

長大アーチ橋の合理的なフェイルセーフシステム に関する検討

光川直宏¹・鈴木直人²・金治英貞³・林訓裕⁴

^{1,2}正会員 工修 株式会社建設技術研究所 大阪本社 道路・交通部（〒540-0008 大阪市中央区大手前1-2-15）

^{3,4}正会員 工修 阪神高速道路株式会社 大阪建設部（〒559-0034 大阪市住之江区南港北1-14-16）

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、主要幹線の道路橋は鋭意耐震補強が進められ、耐震安全性の向上が図られている。しかしながら、アーチ橋など長大橋梁については橋梁規模が極めて大きく補強が困難であり、一般橋に比較して立ち遅れているのが現状である。本論は阪神高速道路の長大アーチ橋の2橋梁に関して、現地地盤特性を考慮した入力地震波を用いて、合理的な耐震性能の向上化検討を行ったものである。

兵庫県南部地震における湾岸線アーチ橋の被災事例^{1)~2)}をみると、支承周りの耐震性能向上が最も重要であると考えられる。そこで、支承、フェイルセーフシステム、隣接桁との衝突挙動等を適切に評価できる非線形モデルを取り入れ、時刻歴応答解析を実施し、対象橋梁および隣接橋梁が落橋に至るメカニズムを体系的に整理した。

また、長大橋の支承は大反力となるため変位制限構造も極めて大きな構造となる³⁾。そこで、損傷制御型の変位制限構造を採用するなど、積極的にエネルギー吸収を期待する合理的なフェイルセーフシステムを提案した。

2. 橋梁概要

対象橋梁は大阪湾岸線に架橋された橋長 445m（側径間 95m＋中央径間 255m＋側径間 95m）の3径間連続中路式バランスドアーチ橋と、ニールセンローゼ橋である。中路アーチ橋は埋立地に架橋され、P147の一点固定となっている⁴⁾。ニールセンローゼ橋は、我が国最長の 254m の支間長を有するとともに、同種の橋梁としては世界的にも最大規模となる。また、架設条件から、台船による全橋大ブロッカー括架設を採用している⁵⁾。（図-1）

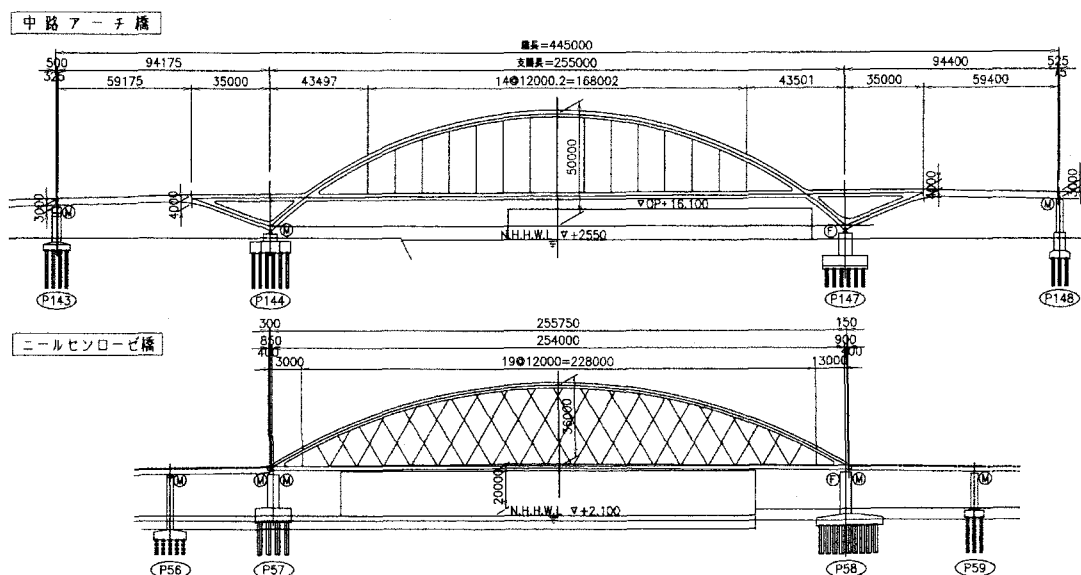


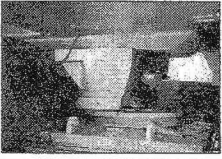
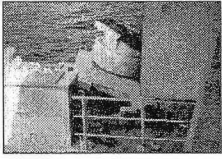
図-1 対象橋梁一般図

3. 長大アーチ橋の破壊モードと補強方針

(1) 湾岸線長大橋における損傷事例

阪神高速の長大アーチ橋で兵庫県南部地震により被害を受けた代表例の被害状況を表-2 に示す。西宮港大橋はピボット支承の上沓が破損し、六甲アイランド橋はピボットローラーのストッパーが破断し沓座から逸脱している。いずれも、本橋自体は落橋には至らず被災後数ヶ月で復旧されているが、西宮港大橋は隣接橋が落下する被害となった。

表-2 湾岸線長大橋の被害状況

橋梁名称	西宮港大橋	六甲アイランド橋
上部構造形式	ニールセンローゼ桁橋	ダブルデッキローゼ桁橋
上部構造	・ハンガーロープの緩み	・上横構と支材の座屈
支承	・ピボット上沓の破断 ・セットボルト破断 	・可動支承ローラー、 水平ストッパー破断 
隣接高架橋桁	・落下	—

※「大震災を乗り越えて—震災復旧工事誌— 阪神高速道路公団」より

(2) 対象橋梁における支承部の破壊形態

レベル2 照査波による対象橋梁の支承部の破壊形態を表-3 および表-4 に示す。各橋梁の支承の破壊形態を整理すると、前述した湾岸線での被災事例とほぼ合致していることが確認された。支承形式毎の傾向としては、ピボットローラー支承はローラーの逸脱、ピボット支承は上沓の破損と推定される。

表-3 支承部の照査結果（ニールセンローゼ橋）

橋脚番号	P57	P58
支承形式	ピボットローラー	ピボット
支承条件	可動 (M)	固定 (F)
支承個数	2 基	2 基
支承反力 (kN)	橋 軸 橋軸直角 鉛 直 (負反力)	0 19,983 9,934 10,545 5,512 (生じない) 25,466 (生じない)
破壊形態 (最弱部品)	橋軸直角方向における下沓ストッパーの破損【F=0.44】	橋軸方向におけるピボットの破損(≒上沓の破損)【F=0.76】
想定される被災状況	支承の破損と橋軸直角方向への桁の逸脱	支承の破損
破壊形態タイプ	六甲アイランド大橋	西宮港大橋

表-4 支承部の照査結果（中路アーチ橋）

橋脚番号	P143	P144
支承形式	ピボットローラー	ピボットローラー
支承条件	可動 (M)	可動 (M)
支承個数	2 基	2 基
支承反力 (kN)	橋 軸 橋軸直角 鉛 直 (負反力)	0 23,929 6,105 (-2,586) 45,997 (生じない)
破壊形態 (最弱部品)	橋軸方向における移動制限装置の破損【F=0.36】	橋軸直角方向におけるローラーの破損【F=0.67】
想定される被災状況	支承の破損と橋軸方向への桁の逸脱	支承の破損と橋軸直角方向への桁の逸脱
破壊形態タイプ	その他	六甲アイランド大橋

橋脚番号	P147	P148
支承形式	ピボット	ピボットローラー
支承条件	固定 (F)	可動 (M)
支承個数	2 基	2 基
支承反力 (kN)	橋 軸 橋軸直角 鉛 直 (負反力)	40,358 29,681 53,430 (生じない) 0 6,858 14,115 (生じない)
破壊形態 (最弱部品)	橋軸方向におけるピボットの破損(≒上沓の破損)【F=0.58】	橋軸直角方向におけるセットボルトの破損【F=0.28】
想定される被災状況	支承の破損	支承の破損
破壊形態タイプ	西宮港大橋	西宮港大橋

(3) 対象橋梁の破壊モードと補強方針

レベル2 照査波による解析の結果、主部材については比較的耐震安全性を有しており、前述したように支承部における損傷が支配的となる。解析結果をもとに、落橋に至る破壊モードを図-2 に示すフォールトツリーによりモデル化し、対象橋が落橋に至るメカニズムを整理した。

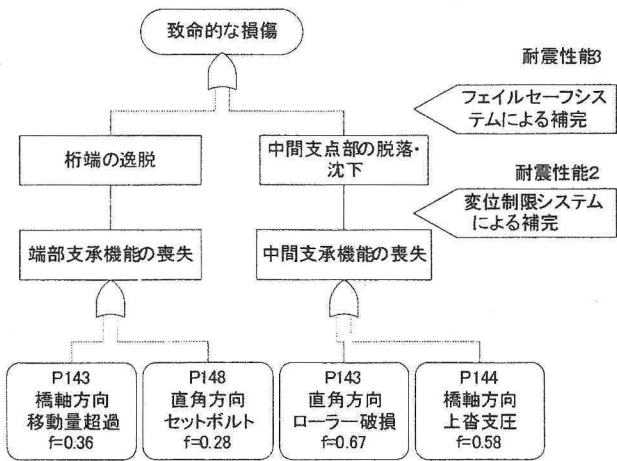


図-2 対象橋のフォールトツリー

支承部の耐震性能向上化を検討するにあたり、目標とする性能レベルを表-5 に示す 3 段階に設定した。耐震性能 1 とは既設支承の破損を許容しないもので、適用可能であれば最も望ましい対策水準である。耐震性能 2 とは既設支承の破損はある程度許容するものの、供用しながら短期で復旧が可能とするものである。耐震性能 3 とは既設支承が損傷しても落橋しないものである。

橋梁全体系の耐震安全性を高めるためには、破壊が脆性的で、損傷後の挙動が予測不能な支承部の損傷は望ましくない。そのため、レベル 2 地震時にも耐震性能 2 を確保するための構造として、変位制限システムを設置するものとした。
 さらに、想定外の地震や挙動に対しても耐震性能 3 を確保するため、落橋防止装置等によるフェールセーフシステムを設置するものとした。

表-5 支承部の耐震性能向上化水準

性能 レベル	耐震性能 1	耐震性能 2	耐震性能 3
目標 機能	既設支承は健全で、地震前と同じ橋としての機能を確保する。	既設支承の損傷が限定的なものにとどまり、地震後、橋としての機能を速やかに回復できる。	既設支承の損傷により橋全体が致命的とならない。
要求 性能	支承単体あるいは別構造で補完することで既設支承を弾性範囲内にとどめる。	変位制限構造を用いて、ある程度の支承の破損は許容するが、鉛直支持機能は保持する。	既設支承は破損するものの、落橋はさせない。
許容 移動量	【固定】 0mm 【可動】 δ_a 以内	【固定】 50～100mm 程度 【可動】 $\delta_a + 100\text{mm}$ 程度	【固定】 — 【可動】 —
対策 構造	・従来型変位制限構造あるいは ・支承取替 ・構造規模（大） ・構造コスト（大）	・損傷制御型変位制限構造 ・構造規模（小） ・構造コスト（小） ・支承の修復費用	・落橋防止構造

4. 変位制限システムの設置方針

(1) 橋梁全体を考えた設計方針

耐震性能 2 を実現するためには、支承本体を取替える方法もあるが、支承反力がきわめて大きく、交通供用下での支承取替えは極めて困難である。そのため、現有支承の耐荷力が不足する場合、変位制限構造等により支承と同等の機能を有する構造を設置することを基本とした。
 対象橋梁は橋軸方向に対して 1 点固定構造であるため、可動支承部に反力を負担させることにより、橋梁全体で慣性力を分担する方法も有効である。また、ダンパーを設置することによりある程度のエネルギー吸収も期待できる。

(2) 変位制限システムの設計荷重

想定する変位制限システムの非線形特性を適切にモデル化し、レベル 2 照査波により発生する反力や変位により変位制限システムを計画するものとした。
 ここで、支承部の設計荷重に対する考え方を表-6 に示す。ストッパーや上沓の破損などは脆性的であり、部品損傷後の粘りは期待できないため、現有支承の耐力は期待しないものとした。しかしながら、セットボルトの引張り等は、降伏後のねばりが期待できるため、現有支承の耐力を期待した変位制限構造の設計が可能と考えた。
 また、変位制限構造自身が変形、損傷することによりエネルギー吸収を期待することもできる。変位制限装置における非線形性を期待する場合には、非

線形性をモデル化し、可動脚に対する照査に対する照査や、現況の支承構造を破損させない範囲の変形量に納めることを照査した。

表-6 支承部の耐力補完に対する考え方

支承部の耐力補完の区分	具体例
支承部の耐力補完が可能なもの	・セットボルトの引張など、ねばりのある破壊形態である場合。 ・プレストレス導入など、事前作用型の対策が有効な場合。
支承部の耐力補完が不可能なもの	・ピボット球体の支圧破壊やローラー突起のせん断破壊など、脆性的な破壊形態である場合。

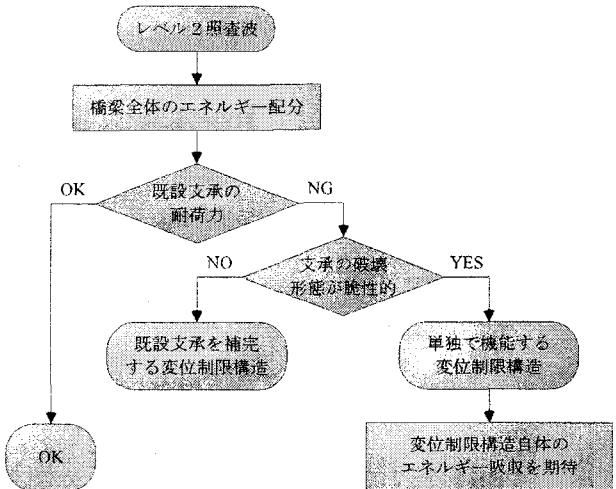


図-3 変位制限システム設置方針

5. フェイルセーフシステムの設置方針

(1) 設置方針

想定外の地震や不測の挙動についても落橋を防ぐために、フェイルセーフシステムを設置する必要がある。支承部においては先の変位制限システムが機能しなかった場合にも耐震性能3は確保できることを目標とする。

(2) 中路アーチ橋

先のフォールトツリーに示したように、中路アーチ橋の致命的な破壊モードは、端支点部の桁の逸脱とともに中間支点部の脱落が考えられる。

端支点は中間支点に比較して大反力とならないことから、落橋防止構造として支承が逸脱した後に作用するように PC ケーブルで連結するものとした。中間支点においては支承を逸脱しても段差が生じないように段差防止構造を設置することとした。

(3) ニールセンローゼ橋

ニールセンローゼ橋の破壊モードは、端支点部の桁の逸脱および段差の発生である。橋軸方向に対して既設支承あるいは変位制限構造が万一破損した場合においても同等の機能を有するように、支承あるいは変位制限構造と同程度の耐力を有する損傷制御型の変位制限構造を設置することとした。

6. まとめ

以上、長大アーチ橋の2橋梁に関して、架橋地点の地震環境を考慮したレベル2照査波を用いて、耐震性能の向上化検討を行った結果、図-4 および図-

5に示すフェイルセーフシステムを構築した。

(1)兵庫県南部地震により支承部に被害を受けた長大橋の被害状況と対象橋梁の支承部の耐荷力から、致命的な損傷に至るメカニズムを体系的に整理した。

(2)支承部に要求する耐震安全性向上の評価基準を設定し、耐震性能2を満足する合理的な変位制限システムの設置計画を行った。

(3)さらに、不測の事態にも耐震性能3を満足するフェイルセーフシステムとして、落橋防止装置や段差防止構造の考え方を示した。

今後は、今回提案したフェイルセーフシステムの構造詳細や設置箇所などを精査していく予定である。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：大震災を乗り越えて一震災復旧工事誌，1997.9.
- 2) 阪神高速道路公団：阪神高速道路 震災から復旧まで写真集，1997.1.
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002.3.
- 4) 三菱・松尾・鋼管・酒井・春本・富士建設工事共同企業体，(財)災害科学研究所：岸和田大橋の全橋および鋼床版の耐荷力照査，1991.3.
- 5) 阪神高速道路公団：新浜寺大橋工事誌，1993.12.
- 6) 金治英貞，鈴木直人，香川敬生，渡邊英一：長大トラス橋の耐震性能向上化における設計入力地震動と損傷制御構造，土木学会論文集，No.787/I-71，pp. 1-19，2005.4.
- 7) (財)鉄道総合研究所，(株)大林組：ダンパー・ブレースを用いた鉄道高架橋の設計指針，2000.1.

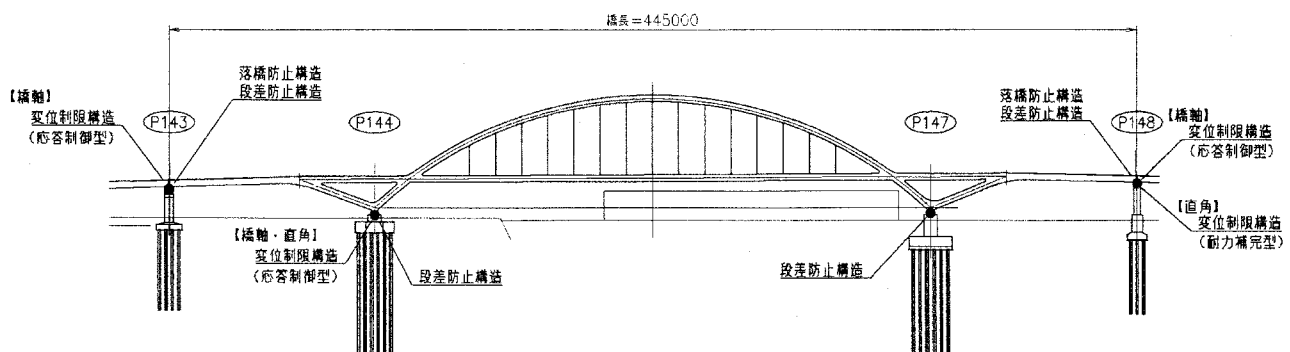


図-4 フェイルセーフシステム配置図（中路アーチ橋）

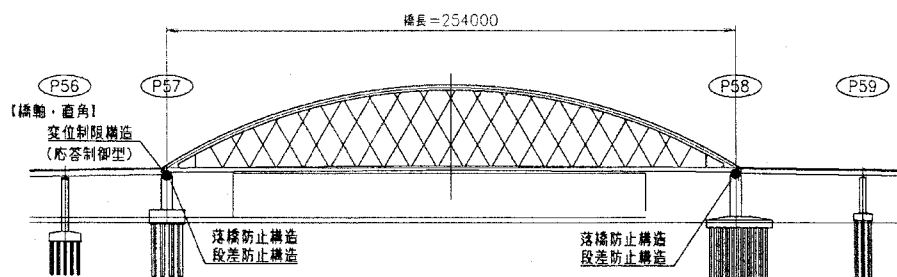


図-5 フェイルセーフシステム配置図（ニールセンローゼ橋）