スマトラ地震津波によるスリランカ南西部の 橋梁被害調査と津波対策の今後の課題 SURVEY OF BRIDGE DAMAGE DUE TO TSUNAMI AT THE SRI LANKAN

SOUTHWEST COAST AND FUTURE SUBJECTS AGAINST TSUNAMI WAVES

石野和男¹ • Bandara Nawarathna² • 矢野真一郎³ • 中川一⁴ • 田中仁⁵ Kazuo ISHINO, Bandara NAWARATHNA, Shinichiro YANO, Hajime NAKAGAWA and Hitoshi TANAKA

¹正会員 工博 大成建設㈱技術センター 主席研究員 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)
²正会員 Ph.D 大成建設㈱技術センター 客員主任研究員 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)
³正会員 工博 九州大学大学院助教授 工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)
⁴正会員 工博 京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)
⁵フェロー会員 工博 東北大学大学院教授 工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

The 2004 December Sumatra earthquake generated tsunami waves caused enormous damage in Sri Lanka. In order to investigate damaged situation due to tsunami propagation in rivers, the committee on Hydroscience and Hydraulic Engineering, Japan Society of Civil Engineers (JSCE) delegated its members as a field investigation team of JSCE. As Sri Lanka is located very far from a possible large earthquake epicenter, influence of shaking earth can be only transferred by tsunami waves. In this paper, damaged situation of 34 bridges alone the southwest coast of the country are discussed. Analyzing the causes for bridge damages, we show the advanced design subjects for river bridges to withstand future tsunami waves.

Key Words : Sri Lanka, Sumatra Tsunami, Tsunami disaster, bridge, field investigation

1. はじめに

2004年12月のスマトラ地震津波によって、スリランカ は大きな被害を受けた.そこで、土木学会水工学委員会で は、この津波被害に対して、主に、河川での津波遡上状況、 河川橋梁の被害状況等の調査を計画し、津波発生から約 5ヶ月後の2005年4月27日から5月3日に調査を実施した.

河川橋梁の被害に関しては、スリランカは、震源から遠 く離れていることから、地震の揺れの影響がなく、津波の みによる被害を調査することができた.本論文では、南西 部における、34箇所に渡る河川橋梁の被害状況を示すと ともに、被害原因を推定して、今後の津波に対する河川橋 梁の事前対策の課題を検討した.なお、本論文は調査団報 告書の要約である.詳細は、報告書¹⁾を参照いただきたい.

2. 橋梁の被害状況の概要

本調査では、南西部のコロンボからハンバントータ間 で小規模のボックスカルバートを含む34箇所の橋梁およ び周辺構造物の被害状況を調査した.

スマトラ地震津波によるスリランカの橋梁被害状況の 中で,道路橋に関してはスリランカの道路局(RDA) が調査していた.本調査でも,RDAを訪問して聞き取り 調査を行ったが,彼らにとって,津波は非常に稀に発生す る外力であり,落橋した橋の架け替え・橋の改修に津波 の影響を考慮する予定は無いとのことであった.

本調査範囲のスリランカの南西部において, コロンボ から南50kmのパヤーガラからゴールにかけては, 海側に 面した道路の陸側に鉄道が敷設されていた. 本調査では, 鉄道橋も調査対象とした. 被害の大きさ順に, 目視で観察 できた被害状況および箇所数を示す.

- コンクリート桁の流失:ハンバントータにおける歩 道橋1箇所
- 2) 木桁の流失:ゴールにおける歩道橋1箇所

- 3) 橋台の破壊による落橋:道路橋3箇所
- 4) 橋台取り付け部の流失:道路橋1箇所,鉄道橋8箇所
- 5) 工事中の仮桁の流失:鉄道橋1箇所
- 6) 橋台の軽微な破損:道路橋7箇所,鉄道橋1箇所
- 7) 高欄手摺の破損:道路橋6箇所

なお,無損傷の道路橋も,5箇所調査した.

3. 橋梁の被害状況とその考察

(1) コンクリート桁の流失:ハンバントータにおける 歩道橋1箇所

本被災は、本調査の中で、唯一のコンクリート桁の流 失事例である.また、本被災は、他の調査では報告されて いない.**写真-1**に、コンクリート桁の流失状況を示す.**写 真-2**に架橋地点の基礎の状況を示す.**写真-1**の左奥が海 側で、海から架橋地点までの距離は125mであった.なお、 桁は、架橋地点から上流側に23.3m流送され、回転はして いたが反転しないで深さ約1.6mの水路内に落下してい た.写真-2に示す架橋地点の基礎の状況から、桁は基礎の 上に載せられた状態で、基礎とは接合されていないと見 られた.調査の結果、桁の諸元は、幅:b=1.6m、長さ: 1=13.3m、厚さ:t=0.3mと測定された.この諸元から、 桁の体積は、概算V=6.384m³と計算され、鉄筋コンク リートの単位体積重量を2.45ton/m³と仮定すると、桁の 海水中の重量はW=9.1tonと算出された.

ここで,桁の海水中の重量が流れ出す流体力を発生させる流速Uを求めると,U=5.3m/sと算出される.

以下に,桁に作用した抗力F_Dの算出方法を示す.

$$\mathbf{F}_{\mathrm{D}} = (1/2) \cdot \boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{U}^2 \cdot \mathbf{C}_{\mathrm{D}} \cdot \mathbf{A} \tag{1}$$

ここに, ρ:流体の密度, U:流速, A:物体の流れ直角面 に対する投影面積, C_D:抗力係数

C_D:抗力係数は,道路橋示方書²⁾によれば,b/t<8の 場合,

$$C_{\rm D} = 2.1 - 0.1(b/t)$$
 (2)

が用いられる.

本桁では、b/t=5.3でありC_D=1.57を用いた. 一方、本地点の津波遡上高さは地上から約4mと報告さ れている.**写真-1**から水路の深さを推定すると1.6mであ る.これらの値から、水路内を遡上した津波高さh=5.6 m、と上記の流速U=5.3m/sを用いたフルード数 は、Fr=0.72と算出される.

このような状況から,津波の流速はU=5.3m/sを超 えて,流体力により橋桁は流失・流送したと推測された.

なお,本調査では,ゴールにおいて,上記の歩道橋より も幅の狭い歩道橋が流されずに残存していることが確認 された.**写真-3**に,ゴールにおいて流されずに残存してい る歩道橋を示す.



写真-1 コンクリート桁の流失状況



写真-2 架橋地点の基礎の状況



写真-3 流されずに残存している歩道橋

写真-3に示されているように、この幅の狭い歩道橋の 両端は、基礎に埋め込まれている.したがって、F_D>Wで あっても、流失しなかったと推察される.

なお,**写真-3**に見られるように,これらの歩道橋の手 摺は,総て流失している.

(2) 木桁の流失:ゴールにおける歩道橋1箇所

上記のゴールにおける幅の狭い歩道橋の下流には,バ タフライブリッジと称される歴史的な橋が存在していた. 写真-4に,調査時のバラフライブリッジの状況を示す.また,写真-5に同橋の津波被害前の状況を示す.写真-5およ び同橋の設計図から、同橋は木橋であることが判明した. 幅の狭い歩道橋地点で推定した抗力が、木橋に作用する ことにより、木橋が破壊されたことは容易に推察される. なお、写真-4には取り付け部の破壊も見られ、洗掘によ る破壊も発生したと推察された.



写真-4 バラフライブリッジの被災状況



写真-5 同橋の津波被害前の状況

(3) 橋台の破壊による落橋:道路橋3箇所

本調査の対象とした道路橋のほとんどは、上下線の2 橋に分割されていた.

橋台の破壊により落橋した道路橋3箇所の内,2箇所は

上下線の2橋とも落橋していて,1箇所は陸側の1橋のみ落 橋していた.これらの橋長は,8.3m,27.6m,30mで,水面 (河床)から桁下の高さは,それぞれ,(0.72m),1.8m, (1.5m)である.すなわち,これらの橋の上流の集水面 積は狭く,河川流量は少ない.一方,大河川の橋梁は,幅は 数百m,水面から桁下の高さは,2m以上であった.

写真-6に橋長8.3mの海側橋; 未破損を示す. 同橋は, 海浜護岸沿いに設置されていた. 写真-7に写真-6に示し た橋長8.3mの海側橋の陸側橋; 落橋を示す. 左岸側の橋



写真-6 橋長8.3mの海側橋; 未破損



写真-7 同上陸側:落橋



図-1 大河川と小河川における豪雨時と津波時の流量・流速の比較概念図

台が破壊され橋台周辺の土砂が流失していた.

図-1に、大河川と小河川における豪雨時と津波時の流 量(Q) ・ 流速(V) の比較概念図を示す. このように, 大河川 では、集水面積は広く、河川流量は多くて、その分、水深 も深い、津波は、汀線から一定の領域にほぼ同様の高さで 押し寄せる.大河川では、津波の戻り流量は流下能力より も少なく、小河川では、津波の戻り流量は流下能力よりも 多くなる.このような状況から,津波時には,大河川の橋 梁の被害は少なく,小河川の橋梁被害は多くなる.なお, 津波の押し波時には,河川だけでなく陸地も含めて津波 は遡上していく.一方,津波の引き波時には,陸地に遡上 した水塊が主に河川を通じて海に戻る. すなわち, 河川に おいては,押し波時よりも引き波時に多大な流量が発生 する. このため、小河川の橋梁や陸地側の橋梁の橋台が 破壊され落橋に至ったと考えられる.なお,いくつかある 小河川の中で、これらの3地点で被害が発生した要因とし ては、津波の溯上高さ、河川を通じての津波の溯上距離が あげられる、一方、津波の遡上を阻害する要因としては砂 州や防波堤の存在と橋台の強度があげられる.

(4) 橋台取り付け部の流失:道路橋1箇所,鉄道橋8箇所

本調査において、落橋に至らないものの橋台取り付け 部の流失が見られた箇所は、道路橋1箇所、鉄道橋8箇所で ある.ここで、筆者の1人である石野が2004年の福井水害 の鉄道橋梁を調査³⁾した経験から、道路橋では、取り付け 部に舗装が施されていれば、流水に対する抵抗性が高い、 一方、鉄道橋の取り付け部は、砕石を用いた線路床であり、 流水に対する抵抗性は弱いことが指摘される.前述した ように、鉄道橋は、道路橋から陸側に数mから数十m離れ ているが、小河川に架かる鉄道橋のほとんどで橋台取り 付け部の線路床が流失していた.

写真-8に,橋台取り付け部の線路床が流失して,補修し ていた鉄道橋の事例を示す.なお、スリランカの鉄道橋の ほとんどは、下路橋である、一方、道路橋のほとんどは、上 路橋である. すなわち, 鉄道橋の河床から桁下間の高さが, 道路橋のそれよりも高く,津波の作用範囲も低くて桁の 流失までには至らなかったと推察される.なお,この他の 鉄道橋の被害に対する要因としては、プラス要因として は,鉄道橋は道路橋から陸側に存在すること,鉄道橋の橋 桁の路面は空間があること、マイナス要因としては、鉄道 橋は道路橋に比べて重量が軽いことである. 写真-9に,橋 台取り付け部の線路床が流失して補修していた事例を示 す. 写真-9の事例は, 道路からの距離があり, 近づくこと ができなかったが、橋台も新設されていて落橋していた 可能性が高い.なお、本事例に示されるように、スリラン カの小河川の鉄道橋のほとんどは、ラグーン内に盛土の 線路床を設置して,洪水を流すことができる最小限の河 川断面を橋梁で渡すものがほとんどであった.

さらに,前述の2004年の福井水害では,洪水により冠水 した道路橋の前後の箇所で,舗装は剥れた場所がかなり



写真-8 橋台取り付け部が流失した鉄道橋(1)



写真-9 橋台取り付け部が流失した鉄道橋(2)

見られた. 一方, 本調査においては, 津波により冠水した 道路橋の前後の箇所で, 舗装が剥れた場所はほとんど見 られなかった. この違いに関しては, 更なる比較・検討が 必要である.

(5) 工事中の仮桁の流失:鉄道橋1箇所

写真-10に, 工事中の仮桁の流失:鉄道橋1箇所を示す. 本調査時には,本設のトラス橋の架け替え中であった.ト ラスの中央下に仮設の橋脚が見える.津波被害時には,ト ラス橋の所に,プレートガーダー形式の桁橋が架けられ ていて,津波により流失したとのことである.本設の道路



写真-10 工事中の仮桁の流失地点

橋でも、落橋の事例が見られることから、工事中の仮桁の 流失は、止むを得ない被災であったと考えられる. 写真-11に、工事中の仮桁が流失した上流側のトラス鉄道橋と その周辺の植生の状況を示す.上流側の本設のトラス鉄 道橋には、大きな被災は見られなかった. 写真-11に見ら れるように、周辺の植生が陸側に倒されていて、津波のエ ネルギーの物凄さが体感された.



写真-11 同上;上流のトラス鉄道橋:左が上流

(6) 橋台の軽微な破損:道路橋7箇所,鉄道橋1箇所

橋台の軽微な破損事例として、写真-12に川幅205m,水面から桁下の高さ3mの道路橋を示す.写真-13にこの道路



写真-12 パナデゥーレ川道路橋:下流から見る



写真-13 同上;左岸下流護岸被災状況

橋の左岸下流護岸被災状況を示す.このように,大河川で は,水面から桁下の高さが高く,桁に津波が作用していな いため,高欄を含む桁の損傷は見られない.その代わり, 取り付け護岸の被災が見られた.

(7) 高欄手摺の破損:道路橋6箇所

高欄手摺の破損の一例を**写真-14**に示す.**写真-14**に示 すハンバントータの海から315m離れた橋梁の湖側の高 欄手摺は,海側に倒れていた.湖に流れ込んだ津波が,湖 からの戻り流れとして高欄手摺に作用して,高欄手摺が 海側に倒れたと推測された.一方,海側の高欄手摺は,湖 側に倒れていた.

この他に,道路橋5所の高欄手摺の破損状況を調査した. 写真-15に,橋長6.7m,水面から桁下の高さ1.7mの道



写真-14 水路に架かる橋の陸側の高欄;右が海側

路橋における海側の状況と海側の高欄手摺の破損状況を 示す.本地点における海側には、河口閉塞を防止する小規 模の導流堤が存在しているとともに、河川は海岸線に直 角に流下していた.津波は、道路に直角な河川を遡上した 後、道路橋に衝突したと考えられる.**写真-15**に示すよう に、道路橋の海側の高欄手摺が破損していた.



写真-15 高欄破損の道路橋の海側

4. 橋梁の諸元・被害状況と津波遡上高さの関係

本調査で,津波遡上高さは橋梁地点での値であり,湾 や防波堤の影響を取り込んでいる.また,調査地点の河 川の勾配は,数千分の1であり,被害の要因とはなり難い. 一方,河川の規模・幅は,橋長が代表している.以上の状 況を考慮することにより,橋梁の被害を分析するパラ メータを以下のように選択した.図-2に「津波の遡上高 さ/橋梁の桁下高さ」と「橋梁の河口からの距離」の 関係を示す.なお,本調査で観測された津波遡上高さ は,2~6.5mであった¹⁾.

図-2から、「津波の遡上高さ/橋梁の桁下高さ」が大 きくなるにしたがい、被害が大きくなることが示された. また、「橋梁の河口からの距離」が短いほど被害が大き くなることが示された.

5. 津波対策の今後の課題

図-2から、「津波の遡上高さ/橋梁の桁下高さ」が大 きくなるにしたがい、被害が大きくなることを示した. また、「橋梁の河口からの距離」が短いほど被害が大き くなることを示した.図-2を用いて、河川勾配が緩い場 所における、津波による橋梁の被害の概要を予測するこ とが可能である.

ここで、スリランカの南西部の河川はその海岸部でほ とんど河床勾配を持っていない.

一方,日本の河川の中には,海岸部でも河床勾配を 持っている河川が多い.このことにより,津波の戻り流れ に関しては,スリランカ南西部の河川の戻り流れよりも, 日本河川のそれの方が,流速が大きくなり,橋梁の被害は 多くなる場合も考えられる.

このように、スリランカ南西部の津波による河川橋梁 の被害状況を教訓として、日本の河川、特に中小河川の橋 梁被害を予測した事前対策の必要性が示された.

また、スリランカの東部では、大河川においてトラス橋 の落橋、橋脚の倒壊が報告されている、本調査および東部 での調査結果を基にして、津波による河川橋梁の被害に 対する事前対策の検討が望まれる.

なお、日本には江戸時代から、地震時には、舟と橋に乗 るなとの言い伝えがある、スリランカでも、渡橋時に津波 で亡くなった方もおられる、この言い伝えが伝承されて、 今後の津波による被害者が少なくなることを望みます.



図-2 津波の遡上高さ/橋梁の桁下高さと橋梁の河口か らの距離の関係

謝辞:本論文の現地調査に当り,財団法人河川環境管理 財団の補助を受けました.現地の橋梁関連の調査では,ス リランカ政府道路局JICA専門家・上田功氏をはじめ,多 くの方々にお世話になりました.また,写真-5および同橋 の設計図は,マータラ上水整備改善事業工事大成・日立 プラント事務所の大房所長に入手していただいた.ここ に,記して感謝します.

参考文献

- 土木学会水工学委員会・(財)河川環境管理財団: インド洋大津波スリランカ被害調査報告書,2005.
- 2) 道路橋示方書·同解説, 日本道路協会, p56, 1996
- 3) 石野和男, 楳田真也, 玉井信行: 2004年福井水害における鉄 道橋梁の被害原因の調査解析と今後の長寿命化方策の検討, 河川技術論文集第11巻, pp157-162, 2005

(2006.9.30受付)