが可能であるとわかる。図-13は、A-1試験体の漸増载荷終了時の状況を示している。A-1、A-2試験体ともに、DCストッパー本体は、変形部と下フランジとの境界部付近に生じたき裂で終局を迎えた。DCストッパー本体に生じたき裂の位置は、図-9に示したコンター図の応力卓越箇所と一致する。

図-14は、正負交番载荷により得られた水平荷重とDCストッパー本体の水平変位の関係を示している。正負交番载荷の水平荷重は、繰返し载荷に伴うひずみ硬化の影響により徐々に大きくなることわかる。それらの最大荷重は、B-1試験体で-719.4kN、B-2試験体で-668.1kN、B-3試験体で-695.8kN、そしてB-4試験体で-686.1kNであった。B-1試験体は、B-2試験体と比較し、降伏相当としたせん断変形( $\delta$ )が大きかったため最大荷重のやや高い傾向がみられたが、B-3とB-4試験体の最大荷重はおおむね一致している。また各試験体における最大荷重に到達するまでの塑性率は、B-1試験体で28.1、B-2試験体で22.0、B-3試験体で26.9、そしてB-4試験体で27.6であり、漸増载荷の最大荷重時の塑性率と比較してやや大きいものの、ばらつきは小さい。なお図中の破線は、漸増载荷と同様で静的非線形解析結果を示している。正負交番载荷でのDCストッパー本体の終局状態は、いずれの試験体も漸増载荷と同様で変形部と下フラ

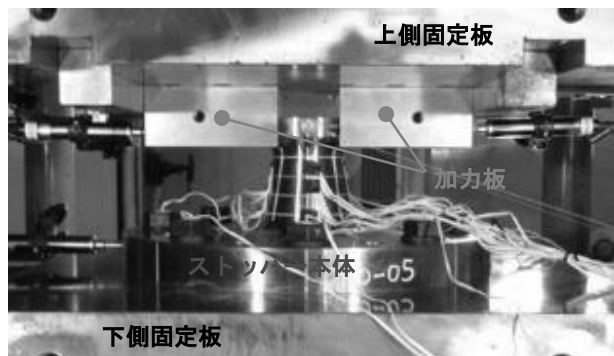


図-10 実験状況（正負交番载荷）

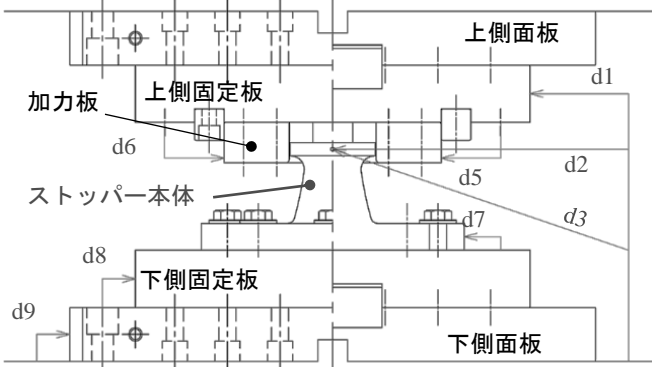


図-11 変位測定位置

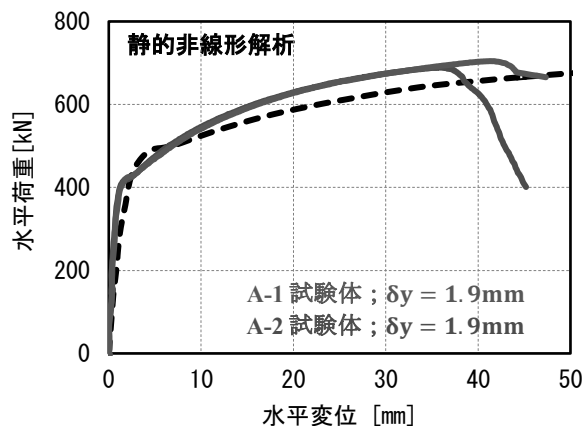


図-12 水平荷重と水平変位の関係（漸増载荷）

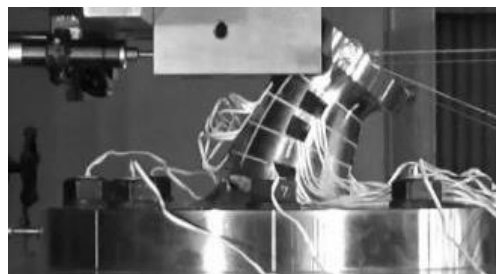
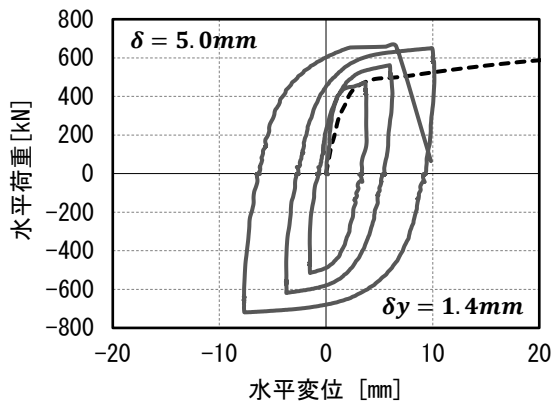


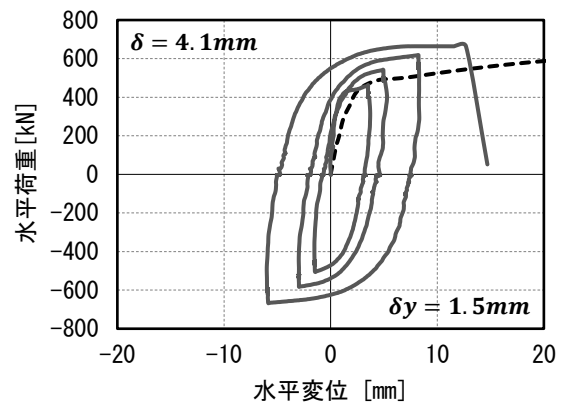
図-13 漸増载荷終了時の状況（A-1 試験体）

ンジとの境界部付近に生じたき裂であった。

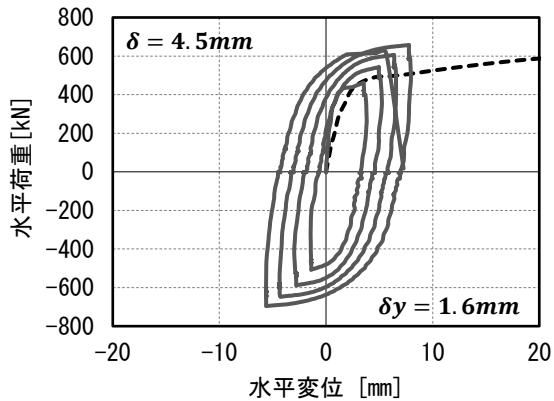
表-5には、漸増载荷と正負交番载荷に加え、静的非線形解析により得られた降伏荷重、最大荷重、そして塑性率の一覧を示している。各実験結果から求



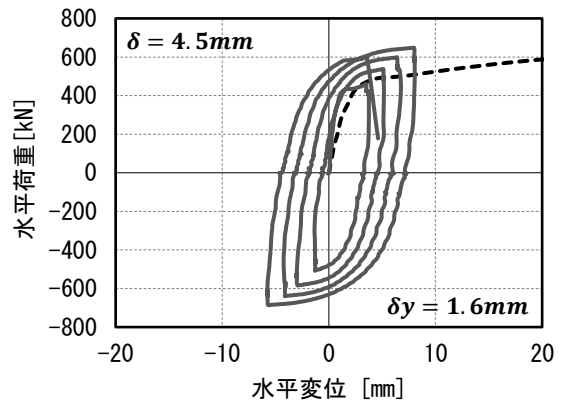
(a) B-1 試験体



(b) B-2 試験体



(c) B-3 試験体



(d) B-4 試験体

図-14 水平荷重と水平変位の関係（正負交番載荷）

めた値は、解析結果と比較して多少の差異がみられるものの、おおむね近似する傾向といえる。

## 6. まとめ

本研究では、従来の水平力分担装置の課題を踏まえ、支承部を壊れにくく、また仮に壊れたとしても粘り強く壊れていくようにコントロールする支承部損傷制御装置DCストッパーの開発コンセプト、形状の検討、および性能検証実験結果について述べた。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- 1) 一般的な鋳鋼材と比べて非常に高いじん性を有する鋳鋼材に着目し、支承を取り替えることなく、また維持管理空間を確保したまま、支承部の耐震性を向上させる新たなデバイスとして支承部損傷制御装置DCストッパーを開発した。
- 2) 水平力400kNタイプの静的非線形解析を行い、漸増載荷、あるいは正負交番載荷との比較を行った。漸増載荷のA-1、A-2試験体の結果はほぼ一致した。また静的非線形解析結果と比較すると、降伏荷重と最大荷重は、多少の差異がみられるものの、おおむね近似する傾向といえる。正負

表-5 降伏荷重，最大荷重，塑性率の一覧

載荷ケース		降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	塑性率 <sup>*</sup>
漸増載荷	A-1	423.3	704.4	21.3
	A-2	418.8	688.8	18.2
	Ave.	421.1	696.6	19.8
正負交番載荷	B-1	436.7	-719.4	28.1
	B-2	430.0	-668.1	22.0
	B-3	433.1	-695.8	26.9
	B-4	432.4	-686.1	27.6
	Ave.	433.1	-692.4	26.2
解析結果		471.3	704.1	18.6

※塑性率は最大荷重時

交番載荷において、B-1試験体はB-2試験体よりも最大荷重のやや高い傾向を示したが、B-3とB-4試験体の最大荷重はおおむね等しい。これら実験結果の傾向は、静的非線形解析結果におおむね近似する。また、最大荷重に到達するまでの塑性率は、正負交番載荷でやや大きいものの、ばらつきは小さい。これらのことから、DCストッパー本体は、水平力分担機能に加え、じん性的な変形能による変位拘束機能を有するとともに

に、耐力コントロールが可能といえる。

- 3) DCストッパー本体は、変形部と下フランジの境界付近に生じるき裂で終局を迎える。この破壊形態は、載荷条件によらず同じであり、静的非線形解析結果での応力卓越箇所とも一致する。
- 4) DCストッパーは、水平力分担装置として担うべきL2地震力以上の耐力を確保しながら、その変形能により取付け部の設計力を超えないような挙動を実現することができる。すわなち、L2地震力を超える状況において取付け部の損傷を防ぎつつ、上部構造と下部構造をできるかぎり長く接続させておくことができる。

本稿のコンセプトで示したように、DCストッパーは、橋軸方向、橋軸直角方向に対する水平力分担機能、変位拘束機能および段差防止機能を有している。一方、道示Vにおける落橋防止システムは、橋軸方向、橋軸直角方向、水平面内での回転方向に対して独立して働くシステムでなければならないとされているが、既設の支承まわりに3方向に対して独立に働く装置を設置するのは、空間の制限や施工時の制約等から困難な場合があると想定される。そのような場合において、DCストッパーを設置しておくことで、地震後の速やかな機能復旧に寄与することが期待される。

## 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，1996。
- 2) 山田金喜，曾田信雄，木水隆夫，広瀬剛，名古屋和史，鈴木基行：東北地方太平洋沖地震により被災した東部高架橋のゴム支承に関する解析的検討，構造工学論文集，(公社)土木学会，Vol.59A，pp.527-539，2013。
- 3) 曾田信雄，山田金喜，木水隆夫，広瀬剛，鈴木基行：東北地方太平洋沖地震により破断した積層ゴム支承の性能試験，構造工学論文集，(公社)土木学会，Vol.59A，pp.516-526，2013。
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，国土技術政策総合研究所資料第646号/土木研究所資料4202号，2011。
- 5) 国土交通省 国土技術政策総合研究所，国立研究開発法人 土木研究所：平成28年（2016年）熊本地震土木施設被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料第967号，土木研究所資料第4359号，2018.3。
- 6) 高橋良和：2016年熊本地震における木山川橋の被害分析，第19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.169-176，2016。
- 7) 伊藤義人，矢澤晃夫，佐藤和也，顧浩声，忽那幸浩，山本吉久：橋梁支承用ゴムの環境劣化特性に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.794/I-72，pp.253-266，2005。
- 8) 篠原聖二，星隈順一：地震により損傷した鉛プラグ入り積層ゴム支承の特性評価に関する実験的研究，土木学会論文集A1（構造・地震工学）Vol.71，No.4，[特]地震工学論文集，Vol.34，pp.I\_587-I\_599，2015.9。
- 9) 林訓裕，足立幸郎，五十嵐晃，党紀，濱野真彰，東出知大：積層ゴム支承の経年劣化損傷が残存性能に与える影響検討，第17回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.197-202，2014。
- 10) 坂本直太，向井梨紗，篠原聖二：積層ゴム支承のゴムと内部鋼板の接着層における経年劣化特性の評価，第19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，2016.7。
- 11) 飯泉信吾：腐食環境におけるゴム/金属加硫接着体の耐久性，日本ゴム協会誌第65巻，pp.96-104，1992。
- 12) 横井浩，奥本忠興，竹内勝政，今井英幸：天然ゴム-鋼板接着の腐食劣化特性，日本ゴム協会誌第67巻，pp.198-206，1994。
- 13) 深堀美英：免震用積層ゴムの長期寿命予測，日本ゴム協会誌第68巻，pp.388-296，1995。
- 14) 高橋良和，Gong Yucheng：2016年熊本地震による横変位拘束構造の損傷メカニズム推定，第37回地震工学研究発表会講演論文集，2017。
- 15) 独立行政法人土木研究所他：橋梁に用いる制震ダンパーの性能検証法及び設計法に関する共同研究報告書（その1 制震ダンパーの動的挙動に関する振動台加振実験），共同研究報告書，整理番号第438号，2012.3。
- 16) 井上一郎，金治英貞：低降伏点鋼，橋梁と基礎 Vol.39-8，pp.29-32，2005.8。
- 17) 西村俊夫，三木千壽：構造用鋼材のひずみ制御低サイクル疲れ特性，土木学会論文報告集，第279号，pp.29-44，1978.11。
- 18) 矢川元基，関東康祐，安藤良夫：ペナルティ関数法による動的接触問題の解析，日本機械学会論文集（A編），49巻448号，pp.1581-1589，1983。
- 19) 浅野直輝：衝撃接触二体問題のためのペナルティ法による仮想仕事の原理，日本機械学会論文集（A編），51巻467号，pp.1893-1899，1985。
- 20) 鈴木規之，都井裕：ペナルティ関数法による動的摩擦接触問題の有限要素解析，日本造船学会論文集，第162号，pp.364-373，1987.11。