

# H形鋼を用いたPC電化柱の簡易な倒壊防止工法

酒井 大央\*      室野 剛隆\*\*  
原田 智\*      坂井 公俊\*\*\*

## Verification of a Collapse Prevention Method using a H Steel Embedded in a PC Power Pole

Hirohisa SAKAI      Yoshitaka MURONO  
Satoshi HARADA      Kimitoshi SAKAI

This study suggests a collapse prevention method of the existing prestressed concrete power pole by inserting a H steel into it. In this paper, the effectiveness of this method was studied analytically and experimentally. It has been found from the analytical results that the power poles are destroyed at their bottoms under strong earthquakes regardless of whether the proposed method is applied or not. However, it has been also confirmed that the H steel prevents the total collapse of the power pole under successive earthquakes. This shows that this method functions effectively. On the other hand, the experimental results show that this method has a possibility of having an effect on reducing the displacement of the power poles.

キーワード：電化柱，PC柱，耐震補強，危機耐性，地震応答解析，振動台実験

### 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震において、多数のPC電化柱の折損が見られ、その復旧作業が列車の運行停止期間に少なからず影響を与えた<sup>1) 2)</sup>。また、東北地方太平洋沖地震発生後に土木構造物の耐震設計基準<sup>3)</sup>が改訂されるとともに、これを受ける形で2013年には、電化柱の耐震設計指針<sup>4)</sup>が改訂された。

この電化柱の耐震設計指針の改訂では、土木構造物の設計地震動の見直しに伴い、電化柱の耐震設計で用いる地震作用も変更になっている。また、ここ数年、電化柱の地震時挙動に関する研究が推進<sup>5) 6) 7)</sup>され、その最新の知見も取り入れられている。例えば、構造物のロッキング振動の影響により、電化柱に作用する加速度が、従来のように構造物の水平振動だけを考慮していた場合よりも、1.2倍から2倍程度大きくなることが示されている。この改訂により、新設の電化柱に要求される耐震性能は非常に高くなっている。

一方、従来の基準で設計された既存の電化柱の中には、新設される電化柱と比較して耐震性能の劣るものも存在する。特に東北地方太平洋沖地震で大きな被害を受けたPC電化柱に対して、何らかの有効な耐震補強工法が求められている。

電化柱の耐震対策工法としては、(i) 電化柱の耐力や変形性能を向上させる対策、(ii) 電化柱の応答を抑制する対策、(iii) 危機耐性の向上を目的に電化柱の倒壊を防止する対策、の3つの考え方がある。ここで、(iii)は、(i)や(ii)と大きく目的が異なる。つまり、(i)(ii)は想定される地震に対して電化柱が損傷することを防止するためのものであり、想定以上の地震に対し耐震性能を保障するものではない。それに対して、(iii)は、設計地震動を超える地震に対しても、倒壊だけは最低限防止しようとするものであり、危機耐性<sup>3)</sup>に重点を置いたものである。

本検討は、この危機耐性に重点を置いたPC電化柱の耐震補強工法として、PC電化柱にH形鋼等の芯材を挿入する簡易な倒壊防止工法を提案するとともに、本工法の有効性を、解析および振動台実験により検証することを目的とする。

### 2. 倒壊防止工法の概要

本検討では、危機耐性に重点を置いた倒壊防止工法を取り扱う。危機耐性とは、想定以上の地震に対しても、構造物またはシステムとして破滅的な状況に陥ることを防止する性能である<sup>3)</sup>。電化柱に対しては、電化柱に大きな損傷が発生した場合にも倒壊を防止することで、車両との衝突という甚大な被害が発生する可能性のある事象を最低限防止する性能と捉えることもできる。

本検討において提案する倒壊防止工法は、H形鋼等の

\* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御  
\*\* 鉄道地震工学研究センター  
\*\*\* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学

特集：地震防災・耐震技術

芯材をPC電化柱に挿入し、芯材の基部をモルタル等で固定する工法である。これは、常時のPC電化柱が有する振動特性や地震時変形性能は変化させないが、想定以上の地震によりPC電化柱が損傷した場合には、芯材がPC電化柱を支持し倒壊を防止することを期待したものである(図1)。本工法は、例えばH形鋼をPC電化柱上部から挿入するなどの方法により、比較的容易かつ安価に施工が可能であると考えられる。

また本工法は、芯材とPC電化柱をモルタルやウレタン等の中詰め材で一体化させることで、PC電化柱の固有周期を短くし、土木構造物との共振を避けることも可能であると考えられる。ただし、本稿においては、この中詰め材による周期の変化については対象としていない。

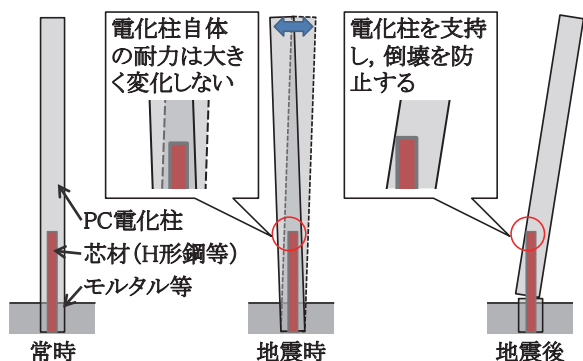


図1 H形鋼を挿入した倒壊防止工法の概要

3. 数値解析に基づく対策効果の確認

3.1 解析モデル

3.1.1 PC電化柱のモデル化

一般的に用いられているPC電化柱(11-40-N11B)を用いることとし、図2に示すように、はり要素でモデル化した。PC電化柱の諸元を表1に示す。PC電化柱自体の長さは11mであるが、基部1mを基礎柱に埋めて固定することを想定し、突出している上部10mをモデル化している。そのため、PC電化柱モデルの基部は剛結とした。自重は各節点に分布させている。PC部材の非線形特性と減衰定数は、既往の振動台実験の結果<sup>8)</sup>を踏まえて設定した。具体的には、骨格曲線を土木構造物の耐震設計標準に示されるPHC杭に準じて算定し、履歴曲線は逆行型を用いた(図3)。減衰は、PC電化柱の1次モードで減衰定数が1.6%程度となる剛性比例減衰とした。ブラケットは剛な線形部材とした。架空地線、保護線、き電線各延長50m分の荷重、腕金、がいしの荷重は電化柱上端部(図2:W0)で支持されるものとした。また、ちょう架線、補助ちょう架線、トロリ線各延長50m分の荷重、ブラケットの自重はブラケット端部(図2:W1)で支持されるものとした。

3.1.2 H形鋼のモデル化

PC電化柱内部に全長4.2mのH形鋼(H150-7-10)を挿入し、加振方向に対して最も断面2次モーメントが大きくなるよう調整したうえで、基部1mをモルタルで固定することを想定して、図2に示すように、はり要素でモデル化した。自重は各節点に分布させ、基部は剛結とした。電化柱とH形鋼の間には、遊間を考慮して、電化柱とH形鋼の相対変位が33mm以下になると剛になる接触ばね(図2)を設けた。H形鋼部材の非線形特性は、全塑性モーメントを折れ点とするパイリニアとした。なお、PC電化柱と同様の減衰を用いている。

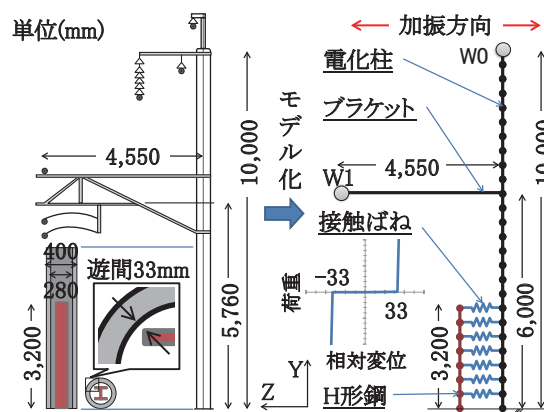


図2 PC電化柱およびH形鋼のモデル化

表1 PC電化柱諸元

種類	11-40-N11B
長さ(m)	11.0
設計曲げモーメント(kN・m)	107.8
曲げ剛性(kN・m <sup>2</sup> )	4.07 × 10 <sup>4</sup>
単位長質量(kN/m)	1.64
断面2次モーメント(m <sup>4</sup> )	1.04 × 10 <sup>-3</sup>

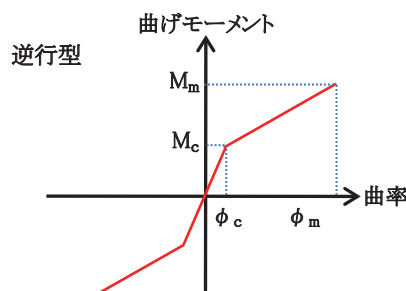


図3 PC電化柱の非線形特性

3.2 解析に用いる地震動

本検討においては、図4のシナリオを想定した。高架橋上に設置された健全なPC電化柱に対し大きな地震動が作用し(図4:A)、ある時刻でPC電化柱の基部が破壊される(図4:B)。その後、基部が破壊されたPC電化柱に対して地震動が継続して作用し、倒壊防止工法が機能する(図4:C)。このシナリオのもと、入力地震

動を設定し、各ケースの応答を比較した。

入力地震動は、L2地震動（スペクトル IIG3 地盤）が作用した場合の高架橋上面の応答波形とした。本検討においては、上記の通り、地震動が作用することにより高架橋上の PC 電化柱が損傷するというシナリオを想定している。そこで、高架橋の諸元は PC 電化柱の応答が大きくなるように設定した。具体的には、表 2 に示すとおりであり、この高架橋諸元を決めるにあたり、高架橋の固有周期と降伏震度を変えた 1 自由度系の解析を数ケース実施し、その中で PC 電化柱の応答が大きくなる高架橋の諸元を選定した。高架橋上面の波形を図 5 に示す。

なお、高架橋のロッキングの影響<sup>3)</sup>を簡易に考慮し、振幅を 1.2 倍して解析モデルに入力している。

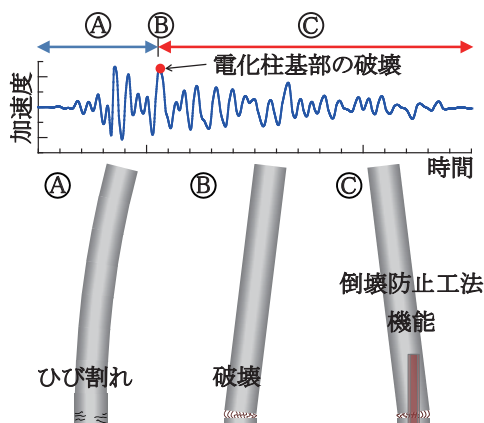


図4 想定シナリオ

表 2 高架橋諸元

固有周期 (s)	降伏震度	減衰	履歴曲線
0.4	0.8	0.1	Clough モデル

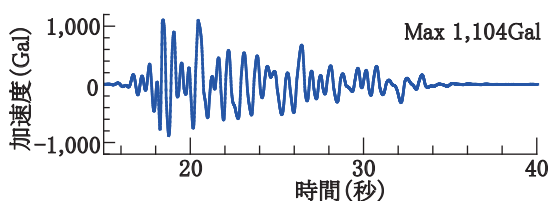


図5 高架橋上面の加速度波形

### 3.3 対策を施していない PC 電化柱の解析

対策を施していない PC 電化柱（以下、無対策）の解析モデルは、図 6 に示す基部が健全なモデル（ケース 1）と基部が破壊されたモデル（ケース 1'）を用い、動的的非線形解析を実施した。なお、PC 電化柱基部の破壊状態は、基部に位置する 2 要素の剛性を 0.01 倍にすることで表現した。

両ケースの入力地震動を図 7 に示す。まず、前節で述べた地震動を用いてケース 1 の解析を行い、PC 電化柱に発生する曲げモーメントが限界値に達する時刻、つまり PC 電化柱が破壊される時刻を求める。次に、この

時刻以降の加速度波形を用い、ケース 1' の解析を行う。ただし、解析において計算を安定させるため、図 7 に点線で示すように、PC 電化柱が破壊される時刻直前の加速度がゼロになる時刻からの加速度波形を入力している。最大応答値を図 8 に示す。なお、ケース 1 の値は、PC 電化柱が破壊される時刻以前の最大値である。ケース 1 の最大曲げモーメントは、基部で曲げ耐力を上回っている。

ここで、別途幾何学的な検討から、電化柱が 8° 以上傾斜するとブラケットが車両限界を支障し、車両と接触する可能性が生じることを確認している。このとき、電化柱下端から高さ 5m の位置の水平変位が 700mm 程度である。この 700mm を限界値の目安として最大変位を見ると、ケース 1' では PC 電化柱上端から 5m 位置の水平変位が 2m 以上となるほど大きく傾斜しており、建築限界を支障している。

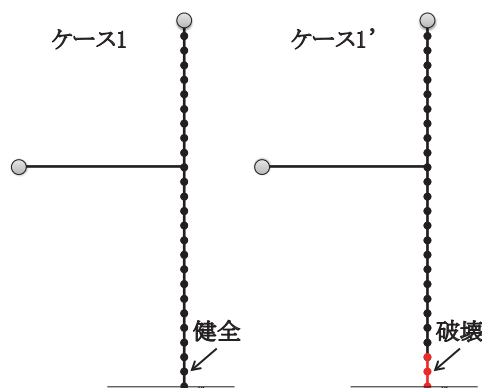


図6 健全な PC 電化柱の解析モデル

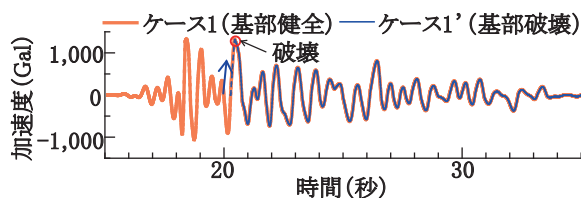


図7 入力地震動（無対策）

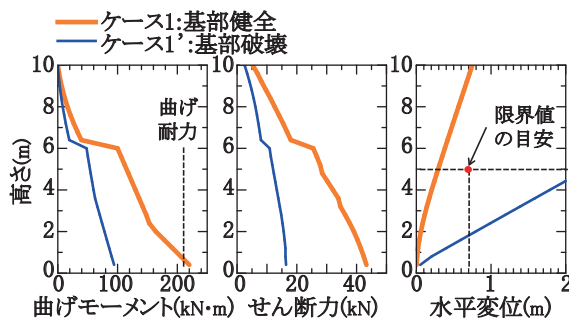


図8 最大応答値（無対策）

### 3.4 倒壊防止工法を施した PC 電化柱の解析

倒壊防止工法を施した PC 電化柱（以下、H 形鋼挿入）の解析では、図 9 に示す基部が健全なモデル（ケース 2）

特集：地震防災・耐震技術

と基部が破壊されたモデル（ケース2'）を用い、動的非線形解析を実施した。なお、ケース2'における破壊状態の表現方法は無対策の解析（ケース1'）と同様とした。

両ケースの入力地震動を図10に示す。入力地震動の考え方は、無対策の解析と同様である。PC電化柱が破壊された時刻に着目すると、無対策（図7）では約21秒であったが、H形鋼挿入では約24秒であり、遅くなっている。これは、H形鋼がPC電化柱と接触することで、系としての剛性が大きくなったためであると考えられる。

最大応答値を図11に示す。ケース2のPC電化柱の最大曲げモーメントは、基部で曲げ耐力を上回っている。また、PC電化柱上端から5mの位置での水平変位700mmを限界値の目安としてケース2'における同位置の水平変位を見ると400mm程度であり、H形鋼がPC電化柱を支持することによる変位抑制効果が顕著に現れ、建築限界を支障していない。なお、両ケースともにH形鋼が塑性化しているため、H形鋼の断面力はほぼ等しいが、塑性率はケース2'の方が大きくなっていることを確認している。

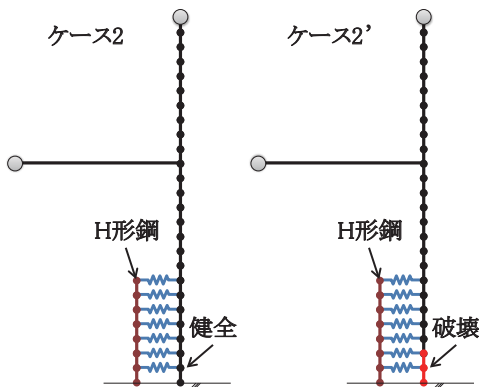


図9 破壊防止工法を施したPC電化柱の解析モデル

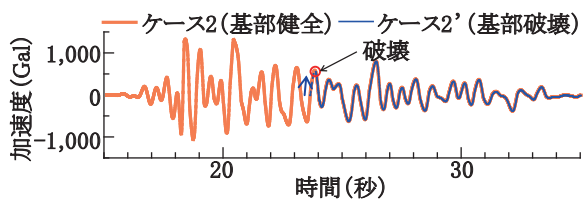


図10 入力地震動（H形鋼挿入）

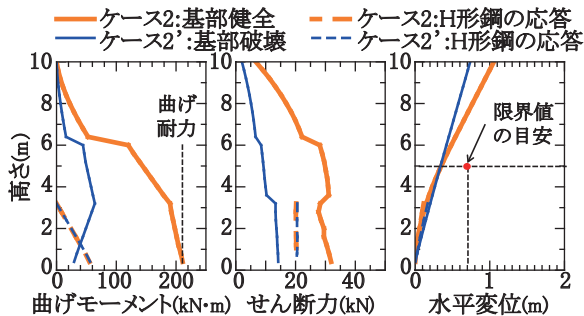


図11 最大応答値（H形鋼挿入）

4. 振動台実験に基づく対策効果の確認

4.1 振動台実験の概要

実物大のPC電化柱による振動台実験を実施し、今回提案した倒壊防止工法の効果を確認する。

試験体には、全長10mのPC電化柱（10-40-N11B）を用いる。ただし、下端1mを架台に挿入し振動台に固定しているため、高さ9mのPC電化柱を模擬していることとなる。図12に試験体の概要を示す。倒壊防止工法は、PC電化柱内部に全4mのH形鋼（H150-7-10）を挿入し、基部1mをモルタルで固定している。比較用に、無対策のPC電化柱も同時に加振している。

入力地震動の一例を図13に示す。PC電化柱が損傷した後に固有周期が延びることを考慮し、0.4秒から1.0秒の幅広い周期帯で大きな応答を示す加速度波形とした（図14）。位相特性は、東北地方太平洋沖地震の観測記録に基づき作成している。加振は、ケース毎にこの地震動の振幅を大きくしていくことで実施している。

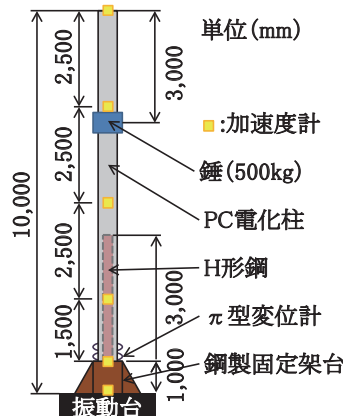


図12 振動台実験の試験体

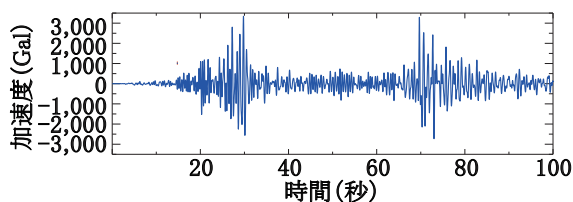


図13 振動台実験の入力地震動の一例

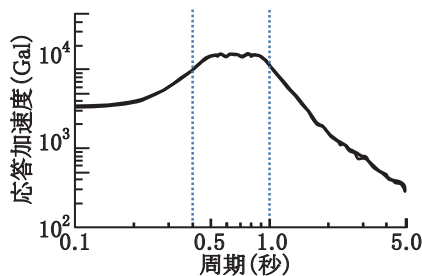


図14 振動台実験の入力地震動のスペクトル

#### 4.2 振動台実験の結果

倒壊防止工法の有無による PC 電化柱の応答の変化を考察するため、各加振ケースにおける入力最大加速度と PC 電化柱基部の最大変位との関係を図 15 に示す。ここで変位とは、PC 電化柱基部に鉛直に設置した  $\pi$  形変位計の計測値を示しており、基部のある程度広い範囲におけるひずみに相当する指標である。また、図 16 に加振ケース 4 における PC 電化柱基部の曲げモーメント  $M$  と曲率  $\phi$  の関係を示す。ここで、PC 電化柱基部の曲げモーメントは PC 電化柱各位置の加速度波形から、曲率は  $\pi$  型変位計からそれぞれ算定している。

図 15 から、入力最大加速度が 500Gal 以下では、倒壊防止工法の有無にかかわらず、PC 電柱基部の変位はほぼ同一であるが、入力加速度約 700Gal 程度のケース 4 では、H 形鋼を挿入したケースの応答変位の方が小さくなっていることが分かる。これは、先に述べた解析的な検証でも見られたように、PC 電化柱と H 形鋼が接触することで系として剛性が大きくなり、変形が抑制される効果が現れたものと考えられる。図 16 から、変形の小さな領域では両者の勾配はほぼ同一であるが、曲率が 0.002 程度を超えた領域では H 形鋼を挿入したケースの方が剛性が大きくなっていることが分かる。本実験では、計測機器配置の都合により、700Gal より大きな加振レベルの計測データは得られていないが、最終的に H 形鋼を挿入したケースの方が、損傷が抑制されていた（図 17、図 18）。

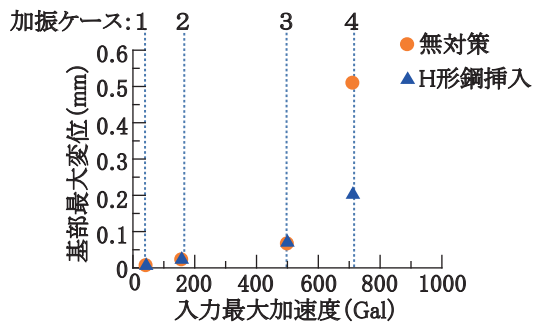


図 15 入力最大加速度と PC 電化柱基部最大変位

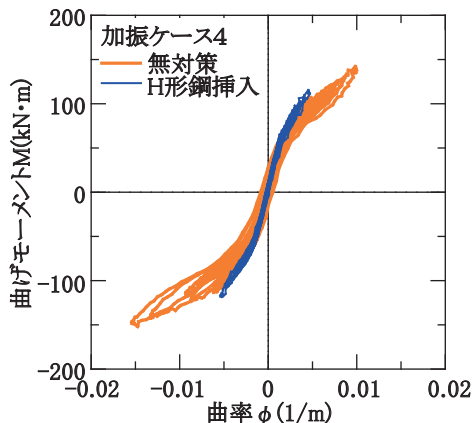


図 16 基部の曲率と曲げモーメントの関係



図 17 1000Gal 加振後の無対策 PC 電化柱



図 18 1000Gal 加振後の H 形鋼を挿入した PC 電化柱

#### 4.3 発生事象確認のための試計算

続いて、解析的な検討に基づき、PC 電化柱と H 形鋼とが接触することで、PC 電化柱の変形が抑制されることを確認する。具体的には、振動台実験の加振ケース 4 を対象に動的非線形解析による試計算を実施した。

解析モデルを図 19 に示す。この解析モデルは、3.1 で示した PC 電化柱および H 形鋼のモデルを基本とし、アームを削除するとともに、PC 電化柱や H 形鋼の寸法を修正し、実験の条件に合わせている。また、鋼製固定架台に埋め込まれる PC 電化柱下端 1m の範囲には、固定架台と PC 電化柱の間に充填したモルタルの圧縮変形を想定した水平ばねを各節点に設けることにより、固定度の影響を考慮した<sup>8)</sup>。なお、これと同様のばねを、H 形鋼下端 1m にも設け、H 形鋼の固定度も考慮した。さらに、PC 電化柱の 1 次固有周期が実測値と概ね一致するようにヤング係数を補正している<sup>8)</sup>。入力波は、加振ケース

特集：地震防災・耐震技術

4において振動台上で観測された加速度波形をそのまま用いることとした。

解析の結果、得られたPC電化柱上端の水平変位波形を図20に示す。この結果から、時刻44秒程度までは両者の応答は一致しているが、45秒付近からはH形鋼挿入の変位が小さくなっている様子が見られる。

また、図21に示すH形鋼とPC電化柱の接触ばねの挙動から、PC電化柱とH形鋼が接触していることが確認できる。このように、H形鋼を挿入することで、PC電化柱の応答を低減できる可能性もあることが分かった。

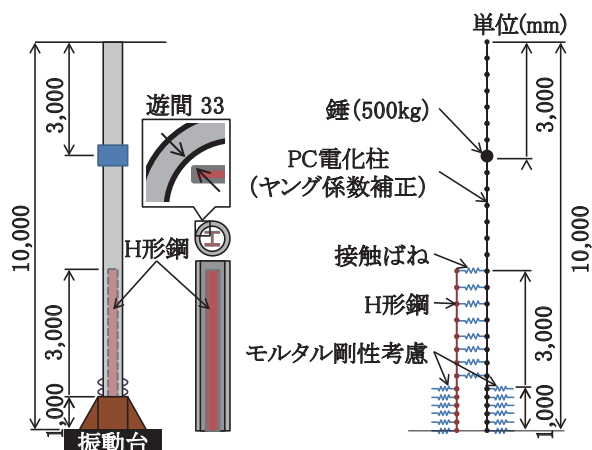


図19 検証解析モデル

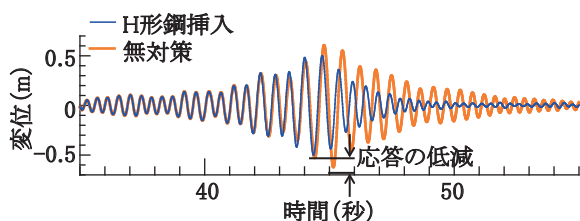


図20 実験検証解析の応答変位波形

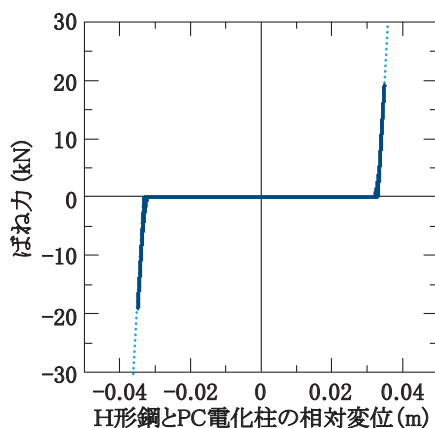


図21 H形鋼上端部接触ばねの変位とばね力の関係

## 5. おわりに

本検討では、危機耐性に重点をおいたPC電化柱の地震対策工法として、H形鋼を挿入した倒壊防止工法を提案するとともに、本工法の有効性を検証した。

解析的な検証においては、高架橋上のPC電化柱に非常に大きな地震動が作用した場合、倒壊防止工法の有無にかかわらず、基部が破壊された。その後、破壊された状態で継続して地震動が作用すると、H形鋼がPC電化柱を支持することで変位を抑制し、本工法が有効に機能することを確認した。

振動台実験においては、入力地震動の振幅が小さい場合には、倒壊防止工法の有無にかかわらず同様の応答を示した。しかし、ある程度振幅が大きくなると、H形鋼がPC電化柱と接触して挙動するため、PC電化柱の変位を抑制する効果を発揮することが確認された。また、この現象を解析により確認することで、H形鋼挿入による耐震補強は、倒壊防止効果だけでなく、応答低減の対策としても効果を発揮する可能性があることを確認した。

## 文献

- 1) 水野光靖, 野澤伸一郎: JR 東日本の鉄道施設における地震被害と復旧状況, 土木学会誌, Vol.96, No.7, pp.13-16, 2011
- 2) 土木学会・日本都市計画学会・地盤工学会 東日本大震災第一次総合調査団: 東日本大震災第一次総合調査団中間とりまとめ (案), 2011
- 3) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計), 2012
- 4) 鉄道総合技術研究所: 電車線路設備耐震設計指針・同解説, 2013
- 5) 室野剛隆, 加藤尚, 豊岡亮洋: 地震動の入力レベルが高架橋と電車線柱の共振現象に与える影響評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 68 巻, 4 号, pp.I.418-I.422, 2012
- 6) 加藤尚, 室野剛隆: 長継続時間地震動が電車線柱~構造物の地震応答に与える影響, 強震継続時間が長い地震動に対する土木構造物の耐震性評価シンポジウム講演概要集, pp.31-34, 2012
- 7) 加藤尚, 坂井公俊, 室野剛隆: 構造物-電車線柱一体モデルによる地震応答特性の評価, 鉄道総研報告, Vol.26, No.11, pp.17-22, 2012
- 8) 坂井公俊, 加藤尚, 室野剛隆, 原田智, 清水政利, 青木佑輔: 大規模地震時の電車線柱の応答値算定のための非線形特性のモデル化, 地震工学研究発表会講演論文集, 第 33 回, 2013