

論文 連続波による RC 造建物の津波崩壊実験の数値流体解析

李 禹彤*1・壁谷澤 寿海*2・壁谷澤寿一*3・久保 毅晃*4

要旨：本研究は津波漂流物が開口部に堆積することで生じる堰止めによる津波荷重と崩壊過程を検証する目的で実施した縮小模型水理実験の一部を粒子法により解析したものである。試験体は1×1 スパン，4 階建ての鉄筋コンクリート造柱梁フレームであり，水理実験では漂流物がない場合には試験体は残存したが，漂流物を前面に横置きした場合には倒壊した。実験方法と実験結果の概要を示すとともに，粒子法による解析手法と解析結果を実験と比較して示した。純ラーメンの試験体で漂流物がない場合の実験に適用した結果ではあるが，実験で計測された波力と解析で作用する波力の時刻歴は概ね一致した。

キーワード：連続波，漂流物，堰止め荷重，水理実験，粒子法，津波荷重

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震では浸水深 10m を超える津波が発生し，東北地方沿岸部では鉄筋コンクリート造の建物でも倒壊や転倒といった被害が生じた。津波に対しては有効な対策が未了であり，建物の損傷は避けられない状態であった。東北地方太平洋沖地震の発生以降，国土交通省では倒壊および残存した建物の耐力と浸水深を調査し，高い浸水深に対しても適用しうる設計用津波荷重を定めた。全国の沿岸部における自治体でも津波避難施設の建設が急がれているが，この設計用の津波荷重は建物受圧面に作用する波圧の積分値で，開口部の津波波圧は見込まないため，津波避難施設等では荷重を軽減できる開口部が計画される傾向にある。一方，津波は浸水のみでなく，家屋の倒壊や自動車，コンテナ，船舶などが漂流，集積する。このような漂流物を伴うため，開口部が閉塞される場合には計算以上の波圧が建物に作用する可能性がある。津波漂流物の衝突荷重に対しては進行性崩壊につながらないこと等を確認するが，堰止めによって生ずる津波荷重の増加については研究レベルでも現象としてほとんど明らかにされていない。

筆者らは 2016 年度に電力中央研究所大型津波氾濫水路で津波漂流物を想定した縮小鉄筋コンクリート造模型の水理実験を実施したが，本報告は実験の一部に数値流体計算を適用して実験と比較したものである。

2. 水理実験

2.1 試験体概要

試験体は4層1×1 スパンの鉄筋コンクリート造純ラーメンの1/10 縮小スケールモデル5 体で，それぞれを試験体 FA, FB, FC, FD, FE とする。FA-FD は共通の設計であるが，FD は静的加力実験用である。FE は波圧検定試

験用非破壊試験体である。平面図および立面図を図-1 に示す。試験体の幅および奥行スパンは 650 mm，階高は 330mm，下部には高さ 1500mm，幅 1100mm，奥行 1200mm の基礎床版を設けている。

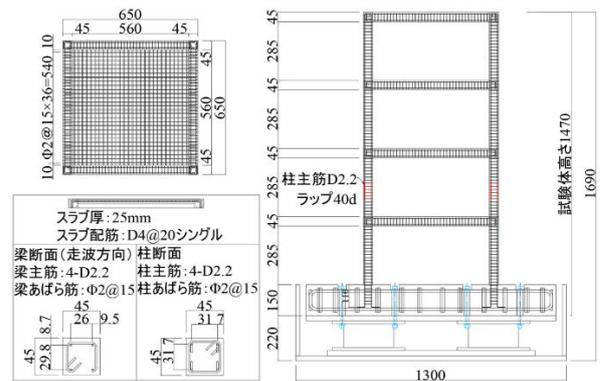


図-1 試験体の平面配筋図・部材断面図 (単位 mm)

2.2 実験施設および漂流物の概要

解析対象の実験は電力中央研究所の津波・氾濫水路において 2016 年 10 月から 11 月に実施された，大型水理実験施設を図-2 に示す。実験施設における水路は水柱落下方式の津波実験装置を有しており，貯水した水を落下させることで連続波を生成する。水路上流側のゲート開度により落下水量および波形を制御している。水路は長さ 20m，高さ 2.5m，幅 4m である。

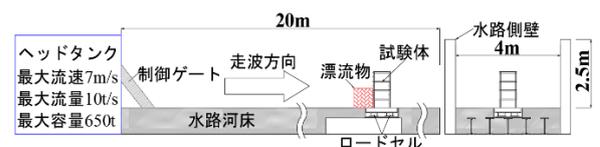


図-2 水路断面図 (電力中央研究所津波氾濫水路)

*1 東京大学 地震研究所 災害科学系研究部門 修士(工学)(正会員)

*2 東京大学 地震研究所 災害科学系研究部門 教授 工博 (正会員)

*3 首都大学東京 都市環境科学研究科建築学域 准教授 博士(工学)(正会員)

*4 首都大学東京 都市環境科学研究科 修士(工学)

なお、本報告の解析には含まれないが、漂流物は2階建て木造住宅を想定した直方体の木製模型とし、外形はX720×Y900×H770 mmとしている。重量は木造建物の比重にもとづいて重量型 220kg (比重 0.44)、軽量型 113kg (比重 0.22) の2種類を製作した。漂流物実験の状況を写真-1に示す。



写真-1 漂流物設置時の様子

2.3 計測計画

実験では試験体基礎下の3軸ロードセルおよび波圧計により波力を計測し、絶対水平変位については試験体背面の頂部から高さ40mm、280mm下位置においてレーザー変位計により計測している。また、水路内各位置では水位計により水位を計測している。試験体の波圧による算定値は近接する算定位置の中間で区間分類し、区間内では測定値で均して試験体面積をかけて背面側波圧も考慮して水平力とした²⁾。

2.4 実験結果

実験結果の概要を表-1に示す。本研究では同一形状4体 (FA, FB, FC, FE) の試験体に対して水理実験を行った。津波入力波は波高と流速の異なる3種類の入力波を用い、それぞれW1, W2, W3と表す。試験体FAを用いた水理実験において水路内の同位置で計測された入力波W1, W2, W3の水位時刻歴を図-3に示す。高強度試験体FEに対しては入力条件を変えた開口がある場合の波力検定試験 (FE1~FE5)、漂流物を試験体前面に設置した試験 (FE6とFE7)、上流から漂流物を放流する試験 (FE8とFE9) を実施した。試験体FAでは2階から4階に鋼板外壁を装着した試験について実施した (FA1~FA5)。試験体FBでは漂流物および波力を変えて、放流する場合、さらに最大波力と重量型漂流物で倒壊に至る実験を実施した (FB1~FB4)。試験体FCでは3回の実験で同じ最大波力を与えた。漂流物を設けない場合 (FC1)、軽量型の漂流物を縦向き設置した場合 (FC2)、横向き設置とした場合 (FC3) で応答性状を比較している。本研究ではこれらの実験結果のうち漂流物を設けていない、大きな流速を作用させた実験ケースFC1について解析的検討を行った³⁾。

表-1 水理実験結果一覧表

Run	漂流物等	波形	最大水位 単位: m	最大水平波力 単位: kN	最大水平変位 単位: mm
FE1-5	波力検定	—	—	—	—
FE6	横長設置	W1	0.78	2.33	—
FE7	横長設置	W1	0.77	2.51	—
FE8	縦長漂流	W1	0.73	1.65	—
FE9	横長漂流	W1	1.01	1.72	—
FA1	開口 76%	W1	0.71	0.48	0.23
FA2	開口 51%	W1	0.69	0.90	0.57
FA3	開口 19%	W1	0.65	1.65	0.96
FA4	開口 19%	W2	0.75	2.02	1.60
FA5	開口 19%	W3	0.95	3.50	10.90
FB1	軽-横長設置	W1	0.63	2.57	1.99
FB2	重-横長設置	W1	0.60	2.52	1.73
FB3	軽-横長漂流	W1	0.69	1.35	19.50
FB4	重-横長設置	W3	1.22	3.68	倒壊
FC1	なし	W3	1.23	1.31	0.82
FC2	軽-縦長設置	W3	1.27	3.63	14.58
FC3	軽-横長設置	W3	0.89	3.75	倒壊

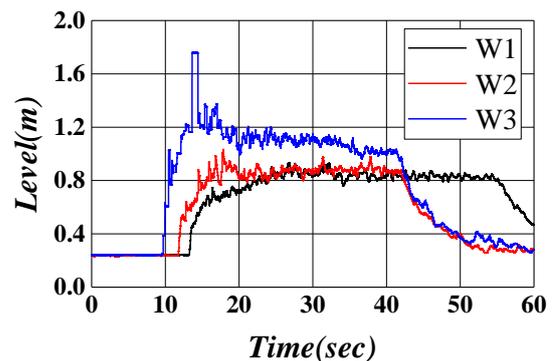


図-3 津波入力波の水位時刻歴

2.5 水平せん断力と水平変位

水理実験による結果の一部を図-4, 図-5に示した。実験結果は解析を実施した試験体FCの漂流物を設置しないケースについて水平せん断力の時刻歴波形および水平せん断力と水平変位の関係について示した。試験体の終局水平耐力 Q_{su} は、1層の柱頭と柱脚が終局曲げ耐力 M_u に達するメカニズムを想定して以下の式(1), (2)により算定した⁴⁾。

$$M_u = 0.8a_t\sigma_y D + 0.5ND[1 - N/(\sigma_B D^2)] \quad (1)$$

$$Q_{su} = 2nM_u/h_c \quad (2)$$

ここに、 a_t : 引張鉄筋の総断面積、 σ_y : 主筋の降伏応力度、 N : 柱軸力(2kN/4)、 D : 柱せい、 σ_B : コンクリート圧縮強度、 n : 柱本数、 h_c : 柱長さ。計算値はFA-FD試験体(柱主筋4-D2.2)で $Q_{su}=2.1\text{kN}$ となる、図-4と図-5には灰色の横線で示す。

試験体の3体目FCであるFC1~FC3の実験では、最

大波力を与えて、漂流物がない場合 (FC1)、軽量漂流物が横置きの場合 (FC2)、縦置きの場合 (FC3) を比較した。FC1 では最大応答せん断力 1.31kN、変位 0.8mm であり、開口率 76% (純ラーメン) の場合最大波力でもほぼ弾性範囲に留まることが確認された。FC2 では最大応答せん断力 3.63kN、最大変形 14.58mm で、縦長設置の漂流物でも影響が大きいことが確認された。FC3 では、漂流物の向きを横長にしたため、最大応答せん断力は 3.75kN に達し、試験体は 1 層の層崩壊で倒壊した。

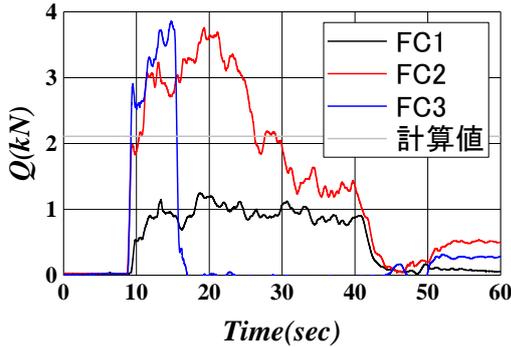


図-4 津波水平力時刻歴 (試験体 FC)

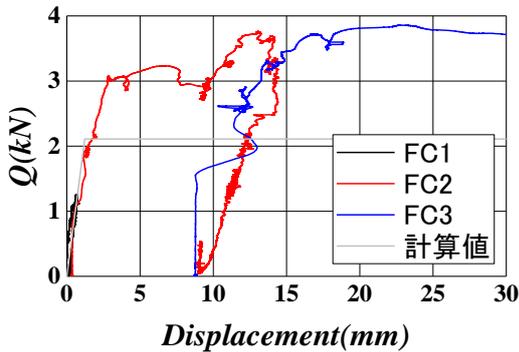


図-5 水平波力と水平変位との関係 (FC)

解析結果と比較するため、実験 FC1 における流速と水位および波圧の高さ方向分布を以下の図-6、図-7 に示す。最大流速は 2.7m/s 程度であり、試験体前面の最大水位が 0.8m 程度の結果となった。計測された波圧は最大水位相当の静水圧分布に達していない。

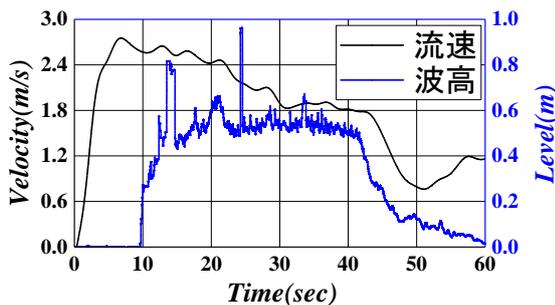


図-6 FC1 における流速と水位の時刻歴

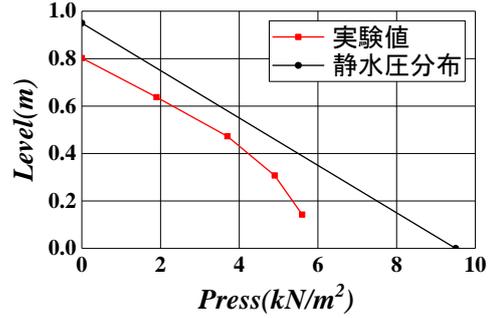


図-7 FC1 における波圧の高さ方向の分布

3. 水理実験の解析

3.1 解析方法の概要

本研究では、水理実験における連続波津波荷重、漂流物の影響、構造物の崩壊を解析的に検討するため、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 理論に基づく粒子法を用いて数値計算を行った。粒子法は連続体を近似的に複数の粒子に分解し、粒子の上で計算を進めることで元の連続体の挙動を運動方程式などに従って求める新しい数値シミュレーション手法である。有限体積法や有限要素法と比較すると、粒子法では粒子自体が位置を持ち、かつ流動することができるので、津波の流れなど大きな変形を扱うのに適している。粒子法では具体的な離散化の方法がいくつかに分別されているが、本解析で採用した空間と時間の離散化を以下に説明する。空間の離散化では、流体を複数の粒子の集合として表す。時間の離散化は粒子がある時間間隔ごとにその位置を計算する。空間および時間に対して離散化された粒子法による解析の概念を図-8 に示す。粒子位置を r 、時刻を t 、時間間隔を Δt で表す。

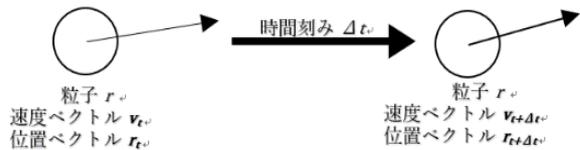


図-8 粒子法による時間と空間の離散化

各粒子には基本的に速度 v と位置 r を変数としてもたせる。ここで、太文字はベクトルで、それぞれ三方向の成分である。また、時間も離散化することによって、各時刻の粒子位置を計算する。

数値計算のアルゴリズムは図-9 のように進めた。まず、粒子の初期配置を与え、古い時刻の既存の値を使って新しい時刻の未知の値を計算するようにプログラムを作成した。すべての数値を算出したら、計算を終了するかどうかの判定を行い、終了でなければ次の時刻の計算を続行する。これらの計算点は位置ベクトルや速度ベクトルなどの変数を持ち、流体の運動を表す式に従って粒

子の速度などを更新する。その更新した速度で粒子を移動させて流体の動きを表現した。

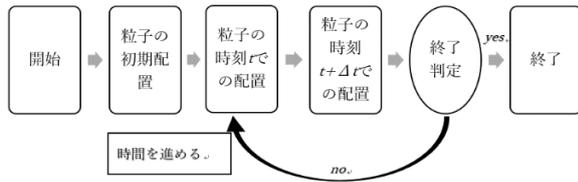


図-9 数値計算のアルゴリズム

3.2 粒子間の相互作用

流体といった連続体の運動を独立した粒子の運動として扱うと、本来の挙動と大きな差が出てきてしまうため、以下の式(3)で空間内の任意位置のベクトル r での物理量 $f(r)$ を積分形式で表現する。

$$f(r) = \int f(r') W(r - r', h) dr' \quad (3)$$

右辺の $f(r')$ は重み付けされる前の物理量で、 W は重み関数 (interpolating kernel) で、 h は影響半径 (smoothing length) である。左辺の $f(r)$ は、任意関数 $f(r)$ を平滑化されたカーネル評価となる。この操作によって、評価点のもつ物理量は連続体の物理量へと平滑化される。粒子法では、ある点における連続体の物理量を、周辺の粒子の物理量の重み付き和で表現し、元の連続体上の物理量を滑らかに粒子間で補間する概念を考慮して表現するものである⁹⁾。連続体モデルの概念を図-10に示した。

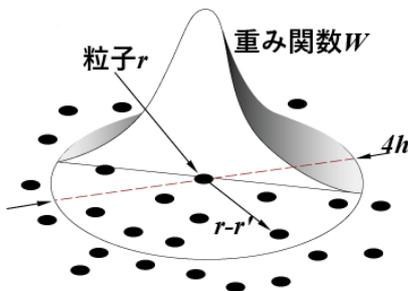


図-10 連続体の離散化および影響半径

さらに粒子の運動を計算するには式(3)ではできないので、右辺の物理量の積分を有限個の粒子の物理量の和で近似する。具体的には、粒子一つの持つ体積を $\Delta r'$ にし、 $f(r') dr'$ を $f_b \Delta r'$ で近似すると式(4)になる。粒子 b における任意関数 f の値は f_b で表す。

$$\int f(r') W(r - r', h) dr' \approx \sum_b f_b \Delta r' W(r - r_b, h) \quad (4)$$

式(4)における粒子の体積を粒子 b の質量および密度で変換すると、最終的に粒子に与えられた物理量は次の式(5)のようになる。

$$f(r) = \sum_b m_b \frac{f_b}{\rho_b} W(r - r_b, h) \quad (5)$$

ここで、 m_b と r_b および ρ_b はそれぞれ粒子 b の質量と空間位置および密度を表す。すなわち、影響半径内のすべての粒子の持つ物理量を評価点に重み関数を用いて内挿することになる。

3.3 重み関数

粒子法では、計算の精度は重み関数の精度に大きく依存することになる。重み関数にはいくつかの方法が試みられているが、本解析では $\Delta = r - r'$ とし、 $q = |\Delta|/h$ とする三次元モデルに対応する重み関数を採用した。重み関数 (Monaghan 1992⁶⁾) は以下の式(6)、式(7)と(8)に示す。

$$0 < q \leq 1 \text{ の時, } W(q, h) = \frac{1}{\pi h^3} (1 - \frac{3}{2} q^2 + \frac{3}{4} q^3) \quad (6)$$

$$1 < q < 2 \text{ の時, } W(q, h) = \frac{1}{4\pi h^3} (2 - q)^3 \quad (7)$$

$$q \geq 2 \text{ の時, } W(q, h) = 0 \quad (8)$$

3.4 流体の支配方程式

p は圧力、 ρ は密度とし、流体内の圧力と密度の関係を表すため、以下の流体の状態方程式(9)を用いる。

$$p = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (9)$$

$\gamma = 7$ 、 ρ_0 は基準密度として値は 1000 kg/m^3 で、 $B = c_0^2 \rho_0 / \gamma$ 、 c_0 は基準密度下の波の伝達速度である ($c_0 = \sqrt{(\partial p / \partial \rho)_{\rho_0}}$)。 v を流体粒子の速度ベクトルとし、運動方程式 (ナビエ・ストークス方程式) は以下の式(10)である。

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{p}{\rho^2} \nabla \rho \quad (10)$$

粒子 a における運動方程式を式(10)と式(5)を用いて SPH 離散形式で表すと式(11)になる。

$$\frac{dv_a}{dt} \approx -\sum_b m_b \left(\frac{p_b}{\rho_b^2} + \frac{p_a}{\rho_a^2} \right) \nabla_a W(r_a - r_b, h) \quad (11)$$

ある単位体積の領域から流体が流出あるいは流入するとき、その領域内の流体の密度がどのように変化するかは、流体を弱い圧縮性をもつ粘性流体として、流体の連続方程式を以下の式(12)で表す。

$$\frac{d\rho}{dt} = -\nabla \cdot (\rho v) + v \cdot \nabla \rho \quad (12)$$

式(12)と式(5)で評価点の粒子 a の密度の変動率を離散形式で表すと式(13)になる。

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b (v_a - v_b) \nabla_a W(r_a - r_b, h) \quad (13)$$

粒子の座標移動は以下の式(14)で周りの粒子集合の平均速度に近い速度で更新されている。

$$\frac{dr_a}{dt} = v_a + 0.5 \sum_b \frac{2m_b}{\rho_a + \rho_b} (v_b - v_a) W(r_a - r_b, h) \quad (14)$$

解析では、まず式(9)で圧力を算出し、式(11)で速度の空間微分値を計算する。さらに、式(13)と式(11)で密度の時間更新 $\Delta \rho$ と速度の時間更新 Δv を求める。更新した速

度に従い、式(14)で粒子を移動させる。これを1ステップとして、解析計算を繰り返す。

3.5 境界条件

本解析では、水路と試験体は壁粒子を用いた境界条件としてモデル化している⁹⁾。具体的には、境界となる水路、試験体を多数の壁粒子で構築し、流体粒子と同じ支配方程式を適用する。壁粒子の移動は考えないが、微小変位による変位、加速度等は考慮される。流体粒子の移動方程式(14)には従わないものとして、解析開始時には動かない粒子として初期座標などの物理量を与える。

3.6 解析モデルと解析結果

解析開始時のモデルを図-11に示す。長さが35m、幅が2.5m、高さが2mの水路を壁粒子で構築し、解析時間を節約するため長さ30m、幅が2.5m、高さが0.6mで先端を傾斜させた水粒子を水路に置いて解析を開始した。試験体は実際とは同じスケールで壁粒子を用いて構成し、水路右側の真ん中に設置した。全部の水粒子に3m/sの初期水平速度を与え、水路左側の壁も3m/sの初期水平速度を与えて水粒子を一斉に動かすことにより解析を開始している。

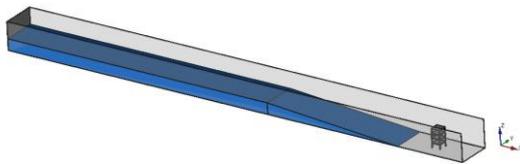
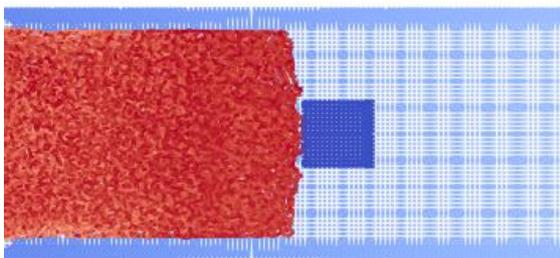
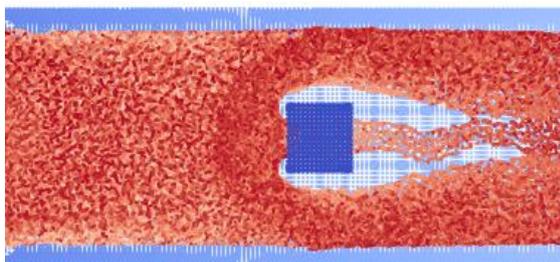


図-11 解析モデルの概要図と粒子の初期配置

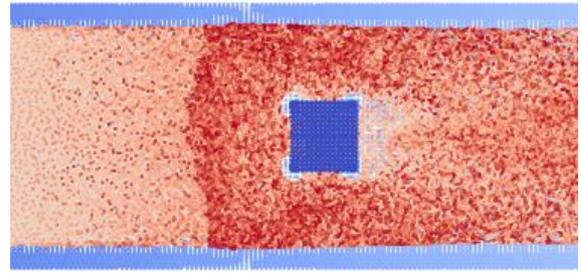
解析開始後の流体の流れの過程（俯瞰図、9秒～18秒後）を図-12に示した。



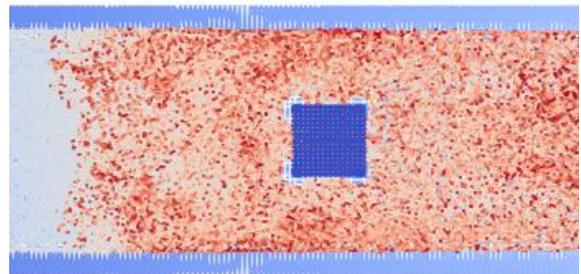
(a) t=9.0s



(b) t=10.5s



(c) t=12.0s



(d) t=18.0s

図-12 解析した流体の流れ

試験体（壁粒子）が流体（水粒子）から受ける波圧は式(15)により計算している（図-13）。

$$P_a = \frac{\sum_b P_b W(r_a - r_b, h)}{\sum_b W(r_a - r_b, h)} \quad (15)$$

壁粒子が受けた力は、流体粒子が壁粒子に接触した後、壁粒子の加速度を式(11)で算出し、以下の式(16)によって慣性力を計算した。

$$F = m \sum \frac{dv_a}{dt} \quad (16)$$

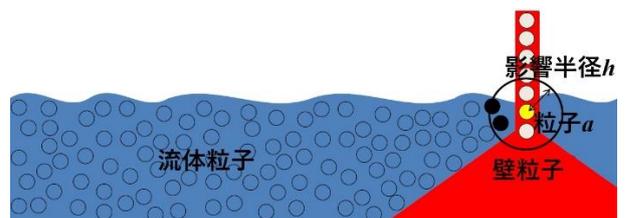


図-13 波圧と波力の計算簡略図

開口率76%（純ラーメン）の場合の解析による最大水位時の高さ方向の波圧分布を実験値（波圧計による計測値）と比較して図-14に示した。また、解析による波力（高さ方向の合計）の時刻歴を実験結果（ロードセルによる計測値）と比較して図-15に示した。開口率76%（純ラーメン）の場合では、波力の最大値は1.42kN、実験値の最大値は1.31kNであり、解析結果は実験結果をやや上回っているが、分布、時刻歴ともに概ね実験結果に整合

する結果が得られた。

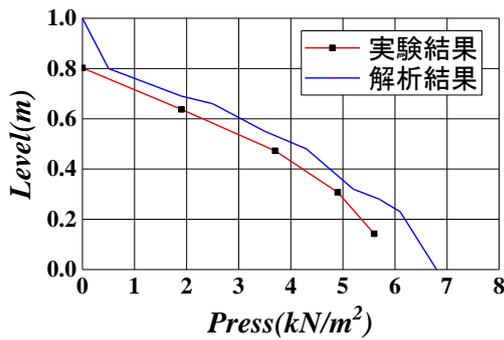


図-14 波圧の高さ方向分布の解析結果

解析結果が実験結果より若干大きいのは境界条件の影響であると推定される。図-16 に示したように、境界条件の影響で、壁粒子と流体粒子の間に隙間が生じ、この隙間の幅は $1.5h$ である。粒子間距離が大きい場合で式(13)を計算すると、壁粒子の密度はより大きい値が算出され、結果としては式(9)での圧力が増大する。試行的な数値計算で粒子間距離を変えた解析では、粒子間距離を小さくすればするほど解析結果は実験結果に近づく傾向があった。今回の解析では、粒子間距離を 5mm にした場合、解析は実験結果と概ね一致する結果になることを確認した。

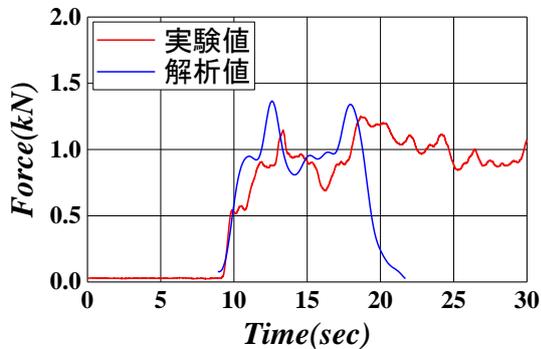


図-15 波力の時刻歴（解析結果）

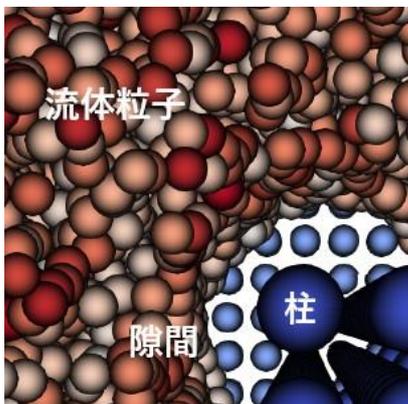


図-16 流体粒子と壁粒子間の隙間

4. まとめ

- 1) 大開口を有する試験体に対して津波外力と漂流物の閉塞効果を想定した水理実験を行った。試験体の応答せん断力外力は開口率が小さいほど大きいのが、倒壊には至らなかった。漂流物の閉塞効果で損傷が累積した状態では同条件の津波荷重で倒壊に至る場合を実験的に示された。以上の実験の概要を報告した。
 - 2) 開口閉塞も漂流物もない場合の実験においては、最大波力 (FC1) によっても試験体では若干の変形 (0.83mm) が生じたが、残存した。このケースに対して、粒子法による解析を適用した。解析手法の詳細を示した。
 - 3) 粒子法で解析した波力を実験と比較し、開口率が 76% (純ラーメン) のモデルを用い、粒子間距離を 5mm にした場合、実験と概ね一致する結果になることを確認した。
- 今後、ほかの実験条件による解析、試験体の弾塑性モデルによる解析、漂流物を考慮した解析などを行う予定である。

謝辞

本研究は日本学術振興会 科学研究費 (学術研究助成金) (基盤(A)) 「倒壊限界と地震動被災を考慮した津波による建物の崩壊メカニズムに関する研究」 (課題番号 00134479 研究代表者 壁谷澤寿海)により実施された。

参考文献

- 1) 壁谷澤寿海, 壁谷澤寿一, 李禹彤, 松山昌史, 木原直人, 連続波と漂流物による鉄筋コンクリート建物の津波崩壊実験 (その1 実験計画および実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 広島, 8.31-9.3, 日本建築学会, 173-174, 2017
- 2) 壁谷澤寿海, 壁谷澤寿一, 李禹彤, 松山昌史, 木原直人, 連続波津波と漂流物閉塞による鉄筋コンクリート建物の崩壊実験, 日本地震工学会大会 2017, 東京, 11.13-14, 日本地震工学会, P1-23-4pp, 2017
- 3) 李禹彤, 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海, 連続波と漂流物による鉄筋コンクリート建物の津波崩壊実験 (その2 実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 東北, 9.4-6, 日本建築学会, 509-510, 2018
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010.3
- 5) Dalrymple, R. A. and B. D. Rogers, Numerical Modeling of Water Waves with the SPH Method, Coastal Engineering, 53/2-3, 141-147, 2006
- 6) Monaghan JJ, Smoothed Particle Hydrodynamics, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 30, 543-574, 1992