構造工学論文集　Vol.34 A（1988年３月）　　土木学会

同調液体ダンパー（ＴＬＤ）の基本特性に関する実験的検討―円筒容器の場合―

AN EXPERIMENTAL STUDY ON TUNED LIQUID DAMPER USING CIRCULAR CONTAINERS

藤野陽三[1)]、Ｂ．パチェコ[2)]、チャイセリ、Ｐ．[3)]、藤井邦雄[4)]
By Yozo FUJINO, Benito PACHECO, Chaiseri, PIYAWAT and Kunio FUJII

Tuned Liquid Damper (TLD), relying upon motion of shallow liquid in a rigid container is experimentally studied. Prototype-sized circular containers with the diameters 40cm and 60cm and partially filled with water are attached to a single-degree-of-freedom structural model with natural period of 2 second. Damping of free oscillation of the SDOF model with TLD is measured. Effects of tuning of TLD (frequency ratio), liquid viscosity, bottom roughness and container roof height on the additional damping are studied. It is found that additional damping due to TLD is primarily caused by wave breaking of liquid and hence is highly dependent upon the structural amplitude. Effect of container size on the additional damping is also studied.

１．　はじめに

材料の高強度化、接合方法等の向上により、構造物の軽量化、フレキシブル化、そして構造減衰の低下が今後さらに進むと予想される。このとき、従来にもまして地震、風などによる振動が問題として顕在化する。

免振、制振法[1)2)]として種々のものが考察され、一部実用化されている。その中で同調付加質量によるダンパー、いわゆるＴＭＤが近年いくつかの構造物に設置されているが、同調に対する性能の敏感さ、ＴＭＤの維持管理、摩擦により微小振動に対して機能しない場合がある、などの問題があり、必ずしも完璧なものではない。

本研究で対象としたのは容器内に液体を入れ、この液体の揺れによる振動エネルギーの吸収・逸散を利用したもので、著者らはこれを同調液体ダンパー（Tuned Liquid Damper, TLD）（図１）と呼んでいる。この種のダンパーは、やや機構は異なるが古くから宇宙構造物の振動防止として用いられてきたNutation Damper（図２）[3、4、5)]、船舶に用いられてきた減揺水槽（図２）[6)]などと液体の動きを利用するという点では共通している。

土木・建築構造物の制振への液体ダンパーの応用についてはModiらのNutation Damperに関する論文（文献7）が先駆的なものである。我国においても佐藤ら（文献8、9、10）、船舶関係ではあるが松浦ら（文献11）も独自にアイディアを発表しており、また、他にも予備的な検討結果がいくつか発表されている[12、13、14、15)]。液体ダンパーは簡便かつ廉価そして設置が容易であり、塔状構造物の水平振動、とくに架設時などの一時的な制振策としては有望な方法の一つと考えられる。

文献16、17を含めて液体ダンパーに関するこれまでの研究は液体の動揺を利用したこのダンパーの有効性を示してはいるものの、それの基本的特性についてはあまり触れておらず、その機構、あるいは実構造物に液体ダン

１）Ph.D.　東京大学助教授　工学部総合試験所（〒113　文京区弥生２－11－16）
２）工博　東京大学講師　　工学部土木工学科（〒113　文京区本郷７－３－１）
３）工修　東京大学大学院　博士課程
４）　　清水建設技術研究所　環境技術研究部部長（〒135　江東区越中島３－４－17）

パーを適用する際に問題となる事項等が未解決のように思われる。

本報告は、同調液体ダンパー（ＴＬＤ）の実用化を念頭において基本的特性を知る目的で行った一連の予備的実験の結果と、そこで得られた知見を述べるものである。用いた容器は円筒形であり、断わりがない限り内容液は水である。

２．　実験の主旨と装置

ＴＬＤ（図１）の有効性を知る目的で、１自由度振動系にＴＬＤを設置し、その基本的特性を自由振動実験から理解することを考えた。

図３に、実験に用いたせん断型振子タイプの装置を示す。振動系の質量はＴＬＤを設置したときに、質量比が現実的な値、すなわち高々数％となるように、116kg～440kgと重くしてある。

従来の実験は、ＴＬＤとしては実際に用いられるであろうサイズよりもかなり小さい模型で行われている。ＴＬＤには液体の動揺、とくに砕波等の非線形現象が関与するので当然サイズ効果（相似則）の問題がからむと考えられる。そこで振動系の固有周期としては長大構造物の代表的な周期である２秒を選び、ＴＬＤの大きさとしてはスペース、持ち運びやすさ等の実用性を配慮し、直径ϕ＝40cm、60cmの２つの円筒容器（実物大を想定）を用意した。このとき、数十トン～数百トンという質量の大きい実構造物にＴＬＤを設置する際には、ＴＬＤをいくつか設置すること（マルティプルダンパー）を念頭においている。なお、厳密には円筒容器の内径は各々38.9cm、58.9cmである。

３．　実験パラメーター

ＴＬＤの性能を評価するにあたり、次のパラメーターに着目し、その影響を調べた。

○振動系の振動振幅Ａ
○液体動揺の一次固有振動f_Lと振動系の固有振動数f_Sとの比$\gamma = f_L/f_S$
○液体の質量m_Lと振動系の質量m_Sとの比$\mu = m_L/m_S$
○液体の粘性の影響
○底面粗度（図４）
○容器上屋根の影響（図５）
○容器サイズの影響

なお、液体動揺の一次固有円振動数f_Lはポテンシャル理論により求まる微小振幅波の値、すなわち

$$f^2_L = 1.84\ g\ \tanh(1.84\ h/a)/(4\pi^2 a) \qquad (1)$$

により求めている（図６）。ここで、ｇ：重力加速度、ａ：容器の半径（＝0.5ϕ）、ｈ：水深である。なお、微小振幅時の固有円振動数がこの理論値とほぼ一致することが知られている。

４．　実験結果

振動系に水平変位（7.5cm）を与え、水平自由振動時の対数減衰率δ_n（図７）を求め、ＴＬＤをのせないときの構造減衰率δs（図８）を差し引き、減衰率の増分（付加減衰率）$\Delta\delta = \delta_n - \delta_s$を求め、ＴＬＤの性能の指標とした。構造系の$\delta_s$がある振幅でピークを示す（図８）のは支持ケーブルつけ根の摩擦等によるものと思われる。

なお、δ_s、δ_nはいづれも対象とする振幅の前後２波の値から計算した。また、実験のδ_s、δ_nにはばらつきがあるが、振幅に対してなめらかな曲線で近似したものを図には示してある。

（１）振動数比の影響　　図９に示すのは、水深ｈを変化させた時、すなわち振動数比γを変えたときの付加減衰率$\Delta\delta$と振動系の振幅Ａの関係を示したものである。図１０は振動数比をパラメータにとり各振幅での$\Delta\delta$の

変化をみたものである。水深hは半径aの高々10%程度であり、容器内の水は浅水状態になっている。

図9、10は、振動数比γが1に近いとき、とくに小振幅でTLDにより大きな$\Delta\delta$が得られることを示している。図9（a）のϕ=40cmの容器では振動系の質量が116kgのとき、γ=1.0にするための液体の質量は1.4kgであり、質量比は約1.2%である。γ=1.0に近いときには$\Delta\delta$の振幅依存性が高く、振幅があるレベルでピークを示す。振動数比γを1.0からはずすと、$\Delta\delta$の増加は小さいが、振幅が大きいときにはγ=1.0の場合とあまり差異はない。ただし、γを1.0よりかなり大きくすると（>1.5）、質量比μが大きいにもかかわらず、$\Delta\delta$の増加はほとんど期待できない。また、大振幅での$\Delta\delta$が問題となるのであれば、むしろγを小さく、すなわち浅めの水深にしておくのが質量比の関係から効率的である（図10）。図9（b）においてγ=1.0よりもむしろ0.88のときの方が$\Delta\delta$が大きいが、これはTLDの付加により全体構造系の振動数が若干変化したためもあると考えられる。

いずれにせよ、振動数比γは1.0に近い方がTLDとしての効果が高く、とくに小振幅で大きい。これがTuned Liquid Damper と著者らが呼ぶ理由である。

なお、図6に示したように、TLDの振動数f_Lは径が大きい場合、水深hにはさほど敏感ではない。これは同調が行い易いことを意味し、TLDの実用上の利点の一つと考えられる。

（2）液体の粘性の影響　通常の粘性ダンパーでは、液体の粘性はある程度高い方がよいといわれている。

図11は、液体に砂糖を混ぜて粘性をあげた場合（密度ρ=1.328g/cm^3、動粘性係数ν=0.744cm^2/sec）と、密度を同じにするために塩化カルシウムを混ぜ、動粘性係数をν=0.032cm^2/secと小さくした場合の付加減衰率$\Delta\delta$を構造物の振幅A=7cm、4cm、1cmで比較したものである。大振幅時にはあまり違いがないが、小振幅時には、粘性の低い場合の方が大きな付加減衰率$\Delta\delta$をもたらすことを図11は示している。

（3）底面粗度の影響　容器表面の粗度がTLDの効果に及ぼす影響を調べた。水深は概して低いので、底面積の方が側面積よりも圧倒的に大きい。そこで図12に示すような半球形のブロックを底面のみに敷き、$\Delta\delta$を求めた。ブロックを密に敷いたもの（Type A）と、粗く敷いたもの（Type B）を用意した。

図13は振幅Aと$\Delta\delta$（実験値）の関係である。底面に何も敷かず、なめらかにした場合と比べ、$\Delta\delta$の向上はみられず、むしろ若干低下している。$\Delta\delta$のピークを示す振動数比γが少し大きくなっており、これは底面のブロックにより底面近くの水の動きが止められ、実質上の水深が浅くなったことを意味していると思われる。

（4）容器屋根の影響　容器に屋根があると、液面動揺が屋根にぶつかり、エネルギーが逸散する可能性がある。そこで屋根の高さを変化させたときの$\Delta\delta$の変化をしらべた。

図14はその結果の一例である（ϕ=40cm、h=0.06a、γ=1.01）。当然屋根を低くしすぎると液体の動きが制限され、$\Delta\delta$が小さくなる。$\Delta\delta$は屋根の高さが適当なとき（G／h=1.0～1.5）に極大値を示すが、G／hを大きくしたときに比べ、その差は余り大きくない。すなわち、屋根の存在による減衰の上昇は余り期待できず、屋根は十分高くしておいた方がよいということになる。

（5）質量比、マルティプルダンパーの影響　図15は振動系の質量を232kg、116kgとしたとき、すなわちTLDの質量比を2倍にした時の付加減衰$\Delta\delta$の比をとったものである。γが1.0付近では質量比が2倍になった時、減衰$\Delta\delta$も約2倍になることがわかる。なお、γが1.5近くになると比は2.0を下回るが、このとき$\Delta\delta$そのものが非常に小さいために生じた測定誤差か、構造的なものであるのかはっきりとはしない。

実際の構造物の質量は、ここで用いた1自由度系の質量116kg～440kgより圧倒的に大きいことが多い。このとき、ここで用いたϕ40cmあるいはϕ60cmのTLDにより制振を行うとすれば、TLDを何個も設置することになる。そこで、振動系の質量mSを一定にしてTLD（ϕ=40cm）を2個、4個、5個としたときの$\Delta\delta$の変化を調べた。図16は、図15と同じく、$\Delta\delta$の比、すなわち、いくつかのTLDをつけたときの$\Delta\delta$をTLDが1つの場合の$\Delta\delta$で除した値を示す。

振動数比γが１に近い、すなわち同調状態にある場合には$\Delta\delta$の比の値は、ほぼＴＬＤの数の比になっている。γが大きいと、図１５の場合と同じくその比は低下する。

以上のようにγが1.0付近ではＴＬＤの効果は質量比で決まり、複数のＴＬＤが設置される場合も$\Delta\delta$はほぼ線形的に増加すると考えてよいことが判明した。

（６）容器のサイズの影響　ＴＬＤの微小振動時の固有周期は式（１）に示したように同じ液体を使う限り、容器の半径ａと水深ｈにより決まる。ＴＬＤの固有周期を構造物の固有周期に一致（同調）させようとするとき、半径ａを大きくし（水深ｈも大きくなる、したがってＴＬＤ一個当りの質量も増す）数少ないＴＬＤとした方がよいのか、あるいは半径ａを小さくして多数のＴＬＤ（１つ１つのＴＬＤの水深ｈは浅くなる）とした方がよいのか　という問題はＴＬＤの実用設計の上からは極めて重要である。

図１７はϕ＝60cm、ϕ＝40cmの容器で各々振動数比が1.0のとき、質量比がほぼ同じになるように振動子の質量をかえた時の付加減衰$\Delta\delta$である。

次に、直径ϕ＝60cmのＴＬＤと、ϕ＝40cmのマルティプルＴＬＤを用いて、半径ａ（＝ϕ/2）のサイズ効果を調べた。振動数比γ＝1.0付近で両者の質量がほぼ同じになるよう、ϕ40cmのＴＬＤは５個（５層構造）としてある。図１８は$\Delta\delta$を振幅Ａ＝1cm、5cmにおいて比較したものである。

図１７、１８ともに、同じ質量比μであれば大きい径のＴＬＤの方が小さい径のＴＬＤをいくつか置くよりも$\Delta\delta$が大きく、効果的であることを示している。

今回の実験ではϕ＝60cmのものまでしか実験していないが、ϕをさらに大きくする方が効果的なのかについては未検討であり、今後さらに実験を追加する必要がある。おそらく最適な径の大きさが存在するものと思われる。

５．　考察

（１）水の動きと付加減衰　図９に示したように、条件によってはＴＬＤは小さな質量で大きい付加減衰を生じさせうることがわかった。この付加減衰はなんらかの形で水の動きと関連があるはずである。容器内の液体の動揺には種々のモードが存在しうることが知れらている[18,19]。

目視により自由振動時の水の動きを大別すると、液面形状モードとして次のⅠ～Ⅵの６つのタイプにわけられることがわかった。

［Ⅰ］いくつかの滑らかな波が共存している状態。

［Ⅱ］１つの波が伝播している状態。

［Ⅲ］容器の側面をに沿って大きな２つの波が位相を逆にして生じてはこれらが衝突する状態。

［Ⅳ］［Ⅲ］の状態に近いが、水表面が滑らかではない状態。

［Ⅴ］水表面が滑らかでない定在波が生じている状態。

［Ⅵ］［Ⅴ］の状態に近いが、水表面が滑らかな定在波が生じている状態。

図９の①～⑥の条件下での水面の動きのタイプを振幅別に示したのが図１９である。なお、各タイプ間の境界振幅は目視で決めており、あいまいな点があることをおことわりしておく。図から明らかなように、付加減衰率$\Delta\delta$の大きいのはタイプⅢの場合である。

自由振動時の構造系の応答振幅と同時に、波高計による波高の測定もいくつかのケースについて行った。波高計は振動方向の直径軸上で容器内側壁から少し入ったところに設置してある。

図２０に一自由度振動系の応答と波高の計測例を示す。振動数比γはおのおの約1.0、1.25であり、ＴＬＤを同調状態に調整してある場合（図９、１９のケース③である）と、同調から少しはずれた場合（ケース④）である。ともに水深が浅く、波高計の測定限界のために波のpeak-to-peakをおさえておらず、波高の大きいときには波の上側ピークのみを計測している。また、設置位置の関係から波の容器側面での反射の影響も含まれていると思われるが、波高に関する大まかな情報は与えていると思われる。

図２０は、波高Ｈは構造物振幅が大きいときも、それほど高くなく飽和的で、砕波が生じていることがうかが

える。ケース③（図９、１９）では構造物の振幅がＡ＝２㎜のとき、Δδが極大ピークを示しているが、このときの波高Ｈは約12㎜である。なお、水深ｈは12㎜である。砕波はＨ／ｈが0.8～1.0付近で生じることが知られており、Δδのピークを示す小振幅（Ａ＝２㎜）のときにすでにＴＬＤ内の液面は砕波状態に突入しているものと考えられる。事実、このとき波頭がくずれているのが観察されている。

構造物の振幅が大きい場合にも、波高は砕波のためさほど大きくならない。言いかえると、振動系のエネルギーが波動エネルギーに移行しない。したがって、１周期あたりの砕波によるエネルギー吸収ΔＥは構造物の振幅が大きくなっても線形的には上昇しないものと考えられる。構造物の運動エネルギーＥは振幅の２乗に比例するので、ΔE/Eは、振幅が小さいほど大きくなることになる。ΔE/EとΔδには近似的に線形比例関係があるから、図９、１９で示すようにケース③でΔδがＡが小さいほど大きい傾向を示したものと思われる。振動系の振幅Ａがあるレベル以下であると砕波が生じず、Δδは急激に減ずることになる。

図１９のケース④のγ＝1.25の場合、Δδがある程度大きくなるＡ＝25㎜のときの波高Ｈに注目すると、Ｈ＝18㎜である。水深18㎜と同じレベルであり、砕波が生じていてもおかしくない領域に入っている。このように振動数比γが1.0からはずれていても、振幅Ａが大きくなれば、液面波高が増大し砕波が生じ、エネルギー逸散が生じる。これが図１９のケース①、②のΔδの傾向にあらわれている。ただし、γが１よりかなり大きいと振幅Ａがかなり大きくなっても液面はスムース（液面形状モードⅥ）で砕波は生じず、Δδの増加はほとんど生じない。

図１１で液体の粘性が高いときかえって付加減衰Δδが下がる傾向がみられたが、これは液体の粘性のため波の発達が抑えられ、そのため砕波が起こりにくくなるためと考えられる。

図１４．で、屋根の効果があまり見られなかった。屋根に液面が衝突することにより生ずるエネルギー逸散と、屋根の存在により逆に液面動揺の発達が抑えられることが相殺したためでないかと解釈される。

（２）容器のサイズ効果　4.(6)の図１７、図１８で示したように、同じ質量比であれば半径の大きい容器の方が減衰効果が大きい。つまりＴＬＤの単位質量あたりの減衰Δδが大きい。

減衰Δδが大きいときにみられるモードⅢの水の動きでは逆位相で進行する２つの波が半周期ごとにぶつかり合い、このとき砕波により多量のエネルギーが損失すると考えられる。波のエネルギーは波速に比例するわけで、半周期ごとに成長する波の粒子速度が大きい方が損失するエネルギーも大きいであろう。波の発達は、その伝播距離に比例すると考えられるから、直径が大きい、つまり伝播距離の長い容器の方が、単位質量あたりのエネルギー損失は大きいということになる。

図２１に、ＴＬＤによる振動系の１周期あたりの運動エネルギーの低下量ΔＥと振動系の振幅Ａの関係を示す。図２１のΔＥは、半径40cm、60cmのＴＬＤを設置したときともに同じ質量比1.2%の構造系の自由振動応答から求めたものである。同じ質量比（＝1.2%）であるが、容器内の水の質量は約１：４である。図１７からわかるようにこの質量比のとき、小振幅でΔδはピークとなっている。図２１からわかるように、φ＝60cmのΔＥはφ＝40cmのそれの約10倍であり、単位質量あたりに換算しても約2.5倍であり、大きい径の方が効率がよいことがわかる。

一般に、振幅に依存しない粘性減衰を仮定すれば、ΔＥは振幅Ａの２乗に比例することになるが、図２１に示すようにＴＬＤではΔＥと振幅Ａの関係が線形比例に近い。これは、ＴＬＤの減衰機構のモデル化としては、粘性型よりもむしろクローン摩擦型あるいは衝撃によるエネルギー損失（衝撃ダンパー）の方が適切であることを示唆している。

なお、構造系の振幅Ａがあるレベル以下になるとΔδが急減するが、このとき、構造系の応答にはビート（うなり）が生まれることを実験的に確かめている。これはＴＬＤと構造系の間でのエネルギーのやりとりはあるが、エネルギーの逸散がない証拠である。逆に、限界振幅以上ではビート現象は認められず、ＴＬＤによりエネルギーが単に吸収されているのではなく逸散が生じていることがうかがえる。逸散は砕波によるものであろう。

容器内の水の動き方は振動数、水深によって微妙に変わってくることもありうるので、容器半径は大きければ大きい程よいわけではないであろう。図１０、１７、１８で示したように、付加減衰Δδを大きくするためにはＴＬＤの液面動揺（一次）周期は構造系のそれと同調状態にすることが必要である。構造系の固有周期が与えられた時、ＴＬＤの液面動揺周期を同調させるために必要な水深ｈを式（１）に従って求めたのが図２２である。

固有周期としてはT_L＝１秒、２秒を選んである。図からわかるように、直径ϕと、水深hの関係は非線形である。径ϕが大きくなるとh/ϕ（h/a ； a＝半径）は急激に増大し、相対的に深水となる。深水状態では、底に近い水は振動時には固定水のように振舞い、減衰には関与しないと考えられる。したがって、径は大きすぎても効率的ではない。前述の実験的事実と考え合わせると径には最適値が存在するように思われる。ただし、図２２が示唆するように最適径は、対象とする液面動揺、いいかえると構造系の固有周期に依存することになろう。また、ＴＬＤの効果は砕波が生じはじめる振幅付近で最大となる（図９、１９）。水深が深くなれば、砕波を生じさせるために必要な構造系の振幅も大きくなる。事実、ϕ＝40cmの容器ではＡ＝約5mmで$\Delta\delta$がピークを示した（図９、１９）のに対し、ϕ=60cmではＡ＝約10mmで$\Delta\delta$がピークを示した。したがって制振の対象となる構造系の振幅によっても容器の大きさは変えるべきものである。

６．　まとめと今後の方向

円筒タンクに部分的に水を入れた簡便な同調液体ダンパー（ＴＬＤ）の基本特性を知る目的で、ＴＬＤを設置した一自由度系の自由振動実験を行った。実験結果から得られた知見をまとめると以下のようになろう。

（１）ＴＬＤは小振幅で非常に高い付加減衰を与える。

（２）ＴＬＤによる制振効果は砕波による寄与が大きいと思われる。これによりＴＬＤの減衰特性がある程度説明できる。

（３）砕波による波高の飽和性のため、減衰効果は振幅依存性が顕著である。

（４）小振幅で付加減衰を大きくするためには、液面動揺の１次固有振動数を構造系の固有振動数と同調させるのがよい。

（５）大振幅では付加減衰があまり大きくはない。ただし、このとき付加減衰$\Delta\delta$は振動数比γの値にあまり依らない。したがって、同調状態に比べ、浅めの水としておくのが質量比の点から有利である。

（６）液体の粘性は低い方がよい。これは粘性により波の発達がおさえられるためと考えられる。

（７）主たる付加減衰は水表面付近でおこる砕波のため、付加減衰は底面粗度の影響をほとんど受けない。

（８）容器の屋根は、波の衝突によるエネルギー損失をもたらす一方、波の発達の阻止という相反する作用があるため、双方がキャンセルして全体としての効果は少ない。したがって、屋根はなるべく高くしておく方が無難であろう。

（９）質量比の小さい範囲では付加減衰$\Delta\delta$は、同調状態の時ＴＬＤの数に線形的に比例する。

（10）ＴＬＤの容器の大きさは実験を行った範囲（ϕ＝60cm、40cm）では大きい方がダンパーとしての効率がよい。これは同じ質量比であれば、大きい半径の容器の方が波動エネルギーが、多数の小さい容器の波動エネルギーの和より大きいからと考えられる。なお、径の大きさは大きい方がよいというわけではなく、振動数、構造系の対象とする振幅に応じた最適値が存在するものと思われる。

本実験では、円筒容器のＴＬＤのみを対象に実験を行った。中空円筒容器（文献7）、効率としてはさほど同筒容器のと差異がないという結果を得ているが矩形容器（文献11、12、15）との詳細な性能比較なども今後行っていきたい。また、容器のサイズについても最適値を見出す必要があると考えている。

なお、このＴＬＤの実構造物への適用を考えた時、工学的（機械的）モデルの開発が望まれるところであるが、砕波という非線形性がからむ問題だけに容易ではない。そこで振動時にＴＬＤと構造物との間に働くせん断力の特性をおさえておくことが考えられる。振動台にＴＬＤをのせ、振動台とＴＬＤの間に設置されたロードセルから得られた動的な力（ベースシャー）と、振動台加速度との関係の測定例を示したのが図２３である。上は力と台加速度との位相差、下は力を台加速度×水の質量で無次元化している。ＴＬＤの液面動揺の一次固有振動数f_Lは0.56HZ、加振振動数ｆとf_Lの比が１付近で位相が90°となっている。また、振幅が増えると別の振動数のところにもピークが現れる。これは波の非線形のために異なる波が発生したと想像されるが、残念ながらこのとき液面の動きを観察しておらず、断定的なことはいえない。ここで求めた力とその位相はＴＬＤの特性を直接表

現したものであり、このような実験から工学的モデルが構築されると考えている。また、力、位相の特性と液面動揺との関連づけから、ＴＬＤの減衰機構に対する正しい理解が生まれよう。

ＴＬＤには、長期間使用による水質の変化、蒸発、容器からの漏れなどの問題はある。また、ＴＬＤは同じ質量比のＴＭＤに比し、大振幅時にはかならずしもΔδが大きいわけではない。しかし、水深を変えることで液面動揺の振動数を容易に変化できる、あるいは長方形容器であれば２方向の異なる振動を１つのＴＬＤで制振できるなど、いろいろな意味で使いやすいダンパーではないかと考えている。

謝　辞　東京大学教授伊藤学先生、東京大学助教授磯部雅彦先生、清水建設佐藤孝典氏にいろいろ有益なコメントをいただいた。また、実験、結果の整理に際しては東京大学助手篠泉氏、同大学院孫利民君、ペンヌン、Ｗ君に手伝っていただいた。心より感謝申し上げたい。

なお、本研究は、文部省特定研究と科学研究費の補助を受けた。

参考文献

１）藤田隆史：免震技術の現状と将来、日本機械学会論文集（Ｃ編）、51巻461号、昭和60－１、pp１－７.

２）辻　　松雄：構造力学的耐風制振策、日本風工学会誌、20号、昭和59年６月、pp. 81－102.

３）Alfriend, K. : Partially Filled Viscous Ring Nutation Damper, J. of Spacecraft, Vol. 11, No. 7, 1974, pp. 456-462.

４）Bhuta, P. G. and Koval L. R. : A Viscous Ring Damper for a Freely Precessing Sattellite, Int. J. Mech. Sci., 1966, Vol, 8, pp. 383-395.

５）Amieux, J. C. and Dureigne, M. : Analytical Design of Optimal Nutation Damper, J. of Spacecraft Vol. 9, No. 12, 1972, Dec., pp. 934-936.

６）渡辺四郎：動揺軽減法（２）、耐航性に関するシンポジウム論文集、日本造船学会、1969年７月、 pp. 156－179.

７）Modi, V. J. and F. Welt : Vibration Control using Nutation Damper, Proc. Int. Conf. on Flow Induced Vibration, Bowness-on-Windemere, England, 1987, pp. 369-376.

８）佐藤孝典： Tuned Sloshing Damper, 日本風工学会誌、32号、昭和62年５月、pp. 67－68.

９）佐藤孝典：液体のスロッシングを利用した制振装置、日本建築学会学術講演梗概集、昭和62年10月、No. 2742、pp. 1483－1484.

10）佐藤孝典： Tuned Sloshing Damper、第42回土木学会年次講演会概要集、1987年9月、pp. 778－779.

11）松浦義一ほか：倉内流体運動を利用した防振法に関する基礎的研究、日本造船学会論文集、No, 160、1986、pp. 424-432.

12）宮田、山田、斉藤：耐風制振振用水槽ダンパーの検討：日本風工学会誌、32号、昭和62年５月、pp. 65－66.

13）Chaiseri, P., Fujino, Y. and Pacheco, B. : Damper using Liquid Motion as Energy Dissipator, 第42回土木学会年次講演会概要集Ⅰ、1987年9月、pp. 780－781.

14）Chaiseri, P. ほか： Damper for Bridge Tower-Utilizing Water Motion as Energy Dissipator, Proc. Int. Conf. on Cable-stayed Bridge, Bangkok, 1987, pp. 545-556.

15）野路ほか：スロッシングを利用した制振装置の研究（その１、その２、その３）、日本建築学会学術講演梗概集、昭和62年10月、pp. 867－872.

16）Sayar, B. and Baumgarten J. R.: Linear and Nolinear Analysis of Fluid Slosh Damper, AIAA J., 20, 11, 1982, pp. 1534-1538.

17）Bauer, H. F. : Oscillations of Immiscible Liquids in a Retangular Container : A New Damper for Excited Structures, J of Sound and Vibration, 93(1), pp. 117-133, 1984.

18）橋本弘之：液体スロッシング問題の現状と将来、日本機械学会誌、89、No. 810、1986、pp. 512-517.

19）白鳥、椎貝：円筒容器内の回転波、第41回土木学会年次講演会概要集Ⅰ、1986、pp. 1071-1072.

（1987年10月16日受付）

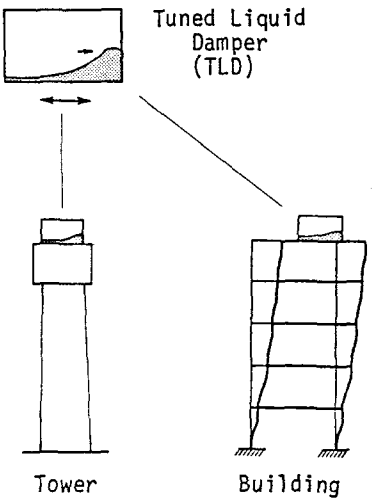


Figure 1: TLD installed on a building (tower) (TLD and building (tower) not to same scale)

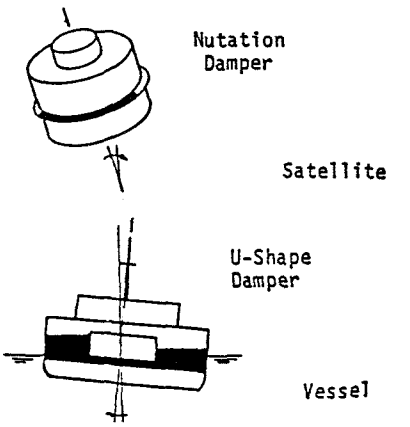


Figure 2: Other liquid dampers

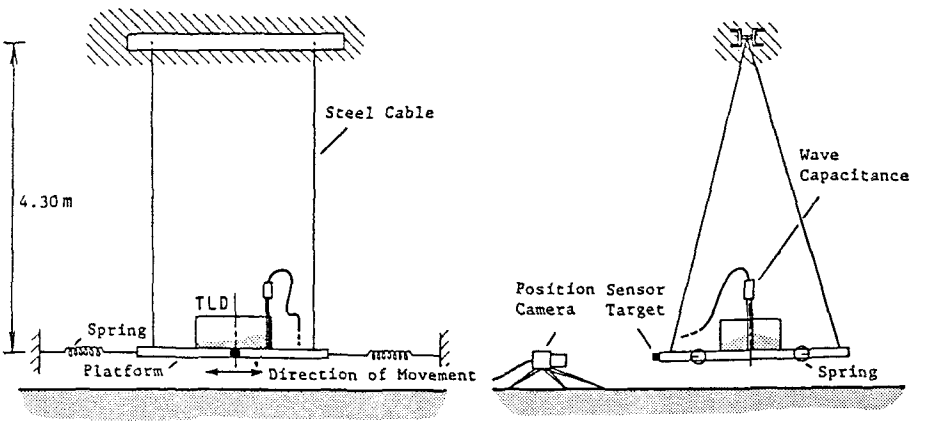


Figure 3: Single-degree-of-freedom structural model TLD

Figure 4: Roughness of container bottom

Figure 5: Gap with container roof

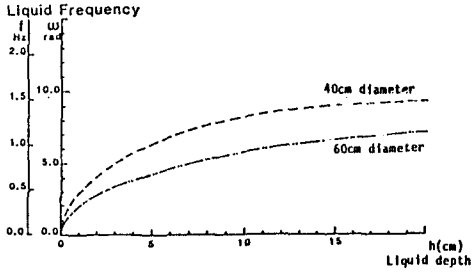


Figure 6: Natural freqency versus depth of liquid

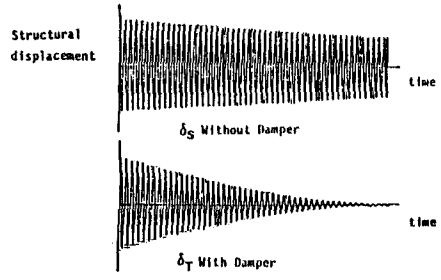


Figure 7: Structual displacement histories

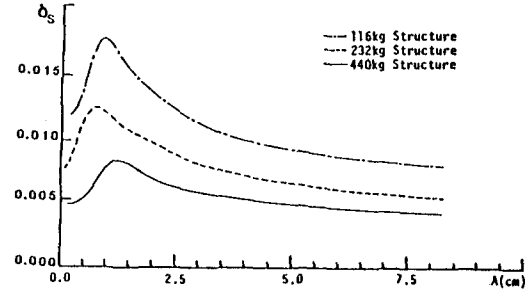
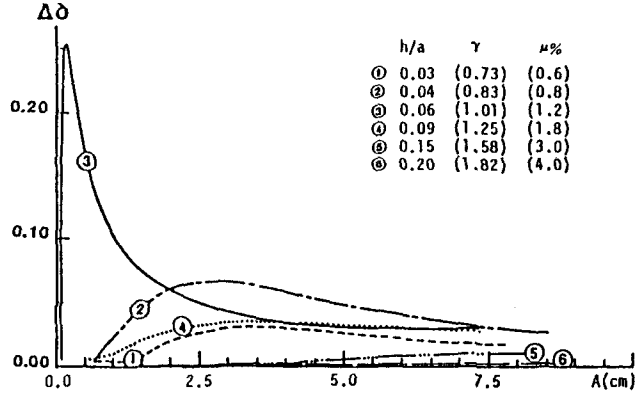
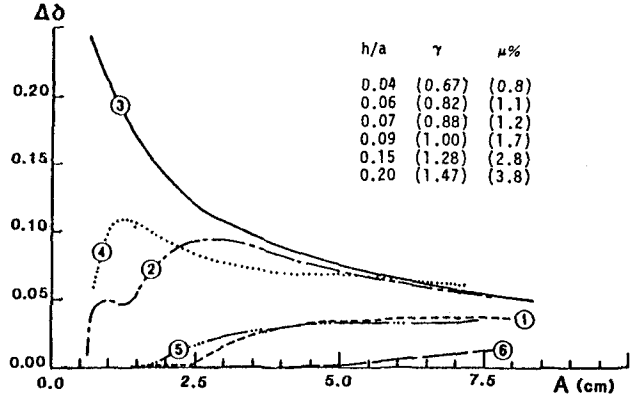


Figure 8: Logarithmic decrement of structure without TLD



(a) ϕ=40cm, m_s=116kg
(mass ratio μ=1.2% in case 3)



(b) ϕ=60cm, m_s=440kg
(mass ratio μ=1.2% in case 3)

Figure 9: Additional damping

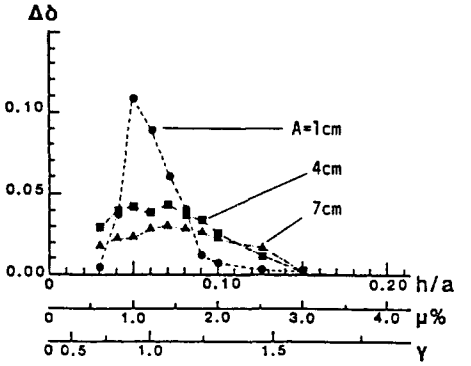
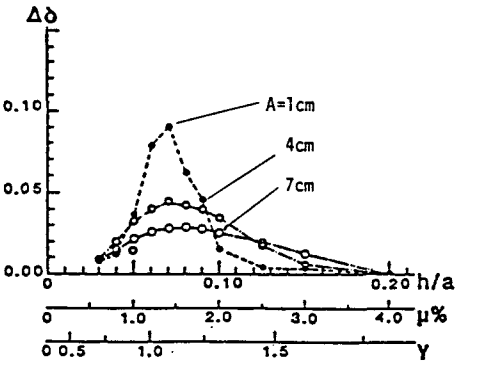


Figure 10: Additional damping versus freqency ratio



(a) With Type A roughness

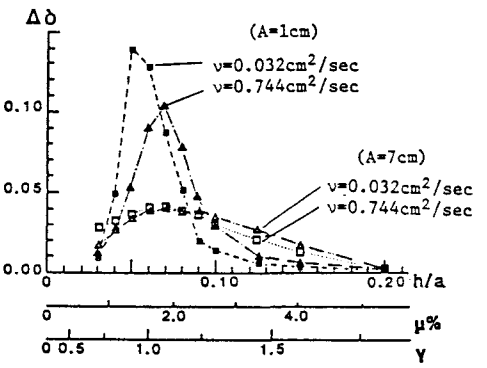
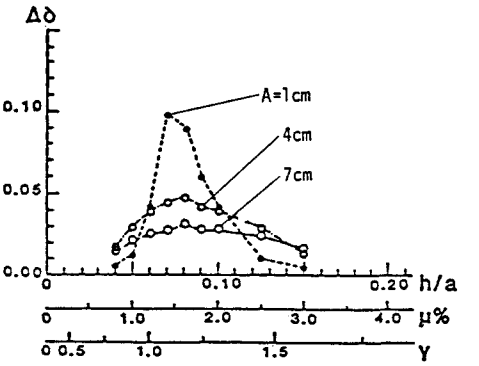


Figure 11: Effect of liquid kinematic viscosity ν (ν=0.032cm²/sec $CaCl_2$ solution; ν=0.744cm²/sec Sugar solution)



(b) With Type B roughness

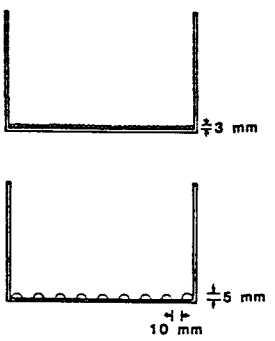
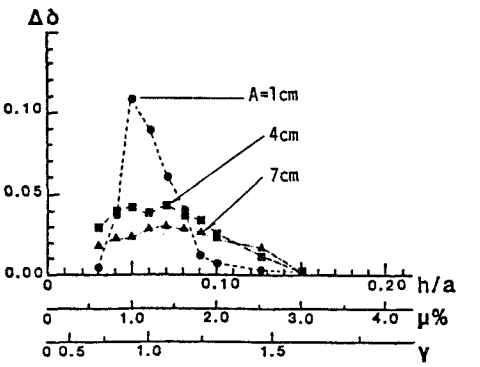


Figure 12: Semispheres as roughness elements at container bottom



(c) Smooth

Figure 13: Effect of bottom roughness on additional damping

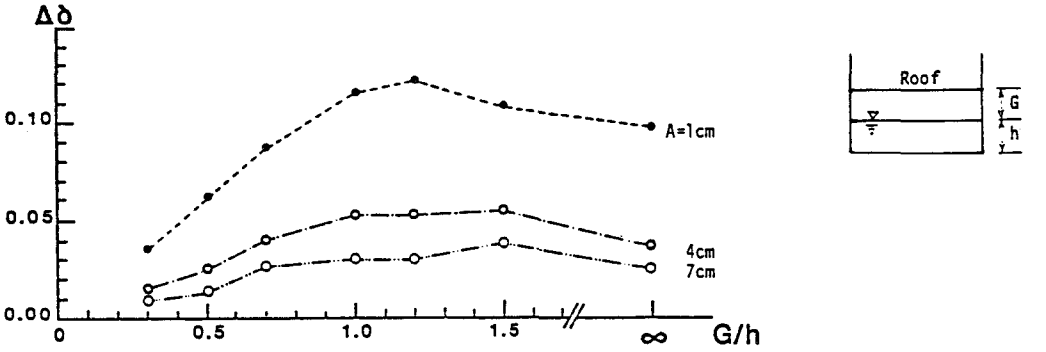


Figure 14: Effect of roof height on additional damping (γ=1.0, h=0.06a)

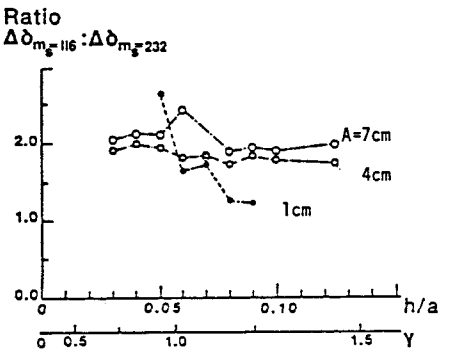


Figure 15: Effect of mass ratio on additional damping (γ=1.01, ϕ=40cm)

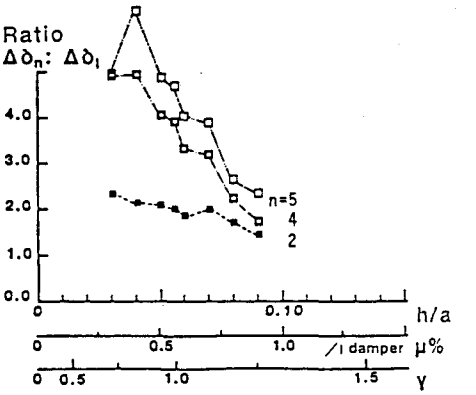
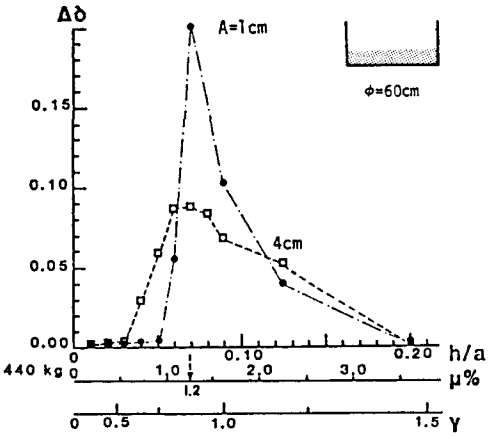
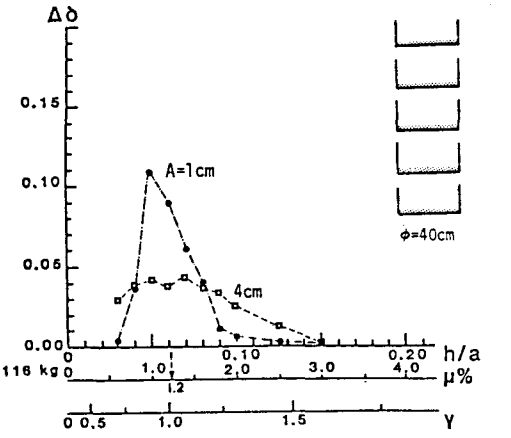


Figure 16: Effect of number n of TLDs on additional damping (232 kg structure)



(a) Diameter =60cm



(b) Diameter =40cm, 5TLD

Figure 17: Comparison of single large TLD and single small TLD

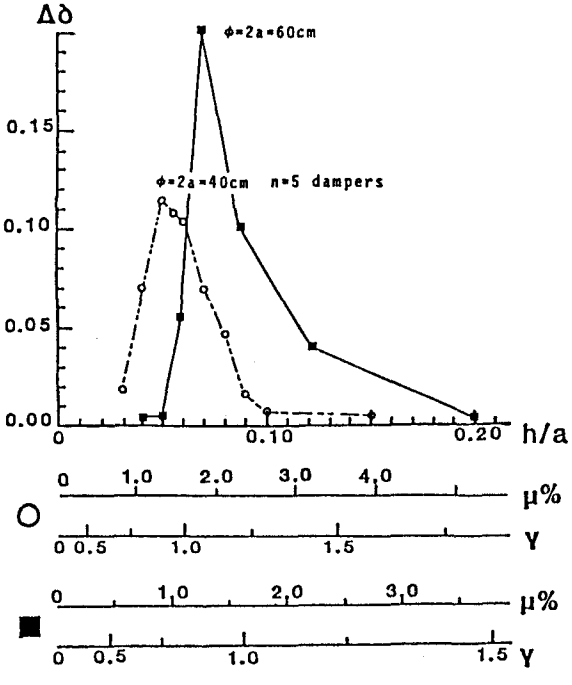


Figure 18: Comparison of one large and five small TLDs (440 kg structure)

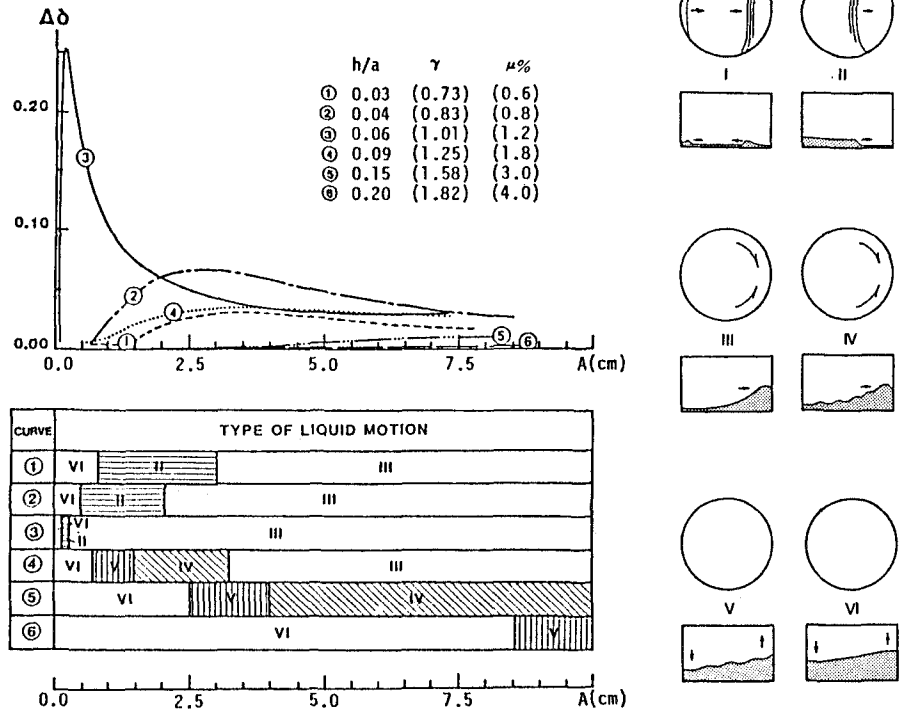
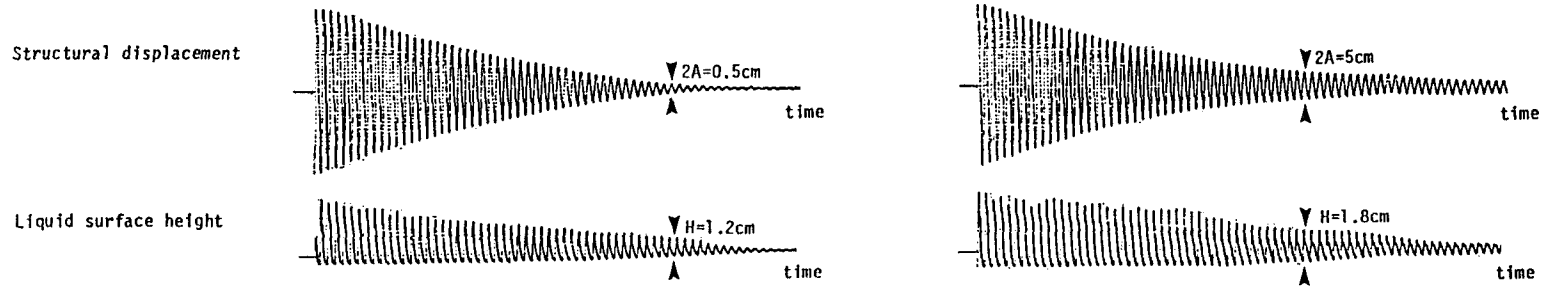


Figure 19: Visual classification of type of liquid motion



(a) Case 3 in Figure 19 (γ=1.0, h=1.2cm)

(b) Case 4 in Figure 19 (γ=1.25, h=1.8cm)

Figure 20: Histories of structural displacement and liquid surface height at one side of TLD

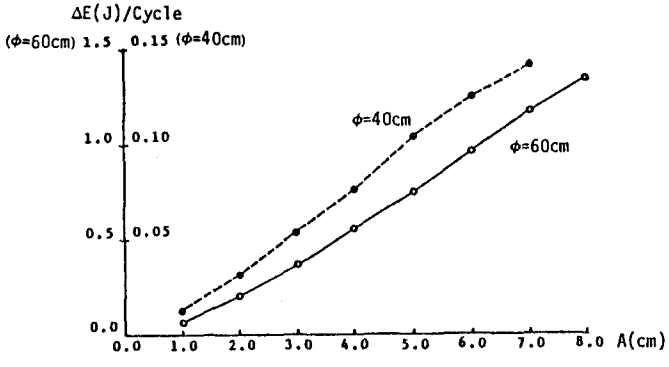


Figure 21: Energy loss per cycle versus vibration amplitude (ratio of mass in ϕ=60cm and 40cm is about 4. For both cases, γ=1, μ=1.2%)

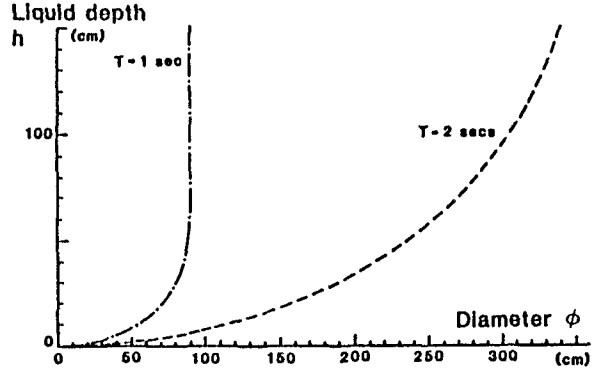


Figure 22: Required depth versus container diameter for specified matural period (or freqency)

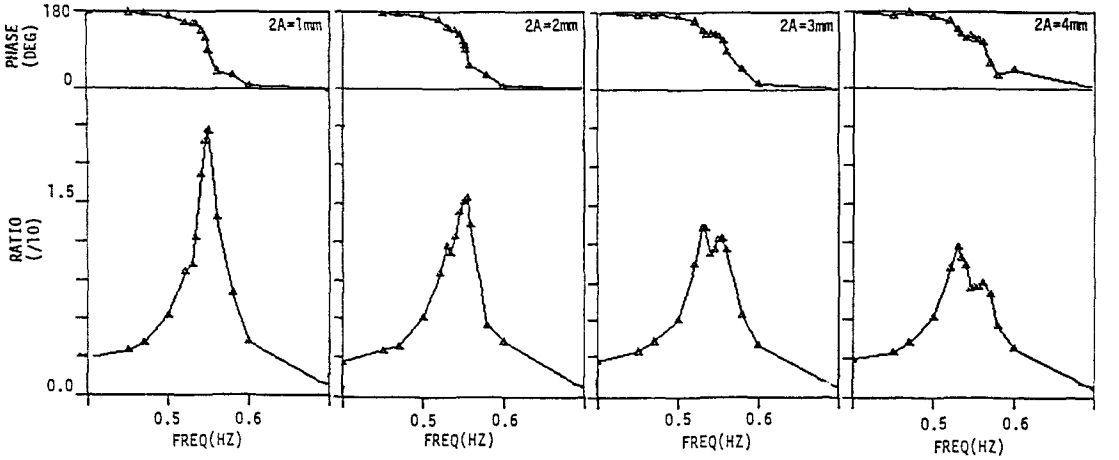


Figure 23: Examples of dynamic base shear force in TLD by shaking table experiments (ϕ=49.2cm, h=1.5cm, ratio=force/(water mass x acceleration))