Ⅰ－Ｂ472　同調液体ダンパーＴＬＤの設計法について

（株）大林組　正会員　○孫　利民　後藤洋三　菊地敏男

１．はじめに　同調液体ダンパー TLD[1]は施工時及び完成後の構造物の制振によく用いられる。TLD は構造的に簡単であるため、特に施工時などの仮用の場合には多く利用されている。一方、TLD 液体のスロッシング（動揺）が非線形的に挙動するため、TLD の実務設計においては難点があると言われている。本論文では著者らの TLD に関する研究蓄積を整理し、更に数値解析により TLD の性能を影響するパラメータを定量的に検討することによって、TLD の設計法について考察した。

２．最適設計理論　TLD の設計においては、一般に線形の TMD 最適設計理論を参照するのが一つの手法である。パッシブ系質量ダンパーの主なパラメータとしては、固有周期、減衰、質量比の３つがある。古典的な TMD 最適設計理論は 50 年代に Den Hartog[2]により提案されていた。

表１　ＴＭＤの最適減衰定数

質量比 μ（%）	構造自身の減衰定数（%）	TMD の最適減衰定数（%）
0.5	0.0	4.3
1.0	0.0	6.1
	1.0	6.2
	2.0	6.4
2.0	0.0	8.6

$$f_{opt}=\frac{1}{(1-\mu)},\qquad \gamma_{opt}=\sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \tag{1}$$

ここに、f_{opt}：最適振動数比（＝TMD 振動数／構造物振動数）、γ_{opt}：TMD の最適減衰定数、μ：ダンパー質量比（＝ダンパー質量／構造物の質量）。式(1)は構造物の減衰を無視したものであるが、その後、Warburton[3]は構造減衰を考慮する場合の最適設計値を数値シミュレーションにより検討した（表１）。ここでは、更に数値シミュレーションにより TMD の制振効果に及ぼす最適減衰定数の感度、質量比及び構造の初期減衰（TMD 装着前）の影響について検討した（図１と図２）。その結果としては次ぎのことが分かる。①構造の初期減衰を考慮する場合、その値が 2%以下であれば、TMD 最適減衰値への影響が僅かであって（表１）、TMD の設計には式(1)が適用できるであろう。②厳密的な最適減衰値が表１に示す通りだが、図１に示すようにその感度はそれほど高くない。特に、減衰が増大する側にはその傾向がより明確である。反面、減衰が過小になると制振効果が急激に低下することがあり（例えば、実用によく用いられる質量比μ＝１％に対し、TMD 減衰定数が 2%以下になる場合）、注意を払うべきであろう。③TMD による付加減衰は質量比が大きければおおきくなる。ただし、両者の関係は線形性ではない。図２に示すように、μ＝１％以上を越えると、質量比の増大による効果が小さくなる。④構造自身の減衰が大きければ、TMD による付加減衰が小さくなるのが分かる。一般には、構造減衰が２％以下の構造が制振する必要があり、その範囲内なら、付加減衰効果が大きい。以上の結論は非線形挙動の強くない TLD に対しても適用できるだろう。

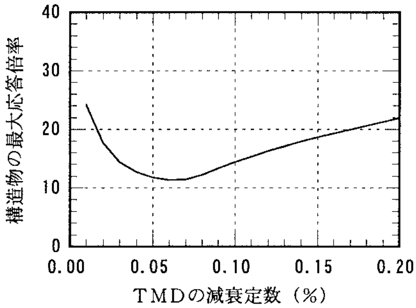

図１　ＴＭＤ減衰の感度

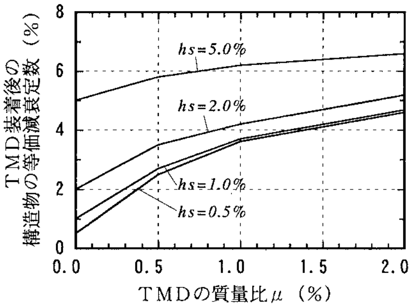

図２　ＴＭＤ質量比及び構造減衰の影響

３．ＴＬＤの固有振動数　線形ポテンシャル理論により、TLD のスロッシング振動数は下式より計算する。[4]

$$矩形：f=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\pi g}{2a}\tanh\frac{\pi h}{2a}} \tag{2}$$

$$円形：f=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2\xi g}{2a}\tanh\frac{2\xi h}{2a}} \tag{3}$$

キーワード：TLD、設計法
連絡先：〒204-0011　東京都清瀬市下清戸４－６４０　（株）大林組技術研究所土木第５研究室

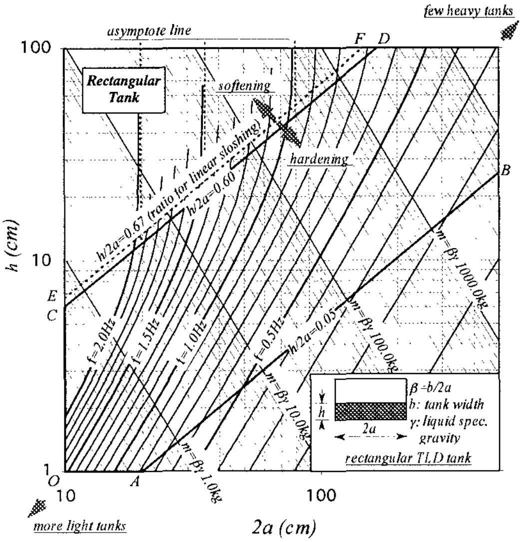

図３　矩形 TLD 設計用ダイアグラム図

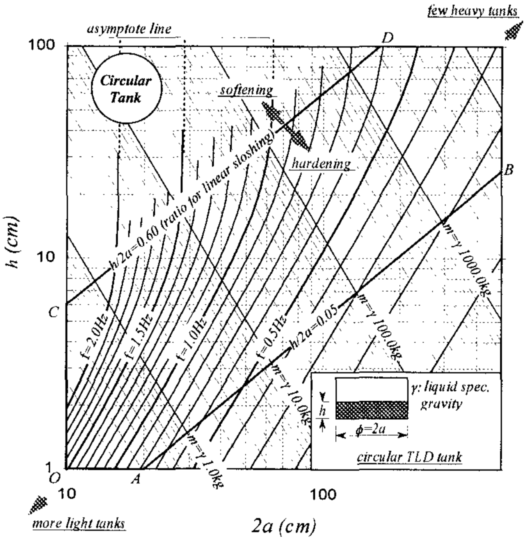

図４　円形 TLD 設計用ダイアグラム図

ここに、$2a$：容器の長さまたは直径、h：液深、g：重力加速度、ξ：(=1.841)Bessel 関数により導出された係数である。ここで、式(2)、(3)に基づいて TLD 設計用のダイアグラム（図３、４）を提案した。

TLD の設計においては、まず要求される固有周期と質量比から TLD 容器のサイズ、液深、個数を決める必要がある。提案したダイアグラム図は TLD の振動数線、液深比線及び質量線により構成され、TLD の容器サイズ、個数、質量、スロッシングの非線形特性などを検討するには大変便利なものである。一般には、TLD の容器サイズと液深は AB〜CD 線間の範囲内にあるなら（即ち、液深比：$0.05<h/2a<0.60$）妥当であろう。

４．ＴＬＤのスロッシング減衰　非線形のスロッシング減衰を正確的に推定するのは容易なことではないが、幸い一般に６％前後の最適減衰を用いる TLD はその非線形性がおさえられているので、工学的には等価線形の手法も適用できよう。TLD に最適な減衰を持たせるためには、高粘性液体（例えば、重泥水 [5]）の利用や減衰付加装置（例えば、液体内にメッシュを設置）などの手段がある。いずれの場合でも、その等価粘性を評価できれば、TLD を１自由度系に見なされる場合の等価減衰定数は式(4)で計算できる [4]。

$$\text{矩形：}h_{TLD} = \frac{1}{h}\sqrt{\frac{\nu_{eq}}{8\omega}}(1+2h/b+S) \qquad (4)$$

ここに、ν_{eq}：液体の等価動的粘性係数、ω：TLD の固有円振動数、S：(=1.0)液体表面係数である。

５．ＴＬＤの非線形性など　TLD には固有周期及びスロッシング減衰が非線形であるので、設計する際 TLD の液深比、スロッシング波動レベル、液体の減衰方式などを検討した上、等価線形化手法を用いることが可能である。また、TLD を１自由度系（TMD 相当）でモデル化するとき、その有効等価質量比（TMD のマスに相当する質量／液体の全質量）は液深比と波動の振幅に依存することが既に分かっているので [4]、TLD の付加減衰効果を検討する際には考慮する必要がある。TLD の挙動をより精確に把握したい場合は、波動理論のモデル [1] による数値シミュレーションも必要であろう。

参考文献　1) Fujino, Y and Sun, L.M. etc, Tuned Liquid Damper (TLD) for Suppressing Horizontal Motion of Structures, ASCE(EM), Vol.118, No.10, pp.2017-2030, 1992. 2) Den Hartog, J.P., Mechanical Vibration, McGraw-Hill, New York, 1956. 3) Warburton, G.B., Optimum Absorber Parameters for Simple Systems, Earthq. Eng. & Struc. Dyns., V01.8, 99.197-217, 1980. 4) Sun, L.M., Semi-Analytical Modeling of TLD with emphasis on damping of liquid sloshing, Doctoral Thesis of Tokyo Univ., 1991. 5)孫利民、菊地敏男、後藤洋三：重泥水を用いたＴＬＤ、土木学会論文集（投稿予定）。