

津波襲来時における津波波力による 大型ケーソン基礎への影響

馬越 一也¹・葛 漢彬²・中村 真貴³・野中 哲也⁴

¹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）

²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）

³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）

⁴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）

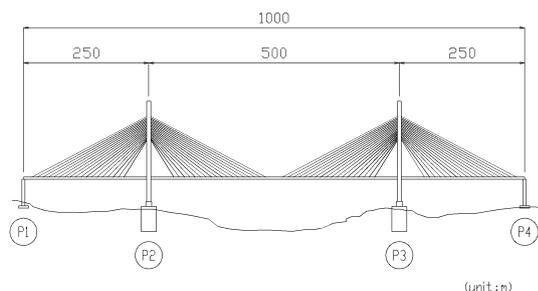
1. はじめに

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、著者らは文献 1), 2)（以下、前論文と称する）において、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。前論文では南海トラフの巨大地震モデル検討会³⁾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、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によって、偶発作用における対象構造物の被害を評価し、その手法を提案している。そこでは、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次の被害（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

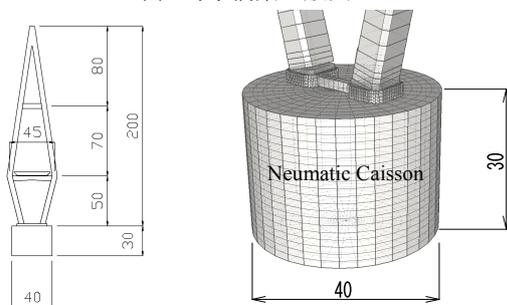
ある大阪湾東側湾岸沿いに架橋している長大斜張橋（図-1）を想定し、津波が襲来したときの大型ケーソン基礎に対する津波波力を3次元津波解析によって算定し、地震時の損傷を考慮した橋梁全体系モデル⁴⁾にその津波波力を入力する動的応答解析を行い、複合現象における構造物被害を明らかにする。

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⁵⁾のほか、OpenFOAM⁶⁾やFrontFlow/Red⁷⁾といった様々な数値流体解析コードがオープンソースとして無償で公開されており、それら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⁸⁾¹⁰⁾。海洋構造物に対する津波解析は、国内では一般財団法人沿岸技術研究センターから無償でダウンロードできるCADMAS-SURF¹¹⁾が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。円柱形状を対象として、OpenFOAM を用いた津波波力の検討は、構造物の規模は異なるものの、文献 12)において石油等の液体貯蔵タンクに対してなされており、本研究でも同様の手法を用いて津波波力を算定するものとした。

津波波力を入力する構造解析においては、文献 4)を参考にして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。



(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

2. 対象橋梁と検討手順

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 12.4 m 根入れされているニューマチックケーソンとした。また、防舷材およびフーチングの形状は無視するものとした。

本研究は次のような手順 (図-2) で検討を行った。

- (a) 南海トラフの巨大地震モデル検討会にて提示された津波波源モデルを参考に作成した 4 連動地震を波源モデルとし、非線形長波理論による津波伝播解析を実施する^{1),2)}。
- (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時系列で算定する。
- (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²⁾。
- (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

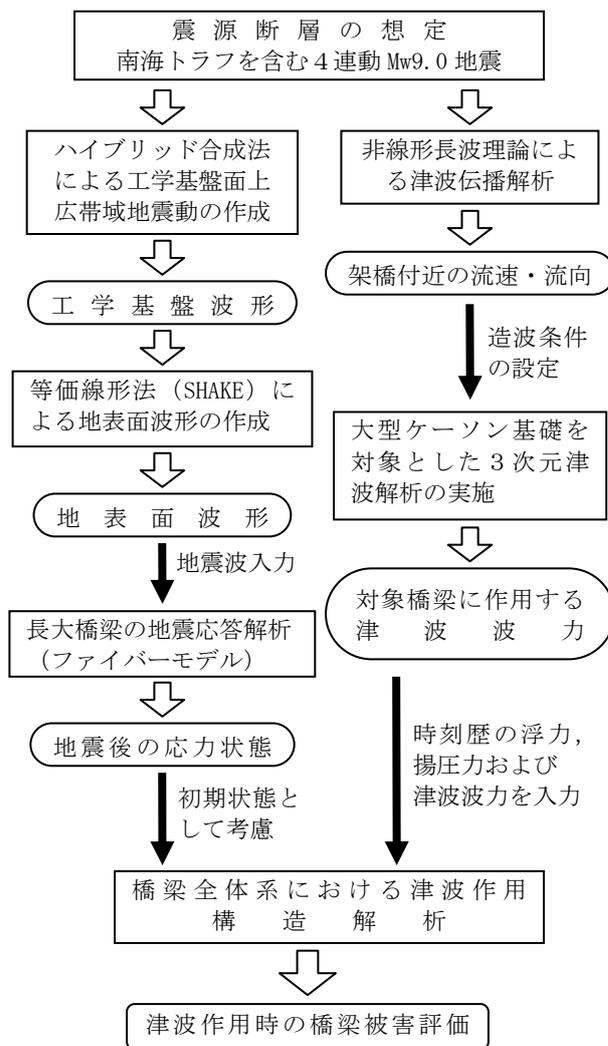


図-2 震源断層から長大橋梁までの全体系における複合現象を模擬する検討フロー

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動的弾塑性有限変位解析を実施する。

ここに、(a)に示す津波伝播解析および(c)の地表面地震動は前論文の結果を流用する。津波伝播解析の解析条件および解析結果ならびに地表面地震動の作成の詳細については前論文を参照されたい。

3. 津波解析

(1) 解析条件

本解析には、OpenFOAM の標準ソルバーのひとつである非圧縮・不混合和流体の 2 層流を対象とした 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。3 次元津波解析において、図-1 に示すようなケーソン基礎の円柱形状に着目してい

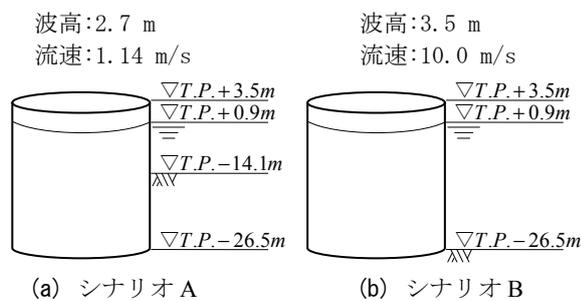


図-3 検討ケース

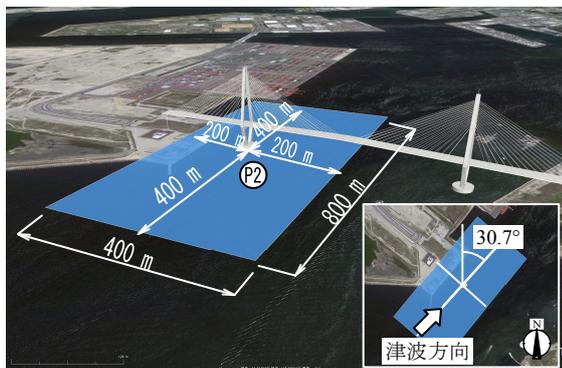


図-4 3次元津波解析領域

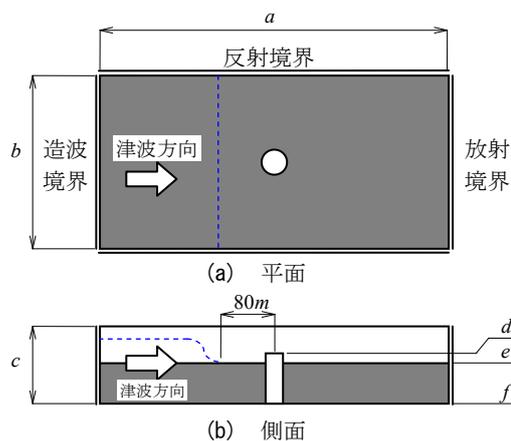
るため、形状のモデル化において有利な有限体積法を用いている。また、VOF法によって津波の自由表面を取り扱い、LES乱流モデル（標準 Smagorinskyモデル）を用いることでケーソン基礎周辺（特に後流）における圧力損失、さらに渦を含んだ複雑な流れを評価した。

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は文献13)で映像記録から分析された流速を参考に設定した。

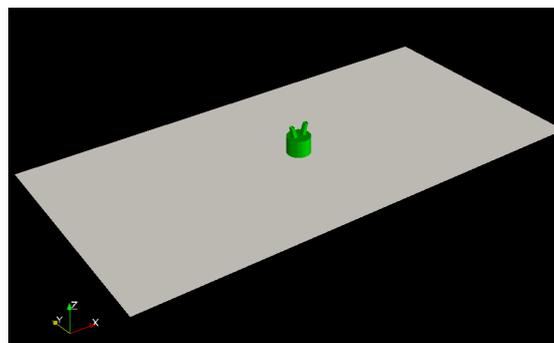
これらのシナリオを解析条件とともに図-3に示す。

解析領域は図-4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800m、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400mの領域を採った。また、解析領域の境界条件は図-5に示すように、

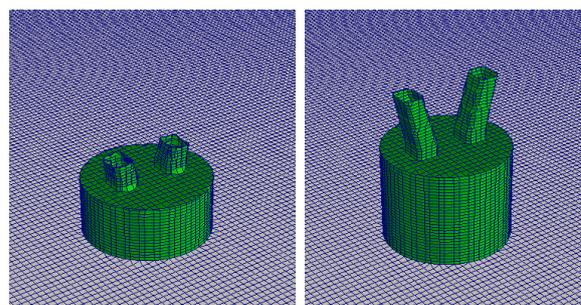


	シナリオA	シナリオB
a	2 m × 400 = 800 m	2 m × 400 = 800 m
b	2 m × 200 = 400 m	2 m × 200 = 400 m
c	1 m × 27 = 27 m	1 m × 50 = 50 m
d	T.P. +3.5 m	T.P. +3.5 m
e	T.P. +0.9 m	T.P. +0.9 m
f	T.P. -14.1 m	T.P. -26.5 m
全要素数	2,160,000	4,000,000

図-5 解析空間、境界条件および要素分割



(a) 全体図 (シナリオ B)



(b) シナリオ A (c) シナリオ B

図-6 解析モデル

津波進行方向の津波の反射による影響を受けないように放射境界とし、津波進行方向の側面は反射境界とした。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-6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-5内c）。解析空間の要素分割は平面

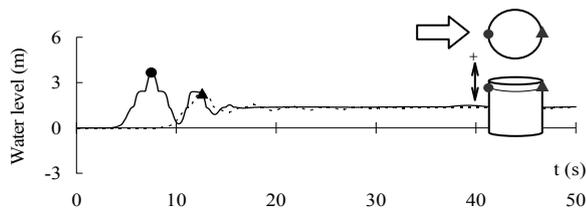


図-7 ケーソン基礎前面と背面の波高 (シナリオ A)

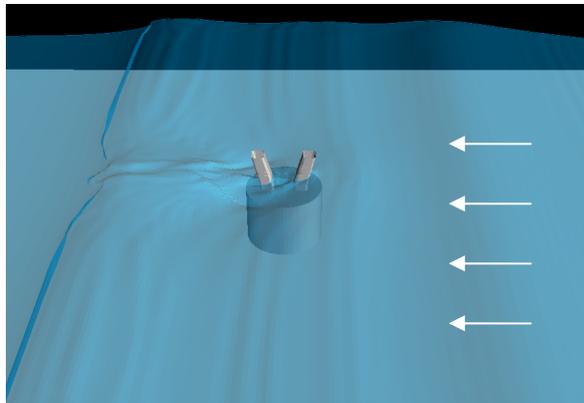


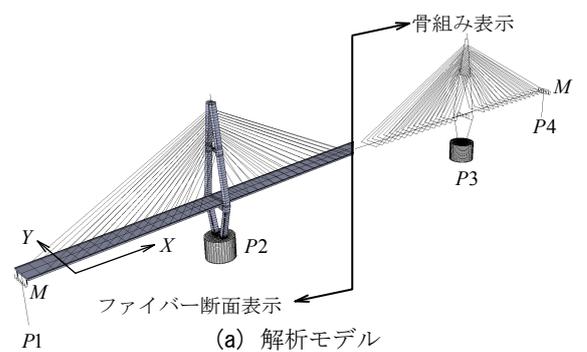
図-8 ケーソン基礎近傍の津波襲来状況
(シナリオ B, 10 s)

800 m×400 mを2 mメッシュとし、高さ方向には1 mで分割した。図-5 (b)に示すように造波境界と、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、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た。

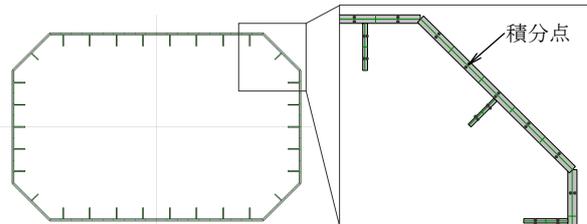
(2) 津波解析

シナリオ Aの解析で得られたケーソン基礎先端位置の波高を図-7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。

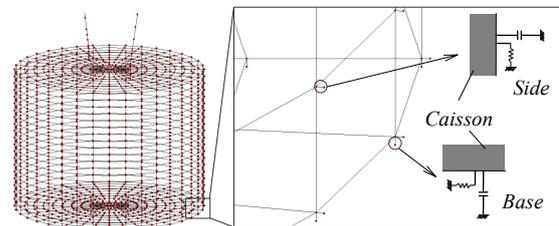
シナリオ Bのケーソン基礎周辺で最大の波高となった時刻のスナップショットを図-8に示す。図はケーソン基礎天端が完全に水没する時刻であり、主塔柱部を津波が迂回して背面側の水面変動を表現できていることがわかる。なお、シナリオ Aおよび Bの代表的な時刻のスナップショットは付録を参照されたい。



(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-9 橋梁全体系解析モデル

4. 橋梁全体系モデルを用いた構造解析

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、前章で算定された対象橋梁に作用する時刻歴の津波波力(以下、波圧力波形)を与える構造解析を実施した。なお、前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、構造解析の応答は微小であったため、解析モデル(次節(1))についてはシナリオ Aを含んだ説明をするが、(2)-(4)についてはシナリオ Bを対象として示すものとした。

(1) 解析モデル

解析モデルの全体図を図-9(a)に示す。解析モデルは主塔および主桁にファイバー要素(図-9(b))を用い、基礎-地盤系は文献4)を参考に地盤と基礎の非線形動的相互作用を考慮するモデルを採用した。これは、図-9(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-10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

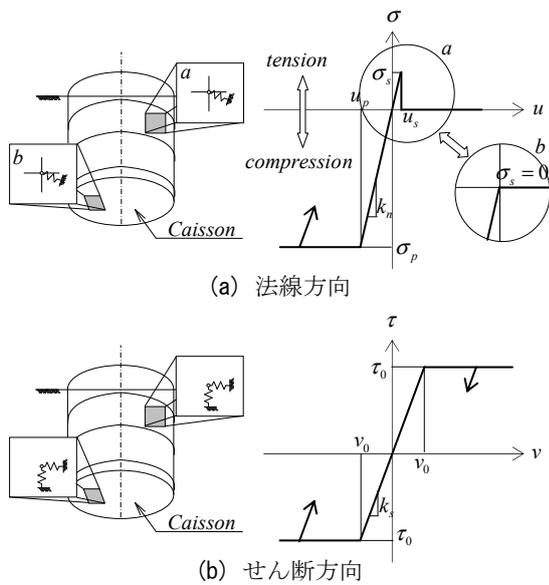


図-10 非線形地盤反力モデル

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、図-10 に示す地盤の非線形特性を設定するが、ケーソン基礎のほとんどは水中であるため、後述するように、この非線形地盤バネに、水中におけるケーソン基礎へ作用する浮力の影響を考慮する。また、本解析では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。

(2) 地震応答解析

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、統計的グリーン関数法と剛性マトリックス法を重ね合わせるハイブリッド合成法から作成した地震波を入力する地震応答解析を実施し、地震による揺れが収まる 600 秒後の応力状態を、津波波力を作用させる構造解析の初期状態とした。地震応答解析の結果、主塔基部に約 $1.28\epsilon_y$ の最大応答ひずみが発生し、P2 主塔頂部に橋軸方向へ 390mm の変位が残留した。

(3) 津波波力の与え方

波圧力波形は、前章で算定された時刻歴の波圧を図-11 のように、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、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体系の応答に対する非対称性を考慮した。

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

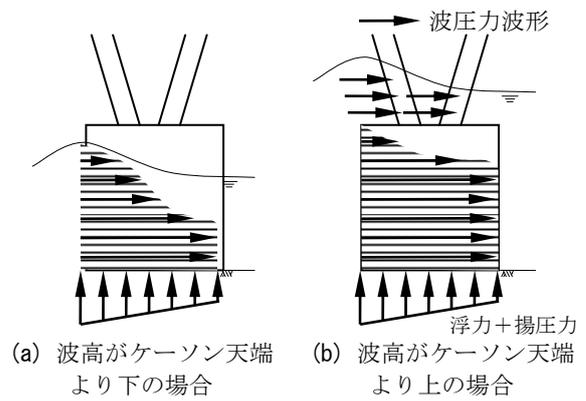
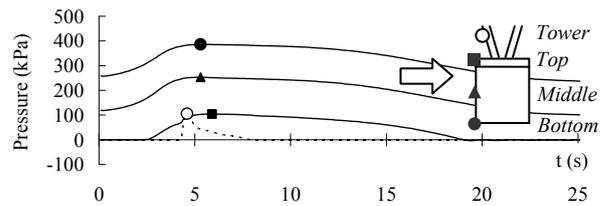
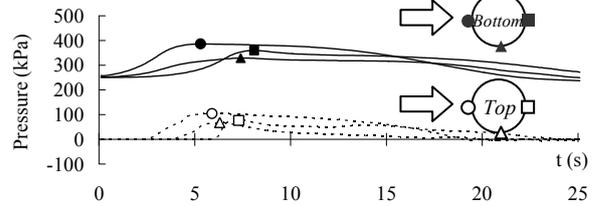


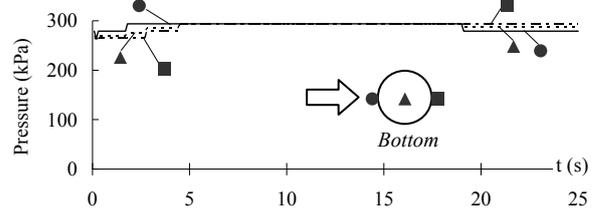
図-11 波力の与え方



(a) 高さ方向



(b) ケーソン基礎円周方向



(c) ケーソン基礎底面

図-12 波圧力波形

とした。そこで浮力の作用として、ケーソン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。

津波作用の構造解析に用いた波圧力波形を図-12 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-12(a)に示す波圧の初期状態 (0 s) 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。

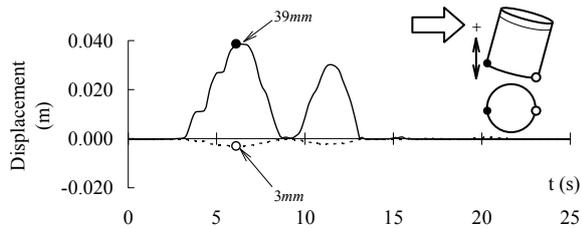
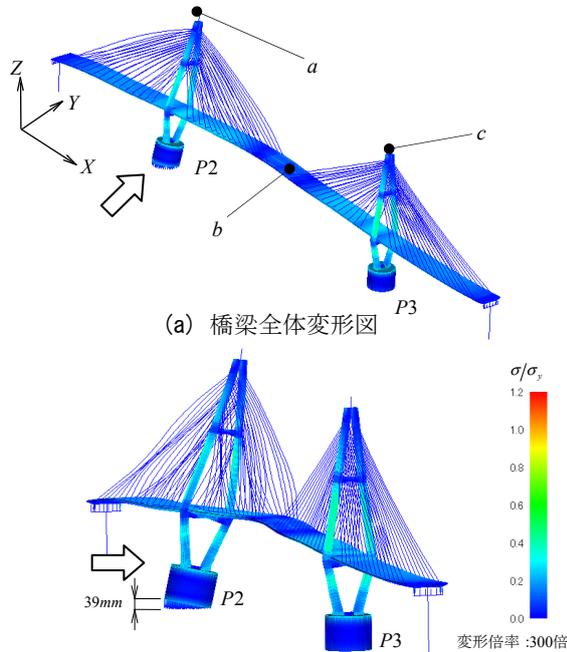


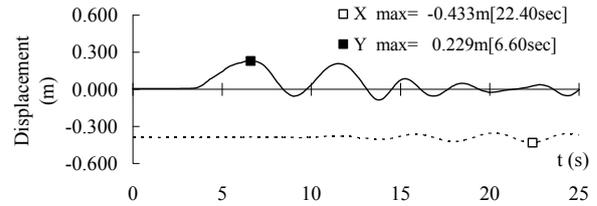
図-13 ケーソン基礎底面の応答変位時刻歴波形



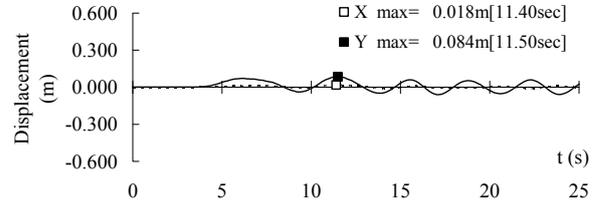
(a) 橋梁全体変形図
(b) ケーソン基礎の浮き上がり
図-14 津波作用時の変形図 (6.2 s)

ケーソン基礎底面と天端の波圧力波形を図-12(b)に示しており、天端前面(図内○)には約3s後、天端背面(図内□)には約4s後から津波波力が作用しており、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。

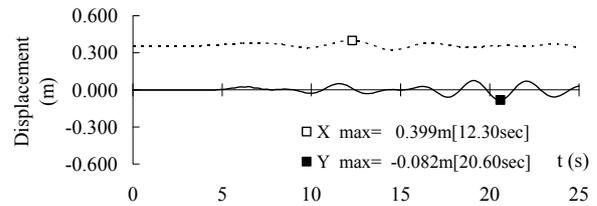
図-12(c)には底面に作用する浮力および揚圧力の時刻歴を示している。シナリオBにおけるケーソン基礎躯体の約90%は水中であるため、同図に示されるように揚圧力による水圧変動は小さく、底面に作用する圧力のほとんどは浮力によるものである。そこで、本解析ではこの浮力による底面の滑動のしやすさを表現するために、ケーソン基礎底面の非線形地盤反力モデルに考慮するものとした。具体的には、底面のすべり限界応力 τ_0 (図-10(b))は文献4)に示されるようにモール・クーロンの破壊基準を用いて算出するが、そのときの鉛直方向応力はケーソン基礎の自重による応力から浮力による上向きの応力を控除することで表した。ここで、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 τ_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



(a) P2主塔頂部(図-14点a)



(b) 主桁支間中央(図-14点b)



(c) P3主塔頂部(図-14点c)

図-15 主要点の応答変位時刻歴波形

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まで考慮した。

(4) 津波波力を与える構造解析

本解析で使用したソフトには SeanFEM(ver.1.22)¹⁴⁾を用いて、複合非線形解析を実施した。幾何学的非線形性は有限変位・有限ひずみ・有限回転(Updated Lagrange法)までを考慮する。

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-13、ケーソン基礎の傾きが最大の時刻である6.2sのときの橋梁全体変形図を図-14、主要点の応答変位時刻歴波形を図-15に示す。ケーソン基礎底面は津波の作用によって最大39mmの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-15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15s以降は橋梁の固有周期($T_Y = 3.27$ s,ここに T_Y :Y方向固有周期)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小さく、地震応答解析で降伏していた主塔柱基部は、ケーソン基礎の変形および波圧力波形を受けても再度塑性化することはなかった。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。

5. おわりに

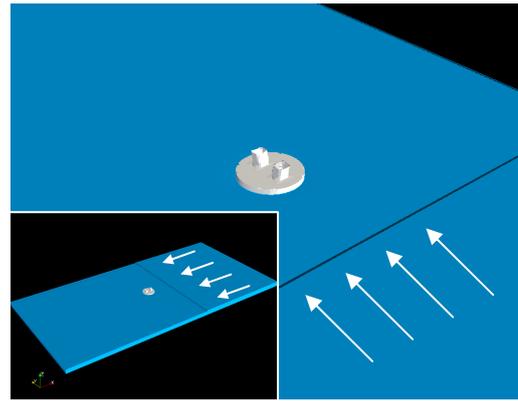
地震による損傷を受けた長大橋梁に対して、津波による波力が作用する現象を、同一震源断層による地震動と津波の複合現象としてとらえ、大型ケーソン基礎に着目した長大橋梁への複合被害シミュレーションの解析手法を例示し、その結果を示した。本研究で得られた結論をまとめると以下のようになる。

- (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) 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、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。

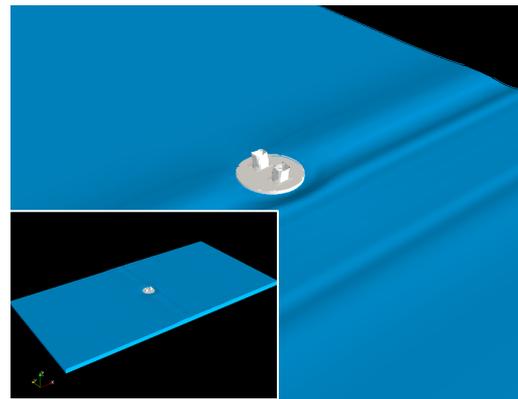
本論文は長大橋梁における偶発作用におけるひとつのケーススタディを示しているため、架橋位置の地域特性や橋梁形式、ケーソン基礎の形状（高さとの比）によって基礎の滑動や転倒といった損傷メカニズムが異なることが予想される。しかしながら、本研究で示した同一震源断層による地震動と津波の作用を全体系における複合現象として捉え、対象構造物に対する損傷を評価するための解析手法を用いることで、他の地域の構造物評価に対しても定量的な分析が可能と考えている。本研究で用いた数値シミュレーションの解析精度の向上や妥当性の検証および評価方法については今後の課題としたい。

付録

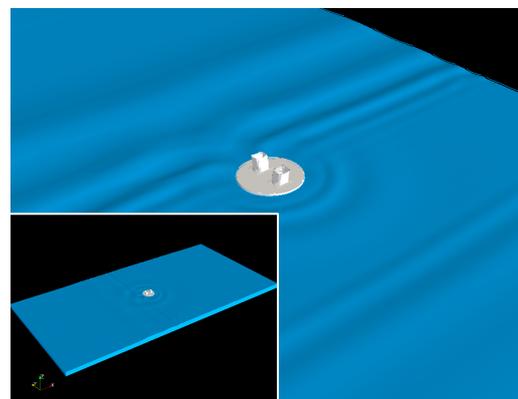
本論文で実施したシナリオ A およびシナリオ B の 3 次元津波解析結果として代表的な時刻のスナップショットを付図-1、付図-2 にそれぞれ示す。



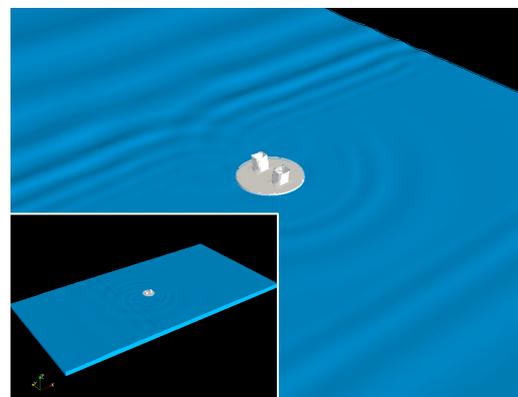
(a) 0 秒後



(b) 10 秒後

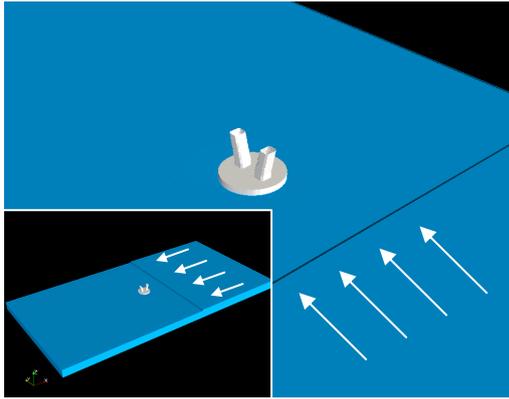


(c) 20 秒後

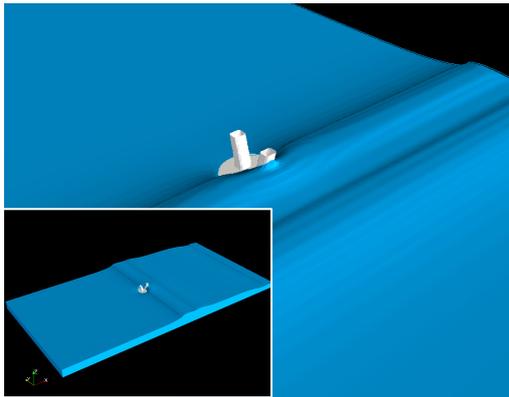


(d) 30 秒後

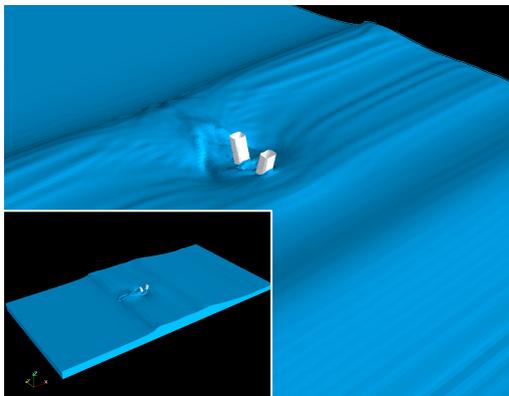
付図-1 解析結果 (シナリオ A)



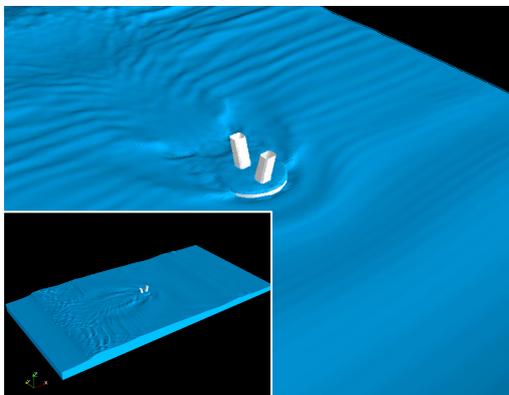
(a) 0 秒後



(b) 5 秒後



(c) 10 秒後



(d) 20 秒後

付図-2 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) 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.
- 12) 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. (投稿中)
- 13) 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.
- 14) 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.