

地震の揺れを予測する

坂井 公俊
 構造物技術研究部
 (耐震構造 研究員)

室野 剛隆
 同
 (同 研究室長)



さかい きみとし むろの よしたか

はじめに

日本列島のまわりでは4枚のプレートがぶつかりあっており、世界的に見ても大きな地震が頻繁に発生している地震大国です。そのため大地震が発生した場合の被害を小さくするという取り組みは、鉄道の安全を考える上で重要な課題であり、構造物の耐震補強や車両の脱線対策、さらには早期地震警報のための地震計の設置などが推進されています。ところがこれらの対策を全ての地点で同時に実施することは困難であり、実際には時間をかけながら徐々に対策を実施することになります。この時、対策を実施する順序を適切に設定する必要があるのですが、そのための有効な方法として、「地震で被害を受ける可能性の高い箇所から対策を行う」という考え方が提案されています。つまり、例えば構造物や軌道、電車線柱など鉄道を構成する要素の地震リスクをそれぞれ評価し、リスクが高い箇所から対策を実施していきます。こうすることで、鉄道路線全体の地震リスクを効果的に低減させることが可能になります。

この鉄道の地震リスクを評価する場合には、その地点で発生する地震の期待値（たとえば、今後30年間を考えた場

合にどのような地震が何%の確率で発生するのか？など）を評価する必要があります。ここでは、この地震の発生確率を計算する手法についてご紹介します。

ここで、地震の発生確率は、主に地震動の最大値（例えば、震度、最大加速度、SI値（スペクトル強度）など）と関連付けて表現されることが多いのですが、例えば最大加速度が同じ300galの地震であっても、その地震を引き起こす断層のマグニチュードや距離が異なると、地震の継続時間などは大きく変化します。そのため、鉄道の地震リスクを適切に評価するためには、この地震動の最大値情報だけでは不十分であり、時刻歴の地震動が必要です。この地震の発生確率と時刻歴の波形を関連付ける方法についても解説を行います。

地震発生確率のシミュレーション方法

地震の発生確率とは、以下のような形で地震の揺れを予測することです。

- ① 今後〇〇年間を想定した場合に、最大どの程度の揺れ（震度など）の地震が発生するのか？

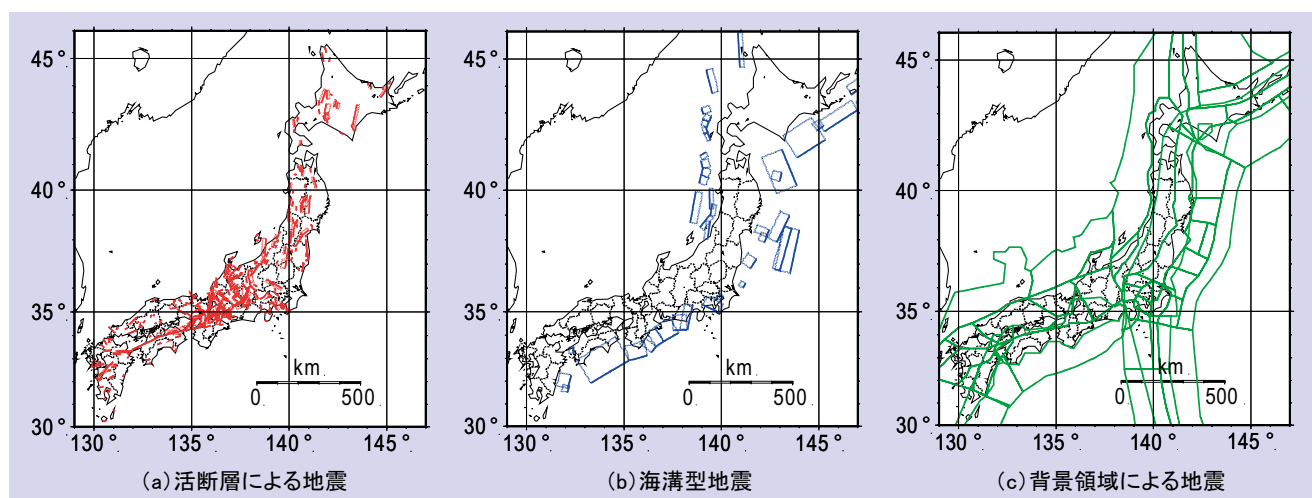


図1 断層のモデル化

②震度△の地震は今後××年間に何%の確率で発生するのか？

この地震の発生確率を計算するにはまず、日本全国に存在する多数の断層をモデル化する必要があります。1995年の兵庫県南部地震では大きな被害が発生しましたが、この地震をきっかけとして活断層調査の重要性が認識され、大規模な活断層調査が実施されました。その結果、活断層の位置や発生間隔を詳細に把握することができ、これらの結果が地震調査研究推進本部などによりまとめられています。今回はこれらの調査結果や過去の地震発生の経験をもとにして断層のモデル化を行いました。図1 (a) の活断層による地震とは、兵庫県南部地震や2004年の新潟県中越地震などのように、陸地で発生する直下型地震のことを言います。図1 (b) の海溝型地震とは、今後発生が危惧されている東海地震や南海地震、宮城県沖地震などのように、プレートの沈み込みによって発生する地震を指します。図1 (c) の背景領域による地震とは、断層が特定されておらず、どこで起こるか分からないような地震のことです。このような地震を、ある領域(地帯構造)で区切り、その中でランダムに地震が発生すると考えることで、地震の取りこぼしがないように設定しました。

このように、断層の位置と地震規模のモデル化を行うことで、例えばある断層で地震が発生した場合に、ある地点で想定される地震の揺れ(震度、加速度、速度、SI値など)をシミュレートすることが出来るようになります。また、これと同時に、各断層には何年に一度発生するか、最近地震が発生してから何年経過しているか、といった情報が設定されているため、今後ある期間でその断層から地震が発生する確率を計算することが出来ます。この地震が発生する確率、地震が発生した場合の揺れの期待値を全ての地震発生域で個別に計算し、それらの結果を統合すること

で、対象地点において想定される地震発生確率を計算することが可能となります。この地震の発生確率を計算する方法は「確率論的地震危険度解析」と呼ばれています。この確率論的地震危険度解析の例として、サンプル地点(鉄道総研、北緯39.7029°、東経139.4430°)において試算を実施します。対象地点と活断層の位置関係を、図2に示しますが、計算地点は立川断層帯の東縁に位置していることが分かります。対象地点で確率論的地震危険度解析を実施した結果を図3に示します。図3 (a) は、地震の大きさを横軸に、その地震の発生確率を縦軸に表記したもので、ハザードカーブと呼ばれます。この図からは、「対象地点において、対象期間(今回の計算では100年間)にどの程度の確率で、どの程度の地震の揺れ(今回の計算では最大加速度)に見舞われるか」を知ることが出来ます。例えば今回の対象地点では、今後100年間に、300galの地震は約50%、1000galの地震は約3%の確率で発生することが

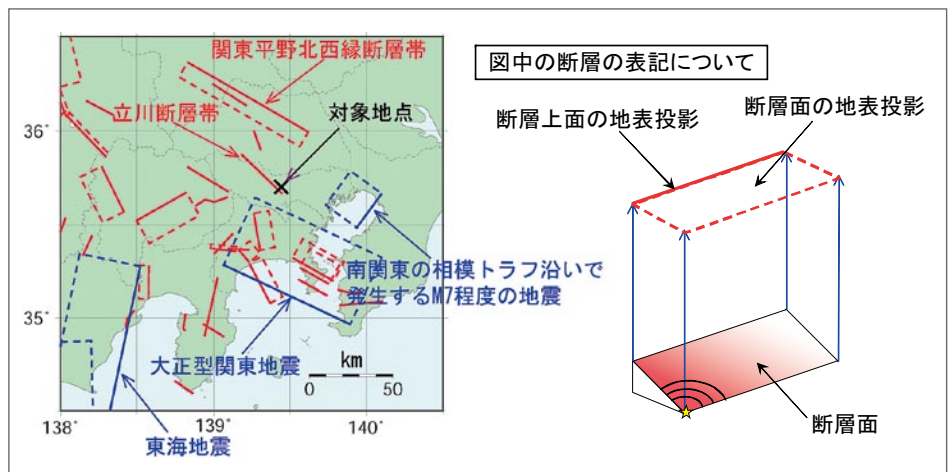


図2 対象地点と断層の位置関係概略(赤：活断層による地震、青：海溝型地震)

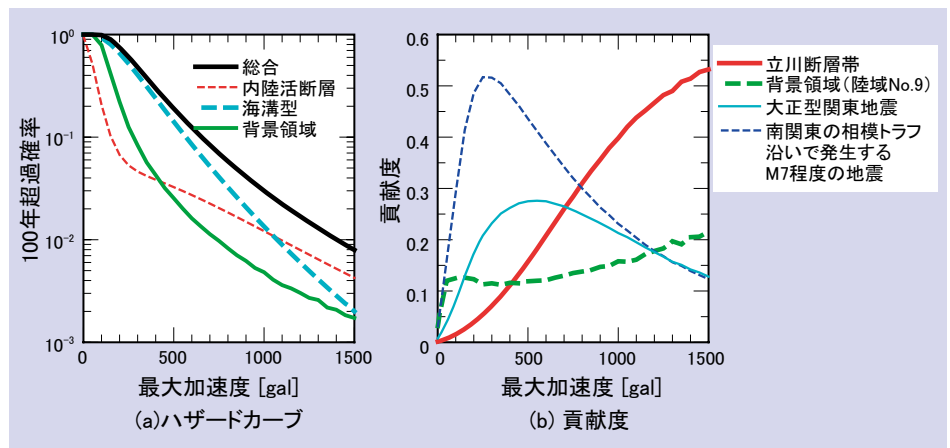


図3 対象地点における確率論的地震危険度解析結果

で、対象地点において想定される地震発生確率を計算することが可能となります。この地震の発生確率を計算する方法は「確率論的地震危険度解析」と呼ばれています。

この確率論的地震危険度解析の例として、サンプル地点(鉄道総研、北緯39.7029°、東経139.4430°)において試算を実施します。対象地点と活断層の位置関係を、図2に示しますが、計算地点は立川断層帯の東縁に位置していることが分かります。対象地点で確率論的地震危険度解析を実施した結果を図3に示します。図3 (a) は、地震の大きさを横軸に、その地震の発生確率を縦軸に表記したもので、ハザードカーブと呼ばれます。この図からは、「対象地点において、対象期間(今回の計算では100年間)にどの程度の確率で、どの程度の地震の揺れ(今回の計算では最大加速度)に見舞われるか」を知ることが出来ます。例えば今回の対象地点では、今後100年間に、300galの地震は約50%、1000galの地震は約3%の確率で発生することが

分かります。またこの図には、内陸活断層による地震、海溝型地震、背景領域による地震、の3種類の地震毎に表現した結果も図示していますが、これによって対象地点では、どういった地震を念頭に置いた対策を行えば良いのか、といったことを知る事が出来ます。

また、この確率論的地震危険度解析はそれぞれの断層ごとに個別に地震の発生確率を計算しているため、対象地点においてある加速度の地震を発生させる可能性が高い断層を知ることも可能です。それを分かりやすく表現したものが、図3 (b) の貢献度の結果です。この図は横軸に地震の大きさ(図3 (a) の横軸と同じ)をとり、縦軸に各断層の貢献度、つまりその加速度の地震を発生させる可能性を示します。この図を注意深く考察することで、対象地点において想定すべき地震像がもう少し具体的に見えてきます。例えば、対象地点において500galの地震を発生させる可能性が高い(貢献度が高い)震源域は、「南関東の相模トラフ沿いで発生するM7程度の地震」となっています。これは、海溝型地震の一種で、対象地点からは比較的距離が離れているために、地震の継続時間が長くなるといった特徴があります。また、対象地点で1000galよりも大きな地震を考えた場合、このような地震を発生させる可能性が高いのは、立川断層帯であることが分かります。立川断層帯は、再現期間としては比較的長い(約12500年に1回)のですが、対象地点からは非常に近いために一度地震が発生すると非常に大きな揺れとなることが想定されます。また距離が近いために地震の継続時間としては、比較的短くなる傾向があります。このように、確率論的地震危険度解析によって得られるハザードカーブと貢献度の結果を考察することで、対象地点において想定すべき地震の大きさ、その地震像をよりはっきりと捉えることが出来るようになります。

発生確率を持った波形のシミュレーション

前章で述べた確率論的地震危険度解析を行うことで、対象地点における地震の発生確率を知ることが出来ます。この結果を用いることで、鉄道の地震リスクを大まかに知ることが可能です。

ところが鉄道システムは、橋や盛土などの土木構造物、路盤、軌道、車両など様々な要素から構成されており、地震時にはお互いが相互に影響を及ぼしあいます。そのため、鉄道システムの地震リスクを評価するためには、確率論的地震危険度解析による地震動の最大値情報だけでは十分な

情報が得られているとは言えません。

また、たとえ同じ最大加速度であったとしてもその地震を引き起こす断層によって地震動の特性は大きく異なります。例えば同じ最大加速度300galの地震であっても、その断層の距離が近いと比較的継続時間が短くなりますし、距離が遠くなると継続時間が長くなります。また、その地震を引き起こす断層のマグニチュードが大きくなるほど、周期の長い成分が強くなる傾向があります。

このように、地震動の特性を表現する場合に最大値情報は一つの側面から物事を見たものにすぎず、鉄道システムのように複雑なシステムの被害を把握する場合には、時刻歴波形が必要になります。そこで確率論的地震危険度解析の結果を用いた時刻歴波形のシミュレーション手法を開発しましたので、その方法について簡単に説明を行います。

まず、時刻歴波形を作成する加速度と各加速度ごとの波形作成数を決定します。ある構造の地震リスクを詳細に把握したい場合には、出来る限り細かい加速度刻みと出来る限り多くの波形数を設定することが望ましいのですが、その分、動的解析を行うケース数が増えるために、解析に時間がかかることに留意しなければなりません。今回は、各加速度ごとに10波計算することとしました。

次に確率論的地震危険度解析によって得られた各断層の貢献度に従って、各断層からシミュレートする波形の数の割合を決定します。これは、表1のように貢献度の高い断層からの波数が多くなるように設定します。具体的には、各加速度ごとに10波計算するとした場合に、貢献度が0.5の断層に割り当てられる波形の数は、10波×0.5=5波となります。

断層から発生される地震動の時刻歴波形は、強震動予測と呼ばれる手法を用いることによって、計算することが出来ます。そしてこの時刻歴波形の最大加速度発生確率は、

表1 貢献度に基づく波形割り当ての例

加速度 (gal)	貢献度 出力数	断層 A	断層 B	断層 C	断層 D	合計
100	貢献度	0.1	0.5	0.3	0.1	1
	出力数	1	5	3	1	10
200	貢献度	0.3	0.2	0.3	0.2	1
	出力数	3	2	3	2	10
300	貢献度	0.8	0.1	0.08	0.02	1
	出力数	8	1	1	0	10
・	・	・	・	・	・	・
・	・	・	・	・	・	・

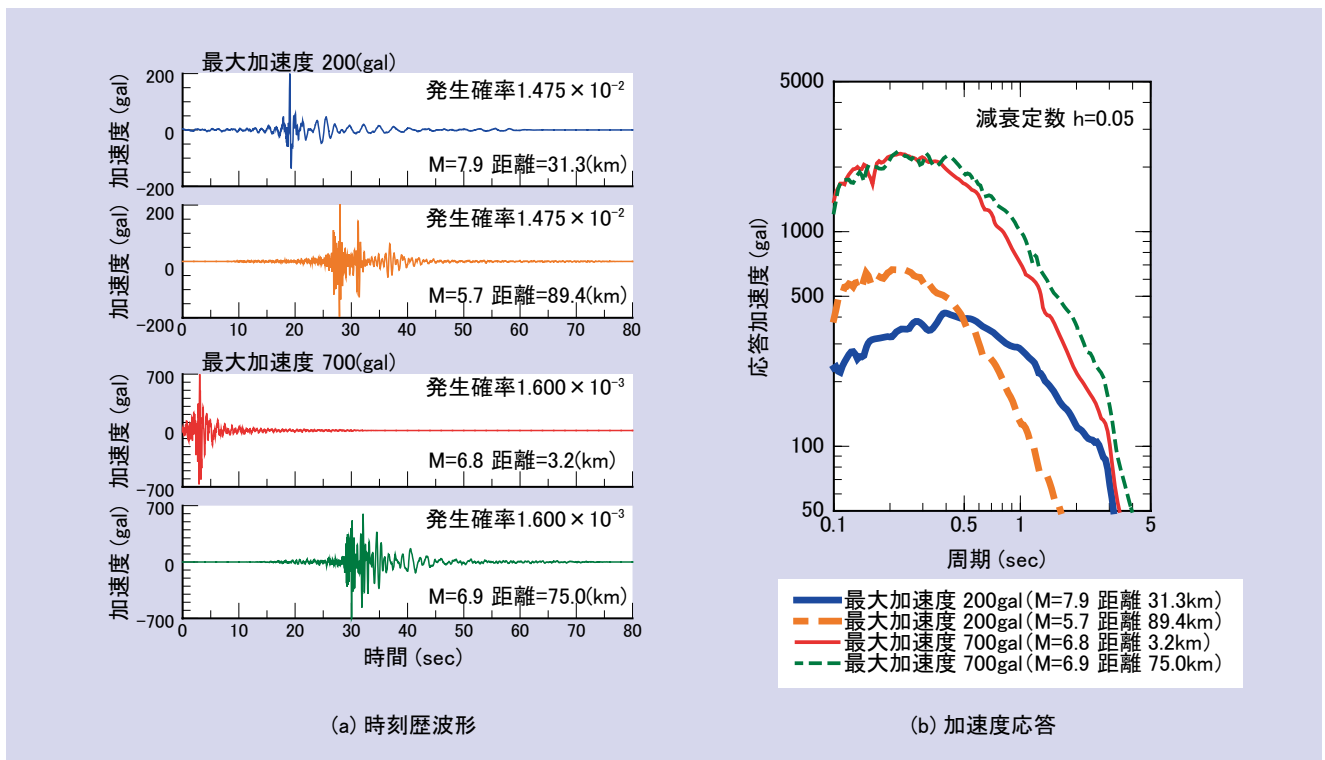


図4 対象地点における生起確率付地震動群の例

確率論的地震危険度解析により分かっているため、時刻歴波形にも同様の発生確率が付与されることになります。この発生確率を有する時刻歴波形(の集合)を「生起確率付地震動群」と呼びます。

前章で地震の発生確率を算定した地点における生起確率付地震動群の作成例を図4に示します。この図より、同じ最大加速度であっても地震の規模や震源と対象地点の距離が異なると、時刻歴波形の特性が大きく異なることがわかります。具体的には、上2つの波形はいずれも最大加速度200gal、下2つの波形は最大加速度700galですが、震源距離が長くなるほど、継続時間が長くなっています。また、最大加速度200galの2つの波形は、地震規模が大きく異なる(上はM7.9、下はM5.7)のですが、図4(b)の応答スペクトルを見ると、その周期特性が大きく異なっており、マグニチュードが大きいほど、長周期成分が卓越する結果になっていることがわかります。

このように断層と対象地点の影響を加味した生起確率付地震動群を用いて動的解析を実施することで、地震発生の物理をより正確に表現可能であり、さらに鉄道システム間の相互作用も考慮出来るため、より多様なアプローチから鉄道の地震リスクを捉えることが可能となります。

おわりに

今回は、鉄道の地震リスクを評価するための地震動設定手法として、地震の発生を確率論的に評価する方法について説明を行いました。さらに、この結果に基づいて時刻歴波形を作成する手法についても簡単に解説しました。本手法を用いて得られた地震波形を用いて動的解析を実施することで、その地点の地震の脅威を全て考慮した上での鉄道のリスク評価を行うことが可能となります。今後は本手法を実際の鉄道システムに適用し、補強優先順位の設定などを行うことで、鉄道システム全体の地震リスクの効果的な低減に繋げていきたいと考えています。[RRR]

文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測値図，2009
- 2) 坂井公俊，室野剛隆：地震危険度解析に基づく生起確率付地震動群の作成方法，鉄道総研報告，Vol.24，No.5，pp.11-16，2010.5