

兵庫県南部地震の教訓を耐震設計に生かすために

(財) 鉄道総合技術研究所
構造物技術開発事業部
担当部長 西村 昭彦

1. はじめに

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、社会・経済の中核である近畿圏の大都市を直撃し、未曾有の大被害を引き起こした。鉄道構造物においても新幹線の高架橋の落橋をはじめとして地下鉄構造物の崩壊など甚大な被害を受け、自然災害の脅威を改めて思い起こさせると同時に、耐震構造のあり方についての見直しの必要性を認識させる結果となった。

鉄道構造物の耐震設計法はこれまで主として震度法が用いられてきた。これは構造物の重量に設計震度という係数を乗じて求めた慣性力を水平方向に静的に作用させて構造物の安定や部材の安全性を照査する方法であり、この照査には許容応力度法が用いられた。

鉄道構造物の耐震設計にこの震度法が導入されたのは昭和初期であり、耐震設計法はその後構造物が被害を受ける毎に改良されてきたが、基本は変わらなかった。この設計法に用いる設計水平震度は0.2程度の値が用いられてきたが、これは許容応力度法を前提としているため、構造系や部材の靱性および設計上の安全率等により大地震にも耐えられると考えられていた。

鉄道橋梁では新潟地震で落橋が発生して以来今回の兵庫県南部地震まで構造物の崩壊などの大被害は発生していないことから、震度法を用いて設計された橋梁は、過去の大規模な地震によく耐えてきたといえる。しかし、兵庫県南部地震は構造物に甚大な被害をもたらした。耐震設計法がいまだ完全でないことを教えてくれた。

現在、各機関において被害原因の究明、新しい耐震設計法の作成など兵庫県南部地震に対する精力的な対応が行われている。鉄道関係でも新しい耐震設計法に取り組んでいるのでその概要を私見も混じえて紹介する。

2. 今後の耐震設計法

兵庫県南部地震により地震力、構造計算法、安全性の照査法の耐震設計を構成する3要素の見直しが迫られている。今後の耐震設計法では、設計で想定すべき地震動、表層地盤の影響、震度法に代わる設計法、確保すべき耐震性能等を検討する。

2.1 鉄道構造物が目標とすべき耐震性能

今後の耐震設計では鉄道構造物が保有すべき耐震性能を明確に示すこととする。どの程度の地震動に対してどの程度の被害を生じるか、限界状態をどこに設定するか、列車の走行安全性はどうかなどについて示さなければならない。すなわち、これらは構造物の重要度および耐震設計において想定する地震動の強度あるいは地形・地質等の地盤条件を総合的に考慮して決定されるものである。また鉄道構造物の重要度は、構造物の損傷度が人命に与える影響の度合い、社会や周辺等への影響度、列車の運行速度や列車本数、被害が生じた場合の復旧の難易度等を考慮して決定する。

これらを考慮すると鉄道構造物の耐震性能は例えば次のようになる。

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、地震後早期に修復可能であることを原則とする。このため、最大の地震応答が許容される塑性変形もしくは許容される耐力の限界を超えないことを目標とする。それ以外の構造物は損傷して早期の修復が不可能となっても、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変形もしくは終局耐力を越えないことを目標とする。

2.2 新しい耐震設計法

耐震設計法については以下に示す課題を検討する。なお、この中にはまだ解析に用いる手法が完全には確立されていないものもあり、すべての項目に満足できる解答が得られるとは考えていないが、現在学識経験者等からなる委員会を設けて検討しており、できるだけその成果を取り込みたい。

①設計計画を重視した設計法

構造物が耐震的に優れた性能を持つための重要な要素の1つとして、地形、地質の特徴を考慮した構造形式の選定がある。軟弱地盤では過去の地震でも、多くの構造物が沈下や傾斜、大きな水平移動などの被害を生じている。また近年の研究によれば表層地盤の不整形性が地震動の増幅に大きな影響を及ぼすことも指摘されている。そこで変形を生じやすい軟弱地盤では相対変位が生じないような構造としたり、上部工が地盤変位の影響を受けにくい構造とする、また、不整形地盤において複数の橋脚が存在する場合は、各橋脚の剛性の配分に注意するなど構造計画においての配慮が重要であることを明確にし、全体系で解析するなどの設計法の必要性を記述する。

②設計に考慮する地震動の検討

兵庫県南部地震においては非常に大きな加速度が観測されたが、過去の地震においても兵庫県南部地震を上回る地震動が記録されている。したがって、過去の地震波形記録を基に、断層解析などを参考にして耐震設計に用いる地震動を定める。

③地盤の評価法の検討

構造物に作用する地震動は表層地盤の特性および地形の影響を強く受ける。そこで設計では設計基盤面での地震動を与え、地盤条件に応じ地震応答解析を行って、構造物に入力する地震動を決定する。一方、兵庫県南部地震でも液状化に伴う地盤の側方流動で基礎が被害を受けておりこれに対する検討を行う。

④耐震設計法の検討

構造物の耐震性能を評価するには精度のよい構造物の挙動の算定法が必要である。そこで、耐震設計法はこれまでの静的な方法から動的解析を主体とする方法とする。

兵庫県南部地震では橋梁ばかりでなく開削トンネルも大きな被害を受けたが、その耐震設計法は応答変位法を用いるのがよいと考えられ、その適用について検討する。

⑤部材の抵抗特性の検討

兵庫県南部地震の被害解析等から、部材はせん断破壊先行型を避けるべきであることが判明した。部材は構造物の重要度を考慮して、その保有すべき耐震性能あるいはその被害程度（靱性率）を決定すべきであり、その方法を検討する。また耐震性能のさらなる向上も図るための方策についても検討を行う。

⑥免震・制振構造の検討

これまで鉄道は免震構造についてあまり採用しなかった。これは、免震構造が沓の変形で地震エネルギーを吸収する方式が主体であったため、桁の変位が大きくなり列車の走行安全性が危惧

されたためである。しかし変形に配慮した構造も考えられることから、免震構造の導入についても検討する。

2.3 耐震設計法の難易度と設計技術者

設計法は、それを使う実務者にとって、明解でわかりやすいものとするのが重要であり、できるだけ簡易な方法とするとともに、条文も平易に記述することが理想であるが、規定を確定的に記述すると、設計技術者の創造力を奪う可能性がある。したがって今後は設計法のメニューを示し、設計技術者が自由裁量できる範囲を多くしたい。またコンピューターが発達した現在、手法をいたずらに易しくするように努力するのではなく、多少複雑でも、より精度よく構造物の挙動を現せる手法を検討し、採用したいと考えている。そのためには設計ツールの開発が必要で、設計基準を作成する機関が開発するのは当然であるが、民間の力もおおいに発揮されるべきである。したがって、今後は設計法の多様化とツールの開発状況等により設計技術者によって設計に差がでることも考えられ、設計技術者の努力も必要となる。さらに、コンサルタント間の競争も始まり、設計レベルの向上も図れると考えている。

3. 施工と維持管理

構造物が耐震性能を確保するためには、設計だけでなく良好な施工が必要である。したがって、設計上要求される材料の品質や強度を確保すべき入念な施工がなされるべきである。とくに、兵庫県南部地震の際に指摘された事項例えばコンクリートの打ち継ぎ目などの施工には注意を払うべきであり、施工会社の技術向上も必要となろう。

また、施工には、材料・気象条件・作業条件等によりある程度ばらつきは避けられないが、高品質の構造物を確保するため、施工性にも十分配慮して材料の選定や構造系式の選定など、施工を意識した設計を行うことも重要である。

さらに、完成後も設計時の耐震性能をできるだけ確保するため、材料の劣化等の状況を把握するための必要な点検・検査と、機能等が低下したとき、時期を逸しない所要の補修等を行うことも重要であり、その方策あるいは体制についても検討する必要がある。

4. 耐震補強

阪神・淡路大震災の被害の特徴は、高架橋の柱、開削トンネルの中柱等のコンクリート構造物が、激しい地震動によりせん断破壊を起こし、高架橋の落橋や開削トンネル駅の崩壊に到らしめたものであった。また土構造物も過去の地震と同様に多くの被害を受けた。

兵庫県南部地震程度の地震は日本全国どこでも起こり得る可能性があるといわれており、古い構造物の多い鉄道構造物は被害を受ける可能性が高く、今後の耐震補強が重要な問題となる。したがって耐震性能の診断手法、経済的、かつ効率的な耐震補強法の開発が必要となる。補強工事等が困難な構造物等については、被害を受ける可能性を考慮して、地震後の早期復旧体制や機能の代替性の整備などソフト面で対処するのがよい。

また、鉄道は線状に種々の構造物が連なるシステムであり、耐震強化の困難な構造物や箇所もある。したがって、耐震構造を考える場合は、個々の構造物を強化することのみを考えるのではなく、被害を受けた場合の復旧のための方策を考えるなど、システムとしての耐震性の向上も大切である。