

スマトラ沖地震で発生した津波被害の詳細分析

宮原 健太¹・幸左 賢二²・二井 伸一³・庄司 学⁴

¹九州工業大学建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

E-mail:h345327k@yahoo.co.jp

²九州工業大学建設社会工学科教授 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

E-mail:kosa@civil.kyutech.ac.jp

³株式会社ウエスコ岡山支社設計部構造設計課 (〒700-0033 岡山市島田本町2-5-35)

E-mail:s-nii@civil.kyutech.ac.jp

⁴筑波大学大学システム情報工学研究科准教授 (〒305-8573 つくば市天王台1-1-1)

E-mail:gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

平成16年12月26日、インドネシア西部スマトラ島北西沖のインド洋において、マグニチュード9.0の巨大地震が発生したが、著者らは4回の現地調査より、橋梁については70以上が桁流失の被害を受けたことを確認している。本論文では調査区間250kmから対象橋梁を選定し、構造種別による被害分析を行い、上部工被害が最も大きいことを確認した。また、損傷した橋梁の調査により、橋梁は被圧面積と重量の影響で流失しやすさが異なることを明らかにした。

Key Words : Tsunami, Wave Force, Damaged Bridge, Damage Analysis, Sumatra Earthquake

1. はじめに

平成16年12月26日のインドネシア西部スマトラ島北西沖のインド洋で発生した地震により、巨大津波が発生した。この津波により、建築物ばかりでなく、社会基盤施設である橋梁が完全に流失する等、甚大な被害が多数発生した¹⁾。現在までに、多くの現地調査が行われているが、バンダアチェに近接した狭い地域での調査が大半を占め、津波によるスマトラ島西海岸の広域調査は少ない。津波被災前後における橋梁及び周辺地形の被害分析を行うため、著者らは橋梁被害調査を2005年12月、2006年8月、2007年8月、2008年8月の計4回実施した。被災調査より、多くの橋梁が流失し、橋梁周辺の地盤は、津波により浸食され、被災前と大きく変化していることを確認している。本研究は、今後発生が予測される東海・東南海地震による津波被害を軽減するため、津波被害特性について検討することを目的としている。バンダアチェからムラボー間で架橋されていたことが確認できた橋梁41橋を対象とし、その対象橋梁を損傷程度、海岸線からの距離、構造諸元により分類し、橋梁位置と損傷程度の判定及び作用波力と上部工重量関係の評価を行い、周辺地形の被害と橋梁被害の関係について検討した。

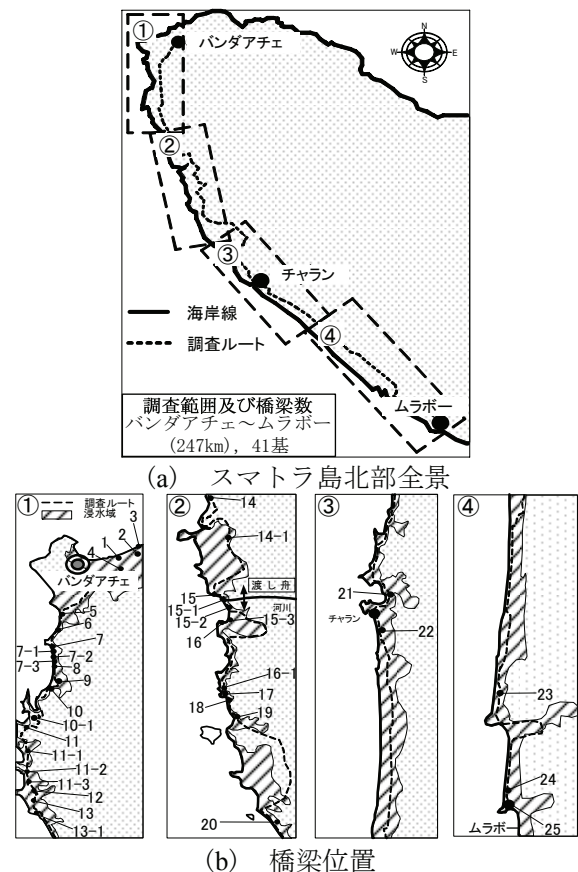


図-1 調査対象橋梁の位置

2. 調査概要

(1) 被災概況

図-1に調査対象の橋梁位置を示す。調査対象区間はバンダアチェからムラボー間の約250kmである。調査区間内で確認した41橋中21橋と半数以上が桁流失等の被害を受けており、その多くは海岸線沿いに架設された橋梁であった。地盤については、スマトラ島の西海岸線沿いでは約30kmにわたり津波の浸食を受けており、多くの道路が流失や水没した。そのため、迂回路を通行するしかない道路や、流失により通行止めとなっていることを確認した。

(2) 橋梁被災分析

調査橋梁41橋を損傷程度によりランク分けする。損傷ランクは、橋梁の使用可否に着目し、表-1に示すように定義した。本論文での分析対象橋梁は、カルバート、津波が到達していない橋梁、構造諸元が不明な橋梁を除く26橋梁とした。図-2に部材別損傷ランクを示す。調査橋梁を上部工、下部工、土工部に分類し、各部材別に損傷ランクと基数を整理した。図-2より、上部工は、損傷ランクAが13橋と半数を占める。一方、下部工は損傷ランクAが4橋、土工部は損傷ランクAが7橋となり、損傷ランクAの比率が2、3割程度となる。このことより、津波による被害は上部工に関するものが最も多いことが分かる。以上より、本章では特に上部工の被害に着目し、更に分析を行う。

図-3に海岸線からの距離と上部工損傷ランクを示す。海岸線から橋梁までの距離は、津波来襲前の衛星写真を用いて測定した。図-3より、海岸線からの距離が0.5km以上の橋梁は、損傷ランクAが2橋、海岸線からの距離が0.4km以内の橋梁は、損傷ランクAが11橋と、内陸部より沿岸部の橋梁の方が被害程度が大きいことが分かる。そこで、沿岸部(0.4km以内)と内陸部(0.5km以上)での構造種別による損傷程度の違いについて分析を行う。

沿岸部の橋梁について分析を行う。図-4に沿岸部での橋梁種別と上部工損傷ランクを示す。RC桁が9橋、PC桁が6橋、鋼トラスが7橋であることが分かる。この中で、鋼トラスは7橋中7橋が桁流失した損傷ランクAである。

一方、RC桁は、桁流失した損傷ランクAが2橋存在しており、部分的損傷である損傷ランクCが大半を占める。また、PC桁は、損傷ランクAが半数、損傷ランクB、Cが半数となっている。

内陸部の橋梁について分析を行う。図-5に内陸部での橋梁種別と上部工損傷ランクを示す。RC桁が2橋、PC桁が1橋、鋼トラスが2橋、鋼I桁が2橋であることが分かる。この中で、鋼トラス、鋼I桁に損傷ランクAが1橋ずつ存在する。以上から、鋼トラスの損傷はその規模が大きく、RC桁、PC桁の損傷は小さいことが分かる。

被害分析より、上部工及び土工部の被害が大きく、沿岸部の橋梁と内陸部の橋梁では、被害程度が異なる

表-1 損傷ランク判定

損傷ランク	上部工	下部工	土工部
A	桁流失等により使用不可能	橋脚流失等により使用不可能	盛土流失等により使用不可能
B	桁移動しているが使用可能	橋脚破壊しているが使用可能	盛土破壊しているが人・車は通行可能
C	部分的損傷	部分的損傷	部分的損傷

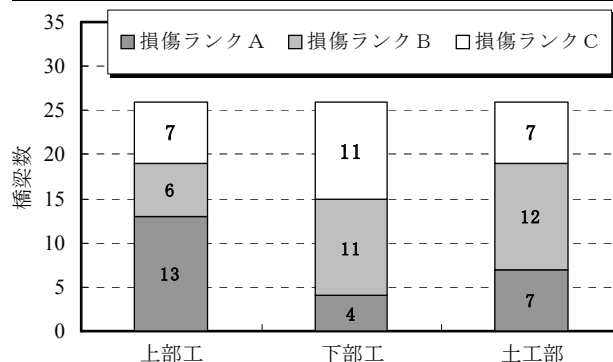


図-2 部材別損傷ランク

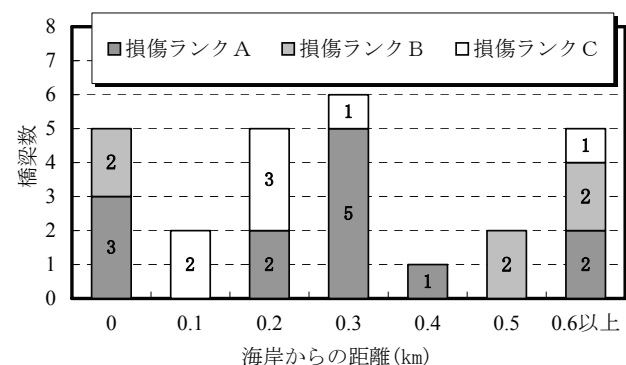


図-3 海岸線からの距離と上部工損傷ランク

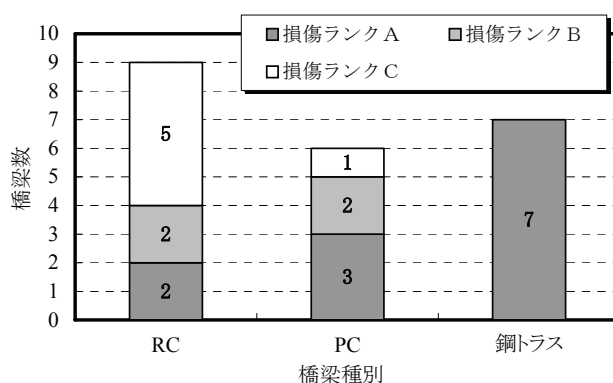


図-4 沿岸部での橋梁種別と上部工損傷ランク

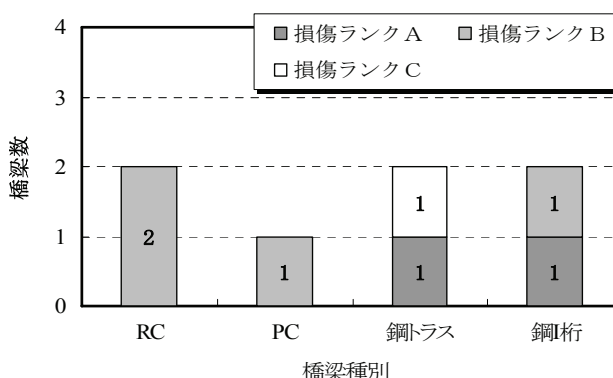


図-5 内陸部での橋梁種別と上部工損傷ランク

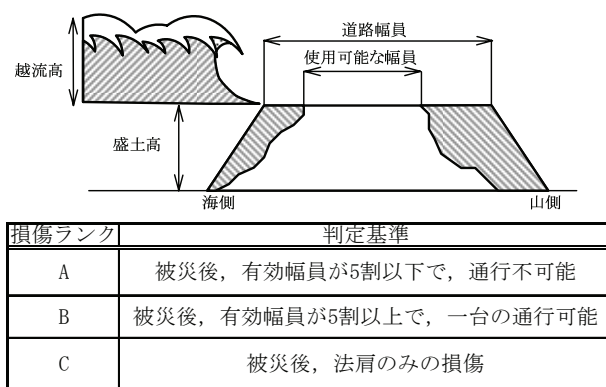


図-6 土工部の損傷判定定義

ることが分かる。そこで、本論文では、越流高と土工構造高の被害関係、沿岸部と内陸部の被害について橋梁とその周辺の土工構造、家屋等の構造物を含んだ地形について検討する。

3. 道路土工部の被害分析

(1) 土工部損傷ランクとその一例

ここでは、橋梁に接続する土工部に着目し、その被害分析を行う。

図-6に道路土工の一例である盛土の評価方法を示す。本分析での判定は、道路幅員に対する有効幅員の割合(5割)を基準とし、その使用可否で損傷ランク判定を行っている。有効幅員を5割としたのは、インドネシアの平均的な橋梁の幅員が7.0m程度であり、有効幅員が5割残れば、救援物資を運ぶトラック(2.5m)が通行可能であると考えたためである。損傷ランクAは、有効幅員が道路幅員の5割以下で通行不可能、損傷ランクBは、有効幅員が道路幅員の5割以上でトラック一台の通行が可能、損傷ランクCは法肩のみの損傷とし、定義した。

図-7に盛土の代表的損傷例として橋梁No.11-2 Lueng le橋の損傷状況を示す。本橋梁は、海岸線から680mに位置し、橋長19.1mの単純RC橋である。道路幅員は10.2mで接続する盛土高は1.5mであった。来襲した津波高は現地のモスクの痕跡より9.5mと推定されている。津波来襲後の被害分析を行うと、海側左岸の被害が大きく、橋梁から2.5m、幅員方向では最大6.0mの洗掘が確認された。山側の盛土の損傷については、上部工が3.0m水平移動したことが要因となり、損傷が生じたと考えられる。以上の状況からこの橋梁の盛土部の損傷ランクはAと定義した。

(2) 土工部の被害分析

調査橋梁26橋中津波高がある程度推測できた8橋について、越流高と土工構造高の被害関係について整理を行う。ここで示す越流高とは藤間ら²⁾が現地で想定した津波高から土工構造高を引いた値である。図-8に越流高と土工構造高の被害関係図を示す。本図は首藤³⁾が行った津波被害分析結果をもとに作

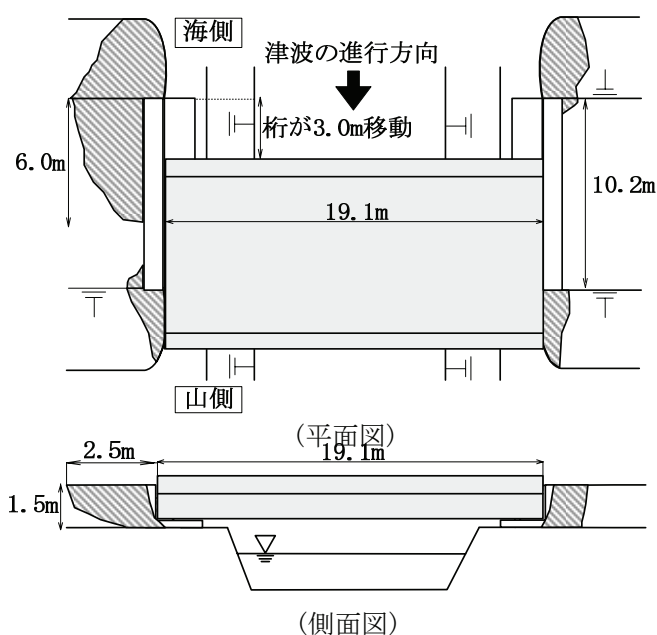


図-7 盛土部の損傷例(No.11-2 橋)

成した。首藤の分析結果では、日本の津波被害のデータから越流高と土工構造高から損傷判定を行い、土工構造高が高ければ損傷しやすく、越流高が低ければ損傷程度は小さくなると評価している。ここで用いる破壊基準線とは、破壊基準線を上回るものは破壊、下回るものは非破壊と判定する指標である。図-8より、調査対象橋梁8橋全てが破壊基準線を越え、倒壊する結果となる。図-8中の検討Iに示す橋梁No.2のみが損傷ランクCであり、破壊基準線で評価する場合と結果が異なる。橋梁No.2の土工部は石積擁壁であることから、他の盛土構造と比較すると擁壁の効果により、被害が小さくなったと考えられる。

一方、図-8中の検討IIに示す損傷ランクAの橋梁No.3に着目する。橋梁No.3とは、海岸線から200mの位置にあり、Cut川を渡過する10径間のPC橋で、橋長は304.5mである。越流高は3.0mで橋梁No.2とは1.0mの差であるが、盛土部の損傷ランクはAと被害が大きかった橋梁である。筆者らは現地の土を橋梁の左岸海側で採取し、土質調査を行った。土質調査結果によれば、Cut川橋の盛土部の土質は細粒分質砂であり、液性限界及び塑性限界は非塑性土(NP)で、塑性指数は0であった。この種の土は、粒子間の粘着性が弱く、水によって固結しにくい土であり、砂浜によく見られる特性を持つ。このことより、Cut川橋の盛土部は土の性質上非常に流失しやすいと考えられる。

図-8中の検討領域IIIでは、越流高及び土工構造高が概ね等しいが、損傷程度に差異がある。図-9に土工構造の石積擁壁と盛土の被害程度について示す。橋梁No.7は幅員7.7m、土工構造高は1.5mである。構造形式は石積擁壁であり、有効幅員が5割以上残ったため損傷ランクはBである。橋梁No.13は幅員9.0m、土工構造高は2.0mである。橋梁No.7と同様に

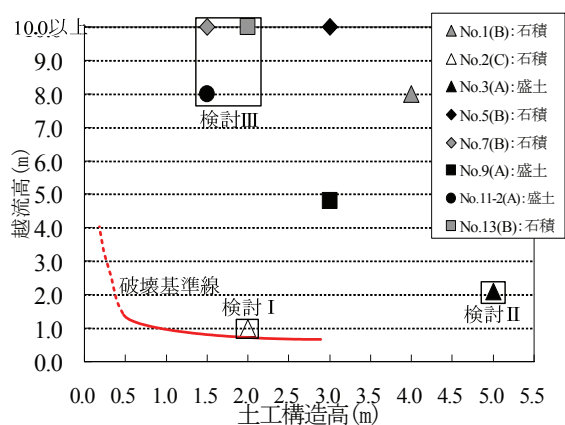


図-8 土工構造高と越流高の被害関係

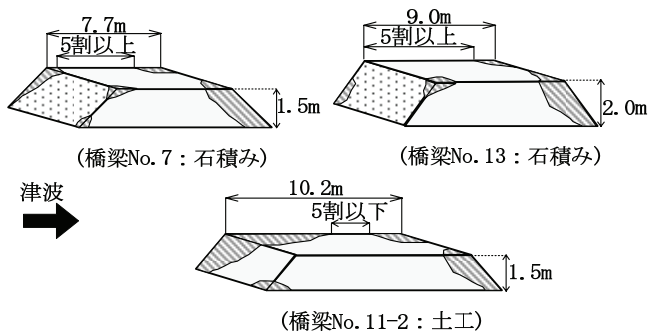


図-9 盛土と石積み擁壁の被害程度

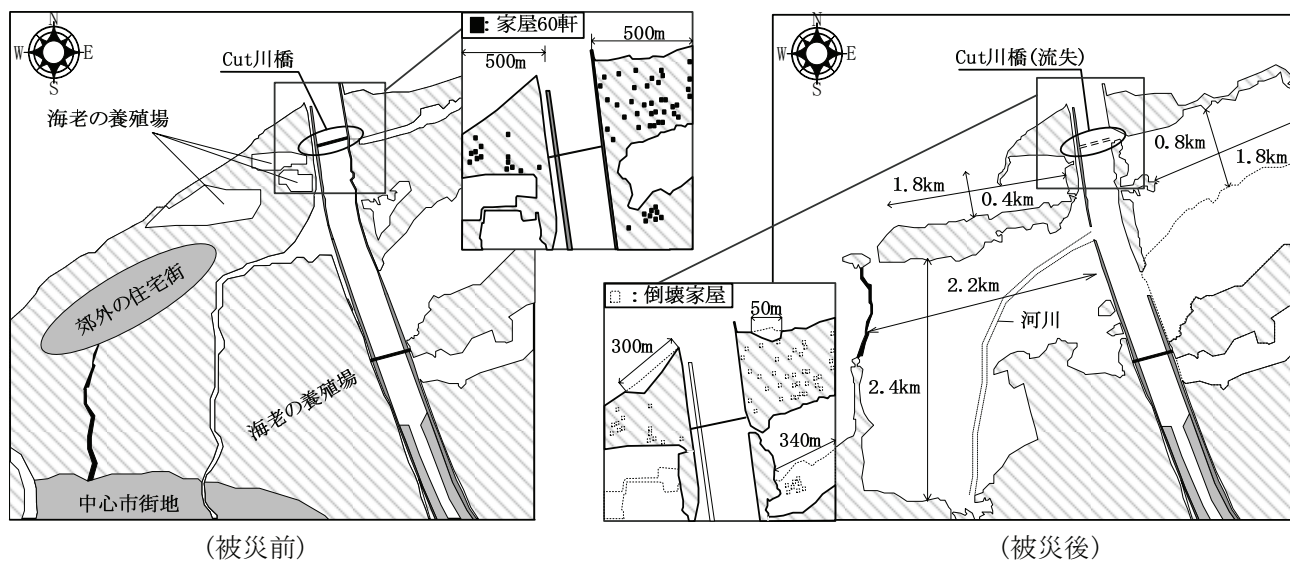


図-10 Cut川橋周辺地形変化状況

石積み擁壁で、有効幅員が5割以上残ったため損傷ランクはBである。一方、橋梁No.11-2(Lueng Ie橋)の土工部は盛土であり、前述の通り損傷ランクはAである。同程度の越流高、土工構造高でありながら被災度に差が発生することから、石積み等の擁壁がある場合は、損傷程度が小さくなると考えられる。

4. 橋梁及びその周辺の詳細被害分析

被害分析結果より、橋梁種別や周辺条件により損傷程度が異なることが分かった。そこで本章では、沿岸部と内陸部の橋梁を各1橋選定し、橋梁、周辺地形、土工構造、家屋等の構造物について詳細検討を行う。詳細調査には津波被災前後の衛星写真を用いた。

(1) 沿岸部で流失した橋梁(Cut川橋)

ここでは、海岸線沿いである沿岸部に架設され、図-8中の橋梁No.3であるCut川橋に着目し、橋梁及び橋梁近辺にあった家屋の被害分析を行う。

図-10にCut川橋の被災前後の周辺地形図を示す。津波被災前の状況は、Cut川橋近郊は郊外の住宅街であり、図-10中の拡大図に示すCut川橋から半径500m以内では、60軒の家屋が存在している。また、両岸には海老の養殖場がある。

一方、津波被災後の状況は、右岸は海老の養殖場を中心に大規模な地盤の流失が生じている。左岸側も右岸側と同様に、海老の養殖場及び河川を中心に地盤が流失している。また、津波来襲前に沿岸沿いに60軒あった家屋は全て流失し、沿岸部は壊滅状態であることが分かる。土工部については、左岸側で4.61km²、右岸側では1.44km²、合計6.05km²流失している。右岸の海老の養殖場近くでは、浸食と共に家屋が流失していることが確認できる。

図-11に津波来襲直後とインドネシアに日本軍が駐留していた際に作成された1940年代の地形図を合わせたものを示す。図-11中の領域Aより、1940年代には海が多く、埋め立てにより海老の養殖地を中心とした地形を形成したことが分かる。Cut川橋の盛土部の砂質は前述したように、粘着性が弱いものであり、津波が来襲した際に埋め立てを行った地盤

を中心に流失したことが考えられる。また、図-11中の領域Bに示す元々存在した地盤については、津波が河川を遡上した際に浸食されたと考えられる。

図-12にCut川橋の断面図を示す。Cut川橋は歩道橋であり幅員は2.8mである。この橋梁について以下の算定式を用い、橋梁重量から求める橋梁の抵抗力と橋梁の被圧面積から求める津波波力を算定する。また、抵抗力と津波波力の比率を求め考察を行う。算定で用いる式を以下に示す。

$$F = \frac{1}{2} \rho_w C_d V^2 A \quad (1)$$

$$S = \mu W \quad (2)$$

$$\beta = \frac{S}{F} \quad (3)$$

ここで、

ρ_w : 水の密度 (1000kg/m³) μ : 摩擦係数 (0.5)
 C_d : 抗力係数 W : 上部工重量 (kN)
 V : 水の流速 (5.0m/sと仮定する)
 A : 被圧面積 (m²)

式 (1)、(2) を用い算定すると、作用波力は 601.8kN、抵抗力は 382.5kN となり、式 (3) より作用力と抵抗力の比率は 0.62 となる。算定結果より、波力と比較すると橋梁の抵抗力は非常に小さいことが分かる。これは、幅員が 2.8m と短く、橋梁重量が軽いことから、桁流失の被害が発生しやすい構造であることが分かる。

(2) 内陸部で桁流失した橋梁 (Lueng Ie 橋)

ここでは、海岸線から距離がある内陸部に架設され、図-8中に示した橋梁No.11-2である Lueng Ie 橋に着目し、橋梁、橋梁近辺にあったモスク及び家屋の被害分析を行う。

図-13に Lueng Ie 橋の津波被災前後の周辺地形図を示す。津波被災前の状況は、Lueng Ie 橋周辺は森林に覆われ、主要道近辺にはモスク及び家屋等の集落が存在していたことが分かる。Lueng Ie 橋が渡過する河川は大きく蛇行し、その河口部には海老の養殖場がある。また、Lueng Ie 橋は海岸線から直線距離で 680m の位置にある。

一方、津波被災後の状況によれば、Lueng Ie 橋北側の森は 6 割程度減少し、西側の林は全壊していることが分かる。モスクについては、来襲により半壊状態となっている。家屋については、被災前に図-13の主要道近辺の拡大図に示す地域では、65 軒あった家屋は 7 軒残る程度と全体の 9 割が倒壊したことから、町全体がが全壊に近い状況であることが分かる。海老の養殖場は津波により浸食され、海水が浸入し、地形が大きく変化している。津波により沿岸部の地形は最大で横幅 1.2km、奥行き 0.2km 洗掘されており、合計で 0.12km² 流失している。また、河口部の洗掘が激しく、Lueng Ie 橋の海岸線からの

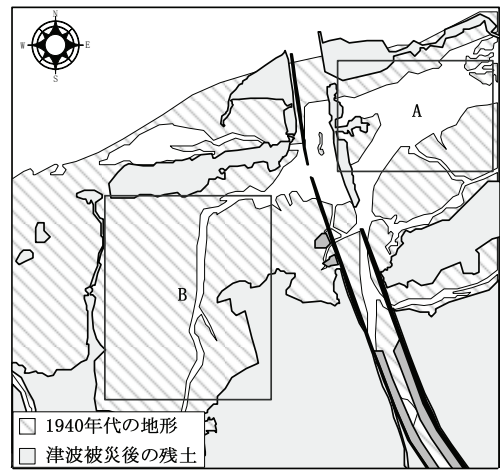


図-11 被災後と 1940 年代の地形図

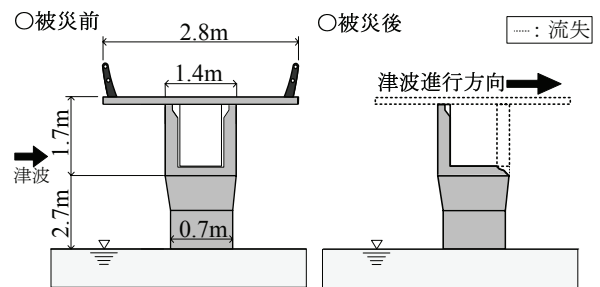
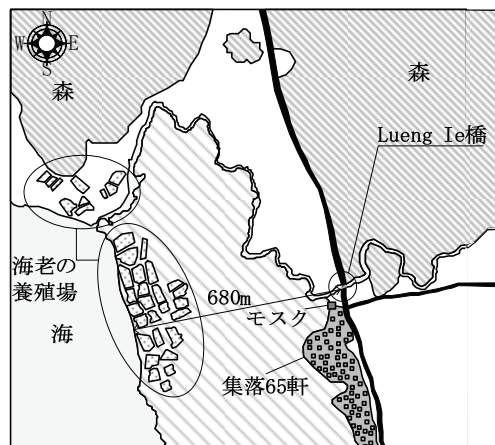
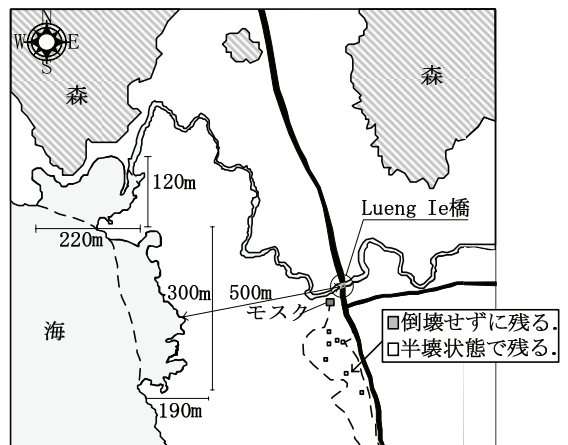


図-12 Cut 川橋断面図



(被災前)



(被災後)

図-13 Lueng Ie 橋の周辺図

距離が 500m と 180m 短縮したことが分かる。海老の養殖場は、現地盤(砂浜)を掘って海水を入れたものであり、浸食されやすい状況であったとも考えられる。図-14 に津波襲来後の Lueng Ie 橋近辺の損傷状況を示す。Lueng Ie 橋上部工は津波により、河川上流方向に 3.0m 桁移動した。一方、下部工はひび割れ程度の軽微な損傷に留まっていた。橋台背面の盛土部の流失量は、左岸部下流側で幅員の 6 割相当である 6.0m 浸食されている。

式(1)を用い作用波力を算定すると、708.8kN、式(2)を用い抵抗力を算定すると 1095.3kN となり、式(3)を用い作用力と抵抗力の比率は 1.54 となる。算定結果より波力と比較すると抵抗力は大きい。これは橋梁重量が大きいことが要因であり、桁移動の被害に留まったことが考えられる。

Lueng Ie 橋の地盤特性について検討する。橋梁周辺の土質は、左岸橋台裏込め部で採取した地盤より液性限界が40.5%、塑性限界が34.7%となり、塑性指数が5.8となる。力学的性質は、圧縮性が小さく、透水性が大きく、乾燥強さが小さい土であり、Cut 川橋に比べ、粘着性を有していることが一因となり、津波により浸食されにくかったことが考えられる。

5. まとめ

- (1) 上部工は、桁流失等の損傷ランク A が 26 橋のうち 13 橋と半数を占め、下工部は損傷ランク A が 4 橋、土工部は損傷ランク A が 7 橋であり、上部工の被害度が高い。
- (2) 越流高と土工構造高の関係を被害分析を行うと、津波高が大きいため、首藤が提案した破壊基準線を超えすべて崩壊する領域に被害が分布する結果となった。しかしながら、実被害では損傷ランク A が多かったものの、石積などの擁壁構

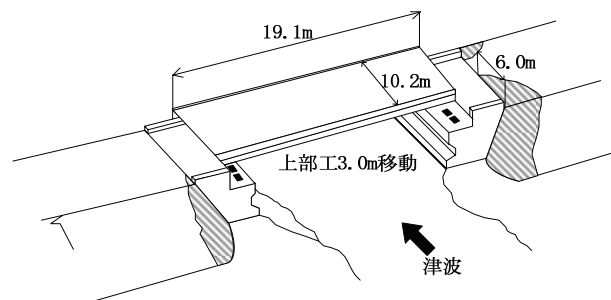


図-14 Lueng Ie 橋の橋梁図

造では部分的な被害であるランク B, C に留まるものもあった。

- (3) 沿岸部にある Cut 川橋梁周辺の土質は大規模な被害を受けているが土質的にも水により浸食されやすい特性を有していた。一方、被害が小さい比較的内陸部にある Lueng Ie 橋近郊の土質は若干粘性を含んだ、固結しやすい土であり浸食しにくい特性値であった。

参考文献

- 1) 国際協力機構社会開発部、北スマトラ沖地震津波災害緊急復旧・復興プログラム最終報告書、pp.1-50, 2005.6
- 2) 藤間功司ら：スマトラ島西海岸における 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.874-879, 2007.8
- 3) 首藤伸夫：津波工学研究報告第 16 号、pp. 1-16, 1999.3