

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

庄司学¹・森洋一郎²

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(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

²筑波大学 工学システム学類(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

1. はじめに

2004年12月26日(UTC 00:58:49)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9.0の巨大地震が発生した。この地震に伴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。インド洋を伝播した津波は同日現地時間9時30分頃にはスリランカ東部に到達し、津波の進行方向に位置する北東部だけでなく、南西部の地域にまで津波が回折し多大な被害を与えた。この結果、スリランカにおける死者数および行方不明者数は2005年12月現在36000人に達し、インドネシアに次ぐ被害となっている。以上より、建物および社会基盤構造物の津波被害の概要を調査するとともに、構造物に対する津波荷重の同定を目的として本研究では2回の現地調査を実施した。具体的には、構造物の中でも道路構造物を対象を絞り、60橋に及ぶ道路構造物の津波被害データを収集し、これらに対する分析から津波荷重の逆同定を試みた。

2. 現地被害調査の概要

現地被害調査は、スリランカの南西部および南部の Galle, Matara, Hambantota, ならびに北東部の Trincomalee の諸都市を中心として、2005年2月17日～2月26日および10月31日～1月4日の2回実施した(図1参照)。調査項目としては道路構造物の被害状況、位置(緯度・経度、汀線からの距離)および構造諸元(構造形式、支承形式、橋台形式、桁長、桁高、幅員、桁下高)、ならびに津波の浸水深さおよび浸水状況等である。ただし、津波の浸水深さについては対象構造物の極近傍の家屋などに浸水線が残っている場合はその位置を測定し、浸水線

が残っていない場合は住民によるヒアリングにより求めた。また、津波の浸水深さは調査時刻の潮位を基準とした値であり、天文潮汐の影響が含まれているため、Tsuji et al¹⁾の方法に従い Galle と Colombo の計算天文潮位のデータにより津波襲来時の浸水深さに補正した。図2には一例として Galle 市内の被害の生じたエリアを示すとともに、Galle 市内で被災した橋梁の被害状況を示す(図3, 図4)。以上より、60の被災データより9橋の橋梁の被災データを一例として示すと表1のようになる。表1には4章で求める津波の流速および橋梁の抗力の結果も合わせて示している。多くの橋梁は橋台に桁が置いてあるだけの単純桁橋であり、これらの橋梁を含めて支承を持たない橋梁がほとんどであった。

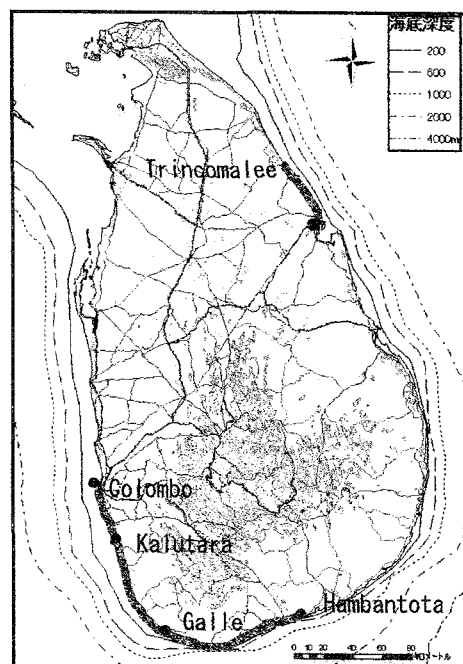


図1 調査対象地域



図2 Galle市内における橋梁被害の位置

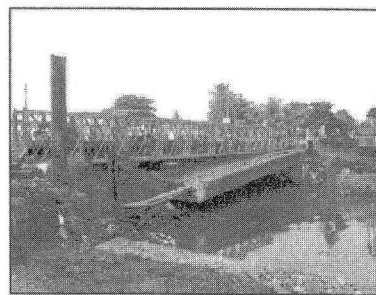


図3 Magalle 橋の被災状況

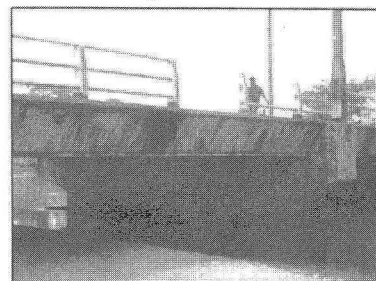


図4 Wakgalmodara 橋の被災状況

表1 橋梁の構造諸元と逆同定した津波の流速 v ，桁の抗力 F_d (60 橋梁中 9 橋梁のみ示す)

橋梁の名称	構造形式	支承形式	海岸線からの距離 (m)	全桁長 (m)	桁下高 (m)	桁長 (m)	幅員 (m)	桁厚 (m)	欄干の高さ (m)	被害状況	潮位補正した浸水深さ (m)	桁の質量 (t)	津波の流速 (m/s)*1	抗力 (k/N)
Akurala Bridge	1span RC	無し	20	23.91	2.31	23.91	10.65	0.92	0.97	落橋・橋台洗掘	8.06	538.73	6.21	875
(Hi-1)	1span RC 橋台石積み	無し	37	5.50	1.91	5.50	11.09	0.37	0.82	落橋・欄干大破	7.11	51.90	6.34	84
Gintota Small Bridge	1span RC	ゴムパッド	148	12.88	1.91	12.88	15.44	0.85	0.96	欄干損傷 桁ズレ	4.04	388.87	7.48	631
Magalle Bridge	1span RC	無し	188	19.12	1.93	19.12	15.82(斜め)	1.10	0.95	桁ズレ(30cm)	6.01	719.23	7.34	1168
(Mih-3)	1span RC	無し	66	5.02	1.05	5.02	5.40	0.80	—	落橋	3.79	49.88	4.42	81
Ahangama Small Bridge	1span RC	無し	15	8.46	2.03	8.46	海側7.855 陸側7.00	0.78	0.87	陸側の桁が落橋	6.54	225.40	7.34	366
(Ma-1)	1span RC	ゴムパッド	107	7.88	1.72	7.88	10.64	0.57	1.01	桁ズレ	3.85	109.96	6.21	179
Bomuwatya Bridge	1span RC	無し	158	17.16	2.93	17.16	10.05	1.04	1.07	桁ズレ	12.37	412.31	6.03	669
h1	1span RC	無し		11.8	3.00	11.8	2.3	0.5	不明	落橋	8.00	23.72	2.89	39

(注) 1) 抗力係数 C_d が2.0の場合の値。

3. 津波の浸水深さに対する橋梁被害のフラジリティ評価

津波による橋梁の被災度を表2のように4段階に分類した。この分類に基づき、60の被災データから浸水していない2橋梁を除き、合計58の橋梁の被災データに対して、浸水深さに対する被災度の分布を表3のように求めた。表3に示す被災率より、対数正規確率紙を用いて最小二乗法により線形回帰直線を求め、被災率 $F_z(r_m)$ を次式で示す対数正規分布でフィッティングした。

$$P_f = F_z(r_m)$$

$$= \int_0^{r_m} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta} \frac{1}{z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln z - \ln c_m}{\zeta} \right)^2 \right] dz \quad (1)$$

ここで z は津波作用による構造物の応答に関する確率変数であり、 r_m 、 c_m は同様に津波作用による構造物の応答および耐力の中央値である。これより式(1)の対数標準偏差 ζ および中央値 c_m を推定した結果を表4に示した。

表4の結果に基づき、津波の浸水深さに対するフラジリティ曲線を求めると、図5のようになる。これより浸水深さが約13mに達したとき50%の橋梁が、桁が流出もしくは桁が移動するという被害となる。

表 2 被災度の定義

被災度	被災状況
A	桁が津波作用によって移動した橋梁、もしくは桁が流出して桁掛かりから完全に落ちた橋梁
B	桁は被害を被っていないが橋台が被災、もしくは橋台裏込め土が洗掘した橋梁
C	桁と橋台は被害を被っていないが欄干が破壊、もしくは流出した橋梁
D	無被害の橋梁

表 4 フラジリティ評価のパラメータ

被災度	A	A+B	A+B+C
傾き	1.10	0.52	0.63
切片	-2.72	-1.02	-1.00
決定係数	0.61	0.96	0.80
平均値	2.47	1.96	1.59
標準偏差	0.91	1.92	1.60
メジアン	11.85	7.08	4.92

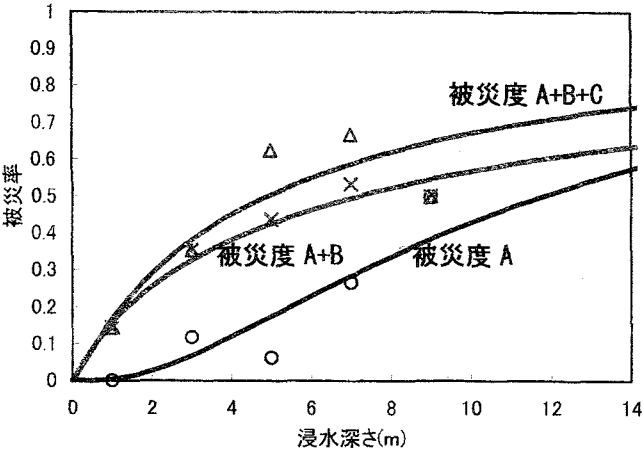


図5 浸水深さに対するフラジリティ評価

表 3 浸水深さに対する被災度の分布

浸水深さ(m)	被災度分布(橋梁数)				累積分布(橋梁数)				被災率(%)			
	A	B	C	D	A	A+B	A+B+C	A+B+C+D	A	A+B	A+B+C	A+B+C+D
0~2	0	1	0	6	0	1	1	7	0.00	14.29	14.29	100.00
2~4	2	4	0	11	2	6	6	17	11.76	35.29	35.29	100.00
4~6	1	6	3	6	6	7	10	16	6.25	43.75	62.50	100.00
6~8	4	4	2	5	4	8	10	15	26.67	53.33	66.67	100.00
8~10	1	0	0	1	1	1	1	2	50.00	50.00	50.00	100.00
10~12	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—	—
12~14	1	0	0	0	1	1	1	1	100.00	100.00	100.00	100.00
計	9	15	5	29	9	24	29	58				

4. 津波の流速の逆同定

ここでは図 6 に示すモデルに基づいて、桁が橋台や桁掛かりから横移動するために必要な摩擦係数 F_f より、桁に対する津波作用力 F_s が大きくなったと想定し、津波に対する桁の抗力 F_d を推定する。以下、桁の抗力 F_d を津波作用力 F_s 相当とみなす。

$$F_s \geq F_f; F_s = F_d \tag{2}$$

なお、 F_f と F_d は次式により求めた。

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_w C_d v_2^2 A \tag{3}$$

$$F_f = \mu m' g \tag{4}$$

ここで、 ρ_w は水の単位体積質量、 C_d は抗力係数、 A は被水圧面積、 μ は桁と橋台上の桁掛かりとの間の摩擦係数、 m' は実効質量である。 ρ_w は海水の物性値として 1030kg/m^3 と仮定した。抗力係数 C_d の値は文献 2 を参考に 0.5 から 2.0 まで変化させた。 μ は桁が橋台に直接置いてある状態を想定

し、鉄筋コンクリート部材同士の摩擦を考慮して、0.3 と仮定した。 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とする。 m' の設定に当たっては、鉄筋コンクリートの単位体積質量を 2300kg/m^3 と仮定した。以上より式(2)~(4)に基づいて津波の流速 v を求めると次式のようにになる。

$$v = \sqrt{\frac{2\mu m' g}{\rho_w C_d A}} \tag{5}$$

式(5)より求められた津波の流速 v (m/s) を表 1 に示す。また、求められた流速を式(3)に代入して桁の抗力 F_d を求め、これらの結果を同様に表 1 に示した。求められた津波の流速 v と当該橋梁地点の極近傍で計測された浸水深さとの関係を図示すると図 7 のようになる。図 7 には津波が襲来した際にスリランカで撮影されたビデオ映像より解析した津波の流速のデータも参考値として併せてプロットしている。図 7 より、桁の抗力係数 C_d が 2.0 の場合、浸水深さが 3.79m から 12.37m に高くなるに従って、津波の流速 v は 2.89m/s から 7.48m/s に変化する

ことがわかる。図7の結果は式(2)の仮定の下で算出したので、求められた津波の流速 v は津波の流速の下限値と考えることができる。よって、実際の津波の流速 v は橋梁被害状況と合わせて考えると、これらの結果より速い可能性が高い。

また、松富・飯塚²⁾によって提案されている津波の流速算定式を示すと次式のようになる。なお、式(6)は津波作用に抗する物体の前面における津波の流速算定式であり、一方、式(7)は背面における津波の流速算定式である。

$$\frac{u}{\sqrt{gR}} \doteq \sqrt{\frac{2C_v^2 F_r^2}{F_r^2 + 2C_v^2}} \sqrt{\frac{h_f}{R}} \quad (6)$$

$$\frac{u}{\sqrt{gR}} \doteq F_r \sqrt{\frac{h_r}{R}} \quad (7)$$

ここで、 u は陸上流速(m/s)、 R は対象地点付近の津波高さ(m)、 C_v は流速係数、 F_r はフルード数、 h_f は構造物の津波進行方向前面の浸水深さ(m)、 h_r は構造物の津波進行方向背面の浸水深さ(m)である。以上より、式(6)、式(7)により求めた流速を図7上に示した。なお、 C_v は0.9、 F_r は2.0とした。

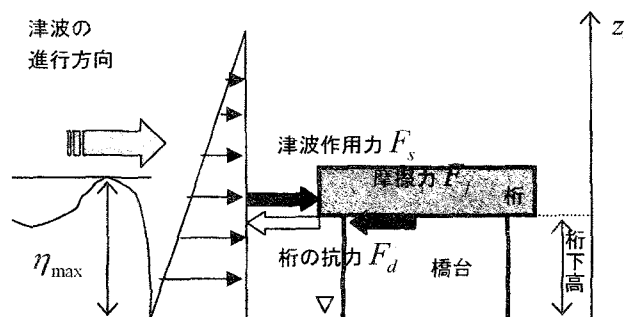


図6 橋に作用する津波荷重のモデル化

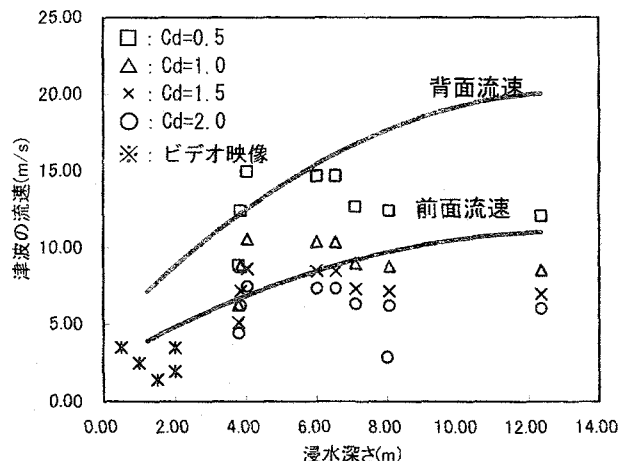


図7 津波の浸水深さと流速の関係

5. まとめ

本研究では、スリランカにおいて津波被害を受けた60の道路構造物を対象とし、これらの構造諸元、立地地点の極近傍で計測された浸水深さなどの被災データに基づき、津波の浸水深さに対するフラジリティを求め、津波の流速 v 、桁の津波に対する抗力 F_d の逆同定を行った。これらの結果、津波の浸水深さと構造物の被災率の関係および津波の流速と浸水深さの関係が明らかになった。

謝辞：本研究にあたっては平成16年度および17年度科学技術振興調整費(代表者、家村浩和京都大学教授)の助成を得て実施したものである。また本調査団の目黒公郎先生、村尾修先生、Srikantha Herath先生、中埜良昭先生、高島正典先生には多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Tsuji, Y., Namegaya, Y., and Ito, J : Astronomical tide levels along the coasts of the Indian ocean , <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/namegaya/sumatera/tide/index.htm>, 参照 2005.11.07
- 2) 松富英夫, 飯塚秀則 : 津波の陸上流速とその簡易推定法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 361-365, 1998