

スリランカ・キリンダ漁港を対象とした2004年インド洋大津波による 土砂移動過程の解析

Inundation and topographic Change due to the 2004 Indian Ocean Tsunami at the Kirinda port, Sri Lanka

高橋潤¹・後藤和久²・大家隆行³・柳澤英明⁴・今村文彦⁵

Jun TAKAHASHI, Kazuhisa GOTO, Takayuki OIE, Hideaki YANAGISAWA, Fumihiko IMAMURA

Tsunami can yield extensive topographic change, which causes secondary damages such as collapse of coastal structures. Therefore, it is important to analyze the topographic change due to the tsunami. In this study, we investigated spatial variation of sedimentation and erosion due to the 2004 Indian Ocean tsunami at the Kirinda port, Sri Lanka by using the bathymetric data before (Nov, 2004) and after (Feb, 2005) the tsunami. We also conducted numerical analysis of tsunami propagation and sediment transport. The results show that the tsunami caused approximately 5m erosion or deposition, and the shoreline was moved approx. 100m toward the offshore. Moreover, backwash that was redirected by coastal structures played a main role of significant erosion around the wave breaker.

1. はじめに

津波は人的被害のみならず、大規模な土砂移動を引き起こす。それに伴い、海岸地形の変化、沿岸構造物の倒壊、発電所の取放口の閉塞、港の機能障害など様々な2次の被害を引き起こす恐れがある(首藤, 1989)。一方、近年では津波堆積物を用いた年代測定により、歴史津波の再来間隔の推定を行う試みもなされている(箕浦・中谷, 1990, 今村ら, 1997)。しかし、津波による土砂移動に関しては、不明な点が多い。例えば、津波により引き起こされる土砂の浸食・堆積過程、港湾施設が土砂移動にどのように影響するか、といったことは把握されていない。

津波による土砂移動のモデル化に焦点を当てた既往の研究として、高橋ら(1992, 1999)、藤井ら(1998)、西畑ら(2005)が挙げられ、それぞれ津波による土砂移動モデルを提案し、現象の再現を試みている。高橋ら(1992, 1999)、藤井ら(1998)は、1960年チリ地震津波により地形変化が観測された宮城県気仙沼湾を対象とし、モデルの適用および再現性の検討を行っている。しかし、津波発生4年前の測量データを用いているため、その間に波浪などの津波以外の要因が海底地形の変動に影響を与えている可能性が排除できない。そのため、純粋に津波による地形変化を検討するには問題があると考えられる。また、内湾のみの測量データのため、外洋に面した場所での土砂移動の実態は不明である。西畑ら(2005)は、2004年インド洋大津波により大規模な土砂移動が観察さ

れたスリランカ・キリンダ漁港を対象として、新たに海底勾配の効果を考慮したモデルを提案し、地形変化の再現を試みている。西畑ら(2005)は、津波直前直後の深浅測量データを用いてモデルの検討を行っているものの、一調査線上の測量データのみを用いているため、空間的な土砂移動に対する検討は十分になされていない。

このように、津波による土砂移動に関して、まだ十分な検討がなされていないという問題の背景には、これまで津波による土砂移動の面的分布を示したデータが得られなかったということが挙げられる。今回、我々は国際協力機構(JICA)から、スリランカ南東部に位置するキリンダ漁港における、2004年11月と2005年2月の漁港全体の深浅測量データの提供を受けた。これは、2004年インド洋大津波の直前直後のデータであり、津波による土砂移動現象の実態を解明するための重要なデータである。

そこで本研究では、このデータを用いてまず漁港周辺の浸食堆積分布を調べる。次に、その分布と津波および土砂移動の数値計算により得られた結果とを比較し、土砂移動がどのように発生するかを検証する。更に、港湾施設が土砂移動に与える影響について考察する。

2. キリンダ漁港概要

本研究で対象とするキリンダ漁港は、スリランカ南東部(6.12N, 81.33E)に位置している。図-1にキリンダ漁港の平面図を示す。主な構造としては、漁港の中心部に位置する主防波堤、北側の副堤、港内の旧副堤からなり、さらに、土砂輸送を抑制するため、主防波堤の400mほど南側に防砂堤が設置されている。

2004年のインド洋大津波発生前には、当漁港の主防波堤と旧副堤の間に土砂が堆積し、閉塞が起きていた(柴山ら, 2005)。しかし、津波来襲後には閉塞が解消している様子が確認された(西畑ら, 2005)。

1 学生会員 東北大学大学院工学研究科
2 博(理)東北大学助教 大学院工学研究科
3 正 会 員 工修 パシフィックコンサルタンツ(株)
4 正 会 員 博(工)東北大学大学院工学研究科
5 正 会 員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科

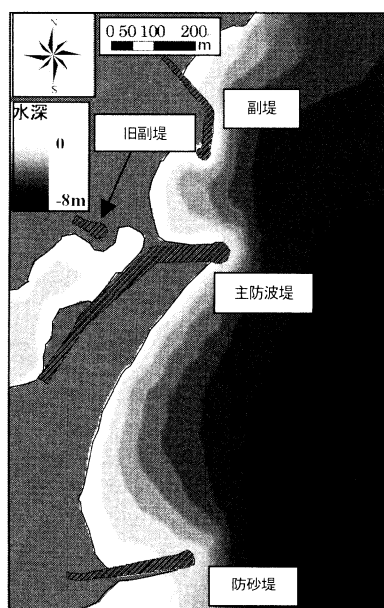


図-1 津波来襲前(2004年11月)のキリンダ漁港平面図

3. 津波による地形変化

2004年11月と2005年2月の深浅測量データを数値化し、両者を比較することによってキリンダ漁港におけるインド洋大津波による浸食・堆積分布を求めたものを図-2に示す。

図-2より、主防波堤、旧副堤間と主防波堤の南側沿いの一部で浸食が卓越し、他の部分では全般的に堆積という傾向がみられた。特に、測量範囲北側の汀線付近での堆積が著しい。沖合では、全体的に0.5~1m程度の堆積が生じている。また、測量範囲全体での総浸食量は36万 m^3 、総堆積量は64万 m^3 であり、最大で5m程度の浸食・堆積が発生していること、また最大で汀線が100m近く沖側へ移動している様子が確認できる。また、全体的な傾向として土砂移動は主に汀線付近で発生していることが分かった。

4. 数値モデルの概要

本研究では、まず津波の浸水計算を行い、検潮記録や被害調査により得られたスリランカ南東部の浸水域および浸水深と整合性の高い断層パラメータを決定した。次に、その計算から得られた水位変化を土砂移動計算の境界条件として、地形変化計算を行った。

(1) 津波の浸水計算

津波の浸水計算は次の手順で行った。まず、地震による初期地盤の変動水位をManshinha & Smylie(1971)による方法で計算した。計算負荷を軽減するため、外洋では空間格子間隔を大きく、対象のキリンダ漁港に近づくに

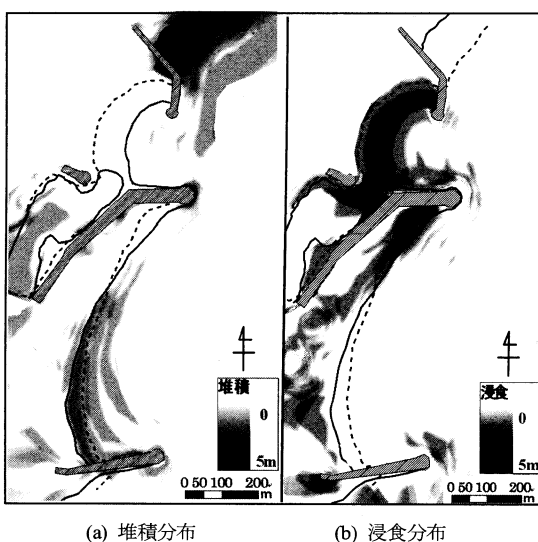


図-2 インド洋大津波によるキリンダ漁港での地形変化。津波前、津波後の地形を比較して作成。実線、破線は津波前(2004年11月)、および津波後(2005年2月)の汀線を表す

つれて空間格子間隔を小さくするという接続計算手法を用いた(後藤・小川, 1982)。計算領域を6つに分け、広領域(領域A)から狭領域(領域F)へ、空間格子間隔を3分の1にしながら接続を行い、最狭域の領域F(6.3km × 5.7km)では、7.59m空間格子でキリンダ漁港を再現した。遡上を考慮した領域D、Eでは陸上のデータとして90mメッ

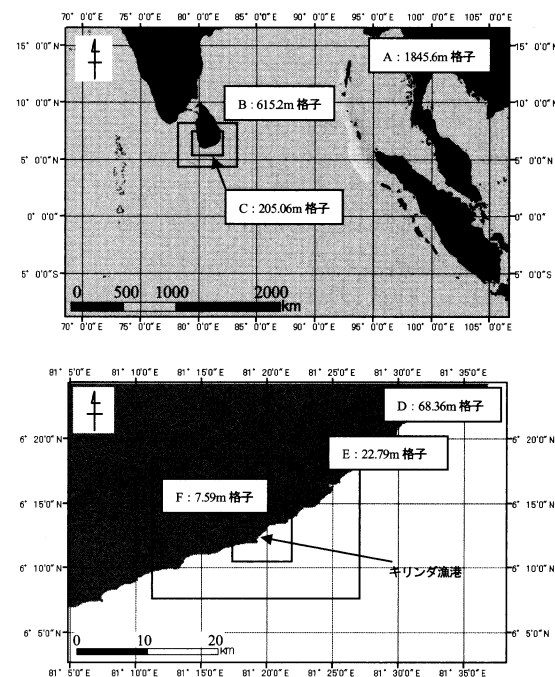


図-3 計算領域および空間格子間隔

シュのSRTMデータを用い、領域Fでは90mメッシュのSRTMと、西畑ら(2005)のコンター図を補間したものを用了。計算で用いた領域および空間格子間隔を図-3に示す。領域Aでは地球座標系における線形長波理論を、領域B～Fでは直交座標系における非線形長波理論を用いた。計算の再現時間は地震発生後240分とした。

(2) 土砂移動モデル

津波による地形変化を再現した研究としては、高橋ら(1992, 1999), 藤井ら(1998), 西畑ら(2005)などが挙げられるが、本研究では高橋ら(1999)のモデルを用い地形変化の再現を試みる。

本モデルは、流砂を滑動や転動により底面と接触を保ちながら移動する掃流砂と、水中に浮遊し流水とともに移動する浮遊砂に分けて、独立に取り扱っている。掃流砂量及び掃流砂層・浮遊砂層の交換砂量はそれぞれ次式で表される。

$$q_B = 21\sqrt{sgd^3\tau_*^{3/2}} \quad (1)$$

$$w_{ex} = 0.012\sqrt{sgd\tau_*^2} - w_0\bar{C} \quad (2)$$

ここで q_B は掃流砂量、 s は砂粒の水中比重、 g は重力加速度、 d は砂粒の粒径、 τ_* はシールズ数、 w_{ex} は各層間の交換砂量、 w_0 は砂粒の沈降速度、 $\bar{C}$ は平均浮遊砂濃度である。

土砂移動計算は、津波浸水計算の領域Fを対象として行い、空間格子間隔は7.59mとした。流水計算には、非線形長波理論を用いた。本モデルでは、砂の粒径をパラメータとして与える必要があるが、キリンダ沖での砂の粒径分布データを入手することができなかった。そのため、今回はキリンダから南西方向に約20kmの距離にあるハンバントータ沖における砂の平均粒径120 μ mを用いた。その他の諸条件は高橋ら(1999)と同様とした。

5. 再現計算結果

(1) 浸水計算の再現性の検証

本研究では、

1. コロンボの検潮記録による第一波到達時間・波高
2. ヤーラ、キリンダ、ハンバントータでの第一波到達時間の証言情報
3. スリランカ南東部(領域D)での浸水域・浸水高の3点に着目し、これらの再現性の高いものを断層パラメータとして採用した。大家ら(2006)の断層モデルの滑り量を中心に变化させて、スリランカにおける計算の再現性を向上させた。

表-1にヤーラ、キリンダ、ハンバントータ、コロンボにおける計算および証言・検潮記録による津波第一波到

表-1 スリランカ南東部各都市、およびコロンボにおける波第一波到達時間・最大波高の比較

地区	津波第一波到達時間(地震発生から)(分)		最大波高(m)	
	計算値	証言・検潮記録	計算値	実測・検潮記録
ヤーラ	120	131~136(証言情報)	11.0	10.5(実測)
キリンダ	120	136(証言情報)	8.1	8.35, 6.93~9.26(実測)
ハンバントータ	125	131~143(証言情報)	5.9	6.1(実測)
コロンボ	165	171(検潮記録)	2.0	2.3(検潮記録)

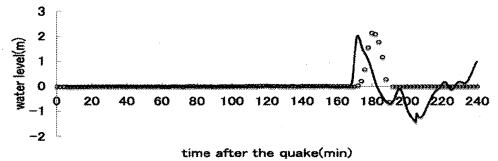


図-4 コロンボにおける計算値(実線)と検潮記録(白丸)の比較

達時間を示す(西畑ら, 2005, Goff et al., 2006, Inoue et al., 2007). コロンボの検潮記録によると、コロンボへの津波到達時間は地震発生後約171分後である(図-4). 計算では6分ほど早く到達しているが、波高は概ね一致した。ヤーラ、キリンダ、ハンバントータにおいても、証言に基づく到達時間と比較し、計算結果の方が全体的に10~15分程度早く到達するという結果が得られた。

図-5に、スリランカ南東部における計算値と実測により得られた浸水域を示す。図-5に見られるように、スリランカ南東部広域(領域D)にて、概ね良好な計算結果を得た。ハンバントータでは浸水高6.1mが観測されている(Goff et al., 2006). 計算における同一地点での浸水高さは5.9mであった。キリンダにおける浸水高であるが、漁港近くの建物で浸水高8.35mが観測されている(西畑ら, 2005). 計算における同一地点の浸水高は8.1mであった。また、柴山ら(2005)により、キリンダ周辺では6.93~9.26mの浸水高が観測されており、計算値はこの値とも整合した。また、ヤーラでの浸水高の実測値は10.5mであり(Inoue et al., 2007), 同一地点の計算値は11.0mと良好な再現性が得られた。

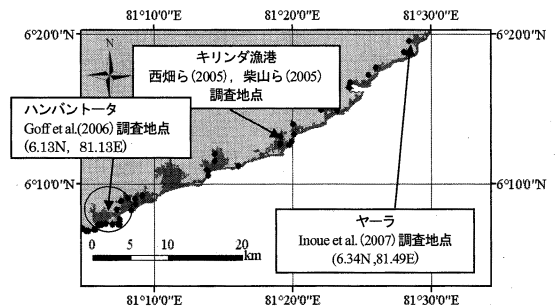


図-5 領域Dにおける計算(灰色部)、実測(黒丸)による浸水域の比較。実測値はWijetunge(2006)による

表-2 断層パラメータ

Segment	Dislocation(m)	L(km)	W(km)	Depth(km)	Strike(°)	Dip(°)	Slip(°)	Longitude(°)	Latitude(°)
1	14	200	150	10	323	15	90	94.40	3.03
2	17	125	150	10	335	15	90	93.32	4.48
3	20	180	150	10	340	15	90	92.87	5.51
4	12	145	150	10	340	15	90	92.34	7.14
5	12	125	150	10	345	15	90	91.88	8.47
6	7	380	150	10	7	15	90	91.57	9.63

(2) 津波の浸水計算に関する考察

浸水計算を実施したところ、検潮記録と比較したコンボを除き、証言情報よりも計算による津波第一波到達が10～15分早いという結果が得られた。このように計算の第一波到達時間が証言情報より早くなる一つの原因として、証言情報で検潮記録のような正確な津波の第一波到達時間を得るのは難しいという理由が考えられる。計算で得られた水位の時系列変化を見ると、第一波の水位が最大になるのは、全ての地区において津波到達からおよそ10分後であった。そのため、仮に証言情報が、津波第一波の最大波高を記録した時点と見なせば、今回計算によって得られた到達時間はそれほど大きくずれていないと考えられる。

浸水域については、図-5のように広範囲に渡り概ね良好な結果を得ることができた。一部ハンバントータ(図-5丸部)で計算値と実測値の間に差が生じている。この原因としては、この地域の沿岸には高い砂丘が発達しているものの、計算で陸上のデータとして用いた90mメッシュのSRTMデータでは、この砂丘を十分に表現できていなかったためであると考えられる。

以上の考察より、本計算結果の再現性は良好であるといえる。そこで、この計算結果を用いて、キリンダでの土砂移動を議論する。計算により決定した断層パラメータを表-2に示す。

(3) 津波伝播計算から得られた流速ベクトル分布と浸食堆積分布の関係

図-6に、津波の伝播計算から得られた第一波来襲時(地震発生から125分後)と第一波引き波時(地震発生から133分後)の流速ベクトル分布を示す。

図-6からわかるように、津波第一波はキリンダ漁港南東部から直線状に來襲し、防波堤を乗り越えて標高10m程度の地点まで遡上している。一方、引き波は防波堤により流れの向きが制約され、港の開口部に集中している様子が確認できる。

(4) 土砂移動モデルの適用

津波伝播計算の結果を用いて、キリンダ漁港を対象に土砂移動モデルを適用し、地形の時系列変化を調べた。その結果、第一波押し波時に沖合の土砂が汀線付近まで運搬され、堆積を引き起こしている様子が確認できた(図-7)。このことから、図-2で見られた汀線付近での堆積は、押し波時に沖合から運搬された土砂が汀線付近に

堆積することで引き起こされたものと考えられる。一方、引き波時には、流れが集中する港の開口部付近や防波堤先端部で浸食が引き起こされている様子が確認できた(図-8)。第二波来襲時も第一波と同様に、押し波時には全体的に堆積が卓越するものの、引き波時には流れが集中する港の開口部付近で浸食が卓越する傾向があることが分かった。また、モデルによる最終的な地形変化と浸食・堆積分布図の比較により、①全般的に堆積が卓越、②港内で浸食、③防波堤沿いで浸食が卓越、という特徴

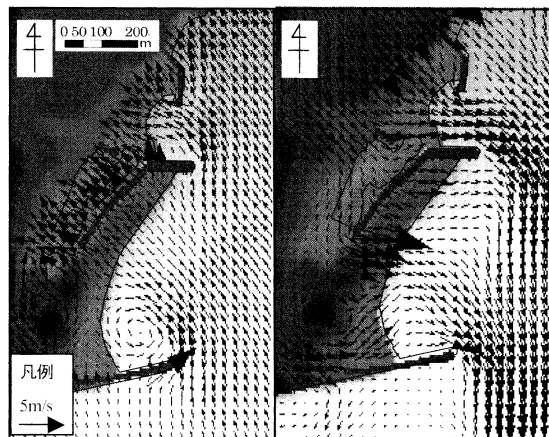


図-6 津波第一波押し波時(左:地震発生から125分後)、引き波時(右:地震発生から133分)の流速ベクトル分布

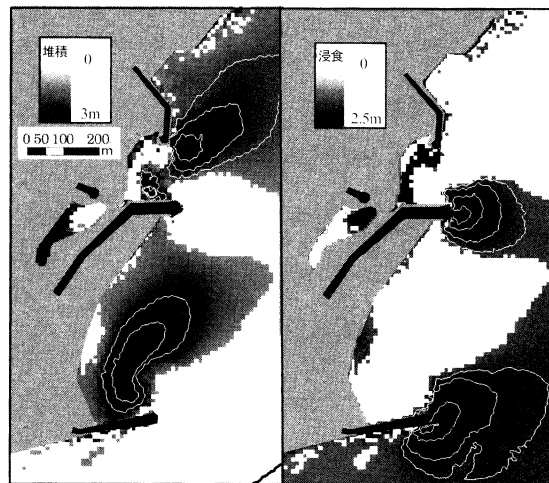


図-7 地震発生から125分後の地形変化の計算結果(コンター間隔0.5m)。左図は堆積分布を、右図は浸食分布を表す

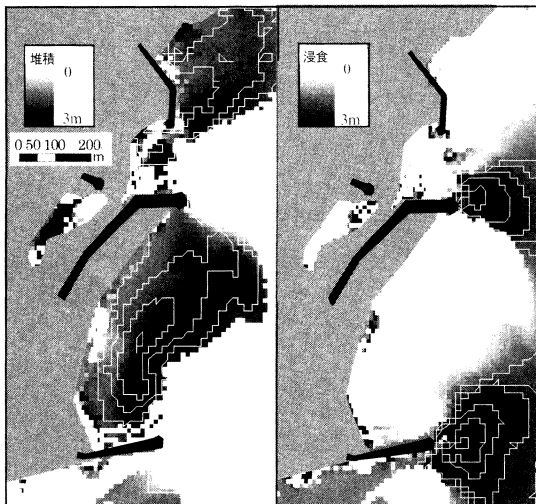


図-8 地震発生から133分後の地形変化の計算結果(コンター間隔0.5m). 左図は堆積分布を, 右図は浸食分布を示す

について再現できていることが確認できた(図-8). さらに, 検討範囲全体の実測による浸食・堆積比は0.56に対して, 計算では0.72と概ね良好に再現できた.

6. おわりに

本研究で得られた主要な結論を以下に列挙する.

- (1) スリランカ南東部における2004年インド洋大津波の再現計算を行い, 浸水域, 浸水高ともに良好に再現可能な断層モデルを得た.
- (2) 測量データを用いて津波による土砂の浸食・堆積分布を求めた結果, キリング漁港において最大で5mの浸食・堆積が発生し, 汀線が最大100m近く沖に移動した場所があることが分かった.
- (3) 測量データから, 全般的には堆積傾向が見られたが, 港内および主防波堤の南側沿いでは浸食が卓越している様子が確認された.
- (4) 津波の遡上計算から得られた流速ベクトル分布を観察したところ, 押し波に比べ引き波は構造物の有無によって流れの方向が左右されやすく, キリング漁港においては引き波が湾の開口部の浸食の主要な役割を果たしたものと考えられる.
- (5) キリング漁港における海底地形変動を計算したところ, 全般的に堆積, 港内で浸食, 防波堤沿いで浸食という特徴, および浸食・堆積量比に関して良好に再現することができた. また, 大局的に地形変化を観察すると, 押し波は沖合の土砂を汀線付近まで運搬し堆積を進行さ

せ, 一方で引き波が集中する箇所では浸食が進行することがわかった.

(6) 本研究で用いたキリング漁港の深浅測量データは, 津波発生の前後, 非常に近い時期に取得されたという点において, 津波による土砂移動モデルの精度検証に適していると考えられる.

謝辞: 本研究を行うに際し, 国際協力機構(JICA)より「スリランカ民主主義共和国南部地域津波災害復旧・復興支援プロジェクト」により得られたキリング漁港の深浅測量データを提供して頂いた. また, 本研究は科学研究費補助金(基盤A)(No.18301033, 代表: 今村文彦)を用いて行われた. ここに記して謝意を表す.

参 考 文 献

- 藤井直樹・大森政則・高尾誠・金山進・大谷英夫(1998): 津波による海底地形変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.386-380
- 後藤智明・小川由信(1982): Leap-Frog法を用いた津波計算法, 東北大学土木工学科資料, p.52
- 今村文彦・箕浦幸治・高橋智幸・首藤伸夫(1997): エーゲ海における歴史堆積物に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.321-325
- 箕浦幸治・中谷周(1990): 津軽十三湖及び周辺湖沼の成り立ち, 地質学論文集, 第36号, pp.71-87
- 西畑剛・田島芳満・森屋陽一・関本恒浩(2005): 津波による地形変化の検証-2004年スマトラ沖地震 スリランカ・キリング港-, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1386-1390
- 柴山知也・岡安章夫・Wijayarathna, N・佐々木淳・鈴木崇之・Jayaratne, R(2005): 2004年スマトラ沖地震津波のスリランカ南部被害調査, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1401-1405
- 首藤伸夫(1989): 津波による土砂の輸送, 東北大学工学部津波防災実験研究所報告, 第6号, pp.1-56
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫(1992): 土砂移動を伴う津波計算法の開発, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.221-235
- 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔(1999): 掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.606-610
- Inoue, S, Wijeyewickrema, A.C, Matsumoto, H, Miura, H, Gunaratna, P, Madurapperuma, M, and Sekiguchi, T(2007): Field Survey of Tsunami Effects in Sri Lanka due to the Sumatra-Andaman Earthquake of December 26, 2004, PAG EOPH, 164, pp.395-411
- Goff, J, Philip, L, Bretwood, H, Robert, M, Bruce, J, Harindra, F, Patrick, L, M.EERI, Hermann, F, Coatas, S, Starin, F(2006): Sri Lanka Field Survey after the December 2004 Indian Ocean Tsunami, Earthquake Spectra, June 2006, Volume 22, Issue S3, pp.S155-S172
- Mansinha, L., and Smylie D.E.(1971): The displacement fields of inclined faults, Bull. Seism. Soc. Am., 61, pp.1433-1440
- Wijetunge, J.J(2006): Tsunami on 26 December 2004: Spatial distribution of tsunami height and the extent of inundation in Sri Lanka, Sci, Tsunami Haz, 24, 3, pp.225-239