

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

馬越 一也¹・葛 漢彬²・野中 哲也³・原田 隆典⁴・村上 啓介⁵

¹正会員 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

²正会員 名城大学教授 理工学部建設システム工学科 (〒468-8502名古屋市天白区塩釜口1-501)
E-mail: gehanbin@meijo-u.ac.jp

³正会員 株式会社地震工学研究開発センター (〒889-2192宮崎市学園木花台西1-1)
E-mail: nonaka@eerc.co.jp

⁴正会員 宮崎大学教授 工学部土木環境工学科 (〒889-2192宮崎市学園木花台西1-1)
E-mail: harada@civil.miyazaki-u.ac.jp

⁵正会員 宮崎大学准教授 工学部土木環境工学科 (〒889-2192宮崎市学園木花台西1-1)
E-mail: keisuke@cc.miyazaki-u.ac.jp

東北地方太平洋沖地震において、津波襲来時にコンテナや船舶が漂流して、構造物が被災した二次被害は甚大なものであった。漂流物には大型船舶も含まれていたことから、大型タンカー等が多く入港する日本の主要港湾において、地震津波の漂流物による被害の拡大が懸念される。そこで本研究では、津波によって漂流した大型船舶が、湾岸線の長大橋へ衝突したことを想定して、衝突時の挙動および構造物への被害を明らかにするために、津波伝播解析と、精緻な橋梁全体系解析モデルによる衝突時の動的弾塑性有限変位解析を用いた数値シミュレーションを実施した。衝突力の算定においては近似的な解析手法の提案をし、対象橋梁の衝突部材が耐えうる最大の漂流物が衝突した場合の挙動について結果を示している。

Key Words : simulation of tsunami, drifting bodies, whole bridge system, impact analysis, geometrically and materially nonlinear analysis

1. はじめに

日本国内において観測史上最大といわれる平成23年3月11日の東北地方太平洋沖地震では、大規模な津波が発生し、東日本一帯の広い範囲の構造物に対して壊滅的な被害をもたらした。津波が直接的な原因と考えられる海岸施設の破壊や橋梁流出、建物浸水といった被害の他に、津波が船舶やコンテナを押し流し、漂流物となって構造物を損傷もしくは破壊した二次的な被害も甚大であった。気仙沼市では、漂流物に300重量トンクラスの大型漁船も含まれており、岸壁係留位置から500m以上もの距離を住居などの建物や施設を破壊しながら漂流した報告¹⁾がある。また、平成23年10月28日に制定された「津波防災地域づくりに関する法律(平成二十三年法律第二百二十三号)」において津波防護施設は、津波の水圧および波力ならびに地震の発生だけでなく、漂流物の衝突に対し

でも安全な構造にするよう定められていることから、構造物に対する漂流物衝突は重要な要素と考えられる。さらに、大型タンカー等が多く入港する日本の主要港湾においては、地震津波の漂流物による被害の拡大が懸念される。このような背景より、本論文では、津波によって漂流した大型船舶が、湾岸線の長大橋へ衝突するといった、偶発作用における挙動および構造物への被害を数値シミュレーションによって定量的に明らかにし、その一連の解析手法を提案する。

対象橋梁は図-1に示す通り、橋長1,000 m(250+500+250)の長大斜張橋であり、大型船舶が入港する大阪湾東側湾岸沿いに架橋していると仮定した。津波による漂流物の衝突に関する研究は、漂流物挙動を表現するモデル化も含めた数値解析および水理模型実験ならびに漂流物衝突力の算定方法など数多い^{2,4)}が、多くが前述の震災前の研究であり、本論文で想定している大型構造物を対象と

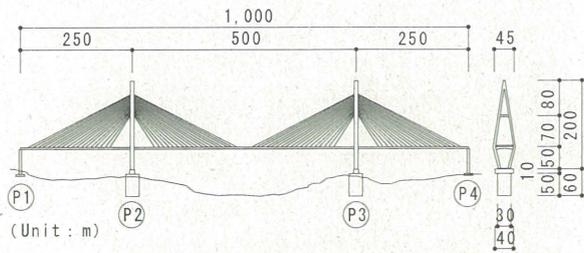
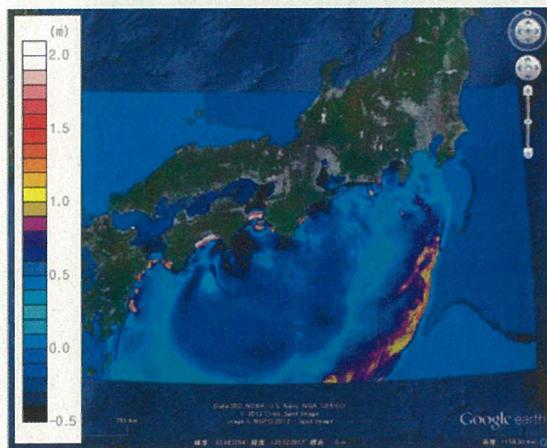


図-1 対象橋梁一般図



(a) 地震直後



(b) 地震発生30分後

図-2 水位変化コンター図

した定量的な検討はなされていないようである。

本論文は、まず南海トラフの巨大地震モデル検討会⁵⁾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た津波伝播解析を実施することにより、漂流した大型船舶の衝突時速度と衝突方向を設定している。次に、衝突によって大型船舶の失った運動量は衝突位置の力積に等しいと仮定し、衝突時間の半分を最大とする正規分布形の力波形として橋梁全体系モデルに入力する動的応答解析を実施した結果を示す。さらに、衝突する柱部を積層シェル要素でモデル化した静的弾塑性有限変位解析を実施することにより衝突方向の耐荷力を求め、被衝突部材が耐えうる最大の漂流物について考察する。

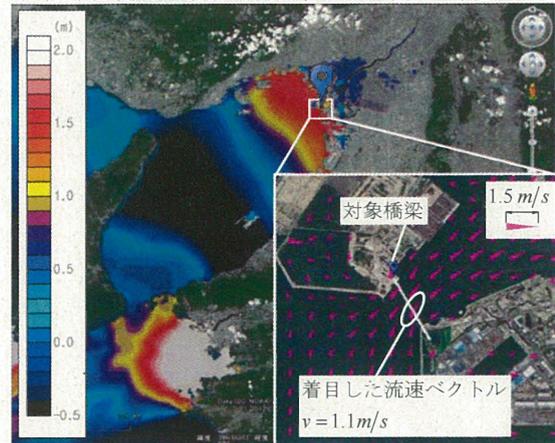


図-3 最大流速時の大阪湾の水位変化コンター図と対象橋梁付近の流速ベクトル図

2. 津波伝播解析

(1) 解析条件

南海トラフの巨大地震モデル検討会⁵⁾にて提示され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、日向灘地震の4連動地震(Mw=9.0, ここに、Mw:モーメントマグニチュード)を想定した波源モデルで津波伝播解析を実施した。解析領域は、着目している大阪湾を中心に、最小計算格子幅は30m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⁶⁾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。なお、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。

(2) 解析結果

波源モデルから計算された地震直後および地震発生30分後の水位変化コンター図を図-2に示す。30分後には太平洋から大阪湾へ通じる紀伊水道に津波が到達している。対象橋梁への第一波は約90分後に到達し、最大津波高さは114分後に記録した。湾内であることから、津波は地形との反射により複雑な波高分布を示した。流速は、南北成分と東西成分流速の合成流速でとると、109分後に最大流速1.1m/sを記録し、その時の流向は 30.7° (流向は北方向から右回りに正をとる、以下同様)であった。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-3に示す。対象橋梁の架設方向は 150° としているため、大型船舶の衝突方向は橋梁に対して 60.7° となる。

3. 大型船舶の衝突解析

大型船舶には大阪湾に入港の可能性があるHandyMax

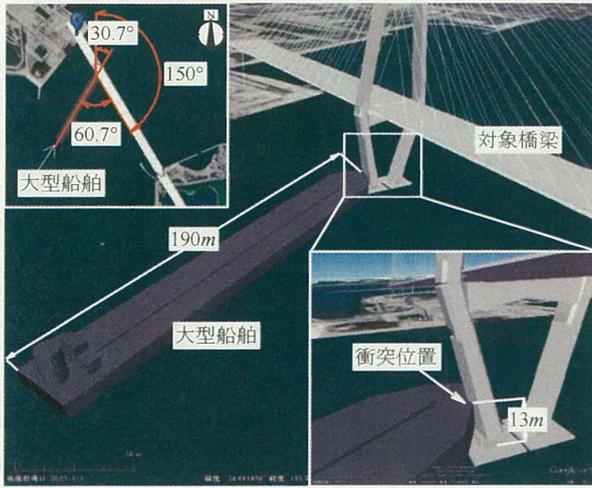


図4 大型船舶の衝突位置と衝突角度

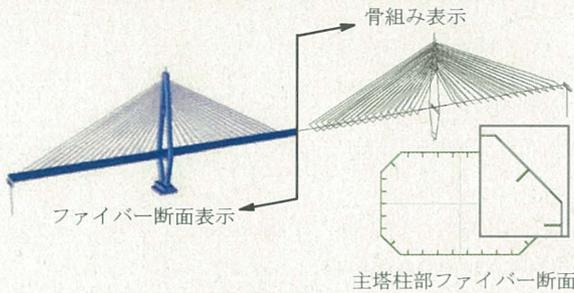


図5 対象橋梁全体系解析モデル図

クラスの満載排水量50,000 tonのばら積み貨物船(全長190 m)を想定した。津波伝播解析によって得られた流向に配置すると図-4に示すようになり、大型船舶の船首が主塔基部から13mの位置に衝突するものとした。

なお、本解析で使用したソフトにはSeanFEM(ver.1.22)を用いて、幾何学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。以後の解析にも同じ解析ソフトを用いた。

(1) 解析条件

a) 解析モデル

衝突時の波動伝播が与える橋梁全体挙動を精確に表現するために、橋梁全体系モデルによる動的弾塑性有限変位解析を用いた。材料非線形性は、橋梁全体系の耐震解析でよく用いられるファイバーモデル^{7,8)}で評価するものとした。ただし、ファイバーモデルは平面保持の仮定により、衝突部位にみられる局部座屈のような断面変形を伴う座屈を表現することはできない。橋梁全体系の解析における連成座屈強度を近似的に考慮する文献⁸⁾のような手法もあるが、対象橋梁の衝突部位である主塔柱部の幅厚比は比較的小さい($R=0.49$, ここに、 R は補剛板の幅厚比パラメータ)ことから、部材座屈の影響のほうが大きいと考えられるため、本検討では局部座屈の影響を考慮しないものとした。衝突部位やその周辺の局所的な損傷状態については、後述するシェルモデルを用いた静的弾塑性有限変位解析結果との比較を通して議論する。

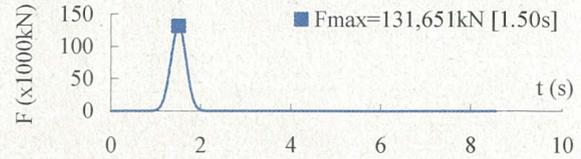


図6 力波形 ($m=50,000 \text{ ton}$, $dt=1.0 \text{ s}$)

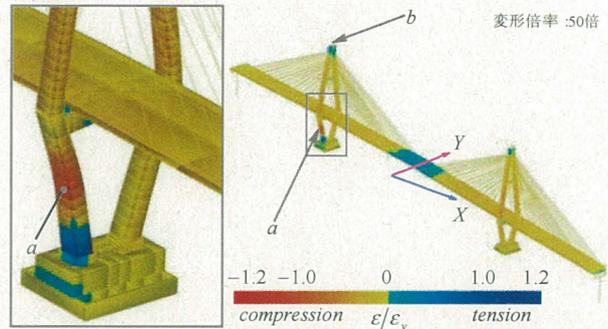


図7 衝突部ひずみ最大時刻のひずみコンター図

解析モデル図を、骨組み表示とファイバー断面表示を合わせて図-5に示す。

b) 衝突力

大型船舶の衝突によって生じる荷重を力波形として解析モデルへ与える。力波形は、衝突によって大型船舶は完全に停止して、失った運動量は主塔の力積に等しいと仮定し、衝突時間 dt の半分を最大とする正規分布形とした。衝突時間 dt の大型船舶の運動量の積分は 3σ (ここに、 σ : 標準偏差) を採ることで衝突現象全体の力積と99.73%一致する。大型船舶の質量 m と津波伝播解析によって得られた流速 v を用いて、時間 t の関数として力波形 $F(t)$ を整理すると次の式(1a)ようになる。

$$F(t) = \frac{mv}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1a)$$

$$\mu = \frac{dt}{2} \quad (1b)$$

$$\sigma = \frac{\mu}{3} \quad (1c)$$

ここに、 μ : 平均値である。この力波形 $F(t)$ の最大値 F_{max} は $t=\mu$ より、

$$F_{max} = \frac{mv}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \quad (2)$$

となる。

衝突時間 dt を1.0sとして、衝突前に1.0s間、波形全体が10.0 sとなるようにゼロを追加して力波形を作成した。作成した力波形を図-6に示す。想定した大型船舶では最大衝突力 F_{max} は131.651 kN(1.5s)となっている。

(2) 解析結果

前述の力波形を用いて動的弾塑性有限変位解析を実施した。解析結果として図-7に、衝突部位の直ひずみが最大の時刻のひずみコンター変形図を主塔衝突部拡大図と

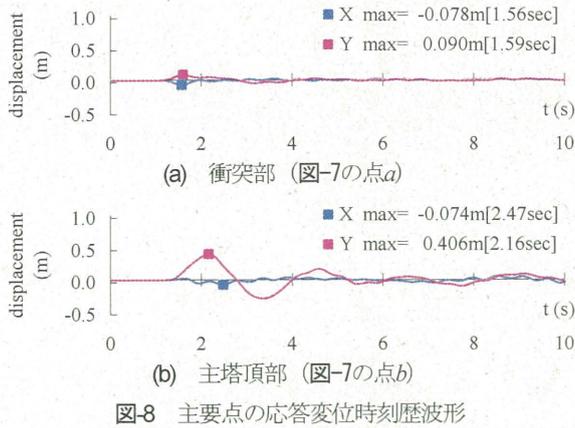


図-8 主要点の応答変位時刻歴波形

ともに示す。また、衝突部(図-7の点a)および最大変形をした衝突側の主塔頂部(図-7の点b)における応答変位時刻歴波形を図-8に示す。同図は、図-7に示すように、橋軸方向をX(青実線)、直角方向をY(赤実線)の記号で示している。

最大衝突力が発生する1.5 sの直後の1.59 sに主塔面内方向に最大変形0.09 mが発生し、それから0.57 s後に波動伝播で主塔頂部へ到達し、最大変位が生じている。衝突位置の圧縮ひずみは僅かに降伏ひずみを超過しており、最大で2,748 μ ($\approx 1.12\epsilon_y$, SM570材)であった。仮定した衝突時間1.0 sにおいては、50,000 tonの大型船舶が衝突すると衝突部位が僅かに塑性化する程度であり、橋梁全体への影響は小さいといえる。

4. 被衝突部材が耐えうる最大の漂流物に対する衝突解析

3章の数値シミュレーションでは、大型船舶の質量 m および衝突時間 dt を仮定して衝突現象が橋梁全体へ与える影響について検討したが、その仮定による状況は限定的であるため、ここでは、被衝突物である主塔の耐力と等しい衝突力になる最大の漂流物質量 M を算定し、そのときの全体挙動について検討を行うものとする。検討手順については次のとおりである。

- 衝突部材である主塔下柱を、局部座屈を考慮できる弾塑性シェル要素でモデル化し、衝突方向のプッシュオーバー解析を実施する。得られた荷重-変位曲線の最大荷重は衝突方向耐力 P_m であり、その時の変位を δ_m とする。
- 船舶の衝突位置は主塔と同じだけ座屈変形すると仮定すると、衝突してから停止するまでの双方の変形量の合計は δ_m の2倍となり、その間、等加速度直線運動で停止したときの時間を衝突時間 dt とする。
- 衝突方向耐力 P_m 、衝突時間 dt および津波伝播解析によって得られた流速 v を用いて、式(2)から最

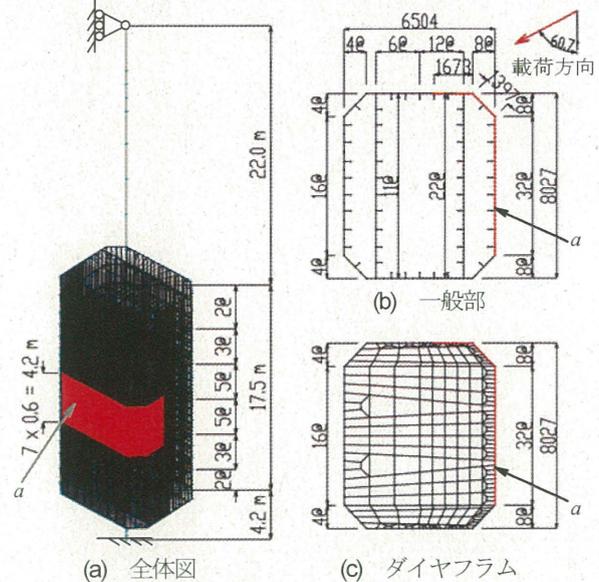


図-9 衝突部材のモデル図とメッシュ分割

大衝突力 $F_{max} = P_m$ となる質量 m を算定する。つまり、この質量 m は耐力と等しい衝突力が発生する最大の漂流物質量 M となる。

- 最大漂流物質量 M および衝突時間 dt を式(1a)に代入した力波形 $F_m(t)$ を入力した衝突解析によって、衝突部材が耐える最大の漂流物が衝突した際の挙動を再現し、その時の衝突現象が橋梁へ与える影響について考察する。

(1) 衝突部材耐力の算定

a) 解析モデル

主塔柱基部から下段水平材までの主塔下柱を抜き出し、図-9に示すような解析モデルとした。衝突位置付近を弾塑性シェル要素でモデル化し、端部は線形はり要素の単純支持とした。シェル要素と線形はり要素は、剛な仮想部材で連結し、ダイヤフラムを3.0 m間隔で配置した。

使用した要素は積層タイプの弾塑性シェル要素であり、応力-ひずみ関係は2次勾配が $E/100$ のバイリニア(ここに、 E :鋼材のヤング係数)、降伏判定はMises降伏条件、塑性流れ則(応力-塑性ひずみ増分構成則)は関連流れ則としている。載荷面は高さ方向4.2 m、幅方向9.07 mの範囲とした。なお、載荷面周辺は大きなたわみや応力が集中されると予想されるため、柱軸方向および母材幅方向の要素分割を細分化している。

b) プッシュオーバー解析

主塔に作用する死荷重として $0.13N_y$ (ここに、 N_y :全断面降伏軸力 = 765,000 kN)を頂点に載荷した後、津波伝播解析によって得られた衝突方向に、図-9(a)に示す範囲を載荷面とした変位制御のプッシュオーバー解析(静的弾塑性有限変位解析)を実施した。得られた荷重-変位曲線を図-10に示す。この図は、縦軸に載荷荷重 P 、横軸に衝突方向変位 δ をとっている。 $\delta = 676$ mmで最大荷

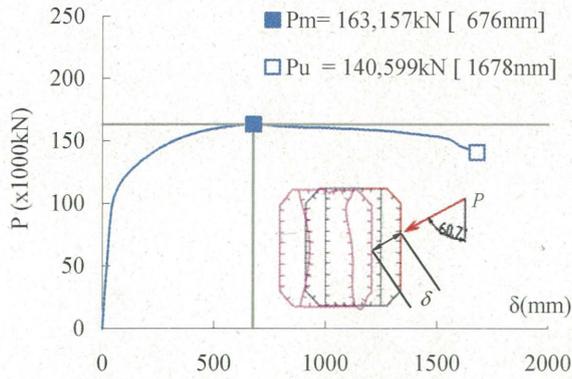


図-10 荷重—変位曲線

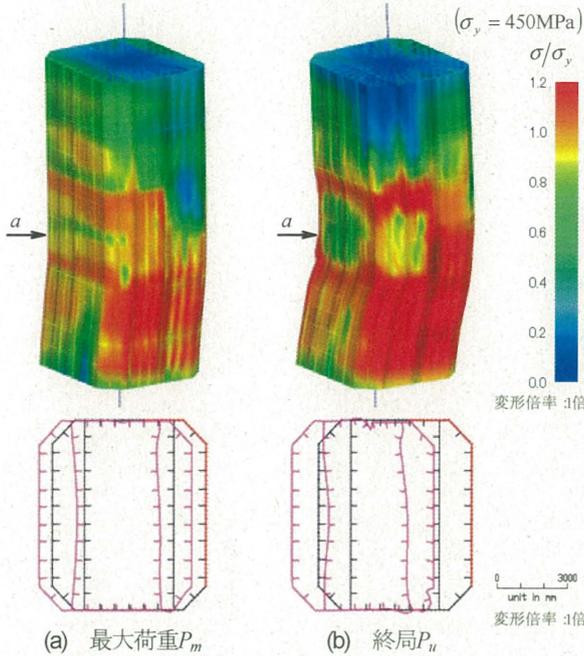


図-11 ミーゼス応力コンター図と断面変形図

重 P_m に達して、 $\delta = 1678$ mmで構造不安定となり終局 P_u に達したと判断できる。載荷位置付近の柱断面は前述の通り幅厚比は小さいため、最大荷重を過ぎた後の劣化域に急激な耐力低下は見られない。このことから、橋梁全体系モデルにおける衝突位置へのファイバーモデル適用で、衝突位置塑性化の評価が危険側になることはないと考えられる。最大荷重時および終局時のミーゼス応力コンター変形図および同図中aの位置の断面変形図を図-11に示す。終局時の載荷面周辺では、局部座屈の進展が見られ、断面変形に伴う座屈が表現できている。

(2) 衝突部材が耐える最大漂流物の想定

衝突物と被衝突物の座屈変形は同じ、衝突後に等加速度直線運動で停止すると仮定すると、衝突時間は、プッシュオーバー解析から得られた最大荷重時の変位 δ_m および津波伝播解析によって得られた流速 v を用いて次の式(3)のように表される。

$$dt' = \frac{2\delta}{v} = \frac{4\delta_m}{v} \quad (3)$$

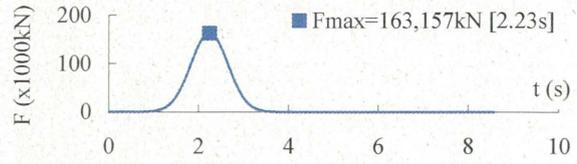


図-12 力波形 ($m = 152,395$ ton, $dt = 2.46$ s)

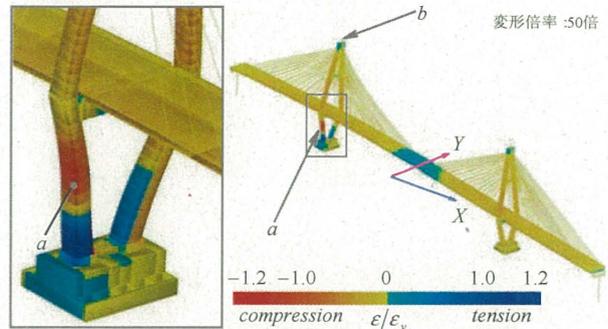
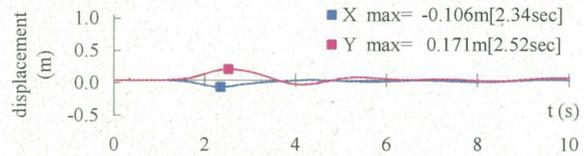
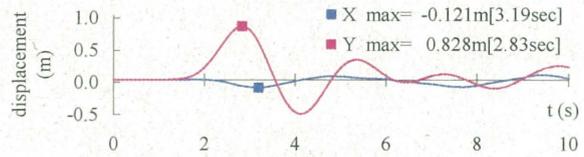


図-13 衝突部ひずみ最大時刻のひずみコンター図



(a) 衝突部 (図-13の点a)



(b) 主塔頂部 (図-13の点b)

図-14 主要点の応答変位時刻歴波形

式(3)より、衝突時間 $dt = 2.46$ sが求まる。

さらに、衝突部材が耐える最大漂流物質量 M は、式(2)の最大衝突力 $F_{max} = P_m$ とすることで次の式(4)で求めることができる。

$$M = \frac{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma}{v} \cdot F_{max} = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3} \cdot \frac{\delta_m \cdot P_m}{v^2} \quad (4)$$

式(4)より、最大漂流物質量 $M = 152,395$ tonが求まる。この漂流物は石油タンカーでは全長270 m程度の大規模(Suezmax)分類に相当する。

(3) 最大漂流物の衝突解析

式(3)および式(4)で求めた最大漂流物質量 M および衝突時間 dt を式(1a)に代入して求めた最大力波形 $F_m(t)$ を図-12に示す。

3章の解析手法で、最大力波形 $F_m(t)$ を入力する動的弾塑性有限変位解析を実施した。衝突部位の直ひずみが最大の時刻のひずみコンター変形図を主塔衝突部拡大図とともに図-13に示す。また、衝突部 (図-13の点a) および最大変形をした衝突側の主塔頂部 (図-13の点b) の変位時刻歴を図-14に示す。衝突位置では最大 $5,996\mu$ の圧縮ひずみ ($\approx 2.66\epsilon_s$, SM570材) が発生し、主塔面内方向に最大0.171 mの変形が見られた。衝突側主塔頂点変位に残

留変位を残すような応答は見られない。また、X方向およびY方向の時刻歴波形はそれぞれ固有周期 (X:5.07sec, Y:3.27sec) とほぼ同じ安定した自由振動をしており、衝突後の波動伝播による振動特性を表現できていると考えられる。

5. おわりに

津波による大型漂流物が、大阪湾湾岸沿いに位置する長大橋へ与える影響を、数値シミュレーションによって定量的に評価を行った。Mw9.0の4連動地震を想定した津波伝播解析では、湾岸特有の複雑な流速分布が表われ、対象橋梁には109分後に最大流速が発生した。漂流物として想定した満載排水量50,000 tonの大型船舶は、津波伝播解析で得られた方向と流速で、対象橋梁の衝突部位(主塔下柱)に2,748μのひずみが発生する被害をもたらした。

さらに、局部座屈が考慮できる弾塑性シェルモデルを用いたブッシュオーバー解析によって、衝突部材が耐える最大の漂流物を算定し、橋梁全体の衝突現象を評価する解析手法を提案した。この手法は、衝突部材の部材耐荷力をシェルモデルを用いた弾塑性有限変位解析によって求めるため、衝突時の局所的な座屈および部材座屈が評価され、その影響は橋梁全体系へ入力する最大衝突力として考慮される。これにより、解析規模が大きい橋梁全体系モデルへの適用も容易であり、その解析例を示した。

長大橋に大型漂流物が衝突したときの挙動を詳細に推定する数値シミュレーションの確立のためには、シナリオ設定の妥当性、解析的精度ならびに要求性能や衝突後の供用性に対する評価方法について、さらに検討を要するものであり、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 例えば、宮城大学事業構想学部：東北地方太平洋沖地震 緊急被害状況報告 (宮城大学) 気仙沼および周辺小漁港集落報告書, 2011.4.
- 2) 廉慶善, 宇佐美敦浩, 水谷法美：構造物前面における津波漂流コンテナの挙動とその衝突力に関する実験的研究, 海洋開発論文集, Vol.24, pp.51-56, 2008.
- 3) 水谷法美, 宇佐美敦浩, 小池竜：津波による小型船舶の漂流特性とその衝突力に関する実験的研究, 海洋開発論文集, Vol.23, pp.63-68, 2007.
- 4) 有川太郎, 大坪大輔, 中野史丈, 下迫健一郎, 石川信隆：遡上津波によるコンテナ漂流力に関する大規模実験, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.846-850, 2007.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Nonaka, T. and Ali, A.: Dynamic Response of Half-Through Steel Arch Bridge Using Fiber Model, Journal of Bridge Engineering, ASCE, Vol.6, pp.482-488, 2001.
- 8) 杉岡弘一, 松本茂, 大石秀雄, 金治英貞, 馬越一也, 長井正嗣：局部座屈を簡易に考慮するファイバーモデルを用いた橋梁全体系解析に関する基礎的検討, 構造工学論文集, No.57A, pp.703-714, 2011.3.

COLLISION SIMULATION OF A LARGE FLOTSAM AND A LONG-SPAN BRIDGE IN A TSUNAMI

Kazuya MAGOSHI, Hanbin GE, Tetsuya NONAKA, Takanori HARADA and Keisuke MURAKAMI

Recently, with the 2011 Tohoku Earthquake occurred, it is becoming important to consider the influence by tsunami flotsam colliding with an important structure. Also, the collision analysis method is being received much attention. However, practical applications of the collision analysis have not been investigated yet. Therefore the purpose of this study is to develop and evaluate a collision analysis method capable of simulating the phenomenon to which large flotsam collides with an important structure like the long-span bridge. Moreover, the marginal size of tsunami flotsam which can avoid collapse to an object bridge is computed using this method.