

コンクリート構造物の耐震補強技術

大内 一 [(株)大林組技術研究所 土木耐震構造研究室]

1. 耐震補強と用語

土木と建築で、あるいは構造物の種類によって異なる用語が用いられ、同じ用語でも内容が同一でないことがしばしば起きる。用語については種々議論があるが^{1),2)}、ここではある程度共通する基本的な用語について以下に解説する。また、補修、補強、復旧などの用語の説明とともに、それらが目標とする耐震性能との関係を図-1に示す。

・補修 (Repair) : 損傷、劣化部分を補いつくろうことにより、構造性能を損傷、劣化前の状態に復帰させること。損傷、劣化の原因が地震による場合を「耐震補修」、経年劣化による場合を「劣化補修」と区別して呼ぶことができる。

・補強 (Strengthening) 弱いところ、足りないところを補って構造性能を向上させること。被災構造物にあっては、被災前より構造性能を高めること。何らかの方法により構造性能の改善を図ることを総称して言う。

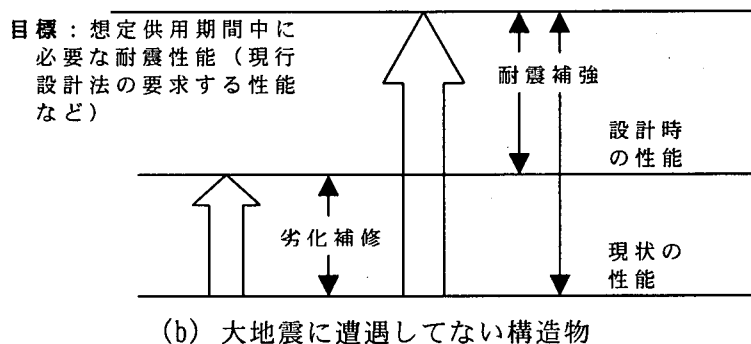
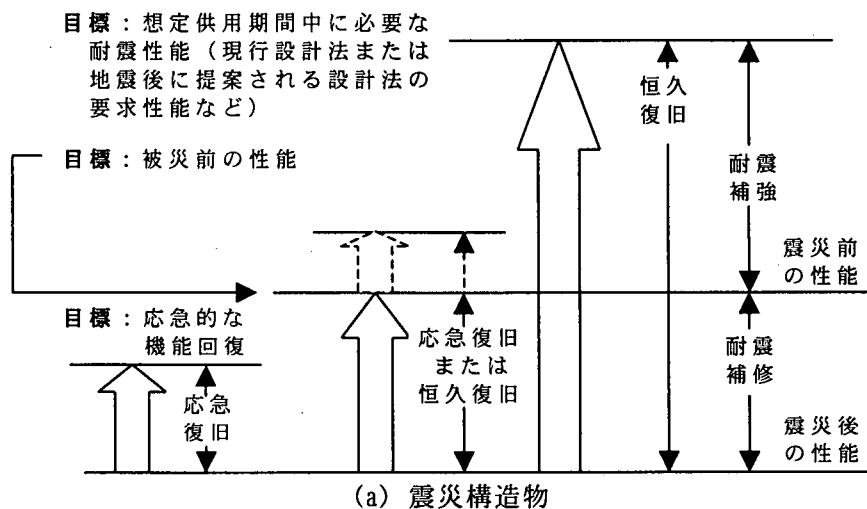


図-1 補修・補強・復旧と構造物の耐震性能

- ・復旧 (Restoration, Rehabilitation) : 損傷した構造物に補修または補修と補強を施して、再使用に耐えるようにすること。震災構造物にあつては、想定供用期間中に必要な耐震性能を確保することを「恒久復旧」と言い、恒久復旧までの間に被害が進行するのを抑えること、仮使用を可能にさせることを「応急復旧」と言う。
- ・改修 (Rehabilitation, Retrofit) : 補修、補強、模様替えなどの総称。非構造部材、設備などへの対策も含む。建築分野で広く用いられる。
- ・耐震補強 (Seismic upgrading, Seismic rehabilitation) : 何らかの方法により耐震性能の改善を図ることを総称して言う。免震や制震による耐震性能改善も含む。広義には、耐震性能の向上と地震被害の軽減 (mitigation) につながるすべての方策を総称して言う。
- ・耐震改修 (Seismic rehabilitation) : 耐震補修、耐震補強の総称。建築分野で広く用いられる。
- ・耐震診断 (Seismic evaluation) : 構造体、非構造体、設備などの耐震性能を診断すること。一般には多数の対象物に適用できる簡便な統一的な手法を用い、必要に応じて詳細な検討を行うことをいう。耐震診断の同意語として耐震点検、耐震照査などの用語が用いられる。

参考のため耐震補強に関連する英語における定義の例²⁾を以下に示す。

- ・ Seismic risk mitigation : 「地震被害の緩和・低減」。地震被害の危険性を低減するあらゆる対策、緩和策を意味する。
- ・ Seismic retrofit : 古くなった既存構造物に改修・改良を実施することにより耐震性能を高めること。構造物が地震に遭遇したかどうかは問わない。
- ・ Seismic rehabilitation : 「修復再生」。損傷を受けた構造物を「修理・修繕」することにより、損傷前の耐震性能よりも高い性能に改善すること。修理・修繕による機能回復とその後の健全な使用に主眼をおく。
- ・ Seismic strengthening : 構造物の耐震性能を高めるために、耐力、変形能力を高めること。一般に言う「耐震補強」。
- ・ Seismic upgrading : 「耐震性能の向上・改善」。耐震性能を高めるためのすべての方策を含む広義の用語。

最近の論文 (世界地震工学会議など) では、rehabilitation または seismic rehabilitation は構造物が大地震に遭遇したか否かを問わず「耐震補強」を表す言葉として用いられている。ATC-33 (FEMA) の「耐震改修指針」³⁾ では、“rehabilitation” と類似の “Strengthening” や “retrofit” という用語は全く出てこない。“rehabilitation” は免震補強、制震補強や非構造部材、設備への対応を含む総合的な用語として用いられている。

2. 耐震診断の考え方

土木構造物の耐震診断については、学会や所轄官庁、事業主体に応じてその手法が示されている。道路橋については、これまで実用的な耐震診断法がすでに示されてきた⁴⁾。一

方、鉄道施設を含むその他の構造物については、兵庫県南部地震以降、ようやくその考え方が示されるようになってきた⁵⁾。ここでは、道路構造物と鉄道構造物について耐震診断の考え方を概説する。なお土木学会でも兵庫県南部地震以降その考え方が示されており⁶⁾、併せて概説する。

(1) 道路構造物

土木コンクリート構造物の代表である橋梁施設の耐震安全性を考える時、これが上部工—支承—下部工—基礎—地盤から構成される構造物であり、どの一つの構成要素も不具合をきたしては倒壊落橋に至る恐れがあり、総合的に耐震性を判定する必要がある。これまでの地震被害経験から、上部工の被害として桁自身の損傷や移動、伸縮継手の損傷が、支承部についてはその破損や台座部コンクリートの損傷が、下部工としての橋脚についてはそれ自身の損傷の他に基礎地盤に起因する沈下、移動、回転などの被害が挙げられる。

これまでいくつかの耐震性判定法が提案されていたが、そのうち日本道路協会から提案されている方法⁴⁾が一般的である。必要に応じ簡易診断用の耐震調査票を作成する方法が示されているのである。同法は兵庫県南部地震以前から用いられている手法であり、その点で1980年以降の道路橋示方書で設計したものは基本的に合格となる。

一方、兵庫県南部地震以降、耐震診断手法の一層の整備に向け、全国レベルでの耐震点検も進められた⁷⁾。これは大まかな項目として構造形式や形状に関する橋梁諸元と液状化可能性、特に橋脚の耐震性、支承そして落橋防止構造からなっている。

構造形式については、斜橋や曲線橋に見られた橋桁の回転や移動などの被災事例から、その形状と落橋防止構造に関する情報の重要性が指摘されている。鉄筋コンクリート橋脚においては、被災橋梁の損傷程度調査結果より適用示方書との因果関係が指摘されており、年代情報が重要である。支承については金属支承である場合の種類と、落橋防止装置との関係でその高さ位置に関する情報が必要となる。さらに液状化可能性については、側方流動に対する対策の関係で埋立地における護岸等から橋脚までの距離情報が必要となっている。

(2) 鉄道構造物

既設の鉄道コンクリート構造物における耐震診断は、保有耐震性能の乏しい構造物を抽出し、補強の要否の判定、補強の優先度を検討することを目的としている。既設構造物等の調査は、既設構造物から採取した試料等から検討に用いる材料の設計用値を定めることを目的として行うもので、設計図書がある場合にはそこに記載された値を用いる場合が多い。しかし構造物に劣化性状が見られる場合には、コンクリート強度および鉄筋の腐食による断面欠損を確認したり、バラストや防音壁などの版上荷重が設計当初より増加している場合にも、現地調査結果に基づいた重量を用いる。破壊形式および耐震性能の判定方法は、鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)⁸⁾および新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料⁵⁾に準じて行うものとなっている。

(3) 土木学会の耐震診断の考え方

このように耐震診断の方法については、これまで所轄官庁や事業所で示されてきたが、兵庫県南部地震を契機に土木学会でも枠組みや考え方が示されるようになった⁶⁾。補強の必要性有無の判断を目的に、比較的短時間で行う1次診断と、最新技術を駆使して耐震性能を判定する2次診断からなる考え方を示している。またこの際想定する地震動の強さは、その地点において新設建造物の設計に用いるものと同じとしている。

1次診断は対象建造物の設計施工時期、準拠基準、構造形式、形態と寸法、地盤条件などにに基づき耐震補強必要性有無および2次診断の必要性判定を行うものとしている。さらに地中建造物については、形状や土被りおよび配筋をもとに耐震補強必要性有無の簡易判定手法が示されている。

2次診断では、耐震性能を代表する適切な指標を用いて定量的評価を行い、補強の必要性有無の判定を行うとともに、補強が必要な場合には優先度を判定するための指標と、工法選定に参考となる情報を提供することとしている。評価にあたって建造物および基礎、周辺地盤の非線形性を適切に考慮し、最新の技術・知見を活用して忠実に予測するのを前提としている。

3. 耐震補強の考え方

ここでは、耐震性能を向上させるという従来の意味に加え、地震応答の低減や地震による損傷の軽減のための方策を総称して「耐震補強」と呼んでいる。この耐震補強の考え方や概念を図-2に示す。

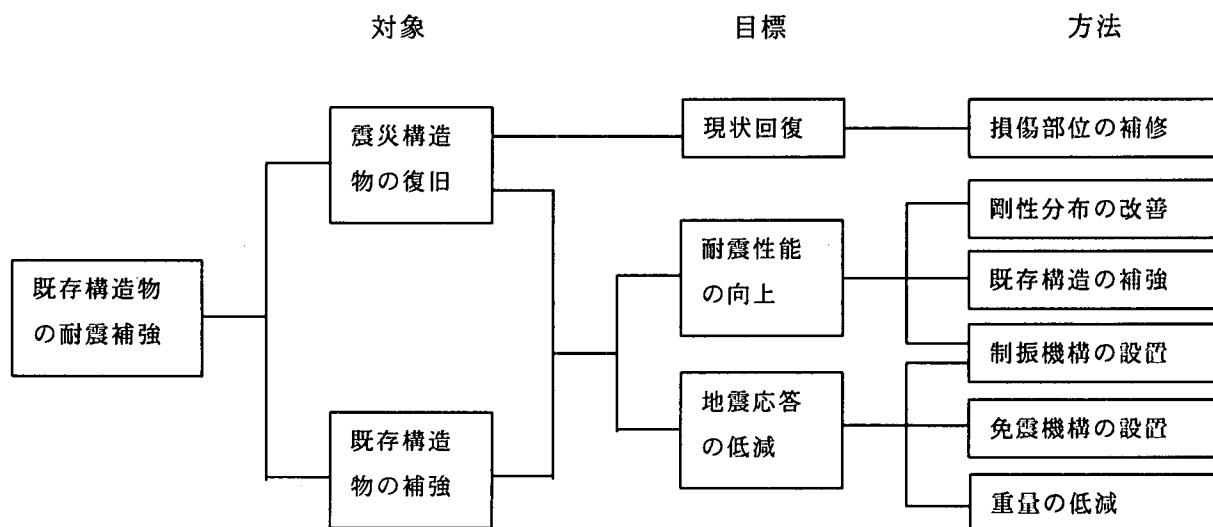


図-2 耐震補強の考え方と補強方法

耐震補強の基本的な考え方は、地震で被災した「震災建造物」では、損傷部分を補修して被災前の耐震性能に復帰させ、必要に応じてさらに耐震性能を向上させて将来の大地震に備え、大地震に遭遇していない建造物では、強度や靱性を増して耐震性能を向上させ、

将来の地震に備えるのが一般的である。剛性の偏在や不連続などの構造上の欠陥を解消すれば、耐震性能の向上につながるので、そうした対応も耐震補強の一環となる。

構造物の地震応答（せん断力，変形）を減らせば被害を減少させることができる。上階を撤去したり重量物を撤去して建物重量を減らせば地震力を低減できる。免震機構を設けることにより、それより上部の地震応答を大幅に減らすことができる。制震機構を設けてエネルギー吸収を図れば、減衰性能が増してせん断力や変形が減少する。新しい構造物に適用されてきたこのような免震技術，制震技術は既存構造物にも適用され、免震補強（免震改修，免震レトロフィット），制震補強（制震改修，制震レトロフィット）などと呼ばれる。

耐震補強と要求性能との関係を図-3に概念的に示す。構造物の設計地震力は一般に固有周期に応じて図中の曲線のように表される。曲線の内側では保有耐力が設計地震力を下回るので「不適格」となり、補強が必要になる。

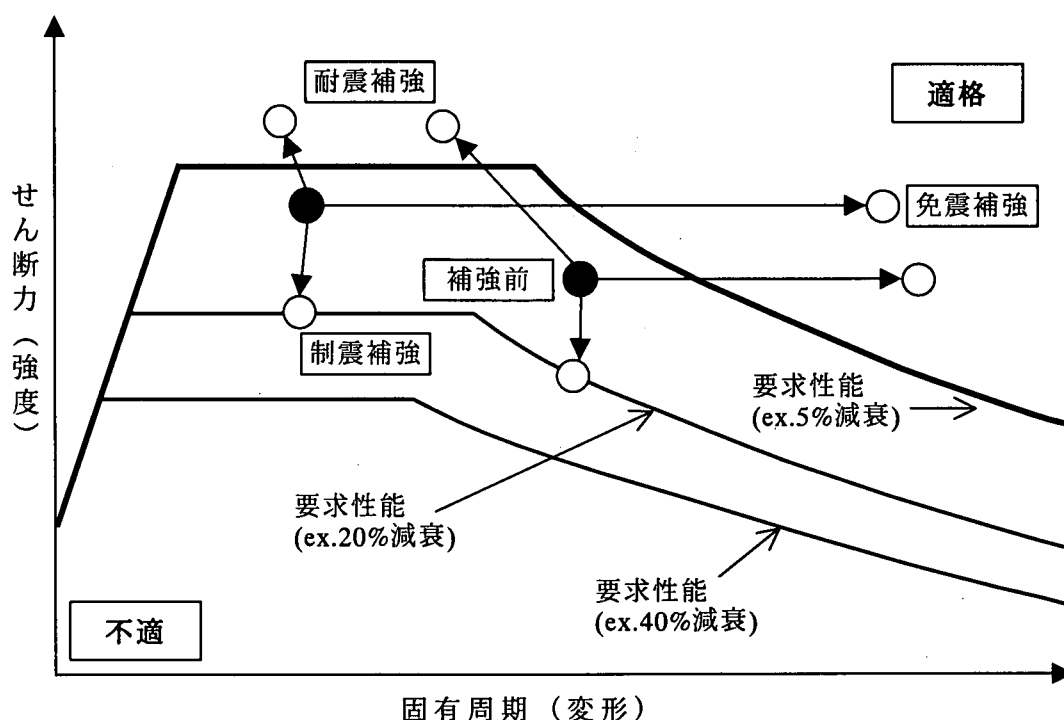


図-3 耐震補強の概念

従来型の耐震補強では、既存構造物の強度を向上させることにより、要求性能を満たす曲線の外側の領域まで耐震性能を引き上げる。変形能力は等価な弾性応答せん断力に置き換えられるので、変形能力を増すことは強度を増すこととして同じように表現される。

免震補強は、保有耐力を変えないことなく、要求性能を満たす長周期の領域に固有周期をシフトさせる方法である。この場合、固有周期を延ばすだけでなく、一般に減衰性能も付与させるので、応答はさらに小さくなる。短周期の構造物に適用すると免震の効果が大きい。制震補強の場合には、構造物内に減衰機構を設け、減衰効果により要求性能を引き下げることを目指す。このとき、同時に保有耐力の向上を図れば効果はさらに大きくなる。固有周期の長い建物や剛性の低い建物に適した方法である。

一方、橋梁固有の問題として落橋防止対策が挙げられる。道路橋については、兵庫県南部地震に対する復旧の基本方針⁹⁾の中にその基本的考え方が示されている。

- 1) 高架橋などの場合には、免震支承を用いた弾性支持方式により地震力を分散させる構造系を採用するのが望ましい。
- 2) 落橋防止装置については、衝撃力の緩和、連結部材の強度の増大、変形性能の向上を図り、橋脚橋台からの桁落下を防止できる構造とする。
- 3) 液状化に伴う地盤流動が予測される地点では、その影響を考慮する。
- 4) 橋脚基礎は橋脚躯体と同等以上の耐力と十分な変形性能を有するものとする。

一方、表-1に示すように、鉄道橋では想定地震規模と支承部を構成する要素の機能に関する考え方が示されている¹⁰⁾。これは、地震時橋梁系全体の耐震性能確保には各構造部材に損傷を許容するのが合理的、被災後補修という観点からは支承本体にも損傷を許容するのがよいとの考え方によっている。すなわち大規模地震時に支承本体の機能低下を許容しているのであるが、その際には落橋防止装置の設置が必要となる。ただし線区の重要度によっては大規模地震に対しても支承本体は全機能健全とする考え方も示されている。

表-1 支承部の機能（鉄道橋）

	中規模地震	大規模地震
支承本体	○	△ ※1
移動制限装置	○	○ ※2
落橋防止装置	—	○ ※3

○：健全， △：一部損傷

※1 鉛直力は支承としての機能を維持する。

※2 ずれ止めが一体になった支承構造においては、必要に応じて取り付ける。

※3 移動制限装置で落橋防止装置を兼用する場合は不要。

4. 耐震診断法

土木構造物の耐震診断法については、道路橋に関し実用的な手法が示されており⁴⁾、本項ではこれについて概説する。

耐震診断は適切な耐震調査フローに従って行うが、必要に応じ簡易診断用の耐震調査票を作成する方法が示されている。表-2に調査票を示す。橋梁各構成要素の耐震性を総合的に考慮した上で、変形に関する評価点 X と強度に関する評価点 Y より、耐震補強の緊急度を表す A, B, C, の3ランクに分類するものである。

すなわち変形については、適用示方書、上部構造形式、平面線形、上部構造材料（RC/PC桁と鋼桁）、縦断勾配、落橋防止装置有無の因子からなる上部工評価点 P_A と下部構造形式、橋脚高さ、地盤、液状化の影響、支持地盤、洗堀の因子からなる評価点 P_B の積として変形評価点 X を評価する。

強度については、特に橋脚の主筋段落し部のせん断破壊に着目し、せん断スパン比、曲げ引張りひび割れ、降伏強度に対する安全率、せん断応力度からなる段落し部せん断強度評価点 P_C と、支承、躯体欠陥、下部構造材料、基礎工法、下部構造形式、基礎の異常の因子からなる下部工強度評価点 P_D の積で強度評価点 Y を評価する。

表-2 橋梁耐震調査票

査機関名				調査年月日	平成 年 月	整理番号		
道路種別		路線名		交通量		橋名		
所在地DID以外	DID (内・外)	バス路線	はい・いいえ	橋長		幅員		
点検項目								
橋梁の点検	(A) 上部工	(1)運用示方書		4.0 大正15年細則・昭和 2.0 昭和31年道示・昭和 1.0 昭和46年道示・昭和 4年道示	39年道示	55年道示		
		(2)上部構造形式		3.0 ゲルバー桁・2径間 以上の単純支持	1.5 1径間単純支持(15 m以上), 2連以上の連続桁	1.0 上路・中路アーチ・ラーメン, 1連の連続桁, 斜張橋, 吊橋		
		(3)平面線形		1.2 斜橋・曲線橋	1.0 直線			
		(4)上部構造材料		1.2 RC・PC	1.0 鋼			
		(5)縦断勾配		1.2 6%以上	1.0 1%未満			
		(6)落橋防止構造		2.0 なし	1.0 1種類			
		$P_A=(1) \times (2) \times (3) \times (4) \times (5) \times (6)$		$P_A=$				
	(B) 下部工の変形	(7)下部構造形式		2.0 単列バイルベント	1.0 その他			
		(8)橋脚高さ		2.0 10m以上	1.5 5m以上10m未満	1.0 5m未満		
		(9)地盤		5.0 4種地盤のうち極軟弱な地盤	2.5 4種	2.0 3種	1.2 2種	1.0 1種
		(10)液状化の影響		2.0 あり	1.0 なし			
		(11)支持地盤		1.2 不均	1.0 均			
		(12)洗掘		1.5 あり	1.0 なし			
		$P_B=(7) \times (8) \times (9) \times (10) \times (11) \times (12)$		$P_B=$				
	(C) 主鉄筋段落	(13)せん断スパン比 (h/D)		2.0 $1 < h/D < 4$	1.0 $h/D \geq 4$	0.5 $h/D \leq 1$		
		(14)段落し部の曲げ引張りひび割れ		2.0 生ずる	1.0 生ずる可能性あり	0.5 生じない		
		(15)段落し部の降伏強度に対する安全率	(15) ¹ S _{fn}	3.0 1以下	2.0 1.1~1.5	0.5 1.5以上		
			(15) ² S _{mm}	3.0 1.1以下	2.0 1.1~1.3	1.0 1.3~1.5	0.5 1.5以上	
		(16)せん断応力度の大きさ		3.0 45以上	2.0 30~45	1.0 15~30	0.5 15以下(単位:tf/m ²)	
	$P_C=(13) \times (14) \times (15)^1 \times (15)^2 \times (16)$		$P_C=$					
	(D) 下部工の強度・変状	(17)固定支承および支承周辺の異常		5.0 重大な欠陥あり	2.0 軽微なもの	1.0 なし		
		(18)躯体の異常		5.0 重大な欠陥あり	2.0 軽微なもの	1.0 なし		
		(19)下部構造材料		2.0 大正15年細則, 昭和14年道示による無筋コンクリート(重力式橋台を除く)	1.0 RC・PC・鋼, 昭和31年道示以後の道示による無筋コンクリート・無筋の重力式橋台			
		(20)基礎工法		2.0 木杭・レンガ積ケーソン・箱枠工法・不明	1.5 既製RC杭・ベデスタル杭・2脚ケーソン	1.0 昭和46年指針以後製造のもの・場所打ち杭・PC杭・鋼杭・直接基礎・一般ケーソン		
		(21)下部構造形式		1.5 RCラーメン	1.0 その他			
		(22)基礎の異常		2.0 あり	1.0 なし			
		$P_D=(17) \times (18) \times (19) \times (20) \times (21) \times (22)$		$P_D=$				
	評価点		$X=P_A \times P_B=$		$Y=P_C \times P_D=$			

調査結果のランク付けは、これらの評価点によって独立に定まるランクのうちいずれか高い方（A>B>C）を該当橋脚のランクとすることに特徴を有する。なお、同一橋が複数の橋から構成されている場合にはその中の最も耐震性の低い橋を、また一つの橋の中では最も耐震性の低い下部構造をそれぞれ調査対象とするものである。

以上は兵庫県南部地震以前から示されていた手法であり、1980年以降の道路橋示方書で設計されておれば、基本的には合格となる。下部工についてはそれまでの被害経験から主筋段落し部破壊に対して特に注意が向けられている。兵庫県南部地震での被害経験を経て、1996年に道路橋示方書は大幅に改定された。したがって、2.でも述べたように、現在耐震診断手法の一層の整備に向け改定の努力がなされているのである。

5. 耐震補強法

土木構造物では、脆性的な破壊を防止してねばり強い構造にするよう補強する考え方が一般的である。したがって、せん断耐力向上と靱性能向上に着目した補強が行われている。

橋脚などの柱部材を対象にした代表的な補強工法を表-3に示す。鋼板補強の場合には、鋼板と既設コンクリートとの間にエポキシ樹脂あるいは無収縮モルタルを充填して鋼板の拘束力を既設コンクリートに伝達させる。RC巻立て補強では帯筋を増設する。炭素繊維などの新素材を用いた補強では、シートを用いる場合には既設コンクリート表面を処理したのちFRP効果と接着効果を意図してエポキシ樹脂により外周に貼り付ける。これらの工事例を写真-1から写真-3に示す。

壁式橋脚のような断面縦横比の大きい橋脚では、最外縁に配置した鋼板や帯筋のみではコンクリートを拘束する効果が小さいため、PC鋼棒や鉄筋を壁内に貫通させ、幅全体にわたって拘束するのが一般的である（写真-4）。また楕円形の鋼板を用いて拘束効果を高め、PC鋼棒不要とする方法も考えられる（写真-5）。

表-3 土木構造物の代表的な耐震補強工法

	RC巻立て	鋼板巻立て	炭素繊維	その他
通常橋脚	<p>帯鉄筋 既存橋脚 帯鉄筋 コンクリート</p>	<p>鋼板 既存橋脚 既存橋脚 無収縮グラウト または エポキシ樹脂</p>	<p>炭素繊維シート または ストランド 面取り 接着剤塗布 (エポキシ樹脂等)</p>	<p>免震補強 橋桁 橋脚 免震支承 (高減衰積層 ゴムなど)</p>
壁式橋脚	<p>中間帯鉄筋 帯鉄筋 削孔 コンクリート グラウト</p>	<p>鋼板 PC鋼棒 (新設) 削孔 グラウト 鋼板 コンクリート または グラウト</p>	<p>炭素繊維シート または ストランド 面取り プライマー処理: 接着剤塗布 (エポキシ樹脂等)</p>	<p>耐震壁による補強 高減衰ブレースによる補強 耐震壁 ダンパー 基礎 基礎増設</p>

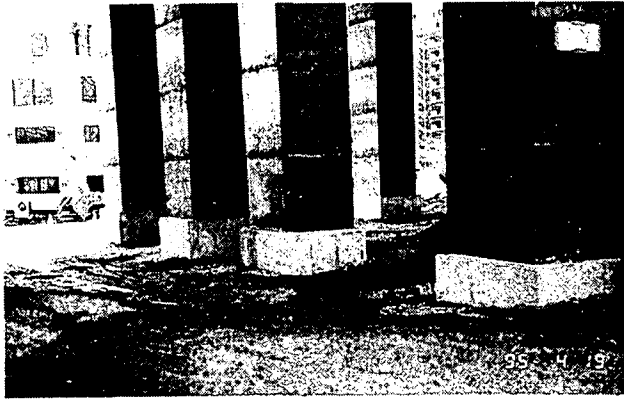


写真-1 鉄道高架橋柱の鋼板巻き補強((財)鉄道総研提供)

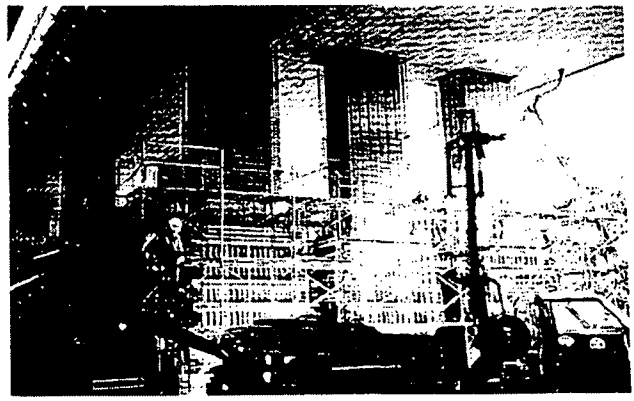


写真-2 橋脚のRC巻立て補強(日本道路公団提供)



写真-3 橋脚の炭素繊維巻立て補強(日本道路公団提供)

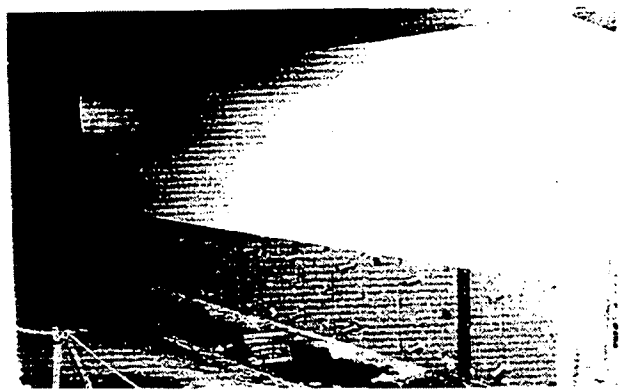


写真-4 壁式橋脚の矩形鋼板巻き補強(日本道路公団提供)

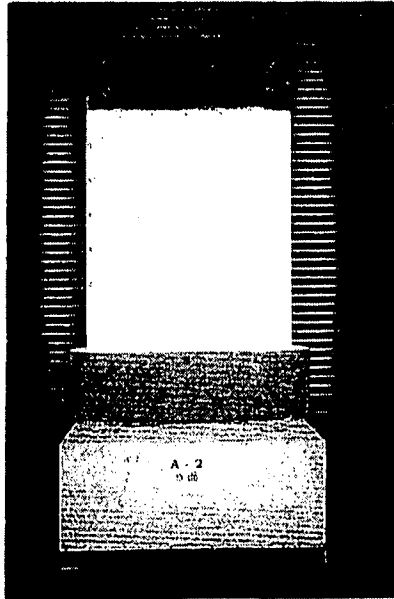


写真-5 壁式橋脚の楕円鋼板巻き補強試験体
(日本道路公団提供)

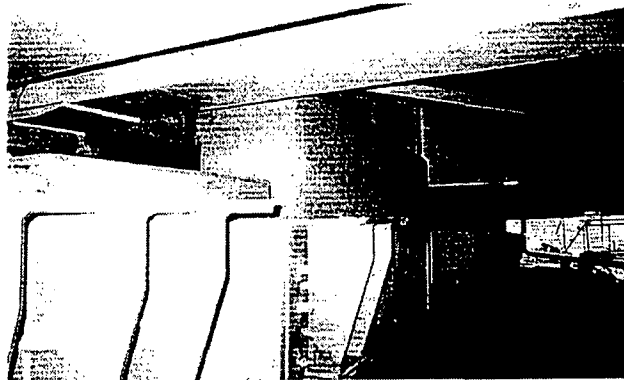


写真-6 落橋防止用コンクリートブラケットの増設
(日本道路公団提供)



写真-7 緩衝ゴムの設置(日本道路公団提供)

塑性変形能力のみでは抵抗できない場合、変形性能の向上と曲げ耐力の増加の両者を期待する補強方法もある。アンカー筋を通じて鋼板をフーチングに定着させ、橋脚基部の耐力の増加を図るが、この種の補強の場合、基礎の補強を併せて検討する必要がある。主筋段落し部でのせん断破壊防止は必至である。塑性変形性能確保や維持補修の観点からこの部分は強度補強を行い、柱端部に塑性ヒンジ部を形成させるのが原則であろう。一方、これらと考え方を異にするのが免震や高減衰ダンパーによる耐震補強である。すなわち橋桁と橋脚の間に免震支承を設けて長周期化させることにより作用力の低減を図る方法がある。残留変形や地震時変形が問題になる場合には剛性補強も必要となり、耐震壁や耐震ブレースの増設が考えられる。耐震ブレースの場合には、剛性だけでなく塑性エネルギー吸収を期待した高減衰機能を付加する技術も考えられよう。このほか、上部工の落橋防止用にはブラケットを増設し、緩衝材を挿入するなどの対策も図られている（写真-6、写真-7）。

参考文献

- 1) 宮崎光生：既存構造物の保存・改修に関する用語，建築保全Re,No.102, 1996.7
- 2) Earthquake Engineering Research Institute：Let's Clean up Our Language, Newsletter, Vol.28, No.8, 1994.8
- 3) Federal Emergency Management Agency：NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (Draft), FEMA 273, 1996.9
- 4) 日本道路協会：道路震災対策便覧（震前対策編），1988
- 5) 鉄道総合技術研究所：新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料，1996.3
- 6) 土木学会：平成8年制定コンクリート標準示方書（耐震設計編）改訂資料，コンクリートライブラリー87，1996.7
- 7) 建設省道路局監修，道路保全技術センター編集：平成8年度道路防災総点検要領（地震），1996.8
- 8) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），1992.10
- 9) 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
- 10) 鉄道総合技術研究所：支承部の耐震補強設計の手引き，1996.3