

地震・津波の複合外力による混成堤の進行性破壊

Progressive Failure of the Caisson-type Breakwater due to Earthquake and Tsunami

今瀬達也¹, 前田健一², 伊藤嘉¹, 三宅達夫³, 鶴ヶ崎和博³, 角田紘子³, 張鋒²

1 名古屋工業大学・大学院工学研究科・cih18501@stn.nitech.ac.jp

2 名古屋工業大学・高度防災工学センター

3 東洋建設・鳴尾研究所

概要

本研究では、地震動による支持地盤の液状化および津波作用時の支持力破壊検討、津波越流による地盤強度の低下に伴う支持力破壊と支持地盤内に発生する透水力による浸透破壊を対象に、破壊要因となる現象の時刻変化にみた破壊プロセスを考察した。まず、地震動が作用すると支持地盤の過剰間隙水圧が上昇して液状化が発生し、防波堤が大きく沈下して、構造的に弱体化することがわかった。この状態で津波が来襲すると、容易に越流を許してしまう可能性がある。また、地震動による過剰間隙水圧が消散しきれない状態で津波外力および津波浸透が作用すると、支持力破壊に至る危険性が非常に高くなることがわかった。さらに、支持地盤内には越流外力と透水力の複合作用により強度が低下することで、支持力破壊および浸透破壊する可能性が高く、津波の継続的作用に伴って進行的に破壊する可能性を有することがわかった。

キーワード：地震，津波，混成堤，洗掘，進行性破壊

1. はじめに

2011年に発生した東日本大震災では、Mw9.0の長周期地震動が発生し、さらに、大津波を発生させ、北海道から千葉県の広域に渡る太平洋沿岸域に甚大な被害をもたらした。沿岸域では、外郭施設である防波堤等の海岸構造物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てしまい、継続して来襲する津波に対して耐波機能を喪失した。今後、発生が予想される東海・東南海・南海地震では、関東・中部・関西の三大工業地帯を含む太平洋ベルト地帯の重要港湾が多数あり、また、沿岸域に沿って人口が密集しているため、津波により被害が生じた場合、我が国の経済に深刻な問題を発生させる恐れがある。そのため、被害を最小限に抑える対策は急務と考える。特に、ハード対策については、東日本大震災における沿岸構造物の被害状況の把握と被害メカニズム解明を早急に行い、抜本的な対策を検討する必要がある。

例えば、外郭施設である防波堤に焦点をあてると、東日本大震災における被害形態¹⁾として、1) 津波波力型、2) 引波水位差型、3) 越流洗掘型、4) 堤頭部洗掘型の4つに分類できる。これらの分類から、考慮すべきキーワードとして、津波外力の規模、越流、引き波、地盤の洗掘が挙げられる。特に、津波越流による流体衝撃力や渦、乱流による地盤洗掘現象については、これまでに研究事例が少なく、

現象を検討する必要性が高い。また、巨大地震災害を対象とした場合には、海溝型地震特有の長周期成分を含む、長時間作用し続ける地震動と、津波力の作用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と考える。

そこで、本稿では以前より実施してきた、混成堤を対象とした津波による浸透問題や支持力破壊等の地盤工学の視点から捉えた検討結果^{2), 3), 4)}を踏まえて、海溝型地震津波を想定した際の地盤液状化による地震被害およびその後に来襲した津波力作用に伴う混成堤の支持力破壊に対する安定性について、複合外力作用に伴う混成堤の不安定化を検討した。また、津波外力については、越流水塊の作用および捨石マウンド・支持地盤への浸透作用に着目した支持地盤への外力と内力の複合作用による不安定化について検討したので報告する。検討にあたり、津波力による地盤-構造物への影響を粒子法であるSPH法^{5), 6)}、地震動・液状化については弾塑性構成式による土水連成有限要素解析⁷⁾を用いた。

2. 海溝型地震による長周期地震動が作用する混成堤の支持地盤不安定化に起因した被害

2.1 検討概要

海溝型地震による長周期地震動を対象とし、混成堤構造における被害メカニズムについて検討した。混成堤とは、我が国において軟弱地盤上に防波堤を施工するために多

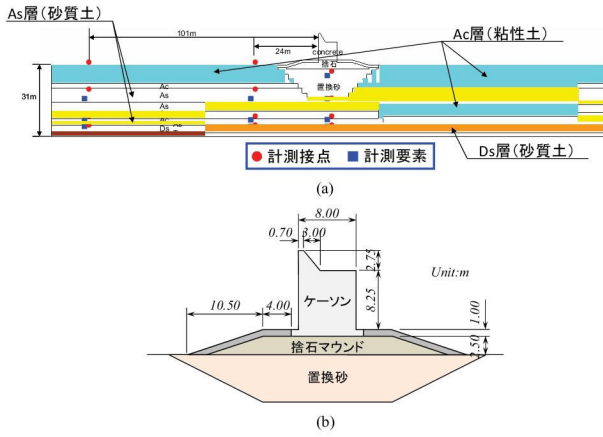
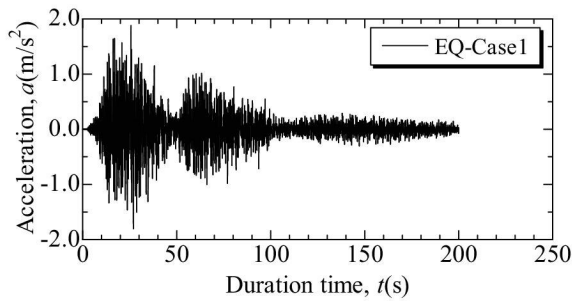


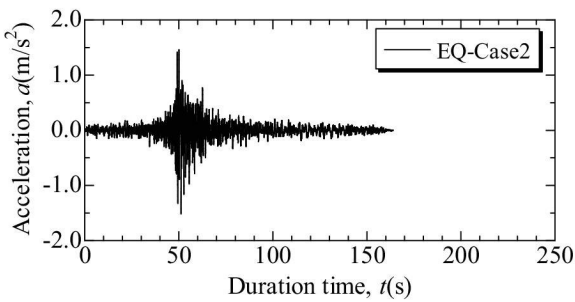
図1 動的解析に用いた検討断面；(a)全領域，(b)混成堤断面

表1 動的解析に用いた地盤材料パラメータ

Parameter		As	Ac
Compression index	λ	0.050	0.130
Swelling index	κ	0.006	0.026
Stress ratio at critical state	R_f	3.650	3.500
Void ratio ($p=98kPa$ on N.C.L.)	N	0.870	0.920
Poisson's ratio	ν	0.300	0.400
Degradation parameter of overconsolidation state	m	0.100	2.200
Degradation parameter of structure	a	2.200	0.100
Evolution parameter of anisotropy	b_r	1.500	0.100
Density [t/m^3]	ρ	1.800	1.680
(under water [t/m^3])		(0.800)	(0.680)
Initial structure	R_0^*	0.800	0.600
Initial degree of overconsolidation	l/R_0	2.500	1.500
Initial anisotropy	ζ_0	0.000	0.000
Coefficient of permeability [m/s]	k	1.000E-04	1.000E-09

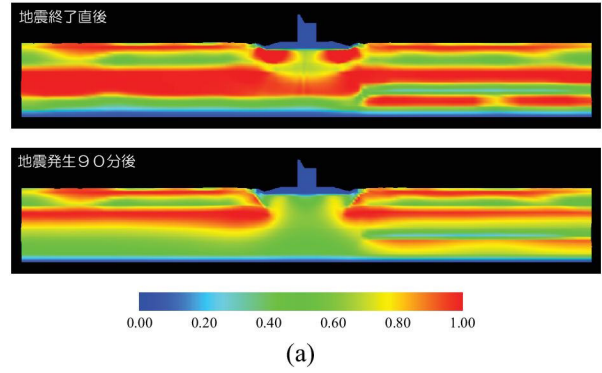


(a)

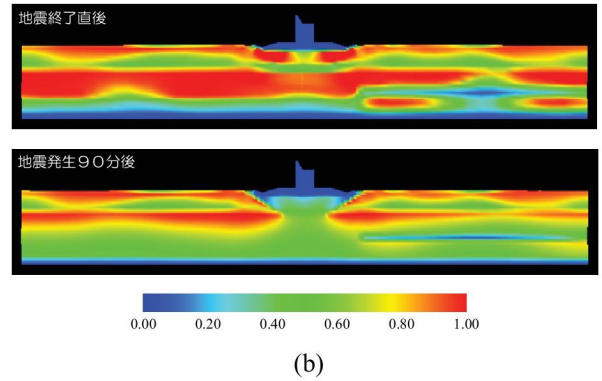


(b)

図2 入力地震動；(a)EQ-Case1，(b)EQ-Case2



(a)



(b)

図3 地震終了直後および地震発生90分後の過剰間隙水圧比分布；(a)EQ-Case1，(b)EQ-Case2

く用いられている床掘り・置換砂工法によって施工された支持地盤上に、捨石マウンドおよびケーソンを据え付けた構造である。解析断面および混成堤断面を図1に示す。動的解析は、回転硬化型弾塑性構成式 Cyclic mobility model による土水連成有限要素解析プログラム「DBLEAVES」を用いた。

2.2 解析条件

境界条件は、静的解析時においては、下部を x, z 方向の変位を固定、側面は x 方向の変位を固定している。動的解析時においては、下部を x, z 方向の変位を固定、側面は等変位境界とした。水理条件は、下面および側面は非排水境界、上面は排水境界とした。

解析パラメータとして、As 層を緩い砂層、Ac 層を緩い粘土層と想定し、過去に実施した豊浦砂および藤の森粘土の解析例を参照して決定した(表1)。また、基盤層である Ds 層および防波堤および捨石マウンドは弾性体材料と仮定して検討している。

入力地震動は、岐阜大学・杉戸真太教授よりご提供頂いた想定される東海・東南海・南海3連動による地震動波形および内閣府中央防災会議により2012年以前に提示された想定地震動を用いた(図2)。本稿では、前者を EQ-Case1、後者を EQ-Case2 としている。

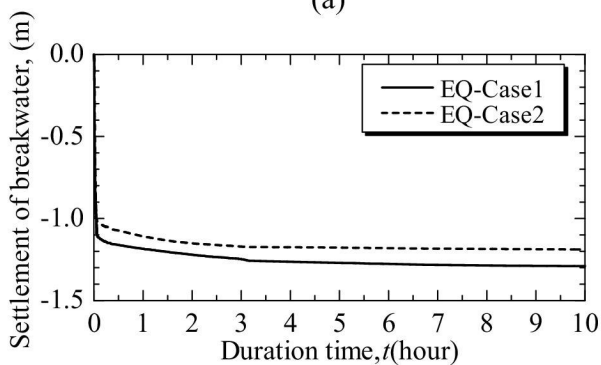
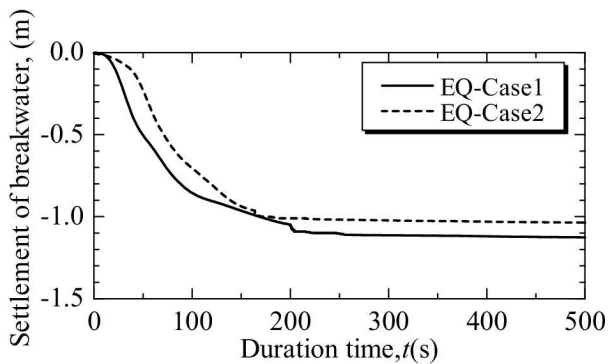


図 4 防波堤天端における鉛直沈下量；(a)地震発生 $t=0s$ から $t=500s$ まで、(b)地震発生 $t=0s$ から $t=10$ 時間まで

2.3 解析結果

2.3.1 過剰間隙水圧比分布の変化

図 3(a)に EQ-Case1, 図 3 (b)に EQ-Case2 における地震終了後と地震発生 90 分後の過剰間隙水圧比を示す。

EQ-Case1 および EQ-Case2 ともに、地震終了後に表層の粘土地盤および各砂層地盤において、過剰間隙水圧の上昇により過剰間隙水圧比が 1.0 近くまで上昇している。特に、防波堤下の置換砂においては、防波堤および捨石マウンドによる上載荷重が少ない箇所では過剰間隙水圧比が 1.0 となり、液状化に至っていると考えられる。また、粘土地盤でも水圧の上昇が見られ、過剰間隙水圧比が 0.6 程度まで上昇している。

地震発生 90 分後には、砂層において、発生した過剰間隙水圧の消散による過剰間隙水圧比の減少が見られるものの、依然として過剰間隙水圧が高く地盤が不安定な状態が続いていることがわかる。防波堤下の置換砂では、過剰間隙水圧比が約 0.5~0.6 程度である。また、粘土層においても、過剰間隙水圧比が比較的高い状態が続いている。

2.3.2 防波堤の沈下

図 3 に EQ-Case1 および EQ-Case2 の防波堤天端における沈下量の経時変化を示す。図 3(a)は地震動載荷開始を $t=0$ として、加振中を含めた $t=500s$ までを示し、図 3 (b)は地震動載荷開始を $t=0$ として、 $t=10$ hours までを示している。

図 3 (a)に着目すると、EQ-Case1 では地震波形に従って、 $t=0\sim 50s$, $50\sim 100s$, $100\sim 200s$ の三段階によって沈下が進行している。加振終了後の $t=200s$ 時には、沈下量が約

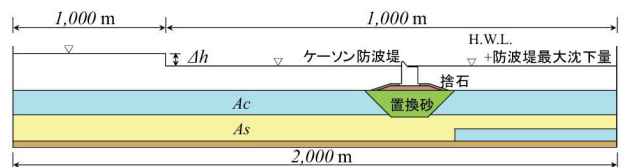


図 5 津波解析のための解析断面

表 2 津波解析における解析ケース

CASE	地震による防波堤の沈下	初期水位差	越流	支持力破壊
Case1-1	防波堤の沈下あり	8.2m	大	波力のみ
Case1-2				波力+地震による残留過剰間隙水圧+津波浸透力
Case2-1		6.5m	小	波力のみ
Case2-2				波力+地震による残留過剰間隙水圧+津波浸透力
Case3-1		4.2m	なし	波力のみ
Case3-2				波力+地震による残留過剰間隙水圧+津波浸透力
Case4	防波堤の沈下なし	8.2m	大	波力のみ
Case5		6.5m	小	波力のみ
Case6		4.2m	なし	波力のみ

1.050m となった。一方で、EQ-Case2 では最大加速度となる $t=50s$ より急激に沈下が進行し、加振終了後の $t=163s$ 時には、沈下量が約 0.966m となった (図 3 (b))。

その後、地震発生 90 分後の沈下量は EQ-Case1 で -1.200m, EQ-Case2 で -1.140m 程度、また、地震発生 10 時間後の沈下量は EQ-Case1 で -1.290m, EQ-Case2 で -1.190m 程度まで沈下した。

3. 地震動による沈下および過剰間隙水圧の変動を考慮した津波外力作用時の支持力破壊検討

3.1 検討概要

地震による防波堤の沈下および支持地盤の過剰間隙水圧変動を考慮した、防波堤に津波力が作用した際の支持力破壊に対する安全性を検討する。検討に用いた解析手法については、参考文献 2), 3) に詳しい。本研究では、前項において検討した動的解析による結果 (EQ-Case1 のみ) を用いている。ただし、本検討では、初期水位 H.W.L に地震発生 90 分後の防波堤天端の沈下量 (-1.200m) を加えることで、地震動による変形を表現した。また、津波解析においては、構造物、捨石また地盤は変形しないものとする。ただし、捨石および支持地盤については、適当な透水性を与えた多孔質構造となっている。

津波外力は沖に水位差を設けて水塊を設定し、Dam break による段波津波を発生させて、防波堤に作用させた。ただし、越流量を変化させて、その影響について考察するため、初期の水位差 $\Delta h=4.2, 6.5, 8.2m$ に設定した。各解析ケースを表 2 に示す。

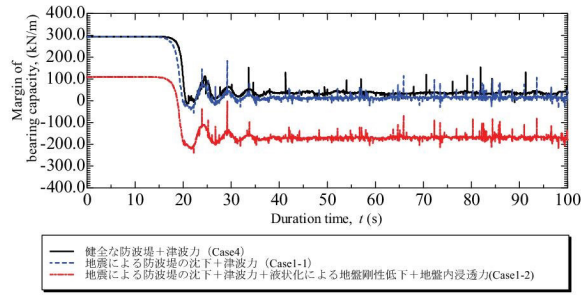


図 6 支持力破壊に対する余裕度変化 (Case1-1, Case1-2 および Case4)

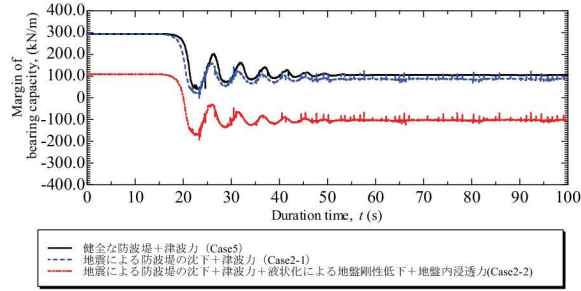


図 7 支持力破壊に対する余裕度変化 (Case2-1, Case2-2 および Case5)

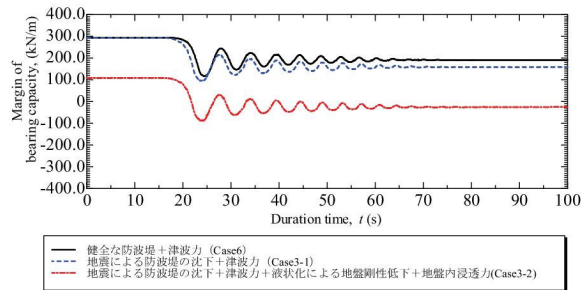


図 8 支持力破壊に対する余裕度変化 (Case3-1, Case3-2 および Case6)

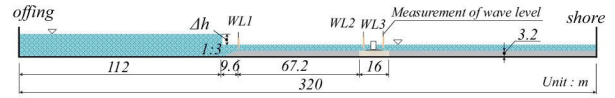
3.2 支持力破壊に対する検討

支持力に対する強度の算出は、港湾設計指針⁸⁾の簡易ピシヨップ法を参照し、次式により支持力余裕度を求めた。

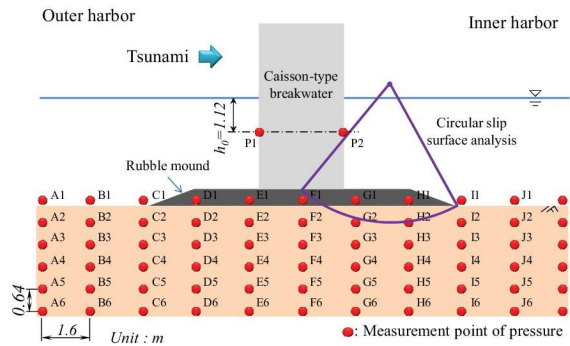
$$F_f = \sum \left\{ \left[c_d S + (W'_d + q_d) \tan \phi_d \right] \frac{\sec \theta}{1 + \tan \theta \tan \phi_d} \right\} - \sum \{ (W_d + q_d) \sin \theta + \alpha P_{Hd} / R \} \quad (1)$$

ここに、 c_d ：見かけの粘着力[kN/m²]、 S ：分割片の幅[m]、 W'_d ：単位長さ当たりの分割片の有効重量[kN/m]、 q_d ：分割片上部からの鉛直荷重[kN/m]、 ϕ_d ：内部摩擦角[°]、 θ ：分割片底面が水平面となす角度[°]、 W_d ：単位長さ当たりの分割片の全重量[kN/m]、 P_{Hd} ：円弧滑りの滑り円内の土塊への水平作用力[kN/m]、 α ： P_{Hd} の作用位置の円弧滑りの滑り円中心からの距離[m]、 R ：円弧滑り円の半径[m]である。本計算においては、見かけの粘着力はないものとしている($c_d=0$)。

本検討では、式(1)の波力による評価に加えて、スライス地盤内の過剰間隙水圧変動(地震により発生した過剰間隙



(a)



(b)

図 9 港湾における津波流動場のモデル化；(a)解析全断面；(b)混成堤と間隙水圧抽出箇所および円弧滑り線

水圧($t=90$ 分時の値)と津波による地盤内浸透力を加算した値)を考慮し、スライス土塊の有効重量を可変して評価した結果を示す。

図 6~8 に各検討ケースにおける支持力に対する余裕度の経時変化を示す。すべての図において、黒実線は健全な防波堤に対して波力のみを考慮した場合、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、地盤内浸透力を考慮したものを示している。

各ケースとも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、差ほど大きな違いはないことがわかる。しかし、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と津波透水力を考慮した場合は、支持力に対する強度が低く、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。

一方で、越流による影響については、防波堤が地震動により沈下したことで防波堤背後の水位が高く、さらに、防波堤の断面構造上、越流水の背後への入射角度が鈍角であったため、背後地盤への影響はあまりみられなかった。

4. 越流・浸透による支持地盤の破壊プロセス

4.1 解析検討の概要

前章までと同様に混成堤を対象として、解析領域の全断面および混成堤断面を若干変化させ、越流および浸透に対する支持地盤の安定性について検討した。図 9(a)には、解析全領域を図 9(b)には混成堤断面と支持地盤内の間隙水圧の計測箇所および支持力に対する安全性を検討するために用いた円弧滑り線を示したものを示す。

津波は前章と同様に Dam break による段波津波を発生させた。また、初期水位差 $\Delta h=0.96$, 6.40m に設定し、越流の有無による検討を行った。捨石および支持地盤には適当

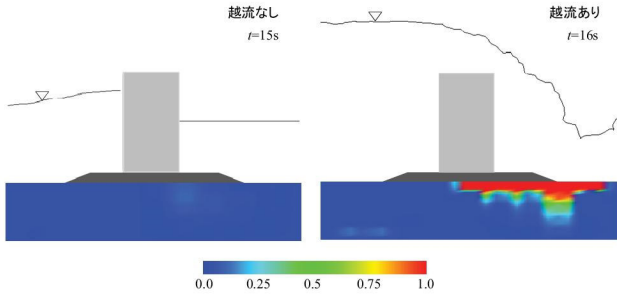


図 10 越流時における防波堤背後地盤の鉛直動水勾配分布(左図; 越流なし, 右図; 越流あり)

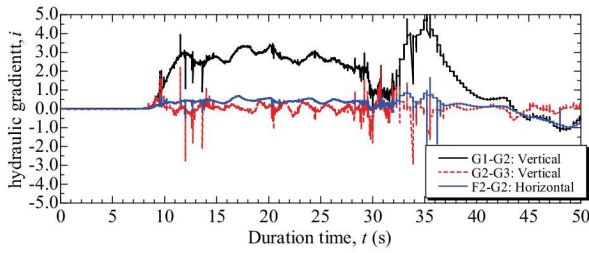


図 11 防波堤背後地盤の鉛直・水平方向の動水勾配変化 (G1-G2 間・G2-G3 間: 垂直方向, F2-G2 間: 水平方向)

な透水性を与え、津波浸透が発生できる構造となっている。

4.2 解析結果

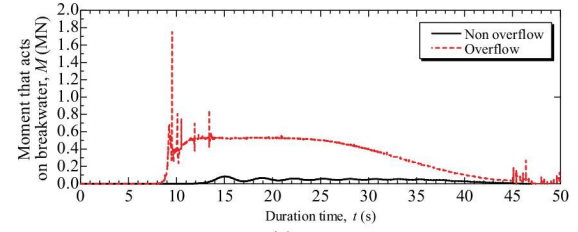
4.2.1 越流による防波堤背後地盤への衝撃圧载荷と防波堤背後地盤の鉛直動水勾配変化

越流による防波堤背後地盤の影響を検討するため、鉛直上向き動水勾配を算出した。動水勾配は、各間隙水圧抽出箇所における過剰間隙水圧から求めた圧力水頭に位置水頭を加えたピエゾ水頭を抽出箇所間距離で除して求めた。越流作用時における海底地盤内の動水勾配分布を図 10 に示す。ここで、正は上向き勾配を意味している。

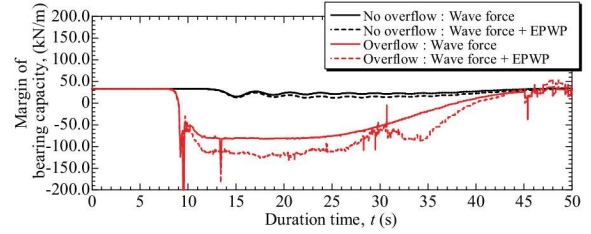
越流がない場合は、背後地盤の動水勾配の上昇が見られない。越流がある場合は、防波堤直下から捨石マウンド法先に至る地盤表層付近で動水勾配が 1.0 まで上昇した。ボーリング現象が発生する限界動水勾配 i_{cr} は、限界動水勾配に達するまでの浸透流が Darcy 則に従うとすると、おおよそ $i_{cr}=0.7\sim 1.0$ となる⁹⁾。本解析においても、支持地盤においては、Darcy 則に従った土水連成解析を行っていることから、支持地盤が液状化に似た状態になると考えられる。

次に、防波堤直下および港内側の防波堤後趾付近における鉛直上向きおよび水平方向の動水勾配の経時変化を図 12 に示す。

防波堤直下から後方の支持地盤で、越流による水塊が作用する時刻 ($t=11\sim 12$ 秒) 以前の $t=9$ 秒程度より F2-G2 間の水平動水勾配が上昇し、防波堤背後へと浸透流が発生することがわかる。また、同時刻の $t=9\sim 10$ 秒前後にかけて鉛直上向きの動水勾配も上昇していることから、越流水塊が作用する以前において、支持地盤が透水力を受け浸透破



(a)



(b)

図 12 支持力破壊に対する安定性の検討;(a)津波圧による単位奥行き当りのモーメント, (b)防波堤の支持力に対する余裕度の経時変化

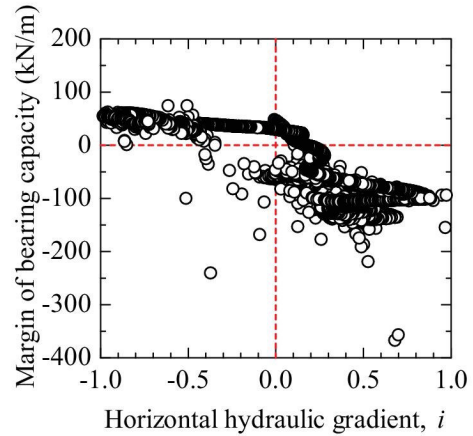


図 13 支持力に対する余裕度と水平方向 (F2-G2 間) の動水勾配変化のクロスプロット

壊する可能性がある。

4.2.2 支持力破壊に対する検討

越流の作用に伴い、防波堤背後地盤が強度低下することがわかった。よって、防波堤に津波が作用している最中に防波堤の支持力が低下することが想定されたため、次に、越流に伴い発生する地盤内水圧変動を考慮した支持力破壊に対する安定性を検討した。

図 12 (a)に防波堤に作用した津波圧による単位奥行き当りのモーメント、図 12 (b)に防波堤の支持力に対する余裕度を示す。余裕度の算出については、3.2 と同様である。また、地盤スライス内の過剰間隙水圧の上昇による地盤の強度低下を考慮するため、地盤の有効重量から過剰間隙水圧分(EPWP)を引いて算出した結果についても検討している。

越流が発生しないケースについては、支持力破壊を起こさない結果となったが、越流が発生するケースについては、津波力の変動に従って余裕度も変動することに加え (図

9(b); 赤実線), ケーソン背後地盤における過剰間隙水圧の発生に伴った強度低下により, 支持力破壊に対する危険性が一段と高くなることがわかる (図 9(b); 赤点線)。その現象は, 越流は発生する間 (約 11 秒~32 秒), 越流発生後のケーソン背後の水位変動が生ずる間 (約 32 秒~40 秒) に大きく影響を及ぼしている。

4.2.3 支持力余裕度と水平動水勾配のクロスプロット

本章で検討してきた支持力に対する余裕度と防波堤下部から背後にかけて作用する水平方向の動水勾配 (F2-G2 間) をクロスプロットし, 破壊要因の影響度について検討する (図 13)。

越流が発生するような比較的大きな津波外力が混成堤に作用する際, 越流と同時にケーソン下の支持地盤内では透水力も大きくなる。すなわち, 支持地盤内においては, 越流による支持地盤上面からの作用に加え, 内部からの浸透を受けた複合外力により強度低下が促進される可能性が非常に高いと考える。よって, ケーソン下の支持地盤の変形問題については, この影響を考慮を十分に考慮する必要がある。

5. 結言

本研究では, 地震動による支持地盤の液状化および津波作用時の支持力破壊検討, 津波越流による地盤強度の低下に伴う支持力破壊と支持地盤内に発生する透水力による浸透破壊を対象に, 破壊要因となる現象の時刻変化にみた破壊プロセスを考察し, 次の結果を得た。

- 1) 長周期地震動が作用した場合, 砂質地盤では, 過剰間隙水圧の上昇により液状化に至る可能性が非常に高い。また, 粘土地盤においても, 過剰間隙水圧が発生し, これらの影響に伴って, 防波堤は大きく沈下することがわかった。また, 粘土地盤で発生した過剰間隙水圧は消散に時間を要するため, 長期に渡り, 沈下が発生する可能性がある。防波堤が沈下すると, 越流を容易に許してしまい, 背後への津波侵入量が大きくなることが懸念される。
- 2) 地震動により発生した過剰間隙水圧の消散途中で, 津波が来襲し防波堤に作用することが考えられるが, この際には, 支持地盤内の間隙水圧が高く, 不安定な状態にあり, 防波堤の滑动・転倒に加えて, 津波外力を受けて支持力破壊に至る可能性が高い。
- 3) 越流した津波の防波堤背後への流動挙動 (背後海面への流入角度, 速度など) によっては, 防波堤背後地盤に越流水塊が作用し, 比較的流速が速い水塊が作用することにより, 背後地盤内に過剰間隙水圧が発生し, 上向きの動水勾配により支持地盤が液状化に似たような状態となりうるということがわかった。これに伴い, より一層支持力破壊に至る可能性が高くなることがわかった。さらに, 越流と同時にケーソン下の捨石マウンドおよび支持地盤内では津波浸透に伴って透水力が作用

し, 浸透破壊に至ることが考えられる。これにより, 越流による支持地盤上面からの作用に加え, 内部からの浸透を受けた複合外力により, 洗掘現象等により地盤変状が一層進行する可能性が高いことが懸念される。よって, 越流による背後地盤の洗掘対策に加え, ケーソン下部の浸透破壊対策も十分検討する必要がある。

今後は, 地盤の変状プロセスを加味した解析検討に基づいて (例えば, 図 14), より詳細なケーソンの破壊メカニズムを分析し, 抜本的な対策を提案する。

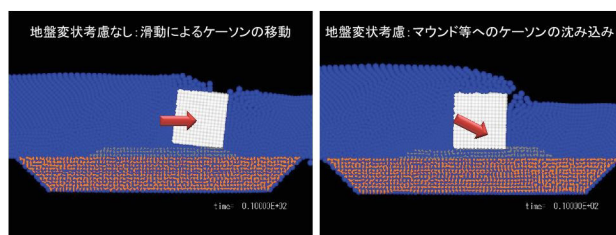


図 14 地盤変状有無に伴ったケーソンの破壊プロセス (左: 滑动によるケーソンの移動, 右: 地盤変状に伴ったケーソンの支持力破壊)

謝辞: 本研究は, 日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)23360203 および特別研究員奨励費 (24・9200) の助成を受けたものです。また, 地震動データは岐阜大学・杉戸真太教授よりご提供頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 地盤構造物耐津波化研究委員会: 第 2 回議事録, 2011.
- 2) 三宅達夫, 角田紘子, 前田健一, 坂井宏隆, 今瀬達也: 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, 2009.
- 3) 今瀬達也, 前田健一, 三宅達夫, 鶴ヶ崎和博, 澤田豊, 角田紘子: 津波力を受ける捨石マウンドー海底地盤の透水現象に着目した海岸構造物の安定性, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 67, No. 1, pp. 133-144, 2011.
- 4) 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.
- 5) Lucy, L. B.: A numerical approach to the testing of the fission hypothesis *Astronomical Journal*, Vol.82, pp.1013-1024, 1977.
- 6) Gingold, R. A. and Monaghan, J. J.: Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and application to non-spherical stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181, pp. 375-389, 1977.
- 7) F. Zhang, B. Ye, Noda, T., Nakano, M. and Nakai, N.: Explanation of cyclic mobility of soils: Approach by stress-induced anisotropy, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.4, pp. 635-648, 2007.
- 8) (社) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上)・(下), 2007.
- 9) 関口秀雄: 漂砂流砂系における地形変化災害ーとくに海岸侵食研究の展望, 京都大学防災研究年報, 第 53 号 A, 2010.