01 東北地方太平洋沖地震の被害概要と地震防災・対策技術

長島 一郎*1・志波 由紀夫*2

Lessons Learned from the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, and Taisei's Disaster Prevention Technology

Ichiro NAGASHIMA, Yukio SHIBA

1. 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，1000 年に一度と言う未曽有の巨大地震であった．マグニチュード（Mw）が 9.0，岩手県沖から茨城県沖に至る断層面の大きさはおよそ 500km×200km で，日本の観測史上最大である。1995 年兵庫県南部地震以後，全国に地震観測網が整備され，全国の主要な断層について調査が進められ，その発生確率が評価されて来ており[1]，東北地方太平洋沖についても個別の領域における地震の発生確率は評価されていた。しかしながら，複数の領域が連動して破壊することは想定されていなかった。

今回の地震は，東北地方から関東に至る広い範囲に震度 6 弱から震度 7 に達する強い揺れをもたらし，津波による甚大な被害を発生させた。また，東京湾岸埋立地や利根川などの河川流域で顕著な液状化が発生し，戸建住宅に大きな被害をもたらした。また，原子力発電所の被災による放射性物質の拡散は，国内に止まらず世界の人々に衝撃を与えた。

本報では，「東北地方太平洋沖地震　地震被害の概要と予測・対策技術」と題して特集を組み，先ず地震動，津波，液状化に関して当社が保有する解析技術を用いて災害の再現と分析を試みている。次に，免震・制振技術や液状化対策技術について，得られた地震観測データに基づいて効果の定量的な分析を行っている。また，今後の地震・津波対策や災害復旧に有効な技術を紹介している。

本論では，今回の地震被害を概観し，特集号に掲載した各論文の概要について説明すると共に，今回の震災で明らかとなった知見と今後の課題を整理する。

2. 地震被害の特徴

今回の地震被害の状況を，兵庫県南部地震の場合と比較して表 1 および表 2 に示す。死者・行方不明者の多さが，津波による被害の甚大さを物語っている。また，被害額は暫定的な推計で 16 兆 9 千億円（原発事故関連の被害は含まれていない）と，阪神・淡路大震災の 1.8 倍とされ，これも広域にわたる被害の大きさを表している。埋め立て地における液状化被害も深刻で，関東地方だけで 1 万 7 千棟を超える戸建住宅が液状化による被害を受けたと言われている[2]。一方で，地震の揺れによる建物の構造的被害は震度の大きさの割には相対的に少なかったとも言われている。地震被害については，既に日本建築学会等から詳細な調査速報が刊行されている[3]。本章ではポイントと思われる特徴について概観する。

表 1 地震被害の状況
Table 1 Casualties and damage to buildings

	東北地方太平洋沖地震＊	兵庫県南部地震
死　者	16,019 名	6,434 名
行方不明者	3,805 名	3 名
負傷者	6,121 名	43,792 名
全　壊	118,621 棟	104,906 棟
半　壊	181,801 棟	144,274 棟
一部損壊	621,013 棟	390,506 棟

＊総務省消防庁：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）（第 140 報）2011 年 10 月 11 日 17 時 00 分

表 2　被害額の推計＊
Table 2 Estimated finacial damage due to the earthquake

項　目	東日本大震災	阪神・淡路大震災
建築物等	10 兆 4 千億円	6 兆 3 千億円
ライフライン施設	1 兆 3 千億円	6 千億円
社会基盤施設	2 兆 2 千億円	2 兆 2 千億円
農林水産関係	1 兆 9 千億円	5 千億円
その他	1 兆 1 千億円	
総　計	16 兆 9 千億円	9 兆 6 千億円

＊平成 23 年 6 月 24 日，内閣府（防災担当）の記者発表資料

2.1　地震動と被害

図 1 に今回の地震と過去の地震の断層面の大きさを比較して示すが，世界的に見ても極めて大きな地震であったことがわかる。宮城県から福島県，栃木県，茨城県にかけて震度 6 強が，岩手県，千葉県，埼玉県，群馬県でも震度 6 弱が観測され，広い範囲で強い揺れが観測された。関東平野における地震動は，新宿において強さは建築基準法における「稀に発生する地震」と「極稀に発生する地震」の中間的なレベルであったが，継続

＊1　技術センター 建築技術研究所 防災研究室
＊2　技術センター 土木技術研究所

時間が極めて長い長周期地震動が観測された。新宿センタービルでは 800 秒間を超える観測記録が得られている。特集の「02 東北地方太平洋沖地震の地震記録の分析と地震動シミュレーション」では，今回の地震動の更に詳細な分析を行うと共に，断層面全体と東北地方太平洋側から関東平野までをモデル化して３次元有限要素法による地震動伝播解析を実施し，地震の揺れの面的な広がりの再現を試みている。

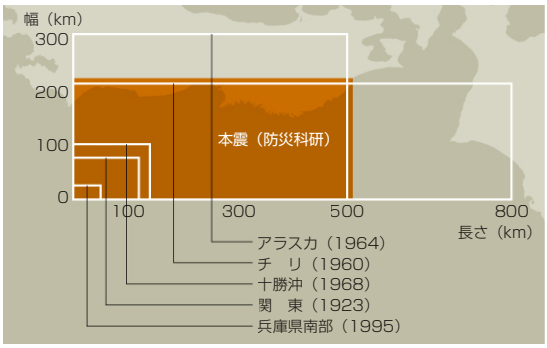

図１　断層面の大きさの比較
Fig.1 Comparison of fault planes

建物の構造的被害としては，1995 年兵庫県南部地震の際にも確認された通り，1981 年の新耐震設計法以前の建物に被害が見られ，特に 1971 年より前の旧基準で設計されたピロティや偏心のある建物では柱のせん断破壊による倒壊被害（写真１）や，柱・梁・壁などの主要構造部材のせん断破壊が多数見られた[3)]。しかし，地震の揺れによる建物の構造的被害は，震度の大きさの割には少なかったと言われている。これは，例えば宮城県では過去に宮城県沖地震をはじめとする複数の地震被害を経験して，耐震対策が進められてきたことが考えられる。また，今回の地震動の周期特性を表す応答スペクトルを図２に示すが，建物に被害を及ぼす周期１秒～２秒の周期成分が小さかったことも，建物被害が少ない理由として指摘されている[4)]。

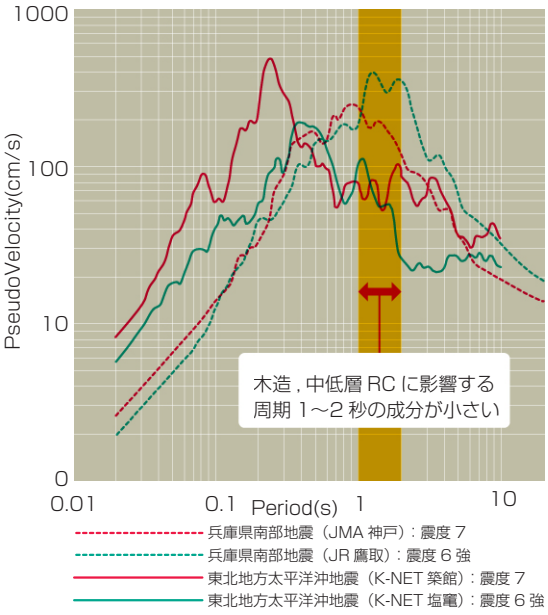

図２　速度応答スペクトルの比較
Fig.2. Comparison of velocity response spectrum

建物の構造的被害が震度の大きさの割に少なかった一方で，建物の主要構造部以外の被害が目立った。1981 年以後の新耐震設計の建物においても建物間を接続するエキスパンション部の被害や（写真 2），天井の破損や落下被害が生じる事例がかなり発生した。また，間仕切り壁の破損や ALC 外壁の脱落等の被害も見られた。また，建物内部の生産施設が大きな被害を受け，自動車や電機，機械，エネルギーなど多くの産業分野で操業が停止した。そのため，被害を免れた国内他地域や海外で代替製品を調達する動きも見られた。事業継続計画（BCP：Business Continuity Plan）の観点からも，建物の構造的安全性に加えて，建物内部の生産施設の機能維持を図る対策技術の重要性が再認識されたと言える。

写真１　ピロティ建物の倒壊被害（郡山）
Photo1 Collapse of a pilotis-type apartment house

写真２　エキスパンション部の被害
Photo2 Damage of expansion

土木構造物では，河川堤防，道路・鉄道の盛土，貯水池の堤体などにおける崩壊，沈下，亀裂，陥没・段差等，夥しい数の土構造物の被害がきわめて広い範囲にわたり発生した。これらには津波や液状化が関与したと考えられる被害も含まれるものの，被災要因としては広域に強い震動が襲ったのと，長時間にわたって揺すられ続けたのが大きい。コンクリート構造物・鋼構造物が受けた被害は，津波によるものがほとんどで，地震動

によるものは多くない。兵庫県南部地震以降に，設計震度が強化された耐震基準に基づいて造られたり，それと同等に耐震補強がなされていた構造物では，深刻な被害の発生を聞かない。ただし，橋梁・高架構造物において，鋼製支承および桁移動制限装置の破損，桁端部の衝突による破損，新幹線の電化柱の折損・傾斜などの被害があった。また，道路橋の反力分散支承として用いられていた積層ゴム支承が破断するという被害があり，1996 年以降にゴム支承が本格的に採用されるようになってから初めての地震被害事例となった[5]。

2.2 津波と被害

今回の地震では，津波が甚大な被害をもたらした。津波による浸水域は 561km^2（山手線内側の面積 63km^2 の約 9 倍）とされており宮城県が最も被害を受けた。東北地方から関東地方へかけての太平洋岸はこれまでにも津波に伴う地震が発生してきており，古くは今回の津波と同規模の被害が生じたと推定されている 869 年貞観地震津波のほか，1986 年明治三陸，1933 年昭和三陸地震津波が知られている。

津波による原子力発電所の非常用電源停止は，放射性物質の拡散と言う今まで経験したことのない災害をもたらした。また，多くの木造住宅が全壊の被害を受けたが，鉄筋コンクリート造の杭基礎建物が転倒している事例も女川周辺で見られた（写真 3）。これは地震の揺れにより液状化したところに津波が作用した結果と推定されている。

10m クラスの高さの津波の破壊力は凄まじく，海岸堤防の被害だけでも，岩手・宮城・福島 3 県の総延長約 300km のうち実に約 190km が全半壊するに及んだ。また，14 の重要港湾および 19 の地方港湾が機能停止したほか，三陸地方の漁港はほぼ全て壊滅的な被害を受けた。海岸沿いや河川の河口近くに架設された橋が多数，津波で破壊されたのは衝撃的であった（写真 4）。また，海岸沿いを走る鉄道の被害も甚大で，JR の在来線では橋桁の流出·埋没が 101 箇所，駅舎の流失が 23 駅，線路の流出・埋没が約 60km 生じるなどして[6]，10 月 3 日現在でも 7 線区に不通区間がある。海岸から約 1km 離れた仙台空港も，滑走路やアクセス鉄道のトンネルが一時水没するなどの被害を受けた。

特集の「03 東北地方太平洋沖地震による津波被害について」では，津波被害の分析に取組んでいる。

写真 3　津波による RC 建物の転倒被害（女川）
Photo 3 RC building overturned by Tsunami attack

写真 4　津波で橋桁が流された道路橋（南三陸町）
Photo 4 A highway bridge whose girders were washed away by the tsunami (Minamisanriku Town)

2.3 液状化と被害

東北地方及び関東地方の広範囲で液状化が発生した。特に，関東地方の東京湾岸埋立地や利根川などの河川流域で甚大な被害が発生した。戸建住宅をはじめとする直接基礎形式の構造物や工作物が，液状化により沈下・傾斜する被害が多く見られた。杭基礎で支持された建物の多くは外観上構造的に無被害であるケースが多かったが，周辺地盤の沈下により建物と周辺地盤の取り付け部分や配管類に被害が見られた。

ライフライン施設関連では，上下水道およびガスの埋設管，電力線の電柱が液状化に起因して被害を受けた。

今回の地震動はマグニチュードが大きかったため継続時間が長く，長周期の比較的大きな振幅で繰り返し揺れが作用したことが液状化を促進したとの見方がある。長周期地震動が液状化へ及ぼす影響や，従来の液状化判定方法のマグニチュード 9.0 クラスの地震への適用性の検討は，今後の研究課題である。特集の「03 東北地方太平洋沖地震における地盤の液状化挙動」では，この研究課題に対する事例検討を行っている。

3. 実証された対策効果

3.1 免震・制振技術

1995 年の兵庫県南部地震を契機として，免震・制振技術の建物への適用が進んで来ており，今回の地震では，多くの建物で免震・制振効果が実証された。免震建物には殆ど構造的被害は無かったが，鋼材ダンパーの止めつけボルトのゆるみや鉛ダンパーの本体に亀裂が見られるケースが報告されている[7]。エキスパンションジョイントに損傷が生じる事例は多く発生し，今後の課題となっている[7]。

震源に近い宮城県仙台市には，天然ゴム系積層ゴム支承と弾性すべり支承を併用した当社のハイブリッド TASS 構法を適用した超高層免震建物があり，免震効果を裏付ける地震観測記録が得られた。免震層ピットにおける震度は 5 強で，免震層の最大変形は約 23cm であった。非免震の場合に比べて 50% ～ 60% 程度の加速度低減効果が得られている。

東京都新宿区に建つ代ゼミタワーは，世界初のセミアクティブ免震システムを適用した超高層ビルである。天然ゴム系積層ゴムとコンピュータ制御で減衰力を切換える可変減衰オイルダンパーを用いた免震システムである。免震層の最大変形は約 10cm で，建物頂部の最大加速度は 30% ～ 40% に低減され

ており，セミアクティブ免震の効果が実証された。

東京都新宿区に建つ新宿センタービルでは，超高層ビルの世界初の長周期地震動対策として，変位依存型オイルダンパーを用いた T-RESPO 構法による制振補強工事を 2009 年に完了していたが，今回の地震で制振効果が実証された。制振補強工事をしなかった場合に比べて，最大変形が約 20% 低減していることがわかった。今回の地震では震源から遠く離れた大阪の超高層ビルでも大きな揺れが観測された [8)]。既存超高層ビルの制振対策の重要性と効果が認識されたと言える。（以上，特集論文：05 東北地方太平洋沖地震における免震・制振建物の効果）

建屋免震だけではなく，半導体製造装置向けの機器免震システム（TASS ユニット）でも顕著な効果が確認された。既存の半導体製造装置の耐震性を向上させるために機器免震システムを導入した岩手県の工場では，機器免震を設置しない装置はかなりの被害を受けたが，機器免震を設置した装置は全て無被害であり生産施設の事業継続性確保に極めて有効であることが明らかとなった。（特集論文：06 半導体製造装置向け機器免震装置（TASS ユニット）の開発と適用）

3.2　モニタリング

新宿センタービルや代ゼミタワーの他，最近の免震建物や制振建物では，建物の揺れや制振装置の地震時や日常の状態をモニタリングできるシステムの設置が進んでおり，今回の地震でも地震後にこれらの情報が即時に把握出来たため，建物の健全性の確認や初動対応の判断に役立った。建物の長寿命化に伴う維持管理の効率化の面からもモニタリングシステム導入の意義は増すと思われる。（特集論文：07 建物における地震・風観測モニタリングシステムの開発と適用）

3.3　液状化対策

今回の地震では多くの液状化被害が見られたが，液状化対策の効果も確認された。東京都江東区新木場周辺の広い範囲で液状化が発生したが，静的締固め砂杭工法を適用した食品工場では，傾斜や沈下の発生はなく建物の健全性が確保されていることが確認された。また，千葉県市原市の貯油タンクでは，薬液を土の間隙に浸み込ませて固化させる地盤改良を実施し，震災後に傾斜や沈下が起こらず健全性が確保されていることを確認した。（特集論文：08 東北地方太平洋沖地震で効果が確認された液状化対策事例と新たな地盤改良工法）

4.　対策技術

本特集では，現在開発中或いは最近開発した対策技術を紹介している。以下に，それらの概要について説明する。

4.1　地震の揺れへの対策

4.1.1 超高層ビルの制振補強対策

2004 年の十勝沖地震の際に，震源から 400ｋｍも離れた苫小牧の石油タンクが被災したことで，「長周期地震動」が注目を集めるようになった。3.1 で紹介したとおり，今回の地震で新宿の超高層ビルで長周期地震動による揺れが観測され，制振補強対策の有効性が実証された。変位依存型オイルダンパーにより既存架構を補強することなく，建物を使いながらの工事を可能にしている。（特集論文：09 既存超高層建物の長周期地震動対策技術）

4.1.2 新しい制振システム

地震の揺れのエネルギーの大半をダンパー（極低降伏点鋼）で吸収させて架構の健全性を確保する，新しいエネルギー吸収集約型制振システム（TASMO）を開発し適用を進めている。性能とコストの両面で優位性の高い本架構システムについては，特集で多くの適用事例を紹介している（特集論文：10 エネルギー吸収集約型制振システム（TASMO）の開発と建築物への適用）

4.1.3 建築デザインに配慮した耐震補強

既存建築構造物の耐震性を向上させる技術は，従来美観や採光を損ねる場合があった。そのため，建物の意匠性や採光を損なわないような耐震補強工法を開発し，適用を進めている。（特集論文：11 建築デザインに配慮した鉄骨系耐震補強工法の開発）

4.1.4 土木構造物の耐震補強

既存土木構造物の耐震性を向上させるため，後施工プレート定着型せん断補強鉄筋（Post-Head-bar）により RC 構造物のせん断耐力を向上させる耐震補強工法を開発した。2005 年に（財）土木研究センターによる建設技術審査証明を取得し，地中構造物の耐震補強工事を中心に，これまでに約 9 万本の施工実績を重ねてきた。本年 8 月に適用範囲を拡充して技術審査証明が改訂され，堰，水門，橋台等の既設の半地下および地上構造物へも適用できるようになった。（特集論文：12 後施工プレート定着型せん断補強鉄筋の適用性の拡充）

液状化地盤上の既設盛土の耐震補強工法として，液状化による変形を許容しながら盛土体として必要な機能維持を図る，経済的な工法の開発を行っている。（特集論文：16 液状化地盤上の既設盛土耐震補強技術の開発 (その2)）

4.1.5 耐震天井

震源に近い仙台や，震源から離れた都内などでも大空間の天井落下による被害が多く発生した。耐震天井の仕様については，国土交通省から技術的助言が出されているものの，法的拘束力がないことも耐震化が進んでいない一因と考えられる。当社で開発して適用を進めているローコストで効果の高い耐震天井を特集論文で解説している。（特集論文：13 耐震性に優れた大規模耐震天井工法の開発）

4.2　事業継続性

4.2.1 地震防災システム（T-RESQ F）

現地に設置した地震計を用いることにより，気象庁の緊急地震速報が間に合わないような直下型地震に対して，主要動が到達する前に揺れの大きさを推定する地震防災システムを開発した。生産施設の事業継続性確保に役立てるため，製造装置の自動停止等への適用を進めている。今回の地震では，気象庁の緊急地震速報が地震規模をうまく推定出来ない事象が発生した。

防災科学技術研究所の K-NET で観測された今回の地震記録を用いた分析を行い，遠方で発生した巨大地震に対する本システムの適用性を検討している。（特集論文：14 生産施設向け地震防災システム (T-RESQ F) の開発）

4.2.2 地震リスク評価

事業継続性を検討する上で，地震による物的損失や機能停止被害を予測評価しておくことは重要である。特集では，地震の揺れによる建物単体の物的被害に関するリスク評価や，耐震補強や免震技術の適用による費用対効果の算定事例について解説している。（特集論文：15 地震リスク評価）

4.3 津波対策

今回の地震では津波により沿岸部の産業施設が甚大な被害を受けた。各産業施設において適切な津波対策を講じるには，先ず防潮堤の設置による浸水防止が考えられる。しかし，護岸からの遡上を防いでも，産業施設では取放水路や排水路を介して海水が浸入する内水氾濫により浸水被害や避難経路の喪失と言った被害が発生する可能性がある。特集では，内水氾濫の特性と対策工について検討を行っている。（特集論文：17 臨海施設の BCP を対象にした津波による内水氾濫解析，18 取放水路を介した津波による内水氾濫について）

4.4 復旧技術

今回の地震による原子力発電所の被害では，放射線の影響で人が近づけない場所での事故収束に向けた作業が必要であり，無人化施工技術を有する当社が早い段階で復旧作業へ協力している。無人化施工技術について本特集で解説している。（特集論文：19 建設業における無人化施工の現状と将来）

また，津波による浸水を受けた農地は，塩害により作物の生育が困難になっている。特集では，植物を利用した土壌の塩分回収の可能性について検討している。（特集論文：20 津波による浸水を受けた農地の除塩対策に関する検討）

5. まとめと今後の課題

今回の地震に関する知見と，今後の課題を以下にまとめる。

1）津波により甚大な人的・物的被害が発生した。また，埋め立て地における液状化被害も深刻で，関東地方だけで 1 万 7 千棟を超える戸建住宅が液状化による被害を受けたと言われている。地震の揺れによる建物の構造的被害は，震度の大きさの割には少なかったとも言われている。一方で，建物の主要構造部以外の被害が目立った。建物間を接続するエキスパンション部の被害や，天井の破損や落下被害が生じる事例がかなり発生した。

2) 多くの免震・制振建物で効果が確認された。ただし，免震建物の鋼材ダンパー取付部のゆるみや鉛ダンパー本体の亀裂及びエキスパンションジョイントの損傷等が報告されている。これらの検証と対策は今後の課題である。

3）長周期地震動対策を世界で初めて実施適用した新宿センタービルで，制振効果が実証された。既存超高層ビルの制振対策は今後重要性を増すと考えられる。

4）建物の揺れや制振装置の地震時や日常の状態をモニタリング出来るシステムを設置した建物では，地震後に即時に状況を把握することが出来たので建物の健全性の確認や初動対応の判断に役立った。建物長寿命化に伴う維持管理の効率化の面からも今後モニタリングシステムを導入する意義は高まると考えられる。

5) 事業継続性を確保するためには，人的被害だけではなく，物的損失や機能停止被害を予測評価し対策を講ずることの重要性が明らかとなった。当社では BCP コンサルやリスク評価，耐震診断，津波，液状化評価などのソフト面や，建物や機器，非構造部材の免震・制振・耐震対策等ハード面での技術を整備して個別のニーズに応じた提案を行っていく。

南海トラフ沿いでは東海地震，東南海地震，南海地震等のマグニチュード 8 クラスの巨大地震が過去に連動して発生しており，近い将来そのような連動地震が発生し，大阪，濃尾，関東平野の都市部に被害をもたらす危険が指摘されている。今回の地震被害を教訓に，当社は決意も新たに今後の地震被害を低減し，事業継続性確保に有効な防災・減災技術の提案・普及を推進する所存である。

最後に，今回の地震で犠牲になられた多くの方々のご冥福を心からお祈りいたします。

参考文献

1） 地震調査研究推進本部：地震動予測地図ウェブサイト http://www.jishin.go.jp/main/yosokuchizu/tohoku/tohoku.htm

2） NHK：クローズアップ現代「住宅は大丈夫か　見落とされた液状化対策」,2011.05.09.

3） 日本建築学会：2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報，2011.07.

4） 境有紀：発生した地震動と建物被害の対応，建築技術，2011 年 10 月号.

5） 土木学会東日本大震災特別委員会総合調査団：東日本大震災 構造物の被害状況，土木学会誌，vol.96 no.6，pp.14-15，2011 年 6 月号.

6） 東日本大震災復興構想会議：復興への提言～悲惨のなかの希望～ 資料編，2011 年 6 月.

7） 日本免震構造協会：第 14 回免震フォーラム「東北地方太平洋沖地震に対する応答制御建築物調査（中間報告）」，2011.09.01.

8） 大阪府総務部：咲洲庁舎の安全性等についての検証結果 http://www.pref.osaka.jp/otemaemachi/saseibi/bousaitai.html，2011.05