

津波による橋梁被害の解析的検討

二井伸一¹・幸左賢二²・運上茂樹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)

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

平成16年12月26日、スマトラ島沖地震により発生した津波によって、橋梁の上部構造が流出する等の被害事例が報告された¹⁾。また、JICA²⁾により、スマトラ島西海岸地域の対象道路全247kmのうち85%である210kmが流失又は水没といった被害に遭ったと報告された。

その報告を踏まえ、著者ら³⁾は橋梁被害調査を実施した。調査対象橋梁は34橋であり、そのうちの過半数である18橋について桁の流出等の被害で使用不可能になっていることを確認した。被害にあった橋梁種別は、鋼トラス橋が12橋と多く、続いてRC桁橋が8橋、PC桁橋が6橋と橋種に関係なく広範囲に甚大な被害を受けたことが分かった。また、波高が10m前後の津波により被害にあったと推定される橋梁は、桁移動が発生するものの橋台被害は軽微であり、20mを超える津波により被害にあった橋梁は桁流出に加え橋台裏の盛土が洗掘されたことが分かり、波高が被害の程度に影響すると推察された。

一方、我が国においても今後発生が予想される東南海・南海地震等の海洋型地震からの津波被害が懸念されている。海岸部における緊急輸送路等の重要路線に架かる橋梁については、津波来襲後の安全性を確保することが重要と考えられている。しかし、津波による橋梁の被災メカニズムは十分に解明されていない。

本研究では、津波による橋梁の被災メカニズムの解明にむけ、シミュレーション解析を実施し、解析の適用性と評価方法について検証を行った。

2. 解析理論

2. 1 解析プログラムの特徴

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 Code⁴⁾以下、PFCと呼ぶ)である。

PFCで使用する基本要素形状は円であり、それらの円要素(以後、粒子と呼ぶ)を集合、接着させることで様々な形状のモデル化を行う。PFCは土粒子、砂、粉体などの粒状体の流動・混合挙動だけではなく、粒子の集合体とした様々な物質、構造体、岩盤、コンクリート等、動的な破壊を含めた固体材料の挙動も取り扱うことができ、変形から破壊、亀裂の進展、崩壊といった非連続体挙動解析、大規模な崩壊・破壊および流動シミュレーション解析が可能である。

PFCにおける粒子運動、粒子の位置及び接触力等は、運動方程式を中央差分による時間進行法によって求める陽解法であり、運動則と力・変位関係則を交互に演算して求める。また、力学計算と並行して、粒子間の新しい接触を検知し、粒子が分離した場合は接触を削除するという連続した処理を行う。

なお、PFCでは粒子間に設定する定数(構成則)が重要であり、設定値によっては要素同士が重なりあうといった現象も生じる。本解析では、別途検討を行い、水の特性をもつように粒子間の構成則を設定している。構成則の詳細事項及び解析モデルについては3章に記す。

2. 2 演算概要

PFCは各粒子間の接触判定を行い、接触した場合には『力(F)－変位(U)の関係； $F=kU$ 』により、接触力(衝突力)を算定し、その後『運動の法則； $F=ma$ 』に従い、対象粒子の加速度、流速、変位が算定される。演算の簡易的な流れを図-1に示す。

2. 3 粒体接触理論

(1) 接触判定

2つの粒子の接触判定について記す。粒子Aと粒子Bがt秒という時間において、図-2に示す位置関係にあるとする。ここで、各粒子の半径を $R^{[A]}$ 、 $R^{[B]}$ 各粒子の位置を $xi^{[A]}$ 、 $xi^{[B]}$ 、2粒子が重なる部分の量を U^n 、その中心位置を $xi^{[C]}$ とする。粒子Aと粒子Bの中心間距離は(1)式のように表すことができる。

$$d = |xi^{[B]} - xi^{[A]}|$$

$$= \sqrt{(xi^{[B]} - xi^{[A]})(xi^{[B]} - xi^{[A]})} \quad (1)$$

これにより U^n は(2)式の通りで、右边が負の値の場合、粒子間に接触が生じていないという判定となり、正の値の場合は接触が生じたという判定になる。

$$U^n = R^{[A]} + R^{[B]} - d \quad (2)$$

このとき、 $xi^{[C]}$ は(3)式となる。

$$xi^{[C]} = xi^{[A]} + (R^{[A]} - \frac{1}{2}U^n)ni \quad (3)$$

ここで、 ni は(4)式で表され、接触面の方向を定義する。

$$ni = \frac{xi^{[B]} - xi^{[A]}}{d} \quad (4)$$

(2) 接触時に生じる力 (contact force)

接触が生じたと判定された場合、2つの粒子間には F_i という力が発生する。 F_i は接触面方向の力(粒子同士の面圧) F_i^n と、粒子同士のズレにより生じる摩擦力 F_i^s の合力として表される。

$$F_i = F_i^n + F_i^s \quad (5)$$

F^n は粒子の定数として与える鉛直方向バネ値 K^n と粒子の重なり量 U^n により算定できる。図-3に粒子間に与える鉛直方向バネ値 K^n の模式図を示す。

$$F^n = K^n U^n \quad (6)$$

粒子同士のズレにより生じる摩擦力 F_i^s は、速度に依存する摩擦力と面圧に依存する摩擦力の比較により、その作用力の選定を行う。

まず、速度に依存する摩擦力の説明を記す。(7)

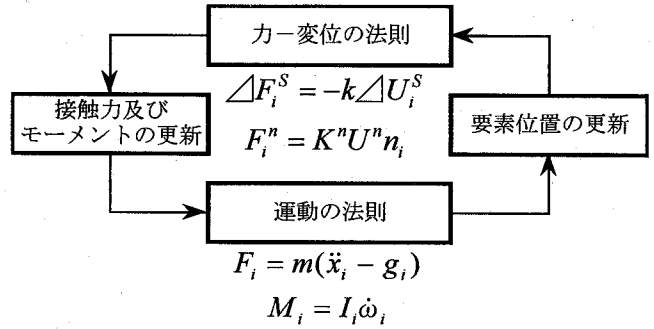


図-1 PFC解析の簡易的な流れ

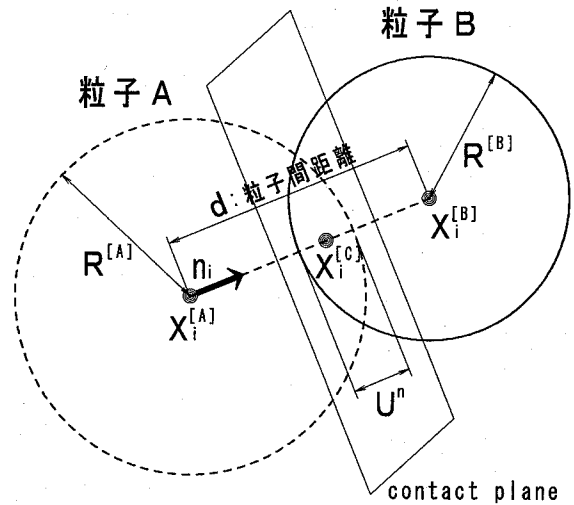


図-2 粒子の位置関係図

式 V^s は接触時に与えられる2粒子間の相対速度である。右边第1項は、接触する2粒子の方向を踏まえた相対速度であり、第2項、第3項は各粒子の中心位置と接触中心位置との変位量に依存した粒子の回転速度を意味する。

$$V^s = (\dot{x}_i^{[B]} - \dot{x}_i^{[A]})t_i$$

$$- \omega_3^{[B]}|x_k^{[C]} - x_k^{[B]}| - \omega_3^{[A]}|x_k^{[C]} - x_k^{[A]}| \quad (7)$$

この時、ある時間間隔(Δt)の変位は(8)式のように表すことができる。

$$\Delta U^s = V^s \Delta t \quad (8)$$

また、摩擦力は粒子の定数として与えるせん断方向バネ値 k^s により(9)式の通り算定できる。図-3に粒子間に与えるせん断方向バネ値 k^s の模式図を示す。

$$\Delta F^s = -k^s \Delta U^s \quad (9)$$

面圧に依存する摩擦力は、先に記した F^n （粒子同士の面圧力）と摩擦係数 μ により「 $\mu \times F^n$ 」で表すことができる。

ある時間の粒子間に生じる摩擦力は、(10)式により選定される。(10)式を満たす場合は「 $F_{old}^s + \Delta F^s$ 」が作用し、そうでない場合は面圧に依存する摩擦力（ $\mu \times F^n$ ）が作用する。

$$F_{old}^s + \Delta F^s \leq \mu F^n \quad (10)$$

ここで F_{old}^s は、既に作用している摩擦力を表す。

2. 4 運動の法則

(1) 加速度算定

2粒子の接触による力の算定を行った。この力により、加速度、速度、変位を順次求めることが可能となる。力と加速度の関係は(11)式の通りであり、これを加速度で表現すると(12)式となる。(12)式より接触時の加速度算定が可能となる。

$$F_i = m(\ddot{x}_i - g_i) \quad (11)$$

$$\ddot{x}_i = \frac{F}{m} + g_i \quad (12)$$

ここで m は粒子質量であり、 g_i は重力加速度または既に作用している加速度である。

(2) 「 $t + \Delta t/2$ 」秒時の速度算定

次に、ある時間 t 秒の加速度と、その前後の時間ステップ（ $t - \Delta t/2$ ）、（ $t + \Delta t/2$ ）秒時の速度と加速度の関係式を(13)式に示す。

$$\ddot{x}_i^{(t)} = \frac{1}{\Delta t} (\dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} - \dot{x}_i^{(t-\Delta t/2)}) \quad (13)$$

(13)式中で、左辺と右辺第2項は既知である。これを(14)式のように展開することで、次ステップの速度が算定できる。

$$\dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} = \dot{x}_i^{(t-\Delta t/2)} + \left(\frac{F_i^{(t)}}{m} + g_i \right) \Delta t \quad (14)$$

(3) 「 $t + \Delta t$ 」秒時の変位算定

さらに、次ステップの変位も同様に算定することができる。算定式を(15)式に示す。

$$x_i^{(t+\Delta t/2)} = x_i^{(t)} + \dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} \Delta t \quad (15)$$

以上より、各粒子の次ステップ（「 $t + \Delta t$ 」秒

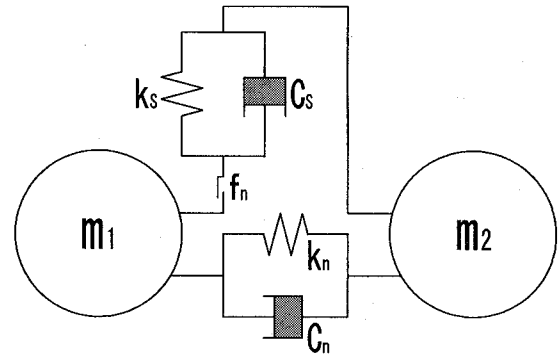
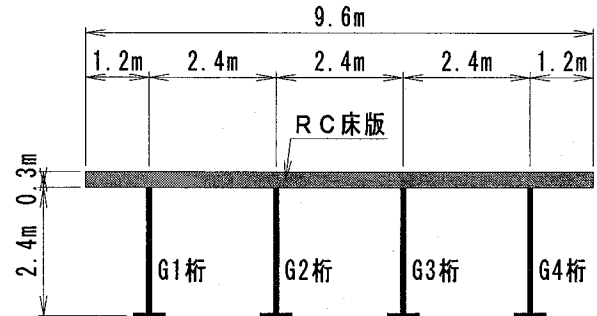


図-3 粒子間構成則模式図



主桁重量(G1~G4の1主桁当たり): 5.4kN/m

R C床版重量: 70.56kN/m

図-4 上部構造断面図

後)の変位が算定され位置が確定する。位置が確定すると、着目する粒子とその周辺粒子との接触判定が行われる。接触している場合は相互作用力（反発力）の算定と粒子間摩擦力の採用値の判定が行われ、本文に記してきた演算が繰り返され、全体の粒子の流れを解いていく。

2. 5 本解析における要素の特徴

本解析における要素の特徴を列挙する。

- ①要素は剛体であり、接触による変形は生じない。
- ②要素間に設定する定数(構成則)は、鉛直バネ値、せん断バネ値、摩擦係数、減衰係数であり、各定数は対象とする要素の特性として適正と判断される値を入力する。
- ③各要素は個別の運動方程式により、各時間の加速度、速度、位置(変位量)が陽解法により算定される。

3. 解析モデル

3. 1 対象橋梁及び津波諸元

解析対象橋梁は、遠藤・運上⁵⁾らが検討した解析モデルを参考に、図-4に示す単径間鋼鉄桁橋（4主

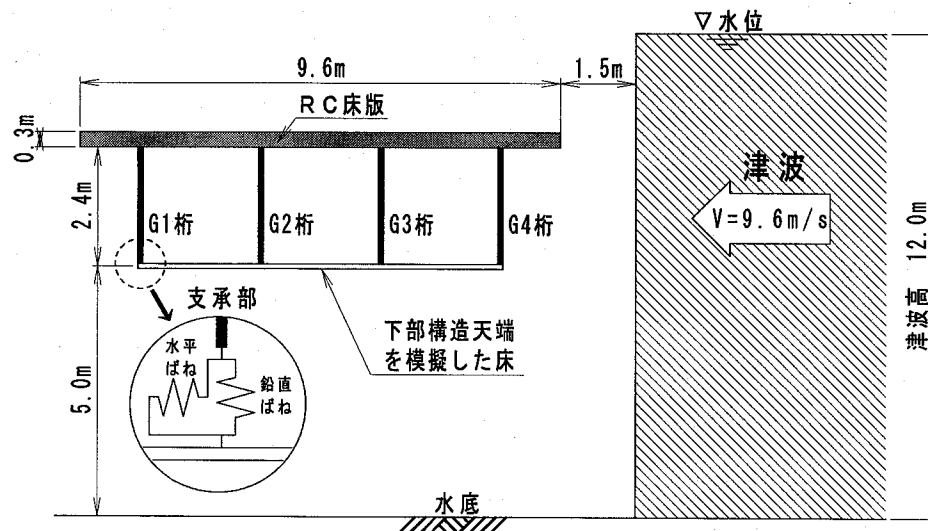


図-5 解析モデル

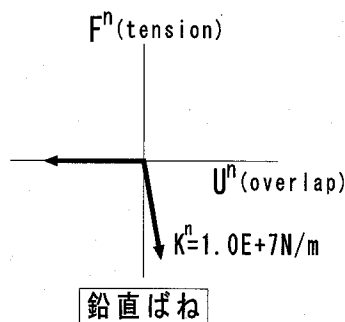


図-6 水粒子間ばねの構成則

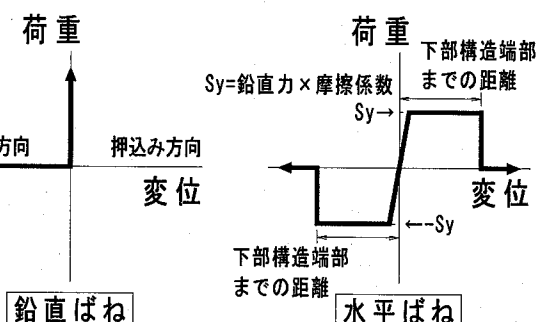
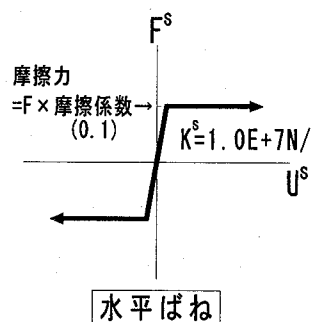


図-7 支承部の力学特性

桁, RC床版)とした。津波条件は, 著者ら³⁾による橋梁被害調査報告を参考に, 津波波高 12 m, 津波流速 9.6m/s とし, 桁下高は 5m とした。

3. 2 桁・床版及び津波の形状

図-5 に解析モデルを示す。津波による作用力は床版及び桁の被圧面積が大きく影響すると推定される。そこで, 桁高はすべて同じ高さとした。

解析モデルは 2 次元として奥行き 1m 分を考慮すると共に, 上部構造は剛体と仮定している。本解析モデルでは水粒子だけでなく, 構造物についても粒子によってモデル化を行う。本モデルでは, I 桁の上下フランジのモデル化を省略した。それに伴い, 桁の単位長さあたりの重量を補正し, 桁重量が対象構造物と同等となるように設定した。

津波現象と仮定する水粒子の流れは, 各水粒子に初速を与え, 強制的に右から左へ移動させるものとした。本水粒子の流れは, 定常流または段波性状に近いものを想定している。

3. 3 水粒子間の構成則

PFC の特徴として粒子間の構成則を適切に設定することが重要である。

本解析で取り扱う粒子特性は水であり, 水柱の崩壊問題に関する既往の実験結果⁶⁾を用いて同定し, 減衰係数, ばねの構成則を設定した。水粒子間ばねの構成則を図-6 に示す。

3. 4 支承部の力学特性について

図-7 に支承部の力学特性を示す。鉛直方向のバネ定数は, 本解析モデルにおいて桁の浮き上がりを考慮するため, 引張方向のバネ定数は 0 とした。一方, 水平ばねは摩擦を考慮しているため, 鉛直力と摩擦係数の積で荷重は一定となり上部構造の移動が始まる。本解析では G1~G4 のそれぞれの桁が移動によって支承部から外に出てしまう現象が起きる。これにより, 上部構造が支承外部へ変位すると荷重を受け持たなくなるため, 図に示すような荷重-変位関係で表すこととした。

解析に使用した各定数を表-1 に示す。また, この解析ケースを CASE-1 とする。

表-1 解析入力定数

水 粒 子	半径 r	(cm)	5
	密度 ρ	(kg/m^3)	1000
	粘着力	(N)	0
	減衰係数	(%)	0
	垂直方向バネ定数 k_n	(N/m)	1.0×10^7
	せん断方向バネ定数 k_s	(N/m)	1.0×10^7
	摩擦係数 μ	(-)	0.1
	初期水位高 (津波高)	(m)	12
	粒子に与える速度	(m/s)	9.6
構 造 物	半径 r	(cm)	10
	※下端壁との接続条件はばね接続		
	垂直方向バネ定数 k_n	(N/m)	1.0×10^7
	せん断方向バネ定数 k_s	(N/m)	1.0×10^7
	摩擦係数 μ	(-)	0.2
※構造物は剛体として設定する			

4. 解析結果

4. 1 時系列変化状況

図-8 に時系列変化状況図を示す。

解析開始 0 秒から、図中右から左へ移動するように速度を与えられた水粒子は、0.2 秒時には床版部分に到達し、その後、0.3 秒時には粒子の多くが G 4 桁 (図中右端の桁) 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。指令流速 9.6m/s を与えられた水粒子が、ほぼ等流速で移動すると、到達時間 T は 0.281s ($=2.7 \div 9.6$) と推定される。これにより解析上の時間軸は、想定と一致することが分かる。

その後、0.5 秒時には上部工構造幅のほぼ半分が水粒子に覆われ、3.0 秒時には完全に水粒子に覆われる。桁移動は 2.0 秒時に顕著となり、G 1 桁 (図中左端の桁) が下部工を模擬した床から離れ、落橋するような状況となる。さらに、3.0 秒後にはよりその離れ距離は大きくなる。

4. 2 支承反力と時刻歴関係

(1) 支承反力の抽出方法

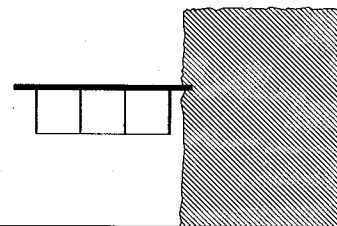
各時刻における G 1 ~ G 4 桁の下端部に生じる鉛直支承反力と水平支承反力を整理する。

図-9 は、桁を構成する最下端の粒子に生じる鉛直作用力 (Y 方向力) と水平作用力 (X 方向力) を出力しグラフ化したものである。なお、本解析は奥行き 1 m 当りを想定した計算であり、解析出力値は単位長さ 1 m 当りの値である。

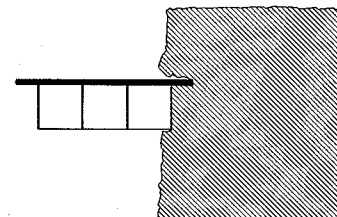
(2) 考察

構造物の時系列変化と支承反力について考察する。図-9 に示す各時刻における鉛直反力と水平反力の推移状況を示す。鉛直反力の合計値に着目すると、本解析の上部構造の重量は 92.16kN (奥行き 1m 当り

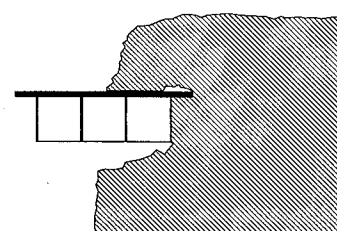
①0.2 秒時



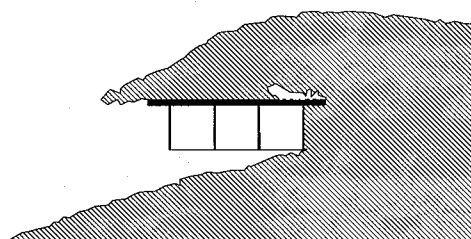
②0.3 秒時



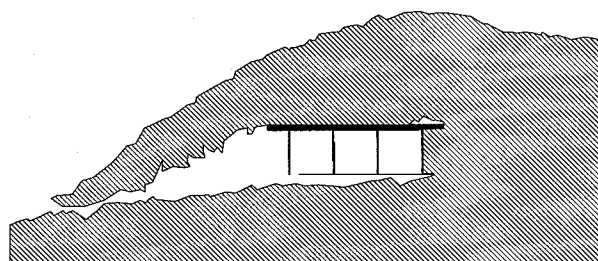
③0.5 秒時



④1.0 秒時



⑤2.0 秒時



⑥3.0 秒時

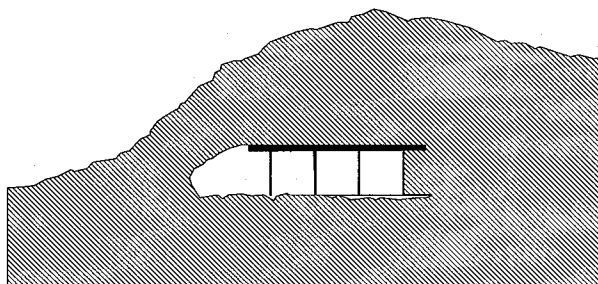


図-8 時系列変化図

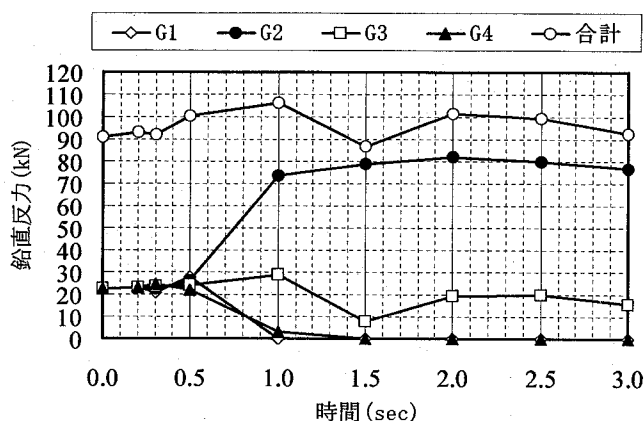


図-9(a) 鉛直反力の推移

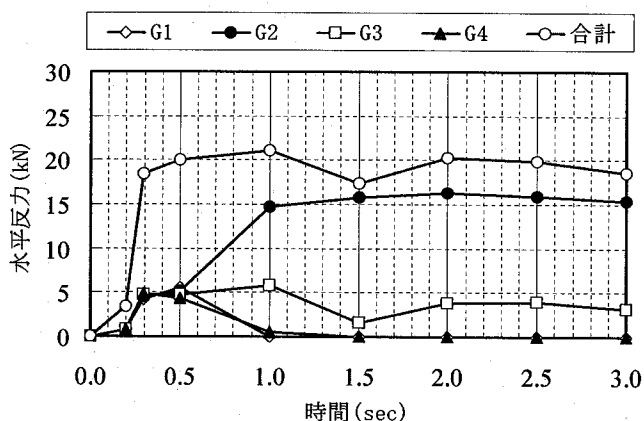


図-9(b) 水平反力の推移

）であり、0.5秒までは、ほぼその値で推移していることが分かる。1.0秒後からは、G1桁及びG4桁の鉛直反力が0となり、鉛直反力の合計値が90kN以下になる等の値のバラつきが生じる。G1桁の鉛直反力が0となるのは、下部工を模擬した床から離れ、鉛直抵抗となる支えが無くなったことが要因と言える。

G4桁については、その周辺で上揚力に相当する力が作用し、鉛直反力が低下したものと考えられる。図-10は、1.0秒時における上部構造と水粒子の接触状況を示したものである。黒線は接触力を表しており、線幅がその力の大きさを表す。また、図-11は、図-10中のRC床版の張り出し部分に着目し拡大したものである。図-11中の数値は、水粒子により下から上向きに作用する床版への力の大きさを表しており、各数値の和は18.6kNとなる。図-9の鉛直反力の推移グラフに示す0.5秒時のG4桁の鉛直反力は22.03kNであり、1.0秒時の3.13kNとの差は18.9kNである。床版に生じる上向きの18.6kNと0.5秒～1.0秒間のG4桁の鉛直反力の低下量18.9kNから、水粒子による上揚力に相当する力が張出し床版部分に作用しG4桁の鉛直力の低下を生じ

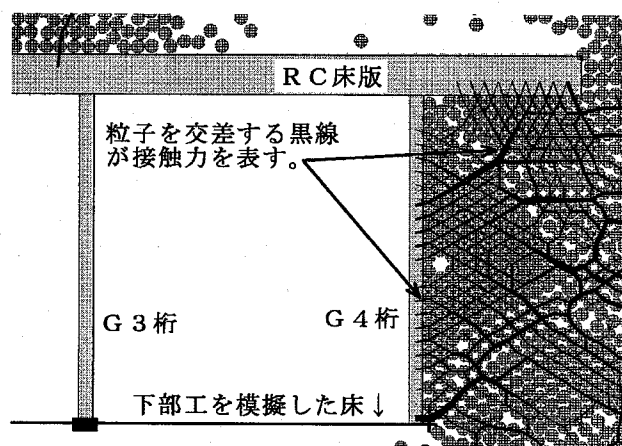


図-10 G4周辺の水粒子の状況 (1.0秒時)

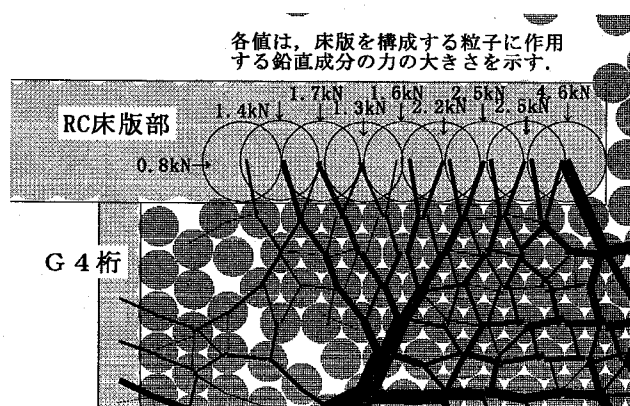


図-11 RC床版張出し部の状況 (1.0秒時)

させたものと考えられる。

次に水平反力について着目すると、水粒子が上部構造物に到達した0.3秒後以降は“水平反力の合計値＝鉛直反力の合計値×摩擦係数＝92.16kN×0.2＝18.43kN”程度で推移することが分かる。1.0秒後からはG1桁及びG4桁の水平反力は0となる。これらの要因は、鉛直反力が0となったことに起因するものと考えられる。また、各桁の水平反力は、各桁の鉛直反力と入力摩擦係数(0.2)との積で推移する。

本解析プログラムでは、水平反力は逐次変化する鉛直反力と入力する摩擦係数との積により算定され、それを抵抗の上限値とし、水粒子による衝突力がその上限値以上で作用すると移動する現象が再現できている。

4. 2 上部構造の移動距離と時刻歴関係

(1) 上部構造の移動距離の抽出方法

各時刻における上部構造の移動距離を整理する。本解析プログラムは、各粒子の座標値(X方向が水平成分)を出力することが可能である。上部構造

の移動距離は、G4桁を構成する最下端の粒子に着目し、時系列で変化するX方向成分（水平成分）の座標値を出力後、0秒時からの相対変位を算定して整理を行った。図-12にその結果を示す。また、図-13は図-12の結果より算定した上部工の移動速度を表すものである。

(2) 考察

式(16)～(18)に示す力のつり合い式を踏まえ、上部構造の移動距離及び移動速度について考察する。式(16)中の左辺第1項は波力の算定式であり、第2項は上部構造と下部構造の境界に生じる摩擦力を表す。また、右辺は上部構造への負担力を表す。

$$\frac{1}{2} \rho_w C_d V^2 A - \mu mg = m \alpha \quad (16)$$

$$S = \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (17)$$

$$v = \alpha t \quad (18)$$

ここに、

ρ_w : 水の密度 C_d : 抗力係数 V : 流速
 A : 被水圧面積 μ : 摩擦係数 m : 構造物の質量
 g : 重力加速度 α : 加速度 S : 移動距離
 v : 構造物の移動速度

図-12に示す水平方向の上部構造移動距離と時間の関係は、時間が経過するにつれ移動距離が放物線状に増加していくことが分かる。式(17)に示すように、移動距離は時間の2次関数の関係にある。解析結果は、つり合い式と同様の結果になったことが言える。また、図-13に示す上部工の移動速度と時間の関係は、1.0秒以降について、式(18)に示すように1次関数の関係にある。

式(16)を加速度で表すと式(19)となる。

$$\alpha = \frac{\rho_w C_d V^2 A}{2m} - \mu g \quad (19)$$

抗力係数 C_d を1.9とした場合、式(19)より α は0.605と算定される。1.0秒時を原点とし、式(17)による3.0秒後の移動距離 S を算定すると1.319mとなり、解析値の1.459mとその差は1割程度である。同様に、1.0秒時を原点とし、式(18)による3.0秒後の移動速度 V を算定すると1.21m/sとなり、解析結果とは2割程度の差となる。

抗力係数を適切に設定することにより、つり合い式を用いて簡易的な評価ができることが分かる。

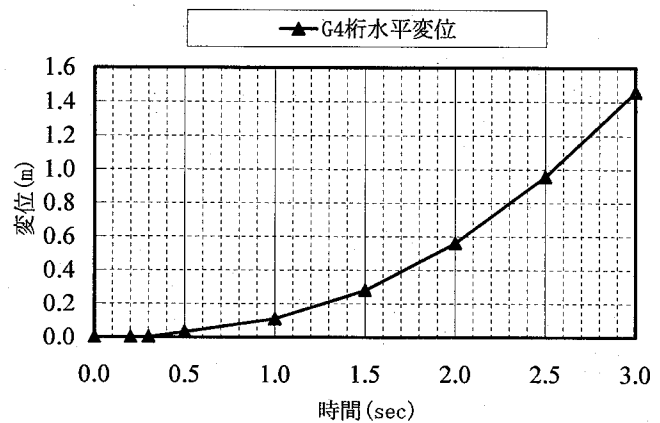


図-12 G4桁水平変位図

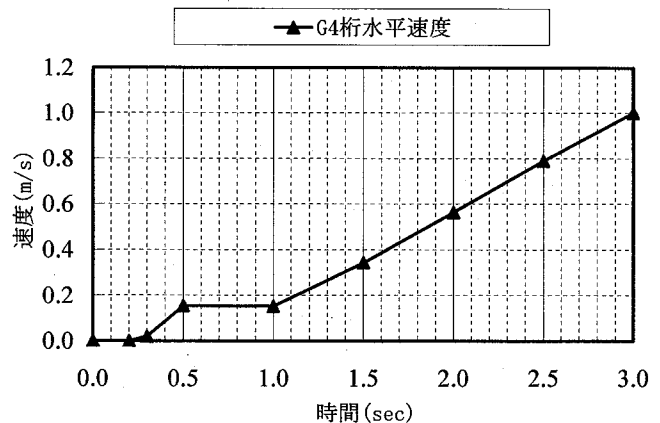


図-13 G4桁水平移動速度図

表-2 解析ケース

解析CASE	V: 流速	μ : 摩擦係数	パラメータ
CASE-1	9.8m/s	0.2	標準ケース
CASE-2	7.8m/s	0.2	津波流速
CASE-3	4.0m/s	0.2	
CASE-4	4.0m/s	0.3	支承摩擦

4. 3 津波流速・摩擦係数を変化させた場合の桁移動距離に関する考察

津波流速と摩擦係数を変化させ、上部工の移動距離の変化について考察する。実施した解析ケースを表-2に示す。図-14は津波流速をパラメータとする解析結果を示し、図-15は摩擦係数をパラメータとする解析結果を示す。式(19)により、津波流速 V の増加に伴い α は大きくなり、 μ の増加に伴い α は小さくなることが分かる。

本解析結果によれば、津波流速をパラメータとしたCASE-1～CASE-3はその傾向が再現できていることが分かる。

支承の摩擦係数をパラメータとしたCASE-3,4を比較すると、CASE-4の結果は1.0秒後から上部工の移動が止まるといった状況になっている。図-16は、

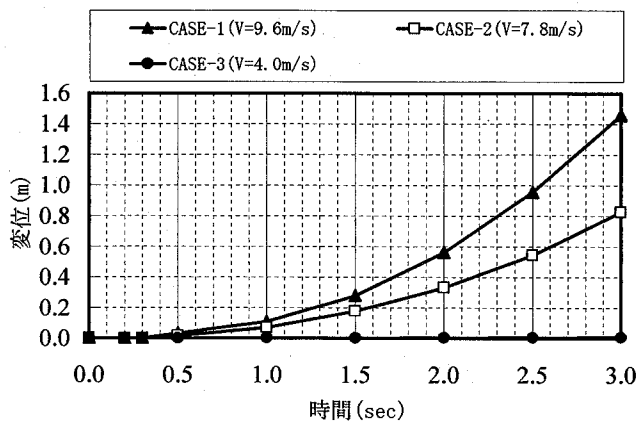


図-14 津波速度をパラメータとする解析結果

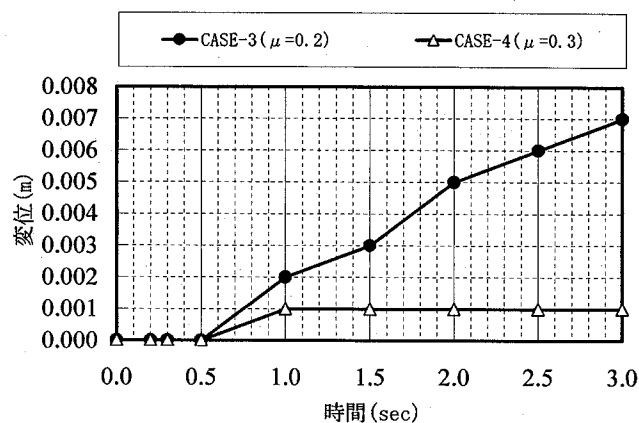


図-15 摩擦係数をパラメータとする解析結果

CASE-4 の 1.0 秒時における G 4 桁周辺の水粒子の速度ベクトルで表したものであり、その矢指の大きさが速度の大きさを表す。図-16 より、G 4 桁周辺の水粒子は速度を失い、移動ができなくなっている様子が分かる。本解析の演算方法は、粒子の接触により力が発生するため、水粒子による上部構造を押す力が無くなっているものと考えられる。また、速度を失った水粒子が一つの塊となり、後続の水粒子がそれを避けて上下に移動する様子も分かる。本結果は、上部構造に衝突する粒子の速度が低下し、式(19)の 2 項と 3 項が等しくなったことで上部構造の移動が止まったものと考えられる。

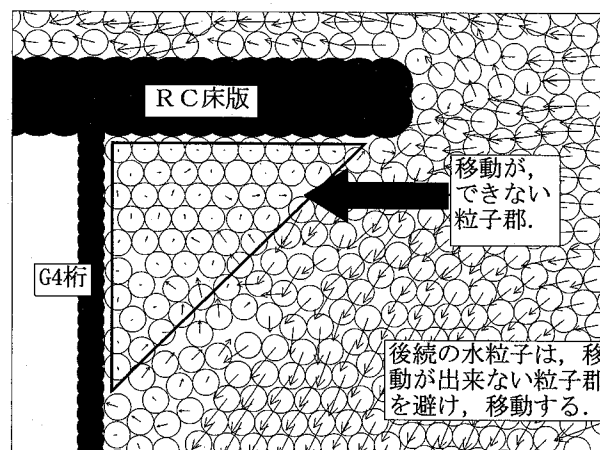


図-16 G 4 桁周辺の水粒子の状況 (CASE-4)

5. まとめ

本文では、個別要素法による流体運動シミュレーション解析により、津波の影響による構造物の移動現象について検証を行った。本検証より得られた知見を以下にまとめる。

- ①case-1 の解析結果から、水平反力は逐次変化する鉛直反力と入力する摩擦係数との積により算定され、上部構造の鉛直反力の合計値 (92.16kN) と入力した摩擦係数 (0.2) との積により算定される水平反力 (18.43kN) を上限値とし、それを超える衝突力が作用すると移動現象が生じる。
- ②case-1 の解析結果から、移動距離と移動速度は、抗力係数を適切に設定することにより、つり合い式を用いて簡易的に評価することが可能である。
- ③case-4 の結果から、構造物の摩擦抵抗抗力が大きい場合、構造物に衝突した水粒子は、構造物と後続の水粒子に挟まれて移動できなくなり、そこに留まる水粒子群が形成される。後続の粒子はそれを避けて移動するため、上部構造への接触力がなくなり、桁移動が止まるといった現象が生じる。

参考文献

- 1) 運上茂樹：2004 年スマトラ島沖地震による道路・橋梁の津波被害調査，土木施工，pp. 62-66，Vol. 46，No. 8，2005
- 2) 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
- 3) 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
- 4) Cundall, P. A. and O. D. L. Strack. : A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, pp. 47-65, Vol. 29(1) 1979
- 5) 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，pp. 869-870，2007. 9
- 6) 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