

インド洋大津波のスリランカ南西部における津波実態・被害調査報告

富田孝史*・有川太郎**・安田誠宏***・今村文彦****・河田恵昭*****

2004年12月26日スマトラ島西方を震源地として M9.0の地震が生じ、インド洋沿岸の広範囲で津波災害が生じた。スリランカは、震源から1600 km も離れ、遠地津波としての特徴を有している。地震発生から2時間を経て津波が到達したものの3万人を超す命が失われ、列車事故や道路・港湾など交通・インフラにも多大な被害を出した。現地調査および実験を通して、被害の実態を明らかにすることが目的である。スリランカ南西部での被害実態について、現地調査ならびに実験を行い、列車事故被害、港湾被害等、人的被害について詳細に検討し、それぞれの特徴を明らかにした。

1. はじめに

2004年12月26日スマトラ島西方を震源地として M9.0の地震が生じ、インド洋沿岸の広範囲で津波災害が生じた。(今村ら, 2005) 広範囲に及ぶ津波被害を調査するために、国際的な協力の下、各被災国において津波被害の現地調査が実施されることとなった。本調査チームは、その中の一部として、スリランカの南西部海岸における津波の実態とその被害状況を2005年1月4日より6日まで調査した。

スリランカは、震源から1600 km 離れ、地震動をほとんど感じない、いわゆる遠地津波としての特徴を有する。地震発生から2時間を経て各地に津波が到達している。インド大陸に接した楕円状の島であり、深海から急勾配に海底勾配が沿岸部に接続している。境界波としての挙動や、大陸からの反射波の影響を受けると考えられる場所である。

また、被害として、確定しただけで3万人を越し、行方不明者も含めると4万人に達すると言われている。なぜ、このように大きな人的被害を出したのか明確にする必要がある。さらに、列車事故や道路・港湾など交通・インフラにも多大な被害を出したと言われる。この実態を明らかにする必要がある。

2. 現地調査結果

(1) 痕 跡 高

Colombo から Galle の東約20 km にある Weligama に至るスリランカ南西部沿岸地域を主として調査した。その調査における主な場所での痕跡高を表-1に、調査範囲全域における痕跡高を図-1に示す。ここで、 H_v は海水面からの痕跡高さ (m) を示し、 D_h は汀線からの距

表-1 津波の痕跡高さの調査結果

地 名	H_v	D_h	痕 跡	測定日時
Weligama	4.9	54	家の外壁	5日, 11:02
Koggala Airport	9.3	64	家の屋根	5日, 11:30
Galle Port	6.0	190	事務所外壁	5日, 13:35
Dodanduwa	4.0	24	家の外壁	5日, 16:35
Hikkaduwa Fishery Harbor	4.7	54	2階の内壁	6日, 09:40
Kahawa	10.0	228	椰子の木	6日, 10:02
Ambalangoda beach	4.7	50	家の外壁	6日, 11:50
Beruwala Fishery Port	2.4	6	建物の内壁	6日, 13:10
North Beach of Beruwala	4.8	50	打ち上げた木	6日, 14:10
Paiyagala Station	6.0	36	2階の内壁	6日, 14:40
Panadura Fishery Port	5.6	150	家の屋根	6日, 15:50
Moratuwa Beach	4.4	10	家の外壁	4日, 17:10

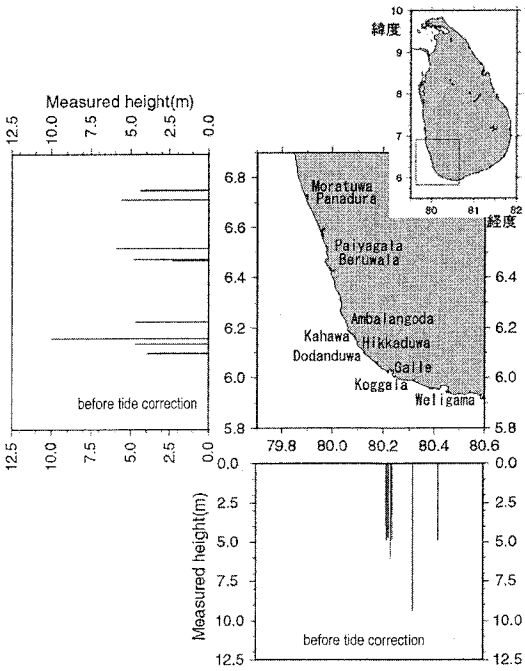


図-1 痕跡高

* 正 会 員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 主席津波研究官
** 正 会 員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 主任研究官
*** 正 会 員 博(工) 京都大学防災研究所 助手
**** 正 会 員 工博 東北大学大学院 教授
***** フェロー 工博 京都大学防災研究所 教授

離 (m) を表している。潮位補正はしていない。なお、この地域の天文潮位の変動は、大きくても平均潮位 ± 0.7 m 程度である。

これを見ると、Galle 港においては 6.0 m、Colombo から南 90 km に位置する Kahawa 地区には 10.0 m の津波痕跡高であったことがわかる。また、Colombo から南に 53 km 離れた Beruwala では、周辺が 5 m 近い高さであったにもかかわらず、漁港のみ 2.5 m の高さであった。この考察については後述する。以上の痕跡高から、スリランカの南西部には大局的には約 5 m 程度の高さの津波が押し寄せたと考えられる。

(2) 津波到達時間と来襲回数

津波来襲回数は証言によると 2 回から 3 回である地区が多い。Galle 港では 9 時 25 分 (スリランカ時間、以下同じ) に Galle 港事務所に来たことを示すプレートが掲げられている。その他の地区における 1 回目の津波の到達時刻は、Kahawa 地区：9 時 45 分、Beruwala 地区：9 時 45 分、Moratuwa 地区：9 時 30 分という証言が得られている。

地震発生時刻は 6 時 58 分であるので、スリランカ南西部海岸に到達するのに 2 時間半あまりの時間を要している。

ただし、最大津波は 2 波目、または 3 波目であったことが多く、Kahawa 地区：10 時 30 分、Moratuwa 地区：11 時 5 分頃であった。これらは証言であるのでおおよその目安にしかならないが、1 波目よりも 2 波目以降のほうが大きく、かつ時間が 30 分以上開いていたと考えられる。

(3) スリランカ南西部での津波被害の概要

全体として主に煉瓦を漆喰で固めた壁の住宅や木造住宅が多く、沿岸部において破壊されている住宅のほとんどが、これらの造りであった。一方で、コンクリート壁で造られた構造物は被害が微少であった。

a) Koggala :

Galle の東 10 km にあり、浜から約 100 m の場所において、標高が 3.6 m と高いにもかかわらず、5 m の木に塩枯れが確認された。その後平坦な土地が続いていたことから、岸から約 300 m 離れた土地においても、15 cm の浸水高が確認された。200 m の位置における金網フェンスも倒されていた。

b) Galle 周辺の海岸 :

海岸から約 70 m の地点に、痕跡高の異なる 2 軒の家が存在していた。海岸に面した煉瓦作りの家が完全に破壊された地点の背後にある家では、浸水高が 2.6 m と大きかった。これに対して、海側の強固な家がほとんど被害を受けずに残っている地点では、浸水高が 0.63 m となっていた。このように、海側にある強固な建物による津波減災効果を確認することができた。また、岸壁が 3.9 m あった Galle 城内では、浸水はあったものの、建



写真-1 Galle 港における岸壁の破壊

物の損傷はなかった。

c) Galle 港 :

岸壁近辺において海水面より 5 m の位置に、またそれより少し内陸に入った事務室の建物において 6 m の位置にそれぞれ水跡が残っていた。この港においては、防波堤には大きな破壊が見られなかったものの、岸壁が破壊されており、使用不能になっていた (写真-1)。また、巨大な浚渫船が港内の陸地に乗り上げていた。

d) Dodanduwa : Galle から北に 12 km 離れた Dodanduwa では、河川が流れており、岸から近いところに橋脚が架かっていた。これは強固なコンクリート造りであり、最近建造されたように見えるものであったが、海水面から 3.9 m の高さにある太さ 20 cm 程度のコンクリート製の手摺りが折れていた。漁船などが散乱していた状況から漂流物が衝突したことによると思われる。また、津波時に橋を通行中の 2 台のオートバイが流された被害が発生した。

e) Kahawa :

後述する。

f) Ambalangoda :

Colombo から南に 80 km 程離れた Ambalangoda では、約 4.7 m の痕跡高が認められた。海岸には、重さ 500 kg 程度の石により侵食防止対策が施されており、海岸に隣接する住宅は破壊されなかった。しかしながら、付近にある河川から遡上した津波により、住宅背後の内陸にある鉄道線路の基礎が洗掘されていた (写真-2)。

g) Beruwala 漁港 :

Kahawa から北に約 35 km のところ (Kahawa と Colombo のほぼ中間) にある Beruwala では、周辺の痕跡高が 4 m を越えていたが、漁港内では 2.3 m であった。また、漁港背後にある堅牢でない住宅は破壊を免れていたことから、防波堤による津波の威力の低減効果があったことがわかる。また、この漁港の北側海岸において、引き波時に漁港の外に引き出された漁船が打ち上げられていた (写真-3)。



写真-2 Ambalangoda における津波による鉄道基礎の洗掘



写真-3 Beruwala 漁港北側の湾沿岸に漂着した漁船

h) Paiyagala :

Kahawa から北に48km 離れた Paiyagala では、浸水高4.2m であった。コンクリート造りの建物は部分的に破壊されていたものの、全壊は免れていた。

i) Panadura :

Colombo から南に25 km この地域は河川と海岸に挟まれており、河川と海岸の両側から津波が遡上した。また、海近くの建物ではコンクリートの床が下から突き上げられるように壊れており、津波の揚圧力の作用を確認できた。

3. 個別現象についての考察

(1) Kahawa での列車事故に関する考察

Kahawa では9両の列車が被災し1500名程度の犠牲者を出した。津波の第1波が来襲した時に、この列車が偶然この付近を通過しており、停止した。第1波は、陸上で1m程度の浸水で被害を出すことはなかった。沿岸地域は、海岸線の道路に比べて若干低地(図-2)であることから、1波目により水が溜まっていたと考えられる。

この周辺の住民も異変を見て、内陸側へ避難を開始している。その一部は、停車していた列車の内部へ逃げ込んでいた。列車の車両は、車などと比較して強固であり、

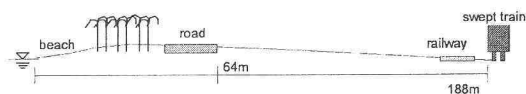


図-2 列車転覆現場の断面図



写真-4 列車の転覆の様子

高さもあるために、住民にとっては安全に見えたと考えられる。しかし、30~40分後(証言によっては15分程度)に来襲した第2波により列車は飲み込まれてしまった(写真-4)。

第2波の痕跡は浸水高で5m前後、局所的に10mに達する場所である。車両は大きな破壊を受けることはなかったが、内部に浸水した海水により、ほとんどの乗客・住民は外に逃げ出すこともできずに、水死してしまった。一瞬に来襲した津波による悲劇である。第1波で避難行動を開始したが、避難場所が悪く被災した。例えば、列車被災地の50m脇にはコンクリート造りの学校の建物が残されており、こういった建物に避難することが大切であった。津波の場合、海岸から遠い場所よりも強固な高い場所への避難が原則となる。平坦な土地が奥まで広がる地区では、日常は学校等に使用できる避難所の整備が必要である。

(2) 港湾施設に関する考察

Beruwala および Hikkaduwa での漁港被害、Galle での港湾被害を視察した。前者の漁港には、開口部の狭い石積みの防波堤があり、漁港の護岸もしっかりしている。そのために港内と港外では、津波の浸水高さに差が生じ、漁港内部での被害軽減に寄与したと思われる。ただし、防波堤そのものは堤体の大きな変形はないものの若干破損し、港内の漁船が流出して座礁していた(写真-3)。

海岸にある石積みの護岸は高さが十分ではなく、津波の内陸部への浸入低減の効果はなかったと判断している。津波の流れが強い場所では、石積みが破壊・移動し、大きな岩塊が何メートルも動いていた。これは危険な状況であった。Galle 港でも、浸水高は5m程度、岸壁の洗

掘・破壊、大型作業船の陸上への打ち上げ、港湾建物の1階部への浸水が見られた。漁港も港湾も壊滅的な被害を受けていないが、機能は停止しており、復旧復興のみならず地域社会への影響は大きい。

(3) 土砂移動に関する知見

沿岸部、建物周り、橋脚や鉄塔周りで大規模な洗掘または堆積が見られた。上部構造そのものの損傷はなくても、基礎部の洗掘のために傾斜し、機能低下が起こっていた。このような砂移動は、押し波だけでなく引き波でも生じ、一方向の強い流れが長時間続いたために大規模の洗掘が生じた。沿岸部では植生基礎部の洗掘も多く見られた。津波の衝撃的な波力により、砂が削り取られたと思われる。さらに、狭い河口に侵入した津波が広い河道内に広がり、大きな渦を形成し、それが線路の基礎を大きく洗掘した例もある(写真-2)。深さ2m、長さ200m以上、幅20m位の規模であった。なお、アスファルトやコンクリートで被覆されていると洗掘による被害はない。

(4) 人的被害についての考察

今回調査をおこなった南西部付近の陸域は、その土地の多くが背後に貯水池のようなものをもつ下りの緩斜面となっている。また、ビルのような高い建物がなく、避難する場所も少ない。さらには、スリランカにおいては、ほとんど大津波の経験がなく、津波という現象を知らなかったことが人的被害を増大させたものと考えられる。

ゴール地区では、海岸から道路を隔ててすぐに民家が密集し、住宅地は道路よりも低いところが多い。また、古い民家は煉瓦造りの家であり強度が低く、全壊しているものが多い。さらに、観光地であることから、人が多く、4000名近い死者を出したものと考えられる。

4. 下り勾配地形における津波力実験

スリランカ南西部では、陸地において平坦な地形や、緩い下り勾配になっている地形が多い。こういった地形による津波の波力の違いを模型実験から調べることにした。

(1) 実験条件

地形は列車が流された Kahawa 地区を参考にした。実験は、港湾空港技術研究所の大規模波動地盤総合水路にて行った(図-3)。造波板から水深4.0mの水平床、1/10勾配の斜面、水深1.0mの水平床、そして、1/50勾配の斜面に続けて陸上部を設置した。陸上部の地形は、勾配無しと、5%の下り勾配の2つした(図-4)。模型縮尺は1/25とし、浸水高、流速および列車模型に生じる波力を測定した。波圧計は、列車模型に4個設置した(図-5)。

津波として、ピストン式の造波板を、20sかけてストローク400cm押し出すことにより、押し波初動の波を作用させた。図-6は、水深1mの位置で測定した入射

波の時系列データである(図-3参照)。

水表面からの津波高は18cmであり、現地換算では津波高4.5m、周期100sを発生させていることとなる。実験は、水平床モデルでは6回、下り勾配モデルでは12回同じ波を造波させた。

(2) 最大遡上高の測定結果

図-7に陸域に侵入した津波の最大遡上高の分布を示す。データは、全回数を平均したものである。

汀線から続く急な上り斜面が勾配の有無にかかわらず5~6cm程度あり、1m陸に入った波高計(ch.2)を見ると、その上り斜面による反射が70%近く生じていることがわかる。その後、勾配無しの斜面よりも下り勾配

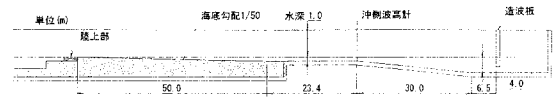


図-3 大規模波動地盤総合水路断面

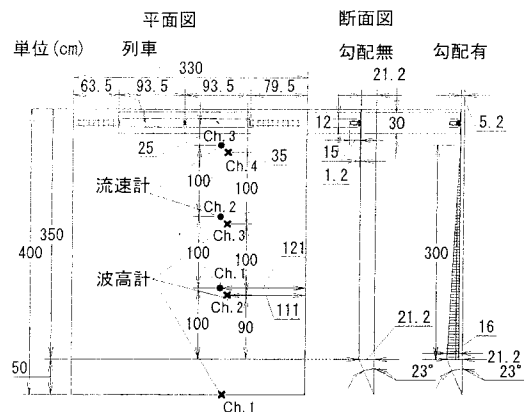


図-4 実験模型断面図

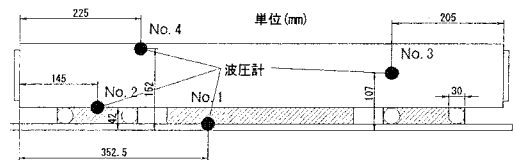


図-5 波圧計設置図

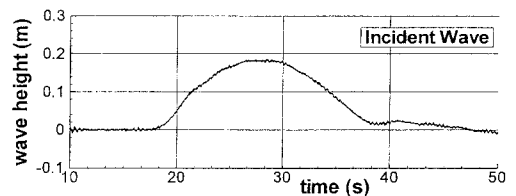


図-6 入射波の時系列データ

のついている斜面のほうが遡上高は大きくなっている。下り勾配の際には、下流に向かうにつれ高さが大きくなっていた。

(3) 流速の測定結果

各地点における流速の比較を図-8に示す。これを見ると、汀線から約3m離れた場所では、勾配無しより勾配有りのほうの流速の方が1.5倍程度になっていることがわかる。

(4) 圧力の測定結果

図-9は構造物に生じる圧力差を示したものである。

P_p は、衝撃波圧を示し、 P_s は、持続している圧力の最大値を示している。実験結果からは、衝撃圧力が約

2.5倍、持続的に生じている圧力に関しては約2.0倍程度になっていることがわかる。これは、流速の自乗に比例して圧力が大きくなること、浸水高も大きくなっていることを裏付けている。

列車が押し流されることからわかる通り、単に衝撃的な圧力だけでなく、その後の流速による圧力もかなり大きかったものと考えられる。

(5) 実験結果のまとめ

下り勾配の影響を調べるため、陸上遡上域に勾配を作った地形を設置した。今回の実験地形は、実際に事故の生じた場所よりも勾配が急と考えられるため、単純に2倍になったとは言いきれないものの、2倍の圧力が生じるということは、本来5mの津波の圧力が10m分に相当するものになっているということであり、今後、このような局所的な地形、構造物の配置等による作用圧力への影響を詳細に調べることが重要と考えられる。

5. おわりに

スマトラ沖地震津波におけるスリランカ南西部での詳細な痕跡高ならびに現地被災状況を調査した。

来襲した状況は、平均的には約5mの津波高であり、第1波目から30分程度跡に来襲した第2波目以降に最大津波が来襲したことがわかった。

津波による主な被害としては、①沿岸の平坦な低地部における内陸にまで及ぶ浸水、②木造・煉瓦造りの家は大半が全壊に対し、コンクリート造りの構造物では部分破壊、③船舶の流出・打ち上げ、④海岸や地盤の洗掘とそれに伴う上部施設の損傷があげられる。一方で、防波堤などの港湾の施設による津波低減効果も確認できた。

津波の浸水状況や津波力に及ぼす陸上地形の影響を明らかにするために、平坦な地形と下り勾配のある地形で比較を行った。今回の実験条件においては、2倍近い圧力差が生じることがわかった。

現地調査の実施にあたりご協力を頂いた㈱日本港湾コンサルタントの市蘭敏郎氏（顧問兼コロポ事務所長）、若築建設㈱の辰巳正弘氏（スリランカ事務所長）に謝意を表す。なお、本研究は科学技術研究費補助金突発災害調査「スマトラ島沖地震津波災害の全貌解明」の一環として実施したことを付記する。最後に、この甚大な災害で亡くなられた方々のご冥福を心よりお祈りする。

参 考 文 献

今村文彦・越村俊一・河田恵昭(2005)：スマトラ地震による甚大な津波被害，土木学会誌，vol. 90，no. 2，pp. 5-7。

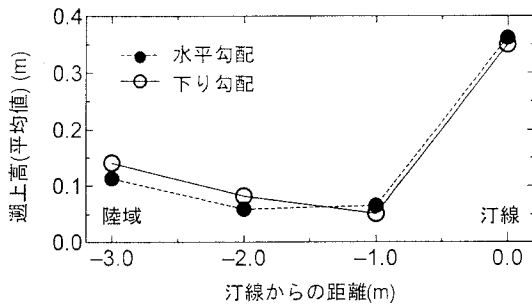


図-7 陸域における遡上高さ

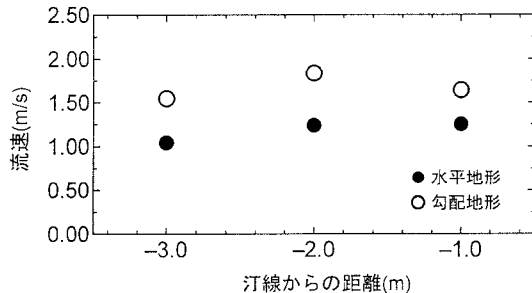


図-8 地形による流速の違い

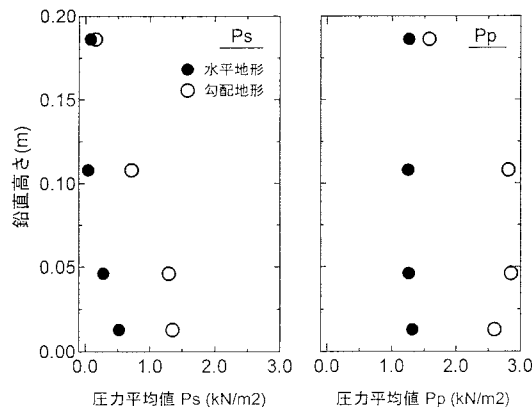


図-9 構造物に作用する津波力の違い