

スマトラ沖地震に伴う津波による橋梁の被害分析

Analysis of damaged bridge by Tunami due to Sumatra earthquake

幸左賢二*, 二井伸一**, 庄司学***, 宮原健太****
Kenji Kosa, Shinichi Nii, Gaku Shoji and Kenta Miyahara

*Ph.D. 九州工業大学 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)
**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)
***工博 筑波大学大学院講師 システム情報工学研究科(〒305-8573 つくば市南原 1 番地 6)
****九州工業大学大学院 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

More than 70 bridges were washed away by the Tsunami caused by the 2004 Off-Sumatra earthquake. 26 bridges were investigated and classified into three ranks as A, B, C according to the damage level.

In girder damage, 13bridges (50%) were washed away by Tsunami, and the girder suffered the most extensive damaged member of among girder, substructure and embankment. Compared the damage rank with β value (the ratio between resistance of girder and tsunami force affected to the girder which assumed constant velocity (5.0m/s)), it was observed clear tendency between the damaged rank of girder and β value.

Key Words: Sumatra earthquake, Wave force, Damaged bridge, Damage analysis
キーワード: スマトラ津波, 津波作用力, 橋梁損傷, 被害分析

1. はじめに

2004年12月26日のインドネシア・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⁾。また、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で死亡している。現在までに、多くの現地調査が行われているが、バンド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く、橋梁と津波の相関関係に着目した研究は未だ十分と言い難い。津波による橋梁及び周辺地形の被害分析を行うため、著者らは2006年1月と9月、2007年8月、2008年8月の計4回の被害調査を実施した。被害調査より、調査した41橋のうち21橋と半数以上の橋梁の上部工が流失し、被災前と大きく変化していることを確認している。

本研究では、津波による橋梁の損傷状況を明らかにし、橋梁の津波による被害現象について検討することを目的とし以下に示す検討を行った。

図-1 に検討フローを示す。本検討では、現地調査の被害分析と簡易式を用いた詳細調査を行っている。まず、

研究目的	
橋梁の損傷状況を明らかにし、橋梁の津波による被害現象について検討	
研究内容	
(1)橋梁を上部工、下部工、土工部で区分し、被害程度を検討	
(2)橋梁種別と被害程度関係の把握	
(3)簡易式を用いた被害判定	
(4)津波作用力と桁抵抗力の比により構造物の津波被害を評価	
(5)特徴的な損傷状況の評価	

図-1 研究目的及び内容

現地調査の被害分析では、過去4回の被害調査において確認できた41橋中26橋を対象とし、それらを損傷程度、構造種別により分類し、各部材による損傷度の違いについて検討した。

次いで、詳細調査では、41橋中18橋を対象とし、津波作用力と桁抵抗力の比を示す簡易式を用いて津波による構造物損傷度との関係性を評価した。

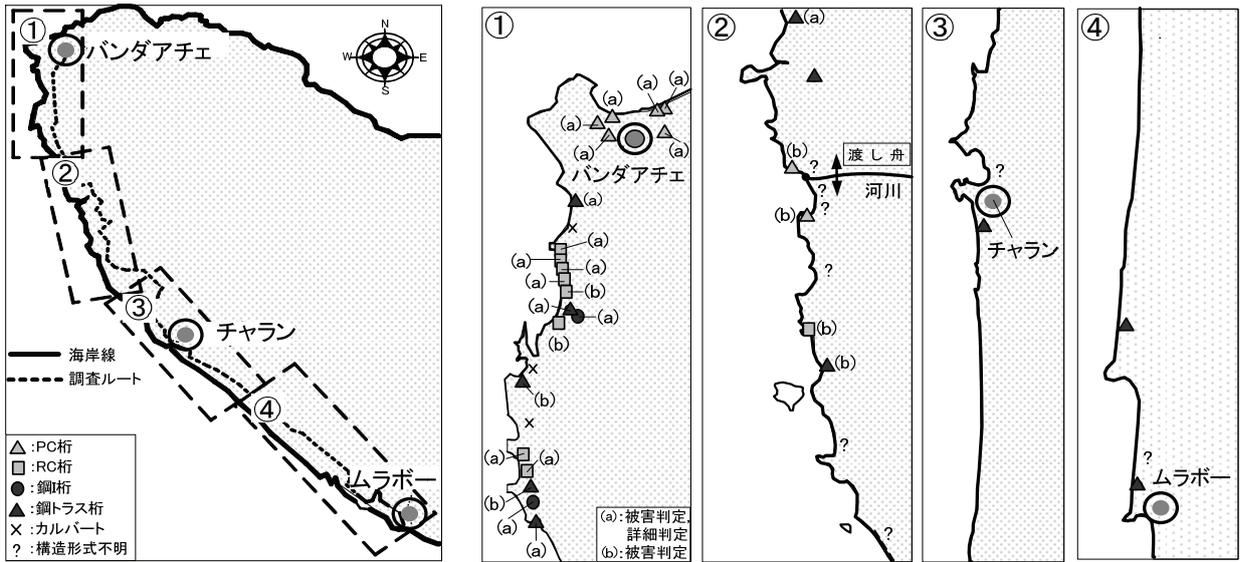


図-2 橋梁の調査対象区間及び調査位置

2. 津波被害状況

2.1 調査概要

(1) 調査範囲

図-2に橋梁の調査対象区間及び調査位置を示す。調査対象区間はバンダアチェからムラポー間の約250kmである。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。著者らは、西岸道路を車で移動し、目視により調査区間内で41橋の橋梁を確認した。著者らの調査で確認した41橋の構造形式の内訳はPC桁が8橋、RC桁が9橋、鋼桁が2橋、鋼トラス桁が11橋、ボックスカルバートが3橋、流失により構造形式不明が8橋である。橋梁周辺では、橋梁の撮影を行い、外観、寸法、損傷状況について調査を行った。

(2) 調査手法

図-3に分析の流れを示す。図-3に示すように、目視により確認できた41橋から損傷度を判別し、分析を行う。被害判定について説明する。ここでは41橋のうち、調査写真及び衛星写真で橋梁種別、損傷状況の判別が可能である26橋を対象とし被害判定を行った。この26橋の構造諸元の内訳はPC桁8橋、RC桁9橋、鋼I桁2橋、鋼トラス桁7橋である。

詳細調査について説明する。ここでは、被害判定を行った26橋のうち、過去4回の調査において筆者らが橋梁の詳細調査を行い、寸法等の構造諸元が判別できる18橋について津波作用力と桁抵抗力の比を用いて評価した。流失した橋梁については、流失後の橋梁写真により寸法を測り判定している。詳細調査を行った18橋の構造諸元の内訳は、PC桁6橋、RC桁6橋、鋼I桁2橋、鋼トラス桁4橋である。なお、詳細については後述する3章に記す。

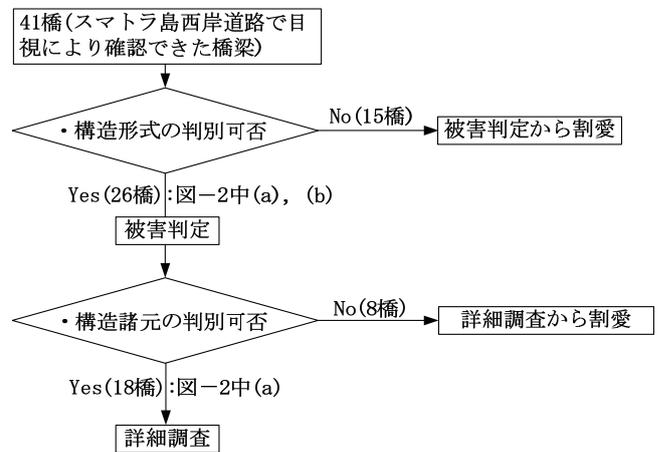


図-3 分析の流れ

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	有効幅員が5割以上で通行不可能
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	有効幅員が5割以上で一台の通行可能
C	部分的損傷	部分的損傷	法肩のみの損傷

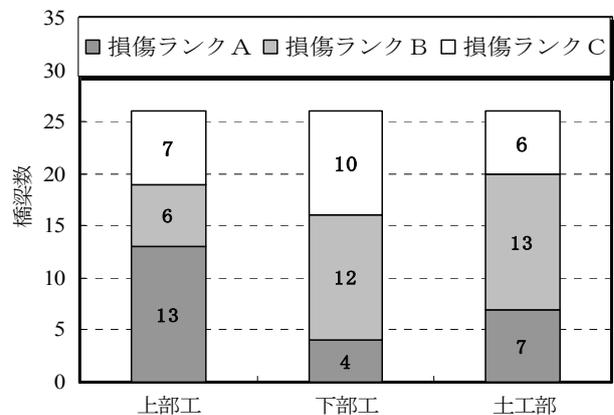


図-4 部材別損傷ランク

(3) 判定手法

損傷ランク判定について説明する。判定は橋梁の使用可否に着目し、表-1 に示すように定義した。上部工を例に判定基準を示す。上部工の判定は桁の移動の有無に着目し分析した。損傷ランク A は上部工が下部工から完全に離脱し使用不可能な橋梁、損傷ランク B は桁移動しているが使用可能な橋梁、損傷ランク C は部分的損傷である橋梁とした。

2.2 調査結果

図-4 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-4 より、上部工は、損傷ランク A が 26 橋中 13 橋と 50% 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 の比率がそれぞれ 15%、26% となる。このことから、津波による被害程度は上部工が最も大きいことが分かる。

図-5 に橋梁種別と上部工損傷ランクを示す。橋梁種別の内訳は PC 桁が 8 橋、RC 桁が 9 橋、鋼 I 桁が 2 橋、鋼トラス桁が 7 橋である。この中で、鋼トラス桁は 7 橋中 6 橋と 86% が桁流失した損傷ランク A である。

一方、PC 桁の桁流失した損傷ランク A は 4 橋、RC 桁は 2 橋、鋼桁は 1 橋であり、損傷ランク A の比率は、PC 桁が 50%、RC 桁が 22%、鋼桁が 50% となる。このことから、鋼トラス桁の損傷ランクは他橋梁種別に比べて特徴的である。

そこで、本検討では特に上部工の被害程度に着目し、以下に分析を行う。

3. 桁抵抗力・津波作用力比を用いた評価

3.1 桁抵抗力・津波作用力比の算定手法

桁移動有無の簡易判定式を用いて、橋梁種別による津波被害程度の分析を行う。本項目では、一定の流速値の仮定を用いて、津波作用力と桁抵抗力の比を求めた。すなわち、一定の流速下の津波作用時における構造物の抵抗特性に着目した分析を行っている。具体的には、41 橋のうち、断面形状が判断できる被害調査橋梁 18 橋に対して、その桁への津波作用力、桁抵抗力を算定し、桁移動の有無を判定する。桁に作用する力は式(1)に示すように抵抗力係数、水の密度、流速、被圧面積の積で表される。式中の抵抗力係数は、後述のように道路橋示方書²⁾より算出する。また、津波高については、当該地点の津波痕跡調査³⁾より 7.1m から 20.1m の高さに津波痕があり、その高さにかかなりの違いが認められる。このような違いは海岸線の地形との関係による影響が大きいと考えられる。既往の津波高と流速の関係については、松富ら⁴⁾の提案式もあるが、今回のような巨大津波の場合では津波高と流速の比例関係については必ずしも明確ではな

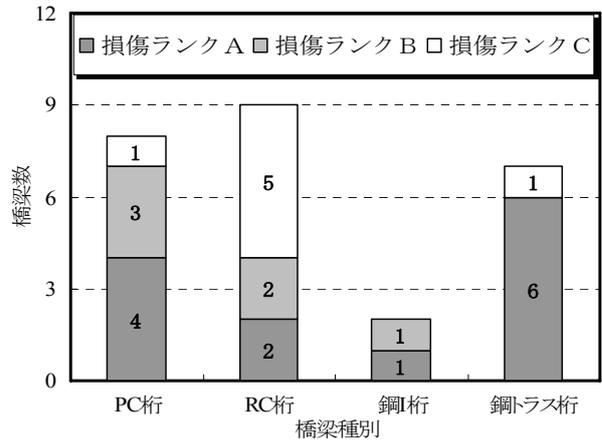


図-5 橋梁種別による上部工損傷ランク

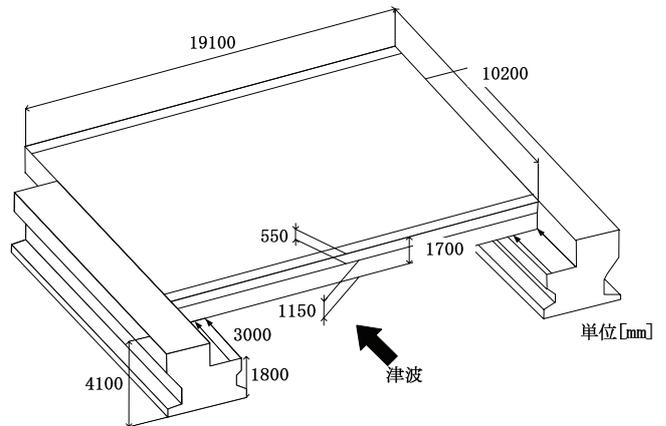


図-6 代表橋梁図(No.11)

い。一方、スマトラ島のバンダアチェ近郊の数箇所で撮影された映像を用いて、流木等の移動速度から判断すると、いずれも津波流速は 5.0m/s であったとの報告を踏まえ、ここではすべてのケースに対して流速 5.0m/s の一定値を採用した。

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

ここで、

ρ_w : 水の密度 (1030kg/m³) C_d : 抵抗力係数
 v : 水の流速 (5.0m/s と仮定) A : 被圧面積 (m²)

津波に対する桁の抵抗力は式(2)に示すように摩擦係数と上部工重量の積で表される。式(2)における μ については後述のように 0.6 を採用する。抵抗力側には、厳密には浮力および上揚力の影響を考慮する必要があるが、津波形状や桁形状が影響する等、複雑な評価を必要とするため、ここでは簡便のため考慮していない。

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

ここで、

μ : 摩擦係数 (ここでは 0.6 を採用)
 W : 上部工重量 (kN)

以上より、桁抵抗力を津波作用力で除す式(3)に基づき桁抵抗力・津波作用力比(β)を求め、桁移動発生の有無を判定する。ここで、桁抵抗力・津波作用力比(β)が大きい場合、桁の抵抗力が大きく、移動しにくい橋梁であることを意味する。

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

図-6に示すNo.11 (Lueng le 橋) を用いて、津波作用力、桁抵抗力、桁抵抗力・津波作用力比(β)の算定例を示す。No.11は、桁長19.1m、幅員10.2m、床版厚0.55m、桁下高1.15mのRC桁橋である。被圧面積は、構造高(床版厚+桁高)と桁長の積であり32.4m²となる。道路橋示方書²⁾より幅員と構造高を用いて抗力係数を求めると1.5となり、式(1)を用いて津波作用力を求めると625.7kNとなる。

次いで、被害調査より得た橋梁の寸法から概略算定した上部工体積(91.2m³)とコンクリートの単位体積重量(24.5kN/m³)の積である重量Wが2235.4kNであることから、式(2)を用いて桁抵抗力を求めると、1341.2kNとなる。以上より、桁抵抗力・津波作用力比(β)は2.1となる。本検討手法で算定した18橋の β 値の平均は1.7である。No.11橋は津波に対して抵抗が比較的大きい橋梁であることが算定結果より言える。

3.2 摩擦係数

式(2)における μ には、実橋梁における桁移動現象に着目し、以下のような摩擦係数を提案する。

著者らの現地調査⁵⁾では、図-4に示すように6橋の桁移動した橋梁を確認した。写真-1に桁面と橋台間の代表的損傷例を示す。写真-1に示す橋梁では、支承部にゴムパットが設置されていたが、津波により支承が破壊され、桁が橋台上を滑るように移動している。桁移動した他の橋梁の桁面と橋台間の調査を行うと、いずれもコンクリート桁面と橋台間ですべりが発生しており、コンクリート橋台面にはひび割れが発生していない。そのため、コンクリート桁は橋台面を比較的滑らかに滑ったと考えられる。そこで、以下の文献を参考にコンクリート桁面での滑り摩擦係数について考察する。

庄司⁶⁾らは、コンクリート製の桁模型について桁移動が発生する角度より橋桁と橋台間の桁移動が生じない限界値である静止摩擦係数を求めている。摩擦条件を津波作用時と同様とするために、桁模型とコンクリート板の接触部分は湿潤状態に保ち、大、中、小の模型タイプに対してそれぞれ10回ずつ計測を行った。静止摩擦係数の平均値を求めると、大、中、小模型のそれぞれの場合において0.65, 0.64, 0.62となっている。

Rabbat⁷⁾らは、コンクリート面と鋼板面間のすべり摩擦係数を測定するため、圧縮応力をパラメータとした図-7に示す方法により実験を行った。図-8に実験結果を



写真-1 桁面と橋台間の代表的損傷

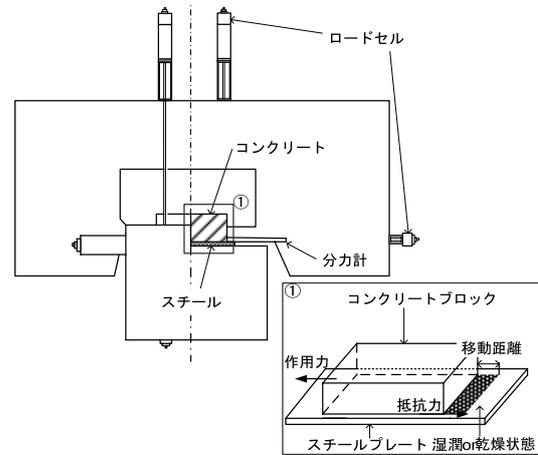


図-7 Rabbat らによる摩擦係数測定方法

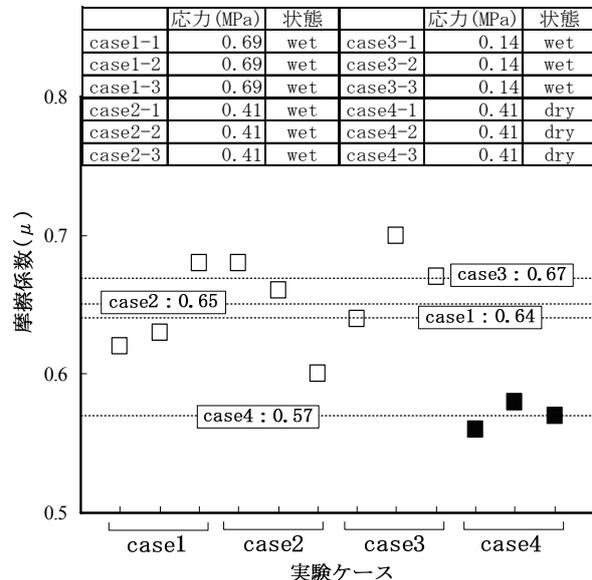


図-8 Rabbat らの実験結果

表-2 分析対象橋梁の構造諸元の平均値

	幅員(m)	構造高(m)	桁長(m)	被圧面積(m ²)
PC桁	6.0	1.8	20.2	36.3
RC桁	7.3	1.0	9.9	9.9
鋼I桁	6.9	1.3	19.8	25.7
鋼トラス桁	6.8	5.7	43.3	82.1

※鋼トラス桁の構造高は主構高さ

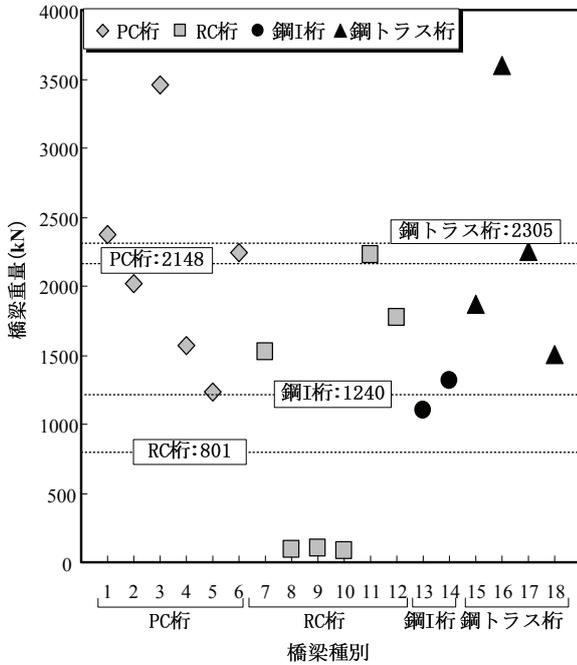


図-9 構造式別重量算定結果

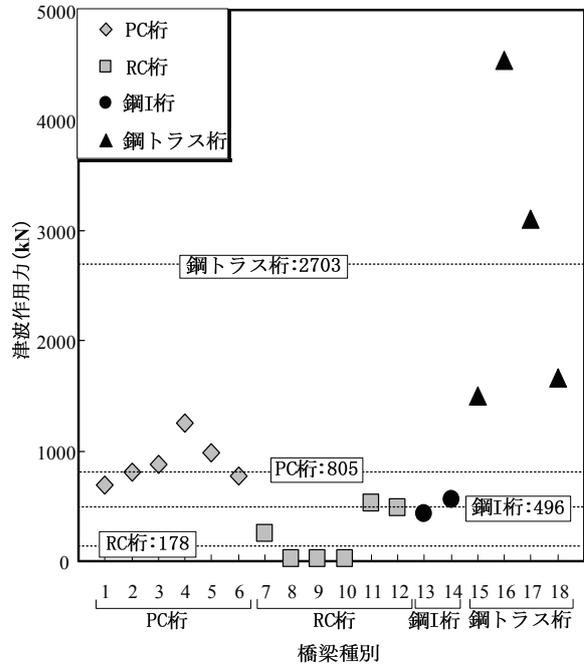


図-10 構造式別津波作用力算定結果

示す。図-8より、圧縮応力(0.14, 0.41, 0.69MPa)及び界面状態(湿潤, 乾燥)をパラメータとしているが、摩擦係数はいずれの場合も0.57~0.67程度となっている。

以上の実験結果によると、コンクリート-コンクリート間、コンクリート-鋼板面のいずれにおいても差異は小さく、摩擦係数は0.6程度と見なして良いと考えられる。

3.3 桁抵抗力・津波作用力分布

表-2に分析対象橋梁の構造諸元の平均値を示す。表-2より、平均幅員については橋梁種別で大きな差異はなく、6.0mから7.0m程度で分布する。図-9に構造形式別重量算定結果を示す。RC桁は平均桁長が9.9mと短く、平均重量も801kNと小さい。これは、桁長3.0mと非常に小さな床版桁を3橋含むためである。鋼I桁が平均桁長19.8m、平均重量1240kNであるのに対し、当該地点のPC桁は平均桁長20.2m、平均重量2148kNと相対的に大きいことが分かる。一方、鋼トラス桁は平均桁長が43.4m、平均重量2305kNとPC桁と比較しても大きな値となる。橋梁重量は桁長に比例するため、図-9のような算定結果となった。

図-10に流速5.0m/sの一定値で求めた構造形式別津波作用力算定結果を示す。RC桁は桁長が短いため平均被圧面積が9.9m²と小さく、平均津波作用力も178kNと小さい。PC桁の平均被圧面積が36.3m²、平均津波作用力805kN、鋼I桁の平均被圧面積が25.7m²、平均津波作用力496kN、鋼トラス桁の平均被圧面積が82.1m²、平均津波作用力2703kNとなる。津波作用力は被圧面積に比例するため、図-10のような分布となった。特に、No.16の鋼トラス桁では桁長が62mであることから、重量3594kN、津波作用力4542kNと極端に大きな値となっている。

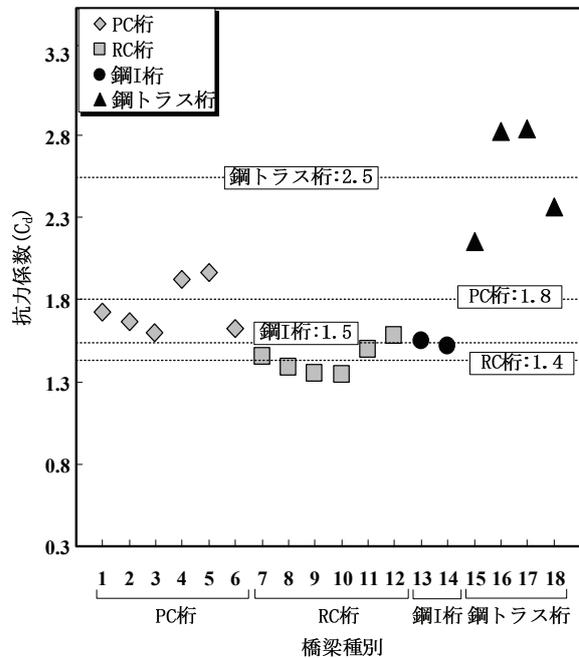


図-11 構造種別による抗力係数算定結果

3.4 抗力係数分布

本検討での抗力係数は、道路橋示方書²⁾に準拠し、桁橋の場合は式(4)、トラス橋の場合は式(5)を用いて求めた。

$$C_d = \begin{cases} 2.1 - 0.1(B/D) & (1 < B/D < 8) \\ 1.3 & (8 < B/D) \end{cases} \quad (4)$$

$$C_d = 0.68\sqrt{\lambda/h} \quad (7 < \lambda/h < 40) \quad (5)$$

ここで、

B: 橋の総幅(m) D: 橋の総高(m)
λ: 主構高さ(m) h: 弦材高さ(m)

図-11 に構造種別による抗力係数算定結果を示す。図-11 より、RC 桁の平均が 1.4、鋼 I 桁の平均が 1.5、PC 桁の平均が 1.8、鋼トラス桁の平均が 2.5 となり、鋼トラス桁の抗力係数が他橋梁種別に比べ大きな値となる。この要因について考察すると、風等の流体物が物体に作用してその物体を通り抜ける際に、被圧背面側には移動方向への作用力を助長することで知られる。一般的に鋼トラス桁のような 2 主構では、その力が大きく作用し、桁橋に比べ抗力係数が大きくなると考えられる。

3.5 橋梁種別による桁抵抗力・津波作用力比分布

図-12 に流速 5.0m/s の一定値で求めた桁抵抗力・津波作用力比算定結果を示す。図-12 より、RC 桁の β 値の平均が 2.7、PC 桁の平均が 1.6、鋼 I 桁の平均が 1.5、鋼トラス桁の平均が 0.6 と橋梁種別により β 値として大きな差異を生じている。

β 値の平均が最も大きな 2.7 である RC 桁について、表-2 を用いて考察する。RC 桁の平均桁長は 9.9m、平均幅員は 7.3m である。平均桁長を平均幅員で除すことで求めた比は 1.4 であり、PC 桁が 3.4、鋼 I 桁が 2.9、鋼トラス桁が 6.4 である。このことから、本調査の RC 桁は、幅員に対し桁長が短い形式であることが言える。津波作用力は式(1)より、流速と水の密度は一定値であるため、抗力係数（構造高(主構高さ)と幅員に比例)と被圧面積（桁長×構造高）の関数で評価できる。

桁抵抗力は式(2)より橋梁重量と一定値である摩擦係数の積で表されている。このうち橋梁重量は桁長、断面積（構造高×幅員に比例）、各部材の単位体積重量の積で表すために、桁抵抗力は幅員、桁長、構造高の関数で評価できると言える。

β 値は式(2)を式(1)で除すことで求める。そのため、 β 値は構造高（主構高さ）及び幅員に比例することが言える。

RC 桁は幅員に対して構造高が低い形状であるため、抗力係数の平均を求めると 1.4 と小さく、津波作用力は小さくなる。また、幅員に対して桁長が短いため、 β 値が大きくなる。この結果、RC 桁の β 値は更に大きくなる傾向を示すと考えられる。

β 値の平均が最も小さな 0.6 である鋼トラス桁について考察する。図-13 に鋼トラス桁の代表断面を示す。図-13 に示す橋梁は図-12 中の No.15 で、構造諸元は桁長 35.0m、幅員 7.0m、トラス高 4.0m、抗力係数 2.2 である。構造諸元より算定した被圧面積は 59.1m² となり、式(1)より津波作用力を求めると 1537.5kN となる。

次いで、式(2)より桁抵抗力を求めると 1121.2kN となり、式(3)から β を求めると 0.7 となる。鋼トラス桁の平均桁長を平均幅員で除すことで求める比は 6.4 であり、本調査の鋼トラス桁は幅員に対して桁長が長い形式であることが言える。前述のように、 β 値は構造高（主構高さ）及び幅員に比例する。式(5)から鋼トラス桁の抗

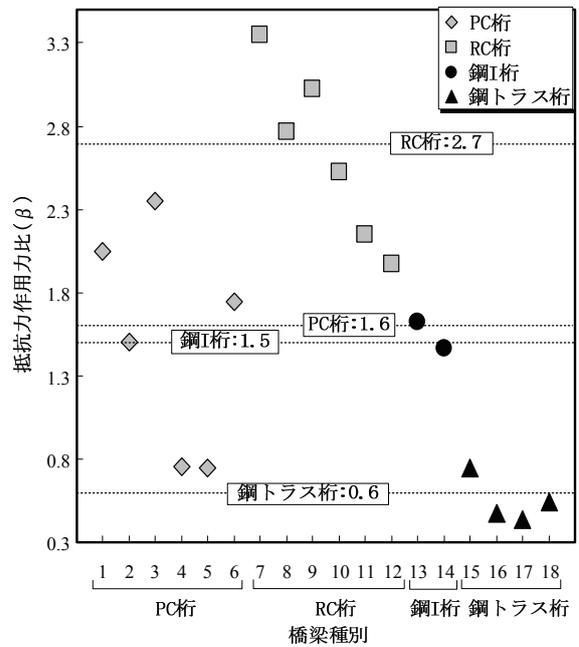


図-12 桁抵抗力・津波作用力比算定結果

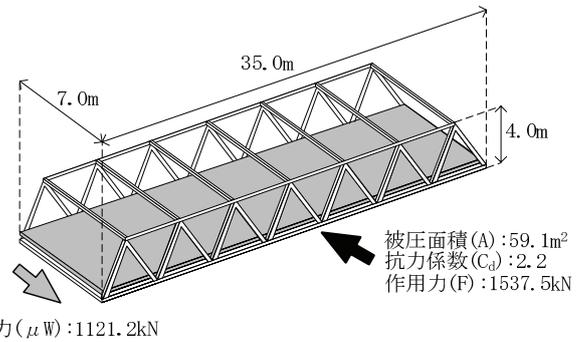


図-13 鋼トラス桁の代表断面 (No.15)

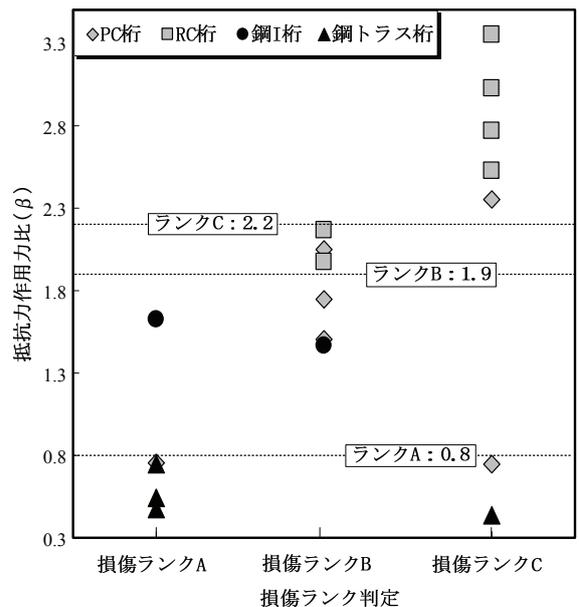


図-14 損傷ランク判定別の β 分布

力係数の平均を求めると 2.5 であり、他橋梁種別と比べ非常に大きい。これは、鋼トラス桁の主構高さの平均が 5.7m であり、弦材高さ (0.4m) に比べ非常に大きいことが要因である。これにより、津波作用力が大きくなる。また、幅員に対して桁長が長いこと、 β 値が小さくなる。この結果、鋼トラス桁の β 値は更に小さくなる傾向を示すと考えられる。

3.6 実損傷ランクとの比較

図-14 に橋梁種別ごとの損傷ランクと β 値との関係を示す。 β 値と損傷度には相関性があり、損傷ランク A で β の平均値が 0.8、損傷ランク B で 1.9、損傷ランク C で 2.2 となる。各損傷ランク間では、損傷ランク A と損傷ランク B 間で 60% 程度、損傷ランク B と損傷ランク C 間で 15% 程度の差異がある。また、損傷ランク A と損傷ランク C では 70% 程度の差異が発生している。

損傷ランク C は、7 橋のうち 5 橋が β 値 2.3 以上に分布し、橋梁種別で分類すると RC 桁が 57% を占める。前述のように β 値は構造高 (主構高さ) 及び幅員に比例する。RC 桁は幅員に対して構造高が低く、津波作用力が小さい。また、幅員に対して桁長が短く、 β 値が大きくなる。これらの影響により β 値が更に大きくなり、損傷ランクは小さくなると思われる。なお、 β 値が 0.4 と小さな値であるが被害程度は損傷ランク C である No.17 については、後述する 4.2 章において考察する。

損傷ランク A は、5 橋のうち 4 橋が β 値 0.8 以下に分布し、橋梁種別で分類すると鋼トラス桁が 60% を占める。鋼トラス桁の多くは、主構高さが弦材高さを大きく上回り、津波作用力も大きい。また、桁長が幅員に対して長く、 β 値が小さくなる。これらの影響により β 値は更に小さくなり、損傷ランクは大きくなると思われる。

特に特徴的な桁流失である損傷ランク A の橋梁について図-15 を用いて説明する。図-15 は PC 桁形式でありながら、 β が極端に小さくなり、桁流失した No.4 橋梁を示す。本橋梁は長さ 20m の歩道橋であるため、幅員が 2.8m と通常 (6.0m) の半分程度であるため、単位長さあたりの重量が 1/2 程度となっている。これに対して津波作用力の支配的要因である構造高は 1.9m と PC 桁の平均 (1.8m) より大きくなっている。このため、 β が通常の桁に比べて 0.7 と 1/3 程度と小さくなり、桁が極めて移動しやすい形状であったと考えられる。

4 移動及び作用方向に着目した評価

4.1 桁移動時の加速度と桁移動距離関係

桁移動加速度の簡易判定式を用いて、桁移動距離と桁移動時の加速度の差異による津波被害程度の検討を行う。具体的には、上部工被害が桁流失又は桁移動である損傷ランク B 以上の被害調査橋梁 11 橋に対して、その桁への津波作用力、浮力を考慮した桁抵抗力を算定し、

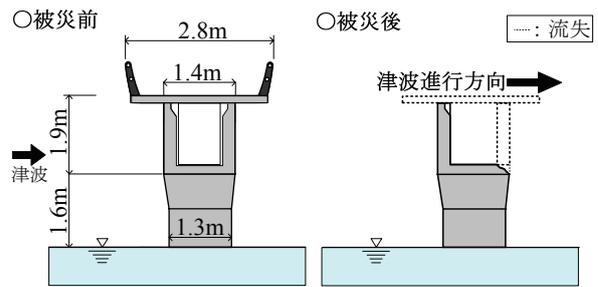


図-15 代表的損傷ランク A 橋梁 (No.4)

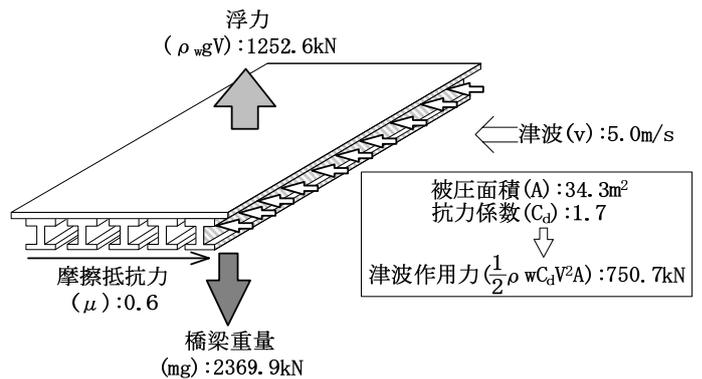


図-16 桁移動加速度の算定例 (No.1)

移動距離と力の差異により発生する加速度の関係を評価する。津波による橋梁の桁移動時の加速度は、式(6)を式(7)のように展開して算定した。式(6)中の右辺第 1 項は津波作用力であり、第 2 項は橋梁重量と浮力を考慮した桁抵抗力である。津波作用力と桁抵抗力の差異を橋梁質量で除すことで、加速度を式(7)のように求める。式(8)に移動方程式を示す。後述する桁移動距離は式(8)のような関数で表される。本検討では、桁移動距離が桁移動時の加速度の大小により支配されると考え、桁移動時の加速度と桁移動距離関係について検討する。

$$m \alpha = \frac{1}{2} \rho_w C_d v^2 A - \mu (mg - \rho_w g V) \quad (6)$$

$$\alpha = \left[\frac{1}{2} \rho_w C_d v^2 A - \mu (mg - \rho_w g V) \right] / m \quad (7)$$

$$S = \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (8)$$

ここで、

m: 橋梁質量 (kg) α : 桁移動時の加速度 (m/s²)
g: 重力加速度 (m/s²) V: 上部工体積 (m³)
S: 桁移動距離 (m)

図-16 に示す橋梁 No.1 (Ulee Lheue 橋) を用いて桁移動加速度の算定例を示す。No.1 は、桁長 22.9m、幅員 7.2m、構造高 (床版厚+桁下高) 1.6m で、津波により 0.3m 桁移動した PC 桁橋である。桁長と構造高の積より被圧面積は、34.3m² となる。幅員と構造高を用いて抵抗力係数を

求めると 1.7 となり、式(6)を用いて津波作用力を求めると 750.7kN となる。

次いで、上部工体積より概略算定した重量が 2369.9kN であり、浮力 1252.6kN を考慮すると抵抗力は 670.4kN となる。以上より、式(8)を用いて桁移動時の加速度を求めると 0.03m/s^2 となる。本検討手法で算定した 11 橋の桁移動時の加速度の平均は 1.66m/s^2 であり、No.1 は津波に対して抵抗が比較的大きい橋梁であることが算定結果より言える。

図-17 に桁移動距離の評価方法を示す。津波被害により桁移動した橋梁の桁中心位置から河川上流方向への鉛直方向距離を Y、水平方向距離を X と定義した。図-17 中の桁が河川上流方向に流失した代表例である橋梁 No.13 では、Y 方向に 100m、X 方向に 30m 移動している。また、桁が真下に落下した代表例である橋梁 No.18 では、Y 方向に 6.0m 移動している。

図-18 に桁移動距離と桁移動時の加速度の関係を示す。ここでは、橋梁の Y 方向の移動量に着目した。

津波により桁移動した損傷ランク B の橋梁について分析する。損傷ランク B の橋梁数は 6 橋であり、桁移動時の加速度は 1.0m/s^2 未満に集中する傾向を示し、平均値は 0.1m/s^2 である。これは、式(6)中の右辺である津波作用力と桁抵抗力間に差異が小さいことを意味する。また、桁移動距離については、損傷ランク B の最大桁移動距離は 4.0m であり、0.3m から 4.0m の間に分布する。このことから、損傷ランク B の 6 橋は、津波作用時に桁抵抗力と津波作用力間の差異が小さく、桁移動時の加速度が小さくなる。そのため、桁移動距離が桁移動時の加速度の影響で小さくなると考えられる。

桁流失した損傷ランク A の橋梁について分析する。損傷ランク A の橋梁数は 5 橋であり、桁移動時の加速度を求めると平均値は 4.4m/s^2 となる。これは、式(6)中の右辺で津波作用力と桁抵抗力間の差異が大きいたることを意味する。また、桁移動距離については、損傷ランク A の最大桁移動距離は 100.0m であり、6.0m から 100.0m に分布する。桁移動量が 6.0m と小さな No.18 は、桁が真下に落下した単径間トラス桁橋である。No.18 は河川を遡上した津波の作用により損傷したことが考えられる。写真-2 に示すように No.18 の背面には急斜面の山が存在し、地形の影響により No.18 の桁移動距離は小さくなったと言える。また、桁移動時の加速度が小さな No.13 については、地形及び流速の影響が考えられるが、詳細な要因については不明である。このことから、損傷ランク A の 5 橋のうち、特殊な例を除く 3 橋は津波作用時に津波作用力と桁抵抗力間に差異が大きく、桁移動時の加速度が大きくなる。そのため、桁移動距離が桁移動時の加速度の影響で大きくなると考えられる。

4.2 津波の進行方向と橋梁の設置角度による被害検討

本項目では、津波の進行方向と橋梁の設置角度の差異

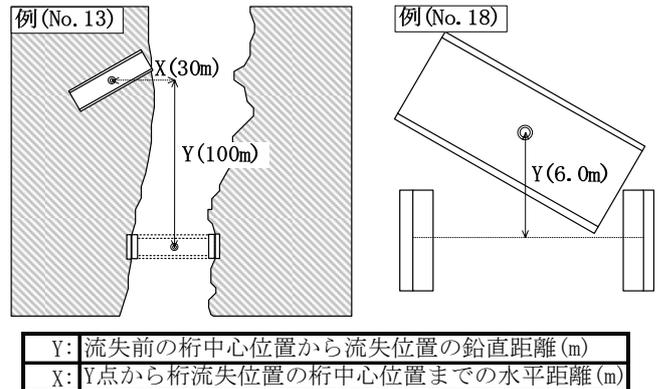


図-17 桁移動距離の評価方法

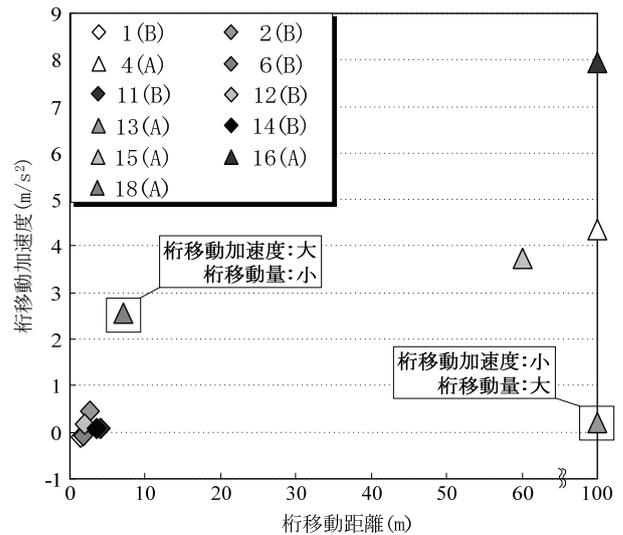


図-18 移動距離と桁加速度関係



写真-2 No.18 被災直後

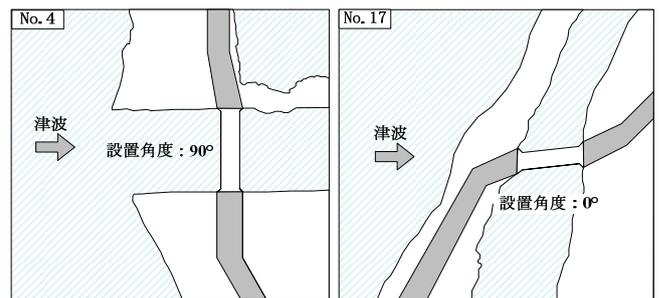


図-19 津波に対する橋梁の設置角度の判定手法

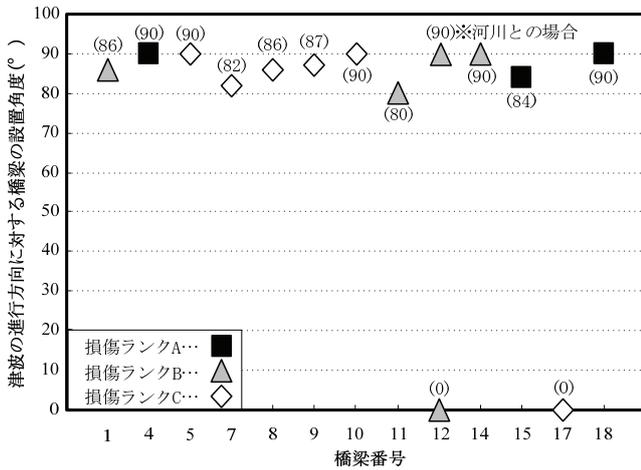


図-20 津波の進行方向と13橋の設置角度

による被害程度について分析を行う。本項目では、上部工被害判定で損傷ランクA及びBであった18橋のうち、津波により直接被害を受けやすいと想定される海岸線から500m以内に架設された13橋を対象とし、分析を行った。図-19に示す2橋を参考例として津波に対する橋梁の設置角度の判定手法を示す。ここでは、津波の進行方向は、津波は海岸線に対して直角方向から浸入すると仮定し、13橋周辺の海岸線の地形より判断した。

図-19に示すNo.4は、津波の進行方向に対して橋梁が平行に設置されている。そこで、本橋梁の津波の進行方向に対する設置角度は90°とした。また、No.17では、津波の進行方向と橋軸が一致している。そこで、本橋梁の津波の進行方向に対する橋梁の設置角度は0°とした。

図-20に津波の進行方向と13橋の設置角度を示す。図-20より、分析対象橋梁13橋のうち、11橋と85%の橋梁が、津波の進行方向に対して平行(80°から90°)に設置されていることが分かる。この11橋の損傷程度は、損傷ランクAが3橋、損傷ランクBが3橋、損傷ランクCが5橋である。この11橋の津波作用面は橋軸直角方向であることから、本検討で提案している桁抵抗力・津波作用力比(β)による評価が可能であり、 β 値が低い場合に損傷ランクAである桁流失が発生するなど、 β 値と損傷度間に明確な傾向を示す。

一方、残りの2橋については、海岸線に対して直角方向から津波が浸入すると仮定すると橋梁の設置角度が0°である。この2橋について、以下に分析結果をまとめる。

図-21に海岸線に対して直角方向から津波が浸入すると仮定すると橋梁の設置角度が0°であるNo.17の橋梁と橋梁周辺を示し考察する。図-21に示すNo.17は、海岸線から100mと沿岸部に設置された鋼トラス桁で、被害判定は部分的な損傷である損傷ランクCである。本橋梁の β 値は、図-12に示すように0.4であり、他橋梁に比べて非常に小さい値である。

橋梁及び橋梁周辺の津波被害について説明する。図-

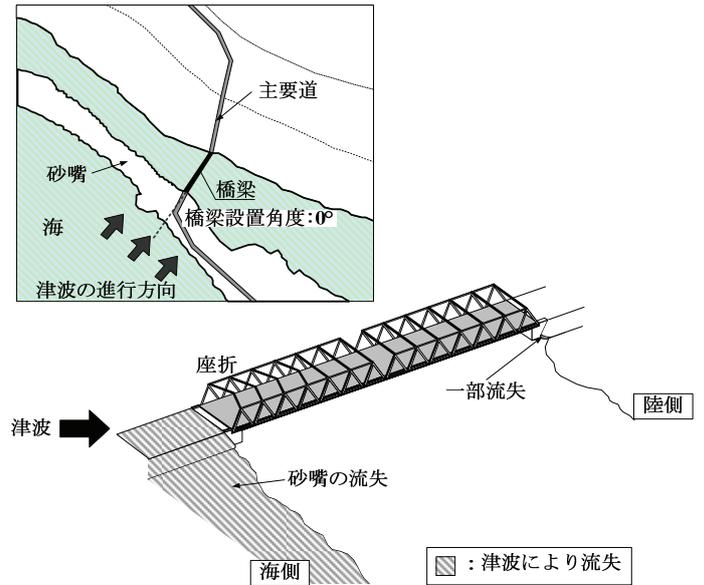


図-21 No.17の橋梁及び橋梁周辺の損傷状況

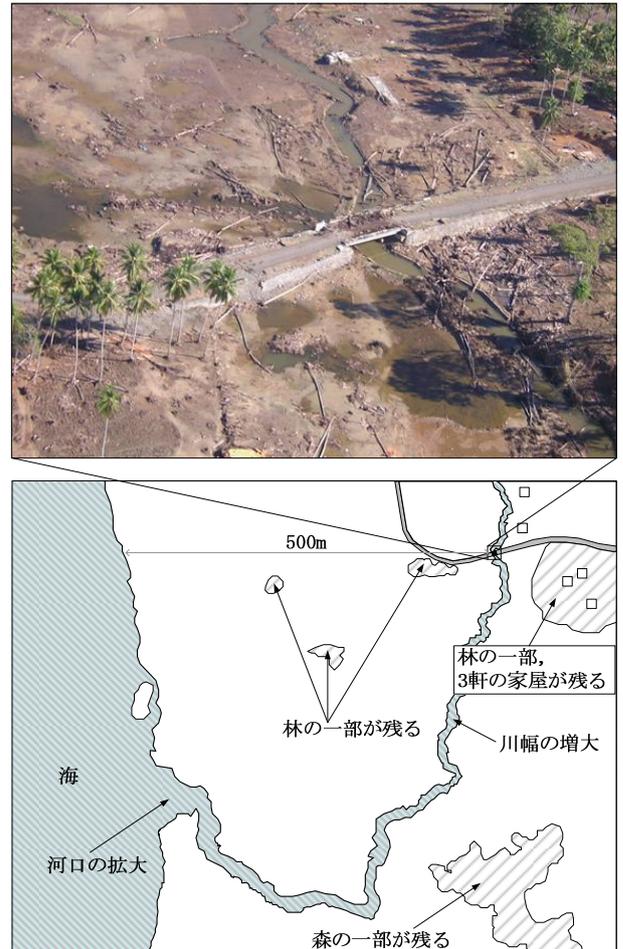


図-22 No.12の橋梁及び橋梁周辺の損傷状況

21に示すように、橋梁については、桁の流失や移動は発生していない。但し、津波作用側より4本の上面トラス部材の座屈が確認された。これは、津波による被害の可能性が考えられる。

一方、橋梁周辺の被害については、土工部を含めた橋梁の海側の砂嘴は、津波により完全に流失している。しかしながら、橋梁の陸側は盛土の一部が流失する程度の被害に留まる。津波は図-21 に示すように砂嘴側から陸側に向けて浸入すると仮定すると、No.17 の津波に対する橋梁の作用面が本研究の桁抵抗力・津波作用力比(β)において評価している橋軸直角方向ではなく、橋軸方向であった可能性が高いことから、評価と実現象が異なる傾向を示したと考えられる。

以上の分析結果より、No.17 は橋梁の設置角度の影響により β 値は低い流失しなかったと考えられる。

図-22 に海岸線に対して直角方向から津波が浸入すると仮定すると橋梁の設置角度が 0° である No.12 の橋梁と橋梁周辺を示し考察する。図-22 に示す No.12 は、海岸線から 500m と比較的内陸部に設置された RC 桁で、被害判定は桁移動した損傷ランク B である。本橋梁の β 値は、図-12 に示すように 1.9 である。

橋梁及び橋梁周辺の津波被害について説明する。橋梁の津波被害は、桁が河川上流方向に 2.0m 桁移動している。

橋梁周辺の被害について述べると、石積みにより形成された土工部の一部は流失しているが、道路舗装の損傷はなく、道路として機能している。海岸線から橋梁周辺までの森林の大半は津波被害後に流失し、地盤が剥き出しの状態となっているが、海岸線から橋梁までの区間で林の一部等が津波来襲後も群生している。河川については、津波被害前後で川幅が増大しており、流木等の堆積も河川下流側で確認できる。このことから津波は河川を遡上した可能性が高いと考えられる。

以上の分析結果より、No.12 は海岸線に対して直角方向から津波が浸入すると仮定すると、橋梁の設置角度は 0° であるが、橋梁周辺の被害より判断すると、津波は海岸線から浸入したのではなく、河川を遡上して被災した可能性が高いと考えられる。

5. まとめ

本文では、スマトラ沖地震に伴い発生した巨大津波による橋梁被害の分析を試みた。本分析により得られた構造種別による被害程度、簡易式を用いた構造物の津波被害評価、橋梁の特徴的な損傷状況に関する知見を以下にまとめる。

- 1) 目視により確認できた 41 橋から構造種別の判別できた 26 橋の被害判定を行うと、損傷ランク A は上部工 13 橋(50%)、下部工 4 橋(15%)、土工部 7 橋(27%) で発生しており、上部工において最も大きい被害が生じていることが分かった。
- 2) 損傷ランク A の桁抵抗力を津波作用力で除すことで求める桁抵抗力・津波作用力比(β)の平均は 0.8、損傷ランク B の平均は 1.9、損傷ランク C の平均は 2.2

であり、 β 値と損傷ランクは明確な傾向を示す。また、 β 値が最も大きい橋梁種別は RC 桁(2.7)であり、最も小さい橋梁種別は鋼トラス桁(0.6)である。

- 3) β 値の高い RC 桁は幅員に対して構造高が低いため、抗力係数が小さく、津波作用力が小さい。また、桁長が幅員に比べ短いため β 値が大きくなる。これらの影響により β 値は更に大きくなる。 β 値の低い鋼トラス桁は主構高さが弦材高さを大きく上回るため抗力係数が大きく、津波作用力が大きい。また、桁長が幅員に比べ長い場合 β 値が小さくなる。これらの影響により β 値は更に小さくなる。
- 4) 桁移動時の加速度と桁移動距離関係について分析すると、桁抵抗力と津波作用力間の差異が小さく加速度が小さな橋梁の場合、桁移動距離が短くなる傾向を示す。また、桁抵抗力と津波作用力間の差異が大きく加速度が大きな橋梁の場合、桁移動距離が長くなる傾向を示す。以上より、桁移動時の加速度と桁移動距離関係には明確な傾向を示すことを確認した。
- 5) 本論文では流速 5.0m/s の一定値を用い、構造特性による水平方向の流れやすさについて検討している。現在の評価手法では、構造特性のみに着目しており、今後の研究課題としては、各橋梁地点で計測されて津波高から、既往の算定式を用いた橋梁の被害度評価を行う必要があると考えられる。

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, pp.1-50, 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, pp.52-54, 2002.3
- 3) 藤間功司, 嶋原良典, Charles SHIMAMURA, 松富英夫, 榊山勉, 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: スマトラ北西海岸における 2004 年インド洋津波の痕跡高分分析, 土木学会地震工学論文集, pp.874-880, 2007.8
- 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, pp.361-365, 1998
- 5) 幸左賢二, 内田悟史, 運上茂樹, 庄司学: スマトラ地震の津波による橋梁被害分析, 土木学会地震工学論文集, pp.895-901, 2007.8
- 6) 庄司学, 森山哲雄, 藤間功司, 嶋原良典, 笠原健治: 単径間橋桁に作用する砕波津波の荷重に関する実験的検討, 構造工学論文集, 第 55 巻, pp.460-470, 2009.4
- 7) Rabbat, B.G and Russell, H.G : Friction coefficient of steel on concrete or grout, J. Struct. Eng., ASCE, Vol.111, No.3, pp.505-515, 1985

(2009 年 9 月 24 日受付)