

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24860020

研究課題名(和文) 鉄道高架橋と上部の電化柱等との一体モデルの動的非線形解析による設計基準の再構築

研究課題名(英文) Nonlinear Dynamic Analysis of Railway Viaduct with Centenary Poles for updating Seismic Design Code

研究代表者

水谷 司 (Mizutani, Tsukasa)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10636632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：東北地方太平洋沖地震において鉄道高架橋上に設置された電車線柱が広範囲に渡り倒壊した。高架橋本体の損傷は軽微であったものの、電車線柱の撤去・建て替え等に時間を要したため、新幹線の運行の再開が大幅に遅れた。このことから高架橋本体のみならず既設の電車線柱の耐震性能を的確に把握しておく必要がある。しかし、商用ソフトではさまざまな制約から特殊な非線形性を有する電車線柱の解析は困難である。そこで本研究では、高度にカスタマイズ可能で汎用性のある動的非線形アルゴリズムISASを開発し、その動的解析を行った。その結果、高架橋上の応答と電車線柱の損傷との関係および既存の電車線柱の設計基準の問題点を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Catenary poles set on railway viaducts fell down and caused trains to be stopped due to the Great East Japan Earthquake even though the viaducts were not damaged severely. To evaluate not only the seismic performance of a viaduct but also that of poles set on it, in this study, nonlinear dynamic analysis was conducted using models of poles and a viaduct considering their material nonlinearity and geometric nonlinearity. The results of analysis reproduce the real damage situation of catenary poles and viaducts in Tohoku district. And one of the results shows that the design input ground motion for catenary poles is not so influential to them. Therefore, it is suggested that design ground motion should be reconsidered.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：動的非線形解析 鉄道高架橋 計測 設計基準

### 1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震において、東北新幹線高架橋上に設置された多数のPC製電車線柱が傾斜・折損した。地震発生後は高架橋本体の損傷は比較的軽微であったものが多かったため、4月2日には復旧が完了したにもかかわらず、多数の折損した電車線柱の建て替えやそれに伴う架線設備の再設置等に時間を要し、開通が4月末まで遅れることとなった。過去にも大規模な地震により、電車線柱が損傷した例は存在し、被害が発生するとその都度電車線柱の耐震設計法は見直されてきたにもかかわらず、上述の被害が発生したことは現行の電車線柱の耐震設計法が未だ十分でないことを示しており、同様の被害を繰り返さないためにも高架橋上の電車線柱が損傷を受けやすい地震動の特性や電車線柱の基礎形式の違いによる損傷度合いの差異について把握し、電車線柱の設計基準に反映させることが必要である。

近年、土木工学の分野でも従来施設部門の担当であった電車線柱について耐震性能を検討する研究が行われるようになり、坂井らにより1978年の宮城県沖地震による電車線柱被害の発生以降用いられるようになった電車線柱の下端を高架橋に固定せずに、基礎部に砂をつめて振動減衰効果を付与した砂基礎の効果を従来の基礎下端を固定したアンカー基礎と比較して検証しており、PC製電車線柱の非線形特性についても検討している。しかしながら、これらの研究は電車線柱単体についての検討にとどまっております。東北新幹線に配置された電車線柱は高架橋上に設置されたものがほとんどであるため、高架橋上に設置された2次システムとして電車線柱の地震応答について検討する必要があります。また、毛利により高架橋-電車線柱一体モデルの動的線形解析が行われているが、電車線柱本体及び、基礎部の非線形特性を考慮していないため破壊時までの挙動を正確にとらえるには至っていない。

### 2. 研究の目的

そこで、本研究では、鉄道高架橋とその上部に設置された電車線柱の骨組みモデルを作成し、動的非線形解析により耐震性能評価を行うことを目的として。

### 3. 研究の方法

本研究では、東北新幹線沿線に存在する高架橋として一般的な構造を有する一層ラーメン高架橋およびその上部に設置された一般的な構造形式を有する電車線柱を対象に、高架橋、電車線柱双方の骨組モデルを構築し、様々な入力波を用いて材料非線形性および幾何学的非線形性を考慮した動的解析を実施することで、電車線柱が損傷を受けやすい地震動の特性や、電車線柱の一般的な基礎形式として用いられている砂基礎とアンカー基

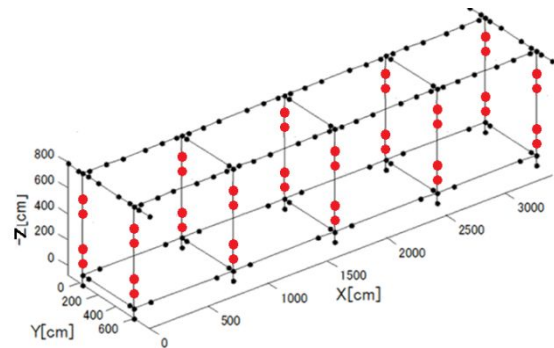


図-1:南長町高架橋 R14 ブロックのモデル  
(図中の赤で示す点に非線形ばねを挿入)

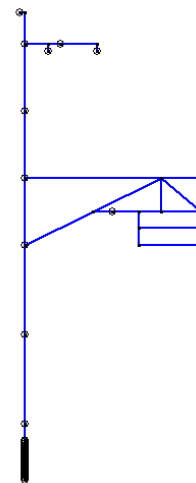


図-2: 構築した電車線柱モデル

礎の耐震性能の差異について分析した。さらに解析結果を分析して得られた知見をもとに現行の電車線柱の耐震設計において動的解析用に用いられている地震動が適切なものかどうかを検討した。

上記の解析には特殊な非線形性を考慮する必要があるが、商用ソフトでは内部のプログラムを自由にカスタマイズすることができず、制約があり実現象を精度よく再現することが困難である。そこで動的非線形解析用アルゴリズムの開発も実施する。

### 4. 研究成果

(1) 動的非線形解析アルゴリズムの行列指向型プログラムによる開発

まず動的非線形解析用のアルゴリズムを開発した。構造解析において方程式を行列形式で記述することで、例えば線形剛性行列に幾何学的非線形剛性行列を単純に加えることで幾何学的非線形解析ができるように、行列を随時加えていくことでより高度なアルゴリズムに容易に発展させることができる。そこで、上記のアルゴリズムを将来研究者らがカスタマイズしていく上での利便性も考慮して行列志向型の MATLAB 言語 (SciLab, MatX, Octave など多数のフリーソフトでも可

ンパイル可能)で開発した。

モデルの各部材は回転3成分,並進3成分の計6自由度を有し,剛性は,ねじれ,せん断,曲げ,軸方向の4剛性を考慮する。せん断に関する材料非線形性をせん断剛性の一様低減法により考慮し,また曲げに関する材料非線形性を,実現象をよくモデル化している弾性部材端部に配置した塑性ヒンジを模擬した剛塑性ばねの剛性低減により再現する材端剛塑性ばね法により考慮する。さらに大地震時での応答を解析できるように大変形により生じる幾何学的非線形性も考慮する。

(2)開発した動的非線形解析アルゴリズムによる動的非線形解析による高架橋・電車線柱の耐震性能評価と新しい設計基準構築に向けた分析

高架橋,電車線柱のモデルは設計値および実験データをもとに構築した(図-1,図-2)。地盤ばね定数の妥当性については実際の高架橋において加速度計測を実施し(図-3),新幹線通過後の自由振動から推定される固有周期とモデルの固有値解析のとの比較により検討した。また電車線柱の砂基礎の非線形復元力特性および減衰定数については,振動台実験データをよく再現できるように同定した。

解析は,電車線柱の質量が高架橋のそれに比べて十分小さく連成の影響が小さいため,高架橋・電車線柱分離モデルを用いて行った。すなわち,地震動を高架橋モデルに入力後,高架橋天端での加速度応答値を算出し,電車線柱の基部に入力するという手法を採用した。入力地震動は東北地方太平洋沖地震時の仙台での観測値のほか,被害の大きかった郡山での観測値,被害の小さかった福島での観測値,さらに現行の電車線柱の耐震設計に用いられている兵庫県南部地震の地震動を用いた。

解析の結果,実際に電車線柱が倒壊した仙台,郡山の地震動入力時の天端加速度は電車線柱に対して影響の大きい周期帯でスペクトルが大きな値を示しているのに対し,福島地震動や設計地震動である兵庫県南部地震を入力したケースでは同じ周期帯でのスペクトルが小さく,電車線柱への影響は小さいことがわかった。これは,今後電車線柱に関する耐震設計法の見直しを示唆するものである。さらに,前述のいずれの地震動を入力した場合においてもアンカー基礎よりも砂詰め基礎を用いた場合の方が,電車線柱基部に働く曲げモーメントが小さくなり電車線柱の倒壊の危険性が小さくなることが理論的に明らかになった。

本研究成果により,今まで注意が行き届いていなかった付属物である電車線柱を含めた鉄道高架橋全体としての耐震性能を評価できたと考えられる。



図-3: 高架橋計測風景(a~dの位置に3軸加速度センサーを配置)

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

水谷司, 藤野陽三, 猪又賢治, 辻田亘, 長山智則, "漏洩同軸ケーブルの電界の乱れからのマルチフラクタル解析による降雨検知の試み," 水文・水資源学会誌, Vol.26(5), pp.258-268, 2013.

高本剛太郎, 水谷司, 藤野陽三, シリンゴリンゴディオンシウス, "東北地方太平洋沖地震においてみられた横浜ベイブリッジの主塔主桁間の衝突とその再現による動的特性の解明," 構造工学論文集, Vol.60A, pp.242-248, 2014.

蘇迪, 嶋田優樹, 三輪陽彦, 藤野陽三, 長山智則, 水谷司, "交通荷重下の鋼桁橋の応答計測と局部応力の評価," 構造工学論文集, Vol.60A, pp.205-213, 2014.

〔学会発表〕(計10件)

Y. Narazaki, T. Mizutani, and Y. Fujino: Analysis of Damage on High Speed Train Viaduct Caused by the Great East Japan Earthquake based on Nonlinear Dynamic Analysis, Proceedings of ANCRISST (Asian-Pacific Network of Centers for Research in Smart Structure Technology), Ulsan National Institute of Science and Technology, July, 2013. (アブストラクト査読あり)

T. MIZUTANI, Y. Narazaki, and Y. Fujino: Analysis of Damage on Shinkansen Viaduct Caused by the Great East Japan Earthquake based on Nonlinear Dynamic Analysis, Proceedings of EASEC-11 (The Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction), Hokkaido Univ., Sep., 2013. (アブストラクト査読あり, 2013/9/11-9/13 講演 予定)

水谷司, 藤野陽三, 猪又賢治, 辻田亘, 長

山智則：鉄道等の通信用アンテナの電界の乱れのWTMM法に基づくMulti-Fractal解析による降雨検知の試み，土木学会第68回年次学術講演会講演概要集，Vol.68，1-441，pp.881-882，2013.

小林寿彦，藤野陽三，Siringoringo Dion，水谷司ほか：白鳥大橋主塔の面内方向振動に関する風洞実験と数値流体解析の適用，土木学会第68回年次学術講演会講演概要集，Vol.68，1-493，pp.985-986，2013.

高本剛太郎，藤野陽三，Siringoringo Dion，水谷司ほか：東北地方太平洋沖地震においてみられた横浜ベイブリッジの主塔主桁間の衝突とその再現による動的特性の解明，土木学会第68回年次学術講演会講演概要集，Vol.68，1-166，pp.331-332，2013.

高田修太，藤野陽三，水谷司：都市内高速道路の維持管理費用に関する調査研究，土木学会第68回年次学術講演会講演概要集，Vol.68，1-367，pp.733-734，2013.

武田智信，長山智則，水谷司，藤野陽三：複雑な形状の都市内高架橋における非線形地震応答解析，土木学会第68回年次学術講演会講演概要集，Vol.68，1-167，pp.333-334，2013.

榎崎泰隆，水谷司，藤野陽三：東日本大震災における新幹線ラーメン高架橋の損傷メカニズムの動的・非線形解析による分析，土木学会第68回年次学術講演会講演概要集，Vol.68，V-84，pp.167-168，2013.

水谷司，小林將志，水野光一郎，藤野陽三：内巻きスパイラルRC柱を有する高架橋の耐震性能の動的・非線形解析による評価，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.67，2012.

稲陰亮介，水谷司，藤野陽三，古宇田剛史：白鳥大橋主塔に生じた風方向振動に関する実験的検証，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.67，2012.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

水谷司

研究者番号：10636632  
機関：東京大学  
部局：885 工学系研究科  
職名：助教