

# 東日本大震災以降の津波に関する検討

鈴木 高二朗\*1

東日本大震災以降、国内のみならず国外を含め、多くの行政機関や研究機関によって被災調査や津波の発生、伝播、浸水、作用波力等の調査・研究が進められてきた。ここでは、東日本大震災以降、港湾空港技術研究所が実施してきた被災調査、波浪観測網による津波の調査、津波の伝播、浸水、構造物に働く波力とその周囲の洗掘について述べる。

キーワード：津波、東日本大震災、被災調査、波力、洗掘

## 1. はじめに

東日本大震災以降、国内のみならず国外を含め、多くの行政機関や研究機関によって被害調査や津波の発生、伝播、浸水、作用波力等の調査・研究が進められてきた。さらに、その結果に基づいて港湾や海岸などの技術基準が大幅に改定されている。国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所（以下、港空研とよぶ）での研究はその一部ではあるが、これまでに数多くの津波研究を実施している。本稿では、東日本大震災以降の津波に関する諸検討について、港空研が実施してきた津波実験、津波シミュレータなどの取組について解説する。なお、著者の研究分野が波力や洗掘であるため、それらの研究に偏った内容とはなるが、それらの研究内容について概説する。主な内容は以下のとおりである。東日本大震災直後の被災調査、波浪観測網による津波の調査、津波の伝播・浸水、構造物に働く波力とその周囲の洗掘について述べる。

## 2. 東日本大震災直後の被災調査

2011年3月11日の津波発生直後の14日から港空研と国総研による合同の現地調査が実施され、速報として2011年4月に港空研資料が発行された<sup>1)</sup>。この調査資料には、現地踏査や船舶調査による港湾施設の被害状況や各地の浸水状況、および浸水高が記載されたほか、各港湾で観測された強震記録やNOWPHAS（全国港湾海洋波浪情報網）で観測された津波波形記録、さらに数値計算による津波の伝播・浸水計算と実測値との比較結果なども掲載された。



\*1 Kojiro SUZUKI

(国研)海上・港湾・航空  
技術研究所 沿岸水工研  
究領域長

防波堤の倒壊が数多く見られたが、その状況が詳細に記述されている。八戸港の八太郎防波堤（北防波堤）、釜石の湾口防波堤、相馬の沖防波堤など、多くのケーソンが倒壊した。また、田老町の2重堤や陸前高田の海岸堤防など、数多くの堤防の倒壊も相次いだ。

本資料では、東日本大震災による津波を最大級の津波としてとらえ、“最大級の津波を十分考慮した防災計画や防護施設の設計体系の構築を考える必要がある”と述べている。とくに、防波堤を越流する（乗り越える）津波は設計で考慮されておらず、その後の研究に引き継がれた。

## 3. 全国港湾海洋波浪情報網 NOWPHAS

全国港湾海洋波浪情報網 NOWPHAS は国土交通省港湾局、東北～九州の各地方整備局、北海道開発局、沖縄総合事務局、国土技術政策総合研究所および港空研が構築している波浪の観測網である。沖合の波浪を観測することで港湾構造物の設計波浪を決定することなどを目的として設置されてきた。2000年以降には比較的水深の浅い海域に設置されていた波浪計（沿岸波浪計）に加えて、より沖合の水深200m付近にGPS波浪計が設置されてきた。東日本大震災以前には、十勝沖地震に伴う津波<sup>2)</sup> やチリ津波<sup>3)</sup> を検知し、津波の検知に有効なことが明らかになっていた。東北地方では2011年3月11日の時点で6基のGPS波浪計が設置されており、巨大な津波の第1波を検知した。この情報は気象庁にも共有されており、宮城県沿岸の津波の予想高さを6mから10m以上に上方修正するきっかけの1つともなった。河合ら<sup>4)</sup> はその後、日本各地のGPS波浪計、沿岸波浪計、潮位計で観測された水位データを収集し、東北地方の太平洋沿岸を中心に日本各地の津波特性を明らかにした。

## 4. 津波の伝播・浸水に関するシミュレーション

### 4.1 津波シミュレータ STOC

津波の伝播・浸水のシミュレーションは、東日本大震災での被災過程を明らかにするとともに、堤防や護岸などの外郭施設の設計津波高や設計外力を決定する不可欠なツールである。また、将来来襲するであろう津波の伝播をリアルタイムで予測することで、人々のスムーズな避難を可能

とすることも期待されている。

こうしたシミュレーションの開発は古くから行われているが、2000年以降、津波の伝播や浸水を高度に予測するシミュレーションモデル STOC が開発されてきた<sup>5)</sup>。

東日本大震災ではこのモデルにより各地の港湾での津波の伝播と浸水計算が実施され、防波堤による背後地の浸水低減効果なども調べられた。富田ら<sup>6)</sup>は防波堤の存在により浸水範囲および浸水高が低減され、損傷した防波堤であっても、完全に破壊されずに一部が残ることにより建設前と比べて一定の浸水低減効果があることを示した。たとえば、釜石湾では湾口の津波防波堤が大きな被害を受けたものの、釜石湾奥の浸水高を防波堤が無かった場合と比較して約15mから約9mに低減したことを明らかにした。

STOCは静水圧近似モデル(ML)と非静水圧近似モデル(IC)から構成されるモデルとして開発されてきた。富田・本多・千田<sup>7)</sup>は通常の津波の伝播計算では静水圧近似で十分だが、波状段波については鉛直方向の運動方程式を解く非静水圧モデル(IC)の方が再現性が高いことを示した。

STOCは開発当初から改良が加えられ、安定したより汎用性の高いモデルとなってきており、最近では一般にも公開されている<sup>8)</sup>。

STOCは現在も改良が加えられ、がれきのような漂流物の動きを予測するモデル(DM)が付け加えられてきている。富田・千田<sup>9)</sup>は漂流物実験を用いたDMの検証を行うとともに、津波火災モデルを開発し、津波の発生から火災の発生～鎮火までを計算可能にした。また、最近では、千田・高川<sup>10)</sup>が岩手県山田町を対象に陸域で発生するがれきの漂流計算を実施し、航空写真から推定したがれき分布と計算結果を比較し、その再現性を確かめている。また、港湾と市街地を模擬した複雑なモデルを用いた漂流物実験と比較し、漂流物の動きの再現性を確かめることも行われている<sup>11)</sup>。

#### 4.2 即時津波予測

東日本大震災以降、数値シミュレーションによる津波の即時予測技術も大幅に向上してきている。高川・富田<sup>12)</sup>は東日本大震災での津波を対象として、GPS波浪計などの沖合の水位観測データから時空間的に変化する津波波源と地盤変動量をリアルタイムに推定することを可能とした。さらに、階層ベイズモデルを用いることでより最適な津波波源の逆解析モデルを構築している<sup>13)</sup>。高川<sup>14)</sup>はこのような観測データからの津波予測モデルの開発だけでなく、津波の伝播メカニズムの解明にも取り組み、水の圧縮性や地殻の弾性が津波の伝播に影響を与えることを明らかにした。これらの現象を考慮することで、遠地津波の伝播計算が大幅に改善されている。

### 5. 津波波力に関する研究

#### 5.1 越流時の静水圧差式

前述したように東日本大震災では数多くの防波堤や堤防などの外郭施設が被災を受けた。その原因は設計をはるかに超える規模の津波が来襲したことに起因している。とく

に防波堤を乗り越える越流時に、防波堤ケーソンの前面と背面に大きな水位差ができ、その圧力差によって多くの防波堤や堤防が破壊された。

港空研では東日本大震災直後から波力実験が開始され、そのメカニズムを明らかにしてきた。有川ら<sup>15)</sup>は釜石湾口防波堤の被災に関して大規模な平面実験を実施して防波堤のケーソンが津波の越流時に滑動したことを示した。この実験結果などをもとにして、越流時の波力に関する静水圧差式が導かれた。この波力式はこれまでに用いられてきた谷本式<sup>16)</sup>に加えて防波堤の耐津波設計ガイドライン<sup>17)</sup>に反映され、2011年以降の防波堤の耐津波設計ではその約半数に採用されている。その後、平成30年の港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>18)</sup>に記載された。

#### 5.2 静水圧差式の改良

一方で静水圧差式を用いた設計が進むにつれて、オリジナルの静水圧差式だけでは評価できない現象も明らかになった。たとえば、ケーソン背後の水位が極端に低くなる場合には静水圧差式よりも波力が大きくなる場合があり、鶴田ら<sup>19)</sup>は背面静水圧補正係数の算定法を提案した。

また、Suzuki and Shimosako<sup>20)</sup>はパラペットが高い場合や上部斜面堤では静水圧差式よりも大きな揚圧力が働く場合があることを明らかにした。

津波遡上時の津波波力も陸上構造物の設計にあたって重要であり、数多くの研究(大村ら<sup>21)</sup>など多数)がある。平成30年の港湾基準には非越流時の津波波力としてこれらの研究が反映されている。ただし、これらの波力算定式の中にフルード数を使う算定法があるが、津波遡上時のフルード数は構造物周辺の地形などによって大きく変わるため、算定に注意が必要である。

### 6. 粘り強い構造

これまでに述べてきた研究をふまえて、平成30年には港湾施設の技術上の基準・同解説が改定された。ここでは、2段階の津波(「発生頻度の高い津波」、「最大クラスの津波」)という設計津波の考え方が導入された。三陸の津波では、1896年の明治三陸津波が発生頻度の高い津波(レベル1津波)であり、東日本大震災による津波が最大クラスの津波(レベル2津波)に相当する。設計津波はレベル1からレベル2の間の規模で設定され、レベル1津波が設計津波となるケースが多い。

一方、「発生頻度の高い津波」を超える規模の津波に対しては、防波堤が変形しつつも倒壊しない「粘り強い構造」であることが求められることとなった。

防波堤を粘り強くする対策として、いくつかの対策が考えられているが、そのなかでもっとも研究が進んだのが防波堤背後に設置する腹付工である。

有川ら<sup>22)</sup>は八戸港八太郎防波堤の被災原因となった越流による防波堤背後の洗掘を実験で再現するとともに、腹付工によって滑動および洗掘を抑制できることを示し、腹付工の有効性を明らかにした。

腹付工については遠心載荷装置を用いた地盤分野からの検討も進められ、その設計法が確立されつつある<sup>23)</sup>。

## 7. 洗掘現象

### 7.1 防波堤開口部の洗掘と越流洗掘

これまでに述べてきた研究により、設計津波や波力の算定が可能となってきたものの、現在でも設計を実施するうえで算定が困難なものは海底地盤の洗掘である。その顕著な例は八戸港での洗掘である。

八戸港では図-1のように防波堤開口部や護岸隅角部で激しい洗掘が発生し、防波堤堤頭部や護岸隅角部でケーソンの滑動被害が発生した<sup>24)</sup>。また、北防波堤では越流によって防波堤背後の砂地盤が洗掘され、ケーソンが滑動した。この越流洗掘は2011年以降の研究の大きなトピックであり、東山ら<sup>25)</sup>、有川ら<sup>22)</sup>などによる実験でその状況が明らかとなっており、粒子法による数値計算でもある程度再現が可能となってきた<sup>26)</sup>。一方、洗掘そのものの現象は明らかになってきているが、洗掘対策工に関する研究はかぎられている。その原因の一つは移動床実験では砂の洗掘によって模型が変形してしまうため、津波の条件ごとに模型を作りなおす必要があり、砂地盤の変形を考慮しない固定床実験と比較するとケース数を増やすのが困難なためである。

### 7.2 洗掘実験と相似則

洗掘現象では多くの場合、砂が激しく浮遊しており、浮遊砂の相似則が問題となる。鈴木ら<sup>27)</sup>は消波ブロックの洗掘による沈下に関して、現地調査、小規模・中規模・大規模実験を行い、洗掘現象の再現には沈降速度パラメータを用いた相似則の適用性が高いことを示した。この相似則はDean<sup>28)</sup>によって砂浜の波による地形変化の実験の相似則として提唱されたものである。砂の浮遊は流れによる砂の浮き上がりと重力による沈降のバランスのうえでなっている。そこで、実験で用いる砂の粒径を決める際に、砂の沈降速度をフルード則（流れの相似則）にあわせるといのが沈降速度パラメータによる相似則である。流れによる砂のピックアップ量については相似則が不十分なものの、ピックアップ量が卓越する場合には沈降速度パラメータによる相似則が現象をより再現しやすいものと考えている。

### 7.3 洗掘対策工に関する水理模型実験

ここでは筆者が所属する耐波研究グループが四国地方整備局の受託研究で行った浦戸湾の湾口防波堤の洗掘対策工に関する実験<sup>29)</sup>について紹介する。津波の浦戸湾への浸入を抑制するには湾口部に津波防波堤を設置することが効果的であり、現在、2つの大型突堤の設置が計画されている。

浦戸湾は奥行き6kmの縦長の湾であり、その湾口は幅が300m弱と狭く、津波来襲時には湾口で10m/sに及ぶきわめて速い流れが発生すると想定されている。そのため防波堤を設置した場合には、流れが縮流によって速くなるなどして、防波堤周囲の砂地盤が激しく洗掘されることが想定される。そこで、幅10m、長さ50mの総合沿岸防災水槽で大型ポンプを用いて津波実験を行った。実験は1/40スケールであり、水路内に種崎側防波堤と桂浜側防波堤を

同時に再現した。

津波は発生頻度の高い津波（レベル1津波）と最大クラスの津波（レベル2津波）を対象としており、防波堤前面の最大水位はそれぞれ、TP+7.2m、TP+8.6mであり、港内側と港外側の水位差は最大でそれぞれ、6.0mと8.5mである。

この実験のなかでもっとも重要なのは砂地盤の洗掘の相似則である。前述した沈降速度パラメータを用いて、実験に使用する砂の粒径を決定した。浦戸湾口部は海底地盤が砂と礫で構成されており、その中央粒径は1.5mm、沈降速度は12cm/sである。フルード則で実験の沈降速度を求めると、沈降速度は $\sqrt{40}$ で割ることで1.9cm/sとなる。この沈降速度に相当する粒径は0.2mmであり、この粒径の砂を用いた。

実験では海底面をモルタルで製作した固定床実験と砂で製作した移動床実験を実施した。固定床実験ではケーソンを含め、マウンド被覆工にも変形が発生しなかったが、移動床実験では、レベル1、レベル2のいずれの津波でも激しい洗掘が発生し、ケーソンの堤頭部が大きく滑動した。

このような洗掘を防ぐために、洗掘防止工に関する実験を実施した。図-2は防波堤堤頭部に連結した袋詰被覆工による洗掘対策工を設置してレベル2津波を作用させた後の状況である。洗掘防止工の周囲では現地量で深さ8.0mに及ぶ洗掘が発生したものの、洗掘防止工が砂地盤の洗掘を防ぐことで、防波堤本体は変形しなかった。この

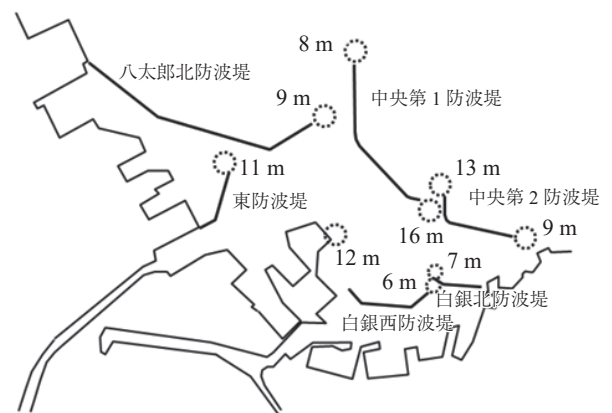


図-1 東日本大震災での八戸港での洗掘発生状況

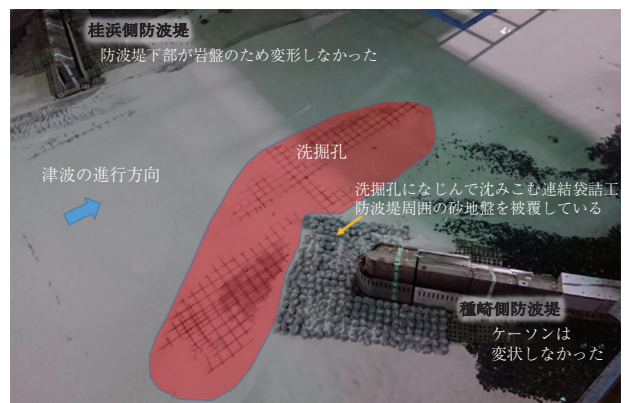


図-2 洗掘対策工に関する移動床実験



ほかアスファルトマットによる洗掘防止工の実験も実施した。いずれの工法も変形しつつも全体としては倒壊しない、いわゆる“粘り強い”構造となることが分かった。

#### 7.4 粒子法による流れの再現計算

久保田ら<sup>30)</sup>は粒子法 (PARISPHERE) による堤頭部周囲の流れの再現計算を実施した。その結果、堤頭部の前後で水位が急激に変化する際、きわめて速い流れが堤頭部で発生し、単に地盤に平行に流れるだけでなく、鉛直下向きに潜り込んでより速い流れとなることが明らかとなった。実験では堤頭部ケーソンよりやや航路側のケーソン直背後に位置する被覆ブロックが最初に飛散しており、このような潜り込む流れがブロックの飛散を引き起こす一つの要因となっていたことが明らかとなった。

実験では計測器を満遍なく設置することはできないため、このような数値計算で実験データを補完することで、より総合的に現象を把握することが可能となると考えられる。

## 8. おわりに

本稿では東日本大震災以降の港空研での研究を主に紹介した。現在もさまざまな数値シミュレーション手法の開発も精力的に実施されており、今後、設計へ反映されていくものと期待されている。また、最近では、人体の津波に対する挙動に関する研究や、これまで設計に組み込まれてこなかった海岸林やマングローブのようなグリーンインフラの研究も進みつつあり、グリーンインフラとグレイインフラ (防波堤などの人工構造物) を組み合わせた防災インフラの最適設計についても検討されている。自然と構造物との調和のとれた海岸防護が今後発展するものと期待している。

### 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，港空研資料，No.1231，2011.4
- 2) 永井紀彦・小川英明：平成15年（2003年）十勝沖地震津波波形の特性，港空研資料，No.1070，2004.3
- 3) 河合弘泰・佐藤真・永井紀彦・川口浩二：GPS波浪計ネットワークを用いた平成22年（2010年）チリ地震津波の日本沿岸における変形特性の解析，港空研報告，Vol.49，No.4，pp.3-77，2010.12
- 4) 河合弘泰・佐藤真・川口浩二・関克己：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震津波の特性，港空研報告，Vol.50，No.4，pp.3-64，2011.12
- 5) 富田孝史・柿沼太郎：海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波シミュレーターSTOCの開発と津波解析への適用，港空研報告，Vol.44，No.2，pp.83-98，2005
- 6) 富田孝史・廉慶善・鮎貝基和・丹羽竜也：東北地方太平洋沖地震時における防波堤による浸水低減効果検討，土木学会論文集B2，Vol.68，No.2，pp.I\_156-I\_160，2012
- 7) 富田孝史・本多和彦・千田優：高潮津波シミュレーター (STOC) による津波被害解析手法，港空研報告，Vol.55，No.2，pp.3-34，2016.6
- 8) 津波シミュレータの公開について (港湾空港技術研究所)，<https://www.pari.go.jp/unit/tsunamitakashio/open-software/t-stoc/download.html> (閲覧日：2021.9.17)

- 9) 富田孝史・千田優：震災漂流物の漂流推定手法と津波火災の発生推定手法の開発，土木学会論文集B2，Vol.72，No.2，pp.I\_421-I\_426，2016
- 10) 千田優・高川智博：津波による建物の非破壊漂流・断片化漂流ががれきの分布特性に与える影響に関する数値的な検討，土木学会論文集B2，Vol.75，No.2，pp.I\_445-I\_450，2019
- 11) 千田優・福井信気・森信人・安田誠宏・山本剛士：漂流物と流れ場の時空間計測データを用いた複雑流れ場における津波漂流物挙動の解析，土木学会論文集B2，Vol.76，No.2，pp.I\_313-I\_318，2020
- 12) 高川智博・富田孝史：時間発展を考慮した津波波源逆解析と観測地点盤変動量のリアルタイム推定，土木学会論文集B2，Vol.68，No.2，pp.I\_311-I\_315，2012
- 13) 高川智博・富田孝史：階層ベイズモデルによる津波波源逆解析の信用区間と観測誤差の同時定量推定，土木学会論文集B2，Vol.70，No.2，pp.I\_196-I\_200，2012
- 14) 高川智博：水の圧縮性と地殻弾性を考慮した津波の分散関係解析：遠地津波予測の精度向上に向けて，土木学会論文集B2，Vol.69，No.2，pp.I\_426-I\_430，2013
- 15) 有川太郎ら：釜石湾口防波堤の津波による被災メカニズムの検討－水理特性を中心とした第一報－，港空研資料，Vol.1251，2011
- 16) 谷本勝利ら：1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察，港空研資料，Vol.470，1983.11
- 17) 国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン，2013.5
- 18) (公)日本港湾協会：国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン，2018.5
- 19) 鶴田修己・鈴木高二朗・喜多司・宮田正史・竹信正寛：津波越流時に混成防波堤ケーソンに働く波力に関する検討，港空研報告，Vol.56，No.1，2017.3
- 20) Kojiro Suzuki and Kenichiro Shimosako：Pressure Distribution Acting on Breakwater Caisson under Tsunami Overflow，PIANC，2018.
- 21) 大村智宏ら：胸壁に作用する津波波力に関する実験的研究，土木学会論文集B2，Vol.71，No.2，pp.I\_991-996，2015
- 22) 有川太郎ら：津波越流時における混成堤の被災メカニズムと腹付工の効果，港空研資料，No.1269，2013
- 23) 高橋英紀，佐々真志，森川嘉之，渡部要一，高野大樹：津波に対するケーソン式防波堤マウンドと腹付工の安定性，港空研報告，Vol.54，No.2，pp.21-50，2015.9
- 24) 富田孝史ら：2011年東北地方太平洋沖地震津波による八戸港の被害，土木学会論文集B2，Vol.68，No.2，pp.I\_1371-1375，2012
- 25) 東山和博・長谷川巖・稲垣茂樹：防波堤港内側マウンドの津波による越流洗掘に関する研究，土木学会論文集B3，Vol.69，No.2，pp.I\_377-382，2013
- 26) Naoki Tsuruta, Kojiro Suzuki and Tsukasa Kita：Particle Simulation considering the Sand-Scale-Effect for Scour behind the Breakwater due to Tsunami with Hydraulic Experiment，ICCM，2016.
- 27) 鈴木高二朗・高橋重雄・高野志志・下迫健一郎：砂地盤の吸い出しによる消波ブロック被覆堤のブロックの沈下被災について，港空研報告，Vol.41，No.1，pp.I\_51-90，2002
- 28) R. G. Dean：Physical modelling of littoral processes，A. A. Balkema，1985
- 29) 鈴木高二朗・池田直太・鶴田修己・朝比翔太・久保田博貴・伊藤森樹：浦戸湾湾口における津波防波堤堤頭部の津波による洗掘について，土木学会論文集B3，Vol.77，2021，in Print
- 30) 久保田博貴・鶴田修己・千田優・朝比翔太・遠山憲二・鈴木高二朗：三次元粒子法型数値波動水槽を用いた防波堤堤頭部における巨大津波流れに関する検討，土木学会論文集B2，Vol.76，No.2，pp.I\_283-288，2020

【2021年9月17日受付】