

損傷制御型サイドブロック取付ボルトの配置方法 に関する研究

張 広鋒¹・和田 新²・右高 裕二²

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）

1. はじめに

近年の大規模地震では、橋梁用支承サイドブロックの被害が多数報告されている。被害は、取付ボルトの緩みや破断もあったが、取付ボルトの破断によってサイドブロック本体が支承から脱落したケースもあった。写真-1に、サイドブロックの脱落事例を示す。破損したサイドブロック部材が高架下に落下すると通行人や通行車両に第三者被害を引き起こす恐れがある。このようなリスクを回避するための一対策として、著者らは高い変形性能を有し、かつ部材が破断しない損傷制御型サイドブロック（Damage-Controlled Side Block, 以下DCSB）の研究開発を行ってきた^{1)~2)}。

図-1に従来型サイドブロックとDCSBのイメージ図を示す。DCSBは、従来型サイドブロックと類似な構造を有し、上部構造の横変位を拘束するための凸部、フランジおよび取付ボルトによって構成される。DCSBの設計思想としては、常時では従来型サイドブロックと同様に上部構造の横変位を拘束するが、大地震時における終局状態では凸部の塑性変形によって上部構造への拘束を開放する。

これまでは、DCSBの凸部に着目し、所定の耐力と変形性能を有し、かつ終局時でも破断しないといった性能を満足させるための検討を重点的に行ってきた。本研究では、DCSBのもう1つの重要な性能である取付ボルトが破断しないことを確実に保証するための検討を行った上、これまでの検討に実施していなかった橋軸直角方向と橋軸方向の2方向加振実験を実施し、実地震により近い作用状況下のDCSBの性能を検証した。本論文では、取付ボルトの配置方法の検討結果および実験結果を報告する。

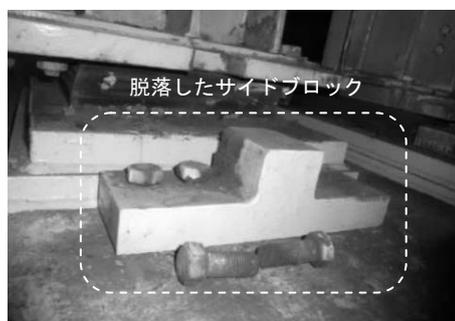


写真-1 橋脚上に脱落したサイドブロック

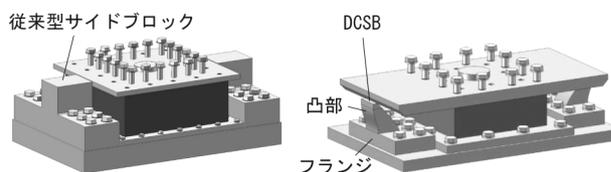


図-1 従来型サイドブロックとDCSBのイメージ図

2. DCSBの基本思想と検討状況

(1) DCSBの基本思想

タイプB支承のサイドブロックは、レベル2地震動に対して上部構造の横変位を拘束する役割があり、レベル2地震動による上部構造の慣性力に抵抗できるように耐力が定められる。一般的なサイドブロックの場合は、凸部を剛体として、取付ボルトの降伏強度を用いてサイドブロックの耐力を設計する。そのため、過大な地震力が作用する場合は取付ボルトが破断することとなる。このような従来型サイドブロックと比べ、DCSBの場合は、取付ボルトの破断で

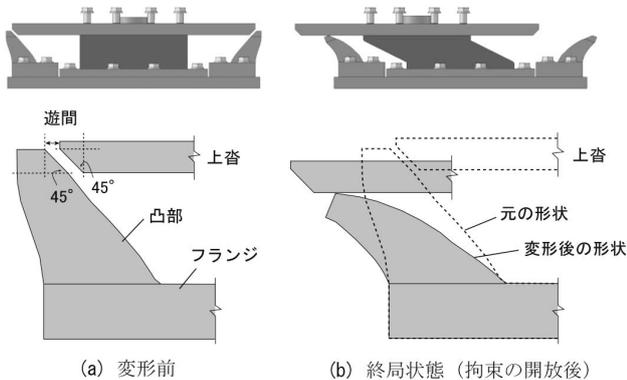


図-2 DCSBの塑性挙動のイメージ図

はなく凸部の塑性変形を利用して上部構造への拘束を開放することとしている。図-2にDCSBの塑性挙動のイメージ図を示す。大きな地震力を受けた際には、凸部が水平変形するとともに鉛直方向にも変形が生じ、凸部頂部が上沓より低くなることによって上部構造への拘束を開放する。

(2) 本研究の検討すべき点

これまでの検討では、従来の支承の設計方法を参考して、DCSBの取付ボルトとフランジを設計した。図-3(a)に示すように、取付ボルトは、従来のサイドブロックと同様に凸部の両側に配置されていた。一連の実験結果より、凸部は所定の耐荷・塑性変形性能を有することや取付ボルトが破断していないことが確認されたが、取付ボルトの塑性変形および凸部前面のフランジの変形が確認された。写真-2にフランジの変形状況を示す。

DCSBの凸部頂部に水平力が作用する場合は、取付ボルトには水平力に釣り合うせん断力に加え、水平力による曲げモーメントによって前面の取付ボルトに引張力が作用する(図-3(b)を参照)。取付ボルトやフランジの耐力が不十分であると、フランジが浮き上がり、さらに変形することがある。また、フランジの変形に伴って中央付近のボルトの塑性変形が増大し、最終的に破断に至る可能性がある。このようなことがあるため、DCSBが終局状態に達しても取付ボルトが破断しないことを確実に保証するためには、凸部の終局耐力に対して取付ボルトに十分な安全余裕を持たせる必要がある。

また、これまでの検討では、地震力が橋軸直角方向の1方向のみに作用することを想定してFEM解析や実験を実施してきた。しかし、実地震では、地震の揺れ方向が斜め方向となる場合が殆どであるため、斜め方向に地震力が作用する場合に対してもDCSBの性能を検証する必要がある。

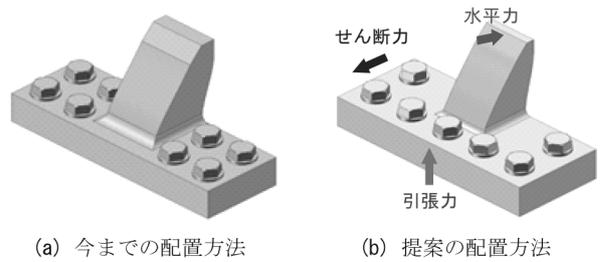


図-3 取付ボルトの配置方法

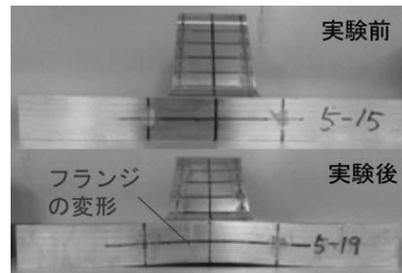
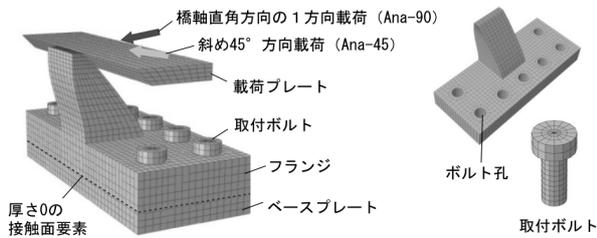


写真-2 フランジの変形状況

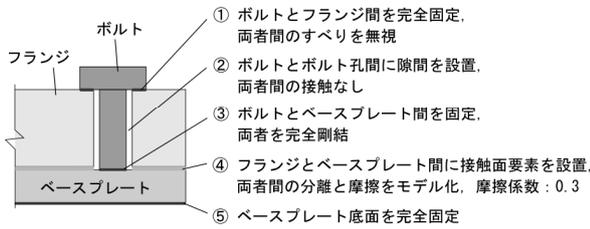
(3) 本研究の検討概要

(2)の検討すべき点を踏まえ、本研究では、取付ボルトの安全余裕度を高めるために、図-3(b)に示す取付ボルトの配置方法を提案した。今までの配置方法と比べ、提案の配置方法では、引張力に対する取付ボルトの抵抗耐力を高めるために、凸部前面の取付ボルトの本数を4本から5本に変更し、ボルト直径も大きくした。後述のFEM解析結果(図-5)に示すように、凸部前面付近のボルトは、両側のボルトより軸力が大きく生じる。取付ボルトをより有効に機能させるために、軸力が大きく生じる凸部前面付近にボルトを多めに配置するようにした。例えば、実験に使用した死荷重反力が500kN程度のゴム支承用サイドブロックの場合は、ボルト径をM20からM24に変更した。なお、フランジが降伏しないように、フランジの厚さも増した。

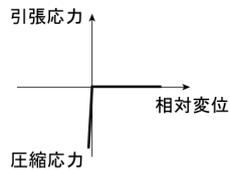
また、実地震により近い作用状況下のDCSBの性能を検証するため、橋軸直角方向の1方向に加振する実験ケースとともに、橋軸直角方向と橋軸方向の2方向に同時に加振する実験ケースも実施した。ここで、実地震の場合は、地震力が橋軸に対して任意の方向に作用する可能性があるが、本研究では、便宜的に橋軸直角方向と橋軸方向の2方向に同じ地震動が作用する場合を想定し、その合力の斜め45°方向に加振することとした。実験では、橋軸直角方向と橋軸方向の2方向に同一波形を適用した。なお、2方向に同一波形を適用することは、波形に位相差がなく、サイドブロックに作用する外力を定量的に評価しやすいメリットもある。



(a) 解析モデルの全体

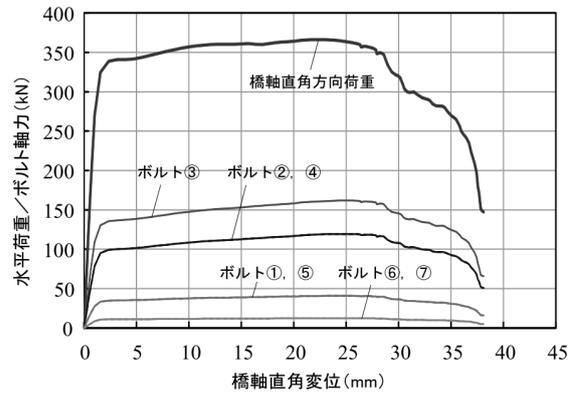


(b) ボルト周辺のモデルの詳細

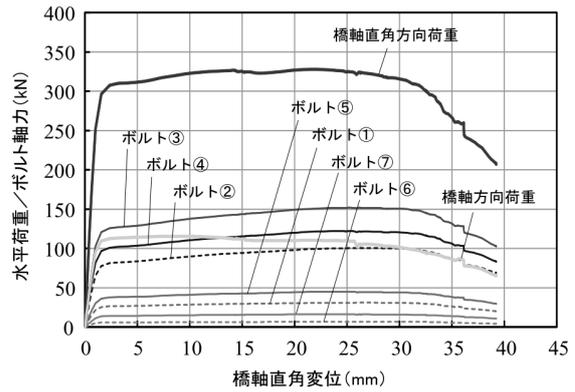


(c) 接触面要素に適用した応力-相対変位関係

図-4 FEM解析モデルの詳細



(a) 解析ケース Ana-90



(b) 解析ケース Ana-45

図-5 FEM解析結果のボルト軸力

3. FEM解析の概要と解析結果

(1) FEM解析の概要

三次元弾塑性FEM解析を用い、提案の取付ボルトの配置方法の妥当性を検討した。解析では、実験供試体と同様に、死荷重反力が500kN程度のゴム支承用サイドブロックを想定した実大寸法供試体を対象とした。取付ボルトには強度区分8.8のM24（保証耐力：212kN）を用いた。

図-4に解析モデルの詳細を示す。解析モデルでは、取付ボルトの軸力を出力するため、ソリッド要素を用いて全てのボルトをモデル化した。また、以下の幾何学不連続性も考慮してフランジの変形を再現できるように設定した。1) ボルトとフランジボルト孔間に隙間を設け、両者が接触しないように設定した。2) 取付ボルトの伸びに応じるフランジの浮きや変形などの挙動を再現するため、フランジとベースプレート間に接触面要素を配置し、両者間の不連続性を考慮した。ここで、接触面要素は、2つの面で構成される厚さ0の特殊要素で、予め設定された両面間の応力-相対変位関係によって両面間の不連続挙動をモデル化するものである。図-4(c)に接触面要素に適用した応力-相対変位関係を示す。このような設定を用いることによって、フランジとベー

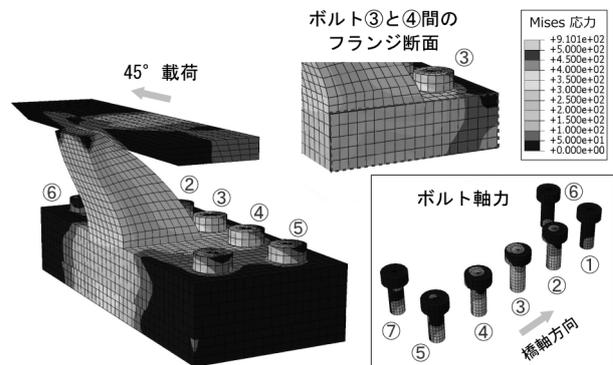


図-6 FEM解析結果の応力コンター図(Ana-45, 変位=20mm)

スプレートの境界面では、圧縮状態となる際に連続体と同様に両者が一体となるが、引張状態となる際に両者が自由に分離することが可能となる。

解析に用いた材料物性については、サイドブロック本体には材料試験から得られた応力-ひずみ曲線を適用した。取付ボルトには、規格値の降伏強度を用いた完全弾塑性モデルを適用した。

(2) FEM解析結果

解析では、橋軸直角方向の1方向荷重（Ana-90）と斜め45° 荷重（Ana-45）の2ケースを実施した。Ana-45の場合では、凸部と载荷プレート間の摩擦に

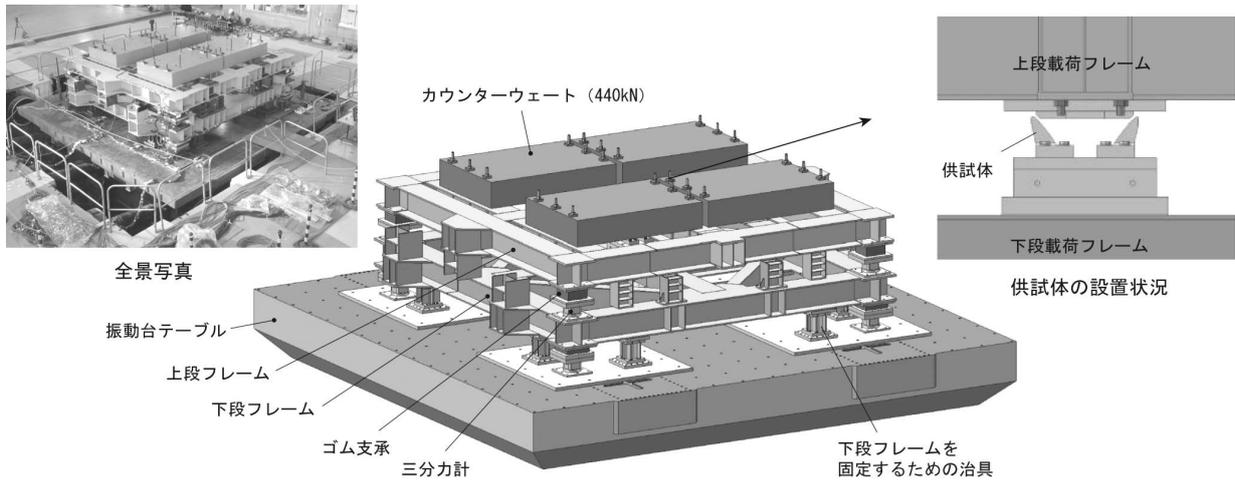
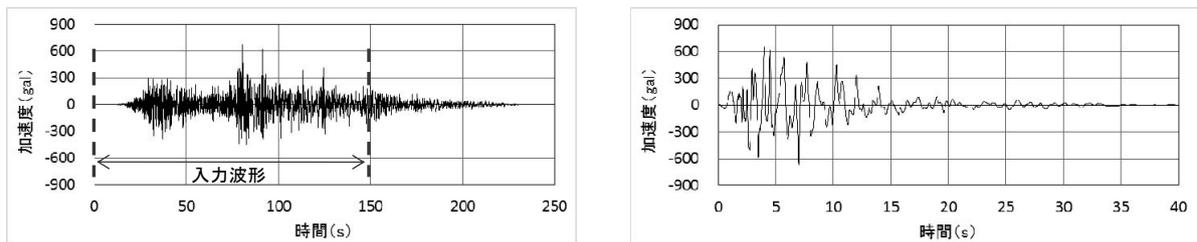


図-7 動的実験の設置状況



(a) タイプ I 地震動 (I-II-2)

(b) タイプ II 地震動 (II-II-2)

図-8 入力地震波形

表-1 動的実験ケースの一覧

No.	ケース名	橋軸直角方向の入力波形 および入力振幅	橋軸方向の入力波形 および入力振幅	備考
1	Dyn1-90	タイプ I (I-II-2), 100%	-	直角方向加振
2	Dyn1-45	タイプ I (I-II-2), 70%	タイプ I (I-II-2), 70%	斜め45°加振
3	Dyn2-90	タイプ II (II-II-2), 70%	-	直角方向加振
4	Dyn2-45	タイプ II (II-II-2), 60%	タイプ II (II-II-2), 60%	斜め45°加振

よって、橋軸直角方向の荷重に伴って橋軸方向にも荷重が生じる。摩擦係数は便宜的に0.3とした³⁾。

図-5に解析結果の載荷荷重および取付ボルトの軸力を示す。ボルトの軸力は、両ケースとも中央にあるボルト③が最も大きく、外側に配置されているものほど徐々に小さくなる分布となっている。両ケースのボルト③の最大値は162kNと152kNで、それぞれ保証耐力の212kNの76%および72%である。

図-6に、一例としてAna-45の最大荷重時（変位=20mm）の供試体の変形状況およびMises応力コンター図を示す。図より、凸部が全体的に緩やかに変形していることが分かる。また、ボルト③と④間のフランジ断面の応力コンター図より、ボルト③付近のフランジの応力が降伏応力の半分以下であり、最大荷重時までフランジに塑性変形が生じていないことが分かる。

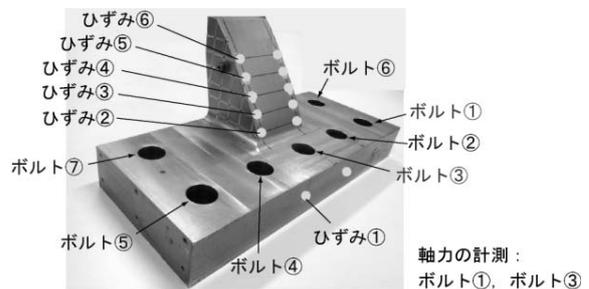


写真-3 供試体の概要および計測箇所

4. 動的実験

(1) 実験の概要

DCSBの性能を確認するため、死荷重反力が500kN程度のゴム支承用サイドブロックを想定した実大寸

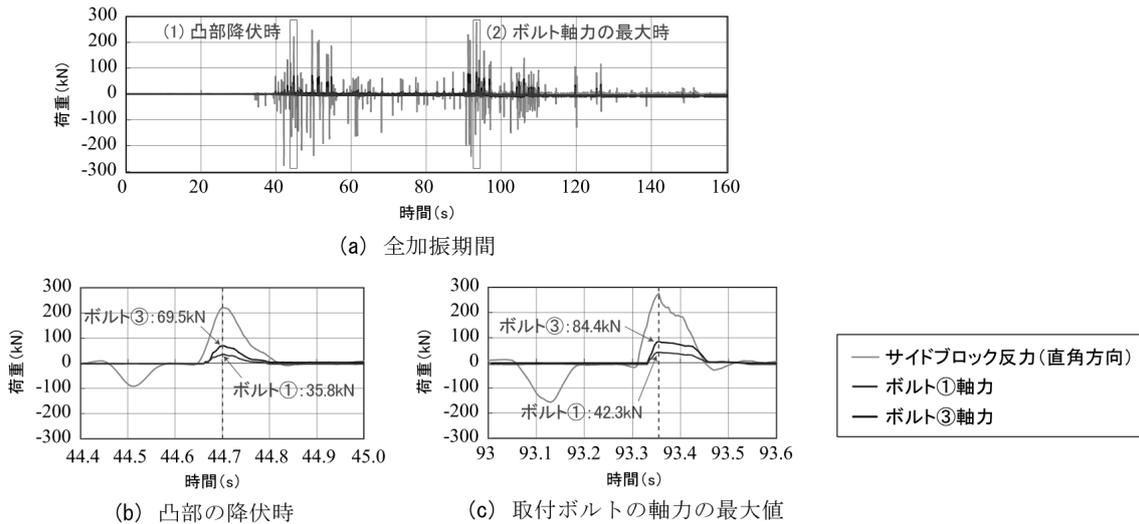


図-9 動的実験結果のサイドブロック反力およびボルト軸力の時刻歴 (Dyn1-90)

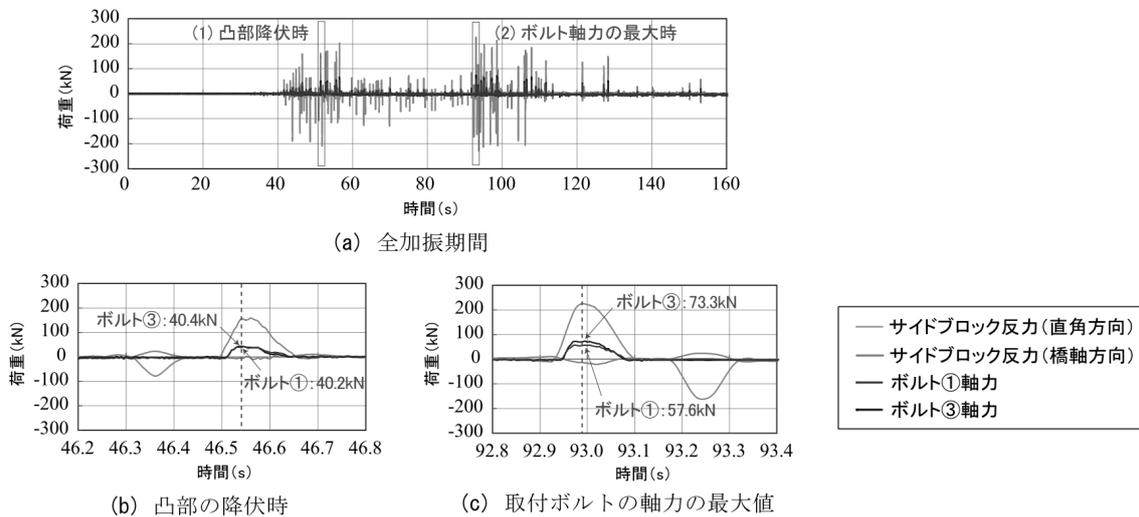


図-10 動的実験結果ののサイドブロック反力およびボルト軸力の時刻歴 (Dyn1-45)

法供試体を用いた静的実験および動的実験を実施した。本文では動的実験のみを報告する。

動的実験では土木研究所が所有する三次元大型振動台を使用した。図-7に振動台実験の設置状況の概要を示す。実験では、振動台テーブルの上に2段の载荷フレームを設置し、2体の供試体を下段フレームの上面中心に設置した。この2段载荷フレームは、他の研究と共用したもので、下段および上段はそれぞれ下部構造および上部構造を模擬するためのものである。本研究では、下部構造の振動特性を考慮しないため、固定治具を用いて下段フレームを振動台テーブルに完全に固定した状態で実験を行った。上段フレームの四隅にはそれぞれゴム支承と支点反力を測るための三分力計を設置した。ここでのゴム支承は、上段フレームの安定性を確保するとともに、加振システムに復元力をもたらすために設置したも

のである。下段フレームを固定した状態の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。

入力波形は、H24道路橋示方書⁴⁾のレベル2地震動のタイプI標準波形(I-II-2, II種地盤)およびタイプII標準波形(II-II-2, II種地盤)の2種類を使用した。表-1に各実験ケースの一覧を示す。各実験ケースの入力振幅は、元の波形の加速度に対するパーセンテージである。いずれも、事前の漸増加振において供試体が終局に至った際の入力パーセンテージである。

写真-3に供試体の状況写真および計測箇所を示す。凸部の塑性挙動を把握するために、高さ方向に5断面においてひずみを計測した。ボルト①とボルト③に対しては、ボルトに埋め込んだひずみゲージを用いて軸力を計測した。

(2) 実験結果

図-9, 図-10に, タイプ I 地震動を用いた実験ケース Dyn1-90 と Dyn1-45 のサイドブロック反力 (サイドブロックに作用した荷重) および取付ボルトの軸力の時刻歴を示す。

ボルトの軸力は, 両実験ケースとも中央のボルト③の方が端のボルト①より大きくなる傾向がある。FEM解析および静的実験においても同様な傾向が確認された。Dyn1-90 と Dyn1-45 のボルト③の最大値はそれぞれ 84.4kN および 73.3kN で, ボルトの保証耐力の 212kN の 1/3 程度である。サイドブロック反力は, Dyn1-90 では最大 276kN で, Dyn1-45 では直角成分が最大 226kN である。なお, 橋軸直角方向のみに載荷した静的実験では, 4つの実験ケースの最大値の平均が 252kN である。

凸部の変形状況については, 静的実験を含む全ての実験ケースにおいて, 全断面がほぼ同時に降伏して凸部の全体が大きく曲がり, 凸部のき裂, 取付ボルトやフランジの明瞭な変形が最後まで生じなかった。写真-4に実験終了後の供試体の変形状況の一例を示す。写真より, 凸部全体が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DCSBの実用化に向けて, 三次元弾塑性FEM解析を用いて取付ボルトの安全率を高めるための配置方法の検討を行った上, 静的・動的実験を用いてDCSBの性能を検証した。検討の結果, DCSBは, 所定の外力に対して取付ボルトに安全余裕度があり, 設計で考慮した要求性能を満足していることが確認された。今後, DCSBの実務設計に向けて設計方法などの検討を進めていく予定である。

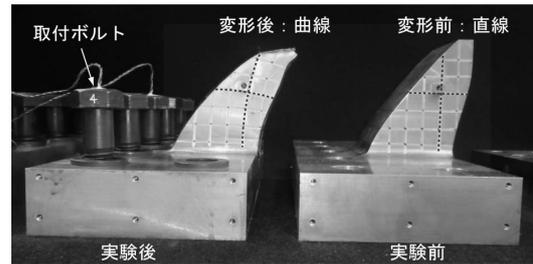


写真-4 実験後の供試体状況

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) 張 広鋒, 蔵治 賢太郎, 右高 裕二, 大住 圭太: 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, 第18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, pp. 1-6, H27. 7.
- 2) 蔵治 賢太郎, 右高 裕二, 張 広鋒, 大住 圭太: 地震時の損傷を制御する支承サイドブロックの FEM 解析による形状検討, 土木学会第70回年次学術講演会, pp. 271-272, H27. 9.
- 3) 土木学会: 高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案), 2006.
- 4) 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, H24. 3.