

位相特性からみた T L D - 3 層ラーメン模型の制振性

VIBRATION CONTROL AND PHASE CHARACTERISTICS OF
TLD - THREE STORIES FRAME MODEL SYSTEM小 坪 清 真* 高 西 照 彦** 成 富 勝*** 多 田 浩****
Seima KOTSUBO Teruhiko TAKANISHI Masaru NARITOMI Hiroshi TADA

A three stories frame model was made of steel. The experimental studies on damped free vibration, stationary vibration and non-stationary vibration of tuned liquid damper(TLD)-three stories frame model system were carried out by using shaking table. The vibration control characteristics of TLD were more clearly explained by taking into consideration of the phase difference between the input acceleration and dynamic wall pressure of water in TLD. The theoretical equations of coupled vibration on TLD and three stories frame model were deduced. In those equations, TLD was modeled in equivalent mass-spring vibration system. The results of theoretical calculations were agree well with those obtained by the experimental studies on vibration.

Key Words: vibration control, TLD, phase characteristics, calculation of response

1. まえがき

合理的な耐震及び耐風設計の下に築造された近代的構造物が、地震あるいは台風等の外力をうけたために、それが破壊するというようなことは、現在では発生しないと考えてもよいであろう。しかし、近年、構造物の高層化、長大化、軽量化に伴って、それが、地震あるいは強風等をうけたとき、当該構造物の上部において人体に感じるような振動が生ずることが指摘され始め、このことが、構造物に対する居住性及び作業性の観点から問題視されるようになってきた。そこで、液体を注入した貯槽を構造物の上部に設置し、構造物の振動によって生ずる液体の動揺振動を利用して、構造物自体の振動エネルギーを吸収し、消散することによって、構造物の振動を低減するという機能をもった同調液体ダンパー (T L D) が注目されている^{5)~8), 10)~16)}。T L D は既に、建築構造物では、千葉ポートタワー、横浜マリントワー¹²⁾等に、橋梁については生口橋^{6), 8)}、幸魂橋⁵⁾等に設置されており、その有効性が実証されつつある。また、同じく液体を用いたダンパーとして、液柱管ダンパー (T L C D)¹⁵⁾も提案されており、それは東神戸大橋⁷⁾に用いられている。

T L D は、貯槽内の液体に発生する動揺振動 (スロッシング) の周期を構造物の基本周期 (制振しようとする振動周期) に同調するように T L D の大きさ及び水深を調整して、貯槽の動揺振動によって発生する壁面動水圧にもとづく減衰力によって構造物に対する制振効果を得ようとするものである。T L D の長所はその構造が単純で、貯槽内容液の水深を変えるだけでその固有周期を変えることができるので、容易に構造物

* 工博 九州共立大学教授 工学部土木工学科 (〒807 北九州市八幡西区自由ヶ丘1-8)

** 工博 九州工業大学教授 工学部設計生産工学科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)

*** 工博 九州共立大学助教授 工学部開発学科 (〒807 北九州市八幡西区自由ヶ丘1-8)

**** 九州工業大学技官 工学部設計生産工学科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)

の固有振動周期に同調させることが可能であること、さらに、TLDはその維持管理に手間が掛からず、他の制振装置と比べて安価であることである。短所としては、地震等による不規則入力に対する応答の初期段階においてその効果が発揮されないこと、および多数個のTLDを設置するための場所を必要とする事が挙げられる。

本論では、まず、3層ラーメン模型を作製し、これにTLDを設置したTLD-3層ラーメン模型系に対して、振動台実験を行い、その定常振動及び不規則振動に対する動特性を求めた。定常振動においては、特に振動台（入力）とTLD内容液の波高及び動水圧との位相差、3層ラーメン各層とTLDの波高及び動水圧との位相差に注目して、これら位相差とTLDの制振性との関連について2、3の考察を行った。つぎに、TLDの水平及び回転振動に対する等価振動系を示し、TLDを設置した3層ラーメン模型に対して、モード解析法を利用して振動方程式^{4),9)}を導き、TLDの最適水深と最適減衰定数とを定める式を示した。さらに、数値計算を行って、定常及び不規則振動実験によって得られた応答値と理論値とを比較して、理論式の妥当性を示した。

2. 振動台実験

2.1 実験装置

振動台実験に用いた3層ラーメン模型は、図-1に示すように、高さ1500mm、幅600mmのステンレス製の2次元模型で、1、2層目の梁は厚さ2mm、奥行120mm、3層目の梁（頂板）は厚さ12mm、奥行300mmである。また、柱は厚さ5mm、奥行120mmである。TLDは厚さ10mmの亚克力樹脂板で作製し、これを3層ラーメン模型の頂板上に、図-1に示すように設置した。TLDの大きさは内寸で50mm×400mm×310mm（高さ）で、これに図-1に示すように、波高計（容量式波高計CHJ4-10、計測技研製）と水圧計（PGM-02KG、共和電業製）を取付けた。波高計はTLDの壁から60mm離れた中央位置に、水圧計はTLDの底面から20mm上の壁面中央にそれぞれ取付けた。3層ラーメン模型の各層上及び振動台上に加速度計（AS-2C、共和電業製）を設置した。

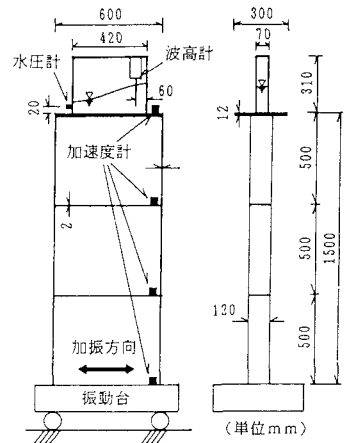


図-1 TLD-3層ラーメン模型系

2.2 実験概要

計測は次のようにして行った。加速度計及び水圧計の出力は、動歪計→ローパスフィルター→直流増幅器を通してアナライジングレコーダ（AR1600、横河電気製）に記録した。波高計の出力は波高計用プリアンプ→直流増幅器を通してアナライジングレコーダに記録した。振動台を用いて行った実験は、以下の通りである。実験はすべて線形の範囲内で行った。

(a) TLDの減衰自由振動実験

TLDの固有振動数と減衰定数を求めるために、TLDの減衰自由振動実験を行った。TLDを振動台上に固定し、長手方向の加振を行ってその内容液を共振状態においた後、静かに振動台を停止させ、内容液に減衰自由振動を生じさせる。このときの波高と壁面動水圧の時刻歴応答を記録する。

(b) 3層ラーメン模型の共振振動実験と減衰自由振動実験

3層ラーメンの固有振動数、振動形及び減衰定数を求めるために、3層ラーメン模型の共振振動実験と減衰自由振動実験を行った。3層ラーメン模型を振動台上に固定し、振動台の加振振動数をいろいろ変えた場合について、ラーメン模型に設置した加速度計の出力を記録した。つぎに、模型の頂部に力を加えることによって、模型に強制変位を生じさせた後、急に加えた力を解放することによって、3層ラーメン模型に対する減衰自由振動実験を行った。

(c) 空のTLDを設置した3層ラーメン模型の共振振動実験と減衰自由振動実験及び不規則振動実験

空の T L D を設置した場合としない場合とで、3 層ラーメン模型の固有振動数、振動形、及び減衰定数がどのように変化するかを明らかにするため、さらには 3 層ラーメン模型の理論計算に用いるモデル化が妥当であるかどうかについて検討するために、上記の実験を行った。実験方法その他は (b) と同じである。不規則振動実験に用いた入力波は、日本海中部地震 (1983.5) の際、秋田港で記録された地震波の N S 成分である。最大加速度は適当に調整して用いた。なお、使用した振動台の性能上、実際に計測された振動台加速度記録は上記の入力波を忠実に再現していないので、本論では、この実際に計測された振動台記録を不規則振動実験に対する入力波として採用することにした。振動台がこの入力波に従って振動したときの T L D - 3 層ラーメン模型系の時刻歴応答 (ラーメン各層の加速度、T L D の波高、壁面動水圧) を記録した。

(d) T L D - 3 層ラーメン模型系の共振振動実験と減衰自由振動実験及び不規則振動実験

T L D 内容液の波高及び壁面動水圧と T L D の制振性との関係を明らかにするために、さらには、本論で示した T L D の等価振動系及び振動方程式の妥当性を示すために、上記の実験を行った。実験方法その他は (c) の場合と全く同様である。ただ、この場合には (c) の場合に加えて、T L D の波高応答と壁面動水圧応答とを同時に計測した。

2. 3 実験結果

計測データの処理方法及び得られた実験結果は、以下の通りである。

(a) T L D の減衰自由振動実験

水深が 8.67cm (3 層ラーメン模型の固有振動数と同調するために必要な水深) のときの波高の減衰自由振動曲線を、図-2 に示す。また、図-3 にそのフーリエスペクトルを示した。これより T L D の第 1 次の固有振動数 1.086Hz が得られる。なお、スペクトルの第 2 番目のピークは、T L D の第 2 次の固有振動数 (理論値は 2.378Hz) を示していると考えられる。図-4 は、図-3 に示した減衰自由振動曲線の極大値を求め、その自然対数を縦軸に、横軸には振動回数 (各極大値が発生する時刻に順番につけた番号) をとってプロットしたものである。波高によって減衰比が多少変化していることがわかる。同図中の直線は、最小二乗法によってプロット点に一番よく合うように定めた直線である。この直線の勾配から T L D の平均的な減衰定数を定めれば 0.0166 が得られる。以上の結果をまとめて、後述の式 (13) によって求めた理論値と共に表-1 に示

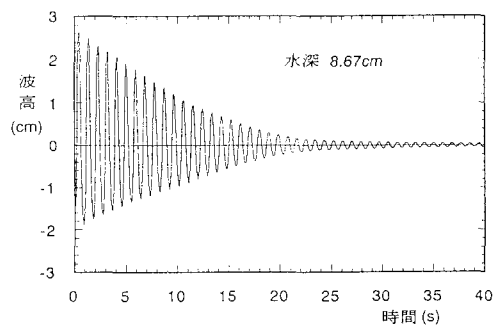


図-2 波高の減衰自由振動曲線

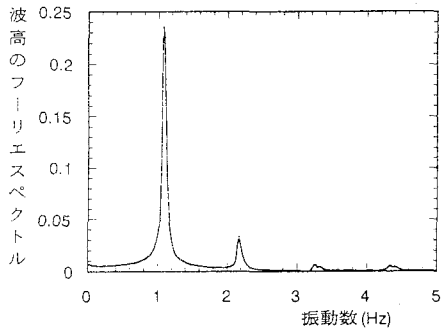


図-3 減衰自由振動に対する波高のフーリエスペクトル

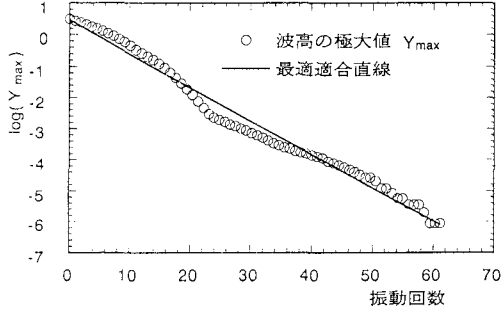


図-4 波高の極大値の対数

表-1 T L D の固有振動数と減衰定数 (水深 8.67cm)

	実験値	理論値
固有振動数(Hz)	1.086	1.0745
減衰定数	0.0166	—

表-2 3 層ラーメン模型の振動特性

振動次数		1		2		3	
		実験値	理論値	実験値	理論値	実験値	理論値
固有振動数(Hz)		1.23	1.2273	8.20	7.908	19.86	18.243
減衰定数		0.0024	—	0.0014	—	0.0014	—
振動 モー ド形	3 層	1.000	1.000	-0.315	-0.302	-0.116	-0.156
	2 層	0.855	0.756	0.780	0.624	1.000	1.000
	1 層	0.378	0.281	1.000	1.000	-0.958	-0.984

した。以後、理論値はすべて3.1に示した理論にもとづいて算出した値を指す。

(b) 3層ラーメン模型の共振振動実験と減衰自由振動実験

得られた結果を、理論値(固有振動数と振動モード形)と共に表-2に示した。第1次の固有振動数及び減衰定数については、それぞれ共振振動実験と減衰自由振動実験から求めた。表-2に示した値は前者の実験によって得られたものである。

表-3 空のTLDを設置した3層ラーメン模型の振動特性

振動次数		f_1 (1次)		f_2 (2次)		f_3 (3次)	
		実験値	理論値	実験値	理論値	実験値	理論値
固有振動数(Hz)		1.07	1.086	7.97	7.766	19.62	18.145
減衰定数		0.0032	—	0.0030	—	0.0027	—
振動モード形	3層	1.000	1.000	-0.231	-0.233	-0.097	-0.116
	2層	0.874	0.752	0.825	0.867	1.000	1.000
	1層	0.405	0.278	1.000	1.000	-0.926	-0.991

(c) 空のTLDを設置した3層ラーメン模型の共振振動実験と減衰自由振動実験及び不規則振動実験

得られた結果を、理論値と共に表-3に示した。模型の振動モード形を図-5に、共振曲線を図-6に、理論値と共に示す。図-6の横軸には、空のTLDを設置した3層ラーメン模型の第1次の固有振動数 f_1 に対する振動台加速度の振動数 f (加振加速度)の比 f/f_1 をとった。第1次の固有振動数と減衰定数については、それぞれ共振振動実験と減衰自由振動実験から求めた。表-3には前者の実験によって得た値を示した。第1次の固有振動数については、(b)の場合と比べて15%程度小さくなっている。この固有振動数における減少率は、3層ラーメン模型の質量が34.6kgであるのに対して、空のTLDの質量が6.6kgであることに丁度見合った値になっている。不規則

振動実験の結果については、本論においてその時刻歴応答図を示さなかったが、実験結果と理論計算結果とは非常によく一致していた。表-2と表-3及び不規則振動実験の結果から、実験値と理論値とは比較的良好に一致しているといえる。このことから、後述の3層ラーメン模型に対する理論計算のためのモデル化の正当性が示されたと考えてもよからう。

(d) TLD-3層ラーメン模型系の減衰自由振動実験

結果の一例を図-7に示す。同図はラーメン頂

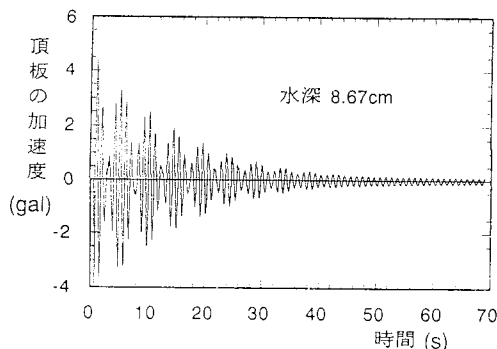


図-7 TLD-3層ラーメン模型系の減衰自由振動曲線

板(3層目)の加速度に対する減衰自由振動曲線である。TLD中の内容液の動揺振動のためにビート状の

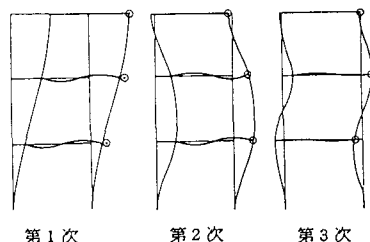


図-5 TLDを設置した3層ラーメン模型の振動モード形 (○: 実験値, —: 理論値)

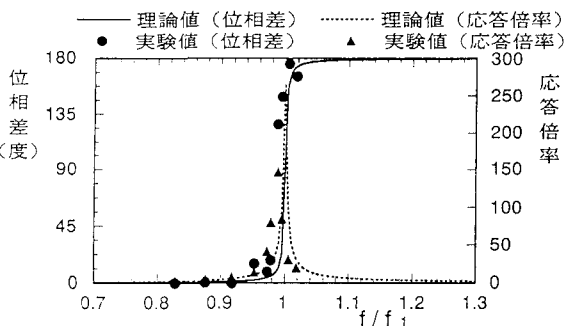


図-6 空のTLDを設置した3層ラーメン模型の頂板の加速度の応答倍率と振動台加速度に対する位相差曲線

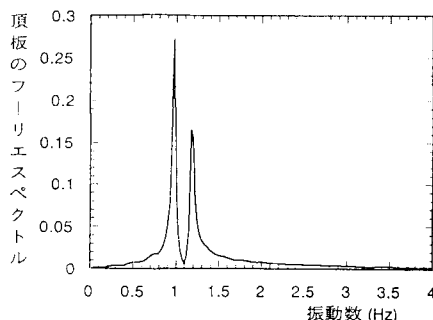


図-8 TLD-3層ラーメン模型系の減衰自由振動に対する頂板加速度のフーリエスペクトル

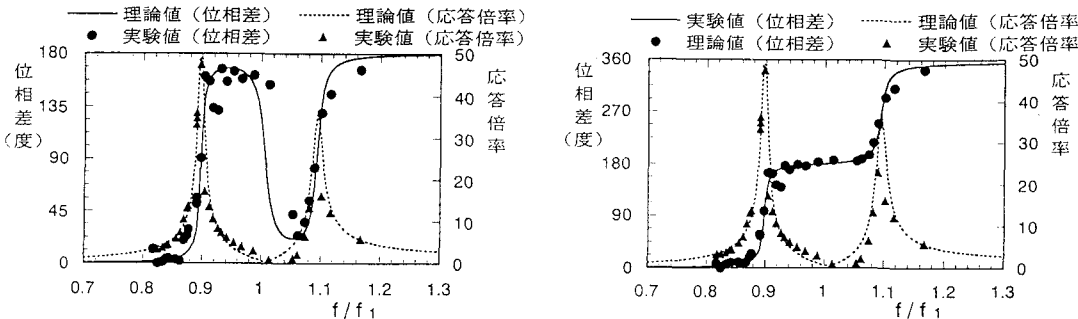
振動が生じていることがわかる。図-8は、図-7の減衰自由振動曲線に対するフーリエスペクトルを示したものである。同図から、TLD内容液の動揺振動とラーメン模型の第1次振動とが同調した結果、模型の第1次振動数の上下に、TLD-3層ラーメン模型系の固有振動数を示す2つのピークが現れていることがわかる。図-8から求めた固有振動数を後述の理論式から算出した理論値と共に、表-4に示した。両者は比較的良好に一致しているといえる。なお、このとき、ラーメン模型の頂板の振動モード形の値を1としたときの、第1次振動に対するモード質量は30.422kgであるから、TLD内容液の質量に等する質量比(式(39))は5.7%となる。

表-4 TLD-3層ラーメン模型系の固有振動数

振動次数	1		2	
	実験値	理論値	実験値	理論値
固有振動数(Hz)	0.971	0.975	1.20	1.188

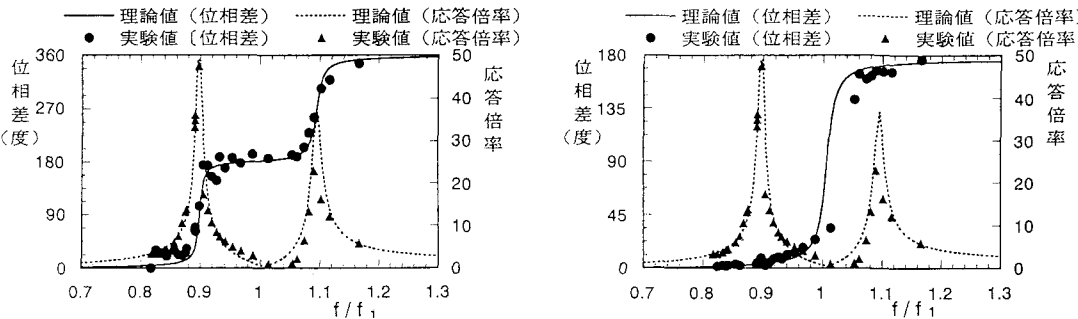
(e) TLD-3層ラーメン模型系の共振振動実験

実験によって得られた3層ラーメン模型頂板、TLDの波高及び動水圧に対する共振曲線の一例を、図-9(a)～(d)に示す。図中の実線と破線は後述の理論式を用いて算出した理論共振曲線である。図中の横軸は図-6の場合と同じく、加振振動数 f と空のTLDを設置した3層ラーメン模型の第1次固有振動数 f_1 の比 f/f_1 である。図-9(a)～(d)にはいずれも、ラーメン模型の頂板の加速度の応答倍率曲線が比較のための基準として描かれている。さらに、図-9(a)にはラーメン模型頂板の加速度と振動台加速度との、図-9(b)にはTLDの壁面動水圧と振動台加速度との、図-9(c)にはTLDの波高と振動台加速度との、図-9(d)にはラーメン模型頂板の加速度とTLDの壁面動水圧との位相差をそれぞれ示している。位相差はいずれも



(a) ラーメン模型頂板の加速度の応答倍率と振動台加速度に対する位相差曲線

(b) ラーメン模型頂板の加速度の応答倍率及びTLDの壁面動水圧と振動台加速度との位相差曲線



(c) ラーメン模型頂板の加速度の応答倍率及びTLDの波高と振動台加速度との位相差曲線

(d) ラーメン模型頂板の加速度の応答倍率及びTLDの壁面動水圧と振動台加速度との位相差曲線

図-9 TLD-3層ラーメン模型の共振曲線

対象とする2つの応答曲線の極大値の生ずる時間差を読み取ることによって算出した。その際、応答曲線にわずかに含まれている高次の雑音については、応答曲線に移動平均法を適用することによって、その影響を

取り除いた。なお、移動平均に対するカットオフ周波数は3 Hzとした。

応答倍率については、TLDが動かない場合(図-6)とTLDが動く場合(図-9(a))を比べると、共振点において後者の方がかなり小さくなっており、TLDの制振効果が認められる。

図-9(a)より、ラーメン模型頂板の2つの共振点において、位相差が90°になっているのは当然なことであるが、 $f/f_1=1$ (応答倍率曲線の谷=空のTLDを設置したラーメン模型の共振点)においても、また、位相差が90°となっていることが注目される。

図-9(b)は、図-9(a)と同じ現象をTLDの壁面動水圧について示したものである。同図から、 $f/f_1=1$ において、動水圧と振動台加速度との位相差が180°となっており、両者は互いに逆位相で振動していることがわかる。

図-9(c)は、図-9(b)の動水圧の代わりに波高をとった場合であるが、波高は動水圧とその位相が等しいことから、波高については動水圧の場合と全く同じことがいえる。

図-9(d)から、 $f/f_1=1$ において、ラーメン模型頂板の加速度と動水圧との位相差が90°であることがわかるが、このことは動水圧がラーメン模型の運動に対して減衰力として作用していることを示している。

以上のように、位相差に注目してみると、TLDの内容液の動揺振動によって生じた動水圧が、それを設置したラーメン模型の制振性に及ぼす影響をよりよく理解することができるように思われる。

(f) TLD-3層ラーメン模型系の不規則振動実験

実験に用いた振動台加速度波形を図-10に示す。得られた実験結果の一例を図-11(a),(b)に示した。同図はラーメン模型の頂板の応答変位の時刻歴を描いたもので、(a)が実験結果、(b)が後述の式(26)～(28)による理論計算結果である。理論値と実験値との一致の程度を明らかにするために、図-12に図-11の一部を拡大して示した。なお、実験においては、ラーメン模型の各層の加速度応答のみを計測したので、図-11(a)に示すように、それを変位応答で表示するためには、得られた加速度の値を2回積分することが必要である。通常、加速度を続けて2回数値積分することによって変位を求める場合、得られた変位波形の中には見掛け上長周期の波の成分が現れ、さらに、ドリフトも生ずる。本論ではこれを避けるために、次のような方法に従って加速度の積分を行った。まず Δt (本論の場合 $\Delta t=0.01$ 秒)毎に与えられた加速度記録 $y_R(t)$ を線形加速度法を用いて2回積分することによって変位応答 $y_R(t)$ を得る。つぎに、この $y_R(t)$ に移動平均法を適用することによって $y_S(t)$ を算出する。すなわち、

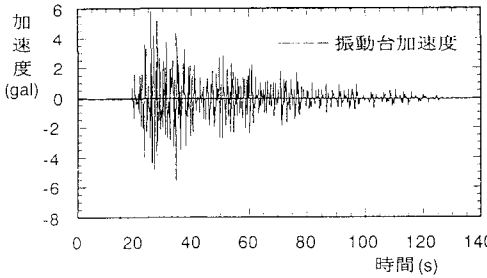
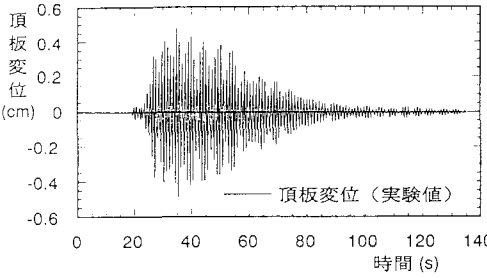
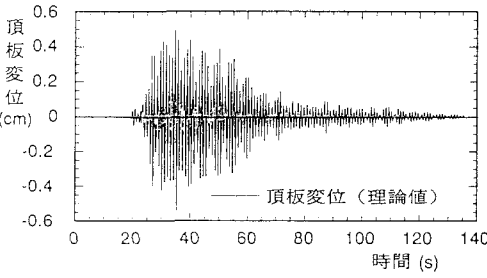


図-10 振動台加速度(入力加速度)



(a) 実験結果



(b) 理論結果

図-11 TLD-3層ラーメン模型系の頂板の応答変位

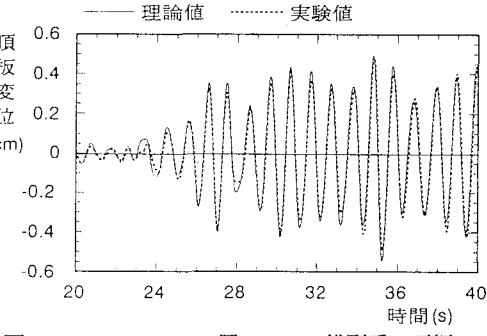


図-12 TLD-3層ラーメン模型系の頂板の応答変位の拡大図

$y_S(t_i) = \frac{1}{2m+1} \sum_{l=-m}^m y_S(t_i + l\Delta t)$ によって $y_S(t)$ を算出する。移動平均時の時間間隔 $(2m+1)\Delta t$ は消去したい長周期成分の最小の周期 (図-1 1 (a) の場合 1.11 秒とした) に選ぶ。このような操作を施した後に得られた $y_S(t)$ には、除去したい長周期成分のみが含まれていることになる。したがって、ここで $y_T(t) = y_R(t) - y_S(t)$ を求めれば、長周期成分を含まない変位応答 $y_T(t)$ が得られることになる。

3. 振動解析理論

T L D - 3 層ラーメン模型系が入力地震波をうけたときの応答解析理論について述べる。

3 層ラーメンは 2 次元ラーメンとして取扱い、これを多質点系に置換した。また、T L D は、これを等価な振動系に置換した。

3. 1 空の T L D を設置した 3 層ラーメン模型の振動解析

まず、空の T L D を設置した 3 層ラーメン模型について、その振動特性を求める。図-1 に示すようなラーメン模型が、支点到地震入力 $\ddot{\phi}(t)$ を受けた場合の振動方程式は、次式のように表される。

$$M\ddot{\mathbf{x}} + C\dot{\mathbf{x}} + K\mathbf{x} = -\ddot{\phi}\mathbf{M}\mathbf{I} \quad (1)$$

ここに、 M, C, K はそれぞれ質量行列、減衰行列、剛性行列である。 $\mathbf{x}$ は変位ベクトルであり、 $\mathbf{I}$ は水平成分に相当する要素のみが 1 で、他の要素はすべて 0 となるベクトルである。

式(1)において、

$$\ddot{\phi}(t) = 0, \quad C = 0, \quad \mathbf{x} = \mathbf{X}_s e^{in_s t} \quad (2)$$

とにおいて固有値解析を行えば、固有円振動数 n_s 、振動形 $\mathbf{X}_s$ ($s = 1, 2, 3, \dots, P$) を得る。 P は全自由度数である。

いま、第 s 次の基準座標を ξ_s とし、

$$\xi = (\xi_1 \ \xi_2 \ \xi_3 \ \dots \ \xi_P) \quad (3)$$

さらに、振動モード行列を

$$\mathbf{X} = (\mathbf{X}_1 \ \mathbf{X}_2 \ \mathbf{X}_3 \ \dots \ \mathbf{X}_P) \quad (4)$$

とし、減衰行列 C の直交性を仮定して

$$\mathbf{x} = \mathbf{X} \xi \quad (5)$$

とにおいて、これを式(1)に代入し、左から $\mathbf{X}^T$ を掛ければ、次式を得る。

$$M_s \ddot{\xi}_s + C_s \dot{\xi}_s + K_s \xi_s = -\ddot{\phi} \mathbf{X}_s^T \mathbf{M} \mathbf{I}, \quad (s = 1, 2, 3, \dots, P) \quad (6)$$

ここに、

$$M_s = \mathbf{X}_s^T \mathbf{M} \mathbf{X}_s, \quad C_s = \mathbf{X}_s^T \mathbf{C} \mathbf{X}_s, \quad K_s = \mathbf{X}_s^T \mathbf{K} \mathbf{X}_s \quad (7)$$

式(6)の両辺を M_s で割れば

$$\ddot{\xi}_s + 2h_s n_s \dot{\xi}_s + n_s^2 \xi_s = -\beta_s \ddot{\phi}, \quad (s = 1, 2, 3, \dots, P) \quad (8)$$

と表される。ここに、 h_s, β_s はそれぞれ第 s 次の減衰定数及び刺激係数であり、

$$\beta_s = \frac{\mathbf{X}_s^T \mathbf{M} \mathbf{I}}{M_s}, \quad (s = 1, 2, 3, \dots, P) \quad (9)$$

である。 $\ddot{\phi}(t)$ が与えられれば、式(8)から ξ_s が得られる。これを式(5)に用いれば、ラーメン模型の各節点の地震応答変位 $\mathbf{x}$ を求めることができる。

3.2 TLDに対する等価振動系

図-13に示すように、長さ L 、奥行き D 、水深 H の長方形液体貯槽が水平及びロッキング振動をしている場合について考える。貯槽は剛であるとし、内容液は非圧縮、非粘性であり、その運動は非回転であると仮定する。さらに、本論では、内容液の振動が線形振動である場合を取り扱うことにする。

さて、TLDと構造物の連成振動を取り扱うとき、TLDを等価振動系(図-14参照)に置換して用いると便利がよい。TLDの等価振動系を構成する諸定数は次のように表される。

第 s 次の水平方向動揺振動モードに対する等価質量 m_{ws} 、その作用点の高さ H_{ws} 、等価ばね定数 k_{ws} は次式のように表される¹⁾。

$$m_{ws} = 8\rho DLH \left(\frac{H}{L} \right)^2 \frac{1}{(\lambda_s H)^3} \tanh \lambda_s H, \quad \lambda_s = \frac{(2s-1)\pi}{L} \quad (10)$$

$$H_{ws} = H \left(1 - \frac{\cosh \lambda_s H - 2}{\lambda_s H \sinh \lambda_s H} \right) \quad (11)$$

$$k_{ws} = n_{ws}^2 m_{ws}, \quad (s = 1, 2, 3, \dots) \quad (12)$$

ここに、 ρ は内容液の密度、 n_{ws} は第 s 次の固有円振動数で

$$n_{ws} = \sqrt{\lambda_s g \tanh \lambda_s H} \quad (13)$$

である。水平剛振動モードに対する等価質量 m_{w0} 、その作用点の高さ H_{w0} は次式のように表される。

$$m_{w0} = \rho DLH - 8\rho DLH \left(\frac{H}{L} \right)^2 \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{(\lambda_s H)^3} \tanh \lambda_s H \quad (14)$$

$$H_{w0} = \frac{H}{m_{w0}} \left\{ \rho DLH \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{12} \frac{L^2}{H^2} \right) - \sum_{s=1}^{\infty} m_{ws} \frac{H_{ws}}{H} \right\} \quad (15)$$

次に、第 s 次のロッキング動揺モードに対する等価慣性モーメント J_{ws} 、等価回転ばね定数 $k_{w\theta s}$ は、図-13の点Qまわりについて、次式のように表される。

$$J_{ws} = 8\rho DH^4 \frac{H}{L} \frac{(\lambda_s H \tanh \lambda_s H - 1 + \frac{2}{\cosh \lambda_s H})^2}{(\lambda_s H)^5 \tanh \lambda_s H} \quad (16)$$

$$k_{w\theta s} = n_{ws}^2 J_{ws} \quad (17)$$

ロッキング剛振動モードに対する等価慣性モーメント J_{w0} は、図-13の点Qまわりについて次式のように表される。

$$J_{w0} = 8\rho DH^4 \left[\frac{1}{192} \left(\frac{L}{H} \right) \left\{ 5 + \left(\frac{L}{H} \right)^2 \right\} + \sum_{s=1,3,5,\dots}^{\infty} \left\{ 3 \frac{\tanh \frac{\pi s L}{2H}}{(s\pi)^5} + \frac{H}{L} \frac{2 \cosh \lambda_s H - 1}{(\lambda_s H)^5 \sinh \lambda_s H} \right\} \right] - \sum_{s=1}^{\infty} J_{ws} \quad (18)$$

3.3 TLD-3層ラーメン模型系の振動解析

図-1に示すラーメン模型の頂板上(Q点)にTLDを設置した場合に、この構造系が $\ddot{\phi}(t)$ で表される面内水平方向の地震入力を受けたときの応答について考える。

まず、TLDの内容液の水平及びロッキング振動に対する振動方程式は、等価振動系を利用すれば、次式のように表される。

$$m_{ws} \ddot{\zeta}_s + C_{ws} \dot{\zeta}_s + k_{ws} \zeta_s = -m_{ws} (\ddot{x}_Q + \ddot{\phi}) \quad (19)$$

$$J_{ws} \ddot{\eta}_s + C_{w\theta s} \dot{\eta}_s + k_{w\theta s} \eta_s = -J_{ws} \ddot{\theta}_Q \quad (20)$$

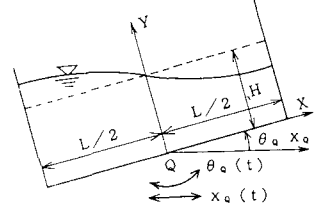


図-13 長方形液体貯槽

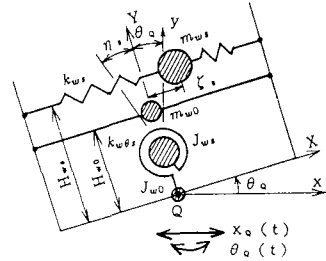


図-14 TLDの等価振動系

ここに、 ζ_{ws} 、 C_{ws} 及び η_{ws} 、 $C_{w\theta s}$ はそれぞれ第 s 次の水平及びロッキング振動に対する基準座標と減衰係数であり、 x_Q 、 θ_Q は点 Q の水平及び回転変位である。上式をそれぞれ m_{ws} 及び J_{ws} で割れば

$$\ddot{\zeta}_s + 2h_{ws}n_{ws}\dot{\zeta}_s + n_{ws}^2\zeta_s = -(\ddot{x}_Q + \ddot{\phi}) \quad (21)$$

$$\ddot{\eta}_s + 2h_{w\theta s}n_{ws}\dot{\eta}_s + n_{ws}^2\eta_s = -\ddot{\theta}_Q \quad (22)$$

ここに、 h_{ws} 、 $h_{w\theta s}$ はそれぞれ第 s 次の水平及びロッキング振動に対する減衰定数である。次に、T L D を点 Q に設置した構造系に対する振動方程式は、次式のように表される。

$$\begin{aligned} M_s\ddot{\bar{\xi}}_s + C_s\dot{\bar{\xi}}_s + k_s\bar{\xi}_s = & -\mathbf{X}_s^T \mathbf{M} \mathbf{I} \ddot{\phi} - \sum_{l=1}^{\infty} m_{wl}(\ddot{\zeta}_l + \ddot{x}_Q + \ddot{\phi})X_{Qs} - m_{w0}(\ddot{x}_Q + \ddot{\phi})X_{Qs} \\ & + \sum_{l=1}^{\infty} m_{wl}(\ddot{\zeta}_l + \ddot{x}_Q + \ddot{\phi})H_{ws}\Theta_{Qs} + m_{w0}(\ddot{x}_Q + \ddot{\phi})H_{w0}\Theta_{Qs} \\ & - \sum_{l=1}^{\infty} J_{wl}(\ddot{\eta}_l + \ddot{\theta}_Q)\Theta_{Qs} - J_{w0}\ddot{\theta}_Q\Theta_{Qs} \end{aligned} \quad (23)$$

ここに、 $\bar{\xi}_s$ は T L D を設置した場合の構造系の第 s 次振動に対する基準座標である。また、 X_{Qs} 、 Θ_{Qs} は点 Q における構造系の水平及び回転方向の第 s 次振動に対する振動モード形であり、これを用いれば、点 Q の水平及び回転変位は次式のように表される。

$$x_Q = \sum_{s=1}^P \bar{\xi}_s X_{Qs} \quad (24)$$

$$\theta_Q = \sum_{s=1}^P \bar{\xi}_s \Theta_{Qs} \quad (25)$$

式 (23) において、右辺第 1 項は入力地震の加速度にもとづく一般力、第 2、3 項は T L D の水平方向の動揺振動及び剛振動によって生ずる壁面動水圧にもとづく一般力、第 4、5 項は同じく、T L D の水平方向の動揺振動及び剛振動によって生ずる壁面動水圧モーメントにもとづく一般力、第 6、7 項は T L D の回転方向の動揺振動及び剛振動によって生ずる壁面動水圧モーメントにもとづく一般力である。

さて、本論では、T L D の等価振動系については、水平及びロッキング振動のいずれに対しても第 1 次振動のみを採用し、構造系についても逆対称 1 次振動のみを考えることすれば、地震入力を受けた構造系の時刻歴応答を定める基礎方程式は、式 (21) ~ (25) において、 $s = 1$ のみをとって、これらを整理することによって、結局、次式のように表される。

$$\ddot{\zeta}_1 + 2h_{w1}n_{w1}\dot{\zeta}_1 + n_{w1}^2\zeta_1 = -X_{Q1}\ddot{\xi}_1 - \ddot{\phi} \quad (26)$$

$$\ddot{\eta}_1 + 2h_{w\theta 1}n_{w1}\dot{\eta}_1 + n_{w1}^2\eta_1 = -\Theta_{Q1}\ddot{\xi}_1 \quad (27)$$

$$\lambda_1\ddot{\xi}_1 + 2h_1n_1\dot{\xi}_1 + n_1^2\xi_1 = -\lambda_2\ddot{\zeta}_1 - \lambda_3\ddot{\eta}_1 - \lambda_4\ddot{\phi} \quad (28)$$

ここに、

$$\lambda_1 = 1 + \mu_{m1}(X_{Q1} - H_{w1}\Theta_{Q1})X_{Q1} + \mu_{m0}(X_{Q1} - H_{w0}\Theta_{Q1})X_{Q1} + (\mu_{J1} + \mu_{J0})X_{Q1}^2 \quad (29)$$

$$\lambda_2 = \mu_{m1}(X_{Q1} - H_{w1}\Theta_{Q1}) \quad (30)$$

$$\lambda_3 = \mu_{J1}Z_{Q1}^2\Theta_{Q1} \quad (31)$$

$$\lambda_4 = \beta_1 + \mu_{m1}(X_{Q1} - H_{w1}\Theta_{Q1}) + \mu_{m0}(X_{Q1} - H_{w0}\Theta_{Q1}) \quad (32)$$

$$\mu_{m1} = \frac{m_{w1}}{M_1}, \quad \mu_{m0} = \frac{m_{w0}}{M_1}, \quad \mu_{J1} = \frac{J_{w1}}{M_1 Z_{Q1}^2}, \quad \mu_{J0} = \frac{J_{w0}}{M_1 Z_{Q1}^2}, \quad Z_{Q1} = \frac{X_{Q1}}{\Theta_{Q1}} \quad (33)$$

地震入力 $\ddot{\phi}(t)$ が与えられれば、式(26)～(28)の連立微分方程式を解くことによって、刻々の ζ_1 , η_1 , $\bar{\xi}_1$ が求められることになる。 $\bar{\xi}_1$ を式(24),(25)に代入すれば、構造系の点Qの水平及び回転変位が得られる。

また、TLDについて、その波高応答 w_1 、水平方向の全壁面動水圧応答 P_{w1} 及び全壁面動水圧モーメント応答 M_{w1} は、次式によって算出することができる。

$$w_1 = W_1\left(\frac{L}{2}, H\right) \left\{ \frac{\zeta_1}{a_{m1}} + \frac{\eta_1}{a_{j1}} \right\} \quad (34)$$

$$P_{w1} = -m_{w1}(\ddot{\zeta}_1 + \ddot{x}_Q + \ddot{\phi}) - m_{w0}(\ddot{x}_Q + \ddot{\phi}) \quad (35)$$

$$M_{w1} = -J_{w1}(\ddot{\eta}_1 + \ddot{\theta}_Q) - J_{w0}\ddot{\theta}_Q + m_{w1}(\ddot{\zeta}_1 + \ddot{x}_Q + \ddot{\phi})H_{w1} + m_{w0}(\ddot{x}_Q + \ddot{\phi})H_{w0} \quad (36)$$

式(34)において、 $W_1(L/2, H)$ はTLDに対する第1次の動揺振動における自由表面上の右側壁面での振動モード形の値である。また、 a_{ms} はTLDの第s次の水平振動に対する等価変位振幅、 a_{js} はロッキング振動に対する等価回転角振幅であって、それらは次式のように表される。

$$a_{ms} = \frac{1}{4}(-1)^{s+1} \frac{L}{H} \lambda_s H \coth \lambda_s H \quad (37)$$

$$a_{js} = \frac{1}{4}(-1)^s \frac{L}{H^2} \frac{(\lambda_s H)^2}{\lambda_s H \tanh \lambda_s H - 1 + \frac{2}{\cosh \lambda_s H}} \quad (38)$$

3. 4 TLDに対する最適減衰定数

TLDを設置した構造系に対するTLDの最適減衰定数 h_{w1} 、水深H及び必要なTLDの個数Nを、次のような仮定及び条件の下で求めた。

(1) 構造系の減衰定数を $h_1 = 0$ と仮定する。(2) TLDの水平振動とロッキング振動に対する減衰定数を相等しい $h_{w\theta 1} = h_{w1}$ と仮定する。(3) TLDの長さL及び奥行きDを与える。(4) TLD内容液の全質量と構造系の第1次のモード質量の比 $\bar{\alpha}_1$ を与える。ここに、モード質量は M_1/X_Q^2 によって定義される値であり、 M_1 は式(7)から求められる構造系の第1次振動に対する換算質量であり、 X_Q は点Qの振動モード形の値である。従って、モード質量はTLDの設置点の振動モード形の値を1としたときの構造系の換算質量である。これより質量比 $\bar{\alpha}_1$ は、TLDの必要個数をNとすれば、次式のように表される。

$$\bar{\alpha}_1 = \frac{N\rho DLH}{M_1} X_Q^2 \quad (39)$$

(5) 最適減衰定数の定義は次の通りである¹⁷⁾。TLD-構造系に対して、その支点到強制変位を加えることによって得られる同系の共振曲線は、TLDの減衰定数の値の如何に関わらず、一定点A、Bを通る。いま、点A及びBにおいて共振曲線がそれぞれ極大値をもつようにしたときの減衰定数を求め、この両者の平均値をとり、これを最適減衰定数 h_{w1} として採用する。

得られた結果を示せば、次の通りである。TLDの水深Hは次式の解として求められる。

$$\tanh \frac{\pi H}{L} = \frac{n_1^2 L(2\lambda_4 - \lambda_2)}{2\pi g \lambda_1 \lambda_4} \quad (40)$$

TLDの必要個数Nは

$$N = \frac{\bar{\alpha}_1 M_1}{\rho DLH X_Q^2} \quad (41)$$

最適減衰定数 h_{w1} は

$$h_{w1} = \sqrt{\frac{6\lambda_4 - 5\lambda_2}{8\lambda_4(1-d^2)} \left\{ d^2 - \frac{\lambda_2^2}{(2\lambda_4 - \lambda_2)(6\lambda_4 - 5\lambda_2)} \right\}} \quad (42)$$

$$d^2 = \frac{\lambda_4(\lambda_2 X_{Q1} - \lambda_3 \Theta_{Q1})}{\lambda_1(2\lambda_4 - \lambda_2)} \quad (43)$$

によって、それぞれ算出される。

4. 数値計算結果

図-1に示す構造系に対して、3層ラーメン模型を節点32、要素数33の多質点系に分割した。構造系の支点は固定とした。3層ラーメン模型の密度は $7.85t/m^3$ 、弾性係数は $2.0 \times 10^8 kN/m^2$ とした。空のTLDを含む3層ラーメン模型の全質量は $41.2kg$ であり、TLDの水深が $8.67cm$ のときの質量比 $\bar{\alpha}_1$ は0.057である。式(40)から得られる水深は $8.657cm$ 、式(42)から算出されたTLDの最適減衰定数は0.1208となる。減衰自由振動実験によって得られた減衰定数は表-1に示すように0.0166であるから、これは最適減衰定数に比べてはるかに小さい値である。本論の目的が、著者等の導いた理論式によって得られた結果を実験結果と比較することによって、理論式の妥当性を示すことにあること、さらには通常、減衰定数が小さいときの方が大きな振動現象が生じるので、理論値との比較に便利であることを考慮して、あえてその内容液に手を加えてTLDの減衰定数を増大させるようなことはしなかった。

4. 1 構造系の固有振動数及び振動モード形

式(13)を用いて算出したTLDの第1次の固有振動数を表-1に示した。

式(2)の条件の下に、式(1)を解いて求めた3層ラーメン模型及び空のTLDを設置した3層ラーメン模型の固有振動数、振動モード形を、第3次振動までについて、それぞれ表-2及び表-3に示した。後者の振動モード形を図示すれば、図-5の通りである。なお、減衰自由振動から求めた3層ラーメン模型と空のTLDを設置した3層ラーメン模型の第1次の固有振動数と減衰定数は、それぞれ $1.23Hz$ 、 0.018 及び $1.07Hz$ 、 0.0021 であった。減衰定数についてはいずれの場合についても、わずかに減衰自由振動から求めた値の方が小さくなっている。

式(8)において、 $\phi = \phi_0 \cos \omega t$ として算出した空のTLDを設置した3層ラーメン模型に対する共振曲線の一例を図-6に示す。同図は模型頂板の加速度の応答倍率と振動台加速度に対する頂板加速度の位相差を示したものである。数値計算に際しては2.の実験によって得られた減衰定数を採用した。

4. 2 TLD-3層ラーメン模型の振動解析結果

空のTLDを設置した3層ラーメン模型及びTLDにおいて、共にその第1次振動のみを採用した場合について、式(26)～(28)及び(24),(25),(34),(35)を用いて、TLD-3層ラーメン模型系の減衰自由振動、共振曲線及び不規則入力応答を算出した。数値計算において採用したTLD及びラーメン模型の減衰定数は、いずれも2.の実験によって得られた値である。

TLD-3層ラーメン模型系の固有振動数を表-4に示す。図-7には実験によって得られた減衰自由振動曲線のみしか示さなかったが、数値計算によって求めたそれは同図の曲線によく一致していた。

TLD-3層ラーメン模型系の共振曲線の一例を、図-9(a)～(d)に示す。いずれの場合にも、実験値と理論値はよく一致しているといえる。

図-10は不規則入力波として用いた振動台加速度を示す。振動現象を線形範囲内におさめるために、入力の最大加速度は小さな値に設定した。図-10は最大加速度が 6 gal である場合を示した。

図-11(b)に、ラーメン模型頂板の変位応答の理論曲線を示した。図-11(a)の実験結果と比べると、両者は非常によく似ていることがわかる。このことをより明確にするために、両者の曲線の部分拡大図を図-12に示した。同図から両曲線はよく一致していることがわかる。

5. おわりに

まず、3層ラーメン模型を作製し、これにTLDを設置した振動系に対して、減衰自由振動実験、共振振動実験、不規則振動実験を行って、ラーメン模型及びTLDの各種応答値を求め、主として位相差の観点からTLDの制振作用に関する検討を行った。次に、TLD-3層ラーメン模型系に対する振動方程式を導き、

数値計算を行って、その結果を実験値と比較することによって、理論式の妥当性に関する検討を行った。得られた結果は、次の通りである。

(1) TLD-3層ラーメン模型系の共振振動実験において得られた入力加速度、ラーメン頂板加速度、TLDの波高及び壁面動水圧相互の位相差から、(i) ラーメン模型頂板の2つの共振点において、模型頂板加速度と入力加速度との位相差が 90° になっていることは当然であるが、ラーメン模型単体の共振点においても、また、その位相差が 90° となっている。このことは動水圧がラーメン模型の運動に対して減衰力として作用していることを示している。

(2) 本論で導いた理論式を用いて数値計算を行った結果、その等の値は減衰自由振動、共振振動、不規則振動等の各種実験によって得られた実験結果とよく一致しており、本論の理論式の妥当性が示されたと考えてよい。

参考文献

- 1) 小坪清真・高西照彦・多田浩: 強制振動をうける液体貯槽内容液に対する等価振動系、土木構造・材料論文集 第6号、pp.33～40, 1991.1.
- 2) 小坪清真・高西照彦・多田浩: ロッキングを行う長方形同調液体ダンパーの動特性、第8回日本地震工学シンポジウム、pp.1803～1808, 1990.12.
- 3) 大崎順彦: 振動理論、彰国社、1980.
- 4) 小坪清真・高西照彦・多田浩: 同調液体ダンパーによる架設途中の斜張橋の制振、振動制御コロキウムPART.B, pp.161～169, 1991.7.
- 5) 米田昌弘・チャイセリ・ピャット・前田研一・藤野陽三: 斜張橋主塔を対象としたTLDの減衰付加効果に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.37A, pp.1019～1028, 1991.3.
- 6) 植田利夫・中垣亮二・有馬健次: TSDによる斜張橋・塔の制振効果、風工学シンポジウム、pp.97～102, 1990.
- 7) 北沢正彦・高枝新伍・正田正一・玉木利裕・坂井藤一・恒川昌宏: 東神戸大橋主塔および鋼製ラーメン橋脚の振動実験、橋梁と基礎、pp.9～14, 1993.2.
- 8) 藤原亨・植田利夫・玉越隆史・南條正洋・小林義和: 生口橋実橋振動実験、橋梁と基礎、pp.9～15, 1993.12.
- 9) 山口宏樹・藤野陽三・津村直宣: 構造物のパッシブコントロール(2)ーTMDを中心としてー、振動制御コロキウムPART.A、構造物の振動制御、pp.36～60, 1991.7.
- 10) 辰巳正明・秦健作・大倉幸三・大西悦朗: 明石海峡大橋主塔の制振対策、第2回振動制御コロキウムPART.A、講演論文集、pp.1～8, 1993.8.
- 11) 金子成彦・吉田治・石川雅章: ネットを挿入した同調液体ダンパーの制振特性、第2回振動制御コロキウムPART.B、講演論文集、pp.17～24, 1993.8.
- 12) 若原敏裕・大築民夫・日比一喜: 高層建物の風応答観測に基づく同調液体ダンパーの制振効果、第2回振動制御コロキウムPART.B、講演論文集、pp.111～118, 1993.8.
- 13) 新谷隆宏: 建築構造物の地震応答制御に関する最近の話題、第2回振動制御コロキウムPART.A、構造物の振動制御(2)、pp.41～53, 1993.8.
- 14) 若原敏裕・大山巧・藤井邦雄: TLDー構造物系の非線形応答特性に関する2、3の考察、振動制御コロキウムPART.B、講演論文集、pp.179～187, 1991.7.
- 15) 坂井藤一・高枝新伍・玉木利裕: 液柱管ダンパー(TLCD)の実験的研究、振動制御コロキウム、PART.B、講演論文集、pp.189～196, 1991.7.
- 16) 宮田利雄・山田均・斉藤善昭: 塔状構造物制振用水槽ダンパーの開発、構造工学論文集、Vol.34A, pp.617～626, 1988.3.
- 17) デン・ハルトック(谷口・藤井共訳): 機械振動論(改訂版)、pp.95～115, コロナ社, 1971.

(1993年9月16日受付)