

2004年インド洋津波におけるスマトラ島北西部沿岸の 被災橋梁に関する数値計算

Numerical Calculation of 2004 Indian Ocean Tsunami around the Damaged Bridges in the Northwest Coast of Sumatra Island

鳴原良典¹・藤間功司²・幸左賢二³・廣岡明彦⁴
二井伸一⁵・庄司 学⁶・宮島昌克⁷・小野祐輔⁸

Yoshinori SHIGIHARA, Koji FUJIMA, Kenji KOSA, Akihiro HIRO-OKA
Shinichi NII, Gaku SHOJI, Masakatsu MIYAJIMA and Yusuke ONO

The survey result reported that Kr. Ritting Bridge suffered no damages although the tsunami was very high, while Lueng Ie Bridge slid approximately 3m although the tsunami was small. We conducted several field investigations around Northwest coast of Sumatra, and the surveys made the detailed numerical simulation around a structure possible. Our numerical simulation showed that the flow velocity at Lueng Ie Bridge was larger than that of Kr. Ritting Bridge. In order to understand whether the girder slide occurred or not, we defined a Safety Factor (S.F.). S.F. of Kr. Ritting Bridge was big enough, and that of Lueng Ie Bridge was small. Hence there was possibility that Lueng Ie Bridge was slide because the horizontal wave force exceeded the resistant force.

1. はじめに

2004年インド洋津波では、インド洋沿岸諸国で多くの道路施設が被害を受けた。中でもスマトラ島の海岸線近傍に位置する橋梁は、津波により桁の流出や移動が生じ使用不能となった事例が報告された。写真-1 (a) は Banda Aceh 市街地から北東に位置する Cut 川橋の被災状況であり、10 径間 PC 桁が完全に流出している。また、幸左ら (2007) はスマトラ島北西部の津波による橋梁被害の現地調査を実施し、調査対象橋梁の約 50% が供用不可能な被害を受けたことを報告している。

このような背景から、津波による橋梁構造物の被害評価手法の確立が急務であり、近年、水理実験や数値計算により橋梁被災のメカニズムの解明を目的とした研究 (五十里ら, 2007; 庄司ら, 2009 など) が数多く報告されているが、特に上揚力のメカニズムについて課題が多く残されており、評価手法は未だ確立していない。

一方で、実際の津波による橋梁被災の程度は津波の規模や地形条件によって異なると考えられる。インド洋津波においても、大規模な橋梁で大破したものもあれば小規模な橋梁でほぼ無被害だったものもあり、その程度は様々であったが、これらを実地計算で評価した例はない。そこで本研究では、インド洋津波で被害を受けた 2 橋梁の被害状況が異なった要因を明らかにするため、実現での橋梁被災の評価としてスマトラ島北西部を対象にした 2004 年インド洋津波の数値計算を実施した。

2. 解析対象地域と解析対象橋梁

本研究では、幸左ら (2007) の現地調査により報告された被害橋梁の中でも、付近に信頼できる津波痕跡高 (藤間ら, 2007) があり、かつ被害の程度に差がある Kr. Ritting 橋と Lueng Ie 橋の 2 橋梁を対象とした。各橋梁の緒元を表-1 に、位置関係を図-1 (b) に示す。Kr. Ritting 橋 (5°25'29"N, 95°14'35"E) は Lho-nga 町の南に位置し、海岸線付近に架設されている RC フォロー桁の 2 径間橋梁である。この付近の津波高は約 20m と非常に大きかったものの、橋梁の被害としては欄干が損傷を受けたのみであり、橋梁本体は無被害であった (写真-1 (b))。一方、Lueng Ie 橋 (5°15'04"N, 95°15'11"E) は Blangme 町に位置し、海岸線から 0.5km 内陸の河川に架設されている RC 桁の単径間橋梁である。同地点での津波高は約 9m と Kr. Ritting 橋に比べて小さかったものの、橋桁上部構造が上流側に 3m 移動した (写真-1 (c))。

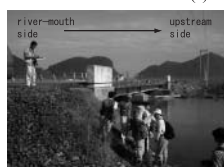
1 正会員	博(工)	防衛学校助教システム工学群建設環境工学科
2 正会員	工博	防衛学校教授システム工学群建設環境工学科
3 正会員	Ph.D.	九州工業大学教授工学部建設社会工学科
4 正会員	工博	九州工業大学准教授工学部建設社会工学科
5 正会員		株式会社ウエスコ岡山支社設計部構造設計課
6 正会員	博(工)	筑波大学大学院准教授システム情報工学研究科
7 正会員	工博	金沢大学大学院教授理工学領域環境デザイン学系
8 正会員	博(工)	京都大学大学院助教工学研究科都市社会工学専攻

表-1 橋梁の緒元

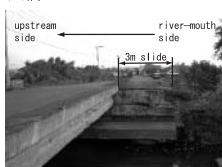
	Kr.Ritting橋	Lueng Ie橋
橋種	RCフォロー桁	RC桁
橋長	26.2m	19.1m
径間数	2径間	1径間
桁長	13.1m	19.1m
幅員	7.7m	10.2m
構造高	1.2m	1.7m
桁下高	1.0m	2.4m



(a) Cut川橋



(b) Kr.Ritting橋



(c) Lueng Ie橋

写真-1 橋梁の被災状況

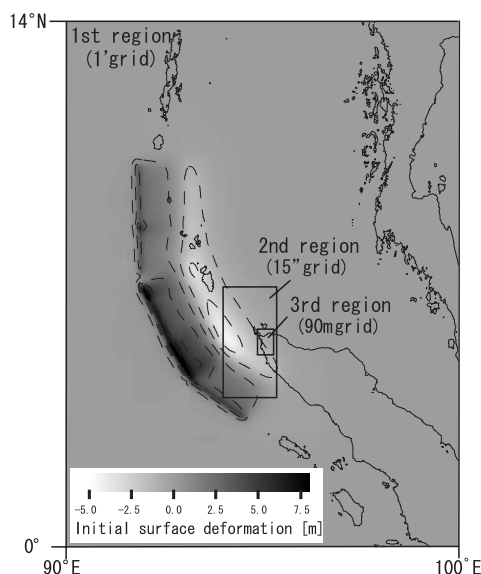
3. 計算条件

(1) 地形データの作成

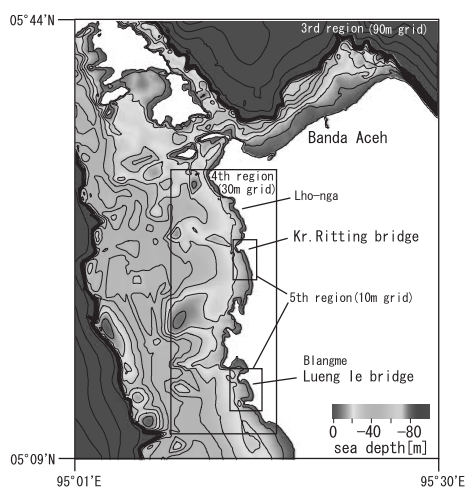
2004年インド洋津波のイベント時に橋梁に作用した津波波力を推定するためには、スマトラ島周辺での津波伝播・遡上計算を行い、橋梁位置での津波水位と流速を算定する必要がある。その際、橋梁周辺の地形を考慮した詳細な計算を行うため、陸域では10m程度の空間解像度の地形データが必要となる。

さて、現在我々が入手可能な地形データとしては、海図と市販もしくは無料配布されているデジタルデータが存在する。海図は図-2の範囲を説明する1/500,000スケールと1/125,000スケールの2種類あり、デジタルデータは海域について1分格子のGEBCO (2008-09-23 参照) が、また陸域について約90m格子のSRTM (2008-06-23 参照) が入手可能である。しかしながら、GEBCOは水深50m以浅の精度が悪く、SRTMについては空間解像度が不十分であり、また地盤高の値もメートルのオーダーである。

そこで本研究では、2007年(8月10日～8月17日)、2008年(8月9日～8月16日)の両期間において、スマトラ島北西部沿岸の深浅測量と地形測量を実施した。海域では、スマトラ島北部の水深50m以浅の沿岸域(5°11'Nから5°30'Nまでの範囲)をボートにより移動しながら、



(a) 計算領域(1次～3次領域)と初期水位分布



(b) 計算領域(3次～5次領域)と橋梁の位置

図-1 計算領域

測深機を使い水深を測定した。一方陸域では、トータルステーションとGPS測量により橋梁周辺の約1km四方の地盤高を計測した。

以上により、深浅測量と陸上測量の結果とデジタイザーにより海図の等水深線を読み取ったデータ、そしてGEBCOとSRTMによるデータを組み合わせることで数値計算に必要な水深・地形データを図-1、図-2のように作成した。図-2(a)では、Kr. Ritting橋の後背地における急勾配の山や橋梁周辺の河川や岩山などが存在する。また、図-2(b)ではLueng Ie橋の後背地が低平地であることがわかる。このように、津波遡上に影響を与える地形条件も忠実に表現している。

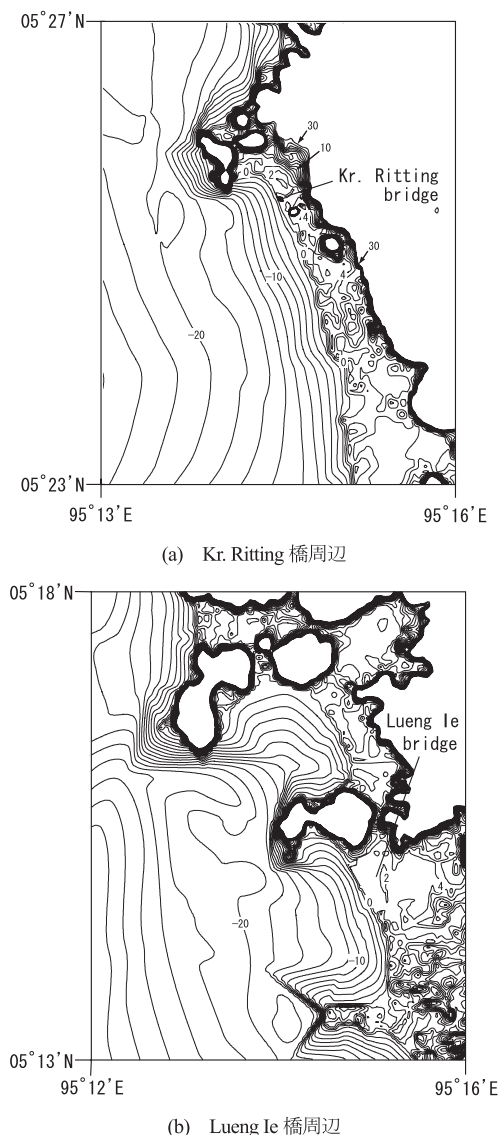


図-2 5次領域の地盤高（等高線正值）と水深分布（等高線負値）

(2) 数値計算条件

前項で述べた方法により作成した水深・陸上地形データを利用した2004年インド洋津波の再現計算を行うにあたり、以下のような計算条件を設定した。

津波数値計算で使用した初期水位分布を図-1(a)に示す。波源モデルとしては大家ら(2006)の断層モデルを採用した。同モデルは人工衛星Jason-1の海面高度計の空間波形との比較によりタイ・インドネシアの津波伝播を説明でき、かつBanda Aceh市街地の浸水域と良い整合性を得られたことが確認されている。計算領域での空間格子の構成としては、図-1、図-2に各計算領域（1次～5次領域）の位置を示している。波源域から沿岸部に近づく

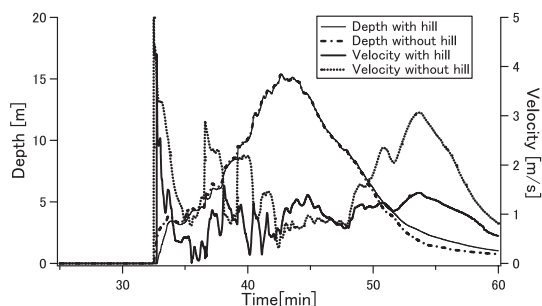


図-3 Kr.Ritting 橋位置での津波浸水深と流速の時系列

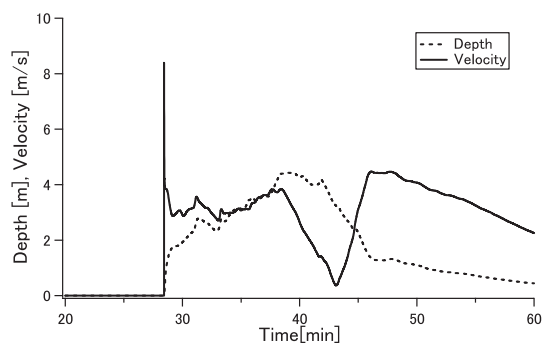


図-4 Lueng Ie 橋位置での津波浸水深と流速の時系列



写真-2 Kr. Ritting 橋梁付近の岩山

につれ、1次領域から5次領域までそれぞれ1分、15秒、90m、30m、10m格子に細分化した。また、時間ステップは0.1sとし、再現時間は地震発生から1時間まで行った。

使用した支配方程式としては1次領域（1分格子）および2次領域（15秒格子）では地球座標系の線形長波理論式を、また3次領域以降（90、30、10m格子）では直交座標系の非線形長波理論式とし、海底摩擦や陸上遡上も考慮した。支配方程式の差分化には後藤・小川（1982）に基づくStaggered Leap-frog法を利用し、遡上計算は小谷ら（1998）の方法を採用した。

4. 計算結果

(1) 橋梁付近の津波浸水深と流速

各橋梁位置での浸水深と流速の時系列をKr. Ritting橋について図-3に、Lueng Ie橋について図-4に示す。なお、ここで示した津波水位と流速は通過波のものであり、数

値計算において橋梁の構造による流れへの影響は考慮されていない。Kr. Ritting 橋での浸水深は約15m, Lueng Ie 橋の周辺は約4.5mであり, この結果は付近でのIUGG (2008-12-06 参照) に報告された実際の津波痕跡高 (それぞれ約20m, 6.9m) よりも若干小さいが調和的といえる。また両者を比較すると, Kr. Ritting 橋での浸水深は Lueng Ie 橋よりも十分に大きい, 流速は小さい。Lueng Ie 橋では約3m/sの流速が約10分継続するのに対し, Kr. Ritting 橋では津波が到達する瞬間で4~5m/sと大きいものの, その後は約1m/s程度である。

このような違いが生じた理由として, 両者の地形の違いが挙げられる。Kr. Ritting 橋では, 写真-2に示すような海岸線側に高さ約15mの岩山が存在している。図-3において, 地形データから岩山の地盤高を取り除いた場合の計算結果と比較すると流速が約1m/s低減されており, 図-5 (a) で陸上遡上する瞬間の浸水状況と流速ベクトルの分布によると, 岩山により津波は二手に分かれ, 橋梁に直接到達していないことが確認できる。また, 橋梁の後背地は海岸線から300m内陸側において急勾配の山であり, 図-5 (a) の時刻から遡上津波の速度を3.5m/sと仮定すると, 先端部は約1分半後に山側で反射し, 約3分後に橋梁の位置に戻ってくることになる。図-5 (b) は山側での反射波と後続の入射波により重複波が形成している状態であり, 橋梁周辺での流速が小さくなったと考えられる。以上より, Kr. Ritting 橋では岩山による遮蔽効果と橋梁背後の地形による重複波の形成によって流速が弱まったといえる。一方で, 図-2 (b) で示したように Lueng Ie 橋の背後は低平地である。よって, 遡上した津波は図-5 (c) のように橋梁位置において流速が弱まらずにそのまま通過したと考えられる。

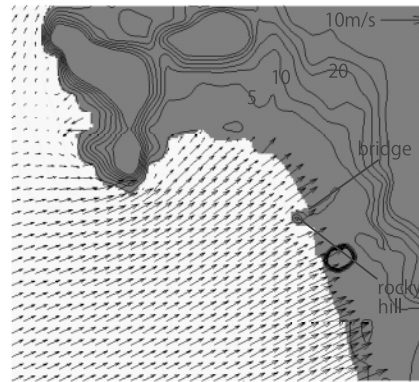
図-6は, 各橋梁位置での浸水深と流速から計算された運動量フラックスの時系列である。この図から全体的に Lueng Ie 橋での運動量フラックスの方が大きく, 特に最大値については Lueng Ie 橋は Kr. Ritting 橋のそれよりも約2.5倍の大きさである。したがって, 橋梁に作用した津波波力は Lueng Ie 橋の方が大きかった可能性が高い。

(2) 桁移動の安全率

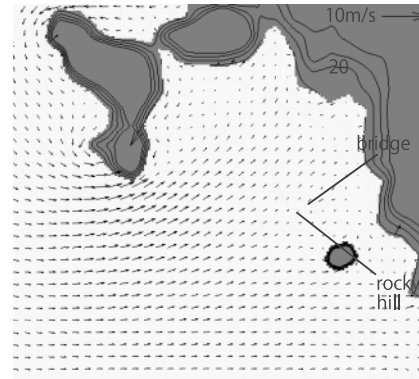
橋桁が流体力により滑動するか否かを判定するための指標として, 本研究では数値計算結果から得られる橋梁に作用する津波の水平波力と, 桁重量による抵抗力との比を安全率 (Safety Factor, S.F.) として, 以下の式で定義した。

$$S.F. = \frac{\mu(\rho V g - \rho_w V' g - F_z)}{F_x} \dots\dots\dots (1)$$

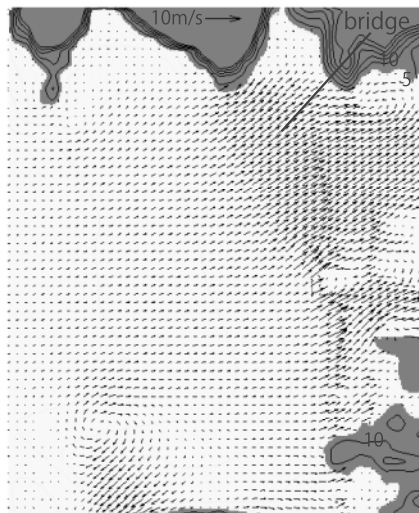
ここで, ρ は鉄筋コンクリートの密度 (=2,500kg/m³), ρ_w は海水の密度 (=1,030kg/m³), g は重力加速度 (=9.8 m/s²), μ は鉄筋コンクリートの摩擦係数であり, $\mu=0.635$



(a) Kr. Ritting 橋周辺 (32 分 35 秒)



(b) Kr. Ritting 橋周辺 (42 分 40 秒)



(c) Lueng Ie 橋周辺 (38 分)

図-5 津波の浸水状況と流速の空間分布
(白と灰色の境界が津波の先端を示す)

(庄司ら, 2009), V は桁の体積 (m³), V' は水中で占める桁の体積 (m³) である。 F_z は桁に作用する上揚力 (N) であり, 本計算は浅水理論であるため0と仮定している。

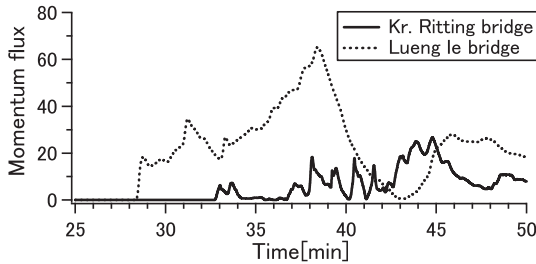


図-6 各橋梁位置での運動量フラックスの時系列

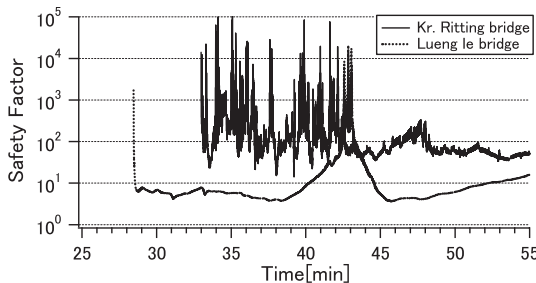


図-7 各橋梁に対するS.F.値の時系列

さらに F_x は桁に作用する水平波力 (N) であり、以下のモリソン式の形で表わされる。

$$F_x = \frac{1}{2} \rho_w C_d A q^2 + C_m \rho_w A B \frac{dq}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 C_d は抗力係数であり、庄司ら (2009) の結果から0.96を採用し、 q は流速 (m/s)、 C_m は慣性力係数で1と仮定している。 dq/dt は加速度であり、数値計算で得られた流速を微分することで算出される。また、 A は水中で占める桁前面の投影面積 (m²) であり、 B は幅員 (m) である。式 (1) による評価から、S.F.値が1未満であれば、津波波力が桁重量による摩擦力を上回り、桁が水平方向に移動することを意味する。

計算結果として、図-7に各橋梁の津波波力による水平方向滑動に対する安全率 (S.F.) の時系列を示す。Kr. Ritting橋は桁重量による抵抗力が津波波力に対して数十～数百倍のオーダーであり十分に大きい。一方Lueng le橋では両者が1のオーダーである。なお、今回のS.F.値の算出には上揚力は0としており、数値計算による津波高も現地調査による痕跡高よりも小さい。そこでLueng le橋について、計算値が痕跡値と同等の値を得たとして流速を見積もり (流速が浸水深に比例すると仮定し、6.9/4.5倍とする)、また、庄司ら (2009) は水理実験から上揚力 F_z が水平力 F_x と同オーダーとなる場合があることを示しているため、 $F_z=F_x$ としてS.F.値を計算すると、S.F.=0.8～2とさらに小さい値を推移することになる。したがって、Lueng le橋は水平波力が摩擦力を上回り、滑動により桁が移動した可能性が高いと考えられる。今後、

S.F.値の更なる精度向上のためには、適切な波源モデルの決定や精度の良い上揚力の評価手法の開発が必要である。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に列挙する。

- (1) スマトラ島北西海岸の津波遡上計算を実施するため現地で深浅測量と陸上地形測量を実施し、水深50m以浅の詳細な海底・陸上地形データを作成した。
- (2) 数値計算によりKr. Ritting橋では地形効果により津波流速が弱められ、Lueng le橋では後背地が低平地であることから、流速が弱まらず橋梁を通過したと考えられる。両者の運動量フラックスの比較から、橋梁に作用した津波波力はLueng le橋の方が大きかった可能性がある。
- (3) 各橋梁の津波波力による水平方向の滑動に対する安全率 (S.F.) を新たに導入した。Kr. Ritting橋でのS.F.値は十分大きく、Lueng le橋は1のオーダーであることから、Lueng le橋は水平波力により桁が滑動した可能性が高いことを明らかにした。

謝辞：本研究を行うに際し、研究の一部は「国土交通省道路局、道路政策の技術研究開発」(代表：幸左賢二)より行われた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 五十里洋行・後藤仁志 (2007)：津波氾濫による橋梁被災過程の数値シミュレーション，海岸工学論文集，第54巻，pp. 211-215.
- 大家隆行・越村俊一・柳澤英明・今村文彦 (2006)：2004年インド洋大津波によるBanda Aceh市街地の津波氾濫解析と被害調査，海岸工学論文集，第53巻，pp. 221-225.
- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫 (1998)：GISを利用した津波遡上計算と被害推定法，海岸工学論文集，第45巻，pp. 356-360.
- 幸左賢二・内田悟史・運上茂樹・庄司 学 (2007)：スマトラ地震の津波による橋梁被害分析，土木学会地震工学論文集，第29巻，pp. 895-901.
- 後藤智明・小川由信 (1982)：Leap-frog法を用いた津波の数値計算法，東北大学工学部土木工学科，52p.
- 庄司 学・森山哲雄・藤間功司・嶋原良典・笠原健治 (2009)：単径間橋梁に作用する碎波津波の荷重に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.55A，pp. 460-470.
- 藤間功司・嶋原良典・Charles SHIMAMORA・松富英夫・榊山勉・辰巳大介・宮島昌克・伯野元彦・竹内幹雄・小野祐輔・幸左賢二・庄司 学・田崎賢治 (2007)：スマトラ北西海岸における2004年インド洋津波の痕跡高分布，土木学会地震工学論文集，第29巻，pp. 874-880.
- IUGG Tsunami Commission：Tsunami measurement data compiled by IUGG Tsunami Commission，
<http://www.nda.ac.jp/cc/users/~fujima/TMD/>，参照 2008-12-06.
- The General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)：
<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gebco/>，参照 2008-09-23.
- NASA, Shuttle Rader Topography Mission (SRTM)：
<http://srtm.usgs.gov/>，参照 2008-06-23.