

杭構造物の衝突による氷板破壊に関する MPS 法を用いた数値解析的検討

寒地土木研究所 正会員 ○阿部 孝章
 寒地土木研究所 正会員 船木 淳悟

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震津波を機に、津波が河川管理上の課題として明確に認識され、津波外力を河川施設設計へ反映することが定められるなどの対策が全国的に進められている。一方で、北海道のような積雪寒冷地域においては、写真-1のように津波発生時大量の氷板漂流物が発生する可能性がある。流水など海水の津波による遡上を対象として、木岡ら¹⁾が個別要素法(DEM)により破壊挙動のシミュレーションを行い、実験で得られる破壊性状や衝突力を概ね再現できることを示している。近年 MPS 法や SPH 法など連続体モデルによる構造解析が様々な分野で取り込まれているが、氷の衝突による破壊などに対しどの程度適用できるかは充分には明らかになっていない。本研究では、粒子法の一つ MPS 法により氷の衝突による破壊実験の再現を行い、その破壊挙動の再現性について検討を行ったことを報告する。



写真-1 津波発生後の河道内の氷板散乱状況 (鶴川・2011/3/13)

2. 海水の衝突・破壊実験¹⁾

衝突・破壊実験は寒地土木研究所(札幌市)で行われた図-1の模式図に示すような自由落下方式による実験である。人工海水を落下高 $h = 1.5\text{ m}$ から落下させ、円断面杭構造物(梁)に衝突させることで破壊した。衝突を受ける構造物として、杭は直径 $d = 60\text{ mm}$ 、支間 0.6 m の両端単純指示の SS 材である。尚、支点部にロードセルを設置し、支点反力の計測も同時に行われている。本稿では、氷板寸法を幅 $B = 0.6\text{ m}$ 、長さ $L = 0.6\text{ m}, 1.2\text{ m}$ とした落下実験を対象に、3次元 MPS 法による数値シミュレーションを行った。

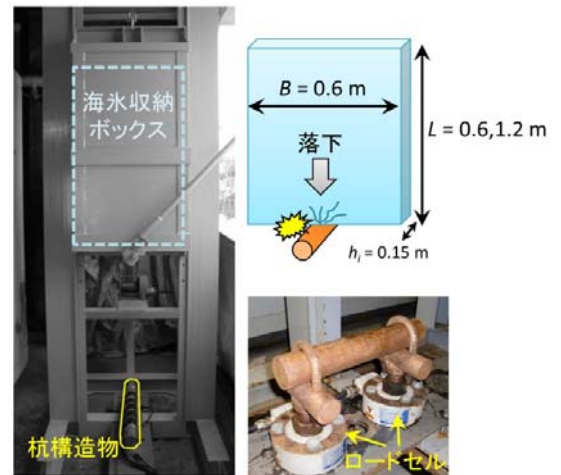


図-1 衝突実験の装置と模式図¹⁾

3. MPS 法におけるモデル化

動的な構造解析における運動方程式は、次のようになる。

$$\frac{Dv_\alpha}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_\beta} (\lambda \varepsilon_{\gamma\gamma} \delta_{\alpha\beta} + 2\mu \varepsilon_{\alpha\beta}) + K_\alpha$$

ここで v_α は速度、 ρ は密度、 λ, μ はラメの定数で、 $\lambda = E\nu/(1+\nu)(1-2\nu)$ 、 $\mu = E/2(1+\nu)$ である。 E は弾性定数、 $\varepsilon_{\alpha\beta}$ は歪みテンソル、 K_α は外力である (α, β は空間座標)。上記の偏微分方程式を MPS 法における独自の粒子間相互作用モデルを用いて離散化する²⁾。離散化にあたり重み関数は MPS 法で標準的に用られる表式; $w(r) = (r_e/r) - 1$ ($r \leq r_e$), $= 0$ ($r > r_e$) を採用した。ここに r は粒子 i と相互作用計算を行う粒子 j との距離、 r_e は粒子 i の相互作用計算範囲を制限する影響半径で、計算粒子径 d_0 の 2.1 倍とした。海水衝突実験に合わせて板状の粒子モデル及び杭状モデルを作成した(図-2)。

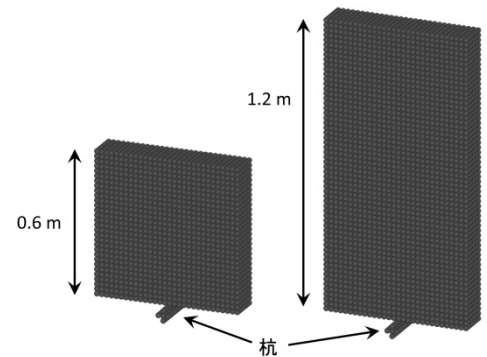


図-2 氷の3次元粒子モデル

計算粒子径 $d_0 = 2\text{ cm}$ としており、短い氷板のシミュレーションでは

キーワード 津波漂流物, 氷板破壊, MPS 法, 構造解析
 連絡先 〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 TEL: 011-841-1639

総粒子数 6,360, 長い氷板では 12,660 個であった。氷板の物性値について, 密度は 900 kg/m^3 , ヤング率は 1.3 GPa , ポアソン比は 0.3 とし, 杭モデルは変位しない剛体として計算を行った。氷板の破壊条件としては, 初期の各粒子と近傍粒子間の距離から, 0.2% 以上変位した時引っ張りによる破壊, 2% 以上変位した時圧縮による破壊が発生するとみなし重み関数の値を 0 にして相互作用を 0 とした。初期状態において杭と氷板は接触しているものとし, 氷板構成粒子の初速度 5.4 m/s を杭方向に与えて衝突させ, 計算上得られる破壊挙動を検討することとした。

4. 結果

図-3 に示したのは, 長さ 0.6 m の氷の衝突実験の高速カメラ (2000FPS) によるスナップショットと, 対応する 3 次元計算結果の対応を示したものである。実験では氷が杭に接触する直前のフレームを $t=0.000 \text{ s}$ とし, 計算結果では初期状態を $t=0.000 \text{ s}$ とし, その後 0.004 s 間隔で実験結果と計算結果のスナップショットを比較表示した。 $t=0.004 \text{ s}$ において実験では亀裂が氷板上端まで進展しているが, 計算結果でも同様の亀裂が氷板の中央部に見られる。 $t=0.008 \text{ s}$ においては杭の近傍で氷の破碎が起こり, 小片となった氷が手前及び下方へ飛散した。計算結果では, 破断面近傍の計算粒子が一部飛散し, 亀裂は僅かに拡大している。また, $t=0.012 \text{ s}$ においては, 実験では杭方向に落下し亀裂は徐々に広がるが, 計算結果では氷板自体の上下位置は大きく変化していない結果となった。現象と異なる点は見られるものの, 中央で亀裂が発生し, 2 分割となる傾向は実現象に近いものと考えられる。

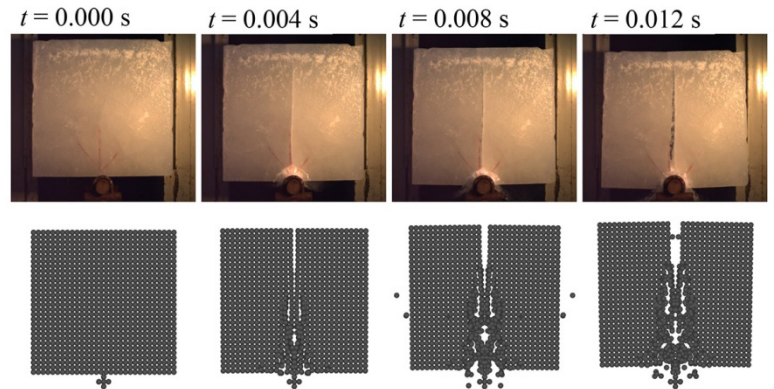


図-3 $B=L=0.6 \text{ m}$, $V_0=5.4 \text{ m/s}$ の実験ケースにおける破壊性状の時間変化とシミュレーション結果

次に, $L=1.2 \text{ m}$ で長い氷板の場合に, $L=0.6 \text{ m}$ の場合と同様の材料パラメータを設定し, 計算結果と実験の破壊状況とを示したのが図-4 である。杭との接触点からはじめ ($t=0.002 \text{ s}$) 上向き方向に亀裂が進行し, 亀裂が概ね 0.8 m 程度となったところから両側の側方に分岐した ($t=0.004 \text{ s}$)。その後氷板は T 字状に破壊され概ね 3 つの部分に分かれた。実験の最終状態を同図右に示した。模型氷の中央から入った亀裂は, Y 字状になり, 3 つの氷片に分割されている。このように, $L=1.2 \text{ m}$ と長い場合は破断形状こそ異なるものの, 3 つの氷片に分かれる破壊状態は数値計算上も現れている。

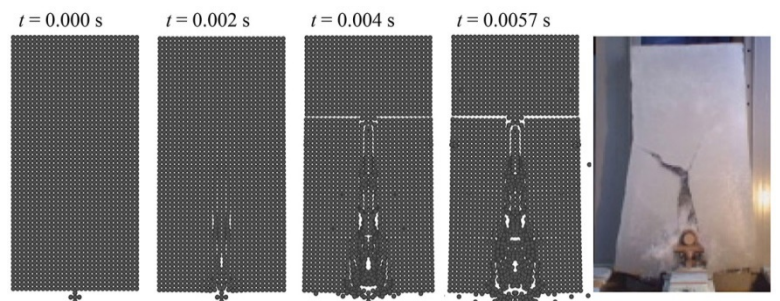


図-4 $B=0.6, L=1.2 \text{ m}$, $V_0=5.4 \text{ m/s}$ の実験ケースにおける破壊状況とシミュレーション結果

5. まとめと今後の課題

本稿では連続体モデルである MPS 法を氷の衝突破壊実験のシミュレーションに適用した。今後は計算パラメータの設定方法や初期粒子配列が破壊性状に及ぼす影響などについて検討を進めていく予定である。

謝辞: 本研究では数値計算の際に戦略的基盤ソフトウェアの開発プロジェクト成果である NEXST_MPS_Solid (Ver 0.1b, (c) MooSeop Song & Seiichi Koshizuka) プログラムを利用した。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 木岡信治ら, 海氷塊の杭構造物への衝突に関する中規模実験とその数値計算法の基礎的検討, 土木学会論文 A2(応用力学), Vol.68 (2), pp.I_423-I_432, 2012.
- 2) 宋武燮ら, MPS 法による弾性構造体の動的解析, 日本機械学会論文集 A 編, 71(701), pp.16-22, 2005.