

津波波力による桁移動現象の解析的検討

Numerical Analysis using DEM simulating the movement of girder due to Tsunami wave force

幸左賢二*, 二井伸一**, 庄司学***, 宮原健太****

Kenji Kosa, Shinichi Nii, Gaku Shoji, 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 girders were washed away by the Off-Sumatra Earthquake and ensuing Tsunami. Numerical Analysis using DEM was performed to investigate the failure mechanism. The result showed, as flow velocity of Tsunami increased, the acting force to the girder and total movement of girder increased. Whether the movement of girder occurred or not is controlled by the coefficient of friction between the girder and beam, and the flow velocity of Tsunami.

Key Words: Sumatra Tsunami, Wave force, Flow velocity, PFC analysis

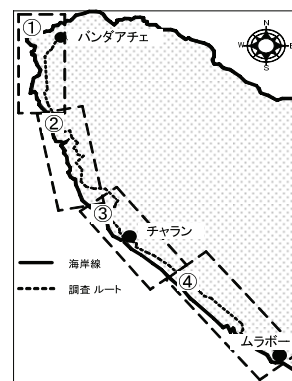
キーワード: スマトラ津波, 波力, 流速, PFC 解析

1. はじめに

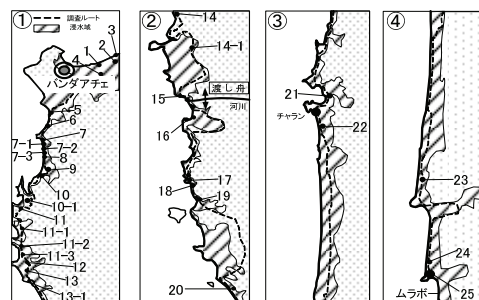
平成 16 年 12 月 26 日のインドネシア西部スマトラ島北西沖のインド洋で発生した地震により, 巨大津波が発生した. この津波により, 建築物ばかりでなく, 社会基盤施設である橋梁の上部構造が完全に流失する等, 甚大な被害が多数発生した. その報告を踏まえ, 著者らは橋梁被害調査を実施した. 調査対象橋梁は 34 橋であり, その過半数である 18 橋について桁の流出等, 津波特有の被害で使用不可能になっていることを確認した. このような被害は前例が少なく, そのため損傷メカニズムについても不明な点が多い.

一方, 我が国においても津波災害は頻繁に発生し, 特に東海・東南海地震による津波被害が懸念されている. しかし, 津波による橋梁への影響に関しては十分に解明されてなく, 特に津波による桁の移動現象について把握する必要がある.

そこで本研究では, 現地調査によって確認された橋梁被害の中でも桁移動に着目し, 粒状体挙動解析によって橋梁損傷シミュレーションを行い, 津波による橋梁の桁移動現象の損傷メカニズムの検証を試みたものである.



(a) スマトラ島北部全景



(b) 橋梁位置

図-1 調査対象橋梁の位置

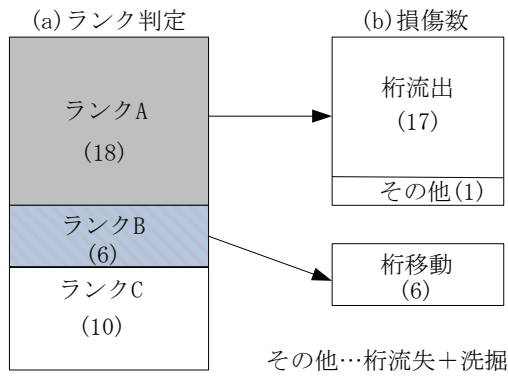


図-2 損傷ランク判定と損傷数

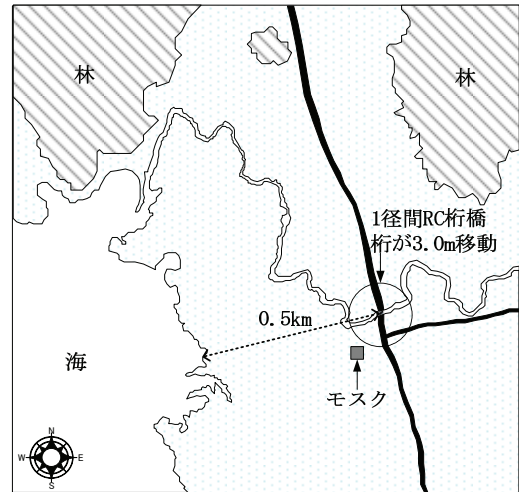


図-3 Lueng Ie 橋梁の周辺図

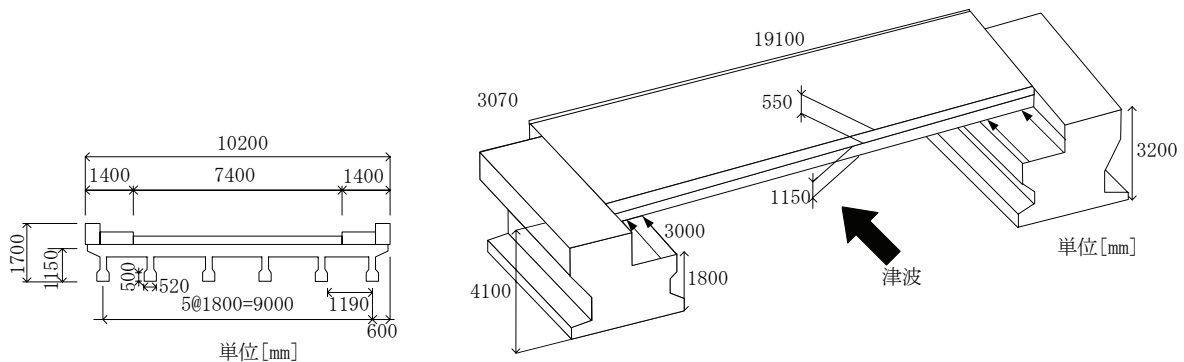


図-4 Lueng Ie 橋梁の橋梁図

2. 被害概要

2.1 調査概要及び分析

スマトラ島の西海岸線は約 30km にわたり津波の浸食を受けており、多くの道路が水没していた。また、バンダアチェからムラボー間の海岸線に沿って北スマトラ西岸道路で結ばれており、JICA による現地調査報告¹⁾によれば、調査区間内の橋梁全 142 基中 83 基が被害に遭い、そのうち 76 基は桁流出あるいは橋台崩壊といった甚大な被害を受けている。筆者らは、その報告を踏まえ、被害調査を行った。

図-1 に調査対象の橋梁位置を示す。調査対象区間はバンダアチェからムラボー間の約 250km であり、調査対象橋梁はこの区間の全 34 橋である。全 34 橋のうち 18 橋で流失など使用不可能な橋梁が確認された。図-2 は調査橋梁 34 基について損傷度から損傷ランクを 3 段階で定義し、分類した。使用不可能な橋梁を損傷ランク A、桁の移動がみられるが、使用可能なものを損傷ランク B、高欄等の付属物の損傷にとどまっているものを損傷ランク C とした。同図より、34 橋中 24 橋の被害が上部工の流失、移動であったことが分かる。本研究は、橋梁の

桁移動メカニズムに着目している。そこで図-2 に示す損傷ランク B の橋梁に着目し、解析の参考事例として Lueng Ie 橋梁の被害状況について以下に詳述する。

2.2 Lueng Ie 橋梁の被害状況

図-3 に Lueng Ie 橋梁の地形を示す。図-3 に示すとおり、Lueng Ie 橋梁は、スマトラ島西海岸沿いで海岸線から約 0.5km 内陸の河川に架設されている橋梁である。河川が大きく蛇行している点と海岸線から近いという点から、津波が河川を遡上したのではなく、海岸から押し寄せて被災したと想定される。図-4 に Lueng Ie 橋梁の構造一般図を示す。図-4 より、Lueng Ie 橋梁は RC 桁であり、橋長 19.1m、幅員 10.2m、桁下高 2.4m の単径間橋梁である。橋梁上部構造はゴムパット支承で支持されている。藤間ら²⁾の測定結果より、現地の津波痕跡は 9.5m、橋梁は海拔から 2.5m の位置にあるため、津波高さは静水面より 12m であった。これは、Lueng Ie 橋梁の橋面からの遡上高は 8m 程度に相当し、その結果、橋梁上部構造は橋軸直角方向に約 3m 移動した。

3. 解析概要

3.1 解析手法

(1) 本解析の特徴

粒子法は、連続体を有限個の粒子によって表現し、各粒子は速度・圧力といった物理量を保持しながら移動するため、連続体の挙動を粒子の運動によって計算でき、自由表面・混相流の解析、構造体の大変形・破壊解析において有用な方法とされている。粒子法の代表例としては、MPS (Moving Particle Semi-implicit)、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)、個別要素法 (Distinct Element Method) などがある。その中の個別要素法による要素試験のシミュレーション例がこれまでにいくつか示されている。例えば、目黒ら³⁾は個別要素法の集合体の作成方法を用いてケーソン型護岸の模型振動実験のシミュレーションを実施している。また、加藤ら⁴⁾は個別要素法に粒子間付着力を導入して二軸圧縮試験を行い、不飽和土の三軸圧縮試験における力学挙動との対応を検討している。本研究においても、これらの既往の研究を参考に水の挙動に着目し、水の特性を持つように粒子間の構成則を設定し、津波による橋梁の桁移動のモデル化を表現した。

本解析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 Code⁵⁾ 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 (以降、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・破壊及び流動シミュレーションが可能である。

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により、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。

(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-5 に示し、粒子間構成則模式図を図-6 に示す。

接触が生じたと判定された場合、2 つの粒子間には接触力 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

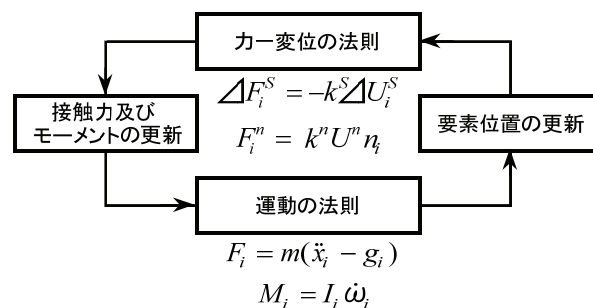


図-5 PFC 解析の簡易的な流れ

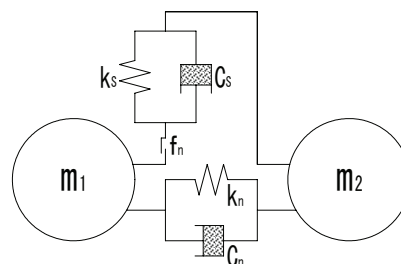


図-6 粒子間構成則模式図

F_i^s の合力として表される。

$$F_i = F_i^n + F_i^s \quad (1)$$

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。

$$F^n = k^n U^n \quad (2)$$

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 により式 (3) の通り算定できる。

$$\Delta F^s = -k^s \Delta U^s \quad (3)$$

(3) 加速度算定

2 粒子間の接触力により、加速度、速度、変位を順次求めることが可能となる。加速度と力の関係を式 (4) に示す。式 (4) より接触時の加速度算定が可能となる。

$$\ddot{x}_i = \frac{F_i}{m} + g_i \quad (4)$$

ここに m : 粒子質量, g_i : 重力加速度

(4) 「t+Δt/2」秒時の速度・変位算定

ある t 秒時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を式 (5) に示す。これによって次ステップの速度が算定できる。

$$\dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} = \dot{x}_i^{(t-\Delta t/2)} + \left(\frac{F_i^{(t)}}{m} + g_i \right) \Delta t \quad (5)$$

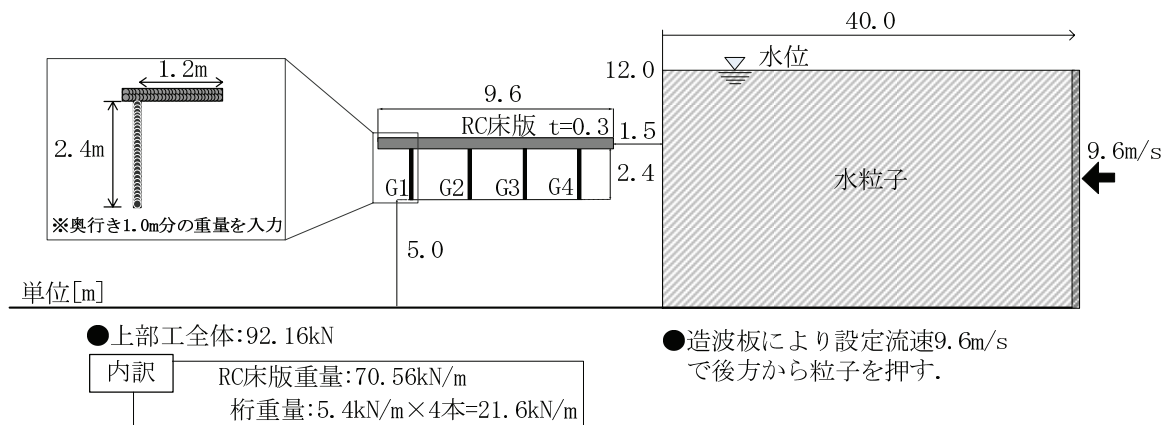


図-7 解析モデル

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. 算定式を式 (6) に示す.

$$x_i^{(t+\Delta t/2)} = x_i^{(t)} + \dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} \Delta t \quad (6)$$

以上より, 各粒子の次ステップの変位が算定され, 位置が確定し, 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, 相互作用力の算定と粒子間摩擦力の採用値の算定が行われ, 演算が繰り返され, 全体の粒子の流れを解く.

3.2 解析モデル

(1) 橋梁

スマトラ島の被害調査⁶⁾によれば, 全34橋梁中18橋梁と半数以上が単径間橋であり, 本解析の対象橋梁は単径間の橋梁とした. 単径間橋梁に着目すると, 橋長は20m前後が対象となる. 本来であれば, スマトラ島に実在し, 被災程度が3mの桁移動である Lueng Ie 橋をモデル化することが望ましい. しかし, 構造諸元, 摩擦係数等, 諸条件が不明であることから, 我が国において標準的な橋梁を対象モデルとした. 橋長20m前後という条件より, 解析対象橋梁は, 図-7に示す橋長21mの単径間鋼I桁橋(4主桁, RC床版)とした. なお, 本解析モデルは遠藤・運上ら⁷⁾が検討した解析モデルを参考にした. また, 橋梁条件は一般的な2車線道路をイメージし, 幅員は9.6mとしている. 本解析では, 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である2.4mとした. 解析モデルは2次元として奥行き1m分の重量を考慮すると共に, 上部構造は粒子の重なりを設け, 密に配置し剛体とした. 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, 桁重量を92.16kNとした. 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.

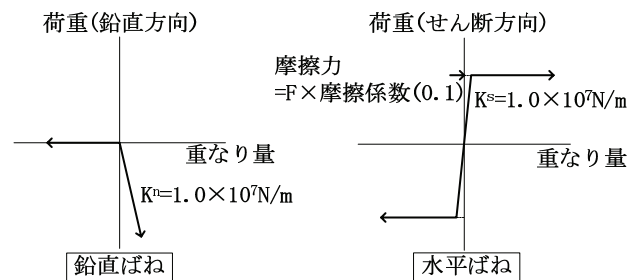


図-8 水粒子の構成則

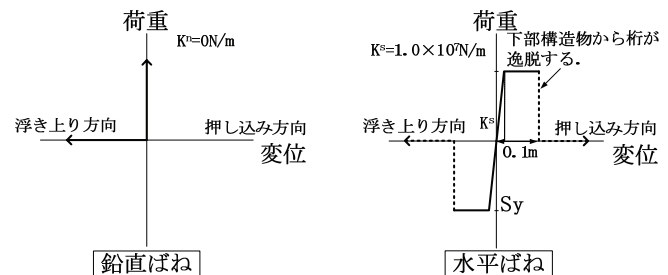


図-9 支承部の力学特性

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
	鉛直方向バネ定数 k_n	(N/m)	10×10^7
	せん断方向バネ定数 k_s	(N/m)	10×10^7
	摩擦係数 μ	(-)	0.1
	初期水位高 (津波高)	(m)	12
構造物	設定流速	(m/s)	9.6
	半径 r	(cm)	10
	※下端壁との接続条件はばね接続		
	鉛直方向バネ定数 k_n	(N/m)	0
	せん断方向バネ定数 k_s	(N/m)	10×10^7
※構造物は剛体として設定する	摩擦係数 μ	(-)	0.2

(2) 水粒子間ばねの構成則

水粒子間ばねの構成則を図-8に示す. 本解析プログラムでは, 粒子間の構成則の設定により, 土や水といった各特性を現すことが可能である. 本研究において, 対

象とする要素は水であり、水の特性を表現する為、ベンチマークテストを行い⁸⁾、構成則であるバネ定数、粘着力、減衰係数を設定した。ベンチマークテストでは、開空間での流れ（自由表面を有する水の流れ）検定と閉空間での流れ（自由表面を持たない流れ）検定を用い、開空間での流れ検定では、粒子同士の重なり体積変化が生じないようにバネ定数を定め、減衰係数を0とすることで定常流れが続くように設定した。ベンチマークテストより、バネ定数は $1.0 \times 10^7 \text{ kN/m}$ 、粘着力は0、減衰係数は0とした。

(3) 支承部の力学特性

スマトラ島での津波被害を参考に、津波による橋梁被災を推定すると、移動現象は、支承部の特性が大きく影響すると想定できる。

スマトラ島での実被害は支承の移動や損傷から始まり、その後桁移動現象が生じると推測される。つまり、半固定といった状況であり、本解析モデルでは、この点に留意し、桁の移動に対する支承の抵抗を表現するバネ定数を設定した。支承部の力学特性を図-9に示す。

鉛直バネは、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、水平バネについては、橋梁は壊れないものと仮定し、バイリニアの様なモデル化を行った。一次勾配は $1.0 \times 10^7 \text{ kN/m}$ とすることで、剛バネに近い定数を設定し、上部工鉛直反力と摩擦係数の積を抵抗の限界値とし、以上のモデル化により、限界値を超える波力が作用すると即座に移動するものとした。

(4) 津波諸元

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。水粒子の流れは、段波性状で水平方向に一樣な速度 9.6 m/s を与えている。設定津波高さは、Lueng Ie 橋梁で推定された 12 m と設定した。津波流速の設定は、設定津波高さ 12 m から松富・飯塚ら⁹⁾の津波算定式(7)を用いた。

$$\frac{u}{\sqrt{gR}} \cong \sqrt{\frac{2C_v^2 F_r^2}{F_r^2 + 2C_v^2}} \sqrt{\frac{h_f}{R}} \quad (7)$$

ここに、

C_v ：流速係数 F_r ：フルード数 h_f ：浸水深
 R ：津波打ち上げ高

流速係数 C_v は、家屋模型の浸水深比とフルード数の関係より0.8から0.9であることが報告されていることから、ここでは0.9とした。また、フルード数を1.0、1.5と仮定した。フルード数1.0の場合、流速は 8.5 m/s となり、フルード数1.5の場合、流速は 10.6 m/s となった。そこで、本解析では、津波流速を両値の平均値である 9.6 m/s とした。

表-2 解析ケース

解析ケース	V：流速	μ ：摩擦係数	パラメータ
CASE-1	9.6m/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

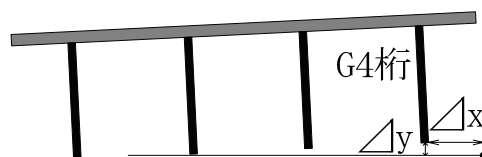


図-10 桁移動距離算定方法

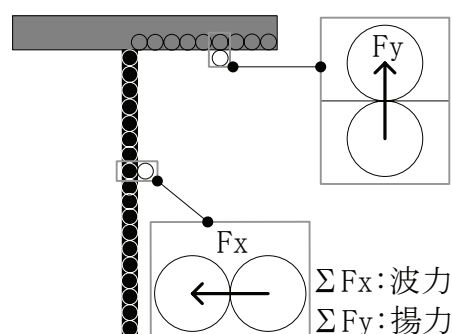


図-11 桁作用力算定方法

(5) 考慮するパラメータ

本解析では、津波流速と支承部の摩擦係数をパラメータとした。このうち、実施した解析ケースを表-2に示す。前述した設定流速 9.6 m/s 、摩擦係数0.2のケースを標準ケース（CASE-1）とし、津波流速をパラメータとし、 7.8 m/s としたCASE-2、 4.0 m/s としたCASE-3及び摩擦係数をパラメータとし、設定流速 4.0 m/s 、摩擦係数0.3としたCASE-4の計4ケースを設定した。

4. 標準解析結果($V=9.6 \text{ m/s}$, $\mu=0.2$)

4.1 作用力の影響による桁移動距離の時刻歴変化

本項では、作用力の変化による桁移動現象について示す。桁移動距離の算定方法を図-10に示す。各時刻において、G4桁の挙動に着目し、移動距離の算定を行った。

本研究の移動距離とは、水平方向(Δx)、鉛直方向(Δy)に分類したものである。また、移動距離を説明する上で必要な作用力の測定方法を併記する。桁作用力算定方法を図-11に示す。本研究では、桁水平方向に作用する力を波力(F_x)として定義した。また床版張り出し部に鉛直方向に作用する力を揚力(F_y)として定義した。各時刻における波力と揚力のバランスにより、桁移動現象が生じると想定し、以下の検討を行った。

解析状況図を図-12に示す。解析状況図とは、対象時

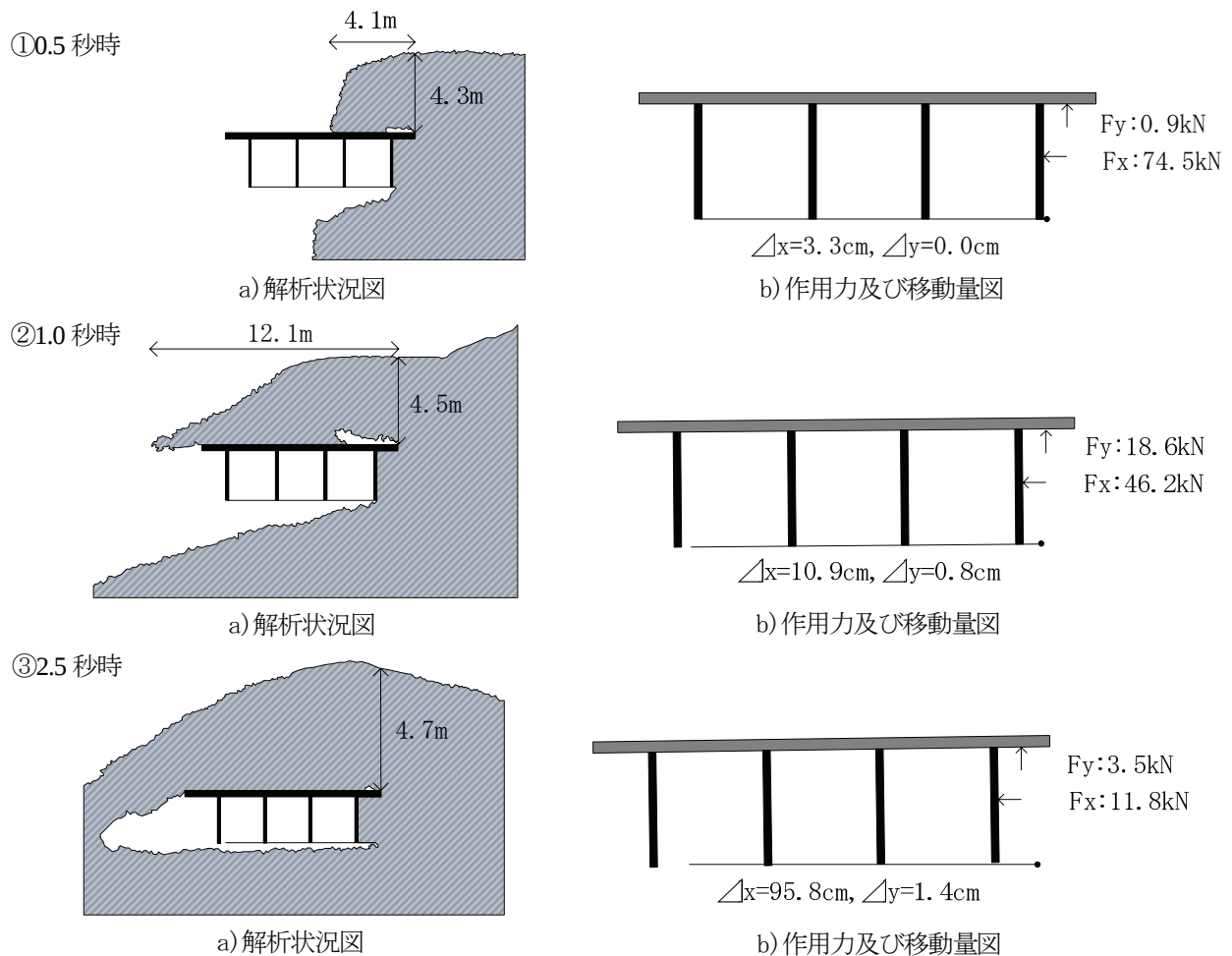


図-12 解析状況図

刻において、波や桁の移動状況を示したものである。0.5 秒時は、津波粒子群が床版及び桁を覆う現象が確認できた。床版上側に 4.3m 乗りかかり、水平方向には 4.1m 覆う状況となっていた。G4 桁は、水平方向に 3.3cm 移動しているのみであった。その際に桁に作用する波力は 74.5kN であり、床版張り出し部には揚力 0.9kN が発生した。1.0 秒時には、津波粒子が 12.1m 進行し、完全に床版を覆う状況となった。また、床版上側での津波粒子量も増加し、4.5m となった。G4 桁移動量は、水平方向に 10.9cm、鉛直方向に 0.8cm 移動していた。G1 桁は下部構造物を模擬した床より逸脱した。この際に、揚力は 18.6kN となり、0.5 秒時に比べ約 20 倍の作用力となった。その揚力の影響で G4 桁は 0.8cm 浮き上がったと考えられる。2.5 秒時には、津波の進行は更に進み、完全に床版と桁を覆う状況となった。G4 桁移動量は水平方向に 95.8cm、鉛直方向に 1.4cm となった。揚力の値が 1.0 秒時と比べ 0.2 倍程度となるが、G4 桁の浮き上がり量は 14cm と大きくなった。その後、桁は一定の傾きを保ちながら水平移動した。

G4 桁の水平変位の時刻歴関係を図-13 に示す。図-13 より、0.3 秒以降から移動を開始することが分かる。その後、移動量は増加し、1.0 秒以降では二次放物線的に増加する。図-13 の結果を時間間隔 Δt で割って算定した上部工の移動速度を図-14 に示す。図-14 中の 0.3 秒か

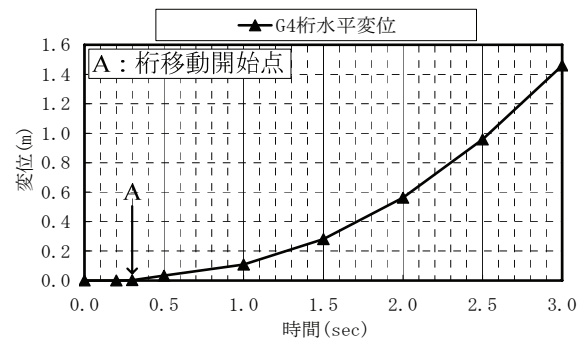


図-13 G4 桁水平変位の時刻歴関係

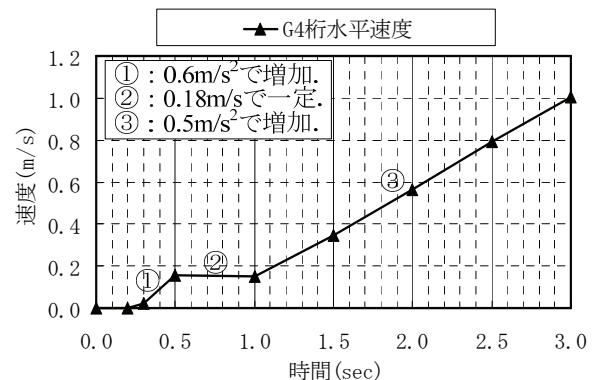


図-14 G4 桁水平速度の時刻歴関係

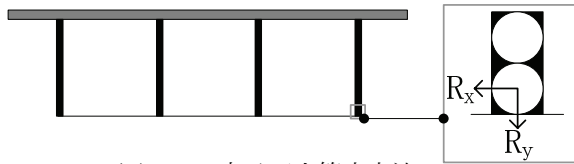


図-15 支承反力算定方法

ら 0.5 秒間を領域①, 0.5 秒から 1.0 秒間を領域②, 1.0 秒以降を領域③とする。また, 同図中, 左上の値は各領域における速度を時間間隔 Δt で割って算定した加速度を示す。領域①では, 0.6m/s^2 の加速度を持つことが分かり, その後, 領域②では, 速度は 0.18m/s と一定となる。領域③では, 再び 0.5m/s^2 の加速度を持つ。領域①, 領域③の加速度, 速度, 変位量について, 算定式 (8) から (10) により考察する。式 (8) 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。

$$\frac{1}{2}\rho_w C_d V^2 A - \mu mg = m\alpha \quad (8)$$

$$S = \frac{1}{2}\alpha t^2 \quad (9)$$

$$v = \alpha t \quad (10)$$

ここに,

ρ_w : 水の密度 C_d : 抗力係数 V : 流速
 A : 被圧面積 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-13 に示す G4 桁水平変位図において, 時間が経過するにつれ移動距離は放物線状に増加していく様子が確認できる。式 (9) 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と言える。また, 図-14 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 (10) に示すように 1 次関数の関係にある。領域②における, 桁移動速度が一定となる現象については, 次節に示す鉛直反力と共に考察する。

4.2 作用力の影響による支承反力の時刻歴変化

本項では, 作用力の影響による支承反力の時刻歴変化について示す。支承反力の算定方法を図-15 に示す。各桁 (G1 から G4) 下部の粒子に働く力を支承反力と定義し, その中で鉛直方向の作用力を鉛直反力 (R_y), 水平方向の作用力を水平反力 (R_x) とした。各時刻における鉛直反力と水平反力の推移状況を図-16, 17 に示す。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) であり, 0.5 秒までは, ほぼその値で推移している。1.0 秒後からは, G1 桁及び G4 桁の鉛直反力が 0 となり, 各桁の鉛直反力の値に大きな

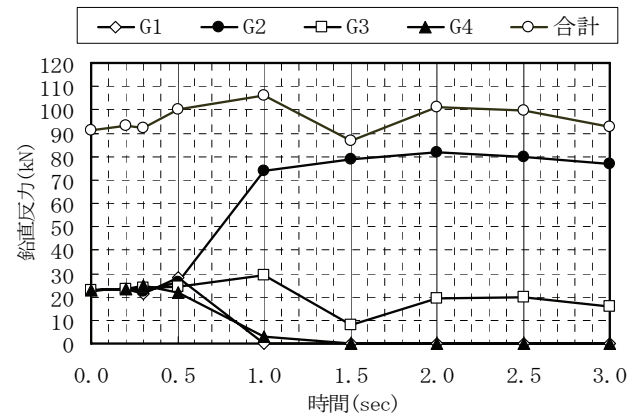


図-16 鉛直反力の時刻歴関係

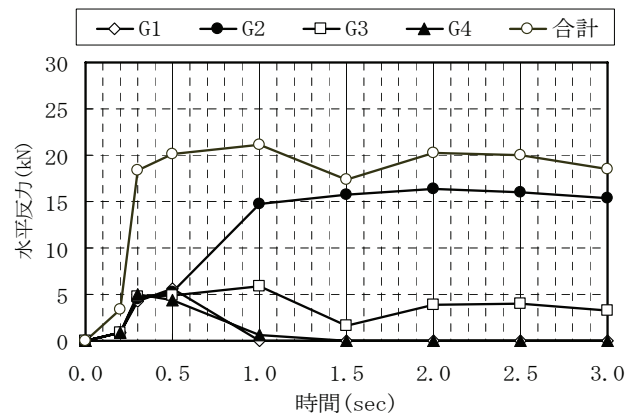


図-17 水平反力の時刻歴関係

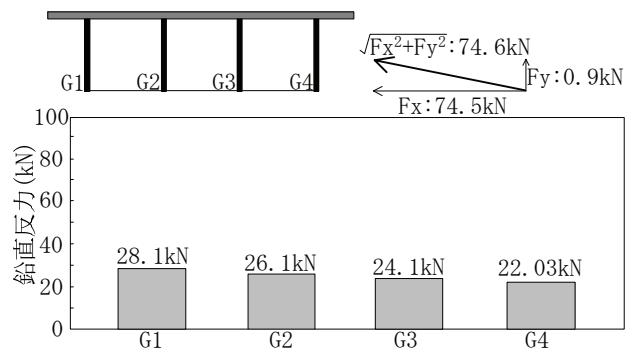


図-18 0.5 秒時の桁作用力状況図

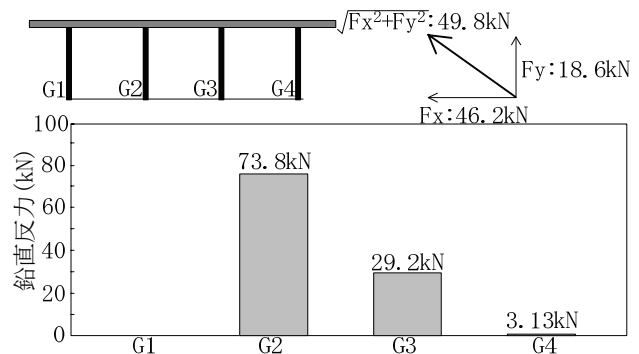


図-19 1.0 秒時の桁作用力状況図

バラつきが生じる。G1 桁の鉛直反力の推移に着目すると、1.0 秒以降で 0kN となっている。これは、津波作用力によって G4 桁が桁移動し、前述したように G1 桁が下部構造物から逸脱するためである。G4 桁の鉛直反力の推移に着目すると、0.5 秒時から 1.0 秒時にかけて鉛直反力が減少する。この現象について、図-18, 19 を用いて考察する。図-18, 19 は 0.5 秒時、1.0 秒時における波力、揚力、合力、各桁の鉛直反力値を示したものである。0.5 秒時には、74.5kN であった波力が 1.0 秒時には 41.2kN と 4 割程度減少する。一方、揚力は 0.9kN から 18.6kN と約 20 倍になる。また、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。0.5 秒から 1.0 秒時には、揚力と鉛直反力の変化量が概ね等しい。そのため、0.5 秒から 1.0 秒時には、波力よりも揚力の影響が大きくなり、G4 桁は揚力の作用で浮き上がる。G4 桁は浮き上がり、0.5 秒から 1.0 秒にかけては、速度ベクトルが鉛直方向に移行するため、水平方向の上昇は抑えられたと考えられる。1.0 秒以降では、G1 桁は下部構造物から逸脱し、G4 桁は浮き上がる。そのため、G2 桁に反力が集中し、桁移動する。

4.3 流速の時刻歴変化

本項では、桁付近での津波流速の時刻歴変化を示す。桁付近での流速測定方法を図-20 に示す。津波流速測定方法は、各時刻において床版張り出し部から下方向にラインを引き、ライン上にある粒子速度を高さ方向に平均した平均流速を求める。図-21 から 23 は 0.5 秒時、1.0 秒時、1.5 秒時の平均流速と桁付近の津波粒子の速度方向とベクトルを示す。図-21 では、桁中央部に衝突後、跳ね返った粒子による滞留域が確認できる。滞留域付近の津波粒子は流速が減少し、滞留域を上下に避けるような挙動を示し、桁付近での平均流速は 3.6m/s となる。図-22 では、滞留域の規模が大きくなる。そのため、滞留域部分の流速は落ち、平均流速も 2.8m/s となる。図-23 では、滞留域の規模が 1.0 秒時と比べ小さくなる。これは、1.0 秒以降では、桁移動量が顕著となる。桁が動いた空間に津波粒子が流れ込むことにより、滞留域の形状が変化したと考えられる。

解析結果より、0.5 秒での流速 3.6m/s が 1.0 秒では 2.8m/s となり減少する。また、1.5 秒では、流速 2.9m/s となり、1.0 秒時より微増する。この流速の増減について考察する。津波粒子が桁に衝突した後に跳ね返り、滞留域を形成する。滞留域は、桁移動や滞留域内の粒子の移動により、形態を変える。滞留域の形態の変化が津波粒子の流れに影響し、後続津波粒子の流速が増減すると考えられる。

4.4 波力と流速の関係

本項では、解析結果の波力と式 (11) より算定する波力との比較を行う（以降、算定波力と呼ぶ）。

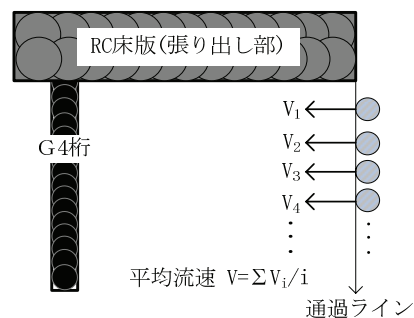


図-20 津波流速測定方法

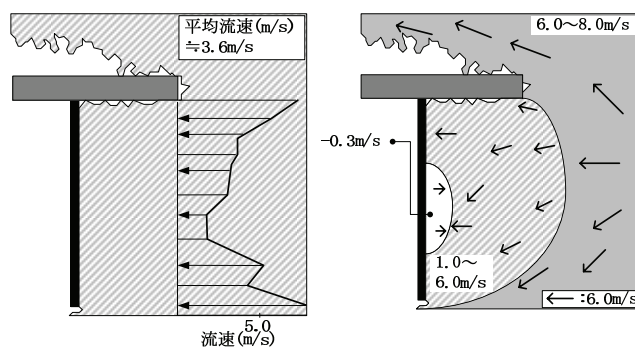


図-21 0.5 秒時の桁付近状況図

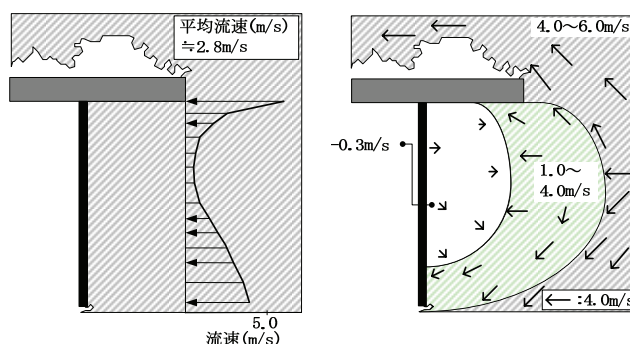


図-22 1.0 秒時の桁付近状況図

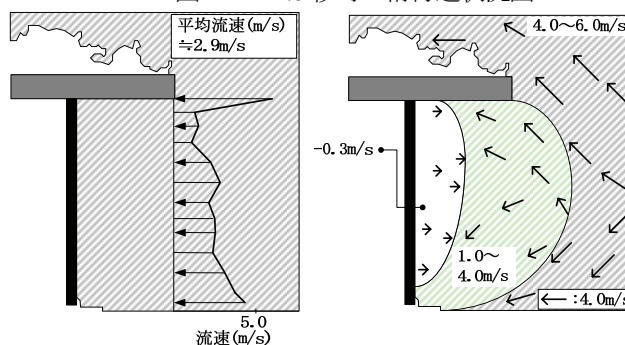


図-23 1.5 秒時の桁付近状況図

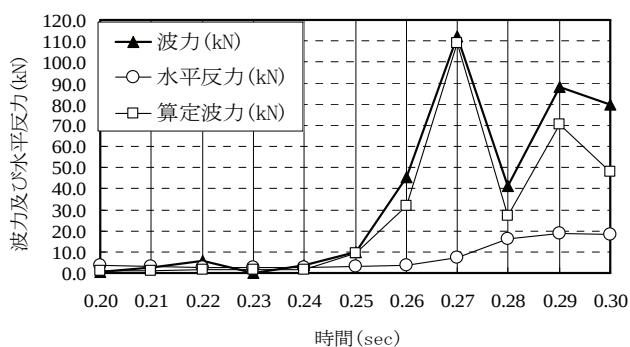


図-24 波力と流速の相関図(0.2 秒から 0.3 秒)

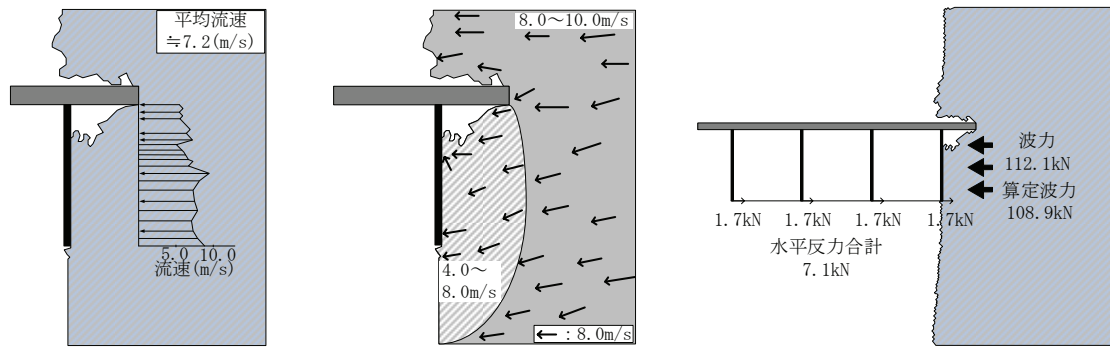


図-25 波力と流速の相関図(0.27 秒)

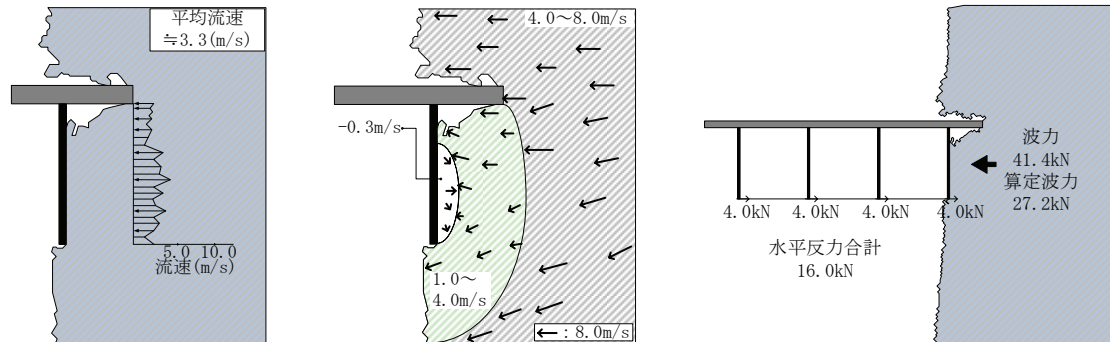


図-26 波力と流速の相関図(0.28 秒)

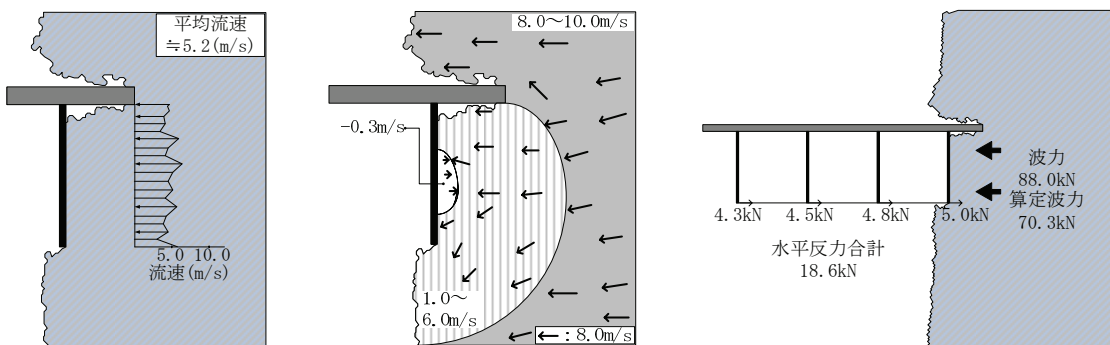


図-27 波力と流速の相関図(0.29 秒)

$$F = \frac{1}{2} \rho_w C_d V^2 A \quad (11)$$

ここに,

ρ_w : 水の密度 C_d : 抗力係数 V : 流速
 A : 被圧面積

抗力係数は一般的に 1.2 から 2.0 とされている. 本研究では, 最大波力による考察を行うため, 抗力係数は 2.0 とした. 流速は図-20 に示す方法で求め, 被圧面積は, 桁と床版部に衝突する水粒子の影響面積とした. 検討時刻を 0.2 秒から 0.3 秒間とし, 0.01 秒ピッチで波力, 算定波力, 水平反力を抽出する. その理由は, 解析のモデル上 G4 桁から津波粒子群までの距離が 2.7m で, 水粒子の与える初期速度は 9.6m/s であり, 津波粒子が桁に衝突する時刻が 0.28 秒と推定されるためである. 結果を図-24 に示す.

0.20 秒から 0.25 秒間における最大波力は, 7.2kN と小さい. 水平反力も 4kN 程度の値であり, 水平反力の上限值である 19kN 程度に達していないため, 桁移動は生じていない. 次に, 0.27 秒の波力は 112.1kN となるものの, 水平反力は 9.2kN であり, この時点でも, 桁移動は生じていない. 0.28 秒以降, 波力が増減する現象が生じる. 水平反力は, 0.29 秒時に 18.6kN となり桁移動が生じる.

ここで, 0.27 秒, 0.28 秒, 0.29 秒の波力と流速の関係を図-25 から 27 に示し, 波力が増減する現象について考察する.

0.27 秒時の平均流速は 7.2m/s である. これを用いて算定した波力は 108.9kN であり, 解析結果である 112.1kN の波力と概ね等しい結果となる. 0.28 秒の平均流速は 3.3m/s であり, 算定波力は 27.2kN, 解析結果である波力は 41.4kN である. 0.29 秒時の平均流速は 5.2m/s であり, 算定波力は 70.3kN, 解析結果である波力は 88.0kN であ

る。0.28 秒時及び 0.29 秒時に算定波力が波力をやや下回る要因は、床版部の津波粒子の流速を考慮していないことが考えられる。

0.27 秒から 0.29 秒での現象についてまとめる。0.27 秒では、本解析中、最大波力である 112.1kN が発生する。この要因としては、0.27 秒時に津波粒子が桁に初めて衝突するために、設定流速が減速せずに衝突し、波力に伴う大きな波力が生じたことが考えられる。0.28 秒時では、流速が 0.27 秒時から 5 割程度減少する。この要因としては、0.27 秒時に桁に初期衝突した津波粒子が跳ね返り、後続の水粒子との間に滞留域を形成することで、後続の津波粒子が桁に衝突できないことが考えられる。この影響で流速が減少し、波力も減少する。0.29 秒時では、流速が 0.28 秒時から増加する。この要因としては、滞留域の規模の減少に伴い滞留域の水粒子が再び、後続の津波粒子に押し込まれ、桁方向に進行することが考えられる。以上より、波力の増減の要因は流速の変化によると考えられる。

5. パラメータ解析結果

5.1 津波流速をパラメータとする解析結果の考察

図-28 に津波流速をパラメータとする CASE-1, 2, 3 の G4 桁の移動変位の時刻歴関係を示す。図-28 より、CASE-1, 2 では、G4 桁移動量が時刻の経過と共に、二次放物線的に増加することがわかる。一方、流速 4.0m/s である CASE-3 では、桁移動量は増加するが、その変化量は CASE-1, 2 と比べると極めて小さい。図-29 は、図-28 の結果より算定した移動速度を表す。図-29 より、CASE-1 において、0.3 秒から 0.5 秒の間に移動速度が増加する。また、0.5 秒から 1.0 秒間では移動速度が一定となり、1.0 秒以降で再度移動速度が増加する。CASE-2 も、CASE-1 と同様の傾向を示す。CASE-3 では、G4 桁移動速度は増減するが CASE-1, 2 に比べると微量である。図-30 に CASE-1, 2, 3 の波力の時刻歴関係を示す。図-30 は、図-11 に示す算定手法により、波力を求めた。図-30 によれば、突発的な波力が生じ、その後、若干減少して推移する。突発的な波力は、桁と水粒子が始めて衝突する時刻にほぼ等しい。しかし移動量は突発的に大きく変化するのではなく、少しずつ増加する。また、CASE-3 では、波力は 0.5 秒以降において、20kN 程度と一定になる。この波力は、水平反力の上限值 19kN とほぼ釣り合う状態であり、これが要因で、G4 桁移動量、G4 桁移動速度変化量は極めて小さくなったと考えられる。

ここで、桁移動速度と波力の関係性について考察する。図-31 は図-29 で示した CASE-1, 2 の桁移動速度と図-30 の波力より求めた算定速度を併記する。図-31 における算定速度は、式 (12) を式 (13) のように展開して算定した。

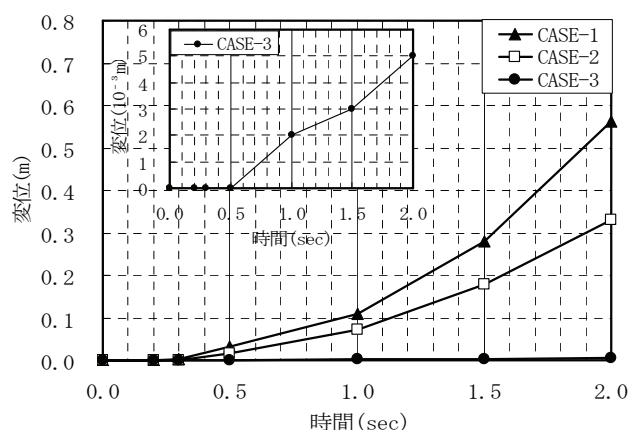


図-28 流速をパラメータとする G4 桁変位の時刻歴関係

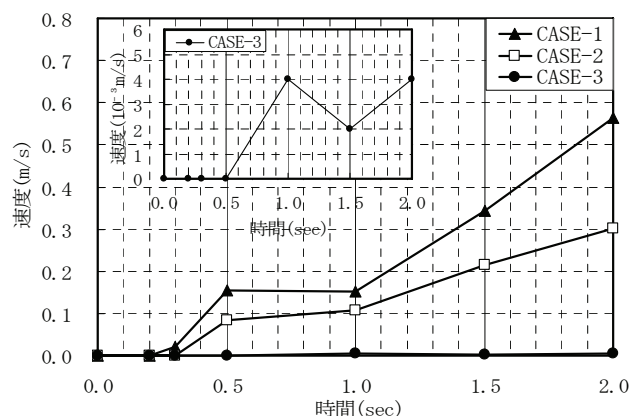


図-29 流速をパラメータとする G4 桁速度の時刻歴関係

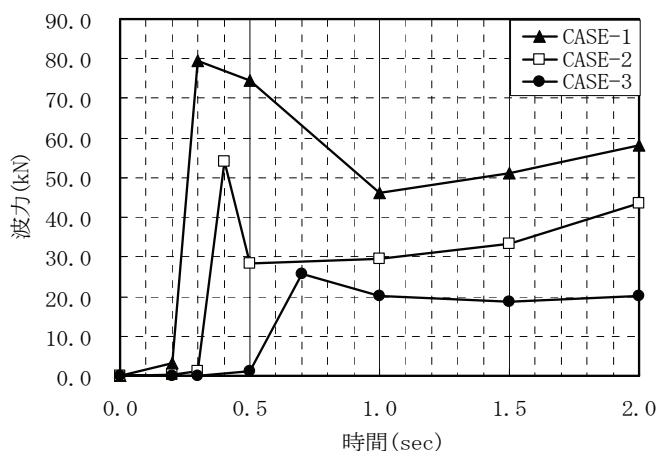


図-30 流速をパラメータとする津波波力の時刻歴関係

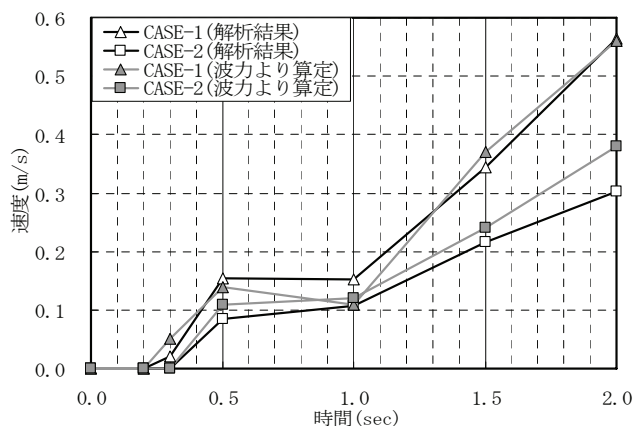


図-31 解析速度と算定速度の比較

$$(F_1 - F_2)\Delta t = M(V_1 - V_2) \quad (12)$$

$$V_1 = \frac{(F_1 - F_2)\Delta t}{M} + V_2 \quad (13)$$

ここに,

M: 上部工質量(9.4t)

F₁: 測定時刻の波力(kN)-水平反力(kN)

F₂: 測定時刻前秒の波力(kN)-水平反力(kN)

V₁: 測定時刻の桁移動速度(m/s)

V₂: 測定時刻前秒の桁移動速度(m/s)

同図より, 解析結果である桁移動速度と波力から算定した移動速度は概ね一致することが分かる. また, CASE-1 では 0.3 秒時, CASE-2 では 0.4 秒時に突発的な波力が発生するものの, 桁移動現象への影響は少ないことが分かる. これは, 桁移動現象がある程度の時間内で発生する持続的な波力による影響が大きいことを意味する.

5.2 摩擦係数をパラメータとする解析結果の考察

摩擦係数をパラメータとした解析結果について, 桁移動速度と津波流速の関係性について考察を行う. 図-32 は, CASE-2, 3, 4 の G4 桁変位の時刻歴関係を示す. 流速 4.0m/s, 摩擦係数 0.3 である CASE-4 では, 1.0 秒時に移動現象が発生するが, 移動量は 0.001m であり, 極めて小さい. また, 1.0 秒以降で, 移動が止まる.

図-33 に CASE-2, 3, 4 における G4 桁水平速度の時刻歴関係を示す. CASE-4 では, 1.0 秒時に移動速度が発生するが, 1.5 秒以降に, 移動速度が 0 となる.

図-34 に CASE-2, 3, 4 の波力の時刻歴関係を示す. CASE-4 での波力は, 流速が等しい CASE-3 の波力と同様の傾向を示す. また, 最大波力は初期衝突と想定される時刻である 0.7 秒時の 27.1kN であり, これは, 摩擦係数を 0.3 としているため, 水平反力 27kN 程度に対応している. CASE-4 では, 初期衝突時に波力が水平反力を上回るが, 1.0 秒時に極わずかに移動し, その後波力が水平反力を上回らないために, 移動現象が生じないといえる.

6. 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を試みた. 本解析により得られた移動現象, 水粒子の流速, 波力に関する知見を以下にまとめる.

(1)津波流速 9.6m/s, 摩擦係数 0.2 とする解析結果より, 桁の移動は 2 次放物線的に増加し, 桁移動速度は 1 次関数上で増加するが, 一定速度となる時間帯が発生する. この原因は, 水粒子が桁衝突後に跳ね返り, 後続の水粒子との間で動けなくなり滞留域を形成する. 滞

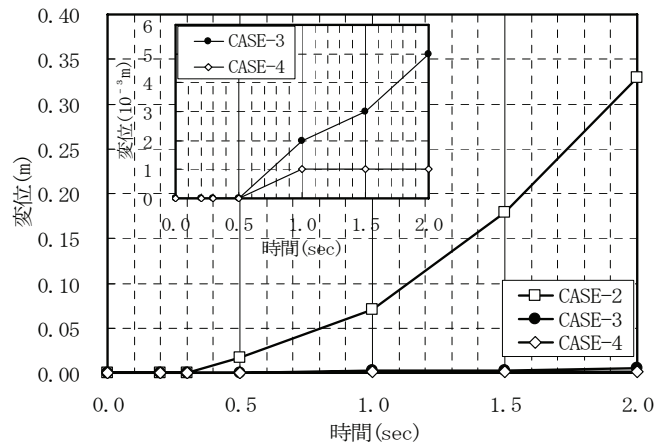


図-32 摩擦をパラメータとする G4 桁変位の時刻歴関係

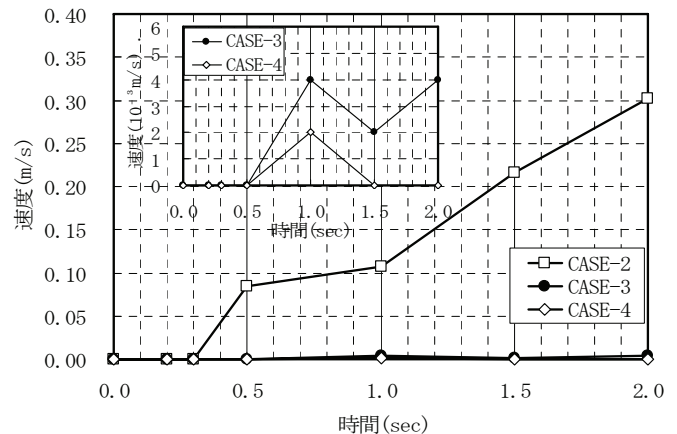


図-33 摩擦をパラメータとする G4 桁速度の時刻歴関係

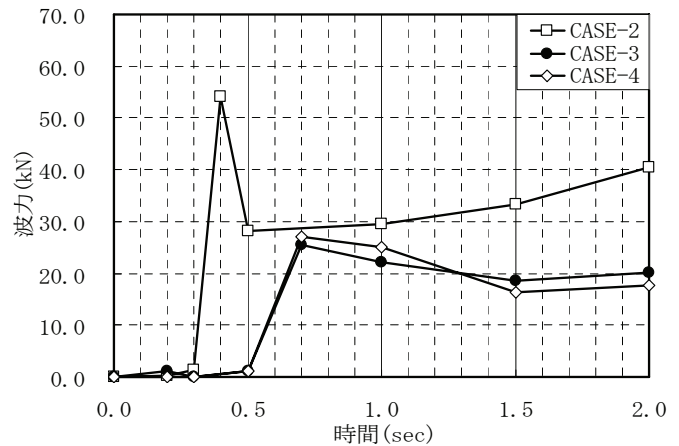


図-34 摩擦をパラメータとする津波波力の時刻歴関係

留域は, 桁移動や滞留域内の粒子の移動により大きさが変化し, 滞留域が小さくなると後続の水粒子に押され, 再び移動現象を生じさせるためと考えられる.

(2)桁移動が生じる前には突発的な波力が桁に作用する. これは, 波力は津波流速に依存し, 水粒子が初期速度をほぼ保ったまま桁に衝突する状態が本解析では, 水粒子が最も速い速度を持つためである.

(3)解析値の平均波力から算定した桁移動速度は解析結果の桁移動速度と概ね一致した. これは, 平均波力が桁移動に寄与することを意味し, 桁移動現象は突発的

な波力ではなく、ある時間に持続する波力の影響が大きいと分かる。

- (4) 津波流速をパラメータとした解析結果より、設定流速により波力の推移は大きく異なる。設定流速を速くすれば大きな波力で推移し、桁の変位も大きくなる。また、摩擦係数の増加に伴う水平反力の増加により、桁移動が発生しない現象が再現された。

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被災緊急復旧・復興プログラム最終報告書, 2005.6
- 2) 藤間功司, 嶋原良典, Charles Shimamura, 松富英夫, 榊原勉, 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: スマトラ島西海岸における 2004 年インド洋津波の痕跡高分布, 土木学会地震工学論文集, 第 29 巻, 2007.8
- 3) 目黒公郎, 岩下和義, 伯野元彦: 拡張個別要素法による複雑な形状の要素からなる媒質の挙動ケーソン式護岸の模型振動実験に対する個別要素法シミュレーション, 土木学会論文集, No.437/I-17, pp.37-48, 1991.
- 4) 加藤正司, 山本修一, 野波賢: 粒子間付着力を取り入れた個別要素法による二軸圧縮試験シミュレーションと不飽和土の三軸圧縮試験の比較, 応用力学論文集, pp.419-426, 1999
- 5) Cundall, P.A.and O.D.L.Strack.: A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, pp.47-65, Vol.29(1)1979
- 6) 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
- 7) 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, I-436
- 8) 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 SerA, pp.312-324, Vol.244, 1952
- 9) 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

(2008 年 9 月 18 日受付)