

# 地震動の継続時間が送電用鉄塔の応答に及ぼす影響に関する検討

佐藤 雄亮<sup>1</sup>・伊津野 和行<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 (一財) 電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

E-mail:satoy@criepi.denken.or.jp

<sup>2</sup>フェロー会員 立命館大学 理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail:izuno@se.ritsumei.ac.jp.

本論文では、地震動のスペクトル特性に着目して、地震動の継続時間が送電用鉄塔の応答に及ぼす影響について非線形有限要素解析により検討した。解析では、高さ77.5mの送電用鉄塔を対象として、3基4径間の鉄塔一架渉線連成系モデルを作成し、スペクトル特性や継続時間の異なる3種類の地震動による非線形地震応答解析を実施した。地震動の継続時間が有する特性としては、繰り返し数と長周期成分の2つの側面に着目した。解析の結果、鉄塔応答への影響はほとんど見られなかったが、地震動の長周期成分の影響により、電線応答が増幅される傾向が見られた。

**Key Words :** *transmission steel tower, overhead wire, seismic performance, earthquake duration, non-linear finite element analysis*

## 1. 序論

2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw=9.0) では、各種構造物に大きな被害が生じた。本地震では、観測された地震動の継続時間が約3分間と、これまでの観測地震波に比べて非常に長いことが1つの特徴である。継続時間の影響から、改めて地震動の長周成分の影響が着目され、斜張橋やゴム支承で支持された橋梁への影響、地盤の液化化への繰り返し数の影響などの各種研究が進められてきている<sup>1)</sup>。

ここで、電力設備の中の送電用鉄塔に着目すると、送電用鉄塔における今回の地震時の被害には、がいし装置等の付属機器の破損や盛土崩壊に伴う鉄塔傾斜、津波による鉄塔の流出の被害が生じたが、地震動そのものによる鉄塔の倒壊や傾斜の被害は報告されていない<sup>2), 3)</sup>。しかし、鉄塔本体に対して電線は径間長によっては固有周期が数秒程度となるケースもあり、また、減衰も小さいことから、電線の振動が大きく成長することで電線同士の接触なども懸念される。電線同士の接触は短絡事故となり、停電が生じる原因となることから、地震動の継続時間が送電用鉄塔の応答に及ぼす影響を解明しておくことは重要であると考えられる。そこで、送電用鉄塔と電線を連成させた解析モデルによる有限要素解析に基づき、

地震動の継続時間が塔体本体ならびに電線応答へ及ぼす影響について検討した。

以下では、実施した有限要素解析の条件、解析の結果を述べ、最後に得られた知見をまとめる。

## 2. 有限要素解析モデル

本章では、実施した地震応答解析で用いた有限要素モデルや境界条件、解析で用いた入力地震波について概要を示す。なお、本解析には汎用有限要素コードABAQUS<sup>4)</sup>を用いた。

### (1) 有限要素解析モデル

本解析では、文献5)に記載されている500kVの耐張型鋼管鉄塔を用いて、3基4径間の鉄塔一架渉線連成モデル(以下、単に連成モデル)を作成し、これを解析対象とした。

図-1に作成した鉄塔の有限要素モデルと寸法を示す。対象鉄塔は高さが77.5mである。なお、実際の鉄塔は同図の鉄塔よりも多くの部材を有しているが、モデル化を簡便に行うため、設計上、荷重を分担する部材をモデル化し、モデル化されていない部材は質量のみを考慮して

パネル全体に均等に配分している。本解析では、同図の鉄塔をはり要素でモデル化した。はり要素は3節点の2次要素とし、部材の交点間が5つのはり要素で構成されるように分割している。モデル化の結果、節点数は7,471、要素数は3,994となった。

図-2に作成した連成モデルのモデル図を示す。同図に示した通り、鉄塔Bを中心として、15度の線路角を有しており、それぞれの径間長は450mである。また、鉄塔A

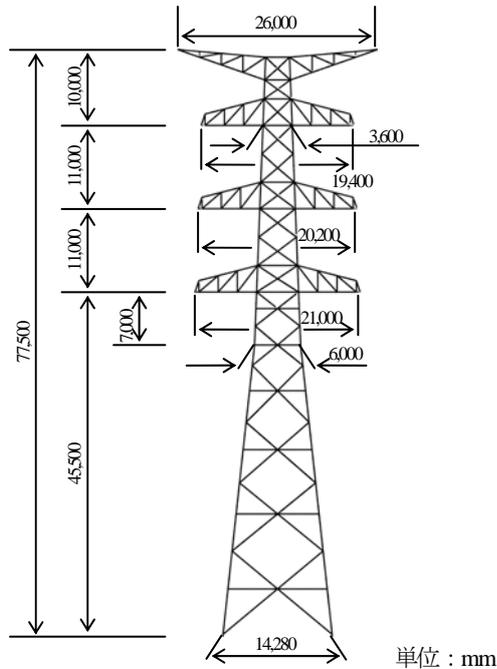


図-1 検討対象とした送電用鉄塔

とCでは、鉄塔Bと逆側にも径間長450mの電線をモデル化した。なお、3基の鉄塔は高低差がない状態を仮定している。電線および架空地線はトラス要素でモデル化し、径間内で45分割した。電線を支持する耐張がいしもトラス要素でモデル化している。

材料構成則として、鉄塔本体を構成するはり要素には、バイリニアで近似した応力-ひずみ関係を用いた。表-1に材料構成則のパラメータを示す。なお、硬化則は移動硬化を仮定している。また、バイリニアの構成則は3基の鉄塔すべてに与えている。これらの値を用いて鉄塔単体を対象とした固有値解析を実施した。得られた固有モード図を図-3に示す。同図から、線路方向と線路直交方向の1次モードは、固有振動数がほぼ同じであることがわかる。電線と架空地線、耐張がいしは弾性トラス要素

表-1 鉄塔部材の材料構成則

ヤング係数	206,000MPa
降伏応力	229MPa
降伏後の傾き	2,060MPa

表-2 電線・架空地線の諸元

種類	単位長さ質量 (kg/mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (MPa)	無風時張力 (N)
電線	0.0108	3484	71,050	121,620
地線	0.001204	263.2	102,900	17,640
がいし	0.1926	660	115,150	121,620

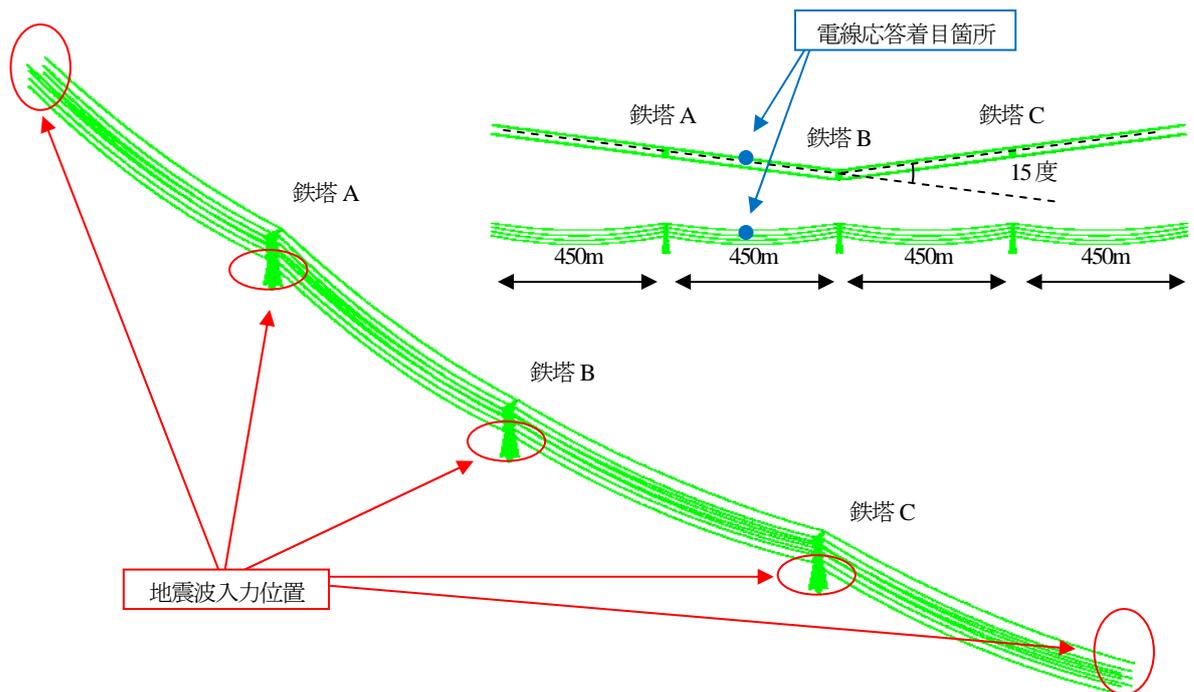


図-2 3基4径間の鉄塔-架渉線連成モデル

とし、表-2の諸元を用いた。

減衰特性は、鉄塔、電線、架空地線ともに剛性比例型とした。設定条件の一覧を表-3に示す<sup>6)</sup>。

## (2) 入力地震動

入力地震動としては、継続時間の短い波形と長い波形を用いた。継続時間が短い波形としては、道路橋示方書の標準波形より、レベル2タイプII（内陸直下型）地震動のI種地盤波形の1つであるII-I標準波（30秒）<sup>7)</sup>を用いた。継続時間が長い波形としては、2011年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）で観測された波形の中から、構造物に影響が大きいと考えられる波形として、固有周期0.5～2.0秒で速度応答スペクトルが卓越する波形データを選び、この領域の平均速度応答が200cm/sを超えるK-NET仙台NS記録<sup>8)</sup>を用いることにした。ここで、地震

動の継続時間が及ぼす影響として、繰り返し数の増加の影響と長周期成分の影響の2つの影響が考えられる。このため、この波形そのものを用いると、II-I波形による応答結果と比較した場合に、継続時間の違いだけではなく、波形に含まれる周期特性による違いも影響してしまう。そのため、K-NETの仙台での観測波形は、原波形だけではなく、スペクトル修正をした波形も用いることにした。標準波II-Iと減衰5%の時に加速度応答スペクトルが同等となるように波形調整を行った波形である。以下では、原波形をK-NET仙台波、波形調整を行った波形を修正K-NET仙台波と呼ぶ。上記の波形調整により、標準波II-Iと修正K-NET仙台波を比較することで地震動の繰り返し数の影響を、K-NET仙台波と修正K-NET仙台波を比較することで長周期成分の影響を検討することが可能となる。

本解析に用いた3つの地震動の加速度波形と加速度応答スペクトルを、図-4と図-5にそれぞれ示す。同図から、2種類の入力地震動は、鉄塔の固有周期である0.65秒

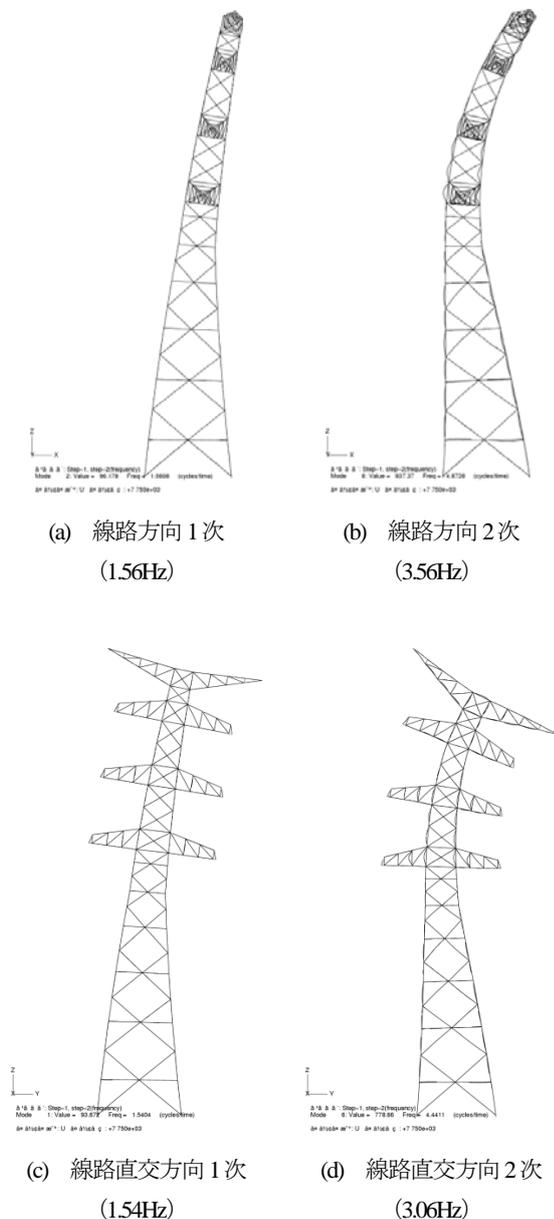
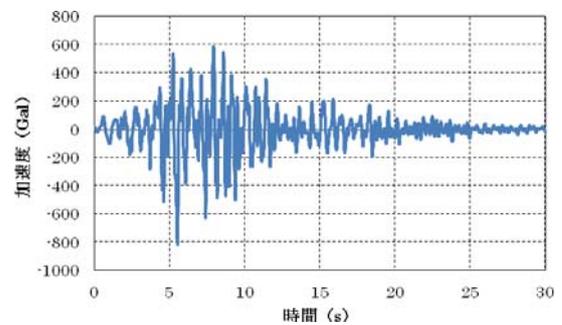


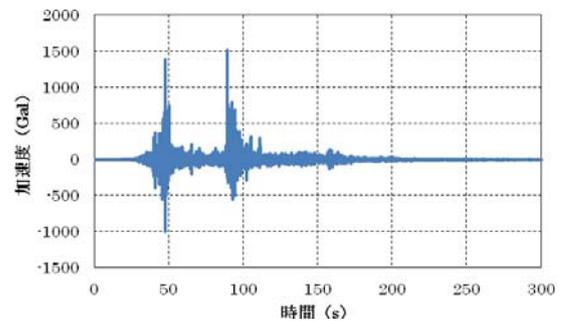
図-3 鉄塔単体の固有モード図

表-3 減衰特性の設定

項目	振動数(Hz)	減衰定数
鉄塔本体	1.54	0.01
電線・地線	0.1	0.004
耐張がいし	0.1	0.004

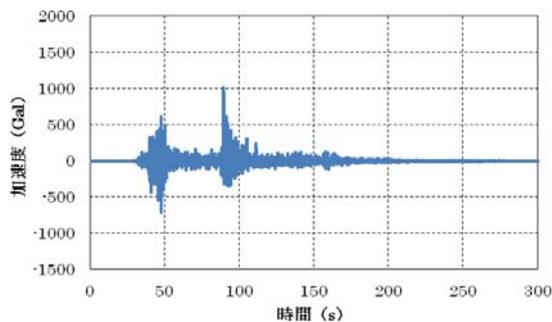


(a) II-I波

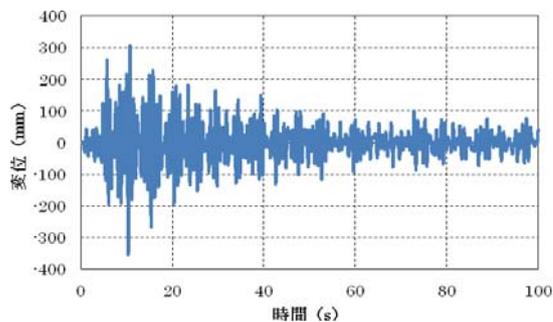


(b) K-NET仙台波

図-4 解析に用いた入力地震動の加速度波形（その1）



(c) 修正 K-NET 仙台波



(a) II-1-1 波

図4 解析に用いた入力地震動の加速度波形 (その2)

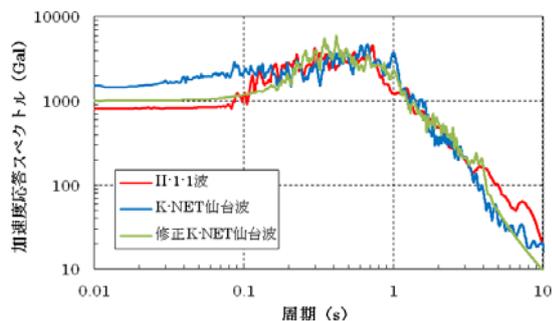


図5 入力地震動の加速度応答スペクトル (h=0.01)

(1.54Hz) 付近では概ね同等のスペクトル値を示しているが、電線応答に寄与する10秒 (0.1Hz) 付近はII-1-1波が一番大きく、修正K-NET仙台波が一番小さな値である。

### (3) 境界条件

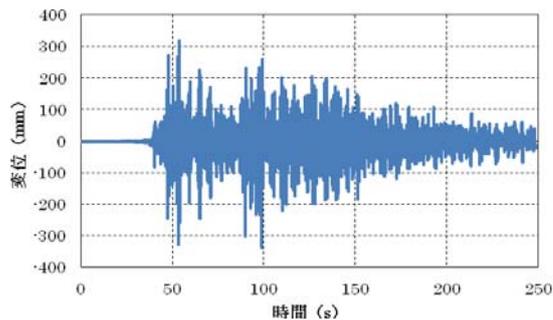
地震動は図-2に記載の通り、3基の鉄塔の基部と端部の電線固定位置に入力している。また、初期条件として電線と架空地線には張力を与えている。与えた張力は表-2の値である。

## 3. 解析結果

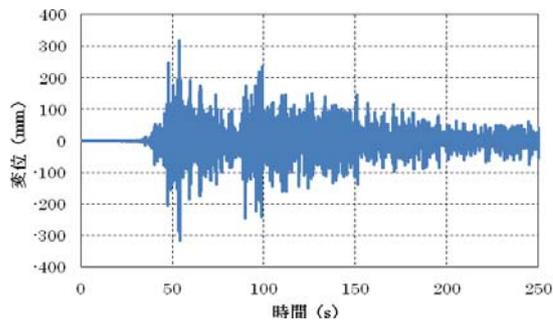
本章では、3種類の入力地震動による地震応答解析の結果から、継続時間の長い地震動が有する、繰り返し数と長周期成分の2つの側面に着目して考察を加える。なお、以下では、鉄塔応答と電線応答のそれぞれについて記述する。

### (1) 鉄塔応答への影響

鉄塔頂部の線路直交方向変位応答を図-6にそれぞれ示す。同図から、3種類の地震動による解析結果において、ほぼ最大値が同等となっていることがわかる。鉄塔頂部変位応答の最大値と最小値を表-4に示す。同表から、概



(b) K-NET 仙台波



(c) 修正 K-NET 仙台波

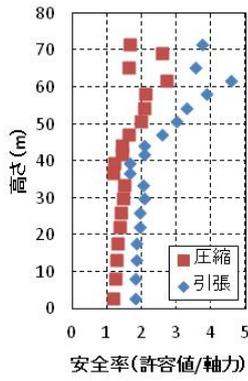
図-6 鉄塔頂部の変位応答

表-4 鉄塔頂部変位の最大値と最小値 (単位 : mm)

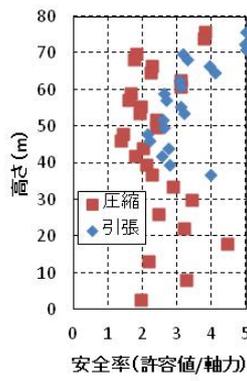
項目	最大値	最小値
II-1-1 波	307.1	-353.8
K-NET 仙台波	319.3	-314.0
修正 K-NET 仙台波	319.4	-336.6

ね各解析ケースの変位応答値が同等であることがわかる。これは、図-5に示した入力地震動の加速度応答スペクトルにおいて、鉄塔の固有周期である0.65秒付近で概ねスペクトルの値が等しいためと考えられる。

次に、鉄塔部材の軸力応答として、高さ方向の支柱材と腹材の引張力と圧縮力の分布を図-7に示す。なお、同図は、部材強度<sup>9)</sup>を発生軸力で除した安全率として値を

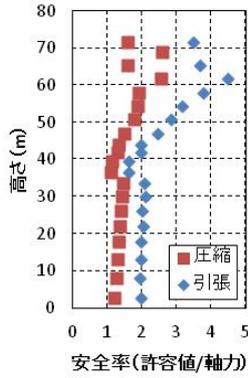


(i) 主柱材

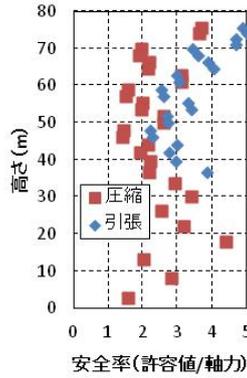


(ii) 腹材

(a) II-1波



(i) 主柱材



(ii) 腹材

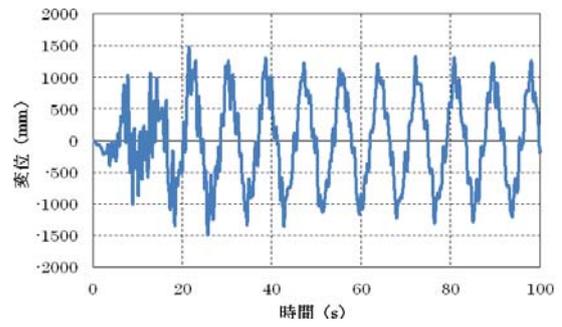
(b) K-NET仙台波

図-7 鉄塔部材における安全率最小値の高さ方向分布

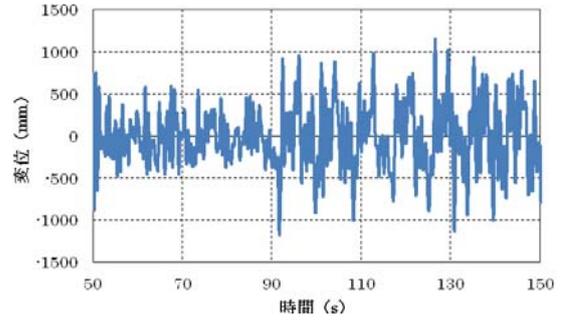
示している。また、軸力は各パネル毎の主柱材と腹材のそれぞれで、構成するすべての要素における引張力と圧縮力の最大値をパネルの代表値として示している。さらに、K-NET仙台波と修正K-NET仙台波は頂部の変位応答が同等であることから、K-NET仙台波の結果を代表して示した。同図から、主柱材と腹材のすべての部材で安全率が1.0を上回っており、今回の入力地震動レベルでは弾性範囲内の応答となった。図-7(a)と(b)に大きな違いが見られないことから、地震継続時間の影響は小さいことも分かる。安全率が一番小さかったのは、II-1波を入力したケースで、その値は主柱材基部で1.16であった。

## (2) 電線応答への影響

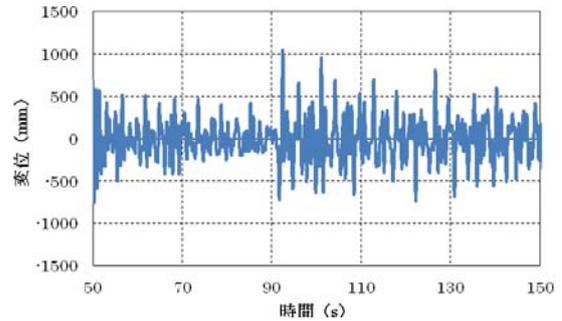
電線の変位応答として、図-2に示した位置、つまり鉄塔A-B間のAからBに向かって左側で、3段に配置された電線のうち一番上側の電線中央における応答に着目した。着目点の線路直交方向の変位応答を図-8にそれぞれ示す。同図では、時刻歴応答波形の横軸の目盛幅を揃えるために、K-NET仙台波と修正K-NET仙台波の解析結果は、最大応答時を含む、50～150秒のみを示している。同図か



(a) II-1波



(b) K-NET仙台波



(c) 修正 K-NET仙台波

図-8 電線中央部の変位応答

ら、II-1波とK-NET仙台波では、8秒程度の周期での応答が生じているのに対して、修正K-NET仙台波では短周期の成分が支配的であることがわかる。特に、II-1波では、入力地震動のピークを過ぎた10秒以降に電線の変位が共振して増幅しており、入力の長周期成分の影響が大きく出ている。変位量で比べると、II-1波が一番大きく、K-NET仙台波、修正K-NET仙台波の順で小さくなっている。これは、入力地震動の加速度応答スペクトルにおける10秒前後のスペクトルの大小関係と一致しており、地震動の長周期成分は電線応答への影響が大きいことがわかる。

次に、入力地震動の加速度が小さくなった時間帯を対象として求めたパワースペクトル密度を図-9に示す。同

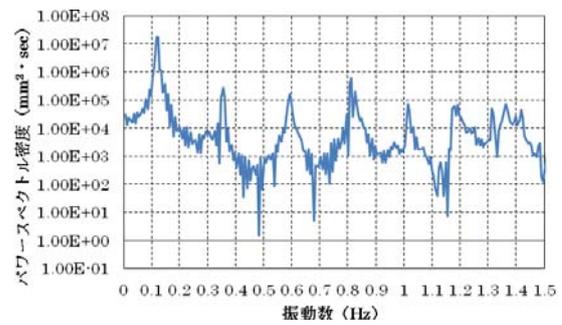
図から、II-1-1波とK-NET仙台波では0.12Hz前後の1次ピークが、2次以降ピークに比べて同等以上の値になっているのに対して、修正K-NET仙台波では、1次のピークが2次以降のピークよりも小さくなっており、入力地震動の加速度応答スペクトル特性と一致した結果となった。今回の解析では、剛性比例型の減衰特性を用いていることから、1次モードが卓越するケースの方が電線応答が大きくなっている。

さらに、図-8に示した節点を含む電線において、II-1-1波による解析結果におけるフーリエスペクトルを用いて、図-9(a)のピーク位置毎に求めたモード形状を図-10に示す。なお、同図の横軸は鉄塔からの距離を示しており、縦軸は中央の節点のフーリエスペクトルの値で正規化している。同図から、各モードは電線中央を山として、次数が上がると端部と中央部の間に1つずつ山が増えていくことがわかる。それぞれのケースにおいて、電線中央の変位が最大となった時間の電線形状を図-11に示す。同図から、II-1-1波では電線中央部が最大となる1次モードが支配的であるのに対して、K-NET仙台波や修正K-NET仙台波では2次以上のモードの影響が大きく、図-9に示したパワースペクトル密度のピーク位置での大小関係と一致している。継続時間の影響は小さく、共振すると継続時間の短いII-1-1波でも長時間揺れ続けて大きな揺れにつながる。電線の減衰定数が0.004と小さいことが原因である。

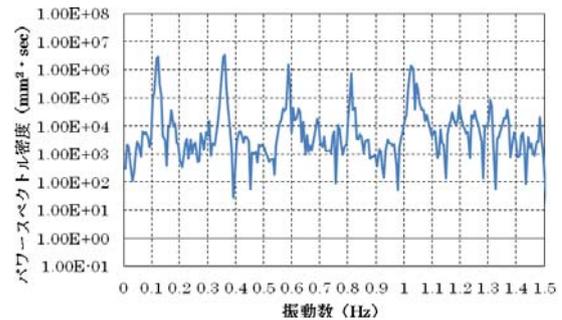
#### 4. 結論

本論文では、地震動の継続時間が送電用鉄塔の応答に及ぼす影響を検討するため、3基4径間の鉄塔一架渉線連成系モデルを対象として、継続時間やスペクトル特性の異なる3種類の地震動を用いた有限要素解析を実施した。解析では、地震動の継続時間が及ぼす影響として、繰り返し数の影響と長周期成分の影響の2つの側面から分析を行った。解析の結果、得られた知見を以下に示す。

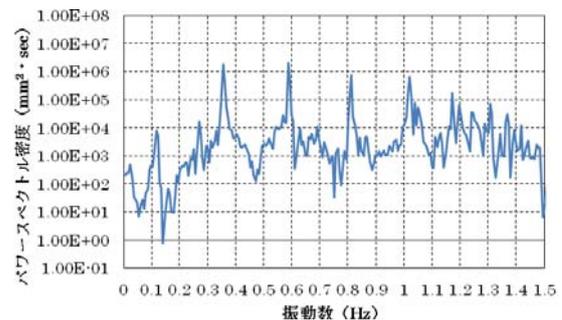
- (1) 鉄塔応答のうち、頂部の変位応答に着目すると、鉄塔固有振動数位置での入力地震動の加速度スペクトルがほぼ同一であることから、応答変位の最大値もほぼ等しくなった。鉄塔部材の軸力の最大値とそれぞれの部材強度を比較すると、すべての部材が弾性範囲の応答であった。このため、今回の解析の範囲内では、繰り返し数の影響を十分に検討することはできなかった。
- (2) 電線の線路直交方向の応答では、地震動の長周期成分の影響により、入力地震動の加速度が小さくなってから電線応答が増幅するケースが見られた。応答



(a) II-1-1波 (20秒以降)



(b) K-NET仙台波 (100秒以降)



(c) 修正 K-NET仙台波 (100秒以降)

図-9 電線中央部変位のパワースペクトル密度

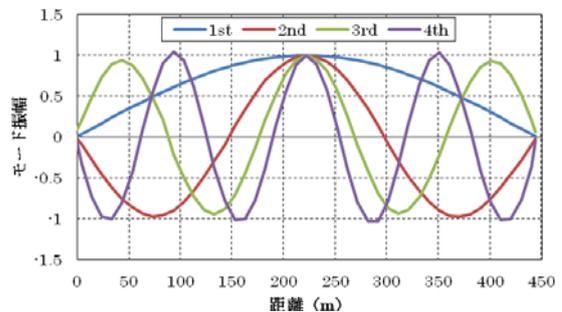


図-10 電線のモード形状

変位の最大値は入力地震動の加速度応答スペクトルの値の順番と一致しており、長周期成分が電線応答

に及ぼす影響が大きいことが分かった。

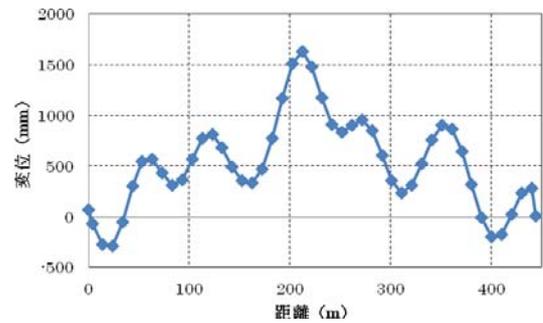
今回の検討範囲内では、鉄塔が弾性範囲内の応答となったため、鉄塔応答に及ぼす影響については検討が不十分となった。鉄塔部材が塑性化することで繰り返し数の増加に伴う塑性化の進行や、塑性化に伴い固有振動数が変化して長周期成分の影響が大きくなることも想定されるため、今後、入力レベルを大きくした検討を実施していきたい。

**謝辞：**本研究の実施にあたっては、防災科学技術研究所の強震ネットワーク記録を利用した。記して謝意を表す。また、検討に協力していただいた土木学会地震工学委員会・強震継続時間が長い地震動に対する土木構造物の耐震性検討小委員会のメンバーに謝意を表す。

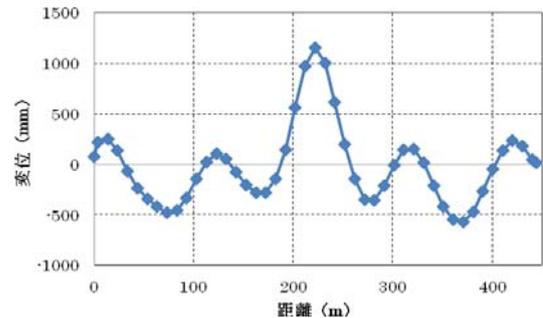
**参考文献**

- 1) 土木学会地震工学委員会：強震継続時間が長い地震動に対する土木構造物の耐震性評価シンポジウム講演概要集, 2012.5
- 2) 東北電力(株)：http://www.tohoku-epco.co.jp/ICSFiles/afiedfile/2011/05/16/as.pdf
- 3) 東京電力(株)：http://www.tepco.co.jp/cc/press/11051605-j.html
- 4) ABAQUS Analysis User's Manual Version6.10, 2011.
- 5) (社)日本電気協会・送電専門部会：架空送電規定(JEAC 6001-2008), 2008.
- 6) (社)電気協同研究会・送電用鉄塔設計荷重専門委員会：電気協同研究「送電用鉄塔の設計荷重～現状と将来展望～」, 第62巻第3号, 2006.11
- 7) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2012.
- 8) (独)防災科学技術研究所強震ネットワーク K-NET：http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/
- 9) 電気学会：送電用支持物設計標準 JEC-127, 1979.

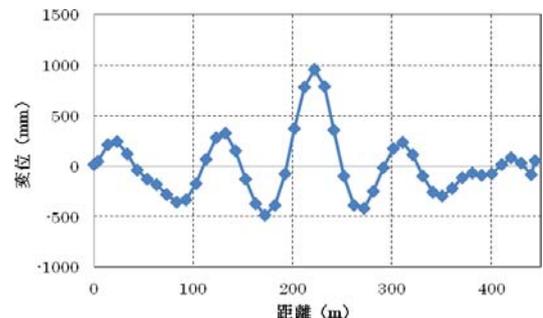
(2012.9.21 受付)



(a) II-1-1波 (21.48秒)



(b) K-NET仙台波 (126.51秒)



(c) 修正 K-NET仙台波 (101.05秒)

図-11 電線形状 (中央部の変位が最大の時)

EFFECTS OF EARTHQUAKE DURATION ON RESPONSE OF AN OVERHEAD TRANSMISSION LINE

Yusuke SATO and Kazuyuki IZUNO

This paper discussed effects of earthquake duration on responses of an overhead transmission line. For this purpose, nonlinear analyses were conducted. An analysis target was the overhead transmission line which has three towers with 77.5m in height and four spans whose length between each towers were equal to 450m, respectively. Three types of ground accelerations were selected as analysis inputs in order to investigate effects of earthquake duration. A number of cycles and a long period component were focused as the characteristics of earthquake duration. Analytical results demonstrated that the long period component of the earthquake increased the maxmim displacement of cables while tower responses were not affected by the earthquake duration.