

防波堤基礎捨石から流入する津波流量の評価

Evaluation of Tsunami Entering Through Breakwater Mound

東京工業大学 准教授 高木泰士

（研究計画ないし研究手法の概略）

港の開口部に可動式の水門や防波堤を設置し、津波・高潮襲来時に港内やその背後地域の被害を防ぐ技術に注目が集まっている。既設構造物と組み合わせて効果を発揮するため、可動部のみでなく、その周囲からの海水流入にも留意する必要がある。特に防波堤の基礎部分は捨石を積み上げた構造が多く、港内外に水位差が生じると捨石の間隙を通じて港内に海水が流入する可能性がある。しかし、基礎捨石を浸透する津波や高潮のリスクはこれまで十分に認識されておらず、流入流量の検討を行うための手法が確立されていない。本研究では防波堤・捨石模型を設置した小型水槽実験と捨石を模擬したポーラス構造を配置した数値流体解析を行い、捨石部からの流入量について検討した。両者の比較を行い、非ダルシー則の係数として Ergun の推定式が適用できることを明らかにした。

（実験調査によって得られた新しい知見）

平成 23 年東北地方太平洋沖地震において発生した津波は、青森県から千葉県までの広い地域に浸水被害をもたらした。特に岩手県、宮城県、福島県では事前に想定されていた高さを超える津波が襲来し甚大な被害を出した。この経験を教訓に我が国の津波対策が大幅に見直されることとなり、津波を数十年から数百年に 1 回という頻度で発生し高さは低いものの大きな被害をもたらす L1 津波と、数百年から数千年に 1 回という極めて低い頻度ながら甚大な被害をもたらす L2 津波の 2 つのレベルに分類する考え方が導入された。前者に対しては防波堤や防潮堤をはじめとする海岸構造物により津波の内陸への侵入を防ぐことで、沿岸住民の人命のみならず財産も守ることを目的とする「防災」対策を取り、後者に対しては沿岸住民の生命を守ることを最優先とし、経済的損失などについてはその軽減を図ることを目的とする「減災」対策を取ることとなった。構造物による津波対策としては、粘り強く耐えるように防波堤を改良することや防潮堤の嵩上げ・拡幅が代表的な対策と言える。一方、河口や港の開口部を可動式の水門や浮上式の防波堤・防潮堤で閉鎖する対策にも注目が集まっている。陸上設置型で港を閉鎖する水門は、沼津港の大型展望水門や兵庫県・由良港の小型水門など国内で多く設置されている。一方、海底設置型水門は実績が少なく、実用上の課題も残されているが、埋設した鋼管杭を浮上させる方式、フラップゲートを立ち上げる方式、ニューマチックケーソン内に収納した鋼壁を浮上させる方式などが提案されている。本来防波堤は港内への波浪の伝播を抑制し、静穏域を作り出すことを目的に設置されており、津波被害を抑えることは想定していない。したがって、水門や防波堤を港口に設置する場合、既設の防波堤を含めて港全体で津波を抑止できるか、詳細な検証が必要となる。例えば、ケーソン防波堤の場合、各函体の間にわずかであるが隙間が存在するが、そのような狭小な隙間からも海水は流入する。津波の周期が短い場合、流入量は限定的であるが、周期が長くなるにつれて、流入量は多くなっていく。高潮の周期は

津波より長い時間、その影響はさらに顕著になると考えられる。さらに、一般的な防波堤ではその基礎部分に捨石が用いられていることが多く、津波により防波堤内外で水位差が発生した場合、捨石間隙から海水が流入し港内の水位が上昇する可能性がある。その場合、締切り水門が正常に稼働しても港内および後背地への津波流入が生じる可能性がある。ところが、基礎捨石より流入する津波や高潮のリスクはこれまで十分に認識されておらず、流入量の評価方法が確立されていない状況にある。本研究では、水理模型実験と数値解析により、基礎捨石からの流入量を推定する方法を提案する。本研究では、防波堤前後に強制的に水位差を付ける還流水槽実験を行い、捨石からの流入流量を測定する。その結果と捨石部を多孔質体で模擬した数値解析を比較し、Ergunの推定式の妥当性を確認する。

(1) 水理模型実験

水理模型実験では、平均粒径 11mm の碎石を用いて捨石マウンドを構築し、その上にアクリル製のケーソン模型を配置した。捨石マウンドは浸水試験より間隙率が 40.2%であることを確認した。上下流に高さの異なる越流堰を設けることで、防波堤前後に一定の水位差を作った。流れが定常状態となった時点で下流側より流出する水量を測定し、ケーソン模型直下の捨石マウンドの断面積で割ることにより、捨石を通過する定常的な流速を測定した。下流側の堰は 10cm に固定し、上流側の堰を 20cm (この場合は越流なし)、15cm, 14cm, 13cm, 12cm と変化させることで 5 段階の水位差を再現した。また、ホース吐出口する乱れを極力減らすため、消波ブロック模型とシルを配置した。堰高が 20cm のときの模型形状を図-1 に示す。

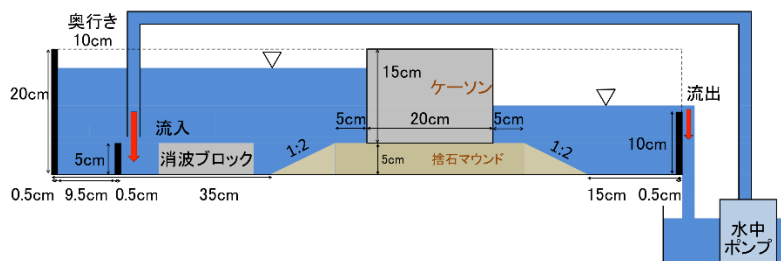


図-1 ケース 1 (20cm 堰) の模型形状

(2) 多孔質体内の圧力損失について

数値解析には OpenFOAM を使用した。VOF 法を用いた非圧縮二相流のソルバが実装されており、津波の防潮堤越流メカニズムや消波構造物に作用する波の解析など複雑な水理現象に適用できる。以下にその基礎方程式を示す。

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p^* + \nabla \cdot \tau + \rho g + f_s \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot U \alpha + \nabla \cdot U_c \alpha (1 - \alpha) = 0 \quad (3)$$

ここで、 U : 速度ベクトル[m/s], ρ : 密度[kg/m³], p^* : 疑似動圧[Pa], τ : 粘性応力テンソル[Pa], g : 重力加速度ベクトル[m/s²], f_s : 表面張力に相当する体積力[Pa], α : 流体の体積率を表すVOF値 ($0 \leq \alpha \leq 1$), U : 気液相の平均流速[m/s], U_c : 気相と液相の相対流速[m/s]である。

また、OpenFOAMでは多孔質体内の流体解析が可能であり、多孔質部分における圧力損失 S は粘性成分と慣性成分の和として以下の式で表される。

$$S = -\left(\mu A + \frac{1}{2}\rho|U|B\right)U \quad (4)$$

ここで、 μ : 粘性係数, ρ : 流体密度, A, B は実験係数である。

(3) 解析条件

数値解析では水理模型実験の全ケースを再現し、係数の妥当性を確認した。数値解析上の境界条件や構造物形状を図-2に示す。水は上流から下流に向けて平行に吹き出す条件を設定した。下流側の堰を越流した水量と同量を上流側から流入還流させて、ケーソン前後の水位が一定になることを確認した。

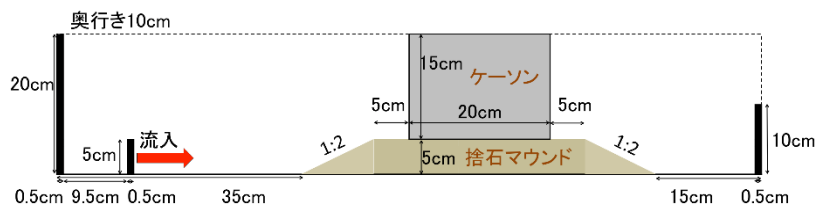


図-2 ケース 1 の再現形状

(4) 数値解析の結果及び妥当性の確認

数値解析では、予め港外部は 17.5cm, 港内部は 11.0cm まで水を張った状態から 400 秒の解析を行うことで、流れは十分に定常状態になることがわかった。そこで 400 秒後の防波堤前後の水位及び防波堤中央部直下の捨石内の流速を出力して、検証を行った。流速分布の一例を図-3, 各ケースの数値解析及び実験との比較を表-1に示す。水位、流速ともに実験と数値解析の誤差は±1%未満に収まっており、解析精度が非常に高いといえる。Forchheimer 式の係数を Ergun 式で評価することで、基礎捨石内の浸透流を精度よく推定できることがわかった。

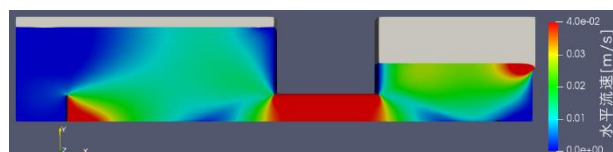


図-3 数値解析の様子 (ケース 1)

表-1 数値解析の結果及び実験との誤差

実験ケース		ケース1		ケース2		ケース3		ケース4		ケース5	
境界条件		港外	港内	港外	港内	港外	港内	左	右	左	右
堰高さ[cm]		20	10	15	10	14	10	13	10	12	10
実験	水位[cm]	18.0	11.1	15.5	10.9	14.6	10.9	13.7	10.8	12.8	10.8
	水位差[cm]	6.90		4.60		3.70		2.90		2.00	
	捨石内流速[cm/s]	4.13		3.29		2.94		2.57		2.08	
数値解析	水位[cm]	17.9	11.0	15.5	10.9	14.6	10.9	13.7	10.8	12.7	10.7
	水位差[cm]	6.89		4.56		3.70		2.88		1.98	
	捨石内流速[cm/s]	4.13		3.31		2.96		2.58		2.10	
誤差 (数値解析 /実験)	水位誤差[%]	-0.341	-0.474	-0.0764	0.276	-0.0322	-0.0753	0.112	0.345	-0.669	-0.646
	水位差誤差[%]	-0.127		-0.910		0.0948		-0.753		-0.797	
	捨石内流速誤差[%]	-0.0257		0.601		0.541		0.462		0.937	

(発表論文)

Takagi H., Tomiyasu R., Oyake T., Araki T., Mori K., Matsubara Y., Ninomiya Y., Takata Y., Tsunami Intrusion through Port Breakwaters enclosed with Self-elevating Seawalls, Ocean Engineering, Elsevier, Vol.199, 13p. 2020.

高田佳史, 高木泰士, 防波堤基礎捨石より流入する津波や高潮に関する水理実験および数値解析, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 75(2), pp. 7-12, 2019.