

東日本大震災と港湾施設

岩波 光保*

本稿では、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震とこれによって発生した巨大津波について、港湾における観測結果を概説するとともに、防波堤、岸壁、栈橋に代表される港湾施設の被害状況を取りまとめた。また、港湾施設のうちプレストレストコンクリート（PC）構造が採用されているPC栈橋およびPCポンツーンの被災状況についても紹介した。さらに、今後の港湾施設の復旧にあたっての基本的な考え方を示すとともに、技術者が今後取り組むべき課題をまとめた。

キーワード：港湾施設、地震動、津波、複合災害、粘り強い構造

1. はじめに

2011年3月11日14時46分18秒、東北地方太平洋沖を震源とするM9.0の海溝型巨大地震が発生し、さらにこれにもなつて未曾有の規模の巨大津波が東日本沿岸を襲い、甚大な被害が発生している。防波堤、岸壁、栈橋といった港湾施設においても、青森県から千葉県に至る広い範囲で、建造物の損傷、崩壊、移動、流出などの被害が報告されている。

港湾空港技術研究所では、この災害から港湾・空港・海岸を早期に復旧・復興させるための技術的な支援を国土交通省等と協力して鋭意実施している。港湾・空港・海岸の被災状況については、すでに調査報告書¹⁾を発行しており、現在は被災メカニズムの詳細な分析と今後の復旧・復興のための技術的な検討を関係機関と連携して進めている。本稿では、既報¹⁾の内容をベースとして、港湾において観測された地震動と津波痕跡などから、港湾施設の被害状況を分析するとともに、今後の復旧・復興にあたっての基本的な考え方を示した。また、港湾施設のうち、プレストレストコンクリート（PC）構造が採用されているPC栈橋とPCポンツーンについて、被害状況を紹介した。

2. 観測された地震動の特徴

東北地方太平洋沖地震では、港湾地域強震観測網²⁾により、全国で30の港湾で強震記録が得られた。例として、岩手県釜石港で観測された加速度波形を図-1に示す。この波形だけでなく、今回の地震で観測された強震記録の

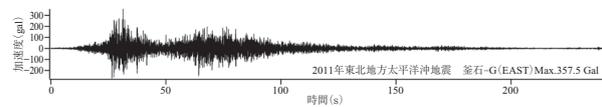


図-1 釜石港で観測された地震波

特徴として、継続時間が非常に長いことがあげられる。また、福島県小名浜港の地表では、1400 galを超える非常に大きな最大加速度が観測された。この値は、今回の地震でK-NETの築館観測点で観測された最大加速度2700 galよりは小さいものの、港湾地域強震観測網で記録された最大加速度としては過去最大のものである。

釜石港の地表で得られた加速度波形のフーリエスペクトルを図-2に示す。同図には、過去に港湾施設に大きな被害をもたらした地震動のフーリエスペクトルもあわせて示している。一般に、港湾施設に対しては0.3～1 Hz程度の周波数成分がもっとも影響を及ぼしやすい³⁾が、釜石港で得られた加速度波形ではこのような成分はあまり卓越していなかったことが分かる。このことは、釜石港の係留施設において地震動による被害がほとんど見られなかつ

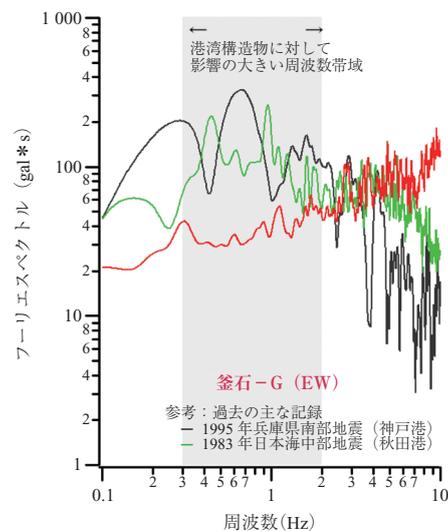


図-2 釜石港で観測された地震波の周波数スペクトル



* Mitsuyasu IWANAMI

(独) 港湾空港技術研究所
構造研究チームリーダー

たことと一致している。また、釜石港以外の観測点で得られた地震波の加速度波形についても同様にフーリエスペクトルを求めた結果を図-3に示す。これによれば、青森県八戸港、岩手県大船渡港、宮城県仙台塩釜港については、釜石港と同様に、港湾施設に対して影響の大きい周波数成分が少ないが、東北地方南部の福島県小名浜港では、1 Hz 付近の成分を比較的多く含んでいることが分かる。このことは、福島県や茨城県において、液状化を含む地震動による港湾施設の被害が東北地方北部よりもみられたことと一致している。なお、東北地方南部以南では、埋立てによって整備した港湾が多いことも、被害を大きくした原因の一つでもある。

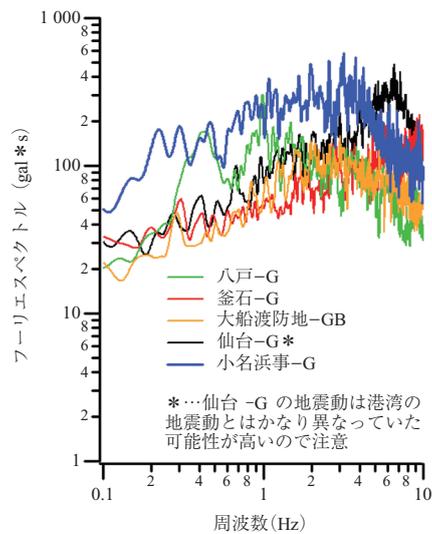


図 - 3 周波数スペクトルの比較

3. 観測された津波の特徴と津波痕跡

全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS) による波浪・潮位の観測⁴⁾の一環として、GPS 波浪計による観測が行わ

れている。GPS 波浪計は、海岸からおおむね 10 ~ 20 km, 水深 100 ~ 300 m の海面に GPS を搭載したブイを係留して、波浪等の観測を行うもので、2010 年 12 月までに東北 ~ 四国地方の太平洋沿岸に 12 基、東北地方の日本海沿岸に 3 基の GPS 波浪計が設置されている。また、GPS 波浪計では、ブイの上部に搭載した GPS で 1 秒ごとに高度を計測しており、条件が良ければ、鉛直方向の測位誤差の標準偏差は離岸距離が 20 km でも数 cm となり、非常に精度の高い観測が可能である。

図-4に、東北~四国地方沿岸の9基のGPS波浪計で観測された東北地方太平洋沖地震に伴う津波の波形を示す。これによれば、地震発生後の間もない14時50分台に東北沖で第1波が観測され、15時10分台に最大の津波高さが記録され、地震の発生から半日後の3月12日3時頃でも高さ数十cmの津波が記録されている。これらのうち、最大波高は岩手県南部沖で観測されており、6.7mであった。また、三重県尾鷲沖、和歌山県南西沖、徳島県海陽沖のGPS波浪計でも、地震から1時間以上を経過した16時過ぎに、高さ0.3~0.5mの第1波が到達していることが分かる。

次に、沿岸部の現地調査で確認された津波痕跡高(浸水高および遡上高)を図-5に示す。ここでの津波痕跡高は、最大波の発生時刻が必ずしも明確ではないことから、すべて津波到達時の天文潮位を基準面として整理している。

浸水高に着目すると、宮城県の気仙沼から女川にかけて、浸水高13mを超える非常に大きな津波が来襲したことが分かる。また、岩手県の宮古から福島県の相馬に至るきわめて広い範囲で10m以上の浸水高が記録されている点も特筆すべきである。

4. 港湾施設の被害状況

ここでは、東北地方太平洋沖地震とこれに伴う津波による港湾施設の被害のうち、係留施設と防波堤でみられた特

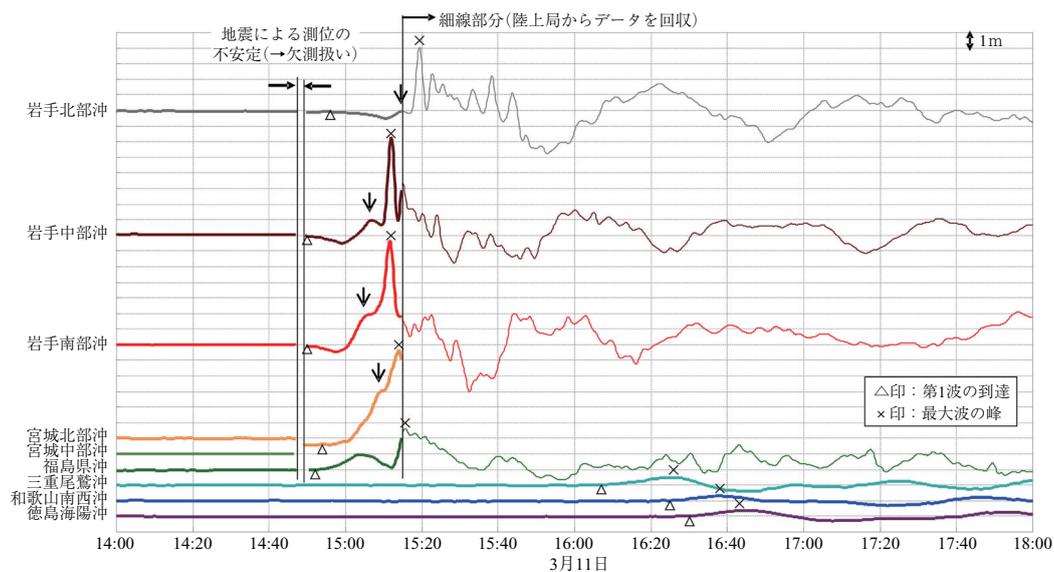


図 - 4 GPS 波浪計で観測された津波

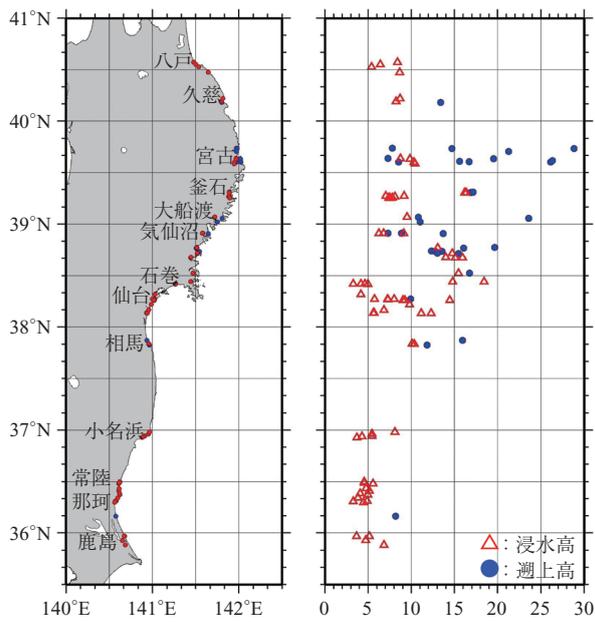


図 - 5 津波痕跡高の調査結果

微的な被害の状況を示す。

4.1 係留施設の被害

写真 - 1 は、重力式係船岸の背後地盤の液状化によってエプロンが陥没したケースである。このような液状化による被害は宮城県以南で多く発生した。写真 - 2 は、鋼矢板式係船岸の前面鋼矢板の継手が外れ、矢板壁が崩壊したケースである。一般に、地震動による被害のみでは、このような破壊形態とはならない。この事例では、地震動によって鋼矢板の損傷やエプロンの破損が生じたところに、

津波による揚圧力や掃流力が作用したものと推察されており、典型的な地震と津波による複合災害といえる。写真 - 3 に、岸壁背後の上屋の被害状況を、写真 - 4 に、背後地でのコンテナ散乱状況を示す。これらは、津波による被害である。

今回の係留施設の被害は、津波によるものがほとんどであり、地震動による被害は、観測された地震動の規模や継続時間の割には顕著ではなかった。これは、前述のとおり、地震波の周波数特性や地盤条件に起因するものである。一部で、地震動による被害が生じた係留施設も存在したことから、これらに対する被災メカニズムの解明を急ぐ必要はあるものの、総じて、現行の港湾施設の耐震設計法がおおむね妥当なものであることが実証された。

4.2 防波堤の被害

今回の震災では、港内静穏度確保のための第一線防波堤が八戸港、久慈港、宮古港、相馬港などで津波による被害を受けただけでなく、津波防波堤として整備された釜石港や大船渡港の湾口防波堤でも甚大な被害が発生した。

釜石港の湾口防波堤は、南堤と北堤からなっており、南堤が全長 670 m で、22 函のケーソンから構成されており、最深部の堤頭函のみが台形のスリットケーソンで、それ以外は通常のスリットケーソンである。北堤は全長 990 m で、44 函のケーソンで構成されており、このうち 573.5 m の区間が台形のスリットケーソン、それ以外は通常のスリットケーソンとなっている。また、開口部潜堤は全長 300 m で、13 函のケーソンで構成されており、端部以外は基面水深 - 32 m、天端 - 19 m となっている。

写真 - 5 および写真 - 6 に、北堤と南堤の被災状況を示す。南堤の 22 函のケーソンのうち、開口部側から 10 函



写真 - 1 重力式係船岸背後の陥没



写真 - 2 矢板式係船岸の崩壊



写真 - 3 上屋の損傷



写真 - 4 コンテナの散乱状況



写真 - 5 防波堤の被災状況



写真 - 6 防波堤の被災状況

はほとんど移動していなかったが、それよりも陸側のケーソンについては水没していた。北堤の44函については、一部で原形をとどめていたが、ほとんどのケーソンが移動あるいは水没していた。また、開口部潜堤を構成するケーソンについても、ほとんどがマウンドから港内側に転落していた。これらのケーソンの移動の原因としては、津波により港内外に発生した巨大な水頭差（約9.5m）によるものに加えて、ケーソン目地部やマウンド中に作用した速い流れによってマウンドが洗掘を受けたことなどによるものであると推察されている¹⁾。

5. PC 構造物の被害状況

今回の震災で被害を受けた港湾には、PC 栈橋やPC ポンツーンなどのPC 構造物が存在している。大船渡港の永浜地区にあるPC 栈橋（水深：-13m）は、図-6に示すように、上部工については、法線平行方向に配置した3列の受け梁にPC ホロー桁を法線直角方向に2列配置しており、下部工については、斜め組杭式となっている。写真-7に示すように、栈橋法線に異状は見られず、PC ホロー桁と受け梁の接合部においても、地震動による慣性力や津波の揚圧力によって損傷の発生が懸念されたが、写真-8に示すように、上部工コンクリート上面にひび割れなどの損傷は認められなかった。上部工下面や鋼管杭の状態



写真 - 8 PC 栈橋の上部工上面の状況

について詳細に調査する必要があるものの、PC 栈橋の高い耐震性と耐震設計の妥当性が検証される結果となった。

また、いくつかのPC ポンツーンでは、係留設備から函体が外れ、水没あるいは流出していた。函体が流出した場合、周囲の構造物等に衝突し二次的な被害をもたらすことから、函体を流出させない係留系を今後検討する必要がある。

6. 粘り強い構造

今回の震災では、地震動による被害よりも津波による被害の方が大きかった。これまでの耐津波設計では、近代で最大の津波、すなわち、100年に1回程度発生する程度の津波を対象としていたために、今回の津波のように1000年に1回程度発生する巨大津波が来襲した場合には、構造物の破壊や流出に至る被害が発生することになる。

今後は、このような巨大津波から人命や資産を守るために、防波堤や防潮堤などの防災施設をどのように整備するかが重要となる。表-1¹⁾に、津波の規模と防災施設に求められる性能のマトリクスの1例を示す。これによれば、レベル1の津波、すなわち、これまでの設計で考慮されていた津波に対しては、人命や財産を確実に守り、構造物の損傷もある程度の範囲にとどめることが求められる。一方、今回の津波のような最大級のレベル2津波に対しては、人命を守ることは当然のことながら、構造物の壊滅的な被害は防止し、甚大な二次被害を防ぐことが求められる。レベル2津波に対しては、構造物の整備による防災機

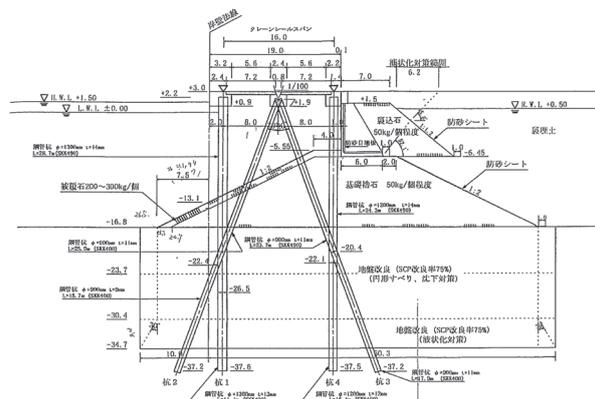


図 - 6 大船渡港永浜地区のPC 栈橋

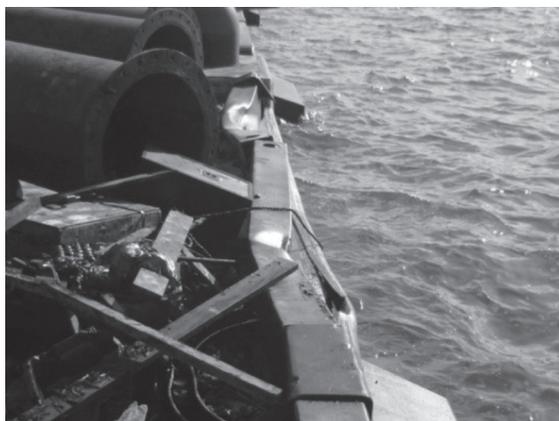


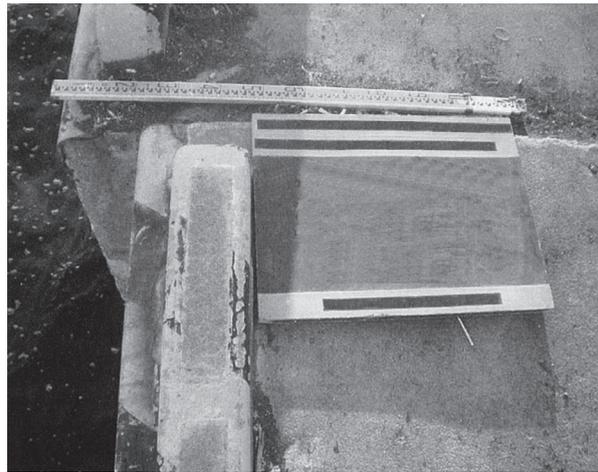
写真 - 7 PC 栈橋の法線

表 - 1 津波に対する要求性能

	対象津波	要求性能
レベル1	・近代で最大 (100年に一度程度)	・人命を守る。 ・財産を守る。 ・経済活動を守る。
レベル2	・最大級 (1000年に一度程度以上)	・人命を守る。 ・経済的損失を軽減する。 ・とくに大きな二次災害を引き起こさない。 ・早期復旧を可能とする。



(a) 地震後



(b) 地震前

写真 - 9 岸壁法線の凹凸

能だけでなく、避難施設の整備や避難経路の確保などのソフト的な対策もあわせて講じておくことはいまでもない。

防波堤や防潮堤などの防災施設にレベル2津波が作用した場合、構造物に壊滅的な被害が生じてはならない。損傷が生じたとしても、津波の威力を軽減する機能は保ち続け、被災後の復旧が容易に行えるように設計しておく必要がある。このためには、構造物に「粘り強さ」が求められる。設計以上の外力が作用したときに、構造物がどのように破壊するのかをあらかじめ把握しておき、壊滅的な損傷に至らないための対策を今回の被災原因究明を踏まえて講じておく必要がある。たとえば、防波堤の内側に作用した流れによるマウンド洗掘が原因と考えられる被災事例対策としては、防波堤の港内側のマウンド上への腹付け石やコンクリートブロックの設置などの洗掘対策を講じて、ケーソン本体の移動を制限することが考えられる。ただし、この場合でも、作用する外力とケーソン本体の移動・沈下の関係を定量的に明らかにしておくことが必要である。さらに、ケーソン本体の移動を制限した場合には、マウンドや支持地盤に大きな反力が発生するだけでなく、ケーソン本体にも大きな波力が持続的に作用することとなる。したがって、水工学に基づく検討だけでなく、地盤工学や構造工学などに基づく検討も同時に必要となり、これまで以上にさまざまな分野の土木技術者の叡知を結集しなければならないと考えている。

7. おわりに

本稿で述べた内容は、震災発生後に実施した緊急調査の結果¹⁾に基づく速報的なものである。現在、港湾施設の復旧のための詳細調査や工事が鋭意進められており、港湾施設の被災メカニズムに関する検討も継続して進められている。今回の震災に対する総括的なとりまとめは、いずれ適切なタイミングで示されることになる。

今回の震災では、防波堤や防潮堤などの防災施設に甚大な被害が生じた。防災施設はいわば待機型の施設であり、

平時にはその存在すら忘れてしまいそうであるが、いざというときに初めてその機能を発揮することが求められる。このような施設の機能をいかに発揮させるためには、いわずもがなではあるが、その計画・設計・施工を適切に行うとともに、適切な維持管理による防災機能の確実な保証が重要である。写真 - 9に、ある重力式係船岸のブロック間の目違いの発生状況を示す。(a)は、今回の地震直後に撮影されたもので、これによれば、今回の地震によりケーソンが20 cm程度移動したのではないかと推測される。一方、(b)は、(a)と同一箇所でも6年前に撮影したものである。これによれば、この目違いは今回の地震によって発生したものではなく、地震前から発生していたものであることが容易に判断できる。このような維持管理データを確実に記録・保存しておくことで、地震や津波の後の判断を的確に行えることとなる。また、定期的な点検診断を確実に行うことで、既存施設の防護機能が評価されるため、安全安心の担保にもつながる。

港湾施設を含む社会基盤施設の復旧事業が円滑に進み、被災地の復興が1日でも早く実現することを祈念し、本稿がその一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 高橋重雄ら：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報，港湾空港技術研究所資料，No.1231，2011
- 2) 野津厚，若井淳：港湾地域強震観測年報（2009），港湾空港技術研究所資料，No.1223，2010
- 3) 野津厚，井合進，一井康二，沼田淳紀：ケーソン式岸壁の変形に寄与する地震動の周波数成分，レベル2地震動に対する土構造物の耐震設計シンポジウムおよび講習会テキスト，pp.311-318，2000
- 4) 河合弘泰，佐藤真，川口浩二，関克己：全国港湾海洋波浪観測年報（NOWPHAS 2009），港湾空港技術研究所資料，No.1226，2011

【2011年9月21日受付】