

15 耐震設計と今後の課題

15.1 耐震設計の変遷と特徴

大正5年佐野利器博士は「家屋耐震構造論」を發表し、耐震設計に必要な地震力の計算に「震度」の概念を提案した。関東大震災の翌年(大正13年)には佐野博士の震度法の考え方が市街地建築物法に導入された。これは世界最初の耐震設計法規である。昭和25年、市街地建築物法に代わって建築基準法が制定された。構造計算の基本は昭和22に發表された建築規格3001によって規定され、震度0.2以上となった。動的弾塑性解析によって構造設計が耐震的に行われるようになったのは昭和38年の建築基準法の改正により、昭和6年に定められた高さ31mの規定が撤廃されたことより始まったものである。新潟地震、十勝沖地震、宮城地震などにより、構造物は多くの被害を受け、耐震工学の分野では多くの教訓を得て、法律上も昭和55年建築基準法が改正された。この耐震設計法で最も特徴のある点は1次設計と2次設計に分かれていることである。1次設計は許容応力度法であり、2次設計の主な部分は1次設計された構造物の保有耐力の照査・検討である。

一方、橋梁の耐震設計への取り込みは関東大震災(被害橋数1785橋)をきっかけに、大正13年に内務省土木局が「橋台・橋脚の耐震化の方法」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通達したときに始まる。さらに、設計荷重としての地震力の規定は大正15年に出された「道路構造に関する細則案、第2章橋梁」において初めて「橋梁所在地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。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震度を0.2、鉛直震度を0.1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ていた。ただし、増減の規準が具体的に規定されていなかったため、昭和31年および39年の2回にわたり改訂され、水平震度は地域と地形の種類によって0.1~0.35の値を取ることとし、鉛直震度は0.1が標準とされた。

また、耐震設計規準の整備によって、橋梁の被害形態が質的に変化してきている。表15.1は、耐震設計関連の規定の変遷と道路橋の被害形態の変化を示したものである⁴⁾。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、関東地震、福井地震の被災例に見られるように、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って引き起こされた横移動、傾斜、転倒が生じ、これにより上部構造が落橋したり、甚大な被害を受けたものが多いが、その後、これらの被害形態は減少した。これに対して、周辺地盤の変状、特に飽和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が良く見られる。これが、顕著な形で最初に認識されたのは、昭和39年新潟地震による昭和大橋の落橋であった。昭和大橋では、周辺地盤が液状化した結果、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欠いていたために上部構造の落橋を招いた。このような経験から、昭和39年~45年にかけて各基礎形式毎の「道路橋下部構造設計指針」が刊行されるとともに、昭和46年に「道路橋耐震設計指針」が規定され、地域、地盤条件および橋梁の重要度に応じて設計震度を統一的に定めるとともに、高橋脚など比較

表15.1 耐震設計関連の規定の変遷と道路の被害形態

西 暦	主 要 な 地 震	主要な被害原因および被害形態の変化	耐 震 設 計 法
1920	1923 関東地震 (M7.9)	橋脚、橋台の移動、傾斜、転倒に伴う下部工の被害	1926 耐震設計の導入。 (大正15年道路構造に関する細則(案))
1930			1939 設計震度の標準化。 (昭和14年鋼道路橋設計示方書(案))
1940			
1946 南海地震 (M8.1)	1942 福井地震 (M7.3)	固定支承における橋座の欠け落ち	1956 地域、地盤条件に応じた設計震度の算定。 (昭和31年鋼道路橋設計示方書)
1950	1952 十勝沖地震 (M8.1)	液状化による被害	
1960	1964 新潟地震 (M7.5)		
1970	1978 宮城県沖地震 (M7.4)	橋脚の破損、支承の破損	1971 地域、地盤、重要度、構造特性に応じた設計震度の算定。液状化判定法の導入。 (昭和46年道路橋耐震設計指針)
1980	1982 浦河沖地震 (M7.1)		1980 液状化に対する設計の考え方の導入。主鉄筋段落し部の設計法。(昭和55年道路橋示方書)
1983 日本海中部地震 (M7.7)			
1990			

的振動し安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、液状化や軟弱粘性土の安定性、落橋防止構造など、耐震設計にかかわる広範囲で重要な事項が初めて規定された。さらに、道路橋耐震設計指針は、昭和55年に「道路橋示方書・V耐震設計編」として改訂され、コンクリートの許容せん断応力度を引き下げるとともに、主鉄筋段落とし位置を従来よりも部材の有効高さに等しいだけ長くするなどの規定が盛り込まれた。また、地震時変形性能照査の規定が新たに設けられ、じん性のチェックをするようになった。

橋の耐震設計に関する多方面の調査研究にもとづいて、平成2年に改訂が行われた。それまでの震度法と修正震度法をあわせて、新たに震度法とし、応答を考慮して設計震度を設定するものとした。また、震度法によって耐震設計された鉄筋コンクリート橋脚は、関東地震クラスの大地震時にも脆性的な破壊が生じないように、地震時保有耐力を照査することが望ましいとし、さらに、地震時の挙動が複雑な橋は、動的解析によって安全性を照査することが望ましいとされている。

15.2 耐震設計計算法

構造物の種類は様々なので、各構造物を所管する官庁または協会毎に多くの耐震設計規準・指針を出している。一つの耐震設計規準としては統括しがたい。耐震設計計算法としては、四つに大別することができる。すなわち、(a)震度法、(b)修正震度法、(c)応答変位

法、(d)動的解析法である。図10.1は耐震設計のフローを示す⁶⁾。

(1)震度法

震度法は地震が構造物に及ぼす影響を力に置き換えて行う設計法であり、地震力の大きさは重量に比例する。この比例定数は地震動加速度を重力加速度で除した値で設計震度と呼ぶ。本来動的荷重である地震力を静的な力とするために、構造物の振動特性や時間的変動を無視したことになる。普通ダムのような剛性が高く、固有周期の短い構造物に適用することが多い。

(2)修正震度法

修正震度法が震度法との違いは構造物の固有周期を算定して設計震度を設定している点である。動的応答を考慮した修正震度法とも呼ばれる。長大橋梁などのようにたわみやすい構造物によく使われる。平成2年に改訂した「道路橋示方書・V耐震設計編」は震度法と修正震度法を一つにとりまとめ、これを改めて震度法として規定した。

(3)応答変位法

応答変位法は地中に敷設された線状の構造物、つまり長大なトンネル、管路網、線路網などの耐震計算法である。震度法と修正震度法は地上構造物に有効であるが、地中構造物のように地盤の動きに構造物の動きが左右される場合は、地盤各部の相対変位に応じて構造物に応力が生じることとなる。応答変位法は表層地盤の変位を算出し、その変位を土のバネを介して、構造物に静的に作用させて、構造物の応力を求める方法である。

(4)動的解析法

震度法と修正震度法は高次モードの影響が無視できる形状単純な構造物にとって、実際の地震時応答をよく近似できるが、大規模な構造物や振動性状の複雑な構造物や重要度と公共性の高い構造物に対しては、動的解析が必要となる。昭和39年に建築学会の「高層建築技術指針」では動的設計法を発表している。とくに、非線形の復元性を示す構造物の地震応答解析は、多くの場合、動的解析によらなければ解決が得られない。動的解析法は対象とする構造物あるいは構造物と地盤をモデル化し、地震入力として地震動波形あるいは応答スペクトルを入力して解析する方法である。運動方程式の解き方法によって、応答スペクトル法と時刻歴応答解析法と周波数応答解析法に分けられる。

構造物の設計は従来より「許容応力度設計法」と「終局強度設計法」にもとづて行われている。これらの設計法は必ずしも合理的な設計法とは言えない。不合理な点を排除する

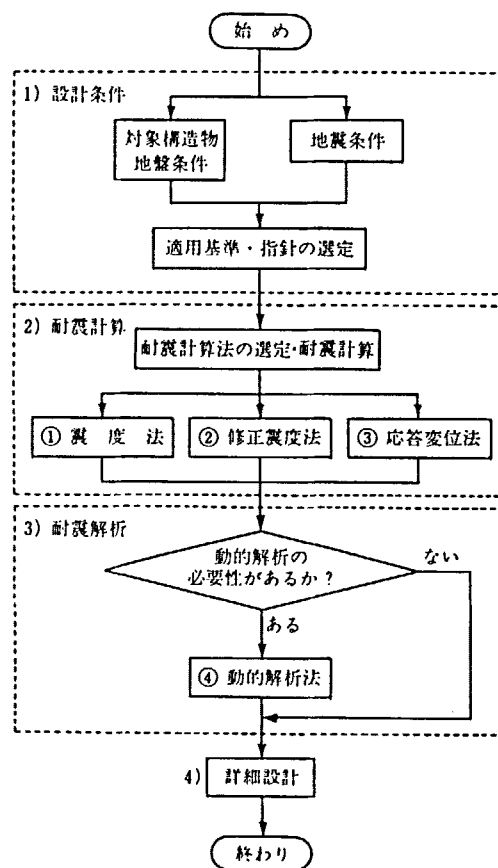


図15.1 耐震設計のフロー

ために、最近では限界状態設計法が提案されている。鉄道橋梁の設計は許容応力度設計法と限界状態設計法が併用されているが、基礎構造物の設計は許容応力度設計法で行われている。昭和55年に建築規準法施行令のうちに、限界状態設計の考え方を耐震設計に適用した。道路橋の耐震設計は原則として震度法を用いて許容応力度、許容支持力、許容変位、安全率またはこれらの組み合わせによって行うものとするが、震度法により耐震設計した鉄筋コンクリート橋脚は脆性的な破壊が生じないように、地震時保有耐力も照査するのが望ましいとしている。

15.3 地震力のとらえ方

地震力は本来動的なものであるが、“設計”という立場から言えば、動的地震力を静的に取り扱くと、構造計算に便利になるため、多くの耐震規準では震度法が使用されている。しかし、地震時の挙動を忠実にとらえるために、動力的な扱いは有効である。1980年に公布された新建築耐震規準は60m以上の建築物については、安全性を確かめるために動的解析を行うよう規定されている。道路橋耐震指針も地震時の挙動が複雑な橋については、動的解析により安全性を照査することが望ましいとしている。

橋の耐震設計は、地震に対する道路交通の安全性の確保を目的とし、比較的生じる可能性の高い中規模程度の地震に対しては、構造物としての橋の健全性が損なわれず、大正12年の関東地震(地盤上：294gal～392gal)のような稀に起こる大きな地震に対しても落橋などが生じないことを目標として行う。道路橋示方書は標準設計水平震度を0.2(196gal)としているが、地域別補正係数、地盤別補正係数、重要度別補正係数、固有周期別補正係数を考慮すると、設計水平震度の値は大体0.1(98gal)～0.3(294gal)となる。地震時保有耐力の

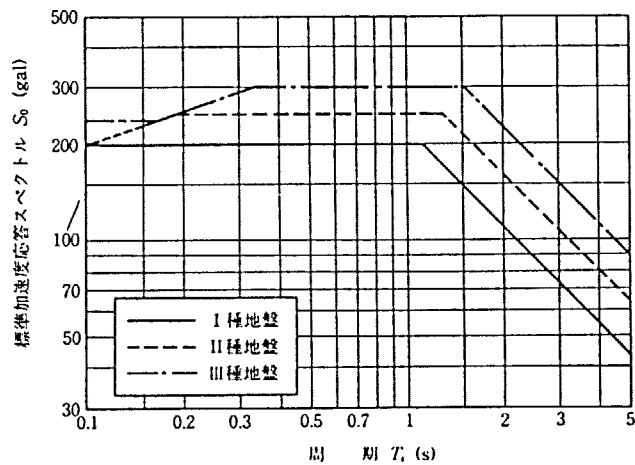


図15.2 標準加速度スペクトル(h=0.05)

照査に用いる時、震動の強さとして関東地震級のものを想定することとしている。したがって、294gal～392galの地震動に対して、橋が弾性挙動をすれば、その橋に生じる加速度は概ね980gal程度となることから、地震時保有水平耐力の照査に用いる設計水平震度の標準値を1.0としたものである。地震時保有耐力の照査に用いる設計水平震度の値は大体0.3(294gal)～1.0(980gal)となる。動的解析を行うとき、応答スペクトル法では図15.2に示すような標準加速度応答スペクトルを用いることとし、時刻履歴応答解析法に用いる地震入力としては、架橋地点と良く似た地形、地盤条件の地点で観測された強震記録と、架橋地点以外の地表面で観測された強震記録を一度その地点の基盤面の地震動に変換し、これに改めて架橋地点の地盤の影響を加味して算出した加速度波形、および強震記録を、その加速度応答スペクトルが応答スペ

クトル法に用いる加速度応答スペクトルSに適合するように調整した加速度波形を選定することとしている。

新耐震規準法の耐震設計の目標は、建物が耐用年限中に数回受けるであろう中程度の強さの地震に対しては、なんら建物の機能が阻害されることなく、また被害は軽微で、修復が容易であることと、建物が耐用年限中に一回遭うか遭わないかという程度に稀なきわめて強い地震に対しては、構造的にかなりの被害を受けてもやむ得ないが、倒壊(崩壊)はしないことである。新耐震規準では、従来の静的震度に代わりに、各階の地震層せん断力係数を求める方法を定めている。地震の大きさに関係をもつ標準せん断力係数に関しては、一次設計のとき、比較的頻度の高い中程度地震(最大加速度:80gal~120gal,最大速度:15kine~20kine)に対応して、0.2とし、二次設計のとき、大地震(最大加速度:300gal~500gal,最大速度:40kine~50kine)に対応して、1.0としている。動的耐震設計でも、最大加速度

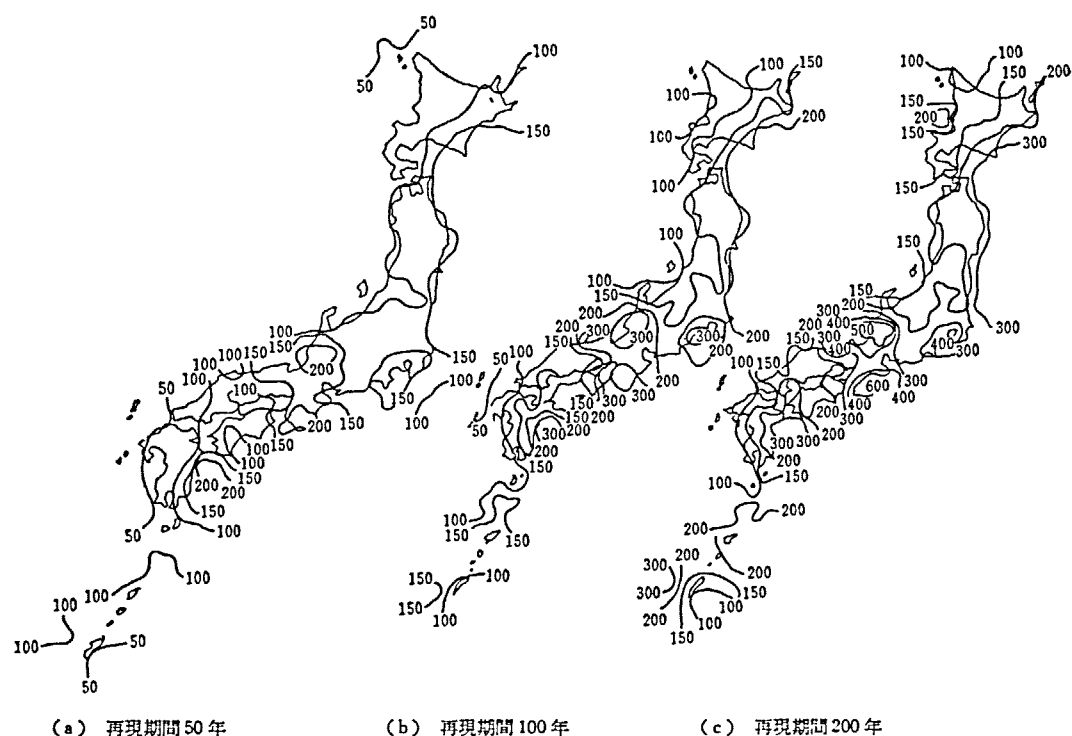


図10.3 固有周期 $T_g=0.3s$ の標準地盤上における最大加速度期待値の地域分布

200gal~250gal程度の中地震に対しては弾性解析、稀に起こるかもしれない大地震(350gal~500gal)に対して弾塑性解析を行っている。入力地震波としては、過去に得られた強震記録とその振幅、周期特性を修正したものおよび特定の模擬地震動を使うとしている。

図10.3は固有周期 $T_g=0.3s$ の標準地盤上における最大加速度期待値の地域分布を示している¹⁴⁾。図を見ると、建物耐用年限中に中程度地震は何回起こっても不思議ではない、しかし、耐震規準が言っている大地震は再現期限が大体100年~200年ぐらいであるが、今回のように設計での想定震動を上回る再現期限1000年ぐらいの地震動を発生した場合には、従来の設計法で設計された構造物はかなり被害を受けることとなった。これはある地域に言えば、きわめて稀な地震であるが、日本全国を考えると、発生確率が高くなることは言う

までもない。かかる課題をどう従来の耐震設計規準へ取り込むかさらに検討する必要がある。

15.4 復旧の耐震設計方針と今後の課題

今回の地震での構造物の破壊メカニズムはまだ不明であるが、復旧に当たっては、各構造部材の強度を向上させると同時に、変形性能を高めて構造物全体系として地震に耐える構造を目指すべきである。つまり、構造物の終極耐力や変形性能についても注意をはらうことが必要である。とくに、道路橋にとっては、(a)橋全体系のねばりを向上させるために、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、(b)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動的解析によって照査すること、(c)高架橋のように橋梁が連担する場合には、免震支承を用いた弾性固定方式により地震力を分散させる構造系を採用すること、(d)鉄筋コンクリート橋脚では、所要じん性率を確保するために十分な帯鉄筋を配置し、かつ軸方向鉄筋の段落としは原則として行わないこと、(e)鋼製橋脚では、必要であれば、中詰めコンクリートを充填するなどにより、必要なじん性を確保すること、(f)基礎工と上部工の接点の接合の方法に工夫する必要なことなどについては留意すべきである⁶⁾。

今後の課題としては以下のように考えられる。

- (1)再現期間が長い地震外力をどのような考え方で評価し、耐震設計・耐震補強などへ適用していくか。
- (2)新設の構造物に対する耐震設計では、限界状態設計法を導入することと不整形地盤に対する設計法。
- (3)上下動が構造物の応答に対する影響はさらに究明する必要がある。また、耐震設計への取り込み方を検討する必要がある。
- (4)構造物の弱い部分の設計に工夫し、施工のバラツキを考慮して、構造全体系の耐震性を向上させる。
- (5)構造物の動的実験を行って、各種構造物の動的破壊メカニズムを解明するべきである。動的解析設計法をさらに発展させる必要がある。
- (6)鉄道線路を支える構造物の種類が多く、耐震設計法もその精度が様々である。この精度の整合と向上を検討すべきである。
- (7)免震・制震構造は効果があったと考えられる。今後さらに検討する必要がある。

さらに、都市内には家屋、建築物、橋梁などの土木施設も含めて、現在の耐震規準の施行以前に建造された構造物が数多く存在している。建物では、いわゆる”既存不適格”の構造物である。今回の地震で劣化、損傷している構造物も数多く存在すると考えられる。これらについても、補修、補強、診断方法について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 福岡正己：新しい耐震設計入門、近代図書、1983年
- 2) 岩下恒雄：建築耐震・耐風工学、オーム社、1984年
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、1990年
- 4) 日本道路協会：道路震災対策便覧、1988年
- 5) 建設省道路局：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様、1995年
- 6) 鹿島建設：耐震設計法／限界状態設計法、鹿島出版会、1993年
- 7) 矢作 枢など：橋梁下部構造物の耐震設計、山海堂、1994年
- 8) 川島一彦など：道路橋の耐震設計計算例、山海堂、1994年
- 9) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能、1990年
- 10) 秋山 宏：建築物の耐震極限設計、東京大学出版会、1987年
- 11) 梅村 魁：動的耐震設計法、技報堂出版、1982年
- 12) 梅村 魁：耐震設計の基礎、オーム社、1984年
- 13) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)・同解説、1988
- 14) 尾崎昌凡など：日本付近における最大地震動の地域分布に関する研究、日米天然会議風耐震構造専門部会第9回合同部会、1977年