

## 2. ばね式免震制動装置の性能確認実験

### Performance Confirmation Experiment of Spring-type Seismic Isolation Braking Device

諸沢 柁治\* 新井 佑一郎\* 柳田 佳伸\* 石鍋 雄一郎\*\*

#### —概要—

免震建物が設計想定を超える巨大地震を受けると、免震層が過大変形し擁壁に衝突することが懸念されている。免震建物の擁壁衝突を防止するためには、免震層に輸入される過大な運動エネルギーをダンパーなどのデバイスで吸収する必要がある。過大な運動エネルギーを吸収するデバイスとして、他社先行技術では特殊なオイルダンパーやゴム等の特殊な材料を用いたデバイスが提案されている。本論で提案する「ばね式免震制動装置」は、特殊な材料を用いずに鋼材のみで構成されたデバイスである。エネルギー吸収は、独自部品である「鋼管コイルばね」に引張力が作用した際に塑性化することで行われる。そのため、信頼性が高く、繰り返しの装置動作でも安定してエネルギーを吸収する。

#### —技術的な特長—

装置に用いられる鋼管コイルばねは、一般的な円形鋼管にらせん状の切込みを入れたものである。エネルギー吸収能力を発揮させるためには、鋼管コイルばねが引張力を受けた際に、ばね線材を拘束鋼管に巻き付けることと、ねじり変形を拘束する必要がある。装置の形状を図1に示す。装置形状より、ばね線材を巻き付ける拘束鋼管は、鋼管コイルばねの内部に挿入されている。ねじり変形の拘束は、外周に取り付けられた角形鋼管（ねじり変形拘束鋼管）と摺動部により構成された機構で行われる。装置の履歴モデルは、図2で示すように剛性が小さな弾性域と、徐々に荷重上昇しエネルギー吸収が行われる制動域と、荷重がほぼ一定となる終局域に分けられる。

本論では、装置の設計に必要な履歴モデル（図2）の設定方法を確立するために、装置の加力実験を実施した。実験により得られた荷重－変位関係（図3）から、初期剛性が小さく、緩やかに荷重上昇することが確認された。また、実験結果から、制動域における剛性  $K_2$  は鋼管径との相関性について定式化を行うことで、履歴モデルの設定方法を確立することができた。

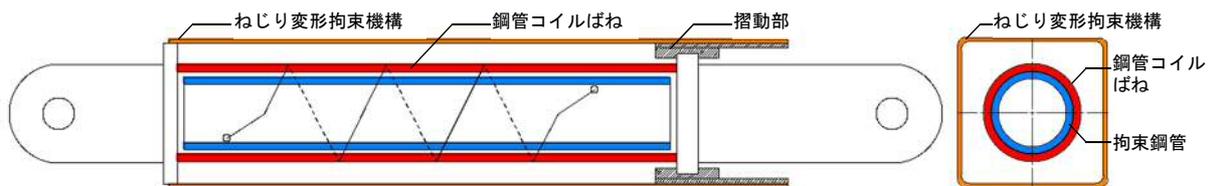


図1 ばね式免震制動装置の形状

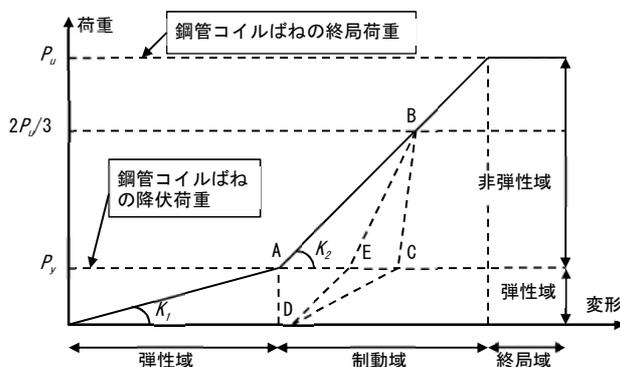


図2 ばね式免震制動装置の履歴モデル模式図

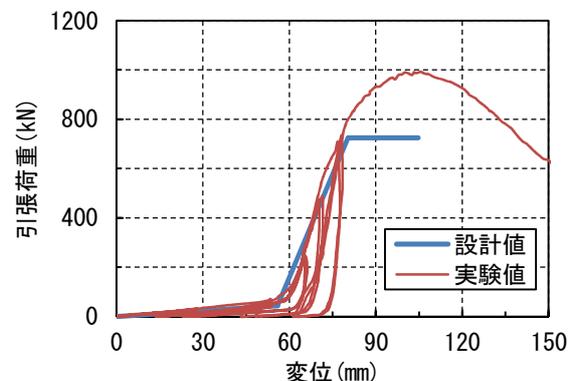


図3 荷重－変位関係

\*技術研究所 構造研究部 建築構造研究室 \*\*日本大学短期大学部 准教授

## ばね式免震制動装置の性能確認実験

## Performance confirmation experiment of spring-type seismic isolation braking device

○諸沢 柁治\* 新井 佑一郎\* 柳田 佳伸\* 石鍋 雄一郎\*\*

Masaharu MOROSAWA Yuichiro ARAI Yoshinobu YANAGITA Yuichiro ISHINABE

In the case of a large earthquake that is expected to occur in recent years, there is a concern that the seismic isolation layer of the base-isolated building will be excessively deformed and collide with the retaining wall. Therefore, in order to suppress excessive deformation of the base-isolated building, a steel tube coil spring with a spiral cut in the steel pipe is used, and a spring-type that plastically deforms while gradually increasing the load and absorbs the energy excessively input to the building. A seismic isolation braking device was developed. However, there is no device with this mechanism so far, and it is necessary to experimentally confirm the behavior when the spring-type seismic isolation braking device operates, so a tensile force experiment was performed. As a result, the expected behavior of the spring-type seismic isolation braking system was confirmed.

Keywords: 地震,免震建物,制動装置,フェイルセーフ

*Earthquake, Seismic Isolation Building, Braking Device, Fail-safe*

## 1. はじめに

近年発生が懸念される海溝型巨大地震による長周期・長時間地震動や、断層近傍で観測されるパルス性地震動では、免震建物の免震層が過大変形し擁壁に衝突することが懸念されている。免震建物の過大変形を抑制するための制動・緩衝部材は、可変の減衰性能を有するオイルダンパー<sup>1),2)</sup>や、土木分野で用いられる緩衝チェーン、船舶分野の防舷材を用いるケースが考案されている。これまでに考案されてきた技術は、ゴムや樹脂、特別な機構のダンパーなど、特殊な部材を用いているため、高価であることや、品質管理の面で課題があった。

これに対し、ばね式免震制動装置は鋼材のみで構成されているため、品質管理の容易さに利点がある。ばね式免震制動装置は、鋼管にらせん状切込みを入れた「鋼管コイルばね」を用いていることで、この鋼管コイルばねがゆるやかに荷重上昇しながら塑性変形し建物に過大入力されたエネ

ルギーを吸収する<sup>3)~5)</sup>。このような機構のデバイスはこれまでにないもので特に履歴特性について実験的に確認する必要がある。

本論では、鋼管コイルばねを用いたばね式免震制動装置の履歴モデル設定方法を確立するため、鋼管コイルばね径  $D_s$  が 185mm、244.5mm、の2体の試験体を製作し、引張加力実験を実施した。その結果について報告する。

## 2. ばね式免震制動装置

## 2.1. ばね式免震制動装置の概要

ばね式免震制動装置は、鋼管コイルばね、拘束鋼管、ねじり変形拘束機構（外側の角形鋼管と摺動部の熱処理部品）で構成され、鋼材以外の特殊な材料を使用していないという特徴がある。また、鋼管コイルばねの引張加力時に生じるねじれ変形を拘束する必要があるため、外側にねじり変形拘束機構を配置した。既往の実験<sup>4)</sup>では摺動部分の食い込みにより、本装置が機能しなくなったた

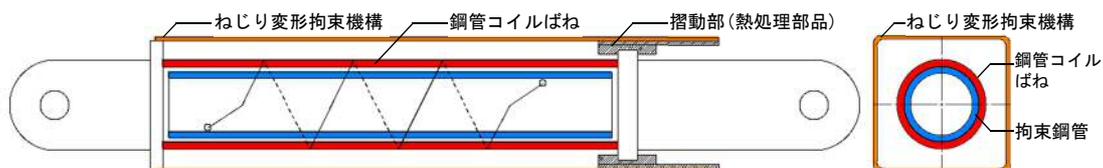


図1 ばね式免震制動装置の構成例

\*技術研究所 構造研究部 建築構造研究室 \*\*日本大学 短期大学部 准教授

め、改良として摺動部分に熱処理部品を取付けた。装置の構成を図1に示す。

ばね式免震制動装置の履歴モデルを図2に示す。本装置は、鋼管コイルばねがねじり変形を拘束された状態で引張加力を受けると、徐々に断面径が絞られ、拘束鋼管に巻き付く。拘束鋼管に巻き付くまでの、鋼管コイルばねが弾性挙動する領域を弾性域と称し、その際の剛性を $K_1$ とした。その後、鋼管コイルばねが拘束鋼管に巻き付きながら荷重上昇し、免震層に入力された過大な運動エネルギーを吸収する領域<sup>3)</sup>を制動域と称し、その際の剛性を $K_2$ とした。その後、最大荷重 $P_u$ を超えると、鋼管コイルばねに亀裂が生じ始め、徐々に荷重が低下していく。この領域を終局域と称し、モデルでは剛性は0とし、 $P_u$ 一定とした。各値の設定方法は $P_u$ を3.1節、 $K_1$ および $K_2$ を5.1節でそれぞれ後述する。

2.2. ピッチ隙間比

ばね式免震制動装置が図2で示す履歴モデルと同等な挙動を示すためには、拘束鋼管に巻き付き弾性域と制動域の切り替わる点が、鋼管コイルばねの降伏点と概ね同等となる必要がある。そこで、既往の実験結果<sup>3)~5)</sup>から、履歴モデルと同等な挙

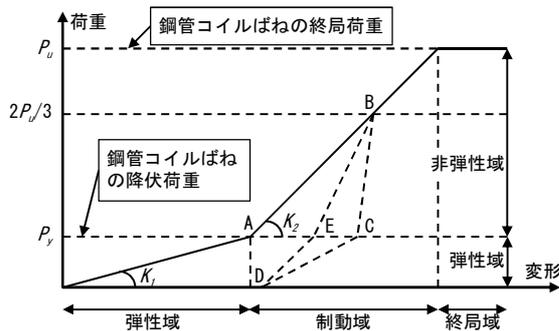


図2 ばね式免震制動装置の履歴モデル

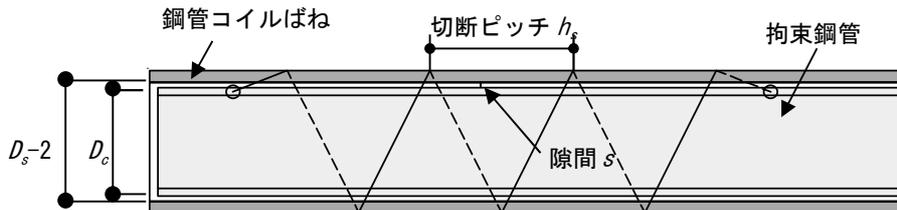


図3 鋼管コイルばねと拘束鋼管の寸法

動を示した試験体を選定し、弾性域と制動域の切り替わる点を決定するパラメータとしてピッチ隙間比を定義した。定義したピッチ隙間比は式(1)より求め、本実験では、その値が100以上140以下となるようにした。

$$r_p = \frac{h_s}{s} = \frac{h_s}{(D_s - 2t_s - D_i)/2} \quad (1)$$

$r_p$ : ピッチ隙間比、 $h_s$ : 切断ピッチ、 $s$ : 鋼管コイルばねと拘束鋼管の隙間、 $D_s$ : 鋼管コイルばねの径、 $t_s$ : 鋼管コイルばねの板厚、 $D_i$ : 拘束鋼管の板厚

3. 実験概要

3.1. 試験体

本実験で用いる試験体の構成を表1に、鋼管コイルばねの寸法および隙間を表2に、試験体形状をそれぞれ図4、図5に示す。試験体は、鋼管コイルばね径が185mm、244.5mmの2種類となっている。鋼管コイルばねの有効巻き数 $n$ は、すべての試験体で2とした。また、切断ピッチ $h_s$ は鋼管コイルばね径 $D_s$ の1.0倍を目標として加工しており、実測値を記載している。鋼管コイルばねの素材は、STKM13Aとした。

表1 試験体構成

試験体名	部位	断面	材質
試験体O-185	鋼管コイルばね	○-185×15	STKM13A
	拘束鋼管	○-152.4×9	STKM13A
	ねじり変形拘束機構	□-250×9	BCR295
試験体O-244.5	鋼管コイルばね	○-244.5×20	STKM13A
	拘束鋼管	○-200×10	STKM13A
	ねじり変形拘束機構	□-350×9	BCR295

表2 鋼管コイルばねの寸法

試験体	ばね鋼管	拘束鋼管	hs (mm)	Ds (mm)	ts (mm)	Ds/ts	Di (mm)	s (mm)	rp	Pu (kN)
O-185	○-185×15	○-152.4×8	182	185	15	12.3	152.4	1.3	140	546
O-244.5	○-244.5×15	○-210×8	241	244.5	15	16.3	210	2.25	107	723

表2中の $P_u$ は装置の設計用最大荷重を表す。ばね式免震制動装置の最大荷重は、装置に作用する最大荷重の規定値を表す。加力実験の結果から、装置の最大荷重は、鋼管コイルばね線材に作用する平均せん断応力度 $\tau_s$ が $200\text{N/mm}^2$ に達した点であることが分かっている<sup>4)</sup>。装置に作用する荷重は、すべて鋼管コイルばねの線材を伝達するため、 $\tau_{max}=200\text{N/mm}^2$ に線材面積 $h_s \times t_s$ を乗じた値が装置の最大荷重 $P_u$ である。

### 3.2. 加力・計測方法

加力装置の概要を図6に示す。加力は両端部ピン支持とし、2000kN長尺アクチュエーターを用いて、ばね式免震制動装置に引張力を作用させて実施した。

荷重は、弾性確認（弾性域）では変位制御、剛性増加後（制動域）は荷重制御で実施した。加力サイクルをそれぞれ表3に示す。

計測は、2000kN長尺アクチュエーターのロード

セルと外部変位計の値から荷重-変位関係を得るものとする。

## 4. 実験結果

### 4.1. 引張荷重-変位関係

実験により得られた引張荷重-変位関係をそれぞれ図7に示す。

図7より、○-185試験体と○-244.5試験体ともに、図2に示した履歴性状に十分適合した荷重-変位関係となった。弾性域から制動域に変化する領域で、鋼管コイルばね線材の降伏と思われる

表3 加力サイクル

サイクルNo.	回数	備考
1	2	弾性確認 ( $1/3 \Delta_y$ )
2	3	弾性確認 ( $2/3 \Delta_y$ )
3	3	弾性確認 ( $\Delta_y$ )
4	3	ねじり変形拘束性能確認 ( $1/3 P_u$ )
5	2	ねじり変形拘束性能確認 ( $2/3 P_u$ )
6	2	規格最大値の確認 ( $P_u$ )
7	1	破壊荷重確認

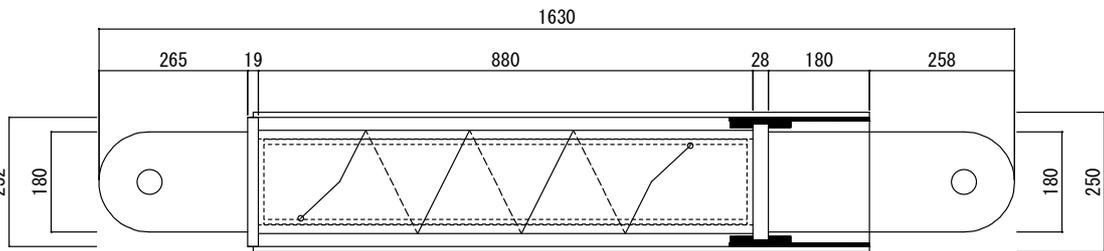


図4 ○-185試験体

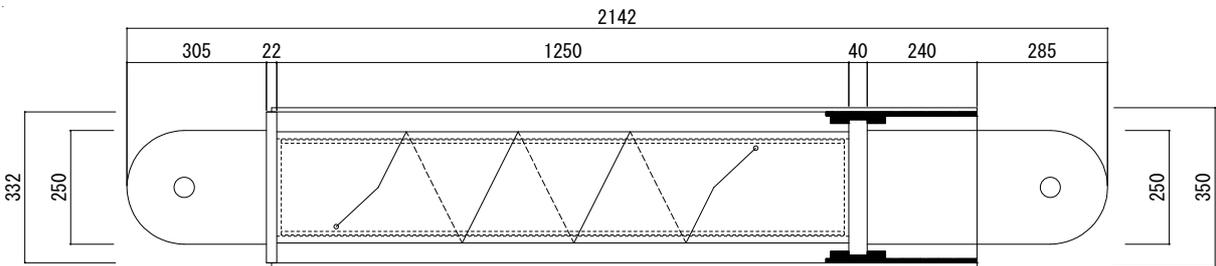


図5 ○-244.5試験体

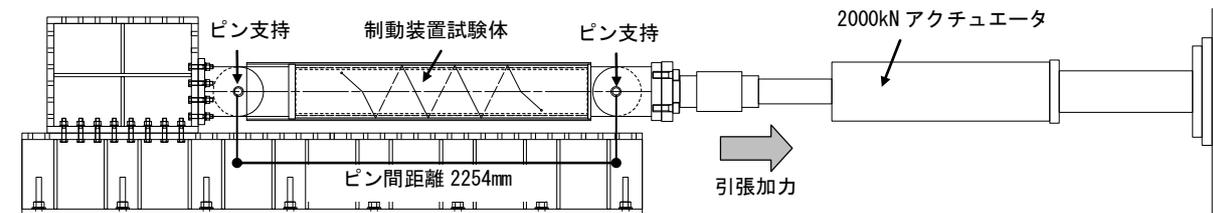


図6 加力装置図

る、剛性低下が見られた。その後想定通りに荷重上昇し制動域に達した。制動域では  $1/3P_u$  および  $2/3P_u$  サイクルで、除荷後に変位の戻りが見られ、ねじり変形拘束機構が正常に機能していることが確認された。その後  $P_u$  のサイクルでは変位の戻りがほとんど見られなくなった。

○-185 試験体は、実験中に、弾性域では想定通りの挙動を示したが、制動域に入った No.4 サイクルから異音が発生し始めた。その後、最終サイクルで終局域に入る直前で試験体から大きな異音が生じ、加力が続行できなくなったため、実験を中止した。

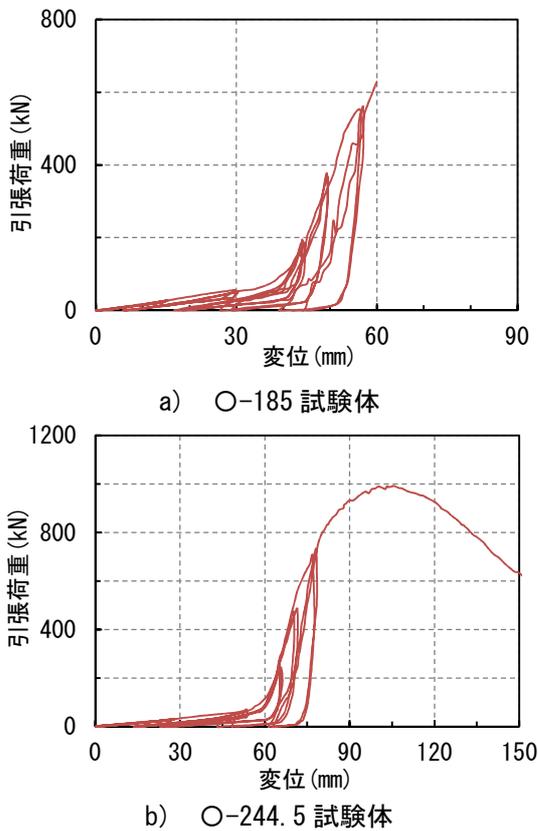


図7 引張荷重-変位関係

#### 4.2. エネルギー吸収性能について

ばね式免震制動装置はねじり拘束機構が機能していれば、繰り返し加力時でもエネルギー吸収し、制動効果を発揮する。形状が異なる2種の試験体のエネルギー吸収性能を評価するために、制動域における各サイクルのエネルギー吸収量および装置入力エネルギーと吸収エネルギーの比

率(エネルギー吸収性能)の比較を行う。エネルギー吸収性能算出の概念を図8に、算出式を式(2)に示す。

$$\text{エネルギー吸収性能} = \frac{\text{面積 ABCDE}}{\text{面積 ABCF}} \times 100\% \quad (2)$$

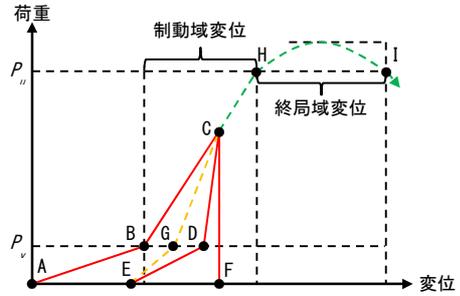


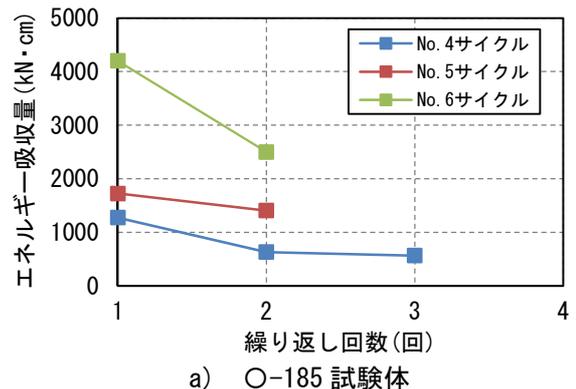
図8 エネルギー吸収性能の概念図

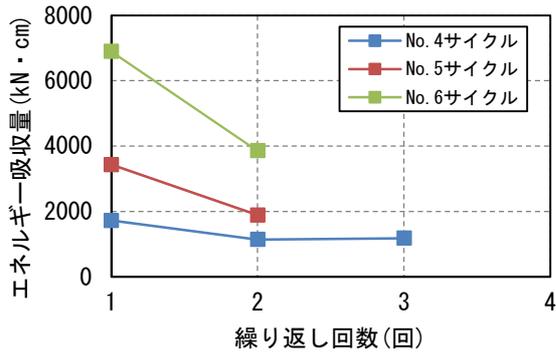
各試験体の制動域における各サイクルのエネルギー吸収量の変化をそれぞれ図9に示す。

図9より、各試験体のエネルギー吸収量は1サイクル目と比較して2サイクル目では減少していることが分かる。また、2回目と3回目のエネルギー吸収量にあまり差がなかったことから、安定した挙動を示すことが分かる。各試験体の1から2サイクル目にかけてのエネルギー吸収量の低下は、図2で示す履歴モデル設定時から想定されていたため、予想通りの実験結果といえる。

各試験体の制動域における各サイクルの装置入力エネルギーと吸収エネルギーの比率の変化をそれぞれ図10に示す。

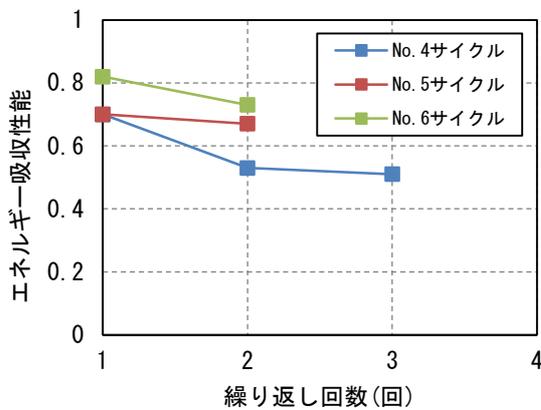
図10より、各試験体のエネルギー吸収性能は1サイクル目と比較して2サイクル目では減少しているが、比較的安定した挙動を示した。



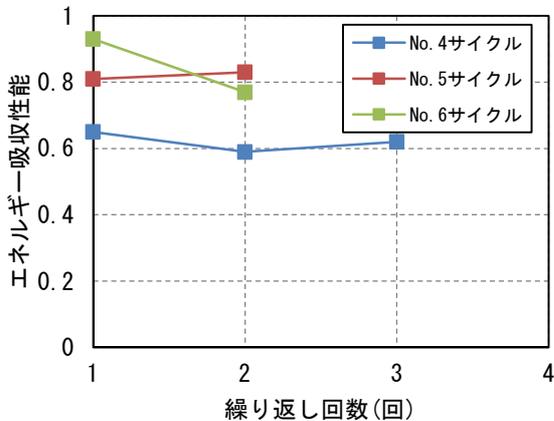


b) O-244.5 試験体

図9 エネルギー吸収量—繰返し回数関係



a) O-185 試験体



b) O-244.5 試験体

図10 エネルギー吸収性能—繰返し回数関係

## 5. 履歴モデルの構築

### 5.1. 履歴モデルの設定方法

ばね式免震制動装置の弾性域での剛性 $K_1$ は、線材断面が矩形のコイルばねの剛性を基準として設定する。そこで、機械工学便覧<sup>9)</sup>から、線材断面が矩形のコイルばねの弾性剛性式を引用し、実験結果<sup>5)</sup>をもとに $K_0$ を1.3倍した値を用いること

とした。弾性域での剛性 $K_1$ を求める式を式(3)に示す。

$$K_1 = 1.3K_0 = 1.3 \times \frac{G \cdot t_s^3 \cdot h_s^3}{2.79n \cdot D_s^3 (t_s^2 + h_s^2)} \quad (3)$$

$K_1$ ：ばね式免震制動装置の弾性域の剛性、 $K_0$ ：理論式より求められる鋼管コイルばねの剛性、 $G$ ：鋼管材料のせん断剛性係数、 $n$ ：鋼管コイルばねの有効巻き数

ばね式免震制動装置単体の制動域における剛性は、実験結果は、実験により得られた荷重—変位関係を無次元化し、サイズが異なる試験体を同列に評価した上で定式化する。比較に用いた試験体(6体)の荷重—変位関係の包絡線を図11に示す。当然のことながら、免震制動装置の挙動は鋼管コイルばねの径により大きく異なることが分かる。

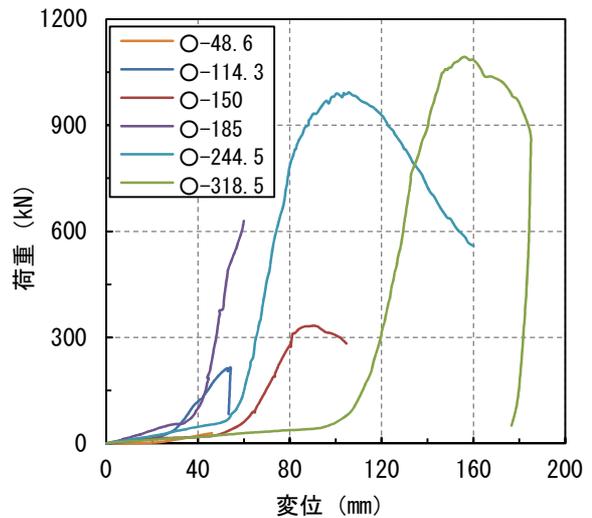


図11 6試験体の荷重—変位関係

無次元化は、荷重を装置の最大荷重 $P_u$ で、変位を有効線材長 $n \times \pi \times D_s$ で除すことを行った。また、弾性域の変位量および降伏荷重も鋼管コイルばねのサイズの影響を受けるため、制動域の評価を行うためには、弾性域の影響を取り除く必要がある。そこで、図11の荷重—変位関係をオフセットし、制動域以降の挙動を比較できるようにした。オフセットは、基準化荷重が0.2となる点と

基準化変位 0 となるように行う。これは、すべての試験体で基準化荷重が 0.2 となるまでに荷重上昇が開始され、制動域に到達するためである。以上の手順によって得られた基準化荷重－基準化変位関係を図 12 に示す。

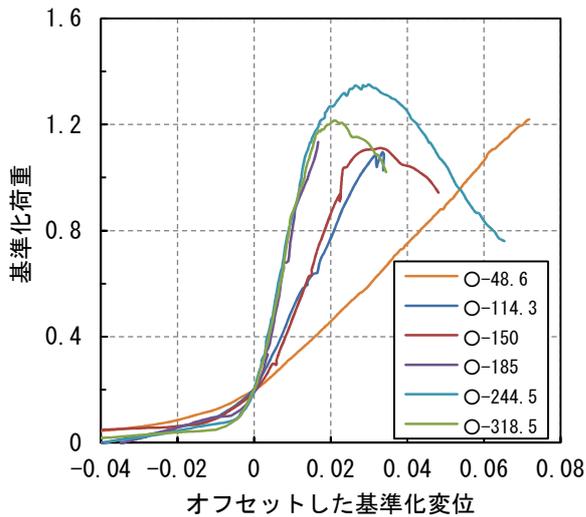


図 12 基準化荷重－基準化変位関係

制動域における剛性の評価は、図 12 に示す基準化荷重－基準化変位関係上の、基準化荷重 0.2 と 1.0 の間の割線剛性とする。ここで得られた割線剛性を無次元化制動域剛性  $K_{d2}$  として定義する。得られた無次元化制動域剛性  $K_{d2}$  は、比較検討の結果、鋼管コイルばねの径  $D_s$  と相関性があることが確認された。無次元化制動域剛性  $K_{d2}$ －鋼管コイルばね径  $D_s$  関係を図 13 に示す。

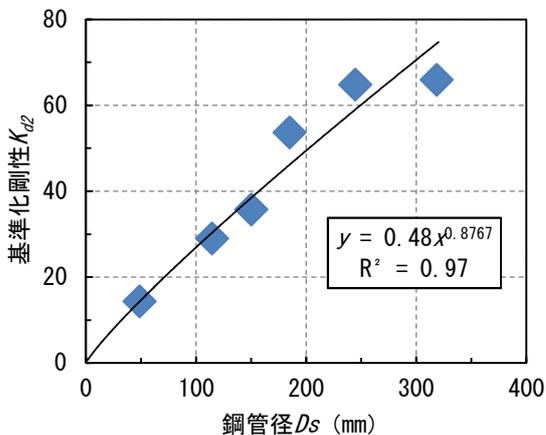


図 13 式(4)に対応する近似曲線

無次元化制動域剛性  $K_{d2}$  は、図 13 示すように、鋼管コイルばね径  $D_s$  の増加に伴い値が上昇していることが分かる。指数近似の回帰式を求めると、 $R^2=0.97$  となり、 $K_{d2}$  と  $D_s$  は極めて強い相関性があることが分かる。なお、回帰式にもより求められる無次元化制動域剛性  $K_{d2}$  は式 (4) 内で係数 (便宜的に単位なし) として扱う。また、図 13 で示すように回帰式を求める際の鋼管コイルばね径  $D_s$  の単位により式が変わる。そのため、用いる長さ単位により式を区別する。

無次元化制動域剛性  $K_{d2}$  から、実際の制動装置における剛性  $K_2$  を求めると式 (4) のようになる。

履歴モデルの設定方法から求められる初期剛性と制動域剛性と実験値のそれぞれの剛性との比較を表 4 に示す。表 4 より、初期剛性は実験値の方が設計値より O-185 試験体は 3割、O-244.5 試験体は 6割と大きくなることが分かる。第二剛性は各試験体とも実験値の方が設計値より 1割程度大きくなることが分かる。このことから、各試験体で実験値と設計値が良い対応を示し、剛性も、実験値の方が大きいことから、設定した履歴モデルは安全側かつ良好な精度であることが確認できた。

$$K_2(\text{kN/mm}) = \frac{P_u}{n \cdot \pi \cdot D_s} \cdot K_{d2} \tag{4}$$

$$= \frac{P_u}{n \cdot \pi \cdot D_s} \cdot (0.48 D_s^{0.8767})$$

$K_2$  : ばね式免震制動装置の制動域における剛性、 $P_u$  : 装置の最大荷重、 $K_{d2}$  : 無次元化した制動域の剛性

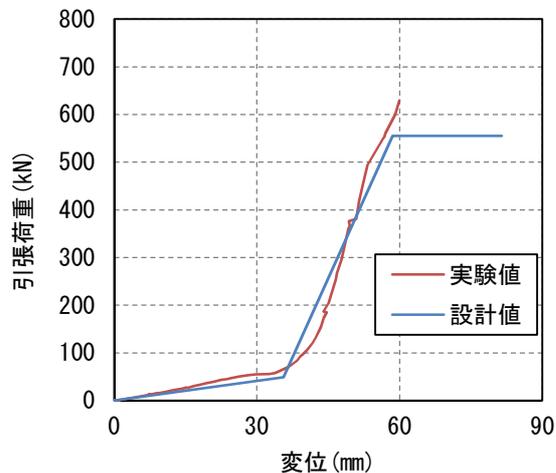
表 4 基準化荷重－基準化変位関係

試験体	弾性域の剛性		制動域の剛性			
	実験値	設計値	実験値/設計値	実験値	設計値	実験値/設計値
O-185	1.76	1.37	1.28	24.08	22.08	1.09
O-244.5	1.23	0.78	1.59	28.99	27.86	1.04

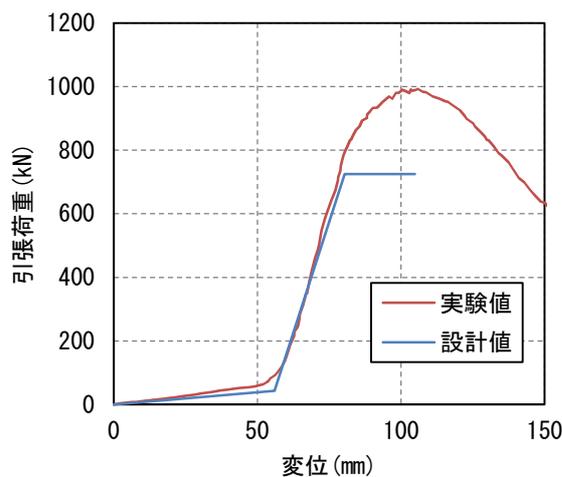
## 5.2. 包絡曲線と履歴モデルの比較

実験で得られた引張荷重-変位関係から包絡曲線を作成し、後述する (5.2節) ばね式免震制動

装置の履歴モデルとの比較を行った。包絡曲線と5.2節で後述する履歴モデルの関係をそれぞれ図14に示す。図14より、包絡曲線と履歴モデルは概ね一致していることが確認できた。



a) O-185 試験体



b) O-244.5 試験体

図 14 引張荷重-変位関係

## 6. まとめ

本論文で得られた知見を下記に示す。

- (1) ばね式免震制動装置の引張荷重-変位関係から、各試験体ともに、弾性域から制動域に変化する領域で、鋼管コイルばね線材の降伏と思われる、剛性低下が見られた。その後想定通りに荷重上昇し制動域に達した。制動域では $1/3P_0$ および $2/3P_0$ サイクルで、除荷後の変位回復が見られ、カバー型ねじり変形拘束機構が正常に機能していることが確認された。

その後 $P_0$ のサイクルでは変位の回復がほとんど見られなくなった。

- (2) ばね式免震制動装置のエネルギー吸収量を確認するため、各サイクルのエネルギー吸収量の比較を行った。各試験体のエネルギー吸収量は1サイクル目と比較して2サイクル目では減少していることが分かった。また、2回目以降はエネルギー吸収量が一定値に収束し、安定した挙動を示すことも分かった。各試験体の1から2サイクル目にかけてのエネルギー吸収量の低下は、履歴モデル設定時から想定されていたため、予想通りの実験結果と言える。
- (3) ばね式免震制動装置のエネルギー吸収性能を評価するために、制動域における各サイクルの装置入力エネルギーと吸収エネルギーの比率(エネルギー吸収性能)の比較を行った。各試験体のエネルギー吸収性能は1サイクル目と比較して2サイクル目では減少しているが、比較的安定した挙動を示した。
- (4) 実験で得られた引張荷重-変位関係から包絡曲線を作成し、ばね式免震制動装置の履歴モデルとの比較を行った。比較の結果、包絡曲線と履歴モデルは概ね一致していることが確認できた。また、各剛性も良い対応性を示したことから、設定した履歴モデルは安全側かつ良好な精度であることが確認できた。

## 参考文献

- 1) 山下勇紀, 西村奈緒, 岸田明子, 多賀謙藏: 擁壁との衝突を考慮した免震建物の応答低減手法に関する研究 オイルダンパー特性による比較 その1, 2, 日本建築学会大会(九州)学術講演会梗概集, pp.543-546, 2016.8
- 2) 三輪田吾郎, 佐野剛志, 花村浩嗣, 中塚光一, 大住和正, 安井雅明: 緩衝装置を含めた免震建物衝突設計手法の検討 その5, 日本建築学会大会(九州)学術講演会梗概集, pp.551-552,

2016.8

- 3)新井佑一郎, 土田堯章, 柳田佳伸, 石鍋雄一郎:  
鋼管コイルばねを用いた免震緩衝装置の開発,  
日本建築学会大会(関東)学術講演会梗概集,  
pp.492-493, 2015.8
- 4)新井佑一郎, 柳田佳伸, 石鍋雄一郎: 鋼管コイ  
ルばねを用いた免震緩衝装置の開発(その 2),  
日本建築学会大会(九州)学術講演会梗概集,  
pp.555-556, 2016.8
- 5)新井佑一郎, 柳田佳伸, 石鍋雄一郎: 鋼管コイ  
ルばねを用いた免震制動装置の開発 その 1,2,  
日本建築学会大会(中国)学術講演会梗概集,  
pp.1003-1006, 2017.8
- 6) 機械工学便覧 改定第6版, 日本機械学会,  
1997