

スマトラ西海岸 Lueng Ie 橋の詳細津波被害分析

宮原健太¹・幸左 賢二²・二井伸一³・小野祐輔⁴

¹学生会員 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）

²正会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1）

³正会員 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）

⁴正会員 京都大学大学院助教 工学研究都市社会工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

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。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、橋梁周辺の土工部は、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。図-1 に研究フローを示すが、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った。

2. 調査概要

(1) 被災概況

図-2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。土工部については、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。また、本調査においても、多くの道路が、所々水没しており、迂回路を通行するしかない道路や、流失

研究目的

スマトラ島で津波により多くの橋梁が損傷
調査事例は少数
(1) 橋梁位置と損傷程度の判定
(2) 作用波力と橋梁重量の関係の評価

対象橋梁

スマトラ島調査橋梁: 41橋 (調査対象)

整理項目

・海岸線からの距離
・川幅
・橋梁種別
・作用波力と橋梁重量など

被害分析

・橋梁耐力-作用波力
・桁長-安全係数

図-1 研究フロー

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

表-1 に西海岸沿い橋梁の津波被害概要を示す。表-1 には調査橋梁 41 橋の損傷程度、海岸線からの距離、構造諸元を示す。同表中の損傷ランクは、橋梁の使用可否に着目し、表-2 に示すように定義した。表-1 によれば、全橋梁の桁長の平均は 27m であり大半の橋梁が 30m 以内であることが分かる。また、幅員の平均も 6.9m であり、大半の橋梁が対向 1 車線道路であることが想定できる。これらのことより、構造諸元は、日本の海岸線沿いの橋梁に近い状況である。

次に分析を行う。分析対象は、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-3 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

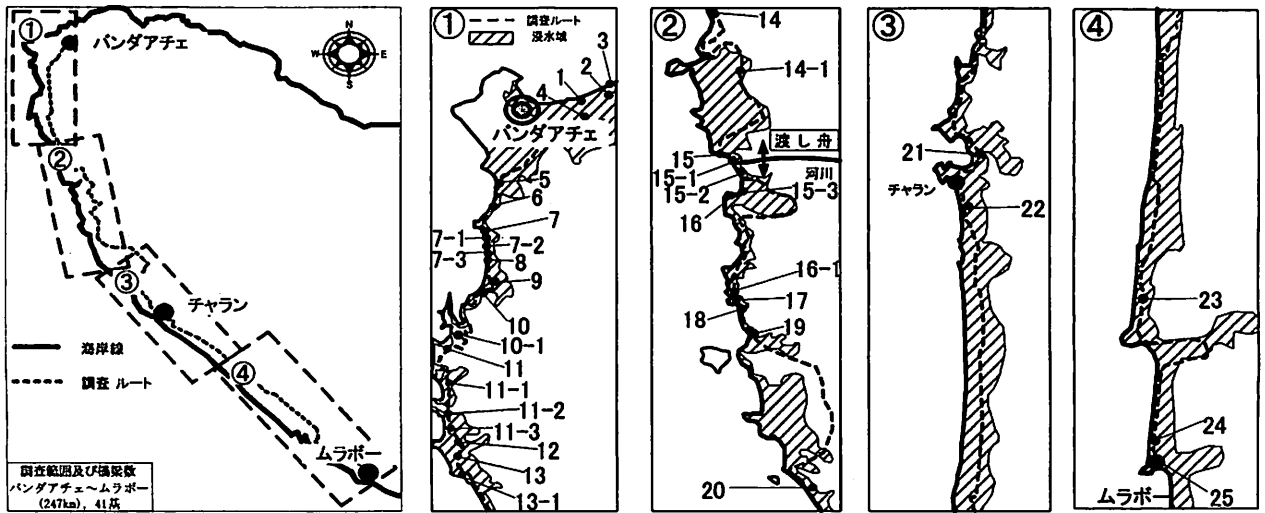


図-2 調査橋梁位置

表-1 西海岸沿いの津波被害概要

No.	橋梁種別	径間数	損傷ランク			X	L	l	Z	h	t
			上部工	下部工	土工部						
1	PC桁	3	B	B	B	0.0	68.6	22.9	7.9	1.5	2.8
2	PC桁	1	B	C	C	2.0	30.0	30.0	8	1.5	1
3	PC桁	10	A	A	A	0.2	304.5	30.5	2.8	1.7	2.4
3-1	PC桁	2	C	B	A	0.2	47.9	23.9	2.8	1.7	2.4
4	PC桁	2	B	C	B	0.0	50.8	25.4	7.2	1.5	2
5	鋼トラス桁	2	A	B	A	0.3	69.4	34.7	7	0.4	3
6	カルバート	1	C	C	C	0.1	10.2	10.2	7.8	-	-
7	RC桁	2	C	B	B	0.2	26.2	13.1	7.7	1.2	1
7-1	RC桁	1	C	C	C	0.1	3.0	3.0	6.3	0.4	1
7-2	RC桁	1	C	C	C	0.2	3.0	3.0	7	0.4	1
7-3	RC桁	1	C	C	C	0.3	3.0	3.0	5.8	0.4	1
8	RC桁	1	C	B	B	0.1	25.0	25.0	7	0.2	2
9	鋼トラス桁	1	A	B	B	0.8	62.0	62.0	9.7	0.4	2
9-1	鋼I桁	1	A	B	B	0.8	19.0	19.0	9.7	0.3	2
10	RC桁	2	A	A	A	0.0	40.0	20.0	7	0.5	2
10-1	カルバート	1	C	C	C	1.0	9.0	9.0	7.6	-	-
11	鋼トラス桁	1	A	B	A	0.3	35.0	35.0	6	0.3	2
11-1	カルバート	1	C	C	C	0.2	12.0	12.0	7	-	-
11-2	RC桁	1	B	C	B	0.5	19.1	19.1	10.2	1.7	4
11-3	RC桁	1	B	C	C	0.5	18.0	18.0	7	1.5	4
12	鋼トラス桁	2	C	C	C	0.7	80.0	40.0	7	0.4	7
13	鋼I桁	1	B	C	B	0.6	21.1	21.1	9	1.45	0.8
13-1	鋼トラス桁	2	A	B	B	0.0	83.0	41.5	7	0.6	5
14	鋼トラス桁	1	A	C	C	0.3	35.0	35.0	6	0.3	1.1
14-1	鋼トラス桁	1	C	C	C	4.6	35.0	35.0	6	0.4	5
15	PCI桁	6	A	A	A	0.0	192.0	32.0	6	0.5	5
15-1	不明	※	A	※	※	0.0	※	※	※	※	※
15-2	不明	※	A	B	※	0.1	※	※	※	※	※
15-3	不明	※	A	B	A	0.1	※	※	※	※	※
16	PCI桁	3	A	A	A	0.3	96.0	32.0	6	0.4	6
16-1	不明	※	A	B	※	0.3	※	※	※	※	※
17	RCスラブ	1	A	C	B	0.3	6.5	6.5	6.8	0.4	2
18	鋼トラス桁	1	A	B	B	0.4	61.0	61.0	6	0.4	3
19	鋼トラス桁	1	A	B	B	0.2	45.0	45.0	6	0.3	2
19-1	鋼トラス桁	2	B	B	※	※	80.0	40.0	6	※	※
20	不明	※	A	B	A	0.2	※	※	※	※	※
21	不明	※	A	A	B	※	※	※	※	※	※
22	鋼トラス桁	2	A	B	B	0.0	110.0	55.0	6	※	※
23	鋼トラス桁	3	C	C	C	※	※	※	※	※	※
24	未確認	※	A	B	A	※	※	※	※	※	※
25	鋼トラス桁	1	A	B	A	※	※	※	※	※	※
平均値						0.5	53.1	27.0	6.9	0.7	2.8

X: 海岸線からの距離(km)

L: 橋長(m)

l: 桁長(m)

Z: 幅員(m)

※: 未確認

-: 無し

h: 構造高(m)

t: 桁下高(m)

表-2 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

材別に損傷ランクと基数を整理した。図-3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-4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-4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、内陸地より海岸線沿いの橋梁のほうが被害程度が大きいことが分かる。しかし、海岸線からの距離が0.5km以上においても、損傷ランクAの橋梁が2橋存在する。この2橋が損傷ランクAである要因を図-5を用いて考察する。

図-5は海岸線からの距離が0.5km以上の橋梁を抽出し、その対象橋梁の津波被災前の衛星写真より算出した右岸と左岸の距離である川幅と桁長及び損傷ランクの関係を整理したものである。図-5より、川幅が10~20mと小さい河川に架設されている橋梁は、桁移動等の被害の損傷ランクBが4橋、軽微な損傷等の損傷ランクCが1橋となる。一方、川幅が100m程度と大きい河川に架設されている橋梁は、桁流失等の損傷ランクAが2橋と損傷程度が大きいことが分かる。このことより、海岸線から距離があ

る橋梁においても、川幅が 100m を越すような広い河川の場合、津波が河川を遡上し、桁流失等の大きな被害が生じると考えられる。

図-4 中の 0.4km 以内の橋梁においては、桁流失などの損傷ランク A が 11 橋と過半数を占めるが、海岸線から近いにもかかわらず、部分的被害である損傷ランク C の橋梁が 6 橋存在する。そこで、海岸線から 0.4km 以内の橋梁について、以下に分析を行う。

図-6 に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。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、損傷程度は橋梁種別で異なることが分かる。そこで、以下の評価式を用いて橋梁種別による津波被害程度の分析を行う。対象は調査橋梁 26 橋とし、その作用波力及び抵抗力を算定して検証する。作用波力は式 (1)を用いる。式中の抗力係数は、道路橋示方書²⁾に準拠している。

$$F = \frac{1}{2} \rho_w C_d V^2 A \tag{1}$$

ここで、

ρ_w : 水の密度 (1000kg/m³)

C_d : 抗力係数

V : 水の流速 (5.0m/s と仮定する)

A : 被圧面積 (m²)

また、抵抗力は式 (2)を用いて算定する。式 (2)中の支承摩擦係数 μ の値は、桁が橋台に直接置いてある状態を想定し、鉄筋コンクリート同士もしくはコンクリートとゴムパット支承の摩擦を考慮して 0.5 とした。

$$S = \mu W \tag{2}$$

ここで、

μ : 摩擦係数 (0.5)

W : 上部工重量 (kN)

以上より求めた作用波力と抵抗力から、式 (3)を用いて作用力抵抗力比 β を求め評価する。

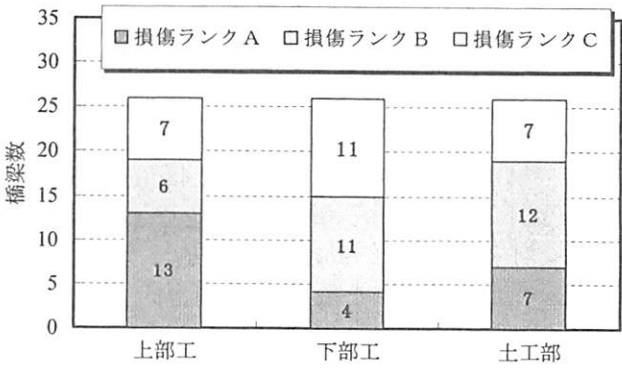


図-3 部分別損傷ランク

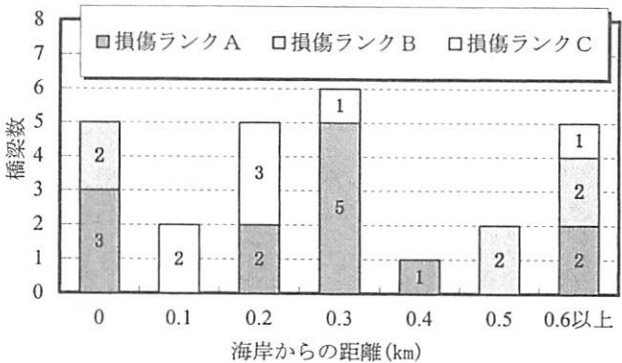


図-4 海岸線からの距離と上部工損傷ランク

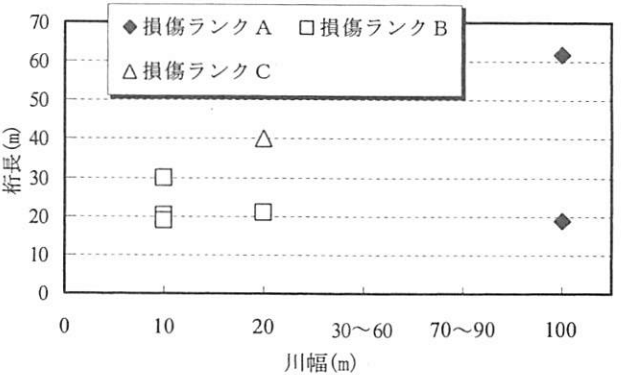


図-5 0.5km 以上での川幅と損傷ランク

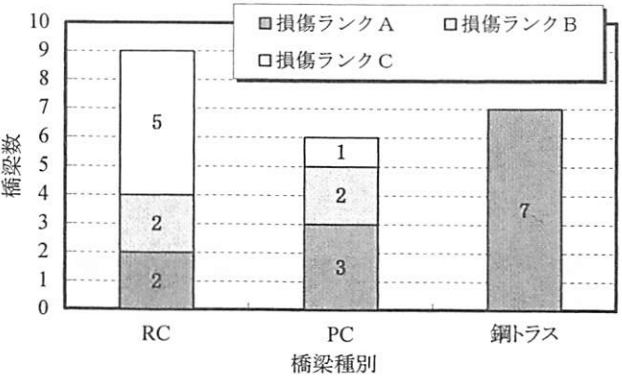


図-6 0.4km 以内での橋梁種別と上部工損傷ランク

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

図-7に示す橋梁 No.11-2 (Lueng Ie 橋)を用いて算定例を示す。Lueng Ie 橋は、桁長 19.1m, 幅員 10.2m, 構造高 1.7m の RC 桁橋梁である。被圧面積 A は、構造高と桁長の積であり 32.4m²となる。抗力係数 C_dは 1.5 であり、津波流速 V を 5.0m/s と仮定すると、作用波力は 608.8kN となる。次に、上部工体積より概略算定した重量 W が 2191.2kN であることから、抵抗力は 1095.3N となる。以上より、作用力抵抗力比 β は 1.8 となる。

図-8に調査橋梁 26 橋中 PC 桁, RC 桁, 鋼 I 桁の橋梁について前述の要領で求めた作用力抵抗力比と桁長の関係を示す。本分析では、鋼トラスは大半が流出しており、主構高や弦材高等、構造諸元を完全に把握できていない。そのため、鋼トラスは割愛している。図-8より、鋼 I 桁の鋼橋の作用力抵抗力比の平均値は 1.25 となり、RC 桁, PC 桁のコンクリート橋梁の作用力抵抗力比の平均値は 1.53 となる。以上より、平均値にはコンクリート橋と鋼橋の作用力抵抗力比の差異は小さい。作用力抵抗力比 0.68 と極端に小さいコンクリート橋が 2 橋存在する。この 2 橋は、Cut 川を併設して渡河する橋梁であり、主に歩道橋として使用されている。

図-9に被災前と被災後の状況図を示す。コンクリート橋の被害状況としては稀な、上部工流失が起きた橋梁である。被害が大きくなった要因は、図に示すように構造高と幅員の比が小さいことである。本橋の構造高は 1.7m であり、作用波力は 601.8kN となる。一方、幅員は小さく、それに伴い上部工重量は 765.1kN となる。この重量は、コンクリート橋の平均上部工重量 (1635.2kN) の 4 割程度と軽く、波力に対する抵抗力が著しく小さかったことが考えられる。

3. Lueng Ie 橋近辺の被害分析

ここでは、海岸線から距離があるが、津波により桁移動した 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-10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。

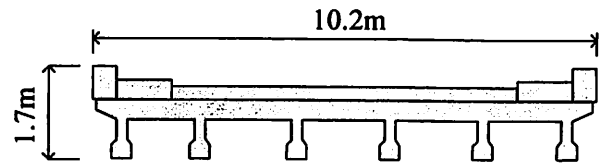
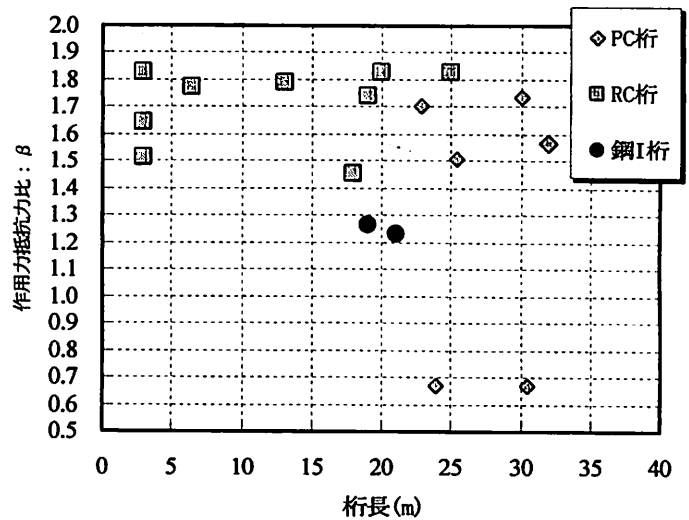


図-7 Lueng Ie 橋上部工断面図



橋種	β	橋種	β
PC桁	1.35	鋼I桁	1.25
RC桁	1.71		
平均=	1.53	平均=	1.25

図-8 橋梁別作用力抵抗力比

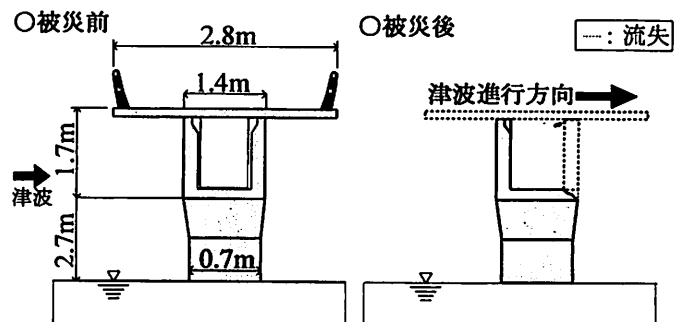


図-9 Cut 川橋断面図

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-10の主要道近辺の拡大図 (100m×100m) に示す地域では、60 軒近くあった家屋は 6, 7 軒残る程度と全体の 9 割が倒壊したことから、町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洗掘され、海水が浸入し、地形が変形している。津波による地形の変形量は合計 87500m²であり、河口部

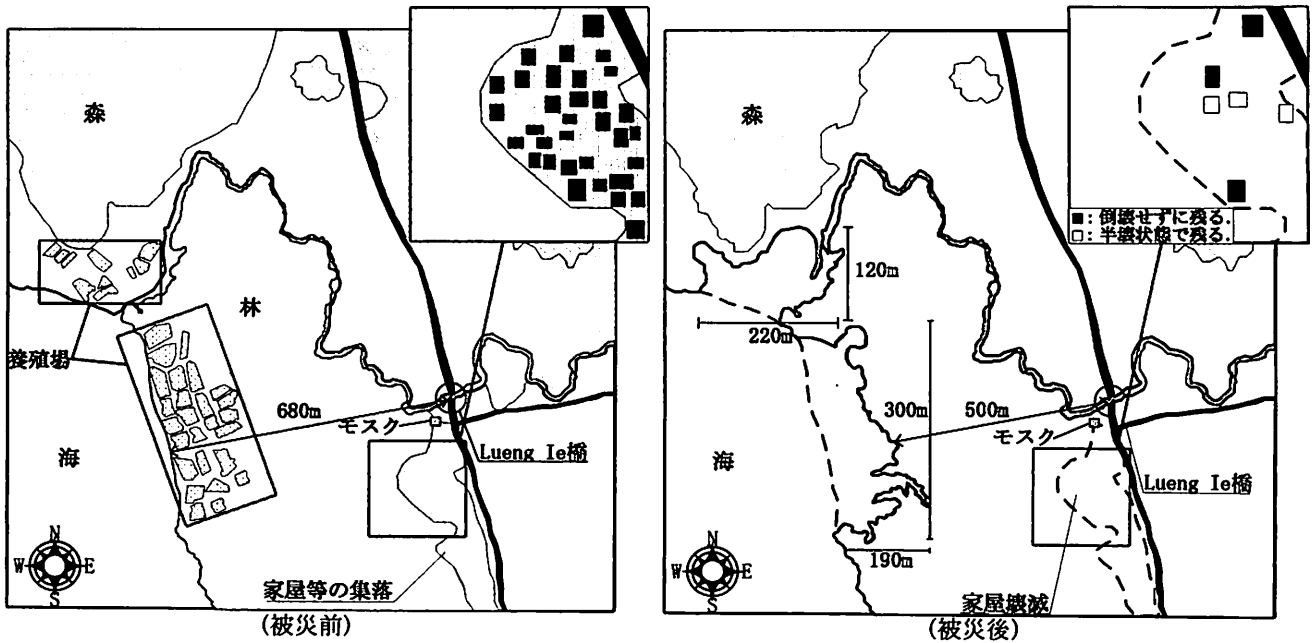


図-10 Lueng Ie 橋の周辺図

の洗掘が激しく、Lueng Ie 橋の海岸線からの距離が 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ことも考えられる。

図-11 に津波襲来後の Lueng Ie 橋周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。橋台背面の土工部の流失量は、右岸部下流側が 12m³、左岸部下流側が 16m³、右岸部上流側が 8.0m³、左岸部上流側が 6.0m³ であった。また、橋梁下流側の両石積み部分は、盛土と共に流失していた。

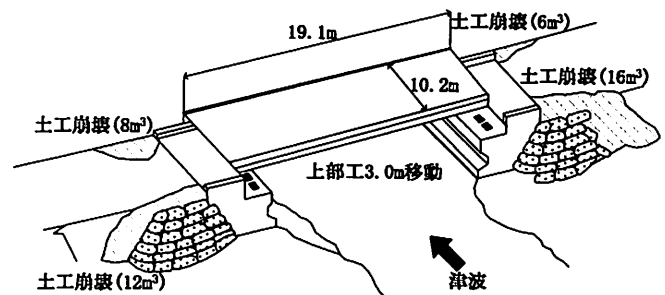


図-11 Lueng Ie 橋の橋梁図

図-12 に津波被災前後における海岸線側のモスクの損傷を示す。モスクの構造高は 13.0m 程度である。また、同モスクの津波痕跡より、津波高が 9.5m であったことが推測される。モスクは津波により完全に浸水していないこともあり、壁が破壊され、柱のみが残るといった半壊程度の被害である。

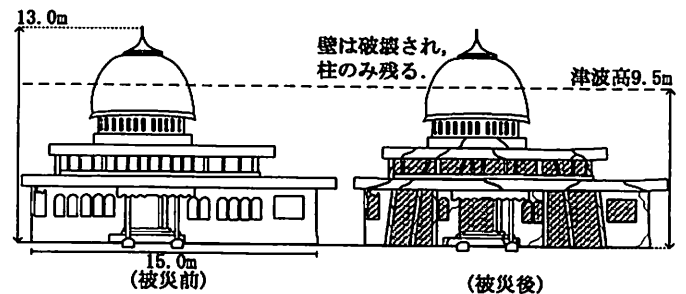


図-12 モスクの損傷(海岸線側)

これらの被害事例から、モスク、家屋、橋梁について作用波力及び抵抗力について、算定式を用いて求め、津波被害現象の分析を行う。現地の状況及び被災状況から、Lueng Ie 橋周辺のモスク及び家屋は、壁などの障害物は存在せず、津波が直接作用したと想定できる。作用波力は前述した要領で式(1)を用い、抵抗力は式(4)を用いて求める。また、式中のせん断応力度 τ_u は庄司^{4), 5)} が仮定した数値を用い、一律に $0.24 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ とした。

$$V_u = \tau_u a \quad (4)$$

ここに、

τ_u : せん断応力度 a : 壁周面断面積 (m²)

図-13 にモスク及び家屋の作用波力と抵抗力の関係を示す。作用波力は津波が衝突する壁の面積、抵抗力は壁周りの断面積を用いて求める。モスクの壁の寸法は壁高 5.5m、壁幅 15.0m、壁厚 0.2m、家屋の壁の寸法は壁高 5.0m、壁幅 4.0m、壁厚 0.1m とし、式(1)、(4)を用いて作用波力及び抵抗力を求めた。モスク、家屋、橋梁の作用波力、抵抗力及び作用力抵

抗力比をまとめたものを表-3に示す。橋梁については、前項で求めた値としている。また、表中に示す作用力抵抗比は前述した要領で式(3)を用いて求めた。表-3より、作用力抵抗比はモスクは1.47、家屋は1.33、橋梁は1.80となる。以下に実被災現象と作用力抵抗比の関係について検証を行う。

作用力抵抗比1.33である家屋は、被災前と比較すると倒壊及び半壊が9割を占めることから、大半の家屋が壁崩壊と共に倒壊したと想定できる。作用力抵抗比1.47であるモスクは、被災前と比較すると、壁は破壊されているが、構造物としての状態を維持し、半壊となっている。これは、モスク内には柱があり、柱の被圧面積は壁よりも小さく、作用波力は小さくなると想定できる。そのため、柱が津波の作用波力に耐え、半壊の状態で維持できたと考えられる。作用力抵抗比1.80である橋梁は、上部工重量が重く、作用力抵抗比は相対的には大きい、桁には3.0mの移動が生じている。

4. まとめ

スマトラ沖地震で発生した津波による橋梁損傷について、現地調査及び分析を実施した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 被災調査より、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 橋であることと比べると上部工の被害度は高い。
- (2) 分析結果より、上部工被害を海岸線沿い（海岸線からの距離 0.4km 以内）と内陸地沿い（海岸線からの距離 0.5km 以上）で比較すると、海岸線沿いの橋梁は、桁流失等の損傷ランク A が 19 橋のうち 11 橋と過半数を占め、甚大な被害が多いが、RC 橋梁は、海岸線沿いであっても 9 橋のうち 2 橋が桁移動等の損傷ランク B、5 橋が高欄部の損傷等の損傷ランク C であり、比較的軽微な損傷であった。
- (3) 分析結果より、全調査橋梁の作用力抵抗比 β を求めると、コンクリート橋と鋼橋の差異は小

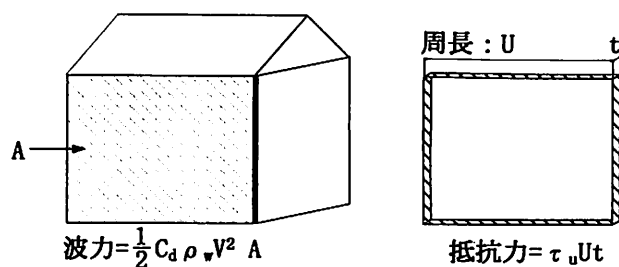


図-13 作用波力と抵抗力の関係(モスク及び家屋)

表-3 Lueng Ie 橋周辺の構造物の安全係数

	モスク	家屋	橋梁
作用波力(kN)	1340.7	325	608.8
抵抗力(kN)	1968	432	1095.3
作用力抵抗比	1.47	1.33	1.80

さい結果となっているが、幅員が短い橋梁は、上部工重量が軽くなり作用波力に耐えられず、流失しやすい傾向を示すことが分かった。

- (4) 分析結果より、作用波力及び抵抗力の関係から、Lueng Ie 橋周辺のモスク及び家屋の壁は津波により破壊され、家屋は倒壊するが、モスクについては、柱が作用波力に耐えるため、半壊の状態を維持したと考えられる。

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、2005.6
- 2) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編、2002.3
- 3) 藤間功司、鳴原良典、Charles Shimamura、松富英夫、榊原勉、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：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、2007.8
- 4) 庄司学、森山哲雄、幸左賢二、松富英夫、鳴原良典、村嶋陽一：2006 年ジャワ島南西沖地震津波による家屋等構造物の被災分析、海岸工学論文集、第 54 巻、2007
- 5) 中埜良昭：スマトラ島沖地震による津波被害を受けた構造物の調査報告書 Ver.2.2、2005