

地震時の損傷を制御する新型支承サイドブロック に関する研究

張 広鋒¹・蔵治 賢太郎²・右高 裕二²・大住 圭太³

¹正会員 博士（工学） 一般財団法人首都高速道路技術センター（〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-10-11）

²正会員 工修 首都高速道路株式会社（〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関1-4-1）

³正会員 工修 一般財団法人首都高速道路技術センター（〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-10-11）

1. はじめに

橋梁用支承のサイドブロックは、主桁の橋軸直角方向の変位を抑制するためのもので、橋軸直角方向の地震力に対して、通常一支承線上の全支承のサイドブロックが均等に負担するものとして設計する。しかし、上部構造の地震時挙動の複雑さや支承の設置誤差などによるサイドブロックの遊間の不均一によって、一支承線上の全サイドブロックに同時かつ均等に地震力を負担させることは極めて困難である。そのため、実際には、一支承線上の全サイドブロックではなく特定のサイドブロックに全地震力が作用し、小さな地震であっても取付けボルトの破断が生じる可能性がある。さらに、仮に全サイドブロックが均等に地震力を負担するとしても、設計以上の地震力が作用すると同様の損傷が生じる。

一方、地震によって破断した取付けボルトや取付けボルトの破断によって脱落したサイドブロック本体は、さらに高架下に落下する恐れがあり、通行人や通行車両に第三者被害を引き起こす危険性がある。図-1に、近年の地震におけるサイドブロックの脱落例を示す。本サイドブロックは、高架下への落下に至らなかったが、取付けボルトの破断によって橋脚上に脱落した。破損したサイドブロック部材の落下による第三者被害を防止する観点よりも、このような事象は絶対に避けなければならないことである。

首都直下地震の逼迫性も指摘される中、本研究では、破損したサイドブロック部材が高架下に落下するといった危険性を回避するための対策として、従来のサイドブロックと異なるコンセプトで、高い変形性能を有し、かつ部材が脆性的に破断しない損傷制御型のサイドブロックの開発に関する検討を行っ



図-1 橋脚上に脱落した支承サイドブロック

た。本論文では、提案したサイドブロックの基本コンセプトやその性能を検証するための静的・動的実験結果を報告する。

2. 損傷制御型サイドブロックの開発

（1）基本思想

一支承線上の特定のサイドブロックに地震力が集中したとしても、サイドブロック凸部の塑性変形によって各サイドブロックの遊間の不均一を吸収できれば、最終的に設計通り全てのサイドブロックが連動して地震力に抵抗する。このような考え方のもと、本研究では、以下の性能を有する損傷制御型サイドブロックを考案した。

1) 凸部の塑性変形によって一支承線上の各サイドブロックの遊間の不均一性を吸収し、設計通り全

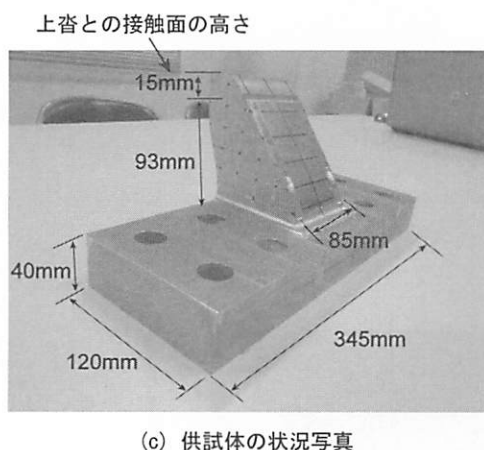
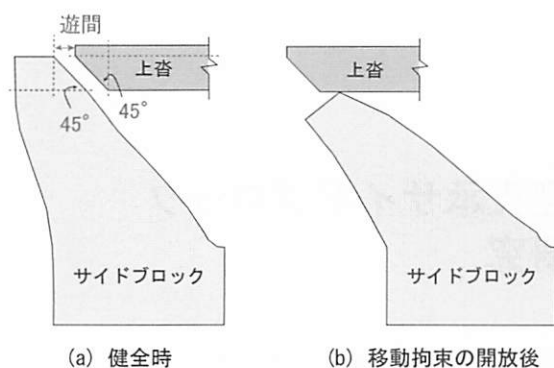


図-2 損傷制御型サイドブロックの形状

サイドブロックを機能させる、2) 設計以上の地震力が作用した場合は上部構造の移動拘束を開放し、取付けボルトや凸部の破断が生じない。このような性能を有するサイドブロックは、凸部の弾塑性変形を利用して設計思想通りの荷重分配を成立させ、また、取付けボルトが最後まで破断せずサイドブロックや取付けボルトの落下を回避することから、その名称を「損傷制御型サイドブロック」と名付けた。

(2) 変形しやすい形状の検討

損傷制御型サイドブロックでは凸部に高い変形性能が要求されるため、開発では変形しやすい形状と変形性能に優れる材料の両面を検討した。

サイドブロック凸部では、塑性変形が局部的に集中すると小さな変形量でも鋼材にき裂が生じる恐れがある。本研究では、サイドブロック凸部の塑性変形を高さ方向に分散させるため、凸部の高さ方向全断面が同じタイミングで塑性化するよう曲げモーメントの大きな基部を太くし、上に向かうにつれて細くなっていく形状とした。さらに、曲がり易さを助長させるため、凸部の背面にS字曲線を入れた。図-2にサイドブロック凸部の断面形状および実験に用いた供試体の状況写真を示す。

図-3に損傷制御型サイドブロックを実装した支承

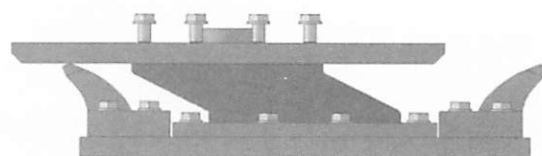
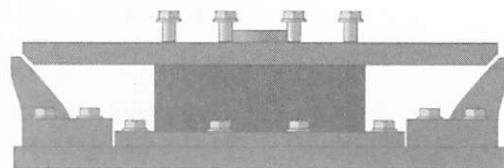
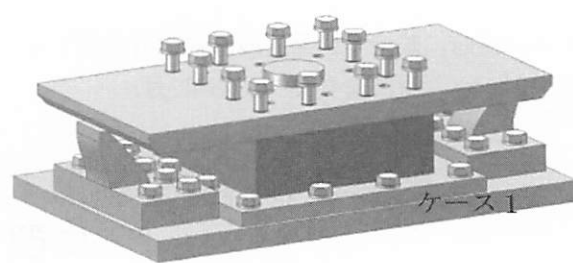


図-3 損傷制御型サイドブロックの実装イメージ図

の全景、健全時および損傷時の凸部のイメージ図を示す。本サイドブロックは、凸部の水平変形に伴って凸部天端の高さが徐々に下がり、最終的に上脊下面より低い位置になることによって上脊の水平移動に対する拘束を開放する機能を有する（図-2bおよび図-3cのイメージ図を参照）。定められた水平力で上部構造の移動拘束を開放させることができれば、橋脚や上部構造に過大な外力が加わることを回避させることができる。また、免震支承を設置し、小さな地震では拘束し大きな地震動の時にだけ機能させるといった使い方もできる。

(3) 変形性能に優れる材料の選定

降伏型ダンパーなどでよく採用される低降伏点鋼材は変形性能に優れるが、板厚が薄いため、サイドブロックのような金属の塊の製造に不向きなことから、本研究では、日本鑄造株式会社により開発された新たな鑄鋼品材料を採用することにした。

本材料は、一般的な鑄鋼品材料と比べ、降伏強度（250MPa）が低く伸び（35%程度）が高いため、変形性能に優れる材料である。また、本材料は、降伏比（降伏強度／耐力）が高く、降伏後の耐力の増加が少ないため、耐力制御を行う構造に適するものである。

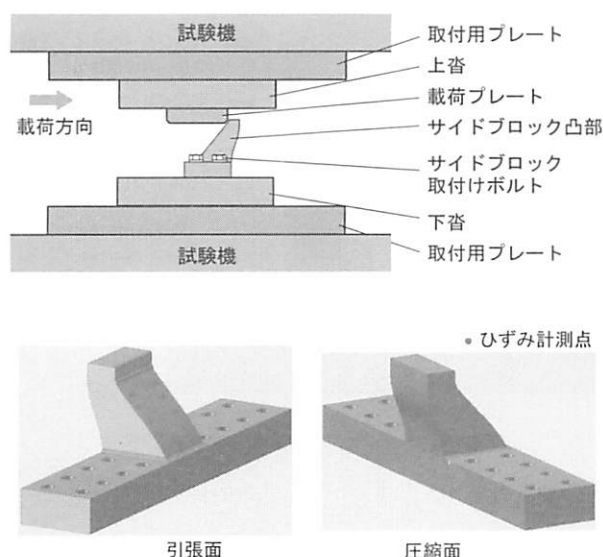


図-4 静的実験方法およびひずみ計測概要

3. 実験供試体の設計

損傷制御型サイドブロックの設計思想の妥当性やその性能を検証するため、静的載荷実験および三次元振動台を用いた動的加振実験を実施した。

実験では、死荷重が50トン程度に相当する支承に適用するサイドブロックを想定し、実大寸法の供試体を用いた。供試体の最大耐力は 328kN 程度になるように設計した。ここでの328kNは、設計水平震度を0.67とし、 $50T \times 9.8 \times 0.67 = 328kN$ で計算したものである。設計水平震度の0.67は、道路橋示方書¹⁾に準拠して以下のように求めたものである。

$$c_s = \frac{1}{\sqrt{2\mu_a - 1}} = 0.4472 \quad (1)$$

$$k_{hc} = c_s \cdot c_{Hz} \cdot k_{hc0} = 0.4472 \cdot 1.0 \cdot 1.5 = 0.67 \quad (2)$$

c_s : 構造物特性補正係数

μ_a : 許容塑性率 : 3.0

c_{Hz} : 地域別補正係数, 東京周辺 : 1.0

k_{hc0} : 設計水平震度の標準値,

レベル2 タイプII地震動, III種地盤 : 1.5

図-2(c)に供試体の状況写真および形状寸法を示す。凸部の形状寸法は、橋軸方向の幅は 85mm、塑性変形を期待する部分（上沓との接触部を除き）の高さは 93mm となっている。この形状寸法は、設計水平地震力の 328kN を目標とし、高さ方向の各断面が同時に塑性化するように各断面の合成応力度が同じになるように設計されたものである。設計では三次元FEM解析を用いた。

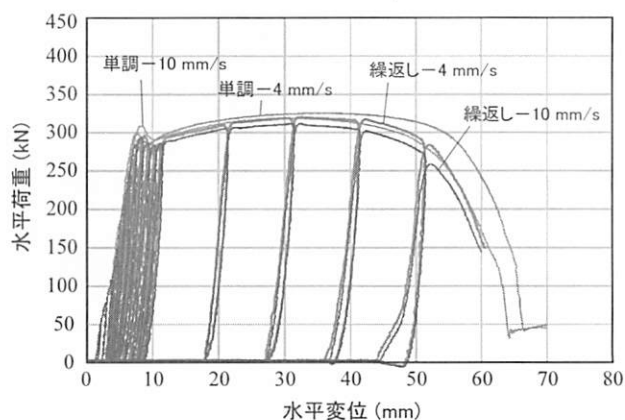


図-5 静的実験結果の水平荷重－水平変位

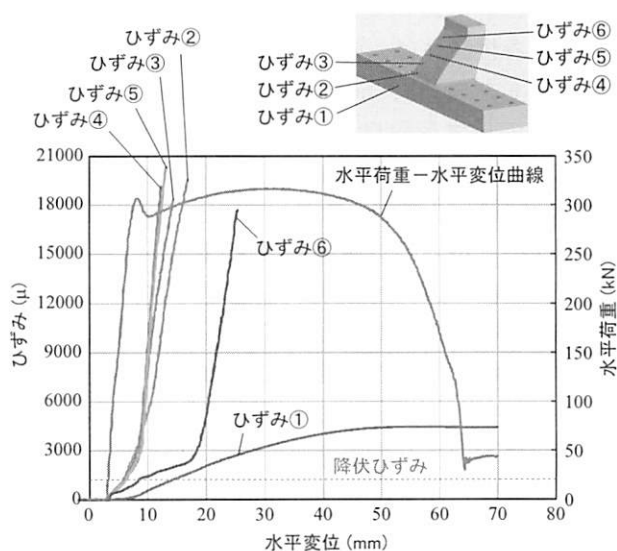


図-6 静的実験結果のひずみ（単調－10mm/s 供試体）

4. 実験概要および実験結果

(1) 静的実験

静的実験は、日本鑄造株式会社が所有する高速 2 軸試験機を用いて実施した。図-4に、静的実験の載荷方法および供試体のひずみ計測箇所の概要を示す。実験では、サイドブロック単体を対象とし、載荷プレートを用いてサイドブロック凸部を所定の変形量まで載荷した。ここで、サイドブロック凸部の所定の変形量とは、図-2や図-3に示すように、サイドブロック凸部天端が載荷プレートより低くなるための鉛直変形量である。載荷方法は、単調載荷および片方向変位漸増繰返し載荷の2種類を用いた。実験ケースは、単調載荷および繰返し載荷のいずれにおいて、それぞれ 4.0mm/s と 10.0mm/s の2種類の載荷速度を用いた計4ケースである。

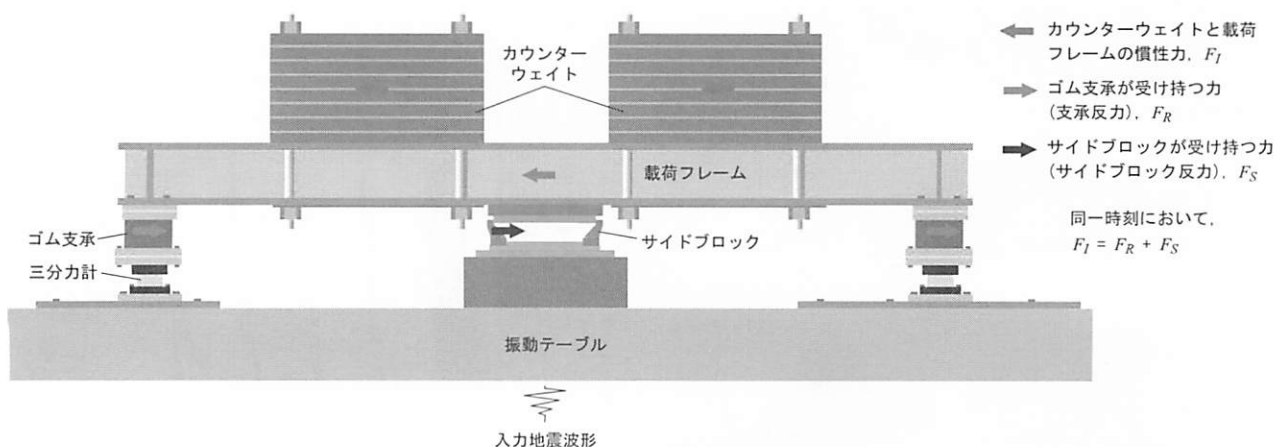


図-7 動的加振実験の設置概要

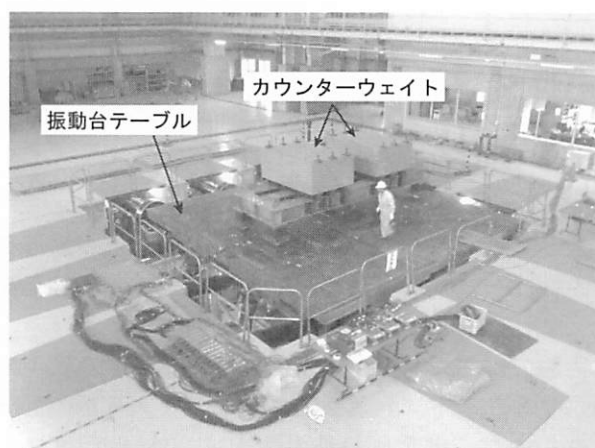
図-5に静的载荷実験の水平荷重-水平変位曲線を示す。各供試体は、降伏後にほぼ同程度の水平耐力を保持したままで 50mm 程度変形した。4つの実験ケースの最大荷重は、それぞれ 326.6kN, 316.6kN, 318.0kN および 309.1kN となり、目標の設計耐力との差が6%以下であった。

図-6に、例として载荷速度を 10mm/s とした単調载荷供試体の凸部のひずみ曲線を示す。図より、凸部のひずみ②～⑤がほぼ同時に降伏したことが分かる。これは、設計思想通りで、凸部全体に塑性変形が生じたことを意味している。実験後の供試体の損傷状況は、いずれの実験ケースにおいても、凸部のき裂や取付けボルトの破断などの異常が生じなかった。なお、実験終了後の供試体の変形状況については、後出の図-12に動的実験後の供試体の変形状況と合わせて示すこととした。

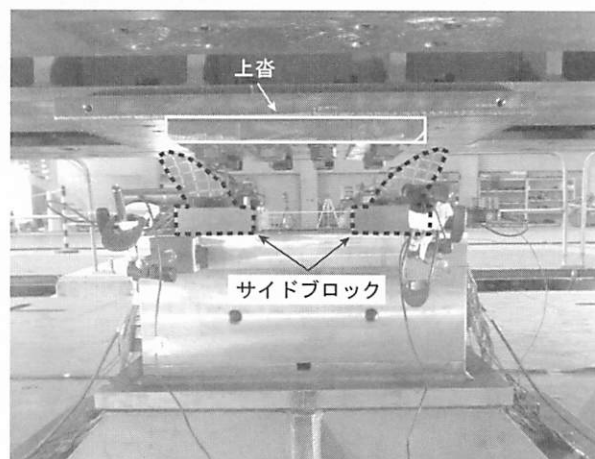
(2) 動的実験

動的実験は、国立研究開発法人土木研究所が所有する三次元大型振動台を用いて実施した。図-7に動的実験の設置概要、図-8に動的実験の設置状況写真を示す。

実験では、カウンターウェイト (444kN) および载荷フレームを用いて上部構造重量を模擬し、载荷フレームの4つの角に設置しているゴム支承を用いて载荷システムの安定性を維持させるようにしている。実験対象は、損傷制御型サイドブロックを有するゴム支承を想定しているが、損傷制御型サイドブロック本体の変形性能に着眼しているため、支承にゴム本体を設置せずサイドブロックと上沓のみを設けた。これより、本加振システムでは、上部構造重量を模擬したカウンターウェイトの慣性力は、载荷フレームを支える4つのゴム支承およびサイドブロックの両方で受け持つ (図-7を参照)。そのため、



(a) 全景



(b) 供試体の取付け状況 (実験後)

図-8 動的実験の設置状況写真

慣性力から4つの支承反力を減じた値をサイドブロックに作用する作用力 (サイドブロック反力) とした。一方、カウンターウェイト、载荷フレームおよびゴム支承を含む本加振システムの固有周期は0.7～0.8秒で、一般的な桁橋と同程度である。

入力地震動波形には、図-9に示すように、H24道

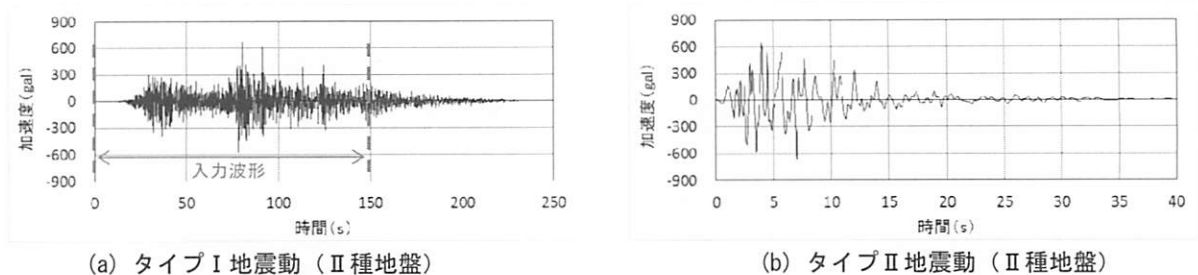


図-9 入力地震動波形

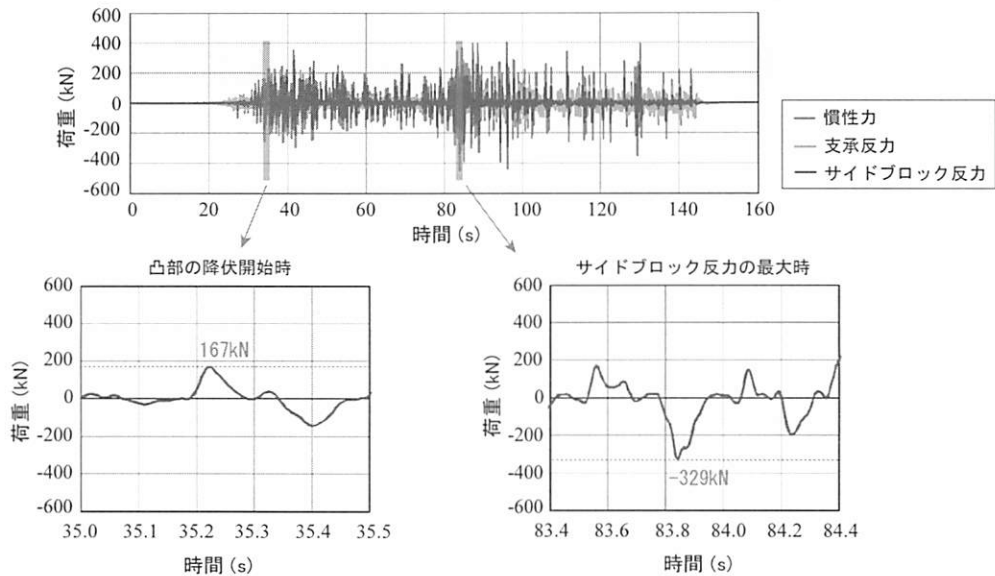


図-10 動的加振実験結果の慣性力、支承反力およびサイドブロック反力の時刻歴（タイプ I 地震動）

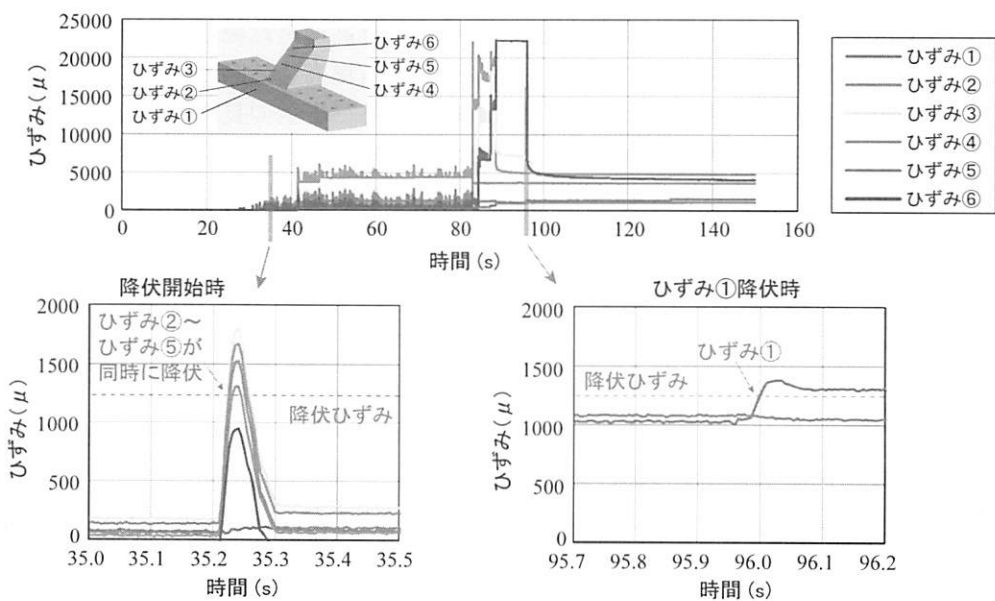
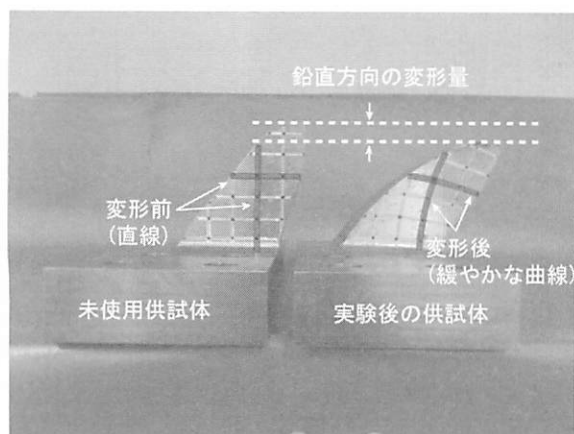


図-11 動的加振実験結果のひずみ時刻歴（タイプ I 地震動）

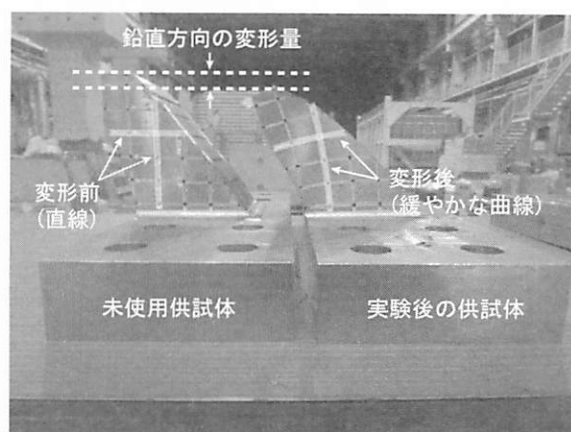
路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編のレベル2タイプⅠ標準地震波（仙台河川国道事務所構内地盤上 EW 成分）及びタイプⅡ標準地震波（JR西日本鷹取駅構内地盤上 EW 成分）の2種類を用いた。ここで、タイプⅠ地震動を用いた場合の加振実験では、加振時間

を短縮するため、150 秒以降の波形をカットした。150 秒以降の波形は、加速度振幅が小さく、構造物の応答への影響が小さいと考えられる。

図-10～図-11に、タイプⅠ地震動を用いた場合の慣性力、支承反力、サイドブロック反力およびひず



(a) 静的実験終了後の変形状況



(b) 動的実験終了後の変形状況

図-12 実験終了後の供試体の変形状況

みの時刻歴を示す。両図より以下のことが確認できる。1) 加振から 35.2 秒付近では、ひずみ②～⑤がほぼ同時に降伏し、降伏時のサイドブロック反力のピークは 167kN となった、2) 加振から 83.8 秒付近では、サイドブロック反力が最大値 (329kN) となった、3) 加振から 96 秒付近ではひずみ①が降伏した。ここで、タイプⅡ地震動を用いた場合の実験結果を示していないが、両実験ケースのいずれにおいても、動的実験結果の最大荷重や凸部の塑性挙動は、静的実験結果と一致し、概ね設計通りの結果であると言える。

サイドブロック凸部の塑性挙動および損傷状況は、凸部の全断面がほぼ同時に降伏して全体が大きく曲がり、き裂などの損傷は最後まで生じなかった。図-12に実験終了後の供試体の変形状況写真を示す。静的実験の場合と動的実験の場合とも、サイドブロック凸部全体が水平方向および鉛直方向に緩やかに変形したことが分かる。

5. まとめ

本研究では、高い変形性能を有しかつ部材が脆性

的に破断しない損傷制御型サイドブロックの開発に向けて、要求性能および基本設計方法を検討した上、実物大供試体を用いた静的実験および動的実験を実施した。その結果、損傷制御型サイドブロックが設計で考えている要求性能を有することを確認した。今後、実用化にあたって取付けボルトの余力の設定や大型支承への適用性などの検討を進めていく予定である。

6. 謝辞：本研究は、国立研究開発法人土木研究所、株式会社高速道路総合研究所、阪神高速道路株式会社、名古屋高速道路公社および首都高速道路株式会社による「支承の長期耐久性に関する共同研究」において首都高速道路グループが主体となって実施したものである。開発にあたっては共同研究のメンバーから多くの助言や協力をいただいた。この場を借りて御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，平成24年3月。