

桁橋の津波被害再現実験

庄司 学¹・森洋一郎²

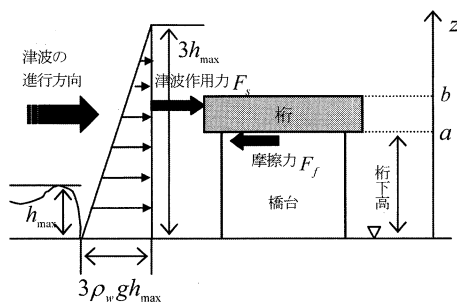
2004 年のインド洋大津波ではインドネシアやスリランカにおいて橋梁構造物が甚大な被害を受けた。津波の作用に対する構造物の脆弱性評価に関しては家屋や建屋を対象として様々な研究事例が報告されている一方で、津波の作用と橋梁構造物の被災との関係については研究事例が少なく、未解明な点が多い。以上より、本研究では、スリランカで被災した桁橋の縮尺模型を製作し、これらに対する津波被害再現実験を実施し、津波の浸水深さおよび津波流速と桁の形状寸法、桁重量をパラメータとして津波の作用と桁の被害との関係を定量的に明らかにすることで、桁橋に対する津波荷重の評価を行った。

1. はじめに

2004 年 12 月 26 日 (UTC00:58:49) にインドネシアのスマトラ島北部沖を震源とするマグニチュード $M_w = 9.1$ から 9.2 の巨大地震が発生した (Lay ら, 2005)。この地震によって発生したインド洋大津波は、東南アジアおよび南アジアを中心にインド洋沿岸諸国に甚大な被害を引き起こした。津波被害が拡大した要因としては、家屋被害とともに、港湾、道路、電力施設、上下水道施設等の様々な社会基盤構造物に被害が発生したためである。このような社会基盤構造物の津波被害を振り返ると、例えば、スリランカでは東部沿岸ならびに南部沿岸、南西部沿岸の約 1,000 km の広範囲な領域において、道路構造物が津波の作用によって被害を受けた。特に海岸線極近傍に立地している橋梁構造物が津波作用力の大小に応じて落橋や橋台の洗掘等の被害を被った。

一方、道路構造物の津波発生時における機能に関しては、地域住民の避難経路や被災後の救援物資の輸送等に活用されるため、これらが被災すると復旧・復興の過程において社会・経済活動に大きな影響が及ぶこととなる。我が国においても東海地震、東南海地震、南海地震を含め、大規模な地震に伴う津波災害の可能性が指摘されていることから、道路構造物に対する津波リスクマネジメントは極めて重要な検討課題となっている。

津波の作用に対する構造物の脆弱性評価に関しては、これまで海岸工学の分野で多くの研究が実施されている。中でも、首藤 (1992) は津波の強度と家屋等の構造物の被害について研究を行っており、松富・首藤 (1994) は北海道南西沖地震津波で得られた被災データに基づいて家屋の被害と津波の作用との関係を定量的に分析している。また、松富・飯塚 (1998) は津波の再現実験から津波流速の算定に関する理論式の提案を行っている。津波の流体力の観点からは朝倉ら (2000) が護岸



註：図中には朝倉ら(2000)による波圧算定式に基づいた波圧分布を併せて記す。

図-1 桁に作用する津波荷重のモデル化

を越流した津波の波力に関する水理実験を行っており、松富・大向 (1999) は家屋の抗力算定に関する水理実験を行っている。しかしながら、これらの研究は構造物の中でも家屋や建屋を主として対象としており、津波の作用と橋梁構造物の被災に関する研究事例は少なく、不明な点が多い。

以上より、本研究では、2004 年インド洋大津波におけるスリランカの橋梁構造物の津波被害を参考として、現地で被災した桁橋の縮尺模型に対する津波被害再現実験を実施し、津波の浸水深さおよび津波流速と桁の形状寸法、桁重量をパラメータとして津波の作用と桁の被害との関係を定量的に明らかにすることで、桁橋に対する津波荷重の評価を行った。

2. 桁模型に対する津波再現実験

(1) モデル化, 実験模型および実験方法

本実験では、スリランカにおける橋梁構造物の津波被害データ (庄司・森, 2006) を参考にし、分析対象橋梁を単純桁橋に絞った上で、図-1 に示すように桁が橋台上の桁掛かりから横移動する (以下、桁移動) という津波被害形態を桁-橋台間の摩擦力 F_f と桁に対する津波作用力 F_s との力のつりあいの関係からモデル化した。桁に対する津波作用力 F_s が津波によって桁に作用する

1 正会員 博(工) 筑波大学講師大学院システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻
2 リクルート

表-1 実験で用いた桁模型と実験条件

水路番号	模型番号	桁長 L(mm)	幅員 B(mm)	桁厚 H(mm)	桁下高 Z(mm)	開度 λ(%)	貯水部水深 h ₁ (mm)	一様水深部水深 h ₂ (mm)
1	1	50.35	28.00	5.70	11	75	40~100	13.1~18.2
	2	50.90	27.80	9.00	11	75	40~100	13.0~18.5
	3	50.85	54.70	5.10	11	75	40~120	13.1~18.6
	4	50.70	54.40	9.00	11	75	40~130	13.0~19.0
2	5	118.40	23.20	5.00	30	41	30~90	12.2~21.1
	6	117.95	46.30	5.50	30	41	50~110	12.3~21.7
	7	118.65	46.15	8.80	30	41	60~140	14.5~21.6
	8	117.80	69.30	6.25	30	41	60~120	14.4~20.7
	9	118.50	68.80	8.90	30	41	60~150	15.2~25.2
3	10	172.60	50.05	5.15	29	14	60~120	14.4~21.1
	11	173.10	49.75	10.10	29	13	70~170	14.3~21.1
	12	173.30	100.10	5.20	29	13	60~120	13.8~20.9
	13	173.80	99.90	10.00	29	13	70~160	14.4~21.6

$$v_L = \sqrt{\frac{2\mu m'g}{\rho_w C_d A}} \dots\dots\dots (4)$$

後述する実験水路の寸法に起因した再現可能な津波流速 v を式 (4) における津波流速の逆算値 v_L と見なすと、想定し得る桁模型の幾何学的な形状 (A, m') が決まる。このような考え方に基づいて、本実験では、落橋もしくは桁移動が生じた 1 径間の桁橋の桁長、幅員、桁高を 1/100 で幾何学的に縮尺し、表-1 に示す合計 13 通りの直方体の桁模型を設計した。この形状寸法を踏まえ、以下の分析においては式 (2) および式 (4) の抗力係数 C_d は 2.0 と仮定した。また、実験開水路の概要を図-2 に示す。表-1 中の記号は図-2 の記号に対応している。

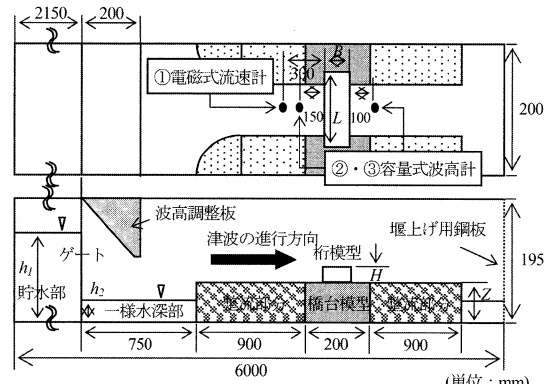
以上より、全 13 種類の桁模型を実験開水路に設置した上で、貯水部水深を変化させ、ゲート急開流れを発生させて津波を再現し、各桁模型に対して桁移動が生じるまで実験を行った。その際、いずれの実験ケースにおいてもフルード数 F_r は概ね 1.0 となった。

桁模型は重量を考慮し、コンクリートで製作した。また、橋台模型は桁と橋台の摩擦を再現するために同様にコンクリートで製作した。本研究で対象とした桁橋は支承を持たない置き桁形式であり、このような条件を考慮して桁模型は橋台模型の上に置いただけの状態とした。なお、桁-橋台間の静止摩擦係数を変化させるために、表-1 に示す全ての桁模型に対して、桁模型の桁掛り部分に粒度 150 の研磨紙を貼付し、同様の水理実験を行った。摩擦係数については、後述する実験によって別途求めた。

実験開水路は、図-2 に示すように長さが 6,000 mm、幅が 200 mm、高さが 195 mm のアクリル製の水路である。水路には全長 2,150 mm の上下式のゲートを有する貯水部を設置し、その横に波高調整板を接続することで全長 3,850 mm の一様水深部の水深調整を行った。また、一様水深部の水量を調整するために、水路下流端には堰上げ用の鋼板を設置した上でこれを 0~30 mm の範囲で上下させ、適宜調整した。橋台の前後 900 mm の領域に整流するための区間を設けた上で、桁模型はゲートから 1,750 mm の位置に設置した。なお、各桁模型に対する開度 λ を $\lambda = (1 - \text{桁模型幅} / \text{水路幅}) \times 100$ に基づいて求めると表-1 のようになる。

(2) 計測方法

計測したパラメータは桁模型の前面の津波流速と、桁前面および背面の浸水深さである。津波流速に関しては、図-2 における①の位置に電磁式流速計 (KENEK 製, VP2000) を設置して計測し、ゲート開放から 5 秒間の平均流速を計測した。また、浸水深さに関しては、図-2 の②および③の位置に容量式波高計 (KENEK 製, CHT6-30) を設置し、サンプリング間隔を 1/500 秒として計測した。



註: 実験装置の概要を模式的に示しているため、実際の縮尺と一部整合しない箇所がある。

図-2 実験水路の概要

抗力 F_d 相当であると見なすと、これらの関係は以下のように定式化できる。

$$F_s \geq F_f; F_s = F_d \dots\dots\dots (1)$$

ここで、桁に作用する抗力 F_d および桁-橋台間の摩擦力 F_f は次式により求められる。

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_w C_d v^2 A \dots\dots\dots (2)$$

$$F_f = \mu m' g \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ρ_w は海水の単位体積質量、 C_d は抗力係数、 v は津波流速、 A は桁の被水圧面積、 μ は桁-橋台間の静止摩擦係数、 m' は桁の質量から浮力相当の質量を差し引いた実効質量である。

式(1)~式(3)の力のつりあいに基づくと、桁移動が生じる直前の津波流速 v の下限値 v_L (以下、津波流速の逆算値 v_L) を次式のように逆算することができる。

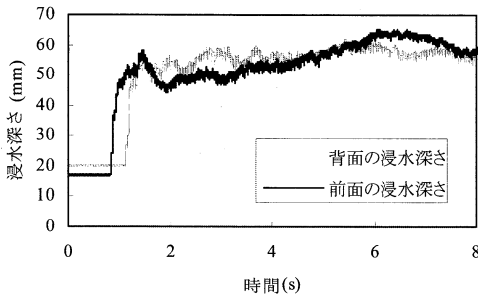
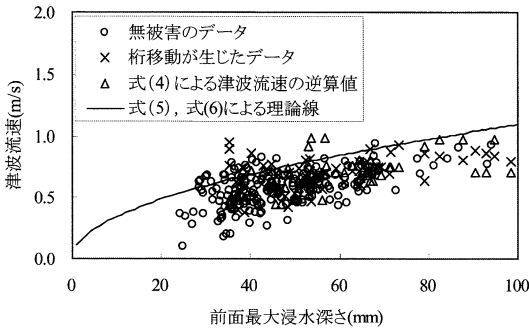
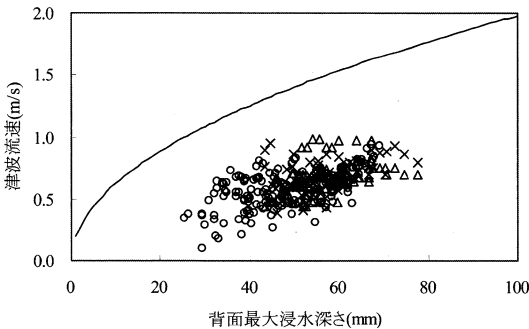


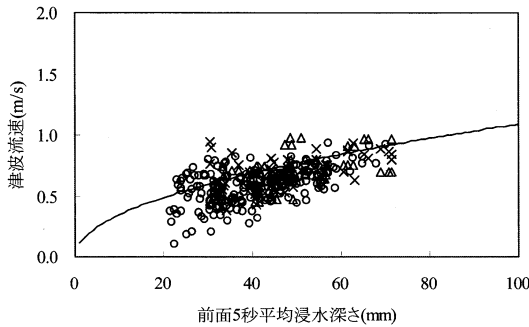
図-3 浸水深さの時系列波形の一例



(a) 前面最大浸水深さを適用した場合



(b) 背面最大浸水深さを適用した場合



(c) 前面5秒平均浸水深さを適用した場合

図-4 津波の浸水深さおよび津波流速と桁移動の関係

(3) 静止摩擦係数の計測実験

桁-橋台間の静止摩擦係数 μ に関しては、表-1 中の模型番号 4 を橋台と同じ表面加工のコンクリート板上に置いた後、この板に傾斜を与え、桁模型が滑動した時点の $\tan \theta$ を計測することで求めた。摩擦条件を水理実験と同様にするため、桁模型とコンクリート板の接触部分は湿潤状態に保って計測を行い、桁模型の底面に前述した粒度 150 の研磨紙を貼付した場合と貼付しなかった場合に対してそれぞれ 50 回ずつ計測を行った。これより静止摩擦係数の平均値を求めると、湿潤状態のコンクリート同士の静止摩擦係数 μ_0 は 0.71、湿潤状態のコンクリートと粒度 150 の研磨紙を貼付したコンクリートとの摩擦係数 μ_1 は 0.80 となった。以下では、これらの数値を使用する。

3. 津波荷重と桁の被害との関係

(1) 津波の浸水深さおよび津波流速と桁移動の関係

津波の浸水深さの時系列の一例を図-3 に示す。これは表-1 中の模型番号 9 に対して静止摩擦係数 μ が μ_0 の場合の結果である。桁模型の前面の浸水深さは遡上する津波の波形を表している。一方、桁模型の背面の浸水深さは、桁模型に津波が衝突し、水位が上下していることがわかる。このような浸水深さの時系列のデータから、桁模型の前面および背面の最大浸水深さを求め、これらと津波流速の関係を示すと図-4(a), (b) のようになる。図-4(c) には、桁模型の前面の容量式波高計が津波の到達を計測した時点から 5 秒間の平均浸水深さを求め、これらと津波流速の関係をあわせて示している。いずれの図に対しても、桁-橋台間の静止摩擦係数 μ が前述した μ_0 および μ_1 の場合の結果を 1 つの図の中にプロットしている。また、桁移動が生じた実験ケース (図中、 \times に相当) に対して式 (4) による津波流速の逆算値 v_L (図中、 \triangle に相当) を求め、それらと浸水深さとの関係をプロットした。

さらに、図中には、松富・飯塚 (1998) によって提案されている以下の津波流速に関する算定式に基づいた理論線を示している。なお、式 (5) は津波作用を受ける物体の前面における津波流速の算定式であり、一方、式 (6) は物体の背面における津波流速の算定式である。

$$\frac{u}{\sqrt{gR}} \approx \sqrt{\frac{2C_v^2 F_r^2}{F_r^2 + 2C_v^2}} \sqrt{\frac{h_f}{R}} \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{u}{\sqrt{gR}} \approx F_r \sqrt{\frac{h_r}{R}} \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 u は陸上流速、 R は対象地点付近の津波高さ、 C_v は流速係数、 F_r はフルード数、 h_f は津波進行方向前面の浸水深さ、 h_r は津波進行方向背面の浸水深さである。なお、式 (5)、式 (6) の適用に当たっては C_v

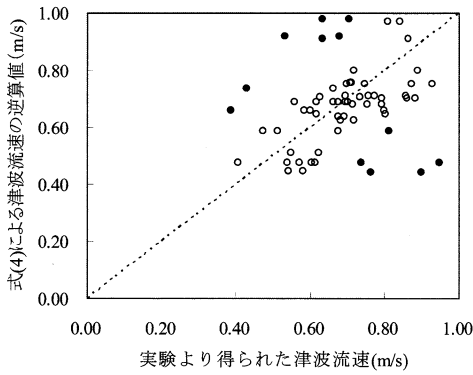


図-5 実験より得られた津波流速と式(4)による津波流速の逆算値の比較

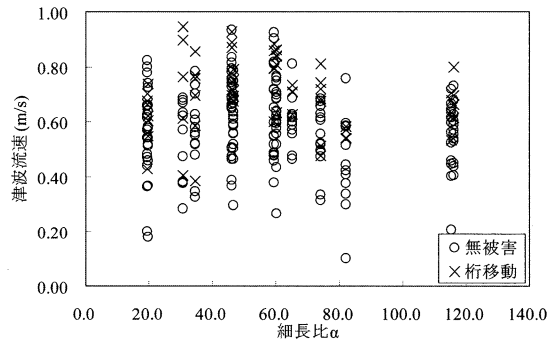
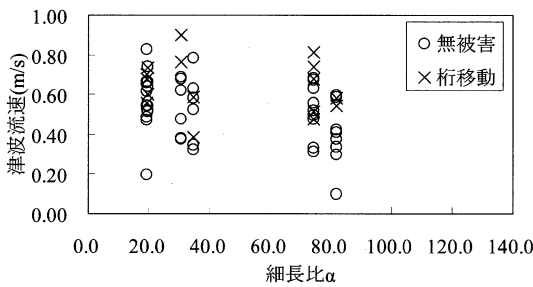
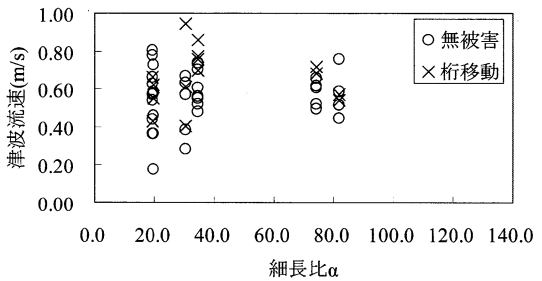


図-6 細長比 α および津波流速と桁移動の関係

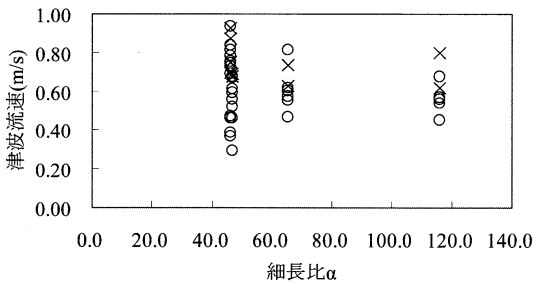


i) 静止摩擦係数 μ が μ_0 の場合

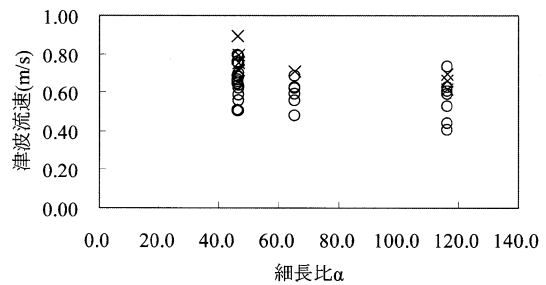


ii) 静止摩擦係数 μ が μ_1 の場合

(a) 桁重量 m が $0 \text{ N}(0\text{g}) < m \leq 0.98 \text{ N}(100\text{g})$ の場合

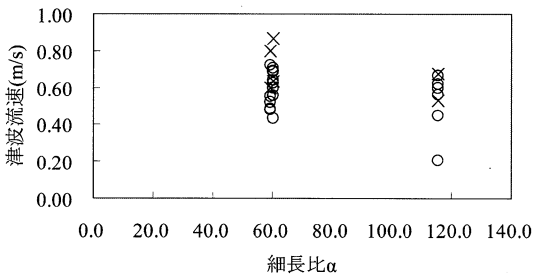


i) 静止摩擦係数 μ が μ_0 の場合

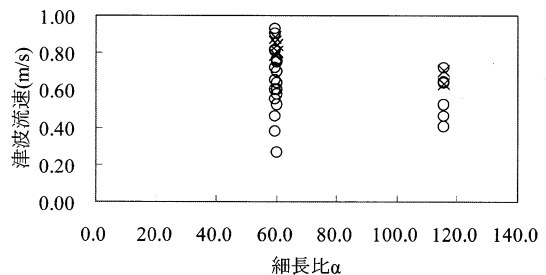


ii) 静止摩擦係数 μ が μ_1 の場合

(b) 桁重量 m が $0.98 \text{ N}(100\text{g}) < m \leq 1.96 \text{ N}(200\text{g})$ の場合



i) 静止摩擦係数 μ が μ_0 の場合



ii) 静止摩擦係数 μ が μ_1 の場合

(c) 桁重量 m が $1.96 \text{ N}(200\text{g}) < m \leq 2.94 \text{ N}(300\text{g})$ の場合

図-7 桁重量 m , 細長比 α および津波流速と桁移動の関係

を 0.9, F_r を実験値相当である 1.0 と仮定した。

図-4(b)によれば、桁模型の背面における最大浸水深さと津波流速との関係を式(6)では適切に近似できていない。これは、津波が桁を越流したことによる影響で流れの乱れが大きくなったためである。一方、図-4(a)および図-4(c)によれば、桁模型の前面における最大浸水深さと津波流速の関係、および桁模型の前面における5秒平均浸水深さと津波流速の関係については式(5)によって精度良く近似されている。従って、以下では津波の浸水深さの指標として桁模型の前面における5秒平均浸水深さ(以下、前面5秒平均浸水深さ)を用いる。

ここで、実験によって得られた津波流速 v と式(4)による津波流速の逆算値 v_L を比較すると図-5のようになる。これらの相関係数は 0.26 であり、相関は低いと言えるが、これは図中、●印で示した 12 ケースのデータ間の整合性が悪いためである。一方、これらを除いた残りの 53 ケースのデータ(図中、○印)のみで相関係数を求めると 0.70 となり、データ間の整合性は高くなる。これより、相関の低い 12 のデータに対しては今後、検証が必要であるが、整合性の高いデータの数を考慮すると 2.(1)で示した桁移動に関する力学モデルは概ね妥当であると考えられる。

(2) 桁の形状寸法および桁重量が桁移動に与える影響

桁の形状寸法および桁重量が桁移動に与える影響を検討するために、桁長 L と断面 2 次半径 r を用いて桁の細長比 α を $\alpha=L/r$ と定義した。なお、断面 2 次半径 r は断面 2 次モーメント I と桁の橋軸方向の断面積 A を用いて $r=\sqrt{I/A}$ より計算できる。以上より求められる細長比 α と実験によって得られた津波流速 v の関係を求めると、図-6 のようになる。図-6 によれば、細長比 α が 40 以下の低い場合には桁移動が生じる津波流速 v のデータ間にばらつきが生じているものの、基本的な傾向として細長比 α が高い場合には低い津波流速で桁移動が生じ、細長比 α が低い場合には高い津波流速で桁移動が生じている。

この結果に基づき桁重量の観点から詳細に検討するために、桁重量 m を 3 区分に分類した上で、細長比 α と津波流速の関係性を求めると図-7 のようになる。図-7 には、静止摩擦係数 μ が μ_0 および μ_1 の場合の結果をそれぞれ示している。いずれの結果からも、同程度の桁重量であれば細長比 α が大きいほど低い津波流速で桁移動が生じることがわかる。

4. 結 論

本研究では、2004 年インド洋大津波によって生じた

スリランカにおける橋梁構造物の津波被害データに基づいて、被災した桁橋の縮尺模型に対する津波被害再現実験を実施することで津波荷重と桁の被害との関係を定量的に明らかにした。得られた知見は以下の通りである。

1) 津波作用によって生じる桁移動という被害形態を桁-橋台間の摩擦力と桁に作用する抗力との力のつりあいに基づいてモデル化することの妥当性を明らかにした。また、松富・飯塚(1998)の津波流速に関する理論式と実験で得られた結果との整合性について検討した。

2) 桁の形状寸法および桁重量が桁移動に影響を与えることを定量的に示した。その結果、桁重量が小さく、細長比 α が大きいほど、桁移動の被害が生じやすく、同程度の桁重量であれば細長比 α が大きいほど低い津波流速で桁移動が生じると言える。

謝辞：本研究は、平成 17 年度科学技術振興調整費(代表者：村尾修筑波大学助教授)の研究の一環として実施したものである。防衛大学校建設環境工学科の藤間功司先生、嶋原良典先生および藤間研究室の方々には本実験テーマに関する貴重なご助言を頂きました。また、筑波大学大学院システム情報工学研究科の水圏環境研究グループの実験水路を使用させて頂き、同グループの京藤敏達先生、武若聡先生、白川直樹先生、辻村太郎氏には貴重なご助言を多々頂きました。実験装置の製作に関しては、同研究科の小島篤志氏に多大なるご協力を頂きました。

参 考 文 献

- 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷毅・高尾誠・金戸俊道・藤井直樹・大森政則(2000)：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，海岸工学論文集，土木学会，第 47 巻，pp. 911-915。
 首藤伸夫(1992)：津波強度と被害，津波工学研究報告，第 9 号，pp. 101-136。
 庄司学・森洋一郎(2006)：2004 年インド洋大津波におけるスリランカの道路構造物の被害，第 9 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp. 221-224。
 松富英夫・首藤伸夫(1994)：津波の浸水深，流速と家屋被害，海岸工学論文集，土木学会，第 41 巻，pp. 246-250。
 松富英夫・飯塚秀則(1998)：津波の陸上流速とその簡易推定法，海岸工学論文集，土木学会，第 45 巻，pp. 361-365。
 松富英夫・大向達也(1999)：津波氾濫流の流体力に関する実験，海岸工学論文集，土木学会，第 46 巻，pp. 336-340。
 Lay, T., H. Kanamori, C. J. Ammon, M. Nettles, S. N. Ward, R. C. Aster, S. L. Beck, S. L. Bilek, M. R. Brudzinski, R. Butler, H. R. DeShon, G. Ekström, K. Satake, and S. Sipkin (2005)：The Great Sumatra-Andaman Earthquake of 26 December 2004. Science, Vol. 308,20,pp. 1127-1133.