

◆ 特集：戦略的な道路構造物マネジメント ◆

橋梁の耐震補強と今後の技術課題

運上茂樹* 西田秀明**

1. はじめに

平成7年の兵庫県南部地震では、鉄筋コンクリート橋脚の破壊、倒壊による落橋、鋼製橋脚の局部座屈に起因する溶接部の破断に起因する落橋といった甚大な被害が発生した¹⁾。このような甚大な被害を受けたのは、主として昭和55年の道路橋示方書よりも古い基準を適用した橋であった。甚大な被害の要因の1つであった鉄筋コンクリート橋脚の段落し部やせん断に対する設計法が改訂された昭和55年の道路橋示方書以降の基準を適用した橋においては甚大な被害は少なかった。このような被災経験を踏まえ、兵庫県南部地震以降これまで昭和55年の道路橋示方書より古い基準を適用した橋梁のうち、複断面区間の橋梁や跨線橋、跨道橋等、2次災害の可能性がある緊急度の高い橋梁の下部構造に対する耐震対策及び落橋防止対策が優先的に進められてきているところである。

平成17年3月には、平成16年10月の新潟県中越地震の発生や、東海地震、東南海・南海地震、首都直下地震等の大規模地震の逼迫性が指摘されていることを踏まえ、緊急輸送道路、新幹線の高架橋柱及び新幹線、高速道路を跨ぐ跨線橋、跨道橋について、平成19年度までの3箇年で重点的に耐震補強を実施することが国土交通省により発表され、現在、耐震補強事業が推進されている²⁾。本事業は、「橋梁耐震補強3箇年プログラム」と呼ばれている。

兵庫県南部地震で経験したような強い地震力に対しても橋梁が耐えられるように補強するためには、落橋など致命的な被害に結びつく可能性のある部材のぜい性的な被害を防止し、橋全体としてねばり強い構造とすることが必要とされる。橋梁の場合は、一般に鉄筋コンクリート橋脚あるいは鋼製橋脚、支承部や落橋防止構造等に対する対策が中心となっている^{3), 4)}。

本文では、既設橋梁の耐震補強技術に関する現状とともに、施工上の課題や今後の技術開発の方向性について整理した結果を述べる。

2. 橋梁耐震補強3箇年プログラムの概要

国土交通省の発表によれば、兵庫県南部地震以降の道路橋の耐震補強に関する現段階の進捗状況は、以下の通りとされている²⁾。

1) 緊急輸送道路

・全国の直轄国道について跨線橋などについては約9割、河川橋などについては約3割の完了。

2) 新幹線、高速道路を跨ぐ跨線橋、跨道橋

・新幹線を跨ぐ跨線橋については全国で約3割、高速道路を跨ぐ跨道橋については全国の約7割の完了。

鉄筋コンクリート橋脚の耐力や変形性能等の耐震性能を向上させるために有効な対策工法としては、従来、鋼板巻立て工法や鉄筋コンクリート巻立て工法が主に採用されてきたところである。これらの工法は性能が確認された有効な工法であるが、河川内の橋脚などに適用した場合には、施工空間や湯水期などの河川条件等の制約、仮締切り工等のための仮設費のコスト増、あるいは、河川内で作業を行う場合には河川環境への配慮が不可欠になるなどの施工上の制約条件やコストの条件が一般に厳しくなる。また、跨線橋については、軌道空間の確保のための建築限界の制約、施工空間や施工可能時間の制約などが大きく影響する。河川橋や跨線橋の進捗率が低いのは、このような施工上の制約条件が一因となっていることが考えられる。

国土交通省による橋梁耐震補強3箇年プログラムでは、緊急輸送道路、新幹線・高速道路をまたぐ跨線橋・跨道橋について、平成19年度までの3箇年で重点的に耐震補強を実施することとされ、高速道路及び直轄国道、都道府県管理道路のうちの「優先確保ルート」上の橋梁、また、新幹線・高速道路をまたぐ跨線橋・跨道橋について、それぞれ平成19年度までに概ね完了することが目標として設定されている。ここで、都道府県管理道路における優先確保ルートは、緊急輸送道路の中でも優先的に確保すべきルートとされ、その選定にあたっては、①東海地震及び東南海・南海地震の法指定がなされている地域及び地震の逼迫性が指摘されている地域、②重要港湾、空港等へのアクセス、③当該橋梁が被災した場合の代替路の状況、

④発災時における自衛隊、警察、消防の被災地への進出計画等との整合、⑤行政区境界における緊急輸送道路ネットワークの連続性の確保、等を考慮することとされている。

本プログラムにおける耐震補強の対象は、昭和55年道路橋示方書よりも古い基準を適用した橋梁のうち、以下の①～⑥に該当する構造を有する橋が基本とされている。これは、兵庫県南部地震を含む既往の地震における橋梁の被災経験に基づき、特に優先的に実施する必要がある重要な対策箇所として選定されている。

(1) 橋脚補強の対象構造

- ①段落し部のある鉄筋コンクリート製単柱橋脚
- ②鋼製単柱橋脚
- ③連続橋の段落し部のある鉄筋コンクリート製固定橋脚

(2) 落橋防止システム設置の対象構造

- ④両端が橋台でない単純桁
- ⑤ゲルバー桁
- ⑥流動化の影響を受ける可能性のある連続桁

本プログラムでは、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し、緊急輸送道路としての機能を確保するため、早急に橋梁の耐震補強を進めることが目的とされてい

る。したがって、その実施にあたって、効率的かつ効果的な実施に十分配慮し、コスト縮減や工期短縮等に努めること、兵庫県南部地震等既往の地震における橋梁の被災経験に基づき、施工性等も勘案して当面必要とする対策を実施すること、とされている。したがって、鉄筋コンクリート橋脚については、繊維材巻立て工法等により、甚大な被災に結びつく可能性のある段落し部の補強を優先的・限定的に実施することとされている。また、地域の状況や橋梁の構造特性（長大橋、トラス・アーチ・斜張橋などの特殊橋など）、あるいは、老朽度等により、必要に応じて学識経験者等の意見を聴取しながら、所要の措置を行うこととされている。

3. 耐震補強技術の現状

一般的な橋梁に対する耐震補強技術について以下に示す⁵⁾。

3.1 鉄筋コンクリート橋脚の補強

表-1は、鉄筋コンクリート橋脚に対する耐震補強の基本的な考え方を整理したものである。耐震補強の目的としては、大きく構造本体の性能向上を図る工法と構造に作用する地震作用の低減を図る工法に分類される。このうち、巻立て工法は、

表-1 鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強に関する要求性能と一般的な耐震補強工法の例

耐震補強の目的		原理	耐震補強工法の例	留意点
構造本体の性能向上	耐力の向上	曲げ耐力	橋脚の軸方向に巻立て、一体化を図ることにより断面の曲げ耐力を向上	<ul style="list-style-type: none"> ・ 橋脚全体の曲げ耐力を向上させるためにはフーチングへの定着が必要（アンカー定着の施工性、確実性が重要） ・ 耐力を過度に大きくし過ぎると基礎への影響が大きくなる。
		せん断耐力	橋脚の横方向に巻立てることによりせん断耐力を向上	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高強度材料を用いる場合には材料がその強度を発揮するひずみ値の大きさに留意（ひずみ値が大き過ぎると高強度を発揮する時点で内部橋脚のせん断破壊が進展する可能性がある）
	じん性の向上		橋脚の横方向に巻立てて内部の軸方向鉄筋とコンクリートを拘束することによりじん性を向上	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大断面の矩形断面では、巻立て材が外方向に膨らみにくい材料の使用、あるいは、これを拘束するための機構が必要 ・ じん性のみでの向上では地震後の残留変位が大きくなる場合もある。
	耐力とじん性の両者の向上	上記2工法を兼ねた工法	<ul style="list-style-type: none"> ・ 曲げ耐力制御式巻立て工法等（フーチングに定着する鉄筋量等を変化させて曲げ耐力を制御） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基礎への影響を低減しつつ、地震後の残留変位を小さくする工法 ・ アンカー定着の施工性、確実性が重要
地震作用の低減	地震力の低減	地震時の構造物の揺れを制御して橋脚に作用する慣性力を低減	<ul style="list-style-type: none"> ・ 橋全体系補強（慣性力の低減・分散、変位拘束等） ・ 免震工法、制震工法、変位拘束工法等 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 分散機構の確実性、制震装置等の長期耐久性が重要

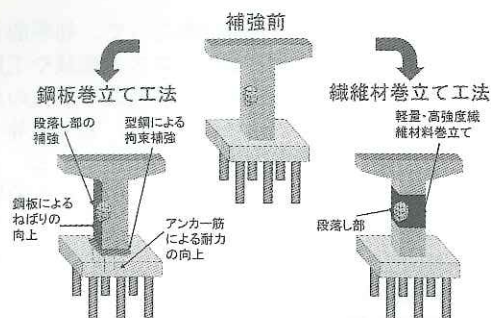


図-1 鉄筋コンクリート橋脚に対する一般的な橋脚の耐震補強工法

既設構造の外周に何らかの材料を軸方向、横方向あるいは斜め方向に巻立てて、既設構造と一体的あるいは協同的に挙動させることによって橋脚の曲げ耐力、せん断耐力、じん性、あるいは、これらを組み合わせた耐震性能の向上を図るものである。

図-1は、一般的な鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強として鋼板巻立て工法の例を示したものである^{2), 3)}。本工法では、橋脚躯体を鋼板で巻き立てることにより兵庫県南部地震において落橋に至るような甚大な被害の原因となった段落し部の曲げ耐力と橋脚全体のせん断耐力の向上を図るとともに、必要に応じてフーチングに鋼板をアンカー定着することにより橋脚全体の曲げ耐力の向上も

図るものである。

この場合、フーチングに定着するアンカーの径や本数をコントロールすることにより曲げ耐力の向上度を制御でき、基礎の補強が必要となるような地震力が作用しないようにすることができる。なお、曲げ耐力の向上が性能的に必要な場合にはアンカー定着は不要となる。また、橋脚の段落し部での損傷を防止し、基部周辺に損傷を誘導するが、巻立て材だけでは塑性ヒンジ領域に対する拘束効果が相対的に低い断面の大きい矩形断面橋脚などの場合には、拘束を高めるための拘束材も設けられる。

この他の巻立て工法としては、鉄筋コンクリート巻立て工法や繊維材巻立て工法等がある。3箇年プログラムでは、早急に橋梁の耐震補強を進めることを目的として、甚大な被災に結びつく可能性のある段落し部に対して、河川橋でも施工条件の制約を受けにくい繊維材巻立て工法により優先的・限定的に実施することとされている。

さらに、橋脚の補強工法としては、上記のような橋脚本体の耐力や変形性能の向上以外に、橋脚に作用する地震力を低減させる以下に示す橋全体系の補強工法がある。3箇年プログラムでは、補強対策部位が常時水中など特殊な条件の場合で巻き立て工法の適用が制約を受ける場合などには、全体系の補強工法が選定される。

表-2 橋全体系の耐震補強工法⁵⁾

	免震工法	慣性力分散工法	変位拘束工法
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水中部の橋脚補強や、橋脚補強による基礎構造への影響が無視できない場合において有利。 ・ 免震工法、慣性力分散工法、変位拘束工法の併用、あるいは部材の耐震補強工法との併用により、補強効果をさらに高められる可能性がある。 		
構造的特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・ 橋軸方向、橋軸直角方向の耐震補強に適用可能。 ・ 不安定な地盤、長周期構造、負反力が生じる構造等では、適用に制約が生じる。 ・ 単純げた橋は、けた連結工法を採用し連続構造に改造する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 橋軸方向の耐震補強に適用。 ・ 単純げた橋は、けた連結工法を採用し連続構造に改造する。 ・ 多点固定方式の場合は、常時の温度変化に対して拘束力が発生する。ただし、地震時のみ固定可能なダンパーの採用が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 橋軸方向の耐震補強に適用。 ・ 橋台の耐力や地盤の安定性が高い場合に適用可能。 ・ 単純げた橋は、けた連結工法を採用し連続構造に改造する。 ・ 2径間程度の小規模な橋梁については、下部構造の補強を行わないで耐震性の向上が図れる場合が多い。 ・ 橋台背面土の抵抗も考慮して橋台の耐震安全性の照査を行う。
施工性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 既設支承高が低い場合は、機能分離型支承の採用等、検討が必要。 ・ 支承部の取り替えの際は、既設部材を損なわないよう注意が必要。 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 橋台の補強が必要な場合は、交通規制を伴うことがある。
維持管理性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 制震装置を用いる場合は装置の維持管理が必要となる場合がある。 ・ 既設橋梁と同様な維持管理が必要。 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 既設橋梁と同様な維持管理が必要。
経済性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水中部の橋脚補強や、基礎構造への影響が無視できない場合は、部材の耐震補強工法に比べ経済的に有利となる可能性がある。 		
			<ul style="list-style-type: none"> ・ 小規模橋梁の場合は、経済的に有利となる可能性がある。

3.2 橋全体系の補強

橋全体系の補強とは、上記3.1に示した橋脚に対する巻立て対策などの補強対策を全く行うことなく、あるいは、補強対策を行うとしても比較的軽微な対策のみを行い、橋全体としての耐震性の向上を図る工法である。

本工法は、河川橋で水中にある橋脚など、巻立て工法による補強が困難な場合、あるいは、コスト低減が可能となる場合に有効となる。表-2は、橋全体系の耐震補強工法を示したものであり、大きく3種類に分類される。

1) 免震工法 (図-2)

免震支承、ダンパー等を併用して、長周期化を図るとともに、減衰性能を高めて、地震時に橋梁に作用する慣性力の低減あるいは遮断を図る工法である。既設支承を免震支承やダンパーに交換あるいは追加することにより免震化を図る。必要に応じて上部構造の連続化・連結化を行う。

2) 慣性力分散工法 (図-3)

地震時に負担する慣性力を他の下部構造に分散することにより、橋全体として地震力に対して抵抗する工法である。各下部構造への地震時慣性力の分散方法としては、ゴム系支承による方法、多点固定による方法、地震時のみ固定として機能するダンパーストッパーによる方法等がある。必要に応じて上部構造の連続化・連結化を行う。

3) 変位拘束工法 (図-4)

地震時に上部構造に生じる変位を拘束する工法で、橋脚に作用する慣性力の低減を図る工法である。橋台による橋軸方向に対する変位拘束効果を期待する工法、あるいは、橋台の補強により変位拘束効果を増強する工法などがある。必要に応じて上部構造の連続化・連結化を行う。

3.3. 耐震補強工法の選定

耐震補強工法としては、当該橋梁の構造条件、施工条件、経済性を考慮して適切な工法を選定することが必要とされる。図-5は、耐震補強工法の選定の流れの例を示したものである。橋脚に対する対策としては、一般には上記3.1に示した巻立て工法等による橋脚補強が基本となる。橋脚が常時水中部にあるなど橋脚の補強が施工上、コスト上困難な場合、あるいは、コスト低減が可能な場合に、橋全体系補強を検討することが一般的な流れとなる。

4. 橋梁の耐震補強技術に関する今後の技術開発

4.1 施工上の制約の克服

耐震補強は、既設構造物の現況を踏まえた上で、構造物に要求される耐震性能を確保することを目

的に実施される。このため、既設構造物の現況に応じた様々な制約条件のもとで実施することが求められる。これは、制約条件はあるものの適切な構造を幅広く選定できる新設橋との大きな違いで既設橋に特有の課題となる。したがって、性能向上効果は当然であるが、最も重要な支配条件は施工性であり、耐震補強では既設構造物に特有の様々な施工上の制約条件を合理的に克服できることが最も重要なポイントといえることができる。これらの解決を図るための耐震補強工法の技術開発

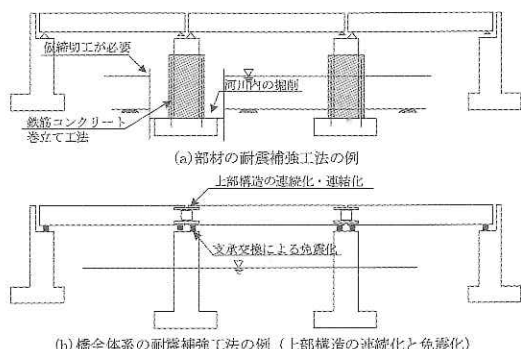


図-2 部材の耐震補強と橋全体系の耐震補強の比較⁵⁾

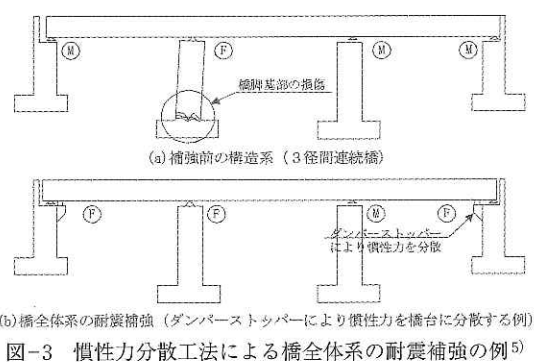


図-3 慣性力分散工法による橋全体系の耐震補強の例⁵⁾

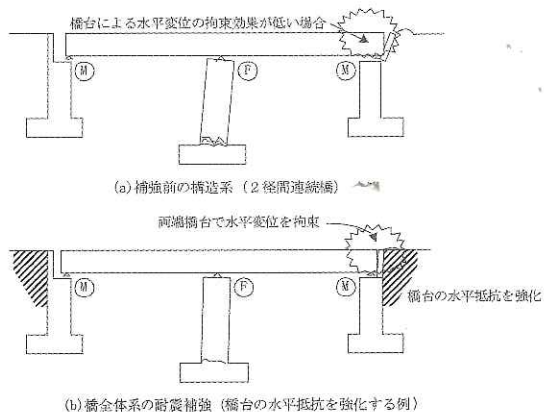


図-4 変位拘束工法による橋全体系の耐震補強の例⁵⁾

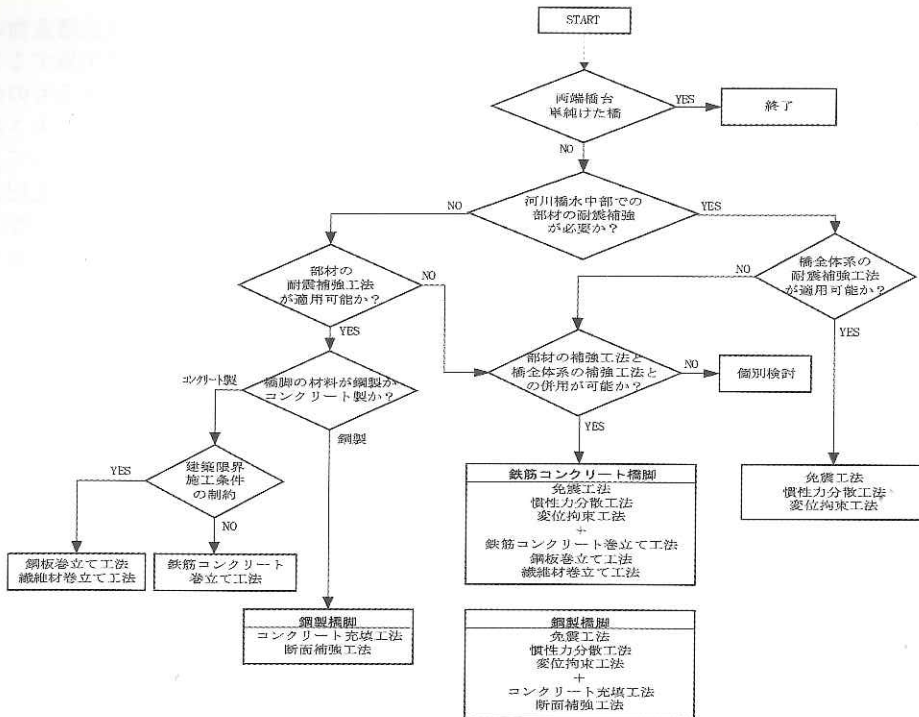


図-5 橋脚に対する耐震補強工法の選定フローの例⁵⁾

のポイントとして以下の3つが上げられる⁶⁾。

- 1) 従来工法からの発展型の工法（定着部や接合部の工夫）
- 2) 施工条件の制約下でも耐震補強で要求される性能を確保可能な工法
- 3) 新材料、新素材、新構造を活用した新工法

このうち、上記2)については、表-3に示すような目的や制約条件を解決するための工法が必要と考えられる。工期短縮、いながら施工（通行規制の最小限化）、施工機械の使用条件、水中施工の条件、維持管理性・耐久性の条件などは、多くの耐震補強の現場において該当する基本的な要求条件であり、これまでの耐震補強に関する技術開発は、これらの条件を解決することを目的の1つとしてきたということが出来る。今後、コスト縮減を含めてこうした制約条件を克服可能な合理的な耐震補強技術が必要と考えられる。

4.2 長大橋・特殊橋に対する耐震補強工法

橋梁耐震補強3箇年プログラムでは、長大橋や特殊橋（トラス・アーチ・斜張橋など）についても補強対象とされている。長大橋・特殊橋は、通常の橋梁のように桁と橋脚が支承を介して支持される形式に限られず各種の構造がある。このため、橋梁形式に応じて、それぞれ、個別の検討により有効な耐震補強策を選択することが必要とされる。

耐震補強における基本的な考え方としては、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・部位の損傷を低減するとともに、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ことになる。ただし、個別設計される特殊橋や長大橋では、一律の補強工法の適用ができない場合も多く、性能検討に応じた個別の対策工法の選定が必要とされる。

工法としては、表-4に示すような方法の例が考えられるが、まだ、一般的ではなく、個別に検討しながらの実施が求められている。一般には、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第一に検討することになる。振動制御技術だけでは性能確保が難しい場合には、部材としての耐力やじん性を増強させる部材補強を選択することになる。なお、部材補強の場合、これによって橋全体の剛性が高くなることによって、固有周期が短くなり、ますます地震力が大きくなり不利となることが考えられるので、耐震補強のコンセプトを明確にする必要がある。また、耐震補強により構造特性の変更を伴う場合には、既設構造への影響、常時荷重等に対する影響照査、補強部材の設置に際しては、施工管理の困難さや疲労問題などから溶接を使用しないなどの注意も必要とされる。また、ダンパー等の振動制御デバイスについても、その性能の検証とともに、地震力は実際には3次

表-3 耐震補強における施工条件等の制約 (文献6) に加筆

項目	概要
①低コスト化	コスト削減のための新しい工夫
②工期短縮	急速施工、工事占用時間の短縮 (迷惑度の低減)、工費縮減
③いながら施工	工事占用空間の最小化 (迷惑度の低減)、使用性の確保・通行規制の最小化
④施工空間の制約	実行上当該部材の補強が不可能な場合: 構造下に住居・店舗のある場合、桁下空間の制約、実質的に手が届かない部材の補強など
⑤環境の制約 (騒音・振動・粉塵・水質汚濁の制約)	アンカーを使わない接着工法、コンクリートチップングを不要とする接着工法、粉塵対策、河川環境に影響のない工法など
⑥火、水等の使用の制約	店舗等との一体型の構造で電子機器の近くにおける工事のため、水を含むコンクリートを使わず、樹脂接着剤等を使用する工法。また、火気厳禁の場所で溶接が不可能な場合の工法、高電圧線の近傍での工法など
⑦施工機械の使用条件	桁下空間などの制約、補強材の軽量化、吊足場等の簡易仮設備、特殊施工機械の使用など
⑧移設・引っ越しの必要性	現況の各種施設の移動、居住者の引っ越し等の必要性
⑨水中施工の条件	ドライアップを不要とする工法 (工費縮減)
⑩維持管理性・耐久性の条件	水中、地中等、長期耐久性を必要とする場合の工法など
⑪既設構造への影響	既設構造の削孔等による影響など
⑫意匠性・景観	耐震補強により意匠性・景観を損なわない、あるいは、向上させるための新しい工夫
⑬その他	工事中の安全確保、廃棄物処理など

表-4 長大橋・特殊橋に対する耐震補強

橋梁形式		損傷想定部位	耐震補強例
鋼橋	トラス橋	主構、弦材、支承部	・ 全体系補強 (ダンパー等の設置による応答低減) ・ 鋼部材: 座屈拘束、じん性補強 ・ 支承部: アップリフト止め、落橋防止システム ・ 全体系補強 (ダンパー等の設置による応答低減) ・ 鋼部材: 座屈拘束、じん性補強 ・ 支承部: 落橋防止システム
	アーチ橋	アーチリブ、垂直材、斜材、横構、支承部	
	斜張橋	主塔、ケーブル、支承部	
	吊橋		
コンクリート橋	アーチ橋	アーチリブ、垂直材、支承部	・ 全体系補強 (ダンパー等の設置による応答低減) ・ 部材: せん断補強、じん性補強 ・ 支承部: アップリフト止め、落橋防止システム
	斜張橋	主塔、ケーブル、支承部	

元的に作用するため、確実に性能が発揮できる設置方法も重要になるところである。

5. まとめ

本文では、橋梁に対する耐震補強技術の現状について整理した。既設構造物の耐震補強では、構造物の構造条件のみならず、工事のための施工空間、使用条件などの周辺環境条件が補強工法の選定や補強工事の実施に非常に大きく影響する。こうした施工条件が厳しい構造物の耐震補強を合理的に可能にする新しい材料、構造、施工機械の開発、適用が必要とされる。

参考文献

- 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会: 兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書、1996年12月
- 国土交通省道路局HP: 記者発表資料、<http://www.mlit.go.jp/road/press/press05/20050308/20050308.html>、2005年3月
- 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年6月

- 日本道路協会: 既設道路橋の耐震補強に関する参考資料、平成9年8月
- 海洋架橋橋梁調査会: 既設橋梁の耐震補強工法事例集、平成17年4月
- 耐震補強に関する研究委員会 (委員長: 菅野俊介 広島大学教授): 委員会報告書コンクリート構造物の耐震補強—研究と実施—、日本コンクリート工学協会、2000年6月

運上茂樹*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所耐震研究
グループ耐震チーム上
席研究員、工博
Dr. Shigeki UNJOH

西田秀明**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所耐震研
究グループ耐震チーム主
任研究員
Hideaki NISHIDA