

# 最近の鉄道構造物の耐震設計技術

室野 剛隆\* 佐藤 勉\*\*

## Trend of Recent Techniques Regarding Seismic Design of Railway Structures

Yoshitaka MURONO Tsutomu SATO

Railway structures in Japan are designed based on the “Design Standards for Railway Structures: Volume of Seismic Design: (1999)” (Abbreviation: Seismic Design Standard). The Seismic Design Standard has been issued in December 1999 after severe damages to urban facilities during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake. In the design standard, the “two-step design procedure” and the “performance based design method” were introduced. A severe ground motion caused by a near fault region, as well as the inter-plate earthquake, which is conventionally considered, was taken into account. After the Hyogoken-Nambu earthquake, a large number of earthquake ground motion came to be recorded by a seismometer net developed rapidly, and a study on the estimation method of strong ground motion progressed. In addition, the seismic design methodology made a rapid progress with the advance of experiment technique and equipment and the advance of numerical analysis technique. In this report, based on such a background, the trend of recent seismic design technology is introduced.

キーワード：耐震設計法，国際基準，性能設計

### 1. はじめに

現行の「鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）」（以下、平成11年標準という）は、1995年兵庫県南部地震の際に発生した鉄道構造物の大被害を契機に、土木構造物の耐震性について検討を行い、とりまとめられたものである。従来の耐震設計で考えられてきた地震動に加えて、断層近傍域で発生する強烈な地震動をも考慮する2段階設計法を採用するとともに、設計地震動に対して所要の耐震性能を照査する性能照査型の設計体系もいち早く導入した。

一方、兵庫県南部地震以降、急速に整備された地震観測網により多数の強震動が記録されるようになり、地震動や地盤震動に関する研究が進展した。また、実験や数値解析の進歩により、構造物の耐震設計に関する技術も高度化され、地震工学分野の研究は大きく進展した。

このような背景を踏まえて、本稿は、最近の耐震設計技術の動向と主な知見について取りまとめたものである。また、平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震についても、現在公開されているデータを基にその地震動特性と構造物への影響について概説する。

### 2. 耐震設計法をめぐる国際基準と国内基準の動向

#### 2.1 国際基準

WTO協定に付随する国際標準化に関わる規定は、「貿易の技術的障害に関する協定（TBT協定）」と「政府調達に関する協定（政府調達協定）」の2つである。これらにより、国際規格を国内強制規格、国内任意規格の基礎とすることが義務づけられている。この場合の、国際規格とは、国際標準化機関によって採択され、一般の人々が入手できる規格のことを指しており、具体的にはISO規格がこれに相当する。

これにより、日本もTBT協定を批准しているため、政府調達および民間部門調達による土木関連分野の工事では、その仕様および技術基準（技術基準、示方書等）の基礎として国際規格の使用が求められる。つまり、鉄道においても、その技術基準は、国際規格に整合するものであることが要求され、ISO規格の事実上の遵守が国際的に求められるようになっている。

#### 2.2 ISO2394 構造物の信頼性に関する一般原則

土木構造物の設計に関連するISOとしては、例えばISO2394がある。ISO2394は「構造物の信頼性に関する一般原則」であり、10章にわたって細かな原則が規定されており、その中では、信頼性設計法を採用し、計算方法として限界状態設計法が用いられている。欧州を中心に検討されてきたEurocodeに代表される地域規格におい

\* 構造物技術研究部 耐震構造研究室 室長

\*\* 構造物技術研究部 主管研究員

## 特集：構造物の耐震設計技術

ても性能設計の考え方を基本とした骨格となっている。

一方、米国では1989年ロマプリエータ地震や1994年ノースリッジ地震による被害を契機に、カリフォルニア構造技術者協会(SEAOC)を中心に耐震設計の考え方に對して見直しが行われた。SEAOCのVision2000は、構造物の重要度に応じた柔軟な設計が行えるように、設計地震動レベルと耐震性能レベルを4段階に分類した性能マトリクスによる設計方法を示した。

### 2.3 ISO23469 構造物の設計の基本—地盤基礎構造物の設計に用いる地震作用

耐震設計に関するISOとしては、いくつかあるが、特に重要なのはISO23469である。2002年から日本提案によりISO/TC98/SC3/WG10が活動を始め、土木学会からの全面的な支援のもとで日本のコンビナーが精力的に国内外の調整を行い、2005年11月にISO23469「構造物の設計の基本—地盤基礎構造物の設計に用いる地震作用」として国際規格にまとめられた。ISO23469は、「経験豊かな」設計技術者および基準策定関係者が地盤基礎構造物の設計に用いる地震作用を定める際に遵守すべき指針の体系を示したもので、いわば、codes for code writersとして書かれたものである。

ISO 23469の本質的な考え方は、上に述べてきた通り、2段階の手順で地震作用(1<sup>st</sup> step: 自由地盤における地震動を評価し、2<sup>nd</sup> step: その結果をもとに地盤と構造物の相互作用を考慮した地震作用を評価する)を決定し、使用性と安全性という2つの性能目標に見合った地震作用(使用性照査地震動: 確率論的解析による評価, 安全性照査地震動: 確率論的解析か確定論的解析のいずれか)を評価する、という点に集約される。

### 2.4 国内基準

港湾施設の耐震基準では、平成19年に改訂が行われ、性能設計体系の本格導入、地震動の扱いの大幅な改訂、破壊確率や変形量を指標とした新たな設計手法の導入という点で、これまでの基準とは様相を異にする大改訂がなされた<sup>2)</sup>。

原子力施設では、平成18年に耐震設計審査指針が改訂された<sup>3)</sup>。この中では、①1995年兵庫県南部地震の経験を契機に、地震動や構造物の耐震性に関する最新の知見を反映させること、②国際的に原子力安全耐震設計に對して確率論的安全性評価を取り入れるという動きとの整合性をとることがなされた。この中で、着目すべきは、設計想定地震動を上回る強さの地震動が生起する可能性は否定できない、つまり「残余のリスク」の存在を明示した上で、合理的に実行可能な限り小さくするための努力が必要とされたことである。残余のリスクが小さいことを確実なものとするために、安全審査とは別に、運転

開始までに確率論的安全(地震PSA)を実施することを推奨(原子力学会PSA実施基準2007制定)している。

## 3. 近年の技術開発に関する各論

このような中で、鉄道構造物の設計においても、省令および設計標準が、順次、性能規定型の設計標準への改訂が進められている。ここでは、近年の耐震設計技術に関わる項目のうち、鉄道構造物の耐震設計で重要な事項となるものをいくつか紹介する。

### 3.1 設計地震動の評価手法

平成11年標準、耐震設計に関連した技術の中で最も進歩した1つが地震動の予測技術であろう。

地震動を予測するための方法として「レシピ」が考案された。この「レシピ」を用いると、過去の地震の震源の特性、伝播経路や表層地盤の構造等に関する情報に基づいて、揺れの予測に必要なパラメータが順番に与えられ、同じ情報から誰がやっても一定の信頼ある予測結果が得られると言われている<sup>4)</sup>。この方法は、文科省の地震調査委員会や内閣府の中央防災会議による特定の活断層や海溝型地震を想定した揺れの予測に用いられている。

このような現状を踏まえると、鉄道構造物の耐震設計でも、L2地震動の設定においては、積極的にこの手法を用いて、サイト特有の地震動を設定することが望ましいと言える。ただし、全ての構造物の設計で、いちいち地震動を予測するのは現実的でないことも事実である。そこで、標準的な地震動(一種の『見なし』と考えることもできる)を用意する意義は高い。このような標準的な地震動を設定する際には、平成11年標準以降、急速に発展した強震観測網により、比較的規模の大きい多数の地震記録が得られており、これらを使うことにより、平成11年標準の標準地震動のスペクトルが見直されている<sup>5)</sup>。

### 3.2 地盤の評価

耐震標準では簡易に地盤挙動を評価する手法として『地盤種別』による方法がある。これは実務的な手法として位置づけられるが、軟弱地盤や溺れ谷など、地震時に土の特性が大きく変化する地盤では適用が難しく、『地点依存の解析(動的解析)』によらざるを得ない。この場合、特に注意を要するのが土の非線形特性のモデル化である。従来は、土の非線形モデルにMasing則を用いることが多く、その結果、せん断ひずみとともに、土のせん断応力～せん断ひずみ関係が紡錘型からスリップ状に変化する特徴を表現できなかったが、改良Masing則を用いることにより上記の特性を表現できるモデルなどが開発されている<sup>6)</sup>。これにより、小さいひずみから大きなひずみレベルまで、精緻に地盤挙動を評価できるように

なった。また、このモデルに用いるパラメータも標準化され、設計実務での適用性が格段に高められた<sup>6)</sup>。

### 3.3 構造物の応答評価

現行の耐震設計では、非線形応答スペクトル法が実務的に有効な手法として位置づけられている。非線形応答スペクトル法を用いる場合には、構造物全体系の降伏点と骨格曲線をどのように定義するかが重要である。これまでは、構造種別によらず、部材や地盤等、最初に降伏する状態を全体系の降伏と定義していた。しかし、種々の構造形式について詳細な検討を行った結果、以下のようなことが分かった<sup>7)</sup>。

- ① 橋脚構造のように塑性ヒンジが橋脚下部に限定的に発生する場合、その損傷が杭や周辺地盤よりも先行するタイプについては、部材としての降伏点と構造物全体系の荷重～変位曲線の折れ点が一一致する。
- ② 橋脚の耐力が大きく、杭部材や基礎周辺地盤の塑性化が顕著な場合は、荷重～変位曲線が滑らかな曲線を示す。部材としての降伏点と、構造物全体系の荷重～変位曲線の折れ点は一一致しない。
- ③ ラーメン高架橋のような不静定構造物では、塑性ヒンジが複数箇所で発生する。この場合には、部材としての降伏点と荷重～変位関係の折れ曲り点は一致せず、ラーメンの4隅に塑性ヒンジが形成された時点で、荷重～変位曲線に明確な折れ曲り点が発生する。

従来、慣用的に用いられているような、初降伏点を構造物全体系の降伏点と考える方法では、適用に限界がある。そこで、非線形応答スペクトル法で、応答値を算定する場合は、荷重～変位曲線上の明確な折れ曲り点を構造物全体系の降伏点として定義することにより、詳細モデルの応答値を精度良く評価することを可能とした。

### 3.4 動的相互作用

動的相互作用には、慣性力による相互作用 (Inertial interaction) と地盤変位による相互作用 (Kinematic interaction) があり、基礎の断面力なども両者の影響により発生する。ISO23469 ではこの点を重視しているにも関わらず、ほとんどの基準が前者のみを考慮している。しかし、鉄道構造物の設計では、両相互作用を考慮しており、地震時に慣性力だけでなく、地盤変位によって杭に応力が発生することにも着目しており、その影響は応答変位法により評価している。また、この際の慣性力と地盤変位の組合せ方法についても合理的に定められており、ISO23469 でのその骨子が採用されている。

平成11年標準では、応答変位法は地盤変位が大きくなるG4地盤以上のみ適用が義務付けられている。しかし、実際には慣性力と地盤変位の相対的な大小関係で、どちらの相互作用の影響が大きいか決定される。例えば、

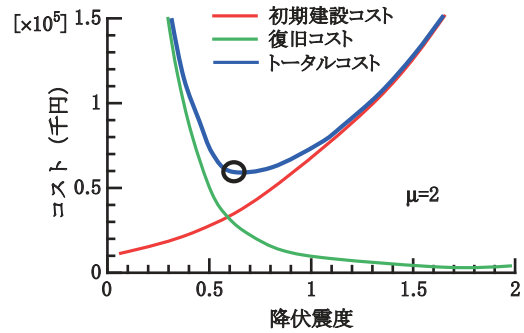


図1 TCMの試算例(じん性率 $\mu=2$ の場合)

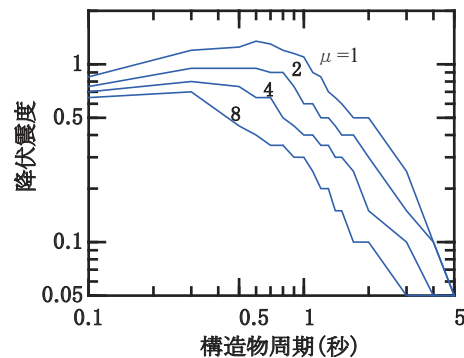


図2 TCMを満足する構造物の照査ノモグラム

免震橋梁を例に考えると、良好な地盤中に建設されていても、上部工からの慣性力が低減される分、基礎の応力は地盤変位による応力が支配的となることが分かった。

### 3.5 新しい指標を用いた照査方法

構造物の要求性能に安全性と復旧性が要求される場合が多い。復旧性は、「想定される作用のもとで、構造物の機能を使用可能な状態に保つ、あるいは短期間で回復可能な状態に留めるための性能」と定義される。想定される地震動に対して構造物を短期間で機能回復可能な状態に保つためには、構造物周辺の環境状況を考慮し、適用可能な技術により、妥当な経費の範囲内で機能回復できる範囲内に構造物の損傷等の程度をコントロールすることが必要である。従来は、性能評価指標として、部材の修復性に着目して損傷レベルを採用することが一般的であった。しかし、より柔軟性のある考え方として、経済性に着目して考えることも可能である。つまり、「妥当な期間および経費で機能を回復できる」という性能を工学的に表現する指標として、「初期建設コスト $C_I$ と設計耐用期間における地震後の復旧コストと間接被害の期待値の和 $C_P$  すなわちトータルコストの最小化 (TCM)」を考えることも可能である。式で表現すれば、式(1)となる。

$$TC = C_I + \sum P_f \cdot C_f \quad (1)$$

こうすれば、線区の重要度や地震活動度などに応じて、柔軟なきめ細かい設計が可能になる<sup>8)</sup>。

ISO2394では信頼性設計を基本としているが、その際

特集：構造物の耐震設計技術

に、目標水準をどのように定めるかが重要であり、その設定法の1つにライフサイクルコストが最小となる水準を目標とするという考え方も示されており、今後の方向性の1つであると思われる。

日本各地で地震危険度解析を行い、生起確率付地震動群を算定し、RC橋脚を対象としてパラメトリックスタディーを実施し、TCMとなる構造物を試算した。東京地区の例を図1と図2に示す。図1によれば、じん性率 $\mu$ が2しかない構造物の場合は、降伏震度は0.6程度必要であることを示している。これらを網羅的に図化したのが図2である。このノモグラムを用いれば、TCMになる構造物であるか否かが容易に照査することが可能である。

4. 東北地方太平洋沖地震を踏まえて

平成23年3月11日に、日本の地震観測史上、最大のマグニチュード9.0を記録した東北地方太平洋沖地震が発生した。耐震設計法を考える上で、この地震は少なからず影響があると思われるので、現在得られている情報から今回の地震の特徴について簡単に考察する。

図3に、加速度波形とフーリエスペクトルを示す。なお、過去の地震記録についても比較のために示した。加速度波形を見ると、兵庫県南部地震は典型的な直下型地震であり、継続時間が短く瞬間的に地震のエネルギーが構造物に作用していたのに対して、今回の地震では、非常に大きな領域が破壊することにより、継続時間が非常に長くなるとともに、最大加速度も大きい。ただし、構造物の被害が大きかった兵庫県南部地震に比べて高い振動数が卓越しており、構造物の固有振動数域(1~2Hz)で振幅が小さいことが分かる。

図4は所要降伏震度スペクトルを示す。所要降伏震度スペクトルとは、横軸に構造物の周期をとり、その周期の構造物の応答塑性率がある値に収まるために必要な耐力(降伏震度)を縦軸にとったものである。鉄道構造物の多くの周期帯域は0.5~1秒程度であり、この周期帯域では、神戸JMAの波形の方が今回の地震よりも圧倒的に厳しいことが分かる。今回の地震では津波により甚大な被害を受けたが、このような周期特性は、揺れにより構造物が倒壊した事例が少ないことと整合している。

5. おわりに

耐震評価技術の進展には目覚ましいものがあるが、本報では、紙面の都合で鉄道総研が中心となって検討した項目を中心に紹介したため、他機関での成果などについては十分に触れることはできなかった。

2章および3章で紹介した国際基準の動向や耐震評価法に関する技術動向を踏まえて、国土交通省の指導のも

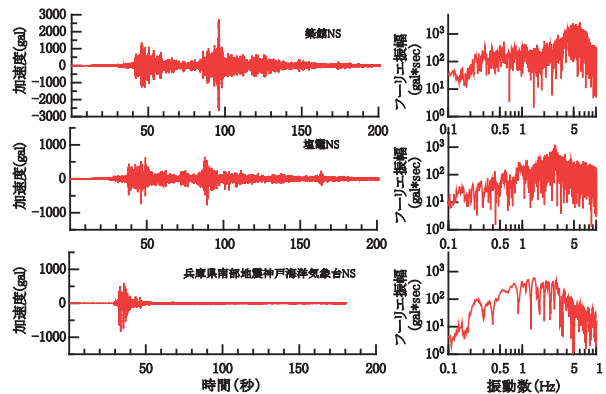


図3 加速度波形とそのフーリエスペクトル

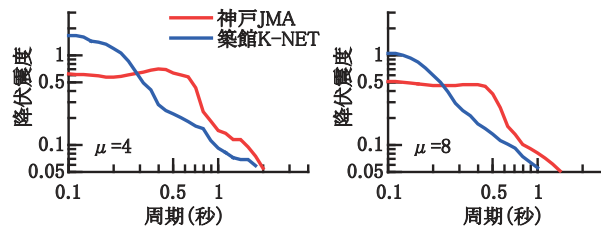


図4 所要降伏震度スペクトルの比較

とに、平成18年に鉄道総研に「耐震設計標準に関する委員会」が設けられた。以来、設計地震動、要求性能、地盤および構造物の挙動評価、照査方法等について検討を重ね、そのとりまとめを行っている最中、3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生した。現在、国土交通省に「鉄道構造物耐震基準検討委員会」が設置され、今回の地震動を耐震設計でどのように解釈すべきか検討が始められたところである。これらの結果を反映した形で、耐震設計標準が取りまとめられる予定である。

文献

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善出版, 1999.
- 2) (社)港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 3) 原子力安全委員会: 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針, 2006.
- 4) 入倉孝次郎, 強震動予測レシピー大地震による強震動の予測手法一, 京都大学防災研究所年報 第47号A, 2004.
- 5) 坂井公俊, 室野剛隆, 佐藤勉: 近年の地震記録に基づくL2地震動の評価, 鉄道総研報告No.25, Vol.9, 2011. (印刷中)
- 6) 室野剛隆, 野上雄太, 田上卓也, 坂井公俊: GHE-Sモデルによる土の動的非線形挙動の評価方法, 鉄道総研報告No.25, Vol.9, 2011. (印刷中)
- 7) 室野剛隆, 佐藤勉: 構造物の損傷過程を考慮した非線形応答スペクトル法の適用, 土木学会地震工学論文集, 第29巻, pp.520-528, 2007.
- 8) 坂井公俊, 室野剛隆, 澤田純男: トータルコストを用いた復旧性照査法に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集 CD-ROM, 2008.