# 京コンピュータによる橋梁を含む 広域3次元津波シミュレーション

野中哲也<sup>1</sup>•本橋英樹<sup>1</sup>•吉野廣一<sup>2</sup>•原田隆典<sup>3</sup>•川崎浩司<sup>4</sup>•馬越一也<sup>5</sup>•菅付紘一<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 株式会社地震工学研究開発センター(〒880-0902 宮崎市大淀 3-5-18 南宮崎駅前ビル)
<sup>2</sup>正会員 株式会社地震工学研究開発センター(〒880-0902 宮崎市大淀 3-5-18 南宮崎駅前ビル)
<sup>3</sup>正会員 工博 宮崎大学教授 工学部社会環境システム工学科(〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)
<sup>4</sup>正会員 博(工)名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8601 名古屋市千種区不老町)
<sup>5</sup>正会員 修(工) 株式会社耐震解析研究所(〒466-0059 名古屋市昭和区福江 2-9-33)

# 1. はじめに

従来の広域の津波浸水シミュレーションは、非線 形長波理論による平面2次元津波解析を実施して, おおよその津波高さ(津波浸水深)や浸水エリアを 求めるものであった.確かにこのシミュレーション は津波防災等において重要であるが, 防災拠点や避 難ビル等の重要施設,橋梁や防波堤のインフラが, 想定される津波の波力に対して、健全で役目を果た すかどうか定量的には評価できない. この平面2次 元津波解析によって得られた津波高さや流速から, 対象構造物に作用する波力を経験的に算出している のが現状である.また,波力算出だけでなく,津波 浸水状態についても平面2次元津波解析は正確では ない. 建物等の影響を考慮して間接的に粗度係数で 表現して浸水状態を評価しているが、本来は津波が 陸上に遡上すると、地形や構造物等の影響を受けて 複雑な挙動(建物の間を流れ、方向と流速が変化し たり,建物の背後に回り込む等)を示し,平面2次 元解析結果のように一律に津波は浸水しない.

そこで、筆者らは、3次元津波解析による評価法 を提案して、実際の橋梁の津波被害再現解析を実施 している.東日本大震災発生から4ヶ月後には、そ の有効性を発表して、実際の橋梁の津波被害の再現 解析<sup>1)</sup>を実施した.その翌年には、橋梁だけでなく 周辺地形を含めた津波被害の再現解析<sup>2)</sup>を実施して きた.

本研究では、その考えを拡張して、数橋を含む広 域の3次元津波シミュレーションを実施しようとす るものである.前回実施した解析モデルのメッシュ 数は、一般的なワークステーションを使用して約



写真-1 京コンピュータ(理化学研究所 HP より)

188 万であった. ワークステーションの並列処理 (PC クラスタ)をしても,現時点では約 3000 万メ ッシュが現実的な限界であると思われる. 今回対象 とした数橋を含む広域3次元津波シミュレーション のメッシュ数は,最終的には約 10 億メッシュを予 定しており,通常のコンピュータでは処理不可能で ある.そこで,本研究では,世界最高峰のスーパー コンピュータである「京コンピュータ」を用いての 3次元津波シミュレーションを実施している. 今回 は,通常のワークステーションでは不可能な約 1.5 億メッシュでの解析をまず試みたので,その結果を 報告する.

# 2. 京コンピュータと解析ソフトの高速化

# (1) 京コンピュータ

世界最高峰のスーパーコンピュータである「京コ ンピュータ」(写真-1)は、現在、世界第4位の性 能(総理論演算性能:11.28PFLOPS)を有している. このコンピュータは、大規模な並列計算機(計算/ ードを8万台以上結合したシステム)であり、通常 のコンピュータとはアーキテクチャが異なっている. 京コンピュータ上で性能を出すためには、プログラ ムを高並列化するなど工夫しなければならない.





写真-2 宮崎市内

#### (2) 解析ソフトの高速化方法

パソコンやワークステーションで実行していた解 析ソフトをスーパーコンピュータ上で、そのまま動 作させても十分な性能がでない場合があることから、 高速化のためにソースプログラムを修正することが 多い.市販の解析ソフトの場合、ソースプログラム の修正はできないが、解析ソフトを実行するだけで も、ある程度の高速演算、特に並列処理を意識する 必要がある.

本研究で使用する解析ソフト OpenFOAM<sup>3)</sup>は、オ ープンソースコードの流体解析ソフトであり、ソー スプログラムの修正が行える.本解析ソフトは、す でに並列処理を意識したプログラムとなっているた め、 京コンピュータ上で動作させるのに、 京コンピ ュータ特有の並列処理機能のための最小限の修正だ けで済んだ. 今回の解析規模は約 1.5 億メッシュ程 度であり,その規模を効率よく解くために並列性能 を評価(並列数と加速率の評価)した結果,96計算 ノード(8 コア/1 計算ノード)で計算するのがよ いことがわかっている. それ以上の計算ノードを使 っても多少の速度向上は期待できるが、全体的に効 率が悪くなる. 最終版の 10 億メッシュモデルでは 1024 計算ノード以上を想定しているが、今回の解析 では 96 計算ノードで解析することにした. 宮崎市 の中心部(6km×5kmの範囲)を例にして説明する. 解析空間を分割して解析する領域分割法を採用す



図-2 本3次元津波シミュレーションの方法

る. この手法はすでに OpenFOAM に組み込まれ, 解析空間を任意に分割することができる.本解析で は,図-1 に示すように宮崎市中心部の3次元解析 空間をX軸方向に8分割,Y軸方向に6分割,Z軸 方向に2分割の合計96分割した.分割された各小 空間に対してひとつの計算ノードを割り付ける.各 小空間をさらに並列計算(8スレッド並列)させ, 合計で並列数が768となり,この並列数で本解析を 実施した.

# 3. 解析対象とシミュレーション条件

#### (1) 対象領域

検討対象地域は、**写真-2** で示すように宮崎市で あり、1 級河川(大淀川),空港,港,さらに防災 拠点となる県庁や市役所が集まっている.この領域 に対して、3次元の津波シミュレーションを実施す る.対象領域のメッシュサイズについては、水平方 向で 5m,高さ方向で 0.5~1.0m として、対象橋梁 周辺ではさらに細かくした.そのため、メッシュ数 は約1.5億にもなる大規模解析モデルとなった.

# (2) 対象橋梁

大淀川には,**写真-2**に示したように複数の大型 橋梁がかかっており,今回の検討で着目する橋は, 河口から2番目の赤江大橋である.

#### (3) 津波波源

津波波源としては、中防防災会議から公表された 南海トラフの M9 波源モデル(以下、「中防波源モ デル」と呼ぶ)を用いることとした.中防波源モデ ルは、多くの小断層から成り、その小断層が破壊速



図-3 平面2次元解析の各領域

領域名	領域サイズ			
	メッシュ サイズ	経度分割数	緯度分割数	メッシュ数
A	2430m	700	600	420000
В	810m	1243	778	967054
С	270m	700	796	557200
D	90m	748	1210	905080
Е	30m	730	805	587650
F	10m	1057	1807	1909999
合計メッシュ数(万):				534.7

表-1 メッシュサイズ

合計メッシュ数(万):

度でずれる(隆起する)のが特徴的である.

#### (4) シミュレーションの手順

京コンピュータのようなスーパーコンピュータを 使っても、このような広範囲の3次元津波シミュレ ーションの計算は容易ではない. 前述した領域分割 法による高速化は当然必要であるが、大規模モデル の津波シミュレーションを効率よく実施するために、 本研究では解析空間および解析時間の最小化を考え, 図-2に示すような方法を提案する.

この図に示すように本提案の津波シミュレーショ ンは以下に示す(a)~(c)の3つのステップから成る.

#### (a) 2次元津波解析の実施:ステップ1

波源域を含む西日本全体を3次元津波シミュレー ションするのは、 スーパーコンピュータを用いても 現実的ではない(研究レベルで実施されているケー スもあるが、メッシュサイズは大きく精度が低い). そのため、まずは非線形長波理論による平面2次元 津波解析を実施する.この解析法は、一般的に行わ れている方法であり,波源を含む広範囲から対象橋 梁を含む最小領域までの領域に対して津波解析を実 施する.この解析により,対象橋梁近辺の津波襲来 状況の確認や最小領域における水位と流速を得るこ とができる.

#### (b) 3次元津波解析の条件設定: ステップ2

前述のステップ1で得られた情報から解析条件を 設定する.具体的には、まず対象橋梁近辺の津波襲 来状況(流速や方向,水位変化など)から判断して



図-4 中央防災会議津波波源 (ケース 11)

3次元解析の解析範囲を決定する.決定した範囲で 3次元津波解析を実施するが、その範囲でも解析時 間が膨大となる.そのため、地震発生時や対象橋梁 に津波が到達する時刻(対象橋梁地点で水位変化が 起こる時刻)から、3次元津波解析を実施するので はなく、対象橋梁が桁流出といった被害を受ける直 前から,解析を実施する方が効率的である.よって, 本研究では、一番沖合の橋梁の橋桁に津波が当たる 前の状況から解析を開始することにした. 解析を実 施する前に、その時点の状態(初期状態)をつくる 必要があるが,その状態を前述の平面2次元解析の 結果から作成するようにした.

#### (c) 3次元津波解析の実施: ステップ3

前述のステップ2で設定した初期状態から,3次 元津波解析を実施する. その解析結果から, 検討対 象地域の津波浸水状況を確認する.また、対象橋梁 に作用する波力が求まり、対象橋梁の桁や橋脚の流 出の判定を行う.

なお、本研究では、前述したように3次元津波解 析ソフトとして, OpenFOAM を採用する. この OpenFOAM は、多相流、燃焼、磁場などの用途に 応じた各種ソルバを有している.本解析では, OpenFOAM のうち, 非圧縮・不混和流体の2相流 ソルバである interFoam を用いた. この interFoam は, 離散化手法として有限体積法を、自由表面流体解析 モデルには VOF 法を採用している.

#### 4. 平面2次元津波シミュレーションの実施

前述した本シミュレーションの方法(図-2)に従 って,非線形長波理論による平面2次元津波解析を 実施する.本解析に必要な地形の各メッシュ領域を 図-3 に、各メッシュサイズを表-1 に示す. この表 に示すように、最小メッシュの解析領域は、領域 F であり, そのサイズは 10m になっている. なお, こ の10mメッシュは、国土地理院から公開されている 5mメッシュデータ基に作成した.



(a) 地震発生後3分



(b) 地震発生後 13 分



2次元津波解析結果のスナップショット 図-5 10 中防波源 8 • EERC 6 水位(m) 4 2 0 -2 15 30 45 60 75 90 105 120 135 150 0 時間(min) 図-6 2次元津波解析結果の水位履歴

本解析で採用した中防波源モデルは,5773 個の 5km メッシュの小断層で近似され,これまで公開さ れてきた波源と異なる.著者らは,中央防災会議等 から公表されてきた情報やこれまでの知見を基に, 東海地震,東南海地震,南海地震,日向灘沖地震の 4連動地震を想定して,M9の波源モデルを提案し



(a) 地震発生後 25 分



(b) 地震発生後 32 分



(c) 地震発生後 35 分図-7 2 次元津波解析の結果



図-8 F領域と3次元津波解析領域

てきた<sup>4)</sup>が,このような多くの小断層には分けなかった.

本解析では、中防波源モデルの中でも、宮崎市に 対して、最も影響の大きいケース 11 (図-4)を採



#### 図-9 検討対象の橋梁



図-10 3次元解析モデル

(a) 3 次元モデル図

(b) 3次元メッシュ図

用した.この波源は、「室戸岬沖」と「日向灘」に 大すべり域を2つ設定した波源である.なお、本解 析では、地震によって堤防が崩壊したと仮定し、初 期水位を満潮だけなく高潮分も考慮した.

この中防波源モデルによる解析結果を図-5 に示 す.この図は、地震発生から大きな津波が宮崎市内 の沿岸部に到達する 32 分までの代表的な水位コン ターのスナップショットを示している.同図(b)か ら、沿岸到達前に津波が何波も発生しているのがわ かる.河口から沖合 2kmの位置(以下,「評価点」 と呼ぶ)での津波の水位変化を表したのが図-6 で ある.この図からも津波が複数襲来していることが わかる.参考までに、著者らが提案した波源の結果 も同図内(グラフ内の「EERC」)に示しているが、 前述したように小断層に分けていないため、水位変 化の山の数が異なっている(全体の水位変化の傾向 は似ている).このように何波も襲来するため、後 述するように3次元解析において、経過時間のどの 区間を計算するか判断を難しくする.

本平面 2 次元解析における宮崎市内の浸水状態の スナップショットを図-7 に示している. 同図(a)か ら,地震発生後 25 分で,宮崎市内に第1波が到達 し,同図(b)から評価点の位置で津波高さが最大と なり,同図(c)から河口周辺で津波高さが最大 (10m弱)となることがわかる.

# 5. 解析条件および初期状態の設定

# (1) 3次元解析領域の設定および対象橋梁の概要

前述した平面2次元津波解析結果の津波襲来状況 (検討対象地点の流速と方向)から判断して,3次 元津波解析の領域を図-8(青色枠)に示すように幅 5km,長さ6km,そして高さを56mとする3次元空 間(図-1参照)とした.

検討対象の赤江大橋は,8径間 PC 連続箱桁橋で ある. 概略図を図-9 に示すが,この図は Web 上か ら得られた情報を基に作成したものであり,本研究 で作成した橋梁モデルは実際のものと詳細な部分で 異なっている.

#### (2) 3次元解析モデル

本研究では、次のような手順で、この3次元空間 の解析モデルを作成した.まず、3次元空間に対し て、国土地理院から公開されている 5m メッシュ情 報から3次元の地形を作成し、その地形上に3次元 構造モデルを構築する.想定している津波で流され ないと予想できる3階建以上の RC 建物もモデル化 した.また、河川堤防や盛土などが不正確なところ があったため手作業で微調整した.このようにして 作成した3次元空間のモデル図と3次元メッシュ図 を図-10に示す.

次に、5m メッシュサイズの3次元空間上に、対 象橋梁をモデル化するが、5m メッシュサイズでは



(a) 3次元メッシュ図(橋梁周辺)



(b) 3次元メッシュ図(拡大) 図-11 対象橋梁の3次元解析モデル



(c) 地震発生から 40 分後の状態 図-12 3 次元津波解析における津波襲来のイメージ

粗すぎるため,橋梁周辺(図-8 参照)だけは,水 平方向 1m,高さ方向 50cmのメッシュとした.粗い メッシュと細かいメッシュの接続は,ステッチメッ シュ機能を用いてスムーズに連続させた.細かいメ ッシュサイズでモデル化した3次元解析モデルのメ ッシュ図を,図-11 に示す.このメッシュサイズで も,橋梁を正確にモデル化することができず,多少 の凹凸が現れる.今後予定している 10 億メッシュ ではこれが改善される.

また、3次元解析領域をこのように小さくしても できるだけ影響がないように、この領域の境界に対 して、津波を作用させる入射境界と津波が橋梁を通 り過ぎて反射しない放射境界(透過境界)を設定し た.



図-14 初期水位と初期流速

#### (3) 初期状態の設定

本モデルに対して,次に示すような方法で,初期 状態を設定して解析することになる. 初期状態の作 成方法を図-12 と図-13 を用いて説明する. 通常は, 水位変化なし, 流速ゼロの静止状態で, 津波を作用 させる(図-12(a))ことが多い.本解析では、解析 時間短縮のため,ある程度,津波が襲来したとき (図-12(b))から、3次元津波解析を実施する.前 述した平面2次元津波解析における評価地点(図-8 内の評価地点)の水位変化を図-13 (図-6 のグラフ の 20~50 分の拡大) に示す. 平面 2 次元解析結果 の対象橋梁位置の津波高さから、おおよその橋梁の 桁の高さまで津波水位が達する時刻がわかる. その 時刻より前で桁下に津波が当たらないと予想できる 32 分から 40 分の 8 分間(480 秒)を解析すること にした.その時間を図-13のグラフ内の太線で示し ている.ここで設定した初期状態を表示させると, 図-14 のようになる. この図は、初期設定する水位 と流速を示している.なお,2次元解析結果の流速 を用いているため、この時点で鉛直方向には流速の 変化はない.



図-15 宮崎市内の津波浸水アニメーション結果



(c) 津波が橋桁を乗り越えた時点図-16 対象橋梁の解析結果のスナップショット

# (4) 3次元解析の方法

前述したように初期状態(図-12(b))から,3次 元解析を実施する(解析終了は図-12(c))が,その 方法を次に示す.2次元解析結果から時刻32分の 水位と流速データを得て,海面の全メッシュ上にそ の水位を,水の領域の全メッシュ上にその流速を初 期値として設定する.3次元解析を実施する時点で, 入射境界(造波境界)から,その地点の2次元解析 結果の流速で水を流入させる.



# 6. 3次元津波シミュレーションの結果

#### (1) 浸水状態

地震発生から 40 分後の宮崎市内の浸水状態を図-15 に示す.この図から,津波が陸上に遡上して, 地形や構造物等の影響を受けながら,津波が浸水し ている状況がわかる.特に,建物の間を流れ,方向 と流速を変化させながら,建物の背後に回り込むと いった複雑な挙動になっている.前述した平面2次 元解析結果の図-7(c)のように,陸上を一律に津波 が浸水している状態とは異なる.

#### (2)対象橋梁の結果

対象橋梁に津波が作用する状態のスナップショットを図-16 に示す. 同図(a)から津波が橋桁に当たる前の状況, 同図(b)から津波が橋桁に当たった瞬間の挙動, 同図(c)から津波が橋桁を乗り越えてい

く状況がわかる.

また、本3次元津波解析により、対象橋梁の橋桁 周りの圧力が算出できる.その圧力から鉛直方向の 波力へ変換して、その波力(橋梁中央部の1径間分 の合計波力)の時刻歴をグラフにすると図-17のよ うになった.このグラフから、桁に津波が衝突して、 津波が上部工を越流し始めた時点(39.4分付近)で、 最大の鉛直方向波力を示すのがわかる.この鉛直波 力が約23000kNにも達するため、鉛直方向に浮き上 がり桁が流出する可能性はあると思われる.ただし、 前述したように、本橋梁のモデル化が正確でない部 分もあるため、実際に流出するかどうかの判定は、 対象橋梁の正確なモデル化および文献2)で提案して いる方法で行う必要がある.

なお,このグラフにおいて,最大荷重を示した後, 鉛直波力が低下するのは,津波が桁を覆いかぶさり 下方向に押さえる力が発生したからである.

# 7. まとめ

本研究では、橋梁を含む広域の3次元津波シミュ レーションを実施した.本研究で得られた主な結論 は以下のとおりである.

- スーパーコンピュータである京コンピュータ上 にて、橋梁を含む大規模な解析モデルによる3 次元津波解析を実施した.
- (2) 非線形長波理論による解析結果の水位と流速を 3次元津波解析の初期状態として解析する効率 のよい解析方法を提案した.
- (3) 広域の3次元津波シミュレーションにより、宮 崎市内の詳細な浸水状況が予想できた.
- (4) 本3次元津波解析により、想定される最大級の 津波に対して、対象橋梁の橋桁が流失する可能 性があると思われる.

また、今後の研究課題として、次のような課題が 挙げられる.

- (課題 1) 津波襲来の前に地震(ゆれ)により,構造物が被害を受けるが、その影響を考慮していない.特に、3次元解析上での堤防崩壊の状況をつくり出す必要がある.
- (課題2) 2次元解析結果を基にして3次元解析の 初期状態を作成しているため、3次元解析 を実施した時点で、計算が不連続になって いる.

謝辞:本論文の結果は,理化学研究所のスーパーコ ンピュータ「京」を利用して得られたものです (課題番号:hp130031).また,流体解析ソフト OpenFOAMを「京」上へ移植および高速化するに あたり,一般財団法人高度情報科学技術研究機構 の小久保達信氏,井上義昭氏,山本秀喜氏,増田典 氏,高田大輔氏にいろいろとご指導をいただきまし た.ここに記して謝意を表します.

#### 参考文献

- 原田隆典,村上啓介, Indradi Wijatmiko,坂本佳子, 野中哲也:津波により桁が流失した床版橋の再現解 析,第14回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関する シンポジウム講演論文集,pp.103-110,2011.
- 2) 野中哲也,本橋英樹,原田隆典,坂本佳子,菅付紘 一,宇佐美勉:津波波源から橋梁までの全体系津波 再現解析,第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に 関するシンポジウム講演論文集,pp.25-32,2012.
- OpenFOAM ユーザー会,一般社団法人オープン CAE 学会: OpenFOAM ユーザガイド和訳, 2010.
- 馬越一也, 葛漢彬, 野中哲也, 原田隆典, 村上啓介: 津波 襲来時における大型漂流物の長大橋衝突シミュレー ション, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.68, No.2, pp.I\_222-I\_227, 2012.11.