

- 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

大地震後に発生する余震を評価する

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震では、マグニチュード9.0の本震だけでなく余震においても大きな被害が発生しました。巨大地震の発生後には大きな余震の発生が予想されるため、構造物の地震安全性を評価する際にはこれらの余震も対象として含んでおくことが重要です。そこで過去の膨大な地震データを整理することで、本震発生後の時間経過に伴う余震の規模や発生タイミングを評価する手法を構築したので、その成果について紹介します。



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



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

はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、マグニチュードM9.0という我が国史上最大規模の地震であり、社会全体に甚大な被害をもたらしました。また、その後発生した余震においても多数の構造物が損傷を受けたとともに、活発な余震活動が復旧作業に大きな妨げとなりました。そのため今後の大規模地震に対する鉄道の安全性を確保するためには、これらの余震に対する配慮もますます重要になってきます。そこで、過去の地震データを整理することで、鉄道の安全性評価で考慮すべき余震の発生モデルを構築したので、その結果について説明します。

余震とは？

ここでは、余震についての簡単な解説を行います。「余震」とは大きな地震（本震）の後にその近くで発生する多数の地震のことを指します。

まず、本震は次のようにして発生します。プレートと呼ばれる厚さ100km程度の硬い層が、地球上をゆっくりと移動しています。複数のプレートの移動によって、そのプレートとプレートの境界には徐々に力が蓄積されていきます(図1の①)。この力がある程度大きくなると、その境界面が一度に大きくずれ、溜まった力を解放します(図1の②)。この力の解放が地震の発生であり、その解放量が大きいほど、地震の規模(マグニチュード)が

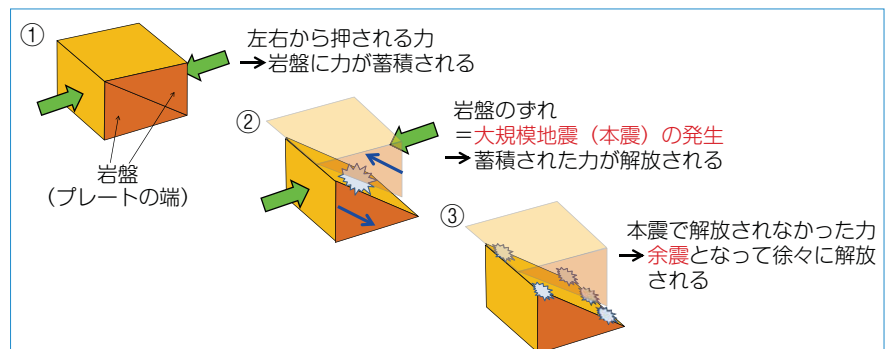


図1 本震・余震の発生イメージ

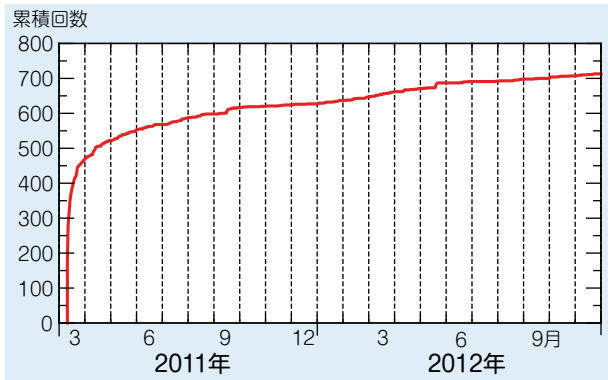


図2 東北地方太平洋沖地震の余震数(M5以上の余震)

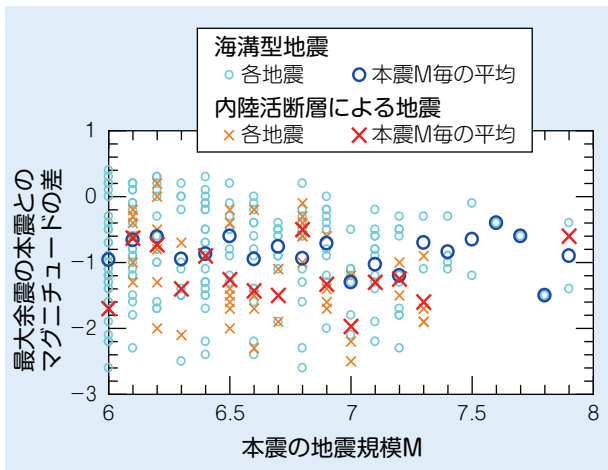


図4 本震と最大余震の地震規模の関係

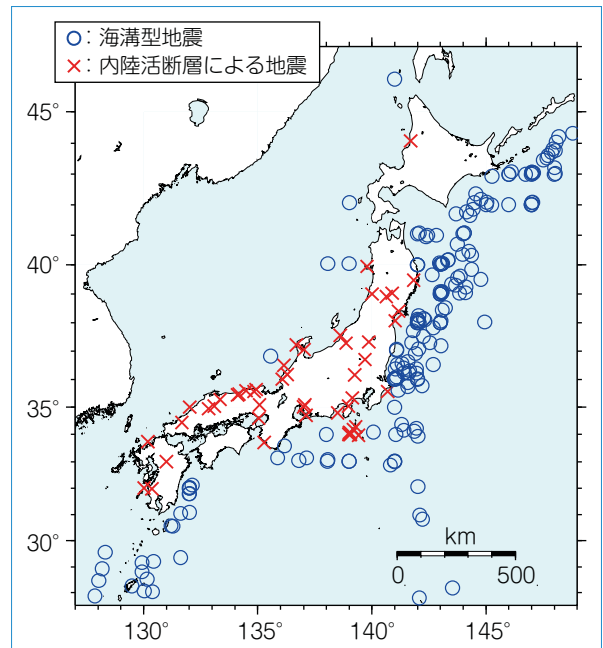


図3 検討に用いた本震の震央位置

に発生したM7.2の余震は、その発生位置が陸地に近かったために、鉄道構造物にも大きな被害を与え、東北新幹線の運行再開に大きな支障となりました。

余震発生モデル化

(1) 本震と余震の整理

余震のモデル化を行うためにまず、過去に発生した本震・余震データの整理を行いました。具体的には、1923年～2010年9月に発生した約180万個の地震を対象とし、M6以上の本震と、それに付随する余震の対応付けをひとつずつ行いました。その結果、図3にあるように、内陸活断層による地震で50個、プレート境界で発生する海溝型地震で211個を本震として抽出しました。以降ではこのデータをもとに余震発生モデル化を行います²⁾。

(2) 本震の規模と最大余震の規模の関係

まず最大余震の地震規模(M)が本震の規模とどのような関係となっているかについて整理しました。横軸に本震の地震規模、縦軸に最大余震の本震とのMの差を取り、各地震毎にプロットした結果を図4に示します。

大きくなります(大規模地震の発生)。上記のようにプレートの移動に伴って、プレート同士がずれることで発生する地震を「海溝型地震」と呼びます。これとは別に、岩盤内に力が蓄積された結果、表面にも亀裂(活断層)が発生することがあり、この地震のことを「内陸活断層による地震」と呼びます。

また、溜まった力の多くは本震によって解放されるのですが、場所によっては力が完全に解放されていない部分があるなど、岩盤が不安定な状態になります。この残った力は徐々に解放されるのですが、これにより余震が発生されると考えられています(図1の③)。

過去の経験から、余震は以下のような特徴があります¹⁾。

- ①余震の数は本震直後に多く、時間とともに次第に少なくなっていきます。
- ②規模が大きい余震は少なく、規模が小さい余震は多く発生します。
- ③大きな余震は余震域の端の周辺で起きやすい傾向があります。

④大きな余震による揺れは、場所によっては本震の揺れと同じ程度になることがあります。

これらの特徴を東北地方太平洋沖地震に照らして見てみます。東北地方太平洋沖地震におけるマグニチュードMが5以上の余震の発生状況を図2に示していますが、余震の発生個数は時間とともに徐々に少なくなっていることが分かります。また、M5以上の余震は2012年11月末時点で700回以上も発生しているのですが、M7以上の余震は6回と、全体の数の中では非常に少なくなっており、M8以上の余震は発生していません。さらに、現時点での最大余震(M7.6)は震源から大きく離れた茨城県沖で発生しています。

ここで、本震と比べて余震は規模が小さいからと言って、その影響を無視することはできません。東北地方太平洋沖地震では、本震後に6回発生したM7以上の大規模余震によって構造物被害が発生しました。特に2011年4月7日

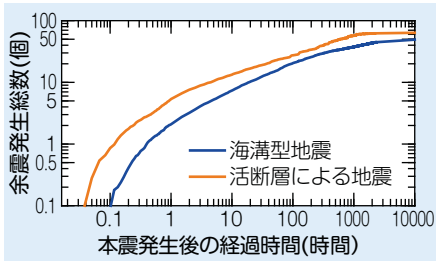


図5 本震発生後の経過時間と余震発生個数の関係 (本震とのM差が3以内の余震を対象)

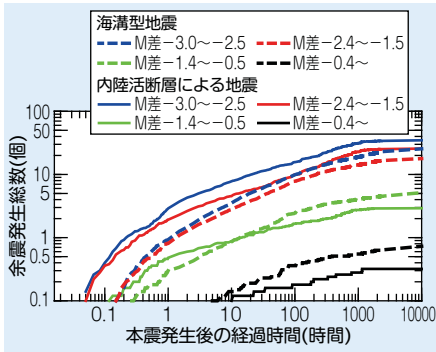


図6 本震発生後の経過時間と余震の発生総数の関係 (本震とのM差毎に区分)

この結果を見ると、各地震毎のバラツキは大きいですが、平均的には本震の地震規模によらず概ね一定の値を示しているように見えます。具体的には、海溝型地震では最大余震は本震よりもM1.0程度小さく、内陸活断層による地震ではそれと同程度か多少小さな規模となっていることが分かります。そのため、例えばM7の大規模地震の発生を考えた場合には、その後の最大余震としてM6程度を考えておけばよいと言えます。

(3) 時間経過に伴う余震の発生個数の推移

本震発生後の時間経過に伴う、余震発生個数の期待値の推移を図5に示します。これらの結果より、単位時間あたりの余震発生個数は、時間が経過するに従って減少していくことが分かります。また、最終的な余震(ここでの余震は、本震のMとの差が3以内の比較的規模の大きな地震)の発生個数は50個以上となっています。

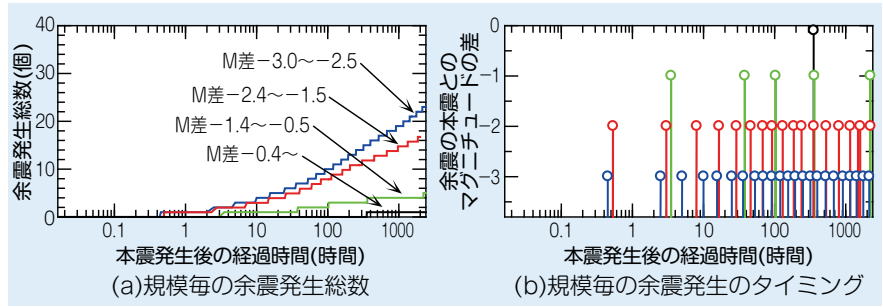


図7 構築した余震発生モデル(海溝型地震)

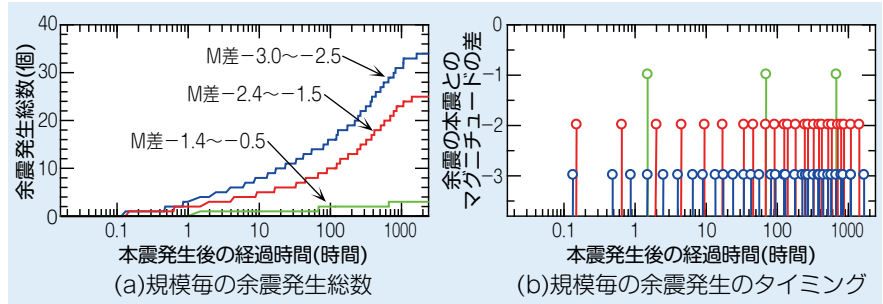


図8 構築した余震発生モデル(内陸活断層による地震)

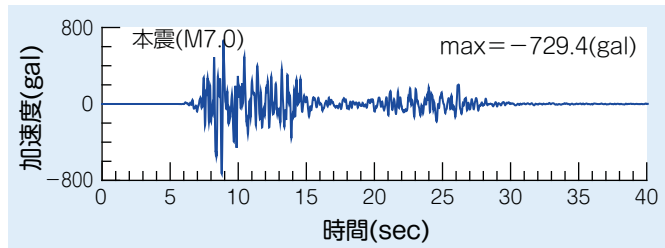


図9 本震の地震動評価結果

図6は、図5の結果を本震とのマグニチュード差毎に分類した結果を示したものです。この図を見ると、マグニチュードの大きな余震ほど発生個数が少ないことが分かります。また、時間経過に伴って余震発生数が減少するという全体的な傾向は図5と変わりませんが、海溝型地震と内陸活断層による地震を比較すると、比較的規模の小さな余震(M差-1.5以下)は内陸活断層による地震の方が発生個数が多く、M差-1.4以上の大きな余震では海溝型地震の方が多くなっています。

(4) 余震発生のモデル化

これまでの結果を用いて、本震発生後の時間経過に伴って発生する余震のタイミングと規模についてモデル化を行いました。最終的に得られた本震

後の経過時間と余震規模の関係を図7(海溝型地震)、図8(内陸活断層による地震)に示します。

このモデルでは、内陸活断層による地震では規模の小さな余震の発生数が多く、逆に海溝型地震では規模の大きな余震発生数が多くなっていることなどを適切に表現できます。また、例えば本震とのマグニチュード差が-1程度の余震は、本震発生後数時間(10時間以内)で1回程度発生し、その後100時間程度までの間に内陸活断層による地震ではもう1回、海溝型地震では2回程度の発生が想定されることもわかります。このように今回構築したモデルを用いることで、本震後の余震発生のタイミングと規模、回数を大まかに予測することが可能となりました。

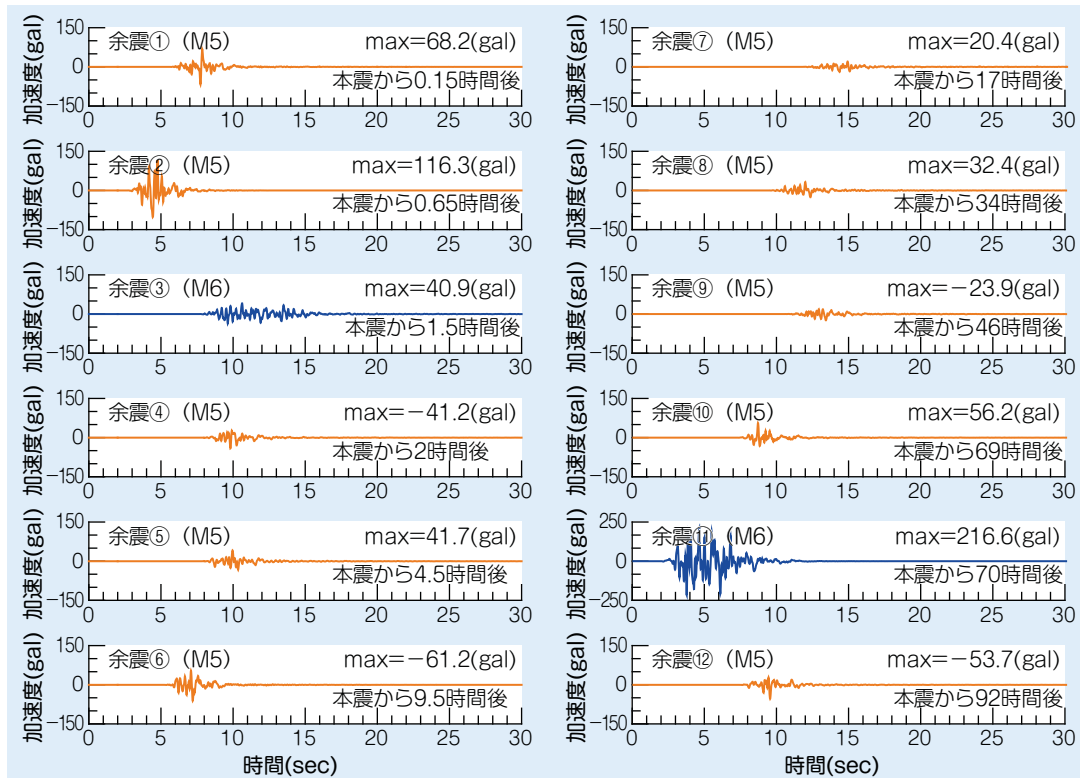


図10 余震の地震動評価結果
(本震発生後から100時間以内に発生したM5以上の余震を対象)

余震を含んだ地震動波形群の試算

ここでは提案した余震発生モデルを用いて、大規模地震が発生した場合の本震と余震の時系列地震動群の試算を行います。今回は本震としてM7の内陸活断層による地震が近傍で発生する場合を想定しました。また、対象とする余震は、M5.0以上の地震（つまり、本震とのマグニチュード差が2以内の余震）とします。余震の評価を行う期間としては、本震発生から100時間以内としました。これは本震において比較的大きな損傷を受けた構造物の補修に要する日数が、概ね3~5日程度であると考えられるので、これを参考に設定した値です。

図8の余震発生モデルから、本震発生後100時間以内の余震数としては、M6の地震が2回、M5の余震が10回と評価されます。そこで、本震・余震あわせて計13個の地震に対してそれぞれ時刻歴波形を作成しました。

得られた地震動波形の評価結果を図9（本震）、図10（余震）に示します。これらの結果から、まず本震では700galを超える非常に大きな地震となるとともに、波の継続時間も20秒程度と比較的長くなっています。一方で、余震波形では、加速度は小さく、かつ継続時間は非常に短くなっています。これは地震規模が大きくなるに従い、断層の壊れる面積が大きくなり、かつ壊れている時間も長くなっているためです。また余震③と余震⑪では、地震規模は等しい（M6）のですが、地震動の大きさは41galと217galと大きく異なります。これは、余震の震源位置がそれぞれ異なっていて、余震⑪の方が対象地点との距離が近くなっているためです。

これらの波形群を用いることで、余震も含めた構造物の安全性評価を行うことが可能となります。

おわりに

過去の地震データを整理することで、鉄道の安全性を確認する際に考慮すべき余震の発生モデルの構築を行いました。これにより本震が発生した後、ある日数以内に想定される余震の規模と回数などを予測することが可能となりました。

今後はこの本震・余震モデルを活用することで、大規模地震に対する鉄道の安全性向上に繋げていきたいと考えています。[RRR]

文献

- 1) 気象庁：http://www.jma.go.jp/
- 2) 坂井公俊，室野剛隆，鉄道総研報告，第26巻，第9号，2012