



録や最近の活断層調査結果をもとに選定する。次にその破壊メカニズムを想定して、地震動を適切に評価する。

評価手法は大別して、経験的手法、半経験的手法、理論的手法の3種類があるが、それぞれの長所や短所などの特徴を十分に理解して適用する必要がある。現状での周期範囲の目安は、経験的手法はせいぜい5秒以下、理論的手法は1~2秒以上、半経験的手法はそれらの中間的な広い範囲で適用できるが、想定断層位置で発生した中小地震の観測波形を必要とする。

地表に活断層が確認できない地域でも、伏在断層による直下地震の可能性は否定できないため、上記3)の下限が必要となる。この下限は、気象庁震度階に換算すると硬質地盤上で震度6弱相当と考えられる。震度6弱といえば、立っていることが困難になり、地割れや山崩れなどが発生する地震動強さであり、重要度の低い構造物は損傷しても、重要度の高い構造物には機能維持が要求されるであろう。

このように、レベル2地震動は自然的ないし物理的要因をもとに定め、構造物の重要度は保有すべき耐震性能に反映させるという考え方は、最近の性能設計の流れとも整合している。

### 問われる技術力

従来の耐震設計では、地震荷重は設計震度で表現さ

れ、これを設定するのに専門的な技術や知識は不要であった。建設地点周辺での活断層の分布状況や大地震の発生履歴、あるいは断層破壊過程や構造物の地震応答特性などを知らなくても、設計基準書(マニュアル)に示された数値を機械的に拾っていけば地震荷重は自動的に求まったからである。そのため地震荷重の設定は技術の本質とは無縁となり、地震という自然現象や地震荷重の工学的意味を理解しないでも、耐震設計が行えるという奇妙な風潮が広がった。

しかし本来、耐震設計は対象構造物に危害を及ぼす可能性のある地震を想定して行うものであり、設計地震動の設定は技術的な責任と醍醐味を伴う、設計作業の中で最も重要な部分である。設計者が、この責任と醍醐味を放棄し、マニュアルから黙々と地震荷重を拾い出し設計作業を繰り返しているだけでは、活気に溢れた耐震技術の発展は望めない。従来のように権威者の判断に全面的に頼るのでなく、設計者自身が自己の責任のもとで独自の技術力を最大限に活かして、より合理的な設計地震動を設定しようとする努力が、今後は求められるであろう。

### 引用資料

- 1) 地盤工学会：地震動，ジオテクノート，1999
- 2) 太田裕・鏡味洋史：耐震工学上考慮すべき地震波の周期の上限と振幅の下限，日本建築学会論文報告集No.249，pp.53-60，1976

## 3. われわれは何を生み出したのか

### (2) 性能設計法および耐震設計基準

西村昭彦

Akihiko NISHIMURA

フェロー会員

(財) 鉄道総合技術研究所

#### それは兵庫県南部地震から始まった

兵庫県南部地震により土木構造物が大被害を受けたことは記憶に新しいところである。この地震が耐震設計に携わる人々に与えた衝撃は大きく、その見直しが地震直後から関係機関で始まった。土木学会では「土木構造物の耐震設計に関する基本問題懇談会」を組織して検討を重ね、その成果は「土木構造物の耐震基準等に関する提言」としてまとめられ、1995年5月および1996年1月の2回にわたって発表された。

これを受け関係各機関の関係者のみでなく、大学や民間の研究者でも地震動、構造物の被害解析や耐震設計の研究が大いに盛り上がりを見せ、耐震設計に関する技術は格段に進歩した。そして兵庫県南部地震から5年近く

が経過した現在、各機関の新しい基準もほぼ策定された。その中にはこれまでの設計法と異なる新しい耐震設計法が導入された基準もある。すなわち性能設計の本格的な導入である。そしてこの方法はISOなどの基準と相まってますます盛んになろうとしている。まさに新しい耐震設計は兵庫県南部地震から始まったといえる。

#### なぜ被害は生じ、新しい耐震設計が必要となったか

過去にも被害を伴う地震は多く生じた。震度法が提案される契機となった濃尾地震(1891年)、土木構造物に本格的に震度法が採用された関東地震(1923年)をはじめとしてそれ以降も北丹後地震(1927年)、鳥取地震(1943年)、東南海地震(1944年)、南海地震(1946年)

などが数年おきに生じている。しかし福井地震（1948年）以降1000人以上の人的被害を伴う地震は発生しなかった。新潟地震（1964年）は砂地盤の液化化で注目されたが人的被害はわずかである。また、構造物も大被害を生じなかった。この間、各地震被害に基づき、耐震設計法も基本は震度法であるが改良が重ねられたことから、耐震設計が進歩したためもう大きな被害は生じないのではないかと考えられるようになった。現在では福井地震は兵庫県南部地震に勝るとも劣らない強い地震動を伴ったと推定されているが、地震記録が無いためあまり耐震設計に寄与しなかった。また、設計水平震度を0.6程度にすべき（一般には0.2が基本）という意見もあったが、設計法が現在のように発達しておらず、このような大きな設計震度には対応できず見送られたようである。しかし、安全神話は兵庫県南部地震によりそれが幻想であることを思い知らされた。

では、震度法のどこがまずかったのか、震度法というより許容応力度設計法の欠陥だといえるが、この設計法では基本的に重量に0.2ないし0.3（これを設計水平震度という、地盤や構造物特性によってこの値は変化する）を乗じて得た力を水平に作用させたときに、構造物に生じる曲げやせん断力による部材応力度が許容応力度を上回らないように断面諸元を決定する。この許容応力度は構造物が降伏しないように少し余裕を持って定めてあり、降伏以降の構造物の挙動は一般に検討しない。しかし、大きな地震動が生ずると構造物は降伏し、非線形の領域に入る。このことはすでに多くの設計者が知っていたが、鉄筋コンクリートで作られた構造物は降伏以降も靱性があるから大丈夫と考えていた。降伏点以降は構造物の挙動は非線形の性状を示すが、この計算は複雑でコンピュータおよび解析プログラムがなければ非常に困難であり、非線形性の設定も実験等から定める必要があるが、データの蓄積も十分でなかったため、検討を行わなかった面もある。しかし、福井地震以降大きな被害を生じる地震がなく、また大きな地震記録がなかったこともその進歩を妨げた要因の1つである。さらに、設計震度そのものがやや曖昧で、地震動の加速度と直接結びついていないため、地震動の記録が採れてもそれを設計にすぐに反映させられなかった。

以上の事項や兵庫県南部地震の被害から、耐震設計にあたっては、内陸型地震によって発生する大地震動を考慮すること、部材の安全性評価においては破壊モードを考慮すること（主要な部材にはせん断破壊を生じさせない）、応答値の算定にあたっては表層地盤の動的性質を考慮することおよび構造物の動的解析を行うこと、また、内陸型地震動を考慮すると地震動が飛躍的に大きくなるが、その地震の再現期間が数百年以上の長期にわたることを考慮すると、安全性の照査においては構造物の

持つ変形性能（耐震性能）を評価し、損傷は許容するが破壊しないことを基本とするのが合理的であることが容易に推定される。

言い換えれば、土木技術者それも耐震設計担当者にのみ通ずる言葉で表現していたもの（設計震度、許容応力度）を、一般にも通用する言葉で表現する（地震動、構造物の破壊の限界等）ということである。そして現在の技術はこれを可能にした。これは地震観測や断層の破壊メカニズム等の研究、部材および地震の非線形性の研究、解析技術の進展に負うところが大きい。またコンピュータの発達も大いにこれを助けたといえる。

### 性能設計に基づく耐震設計の考え方

性能設計は各種の定義がなされているが、ここでは構造物に必要な性能（耐震設計の場合は耐震性能）を明示してそれを実現する設計法とする。そしてこれに必要な条件は定義する性能および照査手法が合理的であり、今後の技術の発展に寄与できる、すなわち設計手法に対する自由度が大きいことであろう。また、耐震性能の表現はわかりやすい必要もある。この観点から制定された新しい耐震設計法の考え方を概説する。

性能設計に基づく耐震設計では、まず目標とする構造物の損傷程度（耐震性能）を定める必要がある。耐震性能は損傷制御の観点からそれを構成する部材（あるいは基礎）の損傷を考慮して、地震後に必要となる補修や補強の程度から定められている。そのグレードは3段階で、(1)地震後にも補修しないで機能を維持できる、(2)地震後に補修を必要とするが、早期に機能が回復できる、(3)地震によって構造物全体が崩壊しないとなっている。

そして、この性能を満足することを照査するための地震動は、構造物の供用期間内に数回程度発生する確率を有する地震動（L1地震動）、と陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震や内陸地震による地震動のように供用期間中に発生する確率が低いが大規模な地震動（L2地震動）の2つである。そして、L1地震動では(1)の性能を、L2地震動では構造物の重要度に応じて(2)ないしは(3)の性能を満足するように設計する。

また、地震動によって生じる構造物の応答値は動的解析を用いる。この場合それを構成する部材（あるいは基礎）の非線形性を考慮する。そして、動的解析の手法は性能設計の精神に基づいて、その基本の考え方が示されており、各種の手法を用いることが可能となっている。その基本とは、(1) FEM等に代表される地盤と構造物を一体としてモデル化し、基礎地震動を用いて動的解析を行う方法、(2)基礎を支持ばねに置換したモデルに地表面の地震動を作用させて動的解析を行う方法、および(3)非線形応答スペクトルを用いる簡易な方法である。





以上述べた設計法の基本的な考え方は先に述べた土木学会の「土木建造物の耐震基準等に関する提言」に沿ったものといえる。この設計法により建造物の地震時の安全性はかなり明確になったといえるが、地震動、建造物

の塑性領域における挙動あるいは建造物を支える土の動的性状にはまだ未解明な部分もあり、今後一層の努力が必要である。

### 3. われわれは何を生み出したのか (3) 道路施設の耐震化対策

保田雅彦 Masahiko YASUDA

フェロー会員 工博 建設省土木研究所 耐震技術研究センター長

#### 耐震性確保に向けた新しい取り組み

阪神淡路大震災では、想像を超える強い地震動により、橋梁・盛土・擁壁等の道路施設に甚大な被害が生じた。道路施設被害等に起因する道路網の寸断は、短期的には緊急活動や復旧活動に、中長期的には地域経済や国民生活に大きな影響を及ぼした。建設省ではこれを教訓として、地震防災対策特別措置法（平成7年7月施行）に基づく緊急輸送道路ネットワーク計画の策定や、道路橋を対象とした震災対策緊急橋梁補強事業の実施等、安全で安心な国土構造を創出するための道路震災対策を推進している。本稿では、道路施設の耐震性確保に向けた新しい取り組みの一例として、道路網のリスクマネジメントの基本方針、道路施設の耐震技術基準および耐震補強技術の動向を紹介する。

#### 道路網としての震災対策

道路網の震災対策は、想定される地震被害を施設の耐震化対策により最小化するリスクマネジメント（震災予防計画）と、危機的状況下での緊急活動を効率化することにより震災の影響を抑止するクライシスマネジメント（危機管理計画）に分類できる。リスクマネジメントにおいては、道路網の構成要素である各種施設の耐震化対

策、および、道路網や道路区間としての耐震性評価が重要である。ここに各種施設の耐震化対策は、適切な耐震技術基準に基づく新設建造物の設計施工と、既設建造物の耐震補強により行う。

一方、道路網や道路区間としての耐震性評価に際しては、地震被害がもたらす機能支障を抑制する観点から、広域幹線道路、緊急輸送道路、一般道路等の属性に応じて、地震時に期待する耐震性能を明確にしておく必要がある（図-1）。広域幹線道路と緊急輸送道路では、道路施設の供用期間中に1~2度発生するような地震に対して通行支障を生ずることなく、また確率は低いが大きな強度をもつ地震動に対しては限定された損傷にとどめ、応急対策により緊急車両が通行できる程度の耐震性能が求められる。

#### 道路橋・道路土建造物に対する耐震技術基準の開発

兵庫県南部地震による被害の経験を踏まえ、道路施設の耐震技術基準が順次改訂されてきた。橋、高架の道路の技術基準である道路橋示方書は1996年11月に、道路盛土、擁壁等の土建造物の技術指針である道路土工指針は1999年3月に改訂された。

兵庫県南部地震では、世界的に見ても経験したことがない大きな影響を建造物に与える地震動が観測されるとともに、橋梁では特に古い時代に建造されたものを中心に橋桁の落下を始め、多数の橋梁で甚大な被害が発生した。道路橋示方書は、被害原因の解明のために建設省により設置された「兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会」からの提言、土木学会による土木建造物の耐震基準等に関する提言を基本として改訂された。道路橋示方書の改訂における最も重要な点は、新たな設計地震動の導入と目標耐震性能を明確化した性能明示型の耐震設計法の導入、および 地震時保有水平耐力法の導入、

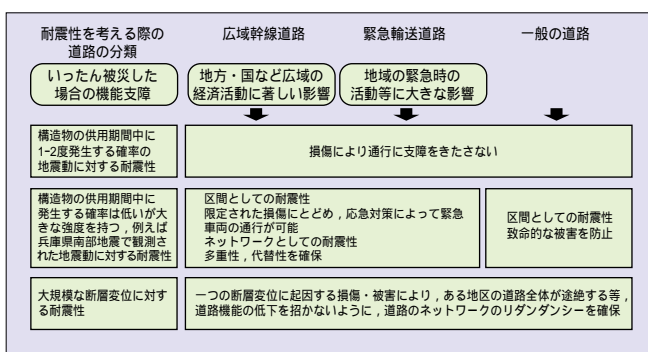


図-1 道路の属性に応じた耐震性確保の考え方