

東日本大震災レポート

第5報（今回の地震の特徴と建物の被害状況，耐震設計について）

森 隆一 Ryuichi Mori
デューデリジェンス事業部
事業部長

杉本 和城 Kazushiro Sugimoto
デューデリジェンス事業部
上席コンサルタント

はじめに

東北地方太平洋沖地震（以下「今回の地震」）では、独立行政法人 防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET 築館（MYG004）（宮城県栗原市築館）において水平最大加速度 2700gal、上下最大加速度 1880gal、三成分合成値で 2933gal の大きな値が記録され、計測震度は 7（6.67）まで達しました。

第5報では、この巨大地震からほぼ1ヶ月半経過した時点での情報・データから、今回の地震の特徴について整理するとともに、地震動の特徴と建物の被害状況，耐震設計との関連性をお伝えします。

なお本レポートは、2011年4月25日までに公表された情報を取りまとめたものです。今後発表される情報に基づき、順次続報を発信していく予定です。

1. 地震の全体像

1.1. 地震の概要

発生日時：3月11日（金） 14:46:18
震源位置：北緯 38° 6' 12"、東経 142° 51' 36"
深さ 約 24 km（暫定値）
地震規模：マグニチュード Mw9.0（暫定値）
各地の震度：震度 7（宮城県栗原市築館）
震度 6 強（宮城・福島・茨城・栃木の4県）
震度 6 弱（岩手から千葉の8県）

（出典：気象庁発表資料）

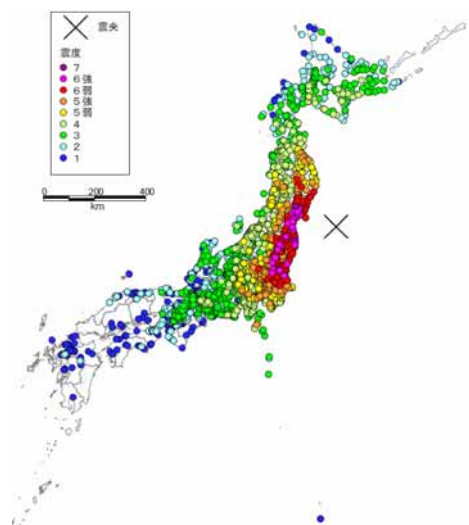


図 1.1 東北地方太平洋沖地震 地表加速度分布
（出典：地震調査研究推進本部，平成 23 年
（2011 年）東北地方太平洋沖地震による
震度分布図）

1.2. 地震の特徴

今回の地震の特徴を下記にまとめます。

< 1 > 観測史上最大のマグニチュード

日本国内観測史上最大で、アメリカ地質調査所（USGS）の情報によれば 1900 年以降、世界第 4 位の地震規模

(マグニチュード) でした。

【解説】地震の規模は、現時点でマグニチュード Mw9.0 と発表されており、日本国内観測史上最大、世界でも 4 番目の規模でした。

断層の破壊が始まった震源地は三陸沖ですが、最終的に断層が破壊した震源域は三陸沖から茨城県沖までの南北約 500km、東西約 200km (気象庁) の広範囲にも及びました。

< 2 > 複雑な断層破壊

震源となる断層面が数分にわたり複雑に破壊し、最大のすべり量は約 30m (剛性率を 30GPa と仮定した場合) であったと推測されています。

【解説】気象庁の分析によれば、断層の破壊は宮城県沖から始まり、2 回にわたり 20m 以上の大きな断層のすべりが生じた後に、約 100 秒遅れて茨城県沖でも 10m を超えるすべりがあったものと推測されています。主な破壊継続時間は約 160 秒であったと推測されています。

このように、数分にわたる複雑な断層の破壊が、後述する地震動の波形の特徴や持続時間の長さにも現れています。

< 3 > 4 つの震源域の連動

政府が個別に発生を想定していた 4 つの震源域が連動しました。

【解説】地震調査研究推進本部 (文部科学省の機関) は、過去に発生した地震に関する調査研究成果に基づき、三陸沖から房総沖で発生する地震の評価を行ってきました。

今回の地震は、①～④の 4 つの震域にまたがり、3 地震が連動して発生したと考えられています。事前には、①と②の 2 つの領域の連動は想定されていたものの、4 つの領域の連動は想定されていませんでした。また、③の福島県沖と④の茨城県沖は、過去にマグニチュード 8 クラスの地震の発生が知られておらず、想定されている地震規模は比較的小さいものでした。なお、最初に破壊した①の領域における今後 30 年間の地震発生確率は、隣接する②とともに高い値でした。

< 4 > 東北地方での極めて大きな地殻変動

【解説】国土交通省 国土地理院は、GPS による観測から宮城県



1900 年以降に起きた Mw8.8 以上の地震を世界震源地図の上にプロットしたもの。黄色の四角は断層面をあらわし、マグニチュードの大きさにおおむね対応するように描かれている。

図 1.2 世界で起きた大きな地震 (出典：東京大学地震研究所、世界で起きた大きな地震)

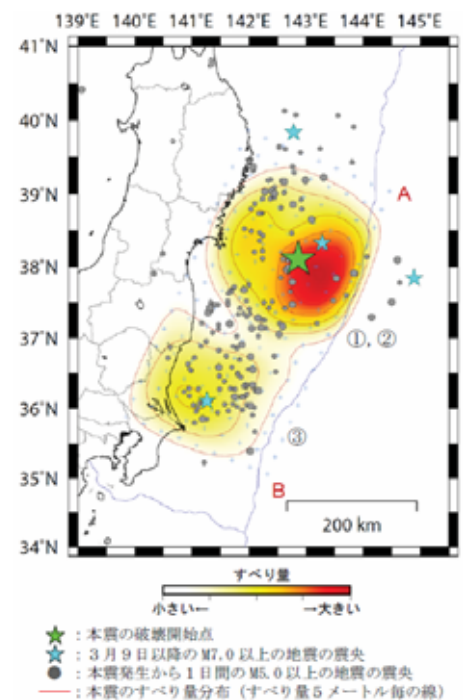


図 1.3 すべり量分布 (出典：気象庁、報道発表資料 第 28 報)

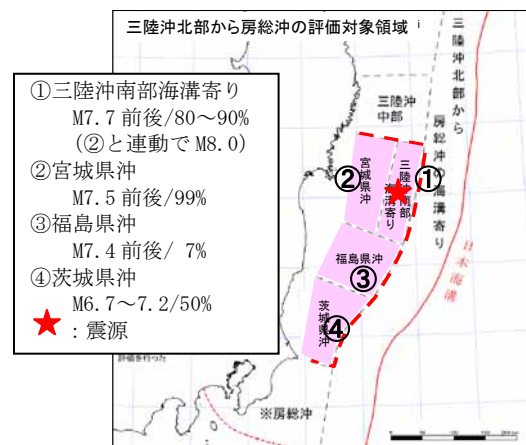


図 1.4 地震調査研究推進本部による領域ごとの評価の概要 (出典：地震調査研究推進本部)

石巻市の電子基準点「牡鹿」が東南東方向に約 5.3m 移動し、約 1.2m 沈下したことが分かったと発表しました。

海上保安庁は、観測された各地域の海底基準点（海底に設置された電子基準点）のデータでは、震源域のほぼ真上に位置する海底基準点「宮城沖 1」が東南東に約 24m 移動し、約 3m 隆起したものが最大であると発表しました。「宮城沖 1」は本震だけで約 20m 以上移動したと見られ、これらの観測結果により、震源付近の海底の移動距離は陸上の約 4 倍以上となることが確認されました。

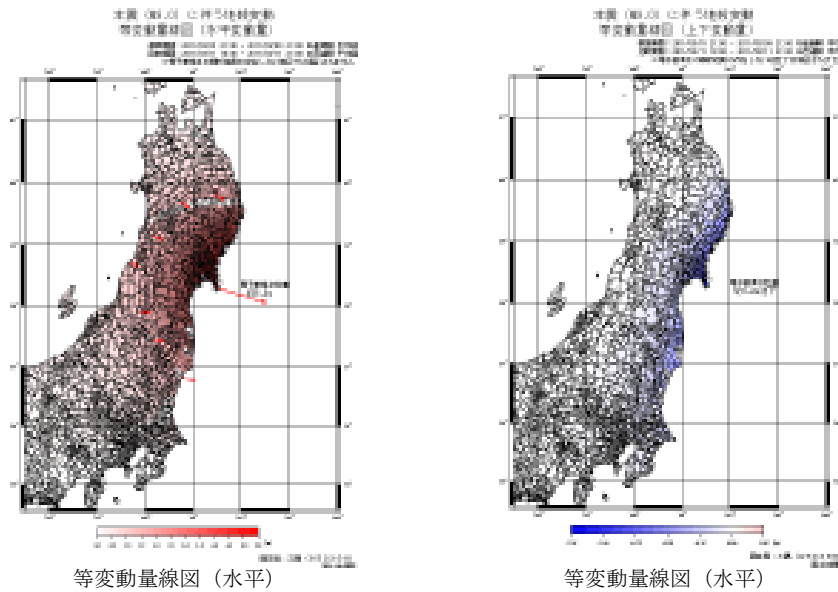


図 1.5 本震に伴う地殻変動
(出典：国土地理院)

< 5 > 広範囲で強い揺れ

地震の規模が大きく、近年発生した内陸の地震と比較して、広範囲で強い揺れが観測されました。

【解説】気象庁によると、震度 5 強以上は青森県から静岡県まで 15 都県、震度 6 弱以上は岩手県から千葉県まで 8 県で観測されました。震度 6 弱以上の範囲は南北約 450 km、震度 6 強は南北約 300 km で、近年発生した内陸の地震と比較してその影響範囲の違いが顕著です。なお、福島、栃木、群馬、茨城、埼玉、千葉の各県で震度 6 弱以上を観測したのは、1926 年以降初めてです。

< 6 > 広範囲で強い地震動の観測

岩手県から茨城県までの広い範囲で、最大加速度が 500gal を超える強い地震動が観測されました。

断層の複雑な破壊により、宮城県以北と福島県以南で、地震動波形の形状に異なる傾向が見られました。

【解説】観測された地震動（防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET、KiK-net の 1,189 地点）の最大地表面加速度（地表の水平成分の大きい方の値）の分布図と、主な地点の加速度波形を示します。

岩手県から茨城県にかけての広い範囲で最大地表面加速度が 500gal を超えており、1,000gal を上回る地点も存在しています。宮城県以北の加速度波形の形状は振幅が大きい時間帯が 2 つある

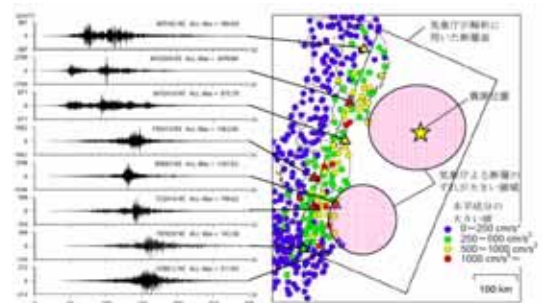


図 1.6 主な地点の加速度波形 (左図) と地表面最大化速度の分布図 (右図)
(出典：清水建設株式会社 技術研究所)

のに対して、福島県以南では1つです。気象庁によると断層面で大きく滑った領域が2つあり、複雑な断層破過程が地震動波形に影響したと考えられます。

< 7 > 地震動が長時間継続

震源の断層面が大きいため、過去の地震と比べ地震動の継続時間は非常に長いものでした。

【解説】最大加速度が大きかった塩釜市（K-NET 塩釜）と仙台市（K-NET 仙台）と、1978年宮城県沖地震の塩釜観測点、1995年兵庫県南部地震の葦合観測点の加速度波形を示します。揺れが持続した時間は約3分と、1978年宮城県沖地震や1995年兵庫県南部地震の数十秒に比べてかなり長くなっています。これは、断層のすべりが生じた領域が三陸沖から茨城県沖まで広がっているためです。

持続時間が被害にどのように影響するかの考察が今後重要になると考えられます。

< 8 > 広範囲で多数の余震の発生

【解説】三陸沖から房総沖にかけての広範囲で多数の地震が発生しています。最大の余震は本震発生の約30分後に茨城県沖で発生した地震のMw7.7で、M7以上の地震が5回発生しています。内陸でも3月12日に長野県北部（M6.7）、3月15日に静岡県東部（M6.4）で震度6強の地震が発生しています。

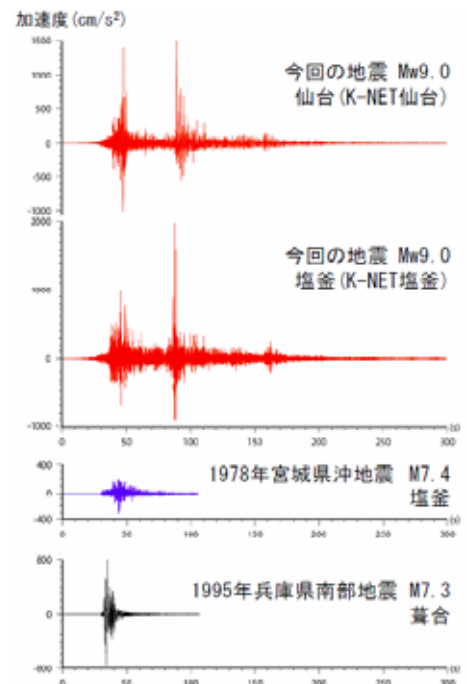


図 1.7 K-NET 塩釜と K-NET 仙台の加速度波形と過去の地震の加速度波形との比較
(出典：清水建設株式会社 技術研究所)

2. 地震動の特徴と建物の被害状況、耐震設計との関連性

2.1. 宮城県栗原市築館の場合

2.1.1. 観測点の地盤と強震記録のスペクトル特性

今回の地震で最大の震度7、最大加速度 2933gal の大きな値が観測された強震観測網 K-NET 築館（MYG004）における記録と周辺の被害状況について記載します。

K-NET 築館（MYG004）観測点は図 2.1 の○に示すように栗原市文化会館の駐車場に接するなだらかな丘陵部に位置します。地盤は、厚さ 1.2m 程の粘性土層（N 値 24）の下に風化した岩盤が存在する良質な地盤です。

観測点での常時微動測定の中から、計算した H/V スペクトル比（水平動と上下動のスペクトル比。H/V スペクトル比の最大ピークとなる周期を地盤の卓越周期とみなすことができる）を図 2.2 に示します。周期 0.1~0.2 秒でピークを示しています。



図 2.1 K-NET 築館（MYG004）周辺の衛星写真
(出典：Google Earth に加筆)

図 2.3 に同地点での最大加速度が 100gal 以上の記録の水平動速度応答スペクトル（減衰 5%）を示します。速度応答のやや小さな記録では周期 0.15 秒に、大きな記録では周期 0.2 秒に、今回の地震の記録では周期 0.25 秒にそれぞれピークが見られます。速度応答の増大とともに周期が伸びています。

速度応答のやや小さな記録では前述の常時微動のピーク周期とおおむね対応しています。従って、強震記録に見られるピークは、表層地盤の増幅特性の影響によるもので、速度応答の増大とともに周期が伸びているのは地盤の非線形性の影響と考えられます。

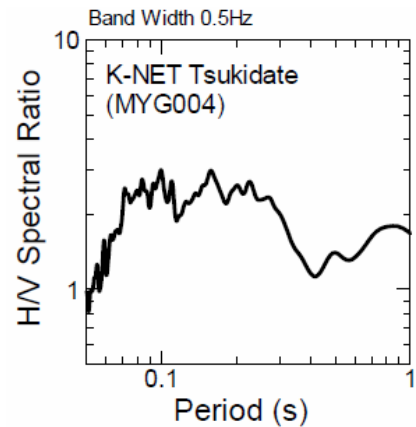


図 2.2 K-NET 築館 (MYG004) 常時微動の H/V スペクトル比

2.1.2. 観測点周辺での被害状況とその分析

図 2.1 の点線の楕円で示すように、観測点の西には 20 棟弱の住宅群が存在します。比較的新しいものが多く、外観上に被害は見当たらなかったようです。

図 2.1 に示す観測点から約 20m 西の直近の平屋住宅（図 2.1 の A 宅）では室内はそれほど大きく散乱していなかったようであり、背の高い茶箆筍（高さ 180 cm 程度、奥行 30 cm 程度）が南北方向に倒れたが、その他の背の低い箆筍やテレビは倒れなかったようです。

観測点から約 300m 北西にある RC 造 4 階建ての栗原市役所では 4 階の天井に被害が見られた程度で、外観上の被害は見られなかったようです。

観測点周辺での被害は全般に軽微でした。

木造家屋の倒壊までの機構は、一般的に初期の固有周期が 0.3 秒程度である木造家屋が、初めに周期の短い大きな地震動で強くゆすられると、柱と梁の接合部がゆるんでしまい、それまで比較的「固く」つくられていた家屋が「ゆるむ」ことで固有周期が 1 秒前後まで長くなり、今度は周期がやや長い地震動がこの「ゆるんだ」家屋に追い討ちをかけるように大きな作用をして、家屋を倒壊に至らせるというものです。これは、おびただしい木造家屋の倒壊を生じた兵庫県南部地震の「震災の帯」で記録された地震動を他の地震の波形と比較して明らかになったことで、このときの周期 1 秒前後の強い顕著な振動は「キラーパルス」と呼ばれました。今回の地震では、初めに短周期の強い地震動が働いたと思われませんが、周期がやや長い地震動は比較的小さく、兵庫県南部地震の 2 分の 1 から 5 分の 1 程度しかなかったために大きな被害には至らなかったと考えられます。

【参考】・スペクトル：地震波にはさまざまな周期の波が含まれています。地震波をさまざまな周期の振動の集まりととらえ、周期ごとの地震波の強さに分解し表したものを「スペクトル」と言います。地震波によって構造物がどのように揺れるかを知る方法として「応答スペクトル」があります。これは構造物がある地震波にさらされたときの最大応答値を「スペクトル」で表したものです。応答値が加速度の場合、「加速度応答スペクトル」、速度の場合、「速度応答スペクトル」と言います。

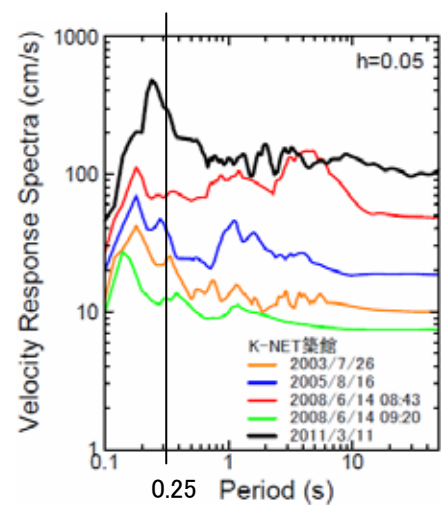


図 2.3 K-NET 築館 (MYG004) 強震記録の速度応答スペクトル (出典：東京工業大学)

2.2. 宮城県仙台市の場合

2.2.1. 宮城県仙台市周辺での被害状況とその分析

国土交通省 国土技術政策総合研究所・独立行政法人 建築研究所による「平成 23 年東北地方太平洋沖地震による建築物被害第一次調査 白河市, 須賀川市, 仙台市における RC 造, S 造, 非構造部材を中心とした建築物被害調査 (速報)」によると、仙台市青葉区における RC 造, S 造の建物被害調査の結果は、

- ・青葉区役所建設部街並み形成課にての建物の被害概要および個々の建物の被害についての情報収集の結果、応急危険度判定は日本建築構造技術者協会 (JSCA) の支援を受けて実施され、3月23日までの結果は、「危険 (赤)」が鉄筋コンクリート造 (RC 造) で 18 棟、鉄骨造 (S 造) で 34 棟あった。そのほとんどが外装材などの落下の危険性が存在するというものであった。また、集合住宅の玄関回りの非構造壁の被害が多く見られるとの情報もあった。
- ・市街地においての調査の結果でも構造躯体の損傷はほとんど見られなかった。周辺の建物においては、ALC パネルの脱落、タイルの剥離、鉄筋コンクリート造非構造部材のひび割れなどは多数確認された。
- ・青葉区は震度 6 弱ですが、構造被害は全体的に少なく、震度に対して被害の程度は大きくないように感じられた。

と報告されています。

仙台市青葉区の地盤は比較的良好な地盤です。図 2.4 に示す応答スペクトルを見てもピークが周期 0.6~0.7 秒にあることが判ります。

震度 6 弱だった仙台市で得られた周期 1~2 秒の波の強さは、約 30 万棟が全半壊した阪神大震災の時の被災地に比べ 2~3 割程度でした。周期 1 秒以下の地震波が強いと、室内にある物は揺れますが、建物への影響は小さくなります。非構造部材は変形に追従できなく、内外装材などの損傷が生じます。

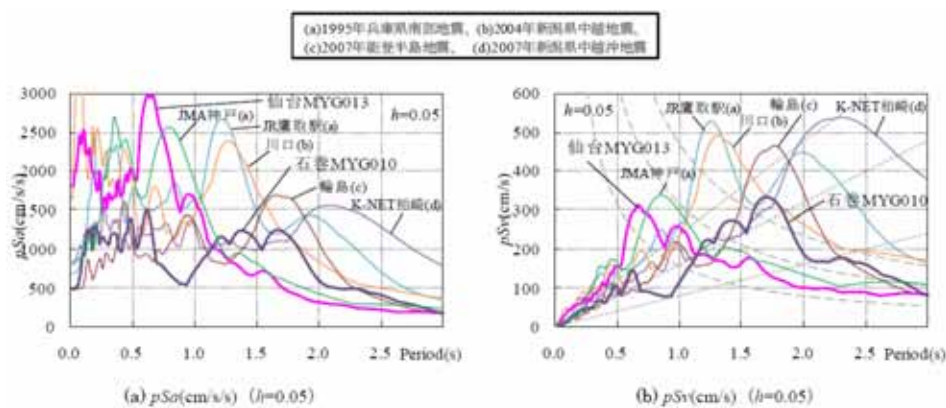


図 2.4 擬似加速度応答スペクトル pSa と擬似速度応答スペクトル pSv の過去の地震記録との比較

(出典：国土交通省国土技術政策総合研究所 建築研究部)

今回の地震による各地の建物被害の状況はまだまとまっていませんが、消防庁によると判明している死者数の多くは津波被害の激しかった沿岸部に集中しており、内陸部では数十人程度とは発表されています。このことから、揺れによる建物被害は少なかったと推定されます。

2.3. 東京都心部の場合

2.3.1. 強震記録のスペクトル特性

文京区(東大地震研)での記録をもとにした速度波形を図 2.5 に、速度応答スペクトルを図 2.6 に示します。速度波形を 2004 年新潟県中越地震と比較すると、今回の地震の方が長時間、揺れが持続したことがわかります。

今回の地震では強い速度応答が、0.5~20 秒の広い周期帯で発生しています。木造家屋(固有周期 0.3 秒程度)~低層建物(固有周期 1 秒前後)~超高層建物(固有周期数秒)など全てで大きく揺れたと考えられます。

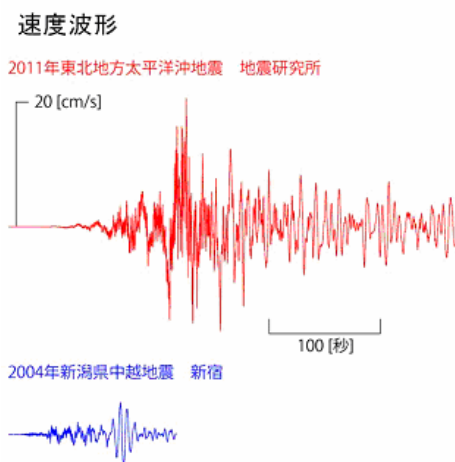


図 2.5 東大地震研・産総研における
2011 年東北地方太平洋沖地震と
2004 年新潟中越地震の速度波形の比較
(出典：東京大学)

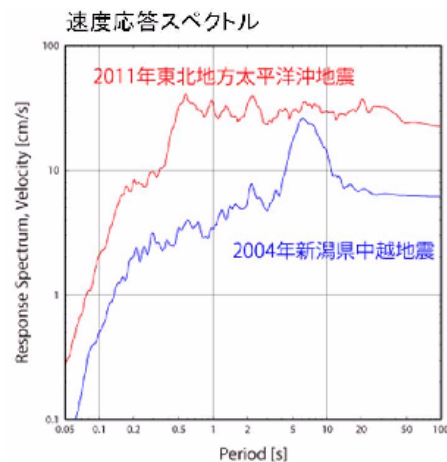


図 2.6 東大地震研・産総研における
2011 年東北地方太平洋沖地震と
2004 年新潟中越地震の速度応答スペクトルの比較
(出典：東京大学)

2.3.2. 超高層ビルの耐震設計

2004 年新潟県中越地震では周期 7 秒前後の長周期地震動が強く発生して超高層ビルを中心に軽微な被害が出ました。速度応答スペクトルを中越地震と比較すると、超高層ビルに影響を与える周期 6 秒から 10 秒の長周期地震動のレベルはほぼ同レベルでした。

今回の地震は、揺れが長く続いたという特徴があります。建築基準法では高さ 60m を超える超高層ビルや免震建物を対象に、時刻暦応答解析による耐震設計を義務付けています。国土交通省 告示 1461 号(超高層建築物の構造耐力上の安全性を確かめるための構造計算の基準を定める件)では、解析用入力地震動の揺れ始めから終わりまでの継続時間を 60 秒以上とすることとしています。

解析に用いる入力波の位相は、過去に起こった代表的な地震の観測波のほか、財団法人 日本建築センターが作成した模擬波を用いる場合があります。極めて稀に発生する地震を想定した「BCJ-L2」は

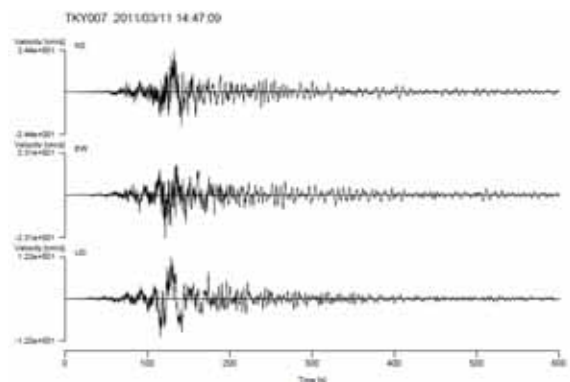


図 2.7 新宿で観測された強振動記録
(出典：防災科学技術研究所)

120 秒までの波形を定めています。極めて稀に発生する地震を想定する場合、告示波によらず、建設地周辺の活断層や地盤特性に応じて個別に作成した地震波（サイト波）を使って時刻暦応答解析を行うケースもありますが、国土交通省 告示 1461 号ではサイト波の継続時間は定めていません。

東海地震や東南海地震が起これると、従来の基準で設計された超高層ビルは想定以上に長時間、大きく揺れる可能性があります。その結果、梁の端部が破断するなどの構造的な被害が生じるおそれがあります。

こうした状況を踏まえて、国土交通省は 2010 年 12 月、超高層ビルや免震建物を対象とした長周期地震動対策の試案を公表しました。試案では、堆積層が厚く長周期の揺れが伝わり易い東京と大阪、名古屋の 3 大都市圏の平野部や沿岸部を対象に、極めて稀に発生する地震として、告示 1461 号に基づく地震波に加えて、継続時間が 500 秒以上の長周期地震動に対する検討を求めています。

今後は更に、今回の地震の継続時間の長さから設計で想定する揺れの継続時間を見直す動きも出てくる可能性があります。

【注記】「1. 地震の全体像 1. 2. 地震の特徴 <6> <7>」の項は「清水建設株式会社 技術研究所：報告書 平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震 一地震の概要一，2011. 4. 18」を参考にしました。

執筆者紹介

森 隆一 Ryuichi Mori

デューデリジェンス事業部

事業部長

専門は地震リスク評価

杉本 和城 Kazushiro Sugimoto

デューデリジェンス事業部

上席コンサルタント

専門は地震リスク評価、耐震コンサルタント

NKSJ リスクマネジメントについて

NKSJ リスクマネジメント株式会社は、損保ジャパンと日本興亜損保を中核とする NKSJ グループのリスクコンサルティング会社です。全社的なリスクマネジメント（ERM）、事業継続（BCM・BCP）、火災・爆発事故、自然災害、CSR・環境、セキュリティ、製造物責任（PL）、労働災害、医療・介護安全及び自動車事故防止などに関するコンサルティング・サービスを提供しています。詳しくは、NKSJ リスクマネジメントのウェブサイト（<http://www.nksj-rm.co.jp/>）をご覧ください。

本レポートに関するお問い合わせ先

NKSJ リスクマネジメント株式会社

デューデリジェンス事業部

〒160-0023 東京都新宿区西新宿 1-24-1 エステック情報ビル

TEL：03-3349-5961（直通）