

平成24年度年度 建築基準整備促進事業

49.津波避難ビルの構造基準の 合理化に資する検討

一般社団法人 建築性能基準推進協会
国立大学法人 東京大学 生産技術研究所
鹿島建設株式会社

調査の目的

水理模型実験や数値波動水槽技術による数値シミュレーションおよび東日本大震災での被災建築物の被害状況等の精査を実施することで、「津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」の見直しに資する知見を得ることを目的とする。

特に、開口の存在による津波波圧の低減効果、内部浸水による浮力低減に及ぼす効果等を水理模型実験や既往の水理実験結果等により把握する。CADMAS-SURF/3D等の数値波動水槽技術により開口部を考慮した津波の波圧作用時の数値シミュレーションを実施し、上記の実験データおよび既往の実験データ等と比較し、数値シミュレーション技術の妥当性の検証を行う。

調査体制

本調査・検討は

一般社団法人建築性能基準推進協会

東京大学生産技術研究所

鹿島建設株式会社

と、独立行政法人建築研究所の共同研究として実施した。

実施に当たっては、委員会を設置し、詳細な検討を行った。

委員会メンバー（16名＋協力委員6名＋OBS2名）

委員長：中埜 良昭（東大生研）

（建築構造の専門家に加え...）

委員：藤間 功司（防衛大学） ⇒ 津波荷重

有川 太郎（港空研） ⇒ 水理実験、数値解析

ほか

(イ)開口を有する建築物に作用する津波の水理実験

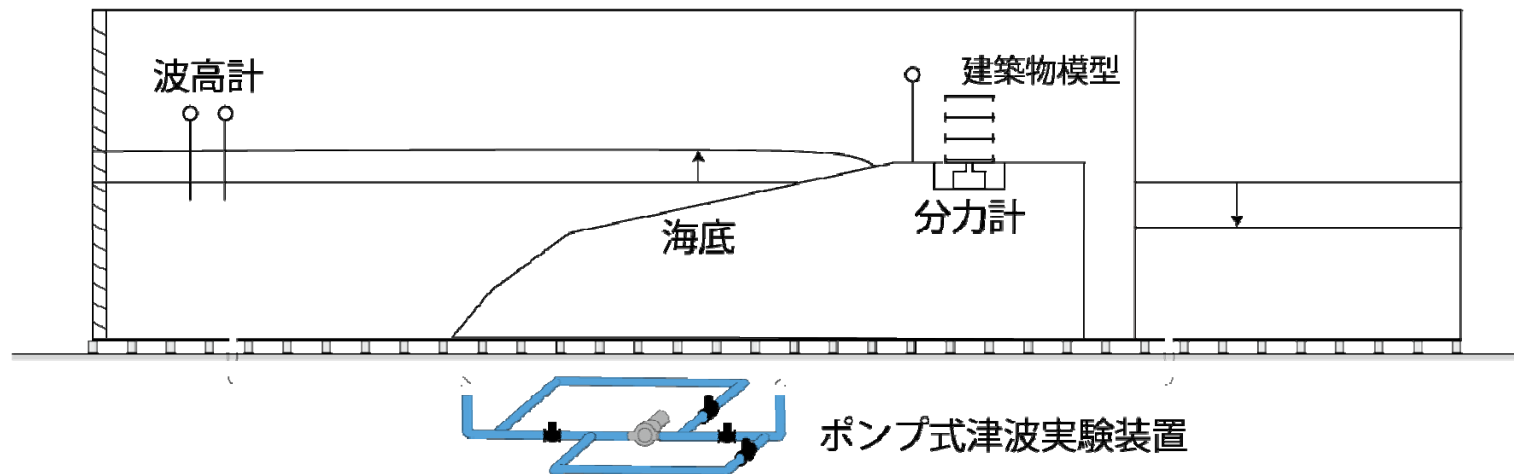


・水理模型実験

1) 実験水槽

- ・長さ60m × 幅0.7m × 高さ1m
- ・縮尺1/100で

海底斜面と陸上地形を設置



(イ)開口を有する建築物に作用する津波の水理実験

2) 建築物模型

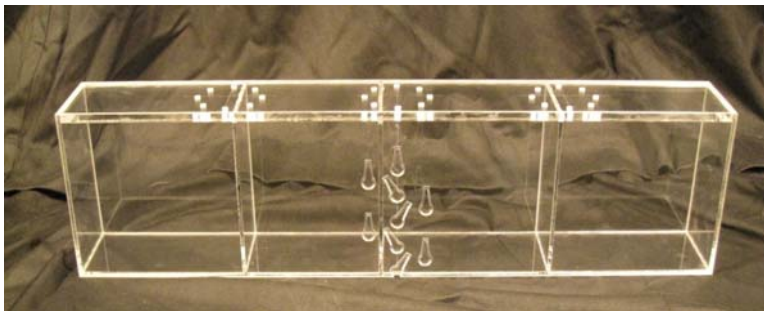
6階建て集合住宅の縮尺1/100とした

側方を水が流下しない模型(2Dモデル): 開口の有無

// 流下する模型(3Dモデル): 開口の有無

合計4タイプ

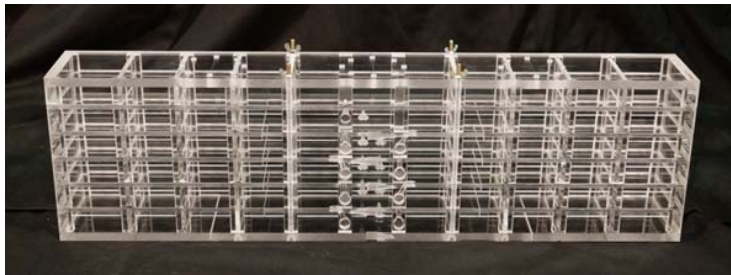
2Dモデル



3Dモデル



開口なし



開口あり

(イ)開口を有する建築物に作用する津波の水理実験

3) 実験方法

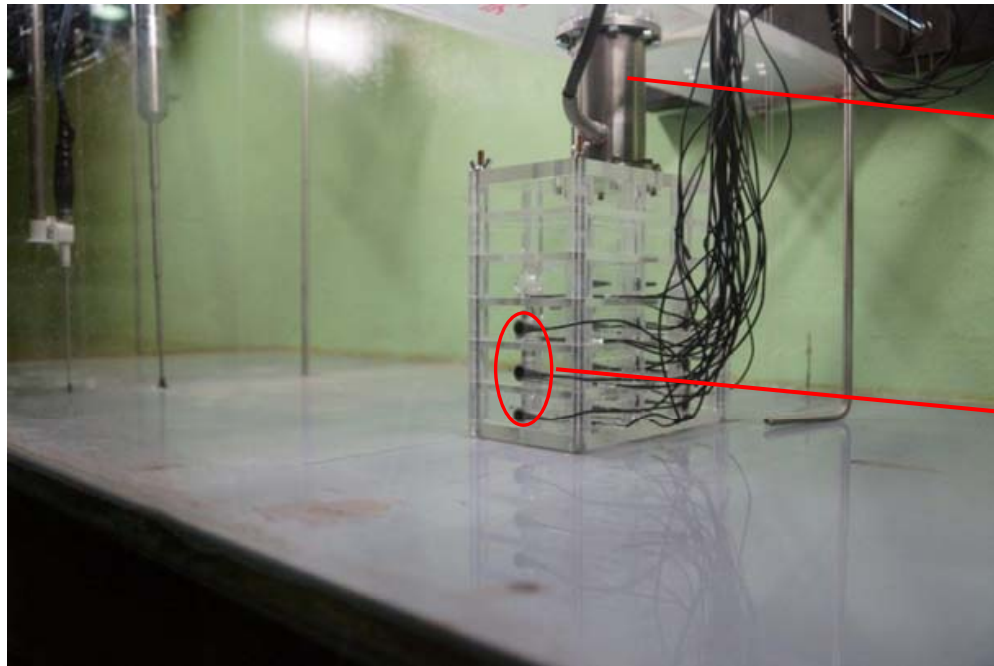
建築物模型 (2D開口有無、3D開口有無)

波高 (3.0、5.0、7.5、10.0cm)

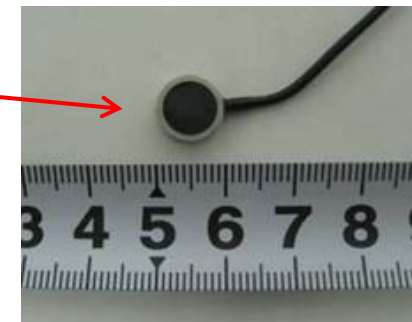
半周期 (30、60秒)

を組み合わせた**合計52ケース**で

建築物模型に作用する波圧および波力を計測



分力計



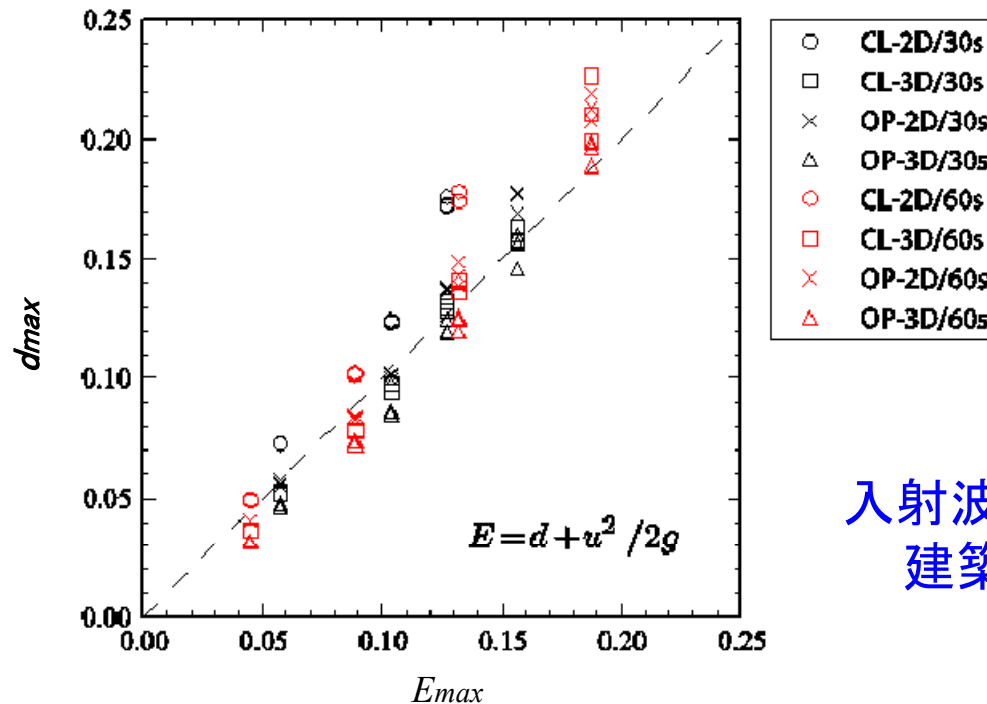
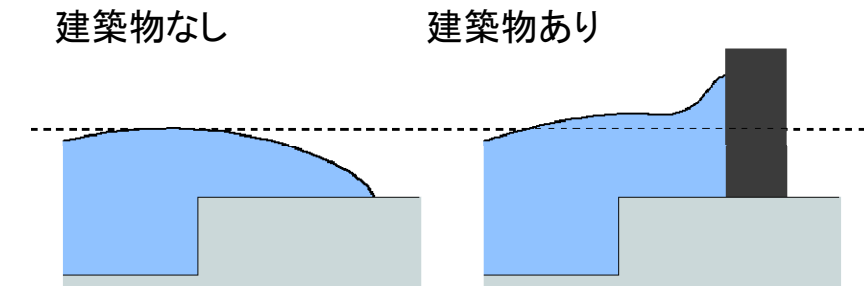
波圧計

3Dモデル(開口なし)模型設置状況

(イ)開口を有する建築物に作用する津波の水理実験

4) 実験結果

建築物によるせき上げ効果は比エネルギーと相関あり



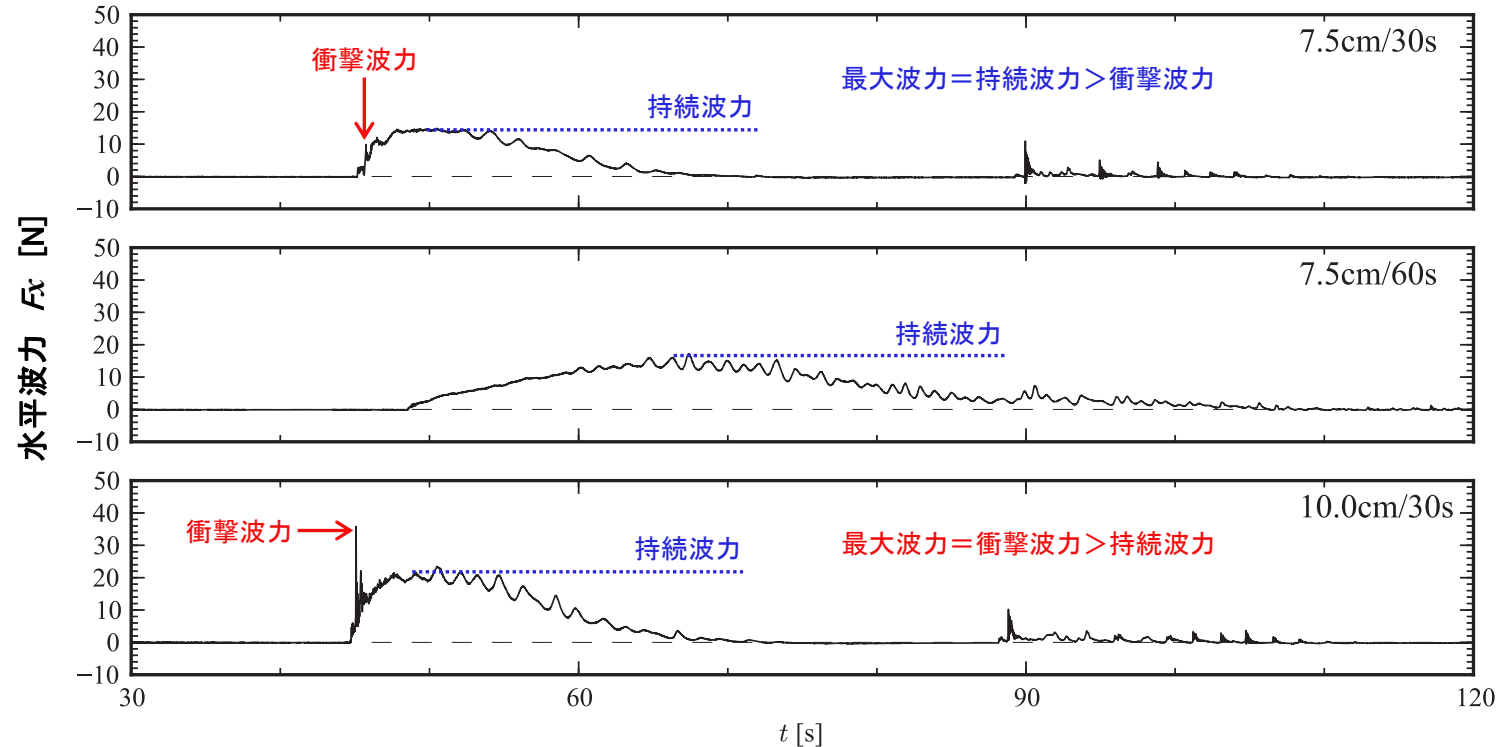
比エネルギー

$$E = d + \frac{u^2}{2g}$$
$$= d \left(1 + \frac{F_r^2}{2} \right)$$

入射波最大比エネルギー E_{max} と
建築物前最大浸水深 d_{max} の比較

(イ)開口を有する建築物に作用する津波の水理実験

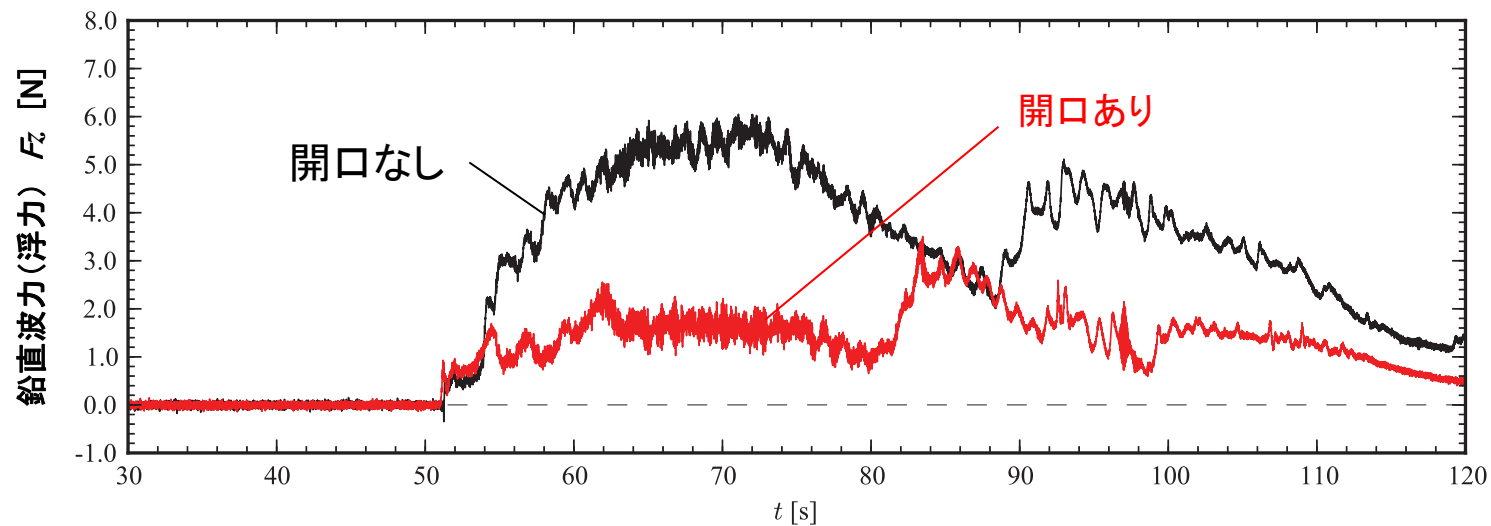
- ・津波の来襲により衝撃波力が生じ、その後水位の上昇に伴う持続的な荷重が発生。
- ・津波の周期が長い場合には衝撃力が生じなかった。
- ・波高が大きく、波長が短い場合には衝撃力が最大波力になる場合がある。



波高・周期による水平波力の違い

(イ)開口を有する建築物に作用する津波の水理実験

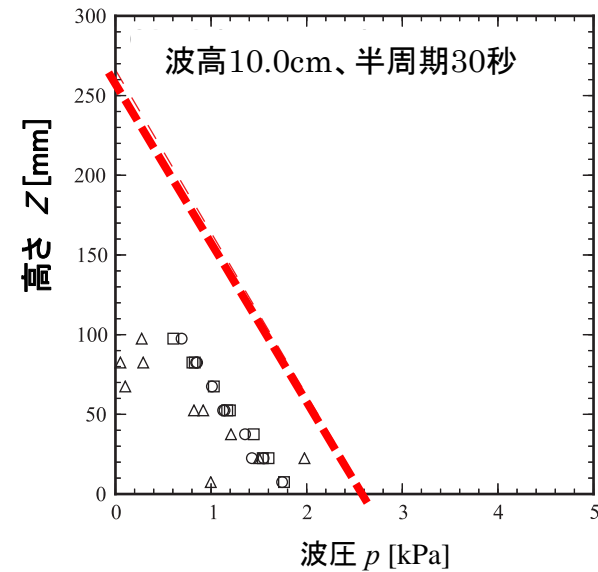
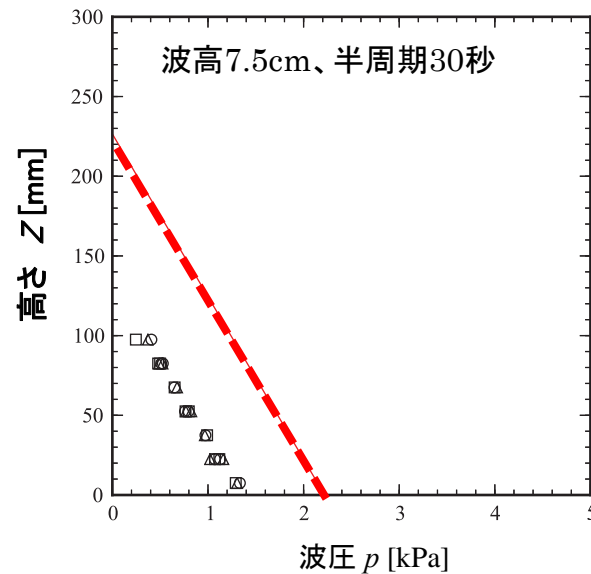
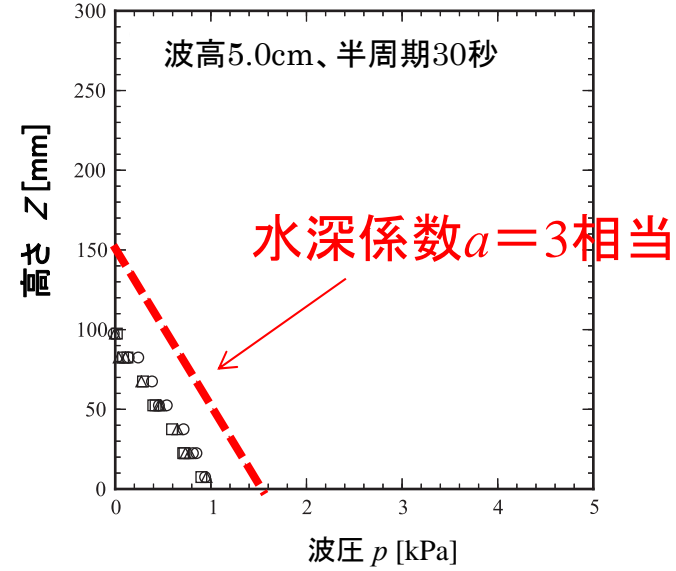
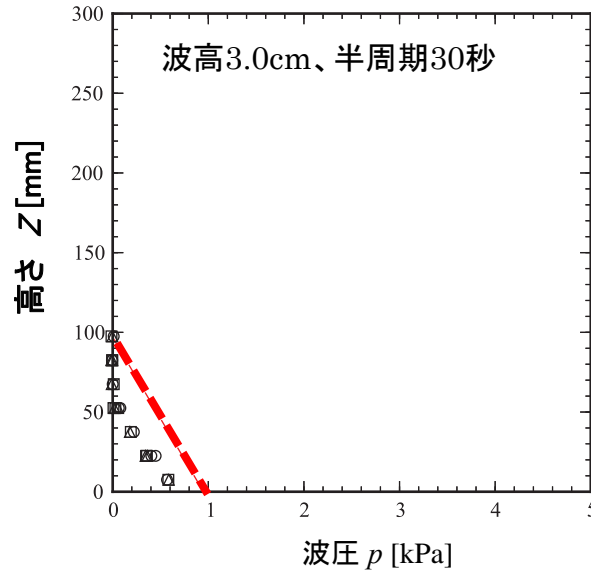
- ・開口からの水の入力により、浮力が低減していることが観測された。



開口の有無による浮力の違い

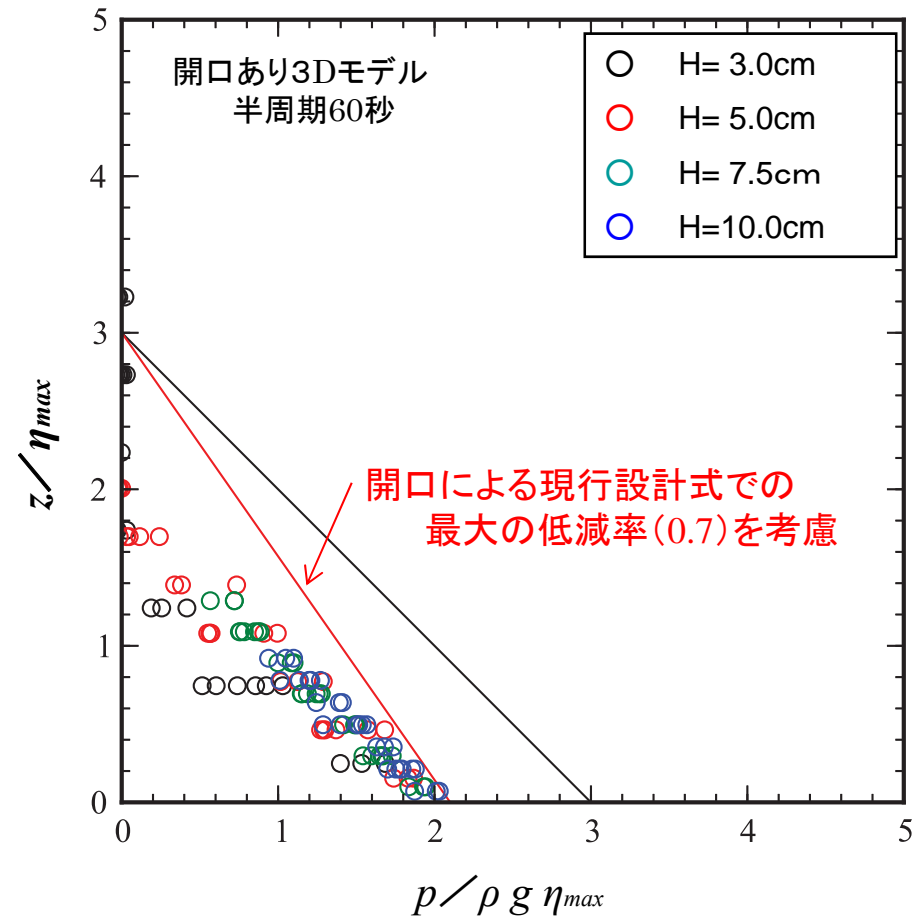
(イ)開口を有する建築物に作用する津波の水理実験

波力が最大となる時刻の波圧分布(3D開口あり)



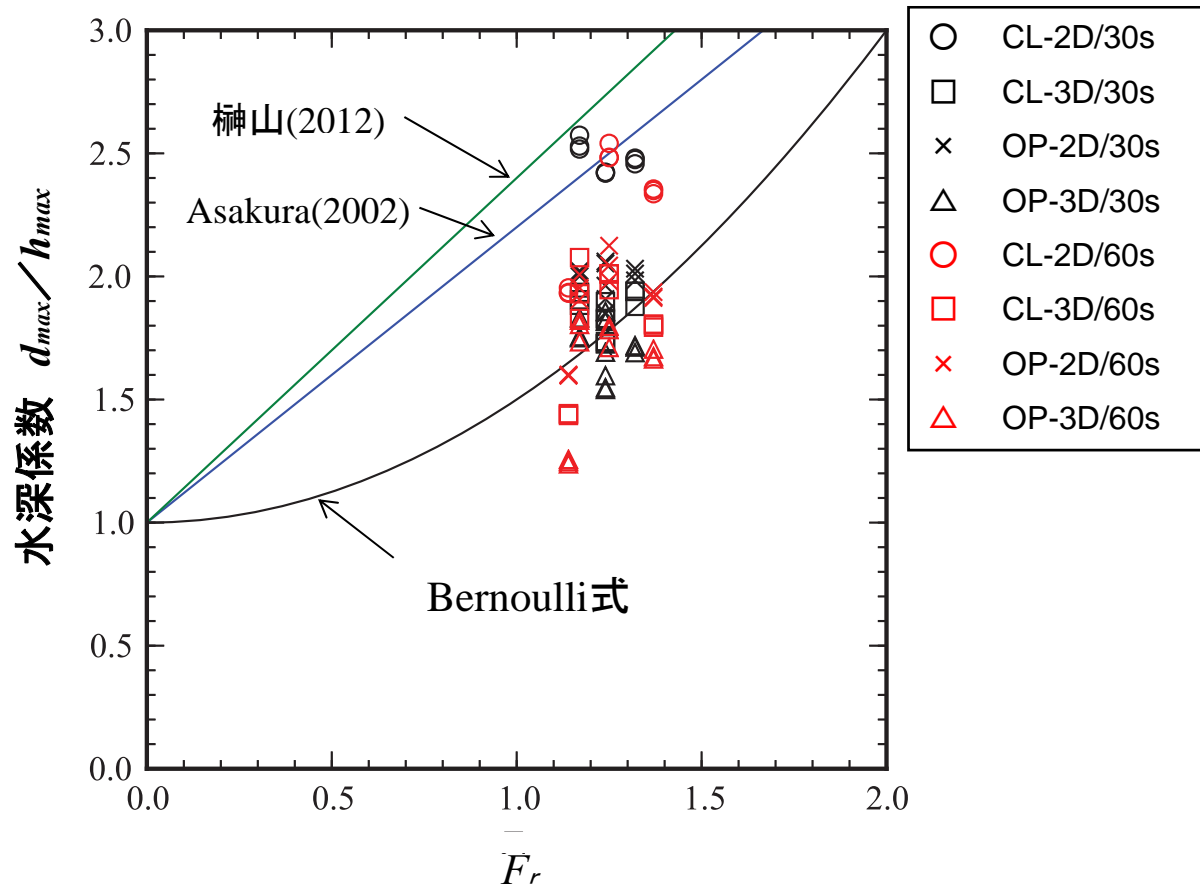
(イ)開口を有する建築物に作用する津波の水理実験

開口ありの3Dモデルでの波力最大時の波圧分布から、
現行設計式の(1 - 開口率)による低減率より、
計測した波圧は低減されていた。



(イ)開口を有する建築物に作用する津波の水理実験

水深係数はFroude数によって変化している。
また、Bernoulli式よりも大きな値をとる場合がある。



(イ)開口を有する建築物に作用する津波の水理実験

水理模型実験のまとめ

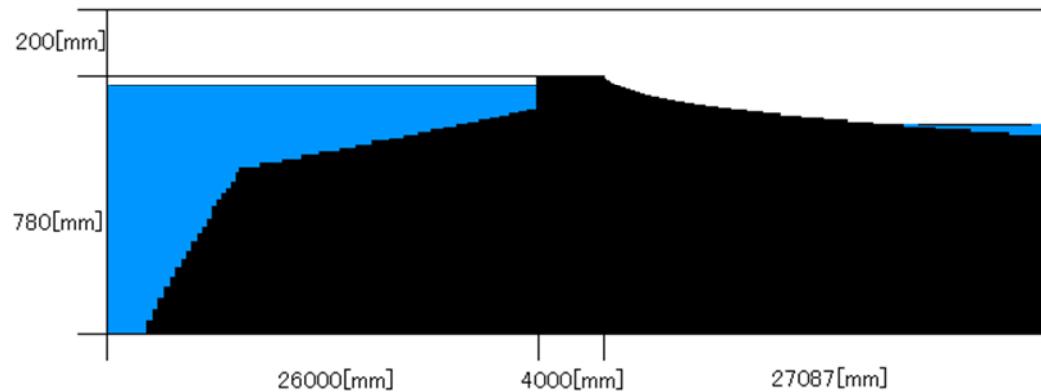
- ・開口がある場合の水平波力は、開口が無い場合の波力に $(1 - \text{開口率})$ 倍した力よりやや小さい。
- ・開口がある場合の鉛直力は、建物内部に浸入する水の影響で開口が無い場合に比べ小さい。
- ・鉛直方向の分布は静水圧分布で良く近似される。
- ・水深係数は、開口があると低減する。
また、3次元構造物の方が、2次元構造物に比べてその低減が大きい。
- ・水理実験の結果得られたせき上げ高さは、入射波のフルード数、設置される建物模型の種類により変化し、入射波の最大浸水深の1.5倍から3.0倍の範囲にある。
- ・津波避難ビルの現行の設計式(水平力, 鉛直力)は、すべてのケースで安全側の評価となる。

(口)開口を有する建築物に作用する津波のシミュレーション

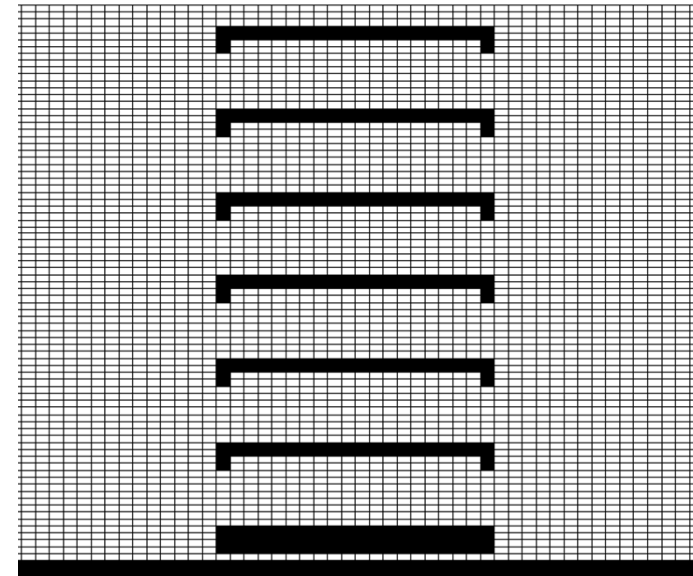
解析方法: 数値波動水槽 (CADMAS-SURF/3D) による解析
水の鉛直運動と空気のトラップを考慮

解析ケース (水理実験の再現)

- 1) 通過波検定
- 2) 断面2次元波圧・波力解析
- 3) 3次元波圧・波力解析



解析領域 (x-z断面、鉛直方向20倍で表示)



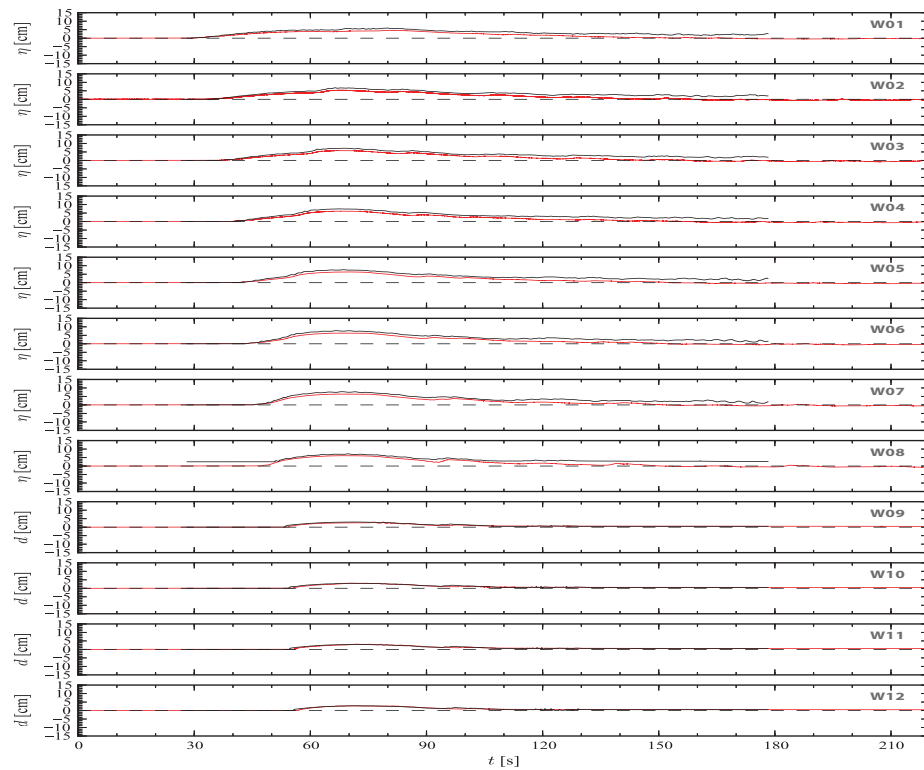
建築物近傍のx-z断面格子

(口)開口を有する建築物に作用する津波のシミュレーション

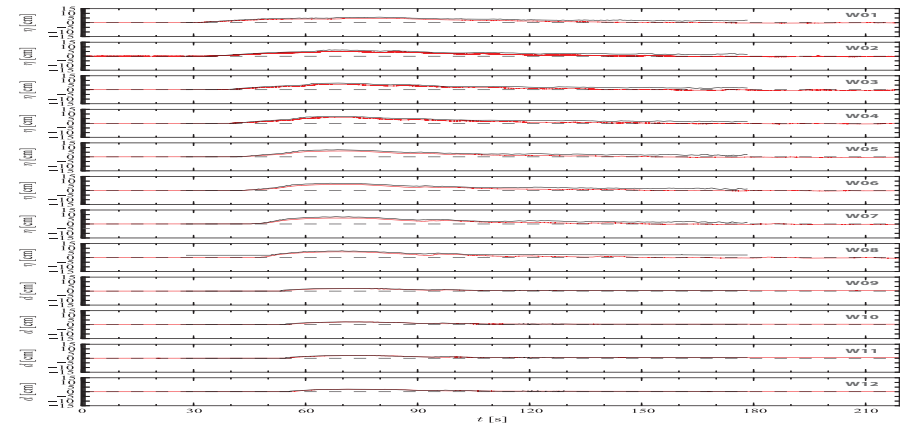
解析結果

1) 通過波検定

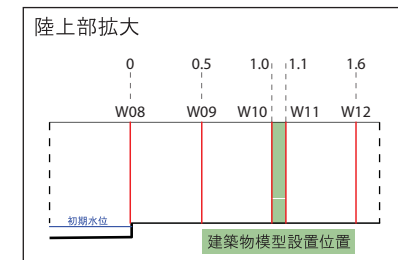
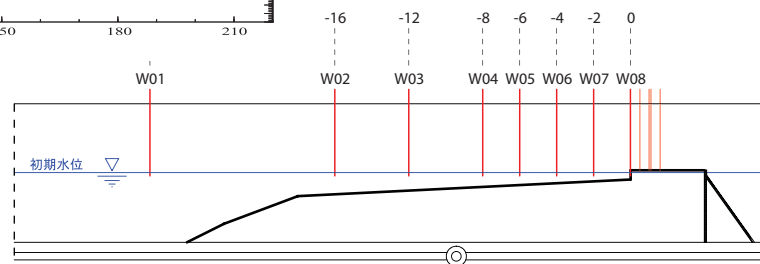
実験結果を良く再現出来た



海域での波高 η (cm)



陸上での波高 d (cm)



波高3.0cm、半周期60秒における水位変動

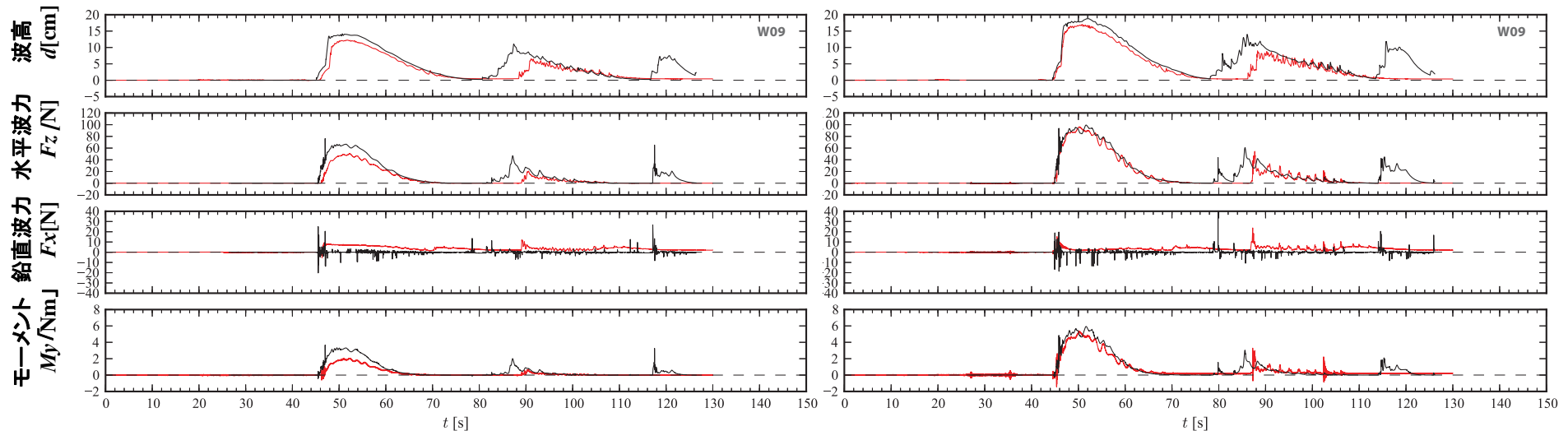
(口)開口を有する建築物に作用する津波のシミュレーション

解析結果

2) 波圧・波力実験(2次元開口なし)

解析値は実験値をやや過大評価しているが、
水平力と転倒モーメントについては実験結果を良く再現出来た。
鉛直力(浮力)については再現出来ず、改善を行った。

黒線が解析値



波高5.0cm、半周期30秒

波高7.5cm、半周期60秒

規格化した波力

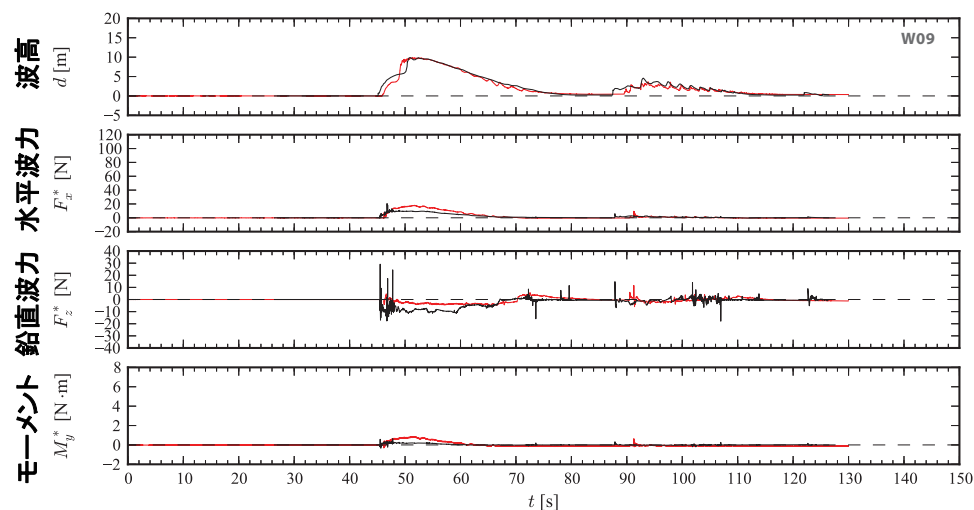
(口)開口を有する建築物に作用する津波のシミュレーション

解析結果

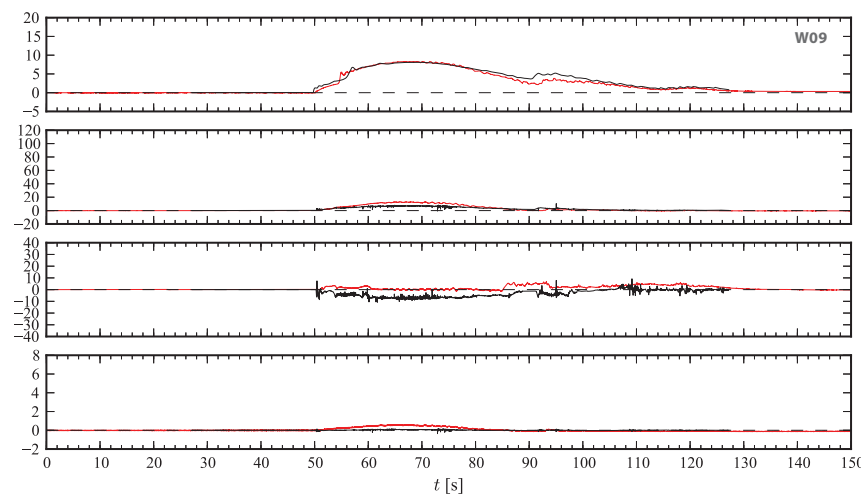
2) 波圧・波力実験(2次元開口あり)

開口なしの解析結果に比べて、実験値をやや小さめに評価していた。
これは柱にかかる荷重が考慮されていないことなどが考えられる。

黒線が解析値



波高5.0cm、半周期30秒



波高5.0cm、半周期60秒

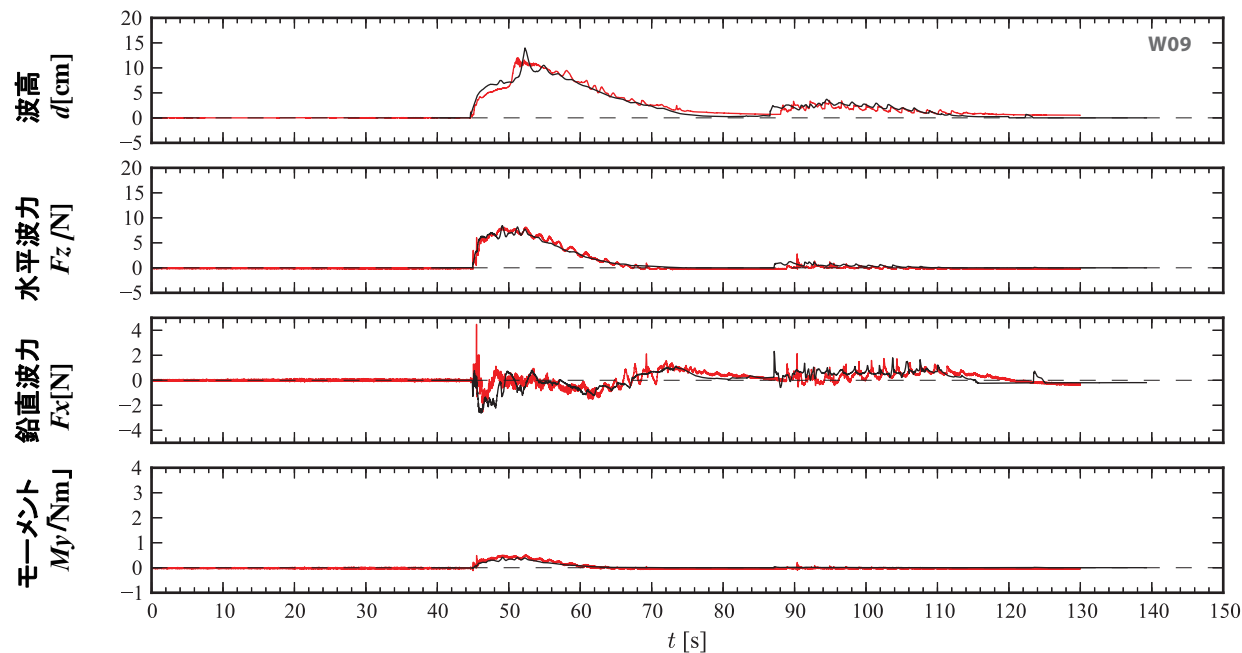
規格化した波力

(口)開口を有する建築物に作用する津波のシミュレーション

解析結果

3) 3次元解析(開口あり)

水平波力、転倒モーメントとも実験結果を良く再現出来た。
底面抵抗を考慮したため鉛直力の再現性もよかった。



波高7.5cm、半周期30秒

(口)開口を有する建築物に作用する津波のシミュレーション

数値解析結果のまとめ

- 数値波動水槽技術(CADMAS-SURF/3D)を用いた3次元数値シミュレーションにより、水理模型実験で得られた建築物模型周囲の水位変化、建築物に作用する波圧、波力(水平力、鉛直力、転倒モーメント)を精度よく再現できる方法を提案した。
- 建物と地盤面との間の水流抵抗を考慮することにより、鉛直力(浮力)の計算精度を大きく向上させた。

(ハ) 被災建築物の被害状況等の精査

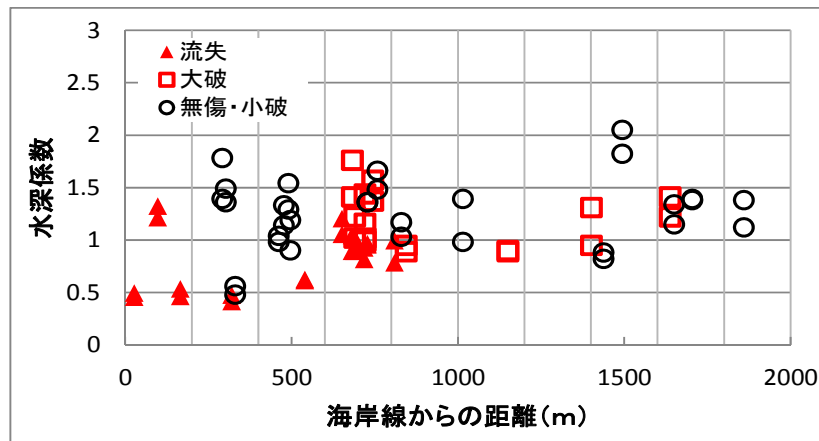
被災建築物の被害状況等について、
以下の精査を行った。

1. 被災木造住宅について
滑動、転倒、アンカーボルトのせん断破壊、
についての見直しの検討および開口部を考慮した
水深係数の推定を行った。
2. 鉄筋コンクリート造(RC造)建築物の
津波被害調査に基づき、
転倒に至った現象について検討を行った。

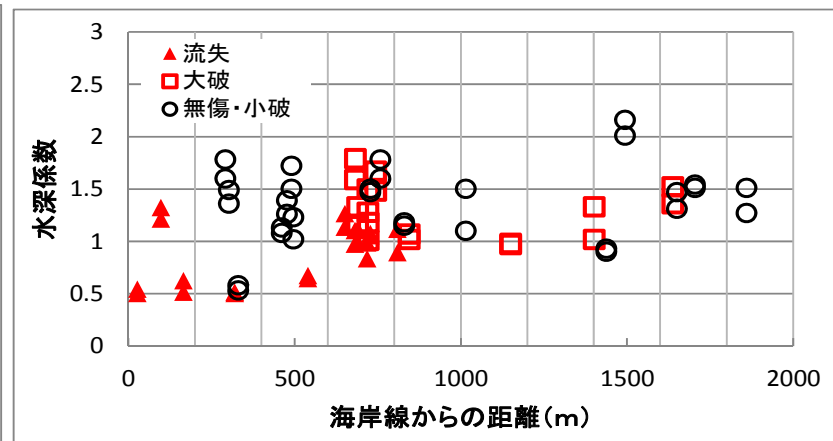
(ハ) 被災建築物の被害状況等の精査

1. 木造建築物の被災状況の精査

木造住宅の開口部を考慮した場合、
考慮しない場合に比べて水深係数が
1.1倍程度大きくなった。



開口部考慮せず

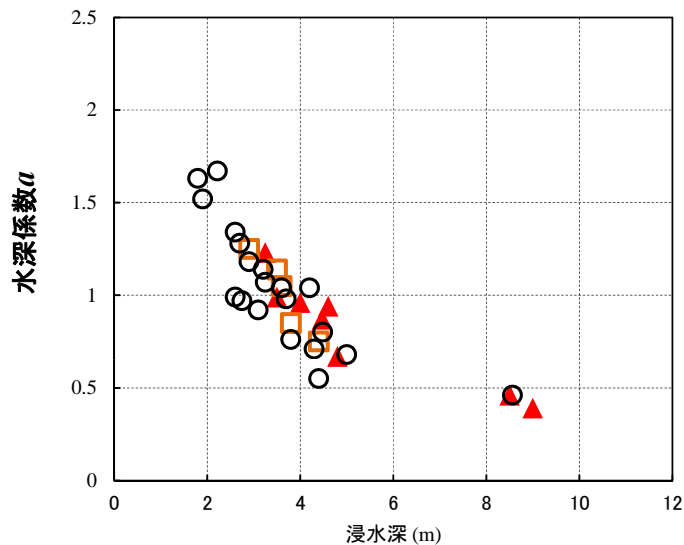


開口部を考慮

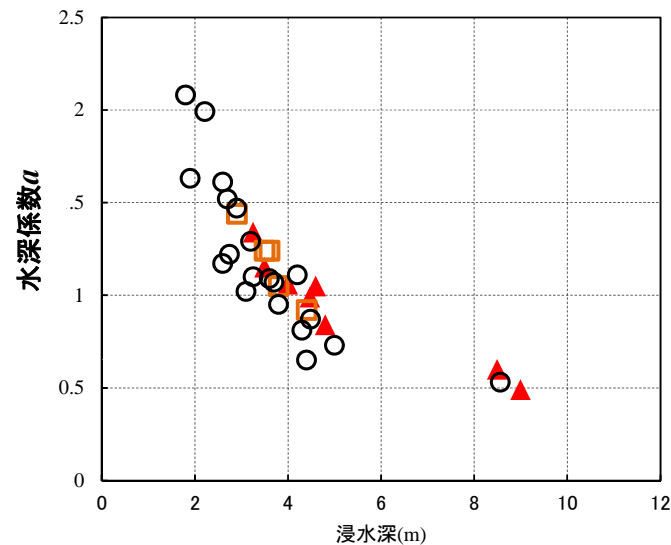
水深係数と海岸からの距離の関係

(ハ) 被災建築物の被害状況等の精査

水平耐力、滑動、アンカーボルト接合部のせん断破壊、転倒のうち最も小さい水深係数を与える場合を推定崩壊形とした場合、崩壊形としては滑動、アンカーボルト接合部のせん断破壊となる場合が多い結果となった。



開口部考慮せず



開口部を考慮

推定崩壊形における水深係数と浸水深関係

(ハ) 被災建築物の被害状況等の精査

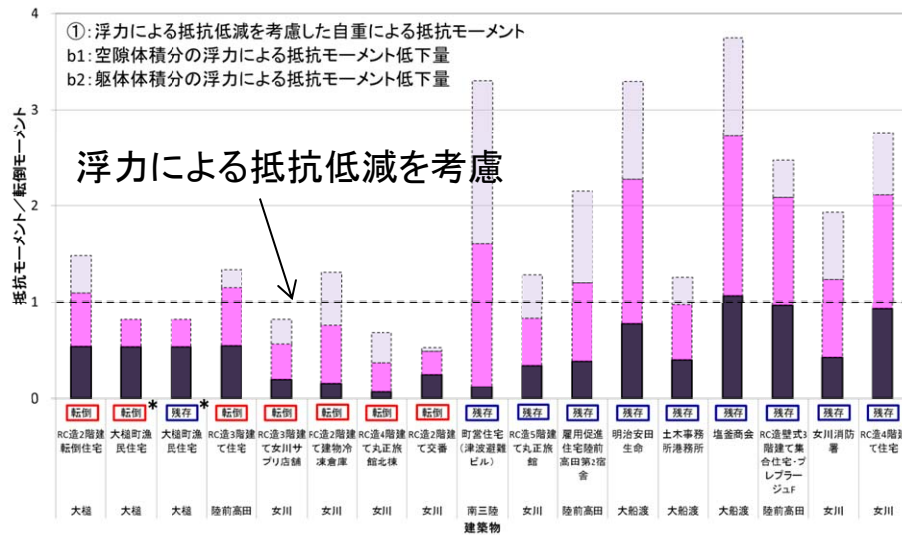
木造建築物の被災状況の精査のまとめ

- 開口を考慮した場合は、開口を考慮しない場合に比べ、木造建築物の水平耐力相當時の水深係数に大きな差がなかった。
- 滑動、転倒、アンカーボルトのせん断破壊の検討時には開口部の考慮の有無による差が大きくなることがわかった。
- 建物の崩壊形は滑動、アンカーボルト接合部のせん断破壊で決定する結果が多かった。
- 推定される崩壊形における水深係数の上限は1.3程度、海岸から500m超では1.2程度と考えられる。

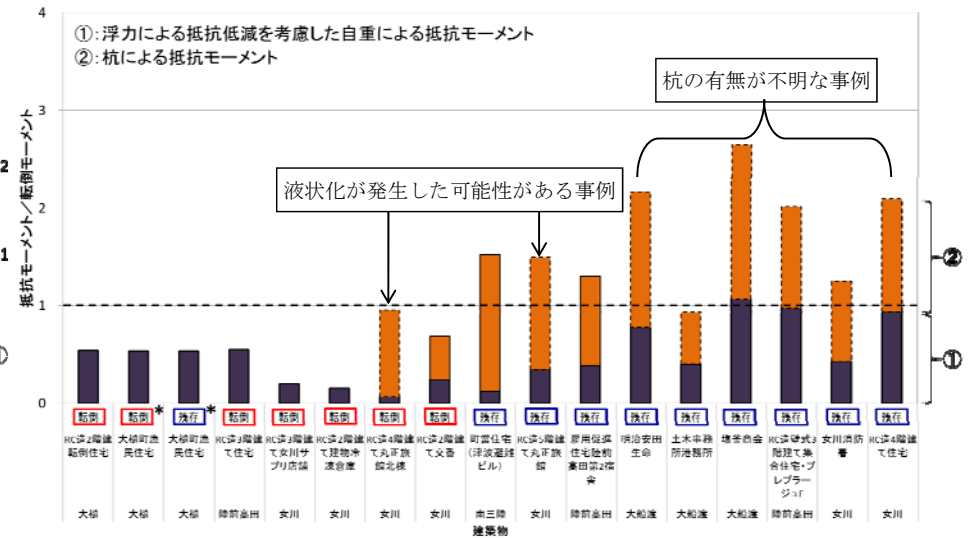
(ハ)被災建築物の被害状況等の精査

2. 鉄筋コンクリート造建築物の転倒被害に関する精査

浮力を考慮した自重による抵抗モーメントに加えて、
杭の引き抜き抵抗を考慮することにより、
被害実態が概ね評価出来た



杭の影響を無視



杭の影響を考慮

抵抗モーメント比と被害程度の関係

(ハ)被災建築物の被害状況等の精査

鉄筋コンクリート造建築物の転倒被害に関する精査のまとめ

- ・被害調査に基づく鉄筋コンクリート造建築物の転倒に関する検討より、浮力と杭の影響を考慮した評価結果は、概ね建築物の残存／転倒の被害実態と符合した。
- ・浮力による抵抗低減および杭による引抜抵抗が建築物の転倒現象に与える影響は無視できず、建築物の耐津波構造設計のためには、これらを十分に考慮する必要があることを改めて定量的に確認した。

まとめ

水理実験の結果、開口を有する建築物に対する数値解析を検証するためのデータを得た。

CADMAS-SURF／3Dによる再現計算の結果、開口の有無、建物周辺への津波の回り込みを考慮して、波圧、波力（水平、鉛直、転倒モーメント）を評価できる方法を構築した。

課題としては、以下があげられる。

- ・数値解析の精度向上のため、入射波条件のさらなる改善が必要。
- ・建物内部や背後の摩擦力、圧力低下などの評価が不十分。
- ・解析のメッシュ間隔と同等以下の部材（避難タワーの柱部材等）の津波波力を評価する方法を開発することが必要。
- ・現行設計式の開口による低減が7割を下回らないとする規定は、不合理に大きな荷重を与えることがあり、改善が必要。
- ・衝撃力に対する評価が必要。