

振動の制御, 制振

1

基本的戦略

- 振動を抑える
 - 原因を絶つ
 - 振動源の解消
 - 風振動に対する空力的対策
 - 伝播経路を経つ
 - 免震
 - 緩い支承
 - 珍しいものでは空溝対策工
 - 振動自体を押さえ込む, 押しやる
 - 制振
 - 減衰制御
 - 振動モード変更
- 振動を許す
 - 閾値
 - 振動の知覚限界
 - 騒音の例

2

振動の知覚限界 perception level

- 怒限度 (じょげんど)
 - 怒 (おもいやること、ゆるすこと)
 - 怒限度 (怒り出す限度) ではない
- 振動の基準
 - 橋梁
 - 100galが目安で用いられることがおおい
 - 管制塔
 - 長時間集中して凝視する作業
 - ISOの基準(ISO2631)
 - 機械振動が対象で主として作業者
 - 建築学会、国土交通省
 - ホテル、病院、集合住宅など
 - 歩行者、運転者

3

3

いわゆる制振

- 機械的な制振
 - 外部とつなぐ
 - 応急対策としては有効
 - 意識的に振動の節をつけるようなつなぎ材を加える
- 受動 (的) 制御 パッシブ制御 **passive control**
 - 構造が動くことで制御力が発生する
 - 減衰器を取り付ける
 - TMD
- 能動 (的) 制御 アクティブ制御 **active control**
 - センサーで振動を検知して振動を抑える力を加える
 - 変位制御
 - 減衰制御

4

振動源を押さえる

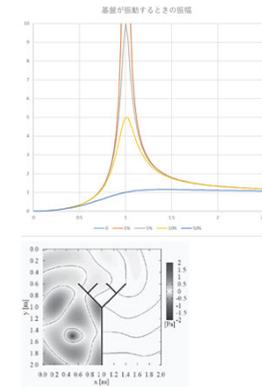
- 風誘起振動
 - 断面形状の調整
- 風誘起振動以外の例
 - 低振動なんとか
 - 振動低減装置を組み込んだ機械類
 - パイプロハンマー
 - 杭矢板の圧入



5

伝達経路を（で）絶つ

- 免震
 - 接合部の剛性を落とし低固有振動数化することで振動を防ぐ
 - 戻りの保証, 地下とつながる管線の柔軟化
- 経路での干渉
 - トナカイ型防音壁
 - 右の例は長岡科技大宮木先生
 - 廃れつつありますが、
 - 空堀対策工
 - 空堀も, 水堀も, 鋼矢板も



6

振動を抑える

- 力で押させるとすると質量と同オーダーのエネルギーが必要
- 大規模なものとするときタイが損傷しやすい
- 斜張橋のステイケーブル（斜張ケーブル）では、一時的対策に限らず、恒久的対策も事例は少なくない。
 - ダンパーを組み合わせる例も多い

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f$$

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = \frac{f}{m}$$

$$\ddot{x} + 2h\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = \frac{f}{k} \frac{k}{m}$$

$$O(\ddot{x}) \sim \omega_0^2$$

$$O(\omega_0^2x) \sim \omega_0^2$$

$$O(2h\omega_0\dot{x}) \sim h\omega_0^2$$

$$O\left(\frac{f}{k} \frac{k}{m}\right) \sim \omega_0^2 \frac{F_0}{k}$$

7

呼子大橋のケーブルダンパー



8

ケーブルのダンパーの例

- 左はフランスセヌ川にかかるプロトンヌ橋
- 右は中央環状の幸魂橋



9

TMDの事例 2自由度系の振動

表 6.1 各種振動に対する最適TMDと制振効果(付加減衰)

	調和外力振動	調和地盤振動	自由振動	自励振動	定常不規則強制振動
最適化基準	応答曲線の固定点を等しく最大点にする	増幅率曲線の固定点を等しく最大点にする	2つのモード減衰を等しく最大にする	2つのモードがともに安定でありうる負減衰を最大にする	構造物の2乗平均応答を最小にする
γ_{opt}	$\frac{1}{1+\mu}$	$\frac{1}{\sqrt{1+\mu}}$	$\frac{1}{1+\mu}$	$\frac{1}{\sqrt{1+\mu}}$	$\frac{\sqrt{1+\mu/2}}{1+\mu}$
$(\xi_r)_{opt}$	$\sqrt{\frac{3}{8} \frac{\mu}{1+\mu}}$	$\sqrt{\frac{3}{8} \frac{\mu}{1+\mu/2}}$	$\sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu/2}}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu(1+3\mu/4)}{1+3\mu/2}}$
ξ_{stl}	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu/2}{1+\mu/2}}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu(1+\mu)}{2}}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{1-\mu/4}}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu(1+\mu)}{1+\mu/2}}$	$\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\mu(1+\mu)}{1+3\mu/4}}$

- γ : チューニング振動数比 ξ : 減衰比
- 等価減衰 モード形の合成
- 調和外力 固定点の大きさをそろえる→ロバスト性
- 調和地盤振動 同上
- 自由振動 両モード減衰を等しく
- 自励振動 両モードが安定である負減衰作用を最大
- 不規則振動 振動エネルギーを最小

10

TMDの得失

- 利点
 - 固定点が不要
 - 理論的に明確
 - 必要減衰が分かれば振動理論で片がつく
 - 後施工でも挿入ができないことはない
- 欠点
 - 機械ものでメンテナンスが必須
 - 振動すると減衰器の冷却装置が必要
 - 可動部寿命は構造本体より短い
 - 調律が厳しい
 - 外すと効果が薄れる
- 番外
 - 十分な制振条件では(振動しないとか) TMDの振動も少なく劣化はすくない
- 採用例はきわめて多い

11

状態方程式としての表現

- 制御の世界では一般的 $\{\dot{x}\} = [A]\{x\} + \{b\}f$
- 例えば、伝達関数 $\{y\} = \{c\}^T \{x\}$
 laplace変換 $\omega X(\omega) = [A]X(\omega) + \{b\}F(\omega)$
 $\dot{x} = v$ $Y(\omega) = \{c\}^T X(\omega)$
 $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f$ $Y(\omega) = \{c\}^T (\omega - [A])^{-1} \{b\} F(\omega)$
 $m\dot{v} + cv + kv = f$ $G(\omega) = \frac{Y(\omega)}{F(\omega)} = \{c\}^T (\omega - [A])^{-1} \{b\}$
- $\{x\} = \begin{Bmatrix} v \\ x \end{Bmatrix}$ 状態変数
- $\{\dot{x}\} = \begin{bmatrix} 2h\omega_0 & \omega_0^2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \{x\} + \begin{Bmatrix} 1 \\ m \end{Bmatrix} f$ 状態方程式
- $\{y\} = [0 \ 1] \{x\}$ 観測方程式
- 一般的には $\{\dot{x}\} = [A]\{x\} + \{b\}f$
 $\{y\} = \{c\}^T \{x\}$

12

状態方程式の使い方

- 線形システム $\{\dot{x}\} = [A]\{x\} + \{b\}f$
- 一階微分で使いやすい $\{y\} = \{c\}^T \{x\}$
- 複素固有値解析 $\{\dot{x}\} = \frac{x(t+\Delta t) - x(t)}{\Delta t} = \frac{x(t) - x(t-\Delta t)}{\Delta t}$
 - 変位と速度が独立変数になるので、得られた固有値の整理が必要
- 移動平均モデルとか自己回帰モデルとか時系列推定モデルにもなじみが良い
 - 自己回帰モデル
 - ϕ は係数, ε は誤差項
$$x_t = \sum_i \phi_i x_{t-i} + \varepsilon$$
- 逆解析への展開

13

能動（アクティブ）制御への拡張

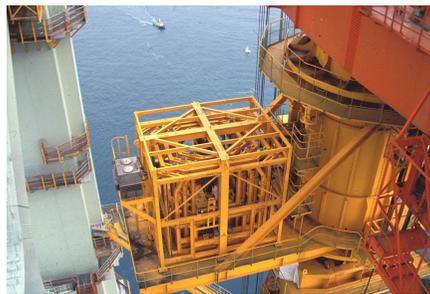
-
- ブロック線図を用いて
 - フィードバック制御
 - フィードフォワード制御
 - 評価関数J. 例えばひずみエネルギーとか運動エネルギーとかと制御エネルギーJ最小→最適制御

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T (x^2 + ru^2) dt$$
 - 対象とする状態が限られれば効率化ができそう → システムが明確でないと制御は難しい → システム同定と表裏一体
 - 効率化しすぎると制御範囲外の振動モードを起振する → スピルオーバー
 - 多くの制御理論が機械航空電気分野で提案され実現している
 - H ∞ 制御理論
 - ファジー
 - ニューラルネット

14

明石海峡大橋架設時の主塔の制振対策

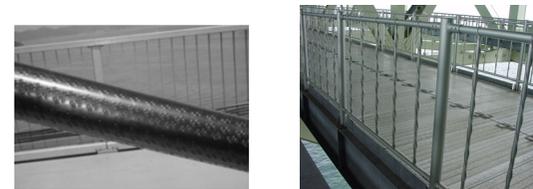
- 多段振り子を用いて、調律と制振
 - 架設ステップ毎に変化する柔軟な制振
 - 振り子振動を同調、調律し（アクティブなTMD）、制振を効率化



15

風による振動への対応

- 断面形状を調整することで空気力を調整できることが多い



- タイで結合し振動数を高める → 破損する例もある



16