# スマトラ地震の津波による橋梁被害分析

幸左 賢二'・内田 悟史<sup>2</sup>・運上 茂樹<sup>3</sup>・庄司 学<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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) <sup>2</sup>学生会員九州工業大学大学院建設社会工学専攻(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1) <sup>3</sup>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) <sup>4</sup>正会員筑波大学大学院システム情報工学研究科(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

スマトラ沖地震により発生した津波によって被害を受けた橋梁に対して,現地調査および粒状体挙動 解析を行った.その結果,大規模な橋台盛土部の洗掘,桁の移動や流失等の被害が確認され,調査対象 橋梁の約50%が供用不可能な被害を受けていることが確認された.また,粒状体挙動解析によって,津 波流速や橋梁支承部の摩擦抵抗係数が桁移動に大きく影響する結果となり,桁移動状態が概ね再現可能 であることがわかった.

Key Words : Sumatra Tsunami, Wave force, Movement of bridge girder, PFC analysis

### 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月にバンダアチェームラボー間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体挙動解析に 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



C: 損傷なし

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<sup>1)</sup>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 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3段階で定

義し,分類した. その結果,大きな損傷ランクA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12橋と最も多く、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あっ た橋梁である. すべての橋梁種別で損傷ランクAの





大きな被害が生じていることがわかる.また,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抜高さを加える ことで簡易的に想定津波高を算出した.図-4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,桁移動や流失が生じているものの,橋台の被 害は軽微であった.

一方,西海岸沿いでは20mを超える津波高が測定 された.西海岸沿いにおいても,北海岸と同様に桁 移動や流失等の大きな被害が生じているが,それに



加え橋台裏の盛土が洗掘するなど、より大規模な損 傷が認められた.また、西海岸沿いの橋梁には橋梁 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、津波の上楊力 や水平力の作用が小さかったこと、および披圧面積 が小さかったため軽微な損傷であったと考えられる.

以下に軽微な損傷が生じた橋梁と大規模な損傷が 生じた橋梁の代表例について述べる.

#### (1) No. 1橋梁の詳細損傷調査

軽微な損傷の代表例として、No.1 橋梁の詳細分 析を示す. 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



図-7 橋梁 No.12 の一般図

傷が認められた.推定津波波力と支承抵抗力から,式(1),(2)を用いて桁を移動させる津波の流速を求める.

$$F_d = \frac{1}{2}\rho_{\rm w}c_d V^2 A \tag{1}$$

ここで,

 $F_d: 津波により桁に作用する力$  $<math>\rho_w: 水の単位体積重量(1030kg/m<sup>3</sup>)$  $<math>c_d: 抗力係数(ここでは 2.0 を採用)$ V: 水の流速(m/s)A: 被水圧面積(43.4m<sup>2</sup>) $<math>F_r = W\mu$ 

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0.3とした.(1),(2)式より流速を求めると、V=3.9m/sとなり、わずかな移動で留まっていることから、4.0m/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.

#### (2) 橋梁No. 12の詳細損傷調査

次に、大規模な損傷例として橋梁 No.12 の詳細分 析を示す. 図-7 に橋梁 No.12 の一般図を示す. 短 スパンは RC 床版鋼 I 桁橋,長スパンは鋼トラス桁 橋からなる 2 径間橋梁であり、鋼トラス桁部のスパ ンは 62m であった. 図-8 に衛星写真により推定さ れた橋梁 No.12 の周辺地形を示すが、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後述す るように桁の移動距離が 80mに及ぶことからも裏づ けられる. 図-9 に橋梁の損傷状況を示す. 現地調 査の結果、両桁とも 80m 上流側に流されていること が確認された. また、橋台背面土が 2m 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. (1), (2)式において抗力係数 Cdを 2.0、被水圧面 積 Aを 19m<sup>2</sup>、桁の重量 Wを 604,000N とし、桁移





図-9 橋梁 No.12 の損傷状況

動流速を求めると V=3.0 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 3.0m/s を大幅に超 えた流速が発生したことが考えられる.



#### 4. PFC解析による損傷シュミレーション

#### (1) 解析モデル

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 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体挙動解析コード(Particle Flow Code)を用いた.解析モデルを図-10に示す. 解析モデル形状は一般に多く架設されているスパン 40m,幅員9.6mの単径間鋼I桁橋とし,床版は現地

調査で多くみられたRC床版とした<sup>3)</sup>. また, 橋梁 No.1の架設状況を参考に, 桁下高を5.00m, 津波高 は現地測定された12.00mとした. また,本検討では 津波による水平作用力に着目し, 津波波形は図に示 すように柱状を想定した. 本解析では2次元モデル としているため, 橋梁断面の奥行きは1mとしてい る.

水粒子間ばねの構成則を図-11に示す.図に示す ように水粒子間のばね係数は1.0×10<sup>7</sup>N/mとしている. 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.本解析モデルでは水粒子だけでなく, 図-10に示すように橋梁についても粒子によってモ デル化している.また,鋼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, 桁重量が対象構造と同等となるように設定している. 図-12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. 水平ばねについては,各桁が下部構造端部に達する まで摩擦抵抗が生じるモデルである.

実施解析ケースを表-3に示す.津波流速と支承 部の摩擦係数をパラメータとした5ケースとした. 津波流速の設定には,現地調査によって測定された 津波高12mから松富・飯塚ら<sup>4)</sup>の津波算定式(3)を用 いて算出される推定流速を用いた.

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

ここで, C<sub>v</sub>:流速係数(0.9), F<sub>r</sub>:フルード数

流速係数C<sub>v</sub>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<sup>4)</sup>ことから,ここでは0.9とした.また, フルード数を1.5,1.0と仮定した場合の津波流速に 加え,式(1),(2)により推定された桁移動流速4.0m/s の3ケースを流速パラメータとした.

支承摩擦係数は0.2, 0.3, 0.5の3ケースとした. 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.

#### (2) パラメータ解析結果

津波流速をパラメータとしたcase1からcase3の解 析結果を示す.図-13にcase1からcase3における桁移 動距離-時刻暦関係を示す.図より津波流速が増加 すると共に桁の移動量が増加する結果となった.ま た, case1より桁移動距離は,変位が生じ始めると単 調的に増加している.

次に、摩擦係数をパラメータとした case3 から case5の桁移動距離-時刻暦関係を図-14に示す.図

より支承摩擦係数が大きい程,移動変位は生じにく く,特にcase4,5についてはcase3と比較すると非常に 小さい変位で停滞している.以上より,津波流速お よび支承摩擦係数は桁移動距離に大きく影響するこ とが明らかとなった.

#### (3) 代表的移動例

caselを代表例として,橋桁の時系列変化を示す. 図-15にcaselの0.5秒時,3.0秒時における桁の挙動 を示す.また,図中には支承部での鉛直反力N<sub>i</sub>と支 承摩擦抵抗力Fr<sub>i</sub>を示している.0.38秒後に津波が桁 に衝突し,その直後に桁が変位した後,(a)0.5秒時 にはすべての桁が支承部に接地し,津波波力に対し て抵抗している.また,この時鉛直反力の和は 93.4kNであった.

(b)3.0秒時にはG1桁は支承外部へ移動した.この時,G3桁およびG4桁の鉛直反力は失われ,G3,G4 桁は支承部に接地していない状態となった.鉛直反 力の和は84.6kNとなり,0.5秒時と比較すると減少した.また,水粒子の中には鉛直上向きに桁や床版に 衝突するものがみられた.以上より,津波波力による上楊力が上部工に作用することが推定される.

#### (4) 移動量が小さい場合の解析例

図-14において移動量が非常に小さかったcase4 について検討した.図-16に1.0秒時から3.0秒時に おける支承抵抗力と津波波力の関係を示す.ここで, 支承抵抗力は全桁の水平支承摩擦力の和,津波波力 はG4桁に作用する津波波力の水平方向成分である. 図より,津波波力F<sub>d</sub>が支承摩擦抵抗力F<sub>r</sub>を上回る時 刻がみられた.そこで,その時刻における桁移動量 xを式(4),(5)より算出した.

$$F_d - F_r = m \,\alpha \tag{4}$$

$$x = \frac{1}{2}\alpha t^2 \tag{5}$$

ここで, m: 上部工質量, t: 作用時間

その結果,1.5秒時に変位した移動量は0.93mmとなり,僅かな変位量であった.よって,case4は津波 波力が摩擦抵抗力を超える時刻があるものの,移動 量は微小であり,概ねつり合いの状態にあるといえる.

次に、津波の流速分布について検討する.図-17 にcase4の(a)津波が桁に到達する前,(b)時刻1.5s, 2.5s時における桁到達断面の津波流速分布を示して いる.また、各流速分布において、被水圧部である 桁投影面の平均流速を示している.図より、本解析 モデルでは河床摩擦を考慮していないため、桁に到 達する以前は水面から河床まで一様な流速分布で進



行した. また,その平均流速は4.22m/sと設定流速より増加したが,これは解析初期状態で柱状であった 粒子群が崩れながら進行したためと考えられる.一 方,桁到達断面では,被水圧面での平均流速は1.5s



時で4.03m/s, 2.5s時で3.48m/sとなり,桁に到達する 以前の平均流速の8割程度に減少した.また,分布 形状より桁上下部では到達前の平均流速より流速が 増加している.これは水粒子が桁上下部に集中して 流れたためと考えられる.

# 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) バンダアチェ北側海岸では津波高は約 10m 前後であり、桁移動が発生するが、橋台の被害は軽微なものが多い.一方、西海岸沿いでは 20mを超える津波高が測定され、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.
- (2) PFC 解析を用いた損傷シュミレーションを実施



図-17 津波断面の流速分布(case4)

した結果,津波による桁の移動変位は津波の流 速および支承摩擦係数が大きく影響する結果と なった.

(3) 桁到達時の水粒子は,桁上下部に集中して流れ る挙動を示し,桁付近での流速は桁に到達する 以前の流速の8割程度であった.

#### 参考文献

- 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
- 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) 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
- 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

(2007.4.6受付)

# INVESTIGATION AND ANALYSIS OF THE DAMAGED BRIDGES DUE TO THE SUMATRA TSUNAMI

# Kenji KOSA, Satoshi UCHIDA, Shigeki UNJHO and Gaku SHOJI

To investigate the damage to bridges due to the 2004 Sumatra Tsunami disaster, field survey and particle flow analysis were conducted. Over 50% of the surveyed bridges were completely collapsed. Analytical results reproduced well the movement of a bridge during tsunami and it was found that the bridge was deeply affected by the friction coefficient between girder and beam and the velocity of the wave.