

論文 3次元動的非線形解析による新幹線高架橋上の電車線柱の地震時挙動の分析

佐藤 啓介*1・細田 暁*2

要旨：東北地方太平洋沖地震を想定した，地震時の新幹線高架橋上に存在する PC 電車線柱の破壊現象を 3次元動的非線形解析によって分析し，従来の電車線柱の耐震性能の向上施策，特に砂基礎の影響が電車線柱の応答に及ぼす影響を検討した。その結果，高架橋上の電車線柱は基部に応力が集中し，コンクリートの圧壊による脆性的な破壊をし，架線等付属物の偏心モーメントによって線路直角方向に内側に折損していくことが分かった。また，砂基礎を考慮することによって基部の応力集中を抑制することができ，損傷を防ぐ効果が十分に見られた。

キーワード：PC 電車線柱，新幹線高架橋，砂基礎，耐震性能，動的非線形解析

1. はじめに

鉄道高架橋上の PC 電車線柱は，大規模地震時に傾斜・折損といった被害が顕著である。高架橋上に存在することで，電車線柱に伝わる振動が増幅されるために応答が大きくなってしまい，2011 年の東北地方太平洋沖地震でも被害が顕著であった（写真 - 1）。この地震では，東北新幹線の高架橋上の電車線柱の被害が広域で非常に多くの本数で生じたため，新幹線の運行再開の大きな障害となった。PC 電車線柱の損傷は過去の大地震でも生じていたが，耐震設計の進歩や耐震補強の着実な実施により高架橋本体の耐震性能が向上するにつれ，PC 電車線柱の損傷が復旧への足かせとして顕在化してきたと言える。

従来，PC 電車線柱の耐震性能の向上方法として，砂基礎（図 - 1）と呼ばれる投げ込み式の基礎で応答値を低減させるものや，鋼板巻きによる補強などが採用されてきた。坂井らは，電車線柱の耐震補強としての砂基礎の効果を検証し²⁾，高架橋と電車線柱の相互作用についても検討しているが³⁾，どれも個別に電車線柱の応答値を比較したもので，高架橋および PC 電車線柱と砂基礎を含む全体系での検討や，電車線柱の破壊までを数値シミュレーションで検討した例は未だない。PC 電車線柱の地震時の挙動を十分に把握することは，これまでの耐震性能向上の取組みの検証と，今後の耐震性能を確保する取組みにおいて重要であると考えている。

本研究では，土木学会の発刊した鉄道構造物の設計計算例⁴⁾に示されている新幹線高架橋を対象に，高架橋上の PC 電車線柱もモデル化し，地震時の PC 電車線柱の破壊現象を 3次元動的非線形解析によりシミュレーションする。シミュレーションでは，PC 電車線柱の種々の耐震性能向上施策の効果を分析する。特に砂基礎の影響が電車線柱の応答に対してどのように寄与したかを検討する。



写真 - 1 電車線柱の損傷（東北新幹線）¹⁾

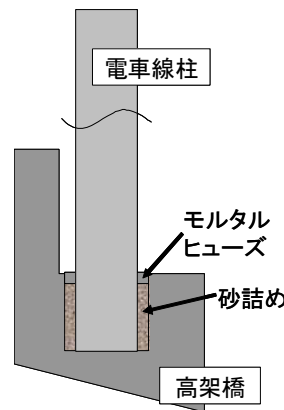


図 - 1 砂基礎概略図

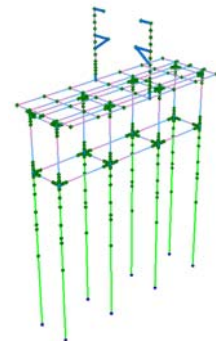


図 - 2 解析モデル

2. 数値解析概要

2.1 高架橋 - 電車線柱一体モデル

新幹線高架橋上に存在する電車線柱の地震時の挙動と破壊現象を検討するために 3次元の動的非線形解析を行った。数値解析には FORUM-8 社の UC-win/Frames3D の version2 を用いた。これは部材の損傷による剛性の時刻歴変化を考慮した上で，3次元動的非線形解析が可能であり，部材要素をファイバー要素とすることで各断面

*1 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府 都市地域社会専攻 (学生会員)

*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 准教授 (正会員)

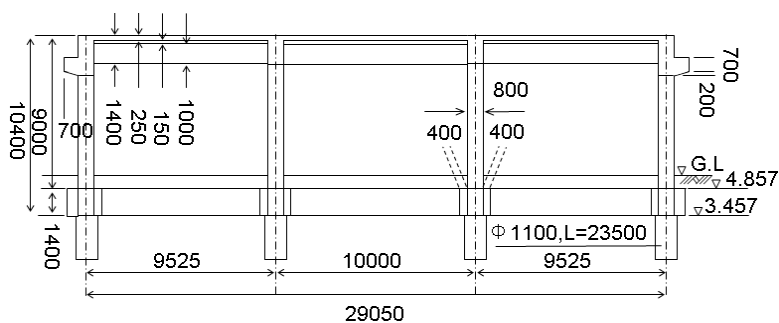


図 - 3 高架橋側面図 (単位 mm)

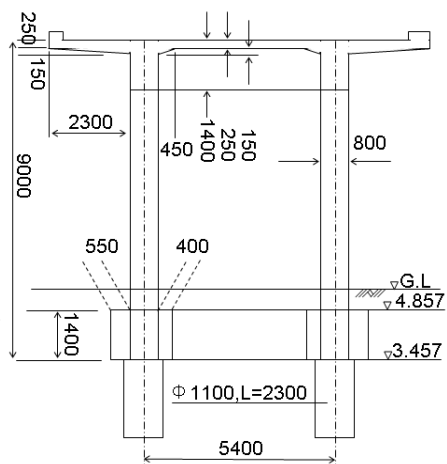


図 - 4 高架橋横断面図 (単位 mm)

の応力状態も把握できるものである⁵⁾。

高架橋と電車線柱は、地震応答に及ぼす相互作用や構造物全体の固有周期の変化も考慮するために一体化させたモデルを作成した。(図 - 2)

本研究で検討する新幹線の RC 高架橋として、「土木学会コンクリート標準示方書に基づく設計計算例(鉄道構造物編)」第IV編⁴⁾に記載されている新幹線高架橋を使用した。対象高架橋は L2 地震動に対してコンクリート標準示方書が定める耐震性能 2 (地震後に機能が短期間で回復でき、補強を必要としない) を満足するものとして土木学会コンクリート示方書「耐震性能照査編」(設計計算例作成時、現在は「設計編」)に従って設計されたものである。図 - 3、図 - 4 および表 - 1 に高架橋の設計図、構造諸元について示す。固有値解析の結果高架橋の 1 次固有振動数は 1.760Hz となった。

地盤については参考文献⁴⁾に記載された地盤条件を検討対象とし、地盤反力係数から得られる 3 方向の地盤ばねを杭部材につながる分布ばねとしてモデル化した。高架橋の詳細情報等については、参考文献⁴⁾を参照されたい。

2.2 電車線柱のモデル概要

PC 電車線柱については、過去に東日本旅客鉄道株式会社で電車線柱の耐震性能を実験的に検討した際に用いた実際のものと同じ電車線柱の図面を入手して入力データを作成した。表 - 2 および図 - 5、に材料物性値および概略図を示す。

数値解析における PC 電車線柱のプレストレス導入については、死荷重を作用させる前に、解析ソフトの機能を用いて緊張材に 611N/mm² の引張応力を与えプレテンションのプレストレス導入を再現した。架線等の付属物については、入手した資料をもとに質量と偏心のみを考慮して簡略化した。架線で接続された隣接する電車線柱

表 - 1 高架橋の構造諸元

形式		
線路規格	新幹線	
構造形式	RCビームスラブ式 ラーメン高架橋	
基礎形式	1柱1杭基礎 (地中梁形式)	
一般形状		
線路方向	径間数	3径間
	全長	30m
線路直角方向	径間数	1径間
	全長	5.4m
コンクリートの物性値		
使用部材	設計基準強度	ヤング係数
スラブ・上層梁 柱・地中梁	24N/mm ²	25kN/mm ²
杭	21N/mm ²	22.4kN/mm ²
鉄筋の物性値		
使用部材	鉄筋の種類	ヤング係数
スラブ・上層梁	SD345	200kN/mm ²
柱・地中梁・杭	SD390	200kN/mm ²

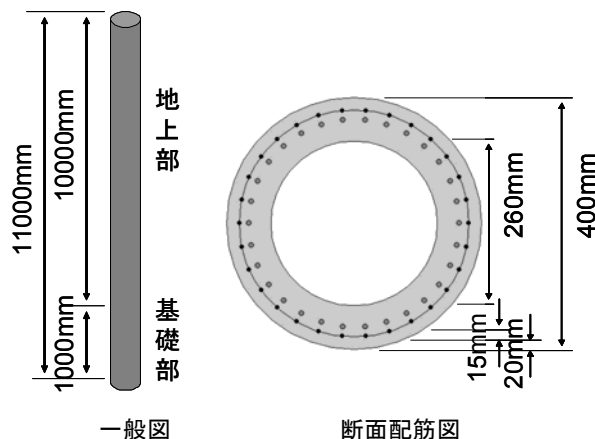


図 - 5 電車線柱概略図

の相互作用は本研究では考慮していない。

2.3 電車線柱基礎部のモデル化

電車線柱基礎に関しては、まず砂基礎の有無によって2パターンのモデルを作成した。砂基礎を考慮しないものは一般的な基礎形式である座板式基礎を模擬するために基礎部を剛体とし、砂基礎を考慮したものは図-6のようにモデル化した。実際の電車線柱下端は、本来投げ込み式基礎のため高架橋との接合はしていないが、本研究では用いた数値解析ソフトの境界条件の制約上、剛結とした。これは実構造物の例では、鋼製の座板で高架橋に剛結された電車線柱に相当するモデルとなっている。

砂基礎のモデル化については、電車線柱基部1mを基礎部分とし、20cm間隔でばね要素を定義した。基礎の頂点にモルタルヒューズを模擬したばね要素を定義し、それより下に砂の減衰を模擬したばね要素を与えた。モルタルヒューズを設置することによって、常時または小規模地震時にはヒューズの剛性で電車線柱を支持し、大規模地震時にはヒューズが破壊することで砂の減衰効果が発揮されるようになっている。また、電車線柱と基礎壁との衝突を考慮するために、基礎壁ばねも基礎全体に定義することとした。各ばね要素の特性については、坂井らが砂基礎を有した電車線柱の載荷実験と、数値シミュレーション

表 - 2 電車線柱の材料物性値

	設計基準強度	ヤング係数
コンクリート	50N/mm ²	33kN/mm ²
	設計基準強度	ヤング係数
非緊張材 D9	540N/mm ²	200kN/mm ²
緊張材 D7	981N/mm ²	200kN/mm ²

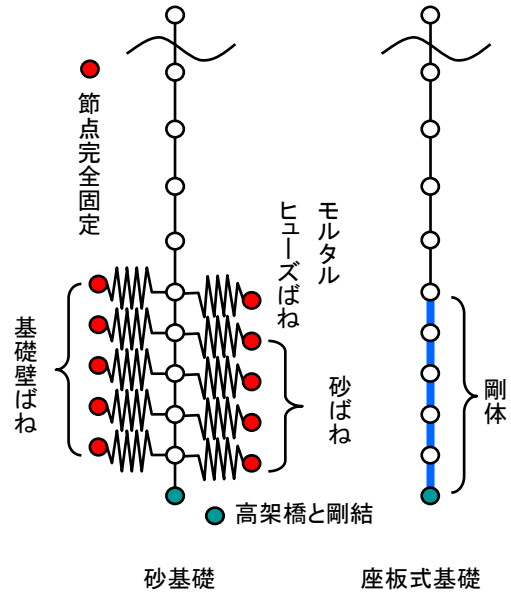


図 - 6 基礎モデル概略図

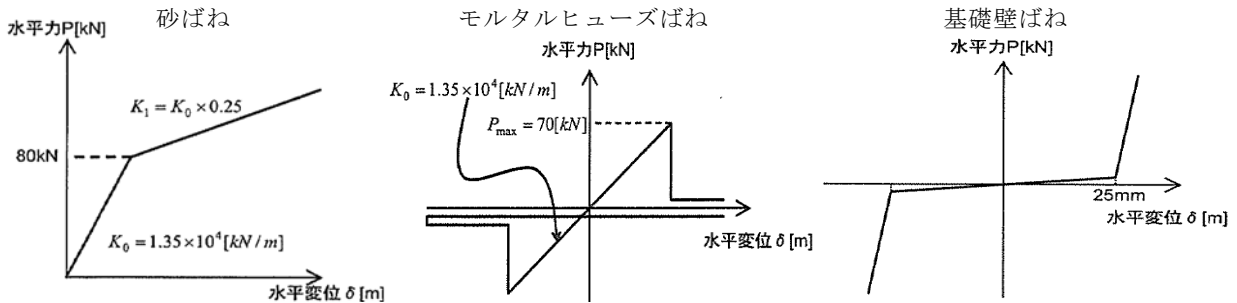


図 - 7 ばね要素の骨格曲線²⁾

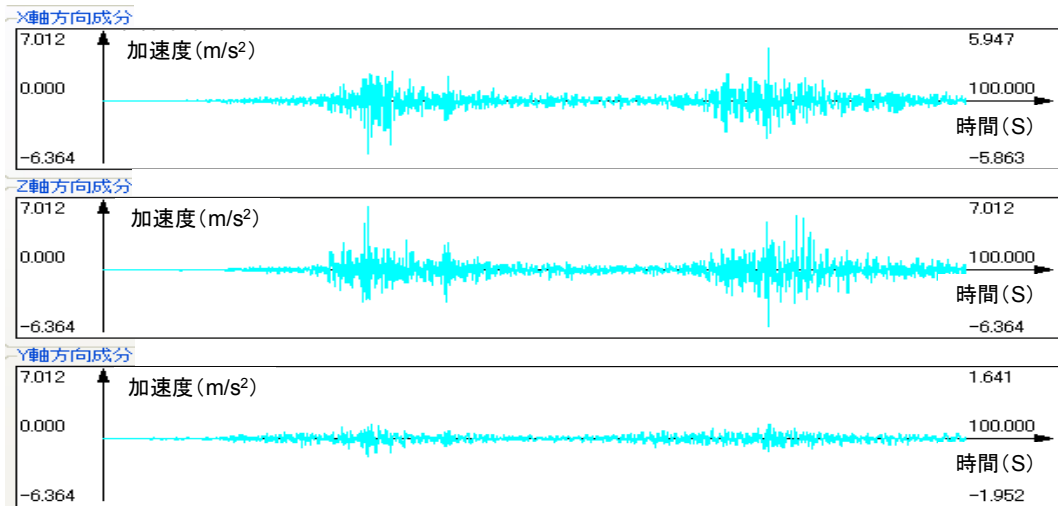


図 - 8 入力地震動（東北地方太平洋沖地震一関観測波）

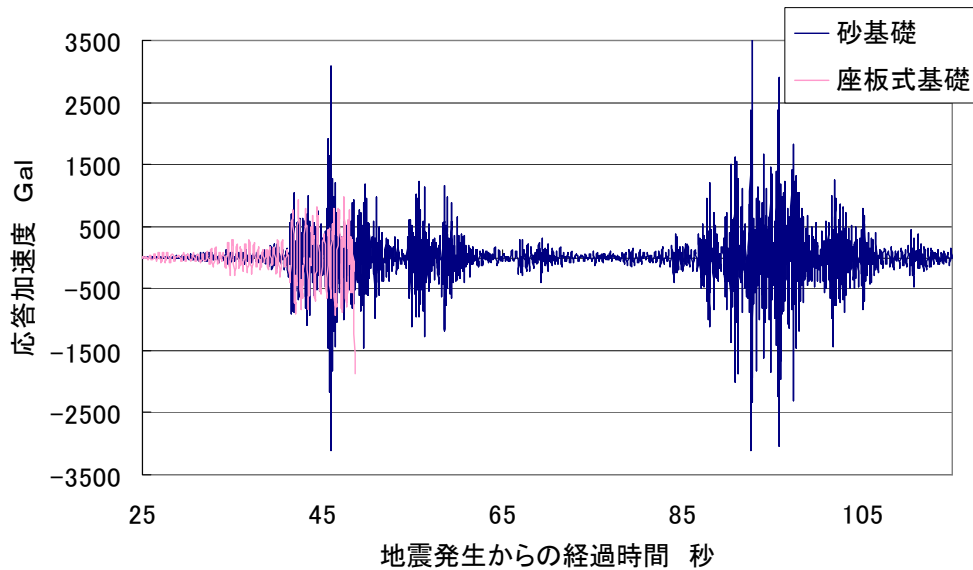


図 - 9 電車線柱上端における応答加速度（線路直角方向）

ユレーションによって得た骨格曲線を使用し、砂ばねに15%、モルタルヒューズに3%の内部減衰を与えた²⁾(図-7)。固有値解析の結果、砂基礎を有する電車線柱の1次固有振動数は1.952Hz、座板式電車線柱の1次固有振動数は1.743Hzとなり、高架橋単体の固有振動数とは若干異なる値となった。

2.4 入力地震動

動的解析における入力地震動には、実際に電車線柱の被害が発生した地震での検討を行うため、K-netの2011年3月11日東北地方太平洋沖地震一関観測波（地表）を用いた（図-8）。入力地震動を地下約26mの杭先端に作用させている。地下100mの位置のセンサーで観測された地中波も存在するが、本研究では杭先端に近い方の地表波を入力地震動とした。図-8におけるX軸、Y軸、Z軸は解析モデルにおける線路直角方向、鉛直方向、線路方向にそれぞれ対応している。

3. 解析結果

3.1 電車線柱上端における応答加速度

図-9に示す電車線柱上端の応答加速度結果を見ると、砂基礎を考慮しない場合には加速度が徐々に大きくなっていき、地震発生から45秒を過ぎたあたりで急激に応答が大きくなり、電車線柱の基礎部上端より2mの要素（図-6の下から9番目の要素）で破壊に至った。

一方砂基礎を考慮した場合では、はじめは応答が小さいが、同じく45秒を過ぎたあたりで応答が大きくなる。しかし、電車線柱は破壊には至らなかった。前半に応答が小さい理由としてはモルタルヒューズの効果が挙げられる。ヒューズの剛性によって電車線柱を支持し、45秒

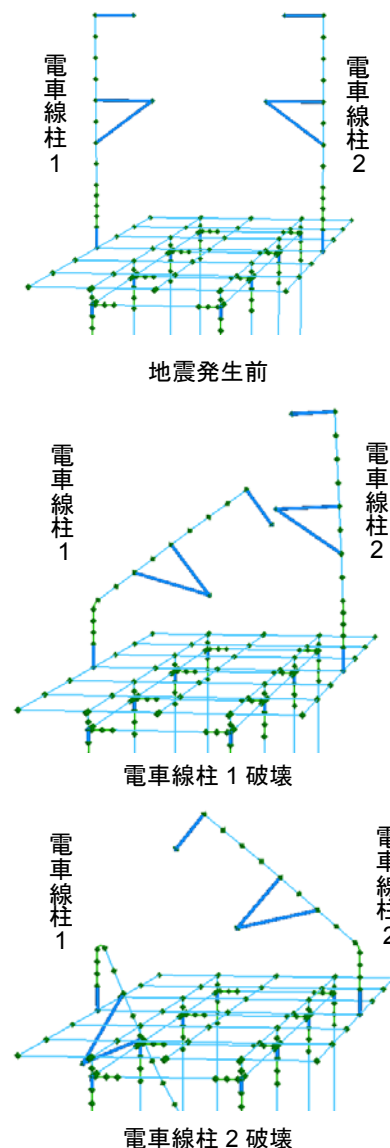


図 - 10 電車線柱破壊モード

を過ぎるとヒューズが破壊されて応答が大きくなった。モルタルヒューズの破壊後も、砂ばねの効果により、電車線柱の応答が抑制された。また、高架橋自体の応答は電車線柱よりも小さく、実際の新幹線高架橋に地震により生じた現象と同様の傾向が見られた。

3.2 電車線柱の破壊モード

砂基礎を考慮しない場合、電車線柱は図 - 10 に示すように、まず電車線柱 1 が内側に倒れ、その後電車線柱 2 が内側に倒れた。どちらの電車線柱も内側に倒れるのは、付属物による内側への偏心モーメントの影響が大きいためであり、実構造物での損傷状況と一致している。

破壊形式については、3.1 で述べた電車線柱の基礎部上端から 2m の部分におけるコンクリートの圧壊である。図 - 11 に座板式基礎を持つ電車線柱の、破壊時におけるコンクリートの応力履歴を示す。赤い太線は応力の履歴を表し、コンクリートの圧縮ひずみが終局ひずみを超えて破壊に至っている。

3.3 電車線柱基部における応力集中

鉄筋の応力状態を比較すると（図 - 12）、まず砂基礎のない場合はいずれも非緊張材が降伏にまで至っているが、電車線柱の基礎を剛体としていることによってその上の要素に応力が集中しているためである。また、基礎直上の応力よりもその 2m 上の部材の応力集中がより大きかった。これは架線等の付属物によって生じる曲げモーメントの影響で、上から二段目の付属物に近い要素のコンクリートおよび鋼材に応力が集中し、破壊したと考えられる。

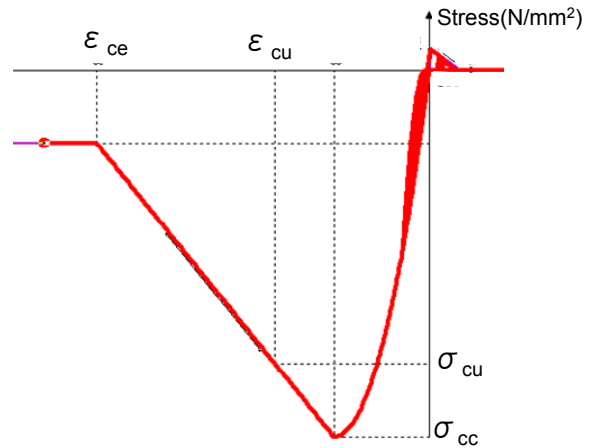
次に、砂基礎のある場合は解析終了までの範囲においても大きな応力が発生しておらず、部材も破壊には至らない。基礎コンクリートと電車線柱の隙間を、モルタル等で充填して剛体化させないことによって応力の集中を防ぐという砂基礎の役割が発揮されることを数値解析で検証できた。またモルタルヒューズについてもヒューズの破壊に至るまで応答を抑制できていることから、数値解析上では十分に機能したと言える。

4. 耐震補強の効果の比較検討

4.1 数値解析方法の概要

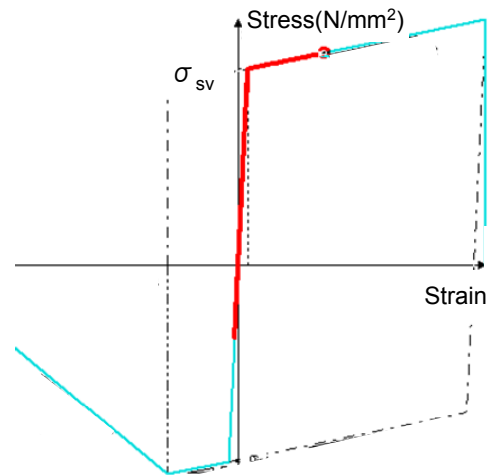
本研究では、砂基礎の他に鋼板巻きや、電車線柱の中空部分をコンクリートで充填するといった実際の構造物でも行われていた補強方法についても地震応答解析を行った。補強は座板式基礎（図 - 6 右図）のモデルをベースとしているため、基礎部は剛体である。

鋼板巻き補強については、電車線柱に厚さ 1.6mm の鋼板を巻き、基礎部上端から 1m までと 2m の高さまで補強した（図 - 6 右図における、剛体要素から上の 2 要素が 1m 補強、4 要素までが 2m 補強となる）2 パターンの

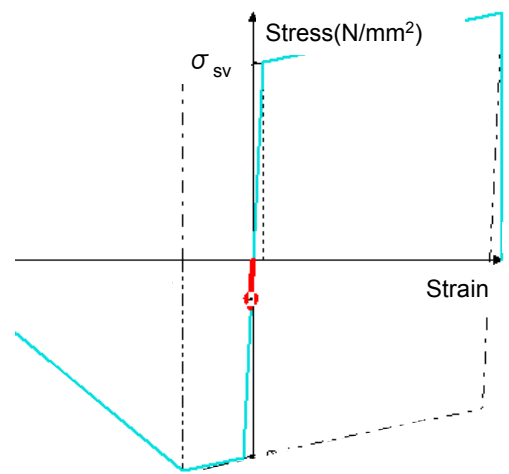


座板式基礎

図 - 11 コンクリートの応力履歴



座板式基礎



砂基礎

図 - 12 非緊張材の応力履歴

表 - 3 耐震補強法別地震時応答結果

	補強なし		砂基礎		鋼板巻き 地際上部1m		鋼板巻き 地際上部2m		中空部充填 基礎から2m	
	損傷	損傷発生時の経過時間	損傷	損傷発生時の経過時間	損傷	損傷発生時の経過時間	損傷	損傷発生時の経過時間	損傷	損傷発生時の経過時間
電柱1	破壊	48.60	—	—	破壊	50.10	鋼材降伏	48.00	破壊	48.75
電柱2	破壊	50.10	—	—	破壊	52.25	鋼材降伏	52.25	破壊	88.35

解析を行った。中空部充填については、基礎部上端から2mの高さまでを圧縮強度21N/mm²のコンクリートで充填したモデルを作製した。地震動については3章の解析と同じ、東北地方太平洋沖地震一関観測波を用いている。

4.2 解析結果

表-3に耐震補強法別の地震応答解析結果を示す。東北地方太平洋沖地震のような規模の大きい地震の場合、耐震補強を施したものでも破壊されることが分かった。砂基礎と鋼板巻き（基礎部上端から2mまでを補強）については電車線柱の破壊は生じなかった。しかし鋼板巻きの場合は電車線柱の鉄筋（非緊張材）や鋼板がいくつか降伏しているのに対し、砂基礎は被害が軽微なひび割れ程度で損傷はほとんど発生しなかった。

電車線柱上端での応答加速度についても、破壊の生じなかった鋼板巻き（基礎部上端から2mの補強）は砂基礎よりも平均して3割程度応答が大きくなっており、電車線柱基部での応力状態についても砂基礎を有する場合よりも高い応力が生じていた。数値解析の結果から、本研究の設定条件では、砂基礎が最もすぐれた電車線柱の耐震性能を発揮することが分かった。

ただし、長期間供用される新幹線構造物において、砂基礎が所定の性能を保有し続けるかどうかや、東北地方太平洋沖地震のように地震動が長時間続く間に、砂基礎の減衰効果が低減する可能性も考えられ、今後も振動台実験等によって減衰が消失する程度を検討するなどの調査や研究が重ねられる必要があると考える。

5. 結論

本研究では、東北地方太平洋沖地震を想定した地震時における、新幹線高架橋上のコンクリート電車線柱の破壊現象を3次元動的非線形解析で分析し、特に損傷抑制として実用されている砂基礎の効果について検討した。

本研究で得られた結論を以下に示す。

(1) 新幹線高架橋上の電車線柱は高架橋との連成によって振動が増幅され、繰り返し荷重が働いて基部に応力が集中し、コンクリートの圧壊によって脆性的な破壊に至った。破壊方向としては、架線等の電車線柱の付属物による偏心モーメントによって線路直角方向に内側へ向かって折損した。

(2) 新幹線高架橋上の電車線柱に砂基礎を採用することによって、大規模地震時に電車線柱基部での応力集中を抑制し、上端での応答加速度を低減できることが数値解析により示された。ただし東北地方太平洋沖地震のような継続時間の長い地震が発生した場合には、砂の減衰効果が消失していく可能性も考えられる。

謝辞：本研究で使用した電車線柱のデータは、東日本旅客鉄道株式会社研究開発センターの小林薫博士にご提供いただきました。鉄道総合技術研究所の坂井公俊氏には貴重なご助言をいただきました。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 東日本旅客鉄道，STRUTURAL ENGINEERING DATA, No.37, pp.74-75, 2011.11
- 2) 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，pp.109-114, 2008
- 3) 坂井公俊：橋梁－電車線柱連成系の地震応答特性の解明と評価方法，第251回 鉄道総研月例発表会，2011
- 4) 土木学会：土木学会コンクリート標準示方書に基づく設計計算例[鉄道構造物編]，コンクリートライブラリー第118号
- 5) K.Maekawa, A.Pimanmas and H.Okamura.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, London, Spon Press, 2003