

### Ⅲ－7 全体構造系の耐震性能を評価した既設道路橋の耐震補強技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平14～平17

担当チーム：耐震研究グループ（耐震）

研究担当者：運上茂樹、小林 寛

#### 【要旨】

兵庫県南部地震以後、河川を横断する橋梁など施工条件の厳しい橋梁や中長大橋において、従来型の耐震補強法を適用した場合その補強対策に多額の費用を要するという課題があり、より効果的、経済的な耐震補強技術の開発が求められている。本研究では、橋梁の全体構造系を考慮した耐震性能評価法及び個々の橋脚の耐震補強を不要とする耐震補強工法の開発を目標とし、地震時に両端の橋台が橋梁全体の応答変位を拘束する効果に着目し、橋梁規模や橋台耐力が橋梁の地震時挙動に及ぼす影響を解析的に検討した。また、耐震性能評価においてせん断評価が支配的となる壁式橋脚の面内方向のせん断耐力の合理的な評価法を実験的、解析的に検討した。これらの成果は、全体構造系を考慮した耐震補強工法としてとりまとめるとともに、「既設橋梁の耐震補強工法事例集（平成17年4月出版）」に反映させた。さらに、中長大橋及び特殊橋梁についても、代表的な橋梁形式について各橋梁形式の特性を踏まえた耐震補強方針について整理するとともに、中長大橋に対する耐震補強事例集としてとりまとめた。また、橋梁の耐震性能照査に用いる信頼性設計式の開発のため、1995年兵庫県南部地震における阪神高速道路3号神戸線の支承と橋脚被災度と地盤のSI値の関係を分析するとともに、大地震発生時の現地の地震計情報と各橋梁の基本情報をもとに被災度を簡便に推定する手法を提案した。

キーワード：既設道路橋、耐震補強、橋全体系、せん断耐力、変位拘束工法、橋台、耐震補強工法事例集、長大橋、被災分析、簡易被災推定法

#### 1. はじめに

兵庫県南部地震以後、一般規模の既設橋梁の耐震補強対策は順次進みつつある。その一方で、河川を横断する橋梁など施工条件の厳しい橋梁や、中長大橋においては、従来型の耐震補強法を適用するとその耐震補強対策に多額の費用を必要とするといった課題が上がっており、従来型の耐震補強法に比べてより効果的、経済的な耐震補強技術の開発が求められている。

国土交通省では平成17年度より19年度にかけて「緊急輸送道路の橋梁耐震補強3箇年プログラム」を実施することとし、長大橋や特殊橋を含むとともに、昭和55年道路橋示方書より前の基準が適用された段落しを有する単柱橋脚など耐震性が相対的に低いと考えられる橋梁について、限定的かつ重点的に即効性のある耐震補強が実施されつつあるところである。

このような背景のもとで、本研究では、従来のように橋梁の各部材毎に耐震性を評価するのではなく、橋全体系としての耐震性能を評価することによって、効果的かつ経済的に耐震性能を向上させる耐震補強技

術の開発を目的として研究を行ったものである。本研究では平成14～17年度にかけて以下の検討を行った。

1) 橋梁の全体構造系を考慮した耐震性能評価法の開発

・河川橋等で両端に橋台を有する橋梁を対象に、橋台と背面地盤の抵抗特性の評価方法とともに、これを考慮した橋全体系の耐震性能の評価法を検討した。

・せん断力の影響が支配的となる壁式橋脚面内方向を対象に、せん断支間比の効果を考慮したせん断耐力評価法を検討した。

2) 橋梁の耐震性能照査に用いる信頼性設計式の開発

・既往の震災兵庫県南部地震により実際に被災したRC橋脚及び支承部を対象に、その損傷度、橋脚の曲げ耐力、最大地盤加速度との関係を検討した。

・既往の震災データに基づき、大地震発生時に現地の地震計情報と各橋梁の基本的情報をもとに被災度を簡便に推定する手法を検討した。

3) 全体構造系を評価した一般橋の耐震補強手法の開発

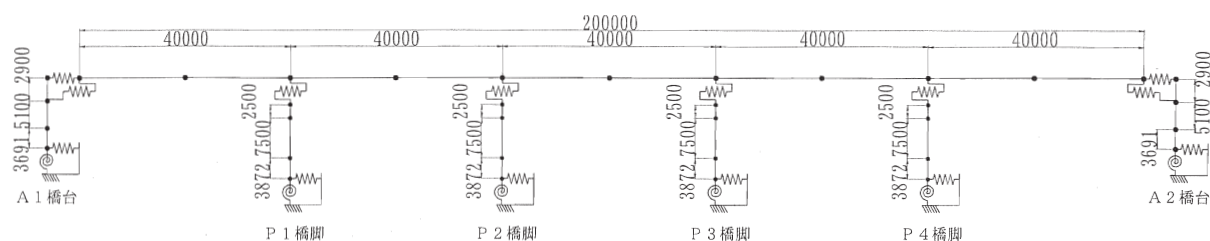


図-1 橋梁全体系モデル

・河川橋で水中にある橋脚の補強対策が困難な場合などに、各橋脚の補強を不要とする橋全体として耐震補強工法として、免震工法、地震力分散工法、変位拘束工法を検討した。

4) 全体構造系を評価した中長大橋の耐震補強手法の開発

・中長大橋に関する耐震補強工法の事例調査を行うとともに、中長大橋の耐震性の評価方法と耐震補強工法を検討した。

## 2. 橋梁の全体構造系を考慮した耐震性能評価法

### 2.1 全体構造系の耐震性能評価法

#### 2.1.1 力学モデル

橋台の拘束を含む橋梁全体の挙動を検討するため、図-1に示すような橋梁全体系の非線形解析モデルを検討した。橋台及び橋脚の詳細を図-2に示す。橋台背面には地盤バネを考慮し、これが橋台の拘束効果を表わすモデルである。このバネは押し込み側にはのみ抵抗するものとし、橋台と背面土が剥離する方向には抵抗しないものとした。

さらに、桁衝突時の挙動をより簡便なモデルで表現するための検討も同時に行った。橋梁全体を一質点系の橋梁モデルとし、非線形骨組構造の橋台や、バイリニアの地盤バネにモデル化した背面土を組み合わせた図-3に示す簡便な3モデルを検討した。全体系との比較の結果、いずれのモデルでも応答特性に大差はないことを確認し、橋台部の影響を考慮した橋梁の挙動を、1質点系モデルのうち最も簡便なモデル2で表現できることがわかった。

#### 2.1.2 背面土の抵抗特性の評価法

橋台及び背面土による上部構造の変位拘束効果を評価する上では、橋台背面土の抵抗特性を適切に評価することが必要とされる。橋桁が橋台に衝突する際には橋台背面土の受働抵抗となると考えられるが、こうした橋台の抵抗特性に関する大規模な実証実験データは少なく、米国カリフォルニア州交通局

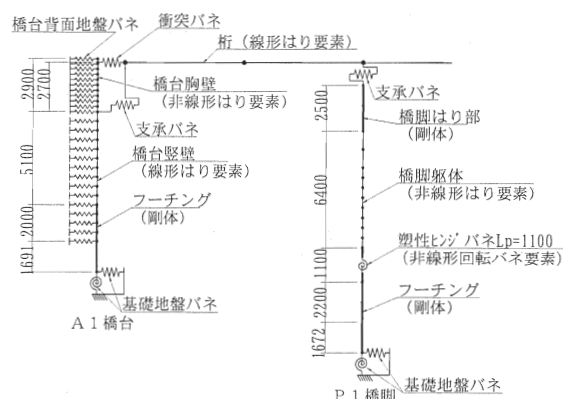


図-2 全体系モデル詳細

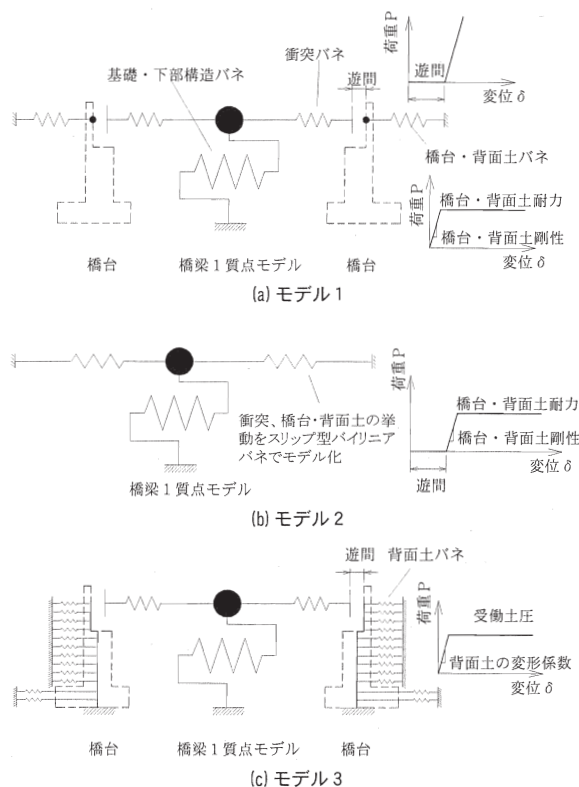


図-3 1質点系解析モデル

(CALTRANS) により実施された橋台の載荷実験<sup>2)</sup>が唯一の大型実験と考えられる。

このため、本研究では、橋台背面土の抵抗特性を

一般的に仮定される場合の多い受働土圧相当と評価することが妥当かどうかをCALTRANSによる実験結果をもとに検証した。

その結果、道路公団設計要領第二集<sup>3)</sup>の参考値やCaltransによる実大橋台による水平載荷実験結果を比較した結果、橋台背面土の地盤反力係数および橋台背面土バネ反力の上限値の算出に道路橋示方書IV下部工編<sup>4)</sup>に示されるケーソン基礎の式を適用できることがわかり、上記の提案モデルでは、本バネ要素を適用することとした。

### 2.1.3 橋台パラペット耐力及び剛性の影響

地震時に上部構造が両端の橋台に衝突する場合、橋台パラペット耐力及び剛性、或いは桁遊間の橋梁全体系応答に及ぼす影響を検討するため、簡便なモデル2を用いてパラメトリック解析を実施した。

橋台パラペット耐力及び剛性の影響を検討するため、パラペットに衝突しない(上部構造の変位を拘束しない)ケース、パラペットと背面土のみで抵抗するケース、ウイングの抵抗を考慮したケースおよびパラペットが降伏しないケースの4ケースについて解析を実施した。

橋台パラペットの抵抗と着目橋脚の応答塑性率の関係を図-4に示す。パラペットが衝突しないケースからパラペットが降伏しないケースまで、パラペットの抵抗が増すに従って最大応答塑性率は低減する。これより、パラペットを補強して十分な耐力を持たせたり、あるいは橋台躯体部での変位拘束を図ることにより上部構造の応答変位を抑えて下部構造の応答塑性率を制御することが可能になることがわかる。実橋梁の場合、この応答変位が着目する固定橋脚の許容塑性率相当以下にできれば、橋脚の耐震補強は不要になることとなる。

また、図-4より2径間連続橋程度の小規模橋梁は、橋台ウイングの抵抗を考慮すれば現状でも耐震性能を満足するケースが多いことがわかる。逆に、径間数の多い橋梁においては橋台部の補強のみでは対応が難しく、桁遊間を調整するなどのさらに変位を拘束するための対応が必要となることがわかる。

### 2.1.4 桁遊間の影響

桁遊間が橋梁全体の応答に及ぼす影響を検討するための解析検討を行った。ここでは桁遊間を標準値の0倍、0.5倍、1倍、1.5倍、2倍及び $\infty$ (衝突しないケース)まで6通りに変化させた。

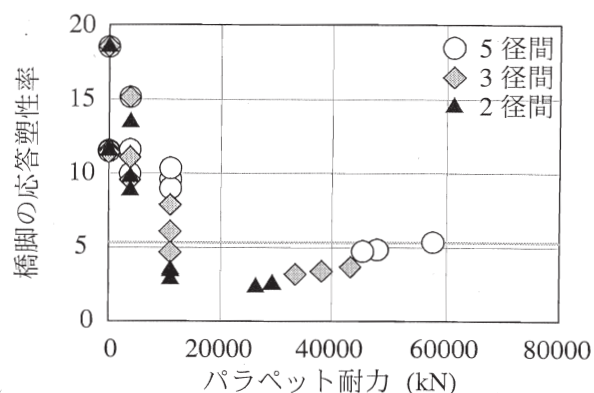


図-4 パラペットの抵抗と橋脚応答塑性率の関係 (Ⅲ種地盤タイプⅡ)

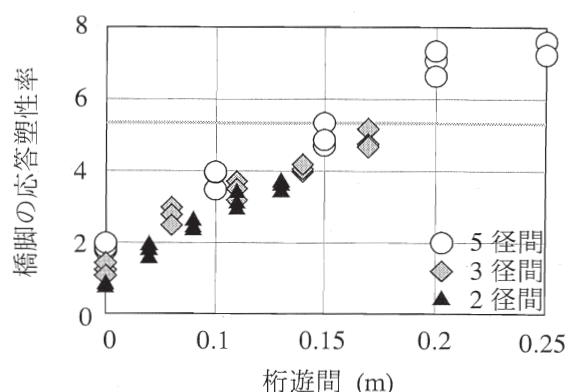


図-5 桁遊間と橋脚応答塑性率の関係 (Ⅲ種地盤タイプⅡ)

桁遊間と着目橋脚の許容塑性率の関係を図-5に示す。これより橋台を適切に補強した上で遊間を小さくすることにより、着目橋脚の許容塑性率以下の応答に抑えることが可能であることがわかる。この場合、最も応答の大きくなるⅢ種地盤においても大規模橋梁で道路橋示方書Ⅰ共通編<sup>1)</sup>による算定値の1/4程度、中規模橋梁で同じく1/2程度まで遊間を小さくすれば耐震性能が満足できる結果が得られた。

### 2.1.5 橋台拘束効果の適用性

以上の検討結果によれば、橋台による変形拘束構造がより適した橋梁の特徴として以下の条件が挙げられる。

- ・両端が橋台構造で、上部構造が一連のけたからなる、あるいは、連結化が可能な構造。
- ・遊間が狭い、あるいは、調整が容易。
- ・橋台部の耐力が高い。
- ・上部構造の重量が小さい(径間数が少ない)。



## 2.2 壁式橋脚のせん断耐力評価方法

### 2.2.1 せん断スパン比の小さい柱を用いた繰返し載荷実験

道路橋示方書V耐震設計編<sup>5)</sup>では繰返し荷重を受けるディープビーム部材のせん断耐力については十分なデータがないため、せん断スパン比が小さいものでも通常の柱部材として扱うこととされている。そこで、せん断支間比が小さい壁式橋脚が、面内方向に交番載荷を受ける場合のせん断耐力におけるディープビームの効果および正負交番載荷の影響を明らかにすることを目的に写真-1に示す供試体を用いて模型載荷実験を実施した<sup>6)</sup>。せん断破壊型とするために断面はせん断強度が曲げ強度の半分程度になるように設計した。柱基部から荷重中心までは1.2m、柱断面寸法は0.9m×0.4mとして短辺を載荷面とした。ここで有効高は0.8m、せん断スパン比は1.5である。鉄筋はSD295材を用い、引張鉄筋比約1%、せん断補強筋比約0.4%とし、それぞれ呼び径D22、D10を配置した。

供試体は2体製作し、交番載荷の影響を検討する目的で一方は正方向のみの繰返し載荷、もう一方は正負交番載荷にて載荷した。ここでは前者を供試体No1、後者を供試体No2と呼ぶ。

載荷方法としては三角波の3回繰返しとし、変位制御で行い、計測については荷重および鉄筋ひずみ、変位をリアルタイムに測定した。

図-6に両供試体の荷重-水平変位関係を示す。両図から正負交番載荷の場合には一方向載荷の場合より若干変形の進展が早くなることが認められるが、最大荷重についてはほぼ同じ値となることが分かる。

図-7に両供試体の曲げ降伏時および最大耐力時における帯鉄筋ひずみの状況を示す。図中の★印は主鉄筋降伏時において帯鉄筋ひずみが降伏を超えた位置、●印が最大耐力時において帯鉄筋ひずみが降伏を超えた位置を示す。図よりNo2供試体の方が主鉄筋降伏時、最大耐力時とも広い範囲で帯鉄筋が降伏していることがわかる。正負交番載荷をした場合には片方向載荷時に比べてせん断破壊が進展し、よりせん断挙動が顕著となるものの、最大耐力および最大耐力時の水平変位には大きく影響を及ぼしていないことがわかった。

今回の供試体について道路橋示方書V編に基づいて曲げ耐力及びせん断耐力を算定した結果を表-1に示す。表には後述する道路橋示方書IV編によるせん断耐力算定結果及び実験値も示している。なお、耐力算定には材料の実強度を用いた。また、道路橋示

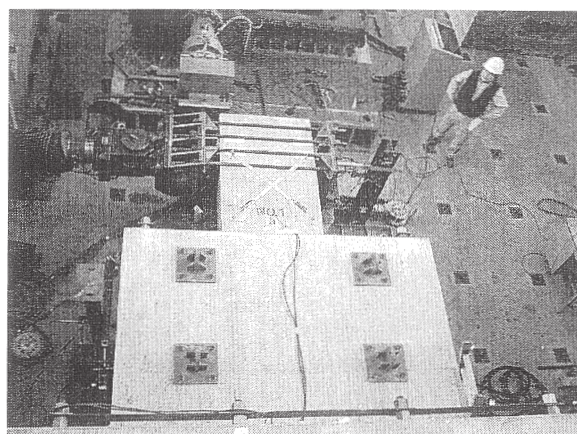


写真-1 実験状況

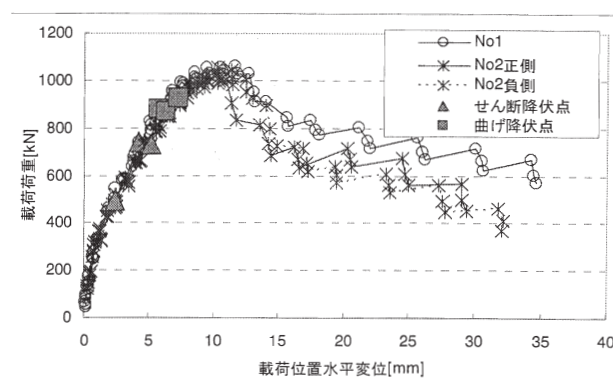


図-6 荷重位置における水平変位量の比較

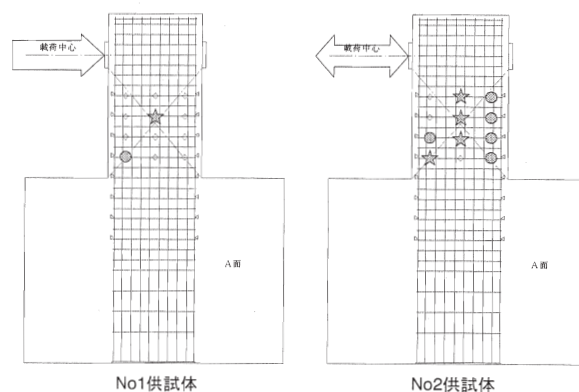
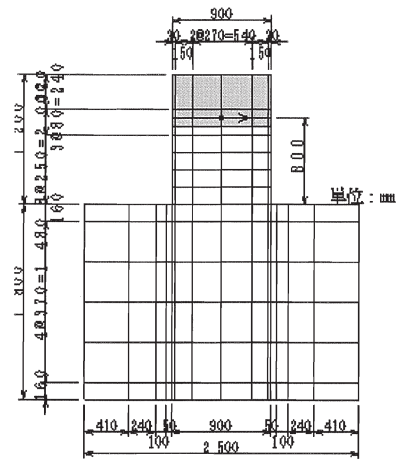


図-7 帯鉄筋降伏位置の比較

方書のせん断耐力算定式は実験式をもとに安全率を考慮した式であるため、今回の実験結果と比較するため、算定値に1.3を乗じた値を用いた。その結果、初降伏荷重計算値 $P_{y0}$ と実験における主鉄筋降伏時荷重、降伏荷重計算値 $P_y$ と実験時最大荷重は良く一致しているものの、せん断破壊荷重計算値 $P_s$ については実験時帯鉄筋降伏時荷重に比べて低めに算定される傾向があることが分かる。これは、今回の供試体は実際はディープビームの効果が発揮されているが、これを設計式では考慮していないことが一因と

表-1 道路橋示方書との比較

計算手法等	耐力・荷重	供試体No1		供試体No2	
		タイプ I	タイプ II	タイプ I	タイプ II
道路橋示方書 V 編	初降伏耐力 (Pyo) [kN]	803			
	降伏耐力 (Py) [kN]	1062	1064	1067	1071
	せん断耐力 (Ps) × 1.3 [kN]	621.4 (せん断先行)	668.2 (せん断先行)	625.3 (せん断先行)	673.4 (せん断先行)
	" (Pso) × 1.3 [kN]	715			
道路橋示方書 IV 編	せん断耐力 (Ps) × 1.3 [kN]	639.6 (せん断先行)	757.9 (せん断先行)	650 (せん断先行)	770.9 (せん断先行)
	" (Pso) × 1.3 [kN]	874.9			
道路橋示方書 IV 編 (斜引張筋の低減係数非考慮)	せん断耐力 (Ps) × 1.3 [kN]	832 (せん断先行)	950.3 (せん断先行)	842.4 (せん断先行)	963.3 (せん断先行)
	" (Pso) × 1.3 [kN]	1067.3			
実験値	載荷方向	正側		正側	負側
	帯鉄筋降伏時 [kN]	743			
	主鉄筋降伏時 [kN]	881		868	-928
	最大耐力時 [kN]	1060		1029	-1056



(a)せん断スパン比 1.0

して考えられる。そこでせん断スパン比の影響を考慮した道路橋示方書IV編に基づきせん断耐力を算出した。その結果道路橋示方書V編に比べて大きくせん断耐力を算定し、実験における帯鉄筋降伏時荷重に近づく結果となった。

実験では、図-7に示したように、供試体の主鉄筋降伏時、最大耐力時とも帯鉄筋は降伏に至っており、せん断補強鉄筋としての機能は果たしていると考えられるため、道路橋示方書IV編に示される斜引張筋の低減係数を考慮せずにせん断耐力を算定したところ、最大耐力時荷重に近い値となった。

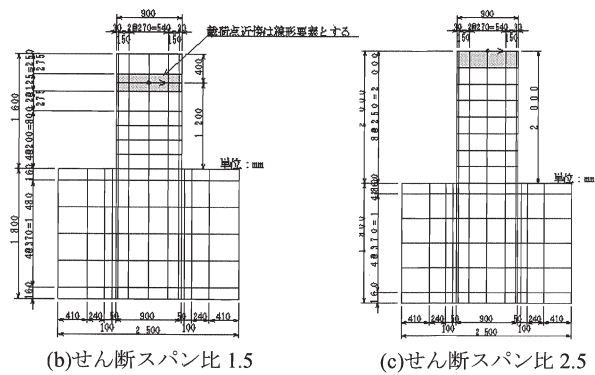
以上からせん断支間比1.5程度のRC壁式橋脚の面内方向については、正負交番繰返し荷重を受ける場合においても、塑性変形が大きく進展しない範囲においてはコンクリートの負担するせん断耐力の算定の際にはせん断スパン比の影響を考慮することが可能であること、帯鉄筋についてもせん断補強効果が発揮されることが明らかとなった。

## 2.2.2 FEM解析による検討

この実験供試体をもとに、非線形FEM解析による解析を行った。解析モデルを図-8に示す。解析は静的な荷重漸増解析とした。解析ケースはせん断スパン比を1.0、1.5、2.5の3通りとし、帯鉄筋の鉄筋量を0.36%、0.18%、0.12%の3通りとした。

各解析ケースにおける水平荷重作用位置の水平荷重と変位の関係を図-9に示す。実験供試体を再現したせん断スパン比1.5、帯鉄筋比0.36%のモデルでは、最大耐力が1060kNであり、実験結果とよく一致した。帯鉄筋降伏時のせん断耐力は解析結果では904kNであり、実験結果の743kNより22%程大きい値となった。

FEM解析結果、実験結果および道路橋示方書IV下部構造編による計算値について壁式橋脚のせん断耐



(b)せん断スパン比 1.5

(c)せん断スパン比 2.5

図-8 非線形 FEM モデル

力とせん断スパン比の関係を図-10に示す。FEM解析、道示式ともせん断スパン比が小さくなるに従って耐力が高くなる傾向を示しており、ディープビームの効果が発揮されていることがわかる。

このように、FEM結果からも先の実験結果と同様にディープビームの効果を考慮した道路橋示方書IV下部構造編に示されたせん断耐力照査式が、背の低い壁式橋脚における軸直角方向のせん断耐力の評価にも適用できることが分かった。ただし、その適用範囲としては、橋脚は弾性応答であること、つまり応答塑性率 $\mu_r \leq 1.0$ が望ましいが、実験結果によれば、 $\mu_r=1.5$ 程度までは見込むことができると判断できる。

## 3. 橋梁の耐震性能照査に用いる信頼性設計式の開発

### 3.1 被災分析と被災推定

大地震発生直後においては、道路ネットワークの確保は避難や救助救援活動、緊急復旧活動において最重要課題とされている。道路ネットワークを構成する施設の中でも、被災時の復旧が容易ではない道路橋の被災度把握は最も重要な情報の1つである。しかしなが



ら、現状では被災した橋梁の使用可否を的確に判断するためには専門家の目視判定によらざるを得ないところがあるため、被災が少しでもあれば一旦通行を制限し、その使用可否の判定後に道路啓開を行うのが一般的である。このため、大規模地震により広い地域で被災が多発した場合には、道路啓開に多大な時間を要することになる。大規模地震後の緊急道路ネットワークを早期に確立するためには、地震後直ちに被災が想定される橋梁を特定し、効率的な点検が実施できるようにする技術が有効と考えられる。

このような背景から、既往の震災データに基づき、大地震発生時に現地の地震計情報と各橋梁の基本的な諸元情報をもとに被災度を簡便に推定する手法について検討を行った。

### 3.2 被災度推定手法

提案手法<sup>7)</sup>は、地震直後に入手できる情報として地震計からの情報をもとに橋梁の被災度を推定する手法である。図-11に提案手法の全体構成を示す。構造的な被災度を判定する被災度評価と走行性を判定する評価から構成し、それぞれチェックシートを用いて、構造特性に応じてより詳細な被災度推定を行う流れである。本手法では、特に大被害の抽出をポイントとした。

チェックシートはそれぞれ複数のフローから成り、必要に応じて判定表を用意している。図-12は、構造被災度の判定フローを示したものである。ここで、推定する被災度としては、大きくA、B、Cに分類したが、この定義は道路震災対策便覧<sup>8)</sup>に従い以下の通りである。

- A：大被害…耐荷力の低下に著しい影響のある損傷を生じており、落橋等致命的な被害の可能性がある場合
- B：中被害…耐荷力の低下に影響のある損傷であり、余震や活荷重等による被害の進行がなければ、当面の利用が可能な場合
- C：小被害…短期間には耐荷力の低下に影響のない場合

以下には、図-11に示した地震被災度判定の考え方、判定根拠について示す。

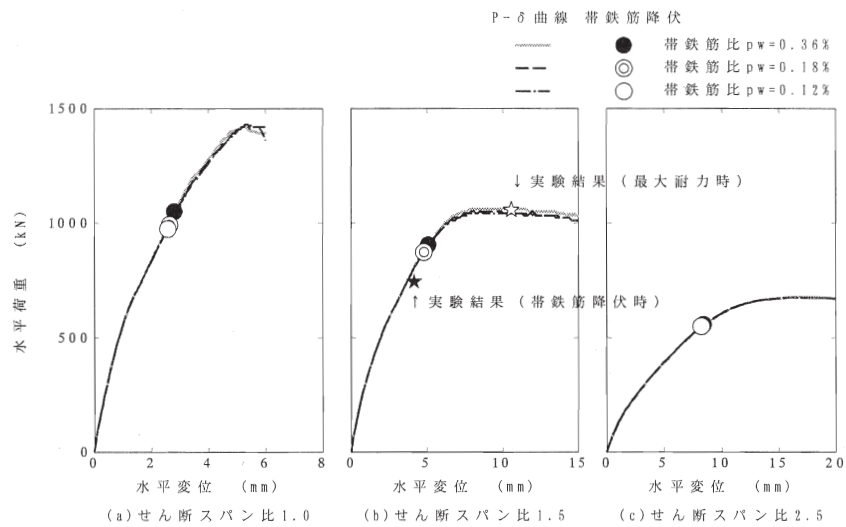


図-9 FEMによる荷重-変位関係

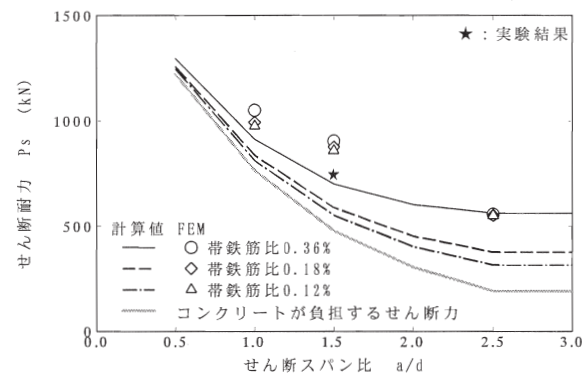


図-10 せん断スパン比とせん断耐力

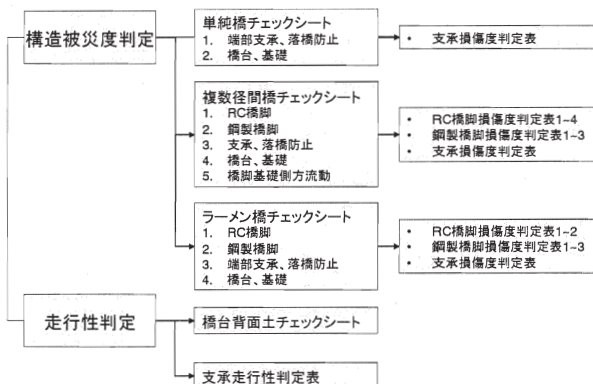


図-11 提案手法の全体構成

### 3.3 橋梁形式別の被災特性

橋梁形式としては、まず複数径間か否かで判断を分けることとした。単径間の橋は地震時に振動しにくく構造的に明らかに致命的な被害を受けにくいこと、また落橋等の甚大な被災事例もほとんどないことから、相対的に被害を受けにくいと判断することができる。このため、このような橋については、端部の支承、落橋防止装置および橋台の躯体と基礎を

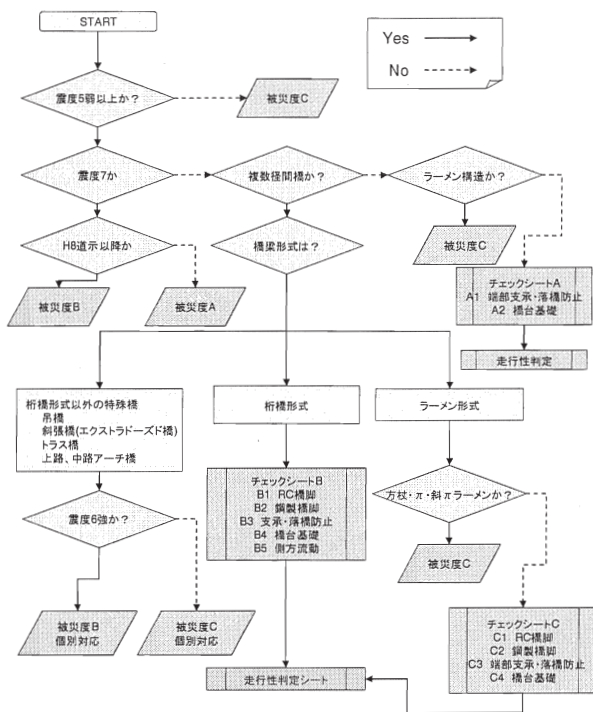


図-12 構造被災度判定フロー

対象に後述するチェックシートを用意した。

複数径間の橋としては、耐震性に差が生じると想定される桁橋形式、ラーメン形式、特殊橋梁(長大橋を含む)に分けて判定するものとした。

長大橋や特殊橋は、一般に道路橋示方書によらず、個別に設計されていると考えられるため、被災度の判定も個別対応が基本と考えられる。ここでは、兵庫県南部地震の際に震度6強の地域における長大橋においては、支承や上部構造に損傷が見られた事例もあることから、このような事例に基づいて震度6強の範囲に含まれるものは被災度Bとし、震度6弱以下については被災度Cと判定することとした。また、桁橋、ラーメン橋については、図-12に示したように、橋脚、支承・落橋防止、基礎について後述するチェックシートにより被災度を判定することとした。

### 3.4 RC橋脚の被災度推定

RC橋脚を例として被災度判定用のチェックシートを図-13に示す。RC橋脚については、一般に設計基準により耐震性に差があることが知られているため、ここでは、①昭和55年道示より古い基準を適用した橋脚、②昭和55年、平成2年道示を適用した橋脚、③平成8年道示以降の基準を適用した橋脚、の3段階に分類することとした。なお、③のRC橋脚は、兵庫県南部地震による地震力相当を考慮して設計される

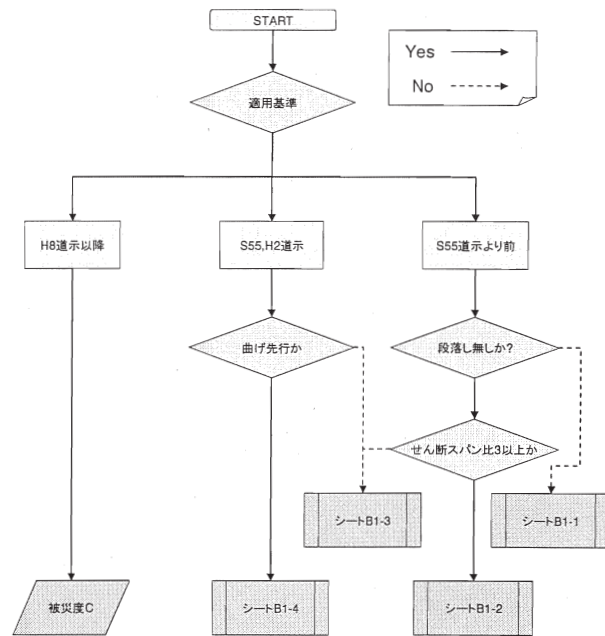


図-13 RC橋脚のチェックシート(複数径間橋)

ので、震度6強以下の地震では軽微な損傷程度以下に留まると考えられるので被災度をCと判定することとした。

また、①、②については過去の被災事例に基づき、さらに次の4種類に分類し、それぞれ当該橋の地点におけるSI値によって被災度を判定することとした。すなわち、i) ①に該当する橋脚で段落しがある橋脚、ii) ①に該当するもののうち段落し無く、かつ曲げ破壊先行と考えられる橋脚、iii) ①あるいは②に該当する橋脚で段落し無く、かつせん断破壊先行と考えられる橋脚、iv) ②に該当する橋脚で曲げ破壊先行と考えられる橋脚、である。

なお、判定用の閾値の設定では、阪神高速道路神戸線の昭和55年道示より古い基準で設計されたRC単柱のうち、段落しのある橋脚について、支承条件および損傷パターンごとに被災度とSI値の関係の整理をもとにした。図-14は、RC橋脚の被災度とSI値の関係(段落し有りの橋脚の損傷度とSI値)を示した一例である。

### 3.5 実被害地震による提案手法の検証

2004年新潟県中越地震(28橋)、2003年十勝沖地震(5橋)、宮城県北部地震(12橋)、宮城県沖の地震(5月26日発生:5橋)を対象とし、本手法の妥当性を検証した。

調査報告書等に示された損傷概要および現地調査写真より道路震災対策便覧を参照して実被害A~D



にランク付けすると同時に、各橋を提案手法に基づいて被災度を判定し、実被害と推定被害の一致度を検討した。ここで、SI値の算定は各地震の断層モデルから距離減衰式を用いて算定したものをを用いた。

実被害と推定被害の比較結果を表-2に示す。全体的に推定被害の方が実被害に比べて厳しく判定されていることがわかる。なお、本手法が実被害より被災度を低めに判定したのも2橋見られた。これについては後述する。

表-2によれば、本手法による判定結果と実被害が一致したものは被災度Aで2橋(9%)、被災度Bで3橋(30%)、被災度Cで6橋(35%)であり、全体の22%であった。これに1ランク安全側に判定したものを加えると本手法による判定結果A、B、Cについて、それぞれ、11橋(48%)、7橋(70%)、15橋(88%)となり、全体的中率は66%となる。

本手法による判定結果よりも実被害の方が大きかった橋を取りこぼし橋梁とすると、今回の検証においては2003十勝沖地震における静川高架橋、宮城県北部地震における小野橋の2橋が該当する。

静川高架橋は、被害としては支承や変位制限装置の損傷が見られたが、SI値が26と算出されたことから推定被災度がCとなった。ただし、厚い堆積盆地上の勇払平野に位置しており、実際の振動は今回の距離減衰式から算出したものより大きかった可能性も考えられる。また、小野橋は、前述の被害を生じたが、SI値が32と算出され、被災度はCとなった。これらは局所的に大きく振動した可能性もあり、推定したSI値が実際の振動を表せていない可能性も想定される。

次に、本手法による判定結果よりも実被害の方が2ランク以上軽かった橋を空振りとする。本手法による判定でAと評価されながら実被害がDであるものが4橋見られるが、これらのうち2橋(新佐梨橋、四日町橋)は新潟県中越地震の調査橋梁、残り2橋(気仙大橋、笹の田大橋)は宮城県沖地震の調査橋梁であった。

新潟の2橋および気仙大橋は、架橋地点のSI値が70を超えたことから被災度Aと推定され、笹の田大橋はループ橋であるが橋軸直角方向の移動制限装置がないため被災度Aと判定された。これについては、地震動の強さと被災度の関係について、例えば、橋ごとと有する構造的な耐荷力や特殊条件もあることから、本提案手法で示した条件だけでは十分に評価できない点もあることを示していると考えられる。

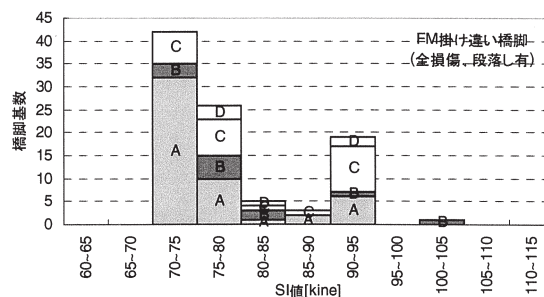


図-14 段落し有りの橋脚の損傷度と SI 値 (FM 掛け違い橋脚)

表-2 推定被害と実被害の比較結果

橋梁数		実被害				
		A	B	C	D	計
推定被害	A	2	9	8	4	23
	B	0	3	4	3	10
	C	1	1	6	9	17
	計	3	13	18	16	50

#### 4. 全体構造系を評価した一般橋の耐震補強手法の開発

##### 4.1 橋台の変位拘束効果を考慮した耐震補強工法の検討

橋全体系の耐震補強工法は大きく3つに分類することができ、橋の構造条件に応じて適切な工法を選択することになる。図-15~17は、以下の3工法のイメージをそれぞれ示したものである。

###### ①免震工法(図-15)

既設支承をゴム支承、免震支承、すべり支承等に交換するとともに、ダンパー等を併用することにより、長周期化を図り減衰性能を高めて地震時に下部構造に作用する慣性力を低減あるいは遮断する工法。必要に応じて上部構造の連続化を実施。

###### ②慣性力分散工法(図-16)

地震時に固定橋脚が負担する慣性力をその橋梁内の他の橋脚や橋台など下部構造に分散させることにより、橋全体として地震力に対して抵抗する工法。必要に応じて上部構造の連続化を実施。

###### ③変位拘束工法(図-17)

地震時に上部構造に生じる水平変位を拘束することによって橋脚に作用する慣性力の低減を図る工法。橋台による橋軸方向に対する水平変位の拘束を期待する工法、あるいは、橋台の補強を行って変位拘束効果を増強する工法など。必要に応じて上部構造の連続化を実施。

以上の3つの工法を単独あるいは併用することに



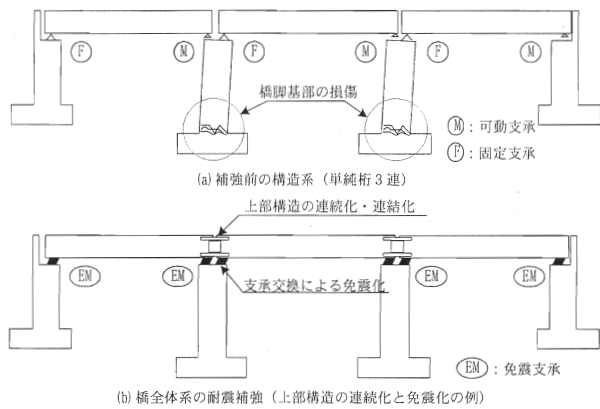


図-15 免震工法

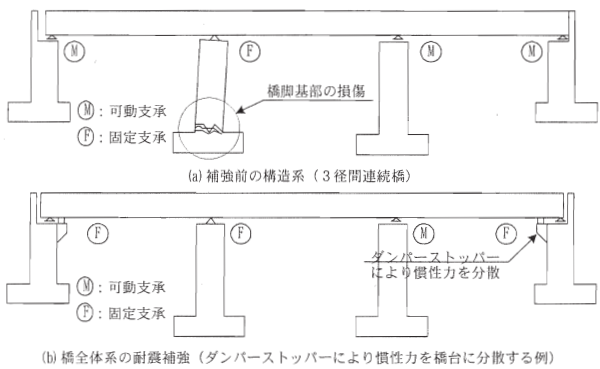


図-16 慣性力分散工法

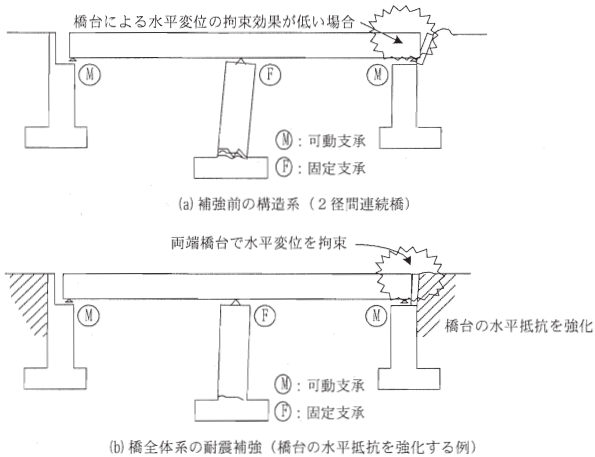
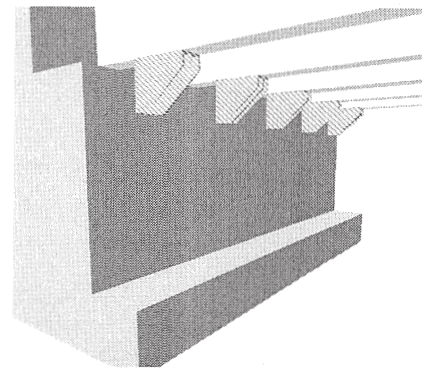


図-17 変位拘束工法

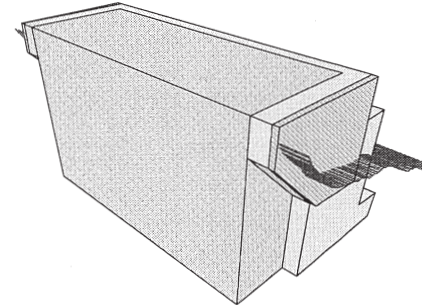
よって、従来工法に比べてより合理的な耐震補強とすることができる場合がある。

なお、橋台の耐震性能の照査において、橋台の耐力が不足して橋台に補強が必要と判断された場合や、けた遊間の調整が必要と判断された場合には、以下に示すような工法が実現性が高いと考えられる。

- ①ブラケット増設工法（図-18 (a)）
- ②ケーブル設置工法



(a) ブラケット増設工法



(b) ウイング増厚工法

図-18 遊間調整・橋台補強工法例

- ③壁高欄補強工法
- ④ウイング増厚工法（図-18 (b)）
- ⑤ウイング端部／踏み掛け版控え杭工法
- ⑥背面土地盤改良工法
- ⑦ケーブル＋控え杭工法／アースアンカー工法

#### 4.2 「既設橋梁の耐震補強工法事例集」<sup>9)</sup>への反映

以上の研究成果については、既設橋梁の合理的経済的な耐震補強の考え方や設計計算例、施工事例や新しい技術情報をとりまとめた「既設橋梁の耐震補強工法事例集」<sup>9)</sup>に反映した。本事例集は、海洋架橋・橋梁調査会から平成17年4月に出版された。

本事例集の目次構成は以下の通りである。

- 1.目的および適用範囲
  - 2.既往地震による橋梁被害の特徴と耐震補強のポイント
  - 3.既設橋梁が確保すべき耐震性能と性能評価の基本方針
  - 4.既設橋梁の耐震補強工法の選定
  - 5.部材の耐震補強工法
  - 6.橋全体系の耐震補強工法
  - 7.落橋防止対策
- ◇補強設計計算例◇

表-3 中長大橋・特殊橋に想定される損傷と対応方針

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	ゲルバーヒンジ	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	・接合部の補強、ダンパープレースの導入
		横構	横構の座屈・損傷・破断	C	A	・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)
		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(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)
		支承	支承の損傷	A	B	・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)
	上下路式トラス橋	弦材	トラス部材の座屈・損傷・破断	A	C	・接合部の補強、ダンパープレースの導入
		斜材	斜材の座屈・損傷・破断	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(RC部材:鋼板・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、ダンパープレースの導入
		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、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)
		アーチ部材	アーチ部の座屈・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)
アーチ橋	上路式アーチ橋	鉛直支材	座屈・損傷	B	B	・接合部の補強、ダンパープレースの導入
		横構	横構の座屈・損傷・破断	C	A	・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)
		中路式アーチ橋	アーチ部材	アーチ部の座屈・損傷	A	C
	中路式アーチ橋	鉛直支材	座屈・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 ・アーチ部材補強(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)
		横構	横構の座屈・損傷・破断	C	A	・接合部の補強、ダンパープレースの導入
	下路式アーチ橋	中路桁	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 ・中路桁の支承部の補強(変位制限機構の付加)
		アーチ部材	アーチ部の座屈・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	・接合部の補強、ダンパープレースの導入
斜張橋(鋼・コンクリート)	主塔	主塔	主塔の座屈・損傷・倒壊	A	C	・ケーブルソケット部の補強
		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) ・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)
	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)
吊橋	ケーブル	ケーブルの滑り・抜け	B	C	・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) ・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	
	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	・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) ・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。



1. 部材の耐震補強工法
  2. 橋全体系の耐震補強工法
  3. 落橋防止システム
- 参考資料

◇新工法・新技術情報◇

1. はじめに
2. 新工法・新技術の検索結果

この事例集の出版を受けて2005年10月21日から28日にかけて、仙台、東京、名古屋、大阪、福岡の5箇所において、「既設橋梁の耐震補強に関するセミナー」が開催された。本セミナーは、今後実施される耐震補強工事において本事例集を参考としての活用を目的として、耐震補強工事に従事される道路管理者や民間の技術者等を対象に、事例集の内容の解説が行われた。全国5箇所合計で779名の参加者があった。

#### 4.3 緊急3箇年プログラムにおける成果の反映

国土交通省では、緊急輸送道路、新幹線の高架橋柱及び新幹線、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ため、「緊急輸送道路の橋梁耐震補強3箇年プログラム」および「新幹線、高速道路をまたぐ橋梁の耐震補強3箇年プログラム」を策定している。本プログラムの策定にあたって、耐震補強の優先度の高い構造条件に関する技術的な提案を行うとともに、実際の対策事業においては4.2に示した事例集が活用されることが期待される。

#### 5. 全体構造系を評価した中長大橋の耐震補強手法

中長大橋・特殊橋については各橋梁形式毎に橋の限界状態を考慮し、各橋梁形式の特性をふまえた耐震補強方針について検討し、現時点で技術的、経済的に実行する耐震補強工法について表-3に整理した。

#### 6. まとめ

本研究では橋梁の全体構造系を考慮した耐震性評価法及び耐震補強工法の開発を目標として実施した本研究について以下にまとめる。

##### ①橋梁の全体構造系を考慮した耐震性能評価法の開発

・河川橋等で両端に橋台を有する橋梁を対象に、橋台と背面地盤の抵抗特性の評価方法を開発するとともに、これを考慮した橋全体系の耐震性能の評価法を開発した。

・せん断力の影響が支配的となる壁式橋脚面内方向を

対象に、実験並びに解析に基づき、せん断支間比の効果を考慮したより高精度なせん断耐力評価法を開発した。これによって補強を必要としない橋脚の評価が可能になった。

②橋梁の耐震性能照査に用いる信頼性設計式の開発  
・既往の震災兵庫県南部地震により実際に被災したRC橋脚及び支承部を対象に、その損傷度、橋脚の曲げ耐力、最大地盤加速度との関係を明らかにし、地震動データに基づく橋脚及び支承部の被災度の評価手法を開発した。

・既往の震災データに基づき、大地震発生時に現地の地震計情報と各橋梁の基本的情報をもとに被災度を簡便に推定する手法を開発するとともに、近年の被害地震にこれを適用し提案手法の信頼性を検証した。本手法は、地方整備局に導入中のSUTARNシステムの中に取り入れられる予定である。

③全体構造系を評価した一般橋の耐震補強手法の開発

・河川橋などで水中にある橋脚の補強対策が困難な場合などに、各橋脚の補強を不要とする橋全体として耐震補強工法として、免震工法、地震力分散工法、変位拘束工法を開発し、開発工法は既設橋梁の耐震補強工法事例集としてとりまとめ、平成17年4月に発刊した。

④全体構造系を評価した中長大橋の耐震補強手法の開発

・中長大橋に関する耐震補強工法の事例調査を行うとともに、中長大橋の耐震性の評価方法と耐震補強工法をとりまとめた。

#### 参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編、日本道路協会、2002
- 2) Karl Romstad, Bruce Kutter, Brian Maroney, Eric Vanderbilt, Matt Griggs, Yuk Hon Chai : Experimental Measurements of Bridge Abutment Behavior, UCD-STR-1, 1995.9
- 3) 設計要領 第二集 橋梁・擁壁・カルバート、日本道路公団、2000
- 4) 道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編、日本道路協会、2002
- 5) 道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、日本道路協会、2002
- 6) 小林寛、運上茂樹：繰り返し载荷を受けるせん断

スパン比の小さいRC柱の挙動に関する実験的検討、  
第8回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震  
設計に関するシンポジウム講演論文集、2005.2

- 7) 小林寛、運上茂樹：大地震における道路橋の被災  
度推定手法、土木技術資料47-12、2005.12
- 8) 道路震災対策便覧（震災復旧編）、日本道路協会、  
2002
- 9) 既設橋梁の耐震補強工法事例集、(財)海洋架橋・橋  
梁調査会、2005.4