

3. 鋼管コイルばねを用いた大型免震緩衝装置の加力実験

Experiment of Large Scale Buffer Device for Seismic Isolation Using Steel-tube Coil Spring

新井佑一郎* 柳田佳伸* 石鍋雄一郎**

—概要—

免震緩衝装置は、免震建物が設計想定を超える地震動を受けた際に、擁壁に衝突する事象を防止するための装置である。本報装置の特徴は、独自の部材である「鋼管コイルばね」を用いることで、ゴムなどの特殊装置を用いずに、鋼材のみで装置が構成されていることである。装置が鋼材のみで構成されるため、安価であり、さらに品質管理が容易という利点がある。装置の基本的な性能は、既報の小型試験体を用いた実験により確認済みである。しかし、実建物への適用を行うためには、装置容量が 1000kN 程度の大容量装置もラインナップする必要がある。本報では、装置の実用化のために必要な大容量化を実現するために、鋼管コイルばねを大口径化した試験体を製作し、加力実験を行った。

—技術的な特長—

本報の免震緩衝装置は、独自部品である「鋼管コイルばね」を用いている。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、ばねとして挙動させるものである。本報実験では、鋼管コイルばねに STK400 ○-318.5×14.3 を用い、切込みのピッチを径と同等の 318mm とすることで、装置容量が 900kN の大型装置を製作した。また、鋼管コイルばねを用いて緩衝機能を発揮させるためには、ばねに引張加力が生じる際のねじり変形を拘束する機構が必要である。本装置は、ねじり変形拘束機構は、繰り返し加力時の性能を高めるための改良を行っている。改良は、摺動面に硬度と強度が高い熱処理鋼材を取り付け、高荷重時の摺動面食い込みを防止するものである。大型緩衝装置試験体の概略図を図 1 に示す。実験により得られた履歴形状（荷重 - 変形関係）を図 2 に示す。また、荷重上昇時の無次元化剛性と鋼管径の関係を図 3 に示す。得られた実験結果より、鋼管径が履歴形状に与える影響が明らかになり、設計用の履歴モデルの作成が可能となった。

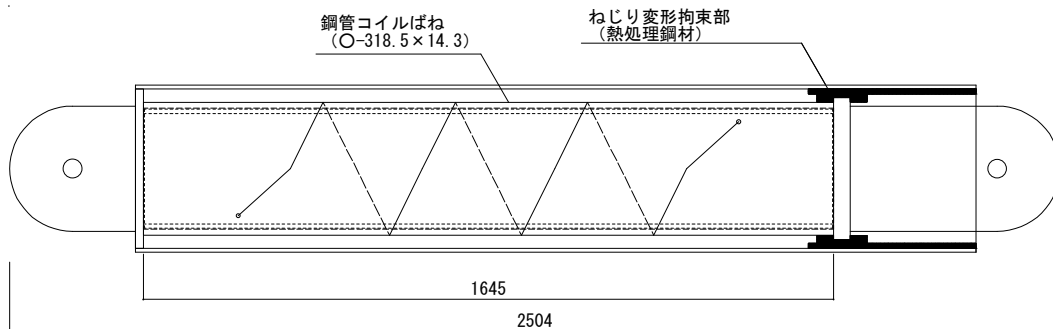


図 1 大型免震緩衝装置試験体

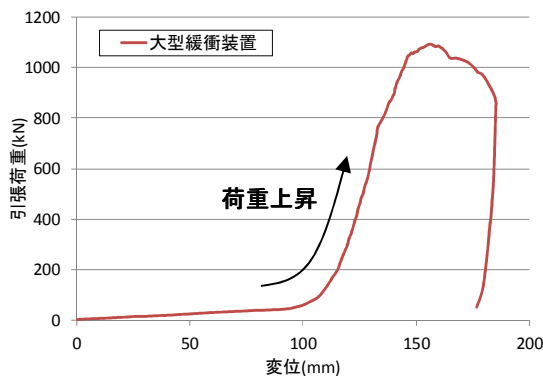


図 2 荷重 - 変形関係

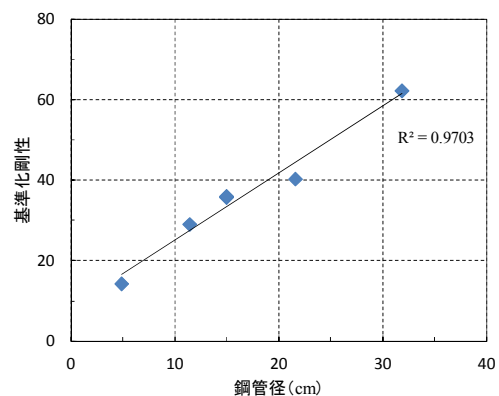


図 3 無次元化剛性 - 鋼管径関係

*技術研究所 構造研究部 建築構造研究室 **日本大学

鋼管コイルばねを用いた大型免震緩衝装置の加力実験 Experiment of large scale buffer device for seismic isolation using Steel-tube coil spring

○新井 佑一郎* 柳田 佳伸* 石鍋 雄一郎**
Yuichoro ARAI Yoshinobu YANAGITA Yuichiro ISHINABE

ABSTRACT The buffer device for seismic isolation preventing an event of collision with the retaining wall when the seismic isolation building receives earthquake motion exceeding design assumption. This device is composed only of steel material, it is inexpensive and has the advantage that quality control is easy. The basic performance of the device has been confirmed by loading test using a small device. In this report, in order to realize the capacity increase necessary for application the equipment to the building, a test specimen with a large diameter of the steel pipe coil spring was manufactured and a loading experiment was conducted.

Keywords : 免震建物, 長周期地震動, フェイルセーフ, 制動装置, 復元力特性
Base isolation building, Long-period grand motion, Failsafe, Buffering device, Restoring force characteristics

1. はじめに

将来発生が予想される南海トラフ地震のような現行の建築基準法の想定を大きく超える地震では、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。近年、免震層の過大変形に対応するため、擁壁衝突時の衝撃を吸収する緩衝材や、衝突を回避するための制動部材の開発が進められ、実建物への適用も始まっている¹⁾など。

本開発では、鋼材のみで構成された緩衝装置を用い、免震建物が擁壁に衝突することを防止する技術の確立を目指している。装置は、鋼管にらせん状の切込みを入れ、ばねとして挙動するようにした独自部品、鋼管コイルばねを用いている。これにより、一般にゴムや樹脂といった特殊な材料を用いる緩衝部材が安価で品質が安定した鋼材のみで製作することが可能となる。

既報^{2,3)}では、鋼管コイルばねを用いた免震緩衝装置の基本的性能を確認するため、縮小試験体による加力実験の結果を報告した。その結果、緩やかな荷重上昇と、高いエネルギー吸収能力を有する装置であることが確認された。また、繰り返し载荷においても安定した履歴を描くことから、複数回の装置動作にも対応できる可能性が示さ

れた。

今後、本装置を実用化し実際の免震建物に適用するためには、以下の課題を解決する必要がある。

- ①.装置の履歴モデルを設定するための手法（設計式など）を確立すること。
- ②.大規模建物に対応するため大容量の装置を実現すること。
- ③.装置の繰り返し加力性能を高めるため、ねじり変形拘束機構を改良する。

ここで①の履歴モデルについては、既報の縮小試験体の実験結果をもとに、大まかな傾向を文献⁴⁾で示した。ただし、装置の履歴特性を設定するためのデータが不足しているため、装置サイズを拡大した実験データの蓄積が必要である。②については、実施適用を行う上で最大 1000kN 程度の装置が必要となるが、既報の実験は縮小試験体のため、現段階で検証データはない。

③は、鋼管コイルばねが引張加力を受ける際に生じるねじれ変形を拘束する機構の改良である。ねじれ変形の拘束は緩衝機能を発揮する上で必須であるが、これまでの実験では固着が発生し、繰り返し载荷時の性能が十分発揮されなかった。実験時にねじり変形拘束機構が機能しなくなり、

*技術研究所 構造研究部 建築構造研究室 **日本大学

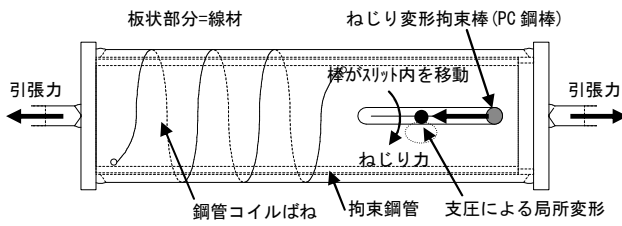


図1 局所変形が生じた部分



写真1 変形状況

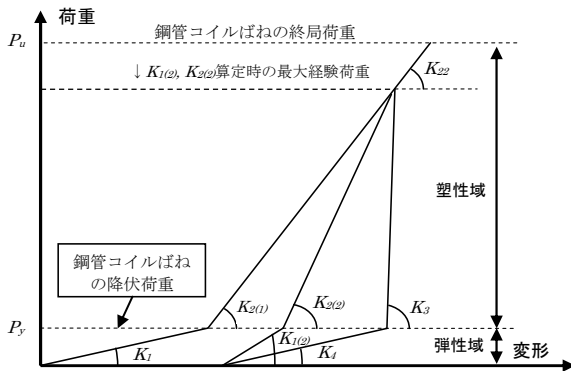


図2 免震緩衝装置の履歴モデル模式図

$$\tau_s = \frac{P}{h \cdot t} \quad \dots(3)$$

- G:せん断弾性係数
- n:線材巻き数
- σ_y :鋼管降伏点
- h:ばね線材高さ(=ピッチ)
- D:鋼管径
- t:鋼管厚さ
- τ_s :線材に作用する応力

弾性剛性 K_1 は、鋼管径 D が及ぼす影響が大きく、径の増加とともに剛性が低下する。降伏荷重 P_y はばね線材高さ h の影響が大きく、 h を大きくすると P_y も増加する。

また、最大荷重 P_u 以下のサイクルで除荷すると、荷重 P_y 付近で除荷剛性が低下し、変位が小さくなる現象が見られる。つまり、最大荷重 P_u を超えなければ、繰り返し加力時でも安定したエネルギー吸収を行うことができると考えられる。既往の検証実験では、ねじり変形拘束機構が十分に機能しなかったため、 P_u の 0.5 倍程度で写真1に示すような固着が発生していた。

固着した状況を図1、写真1に示す。

本論では、上記の①, ②, ③の課題を解決するために、鋼管コイルばねに径が大きな鋼管(○-318.5×14.3)を用い、ねじり変形拘束機構の改良として熱処理部品を取り付けた装置を製作し加力実験を行った。

2. 実験概要

2.1 免震緩衝装置の概要

免震緩衝装置の履歴モデルは、鋼管コイルばねが弾性変形する初期の低剛性領域と、ある程度変形が進んだ後に剛性が増加し塑性化しエネルギー吸収を行う領域に分けられる。装置の履歴モデルの模式図を図2に示す。ここで、鋼管コイルばねの弾性域は理論式が整備されており、弾性剛性 K_1 と降伏荷重 P_y は式(1), (2)で予測することができる⁵⁾。最大荷重 P_u は式(3)で示す、線材に作用する応力度 τ_s を用いて評価する。

$$K_1 = \frac{G \cdot t^3 \cdot h^3}{2.79n \cdot D^3 (t^2 + h^2)} \quad \dots(1)$$

$$P_y = \frac{t^2 \cdot h^2}{0.8\sqrt{3}D(2t+h)} \cdot \sigma_y \quad \dots(2)$$

2.2 試験体概要

試験体の形状を図3、構成および寸法を表1,2に示す。試験体は、既往の実験で良好なねじり変形拘束性能を発揮した、角形鋼管内でエンドプレートを摺動させる方式(以下、カバー型)を改良した形状とした。改良に際し、摺動部に熱処理部品を取り付けた。これにより、加力時の固着が防止でき、繰り返し加力時の性能を高めることができる。鋼管コイルばねの断面および、切断ピッチから、線材の断面積は 45cm^2 となる。既往の実験から、装置の終局荷重(ばね破断により決定)は、線材に作用する応力度が 20kN/cm^2 程度であることが分かっている。よって、本実験で用いる装置の容量は 900kN となる。

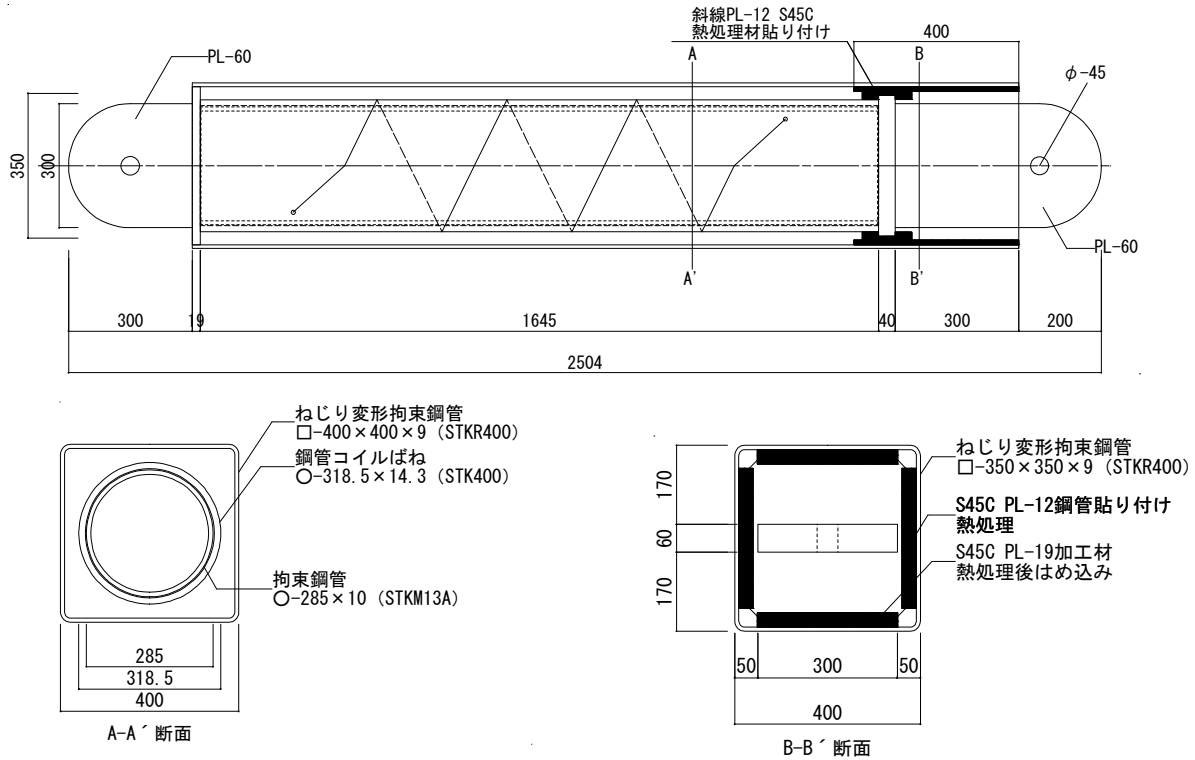


図3 試験体装置形状

表1 試験体装置断面構成

部材名	材質	断面
鋼管コイルばね	STK400	○-318.5×14.3
拘束鋼管	STKM13A	○-285×10
ねじり変形拘束材	STKR400	□-400×400×9

表2 試験体装置寸法

切断ピッチ	318mm	線材断面積	45cm ²
有効巻き数	2	隙間	2.45mm
有効線材長	200cm	ピッチ隙間比	129.8

また、鋼管コイルばねと内部に拘束する拘束鋼管の隙間を無次元化した値で（ピッチ隙間比）は129.8である。既往の実験より、ピッチ隙間比が100以上になると、鋼管コイルばねは降伏とほぼ同時に荷重上昇し、エネルギー吸収を開始することが分かっているため、この値を採用した。

2.3 加力方法

本論の免震緩衝装置は引張荷重にのみ抵抗するものである。加力は2000kN長尺アクチュエーターを用いて、装置に引張力を作用させて行う。

加力装置の概要を図4に示す。試験体は、両端ピン支持になるよう治具を取り付けている。加力サイクルは、これまでの実験を参考に、弾性範囲で変位制御、剛性増加後は荷重制御で行う。加力サイクルを表3に示す。加力は、サイクルNo.1～3、が弾性剛性の確認で、変位制御を行う。サイクルNo.3では装置が荷重上昇し始めた点で加力を止めて除荷を行うため、目標となる荷重および変位は設定しない。サイクルNo.4～6は荷重が上昇しエネルギー吸収を行う領域の確認である。最大荷重 P_u の1/3である300kNピッチで荷重制御を行い、No.5（600kN）までは2回の繰り返しを行う。No.6, 7では装置の最大荷重および破壊状況の確認を行う。

3. 実験結果

3.1 荷重 - 変形関係

実験により得られた荷重 - 変形関係を図5に示す。図は縦軸が装置に作用させた引張荷重を、横軸が変位を表している。また、青線は既往の実験より予測した本試験体の荷重 - 変形関係（包絡線）である。

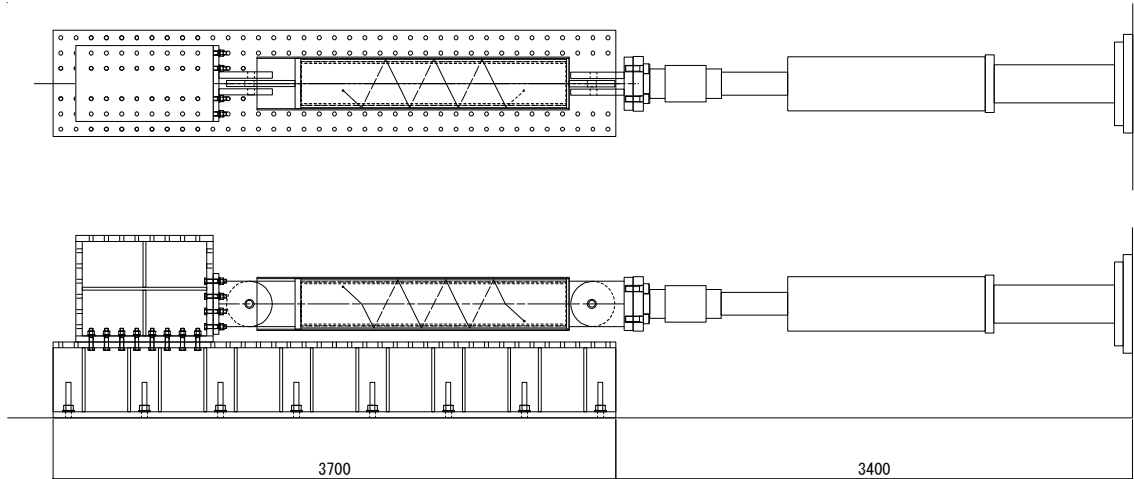


図4 加力装置図

表3 加力サイクル

No.	目標値	回数	備考
1	3cm	2	加力装置動作確認
2	5cm	3	弾性確認 (変位制御)
3	荷重上昇開始	3	弾性確認 (変位制御)
4	300kN	2	ねじり変形拘束性能確認
5	600kN	2	ねじり変形拘束性能確認
6	900kN	2	規格最大値の確認
7	最大荷重	1	破壊荷重確認

結果から、弾性剛性は理論値とよく対応した。また、荷重上昇を開始する点は、予測値で100mmに対し、実験では95~100mmとなり、こちらもおおむね良い対応を示した。このことから、荷重上昇の開始点を決定するピッチ隙間比の設定(100以上)は妥当であるといえる。

また、繰り返し性能はNo.4サイクルの1回目まで、ねじり変形拘束機構の固着は発生しなかった。その後No.4サイクルの2回目の除荷時に、若干残留変形が大きくなり、No.5サイクルで固着が発生した。以上より、試験体は P_u の2/3で2回程度の繰り返し性能を有することが確認された。これは、既往の実験結果を上回る性能であり、熱処理部品を用いたねじり変形拘束機構の改良は有効だったと判断できる。

これに対し、既往の実験の荷重 - 変形関係を相似倍して予測した荷重上昇後の挙動と本実験の結果は乖離が大きかった。特に、本実験の結果は、

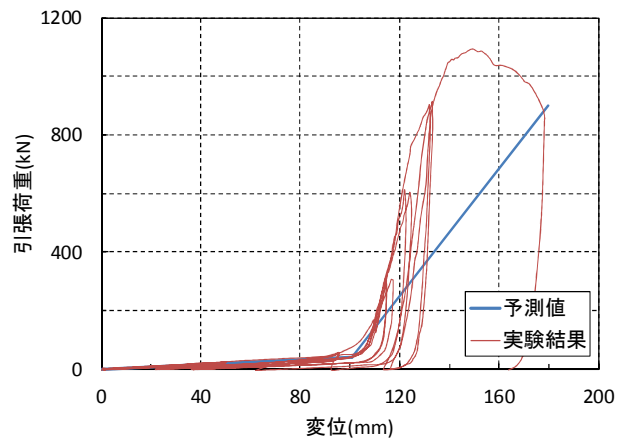


図5 荷重 - 変位関係

予測よりも荷重上昇後の剛性が大きく、緩衝効果を発揮する変形が小さいといえる。そのため、実用化を行うためには、荷重上昇後の変形量がより増加するように改良を行う必要があると言える。

3.2 荷重上昇後の剛性評価

3.1節で示す荷重 - 変位関係から、荷重上昇後の剛性の評価手法に課題があることが分かった。そこで、鋼管コイルばねの径に注目し荷重上昇時の剛性評価式の作成を行うことにした。

評価式の作成は、装置の荷重を最大荷重 P_u で、変位を有効線材長($n \cdot \pi \cdot D$)で基準化した荷重 - 変位関係を作成して行う。基準化した荷重 - 変位関係を図6に示す。図中にはこれまでに行った径が異なる装置も示している。

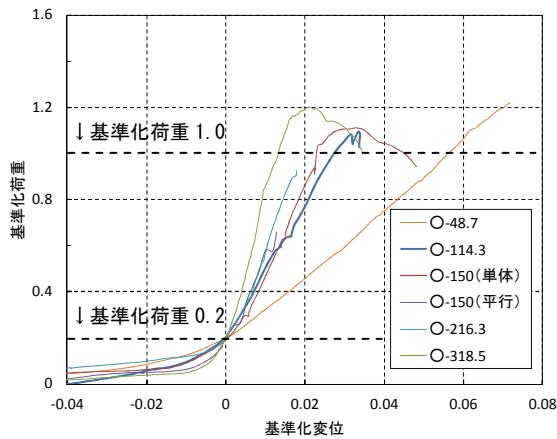


図6 標準化荷重 - 標準化変位関係

装置の弾性変形量は鋼管径により異なるため、標準化荷重 0.2 における標準化変位が 0 となるように、各装置の標準化荷重 - 標準化変位関係をオフセットしている。なお、標準化荷重が 0.2 に達すると、その後の荷重上昇は標準化荷重 1.0 程度まで安定的に推移する傾向が見られた。

標準化荷重 - 標準化変位を用い、荷重上昇時の剛性を標準化剛性として評価する。評価手法には図 6 の各装置における標準化荷重 - 標準化変位関係の、標準化荷重 0.2 と 1.0 に対応する点の割線剛性を用いる。なお、比較に用いた装置の中には、標準化荷重の最大値が 1.0 に達していないものもある。このような装置については、標準化荷重 0.2 に対応する点と最大点の割線剛性とした。

標準化剛性と鋼管径の関係を図 7 に示す。評価結果から、鋼管径が大きくなるにつれ、標準化剛性が線形的に増加することが確認された。線形近似の回帰線を求めた結果、 $R^2=0.9703$ となり、非常に良好な対応性を示したといえる。ただし、鋼管径 216.3mm の装置は、他の装置と比較して、回帰線からの乖離が大きかった。その要因として、鋼管コイルばねの切断ピッチが他の装置で鋼管径の 1.0 倍となるようにしているのに対し、径 216.3mm の装置は 0.75 倍としていることが考えられる。現状では、あくまでも参考結果として比較に加えているが、今後、式の精度を高めるために、径 200mm 前後で切断ピッチが鋼管径の 1.0

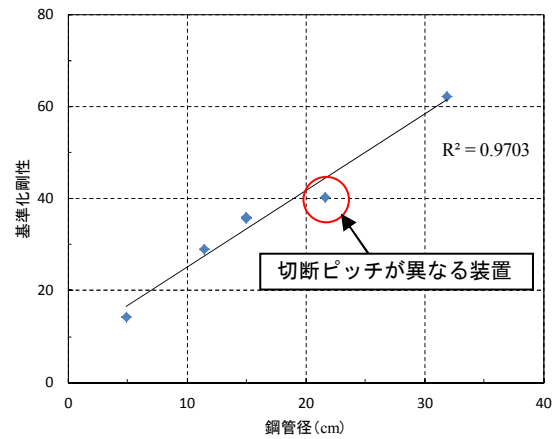


図7 標準化剛性 - 鋼管径関係

倍となるような装置の実験を行う必要がある。

本実験より、任意の形状の免震緩衝装置に対して、履歴モデルを設定する手法を確立することができた。

4. まとめ

本論では、試験体として鋼管コイルばねの径を増加させた免震緩衝装置を製作し、加力実験を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 加力実験の結果、降伏荷重 P_y 以上で緩やかな荷重上昇が発生した。これは既往の実験結果で得られた知見と同等である。
- 2) ねじり変形拘束機構の改良を行った結果、最大荷重 P_u の 2/3 のサイクルまで、2 回の装置動作が可能であることが分かった。
- 3) 得られた装置の荷重 - 変位関係を無次元化し、既往の実験結果と比較した結果、荷重上昇時の剛性は鋼管径に依存することが分かった。

【参考文献】

- 1) 三輪田, 佐野, 花村, 中塚, 大住, 安井: 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
- 2) 新井, 土田, 柳田, 石鍋: 鋼管コイルばねを用いた免震緩衝装置の開発 (その 1), 日本建築学会大会(関東)学術講演会梗概集,

pp.492-493, 2015.8

3) 新井, 柳田, 石鍋: 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

4) 新井, 柳田, 石鍋: 鋼管コイルばねを用いた免震制動装置の開発(その 1, その 2), 日本建築学会大会(中国)学術講演会梗概集, pp.1003-1006, 2017.8

5) 機械工学便覧 改定第 6 版, 日本機械学会, 1977