

# 津波力による建造物の破壊解析の基礎的研究

田中 聖三<sup>1</sup>・Fangtao Sun<sup>2</sup>・堀 宗朗<sup>3</sup>・市村 強<sup>4</sup>・Maddeggedara L.L. Wijerathne<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京大学地震研究所 特任助教 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)  
E-mail: stanaka@eri.u-tokyo.ac.jp

<sup>2</sup>学生員 東京大学大学院工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)  
E-mail: sun@eri.u-tokyo.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 東京大学地震研究所 教授 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)  
E-mail: hori@eri.u-tokyo.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 東京大学地震研究所 准教授 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)  
E-mail: ichimura@eri.u-tokyo.ac.jp

<sup>5</sup>正会員 東京大学地震研究所 准教授 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)  
E-mail: lalith@eri.u-tokyo.ac.jp

本研究では、津波力による建造物の破壊解析を行うことを念頭に、亀裂進展を考慮するために不連続な特性関数を形状関数として用いる PDS-FEM を大規模ソリッド有限要素法解析コードへ実装する。また、建造物に力を及ぼす津波解析には、時々刻々と変化する自由表面を考慮した 3 次元非圧縮性粘性流体解析を行う。移動境界手法として界面関数を用いて自由表面形状を間接的に表現する界面捕捉法を用い、流体の基礎方程式の離散化には安定化有限要素法を用いる。また、大規模問題への対応として、MPI/OpenMP による Hybrid 並列計算手法を導入した。数値解析例として、大規模造波水路内でのコンクリート版破壊実験を取り上げ、実験値と比較を行う。

**Key Words :** Failure analysis, PDS-FEM, Tsunami impact, Stabilized FEM

## 1. はじめに

防波堤や防潮堤などの津波災害に対する防護施設は、津波による衝撃波圧に対して耐えうる性能を保持しなければならない。これらの施設の設計には、従来、静水圧の数倍の荷重が津波荷重として用いられてきた。しかしながら、津波災害の被害予測においては、複雑な津波の挙動による衝撃波圧の作用位置の変化や建造物の変形・破壊による流況の変化などを考慮する必要がある。そのためこれらの建造物の性能を評価するためには建造物の破壊の物理的過程を解明する必要がある。また、時々刻々と変化する流体と構造の連成を考慮する必要がある。

このような動的な外力を評価するために、数値シミュレーションは強力なツールとなるが、本研究で要求される数値解析手法は次の三点である。一つ目は時々刻々と変化する津波現象を解析することのできる 3 次元流体解析手法であり、もう一つは、その津波の衝撃によって生じる亀裂の進展を考慮することのできる構造解析手法である。三点目は、これらの二つの手法を接続する連成解析手法であるが、本論文では研究の第一段階として、流体解析と構造解析の完全な連成は行わず、それぞれを個別に行うこととした。

津波力による建造物の破壊解析を行うことを念頭に、本研究では、亀裂進展を考慮するために

不連続な特性関数を形状関数として用いる PDS-FEM<sup>(1),(2)</sup>を大規模ソリッド有限要素法解析コードである ADVENTURE\_Solid<sup>(3),(4)</sup>へ実装する。また、建造物に力を及ぼす津波解析には、移動境界手法として界面関数を用いて自由表面形状を間接的に表現する界面捕捉法<sup>(5),(6)</sup>を用い、流体の基礎方程式の離散化には安定化有限要素法<sup>(7),(8)</sup>を用いる。数値解析例として、大規模造波水路内でのコンクリート版破壊実験<sup>(9)~(11)</sup>を取り上げ、実験値と比較を行う。

## 2. 自由表面流れ解析手法

### (1) 流体の基礎方程式

自由表面流れのモデルとして、 $\alpha, \beta$  の 2 種類流体を考える。流体  $\alpha$  の密度、粘性係数を  $\rho_\alpha, \mu_\alpha$ 、流体  $\beta$  を  $\rho_\beta, \mu_\beta$  とすると、解析領域内の密度分布および、粘性の分布は以下のように界面関数  $c$  を用いて表される。

$$\rho = c\rho_\alpha + (1 - c)\rho_\beta, \quad (1)$$

$$\mu = c\mu_\alpha + (1 - c)\mu_\beta, \quad (2)$$

ここで、界面関数  $c$  は 1 の場合、流体  $\alpha$ 、0 の場合、流体  $\beta$  となる識別関数である。この界面関数の時刻進展は、以下の ALE 標記による移流方程式に従うものとする。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla c = 0 \quad \text{on } \Omega_t \quad (3)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{u}}$  はメッシュ移動速度  $\hat{\mathbf{u}}$  を考慮した相対流速であり  $\bar{\mathbf{u}} = \mathbf{u} - \hat{\mathbf{u}}$  で表される。流速  $\mathbf{u}$  は次の非圧縮粘性流体の基礎方程式を解くことで求められる。

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \mathbf{u} - \mathbf{f} \right) - \nabla \cdot \sigma(\mathbf{u}, p) = 0 \quad \text{on } \Omega_t(4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \text{on } \Omega_t(5)$$

ここで、 $p$  は圧力であり、 $\mathbf{f}$  は外力を表す。

## (2) 有限要素法による定式化

式 (3) に対して SUPG 法に基づく安定化有限要素法<sup>7)</sup>を適用すると以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} c_*^h \left( \frac{\partial c^h}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}}^h \cdot \nabla c^h \right) d\Omega \\ & + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega_e} \tau_{CS} (\bar{\mathbf{u}}^h \cdot \nabla c_*^h) \left( \frac{\partial c^h}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}}^h \cdot \nabla c^h \right) d\Omega \\ & + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega_e} \tau_{DC} \nabla c_*^h \cdot \nabla c^h d\Omega = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

ここで  $\tau_{CS}$ ,  $\tau_{DC}$  は安定化パラメータであり、以下のよう  
に定義される<sup>5)</sup>。

$$\tau_{CS} = \left( \left( \frac{2}{\Delta t} \right)^2 + \frac{2\|\bar{\mathbf{u}}\|}{h} \right)^{-1/2}, \quad (7)$$

$$\tau_{DC} = \frac{h}{2} \|\bar{\mathbf{u}}\|, \quad (8)$$

ここで、 $h$  は要素長である。

また非圧縮粘性流体の基礎方程式 (4),(5) に対して SUPG/PSPG 法に基づく安定化有限要素法<sup>8)</sup>を適用すると、以下の弱形式を得る：

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_t} \mathbf{w}^h \cdot \rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}^h}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}}^h \cdot \nabla \mathbf{u}^h - \mathbf{f} \right) d\Omega \\ & + \int_{\Omega_t} \varepsilon(\mathbf{w}^h) : \sigma(\mathbf{u}^h, p^h) d\Omega + \int_{\Omega_t} q^h \nabla \cdot \mathbf{u}^h d\Omega \\ & + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega_e^i} \left\{ \tau_S \bar{\mathbf{u}}^h \cdot \nabla \mathbf{w}^h + \tau_P \frac{1}{\rho} \nabla q^h \right\} \\ & \cdot \left\{ \rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}^h}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}}^h \cdot \nabla \mathbf{u}^h - \mathbf{f} \right) - \nabla \cdot \sigma(\mathbf{u}^h, p^h) \right\} d\Omega \\ & + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega_e^i} \tau_{DC} \nabla \cdot \mathbf{w}^h \rho \nabla \cdot \mathbf{u}^h d\Omega = \int_{(\Gamma_t)_h} \mathbf{w}^h \cdot \mathbf{h}^h d\Omega \end{aligned} \quad (9)$$

ここで  $\tau_S$ ,  $\tau_P$ ,  $\tau_{DC}$  は安定化パラメータであり文献<sup>6)</sup>などに詳しい。また、 $\mathbf{h}$  は運動方程式 (4) の Numann 境界条件である。

界面関数  $c$ 、流速  $\mathbf{u}$ 、移流速度  $\bar{\mathbf{u}}$  および圧力  $p$  の時間方向の離散化には、Adams-Bashforth 近似による Crank-Nicolson 法を用い、以下のようになる。

$$c^h = \frac{1}{2} (c_{n+1}^h + c_n^h), \quad (10)$$

$$\mathbf{u}^h = \frac{1}{2} (\mathbf{u}_{n+1}^h + \mathbf{u}_n^h), \quad (11)$$

$$\bar{\mathbf{u}}^h = \left( \frac{3}{2} \mathbf{u}_n^h - \frac{1}{2} \mathbf{u}_{n-1}^h \right) - \hat{\mathbf{u}}_n^h, \quad (12)$$

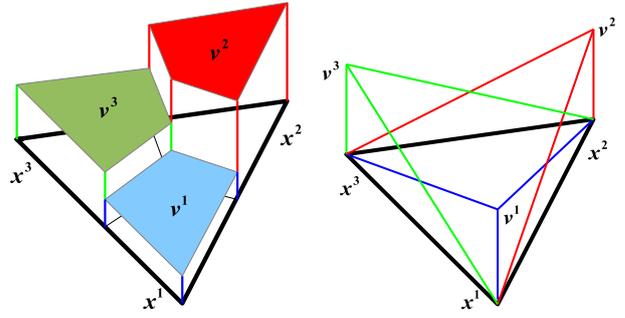


図-1 PDS-FEMにおける変位場(右)、ひずみ場(左)の分布

$$p^h = p_{n+1}^h. \quad (13)$$

## 3. 構造物の破壊解析手法

### (1) PDS-FEM のよる定式化

弾性体の基礎方程式は以下のようになる。

$$\nabla \cdot \sigma(\mathbf{v}) = 0 \quad \text{on } \Omega, \quad (14)$$

ここで、 $\mathbf{v}$  は変位である。PDS-FEM による定式化では、以下のような変位場の離散を行う：

$$\mathbf{v}^h(\mathbf{x}) = \sum_{\alpha} \mathbf{v}_{\alpha}^h \phi_{\alpha}(\mathbf{x}), \quad (15)$$

ここで、 $\phi_{\alpha}$  は領域  $\Omega_{\alpha}$  内のポロノイ多角形に基づく特性関数であり、 $\mathbf{x}$  が領域  $\Omega_{\alpha}$  内にある場合は  $\phi_{\alpha} = 1$ 、それ以外では  $\phi_{\alpha} = 0$  となる。また、ひずみ場に関しては、

$$\nabla \mathbf{v}^h = \sum_{\beta} \mathbf{v}_{\beta}^h \nabla \psi_{\beta}(\mathbf{x}), \quad (16)$$

と要素で定義される形状関数  $\psi_{\beta}$  を用いて評価される。変位場およびひずみ場の分布を図-1に示す(2次元の場合)。このように変位に関して不連続な関数を用いて評価することによりひび割れの界面を簡便に表現可能となる。破壊面の進展は、このポロノイ多角形の各辺上のひずみの法線方向、せん断方向成分を計算し、いずれかがしきい値を越えた場合にこのポロノイ多角形の辺を破壊面とする。これにより、複雑に分岐するクラックの進展も比較的簡便に取り扱うことができる。定式化の詳細については、文献<sup>1)2)</sup>に詳しい。

以上の PDS-FEM による定式化はオープンソースプロジェクト ADVENTURE の構造解析システムである ADVENTURE\_Solid へ実装している。ADVENTURE\_Solid は様々な HPC 環境において実績のある構造解析ソルバーであり、MPI/OpenMP を用いた Hybrid 並列計算手法にも対応している。

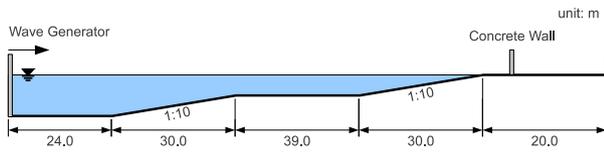


図-2 波動水路モデル図

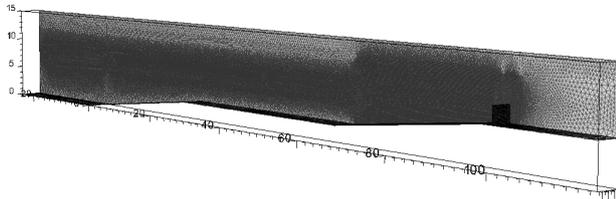


図-3 流体領域の有限要素メッシュ

#### 4. 津波力によるコンクリート版の破壊解析

数値解析例として、港湾空港技術研究所の大規模波動地盤総合水路で行われた津波力によるコンクリート版の破壊実験<sup>11)</sup>を取り上げる。大規模水路のモデルを図-2に示すが、水路は全長184m、幅3.5m、深さ12mの水路で途中2段の斜面を有する。数値解析にあたり、本研究ではまず水路内の津波の解析を行い、そこで得られた圧力分布を元に破壊解析を行うものとする。

##### (1) 大規模波動水路内の津波解析

大規模波動水路内の津波解析を行うために作成した有限要素メッシュを図-3に示す。水面近傍は約20cm、最小節点間隔は10cmであり、総節点数は約250万節点となっている。津波はモデル図-2の左側にある造波版により造波され、波高は約2.5mである。

解析結果として、図-4に各時刻の水面形状を示す。これらの図より、津波が造波され、沖から伝播し、コンクリート版に衝突している様子が解る。また、図-5にコンクリート版前面の計測点P1およびP2での圧力の時刻歴の実験値との比較を示す。時刻はコンクリート版前面に津波が到達した時刻をゼロとした。なお、圧力計測点の位置は図-6に示す。この図より、衝撃波圧は実験値と良く一致している。重複波圧に関しては計算結果と実験結果に差が現れているが、解析モデルでは水路終端を単純に壁面として取り扱っているなど、実験との差異があるためである。

##### (2) コンクリート版の破壊解析

先の津波解析で得られたコンクリート版前面における圧力分布を外力とし、コンクリート版の破壊解析を行う。コンクリート版の諸元を図-6に示す。なお、コン

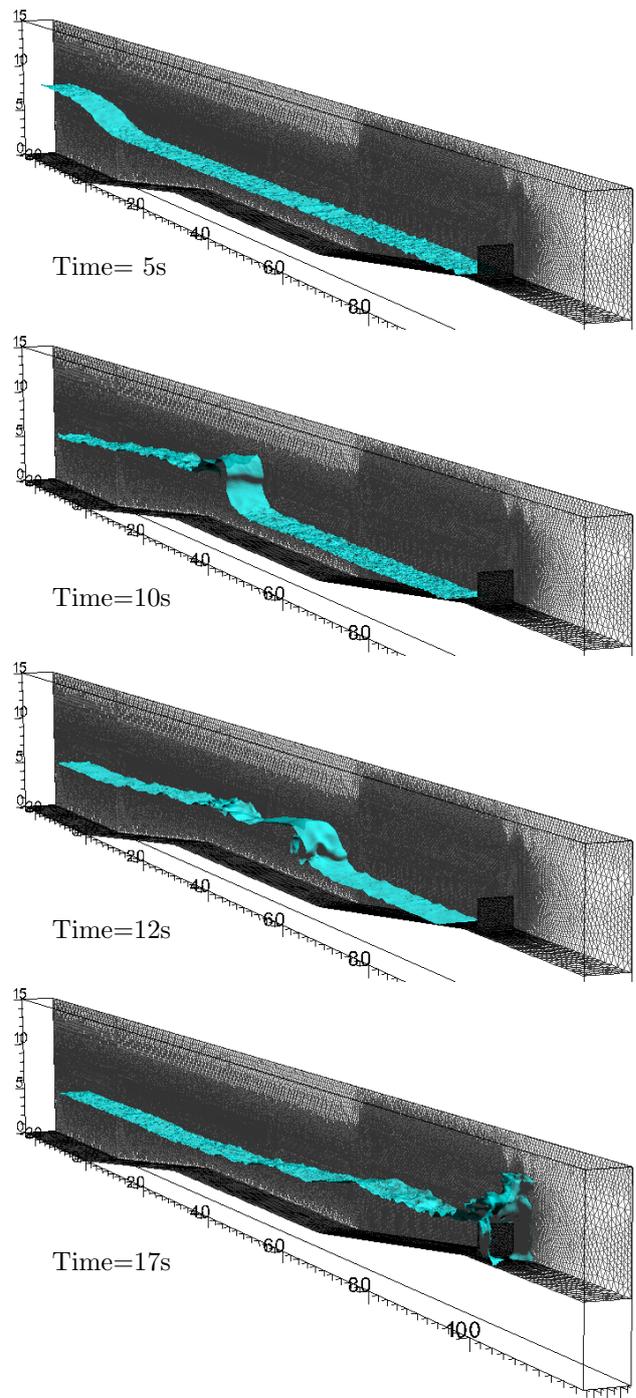


図-4 各時刻の水面形状

クリートの設計基準強度は $18\text{MN/m}^2$ 、鉄筋はD6の単鉄筋とした。これらの材料は線形弾性体として解析を行った。解析メッシュを図-7に示す。これらのメッシュは鉄筋周辺で約2mmのサイズとなり、総節点数は170万節点、1000万四面体要素となっている。

先の津波解析により得られたコンクリート版前面における圧力分布を図-8に示す。この分布は図-5のP1で圧力が最大値となった時刻のスナップショットであり、この圧力分布を節点荷重として静的解析を行うもので

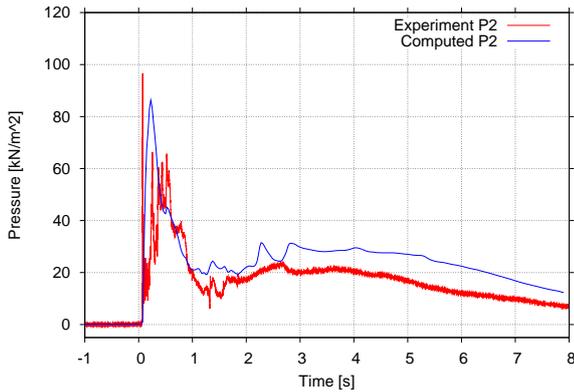
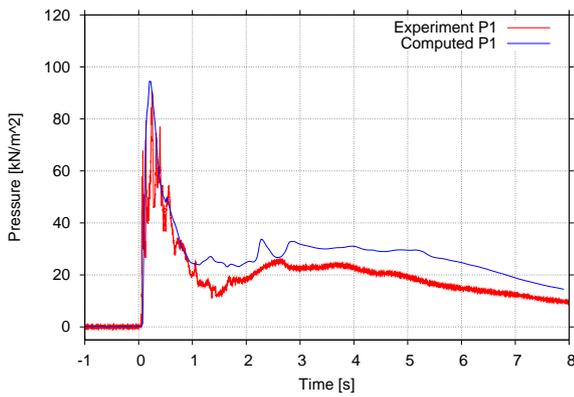


図-5 P1,P2 での圧力時刻歴

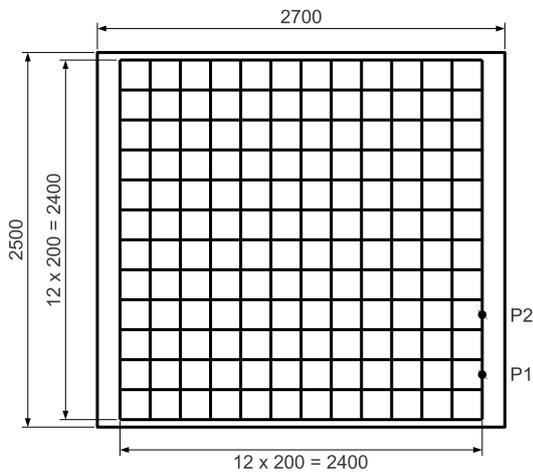


図-6 コンクリート版諸元

ある。この圧力分布を入力条件として PDS-FEM による破壊解析を行った結果を図-9 に示す。図中の赤線は亀裂界面を示す。この図より、津波外力による亀裂進展が見てとれる。しかし、今回は観測点 P1 での圧力の最大値が計測された時刻の圧力分布を静的荷重として与えたため、波がコンクリート版へ衝突した瞬間の衝撃荷重を考慮することができていない。今後、動的解析を行い、実験値等と比較を継続して行う予定である。

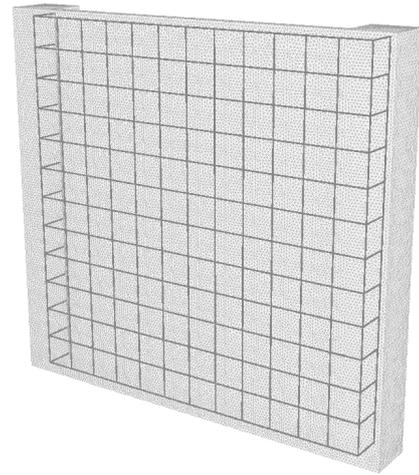


図-7 有限要素メッシュ

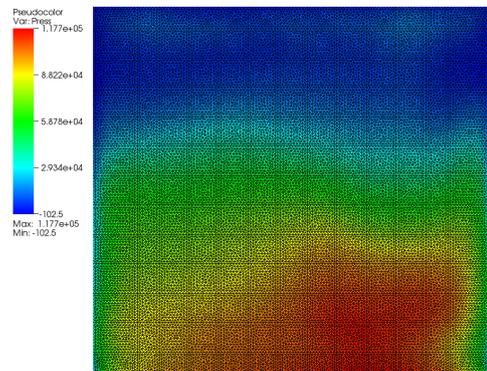


図-8 壁面における津波衝撃圧力分布

## 5. おわりに

本論文では津波波力による破壊解析を行うための数値解析手法の開発を行い、大規模波動水路内の津波解析および津波力によるコンクリート版の破壊解析を行った。本論文においては津波流体解析と破壊解析は個別に行っている。津波解析では実験値との良い一致を示し、妥当な結果が得られたが、破壊解析では津波外力を静的荷重により評価したため、衝撃力を評価することは出来なかった。今後は、総合的な流体-構造連成解析手法の構築を目的とし、解析手法の構築を行っていく予定である、また、構造解析においては、今後も継続して亀裂進展の妥当性について比較、検討を行っていく予定である。

## 参考文献

- 1) Hori, M., Oguni, K. and Sakaguchi, K.: Proposal of FEM implemented with particle discretization for analysis of failure phenomena, *Journal of the Me-*

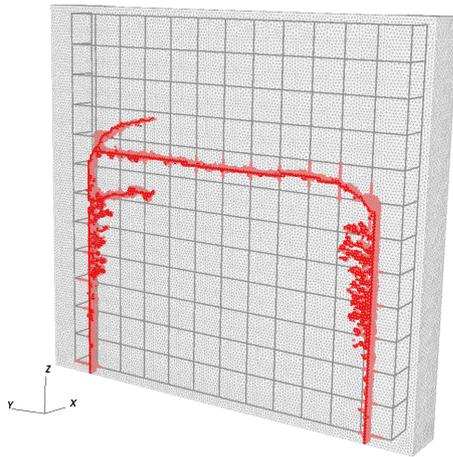


図-9 亀裂進展図

*chanics and Physics of Solids*, Vol.53, pp.681-703, 2005.

- 2) 小国健二, 堀宗朗, 阪口秀: 破壊現象の解析に適した有限要素法の提案, 土木学会論文集, No.766/I-68, pp.203-217, 2004.
- 3) ADVENTRE Project HP, <http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/>

- 4) Miyamura, T., Nogchi, H., Shioya, R., Yoshimura, S. and Yagawa, G. : Elastic-plastic analysis of nuclear structures with millions of DOFs using the hierarchical domain decomposition method, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.212(I-3), pp.335-355, 2002.
- 5) Aliabadi, S., and Tezduyar, T.E. :Stabilized-finite-element/interface-capturing technique for parallel computation of unsteady flows with interfaces, *Compute Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190, 243-261, 2000.
- 6) Aliabadi, S., Abedi, J. and Zellars, B. :Parallel finite element simulation of mooring forces on floating objects, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 41, 809-822, 2003.
- 7) Brooks, A.N. and Hughes, T.J.R. :Streamline upwind/Petrov-Galerkin formulation for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations, *Computer methods in Applied Mechanics and Engineering*, 32, 199-259, 1982.
- 8) Tezduyar, T.E. :Stabilized finite element formulation for incompressible flow computation, *Advances in Applied Mechanics*, 28, 1-44, 1991.
- 9) 有川太郎, 池辺将光, 山田文則, 下迫健一郎, 今村文彦:護岸・陸上構造物に対する津波力の大規模実験, 海岸工学論文集, 52, 746-750, 2005.
- 10) 有川太郎, 大坪大輔, 中野史丈, 下迫健一郎, 高橋重雄, 今村文彦, 松富英夫 :潮上津波力に関する大規模実験, 海岸工学論文集, 53, 796-800, 2006.
- 11) 有川太郎, 中野史丈, 大坪大輔, 下迫健一郎, 石川信隆 :潮上津波力による構造物の変形・破壊挙動の検討, 海岸工学論文集, 54, 841-845, 2007.

## BASIC STUDIES OF FAILURE ANALYSIS OF STRUCTURE DUE TO TSUNAMI IMPACT

Seizo TANAKA, Fangtao SUN, Mneo HORI, Tsuyoshi ICHIMURA  
and Maddegedara L.L. WIJERATHNE

In this paper, we report large-scale parallel computation for failure of structure by tsunami wave force. Particle Discretization Scheme finite element method (PDS-FEM), which has the efficiency to use discontinuous interpolation function at the crack interface, is introduced into Adventure Solid open source framework, to simulate the crack propagation. Tsunami wave propagation is simulated by solving the three dimensional Navier-Stokes equation with free surface. For the large scale problem, the parallel computation based on OpenMP and MPI hybrid parallelization is used to reduce the computational time and to distribute the memory usage.