

I - 1 土木構造物の耐震設計の基本的枠組み

1.1 耐震設計法の変遷と兵庫県南部地震の教訓

今回の兵庫県南部地震により、日本の高度経済成長のシンボルともいえるべき高速道路や新幹線、さらに地下鉄や公共建物などの都市施設が大きく崩壊した。世界でも最大の地震力を考慮して建設された、近代的な耐震建造物のこのような大被害は、直下型地震の破壊エネルギーのすさまじさを示している。耐震構造設計の立場からの被害の教訓を以下のとおりである。

震度7と判定された阪神地域周辺においては、過去に例を見ない衝撃的かつ大きな地震動が多数記録された。神戸海洋気象台での記録を解析したところ、崩壊した10階以下の建物やピルツ高架橋には、設計当時に考慮していた地震力の約10倍の力が作用した可能性のあることが判明した[1]。世界の記録の中でも、最も破壊力のある大きなものの一つであると言える。

日本における1970年以前の耐震設計は、構造物の重量の2割を水平方向に作用させて、構造物の強度だけを保証する「ねばり」のないものであった。このため、68年の十勝沖地震で、鉄筋コンクリートの柱が極めてもろく崩れる「せん断破壊」現象が数多く見られた。71年の米国のサンフェルナンド地震でも同様の破壊が起こった。

70年代前半にはこの原因調査が数多く行われ、その結果から構造物の強度を上回る地震力に対しても、崩壊を防ぐためには、構造物に「ねばりと」と「耐力」を持たせなければならないとの結論になり、80年代以降の基準では、多くの工夫が盛り込まれた。

今回の地震で大きく崩壊した各種構造物を調査したところ、その主な原因は、やはり、鉄筋コンクリート柱の「せん断破壊」や鋼製橋脚の「座屈崩壊」など、極めて脆い破壊形式であった。大被害を受けた構造物のほとんどは70年以前に建設されている。68年や71年の教訓がいまだに生かされていないのである。

耐震設計基準は、約10年毎に、最新の知見を取り込んで改訂されてきている。1981年の建築の新耐震基準や1990年の道路橋示方書耐震設計編では、構造物の重量そのもの(10割)を水平方向に作用させて、「ねばり」の照査を行うよう新しく義務づけている。これらの最新の基準に基づいて設計された構造物の被害は比較的低いものであった。

最新の基準が、今後の大地震に対して十分なものであるか、については、土木学会、日本建築学会をはじめ、関係諸機関で現在活発に討議されている。その主な論点は、設計対象とする直下型あるいは海洋型巨大地震動をどのように設定すべきか？、特に直下型地震では活断層の情報をいかに設計に取り込むべきか？、各種の構造物の用途によって安全性に差があるべきか？、耐震・免震・制震などの新しい技術をいかに構造設計に取り入れるべきか？等である。設計対象とする地震が稀に起こる不確定な自然現象であり、様々な考え方が存在し得る。しかし

ながら、今回の地震動が過去の経験をはるかに上回るものであったこと、個々の構造物の重要性が格段に高くなっていることを考えれば、構造物の耐震安全性をより一段と高める新しい基準の設定を期待したい。特に建設コストを大きく上げることなく、より大きな地震にも耐えるための技術開発を進めなければならない。

一方、1970年代以前の古い構造物の耐震補強は緊急的に実施する必要がある。古い構造物の脆弱性を知りながら、「なぜ補強が遅れていたのか」という疑問が起こる。耐震補強は、近年カリフォルニア州で盛んに行われ、日本でも徐々にだが実施されて来た。補強のペースが遅かった理由としては、日本の構造物の強度が世界最大で、米国の2~3倍もあり、これを上回る地震の来襲の確率は、低いだろうとの油断があった。しかし、耐震設計の歴史と今回の大被害を重ねてみる時、一刻の猶予も許されない。

現地を訪れた米国の地震工学者たちは、今回の直下型地震をサンフランシスコやロスアンゼルスにおける最悪のシナリオとして受けとめている。日本の首都圏や、その他の都市域においても、耐震診断や耐震補強を緊急に実施すべきである。将来の安全性を「担保」するためには、経済的にも十分有効な積極投資と考えなければならない。次の地震と耐震対策との時間の戦いが始まっていると言える。

1.2 耐震基準に関する土木学会の提言

1.2.1 2段階設計法

土木学会の耐震基準等検討委員会による第一次および第二次提言[2][3]では、土木構造物の耐震性能の照査で考慮する地震動として、構造物の供用期間内に1~2度発生する確率を有する地震動、及び陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震や直下型地震による地震動のように供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動、の2段階を考えることが示されてる。この考え方は、現行の耐震設計の一部では既に取り入れられており、それぞれ、レベル1地震動、レベル2地震動として位置づけられている。これらの地震動の耐震設計における目的と性格は以下の通りである。

(1) レベル1地震動は、原則として、それが作用しても構造物が損傷しないことを要求する水準を示す。

(2) レベル2地震動は、極めて稀であるが、非常に強い地震動を定式化したもので、構造物が損傷を受けることを考慮して、その損傷過程にまで立ち入って、構造物の耐震性能を照査する水準を示す。

レベル1地震動は、弾性設計手法と組み合わせて用いられており、静的荷重または弾性動的解析用の地震動として設定されている。土木構造物は多種・多様であり、構造種別ごとに、その特性を反映した設計法の体系とノウハウが、多くの経験の蓄積の上に発達してきており、これを尊重するのが適切である。

一方、レベル2地震動を現行の設計体系において考慮する場合には、標準的地盤における弾性応答で1Gの設計地震動を考慮するなどの形で扱われているが、兵庫県南部地震で経験された強い地震動から、震源断層近傍域で発生する強地震動を対象としたレベル2地震動の再評価が要請されている。

1.2.2 レベル2地震動の考え方

レベル2地震動は以下の考え方に従って設定する。

(1) 内陸活断層によるレベル2地震動は、活断層に関する地質学的情報、地殻変動に関する測地学的情報、地震活動に関する地震学的情報を総合的に考慮して、地域ごとに脅威となる活断層を同定するとともに、その震源メカニズムを想定することにより定めることを基本とする。このため、その工学的方法の確立にむけて努力が傾注されるべきである。

(2) 兵庫県南部地震を契機として、わが国では現在、上記の地球科学的研究が勢力的に進められている。しかし、内陸活断層による地震の再現期間、その規模や地震動の特性の予測の精度は、耐震設計の基礎とするにはなお不十分なことが多い。このため、活断層の情報から直接地震動を定めることができない場合には、兵庫県南部地震などの断層近傍の強震記録をもとに震源断層の近傍で予想される標準的な地震動を作成して、レベル2地震動の基礎とする。

(3) 関東地震のような、陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震による震源域の地震動は、内陸活断層による震源断層近傍の地震動とは異なる特性を持つと予想される。この型の地震による強震記録が存在しないため、現状では地震動の特性については多くの不明な点が残されている。このため、プレート境界で発生する巨大地震による地震動に関する研究を進める必要がある。

1.2.3 レベル2地震動の表現形式

レベル2地震動は、表現形式は以下の通りとする。

(1) レベル2地震動は、基本的に損傷制御の概念に基づく耐震設計に用いられるものであるから、地震動の動的特性を端的に示す表現で示されるべきで、応答スペクトル、または時刻歴地震波形で表すのが適切である。

(2) 地震動を与える地盤レベル

1) 基盤岩における地震動：レベル2地震動は、基盤岩において設定することを基本とする。兵庫県南部地震では、地盤構造の不整形性が地震動の局所的な増幅効果に大きな影響があったこと、また表層地盤の動的な非線形特性や砂質地盤における軟化現象が地震動の増幅特性に大きな影響を与えたことなどが指摘されている。こうした現象を評価して地震動を規定するためには、ここで定義する基盤岩より上部の三次元的な地層構造の情報を考慮することが不可決であり、地形・地盤条件に関する情報の充実と研究開発の推進が急務である。

2) 工学的基盤面における地震動：工学的基盤面における地震動は、当該基盤面における地震記録の分析、上記の手法の活用および以下に述べる地表面の地震動の逆解析などにより設定する。

3) 地表面における地震動：基盤岩および工学的基盤面での観測記録が少ない現状では、それらの面での地震動を規定できない場合も多いと考えられるので、当面は強震記録の裏付けがある地表面で地震動を設定する。

1.2.4 橋梁構造物の保有すべき耐震性能と耐震設計

(1) レベル1地震動に対する耐震性能

・全ての構造物を対象とし、損傷を発生させないことを原則とする。このため地震時の動的応答が弾性限界を越えないものとする。

(2) レベル2地震動に対する耐震性能

・重要な構造物および早期復旧が必要な構造物は、損傷が発生したり、塑性変形が残留しても、地震後比較的早期に修復可能であることを原則とする。このため、構造物の最大の地震応答が許容される塑性変形もしくは極限耐力の限界を越えないものとする。

・上記以外の構造物は損傷して修復不可能となっても、構造物全体系が崩壊しないことを原則とする。このため、地震応答が終局の変形を越えないものとする。

・上記で言う構造物の重要度は一次提言で示したように、1)構造物が損傷を受けた場合に人命・生存に与える影響の度合い、2)避難・救援・救急活動と二次災害活動に与える度合い、3)地域の生活機能と経済活動に与える影響の度合い、を考慮して決定される。

(3) 地上構造物の耐震設計における留意事項と研究・開発課題

・レベル1地震動に対する構造物の動的応答を評価するに当たっては、線形応答スペクトルや時刻歴地震波形を用いた弾性解析を行い、また必要に応じて、上下動を含めた三次元的な影響を検討することが望ましい。

・レベル2地震動に対する構造物の動的応答の評価に当たっては、弾塑性時刻歴応答解析を実施するのが望ましいが、等価線形化解析法、許容塑性率に基づく設計スペクトルの活用など、より簡便な方法を用いることも出来る。

・不静定次数の低い構造物については、特にレベル2地震動に対する保有耐力の確認を厳格に実施する必要がある。このため、各種の弾塑性解析手法の精度を載荷実験の結果との比較などにより検討しておくのが望ましい。

・不静定次数の高い構造物については、鋼材あるいはコンクリート構造物を問わず損傷過程を考慮した終局変形性能の解析を行うのが望ましい。

・鋼構造物については、一部の構造物を除いて許容応力度法のみでの設計で、保有耐力や変形性能の照査が実施されていない。今後の耐震設計に当たっては、鋼材構造物であってもこれらの照査を実施すべきである。特に変形性能を増大させるための断面構成あるいは、断面内の組み合わせ応力の制限などについての研究開発を進める必要がある。

・周期の短い構造物の地震応答は、基礎-地盤系の非線形領域の動的相互作用の影響を大きく受けるため、この影響を設計に取り入れるための研究を推進すべきである。このための簡便な手法として、動的相互作用の効果を全体構造系の長周期化と減衰定数の増大として耐震設計に取り入れられるような手法が考えられる。

・構造物の耐震性を向上させるために免震・制震技術など新しい技術を積極的に導入すべきである。免震構造は比較的短周期構造物の変形性能と減衰性の増大を可能とし、エネルギー吸収機構を含む制震構造は長周期構造物の減衰性の増大を可能とする。

参考文献

- [1] H. Iemura; Extremely High Damage Potential of Field Earthquake Ground Motion - Comparison of Hyogoken Nanbu and Northridge Earthquake -, Proc. of the Japan Academy, Vol. 71, Ser. B, No. 7 (1995)
- [2] 土木学会耐震基準等基本問題検討会議：第一次提言、平成7月5月
- [3] 土木学会耐震基準等基本問題検討会議：第二次提言、平成8年1月