

## 重泥水のスロッシングを利用した制振用ダンパーの開発

—ダンパー性能に関する実験, 解析および高橋脚施工時の制振効果の検討—

孫 利民 菊 地 敏 男  
後 藤 洋 三 加 藤 敏 明(本社 土木技術本部  
設計第1部)

## Tuned Liquid Damper (TLD) Using Heavy Mud

—Experiment, Simulation and Application—

Limin Sun Toshio Kikuchi  
Yozo Goto Toshiaki Kato

## Abstract

This paper presents an investigation and implementation of a tuned liquid damper (TLD) for suppressing wind-induced vibration of high piers of an RC bridge during construction. TLD is a kind of passive damper that uses liquid motion in rigid containers. In this study, heavy mud is used instead of water as the liquid for TLD. The heavy mud consists of bentonite water with heavy materials, BaSO<sub>4</sub>, and other added chemical materials for adjusting the viscosity and resisting the sedimentation of mud particles. The advantage of using heavy mud is that its viscosity is higher than that of water and can be adjusted within a certain range to meet the optimal design value of liquid sloshing. In addition, the heavy mud has a higher density than water, hence more effective mass is available for the same volume, so the TLD using heavy mud can be made more compact (or use few containers). Experimental results showed that the heavy mud TLD is more effective than a conventional TLD using plain water. The simulations based on wave theory showed good agreement between the measurement and the prediction. The TLD using heavy mud was applied to a high RC bridge pier under construction for reducing wind-induced vibration. From a free vibration test and observations of wind-induced response, it was found that the damping ratio of the pier was increased from about 1% to 3%.

## 概 要

重泥水のスロッシングを利用したダンパーは構造制振用の同調液体ダンパー (Tuned Liquid Damper=TLD) の一種である。本論文は重泥水TLDの性能を実験および解析により確認し、高橋脚施工時の制振効果を検討したものである。従来型のTLDは水を用いるのがほとんどで、水の粘性のみによる液体スロッシングの減衰は最適値より小さいため、付加の減衰増加装置が必要になる場合が多い。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安定な液体である。それを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できる。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上、重泥水TLDの挙動について模型実験および非線形波動理論を用いた解析により検討した。その結果、重泥水TLDは水を用いる同じ寸法のTLDの付加減衰の2~3倍を有することを確認した。また、解析結果と実験値がよく整合していることから用いた解析手法の妥当性も検証できた。重泥水TLDを高橋脚の施工時の制振へ適用して制振効果を検討した。加振実験および風応答観測の結果から重泥水TLDを設置することによって、減衰定数は2~3倍程度増加し、振幅は2/3~1/3に減少することを確認した。

## 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) の一種である。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、安全性または施工性などを確保できる (Fig. 1)。

TLDは同調質量ダンパー (TMD) 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、制振効果はダンパー質量比 (TLD内液体質量/構造物のモード質量) の増大に従って高まる。

従来、TLD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

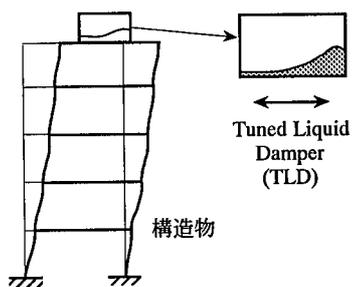


Fig.1 構造物に設置したTLD  
TLD installed on a structure

り小さいため、付加の減衰増加装置が必要となる場合が多い。

重泥水は高粘性（水の数十倍～千倍位）、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を容易に達成することと高い質量比によるTLDの制振効果の向上、合わせて減衰増加装置の不要によるTLDの構造単純化や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確認し、高橋脚施工時の制振に適用して検証したものである。

## 2. 重泥水の成分とレオロジー特性

### 2.1 重泥水の成分

石油や天然ガスの掘削においては、以前から泥水が開発されていた<sup>2)</sup>。従来ボーリング用の泥水（drilling mud）はベントナイト液を主体として、必要に応じてその他の各種の加重剤や調泥剤を加えて調整した一種の水一粘土懸濁液である。泥水は比重と粘性のコントロールが容易で、性質が安定などの諸機能のほかに、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パライトと粘性の調整と安定性を保つための調泥剤（増粘剤、分散剤）を加えたものである。

### 2.2 重泥水のレオロジー特性

重泥水は、非常に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、その比重、特にレオロジー（rheology）特性を把握するのが重要である。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のため、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となっているのが分かる（Fig. 2）。

また、水一粘土の懸濁液である重泥水をTLDの液体と

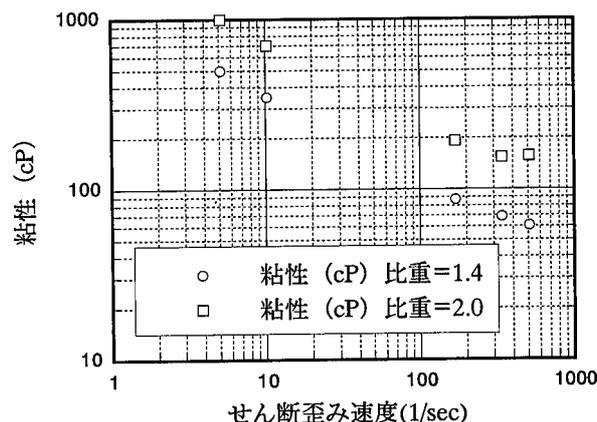


Fig.2 重泥水の粘性  
Viscosity of Heavy Mud

して長期使用する場合、泥粒子の沈降現象が起これず安定な比重と粘性を保つ性能が要求される。林ら<sup>3)</sup>の研究によると、新製泥水は6カ月以内なら大きな性質変化がないまでの技術が確立されている。2～3年連続観測した結果、若干沈降を起こるが、攪拌すれば、泥水の性質がほぼもと通りに回復する。今回は、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が、永久、半永久使用の場合の適用性についてはさらに検討する必要がある。

## 3. 重泥水TLDの定式化

### 3.1 低粘性液体TLDの定式化

以前、著者<sup>4)</sup>は水など低粘性液体を用いるTLDの理論モデルを提案した。

Fig. 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した。液体は非圧縮性、渦なしとし、連続の式は

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

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

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

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

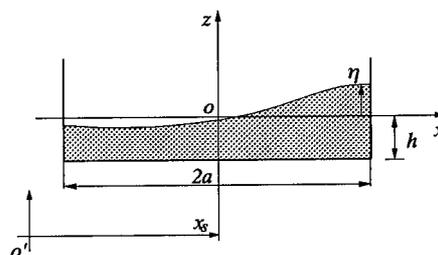


Fig.3 長方形TLDの座標系  
Definition Sketch for Rectangular TLD

である。ここで、 $u, w$ =液体水粒子の水平（ $x$ 方向）と鉛直（ $z$ 方向）速度； $\rho$ =液体の比重； $g$ =重力加速度； $x_s$ =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（Eq.(1)-(3)）を鉛直方向に積分すると、波高 $\eta$ と自由表面での流速 $u(\eta)$ に関する基本方程式が得られる。

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

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

ここで、 $h$ は液体の深さで、 $\phi, \alpha, T_u$ は容器サイズと液体深さにより決める定数である。 $\lambda u(\eta)$ は後で導入した液体の粘性などによる減衰項である。

3.2 重泥水の等価減衰の導入

3.1の数学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、ここで重泥水の等価粘性を導入して、モデルの適用範囲を拡張した。

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

ここで、 $b$ は容器の幅で、 $v_e$ は重泥水の等価粘性係数である。拡張したモデルの有効性は第4章に実験結果より検証した。

4. 模型実験とシミュレーション

4.1 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<sup>5)</sup>。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0.8Hzを有するものである。公称比重1.4と2.0の二種類の重泥水を用いて、TLD容器内の液体のスロッシングを起こし液面の高さ変動の時刻歴自由減衰波形を測定した。その波形より計算した重泥水TLDの等価減衰定数はそれぞれ10.7%と15.3%である。

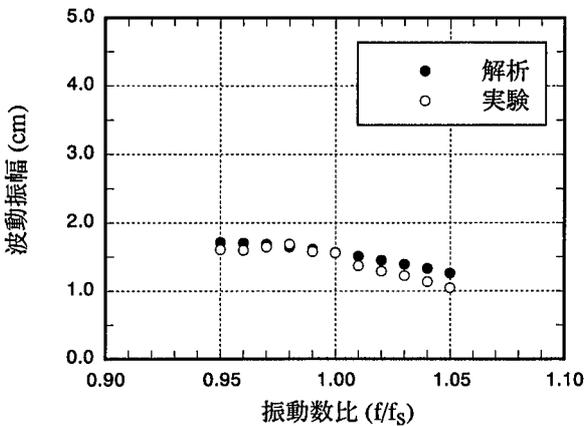


Fig.4 共振曲線（正弦波スイープ加振実験）  
Resonance Curve (Sweep Excitation Test)

比重1.4の重泥水を用いたTLD容器を共振点付近で片振幅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（Fig. 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、曲線の形状もフラットになっている。線形の共振点で（ $f/fs=1.0$ 、 $f$ :加振振動数； $f_s$ :TLD固有振動数）の応答波形を Fig. 5 に示す。波形から、重泥水のスロッシングの非線形（上下振幅が対称ではない）挙動が分かる。

4.2 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に設置し自由振動実験を行った。TLDの質量比は1.1%である。同質量のTMD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TLDを用いた。構造減衰定数は重泥水TLDの設置によって、0.30%から1.91%まで増大した。一方、水を用いる同じ寸法の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、減衰効果は重泥水TLDの1/2~1/3程度しかないのを確認した（Fig. 6）。

4.3 シミュレーションとの比較

第3章で定式化した解析モデルで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。700cPの値を用いた解析結果は実験値とよく一致し（Fig. 4-6）、拡張したモデルの有効性を確認した。

5. 重泥水TLDの設計

5.1 固有振動数

TLDには制振対象の構造物と同じ固有振動数を有する

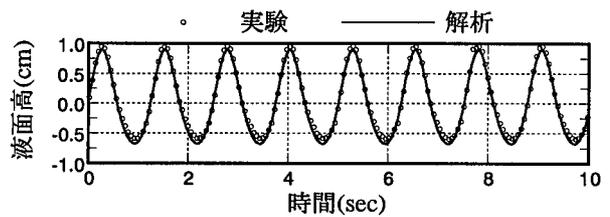


Fig.5 時刻歴（正弦波スイープ加振実験）  
Time History (Sweep Excitation Test)

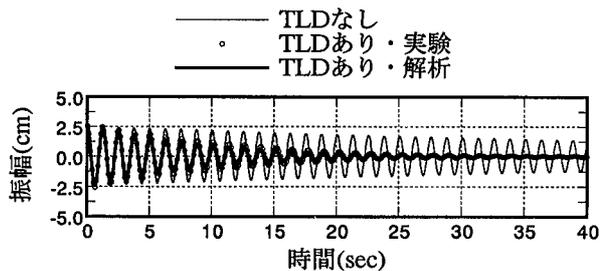


Fig.6 時刻歴（自由振動実験）  
Time History (Free-Vibration Test)

こと、即ち同調することが要求される。線形理論によると、長方形容器内液体のスロッシング固有振動数は次の式により評価できる。

$$f_w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{2a} \tanh\left(\frac{\pi h}{2a}\right)} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $2a$ は容器の長さである。

式(7)から分かるように、ある固有振動数に対して、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、著者は Fig. 7 に示す設計用ダイアグラムを大提案した。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であると、スロッシングは線形である。それより深くなるとソフトニングな非線形、逆に浅くなるとハードニングな非線形特性を表す。

一方、実験および理論研究の結果から分かったように、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')実質上ダンパー質量として働く有効質量が小さくなる問題があり、経験上液深比は $0.05 < h/(2a) < 0.60$ の範囲では適当であろう。

5.2 スロッシング減衰

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せん断歪み速度のオーダーが変わるため、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する上、TLD内重泥水のせん断歪み速度のオーダーを実験的あるいは第3章に提案した理論モデルで繰返し計算により予測することが極めて重要である。

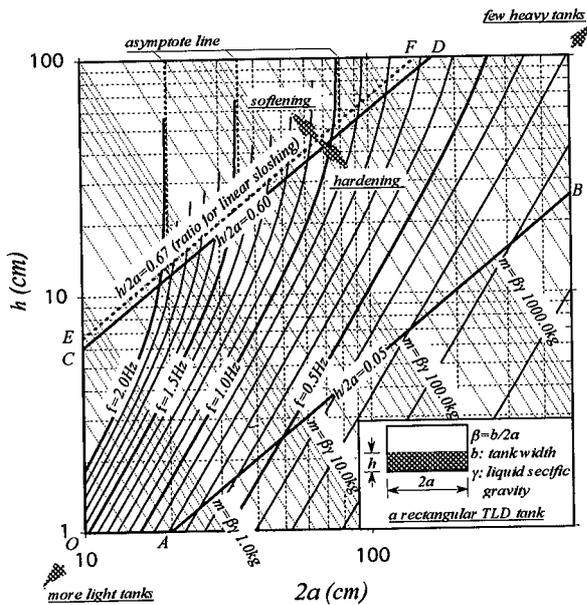


Fig.7 TLD設計用ダイアグラム  
Diagram for TLD Design

6. 施工時高橋脚の制振

6.1 対象橋脚

対象とした橋脚は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<sup>6)</sup>により施工している。この工法は、フーチングを施工したあと、鋼管・鉄筋の建て込みを施工する。このあと、ハイブリッドスリップフォーム工法によりコンクリートを打設するので、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73.5mまで立ち上げた状態である(完成後の橋脚断面は6.5×6.5mである)(Fig. 8)。強風時の振動を制御する目的で比較的簡易な制振装置である重泥水TLDを設置されたものである。

制振の効果を確認するため、常時微動測定と人力加振による自由振動実験より、制振装置の有無における振幅の低減程度、固有周期と減衰定数などを把握した。

6.2 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の長方形もの計8個(橋軸、直角方向各4個)で、鋼管の間の狭い空間を利用して橋脚最上段足場に4カ所2段重ねで設置された(Fig. 9)。重泥水は比重1.4のものを用い、液の深さは19.1cmである(Photo 1)。固有振動数は0.375Hzで、微動測定で実測した橋脚(橋軸方向と直角方向同)の固有振動数に同調している。鋼管自立状態の橋脚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。

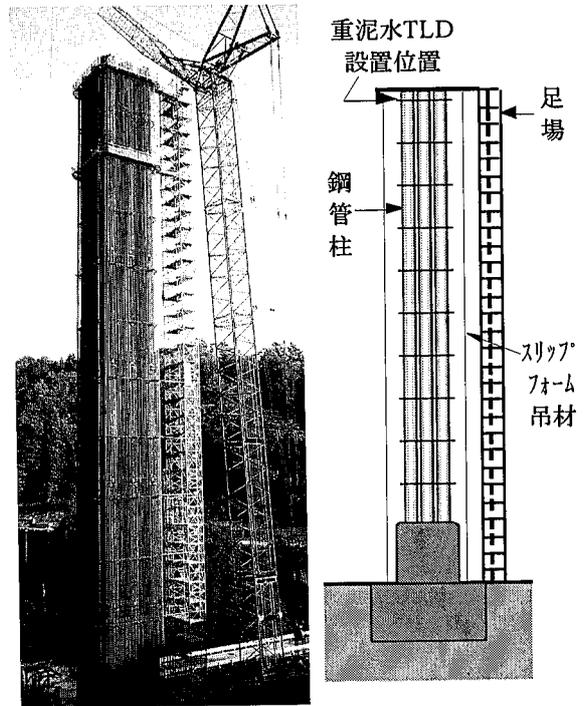


Fig.8 施工時の鋼管コンクリート高橋脚  
Bridge Pier (Steel Pipes) Under Construction

6.3 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 $1/\sqrt{2}$ 法で各実験ケースごとの減衰定数を求めたものが Table 1 である。構造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的であることが分かる。

6.4 自由振動実験結果

橋脚頂部に数人が体を橋脚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橋脚に加振した。橋脚頂部変位振幅が約1cmに達した時点で加振を停止し橋

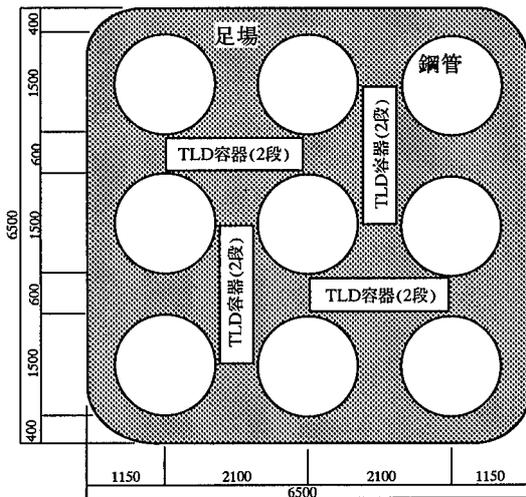


Fig.9 重泥水TLD平面配置図  
Arrangement of Heavy Mud TLD



Photo 1 橋脚頂部に設置した重泥水TLD  
Heavy Mud TLD Installed on Top of Pier

脚の自由振動加速度を測定した。重泥水TLD設置前および設置後、橋軸方向と直角方向にそれぞれ2~3回を加振した。自由振動波形から求めた構造減衰を Table 2 に示す。重泥水TLDの装着により、橋脚の減衰は約3.0倍に増大されたことがわかる (Fig. 10)。

6.5 風応答観測結果

重泥水TLDを設置後、橋脚頂部の風速および風応答加速度を観測した。Fig. 11 に示すように、瞬間風速が10 m/s以上を超えると、橋脚頂部には10gal前後の最大応答加速度を観測された。瞬間風速が小さくなると、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のあいだ、瞬間風速が15.5m/sから4m/s以下に低下し、この間橋脚は自由振動に近い状態にあると考えられる。直角方向の頂部加速度波形から計算した構造減衰定数は2.2%である。言い換えれば、重泥水TLDを設置後、2.2%以上の構造減衰が確保できることが確認できた。

Table 1 減衰定数 (%) (小振幅の場合)  
Damping Ratio (%) (Small Amplitude)

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

Table 2 減衰定数 (%) (大振幅)  
Damping Ratio (%) (Large Amplitude)

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

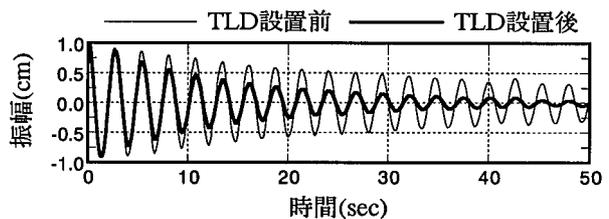


Fig.10 橋脚の自由振動実験波形  
Free-Vibration Test of Bridge Pier

6.6 重泥水TLDの性能評価

数値解析によりこの付加減衰値は10-15%を有するTMDの効果に相当することが分かった。即ち、行った実験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、Fig. 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のが分かる。対象橋脚は人力加振実験の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配慮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制振へ適用し制振効果を検証した。得られた主な結論は以下のとおりである。

- 1) 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、最適減衰を得られるためにはTLD内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。
- 2) 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の付加減衰の2～3倍を有することを確認した。
- 3) 非線形波動理論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。
- 4) 重泥水TLDを高橋脚の施工時の制振へ適用した。自由振動実験および風応答観測の結果から重泥水TLDを設置することによって、減衰定数は3倍程度増加することが分かった。

謝 辞

本研究は東海大学工学部土木工学科の林正夫教授と共同で行ったものです。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を用いました。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きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1) Fujino, Y., Sun, L. M. et. al.: Tuned Liquid Damper

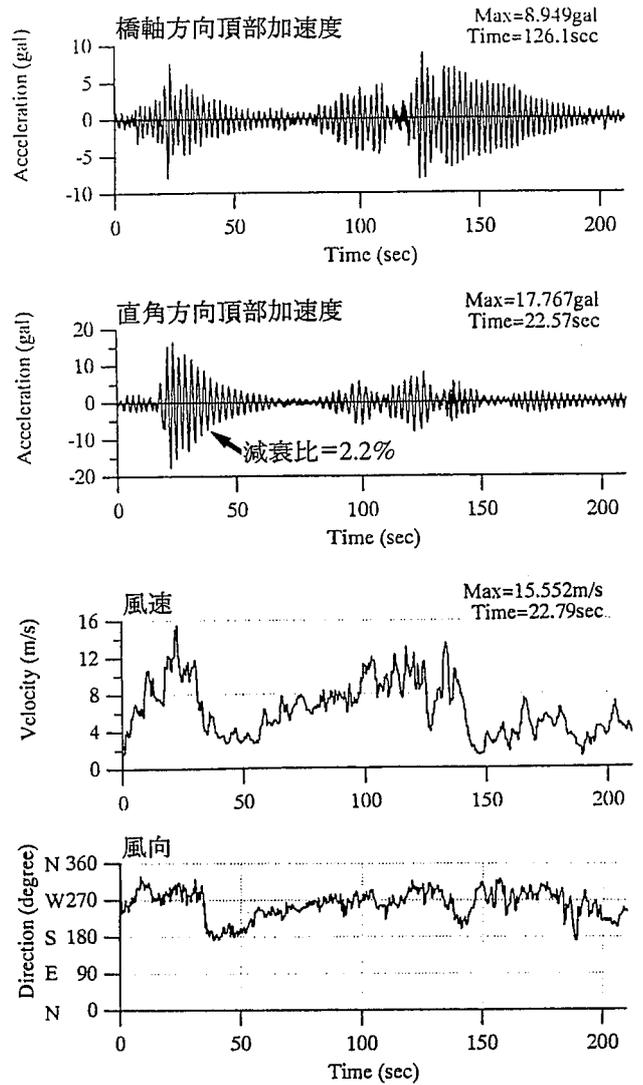


Fig.11 風応答観測結果  
Wind-Induced Response

(TLD) for Suppressing Horizontal Motion of Structures, ASCE, J. Engineering Mechanics, Vol.118. No.10, p2017-2030, Oct., 1992.

- 2) 沖野文吉：ボ-リング用泥水<新版>，技報堂，1981。
- 3) 林正夫ら：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，p275-280，1998年。
- 4) Sun, L. M.: Semi-analysis modelling of Tuned Liquid Damper (TLD) with emphasis on damping of liquid sloshing, Doctoral dissertation, Civil Eng. Dept. of Tokyo Univ., 1991.
- 5) 孫利民ら：重泥水を利用した同調液体ダンパー (TLD)，第53回土木学会年次学術講演会梗概集，1998年。
- 6) 馬淵ら：新型スリッパ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.4，1995年。