

津波避難タワーの耐津波安定性に関する 実験的研究

STABILITY OF A SHELTER TOWER AT EXERTION OF TSUNAMI

安田誠宏¹・高山知司²・間瀬 肇³・竹内 茂⁴

Tomohiro YASUDA, Tomotsuka TAKAYAMA, Hajime MASE and Shigeru TAKEUCHI

¹正会員 博(工) 京都大学助教 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²フェロー 工博 (財) 沿岸技術研究センター 沿岸防災技術研究所 所長
(〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16 住友半蔵門ビル6F)

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁴フジワラ産業(株) (〒550-0024 大阪市西区境川1-4-5)

Tokai, Tonankai and Nankai earthquakes are predicted to generate great tsunamis which will attack the Pacific Coasts. The tsunami will arrive at the coasts within ten minutes after the shaking, and its height reaches 5m or more. To save lives of residents in these affected areas from the tsunami, a shelter tower is newly designed, and it begins to be constructed by the local governments. A hydraulic experiment is performed to check the stability of the shelter tower at exertion of the tsunami. It is confirmed that if there are no debris, the tower is enough stable because tsunami force is smaller than shear strength of the column connections. On the other hand, if the force is increased by debris, overturning moment becomes much larger than the resistant moment by the tower weight without considering the pullout resistance force of the columns. Presuming of tsunami force which acted on land structures such as the tsunami shelter was proposed by using newly derived tsunami velocity equation and the drag coefficient of the structures.

Key Words : *Tsunami shelter, Stability, Tsunami force, Debris, Drag coefficient*

1. はじめに

中央防災会議「東南海、南海地震等に関する専門調査会」は、伊勢湾沖を震源域とする東南海地震と四国・紀伊半島沖を震源域とする南海地震が同時に発生した場合、激しい揺れと10分以内に到達する5mを超す津波によって、東海から九州にわたる極めて広範な地域に被害が及び、死者数は合計で約1万7000人に達すると予測している。また、地震調査研究推進本部は、今後30年以内に東南海地震が発生する確率は50%程度、南海地震では40%と、いずれも高い確率を予測している。これに基づき、沿岸の各自治体では災害対策を進めている。具体的なものとしては、避難場所の設置や避難路の整備、避難ビルの指定、浸水の軽減対策などである。さらに、避難場所として指定されている建物の耐震診断や標高表示板の整備が行われると共に、津波避難タワーの建設や備蓄品の充実などの検討も始められている。

津波避難タワーは、近くに高台や鉄筋コンクリート造

の高層建築物がない避難困難地域や、高齢化が進んでいる地域の住民のための避難施設として有効と考えられ、新たに建設が進められつつある。こうした地域には木造の旧家屋が多く、地震の揺れによって倒壊し、津波によって流されて漂流物となる可能性が高い。津波避難タワーは、津波による波力のみを外力として設計されており、漂流物が衝突したり、堰き止められたりした場合にも、津波避難タワーが安定であるかどうかについては全く考えられていない。

そこで、本研究では、津波避難タワーを対象に水理模型実験を実施し、津波に対する安定性を検証する。また、漂流物がタワーの脚部に引っ掛かるなどして、流れが堰き止められた場合に増大する波力についても調べ、タワーの抗力係数を求める。さらに、設計に用いる作用波力を計算するために、津波の陸上流速の推定方法を提案する。

2. 実験方法および条件

(1) 実験方法

研究対象とした津波避難タワーは、写真-1に示すようなもので、円筒形の鋼柱3本で支えられており、津波が通過しやすい形状をしている。タワーの総重量は約16t、避難デッキの高さは地盤から5.8mで、避難可能人数は約80人である。柱の支間距離は5.4m（実験値：216mm），直径は40cm（実験値：16mm）である。実験スケールは1/25で、フルード相似則に合わせて模型を製作した。タワーが受ける流体力は、津波の圧力，すなわち形状抵抗力によるもののみであるため，形状の縮尺は相似則に沿って再現したが，重量や剛性については特に考慮していない。

実験水路断面図を図-1に，津波が避難タワーに作用している状況を写真-2に示す。長水路中に勾配1:10の海浜と水平な陸上地形を接続させて製作した。沖での一様水深は85.6cmとし，避難タワー模型を，静水面からの地盤高が12cmで，4m内陸に入った位置に設置した。

避難タワーに作用する津波波力の測定方法を説明する。図-2に示すような設置用ベースを製作し，避難タワーはベースと独立した中央のプレートに設置した。ベース内部には，図-3のようにガイドレールとボールベアリング内蔵の小型スライドガイドが取り付けられており，中央のプレートはスライドガイドに固定される。引張圧縮両用型の小型ロードセルもベースに取り付けられており，タワーに津波が作用した際に，模型を固定した中央のプレートから荷重を受けて測定できるシステムである。このプレートとロードセルは接触した状態でネジで固定されているため，プレートはほとんど変位しない。また，設置ベース内にレベル調整用ネジを用意し，タワー設置プレートが水平になるようにした。

津波の流速は，タワー前面に設置したプロペラ式流速計とタワー脇のベースに設置した底面設置型電磁流速計で計測し，津波の伝播遡上の状況は，図-1のWG1～6の6本の容量式波高計で測定した。

(2) 実験条件

振幅が20cmと15cm（現地換算：5mと3.75m）の孤立波を津波として造波した。遡上後，タワー模型設置位置を通過する際の津波の水位は，それぞれ8cm，6cm（現地：2.0m，1.5m）である。漂流物によって流れが堰き止められた状況を，タワーの支柱間に遮蔽板を設置することで仮想した。津波の流れ方向に対して，漂流物がどのように堰き止められれば危険になるのかを調べるために，図-4に示すように避難タワーの設置条件を変化させて実験を行った。さらに，詰まった漂流物の透過率によって波力は変化するため，遮蔽板の開口率 ε を0, 10, 30%に変化させた。左図中の斜線部が遮蔽板である。

実験の再現性にばらつきがないように，同じ津波条件，設置条件に対して，複数回実験をした。



写真-1 津波避難タワー（和歌山県串本町）

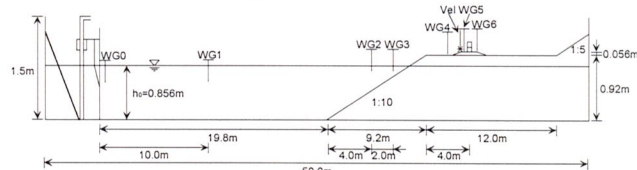


図-1 実験水路断面図

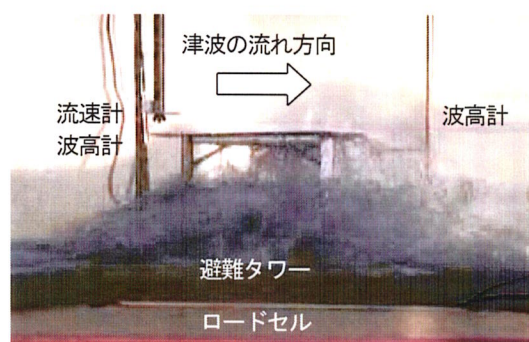


写真-2 避難タワーに作用する遡上津波の状況 (Case T4, 開口率 $\varepsilon=10\%$)

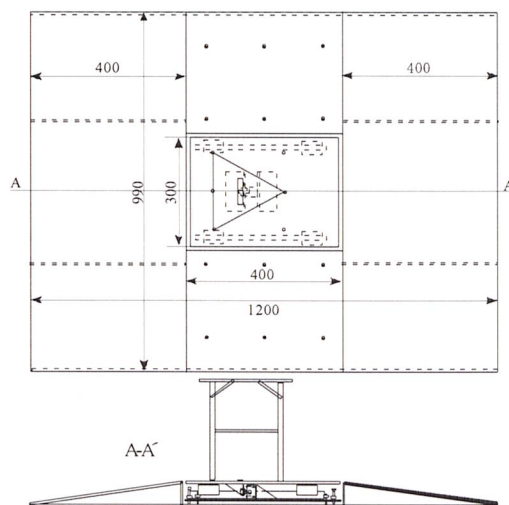


図-2 波力計測システムを組み込んだタワー設置ベース

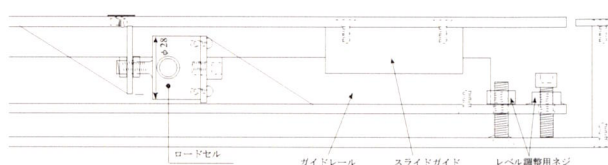


図-3 ロードセルおよびスライドガイド取付詳細図

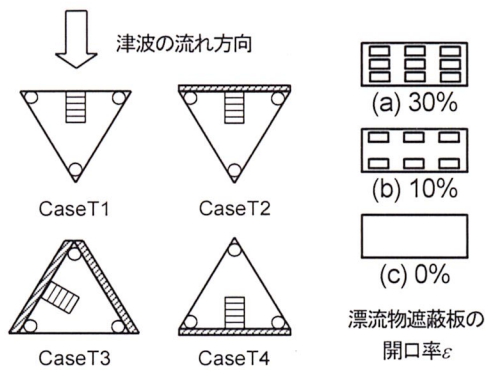


図-4 実験条件（左図：避難タワー設置条件（斜線部が遮蔽板），右図：漂流物遮蔽板の開口率）

3. 津波避難タワーの安定性実験

(1) 避難タワー無し（CaseT0）

まず、避難タワーを設置しない場合について実験を行い、津波の伝播および遡上状況を確認し、抗力係数を求める際の津波水位に対する流速を決定する。津波水位と流速の時系列変化を、それぞれ図-5および6に示した。いずれも、タワー模型位置を通過する津波水位が高い条件（ $a_f=8\text{cm}$ ）のものである。

図-5によると、沖（WG1）での津波の振幅は20cmであったが、WG2では浅水変形して約25cmまで増大する。WG3の辺りから砕波し始めて、陸上へ遡上する。水平床を2m進んだ位置にあるWG4を通過する津波水位は10cmとなり、タワー前面の位置にあたるWG5では、水位は最大で約8cmとなった。

図-6によると、流速の最大値はプロペラ流速計で約2.5m/sが測定された。底面設置型電磁流速計（EM）では、津波の先端部が到達した際に感知しているが、ある程度の水位が通過するまでは測定値が安定しないため、ピーク値を計測できないという欠点があることがわかった。

図示はしないが、津波水位が低い条件（ $a_f=6\text{cm}$ ）の場合には、WG1で15cm、WG2で20cmまで増大し、WG3から同様に砕波して遡上した。WG4を通過する津波水位は8cmとなり、WG5では、最大で約6cmとなった。また、流速の最大値はプロペラ流速計で約2.0m/sが測定された。

(2) 避難タワーのみの場合（CaseT1）

避難タワーのみの場合（T1）について、流速および荷重の時系列変化を図-7に示す。ロードセルで測定された最大荷重は、3回の平均で0.74kgf（7.21N）であった。津波が小さい条件では0.39kgf（3.80N）であった。

(3) 前面に遮蔽板を1枚設置した場合（CaseT2）

a) 遮蔽板の開口率30%

写真-3のように、避難タワーの前面に開口率 $\varepsilon=30\%$ の遮蔽板を1枚設置した場合の、流速および荷重の時系列変化を図-8に示す。タワー前面のWG5では、タワーだけの場合よりも水位が上がり、津波水位は最大で約

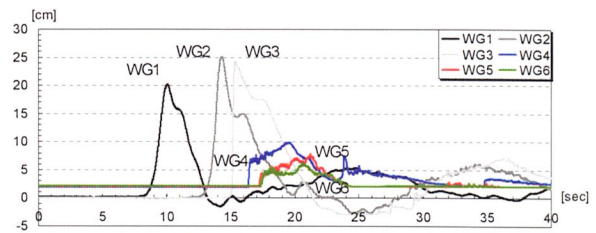


図-5 津波水位の時系列変化（CaseT0, $a_f=8\text{cm}$ ）

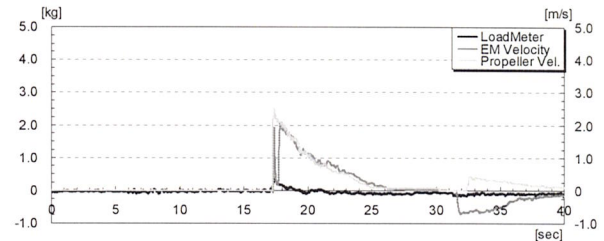


図-6 流速の時系列変化（CaseT0, $a_f=8\text{cm}$ ）

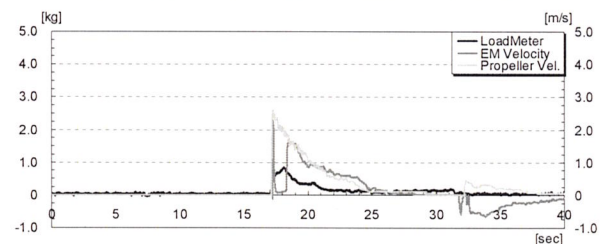


図-7 流速および荷重の時系列変化（CaseT1, $a_f=8\text{cm}$ ）



写真-3 避難タワー模型設置状況（CaseT2, $\varepsilon=30\%$ ）

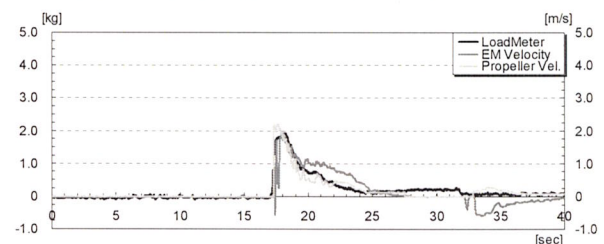


図-8 流速および荷重の時系列変化
（CaseT2, $a_f=8\text{cm}$, $\varepsilon=30\%$ ）



写真-4 避難タワー模型設置状況（CaseT2, $\varepsilon=10\%$ ）

15cmになった。最大荷重は2.09kgfで、タワーだけの場合（図-7）の約3倍になった。

b) 遮蔽板の開口率10%

写真-4のように、避難タワーの前面に開口率 $\varepsilon=10\%$ の遮蔽板を1枚設置した場合、タワー前面のWG5では、遮蔽板の開口率が30%の場合よりもさらに水位が上がり、津波水位は最大で約19cmになった。遮蔽板の開口率が小さくなったために津波が打ち上げられ、避難デッキの床版に飛沫が当たるようになった。避難デッキ床版を広くする、もしくはデッキの高さを高くするなどして、打ち上げへの対策が必要になるといえる。最大荷重は2.96kgfで、タワーだけの場合（図-7）の約4倍になった。

c) 遮蔽板の開口率0%

同様に、避難タワーの前面に開口率 $\varepsilon=0\%$ の遮蔽板を1枚設置した場合、遮蔽板の開口率がないことで津波の打ち上げがさらに促進され、避難デッキの床を越えるような高さまで飛沫が上がるようになった。最大荷重は3.28kgfで、遮蔽板の開口率10%の場合より抵抗力が約1割大きくなった。

(4) 前面に遮蔽板を2枚設置した場合（CaseT3）

a) 遮蔽板の開口率30%

写真-5のように、避難タワーの前面に開口率 $\varepsilon=30\%$ の遮蔽板を2枚設置した場合の、流速および荷重の時系列変化を図-9に示す。タワー前面のWG5での水位は、タワーだけの場合とほとんど変わらず、最大で10cm程度であった。CaseT3のように遮蔽板を設置した場合には、津波が分岐されるだけで、流れを遮って水位を上昇させるようなことはないといえる。最大荷重は1.39kgfで、タワーだけの場合（図-7）の約2倍であった。

b) 遮蔽板の開口率10%

同様に、避難タワーの前面に開口率 $\varepsilon=10\%$ の遮蔽板

を2枚設置した場合、タワー前面のWG5での水位は、遮蔽板の開口率が30%の場合とほとんど変わらず、最大で10cm程度であった。最大荷重は1.24kgfで、遮蔽板の開口率が30%の場合（図-9）より若干小さくなった。これは、分岐された津波の流れに対して、開口率が小さいことで導流板のような効果が生じたためと考えられる。

c) 遮蔽板の開口率0%

同様に、避難タワーの前面に開口率 $\varepsilon=0\%$ の遮蔽板を2枚設置した場合、最大荷重は1.23kgfで、遮蔽板の開口率が10%の場合とほとんど変わらなかった。

(5) 後背面に遮蔽板を1枚設置した場合（CaseT4）

a) 遮蔽板の開口率30%

写真-6のように、避難タワーの後背面に開口率 $\varepsilon=30\%$ の遮蔽板を2枚設置した場合の、流速および荷重の時系列変化を図-10に示す。タワー前面のWG5での水位は、タワーだけの場合とほとんど変わらなかったが、写真-2のように、遮蔽板によって津波が避難デッキの床版に打ち上げられていた。図-10によると、最大荷重は2.87kgfで、タワーだけの場合（図-7）の約4倍になった。

b) 遮蔽板の開口率10%

同様に、避難タワーの後背面に開口率 $\varepsilon=10\%$ の遮蔽板を1枚設置した場合、最大荷重は3.91kgfで、遮蔽板の開口率が30%の場合（図-10）よりも約1kgf増大し、タワーだけの場合（図-7）の5倍以上になった。

c) 遮蔽板の開口率0%

同様に、避難タワーの後背面に開口率 $\varepsilon=0\%$ の遮蔽板を1枚設置した場合の、流速および荷重の時系列変化を図-11に示す。この図によると、ロードセルで測定された最大荷重は4.45kgfであった。タワーだけの場合（図-7）に比べると約6倍で、今回の実験ケースの中で最も大きい値となった。

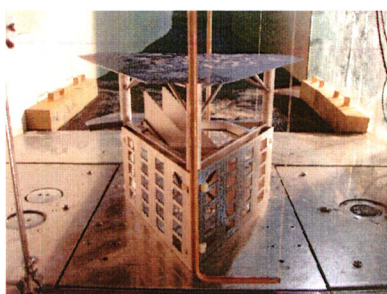


写真-5 避難タワー模型設置状況 (CaseT3, $\varepsilon=30\%$)

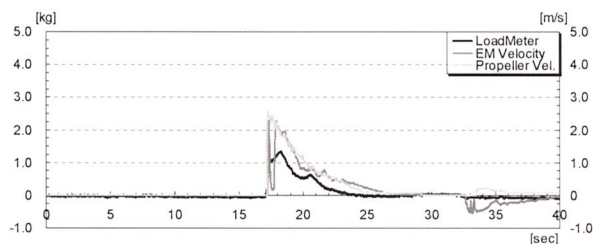


図-9 流速および荷重の時系列変化
(CaseT3, $a_f=8\text{cm}$, $\varepsilon=30\%$)

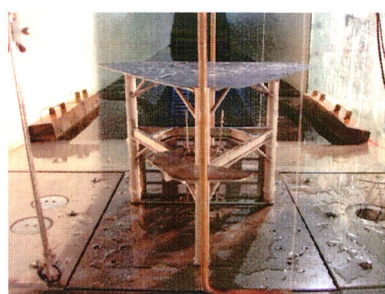


写真-6 避難タワー模型設置状況 (CaseT4, $\varepsilon=30\%$)

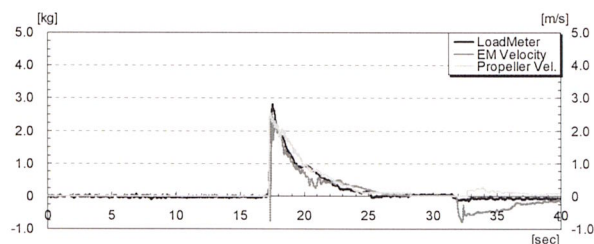


図-10 流速および荷重の時系列変化
(CaseT4, $a_f=8\text{cm}$, $\varepsilon=30\%$)

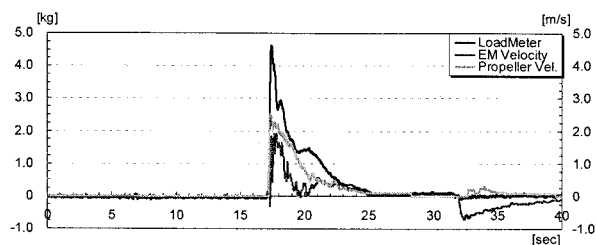


図-11 流速および荷重の時系列変化
(CaseT4, $a_f=8\text{cm}$, $\varepsilon=0\%$)

4. 津波の作用波力に関する考察

(1) 津波水位による波力特性の違い (CaseT1)

避難タワーのみの場合について、津波水位に対する作用波力と流速の変化を図-12に示す。津波水位が6cmから8cmに1.3倍になると、流速は2.1m/sから2.5m/sへ約1.2倍になった。波力は0.39kgf (3.80N) から0.74kgf (7.21N) の約1.9倍に増大した。

(2) 避難タワー設置条件による波力特性の違い

避難タワーの設置条件の違いによる、津波の作用波力の違いを比較したものを図-13に示す。いずれの津波水位および開口率においても、避難タワーの設置条件がT4の後背面に遮蔽板を設置した場合の作用波力が最も大きくなり、次いでT2, T3, T1の順に小さくなる。設置条件T4の波力は、T2の約1.2~1.3倍であった。前面に斜めに2枚設置したT3の場合には、タワーのみの場合(T1)の約1.7倍程度であった。

設置条件としては、流れ方向に対してT3のようにタワーの支柱があるよりも、T4およびT2のようにタワーの支間がある方が、漂流物によって波力が大きくなる可能性が高いことがわかった。

(3) 漂流物遮蔽板の開口率による波力特性の違い

図-14は、漂流物遮蔽板の開口率に対する津波波力の変化を示したものである。T2とT4については、開口率が大きくなるにつれて、津波波力はほぼ線形的に減衰することがわかった。一方で、T3の場合には、設置条件特性による影響の方が顕著で、開口率による影響はほとんどみられなかった。

(4) 作用波力についての設計条件との比較

a) 避難タワーのみの場合 (CaseT1)

タワーに掛かる最大総荷重は実験値で約0.74kgfであった。現地スケールに換算すると11.6tf (113.3kN) となる。避難タワーの設計条件における津波の水平波力は76.22kNで、支柱1本当たりのせん断力として用いられている。支柱3本で支えていると考えると、実験結果の113.3kNより十分大きな値となる。

また、タワーの安定所要重量 $M(t)$ について、転倒モーメントを次のように考えた。通過する津波の水位が2.0m (8cm) なので、作用高はその中心の1.0mである。

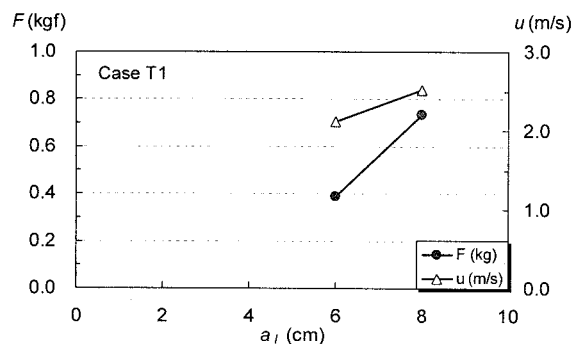


図-12 津波水位による作用波力と流速の違い (CaseT1)

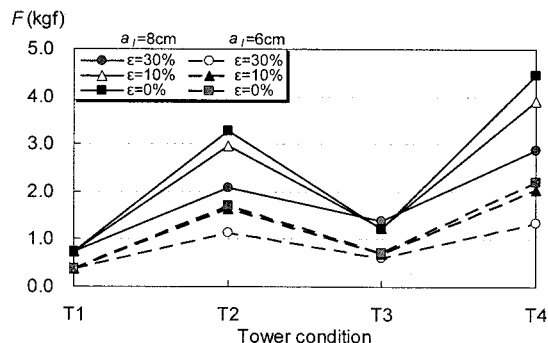


図-13 タワー設置条件の違いによる作用波力の変化

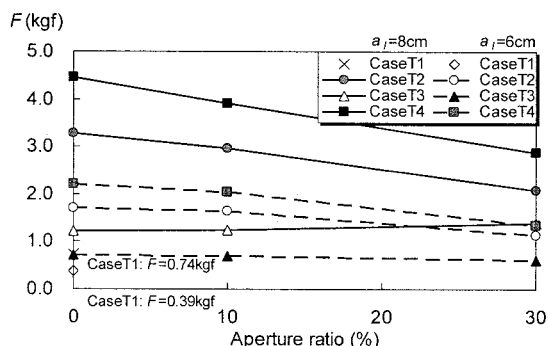


図-14 漂流物遮蔽板の開口率と津波波力の関係

モーメントの腕の長さ、すなわち、タワーの重心位置までの距離は、柱間長 $5.4\text{m} \times (\sqrt{3}/2) \times (2/3) = 3.1\text{m}$ である。したがって、安定所要重量 M は3.74tとなる。タワーの重量は約16tであるので、安定所要重量条件を十分に満たしていることが確認できた。

b) 避難タワー前面が漂流物で遮られた場合 (CaseT2)

避難タワー前面が漂流物で遮られた場合を想定し、CaseT2のタワー設置条件について、実験結果と設計条件を比較した。漂流物によって完全に堰き止められる遮蔽板の開口率0%というのは実際には起こりえないので、条件としては開口率30%より危険側の10%で検討した。

タワーに掛かる最大総荷重は実験値で約3.4kgfであった。現地スケールに換算すると53.1tf (520.4kN) となる。a)と同様に、作用高は1.25m、タワーの重心位置までの距離は3.1mであるので、安定所要重量 M は21.4tとなった。タワーの重量は約16tなので、安定所要重量条件より小さいが、地盤の引き抜き抵抗力を考慮すれば問題ない程度と考えられる。

c) 避難タワー後面が漂流物で遮られた場合 (CaseT4)

避難タワーの後面が漂流物で遮られた場合を想定し、CaseT4のタワー設置条件について、実験結果と設計条件を比較した。漂流物の開口率は10%で検討した。

タワーに掛かる最大総荷重は実験値で約3.9kgfであった。現地スケールに換算すると60.9tf (597.2kN) となる。作用高は1.25m、タワーの重心位置までの距離は1.55mであるので、安定所要重量 M は49.1tとなった。タワーの重量は約16tなので、安定所要重量条件よりかなり小さい結果となり、転倒する危険性があることがわかった。

5. 津波避難タワーの抗力係数と津波の陸上流速

津波避難タワーの設計において波力を算定するには、抗力係数と流速が必要となる。そこで、抗力係数を実験結果より決定する。また、陸上を遡上する津波の流速を推定する方法を提案する。

(1) 津波避難タワーの抗力係数

波力 F と抗力係数 C_D の関係は次式で示される。

$$F = 0.5 \rho A (1 - \varepsilon) C_D u^2 \quad (1)$$

ここに、 ρ は流体の密度、 A は断面積、 ε は遮蔽板の開口率、 u は流速である。

図-15に遮蔽板開口率と抗力係数の関係を示す。津波水位条件による違いはほとんどみられない。設置条件T1とT2の抗力係数はほぼ同じで約0.6であった。設置条件T4の抗力係数はかなり大きくなり約0.8~0.7になった。T3の抗力係数は0.2~0.4と他の条件に比べてかなり小さい。式(1)において遮蔽板の開口率を考慮したことで、漂流物の空隙率による影響を無視できるような抗力係数を決定することができた。

(2) 津波の陸上流速の推定

陸上を遡上する津波の流速を推定する方法については、これまでに松富ら¹⁾による研究があるが、得られた現地データを危険側で包絡したものであるため、やや大きい傾向がある。そこで、津波の遡上高を考慮した陸上流速の推定方法を検討した。

津波の流速は一般的に次式で表される。

$$u = \eta \sqrt{g(h + \eta)} \quad (2)$$

陸上を遡上するにつれて津波の高さ η は減衰し、津波の最大遡上高 R の位置で流速が0になるという関係を用いると、津波の陸上流速は次式で表すことができる。

$$u = \alpha \sqrt{g(R - h_G)} \quad (3)$$

ここで、 h_G は構造物が設置されている地盤高である。

富樫ら²⁾と安田ら³⁾の遡上高算定式を用いて R を決定し、実験結果の流速から係数 α を調べたところ、それぞれ1.1と0.8となり平均で $\alpha=0.95$ (≈ 1) という関係が得られた。

津波避難タワーなどの陸上構造物について、各構造物

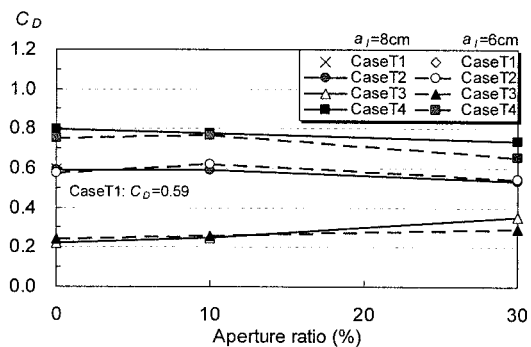


図-15 漂流物遮蔽板の開口率と抗力係数の関係

の抗力係数と式(3)で求められる陸上流速を用いることで、作用する津波の力を推定し、設計に用いることができると考えられる。

6. おわりに

主要な結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 津波避難タワーのみの場合には、津波の流れに対する断面積が小さく、柱の間を津波が通り抜けるため、タワーにそれほど大きな波力は作用しない。
- 2) 漂流物を想定した遮蔽板を設置した場合には、津波による波力がかなり増大することを実験的に明らかにした。避難タワーの後背面に遮蔽板を設置した場合の波力が最も大きくなった。
- 3) 遮蔽板の開口率の違いによって、波力はほぼ線形的に変化することがわかった。
- 4) 設計条件と比較した結果、避難タワーのみの場合には、支柱のボルト接合部のせん断耐力および転倒モーメントのいずれに関しても、津波の作用波力に対して十分に安全であることが確認された。
- 5) 一方で、もし漂流物によってタワーの支柱間が堰き止められた場合には、転倒モーメントがタワーの自重による抵抗モーメントよりも大きくなり、転倒する危険性があることが明らかになった。そのため、タワーを建設する際には、支柱および基礎の埋め込み深さを十分に確保し、引き抜き抵抗力を付加させる必要がある。
- 6) 津波の陸上流速を求める方法を新たに提案し、抗力係数と沖合での津波高から、避難タワーに作用する波力の推定法を提案した。

参考文献

- 1) 松富英夫・飯塚秀則：津波の陸上流速とその簡易推定法，海岸工学論文集，Vol.45，pp.361-365，1998。
- 2) 富樫宏由・中村武弘：津波の陸上遡上に関する実験的研究，第22回海岸工学講演会論文集，pp.371-375，1975。
- 3) 安田誠宏・高山知司・山本博紀：ソリトン分裂津波の変形と波力特性に関する実験的研究，海岸工学論文集，第53巻，pp.256-260，2006。