

# 大型ケーソン基礎を有する長大斜張橋への 津波波力の影響に関する検討

馬越一也<sup>1</sup>・葛漢彬<sup>2</sup>・中村真貴<sup>3</sup>・野中哲也<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 名城大学大学院 理工学研究科 社会環境デザイン工学専攻 (〒468-8502名古屋市天白区塩釜口1-501)

E-mail:magoshi@sean.co.jp

<sup>2</sup>正会員 博(工) 名城大学教授 理工学部社会基盤デザイン工学科 (〒468-8502名古屋市天白区塩釜口1-501)

E-mail:gehanbin@meijo-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 博(工) 宮崎大学工学部社会環境システム工学科研究員 (〒889-2192宮崎市学園木花台西1-1)

E-mail:nakamura@eerc.co.jp

<sup>4</sup>正会員 博(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)

E-mail:nonaka@sean.co.jp

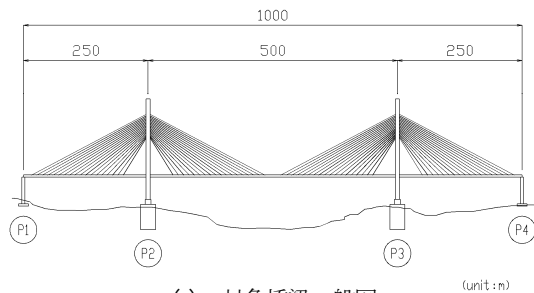
東北地方太平洋沖地震における構造物被害報告を背景に、地震と津波波力が対象橋梁の大型ケーソン基礎へ与える影響について、基礎を含む3次元数値流体解析とその結果から得られた基礎に作用する波力を外力とした橋梁全体系の構造解析により明らかにした。想定した震源断層を波源とする2次元津波伝播解析を実施して、対象橋梁付近の波高、流速および流向を算定し、3次元津波解析の造波条件とした。有限体積法を用いた数値流体解析コードで3次元津波解析を実施し、対象橋梁へ作用する津波波力を算定した。一方、構造物に対しては津波波力作用前には地震による損傷を受けているため、この影響は津波波力を入力する構造解析の初期状態として、地震応答解析によって得られた応力状態を用いることで考慮している。構造解析のモデルには基礎の滑動や浮上りのような地盤と基礎の非線形挙動を考慮して、3次元津波解析から得られた基礎に作用する時刻歴の津波波力を入力する複合非線形解析を実施し、応答解析の結果を示している。本論文ではこのように、同一震源断層による地震と津波といった一連の複合現象を、数値解析を組み合わせてシミュレートした結果を例示し、大型ケーソン基礎を有する橋梁全体系における複合被害を定量的に評価するための手法を提案している。

**Key Words :** tsunami forces, simulation of tsunami, whole bridge system, caisson foundation, geometrically and materially nonlinear analysis

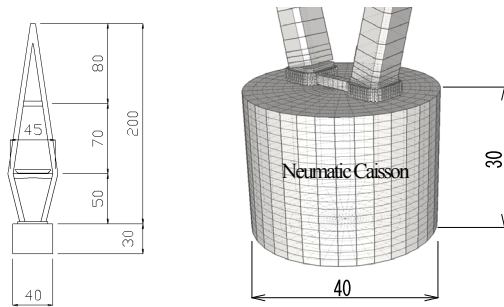
## 1. はじめに

東北地方太平洋沖地震において発生した津波による漂流物被害報告を受け、著者らは日本の主要港湾における大型構造物に対する漂流物被害を想定し、湾岸線に架橋された長大橋梁を対象とした数値シミュレーションを実施してきた<sup>1,2)</sup>。そこでは南海トラフの巨大地震モデル検討会<sup>3)</sup>が2011年12月27日に中間とりまとめとして発表した津波波源モデルを参考にして、東海地震、東南海地震、南海地震および日向灘プレート間地震の4連動Mw9.0地震(Mw:モーメントマグニチュード)の震源断層を想定し、非線形長波理論による津波伝播解析を実施した。さらに、長大斜張橋を対象とした地震応答解析ならびに津波によって漂流した大型船舶の主塔への衝突解析を行い、対象構造物への複合被害を評価し、その一連の偶発作用に対する解析手法を提案している。数値シ

ミュレーションのケーススタディでは、地震時に受けた主塔基部の僅かな損傷が大型船舶の衝突によって増長され、衝突部位よりも主塔基部の損傷が大きくなるという地震の影響を考慮しない場合と異なる結果が得られた。このことから、地震による損傷レベルが比較的小さいとしても、2次的被害(ここでは漂流物の衝突)によってその被害の拡大化が懸念されるといった知見が得られた。このように偶発作用における複合被害を一連の現象として捉えて構造全体で評価することは、損傷メカニズムを議論する上で重要と考えられる。そこで本論文では、長大斜張橋の基礎構造物(ここでは大型ケーソン基礎を想定している)に着目して、同一震源断層における地震動と津波の複合現象における構造物被害について検討を実施するものとした。具体的には、日本の主要港湾のひとつである大阪湾東側湾岸沿いに架橋している長大斜張橋を想定し、津波が襲来したときの大型ケーソン基礎に対



(a) 対象橋梁一般図



(b) 主塔とケーソン基礎の形状

図-1 対象橋梁一般図

する津波波力を3次元津波解析によって算定し、地震時の損傷を考慮した橋梁全体系モデル<sup>2),4)</sup>にその津波波力を入力する動的応答解析を行い、複合現象における構造物被害を明らかにする。対象橋梁は図-1に示すような大型ケーソン基礎を有する橋長1,000 m(250+500+250)の2主塔3径間鋼斜張橋を想定した。大型ケーソン基礎は直径40 m、高さ30 mの円柱形状であり、透水性が高い軟弱地盤に根入れ(12.4 m)されているニューマチックケーソンを想定した。ここに、ケーソン基礎の防舷材およびフーチングの形状は無視するものとした。

近年では、構造物に作用する波力を求めるために粒子法を用いた試み<sup>9)</sup>のほか、オープンソースとして無償で公開されているOpenFOAM<sup>6)</sup>やFrontFlow/Red<sup>7)</sup>といった様々な数値流体解析コードを用いた精度検証や実用性に向けた研究および大規模並列計算への適用が精力的に行われている<sup>8),11)</sup>。国内における海洋構造物に対する津波解析は、一般財団法人沿岸技術研究センターから提供されているCADMAS-SURF<sup>12)</sup>も広く用いられているが、本研究では図-1(b)に示すように円柱形状の大型ケーソン基礎を対象としているため、離散化手法に優位性がある有限体積法を用いた数値流体解析コードOpenFOAMで3次元津波解析を実施した。なお、著者らは構造物の規模は異なるが、円柱形状の石油等液体貯蔵タンクを対象として、OpenFOAMを用いた津波波力の検討<sup>13)</sup>も行っている。

津波波力を入力する構造解析（以下、津波作用構造解析と称する）は、地盤と基礎の非線形動的相互作用を考慮した橋梁全体系モデル<sup>4)</sup>を用いて、津波波力作用時の基礎周辺地盤の非線形挙動および橋梁上部工の損傷を評

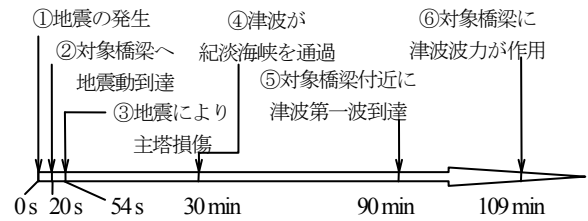


図-2 大阪湾に位置する対象橋梁に対する想定した複合現象の時系列整理

価した。ここに、橋梁全体系モデルには津波波力作用前に受ける地震による損傷を初期状態として与え、その影響を考慮している。

## 2. 検討手順

本論文で想定している大阪湾に位置する対象橋梁への複合被害を、後述する非線形長波理論による津波伝播解析および地震応答解析の結果を用いて時系列に整理すると次のようである（図-2）。

- ① 想定地震の発生 (0秒)
- ② 地震発生約20秒後に対象橋梁に地震動到達
- ③ 地震発生約54秒後に地震による最大応答（主塔基部ひずみ）を記録
- ④ 地震発生後約30分後に津波が紀淡海峡を通過
- ⑤ 地震発生後約90分後に対象橋梁付近に津波第一波到達
- ⑥ 地震発生後109分後に最大津波が到達し、対象橋梁に波力が作用

ここに、②の時刻は、想定した4連動地震のうち、架橋位置最近である東南海地震想定断層からの距離  $L \approx 160$  km、東南海地震断層幅  $W = 80$  km および  $V_s \approx 3.8$  km/s ( $V_s$ : S波速度) として試算した結果である。③の時刻は①の震源断層から作成した地震動を入力する地震応答解析の結果である。また、④、⑤、⑥は津波伝播解析の結果から得られた時刻である。

この一連の複合現象を数値シミュレーションによって明らかにするために、次のような手順で検討を行った。

- (a) 想定した震源断層による地震を波源モデルとした非線形長波理論による津波伝播解析を実施する。
- (b) 津波伝播解析で得られた対象橋梁付近の流速および波高を初期条件として、数値流体解析コードOpenFOAMを用いた3次元津波解析を実施し、大型ケーソン基礎へ作用する波圧を算定する。
- (c) 上記(a)で想定した波源モデルをもとに、短周期工学基盤波を統計的グリーン関数法、長周期工学基盤波を剛性マトリックス法で計算して重ねあわせる広帯域ハイブリッド法によって工学基盤波を求

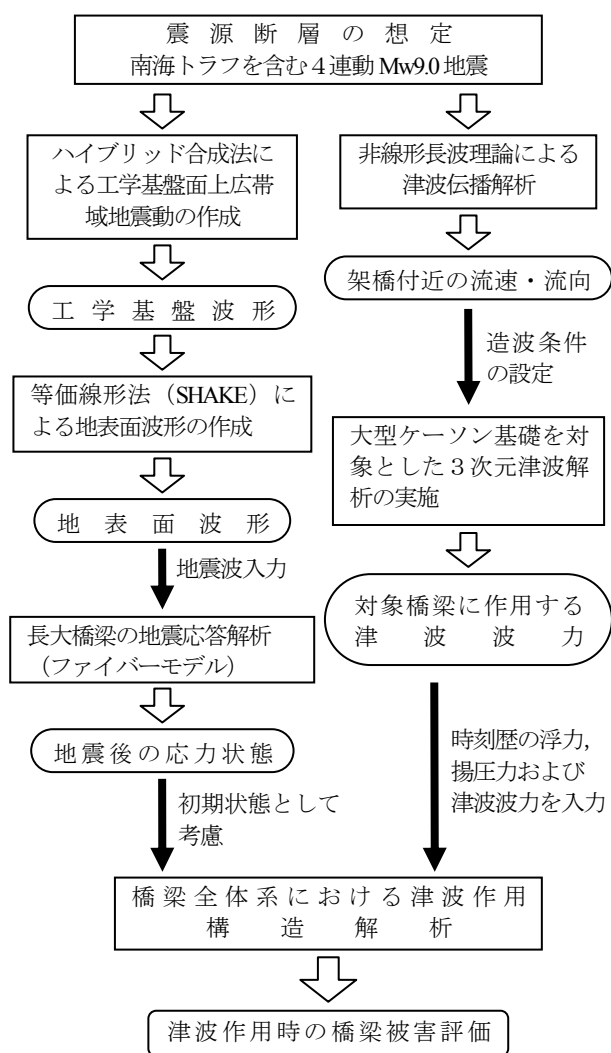


図-3 震源断層から長大橋梁までの全体系における複合現象を模擬する検討フロー

め、等価線形法(SHAKE)により地震応答解析に用いる地表面波を作成する。

- (d) ファイバー要素および地盤と基礎の非線形動的相互作用を考慮した橋梁全体系モデルへ(c)で求めた地震動を入力する複合非線形動的応答解析を実施する。
- (e) (d)の地震による損傷状態を引き継いだ構造へ(b)で求めた津波波力を入力する橋梁全体系の津波作用構造解析を実施する。

この手順をフローにしたものが図-3である。ここに、(a)に示す津波伝播解析および(c)の想定震源断層からの地表面地震動の作成については文献 1), 2)を流用するものとし、本論文では要約して述べている。

### 3. 津波伝播解析

南海トラフの巨大地震モデル検討会が2011年12月27日に中間取りまとめとして発表した津波波源モデルを参

表-1 想定地震の断層パラメータおよび地震規模

| 地震の種類      | 断層帯位置 | 断層長さ<br>L<br>(km) | 断層幅<br>W<br>(km) | 断層面積<br>S<br>(km <sup>2</sup> ) | モーメント<br>マグニ<br>チュード<br>Mw |
|------------|-------|-------------------|------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 南海トラフ地震    | 東海地震  | 115               | 82               | 9,400                           | 8.2                        |
|            | 東南海地震 | 174               | 91               | 15,800                          | 8.4                        |
|            | 南海地震  | 295               | 125              | 37,000                          | 8.8                        |
| 日向灘プレート間地震 | 北部    | 64                | 48               | 3,082                           | 7.7                        |
|            | 南部    | 75                | 54               | 4,079                           | 7.8                        |
| 4連動地震      |       | -                 | -                | -                               | 9.0                        |

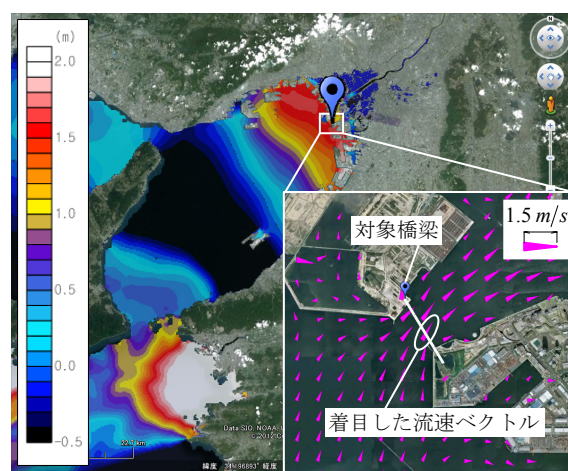


図-4 最大流速時の水位変化コンター図と対象橋梁付近の流速ベクトル図

考にして、東海地震、東南海地震、南海地震、日向灘プレート間地震の4連動地震(Mw=9.0)を想定した波源モデルを用いて津波伝播解析を実施した。想定した4連動地震の断層パラメータおよび地震規模を表-1に示す。津波伝播解析の解析領域は、想定した架橋位置の大阪湾に着目して、最小計算格子幅は10mの6段階多層メッシュ構成とした。津波伝播解析は、想定した波源モデルからMansinha and Smylieの方法<sup>14)</sup>によって計算される海底地盤変動を海面の初期水位変動として、2次元浅水流モデルを差分法に基づく非線形長波理論で行った。計算時間間隔は0.1s、計算継続時間は地震発生から6時間とした。また、計算には対象橋梁付近の台風期朔望平均満潮位T.P.+0.9m(O.P.+2.20m)を考慮している。

津波伝播解析の結果、地震発生30分後には太平洋から大阪湾へ通じる紀伊水道から紀淡海峡にかけて津波が到達し、対象橋梁への第一波は約90分後に到達した。最大流速時の大阪湾の水位変化コンター図と対象橋梁付近の流速ベクトル図を図-4に示す。図に示している着目した流速ベクトル位置の最大津波高さは114分後に

2.702 m を記録した。中央防災会議が 2012 年 8 月 29 日に発表した報告では、対象橋梁付近の大阪市此花区の最大津波高さは 4 m となっている。本解析結果の対象橋梁付近最大津波高さはそれよりも約 1.3 m 低くなっているように見えるが、この要因として、中央防災会議報告の最大津波高さが沿岸地点を抽出したもので、本解析の抽出地点と異なることが挙げられる。確認のために、本解析で中央防災会議報告と同様に此花区近辺の沿岸の最大津波高さを抽出したところ、中央防災会議報告に近い約 3.5 m が記録されている場所もあった。さらに中央防災会議報告で示されている 1 m 到達時刻も比較的一致（中央防災会議報告では 90-120 分、本解析では 104 分）していることがわかった。これらのことから、本解析で想定した津波被害は、中央防災会議の想定とほぼ同程度と考えられる。

同位置での合成流速（東西成分流速と南北成分流速の合成成分の流速）は地震発生 109 分後に最大 1.14 m/s を記録し、その時の流向は北方向から右回りに  $30.7^\circ$  であった。これら津波伝播解析から得られた津波高さ、流速および流向を 3 次元津波解析の造波条件とした。

#### 4. 3 次元津波解析

架橋位置付近の津波伝播解析の結果を用いて、大型ケーソン基礎に作用する津波波力を 3 次元津波解析によって算定した。

##### (1) 解析条件

本解析には、OpenFOAM のひとつである非圧縮・不混合流体の 2 相流を対象としたソルバー interFoam を用いて、対象橋梁に対する 3 次元津波解析を実施した。本解析は、図-1 (b) に示すような円柱形状のケーソン基礎に着目しているため、形状のモデル化において有利な有限体積法を用いている。また、VOF 法によって津波の自由表面を取り扱い、LES 乱流モデル（標準 Smagorinsky モデル）を用いることで、ケーソン基礎周辺、特に後流における圧力損失、さらに渦を含んだ複雑な流れを評価した。

本研究の検討ケースとして、次の 2 つのシナリオを作成した。

- ・ シナリオ A：対象橋梁に対して、同一断層による地震と津波の複合現象を評価するケース。南海トラフを震源断層とした津波伝播解析から得られた流速および波高を 3 次元津波解析の初期状態に用いる。
- ・ シナリオ B：ケーソン基礎周辺地盤が洗掘等により支持機能が低下した状態（すなわち、直接基

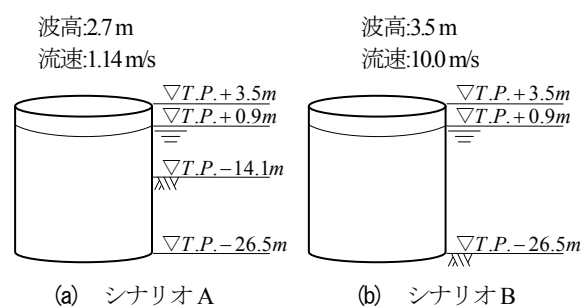


図-5 検討ケース

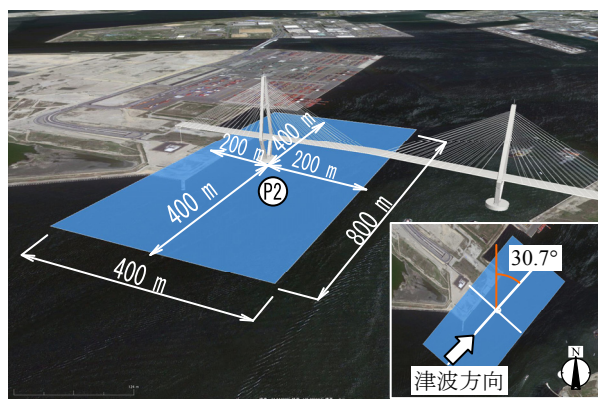


図-6 3次元津波解析領域

礎）に、架橋位置にシナリオ A よりも大きい津波が襲来したと想定したケース。東北地方太平洋沖地震において発生した津波を想定して、3 次元津波解析の初期状態に用いる流速を映像記録から分析された流速<sup>15)</sup>を参考に設定した。

これらのシナリオを解析条件とともに図-5 に示す。ここに、本論文では橋梁全体系における大型ケーソン基礎への津波波力の影響を明らかにすることに主眼を置き、シナリオ B における流速と波高の相互関係を定める造波条件については取り扱わず、造波位置での波高はケーソン基礎の天端とした。

解析領域は図-6 に示すように、対象橋梁の P2 主塔基礎を中心として、非線形長波理論による津波伝播解析から得られた流向に 800 m、流向直角方向の境界条件によってケーソン基礎に対する津波の流れが阻害されない範囲として 400 m の領域を採った。また、解析領域の境界条件を図-7 に示す。津波進行方向の後端面は津波の反射による影響を受けないように放射境界（赤破線で図示）とし、津波進行方向の側面は反射境界（赤実線で図示）とした。津波がケーソン天端を越流して、津波波力が主塔基部へ作用する可能性があるため、図-8 に示すように、主塔下柱の一部の形状を解析モデルに反映した。架橋位置の海底は津波の流れに影響するような大きな起伏はなかったため、解析モデルに海底地形の影響は無視し、モデル空間を節約するために空間高さをシナリオ A とシナリオ B で変化させている（図-7c）。解析空間の要素分割は平面 800 m×400 m を 2 m メッシュとし、高さ

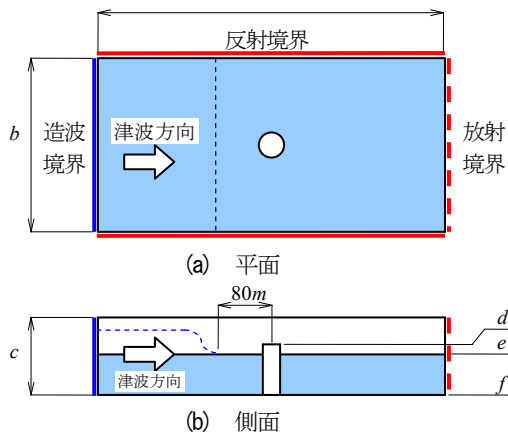
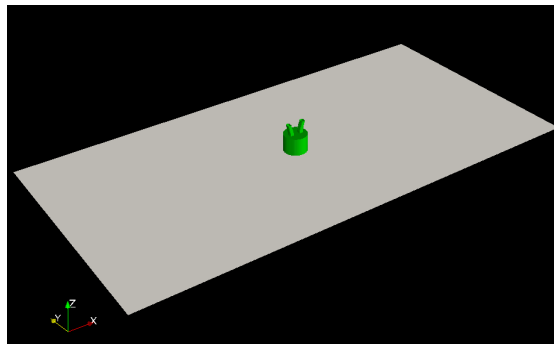
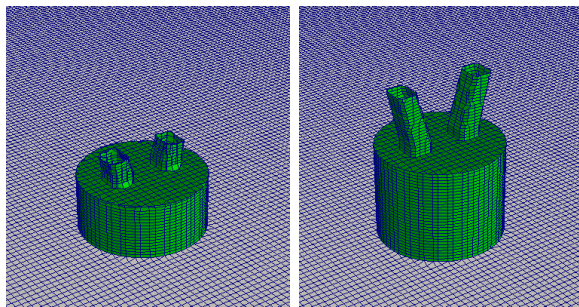


図-7 解析空間と境界条件



(a) 全体図 (シナリオ B)



(b) シナリオ A

(c) シナリオ B

図-8 解析モデル

表-2 検討ケースの要素分割

|      | シナリオA             | シナリオB             |
|------|-------------------|-------------------|
| a    | 2 m × 400 = 800 m | 2 m × 400 = 800 m |
| b    | 2 m × 200 = 400 m | 2 m × 200 = 400 m |
| c    | 1 m × 27 = 27 m   | 1 m × 50 = 50 m   |
| d    | T.P. +3.5 m       | T.P. +3.5 m       |
| e    | T.P. +0.9 m       | T.P. +0.9 m       |
| f    | T.P. -14.1 m      | T.P. -26.5 m      |
| 全要素数 | 2,160,000         | 4,000,000         |

方向には 1 m で分割した。解析空間の要素分割、図-7 に示す a ~ f 値を表-2 に示している。解析空間の要素数はシナリオ A で 216 万、シナリオ B は 400 万となった。図-7(b) に示す造波境界と、ケーソン基礎モデルから 80 m の位置までの範囲に初期水位および初期流速を与え、解析直後からの水塊の落下と、造波境界から津波進行方向に向けて一定流速を与えることで液状段波形状の津波を作用させた。解析継続時間は、流速の遅いシナリオ A は 50 s、流速が速いシナリオ B は 25 s に設定した。また、

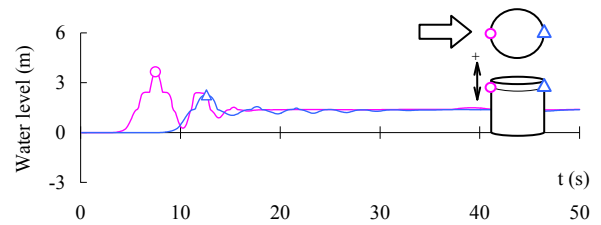


図-9 ケーソン基礎前面と背面の波高 (シナリオ A)

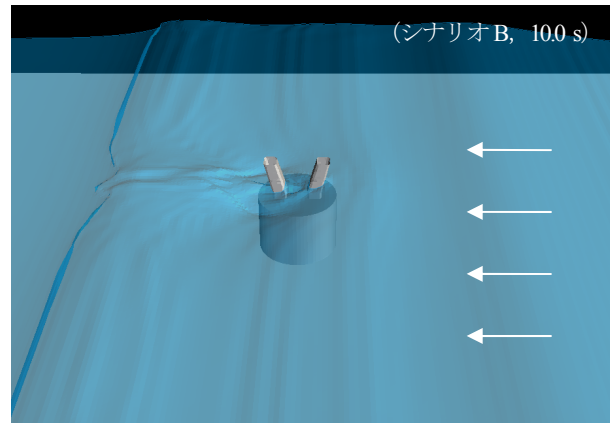


図-10 ケーソン基礎近傍の津波襲来状況

計算時間刻み幅 (時間ステップ) はクーラン条件を満たすように初期値を 0.001 s として計算中に逐次自動調整させる手法を採用している。

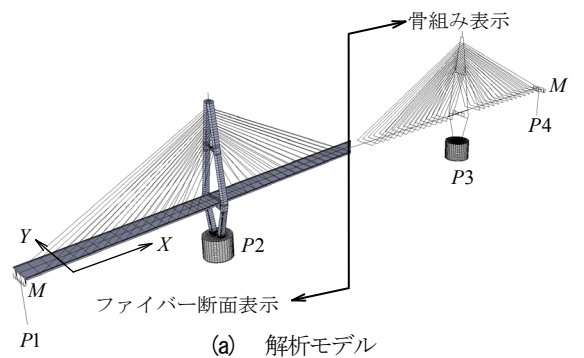
## (2) 津波解析

シナリオ A の解析で得られたケーソン基礎上端位置の波高を図-9 に示す。同図はケーソン基礎の津波進行方向に対して前面 (図内○) と背面 (図内△) の波高であり、初期水位をゼロとして示している。5 s 付近でケーソン前面側から水位が上昇し、それから約 3 s 後に背面の水位が上昇していることがわかる。8 s 付近の前面の波高時刻歴形状で不連続に高くなっているのは津波がケーソンに当たった後のしぶきのような局所的な水位変化を捉えているためである。

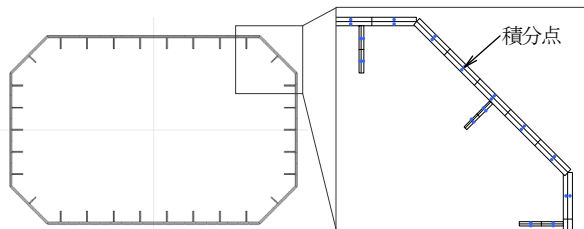
シナリオ B のケーソン基礎周辺で最大の波高となった時刻のスナップショットを図-10 に示す。図はケーソン基礎天端が完全に水没する時刻であり、主塔柱部を津波が迂回して背面側の水面変動を表現できていることがわかる。なお、シナリオ A および B の代表的な時刻のスナップショットは付録を参照されたい。

## 5. 地震応答解析

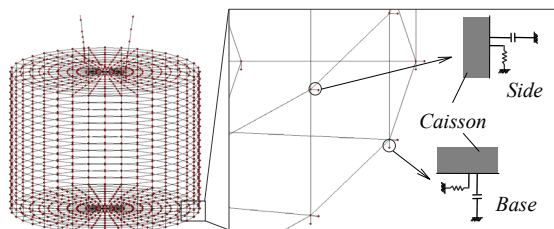
地震による構造物被害の影響を津波作用構造解析の初期状態として引き継ぐために、想定震源断層から架橋位置付近のサイト波形を作成し、ファイバー要素を用いた橋梁全体系モデルへ入力する地震応答解析を実施した。



(a) 解析モデル



(b) 主塔柱一般部ファイバー断面図



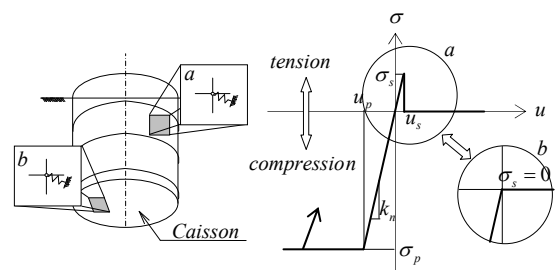
(c) ケーソン基礎モデル図

図-11 橋梁全体系解析モデル

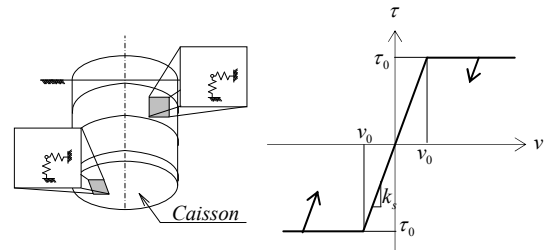
### (1) 広帯域ハイブリッド法による地震波作成

地震応答解析に用いる入力地震動は、3章の津波伝播解析で想定した波源モデルと同一の震源断層から、次のように求めた地表面地震動を用いる。

短周期工学基盤波を、地震と地盤の不確実性を確率論的に予測精度向上を図った統計的グリーン関数法によって作成した。具体的には、加速度応答スペクトルにおいて周期が約1秒以下の領域で既往研究成果に基づき、断層パラメータの立ち上がり時間、破壊伝播速度およびランダム位相角をパラメトリックに300個の地震波を作成し、加速度応答スペクトルの平均スペクトルから $+2\sigma$ （ここに、 $\sigma$ ：標準偏差）シフトしたスペクトルに最も近い波形を選定した。長周期工学基盤波を、1秒以上の領域を対象として運動学的断層モデルと水平成層地盤モデルに基づいた理論的な地震動合成法である剛性マトリックス法を用いて計算した。求めた短周期工学基盤波と長周期工学基盤波の1～12秒の接続周期を中心とするマッチングフィルタを用いて時刻歴波形をフィルタ処理して合成し、広帯域の工学基盤波を計算した。求めた波形から等価線形法(SHAKE)で地震応答解析に用いる地表面地震動を求めた。



(a) 法線方向



(b) せん断方向

図-12 非線形地盤反力モデル

### (2) 橋梁全体系解析モデル

解析モデルはファイバーモデルを用いた橋梁全体系モデル<sup>2)</sup>とした。モデル図を骨組み表示とファイバー断面表示を合わせて図-11(a)に示す。主塔および主桁の実状断面をファイバー要素(図-11(b))でモデル化し、2次勾配が $E/100$ のバイリニア移動硬化則を設定した。下部構造は、本論文で着目しているケーソン基礎の挙動を精確に表現するために、基礎-地盤系は地盤と基礎の非線形動的相互作用を考慮するモデル<sup>4)</sup>を採用した。これは、図-11(c)のように、側面の法線方向とせん断方向、および基礎底面の鉛直方向と水平方向に図-12の非線形地盤バネを分散して配置したモデルである。このモデルは、基礎周辺地盤からの反力特性(浮き上がり、剥離、すべり)を、基礎と地盤の接触面の単位面積あたりに作用する3成分地盤反力に対してWinklerモデルの考え方を採用した非線形地盤バネによって評価する。基礎の周辺地盤特性は文献4)と同じ軟弱地盤を想定して地盤反力係数および極限支持力を算出し、非線形地盤反力モデルに設定する。また、後述するように、津波作用構造解析で波圧力波形を面圧力として作用させるため、ケーソン基礎躯体を剛なシェル要素でモデル化した。以降、図-11(a)に示す方向に、橋軸方向をX、直角方向をYの記号を用いて記述するものとする。

### (3) 固有値解析および減衰の設定

固有値解析結果として、橋軸方向および直角方向の主要モード図を図-13に示す。橋軸および鉛直方向の卓越振動モードは固有周期 $T_X = 4.02$  s、直角方向の卓越振動モードは固有周期 $T_Y = 3.37$  sであった。地震応答解析の減衰モデルには部材別剛性比例減衰を用いて、橋軸と鉛

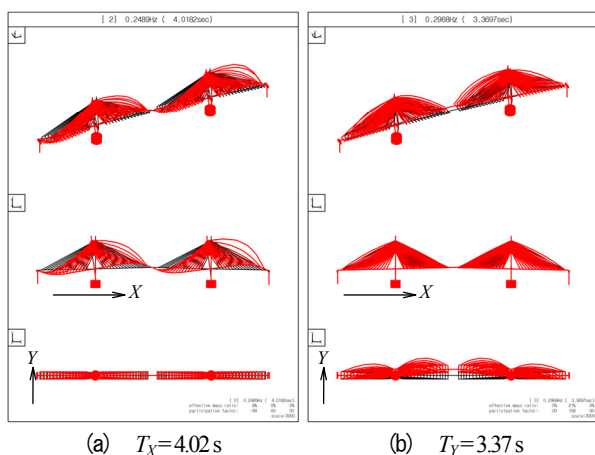
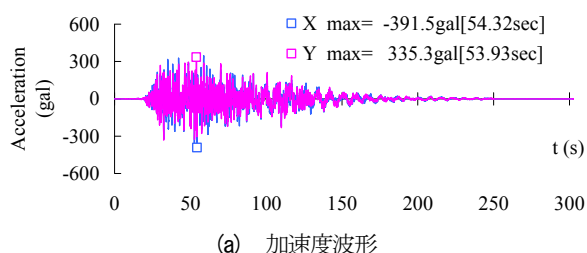
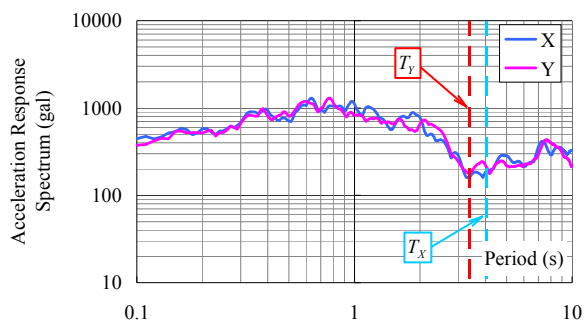


図-13 対象橋梁の卓越振動モード



(a) 加速度波形



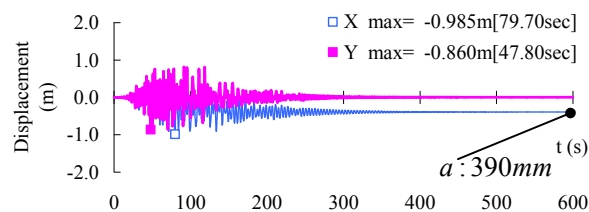
(b) 絶対加速度応答スペクトル (減衰 5%)

図-14 入力地震波

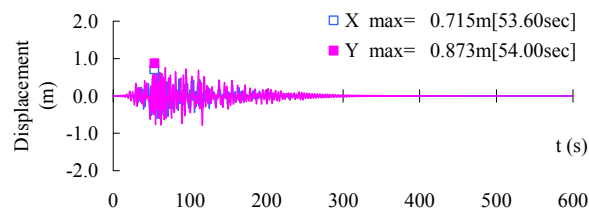
直方向の卓越モード ( $T_x$ ) に対応するひずみエネルギー比例減衰を設定した。ここで、減衰モデルに選択した卓越振動モードの妥当性については地震応答解析の結果をもって議論する。

#### (4) 入力地震波および解析条件

(1) 節で求めた地表面地震動を架設方向である  $X$  方向、 $Y$  方向に展開して入力地震波とした。入力地震波の加速度波形および 5% 減衰の絶対加速度応答スペクトルを各方向の卓越振動モードの固有周期と合わせて図-14 に示す。加速度波形は、 $X$  方向は最大 391.5 gal、 $Y$  方向は最大 335.3 gal であり、主要動は約 20 秒から 150 秒の間となっている。対象橋梁の固有周期  $T_x$ 、 $T_y$  のときの絶対加速度応答スペクトルはそれぞれ 187 gal、180 gal となっており、対象橋梁の固有周期は入力地震波の共振周期帯の下降域に位置している。入力地震波は耐震解析で用いられている時間間隔と同じ 0.01 秒間隔のデジタルデータ



(a) P2 主塔頂部



(b) 主桁支間中央

図-15 応答変位時刻歴波形

であり、主要動後の波形減衰域を含む継続時間 300 秒間 (5 分間) のデータとなっている。ここで、入力地震波の 0.0 s は地震発生時刻であり、架設位置と、そこから最も近い東南海地震の断層位置までの距離は約 160 km、 $S$  波速度  $V_s=3.8$  km/s から、地震波到達時刻は地震発生約 20 秒後となっている。

3 章の津波伝播解析の結果から津波波力の作用は最大流速を記録した 109 分後と想定しているため、入力地震波の継続時間 300 秒間 (5 分間) の揺れの後、構造は十分減衰していると考えられる。そこで地震応答解析の継続時間は、地震による揺れが収まる時刻を事前解析によって求め、地震発生後 600 秒間 (10 分間) に設定した。

なお、本解析で使用したソフトには SeanFEM ver.1.22<sup>16)</sup> を用いて、複合非線形解析を実施した。ここに、幾何学的非線形性は有限変位・微小ひずみ・有限回転 (Updated Lagrange 法) までを考慮する。また、数値時間積分においては、計算時間ステップ毎に収束計算を行い、各ステップで収束していることを確認する。以後の解析においても同じソフトを用いた。

#### (5) 地震応答解析

対象橋梁の基礎位置へ  $X$  方向、 $Y$  方向の地震波を同時に入力した地動地震応答解析を実施した。P2 主塔頂部と主桁支間中央の応答変位時刻歴波形を図-15 に示す。P2 主塔頂部では  $X$  方向に最大 0.985 m、 $Y$  方向に最大 0.860 m の応答変位が発生している。ここで、動的応答時の主要な変形状態は図-13(a) に示す  $T_x$  の固有モードに類似しており、150 s までの主塔頂部および主桁中央支間 1/4 点での鉛直方向、橋軸方向の応答変位時刻歴波形のフーリエ変換からも  $T_x$  の固有周期付近で卓越したスペクトルが現れていたことから、入力地震波に対する主要な振動は  $T_x$  であるといえる。このことから解析で用いた剛性比例減衰に選択した  $T_x$  のモードは動的応答

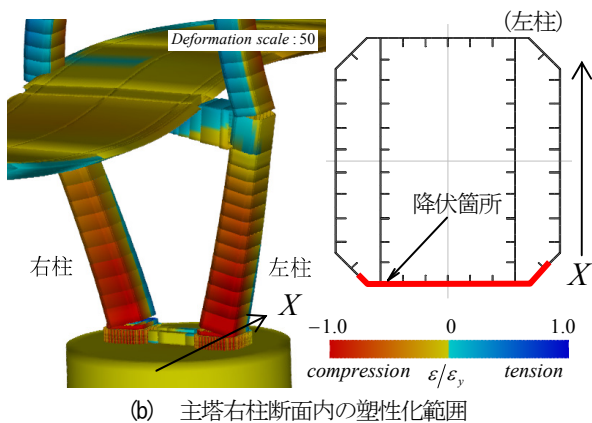
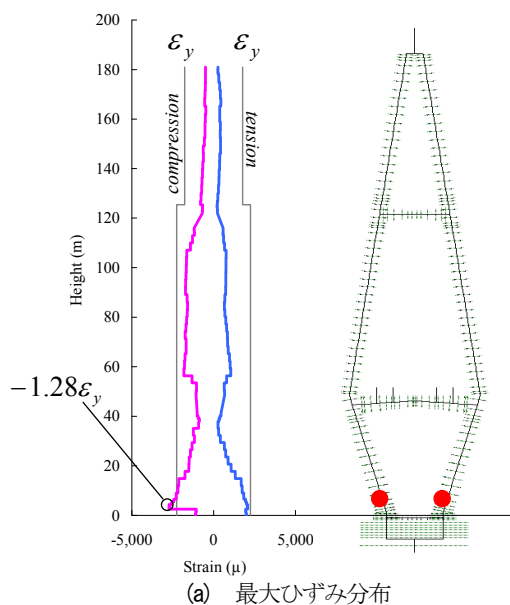


図-16 地震による P2 主塔の最大ひずみ分布と主塔断面内の塑性化範囲

時の振動を評価できていると言え、減衰モデル設定の妥当性を確認した。

図-16 に P2 主塔最大ひずみ分布と主塔基部の塑性化範囲を示す。P2 主塔は基部で最大  $2,880\mu$  の圧縮ひずみ ( $\cong 1.28\epsilon_y$ , SM570 材) が発生しており、降伏ひずみ  $\epsilon_y$  に対する超過率は比較的小さいものの、主塔基部の塑性化によって主塔頂部には  $390\text{ mm}$  の残留変位 (図-15(a) の点 a) が生じる結果となった。これは、図-16(b) の柱基部断面の赤で示している範囲に、X 方向に圧縮力を受ける方向の板が塑性化していることに起因する。P2 主塔基部で最大ひずみが発生した位置での応答ひずみ時刻歴波形および応力-ひずみ履歴を図-17 に示す。同図は主塔基部断面において最大値、最小値を記録したそれぞれの積分点について抽出したものであり、引張側 (プラス側) を青線、圧縮側 (マイナス側) を赤線で表しており、降伏ひずみの位置も合わせて示している。ここには紙面の都合上、P2 主塔の応答を示したが、P3 主塔においても同様の応答、損傷が見られた。また、地震によってケーソン基礎の側面および基礎に僅かな変形があった

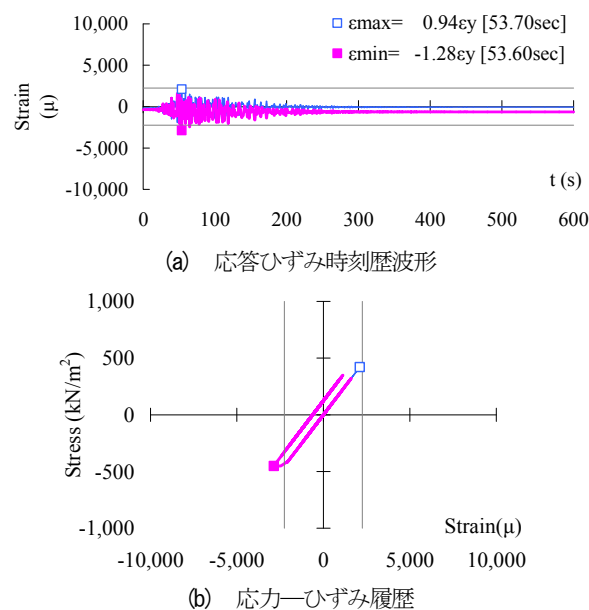


図-17 P2 主塔基部の応答ひずみ

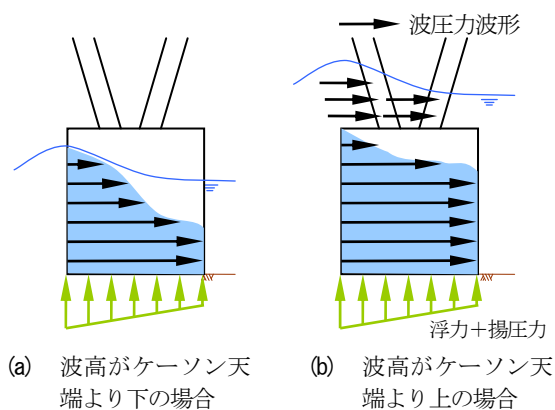


図-18 波力の与え方

ものの、非線形に入ることはなく、浮き上りや滑動といった応答は見られなかった。

## 6. 津波作用構造解析

地震応答解析の結果を初期状態とした橋梁全体系モデルに、4 章で得られた時刻歴の津波波力 (以下、波圧力波形) を与える構造解析を実施した。なお、4 章において算出されたシナリオ A による波圧力波形は小さく、構造解析の応答はシナリオ B と比べて微小であったため、ここではシナリオ B を対象として示すものとした。

### (1) 津波波力の与え方

波圧力波形の与え方の模式図を図-18 に示す。同図に示すように、波圧力波形はケーソン側面と、ケーソン天端よりも波高が高い場合には主塔柱部へも与える。ここに、橋梁全体系において津波は P2 主塔基礎に作用するものとし、P3 主塔基礎は陸上と仮定することで橋梁全

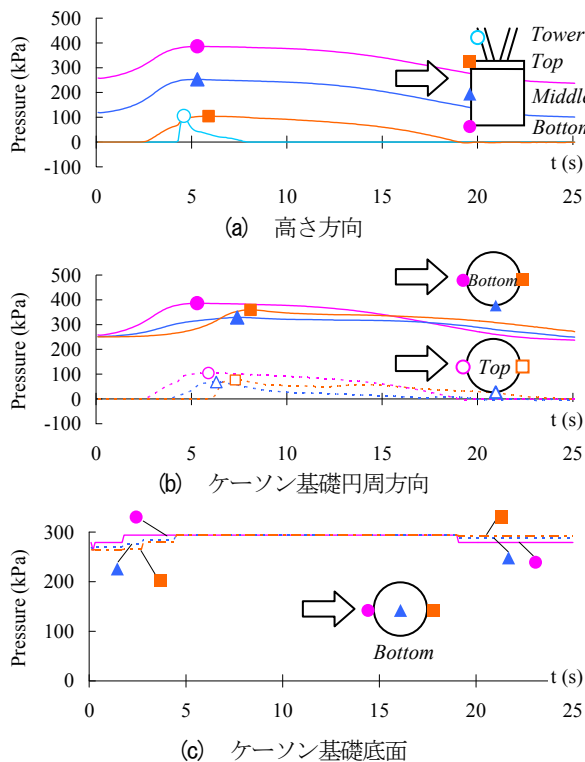


図-19 波圧力波形（シナリオ B）

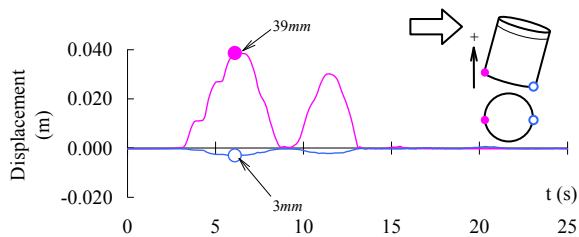


図-20 ケーソン基礎底面の応答変位時刻歴波形

体系の応答に対する非対称性を考慮している。

ケーソン基礎の周辺地盤は軟弱地盤を想定しているため、地盤と構造物の間に間隙水が存在するものとした。そこでケーソン基礎への浮力の作用として、ケーソン基礎底面に上方向の圧力を与える。さらに、時々刻々変化する構造物前後の水位差から発生する揚圧力の作用として、これも事前に波高から時刻歴で算出し、ケーソン底面に上方向の圧力として与えるものとした。

本解析に用いた波圧力波形を図-19 に示す。図内の矢印は津波作用方向を示し、時刻歴波形を指している記号はそれぞれの模式図での抽出位置を表している。

図-19(a) の初期状態 (0s) は静水圧を示しており、水深が深くなるにつれて (図内●▲■の順) 水圧は大きくなっている。また、主塔柱部 (図内○) には約 4 s 付近で波圧力が作用しており、構造物へ波圧力が作用した時の衝撃による圧力 (衝撃段波波圧) が見られる。

ケーソン基礎底面と天端の波圧力波形を図-19(b) に示している。天端前面 (図内○) には約 3 s 後、天端背面 (図内□) には約 4 s 後から津波波力が作用しており、

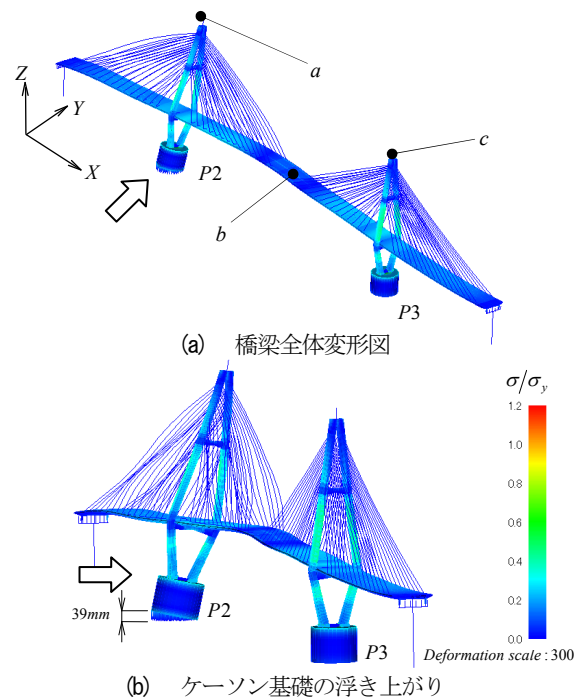


図-21 津波作用時の応力コンター変形図 (6.20s)

ケーソン基礎底面 (図内●▲■) では水流の回り込みによる水圧の変化が表れている。

図-19(c) には底面に作用する浮力および揚圧力の時刻歴を示している。シナリオ B におけるケーソン基礎躯体の約 90% は水中であるため、同図に示されるように揚圧力による水圧変動は小さく、底面に作用する圧力のほとんどは浮力によるものである。そこで、本解析ではこの浮力による底面の滑動のしやすさを表現するために、その影響をケーソン基礎底面の非線形地盤反力モデルに考慮するものとした。具体的には、底面のすべり限界応力  $\tau_0$  (図-19(b)) は文献 4) に示されるようにモール・クーロンの破壊基準を用いて算出するが、そのときの鉛直方向応力はケーソン基礎の自重による応力から浮力による上向きの応力を控除することで表した。ここで、ケーソン基礎底面への影響度の小さい時々刻々の揚圧力の変動は、すべり限界応力  $\tau_0$  の算定においては無視し、波圧力波形にのみ考慮するものとした。このように基礎-地盤系をモデル化することによって、津波波力作用時のケーソン基礎と地盤の動的相互作用ならびに対象としている大型ケーソン基礎の滑動を助長するような浮力の影響を考慮した。

## (2) 津波作用構造解析

波圧力波形を与えた構造解析の結果として、ケーソン基礎底面の変位時刻歴を図-20、ケーソン基礎の傾きが最大の時刻である 6.2 s のときの橋梁全体変形図を図-21 ならびに主要点の応答変位時刻歴波形を図-22 に示す。ケーソン基礎底面は津波の作用によって最大 39 mm の

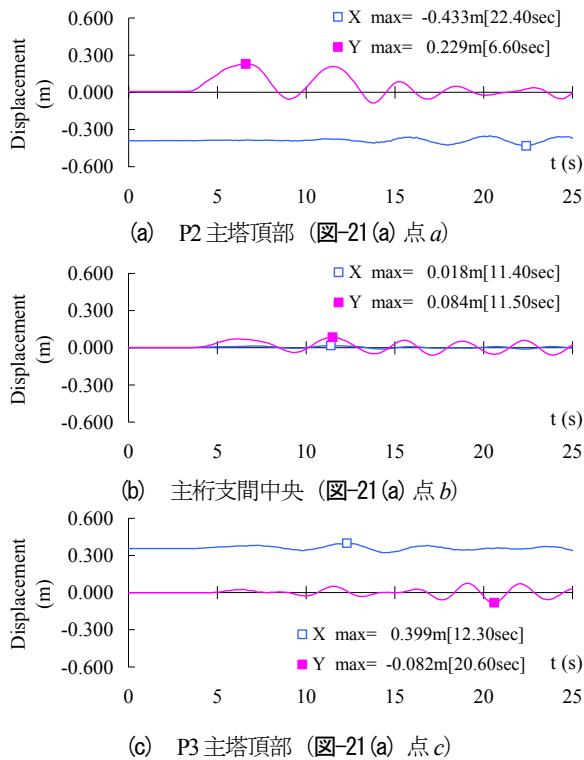


図-22 主要点の応答変位時刻歴波形

浮き上がりが生じており、変形図からはその影響が P2 主塔の傾きおよび主桁の面外変形といった橋梁全体系へ影響していることがわかる。また、図-22 に示すいずれの主要点の変位波形は、波圧力波形の主たる作用方向の Y 方向においては 15 s 以降は橋梁の固有周期（図-13(b)）に近い自由振動を示している。しかし、総じてその変形の変動量は橋梁規模に対して小さく、地震応答解析で降伏していた主塔柱基部は、波力が作用することによるケーソン基礎の変形や直接的に作用する波圧力波形を受けても塑性化範囲が広がることはなかった。また、ケーソン基礎底面は浮き上がったものの残留変形はなく、水平方向へ滑動はしていないことから、津波波力によって対象橋梁へ及ぼす影響は小さいと判断できる。

## 7. おわりに

地震による損傷を受けた長大橋梁に対して、津波による波力が作用する現象を、同一震源断層による地震動と津波の複合現象としてとらえ、大型ケーソン基礎に着目した長大斜張橋への複合被害シミュレーションの解析手法を例示し、その結果を示した。本研究で得られた結論をまとめると以下ようになる。

- (1) 津波伝播解析による対象橋梁付近の流速と水位を OpenFOAM を用いた 3 次元津波解析の初期状態として用い、対象橋梁への津波作用力を算定した

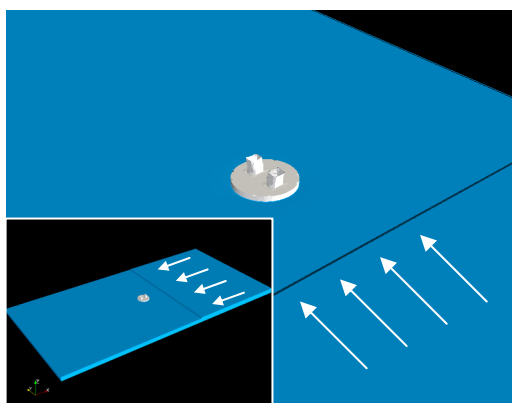
(シナリオ A)．さらに、基礎周辺地盤が洗掘等によって支持機能を失った状態に、東北地方太平洋沖地震レベルの津波が作用した場合を想定したシナリオ B についても同様の手法でケーソン基礎への津波波力を算定した。

- (2) 津波が作用する前の地震による損傷状態を再現するために、橋梁全体系モデルを用いた地震応答解析を実施した。津波伝播解析で想定した波源モデルと同一の震源断層から、広帯域ハイブリッド法による地震動を作成し、これを地震応答解析に用いる入力地震波とした。解析の結果、主塔基部に比較的小さい損傷が見られ、それに起因して主塔頂部には残留変位が発生した。
- (3) 3 次元津波解析から得られた津波波力とともに浮力・揚圧力を、地震による損傷を受けた橋梁全体系モデルへ動的に作用させる構造解析を実施した。シナリオ A による応答は小さく、橋梁へ与える影響はなかった。シナリオ B においては、ケーソン基礎の僅かな浮き上がりが生じたが、基礎の滑動は見られなかった。津波波力を受けることで上部構造に振動が広がるが、その変形は小さく、地震によって受けた主塔基部の損傷範囲が広がることはなかった。さらに浮き上りによる基礎の残留変形も見られなかったことから、対象とした大型ケーソン基礎を有する長大橋梁に対して津波波力の影響は小さいと考えられる。

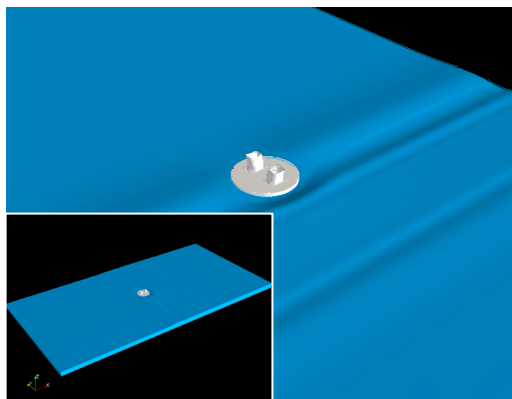
本論文は長大橋梁における偶発作用を想定したひとつのケーススタディを示しているため、架橋位置の地域特性や橋梁形式、ケーソン基礎の形状（高さとの比）によって基礎の滑動や転倒といった損傷メカニズムが異なることが予想される。しかしながら、本研究で示した同一震源断層による地震動と津波の作用を全体系における複合現象として捉え、対象構造物に対する損傷を評価するための解析手法を用いることで、他の地域の構造物評価に対しても定量的な分析が可能と考えている。本研究で用いた数値シミュレーションの解析精度の向上や妥当性の検証および評価方法については今後の課題としたい。

## 付録

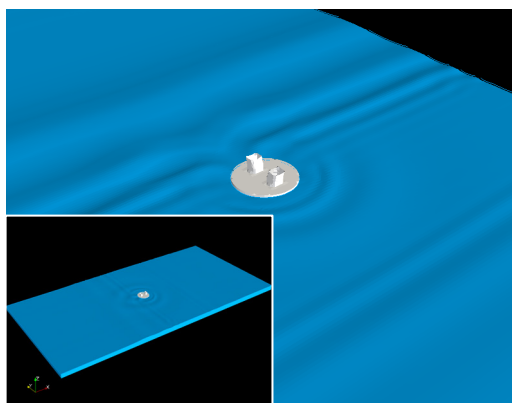
本論文で実施したシナリオ A およびシナリオ B の 3 次元津波解析結果として、代表的な時刻のスナップショットを付図-1、付図-2 にそれぞれ示す。各時刻の全体図と基礎構造に着目した拡大図を示しており、それぞれの図において、(a) に示す矢印は津波進行方向を示している。



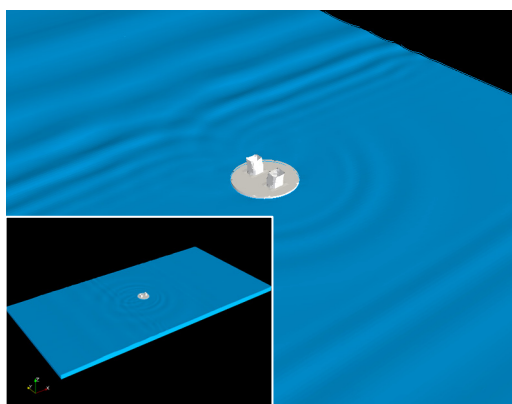
(a) 0秒後



(b) 10秒後

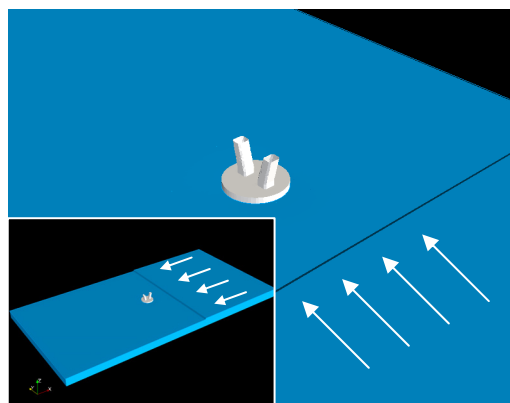


(c) 20秒後

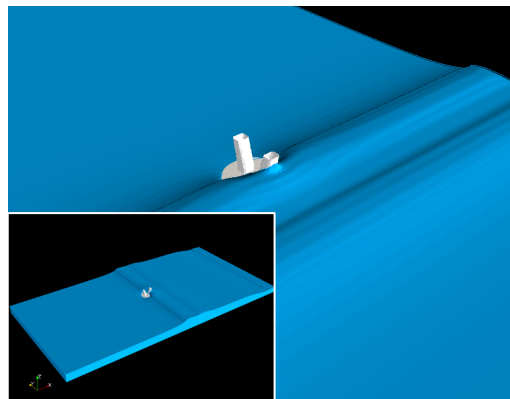


(d) 30秒後

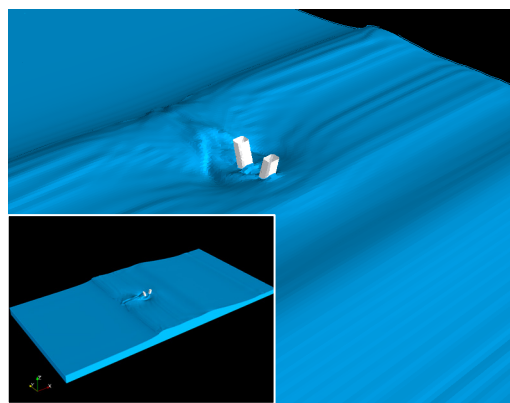
付図-1 3次元津波解析結果 (シナリオ A)



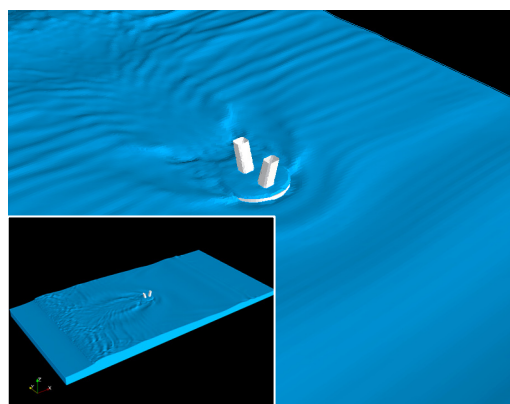
(a) 0秒後



(b) 10秒後



(c) 20秒後



(d) 30秒後

付図-2 3次元津波解析結果 (シナリオ B)

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 馬越一也, 葛漢彬, 野中哲也, 本橋英樹, 原田隆典, 宇佐美勉: 地震被害を受けた長大橋への津波による大型漂流物の衝突に関する解析的アプローチ, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.405-416, 2013.3.
- 3) 内閣府 (防災): 南海トラフの巨大地震モデル検討会, 第7回, 2011.12.27.
- 4) 原田隆典, 野中哲也, 馬越一也, 岩村真樹, 王宏沢: ファイバー要素を用いた地盤・基礎の非線形動的相互作用モデルとその橋梁全体系の地震応答解析への適用, 第10回応用力学論文集, 土木学会地震工学委員会, pp.1047-1054, 2007.8.
- 5) 田邊将一, 浅井光輝, 園田佳巨: 粒子法による津波が橋桁に与える流体力の予測とその検証, 土木学会西部支部研究発表会, I\_68, pp.135-136, 2013.3.
- 6) OpenFOAM ユーザー回, 一般財団法人オープン CAE 学会: OpenFOAM ユーザガイド和訳, 2010.
- 7) FrontFlow/Red: <http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/>
- 8) ファム バン フック, 長谷部雅伸, 高橋郁夫: VOF 法を用いた 3 次元津波解析に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I\_71-I\_75, 2012.11.
- 9) 松浦翔, 森貴寛, 坂谷太基, 川崎浩司: OpenFOAM を用いたダムブレイク解析とその精度検証, 土木学会中部支部研究発表会, pp.147-148, 2013.3.
- 10) 坂本佳子, 原田隆典, 野中哲也, 吉野廣一, 鳥越卓志: I 桁橋に対する津波波力特性の数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.450-458, 2013.3.
- 11) 野中哲也, 本橋英樹, 吉野廣一, 原田隆典, 川崎浩司, 馬越一也, 菅付紘一: 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, 第 16 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.265-272, 2013.7.
- 12) 沿岸技術ライブラリー No.39: CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発, 財団法人 沿岸技術研究センター, 2010.
- 13) 菅付紘一, 原田隆典, 野中哲也, 中村真貴, 馬越一也: 貯蔵タンクに対する津波被害の判定方法, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, 2013.
- 14) Mansinha, L. and Smylie, D. E.: The Displacement Fields of Inclined Faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440, 1971.
- 15) 中野亜美, 幸左賢二, 佐々木達生, 付李: 映像解析による歌津大橋の流出メカニズムの推定, 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.17-24, 2012.7.
- 16) 株式会社耐震解析研究所: SeanFEM ver.1.22 理論マニュアルと検証, 2007.11.

## FOCUSING ON THE IMPACT OF TSUNAMI FORCES TO A CABLE-STAYED BRIDGE ON LARGE CAISSON FOUNDATION

Kazuya MAGOSHI, Hanbin GE, Masaki NAKAMURA and Tetsuya NONAKA

This study is aiming at clarifying influences of the earthquake and tsunami to a cable-stayed bridge which has caisson foundation. For this purpose, a series of numeric simulations were carried out. First, flow speed, direction and height were determined by conducting a two-dimensional tsunami analysis of the large area, and they were then applied in a detailed three-dimensional tsunami analysis to obtain tsunami forces. Next, a structural analysis in which the acquired tsunami forces were input into a whole bridge system was performed. As a result, the foundation slide was not observed although the caisson foundation came floating slightly, and damage by the earthquake did not expand in the tsunami. It is concluded that the influence of tsunami force is small. Furthermore, a numerical procedure is proposed for estimating quantitatively the earthquake and tsunami induced compound damage in the whole bridge system which has large-scale caisson foundation.