

Tuned Liquid Damper による超高層建物の振動制御

若原 敏裕
(技術研究所)

大築 民夫
(技術研究所)

§ 1. はじめに

風工学の分野において、制振装置に関する研究開発の契機となった発端の一つに、昭和54年の台風19号の関東地方直撃が挙げられる。この際、新宿副都心の超高層ビル群で執務中の多くの人々は、周期3秒～5秒の長周期の揺れをほぼ一日中体験することになり、かなりの人が不安感や不快感を訴え、その中には船酔いに似た症状を起こした人もいとされている¹⁾。このような強風によってもたらされる揺れは、建物自体の構造安全性には殆ど影響しないものであるが、このことを契機に、建物の使用性や居住性の向上を図る最も効果的な方法として、制振装置による揺れの制御が積極的に考えられるようになってきた。

現在では、強風時や地震時の振動制御に関する研究が数多く行なわれており、様々な制振装置が開発されている。また、その中の幾つかは既に実用段階に至っているといえる。

ところで、現在多くの振動制御技術に関する研究や開発が行なわれている中であって、ユニークな制振機構と数多い特徴から、ここ数年来非常に注目されているダンパーがある。この制振装置は Tuned Liquid Damper (以下、TLD) と呼ばれるもので^{2)~4)}、基本的には固体質量を利用する機械式のダイナミックダンパー (例えば、Tuned Mass Damper) の一種であるが、付加振動体として、容器内に入れた液体に生じる固有な振動現象 (スロッシング) を利用するところにその特徴がある。現在では、高層観光タワーや空港管制塔等の居住性や使用性の改善を目的に数例の設置例が見られ^{5)~8)}、またその制振性能についても、解析や実験あるいは観測を通して充分満足に値する結果を得ている。

本研究は、本格的な超高層建築物に対して初めて計画された新横浜プリンスホテルの TLD⁹⁾ について、その構造と振動特性、および設置に当たっての実構造物への最適チューニングについて述べるものであり¹⁰⁾¹¹⁾、また建

物竣工後から実施している長期風応答観測の結果に基づき¹²⁾、設置した TLD が強風時に風揺れを制御し、建物の居住性向上のため有効に作用していることについて示すものである。すなわち、超高層建物の風揺れ制御のための TLD の実施設計例を示すと同時に、これまで解析や実験などによって確認されてきた液体ダンパーの制振性能¹⁰⁾¹¹⁾を、実構造物レベルで実証した結果について述べるものである。

まず初めに、TLD の制振原理とその特徴について概説する。次に、TLD を設置する建物の概要と常時微動計測結果による建物の振動特性について述べ、当該建物に設置する TLD の構造とそれに対する振動実験結果から求めた TLD の振動特性、および設置に当たってのダンパーの最適チューニングについて述べることにする。最後に、当該建物に対して実施している風応答観測の概要について述べ、これまで得られているダンパー設置前後の応答観測結果から、本建物の応答特性および TLD の制振効果についての考察を行なうこととする。

§ 2. TLD の制振原理とその特徴

2.1 TLD の制振原理

TLD とは、付加振動体として容器に入れた液体が、容器の大きさと液体の深さによって一定の振動数で振動するスロッシング現象を利用するものである。

スロッシング振動数を建物の固有振動数と一致 (同調) させると、容器内の液体が建物の振動数と共振して建物の振動エネルギーを液体の運動エネルギーとして吸収する。液体の運動に適当な抵抗 (減衰特性) をもたせると、装置に吸収されたエネルギーは漸次消散され、建物の振動を減少させることができる。

図-1 は、TLD の制振機構を説明するため、TLD を設置した建物の一周期の振動状態を表わしたものである。比較のため質点一ばね系で表わされる Tuned Mass

Damper (以下、TMD) の挙動も同時に示している。建物の固有振動数と一致した振動数で加振した場合、建物には振動速度に比例した周期的な加振力が作用する。この場合、TLD からは建物に作用する周期外力を打ち消すような制振力が発生し、建物の振動を抑える方向に作用する。また、TLD 内に生じる波動と TMD の質点の移動を比較すると、両者は同一方向に振動していることが理解できる。

図-1 から理解できるように、液体を利用した制振の原理は、建物の上部に設置した容器内部の液体のスロッシングによる力を建物の振動方向と逆方向に作用させ、制振効果を得ようとするものである。

2.2 TLD の特徴

ここでは、TLD の特徴について簡単に紹介する。液体の振動をダンパーとして用いる利点は、ケースバイケースではあるが、以下のように要約することができる。

- (1) 複雑な機構を全く必要としないため経済的であり、またメンテナンスが不要である。
- (2) 機械式の TMD で問題となる固体摩擦の要因が無く、微小振幅でも確実に効果が期待できる。
- (3) 比較的小型（ただし、多数個必要）に設計できるので設置や搬入が容易であり、場合によっては既設構造物への設置も可能である。
- (4) 1 つの TLD で多方向の振動に対する同時の制振が可能である。
- (5) 制振に使う液体は、通常安価な水を用いるため、制振以外の目的、例えば蓄熱槽や非常用の防火水槽としての設計が可能である。

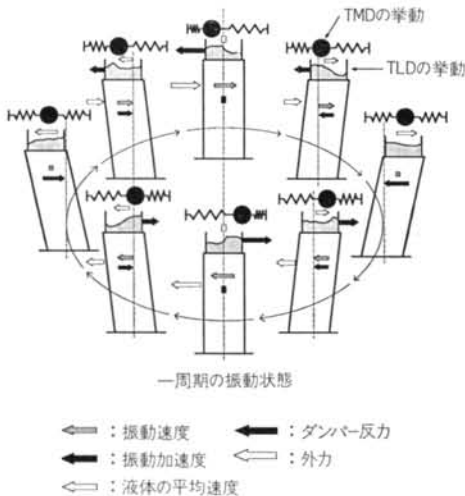


図-1 TLD の制振原理

(6) 建物の構造安全上想定される最大振幅時には、碎波によりスロッシングの減衰が大幅に増加し、液体が応答しなくなるため安全保持機構が不要である。

§ 3. TLD を設置する建物の概要

本研究で対象とした TLD を設置する建物（新横浜プリンスホテル；以下、SYP）は写真-1¹³⁾ に示すような 42 階建ての超高層ホテルである。図-2 はその SYP の構造概要を示したもので、総質量 26,000 t、高さ 149.35



写真-1 新横浜プリンスホテル¹³⁾

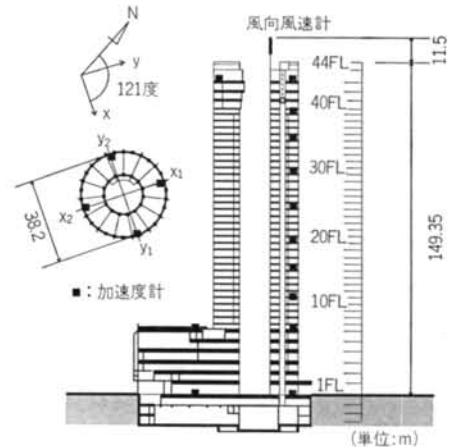
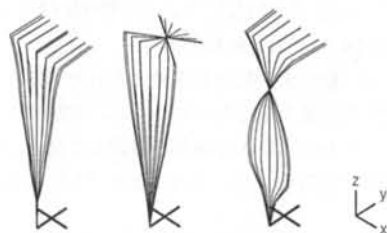


図-2 新横浜プリンスホテルの構造概要と観測機器配置

m, 外壁の直径 38.2m のダブルチューブ構造となっている。なお、図-2には強風応答観測および常時微動計測のための計測機器配置を併記している。

当建物の設計時に、頂部風速 25 m/s (年に1回程度の発生頻度) で ISO の最低知覚閾を超える加速度応答 1.5 cm/s^2 が予測されたため⁹⁾、制振装置の設置が検討され、ドーナツ状の頂部形状という特殊な設置条件と方向性の無い振動特性が予測されるため、円形断面を有する TLD の設置に関する検討を行なうこととなった次第である。

図-3および図-4は、常時微動計測から求めた固有モードと平均周波数伝達関数を示したものである¹⁰⁾。これより、x方向並進1次固有振動数は 0.31 Hz、同じく並進2次は 1.0 Hz であり、揺れ1次は 0.56 Hz である。y方向については、並進1次で 0.32 Hz、並進2次で 1.0 Hz であり、建物の振動方向による振動特性の差異は見られない。また、自由振動実験から、並進1次の固有振動に対する減衰定数は、x, y いずれの方向についてもほ



x方向並進1次モード $f=0.312\text{Hz}$ 揺れ1次モード $f=0.562\text{Hz}$ x方向並進2次モード $f=1.000\text{Hz}$

図-3 固有振動数と固有モード

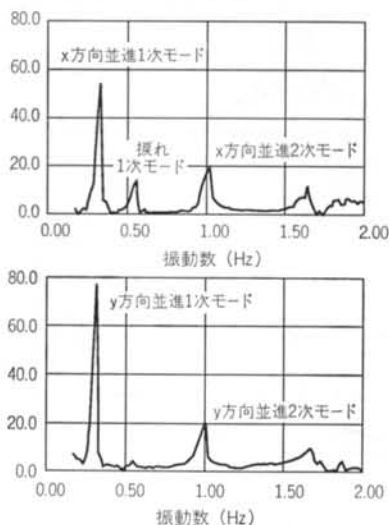


図-4 平均周波数伝達関数

ぼ 1% である。常時微動計測の結果から得られた並進1次に関する固有振動数 0.31 Hz (x方向) および 0.32 Hz (y方向) は、いずれも構造設計時の固有振動数 0.24 Hz の 1.3 倍程度となる。この理由は、構造設計時に考慮していない 2次部材の剛性の影響であり、風による振動等の比較的小振幅レベルの振動を制振する場合、ダンパーの同調振動数を設計時の固有振動数よりも 3割程度 (鋼構造の場合)、予め高めに設定する必要があることを示唆している。

§ 4. TLD の構造概要と振動特性

SYP に設置した TLD は、図-5 に示すような直径 2 m, 1層当たりの有効高さ 20.5 cm, 1ユニット当たり 9層で構成されるものである。なお、直径 2 m は TLD 容器の搬入および設置条件から決定された値である。容器の材質は耐候性と製作コストを考慮し、高架水槽などに準拠した FRP (ガラス繊維強化プラスチック) を用いている。鉛直荷重は外壁と中央部に一体成型した支柱で分担し、容器底部には放射線状に 12本の成型リブを設け剛性を高めている。また、減衰が小さく TLD の制振性能の低下を招く恐れがあるスワリング (旋回) 振動を防止し、さらには最適な減衰を得るため、周辺部には 14

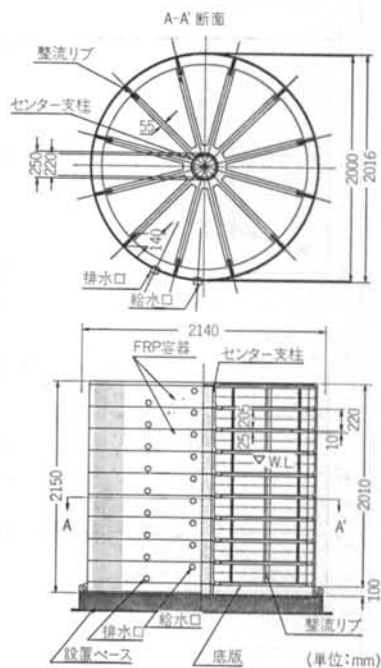


図-5 TLD の構造概要

cmの抵抗板を12枚、底の成型リブに沿って配している。なお、各容器には給水口と排水口を1層当たり1個ずつ設けている。

図-5に示したTLDの振動特性を調べるため、図-6に示すような計測システムを用いてTLDの流体力を測定した。液体以外のTLD容器および他の計測機器類と等しい慣性力 F_T をダミーゲージを用いて同時に測定

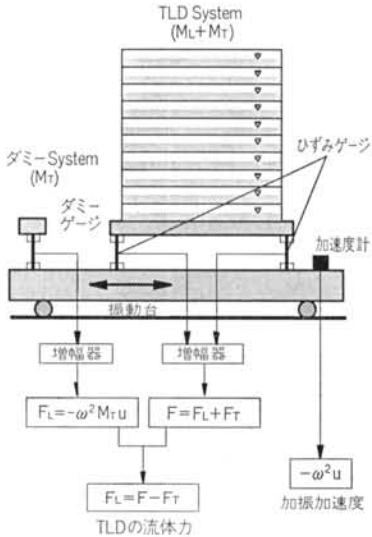


図-6 TLD 流体力の周波数応答関数の計測システム

し、これを試験体下部に設置したひずみゲージから得られる総慣性力 F から差し引くことにより、TLD内の液体だけの流体力 F_L を測定している。振動台は、静止状態から定常振動状態に至るまで正弦波状に一方方向加振を行ない、加振振幅は加速度にて制御し、加速度一定の条件下に加振振動数を低振動数から高振動数へと変化させた。なお、ここでいう「定常振動状態」とは、減衰効果によって振動の初期状態に生じるうなりが消滅した後の状態を指している。

振動実験から計測された流体力 F_L と加振加速度 $-\omega^2 u$ および流体質量 M_L を用いて、TLD 流体力の周波数応答関数 $H_L(\omega)$ を次式から求めた。

$$H_L(\omega) = \frac{F_L(\omega)e^{i\omega t}}{-\omega^2 M_L \cdot ue^{i\omega t}} \quad \dots\dots(1)$$

振動実験におけるTLDの設定固有振動数は、小振幅時の非構造部材の剛性の寄与を考慮し、設計固有振動数0.24Hzに対して3割程度の振動数の割り増し範囲を考えた。したがって、TLDの設定固有振動数は、 $f_L = 0.25\text{ Hz}(4.0\text{ s})$, $0.27\text{ Hz}(3.7\text{ s})$, $0.29\text{ Hz}(3.5\text{ s})$ および $0.30\text{ Hz}(3.3\text{ s})$ の4種類である。

図-7は、振動実験結果から求められたTLD 流体力の周波数応答関数を示したものである。実験における加振振幅、すなわちTLDを建物に設置した場合は建物の応答加速度に相当するが、これによるTLD 流体力の振

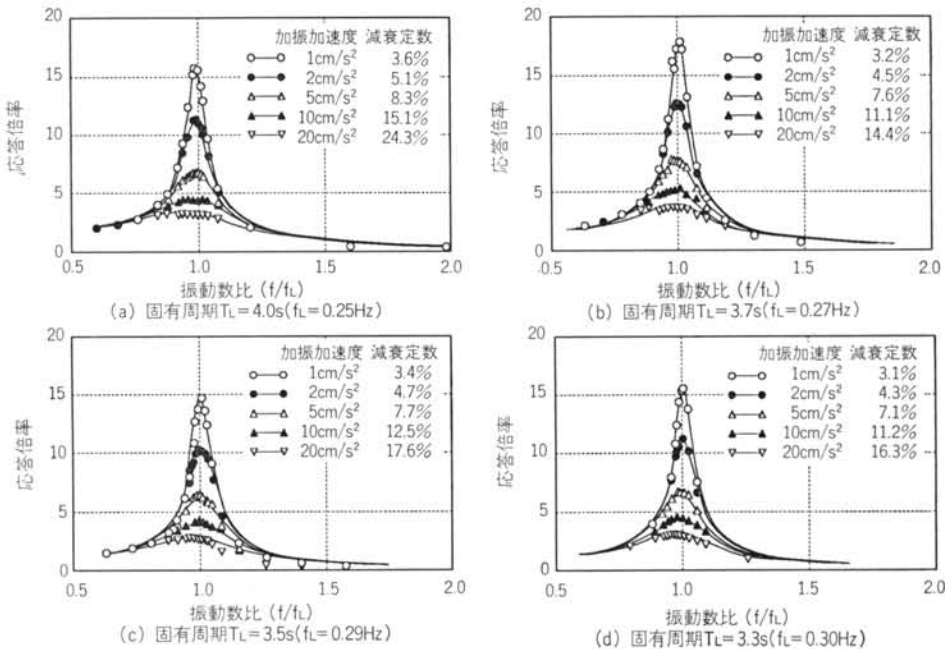


図-7 TLD 流体力の周波数応答関数

動特性の変化を調べるため、各々の設定固有振動数について、加振振幅を1, 2, 5, 10および20cm/s²とした状態のダンパー流体力の周波数応答関数を示している。また、図中の減衰定数は、1質点系の周波数応答曲線を用いてカーブフィッティング(図中、実線で表示)することから求めた TLD 流体力の等価減衰定数である。図-7から、いずれの設定固有振動数の場合も殆ど同様な周波数応答特性を示し、ほぼ1質点系の周波数応答で近似できることが分かる。また、加振振幅に関しては、振幅の増加に伴ないダンパー流体力の等価減衰定数 β は増加することが分かる。

図-8は、加振加速度と等価減衰定数 β の関係を調べたもので、両者の関係は対数軸上で直線関係となり、加振振幅の増加に伴ない、等価減衰定数 β は加速度のほぼ0.5乗に比例して増加する。

§ 5. TLD の設置と最適チューニング

一般に、建物の制振を対象とする場合、ダンパー内の液体の質量と建物の基本モードに対する一般化質量の比 μ は約1%程度(建物の総質量で換算すると約0.3%程度)とされている。定常ランダム振動を対象とする場合、この質量比 μ_{opt} を用いれば、TLDの最適同調振動比 λ_{opt} と最適減衰定数 β_{opt} は、式(2)、式(3)から求められる¹⁴⁾。

$$\lambda_{opt} = \frac{f_L}{f_s} = \frac{1}{1 + \mu_{opt}} \approx 1 \quad \dots\dots(2)$$

$$\zeta_{opt} = \frac{\sqrt{\mu_{opt}}}{2} = 5\% \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 f_s は建物の基本固有振動数、 f_L はダンパーの同調振動数であり、直径 D の円筒容器の場合、次式から求められる。

$$f_L = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3.674g}{D} \tanh\left(\frac{3.674h}{D}\right)} \quad \dots\dots(4)$$

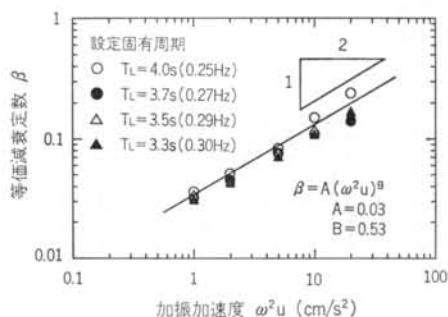


図-8 加振加速度と TLD 流体力の等価減衰定数の関係

上式中で、 g は重力加速度、 h は液体の深さである。式(2)~式(4)を用いれば、ダンパーに関する最適パラメータを簡単に決定できる。ここでは、TLDの同調振動数 f_L は、常時微動計測から求めたSYPの並進1次固有振動数 $f_s=0.31$ Hz(3.2s)と等しいものとし、この条件を満足するように各層の水深をすべて $h=12$ cmに設定した。また、図-8に示したように加速度レベルの増加に伴ないダンパーの等価減衰定数は増加するため、加速度レベルが2~3cm/s²当たりで、ダンパーの等価減衰定数は式(3)で表わされる最適減衰定数 $\beta_{opt}=0.05$ に達する。このことから、建物の応答加速度が2~3cm/s²の状態でも最良ダンパーの性能が効率良く発揮できることになる。なお、現地での給水は、流量管理式の定量給水器を用いて行なった。水深設定の精度は、事前に行なったキャリブレーションの結果に基づけば、 ± 1 mm以内の範囲である。

TLDの配置は、図-9に示すように、所定の質量比 $\mu_{opt}=1\%$ を満足できるように、屋上外壁に沿って等間隔で30ユニット、総計270層を設置することにした。このため、水の総質量は約100t、建物総質量に対して約0.4%である。写真-2はSYP屋上階のTLDの設置状態を示したものである。各TLDユニットはベースプレート上にアンカーボルトで固定され、強震時の転倒防止の

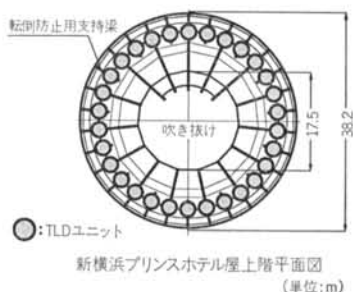


図-9 TLD の配置



写真-2 TLD の設置状況

ため、屋上に等間隔に配置された30本の放射状の梁で上部から支持されている。

§ 6. 風応答観測に基づく TLD の効果

6.1 風応答観測の概要

SYP における風応答観測は、既出の 図-2 に示すような計測機器配置で行なっている。ただし、風応答観測時の加速度計（航空電子 JA-5V）は建物頂部での加速時計 4 チャンネルのみである。風向および風速は、高さ 160 m の高さに設置した風向風速計（小笠原計器 WS-211）により計測している。風向の分解能は 22.5 度ピッチ 16 風向である。加速度計は、x 方向成分に関して x_1, x_2 の 2 チャンネル、y 方向成分について y_1, y_2 の 2 チャンネルである（図-2 平面図参照）。

図-10 に観測システムの概要を示す。AD 変換をサンプリングタイム $\Delta t = 50 \text{ ms}$ で行なった後、常時 10 分毎にその間の風向風速および加速度応答の平均値、r. m. s. 値、ピーク値を自動的に演算し、メモリーカードに記録する。また、強風時には風向、風速および加速度の時系列記録を光磁気ディスクに記録する（サンシステムサプライ FB 1000）。メモリーカードあるいは光ディスクに記録されたデータは、適宜モデムを通じてデータ処理用のパーソナルコンピュータに転送することができる。

風応答観測は 1991 年 11 月より開始し、1992 年 2 月下旬まではすべての TLD 容器に水を入れない状態で応答

観測を行なった。また、1992 年 3 月のホテルオープンの直前にすべての TLD 容器への注水を終了し、その後は TLD の作動状態で応答観測を行なっている。

風応答観測によって得られた x 方向加速度記録 x_1, x_2 および y 方向加速度記録 y_1, y_2 は、SYP の断面形状が円形であることと常時微動計測から求められた方向性の無い振動特性を考慮し、ここでは風向方向 u と風向直角方向 v の加速度応答へ座標変換を行なうことにした。この場合の風向方向 u および風向直角方向 v の加速度応答は、

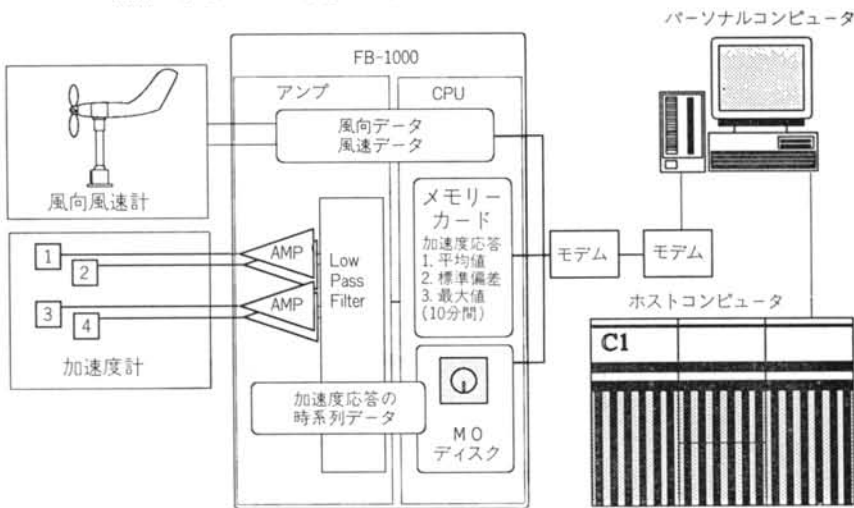
$$\left. \begin{aligned} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_c \\ \ddot{v}_c \end{Bmatrix} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 + \ddot{x}_2 \\ \ddot{y}_1 + \ddot{y}_2 \end{Bmatrix} \\ \theta &= \theta_N + \alpha + \pi \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

で求められることになる。なお、式(5)中の θ_N は 10 分間の平均風向、 α は x 軸と真北がなす角であり、図-2 に示したように 121 度である。

6.2 風応答観測結果

図-11、図-12 は風向方向と風向直角方向の応答について、TLD 設置以前（1991 年 11 月～1992 年 2 月）の観測結果と TLD 設置後（1992 年 3 月～1992 年 10 月）の観測結果を示したものであり、各々 10 分間の平均風速と加速度応答のピーク値および r. m. s. 値の関係を示している。また、図-13 は加速度応答の r. m. s. 値に関して、TLD 設置前後の加速度応答の r. m. s. 値の比較を行なったものである。

液体ダンパーの場合、TMD 等の機械式ダンパーとは



観測対象建物(新横浜プリンスホテル)

清水建設技術研究所

図-10 風応答観測システム

異なり、ダンパーの作動のオンオフを瞬時に行なうことができないため、同一条件の風外力の下でダンパーの制振効果を比較することは難しい。図-11、図-12および

図-13では観測記録の内、ダンパーの設置前後で、平均風速と乱れの強さがおおむね一致する10分間データについて示すことにした。

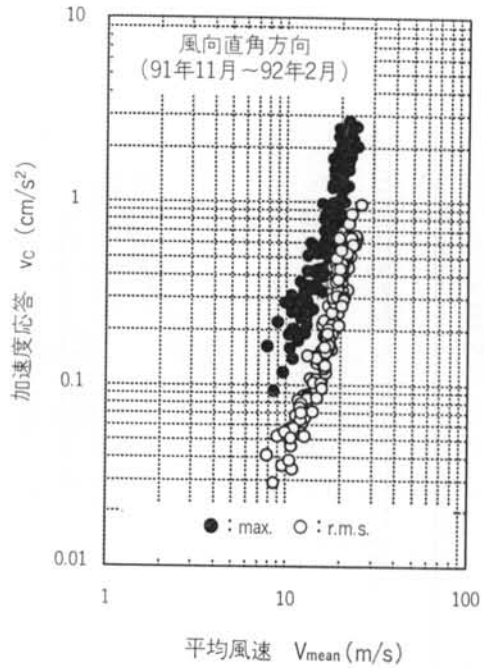
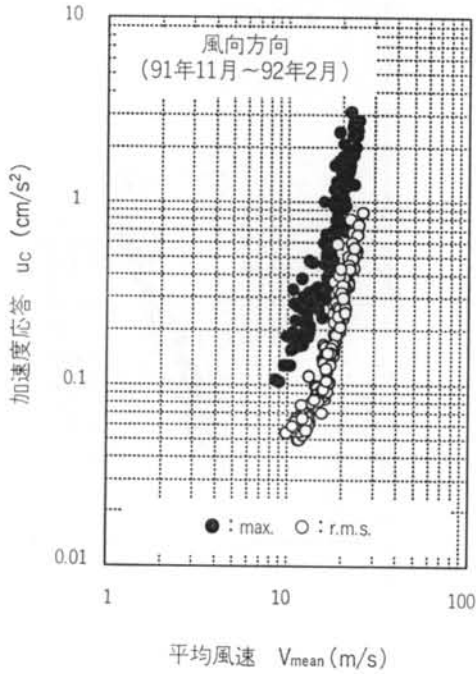


図-11 TLD 設置以前の応答観測結果

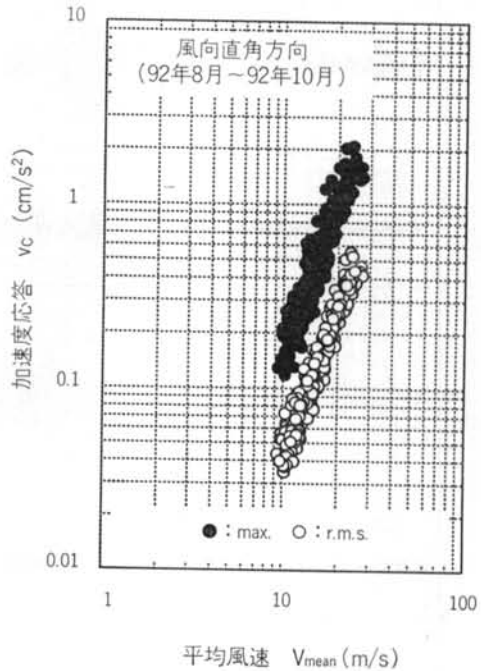
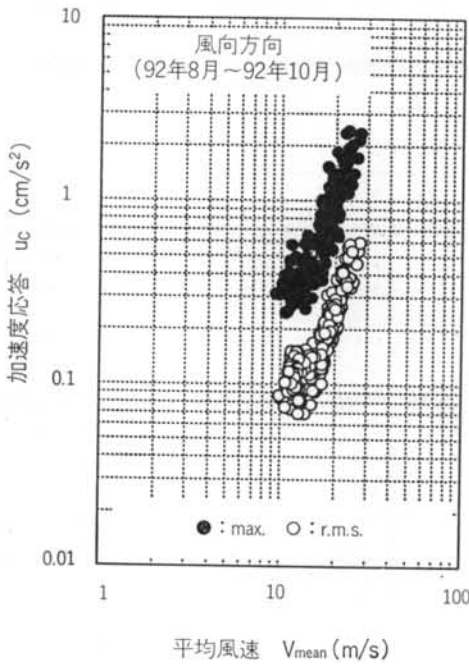


図-12 TLD 設置以後の応答観測結果

まず、図-11、図-12から TLD の設置に関係なく、風向直角方向の応答が風向方向の応答より若干大きめな

値となること分かる。次に、図-13からいずれの方向についても、平均風速の増加に伴ない徐々に TLD の制

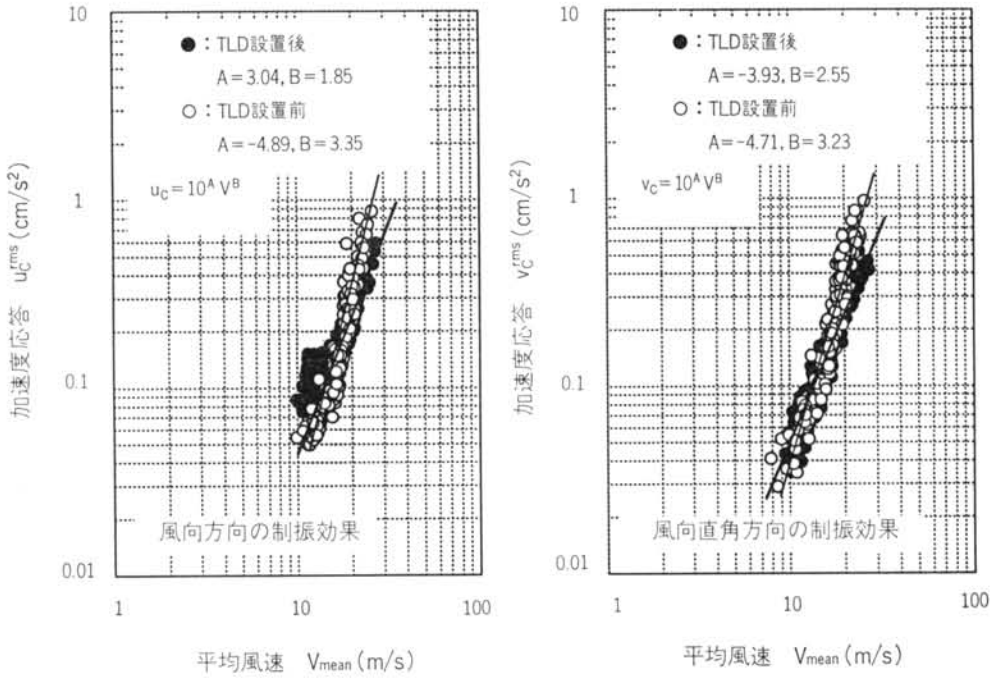


図-13 TLD の制振効果 (加速度応答の r. m. s. 値)

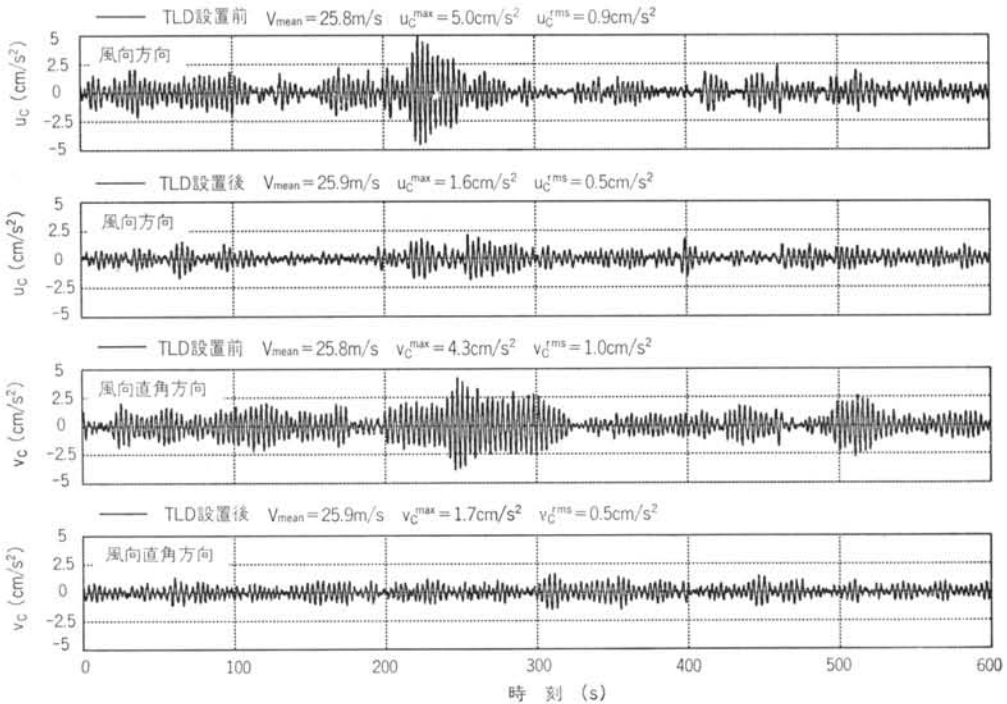


図-14 建物の加速度応答 (TLD 設置前後の比較)

振効果が現われ、風向方向では風速 20 m/s 以上で、風向直角方向では風速 15 m/s 以上で建物応答が抑えられていることが分かる。例えば、風速 26 m/s 付近（図中の最大平均風速）において、風向方向で 0.9 cm/s^2 の加速度が 0.5 cm/s^2 に、風向直角方向では 1.0 cm/s^2 の加速度が 0.5 cm/s^2 までに低減されている。また、いずれの方向の応答も、TLD 設置後の応答の方が風速の増加に対する傾きが小さく、高風速になるに従って TLD の制振効果が良くなる傾向にある。

この建物の 1 次固有振動数 $f_s=0.31 \text{ Hz}$ (3.2 s) における ISO (ISO-6987) の最低知覚閾は、r. m. s. 値で 0.6 cm/s^2 、平均知覚閾は 2.4 cm/s^2 である。この建物の頂部高さにおける再現期間 1 年の最大風速は、ほぼ 25 m/s 程度であり、この風速レベルでの応答（再現期間 1 年の加速度応答）は、TLD 設置以前では最低知覚閾を上回る 1.0 cm/s^2 であるのに対し、TLD 設置以後では 0.5 cm/s^2 程度と半減し、ISO 最低知覚閾を下回る値となる。これより、TLD 設置後の建物の揺れに対する居住性は極めて良好であり、再現期間 1 年の風速に対する応答においても ISO 最低知覚閾を越えることはない。

ここで、TLD 設置前後の加速度応答の r. m. s. 値と平均風速の関係を、図-13 に示した観測記録から回帰すると式(6)、式(7)に示すような結果となる。

$$\ddot{u}_c = 10^A \cdot V^B \quad \dots\dots(6)$$

風向方向

$$\text{TLD 設置前: } A = -3.04, B = 1.85 (\gamma = 0.90)$$

$$\text{TLD 設置後: } A = -4.89, B = 3.55 (\gamma = 0.93)$$

$$\ddot{v}_c = 10^A \cdot V^B \quad \dots\dots(7)$$

風向直角方向

$$\text{TLD 設置前: } A = -3.93, B = 2.55 (\gamma = 0.95)$$

$$\text{TLD 設置後: } A = -4.71, B = 3.23 (\gamma = 0.94)$$

これらの関係式から TLD の設置前後での応答比較を行ない、TLD による応答の制振効果を推定することができる。

いま、風向直角方向の加速度応答の r. m. s. 値について、式(8)で示すような応答の低減率 γ_{eff} を定義すると、

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{eff} &= 1 - \frac{\dot{v}_c(\text{TLD 設置後})}{\dot{v}_c(\text{TLD 設置前})} \\ &= 1 - 6.02 \cdot V^{-0.65} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(8)$$

観測結果から推定される応答の低減率は、風速 25 m/s で約 30%、風速 30 m/s で約 40% であるといえる。

図-14 は、図-11 および図-12 で示した TLD 設置前後の観測結果の内、平均風速が最大であった風速 26 m/s のときの建物加速度の時系列について、TLD 設置前後

の比較を行なったものであり、また図-15 はその場合の加速度応答のリザージュを示したものである。

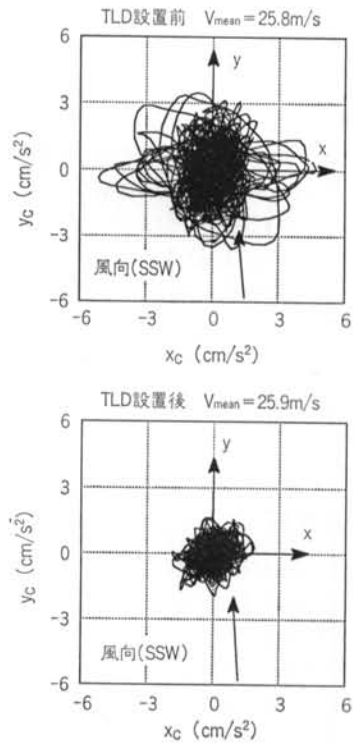


図-15 建物の加速度応答のリザージュ

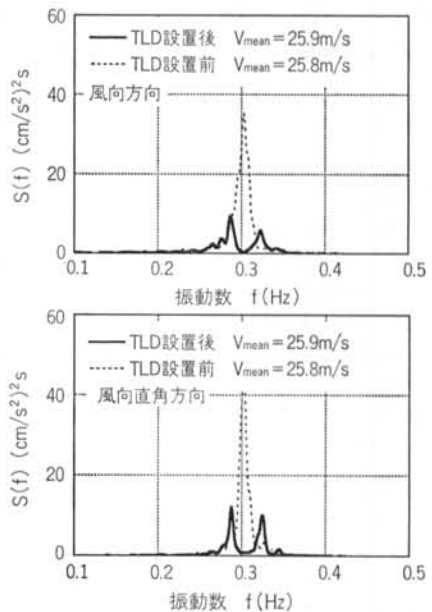


図-16 建物の加速度応答のパワースペクトル (TLD 設置前後の比較)

図-14より、TLDを設置した場合は、 2 cm/s^2 を越える応答成分は見られない。また、図-15より建物応答はほぼ円軌道を描き、TLD設置以前の状態では、風向直角方向に加速度が増加すると、風向と直交する軸に沿って長い楕円軌道となるが、TLD設置後では小さな円軌道を保ったままの応答性状となる。さらに、図-14および図-15から、TLDの設置により建物の加速度が効率良く抑さえられている状況が良く理解できる。

図-16は、図-14で示した応答のパワースペクトルを示したものであるが、TLDを設置した状態のパワースペクトルは固有振動数成分(0.31 Hz)で極小となり、その両側にほぼ対称な2つのピークを持つ振動特性となっており、同調系のダンパーを設置した構造物応答の典型的なスペクトル形状であるといえる。

§ 7. おわりに

本格的な超高層建築物に対して初めて設置された新横浜プリンスホテルのTLDについて、その構造と振動特性、および設置に当たっての構造物への最適チューニングについて述べ、また建物竣工後から実施している長期風応答観測の結果に基づき、設置したTLDが強風時に風揺れを制御し、建物の居住性向上のため有効に作用していることについて示した。

本研究において得られた結果を簡単にまとめると、以下のように要約できる。

(1)常時微動計測から得られた固有振動数は、非構造部材の剛性の影響で、構造設計時の固有振動数に対して3割程度高めであり、風揺れ等の比較的小振幅の振動を制振する場合は、予め高めの同調振動数を設定する必要がある。

(2)ここで用いたTLD流体力の振動特性は、ほぼ1質点系の周波数応答で近似できるものであり、その等価減衰定数は加振振幅に依存した非線形特性を示し、加振加速度の0.5乗に比例して増加する。また、この影響で加速度レベルが $2\sim 3\text{ cm/s}^2$ 当たりで、いわゆる同調系ダンパーの最適減衰定数 $\beta_{opt}=0.05$ に達する。

(3)再現期間1年に相当する風速 25 m/s に対する応答は、TLD設置以前ではISOの最低知覚閾 0.6 cm/s^2 を上回る 1.0 cm/s^2 であるのに対し、TLD設置以後では 0.5 cm/s^2 程度と半減し、ISO最低知覚閾を下回る値となる。TLD設置後の建物の揺れに対する居住性は極めて良好であり、再現期間1年の加速度応答値に対して、ISO最低知覚閾を上回ることはない。

(4)長期風応答観測の結果からTLDによる応答の制振効果を推定すると、観測記録から統計的に求められる応答の低減率 γ_{eff} は、風速 25 m/s で約30%、風速 30 m/s で約40%である。

謝辞 本研究における風応答観測の実施に当たり、当時新横浜プリンスホテル作業所の竹本所長、永井副所長に多大な御協力を頂いた。また、本研究を進めるに当たり、東京大学工学部藤野陽三教授には貴重なご意見を賜っている。ここに記して深謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 伊藤学編著：“風のはなし I, II” 技報堂出版 (1986年)
- 2) V.J. Modi & F. Welt: “Vibration Control using Nutation Dampers” Proc. of Int. Conf. on Flow Induced Vibration (1987) pp. 396~376
- 3) 藤井邦雄, 佐藤孝典, 大塚民夫: “液体のスロッシングを利用した制振装置—Tuned Sloshing Damper について—” 日本建築学会大会学術講演梗概集, B (1987年) pp. 1483~1484
- 4) 藤野陽三, パチェロベニート, チャイセリビヤワット, 藤井邦雄: “TLDの基本特性に関する実験的検討” 構造工学論文集 No. 34 A (1988年) pp. 603~616
- 5) Y. Tamura, K. Fujii, T. Sato, T. Wakahara & M. Kosugi: “Wind-Induced Vibration of Tall Towers and Practical Applications of Tuned Sloshing Damper” Proc. of Workshop on Serviceability of Building (1988) pp. 228~241
- 6) 野路利幸, 他: “スロッシングを利用した制振装置の研究 (その1)~(その16)” 日本建築学会大会学術講演梗概集, B, pp. 867~874 (1987年), pp. 563~570 (1988年), pp. 615~622 (1989年), pp. 905~914 (1990年)
- 7) Y. Tamura, R. Kousaka & V. J. Modi: “Practical Application of Nutation Damper for Suppressing Wind-Induced Vibrations of Airport Towers” J. of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol. 41-44 (1992) pp. 1919~1930
- 8) 若原敏裕, 大山巧, 藤井邦雄: “波面動揺の非線形性を考慮した TLD-構造系の風応答解析” 日本建築学会構造系論文報告

集 第426号 (1991年) pp.79~88

- 9) T. Wakahara, T. Ohyama & K. Fujii: "Suppression of Wind Induced Vibration of a Tall Building using Tuned Liquid Damper" J. of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol. 41-44 (1992) pp. 1895~1906
- 10) 大築民夫, 若原敏裕: "Tuned Liquid Damper による超高層建築物の振動制御—TLD の構造と振動特性—" 日本建築学会大会学術講演梗概集, B (1992年) pp. 1075~1076
- 11) 若原敏裕, 大築民夫: "Tuned Liquid Damper による超高層建築物の振動制御—ダンパーのチューニングと制振効果の予測—" 日本建築学会大会学術講演梗概集, B (1992年) pp. 1077~1078
- 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講演梗概集, Part B (1993年) pp. 111~118
- 13) 清水建設柳広報部編: シミズプレティン 第77号 (1992年) p. 18
- 14) G. B. Warburton: "Optimum Absorber Parameters for Various Combinations of Response and Excitation Parameters" Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 10 (1982) pp. 381~401

