

大規模地震時の電車線柱挙動解析モデルと被害軽減手法

電力技術研究部 電車線構造研究室

主任研究員 原田 智

1. はじめに

電車線柱（以下、「電柱」と記す）は、地震時に高架橋などの構造物と共振して折損することがあるため、電車線路設備耐震設計指針による耐震設計が行われている。しかし、より安全性を確保するために耐震性評価時に考慮すべき荷重が増加する傾向があり、今後発生の可能性が高い大規模地震に対しては、電柱の詳細な応答解析によって耐震性を評価する必要性が高まっている。そこで、大規模地震に対する電柱の精緻な解析モデルによる応答解析を可能とするとともに、施工性や費用を考慮した既存電柱の耐震性を向上させる対策工法を複数選定して実物大実験によりその効果を確認した。本稿では、これらの結果について紹介する。

2. 大規模地震時の解析モデル

大規模地震時の電柱挙動を詳細に把握することを目的とした解析モデルを構築するため、新幹線で用いられている PC 柱および鋼管柱について交番載荷実験を実施した。一例として、PC 柱および鋼管柱の交番載荷実験の結果を図 1、図 2 に示す。

図 1 のように PC 柱は変位が $\pm 1\delta_y$ 付近まで線形に変形するが、それ以上では非線形な荷重・変位特性を示すことがわかった。また最大荷重を経験すると直ちに耐力が低下して折損することから、現状の PC 柱では最大荷重経験後の残存耐力をそれほど期待できないことがわかった。

図 2 のように鋼管柱は変位が $\pm 2\delta_y$ 付近まで線形に変形し、最大荷重の経験後直ちに耐力が低下して変位が増大する特性を示すことがわかった。

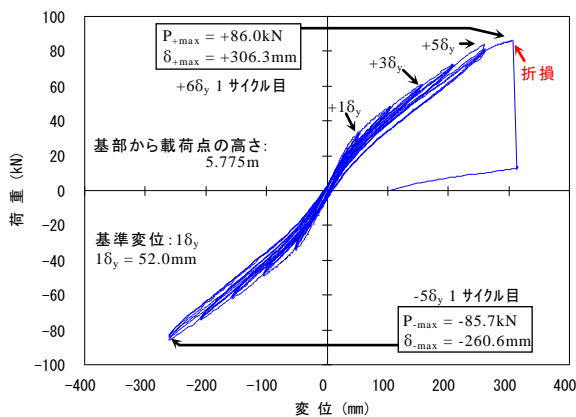


図 1 PC 柱の荷重・変位特性の例

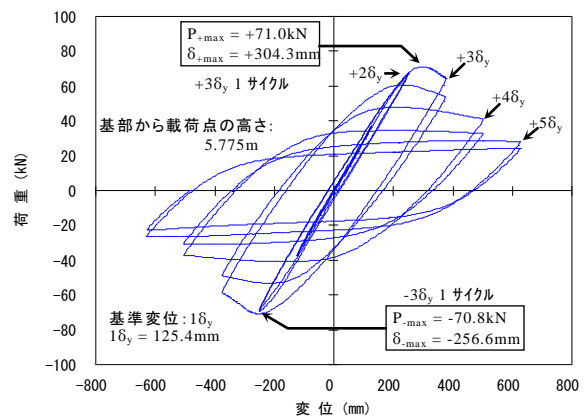


図 2 鋼管柱の荷重・変位特性の例

上記の実験等の結果に基づき、電柱部材の非線形特性を図 3 のように設定した。PC 柱の非線形特性は PHC 杭に準じて算定し、履歴曲線は逆行型に設定することとした (図 3(a))。また鋼管柱は、鋼管杭に準じてバイリニア型で骨格曲線を設定し、履歴曲線は鋼材の標準型を用いることとした (図 3(b))。なお、減衰定数については、加振試験と解析の結果を比較して試行錯誤的に

設定することにより、PC 柱で 1.6%程度、鋼管柱で 6.4%程度の値とした。

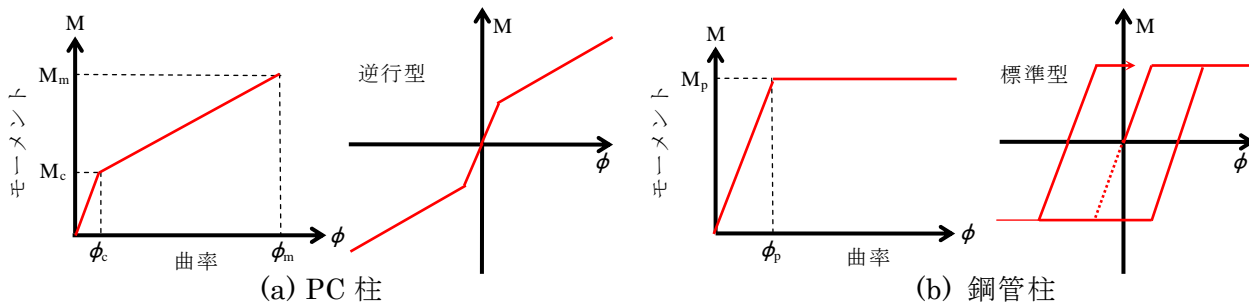


図 3 電柱の非線形特性（左：骨格曲線，右：履歴曲線）

上記の電柱の非線形特性を用いて、図 1 の PC 柱および図 2 の鋼管柱について動的解析を実施した。動的解析における電柱モデルを図 4 に示す。解析モデルでは電柱を線材に置換し、電柱基礎に相当する下端 1m の範囲には充填モルタルの圧縮変形を想定した水平ばねを各節点に設けて電柱基部の固定度の影響を考慮した。

動的解析および実物大電柱の振動台実験で得られた電柱天端の加速度波形を図 5 に示す。図 5 において動的解析と振動台実験の結果はほぼ一致していることから、構築した電柱の解析モデルを用いることによって、電柱の振動状態を概ね再現できることを確認した。

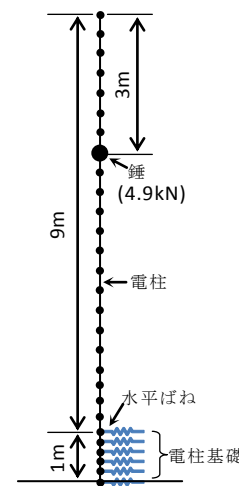
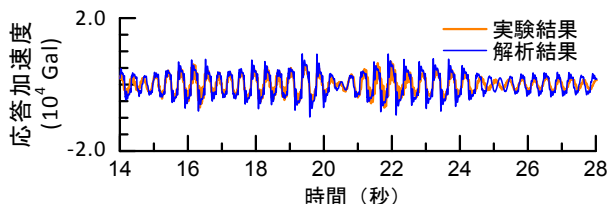
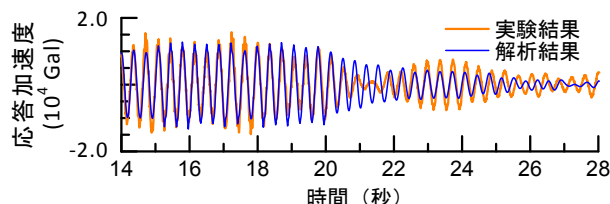


図 4 解析モデル



(a) 図 1 の PC 柱



(b) 図 2 の鋼管柱

図 5 動的解析結果と振動台実験の比較（電柱天端の加速度波形）

3. 被害を軽減する対策工法の検討

実物大電柱の交番載荷実験および振動台実験の結果とともに、現地の施工性や施工費を考慮して、既存電柱（主に PC 柱）の被害を低減するための対策工法を基礎種別（砂詰基礎，モルタル基礎）ごとにそれぞれ検討した。その結果，選定した対策工法を表 3 に示す。

砂詰基礎箇所の PC 柱に対しては，基部に丸鋼を軸方向に並行させ結束バンドを用いて集成して取り付けた集成材を用いて変形性能の向上を目指す工法 (①)，砂の変形累積に伴う砂詰基礎の減衰低下に対する改善策として，砂の代わりに粒径の大きな玉砂利を充填する工法 (②)，またはゲル状の低反発ゴムを充填して振動絶縁を図る工法 (③) を選定した。

またモルタル基礎箇所の PC 柱に対しては，張力を与えたワイヤで基部の 2 箇所に取り付けた電柱バンドを接続して剛性を高めることによって固有周期を短くする工法 (④)，中空部に H 鋼を挿入して電柱自体の倒壊防止を目指す工法 (⑤)，基部に繊維シートを巻き立て変形性能の向上を目指す工法 (⑥)，簡素な構造でかつ安価なブレーキダンパを取り付けることで減衰付加を図る工法 (⑦) を選定した。

表1 対策工法の概要と期待する効果

No.	対策工法 (呼称)	対象とする 基礎形式	期待する効果	対策工法の概要
①	集成材	砂詰基礎	変形性能向上	基部から高さ約1.5mの外周に丸鋼を取付
②	玉砂利		減衰付加	砂の代わりに砂利を充填
③	ゴム材		振動絶縁	砂の代わりに低反発材を充填
④	電柱バンド+ワイヤ	モルタル基礎 アンカーボルト式 含む	剛性付加	基部に電柱バンドを2個取付、ワイヤで接続
⑤	H鋼挿入		倒壊防止	PC柱中空部に挿入
⑥	繊維シート巻き		変形性能向上	基部から高さ約2mまで巻き立て
⑦	ブレーキダンパ		減衰付加	安価なダンパを採用

4. 対策工法の動的実験

選定した既存電柱の対策工法の効果を検証するため、実物大電柱による振動台実験を実施した。実験では、図1と同等の性能を有する長さ10mのPC柱に各対策工法を施して試験体とし、高架橋上の電柱基礎を模擬した高さ1mの固定架台を用いて試験体を振動台に設置した。実験は対策工法の対象となる基礎形式（砂詰基礎、モルタル基礎）ごとに実施し、比較のため無対策（一般的な砂詰基礎箇所PC柱、およびモルタル基礎箇所PC柱）の試験体を振動台にそれぞれ設置した。振動台への入力波は、損傷によって試験体の固有周期が延びることを考慮して、0.4秒から1.0秒の周期帯域で平坦なピークを有する加速度応答波とした。なおこの入力波は、東北地方太平洋沖地震の実測波を元に作成しており、実験では入力波の振幅を徐々に大きくすることによって、試験体が折損するまで加振を継続した。

実験の結果、砂詰基礎およびモルタル基礎を対象とした加振で最初に折損した試験体はいずれも無対策の電柱であり、振動台の最大加速度で796Gal（ケース1-3）、654Gal（ケース2-4）の加振時にそれぞれ折損したことから、各対策工法による被害軽減の効果が確認された。

図6に各試験体の加速度応答倍率を示す。加速度応答倍率の観点からは、ゴム材、電柱バンド+ワイヤ、およびブレーキダンパによる対策工法が応答加速度を低減する効果が高いことがわかった。ゴム材の工法はすべての加振ケースで応答倍率が1.0程度となり、電柱バンド+ワイヤの工法は応答倍率が概ね2.0~3.0程度となった。一方、ブレーキダンパによる工法は入力振幅が小さい場合に応答倍率が3.8程度と無対策の試験体と比較して大きくなるが、入力振幅が大きくなる程ダンパの効果が発揮され応答倍率が無対策の試験体より小さくなり2.3程度となった。

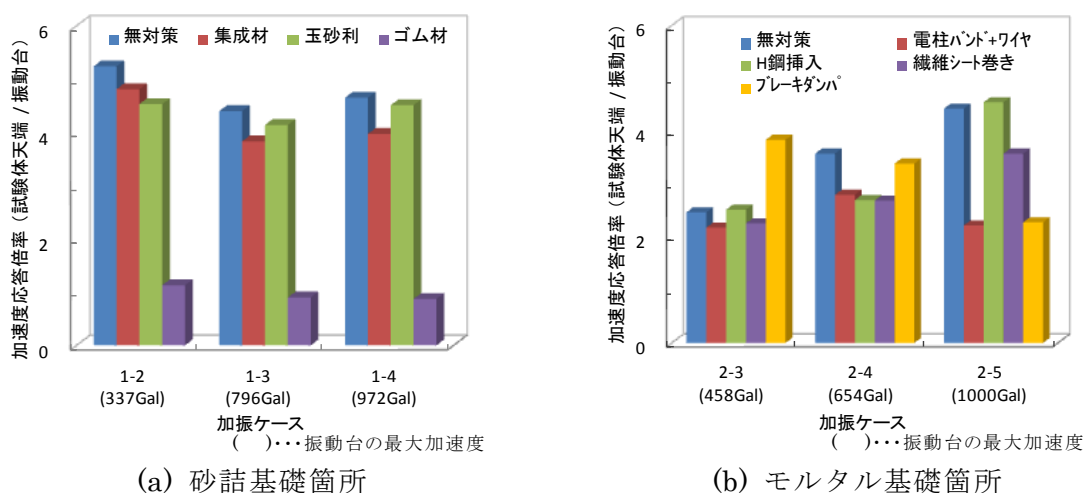


図6 対策工法の加速度応答倍率

5. 対策工法の試算

H 鋼挿入による工法 (⑤) は、電柱が折損した場合に芯材 (H 鋼) が電柱を支持することによって倒壊を防止する、想定以上の地震に対して構造物などが破滅的な状況に陥らないように設計する「危機耐性」の考え方を導入した工法である。前述のとおり振動台実験では他工法の試験体が先に折損したことから実験遂行の安全を優先したため、H 鋼挿入工法の基部を完全に破壊することができなかった。しかし、振動台実験では無対策の試験体が先に折損していることから、H 鋼の挿入によって基部の損傷を低減する効果があると考えられる。そこで、無対策および H 鋼挿入の工法を対象とした応答解析を実施することによって、両者の応答値の差を比較検討した。

まず、図 6(b)に示す対策工法の加速度応答倍率から、実験に基づく両者の応答の差を考察する。試験体への入力となる振動台加速度が 500Gal 以下のケース 2-3 では両者の応答倍率は同程度となるが、500Gal を超えるケース 2-4 では無対策の試験体の方が大きくなり、加振中に折損に至った。これは挿入した H 鋼が電柱に接触したことにより、H 鋼挿入の試験体全体の剛性が無対策と比較して高くなったため、応答が抑制されたものと考えられる。また、振動台加速度が 1000Gal となったケース 2-5 では両者の応答倍率は同程度となり、H 鋼挿入の試験体基部に圧壊の兆候が見られたが倒壊には至らず、無対策と比較して損傷が小さかった。

次に両者の動的解析を実施し、上記の実験結果に基づく考察と同様な傾向を示すことを確認した。なお動的解析では、無対策の解析モデルは図 4 と同様に設定し、H 鋼挿入の解析モデルは図 7 に示すように H 鋼を電柱に接続するように設定した。

これらの解析モデルを用いてケース 2-4 の動的解析を実施した結果、図 8 に示す電柱天端の水平変位が得られた。図 8 では 34 秒程度までは両者の応答は一致しているが、35 秒付近の応答が大きくなる時点で、無対策と比較して H 鋼挿入の変位が小さくなるのがわかる。なおこの時点で H 鋼と電柱が接触する事象は、実験時の加速度計モニタリングでも別途確認されている。H 鋼を挿入することによって電柱の変形が抑制されることが解析的にも示されたことから、本工法の実施により電柱の損傷を抑制できる可能性が高いことを確認した。

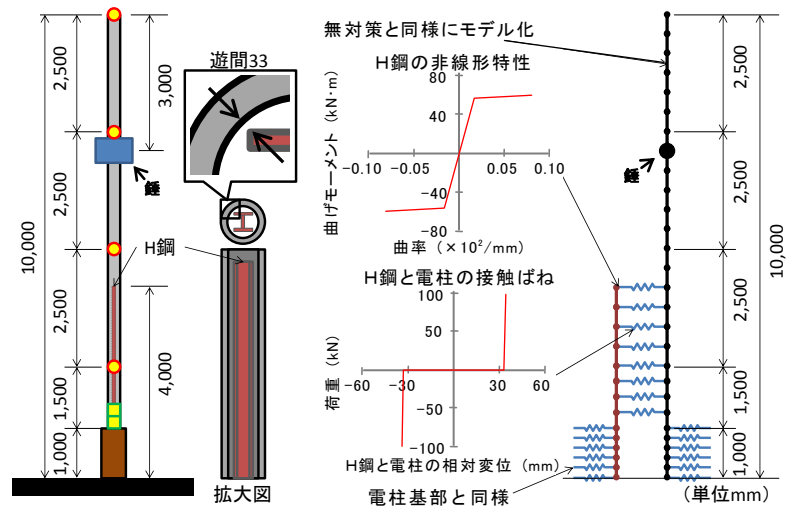


図 7 H 鋼挿入試験体の解析モデル

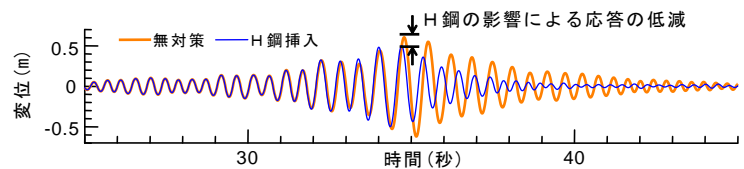


図 8 電柱天端の水平変位波形 (解析結果)

6. まとめ

大規模地震に対して、電柱の詳細な応答解析によってより正確な耐震性評価を可能とするため、実物大電柱の各種実験の結果から非線形特性を有する電柱の解析モデルを構築した。また既存電柱の被害を軽減する対策工法を複数選定し、実物大振動台実験や動的解析によって対策工法の効果を確認した。今後は効果の高い対策工法の実用化に向けた検討を深度化する予定である。