

3. 道路橋の耐震設計法の変遷

3. 1 はじめに

道路橋の耐震設計法（基準）の変遷となった主な地震による道路橋の被害状況を年代順に示せば、表-1（その1～その4）のようである。また、これらの被害地震による橋梁の代表的な被害状況を写真1～15に示している。

土木工学はよく経験工学といわれるが、表-1から、道路橋の耐震設計法（基準）の変遷については、特に、その傾向が強いことが伺われる。これは、人知には限りがあり、被害地震の発生が比較的稀な事象で、その人相・性格（最大加速度、周波数特性、継続時間等）も各地震で大きく異なり、耐震設計の基本となる将来の地震像の予測が難しかったためであろう。また、仮に地震像が掴めたとしても、最近までは、複雑な地震の影響を解析・実験等によってある程度正確に推定することが困難であったこと、さらに高度経済成長に伴って、道路交通の大幅な伸び・人口の都市集中化など、社会環境が急速に変化したため、これに必要な社会基盤や各種構造物の設計基準の整備が少し後手に廻ったことも一つの側面であろう。

なにはともあれ、我が国の道路橋の耐震設計法は関東大震災が端緒となり、その後数度の改訂はあったが、阪神淡路大震災によって新たな転機を迎えたことは紛れのない事実である。

3. 2 道路橋の耐震設計法の端緒

我が国の地震研究は、明治13(1880)年の横浜地震から始まった²⁵⁾。明治24(1891)年濃尾地震(M8.0)が起り、岐阜、愛知両県で人命・家屋等に大きな被害をもたらした。翌年文部省のもとに「震災予防調査会」が発足し、これが震災予防の出発点となった。大正5(1916)年東京帝国大学教授佐野利器が、明治39(1906)年のサンフランシスコ大地震(M8.2)²⁵⁾における建築構造物の被害調査結果をまとめて、震度法のもととなる剛構造思想「家屋耐震構造論」を発表し、このとき初めて耐震という言葉が登場した²⁶⁾。

大正12(1923)年関東地震が起り、大火災と相俟って、人命・各種構造物が激甚な被害を被った(橋梁の被害例：写真1, 2参照)。これが構造物の設計に地震の影響を科学的に考慮する契機となり、翌大正13(1924)年に内務省土木局から、震災復興事業の一環として、道路橋の耐震設計については地震の影響に相当する水平力を設計荷重に考慮する震度法の考え方を適用するよう「橋台・橋脚の耐震化の方法」として通達が出された¹⁾。これが我が国における道路橋の耐震設計の基準化の端緒となった。この震度法の設計概念は上記佐野の提案によるものであり、建築の分野でも内務省土木局の通達とほぼ同時期に、現在の建築基準法のもととなる「市街地建築物法(大正8(1919)年制定)²⁵⁾」の改訂の中に取り入れられている。

具体的に道路橋の設計震度が規定されたのは、内務省土木局が大正15(1926)年に「道路構造ニ関スル細則(案)⁷⁾」をまとめ、建設所在地における最強地震力(地域、地盤条件によって設計水平震度 $k_h=0.1\sim0.3$ 、鉛直震度は水平震度の1/2とする¹⁾)を設計に考慮するように通達したのが最初である。これ以後、表-1のように、新たな震災経験や技術の蓄積を取り入れながら、耐震設計関連の規定が改定されてきている。こうした耐震規定の改訂、耐震技術の進歩と歩調を合わせるかのように、兵庫県南部地震が起こるまでは道路橋の地震被害も着実に減少してきていた。

3. 3 道路橋の過去の地震被害⁴⁾

道路橋の過去の地震被害を振り返ってみると、大きくつぎの3つの段階に分けられる。

(1) 耐震設計をしていないか、または、設計地震力が小さかった時代

大正12(1923)年の関東地震、昭和12(1946)年の南海地震、昭和23(1948)年の福井地震がこの時代に相当する。この時代の橋梁の被害は、写真1～4のように、基礎の強度不足に起因して基礎が過度に移動または傾斜・転倒したために桁が落下あるいは損傷を受けたものが大部分である。

(2) 地盤の液状化や落橋防止構造を見込んでいなかった時代

その後耐震設計法(昭和14(1939)年「鋼道路橋設計示方書」⁸⁾、昭和31(1956)年「鋼道路橋設計示方書」⁹⁾)が改訂され、(1)で述べたような基礎の強度不足に起因した被害は次第に減少してきたが、つぎに遭遇したのが地盤の液状化による被害である。昭和39(1964)年の新潟地震では広範囲に液状化が起り、これに伴う地盤の流動化によって橋脚が移動・傾斜し、写真5、6のような、橋桁が落下するなどの被害が生じた。また、昭和53(1978)年の宮城沖地震では、落橋防止構造がなく、運悪く支承部の修理をしていたこともあって¹⁰⁾、写真7のように、地震の揺れによりゲルバー桁が落下するという被害があった。

上記の新潟地震による被害を契機として、地盤の液状化が科学的に認識・研究され、液状化対策が耐震設計法に導入されるようになった(昭和47(1972)年「道路橋耐震設計指針・同解説」¹¹⁾)。また、落橋防止構造も考案され、設計に導入された。なお、これらの液状化対策と落橋防止構造を耐震設計法に取り入れたのは我が国が世界で初めてである。

(3) 近年の地震被害

こうした耐震設計法の改訂・耐震対策が進むにつれ、また、耐震点検(昭和46、51、54、平成3年)も行われて、最近ではそれ程大きな被害はなくなり、基礎が強化されたため、橋脚や支承部に被害が限定されるようになってきた。したがって、平成7(1995)年兵庫県南部地震が起こるまでは、橋脚や支承部の被害を軽減し、橋梁全体系の耐震性を高めることに耐震設計の主眼がおかれてきた。

ただ、こうした状況の中、昭和57(1972)年の浦河沖地震と平成5(1993)年の釧路沖地震、北海道南西沖地震で、写真9～11のような、兵庫県南部地震の被害にとっても重要である、RC橋脚の段落とし部にせん断(ぜい性)破壊の被害が生じていた。

なお兵庫県南部地震が起こるまでの地震による道路橋の落橋は、関東地震を含め、15橋とのことである⁴⁾。

(4) 兵庫県南部地震

平成7(1995)年1月17日の兵庫県南部地震により、人命はもとより、日本の高度経済成長の象徴である高速道路・新幹線・港湾施設などの公共都市施設に激甚な被害の生じたことは記憶に新しいところであり、道路橋についても、写真12～15のような、落橋等の大被害が数多く生じた。これら橋梁の被害例については、すでに多くの報告がなされ、文献22)に調査結果が詳しく報告されているのでここでは省略する。この地震による被害が直下型地震の地震力の凄まじさにあったことはいうまでもないが、昭和30年代から高度成長期を迎え、都市部では、土地利用の制約上、余剰耐力の小さい(じん性に乏しい)、断面を絞った単柱形式の橋脚が採用されるようになったため、従来のものにくらべて、橋脚が細くなりせん断耐力が落ちて揺れ易くなったことも一因と思われる。また、(3)で述べたような近年の被害状況からみて、橋梁は地震に対して安全であるとの油断(安全神話)があったのではないかと思われる。しかし、この大被害を教訓・契機として、精力的な調査研究と根本的な耐震設計の見直しが進められ、直下型(タイプⅡ)地震に対する設計地震力、震度法・地震時保有水平耐力法を併用した2段階設計法、免震設計法、非線形動的解析による安全性照査法等を導入するなど(表-1 その4参照)、平成8(1996)年12月に「道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編¹⁴⁾」が短期間のうちに大幅に改定されることとなった。

3. 4 耐震設計の主な変遷

3. 2で述べたように、我が国の道路橋の耐震設計で設計震度が最初に規定⁷⁾されたのは、関東地震から3年後の大正15(1926)年である。戦前と戦後間もない当時は橋といえば主に鋼橋であったため、鋼道路橋示方書の中に耐震規定が含まれており、示方書の改訂に伴って、震度法における設計震度が具体化・標準化⁹⁾されてきた(表-1 その1参照)。しかし、耐震設計に重要な固有振動特性・じん性・地盤の液状化・落橋防止構造等の規定はこの当時の設計法には含まれていなかった。ただし、設計震度は水平方向 $k_h = 0.2$ 、鉛直方向 $k_v = 0.1$ を標準としており、米国カリフォルニア州の設計震度 $k_h = 0.06$ にくらべ、当時としては

かなり大きな値が見込まれていた。

昭和39(1964)年の新潟地震を契機とした調査研究成果を踏まえ、昭和46(1971)年に本格的な耐震設計基準の整備が行われ、その翌年に他の道路橋示方書とは独立した別冊の規定「道路橋耐震設計指針・同解説¹¹⁾」制定された。この規定には、震度法しか規定されていなかった昭和39年以前の鋼道路橋示方書に比べ、修正震度法、液状化の簡易判定法、落橋防止構造等の斬新且つその後の耐震設計法の基本となる重要な規定が導入された。その意味でこの設計指針は道路橋の耐震設計法における一つの節目ともなった。

その後昭和55(1980)年に、この別冊指針は「道路橋示方書・V耐震設計編¹²⁾」として改訂され、RC橋脚のせん断(ぜい性)破壊を防ぐための地震時変形性能の照査、 F_L 値による液状化判定法、動的解析等の規定が導入された。そして平成2(1990)年には、その後の橋梁・橋脚の地震応答に関する研究成果を導入して改訂され、従来の震度法と修正震度法を震度法に統一し、設計振動単位(フレーム法⁴⁾)による慣性力の算定法・RC橋脚の地震時保有水平耐力法の照査とそれに必要な等価水平震度、動的(弾性)解析による安全性の照査等の規定が取り入れられた¹³⁾。この平成2年の改訂で特に重要なことは、従来の弾性設計主体の耐震設計法に、RC橋脚に限定されていたとはいえ、初めて塑性域における橋脚のじん性と動的耐力の概念を導入した地震時保有水平耐力の照査法が規定されたことである。

この地震時保有水平耐力の照査規定は、兵庫県南部地震で被災した道路橋の復旧と以降の耐震設計法の見直しに大きな役割を果たし、3.3の(4)で述べたような、平成8(1996)年12月に改訂された現「道路橋示方書・同解説V耐震設計編¹⁴⁾」(表-1 その4参照)へと衣替えすることになる。

3.5 おわりに

前述のように、道路橋の新たな耐震設計法¹⁴⁾では、兵庫県南部地震による大被害に教訓を得て、内陸直下型(タイプII)地震による設計地震力、橋脚のみならず基礎・支承部・落橋防止システムなどに対する保有水平耐力法、免震設計法、動的(非弾性)解析による安全性照査法、液状化・流動化に対する設計法など、新たな規定が導入されており、この設計法で設計・建設された道路橋の耐震安全性はかなり向上するものと思われるが、旧設計法による既存橋梁の耐震安全性の確保(耐震補強)も急務である。また、今回の改訂は震災後、2年半という比較的短期間に行われたため、レベル2地震に対する設計地震荷重²⁷⁾、保有水平耐力法におけるエネルギー一定則に準拠した設計地震力の低減(等価水平震度)²⁸⁾、マルチヒンジ系橋梁²⁹⁾に対する保有水平耐力法の適用、動的(非弾性)解析による安全性照査法等まだ曖昧な点があり、現行にも今後さらに検討すべき課題が残されている。そして、最近では、構造物の使用性と終局耐力のみを対象とした2段階設計を拡張し、より多くの期待される性能が保持できるような設計法、いわゆる性能照査型設計法²⁴⁾、²⁹⁾が、世界各国で、検討され始めている。また、地震荷重(力)を基本とした現行の設計法にかわり、変位(変形)に基づく新たな設計法³⁰⁾も提案されてきている。

したがって、道路橋の耐震設計法は、上記のような課題に対する検討・改訂、新たな設計法の導入など、今後もさらに変遷していくことが予想される。

表-1 主な地震による道路橋の被害形態と耐震設計法の変遷^{1)~14)}

その1

西 暦	主要な地震・耐震設計法	特徴的な被害形態と設計震度等の改正点																
1923. 9. 1 (T12)	関東地震(M7.9, 落橋数6)	強度不足による下部構造(基礎工)の横移動・傾斜・転倒及びこれに伴う落橋等の被害が数多くあった。(写真1 ¹⁵⁾ , 2 ¹⁶⁾)																
1926. 6 (T15)	道路構造に関する細則案 ¹⁷⁾ (内務省土木局)	地震荷重が初めて規定された。所在地の最強地震力を用いる(数値, 計算方法の規定なし: $k_h = 0.1-0.3$, $k_v = k_h / 2$) ¹¹⁾ 。 地震荷重に対する許容応力度の割増し: 一律 60%																
1939. 2 (S14)	鋼道路橋設計示方書 ¹⁸⁾ (内務省土木局)	設計震度の標準化($k_h = 0.2$, $k_v = 0.1$), 架橋地点の状況(地震活動度と地盤の良否)によって増減可($k_h = 0.1-0.3$, 基準なし) ¹¹⁾ 。 地震荷重に対する許容応力度の割増し: 鋼材80%, RC60%																
1946. 12. 21 1948. 6. 28 1952. 3. 4	南海地震(M8.0, 落橋数1) 福井地震(M7.1, 落橋数1) 十勝沖地震(M8.2)	強度不足による下部構造(基礎工)の横移動・傾斜・転倒及びこれに伴う上部構造の落橋等の被害があった。(写真3, 4) ¹⁷⁾																
1956. 5 (S31)	鋼道路橋設計示方書 ¹⁹⁾ (日本道路協会)	地域, 地盤条件に応じた水平設計震度($k_h = 0.1-0.35$)が規定された <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td>軟 弱</td> <td>やや良好</td> <td>良 好</td> </tr> <tr> <td>しばしば大地震が起こった地域</td> <td>0.35-0.30</td> <td>0.30-0.20</td> <td>0.20-0.15</td> </tr> <tr> <td>大地震が起こったことのある地域</td> <td>0.30-0.20</td> <td>0.20-0.15</td> <td>0.15-0.10</td> </tr> <tr> <td>その他の地域</td> <td>0.20</td> <td>0.15</td> <td>0.10</td> </tr> </table> <p>鉛直震度は $k_v = 0.1$ を標準とする。 地震荷重に対する許容応力度の割増し: 鋼材80%, RC50%</p>		軟 弱	やや良好	良 好	しばしば大地震が起こった地域	0.35-0.30	0.30-0.20	0.20-0.15	大地震が起こったことのある地域	0.30-0.20	0.20-0.15	0.15-0.10	その他の地域	0.20	0.15	0.10
	軟 弱	やや良好	良 好															
しばしば大地震が起こった地域	0.35-0.30	0.30-0.20	0.20-0.15															
大地震が起こったことのある地域	0.30-0.20	0.20-0.15	0.15-0.10															
その他の地域	0.20	0.15	0.10															
1964. 6 (S39)	鋼道路橋設計示方書 ¹⁰⁾ (日本道路協会)	設計震度については改定なし。 地震荷重に対する許容応力度の割増し: 鋼材70%, RC50%																
1964. 6. 16 (S39)	新潟地震(M7.5, 落橋数3)	地盤の液状化による下部工の沈下・傾斜及びこれに伴う上部構造の落橋等の被害があった。(写真5 ¹⁰⁾ , 6 ¹¹⁾)																
1971. 3 (S46)	道路橋耐震設計指針「橋, 高架の道路などの技術基準」 (建設省通知)	本格的な耐震設計基準が整備され, 初めて別冊規定が制定された。 設計水平震度(従来の震度法に加え, 修正震度法を導入) 1) 震度法 $k_h = v_1 \cdot v_2 \cdot v_3 \cdot k_0$ k_0 : 標準設計水平震度(=0.2) v_1 : 地域別補正係数(A=1.00, B=0.85, C=0.70) v_2 : 地盤別補正係数(1種=0.9, 2種=1.0, 3種=1.1, 4種=1.2) v_3 : 重要度別補正係数(1級=1.0-1.25(特に重要), 2級=0.8) ($k_h = 0.1 - 0.24$)																
1971(S46)	耐震点検: RCのクラック, 基礎の移動・傾斜・沈下・洗掘等	2) 修正震度法 $k_{h,m} = \beta k_h$ ($h \geq 25m, T \geq 0.5sec$) k_h : 震度法における震度 β : 固有周期 T (≥ 0.5)による補正係数(左図, 44成分) ($k_{h,m} = 0.05 - 0.3$)																
1972. 4 (S47)	道路橋耐震設計指針・同解説 ¹¹⁾ (日本道路協会)	設計鉛直震度 k_v は一般には考慮しない。ただし支承部の設計には $k_v = 0.1$ を標準とする。 簡易な液状化判定法, 落橋防止構造の導入。 地震荷重に対する許容応力度の割増し: 鋼材70%, RC50%																

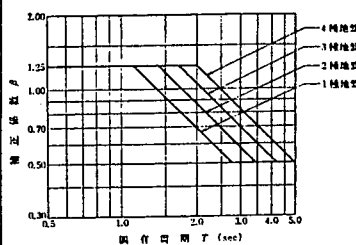


表-1 主な地震による道路橋の被害形態と耐震設計法の変遷^{1)~14)}

その2

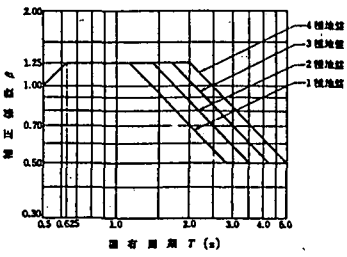
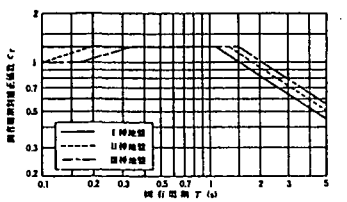
西 暦	主要な地震・耐震設計法	特徴的な被害形態と設計震度等の改正点
1976(S51)	耐震点検 (建設省)	スパン15m以上の高速道路・国道・主要地方道・高架橋の劣化, 落橋防止構造, 橋脚・橋台の強度, 基礎の安定等の点検
1978. 6. 12 (S53)	宮城県沖地震(M7.4, 落橋数1)	下部構造では橋脚, 橋台のコンクリートの剥離, クラック等, 上部構造では落橋, 主桁の切断・クラック等, 支承部では杓座の破壊, 杓本体の破壊等の被害があった。(写真7, 8) ¹⁰⁾
1979(S54)	耐震点検: 前回とほぼ同じ内容	1971(1972)年の道路橋耐震設計指針を基本として, その後の調査研究成果を踏まえ, 1987年に刊行された「新耐震設計法(案)」(建設省)をもとに, 耐震設計法の統一・改訂が図られた。
1980. 5 (S55)	<p>道路橋設計示方書・同解説 V耐震設計編¹²⁾ (日本道路協会)</p> <p>下部(基礎)構造に関する8篇の設計篇を整理統合し, 「道路橋示方書IV下部構造編」が刊行された。</p> 	<p>主な改訂点は以下のようである。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 地盤種別を増幅特性を表す地盤の特性値T。により区別した。 2) 地域区分を地震活動の地域特性に基づいて改めた。 3) 修正震度法の適用範囲を橋脚高さ15m以上に広げた。 4) 固有周期の算定方法(基礎の変形を考慮)及び修正震度法の補正係数βを, 短周期側($0.5\text{sec} \leq T \leq 0.625\text{sec}$)ですりつくよう, 改訂した(左図, 277成分)。 5) 地震時変形性能の照査規定を新たに設けた。(高さが比較的低く, 固有周期の短いRC橋脚・橋台のぜい性破壊を防ぐため) 設計水平震度 $k_{hd} = v_4 k_h$ or $k_{hd} = \beta v_4 k_h$ k_h: 震度法における震度 v_4: 構造特性別補正係数(1.3以上) 6) 砂質土層の液状化判定法(F_L値の採用)を改訂した。 7) 動的解析の位置付けと用いる設計地震動入力を規定した。 8) 支承部及び落橋防止構造の規定を改めた。 設計水平震度(落橋防止装置): $2k_h$ or $2k_{hm}$ <p>地震荷重に対する許容応力度の割増し: 鋼材50%, RC50% 下部構造編でコンクリートの許容応力度(低減), 段落とし部の定着長, 帯び鉄筋の配置等の改訂。</p>
1982. 3. 21 (S57)	浦河沖地震(M7.1)	RC橋脚の主鉄筋段落とし部にぜい性(せん断)破壊が生じた。(写真9) ⁴⁾
1990. 02 (H2)	<p>道路橋設計示方書・同解説 V耐震設計編¹³⁾ (日本道路協会)</p> 	<p>1980年の耐震設計編に, その後の調査研究によって得られた知見(地盤の振動特性, 橋の地震応答特性, RC橋脚の動的耐力等)を導入した。主な改正点は以下のようである。:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 従来の震度法と応答を考慮した修正震度法を一つにまとめ, 改めて震度法(従来の修正震度法に相当)とした。 2) 地盤種別を4区分から3区分と(2種と3種を統一)した。 <p>設計水平震度 $k_h = C_z \cdot C_g \cdot C_i \cdot C_T \cdot k_{h0}$ k_{h0}: 標準設計水平震度(=0.2) C_z: 地域別補正係数(A=1.00, B=0.85, C=0.70) C_g: 地盤別補正係数(I種=0.8, II種=1.0, III種=1.2) C_i: 重要度別補正係数(1級=1.0-1.1(特に重要), 2級=0.8) C_T: 固有周期別補正係数(左図, 従来のβに相当, 394成分) ($k_h = 0.1 - 0.3$)</p>

表-1 主な地震による道路橋の被害形態と耐震設計法の変遷^{1)~14)}

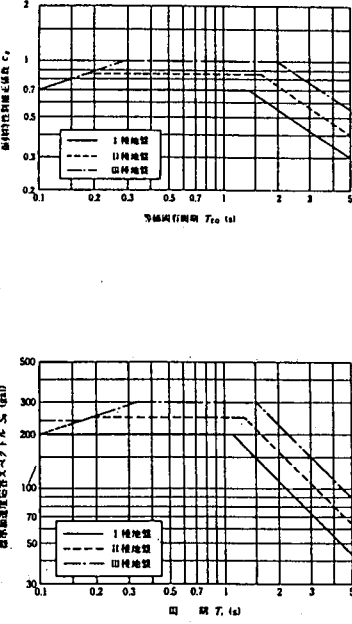
西 暦	主要な地震・耐震設計法	特徴的な被害形態と設計震度等の改正点
1990. 02 (H2)	道路橋設計示方書・同解説 V耐震設計編 ¹³⁾ (続き) (日本道路協会) 	3) 慣性力の算定を設計振動単位ごととし、連続橋の耐震設計法の充実を図った。 4) 砂質土層の液状強度の算定に細粒分の影響を取り入れた。 5) RC橋脚の地震時変形性能に関する規定を地震時保有水平耐力(せん断耐力と終局水平(曲げ)耐力)を基本とする照査法に改めた。 照査に用いる等価水平震度 $k_{h0} = k_{h0} / (2\mu - 1)^{1/2}$ μ : 許容塑性率 (安全係数 $\alpha = 1.5$, せん断破壊先行 $\mu = 1$) k_{h0} : 照査に用いる設計水平震度 $k_{h0} = c_z \cdot c_i \cdot c_R \cdot k_{h0}$ k_{h0} : 照査に用いる設計水平震度の標準値 (=1.0) c_z : 地域別補正係数 (A=1.00, B=0.85, C=0.70) c_i : 重要度別補正係数 (1級=1.0-1.1 (特に重要), 2級=0.8) c_R : 等価固有周期 $T_{\epsilon 0}$ による振動特性格補正係数 (左図上) ($k_{h0} = 0.3 - 1.0$) 6) 動的解析に用いる応答スペクトル (左図下)・地震入力、解析モデル、動的解析による安全性の照査に関する規定を新たに設けた。 地震荷重に対する許容応力度の割増し: 鋼材50%, RC50% 下部構造編で段落とし部の帯び鉄筋の配置要領の追加。
1991(H3)	橋梁震災点検要領(案) (建設省)	橋梁の変状調査を実施し、1980年より以前の示方書で設計された耐震性が相対的に低い橋梁について、必要な対策を施して適切なレベルまで耐震性の向上を図る。
1993. 1. 15 1993. 7. 12 1994. 10. 4 1994. 12. 28 1995. 1. 17 (H7)	釧路沖地震(M7.8) 北海道南西沖地震(7.8) 北海道東方沖地震(8.1) 三陸はるか沖地震(7.5) 兵庫県南部地震(7.2)	釧路沖地震では釧路地方気象台でEW方向922galの最大加速度が記録された。釧路沖地震と北海道南西沖地震では、RC(円形断面)橋脚の段落とし部に曲げ破壊からせん断破壊に至る損傷が生じた。(写真10 ¹⁹⁾ , 11 ²⁰⁾) 兵庫県南部地震では神戸海洋気象台でNS方向818galの最大加速度を記録した。鋼、RCを問わず橋脚の倒壊(鋼製4, RC79) ²²⁾ 橋げたの落下(46径間) ²²⁾ を始め、多数の橋梁で大きな被害が生じた。(写真12) ²¹⁾ , (写真13, 14, 15) ²²⁾
1995. 2 (H7)	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・解説(復旧仕様, 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会, 建設省) 被災した橋の復旧のほか、新設橋梁の設計及び既設橋梁の補強にこの仕様を参考にしよう全国の関係機関に通知された。(1995. 5, 建設省)	兵庫県南部地震後の暫定規定であり、その主な内容は: 1) 地震時保有水平耐力照査法を鋼橋脚、基礎、支承部、落橋防止システム等にも適用すること。また、基礎の耐力・変形性能は橋脚より大きくすること。 2) 動的(非線形)解析により安全性を照査すること。 3) 連続高架橋にはできるだけ免震支承を用いること(免震設計) 4) RC橋脚では、じん性を確保するため、断落としを止め、十分な帯鉄筋を入れること。 5) 鋼橋脚には、局部座屈等を防ぐため、コンクリートを充填すること。 6) 液状化に伴う地盤の側方流動に対する対策を講ずること。 7) 上部構造が落下しないよう落橋防止装置を設計すること。 8) 支承にはなるべくゴム支承を採用すること。

表-1 主な地震による道路橋の被害形態と耐震設計法の変遷^{1)~14)}

西 暦	主要な地震・耐震設計法	特徴的な被害形態と設計震度等の改正点
<p>1996. 12 (H8)</p>	<p>道路橋設計示方書・同解説V耐震設計編¹⁴⁾ (日本道路協会)</p> <p>図1: タイプIの設計水平震度の標準値 k_{h0} (左図上1)</p> <p>図2: タイプIIの設計水平震度の標準値 k_{h0} (左図上2, 上3)</p> <p>図3: 震度法による設計水平震度の標準値 k_{h0} (左図上1)</p> <p>図4: 地域別補正係数 c_z (A=1.0, B=0.85, C=0.7)</p> <p>図5: タイプIの設計鉛直震度の標準値 k_{v0} (左図下1)</p> <p>図6: タイプIIの設計鉛直震度の標準値 k_{v0} (左図下2)</p>	<p>兵庫県南部地震に対する復旧仕様を取り込むとともに、その後の必要な調査研究結果をもとにかなり大幅な改訂がなされた。</p> <p>主な改訂点は以下のようなものである。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 耐震設計の目標(耐震性能を確保すること)を明確化した。 2) 震度法と地震時保有水平耐力度(橋脚・基礎・支承部・落橋防止システム)の2段階設計とする。 3) 設計地震力として、従来のプレート境界型地震(タイプI)に加え、内陸直下型地震(兵庫県南部地震, タイプII)を新たに規定した。設計水平震度は次ようである。: <p>震度法の設計水平震度 $k_h = c_z k_{h0}$ ($k_{h0} = 0.1 - 0.3$)</p> <p>k_{h0}: 震度法による設計水平震度の標準値(左図上1)</p> <p>(土の慣性力・地震時土圧の算定では, I, II, III種地盤に対し, $k_{h0} = 0.16, 0.2, 0.24$)</p> <p>c_z: 地域別補正係数(A=1.0, B=0.85, C=0.7)</p> <p>保有水平耐力度の等価震度 $k_{h0} = k_{h0} / (2\mu_s - 1)^{1/2}$</p> <p>$\mu_s$: 許容塑性率(安全係数 α: B種タイプI 3.0, タイプII 1.5, A種はB種の80%, せん断破壊先行: $\mu_s = 1.0$)</p> <p>k_{h0}: 保有水平耐力度の設計水平震度 $k_{h0} = c_z k_{h00}$</p> <p>k_{h00}: 設計水平震度の標準値(タイプI: $k_{h00} = 0.3 - 1.0$, タイプII: $k_{h00} = 0.6 - 2.0$)</p> <p>(液状化判定では, I, II, III種地盤に対し, タイプI地震で, $k_{h00} = 0.3, 0.35, 0.4$, タイプII地震で, $k_{h00} = 0.8, 0.7, 0.6$)</p> <p>c_z: 地域別補正係数(A=1.0, B=0.85, C=0.7)</p> <ol style="list-style-type: none"> 4) 免震設計法(地震力の分散と高減衰化)を新たに規定した。 5) 液状化および流動化に対する耐震設計法を新たに規定した。 6) RC橋脚の水平力-変位関係の算定方法を改訂した。 7) RCラーメン橋脚およびコンクリートを充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力度を新たに規定した。 8) 動的解析による安全性の照査を、従来の震度法に加え、保有水平耐力度についても照査することとし、これら両照査の動的解析に用いる応答スペクトル・地震入力・解析モデル(線形および非線形モデル)等に関する規定を改めた。 <p>時刻歴応答解析の地震入力として、次のような、加速度応答スペクトル S, S_1, S_0 を規定し、それぞれ、これに近い特性を有する加速度波形を用いることを原則とした。</p> <p>$S = c_z c_0 S_0$, $S_1 = c_z c_0 S_{10}$, $S_0 = c_z c_0 S_{00}$</p> <p>c_z: 地域別補正係数, c_0: 減衰定数別補正係数</p> <p>S_0, S_{10}, S_{00}: 標準加速度応答スペクトル(左図上4, 5, 6)</p>



写真1 酒匂川の架橋の落橋¹⁵⁾
(関東地震1923. 9. 1)



写真3 中角橋の落橋¹⁷⁾
(福井地震1948. 6. 28)

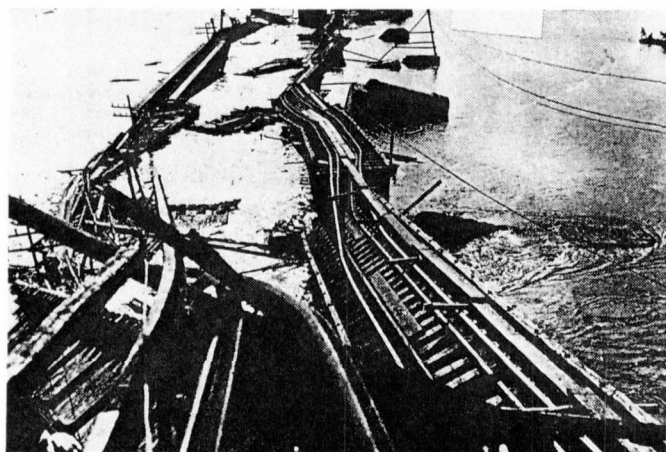


写真2 馬入川の鉄道橋の崩壊¹⁶⁾
(関東地震1923. 9. 1)

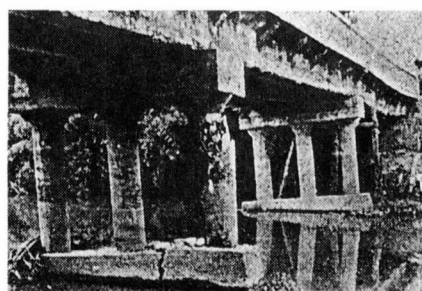


写真4 木呂場橋の橋脚被害¹⁷⁾
(福井地震1948. 6. 28)

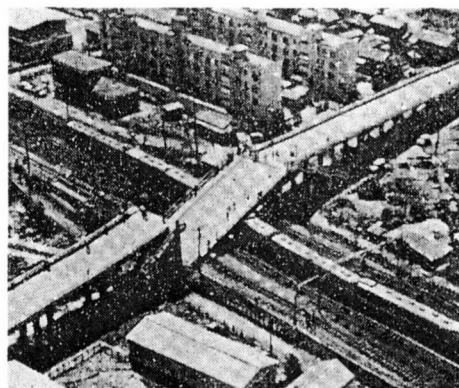


写真6 新潟駅東跨線橋の落橋¹⁾
(新潟地震1964. 6. 16)



写真5 昭和大橋の落橋¹⁶⁾
(新潟地震1964. 6. 16)

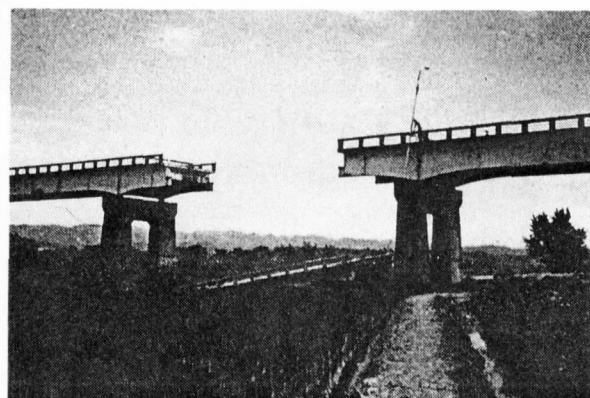


写真7 錦桜橋ゲルバー桁の落橋¹⁸⁾
(宮城県沖地震1978. 6. 12)

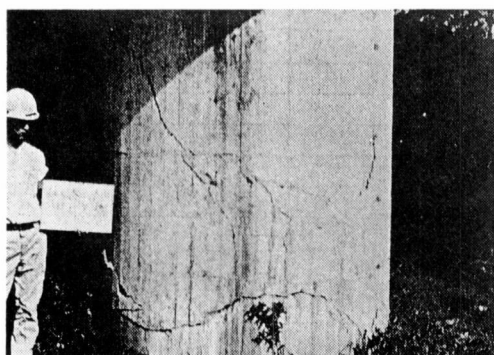


写真8 閉上大橋RC橋脚の被害¹⁸⁾
(宮城県沖地震1978. 6. 12)

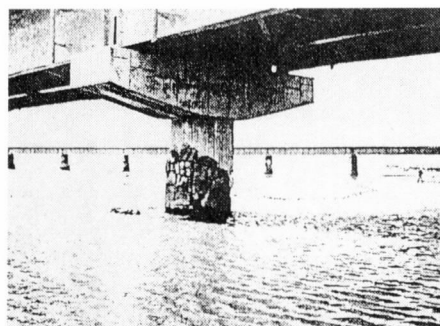


写真9 静内橋RC橋脚段落とし部の被害⁴⁾
(浦河沖地震1982. 3. 21)

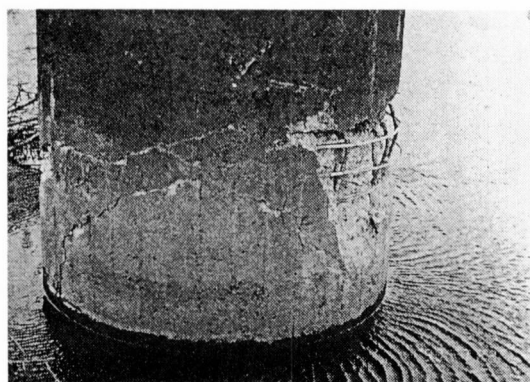


写真11 基栄橋RC橋脚の被害²⁰⁾
(北海道南西沖地震1993. 7. 12)

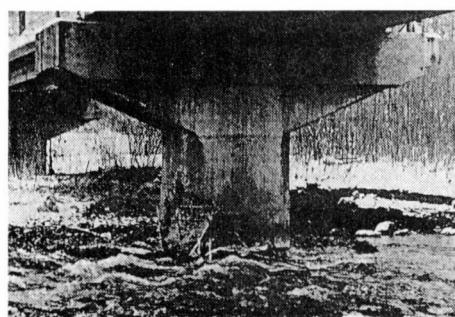


写真10 松之恵橋RC橋脚の被害¹⁹⁾
(釧路沖地震1993. 1. 15)

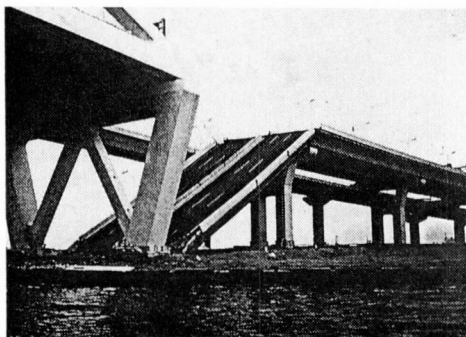


写真12 西宮大橋取付部の落橋²¹⁾
(兵庫県南部地震1995. 1. 17)

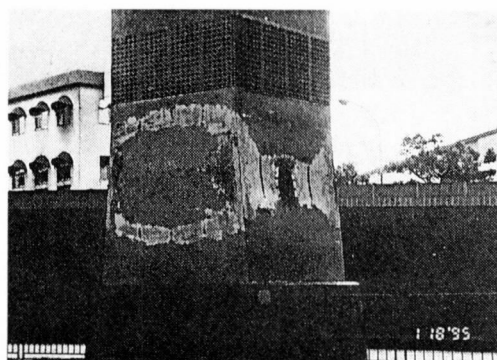


写真13 名神西宮I.C. 西鋼橋脚の局部座屈²²⁾
(兵庫県南部地震1995. 1. 17)



写真14 阪神高速3号神戸線ピルツ橋の倒壊²²⁾
(兵庫県南部地震1995. 1. 17)

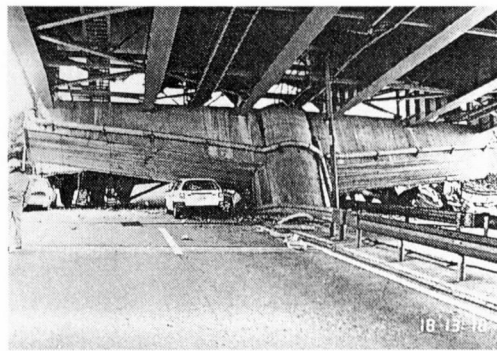


写真15 阪神高速3号神戸線RC橋脚の被害²²⁾
(兵庫県南部地震1995. 1. 17)

参 考 文 献

- 1) 北陸建設弘済会：新潟地震と防災技術，平成6(1994)年6月。
- 2) 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）改定資料，平成8(1996)年7月。
- 3) Kawashima, K.and Unjoh,S. : Impact of Hanshin/Awaji Earthquake on Seismic Design and Seismic Strengthening of Highway Bridges, 土木学会論文集, No.556/I-38, Jan. 1997.
- 4) 川島一彦：耐震設計と今後の技術動向、セメント・コンクリート, No.600, Feb.1997.
- 5) 鹿島建設（株）：平成7年兵庫県南部地震被害調査報告書，平成7(1995)年2月。
- 6) 越後 滋・他3名：平成7年兵庫県南部地震と構造物の被害の概要，川田技法, Vol.15, 1996.
- 7) 内務省土木局：道路構造二関スル細則（案），大正15(1926)年。
- 8) 内務省土木局：鋼道路橋示方書（案），昭和14(1939)年2月。
- 9) 日本道路協会：鋼道路橋示方書，昭和31(1956)年5月。
- 10) 日本道路協会：鋼道路橋示方書，昭和39(1964)年6月。
- 11) 日本道路協会：道路橋耐震設計指針・同解説，昭和47(1972)年4月。
- 12) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，昭和55(1980)年5月。
- 13) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，平成2(1990)年2月。
- 14) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，平成8(1996)年12月。
- 15) 官公庁資料編集会：日本災害史録，平成5(1993)年11月。
- 16) 伯野元彦：被害から学ぶ地震工学 -現象を素直に見つめて，鹿島出版会，1992年12月。
- 17) 北陸地震々害調査報告出版委員会：昭和23年福井地震震害調査報告・土木部門，壯文社，1951年4月。
- 18) 宮城県土木部道路建設課：1978年6月宮城県沖地震による橋梁震害調査報告書，昭和53(1978)年10月。
- 19) 土木学会：1993年釧路沖地震震害調査報告，平成6(1994)年12月。
- 20) 川島一彦・他3名：北海道南西沖地震による道路橋の被害とその特性，橋梁と基礎, No 3, Vol.28, 平成6(1994)年3月。
- 21) パシフィックコンサルタント(株)総合研究所：平成7年阪神大震災(兵庫県南部地震)被害報告書，平成7(1995)年1月。
- 22) 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，平成8(1996)年12月。
- 23) 川島一彦・他2名：現場はどうかかわるか？(特集新耐震講座)，NIKKEI CONSTRUCTION 1996.9.27.
- 24) 土木学会構造工学委員会：高架橋の耐震設計のゆくえ，土木学会平成8(1996)年度全国大会研究討論会2資料，平成8(1996)年9月。
- 25) 大橋雄二：耐震基準の変遷と今後の方向，建築雑誌/VOL 110, No.1372/1995年5月号。
- 26) 毎日新聞社：ドキュメント阪神大震災全記録，毎日ムック，1995年4月。
- 27) 土木学会地震工学委員会地震荷重研究小委員会：レベル2地震動と設計地震荷重の課題－地震荷重研究小委員会の活動報告－，1997年10月。
- 28) 平尾 潔・他4名：強震下におけるRC橋脚の所要降伏震度に関する一研究，第1回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.49-52, 1998年1月。
- 29) 川島 一彦：地震時保有耐力法の高度化に求められる今後の研究課題，第1回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.1-4, 1998年1月。
- 30) M.J.N.Priestly & G.M.Calvi : Concepts and procedures for direct displacement-based design and assessment, Proceedings of Seismic Design Methodologies for Next Generation of Codes, pp.171-181, edited by P.Fajfar & H.Krawinkler, Balkema, Rotterdam, 1997.