建築物に作用する津波力の 低減対策に関する研究

菊 雅美¹・中村 友昭²・水谷 法美³・平川 信也⁴・芦澤 哲⁵

¹正会員 名古屋大学助教 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: kiku@nagoya-u.jp

²正会員 名古屋大学特任講師 高等研究院 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

E-mail: tnakamura@nagoya-u.jp

³フェロー 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: mizutani@civil.nagoya-u.ac.jp

⁴正会員 前田建設工業株式会社 執行役員 建築事業本部 建築設計統括部長
(〒179-8903 東京都練馬区高松5-8 J.CITY)

E-mail: hirakawa.n@jcity.maeda.co.jp

⁵正会員 前田建設工業株式会社 建築事業本部 建築設計第1部 プロジェクト支援グループ (同上)

E-mail: ashizawa.a@jcity.maeda.co.jp

津波避難ビル等の耐津波性能を向上させるため、建築物の管理者が設置可能な規模の津波対策工に着目し、対策工が建築物に及ぼす影響について数値計算により検討した。その結果、対策工によって建築物への津波の到達および最大津波力の発生を遅らせられることを示した。また、建築物前面での最大打上高と最大津波力は同時に発生するとは限らず、鉛直壁前面で局所的に発生する流速により非線形な波圧分布になる場合があることを明らかにした。さらに、建築物近傍に対策工を設置する際は高さを低くすることで、津波力の低減効果が期待できることを示した。ただし、対策工を建築物のごく近傍に設置した場合は衝撃波圧が作用することに留意する必要があることに言及した。以上から、建築物近傍に設置した対策工が津波力の減衰に有効であることを明らかにした。

Key Words : tsunami, building, countermeasure, wave force, wave pressure, numerical analysis

1. 緒言

2011年に発生した東日本大震災では、大津波の来襲により、東北地方太平洋沿岸で壊滅的な被害が発生した。このような大津波に対しては、比較的発生頻度の高い津波を想定した防波堤や防潮堤などの海岸保全施設だけでなく、住民の避難などを含めたハードとソフトの両面から総合的な津波対策を講じることが求められている。そのひとつとして、高台への避難が困難な地域では、津波避難ビルの整備が不可欠である。東京大学生産技術研究所¹⁾は、東日本大震災における津波被害地域の現地調査を行い、遮蔽物として津波に対して十分な高さを有する防波堤や防潮堤が海側にある場合には、海岸保全施設がない場合に対する浸水深の増幅率、すなわち水深係数の低減が期待できることを確認している。さらに、これらの結果を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る

暫定指針が国土交通省住宅局および国土技術政策総合研究所によって取りまとめられ、その解説が国土交通省国土技術政策総合研究所²⁾によって示されている。ただし、上述した暫定指針では、遮蔽物として国や自治体などが整備している防波堤や防潮堤が想定されているのみであり、建築物の管理者が個別に整備可能な小規模の津波対策工に対する検討はなされていない。

想定を上回る最大クラスの津波の来襲に対しては、建築物に作用する津波力を少しでも低減し、被災を防ぐことが重要と考えられる。そこで、本研究では、津波避難ビル等の建築物の管理者が設置可能な小規模の対策工に着目し、津波避難ビル等の建築物の耐津波性能をさらに向上させることを目的とした検討を行う。具体的には、建築物を模擬した鉛直壁の沖側に対策工を設けた数値計算を行い、対策工が鉛直壁に作用する津波力の低減に与える効果とその機構を考究する。

2. 数値解析条件

本研究では、気液2相流を解析できる3次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデルにより解析を行った。同モデルは、非圧縮性粘性流体からなる気液2相流に適用可能な連続式とNavier-Stokes方程式に基づくLESに、気液界面を追跡するMARSに基づくモジュールが組み込まれている。モデルの詳細は中村・水谷³⁾を参照されたい。なお、本モデルの妥当性については、中村ら^{4,5)}によって検証され、水位や圧力に対して水理模型実験結果をよく再現できることが示されている。

図-1および表-1に、本検討で用いた計算領域と計算条件をそれぞれ示す。模型の縮尺は1/75とし、高さ26.0 cmの不透過直立岸壁の背後に不透過水平地盤を設定し、岸壁から80.0 cmの位置に、窓などの開口部がなく、越流が生じない十分な高さを有するビルの側壁を想定した不透過鉛直壁を設置した。そして、鉛直壁から距離 L_0 の位置に、高さ h_s 、幅1.0 cmの不透過な矩形の対策工を設置した。入射波は、津波をモデル化した押し波1波（正弦波半周期分）とした。そして、対策工の高さ h_s を4パターン、対策工の位置 L_0 を7パターン、 $x = -7.0$ mでの津波高 H_0 を3パターン変化させ、対策工がない場合も含めて計87ケースの計算を行った。なお、入射波は、本計算と同一地形を用いて岸壁近傍に設置したコンテナの漂流解析を行った中村ら⁴⁾を参考に設定した。ここで、中村ら⁴⁾は、津波高 $H_0 = 3.24$ cmではコンテナが漂流後に不透過水平地盤上に留まり、 $H_0 = 4.26$ cmではコンテナが沖へ流出することを明らかにしている。

計算格子は、地盤表面の周辺に 0.5×0.5 cmの等間隔格子を用い、それ以外の領域には格子幅を徐々に広げた不等間隔格子を用いた。沖側境界には造波境界、底面、地盤、鉛直壁、対策工の表面にはslip条件、上側境界には圧力一定の条件を課した。また、VOF関数の境界条件として、全境界を勾配ゼロとした。パラメータは、重力加速度 $g = 9.80$ m/s²、水の密度 $\rho = 9.97 \times 10^2$ kg/m³、空気密度を 1.18 kg/m³、水の動粘性係数を 8.93×10^{-7} m²/s、空気動粘性係数を 1.54×10^{-5} m²/s、表面張力係数を 7.20×10^2 N/mとした。その他のパラメータについては中村・水谷³⁾を参照されたい。なお、本検討では、建築物の管理者が設置可能な規模の津波対策工として、奥行き方向に一樣な構造物を想定していることから、断面2次元モデルを用いることとした。

3. 計算結果および考察

(1) 最大津波力の発生機構

津波高 $H_0 = 4.26$ cmを入射させたときの、対策工による

図-1 計算領域の概略図

表-1 計算条件

津波高 H_0	3.24, 4.26, 4.91 cm
継続時間 T	10.0 s
静水深 h	48 cm
岸壁の余裕高 h_f	1 cm
対策工の高さ h_s	0.5, 1.0, 1.5, 2.0 cm
対策工の位置 L_0	5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 40.0, 60.0, 79.0 cm

水面の空間分布の違いを図-2に例示する。同図中において、コンターは津波の合成流速 V 、矢印は鉛直壁に作用する波圧、赤線は水位から求めた静水圧分布である。また、 $R_{\max}$ は鉛直壁前面での最大打上高、 $P_{\max}$ は最大波圧、 $F_{\max}$ は鉛直壁に作用する波圧から算出した最大津波力である。同図(a)より、対策工がない場合、 $t = 8.100$ sに津波が鉛直壁へ到達し、 $t = 9.970$ sの時に $P_{\max}$ が作用している。そして、 $R_{\max}$ に達した後、 $t = 10.070$ sに $F_{\max}$ が鉛直壁へ作用していることがわかる。一方、 $L_0 = 15.0$ cmとして対策工を設置した図-2(b)では、対策工によって津波が打ち上がることで、鉛直壁への津波の到達時刻が $t = 8.280$ sとなり、対策工がない場合に比べて遅くなっている。さらに、 $F_{\max}$ の作用時刻は $t = 10.420$ sであり、岸壁に対策工を設置した図-2(c)と同様に、対策工を鉛直壁近傍に設置した場合でも、 $F_{\max}$ の発生を遅らせている。図-3に、 $F_{\max}$ が生じた時刻 $t_{F_{\max}}$ と対策工なしのときの $F_{\max}$ 発生時刻 $t_{F_{\max}0}$ との差を示す。同図から、津波高が大きくなるほど、対策工によって $F_{\max}$ の発生時刻が遅れていることがわかる。ただし、津波来襲後の $t = 17.000$ sでは対策工と鉛直壁間の水位が高いままとなっているため、対策工を設置した場合は留まった水位に対応した水圧が津波来襲後も鉛直壁に作用し続けることに留意する必要がある。

また、図-2から、鉛直壁前面での最大打上高 $R_{\max}$ が発生する時刻 $t_{R_{\max}}$ と、鉛直壁に作用する波圧に基づく最大津波力 $F_{\max}$ が発生する時刻 $t_{F_{\max}}$ は異なっていることがわかる。図-4は $t_{R_{\max}}$ と $t_{F_{\max}}$ の差について示したものであり、必ずしも $R_{\max}$ 発生時に $F_{\max}$ が作用するとは限らないといえる。これは、遡上した津波が鉛直壁の前面で打ち上がることで $R_{\max}$ が発生し、若干水位が下がった後に $F_{\max}$ が生じる場合と、遡上した津波によりエプロン上での水位が上昇して $F_{\max}$ が生じた後、鉛直壁前面の水位がわずかに上昇して $R_{\max}$ が生じる場合があるためと考えられる。

鉛直壁に作用する最大津波力について、 $R_{\max}$ から静水圧を仮定して求めた $F_{\text{theory}} / \rho g H_0^2$ と、鉛直壁に作用する波圧から算出した $F_{\max} / \rho g H_0^2$ の比較を図-5に示す。同図

図-2 対策工による水面の空間分布の違い ($H_o=4.26$ cm)

図-3 対策工の有無による最大津波力の発生時刻の差

図-4 最大打上高と最大津波力の発生時刻の差

図-5 算出方法による最大津波力の比較

より、 $F_{x,theory} / \rho g H_o^2$ は $F_{x,max} / \rho g H_o^2$ を最大で1.5倍程度過大評価する傾向にあることがわかる。この理由として、前述のように、 R_{max} と $F_{x,max}$ が同時に発生しないことや、 $t_{Rmax} = t_{Fmax}$ の場合でも図-6に例示するように、 R_{max} 発生時に鉛直壁前面で大きな流速が生じ、鉛直壁へ作用する圧力が

図-6 $t_{R_{\max}} - t_{F_{\max}} = 0.0$ s のケース例($H_o = 4.91$ cm, $L_s = 40.0$ cm, $h_s = 2.0$ cm)

(a) $H_o = 3.24$ cm のケース

(b) $H_o = 4.26$ cm のケース

(c) $H_o = 4.91$ cm のケース

図-7 鉛直壁前面での最大打上高 $R_{\max}$

非線形な分布となることが挙げられる。また、津波高 H_o が大きい条件では、 $R_{\max}$ の増大に伴い $F_{x, \text{theory}}$ も大きくなるものの、 $F_{\max}$ と $R_{\max}$ の傾向は一致しないため、 $F_{x, \text{theory}} / \rho g H_o^2$ は $F_{\max} / \rho g H_o^2$ をより過大評価する傾向になると考えられる。以上から、 $R_{\max}$ に基づいて算出される最大津波力 $F_{x, \text{theory}}$ は、安全側ではあるものの過大評価する傾向にあるため、断面方向の波圧分布に基づく最大津波力 $F_{\max}$ を算定可能な断面2次元数値計算は有用であるといえる。

(a) $H_o = 3.24$ cm のケース

(b) $H_o = 4.26$ cm のケース

(c) $H_o = 4.91$ cm のケース

図-8 鉛直壁前面での最大津波力 $F_{\max}$

(2) 対策工による津波力の減衰効果

図-7に、鉛直壁前面での最大打上高 $R_{\max}$ に及ぼす対策工の高さ h_s および位置 L_s の関係を示す。ここで、 $R_{\max,0}$ は対策工がない場合の最大打上高である。同図から、津波高が $H_o = 3.24$ cm のときは、対策工が岸壁に近いほど $R_{\max}$ を低減できていることがわかる。また、対策工の設置位置を $L_s = 40.0$ cm とした条件下では、 H_o や h_s によって $R_{\max} / R_{\max,0}$ の値にばらつきがみられる。一方、鉛直壁近傍 ($L_s \leq 20.0$ cm) に対策工を設置した場合、図-7から、 H_o に関わらず $h_s \leq 1.0$ cm であれば $R_{\max} / R_{\max,0}$ は 1.0 以下であり、対策工による $R_{\max}$ の低減効果が認められる。

鉛直壁に作用する最大津波力 $F_{\max}$ に与える対策工の高さ h_s と位置 L_s の影響を図-8に示す。ここで、 $F_{\max,0}$ は対策工がない場合の最大津波力である。図-8より、岸壁 ($L_s = 79.0$ cm) に $h_s = 2.0$ cm の対策工を設置することで、 $F_{\max}$ の作用を最も低減できることがわかる。これは、従来のような防波堤や防潮堤等による津波対策の有効性を示唆し

図-9 $(2H_o - h_s - h_f)/L_s$ と $F_{\max}/F_{\max0}$ の関係

(a) $H_o = 3.24$ cm のケース

(b) $H_o = 4.26$ cm のケース

(c) $H_o = 4.91$ cm のケース

図-10 鉛直壁前面での最大圧力 $P_{\max}$

ている。一方、建築物の管理者が実施できる津波対策として、鉛直壁近傍($L_s \leq 20.0$ cm)に設置した対策工の効果に着目すると、図-8(a)に示すように、津波高が小さい条件においては、 $F_{\max}/F_{\max0}$ は 1.0 を上回っている。しかし、津波高の増加とともに、わずかながら $F_{\max}/F_{\max0}$ は 1.0 を下回っており、対策工による $F_{\max}$ の低減効果が認め

図-11 最大圧力 $P_{\max}$ 発生時における水面の空間分布例($H_o = 4.91$ cm, $L_s = 5.0$ cm, $h_s = 2.0$ cm)

られる。

図-9に、無次元変数 $(2H_o - h_s - h_f)/L_s$ と $F_{\max}/F_{\max0}$ の関係を示す。ここで、 h_f は岸壁の余裕高(=1.0 cm)であり、 $2H_o - h_s - h_f$ は岸壁で津波が完全重複していると仮定し、岸壁に高さ h_s の対策工を設置した場合の浸水深を意味する。同図より、 $(2H_o - h_s - h_f)/L_s$ を小さくすることで、 $F_{\max}$ を大きく低減できることがわかる。さらに、津波高が大きい $H_o \geq 4.26$ cm の条件では、 $(2H_o - h_s - h_f)/L_s$ の増加とともに、 $F_{\max}$ の低減効果が期待できると判断できる。また、 H_o に依らず、 $F_{\max}/F_{\max0}$ は $(2H_o - h_s - h_f)/L_s = 0.2$ 付近にピーク値があると判断されることから、必ずしも h_s の大きい対策工を設置すれば津波力の減衰効果が得られるとはいえず、 L_s に応じた h_s の設定が必要であると判断される。

鉛直壁に作用する最大波圧 $P_{\max}$ に与える対策工の影響を図-10に示す。ここで、 $P_{\max0}$ は対策工がない場合の $P_{\max}$ である。図-10より、鉛直壁の近く($L_s \leq 20.0$ cm)に対策工を設置した場合、 $P_{\max}/P_{\max0}$ は 1.0 を下回っていることから、 $F_{\max}$ と同様に最大波圧 $P_{\max}$ も効果的に低減できることを確認した。ただし、図-10(b)の $L_s = 5.0$ cm, $h_s = 1.0$ cm や図-10(c)の $L_s = 5.0$ cm, $h_s = 2.0$ cm のケースのように、対策工を鉛直壁のごく近傍に設置した一部のケースでは、 $P_{\max}/P_{\max0}$ は 1.0 を大きく上回り、局所的に大きな波圧が作用する危険性があることが判明した。これは、 $P_{\max}$ 発生時の波動場の様子を示した図-11より、対策工を乗り越えた津波が鉛直壁の底面付近に直接当たったため、鉛直壁前面での水位からは算定できない衝撃的な波圧が生

じたことを確認した。本研究では、衝撃波圧が生じる条件を明らかにするには到らなかったものの、鉛直壁のごく近傍に対策工を設置する場合には、建築物の底面付近に局所的に大きな波圧が作用する可能性を考慮して設計する必要があるといえる。

4. 結論

本研究では、津波避難ビル等の建築物の耐津波性能を向上させるため、建築物の管理者が設置可能な規模の津波対策工に着目した。そして、津波対策工が建築物の側壁に及ぼす影響について、対策工の高さや設置位置を変化させた数値計算により検討した。本研究で得られた主要な結論を以下にまとめる。

1. 津波避難ビル等の建築物近傍に対策工を設置することにより、津波高 H_0 が大きい条件において建築物への津波の到達時間および最大津波力の発生時刻をわずかではあるものの遅らせることが可能になることを示した。
2. 建築物前面での最大打上高 $R_{\max}$ と最大津波力 $F_{\max}$ は必ずしも同時に発生するとは限らず、同時に発生するケースでも、鉛直壁前面で局所的に発生する流速によって非線形な波圧分布になる場合があることを明らかにした。
3. $R_{\max}$ に基づいて算出される最大津波力 F_{theory} は過大評価となる可能性を示すとともに、断面方向の波圧分布から最大津波力 $F_{\max}$ を算定できる断面2次元数値モデルは有用であることを示した。

4. $F_{\max} / F_{\max 0}$ は無次元変数 $(2H_0 - h_b - h_f) / L_s = 0.2$ 付近にピーク値があることから、必ずしも h_b の大きい対策工を設置すれば津波力の減衰効果が得られるとはいえず、 L_s に応じた h_b の設定が必要であることを明らかにした。具体的には、岸壁に対策工を設置する場合は対策工の高さ h_b を高く、建築物近傍に対策工を設置する際は h_b を低くすることで、対策工による津波力の低減効果が期待できるといえる。
5. 対策工を建築物のごく近傍に設置した場合、衝撃波圧が作用することに留意する必要があることを示した。

参考文献

- 1) 東京大学生産技術研究所：平成 23 年度建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書（その 2），2011.
- 2) 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，国総研資料，第 673 号，2012.
- 3) 中村友昭，水谷法美：3 次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデルに基づく遡上津波による陸上構造物周辺の局所洗掘現象に関する数値シミュレーション，第 24 回数値流体力学シンポジウム，E10-4，9 p.，2010.
- 4) 中村友昭，青山功治，水谷法美：遡上津波と胸壁からの反射波によるコンテナの漂流特性と海上への流出対策工の有効性に関する研究，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 68, No. 2, pp. I_216-I_221, 2012.
- 5) 中村友昭，安藤康平，山田裕貴，水谷法美，小竹康夫：津波の越流に伴う混成堤ケーソンの挙動とその機構に関する数値解析，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 68, No. 2, pp. I_831-I_835, 2012.

STUDY ON COUNTERMEASURES FOR REDUCING TSUNAMI FORCE ACTING ON BUILDINGS

Masami KIKU, Tomoaki NAKAMURA, Norimi MIZUTANI,
Nobuya HIRAKAWA and Satoshi ASHIZAWA

To enhance the tenacity of buildings located along coasts such as tsunami evacuation buildings, the effectiveness of small-scale countermeasures that can be constructed by their administrators is investigated using a coupled fluid-structure-sediment interaction numerical model that can compute air-water two-phase flow. The investigation focuses on an impermeable tsunami-resistant wall at the seaward side of a building as the countermeasures, and generates a single leading long-period wave against the building with the wall. Numerical results show that the maximum tsunami force acting on the building can be overestimated by the resultant force of hydrostatic pressure calculated from the maximum inundation depth in front of it, suggesting that the numerical model is a useful tool to evaluate the maximum tsunami force using the vertical distribution of the wave pressure. Furthermore, when the wall is placed in the vicinity of the quay wall, a higher wall can effectively reduce the tsunami force acting on the building. In contrast, when the wall is placed in the vicinity of the building, it can be effective to shorten the wall in terms of the reduction in the tsunami force. In addition, the wall can delay the impingement of the tsunami and the onset of the maximum tsunami force for large tsunami height. From these results, it is demonstrated that the construction of the short wall near the building would be an effective countermeasure.