

津波堆積物の粒度偏析メカニズムの解明に関する基礎的研究

片山 裕之¹・前田 勇司²・安野 浩一朗³・吉河 秀郎⁴・
阪口 秀⁵・西浦 泰介⁶

- ¹ 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 土木技術開発部(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: Hiroyuki.Katayama@mail.penta-ocean.co.jp
- ² 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 土木技術開発部(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: Yuuji.Maeda@mail.penta-ocean.co.jp
- ³ 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 土木技術開発部(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: Kouichirou.Anno@mail.penta-ocean.co.jp
- ⁴ 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 (〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25)
Email: s-yoshikawa@jamstec.go.jp
- ⁵ 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 (〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25)
Email: sakaguchih@jamstec.go.jp
- ⁶ 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 (〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25)
Email: nishiura@jamstec.go.jp

2011年度東北地方太平洋沖地震津波の際、海底の堆積物が陸上部の建屋内まで輸送され、建屋内上層階に行く程堆積した土砂の粒径が細かくなっていたという報告がある。津波による土砂輸送については地形変化や巻上げ量などに着目した研究は数多くあるものの、輸送中や堆積時の粒度分布に着目した報告は少ない。本研究では陸上建屋内に堆積した土砂の粒度偏析メカニズムの解明を目的に、水理模型実験を実施した。実験では輸送中の砂をプランクトンネットにより捕捉し、建屋を再現した模型により砂の堆積状況を把握した。その結果、細粒砂は巻上げ直後の濃度・粒度の鉛直分布が比較的長時間に渡り維持されたまま輸送されるものの、粗粒砂は乱れ場の中でも比較的早く沈降・堆積することがわかった。また、建屋に堆積した土砂の粒度偏析は、細粒分の含有量が階層にかかわらずほぼ一定であり、粗粒分の含有量が下層階になるほど多く含まれることに起因することが示唆された。この現象は遡上距離が短いほど顕著であり、併せて本実験条件では建屋前面に津波が到達した際の再浮上はほとんどないことがわかった。

Key Words : tsunami, sediment transport, hydraulic model experiment, particle size distribution

1. はじめに

沿岸域に來襲した津波は浸水や構造物倒壊、漂流物などの被害だけでなく、大規模な土砂移動を伴うことで海岸地形の変化、発電所の取放口の閉塞、港の機能障害など沿岸域の周辺環境に多大な影響を及ぼす恐れがある¹⁾。また、2011年度東北地方太平洋沖地震津波の際、海底の堆積物が陸上部の建屋内まで輸送され、建屋内上層階に行く程堆積した土砂の粒径が細かくなっていたという報告がある。これまで津波による地形変化に着目した研究は数多くみられるが²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾、津波による陸域までの土砂輸送過程における粒度の偏析過程に着目した報告は少ない。原田ら⁶⁾は移動砂の粒径と初期位置に着目した水理実験を実施し、砂の移動距離に関する検討を行うとともに粒径とくさび形の堆積形状の特徴を定量的に関連付けることで津波の流れの強さを津波堆積物より推定することが

可能であるとしている。しかし、堆積形状だけでなく、堆積物や輸送砂の空間的な粒度分布を検討する必要があると考えられる。高橋ら⁷⁾は、既往の津波の浮遊砂濃度分布モデルが定常流を想定し乱れによる砂粒の巻上げと沈降の平衡状態を仮定していることを指摘し、水理実験から検討を行っている。その結果を用い輸送中の砂の鉛直濃度分布と平衡濃度分布モデルの比較を行っているものの、単一砂による実験であることや実験ケース、計測数などが十分とはいえない。

津波による遡上域まで含めた地形変化を考えたとき、代表粒径による輸送過程や堆積形状の検討だけでなく、粒度分布を考慮することが重要である。本研究は、津波堆積物の輸送過程および堆積過程における粒度偏析メカニズムを解明することを目的とし、2次元断面水理模型実験により海底堆積物の陸上建屋までの輸送過程における空間的粒度分布について検討を行ったものである。

2. 水理模型実験

(1) 実験装置および模型

長さ 50 m × 幅 0.6 m × 高さ 1.2 m の 2 次元断面水路に 1/10 勾配の海底斜面と陸上部を模擬した模型を設置し、ダム破壊法により津波を造波した(図-1)。なお下流側の水路壁を取り除き、反射波の影響をなくしている。また、海底堆積物は斜面上に 60 mm の厚さで敷き均した。模型縮尺は約 1/20 とした。実験は以下の 2 種類を実施した。一つは輸送過程における土砂量及び粒度の鉛直分布を計測することを目的とした実験(以降、トラップ実験)であり、写真-1 に示すようにプランクトンネットを用いた 4 階層を有する模型を用いて輸送過程における砂を捕捉した。海岸線からの距離も考慮し、3 測線設定した。

もう一つは陸上建屋前面に津波が到達した際の乱れによる輸送された砂の再浮上を検討するための実験(以降、建屋実験)であり、写真-2 に示したように開口部は建屋前後のみで各階層間で流出入のない模型を設置し、建屋模型内に砂が堆積する機構とした。なお、建屋背面にはプランクトンネットを設置し、水のみ流出する構造とした。各実験における模型の設置位置を図-2 に示す。造波実験後、捕捉・堆積した砂の乾燥重量と粒度分布を計測した。

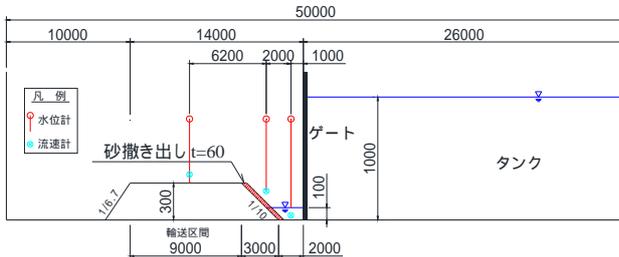


図-1 2次元水路概要(縦横比 10:1)



写真-1 トラップ模型

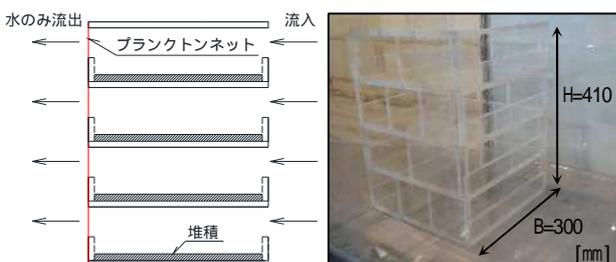


写真-2 陸上建屋模型

(2) 実験条件

造波津波条件は、敷き均した砂の巻上状況を試行錯誤し、最大浸水深約 35 cm、津波フロント部の流速約 250 cm/s(実スケール換算で浸水深約 7 m、流速約 11 m/s)の条件とした。図-3、図-4 にトラップ・建屋模型なしの進行津波の沖側、斜面部、測線 1 前面の水位と流速を示す(計測位置は図-1 参照)。水位、流速ともに $t=50$ s 前後において振動しているが、これは斜面で反射した津波が上流端において再反射しているためである。よって、進行波として扱うことができるのは $t=50$ s 程度までである。堆積物粒度による基礎的な輸送過程を見ることとし、津波は 1 種類、撒出し砂の種類とトラップ設置位置を変化させながら実験を実施した(表-1)。実験に使用した砂の粒径加積曲線を図-5 に示す。

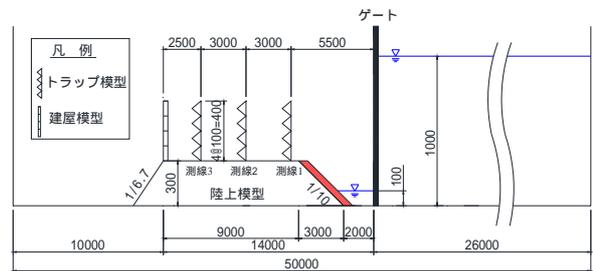


図-2 模型設置位置(縦横比 10:1)

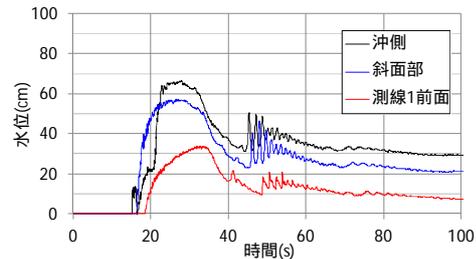


図-3 水位時系列

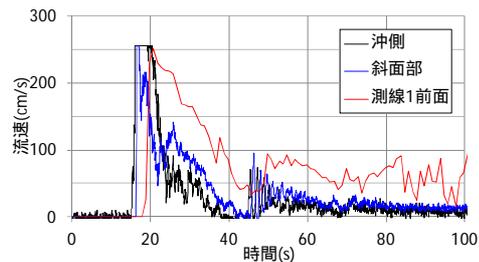


図-4 流速時系列

表-1 実験ケース

ケース	砂種類	トラップ実験/建屋実験	測線No.
case1-1	粗粒砂 ¹	トラップ実験	測線1
case1-2	粗粒砂	トラップ実験	測線2
case1-3	粗粒砂	トラップ実験	測線3
case1-4	粗粒砂	建屋実験	-
case2-1	細粒砂 ²	トラップ実験	測線1
case2-2	細粒砂	トラップ実験	測線2
case2-3	細粒砂	トラップ実験	測線3
case2-4	細粒砂	建屋実験	-
case3-1	7種混合砂 ³	トラップ実験	測線1
case3-2	7種混合砂	トラップ実験	測線2
case3-3	7種混合砂	トラップ実験	測線3
case3-4	7種混合砂	建屋実験	-

1 中央粒径0.90mm
2 中央粒径0.12mm
3 中央粒径0.35mm

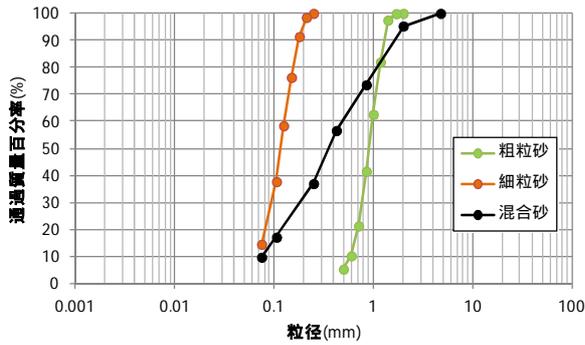


図-5 粒径加積曲線

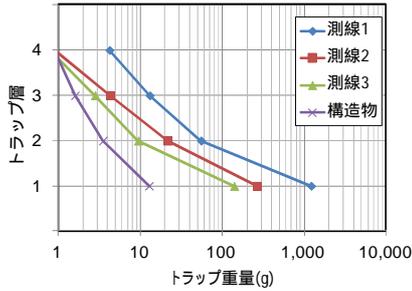


図-6 case1 (粗粒砂) トラップ重量

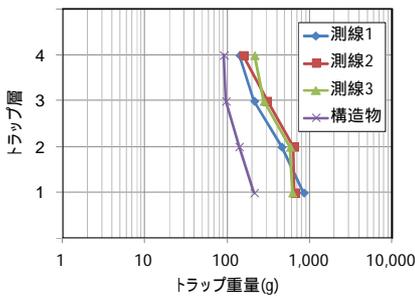


図-7 case2 (細粒砂) トラップ重量

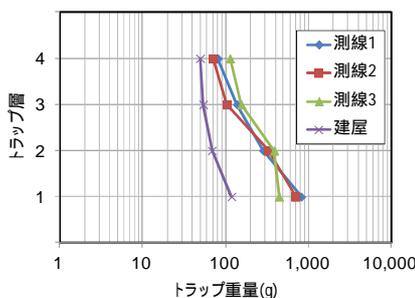


図-8 case3 (混合砂) トラップ重量

3. 実験結果

(1) トラップ, 堆積重量

各測線で捕捉された砂と建屋内各階層に堆積した砂の重量を図-6～図-8に示す。いずれのケースにおいても下層階になるほどトラップ重量が大きくなっており、粗粒砂のケースで顕著である。またトラップ位置が後退すると捕捉量が減少するが、これは沖側からトラップ位置までの陸上模型床への堆積によるものと考えられる(写真-3)。細粒砂と混合砂のケースでは、各測線上層にお



写真-3 堆積状況(上段:測線1, 下段:測線2)

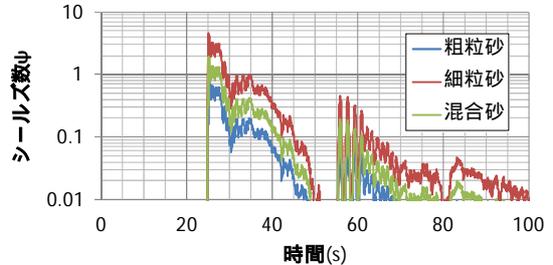


図-9 シールズ数時系列

表-2 移動形態継続時間

砂種類	粗粒砂	細粒砂	混合砂
シートフロー	3	11	4
浮遊移動継続時間	2	5	2
掃流移動継続時間	9	3	3

単位: 秒

いても 100 g 程度以上の砂が捕捉され、3 測線とも各階層で捕捉される量がほぼ同じだった。本実験では陸上部床には砂を敷き均していないため海底斜面部で巻上げられた砂が初期の濃度分布を維持しながら輸送されたものと推定される。流速の鉛直分布を計測していないため、シールズ数の詳細値を知ることはできないが、下式⁸⁾により推算すると、本実験の粒径別シールズ数は図-9のようになる。

$$\psi = \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd} \quad (1)$$

$$\frac{u_*}{\bar{u}} = \frac{\sigma/\rho}{\ln(h/z_0) - 1} \quad (2)$$

ここに、 ψ はシールズ数、 u_* は摩擦速度、 σ は砂密度、 ρ は水密度、 g は重力加速度、 d は砂粒径(代表粒径として中央粒径を使用)、 \bar{u} は鉛直平均流速(砂面上高さ80 mmに設置した流速計の値を使用)、 h は水深、 κ はカルマン定数(=0.4)、 z_0 は粗度高さ(= $\kappa_s/30$)、 κ_s は相当粗度(= d)である。津波フロント到達時はいずれも0.5をこえていることから、シートフロー状態であり、その後浮遊移動、掃流移動と遷移していったと推定されるが、砂の種類によってその移動形態の継続時間が異なっていることがわかる。シールズ数による移動形態を掃流移動($0.1 < \psi < 0.2$)、浮遊移動($0.2 < \psi < 0.5$)、シートフロー($0.5 < \psi$)とし⁹⁾、 $t=50$ s までの移動形態を整理すると表-2のようになる。動画で継続時間を確認すると混合砂をのぞき、概ね表-2

表-3 沈降速度及び沈降距離

ケースNo	砂種類	中央粒径 (mm)	沈降速度 (cm/s)	沈降距離 (cm)
case1	粗粒砂	1.00	9.8	11.8
case2	細粒砂	0.15	1.7	2.0
case3	混合砂	0.35	4.7	5.6

と一致している．混合砂の場合は粒径が広く分布しているため，中央粒径で評価することに問題があると考えられる．また，粗粒砂は浮遊あるいはシートフロー状態の継続時間がわずか5sのみであることから，2層目以上の階層でトラップ重量が小さかったと考えられる．

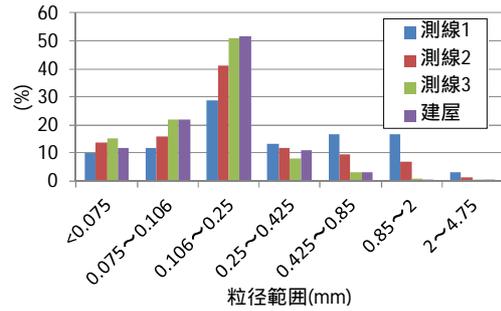
ここで，巻上げ後の砂の鉛直移動が沈降によるものだけと仮定する．次式で表される Rubey の実験式¹⁰⁾より算出される沈降速度と，流速 250 cm/s で測線間距離 3 m の間に沈降する距離を整理すると表-3の通りとなる．

$$w_0 = \sqrt{\frac{2}{3} \left(-1 + \sqrt{gd + \frac{36}{d^2}} \right) - \frac{6}{d}} \quad (3)$$

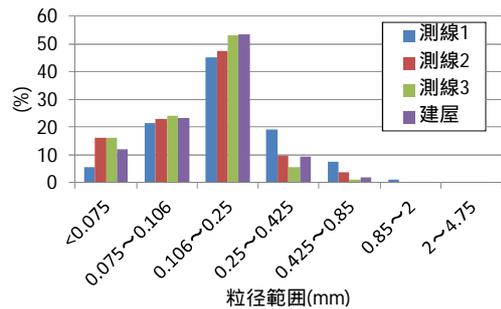
ここに， w_0 は沈降速度， ν は動粘性係数である．トラップ模型の各階層高さは 10 cm であることから，中央粒径で判断すると細粒砂のトラップ重量が初期の濃度分布を維持したまま輸送されたという推定と整合する．ただし，(3)式は層流条件下で得られた実験式であるため，本実験に適用した場合，乱れの影響により実際の沈降速度よりも小さい値として評価していると考えられる．よって，測線間における沈降距離は少なくとも表-3に示した値以上になると考えられる．また，混合砂の場合は粒径の範囲が広いことから 粒径ごとに精査する必要があるが，これについては次節で述べる．一方で，建屋内に堆積した砂の量に着目すると，各階層とも測線3と比べ減少傾向であった．これは建屋前面に設けた開口部から流入した砂が後続する津波により再び建屋前面に流出しているか，あるいはトラップ模型と比較すると閉鎖性が強く，構造物内が満水となると流入抵抗が大きくなり，後続する津波が構造物内に流入しにくくなっていたためと思われる．

(2) 粒度分布

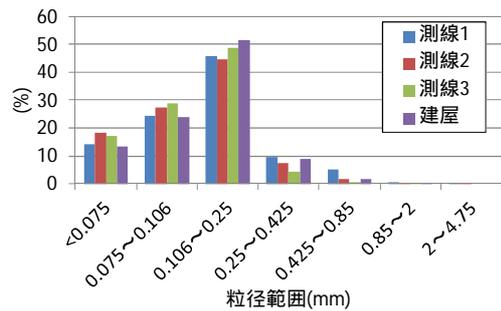
case3-1～3-4 において捕捉された砂の粒径レンジごとの重量割合を図-10に示す．粒度試験はふるい分け試験 (JIS A 1204) に従って実施した．ただし，ケースによってはトラップ重量が目安とされている 200 g 未満 (最大粒径 2 mm の場合) のものもある．いずれのケースにおいても上層階になるほど細粒分が多く含まれていることがわかる．また，2～4層目ではケース間の相違はほとんどない．このことから，2～4層目では比較的細粒分を多く含む砂が濃度だけでなく，粒度分布も初期状態を概ね保ったまま輸送されているものと考えられる．一方，1層目に着目すると，遡上距離が長くなるにつれて細粒分



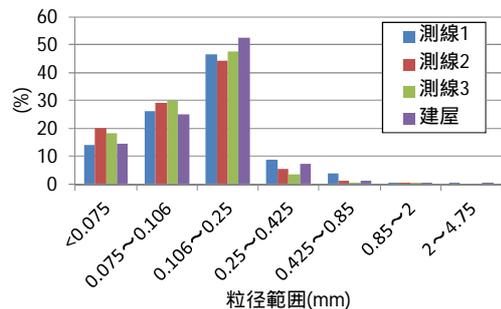
(a) 1層目



(b) 2層目



(c) 3層目



(d) 4層目

図-10 粒度分布

を多く含むようになっていることから，上層の細粒分が徐々に沈降し，1層目にトラップされたか，あるいは粗粒分が路床に堆積したことにより，相対的に細粒分が増えたと考えられる．

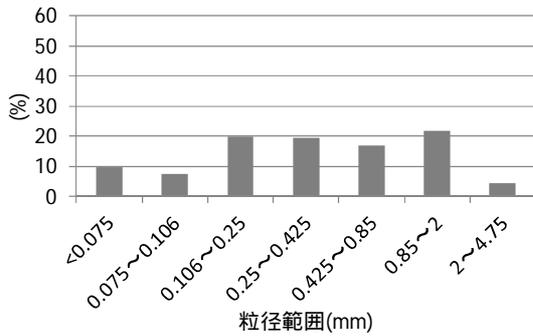


図-11 撒き出し混合砂粒度分布

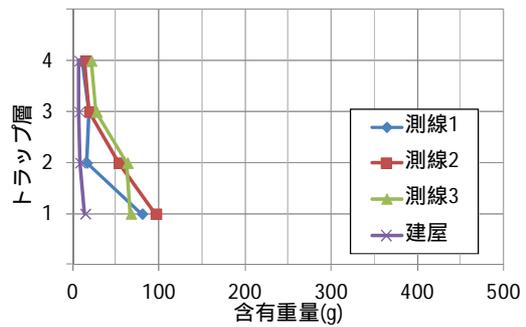


図-13 細粒分 (<0.075mm) 含有重量

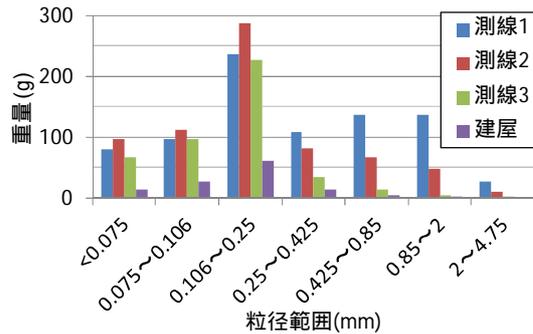


図-12 粒径別含有重量 (1層目)

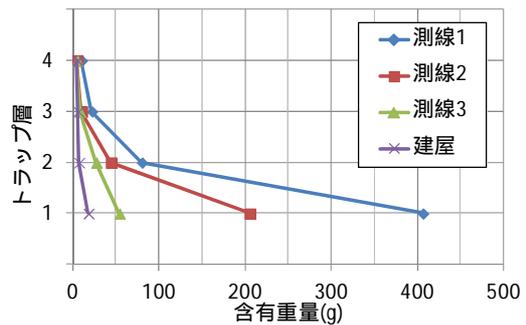


図-14 粗粒分 (>0.25mm) 含有重量

表-4 粒径別 輸送・堆積過程の特徴

粒径範囲	特徴
細粒分 0.075~0.25mm	巻上げ直後の空間分布を維持したまま輸送される
中粒分 0.250~0.85mm	測線3に至るまでに徐々に堆積する
粗粒分 0.850~4.75mm	巻上げ直後に堆積する

図-11 に撒き出した混合砂の粒径レンジごとの重量割合を示す。撒き出した砂の粒径は比較的均等に分布しているが、いずれの測線においても1層目では0.85 mm以上の粒径が含まれているものの、2~4層目ではごく微量しか含まれていない。これは全ての粒径の砂が一度は巻き上げられるものの、測線1~2(距離3m)の間に0.85 mm以上の砂は路床にほぼ全て堆積してしまったためと考えられる。

図-12 は1層目において捕捉された砂の重量を粒径別に示したものである。0.075~0.25 mmの砂は測線2において比較的多く含まれているものの、概ね測線1~3で同程度含まれている。しかし、0.25 mm以上の砂は遡上距離が長くなるにつれて少なくなっている。よって、0.25 mm以上の砂は輸送過程において堆積しているものと考えられる。以上の粒径別の特徴をまとめると表-4の通りとなる。

図-13 は0.075 mm以下の細粒分含有重量を示したものであり、図-14 は0.25 mm以上の比較的粗粒な砂の含有重量を示したものである。いずれの測線においても上層になるほど細粒分含有量が增多するものの、その差は

微量である。一方、粗粒分含有量は下層になるのほど多くなり、遡上距離が短いほどその差は顕著である。これは、細粒分が巻上げ直後の濃度・粒度分布を維持したまま輸送されるのに対し、粗粒分は輸送過程で堆積することを反映した結果と考えられる。また、細粒分、粗粒分ともに測線3から建屋にかけて減少していることから、本実験条件下では津波が建屋前面に到達した際に輸送された砂の再浮上は起きていないと考えられる。

4. 結論

本研究では、津波によって輸送された海底堆積物が陸上建屋に堆積した際の分級作用に関する基礎的な検討を行った。実験では1種類の津波に対して海底堆積物の粒径を変えながら検討を行った。その結果、一定の粒径以下の砂は巻上げ直後の鉛直分布を維持しながら輸送されるのに対し、下層になるほど粗粒分が多くなるのがわかった。現地で見られた現象は上層階になるほど堆積土砂の粒径が小さくなっていったというものであるが、本実験の結果より細粒砂の含有重量は階層にかかわらずほぼ一定であるものの、下層階になるほど粗粒砂が多く含まれるために、上層階の堆積土砂の粒径が相対的に小さくなっていったのではないかと考えられる。また、この現象は遡上距離が短いほど顕著であり、建屋前面に津波が到達した際の再浮上は起きておらず、閉鎖性の強い構造と

なることでむしろ流入量が減少するということがわかった。

ただし、砂は現地スケールであるにも関わらず、外力は実験スケールであるため、実際には再浮上が発生する可能性があるものの、現地スケールにおいても流入量減少の効果が大きいと考えられるため、トラップ砂の計測ではなく、他の手法により検討する必要があると考えられる。また、本実験ではトラップ模型や建屋模型による堰上げの効果が無視できないこと、フロア間の流入出がないことなどの問題が挙げられる。さらに、今後は津波の継続時間をのばすことで巻上げ量を多くすることが必要である。本研究は輸送過程と堆積過程に焦点をおいたものであるが、今後は巻上げ 輸送 堆積という一連の流れを定量的に評価する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 首藤信夫：津波による土砂の輸送，東北大学工学部津波防災実験研究報告，第6号，pp1-56，1989．
- 2) 高橋智幸，今村文彦，首藤伸夫：土砂移動を伴う津波計算法の開発，海岸工学論文集，第39巻，pp.231-235，1992．
- 3) 高橋智幸，首藤信夫，今村文彦，浅井大輔：掃流砂量・

- 浮遊砂間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発，海岸工学論文集，第46巻，pp.606-610，1999．
- 4) 藤井直樹，大森政則，高尾誠，金山進，大谷英夫：津波による海底地形変化に関する研究，海岸工学論文集，第45巻，pp.376-380，1998
- 5) 西畑剛，田島芳満，森屋陽一，関本恒浩：津波による地形変化の検証 2004年スマトラ沖地震津波 スリランカ・キリンダ港，海岸工学論文集，第52巻，pp.1386-1390，2005．
- 6) 原田賢治，今井健太郎，Tran The Anh，藤木悦史：津波斜面遡上による陸域での堆積砂形成に関する水理実験，海岸工学論文集，第67巻，pp.251-255，2011．
- 7) 高橋純平，高橋智幸，松富英夫，島田広昭，井上雅夫，河田恵昭：津波来襲時の高シールズ数における浮遊砂に関する水理実験，土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集，pp.154-155，2003．
- 8) 田中仁，Thu, A：全ての flow regime に適用可能な波・流れ共存場抵抗則，土木学会論文集，No.467/ -23，pp.93-102，1993．
- 9) 清水琢三，近藤浩右，渡辺晃：局所漂砂量算定式の現地適用性に関する研究，海岸工学論文集，第37巻，pp.274-278，1990．
- 10) 土木学会：水理公式集[平成11年版]，157p，1999．

BASIC RESEARCH ABOUT THE BIASED PARTICLE SIZE DISTRIBUTION OF ONSHORE TSUNAMI SEDIMENT

Hiroyuki KATAYAMA, Yuuji MAEDA, Kouichirou ANNO, Syuro YOSHIKAWA, Hide SAKAGUCHI and Taisuke NISHIURA

The particle size of sand, transported by Tsunami sourced of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and deposited in onshore building, was fine-grained on upper floor. There are many studies about bottom topography change or suspended sediment caused by tsunami, whereas there are few studies to evaluate particle size distribution of transported and deposited sand. In this paper, the hydraulic model experiments, to trap transported sand and to deposit sand into onshore building model, was conducted to find out the factor of biased particle size distribution. It was found that fine-grained sand was transported keeping vertical concentration and particle size distribution without relation to distance from coast line, coarse-grained sand settled out and was deposited in this study's case. In addition, biased particle size distribution is caused by constant volume of fine-grained sand and by a lot of coarse-grained sand on under floor. This phenomenon is prominent with the decreasing distance from coast line.