

フローティングネットを用いた 石油タンクの液面揺動抑制装置の開発

Development of Sloshing Damping Devices for Oil Storage Tanks using Floating Nets

中南 滋樹 SHIGEKI NAKAMINAMI

谷垣 正治 MASAHARU TANIGAKI

立見 栄司 EIJI TATSUMI

鈴木 亨 TORU SUZUKI

野田 博 HIROSHI NODA

プラント部 松野 秀夫 HIDEO MATSUNO

プラント部 寒川 慎也 SHINYA SANGAWA

地震時の浮屋根式石油タンクの液面揺動による損傷対策として、フローティングネットを用いた液面揺動抑制装置を開発した。本報では、縮尺模型を用いた振動実験と実大タンクによる自由振動実験を実施し、フローティングネットの波高抑制効果を確認した。また、振幅依存性を考慮したフローティングネットの減衰定数推定式を導くとともに、本装置の設計法を提案した。

キーワード：石油タンク、液面揺動、フローティングネット、制震システム

As the sloshing resistant counter measure of oil storage tanks with floating roof at the earthquake, a sloshing damping device using the floating nets was developed. In this paper, the shaking table tests with a scale-down model tank and the free vibration tests with a real model tank were executed and the wave height control effect of the floating nets was confirmed. Moreover, the presumption equation of the damping factor of the floating nets which considered the amplitude dependency was derived and the design method of this device using the floating nets was proposed.

Key Words: Oil Storage Tanks, Sloshing, Floating Nets, Passive Response Control System

1. はじめに

2003年9月26日に発生した十勝沖地震では、苫小牧を中心に数多くの石油タンクの浮屋根が大きな損傷を受け、結果として全面火災となった事例が見られた¹⁾²⁾。これらの被害要因としては、地震の揺れに伴う内容液の液面揺動（以下、スロッシングという）やスロッシングを引き起こす数秒から数十秒の長周期の地震動が関係していると考えられている²⁾。石油タンクの損傷対策は同種事例の再発防止の観点から重要な課題となってきている。

こうした背景のなか、今日までさまざまなスロッシング防止策に関する研究・提案³⁾がなされているが、有効かつ実用的な方法の開発が望まれている状況にある。

本研究は、当社保有技術である建物の制震装置アクア

ダンパー⁴⁾の技術を応用したスロッシング抑制装置を開発し、既設タンクの制震補強または新設タンクへの設置を提案するものである。

アクアダンパーとは、建物周期と同じスロッシング周

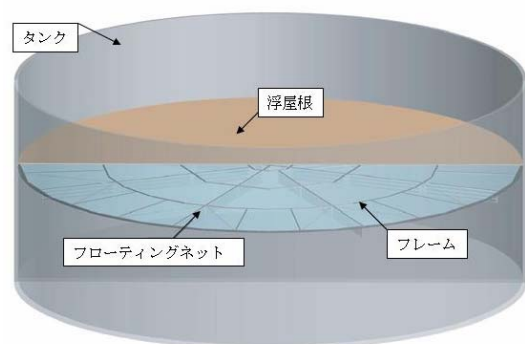


図-1 液面揺動抑制装置の概要

期をもつ直方体の水槽で水の動きに対して直交方向にネットを設置した同調系ダンパーである。石油タンクへの適用にあたっては、図-1 に示すように新たに浮屋根下に浮遊する独立したフレームを構築しフレームにネットを設置した（以下、フローティングネットという）。

本報では、石油タンクの縮尺模型を用いた振動実験を実施しフローティングネットの波高抑制効果の調査を行うとともに、振幅依存性を考慮したフローティングネットの減衰定数推定式を導いた。また、実大タンクによる自由振動実験を実施し減衰効果の確認および提案式の妥当性を検証した。

2. 実験概要

(1) 試験体

a) 模型タンク

表-1 に模型タンクの諸元を、図-2 に概要を示す。タンクは剛体、基礎固定モデルとして扱う。タンク内径 D は 3.28m、液面深さ H_l は 0.882m、内容液は水とした。対象タンクを 80m 級と 40m 級とした場合の模型タンクの縮尺はタンク内径の比で 1/25, 1/13 である。表-1 中の 1 次または 2 次スロッシング周期は式(1)⁵⁾による。

$$T_{sn} \Rightarrow \pi \sqrt{\left(\frac{D}{\epsilon_n \cdot g} \cdot \coth \left(\frac{\epsilon_n \cdot H_l}{D} \right) \right)} \quad (1)$$

ここで、 D : タンク内径 g : 重力加速度 H_l : 液面高さ ϵ_n : 1 次 3.68, 2 次 10.66

式(1) は円筒形の剛体容器内の液体を非圧縮性完全流体とし渦なしの場を考えた場合の式で浮屋根と内容液の粘性は考慮していない⁵⁾。

b) 模型浮屋根とフローティングネット

図-3 に模型浮屋根とフローティングネットの概要を示す。浮屋根の模型は厚さ 2mm のアクリル板とした。曲げ剛性や質量効果についてはフローティングネット有無の効果比較対象用とするため考慮しなかった。

表-2 に模型フローティングネットの諸元を示す。フローティングネットは、円周方向と放射状に配置されたフロート材からなる独立したフレームと減衰要素であるネットで構成されている。模型はアクリル板に直接ネットを取り付けたモデルとした。ネットは実開口率および見付面積が異なる 4 種類とした。実開口率および見付面積は抵抗要素となるフロート材やネット枠を含むものとした。等価受圧面積は加振直角方向にネットの見付面積を換算したものである。

表-1 模型タンク諸元

諸元	記号	単位	対象タンク		模型タンク
			80m級	40m級	
タンク内径	D	mm	82,000	42,640	3,280
タンク高さ	Ht	mm	30,000	15,600	1,200
液面高さ	Hl	mm	22,050	11,466	882
内容液	—	—	原油		水
液比重	ρ	—	0.828~0.887		1.00
粘性係数	μ	m/sec ²	0.00000716		0.000001
側板・底板の厚さ	ts,ta	mm	12.0~37.0, 12.0		12.0, 9.0
スロッシング周期	1次	Ts1	sec	10.88	7.85
	2次	Ts2	sec	5.58	4.03
縮尺比	Hl/D	—	1/25	1/13	—

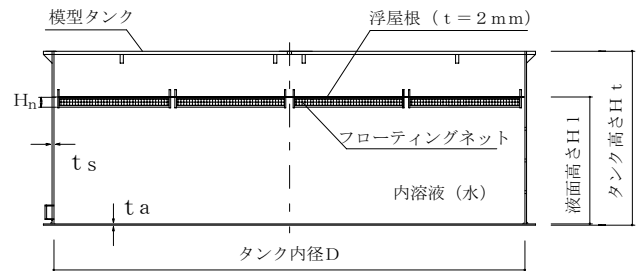


図-2 模型タンク概要図

表-2 模型フローティングネット諸元

ネット種類	ネット高さ	ネット径	ネット間隔	実開口率	見付面積(半径分)	設置数	等価受圧面積
	Hn	d	l	β'	A		
	mm	mm	mm	—	m ²		Ae
							m ²
Type1	68	0.57	3.175	0.501	0.115	8	0.471
Type2	208	0.57	3.175	0.614	0.344	8	1.412
Type3	68	0.23	0.508	0.266	0.115	8	0.471
Type4	208	0.23	0.508	0.307	0.344	8	1.412

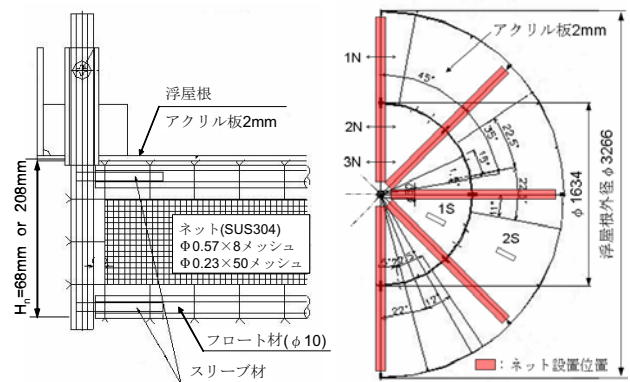


図-3 模型浮屋根・フローティングネット概要

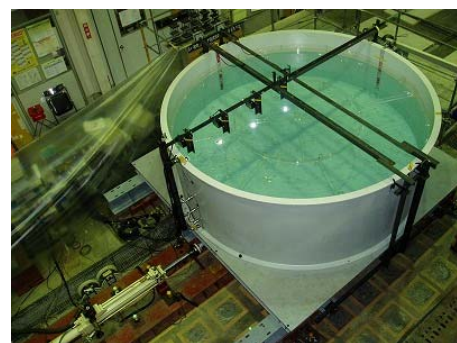


写真-1 振動台の外観写真

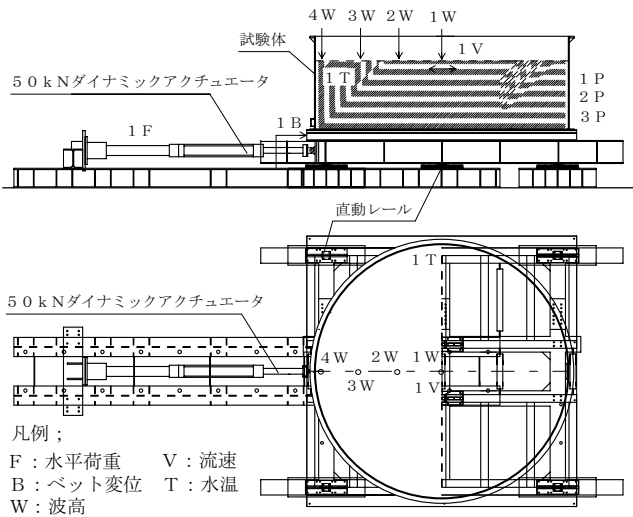


図-4 振動台概要

表-3 実験ケース

NO	実験ケース	フローティングネットの有無	底板下部支持条件	備考
1	自由振動実験	無し	固定	減衰定数の算出
		有り		
2	スイープ実験	無し	固定	固有周期の確認 減衰効果の確認
		有り		
3	ランダム加振実験	無し	固定	地震時の挙動把握
		有り		

(2) 実験方法

写真-1 に振動台の外観写真を、図-4 に概要を示す。実験は、直動レール上にセットされた振動台を 50kN ダイナミックアクチュエータ(最大荷重 50kN, 最大速度 650mm/s, 振幅±400mm)を用いて加振することとした。

計測項目は振動台の水平荷重(F), 入力変位(B), 波高(W), 圧力(P), 流速(V), 温度(T), 浮屋根のひずみ(S), フローティングネットの差圧(N)とし、図-3 および図-4 に示す位置に設置した。

表-3 に実験ケースを示す。実験ケースは自由振動実験, スイープ実験, ランダム加振実験の 3 ケースとした。実験条件は各ケースにおいて水のみ, 浮屋根のみ, フローティングネットあり(TYPE1~TYPE4)の 6 種類とした。

表-4 に自由振動実験の加振パラメータを示す。自由振動実験は振幅依存性を含めた減衰定数を把握することを目的とし、波高をパラメータに 1 次スロッシング周期(後述するスイープ試験で得られた値)で加振を行った。入力波形は正弦波とし、タンク端部の波高が目標波高に到達後加振を停止し、浮屋根のない場合(水のみの場合)には波高計により、また、浮屋根のある場合(浮屋根のみおよびフローティングネットありの場合)にはレーザー変位計により浮屋根の変位を測定し波高を求めた。

表-5 にスイープ実験の加振パラメータを示す。スイ

表-4 自由振動実験の加振パラメータ

実験条件	振動数		目標波高		
	Hz		mm		
水のみ	0.456		10,15,20,30,40,50,70,80,90,100,120		
浮屋根のみ			5,10,40,50,60,70,80,90,100		
フローティングネット			TYPE1	10,20,30,50,60	
			TYPE2	10,20,30,40,50,60	
	TYPE3	10,20,30,40,50,60			
	TYPE4	10,20,30,40,50,60			

表-5 スイープ実験の加振パラメータ

加振条件	振動数	水平振幅			
		0.15mm	0.2mm	0.3mm	0.6mm
1	0.4~1.2Hz	○	—	—	—
2	1次モードピーク	—	○	○	—
	2次モードピーク	—	—	○	○

表-6 ランダム加振実験の入力地震動

NO	観測点	成分	原波				入力波形(模型タンク用)			
			継続時間 sec	加速度 mm/s ²	速度 mm/s	変位 mm	継続時間 sec	加速度 mm/s ²	速度 mm/s	変位 mm
1	HKD129 (K-NET)	EW	290.6	729	303	283	58.1	729	60.6	11.3
2		NS	290.6	867	242	193	80.6	729	84.0	21.8
3			290.6	867	242	193	80.6	867	67.1	14.8
4		H16 *	EW	556.9	1620	324	209	111.4	1620	64.8
5	556.9			1620	324	209	154.5	1620	89.9	16.1
6	NS		556.9	1343	418	207	111.4	1343	83.6	8.3
7			556.9	1343	418	207	154.5	1343	115.9	15.9
8										

《備考》*: 某製油所における観測記録

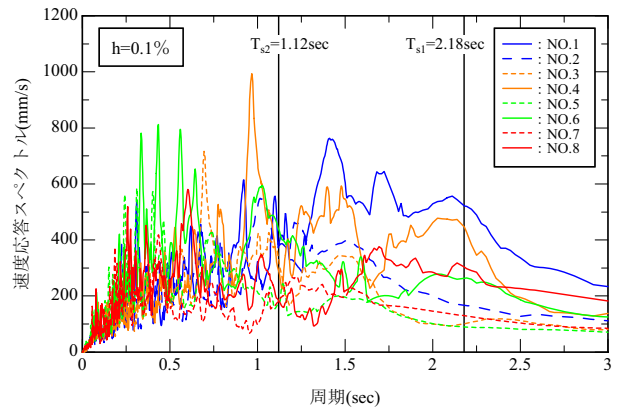


図-5 速度応答スペクトル(模型入力用)

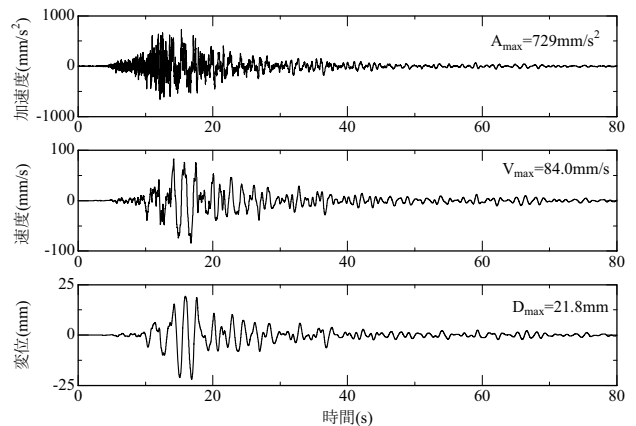


図-6 地震 NO.2 時刻歴波形(模型入力用)

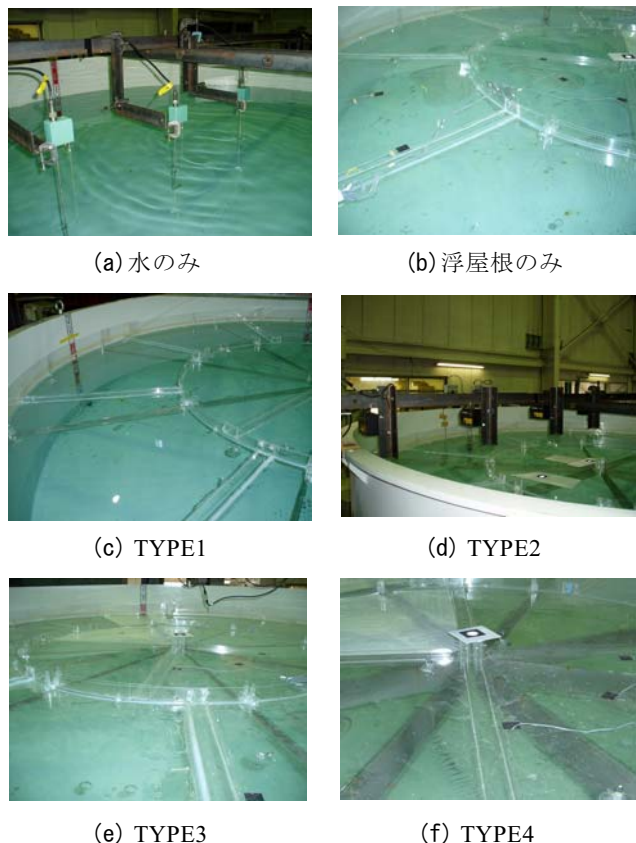


写真-2 実験状況

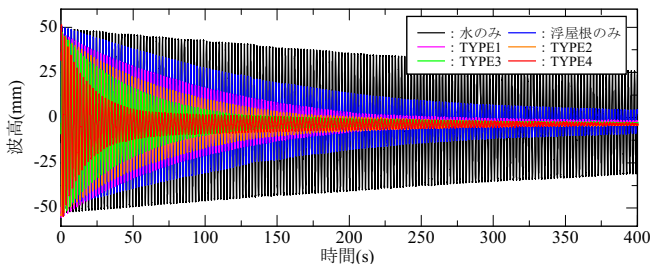


図-7 自由振動波形

ープ実験は固有周期の確認とフローティングネットの減衰効果を確認することとし、加振条件 1 では水平振幅 0.15mm、振動数 0.4~1.2Hz の範囲で 1/100~1/1000Hz 刻みで加振を行った。また、加振振幅依存性を確認するため 1 次と 2 次モードのピークで 0.2mm、0.3mm、0.6mm の振幅で行った(加振条件 2)。

表-6 にランダム加振実験の入力地震動を示す。ランダム加振実験はフローティングネットの地震時の挙動と減衰効果を確認することとした。入力地震波は 2 つの地点で観測された 2003 年十勝沖地震の EW・NS 成分の周期成分を変化させた 8 波形を採用した。図-5 に減衰定数 $h=0.1\%$ の速度応答スペクトルを、図-6 に地震 NO.2 の時刻歴波形を示す。モデルへの入力波形は加速度を実波形と同じにするため加振時間を縮尺比の逆数 L の $1/\sqrt{L}$ 、入力変位を $1/L$ とした。収録時間は 300 秒とした。

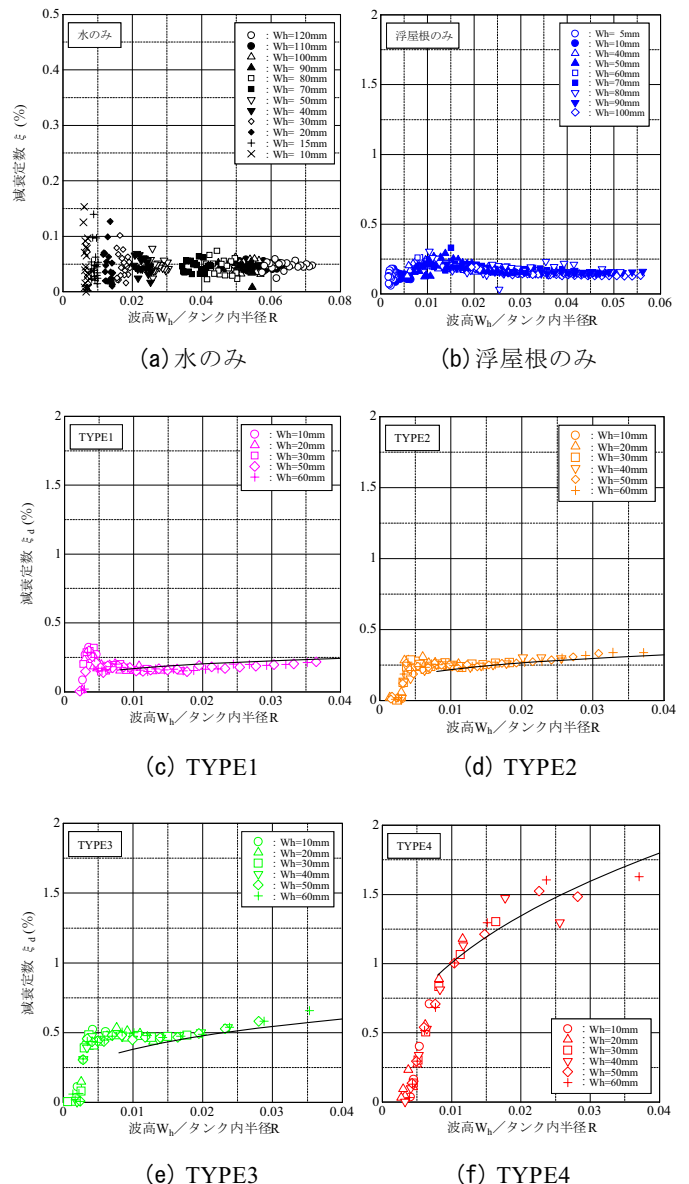


図-8 減衰定数と W_h/R との関係

3. 実験結果

(1) 自由振動実験

写真-2 に実験状況(全ケース共通)を、図-7 に代表的な結果として最大波高 50mm の自由振動波形を示す。図-8 に減衰定数と波高 W_h をタンク内半径 $R(D/2)$ で割った W_h/R との関係を示す。減衰定数は対数減衰率(サイクル数 4)により算出し目標波高ごとに加振停止後から 30 データをプロットした。波高は波の形状が凹側と凸側の平均値とした。フローティングネットの減衰定数 ξ_d は浮屋根のみの場合の減衰定数を差し引いた値とした。減衰定数は水のみで約 0.05%、浮屋根のみで約 0.20%、TYPE1 で 0.15~0.20%、TYPE2 で 0.25~0.35%、TYPE3 で 0.45~0.65%、TYPE4 で 1.00~1.65%であった($W_h/R > 0.01$)。減衰定数の振幅依存性は水のみと浮屋

根のみの場合ではほとんど見られなかったが、フローティングネットの抵抗力が大きいタイプほど顕著に見られた。 ξ_d と W_h/R と関係式をフローティングネットの特性を表す指標である $C_D \cdot Ae/R^2$ をパラメータとして、実験結果を回帰させて式(2)に示す。式(2)の適用範囲は実験データを鑑みて $W_h/R > 0.01$ とした。

$$\xi = \left[0.44 \cdot \exp^{0.77 \left(\frac{C_D \cdot Ae}{R^2} \right)} \right] \left(\frac{W_h}{R} \right)^{0.05 \cdot \text{Log}_e \left(\frac{C_D \cdot Ae}{R^2} \right) + 0.24} \quad (2)$$

$$C_D = \frac{1}{\beta} \cdot \left(1 - \beta \right) \cdot \beta^2 \cdot R_{ed}^{-1/3} \quad R_{ed} = \frac{u \cdot d}{\beta \cdot \nu}$$

ここで、 W_h : 波高 R : タンク内半径 C_D : 抵抗係数
 Ae : 等価受圧面積 β : 実開口率 R_{ed} : メッシュ径を考慮したレイノルズ数 u : 流速(式(4)による)
 d : メッシュ径 ν : 動粘性係数

(2) スイープ実験

図-9 に図-4 における測定点 1W~4W の振幅比(振動台の水平変位に対する波高の比)と振動数の関係を示す。図のプロットは各振動数において波高の時刻歴が定常状態になったときの平均値である。水のみ の 1 次と 2 次スロッシングのピーク振動数は 0.455Hz と 0.892Hz であり理論値(1 次固有振動数 $f_1=0.458\text{Hz}$, 2 次固有振動数 $f_2=0.892\text{Hz}$)との差異は小さい。フローティングネットの付加減衰は最大 2%程度であり 2%の減衰による固有周期の変化は $1/\sqrt{1-\xi}$ から 0.0004 と極めて小さく、

実験値と理論値との差異は減衰による影響ではないと考えられる。以後、本装置の減衰による固有周期の変化はないものとして考察を行う。2 次スロッシングではネットを設置することによりピークが高振動数に移行している。

図-10 に波高モード図を示す。モード図は波高最大時における 4 点での波高測定値を示しており、振幅を 5 倍して表示している。浮屋根を設置することにより 2 次モードが大幅に小さくなっているのがわかる。図-11 に浮屋根のみの場合の波高に対する各タイプの波高の比(波高比)を示す。2 次スロッシングでは明確な効果が見られないが、1 次スロッシングでは振動台の水平変位が大きくなるにつれて、フローティングネットによる波高抑制効果が大きくなっている。

(3) ランダム加振実験

表-7 に各実験条件における最大・最小値を示す。最大・最小値の発生時刻は、各ケースにおいて一致していない。表中の()は浮屋根のみに対する最大・最小値の比率(波高比)を示している。図-12 に代表的な結果とし

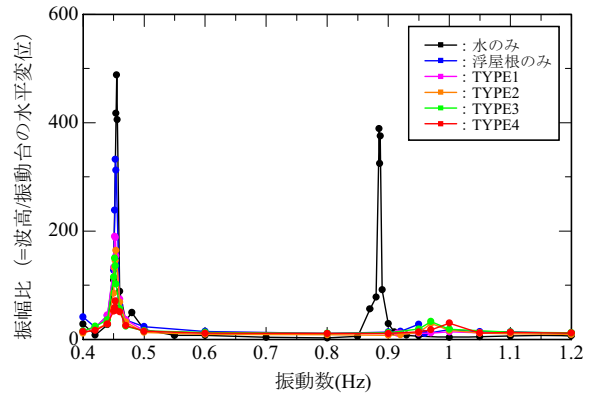
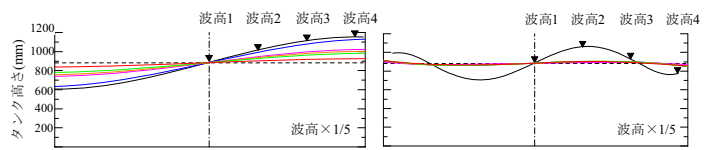
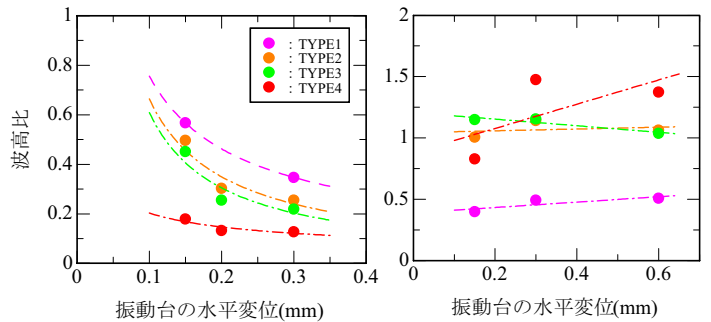


図-9 振幅比と振動数の関係



(a) 一次スロッシング (b) 二次スロッシング

図-10 波高モード図



(a) 一次スロッシング (b) 二次スロッシング

図-11 波高比

表-7 ランダム加振実験結果

実験条件	観測点: HKD129(K-net)								
	EW成分				NS成分				
	NO.1		NO.2		NO.3		NO.4		
	max	min	max	min	max	min	max	min	
水のみ	52.3	-62.2	-	-	92.1	-83.1	-	-	
浮屋根のみ	37.3	-35.7	208.5	-144.8	26.6	-31.6	174.1	-145.3	
フローティングネット	TYPE1	32.5 (0.87)	-45.7 (1.28)	177.1 (0.85)	-135.3 (0.93)	23.8 (0.89)	-27.9 (0.88)	68.0 (0.39)	-137.3 (0.95)
	TYPE2	35.4 (0.95)	-36.9 (1.03)	168.3 (0.81)	-127.5 (0.88)	26.6 (1.00)	-27.6 (0.87)	147.3 (0.85)	-131.7 (0.91)
	TYPE3	28.5 (0.76)	-37.6 (1.05)	149.65 (0.72)	-121.5 (0.84)	25.2 (0.95)	-28.8 (0.91)	138.1 (0.79)	-126.0 (0.87)
	TYPE4	27.2 (0.73)	-37.0 (1.04)	133.7 (0.64)	-105.9 (0.73)	21.3 (0.80)	-26.4 (0.84)	117.0 (0.67)	-109.7 (0.76)
実験条件	観測点: H16								
	EW成分				NS成分				
	NO.5		NO.6		NO.7		NO.8		
	max	min	max	min	max	min	max	min	
水のみ	28.8	-25.3	-	-	43.6	-35.7	-	-	
浮屋根のみ	24.6	-31.2	113.2	-97.2	39.1	-30.0	156.0	-119.9	
フローティングネット	TYPE1	25.7 (1.05)	-28.5 (0.91)	106.0 (0.94)	-89.5 (0.92)	38.0 (0.97)	-28.6 (0.95)	130.0 (0.83)	-132.2 (1.10)
	TYPE2	25.5 (1.04)	-27.4 (0.88)	97.9 (0.86)	-88.2 (0.91)	36.7 (0.94)	-30.2 (1.01)	119.5 (0.77)	-97.5 (0.81)
	TYPE3	29.3 (1.19)	-28.4 (0.91)	94.7 (0.84)	-87.5 (0.90)	38.4 (0.98)	-28.9 (0.96)	107.4 (0.69)	-88.4 (0.74)
	TYPE4	-	-	85.8 (0.76)	-73.5 (0.76)	-	-	81.1 (0.52)	-74.5 (0.62)

て地震 NO.2 の各実験条件の波高時刻歴を示す。浮屋根のみの場合の最大値 208.5mm の発生時刻は 49 秒であり、後揺れによる波高の増長が見られている。一方、フローティングネットあり(TYPE4)の最大値 137mm の発生時刻は 19 秒であり、地震の主要動で最大値が発生している。フローティングネットなしでは加振から終了 200 秒以上を過ぎても波高が約 50mm であったのに対して、フローティングネットありでは加振終了時間 80.6 秒にはほぼ波高は 0 になっている。全試験結果で最も効果のあった TYPE4 の波高比は発生時刻の異なる最大値での評価で 0.52、主要動部分の評価で 0.85 であった。

(4) フローティングネットの抵抗力

フローティングネットの抵抗力は式(3)(機械便覧による)で表される。

$$F_R = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho u_i^2 \cdot Ae \quad (3)$$

ここで、 C_D : フローティングネットの抵抗係数

ρ : 密度 u_i : i 方向流速 Ae : 等価受圧面積

C_D 算出の際に必要な最大流速 u_{max} は微小振幅を想定した速度ポテンシャル理論による式(4)で表される。

$$u_{max} = K \cdot \left(\frac{g \cdot \eta_{max}}{\omega} \right) \quad (4)$$

ここで、 K : 波数(= $2\pi/\lambda$) λ : 波長 g : 重力加速度

ω : 角振動数(= $2\pi/T$) T : スロッシング周期

η_{max} : 最大波高(波の片振幅)

図-13 に最大流速 u_{max} と最大波高 η_{max} との関係を示す。図-13(a) 中の直線は式(4)による理論値であり、プロットは水のみの場合の流速計と波高計の値である。実験値と理論値はおおむね一致しており u_{max} と η_{max} は線形関係とみなせる。図-13(b) に u_{max} と η_{max} の関係における抵抗係数依存性を示す。図中には抵抗係数が $C_D=0.6$ と 1.0 の 2 つ異なるデータ(解析値⁶⁾)をプロットしており、抵抗係数の違いによる u_{max} と η_{max} の関係に大きな差異は見られない。よって、フローティングネットを設置したときの u_{max} の算定も式(4)が成り立つものと考えられる。

4. フローティングネットの設計法の提案

(1) 設計フロー

図-14 にフローティングネットの設計フローを示す。推定手順を以下に示す。

STEP1: 対象タンクの 1 次と 2 次スロッシング周期 T_{s1} , T_{s2} を式(1)により算定する。

STEP2: 対象地域の液高制限に応じて目標波高 W_l を設定

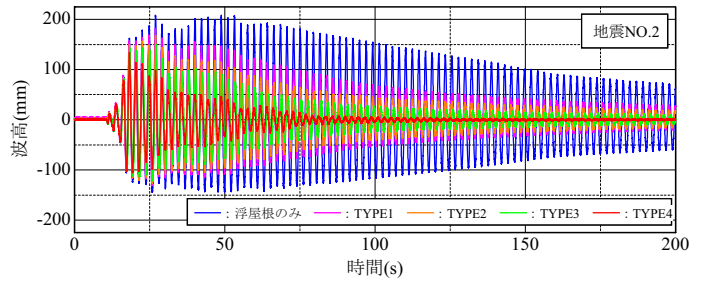
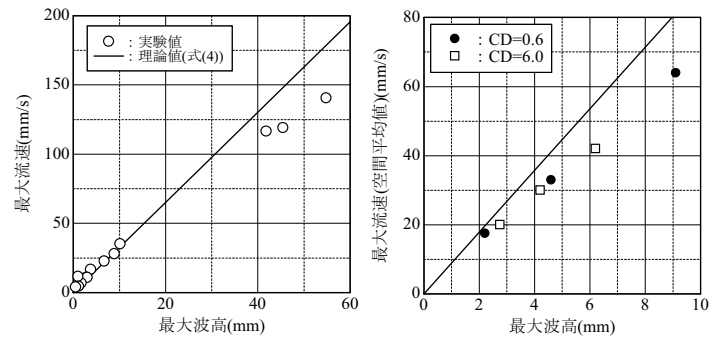


図-12 ランダム加振結果(地震 NO.2)



(a) 式(4)と実験値の比較

(b) 抵抗係数依存性

図-13 最大流速と最大波高の関係

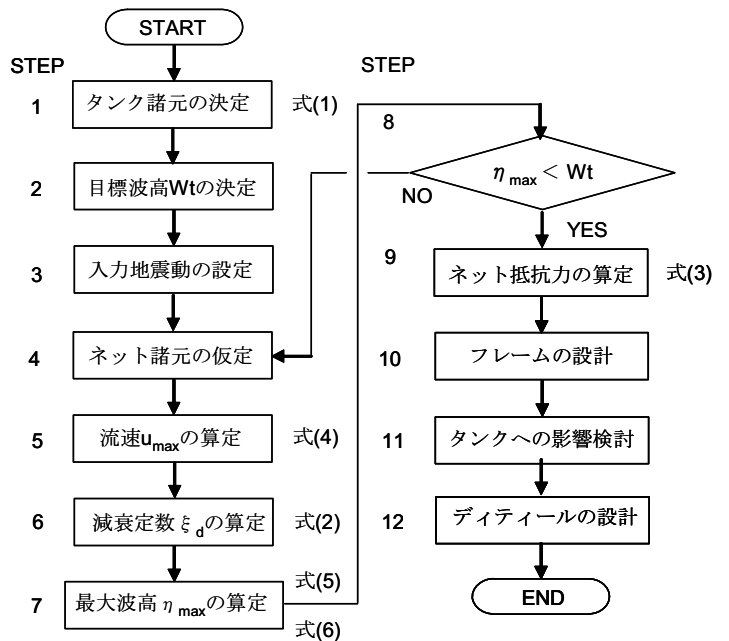


図-14 フローティングネットの設計フロー

する。

STEP3: 入力地震動を設定する。一般的には、地域特性を考慮した告示波¹⁾が利用できる。

STEP4: フローティングネットの等価受圧面積 A_e , 実開口率 β' を仮定する。

STEP5: 目標波高 W_l 時の最大流速 u_{max} を式(4)により算定する。

STEP6: フローティングネットの抵抗係数 C_D および減衰定数 ξ_d を式(2)または実験により求める。

STEP7: 1次と2次スロッシング時の最大波高を式(5)⁵⁾により算定し、最大波高 η_{max} を式(6)¹⁾により算定する。ここで、速度応答スペクトルはSTEP6で求めたフローティングネットの ξ_d を用いる。

$$\eta_{max}^{(n)} = \frac{D}{2 \cdot g} \cdot \frac{2}{\xi_n^2} \cdot \left(\frac{2\pi}{T_n} \right) S_v \quad (5)$$

ここで、 D : タンク内直径 g : 重力加速度 ξ_n :
1次 1.841, 2次 5.331 T_n : n 次スロッシング周期
 S_v : 速度応答スペクトル

$$\eta_{max} = \sqrt{(\eta_{max}^{(1)})^2 + (\eta_{max}^{(2)})^2} \quad (6)$$

ここで、 $\eta_{max}^{(n)}$: n 次モードの最大波高

STEP8: 最大波高 η_{max} が目標波高 W_l 以下になるまでSTEP4~STEP7を繰り返す。

STEP9~STEP12: フローティングネットの抵抗力を式(3)により算定しアルミフレーム材の設計、浮力の検討等タンクへの影響検討、およびディテールの設計を行う。

(2) 既往式の適用検証

浮屋根のみの場合の最大波高の推定は $h=0.5\%$ のときの速度応答スペクトルを用いて式(5)で求めるのが一般的である¹⁾²⁾。ここでは、同様にフローティングネットを用いた場合の最大波高の推定も式(5)で推定可能か検証を行った(STEP7の検証)。

検証用データはランダム加振実験結果とし、モード毎の減衰定数の算定値はRD法⁷⁾(Random decrement technique)による自由減衰波形に対して極大値を結ぶ包絡線を指数関数で最小2乗近似して求めた。時刻歴波形のモードごとへの分離方法は、対象とする振動数を中心にその前後のフーリエスペクトルが谷間となるように設定し、それ以外の不要な振動数成分を $1/1,000$ にして求めた。図-15にモード分離した時刻歴波形例を示す。対象波形は図-4における測定点1W~3Wの3つの測定点における振幅波形とし、小サンプルの長さは対象モードの固有周期の10倍とした。重ね合わせの方法は極大値を始点としてデータのピークをずらせながら重ね合わせる時間平均型とした。図-16にRD法による自由減衰波形例を示す。図-17に計算値と実験値の比較を示す。計算値はRD波形より得られた1次・2次モードの減衰定数と振動台の入力波形の速度応答スペクトルによりモードごとの最大波高を求め、式(6)により重ね合わせた。計算値と実験値はおおむね一致しており、フローティングネットを用いた場合も既往式が適用可能である。

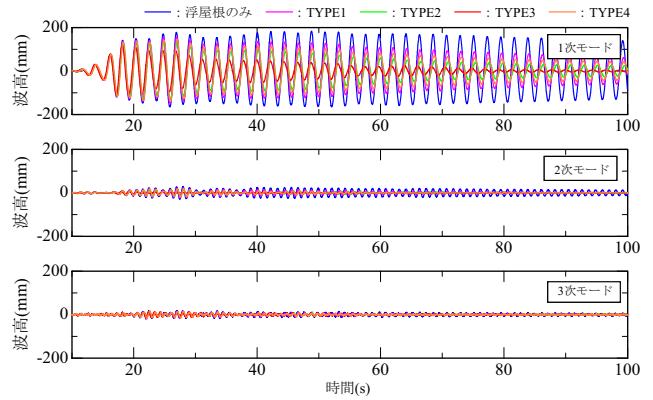


図-15 モードごとの波高時刻歴例(地震NO.2)

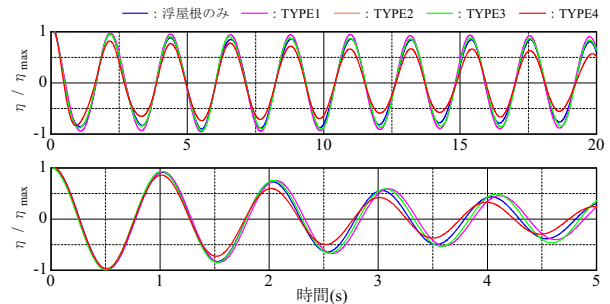


図-16 RD自由減衰波形例

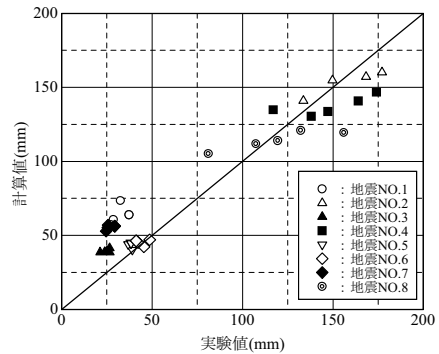


図-17 計算値と実験値の比較

表-8 実大タンク諸元

諸元	記号	単位	数値	
タンク内径	D	mm	15,523	
タンク高さ	H	mm	10,715	
液面高さ	H _l	mm	8,000	
内溶液	—	—	海水	
スロッシング周期	1次	T _{s1}	sec	4.21
	2次	T _{s2}	sec	2.42

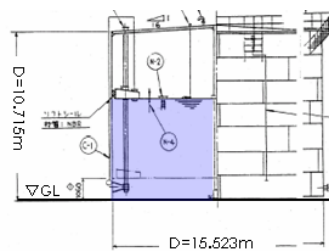


図-18 タンク概要図



写真-3 外観写真

表-9 フローティングネット諸元

諸元	記号	単位	数値
ネット径	d	mm	0.23
ネット間隔	l	mm	0.508
実開口率	β'	—	0.423
見付面積(半径分)	A	m ²	7.839
設置数	—	—	8
等価受圧面積	Ae	m ²	27.05



写真-4 フローティングネット組立状況

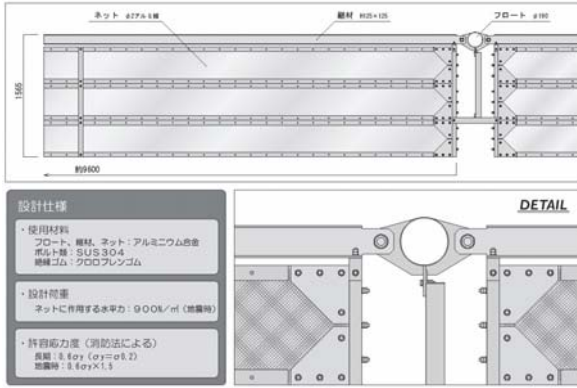


図-19 フローティングネット概要図



写真-5 人力加振状況

写真-6 気泡注入用シリンダー弁

5. 実大タンクの自由振動実験⁸⁾⁹⁾

(1) 実大タンク概要

表-8 に実大タンクの諸元を、図-18 に概要を、写真-3 に外観写真を示す。本タンクは固定屋根付きシングルデッキ型浮屋根式石油タンク(容量 1,600kL)である。タンク中心には固定屋根の支持のためのセンターポールが、北東位置には梯子兼用のガイドポールが1本設置されている。デッキ板とボンツーンの主材は厚さ 4.5mm の軟鋼である。浮屋根外周に設置されているチューブシールは機能しないように取り外した。内容液には海水を用い水深は 8m とした。1 次スロッシング周期は 4.21 秒, 2 次スロッシング周期は 2.42 秒である。

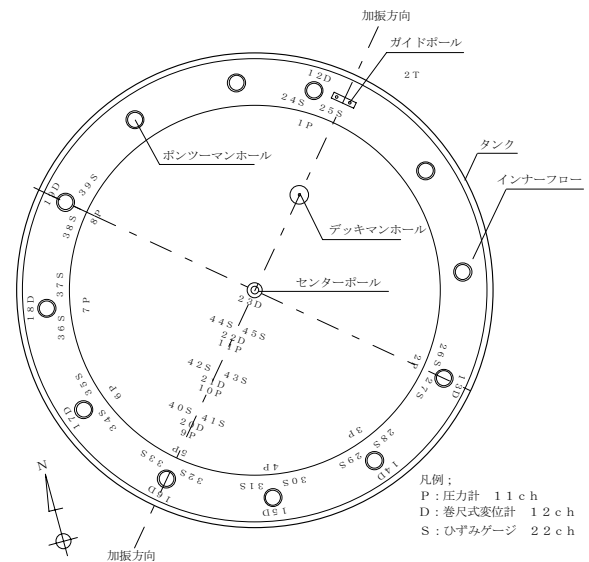
(2) フローティングネット概要

表-9 にフローティングの諸元を、図-19 に概要を、写真-4 に組み立て状況を示す。フローティングネットは図-20 に示す位置に設置した。

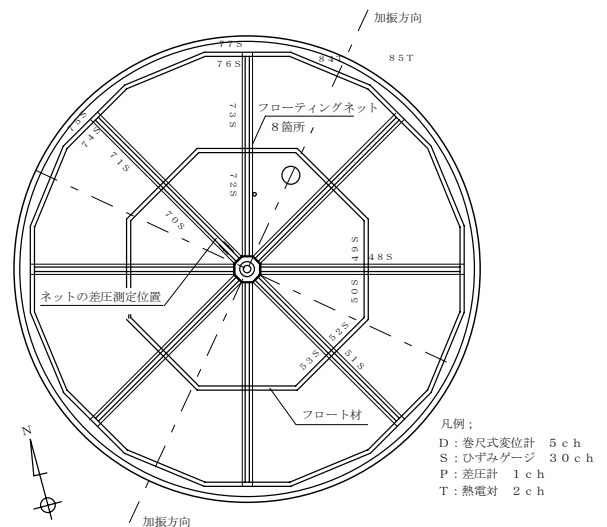
(3) 実験概要

表-10 に実験パラメータを示す(全 20 ケース)。

浮屋根のスロッシング励起は、梃子の原理を利用した人力加振, 気泡注入による加振および人力と気泡注入による同時加振の 3 種類とした。写真-5 に人力加振状況を、写真-6 に気泡注入用シリンダー弁を示す。人力加振は長さ 2m 程度の単管を用いて、ガイドポール脇に設



(a) 浮屋根(インナーフロート)部分



(b) フローティングネット部分

図-20 センサー取り付け位置

置した高さ 1m 程度の架台を作用点とし、単管を梯子の横棧に引っ掛けて支点とした。加振はスロッシング波高が目標値に達するまで繰り返した。目標値に到達後加振を止めその後の時刻歴波形を計測した。フローティングネットの有無で同条件とするため、目標波高はフローティングネットの有無で同じとした。気泡注入による加振方法は側板下部バルブからコンプレッサーの空気を 1 次スロッシング周期で放出し液面を揺動させた。加振パラメータはバルブ数と空気の放出時間とした。

図-20 にセンサー取付位置を示す。計測項目は、波高(D)、浮屋根各部のひずみ(S)、動液圧(P)、水温(T)、ネットの差圧(N)とした。本報では主に波高と減衰定数について考察を加える。

(4) 実験結果

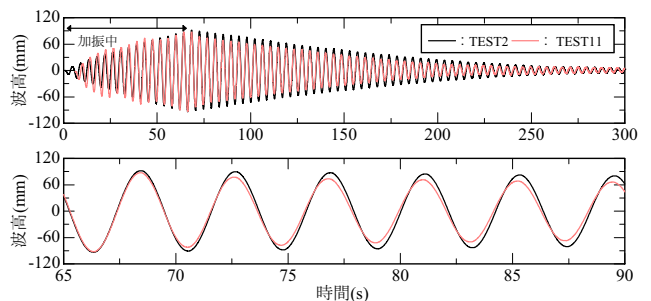
図-21 に代表的な波高時刻歴の比較(人力加振：TEST2 と TEST11, 気泡注入による加振：TEST3 と TEST12)として図-20 における測定点 16D の巻尺式変位計による測定結果を示す。上段図は収録全データを、下段図は加振停止後 5 波までの自由振動波形を示している。

最大片振幅は浮屋根のみの場合では TEST9 の 109mm、フローティングネットありでは TEST20 の 174mm であった。減衰定数は図-20 における 9 つの計測点 12D,14D,15D,16D,17D,18D,20D,21D,22D のデータを使用し、加振後 5 波のデータを最小 2 乗法により近似させて求めた。人力加振時の減衰定数は、浮屋根のみの場合で 0.39%~0.46%、フローティングネットありで 0.84%~0.95%であった。気泡注入による加振時の減衰定数は 1.11%~2.64%であり、人力加振時より大きな値であった。これは注入による加振時のエアが浮屋根下に溜まった影響によるものと考えられる。気泡注入による加振は入力条件が同じなので、フローティングネット有無による波高の比(波高比)はフローティングネットの減衰効果によって生じていると考えられる。表-11 に図-20 における測定点 12D, 16D の波高比と減衰定数の関係を示す。表中の両振幅とは中立軸からの値である。データはバルブ 1 基のものとし、バルブ 2 基のデータは対象外とした。波高比は約 0.7 であり、小振幅($W_h/R=0.052\sim0.097$)領域における本装置の波高抑制効果が確認された。

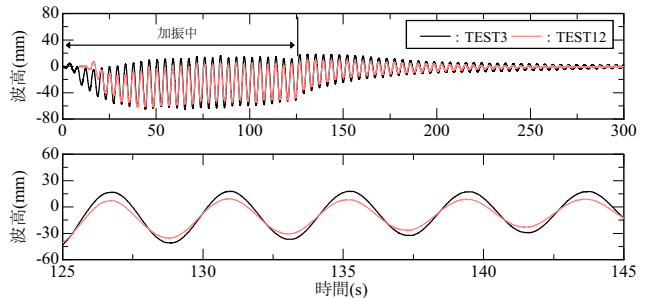
図-22 に人力加振時における減衰定数と W_h/R との関係を示す。フローティングネットの減衰定数は浮屋根のみの場合の減衰定数を差し引いたものである。フローティングネットの減衰定数 ξ_d は W_h/R が 0.01 以上では 0.3~0.5%程度であった。図-23 に式(2)による減衰定数と実験値との比較を示す。図中には $C_D \cdot Ae/R^2=0.1\sim3.5$ の減衰定数曲線と本実験に使用したフローティングネッ

表-10 実験パラメータ

ネット有無	TEST#	加振方法		加振時間(sec)	自由振動時間(sec)	収録時間(sec)	
		人力	気泡注入放出時間(sec)				
			バルブ1	バルブ2	(sec)	(sec)	(sec)
無	TEST1	○	×	×	70	350	420
	TEST2	○	×	×	70	300	370
	TEST3	×	1.00	1.00	120	180	300
	TEST4	×	1.25	1.25	120	180	300
	TEST5	×	1.50	1.50	120	180	300
	TEST6	×	×	1.00	120	180	300
	TEST7	×	×	1.25	120	180	300
	TEST8	×	×	1.50	120	180	300
	TEST9	○	×	1.25	60(気泡,人力)+60(人力)	300	420
有	TEST10	○	×	×	70	350	420
	TEST11	○	×	×	70	350	420
	TEST12	×	1.00	1.00	120	300	420
	TEST13	×	1.25	1.25	120	300	420
	TEST14	×	1.50	1.50	120	300	420
	TEST15	×	×	1.00	120	300	420
	TEST16	×	×	1.50	120	300	420
	TEST17	×	×	1.50	120	300	420
	TEST18	○	×	1.25	60(気泡,人力)+60(人力)	300	420
	TEST19	○	×	×	120	300	420
	TEST20	○	×	×	120	780	900



(a) 人力加振



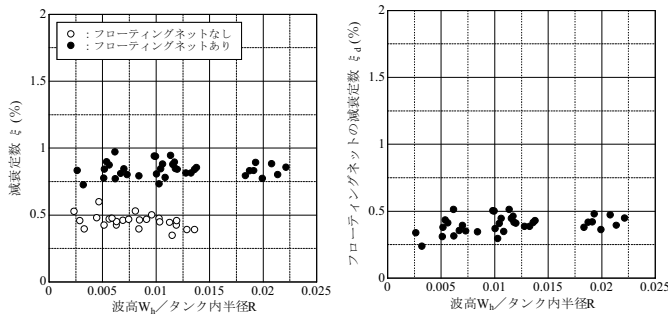
(b) 気泡注入による加振

図-21 波高時刻歴

表-11 気泡注入による加振時の波高比

ネット有無	TEST#	変位計12D			変位計16D		
		両振幅(mm)	減衰定数(%)	波高比	両振幅(mm)	減衰定数(%)	波高比
なし	TEST3	69.4	1.27	0.752	75.6	1.11	0.754
あり	TEST12	52.2	1.87		57.0	1.62	
なし	TEST4	74.2	1.40	0.687	80.2	1.27	0.696
あり	TEST13	51.0	2.05		55.8	1.57	
なし	TEST5	55.0	1.22	0.735	60.8	1.42	0.951
あり	TEST14	40.4	1.41		57.8	2.64	

トの減衰定数曲線 ($C_D \cdot Ae/R^2=1.20$ (Red=60 時))を示している。式(2)による設計値と実験値はおおむね一致しており、実機においても式(2)が適用可能であることがわかった。また、前述のとおりフローティングネットの減



(a) 浮屋根のξを含む (b) 浮屋根のξを含まない
 図-22 減衰定数と W_h/R の関係

減衰定数は振幅依存性を有しているため、 W_h/R が 0.022 より大きい場合は、より大きな波高抑制効果を期待できるものと考えられる。

6. まとめ

フローティングネットを用いた縮尺模型実験および本装置を実大タンクに適用した自由振動実験の結果、以下に示す知見が得られた。

- ①フローティングネットの減衰効果は、ネットの抵抗係数(実開口率, レイノルズ数), 等価受圧面積, タンクの内径および加振振幅に依存するが, 共振振動からランダム振動に対してタンクの液面揺動を抑制する。
- ②減衰特性は, 加振振幅が大きくなるほど減衰性が増加する振幅依存性を示す。この傾向はフローティングネットの抵抗力が大きいタイプほど顕著である。本論文で提案した式(2)によると, 振幅依存性を考慮したフローティングの減衰定数を推定することが可能である。
- ③フローティングネットを用いた本制震システムは, タンクの特性と目標波高および入力レベルに応じて, フローティングネットの抵抗係数, 等価受圧面積を適宜選択することにより最適な制震効果が得られる。
- ④実大タンクによる自由振動実験により小振幅時におけるフローティングネットの減衰効果を確認した。また, 式(2)の妥当性を検証した。

今後の課題として, フローティングネットの抵抗力が浮屋根および側壁へ及ぼす影響を, 実験結果とシミュレーションにより検討する計画である。

謝辞: 本研究を行うにあたり神戸大学中山昭彦教授からご指導頂きました。また, (株)住軽日軽エンジニアリングの若林良樹様からは本装置の製作について多大

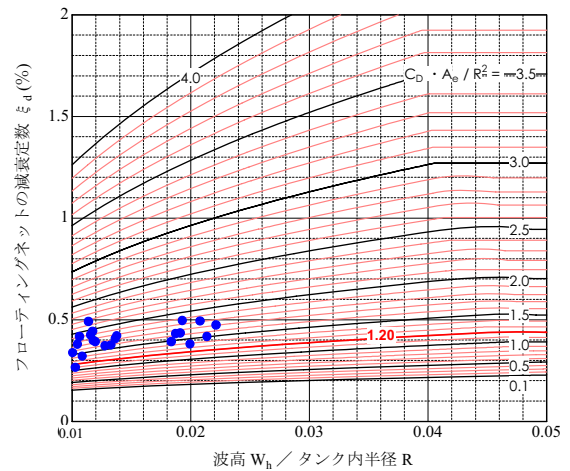


図-23 式(2)による減衰定数と実験値との比較

な協力を頂きました。本研究で用いた 2003 年十勝沖地震 (HKD129)の強震記録は防災科学技術研究所の K-NET の提供によりました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 危険物保安技術協会: 屋外タンク貯蔵所浮屋根審査基準検討会報告書, 2004.9
- 2) 畑山健ほか: 2003 年十勝沖地震による周期数秒から十数秒の長周期地震動と石油タンクの被害, 地震, 第 57 巻, 第 2 号, 2004.12
- 3) 坂井藤一ほか: 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資料, 土木学会, 2005.7
- 4) 野路利幸ほか: 水のスロッシングを利用した制振装置の研究(その 1) 装置の流体力特性と制振効果の特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 411 号, pp.97~105, 1990.5
- 5) 坂井藤一: 円筒形液体タンクの耐震設計法に関する 2,3 の提案, 圧力技術, 18, pp.16~23, 1980
- 6) 野田博ほか: LES による液体スロッシングダンパーの再現, 三井住友建設技術研究所報告, 第 4 号, 2006
- 7) 田村幸雄ほか: RD 法による構造物のランダム振動時減衰評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 454 号, pp.29~38, 1993.12
- 8) 廣川幹浩ほか: 石油タンクのスロッシングの減衰定数, 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資料, pp.23~26, 2005.7
- 9) 西 晴樹: 実タンクによるスロッシング挙動, 第 9 回消防防災研究講演会資料, pp.19~32, 2006.2