

スリットをもつ遮蔽板を用いた 円筒タンク用スロッシング防止ダンパーの開発

Development of the Dumper to Reduce Sloshing of a Cylindrical Tank using partitions with slits

米山望*・高島大輔**・澤田純男***・三浦正博****

Nozomu YONEYAMA, Daisuke TAKABATAKE, Sumio SAWADA and Masahiro MIURA

*正会員 博 (工) 京都大学准教授 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

**正会員 修 (工) (財) 電力中央研究所 (〒 270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

***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)

****正会員 工修 出光エンジニアリング (〒 261-8501 千葉県千葉市美浜区 1 丁目 3 番地)

The liquid sloshing in petroleum tanks is one of severe problem against huge earthquakes such as the Tokai Tonankai and Nankai earthquakes. In this study, we are developing a damper to reduce sloshing. The damper consists of partitions with slits which gives resistance to liquid moving in the tank. The model experiment and numerical simulation are performed to determine the optimum layout of the damper. As the results we find the optimum layout which can reduce the sloshing height to one-tenth. Furthermore, by the results of the real-scale numerical simulation of cylindrical tank with the layout, we confirm our damper is effective to reduce sloshing under the condition of the seismic motion in the 2003 TOKACHI-OKI earthquake.

Key Words : Sloshing, damper, 3D numerical simulation, VOF method

1. はじめに

直接地面を基礎とするタンク、輸送車内の石油コンテナ、原子力発電所におけるクーリングシステムなど自由液面をもつ様々な施設で生じる可能性があるスロッシング現象は多大な人的被害、経済被害を引き起こすことがある。2003 年 9 月 26 日に発生した「2003 年十勝沖地震」では、地震により生じたスロッシングによって、製油所の原油屋外タンク 1 基とナフサ屋外貯蔵タンク 1 基で火災が発生している。発生が懸念されている東海、東南海、南海地震では、「やや長周期地震動」が卓越することが予測されており、同様のスロッシング被害が数多く発生する可能性がある。このため、スロッシング被害を防ぐための対策法を開発することが急務となっている。

このような背景のもと、スロッシングそのものを軽減するための様々な研究が近年実施されている。これまでに提案されたスロッシング抑制法の例としては、バネ垂体方式¹⁾、アンチローリングワイヤー方式²⁾、フィルター方式³⁾、フローティングネット方式、抵抗板方式⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾などがある。これらの中には、模型実験や理論解析等でその効果が検証されているものもあるが、総じて実機における効果の検証が難しいこと、各種荷重条件に対する細部の設計が難しいこと、過去の被害事例からタンク内部に複雑な設備等をできるだけ付加しないことが望ましいこと等によって実用化に至っていないのが現状である。

前報¹⁰⁾において著者らは、遮蔽板をタンク内に設置



図-1 遮蔽板の一例

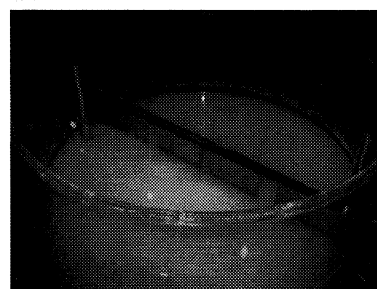


図-2 遮蔽板の設置例

するスロッシング抑制法を提案している。この抑制法は抵抗板方式に分類され、水平方向の流動を制御することにより振動系に減衰付加する。図-1 および図-2 に本研究で行った模型実験で用いた遮蔽板の一例および設置例を示す。前報¹⁰⁾では、遮蔽板に複数の開口部を適切に存在させることにより、スロッシング抑制効果を高めることができることを示し、検討した 21 ケースの遮蔽板レイアウトの中での最適なレイアウトを提

案するとともに、数値解析により実験で確認されたスロッシング抑制効果を再現できることを示した。しかし、スロッシング抑制メカニズムを十分把握した上での最適レイアウトの選定や、数値解析の実スケール解析への適用性の検証などについて課題を残していた。

そこで本報では、様々な開口率・開口位置を持つ遮閉板を用いて内径 512mm の円筒タンク（以下、小タンク）を対象とした模型実験・数値解析を実施し、遮閉板によるスロッシング抑制メカニズムを解明したうえで、最適な遮閉板レイアウトを選定する。さらに、クロス型遮閉板構造を対象に、内径 2m の模型タンク（以下、中間タンク）を使った実験結果と数値解析結果を比較して、実機スケールタンク（内径 50m と想定）に適用する際の妥当性を議論したのちに、提案するクロス型遮閉板構造の実機スケールタンクでの有効性を明らかにする。

2. 抑制メカニズムの解明と最適遮閉板レイアウトの選定

2.1 小タンク模型実験

本研究では、後述するように、多方向からの地震動に対応するため、遮閉板を交差させたクロス型遮閉板構造を提案するが、本章では、スロッシング抑制メカニズムを詳細に把握するため、タンク内中央部に設置する一枚の遮閉板を用いる。実験装置の外観を図-3 に、小タンクの諸元を図-4 に示す。小タンクは内径 512mm、高さ 390mm のアクリル製とした。実際のタンクではタンク内の液体荷重によってタンク側壁が変形するが、小タンクの壁面の厚みは約 10mm で比較的堅いため、加振時に変形はほとんど生じない。タンク内の液体には水道水を用いる。実機では石油や石油精製品を貯蔵しているが、ここでは粘性による違いを考慮しない。また白色絵具を混ぜることによって、レーザ変位計によるスロッシング波高測定を可能とした。

遮閉板は T 型ステンレスアングル製の遮閉板枠（幅

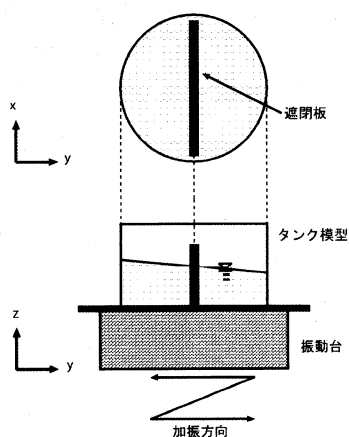


図-3 実験装置の外観（小タンク）

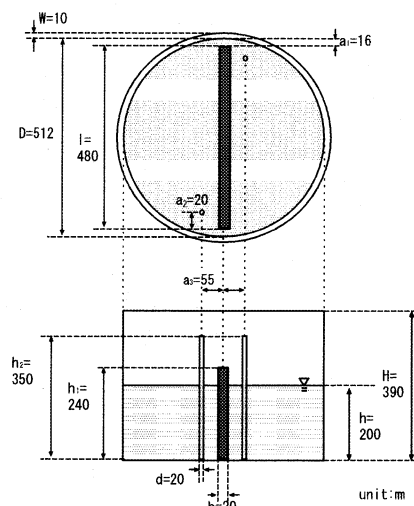


図-4 模型タンク（小タンク）の諸元

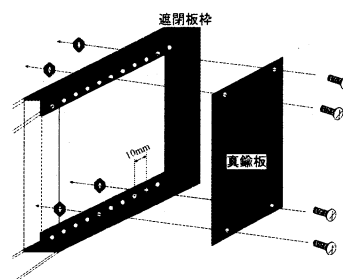


図-5 遮閉板の構成（小タンク）

480mm、高さ 240mm）と真鍮板で構成されている。遮閉板枠には、真鍮板を任意の位置・幅で固定するため直径 3mm のビス用の穴を 10mm 間隔で空けている（図-5 参照）。これにより、様々な開口率や開口位置の遮閉板が実現できる。また、スロッシング抑制メカニズムを調べるため、真鍮板の代わりに金網を用いた実験も行った。

遮閉板枠は 4 隅に取り付けたジョイントを介して 2 本の支柱に固定する。この支柱は小タンクの実験のみ遮閉板固定のため設置するものであり、実機では設置しない。四つのジョイントのうちの二つにロードセルを組み込み、点対称となるように手前上隅と奥下隅に設置する（図-6 参照）。

本実験では、ロードセルによって遮閉板全体にかか

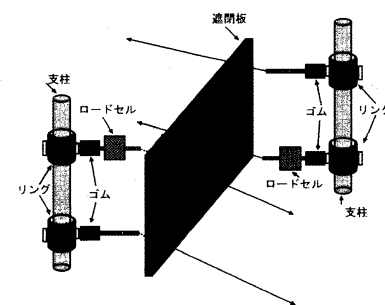


図-6 遮閉板の設置方法（小タンク）

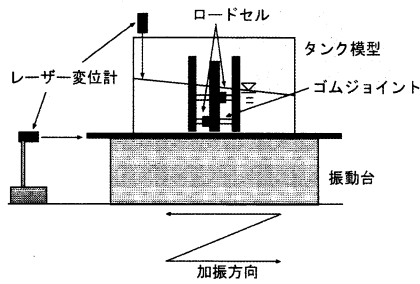


図-7 測定位置

る荷重を測定した他、タンクの外周部分でのスロッシング波高と振動台の水平変位を測定した。スロッシング波高は振動台に設置した架台上よりレーザー変位計を用いて、タンク外周から10mmの位置のスロッシング波高を垂直に測定した。また振動台の変位を、床上に設置したマグネットベース（取付け軸）からレーザー変位計を用いて、振動台端部の位置を変位方向と平行に測定し、振動台の加速度を振動台上に設置した加速度計を用いて、加振方向と平行に測定した。（図-7 参照）

入力とは全て1方向の正弦波を用いた。基本的にそれぞれのケースに対して0.9Hzから0.1Hz間隔で3.0Hzまでの周波数領域で実施した。ただし水位変動が大きい周波数では0.05Hz間隔とした。振動台の振幅が約1mmとなるように手動で調整し、液面の振動が安定したところで15秒間100Hzサンプリングで測定した。

得られたスロッシング波高の時刻歴データから、安定した部分の最大値と最小値の差を求め、その2分の1をスロッシングの振幅とする。これを振動台変位の振幅で除して無次元化した値を縦軸に、横軸に周波数を取り無次元スロッシング波高の応答関数を作成した。

荷重については、遮閉板が加振方向に対して垂直かつ軸対称であるのでロードセルにより測定した荷重が残りの2隅の荷重と等しいとみなし、測定した2隅の荷重の和の2倍を遮閉板全体に生じる荷重とした。上記と同様に計算された荷重を縦軸にして応答関数を作成した。

2.2 数値解析

本研究では、前報¹⁰⁾においてスロッシング現象に対する適用性が検証されている数値解析手法を用いる。以下にその概要を示す。基礎方程式は以下のものである。

1) 連続方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

2) 運動方程式 (Navier-Stokes 方程式) ($i = 1, 2, 3$)

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) \quad (2)$$

3) 流体体積の移流方程式

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

ここに、 u_i は流速の各方向成分、 $G_i = (-\alpha, -\beta, -g)$ は単位体積あたりの外力であり、 g は重力加速度 ($=9.8\text{m/s}^2$)、 α, β はそれぞれ振動台加速度の x 軸方向（実験の加振方向に対し垂直方向）、 y 軸方向（実験の加振方向と平行方向）である。また、 p は圧力、 ρ は流体密度 ($=1000\text{kg/m}^3$)、 ν は動粘性係数 ($=1.0 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)、 F は各計算セルの流体存在割合 ($= [\text{計算セル中の流体体積}] / [\text{計算セルの体積}]$) である。

また、前報では、本研究では乱流による粘性の効果を標準型乱流モデルを用いて解析したが今回は一定値とした。この変更に関して、前報の解析結果と大きな違いは見られなかった。

以上の基礎方程式を直交座標系上で離散化し、SIMPLE 法¹²⁾に基づいて解析する。本研究では直交直線座標系のもとで円筒タンクを対象としたシミュレーションを行なうため、計算セル内にタンク側壁が存在する場合がある。このため、離散化の際には神山らの方法¹³⁾に従い計算セル境界の開口率と計算セルの空隙率を考慮した。各物理量の定義点は、流速のみを計算セルの境界面中央、その他の物理量を計算セルの中央で定義するスタッガード配置とし、離散化は時間について前進差分、移流項は三次精度風上差分、その他は中央差分とした。式 (3) は VOF 法の手順¹⁴⁾に従って解析した。

解析に用いた座標系は図-3 に示すものとする。また時間刻み $\Delta t = 0.005$ 、連続式誤差 D の最大値許容値を $D = 1.0 \times 10^{-5} [\text{1/sec}]$ として解析を行った。また、流速の底面やタンク側壁の境界条件はフリースリップとした。

加振は振幅が1mmで、1.0Hzから3.0Hzまでの間で設定した周波数を用いた水平方向加速度の時間変化を式 (2) の外力項 G_i に含まれる振動台加速度 α, β に与えることで表現した。

計算メッシュは、 x 軸方向、 y 軸方向は共に格子間隔を8mmに、 z 軸方向に関しては格子間隔の5mmとした後で、円弧をできるだけ適切に模擬することを目的として計算セルの交点と円弧が一致するように x 軸方向、 y 軸方向の格子間隔を微調整した。格子数は200,898となった。計算メッシュ分割の水平断面を図-8に示す。なお、解析では遮閉板を厚みのない壁として取り扱い、遮閉板が存在する位置におけるメッシュ境界面の開口率を0として表現した。

2.3 遮閉板によるスロッシング抑制メカニズムの解明

ここでは、提案する遮閉板のスロッシング抑制メカニズムについて、小タンク模型実験及び数値解析結果に基づいて考察する。本研究では無対策タンクを含め、計67ケースの実験を行った。

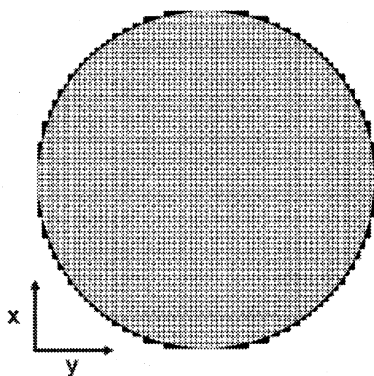


図-8 計算メッシュ分割

(1) 平板およびメッシュ板を用いた抑制効果の検討

本研究で提案する遮閉板は、開口率 0%の平板を用いるが、スロッシング抑制効果について調べるため、平板の代わりに開口率 36%の金網（以降、メッシュ板と呼ぶ）を用いた実験を行い比較検討した。

まず初めに、遮閉板を設置しない無対策ケース（#n00）とスリットなしの平板遮閉板（#b00）およびスリットなしのメッシュ板遮閉板（#m00）を設置した場合のスロッシング挙動を考察する（図-9 参照）。

スリットなしの平板遮閉板（#b00）と#n00 に対し、模型実験で得られたスロッシング波高の応答関数（以下、波高応答とよぶ）を図-10(a)で比較する。#n00 では 1.2Hz 付近に 1 次モードを表すピークを確認できるが、#b00 では 1.75Hz 及び 1.9Hz にピークが存在するだけで、1.2Hz 付近にはピークが見られない。このことから、平板遮閉板を設置すると振動系が変化し、その結果スロッシング波高が小さくなったと考えられる。

一方、スリットなしのメッシュ板遮閉板を設置した場合（#m01）と#n00 に対し、模型実験で得られた波高応答を図-10(b)で比較する。#m01 では、#n00 の応答に対して 1 次モードでは約 6 分の 1、2 次モード

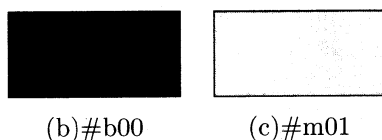
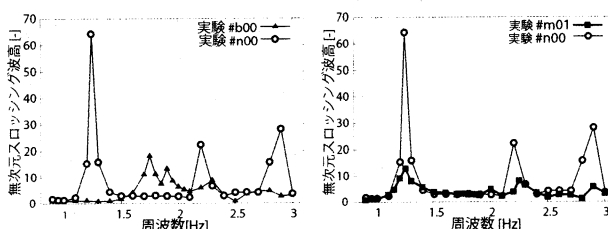


図-9 遮閉板のレイアウト（平板とメッシュ板）



(a) #b00 と #n00 の比較 (b) #m01 と #n00 の比較

図-10 波高応答（平板とメッシュ板）

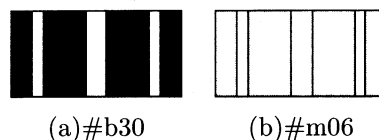
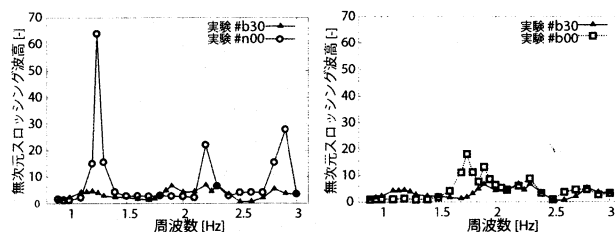


図-11 遮閉板のレイアウト（平板とメッシュ板、スリットあり）



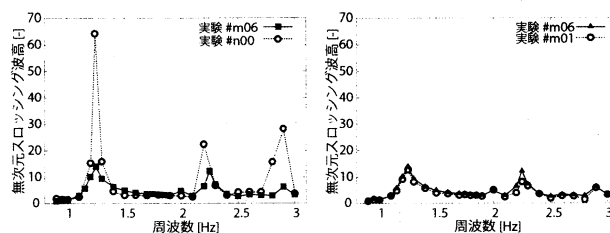
(a) #b30 と #n00 の比較 (b) #b30 と #b00 の比較

図-12 波高応答（平板遮閉板）

では約 2 分の 1 の応答を示している。しかし #b00 と異なり、#m01 の 1 次モードや 2 次モードの周波数は #n00 とほぼ等しく、振動系が変化していない。従って、メッシュ板を用いた遮閉板は、振動系を変化させることはないが、振動系に減衰が付加されることによりスロッシング波高が小さくできたと考えられる。

さらに平板遮閉板、メッシュ板遮閉板それぞれに対して、同じ位置にスリットを設けた実験を行った。図-11(a),(b)にスリット付平板遮閉板（#b30）およびスリット付メッシュ板遮閉板（#m06）のレイアウトを示す。図-12(a)に#b30と無対策ケース（#n00）の波高応答を比較したものを示し、図-12(b)に#b30とスリットなしの平板遮閉板ケース（#b00）の波高応答を比較したものを示す。図-12(a)(b)から、#b30は広い周波数領域でスロッシング波高が抑えられ、無対策ケースに対して、1 次モードで約 10 分の 1、2 次モードで約 4 分の 1 まで減少する。これは平板遮閉板にスリットを設置することにより、振動系が変わったことに加え、スリット通過時に抵抗が生じることによって、振動系に減衰が付加されたものと考えられる。

次に、図-13(a)にスリット付メッシュ板遮閉板ケース（#m06）と無対策ケース（#n00）の波高応答を比較したものを、図-13(b)に#m06とスリットなしのメッシュ板遮閉板（#m01）の波高応答を比較したもの



(a) #m06 と #n00 の比較 (b) #m06 と #m01 の比較

図-13 波高応答（メッシュ板遮閉板）

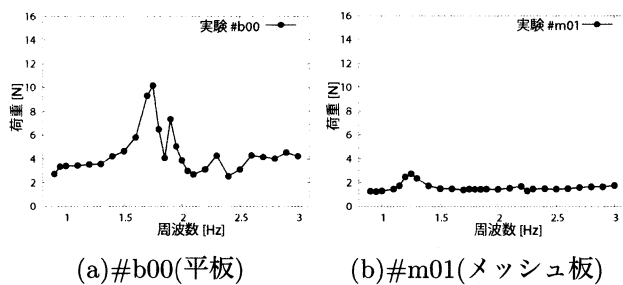


図-14 荷重応答 (スリットなし)

を示す。図-13(b) から、ケース#m06 は、#m01 より応答が若干増加している。また、平板の結果と異なり、スリットを設けても振動系の変化は見られなかった。このことからメッシュ板は振動系を変えることなく減衰を付加することのみによってスロッシングを抑制していると考えられる。従ってメッシュ板を用いるときは、#m01 のようにスリットを設置しないケースが最もスロッシングを抑制できると考えられる。

さらに図-14 に実験で得られた遮閉板に生じる荷重の応答関数 (以下、荷重応答と呼ぶ) を示す。スリットなしの平板遮閉板 (#b00) では、ピーク以外の周波数でも約 3N 程度の荷重が生じているが、スリットなしのメッシュ板遮閉板 (#m01) では、最大でも約 3N 程度の荷重しか生じていない。

次に数値解析を用いて、模型実験の再現を行った。図-15(a) に模型実験結果を、図-15(b) に数値解析結果を示す。これらを比較すると、応答の絶対値は若干異なっているが、応答関数の形状や遮閉板によるスロッシング抑制効果を再現できている。また図-16 に模型実験及び数値解析によって得られたケース (#b00) の荷重応答を示す。ピークで得られる値は両結果とも約 10N で一致しており、広い周波数領域で傾向がほぼ一

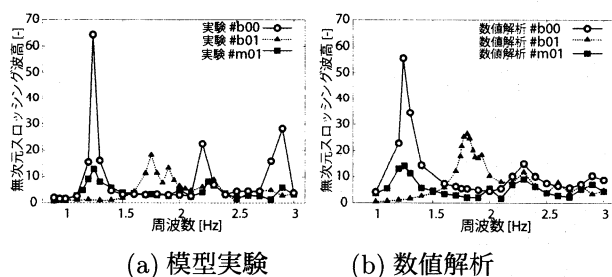


図-15 波高応答 (実験と解析の比較)

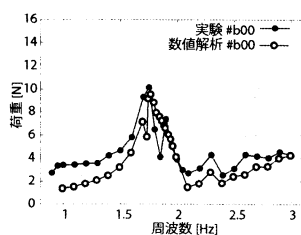


図-16 荷重応答 (#b00)

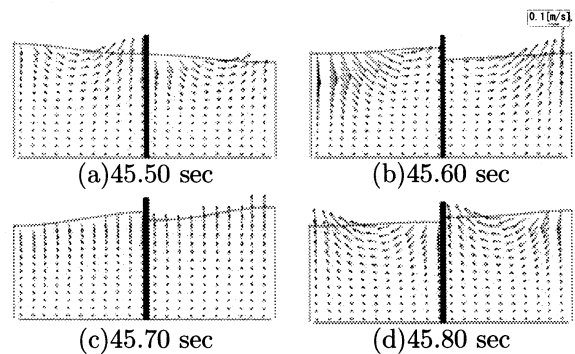


図-17 ピーク時の流速ベクトルと yz 平面の水面形状 (#b01, 数値解析)

致している。しかし、実験結果で得られる値が若干大きくなる。

図-17 に数値解析で得られた、スリットなし平板遮閉板 (#b00) におけるピーク時 (1.75Hz) の yz 平面 (y 軸方向: 加振方向, z 軸方向: 鉛直方向) の水面形を示す。タンク中央の遮閉板によって形成される個々の半円形タンク内で振動している様子がわかる。すなわち、このモードは半円形タンクの 1 次モードであると考えられ、以降「半タンク 1 次モード」と呼ぶ。

平板およびメッシュ板を用いた検討結果をまとめると以下ようになる。

- 本研究で提案する平板を用いた遮閉板を設置すると、振動系が変化し半タンク 1 次モードが出現する。一方、1 次モードのスロッシング波高は小さくなる。
- メッシュ板を用いた場合、振動系を変化させることなく、減衰が付加することによってスロッシング波高が小さくなる。
- メッシュ板を用いた場合では、スリットを設けてもスロッシング波高の応答は小さくならなかったが、平板ではスリットによりスロッシング波高の応答が小さくなった。

以上から、平板を用いてスロッシング抑制するには、スリットを的確に配置し、スロッシング応答が小さくなるように振動系をコントロールすることが重要となる。

このため、次節以降では、平板遮閉板を対象に開口率やスリットの位置によってスロッシング抑制効果がどのように変化するかを調べる。

(2) 開口率の違いによるスロッシング抑制効果の変化

まず、図-18 に示すようなスリットを中央に設けた場合の開口率の変化とスロッシング抑制効果の変化について調べる。#b01 と #n00 は前節でも用いた開口率 0% と 100% の場合であり、#b01, #b02, #b03, #b04 は中央スリット幅を調整して開口率を 12.5%, 25%, 37.5%, 50% としたケースである。

図-19 に模型実験・数値解析で得られた波高応答を示す。数値解析は時間的制約から最小限のケース (周

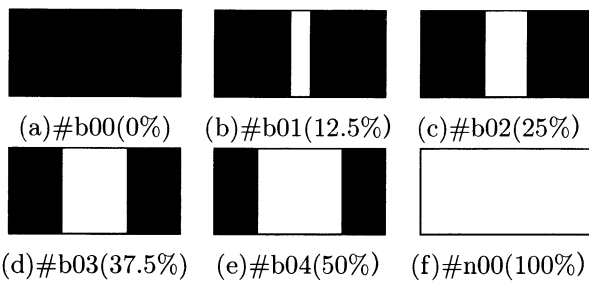


図-18 遮閉板のレイアウト（開口率の違い：中央）

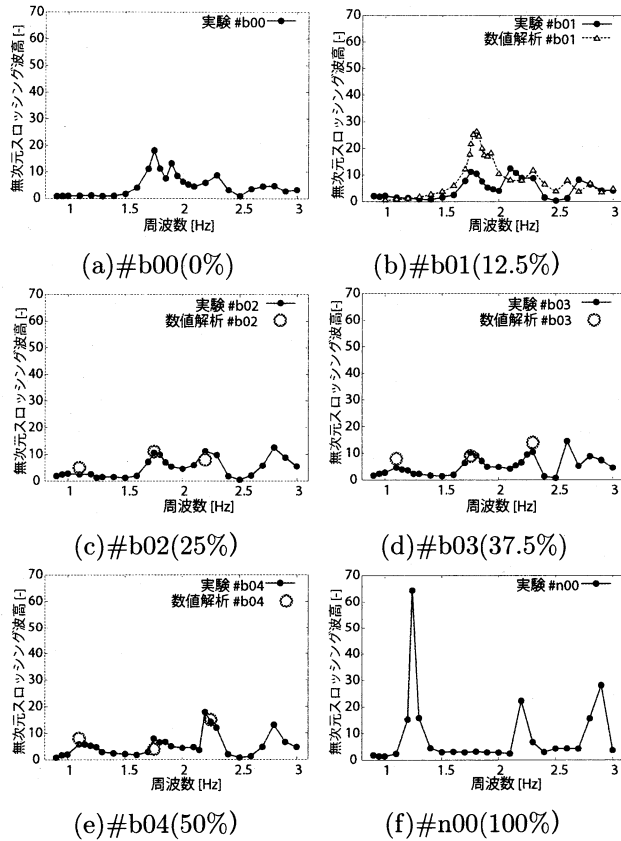


図-19 波高応答（開口率の違い：中央）

波数)について行った。以降、部分的しか計算しなかったケースでは、計算結果を丸でプロットする。図-19より、開口率が小さくなると1次モード(1.2Hz付近)のスロッシング波高は小さくなる。また半タンク1次モード(1.75Hz付近)は、スリットを中央に設ければスロッシング波高が減少し、さらに開口率が大きいほどスロッシング波高は小さくなる。#b04(開口率50%)では#b00(開口率0%)の約2分の1となった。また開口率が大きくなると、1次モードと同様に2次モード(2.2Hz付近)のスロッシング波高も大きくなる。

次にスリットをタンク端部に設けた場合の開口率の変化とスロッシング抑制効果の変化について述べる。図-20に遮閉板のレイアウトを示す。開口率0%の#b00に加えて、#b13、#b19、#b23では中央に位置する平板の幅を調整することで開口率を75%、50%、25%にしている。図-21に模型実験・数値解析で得られた波

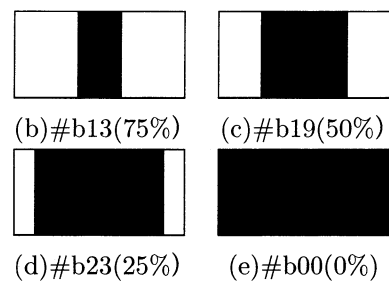


図-20 遮閉板のレイアウト（開口率の違い：端部）

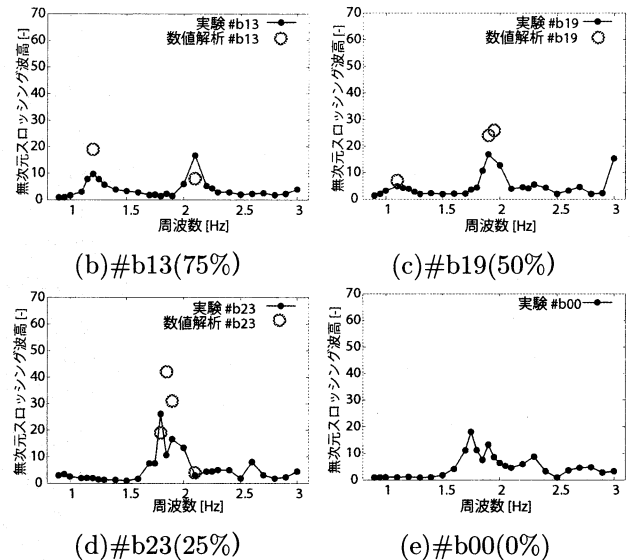


図-21 波高応答（開口率の違い：端部）

高応答を示す。スリットを中央に設けるケースと同様に、開口率が小さくなると1次モード(1.75Hz付近)のスロッシング波高も小さくなっている。また#b23では1.80Hz(半タンク1次モード)、#b19では1.90Hz(半タンク1次モード)、#b13では2.10Hz(2次モード)にピークを示している。以上から、中央を遮閉すると半タンク1次モードや2次モードが大きくなることが分かる。

(3) 開口位置の違いによるスロッシング抑制効果の変化

次に開口率が25%の場合について、開口位置が変化するときの遮閉板によるスロッシング抑制効果の変化について調べる。

図-22に開口率が25%の場合の遮閉板レイアウトを示す。#b23、#b24、#b02はそれぞれ中央スリット幅が0mm、60mm、120mmとなっている。図-23にそれぞれのケースについて模型実験と数値解析で得られた波高応答を示す。

同図から開口率が25%となると1次モードのスロッシング波高は小さい。またパネルをタンク端部に設置した#b02では、1次モード(1.2Hz付近)のスロッシング波高が小さくなる。半タンク1次モード(1.75Hz付近)は中央にスリットを設けると抑えることができ、

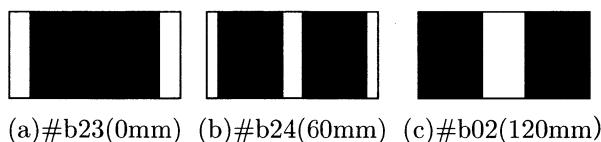


図-22 遮閉板のレイアウト (開口位置の違い)

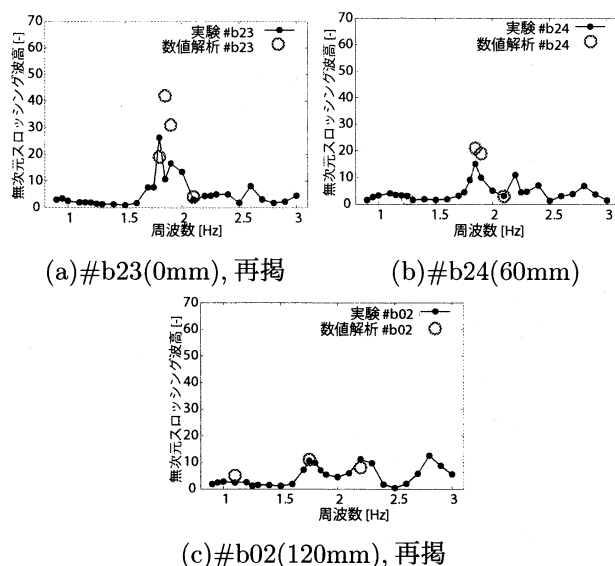


図-23 波高応答 (開口位置の違い)

#b03 ではケース #b23 の約 2 分の 1 まで抑えられている。一方、2 次モード (2.2Hz 付近) は中央にスリットを設けると生じ、スリット幅が広くなると応答が大きくなる。

開口率および開口位置を変化させた場合のスロッシング抑制効果についてまとめると以下のようになる。

- 1 次モード (1.2Hz 付近) のスロッシング応答はスリットの位置に関わらず、開口率が小さければ小さくなる。
- また、1 次モード (1.2Hz 付近) のスロッシング応答は、中央スリット幅を大きくすると大きくなるが、タンク端部に遮閉した場合は抑えられる。従ってタンク中央と端部の両方を遮閉すると、1 次モードを効果的に抑制できると考えられる。
- 半タンク 1 次モード (1.75Hz 付近) は中央を遮閉すると応答が大きくなる。従って、半タンク 1 次モードを小さくするためには、中央にスリットを設けることが効果的であると考えられる。
- 2 次モード (2.2Hz 付近) は、中央スリット幅が大きくなると応答が大きくなる。

次節では、これまでの検討結果を踏まえ最適なレイアウトを選定する。

2.4 最適な遮閉板レイアウトの選定

上述したように、1 次モード (1.2Hz 付近) のスロッシング波高を抑えるには開口率を小さくし、タンク中央及び端部を遮閉すればよい。ここでは図-24 に示す

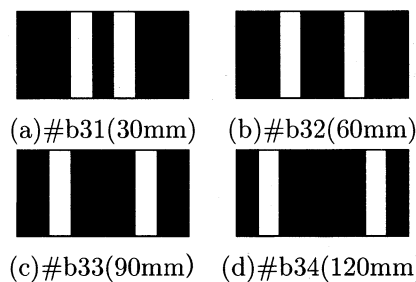


図-24 遮閉板のレイアウト (最適レイアウトの選定 1)

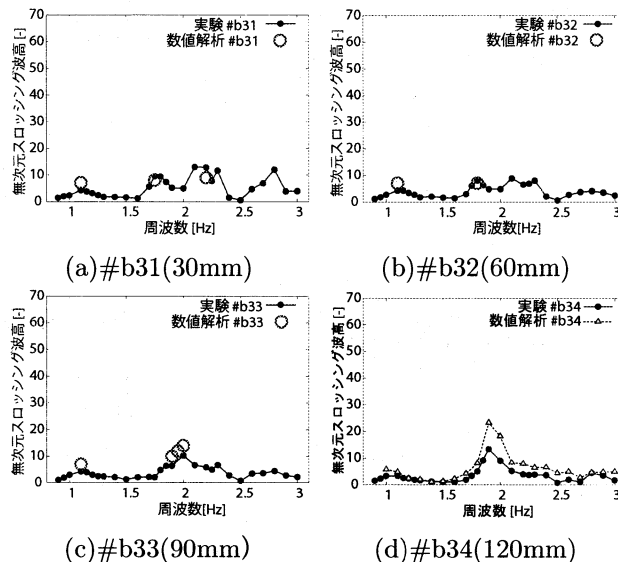


図-25 波高応答 (最適レイアウトの選定 1)

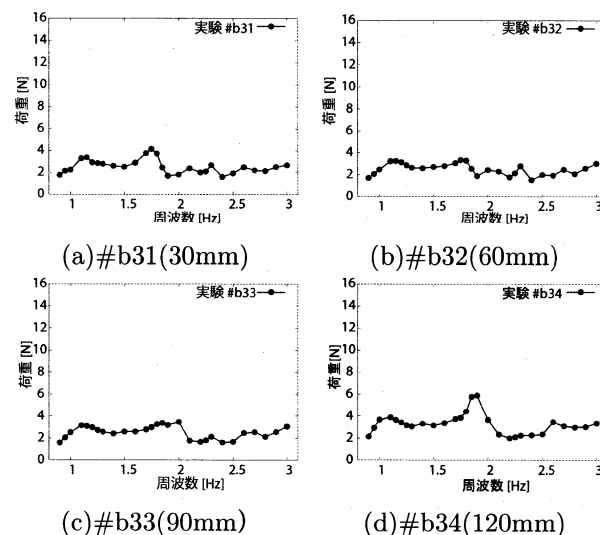


図-26 荷重応答 (最適レイアウトの選定 1)

ように、開口率を 25% として、平板をタンク中央及び端部に設置する場合について、スリットの位置を変えてスロッシング抑制効果を調べた。#b31 は中央平板の幅を 30mm、#b32 は 60mm、#b33 は 90mm、#b34 は 120mm とした場合である。図-25 に模型実験及び数値解析で得られた波高応答を示す。さらに図-26 に模型実験で得られた荷重応答を示す。数値解析を実施



図-27 遮閉板のレイアウト (最適レイアウトの選定 2)

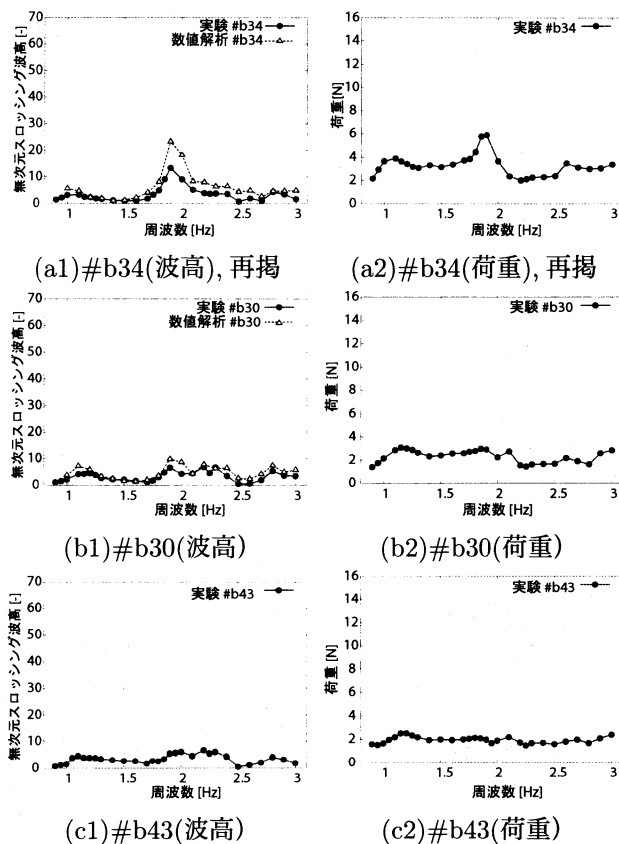


図-28 波高および荷重応答 (最適レイアウトの選定 2)

したケースは実験結果を良く再現している。

1次モードは4つのケースともに小さな応答を示しているが、その中でも#b32(中央平板幅 60mm)で最大となり#b34(中央平板幅 120mm)で最小となった。一方、#b31と#b32では2次モード(2.2Hz付近)の明確なピークが見られるが、#b33と#b34では見られない。一方、半タンク1次モード(1.75Hz付近)は#b34で最も大きなピークを示すが、#b34では1次モード及び2次モードがほとんど生じていない。

また1次モードにより遮閉板に生じる荷重は全てのケースで大きな差異はないが、半タンク1次モードにより生じる荷重はケース#b34で最も大きくなる。

上述したように、半タンク1次モード(1.75Hz付近)はタンク中央にスリットを設けることで抑制することができる。そこでケース#b34を基本レイアウトとし、図-27に示す遮閉板レイアウトで模型実験及び数値解析を実施した。#b30は#b34の開口率を固定した状態で中央を60mm開口した場合、#b43は真鍮板をさらに分別してスリットを増やした場合である。図-

28(a1)(b1)(c1)に模型実験および数値解析で得られた波高応答を示す。さらに図-28(a2)(b2)(c2)に模型実験で得られた遮閉板に生じる荷重の応答関数を示す。

#b30のようにタンク中央にスリットを設けると、1次モードのスロッシング波高が若干増加したが、半タンク1次モードが大幅に減少した。さらに#b30に対して#b43のようにスリットの数を増やしても、両ケースの応答関数に大きな差異は生じなかった。また、数値解析は#b30の波高応答関数を適切に再現した。

遮閉板に生じる荷重は、スリットを設けると広い周波数領域で小さくなり、スリットの多いケース#b43では最も遮閉板に生じる荷重が小さくなる。しかし、本研究では構成がシンプルな#b30を最適な遮閉板レイアウトとする。#b30の遮閉板を設置すると、図-12(a)で示したように、無対策タンクに対して、1次モードで約10分の1、2次モードで約4分の1まで減少すること、また数値解析は、この変化を適切に再現することがわかった。

3. クロス型遮閉板構造

多数方向からの入力に対してもスロッシング抑制効果を発揮するために、実機では、同じレイアウトの遮閉板2枚をそれぞれの中央で交差させた構造(図-29参照)の適用を提案する。以降では、このクロス型遮閉板構造を対象とする。まず、本章では小タンクを対象に実験及び数値解析を実施した。入力には正弦波を用い、図-30に示すように1枚の遮閉板と45°を成す角度から入力を実施した。同図内にスロッシング波高の測定点を○で示した。

図-31に図-29に示す#b00のレイアウトの遮閉板を用いたケースの実験及び数値解析で得られた波高応答を示す。模型実験及び数値解析結果の両方に1.9Hz(半タンク一次モード)及び2.3Hz(二次モード)の2つのピークがある。またピークの値は数値解析結果が実験結果よりも若干大きい値をとるが、広い周波数領域での応答の傾向はほぼ一致していることから、クロス型遮閉板構造の場合でも数値解析で実験を再現できている。またピーク周波数が前章で述べたケース#b00の時の1.7Hzに対し、クロス型構造では1.9Hzにピーク



図-29 クロス型遮閉板構造

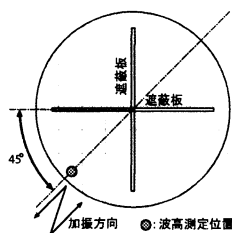


図-30 入力方向 (クロス型構造, 小タンク)

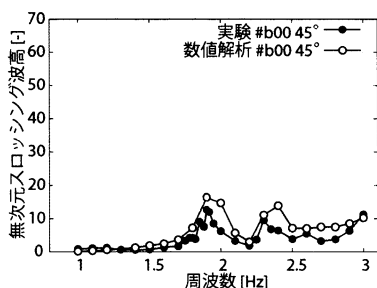


図-31 波高応答 (クロス型遮蔽板)

が現れていることから、振動系が変わることがわかる。

次に数値解析を用いて、入力方向の違いに対してスロッシング波高がどのように変化するかを検証した。入力方向は図-32に示す、遮蔽板に対して0°、30°、45°の角度を成す3方向で実施した。またスロッシング波高の測定位置は図-32に示すように遮蔽板に対して45°の角度を成す位置 (以降、測定点 A) である。これらの3ケースで得られた波高応答を図-33(a)に示す。測定点 A では、遮蔽板と45°の角度を成して入力を実施した時に最も波高応答が大きくなり、特に遮蔽板と0°の角度を成して入力する場合は、他の2ケースよりも応答が小さくなる。一方、遮蔽板に対して0°の角度を成す位置 (以降、測定点 B) で測定した場合の波高応答を図-33(b)に示す。測定点 B では、遮蔽板と0°の角度を成して入力した場合の波高応答が最も大きくなる。

4. 実機スケールでの抑制効果

本章では数値解析を用いて実機スケールでの遮蔽板の抑制効果を検証する。解析対象は「2003年十勝沖地震」でスロッシング被害を受けたタンクであり、この地震で観測された実地震波を入力した。本章ではまず、西松建設(株)によって実施された直径が2m 模型タンク (中間タンク) を用いた中間スケールタンクの実験結果を本研究の数値解析結果と比較して、スケールアップに対する数値解析法の妥当性を検証し、最後に実機スケールでの検証解析結果を示す。

4.1 スケールアップによる数値解析結果の妥当性

中間タンクの模型実験結果と、同条件の元で実施した数値解析の結果を比較して、スケールアップをした

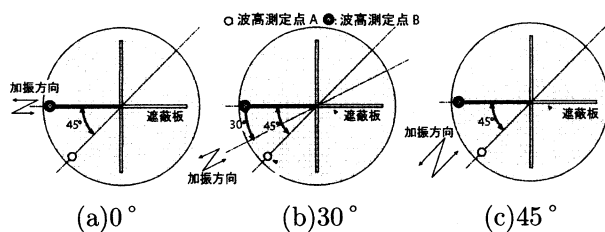


図-32 入力方向と測定位置

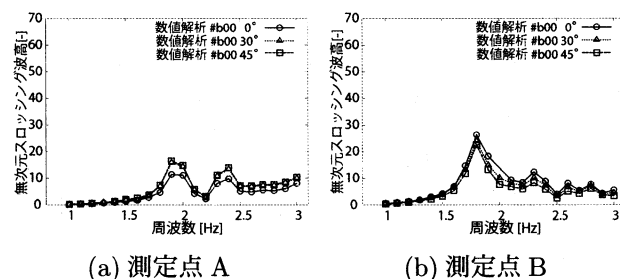


図-33 波高応答 (クロス型遮蔽板, 角度の違い)

際の数値解析結果の妥当性を検証した。中間タンクの諸元を表-1に示す。中間タンクの模型実験は、タンク

表-1 中間タンクの諸元

直径	水深	1次固有振動数	2次固有振動数
1.990 m	0.9 m	0.654 Hz	1.15 Hz

は剛体であり内容水は水道水である。また図-34に示すように、それぞれ1次モード ($T_1 = 1.53$ s)・2次モード ($T_2 = 0.87$ s) の固有振動数と一致する正弦波3波を一方方向に入力した。実験及び数値解析を実施したケースは遮蔽板を用いないケースと図-35に示すレイアウトをクロス型遮蔽板構造にしたケースの2ケースであり、測定位置は図-32の測定点 B である。また数値解析手法はこれまでに用いたものと同様であり、計算メッシュも図-8に示すものと同様である。従って、計算メッシュ間隔はそれぞれ x 軸方向及び y 軸方向は約32mm, z 軸方向は20mmである (小タンクの4倍)。

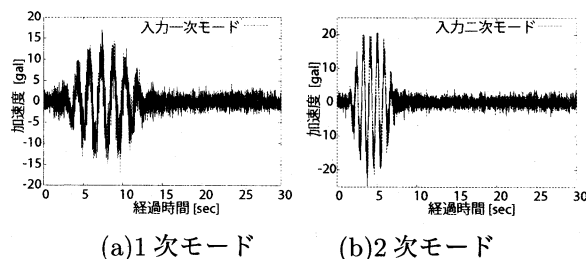


図-34 用いた入力波形 (中間タンク)



図-35 遮蔽板レイアウト (中間タンク)

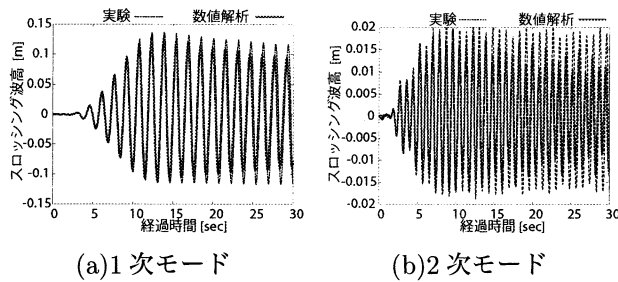


図-36 スロッシング波高の時刻歴 (中間タンク、遮閉板なし)

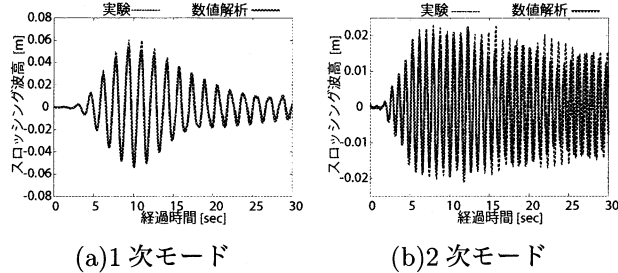


図-37 スロッシング波高の時刻歴 (中間タンク、遮閉板あり)

図-36、図-37にそれぞれ遮閉板なしのケース及び遮閉板ありのケースの、数値解析及び模型実験結果のスロッシング波高の時刻歴波形を示す。遮閉板なしのケースの1次モードでは、スロッシング波高がピークに達するまでは数値解析及び模型実験結果は一致している。しかし、入力が終わる12秒付近から数値解析結果に対し、模型実験結果の位相に遅れが生じ始め、また数値解析結果の方がより減衰している。一方、遮閉板なしの2次モードの場合でも同様に、ピークに達するまでは両結果は良く一致するが、入力が終わると両結果に差が現れ始めている。従って、本解析手法では応答のピークは予測できるが、減衰過程にさらに詳細な検討が必要である。また遮閉板ありのケースの1次モード数値解析及び模型実験結果が減衰過程も含めて良く一致しているが、2次モードでは遮閉板なしのケースと同様に、ピークまではよく両結果が一致したが、減衰過程で両結果に差が生じた。

4.2 解析手法の適用性に関するまとめ

これまで見てきたように一部のスロッシング波高の解析結果は実験結果との乖離があり、該当するケースにおいては、実験結果および解析結果双方の再検証が必要なこと、また、中間タンクの検討結果から、減衰過程の再現性に対し詳細な検討が必要ことがわかった。しかし、前報¹⁰⁾の結果も含め、スロッシング波高に乖離がある場合にも、スロッシングの抑制傾向が逆転するようなケースが見られないこと、本研究で選定した最適遮閉板レイアウト(#b30)などスロッシング波高が抑制されているケースについては波高応答が特に精度で予測できていること、中間タンクの解析においてもスロッシング波高のピーク値に関して

表-2 数値解析に用いた実機スケールタンクの諸元

直径	水深	1次固有周波数	2次固有周波数
51.2 m	20 m	0.126 Hz	0.228 Hz

は精度よく予測できることからピーク値を議論するのであれば、スケールアップする場合にも十分対応できていると考えられることなどから、本研究の解析手法は、スロッシング抑制挙動を適切に予測し、実スケールにも適用可能であると判断できる。

4.3 実機スケールタンクでの抑制効果

前章で述べたように、最適な遮閉板として、#b30の遮閉板レイアウトを選定した。本章ではこの遮閉板を組み合わせたクロス型遮閉板構造が実機で十分な性能を発揮できるかを数値解析に基づき検討する。また実機スケールのタンクとして、「2003年十勝沖地震」で1次モードにより溢流が生じたものを用いた。タンクの諸元を表-2に示す。図-38に示す「2003年十勝沖地震」でK-NET 苫小牧(HKD129)で観測された地震記録の3成分を入力して数値解析を実施した。入力方向は図-39に示す2方向で実施した。

また用いた計算メッシュは図-8に示すものと同様で、計算メッシュ間隔はそれぞれ x 軸方向及び y 軸方向は約800mm、 z 軸方向は500mmである(小タンクの100倍)。図-40にスロッシング波高を出力した位置を示す。測定点N~測定点NEはタンク外周に位置する。

入力方向Iについて、図-41に無対策タンクのスロッシング波高の時刻歴応答を示す。タンク外周でのスロッシング波高の最大値は、測定点N、測定点Sで約3mとなった。次に図-42に#b30の遮閉板を設置した場合のスロッシング波高の時刻歴応答を示す。このケースでは、タンク外周での最大値は測定点Sで約1.3mであった。無対策タンクと比べると外周上では約3分の

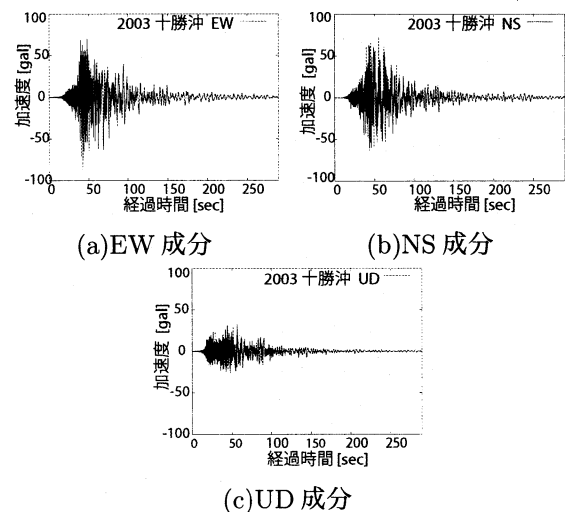


図-38 入力地震動 (実機スケールタンク)

1 になっており、タンク外周のスロッシング波高は、全ての方向に対してスロッシングを抑制できている。

次に入力方向 II についても同様に図-43 に #b30 の

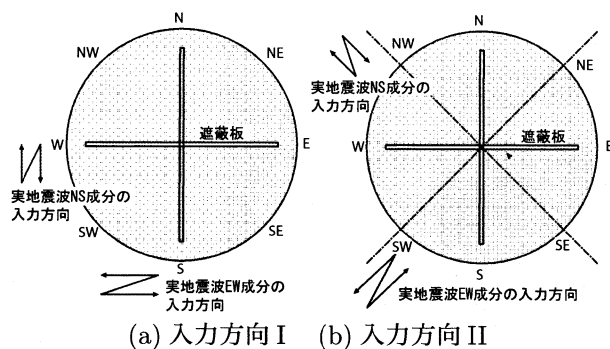


図-39 入力方向 (実地震波)

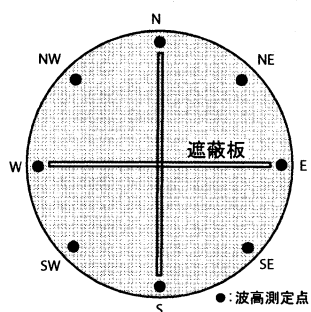


図-40 スロッシング波高の測定位置 (実地震波)

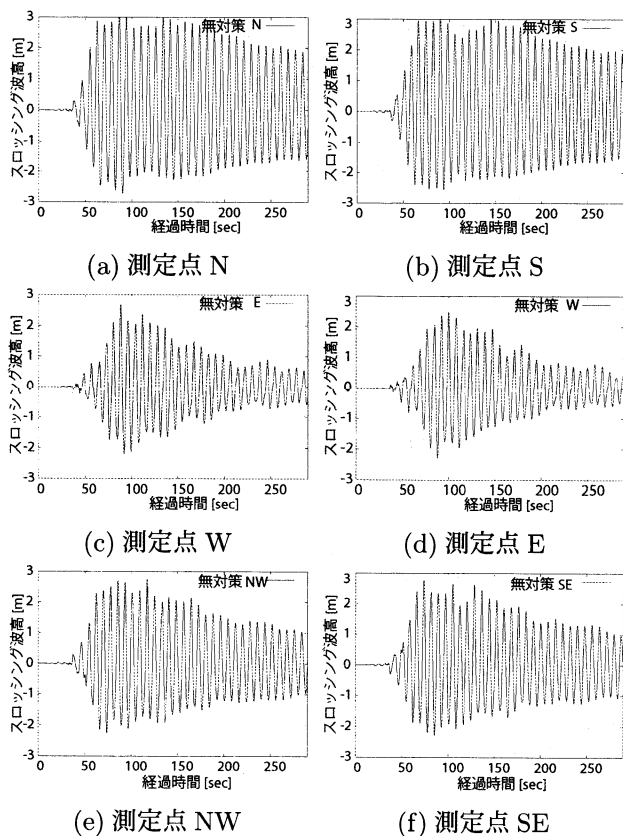


図-41 スロッシング波高の時刻歴波形 (入力方向 I・タンク外周・無対策・実機スケールタンク)

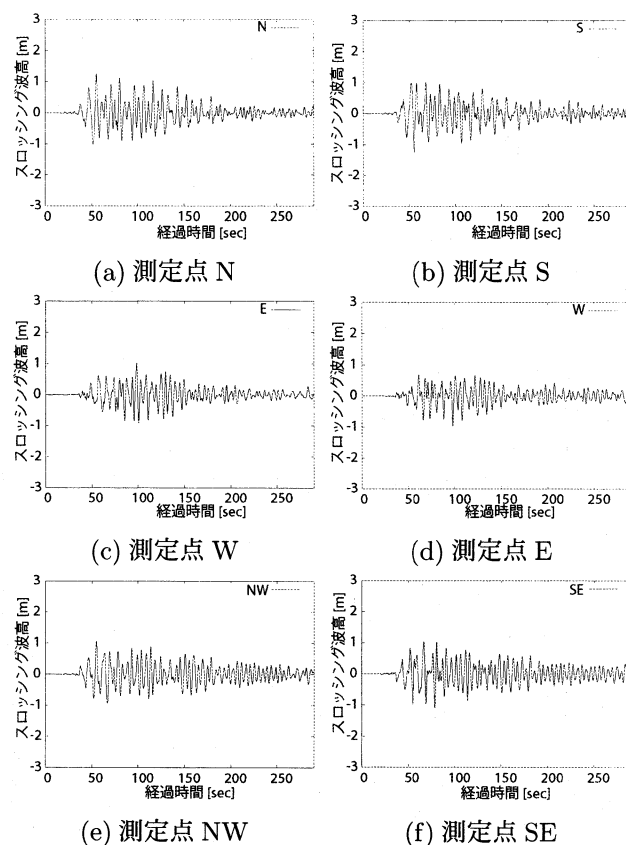


図-42 スロッシング波高の時刻歴波形 (入力方向 I・タンク外周・#b30・実機スケールタンク)

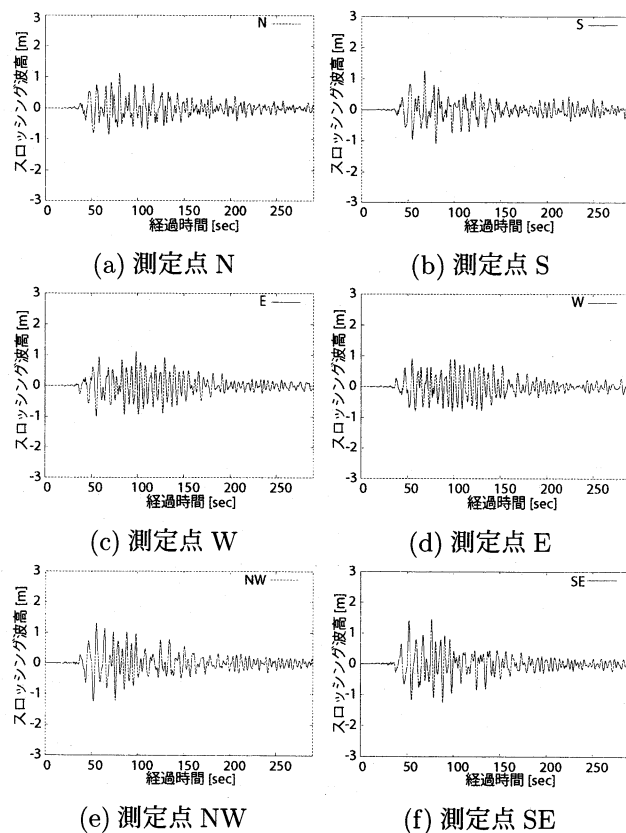


図-43 スロッシング波高の時刻歴波形 (入力方向 II・タンク外周・#b30・実機スケールタンク)

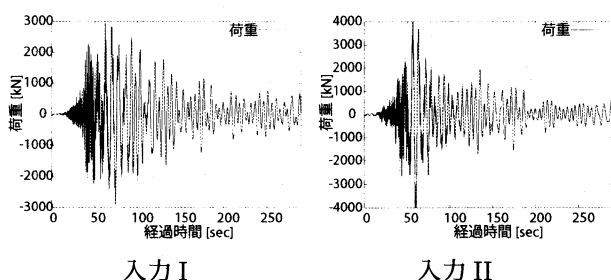


図-44 遮閉板に生じる荷重 (実機スケールタンク)

遮閉板を設置した場合のスロッシング波高の時刻歴応答を示す。入力方向 II では、入力方向 I と異なり、タンク外周では測定点 SE で最大値を取り、その値は約 1.5m となった。これは、無対策の約半分であり、入力方向 I よりも大きい値である。

また図-44 に、数値解析で得られた遮閉板に生じる荷重の時刻歴応答を示す。遮閉板に生じる荷重の大きさは入力方向 I の場合約 3000kN、入力方向 II の場合約 4000kN の荷重が生じている。

以上から、実機スケールタンクでもスロッシング波高を約 2 分の 1 程度に抑えられることがわかる。しかし、地震波の入力方向によってスロッシング波高及び遮閉板に生じる荷重が増減することに注意が必要となる。

5. おわりに

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- 平板によって構成された遮閉板は、振動系に減衰を付加するだけでなく、振動系を変化させてることによって大きなスロッシング抑制効果を示す。また、スリットの位置や大きさによってスロッシング抑制効果が大きく変化する。
- 本研究で選定した最適レイアウト #b30 の遮閉板 1 枚を小タンクに設置すると、無対策タンクに対して、1 次モードで約 10 分の 1、2 次モードで約 4 分の 1 まで減少する。また、数値解析によってこの現象を適切に再現した。
- 中間タンクにクロス型遮閉板構造を設置した場合のスロッシング挙動の数値解析結果を実験と比較したところ、減衰過程は適切に再現できないものの、スロッシング波高のピークを適切に予測した。
- 実機スケールタンクに実地震波を入力する数値解析を行った結果、#b30 の遮閉板を 2 枚用いるクロス型遮閉板構造が実機スケールタンクのスロッシング抑制に対しても有効であることが確認できた。また、地震波の入力角度により抑制効果に差があることがわかった。

今後は、内容物、水深、タンク径の組み合わせによる抑制効果の変化や、本研究で無視しているタンクの変形の影響、浮屋根の効果などについて検討していく予定である。

謝辞

貴重な観測記録を提供していただいた防災科学技術研究所 K-NET に感謝いたします。

参考文献

- 1) 勝井勇次, 勝井優, 原隆, 依田照彦: 浮屋根式貯蔵タンクにおけるスロッシングの抑制に関する実験的研究, 土木学会第 61 回年次学術講演概要集, pp.627-628, 2006
- 2) 小林信之: 円筒形液体貯槽の地震時挙動に関する研究, 東京大学, 1986
- 3) 仁尾浩之, 鈴木森晶, 青木徹彦, 奥村哲夫: 固定屋根式タンクのスロッシング現象の検証試験, 土木学会第 61 回年次学術講演概要集, pp.877-878, 2006
- 4) 小林信之: 隔壁を用いたスロッシング防止法 - 渦を利用した減衰付加 -, 大型タンクのスロッシングに関する耐震・制振・免震等技術のミニシンポジウム講演概要集, pp.37-40, 2005
- 5) Abbas Maleki, Mansour Ziyaeifar: Sloshing damping in cylindrical liquid storage tanks with baffles, Journal of Sound and Vibration, pp.1-14, 2007
- 6) J.R.Cho, H.W.Lee, S.Y.Ha: Finite element analysis of resonant sloshing response in 2-D baffle tank, Journal of Sound and Vibration, pp.829-845, 2005
- 7) M.J.Tait, A.AEI Damatty, N.Isyumov, M.R. Siddique: Numerical flow models to simulate turned liquid dampers (TLD) with slat screens, Journal of Fluids and Structures, pp.1007-1023, 2005
- 8) 姫野武洋, 野中聡, 青木広太郎: バッフル板によるスロッシング抑制効果の数値解析, 第 21 回数値流体力学シンポジウム, C2-2, pp.1-8, 2007
- 9) 吉住文太, 槇本洋二: 大型タンクにおける地震時のスロッシング応答 - 抵抗板によるスロッシングの制振効果を CFD と等価線形解析で予測 -, 三井造船技報, No.190, 2007
- 10) 米山望, 高島大輔, 澤田純男, 三浦正博: 円筒タンク用スロッシング防止ダンパーの有効性に関する実験・数値解析的検討, 応用力学論文集, Vol.10, pp.563-571, 2007
- 11) 米山望: 自由水面をもつ多次元流れの数値水理学研究, Jun, 2001
- 12) Patankar, S.V., Spalding, D.B.: A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimension Parabolic, Journal of Heat Mass Transfer, Vol.15, 1787pp, 1972
- 13) 神山勉, 鹿島遼一, 阿部宣之: 傾斜堤周辺の波動場解析へのポラスモデルの適用性, 海岸工学論文集, vol.38, pp.546-550, 1991
- 14) Hirt, C. W., Nichols, B. D.: Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of Computational Physics, Vol.39, pp.201-225, 1981

(2008 年 4 月 14 日 受付)