

遠心模型実験及び SPH 法による

津波が作用する海岸構造物の被害予測技術開発

Development of Estimation Method for Marine Structure Damage due to Tsunami
Using Centrifuge Model Test and the SPH Method

今 瀬 達 也 (いませ たつや)

名古屋工業大学大学院 工学研究科 博士後期課程

三 宅 達 夫 (みやけ みちお)

東洋建設㈱総合技術研究所 所長

角 田 紘 子 (すみだ ひろこ)

東洋建設㈱鳴尾研究所

前 田 健 一 (まえだ けんいち)

名古屋工業大学准教授 都市社会工学科

澤 田 豊 (さわだ ゆたか)

東洋建設㈱鳴尾研究所 研究員

鶴ヶ崎 和 博 (つるがさき かずひろ)

東洋建設㈱鳴尾研究所 室長

1. はじめに

2011年3月11日14時46分、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、その地震に伴い北海道から千葉県の広域にわたる太平洋沿岸域に大津波が来襲した。特に岩手県、宮城県、福島県、茨城県では甚大な被害が発生した。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思い知らされた。今後も東海・東南海・南海の三連動地震によって地震とともに大津波が発生すると予想されており、被害を最小限に抑える対策が急務である。

ハード対策として、湾内への津波侵入を抑制するために建設された津波防波堤や海岸線沿いに設置され陸上に浸入する津波を抑制するための防潮堤は、東日本大震災時において減災効果が発揮されたが、何度も迫りくる押し波や引き波に対して堅固でかつ粘り強く構造を維持させなければいけないという課題を残した。しかしながら、被災地の現地踏査や調査などでは、どのようなメカニズムで被害が発生したのかが憶測に過ぎないため、明確な被災メカニズムを知ることが難しい。そのため、今後の効率的な耐津波対策を検討するための情報が乏しい。

そこで、本研究では津波による海岸構造物の被害予測を行うことを目的とし、模型実験及び数値解析による被災メカニズムの解明を試みた。模型実験では、土の重力効果による応力～ひずみ～強度関係を十分反映できない重力場 (1g) の実験ではなく、流体-地盤-構造物の挙動において相似則が満たされる遠心力場での実験を実施した。数値解析では、複雑な水の流れと地盤の相互作用や地盤の破壊・大変形を解くため、粒子法による連続体解析手法の一つである SPH 法を用い、土・水・構造物連成解析手法の開発を行った。本稿では、現在までに得られた研究成果について報告する。

2. 遠心力場における津波実験

2.1 実験概要

(1) 実験装置概要

本研究ではドラム型遠心力载荷装置 (東洋建設㈱ 鳴尾研究所 所有) を用い、波浪・構造物・地盤の力学的相互作用を示す SOWAS コンセプトに則り、高性能な津波災害予測が可能な実験手法を開発した¹⁾。ドラム型遠心力载荷装置とは、一般に知られているビーム型とは異なり、実験領域が円筒型水槽 (図-1 (a)) となっている。よって、遠心力载荷時には重力場換算で広領域場が再現できることとなる。本実験では、ダムブレイク方式により津波力を再現するため、実験領域の半分を貯水エリア、もう半分を海岸構造物等をモデル化した模型を設置する模型エリアとした。ダムブレイクの発生は開閉可能なシャッターゲートを設置することで実現している。

(2) 実験方法

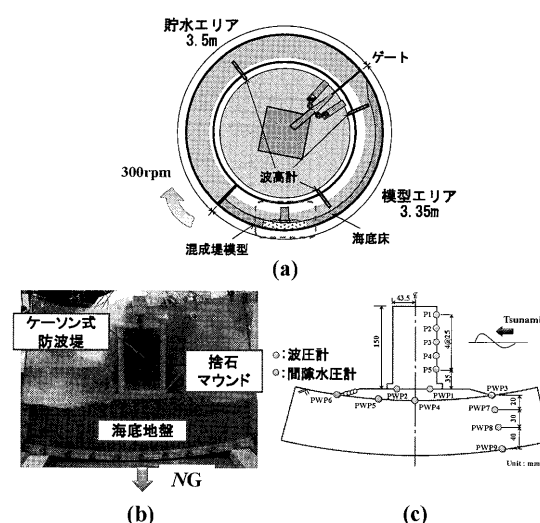


図-1 実験装置概要：(a)実験水槽平面図；(b)混成堤模型；(c)計測器配置図 (P：圧力計，PWP：間隙水圧計)

実験では、先述したように、貯水エリアと模型エリアをシャッターゲートで仕切り、ゲートを介して水位差を設ける。そして、所定の遠心加速度に達するまで装置の回転数を上昇させ、幾何学的・力学的相似則を満足させた遠心力場を再現したのち、ゲートを急開することで段波津波を発生させる。そして、その津波力が構造物や地盤に作用する際の現象について考察する。実験時には、装置内に設置した波高計、防波堤に設置した波圧計、地盤内に設置した間隙水圧計により計測を行っている。さらに、実験容器の可視化窓部から高速度カメラ（500コマ/秒）により現象を撮影し、PIV（粒子画像速度測定法）により画像解析を行っている。

2.2 実験例(1) ケーソン式混成堤の被災—

(1) 実験条件

遠心加速度 $32g$ のもと実験を実施した。海底地盤には豊浦砂を用い、遠心力場における透水時間の相似則を満足させるため粘性流体により飽和させた。また、変形が容易に発生するよう、相対密度 $D_r=40\%$ の緩詰めとなるよう仕上げた。地盤上に中間粒径 $d_{50}=2.9\text{ mm}$ の礫を $h=20\text{ mm}$ で敷設し、捨石マウンドを形成した。その上に重量調節（重力場で1函あたり約 2737 kg ）したアルミ製ケーソン模型を設置し、混成堤を再現した（図-1 (b)）。水槽内の水位は、実験エリア内が $h=100\text{ mm}$ 、貯水エリア内が $h=160\text{ mm}$ とし、初期水位差 $\Delta h=60\text{ mm}$ とした。

(2) 実験結果

本ケースでは、入射波高 $a_1=0.7\text{ m}$ 、最大重複波高 2.5 m の津波が来襲したものである。津波力について、防波堤に作用した波圧と津波算定式としてよく用いられている谷本らの式²⁾を比較し、概ね再現性があることを確認した（図-2）。

写真-1に津波が来襲した際の混成堤周辺の様子を示す。津波を受けたケーソンは滑動し、それに連動して捨石マウンドや海底地盤ではせん断変形が発生することがわかった。さらに、捨石や砂の噴出が確認された。

発生したせん断変形について、定量的に評価するためPIVを用いてせん断ひずみを算定した。せん断発生面の境界がケーソン中央から捨石マウンド法先にかけて発生していることがわかった（図-3）。支持力低下による変形が示唆されたため、波力の影響を考慮した簡易ビショップ法を用いて支持力の低下を評価した。その結果、耐力以下となることがわかった。

次に、捨石や砂の噴出現象について考察した。地盤内の間隙水圧計と防波堤底面の圧力計をもとに動水勾配を算出した（図-4）。動水勾配は過剰間隙水圧から圧力水頭を求め、計測器間距離で除して求めた。この結果、噴出が確認された付近では動水勾配が上昇し、津波力が作用する間、動水勾配が上昇した状態が続くことがわかった。比較指標として鉛直上向き1次元流れの限界動水勾配 $i_{cr}=0.89$ と比べると、地盤内では浸透力の影響により不安定な状態にあると考える。しかし、今後はより詳細な検討として、海底地盤表層を移動する流体によ

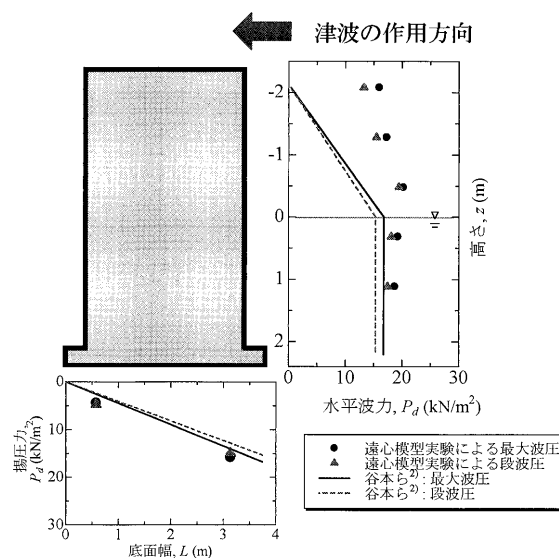


図-2 防波堤に作用した波圧分布

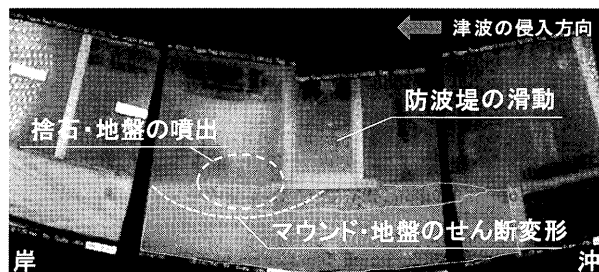


写真-1 遠心実験における津波来襲時の混成堤周辺の様子

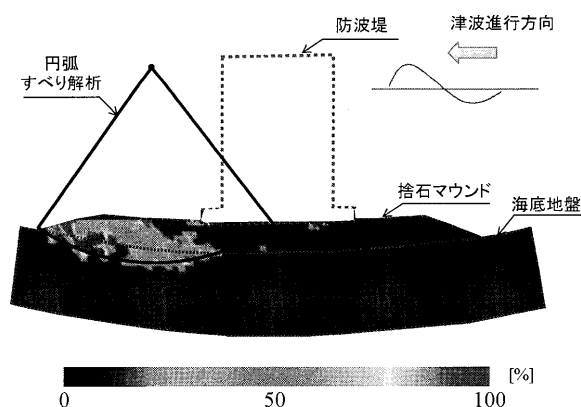


図-3 地盤・捨石マウンドに発生したせん断ひずみ分布と円弧すべり線の決定

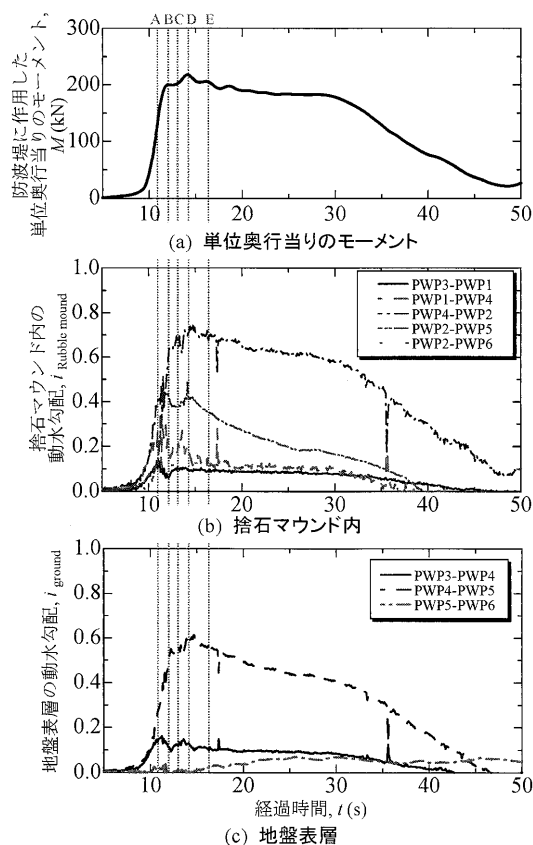
る掃流力の影響と地盤層内部の間隙水圧増加による地盤の不安定化の両視点から現象を考察する。

2.3 実験例(2) 一直立護岸背後の地盤洗掘—^{3),4)}

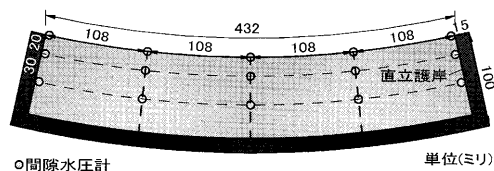
(1) 実験条件

遠心加速度 $50g$ のもと実験を実施した。通常、遠心力場において砂地盤の変形問題を扱う場合、実物と同じ地盤材料を用い、間隙水圧消散の時間を合わせるため粘性流体を使用する。しかし、本実験では、実地盤粒径（平均粒径 0.65 mm ）の $1/N$ （ N は模型縮尺比）の粒径砂（以下、極微細砂という。）を水で飽和させることで、移動と沈降に関する相似則と間隙水圧の消散に関する時

報 告



図—4 津波浸透による海底地盤、捨石マウンドへの影響：(a)防波堤に作用した単位奥行当たりのモーメント；(b)捨石内の動水勾配変化；(c)地盤表層の動水勾配変化

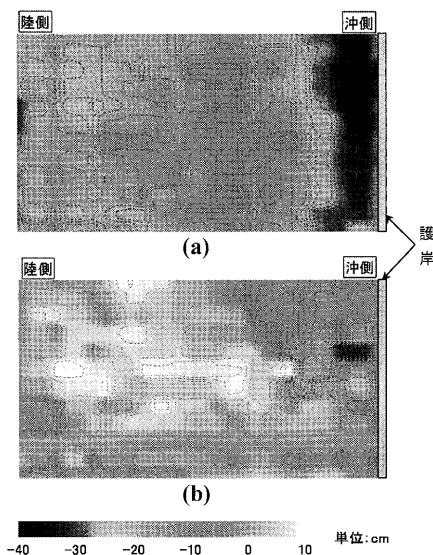


図—5 直立護岸及び背後地盤のモデル概要図

間相似則の両方を考慮して、実験を実施した。図-5に実験時に用いた直立護岸及び背後地盤のモデル概要図を示す。背後地盤内には、間隙水圧計を設置した。地盤条件は、水で飽和させた極微細砂と粘性流体で飽和させた実地盤粒径砂を用いて、現象の比較を行った。水理条件は、初期水位差 $\Delta h = 60 \text{ mm}$ とし、押し波および引き波による洗掘への影響について観察した。

(2) 実験結果

図-6に極微細砂を用いた際の実験前後で測定した地表面高さの変化量を示す。押し波が作用した際(図-6(a))は護岸背面近傍の地盤が大きく洗掘され、引き波時(図-6(b))には護岸背後で砂の噴出、さらに土塊として浮き上がり、移動する現象が目視による観察で確認された。文献4)に掲載した間隙水圧の応答では地盤内部における間隙水圧の消散が遅れ、過剰間隙水圧の上昇により地盤が不安定な状態にあることがわかった。しかし、実地盤粒径砂を用いた場合では、移動量が極めて小さく、また、過剰間隙水圧は上昇するものの消散が比



図—6 護岸背後地盤の洗掘深：(a)押し波による地表面の変化；(b)引き波による地表面の変化

較的速いため、影響を考慮するまでに至らなかった。

3. SPH 法による津波一構造物-地盤連成解析^{5),6)}

3.1 SPH 法の概要

(1) SPH 法とは

近年、混相流問題や大変形問題への適用として、粒子法が注目され、地盤工学においても普及し始めている。本研究で用いる SPH 法もその一つである。SPH 法は、宇宙物理分野から発達した手法で、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 により内挿する。

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

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、次式のように近似する。

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

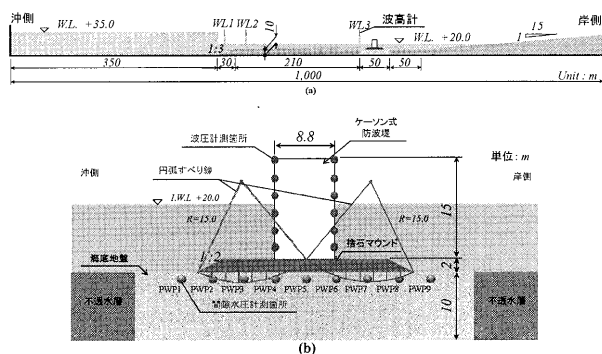
ここに、評価する素片粒子 i の位置ベクトル、質量、密度を $\mathbf{x}_i, m_i, \rho_i$ とし、近接する素片粒子を j とした。また、 W は半径 $2h$ の領域内での積分値が 1 であり、ここでは 3 次のスプライン関数を用いた。

(2) 固体（土）相と流体相の連成

SPH 法において土-流体連成を表現するため、土からなる固体相と、水及び空気からなる流体相に分け、各々について計算し、それらを重ね合わせることで連成問題を解く。重ね合わせは、ダルシー則が成立すると仮定したうえで、両相間に間隙率 n と透水係数 k を考慮した物体力を作用させる。この物体力は、両相の速度差に比例した摩擦力に起因する力と考え、定義した⁵⁾。

3.2 解析例 —ケーソン式混成堤の被災—

(1) 解析条件



図一 7 港湾における津波流動場のモデル化：(a)全域図；(b)混成堤モデルの様子

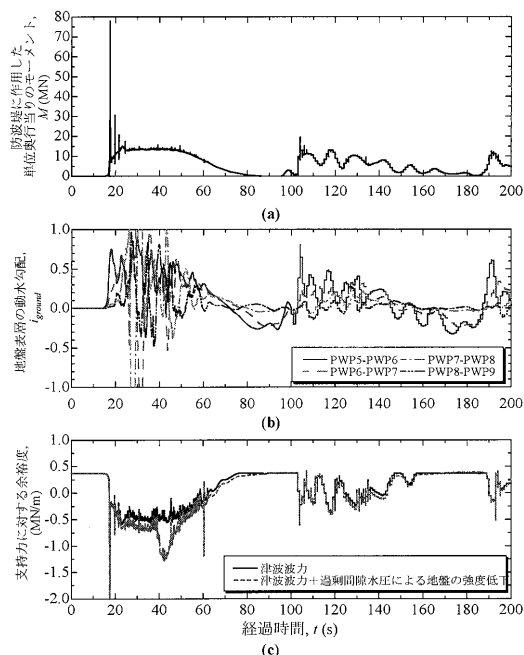
図一 7 (a)に示すような海岸モデルを用いて津波による海底地盤への影響について考察した。段波津波を発生させるため、沖に水位差+15 mの水塊を設置した。岸側は1/15勾配の傾斜を設けて陸域を模擬した。図一 7 (b)のPWPは地盤中の間隙水圧の計算点であり、各点間の動水勾配を算出した。捨石マウンド、海底地盤の透水係数はそれぞれ 1×10^{-2} m/s, 2×10^{-5} m/sとした。

(2) 解析結果

図一 8 に防波堤に沖側から作用する津波圧による単位奥行き当たりの総モーメント(a)、地盤岸側の動水勾配(b)、防波堤の支持力に対する余裕度(c)の経時変化を示す。円弧すべり線は、実験時に発生したすべり線を考慮し防波堤中央から捨石マウンドの法先にかけて引いた。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いたものである。支持力強度に関しては、地盤内の過剰間隙水圧の上昇に伴う地盤強度低下を考慮した計算も行った(図一 8 (c)中の破線)。まず、防波堤に作用する初期の衝撃波圧によって、防波堤の余裕度が一気に低下した($t=18$ s付近)。この時点では、動水勾配については防波堤直下付近が上昇するが、岸側においては上昇が見られない。その後、長周期波の特有である持続波圧が作用する際に、防波堤直下中央から後方岸側において動水勾配が大きく変動する傾向を示した。また、上昇後も高い値が持続し、 $t=42$ s付近では過剰間隙水圧の上昇による地盤の不安定化を考慮した防波堤の余裕度が著しく低下する。この際、地盤内の浸透流の影響や防波堤を越流した津波による防波堤背後の乱流や渦等の流体挙動の影響が地盤中の過剰間隙水圧の上昇を招き、支持力低下が顕著となり、それが持続することで一層低下すると考える。今後は、各々の影響について評価する必要がある。

4. 今後の展望

遠心力場における津波実験及びSPH法による数値解析により、今まで解明が困難であった津波-地盤-構造物の相互作用に着目した津波被災メカニズムに新たな知見



図一 8 押し波による防波堤の安定性：(a)防波堤への作用波圧によるモーメント；(b)岸側地盤表層の動水勾配；(c)防波堤の支持力に対する余裕度（陸側円弧すべり）の経時変化

を得始めている。今後は、より詳細な検討を遂行し、津波減災技術の発展に貢献したいと考えている。

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る。ここに記して謝意を表す。

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) 谷本勝利・鶴谷広一・中野 晋：1983年日本海中部地震津波における津波力と埋立護岸の被害原因の検討，第31回海溝論文集，pp. 257～261，1984。
- 3) 三宅達夫・澤田 豊・角田紘子・鶴ヶ崎和博・前田健一・今瀬達也：遠心力場における津波による洗掘の相似則に関する一考察（その1），第46回地盤工学研究発表会講演要旨集，pp. 2011～2012，2011。
- 4) 三宅達夫・澤田 豊・角田紘子・鶴ヶ崎和博・前田健一・今瀬達也：遠心力場における津波による洗掘の相似則に関する一考察（その2），第46回地盤工学研究発表会講演要旨集，pp. 2013～2014，2011。
- 5) 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。
- 6) 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。

(原稿受理 2011.11.30)