

I - B157

非線形水平振動を行う長方形TLDの等価振動系近似

九州工業大学 工学部 正員 高西照彦
九州工業大学 工学部 正員 多田 浩
大分工業高等専門学校 正員 園田敏矢

1. まえがき

TLD（同調液体ダンパー）を設置した構造物が、風や地震等の外乱を受けたときの動的応答解析を行う場合、TLD内容液の等価振動系が与えられていれば、それは構造物との連成振動を解析するのに用いて非常に便利である。TLDが線形振動するときの等価振動系については既に広く知られているが、非線形振動をする場合のそれについては、わずかに藤野¹⁾、若原²⁾が言及しているに過ぎないようである。本論では長方形TLDが水平方向の強制変位を受けてその内容液が非線形振動を行う場合（ただし、砕波を生ずるまでには至らぬ範囲内で）、その振動現象を近似的に表現する等価振動系を提案し、これを用いて算出したTLDの全壁面動水圧の振動特性を求めて、それが実験結果及びFEMによる計算結果に比較的良好一致することを示した。

2. TLDの振動実験とFEM解析結果

図-1に示すように、一定の水深を有するTLDを振動台上に設置して、変位振幅一定の強制加振を行い、波高及び壁面動水圧に対する共振曲線を求めた。また、加振振幅と壁面動水圧応答最大時の加振円振動数（共振円振動数と呼ぶ）との関係を求めた。他方、ブジネスク方程式を利用したFEM解析によって上記の実験をシミュレートした。得られた結果の一例を図-2～4に示す。実験に用いたTLDの大きさは $L = 20\text{cm}$ 、 $D = 8\text{cm}$ である。水深は $H = 2$ 及び 3cm とした。水圧計は $H_P = 1\text{cm}$ の所に設置した。図-2,3の縦軸は図-1に示す点A、Bにおける単位面積当たりの壁面動水圧の差 $(p_A - p_B)$ を入力加速度に基づく慣性力によって無次元化して表している。 α は入力加速度、 m_{w1} 及び横軸の n_{w1} は後述の式(1)～(4)中の等価質量及び固有円振動数である。同図から加振振幅が大きくなるに従って、共振曲線のピークは ω/n_{w1} の大きい方に移動し、同時にピークの高さが低くなることからわかる。また、図-4から共振円振動数 ω_{w1} は加振振幅の増大に伴ってほぼ直線的に増加しているが、詳細に見るとやや上に凸の形をしているようである。図-2～4から、実験結果とFEM解析結果とは比較的良好一致しているといえる。図-5はFEM解析によって算出したTLDの全壁面動水圧の共振曲線を示したものである。図-3と比較すると、加振振幅の増加に伴って壁面動水圧強度の最大値 $(p_A - p_B)/(m_{w1}\alpha/2DH)$ は低下しているが、全壁面動水圧の最大値 $(P/m_{w1}\alpha)$ は加振振幅に関係なくほぼ一定になっていることがわかる。

3. 等価振動系

2. で示した結果を考慮して、TLDが図-1に示すような強制加振 $\phi(t)$ を受けたときその非線形振動領域における動的挙動を表すためのできるだけ簡単な等価振動系として、次に示すような非線形振動方程式を満たすものを採用した。

$$m_{w1}\ddot{\xi} + c_{w1}\dot{\xi} + k_{w1}(1 + \beta|\xi|/H)\xi = -m_{w1}\ddot{\phi} \quad (1)$$

上式は、等価質量 m_{w1} と等価減衰係数 c_{w1} については線形時の値を採用し、等価ばね定数の項については、線形時の等価ばね定数 k_{w1} をもつ項に非線形項 $(k_{w1}\beta|\xi|/H)\xi$ を付与した振動モデルを表し

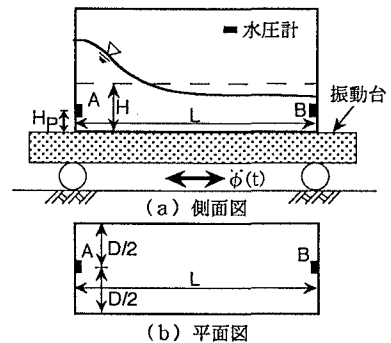


図-1 長方形TLD

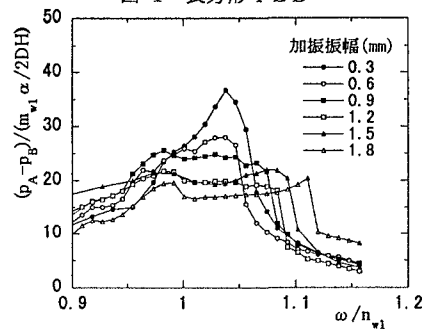


図-2 点A、Bの壁面動水圧分布強度の差の共振曲線（実験値）

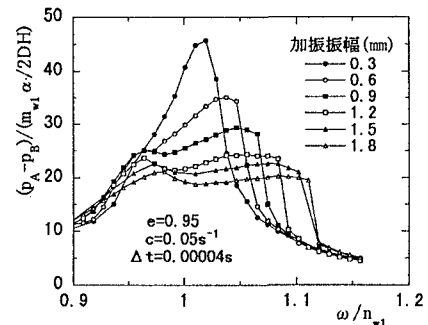


図-3 点A、Bの壁面動水圧分布強度の差の共振曲線（FEM解）

たものである。ここに、 ξ は m_{w1} の変位を表す規準座標、 $\tilde{\beta}$ は非線形性の程度を表す定数である。 m_{w1} 、 k_{w1} は

$$m_{w1} = (8\rho DL^2/\pi^3) \tanh(\pi H/L) \quad (2)$$

$$k_{w1} = m_{w1} n_{w1}^2 \quad (3)$$

$$n_{w1}^2 = (\pi g/L) \tanh(\pi H/L) \quad (4)$$

によって与えられる。ここに、 ρ ：内容液の密度、 n_{w1} ：内容液の1次の固有円振動数。その他の記号については図-1に示す通りである。

$$\text{いま、式(1)において} \quad \phi = \alpha/\omega^2 \sin \omega t \quad (5)$$

$$\text{の場合の定常解の第1次近似解} \quad \xi = X \sin(\omega t - \varphi) \quad (6)$$

を求めれば、 X 、 φ は次式によって与えられる。

$$(n_{w1}^2 - \omega^2 + \frac{8}{3\pi} \tilde{\beta} n_{w1}^2 X/H)^2 X^2 = \alpha^2 - (2h_{w1} n_{w1} \omega X)^2 \quad (7)$$

$$\tan \varphi = 2h_{w1} n_{w1} \omega X / \{n_{w1}^2 - \omega^2 + (8/3\pi) \tilde{\beta} n_{w1}^2 X/H\} X \quad (8)$$

$$h_{w1} = c_{w1}/2m_{w1}n_{w1} \quad (9)$$

TLDの全壁面動水圧は次式によって算出される。

$$\tilde{P} = -m_{w1}(\ddot{\xi} + \ddot{\phi}) = P \sin(\omega t - \delta) \quad (10)$$

$$\frac{P}{m_{w1}\alpha} = \frac{X}{La_0} \left(\frac{\omega}{n_{w1}} \right)^2 \sqrt{1 + 2 \frac{La_0}{X} \left(\frac{n_{w1}}{\omega} \right)^2 \cos \varphi + \left\{ \frac{La_0}{X} \left(\frac{n_{w1}}{\omega} \right)^2 \right\}^2} \quad (11)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left[\sin \varphi / \left\{ \cos \varphi + \frac{La_0}{X} \left(\frac{n_{w1}}{\omega} \right)^2 \right\} \right] \quad (12)$$

$$a_0 = \alpha/Ln_{w1}^2 \quad (13)$$

3. 計算結果及び考察

加振振幅が大きい場合、式(7)及び式(11)から求めた変位及び全壁面動水圧の共振曲線は図-6のh-i-jに示すような不安定領域が生ずる。実験結果及びFEM解析結果をみると、その共振曲線としては図-6においてa-b-c-d-f-gではなく、a-b-e-f-gが実現されているようである。これは強制振動の入力波形が完全な正弦波ではなく、その波にわずかな乱れが存在するためにそのような現象が生じるのではないかと考えられる。このことを考慮して式(11)から動水圧の共振曲線を算出した結果を図-7に示した。また、加振振幅と共振振動数の関係を図-4の□印で示した。数値計算に当たっては、 h_{w1} については線形領域における実験結果によく合うようにその値を定め、 $\tilde{\beta}$ については実験結果及びFEM解析結果によく合うようにその値を定めた。図-4から3者の結果はよく一致していることがわかる。図-5と7を比べると近似解の結果はFEM解の結果に比較的よく一致しているといえよう。なお、ここには示さなかったが、動水圧の位相差についても近似解は実験及びFEM解析の結果に比較的よく近似しているといえる。

- 1) 藤野他：TMDアナロジーをベースにしたTLDの特性の理解，構造工学論文集 vol.36A，1990.3.
- 2) 若原俊裕：同調液体ダンパーを用いた構造物の風応答制御に関する研究，学位論文，1996.9.
- 3) 高西他：長方形TLDの非線形領域における壁面動水圧の動特性，第1回免振・制振コロキウム講演論文集，1996.11.

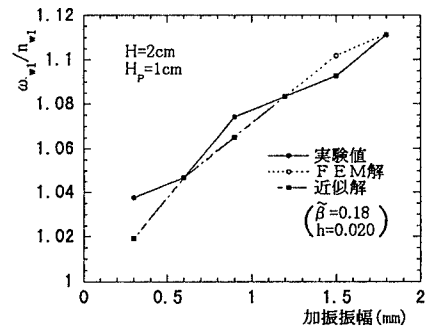


図-4 加振振幅と壁面動水圧の共振振動数の関係

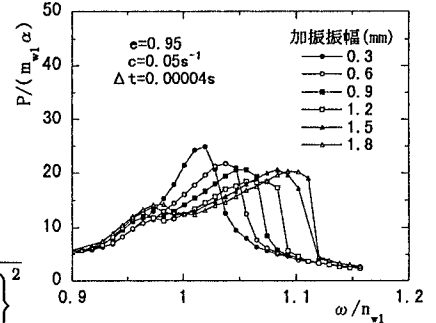


図-5 全壁面動水圧の共振曲線（FEM解）

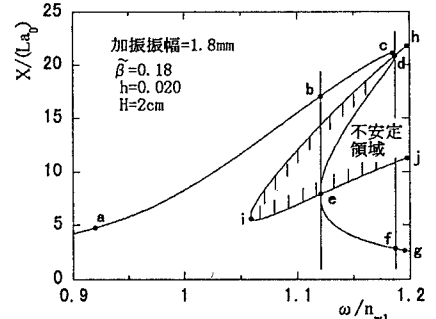


図-6 変位の共振曲線と不安定領域

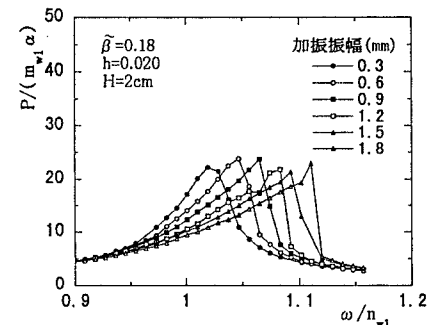


図-7 全壁面動水圧の共振曲線（近似解）