

# 砂詰基礎電化柱の解析モデルと耐震評価方法

原田 智\* 酒井 大央\*\*  
坂井 公俊\*\*\* 室野 剛隆#

## Dynamic Analysis Model and Evaluation Method of Concrete Pole on Sand Foundation during Earthquakes

Satoshi HARADA Hirohisa SAKAI  
Kimitoshi SAKAI Yoshitaka MURONO

Sand foundations have been often used as measures against earthquakes for prestressed concrete poles on viaducts. It is expected that sand foundations function as a damper to hold oscillation of these poles during earthquakes. However, states of the sand in the foundation have not been clarified, in the case where these poles have excessive load during earthquakes. Therefore, we carried out a static load experiment on the sand foundation to construct a dynamic analysis model for prestressed concrete poles on sand foundation during earthquakes. Further we had response spectrum of these poles by using the dynamic analysis model to evaluate their effective performance against earthquakes.

キーワード：耐震，電化柱，砂詰基礎，非線形特性，動的解析モデル，静的載荷試験

### 1. はじめに

鉄道高架橋上にある電化柱の基礎には、主にプレストレストコンクリート柱（以下、PC柱）の地震対策として砂詰基礎を用いた箇所がある。砂詰基礎は、砂の摩擦などの減衰作用によって、地震に対するPC柱の振動を抑制することが期待された設備である。しかしながら東北地方太平洋沖地震では、モルタル基礎箇所と比較して少数ではあるが、砂詰基礎箇所のPC柱に折損等の被害が報告されている<sup>1) 2)</sup>。また、大規模地震時に過大な荷重がPC柱に作用した場合における、砂詰基礎PC柱の挙動は明らかになっていない。そこで、大規模地震に対する砂詰基礎PC柱の挙動を静的載荷試験によって詳細に把握し、その結果から構築した動的解析モデルを用いて応答解析を実施した。さらに、砂詰基礎PC柱の加速度応答スペクトルの一例を試算し、モルタル基礎PC柱と砂詰基礎PC柱の応答値の相関を明らかにした。また、電化柱根際部の曲げ破壊に対する従来の耐力算定方法では評価できない、基礎内部の損傷に対する砂詰基礎電化柱の耐力評価方法を示したので報告する。

### 2. 実物大砂詰基礎試験体の静的載荷試験

地震時における砂詰基礎PC柱の挙動を再現可能な解

\* 電力技術研究部 電車線構造研究室  
\*\* 前 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室  
\*\*\* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室  
# 鉄道地震工学研究センター

析モデルを構築するため、砂詰基礎の実物大模型を用いた静的載荷試験を実施した。本章ではその結果を述べる。

#### 2.1 砂詰基礎試験体の荷重・変位関係

地震時における砂詰基礎PC柱の挙動を把握するため、図1に示す実物大の試験体を用いて基礎底面から2500mmの高さで静荷重を模擬電化柱に作用させ、各部の変位を計測した。載荷による模擬電化柱の変形を微小にするため、鋼管の内部にモルタルを充填したモルタル中実鋼管（φ406.4mm）を模擬電化柱として使用した。また本試験で使用した砂は、実設備の砂詰基礎に充填されている川砂、および剛性等の材料特性が明らかにされている6号珪砂とし、それらを十分に水締めして模擬電化柱と基礎枠の隙間に充填した。なおここでは、大規模地震に対する砂詰基礎PC柱の挙動把握を目的としてい

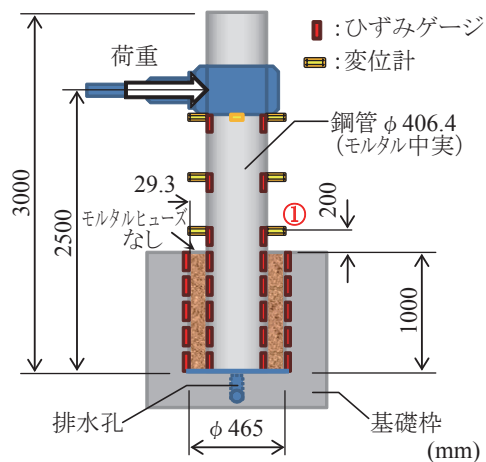


図1 試験体の概要

特集：電力技術

るため、試験体にモルタルヒューズを打設していない。

本載荷試験では、基礎天端からの高さ 200mm (図 1, ①の位置) の基準変位を  $1\delta=1\text{mm}$  とし、 $\pm 1\delta$ ,  $\pm 2\delta$ ,  $\pm 3\delta$ , . . . と変位を正負に増減させ、模擬電化柱が弾性変形する範囲 (模擬電化柱のひずみが  $500\mu\text{st}$  以下) までの荷重と変位の関係を計測した。またそれぞれの変位に対して 3 サイクルずつ載荷し、同一変位での載荷サイクルについて荷重・変位関係の変化を確認した。

図 2 に本試験の荷重・変位関係を示す。図 2 (a) から川砂と 6 号珪砂を比較すると川砂の変位が大きく、両者の剛性が異なることがわかった。また同じ変位では載荷サイクルが増すたびに荷重が減少していることから、載荷によって砂が模擬電化柱に締め固められ、どちらの砂でも変形が累積することがわかった。一方図 2 (b) は、両者の変位 5mm の 1 サイクル目の荷重と変位によって各測定値を正規化したものであるが、川砂と 6 号珪砂の曲線はほぼ一致しており、両者の剛性の変化率や履歴特性は概ね同一であると考えられる。

以上のことから、砂の種類によらず、砂の初期剛性を求めることによって、同一の非線形特性により砂詰基礎 PC 柱のモデル化が可能になると考えられる。

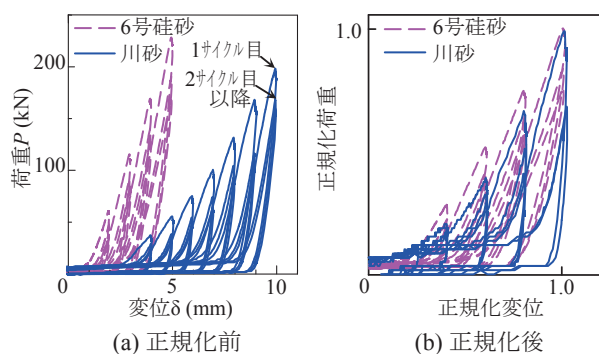


図 2 実物大砂詰基礎試験体の荷重・変位関係

2.2 砂詰基礎試験体の挙動

地震時における砂詰基礎 PC 柱の挙動を把握するため、前述の静的載荷試験において各部の変位を計測した。ここでは模擬電化柱を剛体と仮定し、基礎内部での模擬電化柱の挙動は、基礎枠より上部に設置した複数の変位計の計測値を用いることによって求めた。

本試験で用いた砂は、実設備の砂詰基礎に充填されている川砂とした。またここでも大規模地震に対する砂詰基礎 PC 柱の挙動把握を目的としているため、試験体にモルタルヒューズは打設していない。

砂詰基礎の静的載荷試験における基礎内部を含めた模擬電化柱の挙動を図 3 に示す。図 3 より、模擬電化柱は変位を増加させても、基礎底面からほぼ 500mm の高さを中心として回転運動したことがわかる。

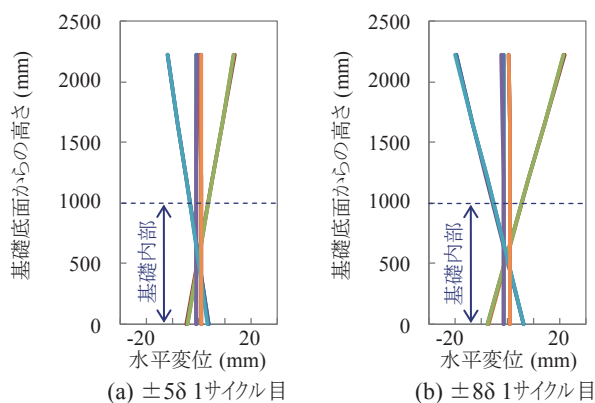


図 3 砂詰基礎内部の挙動

3. 砂詰基礎 PC 柱のモデル化

前述のように砂詰基礎 PC 柱は、基礎底面からの高さ 500mm 付近を回転中心として、回転運動することが明らかになった。ここでは、砂詰基礎 PC 柱の解析モデルの構築について述べる。

3.1 解析モデルの概要

砂詰基礎 PC 柱は回転運動することから、砂詰基礎の部分を回転ばね、さらに PC 柱の部分をばね・質点モデルとしてモデル化した。砂詰基礎 PC 柱の解析モデルの概要を図 4 に示す。

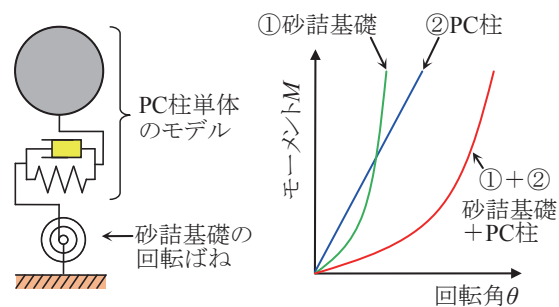


図 4 砂詰基礎 PC 柱の解析モデルの概要

3.2 回転ばねの剛性

静的載荷試験により、砂詰基礎 PC 柱の初載荷曲線 (骨格曲線) は、変形量の増加に伴い剛性が徐々に増大する特性を示した。一方、砂詰基礎 PC 柱の履歴曲線は、繰り返しの載荷によって砂の変形が累積するため、徐々に荷重が減少する特性を示した。また除荷時と再載荷時では異なる特性を示したことから、図 5 に示すような砂のばね剛性によって、砂詰基礎 PC 柱の解析モデルを構築することとした。

図 5 のモデルで必要となるパラメータは、砂の初期回転ばね剛性  $k_0$ 、PC 柱が傾斜して基礎枠に接触した場合の回転角  $\theta_{\text{max}}$ 、初載荷曲線 (骨格曲線) に係わる指数

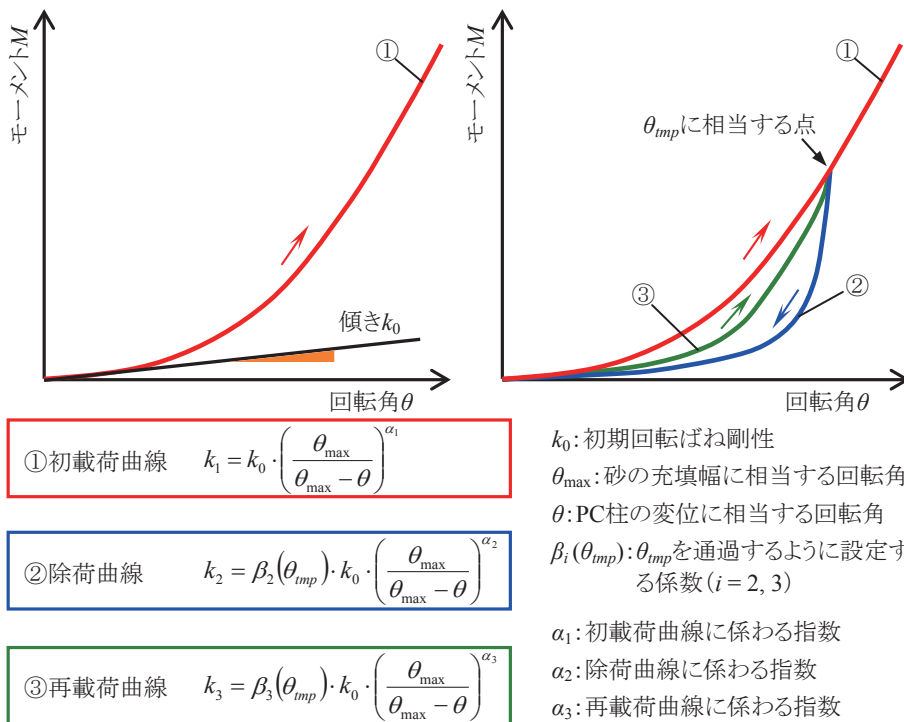


図5 解析モデルにおける砂の剛性

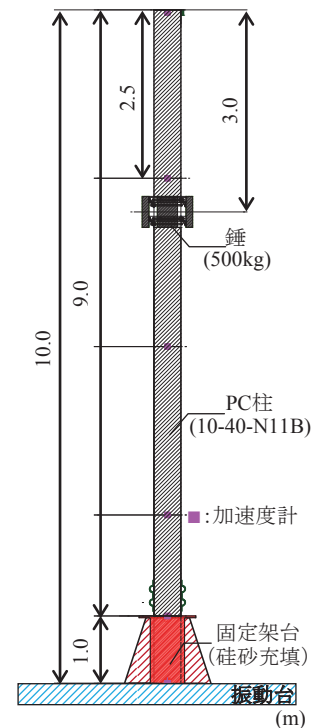


図7 振動試験の試験体

$\alpha_1$ , 除荷曲線に係わる指数  $\alpha_2$ , 再載荷曲線に係わる指数  $\alpha_3$  となる。

### 3.3 回転ばねのパラメータ

前述のパラメータの中で基礎枠に接触した場合のPC柱の回転角  $\theta_{\max}$  は、電柱基礎の形状やPC柱の外径等による幾何学計算で求めた。また砂の初期回転ばね剛性  $k_0$  は、静的載荷試験で充填した砂の密度等から算出した。

パラメータ  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  については、静的載荷試験から得られた荷重  $P$  と変位  $\delta$  の関係を、曲げモーメント  $M$  と回転角  $\theta$  に置き換え、この  $M-\theta$  関係をモデル化の対象として同定した。具体的には、荷重  $P$  と基礎底面からの高さ 1200mm 位置の変位  $\delta$  を、基礎底面からの高さ 500mm 位置の回転中心を支点としたモーメント  $M$  と回転中心での回転角  $\theta$  に換算し、試験時の  $M-\theta$  関係を再現可能なパラメータ  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  を同定した。これらの同定したパラメータを表1に示す。

表1 静的載荷試験に対する解析モデルのパラメータ

	$k_0$ (kN・m/rad)	$\theta_{\max}$ (rad)	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
6号珪砂	24061	0.059	5	80	40

表1のパラメータを解析モデルに用い、6号珪砂を充填した静的載荷試験の  $M-\theta$  関係を再現した結果を図6に示す。図6では、解析の場合と比較して試験時のモーメントが負側で小さくなっているが、初載荷曲線、除荷曲線、および再載荷曲線を概ね表現できていることがわかる。

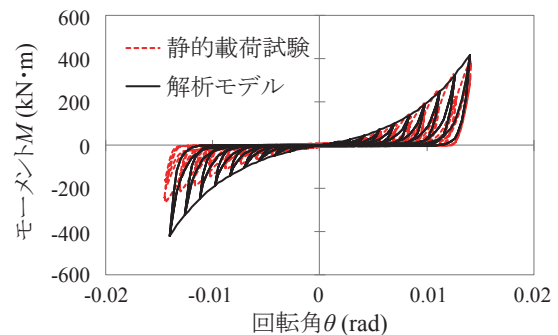


図6 解析モデルによる静的載荷試験の  $M-\theta$  関係の再現

## 4. 解析モデルを用いた動的試験の再現解析

構築した解析モデルを用い、砂詰基礎PC柱の試験体による振動試験の再現解析を実施した。ここでは、砂詰基礎PC柱の解析モデルの妥当性を検証する。

### 4.1 振動試験の試験体

図7に振動台実験の試験体を示す。試験体のPC柱は長さ10m、外径400mm、設計曲げモーメント108kN・m (11tf・m) のPC柱10-40-N11Bであり、砂詰基礎を模擬した固定架台(根入れ深さ1mの鋼製シリンダー)により振動台に固定した。本試験で用いた砂は材料特性が明らかにされている7号珪砂とし、十分に水締めしてPC柱と固定架台の隙間に充填した。また加振時の試験体の挙動を把握するため、図7に示す箇所に加速度計を設置した。なお試験体には、電車線の重量を模擬した錘

(500kg) が、天端から 3m の高さに取り付けられている。

#### 4.2 解析モデルを用いた再現解析

再現解析に用いた解析モデルにおける PC 柱のばね・質点モデルについては、構造物の非線形応答スペクトル法を用いた電化柱の応答評価法<sup>3)</sup>による応答値に一致するように、錘を含めた試験体 PC 柱の等価質量を算出し、また事前に実施したインパクト加振から求めた固有周期により、試験体 PC 柱の等価剛性を算出している。なお振動試験では、充填した砂に 7号珪砂を使用しており、解析モデルにおける回転ばねの初期回転ばね剛性  $k_0$  は 7号珪砂の値を用いている。再現解析および試験体の応答加速度波形を図 8 に示す。

図 8 (b) の応答波形は、図 8 (a) の入力波形を振動台に入力した際の応答波形であり、試験体天端から下 2.5m の高さに設置した加速度計の波形である。図 8 (b) に示すように、解析モデルを用いた再現解析による応答波形が振動試験の応答波形にほぼ一致することから、構築した解析モデルが砂詰基礎 PC 柱の挙動を概ね再現していることがわかる。

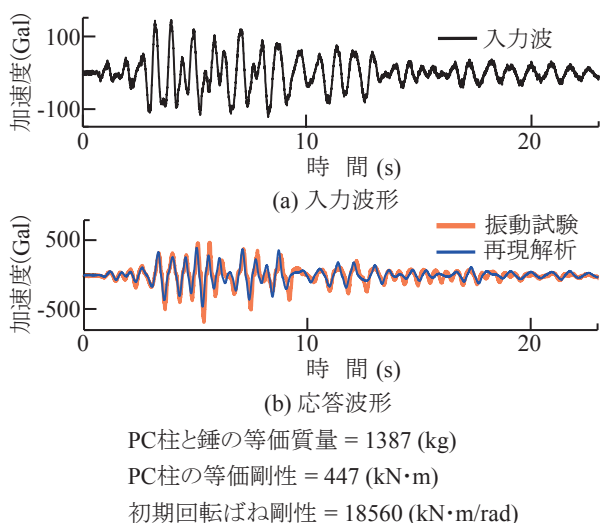


図 8 解析モデルによる振動試験の再現解析

### 5. 砂詰基礎 PC 柱の応答スペクトル

本章では、構築した解析モデルを用いた応答解析により、砂詰基礎 PC 柱の応答スペクトルを試算した結果を述べる。

#### 5.1 解析条件

応答スペクトルを試算するため、表 2 の土木構造物、および表 3 の 3 種類の PC 柱について、L2 地震動スペクトル II に対して応答解析を実施した。

表 2 土木構造物の条件

構造条件	RC 高架橋 (G3 地盤)
降伏震度 $k_{heq}$	0.6
等価固有周期 $T_{eq}$	0.1 ~ 5.0 秒まで対数軸で等間隔に 40 種類
減衰定数 $h$	$h = 0.04/T_{eq}$ ( $0.10 \leq h \leq 0.20$ )
非線形特性	Clough モデル

表 3 電柱基礎を含めた PC 柱の条件

	基礎種別	1 次固有周期 *(s)	備考
①	砂詰基礎	0.51	回転ばねモデル, 減衰定数 $h=0.10$
②	モルタル基礎	0.35	減衰定数 $h=0.03$
③	モルタル基礎	0.51	PC 柱の剛性を調整, 減衰定数 $h=0.03$

\* 1 次固有周期は PC 柱と電柱基礎を含めた全体系の固有周期 (条件①, ②) は PC 柱単体の 1 次固有周期が一致

#### 5.2 加速度応答スペクトルの試算

砂詰基礎 PC 柱の加速度応答スペクトルの一例を図 9 に示す。この結果から、1 次モードの固有周期 (0.5s) 付近で応答が大きくなり、土木構造物の固有周期が 0.5s 以上の範囲では、応答が急激に小さくなるのがわかる。また条件①と②では、振動特性が異なり応答の大小が複雑に変化するため単純な比較ができないが、条件①と③では振動特性が類似しているため、スペクトルの形状が類似していることがわかる。さらに土木構造物の固有周期が大きい場合 (約 2.0s 以上の範囲) を除き、砂詰基礎 PC 柱の応答がより小さく評価されていることがわかる。

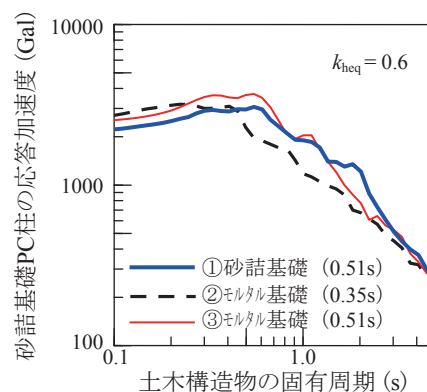


図 9 砂詰基礎 PC 柱の応答スペクトルの一例

#### 5.3 モルタル基礎 PC 柱との相関

砂詰基礎 PC 柱の応答スペクトルの試算では、電柱基礎を含めた全体系の 1 次固有周期を一致させた条件①と③の加速度応答スペクトルに相関が見られた。そこで、前節の応答スペクトルの試算における条件①, ③をケース 1, ケース 1 において 1 次固有周期を変えずに重量を 3 倍にした条件をケース 2, ケース 1 において重量を変えずに 1 次固有周期を 2 倍にした条件をケース 3 として応答解析を実施した。

ケース 1 ~ 3 で、全体系 (電柱基礎と PC 柱を含む) の固有周期が一致する砂詰基礎とモルタル基礎の PC 柱

について、応答値の関係を調べた結果を図10に示す。図10より、両者の応答加速度の関係を图中的折れ線(太線)で概ね表現できることがわかった。以上のように砂詰基礎PC柱の応答加速度は、全体系の固有周期が一致するモルタル基礎PC柱の応答加速度から換算できると考えられる。この換算で得た応答加速度を用いて、従来と同様の計算手順を実施することによって、曲げ破壊に対する砂詰基礎PC柱根際部の耐力評価が可能になる。

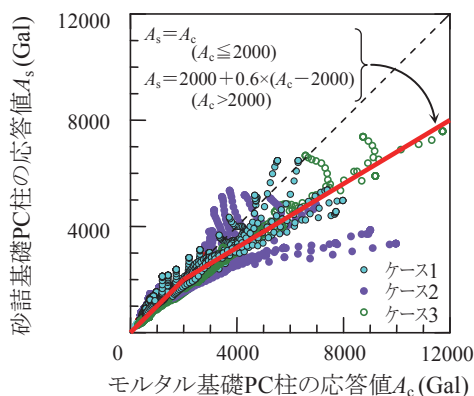


図10 基礎種別による応答加速度の関係

## 6. 砂詰基礎内部における電化柱の損傷評価

東北地方太平洋沖地震では、砂詰基礎に建植されたPC柱に折損等の被害が生じており<sup>1)</sup>、また倒壊には至らなかったが、基礎内部でPC柱がせん断破壊したと考えられる事例も報告されている<sup>2)</sup>。基礎内部のせん断破壊については、PC柱根際部の曲げ破壊に対する従来の計算方法では、PC柱の耐力を評価できない。そこで本章では、砂詰基礎内部のせん断破壊に対するPC柱の耐力評価について述べる。

### 6.1 解析モデル

砂詰基礎内部でPC柱に作用するせん断力を求めるため、図11に示すような砂詰基礎を水平ばねとした砂詰基礎PC柱の解析モデルを構築した。なお解析モデルの水平ばねは、図2の荷重・変位関係を再現可能な非線形特性を有している。この解析モデルを用いた静的解析により、砂詰基礎内部でPC柱に作用するせん断力を求めた。

### 6.2 砂詰基礎内部におけるPC柱の評価手法

地震などの振動に対して、電化柱には曲げ変形が生じることから、電車線路設備耐震設計指針では主に曲げ破壊に対する電化柱の耐力を照査しており、地震時に電化柱の根際に発生するモーメントを算定している。そこで図11に示すように、電化柱根際からの高さ $h$ において

水平集中荷重 $P$ が電化柱に作用した場合について、根際で発生するモーメント $M$ と砂詰基礎内部のせん断力最大値 $V$ の関係を、図11に示す解析モデルを用いた静的解析により求めた。なお砂詰基礎内部のせん断力最大値 $V$ は、電化柱の回転中心に相当する基礎底面から高さ0.5mの付近で生じていた。

新幹線で用いられている主なPC柱(設計曲げモーメント108~196kN・m)について、図11のモデルによる静的解析により算出したモーメント $M$ とせん断力最大値の関係を求めた結果を図12および図13に示す。図12、図13では、横軸をPC柱のモーメント耐力値 $M_d$ に対する根際に生じるモーメント $M$ の比(無次元化モーメント)とし、縦軸をPC柱のせん断耐力値 $V_{cd}$ に対する砂詰基礎内部で生じるせん断力の最大値 $V$ の比(無次元化せん断力)として表している。なおここでは、設計曲げモーメントが196kN・m(20tf・m)のPC柱は、コンクリートの圧縮強度等の材料特性が他のPC柱と異なっていることから、設計曲げモーメントが196kN・mのPC柱とそれ未満のPC柱について、それぞれ分けて示している。

電化柱根際のモーメント $M$ 、および砂詰基礎内部で生じるせん断力の最大値 $V$ は、図11の水平集中荷重 $P$ に

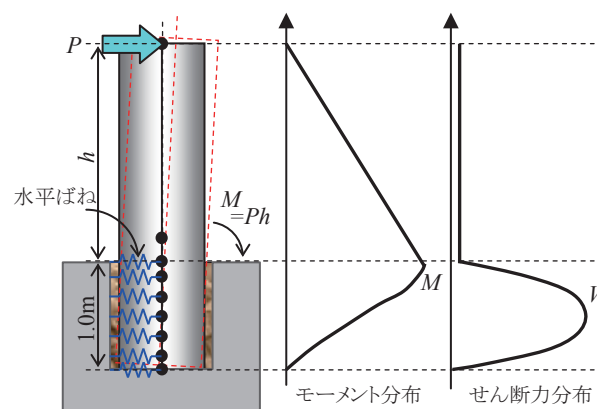


図11 砂詰基礎内部の損傷評価に関する解析モデル

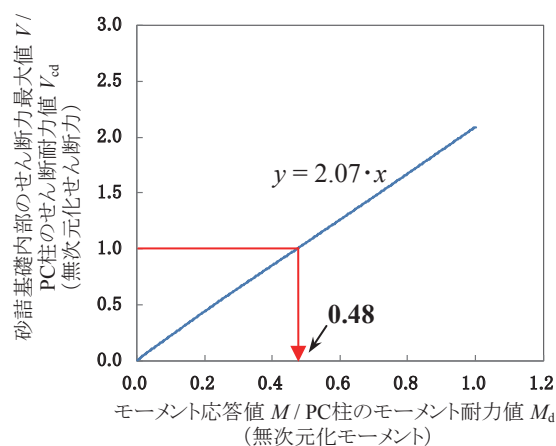


図12 設計曲げモーメント196kN・m(20tf・m)未満のPC柱

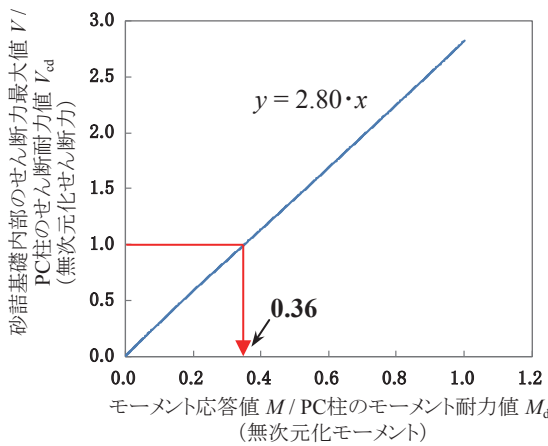


図 13 設計曲げモーメント 196kN・m (20tf・m) の PC 柱

比例して増加することから、図 12 および図 13 に示すように、無次元化モーメントと無次元化せん断力も線形比例の関係となる。このことから図 12、図 13 において、無次元化モーメントと無次元化せん断力が共に 1.0 以下となる範囲で PC 柱を使用することによって、従来の曲げ破壊に加えて砂詰基礎内部のせん断破壊まで考慮した電化柱の耐震設計が可能となる。新幹線で主に使用される PC 柱については、図 12 および図 13 の中に示すように、式 (1) または式 (2) を満足する必要がある。以上、砂詰基礎内部のせん断破壊を評価する手順を示すと図 14 のようになり、従来の耐震設計と同様に電化柱の曲げモーメントによって評価可能ながわかる。

・設計曲げモーメント 196kN・m 未満の PC 柱

$$M/M_d \leq 0.48 \quad \dots\dots(1)$$

・設計曲げモーメント 196kN・m の PC 柱

$$M/M_d \leq 0.36 \quad \dots\dots(2)$$

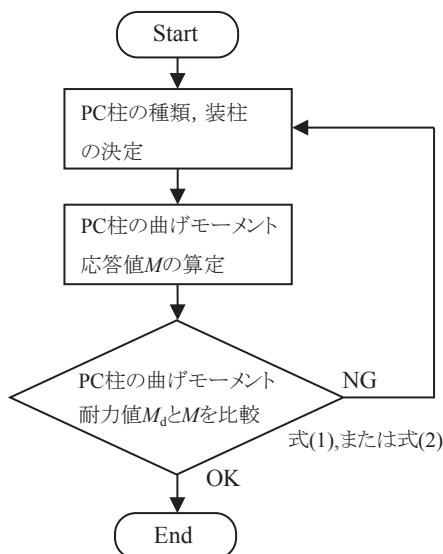


図 14 砂詰基礎内部のせん断破壊の評価手順

## 7. おわりに

大規模地震における砂詰基礎 PC 柱の挙動を明らかにして解析モデルを構築するため、実物大模型の静的載荷試験を実施し、振動試験の応答を再現可能な解析モデルを得た。またこの解析モデルを用いて砂詰基礎 PC 柱の加速度応答スペクトルを試算し、モルタル基礎 PC 柱と砂詰基礎 PC 柱の応答加速度の相関を明らかにした。さらに砂詰基礎内部のせん断破壊を考慮した電化柱の耐震評価方法を提示した。以下にその結果をまとめる。

- (1) 実物大試験体による砂詰基礎電化柱の静荷重実験を実施して荷重・変位関係を詳細に分析し、砂の初期剛性を求めることによって、砂の種類によらず同一の非線形特性により砂詰基礎電化柱のモデル化が可能であることを明らかにした。
- (2) 砂詰基礎電化柱の応答スペクトル算出に用いる解析モデルに回転ばねを用いたモデルを構築し、さらに静荷重実験の荷重・変位関係を再現するパラメータを同定した。
- (3) 構築した解析モデルを用いて砂詰基礎電化柱の実物大振動試験の再現解析を実施し、振動試験の結果を概ね再現できることを確認した。
- (4) L2 地震動に対する応答解析の結果、既存のモルタル基礎電化柱の応答加速度から砂詰基礎電化柱の応答加速度が換算でき、また従来と同じ計算手順で砂詰基礎電化柱根際部の耐力評価が可能なることを示した。
- (5) 地震時に砂詰基礎内部で電化柱に生じるせん断破壊に対して、従来の電化柱の耐震設計の考え方に基いて耐力を評価する方法を提示した。

なお本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施したものである。

## 文 献

- 1) 林屋均, 西脇篤, 山本浩志, 松浦和史, 葉山佳秀, 佐藤裕樹: 東日本大震災における新幹線電力設備の被害状況と復旧, 電気学会研究会資料, 交通・電気鉄道研究会, pp.1-6, 2012
- 2) 甘利智, 毛利哲, 岩井中篤史, 池田国夫, 佐藤孝一, 小田桐史晃, 山崎猛志, 古山幸男, 中島志穂, 那須聡, 西脇篤, 林屋均, 松浦和史: 東日本大震災における新幹線電力設備の被害状況と傾向分析, 電気学会研究会資料, 交通・電気鉄道研究会, pp.13-18, 2012
- 3) 室野剛隆, 加藤尚: 非線形応答スペクトル法を用いた電車線柱の応答評価法, 第 16 回性能に基づく橋梁等の耐震設計法に関するシンポジウム講演論文集, 2013