

【論文】

浮き屋根をもつ円筒タンクのスロッシング抑制について

水田洋司*1 松浦一郎*2 白地哲也*1 川口周作*3

A sloshing restraint of cylindrical tank having float roof

Yoji MIZUTA, Ichiro MATSUURA, Tetsuya SHIRACHI, and Shusaku KAWAGUCHI

In the TOKACHIOKI Earthquake, a float roof of an oil reserve tank in TOMAKOMAI district was destroyed by sloshing, and a fire of a tank occurred as a second disaster. It is thought that the cause of sloshing outbreak was resonance a natural frequency in the long period when occurred in the TOMAKOMAI which was 200km away from seismic center and a natural frequency of oil in the tank. Oil reserve tanks around Japanese big cities are similar in the case of TOMAKOMAI district, and it is an important assignment that an earthquake resistance of a large-scale tank is improved for earthquake vibration in a long period. In this paper, we observed a sloshing characteristic looked from the experiment of a cylindrical tank model having a float roof and a method to reduce sloshing wave height by a pendulum hanged under the float roof.

Key words; sloshing restraint, cylindrical tank, float roof, earthquake, oil reserve tank, long period, earthquake resistance

1. 序論

2003年9月26日午前4時50分すぎに発生した十勝沖地震により、苫小牧地区の石油タンクの浮き屋根が破壊され、二次災害として火災が発生した。火災の消火作業は強風のため難航し、石油タンクは40時間以上にわたって燃え続け、タンク内のナフサが燃え尽きてようやく鎮火した。この災害の原因は、地震により苫小牧地区で長周期地振動が発生し、タンクの内容液と共振してスロッシング現象を起こしたことにある。また、このスロッシングが浮き屋根に大きな負荷を与え、浮き屋根の沈没や原油の漏洩を引き起こしている。さらに、漏れて揮発した原油

に金属摩擦で発生した火花が引火し、火災が発生したと考えられる。石油備蓄タンクの多くは一箇所に複数個設置されているため、一機の火災が他のタンク火災を誘発し、大きな被害が出る恐れもある。このような現状から、土木学会では「巨大地震災害への対応検討委員会」が発足し、長周期地震動とこれに伴う大型貯槽のスロッシングも主要課題として取り上げられている。日本の大都市周辺の石油備蓄タンクは苫小牧の場合と似た環境にあり、長周期地震動に対する大型貯槽の耐震性を向上させることは主要な課題である。

タンクのスロッシング波高軽減策として、これまでに様々な方法¹⁾が提案されている。しかし、現在までに実機に設置されて効果をあげているものはない。本論文では浮き屋根を持つタンクのスロッシング特性と、浮き屋根に振り子をつけたスロッシング抑制装置を設置した時のスロッシング抑制効果につ

*1 九州産業大学 工学部 都市基盤デザイン工学科

*2 九州産業大学大学院 工学研究科 土木工学専攻

*3 九州産業大学大学院 工学研究科 社会開発・環境システム工学専攻 (新日本製鐵株式会社)

いて述べている。まず、発泡スチロールで作成した浮き屋根を設置したアクリル樹脂製円筒タンク模型を用いて振動台実験を行い、波高・動水圧を計測した。次に、浮き屋根に本論文で提案するスロッシング抑制装置を設置した場合の波高・動水圧を計測した。最後に、これらの値を比較し、スロッシング抑制効果について検討した。

2. 円筒タンク模型の概要

振動台実験に用いた円筒タンク模型は厚さ 1cm、外径 60cm、高さ 80cm で、アクリル樹脂製である。内容液は水で、タンク底面から高さ 50cm の所まで注入しており、波高計測時の水面が明確になるよう、入浴剤で着色している。浮き屋根は直径 58cm、厚さ 1cm の、発泡スチロールで製作した。タンク模型と振動台 (IMV 社 : DS-2000-15L)、及び浮き屋根を写真-1 に示す。写真では 2 層のタンクになっているが、内層が実験で使用する模型であり、外槽は水漏れ防止用として設置している。模型は底部で振動台とボルトとナットで固定し、接着面には水漏れ防止用にゴムパッキングを装着している。波高はタンク模型の高さ 40cm~60cm に 5mm 間隔でラインが引いてある計測用メジャーで計測し、動水圧は動水圧計 (共和電業 : PSS-02KDF) で計測している。計測用メジャー及び動水圧計の設置条件を図-1 に、ゴムパッキングの設置状況を図-2 に、浮き屋根を図-3 に示す。また、写真-2 に動水圧計測機器類を示す。

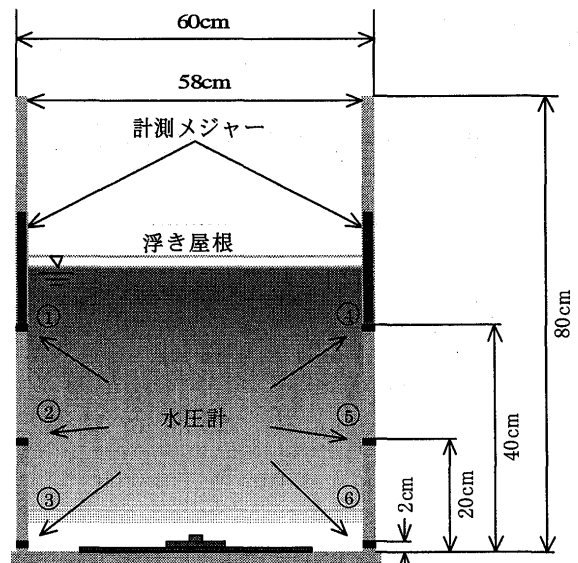


図-1 円筒タンク模型

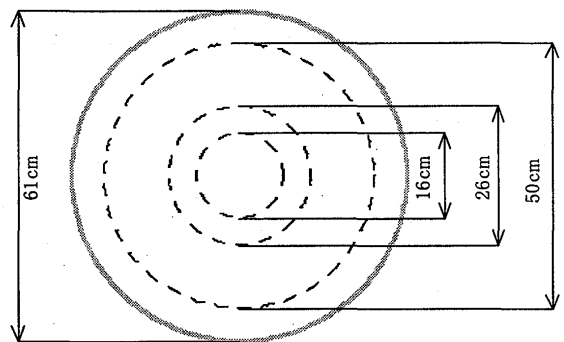


図-2 ゴムパッキング設置図

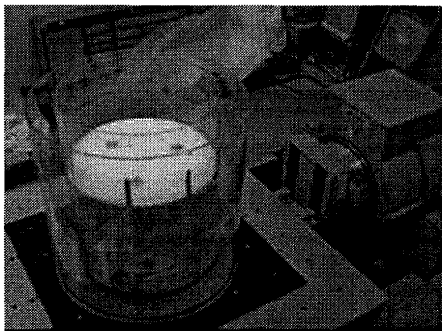


写真-1 円筒タンク模型と振動台

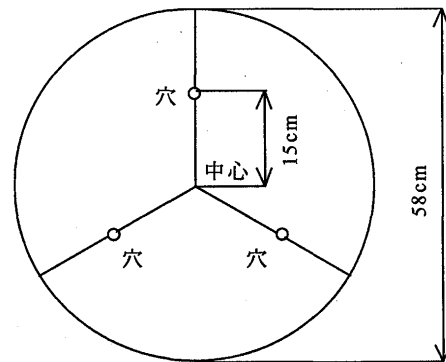


図-3 浮き屋根

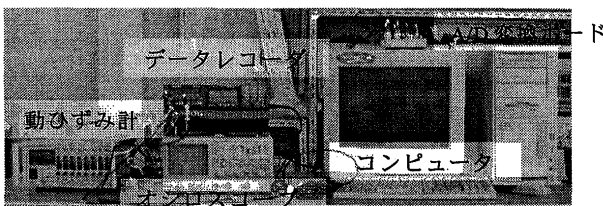


写真-2 計測機器類

3. 浮き屋根を持つ円筒タンクのスロッシング

タンク模型内に内容液を高さ 50cm まで入れ、浮き屋根を浮かべた状態 (以下屋根のみ) で 1.15Hz~1.35Hz の振動数範囲を 0.01Hz 刻みでスイープ加振実験、並びにスポット加振実験を行った。加振加速度はスロッシング時における水面の線形性を保つた

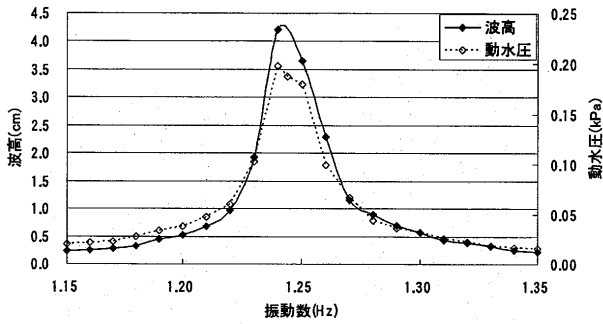


図-4 波高・動水圧共振曲線

めに2galとし、正弦波加振とした。実験結果を図-4に示す。動水圧は動水圧計④で計測された値である。1.24Hzで最大波高4.20cm、最大動水圧は0.198kPaが得られた。

4. 振り子を用いたスロッシング抑制

4.1 スロッシング抑制装置

本論文で提案するスロッシング抑制装置は、浮き屋根の下に取り付けた振り子である。この振り子には動吸振器の役割を担ってもらい、振り子が振動することにより浮き屋根のエネルギーを吸収する仕組みである。振り子の設置状況を図-5に示す。振り子に使用した糸は紡績糸（以下、糸と記す）で、浮き屋根の中心から15cmの所に120°間隔で3ヶ所に穴を開け、3本の糸を中心で結んでいる（図-3参照）。また、結んだ点から錘の中心までの長さを振り子長さとした。振り子型の動吸振器では、振り子の長さや錘の質量によってスロッシングの周期や波高（振幅）が変化すると推測され、それらの影響を確かめる必要がある。

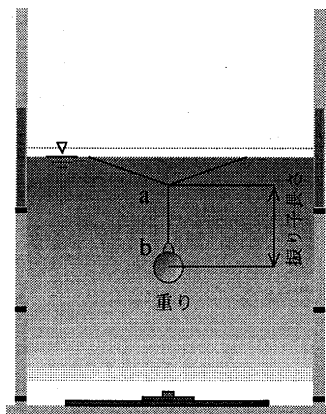


図-5 振り子設置図

4.2 分銅と糸の長さ

振り子でスロッシング波高が抑制できるか調べるために、錘に分銅を用いて振動台実験を行った。分

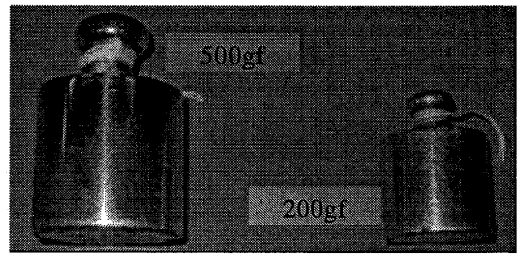


写真-3 分銅

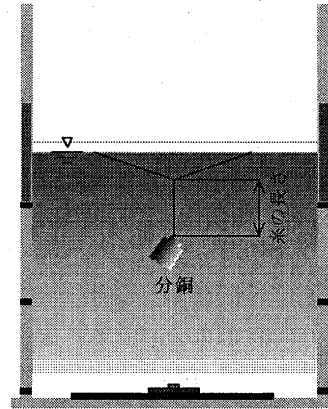
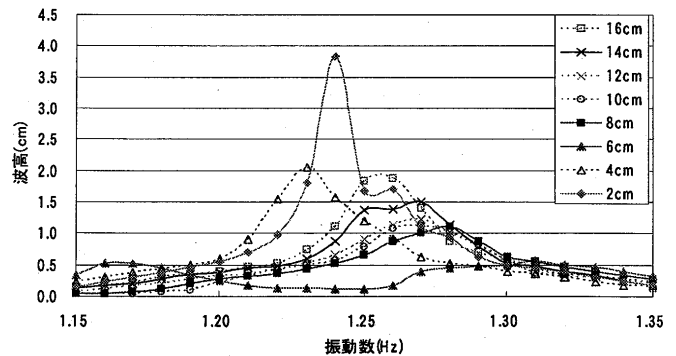
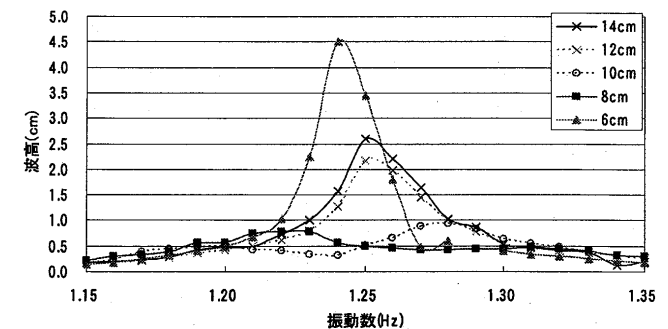


図-6 分銅設置図



(a) 分銅 500gf



(b) 分銅 200gf

図-7 波高共振曲線

銅の材質は鉄、重さは500gf、200gfの二種類で、振り子の糸（直径1.2mmの紡績糸）の長さを変えて実験した。使用した分銅を写真-3に、設置状況を図-6に示す。加振振動数の範囲は1.15Hz~1.35Hzで、

加振時間 60sec のスイープ加振とした。図-7 (a)、(b)に 500gf、200gf の結果を示す。分銅を設置すると図-6 のように分銅は斜めに傾き、正確な重心の位置が判定できないため、糸の長さをパラメータとして図示している。図-7 より、分銅 500gf、200gf 共に糸の長さに拘わらず、スロッシングを抑制できていることが判る。最も効果があったのは 500gf の分銅で糸の長さ 6cm の場合である。最大波高は 0.57cm を示した。一連の実験から、振り子を用いた抑制装置はスロッシング抑制効果のあることが判った。

4.3 振り子の種類

振り子の長さを調整しやすいように紡績糸の代わりに釣り糸に換え、重心位置を明確にするため錘を球形のスチールボールに換えた。直径 $\phi 20$ 、 $\phi 30$ 、 $\phi 40$ 、 $\phi 50$ (mm) の 4 種類のスチールボールを使用した。スチールボールには糸を結ぶための取手が付いている。また、糸を取手に結ぶ際、結び方によって振り子の長さが変わる恐れがあるため、結び目のところにサルカンを付けた。スチールボールを写真-4 に、スチールボールの諸元を表-1 に、サルカンと釣り糸を写真-5 に示す。分銅 500gf に重量に近い $\phi 50$ mm のスチールボールを用い、分銅と同様の低減効果が出るかを振動台実験で調べた。加振振動数範囲は 1.15Hz~1.35Hz で、加振時間 60sec のスイープ加振とした。実験結果を図-8 に示す。分銅で効果のあった糸の長さ (6cm、8cm、10cm) とほぼ同じ長さの糸を使用した場合の共振波高は 2.02cm となり、分銅より効果が小さくなっていることが判る。そこで、スロッシング時の浮き屋根と振り子の状況を目視で確認したところ、浮き屋根から下げている糸との接合部 (図-5 の a 点) や、糸と錘の接合部 (図-5 の b 点) でサルカンがスライドし、浮き屋根の揺れが振り子に伝達されていないことが判った。すなわち浮き屋根の振動エネルギーが振り子に伝えられていないことが判明した。

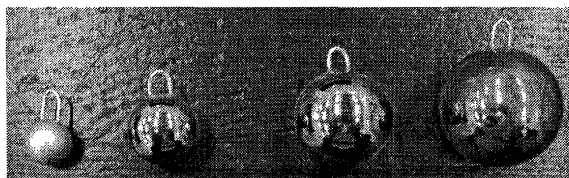


写真-4 スチールボール

表-1 スチールボールの諸元

直径 ϕ (mm)	20	30	40	50
重量W (gf)	33.0	110.8	261.2	510.3

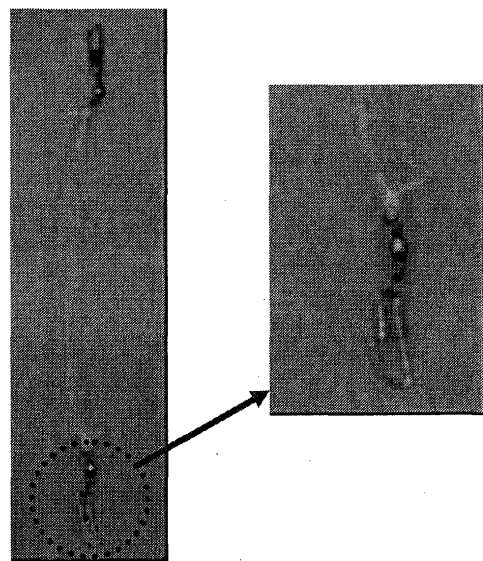


写真-5 サルカンと釣り糸

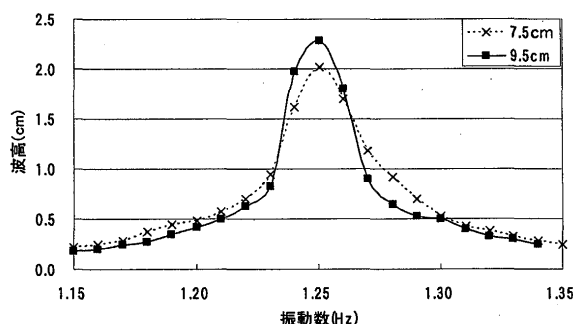


図-8 波高共振曲線 (サルカン)

4.4 振り子の構成

図-7、8の結果を考慮して、釣り糸を紡績糸に戻し、サルカンを外して図-5の a、b 部を図-6の分銅の場合と同様な結合とした。スチールボールの大きさと紡績糸の長さを組み合わせて振動台実験を行った。紡績糸とスチールボールを写真-6に、スチールボールの直径と振り子の長さの関係を表-2に示す。錘の直径をパラメータにし、加振振動数と波高・動水圧の関係を図-9 (a)、(b)に図示している。この図から、錘が重くなるほど波高・動水圧共に抑制効果が大きくなっていることが判る。最も効果があったのは、 $\phi 50$ mm で最大波高 1.10cm、最大動水圧 0.052kPa まで低減できた。この時、振り子の糸はどのスチールボールでも同じものを使用しているが、錘の直径が違うため、表-2に示す通り振り子の長さが少し違ってくる。つまり、同じ糸を使用しても錘の直径が異なるため、振り子の長さが違ってくる。したがって、図-9には錘の質量と振り子の長さの効果が同時に起きているということが判る。

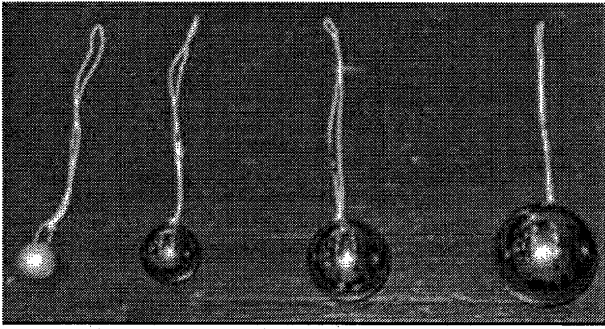
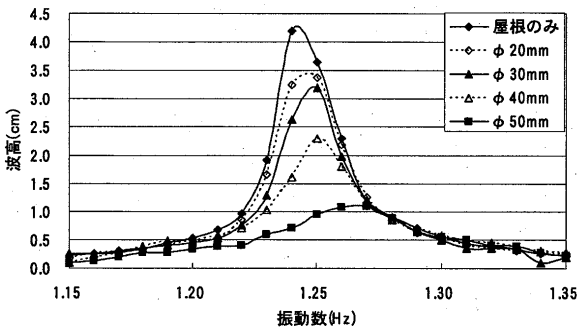


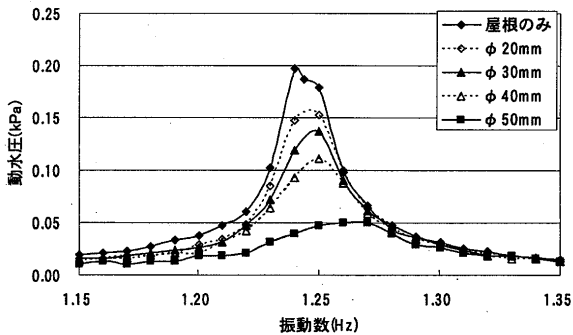
写真-6 紡績糸とスチールボール

表-2 スチールボールの直径と振り子の長さ

直径φ (mm)	20	30	40	50
振り子長さ(cm)	14.6	15.3	15.9	15.6



(a) 波高



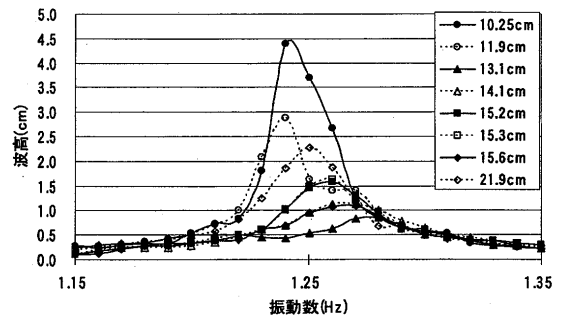
(b) 動水圧

図-9 振り子の質量

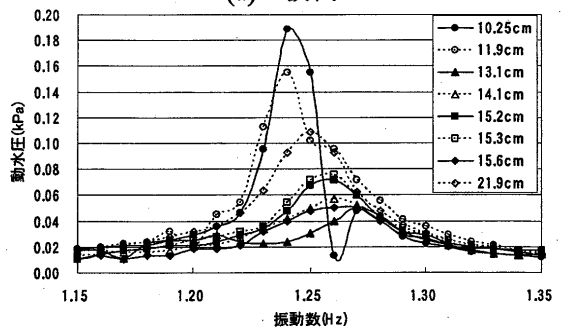
次に、φ50mmのスチールボールを用いて振り子の長さをパラメータにした場合の加振振動数と波高・動水圧の関係を図-10(a)、(b)に示す。この図から波高・動水圧は共に、ほとんどの条件で浮き屋根のみの場合よりも波高・動水圧の抑制効果があることが判った。また、波高・動水圧の共振曲線は類似したものとなっており、最大波高を示す振動数のとき、最大動水圧を生じていることが判る。最大効果は振り子長さ13.1cmの時に、最大波高0.85cm、

最大動水圧0.050kPaとなった。このことから、振り子長さの最適な長さで抑制効果があり、長すぎたり短すぎると抑制効果が得られていない。また、振り子長さが10.25cm、11.9cmの時の波高・動水圧共振曲線は、他の条件の場合とは異なり、二つの山が見られる。これは動吸振器の特徴である。このことから、浮き屋根と振り子の振動には、2自由度系動吸振器の特徴が出ている。タンク模型壁面の動水圧分布を図-11に示す。この図から、動水圧の壁面分布は高さが高い（水面に近い）ほど、動水圧が大きくなることが判る。また、抑制効果がある振り子では、どの高さ（水深）においても動水圧が小さくなることが判った。振り子長さをパラメータとし、最大波高との関係を図-12に示す。この図から、この抑制装置には使用する錘の質量によって最適な振り子長さがあり、φ50mmのスチールボールにおける最適な振り子長さは13.1cmであるということが判った。

動吸振器の最適設計³⁾では最適同調と最適減衰を備えることが要求される。本論文で提案し、実験した振り子型の場合は、最適減衰の設定は難しく、最適同調によって抑制波高が決まると考えられる。すなわち、振り子長さや錘の大きさがその鍵である。本論文では、実験によって錘の大きさが決まればスロッシング波高・動水圧を最小にする振り子長さが存在することを確かめた。今後、浮き屋根と振り子の関係について定式化を行い、最適同調を示す錘と振り子長さの関係を明らかにしていく必要がある。



(a) 波高



(b) 動水圧

図-10 振り子の長さ

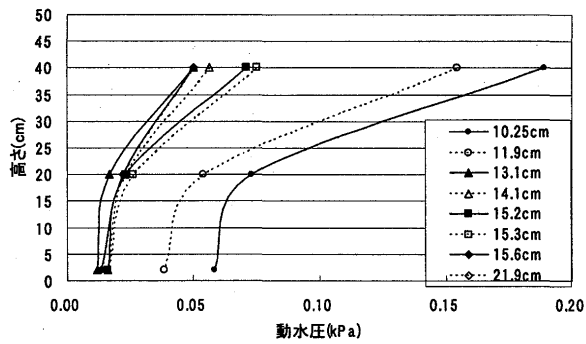


図-11 動水圧分布

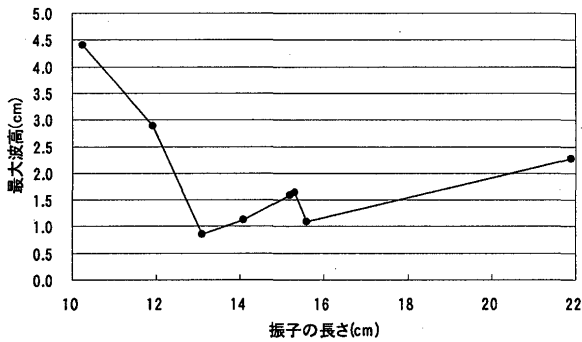


図-12 振り子の長さ と 最大波高

5. 結論

本論文では、浮き屋根にスロッシング抑制装置を取り付けた円筒タンク模型の振動台実験について述べた。以下に得られた知見をまとめる。

- ① 提案した振り子型抑制装置でスロッシング時の波高・動水圧を低減することが出来る。
- ② 浮き屋根の振動エネルギーが振り子に確実に伝達できるように、振り子の結合部に工夫が必要である。
- ③ 錘は質量が大きいと抑制効果が大きい。
- ④ 使用する錘の質量によって、最適な振り子の長さが存在する。
- ⑤ 提案の振り子型抑制装置は動吸振器の役目を果たしており、スロッシング抑制法として活用することが出来る。

参考文献

- 1) 坂井藤一：大型タンクのスロッシングに関する耐震・制振・免振等技術の現状と展望、大型タンクのスロッシングに関する耐震・制振・免振等技術のミニシンポジウム講演概要集、pp.1-9、2005年7月
- 2) 水田、川口、白地、菅付、松浦：円筒タンク模型のスロッシング波高に関する一考察、九州産業大学工学部研究報告書第42号、pp.215-212、2006年12月
- 3) 背戸一登：構造物の振動制御、コロナ社、p.39-45、2006年4月