

東北地方太平洋沖地震で 地盤はどう揺れたか

室野 剛隆

構造物技術研究部(耐震構造研究室 室長)



むろの よしたか

はじめに

平成23年3月11日午後2時46分頃、三陸沖の深さ24kmの海底を震源として、Mw9.0*の巨大地震が発生しました。発震機構は西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、沈み込む太平洋プレートと陸側のプレートの境界で発生した地震です。断層の長さは南北約450km、東西約200kmで、岩手県沖から茨城沖までの広いプレート境界で大きなずれが発生したと推定されています。断層のすべり量は30mを越えたとも言われており、これによる海底変動が海面の変化をもたらし、巨大な津波が発生しました。また、この地震により宮城県栗原市で震度7、宮城県、福島県、茨城県、栃木県で震度6強など広い範囲で強い揺れを観測しました。ここでは、現在公開されている情報などから、この地震の揺れの特徴について紹介します。

想定地震と過去の地震

東北地方の太平洋沖は、過去に何度も大きな地震に見舞われてきました。そのため、地震に対する取り組みも盛んに行われてきた地区の1つでした。

想定地震

政府の地震調査研究推進本部では、図1に示すように、

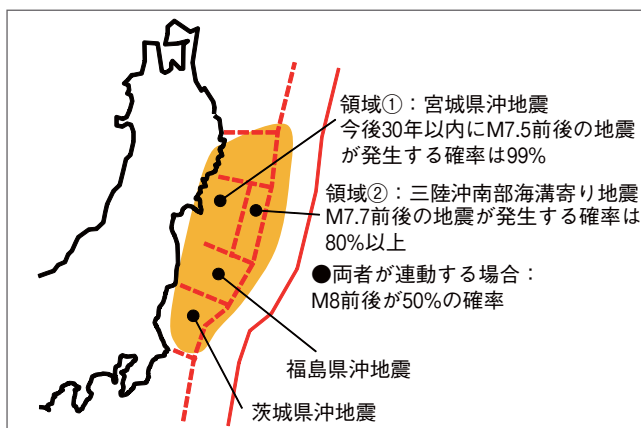


図1 これまでの想定地震

この地域での地震を複数想定してきました。例えば、宮城県沖地震の発生確率は今後30年以内に99%でその規模はM7.5前後、三陸沖南部海溝寄り地震の発生確率は80%でその規模はM7.7前後、両者が連動する場合はM8前後が50%の確率で発生すると想定されていました。

しかし、図2に示す断層の破壊過程を見ると、震源付近の宮城県沖と岩手県沖、さらには福島県・茨城県沖に大きな断層のずれを確認することができ、個別に想定されてきた3から4つの地震が連動したことで巨大な地震が発生したと推定されています。

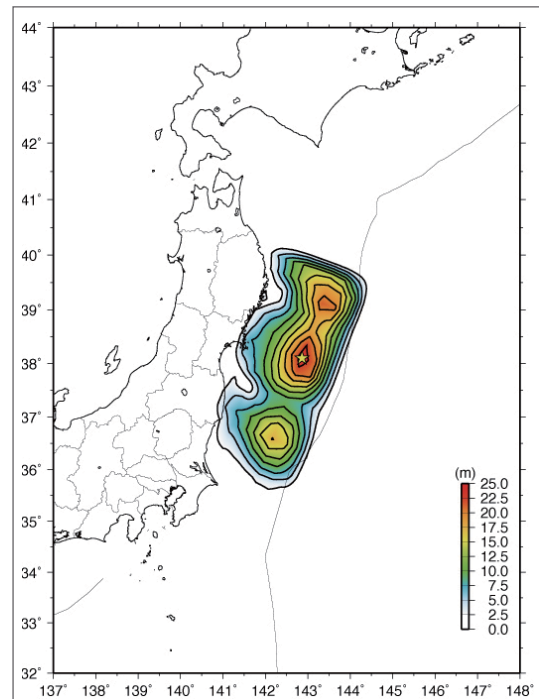


図2 推定された破壊過程
(筑波大学八木准教授による解析例)

* Mwはモーメントマグニチュードであり、従来からよく使われている気象庁マグニチュードMjとは定義が異なる。今回の地震はMjの適用外のため、異なる定義を用いている。なお、本文では特に断りがない限りマグニチュードMは気象庁マグニチュードである。

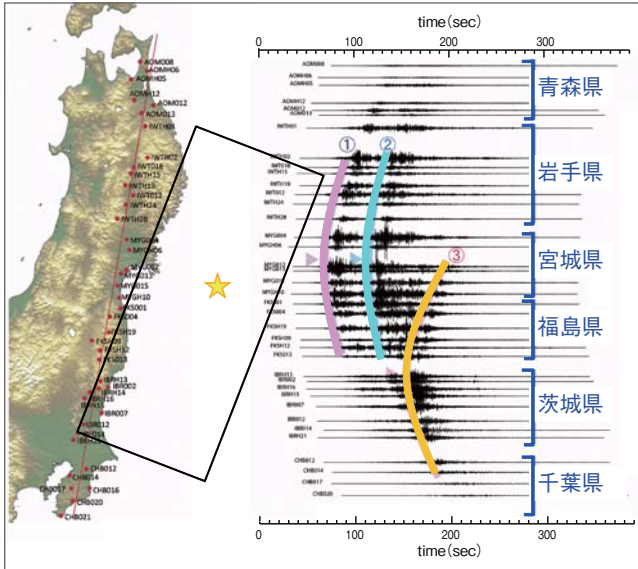


図3 K-NETで観測された加速度波形
(東京大学瀧瀬教授らの図面に加筆)

過去の地震の概要

1896年6月15日には、三陸沖約200kmでM8.5の地震(明治三陸地震)が発生しました。揺れは震度3程度と小さかったようですが、津波で多くの方(約20,000人)が亡くなっています。

1933年3月3日には、M8.1の地震(昭和三陸地震)が発生しました。この地震では震度5程度でしたが、津波の高さはやや小さかったこともあり、死者は約3,000人でした。

最近では津波による堆積物調査などにより、過去2500年間での巨大地震の発生状況が解明されつつあります。例えば、869年(貞観11年)に発生した貞観地震では、岩手県沖(三陸沖)から福島県沖または茨城県沖まで震源域が及んだM8.6の連動型巨大地震であった可能性が指摘されています。また、津波の痕跡には、貞観津波を示すと思われるもの以外にも、いくつか存在することも明らかとなり、400~800年(平均600年程度)の間隔で、繰り返し巨大地震・巨津波が発生していることが分かってきました。

揺れの特徴

複雑な断層破壊による複雑な揺れ方

(独)防災科学技術研究所の地震観測網K-NET, KiK-netでは、多くの貴重な記録を観測・公開しています。図3は東北~関東地方で得られたK-NET観測点の記録を、南北方向に並べたものです。上述したように450km×200kmの広い領域で、複数の断層が複雑に破壊したため、観測記録にも複数の大きな波群①~③が見られます。具体的には、東北地方では2つの大きな波群が、関東地方ではそれとは別の1つの波群が見られます。各波群は以下のように発生したものであると推定されます。

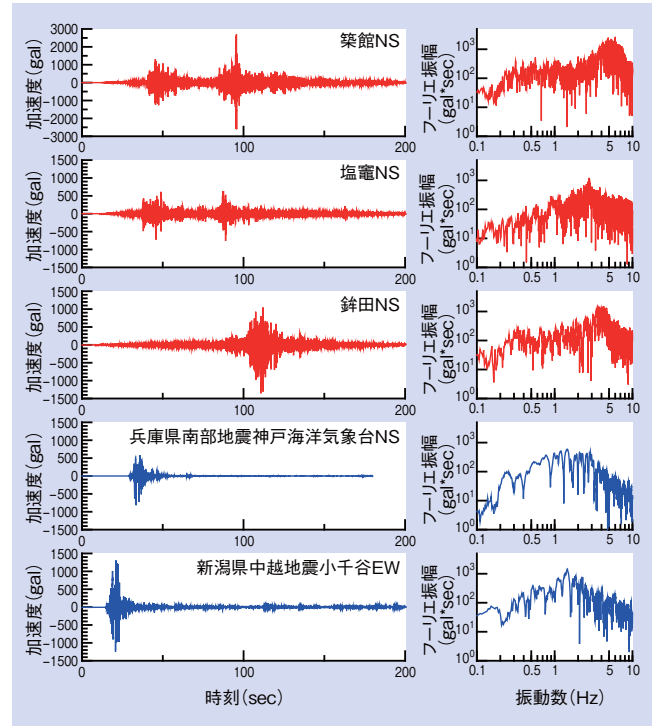


図4 加速度波形とフーリエスペクトル

- ①宮城県沖で大きな断層破壊があり、東北地方全体に地震動が伝播し、大きく揺れました。
- ②約50秒後に再び宮城県沖で大きな断層破壊があり、①と同様に地震動が伝播しています。なお、①および②による破壊では、関東地方は大きく揺れていません。
- ③さらに、茨城~福島県沖で大きな断層破壊があり、この地震では南東北~北関東地方が大きく揺れました。関東地方での揺れは、この3つめの破壊による影響が主要因であったと思われます。

非常に強い揺れ

今回の地震で観測された記録の中から特徴的な加速度波形とそのフーリエスペクトルを図4に示します。なお、過去に鉄道に被害をもたらした地震記録についても比較のために示してあります。

今回の地震では、ほぼ日本全域で有感となりました。特に、震源域に近い宮城県、福島県、茨城県、栃木県では、非常に大きな揺れに襲われました。K-NET, KiK-netによると、最大加速度が1000galを超える強震動を記録した地点が約20箇所もありました。特に、K-NET築館では最大加速度が約3000galという極めて強い揺れを観測しました。これほど、広い地点で1000gal以上の最大加速度が得られたことは過去に類を見ません。ちなみに、多くの土木構造物に壊滅的な被害をもたらした1995年の兵庫県南部地震では、神戸海洋気象台で818galの地震が観測されており、最大加速度という点で見れば、今回の地震の方が遥かに大きかったことが分かります。

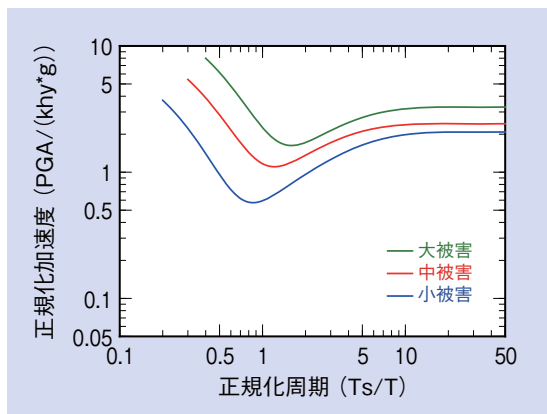


図5 構造物の被害推定ノモグラム

高い卓越振動数

しかし、加速度が非常に大きかったわりに、揺れによる被害は限定的であったと言われています。この理由について考えてみます。

1995年の兵庫県南部地震や2004年新潟県中越地震では、多くの土木・建築構造物が倒壊を含む損傷をしましたが、フーリエスペクトルの卓越振動数は、1~2Hz程度であり、構造物の固有振動数域でパワーを有していることが分かります。それに対して、今回の地震では、3~5Hzの高い振動数成分が卓越しており、被害が大きかった地震に比べると構造物の周期帯域では振幅が小さいことが分かります。

図5は構造物の被害推定ノモグラムと言われているもので、地震による被害程度を即座に推定するためのノモグラムです。横軸には、地震時の卓越周期を構造物の周期で正規化した値、縦軸は、地震動の最大加速度を構造物の降伏加速度で正規化した値です。鉄道構造物の一般的な周期は0.5~1.0秒程度です。これに対して、今回の地震の卓越周期は先に述べたように0.2~0.3秒程度(3~5Hz前後)であり、最大加速度が仮に1000galであったとしても、せいぜい、小被害程度の破壊力であったことが分かります。これに対して、兵庫県南部地震では、中から大被害の破壊力を有していたことが分かります。

ところで、2004年に三陸南地震が発生しました。その時も同様に高い振動数が卓越していました。このように、この地域では高い振動数が卓越する傾向があるのですが、これは地盤の堆積構造と関連があります。図6は地震基盤と言われる非常に強固な岩盤までの深さを表したのですが、今回の地震で揺れが大きかった地域は、他の地点よりも相対的に基盤までの深さが浅いことが分かります。

なお、東京を中心とした関東地方では、堆積層が非常に厚く堆積しており、揺れが東北地方と大きく異なることが

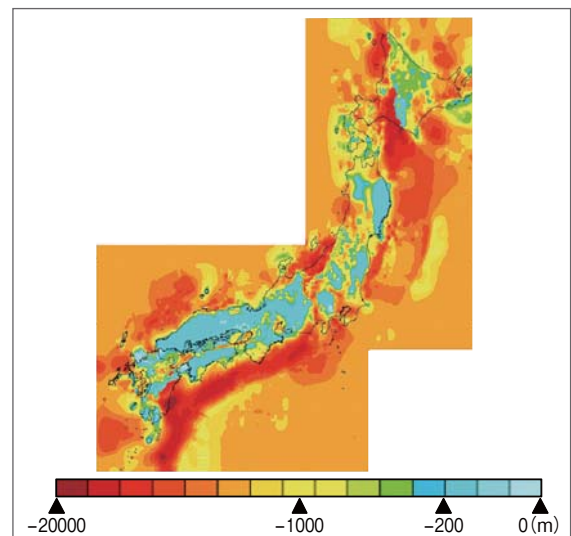


図6 地震基盤までの深さ
((独)防災科学技術研究所 提供図面に加筆)

類推できます。このことは、今後、発生が危惧されている首都圏直下地震や東海・東南海・南海地震では注意を必要とする事項だと考えられます。

長く続いた揺れ

今回の地震による揺れのもう1つの特徴として、継続時間が極めて長かったことが挙げられます。これは、巨大な領域が時間をかけて破壊したことに起因しています。図3からも分かるように、最初の破壊から3つ目の破壊まで約100~150秒程度かかっています。その結果、揺れの継続時間は3分にも及んでいます。

一方、兵庫県南部地震や新潟県中越地震では、典型的な直下型の地震動であり、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た波形であることが分かります。

一般に、瞬間的にエネルギーが投入されたほうが、構造物の損傷が大きくなると言われています。このことは、揺れによる被害が限定的であったもう1つの理由になります。

関東地方の長周期の揺れ

今回の地震では、震源から遠くなれた都内でも大きな揺れが観測され、東京都内や千葉県・神奈川県内でも被害が発生しています。図7はK-NET浦安で観測された地表面の加速度とそのフーリエスペクトルです。揺れは600秒も継続しており、極めて長いものでした。また、主要動以後に振動数が0.3~0.5Hzほどのやや長周期の成分が繰り返されており、フーリエスペクトルを見ても、低振動数までパワーを有しています。都内で地震を感じた方々が長周期に感じたというのは、この成分が影響していると思われます。これは、先に述べた堆積層の厚さとも密接に関係して

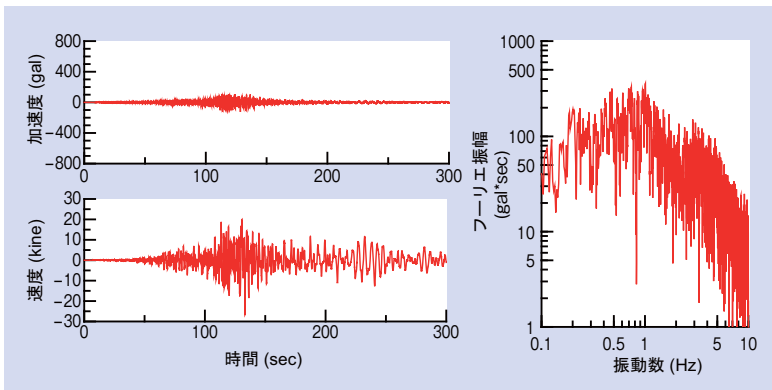


図7 K-NET浦安で観測された地震動の特性

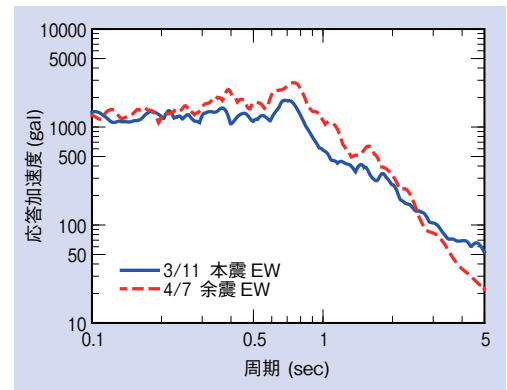


図9 本震と余震の加速度応答スペクトル

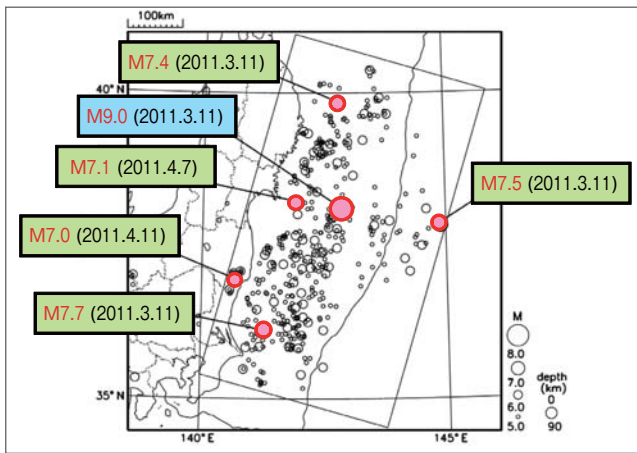


図8 余震分布図(気象庁提供図面に加筆)

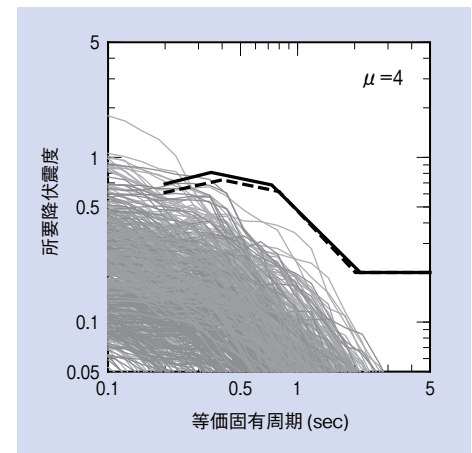


図10 所要降伏震度スペクトル

いると思われます。また、千葉県などでは液状化の被害が顕著でしたが、この長周期・長継続時間の影響が大きかったことが、別途行った解析から分かっています。

活発な余震活動および誘発地震

本震で非常に大きな領域の断層が破壊したため、余震の規模も大きく、余震の数も非常に多く発生しています。特に、M7.0以上の余震は2011年12月までに5回も発生しています(図8)。

例えば、4月7日23時32分頃に発生したM7.1の余震は、その震源が本震の震源よりも陸地に近かったこともあり、仙台付近では本震と同様もしくはそれよりも大きな揺れました。図9にK-NET仙台で観測された余震の加速度応答スペクトルを示しますが、広い周期帯域で本震の揺れを上回っていることが確認されます。また、余震により被害が拡大したという報告もされています。

また、余震域とは全く異なる箇所での地震も発生しており、3月12日長野県内の地震、15日の静岡県内の地震などは、今回の地震による誘発地震と考えられています。

設計地震動の比較

図10は所要降伏震度スペクトルで、横軸は構造物の周期を、縦軸はある塑性率以内に構造物の応答が収まるために必要な降伏震度(強度)を表しています。図には耐震設計標準で使われている標準設計地震動のスペクトルも示してあります。本来は、Mw9の巨大地震は現行の耐震設計では想定をしていませんでしたが、一般的な構造物の周期帯域では概ね今回の地震を包絡できており、設計地震動としても有効であったことが確認できました。

おわりに

現在公開されている強震記録の情報に基づき、東北地方太平洋沖地震の特徴を「揺れ」の観点から概観しました。今後は、より詳細なデータに基づき、地震動の特性の解明や構造物の被害との関連などについて研究を進める予定です。また、耐震設計標準については、今回の地震を踏まえ、平成24年度中の出版に向けて現在改定中です。RRR