地震 - 津波による混成堤の 破壊モードと性能規定に関する考察

松田 達也¹・前田 健一²・三宅 達夫³・宮本 順司⁴
鶴ヶ崎 和博⁴・角田 紘子⁵

¹正会員 豊橋技術科学大学助教 建築・都市システム学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)
E-mail:t.matsuda@ace.tut.ac.jp

²正会員 名古屋工業大学教授 大学院工学研究科 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)
E-mail:maeda.kenichi@nitech.ac.jp

³正会員 東洋建設株式会社 顧問 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1丁目25-1)

⁴正会員 東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1丁目25-1)

⁵東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1丁目25-1)

本研究では、地震動と津波の作用を想定した混成堤の破壊モードを検討し、多重防御における混成堤の性能について検討した。さらに、ねばり強い構造に向けた対策を外力と破壊モードの観点から考察した。その結果、地震、津波と地震・津波の連続作用時の混成堤には支持地盤の不安定化に伴ってケーソンの沈下や移動や回転などの破壊が生じることを示した。また、多重防御における混成堤の性能として変状を許容した際の背後地域の浸水深さを指標に調べた結果、ある範囲内でケーソンの変状が許容できることを明らかにした。さらに、支持地盤の不安定化に対する対策方法とそれに伴う破壊モードの変化を議論し、地震・津波外力のオーバーロードが混成堤に作用した際も範囲内に収束するよう、外力と破壊モードの観点から対策法を議論する必要性を示した。

Key Words : caisson-type breakwater, earthquake, tsunami, reinforce, performed provision

1. はじめに

2011年の東日本大震災において外郭施設の防波堤が湾内に侵入する津波を遅延させることで避難時間を延長させるなど一定の防御・減災機能を果たしたが、多くの構造物は大破し、継続して来襲する津波に対して耐波機能を喪失した。海岸構造物においては、今後発生するであろう海溝型地震による地震動と津波を想定した複合外力作用下の安定性を検討する必要がある。一方で、長時間作用する津波流を防波堤等の構造物単体で防ぐことが難しいと考え、沿岸域の津波防御について地域海岸ユニットを対象とした多重防御が考えられるようになってきた。よって、構造物単体（例えば、防波堤）においては、多重防御としてのシステムにおいて防波堤が果たすべき性能規定について考察する必要がある。その性能については、やはり破壊モードを踏まえた上で設計概念を明確にする必要があるし、粘り強い構造化に向けた対策方法を検討する必要がある。

著者らの既往の研究^{1),2)}では、津波作用時を考慮した

場合と地震・津波の連続して作用した場合のケーソン安定性を検討した。本論文では、さらに解析をパラメトリックに進め、津波襲来前の地震動によるケーソンの沈下などの変状形態および津波による移動や回転などの変状を解析した。その結果からケーソンの変状を許した場合を考慮して、地域海岸ユニットにおける多重防御を捉えた上で、破壊モードに応じた背後地への津波浸水深さを調べ、東日本大震災時の津波浸水深と各企業・工場の復旧日数（フル操業）事例をもとに、どの程度の変状が許容できるかという観点から混成堤の性能規定について考察した。また、支持地盤の強度低下に主眼を置いた混成堤の対策方法とその対策に伴う破壊モードの変化を検討し、地震・津波外力のオーバーロードが混成堤に作用した場合や対策法による変状モードが許容できる範囲内に収束するようなねばり強い構造について考察した。

2. 地震・津波による混成堤の破壊モード

(1) 地震動による混成堤下支持地盤の不安定化

本節では回転硬化型弾塑性構成式Cyclic mobility model³⁾

(a) 混成堤周辺の地盤構造

(b) 混成堤モデルの断面図

図-1 動的解析に用いた地盤構造と混成堤断面

(a) 加振終了後5秒: (左), EQ-1; (右), EQ-2

(b) 加振終了後約3時間: (左), EQ-1; (右), EQ-2

0.00 0.20 0.40 0.60 0.80 1.00

図-2 加振終了直後と終了3時間後の過剰間隙水圧比の分布

-1.20 -0.77 -0.35 0.07 0.50 [m]

図-3 加振終了後の変位図 (×4倍表示)

による土水連成有限要素解析プログラム「DBLEAVES」を用いた動的解析の結果について述べる。解析モデルを図-1に示す。地震波は岐阜大学杉戸教授による3連動想定地震波(EQ-1)および平成23年3月31日以前に中央防災会議より提示された東海・東南海想定地震波(EQ-2)を用いた。地震波の特徴として、EQ-1は最大加速度 1.88 m/s^2 、継続時間約200 s、EQ-2は最大加速度 1.51 m/s^2 、継続時間約160 sである。解析条件および解析パラメータについては既報²⁾を参照されたい。

図-2に過剰間隙水圧比(初期静水圧以上に上昇した過剰間隙水圧と地盤における初期鉛直有効応力との比)を示す。ケーソン下の置換砂では、地動に伴い砂層がせん断変形することで過剰間隙水圧が上昇し、ケーソンや捨

図-4 津波解析に用いた解析モデル全体概要

(a) 越流なし

(b) 越流あり

0.0 0.25 0.5 0.75 1.0

図-5 津波作用による支持地盤の強度変化: 鉛直上向き流れの動水勾配変化

図-6 津波作用による支持地盤の強度変化: 鉛直上向き流れの動水勾配変化

石などの上載圧がなく初期有効応力が小さい箇所では、過剰間隙水圧が1.0となり液状化に至った。図-3に、加振前後の混成堤の変位コンター図を示す。正の値(暖色)が引張、負の値(寒色)が圧縮を示しているが、現象として、支持地盤の液状化に伴って支持力の低下が生じ、ケーソンは均一に垂直沈下することが明らかとなった。

(2) 津波による混成堤下支持地盤の不安定化

SPH法を用いた津波解析結果について示す。解析モデルを図-4に示す。初期水位差を変化させ、段波を発生させた。解析の詳細は既報²⁾を参照されたい。

津波による支持地盤の不安定化を検討するため、支持地盤の鉛直上向き動水勾配を算出し、コンター図でまとめた(図-5)。動水勾配が0.7~1.0(暖色)になると液状化に似た応力状態になることを示す。越流の有無による比較すると、越流が発生する場合、ケーソン背後の支持地盤では過剰間隙水圧の上昇に伴い、地盤強度が著しく低下する可能性があるが、越流が発生しなくても、ケーソン背後の支持地盤では、動水勾配の上昇を確認した。よって、越流水塊の衝突に加え、ケーソン沖側からの浸透流も考慮する必要がある。越流および浸透により動水

図-7 地盤損傷を考慮した混成堤支持力余裕度の経時変化

表-1 段波圧および継続波圧が作用する際の支持力余裕度低下要因分析

Phase	1 st (t=9.2s)	2 nd (t=20s)
波力	100.00 %	100.00 %
波力+透水力	105.62 %	110.32 %
波力+越流による衝突力	101.48 %	132.46 %

勾配が上昇する支持地盤の箇所が、津波力を受ける混成堤の支持力に影響を及ぼす範囲であると想定されるため(図-6)、越流が発生する際の地盤強度の低下を考慮して、簡易ビショップ法を用いて支持力安定を検討した。すべり線については、ケーソン底面中央から捨石マウンド堤内側の法先を結ぶようなすべり線を仮定した。

図-7に支持力の余裕度を示す。支持力の余裕度とは、津波力による円弧すべりを発生させようとする力から支持力強度を差し引いたものである。一般的な安全率は、前者を後者で除した値となる。図内には、波力による支持力余裕度変化(黒色実線)、波力+浸透作用の透水力による支持力強度の低下を考慮した支持力余裕度変化(青色一点鎖線)、そして、波力+浸透作用の透水力および越流水塊による衝撃力による支持力強度の低下を考慮した支持力余裕度変化(赤色点線)をそれぞれ示している。 $t=9.2$ sのときが段波圧が作用した時刻、それ以降が継続波圧が作用しており、 $t=9.2$ sまでを1st Phase、それ以降を2nd Phaseとした。 $t=9.2$ sでは、図内すべての支持力余裕度線が同程度低下していることから波力に伴う支持力余裕度の低下が支配的であると考えられる。一方、継続波圧が作用する2nd Phaseでは、波力のみに加えて越流水塊および浸透作用により支持地盤の強度低下が誘発されることから、支持力余裕度に差がみられる。表-1に具体的な数値として、 $t=9.2$ sと $t=20.0$ sにおける波力のみによる支持力余裕度を基準とした各支持力余裕度の増減について示す。 $t=9.2$ sでは支持地盤の強度低下により7.1%程度支持力余裕度が減少している。一方で、 $t=20.0$ sにおいては42.78%程度支持力余裕度が減少していることがわかった。

(a) 初期水位差 $\Delta h=4.2$ m: 越流なし (b) 初期水位差 $\Delta h=8.2$ m: 越流あり

図-8 地盤の強度低下を考慮した地震—津波作用による混成堤の支持力余裕度の経時変化

(3) 地震動—津波による混成堤下支持地盤の不安定化

地震動—津波の複合外力による混成堤下支持地盤の不安定化について述べる。本章(1)で検討した地震動の作用を受けた混成堤に、地震終了後90 minに初期水位差 $\Delta h=4.2$ mおよび8.2 mの段波津波を作用させ、地震外力の作用により変状した混成堤に津波が作用する現象を再現した。本検討では前節2. (2)により支持地盤の強度低下に伴って支持力破壊が発生する危険性があることから、地震により発生した地盤内の過剰間隙水圧変動と津波越流による衝突力および支持地盤内への浸透による透水力の影響を考慮した支持力の安定性について検討した。

図-8に支持力に対する余裕度の経時変化を示す。両図とも黒実線は健全な防波堤に対して波力のみ影響を考慮した場合、青点線および赤一点鎖線は地震動による防波堤の沈下を考慮して、前者は波力のみを用い、後者は波力に加え、地震液状化による地盤剛性低下、地盤内の透水力を考慮したものを示す。波力レベルの違いにより支持力余裕度の変動が異なる。特に、図-8(b)に着目すると、健全時の場合と地震動による防波堤沈下を考慮した場合では大きな違いはない。一方で、地震動による支持地盤の残留過剰間隙水圧および津波作用時の波力、津波透水力および越流水塊による衝突力を考慮した場合では、支持地盤の強度が低下し、特に初期の段波圧作用時に支持力破壊に至る可能性が高くなることがわかった。本結果では、特段、地震後の残留過剰間隙水圧が支持地盤の強度低下に寄与した。

 図-9 地域海岸ユニット⁴⁾における耐波構造物

図-10 多重防御と防波堤の性能規定

3. 地域海岸ユニットを対象とした混成堤の地震・津波外力に対する性能規定に関する考察

(1) 性能規定に関する検討概要

前章では、混成堤を対象として地震動・津波外力が作用する防波堤の破壊モードについて、支持地盤の不安定化を中心とした考察を行った。本章では、湾内への津波侵入を構造物単体で制御することは非常に難しいという東日本大震災の教訓から、地域海岸ユニット⁴⁾ (図-9) に着目した多重防御を対象とし、多重防御における防波堤の位置づけを踏まえ、その性能規定について考察する (図-10)。

本研究では基礎的な検討として、前章までに考察した津波襲来前の地震動によるケーソンの沈下などの変状形態および津波による移動や回転などの変状等の破壊モードを考慮して、破壊モードに応じた背後地への津波浸水深さを調べた。また、東日本大震災時の津波浸水深と各企業・工場の復旧日数 (フル操業) 事例をもとに、どの程度の変状が許容できるかという観点から混成堤の性能規定について考察した。

(2) 検討方法

対象とした解析モデルを図-11に示す。津波流は沖合に基準水面より+15.0mの水位差を設け、段波形式で与えた。地震・津波の作用による混成堤の安定解析により、いくつかの変状が計算でき (図-12)、最も発生しうる可能性がある4つの変状パターンを対象とした検討を行った (図-13)；1) 無被害 (健全な状態)：Case1, 2) 地震動により2m垂直に沈下、水平移動なし：Case2, 3) 津波により港内側へ5m水平滑動、垂直移動なし：Case3, 4) 津波によりマウンドから滑落 (大破)：Case4。これらの変状を許容した場合の比較を、図-11内に示す水陸境界 (A地点) における津波浸水深さにより検討した。

図-11 津波流動モデルと津波浸水深さ計測位置 (A点)

図-12 津波流によりケーソンが防波堤から滑落する様子

図-13 地震・津波による混成堤の破壊モード

図-14 混成堤の破壊モードに応じた水陸境界A地点での津波浸水深さ

 図-15 東日本大震災における浸水地域の各企業・工場の復旧日数 (フル操業) と浸水深：文献⁵⁾ に加筆

(3) 結果と考察

水陸境界A地点における津波浸水深さを図-14に示す。Case1の健全な状態を基本として結果をまとめる。防波堤が存在するCase1からCase3までは、防波堤が存在しないCase4に比べて浸水深さが約半分まで減少することがわかる。防波堤が沈下したCase2では、Case1に比べて天端高が低くなることから越流が容易となり、背後地の浸水高さも増加する。一方で、水平移動したCase3では、Case1と同じ天端高であることから、水平移動の場合は健全な状態と同等の浸水深さであった。

以上の結果より、防波堤は変状するが存在することで（Case1-3）、防波堤が存在しない場合（Case4）に比べて浸水深さが約半分まで減少した。しかし、天端高が確保されていないと越流が容易となり背後地の浸水高さも増加した。例えば、東日本大震災における浸水地域の各企業・工場の復旧日数（フル操業）と浸水深の関係⁹⁾（図-15）を参考にすると、浸水深1 mを境に復旧日数が大幅に増加することがわかる。各企業・工場の事業継続計画（BCP）を踏まえると、浸水深は重要な指標となり、浸水深を低減させるためには、ケーソンの水平移動は許容できるが沈下量を抑制し、背後への流入量を低減させる必要がある。本検討では簡易的に2次元断面を用いたが、今後は3次元の特性または多重構造物を考慮して、性能評価が行える解析ツールの発展と評価項目を詳細に議論する必要がある。

4. 支持地盤の補強による混成堤の耐震・耐津対策と性能評価

混成堤は、地震動、津波越流および津波浸透を受けると、ケーソンの支持地盤において、液状化または流動化のような現象が発生し、ケーソンが支持力を失うことで大きく沈下、そして支持力破壊が発生し、耐波機能が著しく低下する可能性がある。特に、地震の本震・余震、何波も来襲し、押し波・引き波が繰り返して作用する津波が混成堤に作用することで、これらの外力によって支持地盤に塑性ひずみが蓄積し、“負のスパイラル”によって支持地盤の不安定化が促進される。よって、この負のスパイラルを断ち切る必要がある。前途にも述べたが、

液状化または流動化のような現象が発生することから、これまで培われてきた液状化対策技術を用いることで、被害を最小限に抑制できると考えた。表-2に既往の液状化対策工法を用いた際の混成堤の耐震・耐津波構造として考えられる効果を整理した。構造物は、新設と既設に分けている。また、対策として地盤改良、抑え盛土・アンカー補強、洗掘・浸食対策の大きく3つに分類している。それぞれ新設と既設に応じて対応できる既往の液状化対策を書き記した。抑え盛土・アンカーについてはケーソンの滑動防止とした。また、被覆ブロックや蛇籠などを用いることで液状化対策に加えて洗掘・浸食対策として有効となると考えた。いくつか対策法を挙げたが、本稿では、経済面・技術面から既設の防波堤に用いることが想定される抑え盛土を例に挙げ、補強効果について外力レベルと対比させながら検討した。

まず、波力に対してケーソンの水平移動を拘束するだけでなく、支持力に対しても約1割程度余裕度が増加した。しかし、2(a)と同様の計算方法で、津波外力を大きくすると越流水塊や浸透流により支持地盤が強度低下し、支持地盤が健全な状態であると仮定した、赤塚ら⁹⁾：破壊モード1や菊池ら⁷⁾：破壊モード2が示した抑え盛土内または捨石マウンド内に発生するすべり線ではなく、支持地盤も含めた大規模な支持力破壊：破壊モード3に至る可能性があることがわかった（図-17）。図-18に被害程度と外力の関係を示しているが、想定した外力に対しては十分な機能を発揮できるが、想定値を上回る外力（オーバーロード）が作用した場合には、想定される破壊モードと異なった破壊モードが現れ、甚大な破壊につながる可能性があり、外力レベルに応じた破壊モードを明確にし、破壊モードを踏まえたうえで性能規定内に構造物を設計する必要がある。

5. 結言

津波作用時と地震・津波の連続作用時の混成堤について地震動によるケーソンの沈下や津波による移動や回転などの変状を解析した結果を示した。多重防御を対象に背後地への津波浸水深さを調べ、ある範囲内で変状が許容できることを明らかにした。さらに、支持地盤の不安

表-2 混成堤の粘り強い構造に向けた既存の液状化対策の導入とその効果

対 象		地盤改良			抑え盛土・アンカー	洗掘・浸食対策
		置換・間隙圧消散	締固め	固化・注入		
混成堤	新規	SCP工法 (粘土地盤) VD工法	SCP工法 (砂地盤) バイプロフローテーション工法	ソイルセメント 深層混合処理工法 薬液注入工法	抑え盛土 (支持力補強)	被覆ブロック
	既設	VD工法	—	薬液注入工法	抑え盛土 (支持力補強)	被覆ブロック 蛇籠

図-17 津波越流および浸透流によって発生する地盤内部の上向き動水勾配（暖色となるほど数値が大）と地盤強度低下に伴う想定すべり線の模式図

図-18 裏込め石対策における破壊モードを考慮した性能評価の一例

定化に対する対策方法とそれに伴う破壊モードの変化を議論し、地震・津波外力のオーバーロードが混成堤に作用した際も範囲内に収束するよう、ねばり強い構造について外力と破壊モードの観点から議論する必要性を示した。

謝辞：本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基礎

研究(B)23360203, 特別研究員奨励金(24・9200)および研究スタート支援26889035の助成を受けています。また、公益社団法人地盤工学会 地盤構造物耐津波化研究委員会（委員長：菊池喜昭氏（東京理科大学教授））防波堤・防潮堤WGにおいて議論した内容が含まれています。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 今瀬達也・前田健一・三宅達夫・鶴ヶ崎和博・澤田豊・角田紘子：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, 2011.
- 2) 今瀬達也・前田健一・三宅達夫・澤田豊・鶴ヶ崎和博・角田紘子・張鋒：地震および越流による地盤損傷を考慮した津波力を受ける混成堤の支持力破壊検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_866-I_870, 2012.
- 3) F. Zhang, B. Ye, T. Noda, M. Nakano and K. Nakai: Explanation of cyclic mobility of soils: Approach by stress-induced anisotropy, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.4, pp. 635-648, 2007.
- 4) 海岸における津波対策検討委員会
(http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/kaigantsunamitaisaku/: 参照 2015-05-17) .
- 5) 柴崎隆一：東日本大震災による港湾都市における産業・物流の被害・復旧状況, 国土技術政策総合研究所資料, No. 677, 2012.
- 6) 赤塚雄三, 竹田英章, 蓮見隆：混成堤の堤体背後に設置したコンクリート方塊あるいは割石の滑動抵抗, 第 22 回海岸工学講演会論文集, Vol.2, pp. 421-425, 1975.
- 7) 菊池喜昭, 新舎博, 河村健輔, 江口信也：裏込めを有するケーソン式混成堤の安定性の検討, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.67, No.4, pp. 474-487, 2011.

(2015.3.18 受付)

DAMAGE MODE OF THE CAISSON-TYPE BREAKWATER DUE TO AN EARTHQUAKE-TSUNAMI AND ITS PERFORMANCE PROVISION

Tatsuya MATSUDA, Kenichi MAEDA, Michio MIYAKE, Junji MIYAMOTO, Kazuhiro TSURUGASAKI and Hiroko SUMIDA

This study investigated the performance of a breakwater as a multi-pronged protection system against the earthquake and tsunami-induced damage sustained by a caisson-type breakwater. This research also examined a breakwater reinforcement method that considers external force and damage level. A caisson is typically deformed by seabed instability caused by liquefaction or fluidization due to seismic waves and tsunamis. Accordingly, we determined the allowable deformation value for a caisson by analyzing the inundation depth of a tsunami in background area in relation to multi-protective performance. Results point to the need to effectively manage caisson settlement. We proposed that the best achieved by using current liquefaction countermeasures. Especially, the relationship between external force and damage mode was discussed through the countermeasure on the use of backfill material to stabilize caissons. The damage mode observed in this work may be developed the difference between the actual and assumed deformation caused by the external force acting on a caisson. The relationship between external force and damage should therefore be thoroughly scrutinized when determining deformation level under conditions wherein excessive loads act on breakwater.