

(2) 固有振動周期の概算法

TLD による振動制御を論ずる場合、プラットフォームの固有振動数 f_p と TLD 内のスロッシング（液体動揺）の固有振動数 f_s との比 $\gamma = f_p/f_s$ が重要なパラメーターとなる。TLD 内のスロッシングの 1 次固有振動数 f_s は、TLD 内の液体の動揺を矩形閉塞浅水域における 2 次元運動と見なし、微小振幅波理論を用いることにより、次式から算定される。

$$f_s = \sqrt{(\pi g/a_T) \cdot \tanh(\pi h_T/a_T)/2\pi} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 a_T は TLD の振動方向の長さであり、 h_T は TLD 内の水深である。また、プラットフォームの固有振動数 f_p は、4 脚柱のプラットフォームを 1 本脚に置き換え、1 自由度の構造物にモデル化した振動解析を行うことにより、近似的に次式から算出される。

$$f_p = \frac{\lambda_1}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 λ_1 は 1 次の固有値であり、 EI は柱の曲げ剛性係数、 m は TLD を加えたデッキの質量である。なお、式 (2) を用いて求めた図-1 のプラットフォームの空中における固有振動周期は、2% 以内の誤差で実測値と一致した。

(3) 実験方法

a) 空中での自由振動実験

実験は、図-1 のプラットフォーム模型に対し、TLD を設置した場合と TLD を設置しない場合の両者に関し、デッキ部 C 点に初期変位 1 cm を与えて自由振動させることにより、TLD による振動制御の効果を検討するが、図-2 のそれぞれの TLD において、TLD 内の水深を変化させることにより、固有振動数比 γ を 0.5~2.0 の範囲で変化させた。このとき、プラットフォームの脚柱間隔は $l_h = 80$ cm である。なお、TLD がいない場合のデッキ重量は、デッキ鋼板上に TLD 全体の重量に相当するおもりを載荷し、TLD を付けた場合のデッキ総重量と同一とした。また、TLD を設置した場合には、TLD 内の水の重量と TLD の重量を加えたデッキの総重量との比 μ が 20% を越えないようにした。

b) 波による TLD 付きプラットフォームの振動実験

実験は、福井工業高等専門学校にある長さ 26 m、幅 60 cm、深さ 80 cm の 2 次元造波水槽を用い、その中央に図-1 の模型のプラットフォームを設置した。プラットフォームの脚柱間隔は、脚柱間隔が波の波長の半分になる時に生じる変

位の相殺点が、変位の共振点に近づき過ぎないように、 $l_h = 54.4$ cm とした。実験時の水深は $h = 60$ cm であり、波の波高は $H = 6$ cm である。まず、TLD による振動変位の減少効果を、固有振動数比 γ を変化させて検討するが、 γ は、空中での自由振動実験と同様、TLD 内の水深を変えて変化させた。作用させる波は、各 γ ごとに、共振を生じる周期の波を用いた。次に、この実験結果から、共振制御に適すると思われるタイプの TLD を選定し、それらの TLD を用いた場合の共振特性を検討するが、作用させる波の周期は、 $T = 0.6 \sim 1.6$ sec の範囲で変化させた。

TLD を設置しない場合のプラットフォームの波浪振動変位は、石田ら (1986, 1987) が提示した理論解を用いて算出するが、理論計算では、抗力係数は $C_D = 1.0$ 、慣性係数は $C_M = 2.0$ 、付加質量係数は $C_a = 1.0$ を用い、減衰係数 c_0 は、プラットフォームを空中で自由振動させたときの減衰曲線から求めた値を用いた。

3. 結果および考察

(1) 空中での自由振動変位の減衰

自由振動時の TLD の性能の指標として、対数減衰率 δ を採用した。図-3 は、縦軸にデッキ変位の対数減衰率の逆数 $1/\delta$ をとり、横軸に γ をとることにより、 γ の変化に対する振動変位の減衰効果を示す。図中の ● は TLD を設置した場合であり、△ は TLD がいない場合である。(a) は、Type 1 の TLD を用い、水深 h_T を 3.0~5.0 cm の範囲で変化させ、 γ を 1.5 以上とした場合であるが、いずれの場合も、TLD 非設置時より、TLD 設置時の方が減衰作用が小さく、TLD は逆効果

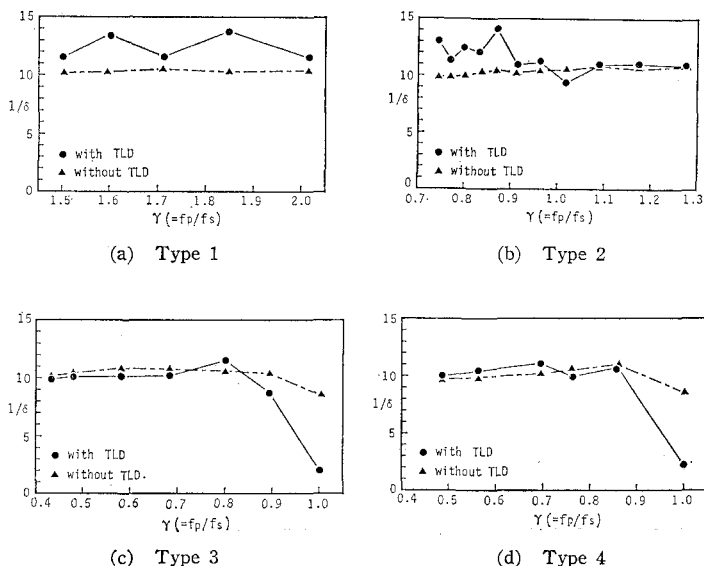


図-3 γ に対する TLD の減衰効果

となる。(b)は、Type 2 の TLD を用い、水深 h_T を 3.0~8.0 cm の範囲で変化させ、 γ を 0.7~1.3 の範囲とした場合であるが、 f_p と f_s が一致する $\gamma=1$ において、TLD を設置した時の減衰作用が大きいが、 $\gamma>1$ では、TLD の設置により減衰作用が小さくなる。(c)は、Type 3 の TLD を用い、水深 h_T を 1.5~12.5 cm の範囲で変化させ、 γ を 1 以下とした場合であるが、 $\gamma=1$ において、TLD を設置した時の減衰作用が極めて大きく、また、 $\gamma<1$ でも、 $\gamma=0.8$ 以外は、TLD 非設置時に比べ、TLD 設置時の減衰作用が若干大きくなる。

(d)は Type 4 のマルチプルダンパーの場合であり、(c)の場合と同様に γ を変化させたが、TLD 設置時に $\gamma=1$ において、極めて大きな減衰作用が見られるものの、 $\gamma<0.7$ では TLD 非設置時に比べ、TLD 設置時の方が減衰作用が小さくなる。

図-4 は、自由振動開始時からの時間変化であり、スロッシング η_T 、TLD 設置時の振動変位 ξ_T および TLD 非設置時の振動変位 ξ を示す。(a)は Type 1 の TLD を用い、 $\gamma=2.01$ ($h_T=3.0$ cm, $\mu=0.13$) の場合であるが、TLD の設置による振動変位の抑制は見られず、 η_T には高調波数成分が強く混入している。(b)は、Type 2 の TLD を用い、 f_p と f_s をほぼ一致させ、 $\gamma=1.02$ ($h_T=4.5$ cm, $\mu=0.18$) とした場合で、TLD の設置により振動変位が抑制される傾向があるが、 η_T の振幅が大きく、 η_T と ξ_T の両方に高調波数成分が混入している。これは、スロッシングにより、プラットフォームの固有振動が誘発されたものと思われる。(c)は、Type

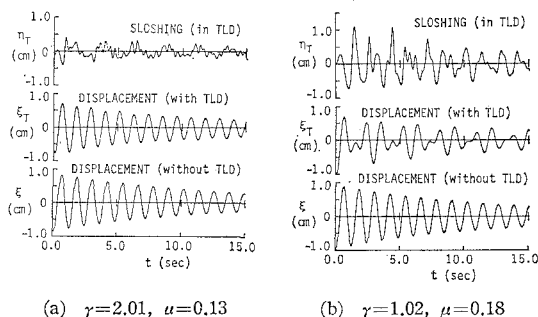


図-4 時間変化

3 の TLD を用い、 f_p と f_s をほぼ一致させ、 $\gamma=1.03$ ($h_T=1.5$ cm, $\mu=0.03$) とした場合であるが、(b)の場合より ξ_T の減衰作用が大きく、振動開始 5 秒後に ξ_T は初期変位の 1/5 程度となり、また、 η_T も ξ_T の減少後、急速に減衰している。(d)は、Type 3 の TLD を用い、 $\gamma=0.48$ ($h_T=8.5$ cm, $\mu=0.15$) とした場合であるが、 η_T は小さく、高調波数成分が強く混入している。この場合、TLD 設置による振動変位の抑制は見られない。図-3 では、TLD の設置により、むしろ減衰作用の低下が生じる場合があることを指摘したが、図-4 の例では、いずれの場合においても、TLD の設置により、プラットフォームの振動変位が増大するという危険性を生じていない。以上より、振動を制御するには、 f_p と f_s が一致する $\gamma=1$ の時が、最も効果的であるという結果が得られた。

図-5 (a) および (b) は、図-3 (b) および (c) における $\gamma=1$ の場合をスペクトル解析したものである。実線は TLD 設置時の振動変位の線スペクトル H_{ξ_T} であり、点線はスロッシングの線スペクトル H_{η_T} である。図-5 (a) は、Type 2 の TLD を用いた場合であり、固有振動数は $f_p=0.83$ Hz および $f_s=0.81$ Hz であるが、スロッシングと振動変位の両方で、 $f=0.71$ Hz および $f=1.04$ Hz の周波数成分が卓越している。この周波数はそれぞれ、TLD 内の水深をゼロおよび 2 倍 ($2h_T$) とした時のプラットフォームの固有振動数にほぼ一致している。また、(b)は、Type 3 の TLD を用いた場合であり、 $f_p=0.83$ Hz および $f_s=0.81$ Hz であるが、これらの固有振動数の前後に 2 つのピークが生じるものの、(a)ほど顕著ではない。

(2) 波による共振の抑制

図-6 は、共振を生じる波を作用させた時の、 γ の変化に対するデッキ変位の抑制効果を示すが、縦軸はスロッシング変位およびデッキ変位の最大値であり、横軸は γ である。図中の○はスロッシング変位の最大値 $|\eta_{Tmax}|$ であり、●は TLD 設置時のデッキ変位の最大値 $|\xi_{Tmax}|$ で、▲は TLD 非設置時のデッキ変位の理論計算値の最大値 $|\xi_{max}|$ である。(a)は、Type 1 の

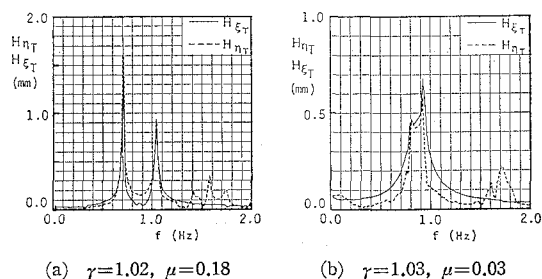


図-5 線スペクトル

TLD を用い、 γ を 1.5 以上とした場合であるが、TLD 非設置時に $|\xi_{\max}|$ が約 4 mm 以上であったものが、TLD の設置により $|\xi_{T\max}|$ が 1 mm 以下に減少している。このとき、 $|\eta_{T\max}|$ は、 $\gamma=1.84$ 以外では約 0.3 mm に過ぎない。(b) は Type 2 の TLD を用い、 γ を 0.7 ~ 1.3 の範囲とした場合であるが、空中での自由振動と同様に、 $\gamma=1$ において共振変位の抑制が顕著となり、TLD の設置により $|\xi_{T\max}|$ が 0.2 mm にまで減少している。また、 $|\eta_{T\max}|$ は、 $|\xi_{T\max}|$ の増減によく対応している。(c) は、Type 3 の TLD を用い、 $\gamma < 1.1$ とした場合であるが、 $\gamma=1$ において著しい共振変位の抑制が見られるものの、 $\gamma \leq 0.8$ では、TLD 非設置時に 4.3 mm であった変位が、TLD の設置により最大 6 mm にまで増大し、逆効果が生じることがわかる。また、この場合には、(a) および (b) に比べ、 $|\eta_{T\max}|$ が大きく、特に、 $\gamma=1$ 付近で、 $|\eta_{T\max}|$ が増大している。(d) は Type 4 のマルチプルダンパーを用いた場合であるが、 $\gamma=1$ において、効果的な振動変位の抑制が見られると共に、(c) の $\gamma \leq 0.8$ で見られるような $|\xi_{T\max}|$ が $|\xi_{\max}|$ を越える逆効果も生じない。このことから、マルチプルダンパーは、共振制御に対し、非常に効果的な形状であることが予想される。

図-7 には、波の一周期間の振動変位およびスロッシングの位相変化を示す。図中、破線はスロッシング η_T で、実線は設置時のデッキ変位 ξ_T であり、一点鎖線は TLD 非設置時のデッキ変位 ξ である。(a) は、Type 1 の TLD を用い、 $\gamma=2.00$ ($\mu=0.13$) とした場合であるが、 ξ_T は TLD の設置により著しく制御されている。また、 η_T には、 f_s の振動数成分の混入が見られる。(b) は、Type 2 の TLD を用い、 f_p と f_s をほぼ一致させ、 $\gamma=1.02$ ($\mu=0.18$) とした場合であるが、 ξ_T

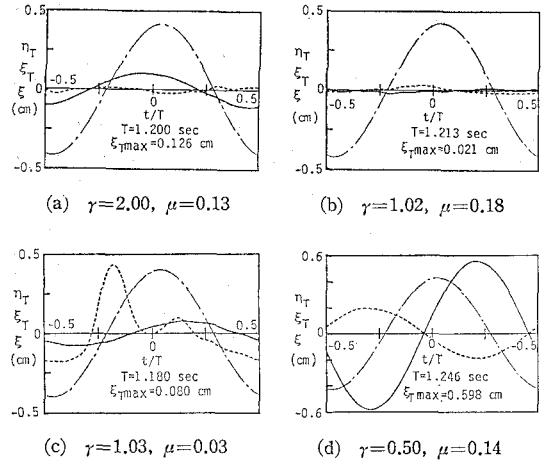


図-7 スロッシングおよび振動変位の位相変化

と η_T とは相殺し、両者ともほぼ消失している。また、(c) は、Type 3 の TLD を用い、 f_p と f_s をほぼ一致させ、 $\gamma=1.03$ ($\mu=0.03$) とした場合であるが、 η_T の振幅が大きく、高調波数成分が卓越しているため、(b) の場合より振動抑制の効果が低い。(d) は、Type 3 の TLD を用い、 $\gamma=0.50$ ($\mu=0.14$) とした場合であるが、 ξ_T は ξ よりも大きくなり、逆効果となっている。以上より、波が作用する場合においても、 f_p と f_s が一致する $\gamma=1$ の時に最も効果的に共振が抑制されることが明白となった。さらに、TLD の設置により、それが無い場合よりも振動変位が増大するという逆効果が生じるのは、 $\gamma < 0.9$ の範囲であって μ が比較的小さい場合である。

図-8 は、Type 2 および Type 3 の TLD を用い、 $\gamma=1$ に固定した時のプラットフォームを対象とし、作用する波の周期を 0.6~1.6 sec の範囲で変化させたときの共振特性を示すものであるが、縦軸はデッキ変位の最大値であり、横軸は作用する波の周期 T である。図中の ● は TLD 設置時の最大値 $|\xi_{T\max}|$ であり、実線は TLD 非設置時の最大値 $|\xi_{\max}|$ の理論曲線である。(a) は、Type 2 の TLD を用い、 $\gamma=1.02$ ($\mu=0.18$) とした時の結果であるが、TLD がない場合に約 6 mm であった共振変位が、TLD の設置により、 $T=1.20$ sec において、2 オーダーも減少する反面、 $T=0.97$ sec ($f=1.03$ Hz) および $T=1.40$ sec ($f=0.71$ Hz) の波により、新たに約 2.5 mm の共振変位が発生する。これは、図-5 (a) の自由振動時の線スペクトルで

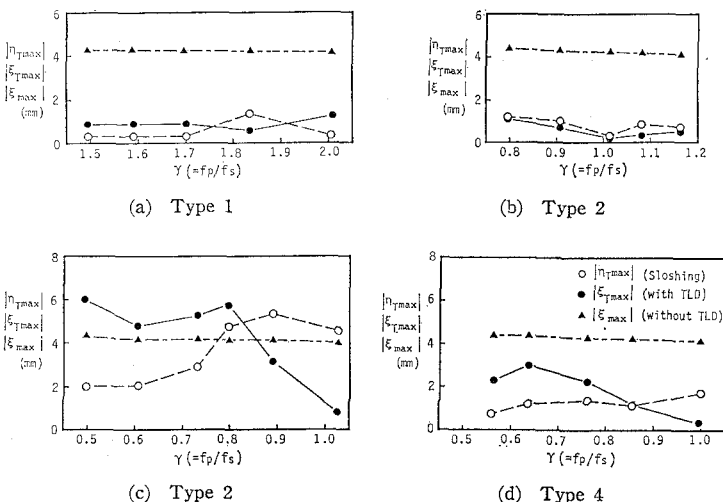


図-6 γ に対する TLD の共振の抑制効果

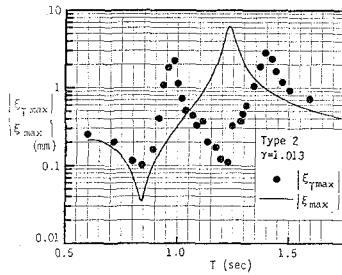
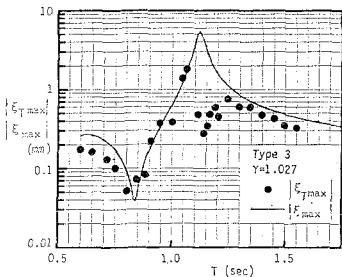
(a) $\gamma=1.02$, $\mu=0.18$ (b) $\gamma=1.03$, $\mu=0.03$

図-8 TLD の設置による共振特性

4. 結 論

本研究により得られた結果を要約すると以下の通りである。

(i) 空中での TLD 付きプラットフォームの自由振動実験において、プラットフォームの固有振動数と TLD 内のスロッシングの固有振動数を一致させた $\gamma=1$ の場合、容易に振動が抑制されたことから、TLD の有用性が確認された。

(ii) TLD 付きプラットフォームに波を作用させた場合にも、TLD により共振が抑制されることが実証されたが、特に、 $\gamma=1$ とした時に、共振変位の減少が著しい。しかし、 $\gamma=1$ とした場合でも、 μ が小さい時は、概して共振の抑制効果が小さく、また、逆に μ が大きい時は、スロッシングとプラットフォームの振動の相互作用が新たな固有振動を誘起することがあり、この場合、その固有周期を持つ波により新たな共振が生じ、TLD の有効性が失われることがある。特に、 $\gamma < 1$ のときには、TLD を設置したために、むしろ共振変位が大きくなる場合があることが判明した。なお、今後の課題として、 $\gamma=1$ の条件下で、 μ の最適値を求めることが考えられる。

参 考 文 献

- 石田 啓 (1986): 微小振幅波による小口径柱体の振動に関する理論解, 土木学会論文集, 第 369 号/II-5, pp. 161-170.
- 石田 啓・加島 卓・上野 彰 (1987): ストークス波による海洋プラットフォームの振動に関する理論解とその応用, 土木学会論文集, 第 381 号/II-7, pp. 121-130.
- 石田 啓・黒崎和保・小村辰彦 (1990): 海洋プラットフォームの共振抑制に関する研究, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 669-673.
- 石田 啓・小村辰彦 (1991): 不規則波に対する海洋プラットフォームの共振抑制, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 721-725.
- Sun, L. M., Y. Fujino, B. M. Pacheco and M. Isobe (1989): Nonlinear Waves and Dynamic Pressures in Rectangular Tuned Liquid Damper (TLD)—Simulation and Experimental Verification—, Proc. of JSCE, No. 410/I-12, pp. 904-905.

見られた 2 つのピーク周波数に波の周期が一致し、共振が生じたものである。(b) は Type 3 の TLD を用い、 $\gamma=1.03$ ($\mu=0.03$) とした時の結果であるが、TLD を設置しない場合に 5.5 mm であった共振変位が、TLD の設置により 1.4 mm にまで減少している。これは、石田ら (1990) が示した変位の相殺点と共振点を一致させる方法と同程度の抑制効果を発揮している。また、(b) では (a) に見られるような新たな共振は生じない。したがって、 $\gamma=1$ であっても、TLD 内の水量が多い場合、スロッシングによりプラットフォームに新しい 2 つの固有振動数が生じ、その周期を持つ波が作用する時に、共振が生じることが判明した。