

既設道路橋の耐震補強事例調査および合理的補強手法の提案

崔準祐¹、葛西昭²、松永昭吾³、その他⁴

(一社)九州橋梁・構造工学研究分科会(KABSE)、九州大学、熊本大学、(株)共同技術コンサルタント、
研究分科会委員

概要:兵庫県南部地震以降、九州の道路橋において多くの耐震補強実施例が存在する。本研究では、産官学の協力の下、これまで九州で耐震補強が行われた道路橋を対象に、耐震補強工法の選定と工法の選定条件、設計基準や設計手法、また施工工法などにおいて、今後の耐震補強設計・工事に有効に活用できる具体的な知見を整理し、合理的補強手法を提示することを目指している。

1. はじめに

平成 24 年度に会計検査院が行った決算検査報告によれば国土交通省が行った 18 の既設橋梁耐震補強工事において、たとえば橋脚の耐震補強を行う場合、基礎部が受ける影響を検討した上で橋梁全体として耐震性能を確保できる工法を選定していかなかったり、橋梁の耐震性能が確保されないおそれがある場合、基礎部の耐震補強の要否等について更に詳細に検討していくなかつたりしていて、橋梁全体としての耐震性能が確保されているかどうか明確となっていない事例が指摘され、是正改善の処置と地方公共団体に対する助言が求められている。

このような状況を踏まえ、一般社団法人九州橋梁・構造工学研究会 (KABSE) では、産官学の協力により、これまで九州で耐震補強が行われた道路橋を対象に、耐震補強の設計基準や設計手法、施工工法など、耐震補強に関する具体的な知見を整理し、資料を取りまとめてきている。こうした耐震補強のデータベース化により、今後の耐震補強の設計や工事に有効活用を図るとともに、合理的な耐震補強手法やその事例を提示し、九州における橋梁技術者相互の情報共有や耐震補強に関わる技術を向上することを目的とする。

2. 研究分科会の体制

本研究分科会では、以下の 3 つの WG に分けて資料収集、データ分析を行った。

- ・ 設計事例調査 WG
- ・ 照査、検証 WG
- ・ 補強工法 WG

各 WG で収集したデータの詳細および分析結果を次章より紹介する。

3. 設計事例調査 WG

本 WG では、これまでの耐震設計および耐震

補強に関する設計基準の変遷、九州の橋梁を対象とした耐震補強の選定方法および選定理由について取りまとめている。それぞれについて以下に詳述する。

3. 1 耐震補強に関する設計基準の変遷

これまでの耐震設計および耐震補強において、兵庫県南部地震以降の耐震補強の考え方の変遷を表 1 に示す。

3. 2 耐震補強工法の選定方法について

(1) 概要

ここでは、九州管内で耐震補強が施された道路橋において、無作為で選んだ 36 橋を対象とし、橋脚、橋台、縁端拡幅、落橋防止装置、基礎、支承部、上部工・その他部材に関する耐震補強工法とそれを選定した理由、構造条件や環境条件と選定工法との組み合わせなどについて分析を行った。

(2) 橋脚

橋脚を耐震補強した事例は 12 例が収集され、炭素繊維巻立て工法が 6 例、RC巻立て工法が 3 例、ポリマーセメント吹付け工法が 2 例、慣性力分散工法(ダンパー工法)が 1 例であった。炭素繊維巻立て工法が選定された橋脚形式は、河川内に位置する RC 単柱橋脚 2 例と 2 柱式橋脚 1 例、ダム内に位置する RC 単柱橋脚 1 例、陸上部にある RC 単柱橋脚 2 例であった。河川内に位置する RC 橋脚は河積阻害率を増加させない、自重増加による影響や施工期間が短いという理由から炭素繊維巻立て工法が選定されている。また、ダム内に位置する RC 橋脚は吊足場による施工が可能であるという理由から炭素繊維巻立て工法が選定されている。陸上部の RC 橋脚は段落し部のみの補強であるため炭素繊維巻立て工法が選定されている。

RC巻立て工法が選定された橋脚形式は、陸上部にある RC 単柱式橋脚と RC 張出し式橋脚及び河川内に位置する RC 張出し式橋脚であつ

表1 兵庫県南部地震以降の耐震補強の考え方の変遷（宮城県沖地震～兵庫県南部地震前）

発行年	タイトル	概要	メモ
H7.1 (1995.1.17 兵庫県南部地震 M7.2)	(阪神大震災)		主に橋脚、支承被災、液状化
H7 「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、平成7年6月、(H7復旧仕様)	平成7年2月27日に通知された復旧仕様(5月25日付で新設橋および耐震補強設計における技術基準の当面の措置と位置付け)の計算例。復旧仕様の解説(案)が参考資料として掲載されている。 (1)復旧仕様に基づく新設橋梁の設計計算例 (2)復旧仕様に基づく既設橋梁の補強計算例 (参考)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及び復旧仕様の解説(案)		RC橋脚のじん性補強、曲げ耐力補強の鋼板厚はt=9~12mm
H7 鉄筋コンクリート橋脚耐震補強施工マニュアル、平成7年8月、関東地整	マニュアル及び参考図集		
H7 RC橋脚の耐震補強設計要領(阪神高速)	鋼板巻立てを前提に、S55道示より前に設計されたRC橋脚の耐震補強		
H8 曲げ耐力制御式鋼板巻立て工法による鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強、平成8年5月、土研	鋼板接着+アンカーによる耐力補強		
H8 道路橋補強設計要領、H8.5、日本道路協会			
H8 鋼製橋脚耐震補強設計要領(案)首都高速道路公団	首都高速道路における鋼製橋脚の耐震補強		
H8 既設鋼製橋脚の耐震補強設計要領(案)阪神高速	阪神高速道路における鋼製橋脚の耐震補強(鋼断面補強、コンクリート充填)		
H8 道路震災対策便覧(震後対策編)			
H8.12 道路橋示方書・同解説V耐震設計編 平成8年12月(H8道示)	地震時保有水平耐力法を拡充し、鉄筋コンクリート橋脚だけでなく、全ての構造を地震時保有水平耐力法によって耐震設計することを基本とした。免震設計を導入し、落橋防止システムの充実を図った。		
H9.8 既設道路橋の耐震補強に関する参考資料、平成9年8月、日本道路協会	巻立て補強を採用する場合の塑性ヒンジ長の補正係数0.8が記載 (1)RC橋脚の耐震補強計算例 (2)RC壁式橋脚の耐震補強計算例 (3)鋼製橋脚の耐震補強計算例		
H12.12 既設道路橋基礎の耐震補強に関する参考資料、平成12年12月、日本道路協会	(1)調査における留意事項(留意事項、基礎の形状および損傷状況、洗掘) (2)基礎の補強法(基本的な考え方、耐力を向上させる方法、液状化対策、流動化対策、洗掘に対する対策、橋全体系で対処する方法) (3)基礎の耐震補強計算例(杭基礎、ケーソン基礎、流動化に対する補強) (4)施工における留意事項		
H14.3 道路橋示方書・同解説V耐震設計編 平成14年3月(H14道示)	性能規定型の技術基準に変更とともに、橋台基礎、鋼製橋脚、支承部等の耐震性能の照査方法の導入、あるいは合理化		性能規定化
H14 道路震災対策便覧(震前対策編、震災復旧編)、平成14年、日本道路協会			
H15.5 (2003.5.26 三陸南地震 M7.1)			「=宮城県沖地震」
H15.7 (2003.7.26 宮城県北部地震 M6.4)			須江断層
H15.9 (2003.9.26 十勝沖地震 M8.0)			
H16.10 (2004.10.23 新潟県中越地震 M6.8)			
H17.2 既設橋梁の耐震補強マニュアル(案)、平成17年2月、関東地方整備局(H17関東地整マニュアル)	H14道示に対応した耐震補強の設計方法、施工方法、維持管理方法について規定 ・設計編: 基本方針、耐震補強検討フロー、調査、RC橋脚、鋼製橋脚、動的照査法、基礎の耐震補強、落橋防止システム、		「H21考え方」では適用基準
H17.3 (2005.3.20 福岡県西方沖地震 M7.0)			九州
H17.4 既設橋梁の耐震補強工法事例集、平成17年4月、(財)海洋架橋・橋梁調査会	本編は耐震補強の教科書、その他補強設計計算例、新工法、新技術情報の紹介。 (1)既往地震による橋梁被害の特徴と耐震補強のポイント (2)既設橋梁が確保すべき耐震性能と性能評価の基本方針 (3)既設橋梁の耐震補強工法の選定 (4)部材の耐震補強工法 (5)橋全体系の耐震補強工法 (6)落橋防止対策		土研と調査会の共同執筆 「H21考え方」では参考資料
H17.6 緊急輸送道路の橋梁耐震補強3箇年プログラム、平成17年6月23日、国土交通省道路局、都市・地域整備局通知(3ブロ)	被災時の円滑な救急・救援活動の緊急物資の輸送、復旧活動の支援等において重要な役割を果たす緊急輸送道路の橋梁について、平成17年～平成19年度までの3箇年において耐震補強を重点的に実施する。 ・「緊急輸送道路の橋梁耐震補強3箇年プログラム」耐震補強マニュアル(案)		
H18.9 道路震災対策便覧(震前対策編)、平成18年9月、日本道路協会	(1)新潟県中越地震など被災を踏まえた、道路管理者が行うべき震前対策について新たな考え方・事例の整理 (2)津波被害の特徴と被害予防・軽減対策についての記述の充実 (3)法律の制定、被害想定、地震防災戦略等の政府の取組みの反映		
H19.3 (2007.3.25 能登半島地震 M6.9)			6強
H19.7 (2007.7.16 新潟県中越沖地震 M6.8)			6強
H20.6 (2008.6.14 岩手・宮城内陸地震 M7.2)			6強
H20.12 道路橋の補修・補強計算例、2008.12.(財)道路保全技術センター・(財)海洋架橋・橋梁調査会	(1)下部工(RC巻立て補強、鋼板巻立て補強、織維材巻立て補強) (2)基礎工(鋼板圧入によるパイプレンジト橋脚耐震補強、増し枕による杭基礎の耐震補強、高耐力マイクロバイルによる杭基礎の耐震補強、STマイクロバイルによる杭基礎の耐震補強) (3)上下部工連結による落橋防止装置		
H21.3 「橋梁耐震補強における対策工法の選定の考え方」について 平成21年3月31日 道路局国道・防災課道路防災対策室長補佐	3プロ後、兵庫県南部地震と同程度の地震動に対しても落橋等の甚大な被害を防止 (1)H7復旧仕様、H8道示以降の設計は対策不要 (2)H8、H14道示による耐震補強済み橋梁は対策不要 (3)無補強橋梁はH8(H14)道示レベルに補強 (4)S55より前の道示設計のうち3プロ補強済みの橋梁はグレードアップ補強 ※H17関東地整マニュアルの適用		

H22.5	既設道路橋基礎の耐震性能簡易評価手法に関する研究、平成22年5月、土研	3プロで未対応だった道路橋基礎耐震補強のプログラムレベルの実施 「想定される損傷度区分と崩壊パターン」、「許容塑性率に関する既往の研究」、「過去の被災事例と傾向分析から見た基礎補強の優先順位」、「設計基準および施工技術の変遷から見た基礎補強の優先順位」、「静的荷重漸増解析を用いた試設計計算」、「耐震性評価」、「液状化が生じる場合のDEの簡易評価法」、「耐震性簡易判定フローと調査要」が記載されている。	
H23.2	既設ケーソン基礎の終局状態の変形性能に関する共同研究報告書	H8道示適用前の軸方向鉄筋が極めて少なく、隔壁を有する断面形状の耐震性能の検証	
H23.3 (2013.3.11 東日本太平洋沖地震)	(東日本大震災 震度7)		支承、液状化、梁、津波
H23.3 (2013.3.12 長野県・新潟県境付近)	(死者3)		6強
H24.3	道路橋示方書・同解説V耐震設計編 平成24年3月(H24道示)	東日本大震災の被害経験を踏まえ、維持管理の確実性、容易さに配慮。 (1)プレート境界型の大規模地震を考慮するためにレベル2地震動(タイプI)の見直し。 (2)津波に関する地域の防災計画等を考慮した上で橋の構造を計画することを規定 (3)地震の影響を支配的に受ける部材に求められる基本事項が明示 (4)RC橋脚のP-δ関係の算出方法の見直し(軸方向鉄筋の引張ひずみ)。施工性改善を目的としてSD390、SD490鉄筋を主鉄筋に使用する場合の規定 (5)落橋防止システムの規定の見直し	
H24.11	既設橋の耐震補強設計に関する技術資料、平成24年11月、国総研・土研	(1)耐震補強において目標とする橋の耐震性能の設定の考え方 (2)耐震補強設計における留意事項 (3)支承部の耐震補強対策及び落橋防止対策における考え方 (4)鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強設計における考え方	耐震性能2(速やかに機能回復)を目指す場合のバイブル

た。陸上部のRC橋脚でRC巻立て工法と鋼板巻立て工法とプレキャストパネル巻立て工法との比較により、経済性・維持管理性に優れるRC巻立て工法が選定されている。また、河川内に位置するRC張出し式橋脚の現況の河積阻害率が4.8%であり、炭素繊維巻立て工法とRC巻立て工法とプレキャストパネル巻立て工法との比較を行い、補強後の河積阻害率が5.5%>5%となるが、河川管理者からの了承を得て経済性・維持管理性に優れるRC巻立て工法が選定されている。

ポリマーセメント吹付け工法が選定された橋脚形式は、河川内に位置するRC壁式橋脚とRC張出し式橋脚であった。RC壁式橋脚の現況の河積阻害率が5.9%であり、RC巻立て工法と鋼板巻立て工法とポリマーセメント吹付け工法との比較を行い、河積阻害率を現状維持させるためにポリマーセメント吹付け工法が選定されている。また、RC張出し式橋脚の現況の河積阻害率が3.8%であるが、非出水期とのり養殖期による施工期間などの制約で、施工期間の短縮が必要であったためにポリマーセメント吹付け工法が選定されている。

慣性力分散工法（ダンパー工法）が選定された橋脚形式は、河川内に位置するRCラーメン橋脚であった。現況の河積阻害率が5%であり、RC巻立て工法とPPモルタル巻立て工法と慣性力分散工法（ダンパー工法）との比較を行い、仮設工を含めた経済性が最も優位であること、河積阻害率が現況よりも高くならないことから慣性力分散工法（ダンパー工法）が選定されている。

（3）橋台

今回、橋台を耐震補強した事例は収集されなかった。

（4）縁端拡幅

縁端拡幅を実施した事例は6例が収集され、すべての事例においてRC構造が選定されている。1例のみの比較であるが、RC構造と鋼製ブリケットとの比較により、経済性・維持管理性に優れるRC構造が選定されている。

RC構造が選定された橋梁の上部工形式は、鋼単純I桁橋と、PC単純プレテン単純床版橋、鋼非合成箱桁+鋼合成H桁、鋼単純H桁、鋼単純合成鋼桁橋、PC単純プレテンT桁橋であった。

（5）落橋防止装置

落橋防止装置を設置した事例は13例が収集され、PCケーブル桁連結が6例、PCケーブル上下部工連結が1例、緩衝チェーン連結が1例、鋼製ブリケットが1例、RC壁が2例、1.5SE確保（RC構造）が2例であった。

PCケーブル桁連結が選定された橋梁の上部工形式は、RC中空床版+鋼合成桁、鋼単純ランガー橋、鋼単純H桁橋（2連）、鋼3径間連続鋼桁橋（2連）、PC単純ポステンT桁橋（10連）、鋼単純合成鋼桁橋であった。

RC中空床版+鋼合成桁と鋼単純ランガー橋でPCケーブル桁連結と緩衝チェーン連結との比較を行い、経済性に優れるPCケーブル桁連結が選定されている。

鋼3径間連続鋼桁橋（2連）でPCケーブルと鋼製ブリケットとの比較を行い、PCケーブルは経済性に劣るが、機能の確実性からPCケーブル桁連結が選定されている。

PC単純ポステンT桁橋（10連）でPCケーブル桁連結とPCケーブル上下部工連結とRC壁との比較を行い、経済性・維持管理性に優れるPCケーブル桁連結が選定されている。

鋼単純H桁橋（2連）でPCケーブル桁連結

と緩衝チェーン連結と鋼製ブラケットと鋼製壁とRC壁との比較を行い、経済性に優れるPCケーブル桁連結が選定されている。

鋼単純合成鋼桁橋で緩衝チェーン連結と緩衝ピン連結とPCケーブル桁連結と鋼製壁との比較を行い、経済性に優れるPCケーブル桁連結が選定されている。

PCケーブル上下部工連結が選定された橋梁の上部工形式は、鋼3径間連続鋼桁橋（2連）であった。PCケーブルと鋼製ブラケットとの比較により、PCケーブルは経済性に劣るが、機能の確実性からPCケーブル上下部工連結が選定されている。

緩衝チェーン連結が選定された橋梁の上部工形式は、鋼合成鋼桁橋であった。PCケーブル連結と緩衝チェーン連結との比較により、経済性に優れる緩衝チェーン連結が選定されている。

鋼製ブラケットが選定された橋梁の上部工形式は、鋼非合成鋼桁橋であった。選定理由は不明である。

RC壁が選定された橋梁の上部工形式は、鋼単純I桁橋とPC単純プレテンT桁橋であった。PC単純プレテンT桁橋でRC壁と鋼製ブラケットとPCケーブル連結との比較を行い、経済性・維持管理性に優れるRC壁が選定されている。

1.5S_E確保（RC構造）が選定された橋梁の上部工形式は、PC単純プレテン単純床版橋とRC床版+PCポステンT桁+PCプレテンT桁であった。RC床版+PCポステンT桁+PCプレテンT桁でRC構造と鋼製との比較を行い、経済性に優れるRC構造が選定されている。

（6）基礎

今回、基礎を耐震補強した事例は収集されなかった。

（7）支承部

支承部を耐震補強した事例は4例が収集され、RC壁設置が2例、増設横桁+アンカーバーが1例、支承取替えが1例であった。

RC壁設置が選定された橋梁の上部工形式は、RC中空床版+鋼合成桁とPC単純プレテンT桁橋であった。PC単純プレテンT桁橋でRC壁と鋼製ブラケットとの比較を行い、経済性・維持管理性に優れるRC壁が選定されている。増設横桁+アンカーバーが選定された橋梁の上部工形式は、鋼単純H桁（2連）であった。増設横桁+アンカーバーと鋼製壁とRC壁との比較により、経済性に優れること、落橋防止構造との組み合わせが良いことから増設横桁+アンカーバーが選定されている。

支承取替えが選定された橋梁の上部工形式は、鋼単純合成鋼桁橋であった。支承を取り替えた理由は不明である。

（8）上部工・その他部材

今回、上部工を耐震補強した事例は収集されなかった。横変位拘束構造について、今回収集された事例は2例のみであるが、2例とも鋼桁橋であり、アンカーバー形式が採用されている。

4. 照査、検証 WG

本WGでは、耐震補強設計における照査・検証方法および落橋防止システム設計について、設計成果品から具体的な設計方針・設計手法について整理を行った。また、耐震補強設計における各照査項目について、適用示方書等の条件により設計方針・設計手法の変化について検討した。また、設計者の判断となる項目について設計フロー（案）を提示した。

4.1 分析対象橋梁

本WGで分析対象とした橋梁は、代表的な耐震補強工法であるRC巻き立て工法で耐震補強されている橋梁とした。また、落橋防止システム設計については、主に設計手法が設計者の判断により異なることが多いと考えられるコンクリート部材に着目することとし、変位制限構造および落橋防止構造としてコンクリート壁を用いた橋梁を対象とした。

4.2 耐震補強照査

（1）基礎資料収集および調査の実施状況

下部工の構造寸法や下部工の配筋調査は実施されているが、ほとんどの橋梁において、基礎の既存資料が無い場合においても不可視部分であることから、復元設計等の対策は実施されていないことが分かった。耐震補強設計においては、柱の補強が進んでいるなか基礎を含めた照査も重要なことから、現地調査方法や復元設計の実施を行う必要があると考えられる。そのための信頼性がある調査方法等の開発が望まれる。

（2）既設橋の照査

1) 塑性ヒンジのモデル化、復元力特性および減衰モデル

解析に用いている各種モデルの設定は、静的解析・動的解析の種類に関わらず、ほぼ同じモデルが採用されていることから、設計者が意図的に解析モデルの変更を行わないか、あるいは特殊な解析条件が必要となる場合を除いて、標準的なモデルが採用されていることがわかった。塑性ヒンジに対しては、ほとんどM-φモデルが採用されていることから、M-θモデルが優位

(あるいは適切)と判断されるケースはほとんどないと考えられる。

2) コンクリートの品質試験、強度および劣化状況の解析モデルへの反映

耐震補強において、品質試験、強度および劣化状況の確認は、対象となる構造物の品質を確認する目的であることが多く、架設年次に採用された適用示方書通りの設計基準強度を品質試験にて確認していると考えられる。品質試験を実施している場合においても、試験数などから構造物全体の強度を確認する妥当性が得られにくいことから、その結果を解析モデルに反映していないと考えられた。また、設計基準強度に対して品質試験結果（反撓硬度試験）から得られるコンクリート強度が下回る場合には、安全側の配慮として試験結果を採用されていた。

今回収集した資料において、ASR等で長期強度の信頼性が期待できないものが確認できなかつたことから、この場合は解析モデルに反映される場合もあると推定される。

今後、試験結果を採用する場合、設計基準強度を採用する場合、劣化の状況に応じた採用基準など、今後何らかの目安を提示する必要があると考えられる。

3) 可動橋脚の分担重量

可動橋脚における分担重量は、基本的に上部工反力の1/2とするように道路橋示方書にて定められている。これは、可動支承が損傷あるいは機能を逸した場合に、当該下部工がその荷重を負担できることを目的としている。この調査では、「反力の1/2」、「0（ゼロ）」のケースが確認されている。「0（ゼロ）」のケースでは、静的解析と動的解析の両方を実施しており、静的解析時は「反力の1/2」、動的解析時には「0（ゼロ）」としており、基本的な設計思想は基準通りに扱われている。

可動橋脚の上部工分担重量は、支承の機能と密接に関連しており、今後は支承の取替と道示に耐震補強が行われる場合は分担重量の取扱いには検討の可能性があると考えられる。

4) 衝衝突の影響

衝衝突を考慮した耐震補強設計は、橋梁全体系補強を前提として、伸縮遊間が狭くかつ橋脚にかかる負担を軽減すること（変位拘束）を目的に行われることが多い。

衝衝突は、上部工の移動量が衝遊間量を超過した場合に生じるが、一般的に衝突が生じない範囲で補強設計を行うことが多く、今回も対象橋梁の7割程度は「衝突なし」となっている。衝突の影響を考慮する場合は、橋台およびその

背面の地盤の評価と適切なモデル化が必要となるため、モデル化の妥当性等の検証が必要となる。

5) ディープビーム効果

ディープビーム効果は、平成8年道示から導入された概念であり、主に橋軸直角方向におけるせん断耐力の評価方法である。適用事例も徐々に増加しており、既設構造物の保有耐力を最大限に活用する設計思想が浸透しつつあることが確認できる。

6) 柱の段落し部

柱の主鉄筋に段落しがある場合の照査方法については、ほとんどが非降伏として照査されており、一部において降伏曲率の2倍としているものがあった。照査値が異なりは耐震性能の差違につながることから、管理者として照査値を明確にする必要があると考えられる。

7) 基礎照査

基礎の照査は、過去の被災事例から基礎に大きな被害が確認されていないことから、照査を行った事例が多くない。これは、基礎の設計における安全率が一般的にそれ以外の部材に比べて高く設定されていると考えられていることがあり、被災事例からもこの考え方を裏付ける結果となっている。また、地上部は竣工図書等がなくとも、形状寸法調査や品質調査等から各種諸元の確認が可能であるが、基礎は地質構成・諸元等の確認が困難であることもあり、積極的に照査を行える環境が整っていなかったと考えられる。

基礎の照査は、橋脚補強を前提としている場合、補強後の橋脚耐力を基準に照査する必要があるので、設計上の必要性の観点からも実施されていない事例がほとんどであると考えられる。L2照査における照査方法は、橋軸・直角方向とともに、耐力照査と応答塑性率照査とともに事例があり、基礎の保有耐力に余裕がある場合には応答塑性率照査が採用されるので、構造物の特性に応じて方法が選定されていると考えられる。

（3）補強後の照査

1) 基礎照査

耐震補強後は、一般的に基礎のかかる荷重が増加するので、L1及びL2に対して耐力照査を行うことが望ましいが、先に述べた理由から、竣工図書が得られない場合には正確な照査結果が得られない場合が多い。

L1照査は、L2照査結果を満足すればL1を満足すると考えられており、実施されるケースが少ないと考えられる。照査方法は、橋軸・直角方向別に基礎の保有している耐力に差がある

ことが多いので、補強後であっても基礎耐力の方が橋脚基部の耐力に比べて大きい場合には、応答塑性率による照査が行われることになる。その際の許容値は、道路橋示方書に規定されている「4」が採用されている。

4. 3 落橋防止システム設計

(1) けたかかり長

けたかかり長の材料は、PCT 橋の場合、ほぼコンクリート製となっている。これはコンクリートによる拡幅は鋼製と比較して経済的であり、PCT 枠の場合、コンクリートによる縁端拡幅の施工は容易であるため、採用されている傾向が強いと考えられる。一方、その他コンクリート橋は床版橋や箱桁橋であり、支承高が無い場合はコンクリートの打設が困難となる場合がある。よって、コンクリート製に割合が低いと考えられる。なお、鋼桁は I 枠の場合と箱桁の場合のデータとなっている。箱桁の場合はやはり、コンクリート製の施工が困難な場合があるため、鋼製の割合が多いと考えられる。

照査方法において、曲げは許容応力度のみであるが、せん断の照査は軸方向鉄筋のせん断耐力とする場合と棒部材のせん断耐力とする場合でばらつきが見られた。H14 年道示と 3 プロ等が軸方向鉄筋のせん断耐力としている割合が多いが、これは H17 年に発行された「既設橋梁の耐震補強工法事例集 H17.4 (財) 海洋架橋・橋梁調査会」の計算事例が縁端拡幅のせん断耐力を軸方向鉄筋のせん断耐力としていたことが影響している可能性がある。

(2) 落橋防止構造

1) 端支点構造と中間支点構造

端支点においては、PCT 橋の場合はコンクリート製の落橋防止構造が多い傾向となった。これは、コンクリート製は経済的であり、PCT 橋であれば取り付け箇所も比較的確保可能であるため、選定されている傾向が多いと考えられる。一方、そのたコンクリート橋は床版橋、箱桁橋であるため、コンクリート製の落橋防止構造は取り付け箇所が制限されるため、42%と比較的選定されていない。鋼桁は I 枠と箱桁のデータとなっており、条件が様々となっている。選定している構造もばらつきが多い。中間支点においては桁連結構造 (PC ケーブル) がどの形式も多い傾向となっている。固有周期や桁重量等の桁連結条件を満足しやすく、維持管理面でも優れるため選定している傾向が強いと考えられる。

2) 落橋防止構造の照査方法

落橋防止構造の照査方法において、H14 道示

と 3 プロ等の曲げ照査は終局耐力法の割合が比較的多い。これは縁端拡幅のせん断照査と同様に「既設橋梁の耐震補強工法事例集 H17.4 (財) 海洋架橋・橋梁調査会」の計算事例において、コンクリート製の落橋防止構造の曲げ照査を終局耐力としていることが影響している可能性がある。また、せん断照査はほぼ棒部材による照査としている。これは「既設橋梁の耐震補強工法事例集 H17.4 (財) 海洋架橋・橋梁調査会」の計算事例がコンクリート製の落橋防止構造のせん断照査を棒部材のせん断耐力としていることが影響している可能性がある。

3) 横桁構造

横桁構造は、上部工形式に合わせる傾向が強い。これは施工上、鋼桁に対しては鋼部材で補強する方がやりやすく、コンクリート桁に対しても同様であると考えられる。また、照査方法についてばらつきがあり、道示別でも明確な傾向は無かった。横桁照査については設計者の判断にゆだねられる傾向が強いと考えられる。

(3) 変位制限構造

1) 端支点構造と中間支点構造

端支点においては、鋼桁はアンカーバーや鋼製ストッパー等の鋼製構造が多数を占める傾向であった。PCT 橋の場合はコンクリート製構造が多い傾向であった。一般的には、アンカーバーやコンクリート壁は簡易な構造かつ経済的であり、上部工形式・主桁形状および取付条件等の施工容易性や取付後の構造系変化が少ないこと等の理由により選定傾向が多くなっていると考えられる。中間支点においても、同様な傾向になっている。

2) 変位制限構造照査方法

変位制限構造の照査方法において、H8、H24 道示と 3 プロ等の曲げ照査は許容応力度法による照査の割合が多くなっているが、H14 道示については終局耐力法による照査が半数に近い割合となっている。これは「既設橋梁の耐震補強工法事例集 H17.4 (財) 海洋架橋・橋梁調査会」の計算事例において、コンクリート製の落橋防止構造の曲げ照査を終局耐力としていることが影響している可能性がある。

せん断照査は、棒部材による照査が多数を占めている。これは「既設橋梁の耐震補強工法事例集 H17.4 (財) 海洋架橋・橋梁調査会」の計算事例がコンクリート製の落橋防止構造のせん断照査を棒部材のせん断耐力としていることが影響している可能性がある。

鋼部材の許容応力度割増し(安全率)は、H8 道示では 1.7、H14 道示では 1.5 を採用しており、

H24 道示では 1.5 を採用している事例はあるものの、多くは 1.7 を採用している。これは、道示改訂の変遷によるものであり、耐震設計編の支承における鋼部材照査について L2 地震動に対する許容応力度の割増し係数が H8 および H24 道示では 1.7、H14 道示では 1.5 と記載されていることによる。

3) 橫桁構造

横桁構造は、上部工形式(材質)に合わせる傾向が強い。これは施工上、鋼桁に対しては鋼部材で補強する方がやりやすく、コンクリート桁に対しても同様であると考えられる。また、本事例においては、横桁補強が必要となった橋梁の割合は 75% であった。

照査方法についてはばらつきがあり、道示別でも明確な傾向は無かった。横桁照査について

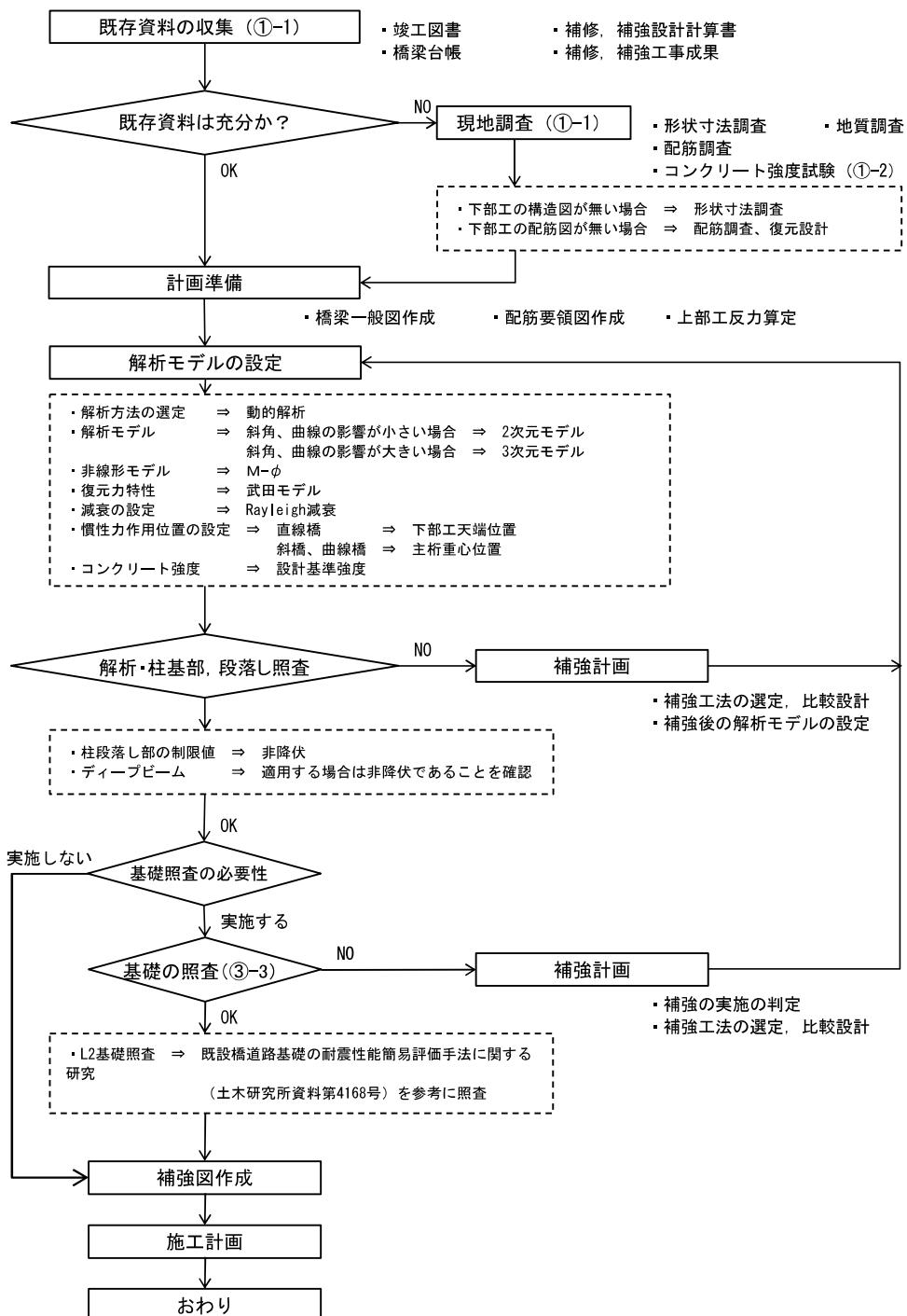


図 1 RC 巻き立て工法による耐震補強設計フローの例 (参考)

は設計者の判断にゆだねられる傾向があると考
えられる。

4.4 設計フロー案の提案

RC 卷き立て工法による耐震補強設計および落橋防止システム設計における設計フロー（参

考）を図 1、図 2 に示す。

なお、ここに示す設計フロー（参考）は、今
回の分析結果をもとに本分科会で提案するもの
であり、実際の耐震補強設計に参考とする場合
には対象橋梁の諸条件に応じて参考にされたい。

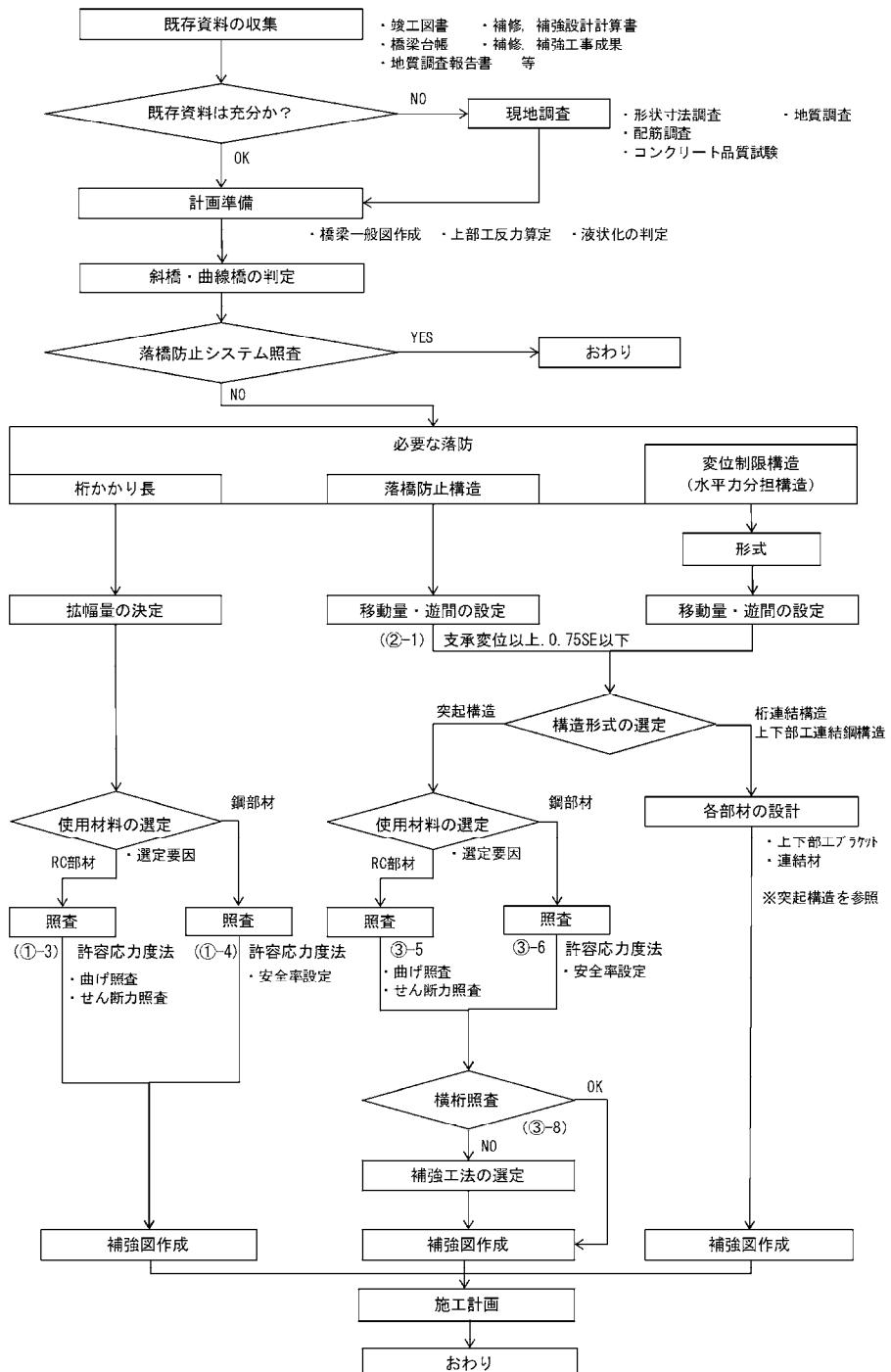


図 2 落橋防止システムの設計フローの例（参考）

5. 補強工法 WG

本WGでは、施工された橋梁の耐震補強工法について資料収集を行い、補強部位ごとに整理した。本報告書では、落橋防止構造で耐震補強した13橋梁を対象に、補強工法事例について紹介する。

落橋防止構造は、以下の基本的な構造から、補強対象橋梁に適合する工法が選定されている。

- ・上部構造と下部構造を連結する構造(以下、上下部連結構造)
- ・2連の上部構造を互いに連結する構造(以下、桁連結構造)
- ・上部構造および下部構造に突起を設ける構造(以下、突起構造)
- ・桁かかり長を大きく(必要桁かかり長の1.5倍以上を確保)確保する構造(以下、1.5S_{ER}確保)

分析を行った13橋に採用されている落橋防止構造は、上下部連結構造が40%(8橋)、桁連結構造が25%(5橋)、突起構造が25%(5橋)、1.5S_{ER}確保が10%(2橋)であり、上部下部構造を連結する事例が多く見られた(図3)。なお、対象橋梁数(13橋)と図3の合計数(20橋)が異なっているのは、1つの橋に複数種類の落橋防止構造が設置されているためである。



写真1 PCケーブルの設置例（上下部連結）



写真2 PCケーブルの設置例（桁連結）

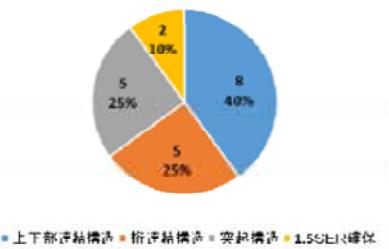


図3 落橋防止構造の種別（橋梁数）

(1) 上下部連結構造（8橋）

上下部連結構造の材料種別は、PCケーブルが87%(7橋)、緩衝チェーンが13%(1橋)であり、PCケーブルを採用する事例が多く見られた(写真1、図4)。

(2) 桁連結構造

桁連結構造の材料種別は、PCケーブルが80%

(4橋)、緩衝チェーンが20%(1橋)であり、上下部連結構造と同様にPCケーブルを採用する事例が多く見られた(写真2、図5)。上下部連結構造と桁連結構造を併用する場合、上下部構造連結、桁連結とともにPCケーブルを採用するなど、使用材料の統一が図られている。

(3) 突起構造

突起構造の材料種別は、RC壁が80%(4橋)、

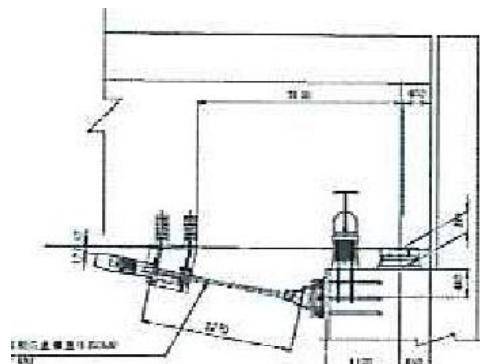


図4 PCケーブルの設置例（上下部連結）

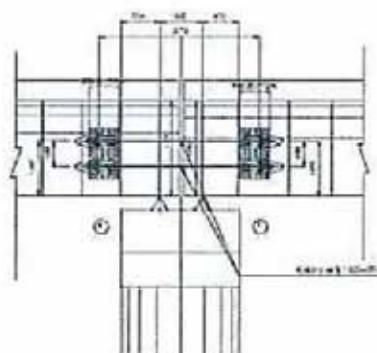


図5 PCケーブルの設置例（桁連結）

鋼製壁が 20% (1 橋) であり、RC 壁の採用事例が多く見られた (写真 3、図 6)。RC 壁は、コンクリート桁の端部横桁により移動を拘束する構造として橋座部に設置されている。橋座部の RC 壁を設置するスペースを確保するために縁端拡幅が行われている。鋼製壁は、鋼桁の下フランジに設置されており、堅壁や脚柱の壁面 上部により移動を拘束する構造となっている。



写真 3 RC 壁の設置例 (突起構造)



写真 4 RC ブラケット (1.5 S_ER 確保)

6. おわりに

本研究では、九州で耐震補強が行われた道路橋を対象に、耐震補強の設計基準や設計手法、施工工法など、耐震補強に関する具体的な知見を整理し、資料を取りまとめた。こうした耐震補強のデータベース化により、今後の耐震補強の設計や工事に有効活用を図るとともに、九州における橋梁技術者相互の情報共有や耐震補強に関わる技術を向上できれば幸いである。

今後は、2016 年 4 月 14 日と 4 月 16 日に発生した熊本地震に対し、耐震補強されていた道路橋において耐震補強効果を確認するとともに、甚大な被害を受けた橋梁に対する被害原因と課題点について整理していく予定である。

(4) 1.5 S_ER 確保

必要桁かかり長を 1.5 倍以上確保して落橋防止構造とする形式の採用事例は 2 件と少なく、材料種別は、RC ブラケット、鋼製ブラケットとともに 1 件 (50%) であった (写真 3、図 7、図 8)。橋台堅壁や脚柱及び梁に部材が設置されるため、耐震補強後も支承部周りの維持管理が比較的容易となる。

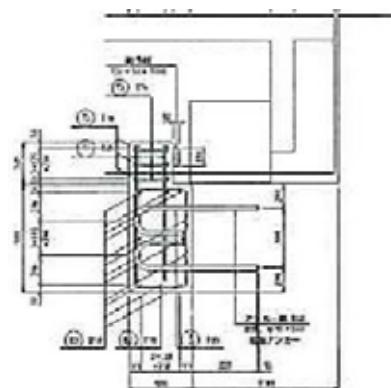


図 6 RC 壁の設置例 (突起構造)

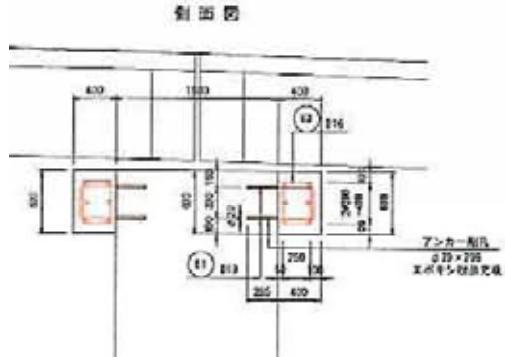


図 7 RC ブラケット (1.5 S_ER 確保)

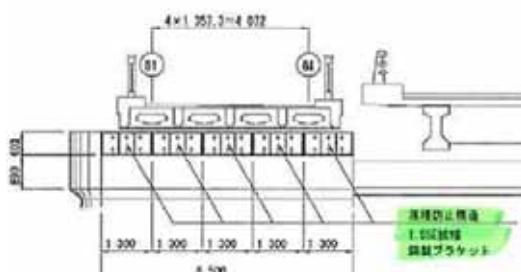


図 8 鋼製ブラケット (1.5 S_ER 確保)

参考文献

- 1) 国土交通省都市・地域整備局:「緊急輸送道路の橋梁耐震補強 3 箇年プログラム」の策定について、平成 17 年 6 月
- 2) 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