

免震建物に作用する津波サージ力と応答性状に関する研究

—免震クリアランスの実況を踏まえた動的応答評価—

明治大学大学院 理工学研究科 建築・都市学専攻 曾根 克彦

1. 研究背景および研究目的

2011年東北地方太平洋沖地震以後、津波荷重評価式として式(1)に示す静水圧式¹⁾が活用されている。

$$Q_T = \rho g B (1 - \gamma) \int_{Z_1}^{Z_2} (a\eta - z) dz \quad (1)$$

ここで、 Q_T [kN]：津波荷重、 ρ [t/m³]：流体の単位体積質量、 g [m/s²]：重力加速度、 B [m]：津波受圧面の幅、 γ ：壁面開口率、 Z_1 [m]：津波受圧面の下端高さ、 Z_2 [m]：津波受圧面の上端高さ、 a ：水深係数、 η [m]：設計用浸水深である。

静水圧式は耐震建物を対象として公表されているが、現在では免震建物の設計にも用いられている。それに基づき、ガイドライン²⁾の策定や適用性に関する研究^(例えば 3), 4)が進められ、免震建物に作用する津波荷重は耐震建物と同様に静水圧式を用いて評価可能であるとされている。木下ら³⁾は、免震ピットへの津波の流入が津波荷重や免震層の応答を低減することを示唆しているものの、上部構造に作用する波圧の分布や免震層の応答についての検討は十分には行われていない。また、小林ら⁴⁾は、上部構造に作用する波圧の分布や免震層の応答について着目しているものの、免震クリアランスおよび免震ピットの実況を踏まえた、免震ピットの浸水状態の把握は行われていない。

そこで、本研究では免震クリアランスおよび免震ピットを再現した免震建物の縮小模型を用いて水理模型実験を実施し、免震ピットの浸水状態が津波荷重と応答変位に及ぼす影響を明らかにする。

2. 水理模型実験の計画

2.1 実験水路および試験体

実験水路および計測機器の配置を図1に示す。実験水路は幅300mm、高さ400mmの矩形の鋼製水路であり、本実験では9500mmを部分的に使用した。水路端に、33.75Lの水を貯水し、遮水壁を開放させることで水が水路内に流れ込むダムブレイク型造波を採用した。水路は予め水を溜めた一様水深部(全長2600mm、水深50mm)と陸部に分かれ、津波は傾斜面(全長1200mm、勾配1/20)を遡上して試験体に作用する。なお、以降の検討では遮水壁からの距離を D とする。

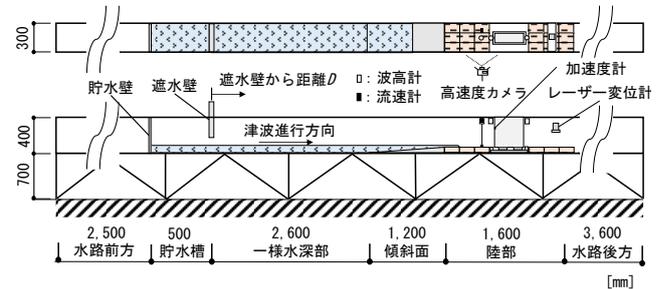


図1 実験水路および計測機器の概要

本実験では、免震性能を持つ試験体(以下、免震試験体)および耐震建物を想定した試験体(以下、固定試験体)を用いた(写真1)。試験体は原型で高さ28m、幅8m、奥行24mの8階建てRC造建物を想定し、質量は1.3 t/m²/階とする。免震周期 T は原型で3, 4, 5 sの3種類を想定し、表1に示す試験体の諸元は、縮尺を1/80としてフルードの相似則に従って設定した。なお、表1に示す免震層の諸元は、性能確認実験における平均値を示す。

試験体は塩化ビニル板およびステンレス板、免震層はリニアボールスライド(摩擦係数 $\mu = 0.0006 \sim 0.0012$)および引張ばねを用いて再現した。

試験体のクリアランス幅は7.5 mm(原型で60 cm)であり、免震ピットへ流入する水は免震クリアランス以外から流出しない。また、免震層の浸水状態として、造波前に免震ピットが空である状態(津波第1波を想定、以下、浸水なし)と造波前に免震層ピットが冠水している状態(津波第2波以降を想定、以下、浸水あり)の2種類で実験を行う。

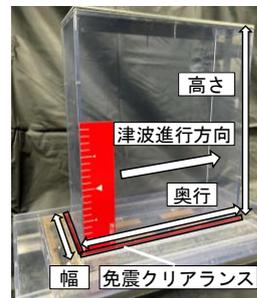


写真1 試験体

表1 試験体諸元

上部構造			
高さ[mm]	350		
幅[mm]	100		
奥行[mm]	300		
質量[kg]	3.9		
免震層			
固有周期[s]	0.34	0.44	0.55
水平剛性[N/mm]	1.46	0.87	0.55
摩擦[N]	0.65	0.29	0.45
減衰定数[%]	7.33	7.29	8.10

2.2 計測計画

本研究では、通過波実験および試験体実験を行う。通過波実験では、試験体を設置しない状態で津波進行波の浸水深および流速を計測する。浸水深の計測は、試験体設置位置($D = 4500$ mm)を含めた3箇所で行い、超音波式波高計を用いる。流速の計測は、

試験体設置位置でプロペラ式流速計および高速度カメラを用いた PIV 解析により計測する。高速度カメラの設定は、解像度 1280 px×1024 px、フレームレート 500 fps、シャッタースピード 0.001 s とする。

試験体実験では、浸水深と流速に加え、試験体に作用する波圧を波圧計、免震試験体の応答加速度および応答変位をそれぞれ加速度計およびレーザー変位計を用いて計測する。なお、波圧計は、試験体前面で 12 箇所、背面で 3 箇所とした (図 2)。サンプリング間隔は 0.001 s とし、各データの時刻歴波形はノイズ除去を目的に、50 Hz のローパスフィルタを適用する。実験は、ばらつきを考慮して通過波実験を 7 回、各試験体実験を 5 回実施した。

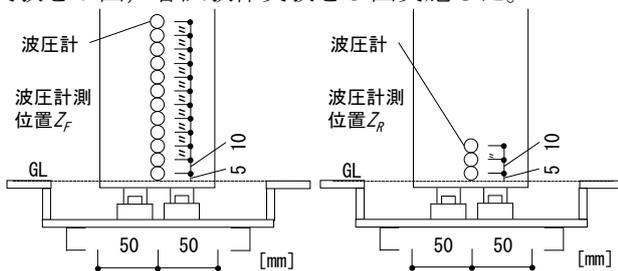


図 2 波圧の計測位置 (左: 前面, 背面)

3. 造波した津波の特徴

有川ら⁵⁾の実験では、試験体がない状態での浸水深ピーク (以下、 η_{max}) 時におけるフルード数と水深係数の関係は、式 (2) に示す損失係数を含めたベルヌイ式⁶⁾に対応することが示されている。

$$a = 1.0 + 0.5(1 + \xi)Fr^2 \quad (2)$$

ここで、水深係数 a : 静水圧に対する試験体設置時に試験体前面で計測した準定常的な波圧の比、 ξ : 損失係数 (0~0.4)、 Fr : η_{max} 時のフルード数である。

図 3 に $D=4500$ mm における浸水深と流速の時刻歴の結果を示す。図 3 より、全 7 回の結果とその平均値の差は最大で 1 割程度であることから、造波に対する再現性を確認した。また、図 3 に示した浸水深と流速からフルード数を、固定試験体実験の結果から水深係数を算出し、それらの関係と式 (2) の比較を図 4 に示す。本実験では、準定常的な作用部分の水深係数は 2.5 程度であり、また損失係数は 0~0.4 の範囲に分布しており、式 (2) と概ね対応した。

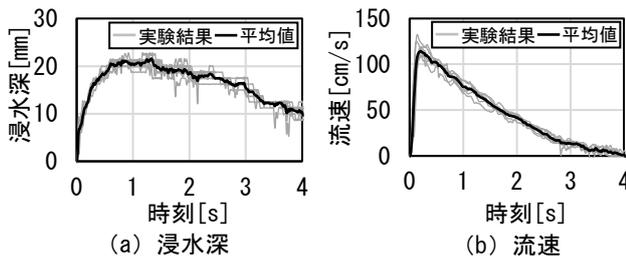


図 3 浸水深と流速の時刻歴 ($D = 4500$ mm)

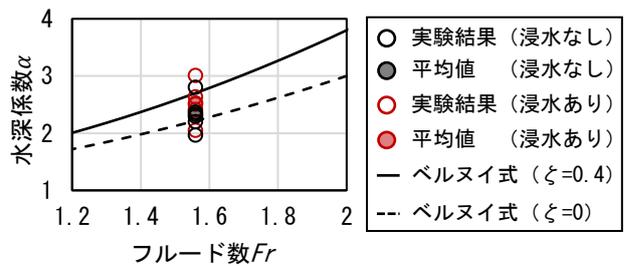
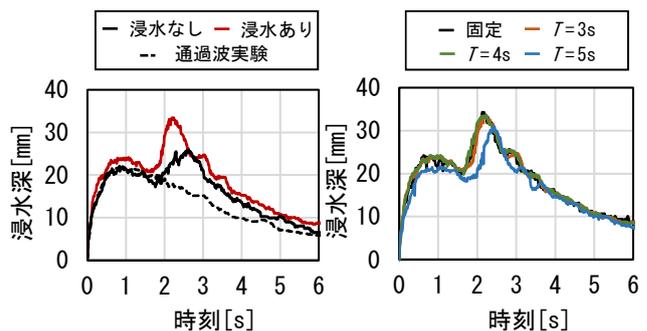


図 4 フルード数と水深係数の関係

4. 試験体実験の結果

4.1 試験体前面の流況

図 5 (a) に各浸水状態の $T=3$ s の $D=4300$ mm における浸水深の時刻歴を、図 5 (b) に浸水ありの各試験体の $D=4300$ mm における浸水深の時刻歴を示す。なお、(a) には比較として通過波実験における結果を重ね合わせている。図 5 (a) より、 $t=1.8$ s 以降で通過波実験よりも試験体実験における結果が上回った。これは、試験体に衝突した津波が堰き上げられた後、反射波として津波進行方向と逆向きに進むためである。免震周期が同一である場合、反射波による浸水深のピークは、浸水なしよりも浸水ありの方が大きくなっている。これは、免震ピットへ流入する水量が、浸水なしよりも浸水ありの方が極めて少なく、試験体前面に水が滞留するためであると考えられる。また、図 5 (b) より浸水状態が同一である場合、反射波による浸水深のピークは、免震周期が長いほど小さくなった。これは、免震周期が長い試験体ほど応答変位が大きくなり、津波を堰き止めにくくなるためであると考えられる。



(a) 浸水状態による比較 (b) 免震周期による比較

($T = 3$ s)

(浸水あり)

図 5 浸水深の時刻歴 ($D = 4300$ mm)

図 6 (a) に各浸水状態の $T=3$ s の $D=4500$ mm における流速の時刻歴を、図 6 (b) に浸水なしの各試験体の $D=4500$ mm における流速の時刻歴を示す。なお、(a) には比較として通過波実験における結果を重ね合わせている。図 6 より、免震周期や浸水の有無によらず通過波実験と試験体実験におけ

る流速の最大値は、同程度であることがわかる。また、図 6 (a) より、免震周期が同一である場合、流速が最大となる時刻以降では、流速は浸水なしの方が浸水ありよりも速くなっている。これは、浸水深と同様、免震ピットへの水の流入量の差によるものである。また、図 6 (b) より、浸水状態が同一である場合、免震周期によらず流速の最大値および時刻歴が同様であることがわかる。そのため、免震試験体の変位することによる試験体前面の流速への影響は小さいと考えられる。

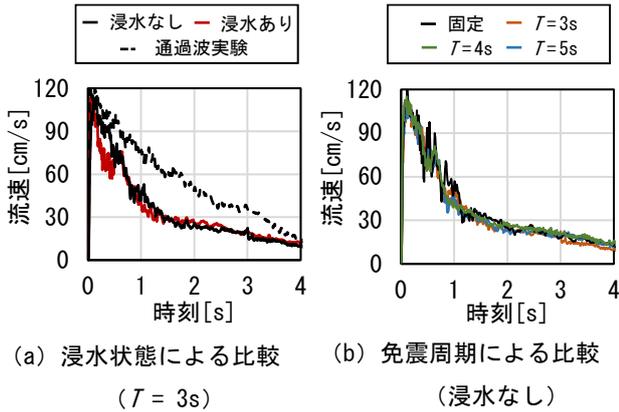


図 6 流速の時刻歴 ($D = 4500$ mm)

4.2 免震試験体の応答

図 7 に各免震試験体の応答の時刻歴を示す。なお応答速度は、0.001 s 間の応答変位の差分による数値微分によって算出した。図 7 より、最大応答加速度は、試験体による明確な傾向は確認されなかったが、最大応答速度および最大応答変位は、浸水状態が同一である場合、免震周期が長くなるほど大きくなり、免震周期が同一である場合、浸水なしよりも浸水ありの方が大きくなった。また、最大応答速度と最大応答変位を原型値に換算すると、それぞれ 15~40 cm/s 程度、20~50 cm 程度となり、一般的な免震用オイルダンパーの限界速度である 100~150 cm/s に達せず、一般的な免震建物のクリアランス幅である 60 cm に収まるレベルであった。

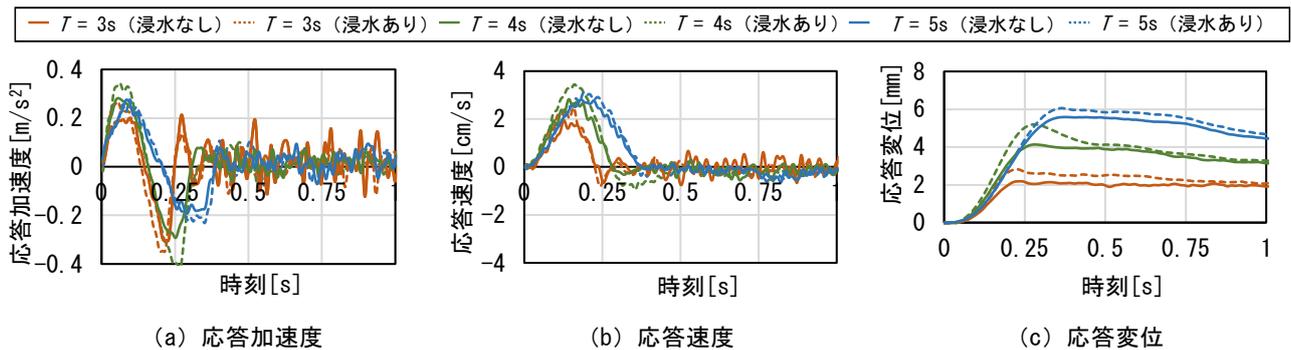


図 7 免震試験体の応答の時刻歴

4.3 試験体に作用する津波荷重の評価

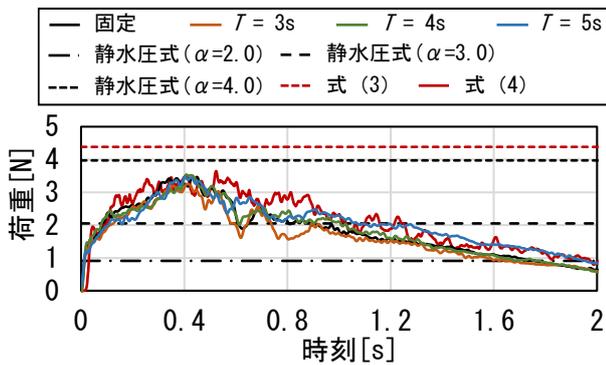
免震建物に作用する津波先端部の衝撃的な荷重の評価方法について、式 (1) および流速の影響を考慮した、米国で用いられている式 (3), (4) に示す津波荷重評価式⁷⁾を用いて分析を行う。また、試験体に作用する津波荷重は、各波圧計で計測した波圧に負担面積を乗じて足し合わせることで算出した。

$$P_{uw} = 1.25 I_{tsu} \gamma_s h_{max} \quad (3)$$

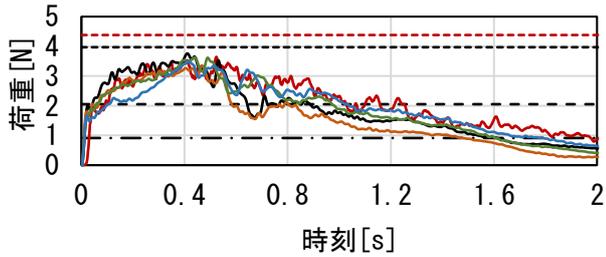
$$F_{impulse} = \frac{3}{4} \rho_s I_{tsu} C_d B (hu^2) \quad (4)$$

ここで、 P_{uw} [kPa]: 等価最大一様圧力 (最大浸水深の 1.3 倍の範囲に作用)、 $F_{impulse}$ [N]: 津波先端部の衝撃荷重、 I_{tsu} : 津波重要度係数、 γ_s [kN/m³]: 水の単位体積重量、 h_{max} [m]: 最大浸水深、 ρ_s [kg/m³]: 水の密度、 C_d : 抗力係数、 B [m]: 建物の見付け幅、 h [m]: 浸水深の時刻歴、 u [m/s]: 流速の時刻歴である。

図 8 に各試験体に作用した津波荷重および各津波荷重評価式を示す。図 8 より、津波荷重の最大値 (以下、 F_{max}) は試験体によらず同程度であった。また、免震周期が同一である場合、浸水なしよりも浸水ありの方が単位時間あたりに増加する津波先端部の荷重が大きくなる傾向を示し、この差は免震周期が短いほど顕著であった。これは、4.1 節と同様に、免震周期が短いほど免震層の変位は小さく、浸水ありの場合、免震ピットへの津波の流入が制限されることで、試験体前面に水が滞留するためであると考えられる (写真 2)。加えて、静水圧式において、堰上げ高さから求まる水深係数 (本実験では 4 程度) を用いて算出した津波荷重は、試験体に作用する津波荷重の最大値を安全側に評価している。さらに、流速の影響を考慮した式 (3) および式 (4) との対応も良好であることから、津波先端部の衝撃荷重に対して、水深係数を適切に設定することで、静水圧式を用いて免震建物および耐震建物に作用する津波サージ力を評価可能であると考えられる。

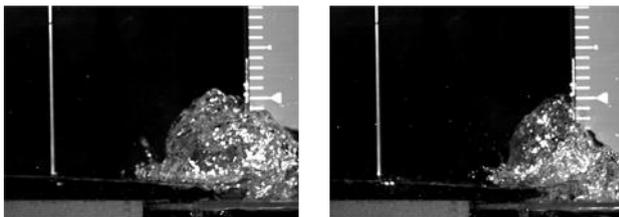


(a) 浸水なし



(b) 浸水あり

図8 津波荷重の時刻歴



(a) 浸水あり

(b) 浸水なし

写真2 試験体前面の流況

5. 津波先端部の衝撃荷重に対する動的応答増幅

F_{max} および免震層の荷重-変位関係から求まる静的変位に対する最大応答変位の比を変位応答倍率として、免震層の動的な応答の増幅について検討する。図9に各免震試験体実験における静的変位と動的変位を示す。図9より、津波衝突後の流況の乱れにより適切に津波荷重を計測できなかった2ケースを除くと、試験体の応答変位は1.0~1.5倍程度、動的に増幅することがわかる。また、免震周期が同一の場合、浸水なしよりも浸水ありの方が、変位応答倍率が高くなる傾向が見られた。これについて、各免震試験体実験における津波荷重の時刻歴から算出した力積と応答変位の関係を図10に示す。図10より、免震周期が同一の場合、浸水なしと浸水ありで比較すると、応答変位が最大となる時刻までの津波の力積が大きくなるにつれて最大応答変位が大きくなる傾向を示した。すなわち、4.3節で前述した津波荷重の立ち上がり変位の動的な増幅の要因の一つとして考えられる。

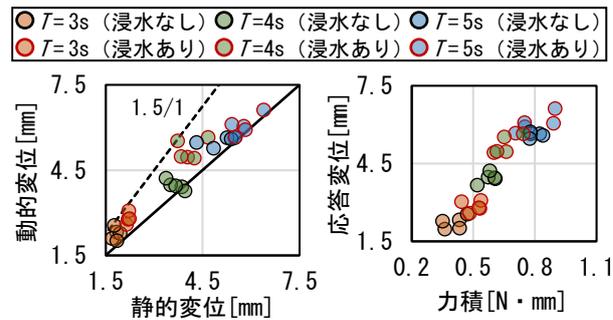


図9 静的変位と動的変位の関係

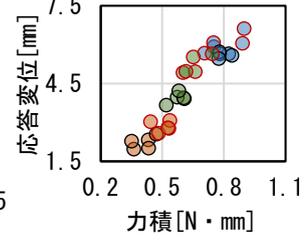


図10 力積と応答変位の関係

6. まとめ

本研究より得られた知見を示す。

- 1)免震建物に作用する津波先端部の衝撃的な荷重は、水深係数を適切に設定することで、耐震建物と同様に静水圧式を用いて評価可能である。
- 2)津波衝突時に免震ピットが冠水している状態であると、空の状態よりも単位時間あたりに増加する津波先端部の荷重が大きくなる傾向を示し、この差は免震周期が短いほど顕著であった。
- 3)免震層の最大応答変位は、津波荷重を静的に作用させて評価した変位に対して1.0~1.5倍程度の増幅が起こる可能性があり、津波衝突時に免震ピットが冠水している状態であると、空の状態よりも変位の増幅が大きいことを確認した。加えて、津波荷重の力積と最大応答変位には相関があり、動的な応答の増幅は力積を評価することで把握できる可能性があることを確認した。
- 4)上記1)~3)より、現状の設計で行われているような免震層への浸水の影響を考慮しない設定は、津波荷重の算定上は安全側の仮定となる。

参考文献

1. 国土交通省国土技術政策総合研究所：津波避難ビル等の構造上の要件の解説，2012
2. 一般社団法人日本免震構造協会：免震建物における対津波構造設計マニュアル-津波を受ける免震建物の構造設計に当たっての基本事項と設計例-，2020
3. 木下貴博ら：3次元流体解析に基づく免震建物の津波荷重の評価，日本建築学会関東支部研究報告集I，pp.349-352，2021
4. 小林正人ら：免震建物に作用する津波サージ力と応答性状に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.89，No.815，pp.22-30，2024
5. 有川太郎ら：防潮堤背後の建物に作用する津波力に関する実験的検討，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.70，No.2，pp.I_806-I_810，2014
6. 松富英夫ら：開口部を有する鉄筋コンクリート造建物に働く津波流体力に関する基礎実験，土木学会論文集 B2(海洋工学)，Vol.69，No.2，I_326-I_330，2013
7. American Society of Civil Engineers, Structural Engineering Institute. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, 2016