

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震・被害調査報告 （相馬市周辺，仙台塩釜港周辺）

Examination Report on the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

桜井朋樹	技術開発本部基盤技術研究所構造研究部	主査
佐藤祐二	技術開発本部基盤技術研究所構造研究部	課長
高梨正祐	技術開発本部基盤技術研究所構造研究部	主査
岩本浩祐	技術開発本部基盤技術研究所構造研究部	主査
大豊晃祥	技術開発本部基盤技術研究所構造研究部	

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震は、我が国観測史上最大の M9.0 のエネルギーをもち、これまでにない規模の津波をも発生させて、甚大な災害をもたらした。当社でも相馬工場の被災をはじめ、多くの製品での被害が報告されている。本調査は、この地震による被害状況について当社製品を中心に調べるとともに、その情報を基に震災復旧・復興、あるいは今後の震災予防に向けた研究開発、製品の信頼性向上へつなげていくことを目的として実施した。実施は、第 1 次が相馬市周辺を、第 2 次が仙台塩釜港周辺を中心にと、2 回にわたって行った。

Off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, which occurred on March 11, 2011, caused extensive disasters in Eastern Japan. It was a magnitude 9.0 earthquake that generated tsunami on a large scale. At IHI, the Soma factory was damaged by the earthquake, and in addition, we heard that many IHI products were damaged. We examined how the damage was caused by the earthquake in two stages. The first examination was in and around Soma City in Fukushima prefecture, and the second was in and around Sendai-Shiogama Port in Miyagi prefecture.

1. 緒 言

1995 年の兵庫県南部地震以降、我が国では被害をもたらす規模の比較的大きな地震が頻発しており、一説によれば地震活動期に入ったとも言われている。そのなかでも 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）は、最大規模の地震と言って過言ではない。それは、震源域の広さ、エネルギーの大きさ、発生した津波の大きさ、さらには被災地域の広さと規模など、多くの点で観測史上最大を記録していることから明らかである。

この地震、および震災に対して国内の各機関も調査を行い、適宜報告会などを行っている。

まず、国としては①文部科学省管轄の独立行政法人防災科学技術研究所が 2011 年 4 月 17 日に、地震動、津波の解説を中心とした緊急報告会を行ったのを皮切りに②国土交通省国土技術政策総合研究所が独立行政法人土木研究所、独立行政法人建築研究所との合同で行った被災地派遣状況・災害調査報告会③独立行政法人港湾空港技術研究所が主催の港湾・空港・漁港の地震・津波災害

調査報告講演会（国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人水産総合研究センターとの合同）が開催され、調査報告が行われている。

学協会の動きとしては、日本学術会議を中心に各学会を横通しする連絡会が設置され、5 月 27 日に「巨大地震と大津波から国民の生命と国土を護るための基本方針」が各学会会長の連名で示された。この連絡会に名を連ねる学会のなかでは、公益社団法人土木学会が早い段階から調査活動を進めており、4 月 8 日に震災調査速報会、その後も被害調査団（地震工学委員会）緊急地震被害報告会を行い、震災、津波被災の状況が中心とした報告が成されている。社団法人日本機械学会でも「東日本大震災調査・提言分科会」が設置されて活動に入っている。さらに“長期的視点からの提言を作成する活動”も別途開始される予定である。このほか、社団法人日本地震工学会や社団法人日本高圧力技術協会でも、報告会、シンポジウムが開催されている。

以上の官学の動きに対して、産である企業、特に被災地域に生産設備がある大手の企業については、地震動の被害

状況はあまり公開されていないのが現状である。

当社については、被災した相馬工場は5月13日に完全復旧に至っている。そのほか、原子力発電所をはじめとする発電プラント、運搬機械、橋梁や水門といったライフライン、インフラに関する製品の被災に対する調査、復旧に全力を注いでいる。

技術開発本部でも、震災復旧・復興、あるいは今後の震災予防に向けた研究開発に取り組んでいる。それらの一環として、今回の地震動による被害状況について調査を実施した。実施は、第1次が相馬市周辺を、第2次が仙台塩釜港周辺を中心に、2回にわたって行った。以下にその詳細を報告する。

2. 調査要領

調査は、前述のように2回に分けて、第1次が相馬市（福島県）周辺を、第2次が仙台塩釜港（宮城県）周辺を中心に実施した。

以下に調査要領を説明する。

2.1 調査目的

本調査の目的は、東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）による被害状況について、当社製品を中心に調査し、その情報を基に震災復旧・復興、あるいは今後の震災予防に向けた研究開発、製品の信頼性向上へつなげていくことにある。

2.2 調査日程

(1) 第1次調査：相馬市周辺

相馬市周辺の調査は、株式会社 IHI ビジネスサポートの協力を得て、以下の日程で実施した。

調査手段：車による移動

4/14 PM 磯子 → 福島

4/15 AM 福島 → 相馬

PM 相馬港・相馬市周辺調査

4/16 相馬 → 福島 → 磯子

(2) 第2次調査：仙台塩釜港周辺

仙台塩釜港周辺の調査は、IHI 運搬機械株式会社、IHI 東北支社の協力を得て、以下の日程で実施した。

調査手段：鉄道と車による移動

4/19 AM 東京 → 福島 → 仙台

PM 仙台塩釜港周辺の調査

4/20 AM 石巻港周辺の調査（調査結果は割愛）

PM 仙台 → 福島 → 東京

3. 調査結果

3.1 第1次調査：相馬

区域別に以下の二つに分けて述べる。

- ・ 相馬港周辺
- ・ 相馬市－亘理町間

全般に、地震動による大きな被害は少なく、津波による被害が甚大で、その力の大きさを目の当たりに見せつけられた。

3.1.1 相馬港周辺

(1) 地震動による被害

まず、相馬港周辺で見られた地震動による被害としては、

① 家屋の屋根瓦の落下

② ブロック塀、石塀の崩落

③ 地盤、路面の多少の陥没、段差

といった比較的軽微な被害がほとんどであった。①、②は比較的古い家屋で見られるのがほとんどであった。②は、1978年宮城県沖地震による被災後、鉄筋を入れることが義務付けられたが、それ以前のものと思われる。

港での地震動による被害は、岸壁の被災（側方流動、崩壊）が2号埠頭で見られた（第1図）。さらに、地震後に到来した津波によって土砂がさらわれることによって、岸壁（埠頭）の陥没箇所が拡大したものと推測される。また、第1図に示すように、この被災箇所にあったと思われるタイヤマウント型の移動式ダブルリンク式クレーンも、この岸壁の被災によって海中へ転落したと思われる。

そのほかには、地震動による被害はほとんど見られなかった。



第1図 相馬港2号埠頭の岸壁被災箇所とクレーン
Fig. 1 View of damage at the No. 2 wharf in Soma Port

(2) 津波被害

津波については、以下のような状況である。

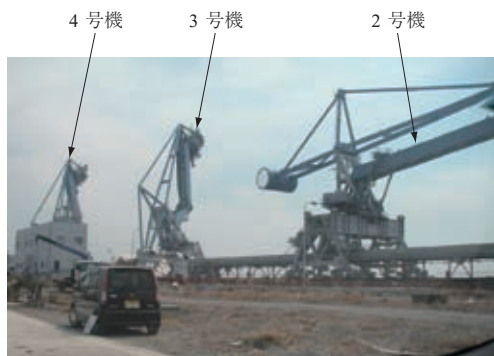
① おおむね、国道 6 号線（海岸線から 2, 3 km の内陸部を海岸と並行に走っている）まで津波が達している。

② 港内での津波の波高は、埠頭の建築物や倉庫の 1 階の高さ程度まで達していたとのことであった。

独立行政法人港湾空港技術研究所の報告によれば、相馬港での津波による浸水高は約 10 m、岸壁上では約 7.5 m で、② の状況とおおむね合致する。

以下に相馬港内の幾つかの場所について報告する。

第 2 図、第 3 図に 5 号埠頭のアンローダを示す。この埠頭は、相馬港に隣接する相馬火力発電所の石炭積み卸し専用で、4 基のアンローダが設置されている。これらのアンローダは、陸側から 1, 2, 3, 4 号の機番号が付けられている。埠頭自体の損傷は見



第 2 図 相馬港 5 号埠頭のアンローダ
Fig. 2 View of damage at the No. 5 wharf in Soma Port



第 3 図 アンローダ 3 号機の被災状況
Fig. 3 Damage to the No.3 unloader

られなかったが、第 2 図に示すように、海側の 3, 4 号機が損傷、転倒している。この損傷と転倒の発生は、以下の順による。

① アンローダ稼働中に地震発生、それに続く津波警報によって稼働状態のまま、アンローダのオペレータが避難。続いて、同じく津波から退避するために船が離岸、移動を開始。

② アンローダの先端部が船倉に入れられた状態で、船に引かれることになったため、アーム先端に曲げ力（モーメント）が発生。この力でアームが折れる（座屈）。

③ さらに船が移動し、アンローダ先端（大部分）が切断する（引きちぎられる）。

④ アンローダ先端部を喪失したことによって、カウンタウェイトとの平衡が崩れる。アンローダの揺脚が折れ曲がり後方（カウンタウェイト側）へ転倒。その際にコンベヤも巻き込み損傷。

したがって、このアンローダの損傷、転倒は、地震動ではなく、津波による副次的な被害といえることができる。

このほかに、揚運炭コンベヤについて 5 号埠頭に近い部分で一部（長さ約 50 m）が倒壊していた。倒壊部のコンベヤは、ほかの部分に比べて低い（約 6 m 以下）部分であることから、地震動ではなく津波による被害と考えられる。

そのほかでは、1 号埠頭のセメントサイロが残っていた。これは、コンクリート製であるうえに、基礎を確実に固定されていたため、津波による被害を受けなかったと考えられる。外観上も損傷がなく、地震動による被害もほとんど受けなかったと思われる。

3.1.2 相馬市一互理町

相馬市と、その北に位置する互理町（宮城県）の間（約 30 km）にわたって、海岸沿いの被災状況を調査した。

相馬港の被害状況と同様に、地震動による被害は道路の陥没やき裂程度で、大半の被害は津波によるものであった。その概要は、

① おおむね、海岸から 2～3 km 内陸を南北に走っている国道 6 号線まで津波が達している。

② 防波堤の損壊などにおいては、引き波による被災が見られる。特に港湾部とそれ以外とは異なるよう

である。防波堤の有無などの差によると思われる。
であった。

以下に特徴的な被害状況について説明する。

第4図は海岸付近の被害状況である。海岸との境になる遠方の立木の列まで、津波によって更地になってしまっている。また、防波堤が断続的に崩壊している。これは引き波によって損壊を受けたそうである。

第5図、**第6図**は、JR 新地駅付近の海岸沿いの道路橋の被害状況である。橋台間（**第5図**）に掛かっていた橋桁が、津波によって約 100 m 程度陸側へ持って行かれてしまっている（**第6図**）。橋台も周囲を津波が行き来



第4図 相馬市と亘理町間の海岸付近

Fig. 4 View of damage at the coast between Soma City and Watari Town



第5図 新地町付近の海岸沿いの橋

Fig. 5 Bridge along the coast near Shinchi Town



第6図 上流へ流された橋桁

Fig. 6 View of damage to bridge girders

することで、取付道路の盛土が削られて、このような橋台のみが残った状態になった（**第5図**）。

3.1.3 まとめ

被害状況をまとめると以下のようなになる。

- ① 地震動による被害は、相馬港でクレーン、岸壁などでの被害が見られたが、それ以外では屋根瓦のずれ・落下、ブロック塀、石塀の損壊といった比較的軽度の地震動被害に止まっている。
- ② 津波による被害は、地震動での被害より顕著、かつ広範囲にわたって見られた。
- ③ 相馬港では、比較的強固に作られている PC 製のサイロが残っていることから、固定方法、強度のある外板（外壁）といった対策で、津波による被害は防げる、あるいは減じると考えられる。

調査時は、被災から 1 か月以上を経過していたが、まだ津波によるがれきが散乱している状態で、復興へ向けての状況には至っていない。今回のような大波高の津波では、津波によって運ばれてくるがれきの衝突、あるいはさまざまな物をさらうといった力、エネルギーは地震動以上とも考えられる。

3.2 第2次調査：仙台塩釜港周辺

3.2.1 仙台塩釜港高砂コンテナターミナル

仙台塩釜港の高砂コンテナターミナルにおける津波の高さは約 3 m であり、コンテナが多数散乱していた。たとえば**第7図**のように津波の威力のすさまじさを物語る光景が随所に見られた。

同コンテナターミナルには、4 機のコンテナクレーンがあり、そのうちの 1 機は当社製である。**第8図**に示す当社製のコンテナクレーンについては、クレーン上部を含め目視で確認できる損傷はなかったが、津波によって散乱したコンテナが衝突し、脚下部の昇降階段や手摺りなどが



第7図 引きちぎられたコンテナ

Fig. 7 Containers destroyed by the tsunami

(a) 全体



(b) 車輪部



第 8 図 コンテナクレーン
Fig. 8 Container crane

変形していた。水没しているため、復旧には電気系統のチェックなどが必要とのことである。

設置されている 4 機のうち 2 機が免震装置をもっている。地震発生時は 4 機とも荷役はなく、倒壊や脱輪などの大きな損傷はなく、免震装置の有無による差は見られなかった。被害状況に、免震装置の有無による有意差が現れなかった理由としては、今回の地震動が比較的短周期の地震波成分が卓越しているためであり、今回の地震動特有の事象と考えられる。

同コンテナターミナルの岸壁については、東側（太平洋側）の 2 号バースの被害が顕著であり、海・陸レール間の舗装部位が数十 cm 以上沈下し、多数段差が見られた。これは主に地震動による被害と推測される。ただし、レール間の相対残留変形は比較的小さく、コンテナクレーンが転倒やまた裂きなどの大きな被害を受けなかった一因であると考えられる。

港湾周辺では、地震後 1 か月以上経過しているものの第 9 図に示すように道路以外は手付かずの状態であった。

3.2.2 まとめ

- ① 仙台塩釜港のコンテナクレーンについては、地震動による直接的被害はほとんどないことが分かった。ただし、津波の被害を受けているため、復旧には電



第 9 図 仙台塩釜港周辺
Fig. 9 View of damage near Sendai-Shiogama Port

気機械類や稼働部の健全性確認が必要である。

- ② 仙台塩釜港のコンテナクレーンは、4 機中 2 機が免震装置を装備していたが、被害状況からは免震クレーンと非免震クレーンとの有意差は確認できなかった。これは今回の地震波の特性に起因すると考えられる。
- ③ 今回、主に調査したクレーン類に限らず、構造物全般として、地震動による直接的被害は少なく、津波による被害が甚大と実感した。1995 年兵庫県南部地震以降の耐震性向上対策の成果であるとも言える。
- ④ 機械類は水没対応が必要である。場合によっては、海水のみではなく、細かい砂に対する稼働部の対策も必要となる。また塩化物イオンによる応力腐食割れにも注意が必要である。

4. 地震波について

4.1 地震動の特性

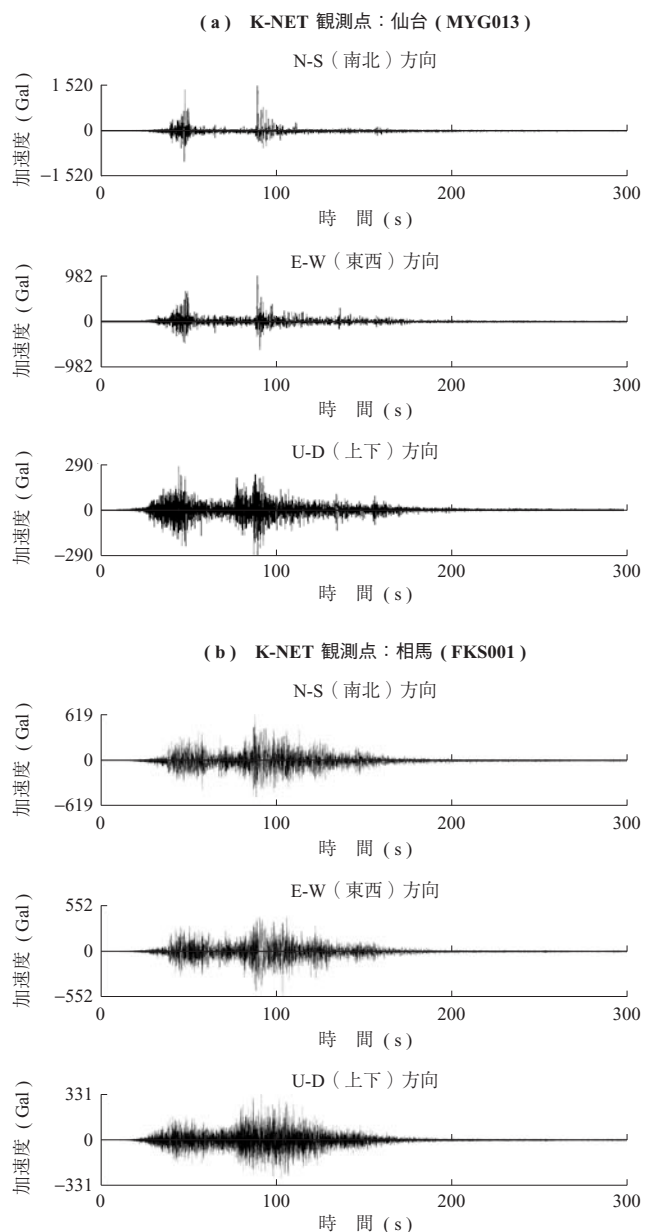
相馬と仙台での時刻歴波形を第 10 図に示す。

地震波形のデータは、独立行政法人防災科学技術研究所 K-NET⁽⁵⁾のものである。K-NET は、全国を約 20 km 間隔で 1 000 点以上の観測点で覆っている強震観測網（地震観測網）である。

今回の地震波形の特徴として、

- ① 振幅の大きな箇所が、50 s 付近と 90 s 付近の二つある。
- ② 地震動の継続時間が長い。特に振幅が比較的大きい時間が、約 150 s 間ほど続いている。（一般的な地震動では、全時間が 1 分（60 s）以下）という点が挙げられる。これらは震源（域）が広いことに起因すると考えられる。

さらに、相馬、仙台を含めて幾つかの観測点で計測された時刻歴データについて、加速度応答スペクトルを算出し



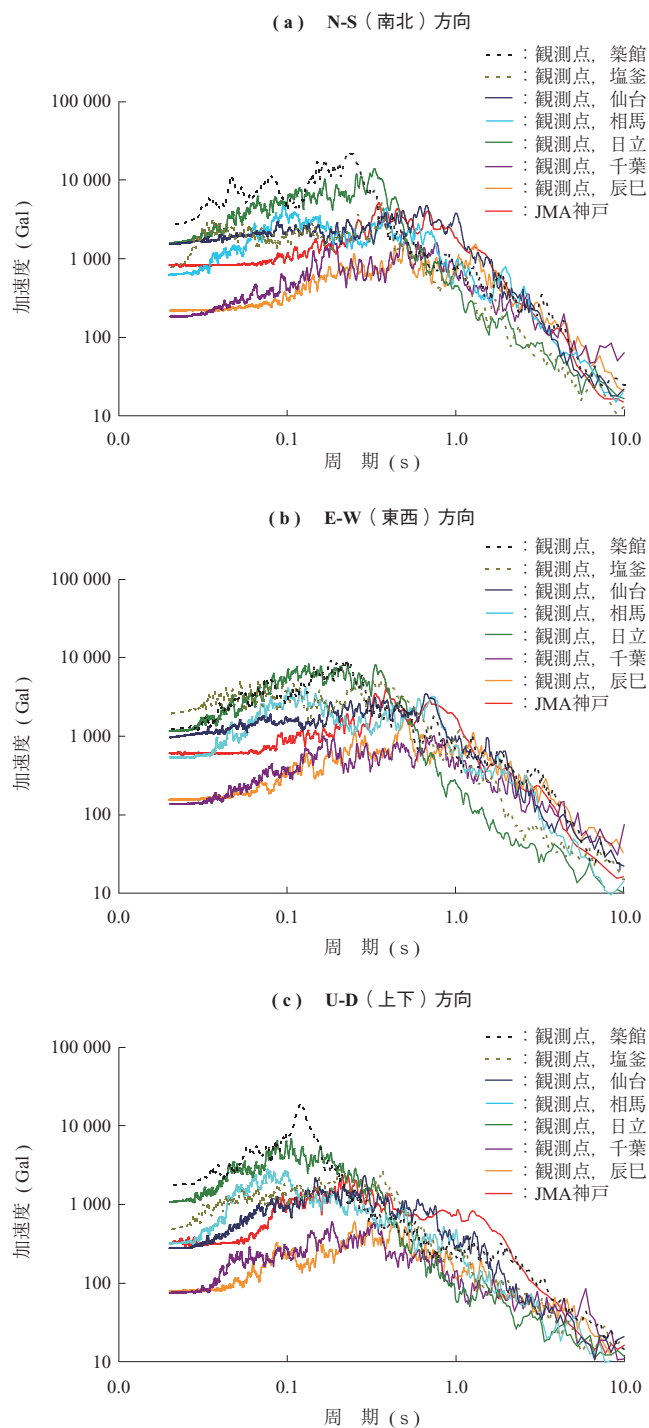
第 10 図 地震波 (加速度) K-NET⁽⁵⁾
(独立行政法人防災科学研究所から)

Fig. 10 Earthquake waveforms observed by K-NET

た結果を第 11 図に示す。築館は、最大震度 7 を記録した栗原市 (宮城県) の観測点である。さらに比較のために、兵庫県南部地震 (1995 年) での観測点: JMA 神戸 (神戸海洋気象台) でのスペクトルも示す。

これらの図から、今回の地震波は、比較的短い周期の成分が卓越していることが分かる。これは、特に被害の大きい日立以北の観測点で顕著である。千葉、辰巳の関東、東京湾岸の観測点になると、この短周期成分が小さくなり、長周期成分が大きくなっている。

また、一般家屋などの建築構造物の固有周期域である 1 s, 2 s 付近では、JMA 神戸が大きいことも分かる。し



(注) 減衰: 1%

第 11 図 加速度応答スペクトル

Fig. 11 Acceleration response spectrum of off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

かし、5 s 以上の周期では、JMA 神戸よりも千葉、辰巳の方が大きな応答を示している。これは最近着目されている、平野部における長周期成分の増幅によると思われる。

地震波の加速度が比較的大きい (震度が大い) にもかかわらず、今回の調査で被災構造物や家屋の倒壊が、ほとんど見られないのは、以上のような地震波の特性が主要因の一つと考えられる。

4.2 観測地震波の課題

今回の東北地方太平洋沖地震では、これまでに整備されてきた地震観測網が有効に機能しており、それらの観測点の密度は高い。その一方で新たな課題も現れてきている。

第12図は、仙台塩釜港付近の概略地図である。マーキングのある3か所は、地震観測点でK-NETの塩釜、仙台と、国土交通省港湾局の港湾地域強震観測網⁽⁶⁾の仙台である。相互に数kmの距離を隔てて設置されている(K-NET塩釜と港湾地域強震観測網・仙台の間が約2km)。

この3か所のNS方向の地震波形について加速度応答スペクトルを求めた結果を第13図に示す。

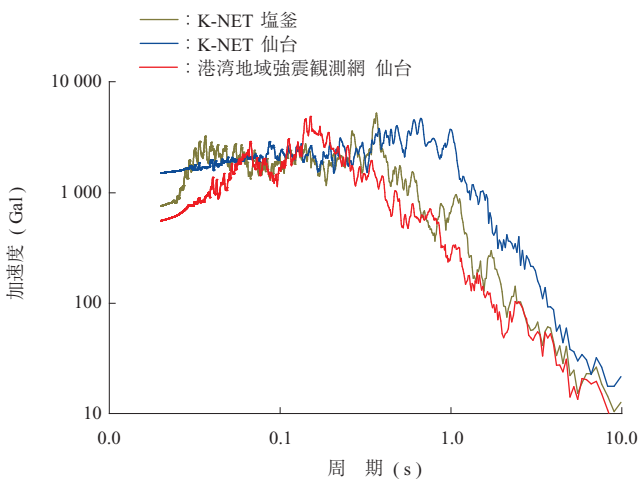
図から周波数特性の差があることが分かる。また、本稿には掲載していないが、時刻歴波形での最大加速度値についても、K-NET塩釜：761Gal、K-NET仙台：



K-NET：仙台 港湾地域強震観測網：仙台 K-NET：塩釜

第12図 仙台塩釜港付近の地震観測点

Fig. 12 Observation points near Sendai-Shiogama Port



(注) 減衰：1%

第13図 観測点での差：NS方向加速度応答スペクトル

Fig. 13 Comparison of observation points (Acceleration response spectrum in NS-direction)

1515Gal、港湾地域強震観測網・仙台：559Galと差が見られる。

通常、構造物・設備の耐震検討において、そのサイト近傍にある観測点で記録された地震波形を用いることが多い。この例のように、非常に近い観測点間で差がある場合、どの波形を適用するかで、耐震性が異なる結果となる。

これらの差には、地盤の違いなどが要因として推測されるが、今後の詳細な分析が必要と考える。

5. 結 言

2回にわたって東北地方太平洋沖地震の被害状況を調査した。その結果を以下にまとめる。

- ① 今回の被災で、地震動による被害は比較的軽微であり、大きな被害は津波によるものがほとんどであった。これは、地震波の周波数特性が構造物に大きな被害を及ぼさない特性であったこと、1995年兵庫県南部地震を契機に耐震性向上を進めたことなどによる。
- ② 津波による被害は、地震動での被害より顕著、かつ広範囲にわたって見られた。
- ③ 仙台塩釜港のコンテナクレーンについては、津波の被害を受けているため、復旧には電気機械類や稼働部の健全性確認が必要である。
- ④ 仙台塩釜港のコンテナクレーンは免震、非免震の両タイプがあったが、被害状況からは免震クレーンと非免震クレーンとの有意差は確認できなかった。これは今回の地震波の特性に、その要因があると考えられる。したがって、この事象が免震化の有効性を阻害する要因にはならない。
- ⑤ 相馬港では、比較的強固に作られているPC製のサイロが残っていることから、固定方法、強度のある外板(外壁)といった対策で、津波による被害は防げる、あるいは減じると考えられる。

今後の課題としては、まず、被災した構造物の使用可否判断や累積疲労などの評価が必要である。加えて、これらの復旧については優先順位付けや方法など、方針を決めて実施していく体制が必要である。

さらに顕著な被害をもたらした津波への対策として、津波によって構造物に作用する荷重(外力)の推定、それによる妥当性をもった構造検討を行うことが、要求されると考える。

— 謝 辞 —

相馬市周辺の調査においては、本稿での写真掲載に当たって福島県相馬港湾建設事務所、相馬共同火力発電株式会社のご協力をいただきましたことに、深く感謝の意を表します。

また、仙台塩釜港の調査では、宮城県仙台塩釜港湾事務所にご協力いただき、現地調査を実施するとともに、写真を掲載させていただきました。ここに記し、深く感謝いたします。

最後に、このたびの東北地方太平洋沖地震によって被災されたみなさまに、慎んでお見舞いを申し上げますとともに、一日も早く復興されるよう心からお祈り申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 独立行政法人防災科学技術研究所 主催：緊急報告会－東日本大震災への対応－資料 2011年4月
- (2) 国土交通省国土技術政策総合研究所，土木研究所，建築研究所 主催：東日本大震災調査報告会資料 2011年4月
- (3) 独立行政法人港湾空港技術研究所：港湾空港技術研究所資料 No.1231 2011年4月
- (4) 独立行政法人防災科学技術研究所：全国強震観測網 K-NET (Kyoshin Net)
- (5) 国土交通省港湾局：港湾地域強震観測