

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

新しい耐震設計標準

技術基準の策定・整備に係る事業は鉄道総合技術研究所における事業の1つの柱となっており、国土交通省の指導のもとに各分野の設計標準に関する委員会を設けて検討を進めてきています。その中で、耐震設計に関する事項をとりまとめたものが、「鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計標準）」（以下、耐震標準）ですが、平成24年9月に新しく改訂されました。本稿では、その内容について分かりやすく紹介します。



室野 剛隆
Yoshitaka Murono
構造物技術研究部
耐震構造研究室
室長
[専門分野] 地震工学

耐震設計の意義とその変遷

鉄道構造物の設計を行う際には、構造物に作用する荷重に耐えられるように設計します。作用としては、構造物自らの重さや列車荷重、風による影響等々、様々なものがありますが、作用として地震を考える場合を特に「耐震設計」と呼びます。日本は地震国なので、鉄道構造物のみならず土木・建築構造物の多くは、耐震設計によってその断面が決まります。その意味から、耐震設計は非常に重要であると言えます。

鉄道などの近代土木構造物の設計技術は、当初はヨーロッパから導入されたと言われていています。しかし、ヨーロッパは地震が少なく、導入された設計技術には地震への配慮がありませんでした。その結果、1923年関東地震では多くの構造物が被害を受けました。この地震を契機に耐震設計が導入されました。当時の耐震設計は震度法が基本でした。震度法は、図1に示すように自重の1～2割を地震による影響として静的に構造物に作用させ、発生する応力が許容値以内であることをチェックする設計法です。水平力と自重の比を「震度」と呼びます。まさに耐震設

計の『創成期』と言えます。これにより、地震により構造物が壊滅的な被害を受けることは少なくなりましたが、1964年新潟地震では液状化、1978年宮城県沖地震では建設中の東北新幹線高架橋の被害（支承部の破壊、柱や中層梁のせん断ひび割れ）などが発生し、それらの反省として、耐震設計法は少しずつ発展しました（『発展期』）。例えば、当初の震度法では、地盤の揺れに対して構造物は増幅しないと仮定していましたが、実際には構造物が受ける地震力をもっと複雑であることから、構造物の特性（揺れやすさ）に応じて、震度を変化させる「修正震度法」が開発されました。

しかし、1995年兵庫県南部地震ではあらゆるインフラが壊滅的な被害を受け、それまでの耐震設計法が全面的に見直されることになりました。耐震設計法の『転換期』と言えます。鉄道でも平成11年に耐震標準が見直されました。この中では、2段階設計法が採用されました。「供用期間中に数回経験するかもしれない地震動」に対しては、構造物は損傷しないように設計し、「ほとんど遭遇する可能性は少な

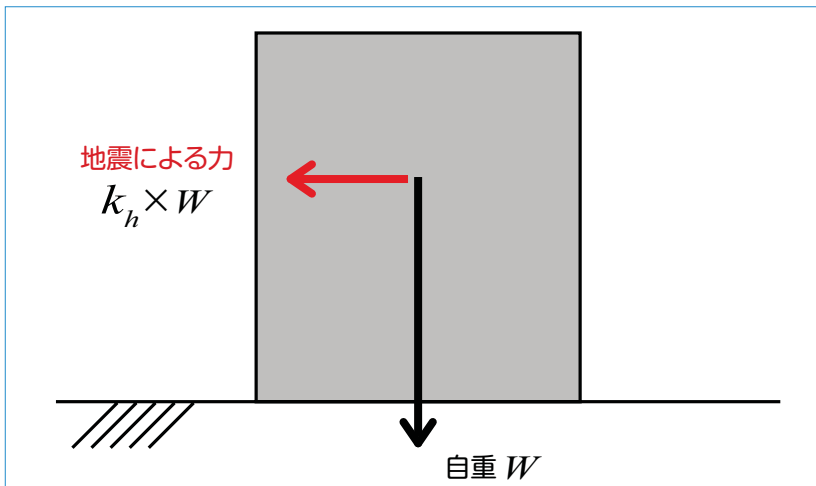


図1 耐震設計の創世期による方法－震度法－

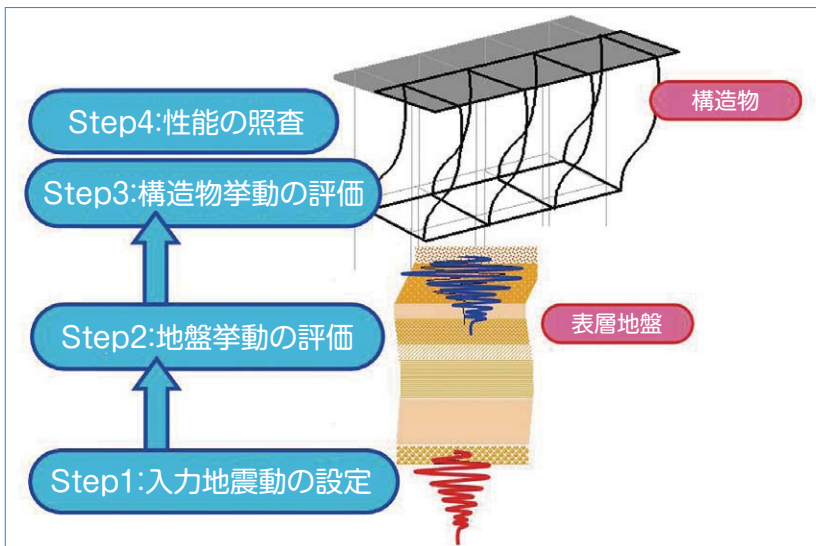


図2 性能設計の手順

いけれど、ひとたび発生すると非常に強烈な地震動」に対しては損傷を許容するけれど倒壊を防ぐ、という設計法です。これにより、地震に対する構造物の安全性は飛躍的に向上しました。

耐震標準の改訂経緯

平成11年標準により大変貌を遂げた耐震標準ですが、発刊から10年以上が経ち、新たな局面を迎えることになり、今回改訂することになりました。

改訂に対する要因の1つはWTO（世界貿易機関）の「貿易の技術的障害に

関する協定（TBT協定）」等です。この協定では、国内の技術基準は、その上位として位置づけられる国際規格に遵守することが求められています。加えて、説明責任、情報開示、新技術、コスト縮減、性能保証といった、公共工事を取り巻く最近の情勢から、従来の仕様設計から性能設計（後に詳しく説明します）へ移行することが不可欠であるとされました。

さらに、兵庫県南部地震以降、地震観測ネットワークが急速に整備され、非常に多くの地震が記録され、地震に

関する研究が大いに進展しました。これらの知見を盛り込むことで、より合理的な耐震設計が可能になると判断されました。

そこで、当研究所に設置した「耐震設計標準に関する委員会」（委員長：佐藤忠信神戸学院大学教授）において平成18年から調査研究を行い、耐震標準の改訂の準備を整えてきました。ところが、刊行を目前に控えた平成23年3月に、東北地方太平洋沖地震が発生しました。これまでの設計地震動の規模をはるかに上回る地震であったことから、「鉄道構造物耐震基準検討委員会」（委員長：佐藤忠信神戸学院大学教授）が設置され、設計地震動を含めた検証作業を行うとともに、いくつかの新たな知見を盛り込みました。そうして、平成24年9月に改訂・耐震標準が発刊されました。以下、その内容のポイントを簡単にご紹介します。

改訂のポイント

①国際標準への適合と性能規定化

先に述べたように、上位基準である国際基準が性能規定化に移行したため、それらとの整合を図るために性能規定化に移行するとともに、様々な点で国際基準に配慮しました。

従来の設計法は、仕様設計と呼ばれており、設計基準の中で構造寸法、材料、手法・手段を細かく規定し、これに基づき設計する手法です。仕様がこと細かく決められているので、新しい技術の導入が難しいという欠点がありました。それに対して、性能設計は、要求性能を明確に規定し、これが満足されていることが確認できれば、手法や構造型式は問わないという設計法です。これにより、新技術の導入に対して柔軟な対応ができるようになりました。

図2に性能設計法の手順を概念的に示します。

表1 地震動の大きさに応じて構造物に要求される性能

性能	設計地震動	内容	適用
安全性	L2地震動	崩壊防止	全て
	L1地震動	走行安全性に係る変位	全て
復旧性	復旧性照査地震動	修復性	重要度の高い構造物

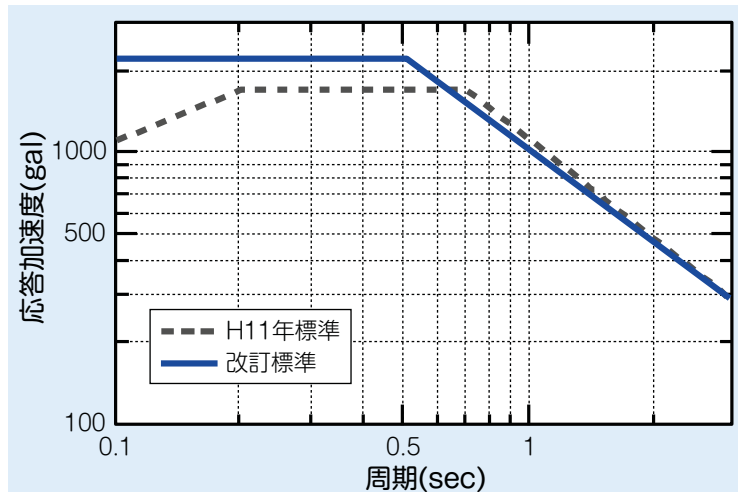


図3 L2地震動の標準スペクトル(スペクトルⅡ)

②地震時の要求性能

地震時における構造物の要求性能として「安全性」について設定し、重要度の高い構造物については「復旧性」についても設定しました。

安全性とは、想定される作用のもとで、構造物が使用者や周辺の人の生命を脅かさないための性能で、「構造物の構造体としての安全性(構造物全体系が破壊崩壊しないための性能)」と「機能上の安全性(車両が脱線に至る可能性をできるだけ低減するための性能)」を規定しました。

復旧性については、構造物周辺の環境状況を考慮し、想定される地震動に対して、構造物の修復の難易度から定まる損傷等を一定の範囲内に留めることにより、短期間で機能回復できる状態に保つための性能を規定しました。

どの規模の地震(詳細は④参照)に

対して、どの性能を確保するかを表1にまとめました。

③地震随伴事象への配慮

耐震標準では、地震の『揺れ』に対して構造物の性能を確保することを念頭に置いています。しかし、最近では、津波や地表断層変位などによって構造物が被害を受ける事例も発生しています。そこで、津波や断層変位を、地震に付随して発生する「地震随伴事象」として定義しました。随伴事象が構造物に与える影響については、まだ解明されていない部分も多く、設計手法も確立していないことから、性能を定めて照査をする対象としませんでした。その代わりに、津波や断層変位を受けないように路線計画を行ったり、その影響を少なくする構造型式を採用するなど、構造計画の段階で適切に配慮することにしました。

④地震動の見直し

地震動は2つの地震動を考えます。

- ・L1地震動：設計耐用期間中に数回程度発生する確率を有する地震動
- ・L2地震動：建設地点で想定される最大級地震動

L2地震動は、さらに、海溝型地震を想定した「スペクトルⅠ」と内陸活断層を想定した「スペクトルⅡ」に分類されます。急速に発展した地震観測網により、多数の地震記録が得られており、これらの解析することにより、L2地震動の標準応答スペクトルを見直しました¹⁾。図3にスペクトルⅡの標準スペクトル(基盤面位置)の平成11年標準と改訂耐震標準との対比を示します。短周期側で地震動が大きくなっていることが分かります。

⑤応答値の算定

性能設計法では、地盤や構造物の応

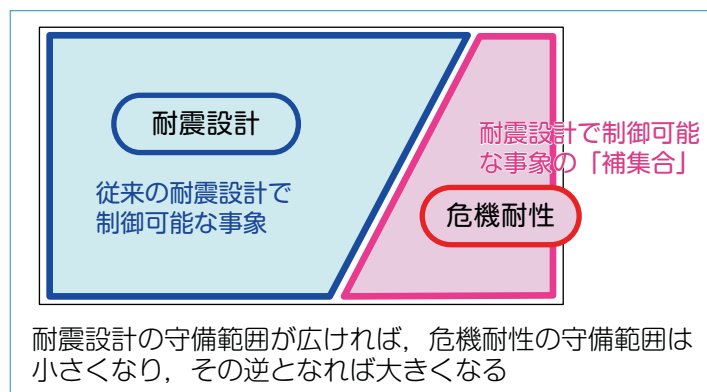


図4 耐震設計と危機耐性の関係

答値を正確に求めることが前提条件となるので、応答値の算定方法を高度化しました^{2),3)}。その詳細は、かなり専門的になりますので、ここでは省略をします。

電車線柱の応答値の算定についても新しく盛込みました。東北地方太平洋沖地震で、電車線柱が多数折損したことがその背景にあります。高架橋上の電車線柱の応答を算定する際には、高架橋の水平運動に加えて、高架橋の回転運動の影響を加味することが非常に重要であることを解明し⁴⁾、この点を耐震標準に示しました。

⑥危機耐性という概念の導入

東北地方太平洋沖地震は、我が国史上最大のマグニチュード9という巨大地震でした。設計で考慮している地震を遥かに凌駕する規模の地震で、巷ではこの震災を表現する言葉として「想定外」という言葉がよく使われました。この地震により、設計地震動を越える地震動の発生の可能性が排除できないことが明らかになりました。しかし、鉄道構造物は一般に公共性が高く、円滑な機能の維持・確保が個人の生命や生活、社会・生産活動にとって非常に重要であることを考えると、設計地震動に対して表1のような性能を

満足していることに加えて、想定を超える地震に対しても、構造物またはシステムとして、破滅的な状況に陥らないように設計する必要があると考えられます。これを「危機耐性」と呼ぶことにしました。新しい概念で分かりづらいつと思うので、イメージを図4に示しました。世の中の事象には、耐震設計（本稿でいう性能設計法）で制御できる事象と、その補集合に該当する事象があり、その部分に対する対応が危機耐性です。耐震設計を強化することにより、危機耐性の守備範囲は小さくなりますが、ゼロにはならないことを肝に銘じなければなりません。残念ながら、このような想定を超えた状態に対する性能を直接的に定義し照査する体系は現段階ではありませんので、耐震標準では、計画・設計段階でこれを配慮することとしました。例えば、破壊の形態を延性的なもの（曲げ破壊型と呼ぶ）となるように配慮することや、設計段階から、被災構造物への進入路や作業ヤードを確保して被害の波及を防止することなどが考えられます。今後は、危機耐性を定量的に評価できる手法や危機耐性に優れた構造物の開発が大きな課題です。

おわりに

耐震設計はその時代の社会性を帯びて変わってきています。しかし、どんな時代においても、2つの問いかけの観点でつくられており、ひとつは社会的安全性の観点、2つ目は必要に応じた経済性の観点です。利用者、さらに社会生活を守るために耐震設計は行うべきものではありませんが、経済的な限界もあり合理性を欠かさない配慮も必要だと理解しています。切迫する巨大地震を前に、耐震設計の意義を心に留めつつ、2つの観点で今後の設計に望んでいきたいと考えています。RRR

文献

- 1) 坂井公俊, 室野剛隆, 佐藤勉: 近年の地震記録に基づいたL2地震動の考え方とその設定方法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.4, pp.5-12,2011
- 2) 室野剛隆・野上雄太・田上和也・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, Vol.25, No.4, pp.13-18,2011
- 3) 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
- 4) 加藤尚, 坂井公俊, 室野剛隆: 構造物—電車線柱一体モデルによる地震応答特性の評価, 鉄道総研報告, Vol.26, No.11, pp.17-22,2012