

スマトラ沖地震の橋梁被害調査

小屋拓郎¹・幸左 賢二²・運上茂樹³・庄司学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 独立行政法人土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6）

⁴正会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科（〒305-8573 つくば市天王台1-1-1）

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、図-1に示す北スマトラ西海岸のバンダアチェからムラボ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、現在まで十分な調査は実施されていなかった。筆者らは、2006年1月と9月にバンダアチェ〜ムラボー間247kmの橋梁被害状況を調査した。バンダアチェからムラボ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。この区間で確認された橋梁被害には桁の移動や流失等、津波特有の被害が確認された。このような被害例は前例が非常に少なく、そのため損傷メカニズムについても不明な点が多い。

本論文では現地調査によって確認された橋梁被害に着目し、詳細な被害調査および粒状態挙動解析によって橋梁損傷シュミレーションを行い、津波による桁移動や桁流失の損傷メカニズムの解明を試みたものである。

2. 調査概要

図-1に示す調査位置の各地域を拡大したものを図-2に示す。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いる。表-1にJICAによって報告された¹⁾西海岸地域の道路被害状況を示す。道路については、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、調査した34橋のうち18

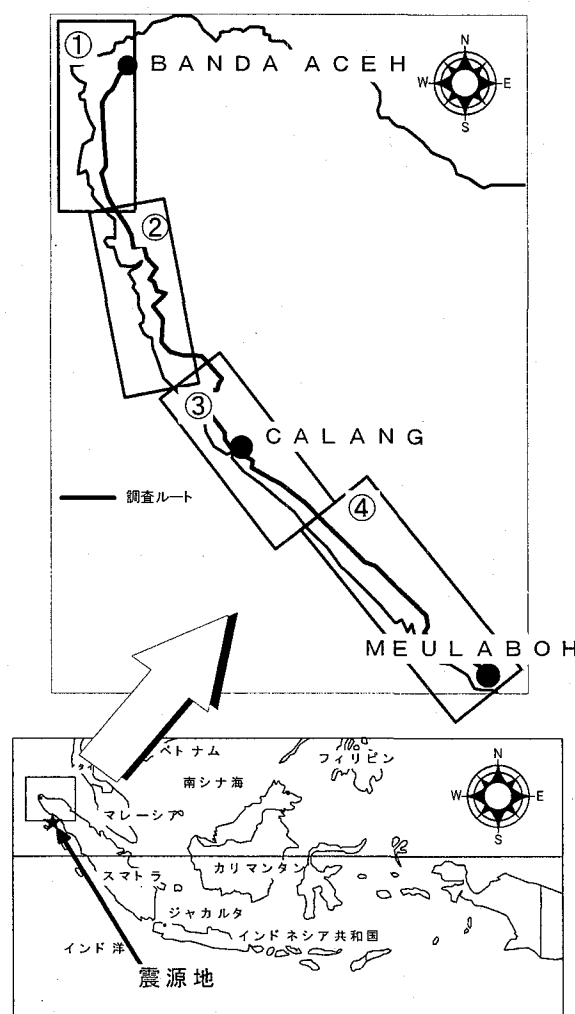


図-1 調査位置

表-1 西海岸の被害状況

道路(km)		調査橋梁(橋)		
		損傷程度	ランク	橋
流失、水没区間	29.6	桁流失等で使用できないほどの損傷	A	18
全壊区間	60.1			
中規模被害区間	94.1	桁移動など軽微な損傷(使用状態では問題なし)	B	6
小規模被害区間	26.0			
小計	209.8			
被害なし	37.2	損傷なし	C	10
合計	247.0	合計		34

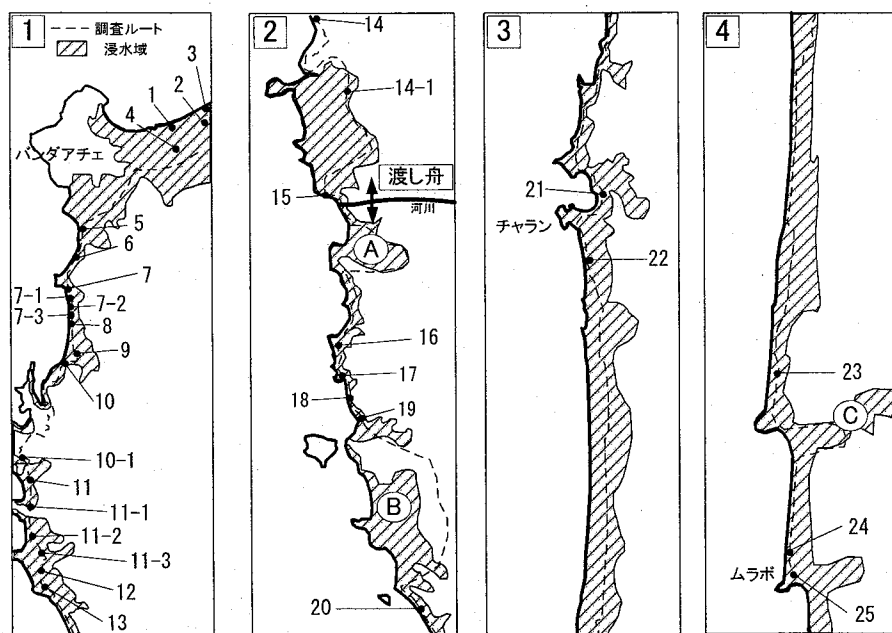


図-2 調査橋梁位置

表-2 被害程度を調査した橋梁一覧

No.	橋梁種別	被災ランク	特徴
1	3径間PC桁橋	B	桁が50cm移動
2	1径間PC桁橋	B	桁が50cm移動
3	10径間PC桁橋	A, B	桁流失, 柱流失, 橋台裏側の洗掘
4	2径間RC桁橋	B	桁が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桁橋	C	損傷なし
7-1	RC桁	C	損傷なし
7-2	RC桁	C	損傷なし
7-3	RC桁	C	損傷なし
8	スパン25mRC桁	A	桁流失
9	鋼トラス桁, 鋼桁	A	桁流失
10	2径間RC桁	A	桁流失
10-1	ボックスカルバート桁橋	C	損傷なし
11	鋼トラス桁橋	A	桁流失
11-1	ボックスカルバート桁橋	C	損傷なし
11-2	RC桁	B	桁が3m移動
11-3	RC桁	B	桁が1m移動
12	2径間トラス桁	C	損傷なし
13	1径間鋼桁	B	桁が2.4m移動
13-1	2径間鋼トラス桁橋	A	桁流失
14	1径間鋼トラス桁橋	A	桁流失
14-1	1径間鋼トラス桁橋	C	損傷なし
15	6径間PCI桁橋	A	桁流失
16	3径間PCI桁橋	A	桁流失
17	1径間RCスラブ橋	A	桁流失
18	1径間鋼トラス桁	A	桁流失
19	1径間鋼トラス桁	A	桁流失
20	未確認	A	桁流失, 橋台裏側の洗掘
21	未確認	A	桁流失
22	2径間鋼トラス桁	A	桁流失
23	3径間鋼トラス桁	C	無損傷
24	未確認	A	橋梁周辺の大規模な洗掘
25	鋼トラス桁橋	A	桁流失, 橋梁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

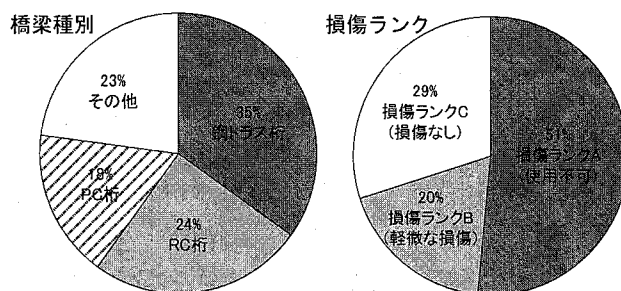


図-3 橋梁種別と損傷ランク

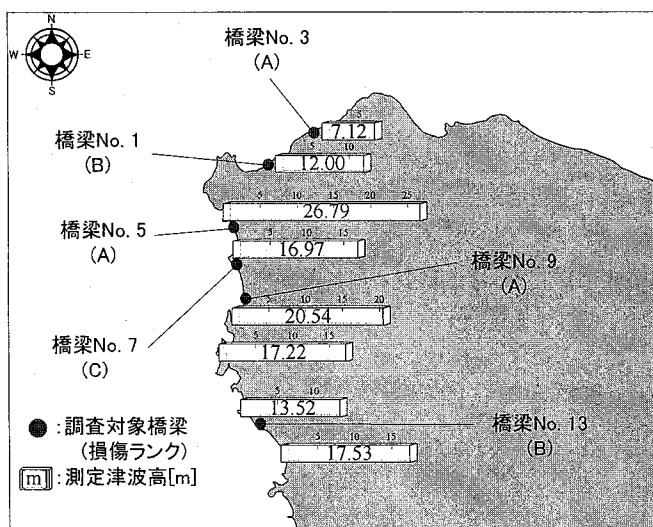


図-4 対象橋梁位置と津波高

橋で流失などの被害が発生おり、使用不可能な状態であった。表-2に、同ルートで確認した橋梁の一覧表を示す。損傷程度から損傷ランクを定義し、分類した結果、使用が困難となりうる損傷ランクA、Bは主として桁流失および桁移動が生じていること

がわかる。図-3に調査橋梁の橋梁種別および損傷ランクの比率を示す。図より橋梁種別については鋼トラス桁橋が35%と最も多く、続いてRC桁橋、PC桁橋の順であった。また、その他の橋梁はボックスカルバートや橋梁種別が桁流失により確認不可能で



写真-1 橋梁 No.1 の損傷状況(桁移動, 高欄損傷)



写真-2 橋梁 No.9 の損傷状況(トラス桁の流失)

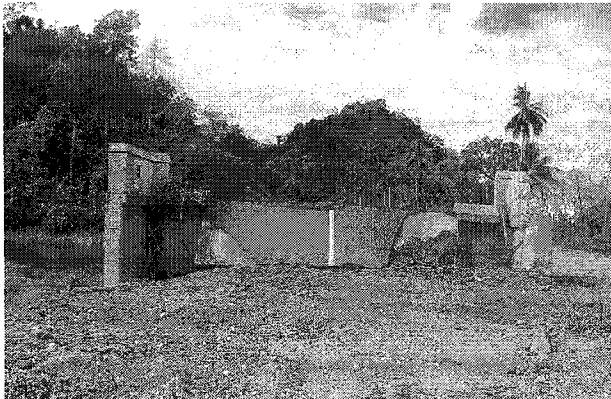


写真-3 橋梁 No.9 の損傷状況(盛土洗掘)

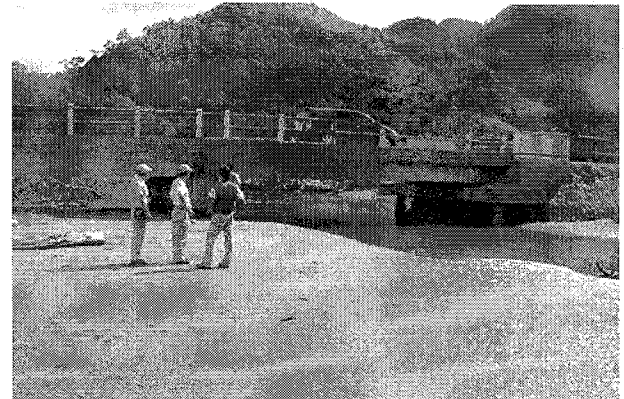
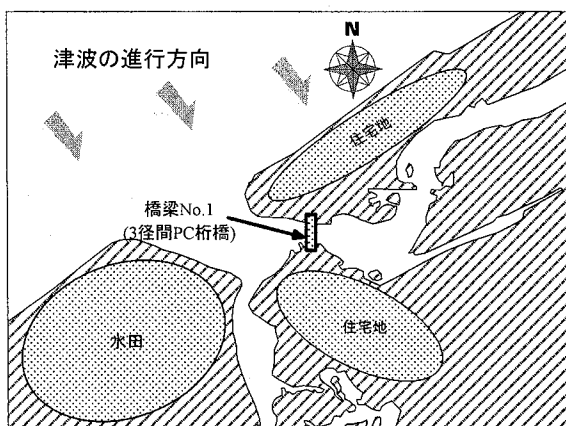
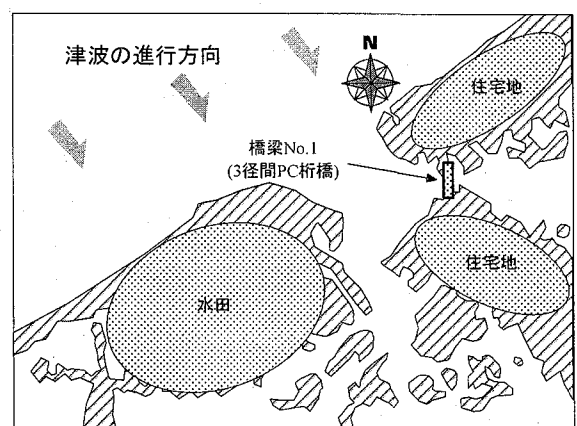


写真-4 橋梁 No.7 の損傷状況(損傷なし)



(a) 被災前



(b) 被災後

図-5 橋梁 No.1 の周辺図

あった橋梁である。損傷ランクは桁流失等によって使用が不可能となる損傷ランクAが全34橋中半数を超える状況であった。

3. 詳細調査

詳細な橋梁の被害分析を行うため、図-2に示すバンダアチェ近郊の6橋について詳細調査を実施した。詳細調査を行った橋梁位置、損傷ランクおよび津波高を図-4に示す。ここで、現地調査では浸水した家屋や構造物、斜面の樹木から浸水深さを測定している。浸水深さに測定地点の海拔を加えること

で簡易的に想定津波高を算出している。図-4および表-2より、バンダアチェの北側海岸では津波高は約10m前後であり、主な損傷は写真-1に示すNo.1橋梁のように、桁移動が発生しているが、橋台の被害は軽微であった。

一方、西海岸沿いでは20mを超える津波高が観測された。写真-2に代表例としてNo.9橋梁の被害写真を示す。橋梁No.9は鋼トラス橋であるが、桁が流失し、上流約70m付近まで流されている。写真-3にはNo.9橋梁の橋台部の損傷状況を示す。桁の流出のみならず橋台部の盛土までもが洗掘し、道路が

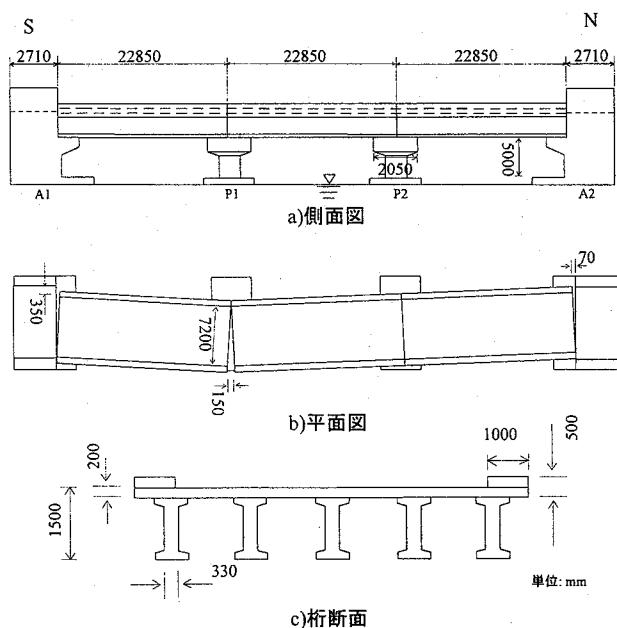


図-6 橋梁一般図(No.1)

寸断されている。他の西海岸の橋梁についても桁移動や桁流失に加え、橋台裏の盛土が洗掘するなど、大規模な損傷が認められた。また、西海岸沿いの橋梁には写真-4に示す橋梁 No.7 のように作用津波高が大きかったにも関わらず、桁移動が生じていない橋梁が確認された。これらの橋梁は 1 径間もしくは 2 径間の RC 桁橋であり、津波高に対して桁下高が非常に低いため、津波の上揚力や水平力の作用が小さかったこと、および被圧面積が小さかったため軽微な損傷であったと考えられる。

4. 損傷分析

4.1 No. 1 橋梁の詳細損傷調査

ここでは代表例として、No.1 橋梁について詳細分析例を示す。図-5 に津波発生による橋梁 No.1 周辺の地形の変形状況を示す。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。図-6 に No.1 橋梁の構造一般図を示す。No.1 橋梁は、単純 3 径間 5 主桁 PC 桁橋である。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、桁移動に伴う桁遊間の開口と閉口が認められた。測定津波高は 12m 程度と推測され、桁高を越える津波が作用したため、高欄部についても著しい損傷が認められた。(1)、(2)式を用いて桁を移動させる津波の流速を求める。

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_w c_d v^2 A \quad (1)$$

ここで、

F_d : 津波により桁に作用する力

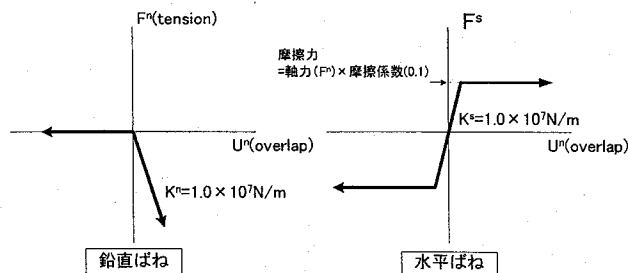


図-7 水粒子間ばねの構成則

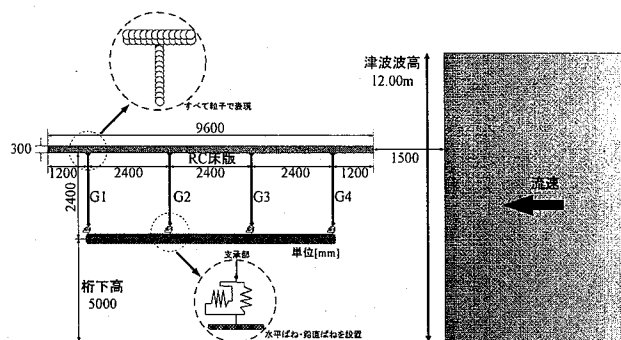


図-8 解析モデル

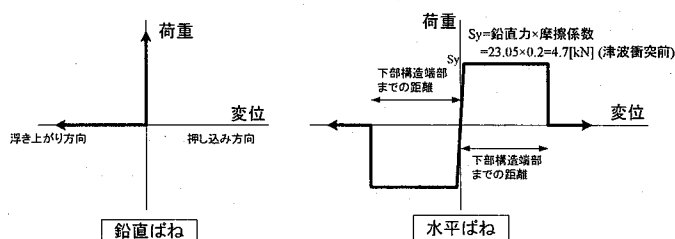


図-9 支承部の力学特性

ρ_w : 水の単位体積重量(1030kg/m³)

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(43.4m²)

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

ここで、

W : 桁の重量 (浮力を考慮せず 2176000N)

μ : コンクリートの摩擦係数(0.3)

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の摩擦を考慮して 0.3 とした。(1)、(2)式より流速を求めると、 $V = 3.9$ m/s となり、わずかな移動で留まっていることから、4.0 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。次に、測定津波高および推定流速を用いて、No.1 橋梁の損傷シミュレーションを行った。

4.2 PFC 解析による損傷シミュレーション

津波に対する橋梁の被災メカニズム解明のため、スマトラ沖地震によるインド洋津波を想定した橋梁応答のシミュレーション解析を実施し、上部構造の流失被害を再現した。解析ツールには、多粒子の相

相互作用により流体運動がシミュレーション可能な、個別要素法による粒状態挙動解析コード（Practical Flow Code）を用いた。解析モデルを図-7, 8, 9に示す。解析モデルには文献3)に示す運上りが行った解析モデルを用いている。水粒子間ばねの構成則を図-7に示す。図に示すように水粒子間のばね係数は $1.0 \times 10^7 \text{ N/m}$ を用いた。また、減衰定数を与えた場合、粒子間の反力が減衰として吸収されるため、流体の形状の崩壊仮定が実際の流体(水)よりも遅くなることから、減衰定数は0としている。解析モデル形状を図-8に示す。解析モデルは調査橋梁で多くみられたRC床版とした。また、津波による作用力は床版及び桁の被圧面積が大きく影響すると推定される。そこで、上部構造はすべての橋梁を同一条件で検討するため、標準モデルとして桁本数を4本と仮定し、モデル化した。解析モデルは2次元として奥行き1m分を考慮すると共に、上部構造は剛体と仮定している。本解析モデルでは水粒子だけでなく、図-8に示すように構造物についても粒子によってモデル化している。また、I桁をモデル化する場合、解析では上下フランジを省略してモデル化している。それに伴い、桁の単位長さあたりの重量を補正し、桁重量が対象構造物と同等となるように設定した。

損傷シミュレーション解析としてNo.1橋梁のモデル化をする。解析モデルは図-8を用い、桁下高は対象橋梁と同様に5.00mとし、津波高は推定津波高の12.00mとした。実施解析ケースを表-3に示す。検討パラメータは支承部の摩擦係数と津波流速である。図-9に支承部の力学特性を示す。桁の浮き上がりを考慮するため、鉛直方向のばね係数は0とした。また水平方向の摩擦係数は0.2, 0.3, 0.7の3ケースとし、各桁の縁端部までの摩擦滑りを考慮した。津波流速は現地調査によって得られた津波高12mから松富・飯塚ら⁴⁾の津波算定式(3)を用いて算出される推定流速とした。

$$\frac{u}{\sqrt{gR}} = \sqrt{\frac{2C_v^2 F_r^2}{F_r^2 + 2C_v^2}} \sqrt{\frac{h_f}{R}} \quad (3)$$

ここで、 C_v ：流速係数(0.9), F_r ：フルード数
よって、津波流速はフルード数によって決定される。フルード数を1.5, 1.0とした流速2ケースに加え、式(1), (2)により推定された桁移動流速 $v=4.0\text{m/s}$ の3ケースの流速をパラメータとした。流速係数 C_v は、家屋模型の浸水深比とフルード数の関係より流速係数が0.8~0.9程度であることが報告されている⁴⁾。想定津波では浸水深が推定されることから0.9を用いた。以上の解析ケースを用いて上部構造の挙動解析を実施した。

表-3 解析ケース

	津波高(m)	フルード数 F_r	支承部摩擦係数	流速(m/s)	パラメータ	解析時間
case1	12.00	1.5	0.2	9.6	津波流速	3.0s
case2	12.00	1.0		7.8		
case3	12.00	-	0.3	4.0	支承摩擦	6.0s
case4	12.00	-	0.7	4.0		

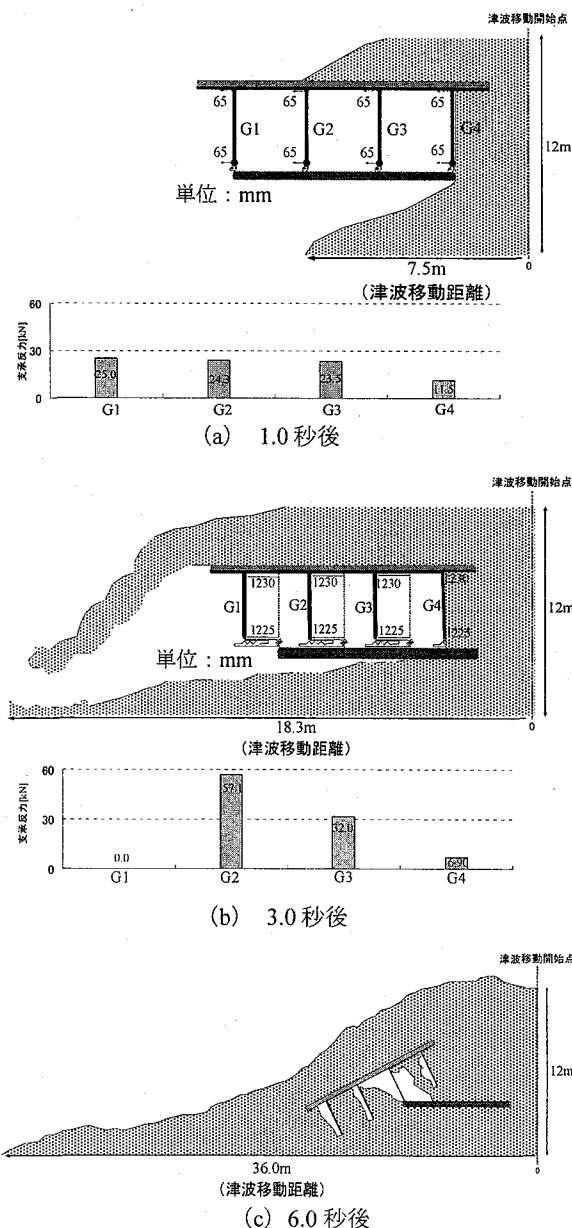


図-10 橋桁の時系列変化と支承反力（ケース4）

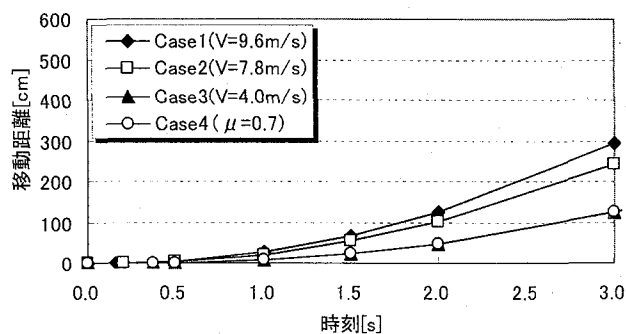


図-11 桁移動量と時刻歴関係

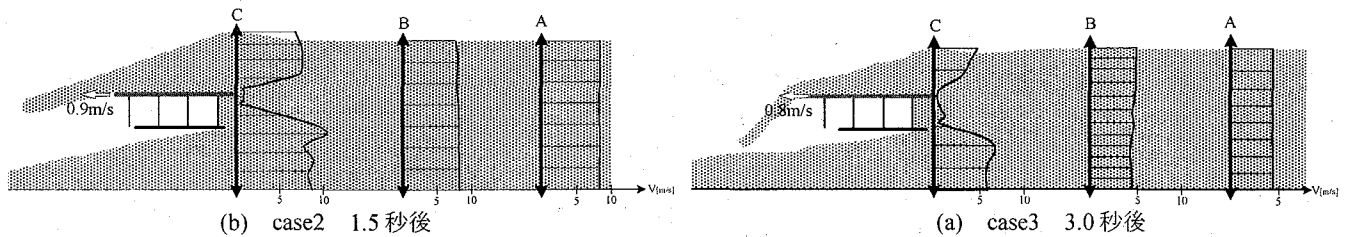


図-12 津波の流速分布

4.2 解析結果

図-10にcase3における解析ステップと桁の挙動および支承反力示す。図中には各橋桁上部(床版部)と橋桁下部(支承部)の変位を示している。解析結果では0.38秒後に津波が桁に衝突し、その直後に桁が変位し始めた。(a)1.0秒時にはG1桁は支承部に留まっている。ステップの進展と共に桁は移動していき、(b)3.0秒後には桁G1が支承外部へ変位したため、G1桁分の支承反力は他の3つの桁に配分された。また、特にG2桁の支承反力が増加していることから、G1桁の落橋に伴い上部構造物自体が反時計回りに回転し始めていると推定される。その後、(c)6.0秒後にはG2桁も支承外部へ変位し、上部構造物が落橋する結果となった。

図-11に他の3ケースにおける桁の移動距離と時刻歴の関係を示す。また、桁の移動距離は床版右端の水平変位を示している。図より、全ケースで桁の移動が確認される結果となった。流速をパラメータとしたcase1からcase3を比較すると、津波流速が増加するに従い、桁の移動量も増加している。よって、桁の挙動には津波流速が大きく影響すると考えられる。一方、支承摩擦係数をパラメータとしたcase3とcase4を比較すると、桁の移動変位に変化は生じていない。これは、津波による波力が桁の摩擦抵抗と比較して非常に大きかったためと考えられる。

図-12に津波の流速分布を示す。図には $v=7.8\text{m/s}$ のcase2と $v=4.0\text{m/s}$ のcase3の流速分布を示している。ここで、同一の津波進行状態で比較するため、case3の津波流速はcase2の約50%であることから、case2では1.5秒後、case3では3秒後で流速分布を比較した。また、図には各時刻における上部構造物の移動速度を示している。代表流速分布断面A, B, Cで各ケースの流速分布を比較した。本解析モデルでは河床摩擦を考慮していないため、橋梁衝突前の津波断面A, Bにおいては、両ケース共に水面から河床まで同程度の流速分布を保ちながら橋梁に接近した。しかし、橋梁に衝突するC断面では上部構造付近で流速が非常に小さくなり、その上下部では流速が大きく分布する。これは橋梁に衝突した水粒子が上部構造の上下に回り込もうとしたためと考えられる。

図-11よりcase2の1.5秒経過時とcase3の3.0秒経過

時の桁移動距離を比較すると、case2では53.6cm、case3では122.5cmとなり、約2倍程度の差異が見られた。しかし、各時刻における桁の移動速度は図-12より、case2, case3で0.9m/s, 0.8m/sとなり、ほぼ同様の値となった。よって、図-11, 12より桁の移動変位と移動速度には異なる性状がみられる結果となった。以上のように、津波による上部構造が移動する挙動を本解析である程度は再現可能であると考えられる。

5. 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、現地調査およびPFC解析を実施した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 調査対象橋梁 34 橋中、18 橋が使用不可能な被害が生じていることが確認され、その多くは西海岸で生じていた。
- (2) バンダアチエ北側海岸では津波高は約 10m 前後であり、主な損傷として桁移動は発生するが、橋台の被害は軽微であった。一方、西海岸沿いでは 20m を超える津波高が観測され、桁移動や桁流失に加え、橋台裏の盛土が洗掘する大規模な損傷が見られた。
- (3) PFC 解析を用いた損傷シミュレーションを実施した結果、橋桁の移動がある程度は再現可能であった。また、津波による桁の移動変位は津波の流速が大きく影響する結果となった。

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”, 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. 28th JSCE.Earthquake Engineering Symposium, 2005
- 3) 遠藤和男, 運上茂樹:平成 16 年スマトラ島沖大地震による津波を想定した橋梁の応答特性に関する解析的検討, 土木学会第 61 回年次学術講演会, I-436
- 4) 松富英夫, 飯塚秀則:津波の陸上流速とその簡易推定法, 土木学会海岸工学論文集, 第 45 巻, 1998