

大規模地震時における砂詰基礎電化柱の動的解析モデルと耐震評価

鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

主任研究員 原田 智

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。しかし 2011 年の東北地方太平洋沖地震では、比較的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。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り詳細に把握し、その解析モデルを構築し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 柱に対して応答値の相関を明らかにしたので報告する。

2. 砂詰基礎電化柱とは

砂詰基礎は、砂の摩擦等の減衰作用によって、地震に対して PC 柱の振動を抑制することが期待された設備である。砂詰基礎 PC 柱の基本構造を図 1 に示す。砂詰基礎は、1978 年の宮城県沖地震において新幹線高架橋で建設中の PC 柱が多数折損したため、既設の電柱基礎の構造を変更せず実施可能な対策工法として採用されたものである。そのため、砂や砂利の代わりにモルタルを充填した既存の電柱基礎（モルタル基礎）と PC 柱の根入れ深さは同じだが、PC 柱の他、電車線や架線金具等の常時荷重を支持するモルタルヒューズが基礎上部に打設される点が異なっている。このモルタルヒューズは、大規模地震時のような PC 柱に大きな荷重が作用する際には破壊するように打設する必要があり、モルタルヒューズが破壊された後は電柱基礎内部の砂が PC 柱等を直接支持する構造となり、砂の減衰作用によって PC 柱の振動を抑制するものである。

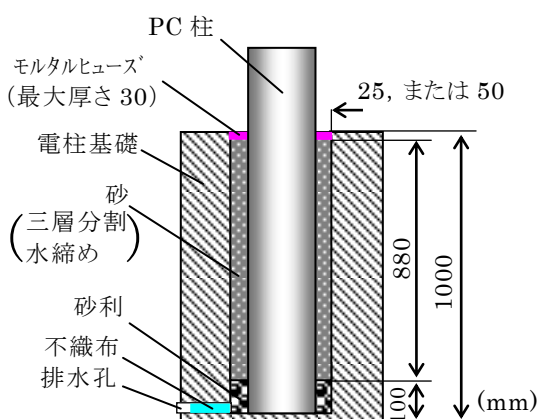


図 1 砂詰基礎の基本構造

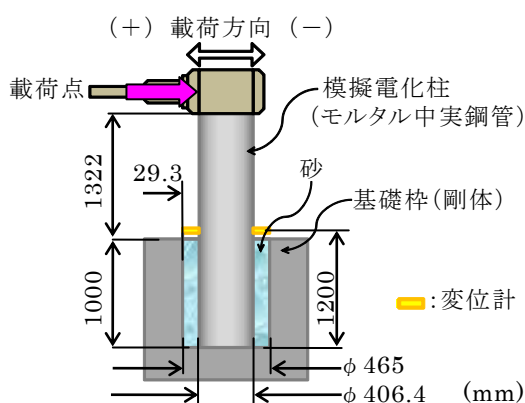


図 2 静的載荷試験における試験体の概要

3. 静的載荷試験および大規模地震時の解析モデル

砂詰基礎 PC 柱の解析モデルを構築するため、図 2 に示す実物大の試験体を用いて静的載荷試験を実施した。試験体は砂詰基礎の深さや幅は図 1 の基本構造とほぼ同一とし、モルタルを内部に充填した鋼管を模擬電化柱として載荷による変形を微小に抑え、砂単独の荷重・変位関係が得られる構成とした。試験体に充填した砂は材料特性が明らかにされている 6 号珪砂、および実設備

に充填されている川砂とし、載荷荷重および模擬電化柱底部からの高さ 1200mm 位置の変位をそれぞれ計測した。基準変位 1δ を 1mm として、変位を $\pm 1\delta$, $\pm 2\delta$, $\pm 3\delta$, ... と段階的に増加させた際の荷重・変位の関係を図 3 に示す。

図 3(a)によると、6 号珪砂と比較して川砂の変位が大きくなるが、両者とも初期載荷（1 サイクル目）よりも 2 サイクル目以降の荷重が小さく、2 サイクル目以降は変位の増加に対して荷重は増加せず、ある変位を超過すると荷重が急峻に増加する特性を示している。これは模擬電化柱の載荷によって砂が押し固められ、砂と模擬電化柱に隙間が生じることを示している（図 4）。

一方図 3(b)は、変位 5mm における荷重と変位の計測値により、図 3(a)の荷重・変位関係を正規化したものである。図 3(b)によると、6 号珪砂および川砂の荷重・変位関係は類似した形状を示していることから、砂の種類によらず、同一の非線形特性によってモデル化が可能であることを示している。

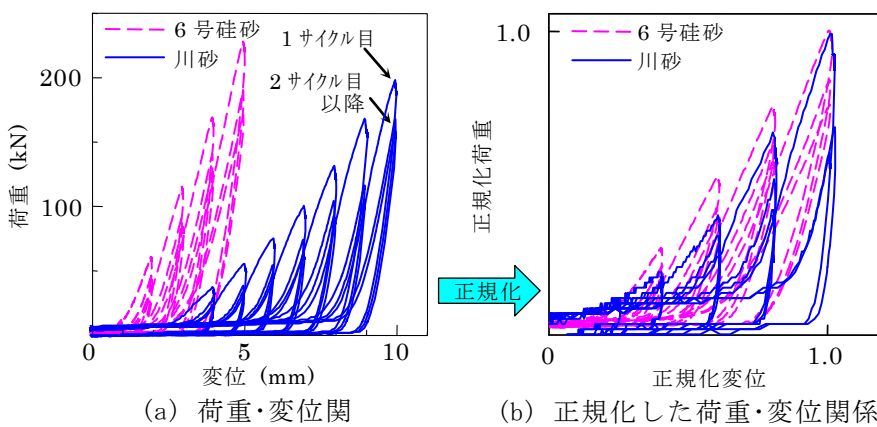


図 3 砂詰基礎の荷重・変位関係

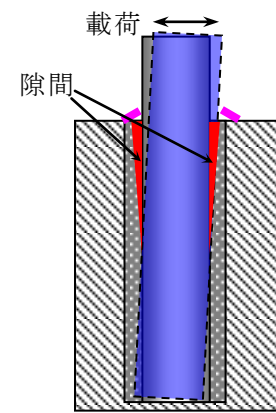


図 4 砂の大変形時に生じる隙

図 5(a)に示すように実物大試験体の静的載荷試験の結果より、砂詰基礎 PC 柱は基礎底面から約 500mm の高さで回転運動していると考えられる。そこで砂詰基礎を回転ばねとみなし、図 5 のようにモデル化した。またモデル化に際して砂詰基礎の回転ばねの剛性は、図 6 に示す特性（初期載荷、除荷、再載荷の各特性）を満たすように数式化した（図 6 中の式(1)）。なお式(1)において、 k_0 は砂の初期剛性であり砂の種類（ここでは 6 号珪砂、川砂）によって定まる値であり、 α_i は図 3 の荷重・変位関係を再現可能なように設定する係数である。

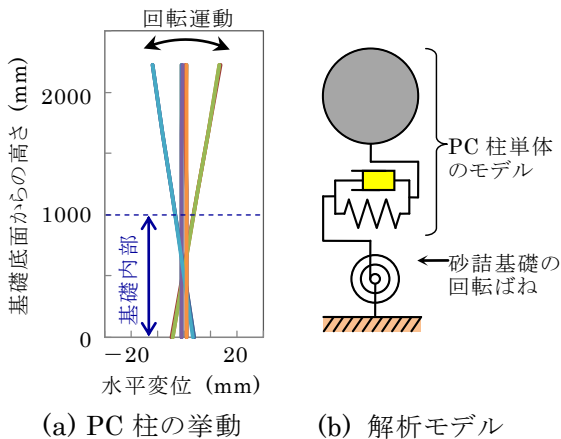


図 5 砂詰基礎 PC 柱のモデル化

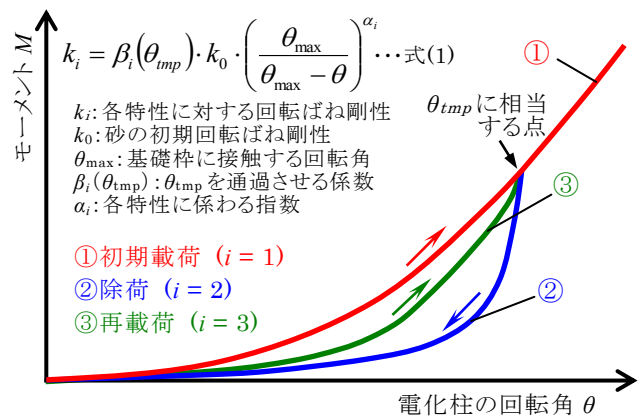


図 6 砂詰基礎の回転ばねの剛性

4. 解析モデルを用いた振動試験の再現解析

3章で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、解析モデルの妥当性を検証した。振動試験における試験体を図 7 に示す。試験体は長さ 10m の PC 柱を用い、固定架台と PC 柱の間に砂（7号珪砂）を充填して振動台に固定した。なお試験体には、天端から 3.0m の位置に架線等の重量を模擬した錘（500kg）を設置し、大規模地震時の砂詰基礎 PC 柱の挙動を把握するため、PC 柱の根際にモルタルヒューズを打設していない。

図 8 に振動試験の入力波形、応答波形および再現解析による応答波形を示す。応答波形は、試験体天端から下 2.5m 位置に取り付けた加速度計の波形である。なお振動試験では 7号珪砂を用いていることから、初期回転ばね剛性 k_0 を $18560\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ としている。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をよく再現していることから、構築した解析モデルが妥当であることを確認した。

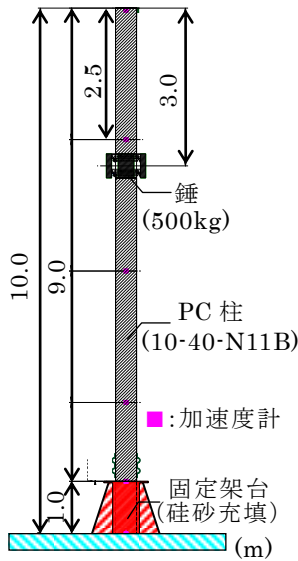
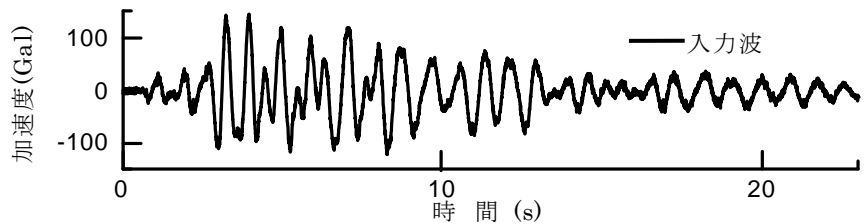
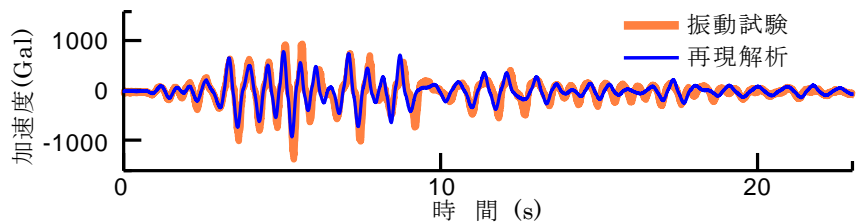


図 7 振動試験の試験体



(a) 入力波形



(b) 試験体応答波形（試験体天端から下 2.5m の位置）

図 8 砂詰基礎 PC 柱の解析モデルを用いた再現解析

5. 砂詰基礎電化柱の応答加速度

砂詰基礎 PC 柱の解析モデルを用いた応答解析によって算出した加速度応答スペクトルの一例を図 9 に示す。本計算では、土木構造物を G3 地盤上の RC 高架橋（降伏震度 $k_{\text{heq}} = 0.6$ ）とし、電化柱を単体で 0.35s の 1 次固有周期を持つ PC 柱とし、この PC 柱の電柱基礎を砂詰基礎 (①) およびモルタル基礎 (②) とした場合の応答値を算出した。また比較として、電柱基礎を含めた電化柱全体系の 1 次固有周期を、砂詰基礎 PC 柱 (①) の 1 次固有周期に一致するように PC 柱の剛性のみを調整したモルタル基礎 PC 柱 (③) についても応答値を算出した。これらの条件①～③についての加速度応答スペクトルを図 9 に示す。

図 9 から条件①と③では、1 次固有周期付近の 0.5s 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ことがわかる。また条件①と③では振動特性が類似しているため、土木構造物の固有周期が極端に大きな場合（1.0s 以上の範囲）を除き、スペクトルの形状が酷似していることがわかる。このように電柱基礎を含めた電化柱全体系の 1 次固有周期が一致した場合、砂詰基礎 PC 柱とモルタル基礎 PC 柱の加速度応答には相関があると考えられる。

そこで上記の条件①と③をケース 1 とし、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, 砂詰基礎 PC 柱とモルタル基礎 PC 柱の加速度応答の相関を調べた。砂詰基礎 PC 柱とモルタル基礎 PC 柱の加速度応答の相関を図 10 に示す。その結果, 土木構造物が 1.0s 以上の場合を除き, 両者の応答加速度の関係が図中の折れ線(太線)によって表現できることがわかった。以上のことから, 砂詰基礎 PC 柱の応答加速度は, 電柱基礎を含めた電化柱全体系の 1 次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。

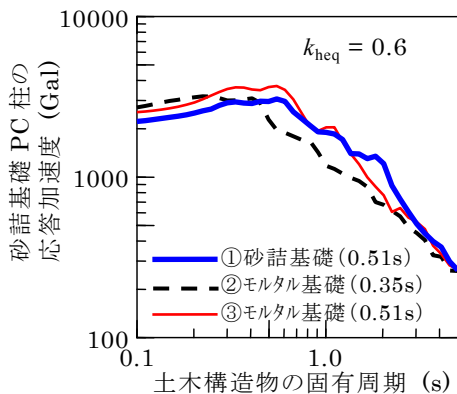


図 9 砂詰基礎 PC 柱の応答スペクトルの一例

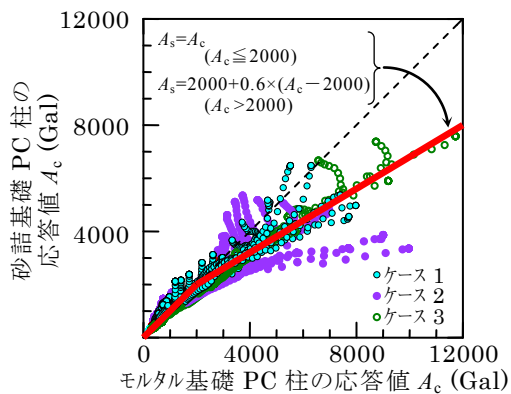


図 10 基礎種別による応答加速度の関係

6. 電柱基礎内部の電化柱損傷に対する評価

東北地方太平洋沖地震では, 砂詰基礎 PC 柱の基礎内部で PC 柱がせん断破壊したと考えられる事例が見られた。そこで砂詰基礎を水平ばねとしてモデル化し, PC 柱に集中水平荷重を作用させた場合について, 砂詰基礎内部で PC 柱に作用するせん断力 V と PC 柱根際に生じる曲げモーメント M の関係を静解析によって求めた。その結果を図 11 に示す。なお図 11 は, 設計曲げモーメントが $20\text{tf}\cdot\text{m}$ 未満の PC 柱について算出した結果であり, 縦軸と横軸はせん断力 V およびモーメント M をそれぞれの耐力値によって無次元化した値としている。

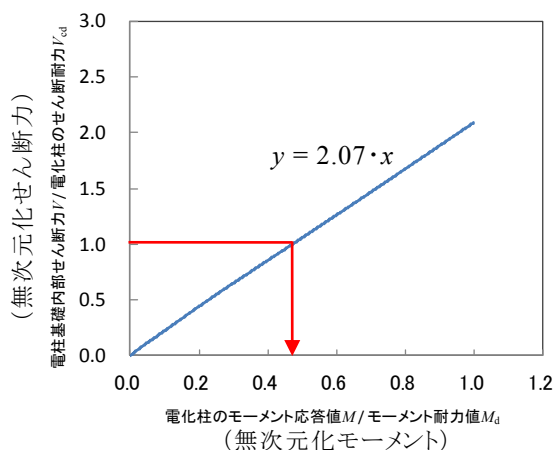


図 11 設計曲げモーメント $20\text{tf}\cdot\text{m}$ 未満の PC 柱

図 11 において, 砂詰基礎内部における PC 柱のせん断破壊を防止するためには, 無次元化せん断力が 1.0 以下の範囲で PC 柱を使用する必要がある。そのためには, 地震時に砂詰基礎 PC 柱の根際に生じる曲げモーメント M を $0.48M_d$ (M_d : 曲げモーメントの耐力値) 以下となるようにする必要があり, PC 柱根際の曲げ破壊より砂詰基礎内部のせん断破壊が先行することがわかる。

7. まとめ

大規模地震における砂詰基礎 PC 柱の解析モデルを構築するため, 実物大試験体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。さらに, 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, 砂詰基礎 PC 柱とモルタル基礎 PC 柱の応答加速度の相関を明らかにした。なお本研究の一部は, 国土交通省の技術開発費補助金を受けて実施したものである。