

第6章 その他の対策

6. 1 音響対策

6. 1. 1 密閉構造

遮音という観点から考えると、橋梁そのものを遮音材や吸音材で覆ってしまうのが最も効果的であり、鉄道橋、道路橋ともに実施された例もある。しかし効果がかかり期待できる反面、

- ① 設置区間をそれなりに長い範囲とする必要がある。
- ② 経済的なコストが高い。
- ③ 建築限界との関係で構造的な寸法の制限を受ける。
- ④ 道路橋の場合、排気ガスの問題がある。
- ⑤ 日照障害や電波障害といった新たな環境問題が発生する。
- ⑥ 施工上の問題がある。
- ⑦ 美観上の問題がある。

等のいろいろな問題をかかえている構造でもある。効果の高い防音対策ではあるので今後の研究が期待されるが、例えばビルと高速道路を一体化するというような場合には有効な対策となり得るであろう。

6. 1. 2 騒音干渉装置

騒音干渉装置は主に鉄道橋で用いられる対策である。これは直接の音波と干渉装置を通して下方へ出た音波との間に半波長のズレを生じさせ、このズレた二つの波を混合することにより互いの音波を消し合い減音領域を生じさせようとしたものである。図-6.1.1は、干渉型防音壁の一例である。これは鉄道橋で防音壁の高さを高くする代わりに、防音壁の上部に音の屈折遅延回路である干渉装置を取り付け、減音効果を上げるよう考案されたものである。

干渉装置を単体として用いると、干渉装置を通った音波が下方に出て減音されない領域を生ずる。このため干渉装置の背面に小防音壁を組み合わせて、かつ一体形成した一体型干渉装置が開発されており、東海道新幹線名古屋地区において実際に設置されている。図-6.1.2は、干渉装置の標準的な設置方法である。

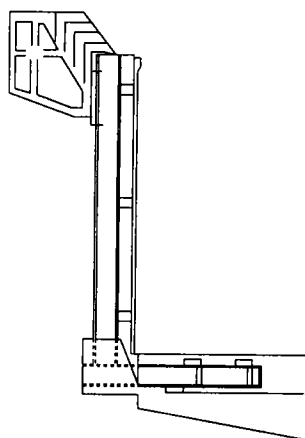
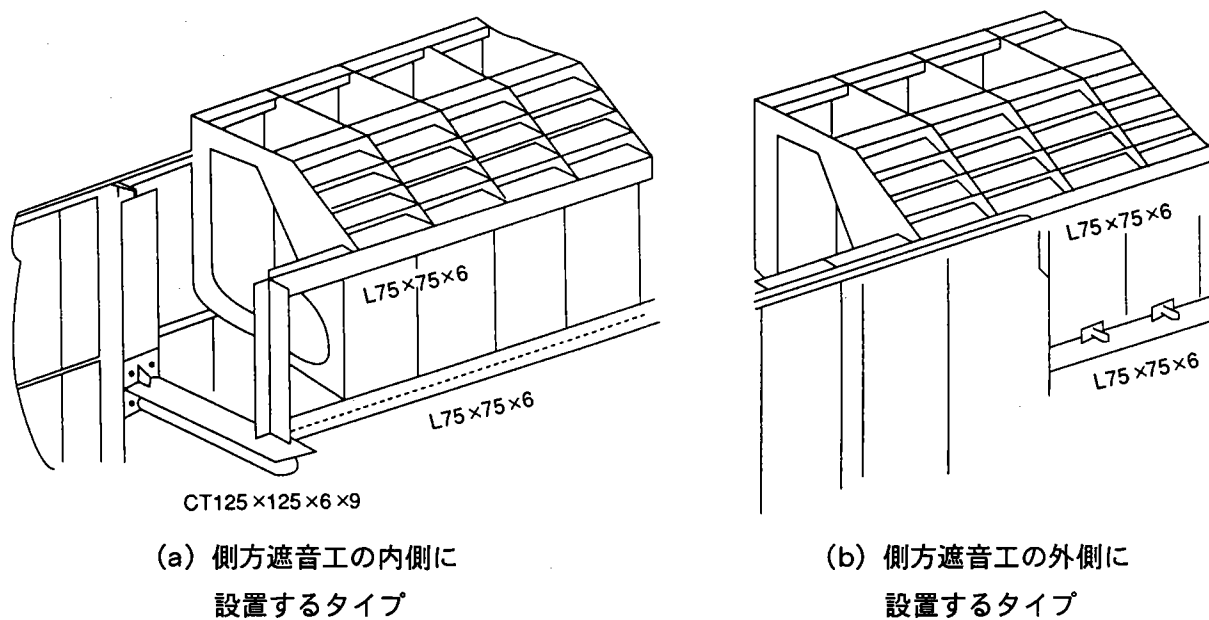


図-6.1.1 干渉型防音壁¹⁾



(a) 側方遮音工の内側に
設置するタイプ

(b) 側方遮音工の外側に
設置するタイプ

図-6.1.2 干渉装置の標準的な設置方法²⁾

6. 1. 3 音のアクティブコントロール

音波は、図-6.1.3に示すように波長と振幅が同じで位相が逆の音波と出会うと、互いに消し合って双方の音波が消滅することが知られている（音の干渉）。音のアクティブコントロールとは、この音の干渉を利用して騒音源から発生する音波に対して別の音源から逆位相の音波を能動的に付加することにより騒音を減少させるものである。

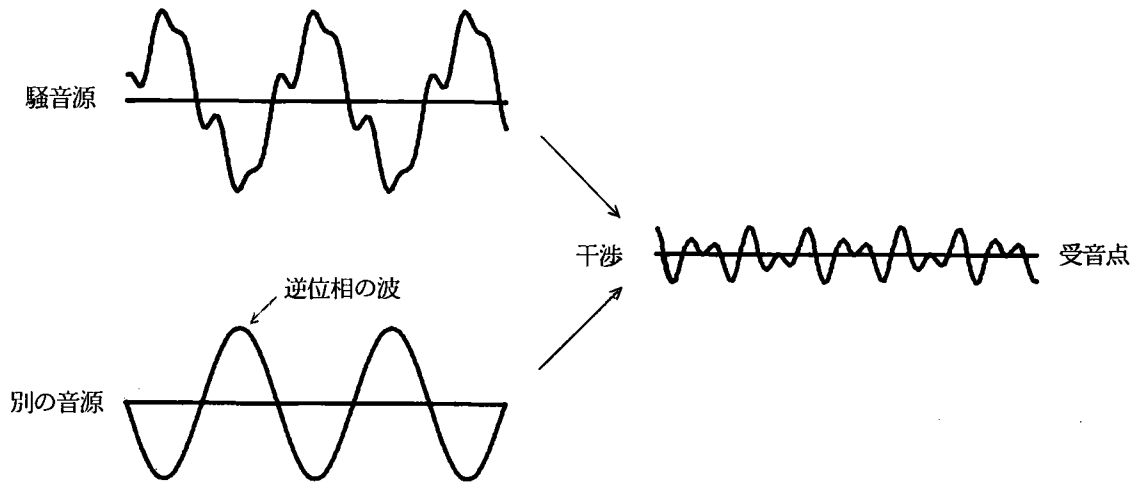


図-6.1.3 音のアクティブコントロールの原理

この方法は、従来からの吸音や遮音などの対策にくらべてよりスマートであり、かつ低周波空気振動に対しても比較的有効なことから、近年注目されている騒音対策のひとつである。しかしながら現状ではまだ多くの技術的な制約があって、音のアクティブコントロールで効果が期待できるのは、音場が1次元の場合には、

- ① 騒音は、振幅変動が小さい正弦波で、周波数成分が単一であること
 - ② 騒音源の出力が、付加音源に比べて著しく大きくないこと
- 2、3次元の場合には、これらの条件に加えて、
- ③ 騒音放射面の大きさが受音域までの距離に対して十分小さく、騒音源の近傍に付加音源を設置できる時
 - ④ 対策を施す場所が騒音源から十分隔たっており、到来騒音が平面進行波に近いと見なされる時

に限られており、実際に適用されたのもダクト系の騒音など極めて限定された範囲に留まっていた。また以上の制約のほかに、制御機器そのものの出力、耐候性、寿命、信頼性、安定性についても制約があり、現段階で橋梁の騒音対策に音のアクティブコントロールを採用するのはほとんど不可能である。しかしこれに関する研究・開発は、乗用車やオフィスビル内の騒音対策を中心として急速に進んでおり、制御方法や機器開発において今後の成果が期待される³⁾。

6. 2 振動制御

鋼橋における防音対策としての振動制御は、振動体の表面から放射される音（構造音）の低減に活用できる。例えば橋体の振動に対応して放射される低周波空気振動も、音源となる橋体の振動が制御されればその放射音も低減できる。橋梁の振動制御に関する研究は交通、地震、風による振動そのものの制御を目的として行われているのが現状であるが、これらの成果を防音対策に活用することも一つの方法であろう。

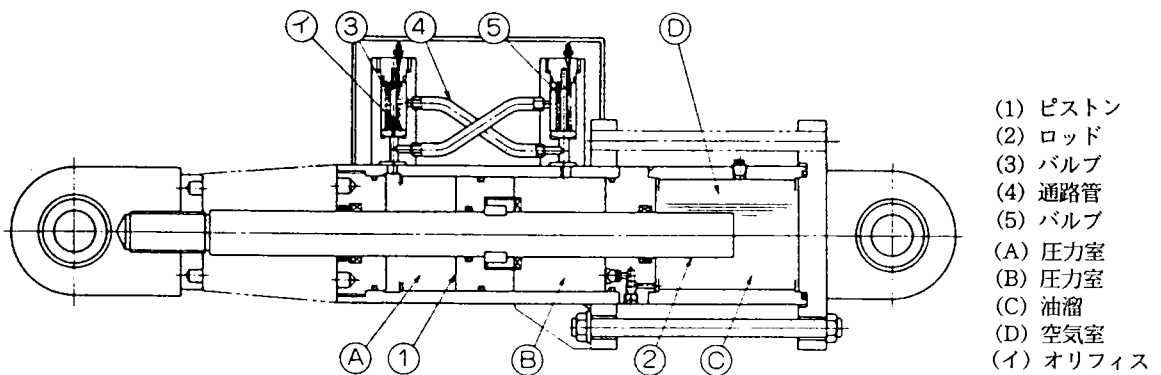
振動制御は、外部からエネルギーを供給するか否かによって、アクティブコントロールとパッシブコントロールに分けることができる。以下に、それらのうちのいくつかの例を紹介する。

6. 2. 1 パッシブコントロール

(1) オイルダンパ

構造物の振動を、減衰を増加させることで抑制することは従来からよく行われてきている。構造物に減衰を付加するための要素のうちの代表的なものの一つがオイルダンパである。オイルダンパの原理は、流体（油）の粘性または圧力抵抗を利用して振動速度に比例する抵抗力を発生し、この抵抗力が振動中に（抵抗力と振動変位の位相差に起因する）仕事をなすことによって構造物の運動エネルギーを熱エネルギーに変換するものである。

橋梁における使用例は、高架橋の橋軸方向の耐震固定⁴⁾、吊橋主塔架設時のダンパウエイト制振工法⁵⁾、斜張橋ケーブルの耐風制振対策⁶⁾などであるが、橋梁以外の構造物では図-6.2.1に示すように球形タンクの耐震用に設置されたものもある。構造物におけるオイルダンパの使用は、作動油やシールの交換や油漏れの点検などメンテナンスの問題を避けて通れず、管理者からは必ずしも好まれない傾向がある。しかし車両関係まで含めると使用実績が他に比べてずば抜けており工業的な供給体制も確立されていることを考えると、オイルダンパは今後も構造物における主要な減衰要素として使用されていくであろう。



- (1) ピストン
- (2) ロッド
- (3) バルブ
- (4) 通路管
- (5) バルブ
- (A) 圧力室
- (B) 圧力室
- (C) 油溜
- (D) 空気室
- (イ) オリフィス

(トキコ㈱産業用油圧機器カタログより)

図-6.2.1 オイルダンパ

オイルダンパと同様な機能を持ち、長期の耐久性やメンテナンスフリーに考慮したダンパとして、近年金属の塑性履歴を利用した塑性ダンパや固体摩擦を利用した摩擦ダンパなども開発されている⁷⁾。しかし抵抗力が非線形であるため設計が容易でなく、免震構造物の変位制限などまだ一部の用途に限られている。

(2) TMD・TLD・TSD

TMD (Tuned Mass Damper) とは、図-6.2.2のように構造物に取り付けてその振動を抑制する付加振動系のことであり、その原理は二自由度系の応答特性として古くから知られている⁸⁾。TMDの特徴は、付加振動系の振動数を構造物の振動数にチューニングして使用するところにあり、構造物が単一振動数成分で共振するような場合に大きな制振効果を発揮する。しかし橋梁の交通振動のように複数の振動数成分が関与する非正常応答に対しては効果が乏しいとも言われているので十分検討する必要がある。

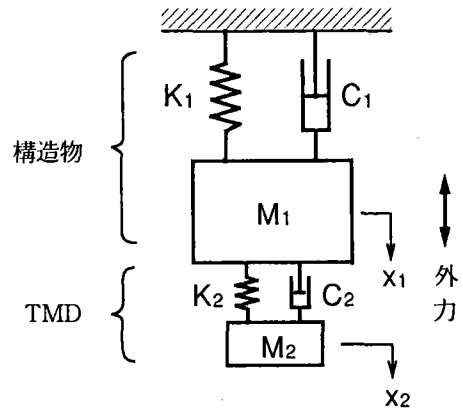


図-6.2.2 TMDの力学モデル

橋梁においては、近年、展望塔や長大橋主塔の渦励振対策として数多く用いられるようになってきたが⁹⁾、交通振動による高架橋周辺の地盤振動防止のために、試験的に高架橋に設置された例もある¹⁰⁾。図-6.2.3は、斜張橋主塔の架設時制振対策として用いられた振子型TMDの例である¹¹⁾。

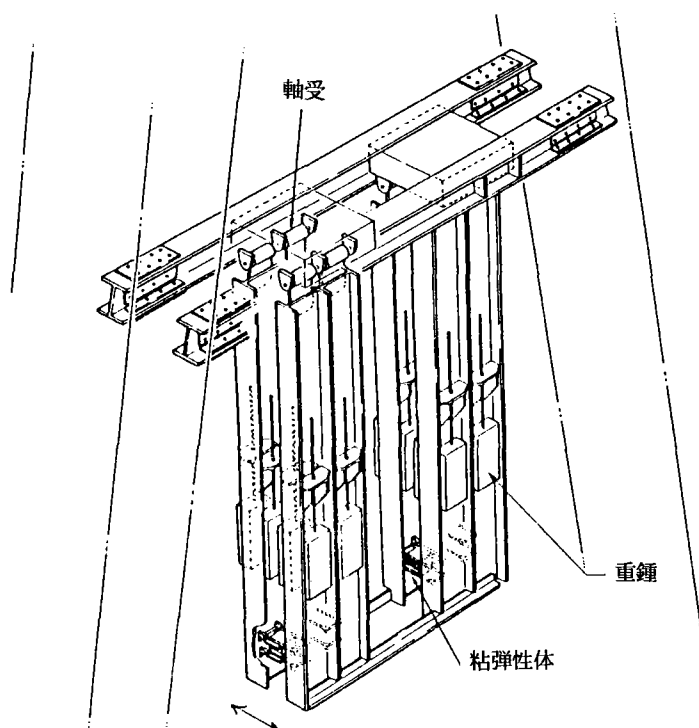


図-6.2.3 斜張橋主塔に取り付けられた振子式TMD

TLD、TSDとはそれぞれ、Tuned Liquid Damper、Tuned Sloshing Damperの略称であり、図-6.2.4のように水を入れた容器を構造物に設置して、その振動を抑制しようとするものであり、基本的には同一である。構造物に付加振動系を取り付ける意味ではTMDと同様であるが、振動系として液体のスロッシングを利用する点が異なっている。形状的な制約が少なく材料が安価であり、機械的な摩擦が存在しないため微振動から効果が期待できる一方、付加振動系の減衰の調整が難しいことや、振幅が碎波領域に至ると効果が減少する問題点がある。また制振の対象は水平面内の振動に限られる。

TLD・TSDは、当初展望台のような搭状の建築構造物に採用されていたが、最近では斜張橋主塔の架設時制振対策にも用いられるようになった¹²⁾。

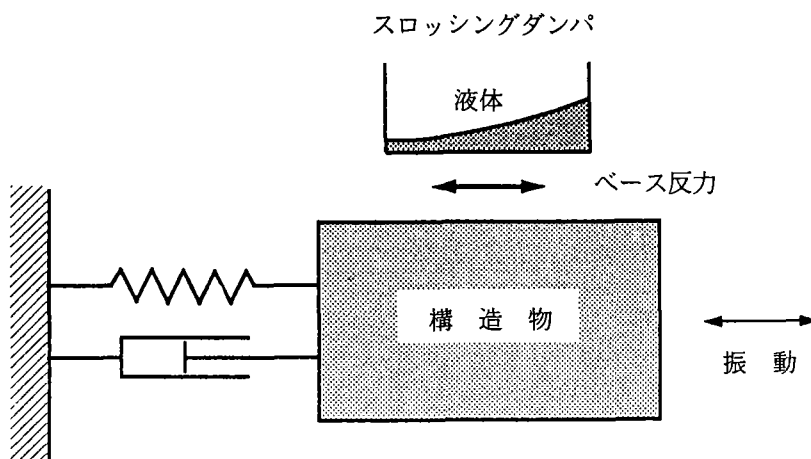


図-6.2.4 TLD・TSDの原理

(3) 磁気摩擦制振

少し変わったところでは、磁石を振動体に付着させて摩擦ダンパーを構成し、振動を防止しようとする研究も行われている¹³⁾。磁石の付着方法には、図-6.2.5のように慣性方式と拘束方式の2通りがあり、低周波領域には拘束方式が有効である。

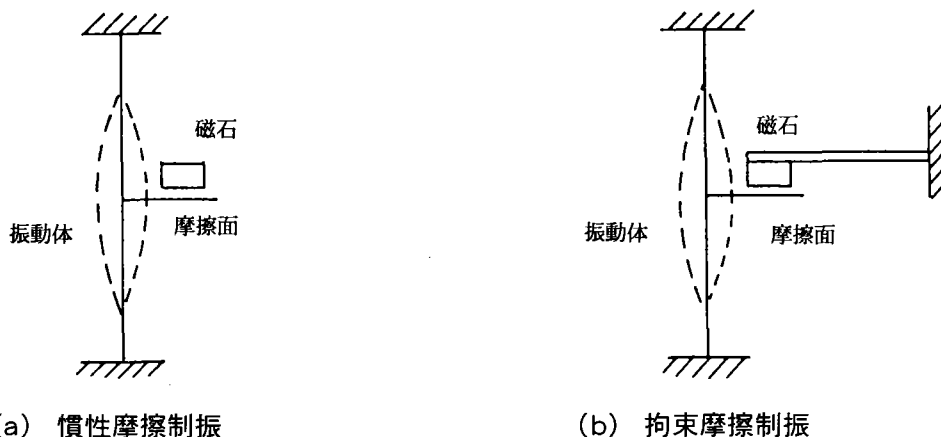


図-6.2.5 磁気摩擦制振の方法

慣性方式を図-6.2.6のように鉛直方向の制振に使用する場合の適用限界は次のように求められる。この振動を振幅 D の正弦波 $y = D \sin \omega t$ とすると、磁石に働く慣性力は m を磁石の質量として

$$m\ddot{y} = -mD\omega^2 \sin \omega t$$

と表わされる。振動体と磁石に相対変位が生じるためには、 F を磁石による静止摩擦力として $m\ddot{y}_{\max} > F$ でなければならないから、

$$mD\omega^2 > F \quad (6.2.1)$$

が成立する。また、磁石の吸着力は自重を保持できるだけ強さを必要とするので、重力加速度を g とすると

$$F > mg \quad (6.2.2)$$

でなければならない。式 (6.2.1), (6.2.2) より、慣性摩擦制振が効力を発揮するためには $D\omega^2 > F/m > g$ 、すなわち

$$D > g/\omega^2 \quad \text{または} \quad D > g/(2\pi f)^2 \quad (6.2.3)$$

であることが必要である。言い換えれば、慣性摩擦制振は振動体の振動数と振幅によって定まる条件が、図-6.2.7の直線より上側にならないと有効でない。橋梁の1次モードの振動は慣性摩擦によって制御することはできないが、金属打撃音に対しては有効であることがわかる。

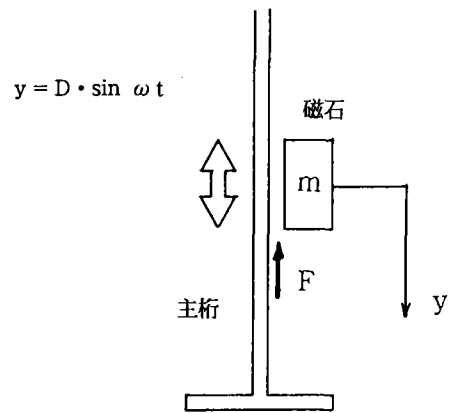


図-6.2.6 慣性摩擦制振モデル

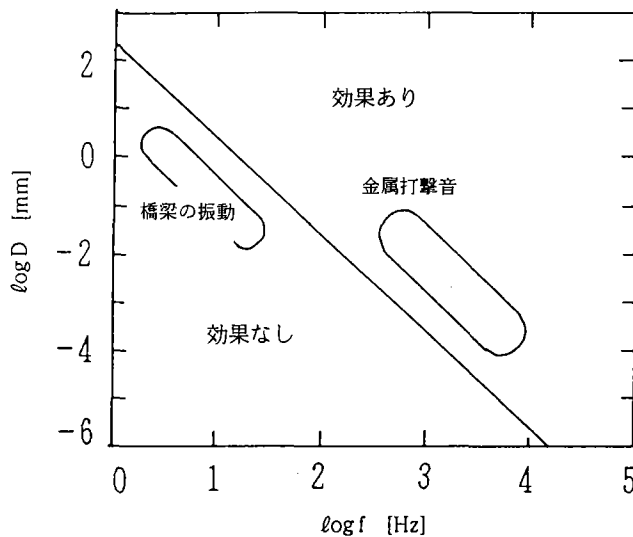


図-6.2.7 慣性磁気摩擦制振の有効範囲

拘束摩擦制振には、図-6.2.8のように中間支柱を用いるものと、図-6.2.9のように副桁を用いる方法がある。実橋に中間支柱を介して拘束摩擦制振を実施した結果を図-6.2.10に示す。800Nの摩擦力により橋梁中央の動的変位が半分以下に減少している。また車両が橋梁外へ退出した後の振動減衰が速やかである。図-6.2.11は、スパン3.2mの模型橋に副桁を用いて拘束摩擦を加えたものである。自由振動に対する制振効果を図-6.2.12に示す。磁石による摩擦力が大きいほど制振効果があるというのではなく、最適な摩擦力が存在する。副桁の剛性などによっても制振効果は影響されるが、橋梁の機械インピーダンスと副桁の機械インピーダンスを一致させたとき、最も高い制振力が得られることがわかっている。

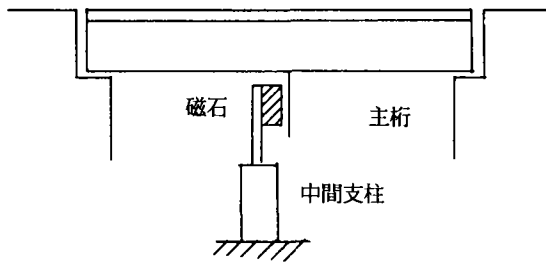


図-6.2.8 中間支柱を用いる方法

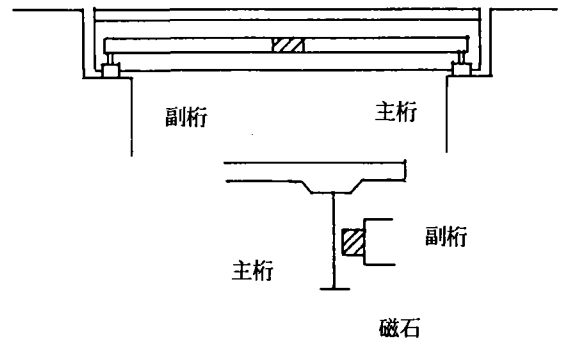
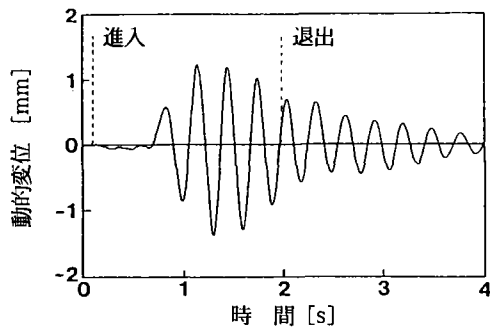
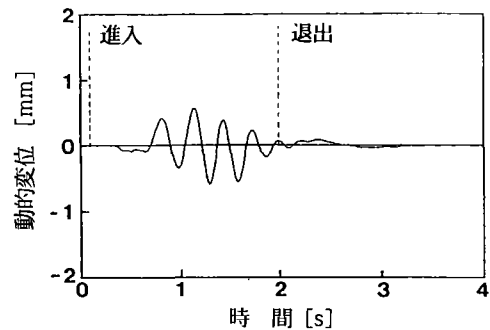


図-6.2.9 副桁を用いる方法

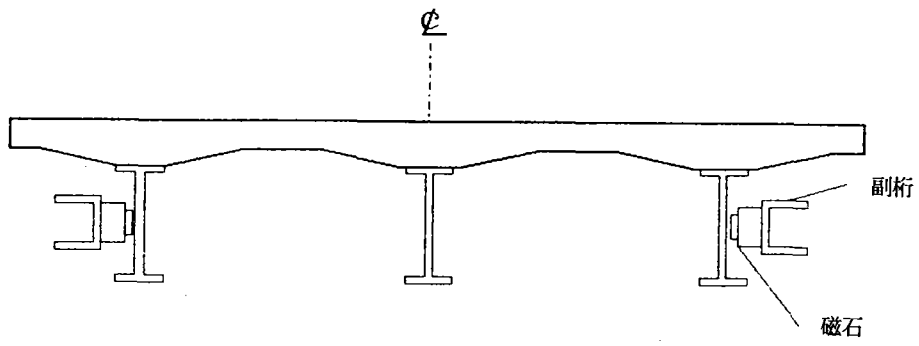


(a) 摩擦力なし

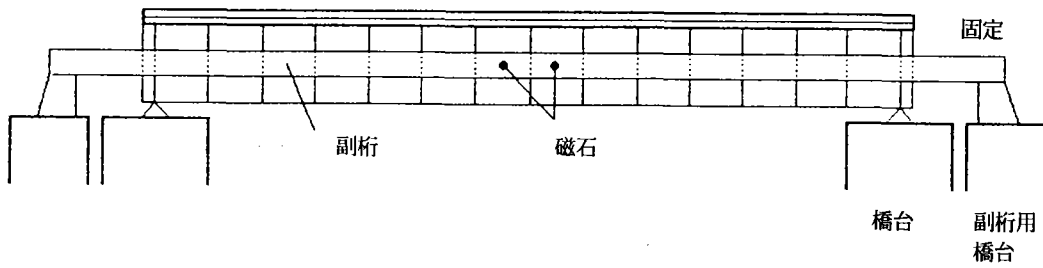


(b) 摩擦力 800N

図-6.2.10 中間支柱を用いた拘束摩擦制振

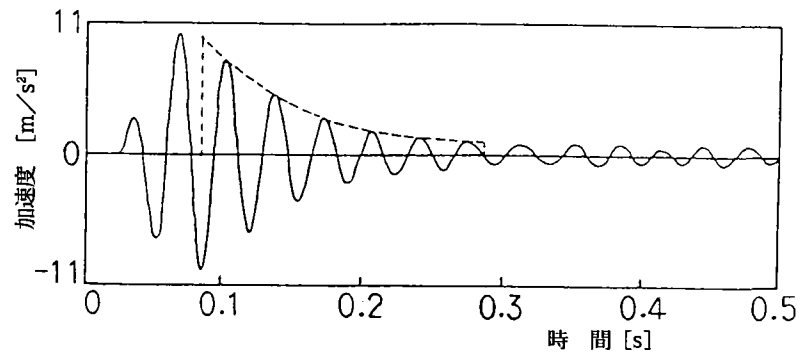


(a) 断面図

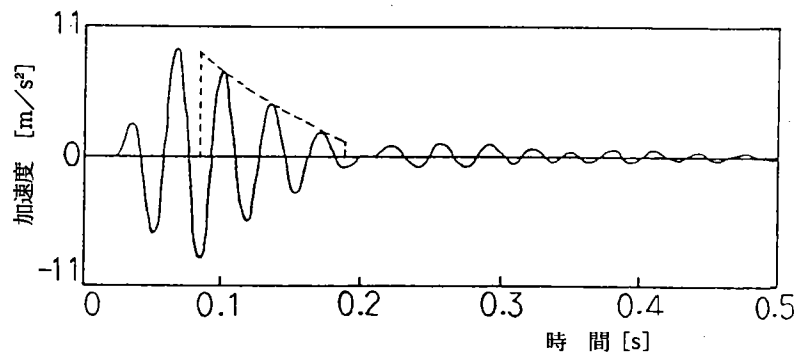


(b) 側面図

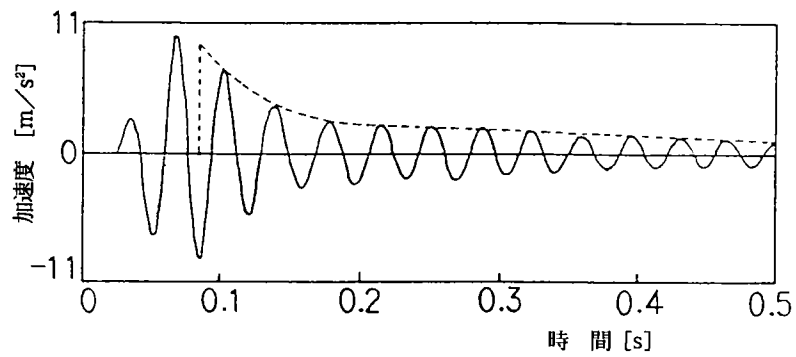
図-6.2.11 副桁を用いる制振機構



(a) 摩擦力 ゼロ



(b) 摩擦力 14N

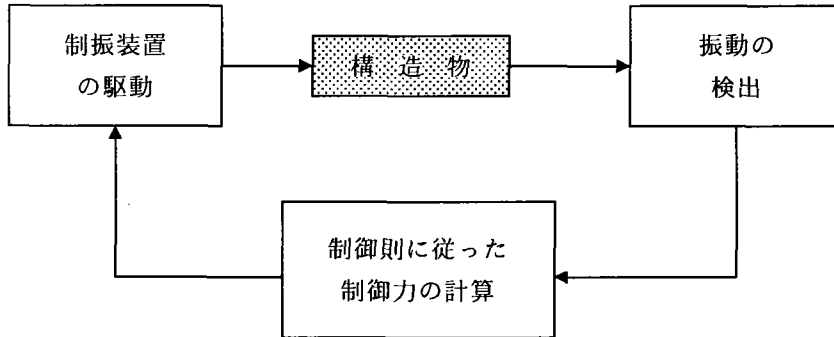


(c) 摩擦力 42N

図-6.2.12 加速度減衰波型 (副桁 (小))

6. 2. 2 アクティブコントロール

振動のアクティブコントロールとは、検出された構造物の振動をもとに、あらかじめ構成してある制御則に従い制振装置を駆動して、振動の低減を図る方法である。



この方式では理論的には過減衰まで制御可能であり、広い周波数領域で効果が期待できる反面、機構が複雑となってコストが高い欠点がある。実際の構造物に適用するにあたっては、次のような検討項目がある。

- ① 最適なフィードバックゲインを決定するためのアルゴリズム
- ② 構造物の振動特性の同定法
- ③ 構造物の状態量の把握（制御変数、オブザーバの選択）
- ④ アクチュエータの選定（油圧式 or 電気式）
- ⑤ メカニズムの選定（テンドン方式 or マスダンパー方式 or etc）
- ⑥ 制御システムの時間遅れ補償

これらを、構造物の構造型式、振動特性、設置条件を考慮して決定することにより、システムとしての制振性能が算出される。以下に二つの実施例を紹介する。

(1) 交通振動のアクティブコントロール¹⁴⁾

図-6.2.13に示す二階建て非対称鋼ラーメン橋脚の振動を制御して、共振現象を生じていた道路脇にある四階建ビルの振動障害の軽減を図っている。システムの概要は、

- ① ラーメン橋脚の対角線上に設置したテンドン棒によって振動を制御
- ② 制御周波数帯域は、2~5Hz
- ③ 装置の構成は、センサー、テンドン棒、アクチュエータおよび制御器
- ④ 制御方法は、最適レギュレータによるフィードバック制御

である。これによって、制御対象である橋脚の振幅は約1/2に低減し、建物の加速度も約2/3に減少したとされている。

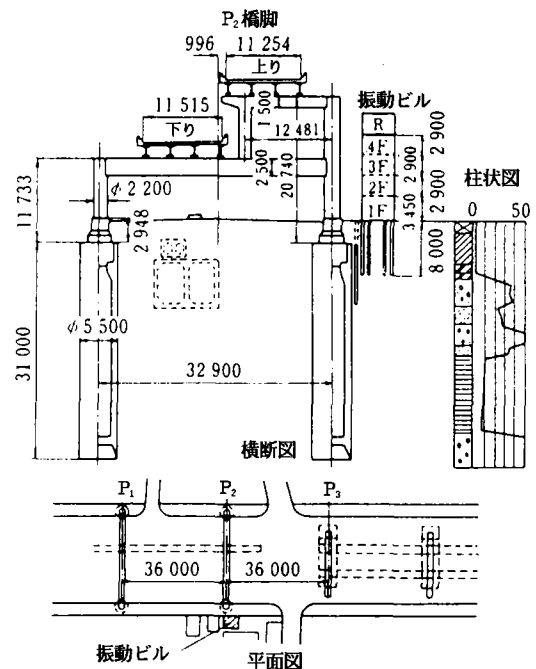


図-6.2.13 高架橋橋脚¹⁴⁾

(2) 高層ビルによる振動のアクティブTMD制御¹⁵⁾

風による高層ビルの振動エネルギーを、ビルの頂部に設置したTMDによって吸収して、居住性と機器への悪影響の除去を図っている。TMDにはアクチュエータを付けてアクティブ化することにより、理想的なパッシブTMDとして動作するとともに所要ストロークを大幅に減少させている。システムの特徴は、

- ① アクティブTMD方式による東西、南北の二方向の振動制御である。
- ② ビルの加速度が 0.003G を越えるとシステムが起動し、30分間0.00075G以下であれば停止する。
- ③ 装置は図-6.2.14に示すような構成で、横振れ防止装置を取り付けた400tのコンクリートブロック（ビルの質量の2%）を油圧で支持して、水平方向にアクチュエータを取り付けている。
- ④ ダンパーは、あらかじめ定めたゲインファクターにより決定され、システムの最適化は行われていない。

等である。このシステムではビルの変位が30cm以上にならないよう設計されているが、これによって定常的なスウェイ振動が40%ほど減少したとされている。

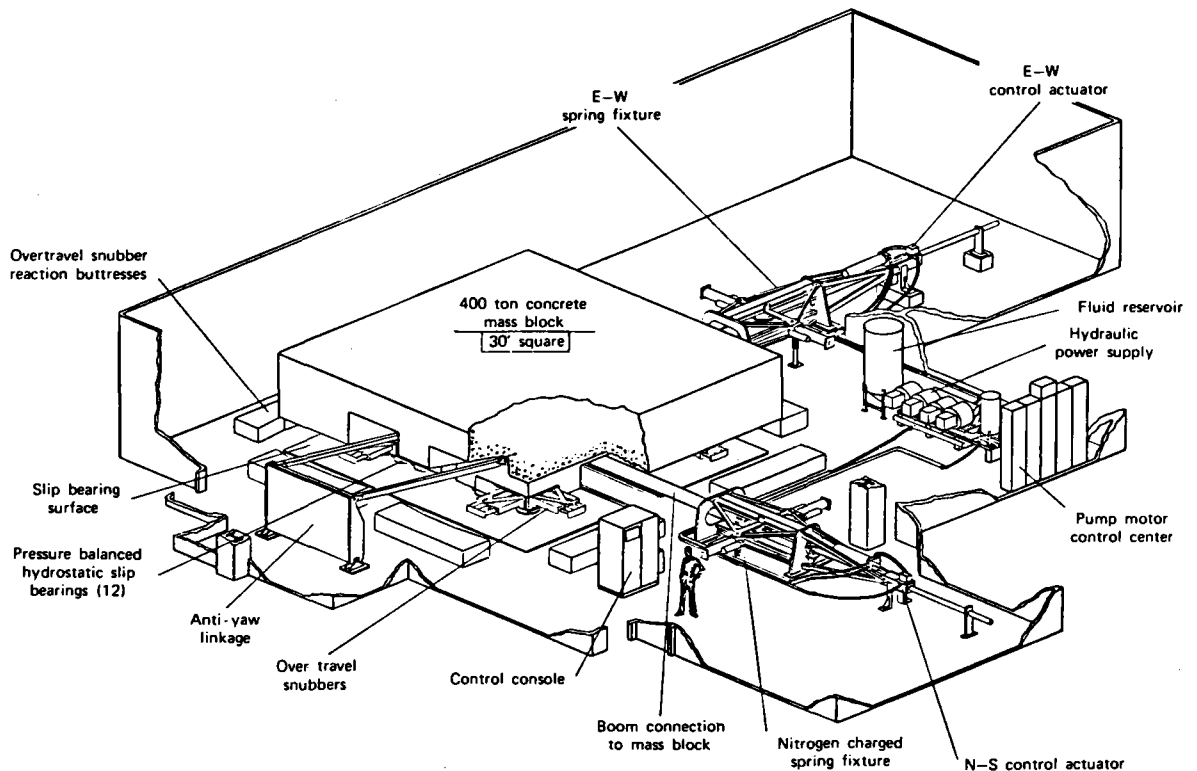


図-6.2.14 高層ビルによるアクティブTMD¹⁵⁾

第6章の参考文献

- 1) 中原繁則：鉄道の防音壁，橋梁と基礎，1986 - 8
- 2) 鋼橋防音工の設計施工の手引き，鉄道総合技術研究所，1987 - 9
- 3) 長友宗重：音響におけるアクティブ制御，日本音響学会誌，Vol.42, No.11，1986
- 4) 矢作枢ほか：耐震設計の変遷と現状，橋梁と基礎，1979 - 10
- 5) 成井信ほか：吊橋主塔架設時の制振対策，本四技報，No.21，1982 - 7
- 6) 吉村健ほか：荒津大橋のレインバイブレーションとその防振対策，土木学会西部支部研究発表会，1989 - 3
- 7) 日本建築センター：制振、免震構造建築物の技術開発について，1988 - 10
- 8) デン・ハルトック（谷口、藤井訳）：機械振動論，コロナ社，1960
- 9) 辻松雄：構造力学的耐風制振対策，日本風工学会誌，No.20，1984 - 6
- 10) 梶川康夫：動吸振器による高架橋の振動軽減対策，構造工学論文集，Vol.35A，1989 - 3
- 11) 加納勇ほか：名港西大橋の動吸振器方式耐風制振装置，第39回土木学会年講概要集，第I部門，1984
- 12) 平島寛：主塔の有害振動を水で防ぐ，日経コンストラクション，1989 - 10
- 13) Yoshikawa et. al：Vibration Reduction of Steel Structure using Magneto Friction, The ASME Winter Annual Meeting, Boston, Massachusetts, 1987 - 12
- 14) 矢作枢・吉田和彦：高架橋における交通振動のアクティブコントロール，土木学会論文集，No.356/I - 3，1985 - 4
- 15) Lund,R.A.：Active Damping of Large Structure in Winds, Proc. of the IUTAM symp. on Structural Control, Univ. of Waterloo，1979