

スマトラ沖地震に伴う津波によるPC橋梁の被害分析

九州工業大学	正会員	Ph. D	○幸左	賢二
株式会社ウエスコ	非会員			二井 伸一
九州工業大学	非会員			宮原 健太
筑波大学	正会員	工博		庄司 学

More than 70 bridges were damaged by the Tsunami caused by the 2004 Off-Sumatra earthquake. Among them, 26 bridges were investigated and classified into three ranks as A, B, C according to the damage level. It was observed clear tendency between the damaged rank of girder and β value (ratio between resistance of girder and tsunami force affected to the girder).

Key words : Tsunami, Wave Force, Damaged Bridge, Sumatra Earthquake

1. はじめに

2004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く、橋梁と津波との相関関係に着目した研究は未だ十分と言い難い。津波被災前後における橋梁及び周辺地形の被害分析を行うため、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。現地調査より、多くの橋梁が流失し、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、図-1に示す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、部材別、構造種別により分類し、構造種別による損傷程度の判定を行った。また、簡便な桁抵抗力津波作用力比を用いて構造物損傷度との関係性を評価した。

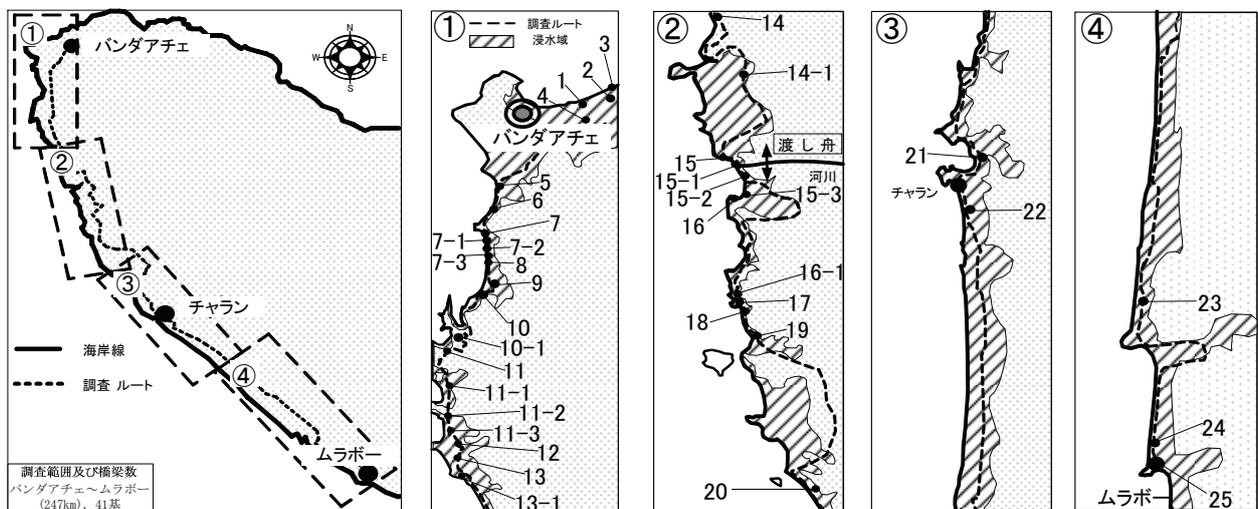


図-1 調査橋梁位置

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) 橋梁種別と損傷ランク判定
 (2) 桁抵抗力津波作用力比と実損傷関係の評価

対象橋梁

スマトラ島調査橋梁:41橋(調査対象)

詳細分析(26橋)

- ・桁抵抗力津波作用力比の算定
- ・実損傷ランクと抵抗力作用力比の比較

図-2 研究フロー

2. 津波被害状況

図-2に研究フローを示す。調査橋梁41橋を損傷程度によりランク区分する。損傷ランクは、橋梁の使用可否に着目し、表-1に示すように定義した。写真-1に損傷ランク例を示す。その結果、本論文での分析対象橋梁は、調査した41橋のうちカルバート、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橋梁としている。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。このことより、津波による被害程度は上部工が最も大きい。そこで、本章では特に上部工の被害に着目し、以下に分析を行う。

図-4に橋梁種別による上部工の損傷ランクを示す。対象橋梁はPC桁が7橋、RC桁が9橋、鋼I桁が2橋、鋼トラスが8橋である。鋼トラス桁が多いが、鋼トラス桁は海上運輸され、現地での組立が簡易なため採用されたと考えられる。

一方、鋼トラスは8橋中7橋と90%以上が桁流失した損傷ランクAである。

また、桁流失をした損傷ランクAはPC桁3橋、RC桁2橋、鋼I桁1橋であり、比率的には20%~50%であり、鋼トラスの損傷程度は他橋梁種別に比べて特徴的である。

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	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



(損傷例：ランク A)



(損傷例：ランク B)



(損傷例：ランク C)

写真-1 損傷ランク判定

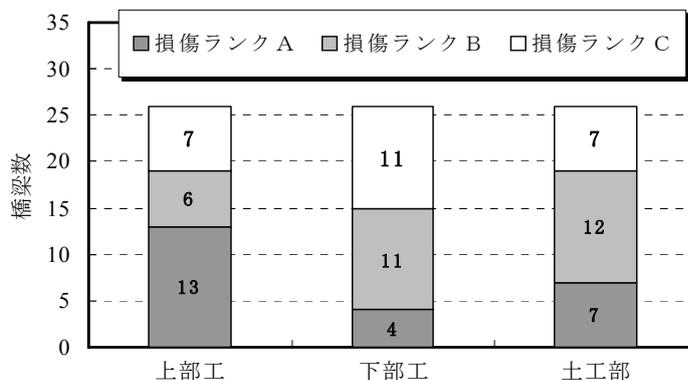


図-3 部材別損傷ランク

3. 評価式

3.1 移動有無評価式

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。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26橋に対して、その桁への作用力、桁抵抗力を算定し、桁移動の有無を判定する。(1)式に津波による桁への作用力を示す。式中の抗力係数は、道路橋示方書²⁾より算出する。また、平均流速については、当該地点の多くが津波高10.0m程度であることから、ここでは平均流速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 : 抗力係数
 V : 水の流速 (5.0m/sと仮定) A : 被圧面積 (m²)

桁の抵抗力は式(2)を用いて算出する。(2)式における μ には後述のように0.6を採用する。抵抗力側には、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ことから、現在実験的にその影響を検討中であり、ここでは考慮せずに評価している。

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

ここで、

μ : 摩擦係数(ここでは0.6を採用)
 W : 上部工重量(kN)

以上を基に、(3)式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。

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

3.2 摩擦係数

実橋梁における桁移動現象に着目して分析し、摩擦係数を提案する。現地調査によると6橋の桁移動のみが発生している橋梁が確認された。このうち、**図-5**に示すようにもっとも大きな3mの桁移動が確認されたLueng Ie橋で

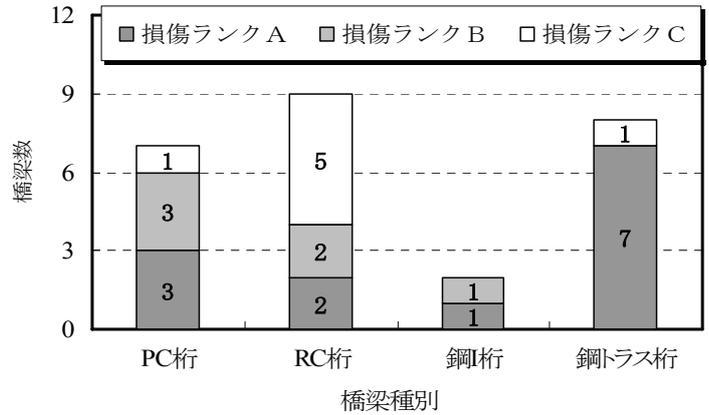


図-4 橋梁種別による損傷ランク

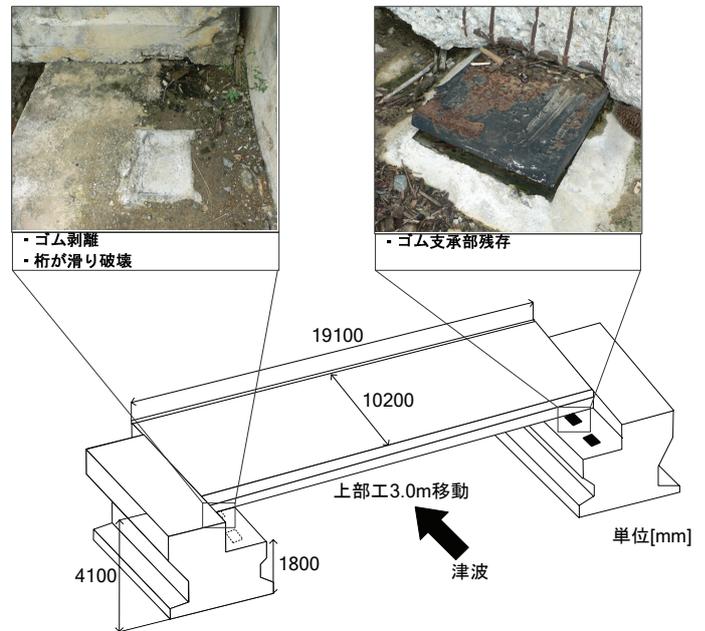


図-5 Lueng Ie 橋の損傷状況

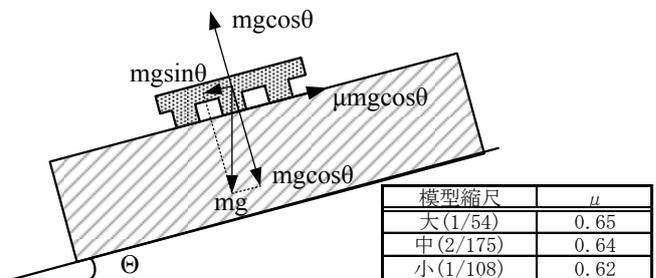


図-6 庄司らによる摩擦係数測定方法

は、ゴム支承上面(25cm×25cm)とコンクリート桁面ですべりが発生している。また、コンクリート橋台面にはひび割れが発生していないことから、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³⁾らは、図-6に示す方法により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面の静止摩擦係数を求めている。また、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って、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。

図-7はRabbat⁴⁾らによって実施された、圧縮応力をパラメータとしたコンクリート面と鋼板面のすべり摩擦係数の計測図である。図-8に示す圧縮応力(0.14、0.41、0.69MPa)および界面状態(湿潤、乾燥)状態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、すべり摩擦係数の差異は小さく0.6程度と見なし、良いと考えられる。

3. 3 桁抵抗力・津波作用力分布

図-9に構造形式別重量分布を示す。RC桁は平均桁長が12mと短く、重量も858kNと小さい。鋼I桁が平均桁長20m、重量1274kNであるのに対して、当該地点のPC桁は鋼桁と比較しても、桁長28m、重量2005kNと相対的に大きいことが分かる。

一方、鋼トラス桁は桁長が44m、重量2571kNとPC桁と比較しても大きな値となっている。

図-10に構造形式別津波作用力分布を示す。津波作用力は、被圧面積(桁高×桁長)に比例することから桁高、桁長に比例し、RC桁224kN、鋼I桁467kN、PC桁642kN、鋼トラス桁955kNと桁

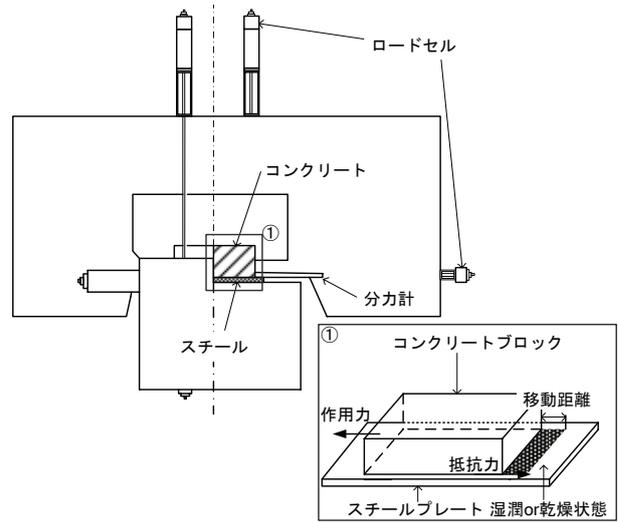


図-7 Rabbat らによる摩擦係数測定方法

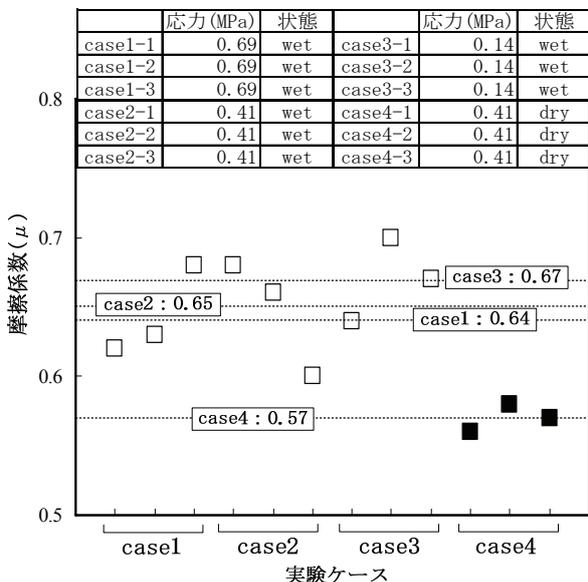


図-8 Rabbat らの実験結果

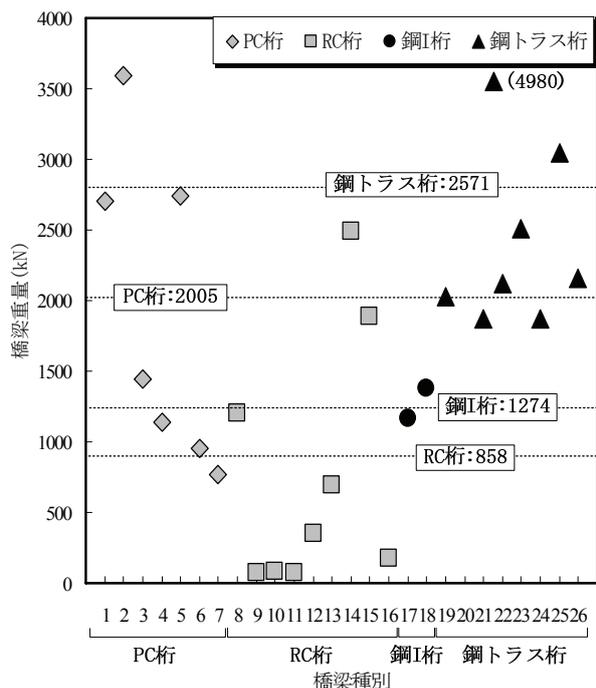


図-9 構造式別重量分布

長に比例した値となっている。特に、No. 20の鋼トラス桁では桁長が62mであることから、重量4980kN、津波作用力1972kNと極端に大きな値となっている。

4. 評価結果

4. 1 桁抵抗力津波作用力比

図-11に桁抵抗力津波作用力比 β の分布を示す。後述する2つのPC桁を除き、構造形式別の β の差異が小さいことが分かる。また、コンクリート系ではRC桁が2.3, PC桁が2.1(後述の2橋を除く)であるのに対し、鋼材系のI桁が1.7, 鋼トラス桁が1.6と3割程度の差異を生じている。

これについて代表的PC桁と鋼トラス桁を用いて説明する。図-12に示すように、PC桁は幅員7.9m、被圧面積34.3m²、高さ1.5m、津波作用力674kN、桁抵抗力1621kN、 β 値2.4となっている。これに対して鋼トラス桁は幅員7.0m、被圧面積48.5m²、高さ6.0m、津波作用力788kN、桁抵抗力1214kN、 β 値1.5となっている。以上のように鋼トラスでは津波作用力が1.16倍、桁抵抗力が0.75倍となり、 β 値としては35%の差異が発生する。

4. 2 損傷ランク比較

図-13に構造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、損傷ランクのAで β の平均値が1.8, Bで2.1, Cで2.4とそれぞれ15%程度の差異がある。また、損傷ランクがAとCでは30%程度の差異が発生している。

桁抵抗力津波作用力比 β の15%の違いについて考察する。(3)式を用いて現地の津波高さによる流速の相違に着目すると、僅か10%の流速の差異で β 値が20%増減する。そのため、 β の値にはコンクリート橋や鋼橋など材種の相違による影響とともに、流速の影響が大きいと言える。ついで同一PC桁形式でありながら、 β が極端に小さくなったNo. 3, 4橋梁について考察する。図-14に断面形状と損傷形状について示す。図に示すように長さ20mの歩道

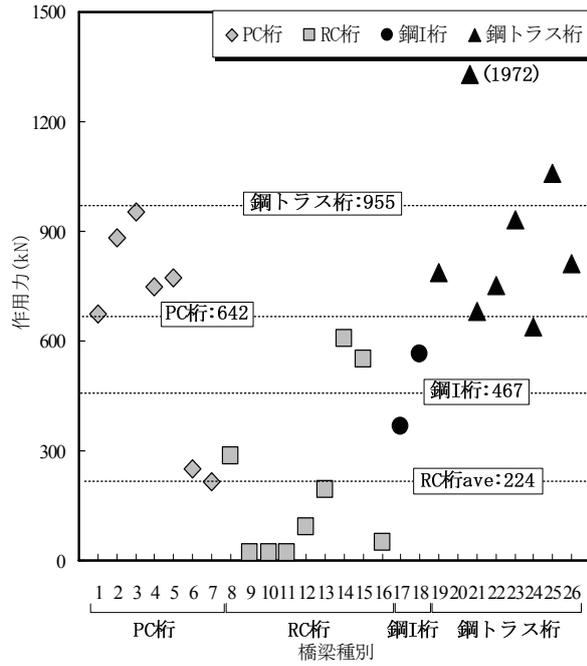


図-10 構造式別津波作用力分布

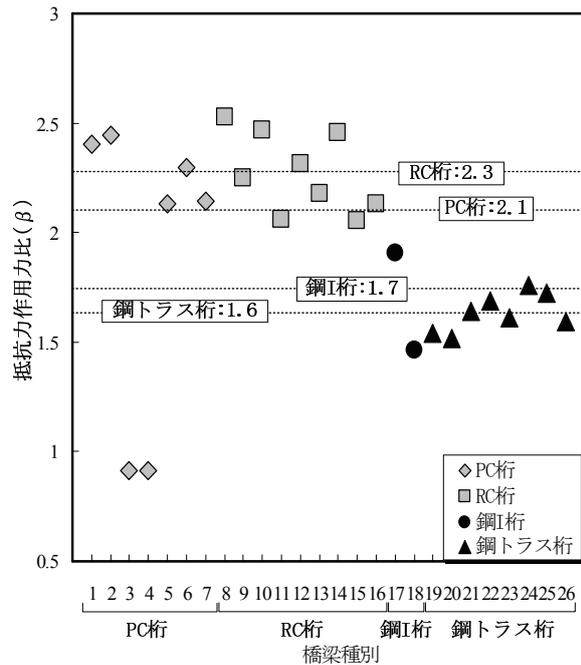


図-11 桁抵抗力津波作用力比分布

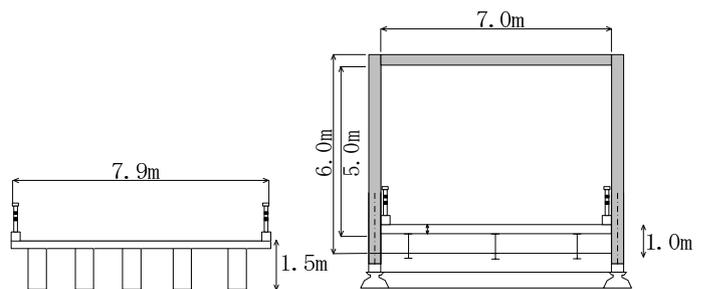


図-12 PC桁, 鋼トラス桁の代表断面

橋で幅員が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桁高は1.7mと通常のPC桁(1.6m)より大きくなっている。このため、 β が通常の桁に比べて0.9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。

5. まとめ

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により得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 調査対象26橋のうち、損傷ランクAは上部工13橋，下部工4橋，土工部7橋発生しており，上部工において最も大きい被害が生じている。
- 2) 構造緒元より算出した桁抵抗力津波作用力比 (β 値) と桁損傷ランクには相関があり，損傷ランクAとCでは β 値に30%程度の差異が認められた。
- 3) 分析結果によると，同一PC桁形式でも，幅員が小さい歩道橋(2.8m)では β 値が他の橋梁の1/3程度となり，桁移動が発生しやすい橋梁形状も存在することが明らかとなった。

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，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) 庄司学ら：単径間橋桁に作用する碎波津波

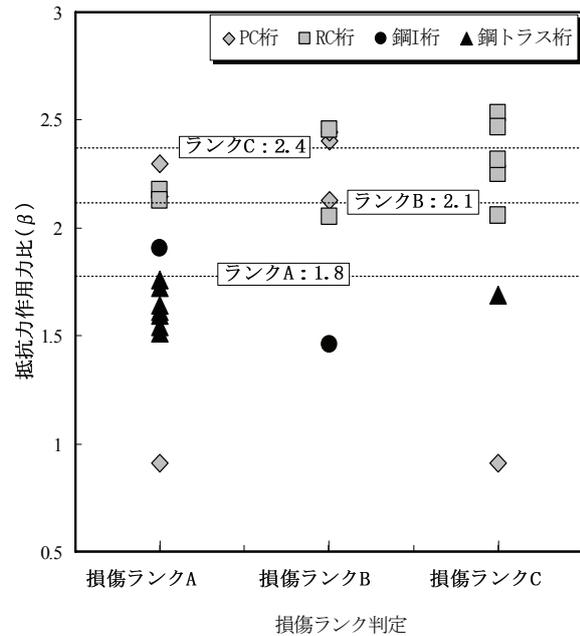


図-13 損傷ランク判定別の β 値分布

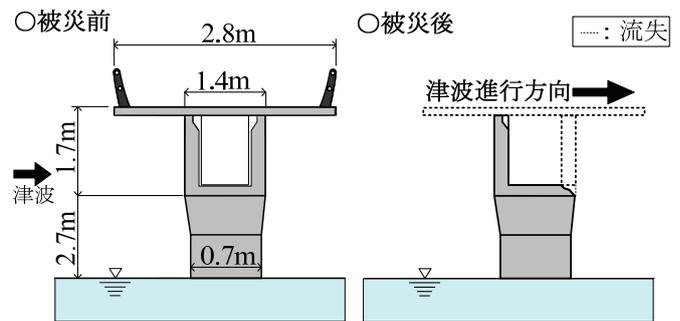


図-14 Cut 川橋断面図

- 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
- 4) 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.