

# 鋼棒群を用いた鋼鉄道橋制震装置の設計法

和田 一範\* 櫛谷 拓馬\*\* 豊岡 亮洋\*

Design Method for Seismic Control Devices Installed on Steel Railway Bridges

Kazunori WADA Takuma KUSHIYA Akihiro TOYOOKA

Some authors of this paper have proposed a damping device with a bridge collapse prevention function installable in narrow spaces. In this paper, we propose a method for the rough design of the proposed device. Specifically, we organized the results of the nonlinear response analysis of a single degree of freedom system and proposed a nomogram that can be used to calculate the displacement of the girders and the response ductility factor of the piers in accordance with equipment specifications. By using this result, it is possible to have a rough idea of the specifications to meet the required performance before detailed dynamic analysis is carried out, so it is expected to reduce the amount of work involved in the detailed calculations.

キーワード：制震装置，設計法，鋼鉄道橋

## 1. はじめに

既設の橋りょう・高架橋の耐震補強法として、鋼板巻き立て工法などの一般的な工法の適用が困難な場合、制震装置の適用が有力な選択肢のひとつとなる。鉄道橋においては、く体の補強が困難な長大橋に摩擦型ダンパーが適用された事例<sup>1)</sup>、店舗利用のため柱の補強が困難な高架橋にブレース型ダンパーが適用された事例<sup>2)</sup>などが挙げられる。しかし、都市部の道路や鉄道を跨ぐ橋りょうでは、桁下空頭が十分取れず、従来のダンパーが適用できないような場合もある。そこで、著者らのグループは無道床の鋼鉄道橋を対象とした鋼棒群を用いた小型の落橋防止機能兼用型制震装置（以下、提案装置）を開発している<sup>3)</sup>。

制震装置は今後も適用事例が増加していくことが期待される。現状では、制震装置の設計は、骨組モデルに代表される詳細な解析モデルを構築し、装置の諸元をパラメータにした繰り返しの非線形動的解析を行う（以下、詳細解析と表記）ことが一般的である。しかしながら、このような非線形動的解析の繰り返し計算という作業は煩雑であり、適用に際して障害となっている。要求性能を満足する可能性が高く、かつ過大なスペックではない諸元を初期値として設定できれば、繰り返し計算の回数削減、すなわち設計作業の省力化が期待できる。

そこで、鋼鉄道橋へ提案装置を適用するにあたり、詳細解析を行う上での鋼棒諸元の初期値を効率的に設定する手法（以下、鋼棒諸元の概略設定法と表記）を構築した<sup>4)</sup>。本手法を用いた提案装置の設計フローを図1に示

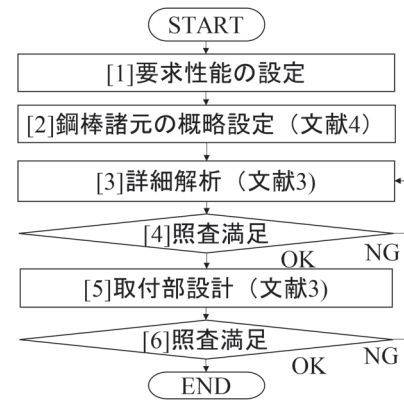


図1 提案装置の設計フロー

す。作業が煩雑化しやすい [3] 詳細解析に入る前の [2] の段階で要求性能を満足するための鋼棒の大まかな諸元を設定できるため、詳細解析での繰り返し計算の回数削減が期待できる。本稿では、図1に示す提案装置の設計法の中でも特に文献4の一部に示される装置の概要、パラメータスタディによる傾向分析、応答変位および応答塑性率の算定ノモグラムについて述べる。

なお、採用事例の多い摩擦型ダンパーを対象とした類似の検討を著者の一部が実施しており<sup>5)</sup>、本稿の成果と合わせることで多数の制震装置の効率的な設計が可能となる。

## 2. 検討概要

本章では、提案装置の概要について述べた後に、鋼棒諸元の概略設定法を構築するうえで、対象とした橋りょうとモデル化手法、検討パラメータについて述べる。

\* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

\*\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

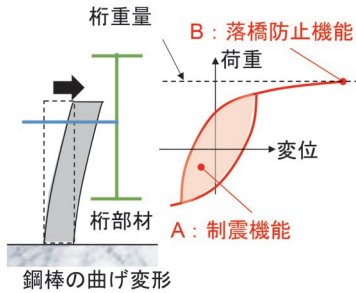
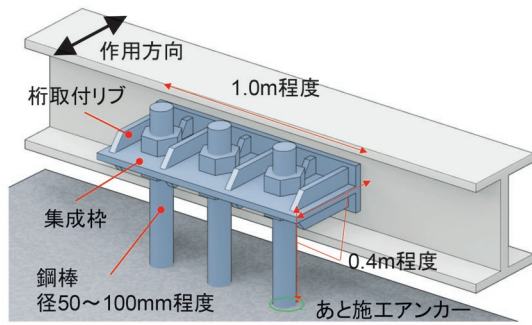


図2 提案装置の概要

### 2.1 提案装置<sup>3)</sup>の概要

提案装置は図2に示すように、複数の鋼棒を橋台天端にあと施工アンカーで設置し、集成枠を介して桁に取り付けることで、桁の慣性力を一様に鋼棒群に伝達する構造である。鋼棒の塑性化後の曲げ変形によるエネルギー吸収効果で制震機能を有する（図2のA）とともに、鋼棒の高い延性で桁重量を支持することで落橋防止機能を有する（図2のB）。さらに、狭あいな桁支承部上に設置することを想定し、鋼棒径 $\phi$ が50~100mm程度、鋼棒本数 $n$ は1箇所当たり3~8本程度、全体寸法は径80mm、鋼棒3本の場合、幅1m×高さ0.4m×奥行0.4m程度という小型なサイズであり、桁下空頭を侵さない。また提案装置で発揮される制震機能は、鋼棒径、鋼棒本数、鋼棒材料、荷重の作用高さなどを調整することで任意に調整可能である。

### 2.2 検討対象橋りょうとモデル化法

検討対象とする橋りょうおよびモデル化のイメージを図4に示す。片側が橋台でもう一方が橋脚となっている橋りょうを検討対象とした。このような構造は、道路を跨ぐ架道橋、鉄道を跨ぐ線路橋、河川を跨ぐ河川橋などに存在する。検討方向は、提案装置が落橋リスクに対する対策という主旨に鑑みて橋軸方向とした。

モデル化としては、鉄道の耐震設計で行われる設計振動単位<sup>6)</sup>の考え方にに基づき、1自由度系でモデル化した。すなわち、図3における赤点枠で囲まれた桁—固定支承—橋脚を1つの設計振動単位としてモデル化した。このとき、橋脚は文献6を参考に骨格曲線にBi-Linear、履歴特性にCloughモデル（降伏剛性に対する降伏後の剛

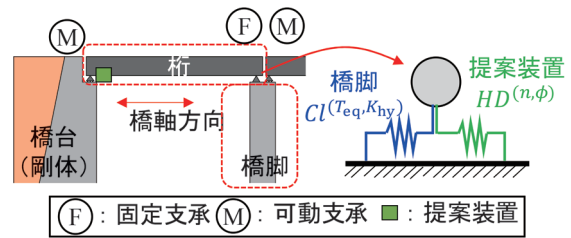


図3 検討対象構造とモデル化法

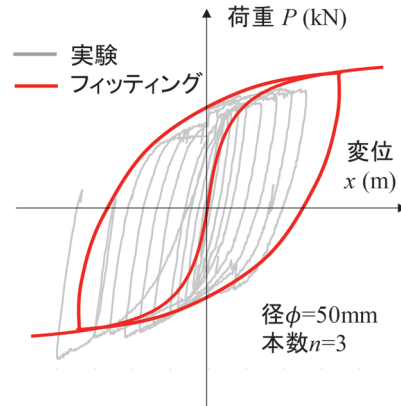


図4 装置の非線形特性(鋼棒径50mm, 鋼棒本数3本)

性低下倍率 $a=0.1$ 、除荷時の剛性低下指数 $\beta=0.2$ )を設定し、減衰特性は周期依存させた。橋台は十分健全であると仮定し、地盤と同一挙動する剛体とみなすこととした。提案装置の非線形特性は、既往の要素実験結果にフィッティングさせるようにMasing則に従う双曲線モデルでモデル化したもの（図4<sup>3)</sup>を基本とし、2.3節で述べるように鋼棒本数や鋼棒径の違いに応じて、図4の結果を補正することで、任意の鋼棒本数・径に対してモデル化可能とした。

### 2.3 検討パラメータの整理

検討パラメータとしては、橋脚の振動特性（等価固有周期 $T_{eq}$ 、降伏震度 $K_{hy}$ ）および提案装置の諸元（鋼棒径 $\phi$ 、鋼棒本数 $n$ ）、桁や橋脚の質量を1質点系に置換する際の等価質量 $m$ がある。1質点系の運動方程式を基に各パラメータの関係を考察することで、次章で検討するパラメータを整理する。

対象とするモデルの運動方程式は次式で表される。

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + \frac{Cl^{(T_{eq}, K_{hy})}(x)}{m} + \frac{HD^{(n, \phi)}(x)}{m} = -\ddot{z} \quad (1)$$

ここで、 $x$ は変位、 $h$ は減衰定数、 $\omega$ は固有円振動数、 $z$ はある入力地震動に対する地表面変位を表す。また、 $HD^{(n, \phi)}(x)$ は鋼棒径 $\phi$ 、本数 $n$ 本の時における双曲線モデルの復元力、 $Cl^{(T_{eq}, K_{hy})}(x)$ は等価固有周期 $T_{eq}$ 、降

伏震度  $K_{hy}$  における橋脚の復元力を表す。

上式において、復元力を表す左辺第3項と第4項が質量に依存して変化すると予想される。ここで、左辺第3項は2.2節で述べたように骨格曲線がBi-Linear型、履歴曲線がCloughモデルの非線形特性となる復元力項であり、図5および次式に示すように、等価固有周期  $T_{eq}$ 、降伏震度  $K_{hy}$ 、剛性低下率  $\alpha$ 、除荷時の剛性低下指数  $\beta$  で規定され、等価質量に依存しないことが知られている。

$$\text{降伏点} : p_y = K_{hy} * g \quad (g : \text{重力加速度}) \quad (2a)$$

$$\text{初期剛性} : k_1 = \left(\frac{2\pi}{T_{eq}}\right)^2 \quad (2b)$$

$$\text{2次剛性} : k_2 = \alpha k_1 \quad (\alpha : \text{定数}) \quad (2c)$$

$$\text{除荷時剛性} : k_r = k_1 \left(\frac{d_{max}}{d_y}\right)^{-\beta} \quad (\beta : \text{定数}) \quad (2d)$$

次に、式(1)の左辺第4項  $HD^{(n,\phi)}(x)/m$  について考える。この非線形特性は前述したように既往の要素実験結果<sup>3)</sup>にフィッティングさせるようにMasing則に従う双曲線モデルでモデル化しており、骨格曲線は次式で表される。

$$P_{HD}^{(n,\phi)}(x) = \frac{K_0(\phi)nx}{1+x/\delta_y(\phi)} \quad (3)$$

ここで、 $K_0(\phi)$  は剛性に関するパラメータ、 $\delta_y(\phi)$  は降伏変位に関するパラメータであり、それぞれ鋼棒径  $\phi$  の鋼棒1本あたりの指標である。例えば、鋼棒径50mmの場合は要素実験結果をフィッティングすることにより、 $K_0(50) = 2.6 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ 、 $\delta_y(50) = 1.1 \times 10^{-2} \text{ m}$  となる。上式において、鋼棒本数が  $n'$  本の場合の骨格曲線は次式で表せる。

$$P_{HD}^{(n',\phi)}(x) = \frac{n'}{n} P_{HD}^{(n,\phi)}(x) \quad (4)$$

また、Masing則は骨格曲線には依らないため、次式が成り立つことが分かる。

$$HD^{(n',\phi)}(x) = \frac{n'}{n} HD^{(n,\phi)}(x) \quad (5)$$

今、等価質量が  $m'$ 、鋼棒本数が  $n'$  である場合、式(1)は次式で表記できる。

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + \frac{Cl^{(T_{eq},K_{hy})}(x)}{m'} + \frac{HD^{(n',\phi)}(x)}{m'} = -\ddot{z} \quad (6)$$

式(6)に式(5)を代入すると以下が得られる。

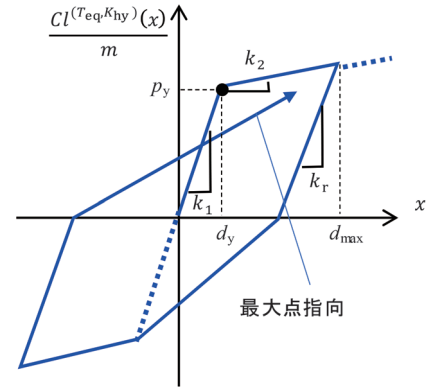


図5 橋脚の復元力モデルの概要

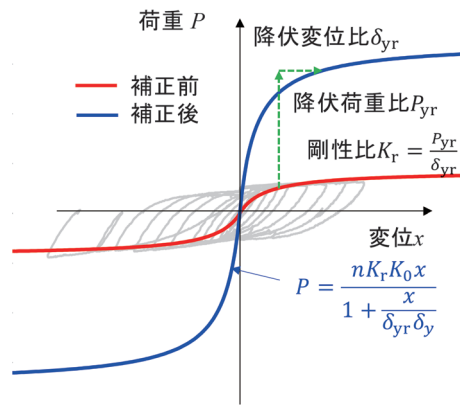


図6 提案装置の非線形特性（鋼棒径が異なる場合）

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + \frac{Cl^{(T_{eq},K_{hy})}(x)}{m'} + \frac{n'HD^{(n,\phi)}(x)}{m'n} = -\ddot{z} \quad (7)$$

ここで、式(7)と式(1)を比較すると、左辺第3項は先述したように等価質量に依らないため、式(7)と式(1)で異なる箇所は左辺第4項の係数だけである。この係数が等しいとき、すなわち

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m'} \cdot \frac{n'}{n} \Leftrightarrow \frac{m'}{m} = \frac{n'}{n} \quad (8)$$

が成り立つ時、質点の挙動は一致する。式(8)から、基準となる質量  $m$  と実際の質量  $m'$  の比率と基準の鋼棒本数  $n$  と実際に設置する鋼棒本数  $n'$  の比率が一致した場合に、桁の挙動は一致するということが分かる。すなわち、ある基準質量  $m$  であらかじめ検討しておけば、実際の橋りょうに適用する際には基準質量  $m$  と実際の質量  $m'$  の比率に合わせて鋼棒の本数を調整することで、質量の違いに対応することが可能である。

また、鋼棒径を変える場合は図6および次式で示すように、剛性比  $K_r$ 、降伏変位比  $\delta_{yR}$  を用いて補正する。

表1 検討パラメータ一覧

項目	パラメータ
橋脚	等価固有周期 $T_{eq}(s)$
	降伏震度 $K_{hy}$
	基準質量 $m(t)$
提案装置	鋼棒径 $\phi(mm)$
	鋼棒本数 $n$ (基準質量 $m$ に対して)

$$P_{HD}^{(n,\phi)}(x) = \frac{K_0(\phi')nx}{1+x/\delta_y(\phi')} = \frac{K_r K_0(50)nx}{1+x/(\delta_{yr}\delta_y(50))} \quad (9)$$

ここで、剛性比  $K_r$  は次式で示すように降伏荷重比  $P_{yr}$  と降伏変位比  $\delta_{yr}$  の比で表される。

$$K_r = \frac{P_{yr}}{\delta_{yr}} \quad (10)$$

また、鋼棒径  $\phi$  の降伏荷重  $P_y$  および降伏変位  $\delta_y$  は、鋼棒を片持ち梁と仮定して、縁応力度が降伏強度  $\sigma_y$  に達する際の荷重と変位として次式で算定する。

$$P_y = \frac{I\sigma_y}{0.5\phi} \cdot \frac{1}{h}, \quad \delta_y = \frac{P_y h^3}{3EI} \quad (11)$$

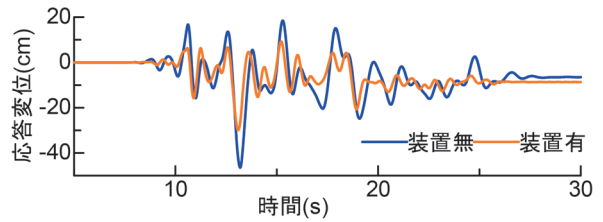
上式において、 $I$  は鋼棒の断面2次モーメント、 $h$  は載荷点高さ、 $E$  はヤング係数である。異なる鋼棒径について、式(11)を用いて降伏荷重、降伏変位を算定することで、骨格曲線を補正するための式(9)に必要なパラメータが算定できる。

以上をまとめると、次章で示すパラメータスタディを行う際は、表1が検討パラメータとなる。本稿では、等価固有周期  $T_{eq}$  は  $0.2s \sim 5s$ 、降伏震度  $K_{hy}$  は  $0.2 \sim 2$  の範囲で網羅的に設定し、基準質量  $m$  は  $100 \sim 2000t$  で設定した。鋼棒径  $\phi$  は  $50mm, 80mm$  の2ケース設定し、鋼棒本数  $n$  は  $1 \sim 12$  本で設定した。また、入力地震動は、鉄道構造物の耐震設計<sup>6)</sup> で考慮している L2 地震動スペクトル II (G3 地盤) とした。なお、文献4では他の設計地震動も含めた検討を実施している。また、鋼棒の材質や載荷高さもパラメータになり得るが、それらは文献3の実験条件で固定(材質: SS400, 載荷高さ: 基部から  $400mm$ )としている。

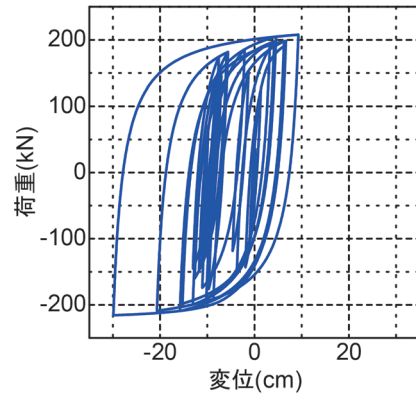
### 3. パラメータスタディによる傾向分析

#### 3.1 応答変位波形と装置の履歴曲線

本章では、ノモグラムを算定する前にいくつかの解析結果を分析することで、応答結果の傾向分析を行う。解



(a) 桁の応答変位波形



(b) 装置の履歴曲線

図7 応答結果の例 ( $T_{eq}=1.0s, K_{hy}=0.5, m=100t$ )

析結果の一例として等価固有周期  $T_{eq}=1.0s$ 、降伏震度  $K_{hy}=0.5$ 、基準質量  $m=100t$ 、鋼棒径  $\phi=50mm$ 、鋼棒本数  $n=8$  本とした場合の桁の応答変位波形および提案装置の履歴曲線を図7に示す。本図より提案装置がループを描くことでエネルギー吸収する制震効果を発揮し、提案装置を設置しない場合に比べて、最大応答変位が低減することが確認できる。以降では、各パラメータに対する最大応答変位や応答塑性率等で結果を分析する。

#### 3.2 鋼棒諸元と応答値の関係

鋼棒本数または鋼棒径以外のパラメータを固定し、鋼棒諸元と桁の応答変位および橋脚・基礎系の応答塑性率の関係の例として等価固有周期  $T_{eq}=1.0s$ 、降伏震度  $K_{hy}=0.5$ 、基準質量  $m=100t$  とした結果を図8に示す。本図より、鋼棒本数  $n$  が増加するほど、また鋼棒径  $\phi$  が大きいほど、桁の応答変位および橋脚・基礎系の応答塑性率の低減量が大きいことがわかり、提案装置による制震効果が大きいことがわかる。ただし、鋼棒径  $\phi=80mm$  の場合には鋼棒本数が5本以上の範囲で応答塑性率が低減しにくくなっていることがわかる。これは等価固有周期  $T_{eq}=1.0s$ 、降伏震度  $K_{hy}=0.5$ 、基準質量  $m=100t$  における装置の履歴曲線(図9)に示すように、鋼棒本数が少ない場合は、装置で荷重を負担しつつ、履歴ループで減衰効果も発揮されるが、鋼棒本数が増えると、装置がほぼ弾性体のように振る舞うことで、鋼棒本数が少ないときに見込まれた履歴減衰の影響が小さくな

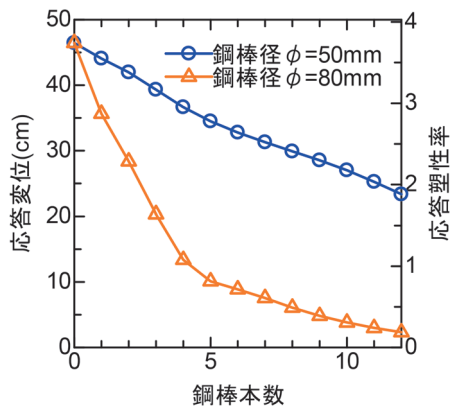


図8 鋼棒諸元と応答変位，応答塑性率の関係例  
( $T_{eq}=1.0s$ ,  $K_{hy}=0.5$ ,  $m=100t$ )

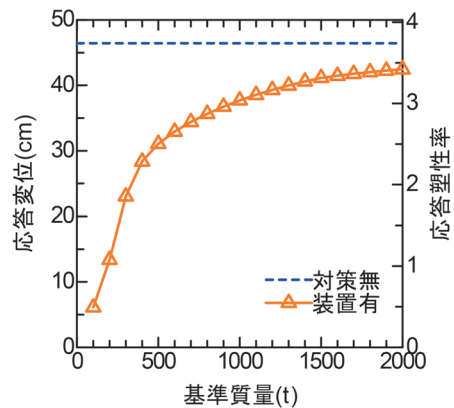


図10 基準質量と応答変位，応答塑性率の関係例  
( $T_{eq}=1.0s$ ,  $K_{hy}=0.5$ ,  $n=8$ )

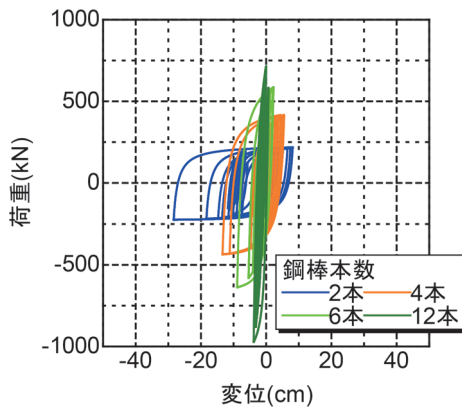
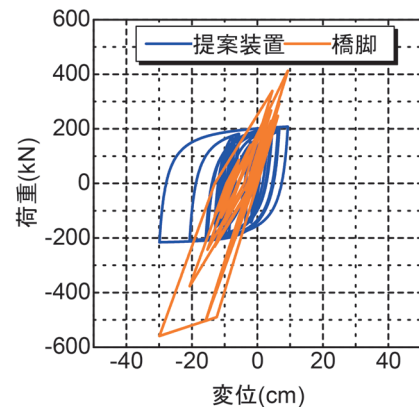


図9 鋼棒諸元と装置の履歴曲線の関係例  
( $T_{eq}=1.0s$ ,  $K_{hy}=0.5$ ,  $m=100t$ ,  $\phi=80mm$ )

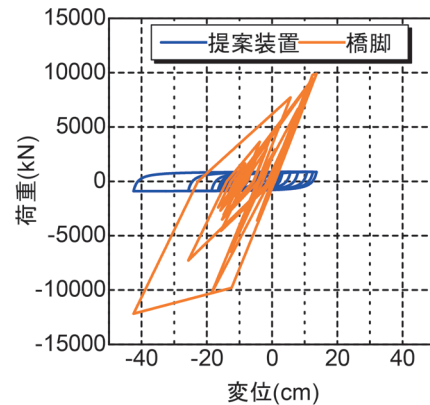
るためと考えられる。

### 3.3 基準質量と応答値の関係

基準質量以外のパラメータを固定し，基準質量と桁の応答変位および橋脚・基礎系の応答塑性率の関係の例として等価固有周期  $T_{eq}=1.0s$ ，降伏震度  $K_{hy}=0.5$ ，鋼棒径  $\phi=80mm$ ，鋼棒本数  $n=8$  とした場合の結果を図10に示す。本図より基準質量  $m$  が大きいほど，装置導入による応答変位や応答塑性率の低減量が小さい，すなわち提案装置による制震効果が小さいことがわかる。これは，橋脚と提案装置の履歴曲線（図11）から明らかなように，基準質量  $m$  が大きくなるほど，橋脚の復元力が提案装置の復元力よりも相対的に大きくなり，提案装置の制震効果が相対的に小さくなるためである。提案装置は都市内の無道床の鋼鉄道橋での施工を想定した小型なサイズの範囲で検討しているため，例えば図10の条件で桁の応答変位を50%程度抑制させたい場合，桁質量300t程度が適用できる構造物の上限となる。



(a) 基準質量  $m=100t$



(b) 基準質量  $m=2000t$

図11 提案装置と橋脚の履歴曲線  
( $T_{eq}=1.0s$ ,  $K_{hy}=0.5$ ,  $\phi=80mm$ ,  $n=8$ )

## 4. 応答変位，応答塑性率の算定ノモグラムを用いた鋼棒諸元の概略設定法

本章では，前章で述べた検討パラメータの範囲で網羅的に地震応答解析を実施した結果を基に応答変位，応答塑性率の算定ノモグラムを整理する。本章ではまずノモ

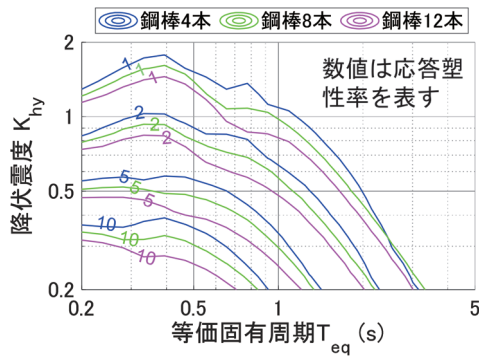


図 12 ノモグラムの一例 ( $\phi=50\text{mm}$ ,  $m=100t$ , L2 地震動スペクトルⅡ (G3 地盤))

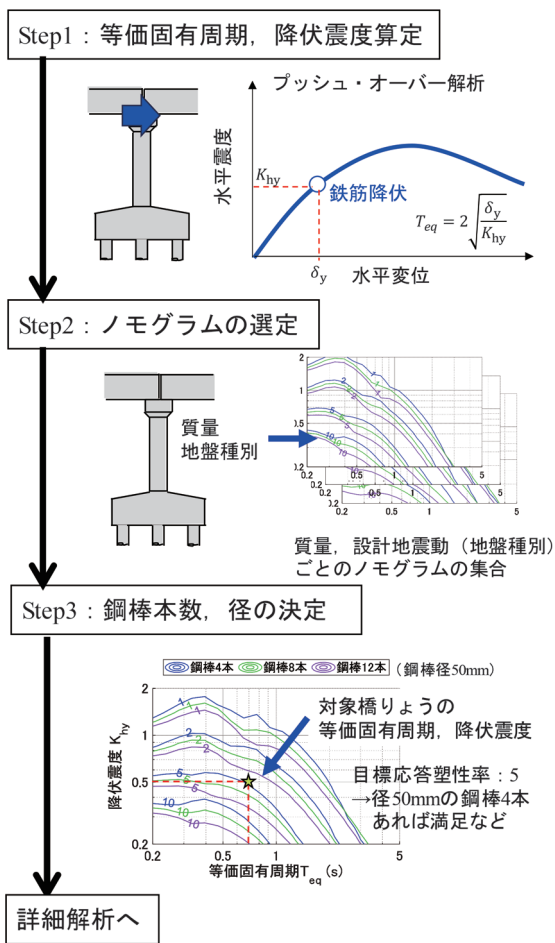


図 13 ノモグラムを用いた鋼棒諸元の概略設定の手順

グラムの概要を示した後、ノモグラムを利用した鋼棒諸元の概略設定の手順を具体例に基づいて示す。

#### 4.1 ノモグラムの概要

一般的な鉄道橋りょう・高架橋の耐震設計では、構造物の等価固有周期、降伏震度を所要降伏震度スペクトルと呼ばれる図上にプロットすることで応答塑性性を算定している<sup>6)</sup>。このスペクトルは、設計地震動ごとに用意

されており、設計者は等価固有周期、降伏震度を事前に評価しておけば、詳細な動的解析をせずに応答値を算定できる仕組みとなっている。鋼棒諸元の概略設定法についても、この所要降伏震度スペクトルに類似した表現方法を考える。

具体的には、提案装置が設置された図 3 のモデルを対象にした網羅的な動的解析結果を整理することで、等価固有周期、降伏震度ごとの応答変位および応答塑性率の等値線を整理する。ノモグラムの一例を図 12 に示すが、このような図を設計地震動および鋼棒径、鋼棒本数、基準質量ごとに事前に構築する。

#### 4.2 ノモグラムを利用した鋼棒諸元の概略設定の手順

前節で構築したノモグラムを用いた鋼棒諸元の概略設定の手順を図 13 および以下に示す。なお、この内容は図 1 に示した詳細解析に移る前の作業となる。

- ・ Step1: 対象橋りょうの等価固有周期、降伏震度を算定する。これには、対象橋りょうの骨組み解析モデルによるプッシュ・オーバー解析が必要となるが、図 1 の詳細解析において使用する骨組み解析モデルを利用可能である。
- ・ Step2: 対象橋りょうの桁の概算質量、設計地震動（当該橋りょう位置での地盤種別）の情報から、適切なノモグラムを選択する。
- ・ Step3: Step1 で得られた等価固有周期、降伏震度を Step2 で選択されたノモグラムにプロットし、応答塑性率、応答変位が目標とする制限値以内に収まるために必要な鋼棒本数、鋼棒径をノモグラムから読み取る。ここで、目標とする制限値については、落橋に至らないための桁かかり長や対象橋りょうの変形性能に応じて設定することを想定している。

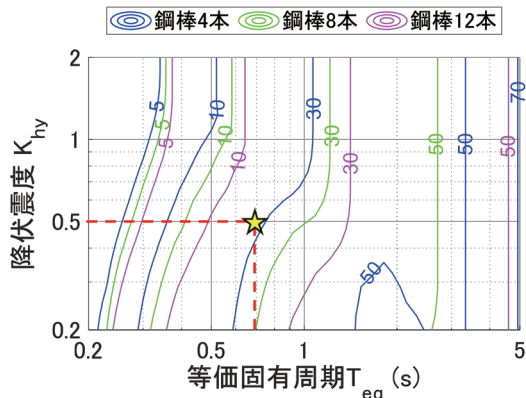
なお、上述した鋼棒諸元の概略設定が適用可能な条件は図 3 で示すモデルで表現できる構造形式、地震時挙動となる。すなわち、対象橋りょうが 1 質点系でモデル化できることが前提であり、斜角を有する場合や背の高い橋りょうなどは適用不可である。また、目標とする応答変位に至るまでに橋脚く体が損傷レベル 4 に至る場合や桁支承部の可動範囲を越える場合は、図 3 のモデルでは地震時挙動を表現できていないため、鋼棒諸元の概略設定法が適用不可となる。

#### 4.3 ノモグラムを利用した鋼棒諸元の概略設定の例

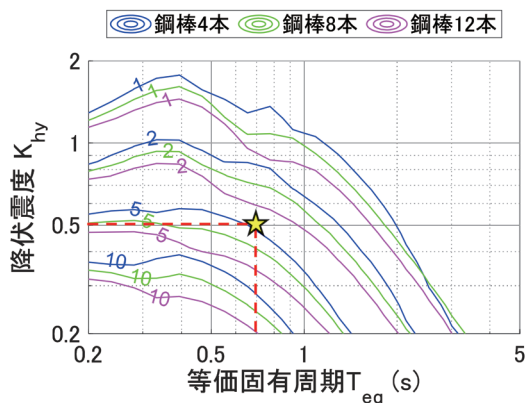
ノモグラムを利用した鋼棒諸元の概略設定の例を示す。対象橋りょうの等価固有周期、降伏震度、桁質量や目標となる制限値、設計地震動の情報を表 2 に整理する。表 2 の等価固有周期  $T_{eq}$ 、降伏震度  $K_{hy}$  を図 14 (a) に星印でプロットするが、鋼棒径  $\phi=50\text{mm}$ 、鋼棒本数  $n=4$  本で目標とする応答変位を満足することがわかる。

表2 鋼棒諸元の概略設定を行う対象橋りょうの情報

等価固有周期 $T_{eq}(s)$	0.7
降伏震度 $K_{hy}$	0.5
等価質量 $m(t)$	150
目標応答変位(cm)	30
目標応答塑性率	5
設計地震動	L2 スペクトル II (G3 地盤)



(a) 応答変位 (単位: cm)



(b) 応答塑性率

図 14 ノモグラムを用いた鋼棒諸元の概略設定の例 ( $\phi=50\text{mm}$ ,  $m=100\text{t}$ )

また図 14 (b) より、上記鋼棒諸元で、目標とする応答塑性率も満足できることがわかる。最後に、対象橋りょうの桁質量とノモグラムの基準質量の比は 1.5 となるので、式 (8) より実際に必要な鋼棒本数は 6 本となることがわかる。

以上のようにノモグラムを用いることで、橋りょうの振動特性および設計地震動を設定すれば、詳細解析を行う前に、目標とする応答変位や応答塑性率を満足するために必要な鋼棒本数、鋼棒径を概略的に把握できる。

## 5. まとめ

本稿では著者らのグループが提案している無道床の鋼鉄道橋を対象とした狭あい施工可能な落橋防止機能兼用型制震装置の設計法を示した。特に、設計作業の省力化のため、詳細解析を行う前に鋼棒諸元の初期値を効率的に設定する方法を構築するため、橋りょうを 1 自由度系で簡易にモデル化したうえで、鋼棒諸元と橋りょう諸元を多様に变化させた地震応答解析を実施し、鋼棒諸元と応答変位や応答塑性率との関係性を整理した。そして、鋼棒諸元や橋りょう諸元から応答変位や応答塑性率を簡易に算定できるノモグラムを構築し、それをを用いた鋼棒諸元の概略設定法を提案した。本稿の知見を以下に示す。

- ・ 鋼棒径、鋼棒本数が大きいほど、橋りょうの応答変位や応答塑性率を低下させる効果がある。ただし、鋼棒本数が多すぎると、装置がほぼ弾性体のように振る舞い、履歴減衰の影響が小さくなるため、効率的に応答が低減できる鋼棒径、本数の条件が存在する。
- ・ 桁質量が大きくなるにつれ、提案装置による応答変位や応答塑性率の低減効果が小さくなり、提案装置を適用できる橋りょうには限界がある。
- ・ 以上の傾向も踏まえて、橋りょうの等価固有周期、降伏震度、桁質量および鋼棒の径、本数をパラメータに応答変位、応答塑性率の算定ノモグラムを構築した。本ノモグラムを活用することで、詳細解析を行う前に、目標とする応答変位や応答塑性率を満足するために必要な鋼棒本数、鋼棒径を概略的に設定できる。

## 文献

- 1) 豊岡亮洋, 古屋卓稔, 中田裕喜, 宇野匡和: 免制震構造を活用した大規模鉄道 PC 橋りょうの耐震補強, 第 19 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.279-286, 2016
- 2) 喜多直之, 吉田幸司, 岡野素之, 関雅樹: 鉄道 RC ラーメン高架橋を対象とした圧縮型鋼製ダンパープレース工法の実用化, 土木学会論文集 F Vol.63, No.3, pp.277-286, 2007
- 3) 土井達也, 豊岡亮洋, 齊藤雅充, 和田一範, 名波健吾, 福本守: 狭隘な箇所設置可能な落橋防止機能兼用型制震装置の開発, 土木学会論文集, Vol.79, No.13, 22-13003, 2023
- 4) 和田一範, 柳谷拓馬, 豊岡亮洋: 狭隘箇所設置可能な落橋防止機能兼用型制震装置の概略設計法の提案, 土木学会論文集 A1, Vol.78, No.4, pp.1\_152-I\_161, 2022
- 5) 豊岡亮洋: 所要の応答塑性率を実現する摩擦型ダンパーの設計手法の提案, 土木学会論文集 A1, Vol.73, No.4,

pp.I\_568-I\_579, 2017

耐震設計, 丸善出版, 2012

6) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説