

波高と桁高をパラメータとした津波橋梁被害の 個別要素法解析

二井伸一¹・幸左賢二²・宮原健太³・庄司学⁴

¹正会員 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）

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学生会員 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）

⁴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）

1. はじめに

2004年12月26日にスマトラ島を襲った巨大津波により橋梁上部工が流出する等、道路は大規模な被害を受けた。我が国においても、東海・東南海地震による津波により道路被害が懸念されている。しかし、橋梁は従来の津波による損傷が比較的軽微であったこともあり、その検討は極めて限られている。

検討方法としては、模型実験、数値シミュレーション解析が考えられるが、このうち数値シミュレーション解析は、津波が橋梁に作用する状況を逐次検証ができるといった優位点がある。

そこで筆者らは個別要素法を用い、津波による橋梁上部構造の移動現象に関する検討を行ってきた¹⁾。検討結果によれば、上部工重量と摩擦係数の積で算定される抵抗力以上の作用力が、上部工に作用した場合に移動現象が生じること、移動距離と移動速度は簡易式で評価が可能であることを確認している。また、津波流速と摩擦係数をパラメータとする解析も行っており、津波流速に伴い上部工の移動速度が増加すること、摩擦係数に伴い上部工の抵抗力が大きい場合、上部工の隅角部で水粒子の動きが止まり上部工の移動も止まるという現象を確認している。

本文では、解析結果が簡易式で評価可能であることを踏まえ、桁の位置（以降、桁下高と呼ぶ。）と上部工形式をパラメータとして、桁の移動加速度より簡易的に波力を算定し移動に起因する波力について検証を行った。

2. 解析概要

(1) 解析諸元

本研究で使用する解析プログラムは、個別要素法による流体運動シミュレーション解析が可能な粒状体挙動解析コード（Particle Flow Code²⁾）である。使用する要素は円（球体）であり、要素間の減衰係数、ばねの構成則の入力により、水粒子や構造物の特性を与える。水のモデル化は、水柱の崩壊問題に関する既往の実験結果³⁾を用いて同定した。また、橋梁は剛体要素とした。

(2) 解析パラメータ

実施した解析ケースを表-1に示す。Case1は標準ケースと位置付けした解析ケースであり、桁下高5mと津波条件は著者ら⁴⁾による調査報告を参考に、スマトラ島に実在する橋梁をモデルとしている。図-1に示すように津波波高は12mで、津波流速は波高から簡易的に求める松富式⁵⁾を用いて9.6m/sと設定した。また、標準ケースにおける橋梁モデルは、我が国における標準的な単純桁橋を対象とし、実在する橋長21mの単径間鋼I桁橋（4主桁、RC床版）とした。

次に解析パラメータについて記す。波高と橋梁の位置（桁下高）関係が作用波力に影響すると予想されることから、標準ケースの桁下高5mを基準に、Case2は0.5倍の桁下高となる2.5m、Case3は水底近傍に設定した1m、さらに、Case4は2倍の桁下高となる10mの3ケースを設定した。また、構造形式を変化させたCase5を設定した。設定根拠や具体的な断面形状等は結果とともに後述する。

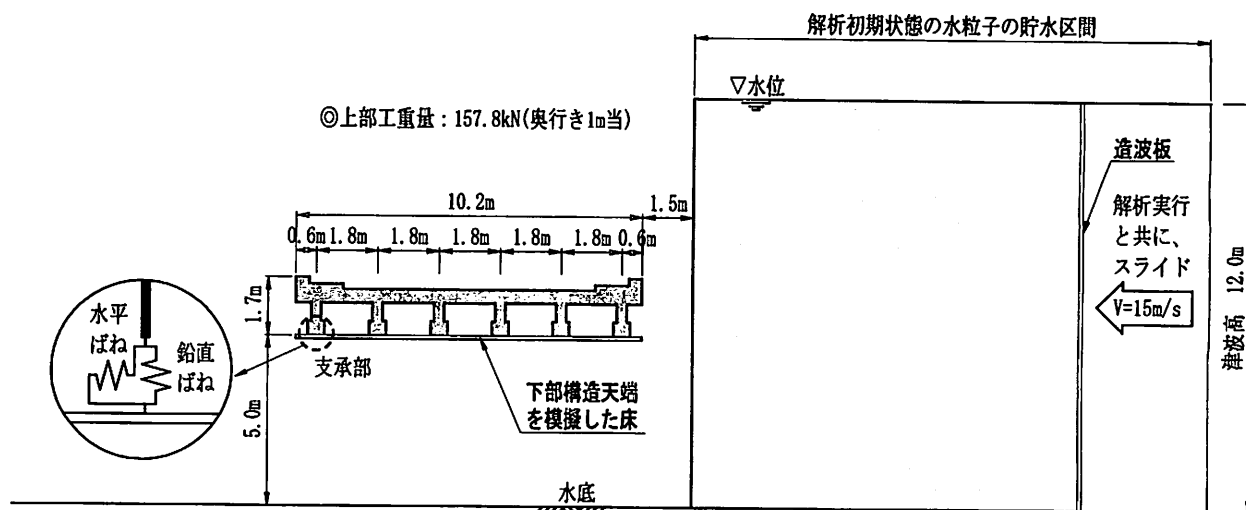


図-1 解析モデル（標準ケース）

3. Case-1 の解析結果

(1) 上部工の移動状況

図-2 に時系列変化状況図を示す。水粒子は、解析開始 0 秒から継続的に初期速度 9.6m/s が与えられ、図中右から左へ移動し、0.2 秒時には床版部分に到達する。解析モデル上、解析開始の水粒子群の位置と G 4 桁との離隔は 2.7m である。水粒子が、等速で移動すると仮定すると、到達時間 T は 0.281s ($=2.7 \div 9.6$) と推定され、解析上の時間軸は、想定と一致することが分かる。ただし、実際には、水粒子は移動中に重量の影響を受けており、斜め下方向へ落ちるような移動特性を持つ。その結果、0.5 秒時の状況では、上部工上面は水粒子に覆われるものの、上部工下面には揚力に相当するような水粒子の衝突が見られない。

一方、上部工側面には波力に相当するような水粒子の衝突が確認できる。この結果、G 1 桁（図中左端の桁）は、下部工を模擬した床から逸脱し、以後、その水粒子の衝突作用が継続するため、2.0 秒後には上部工が完全に逸脱し、津波による橋梁流出現象が再現されている。

上部工の移動現象については、式（1）～（2）により評価する。

$$F - \mu mg = m\alpha \quad (1)$$

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

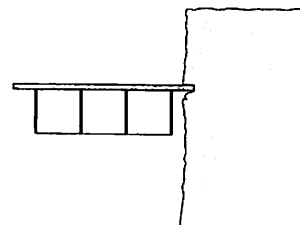
ここに、

F : 津波作用力 μ : 摩擦係数 m : 構造物の質量
 g : 重力加速度 α : 加速度

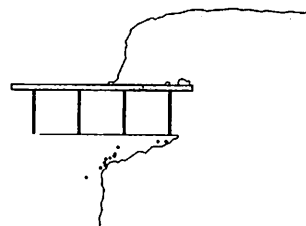
表-1 解析パラメータ

解析CASE	桁下	構造形式	パラメータ
Case1	5m	R C 鈑桁	標準ケース
Case2	2.5m		桁下高
Case3	1.0m		桁下高
Case4	10m		桁下高
Case5	5m	R C T 桁	構造形式

◎ 0.2 秒時
 水平移動距離: 0.002m



◎ 0.5 秒時
 水平移動距離: 0.385m



◎ 2.0 秒時
 水平移動距離: 8.020m

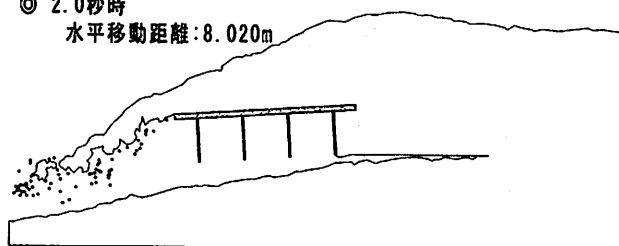


図-2 解析状況図

式（1）は、上部工の抵抗力 μmg に対し、津波による作用力 F が上回ると、加速度 α で移動する現象のつり合い式を示す。また、式（2）は、加速度

α による移動距離を示す式であり、移動距離は時間 t に対する2次関数の関係にあることを示している。これらの式を基に、解析結果を検証する。

図-3は、上部工の移動変位を時系列で示したもので、0秒～1.0秒間の上部工移動変位量を示している。水粒子が床版に衝突する0.2秒以降より、移動量が2次放物線上に増加する様子が確認できる。また、同図に0.2秒を原点とする2次関数の近似式を併記する。 α を4.5と設定すると、解析結果の曲線を近似する結果となり、0.2～1.0秒間に上部工は 4.5m/s^2 の等加速度で移動することを意味する。

(2) 上部工の移動速度

上部工の移動速度は、式(2)の時間積分により、式(3)で表すことができる。

$$v = \alpha t \quad (3)$$

0.2～1.0秒間の移動加速度は 4.5m/s^2 であり、移動速度は4.5を傾きとする一次関数の関係にあると考えられる。図-4は図-3を各時間間隔で割り、縦軸を移動速度としてプロットした図である。また、同図に、0を原点とし傾きを4.5とする近似式も併記する。図-4によれば、0.4秒以降は、4.5を傾きとする近似式と移動速度 v の相関性が良いことが確認できる。しかし、移動現象が始まる0.2秒から0.4秒間では乖離が大きい。そこで、0.1秒刻みの移動加速度を算定する。同図中に、0.2～0.3秒間、0.3～0.4秒間、0.4秒～の3区間に分け、各区間の移動加速度に相当する傾きを記す。

図-5は上記3区間の状況の模式図である。各区間の状況について、同図と共に記す。0.2～0.3秒間の傾きは1.80であり、他に比べ移動加速度が遅いことが分かる。これは、0.2秒時にはRC床版の張り出し部のみに水粒子が接触し、その後、0.3秒時に桁に接触するまでの時間差が影響したためと考えられる。次に、0.3～0.4秒間の傾きは13.3であり、移動速度は急激に増加する。この時点で、津波が作用する被圧面は上部工側面全体となり、半固定である橋梁へ衝撃的な波力が作用したためと考えられる。その後、0.4秒以降の傾きは4.58で、0.3～0.4秒間の傾き13.3に比べ半分以下となり、等速で移動する状況が確認できる。0～1.0秒間の移動速度は0.4秒以降の等速移動状態の傾きを表すと考えられる。

移動変位及び速度は、移動加速度 α による運動式で評価することが可能であり、時間刻みを短くすることで、その精度は高まるものと判断する。

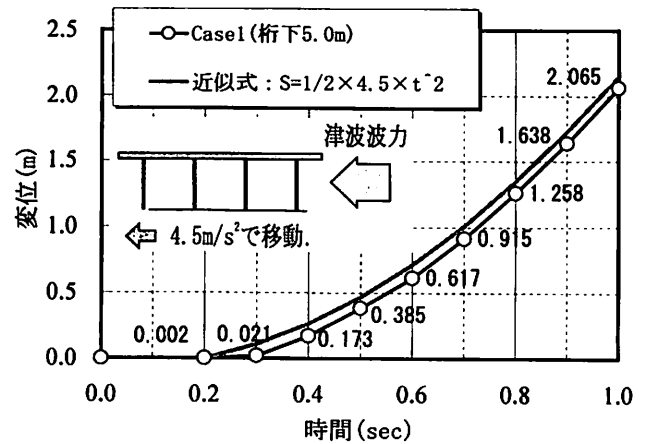


図-3 水平変位図 (0秒～1秒)

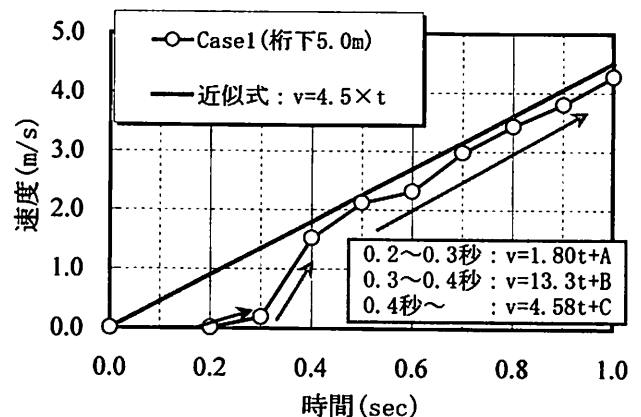


図-4 水平移動速度図 (0秒～1秒)

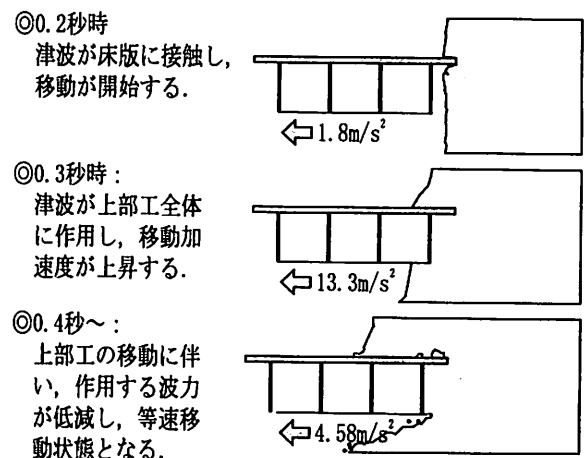


図-5 各時刻における移動加速度

(3) 移動時の波力評価

上記で算定した α を用いて、各区間の波力を算定する。算定式は、式(1)を式(4)のように変換したものを用いる。なお、図中の波力は、奥行き1m当りの数値とする。

$$F = m \alpha + \mu mg \quad (4)$$

式中の各数値は、上部工質量 m を 9216kg/m、摩擦係数 μ を 0.2 とする。また、0.2～0.3 秒間の α は 1.80、0.3～0.4 秒間の α は 13.3、0.4 秒以降の α は 4.58 である。なお、この算定による波力値は、各時間間隔の平均値を意味するため、0.2～0.3 秒間であれば 0.25 秒時の波力となる。算定した波力結果を図-6 に示す。移動加速度 α の増減に伴い、波力が増減する様子が確認でき、0.2～0.3 秒間の波力は 35.4kN/m、0.3～0.4 秒間の波力は 143.5kN/m、0.4 秒以降の波力は 61.5kN/m である。

0.3 秒～0.4 秒間の波力は移動加速度 α に伴い急激に増加し、その後、波力は減少して最大値の半分以下となる。前者は津波による瞬間的な衝突力に相当し、後者は上部工を等速で移動させる持続的な作用力に相当する。また、波力の減少は上部工の移動による減衰が生じるためであり、上部工の移動を防止するには、この瞬間的な作用力に耐え得る構造にしておくことが望ましいと考える。具体的には、支承部のアンカーや変位制限構造等が、この瞬間的な作用力に耐えることができれば、上部工の移動現象は発生しない可能性がある。

4. パラメータ解析結果

(1) 桁下高の差による解析結果

Case1～Case4 の解析結果について整理する。解析パラメータは桁下高であり、各解析ケースの模式図を図-7 に示す。図に示す通り、本解析の津波は右から左へ進行し、重力の影響で左下方向に崩れ落ちるような性状を持つ。各ケースの移動変位量にこの津波性状が影響すると考えられる。

図-8 は、各解析ケースの上部工の移動変位を時系列で示したものである。標準ケースに比べ、上部工の桁下高が低い Case2 と Case3 は移動量が大きく、桁下高が高い Case4 は移動量が小さい。この要因を式 (5) と図-9 を用いて考察する。式 (5) は流体による衝突作用力を表し、 ρ は流体密度、 C_D は抗力係数である。作用力の大小は衝突する物体の速度 V と作用面積 A が影響する。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D V^2 A \quad (5)$$

また、図-9 は各ケースの 0.1 秒時の状況で、解析結果より、水粒子の移動方向と速度を模式的に示したもので、水面に近い水粒子は左斜め下方向へ 9.6m/s で移動し、水底に近い水粒子は水平方向に 11.6m/s で移動する。本解析の津波の特徴は、水底

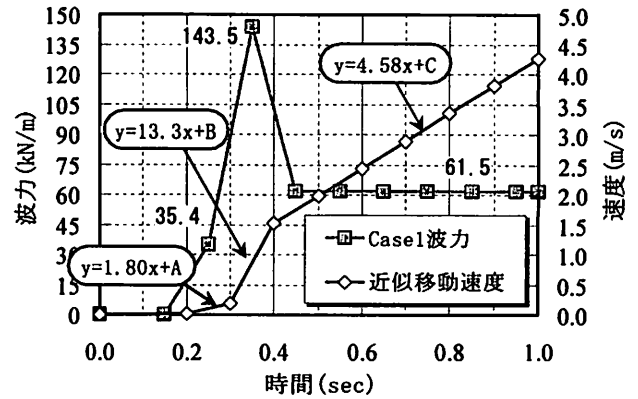


図-6 移動状態における波力の推移

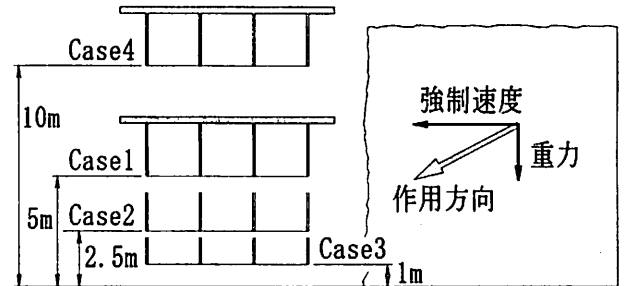


図-7 桁下高パラメータ模式図

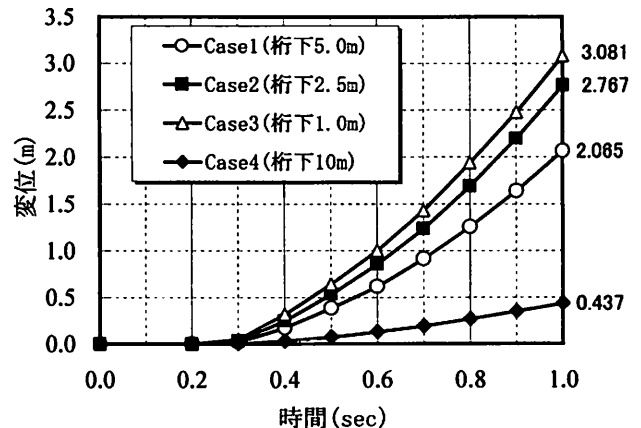
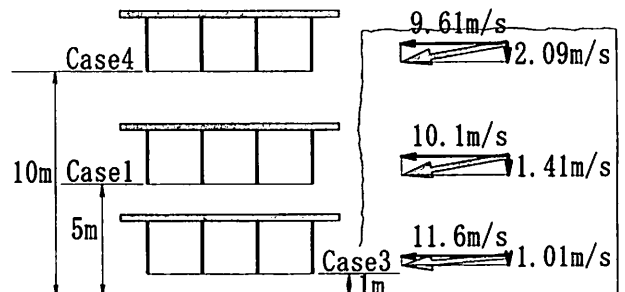


図-8 水平変位図 (桁下高パラメータ)



津波条件：波高12m、初期流速9.6m/s

図-9 水粒子の移動速度成分

に近くなると流速が増し、移動方向は左斜め下方向から水平方向へ変化すると考え、衝突速度が遅く被

圧面積の小さい Case4 は、作用力が小さく移動変位量が小さかったと考えられる。一方、Case1～Case3 は被圧面積に差は無いものの、作用する水粒子の速度に伴って波力が増加し、移動量に差が生じたと考えられる。

図-10 は、図-8 より移動速度を算定し、時系列に示したものである。また、0.3～0.4 秒間に着目し、図-4 と同様に移動加速度に該当する近似 1 次曲線の傾きを併記する。移動加速度の値の傾向についても水平変位量の傾向と同じであり、桁下高が低くなるにつれ移動加速度が増加する。

ここで、標準ケースで検証した方法と同様に、式(4)を用いて波力を算定する。結果を図-11 に示す。0.3～0.4 秒間の各ケースの最大波力は、67.0～221.6kN/m と桁下高の差による影響が大きいことが分かる。その後、0.5 秒以降は 47.7～73.3kN/m と最大波力に比べ、差が無いことが分かる。

(2) 上部工形式の違いによる解析結果

単純橋に採用されるコンクリート橋は、鋼橋に比べて桁高が低く、被圧面積の減少に伴う作用力の減少と、重量が重いことによる抵抗力の増加といった特性が考えられ、移動し難い構造形式と想像される。そこで、Case1 の鋼 I 桁から、Case5 で RCT 桁に断面形状を変更し検証を行う。Case5 の上部工断面図を図-12 に示す。Case5 の桁下高は標準ケースと同様に 5m で、初期の津波位置と床版張り出し部との離隔も 1.5m である。なお、この RCT 桁橋はインドネシアに実在する橋梁で、津波により上部工が 3m 水平移動した橋梁である。

図-13 は、Case5 の解析状況図である。Case1 に比べ、右端の桁が初期津波位置に近いので、0.2 秒時点で既に上部工側面全体が被圧面となっており、早い段階で大きな作用力が生じると予想される。

図-14 は、Case1 と Case5 の上部工移動変位を時系列で示したものである。図によれば、1.0 秒時点での Case1 の変位が 2.065m であるのに対し、Case5 は 0.966m と半分程度の変位量である。この要因は、先に述べた通り、Case5 の RCT 桁は Case1 の鋼桁に比べて、上部工重量が 1.5 倍重く、桁高が 0.6 倍低いことが考えられる。

図-15 は、図-14 より移動速度を算定したもので、移動加速度に相当する 1 次曲線の傾きは 0.2～0.3 秒間で 3.45、0.2～0.3 秒間で 4.00、0.4 秒以降で 2.03 であり、極端な差はない。また、加速度は 0.2 秒から生じており、0.3 秒時点では、Case1 よりも早い加速度で移動する。

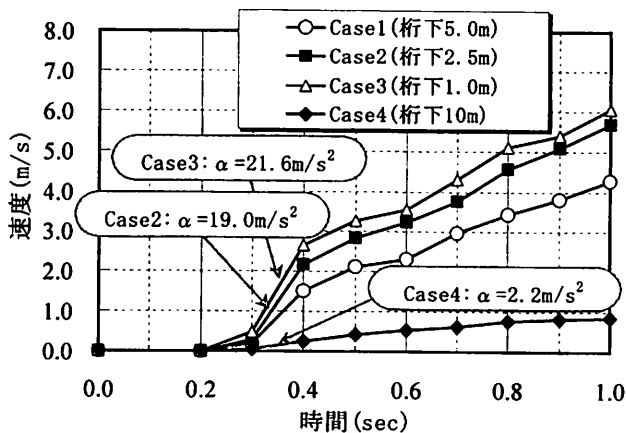


図-10 水平速度図 (桁下高パラメータ)

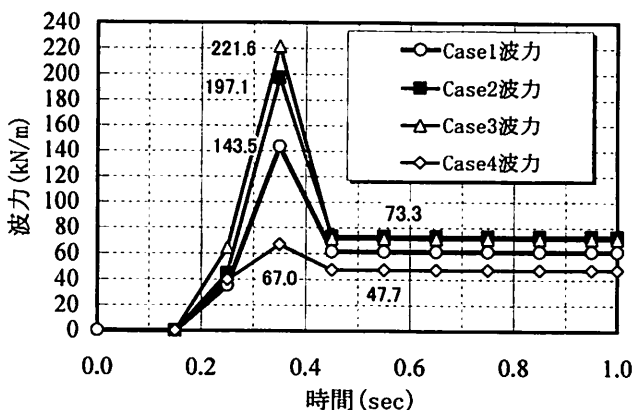
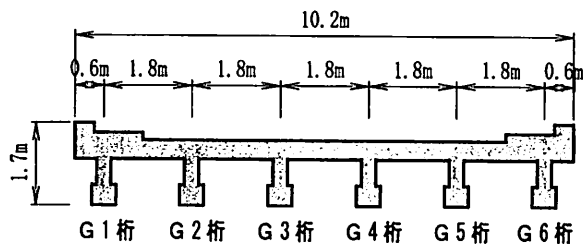


図-11 波力図 (桁下高パラメータ)



上部工重量: 157.8 kN/m

図-12 RCT 桁断面図

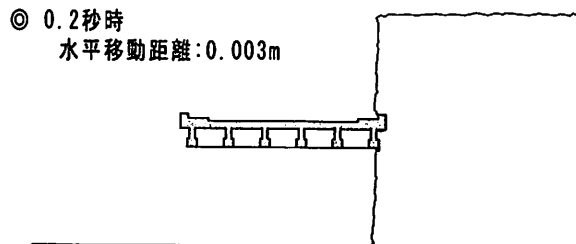
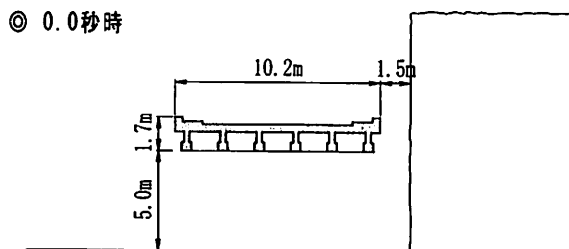


図-13 解析状況図 (Case5)

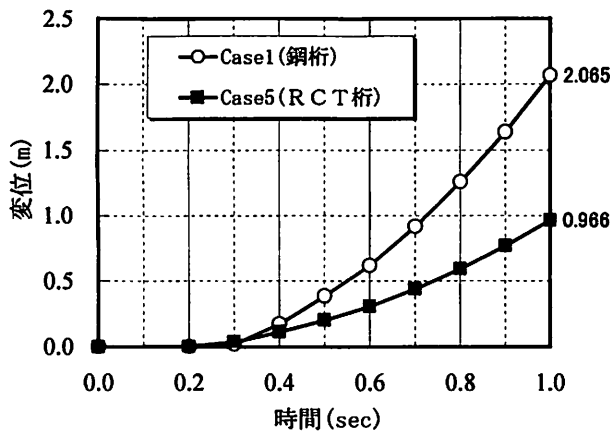


図-14 水平変位図 (上部工形式変化)

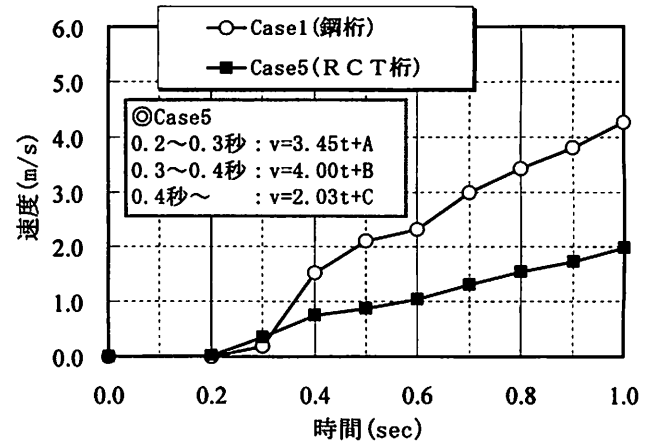


図-15 水平速度図 (上部工形式変化)

次に式(4)を用いて波力を算定する。Case5の上部工質量 m は15780kg/mであり、結果を図-16に示す。同図によれば、0.2~0.3秒間で87.1kN/m、0.3~0.4秒間で96.0kN/mと0.2秒を要して大きな波力が作用したことが分かる。この要因は、Case5の桁形状で被圧側の張り出し床版長が短く、Case1の鋼桁に比べて、短時間で桁部分に津波が作用したことが考えられる。また、Case1に比べ、等速移動するまでに時間を要するが、これは桁重量が重く抵抗力が大きいためである。なお、0.2~0.4秒間にCase1に作用する波力の合計値は、178.9kN/mであり、Case5は183.1kN/mと両値はほぼ等しく、上部工形状の差に関らず作用力は力積で評価が可能であると考えられる。また、0.5秒以降の等速移動状態では、桁下高と作用津波の条件が同じ場合、上部工形状が違って、作用波力は同等であることが確認できる。

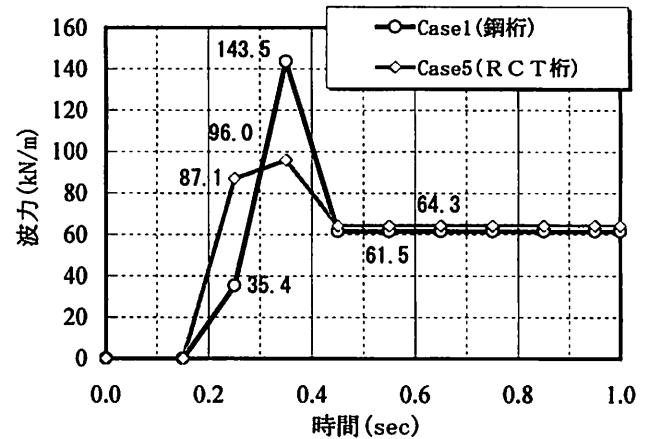


図-16 波力図 (上部工形式変化)

5. まとめ

本検証より得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 対象橋梁を鋼I桁橋とし、桁下高が5mの状態では波高12mの津波を作用させた場合、上部工の移動変位及び速度は、移動加速度 a による運動式で評価することが可能である。
- 2) 同解析結果より、0.1秒刻みで移動加速度を算定し、運動式より波力を算定すると、0.3秒~0.4秒間で瞬間的に上昇し、0.4秒以降で半分以下に減少する。上部工移動対策としては、この瞬間的な波力に対して検証することが有効である。
- 3) 本解析の津波性状は、水面より水底の流速が速いといった特性を有している。このような津波が橋梁に作用し、桁下高が波高に対して低い位置にあると、流速の増加に伴う作用波力は大きくなり、移動変位量が増加する。

- 4) 上部工重量が重い場合、抵抗力が増すため、津波が衝突してから等速移動状態に至るまでに、ある程度の時間を要する。また、瞬間的な作用力は小さいが、津波衝突近傍時間での力積量は上部工重量の軽いものと同等である。

参考文献

- 1) 二井伸一, 幸左賢二, 運上茂樹, 庄司学: 津波による橋梁被害の解析的検討, 第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.81-88, 2008.1
- 2) Cundall, P.A. and O.D.L. Strack: A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, pp.47-65, Vol.29(1) 1979
- 3) Martin, J.C. and Moyce, W.J.: An Experimental Study of the Collapse of Liquid Columns on a Rigid Horizontal Plane, Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A, pp.312-324, Vol.244, 1952
- 4) 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
- 5) 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