

4. ねじり変形に注目した免震緩衝装置の改良実験

Improved Experiment of the Buffer Device for Seismic Isolation which Focused on Torsioned-deformation

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、建物内の揺れを大幅に低減することができるため室内の安全性が高まり、地震後の生活や事業の再建が早期に行えるという利点がある。しかし、長周期・長時間地震動や内陸直下の断層近傍で見られるパルス性地震動下では、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。本研究は、鋼材のみで構成されたシンプルな緩衝装置を用いて、免震建物にフェイルセーフを追加することを目標としている。本年度の研究では、装置の性能を向上させるため、鋼管コイルばねのねじり変形拘束機構を改良し、実験を行った。

—技術的な特長—

緩衝装置の構成部品である鋼管コイルばねは、ばね単体に引張力を作用させると、ねじり変形が生じる。アイデアの段階から、緩衝機能を発揮させるためには、鋼管コイルばねに生じるねじり変形を拘束する必要があることが分かっている。昨年度の実験では、鋼管コイルばねに長穴をあけ、そこにPC鋼棒を挿入するという簡易な方法で、ねじり変形を拘束した。しかし、この方法ではねじり変形を拘束するPC鋼棒と鋼管コイルばねの摺動部に局所変形が生じやすく、十分な性能を発揮できなかった(図1、写真1参照)。

そこで、ねじり変形拘束機構の改良として、拘束材との摺動部を面接触とすることで、支圧応力を低減させた。本論では、改良案として(a)角棒型と(b)カバー型のねじり変形拘束機構を考案し、実験を行った。実験結果が良好だった(b)カバー型の試験体の形状を図2に示す。ただし、カバー型試験体も250kN付近で、摺動部の固着が発生し、緩衝機能が喪失した(図3)。今後はカバー型の機構を改良し、装置の性能向上を目指す予定である。

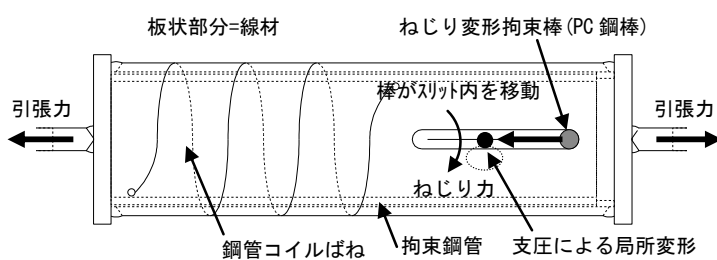


図1 局所変形が生じた部分



写真1 変形状況

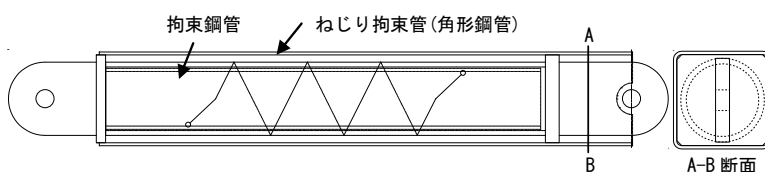


図2 カバー型のねじり変形拘束機構を取り付けた試験体

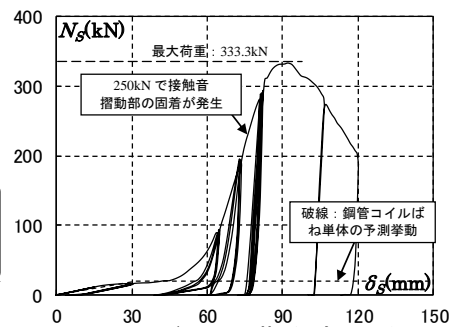


図3 カバー型の荷重-変形関係

*技術研究所建築研究室 **日本大学

ねじり変形に注目した免震緩衝装置の改良実験 Improved Experiment of the Buffer Device for Seismic Isolation which Focused on Torsioned-deformation

○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. When steel tube coil springs load a tensile force, it is confirmed that torsion-deformation occurs. Torsioned deformation restriction is necessary to show an effect of shock absorption. In this paper, the improved mechanisms for restriction of torsioned deformation was proposed, and the effect was confirmed by an experiment.

Keywords: 免震建物, フェイルセーフ, 緩衝装置, コイルばね, ねじり変形

Seismic Isolation Building, Fail-safe, Buffer Device, Coil Spring, Torsion-deformation

1. はじめに

近年発生が懸念される南海トラフ地震のような海溝型巨大地震では、長周期・長時間地震動により、固有周期が長い免震建物に設計想定を超える入力が生じることが懸念されている。このような状況から、国土交通省は2017年をめぐり、固有周期が長い超高層建物や免震建物に対して、長周期地震動を考慮した設計を行うよう、制度改正を行う方針を打ち出している。

また、内陸直下型地震では、断層近傍の大振幅地震動（パルス性地震動）により、免震建物が過大変形し、同じく擁壁に衝突することが懸念されている¹⁾。関西地区では、大阪市直下の上町断層に関する研究報告が発表され、過大変位の危険性が指摘された²⁾。さらに、平成28年熊本地震では、衝突は発生しなかったものの、震源近傍の免震建物で、設計想定に迫る程度の大きな変形が観測されている。

ここで、免震建物は、免震層で集中的にエネルギー吸収をさせる構造であり、設計想定を超える地震入力で免震層が過大変形すれば、擁壁への衝突など大きな被害につながりやすいという特徴がある¹⁾。地震時の免震装置動作状況を図1に示

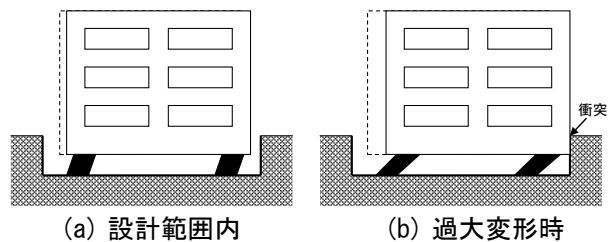


図1 地震時の免震装置動作状況の概念図

す。図より、免震建物は、設計想定範囲内の地震では、免震層のクリアランス範囲内で変形するため、上部建物に伝わる揺れを吸収することができる。しかし、設計想定を超える地震で過大変形が生じると、擁壁に衝突し、上部建物に衝撃荷重が入力するため、予期せぬ被害につながる。このような免震建物の新たな課題に対応するために、デバイスメーカーや建設会社は、過大変形に対応する技術の開発を、特に東日本大震災以降活発化している。

提案する本技術は、これまでに出願されたどの技術とも類似せず、独自の機構を有している。また、高い性能を持ちつつ、装置がシンプルで低コスト化が可能という特徴も持っている。

緩衝装置を構成する主要部品“鋼管コイルば

*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として行っている。

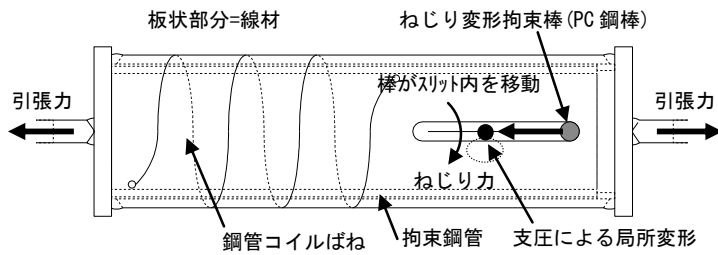


図2 局所変形が生じた部分



写真1 変形状況

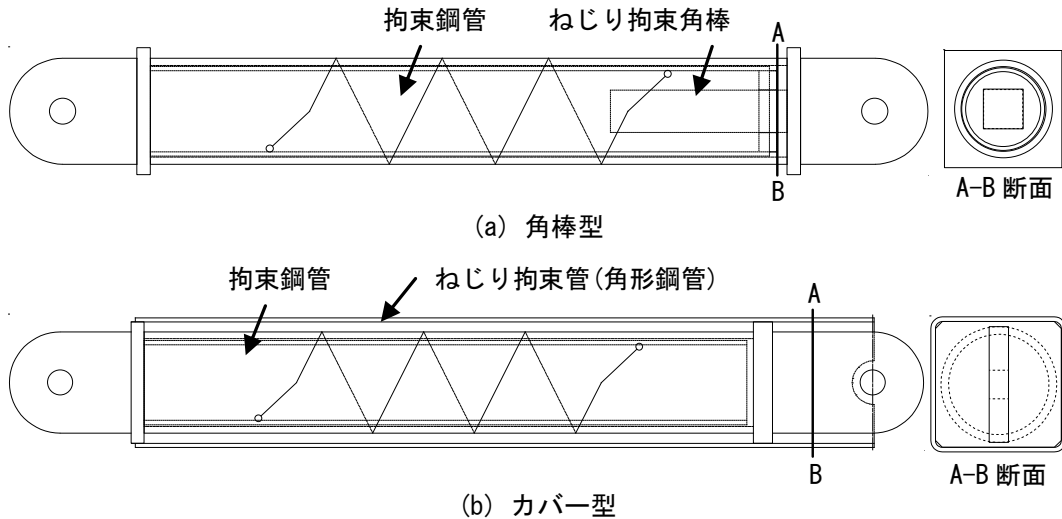


図3 各ねじり拘束機構を取り付けた試験体

ね”は、ばね単体が引張力を受けると、周方向にねじるような変形が生じる。初期の検証実験から、緩衝効果を発揮するためには、このねじり変形を拘束する必要があることが分かっている。効果検証実験では、鋼管コイルばねのねじり変形拘束機構が早期に機能しなくなったため、高荷重領域での繰り返し加力の性能が十分に発揮されなかった。そこで本論では、ねじり拘束機構の改良を行った試験体による検証実験の結果を報告する。

2. 効果を発揮する上で重要となるねじり変形拘束機能について

2014 年度に実施した効果検証実験³⁾では、ねじり変形拘束機構としてスリットに PC 鋼棒を挿入する方法を用いた。その結果、ねじり力が大きくなる高荷重領域で、PC 鋼棒と鋼管に設けたスリットの接触部で支圧による局所変形で固着が生じ、装置の残留変位回復性能が喪失した。効果検証実験で局所変形が生じた部分を図2と変

表1 提案するねじり拘束機構の概要

	角棒型	カバー型
拘束部品	角鋼棒	角形鋼管
利点	機構を内蔵できる	より高い効果が期待できる
欠点	組み立て工程が複雑	鋼材量が多い

形発生状況を写真1に示す。

本論では、表1に示す2タイプのねじり拘束機構を考案し、性能検証実験を行った。ここで、各ねじり拘束機能を持つ試験体の形状を図3に示す。(a)の角棒型は、角鋼棒を拘束鋼管に開けられた角穴に挿入し、穴内で摺動させることで、ねじり変形を拘束するものである。ねじり力は角棒から摺動部を介して、固定された拘束鋼管に伝達する。拘束鋼管にねじり変形拘束機能も担わせるため、材料の節約が可能である。

(b)のカバー型は鋼管コイルばねを角形鋼管内に挿入した構造になっている。引張力を受け、鋼管コイルばねにねじり力が生じると、角形鋼管が

ねじり変形を拘束する。本機構は、ねじり拘束時の摺動部が面で接触するため、安定した性能が期待できる。反面、ねじり変形拘束専用の部材(角形鋼管)が必要となるため、必要鋼材量は多くなる。

製作者へのヒヤリングでは、製作の容易さという観点でみると、(a)の角棒型よりも(b)のカバー型の方が優れているという回答を得ている。現段階での製作見積もりは鋼材量をベースに算出しているため、(b)が(a)よりも1割程度価格が高い。しかし、量産時に生産効率を高めやすいのは(b)であるため、両者の製造コストは逆転することも考えられる。

3. 検証実験

3.1 試験体概要

各試験体の鋼管コイルばねは同一の STKM 13A 材○-150×10 を用いた。鋼管コイルばねの諸元を表 2 に示す。また、表中の降伏強度 N_y 、弾性限変位 δ_{sy} 、弾性剛性 K_s 、終局強度 N_u は式(1)～(4)に示す方法³⁾で算出した。拘束鋼管の径は、効果検証実験の結果を参考に角棒型で 125mm(125-B)、カバー型で 125mm(125-C)、127mm(127-C)に設定した。

3.2 加力方法

加力は疲労試験機を用い、試験体に引張荷重を静的に作用させた。加力サイクルはばね弾性、ばね降伏荷重で各 2 回の繰り返し载荷を行った後に、100kN、200kN、300kN と荷重を漸増させた。

3.3 荷重変形関係

加力により得られた荷重 N_s - 変形 δ_s 関係を図 4 に示す。角棒型(125-B)ではばね降伏後に、変位 δ_s が 60mm を超えた領域から荷重上昇が始まった。100kN のサイクルでは、除荷時に低荷重で変位が減少し、本装置の特徴である残留変位回復機能が確認された。しかし、200kN サイクル時の荷重上昇域で剛性が上昇し、残留変位の回復が見られなくなった。これは、角棒摺動部が支

表 2 試験体鋼管コイルばねの諸元

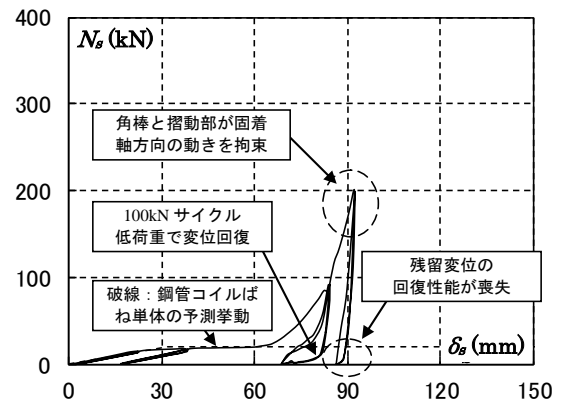
ばね鋼管	径D (mm)	板厚t (mm)	降伏強度 (kN)	弾性限変位(cm)	弾性剛性 (kN/cm)	終局強度 (kN)
○-150×10	150	10	19.8	3.2	6.2	401.0

※材料降伏点 $\sigma_y = 310\text{N/mm}^2$ 、引張強さ $\sigma_u = 476\text{N/mm}^2$ にて評価

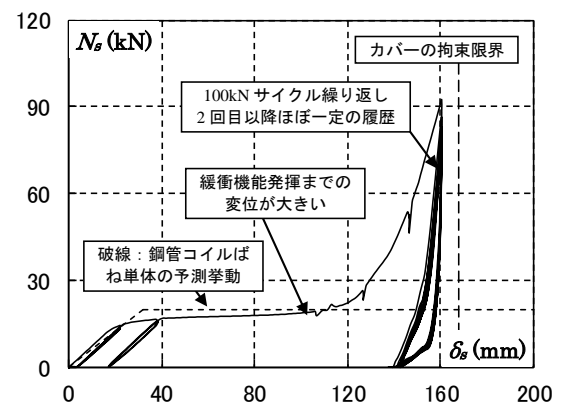
$$N_y = \frac{t^2 \cdot h^2}{0.8\sqrt{3}D(2t+h)} \cdot \sigma_y \quad \dots(1) \quad \delta_{sy} = \frac{3.48n \cdot D^2 \cdot (t^2 + h^2)}{\sqrt{3}G \cdot t \cdot h(2t+h)} \cdot \sigma_y \quad \dots(2)$$

$$K_s = \frac{G \cdot t^3 \cdot h^3}{2.79n \cdot D^3(t^2 + h^2)} \quad \dots(3) \quad N_u = h \cdot t \cdot \frac{\sigma_u}{\sqrt{3}} \quad \dots(4)$$

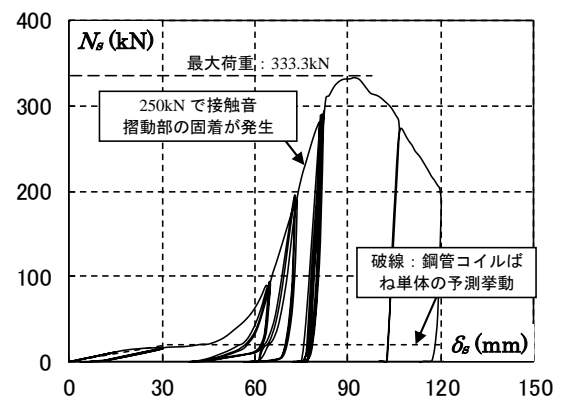
G:せん断弾性係数 h:ばね線材高さ(=ピッチ) t:鋼管厚さ
n:線材巻き数 D:鋼管径



(a) 角棒型 (125-B)



(b) カバー型 (125-C)



(c) カバー型 (127-C)

図 4 荷重-変形関係

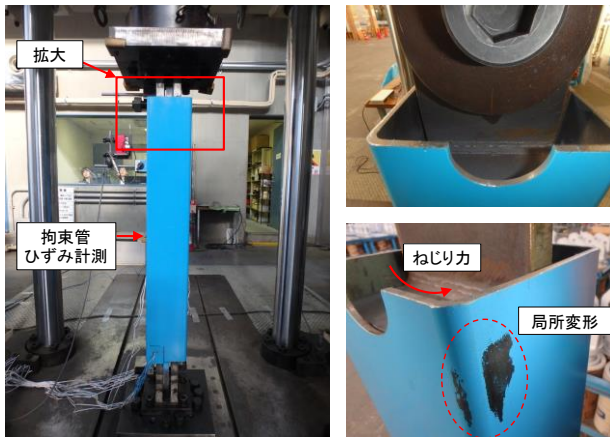


写真 2 127-C 試験体加力状況

表 3 各試験体のヒステリシス比

サイクル荷重	回数	125-B	125-C	127-C
100kN	1回目	0.91	0.94	0.81
	2回目	0.70	0.65	0.60
200kN	1回目	-	-	0.84
	2回目	-	-	0.72

圧により固着したためだと考えられる。

カバー型(125-C)では、緩衝機能を発揮するまでの変形が大きく、100mm 程度変形が進んだのちに荷重が上昇した。そのため、100kN サイクルでカバーがねじりを拘束できる限界変位に近づいたため、当該サイクルの繰り返し回数を 10 回まで増やした。その結果、2 回目以降はほぼ同一の履歴形状となることが確認された。

カバー型(127-C)では、他の試験体と比較して、緩衝装置に要求される履歴形状に近い形となった。また、200kN サイクルまでは、ねじり変形拘束性能が発揮され、除荷時の変位回復が見られた。その後、荷重が 250kN に達した時点で、試験体から接触音が発生し、摺動部で固着が発生した。最大荷重は 333.3kN であった。

3.4 ねじり変形拘束機能喪失時の状態（カバー型）

ねじり変形拘束機構が喪失した状態が外観に現れた。カバー型試験体（127-C）の実験終了時の状況を示す。実験状況とねじり変形拘束機構が喪失した際のカバーの状態を示した写真が写真 2 である。荷重が 250kN 程度に達した時点で、摺動部とねじり変形拘束管（角形鋼管）との間で

接触音が発生し、その後摩擦音が聞こえるようになった。実験後に状況を確認すると、摺動部付近のねじり変形拘束管に塗装の剥がれが見られた。また、摺動部の拘束管にははらみ出しが見られ、ねじり力による局所変形の発生が確認された。

なお、ねじり変形拘束管に塑性変形による損傷が見られたのは、摺動部近傍のみで、その他部分には異常は見られなかった。ねじり変形拘束管には、写真 2 で示す位置に 3 軸ひずみゲージを貼り付けている。このゲージの計測値は、最大主ひずみで 116μ であり、鋼管コイルばねのねじり力を拘束する十分な断面を有することが確認された。

つまり、摺動部の支圧応力に耐えるもしくは緩和できるよう改良ができれば、装置の繰り返し荷重に対する性能を高めることが可能になる。

3.5 ヒステリシス比 H_r による評価

装置のエネルギー吸収効率評価としてヒステリシス比 H_r を用いた評価を行った。各試験体の評価結果を表 3 に示す。評価結果から、ヒステリシス比は最大で 0.8~0.9 を超える高い値となった。これは、昨年度に行った効果検証実験とほぼ同等の値である。また、加力 2 回目でも 0.6~0.7 程度の値を示しているため、繰り返し加力時でも大幅なエネルギー吸収効率低下は見られなかった。緩衝装置の材料にゴムや合成樹脂を用いる他社の先行技術では、ヒステリシス比が 0.5 程度である⁵⁾。本技術は、鋼材という安価な材料を用いながら、緩衝機能とエネルギー吸収効率の両立を実現したものだといえる。

4. 本技術の展開と応用

本技術は、緩衝機能を実現するためのデバイスを開発するものである。現状では、免震建物の過大変形対策に適用することを想定しているが、緩衝機能が必要な部分であれば本技術を応用することが可能である。

その応用例として、橋梁の落橋防止装置に適用するというアイデアを文献 6,7) で示した。橋梁の

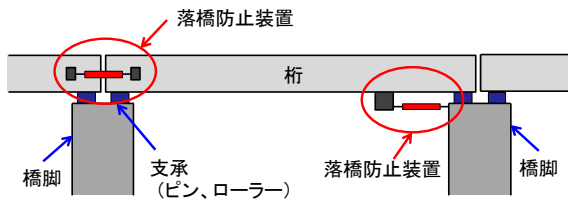


図5 落橋防止装置の取り付け位置



写真3 ゴム被覆チェーンによる装置の例

落橋防止装置は、1995年の阪神淡路大震災で桁が落下するという被害が発生したため、それ以降全国の橋梁に取り付けられるようになったという経緯がある。橋梁の構造イメージを図5に、現在用いられている落橋防止装置の例を写真3に示す。

地震時に桁は大きく変位するため、単純な鋼棒やチェーンのような装置では動作時に衝撃荷重が生じてしまう。この現象は、免震層が過大変形し、擁壁に衝突するという現象と類似性がある。そこで、一般に落橋防止装置には緩衝機能が取り付けられて、材料にはゴムや合成樹脂などが用いられている。ここで、写真3に示す落橋防止装置はゴム被覆チェーンと呼ばれ、鎖をゴムで被覆し緩やかな荷重上昇を実現したものである。

このような落橋防止装置は取り付け方法が免震緩衝装置とほぼ同一のため、装置の機構や形状をほとんど変えることなく、既存の装置を置き換えることができる。また、鋼管コイルばねを用いた緩衝装置は、鋼材のみで構成されているため、錆以外の劣化要因がない。また、すべてが再資源化可能な材料で構成されているため、廃棄時のコストと環境負荷の低減にもつながり、ライフサイ

クルコストが従来技術と比較して大幅に低減可能である。

5. まとめ

本論では、ねじり変形拘束機構を変化させた試験体の加力実験をおこなった。得られた知見を以下に示す。

- 1) カバー型は角棒型と比較して、ねじり変形拘束性能が高い。
- 2) 拘束鋼管の径が小さくなると、緩衝効果を発揮するまでの変位が大きくなる。
- 3) カバー型の改良は、ねじり変形拘束管の摺動部の強度向上もしくは応力分散で行えばよい。
- 4) ヒステリシス比の評価から、効果検証実験と同様に高いエネルギー吸収効率を示すことが確認された。
- 5) 繰り返し载荷時でもヒステリシス比は0.6～0.7程度であり、複数回の衝突にも耐えうる機構であることが確認された。

【参考文献】

- 1) 久田嘉章：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
- 2) 大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および設計法に関する研究会：大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針，pp.3.3-28～3.3-31，2015
- 3) 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，日本建築学会大会(関東)学術講演会梗概集，pp.492-493，2015.8
- 4) 機械工学便覧 改定第6版，日本機械学会，1977
- 5) 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
- 6) 新井，土田，牛島，石鍋：鋼管コイルばねを用いた緩衝機能付き落橋防止装置の提案，土木学会第70回年次学術講演会梗概集，pp.41-42，

2015.9

7) 新井, 牛島, 石鍋: 鋼管コイルばねを用いた
落橋防止装置のねじり変形拘束機構に関する研
究, 土木学会第 71 回年次学術講演会梗概集,
pp.413-414, 2016.9