

## スマトラ沖地震の橋梁被害調査

幸左賢二<sup>1</sup>，宇野裕教<sup>1</sup>・宮島昌克<sup>2</sup>・小野裕輔<sup>3</sup>・橋本隆雄<sup>4</sup>Kenji KOSA<sup>1</sup>, Hironori UNO<sup>1</sup>, Masakatsu MIYAJIMA<sup>2</sup>, Yuusuke ONO<sup>3</sup>  
and Takao HASHIMOTO<sup>4</sup><sup>1</sup>九州工業大学建設社会工学科  
<sup>3</sup>京都大学大学院工学研究科<sup>2</sup>金沢大学大学院自然科学研究科  
<sup>4</sup>千代田コンサルタント

本研究ではスマトラ沖地震においてスマトラ島西海岸で津波により発生した，橋梁の流失などの被害状況を報告する．まず，調査したバンダアチェからムラポー間247kmにある25橋梁の被害状況を概説する．ついで，4橋を対象に詳細調査を実施し，桁移動状況および損傷状況の評価を実施した．また，移動および流失に至る桁の状況から，津波の流速を求め，付近で観測された流速と対比することにより，評価手法の妥当性を検証した．

## 1. はじめに

スマトラ沖地震により，スマトラ島では13万人を超える人々が主として津波による被害により死亡している．特に，北スマトラ西海岸のバンダアチェからムラポー間は到達津波高も高く，被害のもっとも大きい地域ではあるが，GAMと呼ばれる武装集団活動により，現在まで十分な調査は実施されていなかった．筆者らは，GAMと政府との和解成立後の，2006年1月にバンダアチェ - ムラポー間247kmの橋梁被害状況を調査したので，ここに橋梁被害状況を報告するものである．図 - 1の調査位置に示すように，バンダアチェからムラポー間は海岸線に沿って北スマトラ西岸道路で結ばれているが，途中に人口2万人のチャランがあるのみで，山が海岸線までせまる地形である．図 - 2の詳細調査図に，調査ルートと橋梁位置を示すが，海岸線は数kmにわたり，津波の浸水を受けており，従来の道路も多くは流失や水没している．このため，図 - 2のa, b, cの地域では，水没した地域の道路を復旧するのではなく，山の中に新たに未舗装の道路を切り開いており，凸凹が酷く，ジープでも時速10km程度の走行となっている．また，図 - 2のa地域では，河川により道路が寸断されており，渡し船により，かろうじて輸送が確保されている状態となっている．表 - 1に示すようにJICAの報告書<sup>1)</sup>によると，道路全体(247km)の85%近くの210kmで流失や水没を含む被害が発生している．また，橋梁についても，142橋のうち83橋で流失などの被害が発生している．表 - 2に，同ルートを踏破して確認した橋梁の一覧表を示す．西海岸道路は，カナダ政府のODAにより建設されたことであり，20mまでの短スパンはRC床版桁，30mを超えるスパンは鋼トラス桁を標準としている．時間の制約があり，142橋のうち，損傷度を確認したものは25橋であるが，そのほとんどの橋梁では桁流失などにより，橋梁の機能そのものが消失していた．例えば，写真 - 1に示す橋梁は，周辺が大規模な洗掘により，旧道路は水中に陥没し，

橋台が海上に浮かぶ状況であった．このため，数キロ内陸側に新たな道路を建設中であった．これに対して，後述の詳細調査を実施した，バンダアチェ周辺の橋梁では，桁は移動により流失したのもあったが，橋台や橋脚は，背面土の洗掘などが認められたものの，機能は確保されていた．

表 - 1 西海岸の被害状況

道路 (km)		橋梁 (橋)	
流失, 水没区間	29.6	流失あるいは崩壊	76
全壊区間	60.1	被害有り	7
中規模被害区間	94.1		
小規模被害区間	26.0		
小計	209.8	小計	83
被害なし	37.2	被害なし	59
合計	247.0	合計	142



写真 - 1 損傷ランク A の橋の被害状況 (No. )

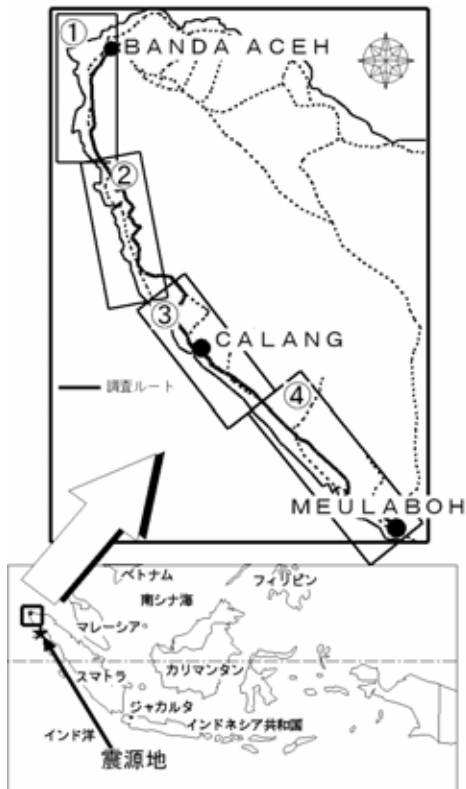


図-1 調査位置

表-2 被害程度を調査した橋梁一覧

No.	橋梁種別	ランク	特徴
①	3径間PC桁橋	B	桁が30cm移動
②	1径間RC桁橋	B	桁が40cm移動
③	10径間RC桁橋	A	桁流失, 柱流失, 橋台裏側の洗掘
④	2径間RCフォロー桁橋	B	桁が約80cm移動
⑤	2径間鋼トラス桁橋	A	トラス橋が下流へ流失,
⑥	3径間ボックスカルバート桁橋	C	損傷なし
⑦	2径間RCフォロー桁橋	C	損傷なし
⑧	未確認	A	桁流失
⑨	2径間RCフォロー, 鋼トラス桁	A	RC, トラス桁が100m程流される.
⑩	2径間トラス桁橋	A	トラス桁が流される
⑪	未確認	A	桁流失
⑫	2径間鋼トラス桁橋	C	損傷なし
⑬	1径間H鋼桁橋	A	桁が橋台から外れる.
⑭	1径間鋼トラス桁橋	A	桁流失, 橋台裏側の洗掘
⑮	未確認	A	桁, 柱流失, 橋台損傷, 周辺地盤の洗掘
⑯	未確認	A	桁流失
⑰	1径間RCフォロー桁橋	A	桁流失
⑱	1径間鋼トラス桁橋	A	桁流失
⑲	1径間鋼トラス桁橋	A	桁流失
⑳	未確認	A	桁流失, 橋台裏側の洗掘
㉑	2径間鋼トラス桁橋	A	桁流失
㉒	2径間鋼トラス桁橋	A	桁流失
㉓	3径間鋼トラス桁橋	C	損傷無し
㉔	1径間RCフォロー桁橋	A	橋周辺の大規模な洗掘
㉕	未確認	A	桁流失, 橋周辺の大規模な洗掘

A: 桁が流される等使用できないほどの損傷  
 B: 桁移動など軽微な損傷。使用するには問題ない  
 C: 損傷なし

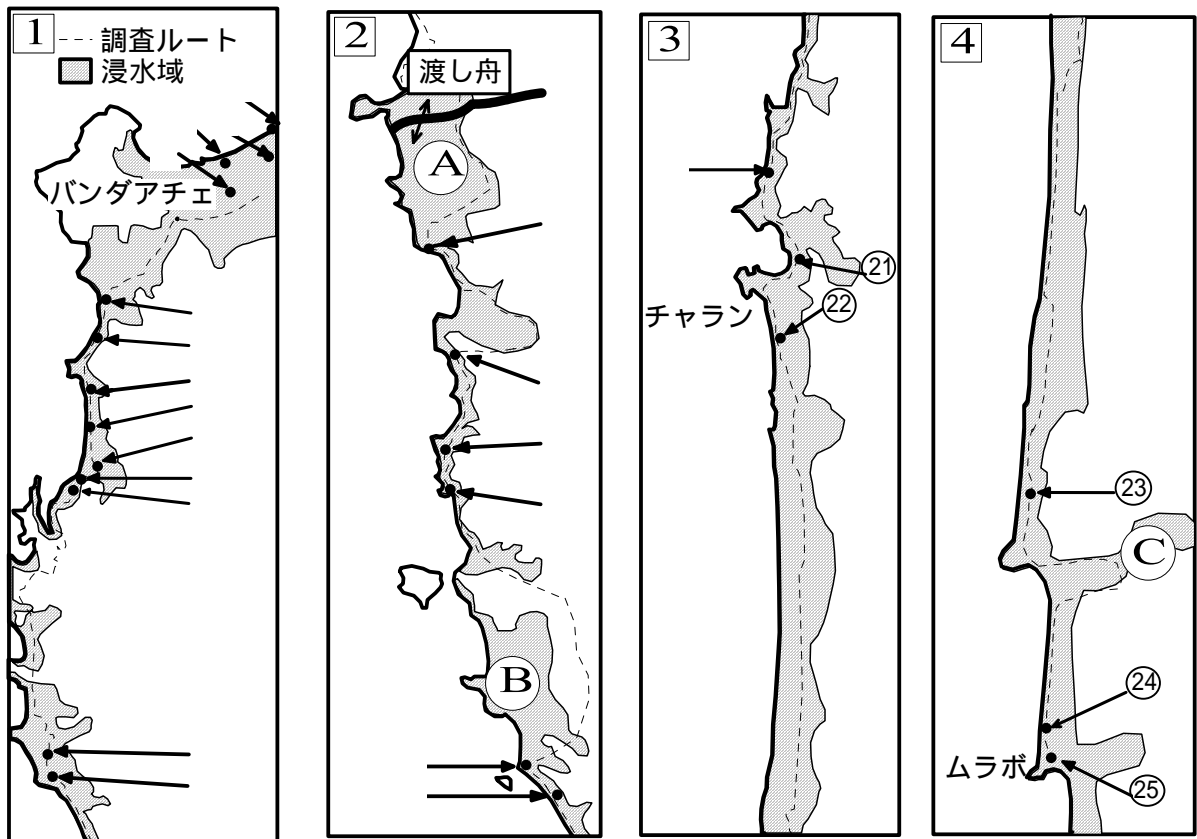


図-2 調査範囲

## 2. 橋梁の詳細調査

### (1) 橋梁No.3

表 - 2 に示すように、西海岸においては桁が流失するとともに、橋台も大規模な洗掘により、原形を留めない橋梁が多かった。また、一部損傷なしの橋梁もあるが、これは橋梁の設置位置が高いことにより、津波が到達していない可能性が高い。これに対して、バンダアチエ周辺の橋梁は橋台、橋脚そのものは機能を保持しており、桁のみが移動したものが多かった。ここでは、現地調査した25橋のうち、詳細調査を実施したバンダアチエ周辺の4橋について損傷状況を説明する。図 - 2, 3 の橋梁位置図からも分かるとおり、橋梁 No.3 は、バンダアチエ市北東部を流れる Cut 川の河口付近に位置している。

図 - 3 の橋梁周辺の損傷状況に示すように、Cut 川の河口付近は幅員 300m の本流と左岸側の幅員 50m の水路から成り立っており、2 径間単純桁橋は左岸側の水路を、10 径間単純桁橋は右岸側の本流を横過している。水路側は図 - 4 に示すように、橋長 48m、支間長 23m の 2 径間 RC 単純桁橋であり、図 - 5 の橋脚断面図に示すように、柱部は直径 700mm の円形断面であり、幅員 2600mm のスラブ構造が 900mm の 1 ボックス桁によって支持されている。また、桁の転倒防止のためか、桁端部は U 型の橋脚から張り出された化粧版により、橋軸直角方向の変位を拘束されている。写真 - 2 に示すように、コンクリート化粧版部には津波が作用し、桁が押し出されたことによる斜めひび割れが発生している。ここでは、簡易的に発生斜めひび割れ状況から作用力を推定する。

$$F_d = 1/2 \cdot \rho_w \cdot c_d \cdot v^2 \cdot A \quad (1)$$

ここで、  
 $F_d$ : 津波に対する桁の抗力  
 $\rho_w$ : 水の単位体積重量 (1030kg/m<sup>3</sup>)  
 $c_d$ : 抗力係数 (ここでは 1.0, 2.0 を採用)  
 $v$ : 水の流速 (m/s)  
 $A$ : 被水圧面積 (23x1.7m<sup>2</sup>)

$$F_c = A \cdot \tau \quad (2)$$

ここで、  
 $F_c$ : コンクリートによるせん断抵抗  
 $A$ : せん断抵抗面積 (160x30x2cm<sup>2</sup>)  
 $\tau$ : 平均せん断応力度 (0.4N/mm<sup>2</sup>)

桁のすべり抵抗を加味することも考えられるが、変位が拘束されていることからここでは考慮していない。  
 以上より、コンクリートがせん断抵抗に達するときの流速を求めると、 $V = 3.1\text{m/s}$  ( $c_d=1.0$ ),  $4.4\text{m/s}$  ( $c_d=2.0$ ) となる。一方の桁が流失し、他方の桁が流失を免れていることから、当地では  $4.0\text{m/s}$  程度の流速であったと推定される。

写真 - 3 および図 - 6 には 10 径間単純桁の損傷状況を示す。広い川幅に架けられた本橋は、津波により全部の桁が流失し、橋脚付近に落下するとともに写真 - 3 に示す

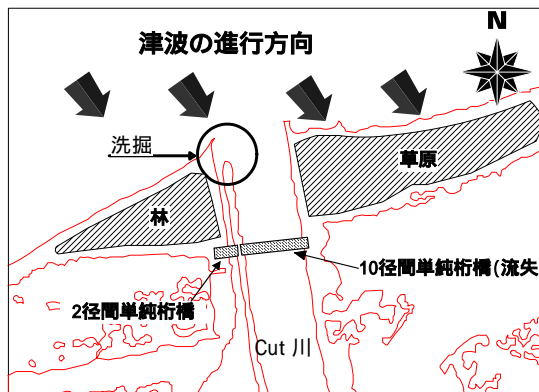


図 - 3 橋梁周辺の損傷状況 (No.3)

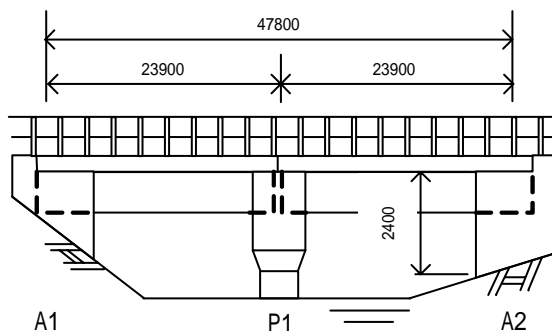
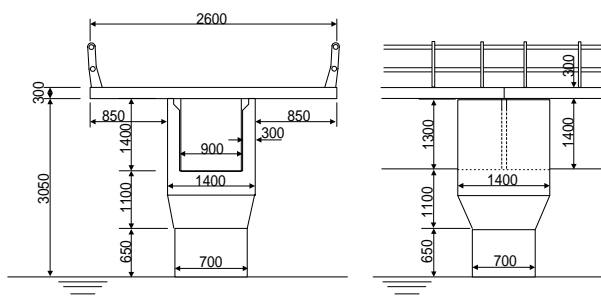


図 - 4 2 径間 RC 橋の一般図



橋脚(断面図) 橋脚(側面図) 単位:mm  
 図 - 5 橋脚構造図



写真 - 2 津波被害を受けた橋台

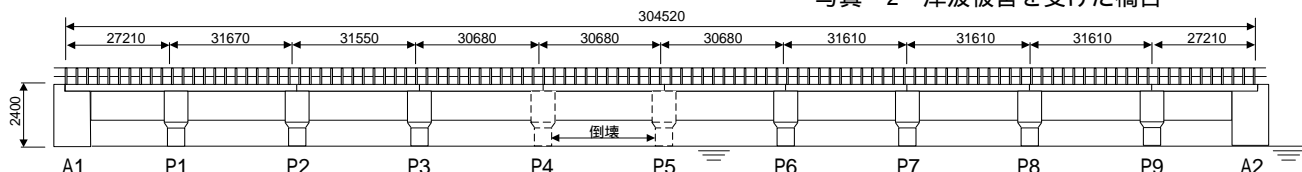


図 - 6 10 径間 RC 橋の一般図

ように、橋脚の U 字型の柱頭部の片側部材がせん断破壊しているのが確認された。また、河川の中央部付近の P 4, 5 の 2 橋脚は倒壊し流失していた。以上より、津波が桁軸直角方向に作用することにより、津波作用後面側の化粧版がせん断破壊し、桁が流失に至ったと考えられる。また、2 径間および 10 径間単純橋の橋台周辺にも、大きな洗掘の跡が認められ、津波が大規模であったことが伺われる。流失に至った本橋の 2 径間単純桁との差異としては、2 径間単純桁では、左岸側に樹木林があり、水路部では相対的に流速が弱められたこと、一方 10 径間単純桁部では河口幅員が大きく、津波高さや流速が、水路部に比べて大きかったことがなどが考えられる。



写真 - 3 津波被害を受けた橋脚

(2) 橋梁 No.1 (Ulee Lheue の橋)

図 - 7, 8 に津波発生による Ulee Lheue 橋周辺の地形の変状状況を示す。津波発生前は住宅地や水田であった地形が、津波発生による土砂の洗掘により、湿地帯化していることが分かる。さらに、1940 年代の旧日本軍が作成した地図によると、60 年前の地形は、地震後の地形状況に近似しており、60 年間の河川や海岸の作用により堆積した土砂が、津波の浸食により元の地形となったと推定される。Ulee Lheue 橋は、単純 3 径間 5 主桁 PC 桁橋である。我々が調査した時点では、桁移動などは復旧されていたことから、ここでは高橋らによって実施された測定結果を参考として、損傷状況の推察を行なう<sup>2)</sup>。図 - 9 に高橋らの文献を基に作成した一般構造図を示す。スパンはいずれも 23m であるが、津波により桁が 30cm 橋軸直角方向に移動するとともに、桁移動に伴う桁間口の開口と閉口が認められた。また、桁高は海面よりも 7m 以上の高さであり、アプローチ部は石積み盛土となっていたが、橋面付近には洗掘が認められた。現地のヒヤリングによると、少なくとも 10m を超える波高であり、高欄部が著しく損傷していることから、桁高を超える波高であったと推定される。(3), (4) 式を用いて桁を移動させる津波の流速を求める。

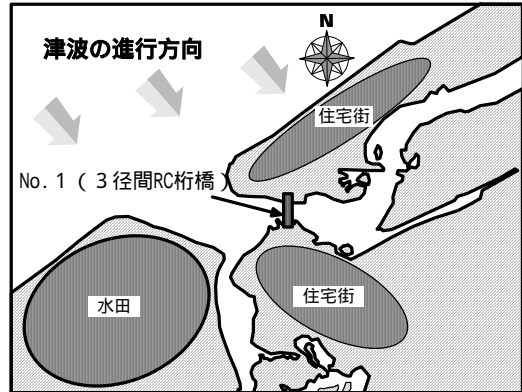


図 - 7 橋梁周辺の損傷状況 (被災前)

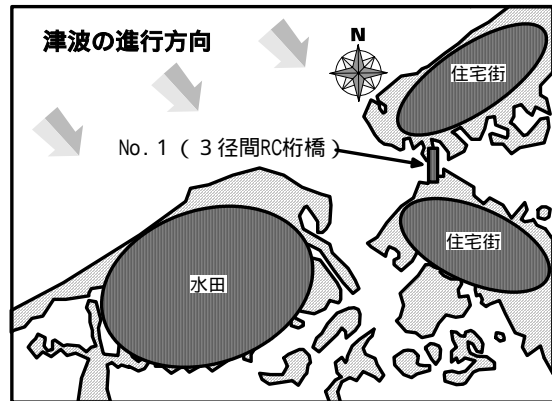


図 - 8 橋梁周辺の損傷状況 (被災後)

$$F_d = 1/2 \cdot \rho \cdot c_d \cdot v^2 \cdot A \quad (3)$$

ここで、

$F_d$ : 津波により桁に作用する力

$\rho$ : 水の単位体積重量 (1030kg/m<sup>3</sup>)

$c_d$ : 抗力係数 (ここでは 2.0 を採用)

$v$ : 水の流速 (m/s)

$A$ : 被水圧面積 (43.4m<sup>2</sup>)

$$F_r = W \cdot \mu \quad (4)$$

ここで、

$W$ : 桁の重量 (浮力を考慮せず 2176000N, 浮力を考慮 1300000N)

$\mu$ : コンクリートの摩擦係数 (0.3)

(4) 式において、浮力を考慮すると、見かけの比重が 2.5 から 1.5 に減少することにより、約 6 割の重さとなる。(3), (4) 式より流速を求めると、 $V=3.9\text{m/s}$  (浮力考慮の場合)、 $3.0\text{m/s}$  (浮力考慮せずの場合) となり、わずかな移動で留まっていることから、 $4.0\text{m/s}$  程度の流速が作用していたのではないかと推測される。

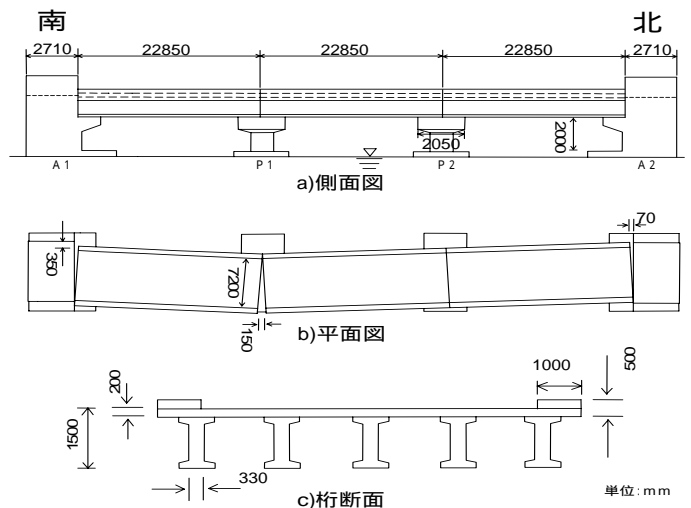


図 - 9 3径間単純PC桁



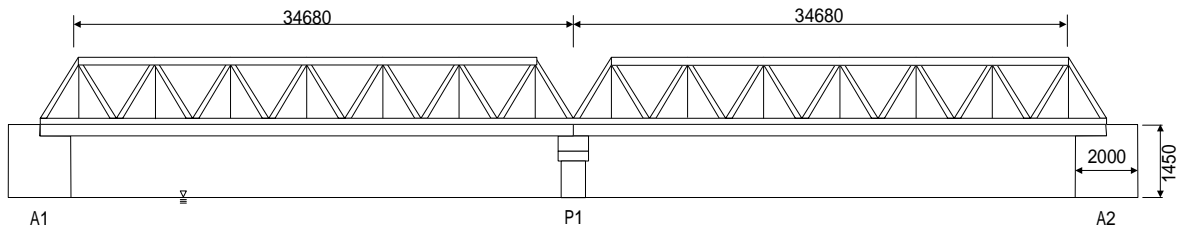


図 - 10 トラス橋の一般図

(3) 橋梁 No.5

本橋梁は、バンダアチェ郊外のセメント工場近傍の河川を横過するトラス橋である。地震前後の衛星写真より推定した橋梁付近の地形の変状を図 - 11, 12 に示す。図に示すように、地形は他の地域に比べると、津波発生前後でもそれ程変化せず、河道の変化も小さい。地震直後に撮影された衛星写真を元に推定した橋梁一般図を図 - 10 に示すが、スパン長 35m、高さ 4mの単純二径間トラス桁であり、津波により約 30m上流側に流され横倒し状態となっている。現地の調査によると、橋台や橋脚の損傷は軽微であるものの、橋台背面土の洗掘が大きく、応急的な盛土や架設トラス桁により通行可能な状態となっている。橋脚自体の損傷は軽微であるが、支承間のコンクリート壁部に損傷が認められる。本橋はトラス桁であり、被水圧面積や抵抗係数の推定が困難であるが、ここでは、 $C_d=2.0$ として桁の移動する流速を求めた。

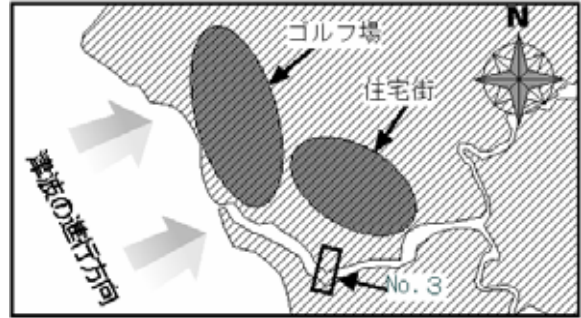


図 - 11 橋梁周辺の損傷状況 (被災前)

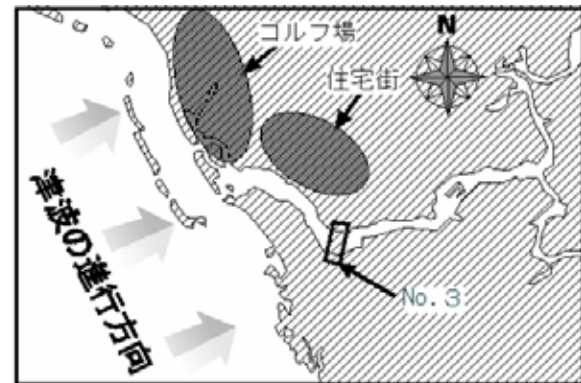


図 - 12 橋梁周辺の損傷状況 (被災後)

$$F_d = 1/2 \cdot \rho_w \cdot c_d \cdot v^2 \cdot A \quad (5)$$

ここで、

$c_d$  : 抗力係数 (ここでは 2.0 を採用)

$V$  : 水の流速 (m/s)

$A$  : 被水圧面積 (27m<sup>2</sup>)

$$F_r = W \cdot \mu \quad (6)$$

ここで

$W$  : 桁の重量 (浮力考慮せず 1030000N)

$\mu$  : コンクリートの摩擦係数 (0.3)

以上より、移動可能な桁流速を求めると 2.4m/s となった。鋼トラス桁はコンクリート桁よりも、重量が小さいために、比較的小さな流速で移動を開始することが分かる。しかしながら、トラスのような特殊形状についての、開口断面の抵抗係数や浮力の影響については不明な点も多く、さらなる検討を要する。

(4) 橋梁 No.9

セメント工場から、さらに 5 km 南下した地点にある、河川を横過する橋梁である。図 - 14, 15 に衛星写真により推定される地形を示すが、河川の両側が小高い丘陵となっており、津波が集積する地形となっている。このことは、現地のヒヤリングや桁の移動距離が 80m に及ぶことから裏づけられる。図 - 13 は、衛星より推定した橋梁一般図であるが、短スパンは RC 床版鋼桁橋、長スパンはトラス桁構造となっている。現地調査の結果、両桁とも 80m 上流側に流されているのが確認された。また、橋台背面土の 2 m 以上洗掘されており、津波が大規模であったことを裏付けている。ここでは、短スパン桁から流速を求める。



写真 - 9 流失した橋梁 (Phot by UN)

$$F_d = 1/2 \cdot \rho_w \cdot c_d \cdot v^2 \cdot A \quad (7)$$

ここで、

$c_d$  : 抗力係数 (ここでは 2.0 を採用)

$V$  : 水の流速 (m/s)

$A$  : 被水圧面積 (19m<sup>2</sup>)

$$F_r = W \cdot \mu \quad (8)$$

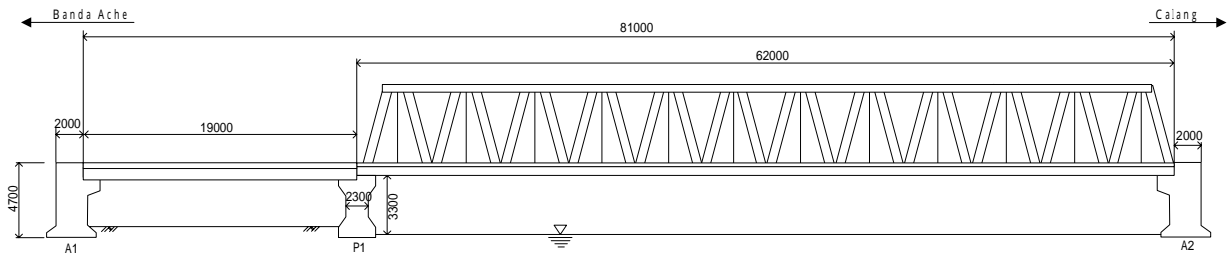


図 - 13 橋梁一般図

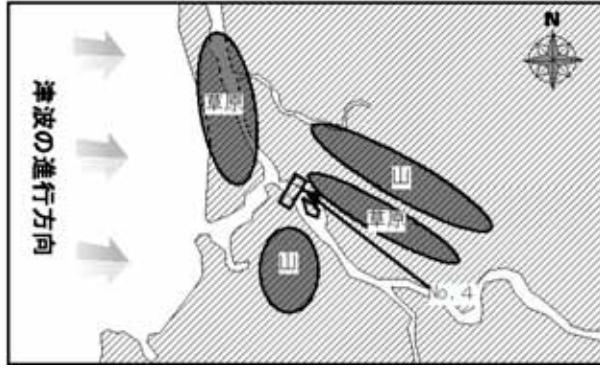


図 - 14 橋梁周辺の損傷状況（被災前）

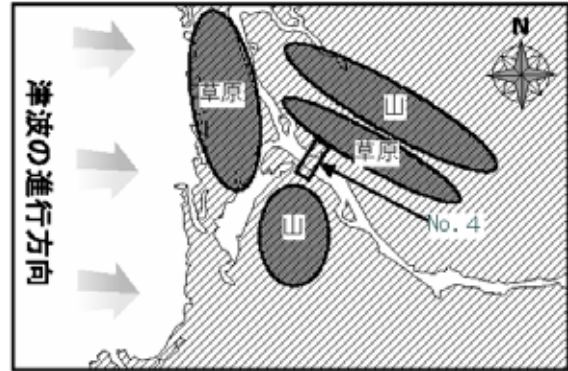


図 - 15 橋梁周辺の損傷状況（被災後）

ここで

W：桁の重量（浮力考慮せず 604,000N）

(7),(8)式より流速を求めると  $V=3.0 \text{ m/s}$  となる．しかしながら，I桁および鋼トラスともに 80m も流されていることから，本地点では地形条件により波高や流速を増した大規模な津波が発生したことが考えられる．

(5)推定流速について

4橋に対する桁移動解析では鋼桁で 2.4m/s,3.0m/s，コンクリート桁で 3.9m/s,4.4m/s で桁移動が発生する結果となった．これに対して，現地におけるビデオ映像結果を用いた分析では 5.2m/s の流速推定が報告されており，概ね対応した結果であると推測される<sup>3)</sup>．

### 3.まとめ

スマトラ西海岸の橋梁の被害状況調査の結果を以下にまとめる．

1) バンダアチェからムラポー間 247km では，142 橋梁のうち，83 の橋梁の流失が報告されている．筆者らは，このうちの 25 橋の調査を実施した．その結果，バンダアチェ周辺では橋台・橋脚は健全で桁のみが流失したものが多く、西海岸では橋台・橋脚そのものが機能を失っているものが多かった．これは到達した津波の高さ・流速の相違によると考えられる．

2) 上記のうち，桁の移動が発生したバンダアチェ周辺の 4 橋について詳細調査を実施した．4 橋の桁移動に至る流速は 2.4～4.4m/s 以上であると推定される．

3) 調査した橋梁のうち，桁の変位拘束装置が設置されていた Cut 川橋梁では，桁の移動が発生していないものもあり，津波流速が 4 m/s 程度の場合，本手法が有効である可能性が指摘できる．



写真 - 10 流出した桁(Phot by UN)

### 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) Hirokazu IEMURA, Mulyo Harris Pradono and Yoshikazu TAKAHASHI, "Report on the Tsunami Damage of Bridges in Banda Aceh and Some Possible Countermeasures", Proc. 28<sup>th</sup> JSCE. Earthquake Engineering Symposium, 2005
- 3) Sakakiyama, T., H. Matsutomi, Y. Tsujiani and Y. Murakami, "Comparison of Current Velocities of Tsunami inundated Flow Based on Analysis of Video Picture and Field Survey, Abstract for the December 26, 2004 Off-Sumatra Earthquake meeting, Japan Assoc. for Earthquake Eng., pp.33-38, 2005.