



特集

3.11 東日本大震災から
もうすぐ10年
～大きく変わった
沿岸防災～



津波防災に関する設計・研究の最新事情

鈴木 高二郎 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 耐波研究グループ長

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震津波の後、多くの組織によって災害復旧と外郭施設の粘り強い化が進められ、それにもなう調査研究により新たな知見と設計法が蓄積されてきた。本稿では、外郭施設の設計の観点から、主に波力や洗掘の研究および設計法について概説する。

2. 背景

2.1 東北地方太平洋沖地震津波以降の耐津波設計

昭和三陸津波（1933年）の直後から築造された田老町の津波防潮堤をはじめ、近代から現代にかけてわが国では多くの津波対策施設が築造されてきた。また、日本海中部地震津波（1983年）後の調査研究により防波堤に働く波力公式（谷本式）も整備されたほか、釜石湾口防波堤の整備ではダブルスリットを擁する新形式巨大ケーソンも築造されてきた。

東北地方太平洋沖地震津波では、設計をはるかに上回る津波が来襲し、釜石湾口防波堤をはじめ、大船渡、八戸、相馬など巨大な防波堤が破壊されたほか、田老町の津波防潮堤などの陸上構造物も甚大な被害を受けた。これらの被害の最も大きな要因の一つは、津波が対策施設の天端を乗り越える越流現象だった。その後の研究で越流時には巨大な波力が構造物に作用することが明らかになったほか、構造物の背後が破壊されていたことも明らかになってきた。東北地方太平洋沖地震津波以前は、防波堤や堤防、護岸は主に波が作用する施設の前面側が強固に設計されていたが、越流現象は設計で考慮されておらず、越流時の巨大な波力や越流による洗掘が施設倒壊の大きな要因となった。

東北地方太平洋沖地震津波以降、数多くの組織によって調査研究が進められ、越流時の波力を含む多くの波力算定式が提案されてきたほか、洗掘についても研究が進んできている。

2.2 南海トラフ巨大地震と多重防護

南海トラフ地震による巨大津波は、現在わが国で最も警戒されている津波の一つである。これまで100~200年の間隔で発生しており、1707年の宝永地震津波では2万人におよぶ犠牲者があったと推定されている。前回の南海地震は1946年に発生した昭和南海地震であり、高知県では700人近くが犠牲となっている。現在、四国地方整備局、高知県では南海地震津波への備えとして、土佐湾沿岸の津波防護施設を整備している。須崎湾や浦戸湾は過去から津波の被害を受けており、これまでに津波防波堤などが整備されてきた。なかでも高知市は浦戸湾



図1 津波に対する浦戸湾の多重防護

に面しており、現在、図1に示すような三重防護による対策が整備されてきている。まず、第1防護ラインは高知港の防波堤（南防波堤、東第一防波堤、桂浜防波堤）であり、津波の浸入を抑えるための防波堤の天端の嵩上げ等が進められている。第2ラインは高知港背後および浦戸湾口の護岸からなるもので長大な護岸の補強および嵩上げが進められている。また、第2ラインの一部として浦戸湾への津波の浸入を抑制するための津波防波堤が計画されており、その設計が進められている。そして第3ラインは浦戸湾内部の護岸の補強と嵩上げである。

高知港の耐津波設計は最新の津波対策技術を用いて実施されており、4章で現在設計が進んでいる浦戸湾口の津波防波堤とその洗掘対策工に関して詳述する。

3. 越流・遡上時の波力について

平成30年に発行された港湾の施設の技術上の基準・同解説（以降、港湾基準とよぶ）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や、強大な津波波力に対して粘り強さが定義されるなど、多くの新しい考え方が導入された。粘り強い対策として、防波堤背後の腹付工やその被覆工の研究（三井ら、2013；佐藤ら、2017など）も大きく進展した分野である。

波力に限ってみると有川ら（2013）の実験などをふまえて越流時の波力を推定する静水圧差式が提案された。この設計式は谷本式に加えて平成30年の港湾基準に掲載されており、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。

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（2017）が背面静水圧補正係数の算定法を提案している。また、パラベ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が明らかとなっている（Suzuki and Shimosako, 2018）。

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、2015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のだが、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。

このように2011年以降、設計津波の設定、波力、粘り強さ

など、数多くの設計法が確立されてきたが、現在でも設計が難しい事象がある。一つは3次元的な複雑な構造物に働く波力であり、もう一つは構造物周囲の洗掘である。

3次元的な複雑な構造物としては、隅角部を有する防波堤などがある。隅角部が沖に突き出すような防波堤や護岸で越流が発生すると、その隅角部の背後に津波の越流が集中し、背後のマウンドや地盤、腹付工が洗掘されやすくなる（笠原ら、2016）。こうした洗掘や3次元的に複雑な現象は水理模型実験に頼らざるを得ない。

4. 洗掘

4.1 防波堤開口部の洗掘と越流洗掘

前述したように設計を実施するうえで現在も算定が困難なものは海底地盤の洗掘である。図2は八戸港で発生した洗掘の状況であり（富田ら、2012）、防波堤開口部や護岸隅角部で激しい洗掘が発生した。これらの洗掘によって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ている。このような被害は北海道南西沖地震津波など（木村ら、1994）、かつてから問題となっており、最近では宮古湾の防波堤周囲の洗掘（近藤ら、2012）など、高橋ら（1999）のモデル等を用いた数値シミュレーションで洗掘量を評価することも行われてきている。

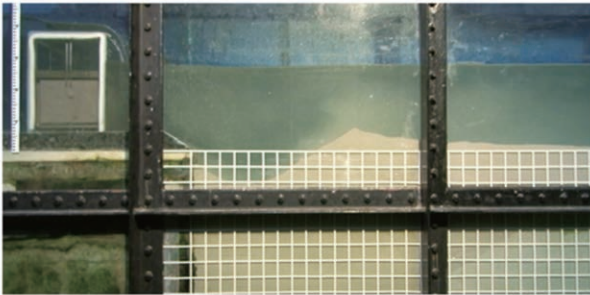
八戸では、このほか八太郎防波堤が越流による防波堤背後の洗掘で被災を受けた。この越流洗掘は2011年以降の研究の大きなトピックであり、東山ら（2013）、有川ら（2013）等による実験でその状況が明らかとなっており、図3のように粒子法による数値計算でもある程度再現できてきている（Tsurutaら、2016）。

このように洗掘現象は明らかになってきているものの、洗掘対策工に関する研究は限られている。その原因の一つは移



図2 東北地方太平洋沖地震津波での八戸港での洗掘発生状況

Experiment



PARISPHERE with reattachment model

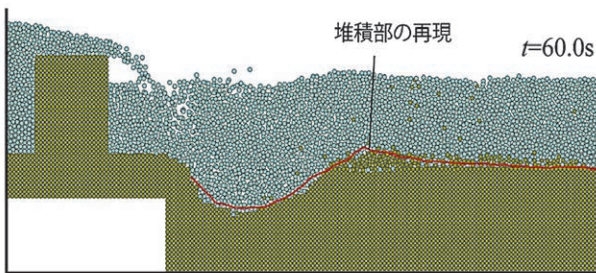


図3 粒子法(PARISPHERE)による越流洗掘の再現

動床実験の実施が固定床実験と比較すると困難だからだと思われる。

4.2 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・高橋ら(2002)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ている。津波の越流による洗掘現象についても有川ら(2014)がこの相似則の妥当性を示している。

この相似則はDean(1985)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上でなりたっている。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)にあわせるという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ではあるものの、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。

4.3 洗掘対策工に関する水理模型実験

耐波研究グループでは四国地方整備局の受託研究で現在、浦

戸湾の湾口防波堤の洗掘対策工に関する実験を行っている。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つの突堤を設置することが計画されている。

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に及び極めて速い流れが発生するものと想定されている。山下ら(2019)は高知県に最大クラスの津波が来襲した場合の数値シミュレーションを実施し、浦戸湾を含めた高知沿岸の海底地形の変化を推定している。その結果、浦戸湾の湾口では防波堤がない場合に2mに及ぶ洗掘が発生すると推定している。

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。そこで現在、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実施している。実験は1/40スケールで実施しており、図4のように水路内に2つの防波堤(種崎側防波堤および桂浜側防波堤)を同時に再現している。湾口の幅、水深はそれぞれ300mと9~16m(模型量で7.5mと0.23~0.4m)である。

津波は発生頻度の高い津波(L1津波)と最大クラスの津波(L2津波)を対象としており、L1津波、L2津波の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、6mと8.5mである。

この実験の中で最も重要なのは砂地盤の洗掘の相似則である。今回の実験では、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ている(図5)。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



図4 高知浦戸湾口の1/40実験模型

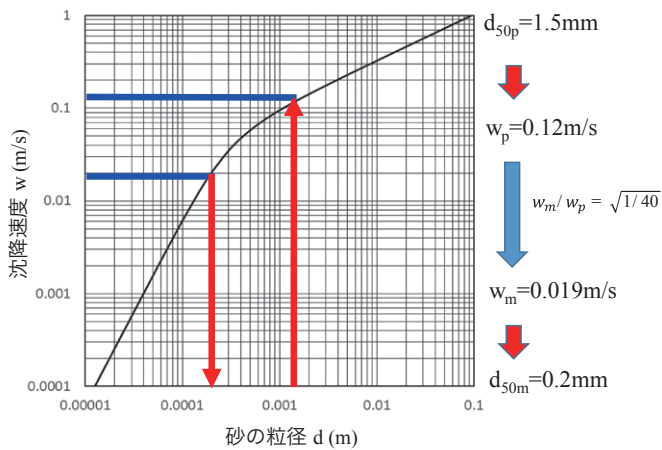


図5 沈降速度パラメータによる実験に用いる砂の選定

の沈降速度に相当する砂の粒径は0.2mmであり、実験で用いる砂の粒径として選定している。

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ている。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いことが明らかとなった。一方で、移動床実験では、図6のようにL1津波のいずれにおいても激しい洗掘が発生し、ケーソンの堤頭部が大きく滑动するという現象が発生した。

このような洗掘を防ぐために、複数の洗掘防止工に関する実験を行っている。図7は、袋詰被覆工を連結した洗掘防止工を設置した事例であり、L2津波を作用させた後の実験状況である。袋詰被覆工が洗掘孔に沈みこみ連結袋詰工防波堤周囲の砂地盤を被覆している。変形しつつも全体としては倒壊しな

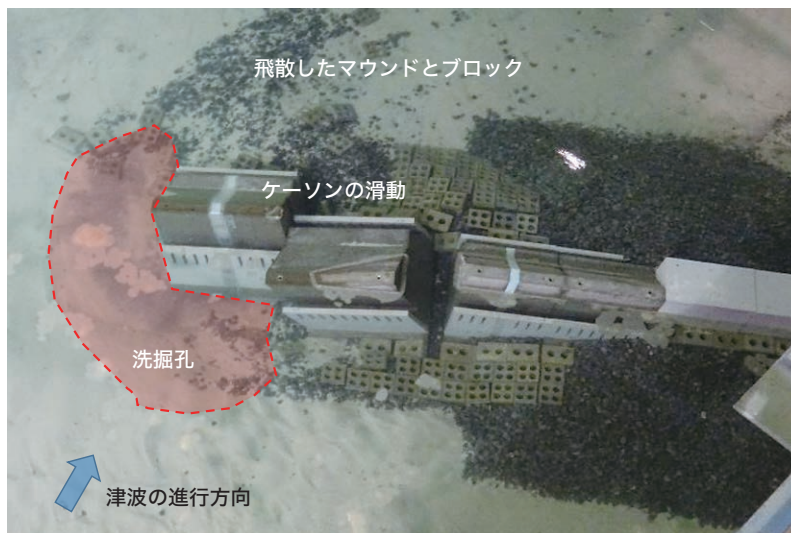


図6 L1津波による種崎側防波堤堤頭部の洗掘とケーソンの滑动状況

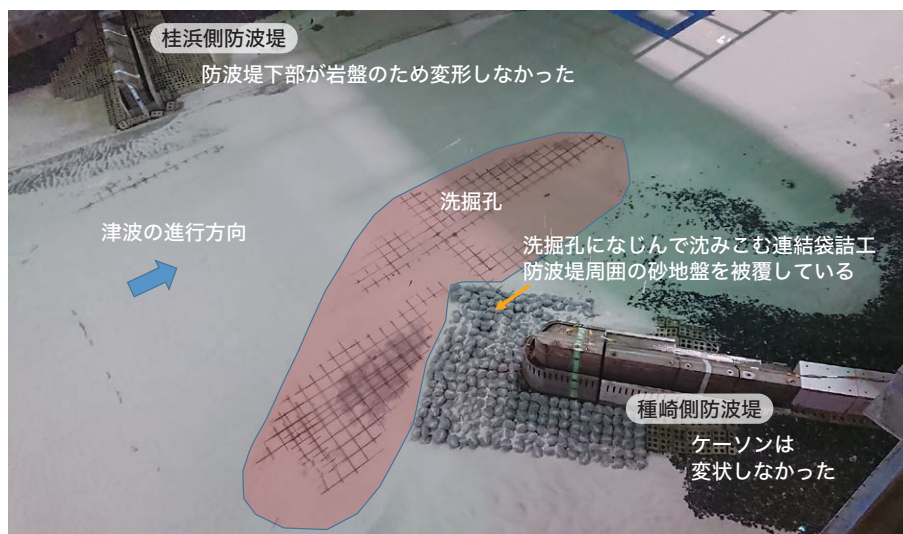


図7 洗掘対策孔によりL2津波作用でも変形しなかった防波堤堤頭部の状況

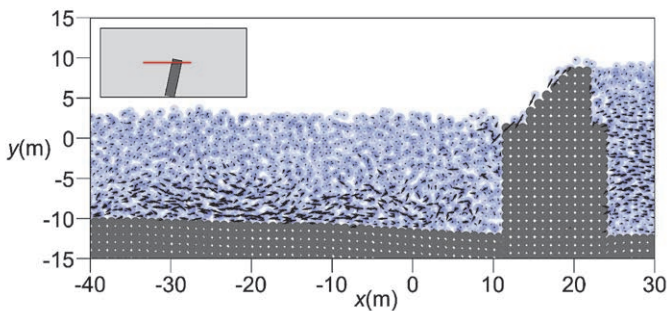
い、いわゆる“粘り強い”構造となっている。

4.4 粒子法による再現計算

図8は粒子法 (PARISPHERE) による堤頭部周囲の流れの再現計算結果である (久保田ら, 2020)。堤頭部の前後で水位が急激に変化する際、極めて速い流れが堤頭部で発生するが、この流れは図8のb) に示すようにただ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分かる。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いたが、このような潜り込む流れもブロックの飛散を引き起こす一つの要因となっているものと考えられる。

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、このように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。

a) 堤頭部ケーソン背後の流れ



b) 堤頭部ケーソンよりやや航路側の流れ

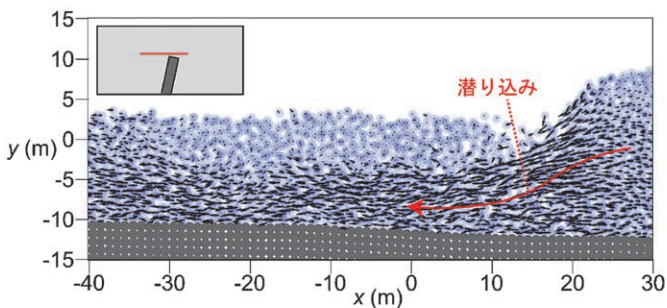


図8 粒子法(PARISPHRE)で再現された堤頭部で鉛直下向きに潜り込む流れ

5. おわりに

本稿では東北地方太平洋沖地震後の新たな設計や研究の進展について述べるとともに、現在南海トラフ巨大地震津波に対する最新の設計、研究について主に波力と洗掘の観点から述べた。洗掘現象については、現在もそれぞれの構造物に特化した検討となっているが、これまでの実験結果などをもとにして物理現象を明確化し、より汎用的な設計手法を確立したいと考えている。

参考文献

- 三井ら (2013) : 防波堤港内側マウンド被覆材の津波越流に対する安定性照査方法の提案, 土木学会論文集B2.
- 佐藤ら (2017) : 腹付工を有する防波堤の耐波設計法の提案, 国総研資料.
- 有川ら (2013) : 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.
- 鶴田ら (2017) : 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.
- K. Suzuki and K. Shimosako (2018) : Pressure Distribution Acting on Breakwater Caisson under Tsunami Overflow, PIANC PANAMA.
- 大村ら (2015) : 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.
- 竺原ら (2016) : 堤体幅の不連続部を持つ防波堤の腹付被覆工に及ぼす斜め入射津波の影響について, 土木学会論文集B2.
- 富田ら (2012) : 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.
- 木村ら (1994) : 1993年北海道南西沖地震津波による奥尻港防波堤の被災原因について, 海岸工学論文集.
- 近藤ら (2012) : 港湾での津波による土砂移動計算の再現性評価, 土木学会論文集B2.
- 高橋ら (1999) : 掃流層・浮遊層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発, 海岸工学論文集.
- 東山ら (2013) : 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.
- Tsuruta, N. et al. (2016) : Particle Simulation considering the Sand-Scale-Effect for Scour behind the Breakwater due to Tsunami with Hydraulic Experiment, ICCM.
- 鈴木・高橋ら (2002) : 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.
- 有川ら (2014) : 越流による直立型堤防背後の洗掘量に関する研究, 土木学会論文集B2.
- Dean (1985) : Physical Modelling of Littoral Processes, Physical Modelling in Coastal Engineering, A.A.Balkema.
- 山下ら (2019) : 高知県における最大クラスの津波による地形変化と潜在的影響の評価, 土木学会論文集B2.
- 久保田ら (2020) : 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.