

地盤－流体の連成作用の見直しの必要性と地震－津波の複合作用に対する沿岸構造物の減災性能評価に関する考察

浸透破壊 津波 液状化 複合災害 越流 三相

名古屋工業大学大学院 学 今瀬 達也
 名古屋工業大学高度防災センター 国 前田 健一
 名古屋工業大学高度防災センター 国 張 鋒
 名古屋工業大学大学院 学 伊藤 嘉

1. はじめに

2011年3月11日、我が国では近代観測史上最大となるマグニチュード (Mw) 9.0の地震が発生した。さらに、その地震にともない北海道から千葉県の広域に渡る太平洋沿岸域に大津波が来襲した。津波がひとたび発生すると被害は長期化し、我が国の経済や産業に与える影響が極めて大きいことを認識するに至った。特に、海岸域では、津波により海岸構造物に甚大な被害が発生し、現在も、津波により被災した構造物は機能喪失や低下により、波浪や高潮等に対しても防御能力の著しい低下が危惧される。そのため、被災地のいち早い復興・復旧計画を遂行するためにも、まず海岸域の早期復旧が急がれる。また、今後津波の発生が想定されている東海・東南海・南海の三連動地震に対しても、今回の震災を教訓に、被害を最小限に抑える対策を講じる必要がある。そのためには、まず津波による海岸構造物の破壊メカニズムを解明することが必要である。さらに、津波のみでなく、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に対しても対策を検討する必要がある。

そこで、本研究ではこれまでに防波堤を対象とした耐津波について浸透問題や支持力破壊等の地盤工学的問題について検討してきた内容¹⁾³⁾を踏まえて、さらに以下の点について、検討を進める必要があると考える。

- 1) 海岸構造物に対する現行の設計を援用した検討の提案
- 2) 海岸構造物の津波外力に対する検討
- 3) 海岸構造物の地震－津波による多重外力に対する検討
- 4) 今後考慮すべき、流体－地盤の連成作用の新しい課題

そこで、本稿では上記について考察した内容を順序立てて報告する。

2. 複合災害を考慮した沿岸構造物の性能評価へのアプローチ

今後発生しうる地震、または、それに伴う津波に対する構造物の安定性を検討する上で、作用する外力の設定、対象とする地盤－構造系の境界条件や応答を記述するモデリングが必要である。

まず、作用する外力について、津波工学では地震と津波のエネルギーの関連性はIidaの式⁴⁾などで示されている。

$$m = 2.61M - 18.44 \quad (1)$$

ここに、 m ：津波マグニチュード、 M ：地震マグニチュードである。地震マグニチュードと津波マグニチュードの関連性から想定される被害形態をA~Dの4つに分類する(図-1)。この被害形態を外力の発生源としての地震マ

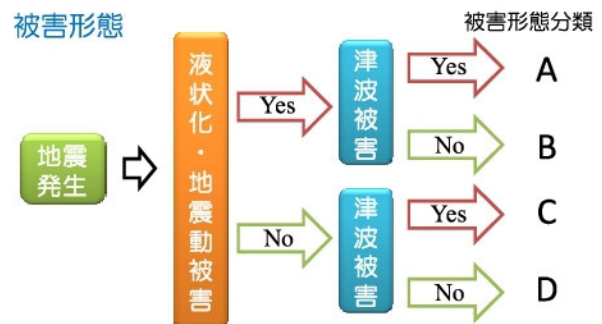


図-1 地震・津波を受ける際の被害分類

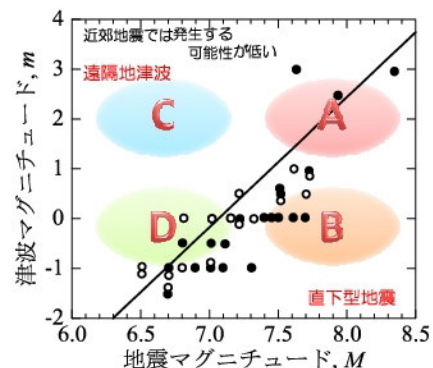


図-2 地震マグニチュードと津波マグニチュードの関係 (Iida⁴⁾ に加筆) (実線は式(1), ドットは事例)

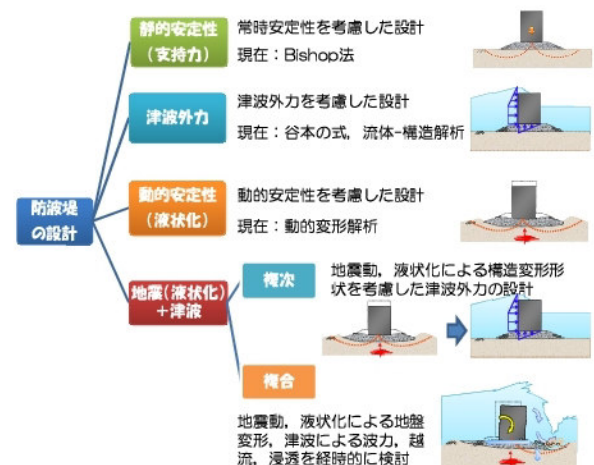


図-3 防波堤構造物を対象とした現行設計を援用した検討方法の提案

グニチュードと津波マグニチュードとの関係図に重ねて記入してみると図-2のようになる。ここで、Cは地震力が小さく、津波力が大きいことから遠隔地津波を想定する。Bは地震力が大きく、津波力が小さいので直下型地震を

想定することができる。一方で、AとDに関してはIidaの式に対し相間性があることから、地震-津波の連動の外力の想定が必要となる。

つぎに、防波堤構造物を例に、構造物の性能評価に関する方法として、現行設計を援用した検討方法を整理してみた(図-3)。設計条件で分類し、常時安定性、津波外力による安定性、動的载荷による安定性、地震+津波の複合作用による安定性について評価する。ここでは、地震+津波について、「複次」と「複合」という観点に分けて考えている(茨城大・安原先生の提案を引用)。ここで、「複次」とは、従来と同様に動的判定を行い、地震動・液状化による構造変形を考慮した形状に、津波外力を作用させて安定性を検証するものである。「複合」とは地震動・液状化によって損傷した地盤に津波の波力・越流・浸透の作用を連続的に検討するものである。

3. 津波越流による衝撃力による地盤の不安定化

3.1 解析手法

本研究では、津波解析に粒子法のひとつであるSPH法を用いる。SPH法とは、物理量を有して運動する粒子素片(半径 h)を格子としたLagrange的手法である。注目する粒子素片の中心 \mathbf{x} (位置ベクトル)における物理量 $f(\mathbf{x})$ は、影響範囲内にある粒子素片 \mathbf{x}' の物理量 $f(\mathbf{x}')$ を平滑化関数 W により内挿して計算する。

$$\langle f(\mathbf{x}) \rangle = \int f(\mathbf{x}') W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) d\mathbf{x}' \quad (1)$$

ここで、式(1)について有限個(総数 N 個)の粒子素片に離散化するため、次式のように近似式を考える。

$$f_i = \langle f_i \rangle = \sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j}{\rho_j} W_{ij}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h) \quad (2)$$

ここに、評価する素片粒子 i の位置ベクトル、質量、密度を \mathbf{x}_i 、 m_i 、 ρ_i とし、近接する素片粒子を j とした。また、平滑化関数 W は半径 $2h$ の領域内での積分値が1であり、本解析では3次のスプライン関数を用いた。

3.2 検討断面

解析対象をケーソン式防波堤、捨石マウンド、海底地盤からなる混成堤とした。解析断面の全断面を図-4(a)、混成堤モデルと間隙水圧の計測箇所および支持力に対する安全性を検証するために用いた円弧滑り線を示したものを図-4(b)に示す。津波はダムブレイク形式による段波津波を発生させた。また、初期の水位差 $\Delta h=0.96$ 、6.40mの2パターンとし、越流量の有無による比較を行った。

3.3 解析結果

a) 越流による衝撃圧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。越流時の海底地盤内の動水勾配を図-2に示す。ここで、正值は上向きを意味している。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のに比べて、越

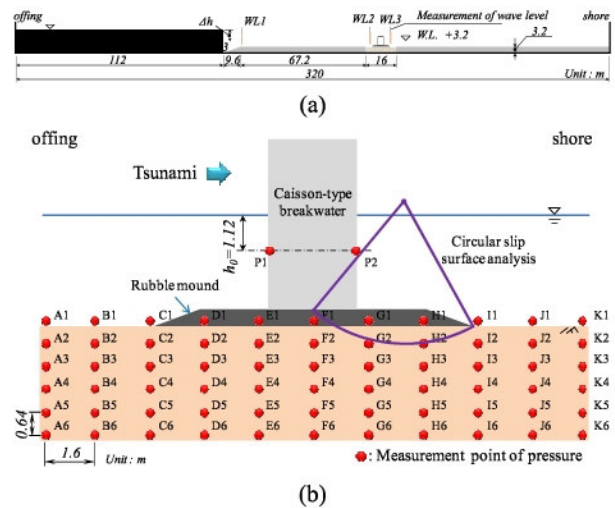


図-4 港湾における津波流動場のモデル化；(a)全領域断面，(b)混成堤断面と圧力抽出箇所および円弧すべり線

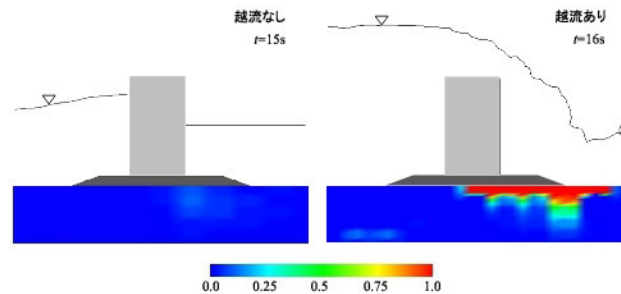


図-5 越流時における防波堤背後地盤内の鉛直動水勾配分布(左:越流なし，右:越流あり)

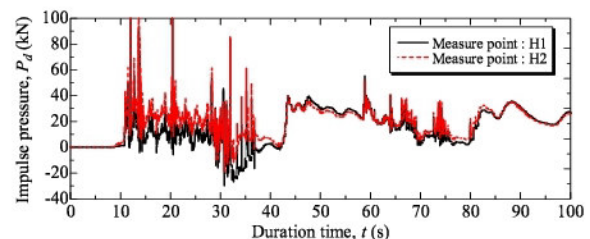


図-6 越流水塊が防波堤背後地盤に与える衝撃力

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まで上昇することがわかる。このことから、越流により地盤が不安定な状態になると考える。また、越流水塊が地盤表層に与える衝撃圧をみると(図-6)、地盤表面(抽出箇所:H1)とG.L.-0.48m付近(抽出箇所:H2)の比較では、地盤内部の圧力増分が高く、表面の変動に付随できていないことがわかる。今後は、この衝撃力の影響を評価する必要がある。

c) 支持力破壊の検討

次に、支持力破壊について検討する。図-7(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、(b)に防波堤の支持力に対する余裕度を示す。ここで、余裕度とは滑動変形に対する支持力強度から津波外力を引

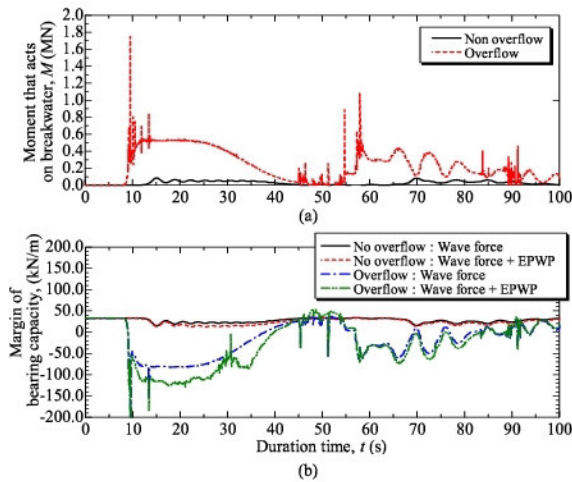


図-7 支持力破壊に対する安定性；(a)津波圧による単位奥行当りのモーメント；(b)防波堤の支持力に対する余裕度

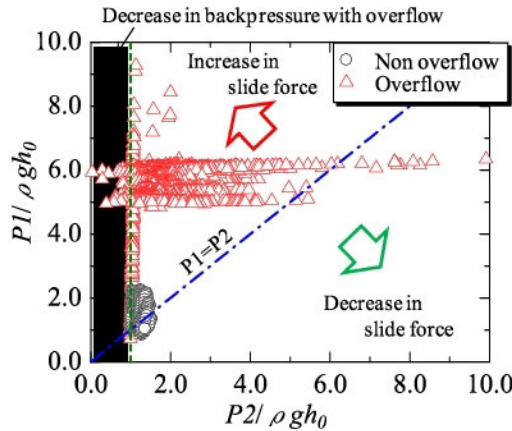


図-8 防波堤前面(P1)と背面(P2)の作用波圧における静水圧比

いたものである。支持力強度に関しては、地盤スライス内の過剰間隙水圧の上昇を考慮した計算も行った。越流なしの場合は、津波外力に対して安全側にあるが、越流する際は支持力が著しく低下する。この要因としては、津波外力が大きいことに起因するが、越流時の地盤劣化を考慮した場合（図-4(b)中の二点鎖線）は、津波外力のみに比べてさらに余裕度が低下しており、地盤の不安定化を十分に考慮する必要があると考えられる。

d) 越流による防波堤背後の水圧低下を考慮した防波堤の滑動に対する検討

越流により防波堤背後で水圧低下が発生し、防波堤の滑動に対する安全率が低下することが指摘されている。本ケースにおいてもその検討を行った。図-8に防波堤前面と背面の作用波圧における静水圧比を示している。図内の一点鎖線は $P1=P2$ を意味しており、滑動力が発生しないことを意味している。この結果から、越流する場合においては防波堤前面に津波波圧が作用しているにもかかわらず、背面では静水圧以下に低下することがわかる。一方で、越流しない場合では、背面水圧が低下することはない。今後は、越流による防波堤背後の水圧低下を及

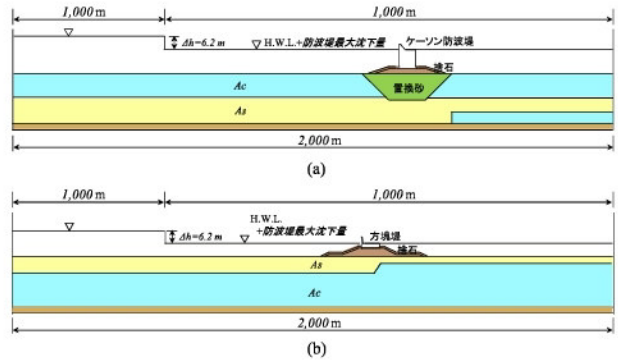


図-9 港湾における地震-津波の複合災害検証；(a)床掘り・置換工法による混成堤モデル，(b)厚い堆積粘土上に設置された方塊堤モデル

表-1 材料パラメータ（弾塑性材料）

Parameters		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 ($p^*=98\text{kPa}$ 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	$1/R_0$	2.500	1.500
Initial anisotropy	ζ_0	0.000	0.000
Coefficient of permeability [m/s]	k	1.000E-04	1.000E-04

表-2 材料パラメータ（弾性体材料）

Parameters		Breakwater	Rubble mound
Young's modulus [kPa]	E	2.500E+05	2.500E+05
Poisson's ratio	ν	0.200	0.200
Density [t/m^3]	ρ	2.000	2.000
(under water) [t/m^3]	-	1.000	1.000
Coefficient of permeability [m/s]	k	-	1.000E-04

ぼす要因（越流水塊による背後の水位低下や渦等）を定量的に評価し、防波堤の滑動に与える影響を考察する。

4. 地震-津波の複合災害による海岸構造物の不安定化

東日本大震災では、海溝型地震の特徴と言える長周期成分を含み、長い継続時間の地震動が発生した。この地震動によって各地で液状化などにより被害が多発した。

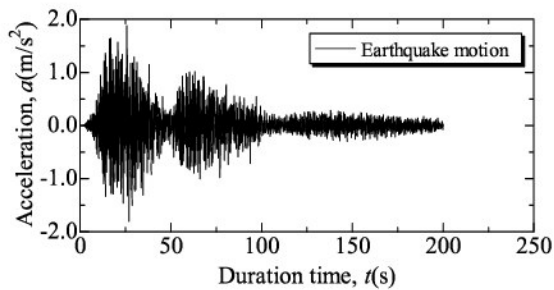


図-10 入力地震波形

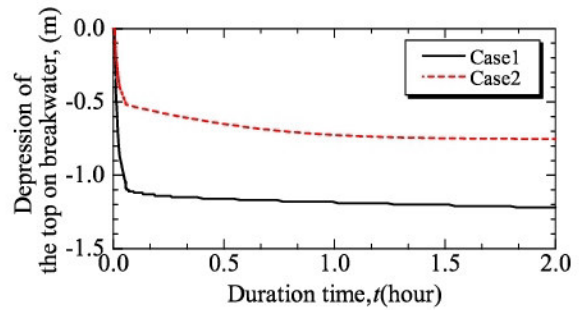


図-12 防波堤天端における沈下量

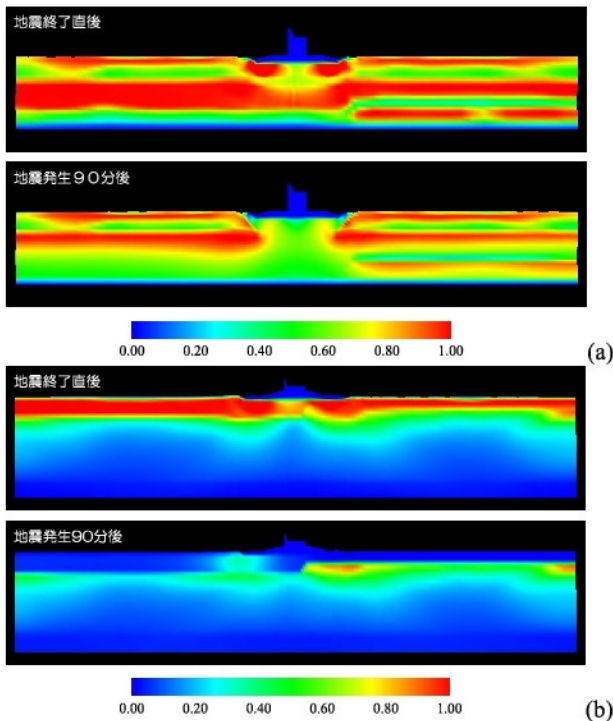


図-11 地震終了直後および地震発生90分後の過剰間隙水圧比変化；(a)Case1, (b)Case2

海岸構造物においても、地震動を受けて液状化により劣化した構造物に、津波が来襲し被害が拡大した事例が挙げられている。そこで、本研究においても地震-津波による海岸構造物の複合災害のメカニズムを検証する。

4.1 動的解析

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」⁵⁾を用いる。Cyclic mobility modelは土の力学挙動に大きな影響を与える土の密度や過圧密比、自然堆積過程に形成された構造、および各種応力履歴を受けることで発生した土の応力誘導異方性を一つのモデルでパラメータを変えことなく表現することを目的に開発された構成式である。解析断面に、我が国において多く存在する床掘り・置換工法；Case1 (図-9(a))と粘土層の上部に砂層が堆積している；Case2 (図-9(b))を有する防波堤を用いた。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。また、水理条件は、下面

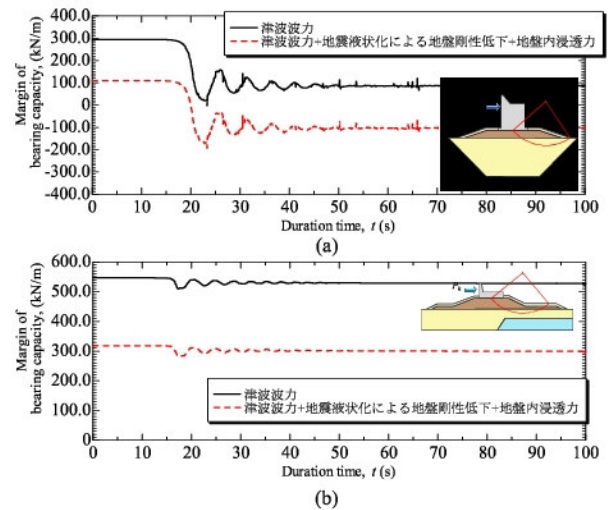


図-13 支持力破壊に対する安定性；(a)Case1, (b)Case2

および側面は非排水境界、上面は排水境界とした。解析パラメータは、As層を緩い砂層、Ac層を緩い粘土層と想定し、過去に実施された豊浦砂および藤の森粘土の解析を参照に決定した(表-1)。基盤層であるDs層は、非常に硬い弾性体材料(弾性係数 $E=100\text{MPa}$)と仮定した。また、防波堤および捨石マウンドについても弾性体材料とし、表-2に示すパラメータを設定した。入力地震動は、岐阜大・杉戸先生より提供頂いた想定される海溝型地震動の波形を用いた(図-10)。

4.2 動的解析による結果

a) 過剰間隙水圧比

図-11(a)にCase1, 図-11(b)に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。

Case1では、地震終了後に砂層では非常に高い数値を示しており、不安定な状態にあると考える。特に、置換砂における防波堤・捨石マウンドの上乗荷重が少ない箇所では過剰間隙水圧比が高く、これにより捨石マウンドや防波堤の沈下が大きく発生する要因となると考える。地震発生後90分後では、砂層で発生した過剰間隙水圧が粘土層などに消散していくが、いずれも高い値の状態が続くことがわかる。

Case2においても、地震終了直後では砂層において過剰間隙水圧比が高いことがわかる。しかし、砂層が上昇部にあることから、過剰間隙水圧の消散が速く、地震発生90分後にはもとの状態まで落ち着いている。ただし、防

波堤直下の段差境界となっている粘土層では過剰間隙水圧が消散できず、過剰間隙水圧比が高い状態が続く。

b) 防波堤上端に沈下量

図-12にCase1およびCase2の防波堤天端における沈下量の経時変化を示す。地震発生2時間後に沈下量はCase1で1.2m程度、Case2で-0.75m程度となり、沈下量が非常に大きいことがわかる。防波堤の沈下が大きいと津波が越流し、湾内への津波浸入を許すため、慎重な検討が必要となる。

4.3 地震後の津波来襲に伴う支持力低下

a) 津波外力の設定

地震により被害を受けたのちの津波を想定した防波堤の安定性について検証した。地震による被害を再現するため、初期水位をH.W.Lに防波堤天端の沈下量を加えて設定した。津波外力は沖に水位差を設け、ダムブレイク形式により沖合入射波高が3.0mとなるように与えた。

b) 支持力破壊に関する検討

図-13(a)にCase1, (b)にCase2の支持力に対する余裕度を示す。両図とも黒実線は波力のみを考慮した場合、赤点線は波力、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。どちらもケースにおいても、地盤の不安定化を考慮すると余裕度が著しく低下することがわかる。特に、Case1では防波堤の津波力が作用する面積が大きいと津波外力を受けやすく、さらに地盤の弱体化に伴い余裕度がマイナスとなり、支持力破壊する危険性が高いことがわかった。

5. 3相系を考慮した流体-地盤の連成作用：新たな課題

5.1 実験概要

流体作用による地盤洗掘メカニズムを定量的に評価する目的で、水平移動流が作用する地盤の洗掘実験（実験Ⅰ）および越流作用による地盤洗掘実験（実験Ⅱ）を行った。実験では、長さ2.0m×幅0.3m×高さ0.3mの亚克力水路を用いた(図-14(a))。地盤内部の間隙水圧を計測するために、間隙水圧計を設置した(図-14(b), (c))。流体挙動は、ポンプを用いて水路内に循環流を形成し、定常流を再現した。地盤には豊浦砂および礫材($D_{50}=4.73\text{mm}$)を用い、地盤の相対密度(D_r)・飽和度(S_r)を変化させて考察した。流体の流入条件についてはすべて同一とし、フルード則を満足するよう相似則を考慮した。

5.2 水平移動流が作用する地盤の洗掘実験の結果

a) 掃流力 τ^* の算出

掃流力 τ^* および限界掃流力 τ^*_c を評価するため、ピトー管を用いて測定した断面鉛直流速分布をもとに掃流力を算出し、岩垣の式⁶⁾により得られる限界掃流力と比較した。豊浦砂については、 $\tau^*=1.03>\tau^*_c=0.30$ となり、掃流力により洗掘発生する条件であることを確認した。礫材については、 $\tau^*=0.0025>\tau^*_c=0.05$ となり、洗掘が発生しなかった。以降、豊浦砂を用いた実験のみについて述べる。

b) 洗掘の様子

飽和地盤について、相対密度 $D_r=40\%$ および 70% の時の実験の様子を図-15に示す。洗掘量による違いは大きく見

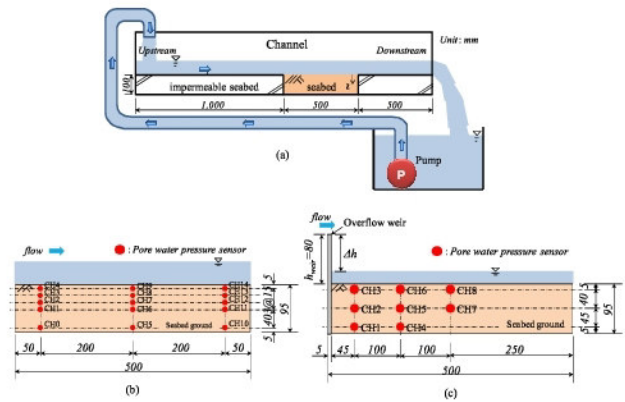


図-14 実験装置概略図；(a)全体，間隙水圧の設置；(b) 実験Ⅰ，(c) 実験Ⅱ

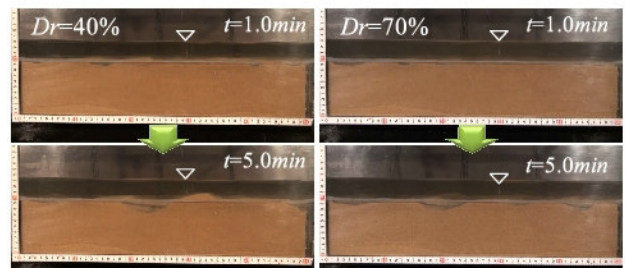


図-15 実験Ⅰにおける飽和地盤の洗掘

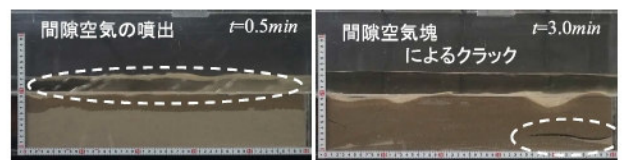


図-16 実験Ⅰにおける不飽和地盤の洗掘

られないが、下流方向への洗掘速度は $D_r=40\%$ の方が速いことを確認している。一方、不飽和地盤では、地盤内への浸透水と間隙空気が置換され、地盤表層では空気塊が噴出し、洗掘の突発的発生と拡大が起きた(図-16)。

c) 地盤内部の応力変化

図-17(a)に $D_r=40\%$ 、(b)に $D_r=70\%$ における間隙水圧計(図-14(b))により計測した水圧増分を示す。地盤に流体力が作用すると、 $D_r=40\%$ 、 70% ともに地盤表層部に水深上昇以上の過剰間隙水圧が発生した。地盤表層に過剰間隙水圧が発生する $D_r=70\%$ に比べ、 $D_r=40\%$ では土槽中央付近($z=35\text{mm}$)まで過剰間隙水圧の発生が見られる。このような過剰間隙水圧の発生が洗掘現象の進行を促進させるひとつの要因ではないかと考える。

5.3 越流力が作用する堆積地盤の洗掘現象

a) 洗掘の様子

本実験では、図-14(a)で示した実験装置に越流堰を設け、越流による堰背後地盤の洗掘現象について観察した。実験では、地盤の条件および越流堰前面と背後の初期水位差(Δh)を変化させて、その影響を考察した。実験の一例として地盤条件を変化させた $\Delta h=60\text{mm}$ における洗掘の様子を図-18に示す。図に示す通り、相対密度による洗掘深の変化はなく、豊浦砂と礫材の粒径による違いが見られた。そこで、以下粒径による比較を行う。

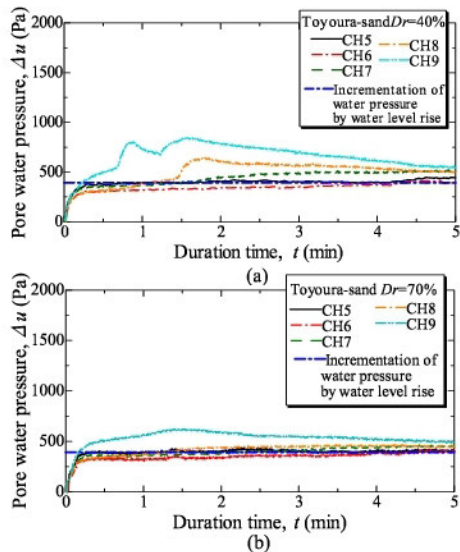


図-17 水平移動流に伴う水圧変動（実験Ⅰ）；a)Dr=40%、(b)Dr=70%

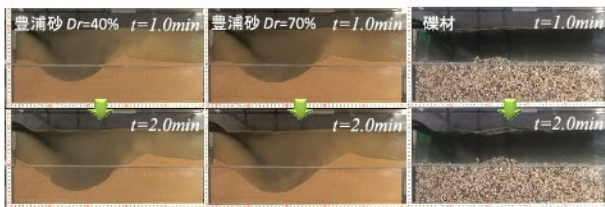


図-18 実験Ⅱにおける越流による洗掘現象の様子

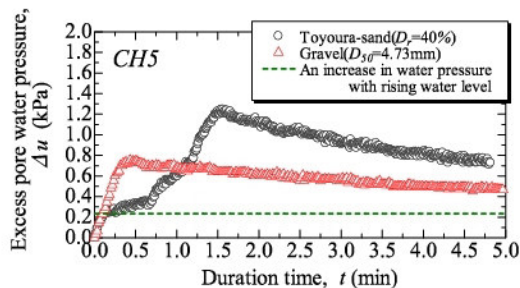


図-19 越流にともなう地盤内の水圧変動（実験Ⅱ）

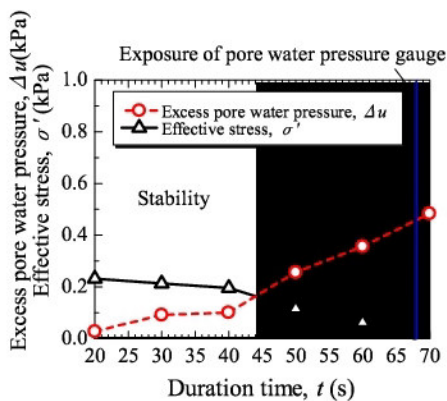


図-20 豊浦砂 (Dr=40%) における有効土被り圧と過剰間隙水圧の変化（実験Ⅱ）

b) 地盤内の応力変化

図-19に地盤内に設置した間隙水圧計CH5（図-14(c)）

による水圧変化を示す。礫材を用いた場合は、実験開始から水圧の上昇が確認できる。これは、土槽内に設置したものの水圧計においても同程度の上昇が発生した。一方で、豊浦砂を用いた場合は、実験初期では越流に伴う水面上昇分の圧力増加が発生し、さらに洗掘が進行するにつれて過剰間隙水圧が発生した。そこで、過剰間隙水圧が地盤に与える影響を調べるため、洗掘変化する地盤の土被り圧と過剰間隙水圧を比較した（図-20）。その結果、計測器が露出（68秒付近）する以前（44秒後）に過剰間隙水圧が土被り圧を上回ることがわかった。このことから、越流による衝撃力により地盤では内部で過剰間隙水圧が発生し、液状化に似た不安定な状態となり、土砂移動を助長させるのではないかと考える。

6. 結言

地震－津波災害において、地盤の液状化現象の発生と津波の浸透作用が複合化させることがわかった。また、現行では見逃している流体－地盤の連成現象の存在の可能性（流体の衝撃力、渦など）を示すとともに、これを適切な作用力として記述する必要があることがわかった。

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と基盤研究(B)21360222の助成を受けたものであり、ここに記して謝意を表す。地震波形について、岐阜大学杉戸教授よりご提供頂いたものである。また、本研究は東洋建設(株)鳴尾研究所（三宅達夫所長）との共同研究で得られた研究成果を用いている。性能評価に関しては、地盤工学会「地盤構造物耐津波化研究委員会」の活動の一環と遂行したものである。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 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: 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.
- 4) Iida, k.: Magnitude and energy of earthquakes accompanied by tsunami, and tsunami energy. *J. Earth Sci., Nagoya Univ.*, 4:101-112, 1958.
- 5) 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.
- 6) 岩垣雄一: 限界掃流力に関する基礎的研究(Ⅰ)限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第41号, pp.1-21, 1956.