

重泥水を用いた同調液体ダンパー (TLD) に関する研究

孫 利民¹・菊地敏男¹・後藤洋三¹・林正夫²

¹正会員 工博 (株)大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640)

²正会員 工博 東海大学教授 土木工学科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117)

重泥水はベントナイト液に加重材 (バライト) を加えて製成された高粘性、高比重の特性を有する材質が安定な液体である。これを TLD に用いると、高比重と最適スロッシング減衰により TLD の小型化と制振効果の向上が可能となる。本研究では、非ニュートン流体である重泥水の減衰特性を把握した後、重泥水 TLD の挙動を模型実験、等価減衰を導入した非線形波動理論解析ならびに高橋脚施工時の鋼管柱の加振実験により検討した。その結果、重泥水 TLD は水を用いる同じ寸法の TLD の 2～3 倍の減衰付加性能を有することを確認した。また、重泥水 TLD の簡易設計手法を提案した。

Key Words: Tuned Liquid Damper, heavy mud, experiment, damping evaluation, design diagram

1. はじめに

重泥水のスロッシングを利用したダンパー (以下: 重泥水 TLD) は構造制振用の同調液体ダンパー (Tuned Liquid Damper=TLD) ^{1)~4)} の一種である。揺れやすい構造物の頂部に設置することによって、風や地震などの外乱による振動を低減し、対象構造物の使用性、安全性、施工性などを確保できる (図-1)。

TLD は同調質量ダンパー (TMD) ⁵⁾ と同じ原理で、構造物の動的特性を変えると同時に振動エネルギーを吸収して構造物の応答を低減する。TLD には最適なスロッシング減衰が要求され、また、その制振効果はダンパー質量比 (TLD 内液体の有効質量/構造物のモード質量) の増大に従って高まる。

従来、TLD には水を用いる場合がほとんどで、水の粘性のみによるスロッシング減衰は要求される最適減衰値より小さいため、付加の減衰増加手段や装置が必要となる場合が多い。例えば、孫ら⁶⁾は高粘性液体を用いた TLD の性能を研究した。小坂ら⁷⁾は金属ネットを、田村ら⁸⁾は浮遊物を水中に入れ、減衰の増加を図った。坂井ら⁹⁾は U 字型容器を用い、水路にオリフェス板を設けて減衰を調整した。Gardarsson ら¹⁰⁾は容器の底に斜面を設け砕波によるエネルギー消散の減衰を利用した。また、最近では減衰特性を電氣的に調整できる磁性流体を用いた TLD の研究が阿部ら¹¹⁾により報告されている。

この研究で取り上げた重泥水は高粘性 (水の数十倍～千

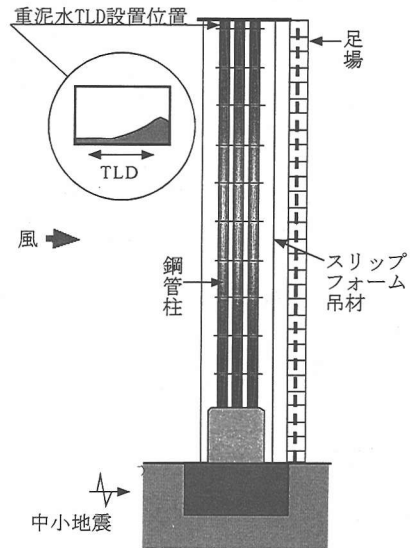


図-1 構造物 (施工時の鋼管コンクリート高橋脚) に設置した TLD

倍位)、高比重 (水の 1.4 倍以上)、安価などの特性を有するもので、TLD の液体として用いると、最適スロッシング減衰の容易な達成と高い質量比による制振効果の向上、減衰装置不要による構造の単純化と小型化が期待できる。

本研究は重泥水 TLD の性能を、実験および解析により検討し、更に鋼管柱 RC 高橋脚施工時の制振に適用して検証したものである。

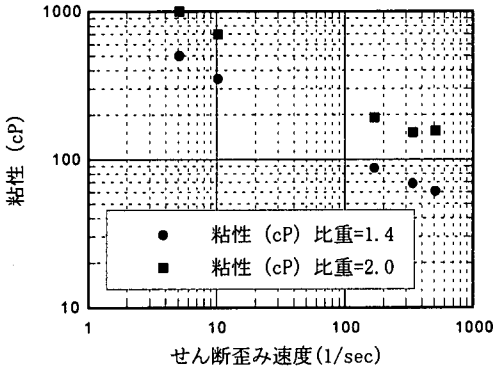


図-2 重泥水の粘性

2. 重泥水の成分とレオロジー特性

(1) 重泥水の成分

石油や天然ガスの掘削に於いては、以前から泥水が使用されていた¹²⁾。従来のボーリング用泥水 (drilling mud) は、ベントナイト液を主体とし、必要に応じて各種の加重剤や調泥剤を加えて調整した一種の水-粘土懸濁液である。泥水は比重と粘性のコントロールが容易で、化学的性質が安定の上、無毒性、無公害、使用後の廃泥水が回収処理しやすいなどの特徴がある。

今回 TLD に用いた重泥水はベントナイト泥水に、高比重を維持するための加重剤バライトと粘性の調整と安定を保つための調泥剤 (増粘剤, 分散剤) を加えたものである。

(2) 重泥水のレオロジー特性

重泥水は、複雑な流動特性や界面現象を示す非ニュートン流体である。TLD に使用するためには、特にその比重とレオロジー (rheology) 特性の関係を把握することが重要である。公称比重 1.4 と 2.0 の二種類の重泥水の粘性をファン VG メーター (Fann VG Meter Model 35) により測定した。重泥水は非ニュートン流体であるため、その粘性がせん断歪み速度によって水の粘性 (1cP) の数十倍から千倍位に変化するの分かる (図-2)。

また、水-粘土の懸濁液である重泥水を TLD の液体として長期使用する場合は、泥粒子の沈殿現象を起こせずに安定な比重と粘性を保つ性能が要求される。林ら¹³⁾の研究により、新製泥水は 6 カ月以内なら大きな性質変化がないこと、2~3 年連続して放置すると若干沈殿が起こるが、攪拌すれば、泥水の性質がほぼもと通りに回復することが明らかになっている。本論文の実用例では、重泥水 TLD を施工時の数ヶ月間の仮設ダンパーとして使用しただけであったが、永久、半永久使用の場合の適用性についてはさら

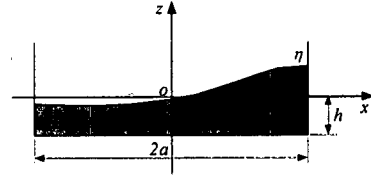


図-3 長方形 TLD の座標系

に検討する必要がある。

3. 重泥水 TLD の定式化

(1) 従来の低粘性液体 TLD の定式化

容器内液体のスロッシング挙動についての定式化は等価な質点系を用いる方法と非線形波動理論を直接用いる方法がある。前者では、古くから Housner¹⁴⁾のモデルがあり、また最近は大西ら¹⁵⁾が一連の等価質点モデルを提案している。一方、TLD の場合は、液体のスロッシングが強い非線形性を持つ振幅まで成長するので、その挙動を精度良く解析するためには、波動理論によるモデル¹⁶⁾⁻¹⁹⁾が必要である。

ここでは、著者ら^{18),19)}は以前に提案した水などの低粘性液体を用いた TLD の波動理論モデルを簡単に記述する。

図-3 に示すように、長方形容器内の液体スロッシングを 2 次元問題として考え、非線形浅水波理論によって定式化する。液体は非圧縮性、渦なしとし、連続の式は

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

である。粘性を無視する場合、ポテンシャル流と考え、運動方程式 (Navier-Stokes equation) は

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \ddot{x}_s \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (3)$$

である。ここで、 u, w は液体粒子の水平 (x 方向) と鉛直 (z 方向) 速度; ρ は液体の比重; g は重力加速度; \ddot{x}_s は容器の変位である。

ポテンシャル関数を仮定し、支配方程式 (式(1)-(3)) を鉛直方向に積分すると、波高 η と自由表面での粒子水平速度 $u(\eta)$ に関する基本方程式が得られる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + h\sigma \frac{\partial (\phi u(\eta))}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

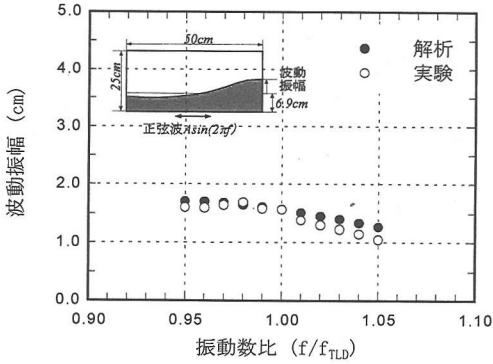


図-4 重泥水 TLD の共振実験結果

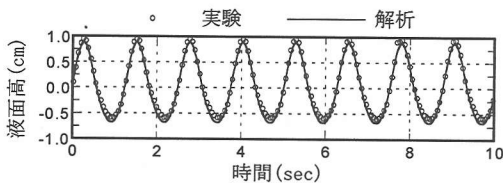


図-5 重泥水 TLD の共振点加振での波高時刻歴

$$\frac{\partial}{\partial t} u(\eta) + (1 - T_H^2) u(\eta) + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + gh\sigma\phi \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \frac{\partial \eta}{\partial x} = \lambda u(\eta) - \ddot{x}_s \quad (5)$$

ここで、 h は液体の深さで、 ϕ 、 σ 、 T_H は容器サイズと液体深さにより決める定数である。 $\lambda u(\eta)$ は基本方程式に後から導入した減衰項で、液体の粘性などに依存するものである。

(2) 重泥水の等価減衰の導入

前記の理論モデルは水など粘性の小さい流体に対して提案されたものであるが、ここで重泥水の粘性を考慮して減衰項を修正し、モデルの適用範囲を拡張する。

式(5)中の減衰係数 λ は式(6)の形式で表すことができる。

$$\lambda = \frac{1}{(\eta + h)} \sqrt{2\alpha v_e (2 + h/b)} \quad (6)$$

ここで、 b は容器の幅、 α はスロッシングモードの円振動数、 v_e は重泥水の等価粘性係数である。

従来の水を用いる TLD に比べ、重泥水を用いる場合は、その高粘性による減衰効果でスロッシング挙動の非線形性が弱められる。したがって、重泥水の粘性測定試験結果からその等価粘性係数 v_e の値を適切に評価できれば、上記

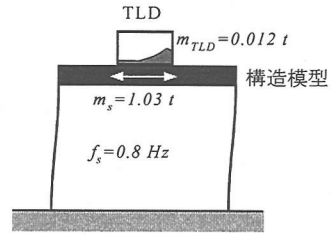


図-6 重泥水 TLD+構造模型の実験装置図

拡張モデルにより重泥水 TLD の挙動を十分な精度で解析できると考えられる。拡張したモデルの実用性については後述の実験結果と比較して検証する。

4. 模型実験による重泥水 TLD の性能検証

(1) 正弦波スイープ加振実験

模型実験により重泥水 TLD の性能を確認した。模型実験用 TLD は長さ 50cm×高さ 25cm×幅 25cm の長方形容器に重泥水を 6.9cm の深さに入れ、固有振動数を 0.8Hz としたものである。公称比重 1.4 と 2.0 の二種類の重泥水を用い、TLD 容器内の液体にスロッシングを起こして液面高さの時刻歴波形から自由減衰を測定した。測定した重泥水 TLD の等価減衰定数はそれぞれ 10.7% と 15.3% であった。

比重 1.4 の重泥水を用いた TLD 容器を共振点付近 ($f/f_{TD} = 0.95 - 1.05$, f : 加振振動数; f_{TD} : TLD の固有振動数) で片振幅 10gal の正弦波でスイープ加振し、振動方向の容器端部壁付近の液面応答を計測した。共振曲線 (図-4) から分かるように、重泥水の減衰が高いため、液面の応答が小さく、共振曲線の形状もフラットになっている。線形理論の共振点 ($f/f_{TD} = 1.0$) での応答波形を 図-5 に示した。重泥水のスロッシングの非線形 (上下振幅が非対称) 挙動が分かる。

(2) 自由振動実験

重泥水 TLD 模型を重さ 1.03t の一自由度構造模型 (図-6) に設置し自由振動実験を行った。構造模型の固有振動数は 0.8Hz、構造減衰は 0.3% である。TLD の質量比が 1% 前後の場合、その最適減衰定数が約 6-7% であることから、これに近い減衰を有する比重 1.4 の重泥水を用いた TLD を使用した。構造模型に対する重泥水 TLD の質量比は 1.4% である。

構造減衰定数は重泥水 TLD の設置によって、0.30% から 1.91% に増大した (図-7)。一方、水を用いた同じ寸法の TLD の場合は、液体スロッシング減衰が最適値より小さいため、平均的な減衰効果は重泥水 TLD の半分以下しかないと同じ自由振動実験を行って確認した (図-8)。

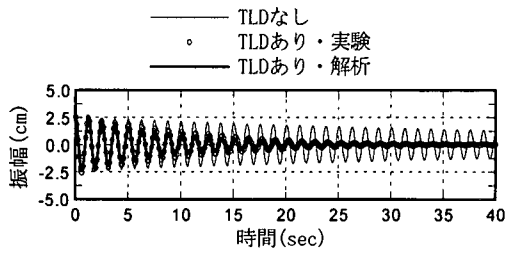


図-7 重泥水 TLD+構造模型の自由振動

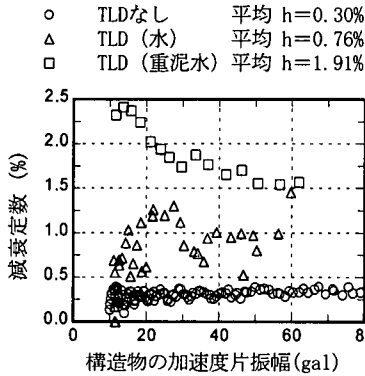


図-8 重泥水 TLD+構造模型の自由振動実験から求めた減衰定数

(3) 振動台加振実験

図-6に示す実験模型を振動台に載せ、加振実験を行って重泥水 TLD の制振性能を検討した。

風による振動に対する制振効果を検討するため、ホワイトノイズ 80sec+無入力 40sec の模擬入力で構造模型を加振した(図-9)。風振動に対する居住性向上を検討対象としたため、入力レベルを無制振時に最大応答加速度が約 4gal になるように設定した。応答加速度の RMS 値は無制振時の 1.379 に対し、水を用いた TLD の場合が 1.224、重泥水 TLD の場合が 0.895 となって、重泥水を用いることにより TLD の制振性能が向上しているのが分かる。

また、中小地震入力に対する制振効果も検討した。パッシブダンパーである TLD は初動段階(液面動揺の振幅がある程度の大きさになるまで)の制振効果があまり期待できない。そのため、入力地震波の特性によって制振効果の評価は変わってくる。EL CENTRO NS 波(最大加速度 80gal)で加振の場合、構造模型の最大応答加速度が約 30sec 前後に出現したため、最大値が 2/3 位(117gal から 70gal 位)まで低減され、制振効果が認められた。一方、神戸海洋気象台 NS 波(最大加速度 50gal)で加振した場合、構造模型の最大応答加速度が初動段階(約 10sec 前後)に出現したため、最大値が僅かしか低減されなかった。それでも波形

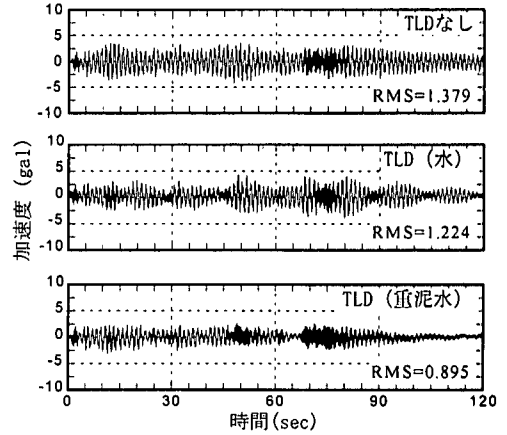


図-9 重泥水 TLD+構造模型の雑ノイズ入力
の応答波形

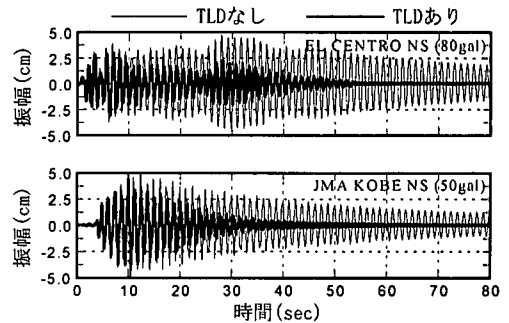


図-10 重泥水 TLD+構造模型の地震入力応答波形

の 20sec 以後を見ると、重泥水 TLD は地震の後揺れに対して良い制振効果があったと言える。

(4) シミュレーションとの比較

3. (2)で述べた拡張したモデルで実験のシミュレーションを行った。ここで、重泥水粒子の応答速度の予測範囲から重泥水の粘性は約 500~800cP の範囲にあると推定した。解析したケースの内、700cP の値を用いた解析結果が実験値とよく一致し(図-4,5 と 7)、拡張モデルが有効で、かつ実用に十分な解析精度が得られることを確認した。

5. 重泥水 TLD の設計

TLD は構造的に簡単であるため、揺れやすい構造物の制振、特に施工時などの仮設用制振装置としてよく利用されている。一方、TLD の液体のスロッピングが非線形的に挙動するため、TLD の実務設計においてはその制振効果を予測することが難しいと言われている。ここでは TMD

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

及びTLDに関する既往の研究を整理し、更に数値解析によりTLDの性能に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。

(1) TMD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 Hartog²⁰⁾により提案されている。ダンパーの最適振動数比 f_{opt} (=TMD振動数/構造物振動数)と最適減衰定数 γ_{opt} を式(7)と(8)で表すことができる。

$$f_{opt} = \frac{1}{1 - \mu} \quad (7)$$

$$\gamma_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \quad (8)$$

ここに、 μ は質量比(=ダンパー質量/構造物の質量)である。

式(7)と(8)は構造物の減衰を無視したものであるが、その後、Warburton⁵⁾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ている(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-11と図-12)。その結果としてつぎのことが分かる。①TMDの最適減衰値については、構造物自身の減衰が2%以下であれば、それによる影響が僅かであって(表-1)、TMDの設計には式(7)と(8)が適用できる。②理論上の最適減衰値は表-1に示す通りであるが、図-11に示すように減衰が2-10%の範囲内ならその感度はそれほど高くない。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になり(例えば、実用によく用いられる質量比 $\mu = 1\%$ 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る。一般には、最適減衰値が2-10%の範囲内にあるならよいと考えられる。③TMDによる付加減衰は質量比が大きければ大きくなる。ただし、図-12に示すように、質量比が1%以上を越える

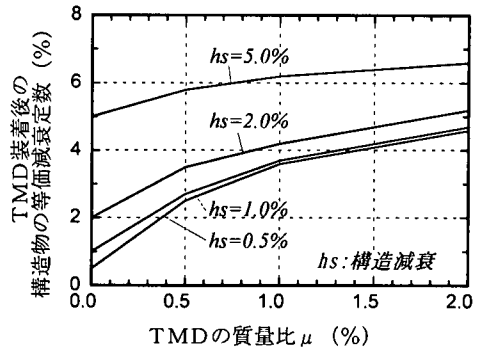
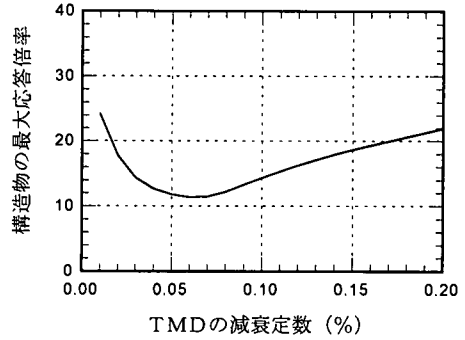


図-12 TMD質量比及び構造減衰の影響

と、質量比の増大による改善効果が小さくなる。④構造物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(図-12)。一般には、減衰が2%以下の構造物に対して付加減衰効果が大きい。

以上の結論は重泥水TLDのような非線形挙動の強くないTLDにも適用できるものであると考えられる。

(2) TLDの固有振動数と設計用ダイアグラム

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できる¹⁹⁾。

$$\text{矩形: } f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{2a} \tanh \frac{\pi h}{2a}} \quad (9)$$

$$\text{円形: } f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\xi g}{2a} \tanh \frac{2\xi h}{2a}} \quad (10)$$

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。

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、個数を定める必要がある。式(9)あるいは(10)から分かるように、ある固有振

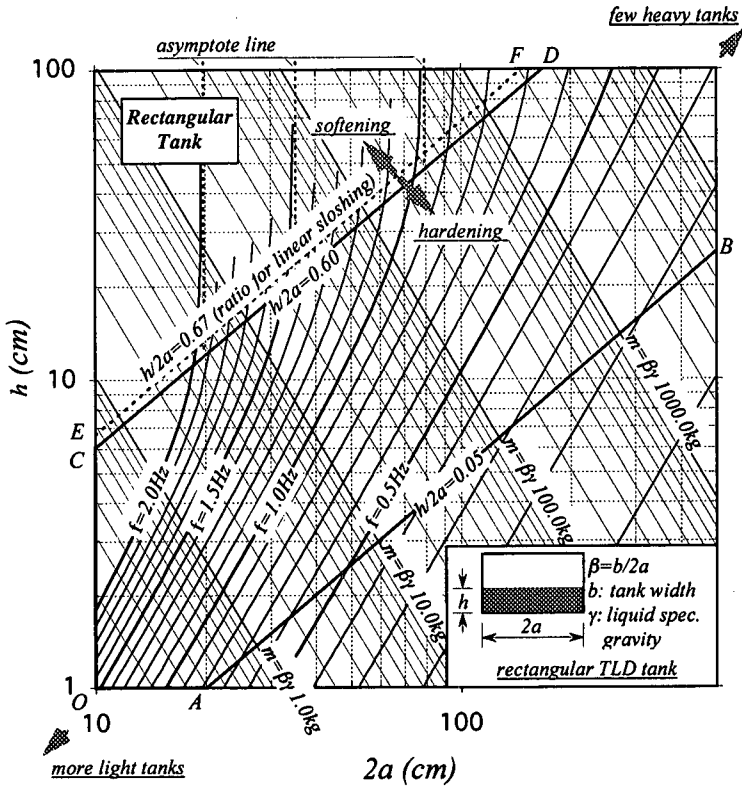


図-13 長方形TLD設計用ダイアグラム

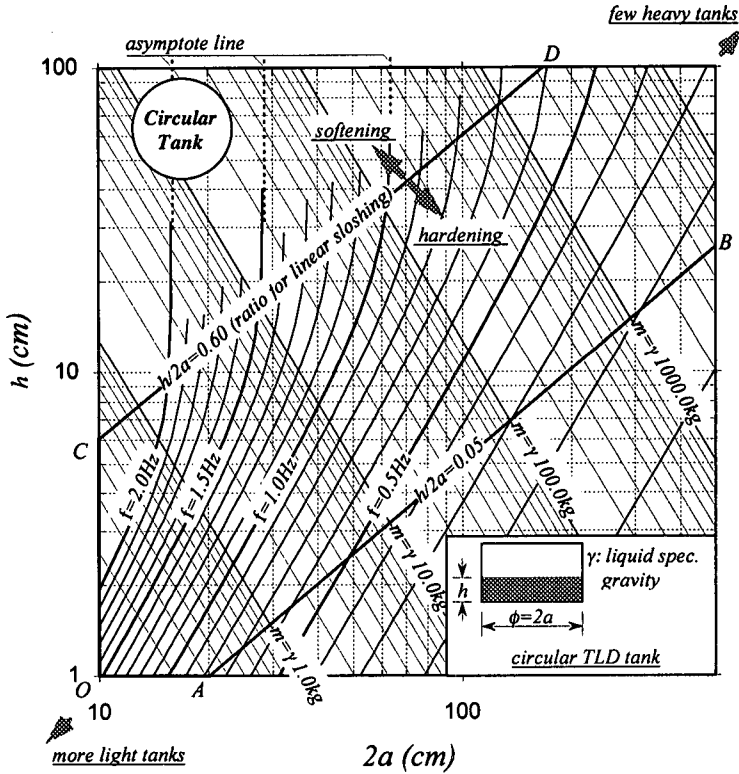


図-14 円形TLD設計用ダイアグラム

動数に対して、複数の容器サイズ $2a$ と液深 h の組合せを選択できる。

ここで、式(9)、(10)に基づいて TLD 設計用のダイアグラム(図-13 と図-14)を提案する。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容易に検討できるものである。容器内液体のスロッシングの非線形特性は液深比 ($h/2a$) に依存する。長方形容器の場合、 $h/2a$ が 0.67 (円形容器の場合は 0.60) になると、スロッシングは線形になる。それより深くなるとソフトニングな非線形特性と、逆に浅くなるとハードニングな非線形特性となる。一方、実験および理論研究の結果から明らかになっているように、液深比 $h/2a > 0.6$ の場合、容器内の液体が深すぎて下部の液体があまり動かず (いわゆる 'dead water')¹⁴⁾ 実質上ダンパー質量として働かなくなる。一般には、TLD の容器サイズと液深は AB~CD 線の間にある (即ち、液深比 : $0.05 < h/2a < 0.60$) のが妥当である。

(3) 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に推定するのは容易でないが、一般に 6% 前後となる最適減衰を用いる TLD はその非線形性がおさえられるので、工学的には等価線形的手法を適用できる。TLD に最適な減衰を持たせるためには、重泥水のような高粘性液体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 自由度系に見なした等価減衰定数は式(11)で計算できる¹⁹⁾。

$$\text{矩形: } h_{TLD} = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{v}{8\omega}} (1 + 2h/b + S) \quad (11)$$

ここに、 v_e は式 (6) と同じ液体の等価動的粘性係数、 ω は TLD の固有円振動数である。S は液体表面係数で、一般には 1.0 の値を用いる。

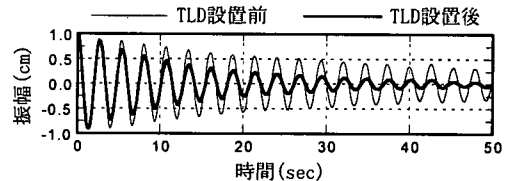
非ニュートン流体である重泥水を用いる場合、容器の大きさと構造物の振動周期や振幅によって液体の最大せん断歪み速度のオーダーが変わるため、それに依存するスロッシング減衰も変化する。したがって、最適減衰を得るためには、TLD を設計する段階で、重泥水のレオロジー特性を把握した上で、使用時の TLD 内重泥水のせん断歪み速度のオーダーを実験あるいは解析により予測することが重要である。

(4) TLD の有効等価質量

TLD を設計する際、液深比 ($h/2a$)、スロッシング波動レベル、液体の減衰などを検討した上で、等価線形化手法を用いることが可能である。一方、TLD を 1 自由度質点系 (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) は液深比とスロ

TLD 設置状況	橋軸方向	直角方向
設置前	0.312	0.312
設置後	0.436	0.819

TLD 設置状況	橋軸方向		直角方向	
設置前	1 回目	0.76	平均	0.80
	2 回目	0.92	0.86	0.83
	3 回目	0.90	-	0.82
設置後	1 回目	2.27	平均	2.75
	2 回目	2.56	2.42	2.60
	3 回目	-	-	2.81



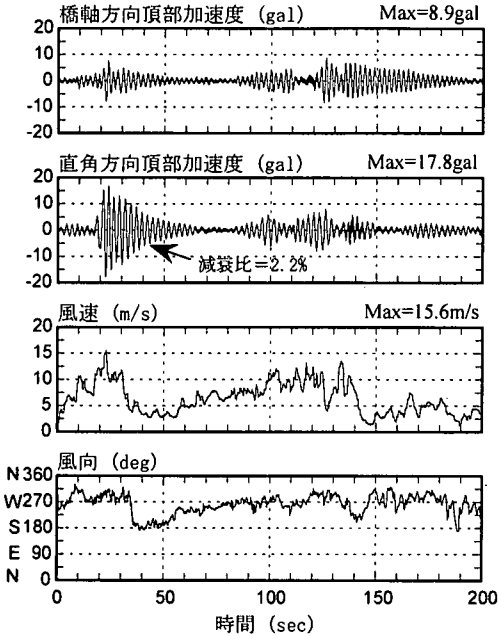
シングの振幅に依存することが分かっている²¹⁾。TLD の付加減衰効果を検討する際にはそれを考慮する必要がある。TLD の挙動をより正確に分析したい場合は、波動理論モデル¹⁸⁾、¹⁹⁾を用いる数値シミュレーションが必要となる。

6. 施工時高橋脚の加振実験

(1) 対象橋脚

対象とした橋脚は高さ 73m の鋼管コンクリート複合構造であり、ハイブリッドスリップフォーム工法²²⁾により施工している。この工法は、フーチングを施工した後、仮設足場兼用の鋼管を先行して全高さまで建て込み次に鉄筋を組み建てる。その後、スリップフォーム工法によりコンクリートを打設するもので、鋼管の自立状態が長期に及ぶ場合がある。実験の対象は直径 1.5m の鋼管 9 本を高さ 73.5 m まで立ち上げた状態である (図-1 参照、コンクリート打設後の橋脚断面は 6.5 × 6.5 m である)。強風時の振動を抑制する目的で比較的簡易な制振装置である重泥水 TLD を設置したものである。

制振効果を確認するため、常時微動測定、人力加振による自由振動実験、および対風応答観測を行った。



(2) 重泥水 TLD 装置

用いた重泥水 TLD の容器は長さ 180cm×高さ 50cm×幅 50cm の長方形で、計 8 個（橋軸、直角方向各 4 個）を鋼管の間の狭い空間を利用して最上段足場に設置された。重泥水は比重 1.4 のものを用い、液の深さは 19.1cm である。固有振動数は 0.375Hz で、微動測定で実測した 9 本組鋼管柱（橋軸方向と直角方向は同じ）の固有振動数に同調している。鋼管柱の 1 次モード質量が約 70t で、重泥水 TLD の質量比は 1.34% になる。

(3) 微動測定結果

TLD 設置前後のほぼ無風状態での微動測定を行い、フーリエスペクトルから $1/\sqrt{2}$ 法²⁰⁾ で減衰定数を求めたものが表-2 である。設置後の減衰が増大したことから重泥水 TLD は微小振幅の振動に対しても効果があることが分かる。

(4) 自由振動実験結果

9 本組鋼管柱頂部に数人が体を鋼管柱の固有周期に合わせて水平往復移動し、その慣性力を利用して加振した。鋼管柱頂部の変位振幅が約 1cm に達した時点で加振を停止し、自由振動加速度を測定した。重泥水 TLD 設置前後、橋軸方向と直角方向にそれぞれ 2～3 回加振実験を行った。自由振動波形から求めた減衰を表-3 に示す。重泥水 TLD の設置により、鋼管柱の減衰は約 3.0 倍に増大されたことが分かる（図-15）。

(5) 対風応答観測結果

重泥水 TLD を設置後、鋼管柱頂部の風速および対風応答加速度を観測した。図-16 に示すように、瞬間風速が 10 m/s 以上を超えると、鋼管柱頂部には 10gal 前後の最大応答加速度が観測された。瞬間風速が小さくなった時に、重泥水 TLD の減衰効果を応答加速度波形の振幅低減からはっきり確認できる。例えば、観測時間の 25sec から 60sec の間は瞬間風速が直前の 15m/s 以上から 4m/s 以下に低下し、この間鋼管柱は自由振動に近い状態にあると考えられる。振幅のより大きい直角方向の頂部加速度波形から計算した減衰定数は 2.2% である。風による加振がなくなっている訳ではないので、重泥水 TLD の設置によって、2.2% 以上の減衰が確保できていると言える。

(6) 重泥水 TLD の性能評価

数値解析によるシミュレーションでこの付加減衰値は 10-15% の減衰定数を有する TMD の効果に相当することが分かった。即ち、実験の際の変位振幅範囲に対し、用いた重泥水 TLD の等価減衰は 10-15% 程度である。この値は最適減衰値の 6-7% より高めとなっているが、図-2 から分かるように、重泥水の粘性はせん断歪み速度の増大に連れて小さくなるので、大変位の場合の重泥水 TLD の等価減衰は最適値により近くなる。強風時に対象構造物には人力加振実験の 1cm 程度の変位よりも大きな変位（数 cm～十数 cm）が生じる可能性があると考えるので、今回用いた重泥水 TLD は重泥水の非線形減衰特性を活用したロバスト性のある設計となっていると言えよう。

7. まとめ

本論文では重泥水 TLD の性能を実験および解析により検討し、さらに高橋脚施工時の 9 本組鋼管柱の制振に適用し効果を検証した。得られた主な結論は以下のとおりである。

- 1) 重泥水 TLD の挙動について模型実験により検討した結果、重泥水 TLD は水を用いる同じ寸法の TLD の 2～3 倍の付加減衰効果を有することを確認した。
- 2) 拡張した非線形波動理論モデルを用いた解析結果は実験値とよく整合しており、解析手法は妥当であることを確認した。
- 3) 重泥水 TLD を高橋脚施工時の高さ 73m の 9 本組鋼管柱の制振へ適用した。自由振動実験および対風応答観測の結果から重泥水 TLD の設置によって、減衰定数は 3 倍程度増加することが分かった。
- 4) 非ニュートン流体である重泥水の粘性はせん断歪み速度によって水の粘性 (1cp) の数十倍から数百倍となることが分かった。したがって、TLD を設計する段階で、最適減衰を得るためには TLD 内の重泥水のせん断歪み速度の

オーダーを予測することが重要である。

5) TLD の最適設計手法を考察し、設計用ダイアグラムを提案した。

今後の研究課題には、重泥水 TLD を長期的に使用する場合の泥粒子の沈殿防止策や、重泥水の等価スロッシング減衰をより精度良く評価する手法などが挙げられる。

謝辞：重泥水 TLD の解析には、著者（孫）が東京大学工学部土木工学科橋梁研究室に在学時、藤野陽三教授のご指導の下で開発した解析プログラム LIDAMPS を用いた。橋脚の制振案を検討する際、日本道路公団東北支社の渡辺将之氏に助言をいただいた。また、本研究を進めるに当たって、大林組の加藤敏明、星加益朗、炭田光輝、佐藤安衛諸氏から多くの支援をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Modi, V. J. and Welt, F.: Damping of wind induced oscillations through liquid sloshing, *J. Wind Eng. And Ind. Aerodyn.*, Vol. 30, pp. 85-94, 1988.
- 2) 佐藤孝典: Tuned Sloshing Damper, *日本風工学誌*, No. 32, pp. 67-68, 1987.
- 3) 藤野陽三, ベニート・M・パチェコ, ピヤワット・チャイセリ, 藤井邦雄: TLD の基本特性に関する実験的検討, *土木学会構造工学論文集*, 34A, pp. 603-616, 1988.
- 4) Fujino, Y., Sun, L. M., Pacheco, B. M. and Chaiseri, P.: Tuned Liquid Damper (TLD) for Suppressing Horizontal Motion of Structures, *ASCE, J. Engineering Mechanics*, Vol. 118, No. 10, pp. 2017-2030, 1992.
- 5) Warburton, G. B.: Optimum Absorber Parameters for Simple Systems, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, Vol. 8, pp. 197-217, 1980.
- 6) Sun, L. M., Pacheco, B. M., Fujino, Y. and Chaiseri, P.: Effects of liquid viscosity on TLD performance -Experiment and simulation-, *JSCE, Proc. of 44th Annual Meeting*, pp. 732-733, 1989.
- 7) 小坂英之, 野路利幸, 立見栄司, 山中久幸: 水のスロッシングを利用した制振機構の制振効果に関する実験的検証, *日本地震工学シンポジウム論文集*, 8-2, pp. 1797-1802, 1990.
- 8) Tamura, Y., Kosaka, R. and Modi, V. J.: Practical application of nutation damper for suppressing wind-induced responses of airport towers, *J. Wind Indust. Aerodyn.*, 43, pp. 1919-1930, 1993.
- 9) 坂井藤一, 高枝新伍, 玉木利裕, 北沢正彦, 正田正一: TLCD による東神戸大橋主塔の制振実験, 第 46 回土木学会年次学術講演会概要集第一部, pp. 980-981, 1991.
- 10) Gardarsson, S., Yeh, H. and Reed, D.: An investigation of sloped bottom Tuned Liquid Dampers, *Proc. of 2nd World Conf. on Struct. Contl.*, Vol. 1, pp. 155-164, 1998.
- 11) Abe, M., Fujino, Y. and Kimura, S.: Tuned Liquid Damper (TLD) with high performance fluids, *Proc. of 2nd World Conf. on Struct. Contl.*, Vol. 1, pp. 131-138, 1998.
- 12) 沖野文吉: ホーリング用泥水<新版>, 技報堂, 1981.
- 13) 林正夫: 重泥水により作動する高出力 CASE に関する物性の基礎実験, 第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 275-280, 1998 年.
- 14) Housner, G. W.: Dynamic pressures on accelerated fluid containers, *Bull. Seismo. Soc. Amer.*, 47, pp. 15-35, 1957.
- 15) 高西照彦, 園田敏矢, 多田浩: 非線形水平振動を行う長方形 TLD 内容液の等価振動系近似, *土木学会論文集*, No. 598/I-44, pp. 111-123, 1998.
- 16) 大山巧: 円筒容器内の非線形スロッシング現象の解析, *土木学会論文集*, No. 417/II-13, pp. 255-264, 1990.
- 17) 若原敏裕, 藤野陽三, 野村卓史: Boussinesq 方程式を用いた円筒形同調液体ダンパーの非線形スロッシング解析, *土木学会論文集*, No. 549/I-37, pp. 125-140, 1996.
- 18) Sun, L. M., Fujino, Y., Pacheco, B. M. and Chaisei, P.: Nonlinear waves and dynamic pressures in rectangular Tuned Liquid Damper (TLD), *JSCE, Struc. Eng./Earthq. Eng.*, Vol. 6, No. 2, pp. 251s-262s, 1989.
- 19) Sun, L. M.: Semi-analysis modeling of Tuned Liquid Damper (TLD) with emphasis on damping of liquid sloshing, *Doctoral dissertation, Civil Eng. Dept. of Tokyo Univ.*, 1991.
- 20) Den Hartog, J. P.: *Mechanical Vibration*, McGraw-Hill, New York, 1956.
- 21) Sun, L. M., Fujino, Y., Pacheco, B. M. and Chaiseri, P.: The properties of Tuned Liquid Dampers using a TMD analogy, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, Vol. 24, pp. 967-976, 1995.
- 22) 馬淵勝美, 市川裕康, 奥田幸男, 加藤敏明: 新型スリップフォームによる複合構造高橋脚の施工, *コンクリート工学*, Vol. 33, No. 4, pp. 55-61, 1995.
- 23) Clough, R. W. and Penzien, J.: *Dynamics of structures*, McGraw-Hill, 1975.

(2000.1.14 受付)

TUNED LIQUID DAMPER (TLD) USING HEAVY MUD

Limin SUN, Toshio KIKUCHI, Yozo GOTO and Masao HAYASHI

This paper presents an investigation of a tuned liquid damper (TLD), for which heavy mud is used instead of water as the liquid. The viscosity of heavy mud is higher than that of water and can be adjusted within a certain range to meet the optimal design value of liquid sloshing of TLD. In addition, the heavy mud has a higher density than water, hence more effective mass is available.

The experimental results showed that the heavy mud TLD is more effective than a conventional TLD using plain water. The simulations, using a modified theoretical model with equivalent damping of heavy mud, showed good agreement between the measurement and the prediction. The heavy mud TLD was applied to a high RC bridge pier under construction for reducing wind-induced vibration. It was found that the damping ratio of the pier was increased from about 1% to 3%.