

特集

阪神・淡路大震災により普及が進んだ橋梁免震と不都合な真実を克服するための取り組み

高橋良和¹

Promotion of Bridge Seismic Isolation by the Great Hanshin-Awaji Earthquake and Overcoming Inconvenient Truths

Yoshikazu TAKAHASHI¹

Abstract

Since the Great Hanshin-Awaji Earthquake, seismic isolation bearings for bridges have become widely used, and there is no doubt that they have higher seismic performance than conventional steel bearings. On the other hand, the fact that some seismic isolation bearings ruptured or failed in recent earthquakes should be recognized as an inconvenient truth.

After the Great Hanshin-Awaji Earthquake, we regret our lack of understanding of the seismic behavior of full-scale structures well, and the world's largest three-dimensional shake table, E-Defense, was installed. Recently, we recognized our lack of understanding of full-scale seismic isolation bearings well, E-Isolation was developed as a large dynamic loading machine with a high-precision load measurement mechanism. The accumulation of high-quality data on full-scale seismic isolation bearings using E-Isolation has begun to restore their reliability.

キーワード：阪神・淡路大震災，橋梁免震，耐震設計，地震被害，E-アイソレーション

Key words: Great Hanshin-Awaji Earthquake, bridge seismic isolation, seismic design, earthquake damage, E-Isolation

1. はじめに

日本は世界でも有数の地震国であり，地震国に暮らす我が国の技術者は，この地震国固有の「風土」の文脈の中に，どのような形で社会基盤構造を構築すべきかについて真剣に考えてきた。このような議論の中で常に参照されるのが，過去の地

震被害である。特に大震災と呼ばれる大災害に対しては，単に従来の耐震対策の延長ではなく，パラダイムシフト的变化が生まれている。ただ，その変化は突然変異的に生まれたものではなく，将来を見越した着実で入念な準備に基づいたものであり，それが一気に広がる契機が被害地震であっ

¹ 京都大学工学研究科社会基盤工学専攻
Department of Civil and Earth Resources Engineering,
Kyoto University

た。近年にも多くの被害地震が発生しているが、耐震対策に与えたインパクトとしては、阪神・淡路大震災を上回るものがない印象を持つ。阪神・淡路大震災が土木構造物のための耐震設計法に与えた影響は、本誌の「阪神淡路大震災から15年を経て」の企画特集で報告されている¹⁾が、本稿では、阪神・淡路大震災が橋梁分野にもたらした耐震対策のパラダイムシフト、免震技術に着目し、阪神・淡路大震災前夜の状況とその後の変化を振り返るとともに、現在直面している新たな課題とその克服について考える機会としたい。

2. 阪神・淡路大震災前夜における耐震研究

筆者は1993(平成5)年、京都大学土木工学教室の耐震工学研究室に配属された。当時の京都大学土木には耐震を専門とする研究室が複数あり、鉄道工学を祖とする路線施設学研究室、橋梁工学・土木設計学を祖とする耐震工学研究室、地盤・構造物基礎に取り組む耐震基礎研究室、そして都市安全の観点から取り組む都市耐震研究センターが、それぞれの強みを活かしながら耐震工学の全分野をカバーしていた。耐震工学研究室では、山田善一先生が1976年のIABSE東京大会でニュージーランドの研究者と交流することで免震技術の有用性に気づき、以降深く関係され²⁾、家村浩和先生が制震技術も含め、地震入力エネルギー分担の観点³⁾から取り組み、以降、様々な振動制御⁴⁾に関する解析や実験が実施されていた。筆者が配属された1993年当時では、建設中の明石海峡大橋架橋地点に設置した地震計のアレー観測記録に基づく長周期地震動の研究や、長大橋の地震応答解析、鋼・コンクリート構造物の弾塑性挙動に基づく耐震検討、そして構造物の振動制御が取り組まれていた。当時学生であった筆者が感じた耐震工学の雰囲気は、より強く、より靱性のある構造物を実現しようとする耐震研究は既にかなり進展している感があり、従来の耐震工学とは異なる分野を新規開拓する機運が高かったように思う。その一つが構造動力学の知識を活かす構造制御技術であった。

3. 阪神・淡路大震災直後の対応～道路橋に対する復旧仕様～

兵庫県南部地震においては、道路橋に大きな被害が生じたことから、建設省(現在の国土交通省)では地震直後に被災原因の究明と今後の耐震設計のあり方等の検討を目的に、耐震工学、橋梁工学等の専門家からなる兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会が設置され、発災後わずか約1ヶ月で「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」(復旧仕様)⁵⁾が1995年2月27日に関係機関に通知され、5月25日には、橋、高架の道路等の技術基準(道路橋示方書)の改定が行われるまでの当面の措置として、全国で今後実施される新設橋梁の設計および既設橋梁の補強についても復旧仕様を参考とする旨が通知された。

道路橋の復旧にあたっては、各構造部材の強度を向上させると同時に、変形性能を高めて橋全体系として地震に耐える構造を目指すこととなり、主な耐震設計の基本方針として、下記が留意事項として挙げられた。

- (1) 橋全体系のねばり(変形性能)を向上させ、十分な靱性を確保すること。
- (2) 動的解析により照査すること。
- (3) ゴム支承、特にエネルギー吸収性能のある免震支承の採用が望ましいこと。
- (4) 落橋防止装置によりけたの落下を防止できる構造とすること。

ここで、ねばりのある構造とするために、従来の道路橋示方書において、鉄筋コンクリート橋脚に対しては地震時保有水平耐力を基本とする照査法に改められていたが、これを鋼橋脚や基礎等にも適用することとなり、1990(平成2)年の改定以降の研究による知見として、動的解析による照査、ならびにゴム支承・免震支承の採用が導入された。

4. 免震技術・免震設計

地盤と構造物の間に滑り面を設けることで、地震時に水平せん断力が上部構造に伝達されず、被害の低減が可能であろうとの発想は、かなり古くから存在した。1923(大正12)年に発生した関東

大震災後、建築物の固有周期を伸ばして地震との共振を避けるのがよいとする柔構造が真島健三郎により提唱されている。ただ、当時は低層の建物を設計することが前提であったこと、また地震動の周期特性などが不明であったこともあり、柔構造の実現性は高くなく、剛構造へと収束していった。

1970年代後半より、構造物への地震力、地震エネルギーを低減するため、免震支承やダンパーなどの免震・制振に関する技術開発が進展した。近代的な意味での免震技術は「構造物の固有周期を地震動の特性より長くするとともに、地震の入力エネルギーを免震部材で吸収することより、使用上問題とならないレベルまで変位を低減する技術」である。この技術の実用化が進んだのは、ニュージーランドにおける免震装置、特に鉛プラグ入り積層ゴム支承の開発の貢献が大きい⁶⁾。日本ではまず、建築や機械分野⁷⁾での適用が始まり、1983(昭和58)年に日本最初の免震建物(八千代台住宅)が竣工した。

土木工学においては、橋梁を対象とした検討⁸⁾が進められ、1986(昭和61)年に(財)国土開発技術研究センターが「免震装置を有する道路橋の耐震設計研究委員会」を設置して調査を始め、1989(平成元年)に「道路橋の免震設計法ガイドライン(案)」⁹⁾が取りまとめられた。このガイドライン(案)を参照し、1991(平成3)年にわが国最初の免震橋梁(宮川橋)が竣工した。また建設省土木研究所と民間28社との共同研究が進められ、その成果が1992(平成4)年に「道路橋の免震設計法マニュアル(案)」¹⁰⁾として取りまとめられた。

このような共同研究等を通じ、免震設計を道路橋に適用する際には、建築物等と比較して決定的に違う点があることが明らかとなってきた。これは、免震設計を橋に適用する際には、長周期化よりも減衰性能の向上が重要であり、また、免震支承の剛性を調整することにより複数の下部構造になるべく均等に地震力を分散させることが重要であるという点である。長周期化すると桁に生じる慣性力は低減するが、桁の変位は増大し、桁と桁・橋台間の遊間を大きくする必要があるが、伸

縮継手が大きくなると車両の走行による大きな騒音や振動が生じるだけでなく、維持管理上の問題も大きいため、橋では桁端処理の問題から、長周期化することは好ましくないと考えられた。これは Base Isolation という言葉で表される概念の免震とは明らかに異なるものであり、Menshin Design とも呼ばれるわが国に適用される橋の免震設計の特徴である。

このような調査研究と並行し、先の宮川橋(鉛プラグ入り積層ゴム支承、支承サイズ一例:平面寸法角型(以下□と示す)450×550 mm, ゴム層厚11 mm×10=110 mm)を含め、山あげ橋(高減衰ゴム支承、支承サイズ一例:□1,520×970 mm, ゴム層厚18.7 mm×8=149.6 mm)など5つの免震橋梁が試験施工された。これに加え、免震支承を反力分散沓の役割を果たす支承として採用し、設計計算には見込まれていないものの、減衰性能の付加が地震応答を低減することが期待された多径間連続橋の採用が、新設や耐震補強の一環で進められた。このように、免震技術に関する様々な検討が進められていたことが、阪神・淡路大震災後の道路橋の設計基準への採用に結びついたのである。

5. 阪神・淡路大震災における免震橋梁の応答記録

阪神・淡路大震災発災時は、免震技術の社会への実装が進められてきた時期であり、建築物では80棟の免震建物が建設・計画されていた。兵庫県南部地震により、強震域にある数棟の免震建物において免震効果が確認された。神戸市北区にある松村組技術研究所の研究棟は高減衰積層ゴム支承(平面寸法円型(以下φと示す)600 mm, ゴム総厚6.5 mm×21=136.5 mm, φ700 mm, ゴム総厚7.5 mm×18=135 mm)8基により免震化されており、兵庫県南部地震による入力地震動が最大274.4 gal (cm/s²)であったのに対し、隣接する非免震建物では約3.5倍に増幅されたのに対し、免震建物では約1.5分の1に低減されていたことが報告されている¹¹⁾。観測地震動の解析¹²⁾から、免震層は東西方向に約13 cm程度の変位応答を示したことから、せん断ひずみ約100%相当の免震効

果が確認されたことになる。一方、免震橋梁は、1995年8月時点で、設計中のもも含めると40橋あった。また、免震支承を用いて反力分散を図った橋梁も含めると80橋以上にのぼっており、建築物と同等の件数を有していた。大阪府泉大津市の阪神高速松の浜高架橋は免震支承を用いて反力分散化された橋梁であり、鉛プラグ入り積層ゴム支承（ $\square 850 \times 1,050 \text{ mm}$ 、ゴム総厚 $21 \text{ mm} \times 6 = 126 \text{ mm}$ ）4基により上部構造が支持されており、減衰を有しない通常のゴム支承を用いた区間も存在し、兵庫県南部地震による観測記録が報告されている¹³⁾。通常のゴム支承を有する橋脚では、橋軸方向に地下1mで169 galの入力地震が観測され、フーチング部で137 galに低減、橋脚天端で224 galと約1.3倍増幅し、橋桁では236 galと、橋脚天端よりわずかに増幅していた。一方、免震支承を有する橋脚では、橋軸方向に地下1mで145 galの入力地震が観測され、フーチング部で104 galに低減、橋脚天端で201 galと約1.4倍増幅したが、橋桁では189 galとなり（図1）¹⁴⁾、橋脚天端よりも小さくなり、免震支承がゴム支承より

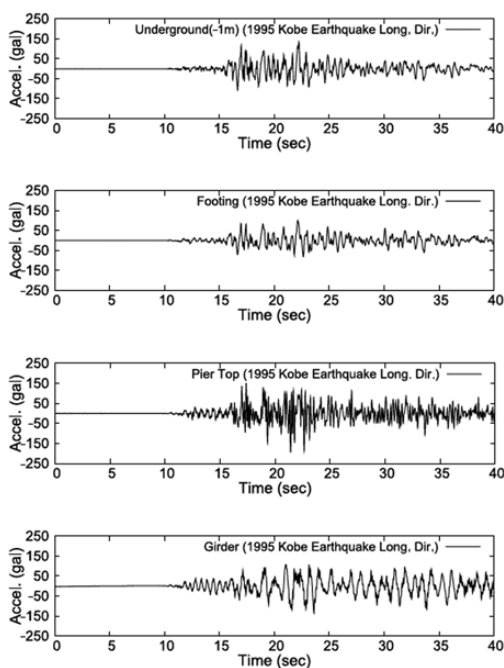


図1 兵庫県南部地震による免震橋梁応答¹⁴⁾

も有効に機能していることが確認された。ただし、地震動の解析による免震支承の変位は約2.2 cmであり、せん断ひずみ17%程度と小さい。ただし、同報告書¹³⁾で報告された北海道東方沖地震時の山あげ橋、三陸はるか沖地震時の丸木橋大橋は、免震支承の推定応答変位は設計降伏変位よりはるかに小さいものであり、貴重な観測記録が得られたことには間違いはない。

6. 阪神・淡路大震災以降の免震橋梁の標準化

阪神・淡路大震災以降は、被災橋の復旧を含め、新設の多径間連続橋においては免震構造の採用が一般的となった。既設橋でも、走行性の向上と交通振動の低減、維持管理性の向上を目的として既設の単純桁の連続化を図り、免震支承を採用した耐震補強も一般的となっている。

免震橋はすでに一般化していることもあり、免震橋としての正確な統計データはないが、国土交通省地方整備局の協力のもと実施された国道における免震橋の調査データによれば、免震橋は国道では2009（平成21）年末時点で207橋であり、高速道路や地方道等を含めると、すでに500橋を越えていると推察されている¹⁵⁾。特に、高い耐震性能が求められる橋梁で免震技術が採用されることが多い。

免震支承は大きな上部構造重量を支持するため、寸法は大きくなる傾向にあり、国内最大級の免震支承を用いた橋梁として、神戸スカイブリッジ（高減衰ゴム支承、支承サイズ一例： $\square 1,770 \times 1,770 \text{ mm}$ 、ゴム層厚 $50 \text{ mm} \times 8 = 400 \text{ mm}$ ）、光橋（鉛プラグ入り積層ゴム支承、支承サイズ一例： $\square 2,120 \times 1,720 \text{ mm}$ 、ゴム層厚 $35 \text{ mm} \times 4 = 140 \text{ mm}$ ）、天満橋（反力分散積層ゴム支承、支承サイズ一例： $\square 2,200 \times 1,900 \text{ mm}$ ）などがある¹⁵⁾。製造装置の制約により最大支承サイズが決まることが多く、それ以上大きな支承サイズが必要となる場合には、複数個並列設置される。写真1は東京ゲートブリッジの事例であり、 $\square 1,400 \times 1,400 \text{ mm}$ の積層ゴム支承を2×2個配置し、 $\square 3,300 \times 3,300 \text{ mm}$ の一つのフランジプレートに取り付けられ、一基

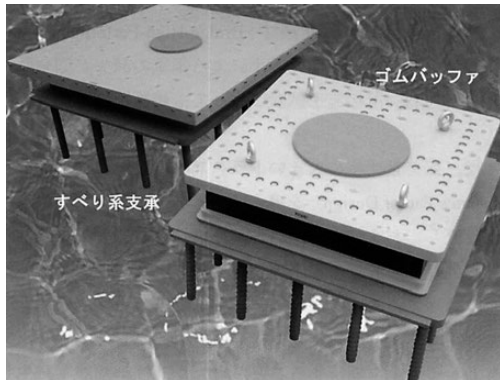


写真1 東京ゲートブリッジのゴム支承¹⁵⁾

のゴムバッファとして設置されている。

7. 不都合な真実～免震支承の地震被害～

7.1 1995年兵庫県南部地震

兵庫県南部地震では、鋼製支承全体の21%が甚

大な被害 (Aランク) の判定されたのに対し、Aランクの被災を受けたゴム支承はないと報告されているが、反力分散支承に用いられたゴム支承で、亀裂が入った事例が1例のみあったこと¹⁶⁾は、あまり注目されなかった。破断したゴム支承 (リング沓) は、現在一般的な積層ゴム支承ではないものの、最大変形時150%のせん断ひずみを期待するゴム支承の被害であり、重要な事例であると考えため紹介しておく。

損傷が発生したゴム支承は阪神高速西宮浜の鈮桁に設置されており、同一橋脚上の10基の支承のうち、1基ではほぼ全周に渡り亀裂が確認された (写真2)。損傷要因は推定できなかったが、補修した支承の分散機能の低下を考慮した検討後、損傷したゴム支承は補修された。

7.2 2011年東北地方太平洋沖地震

2011 (平成23) 年、東北地方太平洋沖地震が発



写真2 西宮浜工区におけるゴム支承の損傷



写真3 東部高架橋における積層ゴム支承の破断

生し、甚大な津波被害が発生したが、地震被害の中でも注目されたのが、免震支承の破断を含む地震被害である。仙台東部道路東部高架橋(写真3)と仙台北部道路利府高架橋、東水戸自動車道新那珂川大橋において、反力分散型積層ゴム支承が破断し、国道6号日立バイパス旭高架橋では、鉛プラグ入り積層ゴム支承に大きな亀裂が発生した。

従来の載荷実験では、ゴム層における破断で終局となることが多いものの、写真4に積層ゴムの破断面を示すように、鋼板とゴム間の接着部で切れたように見える。これらの支承は、平成8年道路橋示方書に基づき設計され、平成3年道路橋支

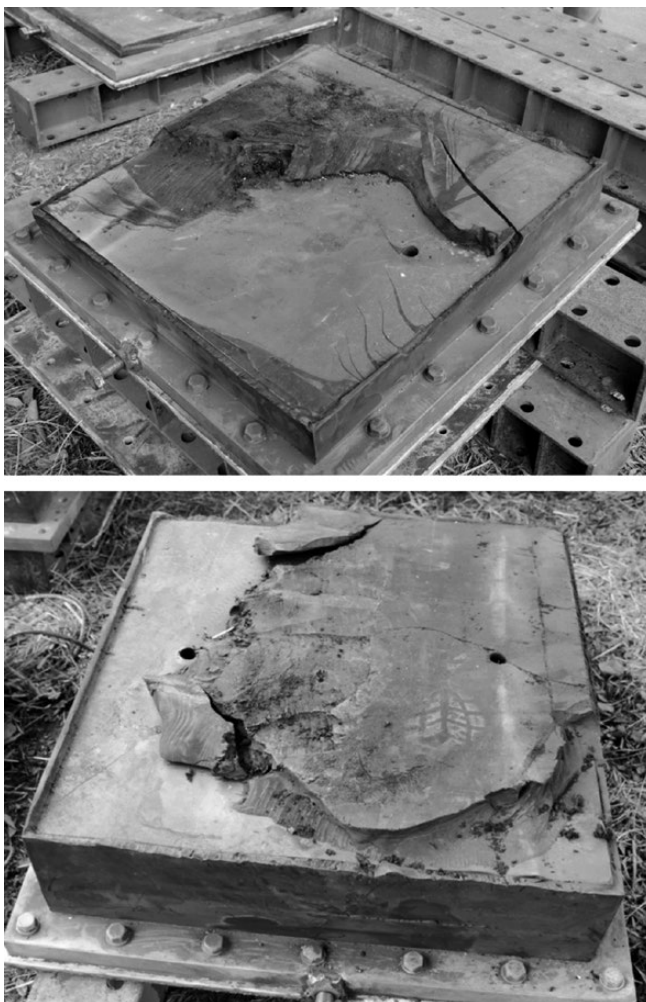


写真4 積層ゴムの破断面

承便覧に準拠して品質管理されており、いずれの基準・規格値を満足していることが確認されている。製作不良なども考えられたが、損傷した積層ゴム支承から採取した試験片を用いた材料試験や取り出した支承を用いた載荷実験により、経年劣化等の要因により、せん断変形性能が低下していた可能性があること、破断した積層ゴム支承のうち、二次形状係数（ゴム総厚に対する平面有効寸法の比）が4より小さい支承はせん断性能が低かった可能性があることが指摘されている¹⁷⁾。また、東部高架橋の解析的検討の結果、通常的设计ではモデル化しない落橋防止構造の側面の衝突による桁の回転やジョイントプロテクターの各個撃破による部分的な桁移動の拘束が原因となり、支承高の低い側や移動量大きいゴム支承が破断した、などの被災メカニズムが推定されている¹⁸⁾。

もちろん、強震域に存在する免震橋梁（反力分散橋梁含む）に採用されている支承は、上下部構造間の相対変位を吸収し、被害を受けなかったものがほとんどである。地震直後の被害報告¹⁹⁾では、筆者はゴム支承の破断に気づいていなかったが、阪神・淡路大震災後の耐震基準において推奨されてきた耐震対策の不具合は、耐震工学の意義が問われていると感じ、様々な機会で発表してきた^{例えば20-22)}。破断した積層ゴム支承は、おそらく全体の1%以下であり、当時、免震支承の不具合を声高に発表する筆者に対し、免震化の推進を逆行させるものだと指摘されたこともあった。しかし、橋梁の免震設計を推進してこられた川島一彦先生は、針小棒大と感じられていたかもしれないが、免震技術の講習会²⁰⁾等で私にも発表の機会を与えていただいたこと大変感謝している。

7.3 2016年熊本地震

2016（平成28）年熊本地震では、懸念していたゴム支承の被害が再び発生した²³⁾。熊本県道28号の大切畑大橋では、P2橋脚を除く全ての橋脚・橋台上でゴム支承が破断（写真5）し、俵山大橋でもゴム支承が桁から逸脱、落下するなどの被害が発生した。また、免震ではないが、国道325号の南阿蘇橋では、耐震補強として設置されていた

制震ダンパーの取付部が破壊する（写真6）など、耐震対策がうまく機能しなかった事例が確認された。

これら橋梁の被災メカニズムについては、地震動だけではなく、山岳部斜面崩壊や断層などによる地盤変位による影響が指摘されており^{例えば24)}、必ずしも設計で想定された状況と同一ではないことに注意は必要であるが、地震後、速やかに機能を回復できなかった橋梁が10数橋あり、兵庫県南部地震以降の基準で設計されていた橋梁でゴム支承が破断したり、制震ダンパーの取付部が破壊するような、耐震設計の意図と異なる壊れ方をした橋の被害があった事実は重大である。

熊本地震後、筆者を主査として道路橋支承便覧が改定された²⁵⁾。東北地方太平洋沖地震以降の知見を踏まえ、二次形状係数の下限を4以上とすることや、従来の「品質管理と検査」を大幅に充実させ、支承の耐荷・耐久性能を確認する特性検証試験や出荷品に全数に対して求める力学特性試験

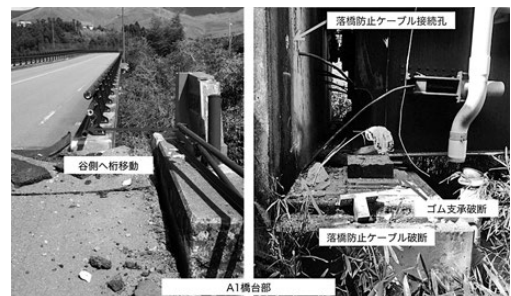


写真5 大切畑大橋における積層ゴム支承の破断



写真6 南阿蘇橋におけるダンパー取付部の破断

の標準や管理項目やデータを統一するための品質管理記録の様式例の提示など、品質管理に関わる規定が強化された。

7.4 2024年能登半島地震

2024（令和6）年能登半島地震でも、引き続き免震支承の被害が確認されている。震源近くの国



写真7 烏川大橋における積層ゴム支承の被害



写真8 花山橋における積層ゴム支承の被害



写真9 天神橋における積層ゴム支承の破断

道249号の烏川大橋（大谷ループ橋）では、橋台部で免震支承の取付部ボルトが破断し、ベースプレートから逸脱した（写真7）。損傷の要因については、桁に損傷が見られず、橋台部周辺地盤が大きく崩壊していることから、橋台が移動し、ゴム支承が追従しきれず、沓やベースプレート間を固定するボルトが破断したと考えられる。

輪島市の花山橋では、橋台部の積層ゴム支承や取付ボルト部の破断が確認された（写真8）。本橋は橋台部が大きく傾斜しており、支承部が大きく変形したことによりゴム支承が追従できず、破断したと考えられる。

輪島市の天神橋では、複数の積層ゴム支承が高さ中央部で破断した（写真9）。橋台周辺の盛土部は大きく損傷し、地震後に上下部接続部に残留変形は生じていたものの、先の2橋と異なり、破断するほどの過大な相対変位ではないため、想定以上の応答による被害か、あるいは経年劣化等によるものか、今後の被害メカニズムの検討は重要である。

烏川大橋や花山橋の場合、設計上固定と考えられる橋台部が移動したことにより、上下部接続部に想定以上の相対変形が生じたことが積層ゴム支承の破断の要因と考えられるため、支承の被害と分類することの是非については議論の余地があるが、設計上の想定と異なる状況であることは間違いない。

8. 免震技術の信頼回復への対策

8.1 E-ディフェンスによる検証

阪神・淡路大震災では、新しい技術開発だけでなく、実大構造物の破壊過程の理解が足りなかったという反省が共有され、防災科学技術研究所において兵庫耐震工学研究センターの実大三次元震動破壊実験施設（E-ディフェンス、図2）が建設され、2005（平成17）年より供用が開始された。E-ディフェンスは世界最大の震動台であり、そのテーブルは $20 \times 15 \text{ m}$ 、最大搭載質量が1,200 tonであり、実大規模の建物などに兵庫県南部地震クラスの地震の揺れを再現し、その揺れや損傷、崩壊の過程を詳細に検討できる。

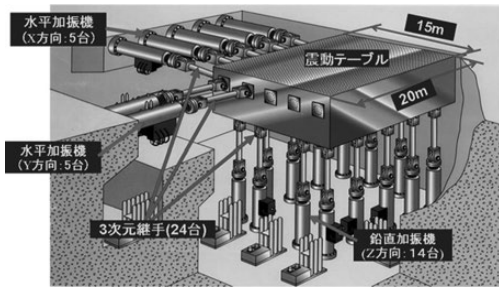


図2 E-ディフェンス震動台



写真10 E-ディフェンスにおける橋梁耐震実験

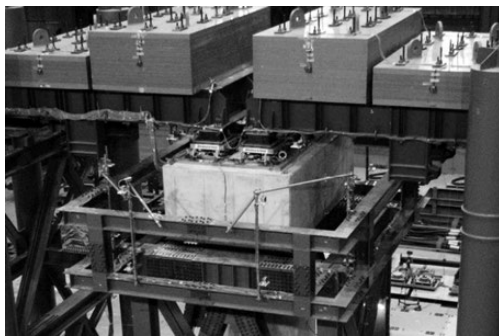


写真11 橋梁耐震実験における免震実験

2007 (平成19) 年より、橋梁耐震実験が実施された²⁶⁾。試験体の柱高さは7.5 m、断面直径1.8 m の実大橋脚である (写真10)。1970年代に建設され、軸方向鉄筋筋落し部を有する C1-2 試験体と、同じ上部構造重量を支持する2002年道路橋示方書に基づく C1-5 試験体に対する震動台実験により、被害の再現と改定された耐震基準の有効性を確認することができた。さらに次世代 RC 橋脚の耐震

性能を目的とした C1-6 試験体の実験に先立ち、RC 橋脚上の固定支承を免震支承 (超高減衰積層ゴム支承) に置き換えた実験 (写真11) が実施された²⁷⁾。支承サイズは $\square 400 \times 400 \text{ mm}$ と実大支承に比べると小さく、また C1-6 実験のために加振強度にも制約があったため、本実験ではせん断ひずみ20%程度の応答しか発生させることができなかった。

8.2 E-アイソレーションの建設と検証

免震支承の実際の特性と性能は、実物大の試験体を用いて動的実荷重条件の下で確認することが必須である。東北地方太平洋沖地震におけるゴム支承破断の原因究明でも、現在のせん断変形性能試験の方法は、面圧、載荷速度等が実際の地震時のゴム支承の挙動と合致せず、地震時のせん断変形性能が正確に評価されていない可能性があることが指摘されている¹⁷⁾。現行の道路橋支承便覧²⁵⁾では、特性検証試験として、 $\square 240 \times 240 \text{ mm}$ あるいは $\square 400 \times 400 \text{ mm}$ の平面寸法を有する免震支承に対し、面圧 6 N/mm^2 に相当する鉛直力を作用させ、水平加振周期2.0秒の正負交番繰返し載荷をすることを基本としているが、これは国内に存在する試験機性能を勘案して設定されたものであり、より大きな平面寸法の支承に対しても動的載荷実験をすることが好ましいものの、このような能力を備えた試験施設は世界の中でも米国・中国・台湾・イタリア・トルコに限られており、わが国は地震国であるにも関わらず、実大の試験体に動的大变位を与える試験機は存在しなかった。

内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「国家レジリエンス (防災・減災) の強化」において、筆者を研究責任者とする研究プロジェクトが採択され、その成果の一つとして、高精度の荷重計測機構を有し、鉛直方向に動的30,000 kN の載荷能力、水平方向に動的5,100 kN の載荷能力、 $\pm 1,300 \text{ mm}$ の可動、800 mm/秒の速度能力を有する E-アイソレーション (写真12) が、E-ディフェンスに隣接して設置され、2023 (令和5) 年に供用が始まった²⁸⁾。

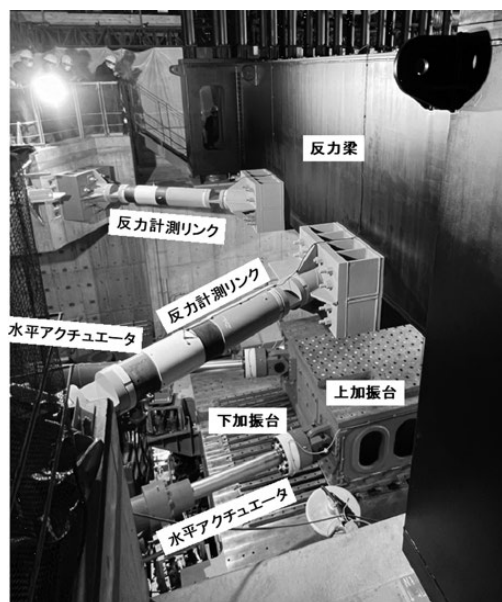


写真12 E-アイソレーション加振・計測機構

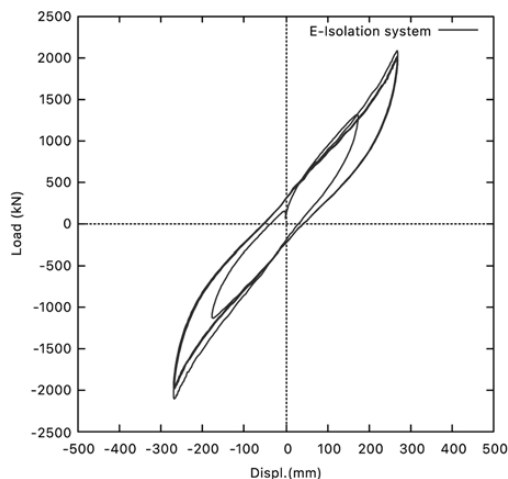


図3 橋梁用免震支承として世界最大級動的試験結果

E-アイソレーションにおいて、2024（令和6）年、土木研究所・ゴム支承協会・日本支承協会の共同研究として、実大の橋梁用免震支承の実験が実施された²⁹⁻³¹⁾。□820×820 mm、ゴム総厚20 mm×5=100 mmの反力分散積層ゴム支承に対し、加振周期を準静的の100秒から動的の2秒

まで変化させた正負交番載荷実験され、実大・実速度による橋梁免震支承の性能の蓄積が始まった。また、実験に先立ち、載荷経験済みではあるが□1,020×1,020 mm、ゴム総厚39 mm×4=156 mmの反力分散積層ゴム支承を用い、鉛直荷重6,000 kNを載荷し、せん断ひずみ175%の振幅で加振周期2.5秒（最大速度68.6 cm/秒）の加振実験を実施した（図3）³²⁾。従来、海外の試験機を用いて実施されてきた実大免震支承のほとんどは建築用であり、ゴム剛性が硬く（G14）、一次形状係数が6.4と小さい平面寸法□1,000 mmクラスの橋梁用積層ゴム支承を動的実験された事例は、筆者は寡聞にして知らない。

9. まとめ

阪神・淡路大震災を契機に一般的となった免震技術は、従来の鋼製支承を用いた耐震技術よりも耐震性能が高く、過去の地震時にも、その多くが機能を発揮していることは間違いない。一方、耐震性能を高めるための免震支承が数例であったとしても地震時に期待通り機能しなかったことは、不都合な真実として認識し、信頼性を取り戻すために努力する必要がある。

阪神・淡路大震災では、実大構造物の地震時挙動に対する理解が足りなかったという反省のもと、世界最大三次元震動台E-ディフェンスが設置され、従来得ることができなかった地震時の各種データが計測されるようになった。縮小動的・実大静的実験により検証されてきた免震支承が、実大動の下で期待通りの機能を発揮できなかったのでは、という疑問・反省が、高精度荷重計測機構を有する実大動的加振機E-アイソレーションを開発につながった。E-アイソレーションを用いた実大免震支承に対する質の高いデータの蓄積が始まっている。

地震国であるわが国は、自然災害を単に災いと嘆き悲しむのではなく、それを受け入れ、さらに勤勉さや丁寧な仕事に裏付けられた創造性、技術力を発揮することで、世界有数の高機能・高品質なインフラを実現してきた。地震被害から学び、それを乗り越える取り組みは、終わることはない。

謝辞

本稿執筆の機会を与えていただいた本誌編集委員会に感謝する。また、地震被害写真の一部は、京都大学植村佳大助教より提供いただいた。本稿執筆を通じ、阪神・淡路大震災を機に助手に採用いただいた京都大学村浩和名誉教授、橋梁免震の世界を切り拓かれた東京工業大学川島一彦名誉教授による、これまでの暖かく熱心なご指導を改めて振り返ることができた。記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 盛川仁：土木構造物のための耐震設計法：阪神淡路大震災前後，自然災害科学，Vol.29，No.2，pp.137-150，2010.
- 2) 山田善一：名誉会員に聞く，日本地震工学会誌，No.11，pp.28-30，2010.
- 3) 家村浩和・岩崎好寿：免震および制震構造物における地震入力エネルギーの分担率と耐震安全性，第1回構造物の安全性および信頼性に関する国内シンポジウム論文集，pp.28-30，1987.
- 4) Yamada, Y., Iemura, H. and Igarashi, A.: Active Control of Structures under Stochastic Base Excitation with a Predominant Frequency, Proceedings of the 5th International Conference on Structural Safety and Reliability, pp.1427-1434, 1989.
- 5) 日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案)，1995.
- 6) Robinson, W. H.: Lead-Rubber Hysteretic Bearings Suitable for Protecting Structures during Earthquakes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.10, pp.593-604, 1982.
- 7) 藤田聡史：免震技術の現状と将来，日本機械学会論文集(C編)，Vol.51，No.461，pp.1-7，1985.
- 8) 川島一彦：免震設計技術の発展と今後の展望，土木学会論文集，No.398/I-10，pp.1-12，1988.
- 9) 財国土開発技術研究センター：道路橋の免震設計法ガイドライン(案)，1989.
- 10) 建設省土木研究所及び民間28社：道路橋の免震設計法マニュアル(案)，土木研究所共同報告書，1992.
- 11) 芳沢利和：阪神大震災と免震建築，日本ゴム協会誌，Vol.68，No.4，pp.228-232，1995.
- 12) 古川忠稔・伊藤雅史・小野聡子・橋英三郎：実地震観測記録を用いた2棟の免震建物動特性の同定，日本建築学会構造系論文集，No.558，pp.117-124，2002.
- 13) 建設省土木研究所：実測記録に基づく免震橋の地震時振動特性に関する研究，土木研究所資料第3383号，1995.
- 14) Yin, X. and Takahashi, Y.: Response of seismic isolated elevated bridge due to slightly strong earthquakes in 1995 and 2018, Journal of JSCE, Ser. A1, Vol.76, No.4, pp.I_529-I_540, 2020.
- 15) 道路橋の免震構造研究委員会：わが国の免震橋事例集，土木研究センター，2011.
- 16) 日本道路協会：参考資料-2 兵庫県南部地震における支承部の被災状況，道路橋支承便覧，p.305，2004.
- 17) 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，Vol.59A，pp.516-526，2013.
- 18) 山田金喜・曾田信雄・木水隆夫・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，Vol.59A，pp.527-539，2013.
- 19) 後藤浩之・高橋良和・鉢田泰子・高橋章浩・盛川仁：東日本大震災速報 地震動による地盤と構造物の被害，自然災害科学，Vol.30，No.1，pp.49-53，2011.
- 20) 高橋良和：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，土木研究センター，2011.
- 21) Takahashi, Y.: Damage of rubber bearings and dampers of bridges in 2011 Great East Japan Earthquake, Proceedings of International Symposium on Engineering Lessons learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, pp.1332-1341, 2012.
- 22) Takahashi, Y. and Hoshikuma, J.: Damage to road bridges induced by ground motion in 2011 Great East Japan Earthquake, Journal of JSCE, Vol.1, pp.398-410, 2013.
- 23) 高橋良和：平成28年熊本地震による橋梁の被害報告，橋梁と基礎，Vol.50，No.9，pp.32-37，2016.
- 24) 本橋英樹・野中哲也・馬越一也・中村真貴・原田隆典：熊本地震の断層近傍における地震動と橋梁被害の再現解析，構造工学論文集，Vol.63A，

- pp.339-352, 2017.
- 25) 日本道路協会：道路橋支承便覧, 2018.
- 26) Kawashima, K., Sasaki, T., Kajiwara, K., H. Ukon, S. Unjoh, J. Sakai, Y. Takahashi, K. Kosa, and M. Yabe: Seismic performance of a flexural failure type reinforced concrete bridge column based on E-Defense excitation. 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, pp.267-285, 2009.
- 27) 中山学・川島一彦・矢部正明：E-ディフェンスを用いた免震支承の震動実験, 土木学会大65回年次学術講演会, I-018, 2010.
- 28) 高橋良和・竹内徹・吉敷祥一・篠崎洋三・米田雅子・梶原浩一・和田章：E-Isolation：免震支承・制振部材の高性能実大動的試験機, 日本免震構造協会誌, No.121, pp.1-13, 2023.
- 29) 浅子卓也・久慈茂樹・小林巧・大住道生・今井隆・姫野岳彦：実大動的加力試験機道路橋用ゴム支承の実大実速度による各種依存性の検討, 第27回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.143-150, 2024.
- 30) 久慈茂樹・佐藤京・寺澤貴裕・畠山乃・植田健介・余野智哉・姫野岳彦：実大動的加力試験機積層ゴム支承を用いた加振試験による寸法効果について, 第27回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.81-86, 2024.
- 31) 佐藤京・寺澤貴裕・久慈茂樹・植田健介・姫野岳彦・徳江良・畠山乃：実大動的加力試験機実規模積層ゴム支承を用いた加振試験による加振サイクルと内部温度について, 第27回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.31-36, 2024.
- 32) 上田知弥・植村佳大・高橋良和：実大動的加力試験機 E-Isolation における高精度荷重計測技術, 第27回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.373-378, 2024.

(投稿受理日：2024年8月5日)

要 旨

阪神・淡路大震災以降、橋梁用免震支承が広く使用されるようになり、従来の鋼製支承に比べて高い耐震性能を有することは間違いない。一方で、近年の地震で免震支承の一部が破断・破損していることは、不都合な真実としてしっかり認識しなければならない。阪神・淡路大震災後、実大構造物の地震挙動をよく理解していなかったことを反省し、世界最大の三次元振動台 E-ディフェンスが設置された。近年、実大免震支承に対する理解不足を痛感し、高精度な荷重計測機構を備えた大型動的載荷装置として E-アイソレーションを開発した。E-アイソレーションの稼働により、実大免震支承の高品質データが蓄積し、信頼性の回復が始まっている。