非線形特性のモデル化が電車線柱の地震時挙動に与える影響に関する基礎的検討

鉄道総合技術研究所　正会員　坂井公俊，加藤　尚，室野剛隆
非会員　原田　智，清水政利
日建設計シビル　正会員　○青木佑輔，西山誠治

1. はじめに　2011 年の東北地方太平洋沖地震では，多数の PC 製の電車線柱で傾斜や折損等の被害が発生し，その復旧には多くの時間を要した．つまり，鉄道の地震に対する安全性，復旧性を向上させるためには，土木構造物だけでなく，鉄道システム全体の耐震性能をバランスよく向上させる必要がある．これまでの電車線柱の設計は主に線形領域のみで議論がされており，非線形特性の評価とその妥当性について検討を行った例はほとんどない．そこで本検討では，実大の PC 製電車線柱を用いた振動台実験結果を対象とした非線形動的解析を実施することで，電車線柱の非線形特性の表現方法が地震時挙動に与える影響について考察を行う．

2. 電柱のモデル化，解析方法

(1) 振動台実験の概略　比較の対象とする振動台実験は，実大の PC 製電柱（高さ 10m）を用いて実施した．実験に用いた電柱の断面諸元を図 1 に，錘の設置位置や計測箇所の概略を図 2 に示す．試験は固有振動数，減衰定数を算定するためのインパルス試験と高架上の応答波形を模擬した動的加振等を実施している．最終的には電柱基部に大きな損傷が発生するレベルまでの加振を行った．

(2) 電柱のモデル化　解析は，電柱を線材に置換してモデル化する．解析モデルも図 2 に示しているが，電柱の接点分割ピッチは，概ね 1D（＝400mm）間隔となるよう設定した．鋼製シリンダーに該当する柱下端 1m の範囲は，部材を 200mm（≒0.5D）間隔で分割し，間詰モルタルの圧縮変形を想定した水平バネを各節点に設けることにより，柱基部のシリンダー部の固定度の影響を考慮した．また，PC 電車線柱のヤング係数は，実強度とインパルス試験時のひずみレベルの差異を考慮することとした．具体的には，構築したモデルの 1 次固有振動数がインパルス試験で得られた固有振動数を概ね満足するように，ヤング係数を設計値の 1.35 倍とした値を用いる．これにより得られた固有振動数を表 1 に示すが，構築した解析モデルによって，実験結果の 2 次モードまで概ね再現できている．

(3) 解析手法，非線形特性のモデル化　動的解析は Newmark-β 法による直接積分法（β=1/4）とする．減衰は，1 次モードで実験によって得られた減衰（h=0.008）となるような剛性比例型減衰を用いた．入力地震動としては，図 3 に示す振動台の加振波形を用いた．

電柱の非線形特性は，まず骨格を鉄道構造物の耐震設計標準 [1]に示される PHC 杭に準じて算定した．得られた M-φ関係を図 4 に赤実線で示す．この図には振動台実験による電柱の応答加速度と基部の変位計から算定した M-φ関係も記載しているが，本モデルと概ね一致していることが分かる．

続いて履歴法則は，以下の 2 種類を設定した．具体的には，耐震標準に準じて①原点指向型としたケースと，振動台実験の M-φ関係は履歴をほとんど描かなかったため，②骨格曲線上を移動する逆行型のケース，を用いる．さらに，実験の M-φ関係をより再現することを目的として，③骨格の第 2 勾配比を振動台実験の計測 2 点（AW-D1，AW-D2）の平均値程度となるよう 15%大きく設定したケース（履歴は逆行型），についても検討を行うこととした．

3. 動的解析結果　上述した条件に基づき動的解析を実施した．電柱上端の応答加速度を図 5，電柱基部の曲率を図 6 に示す．まず，応答加速度は，逆行型の履歴則を用いた②，③で多数のパルスが生じている．また電柱基部の曲率は各モデルとも 19 秒程度までは良好に実験を再現できている．ただし 20 秒程度以降の大きな振幅を経験した以降は，履歴を描く①の再現性は低い．また②は 23 秒程度以降で再現性が低くなっているが，第 2 勾配比を調節した③は全時刻において実験結果を良好に再現できている．

つまり土木構造物の骨格曲線と，逆行型の履歴則を組み合わせて用いることで，電柱の地震時非線形挙動を概ね再現できる．さらに，より実際の骨格に近いモデルを用いることで，地震時の非線形挙動をほぼ完全に表現できることが分かった．今後はより詳細な検討を行い，電柱の非線形特性のモデル化方法，応答値算定方法の提案を行う．

なお，本研究の一部は，国土交通省補助金を受けて実施した．

参考文献　1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説　耐震設計，1999.

キーワード　地震応答解析，電車線柱，非線形特性

連絡先　〒541-8528 大阪市中央区高麗橋 4-6-2　（株）日建設計シビル　技術開発部　ＴＥＬ06-6229-6372

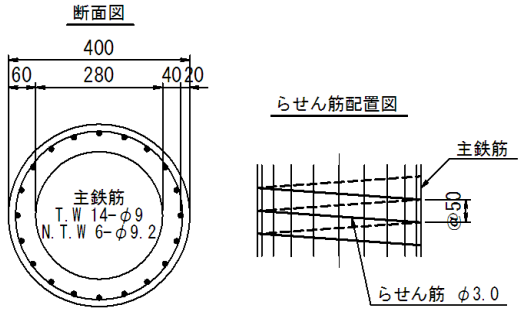

図 1　実験に用いた電柱の基本諸元

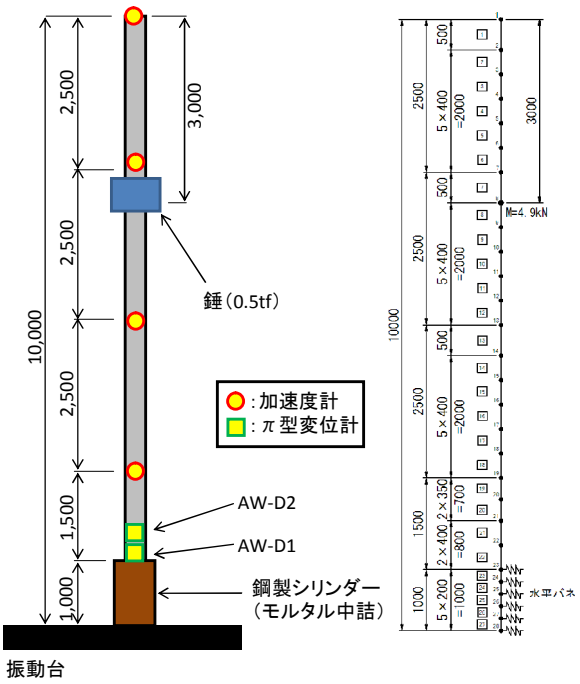

図 2　振動台実験の計測項目，解析モデル

表 1　固有値解析結果

固有値[Hz]		1次	2次	3次
実験結果	max	3.07	20.25	50.68
	min	2.91	19.79	48.16
解析結果		3.10	21.00	54.80

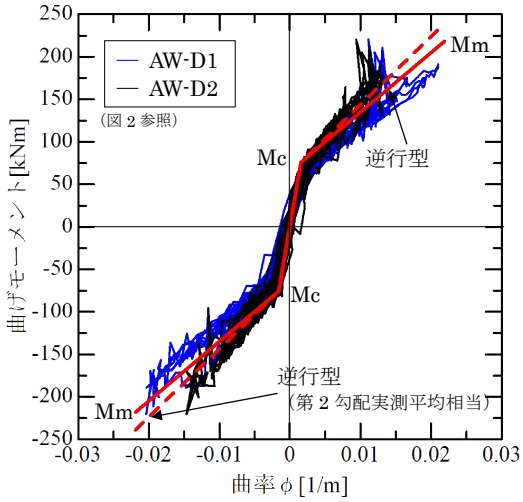

図 4　電柱下端の M-φ 関係

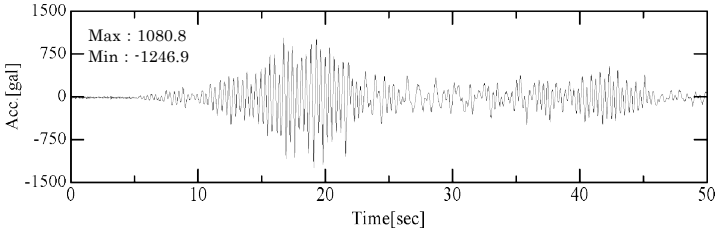

図 3　入力地震動（振動台実験の加振波形）

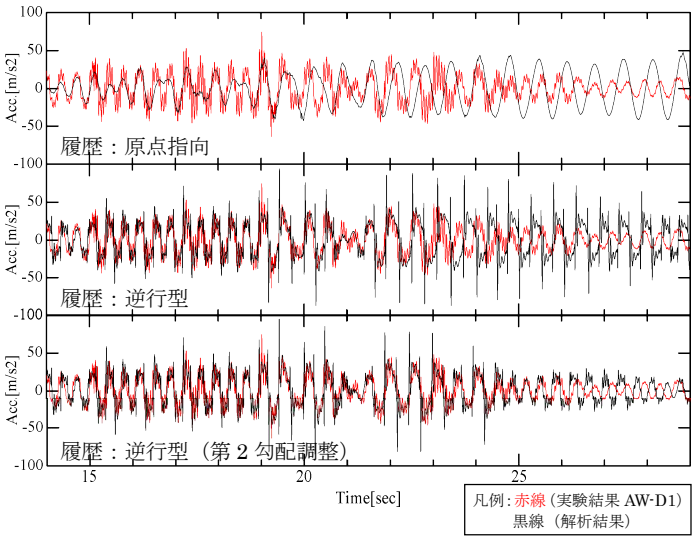

図 5　電柱上端の応答加速度波形

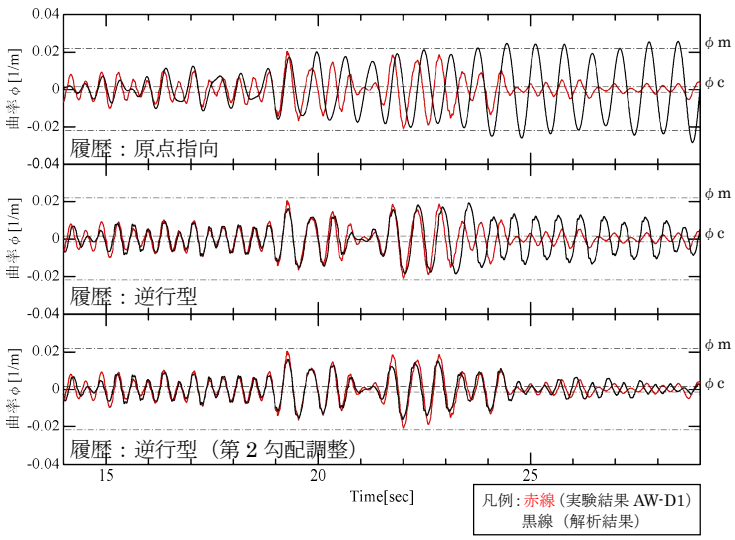

図 6　電柱下端の曲率波形