

5. 耐震性判定法と耐震補強法

5. 1 はじめに

我が国は、世界第1級の地震国であり、現在までに幾多の地震被害を経験してきた。公共土木構造物の1つである道路橋は、避難路や緊急物資の輸送路などのライフラインとして非常に重要な役割を担うとともに、一旦被災してその機能を喪失した場合には、復旧に長時間を要し、地域社会・地域経済、ひいては全国の社会経済に与える影響が大きい。このため、既設の橋梁については、適切にその耐震性を判定し、必要とされる耐震補強を行って耐震性能を高めていくことが必要とされる。

橋梁については、長い橋梁建設の歴史の中で各種の技術開発の発展とともにその設計・施工法が確立・拡充されてきた結果、既設橋梁の中でも特に古い時代に建設された橋梁の中には、現在の耐震水準から見ると耐震性が低いものもある。大正12年の関東地震以来最大の被害を及ぼした平成7年の兵庫県南部地震では、従来の耐震設計で考えられてきた設計地震力を大幅に上回る地震動が作用し、特に古い時代に建造された橋梁を中心に甚大な被害を及ぼした。このため、既設橋梁に対しては、その耐震設計がどのように行われてきたかを十分に把握するとともに、橋梁の耐震性に影響を及ぼす因子を十分に認識した上で耐震性判定や耐震補強を行っていくことが重要である。

本章では、海外と我が国の耐震性判定や耐震補強に関する考え方の比較を行うことを目的に、主に我が国の道路橋を対象に、過去の地震被害の経験を踏まえて改訂されてきた耐震基準の変遷、平行して震災対策の一環として進められてきた耐震補強の変遷、さらに、耐震性判定法の考え方、各構造部材に対する耐震補強法の考え方を紹介する。

5. 2 地震被害の経験と耐震基準・耐震補強の変遷

1) 道路橋の耐震基準の変遷

我が国で構造物に対する耐震設計の必要性が認識されるようになったのは、1891年（明治24年）の濃尾地震による被害経験が契機といわれている¹⁾。その後、1916年（大正5年）には、佐野により初めて震度法という耐震設計の概念が提案され²⁾、これによって構造物の耐震設計が具体的に行われるようになった。震度法は、動的に作用する地震力を静的な慣性力に置き換えて構造計算を行う耐震計算法であり、慣性力は構造物の重量と設計震度の積として表される。震度法は、その概念の単純明快さと計算の簡便さから、耐震設計の中心的な計算方法として現在に至っている。

ここでは、過去の地震被害の経験とともに開発、改良されてきた耐震設計基準の変遷について示す。

(1) 大正12年関東地震以降の耐震設計基準の変遷

道路橋の設計において地震の影響を具体的に考慮するようになったのは、1923年（大正12年）の関東地震による被害を契機として翌1924年（大正13年）に内務省土木局が「橋台・橋脚等の耐震化の方法」として地震力に相当する水平力を設計の際に考慮するように通達した時に始まる³⁾。

関東地震における道路橋の被害は、東京、神奈川、静岡などで1,785橋に及び、震央に近い神奈川県では半数以上の橋が被災した。この当時は、まだ道路橋に対しては、地震力が考慮されていなかったため、下部構造が破壊して上部構造の落下に至るような甚大な被害が見られた。写真5.1は、その一例として小田原市内の酒匂橋の落橋を示したものである。酒匂橋は橋長360m、合計33径間の単純橋であったが、全スパンが同じように落橋した。

関東地震以後の耐震性に関する諸規定の整備状況は表5.1⁴⁾および図5.1⁵⁾に示す通りであり、まず、1926年(大正15年)の「道路構造に関する細則案 第2章橋梁」において初めて設計荷重として地震力の規定が盛り込まれた⁶⁾。ここでは、地震荷重は橋梁の所在地方における最強地震力により橋梁の各部に最大応力を生ずるものを用いることと規定されているが、具体的な数値及び計算方法については示されていなかった。この細則案に代わって昭和14年に出された「鋼道路橋設計示方書案」においては、設計震度の標準値として水平加速度を0.2g、鉛直加速度を0.1gとし、架橋地点の状況を考慮してこれを増減することと規定された⁷⁾。ただし、増減の基準が具体的に規定されていなかったため、設計震度としては、一般に水平加速度0.2g、鉛直加速度0.1gがそのまま用いられるのが実状であった。このため、その後に改訂された1954年(昭和31年)の「鋼道路橋設計示方書」においては、水平震度は架橋地域と地盤の種別に応じて9種類に分類し、その値としては0.1~0.35の値をとることとされ、また、鉛直震度としては0.1を標準とすることと規定された⁸⁾。

このような一連の耐震基準の整備によって、設計地震力を考慮していなかった時期に建設された道路橋では、1923年(大正12年)関東地震の被災例に見られたように、下部構造自体の強度不足、周辺地盤の変状あるいは支持力不足により下部構造の大きな横移動、傾斜、転倒を生じ、これが契機となって上部構造が落橋したり甚大な被害を受けたものが多かったが、耐震設計基準の整備に伴ってこうした被害形態は減少した。

これに対して、周辺地盤の変状、特に砂質地盤の液状化に伴う下部構造の過大な移動、変形による被害形態は現在でも見られる被害である。液状化による被害が顕著に認識されたのは、1964年(昭和39年)の新潟地震による昭和大橋の落橋(写真5.2)であった。昭和大橋では、周辺地盤が広範囲に液状化した結果、下部構造に大きな変形が生じ、上下部構造間に有効な落橋防止構造を有していなかったために、上部構造の落橋を招いた。

このような被災経験や動的解析法などのその後の耐震設計に関する研究の進展を踏まえ、1971年(昭和46年)に「道路橋耐震設計指針」が規定された¹⁰⁾。ここでは、設計震度は、標準設計震度を0.2とし、これを地域、地盤条件、および橋梁の重要度に応じて統一的に定めるとともに、高橋脚等比較的振動しやすい橋については修正震度法を適用することとされた。さらに、設計震度の規定の他に、地震時の地盤の液状化なども考慮して地震の影響を総合的に評価するとともに、上下部構造間の相対変位による落橋を防止するための構造細目などによって構造系全体としての安全性を確保しようという考え方も導入された。

一方、1978年(昭和53年)宮城県沖地震では、鉄筋コンクリート橋脚の損傷と同時に支承及びその周辺の上下部構造の損傷が顕著に見られるようになった(写真5.3)。これは、下部構造の耐震設計法が進んできた結果、関東地震、福井地震に見られたような下部構造の移動、傾斜等の被害が少なくなったが、そのかわりに橋脚、支承周辺部のうちねばりの



写真5.1 大正12年関東地震による酒匂橋の落橋



写真5.2 昭和39年新潟地震による昭和大橋の落橋



写真5.3 昭和53年宮城県沖地震による千代大橋のRC橋脚の被害

表5.1 道路橋の耐震設計基準の主要規定の変遷

年 代	耐震設計関連の規定	規定の主な内容				主な地震
		耐震計算法と設計震度	落橋防止対策	液状化対策		
1920 (大正9) 年	1929 (大正15) 年 道路構造に関する細則案	・最強地震力を考慮する。ただし、具体的な数値、計算方法は示されず	・規定なし	・規定なし	1923 (大正12) 年 関東地震(M7.9)	
1930 (昭和5) 年	1939 (昭和14) 年 鋼道路橋設計示方書案	・水平加速度0.2g及び鉛直加速度0.1gを標準	・規定なし	・規定なし	1952 (昭和27) 年 十勝沖地震(M8.1)	
1940 (昭和15) 年 1950 (昭和25) 年	1956 (昭和31) 年 鋼道路橋設計示方書	・水平震度は0.1~0.35とし、地域別、地域別に9種類に分類して規定	・規定なし	・規定なし	1964 (昭和39) 年 新潟地震(M7.5) 1971 (昭和46) 年 フェルナント地震(M6.6)	
1960 (昭和35) 年	1964 (昭和39) 年 鋼道路橋設計示方書	・同上	・規定なし	・規定なし	1978 (昭和53) 年 宮城県沖地震(M7.1)	
1970 (昭和45) 年	1971 (昭和46) 年 道路橋耐震設計指針	・震度法(地域別、地盤別、重要度補正係数を考慮)による耐震計算 ・応答を考慮した修正震度法 ・設計水平震度(0.1~0.3)	・落橋防止対策を規定 (移動制限装置、空隙縁端距離、桁間連結装置)	・液状化の可能性を現位置特性、土質特性による土層の支持力を無視	1983 (昭和58) 年 日本海中部地震(M7.7)	
1980 (昭和55) 年	1980 (昭和55) 年 道路橋示方書 V耐震設計編	・震度法(地域別、地盤別、重要度補正係数を考慮)による耐震計算 ・応答を考慮した修正震度法 ・設計水平震度(0.1~0.3) ・地震時解析の位置づけを行い、設計地震力を規定	・落橋防止対策を規定 (移動制限装置、S _E 、落橋防止装置)	・土の液状化強度と地震荷重の比較による合理的な判定方法を規定して、土層の土質定数を低減	1989年M7.7 ⁰ M7.1 ¹ M7.1 ² 地震	
1990 (平成2) 年	1990 (平成2) 年 道路橋示方書 V耐震設計編	・震度法と修正震度法を統合し、新たに震度法(地域別、地盤別、重要度補正係数を考慮)による耐震計算 ・設計水平震度を(0.1~0.3) ・連続橋の耐震計算方法を規定(設計震度: 0.7~1.0) ・動的解析による安全性の照査方法を規定	・同上	・同上し、砂質土層の液状化強度の影響を考慮し、算定方法を高度化	1993 (平成5) 年 釧路沖地震(M7.8) 北海道南西沖地震(M7.8) 1994 (平成6) 年 ノースアイランド地震(M6.6)	
	1995 (平成7) 年 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	・同上、さらには以下を追加 ・地震の影響の大きい部材(RC橋脚、鋼製橋脚、基礎、支承等)に対する地震時保有水平耐力の照査の実施(設計震度: 1.5~2.0) ・動的解析による兵庫県南部地震に対する安全性の照査 ・免震設計の採用 ・ねばり強い構造のための配筋細目等	・同上 ただし、落橋防止装置の強度を強落橋防止機能を付与するに際しては、複数を考慮	・同上 ただし、砂質土層の液状化の影響を考慮し、算定方法を高度化	1995 (平成7) 年 兵庫県南部地震(M7.2)	

少ない弱点部に被害が集中するようになったためと考えられる。このような点に対処するために、1980年（昭和55年）の「道路橋示方書V耐震設計編」では、鉄筋コンクリート橋脚の変形性能の照査法が加えられた¹¹⁾。また、 F_L 値を用いる液状化発生の判定方法が具体的に規定され、基礎構造物の耐震設計に際して液状化の影響を見込む考え方も示された。

1990年（平成2年）には、道路橋の耐震性に関する新しい研究成果や近年の地震被害を経験を踏まえて、連続橋の耐震計算法や鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査法が規定された¹²⁾。地震時保有水平耐力の照査法は、震度法により耐震設計された鉄筋コンクリート橋脚に対して、これをさらに上回る大きな地震力が作用しても落橋等の致命的な破壊を生じないことを照査することを規定したものである。地震時保有水平耐力の照査に用いる設計震度の標準値は1.0とされた。これは、1923年（大正12年）の関東地震による東京での地震動相当の地震力を対象としたものであり、このような大きな地震力を受けても鉄筋コンクリート橋脚が許容される損傷に止めることを照査するのが、地震時保有水平耐力の照査のねらいである。

（2）平成7年兵庫県南部地震による橋梁の被害と耐震基準の改訂

道路橋の耐震上最も大きな影響を及ぼしたのが、平成7年1月に発生した兵庫県南部地震である。兵庫県南部地震では気象庁による観測史上はじめて震度7（激震）を記録するとともに、道路橋では高架橋が倒壊するなど関東大震災以来、最大の被害を引き起こした¹³⁾。兵庫県南部地震では、従来我が国でほとんど観測されたことがない極めて大きくかつ短時間に衝撃的な地震動が生じたことが指摘されている。水平成分の最大加速度が600 gal を超える地点は5カ所あり、広範囲な地域に大きな加速度が生じた。特に、神戸海洋気象台では、最大818gal と極めて大きな地震動が記録されている。道路橋では、1980年（昭和55年）より古い基準で設計された橋を中心として、上部構造の落橋を含む甚大な被害が生じた。特に、鉄筋コンクリート橋脚の主鉄筋段落し部で損傷が生じるとともに、鋼製橋脚、支承部、落橋防止装置等で被害が生じた。

このような被害経験を踏まえ、被災地域の復旧のための設計仕様が地震後の2月27日に「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（復旧仕様）」として、建設省より関係機関に通知されている¹⁴⁾。兵庫県南部地震では、1990年（平成2年）の基準で設計された橋では大きな被害が少なかったことから、復旧仕様ではこれを基本とし、各構造部材の強度を向上させると同時に、変形性能を高めて橋全体系として地震に耐える構造を目指し、震度法による設計に加えて、地震時保有水平耐力を照査することとされている。さらに、今回の地震に余裕をもって耐えられる構造であることを前述の神戸海洋気象台等の実測記録を用いて動的解析によって照査することとされた。この他に、免震設計の採用や地盤流動の影響なども考慮されている。

復旧仕様は、5月27日には、橋、高架の道路等の技術基準（道路橋示方書）の改訂が行われるまでの当面の措置として、全国で今後実施される新設橋梁の設計及び既設橋梁の補強についても道路種別及び構造・機能に応じて復旧仕様を参考とすることが建設省より関係機関に通知された。

道路橋示方書の改訂に関しては、平成7年4月より日本道路協会橋梁委員会において検討が進められてきた。新しい道路橋示方書は、兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会から

の今後の道路橋の耐震設計に関する提言¹²⁾と上記の復旧仕様や復旧仕様の準用に係る参考資料¹⁴⁾、さらに土木学会による土木構造物の耐震基準等に関する提言¹⁵⁾などを基本として、その後の橋の耐震設計に関する調査研究の成果等を加えてとりまとめられ、平成8年11月1日に建設省より通知され、現在に至っている¹⁶⁾。

(3) 平成8年道路橋示方書における耐震設計の考え方

表5.2は、耐震設計で考慮する地震動と目標とする橋の耐震性能、およびこれを検討するための耐震計算法を示したものである。道路橋示方書に規定された最も重要な点が表5.2にまとめられる。

耐震設計で考慮する地震動としては、橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動および供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動の2段階の地震動を考慮する。ここで、橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動としては、比較的生じる可能性の高い中規模程度の地震による地震動とし、従来の耐震設計において震度法に用いる設計震度として規定されてきた地震力を踏襲している。また、橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動としては、平成2年の耐震設計編において規定された大正12年の関東地震の際の東京周辺における地震動のように発生頻度が低いプレート境界型の大規模な地震による地震動に加え、平成7年兵庫県南部地震のように発生頻度が極めて低いマグニチュード7級の内陸直下型地震による地震動を考慮する。

これらの地震動に対して、橋の耐震設計は、橋の重要度に応じて必要とされる耐震性能を確保することを目標として行うものであり、重要度が標準的な橋については、致命的な被害を防止することを目標とし、また、高速道路、一般国道、緊急輸送道路等における特に重要度が高い橋では、限定された損傷にとどめることを目標としている。

構造物の耐用期間中にまれに起るような大地震に対しても全く損傷を受けないような構造物を作ることは技術的にも、また、コストなどの面でも必ずしも現実的な対応とはいえず

表5.2 平成8年道路橋示方書に規定される耐震設計で考慮する地震動と目標とする橋の耐震性能

耐震設計で考慮する地震動		目標とする橋の耐震性能		耐震計算法	
		重要度が標準的な橋 (A種の橋)	特に重要度が高い橋 (B種の橋)	静的解析法	動的解析法 (地震時の挙動が複雑な橋)
橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動		健全性を損なわない		震度法	
橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動	タイプⅠの地震動 (プレート境界型の大規模な地震)	致命的な被害を防止する	限定された損傷にとどめる	地震時保有 水平耐力法	時刻歴応答解析法 応答スペクトル法
	タイプⅡの地震動 (兵庫県南部地震のような内陸直下型地震)				

ない。このため、大地震に対しては、多少の損傷を許容し、これによって地震の震動エネルギーを適切に吸収することができれば、致命的な損傷を防ぎ、構造物として安全かつ合理的な設計が可能になる。このため、道路橋の耐震設計では、構造部材の強度を向上させると同時に変形性能を高めて橋全体として地震に耐える構造系を目指すために、耐震設計は震度法だけではなく地震時保有水平耐力法によっても行うこととされている。

道路橋示方書の改訂の中でも、耐震設計の基本が震度法から地震時保有水平耐力法に移行した点が最も重要な改訂事項の1つである。

2) 道路橋に対する震災対策の経緯

(1) 兵庫県南部地震以前の震災対策

道路施設の震災対策の一環として、昭和46年以降数次にわたり道路橋の震災点検が実施され、耐震補強が行われてきた^{17) 18)}。表5.3は、現在までの道路橋の震災点検の経緯を示したものである。

道路橋に対する震災点検が最初に実施されたのは昭和46年である。これは、昭和46年2月に米国ロサンゼルス市付近に発生したサンフェルナンド地震(M=6.6)により高架橋を中心に甚大な被害を生じたのを契機として我が国の地震対策を強化促進するために実施されたものである。一般国道指定区間以上の道路の全区間と、その他の道路の一部の区間に存する橋長5m以上の道路橋に対して、破損、亀裂、傾斜、滑動、沈下、洗掘などの変状が生じていないかなどが調査された。約18,000橋が調査され、このうち、約1,500橋に対策が行われた。

これ以後、昭和51年、昭和54年、昭和61年、平成3年と対象とする道路や点検項目が順次拡大されながら震災対策が行われてきている。最も最近の震災点検は、平成3年に実施されており、昭和57年の浦河沖地震、昭和58年の日本海中部地震、昭和59年の長野県西部地震の各地震による被害と震災対策への要望が高まるとともに、道路の耐震性の一層の向上を図るために実施されている。平成3年の震災点検では、約60,000橋が点検され、平成6年末までに、約7,000橋に対策が行われた。

こうした一連の震災対策事業により、平成6年までに累積で約32,000橋に対して耐震対策が実施されている。

(2) 兵庫県南部地震以降の震災対策

兵庫県南部地震では、橋脚の倒壊、橋桁の落下を始め、多数の橋梁で甚大な被害が発生した。道路橋については、昭和46年以前の古い耐震基準が適用された鉄筋コンクリート橋脚において著しい被害を生じたものがあつたとともに、被害原因としては兵庫県南部地震における地震動が従来経験したことのない大きな影響を構造物に与える地震動があり、著しい被害を受けた橋はいずれも設計で想定していた以上の地震力を受けたことが被害の根本的な原因と推定されており、道路橋の被災特性については、以下のようにまとめられている¹³⁾。

①地震動

強震観測記録や地盤の地震応答解析等を総合すると、今回の地震における水平方向の地震動は、強震計による観測が開始され、正確な地震動の把握が可能となった昭和

表5.3 道路橋に対する震災対策の経緯

点検年次	点検の主な契機	点検対象道路	点検項目	点検橋数	対策橋数
昭和46年	米国ロサンゼルス地震（昭和46年2月）による被害	一般国道指定区間以上の全区間、およびその他の道路の一部（橋長5m以上）	①破損、沈下等の変状 ②パイラメント橋脚の支承縁端距離	18,000橋	1,500橋
昭和51年	震災対策のより一層の推進	一般国道指定区間以上の全区間、およびその他の道路の一部（橋長15m以上および立体交差）	①破損、沈下等の変状 ②支承縁端距離と落橋防止装置	25,000橋	2,500橋
昭和54年	伊豆大島近海地震（昭和53年1月）、宮城県沖地震（昭和53年6月）による被害	主要地方道以上の全区間、およびその他の道路の一部（橋長15m以上および立体交差）	①破損、沈下等の変状 ②落橋防止装置 ③液状化の影響 ④土および杭基礎の支持力 ⑤R C橋脚の強度 ⑥耐震性の低い古い基礎構造	35,000橋	13,000橋
昭和61年	浦河沖地震（昭和57年3月）、日本海中部地震（昭和58年5月）、長野県西部地震（昭和59年9月）の各地震による被害と震災対策への要望の高まり	主要地方道以上の全区間、およびその他の道路の一部（橋長15m以上および立体交差）	①破損、沈下等の変状 ②落橋防止装置 ③液状化の影響 ④R C橋脚（基部および段落し部）の強度 ⑤杭基礎の支持力 ⑥耐震性の低い古い基礎構造	40,000橋	8,000橋
平成3年	道路の耐震性の一層の向上	主要地方道以上の全区間、およびその他の道路の一部（橋長15m以上および立体交差）	①破損、沈下等の変状 ②落橋防止装置 ③液状化の影響 ④R C橋脚（段落し部）の強度 ⑤耐震性の低い古い基礎構造	60,000橋	7,000橋 平成6年末
平成7年	兵庫県南部地震（平成7年1月）による橋梁の被害	一般国道指定区間以上の全区間、およびその他の道路の重要区間（立体交差、高架、重要な橋）	①昭和55年より古いR C橋脚 ②落橋防止構造	—	30,000橋脚

注）点検橋数、対策橋数は、概数を示している。

39年新潟地震以後、我が国はもとより世界的に見ても経験したことの無い大きな影響を構造物に与える地震動であった。これは、現在までの道路橋の耐震設計で考慮されてきた地震力を大幅に上回るものであった。さらに、上下方向にもきわめて大きな地震動が生じた。

② R C 橋脚

R C 橋脚のうち、主鉄筋段落し部の規定が改訂される以前に設計施工された橋脚においては、曲げ損傷からせん断破壊に移行するという著しい被害を生じたものがある。また、基部に著しい被害を受けた橋脚もある。RC 橋脚の被災と適用示方書の関係を分析すると、昭和39年および昭和46年の耐震設計基準が適用された阪神高速道路3号神戸線では、倒壊したものや亀裂、座屈、鉄筋の破断等の損傷、または変形が大きい等の大きな被害を受けた橋脚が全体の15%あるが、昭和55年以降の道路橋示方書に準拠した阪神高速道路5号湾岸線では、こうした被害が生じていない。

③ 鋼製橋脚

鋼製橋脚では、水平地震力に伴う矩形断面鋼製柱のウェブ及びフランジの局部座屈が角溶接部の破断に発展し、その結果上下方向耐力の低下を起こして桁が沈下した例がある。

④ 上部構造

桁の損傷の大部分は、支承の被害に伴って支承部に生じたものである。また、落橋防止構造の取付け部にも被害が生じている。

⑤ 落橋防止装置

桁連結方式の落橋防止装置では、装置本体もしくはこれを取り付ける桁の破断により落橋を有効に防止できなかった事例がある。

⑥ 支承

鋼製支承には、セットボルトの破断、支承本体の破壊、ローラーの逸脱、アンカーボルトの破断等多数の被害が生じている。ゴム支承の被害は、鋼製支承に比べて少ない。

⑦ 地盤および基礎

液状化に対する判定が不要とみなされていた砂礫地盤等粒径の大きい地盤でも液状化が生じたり、液状化に伴う地盤流動が観測されている。

基礎については、地震時の安定性に影響のある沈下や鉄筋の破断、コンクリートの剥離などの構造的な被害はほとんど生じていない。ただし、水際線近傍などにおいて液状化に伴う地盤の流動が生じた箇所では残留変位を生じた基礎がある。この場合でも基礎に生じた損傷は曲げひびわれ程度であり、また、地盤流動が主原因で上部構造の落下につながった橋はなかった。地盤流動が同じ程度であっても、ケーソン基礎や地中連続壁基礎のように剛性の高い基礎では残留変位が小さい。

道路橋の被災特性として以上のような事実を踏まえ、平成7年～平成9年の3カ年間に緊急耐震補強が実施された。重要度の高い橋を中心に、被災が大きかった昭和55年よりも古い基準が適用された鉄筋コンクリート橋脚と落橋防止構造の設置が優先的に行われた。

5. 3 耐震性判定法

1) 地震危険度評価

既設道路橋の耐震性を精度よく評価するためには、現在の基準に従って設計照査を行うことにより可能である。しかしながら、非常に多数の橋を1橋1橋細かい設計照査を行っていくことは、一般に時間的にも経済的にも現実的ではない。このため、従来、我が国では、簡便な手法で耐震性が相対的に低い橋梁をスクリーニングし、そして構造設計条件をもとに具体的に耐震性能を照査していく2段階の耐震性評価法が用いられてきている。

既設橋梁の耐震性判定と耐震補強の優先度を設定する上で最も大きな要因となるのが、次の3つと考えられる。

①地震の発生危険度

地震の発生時期や規模を正確に予測することができれば、将来起こり得る地震の規模に対して必要な耐震対策を、地震の発生時期までに対策が完了するような合理的な震災対策が可能となる。しかしながら、地震の発生時期や規模を正確に把握するのは、現段階では困難である。

現在、内陸部に関しては、活断層の調査などが行われており、活断層の存在が明確な地域においてはこうしたデータの積み重ねによって、地震の影響地域を明確にし、活断層の影響を地域計画の中に反映して優先的に耐震対策を図っていくということも考えられる。

②既設橋梁の耐震性能

想定する地震力に対して、橋梁がどのような耐震性能を発揮できるかを十分に把握することが必要とされる。耐震補強の優先度を考える上では、構造物の脆弱度を把握する必要がある。既設橋梁の耐震性能は、想定する地震力に対して、設計照査を行うことにより把握できるが、設計法の高度化に伴う弱点部の抽出や既往の地震被害の経験から、特に被害を受けやすい部材などを抽出することが可能である。

③路線の重要度

耐震補強を行う上では、個々の橋梁構造物自体の耐震性レベルの他に、地震時に地域の道路ネットワークとして有効に機能できるように考慮した上で設定する必要がある。例えば、道路橋示方書では、重要度は、表5.4に示すように道路種別や構造特性に応じて設定されており、避難路や緊急物資の輸送路などの地域の防災計画上の位置付け、複断面・跨線橋・跨道橋など被災時に他の構造物に影響を及ぼす2次災害の可能性、利用交通量など利用状況と代替性の有無、被災時の復旧など機能回復の難易、などを考慮して重要度を設定することとされている。

2) 道路橋の耐震性に影響を及ぼす要因

表5.5は、道路橋耐震性に影響を与える要因とそれに対する耐震補強の可能性を示したものである¹⁹⁾。これは、昭和53年の宮城県沖地震で被害を受けた宮城県内の道路橋95橋と、同じ地域にあって被害を受けなかった19橋を基本に、これに大正12年関東地震、昭和23年福井地震、昭和39年新潟地震により落橋等の大被害を受けた10橋を加えた124橋を対象に、数量化理論により耐震性に影響を及ぼす因子を分析した結果を示したものである。これによれば、合計16項目が橋梁の被害に関係があり、この中でも、特に、①適用示方書、

⑥落橋防止構造、⑨地盤条件、⑫洗掘、⑬下部構造材料、⑭基礎工法、⑮地震動加速度、⑯主鉄筋の段落し、の8項目が道路橋の耐震性に大きく関与する。

表5.4 平成8年道路橋示方書における道路橋の重要度の分類

道路種別等	構造・機能	複断面、跨線橋、跨道橋及び地域の防災計画上の位置付けや当該道路の利用状況等から特に重要な橋、高架の道路等	左記以外の橋等
高速自動車国道 都市高速道路 指定都市高速道路 本州四国連絡道路 一般国道		特に重要度が高い橋 (B種の橋)	特に重要度が高い橋 (B種の橋)
都道府県道 市町村道		特に重要度が高い橋 (B種の橋)	重要度が標準的な橋 (A種の橋)

3) 兵庫県南部地震による被災経験と耐震性判定

平成7年の兵庫県南部地震による被災の特徴は、上記5.2に示した上記の通りであり、特に、橋梁に作用した地震力が、現在までの道路橋の耐震設計で考慮されてきた地震力を大幅に上回るものであったこと、多くの被災を受けた鉄筋コンクリート橋脚では、主鉄筋段落し部の規定が改訂される昭和55年より前に設計施工された橋脚において曲げ損傷からせん断破壊に移行するという著しい被害を生じたものがあったこと、鉄筋コンクリート橋脚の被災と適用示方書の関係を分析すると、昭和39年および昭和46年の耐震設計基準が適用された阪神高速道路3号神戸線では、倒壊したものや亀裂、座屈、鉄筋の破断等の損傷、または変形が大きい等の大きな被害を受けた橋脚が全体の15%あるが、昭和55年以降の道路橋示方書に準拠した阪神高速道路5号湾岸線ではこうした被害が生じていないこと、などが明らかになっている。

このような被害の経験を踏まえると、以下のような項目が主に耐震性に影響を及ぼし、耐震性判定で着目する項目と考えられる。特に、耐震基準の年次が耐震性判定の上で非常に重要な項目となる。

- ①鉄筋コンクリート橋脚
適用基準と主鉄筋段落しの有無
- ②鋼製橋脚
適用基準
- ③落橋防止装置
適用基準と構造形式(斜橋・曲線橋)
- ④支承
適用基準と支承の種類(鋼製、ゴム支承)
- ⑤液状化・流動化
適用基準と架橋位置(水際線との距離)

表5.5 道路橋の耐震性に影響を与える要因とそれに対する耐震補強の可能性

影響要因	被害度に及ぼす相対的な程度	耐震補強による変更の可能性	耐震補強の考え方
①適用示方書	大正15年細則・昭和14年道示によるものは、相対的に被害度は高くなる。	あり	現行基準との相違点に対する補強
②上部構造形式	ゲルバー桁および2径間以上の単純支持は、相対的に被害度は高くなる。一方、上路・中路アーチ、ラーメン、連続桁橋等は相対的に被害度は低くなる。	なし	
③平面線形	曲線橋・斜橋は、直橋よりもむしろ被害度が低くなる。	なし	
④上部構造材料	R C・P Cと鋼の間には大差はないが、ややR C・P Cの方が相対的に被害度は低くなる。	なし	
⑤縦断勾配	勾配のある方が、勾配のない場合に比較して被害度は高くなる。	なし	
⑥落橋防止構造	落橋防止がないと相対的に被害度は高くなる。一方、落橋防止があれば相対的に被害度は低くなるが、落橋防止が1種類よりも2種類ある方がより被害度は低くなる。	なし	落橋防止構造の設置
⑦下部構造形式	単列パイルベントおよびR Cラーメンは、相対的に被害度は高くなる。	あり	下部構造補強
⑧橋脚高さ	橋脚高さの高い方が、相対的に被害度は高くなる。	なし	
⑨地盤条件	地盤が軟弱なほど、相対的に被害度は高くなる。	なし	
⑩液状化の影響	液状化の生じた場合の方が、相対的に被害度は高くなる。	あり	基礎補強、地盤対策
⑪支持地盤	不均一な場合の方が、相対的に被害度は高くなる。	なし	
⑫洗掘	洗掘のある場合の方が、相対的に被害度は高くなる。	あり	洗掘防止対策
⑬下部構造材料	大正12年細則・昭和14年道示による無筋コンクリートの方が、相対的に被害度は高くなる。	あり	下部構造補強、取り替え
⑭基礎工法	木杭および基礎工法不明のものは、相対的に被害度は高くなる。	あり	基礎補強
⑮地震動加速度	地震動加速度が大きいほど、相対的に被害度は高くなる。特に、地震動加速度が400gal以上になると、相対的に被害度は高くなる。	あり	免震工法
⑯主鉄筋段落しの影響	主鉄筋段落し部の定着長が十分ではない場合には、相対的に被害度は高くなる。	あり	橋脚躯体の補強

5. 4 耐震補強法

1) 耐震補強の基本的な考え方

兵庫県南部地震で経験したような強い地震力に対して橋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きやすい部材のぜい性的な被害を防止するとともに、橋全体系としてねばり強い構造とすることが重要である²⁰⁾。

耐震補強工法を目的別に分類すると、表5.6のようになる。

表5.6 橋梁の耐震補強法の分類

耐震補強の目的	力学的な要求耐震性能	耐震補強法
下部構造躯体の耐震性の向上	<ul style="list-style-type: none"> ・ 躯体の曲げ耐力、せん断耐力の向上 ・ 変形性能の向上 ・ 剛性の向上（変形の拘束） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鉄筋コンクリート巻立て ・ 鋼板巻立て ・ 新素材等の巻立て ・ 耐震壁増設（ラーメン構造他） ・ 補剛材の増設
基礎構造の耐震性の向上	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地盤の液化化抵抗の向上 ・ 支持力（鉛直、水平）の向上 ・ 基礎本体の耐力・変形性能の向上 ・ 洗掘による支持力不足対策 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地盤改良 ・ 増し杭 ・ フーチング拡大 ・ 地中壁の設置 ・ 根固め
支承構造の耐震性の向上	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水平耐力の向上 ・ 変形性能の向上 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 支承の交換（ゴム系支承との交換） ・ 変位制限構造の設置
橋全体系の耐震性の向上	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地震時慣性力の低減 ・ 全体系の変位の制限 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 免震構造、制震構造 ・ 全体系の中で慣性力分担の調整 ・ 全体系の中で変位の制限
フェイルセーフ機構	<ul style="list-style-type: none"> ・ 落橋防止システムの設置 	<ul style="list-style-type: none"> ・ けたかかり長 ・ 落橋防止構造 ・ 変位制限構造 ・ 段差防止構造

2) 各構造部材別の耐震補強法

(1) 鉄筋コンクリート橋脚

兵庫県南部地震のような大きな地震に対して橋が耐えられるように補強するためには、表5.7に示すように、基礎への影響を最小限にするとともに、地震後の残留変形を少なくすることに配慮し、橋脚躯体の曲げ耐力とじん性の両者の向上が期待できる補強工法を適用する必要がある。このような鉄筋コンクリート橋脚の補強工法として図5.2に示される曲げ耐力制御式鋼板巻き立て工法が用いられている¹⁴⁾。この工法のポイントは、橋脚躯体を鋼板で巻立て、軸方向鉄筋の段落し部を補強するとともに、アンカー筋により鋼板をフーチングに定着させて橋脚の耐力とじん性の両者の向上を図るものである。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を制御することができる。写真5.4は、模型振動台実験による補強した場合と補強しない場合の損傷状況を比較したものである。補強しない場合にはかぶりコンクリートが大きく剥離したが、補強した場合にはアンカー筋が多少変形する程度の損傷であった。これは、アンカー筋により曲げ耐力が向上した結果、橋脚の応答変位が小さくなるとともに、鋼板により拘束効果が高められたことにより基部のコンクリートの損傷が拘束されたためである。振動台実験による応答変位を解析により求めた応答変位と比較したのが図5.3である。現在一般に用いられている非線形解析法により履歴特性をかなりの精度で追跡できることがわかる。

表5.7 耐震補強で要求する性能と耐震補強工法

耐震補強の目的		原理	耐震補強工法	留意点
耐力の向上	曲げ耐力	<ul style="list-style-type: none"> 橋脚の軸方向に巻立てにより、断面の軸方向の曲げ耐力を向上させる。 	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋コンクリート軸方向の巻立てにより曲げ耐力が向上する。 鋼板軸方向の巻立てにより曲げ耐力が向上する。 炭素繊維等の高強度材料・高弾性新材料の巻立て工法による軸方向の寄与する新材料の力学特性・厚さを向上させる。 	<ul style="list-style-type: none"> 基礎の曲げ耐力を向上させる必要が、耐力基礎への影響が大きくなる。
	せん断耐力	<ul style="list-style-type: none"> 橋脚の横方向に巻立てにより、せん断耐力を向上させる。 	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋コンクリート軸方向の巻立てによりせん断耐力が向上する。 鋼板軸方向の巻立てによりせん断耐力が向上する。 炭素繊維等の高強度材料・高弾性新材料の巻立て工法による軸方向の寄与する新材料の力学特性・厚さを向上させる。 	<ul style="list-style-type: none"> 高強度材料のせん断耐力を向上させる必要が、耐力基礎への影響が大きくなる。
じん性の向上		<ul style="list-style-type: none"> 橋脚の横方向に巻立てにより、せん断耐力を向上させる。 	<ul style="list-style-type: none"> せん断耐力の向上と同様の巻立て工法 	<ul style="list-style-type: none"> 矩形断面では、巻立てにより、せん断耐力が向上する。 膨らみが必要な場合、巻立てにより、せん断耐力が向上する。
	耐力とじん性の両者の向上	<ul style="list-style-type: none"> 上記2種類の工法を兼ね備えた工法 	<ul style="list-style-type: none"> 曲げ耐力制御式巻立て工法（フレキシブルコンクリート） 免震工法、制震工法 	<ul style="list-style-type: none"> 基礎の耐力を向上させる必要が、耐力基礎への影響が大きくなる。
地震力の低減		<ul style="list-style-type: none"> 地震時の橋脚に作用する力を低減させる。 		<ul style="list-style-type: none"> 設計地震力に対する配筋率を低減させる必要が、耐力基礎への影響が大きくなる。

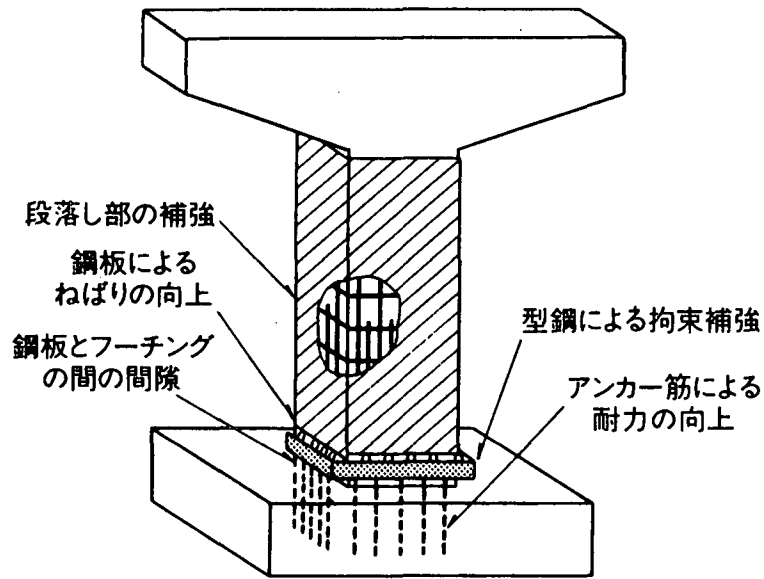
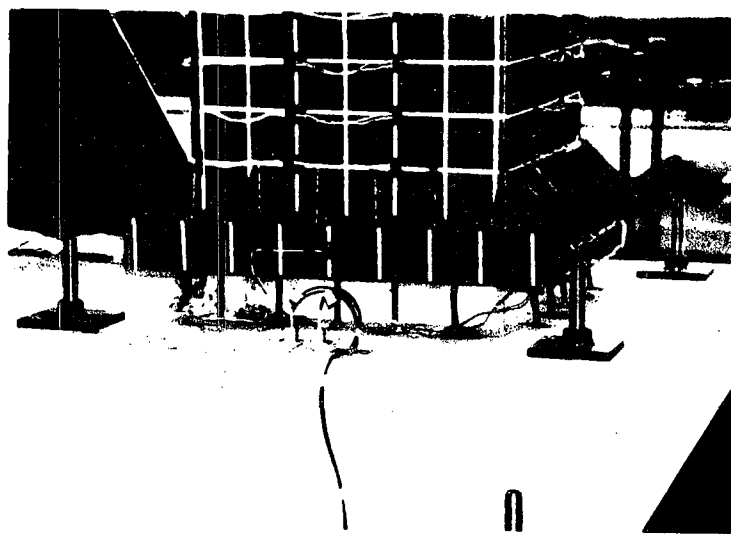


図5.2 曲げ耐力制御式鋼板巻立て工法の概念図



(1)補強していない場合



(2)補強した場合

写真5.4 模型振動台実験による耐震補強効果の検証

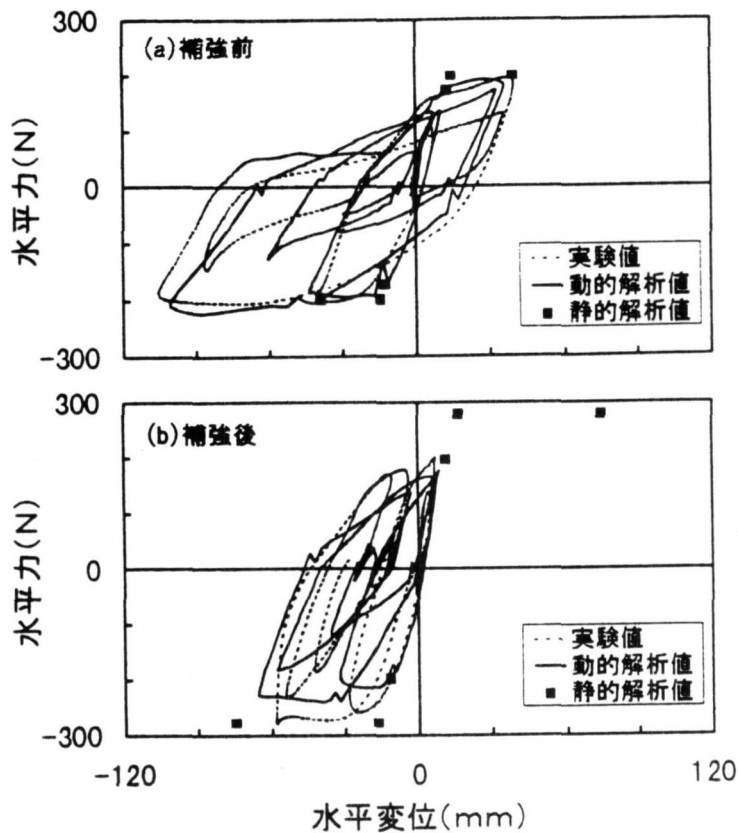


図5.3 模型実験と非線形解析による荷重～変位関係の比較

この他にも、従来から実績のある鉄筋コンクリート巻立て工法やさまざまな新しい耐震補強法が開発されつつあり、例えば、鉄筋コンクリート橋脚の変形性能を向上させる補強法として、炭素繊維シート等の新素材を活用した耐震補強技術についても最近採用が検討されつつある²¹⁾。炭素繊維は、材料が薄くて軽量であるため、施工性が優れており、耐震補強への適用が期待されている。写真5.5および図5.4は模型実験状況と模型実験から得られた荷重～変位関係を示したものである。これによると、円形断面の鉄筋コンクリート橋脚を炭素繊維で巻立てることによりせん断耐力やじん性の向上に有効であることが明らかにされている。

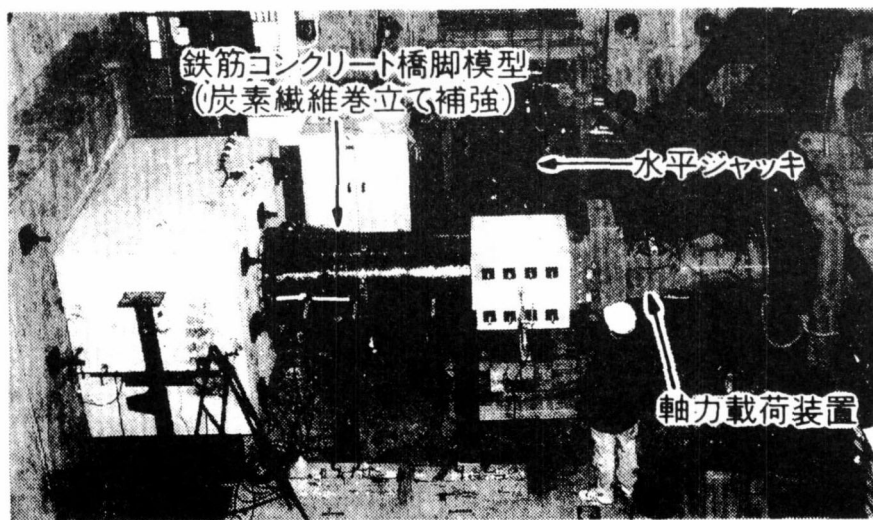


写真5.5 炭素繊維シートによる耐震補強効果に関する模型実験

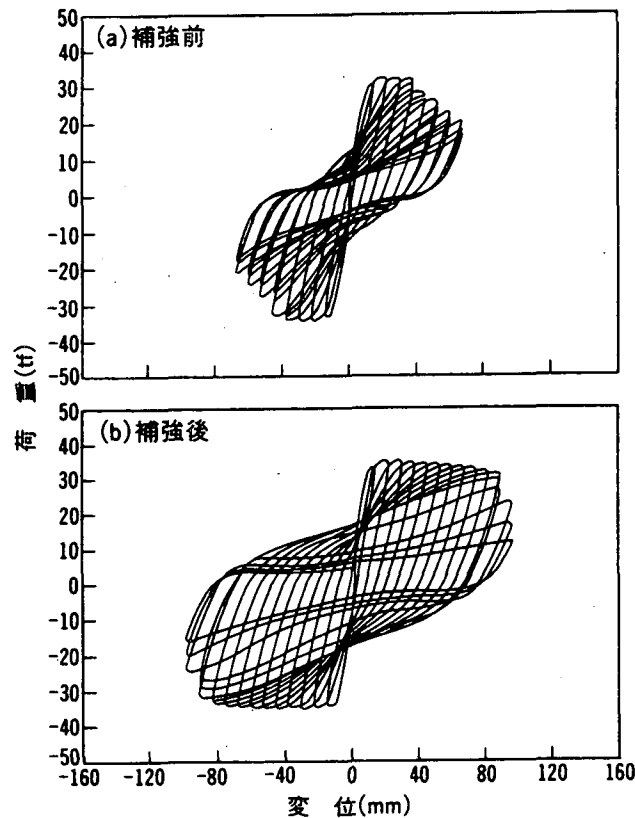


図5.4 円形断面鉄筋コンクリート橋脚に対する炭素繊維シートによるじん性補強効果

(2) 鉄筋コンクリートラーメン橋脚

鉄筋コンクリートラーメン橋脚に対しても考え方は1本柱形式と同様であるが、その構造特性から面外方向と面内方向で耐震補強の考え方が異なる。すなわち、面外方向に対しては、一般に一本柱形式の橋脚と同様にじん性と耐力の向上をバランスさせた耐震補強工法が必要とされる。これに対して、面内方向に対しては、一般に鉄筋コンクリートラーメン橋脚は曲げ耐力が大きいせん断破壊型となりやすい構造であるので、最終的な損傷がせん断破壊型にならないようにせん断耐力を向上させる耐震補強が必要とされる。面内方向に対して、柱部材の耐力のみを向上させる補強を行うとはり部材が終局状態に早く達しやすくなり、逆にはり部材の耐力だけを向上させる補強を行うと柱部材が早く終局状態に達しやすくなる。したがって、ラーメン橋脚の場合には、基礎と柱の耐力とじん性の関係のみならず、柱部材とはり部材の耐力のバランスを十分留意する必要がある。さらに、柱とはりの接合部については、ここが柱やはりよりも先に塑性化し、脆性的な破壊を生じるのを避ける必要がある。

このようにラーメン橋脚の場合には、柱、はり、柱はり接合部、基礎など橋脚を構成する部材間の特性を十分に考慮して耐震補強を行う必要がある。

表5.8および図5.5は、ラーメン橋脚に対する代表的な補強方法の一例を示したものである。

(3) 鋼製橋脚

鋼製橋脚に対しても、基本的な耐震補強の考え方は鉄筋コンクリート橋脚と同様であり、

耐力とじん性をバランスさせた耐震補強が重要となる。橋脚躯体の耐力を増加させると、橋脚躯体からアンカー部や基礎に伝達される地震力も大きくなり、基礎やアンカー部を含めた大規模な補強が必要とされるためである。しかしながら、鋼製橋脚の特徴であるアンカー部については、補強が困難で容易に耐力向上を図れないため、できるだけ橋脚のじん性を向上させることが必要となる。

また、鋼製橋脚では、作用モーメント分布に合わせ、高さ方向の板厚や材質を変化させたり、車両衝突時の変形防止のため中埋めコンクリートが充填されている場合がある。このため、補強設計では、橋脚各断面の耐力とアンカー部の耐力の大小関係に応じて、塑性ヒンジの位置および補強方法を検討する必要がある。

図5.6および図5.7は、鋼製橋脚に対する補強設計フローおよび補強方法の一例を示したものである。

(4) 基礎構造

基礎構造の耐震性が問題となるのは、橋脚の耐力が大きいために基礎に先行的に非線形性が生じフーチングを含む基礎構造躯体や杭の耐力、変形性能が不足する場合、液状化・流動化などにより支持力が不足する場合などが考えられる。対策工法としては、地盤の支持力を増すことにより基礎の支持力を増加させる工法と構造的に支持力を増加させる工法がある。一般には、確実な対策工法としては構造的に対処する方が確実で経済的な場合が多い。

これまでも主に液状化対策として、図5.8に示すように増し杭を行って支持力を増加させる工法が用いられてきている。一般に、基礎の耐震補強は、施工空間が限られ、また、一般に工費が高くなることもあり、今後経済的・合理的な基礎に対する耐震補強工法の開発が必要とされる。小型の杭を簡便に施工するマイクロパイルなどについても研究が進められている。

3) 橋全体系としての耐震補強

既設橋梁の個々の部材全てを現在の基準に合致するように補強を行うためには、造り直すことと同様であり、基本的に困難である。このため、構造は異なっても、耐震補強を施すことにより、現在の基準で目標としている耐震性能と同等の耐震性能を達成できるように橋全体として耐震補強を行うことができれば、現在の基準と同レベルの耐震性を確保できることになる。このため、耐震補強を行うためには、その部材の損傷が構造全体の致命的な破壊に至らない場合には、一部の部材の補強のみに着目せず、全体として耐震性を確保できるような耐震補強を行うことが重要と考えられる。

図5.9は、液状化対策を橋全体として確保した事例を示したものである。液状化地盤におけるパイルベント式橋脚を有する単純11径間橋梁である。各橋脚が単独で現在の基準が想定する耐震性を確保しようとするれば、各橋脚をそれぞれ補強しなければならないが、この橋の場合には、両端の橋台部において増し杭を行うとともに、上部構造を連続化させることにより各下部構造位置の上部構造の変位を拘束するというものである。地震時の水平力を全て橋台部で支持することから、各橋脚は液状化時に鉛直荷重を支持できる性能を確保できればよいことになる。

表5.8 鉄筋コンクリートラーメン橋脚に対する補強工法

補強箇所	補強工法	特徴
柱	鉄筋コンクリート増厚工法	柱を橋軸方向に増厚する工法で、柱のせん断耐力と、曲げ耐力の向上を図る。柱を橋軸直角方向に厚くすることができない場合に有効。
	曲げ耐力制御式鋼板巻立て工法	柱のせん断耐力、じん性および曲げ耐力の向上を図る。
	鋼板巻立て工法	柱のせん断耐力の向上を図る。巻立てた鋼板を形鋼等で拘束すればじん性の向上も期待できる。
	鉄筋コンクリート巻立て工法	柱に鉄筋コンクリートを巻立て、せん断耐力、じん性、曲げ耐力の向上を図る。
はり	鋼板巻立て工法	はりのせん断耐力の向上を図る。
	鉄筋コンクリート増厚工法	はりを橋軸方向に増厚し、せん断耐力と曲げ耐力の向上を図る。
	プレストレス導入工法	はり軸方向にプレストレスを導入し、はりの曲げ耐力の向上を図るが、本工法の採用にあたっては、既設コンクリートの圧縮強度の照査等が必要。
柱はり接合部	鋼板巻立て工法	隅角部のせん断耐力の向上を図る。
	鉄筋コンクリート増厚工法	隅角部を橋軸方向に増厚し、せん断耐力の向上を図る。

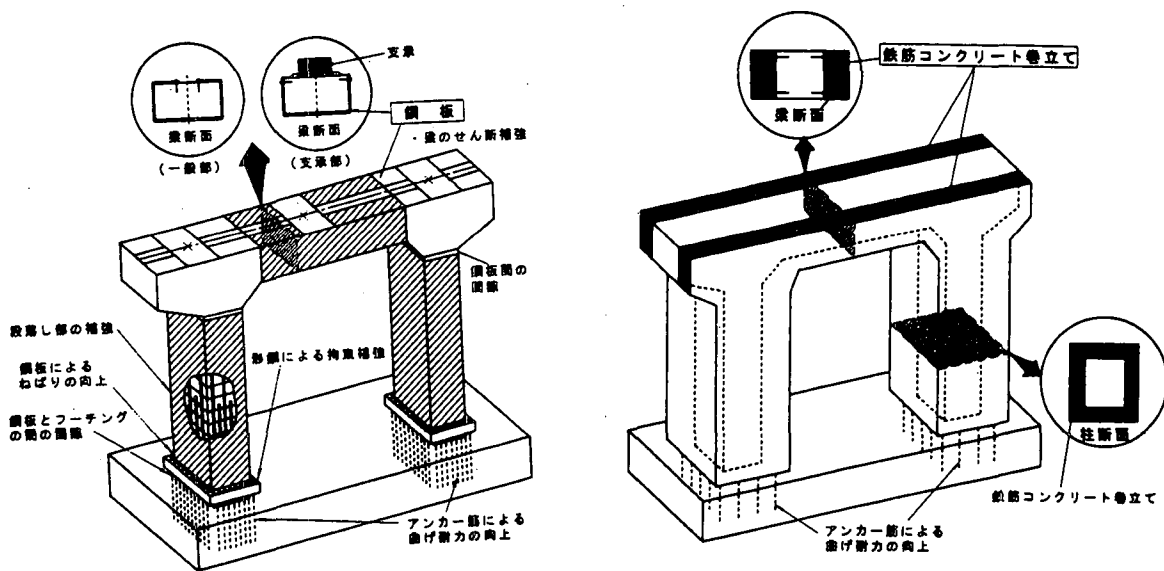


図5.5 鉄筋コンクリートラーメン橋脚に対する補強工法の一例

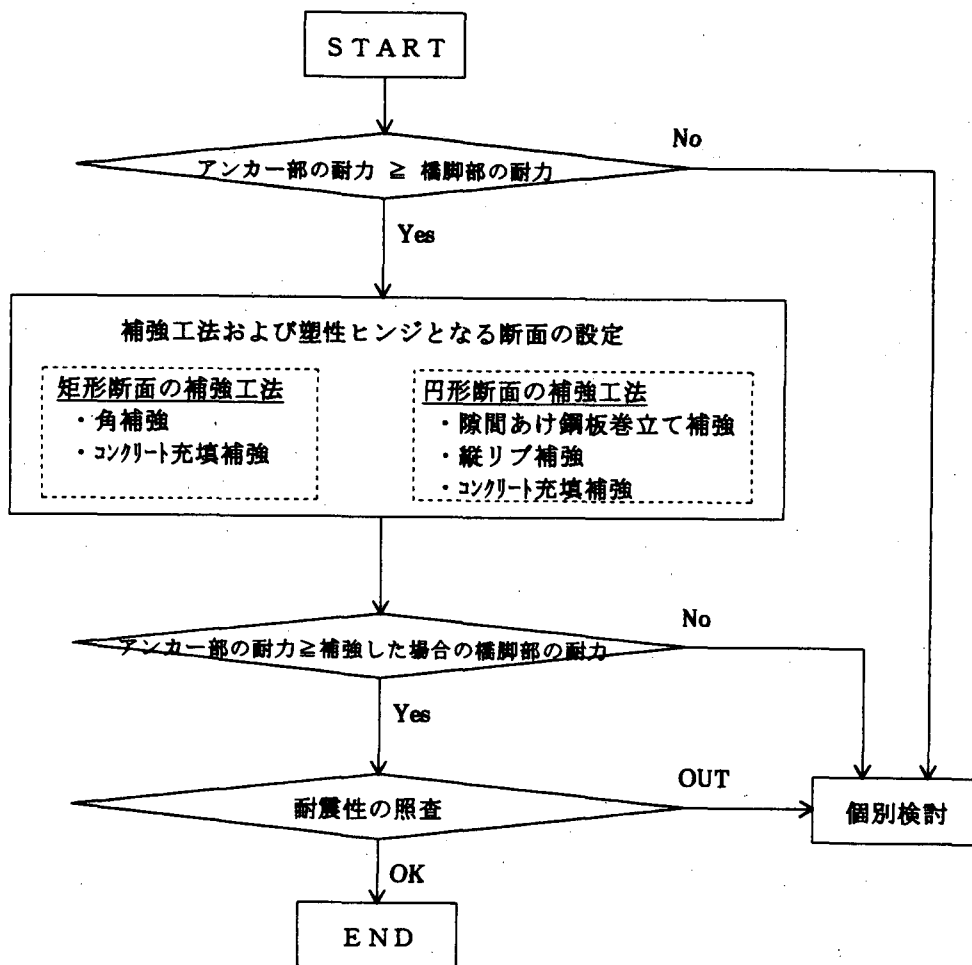


図5.6 鋼製橋脚に対する補強設計フロー

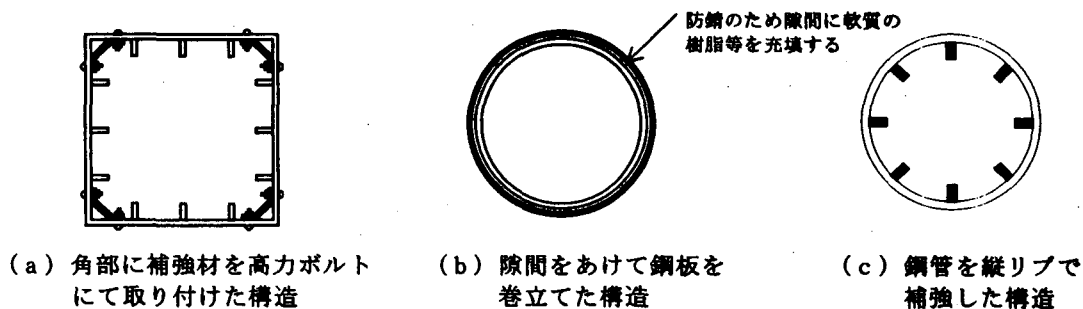


図5.7 鋼製橋脚の補強方法

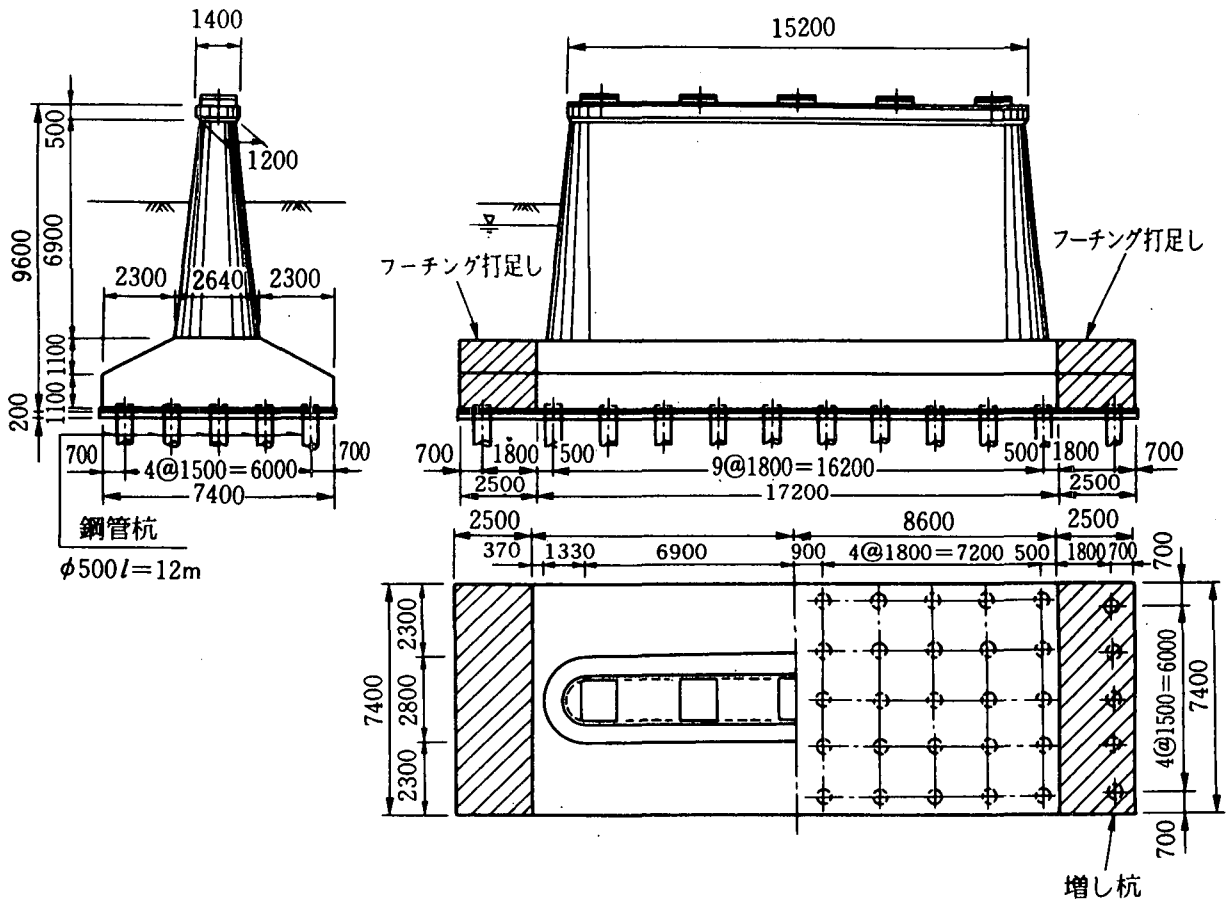


図5.8 増し杭、フーチング拡大により液状化に対する基礎の耐震補強の例

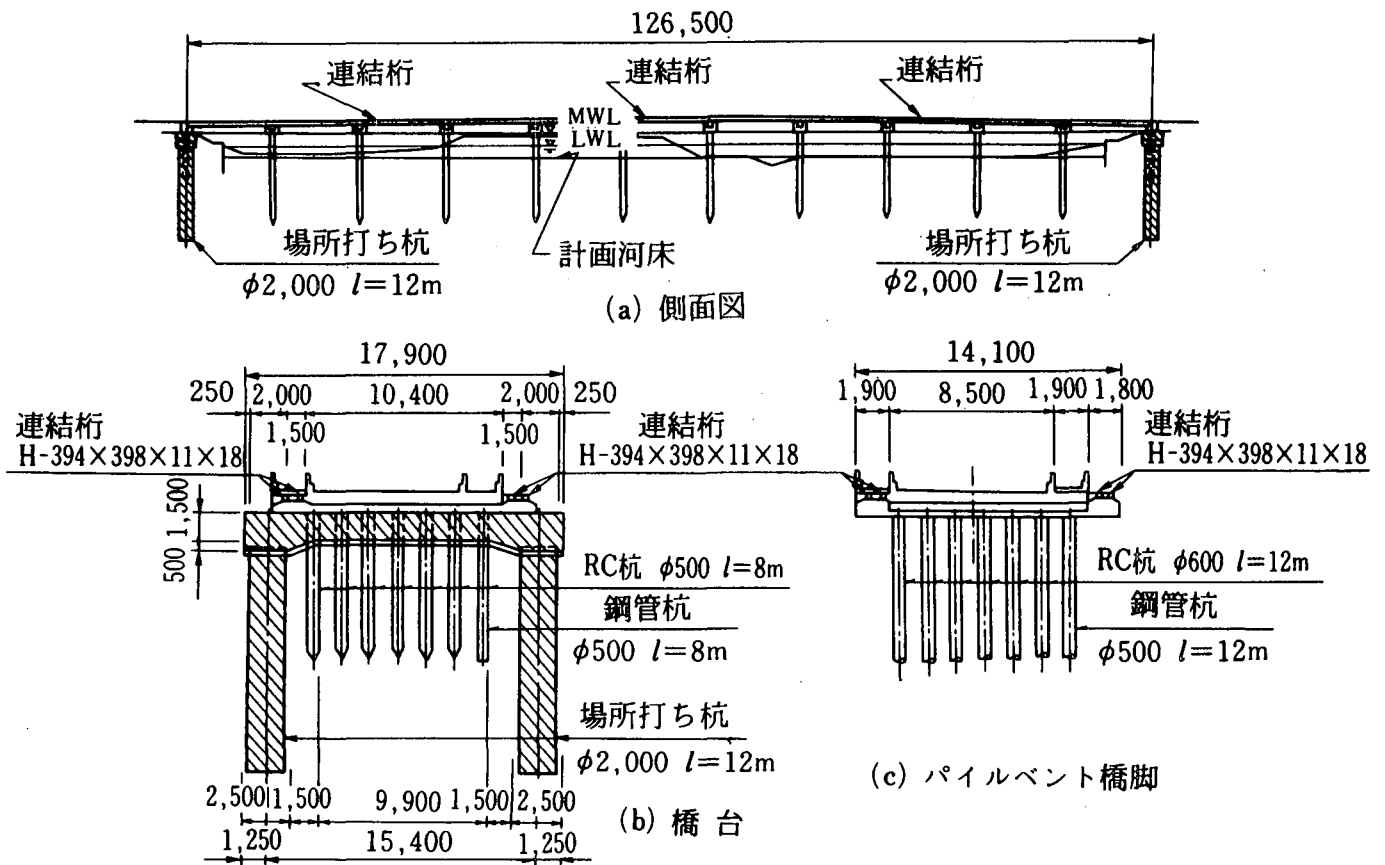


図5.9 連結桁で両端の橋台に地震力を分担させた液状化対策の例
(橋全体系に対する耐震補強の例)

5. 5 今後の展望

既設橋梁の耐震補強では、既設橋梁の構造条件のみならず、工事のための施工空間、交通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。今後、こうした施工条件が厳しい橋梁の耐震補強を行うためには、必要な耐震性能を明確にし、これを達成することが可能となるより合理的で簡便な耐震補強工法を開発するとともに、さらに、橋全体として耐震性を確保するといったトータルな耐震補強工法や耐震補強効果の評価法を確立していく必要があると考える。

以上、道路橋を対象に我が国における耐震性判定と耐震補強の現状について、耐震設計基準の変遷、耐震点検・耐震補強の変遷、耐震補強法などを紹介した。今後、これまで蓄積されてきた重要な社会資本である橋梁を長期に渡って適切に維持管理していくために、道路橋の耐震性の向上を図るためのさらなる技術開発が期待される。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：日本道路史、1977年10月
- 2) 佐野：家屋耐震構造論、震災予防調査会、1916年
- 3) 日本道路協会：道路震災対策便覧（震前対策編）、1988年2月
- 4) 大塚、運上：道路橋の耐震設計基準の変遷、橋梁と基礎、96-8、1996年8月
- 5) 川島、運上：道路橋の橋台および橋脚の耐震補強、基礎工、Vol. 20、No. 2、1992年2月
- 6) 内務省土木局：道路構造に関する細則案（1926.6）
- 7) 内務省土木局：鋼道路橋設計示方書案（1939.2）
- 8) 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書（1956.5）
- 9) 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書（1964.11）
- 10) 日本道路協会：道路橋耐震設計指針（1971.3）
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編（1980.2）
- 12) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編（1990.2）
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 土木学会：土木学会耐震基準等に関する提言集、平成8年5月
- 16) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編、平成8年12月
- 17) 日本道路協会：日本道路協会五十年史 道路、平成9年12月
- 18) 建設省道路局企画課監修：道路技術基準通達集－基準の変遷と通達－、第6次改訂、平成9年8月、ぎょうせい
- 19) 川島、運上、吾田：既設道路橋の耐震性判定法、土木技術資料、30-8、1988.8
- 20) 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
- 21) 土木研究センター：炭素繊維を用いた耐震補強法研究会報告書、平成8年9月