

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

# 近年の地震と耐震設計

日本は世界有数の地震国で、数多くの大地震を経験してきました。本特集記事では、なぜ、地震が多く発生するのかそのメカニズムを説明するとともに、近年の特徴的な地震を例にして、地盤の揺れから構造物の応答に変換されるメカニズムについて概説します。また、これらのことが最新の耐震設計にどのように反映されているのか、最新の耐震設計標準に基づき紹介します。



**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



**坂井 公俊**  
Kimitoshi Sakai  
構造物技術研究部  
耐震構造研究室  
副主任研究員  
[専門分野] 地震工学

## 地震とは

地下の岩盤が周囲から押されると、岩盤中にひずみが蓄積し、それが限界に達したときに、ある面を境としてズレる現象を地震と言い、このズレを断層と言います。地震が起きるとズレの影響が波となって周囲に伝わり、やがて地表に達すると地表が「揺れ」ます。私たちはこの「揺れ」で、地震が地下で発生したことを知ります。それでは日本列島の地下にどのような力が作用しているのでしょうか。

近年、GPSなどの宇宙測地技術が進歩し、広範囲の大地の変形を連続的に測定できるようになりました。その結果、日本列島の地下では、

一般には東西方向に、場所によっては北西-南東方向に強い圧縮力がかかっていることが分かってきました。このような力が作用している原因は、日本周辺のプレート(☞参照)の動きと密接に関係しています。

図1は日本列島とその周辺のプレートの分布を示しています。海側の太平洋プレート、フィリピン海プレート、

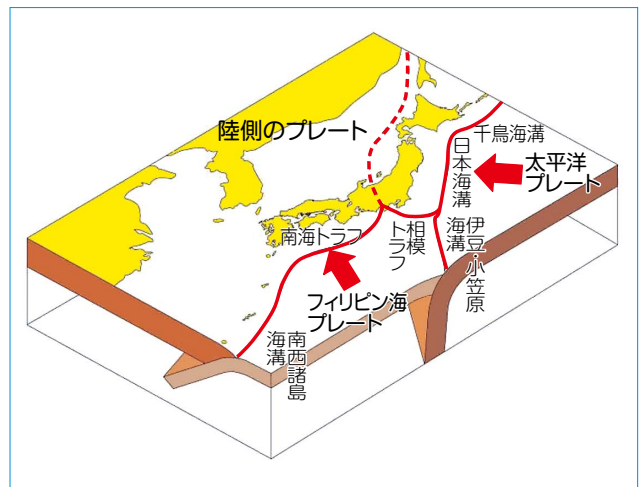


図1 日本列島と周辺のプレート

## ☞ プレート

地球の表面には、厚さ数十 km ほどの岩盤が十数枚ほど隙間なく敷き詰められています。これをプレートと呼びます。これらのプレートが別々の方向に年間に数 cm の速さで移動しており、プレートの境界では、プレートが衝突したり、離れたります。このような動きをプレートテクトニクスと呼ばれています。

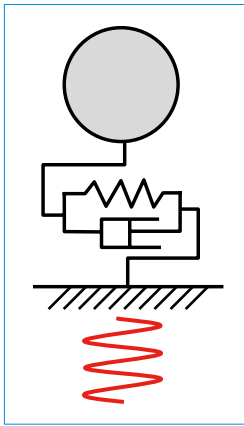


図2 地震を受ける構造物を簡単に表現したモデル

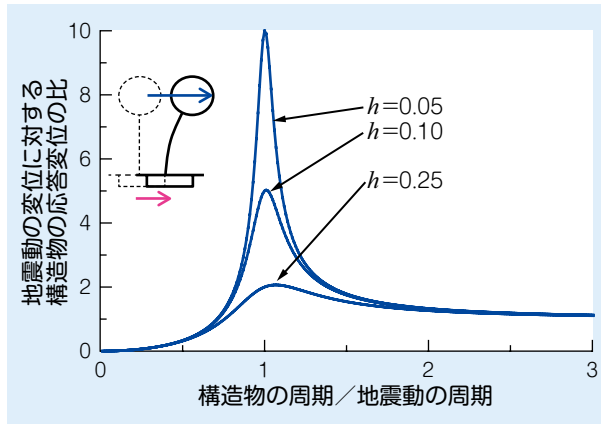


図3 地震動に対する構造物の揺れの増幅特性

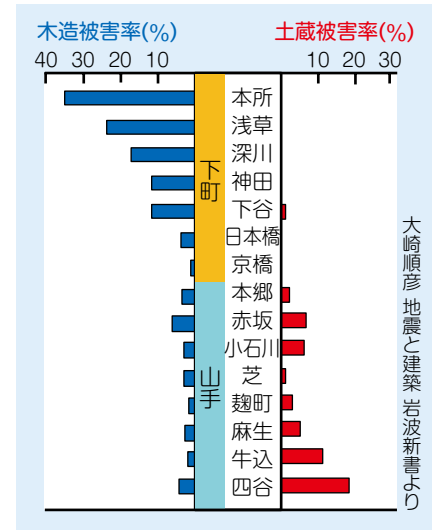


図4 関東地震の際の被害特性

ト、そして陸側のユーラシアプレートと北米プレートの4つがあります。太平洋プレートは、東南東の方向から年間約8cmの速さで、フィリピン海プレートは、ほぼ南東の方向から年間3～7cmの速さで、それぞれ日本列島に近づき、密度の重い海側のプレートが、日本列島付近で陸側のプレートの下に沈み込みます。

このような海側のプレートと陸側のプレートの境界では、広い範囲で圧縮力が作用し、日本列島全体に強い力が作用することになります。このプレートの境界では、規模の大きな地震が発生します。これを海溝型地震と言います。一方、陸域の浅い場所で発生する地震は、プレート境界から少し離れた場所で発生しており、これはプレートの沈み込みに伴い、周囲にかかる力によって発生すると考えられています。これを内陸活断層型の地震などと呼んでいます。

### 地震の大きさと構造物の揺れ

地震の大きさを表す指標(単位)には、マグニチュード(M)、震度、加速

度(gal)、速度(kine)の4つがよく用いられています。ただし、震度、加速度、速度は観測しているその地点での地震の揺れ方(地震動)の大きさを表しているのに対して、マグニチュードは地震そのものの規模(震源における地震エネルギー)を表します。

興味深いのは、これらの指標が大きいからと言って、必ずしも構造物の被害が大きくなるわけではありません。このことは、一般の方はもちろん、設計に携わる技術者でも誤解をするところでは、地震の揺れと構造物の応答の関係を少し数学的に捉えてみます。

構造物を図2のように1つの質点と1つのばねと1つの減衰装置(ダッシュポット)で表現します。また、地震動を正弦波と考えます。この時の質点の動きを数学的に解いてみます。すると、図3のような関係が得られます。横軸は構造物の固有周期(参照)と地震動の周期の比、縦軸は地震動の振幅に対して、構造物の応答が何倍の振幅で揺れるかを示しています。すると、地震動の周期と構造物の固有周期が一致した時に、揺れが著しく大きくなっ

ていることがわかります。これを『共振現象』と呼びます。また、図中には3本の線がありますが、これは、構造物が持つ減衰性能の違いを表しており、図中の $h$ が大きいほど減衰性能が高いことを意味しています。減衰性能が高いと、構造物は揺れ難くなることがわかります。

例えば、1923年の関東地震では、図4のような調査結果が得られています<sup>1)</sup>。土蔵の被害は山の手に、木造の被害は下町に集中しています。これは、図3を用いて明確に説明することができます。山の手は地盤が固く、地震動の揺れの周期も短いため、硬い土蔵が共振して被害を受け、地盤が軟らかい下町では地震動の周期が長く、柔らかい木造が共振して被害を受けたと考えられます。構造物の揺れを考える場合は、地震動の大きさだけでなく、地震の周期と構造物の周期の関係が非常に重要であることがわかります。

### 兵庫県南部地震と東北地方太平洋沖地震

最近の地震でも同様の経験をしています。1995年に発生した兵庫県南部地震では、800(gal)を超える加速度を記録し、多くの土木・建築物が倒壊をし

#### 固有周期

振動によって同じ状態をくり返すのに要する時間を周期と言います。構造物には、それぞれ固有の周期があり、これを固有周期と言います。固有周期は、質量と剛性で決まります。構造物の重量が大きいほど、背が高いほど長くなります。

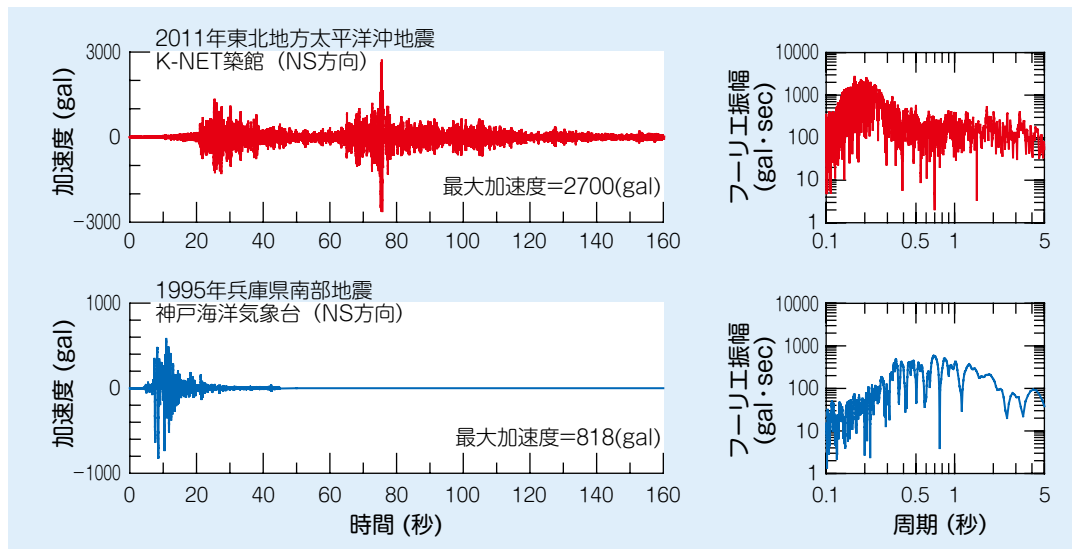


図5 兵庫県南部地震と東北地方太平洋沖地震での加速度記録

ました。この地震のモーメント・マグニチュード  $M_w$  (☞参照) は6.9でした。一方、2011年の東北地方太平洋沖地震では、 $M_w 9$ という我が国史上最大の地震で、不幸にも津波により多くの犠牲者が出ました。地震の揺れも大きく、1000 (gal) を超える大加速度が多地点で記録されました。しかし、揺れそのものによる建造物の被害は兵庫県南部地震に比べて非常に限定的でした。

そこで、兵庫県南部地震の記録(神戸海洋気象台での記録)と東北地方太平洋沖地震の記録(K-NET 築館の記録)について、加速度波形とフーリエ振幅スペクトル(☞参照)を示したのが図5です。神戸の地震では、周期0.5~1秒付近の波の成分が多く含まれていたのに対して、東北の地震ではそ

の周期帯域の成分は少なく、0.3秒以下の成分の波が極めて多く含まれていたことが分かります。一方、鉄道の高架橋などの固有周期は0.5~1秒程度だと言われています。つまり、神戸の記録では、地震と建造物の周期が近く、建造物が大きく揺すられたために、被害が大きくなったと解釈できます。これは図3からも容易に理解できます。被害の大小は複数の要因が関与しており、上記のことだけで説明できるものではありませんが、主要因であったことは間違いありません。

地震の加速度や震度が大きいと、被害が大きいと簡単に連想してしまいがちですが、実際にはそれほど単純ではなく、揺れの大きさ以外に、どのような周期成分の波が含まれているかが、被害の大

小をコントロールしているのです。

### 最新の耐震設計は？

このような地震に対して、鉄道建造物がどのような考え方で設計されているのか、ポイントを紹介します。

鉄道などの近代土木建造物の設計技術は、当初はヨーロッパから導入されたと言われていました。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建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(☞参照)という非常に簡素な方法でしたが、まさに耐震設計の『創成期』であったと言えます。その後も、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などを経験し、その度に耐震設計法は震度法をベースに発展してきました(『発展期』)。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、1999年には震度法

#### ☞ マグニチュード

地震のマグニチュードとは、地震が発するエネルギーの大きさを対数で表した指標値です。マグニチュードが2増えるとエネルギーは1000倍になります。

日本では、気象庁マグニチュード  $M_j$  が慣例的に用いられてきました。気象庁マグニチュードは、観測された振幅を基準とした独自基準のマグニチュードです。一方、モーメント・マグニチュード  $M_w$  は、地震による岩盤のずれの規模を基に計算されます。規模の大きな地震に対して、 $M_j$  では正確に評価できませんが、 $M_w$  は大きな地震に対しても有効です。

#### ☞ フーリエ変換とは

フーリエ変換とは、複雑な波形を周期の異なる正弦波群に分解し、その足し合わせで表現しようとする方法です。分解された各正弦波の振幅を“フーリエ振幅”と呼び、横軸に周期(振動数)をとって、それぞれのフーリエ振幅を図化したものをフーリエ振幅スペクトルと言います。どのような周期の成分が卓越しているか判断できます。

#### ☞ 震度法

震度法とは、自重の0.1~0.2割を地震による影響として静的に建造物に作用させ、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。

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	全ての構造物
	L1 地震動	走行安全性に係る変位	全ての構造物
復旧性	復旧性照査地震動 (L2 スペクトルⅡ)	修復性	重要度の高い構造物

が全面的に見直されました。

最新の鉄道構造物は、平成24年に改訂された『鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)』<sup>2)</sup>(以後、耐震標準)に準拠して設計されています。以下に、新しい耐震設計の考え方について、ポイントを説明します。

21世紀になると、さまざまな分野でISOなどの国際規格の制定が急速に行われました。設計基準に関しても例外ではありません。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)」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を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。

そこで、耐震標準も従来の仕様設計から性能設計に変更しました。仕様設計とは、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、『①構造物の目的とそのため必要とされる性能を規定し、②規定された性能を構造物の供用期間中確保することにより、構造物の目的を実現させる設計法』です。つまり、要求性能が満足されていることが確認されれば、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。

上記の下線部①の「必要とされる性能」について説明します。鉄道構造物では、全ての構造物に対して「安全性」を設定し、重要度の高い構造物については「復旧性」についても設定することにしました。「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々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で走行安全性とも言います)」があります。「復旧性」は、損傷など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です。

次に下線②の部分ですが、冒頭に紹介したように我が国は世界有数の地震国なので、さまざまな地震に対して「安全性」や「復旧性」を確保しなければなりません。

設計で考える地震としては、規模と性質が異なる2つの地震を考えます。

- 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地震動には、さらにM8クラスの海溝型地震が海域で発生した場合とM7クラスの内陸活断層地震が直下で発生した場合の2タイプを考えます。

どの規模の地震に対して、どのような性能を確保するかを表1に示します。L2地震動という非常に大きな地震に対しても、構造物の倒壊を防ぐことが要

求され、列車の走行安全性は、少なくともL1地震動に対して確保されています。なお、新幹線や大都市の主要路線においては、上記の性能以外に、復旧性が求められ、より高い耐震性を有することになります。

なお、性能が確保されているかどうかのチェックは、地盤や構造物の動的解析などを行い、先述した地震動と構造物の応答の関係を精緻に評価することになります。その詳細は、かなり専門的になりますので、ここでは省略します。

## おわりに

『敵を知り己れを知らば、百戦して危うからず』という有名な孫子の言葉があります。ここで、“敵＝地震”、“己＝構造物”と解釈すれば、地震に対して安全な社会を作るために私たちが何をすべきかを示唆しているようにも思えます。設計技術者の中には、“地震は分からないから、適当に割り切つて”という風潮が根強くあるのも事実ですが、孫子の言葉に帰れば、建設地点にどのような地震が発生するのか“敵”をしっかりと評価し、どのような揺れ方をする構造物を設計すればその地震に対して有利なのか“己”を知らなければ、地震に強い社会造りに貢献できないのです。[RRR]

## 文献

- 1) 大崎順彦：地震と建築，岩波新書，1983
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)，丸善，2012