

# 支承部に地震被害を生じた免震橋の再現解析

藤田 亮一<sup>1</sup>・貞松 昌憲<sup>2</sup>・高橋 良和<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 株式会社エイト日本技術開発 関西支社（〒532-0034 大阪市淀川区野中北1-12-39）

<sup>2</sup>正会員 工修 株式会社エイト日本技術開発 東京支社（〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11）

<sup>3</sup>正会員 工博 京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

## 1. 概要

2011年東北地方太平洋沖地震では、ゴム支承を有するいくつかの橋梁において支承部の被害が確認されている。<sup>1)</sup>本文では、これらの被災した橋梁から選んだ免震橋を対象として動的解析を用いた再現解析を行い、被災要因の分析を試みた。以下、その結果について報告する。

## 2. 対象橋梁の諸元と被害の概要

対象橋梁は、橋長 981.2m、幅員 8.250m（本線）の 18 径間の橋（PC7 径間連続箱桁×2 連（本線部）+PC4 径間連続箱桁（ランプ橋））である。下部構造は、躯体が RC 小判型橋脚、ラーメン式橋台、逆 T 式橋台、基礎は直接基礎（As1 橋台～P4 橋脚）、鋼管矢板基礎（P5～P14 橋脚）、杭基礎（A2 橋台）となっている。支承は鉛プラグ入り積層ゴム支承（SPRS）が用いられている。適用基準は平成 8 年版道路橋示方書<sup>2)</sup>である。対象橋梁の平面図、側面図、一般図を図-1～3 に示す。

地震による免震支承の被害としては、支承側面の亀裂、防錆のための被覆ゴムとサイドブロックの干渉などがあげられる。特にランプ橋As1橋台上には、1支承線上に3基の円形のゴム支承が設置されており、そのうち海側のG1支承に長さ41cmにわたる水平方向の亀裂が生じていた。

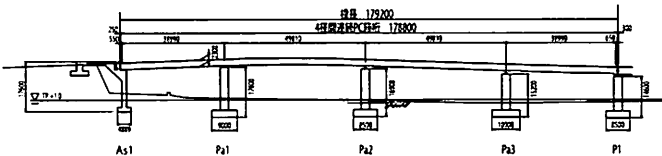


図-2 ランプ部側面図

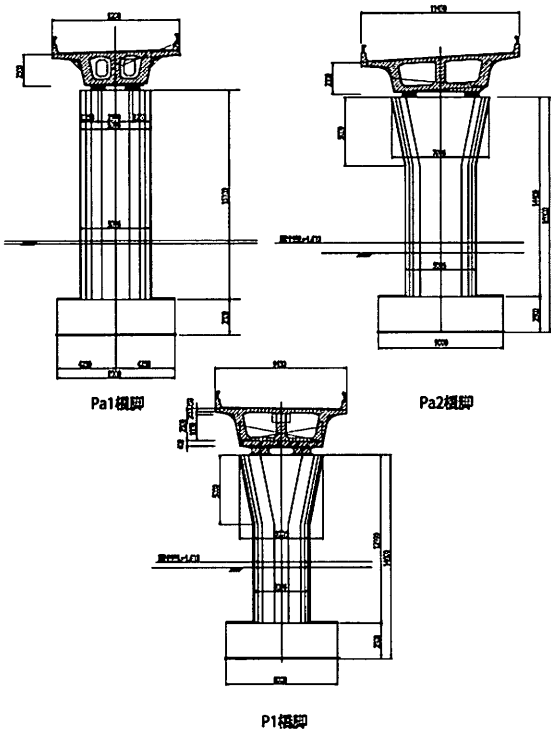


図-3 橋脚一般図

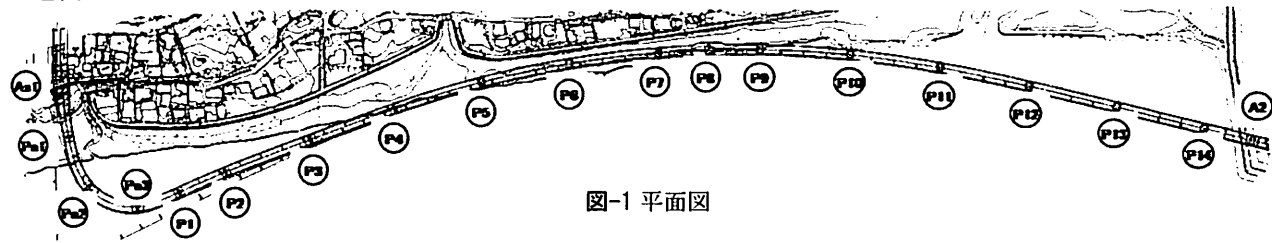


図-1 平面図

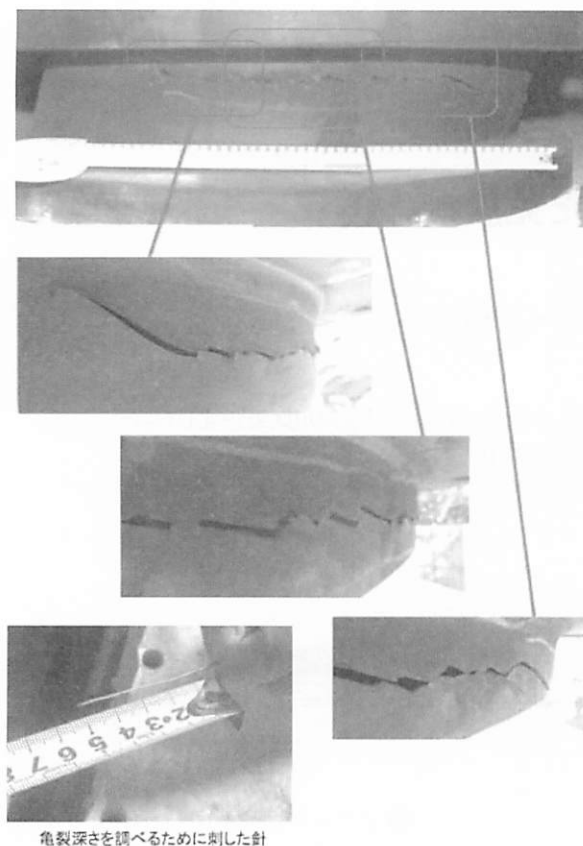
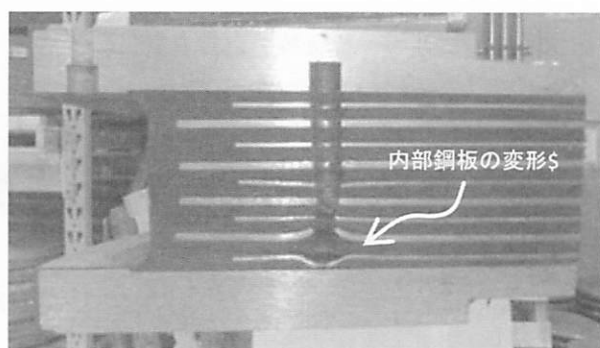
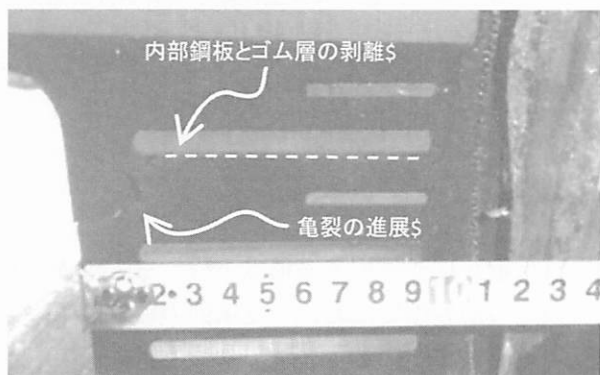


図-4 As1橋台G1支承の亀裂

本橋梁は、橋脚及び桁には損傷を見受けられなかったものの、免震支承部で亀裂を含む損傷が発生した。曲線橋であるランプ橋の橋台部（As1）において、3基の免震支承のうち、海側のG1支承が中間部分で水平方向に41cmの亀裂が生じた。G1支承本体は丸い鉛プラグ入り積層ゴム支承であり、海側の支承側面に、支承本体中央部分で水平方向41cmの亀裂が生じた。その詳細を図-4に示す。亀裂は雁行状であり、針金で亀裂の深さを測ると、5cm程度の深さがあることが確認された。一般にゴム支承の破断実験では、引っ張り応力が卓越する上下縁部に水平で直線状の亀裂が生じることが多い。これに対し本支承は雁行状の亀裂を示していることから、高橋<sup>3)</sup>は雁行状地震断層亀裂との類似性を指摘している。これは地盤深部で直線のせん断変形が生じたとしても、地表部ではその亀裂が雁行状になって現れるというものであり、堀ら<sup>4)</sup>によって実験、解析が行われている。高橋は、支承内部（鋼板とゴムの接着部など）でせん断応力により亀裂が生じたものと推定している。また、免震支承の取替え工事において撤去された支承を観察すると、鉛プラグの一部がアンカーボルト孔に流出しているのが確認された。すなわち、免震支承の鉛体積が減り、空隙が生じることで、期待される減衰性能が発揮できない可能性



(a)位置決め孔周りの内部鋼板の変形



(b)亀裂の進展方向

図-5 As1橋台G1支承の切断面

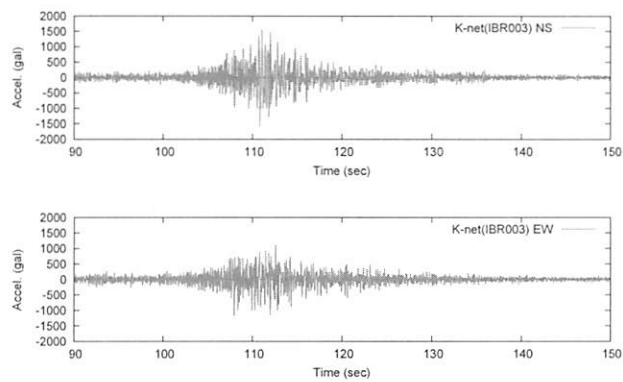
がある。篠原ら<sup>5)</sup>は、亀裂が生じたAs1-G1支承などを撤去・切断して、内部を詳細に観察した。表面の亀裂が屈曲に進展し、内部鋼板とゴムの接着面に辿り着き、内部鋼板とゴムが分離し、亀裂の終点は表面から約9cmまで達していることが明らかとなった（図-5）。また、P1-G2、P8-G1支承も切断し、支承の鉛プラグが分離していること、さらにP1-G2の鉛プラグが酸化され、一部茶色の酸化鉛になっていることが明らかとなった。

この他に特徴的な損傷として、サイドブロックの支承フランジの被覆ゴムへの食い込みがある。本橋はPC箱桁であり、クリープ収縮を調整するため、支承に予備せん断を与えている。その載荷治具がそのままサイドブロックとして利用されているが、これが被覆ゴムに食い込み、変形を拘束している。このサイドブロックとの接触による支承の被覆ゴム損傷はP1橋脚のP2側からA2橋台まで、全体的に発見された。

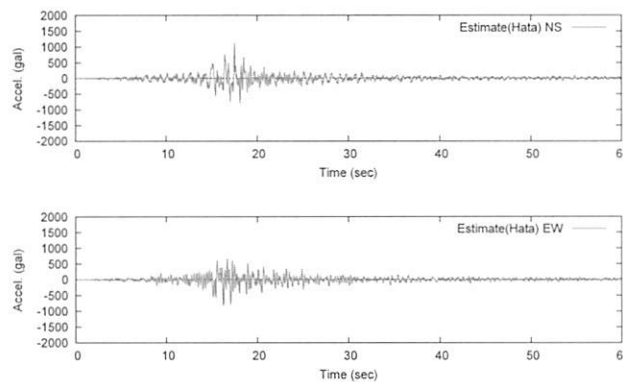
### 3. 周辺の観測記録と推定された地震波

本高架橋の位置周辺の地震波形観測箇所として、K-NET日立（IBR003）、NEXCO日立北IC、MLIT日立観測点が、いずれも本高架橋から5km以内の距離

に位置している。しかし、これらの地震記録の特性は固有周期0.8秒より大きくなると急激に小さなスペクトルを示し(図-6～7)、免震橋梁の被害をうまく表現できない可能性がある。秦ら<sup>6)</sup>の余震観測によると、K-NET日立と本高架橋地点では、H/Vスペクトルの形状やピーク周波数に非常に大きな差異が確認されており、本高架橋サイト周辺においてサイト特性が急変していると考えられることを指摘している。そして、余震観測によるサイト特性を評価し、サイト特性置換手法に基づき地震動を推定している。これにより推定した地震動は、タイプI地震動スペクトルは超過し、タイプII地震動スペクトルに対してはほぼ同等程度または一部の帯域でやや上回る程度の加速度応答となる特性を有している。



a) 観測記録波(K-NET IBR003)



b) 推定波

図-6 周辺の観測記録と推定波の加速度波形

#### 4. 解析モデル

本高架橋で大きな亀裂が発生したランプ橋は曲線橋であり、また本線部では支承のサイドブロックに損傷がみられた。そこでここでは、支承のサイドブロックに損傷がみられた本線部も含めた全体系のモデルによる動的解析を実施した。解析モデルを図-8に、固有振動モードを図-9～10に示す(免震支承部は等価剛性を使用)。橋脚は曲げの非線形性(Takeda モデル)を考慮した梁要素でモデル化し、支承はそれぞれの設置位置に非線形ばね(バイリニアモデル)でモデル化した。

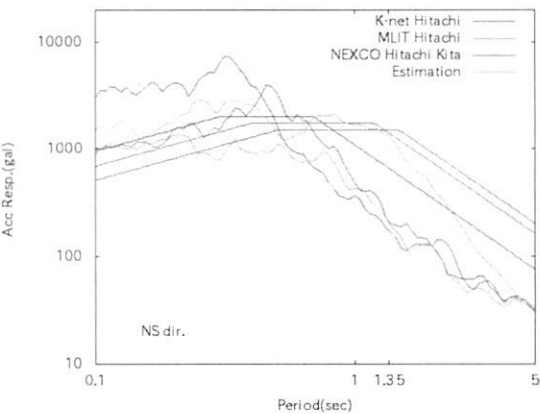
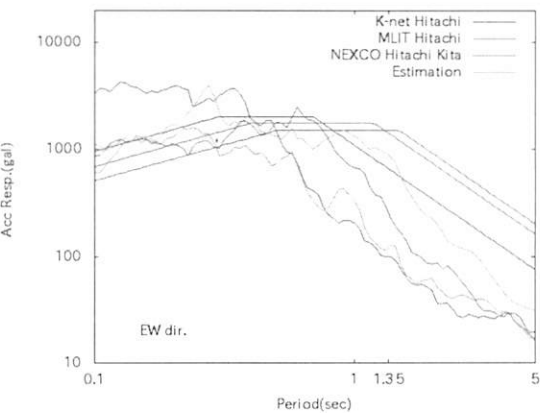


図-7 周辺の観測記録と推定波の加速度応答スペクトル

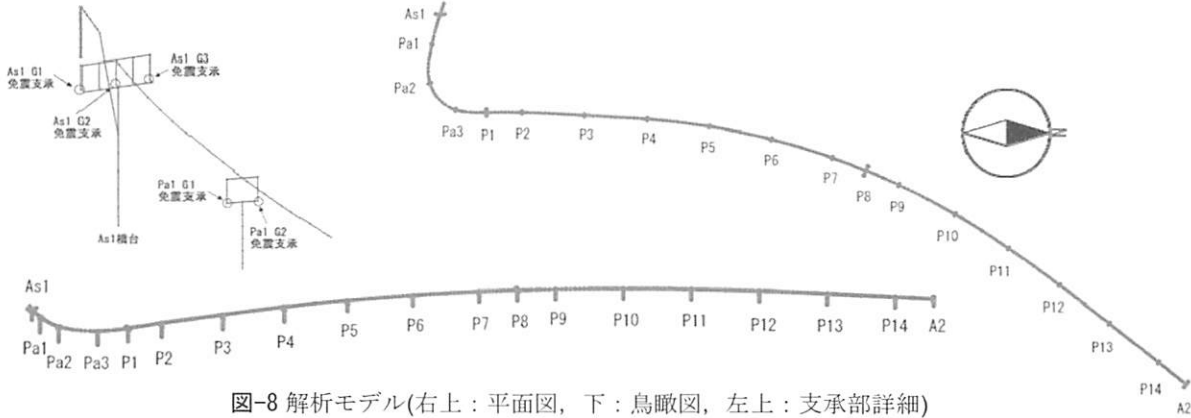
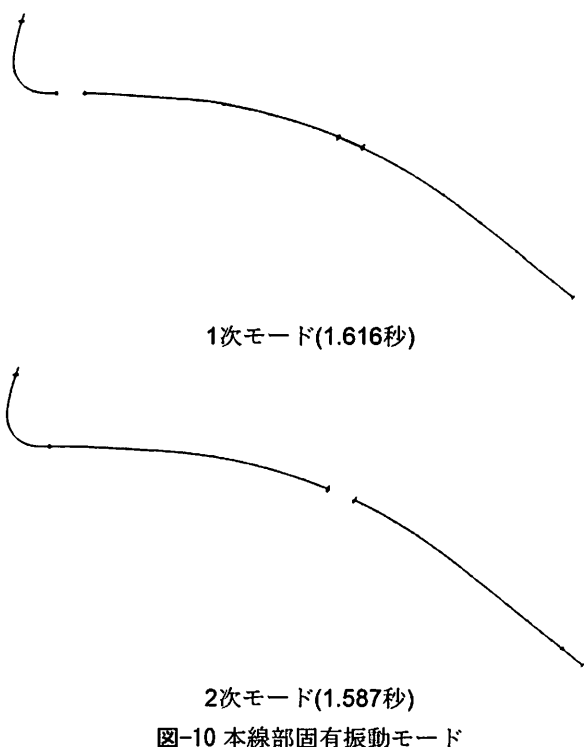
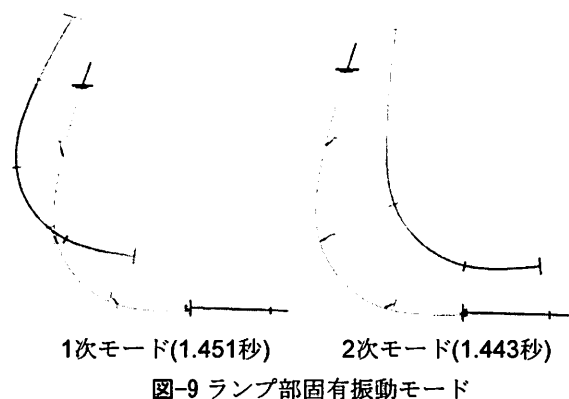


図-8 解析モデル(右上：平面図，下：鳥瞰図，左上：支承部詳細)



## 5. 免震支承の被害に着目した解析

動的解析に用いる入力地震動は、前述の K-NET 日立での観測波(観測波)、余震観測に基づく推定波(推定波)、および道路橋示方書 V 耐震設計編のタイプ II 地震動(道示波、I 種地盤、1 波目)とした。道示波は橋軸方向(南北方向)および直角方向(東西方向)の 1 方向入力とし、観測波と推定波は水平 2 方向の入力とした(鉛直方向には入力していない)。

免震支承の主な損傷は、As1 支承に生じた亀裂である。先に示したように、As1 支承は雁行状の亀裂を生じており、せん断変形により支承が破断したと推測できる。それ以外にも P1 支承(終点側)や P8 支承に軽微な亀裂が認められるが、ここでは大きな損傷である As1 支承に着目して整理する。

まず、各種地震動を入力した動的解析による As1 支承の応答結果を図-11～図-13に示す。支承の変位は

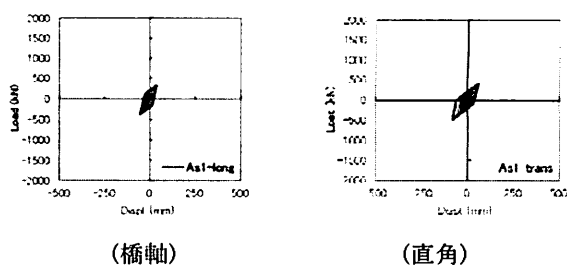


図-11 As1 支承の荷重-変位履歴(観測波)

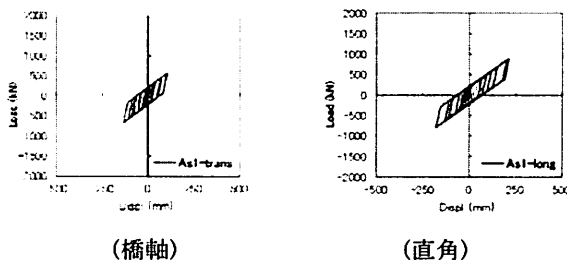


図-12 As1 支承の荷重-変位履歴(道示波)

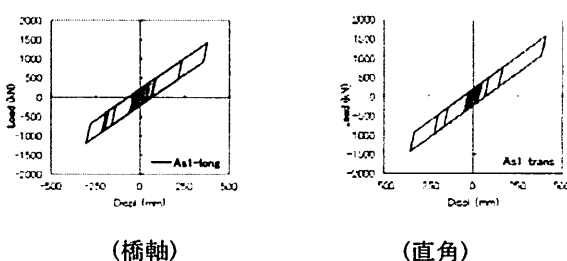


図-13 As1 支承の荷重-変位履歴(推定波)

いずれも道路軸線接線方向を橋軸方向、それに直交する方向を直角方向として示している。観測地震動による免震支承の最大応答変位は100mm以下であり、許容変位の約3割程度にすぎない。篠原らの実験<sup>5)</sup>では、撤去した免震支承の変形はせん断ひずみ200%以上の性能を示しており、観測地震動では支承に亀裂などの変状が生じるとは考えにくい。道示波を入力した場合、支承は許容変位の8割程度の応答を示している。一方、推定波では、許容変位の1.5倍程度の応答を示している。

次に免震支承の許容変位(250%ひずみ時の変位)と最大応答値の比率を整理した結果を図-14に示す。推定波を入力した場合の解析結果に着目してみると、As1 支承の橋軸方向の変位は許容値を 5 割ほど超過しており(せん断ひずみが約 370%)、設計の想定を越えた変位が生じていることが確認できる。ただし、その他の橋脚上の支承についても橋軸方向ないしは直角方向で許容値を超過しており、変位の絶対値としては As1 支承の変位が大きい。許容値に対する超過率はランプ部のいずれの支承でも大きくなっており、この結果だけでは損傷の大きかった As1 および P1 の支承が他に比べて顕著に厳しい状態であっ

たとは言いきれない。

そこで、水平方向だけでなく鉛直方向の挙動(桁のロッキング振動に伴って支承に生じる鉛直引張力)に着目して整理したものが図-15 である。同図に示すとおり、As1 および P1 の支承に引張力が生じており、特に As1 では設計上の許容引張応力である  $2\text{N/mm}^2$  の約 2 倍となっている。連続桁の端部は中間部に比べて死荷重が小さくなりがちであり、その結果支承の面積も小さくなりやすく、また解放端であることから桁のねじりに対する抵抗も小さいため、桁端部の支承に生じる鉛直引張応力が大きくなっていると考えられる。As1 支承に作用する鉛直力の時刻歴波形(図-16)を見ると、G1 と G3 の支承に作用する鉛直力がほぼ逆位相になっており、桁の直角方向への回転(ロッキング)で生じるモーメントが支承に偶力となって作用することで大きな鉛直力を生じていると推測できる。また As1 は一支承線の上に 3 基の支承が設置されており、死荷重反力はやや偏りがあるものの 3 支承で分担しているが、地震時に生じる桁の回転に対しては両端の 2 支承(G1 と G3)で分担することになる。支承の断面積は死荷重反力に対して決まることが多く、一支承線上の支承数が増えるほど個々の支承の断面積は減少する傾向になる。このため、As1 の支承は一支承線あたり 2 支承で構成される他橋脚の支承に比べて断面積が小さく、同じ鉛直力でも引張応力としては大きくなる傾向にあるといえる。時刻歴波形から中央の G2 支承に発生する鉛直力が G1 や G3 に比べて明らかに小さいことがわかる。

支承のせん断変形が大きくなると有効引張面積(移動量を控除した引張力を受け持つゴム面積)が小さくなるため、破断引張応力が低下することが実験<sup>7)</sup>で確認されており、実際には破断応力に近い引張応力が支承に発生した可能性があるといえる。また、引張力作用下において支承のせん断変形性能が低下することも当該橋梁の支承を用いた実験結果<sup>5)</sup>から指摘されており、水平方向および鉛直方向の荷重と変形により支承の損傷が生じたと考えられる。

入力波の違いに着目して結果を比較してみると、支承の変位が許容値を超過したのは推定波だけであり、観測波や道示波ではすべて応答値が許容値未満となっている。この結果から、推定波は実際の被害状況と整合しており、観測波に比べると当該地点に生じたであろう地震動をある程度再現できていると考えられる。ただし、橋脚の履歴応答を見ると、P1 橋脚の橋軸直角方向で軽微な降伏が発生するとともに、P8 橋脚では大きな非線形応答を示している。被

害調査結果では、橋脚には地震による損傷は確認されておらず、解析結果と整合していない。よって、推定波の妥当性について、再評価する必要があると考えられるものの、工学的地震動の評価によって推定波が導き出されたことより、推定波と同様の特性を有する地震動が橋梁地点で起こり得ると考えられ、レベル2地震動相当或いはそれ以上の地震が入力したと考えられる。

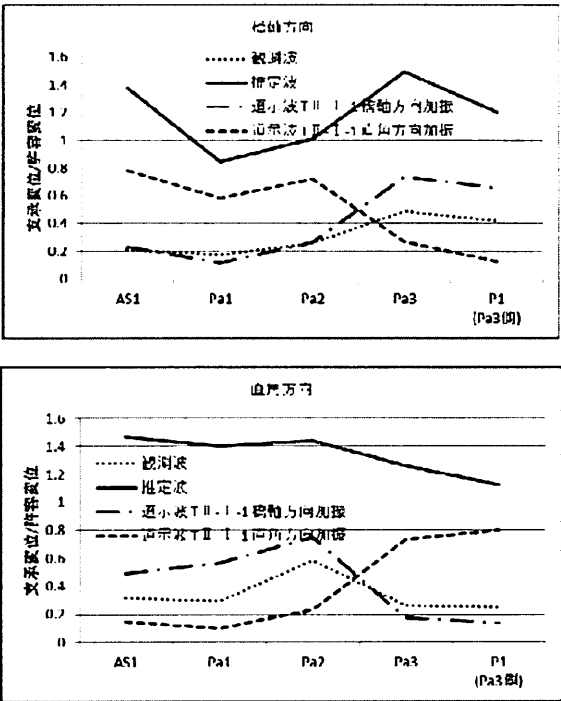


図-14 免震支承の変位と許容変位の比率

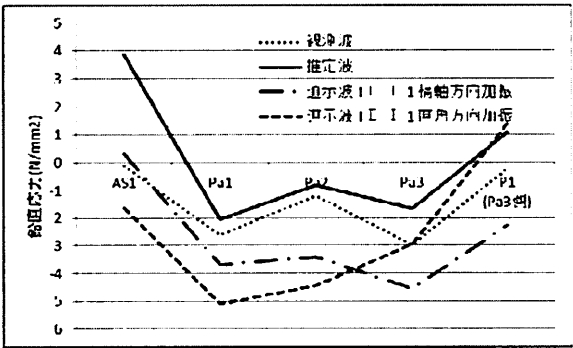


図-15 免震支承に生じた引張応力(引張が正)

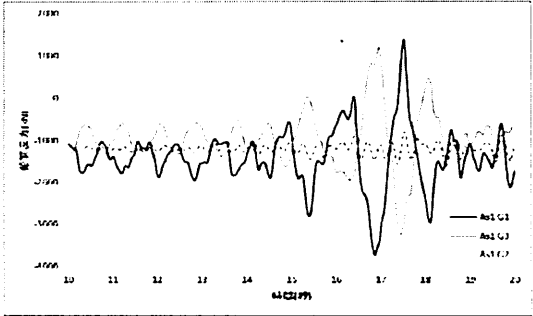


図-16 免震支承に生じた鉛直力の時刻歴(引張が正)

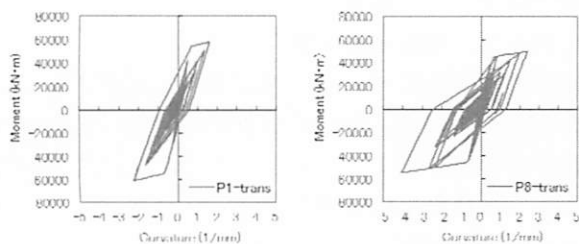


図-17 推定波を入力した場合の橋脚応答  
(P1 直角) (P8 直角)

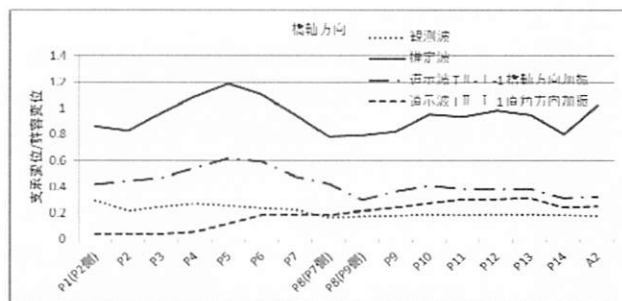


図-18 免震支承の変位と許容変位の比率

## 6. サイドブロックの被害に着目した解析

次に、サイドブロックの被害に着目して結果を整理する。各地震動を入力した解析結果より、本線橋の免震支承の変形率を図-18 に示す。P1～A2 の本線部は直角方向がサイドブロックで固定されている(解析上はサイドブロックが損傷しない前提としている)ことから橋軸方向変位のみを示している。推定波を入力した場合の変位が最も大きくなっており、支承の応答変位は許容変位の 80%～120%程度である。一部許容値を越えているところもあるが、桁の橋軸方向の移動がサイドブロックと支承の接触により抑制された可能性を考えると、免震支承の損傷が限定的かつ軽微であった実態と解析結果はおおむね対応しているといえる。

サイドブロックは本線部の支承に設置されており、4本のボルトで固定されているものと6本のボルトで固定されているものの2種類が存在する。本橋で損傷が認められたP1支承(終点側)、P8支承(終点側)、A2支承はいずれも4本のボルトで固定されたものである。サイドブロックの被害で最も顕著であったのは、P8支承(終点側)のサイドブロックの固定ボルトが破断していたものである(図-19)。

ブロックを固定していたボルトが変形・破断していることから、各支承のボルトに発生するせん断力に着目してせん断耐力との比率を整理した。結果は図-20のとおりであり、推定波を入力した場合をみると、最も損傷の激しかったP8支承(終点側)が特に厳しい結果にはなっておらず、実現象との整合がとれていない。そこで、サイドブロック天端が支承に押される際にボルトに生じる引張力(ボルト配置がサイドブロック中心よりも支承側に偏心しており、サイドブロックが外側に倒れる際にボルトに引張力が生じる)に着目して引張力と引張耐力を整理した。結果は図-21に示すとおりであり、サイドブロックが傾斜していたP1支承(終点側)、サイドブロックが破断していたP8支承終点側の応答値が他支承



図-19 サイドブロックの損傷状況<sup>5)</sup>

に比べて大きくなっており、実際の損傷状態と傾向が整合していることがわかる。したがって、アンカーボルトに作用するせん断力よりも引張力が支配的となって損傷が生じたと考えられる。なお、A2支承の応答が極端に大きい但实际上にはサイドブロックの損傷が軽微(ゴム支承に食い込んでいるのみ)である点については、サイドブロックがゴムに食い込むことによって結果として安定性が保たれたため解析と実現象が整合していないのではないかと推測している。

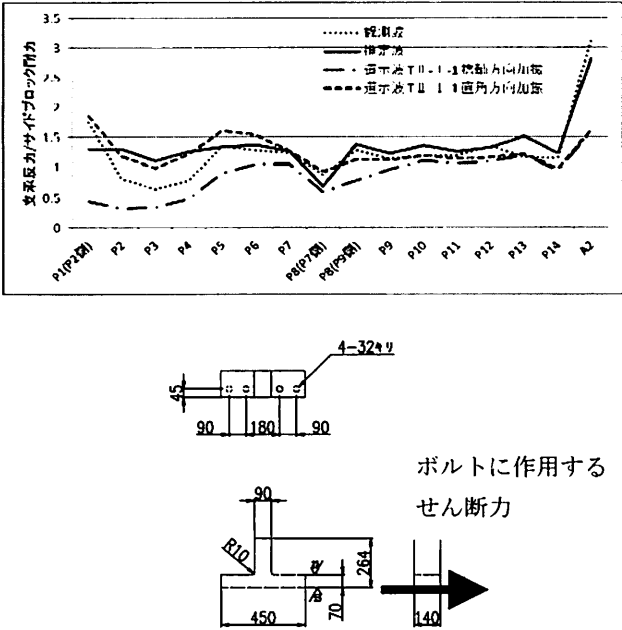


図-20 ボルトに発生するせん断力とせん断耐力の比率

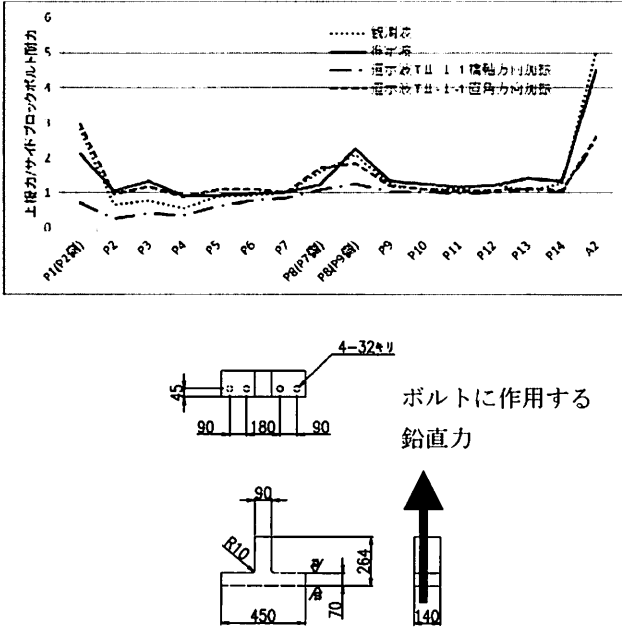


図-21 ボルトに発生する引張力と引張耐力の比率

# 7. まとめ

本項では、支承に被害を生じた免震橋を対象に余震観測記録に基づいて推定した地震動を用いて動的解析により被害の再現を試みた。得られた知見を以下に整理する。

- ① 架橋地点近傍の観測記録を用いた場合の橋梁の応答値は小さかったが、推定波を用いた計算では許容値を超過する応答となった。被害との対応は推定波を用いた結果の方が整合しており、地震時には周辺の観測点よりも大きな地震動が生じていた可能性が高いと考えられた。
- ② ランプ部の全ての支承には許容値を越えるせん断変形が生じていた可能性があるが、それに加えて端部では鉛直方向の引張力が生じており、せん断と引張の影響で特に As1 の支承が損傷したと推測できた。この鉛直方向の引張力は桁の直角方向への回転によるものと考えられ、特に一支承線上の支承数が多い場合は端部の支承の負担が大きくなる傾向にあることから、G1 支承に損傷が集中したと推測された。
- ③ 本線部のサイドブロックを固定するアンカーボルトには許容値を越えるせん断力が作用していた可能性があるが、特に P1(終点側)と P8 で損傷が大きかったのは、サイドブロックの転倒によりアンカーボルトに生じる引張力の影響であると推測できた。

今回の試算により被害(および無被害)の全てを説明できたとは言いきれないが、いくつかの可能性を提示することはできたと考えている。免震支承が耐震性向上に有効なデバイスであることは、当該橋梁に大きな地震力が作用した可能性があるにも関わらず被害が限定的であったことから明かであるが、その一方で元々挙動が複雑なデバイスであることに加え製作や施工の際に生じるばらつきや経年変化等が挙動に影響する可能性があり、それらを勘案した上で安全かつ合理的な設計を行っていくことは難しいテーマであるといえる。多くの研究や被害事例を踏まえて現行の設計法が構築されているが、近い将来に想定されている大地震に向けてさらに改良を加えていく必要があると思われる。

謝辞：本文の作成にあたっては(独)防災科学研究所のK-NET、国土交通省、NEXCO東日本の観測記録を使用させていただきました。また、(公社)土木学会地

震工学委員会の「東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会(委員長：幸左九州工業大学教授)」の委員の皆様からは有益な御意見を多数いただきました。ここに記して深く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Takahashi, Y.: Damage of Rubber Bearings and Dampers of Bridges in 2011 Great East Japan Earthquake, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, 2012.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編，平成 8 年 12 月
- 3) 高橋：地震被害からの教訓と免震・制震構造に関する研究動向，橋梁の免震設計に関する講習会，[http://www.pwrc.or.jp/koen\\_siryoku011206.htm](http://www.pwrc.or.jp/koen_siryoku011206.htm), 2011.
- 4) 堀，中川：非線形スペクトル確率有限要素法の提案と断層問題への適用に関する基礎的研究，土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, pp.643-652, 2010.
- 5) 篠原，星隈：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，土木学会第 34 回地震工学研究発表会講演論文集，2014.
- 6) 秦，高橋，後藤，野津：余震観測記録に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震におけるゴム系支承の被災橋梁での地震動の評価，日本地震工学会論文集，Vol.13, No.3, pp.30-56, 2013.
- 7) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧，平成 16 年 4 月