

補強対策が困難な既設道路橋に対する耐震設計法の開発

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 18～平 21

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：星隈順一（上席），張広鋒

【要旨】

平成 17 年度から平成 19 年度まで緊急輸送道路の橋梁耐震補強 3 箇年プログラムが実施されたが、今後の効率的な震災対策事業に資するためには、本 3 箇年プログラムの技術的なフォローアップを行うとともに、現場の個別条件を加味した性能評価の高度化、対策が困難となる橋梁に対する新しい工法の開発等が必要とされている。本研究では、既設特殊橋梁・長大橋梁の性能評価手法の高度化、補強対策が必要とされる橋に対する耐震補強法の選定における考え方の整理、照査設計検討例の作成等を行ったとともに、既設 RC 橋脚の段階的耐震補強方策の策定、現行耐震水準にグレードアップさせるための耐震補強工法の開発を行った。また、検討の結果をまとめ、既設特殊橋梁・長大橋梁の耐震補強設計に関する参考資料（案）および RC 橋脚のアップグレード耐震補強設計マニュアル（案）を作成した。

キーワード：特殊橋梁，長大橋梁，RC 橋脚，耐震性能照査，耐震補強

1. はじめに

被災時の円滑な救急・救援活動や緊急物資の輸送、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うち落橋等の甚大な被害を受ける可能性のある橋を対象に、橋脚補強と落橋防止対策を優先的かつ限定的に実施する緊急輸送道路の橋梁耐震補強 3 箇年プログラムが平成 17 年度～平成 19 年度まで実施された。この 3 箇年プログラムでは、対象路線にある昭和 55 年道路橋示方書よりも古い基準を適用した橋梁において、段落し部のある鉄筋コンクリート（RC）製単柱橋脚、鋼製単柱橋脚および連続橋の段落し部のある RC 製固定橋脚に対しては橋脚の補強、両端が橋台でない単純桁、ゲルバー桁および流動化の影響を受ける可能性のある連続桁に対しては落橋防止システムの設置が行われている。また、対象路線にあるトラス橋、アーチ橋、斜張橋、吊橋等の特殊橋梁および道路橋示方書の適用範囲外となる特殊橋梁・長大橋梁も 3 箇年プログラムの補強対象とされた。

一方、今後の効率的な震災対策事業に資するためには、同 3 箇年プログラムの技術的なフォローアップを行うとともに、現場の個別条件を加味した耐震性能評価の高度化、対策が困難となる橋梁に対する新しい工法の開発等が必要とされている。このような背景を踏まえ、本研究では、既設特殊橋梁・長大橋梁および既設 RC 橋脚を対象として、耐震性能評価の手法、補強対策が必要とされ

る橋に対する耐震補強法の選定における考え方の整理、耐震補強工法の開発等を行った。また、検討の結果をまとめ、既設特殊橋梁・長大橋梁の耐震補強設計に関する参考資料（案）および RC 橋脚のアップグレード耐震補強設計マニュアル（案）を作成した。

2. 既設特殊橋梁・長大橋梁の性能評価手法の高度化および耐震補強方法の検討

2.1 既設特殊橋梁・長大橋梁の耐震構造上の重要部位

既設特殊橋梁・長大橋梁において所要の耐震性能を確保するためには、既往の地震被害を分析した上、耐震構造上の重要部位を抽出するとともに、現況の耐震性能の適切に評価し、地震時に必要とされる耐震性能を確保できるような方策を講じることが必要とされる。

これまで、大きな地震を経験したこと自体が少ないという点もあるが、過去の地震による特殊橋梁・長大橋梁の被災事例が少ない。本研究では、最近の地震による特殊橋梁・長大橋梁の被災例として、1989 年の米国ロサンゼルス地震、1995 年兵庫県南部地震、1999 年台湾集集地震、2001 年芸予地震における被災事例の整理を行った。表-1 に、例として兵庫県南部地震による被害の概要を示す。これらの地震被災例を分析し、代表的な特殊橋梁・長大橋梁の耐震構造上の重要部位と留意すべき

表-1 兵庫県南部地震による特殊橋梁・長大橋梁の主な被害¹⁾

橋梁名	構造形式	橋長	被害の概要
西宮港大橋	単純ニールセンローゼ桁橋	252m	隣接桁の落下 ピボット支承上弦の破断、割れ 斜吊ケーブルの張力抜け
六甲アイランド橋	ダブルデッキ単純ローゼ桁橋	218m	ピボットローラー支承(可動)の破壊 アーチ主構の橋軸直角方向への移動(3.1m)、支承からの脱落 上横構・支材の座屈変形
東神戸大橋	3径間連続ダブルデッキ斜張橋	885m	端橋脚のウインド脊の破損、ペンデル脊のピンの抜け ダンパーのはずれ 桁端部の浮き上がり 橋脚の局部座屈
天保山大橋	3径間連続斜張橋	640m	斜材ケーブルのこすれ ケーブルダンパーの損傷 耐震連結装置の損傷 支承部の損傷
神戸大橋	3径間連続ダブルデッキ鋼アーチ橋	319m	中間支点可動脊の限界移動量からの逸脱 端支点ペンデルアイバーの変形
灘浜大橋	5径間連続V脚ラーメン橋	400m	中間支点ピボット支承、端支承、主桁端部、伸縮装置、耐震連結装置、制振装置の損傷
一庫大橋	3径間連続上路式鋼トラス橋	144m	可動支承ローラーの逸脱

と考えられる損傷形態を橋梁構造別に整理すると表-2 のようになる。なお、図-1 には、例として鋼アーチの耐震構造上の重要部位を図にして示している。

2.2 既設特殊橋梁・長大橋梁の耐震性能照査

特殊橋梁や長大橋梁の確保すべき耐震性能の設定においては、被災した場合の路線の代替性の有無や構造条件・施工条件などによる機能回復の難易度等、個々の既設橋梁の条件を適切に考慮して設定することが重要である。特殊橋梁や長大橋梁は一般に橋梁規模が大きいことから、被害を受けた場合の応急復旧や本復旧も容易ではないことが考えられるため、確保すべき耐震性能の設定では、このような点も考慮する必要がある。

また、長大橋梁や特殊橋梁の場合は、個々の現場条件を反映させた設計となり、様々な構造形式が採用されるとともに、多くの特性の異なる部材から構成される構造となる場合も多い。このため、耐震性能の検証方法や耐震補強方法は、従来の一般的な桁橋形式の橋梁と異なるのが一般的である。このような橋梁の性能評価に関しては、橋全体としての耐震性を考慮することが重要である。また、性能評価の基本事項としては、1) 確保すべき性能を明確にするとともに、その性能を確保するために必要とされる橋全体及び各構成部材の限界状態の検討; 2) 地域の条件に応じて個別に検討した上に耐震性能の評価において考慮すべき地震動の設定; 3) 橋の構造特性や材料特性を考慮に入れた性能の評価; 4) 地震後の復旧性、耐震補強の必要性等を含む地震後の橋の状態の評価、等を

表-2 特殊橋梁・長大橋梁の耐震構造上の重要部位と留意すべき損傷形態

橋梁形式	耐震構造上の重要部位	留意すべき損傷形態
鋼トラス橋	上弦材、下弦材、斜材	座屈
	横構造	座屈
	支承部	損傷
鋼ラーメントラス橋	脚柱 基部	損傷、アップリフト
	上下部剛結部	損傷
	横構	降伏、座屈
コンクリートアーチ橋	アーチリブ 基部	曲げ降伏、せん断
	アーチリブ クラウン部	曲げ降伏、せん断
	支承部	支承本体の損傷、アップリフト
鋼アーチ橋	アーチリブ 基部	降伏、座屈
	アーチリブ クラウン部	損傷
	端部支柱	降伏、座屈
	支承部	支承本体の損傷、アップリフト
コンクリート斜張橋	主塔基部	曲げ降伏、せん断
	ケーブル	張力抜け
	支承部	支承本体の損傷
鋼斜張橋	主塔基部	降伏、座屈
	ケーブル	張力抜け
	支承部	支承本体の損傷

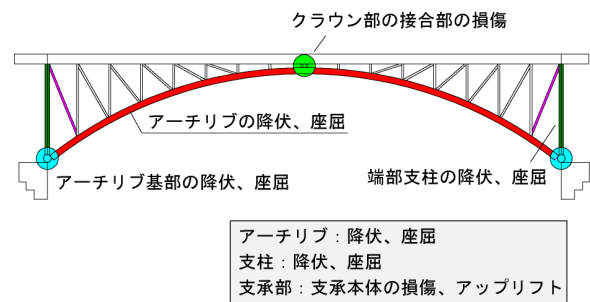


図-1 鋼アーチ橋の耐震構造上の重要部位

考慮すべきである。図-2 に、本研究で整理した既設特殊橋梁・長大橋梁の性能評価の流れを示す。

既設橋梁の耐震性能照査では、許容値を超過するか否かを機械的に判定するのではなく、許容値の超過の程度を考慮し、その超過が橋の部材としてどのような損傷状態となるのかを判断して耐震性能を照査する必要がある。照査方法としては、一般に変位照査法とひずみ照査法が挙げられる。変位照査法とは、橋の要求性能に応じて設定された許容限界変位に対して、非線形動的解析により求められた最大応答変位を照査する方法である。変位照査法は、基本モードが卓越する構造物に適用可能であり、実務でよく用いられる方法である。一方、ひずみ照査法とは、橋の要求性能に応じて設定された部材の許容限界ひずみに対して、ファイバーモデル等の解析方法を用いる非線形動的解析により求められた最大応答ひずみを照査する方法である。ひずみ照査法は基本モードが卓越し

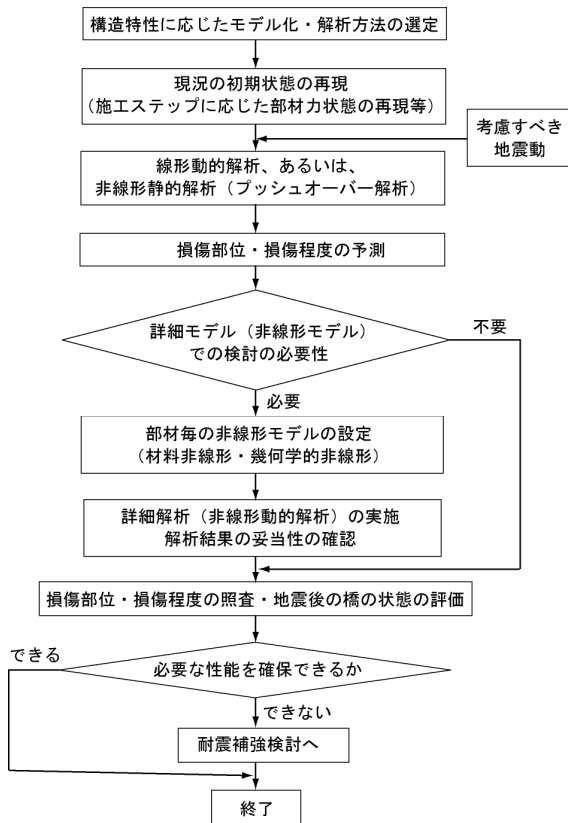


図-2 既設特殊橋梁・長大橋梁の耐震性能評価の流れ

ない構造物においても適用可能である。本研究では、変位照査法に関する検討の他、鋼アーチ橋に対してひずみ照査法による照査を行い、ファイバーモデル解析を用いる場合の照査方法や照査の流れを検討した。図-3 に、ファイバーモデル解析を用いた場合の照査例を示す。

2.3 既設特殊橋梁・長大橋梁の耐震補強

特殊橋梁や長大橋梁の場合は、それぞれ特徴的な構造特性を有するため、一律の補強対策工法の適用が容易ではないのが一般的である。このため、1橋1橋の損傷部材の特定と耐震性能の検討、並びにこの結果に応じた耐震対策工法の選定が必要とされる。図-4 は、既設特殊橋梁・長大橋梁に対する一般的な耐震対策工法の選定の流れを示すものである。耐震補強工法の選定においては、現況評価結果に基づき、地震時に弱点部となる部材・部位を特定し、その部材・部位の損傷を低減し、橋全体として地震時の安定を保つことができるような対策を実施する。耐震補強レベルとしては、当該橋梁に確保すべき機能と性能を考慮する必要がある。また、部材補強（部材の耐力・じん性が不足する場合）を行う場合に、橋全体の剛性が高くなると、固有周期が短周期化し、これによって作用地震力が大きくなり、補強後の耐震性能が厳

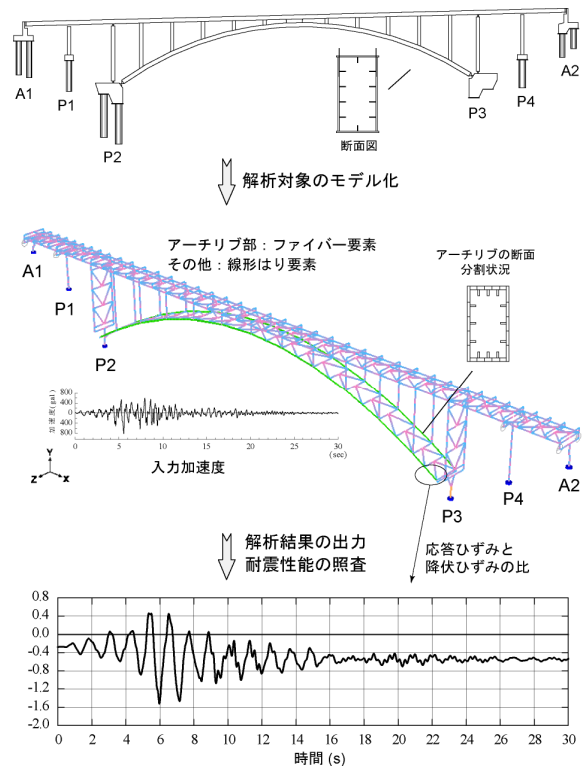


図-3 ファイバーモデル解析による照査の一例

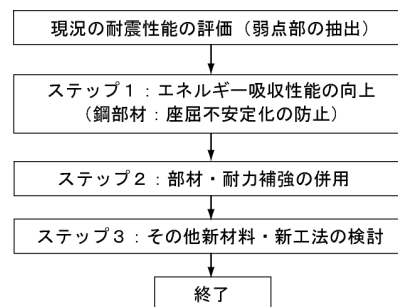


図-4 既設特殊橋梁・長大橋梁に対する耐震対策工法の選定の流れ

しくなる場合があるため、剛性を向上させる補強工法を選定する場合には留意する必要がある。このため、図-4 に示すようにダンパー等よりエネルギー吸収性能をできるだけ向上させて地震時の振動を低減する対策工法を優先的に検討するのが一般的である。なお、特殊橋梁や長大橋梁の場合は、部材数も多く、力学的にも相互に影響し合う構造であるため、一部の部材補強が別の部材の損傷を発生させるなど相互作用を生じ得るため、このような観点からもダンパー等の併用によりエネルギー吸収性能をできるだけ向上させて地震時の振動を低減させるような対策工法を優先的に考慮すべきである。

表一-3 既設特殊橋梁・長大橋梁における想定される損傷と耐震性能の向上策

橋梁形式	主要部位	想定される損傷	損傷の影響度	損傷の修復性	考えられる耐震性能向上方針	
桁橋	ゲルバー桁	上部構造ゲルバーヒンジ部の損傷	A	B	・ゲルバーヒンジ部の補強(支承・落橋防止システムを含む) ・ゲルバーヒンジ部の相対変位を低減する応答制御構造(免震構造・変位制御構造等)	
	その他	一般部の支承・橋脚の損傷(一般橋に同じ)	A	B	・免震構造(免震支承・ダンパーの設置)、変位制御構造などによる全体応答低減 ・部材補強による耐力・じん性向上(RC部材:鋼板・RC・炭素繊維巻立て、鋼部材:コンクリート充填、鋼リブ補強など) ・支承部の補強(支承・落橋防止システムを含む)	
	ラーメン橋	上部構造 主桁中間部・主桁支点部の損傷、 上下部構造剛結部の損傷	B	B	・免震構造(免震支承・ダンパーの設置)、変位制御構造などによる全体応答低減 ・部材補強による耐力・じん性向上(接着工法・アウトケーブル工法など)	
トラス橋	ゲルバートラス橋	弦材	下弦材の座屈・損傷・破断	A	C	・免震構造(軸降伏型ダンパー設置・床組免震・免震支承など)、変位制御構造などによる全体応答低減 ・部材補強による耐力・じん性向上(RC・炭素繊維シート巻立て、コンクリート充填、鋼リブ補強など)
		斜材	斜材の座屈・損傷・破断	B	B	・部材補強による耐力・じん性向上(RC・炭素繊維シート巻立て、コンクリート充填、鋼リブ補強など)
		横構	横構の座屈・損傷・破断	C	A	・接合部の補強、ダンパーブレースの導入
		床組	大変位による弦材への衝突による弦材の座屈・損傷・破断	C	B	・免震構造(床組免震など)による応答低減 ・緩衝材の設置による衝突力緩和 ・床組の支承部の補強(変位制限機構の付加)
	支承	支承の損傷	A	B	・免震構造(軸降伏型ダンパー設置・床組免震・免震支承など)、変位制御構造などによる全体応答低減 ・支承部の補強(支承・落橋防止システムを含む)	
上下路式トラス橋	弦材	トラス部材の座屈・損傷・破断	A	C	・免震構造(軸降伏型ダンパー設置・免震支承・ダンパーの設置など)、変位制御構造などによる全体応答低減 ・部材補強による耐力・じん性向上(RC・炭素繊維シート巻立て、コンクリート充填、鋼リブ補強など)	
	斜材	斜材の座屈・損傷・破断	B	B	・部材補強による耐力・じん性向上(RC・炭素繊維シート巻立て、コンクリート充填、鋼リブ補強など)	
	横構	横構の座屈・損傷・破断	C	A	・接合部の補強、ダンパーブレースの導入	
その他	支承・橋脚の損傷(一般橋に同じ)	A	B	・免震構造(免震支承・ダンパーの設置)、変位制御構造などによる全体応答低減 ・部材補強による耐力・じん性向上(RC部材:鋼板・RC・炭素繊維巻立て、鋼部材:コンクリート充填、鋼リブ補強など) ・支承部の補強(支承・落橋防止システムを含む)		
アーチ橋	上路式アーチ橋	アーチ部材	アーチリブの座屈・損傷 アーチ定着部の損傷	A	C	・免震構造(免震支承・ダンパーの設置)、変位制御構造などによる全体応答低減 ・アーチリブ部材補強(鋼板接着、RC・炭素繊維巻立て、コンクリート充填、鋼リブ補強など)
		鉛直支材	座屈・損傷	B	B	・部材補強による耐力・じん性向上(RC・炭素繊維巻立て、コンクリート充填、鋼リブ補強など)
		横構	横構の座屈・損傷・破断	C	A	・接合部の補強、ダンパーブレースの導入
	中路上式アーチ橋	アーチ部材	アーチリブの座屈・損傷	A	C	・免震構造(免震支承・ダンパーの設置)、変位制御構造などによる全体応答低減 ・アーチリブ部材補強(鋼板接着、RC・炭素繊維巻立て、コンクリート充填、鋼リブ補強など)
		鉛直支材 吊材	座屈・損傷	B	B	・部材補強による耐力・じん性向上(RC・炭素繊維巻立て、コンクリート充填、鋼リブ補強など)
		横構	横構の座屈・損傷・破断	C	A	・接合部の補強、ダンパーブレースの導入
	中路上式	桁とアーチ部材の衝突によるアーチリブの損傷	C	B	・免震構造(床組免震など)による応答低減 ・緩衝材の設置による衝突力緩和 ・中路上式の支承部の補強(変位制限機構の付加)	
	下路式アーチ橋	アーチ部材	アーチリブの座屈・損傷	A	C	・免震構造(免震支承・ダンパーの設置)、変位制御構造などによる全体応答低減 ・アーチリブ部材補強(鋼板接着、RC・炭素繊維巻立て、コンクリート充填、鋼リブ補強など)
		吊材	座屈・損傷	B	B	・部材補強による耐力・じん性向上(RC・炭素繊維巻立て、コンクリート充填、鋼リブ補強など)
		横構	横構の座屈・損傷	C	A	・接合部の補強、ダンパーブレースの導入 ・ケーブルソケット部の補強
その他		支承・橋脚の損傷(一般橋に同じ)	A	B	・免震構造(免震支承・ダンパーの設置)、変位制御構造などによる全体応答低減 ・部材補強による耐力・じん性向上(RC部材:鋼板・RC・炭素繊維巻立て、鋼部材:コンクリート充填、鋼リブ補強など) ・支承部の補強(支承・落橋防止システムを含む)	
斜張橋(鋼・コンクリート)	主塔	主塔の座屈・損傷・倒壊	A	C	・免震構造(免震支承、ダンパー支承、ケーブルダンパー設置)、変位制御構造などによる全体応答低減 ・部材補強による耐力・じん性構造(コンクリート充填、RC・炭素繊維巻立て、鋼リブ補強、鋼板接着など) ・主塔基部固定部の補強による転倒防止(アンカー増設など)	
	ケーブル	ケーブルの伸び・破断	A	B	・免震構造(免震支承、ダンパー支承、ケーブルダンパー設置)、変位制御構造などによる全体応答低減 ・ケーブル定着部の補強	
	主桁	主桁の座屈・損傷 主桁と主塔の衝突による主塔損傷・主桁損傷	B	B	・免震構造(免震支承、ダンパー支承、ケーブルダンパー設置)、変位制御構造などによる全体応答低減 ・緩衝材の設置による衝突力緩和 ・主桁の支承部の補強(変位制限機構の付加)	
吊橋	主塔	主塔の座屈・損傷・倒壊	A	C	・免震構造(免震支承、ダンパー支承、ケーブルダンパー設置)、変位制御構造などによる全体応答低減 ・部材補強による耐力・じん性構造(コンクリート充填、RC・炭素繊維巻立て、鋼リブ補強、鋼板接着など) ・主塔基部固定部の補強による転倒防止(アンカー増設など)	
	ケーブル	ケーブルの滑り・抜け	B	C	・免震構造(免震支承、ダンパー支承、ケーブルダンパー設置)、変位制御構造などによる全体応答低減 ・主塔頂部ケーブルサドルの補強(サドル部の滑り止めを含む)	
	補剛桁	補剛桁と主塔の衝突による主塔損傷・補剛桁損傷	B	B	・免震構造(免震支承、ダンパー支承、ケーブルダンパー設置)、変位制御構造などによる全体応答低減 ・緩衝材の設置による衝突力緩和 ・補剛桁の支承部の補強(変位制限機構の付加)	

注1) 損傷の影響度

- A: 構造系の崩壊に繋がる恐れがある
- B: 構造系の崩壊には繋がる可能性は低いが使用性・復旧性に及ぼす影響が大きい
- C: 使用性・復旧性への影響は小さい

注2) 損傷時の修復性

- A: 供用下での修復が可能
- B: 供用下での修復は困難
- C: 修復ほぼ不可能

注3) 上記では主として上下部構造部分の対策を整理。基礎・地盤については要別途考慮。

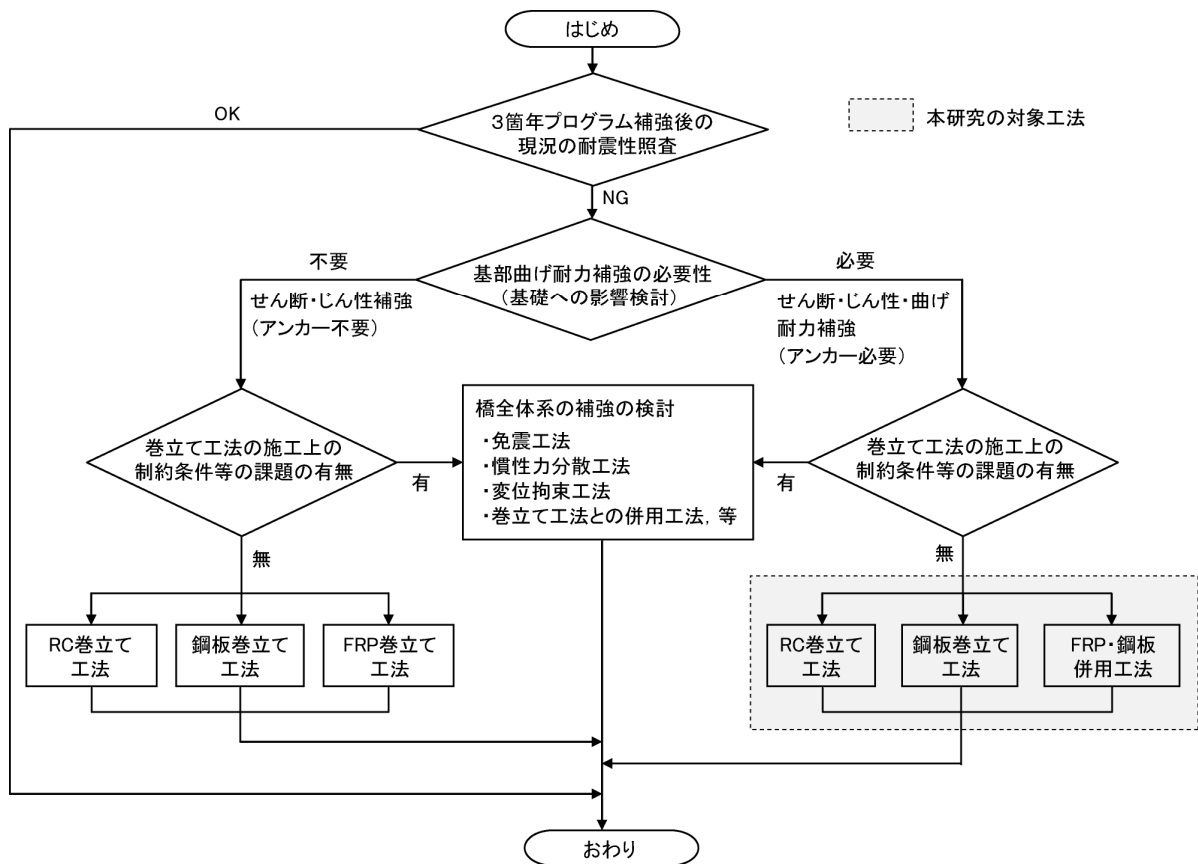


図-5 RC橋脚のアップグレード耐震補強工法の一般的な選定フロー

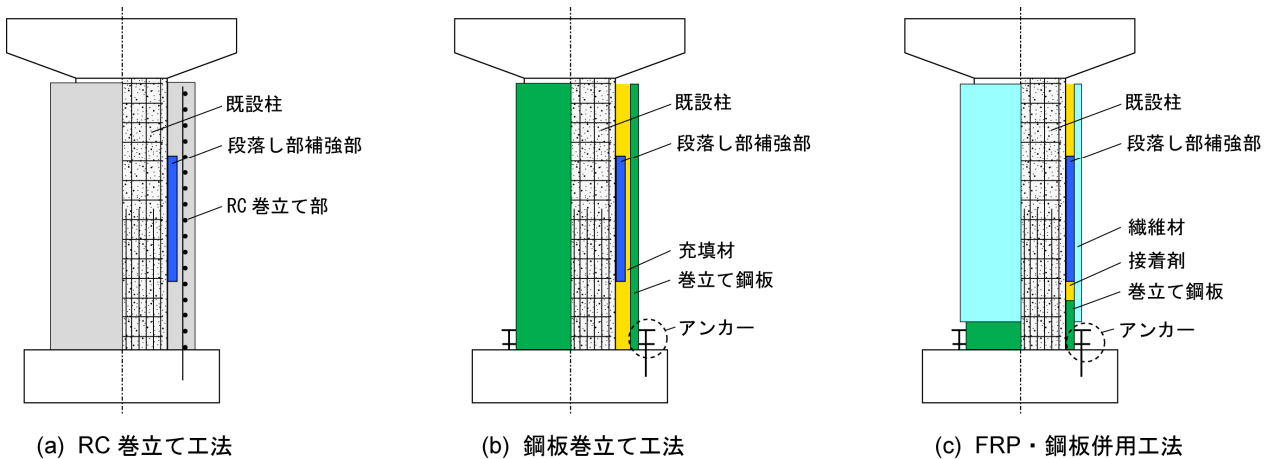


図-6 アップグレード耐震補強工法のイメージ図

なお、本研究では、特殊橋梁・長大橋梁における想定される損傷と耐震性能の向上策を整理した。表-3 にその一覧表を示す。また、検討では、鋼アーチ橋、鋼トラス橋、鋼斜張橋、RCアーチ橋、PC斜張橋等に対して、耐震性能照査および補強設計事例を作成した。

以上の検討結果をまとめ、「既設の特殊橋梁・長大橋梁の耐震性能評価および耐震補強に関する参考資料」の案を作成した。

3. RC橋脚の段階的耐震補強

3.1 RC橋脚のアップグレード耐震補強

3箇年プログラムで主鉄筋段落し部の耐震補強が実施されたRC橋脚のうち、今後の大地震に備え、柱基部の曲げ耐力の補強に伴う橋脚全体のさらなるのアップグレード耐震補強が必要となる場合がある。橋脚基部の補強としては、橋脚がねばり強い構造となるようにじん性補強

を優先し、じん性補強のみでは橋脚に大きな残留変位が発生する場合は、曲げ耐力の向上も必要となる。この場合、橋脚躯体の曲げ耐力を過度に向上させると、基礎構造を含めた補強が必要となることがあるため、基礎が支持できる範囲内でじん性と曲げ耐力の向上をバランスさせることが補強設計を行う上で重要となる。このような考え方の下で、本研究では、段落し部の既存補強部を有効に活かし、アップグレード耐震補強に用いられる補強工法を検討した。図-5 に、RC 橋脚のアップグレード耐震補強工法の一般的な選定フローを示す。図-6 に、検討した3工法のイメージ図を示す。ここで、各工法の概要は以下の通りである。

(1) RC 巻立て工法

本工法は、RC 橋脚躯体の周囲を鉄筋コンクリートで巻立て、新旧コンクリートの付着を確保するとともに、軸方向鉄筋をフーチングに定着することによって耐力を増加させる工法である (図-6(a))。

(2) 鋼板巻立て工法

本工法は、RC 橋脚躯体を鋼板で巻き立て、その間隙を充填材により密実させるとともに、アンカー筋を通じて鋼板をフーチングに定着させる工法である (図-6(b))。

(3) FRP・鋼板併用工法

塑性ヒンジとなる基部の補強には伸び性能の高い鋼板による巻立て工法、塑性ヒンジとならない躯体部の補強には軽量で引張強度の高い FRP を主として軸方向に巻立てる工法を適用し、鋼材と FRP のそれぞれの力学特性を活かす併用工法である (図-6(c))。本工法の補強のメカニズムとしては、アンカーボルトと鋼板の組み合わせによって基部の曲げ耐力・じん性補強を行い、鋼板を介して基部アンカーボルトによる曲げ耐力の増加分を躯体部に巻き立てた FRP に負担させることにより、橋脚全体の耐震性能を向上させることである。FRP と鋼板の接着接合部は、施工性を配慮し、樹脂を用いて接着することとしている。

これらの工法は、それぞれ、構造上特徴があり、適用が有利となる場合も異なる。特に、FRP・鋼板併用工法は、FRP シートを主要補強材としているため、補強による死荷重の増加が少なく、狭隘な場所でも容易に施工可能等のメリットがあり、施工や工期等の制約条件の多い現場への適用が期待できる。

なお、検討した耐震補強工法の補強効果を実験的に検証した上、補強工法の基本的な考え方や設計計算方法等をまとめ、設計マニュアル (案) を作成した。図-7 に作成したマニュアル (案) の目次を示す。

3 箇年プログラムで段落し部の対策を実施した鉄筋コンクリート橋脚のアップグレード補強マニュアル (案)

1. 一般
1.1 基本的な考え方
1.2 設計一般
(1) 適用基準
(2) 既設橋脚の調査
(3) 耐震補強設計の流れ
(4) 断面変化部の設計計算
(5) 主鉄筋段落し部における既設の巻立て補強部の表面処理方法
(6) 補強設計における留意事項
1.3 耐震補強工法の選定
2. 鉄筋コンクリート巻立て工法
2.1 工法の概要
2.2 設計
2.3 構造細目
(1) 巻立てコンクリート厚
(2) 表面処理
(3) 巻立て部に配置する鉄筋
(4) 軸方向鉄筋のフーチングへの定着
(5) 鉄筋のかぶり
(6) 帯鉄筋の継手
(7) 中間貫通鋼材の配置
(8) 組立て用アンカーの施工
2.4 使用材料
(1) コンクリート
(2) 鉄筋
3. 鋼板巻立て工法
3.1 工法の概要
3.2 設計
(1) 一般
(2) 曲げ耐力制御式鋼板巻き立て工法の設計
(3) 鉄筋コンクリートと円形鋼板を併用した下端拘束工法の設計
3.3 構造細目
(1) 鋼板の板厚
(2) 鋼板の分割数
(3) 補強鋼板の現場継手
(4) 鋼板固定用アンカーボルト
(5) 充填材の注入口
(6) 補強鋼板の防食対策
(7) 表面処理
3.4 使用材料
(1) 鋼材
(2) 既設橋脚と鋼板の接着
(3) アンカー用の鉄筋

図-7 3 箇年プログラムで段落し部の対策を実施した鉄筋コンクリート橋脚のアップグレード補強マニュアル (案) の目次

4. アップグレード耐震工法の補強効果の検証

本研究では、検討したアップグレード耐震補強工法を適用した RC 橋脚模型に対して繰り返し交番載荷実験を行い、これらの補強工法による補強効果を検証すること

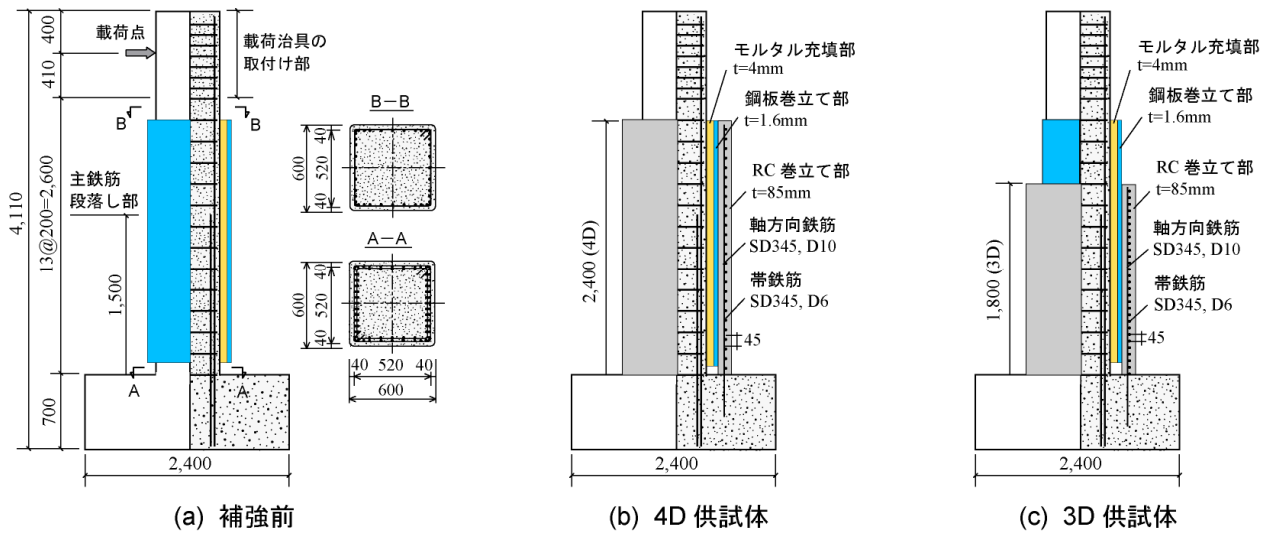


図-8 供試体の概要

とした。以下に、検証実験の概要および主な実験結果を示す。

4.1 RC 巻立て工法

FRP 巻立て工法や鋼板巻立て工法によって主鉄筋段落し部の耐震補強が実施された RC 橋脚に対して、RC 巻立て工法を用いてアップグレード耐震補強を行う場合は、新たな巻立て部と主鉄筋段落し部の既存補強部間に境界面が形成され、外力を受けて橋脚が変形する場合は、この境界面にずれが生じることが予想される。本検討では、アップグレード耐震補強効果に及ぼすそのずれの影響を実験的に検討することとした。

実験では、昭和 55 年道路橋示方書より以前の耐震基準で設計された主鉄筋段落し部を有する RC 橋脚に対して、鋼板巻立て工法により主鉄筋段落し部を補強し、その後、RC 巻立て工法により柱基部の曲げ耐力補強を実施した場合を想定した縮小模型を用い、繰り返し交番载荷を実施した。

図-8 に供試体の概要図を示す。供試体は、断面は 600mm × 600mm の正方形で、基部から載荷点までの高さは 3,010mm、せん断支間比は 5.0 である。柱主鉄筋には SD295 D10 を 2 段配筋し、基部から高さ 1,500 mm の位置で段落ししている。主鉄筋段落し部の補強には、板厚 1.6mm の鋼板を用い、橋脚全高さに補強を実施することとし、その巻立て高さは両方とも 2,400 mm とした。この高さは 4D (D : 断面幅) 相当となる。アップグレード補強部については、巻立て高さによる影響を検討可能にするため、巻立て高さを 4D と 3D の 2 ケースを用いることとした。以下には、両供試



図-9 実験設置状況

体をそれぞれ 4D 供試体と 3D 供試体と呼ぶ。一方、実橋脚の場合は、主鉄筋段落し部の補強用としての鋼板には塗装が施されている。本実験では、アップグレード補強の施工性を鑑み、巻立て鋼板の塗装を除去せず、また特別な処理も施さない状態において鋼板とコンクリート間のずれの影響を検討可能にするため、実橋脚の場合と同様に鋼板の外表面に樹脂系塗料を塗装した。

図-9 に実験設置状況写真を示す。実験では、载荷変位は正弦波とし、载荷速度は 10 mm/sec とした。各载荷ステップの繰り返し回数は 3 回を基本とした。

図-10 に水平荷重-水平変位履歴曲線を示す。ここで、比較するために過去に実施した無補強供試体の包絡線も示している²⁾。ここでの無補強供試体は、図-7(a) に示す供試体の鋼板巻立て補強前の供試体と同様に設計されたものであるが、基部の曲げ破壊を生じさせるために主鉄筋の段落し部を設けていない。図より、両供試体とも、 $2\delta_y \sim 6\delta_y$ にほぼ同程度の耐力を維持し、 $7\delta_y$ からは荷

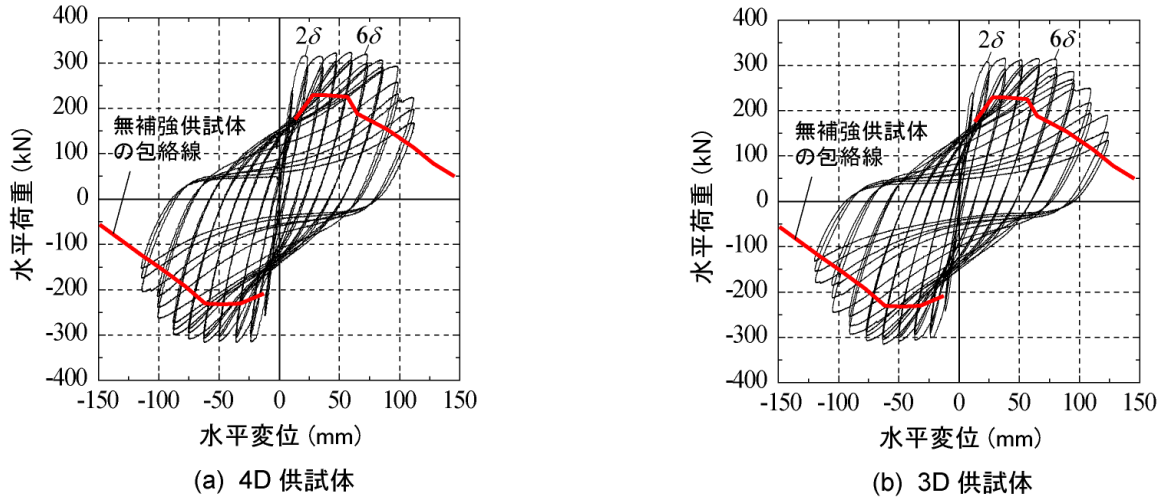


図-10 水平荷重-水平変位履歴曲線

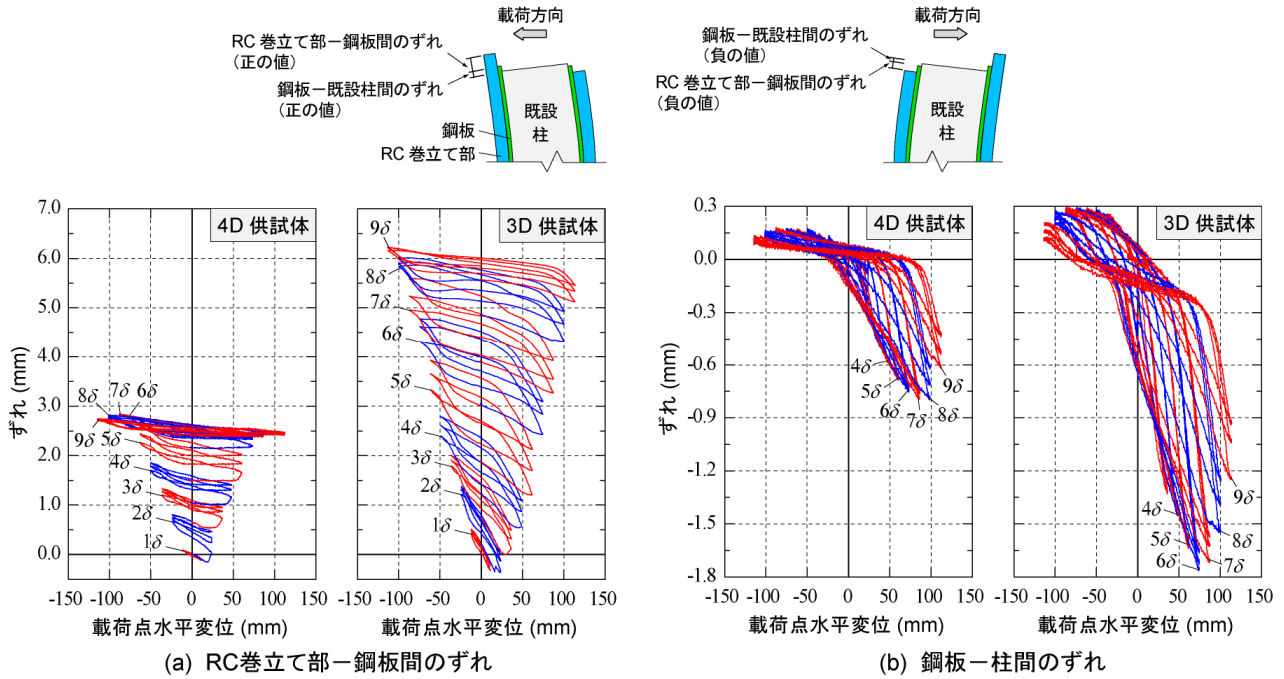


図-11 RC 巻立て部-鋼板間、鋼板-柱間に生じたずれの履歴曲線

重が徐々に低下している。無補強供試体と比べ、両供試体とも高い耐力と変形性能を発揮していることが分かる。図-11 に、橋脚軸方向における RC 巻立て部-鋼板間、鋼板-柱間に生じたずれの履歴曲線を示す。ここで、説明の便宜上、図に示すようにずれの正と負を定義した。図より、両供試体とも、 $2\delta_y$ から $6\delta_y$ までの結果は、載荷変位の増加や同じ載荷ステップにおいても載荷サイクル数の増加に伴ってずれが正の方向に増加して行くことが見られる。RC 巻立て部-鋼板間の最大ずれは、4D 供試体の場合は 2.8mm 程度、3D 供試体の場合は 6.2mm

程度となっている。

ここで、水平荷重-水平変位履歴曲線を考察すると、3D 供試体は、 $7\delta_y$ からの荷重の低下が 4D 供試体より速いが、 $2\delta_y \sim 6\delta_y$ は 4D 供試体と同様な耐荷性状を示すことが分かる。一方、現行耐震設計基準に基づく設計上、耐力が低下し始める時点までを考慮するという観点より、3D 供試体の場合は、橋脚全高さに補強することを想定した 4D 供試体の場合と同様な耐荷性能を有することと考えられる。また、両供試体とも、 $2\delta_y \sim 6\delta_y$ は、載荷変位が増加する度にずれも増加しているのに対し、

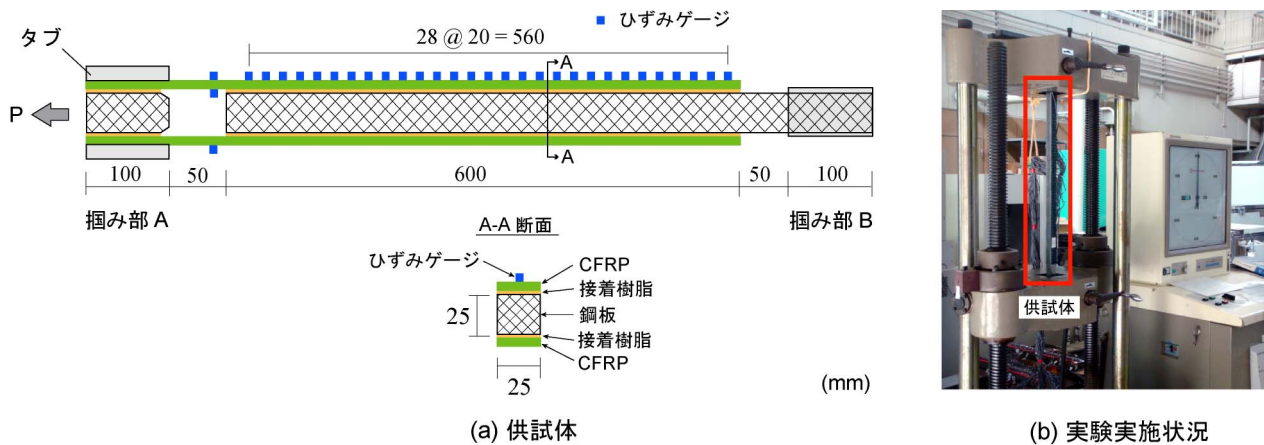


図-12 付着実験の概要

水平荷重-水平変位履歴曲線が安定なループを示していることより、本実験の場合は、耐荷性能に及ぼすずれの影響が明確に生じていないことが分かる。これより、本実験のように、RC 巻立て部の巻立て高さを 3D とすれば、RC 巻立て部と鋼板間や鋼板と柱間にずれが生じて、RC 巻立て部による補強効果が発揮でき、そのずれによる耐荷・変形能の低下が明瞭に生じないと考えられる。

以上の考察より、主鉄筋段落し部の耐震補強が既に実施された RC 橋脚に対して、従来の RC 巻立て工法を用いてアップグレード耐震補強を行う場合においては、RC 巻立て部の巻立て高さを十分に確保すれば、新旧補強部にずれが生じて RC 巻立て部による補強効果が発揮でき、橋脚の曲げ耐力や変形性能を確保できると考えられる。なお、本研究の範囲内では、巻立て高さを 3D とすれば、橋脚全高さに補強を実施する場合と同程度の耐震補強効果を得られることが確認できた。

4.2 FRP・鋼板併用工法

本工法では、従来の鋼板巻立て工法と同様に巻立て鋼板下端部に塑性ヒンジを誘導し、FRP と鋼板の接着接合部では塑性化させないように設計することを基本コンセプトとしている。鋼板巻立て部や FRP 巻立て部は、従来通りの方法によって設計可能であるが、FRP-鋼板接着接合部には、FRP と鋼板間の十分な付着耐力を確保することが重要なポイントとなっている。そこで、本工法的设计手法を確立することに向けて、以下の 2 項目に対して実験的に検討した。まず、FRP-鋼板接着接合部の構造ディテールを確立するために、FRP と鋼板の付着実験を行い、FRP と鋼板の付着特性を検討した。その後、提案の補強工法の補強効果を検証するために、提案の補

強工法を適用した RC 橋脚模型に対して繰り返し交番荷重実験を実施し、従来の鋼板巻立て工法を用いた場合の実験結果と比較することにより、本補強工法の補強効果を検討した。

図-12 に、本研究に用いた付着実験用供試体の概要図および実験実施状況を示す³⁾。供試体は、断面 25mm×25mm の SS400 圧延鋼材の両面に炭素繊維シート (CFRP) を接着して製作したものである。実験では、両面の CFRP の剥離が全面に至るまでに実施した。実験結果に基づいた検討結果は以下の通りである。1) 付着界面に剥離が生じることによって付着力の変位に対する増加率が低下する。剥離がある程度の範囲まで進行すると荷重が増加しなくなる。2) 剥離開始時における CFRP のひずみ値は、接着層数が多いほど小さくなる傾向がある。ケース 3 とケース 4 の場合において、最も低い値は 3,500 μ 程度となっている。3) 有効付着長は、接着層数が多いほど長くなる傾向がある。本実験結果では、繊維目付 600g/m² の CFRP を用いた場合、1 層接着の場合で 80~100mm、2 層接着の場合で 100~160mm、3 層接着の場合で 120~180mm、4 層接着の場合で 140~200mm 程度となっている。

FRP・鋼板併用工法の補強効果を検証するための実験では、FRP 巻立て工法によって主鉄筋段落し部の耐震補強が既に実施された RC 橋脚を対象としている。図-13 に、供試体の寸法、段落し部に対する既存補強部および FRP・鋼板併用工法による補強部の概要を示す。供試体は、断面が 600mm×600mm の正方形で、せん断支間比は 5.0 である。軸方向鉄筋と横拘束筋には、それぞれ SD295 D10 と SD295 D6 を用いた。提案の補強工法によるアップグレード補強を実施する前に、段落し

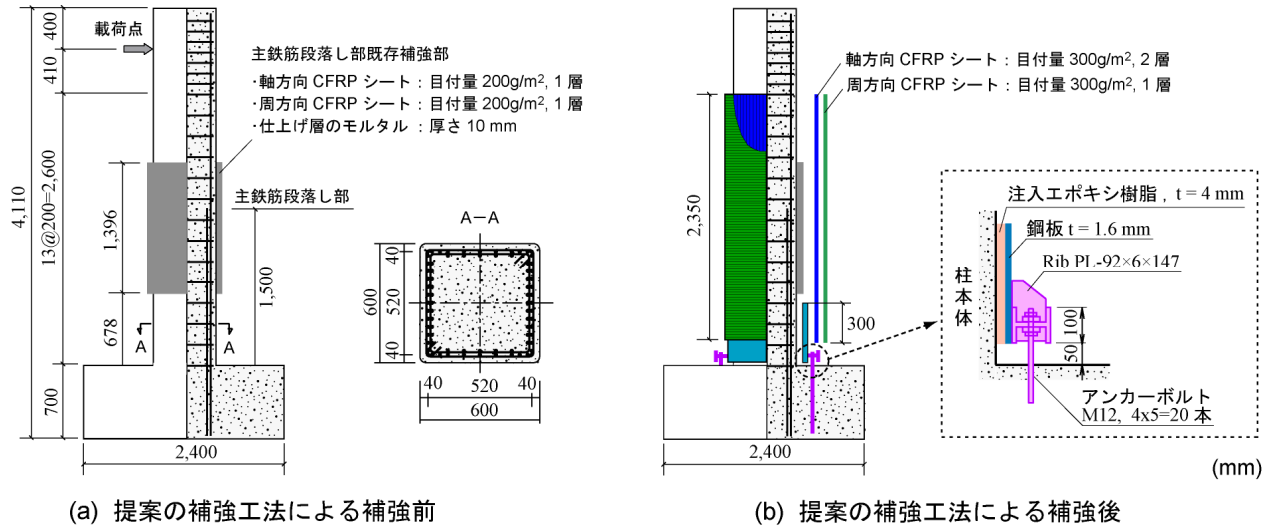


図-13 RC 橋脚模型供試体の概要図

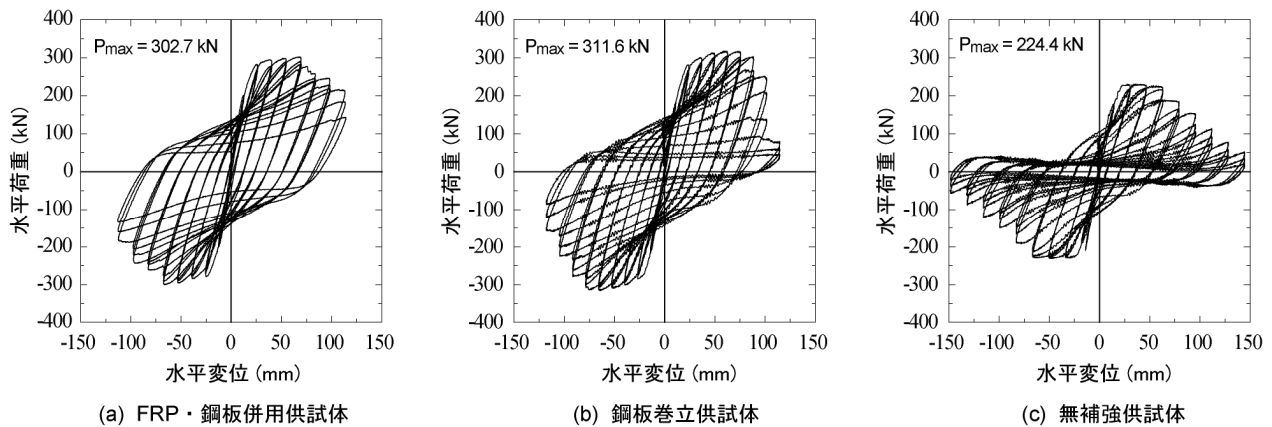


図-14 水平荷重-水平変位の履歴曲線

部の既存補強部を再現するために、基部で曲げ破壊となるように CFRP 巻立てにより主鉄筋段落し部を補強した。提案の工法による補強を行う前に、主鉄筋段落し部補強部の仕上げ層に表面処理（ディスクサンダーによる目荒し）を施した。また、実験の実施状況は、図-8 に示す実験と同様である。

実験では、基準変位 δ_y を 12.7mm とし、 $8\delta_y$ まで繰り返し荷重を行った。図-14(a) に、本実験で実施した FRP・鋼板併用供試体の水平荷重-水平変位の履歴曲線を示す。ここで、提案の補強工法の補強効果を検討可能にするため、過去に実施した無補強供試体と鋼板巻立て供試体の繰り返し正負交番荷重結果を用いて比較検討を行うこととした²⁾。無補強供試体は、4.1 節に用いた無補強供試体と同一のものである。この無補強供試体は、図-13(a)に示す主鉄筋段落し部の耐震補強が施された状態に相当する。鋼板巻立て供試体は、主鉄筋の段落しを行

っていない無補強供試体に対して柱全高さに鋼板で巻立てたもので、柱の基部断面や鋼板巻立て部の詳細は今回の供試体と同様である。図より、本実験で実施した供試体は、無補強供試体より高い荷重や変形性能を発揮し、鋼板巻立て供試体とおおむね同程度の耐荷性能を示すことが確認できた。また、各荷重ステップ終了後、CFRP と鋼板の接着部、巻立て部上端面等の断面変化部を観察したが、CFRP の変状や剥離等が特に認められなかった。

以上の考察より、本研究で提案している FRP・鋼板併用工法は、従来の柱全体に対する鋼板巻立て工法を適用する場合と同程度の耐震性能を発揮できることが確認できた。

検証実験による検討結果を整理すると以下のものである。1) 鋼板巻立て工法や FRP 巻立て工法によって主鉄筋段落し部の耐震補強が実施された RC 橋脚に対して、従来の RC 巻立て工法を用いてアップグレード耐震補強

を行う場合、本研究のように、RC 巻立て部巻立て高さを 3D とすれば、RC 巻立て部と鋼板間や鋼板と柱間にずれが生じて、RC 巻立て部による補強効果が発揮でき、そのずれによる耐荷・変形能の低下が明瞭に生じないことが確認できた。2) 本研究で提案している FRP・鋼板併用工法は、従来の柱全体に対する鋼板巻立て工法を適用する場合と同程度の耐震性能を発揮できることが確認できた。

5. まとめ

本研究は、平成 17 年度から平成 19 年度まで緊急輸送道路の橋梁耐震補強 3 箇年プログラムの技術的なフォローアップを行うとともに、現場の個別条件を加味した耐震性能評価の高度化、対策が困難となる橋梁に対する新しい工法の開発等を行うものである。本研究の成果は以下のようなものである。

- 1) 既設特殊橋梁・長大橋梁の性能評価手法の高度化、補強対策が必要とされる橋に対する耐震補強法の選

定に関する考え方の整理、照査設計検討例の作成を行い、「既設の特殊橋梁・長大橋梁の耐震性能評価および耐震補強に関する参考資料(案)」を作成した。

- 2) 既設 RC 橋脚の段階的耐震補強方策の策定、現行耐震水準にグレードアップさせるための耐震補強工法の開発を行い、「3 箇年プログラムで段落し部の対策を実施した鉄筋コンクリート橋脚のアップグレード補強マニュアル(案)」を作成した。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害 橋梁, 1996 年 12 月
- 2) 川島一彦, 大塚久哲, 中野正則, 星隈順一, 長屋和宏：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, 土木研究所資料第 3444 号, 平成 8 年 5 月.
- 3) 張 広鋒, 星隈順一, 堺淳一：RC 橋脚の耐震補強に用いる FRP-鋼板接着接合部の付着挙動, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.432-439, 2010.3