

4. 免震緩衝装置の技術提案と検証実験結果

Technical Proposal and Verification Experiment of Buffer Device for Seismic Isolation

新井佑一郎* 石鍋雄一郎**

—概要—

安全・安心な建物として免震構造を採用するケースが近年増加している。免震建物は、免震層が地震エネルギーを吸収するため、建物内の揺れを大幅に低減することができるため安全性が高いとされている。その反面、長周期長時間地震のような設計想定を超える地震動を受けた場合は、免震層が過大変形し、擁壁に衝突するなど被害が予想される。免震建物の過大変形を防止するためには、緩衝機能を持つエネルギー吸収デバイスを用いる方法があるが、安価で効果的なデバイスは実現できていない。そこで、本論では特殊な材料を用いず、鋼材のみで構成された安価かつ免震緩衝装置に必要な機能を兼ね備えたデバイスの提案と検証実験結果について述べる。

—技術的な特長—

緩衝装置に必要な力学的特性は、①緩やかに荷重上昇すること、②履歴面積が大きいこと、③装置の残留変形が小さいことである。

本論では、ゴムや樹脂といった特殊な材料を用いずに、鋼材のみで構成された装置で、①～③の性能を満足することを目指した。そこで提案するのが、当社独自の部品である鋼管コイルばねを用いた機構である。鋼管コイルばねは、円形鋼管にらせん状切込みを入れることでばねとして機能するようにしたデバイスである。この鋼管コイルばねに拘束鋼管を挿入することで、装置が引張荷重を受けるとばね線材が絡まりながら、緩やかに荷重上昇するという機構が実現できる。検証実験のために試作した装置の外観図を図1に示す。

検証実験の結果例として、径100mmの鋼管で製作した試験体の荷重－変形関係を図2に示す。結果より、初期剛性が小さく変形の増大に伴い緩やかに荷重上昇する傾向がみられ、条件①を満たすことができた。また、除荷開始時の除荷剛性が大きく、履歴面積を大きくとることが可能なため、②の条件を満たした。また、120kNのサイクルでは除荷時の低荷重領域で剛性が低下することで、残留変形が抑えられ、③の条件もおおむね満たした。しかし、荷重が大きくなるにつれて、残留変形が大きくなり③の条件を満たさなくなった。この要因として、ばねのねじり拘束機構の性能不足が考えられるため、今後の課題として検討を行う必要がある。

以上より、鋼管コイルばねを用いることで緩衝装置に必要な条件を満たすことが可能であることが確認された。

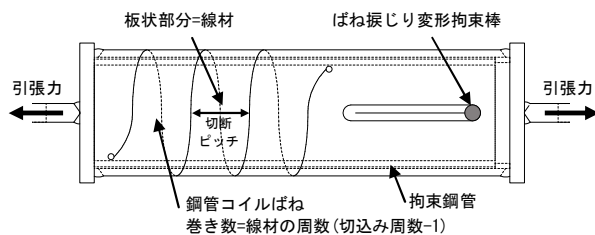


図1 鋼管コイルばねを用いた緩衝装置

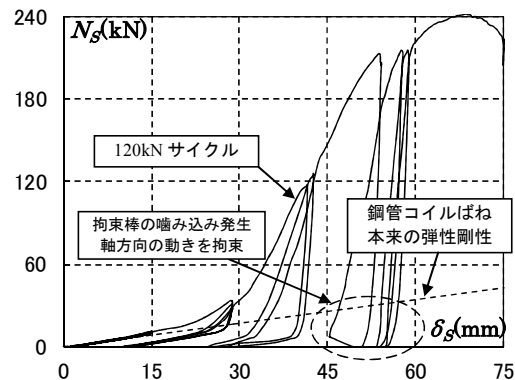


図2 試験体の荷重－変形関係

*技術研究所建築研究室 **日本大学

免震緩衝装置の技術提案と検証実験結果

Technical Proposal and Verification Experiment of Buffer Device
for Seismic Isolation

○新井 佑一郎* 石鍋 雄一郎**

Yuichiro ARAI Yuichiro ISHINABE

ABSTRACT

It is expected by a long period grand motion that excessive deformation occurs in seismic isolation building. It may collide in retaining wall when excessive deformation occurs in seismic isolation building. In today, the method to solve excessive deformation of seismic isolation is developing. This is a step for developing a buffer device to avoid collision. The device uses Steel-tube coil spring and aims at the simple thing with high efficiency.

Keywords: 免震建物, 長周期地震動, フェイルセーフ, 緩衝装置, 鋼管, コイルばね

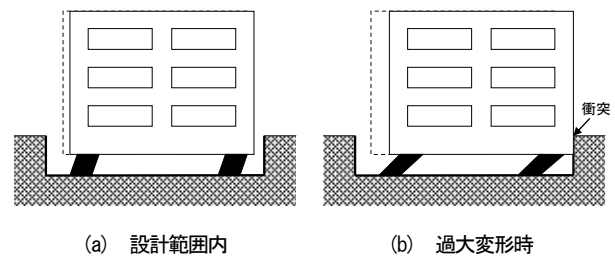
*Seismic isolation building, Long period grand motion, Fail-safe
Buffer device, Steel tube, Coil spring*

1. はじめに

近年地震被害が増加している中、防災・減災に対する意識は官民ともに高まっている。その中でも、建物の揺れを大きく低減できる免震に対するニーズも高まり、2012 年末時点で国内に 3300 棟もの免震建物が建設されるまでになった。免震建物が増加した要因は、地震時に建物の構造被害を防ぐだけではなく、地震後の継続利用という、高い水準の耐震性能が求められるようになったためである。

免震建物は、建物下部に設置された剛性が低く、エネルギー吸収デバイスを配置した層（免震層）が大きく変形することで、建物に入力する地震エネルギーを集中的に吸収する構造である。よって、通常の耐震建物や制震建物とは異なり、上部構造の層間変形や応答加速度が小さく、構造部材や内装材や設備への損傷を抑えることが可能である。通常、免震建物の設計では予想される地震動を決定し、時刻歴応答解析により免震層がどの程度変形するかを算定している。この変形量がクライテリアを超えないように免震部材を配置し、設計は行われている。

近年発生が予想される巨大地震では、長周期地震動による周期の長い構造物への被害が懸念されている。免震建物の固有周期は、一般に 4 秒程度であるため、



(a) 設計範囲内 (b) 過大変形時
図1 地震時の免震装置動作状況の概念図

この影響を受ける可能性が指摘されている。免震建物が設計想定を超える地震動を受けた場合の被害としては、図 1 に示すような免震層の過大変形による擁壁への衝突等が考えられ、大きな被害につながる可能性も高い。

近年、免震建物の過大変形に対する業界の認識は高まっており、過大変形に対応する技術の特許出願件数も増加傾向にある。また、大阪市内直下の上町断層層による直下地震を想定した検証（大震研）では、免震建物の過大変形に対する検討も行われている。その中で、土木分野で用いられる落橋防止装置を応用した「制動設計」が紹介されている¹⁾。

以上のように、免震建物の過大変形や擁壁衝突に対する社会的な認識が高まっているが、その反面、対策

*技術研究所 建築研究室

**日本大学 助教

※本研究は日本大学理工学部建築学科との共同研究の一環で行っている。

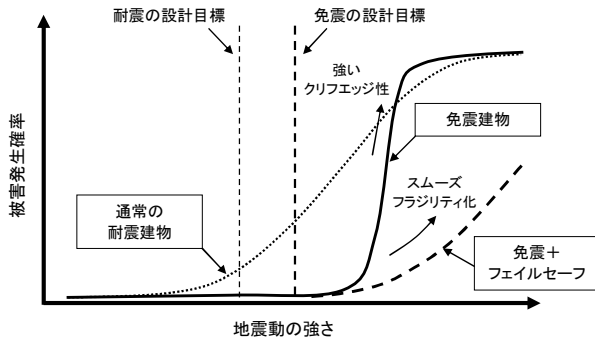


図2 地震被害発生確率—地震強さの概念

に必要な緩衝装置等のデバイス類は、土木の落橋防止装置や船舶用の防舷材を用いるケースが多い。しかし、他分野で用いられているデバイスが、果たして免震建物の過大変形という現象に適しているかという課題に対しては不安が残る。そこで、本研究は免震建物の過大変形に対応した独自のデバイスの提案を行うことを目的としている。本論は、アイデアの紹介と、基本的な検証実験について示したものである。

2. 耐震建物と免震建物のフラジリティ関数

ここで、耐震建物（建築基準法レベルで設計された日免震建物）と免震建物の地震被害発生確率—地震強さ（フラジリティ関数）の概念を図2に示す²⁾。図2に示す概念図では、耐震建物（建築基準法レベル）に対してある程度高い安全性を持たせるという目標で設計した免震建物を想定している。

図は縦軸に被害発生率（主として構造部材の被害率）を、横軸に地震動の強さを表している。同図から、耐震建物は設計想定レベル以下で構造部材の損傷が開始するため、被害発生確率は0となっていない。しかし、免震建物は、設計想定内では基本的に構造部材が弾性範囲内なので、被害発生確率は限りなく0となる。

次に、設計想定を上回る地震が発生した場合、耐震建物は地震動レベルが大きくなるにつれて緩やかに損傷確率が増加していく傾向がある。そのため、一般的な耐震建物は余裕度も大きく、設計想定を超える地震動下でも直ちに構造躯体の終局状態に至らないケースが多い。

これに対し、免震建物は設計想定を上回る地震が発生した場合、急激に確率が増加し、条件によっては耐震建物よりも被害発生確率が高い領域も出てくる。このようなクリフエッジ性が強い免震建物の特性を緩和し、耐震建物のような緩やかな関数化（スムーズフラジリティ化）が可能ならば、免震の課題解決が可能

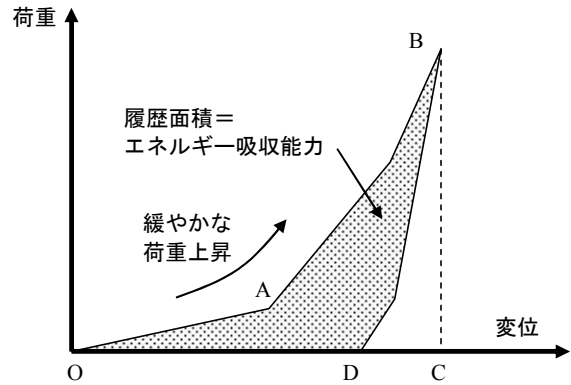


図3 緩衝装置の荷重-変形概念

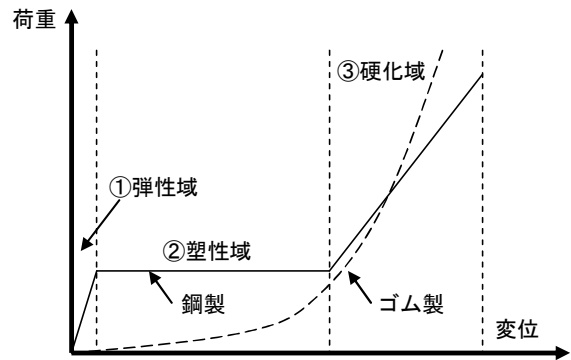


図4 材料による緩衝特性の違い

となる。その手段として、緩衝装置のようなフェイルセーフが重要な役割を担うことになる。

免震建物へのフェイルセーフの必要性は、免震建物が普及し始めた1980年代に指摘され、実際に過大変形や引き抜きに対する対応策が検討し、実建物に適用された例もある³⁾。しかし、その後はダンパーの発達や免震設計手法の確立により、より精度の高い設計が可能になったため、フェイルセーフを取り入れた免震建物は建設されなくなった。

3. 鋼管コイルばねを用いた緩衝装置

3.1 緩衝装置に求められる性能

免震建物の過大変形を抑えるためには、以下に示す2つの機能を持つ緩衝装置が必要である。

- 1) 装置動作時の衝撃荷重を抑えるために、緩やかに荷重上昇をするような機構であること。
- 2) 免震層に入力された過大な運動エネルギーを十分吸収可能な機構であること。

1)、2)の機能を実現する緩衝装置の荷重—変形関係概念図を図3に示す。緩衝装置に入力されるエネルギー W_0 は、OABCで囲まれる面積に相当する。これに対し、緩衝装置が吸収するエネルギー W_s は網掛け

で示す OABD で囲まれる面積となる。既往の研究⁴⁾では W_0 と W_s を用いて、式(1)に示すヒステリシス比 h_r を定義している。また、装置が吸収しきれなかった残留エネルギー W_{re} は式(2)で表される。

$$h_r = W_s / W_0 \times 100 \quad \dots(1)$$

$$W_{re} = W_0 - W_s \quad \dots(2)$$

h_r : ヒステリシス比

W_s : 緩衝装置吸収エネルギー

W_0 : 総入力エネルギー

残留エネルギー W_{re} は、緩衝装置が放出する弾性エネルギーであり、建物を押し返す方向に作用する。そのため、 W_{re} は小さいほうがよい。また、 h_r が大きいほど効率がよい。一般に高減衰ゴムや合成繊維で構成された装置のヒステリシス比 h_r は40~50%程度と言われている⁴⁾。また、D点の変位が小さいほど装置に残留変形が残りにくいことを示す。そのため、複数回の衝突に対応するためには、残留変形が小さいほど良いが、逆にヒステリシス比 h_r は小さくなる。

3.2 材料による緩衝特性の違い

ここで、緩衝装置を構成する材料の違いによる、緩衝特性の差を検討する。土木の落橋防止装置の分野では、ゴム製緩衝材のほかにながら鋼製緩衝材について検討した例がある。ゴム製および鋼製緩衝材の履歴特性の模式図を図4に示す。図は縦軸が荷重、横軸が緩衝材の変形量を表している。ゴム製の緩衝材は荷重を受けると、初期剛性が小さく、徐々に剛性が上昇し硬化していく性質（ハードニング）がみられる。そのため、緩衝装置に必要な緩やかな荷重上昇を実現する上で適した特性を持つといえる。

次に、鋼製緩衝材は鋼材の塑性化を利用して緩衝材に入力したエネルギーを吸収するという性質がある。そのため、鋼材が降伏する必要があるため、荷重を受けると最初は剛性が大きい弾性域となり、降伏後は塑性域に達する。なお、鋼製緩衝材を扱った既往の研究では、形鋼の圧縮変形を利用していたため、塑性化後に強度上昇する領域が見られた。鋼製緩衝材は弾性から塑性という流れを踏むため、初期剛性が大きいという特徴があり、緩やかな荷重上昇という緩衝装置の機能を実現する上で不利な性質も持ち合わせている。

以上より、緩衝装置の性能をすべて満足する材料はなく、目的や条件に応じて適切な材料を選定することが必要である。

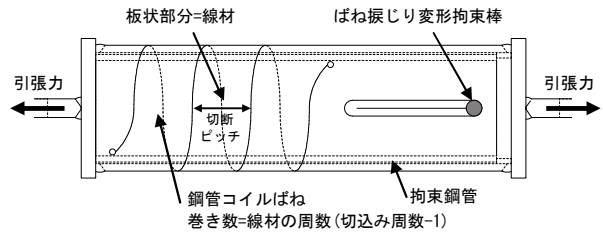


図5 鋼管コイルばねを用いた緩衝装置

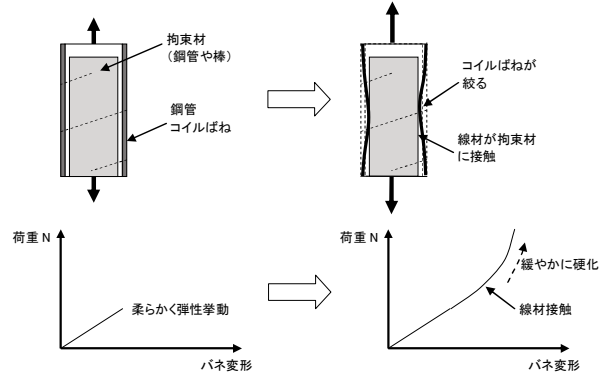


図6 緩衝メカニズムの概念図

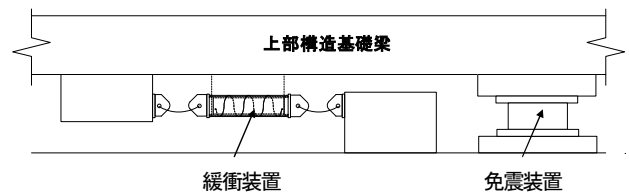


図7 緩衝装置の取り付け方法イメージ

3.3 鋼管コイルばねを用いた緩衝装置の概要

緩衝性能と生産性を両立した緩衝装置として、鋼管コイルばねを用いた機構を提案する。鋼管コイルばねは、鋼管にらせん状の切込みを入れることで、ばねとして機能するようにした部材である。構成材料は市場に幅広く流通する炭素鋼鋼管で、ゴムや合成樹脂といった特殊な材料を必要としないという利点がある。また、鋼管コイルばねの製作は、切断加工のみのため、材料ロスがほとんどなく、生産効率も良好である。提案する緩衝装置の形状を図5に示す。

装置は鋼管コイルばねの内部に拘束鋼管を挿入し、ばね引張時の線材（板状部分）の変形（引張に伴いばね径が絞るような変形）を徐々に拘束できるようにしたものである。メカニズムの概念を図6に示す。また、鋼管コイルばねのように線材巻き数 n が少ないばねは、引張力を受けると、ねじり変形が生じるため、拘束棒を挿入し回転方向の動きを拘束している。鋼管コイルばねのねじり変形の拘束は、緩衝装置の性能を発揮する上で必須の事項である。そのため、適切な振

表1 試験体リスト

試験体名	径 (mm)	板厚 (mm)	断面積 (cm ²)	巻き数 (回)	切断ピッチ (mm)	降伏点 (N/mm ²)	降伏荷重 (kN)	降伏変形 (cm)	ばね剛性 (kN/cm)
100-1-2	114.3	8.6	28.56	2	100	426	16.6	2.8	5.93
200-0.5-2	216.3	12.7	81.23	2	100	480	20.6	7.4	2.79
200-0.75-2	216.3	12.7	81.23	2	150	480	33.1	7.9	4.22
200-1-2*	216.3	12.7	81.23	2	200	480	45.8	8.1	5.64

*: 200-1-2 はばね単体試験体につき、拘束鋼管を挿入していない。

じり止め機構を緩衝装置に取り付けることが、高性能化を実現する上で重要な課題となってくる。

本装置は引張荷重を受けた場合に緩衝機能を発揮する構造となっている。装置の実建物への取付けイメージを図7に示す。装置は免震層内で吊り上げられるように設置され、躯体とはたるませた強力チェーンや高強度ロープなどの緊結材で接続される。そのため、設計想定範囲内では装置に引張荷重は作用せず、設計想定変位を超過すると緊結材が引っ張られ、装置に引張荷重が導入される。装置は X 正負方向、Y 正負方向の計4台で1セットが構成される。

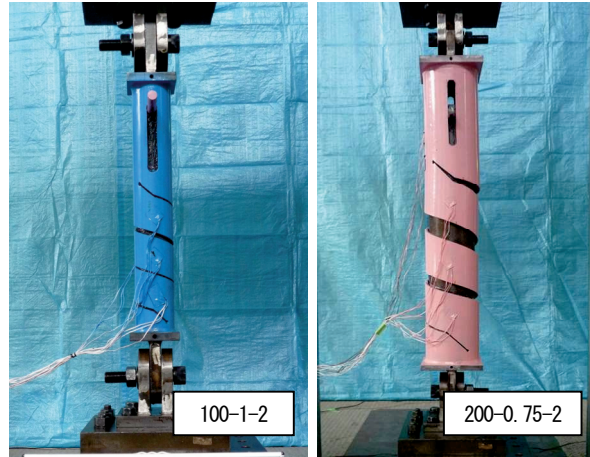


写真1 加力状況

4. 鋼管コイルばねを用いた緩衝装置の検証実験

4.1 試験体の概要

3 節に示す緩衝装置の効果を検証するため、装置を試作し、静的な引張加力実験を行った。試験体リストを表1に示す。試験体名称は以下に示すルールで決定している。

例: **200-0.75-2**

鋼管径 切断ピッチ/鋼管径 線材巻き数

ここで、表中の径、板厚、断面積は鋼管の規格値を示している。また、材質は径 100mm が STK400、径 200 が STK490 であり、降伏強度および弾性限界変形は、引張試験により求めた降伏点 (0.2%オフセット耐力) の値を用いた。ばね降伏荷重 N_y 、降伏変形 δ_{sy} 、ばね剛性 K_s の算出式を式(3)~(5)に示す⁵⁾。

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

$$\delta_{sy} = \frac{3.48 n \cdot D^2 \cdot (t^2 + h^2)}{\sqrt{3}G \cdot t \cdot h(2t+h)} \cdot F \quad \dots(4)$$

$$K_s = \frac{G \cdot t^3 \cdot h^3}{2.79n \cdot D^3(t^2 + h^2)} \quad \dots(5)$$

G: せん断弾性係数 h: ばね線材高さ(=ピッチ)
 t: 鋼管厚さ D: 鋼管径
 n: 線材巻き数 F: 鋼材基準強度

鋼管コイルばねの強度および剛性に関する予測値は、ばね単体が弾性挙動した場合の値である。そのため、線材が拘束鋼管に接触し、緩やかな荷重上昇を示した後の挙動を予測するものではない。予測値から、鋼管コイルばねの剛性は非常に低く、単純な鋼管の軸剛性と比較して数千分の1程度まで低下する。また、弾性限界変形は大きく拡大し、鋼管径 100mm で 2.8cm、鋼管径 200mm では 7~8cm 程度になる。以上に示す鋼管コイルばねの特性が、緩衝特性として有利に働く初期剛性の低さを実現している。

加力は、750kN 疲労試験機を用い、引張軸力を繰り返し作用させた。加力状況を写真1に示す。

4.2 実験結果

加力により得られた荷重-軸変形関係を図8に示す。図は、試験体4体のうち、明確な緩衝性能を示した2体(100-1-2試験体, 200-0.75-2試験体)と、ばね単体試験体(200-1-2)の荷重-変形関係を示している。グラフ縦軸は試験体に作用させた引張荷重を、横軸は軸変形量を表している。

100-1-2試験体はかく荷重サイクル3回の繰り返し加力を行った。結果から、試験体の最大荷重は240kN程度であり、その後耐力低下して破断に至った。また、最大荷重120kNまでのサイクルでは、除荷後の剛性が低荷重領域で急激に小さくなり、残留変形が履歴面

積のわりに小さくなる現象がみられた。これは緩衝装置として適した履歴性状である。しかし、最大荷重 240kN のサイクルでは、除荷剛性の低下は見られず、最大変形に近い残留変位が生じた。この要因として、鋼管コイルばねのねじり拘束機構として挿入した PC 鋼棒が、鋼管との接触部で支圧により降伏し、軸方向変位を拘束したことが考えられる。なお、安定サイクルである 120kN サイクル 1 回で評価したヒステリシス比 h_r は 0.86 だった。

200-0.75-2 試験体では、最大荷重 300kN および 350kN のサイクルで 5 回の繰り返し载荷を行った。これは、長周期・長時間地震動における複数回の緩衝装置動作を想定したものである。結果から、5 回程度繰り返した場合でも履歴性状は安定しており、繰り返し加力に対する性能を有することが確認できた。なお、200-0.75-2 試験体では、ねじり拘束機構の喪失は見られず、最終加力までおおむね安定的に動作した。安定サイクルである 350kN サイクル 1 回目で評価したヒステリシス比 h_r は 0.77 だった。

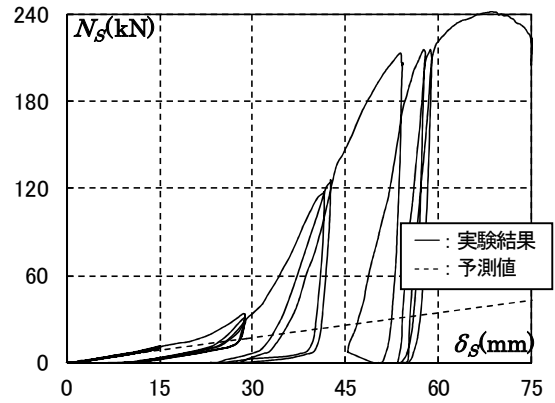
以上、2 種類の試験体ともに、式(5)で予測した弾性剛性と概ね同等の剛性を示した。よって弾性レベルの挙動予測は、既往の計算式で対応できると考えることができる。

ばね単体試験体 (200-1-2) の荷重-変形関係を示す。本試験体は、鋼管コイルばね本来の挙動を確認するためのものなので、拘束鋼管やねじり止め機構は取り付けてられていない。図中の破線は式(3)~(5)で予測したばね単体での弾塑性挙動である。実験結果より、弾性剛性は概ね予測値通りの値となった。また、降伏荷重と降伏変形は予測値の 8 割程度で非線形化が始り、降伏荷重および弾性限変形は、理論値に対して過小評価となった。要因としては材料特性や切断開始点のばね線材境界条件などが考えられるが、現段階では反弾効できないため、今後詳細な検討を行う必要がある。さらに、鋼管コイルばねは、塑性変形が進展すると、軸変位 400mm 程度から再度緩やかに硬化する現象がみられた。

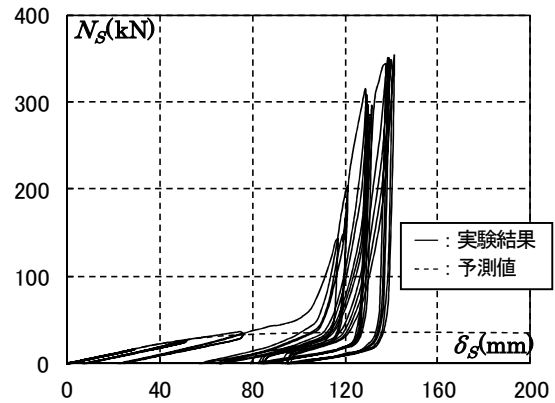
4.3 エネルギー吸収能力の評価

予備実験試験体のエネルギー吸収能力をヒステリシス比 h_r により評価する。100-1-2 試験体と 200-0.75-2 試験体の各荷重サイクルにおけるヒステリシス比の推移を図 9 および図 10 に示す。図は縦軸にヒステリシス比 h_r 、横軸に各サイクルの繰り返し回数を示したものである。

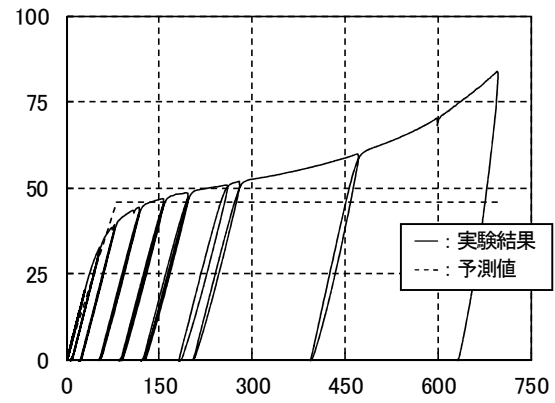
結果より、100-1-2 試験体の 30kN サイクルで繰り返しによるヒステリシス比の低下が顕著になってい



(a) 100-1-2 試験体



(b) 200-0.75-2 試験体



(c) 200-1-2 ばね単体試験体

図 8 荷重 - 変形関係

る。これは、荷重が小さな領域であるため、履歴に占める弾性ひずみエネルギーの割合が多いことが要因である。一方、塑性ひずみエネルギーの割合が多い 120kN サイクルでは、繰り返しによる値の変化は小さくなっている。

300kN、350kN サイクルで各 5 回の繰り返し载荷を行った 200-0.75-2 試験体では、繰り返し回数が 3 回以降になるとヒステリシス比の値が一定値に収束する傾向がみられた。以上より、本装置は繰り返し加力を受けた場合でも、ヒステリシス比の値は安定して

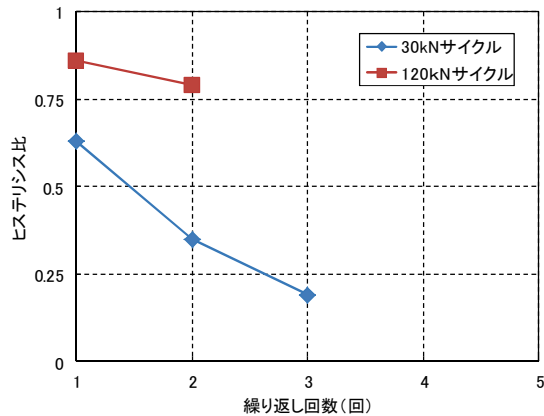


図9 100-1-2 h_r -繰り返し回数関係

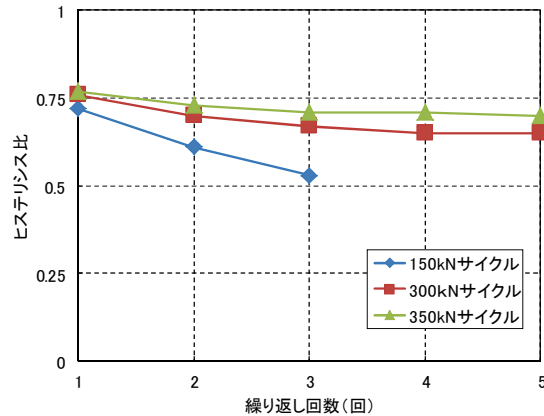


図10 h_r -繰り返し回数関係

おり、持続的にエネルギー吸収可能な性能を有していることが分かった。

4.3 結果と改良点の整理

4.1節および4.2節で示した予備実験結果から、鋼管コイルばねを用いた緩衝装置の機構は、ゴムを用いた緩衝装置値と比較して高いエネルギー吸収能力を示した(ゴム系 $h_r=0.5$ 程度、鋼管コイルばね $h_r=0.8$ 程度)。また、除荷時に低荷重で剛性が低下し、残留変位が減少する現象も見られた。これは、装置の繰り返し動作に対する寿命を考える上で有利な結果といえる。

しかし、100-1-2試験体では早期にねじり止め機構が機能しなくなり、十分な緩衝性能を発揮できなかった。そのため、今後の改良ではより効果的なねじり止め機構の提案が重要な課題となってくる。

5. 今後の展望とまとめ

5.1 土木分野への応用

緩衝装置は土木分野の落橋防止装置で多用され、製品ラインナップも豊富である。落橋防止装置で用いられる緩衝機構は、主としてゴムを用いた製品が多く、一部に鋼材の塑性化によるエネルギー吸収能力に期待した製品も見られる。

大きな変形および桁と下部工の衝突の発生が想定される橋梁分野は、免震建物の過大変形と同様の課題を抱えているといえるため、本論の技術を展開することが可能な市場といえる。

5.2 まとめ

本論では、鋼管コイルばねを用いた免震緩衝装置の提案と、アイデア検証のための予備実験結果について述べた。得られた知見を以下に示す。

- 1) 特殊な材料を用いない緩衝機構として、鋼管コイルばねを用いた方法を提案した。

- 2) 予備実験を行い、想定した2つの特性(①緩やかな荷重上昇、②エネルギー吸収性能)を有する装置であることを確認した。
- 3) 5回の繰り返し载荷を行い、安定した履歴性状とエネルギー吸収特性を有することが確認された。
- 4) ヒステリシス比の評価から、ゴム等を用いた従来技術と比較して、高いエネルギー吸収効率を有することが確認された。
- 5) 履歴形状から、除荷時の低荷重領域で剛性が低下し、変位が回復する現象がみられた。よって、本装置は繰り返し動作に対する寿命の面でも有利であることが確認された。
- 6) 繰り返し加力を受けた場合でもヒステリシス比の低下は小さいことが分かった。
- 7) 鋼管コイルばねのねじり変形を拘束する機構を改良すれば、さらに性能を向上が可能となる。
 今後は装置の改良および、建物へ組み込んだ場合の効果検証を行い、実用化につなげる予定である。

【参考文献】

- 1) 神田, 竹内, 前野, 小倉: 上町断層帯地震に対する設計用地震動ならびに設計法に関する研究 その19, AIJ大会学術講演会梗概集, 構造II, pp.501-502, 2015.9
- 2) 久田: 地震荷重・地震動想定と工学的判断, 建築防災, 日本建築防災協会, pp.2-5, 2015.2
- 3) 有馬, 宮崎, 光阪, 加藤: 免震構造用バックアップシステムの研究 その1, AIJ大会学術講演会梗概集, 構造I, pp.495-496, 1989.9
- 4) 高橋, 穴原, 深堀: 水平変位制御によって免震建物に発生する衝撃力に関する実大実験と応答解析, 日本建築学会構造系論文集, No.573, pp.223-230, 2003.11
- 5) 機械工学便覧 改定第6版, 日本機械学会, 1977