

電化柱砂基礎の地震時挙動把握のための 静的載荷実験

酒井 大央¹・原田 智²・坂井 公俊³・室野 剛隆⁴

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:hsakai@rtri.or.jp

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 電力技術研究部 電車線構造
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:satoshih@rtri.or.jp

³正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震動力学
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:ksakai@rtri.or.jp

⁴正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:murono@rtri.or.jp

電化柱の基礎形式のひとつに砂基礎がある。これは、砂の減衰作用により、電化柱の地震時の応答を抑制することを目的としたものである。一方で、近年発生した大規模地震において、砂基礎を有する電化柱に折損などの被害を受けたものが存在しているが、砂基礎の地震時挙動については未解明な部分が多く、その被害要因の詳細な分析は実施されていない。

そこで本研究では、電化柱砂基礎の地震時挙動を把握するための基礎的な検討として、電化柱基部及び基礎枠を模擬した試験体を用いて、砂基礎の単調載荷実験および交番載荷実験を実施したので、その実験概要および結果を報告する。

Key Words : power pole, sand-filled foundation, earthquake, the cyclic loading test

1. はじめに

鉄道高架橋上に設置された電化柱の基礎形式のひとつに、砂基礎がある。この砂基礎は、基礎枠に電化柱を挿入した後、基礎枠内に砂を充填し、上部にモルタルヒューズを設ける構造である。1978年宮城県沖地震において多くの電化柱にひび割れや折損といった被害が発生したことを受け、この砂基礎の開発が行われ、現在では、東北新幹線以降に建設された新幹線や在来線の高架橋において、数多くの電化柱の基礎形式として採用されている^{1,2)}。しかし、1993年北海道南西沖地震³⁾、1995年兵庫県南部地震⁴⁾、2004年新潟県中越地震⁵⁾、2011年東北地方太平洋沖地震⁶⁾などでは、砂基礎を有する電化柱においても折損などの被害が発生している。これらに対する被害原因の推定や、耐震性能向上のためには、砂基礎の地震時挙動の把握および、検証解析が必要である。

これまで、砂基礎の振動特性を把握するための研究が進められており、基礎的な研究として、静的載荷実験

^{1,2)}も実施されている。これらの検討では、実際の砂基礎構造を模擬した試験体が用いられており、基礎枠内下部の砂利や上部のモルタルヒューズの影響を含んだ結果が得られている。また、静的載荷実験においては、変位を段階的に大きくしていく交番載荷実験が行われており、単調載荷実験を行った事例は見受けられない。

そこで、本研究においては、砂基礎に充填された砂の挙動を把握するめ、基礎枠に砂のみを充填した試験体を用い、静的載荷実験を行った。実験においては、砂を用いた単調載荷実験、また、砂、川砂を用いた交番載荷試験を行ったので、その実験概要と結果を報告する。

2. 砂基礎の概要

砂基礎は、砂の摩擦などによる減衰作用により、電化柱の地震時の応答を抑制することを目的とした構造である。常時は、砂基礎上部に設置されたモルタルヒュー

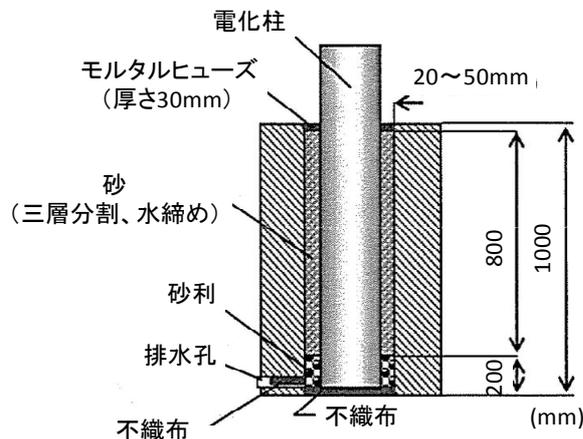


図-1 砂基礎の基本構造

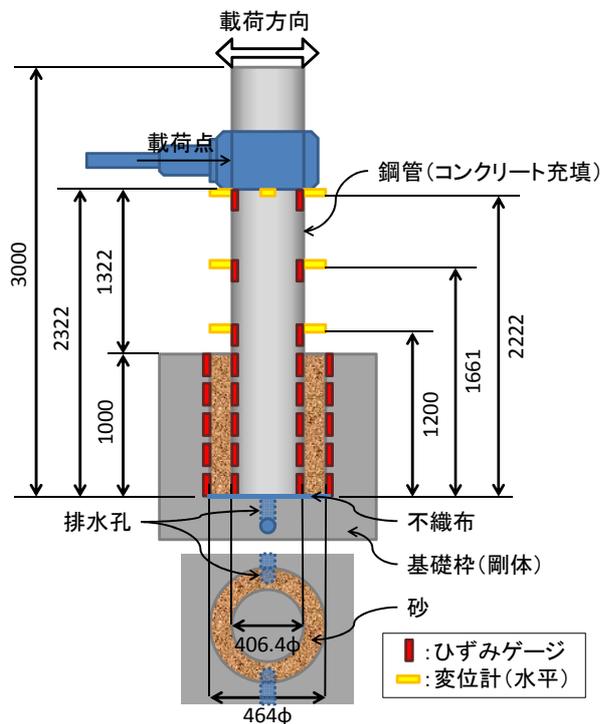


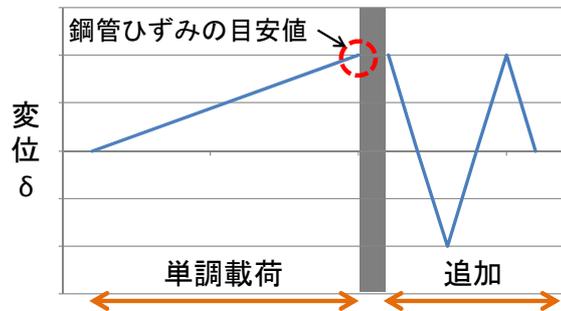
図-2 試験体概要

ズが電化柱を支持しているが、地震時にはこれが破壊されることで、砂が電化柱を支持する。砂基礎の基本構造²⁾を図-1に示す。基礎枠内下端から100mmの高さまでは砂利が充填され、その上に砂が充填される。上部には、厚さ30mm程度のモルタルヒューズが設置される。砂の充填は3層に分けて行われ、各層ごとに、砂の沈下が無くなるまで水締めを行う。基礎枠内下端には排水孔が設けられており、下面には砂の流出防止のため、不織布が敷かれている。

本研究においては、砂の挙動を把握することに重点を置き、基礎下部の砂利及び上部のモルタルヒューズを設置せずに実験を実施することとした。

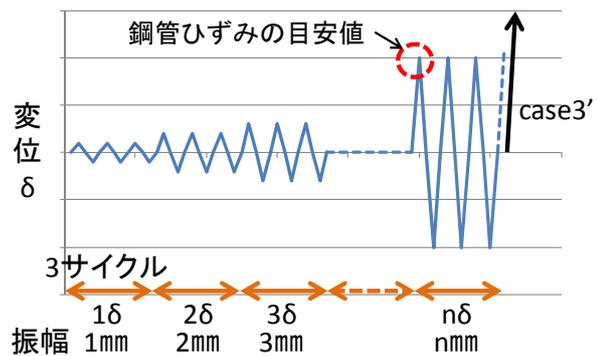
表-1 実験ケース

ケース	荷重方法	砂		
		種類	投入重量(kg)	密度(g/cm ³)
case1	単調	珪砂	60.5	1.51
case2	交番	川砂	62.5	1.56
case3	交番	珪砂	60.9	1.52
case3'	単調	珪砂		



※単調荷重後に追加で1.5サイクルの交番荷重

図-3 単調荷重実験荷重パターン(case1)



※case3'は、case3に続けて実施。鋼管が塑性変形後も荷重を継続。

図-4 交番荷重実験荷重パターン(case2, case3, case3')

3. 実験概要

(1) 試験体の作成

本実験に用いた試験体の概要を図-2に示す。本実験においては、コンクリート充填した高さ3mの鋼管(外径406mm, 厚さ19mm)により電化柱の基部のみを模擬した。鋼管の水平変位を計測するため、高さ2222mm, 1661mm, 1200mmの位置に変位計を設置した。また、鋼管の曲げ変形を計測するため、水平変位計の直下と、基礎枠内には200mmピッチでひずみゲージを設置した。

基礎枠には、鋼管(外径508mm, 厚さ22mm)を用い、剛性を確保できるように、外部を鉄筋コンクリートで覆う構造とした。基礎枠の変形を確認するため、基礎枠の鋼管にもひずみゲージを設置した。基礎枠下面に排水孔を

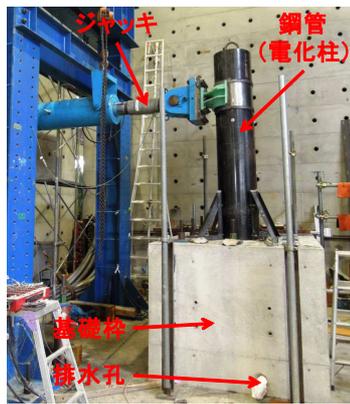


写真-1 試験体外観

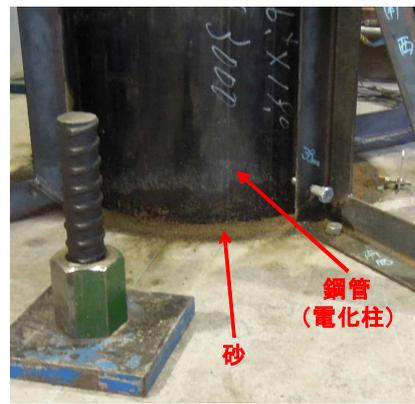


写真-2 砂充填状況(水締め後)

設け、砂の流出防止のため、不織布を敷設した。この基礎枠を鋼棒で床に固定し、载荷実験を実施する。

基礎の深さは1000mmであり、前述したように砂利やモルタルヒューズは用いず、砂のみで充填する。砂は、実施工と同様に3層に分けて各層ごとに水締めを行いながら充填する。

本試験体は、施工の都合上、基礎枠内底面にわずかながら凹凸があり、電化柱を模擬した鋼管を自立させた状態で、上端が载荷方向正側に14mm傾斜している。そのため、基礎枠内高さ500mmの位置で鋼管が中心に位置するように調整して設置した。

試験体の外観を写真-1に、砂を充填した状態の試験体の様子を写真-2示す。

(2) 実験ケース

実験ケースを表-1に示す。全ケースともに、高さ1200mm位地に設置した変位計のモニタリングによって制御を行う。

case1として、珪砂を充填した砂基礎の単調载荷実験を行う。単調载荷実験の载荷パターンを図-3に示す。鋼管のひずみに注視し、塑性変形しない範囲で変位を増加させる。鋼管のひずみが事前に検討した目安値(600 μ)程度に達したら载荷を終了する。なお、変位の大きいレベルでの繰り返しの影響を把握するため、単調試験終了後に追加で1.5サイクルの交番载荷を実施した。この追加試験の振幅は、単調载荷試験終了時の変位とした。

case2, case3では、case1とは载荷パターンを変化させ、3回繰り返しの正負交番载荷を行う。両ケースの载荷パターンは同一とするが、充填する砂の種類を変化(case2:川砂, case3:case1と同様の珪砂)させた。载荷のパターンは図-4に示すとおりであり、3サイクル毎に変位を1mmずつ増加させる。交番载荷試験においても、鋼管の弾性変形領域内での载荷を行うこととする。なお、case3の最後に、case1~3よりも大きな変位領域での荷重変位関係を把握するため、単調载荷を行った(case3')。case3'では、電化柱を模擬した鋼管が塑性化した後も、

安全に実験が行える範囲内で载荷を継続している。

4. 実験結果

各ケースの荷重変位関係を図-5~図-8に示す。変位は全て高さ1200mmに設置した正負両側の変位計の平均値である。case1では、正側、負側で同じ変位レベルの時に荷重も同程度となっているのに対し、case2, case3では、正側より負側の荷重が小さくなっている。これを詳細に検討するために、case2における1 δ 1サイクル目の基礎枠内での鋼管の挙動を図-9に示す。これは、鋼管が剛体変形しているという仮定に基づき、基礎上部に設置された変位計の値から推測したものである。この結果を見ると、正側に载荷した後に除荷すると、基礎枠中央より負側に寄った位置で鋼管が直立している。さらに負側に载荷した後除荷すると、鋼管は変位ゼロ付近で直立している。これと同様の整理を行った結果を、図-10(case1, case3の1, 3, 5 δ 载荷時)、図-11(case2の1, 3, 5, 10 δ 载荷時)に示す。case1では、载荷後の荷重ゼロにおいても鋼管に残留変位は見られないが、case2, case3では、鋼管の直立する位置が中央からずれている。そのため、正側に载荷する際の実質の変位量が負側より大きくなり、図-6, 図-7のように同一変位において正側の荷重が大きくなったものと考えられる。

各ケースの荷重変位関係の正側を拡大したものを、図-12~図-15に示す。同一変位時の2サイクル目、3サイクル目の荷重に着目すると、徐々にその値が小さくなっている。また、荷重の増加の様子も1サイクル目とは異なっている。これは、1サイクル目に砂がある程度締め固められたためであると考えられる(図-17)。ここで、変位が大きくなるにつれ、鋼管と基礎枠により砂が圧縮されることで砂基礎の表面が隆起し、鋼管が直立した状態において、鋼管と砂の間に隙間が生じていることを確認している。このように、繰り返しにより荷重が低下する傾向は、既往の研究²⁾でも見られている。ただし、

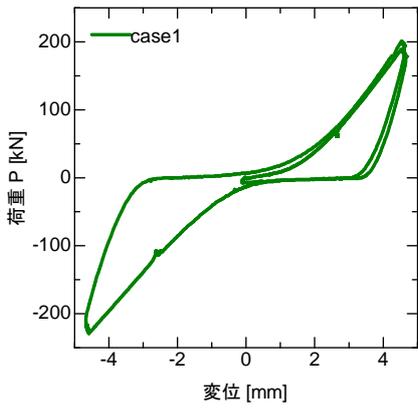


図-5 case1 荷重変位関係

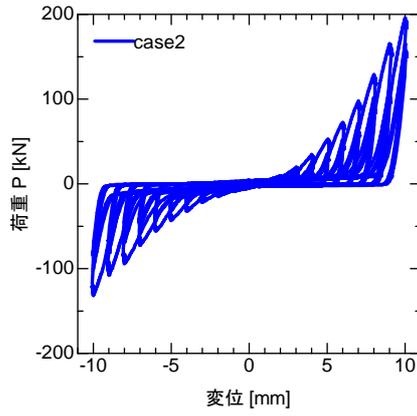


図-6 case2 荷重変位関係

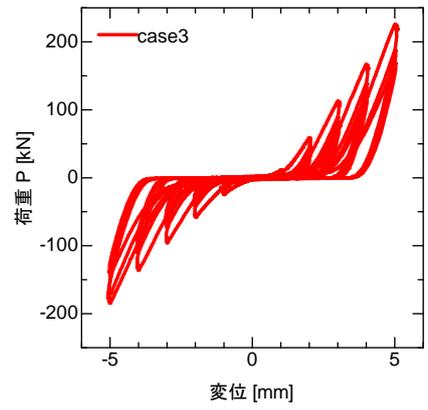


図-7 case3 荷重変位関係

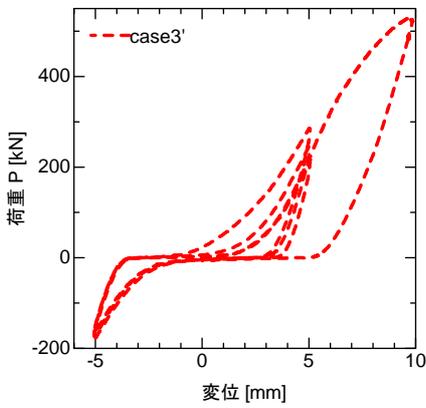


図-8 case3' 荷重変位関係

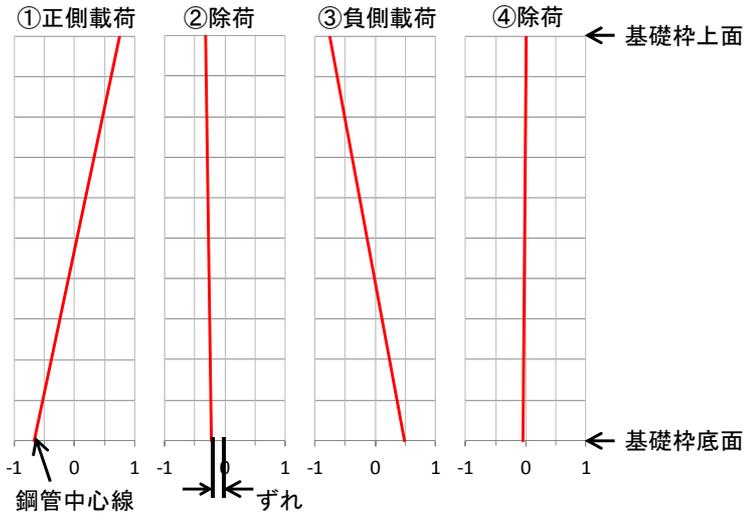


図-9 基礎枠内の鋼管の挙動(case2_1δ 1サイクル目)

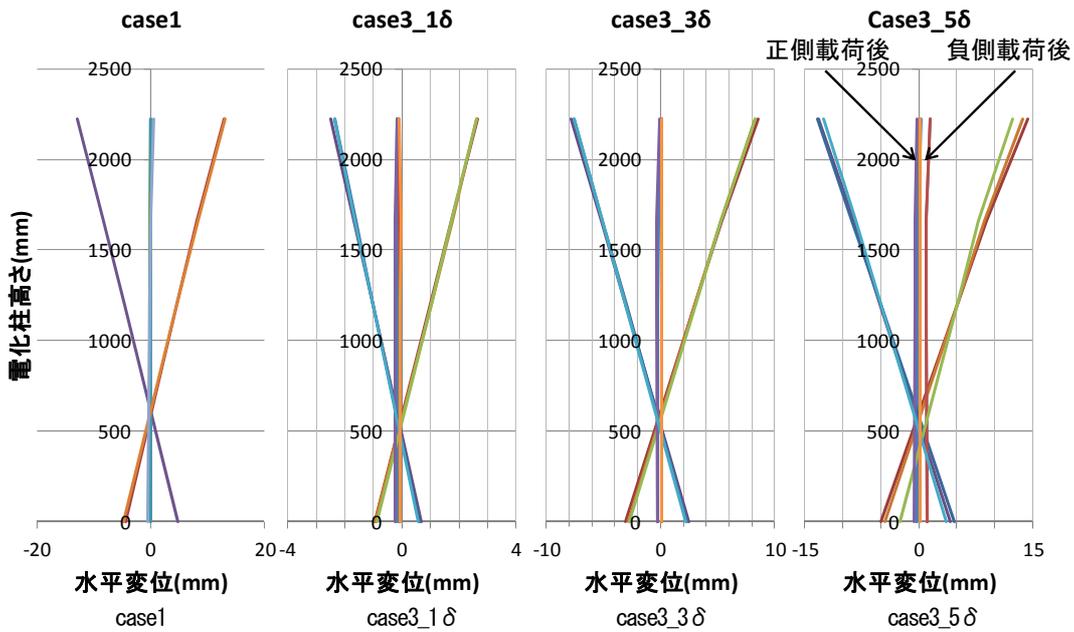


図-10 鋼管の挙動(case1, case3)

case1, case3'においてはこの傾向とは異なる. 例えば図-15を見ると, 1サイクル目より, 2サイクル目の荷重の方

が大きくなっている. ここで, case3'の1サイクル目から2サイクル目にかけての砂基礎の状態を観察した結果,

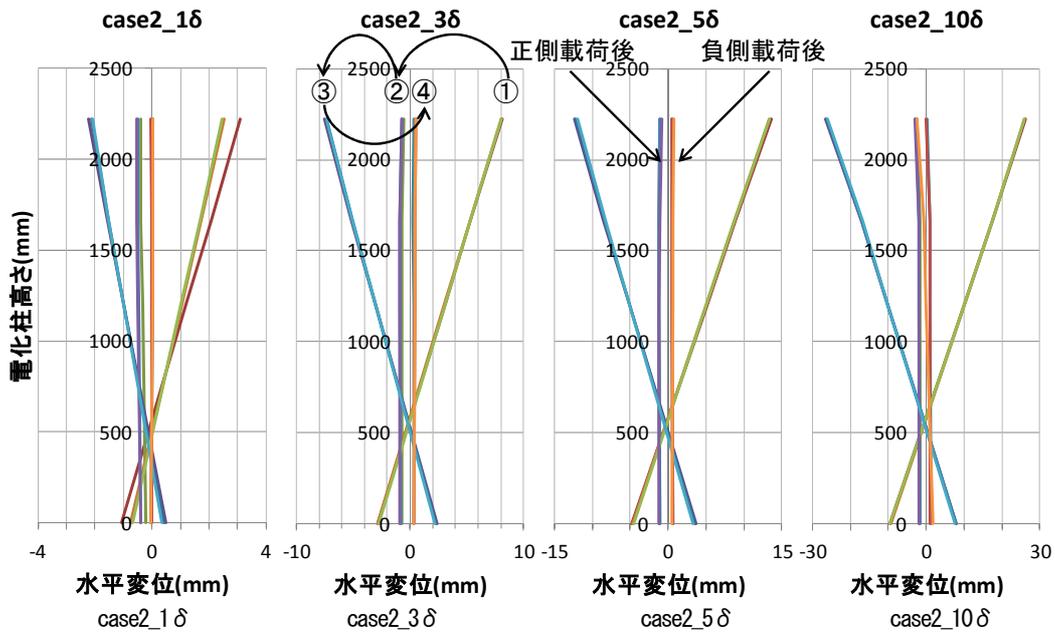


図-11 鋼管の挙動(case2)

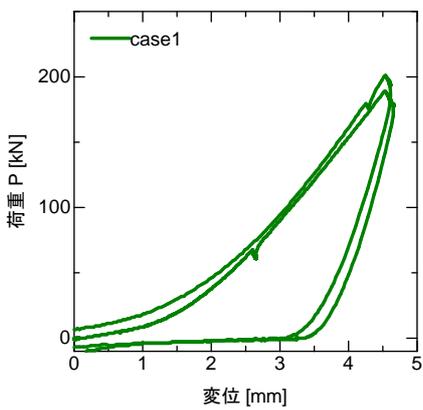


図-12 case1 荷重変位関係(正側)

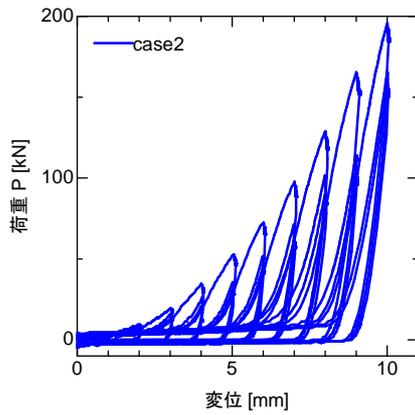


図-13 case2 荷重変位関係(正側)

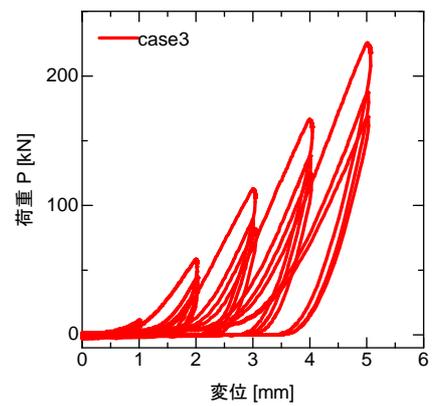


図-14 case3 荷重変位関係(正側)

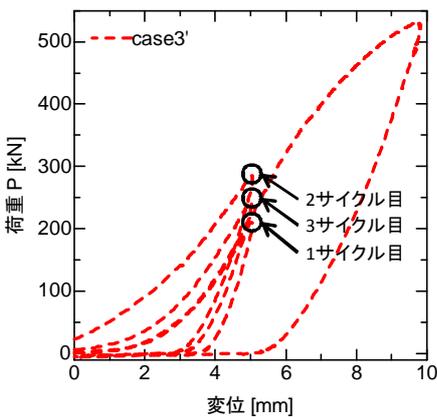


図-15 case3' 荷重変位関係(正側)

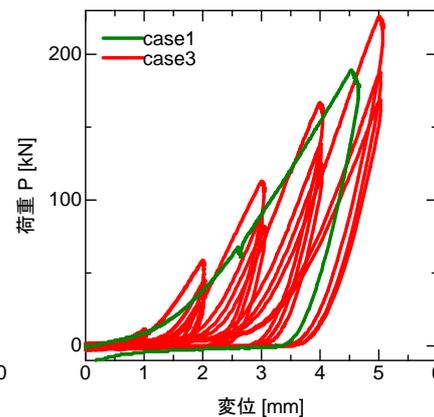


図-16 case1,case3 荷重変位関係(正側)

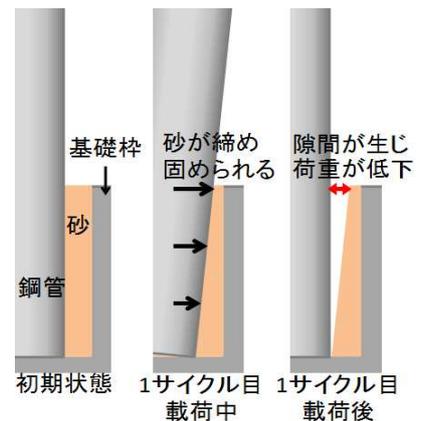


図-17 砂の締め固め

砂基礎表面の隆起が低くなっていることを確認している。このことから、case3'の2サイクルが1サイクル目より大きな荷重を示したことの理由は、締め固められた砂が何らかの原因により崩れ、鋼管との間に生じていた隙間を

埋めたためと考えられる。またこれと同様の現象は、図-12に示す1サイクル目と2サイクル目の履歴がほぼ同じであったcase1にも見られた。

図-15に示すcase3'の単調載荷時の荷重変位関係に着目

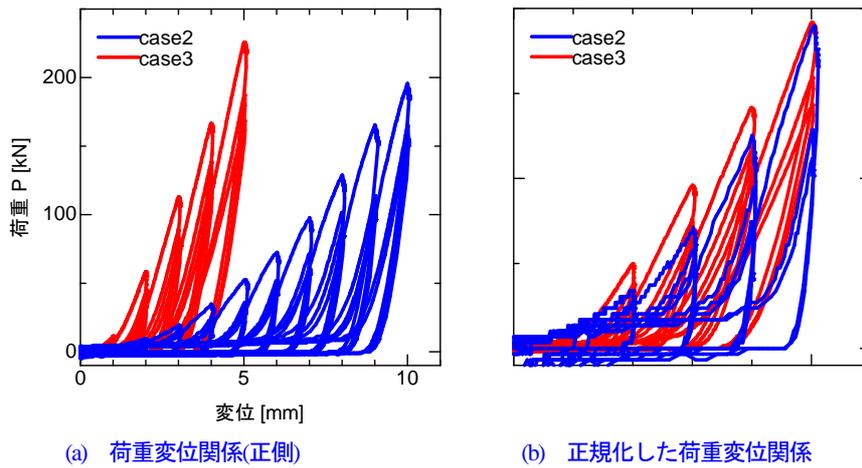


図-18 case2,case3 荷重変位関係の比較

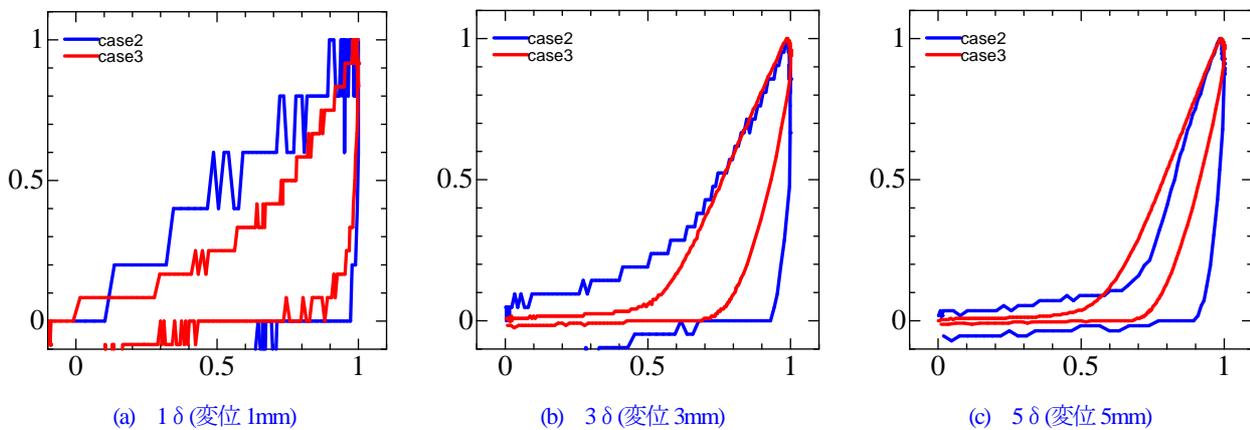


図-19 case2,case3 正規化した荷重変位関係(1 サイクル目)

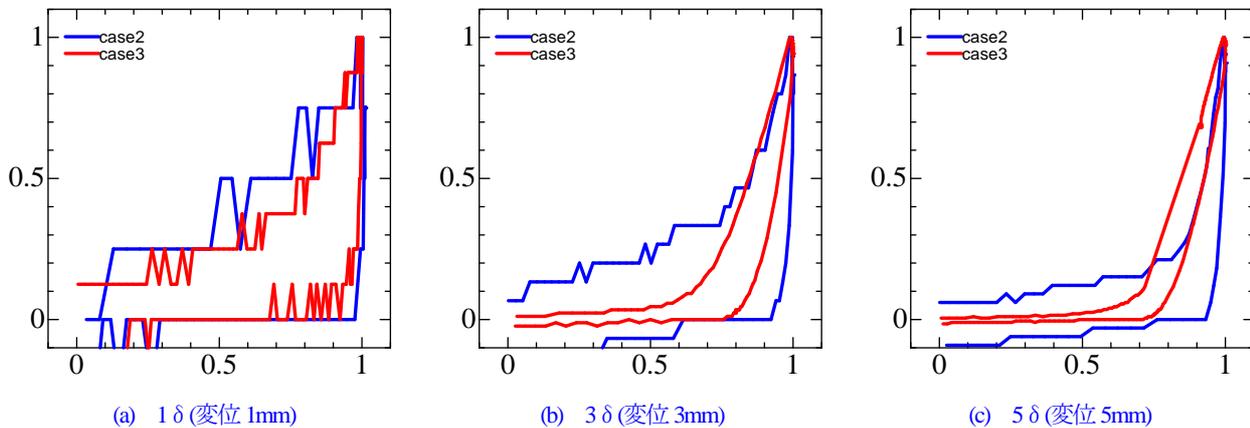


図-20 case2,case3 正規化した荷重変位関係(3 サイクル目)

すると、変位が7mm程度となるあたりから、傾きが緩やかになっている。この要因については、鋼管が塑性化した影響などが推測されるが、詳細は不明である。

図-16は、case1とcase3の正側の荷重変位関係を重ねたものであるが、case1の荷重変位関係がcase3を概ね包絡しており、砂が同一であれば、载荷パターンによらずその骨格はほぼ同一であることが確認できる。

続いて図-18では、砂の種類の違い（川砂、珪砂）に

よる影響を比較する。このうち、図-18(a)は、川砂を用いたcase2の正側の荷重変位関係を比較しているが、両者の特性は大きく異なっており、用いる砂の剛性の違いが反映されている。続いて、それぞれの荷重変位関係を変位5mmの1サイクル目の荷重で正規化したものを図-18(b)にしめすが、両者はほぼ重なっており、剛性の変化率や履歴特性は用いる砂にかかわらず概ね等しいことが分かる。これをもう少し詳細に見るために、変位1mm、

3mm, 5mmの際の荷重変位関係を正規化したものを図-19 (1サイクル目), 図-20 (3サイクル目) に示すが, 両者の形状は概ね一致していることが分かる。

また, 各ケースにおいて変位が最大に達した際の鋼管の変形を図-21に示すが, case1~3において, 基礎枠内での鋼管の変位はわずかであることを確認している。なお, 基礎枠はほぼ変形していないことを確認している。

最後に, 各ケース毎に実施した自由振動試験から得られた固有振動数を表-2に示すが, 各ケース共に砂を充填することにより固有振動数が大きくなり, 载荷後には固有振動数が低下することが分かっている。

5. おわりに

電化柱砂基礎の地震時挙動を把握するための基礎的な検討として, 電化柱基部及び基礎枠を模擬した試験体を用いて, 砂基礎の静的载荷実験を行い, その結果を示した。これにより, 砂を充填した場合, 単調载荷の骨格曲線は, 交番载荷の結果を概ね包絡することが分かった。また, 剛性の変化率および正規化した履歴曲線の形状は, 用いる砂の種類によらず概ね一致することが分かった。このことから, 用いる砂の初期剛性を評価することで, 砂によらず, 同様の非線形特性のでモデル化できる可能性があると言える。

今後はこの試験結果に基づいて簡易な骨格曲線, 履歴曲線のモデル化を行うとともに, 各種試験結果の再現解析を実施する予定である。

参考文献

- 1) 坂井公俊, 室野剛隆, 佐藤勉: 電車線柱砂基礎の载荷実験と地震時挙動の把握, 鉄道力学論文集, 第12号, 2008
- 2) 原田智: 砂詰基礎の交番载荷実験, 電気学会交通・電気鉄道

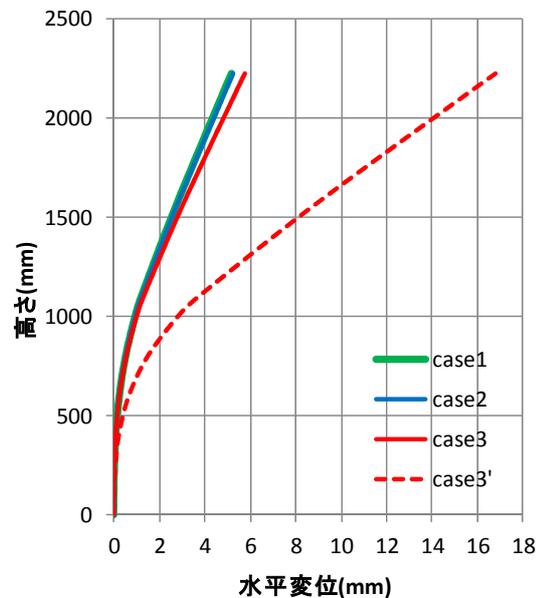


図-21 各ケースにおける鋼管の最大変形量

表-2 固有周期の変化(载荷方向)

ケース	固有振動数 (Hz)		
	投入前	投入後直後	終了時
case1	6.10	15.70	10.90
case2	5.30	15.40	13.60
case3	2.90	15.60	-
case3'	-	-	6.30

研究会, TER-13-042, 2013.

- 3) 庄司次男: 南西沖地震の電車線路復旧概要, 鉄道電気, 9, pp.24, 1994.
- 4) (社) 日本鉄道電気技術協会: 鉄道電気設備の被害と復旧の記録~阪神・淡路大震災を乗り越えて~, 1996.
- 5) 東日本旅客鉄道株式会社: 新潟県中越地震震災復旧記録誌, 2005.
- 6) 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.

LOADING TESTS ON SAND-FILLED FOUNDATION FOR POWER POLE

Hirohisa SAKAI, Satoshi HARADA, Kimitoshi SAKAI
and Yoshitaka MURONO

One of the common foundations for power pole is the sand-filled foundation. It is expected that sand-filled foundations works as a damper so as to dissipate vibration energy of poles during earthquakes. However, quite a number of poles with the sand-filled foundation have been severely damaged in the past earthquakes. The earthquake performance of this foundation is not clarified completely.

In this study, the monotonic and cyclic loading tests are conducted as fundamental researches to understand dynamic behavior of the sand-filled foundation. In these tests, the test body which modeled a power pole bottom and a foundation frame is used. This paper reports the summary of the test.