

同調液体ダンパーによる構造物の制振に関する数値解析

山崎友之*, 中山 司†

Numerical Analysis of the Vibration Control of Structures by Tuned Liquid Dampers

Tomoyuki YAMAZAKI, Tsukasa NAKAYAMA

abstract

A numerical method is presented for estimating the damping performance of a tuned liquid damper that is used to suppress the wind-induced oscillation of high-rise buildings and tower-shaped structures. The method consists mainly of two processes. One is for the analysis of nonlinear sloshing of liquid in moving tanks, and the other is for the analysis of oscillation of structures. Liquid sloshing is analyzed numerically by the boundary element method and the time-advancing method based on the Taylor-series expansion of variables. Structures considered in this paper are modeled as frame structures with straight beams. The finite element method is used for the numerical analysis of structural oscillation. The proposed method is tested by analyzing three models of TLD-structure systems, and encouraging results have been obtained.

1 はじめに

高さが400mを越える超高層ホテルやタワーが現れ、世界的に建築物の高層化がますます進んでいる。通常、建築物は地震荷重が風荷重より卓越するため、耐震性能に優れた柔構造が用いられる。しかし、建物高さが200mを越えると風荷重が地震荷重を上回る場合があり、柔構造がかえってあだとなって建築物の振動を引き起こしてしまうことがある。1979年、台風19号が関東地方を直撃したとき、新宿副都心では高層ビルを中心に3～5秒の長周期の揺れが一日中続いた。このとき構造安全性に影響はなかったが、高層ビルの中で働く人々が酔いに似た症状を起こしたという。これを機会に、高層建築物の中で働く人々の居住性、作業性の向上をはかるために制振装置を用いて建築物の揺れを制御することが積極的に考えられるようになった。

制振装置とは、装置と構造物の固有周期を同調させ、構造物の揺れを低減しようとする装置である。その代表に、同調質量ダンパー (Tuned Mass Damper, TMD) や同調液体ダンパー (Tuned Liquid Damper, TLD) がある。TMDは固体質量を機械的に動かして構造物の振動を抑える装置であるのに対して、TLDは固体の代わりに液体を用い、貯槽内の液体振動が発生する流体力を減衰力として利用する装置である。TLDは構造が簡単で周期の調節が比較的容易であるため近年注目を集めており、横浜マリントワーや新横浜プリンスホテル、東京国際空港タワー、長崎空港タワーなどに設置されている [1, 2]。TLDの特徴をまとめると、次のようになる。

- 構造が単純で、メンテナンスも容易なので経済的である。
- 機械稼働部がないので、低い加速度レベルから制振効果を発揮することができる。

*中央大学大学院理工学研究所精密工学専攻 (現在 岩井機械工業 (株) 勤務)

†中央大学理工学部精密機械工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

- 比較的小型に設計することができるので、設置や搬入が容易であり、既存の構造物にも設置が可能である。
- 貯液に普通の水を使用するため、防火水槽などの機能を兼備させることも可能である。

TLD の制振性能の評価は、貯槽内の液体振動（スロッシング）をいかに精度よく解析できるかにかかっている。一般に、風荷重による高層建築物の振動は長周期であり、それを抑える制振装置も長周期の振動性能を持つ必要がある。TLD の場合、長周期の液体振動を実現するためには液深を浅くする必要がある。このとき、貯槽内の液体振動は強い非線形性を示すため、発生する流体力の算定にもその非線形性を考慮しなければならない。従来は、取り扱いの容易さから、実験的に求めた等価質量と等価減衰を用いる等価質点系による線形解析が用いられていたが、実用上十分とは言い難い。そこで、本研究では、境界要素法を用いたスロッシングの非線形解析法と有限要素法による骨組構造物の振動解析法を組み合わせ、TLD の制振性能を評価するための計算手法を構築することを目的とした。本論文では、構築した手法の概要と、その手法の有効性を検証するために行った数値計算の結果について報告する。

2 液体 構造連成振動解析の手順

TLD の制振性能を評価するためには、貯槽内の液体振動と構造物の振動をそれぞれ解析しなければならない。本手法では、液体振動の解析に境界要素法を用いた非線形スロッシングの数値解析法を採用し、構造物の振動解析には骨組構造物に対する有限要素法を採用する。連成解析の手順は次のとおりである。

1. 構造物に働く風力や液体振動による流体力を外力として、構造物の振動解析を行い、TLD 設置点での加速度を求める。
2. 1 で求めた加速度を加振源として貯槽内の液体振動を解析し、貯槽壁に働く流体力を計算する。
3. 時間を Δt だけ進めて、再び 1 からの手順を繰り返す。

そこで、液体振動と構造物振動のそれぞれの解析方法の概要を以下に述べる。

2.1 貯槽内液体の非線形振動の解析

2.1.1 液体振動の基礎方程式と時間進行法

Fig. 1 のような 2 次元矩形貯槽が水平加振を受ける場合を考える。座標系 $o-xy$ は貯槽に固定され貯槽とともに運動する動座標系とし、静止液面に一致させて x 軸を設け、鉛直上向きに y 軸を設ける。貯槽内液体は非圧縮非粘性流体とし、液体内の流れは非回転流れとする。このとき、座標系に対する液体の相対速度 \mathbf{u} を用いると、速度ポテンシャル $\phi(x, y, t)$ を $\nabla\phi = \mathbf{u}$ で定義することができる。 ϕ を用いると、液体振動の基礎方程式は次のように表される。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (\Omega \text{ 内}) \quad (1)$$

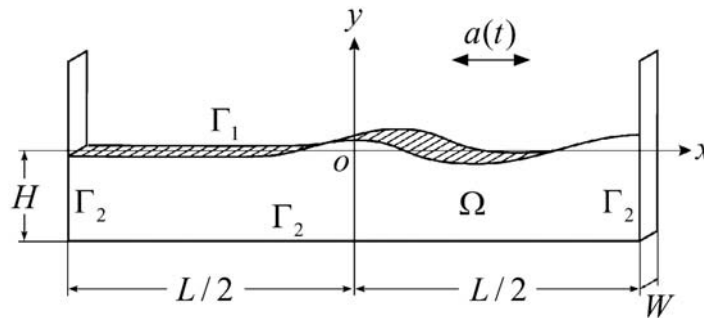


Fig. 1 Two-dimensional rectangular tank

$$\frac{D\phi}{Dt} - \frac{1}{2}(u^2 + v^2) + \mu\phi + a(t)\xi + g\eta = 0 \quad (\Gamma_1 \text{ 上}) \quad (2)$$

$$u = \frac{D\xi}{Dt}, \quad v = \frac{D\eta}{Dt} \quad (\Gamma_1 \text{ 上}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial n} = 0 \quad (\Gamma_2 \text{ 上}) \quad (4)$$

ここに、 Ω は液体内部、 Γ_1 と Γ_2 はそれぞれ液面と貯槽壁を表す。 t は時間、 u, v はそれぞれ速度 \mathbf{u} の x 成分と y 成分、 (ξ, η) は液面上の流体粒子の座標、 $a(t)$ は貯槽に加えられる水平方向の加振加速度、 g は重力加速度である。 D/Dt はラグランジュ微分演算子であり、 $\partial/\partial n$ は境界に立てた外向き法線 n に沿って微分することを意味する。式 (2) の左辺第 3 項は、液体振動の減衰効果を表すために導入された項である。係数 μ は

$$\mu = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{\nu\omega}{2}} \left(1 + \frac{2H}{W} + C \right) \quad (5)$$

で与えられる [3]。ここに、 H は液体静止時の深さ、 ν は動粘性係数、 ω は加振振動数、 W は貯槽の奥行である。 C は surface contamination と呼ばれる定数で、ここでは $C = 1$ とする。

初期値境界値問題 (1)–(4) において未知量は ϕ と (ξ, η) である。すなわち、時々刻々の液面形状を求めながら、 ϕ の値を計算しなければならない。そこで、ある時刻 t から Δt だけ時間が経過したとき、液面の位置が Fig. 2 のように変化する場合を考えよう。時刻 t の液面上の位置 (ξ, η) にあった流体粒子が時刻 $t + \Delta t$ に液面上の (ξ', η') に移動し、それに伴ってその流体粒子の速度ポテンシャルが ϕ から ϕ' に変わったとする。このとき、 Δt が十分微小であれば、 ξ', η', ϕ' を (ξ, η, t) を中心とするテイラー級数に展開することができる。このテイラー級数を n 階微分の項で打ち切ると、

$$\xi' \approx \xi + \Delta t \frac{D\xi}{Dt} + \frac{(\Delta t)^2}{2} \frac{D^2\xi}{Dt^2} + \cdots + \frac{(\Delta t)^n}{n!} \frac{D^n\xi}{Dt^n} \quad (6)$$

$$\eta' \approx \eta + \Delta t \frac{D\eta}{Dt} + \frac{(\Delta t)^2}{2} \frac{D^2\eta}{Dt^2} + \cdots + \frac{(\Delta t)^n}{n!} \frac{D^n\eta}{Dt^n} \quad (7)$$

$$\phi' \approx \phi + \Delta t \frac{D\phi}{Dt} + \frac{(\Delta t)^2}{2} \frac{D^2\phi}{Dt^2} + \cdots + \frac{(\Delta t)^n}{n!} \frac{D^n\phi}{Dt^n} \quad (8)$$

を得る。式 (6)–(8) の右辺の微係数はすべて時刻 t における値をとる。そこで、時刻 t において ξ, η, ϕ のラグランジュ微係数を計算することができれば、時刻 $t + \Delta t$ での液面の形状と位置、そこでの速度ポテンシャルを知ることができる。これらの微係数の計算方法を次節で述べる。

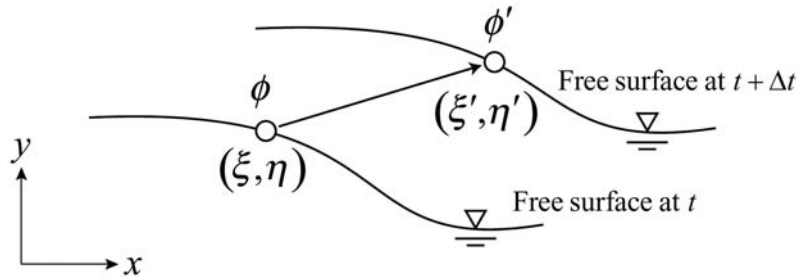


Fig. 2 Movement of a fluid particle on a free surface in a time interval between t and $t + \Delta t$

2.1.2 ラグランジュ微係数の計算

1) 1 階のラグランジュ微係数

境界値問題

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (\Omega \text{ 内}) \quad (9)$$

$$\phi = \hat{\phi} \quad (\Gamma_1 \text{ 上}) \quad (10)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (\Gamma_2 \text{ 上}) \quad (11)$$

を考える．ここに $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ である．また， $\hat{\phi}$ は直前の時間ステップで計算された，時刻 t における ϕ の値を表し，その値は既知である．この境界値問題を直接境界要素法 [4] で解くと， Γ_1 上で外向き法線方向微係数 $\partial\phi/\partial n$ が得られる．一方，境界 Γ_1 に沿って数値微分を行えば， Γ_1 の接線方向の微係数 $\partial\phi/\partial s$ が得られる．この二つの量から 1 階のラグランジュ微係数 $D\xi/Dt$, $D\eta/Dt$ が

$$\frac{D\xi}{Dt} = u = \frac{\partial\phi}{\partial x} = \frac{\partial\phi}{\partial n} n_x - \frac{\partial\phi}{\partial s} n_y, \quad \frac{D\eta}{Dt} = v = \frac{\partial\phi}{\partial y} = \frac{\partial\phi}{\partial n} n_y + \frac{\partial\phi}{\partial s} n_x \quad (12)$$

のように計算できる．ここに， n_x, n_y はそれぞれ外向き法線 n の x 軸， y 軸に対する方向余弦である．数値微分の方法については文献 [5] を参照されたい．

$D\phi/Dt$ は境界条件式 (2) より直接計算できる．

2) 2 階のラグランジュ微係数

たとえば， $D^2\xi/Dt^2$ は

$$\frac{D^2\xi}{Dt^2} = \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial\phi_t}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \quad (13)$$

のように表すことができる．ここに $\phi_t = \partial\phi/\partial t$ である． u の勾配 $\partial u/\partial x$, $\partial u/\partial y$ は数値微分で計算するものとすれば， $D^2\xi/Dt^2$ を求めるためには自由表面上で $\partial\phi_t/\partial x$ を知る必要がある．そこでこれを以下のようにして計算する．

ラプラス方程式 (1) を時間で 1 回微分すると， ϕ_t もまたラプラス方程式を満たすことがわかる．そこで ϕ_t に関する次のような境界値問題を考える．

$$\nabla^2 \phi_t = 0 \quad (\Omega \text{ 内}) \quad (14)$$

$$\phi_t = \frac{D\phi}{Dt} - (u^2 + v^2) \quad (\Gamma_1 \text{ 上}) \quad (15)$$

$$\frac{\partial\phi_t}{\partial n} = 0 \quad (\Gamma_2 \text{ 上}) \quad (16)$$

ここで，式 (15) の右辺の量はすべて，ステップ 1) で計算されていることに注意されたい．この境界値問題を直接境界要素法で解けば，自由表面上で $\partial\phi_t/\partial n$ の値を得る．式 (15) により Γ_1 上では ϕ_t の値は既知であるから，数値微分によって $\partial\phi_t/\partial s$ を計算することができる．したがって，

$$\frac{\partial\phi_t}{\partial x} = \frac{\partial\phi_t}{\partial n} n_x - \frac{\partial\phi_t}{\partial s} n_y \quad (17)$$

によって $\partial\phi_t/\partial x$ を計算することができる． $D^2\eta/Dt^2$ についても同様である．

$D^2\phi/Dt^2$ は，式 (2) の両辺にラグランジュ微分演算子 D/Dt を作用させて得られる式によって計算することができる．

3) 高階のラグランジュ微係数

一般に， k 階のラグランジュ微係数を得るためには， $\partial^{k-1}\phi/\partial t^{k-1}$ に関する境界値問題を解けばよい．この境界値問題を解き，2) と同様の手順を踏むことにより， k 階のラグランジュ微係数を計算することができる．

2.1.3 流体力の計算

直接境界要素法を用いると，ノイマン型境界条件が指定される貯槽壁上では，ラプラス方程式 (1) の解として ϕ が得られる．これを用いると貯槽壁上の点 (x, y) に働く圧力 p を

$$p^{(t)} = -\rho \left[\frac{\phi^{(t)} - \phi^{(t-\Delta t)}}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial\phi^{(t)}}{\partial s} \right)^2 + \mu\phi^{(t)} + a^{(t)}x + gy \right] \quad (18)$$

で計算することができる．ここに，上付添字 (t) は時刻 t における値を示す．貯槽壁に沿う方向の偏微分係数 $\partial\phi/\partial s$ は数値微分で計算できる．式 (18) で計算される圧力を貯槽壁に沿って積分すれば流体力が得られる．

2.2 構造物の振動解析

構造物は直線はりで構成される骨組構造物とし，はりどうしは剛接されているとする．はりは軸方向の伸縮による縦振動と曲げ変形による曲げ振動を起こす．このとき 1 本のはりの縦振動と曲げ振動の方程式は

$$m \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - EA \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} = P \quad (19)$$

$$m \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 V}{\partial X^4} = Q \quad (20)$$

で与えられる．ここに， X ははりの軸方向に設けた座標であり， $U(X, t)$ ， $V(X, t)$ はそれぞれはりの軸方向変位と軸に垂直方向のたわみを表す (Fig. 3 参照)． m は単位長さあたりの質量， E は縦弾性係数， A は断面積， I は断面 2 次モーメントである． $P(X, t)$ と $Q(X, t)$ はそれぞれはりに作用する軸力と分布荷重である．

式 (19)，(20) を有限要素法で離散化し，構造物を構成するすべてのはりについて重ね合わせると，

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{U}}{dt^2} + \mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{F}_W + \mathbf{F}_L \quad (21)$$

を得る [6]．ここに， \mathbf{M} ， \mathbf{K} はそれぞれ質量行列，剛性行列である． \mathbf{U} ははりの両端の水平方向変位と鉛直方向変位，たわみ角を成分とするベクトル， \mathbf{F}_W は風荷重等の外力を表すベクトル， \mathbf{F}_L は TLD が発生する流体力のベクトルである．後述の骨組構造物モデルの計算においては，構造物の構造減衰を考慮して，式 (21) の左辺に減衰項を付加した

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{U}}{dt^2} + \mathbf{C} \frac{d\mathbf{U}}{dt} + \mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{F}_W + \mathbf{F}_L \quad (22)$$

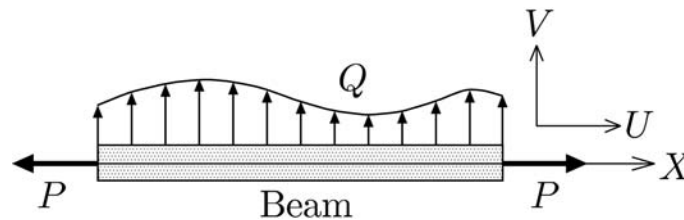


Fig. 3 Axial and distributed loads acting on a straight beam

を用いる．式 (22) をニューマークの β 法を用いて，時間を Δt ずつ進めながら解く．本研究では $\beta = 1/4$ とした．

3 数値計算

3.1 振り子モデル

2.1 節で述べた貯槽内のスロッシングとそれによって生じる流体力の計算方法の計算精度を検証するために，藤野ら [7] による実験結果との比較を行った．Fig. 4 に実験に用いられた装置のスケッチを文献 [7] より引用して示す．2 本のワイヤで水平につり下げられたプラットフォーム上に，矩形貯槽に水を入れた TLD と加振装置が載っている．矩形貯槽は幅 $L = 0.252$ m，奥行き $W = 0.322$ m であり，水深 $H = 0.021$ m である．振動系全体の質量は 168 kg である．

加振装置が発生する周期的加振力の周波数 f を変化させたときのプラットフォームの応答変位をプロットしたものが Fig. 5 である．図中， f_s は振動系の固有振動数である．図示した応答変位は，加振開始より十分時間が経過したあとの 20 周期分の応答変位の振幅の 2 乗平均を $\sqrt{2}$ 倍したものである．図中， \bullet が本手法による計算値， \circ が実験値を示し，実線は TLD を作動させないときの応答曲線である．計算値と実験値の一致は良好である．この数値実験の結果により，貯槽内液体の振動計算とそれに基づく流体力計算の方法が実用に十分耐えうるものであることを確認した．

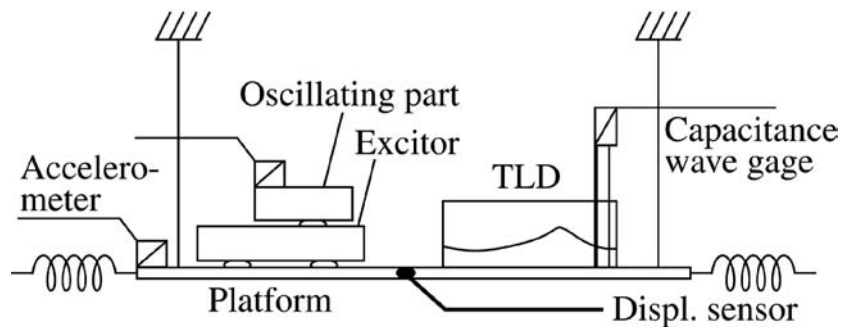


Fig. 4 Pendulum model

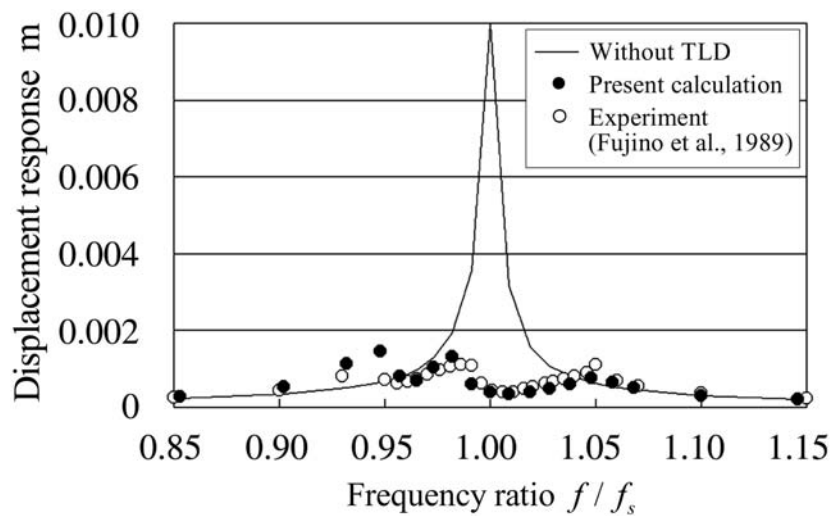


Fig. 5 Platform displacement vs. frequency ratio

3.2 ばね・ダンパーモデル

矩形貯槽の幅 L の大きさが TLD の制振性能に及ぼす影響を調べるために、Fig. 6 に示す、ばねとダンパーにつながれた台車による計算を行った。貯槽内の液体は水である。高層建築物の 1 次固有周期が 2s ~ 5s の間に多く分布していることから、台車の固有周期を 3.0s, 4.0s, 5.0s の三つに設定し、それぞれについて水槽の幅をいろいろに変えて制振効果を調べた。このとき、貯槽内液体の総質量が台車質量の 1% になるように TLD の設置数をケースごとに変えた。また、貯槽内の水深 H は、スロッシングの 1 次固有周波数が台車の 1 次固有周波数 T_s に一致するよう、次式により設定した。

$$T_s = 2\pi \left[\frac{\pi g}{L} \tanh \left(\frac{\pi H}{L} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (23)$$

$T_s = 3.0$ s のときの L , H , TLD の設置数の組み合わせの例を Table 1 に示す。台車に加える加振力 F_a は次式で与える。

$$F_a = \begin{cases} A \sin \left(\frac{2\pi}{T_s} t \right) & (0 \leq t \leq 2T_s) \\ 0 & (2T_s < t) \end{cases} \quad (24)$$

ここに $A = 2522.7$ N とする。ダンパーに対しては $C = 0.01$ とする。

$T_s = 3.0$ s のときの台車の応答変位の時刻歴を、 $L = 0.5$ m, 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m の場合について図示したものが Fig. 7 である。実線は TLD を作動させたときの応答変位であり、破線は TLD を作動させないときの応答変位曲線の包絡線である。図を見ると、水槽の幅が小さい方が制振効果が大きいことがわかる。水槽の幅を大きくすると、応答曲線にうなりが現れる。特に、 $L = 1.5$ m, 2.0 m の結果では、TLD を作動させた場合の方が TLD を作動させない場合よりも振幅が大きくなる部分が見られ、全体として制振効果が低いようである。

Fig. 8 に、水槽の幅の変化に対する対数減衰率の変化の様子を台車の固有周期ごとに示す。固有周期が 3.0s の場合を見ると、水槽の幅が最も小さい 0.5 m のとき、対数減衰率は 2.79% で最も大きく、幅が大きくなるにつれておよそ 0.6% に収束していく。固有周期が 4.0s や 5.0s の場合でも同様の傾向にある。

水槽の幅が 0.5 m と 1.5 m のときの台車の速度と流体力の時間変化を Fig. 9 に示す。幅が 0.5 m のときは、台車の速度と流体力の位相はほぼ 180° であり、流体力が台車の運動を抑えていることがわかる。しかし、幅

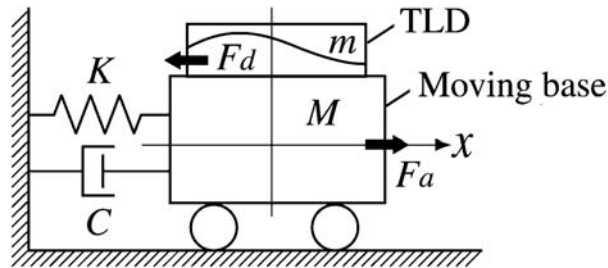


Fig. 6 Spring-damper model

Table 1 Examples of parameters of TLD in the case of $T_s = 3.0$ s

L [m]	0.50	1.00	1.50	2.00
H [m]	0.011	0.046	0.105	0.193
Number of TLD	1315	157	46	19

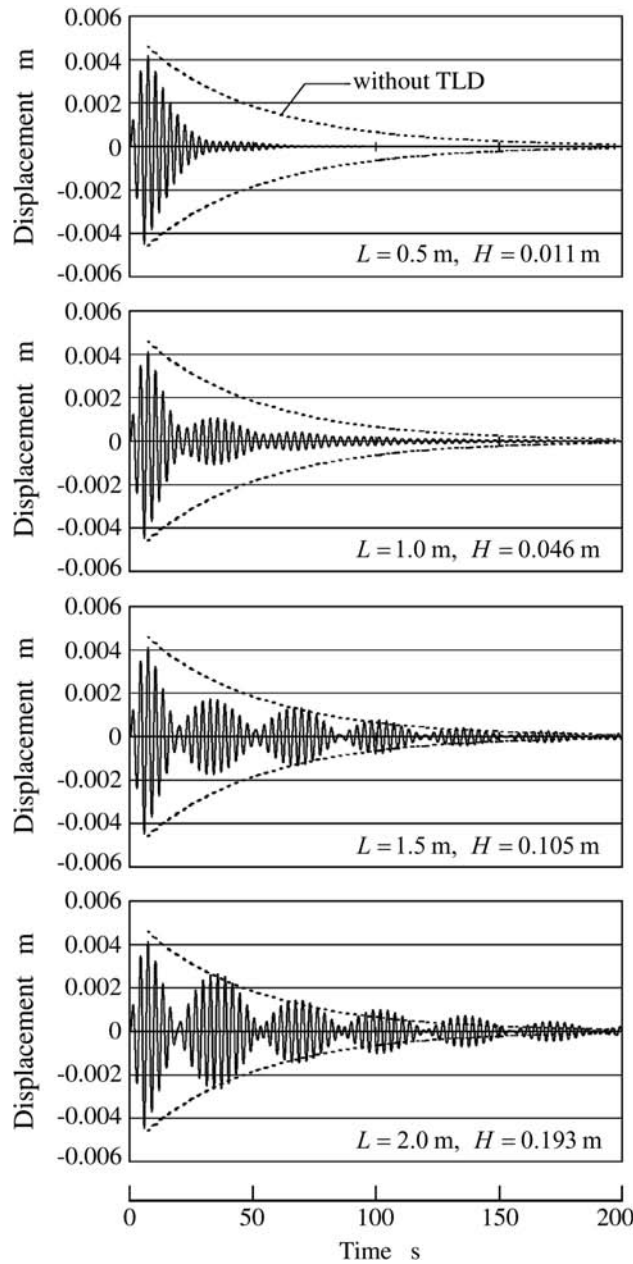


Fig. 7 Time histories of the base displacement for various size of tanks in the case of $T_s = 3.0$ s

が 1.5 m のときは、台車の運動が弱まっても流体力はすぐには減衰せず、次第に位相がそろい、流体力によって台車が加振される様子が分かる。この原因は次のように考えられる。Table 1 に示したように、水槽の幅を変えたときに、液体の振動周期と台車の振動周期を同調させるために水深を変化させ、同時に水と台車の質量比を 1% に保つために貯槽の数も変えている。そのため、水槽の幅を大きくすると、貯槽の総数が減るために液体と貯槽壁との接触面積が減少し、摩擦による減衰効果が減ってしまう。その結果、幅の大きい貯槽では、台車の振動が減衰しても液体は振動を続け、逆に台車を加振することになる。これが、Fig. 7 に見られる台車の応答変位のうなりを生じさせており、台車の振動の減衰を遅くしている原因と考えられる。したがって、TLD による制振効果を高めるためには小さい貯槽を多数設置する方がよい。

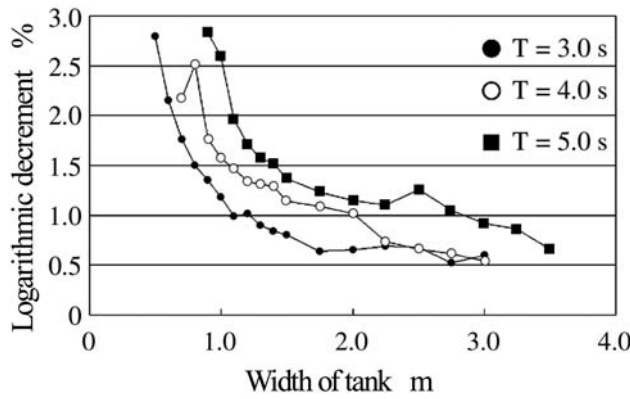


Fig. 8 Variation of logarithmic damping ratio with tank width

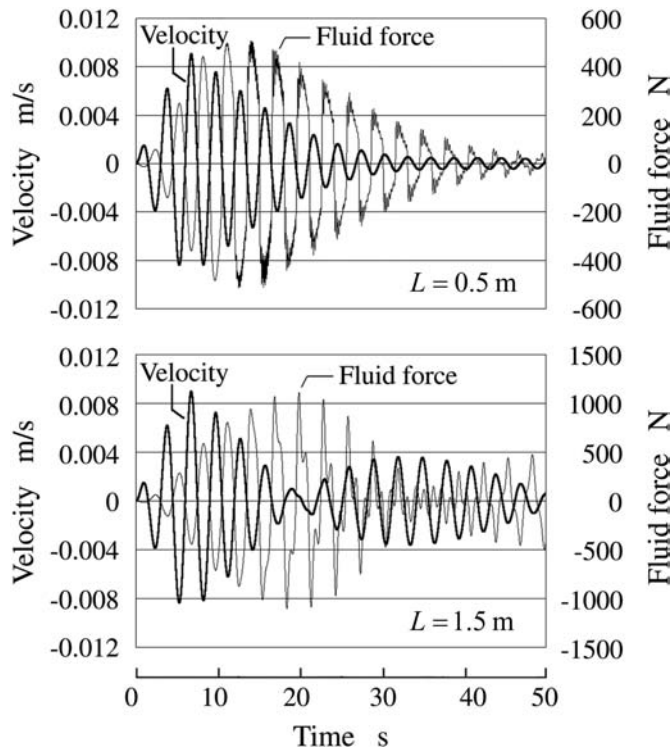


Fig. 9 Time histories of base velocity and fluid force

3.3 骨組構造物モデル

Fig. 10 に示す 5 層 2 スパンの骨組構造物について解析を行う．構造物の高さは 87.5 m，幅は 15.6 m である．各層と各スパンはそれぞれ等間隔である．1 次の固有周期を 3.0 s とする．構造減衰に関しては， $C = \alpha K$ の形の剛性比例型減衰を仮定する．係数 α は実構造物のデータを参考にして $\alpha = 0.01$ とする．構造物の屋上に，加振方向の幅が $L = 0.7$ m，奥行きが $W = 1.0$ m の貯槽を 30 基設置する．水深は，貯槽内のスロッシングの周期が構造物の固有周期に一致するよう $H = 0.022$ m とした．このとき貯槽内液体と構造物の質量比は 1.04% である．外力は構造物の 1 次固有周期と同周期の正弦波とし，構造物片側の 5 節点に水平に与えた．最上端に働く外力の振幅を，TLD を設置していないときの構造物最上端の共振振幅が 0.03 m になるように設定した．このとき，最上端の応答加速度は 0.14 m/s^2 になる．これは，住居として望ましいとされる加速度レベル 0.025 m/s^2 を大きく上回っており，制振が必要とされる大きさである．外力の高さ方向の変化はべき乗

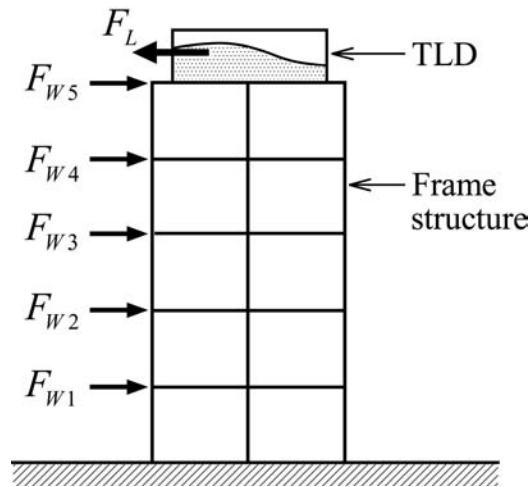


Fig. 10 Frame-structure model

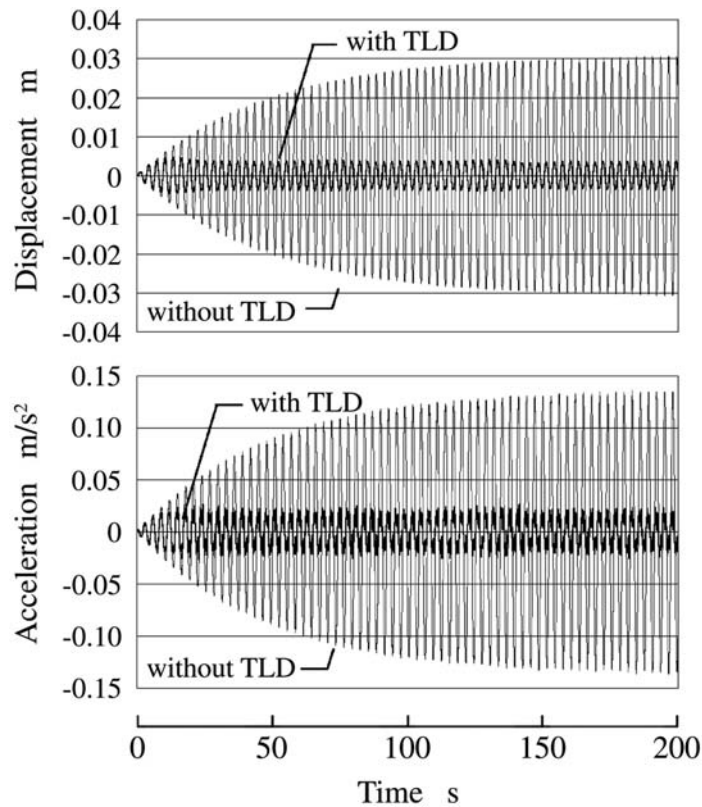


Fig. 11 Time histories of displacement and acceleration at the top floor

則に従った．この結果，Fig. 10 の五つの外力の振幅は $F_{W1} = 11.80 \text{ N}$ ， $F_{W2} = 14.53 \text{ N}$ ， $F_{W3} = 16.41 \text{ N}$ ， $F_{W4} = 17.89 \text{ N}$ ， $F_{W5} = 19.12 \text{ N}$ となる．

構造物最上階 (TLD 設置階) の節点の応答変位と応答加速度の時間変化を Fig. 11 に示す．上図が応答変位，下図が応答加速度である．それぞれの図で，太線が TLD を作動させたときの応答を示し，細線は TLD を作動させないときの応答を示す．応答変位の図から，TLD を作動させたときに最上端の振幅は 1/6 程度に抑えられており，TLD の制振効果を確認することができる．また，人間が構造物の揺れから不快感を感じる原因と

なる加速度を見ても、変位と同程度に低減されており、人間の生活環境が改善されることを確認できた。

4 おわりに

非線形スロッシングの数値解法と骨組構造物の振動の数値解法を組み合わせ、同調液体ダンパーの制振性能を調べるための数値計算法を構築した。振り子モデル、ばね・ダンパーモデル、骨組構造物モデルを用いて検証計算を行い、構築した方法の有効性を確認した。特に、ばね・ダンパーモデルを用いた数値実験では、同じ水量を使う場合、幅の大きい貯槽を用いて設置数を減らすよりも幅の小さい貯槽を多数設置する方が制振効果が高いことがわかった。今後、骨組構造物モデルによる数値実験を繰り返して、構造物の大きさに対する貯槽の最適な大きさと最適な設置数を見いだすことが課題である。

骨組構造物モデルによる数値計算から、人間の不快感の原因となる構造物の揺れの加速度について TLD の制振効果を検証し、TLD によって人間の生活環境が改善されることを確認した。

参考文献

- [1] 若原敏裕, 大築民夫: 超先進構造・材料としての知的材料 - 液体ダンパーによる構造物の制振技術 - . 機械の研究, **45**, 699–705 (1993).
- [2] Tamura, Y., Fujii, K., Ohtsuki, T., Wakahara, T. and Kohsaka, R.: *Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitation*. Engineering Structures, **17**, 609–621 (1995).
- [3] Miles, J.W.: *Surface Wave Damping in Closed Basins*. Proceedings of the Royal Society of London, **A297**, 459–475 (1967).
- [4] 登坂宣好, 中山 司: “境界要素法の基礎” 日科技連出版, 東京 (1987).
- [5] Nakayama, T.: *A computational method for simulating transient motions of an incompressible inviscid fluid with a free surface*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, **10**, 683–695 (1990).
- [6] 吉原 進: “建築系の振動工学” 森北出版, 東京 (1990).
- [7] 藤野陽三, パチエコベニート, 孫 利民, チャイセリピヤワット, 磯部雅彦: 同調液体ダンパーに関する非線形波動シミュレーションとその実験的検証 - 長方形水槽の場合 - . 構造工学論文集, 土木学会, **35A**, 561–574 (1989).