天端を越流する津波が防波堤の安定性に与える影響について

Stability of Caisson Breakwater against Tsunami with Overflowing Top of Caisson

小竹康夫¹・松村章子²・山野貴司³・金澤 剛⁴・荒木進歩⁵

Yasuo KOTAKE, Akiko MATSUMURA, Takashi YAMANO, Tsuyoshi KANAZAWA and Susumu ARAKI

In order to examine the stability of caisson breakwater against Tsunami which flow over the top of caisson, wave flume experiments and numerical calculations were carried out. As a result of experiments, it is shown that the water surface elevation observed behind the caisson breakwater reached the maximum (or minimum) value earlier than that observed in front of the caisson did and this may decrease the stability of the caisson. As for numerical calculations, the water particle velocity which flow over the top of caisson is very large and large scale turbulence was computed behind the caisson. This large velocity and the turbulence may cause the caisson overturning, which was observed in the experiments.

1. はじめに

東日本大震災では、東北地方太平洋沖地震により発生した非常に大規模な津波が東日本沿岸域に襲来し、多くの尊い人命が奪われる大惨事を引き起こした。現在も津波で被災した防波堤や防潮堤は機能が消失または低下したままの状態であるとともに、地盤沈下の生じている地区もあり、これらの場所では、津波だけでなく、高潮や高波に対しても防御機能が極めて脆弱な状態となっている。背後地の復旧、復興のためにも、これら防潮施設の機能を早期に回復する必要があるが、そのためには、損壊状況の把握やそのメカニズムの解明が急がれる。さらに日本では、今後も、東海地震、東南海地震、南海地震などによる津波の襲来が危惧されており（地震調査研究推進本部地震調査委員会、2010）、同様の被害を発生させないためにも、今回の震災を教訓とする津波対策が緊急の課題である。

今回の震災では、学会や独立行政法人などが発生直後から被災地で現地調査を行い、様々なデータを蓄積、公表している（たとえば、土木学会他、2011、高橋ら、2011など）。高橋ら（2011）は、釜石での津波痕跡調査やGPS波浪計による観測結果にもとづき、数値シミュレーションで今回の津波を再現し、津波防波堤による津波高の低減や到達時間遅延の効果を定量的に評価しており、今後の防災計画に参考となる貴重な情報である。さらに高橋ら（2011）は、津波防波堤の損壊状況から、ケーソン目地に着目した検討を行い、津波防波堤前後の水位差によりケーソン目地に発生する速い流れがマウンド

を破壊し、津波防波堤の被災につながったと考察している。ケーソン目地での速い流れによるマウンドの被災については、三宅ら（2010a, 2010b）も津波を対象とするドラム型遠心載荷装置を用いた実験により以前からその危険性を指摘しており、構造物の設計、施工上、非常に重要な現象である。

またGPS波浪計の観測結果や、津波来襲時を撮影したビデオ映像、あるいは現地でのヒアリングなどから、津波により上昇した港外水位が防波堤天端を上回り、越流が継続する間、多くの防波堤が水没状態となったことが推察される。谷本ら（1983）は、日本海中部地震による津波災害の現地調査結果にもとづき、防波堤を越流する条件も対象とした水理模型実験や数値計算を行い、津波の実態について考察している。さらにその結果をとりまとめ、津波により構造物に作用する波圧分布を提案している。しかし、設計で設定した以上の水位上昇を伴う津波が防波堤に作用した場合、水没に伴う浮力の増大や越流により発生する堤体背後の乱れなど、設計以上の外力が防波堤に作用し、構造物の安定性を低下させる恐れがある。そこで本研究では、断面水路での水理模型実験および数値波動水路を用いた再現計算により、天端高を超える長周期の波浪が防波堤に与える影響を確認することを目的とした。

2. 検討方法

(1) 断面水路での水理模型実験

実験に使用した断面水路の模式図を図-1に示す。水路端部に反射波吸収制御付きのピストン型造波装置が設置されており、造波板ストロークは±1.0mである。この造波板から岸側に約10m離れた地点から約7mの1/20勾配斜面および約20mの1/50勾配斜面を立ち上げたのち、水平床に接続する仮設海底床を設け、水平床上に混成堤模

1	正会員	博(工)	東洋建設(株)	鳴尾研究所
2			東洋建設(株)	鳴尾研究所
3	正会員	修(工)	東洋建設(株)	鳴尾研究所
4	正会員	工修	東洋建設(株)	鳴尾研究所
5	正会員	博(工)	大阪大学	大学院工学研究科

図-1 実験水路

表-1 実験の条件

項目	Type1	Type2
規則波周期 T	20s (12s)	20s
通過波高 H_T	2~7cm	8~11cm
模型位置水深 h	48cm	50cm
マウンド天端高 hm	31cm	33cm
マウンド天端幅 Wmt	25cm	50cm
マウンド底面幅 Wmb	70cm	182cm
ケーソン質量 M	83.7kg	57.6kg
マウンド砕石サイズ	1~8cm	1~4cm

表-2 計算に用いた主要パラメータ一覧

造波方法	クノイド波	
時間刻み	自動計算 (CFL条件)	
透過構造物	慣性係数 C_M	1.2
	抗力係数 C_D	1.0
格子サイズ	水平 (x) 方向	1~10cm
	奥行 (y) 方向	0.5cm
	鉛直 (z) 方向	1~6.5cm
格子数	水平 (x) 方向	1897セル
	奥行 (y) 方向	1セル
	鉛直 (z) 方向	97セル

図-2 混成堤模型

型を設置した。模型の模式図を図-2に示す。マウンドは透過性を考慮して砕石で製作し、異なる2種類の形状に対して、表-1に示す水深 h およびケーソン質量 M で実験を行った。Type1は、ケーソンの移動やマウンドの変形がなく、混成堤模型が固定された条件での実験を目的とした。そのため、マウンドには大きな砕石を用いるとともに、ケーソン質量は一般的な構造部材を想定した場合の約1.4倍とした。ただしマウンドに大きめの砕石を使用した結果、マウンド天端面の不陸は大きい。一方Type2では、波浪によるケーソンの移動を許容する実験を目的として、ケーソン質量は一般的な構造部材を想定して設定した。またマウンド天端面の不陸を小さくするため、小さめの砕石を用いてマウンドを製作した。なおケーソン模型は塩化ビニル製で摩擦係数が小さいため、市販の滑り止めマットをケーソン底面に貼り付けた。

波浪は周期20秒の規則波とし、一部の条件では比較用として12秒の規則波を用いた。また混成堤模型を設置する前の、仮設海底床のみの状態で、造波板を駆動させ

るために入力する信号と模型設置位置での通過波高をあらかじめ検定し、模型設置時に非越流から越流状態の波浪が模型に作用するように信号を準備した。なお造波板に入力する規則波信号は引き波初動とし、水路端部からの反射波の影響を避けるため、第一波を解析対象とした。また模型設置時には、模型位置から港外側（造波板側）、港内側に各々1.4m離れた地点で容量式波高計により水位変動を測定した。

(2) 数値波動水路を用いた数値計算

水路実験の再現計算には、Navier-Stokes方程式を基礎式として、自由表面の境界条件にVOF法を用いるCADMAS-SURF/3D（沿岸技術研究センター，2010）を用いた。この手法では、適切にパラメタ設定を行うことで、越流を精度よく再現できる（沿岸技術研究センター，2008）とともに、マウンドを慣性係数 C_M および抗力係数 C_D をもつ透過性構造物として扱うことができる。解析領域は実験スケールで、沖側は計算時間を考慮して構造物近傍から、岸側は境界からの反射波の影響を抑えるために十分に長い領域を設定するものとし、ケーソン周りの波圧や越流流速を算定した。計算に用いた主要なパラメタを表-2に示す。

3. 防波堤ケーソンの安定性に関する考察

(1) 水理模型実験の結果

a) 港内への水位到達時間

Type1での実験で測定した水位変動の一例を図-3に示す。横軸は周期 T で無次元化した時間、縦軸は水位を造

図-3 堤体の港内外での水位変動の一例 (実験結果)

波板前面の基準点波高で無次元化して示している。模型の港外側と港内側で水位が最高あるいは最低を示した位相を比較すると、港内で最低(最高)水位を示した後に、港外で最低(最高)水位を示している。この例に示す以外の波浪条件でも同様である。この原因は以下のように考えることができる。

まず模型より港外側1.4mの地点を引き波(押し波)が通過したのち、マウンド内部、あるいは模型側面と水路壁との約5mmの隙間から水位変動が港内側に伝播し、模型より港内側1.4mの地点で引き波(押し波)による最低(最高)水位が測定される。この港外から港内へ水位変動が伝播している間に、港外側では堤体からの反射波が入射波と重合することにより重複波が形成され、引き波(押し波)通過時よりも更に水位が低下(上昇)し続ける。そのため、港外では港内より遅れて最低(最大)水位が観測される。これは波浪周期が長いことに起因する現象である。この結果、港内の水位が上昇(降下)に転じた後も、港外では逆位相の水位変動がしばらく継続することになるため、ケーソンは転倒に対する安全率が低下することになる。ただし実際の海域では、防波堤開口部からも水位変動が伝播するため、その影響も考慮してケーソンの安定性を検討する必要がある。

また図-3では、港内で測定された水位変動が、水位上昇時に双山の形状を示している。これはケーソン天端を越流した水塊が港内側の水面に打ち込むことにより生じた波浪による水位変動である。

b) 港外の波高増幅率

図-4には、Type1で実施した実験での港外の測定点における波高増幅率を示す。横軸は造波板前面の基準点での波高、縦軸は模型を設置しない状態で通過波高に対する増幅率である。比較用としてマウンドだけ設置した場合の周期20秒および12秒のケースと、防波堤模型を設置した状態で、周期20秒の波浪に対する水位上昇の増

図-4 堤体の港外側での波高増幅率 (実験結果)

幅率も示す。ここでの波高は、水位の時間変動からゼロアップクロスにより第一波を分離し、水位の最大値と最小値の差として定義した。図には顕著な越流が発生する範囲も示しており、この条件より小さな波高では、堤前で重複波が発生することになるが、越流の有無にかかわらず波高は通過波の2.2~2.4倍程度である。一方、谷本ら(1983)の実験では、第一波による水位上昇量は、通過波による水位上昇量の2倍以下との結果が報告されている。今回の実験でも水位上昇量で整理すると、重複波による水位上昇量は通過波の2倍以下となり、谷本ら(1983)と同様である。この結果、引き波時の水位低下は通過波の2倍以上となる。引き波時に大幅に水位が低下すると、ケーソンが港外側に滑動あるいは転倒する危険性が増す。

一方マウンドだけの場合、周期20秒では入射波高の増大に伴い増幅率が增大する傾向を示した。周期12秒の場合には通過波の波高とほぼ同等であり、マウンド規模に対して周期依存性があると推測されるが、防波堤建設時のケーソン未設置の状態での様な波浪が作用すると、港内の波高が増大する危険性があるため、注意が必要である。どの様な条件で波高が増大する危険性があるかについては、今後、詳細な検討を要する。

(2) 数値計算の結果

a) 波浪の作用状況

図-5は、ケーソンへの押し波作用時において、越流が港内側に打ち込み始めた直後の時刻(上の図)と、その約1秒後の時刻(下の図)の空間波形を示したものであり、いずれも同一の波浪条件での計算結果である。上の図から下の図にかけて、ケーソン天端を越流した水塊が港内側に打ち込む際、速い流速が発生している様子がわかる。またその際、打ち込み点のすぐ岸側で水位が上昇している。図-3の港内側で測定された双山の水位変動は、この越流水塊が港内側に打ち込んだ際に発生した波浪を

図-5 数値計算による押し波作用時の状況

測定したものと考えられる。さらに上の図ではケーソン前趾で、早い流速がマウンド内部に向けて発生し、流れがケーソン底面から剥離している様子がわかる。これにより計算ではケーソン前趾底面の波圧が押し波時において静水圧に近い小さな値を示した。この算定結果については、水理模型実験で波圧を測定することにより検証を予定している。また下の図では、ケーソン背後に渦が発生するとともに、打ち込みにより生じた水位差がさらに拡大し、ケーソン側に水面勾配が立ち上がろうとしている様子がわかる。

b) ケーソンに作用する力

計算で出力された波圧分布をもとに、ケーソン後趾回りの回転モーメントを求めると、図-6に示す通り入力波高にほぼ線形に比例して増大する傾向を示す。ここで図の横軸は計算の入力条件として用いた沖の波高、縦軸はケーソン後趾を支点として、港内側に転倒する方向を正とする回転モーメントの時間変動の最大値であり、Type2の再現計算結果を用いている。この図より、入射波高の増大に比例して、港内側へのケーソン転倒の危険度が上昇するといえる。

つぎにケーソンの滑動に影響を与える鉛直方向の力のつり合いを検討することを目的として、計算結果による鉛直上向きの波圧合力、天端流速およびケーソンに作用する浮力の変化を図-7に示す。横軸は港内での水位上昇量の最大値であり、縦軸は鉛直方向上向きを正とする波圧合力および浮力と、天端面での水平流速である。ここで、鉛直方向の波圧合力には、越流により天端面に鉛直下向きに作用する波圧合力も考慮している。また天端面での水平流速は、ケーソンに接する直上のセルのうち、

図-6 波圧によるケーソン後趾回りの回転モーメント

図-7 ケーソンに作用する力の試算

沖側端部での流速値を用いた。まず浮力については、没水後は水位によらず一定値となる。つぎに鉛直上向きの波圧合力は、波高の増大に比例して増大するが、越流前に比べて越流後は増加率が小さい。これは越流により天端面に鉛直下向きの波力が作用するためである。一方、流速は越流することで発生し、越流開始直後はややデータがばらつくものの、波高の増大に比例して線形に増大する。このように越流することでケーソンを押さえつける効果があるものの、越流流速の増大に比例して鉛直上向きに作用する力も増加し、ケーソン滑動の危険度が上昇すると言える。

4. 実験によるケーソンの被災事例

ここでは、実験で確認された2種類の被災形態について示す。天端を越流する波浪の作用により現地でも同様の被災の発生が示唆されるため、注意が必要である。

(1) Type1実験での被災（引き波による滑動）

Type1実験での押し波と引き波およびケーソンの被災状況を図-8に示す。白線は模型の初期位置を示す。この図で、押し波時にケーソンが港内側に傾き、引き波時に港外側に滑動している。Type1では、マウンド材料として大きな碎石を用いたためにマウンド天端面の不陸が大

図-8 Type1実験での波浪の作用状況とケーソンの被災

図-9 Type2実験で押し波作用時におけるケーソンの被災

きく、ケーソン底面との接地面積が小さく滑動しやすいとともに、ケーソンがロッキングしやすい条件であった。そのため、押し波作用時にロッキングによりケーソン後趾を支点として港内側に傾いて不安定な状態となったところに引き波が作用し、港外側に滑動する被災形態を示したと思われる。

(2) Type2実験での被災(押し波による転倒)

Type2実験で押し波作用時におけるケーソンの被災状況を図-9に示す。Type2では、押し波時にケーソン後趾を支点として港内側に転倒する被災形態を示した。被災時の実験条件は、通過波高が11.0cmとなるように造波信号を与えており、図-6の波力による後趾回りの回転モーメントは18.0Nmである。一方、浮力を考慮した模型質量から求まる回転モーメントは逆方向に20.3Nmであり、ケーソンは後趾を支点とする転倒に対して安定と判断される。しかし実験でケーソンは転倒しており、波力以外の原因によるものと推測される。図-9からは越流が港内に打ち込む際にケーソン背後に空気を巻き込んだ乱れを発生させている状況が確認できる。すなわち、防波堤天端を越流することによりケーソン背後に空気を巻き込んだ大規模な乱れが発生し、波力による回転モーメントでは安定と判断されるケーソンが転倒した可能性がある。

5. まとめ

本研究では断面水路を用いた水理模型実験及びその再現計算により、天端を越流する津波に対するケーソン式混成堤の安定性に対する注意事項と被災形態について以

下を指摘した。

- ・押し波あるいは引き波の継続時間が長く、港内外での水位変動の位相が逆転し、安全率を低下させる恐れがある
- ・引き波の水位低下が、通過波の2倍以上になり、ケーソンが港外側に引き出される危険性がある
- ・越流が港内側に打ち込む際に発生する、空気を巻き込んだ大規模な乱れの影響により、ケーソンが港内側に転倒する危険性がある

今回の実験および計算は断面2次元を対象としている。そのため開口部の影響を受けた港内側の水位変動は考慮できていない。開口部を考慮することによって、更に不安定性を増す危険性も否定できない。そこで、防波堤開口部も考慮した実験を計画するとともに、数値計算で算定されたケーソン底面前趾での圧力低下についても測定する予定である。

参 考 文 献

- 沿岸技術研究センター (2008) : CADMAS - SURF実務計算事例集, 沿岸技術ライブラリーNo.30, 306p.
- 沿岸技術研究センター (2010) : CADMAS - SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発, 沿岸技術ライブラリーNo.39, 235p.
- 高橋重雄・戸田和彦・菊池嘉昭・菅野高弘・栗山善昭・山崎浩之・長尾 毅・下迫健一郎・根本貴史・菅野甚活・富田孝史・河合弘泰・中川康之・野津 厚・岡本 修・鈴木高二朗・森川嘉之・有川太郎・岩波光保・水谷崇亮・小湊英司・山路 徹・熊谷兼太郎・辰巳大介・鷲崎誠・泉山拓也・関 克己・廉 慶善・竹信正寛・加島寛章・伴野雅之・福永勇介・作中淳一郎・渡邊祐二 (2011) : 2011年東日本大震災における港湾・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, 200p.
- 谷本勝利・高山知司・村上和男・村田 繁・鶴谷広一・高橋重雄・森川正行・吉本靖俊・中野 晋・平石哲也 (1983) : 1983年日本海中部地震津波の実態と二、三の考察, 港湾技術研究所資料, No.470, pp.299.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2010) : 「全国地震動予測地図」の更新について (平成22年5月20日公表), 地震調査研究推進本部HP.
- 土木学会・日本都市計画学会・地盤工学会 東日本大震災 第一次総合調査団 (2011) : 東日本大震災 第一次総合調査団 中間とりまとめ (案), 土木学会HP, 86p.
- 三宅達夫・澤田 豊・角田紘子・鶴ヶ崎和博・前田健一・今瀬達也 (2010) : 津波による防波堤の安定性と開口部の影響に関する遠心模型実験 (その1), 第45回地盤工学研究発表会講演要旨集, pp.1845-1846.
- 三宅達夫・澤田 豊・角田紘子・鶴ヶ崎和博・前田健一・今瀬達也 (2010) : 津波による防波堤の安定性と開口部の影響に関する遠心模型実験 (その2), 第45回地盤工学研究発表会講演要旨集, pp.1847-1848.