

津波の浸水深と流速

松富 英夫*・首藤 伸夫**

1. まえがき

北海道南西沖地震津波における被害の特徴の一つは、津波そのものや漂流物による家屋被害が目立ったことである。例えば、奥尻島青苗五区では津波により家屋群が全て破壊され、青苗漁港の臨港地区では漁船や箱型作業船が漂流して家屋群を破壊した。地震・津波の予想される東海地方沿岸には、全国有数の規模を持つ漁港や貯木場¹⁾が複数存在し、青苗で起こったような津波災害が大規模に生じる可能性がある。

津波を考慮しなければならぬ地域での津波浸水深のデータは比較的多い。また、現在では、沿岸各地の浸水深は、波源での初期波形が決まれば、数値計算によりかなり正確に推定できる。よって、浸水深と流速の関係を明らかにすれば、沿岸毎の津波流体力や漂流物の移動速度、ひいては漂流物の衝突力が定量的に評価できることになる。

そこで、本研究は、現地調査データに基づいて、津波の浸水深と流速の関係を論じるものである。主たる現地調査津波は北海道南西沖地震津波である。調査項目は、家屋の前面と背面での浸水位と浸水深、家屋の平面形状とその諸元である。

2. 津波の浸水深と流速

津波の流速データの収集及び流速と浸水深の関係の検討は以下の理由で有意義である。

① 津波の形態として、段波やサージが考えられる。これ等の場合は、衝撃波力や浸水深と流速の自乗の積に比例する抗力が主体となり、それ等の推定には流速を必要とする。

② 漂流物の衝突力を議論する場合も、その移動速度を推定する必要があることから、流速を必要とする。

③ 家屋等の被害程度は浸水深や津波高と関係づけられて論じられる^{2)~4)}。本来ならば、流速と関係づけたいのだが、流速データが無いからである。ただし、それには、浸水深や津波高のデータは比較的多く、家屋被害だけでなく、沿岸での津波形態、集落被害、防潮林の効果、漁船・養殖筏の被害、津波の音等といったことも統一的に議論できて、非常に便利という側面もある。

④ 津波高や検潮記録だけでなく、流速も津波の実態把握や数値計算結果の検証のための好資料となり得る。

実津波の浸水深と流速の関係はこれまで検討されたことがない。長波理論からは、流速は浸水深の平方根に比例し、流体力は自乗に比例すると推察される²⁾。段波の衝撃波力については、その成立が確認されている⁵⁾。

浸水深 h と流速 u の関係を意識して現地調査が行われた最初の津波は1992年インドネシア・フローレス島沖地震津波と思われる⁶⁾。その津波と北海道南西沖地震津波で得られた浸水深と流速の関係を図-1(a)と(b)に示す。それ等の測定場所、具体的な数値や家屋の平面形状等は表-1に示す。ただし、流速は、流れ方向に見て、家屋等の前面と背面または側面に残された津波痕跡から水位差を割出し、ベルヌーイの定理を用いて評価している。

*秋田大学鉱山学部土木環境工学科

**東北大学工学部附属災害制御研究センター

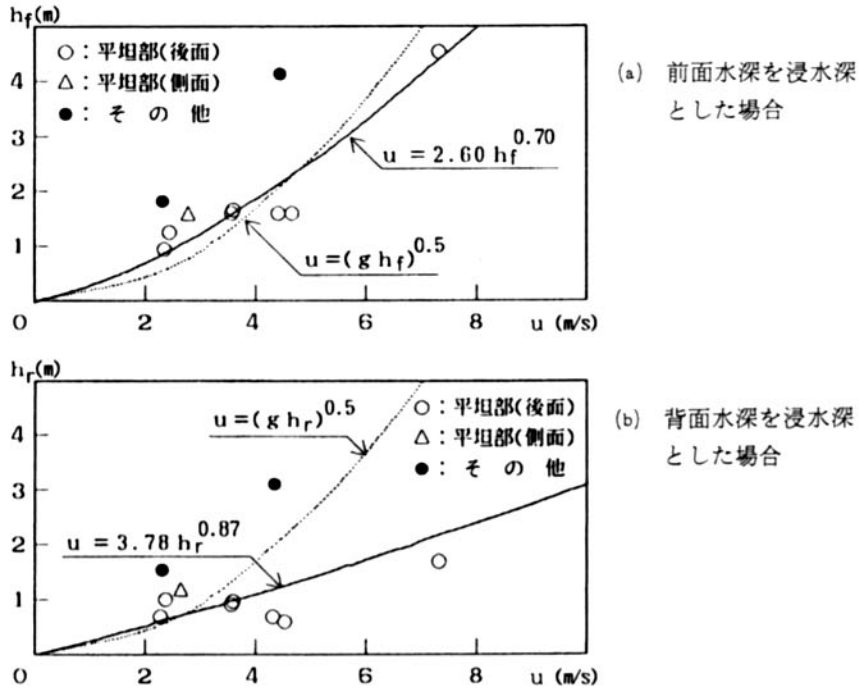


図-1 実津波の浸水深と流速の関係

表-1 現地調査データの一覧

測定場所	水深 (m)		水位差 (m)	流速 (m/s)	平面形状	家屋の造り	記号	備考
	前面	背面						
Wuring (モスク)	1.56	0.91	0.65	3.57	正方形 (17.7×17.7m)	煉瓦葺	○	側面
	1.56	1.19	0.37	2.69	〃	外	△	
藻内	1.29	1.00	0.29	2.38	長方形 (7×12m)	木造	○	
賽ノ河原	4.45	1.70	2.75	7.34	六角形 (15.6×19.0m)	鉄筋	〃	
青苗漁港冷蔵施設	4.06	3.09	0.97	4.36	長方形 (43.1×31.3m)	鉄筋	●	
稲穂小学校	1.60	0.65	0.95	4.32	長方形 (36.3×29.3m)	木造	○	海側
	1.60	0.55	1.05	4.54	〃		○	中間
	1.60	0.94	0.66	3.60	〃		○	陸側
江差港	0.94	0.67	0.27	2.30	長方形 (14.5×48.0m)	鉄筋	〃	引き波
大成町宮野	1.78	1.50	0.28	2.34	長方形 (21.5×7.2m)	鉄筋	●	

この評価法から、得られる関係は陸上の定常的な流れに適用できるものである。(a)と(b)の違いは、浸水深として各々背面または側面と前面のものを採用している点にある。図中の白丸は、ほぼ平坦か、周囲に比べてやや高所の頂部辺りに位置する家屋等から、つまり海水が滞留し難い所で得られたものである。三角は、低い方の浸水深として、側面のものを採用した場合である。黒丸は、すぐ背後が崖であったり、周囲が防波堤等で囲まれていて、海水が滞留し易い所で得られたものである。図より、黒丸が孤立していることが判断される。背面の浸水深に海水滞留の影響が現れたためであろう。(a)と(b)中の実線は、黒丸を除いた場合の回帰曲線で、各々次式である。

$$u = 2.60 h_f^{0.70} \dots\dots\dots (1a)$$

$$u = 3.78 h_r^{0.87} \dots\dots\dots (1b)$$

ここで、添字 f と r は前面と背面の別を示す。共に h のべき指数が推定値の 0.5 より大きい。式 (1a) と (1b) は、データ数が少ない上、流速は津波波形や底面勾配等に強く依存するかもしれない、暫定的なものである。各図中の破線はフルード数が 1 の流れを示す。海水の滞留性の弱い所での津波の流れは、限界流に近い射流であることが判断される。

式 (1a) の物理性は式 (1b) に比べて劣る。とは言え、既往の津波被害に関する諸検討結果が最大浸水深と関係づけられていることを考えると、浸水深の流速への換算式としては、式 (1a) の方が便利だろう。

式 (1b) の使い道は存在する。家屋等への抗力を考える場合、浸水部分の投影面積の算定では、前面ではなく、背面での浸水深を用いる必要がある。それは、式 (1a) で推定された流速を、式 (1b) を変形した次式に代入して推定され得る。

$$h_r = 0.217 u^{1.15} \dots\dots\dots (1c)$$

その他、式 (1b) は定常的な流れでの漂流物の移動速度 (= 流速) としても用いられ得る。

上記二つの考えに従い、式 (1a) と (1c)

を用いて、抗力 F_D を家屋等の前面での浸水深のみで表現すれば、次式となる。

$$F_D = \rho C_D u^2 A / 2 \\ = 2.20 \gamma C_D h_f^{2.14} B / g \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 γ は流体の単位体積重量、 C_D は抗力係数、 A と B は浸水部分の投影面積と幅、 g は重力加速度である。抗力は浸水深のほぼ 2 乗に比例しており、長波理論からの推察²⁾と合致している。

抗力係数をパラメータに、式 (2) の計算例を図-2 に示す。ただし、 γ は 1.03 tf/m^3 、幅は単位幅を考えている。

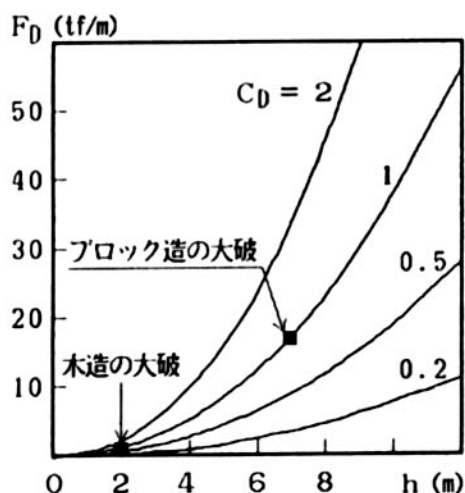


図-2 抗力と浸水深の関係

著者等の一人¹⁾は浸水深と家屋の被害程度の間を検討し、次の知見を得た。①鉄筋コンクリート造の家屋は浸水深 5 m でも被害をほとんど生じない。②コンクリート・ブロック造の家屋は、データ数が少なくて明言はできないが、浸水深が 7 m を超えると大破に至るようである。③木造家屋は浸水深が 2 m を超えると大破に至るようである。

これ等の知見と式 (1)・(2) により、家屋が大破する時の抗力の計算例を示す。家屋として、畳 6 枚分の幅 (= 10.8 m) を有し、平面形状がほぼ正方形の木造家屋を考える。木造

家屋は浸水深が2mを超えると大破に至る。よって、この時の流速は、式(1a)より、

$$u = 2.60 \times 2^{0.70} = 4.22 \text{ m/s} \quad \dots (3)$$

上記の浸水深2mは家屋前面でのものと考えられる。背面での浸水深は、式(1c)より、

$$h_r = 0.217 \times (4.22)^{1.15} = 1.14 \text{ m} \quad \dots (4)$$

家屋の平面形状より、抗力係数は1程度を採用すればよい。よって、家屋に働く抗力は、

$$F_D = 0.5 \times 1 \times 1.03 \times (4.22)^2 \times 1.14 \times 10.8 / 9.8 = 11.5 \text{ tf} \quad \dots (5)$$

日本の木造家屋は流速4.2m/s以上か単位幅当たり1トン強以上の抗力で大破に至るようである。

表-2に家屋の造り別の大破に至る流速と単位幅当たりの抗力を示す。ただし、浸水深を除いて、計算条件は上記の計算例と同じである。抗力については、黒四角で図-2中にも示してある。

表-2 家屋の造り別の大破に至る流速と抗力

家屋の種類	流速 (m/s)	抗力 (tf/m)
鉄筋コンクリート造	10.2 以上	16.9 以上
コンクリート・ブロック造	10.2	16.9
木造	4.2	1.06

3. むすび

津波の浸水深と流速の関係を検討した。本研究で得られた主な結論は次の通りである。

① 現地調査データに基づく津波の浸水深と流速、浸水深と抗力の関係式を得た。

② 日本の木造家屋は流速4.2m/s以上

か単位幅当たり1トン強以上の抗力で大破に至るようである。

謝辞：現地調査を実施するに当たり、電力中央研究所の松山昌史氏、INA新土木研究所の山木滋氏、東北大学の高橋智幸氏、東北大学と秋田大学の学生諸氏よりご協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。本研究の一部は文部省科学研究費（代表：北海道大学 石山祐二教授）によって行われたことを付記する。

参考文献

- 1) 松富英夫・里中嘉樹・池田弘樹：沿岸貯木場の実態について、津波工学研究報告、第10号、pp.29-42、1993.
- 2) Shuto, N. : Tsunami intensity and disasters, Tsunamis in the world, pp.197-216, 1993.
- 3) 首藤伸夫：津波発生及び来襲時の音響 - その1 明治三陸大津波時の分類 -、津波工学研究報告、第7号、pp.1-43、1990.
- 4) 首藤伸夫：津波発生及び来襲時の音響 - その2 昭和三陸大津波による沿岸での音響発生条件 -、津波工学研究報告、第10号、pp.1-12、1993.
- 5) 松富英夫：砕波段波衝突時の圧力分布と全波力、海岸工学論文集、第38巻、pp.626-630、1991.
- 6) 松富英夫：フローレス島東北部の津波とその被害、月刊海洋、海洋出版、Vol.25, No.12, pp.756-761、1993.
- 7) 首藤伸夫：北海道南西沖地震津波による家屋の被害、津波工学研究報告、第11号、1994.