

論文 砂基礎 PC 電化柱の水平振動台試験による応答特性

草野 英明*1・渡辺 一功*2・岩田 道敏*3・築嶋 大輔*4

要旨: 東北新幹線高架橋上の PC 電化柱が東北地方太平洋沖地震により被害を受け、復旧に多くの時間を要した。PC 電化柱の基礎形式の中で減衰効果の高いと言われている砂基礎についても、モルタル基礎と同様の被害を受けたことから、砂基礎の PC 電化柱を模した試験体を用いて振動台試験機による実験を行った。その結果、砂が乾燥状態で十分な量が充填されていれば、繰り返し大きな振動を受けても減衰効果が期待できる一方で、砂が湿潤状態で PC 電化柱の揺れにより充填された砂が圧縮され、電化柱の周囲に空隙ができやすい場合や、砂の量が減少している場合は減衰効果が小さくなると判明した。

キーワード: PC 電化柱, 砂基礎, 水平振動台試験, 応答特性

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震および同 4 月 7 日に発生した余震では、東北新幹線の高架橋や橋梁上のプレストレスコンクリート電化柱(以下、PC 電化柱)が、折損・変位し復旧に多くの時間を要した。図-1 に被害状況の一例を示す。このように多くの被害を受けた PC 電化柱の基礎形式には、PC 電化柱の基礎部にモルタルを充填し固定するモルタル基礎、PC 電化柱下端部に座板を設け、アンカーボルトで基礎コンクリートと座板を固定した座板基礎、PC 電化柱の基礎部に砂を詰め、砂の上部 30mm 程度にモルタル(以下、モルタルヒューズ)を充填する砂基礎の 3 種類がある。本稿では砂基礎における砂の状態の違いが PC 電化柱の損傷に与える影響について、水平振動台試験により検討した結果を述べる。



図-1 折損変位した PC 電化柱 (砂基礎)

2. 砂基礎の導入経緯¹⁾

1970 年代までの PC 電化柱における自然災害に対する強度は、主として風荷重に対して考えられており、地震に対しては安全であると考えられていたが、1978 年の宮城県沖地震において、多くの PC 電化柱にひび割れ、折損被害が発生し、この経験を踏まえて砂基礎が開発され、PC 電化柱の新たな基礎形式として採用された。砂基礎は、常時または小規模地震時にはモルタルヒューズによって PC 電化柱付け根の変位を拘束しているが、大規模地震時にはモルタルヒューズが破壊して、PC 電化柱の振動エネルギーが減衰の大きな砂によって吸収されることで、PC 電化柱の応答を低減させる機能を有している。

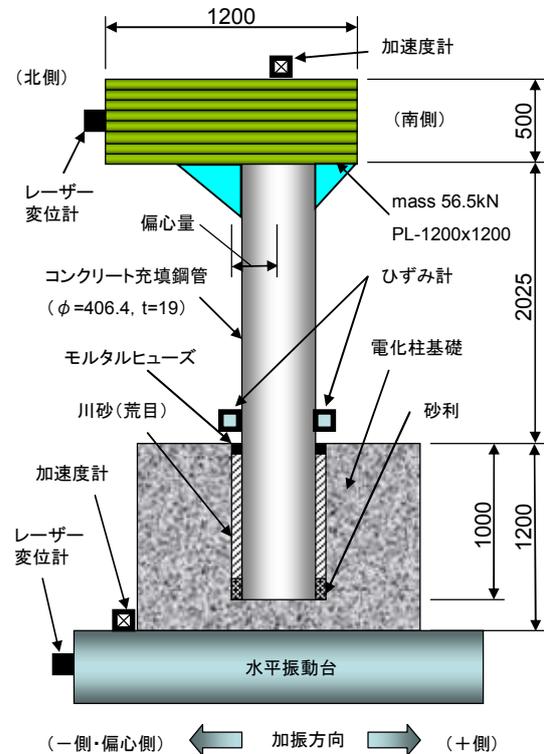


図-2 試験体概要図 (単位: mm)

3. 実験概要

本来減衰効果の高い砂基礎の電化柱が折損した原因

*1 東日本旅客鉄道(株) 建設工事事務部 構造技術センター 主席 (正会員)
 *2 北海道旅客鉄道(株) 工務部 工事課 工事計画 G 主席 工修 (正会員)
 *3 東日本旅客鉄道(株) フロンティアサービス研究所 上席研究員 工修 (正会員)
 *4 東日本旅客鉄道(株) 建設工事事務部 構造技術センター 課長 工修 (正会員)

として、東北地方太平洋沖地震においては、継続時間の長い地震動を受けて砂の減衰効果が低下し、PC電化柱と電化柱基礎の上部が接触した衝撃で大きな曲げモーメントが発生したと推定した。そこで、本研究では砂基礎の砂の状態が、砂基礎の減衰効果にどのような影響を与えるか砂の状態をパラメータにして実験を行った。

実験は、実物大の電化柱基礎（埋め込み長 1000mm）に電化柱を模したコンクリート充填鋼管を建て込み、電化柱基礎と鋼管柱の隙間に対して、砂利（ $\phi 10\text{mm}\sim 20\text{mm}$ ）を 100mm の高さで底部に敷き詰め、その上に川砂（荒目）を電化柱基礎の天端面より 30mm 低い位置まで充填した。充填後は、モルタルヒューズとして無収縮モルタルを打ち込み、硬化確認後、水平振動試験装置（最大搭載質量 200kN・最大加振力 $\pm 500\text{kN}$ ・最大変位 $\pm 300\text{mm}$ ・最大加速度 1.6G）で加振した。図-2 に試験体概要図を示す。

加振は線路直角方向を想定して 1 方向に作用させた。これは線路並行に配置された電化柱は架線やケーブルで繋がっているため、線路方向に対する地震の影響が小さいためである²⁾。また、鉛直方向の地震動を作用させていないのは PC 電化柱の自重が 30kN 程度と小さく、鉛直方向の地震動による影響は小さいと推定したためである。

なお、東北地方太平洋沖地震において PC 電化柱が本震では折損せずに、余震を受け折損したのもあったため、加振により生じた傾斜は戻さず、そのままの状態を加振を 2 回繰り返した。

3.1 入力地震動

電化柱に作用させる地震動は、東北地方太平洋沖地震（K-net 築館）とし加速度応答スペクトルを図-3 に示す、この地表面地震波を高架橋下端へ入力して算出された高架橋天端での動的応答値とした。動的応答値の算定に使用する高架橋は、実在する東北新幹線の高架橋とした。

なお、地震時の構造物には、図-4(b) のとおり水平振動のほか、回転振動が発生しており、この構造物の回転振動が PC 電化柱の応答を増大させることが報告されている³⁾。そのため、応答値については、高架橋の回転振動による影響を考慮するため、高架橋天端の水平応答値に回転振動補正係数 1.8⁴⁾ を乗じた。さらに、試験体の周期と実際の電化柱の周期とは大きく異なるため、入力地震動の時間軸を試験体と実際の電化柱との周期の比を乗じて短縮した。

また、電化柱の長さが実物と試験体では一致しないため、発生曲げモーメントとせん断力を同時に合わせることは不可能であった。そのため本試験では常時と地震時に発生する電化柱地際の曲げモーメントが、実際と同等になるよう試験体上部の mass を偏心させて設置し、実験を行うこととした。

3.2 各種パラメータ設定

試験体は全部で 5 体あり、砂の乾湿・施工方法・モルタルヒューズの有無・砂量の 4 項目に分類して高架橋上に建植してある電化柱を再現する形で、表-1 に示すとおりパラメータの設定を行なった。パラメータの設定理由を以下に示す。

(1) 砂の乾湿

砂を乾燥状態にさせた場合と、モルタルヒューズと電化柱との隙間より雨水等が浸透し、砂が湿潤状態にある場合を想定して、この違いによる影響を確認する。

(2) 施工方法

砂を詰める際の施工方法は、建設当時の施工基準で、砂を 3 層に分けて水締めを行ったものだが、もう少し粗く施工されている可能性もあると考え、砂を 1 層で詰めた場合を想定して、この違いによる影響を確認する。

(3) モルタルヒューズの有無

現地のモルタルヒューズにおいては、経年劣化等によりモルタルヒューズが損傷している場合や、砂が電化柱基礎天端面まで充填され、その上にモルタルが被せられ、

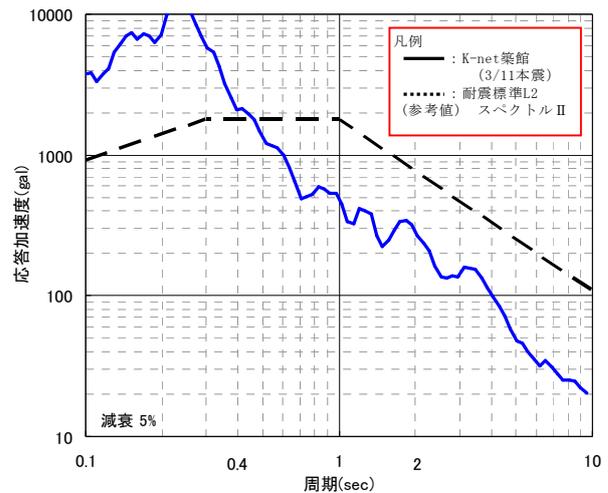


図-3 加速度応答スペクトル（K-net 築館）

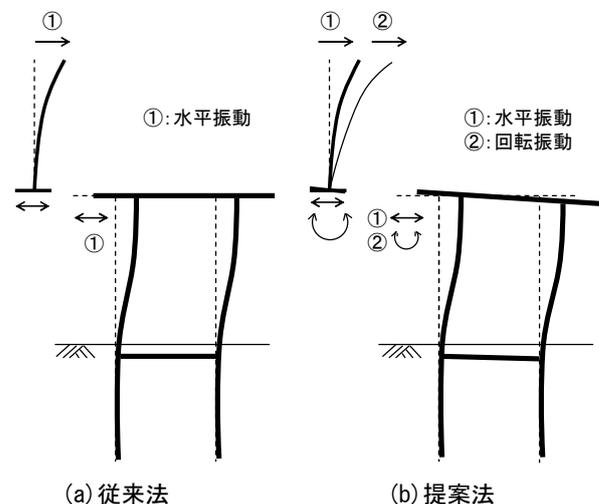


図-4 回転振動概要図

モルタルヒューズとしての機能を果たしていない例があると想定されたため、モルタルヒューズなしを考慮して、この違いによる影響を確認する。

(4) 砂量

砂の量は通常モルタルヒューズ下面まで充填されているが、列車の振動や過去の地震等の影響で施工当初よりも砂が沈下している場合を想定して、この違いによる影響を確認する。

3.3 試験体計測項目

振動台試験機および試験体には、図-2 に示すとおり mass 天端と振動台天端に加速度計を設置し、mass 側面と振動台側面にはレーザー変位計をそれぞれ設置した。また、コンクリート充填鋼管柱にはコンクリート基礎天端面より+100mmの加振方向（南側・北側）にひずみ計を設置し、リアルタイムで計測を行った。

4. 砂基礎振動台試験結果

4.1 各試験体の損傷状況

実験の結果、モルタルヒューズの無い No.4,5 を除く試験体において、加振1回目でモルタルヒューズの損傷が確認された。モルタルヒューズ損傷後に実施した2回目の加振では、全ての試験体で1回目と比較し柱傾斜量が大きくなる傾向にあった。また、2回加振を繰返したが、柱と基礎上端部は全ての試験体で接触しなかった。試験体加振結果一覧および各試験体2回目加振後のモルタルヒューズ損傷状況を、表-2、図-5 に示す。

4.2 各試験体の損傷状況

(1) 砂の乾湿の影響 (No.1 と No.2)

実験の結果、図-5 のとおり、加振直後のモルタルヒューズの損傷状態は、砂が乾燥している No.2 よりも砂が湿潤状態の No.1 の方が激しくなるがひずみについては明らかな違いは無かった。一方、柱傾斜量は表-2 のとおり、砂が乾燥状態の場合に繰返し载荷しても増加しにくくなる傾向が確認された。これは、砂が湿潤状態の場合は加振による PC 電化柱の揺れにより、充填された砂が圧縮され電化柱の周囲に空隙ができるが、砂が乾燥状態の場合は、砂が固まることもなく電化柱との周囲に空隙

表-2 試験体加振結果一覧

計測項目 試験体No.	1 回目加振		2 回目加振		柱と基礎 接触加振 回数
	回転振動補正係数 x 1.8				
	柱傾斜量 (mm)	最大ひずみ (μ)	柱傾斜量 (mm)	最大ひずみ (μ)	
1	49.0	337	72.2	541	接触なし
2	95.1	362	99.0	486	接触なし
3	60.6	377	107.8	634	接触なし
4	146.5	537	153.8	657	接触なし
5	38.2	430	44.2	427	接触なし

※柱傾斜量は、mass と振動台の応答変位波形における最後の変位振幅の中心間の距離。

<参考> JIS 規格の 15t 柱における破壊曲げモーメントの規格値 300kN・m が電化柱地際に発生した場合のひずみは 600 μ 程度。

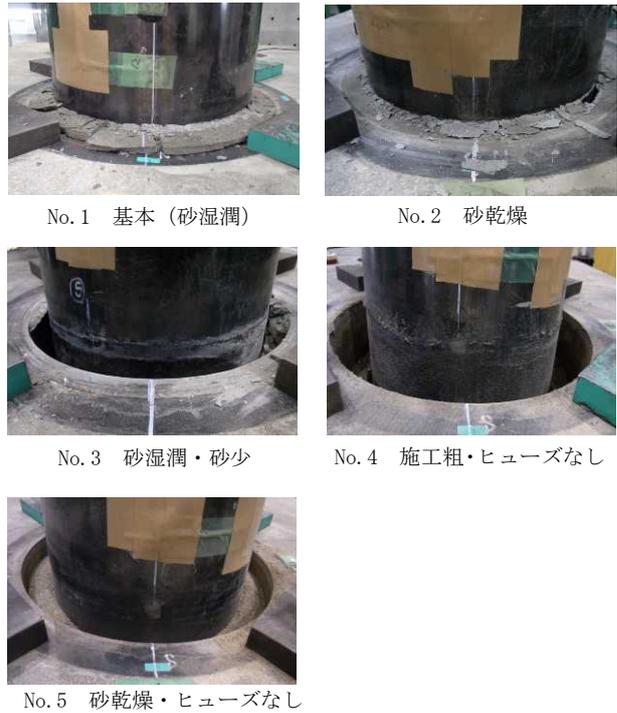


図-5 試験体損傷状況（2回目加振後）

表-1 各種パラメータ設定一覧

試験 No.	砂の乾湿	施工方法	ヒューズの有無	砂量	備考
1	湿	-	有	-	基本
2	乾	-	有	-	砂乾燥
3	湿	-	有	少なめ	砂少なめ
4	湿	粗	無	-	施工粗い、ヒューズなし
5	乾	-	無	-	砂乾燥、ヒューズなし

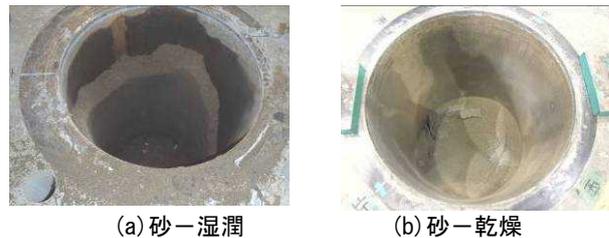


図-6 砂の乾湿の影響（電化柱引抜き後）

もない、試験の終了後に柱を引き抜いた後の状態を見ても、図-6(a)のとおり砂が湿潤状態では電化柱基礎の内面に圧縮され固結しているのに対し、乾燥している場合は、図-6(b)のとおり砂が電化柱基礎底部に崩落していることから、繰り返し加振を受けて一瞬発生した柱と砂との隙間に乾燥した砂が崩落し、電化柱の周囲に空隙ができないためと考えられる。

(2) モルタルヒューズの有無の影響 (No. 2 と No. 5)

実験の結果、表-2 のとおり柱傾斜量を見ると、砂が乾燥状態の No. 2 と No. 5 の場合は、モルタルヒューズがある No. 2 の方が大きかった。したがって柱傾斜量は、砂が乾燥状態の場合、モルタルヒューズがある方が大きくなる結果となった。これは、砂が乾燥状態でモルタルヒューズがある場合は、始めに電化柱基礎天端のモルタルヒューズが支点となって電化柱下端が変位し、モルタルヒューズが無い場合に比べ柱の傾斜が大きくなるためと思われる。また、ひずみについて1回目の加振ではモルタルヒューズの無い No. 5 の方が大きくなる傾向が確認された。

(3) 砂の量による影響 (No. 1 と No. 3)

実験の結果、モルタルヒューズの壊れ方は図-5 のとおり砂の量が少ない No. 3 の方が激しかった。しかし、砂が少ないためモルタルヒューズは破壊されると同時に下に崩落した。柱傾斜量およびひずみは、表-2 のとおり、砂の量が少ない No. 3 の方がそれぞれ大きい。したがって、モルタルヒューズは砂の量が少ないほど壊れやすく、柱傾斜量とひずみは砂の量が少ないと大きくなる傾向が確認された。

4.3 各種時刻歴波形による比較

基本試験体の No. 1 の1回目の加振で得られた時刻歴波形を用いて、砂基礎電化柱の損傷過程を推察する。さらに柱傾斜量が最も大きい試験体 No. 4、砂が乾燥していてモルタルヒューズの無い試験体 No. 5 との比較をそれぞれ行う。

(1) 基本試験体 No. 1

基本試験体 No. 1 の mass 変位・振動台変位および mass 加速度、南側柱ひずみ、振動台の入力加速度の時刻歴波形を図-7 に示す。実験の結果、0.3min 付近より振動台の加振が始まり、その直後、比較的大きな 300gal 程度の加速度で加振されるが、0.8min 付近までモルタルヒューズの損傷は無いと推定される。mass の変位および加速度振幅も概ね 0 のラインを中心に正負に振幅されている。しかし、0.8min 付近で振動台への入力加速度の最大値である 758gal の加速度で加振されるとモルタルヒューズの損傷が始まり、mass 変位が偏心側(一侧)に移行すると同時に、mass 加速度も偏心側(一侧)で振幅するようになる。また、モルタルヒューズが損傷を受け、柱が

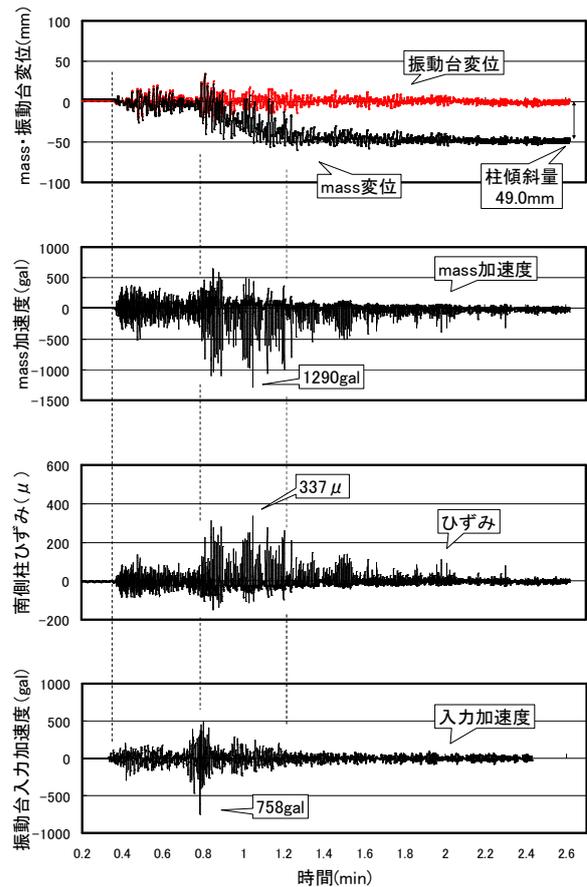


図-7 時刻歴波形 (試験体 No. 1)

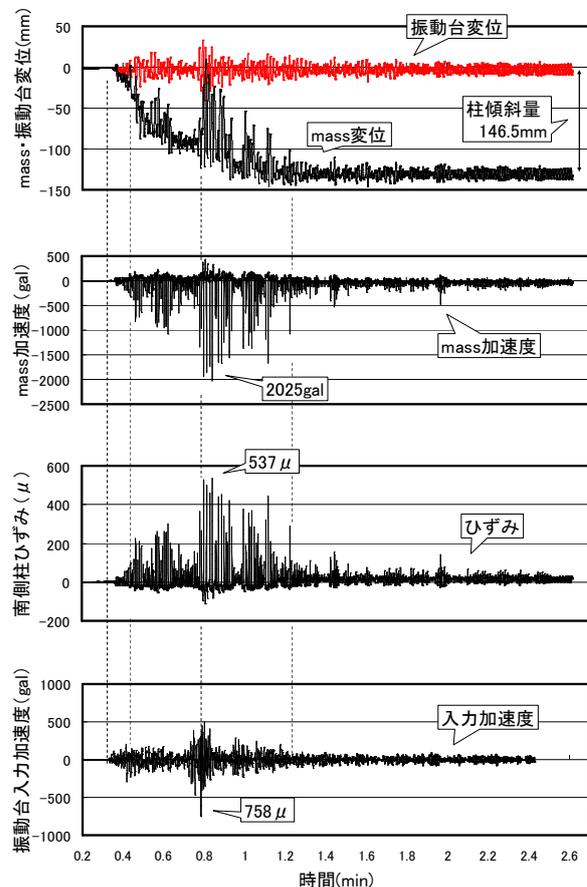


図-8 時刻歴波形 (試験体 No. 4)

徐々に傾斜した 0.8min 付近から 1.2min 付近の間で入力されている振動台入力加速度は 300gal 程度となっているが、mass 加速度は 1.0min 付近で最大の 1290gal を記録している。このとき発生した最大加速度に合わせて、柱の引張ひずみも最大値である 337μ を記録する結果となった。

(2) 試験体 No. 4 (施工粗く・モルタルヒューズ無し)

最も柱傾斜量の大きかった試験体 No. 4 では、図-8 に示すとおり、0.3min 付近より振動台の加振が始まり、その直後の 0.4min 付近から、mass 変位が大きく偏心側(一侧)へ移行しながら振幅を繰返し、0.8min 付近で最大入力加速度による加振がされた後、さらに mass 変位が偏心側(一侧)に進行する結果となった。また、この 0.8min から 1.2min の中で mass 変位量が增大し、全 5 体の中で柱傾斜量が 146.5mm と最も大きい結果となった。また、傾斜量が大きいと mass 加速度およびひずみが增大する傾向があり、mass 加速度 2025gal とひずみ 537μ についても同様に、1 回目の加振としては、5 体中最も大きい結果となった。

(3) 試験体 No. 5 (砂乾燥・モルタルヒューズ無し)

砂が乾燥し、モルタルヒューズの無い試験体での実験の結果、図-9 に示すとおり、0.3min 付近より振動台の加振が始まり、モルタルヒューズが無いため加振直後より偏心側(一侧)に移行し、偏心側(一侧)で振幅を繰返す。また 0.8min 付近で最大入力加速度による加振がされた以降も、若干 mass 変位は大きくなるが、砂乾燥でモルタルヒューズがある試験体 No.2 と比べて、柱傾斜量は小さい結果となった。

また、試験体 No.1, No.4 と比べて、0.8min 以降の mass 加速度および、ひずみの応答値が小さくなる傾向が見られ、乾燥した砂による減衰効果が高いと認められた。

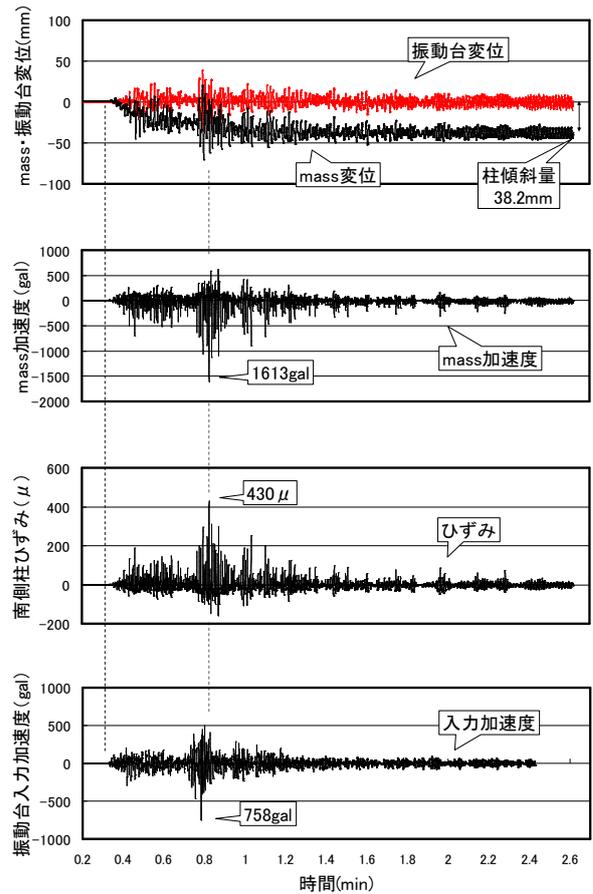


図-9 時刻歴波形(試験体 No. 5)

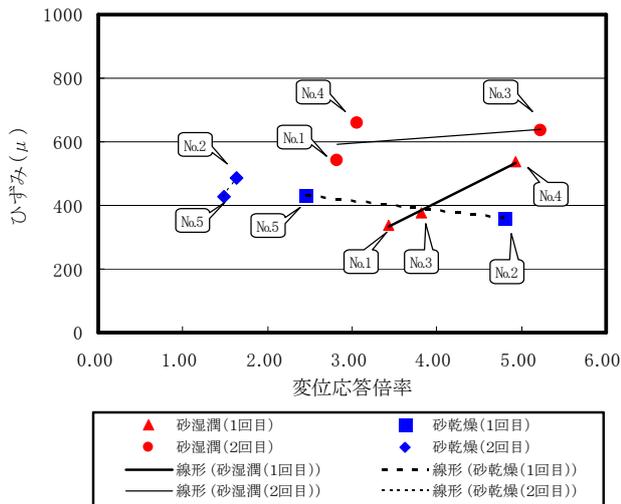
4.4 応答変位倍率及び応答加速度倍率による比較

振動台への加速度は一定の地震動を入力しているが、試験体の応答が 1 体 1 体異なるため振動台の変位や加速度を完全に同一にすることはできない、そのため mass 変位 / 振動台変位および mass 加速度 / 振動台加速度、それぞれの応答倍率を求めて比較した。変位応答倍率および加速度応答倍率一覧を表-3 に示し、応答倍率とひ

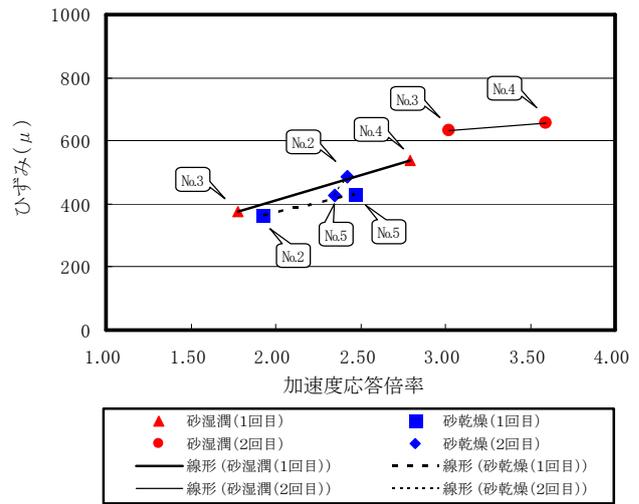
表-3 変位応答倍率および加速度応答倍率一覧

試験 No.	最大入力加速度 (gal)		最大ひずみ (μ)		mass 変位 (mm)		振動台 変位 (mm)		変位 応答倍率		mass 加速度 (gal)		振動台 加速度 (gal)		加速度 応答倍率		備考
	1回目加振	2回目加振	1回目加振	2回目加振	1回目加振	2回目加振	1回目加振	2回目加振	1回目加振	2回目加振	1回目加振	2回目加振	1回目加振	2回目加振	1回目加振	2回目加振	
1			337	541	50.1	37.6	14.6	13.3	3.43	2.83	1290	2167	-	-	-	-	基本(地震動:東北)
2			362	486	108.8	57.5	22.7	35.1	4.79	1.64	1303	1729	677	713	1.92	2.42	砂乾燥
3	758	758	377	634	62.5	49.2	16.4	9.4	3.81	5.23	1354	2232	763	738	1.77	3.02	砂少なめ
4			537	657	115.7	70.9	23.5	23.2	4.92	3.06	2025	2477	726	689	2.79	3.60	施工粗く、ヒューズなし
5			430	427	62.5	23.8	25.5	16.1	2.45	1.48	1613	1574	652	640	2.47	2.46	砂乾燥、ヒューズなし

※mass 変位と振動台変位は、それぞれの試験体でひずみが最大値になった直前の変位波形のピーク値を示している。



(a) 変位応答倍率とひずみの関係



(b) 加速度応答倍率とひずみの関係

図-10 応答倍率特性

ひずみの関係を図-10に示す。なお、加振を2回行っているため、それぞれの比較を示す。表-3より、1回目の加振の変位応答倍率では、No.4(施工が粗くモルタルヒューズがない)が最も倍率が高く、次いでNo.2(砂乾燥、モルタルヒューズあり)、No.3(砂少なめ)と続いている。加速度応答倍率でもNo.4が最も高い倍率となり、次いでNo.5(砂乾燥、モルタルヒューズなし)となっている。2回目の加振の変位応答倍率では、No.3の倍率が最も高く、次いでNo.4と続いている。加速度応答倍率でもNo.4の倍率が最も高く、次いでNo.3となった。

変位の応答倍率とひずみの関係では図-10(a)に示すように1回目の加振および2回目の加振でも、砂が湿潤状態の場合、変位応答倍率の増加に伴いひずみが増加していることがわかる。これに対し砂が乾燥している場合、1回目の加振では、変位応答倍率の増加に伴うひずみの数値が減少傾向にあり、砂が乾燥している場合は砂の減衰効果が高く、ひずみの発生が低減できる結果となった。

また、2回目での加振ではモルタルヒューズが破壊された状態での加振となるが、ひずみが大きく増大しないことから、繰り返し大きな振動を受けて乾燥した砂の減衰効果により、ひずみの発生が低減できることが確認できた。

加速度の応答倍率とひずみの関係では図-10(b)に示すとおり、1回目の加振は砂の乾湿に関わらず、加速度応答倍率の増加に伴いひずみも増加する比例関係にあることが確認され、モルタルヒューズが損傷した後の2回目の加振では、砂が乾燥しているNo.2、No.5の試験体は、1回目と比べ加速度応答倍率およびひずみが大きく増加しない傾向が見られた。

5. まとめ

砂基礎の砂の状態が、砂基礎の減衰効果にどのような影響を与えるか砂の状態をパラメータにして実験を行った結果得られた知見を以下に示す。

- (1) 砂が乾燥状態で十分な量が充填されている状態であれば、繰り返し大きな振動を受けても減衰効果が期待できる一方で、砂が湿潤状態ではPC電化柱の揺れにより砂が圧縮され、PC電化柱の周囲に空隙ができ易くなるため減衰効果が小さくなり、PC電化柱に発生する応答値が大きくなる。
- (2) 砂の量が少ないとモルタルヒューズは壊れやすく、柱傾斜量とひずみは大きくなりPC電化柱に発生する応答値は大きくなる。

今後は、得られた知見を活かし、東北地方太平洋沖地震で損傷を受けた砂基礎PC電化柱の破壊メカニズムを解明していく予定である。

参考文献

- 1) 坂井公俊, 室野剛隆, 佐藤勉: 電車線柱砂基礎の載荷実験と地震時挙動の把握, 鉄道力学論文集 第12号, 2008.
- 2) 草野英明, 岩田道敏, 菅野一位, 三上淳, 羽矢洋: ラーメン高架橋上電化柱の地震時振動特性に関する調査, SED No.40, pp.28-35, 2012.11
- 3) 今村年成, 室野剛隆, 坂井公俊, 佐藤勉: 電車線柱-高架橋連成系の地震応答特性, 土木学会地震工学論文集 pp.1182-1190, 2007.
- 4) 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), 丸善, 2013.9