

2018年度（第10回）免震構造・制振構造に関わる研究助成の成果報告

津波荷重に対する免震建物の構造安全性評価

小林 正人（明治大学）

1 はじめに

東北地方太平洋沖地震以後、多岐に渡る津波対策が行われている。津波荷重 Q_T の評価手法として、式(1)および図1の静水圧式が広く用いられている¹⁾。

$$Q_T = \rho g B (1-\gamma) \int_{z_1}^{z_2} (a\eta - z) dz \quad (1)$$

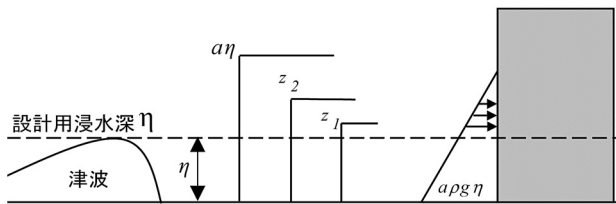
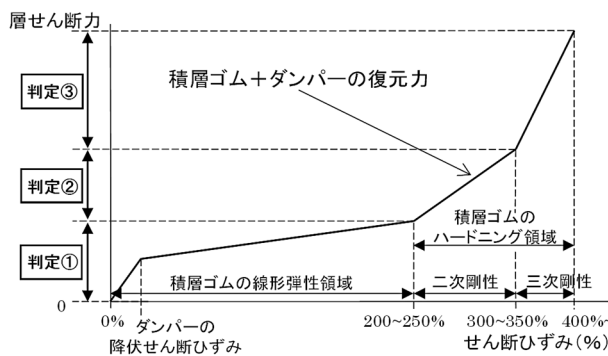


図1 静水圧式の概要図

ここで、 ρ ：水の単位体積重量、 g ：重力加速度、 B ：津波受圧面の幅、 γ ：壁面開口率、 z_2 、 z_1 ：津波受圧面上端高さおよび下端高さ、 a ：水深係数、 η ：設計用浸水深である。

建築物への静水圧式の適用性については、津波被害調査の結果に基づいた検討²⁾がなされているが、免震建物に対する適用性はまだ把握されていない。



- 判定①：津波荷重が設計用地震荷重以下に収まるため建物被害は生じない。詳細検討の必要無し。
- 判定②：津波荷重が、設計用地震荷重を上回り、上部構造と擁壁の衝突や免震デバイス接合部の損傷が生じる可能性があり、詳細検討の必要性有り。
- 判定③：積層ゴムの座屈や破断、上部躯体の転倒や流出、上部躯体の塑性化の可能性があり、詳細検討の必要有り。

図2 津波荷重に対する構造安全性評価基準

筆者らは図2に示す津波荷重に対する免震建物の構造安全性評価基準（以下、評価基準）を提案している³⁾。静水圧式の免震建物への適用性を明らかにできれば、津波浸水予想地域内における免震建物の

構造安全性評価が可能となる。本研究では、水理模型実験により津波に対する免震建物の挙動を分析し、免震建物への静水圧式の適用性について検討した。

2 実験概要

2.1 実験装置および試験体

実験水路および測定機器の配置を図3に示す。実験水路は、全長13m、水路幅30cm、高さ40cmの矩形の鋼製水路（一部観察用ガラス）であり、水路端に作成した水柱を崩壊させることで造波する仕組みである。水路はあらかじめ水を溜めた一様水深部（水深3cm）と陸部に分かれる。一様水深部と陸部の境からレンガ（高さ6cm）を設置し、津波はレンガを越流して試験体に作用する。

本実験では、図3に点線で示す位置で津波の波高（以下、便宜的に浸水深と呼ぶ）と流速を、それぞれサーボ式波高計と電磁流速計で測定した。計測は試験体からの反射波の影響を考慮して、試験体の受圧面からそれぞれ50cm、30cm前方で実施した。

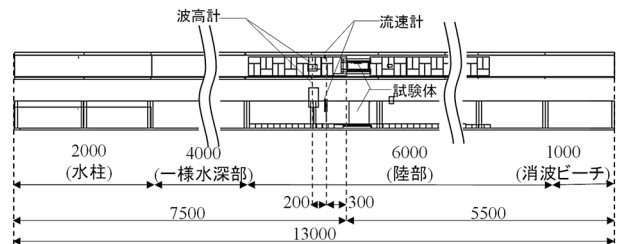


図3 実験装置の概要

試験体は、免震試験体と波力算定用試験体（以下、波力試験体）の2種類を製作した。

免震試験体の対象建物は、高さ28m、幅8m、奥行き24mの8階建てRC造とした。縮尺は1/80とし、原型の免震周期を4sとした試験体を製作した。表1の免震試験体諸元はフルードの相似則に従って設定した。試験体材料は、塩化ビニル樹脂板およびステンレス鋼板を用いた。免震層はリニアボールスライドと引張ばねを用いて再現した。

波力試験体はアルミ板を用い、上部固定の片持ち支持として実験水路に設置する（図5参照）。試験体幅は、免震試験体と同じ100mmとした。

表 1 免震試験体諸元

免震試験体			
	原型	模型(計算値)	模型
高さ H	28m	35cm	
幅 B	8m	10cm	
奥行き D	24m	30cm	
質量 m	1997t	3.90kg	3.55kg
固有周期 T	4s	0.45s	0.43s
水平剛性 K	4927kN/m	769.8N/m	760N/m

2.2 水理模型実験

通過波検定実験と2種類の試験体実験を実施した。通過波検定実験は、試験体のない状態での浸水深 η と流速 v を計測し、流れの状態を表すフルード数 $Fr(=v/\sqrt{g\eta})$ の算定を目的として実施した。実験は試験体設置位置でのばらつきを考慮して5回行った。計測はサンプリング間隔を1/1000秒とし、流況分析のため16倍スローの動画を撮影した。

免震試験体による実験は、免震建物の構造挙動の把握を目的として実施した。津波の浸水深、流速は図3に示す位置で計測した。試験体の変位、加速度はレーザー変位計とひずみゲージ式加速度計により計測した。図4、写真1に実験の概要と様子を示す。

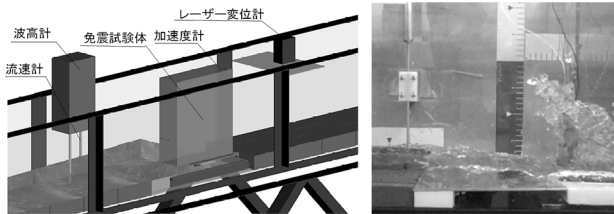


図 4 実験概要

写真 1 実験の様子

波力試験体による実験は、試験体に作用する津波波力の算定を目的として実施した。津波の浸水深、流速は図3に示す位置で計測した。防水処理したひずみゲージをアルミ板の両面に4枚ずつ貼付け、試験体の曲げひずみを計測した。曲げひずみからアルミ板に生じる曲げモーメントを算定し、その値から得られたせん断力を試験体に作用した津波波力とみなした。図5、写真2に実験の概要と様子を示す。

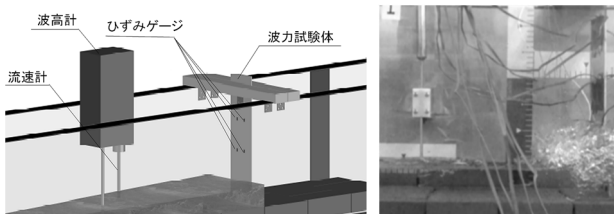


図 5 実験概要

写真 2 実験の様子

3 実験結果

本実験で得られた計測データは、50Hzのローパスフィルタでノイズ除去を行っている。

3.1 通過波検定実験

図6に通過波検定実験の浸水深の時刻歴を示す。

①～④の4波が確認された。①はサージフロントと呼ばれる第1波であり、②は第2波、③および④は水路端からの反射波である。ここでは第1波に対する応答に着目して分析を行う。第1波の最大浸水深および最大流速からフルード数を算定し、5回の実験の値を平均すると2.17となった。本実験水路は、0～2程度⁴⁾とされる津波のフルード数の最大値に概ね近い津波を造波できることが確認された。

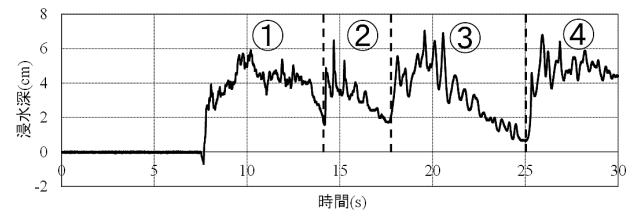


図 6 浸水深の時刻歴

3.2 試験体実験

免震試験体の変位および加速度の時刻歴の一例を図7に示す。流速が最大となる時刻 t 、浸水深が最大となる時刻 T を図中に示している。免震試験体は流速が最大となる時刻 t 付近で最大応答変位に達することが確認された。

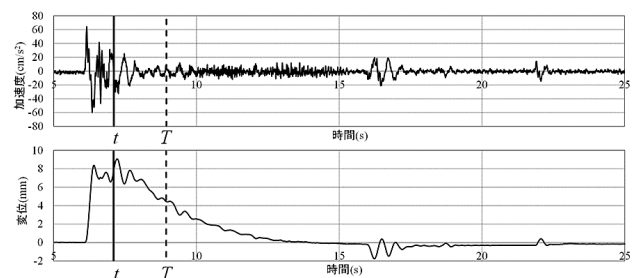


図 7 免震試験体の変位および加速度の時刻歴

免震試験体の応答をフルードの相似則に基づいて原型に換算したものを表2に示す。表中の値は流速、浸水深の近い3ケースの最大応答値の平均である。応答速度は応答変位の計測データを微分して算定した。

本実験の対象建物は浸水深5.3mの津波に対して擁壁衝突が想定される60cm程度の変位となったが、応答加速度は大地震時に想定されるレベルより小さくなった。応答速度もオイルダンパーの限界速度として想定されるレベルには達しない程度となった。

表 2 実験値と原型の換算値

	浸水深	流速	応答変位	応答加速度	応答速度
縮尺($\lambda=1/80$)	λ	$\lambda^{1/2}$	λ	1	$\lambda^{1/2}$
実験値	6.6cm	175.3cm/s	7.5mm	57.4cm/s ²	4.0cm/s
原型	5.3m	15.7m/s	59.6cm	57.4cm/s ²	36.0cm/s

免震試験体と波力試験体の計測結果を表3に示す。免震試験体の波力は、慣性力 $m\alpha$ と復元力 $K\delta$ の和と

研究助成事業

等値とみなして評価した。慣性力 $m\alpha$ は加速度の計測値 α に試験体の質量 m を乗じ、復元力 $K\delta$ は変位の計測値 δ に免震層を模擬した引張ばねの剛性 K を乗じることで算定した。また、水深係数 a は、津波波力が最大となる時刻における津波の堰上げ高さを動画から計測し、各試験体の最大浸水深 η_{\max} で除することで算定した。写真3に、免震試験体 No.1 の津波の堰上げ高さを示す。

表3 各試験体に対する波力と水深係数

免震試験体					
ケースNo	浸水深(cm)	流速(cm/s)	フルード数	水平波力(N)	水深係数
1	7.76	173.0	1.98	7.47	1.74
2	6.13	157.4	2.03	5.41	1.47
3	5.86	143.5	1.89	6.00	2.22
4	5.43	160.5	2.20	6.09	2.76
5	4.49	124.0	1.87	4.35	2.23
6	6.51	242.4	3.03	10.29	2.23
7	3.45	178.9	3.08	5.54	3.19
波力算定用試験体					
ケースNo	浸水深(cm)	流速(cm/s)	フルード数	水平波力(N)	水深係数
1	7.33	174.3	2.06	9.92	2.25
2	6.53	155.6	1.95	6.23	2.14
3	6.68	144.1	1.78	6.13	2.02
4	5.99	200.4	2.62	5.93	2.50
5	5.76	134.8	1.79	4.39	1.65
6	7.11	147.3	1.76	7.48	2.18
7	5.31	240.9	3.34	11.35	3.30

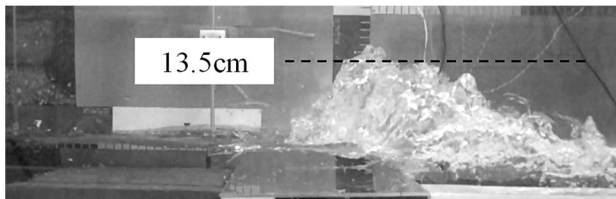


写真3 堰上げ高さ

本報ではフルード数の値が3以下となるケースを対象に分析した。表3のとおり14ケースのうち11ケースが該当した。浸水深は4.49~7.76cm、流速は124~200cm/sであった。フルード数は1.76~2.62となった。原型に換算すると、浸水深は3.59~6.28m、流速は11.1~17.9m/sとなった。本実験で造波した津波の流速は東北地方太平洋沖地震の観測記録²⁾の最速値である約10m/sを超えるレベルであった。

4 免震試験体に作用する津波波力

4.1 津波波力

流速と波力の関係を図8に、浸水深と波力の関係を図9に示す。免震試験体および波力試験体に作用する波力は、いずれも流速、浸水深に対して概ね比例的に増加している。また、両試験体において、流速と浸水深が近い値のケースNo.1~3それぞれを比較すると、免震試験体に作用する波力は、波力試験体に作用する波力と近い値となり、試験体の違いによる波力の大きな増減は確認されなかった。

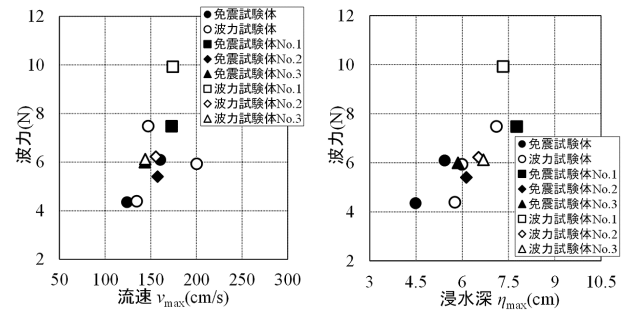


図8 流速と波力の関係 図9 浸水深と波力の関係

4.2 水深係数

流速と水深係数の関係を図10に、浸水深と水深係数の関係を図11に示す。波力試験体では、水深係数は流速、浸水深に対して概ね比例的に増加していることが確認された。一方、免震試験体では同様の傾向は確認されなかった。免震試験体では津波波力が作用した際に免震層に変位が生じるが、その作用の仕方により変位にばらつきが生じた。それに伴い堰上げ高さにも影響が及んだと考えられる。

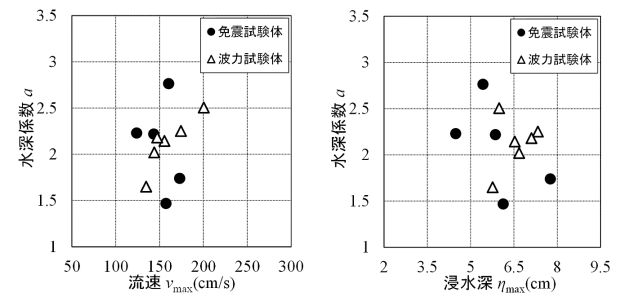


図10 流速と水深係数の関係 図11 浸水深と水深係数の関係

5 静水圧式の免震建物への適用性

静水圧式の免震建物への適用性を検討する。ここで、式(1)における η は各試験体で計測された最大浸水深 η_{\max} 、水深係数 a は堰上げ高さを最大浸水深 η_{\max} で除した値とする。壁面開口率 γ は0とした。

実験の計測データから算出した水平波力(以下、実験値)と、堰上げ高さから算出した水深係数を用いて式(1)で算定した波力(以下、算定値)および水深係数 ($a=1.5, 2, 3$)を用いて算定した波力(以下、推定値)を比較した。両試験体のうち、平均的な結果となった免震試験体 No.3 と波力試験体 No.2 に作用する波力をそれぞれ図12、図13に示す。免震試験体、波力試験体ともに、算定値は実験値を上回る結果となった。

研究助成事業

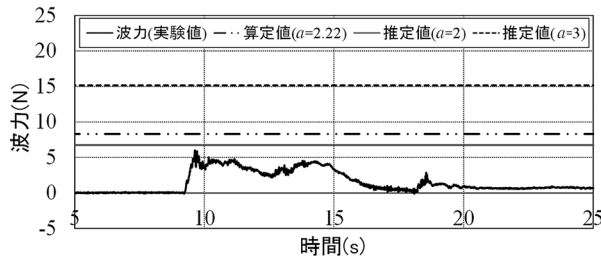


図 12 免震試験体に作用する波力 (No. 3)

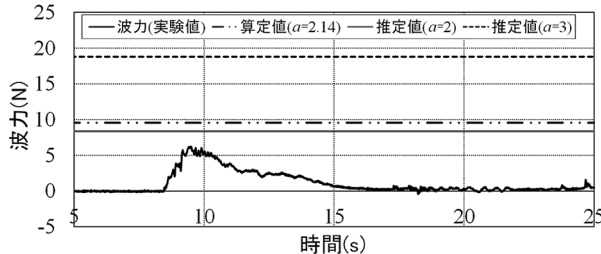


図 13 波力試験体に作用する波力 (No. 2)

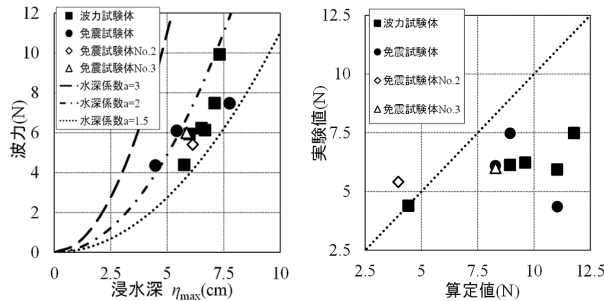


図 14 浸水深と波力の関係 (実験値と推定値の比較)

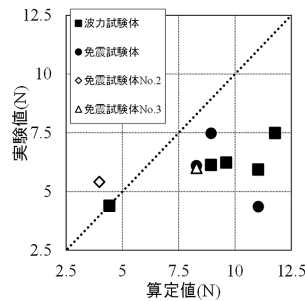


図 15 算定値と実験値の関係

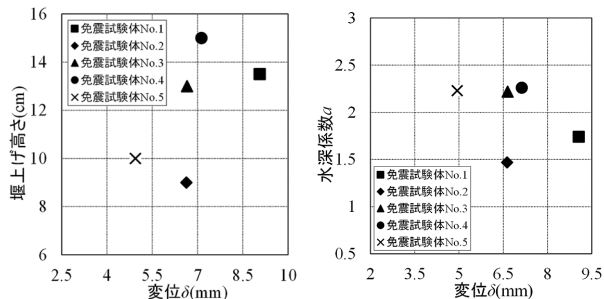


図 16 変位と堰上げ高さの関係

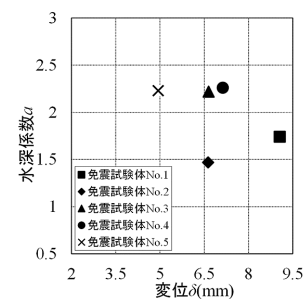


図 17 変位と水深係数の関係

免震試験体および波力試験体における実験値と推定値の比較を図 14 に示す。本実験では、水深係数 $a=2$ とすることで、実験値を概ね包絡できることが確認できた。算定値と実験値の関係を図 15 に示す。免震試験体、波力試験体ともに、ほとんどのケースで算定値は実験値を上回る事が確認できた。以上より、水深係数を適切に設定できれば、免震建物に作用する津波波力は、式(1)の静水圧式によって概ね安全側に評価することができるといえる。

しかしながら、免震試験体 No.2 のみ実験値が算定値を上回る結果となった。免震試験体の変位と堰上げ高さの関係を図 16 に、変位と水深係数の関係を

図 17 に示す。免震試験体 No.2 は同等の変位が生じた免震試験体 No.3、No.4 と比べて堰上げ高さが低く、それに伴い、算定した水深係数が $a=1.47$ と小さくなったため、算定値よりも実験値の方が大きくなったと考えられる。しかし、この堰上げ高さがばらつきの範囲内であるか、特定の原因によるものであるかは、現状では不明である。今後より詳細な実験を実施する必要がある。

6 まとめ

本研究では水理模型実験により津波に対する免震建物の挙動を分析し、免震建物への静水圧式の適用性について検討した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 津波荷重に対する免震試験体の応答変位は、流速が最大となる時刻付近で最大値を示した。また、本実験の対象建物は浸水深 5.3m の津波に対して擁壁衝突が想定される 60cm 程度の変位となったが、応答加速度は大地震時に想定されるレベルより小さくなった。応答速度もオイルダンパーの限界速度として想定されるレベルには達しない程度となった。
- 2) フルード数の値が 3 以下となる津波を対象とした場合には、免震試験体に作用する波力は、波力試験体に作用する波力と近い値となり、試験体の違いによる波力の大きな増減は確認されなかった。
- 3) 堰上げ高さから算出した水深係数を用いた検討結果より、水深係数を適切に設定できれば、静水圧式を用いて、免震建物に作用する津波波力を概ね安全側に評価することが可能であることを確認した。しかしながら一部に危険側の評価となるケースも確認されたため、今後より詳細な実験を実施する必要がある。

謝辞

本研究を実施するにあたり、共同研究者の有賀司氏、阪上雄斗氏、川上善嗣氏、藤森智氏、遠藤龍司氏らから多大なる尽力を賜りました。

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，2012.3
- 2) 中埜良昭ら：2011年東北地方太平洋沖地震による建築物等の被害調査に基づく津波荷重の評価-比較的単純な工作物および建築物の被害調査結果に基づく検討-，構造工学論文集，Vol.58B，pp.97-104
- 3) 小林正人，服部龍太郎，藤森智：津波荷重に対する免震建物の構造安全性評価基準の提案，日本建築学会技術報告集，第23巻，第53号，pp.71-76，2017.
- 4) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(2015)，pp.563-592