

津波による被災橋梁に対する水路実験の再現解析

杉本 健¹・薄井 稔弘²・運上 茂樹³

¹正会員 工修 本州四国連絡高速道路(株) (〒651-0088 神戸市中央区小野柄通4-1-22)

²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)

³正会員 工博 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)

1. はじめに

平成16年12月26日のスマトラ島沖地震に伴って発生したインド洋津波により、橋梁上部構造が完全に流失する等橋梁に甚大な被害が多数発生した。これら津波による橋梁への影響に関しては十分に解明されておらず、被災事例についての研究が重要であると考えられる。このため著者らは、津波による橋梁の流失被災メカニズムを解明するために、実際の津波による被災橋梁を対象に橋梁模型を製作し水路実験を実施している¹⁾²⁾。

本稿では、この水路実験を対象に実施した、水路実験の再現を図るためのシミュレーション解析について報告する。

2. 津波の水路実験

本研究にさきだって、RC(鉄筋コンクリート)橋模型1体を対象に水路実験を実施した。橋梁模型は実際にインド洋津波で被災したスマトラ島の橋梁を参考に製作し、その寸法は図-1に示すとおりである。模型縮尺は水路の寸法及び水路における津波の造波高さを考慮して、1/50とした。

実験で使用した二次元水路は、図-2に示すとおりであり、水路長は20m、幅1m、高さ0.8mである。津波は湛水したゲートを転倒させることにより発生させた。

実験時には橋梁模型上流側2.0m、4.0m地点の2箇所での波高計において時刻歴の津波高さの測定を行うとともに、橋梁の主桁前面(津波が当たる側)5箇所及び床版裏面3箇所に波圧計を設置し、橋梁に作用する波圧を計測した(図-1)。また、橋梁模型の下に分力計を設置し、橋梁模型全体に作用する抗力及び揚力を計測した。

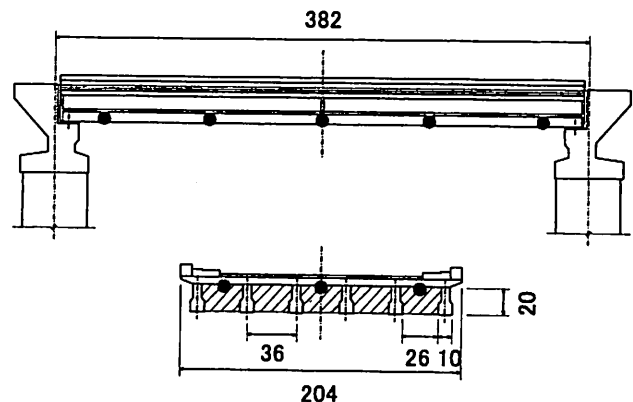


図-1 実験に用いた橋梁模型 (●: 波圧計設置位置)

水路側面図

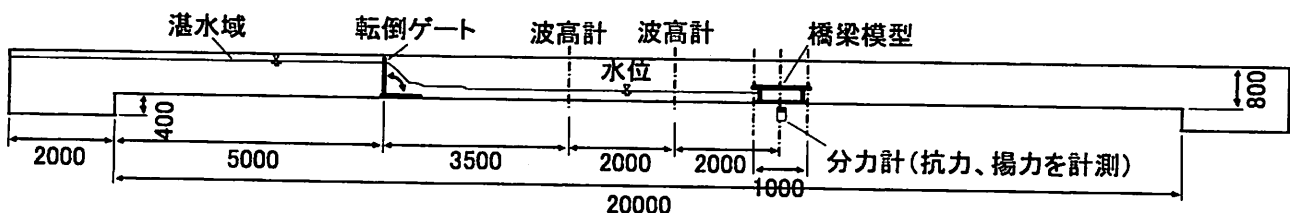


図-2 実験に用いた水路

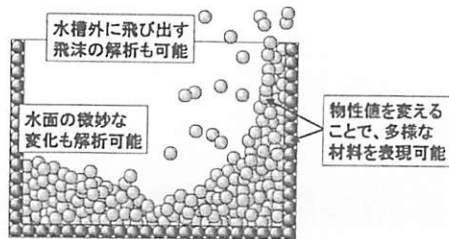


図-3 粒子法を用いた解析の特徴

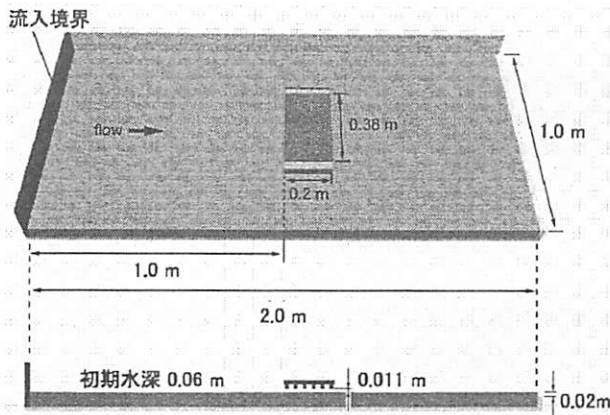


図-4 3次元モデル計算領域

3. 粒子法 (MPS法) による数値解析

(1) 粒子法 (MPS法) の概要

激しい水の流れなどを解析する際、従来のシミュレーション手法ではメッシュ (格子) を用いて計算するため、メッシュの生成が煩雑で時間を要する、計算結果がメッシュ形状に沿うため飛沫や水面の微妙な変化が解析できないなどの問題点があった。これに対し、水の流れを粒子の動きで模擬して計算する粒子法では、水面の微妙な変化や飛沫の発生、水塊の分裂や合体などを精度良く安定に解析できる利点があるとされている (図-3)。

このため、本研究では水路実験の再現を図るためのシミュレーション解析の手法として粒子法 (MPS法: Moving Particles Semi-implicit Method)^{3) 4)}を用いた。

(2) 解析モデルの作成

解析モデルは粒子によって作成するが、水路実験と同じ全長の水路を3次元モデルで作成すると、現状の計算機的能力を超過する。このため、図-4に示すように橋梁周辺部のみを3次元モデルとし、上流部は奥行き方向に流速分布が一様であると仮定した鉛直2次元モデルとした。

また、各要素を構成する粒子径は均一で0.005mとし、橋梁については固定としたため水粒子について

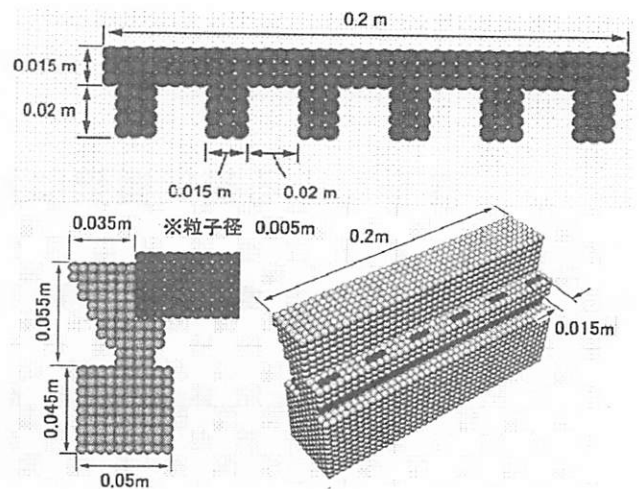


図-5 橋梁モデル (上: 橋梁断面 下: 橋台)

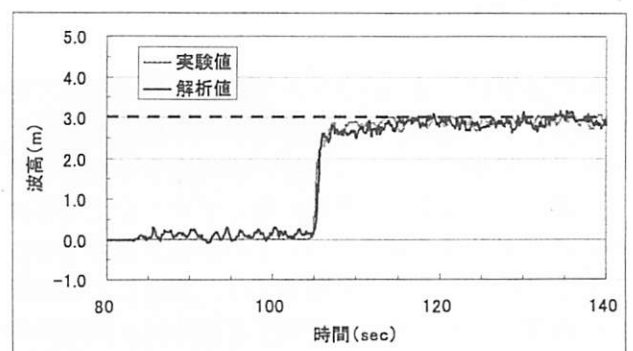


図-6 波高の時刻歴 (橋梁から100m上流地点)

のみ標準的な物性値 (密度: 1000kg/m^3 、粘性係数: $0.001\text{Pa}\cdot\text{s}$) を与えて解析を行った。図-5に作成した橋梁モデルを示す。

4. 解析結果と考察

(1) 水路上流側における2次元解析

計算領域は水路実験と同様とし、橋梁上流側2.0mと4.0mの地点で波高計測を行うとともに、3次元計算領域との接合部である橋梁上流側端部から1.0mの地点で、底面から鉛直方向に0.005m間隔で流速を計測した。

図-6に橋梁上流側2.0m地点での波高を時刻歴で示す。横軸の時間及び縦軸の波高は、実物換算値により表記している。実験値と解析値の絶対値及びその推移は概ね良好に対応しており、水路実験に対する本解析の再現性は十分に高いと考えられる。

(2) 橋梁周辺における3次元解析

a) 津波の挙動

3次元計算の流入境界では、2次元計算で得られ

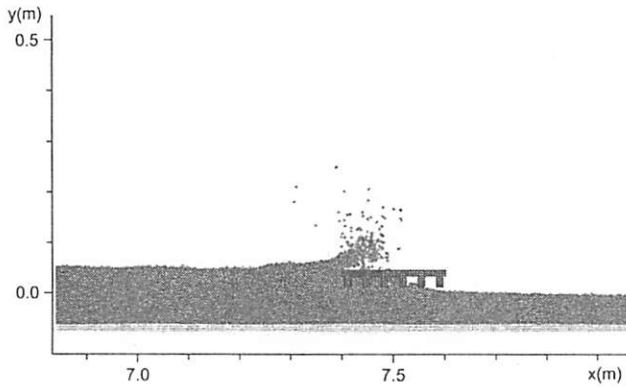


図-7 解析結果の瞬間像 (t=117.02 s)

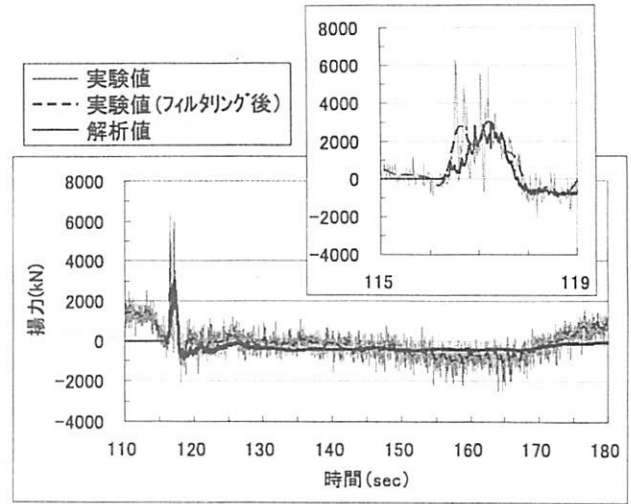


図-9 床版裏面に作用する波力 (揚力)

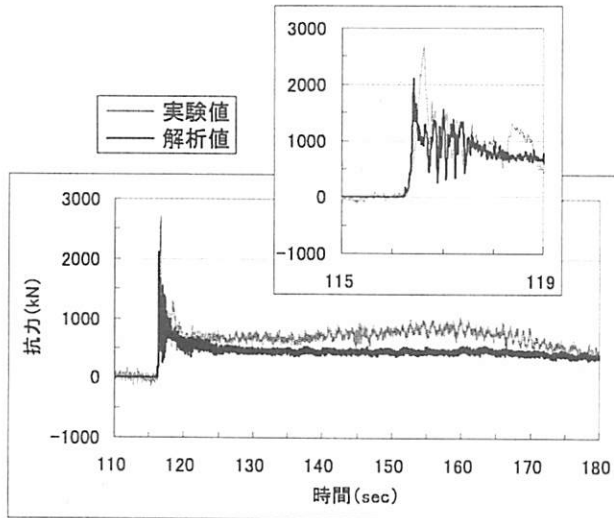


図-8 橋桁及び地覆に作用する波力 (抵抗力)

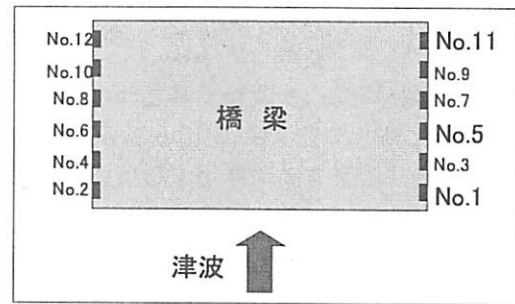


図-10 支承番号

た流速分布を奥行き方向に一様に入力値として与えて解析した。

図-7に解析結果のうち、津波が橋梁に衝突し砕波した瞬間の像を示す。前後の挙動を見ると、津波は橋梁に衝突した後、砕波して上方に飛沫を上げ、橋梁に乗り上げる。また、床版裏面においても主桁間の空隙に水粒子が回り込んでおり、水路実験の状況をよく再現していると考えられる。

b) 橋梁に作用する抵抗力・揚力

図-8及び図-9は、水深3mで高さ3mの津波がRC橋梁に衝突した場合に橋梁上部構造に作用する水平波力(抵抗力)及び鉛直波力(揚力)を水路実験結果と併せて時刻歴で示したものである。なお、横軸の時間及び縦軸の抵抗力・揚力は、実物換算値により表記している。いずれの実験結果にも電源によるノイズが含まれているが、ここでは処理せずそのままの値を示している。

橋梁上部構造に作用する抵抗力の時刻歴を示した図-8によれば、津波衝突後すぐに最大値を記録し、

その後は下降傾向を示すが、下降し始めの約1秒間は振動が大きい。最大値は、解析値(2113kN)が実験値(2709kN)をやや下回ったが、概ね対応していると考えられる。

次に、橋梁上部構造に作用する揚力の時刻歴を示した図-9によれば、解析結果ではt=117.2sに一回最大値(3042kN)を記録した後、下降する。それ以降は津波が床版を越流し下向きの荷重が作用するため、揚力がt=117.8sで負の値に転じ、負の値のまま推移する。一方、実験の計測値はノイズが大きく乗るため、30Hzでフィルターをかけて高周波数成分を除去するとt=116.6s(2766kN)とt=117.2s(3021kN)にそれぞれピークが現れた。この理由は不明であるが、値の大きさ及び最大値計測後の値の推移については解析値と良好に対応した。

以上のように解析結果は、実験で確認された津波衝突時に橋梁上部構造に衝撃的に作用する外力と衝突以降継続的に作用する定常的な外力の双方が概ね再現されていると考えられる。

c) 支承部に作用する反力

橋梁模型の支承は計12箇所にした。図-10に支承番号を示す。

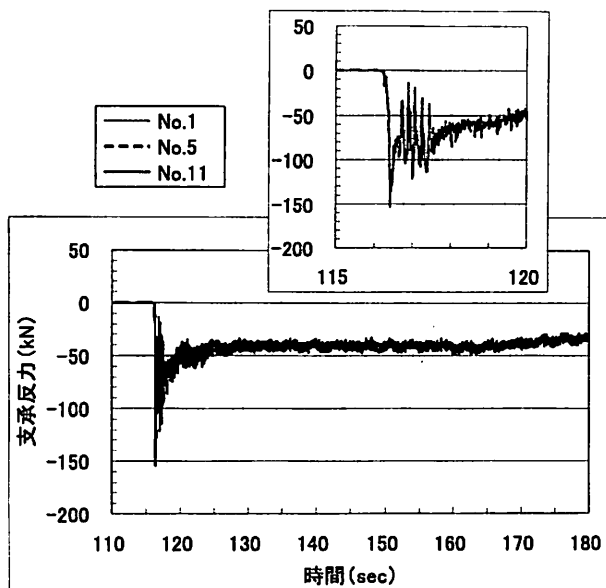


図-11 支承部に作用する反力（流下方向）

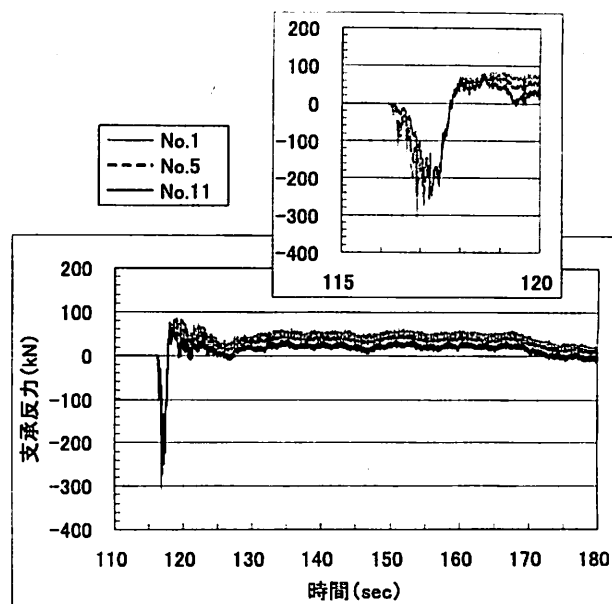


図-12 支承部に作用する反力（鉛直方向）

図-11及び図-12は、水深3mで高さ3mの津波がRC橋梁に衝突した場合に各支承部（No.1, 5, 11）において流下方向及び鉛直方向に作用する反力を時刻歴で示したものである。

流下方向の支承反力の時刻歴を示した図-11によると、各支承部の反力は全箇所においてほぼ同じ値が得られている。これは、図示した以外の支承部においても同様である。また、時刻歴としては橋梁上部工に作用する抗力と同様の傾向を示しており、津波衝突時に衝撃的な反力が作用した後、一定時間定常的な反力が作用している。

一方、鉛直方向の支承反力の時刻歴を示した図-12によると、津波の衝突時から $t=117.0s$ までは、下流側と上流側の支承部において反力の値に差が生じ、上流側ほど反力が大きい。その後、 $t=117.3s$ で全箇所ではほぼ等しい値となる。この時刻は、橋梁に乗り上げた水塊が床版に着地した時刻に相当する。 $T=117.3s\sim 117.9s$ では、ほぼ等分布のまま全体的に反力が低下し、正の値（圧縮に対する反力）に転じる。ただし、上流側ほど大きな値をとるようになる。

5. まとめ

インド洋津波により被災した橋梁を対象にした模型水路実験を、シミュレーション解析により再現を図った。本研究により、解析手法として粒子法（MPS法）を用いることで、水の床版裏面への回り

込みや飛沫等の再現ができ、水路実験結果を定性的・定量的に再現可能であることを示した。

今後は、これらの解析結果を踏まえ、津波による橋梁被害を軽減するための対応策の検討を実施したいと考えている。

謝辞：本研究は、(独)日本学術振興会より科学研究費補助金(18206050)の助成を受けて実施したものである。また、九州工業大学幸左賢二教授、筑波大学庄司学講師及び大日本コンサルタント田崎賢治氏からは、インド洋津波で被災した橋梁に関する資料を提供していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 杉本健, 運上茂樹：津波による橋梁の被災メカニズムに関する実験的研究, 第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 97-100, 2008.
- 2) 杉本健, 薄井稔弘, 運上茂樹：津波及び高潮の橋梁への影響に関する水路実験, 土木技術資料, Vol.50 No.11, pp. 24-29, 2008.
- 3) Koshizuka, S. and Oka, Y. : Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, Nuclear Science and Engineering, Vol.123, pp.421-434, 1996.
- 4) 塚越誠一：粒子法, 丸善, pp.144, 2005.