

連結型アクティブ制振装置の開発と高層 3 棟への適用

Development of Connecting Type Actively Controlled Vibration Control Devices and Application to High-rise Triple Buildings

小池 裕 二 技術開発本部総合開発センター機械システム開発部 課長 博士(工学)
中川 啓 三 物流・鉄構事業本部鉄構事業部品質保証部 部長
今関 正 典 石川島プラント建設株式会社機械鉄構建設事業部機械建設部 課長
村田 保 物流・鉄構事業本部鉄構事業部管理部
白木 博文 物流・鉄構事業本部鉄構事業部土木・鉄構技術部

隣接する高層ビルを伸縮するブリッジで連結し、アクチュエータ制御によってアクティブに揺れを低減する新しい方式の制振装置を開発した。2001 年 4 月に竣工した晴海アイランド トリトンスクエアのオフィス X 棟・Y 棟・Z 棟は、それぞれの高さが 195 m, 175 m および 155 m の高層 3 棟であり、互いが隣接している。強風時の居住性を向上させるため、本装置 2 基が適用された。工場での装置単体作動試験および現地での加振試験の結果、本装置が目標どおり性能を発揮していることを実証した。

A new type of active vibration control system has been developed. The active-damping bridge connects one building to another, and actively controls expansion and contraction to reduce vibrations. The X, Y and Z Tower office buildings of the Harumi Island Triton Square, which opened in 2001, are high-rise triple towers of 195 m, 175 m and 155 m respectively, and are located very close to one another. With the view of increasing habitability during strong winds, the towers have been equipped with two units of this type. This system has achieved the designed damping performance through the functional test of single unit at the factory and excitation tests at the site.

1. 緒 言

高層ビルでは、強風時の揺れを低減し、高い居住性を確保することが要求される⁽¹⁾。そのため、揺れを積極的に制御し、高い制振効果が期待できるアクティブ制御が不可欠となり、AMD (Active Mass Damper (Driver)) あるいは、HMD (Hybrid Mass Damper) などと呼ばれる、可動マスの慣性力を用いた方式が近年適用されている。これは、センサで検出した建物の揺れに基づいて、建物上部に設置した可動マスを電動モータあるいは油圧シリンダで駆動させるもので、建物総質量の 1/300 から 1/500 程度の比較的軽量の可動マスで大きな制振効果が得られることから、これまでに 40 件以上の建物に適用されてきた⁽²⁾。しかし、制振対象が複数の建物にわたり、これらが隣接して建っている場合には、各建物に可動マス方式の制振装置を設置する代わりに、建物間をダンパやアクチュエータなどの制振要素で連結する方法が適用できる。これは両建物間の相互作用を利用して制振する方法である。国枝は、この方式にいち早く着目し、「一連托生形減衰方式」と称して、塔状構造物同士を適切な減衰係数をもつダンパで連結する方法を提

案した⁽³⁾。連結方式に初めてアクティブ方式の適用を試みたのは、背戸ら^{(4),(5)}である。2, 3, 4 連などの並列構造物を対象に、構造物同士をアクチュエータで連結して制振する場合について、数値シミュレーションおよび模型実験による精力的な研究を行ってきた。また、こうしたアクティブ方式に関する研究は、井川ら⁽⁶⁾によっても行われている。

このような背景のなかで、実際の建物での連結制振の実施例としては、2 棟間に用いたパッシブダンパの例があるが、アクティブ方式についてはこれまで知られていない。2001 年 4 月に竣工した東京の晴海アイランド トリトンスクエアのオフィス X 棟・Y 棟・Z 棟は、お互いが隣接して建つ超高層ビルである。強風時の揺れを低減するため、各棟間を電動モータで伸縮可能なブリッジによって連結し、積極的に揺れを低減する新しいアクティブ式制振装置 2 基が設置された。建物間を連結するブリッジが制振するため、この装置を制振ブリッジと呼んでいる。

本稿では、まず、建物と制振ブリッジの概要を述べた後、工場における制振ブリッジの単体作動試験および、建物への据付け後の加振試験の結果について紹介し、本装置が目

標どりの性能を発揮していることを示す。

2. 建物の概要と制振仕様

2.1 建物の概要

晴海アイランド トリトンスクエアは、「晴海一丁目地区第一種市街地再開発事業」に基づき、オフィスビル、商業・サービス施設、展示施設、コンサートホールおよび集合住宅などの施設からなる「職」、「遊」、「住」三つの機能を併せ持つ街として計画され、2001年4月に竣工した。全街区を合わせると敷地面積が約84,800 m²、延べ床面積が約671,900 m²となる。

第1図は、制振ブリッジが適用されたオフィスX棟・Y棟・Z棟の概観を示す。高さが195、175、155 mのトリプルタワーであり、この地区のランドマークとなっている。これらの建物の設計時における振動特性は第1表のとおりである。各棟の地上部は54×54 mの正方形に隅切りが施された平面形をしており、ホール棟を中心に三角形上に配置されている。地上では独立しているが、地下ではホール棟を含めて一体の構造となっており、地下約30 mで東京層砂層に直接支持させている。オフィスX棟・Y棟・Z棟には、大地震の後も建物の資産価値を守ることを目的に制震ダンパによる耐震設計が採用され、レベル2（建物の耐震設計に用いる地震入力の大きさで速度の最大値を

50 cm/s に基準化したもの）の地震に対しても柱や梁などの主体構造を損傷させない（降伏させない）構造としている。そのうえで、日常の風揺れに対しては別途、制振装置を適用し、居住性の向上を図っている。その装置としては、X棟とY棟およびY棟とZ棟との間隔が、いずれも13.25 mであり、隣接していることから、各棟間を伸縮可能なブリッジで連結し、アクティブに振動制御する制振ブリッジが適用された。第2図には、制振ブリッジの設置状況を示す。制振ブリッジの設置高さは、X棟とY棟間が162.4 m、Y棟とZ棟間が138.4 mである。アクティブ方式を採用することによって摩擦やガタを回避し、数 cm/s²程度の比較的微小な振動に対しても制振効果を発揮する。

制振ブリッジでは、可動マスを用いた制振装置のように建物内に大きな設置スペースを確保する必要がない。また、今回の装置には備えられていないが、装置に通路を設けることによって、非常時の避難路としての活用も可能など、可動マス方式にはない長所もある。

2.2 制振仕様

本装置に対する制御目標は、各棟における2方向の最大加速度を日本建築学会が定める居住性能評価基準の第3曲線H-3⁽¹⁾（以下、H-3と呼ぶ）に満足させることである。これは、本建物の場合、減衰を非制振時の2倍から3倍程



第1図 オフィスX棟・Y棟・Z棟の概観

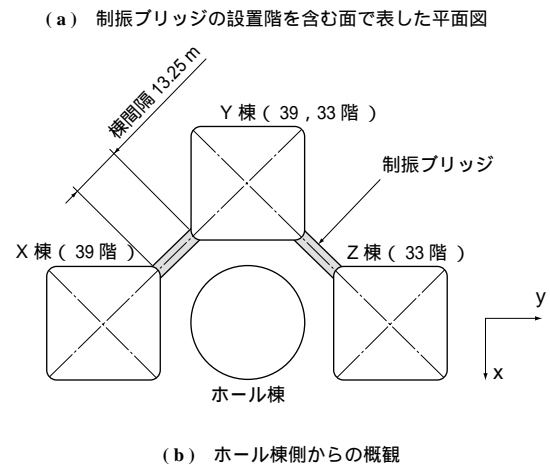
Fig. 1 General view of triple-tower (X, Y and Z) office buildings

第1表 各棟の振動特性（設計値）

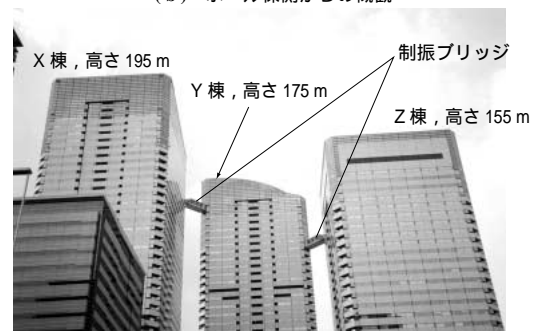
Table 1 Vibration characteristics of towers (designed values)

建物	固有周期			一般化質量	
	x方向 (s)	y方向 (s)	ねじれ (s)	並進* (t)	ねじれ (t・m ²)
X棟	4.9	5.0	2.7	27 300	2.3 × 10 ⁷
Y棟	4.1	4.1	2.4	24 500	2.0 × 10 ⁷
Z棟	3.9	3.7	2.6	24 000	1.8 × 10 ⁷

(注)*: x方向とy方向は同一値



(b) ホール棟側からの概観



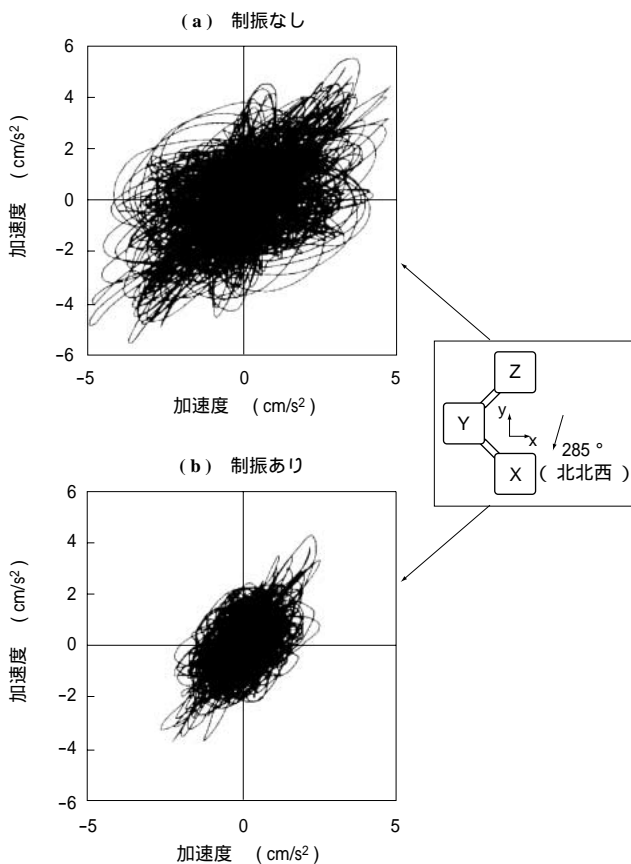
第2図 制振ブリッジの設置状況

Fig. 2 Arrangement of active-damping bridges

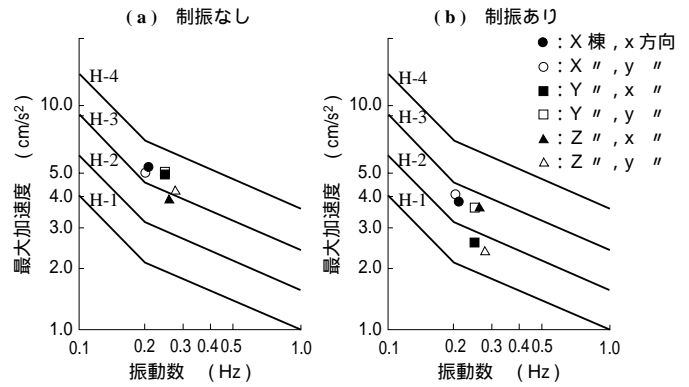
度に向上させることに相当する。本装置によって制振仕様を満足できることを確認するため、強風時の時刻歴応答を解析した⁽⁷⁾。建物の諸数値には第1表の値を用い、各棟の減衰比はすべて1%とした。風外力には風洞実験結果から求めた1次モードの等価外力を用いた。再現期間は1年であり、X棟頂部(高さ:194.9m)での平均風速は27.7m/sである。解析では16風向を対象とし、居住性の評価では、風向別に得られた時刻歴応答解析結果に各風向での発生頻度を考慮した。

第3図は、解析結果の一例として、Y棟の加速度応答軌跡を示したもので、風向は頻度の高い285度(北北西)の場合である。比較のため、制御を加えない非制振時(第3図(a))と制振時(第3図(b))の両状態を示している。第3図(b)から、制振時には揺れの軌跡の範囲が非制振時の1/2程度に低減されていることが分かる。

第4図は、再現期間1年に対応する最大加速度を性能評価基準上にプロットしたものである。非制振時(第4図(a))はZ棟のx方向を除き、評価基準H-3を上回っているが、制振時(第4図(b))はすべてのケースで



第3図 Y棟の加速度応答軌跡(風向角:285度(北北西))
 Fig. 3 Orbits of acceleration response for the Y-Tower
 (Wind direction: 285 degrees (north-northwest))



(注) H-1~H-4:居住性評価基準(日本建築学会)⁽¹⁾

第4図 居住性評価の解析結果
 Fig. 4 Analytical results of habitability evaluation

H-3を満足していることが分かる。

3. 制振ブリッジの構造

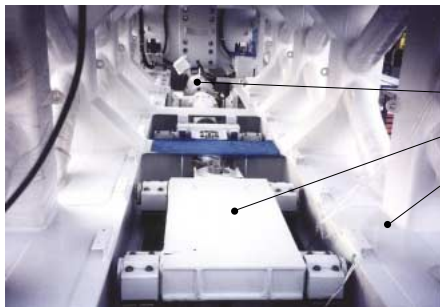
第5図に制振ブリッジの概観(第5図(a))と内部の駆動部(第5図(b))を示す。また、立体構造図を第5図(c)に示し、主要仕様を次に示す。

制御推力	±340 kN
電動モータ	37 kW × 2 台
制御ストローク	±0.1 m
最大ストローク	±2.4 m (クランプ解放時)
装置質量	約 80 t

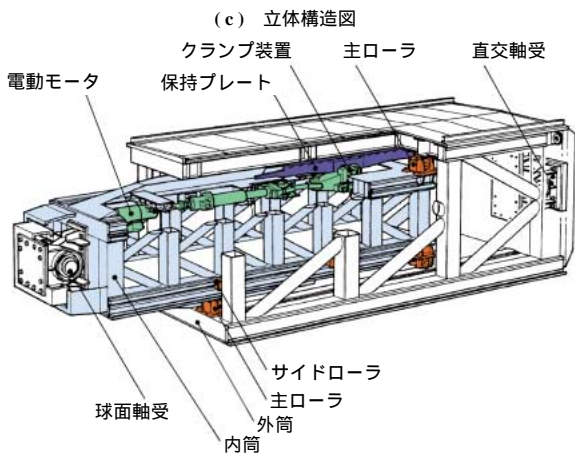
制振ブリッジは内筒、外筒と呼ばれる二つの構造体の「入れ籠(いれこ)」によって構成され、両者はローラ支持によって伸縮できるようになっている。建物との連結部には、内筒側に球面軸受、また外筒側には直交軸受を採用することで、水平2方向および上下方向の建物間相対変位に対する拘束を除いている。内筒には、電動モータとボールねじで駆動されるクランプ装置が上下に1台ずつ設置されている。このクランプ装置は、内筒と外筒を連結させるもので、外筒中央部の保持プレートを油圧によって把持すると、電動モータによって内外筒を伸縮させることができる。風が吹かない通常時のほか、大地震時や暴風時にはクランプ装置を開放し、建物間には互いの相対変位を許すのみで、力が加わらないようしている。一方、強風で建物が揺れだすと、クランプ装置は外筒との相対変位に対して追従動作を開始し、外筒を把持する。この状態になると、相互の建物に制御力を加えられるようになり、制振動作が開始される。制振時の制御ストロークは±0.1mであり、またクランプ装置を開放した状態での内外筒間の有効ストロークは±2.4mである。



(a) 概観



(b) 内部の駆動部

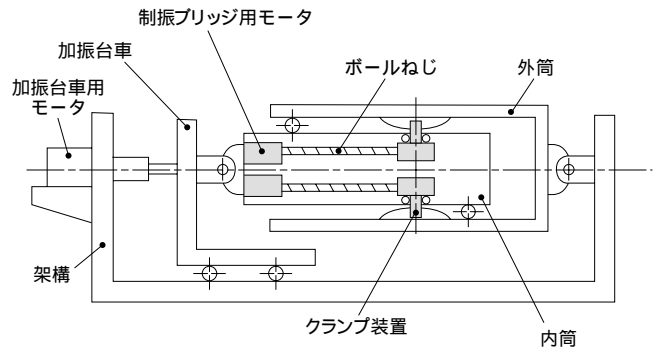


(c) 立体構造図

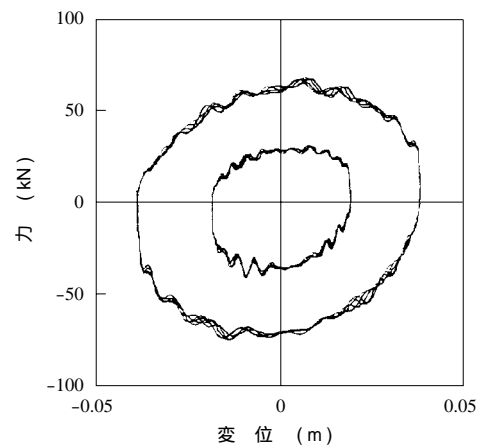
電動モータ
保持プレート
クランプ装置
主ローラ
直交軸受
球面軸受
サイドローラ
主ローラ
外筒
内筒

第5図 制振ブリッジの概観と構造
Fig. 5 General view and key components of active-damping bridge

建物への設置に先立ち、工場で装置単体の性能試験を実施し、基本性能を確認した。試験には第6図の試験機を用い、内外筒間の相対変位は内筒側に取り付けられた加振用台車を駆動させることによって与える。制振ブリッジが発生する制振力は、外筒と架構との支承部および2台のモータ側に挿入されたロードセルによって検出される。第7図は、装置を制振モードとし、内筒を加振用台車によって強制的に正弦波作動させたときに実測された制振力を履歴曲線で示したもので、加振振動数を0.25 Hz、振幅を約±0.02 m および約±0.04 m とした場合である。第7図から、振幅依存性のない、ほぼ理想的な比例粘性減衰が得られていることが分か



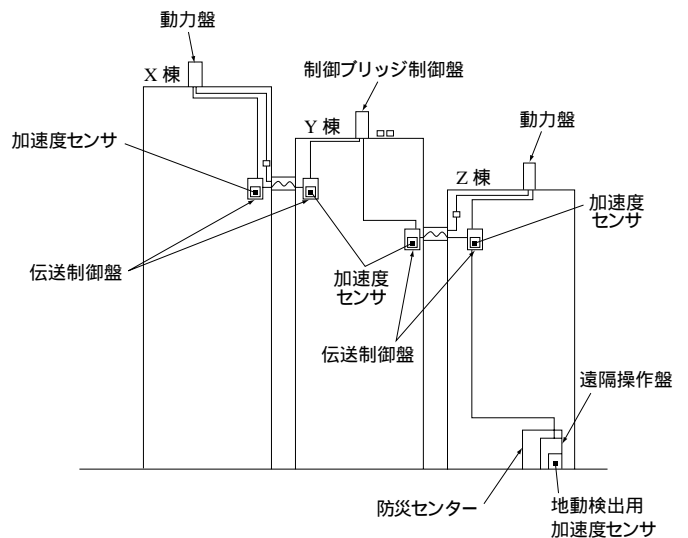
第6図 装置単体の性能試験に用いた装置の構成
Fig. 6 Configuration of devices used for functional tests



第7図 制振力の履歴曲線の実測結果
Fig. 7 Measured hysteretic curve of vibration control force

る。また、クランプを開放した状態で内外筒間の最大静止摩擦係数を計測した結果、0.01 以下であり、内外筒間の相対運動は滑らかであることを確認した。

第8図に制御系の構成を示す。X棟とZ棟の最上階には各装置の動力盤が、またY棟の最上階には制御盤が配置さ



第8図 制御系の構成
Fig. 8 Control system arrangement

れている．制御に必要な演算処理は，この制御盤に納められた制御器によって行われる．各棟の装置設置階の水平 2 方向には，建物の揺れを検出するための加速度センサが配置されている．これらの信号および装置に関する信号は，伝送制御盤から光複合ケーブルによって Y 棟最上階の制御盤に送信される．風および地震に対する運転方式は，以下のとおりである．風の場合は床加速度レベルが 2 cm/s^2 を超えると運転を開始し，制御ストロークが $\pm 0.1 \text{ m}$ を超えると自動的にクランプを開放する．一方，地震の場合は地上の加速度センサで判断し，地動加速度が 10 cm/s^2 を超えた場合はクランプを開放した状態とする．

4. 制御系設計

第 9 図に，制振ブリッジで連結された 3 棟の力学モデルを示す．これは，各質点が並進 2 方向の自由度をもつ多自由度系の物理モデルであり，並進 2 方向の面内揺れと 3 棟が三角形に配置されたことによる制御力の方向性を考慮している．この系に対する運動方程式は次式で表される．

$$M \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{pmatrix} + C \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} + K \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = f + U \begin{pmatrix} f_{c1} \\ f_{c2} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで， M, C, K は，それぞれ建物の質量マトリクス，減衰マトリクスおよび剛性マトリクスを， x と y は各方向にお

ける質点の変位ベクトルを表す．また， f は外力ベクトル， U は制御力の作用点と方向を定義するマトリクスである．

制御系の設計は，モード座標系で行う．そのために，モード座標を η 導入して (1) 式を (2) 式のように変換する．

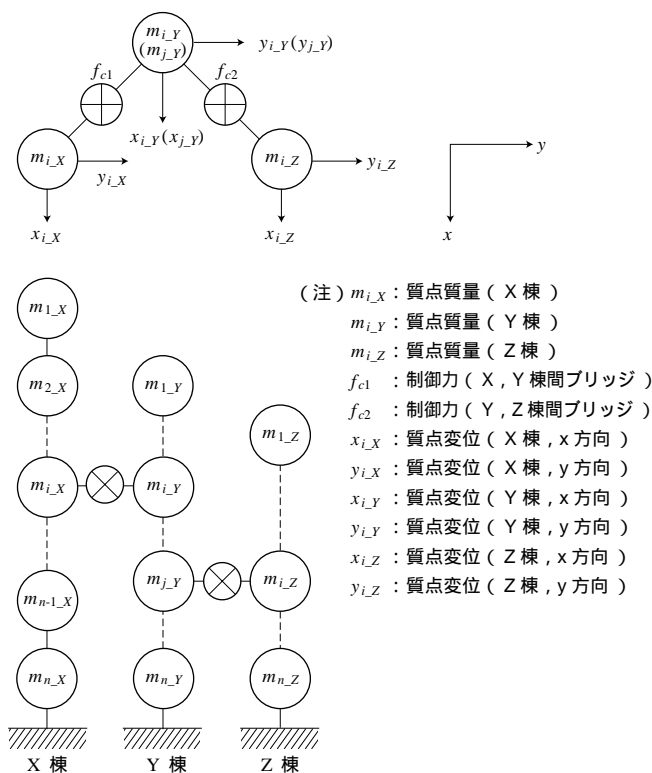
$$M_m \ddot{\eta} + C_m \dot{\eta} + K_m \eta = U_m \begin{pmatrix} f_{c1} \\ f_{c2} \end{pmatrix} + F_m f \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで， M_m, C_m, K_m は，それぞれモード質量マトリクス，モード減衰マトリクスおよびモード剛性マトリクスであり， U_m と F_m は制御力と外力に関するマトリクスである．

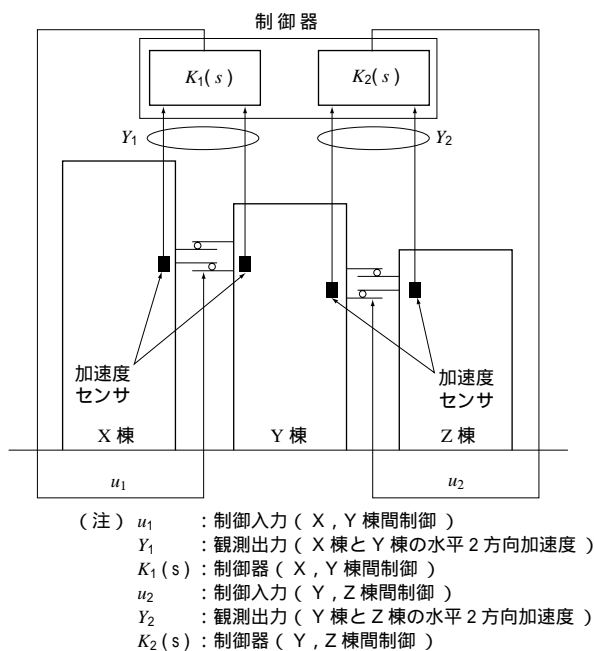
制御手法の概念を第 10 図に示す．2 基の制振ブリッジには，それぞれの制御器をもたせており，X，Y 棟間のブリッジには X 棟と Y 棟の水平 2 方向加速度を，また Y，Z 棟間のブリッジには Y 棟と Z 棟の水平 2 方向加速度をそれぞれ用いて，個別に制御している．この制御系に対する設計モデルは 1 入力系となるので，(2) 式の全体モデルから制御対象に関する成分を抽出した次式の部分モデルを用いることにする．

$$M_{m_i} \ddot{\eta}_i + C_{m_i} \dot{\eta}_i + K_{m_i} \eta_i = U_{m_i} f_{ci} + F_{m_i} f_i \quad \dots (3)$$

ここで， $i (= 1, 2)$ は制振ブリッジの識別を示す番号であり，(3) 式の M_{m_i}, η_i などは，ブリッジの選択に応じて (2) 式から抽出されたマトリクス，ベクトルを表す．制御系の設計には H 制御理論を採用し，高次モードに対するスプilloーバ不安定の回避とパラメータ変動に対するロバスト性 (頑健性) の向上を図る．H 制御理論によれば，制御入力 $u_i (= f_{ci})$ は出力 Y_i と制御器 $K_i (s)$ によって次



第 9 図 制振ブリッジで連結された 3 棟の力学モデル
 Fig. 9 Dynamic model of three towers connected with active-damping bridges



第 10 図 制御手法の概念
 Fig. 10 General idea of control method

式で表される。

$$u_i = K_i(s) Y_i \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 Y_i には建物の加速度を用いており、連結 2 棟の直交 2 方向成分からなる 4 成分で構成される。

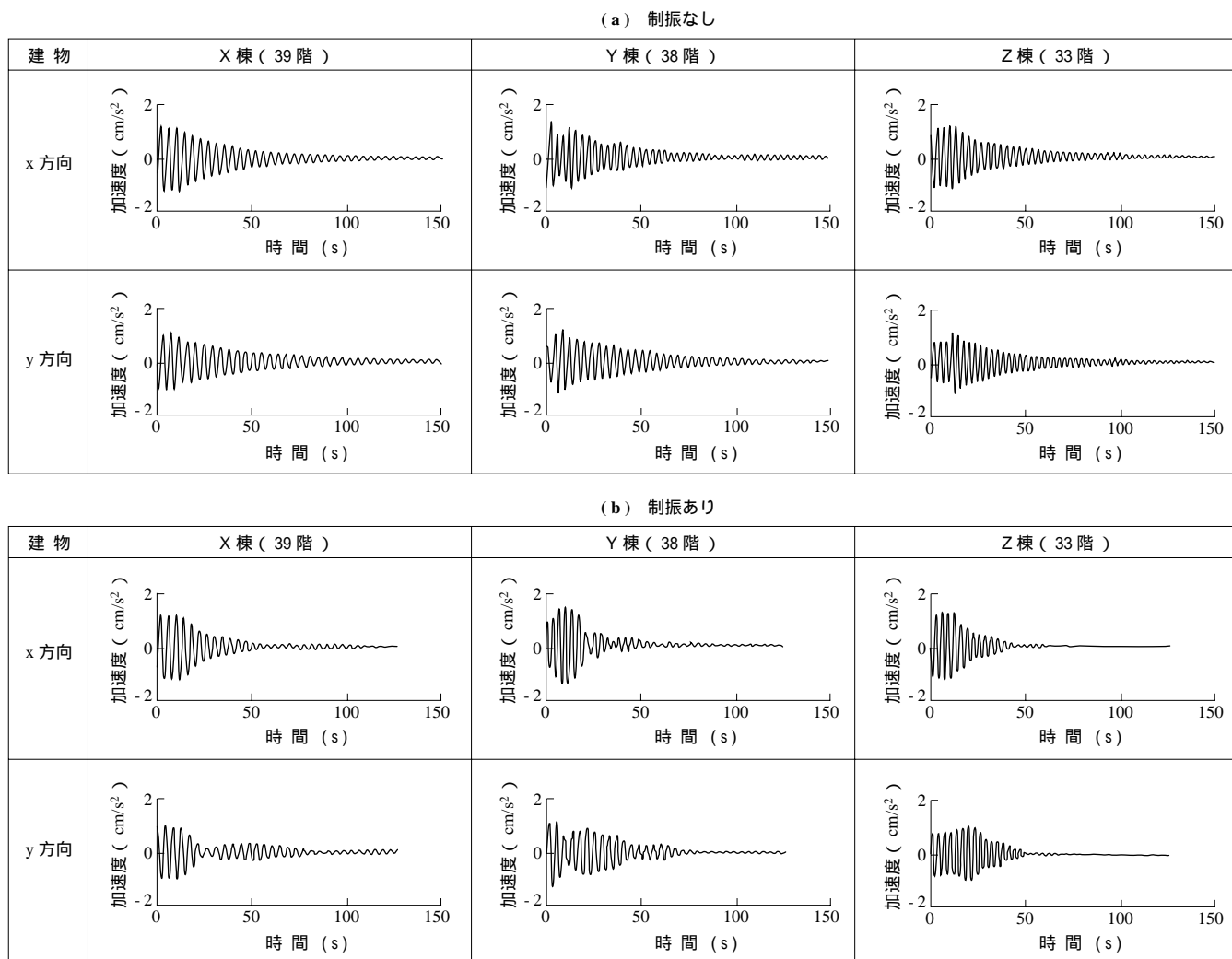
5. 現地での制振効果確認試験

制振ブリッジを建物に据付けた後、現地で加振試験を実施し、制振効果を確認した。制御系の設計に必要な建物モデルは、実際に制振ブリッジを用いて建物加振を行い、実測結果を基にモードパラメータを同定することによって作成した。ここでは、並進モードのみを対象とし、2 次モードまでをモデリングした。制御系の設計では、1 次モードを制振して、2 次モード以上をロバスト安定とするため、上記の 2 次モードまでを含むフルオーダーモデルから 2 次モードを打ち切った低次元化モデルを考え、このモデルに対して H 制御系を設計した。得られた制御器は、サンプリ

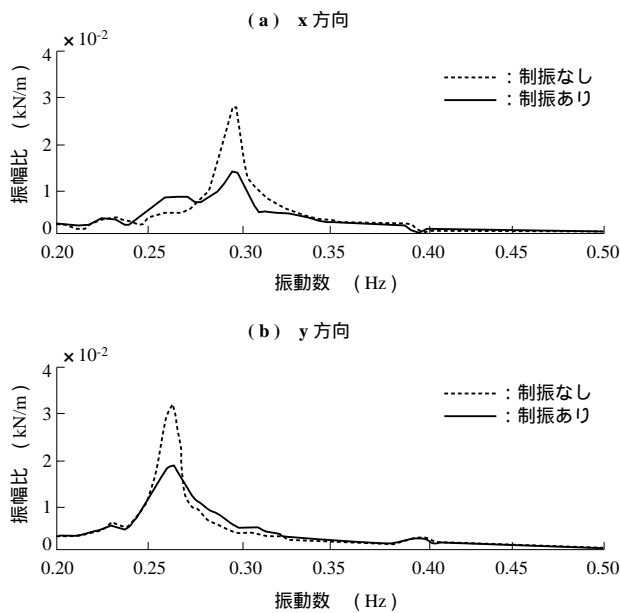
ング時間 5 ms で実装した。

この制御器を用いて制振効果を確認した。制御器には、X、Y 棟間用および Y、Z 棟間用のいずれも、次数が 10 次のものを用いた。第 11 図は、自由振動応答試験結果を示す。制振ブリッジ 2 基で建物を同時に強制加振後、クランプ装置を開放させた非制振（第 11 図 - (a)）のときと制振（ - (b) ）に切り換えたときとの減衰状況を比較している。加振振動数は、X、Y 棟間用が 0.243 Hz、Y、Z 棟間用が 0.303 Hz であり、起振力はいずれも 58.8 kN である。第 11 図から、制振時における各棟の水平 2 方向の加速度は、非制振時に比べ速やかに低減し、減衰比が 3 ~ 4% に向上していることが分かる。

また、第 12 図は、掃引試験で得られた Y 棟の周波数応答を x 方向（ - (a) ）と y 方向（ - (b) ）に対して示したもので、X、Y 棟間用を起振機とし、Y、Z 棟間用の制振ブリッジを制振作動させた場合とさせない場合を比較している。



第 11 図 実測された 3 棟の自由振動応答
Fig. 11 Measured free vibration responses of three towers



第 12 図 実測された Y 棟 38 階の周波数応答
Fig. 12 Measured frequency responses of Y-Tower 38th floor

1 基のみの制振であるが、各方向とも共振ピークが 1/2 程度に低減していることが分かる。

また、試験全体をとおして、作動時における室内の騒音レベルは暗騒音 32 dB に対して、40 dB 以下であり、建物居住区への影響は問題ないことも確認した。

6. 結 言

隣接する高層ビルをブリッジで連結し、アクティブに揺れを低減する新しい制振装置を開発し、晴海アイランドトリトンスクエアの高層 3 棟に適用した。工場での装置単体作動試験および現地での加振試験の結果、本装置を採用することで建物の減衰が非制振時の 2 倍から 3 倍に向上していることを実証し、居住性能評価指針の H-3 を満足できる見通しを得ることができた。

今後は、実強風下での制御状況を観測し、制振効果を確認していく予定である。制振ブリッジは、可動マスを必要としない、新しい制振方式として高層ビルにとどまらず、浮体の動揺制御⁽⁸⁾など他分野への適用も期待されており、本稿が制振ブリッジ普及への一助となれば幸いである。

謝 辞

晴海アイランドトリトンスクエアは西地区が株式会社日建設計、株式会社久米設計、株式会社山下設計による設計

共同体、東地区が都市基盤整備公団と株式会社竹中工務店 JV による設計である。また、制振ブリッジは、株式会社日建設計との共同開発によるものであり、その実施に当たっては日本大学の背戸一登教授から有益なご指導をいただきました。多大なご協力、ご指導をいただいた関係各位に対し、ここに記し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 日本建築学会：建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説 丸善株式会社 1991 年 4 月 pp.40 - 47
- (2) 藤田隆史：建築分野におけるマスダンパ型制振技術の動向 日本振動技術協会振動技術 No.2 pp.2 - 11
- (3) 国枝正春：構造物の防震設計と免震設計 日本機械学会誌 第 79 巻 689 号 1976 年 4 月 pp.361 - 365
- (4) 背戸一登, 富波佳均, 松本幸人, 土井文夫：並列する弾性構造物のモデル化法と振動制御法 (超々高層ビル実現のための基礎研究) 日本機械学会論文集 (C 編) 第 62 巻 585 号 1995 年 5 月 pp.1 899 - 1 905
- (5) 松本幸人, 背戸一登：多連ビル構造物のアクティブ振動制御 (第 2 報, 4 連ビル模型構造物の曲げねじれ振動制御の地震応答にもたらす効果) 日本機械学会論文集 (C 編) 第 65 巻 639 号 1999 年 11 月 pp.4 286 - 4 292
- (6) 井川 望, 山田祐司, 横山浩明, 橋 英三郎：負剛性による 2 棟連結型制振システム 構造工学論文集 第 42 B 巻 1996 年 3 月 pp.629 - 634
- (7) 寺澤正文, 井上芳生, 木村 匡, 大竹和夫, 山根豊, 吉江慶祐：晴海アイランドトリトンスクエアのアクティブ棟間連結制振装置 その 2 制振効果の予測解析 日本建築学会 2001 年度学術講演梗概集 (関東) 構造 2001 年 9 月 pp.439 - 440
- (8) 渡邊英一, 橋 英三郎, 古田 均, 小田一紀：スペシャルレポート海に浮かぶ島「クリーンフロートプロジェクト」- そのコンセプトと制御技術, 環境技術 - JSSC 37号 2000 年 7 月 pp.13 - 24