

土砂を含む河川遡上津波が構造物に与える影響*

秋田大学理工学部 小太刀 旬哉
 岡山理科大学理学部 鎌滝 孝信
 秋田大学大学院理工学研究科 齋藤 憲寿
 秋田大学大学院理工学研究科 渡辺 一也

1. はじめに

地震により発生した津波は、河口部などから土砂を含んで河川を遡上し氾濫することで市街地に被害を与える。津波氾濫水は、土砂を巻き込むことで密度が増加し、それに伴い水平力・鉛直力も増加することが松富ら¹⁾により明らかにされており、河川遡上津波の実験において土砂、すなわち氾濫水密度を考慮することは重要である。また、2種類の土砂を用いて河川遡上津波を再現する研究²⁾は行われているが、土砂を考慮した橋脚等の構造物への影響や、構造物による土砂の移動および堆積様式への影響に関する研究は少ない。

そこで本研究では、2種類の粒径の異なる砂を用いて河川遡上津波を発生させ、橋脚を想定した構造物にかかる波力と土砂の移動および堆積について検討を行った。

2. 実験方法

実験水路は図1に示す、すべり台状の開水路（幅 0.34 m、高さ 0.2~0.3 m）を用いた。また、土砂は東北硅砂株式会社の4号硅砂および7号硅砂を用い、中央粒径値はそれぞれ 0.54 mm、0.13 mm である。粒径分布³⁾を図2に示す。水路の海側には7号硅砂を層厚 6 cm、川側には4号硅砂を層厚 3 cm で敷き、貯水槽（高さ 0.5 m、幅 0.3 m、奥行き 1.7 m）に水を貯めてゲートを急開することで津波氾濫流を発生させた。そして、超音波式水位計（KEYENCE 社製、UD-50）で津波の波形を確認するとともに、水路末端で氾濫水を採取し、氾濫水の体積と質量を測ることで津波氾濫水の密度を求めた。

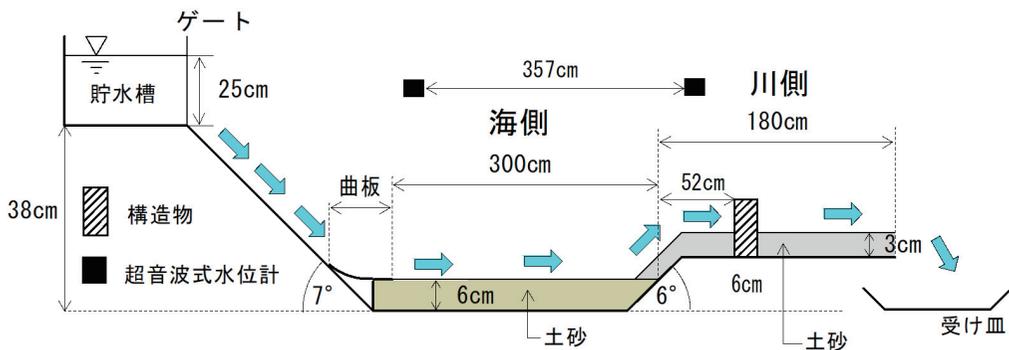


図1 実験水路

*Influence of tsunami run-up including sediments to river on a structure by Shunya KODACHI, Takanobu KAMATAKI, Noritoshi SAITO and Kazuya WATANABE

水路の川側に円柱状の構造物を設置し、構造物前方に取り付けた圧力センサから津波の衝突時の波力を計測した(図1, 3)。圧力センサの設置位置は砂の表面から高さ1cmとし、計測間隔を0.05秒とした。貯水槽側から見た構造物の正面図を図3に示す。また、図4に示す箇所を実験前と実験後にポイントゲージを用いて砂の層厚測定を行い、さらに各地点で断面を確認した。なお、層厚測定は海側始点の30cm離れた箇所を地点1とし、川側方向に地点32まで15cm間隔で行った。

実験は下記の条件で行った(以下Case1, Case2)。

- ・Case1: 海側に7号珪砂, 川側に4号珪砂を敷設
- ・Case2: 海側に4号珪砂, 川側に7号珪砂を敷設

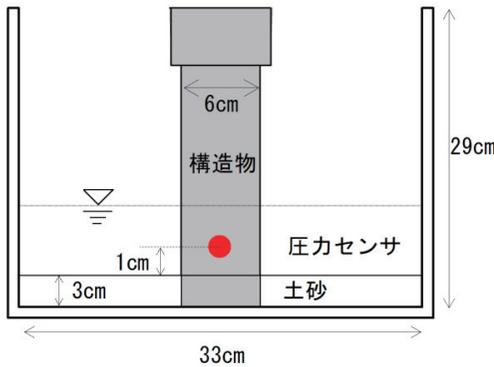


図3 構造物正面図

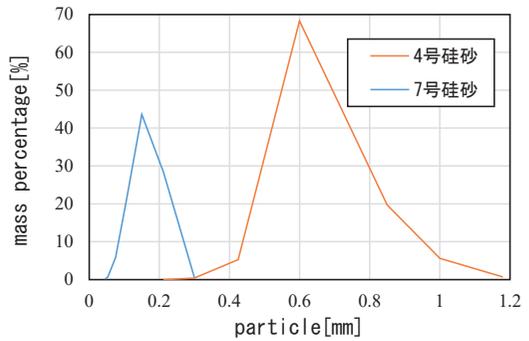


図2 使用土砂の粒径分布³⁾

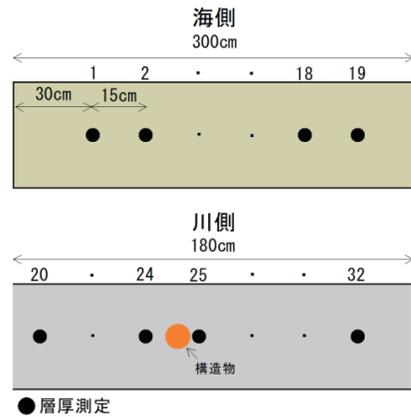


図4 層厚測定箇所(上面図)

3. 実験結果

(1) フルード数, 氾濫水密度

本実験において発生させた津波氾濫流のフルード数を既往研究⁴⁾と同様に検討した。動画撮影による氾濫流の先端移動速度と水深を用いた方法, 水路海側の側壁に設置した微小角柱と水路中央のポイントゲージに取り付けた薄い板により発生させたマッハ角を用いた方法によりフルード数を算出した。Case1 および Case2 のフルード数を表1に示す。Case1 と Case2 のフルード数の差が最大で0.25であることから, おおよそ同じ津波氾濫流を再現できたと考える。

表1 フルード数の比較

	Case1	Case2
動画撮影	2.17	2.10
マッハ角(微小角柱)	2.31	2.06
マッハ角(ポイントゲージ)	2.20	2.20

Case1 および Case2 の氾濫水密度はそれぞれ 1.12 g/cm^3 , 1.07 g/cm^3 で、Case1 の方が Case2 に比べ大きい。また、受け皿に入った氾濫水を見ると、Case1 では海側の 7 号硅砂と川側の 4 号硅砂共に確認でき、Case2 では、海側の 4 号硅砂はほとんど見られず川側の 7 号硅砂が主である。このことから、Case1 では海側の砂が受け皿まで到達したが、Case2 ではほとんど到達しなかったといえる。

(2) 波力

Case1 および Case2 での波力の経時変化を図 5、図 6 に示す。津波が構造物に衝突すると波力が著しく増加し、その後時間が経過するにつれて徐々に減少することが両方で確認できる。さらに Case1 と Case2 を比較すると、どちらも同様な形状を示しているが、Case2 では小さな起伏が多く見られる。

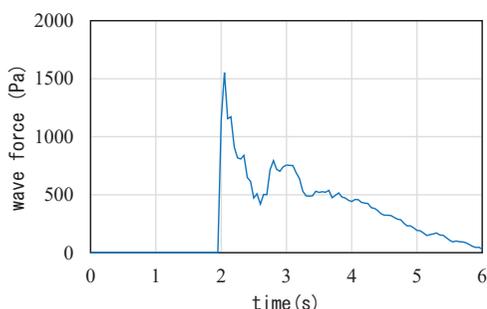


図 5 Case1 波力の経時変化

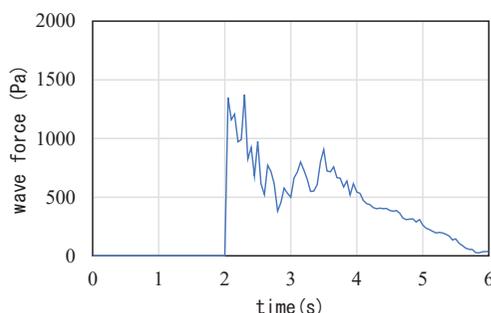


図 6 Case2 波力の経時変化

Case1 および Case2 の結果から実験値と理論値の比較を行った。圧力センサで得られた値は衝突時に作用した圧力 (Pa) のため、波力を検討するにあたり荷重 (N) へ換算した。また、津波衝突時の波高は動画撮影により衝突時における構造物付近の側壁の目盛を読み取ることで求め、この結果を実験値とした。高橋ら⁵⁾によると、流れの中の比較的細い柱状のものに作用する力は (1) 式で求めることができる。

$$F = \frac{w_0}{2g} \cdot A_0 \cdot C_D \cdot U^2 \quad (1)$$

このときの w_0 は単位体積重量、 g は重力加速度、 A_0 は投影面積、 C_D は抗力係数、 U は平均流速である。単位体積重量は氾濫水密度を使用し、投影面積は衝突時の波高と構造物の横幅から求めた。 C_D は平山ら⁶⁾より 1.17 とし、 U は海側を流れる先端移動速度とした。この結果を理論値とし、実験値と理論値の比較を表 3 に示す。その結果、実験値と理論値は概ね一致した。

表 3 衝突時の波力の比較

	実験値 (N)	理論値 (N)
Case1	1.40	1.44
Case2	1.21	1.17

(3) 土砂移動

Case1 および Case2 の実験前と実験後における砂の層厚変化を図 9、図 10 に示す。Case1 (図 9) において海側の始点から 165 cm までは洗掘により層厚が減少し、165 cm から 375 cm までは層厚が増加した。実験前と実験後の層厚の差と水路幅から砂の体積を求めると、 $8,081 \text{ cm}^3$ の砂が洗掘により移動し $7,757 \text{ cm}^3$ の砂が堆積した。特に海側終点と川側始点にかけて実験後の層厚が増加したことから海側に敷設した 7 号珪砂が多く移動、堆積したことが確認できる。

Case2 (図 10) では、海側始点からおおよそ 75 cm までは洗掘により層厚が小さくなり、100 cm から 350 cm 付近にかけて層厚が増加した。構造物周辺は Case1 同様、洗掘により層厚が減少し、海側始点では $4,653 \text{ cm}^3$ の土砂が洗掘され $6,530 \text{ cm}^3$ の土砂が堆積した。特に海側始点 100 cm から 270 cm にかけて実験後の層厚が増加したことから、海側の砂は Case1 よりも遡上せず、海側に多く留まったと考えられる。また、Case2 の海側始点 310 cm から 350 cm にかけても実験後の層厚が増加しており、この増加における砂の中には海側に敷設した 4 号珪砂と川側に敷設した 7 号珪砂が戻り流れにより堆積したものと考えられる。

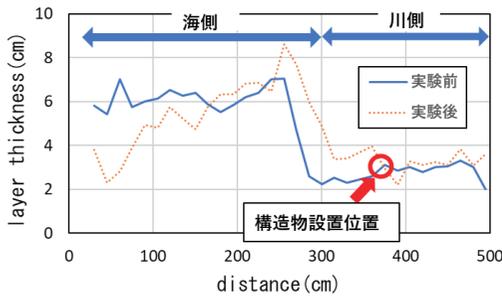


図 9 Case1 層厚の変化

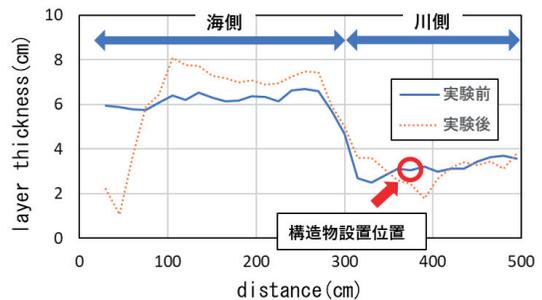


図 10 Case2 層厚の変化

Case1 および Case2 の構造物周辺の堆積状況をそれぞれ図 11、12 に示す。Case1 においては、川側に敷設した 4 号珪砂は構造物直下にのみ見られ、海側に敷設した 7 号珪砂は川側全体に堆積している。一方、Case2 の構造物周辺は海側に敷設した 4 号珪砂は点在して堆積しており、Case1 よりも洗掘が大きい。この結果は、粒径のより小さい 7 号珪砂は 4 号珪砂と比べて津波氾濫流によって移動、洗掘され易いことを示す。

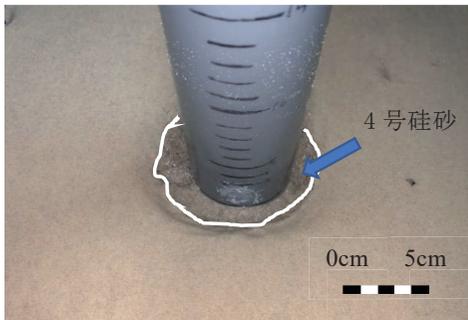


図 11 構造物前方 (Case1)



図 12 構造物前方 (Case2)

Case2 における構造物以後の砂の堆積状況（上面図）を図 13 に示す。Case1 では海側に敷設した 7 号珪砂は川側に敷設した 4 号珪砂の上全体に堆積したが、Case2 では海側に敷設した 4 号珪砂は、川側に敷設した 7 号珪砂の上に点在して堆積した。また、4 号珪砂の分布は川側終点に向かうにつれて徐々に少なくなっており、構造物を設置していた水路中央部分にはほとんど 4 号珪砂は見られない。このことから、Case2 において粒径の大きい 4 号珪砂は川側まであまり遡上しないことが分かった。さらに、砂の堆積結果を踏まえて図 6 をみると、最大波力以降、細かい起伏が多くなっている。これは、海側に敷設した 4 号珪砂が川側に点在して堆積したことから、土砂が津波氾濫流に不均一に含まれ、構造物に衝突していたことを示す可能性があると解釈される。

Case1 における層厚測定地点 20、25 および 30 の堆積状況を図 14～16 に示す。海側に敷設した 7 号珪砂は川側に敷設した 4 号珪砂の上全体に堆積しており、地点 20 では 15 mm、地点 25 では 10 mm、地点 30 では 3 mm 程度堆積した。また、川側の地点 20～32 の全地点で堆積層を確認することができ、堆積層厚は遡上するにつれて徐々に小さくなる傾向である。

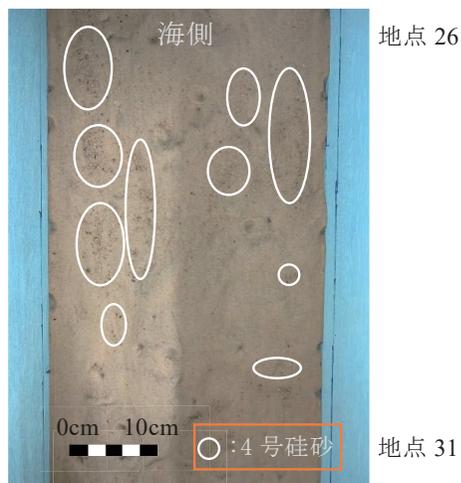


図 13 構造物以後の堆積状況（Case2）

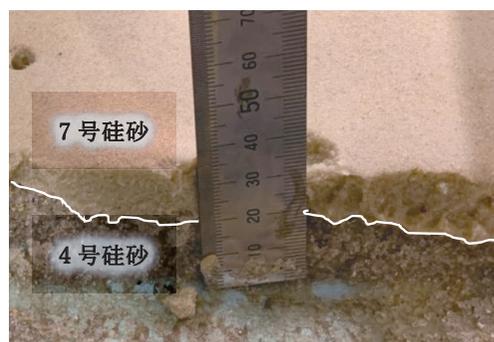


図 14 地点 20 断面写真（Case1）



図 15 地点 25 断面写真（Case1）



図 16 地点 30 断面写真（Case1）

Case2 における層厚測定地点 20, 21 および 22 の堆積状況を図 17~19 に示す。地点 20 では、4号砂が 15 mm 程度堆積したが、さらに 7号砂が 4号砂の上に 0.5 mm 程度堆積している。これは、戻り流れにより川側に敷設した 7号砂が運ばれて堆積したと考えられる。地点 21 では 4号砂が 10 mm 程度堆積したが、地点 22 以降は堆積層を確認できなかった。

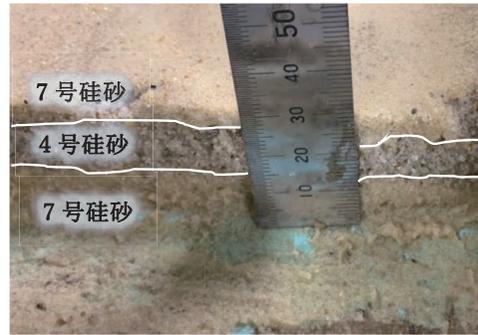


図 17 地点 20 断面写真 (Case2)



図 18 地点 21 断面写真 (Case2)



図 19 地点 22 断面写真 (Case2)

4. まとめ

本研究により、以下のことが明らかになった。

- ・粒径の小さい 7号砂は氾濫流によって移動しやすいため、構造物周辺において洗掘されやすかった。
- ・Case2 では粒径の大きい 4号砂は構造物周辺に堆積しにくく、構造物以後は構造物の影響により水路中央の堆積はほとんど見られなかった。
- ・Case2 において、波力のデータの起伏が多くなった原因として、海側に敷設した 4号砂が津波氾濫流の中に不均一に含まれていたと考えられる。

参考文献

- 1) 松富英夫, 岡田隼人, 久保友寛, 今野史子: RC 造建築物に作用する津波荷重の氾濫水密度への依存に関する基礎実験, 土木学会論文集 (海岸工学), 74, 2, I_265-I_270, 2018.
- 2) 高桑充広, 鎌滝孝信, 齋藤憲寿, 渡辺一也: 河川遡上津波による土砂混合及び堆積に関する実験, 東北地域災害科学研究, 56, 69-74, 2020.
- 3) 東北砂砂株式会社: 粒度分布表 (<http://www.tohoku-keisya.co.jp/products/>), (2021年1月9日アクセス)
- 4) 松富英夫, 千葉裕太, 三上輝: 氾濫水密度と波周期の津波荷重への影響, 土木学会論文集 (海岸工学), 75, 2, I_397-I_402, 2019.
- 5) 高橋重雄, 遠藤仁彦, 室善一郎: 越波時における防波堤上の人転倒に関する研究, 港研報告, 31, 2, 31p., 1992.
- 6) 平山秀夫, 辻本剛三, 島田富美男, 本田尚正: 海岸工学, コロナ社, 191p., 2003.