

2 方向入力を受ける TLD 付き 3 層ラーメン模型の応答特性

RESPONSE CHARACTERISTICS OF THREE STORIES FRAME MODEL WITH TLD
RECEIVING INPUT WAVES FROM TWO DIRECTIONS

高西照彦* 園田敏矢** 多田浩*** 成富勝****

Teruhiko TAKANISHI, Toshiya SONODA, Hiroshi TADA and Masaru NARITOMI

- * 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)
 ** 大分工業高等専門学校助教授 土木工学科 (〒870-01 大分市大字牧1666)
 *** 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)
 **** 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)

To calculate the response when Tuned Liquid Damper(TLD)-structure system is vibrated from two horizontal directions, a method is proposed that the input wave is decomposed into weak axis and strong axis directions of the structure to compute each response value for each direction and then the values are composed again.

(1)The rectangular TLD vibrated from two horizontal directions is modeled as equivalent mass-spring vibration system. (2)The response for stationary vibration and non-stationary vibration when this TLD is placed on three stories frame is calculated theoretically. (3) A TLD-three stories frame model is built and the validity of the theory is examined experimentally by using this model. The results of the theoretical calculations corresponded quite well with those obtained by the experimental studies on vibration.

Key Words: response characteristics, equivalent vibration system,
TLD-structure system, input wave from two directions

1. まえがき

近年、長大橋梁の主塔や高層建築物、あるいは高いタワーなどに、同調液体ダンパー (TLD) と呼ばれる制振装置を設置することによって、当該構造物の地震や風に対する振動を低減しようとする試みがなされており、いくつかの実施例がある。

従来、TLDの構造物に対する制振性については、当該構造物の第1次の水平振動のみをとりあげて、それについての理論的、実験的検討がなされてきた^{1), 2), 3), 4), 5)}。

著者ら^{6), 7), 8)}も、TLD付き3層ラーメン模型の水平1方向に対する定常及び非定常振動の理論的、実験的研究を行い、理論値と実験値とがよく合うという結果を得ている。

しかし、地震入力は水平2方向および上下方向の3成分を有するので、構造物に設置されたTLDは水平2方向および上下方向の入力をうけて、その内溶液は複雑な動揺振動をすることになる。

現在までに、TLDを設置した構造物が水平2方向入力を同時にうける場合の応答特性について検討を行った研究はほとんどないように思われる。したがって、ここ

でTLD付き構造物の水平2方向入力に対する応答特性に関して検討を加えておくことは有用なことでありと考えられる。

なお、上下方向入力に対する応答特性については稿を改めて述べることにする。

本論では、まず長方形TLDが、図-1に示すように、それぞれx、y方向に振動する場合に対してその等価振動系 (図-2) を示し、次に、図-3に示すように、TLDを設置した3層ラーメン模型が2方向の入力をうけた場合について、3層ラーメンの定常および非定常応答 (地震応答) を求めて、2方向に振動するTLDが、3層ラーメン模型の応答特性に及ぼす影響およびTLD内容液の弱非線形な動揺振動に対する重ね合わせの原理の適用性とその適用限界に関する検討を行った。

なお、本論では3層ラーメン模型に対するTLDの制振性について検討を行うことを直接の目的としてはいないので、TLD内容液の減衰に関しては、それが最適減衰定数になるような調整を行わず、内容液として普通の水道水を用いた。水の場合、減衰が小さいが、TLD内溶液の応答特性を明らかにするには減衰の小さい方が内溶液の動揺現象がより鮮明に現れるものと考えられる。

2. TLDに対する等価振動系の理論

図-1に示すような長さ L 、奥行き D 、水深 H の長方形液体貯槽の自由振動について考える。貯槽は剛であるとし、その内容液は非圧縮、非粘性であり、運動は非回転であると仮定する。さらに、本論では、内容液の動揺振動の非線形性があまり大きくない場合を取り扱うことにする。なお、非線形性が大きい場合については、現在研究中である。

一般に液体貯槽中の内容液の振動形は、その固有振動数に対応する振動形（以後、動揺振動モードと呼ぶ）と無限大の固有振動数に対応する振動形（以後、剛振動モードと呼ぶ）とに分けて考えることができる。本論においては、この２種類の振動形に対する等価質量および等価ばね定数をそれぞれ求めることによって、図-1に示すような長方形貯槽が水平 z 方向の強制振動をうける

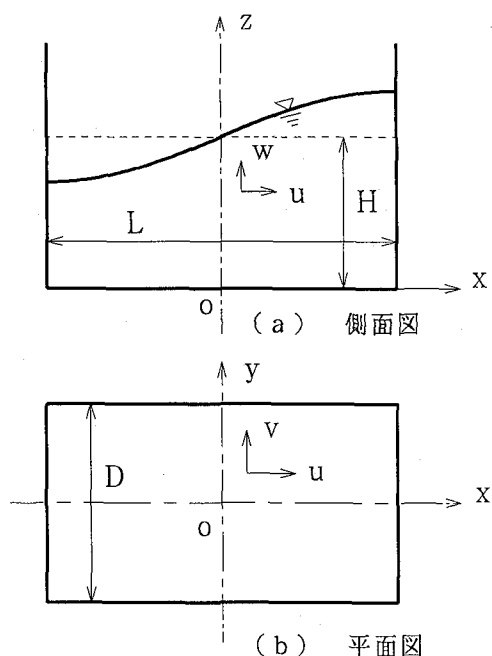


図-1 長方形 TLD および座標系

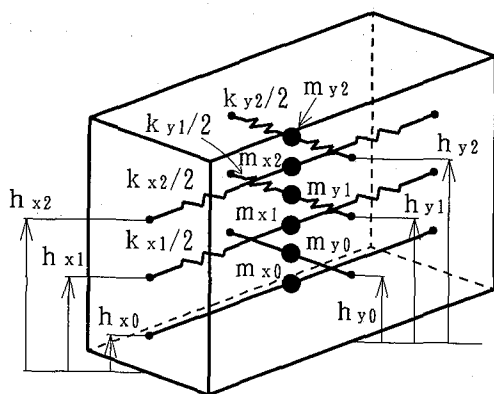


図-2 長方形 T L D の等価振動系

場合について、その内容液に対する等価振動系（図-2）を導くことにする。

2. 1 動揺振動モードの場合

内容液の動水圧を σ とすれば、その自由振動に対する基礎方程式は、次式のようになる。

$$\frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \sigma}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

境界条件は、両側壁において、次式の通りである。

$$\left. \frac{\partial \sigma}{\partial x} \right|_{x=-\frac{L}{2}} = \left. \frac{\partial \sigma}{\partial x} \right|_{x=\frac{L}{2}} = 0 \quad (2-a)$$

$$\left. \frac{\partial \sigma}{\partial y} \right|_{u=-\frac{D}{2}} = \left. \frac{\partial \sigma}{\partial y} \right|_{u=\frac{D}{2}} = 0 \quad (2-b)$$

底面と自由表面における境界条件は、次式の通りである。

$$\left. \frac{\partial \sigma}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (3-a)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial t^2} + g \frac{\partial \sigma}{\partial z} \right)_{z=H} = 0 \quad (3-b)$$

上式 (1)~(3) を満足する解 σ を用いて、壁面動水圧及び壁面動水圧モーメントを求め、等価振動系の理論⁶⁾に従えば、 x および y 方向に対する内容液の等価振動系が、次式に示すように得られる。

$$\lambda_{2i-1} = \frac{2i-1}{L} \pi, \quad \mu_{2j-1} = \frac{2j-1}{D} \pi \quad (4-a, b)$$

$$n_{x,2i-1} = \sqrt{g\lambda_{2i-1}\tanh\lambda_{2i-1}H} \quad (5-a)$$

$$n_{y,2j-1} = \sqrt{g\mu_{2j-1}\tanh\mu_{2j-1}H} \quad (5-b)$$

$$m_{x,2i-1} = 8\rho LDH \left(\frac{H}{L}\right)^2 \frac{\tanh \lambda_{2i-1} H}{(\lambda_{2i-1} H)^3} \quad (6-a)$$

$$m_{y,2j-1} = 8\rho LDH \left(\frac{H}{D}\right)^2 \frac{\tanh \mu_{2j-1} H}{(\mu_{2j-1} H)^3} \quad (6-b)$$

$$k_{x,2i-1} = 8 \frac{\rho g L D}{(2i-1)^2 \pi^2} \tanh^2 \lambda_{2i-1} H \quad (7-a)$$

$$k_{y,2j-1} = 8 \frac{\rho g L D}{(2j-1)^2 \pi^2} \tanh^2 \mu_{2j-1} H \quad (7-b)$$

$$h_{x,2i-1} = H \left\{ 1 - \frac{\cosh \lambda_{2i-1} H - 2}{\lambda_{2i-1} H \sinh \lambda_{2i-1} H} \right\} \quad (8-a)$$

$$h_{y,2j-1} = H \left\{ 1 - \frac{\cosh \mu_{2j-1} H - 2}{\mu_{2j-1} H \sinh \mu_{2j-1} H} \right\} \quad (8-b)$$

上式において、 $n_{x, 2i-1}$ 、 $n_{y, 2j-1}$ は内容液の x 、 y 方向の振動に対する固有円振動数で、下付添字 $2i-1$ 等ははその振動次数を表す(以下同じ)。 $m_{x, 2i-1}$ 、 $m_{y, 2j-1}$ は x および y 方向振動に対する等価質量、 $k_{x, 2i-1}$ 、 $k_{y, 2j-1}$ は等価ばね定数、 $h_{x, 2i-1}$ 、 $h_{y, 2j-1}$ は等価質量の作用点の高さである。

2. 2 剛振動モードの場合

長方形液体貯槽が図-1に示すように、 x および y 方向に調和波入力にもとづく強制振動 $\phi_x(t) = \phi_{0x} \sin \omega_x t$ および $\phi_y(t) = \phi_{0y} \sin \omega_y t$ をうけた場合について考える。動水圧 σ は式(1)の基礎式をそれぞれの振動形式に应ずる境界条件の下で解くことによって求められる。この σ を用いて壁面動水圧を算出した後、それぞれ $\omega_x \rightarrow 0$ 、 $\omega_y \rightarrow 0$ とした極限をとることによって、剛振動モードに対する壁面動水圧を得ることができる。このようにして得た解と2.1の解の内、入力加速度に比例する壁面動水圧とを加え合わせれば、入力加速度に比例する係数として、内容液の固定水に対する等価質量を求めることができる。

$$m_{x0} = \rho L D H - \sum_{i=1} m_{x,2i-1} \quad (9-a)$$

$$m_{y0} = \rho L D H - \sum_{j=1} m_{y,2j-1} \quad (9-b)$$

なお、その作用点は壁面動水圧モーメントを求めることによって容易に算出することができる。結果のみを示せば、

$$h_{x0} = \frac{H}{m_{x0}} \left[\frac{1}{12} \rho D L H \left\{ 6 + \left(\frac{L}{H} \right)^2 \right\} - \sum_{i=1} m_{x,2i-1} \frac{h_{x,2i-1}}{H} \right]$$

$$h_{y0} = \frac{H}{m_{y0}} \left[\frac{1}{12} \rho D L H \left\{ 6 + \left(\frac{D}{H} \right)^2 \right\} - \sum_{j=1} m_{y,2j-1} \frac{h_{y,2j-1}}{H} \right]$$

(10-a, b)

2. 3 長方形TLDの等価振動系

2.1及び2.2の所論に従えば、長方形TLDが2方向入力を受ける場合の内容液に対する等価振動系は、図-2に示すように、それぞれTLDの長軸方向と短軸方向に自由度を有する等価質量と等価ばねからなる振動系としてモデル化してもよいといえよう。

さて、長方形TLDが図-3(b)に示すように、ラーメン模型の強軸方向と θ の角度をなす方向からの入力を受けた場合には、側壁平行方向入力の場合と異なり、TLDの内容液は複雑な動揺振動を生ずることになる。このときの動揺振動を解析するのに、上記の任意方向の入力をラーメン模型の弱軸方向と強軸方向の分力に分解した後、それぞれの方向毎にその分力を入力として用いてラーメンとTLD内容液に対する応答計算を行い、得られた結果を重ね合わせることによってTLD内容液の動揺振動に対する最終的な解を求めるという方法が考えられる。

本論ではTLD付きラーメン模型を用いた実験を行って、上記の解析方法の有用性を示すと共に、入力の入射角 θ の変化によるラーメン模型及びTLD内容液の応答特性の違いを明らかにした。

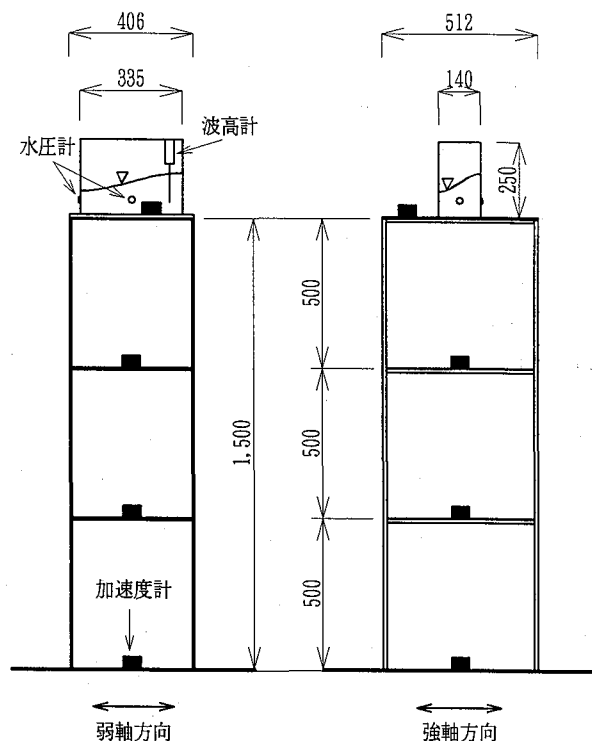
なお、TLD及びラーメン模型に対する応答計算法の

理論については、既に文献⁹⁾に詳論したので、ここではそれについてはこれ以上述べないことにする。

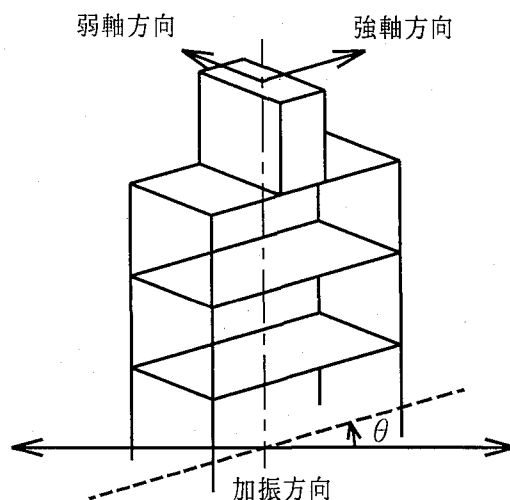
3. 振動台実験

3.1 実験装置

本実験では、入力波の方向の違いが応答特性に与える影響およびTLD内容液の弱非線形な動揺振動に対する重ね合わせの原理の適用性とその適用限界を検討するために、TLD付き立体3層ラーメン模型を作製し、それ



(a) TLD付き3層ラーメン模型と計測器の配置
(単位mm)



(b) 加振方向

図-3 TLD付き3層ラーメン模型

を振動台の加振方向に対して適当な角度だけ回転した位置に設置して加振実験を行った。このようにすれば、ラーメン模型は見掛け上2方向入力を受けたことになる。3層ラーメン模型は、図-3(a)に示すように、高さ1500mm、幅512mm、奥行406mmのステンレス製の3次元模型で、板厚12mmの鋼板を3層の頂板として使用した。TLDは厚さ10mmのアクリル樹脂板で作製し、これを3層ラーメン模型の頂板上に、図-3(a)に示すように設置した。TLDの大きさは内寸で140mm×335mm×250mm(高さ)で、2方向の波高及び水圧が測定できるように、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2個取付けた。波高計はTLDの長辺方向の壁から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。また、3層ラーメン模型の各層上および振動台の上には水平2方向の振動を測定できるように加速度計を設置した。

3. 2 実験概要

図-3(b)に示すように、模型の水平剛性の小さい方向を弱軸方向、大きい方向を強軸方向と呼ぶこととする。3層ラーメン模型を図-3(b)に示すように振動台の加振方向に対し、強軸方向を角度 θ 傾けて実験を行った。その θ は $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ とし、 15° ずつ回転させて加振したときの弱軸方向、強軸方向の2方向についてそれぞれ測定を行った。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TLD内容液の動揺振動の波高が極端に高くない(碎波など生じない)状態で行った。因に、波高 w と水深 H との比 w/H は高々0.45であった。

(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、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。弱軸方向及び強軸方向のそれぞれについて実験を行った。

(b) 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

空のTLD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、およ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(b)の実験を行った。空のTLDを設置した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。次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、空のTLDを設置した3層ラーメン模型に対する減衰自由振動実験を行った。弱軸方向および強軸方向それぞれについて実験を行った。

(c) TLD付き3層ラーメン模型の共振振動実験と減衰自由振動実験および不規則振動実験

TLD内容液の波高および壁面動水圧の応答特性を明らかにするため、および本論で提案したTLDの2方向振動に対する等価振動系の妥当性を示すため、上記(c)の実験を行った。振動台の加振方向との角度 θ を変えて実験を行い、弱軸、強軸方向の加速度、TLDの波高応答及び壁面動水圧応答を同時に計測した。

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NS成分である。入力波の加速度の大きさをいろいろ変えた場合について実験を行ったが、その際、加速度記録に一定の定数を掛けることによってその大きさを調整して用いた。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、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。

3. 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、以下のとおりである。

表-1 TLDの固有振動数と減衰定数
(水深9.98cm)

		実験値	理論値
弱軸方向	固有振動数(Hz)	1.32	1.307
	減衰定数	0.0064	—
強軸方向	固有振動数(Hz)	2.34	2.334
	減衰定数	0.0037	—

表-2 空のTLDを設置した3層ラーメンの振動特性

振動次数	1		2	
	実験値	理論値	実験値	理論値
弱軸固有振動数(Hz)	1.38	1.376	7.36	7.302
方向減衰定数	0.0024	—	0.012	—
強軸固有振動数(Hz)	2.57	2.575	13.03	13.489
方向減衰定数	0.0011	—	0.019	—

表-3 TLD付き3層ラーメン模型の固有振動数(Hz)

振動次数	1		2	
	実験値	理論値	実験値	理論値
弱軸方向	1.12	1.135	1.51	1.546
強軸方向	2.10	2.140	2.64	2.678

(a) TLDの減衰自由振動実験

水深が9.98cm（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、弱軸方向と強軸方向の固有振動数と減衰定数を理論値とともに表-1に示す。減衰定数は両方向とも小さい値であるが、両者を比べれば、弱軸方向の減衰定数は強軸方向の約2倍程度の大きさとなっている。なお、減衰定数は波高が高いときは大きく、低くなるに従って小さくなるという非線形性を示す。表-1の場合は、一例として、波高が2cmのときの結果を示したものである。

(b) 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

得られた結果を、理論値と共に、表-2に示す。弱軸方向、強軸方向共に、固有振動数は実験値と理論値とがよく一致しているといえる。このことから、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と考えられる。図-4は、 $\theta = 90^\circ$ のときの弱軸方向における、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である。横軸には、表-2に示す1次の固有振動数 f_1 に対する加振振動数の比 f/f_1 をとった。この図より $f/f_1=1$ で応答倍率はピーク値となっており、そのときの位相差はほぼ 90° となり、ラーメンは共振状態となっていることがわかる。なお、本論において理論値を算出するのに必要な減衰定数の値としては、すべて実験によって得られた値を用いることにし、それぞれ、そのときの最大波高に対応する減衰定数を採用した。

(c) TLD付き3層ラーメン模型の減衰自由振動実験

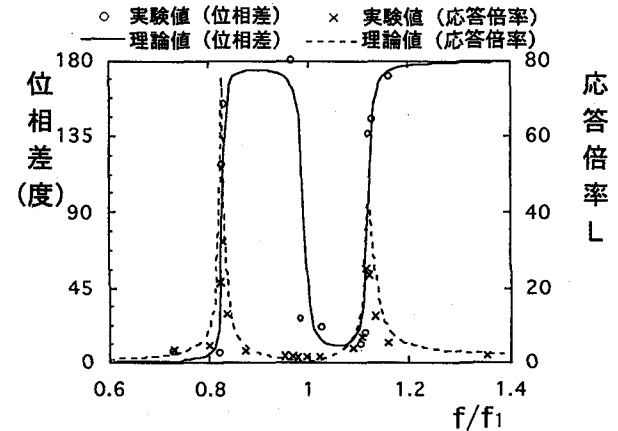
表-3はTLD付き3層ラーメン模型の固有振動数で、弱軸、強軸方向共に実験値と理論値は比較的良好一致しているといえる。

(d) TLD付き3層ラーメン模型の共振振動実験

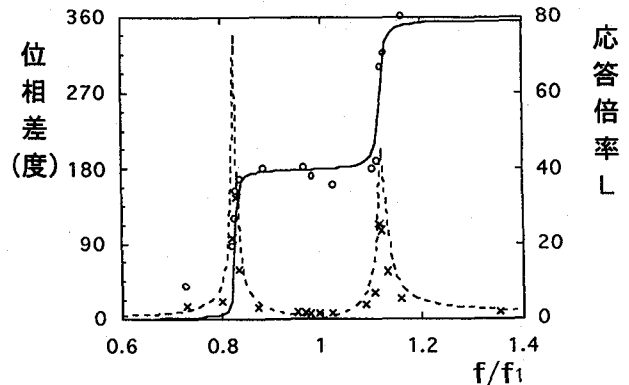
実験結果の一例として、 $\theta = 45^\circ$ における弱軸方向の3層ラーメン模型頂板の加速度、TLDの動水圧に対する共振曲線を図-5(a)~(c)に示す。図中の実線と破

線は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-4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-5(a)~(c)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。図-5(a)にはラーメン模型頂板の加速度と振動台加速度との、(b)にはTLDの壁面動水圧と振動台加速度との、(c)にはラー



(a) ラーメン模型の頂板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) ラーメン模型の頂板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

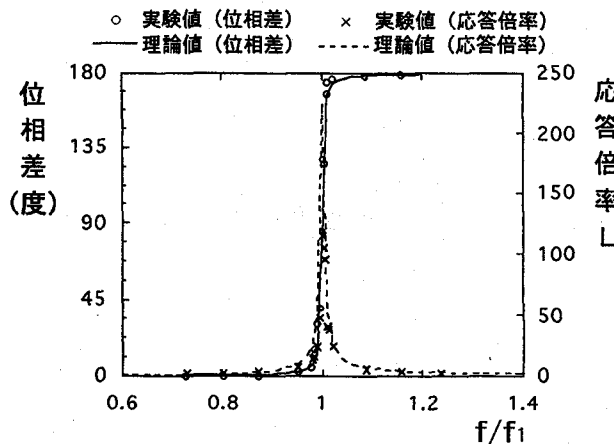
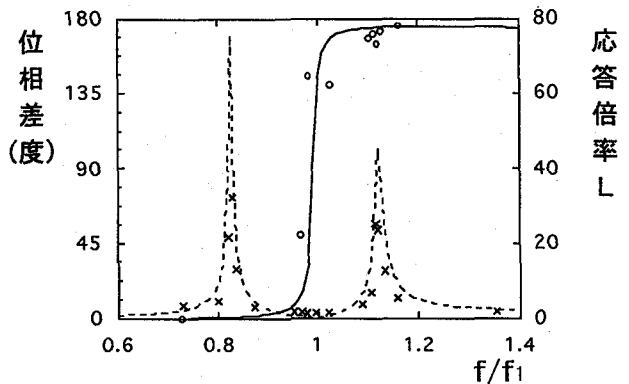


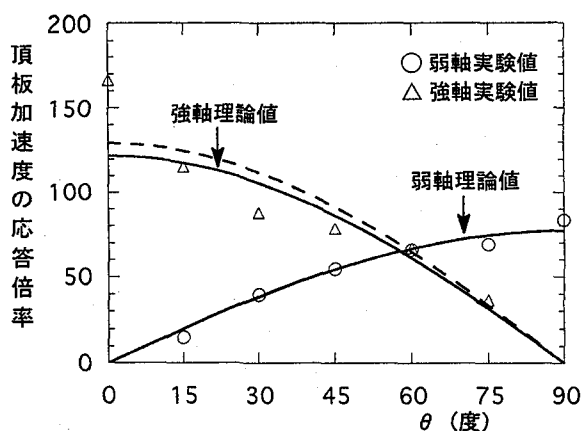
図-4 空のTLDを設置した3層ラーメン模型の頂板加速度の応答倍率と振動台加速度に対する位相差曲線



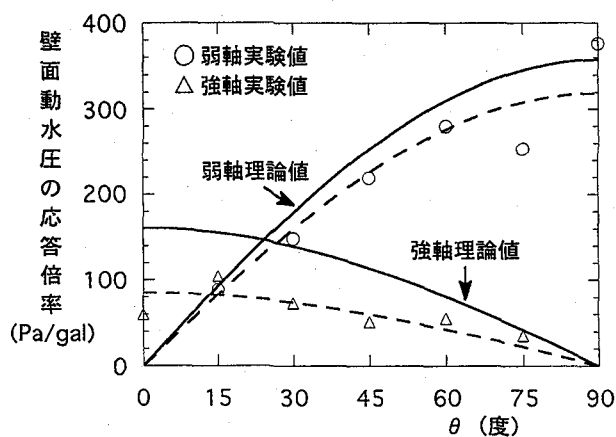
(c) ラーメン模型の頂板加速度の応答倍率及びTLDの壁面動水圧との位相差曲線

図-5 TLD付き3層ラーメン模型の共振曲線

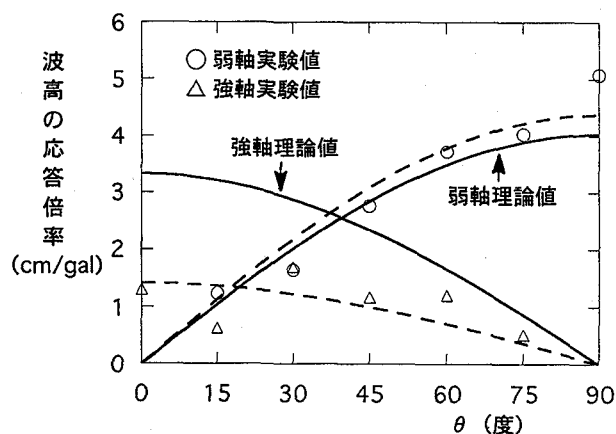
ン模型頂板の加速度とTLDの壁面動水圧との位相差をそれぞれ示している。位相差はいずれも対象とする2つの応答曲線の極大値の生ずる時間差を読みとることによって算出した。その際、応答曲線にわずかに含まれている高次の雑音については、応答曲線に移動平均法を適用することによって、その影響を取り除いた。なお、移動平均法に対するカットオフ周波数は3Hzとした。



(a) 頂板加速度の応答倍率



(b) 壁面動水圧の応答倍率



(c) 波高の応答倍率

図-6 定常振動に対する応答倍率

応答倍率については、TLDが働かない場合(図-4)とTLDが働く場合(図-5(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。しかし、TLD内容液として水を用いたので、その減衰定数が最適減衰定数に比べてかなり小さいため、本実験におけるTLDの制振効果は小さい。図-5(a)より、ラーメン模型頂板の2つの

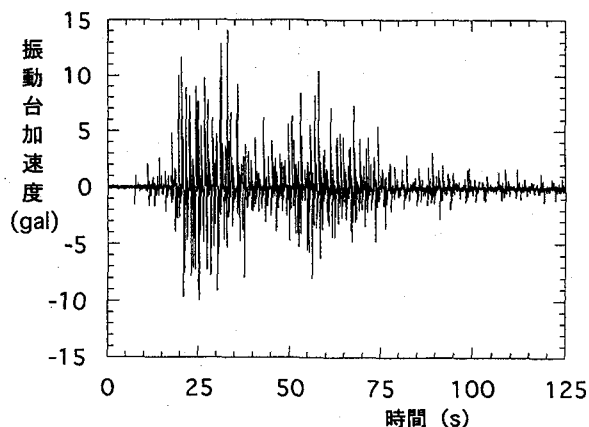
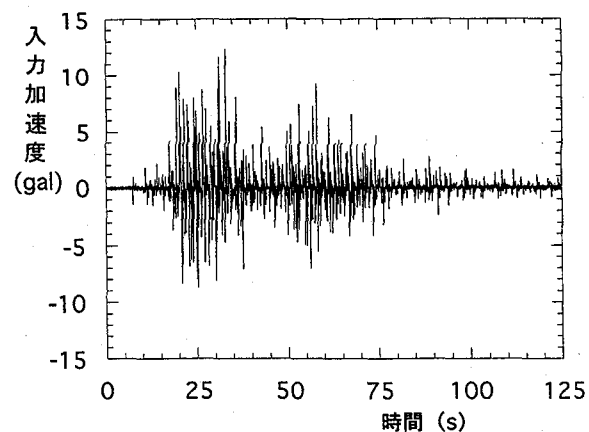
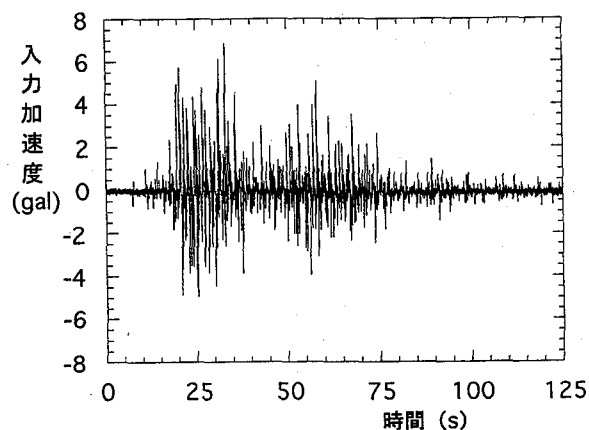


図-7 振動台加速度



(a) 弱軸方向の入力加速度



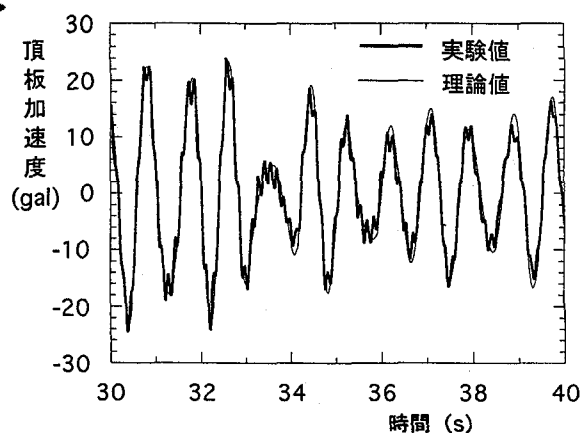
(b) 強軸方向の入力加速度

図-8 2方向に対する入力加速度($\theta = 60^\circ$ の場合)

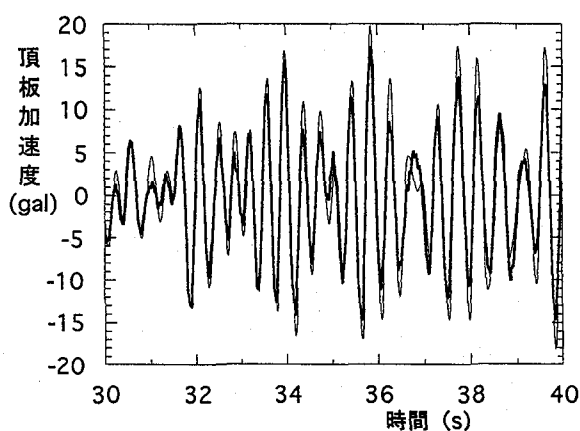
共振点において、位相差が 90° になっているのは当然なことであるが、 $f/f_1=1$ （応答倍率曲線の谷＝空のTLDを設置した3層ラーメン模型の共振点）においても、また、位相差が 90° となっていることが注目される。図-5(b)は、図-5(a)と同じ現象をTLDの壁面動水圧について示したものである。同図から、 $f/f_1=1$ において、動水圧と振動台加速度との位相差が 180°

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-5(c)は、3層ラーメン模型頂板加速度と壁面動水圧との位相差について示したものである。同図から、 $f/f_1=1$ において、頂板加速度と動水圧との位相差が 90° となっており、動水圧が頂板に対して減衰力として働いていることがわかる。

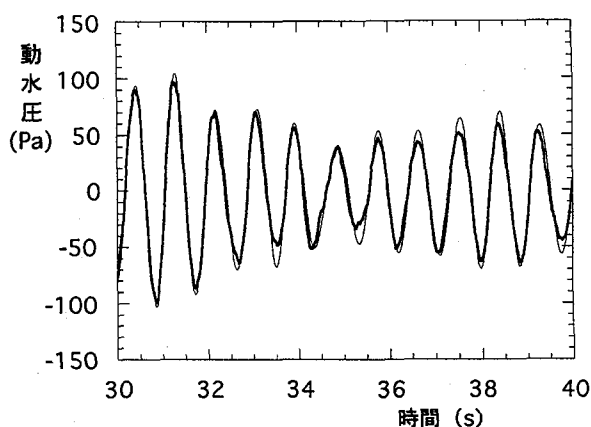
以上、 $\theta=45^\circ$ のときの弱軸方向の結果のみを示した



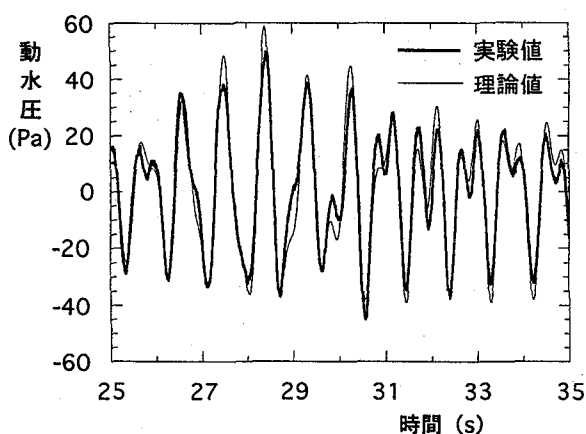
(a) 頂板加速度



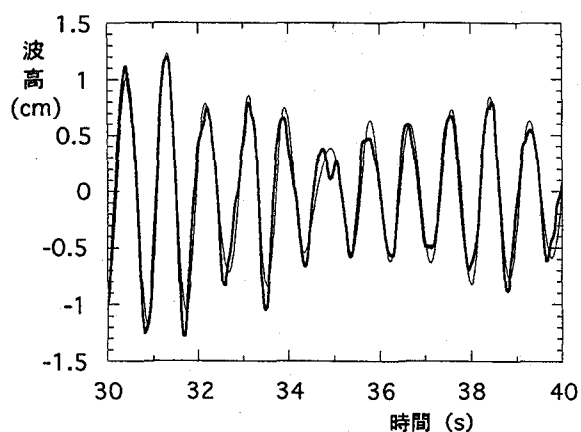
(a) 頂板加速度



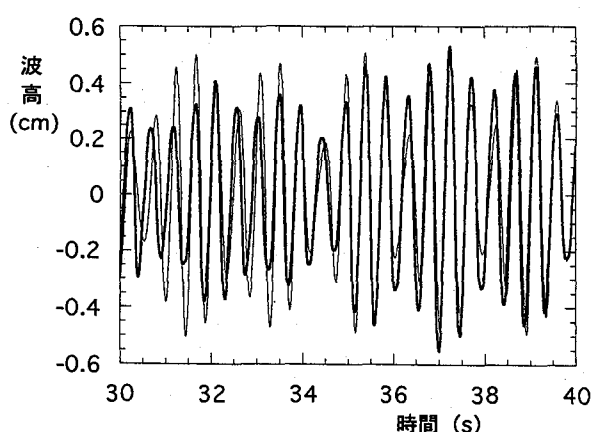
(b) 動水圧



(b) 動水圧



(c) 波高



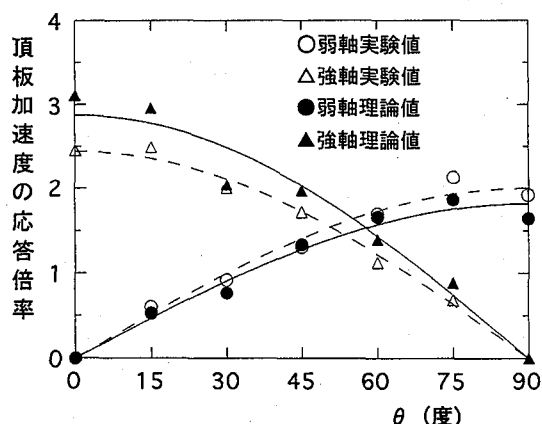
(c) 波高

図-9 非定常入力に対する弱軸方向の時刻歴応答曲線
($\theta=60^\circ$ 、部分拡大図)

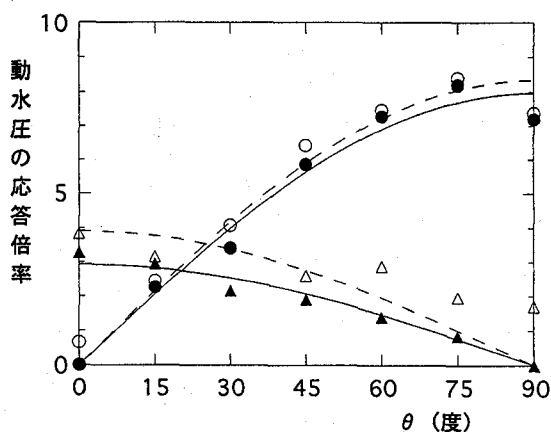
図-10 非定常入力に対する強軸方向の時刻歴応答曲線
($\theta=60^\circ$ 、部分拡大図)

が、入力波の入射角 θ の如何にかかわらず、TLDとラーメン模型の応答は弱軸方向と強軸方向とでいずれも同様の結果が得られた。

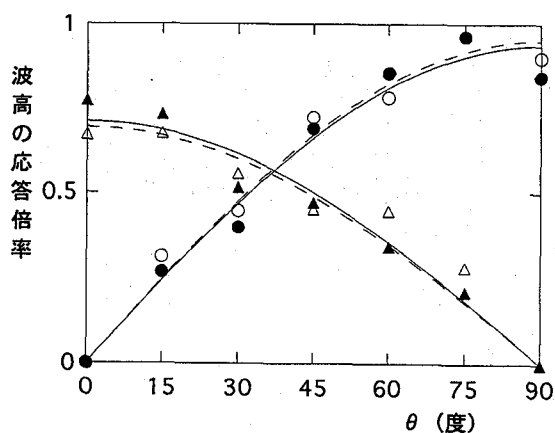
図-6は定常振動入力に対するTLD付き3層ラーメン模型の応答特性の一例を示したものである。入力加速度を5~100galに調整して、TLD内溶液の波高が一定になるようにして実験を行った。したがって、このとき波高の大きさは線形から非線形まで段階的に変わること



(a) 頂板加速度の応答倍率



(b) 動水圧の応答倍率



(c) 波高の応答倍率

図-11 非定常入力に対する時刻歴応答の最大値

なる。図-6は波高 w と水深 H の比が $w/H=0.45$ の場合である。図-6(a)は、入射角 θ をいろいろ変えたときの3層ラーメン模型頂板加速度の応答倍率を示したものである。実線は理論値であり、○は弱軸方向の実験値、△は強軸方向の実験値、破線は実験値の近似曲線を示している。図-6(b)は壁面動水圧の応答倍率を示し、図-6(c)は波高の応答倍率を示したものである。図-6の結果より、弱軸方向の応答倍率は $\theta=90^\circ$ のとき最大、 $\theta=0^\circ$ のとき0となるsineカーブを描き、強軸方向の応答は $\theta=0^\circ$ のとき最大、 $\theta=90^\circ$ のとき0となるcosineカーブを描くことがわかる。

w/H が小さいときは θ の変化に対して理論値と実験値とはよく一致しているが、図-6に示した程度に非線形性が大きい場合には、TLDについてその壁面動水圧と波高が理論値と実験値との間に差が生じてくることになる。その差は強軸方向について著しい。実験の結果から判断すれば、TLDの短軸方向のスロッピングの方が同じ w/H に対して長軸方向のそれより非線形が強く現れているといえる。

以上の結果から、波高 w と水深 H の比が $w/H<0.45$ (TLD内溶液のスロッピングに対する非線形性があまり大きくない範囲)においては理論値と実験値とはよくあっているといえよう。このことから、2方向入力を受けるTLD付き構造物の振動に対して、その応答を求めるとき、入力波を構造物の弱軸及び強軸方向に分解した後、それぞれの方向に対して応答を求めればよいことが分かる。

(e) TLD付き3層ラーメン模型の不規則振動実験

入力加速度の最大値をいろいろ変えた場合について実験を行った。振動台の性能上、そのストロークが $\pm 25\text{mm}$ に制限されているため、入力加速度の最大値は30galまでとした。実験結果の一例を図-7~11に示す。

図-7は振動台入力波として用いた加速度波形を示し、図-8(a)、(b)は $\theta=60^\circ$ の時の弱軸及び強軸方向の入力加速度波形を示す。この場合は、強軸に比べ弱軸方向の入力加速度が大きいことが分かる。図-9に、TLD付き3層ラーメン模型がその弱軸方向から図-8(a)に示す入力加速度をうけたときの時刻歴応答を示す。太線は実験値を示し、細線は理論値を示している。(a)は頂板加速度、(b)は動水圧、(c)は波高の応答曲線である。図は実験値と理論値の比較を明確にするため、結果の一部分を拡大して示している。同様に、図-10は、強軸方向から図-8(b)に示す加速度を入力したときの時刻歴応答である。図9、10から、弱軸および強軸方向共に実験値と理論値がよくあっていることが分かる。いろいろの θ について不規則入力に対するTLD付きラーメン模型の応答実験を行い、その最大値を求めて、 θ に対してプロットしたのが図-11である。図中の実線と点線はそれぞれ理論値と実験値に一番よく合うsine及びcosineカーブである。図-11(a)は頂板加速度、(b)は動水圧、(c)は波高の応答倍率を示して

いる。弱軸、強軸方向共に、実験値と理論値はよく一致しているといってもよく、 θ の変化に対する応答値の変化の傾向も定常振動の場合と同様である。

なお、入力加速度を変えた場合の結果についても、上記の場合と全く同じ結果が得られた。

以上のことより、任意の方向から非定常振動を受ける TLD 付き構造物の応答は、入力波を構造物の弱軸及び強軸方向に分けた後、それぞれの方向に対して独立に応答を算出した後、得られた値を重ね合わせることによって求めることができることがわかる。定常振動実験の場合の入力加速度の最大値 100gal および TLD の応答波高 w と水深 H の比 $w/H=0.45$ に比べると、不規則振動実験の入力加速度のそれは 30gal および $w/H=0.3$ であり、後者の方が TLD の応答波高に対する非線形性が多少弱くなっている。なお、不規則振動実験において、入力加速度の最大値が 30gal の場合、頂板の加速度の最大値すなわち、TLD に対する入力加速度の最大値は 100gal 程度になっている。

4. まとめ

まず、長方形 TLD が 2 方向入力を受ける場合の等価振動系を示し、つぎに、これを 3 層ラーメンに設置した場合の定常、非定常入力に対する TLD 付き 3 層ラーメン模型の応答を著者らの提案した理論式を用いて求めた。さらに、3 層ラーメン模型を作製し、定常および非定常振動実験を行って、上記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 付き 3 層ラーメン模型の共振振動実験及び不規則振動実験から、弱軸方向の応答倍率および不規則入力に対する最大応答値は $\theta=90^\circ$ のとき最大、 $\theta=0^\circ$ のとき 0 となる sine カーブを描き、強軸方向のそれは $\theta=0^\circ$ のとき最大、 $\theta=90^\circ$ のとき 0 となる cosine カーブを描く。

(2) TLD 付き構造物の応答を求めるには、入力波を構造物の弱軸および強軸方向に分解した後、それぞれの方向に対する応答値を算出した後、得られた値を重ね合

わせればよいという考え方を提案した。

(3) 本論で提案した理論式を用いて数値計算を行った結果、TLD 内溶液の非線形性があまり大きくないとき（定常振動入力に対しては波高 w と水深 H との比が $w/H < 0.45$ 、不規則振動入力に対しては $w/H < 0.3$ ）、定常及び非定常応答に対し理論値は実験結果とよく一致していることを示した。このことから、本論で提案した理論式の妥当性が示されたといえる。

参考文献

- 1) 阿部雅人・藤野陽三：摂動解による同調質量ダンパー (TMD) - 構造物系の動特性と制振評価、土木学会論文集、No. 446/ I -19, pp157~166、1992.4。
- 2) 藤野陽三・ベニート M. バチェコ・孫利民・ピヤワット チャイセリ・磯部雅彦：同調液体ダンパーに関する非線形波動シミュレーションとその実験的検証 - 長方形容器の場合 -、構造工学論文集、Vol. 35A, pp561~574、1989.3。
- 3) 藤野陽三・バチェコ ベニート・チャイセリ・ピヤワット・孫利民・古賀健一：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, pp561~574、1990.3。
- 4) 藤野陽三・孫利民・山口宏樹：マルチプル TMD - TLD の特性の把握、構造工学論文集、Vol. 38A, pp825~836、1992.3。
- 5) 山口宏樹：TMD に関する 2, 3 の考察、構造工学論文集、Vol. 37A, pp773~780、1991.3。
- 6) 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、pp33~40、1991.1。
- 7) 小坪清真・高西照彦・成富勝・多田浩：位相特性からみた TLD - 3 層ラーメン模型の制振性、構造工学論文集、Vol. 40A, pp905~916、1994.3。
- 8) 小坪清真・高西照彦・多田浩・成富勝：2 方向地震入力を受ける TLD 付き構造物の制振特性、第 22 回地震工学研究発表会講演概要集、pp839~842、1993.7。

(1995年9月18日受付)