

免震建物に作用する津波荷重に関する水理模型実験

明治大学大学院 阪上 雄斗

1 はじめに

東北地方太平洋沖地震以降，各自治体より津波避難ビルの整備など多岐に渡る津波対策が行われており，国土交通省より式(1)で示される静水压式を用いた検討方法が示されている¹⁾。一方で，免震建物においては津波が作用した際の波圧分布や津波荷重の評価法については未だ不明確である。

そこで，本研究では免震建物を対象とした水理模型実験を実施し，免震建物に作用する波圧分布について分析を行い，免震建物への静水压式の適用性を評価することを目的とする。

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

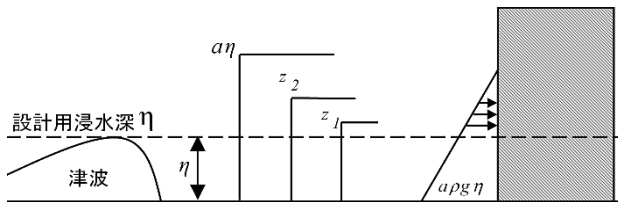


図1 静水压式の概要図

ここで， ρ ：水の単位体積質量， g ：重力加速度， B ：受圧面の幅， z_2 ：津波受圧面上端高さ， z_1 ：津波受圧面下端高さ， a ：水深係数， η ：設計用浸水深

2 水理模型実験概要

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2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，水路端で貯水し遮水壁を開放す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1cm）と陸部に分かれる。一様水深部と陸部の境から勾配傾斜面（全長1.2m，勾配1/20）を設置し，津波は勾配傾斜面を遡上して試験体に作用する。

本実験では，図2に点線で示す位置で津波の波高（以下，浸水深）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30cm前方で実施した。

試験体は建物試験体を模擬した免震試験体，固定試験体および試験体に作用する波力を算定することを目的とした波力算定用試験体（以下，波力試験体）の3種類を製作した。

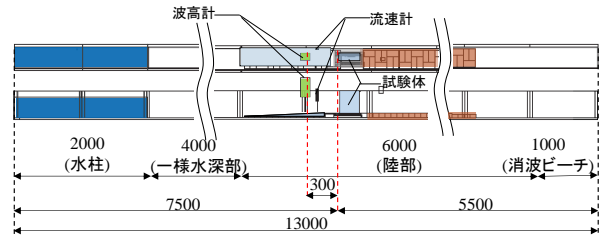


図2 実験装置概要

建物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とした試験体である。表1に示す免震試験体諸元はフルードの相似則に従って設定した。試験体材料はアクリル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ダと引張りばねを用いて再現した。

波力試験体はステンレス鋼板を用い，上部固定の片持ち支持として実験水路に設置する（図4参照）。試験体幅は，建物試験体と同じ10cmとした。

表1 建物試験体諸元

建物試験体諸元			
	縮尺	原型	試験体
高さ H	λ	28m	35cm
幅 B	λ	8m	10cm
奥行き D	λ	24m	30cm
質量 m	λ^3	1997t	3.9kg
固有周期 T	$\lambda^{1/2}$	4.0s	0.45s
水平剛性 K	λ^2	4927kN/m	769N/m
変位 δ	λ	51cm	6.4mm

2.2 水理模型実験

通過波検定実験と3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10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。

免震試験体を用いた水理模型実験では，免震建物に作用する波圧分布を把握することを目的として実施した。津波の浸水深，流速は図2に示す位置で計測した。図3，写真1に実験の概要と流況を示す。

また，固定試験体を用いた水理模型実験では，固定建物に作用する波圧分布を把握することを目的として，免震層を固定し免震試験体と同様の実験を実施した。

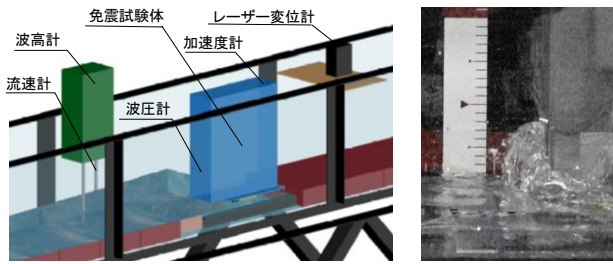


図3 免震試験体実験概要 写真1 実験の流況

波力試験体を用いた実験では、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2に示す位置で計測した。防水処理したひずみゲージをステンレス鋼板の両面に4枚ずつ貼付け、試験体の曲げひずみを計測した。曲げひずみからステンレス鋼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する津波波力とみなした。図4、写真2に実験の概要と実験の流況を示す。

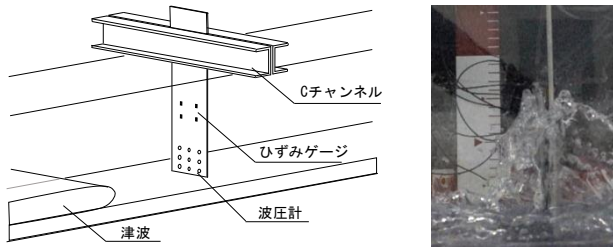


図4 波力試験体実験概要 写真2 実験の流況

波圧の計測に際しては、全ての試験体実験において試験体前面に図5のように9個の小型波圧計(左下からP1~P9)を配置した。計測した各波圧に負担面積を乗じ、足し合わせることで波力を算定した。

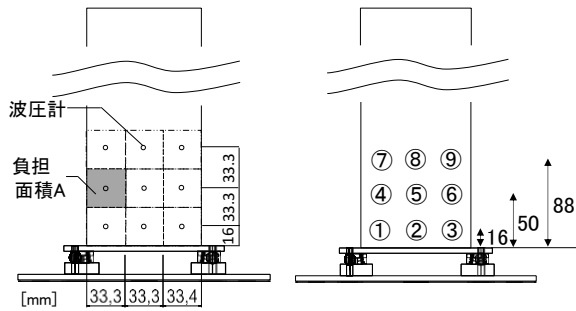


図5 波圧計の配置図

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

通過波検定実験の浸水深と流速の時刻歴の一例を図6、図7に示す。浸水深は波が計測位置に到達した後、しばらくして最大の浸水深に達した。一方で、流速は波の到達時に最大値を向かえ、徐々に減

少していく傾向にあることを確認した。また、浸水深と流速の関係について、流速が最大となる時刻での浸水深はやや小さく、浸水深が最大となる時刻での流速は小さいことから、最大流速と最大浸水深の時刻は一致しないことがわかった。

最大浸水深および最大流速からフルード数を算定し、10回の実験値を平均すると1.95となった。本実験水路は、0.7~2程度²⁾とされる津波のフルード数と概ね近い津波を造波したことを確認した。

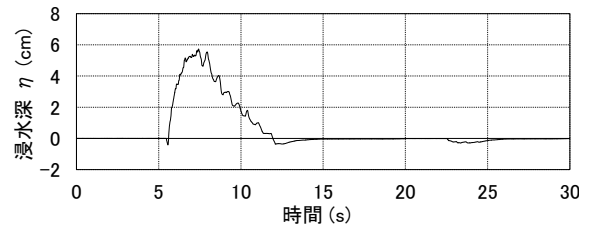


図6 浸水深の時刻歴波形

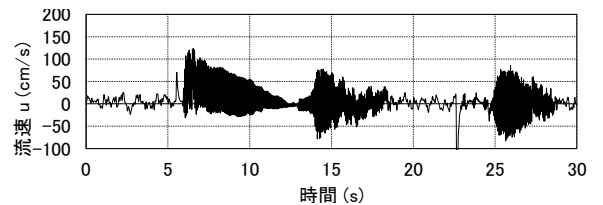


図7 流速の時刻歴波形

3.2 免震試験体実験

波圧計(P2,P5,P8)で計測した波圧の時刻歴の一例を図8に示す。最下段となる波圧計P2が最も大きな波圧を示し、計測位置が高くなるにつれて波圧が小さくなった。また、P1、P2、P3のように同一高さに配置した波圧計で計測した波圧は、計測値に若干の差はあるものの概ね近い傾向を示した。

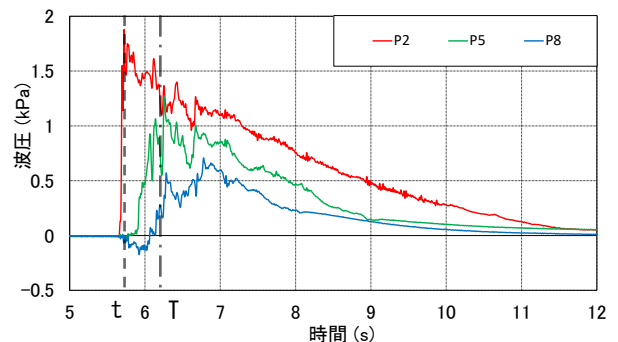


図8 波圧の時刻歴波形(免震試験体)

3.3 固定試験体実験

波圧計(P2,P5,P8)で計測した波圧の時刻歴の一例を図9に示す。波圧の最大値には、最下段となる波圧計P2が最も大きな波圧を示し、計測位置が高くなるにつれて波圧が小さくなった。しかし、P2の波圧は最大値を向かえた後、波圧が低下し、一時的にP5の波圧より小さい値となった。同一高さに配置したP1、P3で計測した波圧でも同様の傾向を示した。

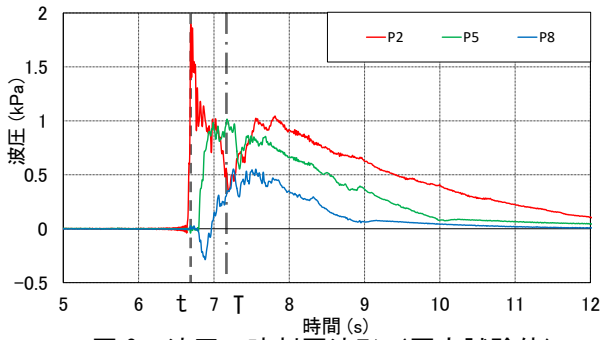


図9 波圧の時刻歴波形 (固定試験体)

ここで、図8、9に示す時刻t、Tにおける建物試験体実験の流況を写真3、4に示す。固定試験体の波圧が低下した時刻T付近では、試験体に衝突し堰き上がった津波が水塊となり、試験体前面に落下していることを確認した。一方で免震試験体では、津波衝突後に変位が生じ、固定試験体と比べ試験体前面から離れた位置に水塊が落下した。試験体の違いによる流況の変化が、固定試験体の波圧が低下した原因の1つとして考えられる。

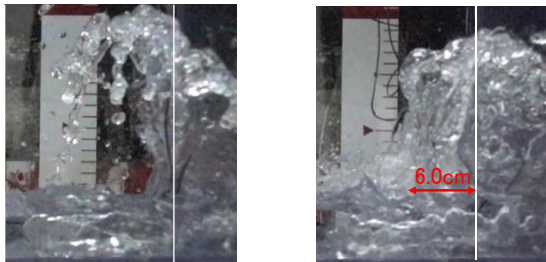


写真3 固定試験体の流況 (左:時刻t, 右:時刻T)

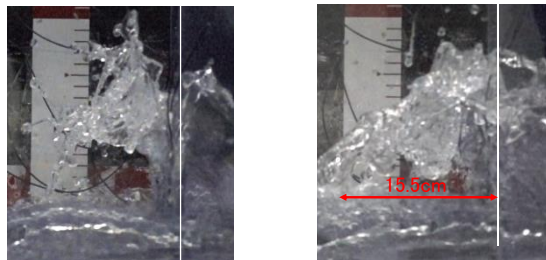


写真4 免震試験体の流況 (左:時刻t, 右:時刻T)

免震試験体と固定試験体の波圧の時刻歴の比較を図10に示す。津波衝突後、両試験体ともほぼ同時刻にP2で最大値を示した。P5、P8では固定試験体の方が早い時刻で波圧を計測したが、試験体の違いによる波圧の大きな増減は確認できなかった。

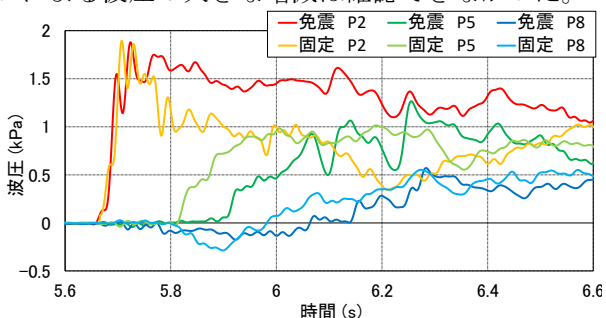


図10 波圧の時刻歴波形の比較

4 免震建物に作用する津波波力の評価

4.1 波力試験体に作用する波力

波圧計から算定した波力 (以下、 Q_c) と曲げひずみから算定した波力 (以下、 Q_s) の時刻歴の一例を図12に示す。 Q_c と Q_s は概ね同時刻で最大値を示した。また、多くのケースで Q_c の値が Q_s を上回ったが、両者の最大値も近い値となることを確認した。以上より、波圧で計測した波圧に負担面積を乗じて、波力を評価可能であると考えられる。

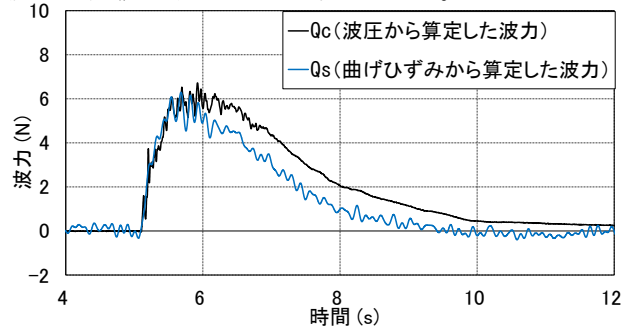


図12 波力試験体に作用する波力の時刻歴波形

4.2 免震試験体に作用する波力

図13に免震試験体に作用する波力と波圧の関係を示す。波圧と波力の最大値となる時刻が異なった。津波先端部は衝撃的な波圧だが、作用する領域は局所的であり、波力への影響は小さいと考えられる。

図14に建物試験体の波力の比較を示す。免震試験体の波力が固定試験体の波力を上回り、最大となる時刻が異なった。原因としては、固定試験体最下段の波圧が最大値以降に低下することや、波圧と波力で最大となる時刻が異なることが考えられる。

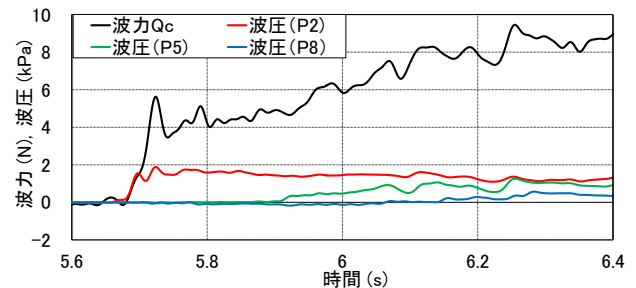


図13 波圧と波力の時刻歴波形 (免震試験体)

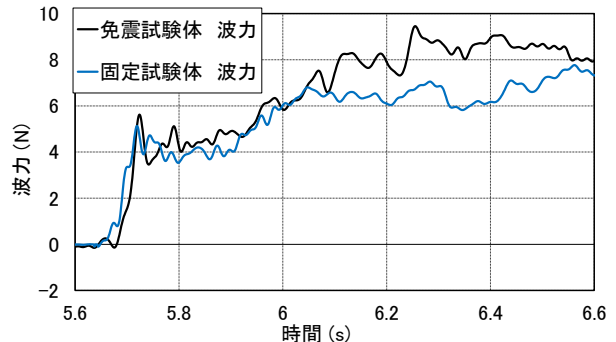


図14 免震試験体と固定試験体の波力の比較

4.3 免震試験体に作用する波圧の評価

建物試験体の最大波圧 P_{max} を $\rho g \eta_{max}$ で除すことに

より無次元化³⁾した。ここで、 $P_{max}/\rho g \eta_{max}$ を無次元最大波圧、 η_{max} は各実験の最大浸水深とする。図15に建物試験体における最大波圧分布を示す。両試験体ともに最下段波圧が、静水圧分布を上回ったが、津波先端部の衝撃的波圧が作用したためである。

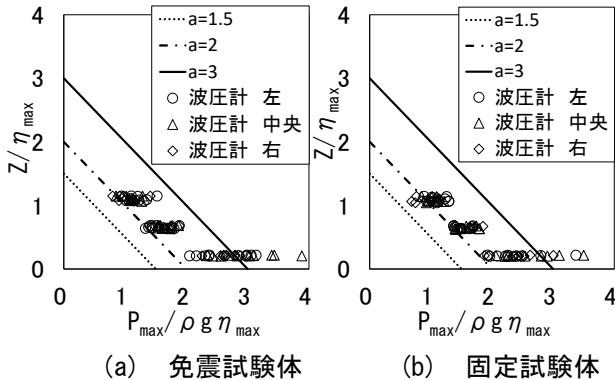


図15 最大波圧における無次元波圧分布

図16に各試験体の最大波力時の波圧における無次元化波圧分布を示す。試験体に作用する波圧は概ね $a=2.0$ 付近に分布し、静水圧分布と近い傾向を示したが、固定試験体最下段の波圧分布は $a=2.0$ を下回った。これは、固定試験体の波圧が最大値を向かえた後、著しく低下したためである。

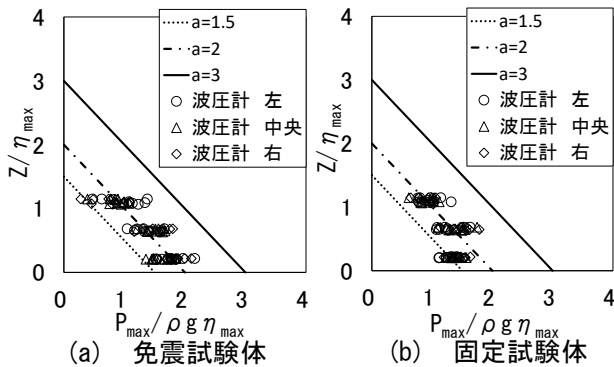


図16 最大波力時における無次元波圧分布

4.4 水深係数の算定

建物試験体実験における津波波力が最大となる時刻で、津波の堰上げ高さを動画(写真5参照)で計測し、各実験ケースの最大浸水深で除すこと水深係数を算定した。図17に浸水深と水深係数の関係を示す。実験ケースでばらつきはあるが、本実験では、水深係数は概ね $a=1.5\sim 2.5$ の範囲となった。

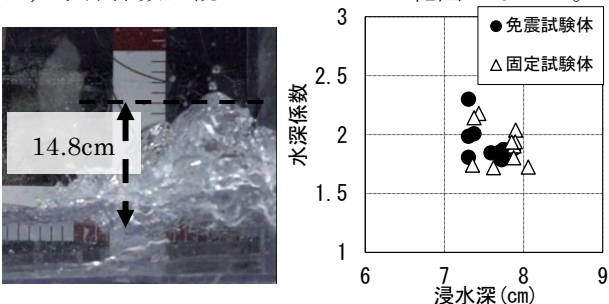


図17 浸水深と水深係数

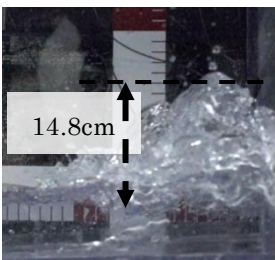


写真5 堰上げ高さ

4.5 静水圧式を用いた津波波力の評価

静水圧式の免震建物への適用性を分析する。ここで、式(1)における η は各試験体実験で計測した最大浸水深、水深係数は堰上げ高さから算定した値、壁面開口率は0とする。

波圧計から算定した波力(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($a=1.5, 2, 3$)を用いて推定した波力(以下、推定値)を比較した。

建物試験体における実験値と推定値の比較を図18に示す。本実験で水深係数 $a=2$ を用いて、実験値を概ね包絡することができた。算定値と実験値の関係を図19に示す。実験ケースによって、大小関係に違いはあるものの、算定値と実験値は概ね近い値となることを確認した。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波力は、静水圧式を用いて概ね評価することができるといえる。

しかしながら、衝撃的な波圧である津波先端部が作用する場合に、波圧分布は静水圧分布と一時的に異なる可能性があることに留意する必要がある。

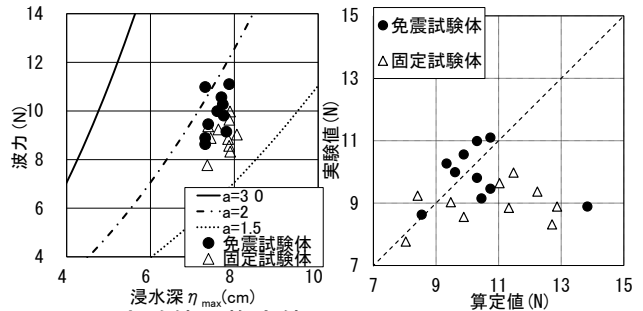


図18 実験値と推定値

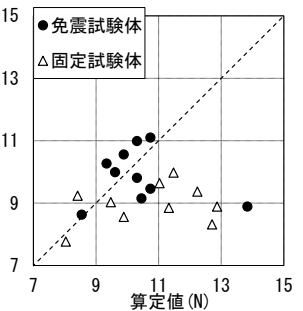


図19 算定値と実験値

5 まとめ

本論では、免震建物に作用する波圧分布の分析を行い、免震建物への静水圧式の適用性について評価を行った。衝撃的な波圧である津波先端部が作用した際の最大波圧分布は、一部静水圧分布を上回った。一方で、波力最大時の波圧分布は、静水圧分布と近い傾向となることを確認した。また、堰上げ高さから算定した水深係数の検討より、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を静水圧式を用いて、概ね評価することが可能であることを確認した。

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. 松富英夫ら：Banda Acehと周辺における2004年インド洋津波と被害想定からみた課題,海岸工学論文集,第52巻,pp1366-1370
3. 朝倉良介ら：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集,第47巻,pp.911-915