

日立造船 中垣亮二 ニチゾウテック ○植田利夫 有馬健次 加道博章

1. まえがき 最近, 高層ビル, 観光タワーなどの風・地震による振動を抑制する方法として直方体タンクあるいは円筒容器内の液体のスロッシング現象を利用する Tuned Sloshing Damper(TSD), あるいは, Tuned Liquid Damper(TLD) などと称される制振装置が採用されている。TSD(あるいはTLD)は, 同じく各種の構造物の制振装置に活用されている Tuned Mass Damper(TMD)と同様ダイナミックダンパーの一種で, TMDに比べて構造的には簡単で, スロッシング時の質量効果, 周波数, 減衰性能の評価が明確になれば, 応用範囲がさらに広がる期待される。本文では, 直方体タンクのTSD単体の性能実験からスロッシング現象の特性, 減衰の評価法, 減衰性能増大法, また, TSD搭載塔構造模型実験から制振効果の推定法を検討した結果を述べる。

2. TSDの振動特性 液体として水を用い, 長さ $a=30, 60, 90, 120\text{cm}$, 幅 $b=30\text{cm}$, 水深 $h=5, 10, 15\text{cm}$ のTSDを振動台に載せ, 振幅 $X=0.5\sim 4\text{cm}$ の定常加振時のスロッシング波高 η の共振応答からスロッシング特性を検討した。

2.1 スロッシング周波数の評価 スロッシング周波数 f_m は微小振幅波としてポテンシャル理論より, $f_m = \sqrt{g\alpha \tanh \alpha h / 2\pi}$, $\alpha = m\pi/a$ ($m=2n-1, n=1, 2, 3, \dots$) ----- (1) ここで, g : 重力加速度, として与えられる。各周波数は $\pm 2\%$ の誤差範囲内で(1)式により推定できることを確認した。ダイナミックダンパーにおいて任意の質量比に対して制振効果を大きくするためには最適周波数にtuningすることが重要なポイントであり, タンク長 a , 水深 h を微調整することにより十分に対応しうることがわかった。

2.2 スロッシングの減衰性能の評価 松浦・有馬等⁽¹⁾は波高 η の共振応答を(2)式のように求めている。

$$\eta/X = \frac{a\omega^2}{g} \sqrt{\left\{ 1 - \frac{4}{\pi^2} \sum_m \frac{1}{m^2} \frac{\omega^2(\omega_m^2 - \omega^2)^2}{(\omega_m^2 - \omega^2)^2 + \lambda^2 \omega^2} \right\}^2 + \left\{ \frac{4}{\pi^2} \sum_m \frac{1}{m^2} \cdot \frac{\lambda \omega^3}{(\omega_m^2 - \omega^2)^2 + \lambda^2 \omega^2} \right\}^2} \quad \text{----- (2)}$$

ここで, ω : 加振周波数, $\omega_m = 2\pi f_m$, λ : 流体の速度に比例する抵抗力に関する係数

また, 松浦・有馬等⁽¹⁾は G.W.Housner⁽²⁾の考え方を発展させて, 直方体内のスロッシングを(3)式のように等価な多質点系モデルに置換している。

$$\begin{aligned} \text{固定液質量} \quad M_o &= \rho a b h \left[1 - \frac{8}{\pi^2 h} \sum_m \frac{\tanh \alpha h}{m^2 \alpha} \right] & \text{等価ばね定数} \quad K_m &= M_m \omega_m^2 \\ \text{変動液質量} \quad M_m &= \rho a b h \cdot \frac{8}{\pi^2 h} \sum_m \frac{\tanh \alpha h}{m^2 \alpha} & \text{等価減衰係数} \quad C_m &= \lambda M_m \end{aligned} \quad \text{----- (3)}$$

(3)式より, 変動液質量 M_m が卓越している1次モードのスロッシングが利用される。このとき, $\lambda = C_1/M_1 = 2h\omega_1 = 2\delta f_1$ の関係から, 1次モードのスロッシングの等価対数減衰率は $\delta = \lambda/2f_1$ と評価される。共振応答曲線に(2)式をフィットさせ λ を換算し δ を求めた。結果を図1に示す。タンク長及び水深により δ が変化し, タンクが長くなれば一定値に収れんする傾向がみられる。水深の浅い方が減衰性能が大きいようである。水のみTSDは $\delta = 0.05 \sim 0.1$ で, TMDと対比すると, 例えば, 質量比0.5~1%のときの最適減衰率 $\delta \approx 0.3 \sim 0.6$ に比べて小さい。

2.3 スロッシングの減衰性能増大法 スロッシングの減衰性能を増

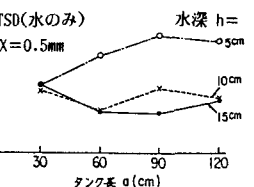
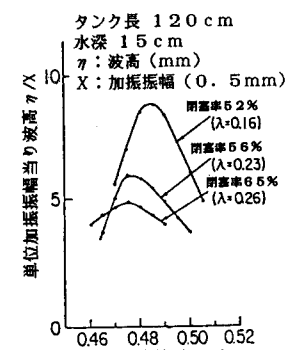
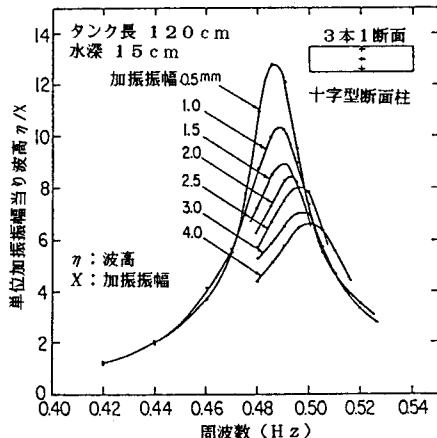
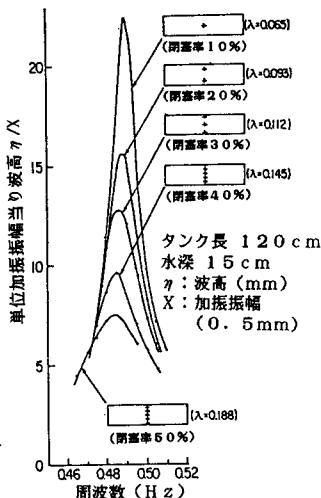


図1 $\delta = \lambda / 2f_1$

大させ, 波高の共振応答倍率を減少させるには抵抗体を挿入することが考えられる。ここでは, 格子タイプ(閉塞率: 52, 56, 65%)及び十字型断面柱タイプを検討した。図2に格子タイプ3種, 図3に十字型断面柱を中央1断面に1~5本設置(閉塞率: 10~50%)した場合の結果($X=0.5\text{mm}$)を示す。閉塞率あるいは設置本数が増えるに従い波高が小さく(λ が大きく)なり, 共振周波数がわずかに小さくなる傾向である。さらに, 十字型断面柱の設置断面数と本数を種々変化させた結果, 4本4断面と5本5断面を設置した場合には $\delta = 0.46$, 5本9断面と4本10断面を設置した場合には $\delta = 0.64$ を得ており, 最適減衰率に調整可能であることがわかった。

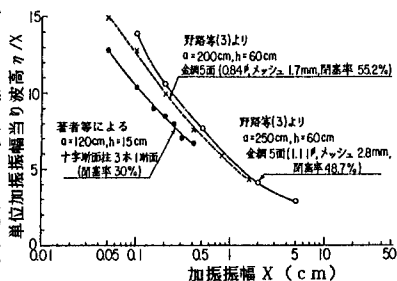
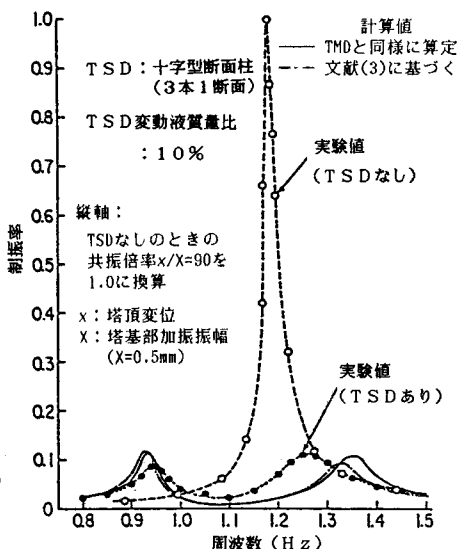
図2 波高の共振応答 η/X (格子タイプ)図3 波高の共振応答 η/X (十字断面柱タイプ)図4 波高の共振応答 η/X (加振振幅の影響)

2.4 加振振幅に関する特性 $a=120\text{cm}$, $h=15\text{cm}$ において十字型断面柱を3本設置した場合について $X=0.5\sim 4\text{mm}$ に変化させたときの波高の共振応答を図4に示す。 X が大きくなるにつれ η/X は減少し、非線形特性を有している。また、共振周波数はわずかに大きくなる。 X と η/X の関係を野路等⁽³⁾の結果と併せて図5に示す。各データはタンク長、水深、抵抗体が異なるが、いずれも X とともに η/X が指数関数的に減少しており、 $X=5\text{cm}$ では $\eta/X=3$ で、さらに、 X が大きくなれば、減衰性能の大きい抵抗体を設置した場合 $\eta/X \approx 1$ に収れんとすると推察される。

3. TSD搭載時の制振効果 $a=30\text{cm}$, $b=30\text{cm}$, $h=5\text{cm}$ のTSD($f=1.07\text{Hz}$)

を搭載した塔モデル(振動数 1.18Hz , 換算重量 33kgf)を振動台に載せ加振実験を行った。TSDの変動液の質量比は10%で $X=0.5\text{mm}$ である。結果を図6に示す。TSDなしのとき塔頂変位 $x=45\text{mm}$, 共振倍率 $x/X=90$ であるが、TSDあり(十字型断面柱3本)のとき $x/X=10$ で、制振率は約1/10である。図中、実線はTMDと同様の応答計算結果、一点鎖線は松浦・有馬等⁽¹⁾が(3)式の多質点系モデルを用いて導いた計算方式による。両者はほぼ一致しており、共振振動数は若干ずれているが、応答倍率はほぼ推定できることがわかる。なお、初期の塔頂変位 $x=35\text{mm}$ の自由減衰振動実験から、TSDなしのとき $\delta=0.032$, TSDあり(十字型断面柱3本)のとき $\delta=0.43$ であることを確認した。

4. あとがき 減衰性能の大きい抵抗体を設置したTSDでは比較的大きな振動でもスロッシングが維持され、吊橋・塔等の耐風対策として活用できると考えられるが、実機での実験データの収集が今後の検討課題である。【文献】(1) 松浦・有馬等：倉内流体運動を利用した防振法に関する基礎的研究, 日本造船学会論文集, 第160号, 昭和61年11月, (2) Housner, G.W.: Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers, Bulletin of the Seismological Society of America (1957), (3) 野路等：スロッシングを利用した制振装置の研究(その1), (その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 昭和62年10月

図5 $\eta/X \sim X$ 図6 塔頂変位 x の周波数応答