津波越流時の防波堤基礎の不安定化と腹付工の効果

Instability of Breakwater Foundation under Tsunami Overflow and its Countermeasure

宮本順司¹・三宅達夫²・鶴ヶ崎和博³・角田紘子⁴・前田健一⁵・松田達也⁶

Junji MIYAMOTO, Michio MIYAKE, Kazuhiro TSURUGASAKI

Hiroko SUMIDA, Kenichi MAEDA and Tatsuya MATSUDA

This paper discusses the experimental findings pertaining to a failure of composite breakwaters brought by the instability of a foundation mound due to the seepage flow induced by a huge tsunami. Centrifuge tsunami testing using a drum channel was applied to reproducing the reduction of the bearing capacity of a mound under seepage flow leading up to the failure of the mound. The results show the occurrence of boiling and fluidization as well as the spread of the instability zone in the mound at the vicinity of the caisson as a consequence of the seepage, yielding the significant displacement of the caisson. The effects of the resiliency structure, which is placing rubble on the back of a caisson, are also examined in the light of stability of a mound as well as a foundation bed under the seepage flow.

1. はじめに

東日本大震災では、津波の来襲により多くの防波堤が被災した。越流をおこすような大きな津波が防波堤に来襲すると、港内外の水位差増大によりケーソンが滑動しやすくなることや、マウンドが越流洗掘されることによりマウンドの支持力が減少しケーソンが倒壊しやすくなることなどの被災メカニズムが得られている(有川ら, 2012; 有川ら, 2013a)。さらに、対策工としてケーソン背後に腹付工を有する構造があげられ、その効果が確認されている(有川ら, 2013b)。一方で、同じような大きな津波の来襲時には、港内外の水位差によってマウンド内や地盤内に浸透流が発生し、防波堤基礎が不安定化する可能性が数値解析や水理模型実験、遠心模型実験等により示されている(今瀬ら, 2011; 矢追ら, 2012; 笠間ら, 2013; 高橋ら, 2013a)。しかし、津波到達後、水位差の増大にともなう、浸透によるマウンドの不安定化がおり、それが、ケーソンの著しい変位や倒壊へと結び付いていく一連の過程や、マウンド不安定化に対する腹付工の効果に関しては未解明な部分が多い。

本研究の目的は、ドラム遠心載荷装置の津波水路を用いて、実スケールのマウンドや地盤の応力状態を再現した上で、混成堤を対象にした津波越流実験を行ない、浸透流によるマウンド不安定化に伴うケーソンの倒壊過程を詳しく観察するとともに、ケーソン背後の腹付工の効果をマウンド内浸透や基礎地盤の安定性の観点から調べ

ることである。

2. ドラム水路を用いた遠心力場津波実験

ドラム型遠心力載荷装置(半径1.1m)(東洋建設(株)保有)の円筒水路を用いて、ケーソン/マウンド/地盤系の津波実験を行った(図-1参照)。水路にはエアシリンダーに直結したゲートが設けられている。ゲートを閉めた状態で貯水部と実験水路部との間に水位差をつけ、ゲートを開放することで津波を発生させることができる。筆者らの研究グループでは、このゲート開放による津波発生方式を従来から採用していたが(三宅ら, 2009)、津波の大きさに上限があった。本研究では、実験水路部の水路幅を貯水部の水路幅0.3mの約1/2(0.14m)に絞ることで、混成堤模型に作用する津波の規模を大きくしている。また、越流した津波が港内側領域の端で反射して模型に戻ってくるまでの時間を長くするために、水路内に排水領域を設けている。

実験は遠心力場70Gで実施した。本論文で示す実験ケースを表-1に示す。Case1では、津波越流時のマウンドの不

図-1 遠心力場津波実験に用いるドラム津波水路

1 正会員	博(工)	東洋建設(株) 鳴尾研究所
2 正会員	工博	東洋建設(株) 顧問
3 正会員	博(工)	東洋建設(株) 鳴尾研究所 室長
4		東洋建設(株) 鳴尾研究所
5 正会員	博(工)	名古屋工業大学教授 工学研究科
6 正会員	博(工)	豊橋技術科学大学助教 建築・都市系

表-1 実験ケースの一覧

Case	断面	着目点
1	混成堤断面1	津波作用時のマウンド不安定化
2-1	混成堤断面2 (無対策)	・マウンドの安定性に対する腹付工の効果 ・津波作用時の基礎地盤の不安定化
2-2	混成堤断面2 +腹付工

図-2 混成堤模型断面図 (単位: mm)

安定化過程とケーソン挙動との関係に着目している。Case2では、腹付工のない場合 (Case2-1) とある場合 (Case2-2) の二つの実験を行い、ケーソン変位やマウンド、地盤の安定性に対する腹付工の効果を調べている。

実験模型の断面を図-2に示す。混成堤断面2のCase2-2では、ケーソン高さの1/3程度の高さの腹付工を有している。マウンド材料や腹付工には、礫質材 (土粒子比重 $G_s=2.61$, 平均粒径 $D_{50}=3.1\text{mm}$) を使用した。混成堤断面2 (Case2-1, 2-2) では基礎地盤の安定性にも着目するため、ケイ砂7号を用いて水中落下法により緩詰め地盤 (相対密度 $Dr=35\%$) を作成した。遠心模型実験では、実スケールのマウンドや地盤の応力状態を再現できるだけでなく、浸透に関する時間相似則と津波伝播に関する時間相似則とを一致させることができる。マウンド内では浸透流場が乱流状態になると仮定し、地盤内では浸透流場が層流状態になると仮定している。この仮定のもとでは、間隙流体として、マウンドでは水、地盤内では粘性流体 (遠心力場70G場の場合、水の70倍の粘性をもつメトローズ (信越化学工業製) 溶液) を使用することで、津波伝播に関する時間相似則、マウンド内の浸透に関する時間相似則、基礎地盤内の浸透に関する時間相似則が一致する (高橋ら, 2013b)。

図-3 津波来襲時に模型手前の水路で測定した水位変動

図-4 越流によりケーソンがマウンドの変状を伴いながら傾斜・倒壊していく過程 (Case1)

遠心力場におけるケーソンやマウンド材等の物体運動についてであるが、運動方程式より、縮尺1/NでN倍の重力加速度におかれた模型内の運動は、時間縮尺を1/Nとすれば実物挙動と1:1の対応がつく。ただし、厳密には半径方向に遠心加速度が異なり、また、運動する物体にはコリオリ力も働くため、本論文内容とは直接関係ないが、取扱う物体が半径方向に長い場合や、物体の落下距離が大きい場合は、これらの影響を大きく受けた運動が得られることに留意する。

3. マウンド不安定化とケーソンの倒壊過程

(1) 津波越流時の混成堤挙動の観察

津波来襲時に水路内で測定した水位変動を図-3に示す。同図横軸の時間は、遠心力場70G場の実験におけるものであり、これを70倍することで実スケールの時間へ換算することができる。水位変動の測定結果をみると水位は徐々に増加し、実スケールで最大6mの水位上昇がおこっている。なお、ケーソン天端は初期水面より3.5mの高さにある。

越流をおこす大きな津波の来襲により、ケーソンがマウンドの著しい変状を伴いながら傾斜・倒壊していく様子を、高速度カメラを用いてとらえた (図-4参照)。同図では、津波の到達時刻 ($t=2.750\text{s}$) から、ケーソンが完全に横転した時刻 ($t=3.300\text{s}$) までの0.55秒間 (実時間換算: 約40秒間) のケーソンの動きを0.025秒 (実時間換算: 1.75秒) ごとに示している。マウンドの破壊を伴いながらケーソンが傾斜した直後の瞬間の映像 ($t=3.200\text{s}$)

図-5 ケーソンに作用する水圧と、津波作用時のケーソンの変位と回転の時刻歴 (Case1)

図-6 津波越流時のマウンド内の間隙圧挙動と動水勾配の変化 (Case1)

を代表として同図の背景に示している。また、津波前のマウンド形状や、越流時の水面形状を重ねて示している。越流水深は、3～4cm (実スケール2～3m程度) である。図-4より、ケーソンはマウンドにめり込みながら港内側へ傾斜していき、その後の波圧で回転させられ完全に倒壊する状況がわかる。

ケーソンの変位及び回転の時刻歴を、ケーソンに作用する波圧の時刻歴とともに図-5に示す。図 (a) は、ケーソンの代表3箇所に作用する水圧の初期静水圧からの変動を表している。津波到達後、港外側の水位が上昇し、越流が発生する。越流後も港内側の水位は水路後端の排

水領域 (図-1参照) の効果でしばらくは上昇せず、港内外の圧力差が増加していく。このような波圧変動を把握したうえで図 (b) のケーソンの動きを見てみる。津波到達後、水位上昇し越流に至ったのちもしばらくはケーソンに有意な変形は生じていないことがわかる。しかし、越流開始から約0.1秒後 (実時間換算: 約7秒後) の時刻 $t=3.05$ 秒頃からケーソンの変位が急増しはじめ、次いで回転も増加させながら、急激かつ著しい変状に至っていることがわかる。次節では、このような急激なケーソンの変状過程を、津波の作用に伴って発生するマウンド内の間隙圧変動から考察していく。

(2) 津波越流時のマウンド内の間隙圧挙動

マウンド内浅部における間隙圧の初期静水圧からの変動を図-6(a) に示す。港外側から港内側へと発生間隙圧が小さくなっており、マウンド内に浸透流が発生していることがわかる。

はじめに津波作用時の浸透に対するマウンドの安定性を、港内外の圧力差 Δu とケーソン幅 L から得られる平均的な動水勾配 i_{ave} から検討する。港内外の圧力差 Δu は、最大で $\Delta u=50$ kPa 程度である (図-5(a) 参照)。従って、ケーソン直下のマウンド内に発生する浸透流の平均動水勾配は $i_{ave}=0.66$ と求めることができる ($i_{ave}=(\Delta u/\gamma_w)/L$, γ_w : 水の単位体積重量; $\gamma_w=686$ kN/m³, $L=0.11$ m)。一方、マウンド内でケーソン上載圧が作用しない箇所におけるマウンドの限界動水勾配 i_{cr} はマウンドの有効単位体積重量 γ' より $i_{cr}=0.88$ ($=\gamma'/\gamma_w$, $\gamma'=605$ kN/m³) と算出できる。マウンド内の平均的な動水勾配 i_{ave} と限界動水勾配 i_{cr} との関係においては、 $i_{ave}<i_{cr}$ であり、マウンドは浸透に対して安定である。

次に局所的な動水勾配の点から、浸透に対するマウンドの安定性を調べてみる。マウンド内浅部の動水勾配の推移を、マウンド内の間隙圧やケーソン下端の圧力から区間ごとに求め、図-6(b) に示す。港内外の水位差の増加に伴いマウンド内の動水勾配は増大するが、はじめに、ケーソン背面下端付近 (区間3) の動水勾配が他の区間よりも著しく増大している。限界動水勾配を超えさらに上昇したのち不安定化に至っている。これはケーソンの変位が急増し始めた時刻と一致しており (図-5(b) 参照)、ケーソン背面下端付近 (区間3) が浸透流によって不安定化したこととケーソン変位の急増とを関連づけることができる。さらにこの時、ケーソン下面の中央から港内側の区間2における動水勾配が、前面側の区間1の動水勾配よりも大きく上昇し、暫くして不安定化している。すなわち、ケーソン下端から下面へ不安定化領域が拡大した。この時点からケーソンの傾斜が急増し始めており、不安定化領域がケーソン下面に広がったことと、ケーソン傾斜の急増とを関連づけることができる。

図-7 ケーソン背面下端付近のマウンドの不安定化過程の観察結果(Case1)

(3) 浸透によるマウンド不安定化の詳細な観察

間隙圧計の計測結果から得られた基礎マウンドの浸透流による不安定化を実際に確認するために、ケーソン背面下端付近のマウンドに焦点をあてて、高速度カメラ画像を詳しく調べた(図-7参照)。同図(a)は、津波前のケーソン背面下端部および周辺のマウンドを示している。このケーソンの位置およびマウンド形状は初期状態として、続く画像(同図(b)~(e))にも重ねて点線で示している。ケーソンの変位が急増し始めた時刻($t=3.052$ 秒)の画像(同図(b))をみると、ケーソン端部より激しいボイリングが発生していることがわかる。同図(c)($t=3.100$ 秒)の画像をみると、ケーソン端部のボイリング孔が拡大し、ケーソンのわきには流動化領域が形成されていることがわかる。その後の同図(d)の画像では、ケーソン端部周辺のボイリング孔が拡大することで、ケーソン端部の直下に大きな間隙が発生していることが確認できる。これにより、ケーソン端部下面も含めて、下端部付近全体が流動化することで(同図(e))、ケー

図-8 ケーソン変位に対する腹付工の効果(Case2-1, 2-2)

図-9 マウンド内の動水勾配の変化：マウンド内浸透に対する腹付工の効果(Case2-1, 2-2)

ソンはマウンドにめり込みながら、かつ、流動化したマウンドを押し分けながら、大きく傾斜していった。図-4に示すような激しい倒壊はマウンド下端付近の不安定化現象から始まり、流動化域の拡大で発達していくことを実際にとらえることができた。

次章では、このような著しいマウンドの不安定化に対する腹付工の効果を調べる。

4. マウンドや地盤の安定性に対する腹付工の効果

(1) 腹付工によるマウンドの浸透に対する安定化とケーソン変位の抑制

腹付工を施した場合の越流津波来襲時のケーソン変位の時刻歴を無対策の場合と比較して図-8(b)に示す。なお、同図(a)には、これら2つの実験における、ケーソン前面下端に作用する津波の波圧を示している。腹付工により、津波越流時のケーソンの変位が著しく抑えられ

図-10 混成堤に大きな津波が作用した時の基礎地盤の不安定化(Case2-2)

ていることがわかる。

ケーソン変位が腹付工により著しく抑えられた理由の一つとして、腹付工を有する場合はマウンドが浸透に対して安定を保つことがあげられる(図-9参照)。無対策の場合(Case2-1)は、前章3で示したCase1と同様に、ケーソン背面側のマウンド内(区間2)が不安定化し、その結果ケーソンの著しい変位に至る。一方、腹付工を有する場合(Case2-2)は、動水勾配が増大するものの不安定化には至っていない。この理由として、腹付工による浸透距離の増加があげられるが、ケーソン下端部付近の浸透距離をわずかに増加させるだけで同領域が急激に安定化することは興味深く、今後の課題である。

(2) 地盤の安定性に対する腹付工の効果

腹付工によりマウンドは安定しケーソン変位も抑制されるが、港内側地盤内では間隙圧が急上昇するとともに、ケーソン背面部直下で間隙圧が減少するなどの不安定化現象が観察された(図-10参照)。津波到達後、地盤内の間隙圧は浸透により徐々に上昇し始めるが、越流が開始し、ケーソンが変位し始める時点(図-8(b)参照)から、港内側地盤中深部(G5)の間隙圧が急上昇するとともに、ケーソン下端直下地盤浅部(G4)の間隙圧が低下している。これは、ケーソンに波圧が作用し地盤にその荷重が転荷されることにより、ケーソン背面直下の地盤浅部ではせん断破壊に近い状態が発生するとともに、港内側地盤中深部ではせん断により過剰間隙圧が蓄積したといえる。特に、地点G5では、初期有効上載圧のレベル近くまで過剰間隙圧が急上昇しており、非常に緩い砂地盤がせん断で液状化に至る挙動と類似している。実際の海底地盤は比較的締まっているのでこのような急激かつ著しい過剰間隙圧発生の可能性は少ないと思われるが、港内側地盤内ではせん断変形が発生することを示している。このような傾向は腹付工のないCase2-1でも見られた。

5. まとめ

本研究では、ドラム遠心载荷装置の津波水路を用いて、

混成堤を対象にした津波越流実験を行ない、浸透によるマウンド不安定化に伴うケーソンの倒壊過程を詳しく観察するとともに、マウンド、地盤の安定性に対する腹付工の効果を調べた。主な結果は以下の通りである。

- 1) 津波越流時に、ケーソン背面下端付近のマウンド内の動水勾配が局所的に増大しマウンドが不安定化する。この時からケーソンは顕著に動き始め、その後、不安定化領域がケーソン下面へ拡がることにより、ケーソンは傾斜を伴いながら著しく変状していく。
- 2) 津波越流時のマウンドの不安定化過程を高速度カメラによりとらえた。港内外の水位差上昇に伴う浸透流により、はじめ、ケーソン下端部でボイリングが発生し、その後、ボイリング孔が拡大し、ケーソン下端部付近全体に流動化が拡がることをとらえた。この後、ケーソンはマウンドにめり込みながら大きく傾斜していく。
- 3) 腹付工を有する断面では、マウンドが浸透に対して安定を保ち、ケーソン変位が著しく抑えられた。しかし、基礎地盤内ではせん断に伴う不安定化が生じていた。すなわち、津波時、ケーソン背面直下地盤では、破壊に近い現象が発生するとともに、港内側地盤内では、急激かつ著しく過剰間隙圧が上昇した。

参 考 文 献

- 有川太郎・佐藤昌治・下迫健一郎・長谷川 巖・稲垣茂樹・佐藤正勝・下澤 治(2012):東日本大震災における釜石湾口防波堤の被災メカニズムに関する研究,土木学会論文集B2(海岸工学),Vol.68, No.2, pp.I.826-I.830.
- 有川太郎・佐藤昌治・下迫健一郎・巖 駿(2013a):津波越流時における防波堤の安定性に関する研究,土木学会論文集B2(海岸工学),Vol.69, No.2, pp.I.916-I.926.
- 有川太郎・佐藤昌治・下迫健一郎・富田孝史・廉 慶善・丹羽竜也(2013b):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, 37p.
- 今瀬達也・前田健一・三宅達夫・鶴ヶ崎和博・澤田 豊・角田紘子(2011):捨石マウンドー海底地盤への津波浸透による混成堤の不安定化,土木学会論文集B2(海岸工学),Vol.67, No.2, pp.I.551-I.555.
- 笠間清伸・善 功企・春日井康夫(2013):浸透流に着目したケーソン式混成防波堤の安定性に関する水理模型実験,土木学会論文集B2(海岸工学),Vol.69, No.2, pp.I.966-I.970.
- 高橋英紀・佐々真志・森川嘉之・高野大樹・丸山憲治(2013a):津波による浸透作用下の防波堤基礎マウンドの支持力発現特性,土木学会論文集B3(海洋開発),Vol.69, No.2, pp.I.371-I.376.
- 高橋英紀・佐々真志・森川嘉之・高野大樹・丸山憲治(2013b):遠心力場における防波堤基礎地盤に対する津波浸透実験,土木学会論文集B3(海洋開発),Vol.69, No.2, pp.I.365-I.370.
- 三宅達夫・角田紘子・前田健一・坂井宏隆・今瀬達也(2009):津波の遠心力場における実験手法の開発とケーソン式防波堤への適用,海洋開発論文集,第25巻, pp.87-92.
- 矢追祐士・井合 進・飛田哲男(2012):津波による防波堤の複合破壊機構に関する遠心模型実験と解析,土木学会第67回年次学術講演会, pp.435-436.