

アルミニウム合金製電車線柱への 電車線路設備耐震設計指針の適用方法

近藤 優一* 常本 瑞樹* 金色 貴史** 中島 祐樹**

Proposal of Seismic Design Information of Poles Made of Aluminum Alloy in Overhead Contact Systems

Yuichi KONDO Mizuki TSUNEMOTO Takashi KANAIRO Yuki NAKAJIMA

Since aluminum alloy is lightweight with excellent corrosion resistance, installing poles made of aluminum alloy could improve workability and maintainability. However, the Seismic Design Guideline for Overhead Contact Systems and Commentary does not specify seismic design information of poles of aluminum alloy. Therefore, we conducted experiments and analyses of poles of aluminum alloy from the viewpoint of seismic design. Based on those results, we proposed the information of poles of aluminum alloy to enable seismic design in accordance with the Seismic Design Guideline for Overhead Contact Systems and Commentary.

キーワード：電車線柱，耐震設計，アルミニウム合金，固有周期，限界値

1. はじめに

電車線柱（以下、電柱）には、一般的にコンクリート柱と鋼管柱が使用されている。コンクリート柱は省メンテナンスであるが、質量が大きいことから、施工に必要な重機が大型になるなどの課題がある。一方、鋼管柱は、コンクリート柱に比べて軽量であるものの、経年劣化により腐食するため、定期的な塗装が必要となり、メンテナンスに労力がかかるという課題がある。

アルミニウム合金（以下、アルミ合金）は軽量かつ耐腐食性が高く、電柱への適用による施工性や保守性の向上が期待できる。合金番号が6000番台のアルミ合金（以下、6000系アルミ合金）は、応力腐食割れが発生する恐れが少なく¹⁾、強度と耐食性が高い特徴があることから、土木構造物に使用できるアルミ合金に挙げられている²⁾。これまでに試験的に電柱³⁾やビーム⁴⁾に適用したアルミ合金もすべて6000系アルミ合金である。

電柱は、地震による倒壊や列車の走行空間への支障を防ぐために耐震設計を行う必要があり、一般に「電車線路設備耐震設計指針・同解説」⁵⁾（以下、「耐震設計指針」）に基づいて実施されるが、耐震設計指針では、アルミ合金製の電柱が想定されていないため、そのまま適用することができない。本報告では、電柱として導入が検討されている6000系アルミ合金継目無管をアルミ柱と称することとし、アルミ柱に耐震設計指針を適用する方法を検討した結果について述べる。

2. 耐震設計指針の適用に必要な事項

電柱の耐震設計では、土木構造物と電柱の固有周期などの条件に応じて、地震に対する電柱の応答加速度を推定し、この応答加速度によって生じる曲げモーメントと、その限界値を比較することで安全性を評価する。アルミ柱の耐震設計には、後述する固有周期補正乗率、曲げモーメントの限界値、加速度応答スペクトルが必要となる。これらを定めることにより、耐震設計指針に基づいたアルミ柱の耐震設計が可能となる。

電柱の固有周期は、単体の電柱（以下、素柱）の固有周期に固有周期補正乗率を乗ずることによって算定される。表1に固有周期補正乗率を示す。固有周期補正乗率には、電線やそれを支持する金具など（以下、添架物）の質量による影響を補正する α_w と、電柱がコンクリート柱の場合に生じるひび割れの剛性低下による影響を補正する α_R がある。前者は、新幹線において、電柱や添架物を多自由度のばね-質点モデルとして扱った解析結果⁶⁾を基に、後者は、電柱の交番載荷試験結果⁵⁾を基に、それぞれ定められている。

曲げモーメントの限界値は、コンクリート柱と鋼管柱の両方とも設計曲げモーメント（以下、設計値）の2倍と定められている⁵⁾。これは、コンクリート柱の場合には、JIS A 5373において、終局曲げ耐力が設計値に相当する限界ひび割れ幅耐力の2倍以上とするように規定

表1 電柱の固有周期補正乗率⁵⁾

電柱種別	添架物の質量による影響補正乗率 α_w	剛性低下による影響補正乗率 α_R
コンクリート柱	1.1	1.0~1.5
鋼管柱	1.2	1.0（補正なし）

* 電力技術研究部 電車線構造研究室

** 元 電力技術研究部 電車線構造研究室

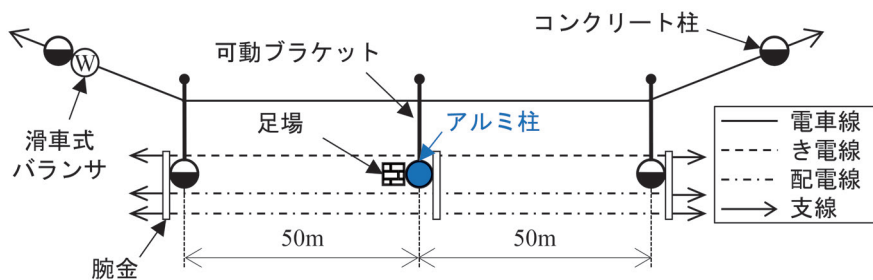


図1 アルミ柱の振動実験概要図 上面図⁸⁾

されており⁷⁾、鋼管柱の場合には、交番荷重試験結果において、最大曲げモーメントが設計値の2倍よりも十分に大きかったためである⁵⁾。

加速度応答スペクトルは、耐震設計指針に示されており、電柱の応答加速度を推定する際に用いる。この加速度応答スペクトルを作成する際の減衰比は、コンクリート柱および鋼管柱でそれぞれ0.05、0.02としている。

3. 添架物の質量が固有周期に与える影響^{8) 9)}

本章では、添架物の質量がアルミ柱の固有周期に与える影響について検討するため、在来線を想定した装柱条件の実物大アルミ柱の振動実験を行い、添架物を取り付けられたことによる電柱の固有周期増加率を測定し、理論計算結果と比較する。

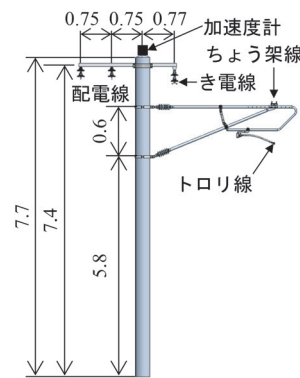
3.1 アルミ柱の振動実験

素柱の状態と添架物を取り付けられた状態のアルミ柱の振動実験^{8) 9)}をそれぞれ実施した。図1にアルミ柱振動実験の全体概要図を、図2にアルミ柱の装柱図および外観写真を示す。また、表2、表3にアルミ柱と線条の諸元をそれぞれ示す。線条は在来線で一般的に使用されるものとし、径間長は50mとした。

アルミ柱の固有周期は、アルミ柱の天頂部を足場から人力により線路直角方向あるいは線路平行方向に強制加振させ、加振終了後の自由振動波形を周波数解析することによって推定した。

3.2 添架物を取り付けられた電柱の固有周期理論計算

図3に示すように、添架物を取り付けられた電柱を二つの質点が付加された片持ちはり^{8) 9)}と仮定し、固有周期の理論計算を実施した^{8) 9)}。このとき、文献6の考え方に基づいて、電柱の振動に寄与する電車線等の等価質量 m_1 (以下、電車線等価質量)と、き電線等の等価質量 m_2 (以下、き電線等価質量)を設定した。各添架物の等価質量は表4に示す通りである。電車線取付高さ h_1 は可動ブラケットの取付位置の中間点(6.1m)とし、き電線等取付高さ h_2 は、腕金の取付位置(7.4m)とした。



(a) 装柱図(単位:m)⁸⁾



(b) 外観写真

図2 アルミ柱

表2 アルミ柱諸元⁸⁾

合金番号等	A6082TE-T6
外径(mm)	350
厚さ(mm)	10
断面二次モーメント $I(\text{m}^4)$	1.54×10^{-4}
曲げ剛性 $EI(\text{N} \cdot \text{m}^2)$	1.08×10^7
単位長質量 $\rho(\text{kg/m})$	28.1
設計曲げモーメント(kN·m)	128

表3 線条諸元⁸⁾

線種	型式	張力(kN)
ちょう架線	St135	19.6
トロリ線	GT-M170	9.8
き電線	Al510	6.87
配電線	Cu-OE38	1.96

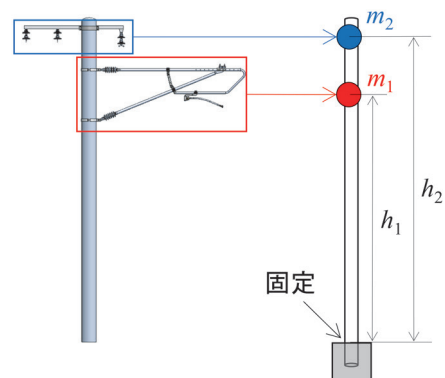


図3 二つの質点が付加された片持ちはり⁸⁾

3.3 固有周期増加率の実験結果と計算結果および添架物の質量を考慮したアルミ柱の固有周期算定手法

図4に添架物を取り付けられたことによるアルミ柱の固有周期増加率の実験値と計算値を示す。図4より、アルミ柱の固有周期増加率の実験値は、線路直角方向で1.5程度、線路平行方向で1.3程度であった。コンクリート柱および鋼管柱の固有周期補正乗率 α_w がそれぞれ1.1、1.2であり、これらに比べるとアルミ柱の固有周期増加率は大きいことがわかる。この理由として、アルミ柱は、コンクリート柱や鋼管柱に比べて軽量であることから、添架物の質量の影響が相対的に大きいためであると考えられる^{8) 9)}。また、アルミ柱の固有周期増加率を実験値と計算値で比較すると、実験値は計算値に比べて10%程度小さかった。文献6では新幹線を想定した装柱を対象としており、そのときの考え方に基いて等価質量を設定したが、今回は在来線を想定した装柱であるため、その違いが、実験値と計算値に差が生じた要因となった可能性が考えられる。

4. 曲げモーメントの限界値と剛性低下が固有周期に与える影響

4.1 アルミ合金の機械的性質

表5に、試験的に電柱やビームに適用されたことがある6000系アルミ合金の機械的性質^{10) 11)}を示す。表5に示すように、引張強さに対する耐力の割合は0.8~0.9となる。アルミ合金材の許容引張応力は、分野によって異なる値であるが、鉄道車両における算出方法¹²⁾を採用した。具体的には、許容応力を求める際の基準となる基準強さを耐力と引張強さの0.7倍の小さい方とし、これを安全率1.5で除することで許容引張応力を算出した。なお、これは鋼管柱と同じ算出方法である。結果として、表5に示したアルミ合金の基準強さは、すべて引張強さの0.7倍となる。

また、一般に、アルミ合金の応力とひずみの関係は、式(1)によって表される。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (1)$$

ε : ひずみ

σ : 応力 (N/m²)

E : ヤング率 (N/m²)

$\sigma_{0.2}$: 耐力 (N/m²)

n : ひずみ硬化パラメータ

ひずみ硬化パラメータ n は、熱処理のアルミ合金は20以上であり、非熱処理のアルミ合金は20未満であることが示されており¹³⁾、実験によって6000系アルミ合金は29.1と求められている¹⁴⁾。これを用いて表されるアルミ合金の応力とひずみの関係を図5に示す。なお、応

表4 添架物の等価質量⁸⁾

	質量(kg)	等価質量(kg)	
		線路直角方向	線路平行方向
電車線	可動ブラケット	65.7	32.9
	曲線引金具	1.90	0.95
	ちょう架線	54.5	-
	トロリ線	76.6	-
	合計	199	33.8
き電線等	腕金	36.3	36.3
	き電線	76.7	3.00
	配電線	28.8	6.00
	合計	340	45.3

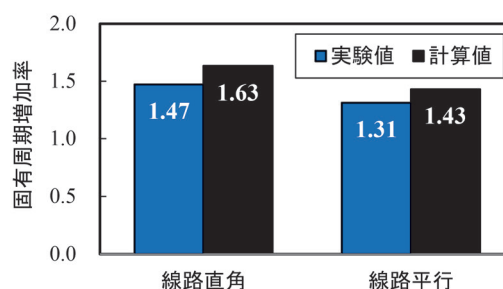


図4 固有周期増加率の実験値と計算値の比較

表5 アルミ合金の機械的性質

合金番号等	A6082TE-T6	A6061S-T6	A6N01TE-T5	
厚さ(mm)	$t \leq 5$ $5 < t \leq 25$	-	$t \leq 6$	$6 < t \leq 12$
耐力(N/mm ²)	250 260	245	235	175
引張強さ(N/mm ²)	290 310	265	265	225
耐力/引張強さ	0.8 0.9	0.9	0.8	0.8

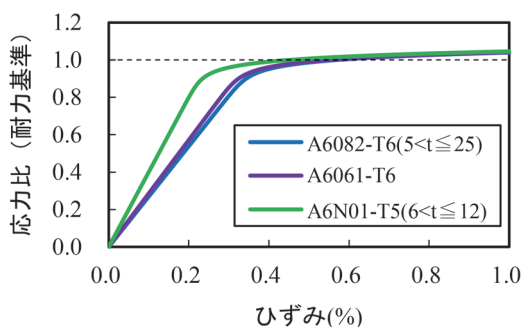


図5 アルミ合金の応力-ひずみ曲線

力は耐力を基準とした比で表している。図5に示すように、いずれの6000系アルミ合金においても、線形性が失われる弾性限度は耐力の0.9倍程度である。

以上に示したように、アルミ柱に適用される6000系アルミ合金は、引張強さに対する耐力や弾性限度の割合が合金番号によらず同程度である。したがって、これらを素材とするアルミ柱の最大曲げモーメントや荷重-変位特性も同様の傾向になると考えられる。

4.2 アルミ柱の交番載荷試験⁹⁾

アルミ柱の曲げモーメントの限界値や剛性低下による固有周期補正乗率 α_R を適切に設定するため、アルミ柱の交番載荷試験を実施し、アルミ柱の最大曲げモーメントや荷重-変位特性を取得した。

4.2.1 実験方法

図6にアルミ柱の交番載荷試験概要図を示す。アルミ柱の諸元は表2の通りである。表2に示したアルミ柱の設計値は、アルミ柱の表面に発生する最大曲げ応力が許容引張応力に達するときの曲げモーメントとした。アルミ柱は1mを固定架台に埋め込んでモルタルで固定した。また、荷重点は固定架台から3mの位置とした。載荷中の荷重を荷重計、荷重点の変位を変位計、地際部付近のひずみをひずみゲージで測定した。

正負交番する載荷変位は、基準変位 1δ の整数倍で $\pm 1\delta, \pm 2\delta, \pm 3\delta \dots$ と段階的に大きくし、各載荷変位の繰り返し数を3回とした。基準変位 1δ は、図6に示すように、正側載荷時に引張方向に張り付けたひずみゲージの測定値が、アルミ合金の耐力に相当するひずみに達したときの変位 (約95mm) とした。

4.2.2 実験結果

図7にアルミ柱の交番載荷試験結果を示す。図7は、地際部の曲げモーメントと荷重点変位の関係で表している。

(1) 最大曲げモーメント

図7より、アルミ柱の最大曲げモーメントは設計値の2.9倍であった。なお、それ以上の荷重が加わると、荷重が頭打ちとなって変位量が大きくなり、最終的に -3δ への載荷中にアルミ柱の地際部が破断した。また、アルミ柱と固定架台間のモルタルが損傷し、隙間が生じた。

(2) 荷重-変位特性

図7より、設計値の2.3倍まで荷重点変位と地際部の曲げモーメントの関係は線形であり、それ以上の荷重が加わると剛性が低下した。

4.3 曲げモーメント限界値と剛性低下影響補正乗率 α_R

アルミ柱の最大曲げモーメントは、設計値の2倍に対して十分な余裕があることから、アルミ柱の曲げモーメントの限界値は、鋼管柱やコンクリート柱と同様に、設計値の2倍と設定して問題ないと考えられる。

アルミ柱の曲げモーメントの限界値を設計値の2倍と設定すれば、曲げモーメントの限界値までにアルミ柱の剛性は低下しないことから、鋼管柱と同様に、剛性低下の影響を考慮した固有周期補正乗率 α_R は1.0としてよいと考えられる。ただし、今回対象とした6000系以外のアルミ柱の場合には、荷重-変位特性が異なる可能性があるため、別途、検討が必要である。

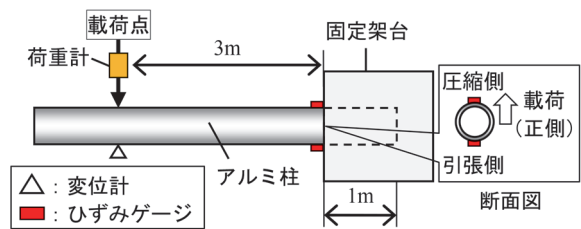


図6 アルミ柱の交番載荷試験概要図⁹⁾

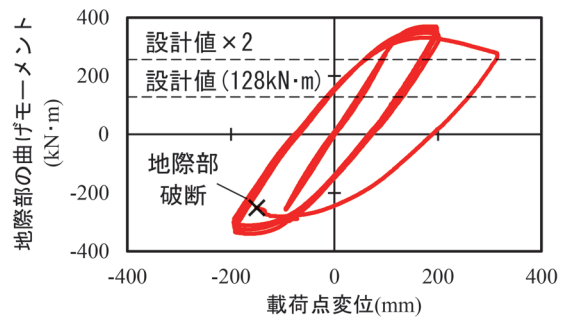


図7 アルミ柱の交番載荷試験結果⁹⁾

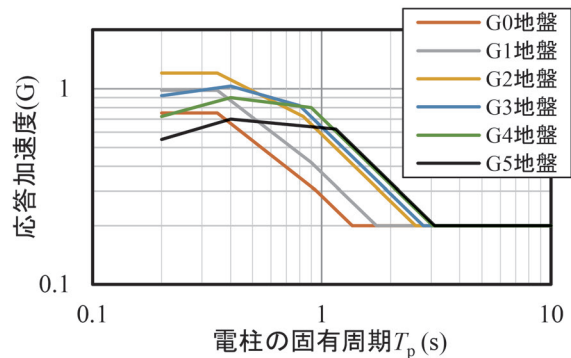


図8 盛土のアルミ柱の加速度応答スペクトル

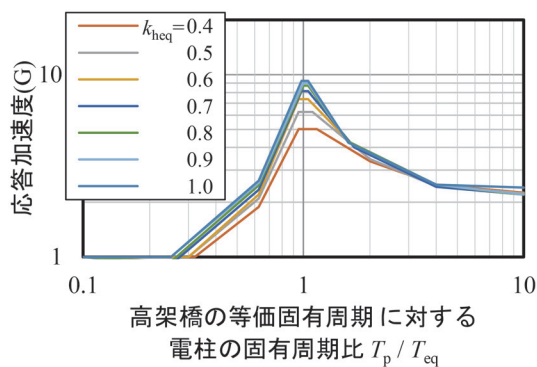
5. アルミ柱の加速度応答スペクトル⁹⁾

一般に、実構造物の減衰比は、構造物の材質や構造などによって異なる。

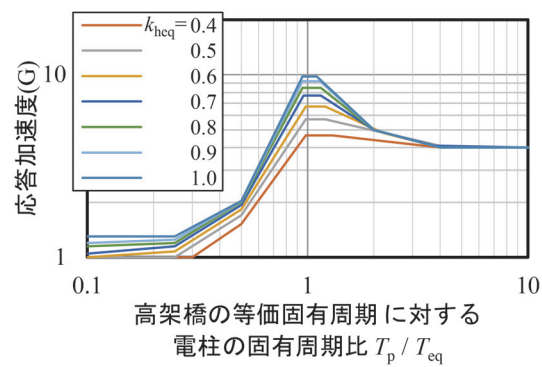
アルミ柱と材質は同じで、構造が類似しているアルミ合金製照明ポールでは、風圧による照明ポールの共振振幅を推定する際に減衰比0.01¹⁵⁾を用いている。また、アルミニウムやアルミ合金の材料としての減衰は、振幅の増加に応じて変化しない¹⁶⁾、あるいは増加する¹⁷⁾ことが報告されている。これらのことから、今回は減衰比0.01を採用し、加速度応答スペクトルを作成することとした。

図8に盛土の加速度応答スペクトルを、図9、図10に高架橋上の加速度スペクトルを示す。なお、 k_{neq} は構造物全体系の折れ曲がり震度⁵⁾とする。

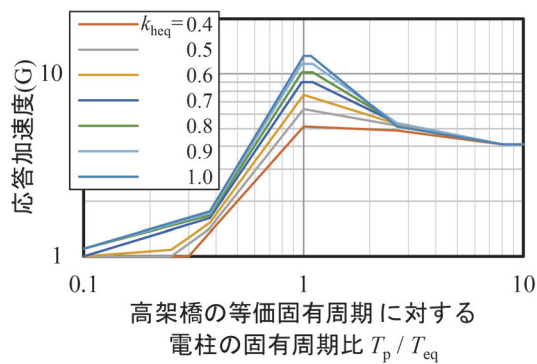
土木構造物の条件および高架橋の等価固有周期に対する電柱の固有周期の比が同じ条件でアルミ柱と鋼管柱の応答加速度を比較した。図11に地盤種別ごとの最大応



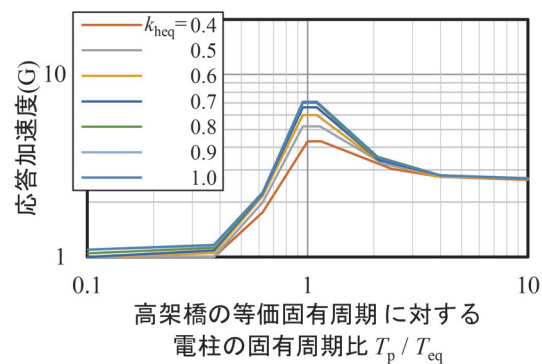
(a) G1 地盤



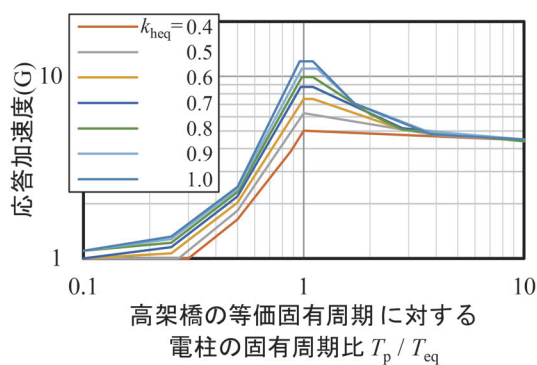
(a) G4 地盤



(b) G2 地盤



(b) G5 地盤



(c) G3 地盤

図9 高架橋上のアルミ柱の加速度応答スペクトル

図10 高架橋上のアルミ柱の加速度応答スペクトル

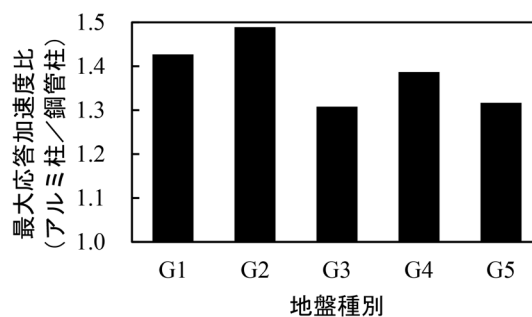


図11 地盤種別ごとの最大応答加速度比

答加速度比（アルミ柱／鋼管柱）を示す。図11より、アルミ柱の応答加速度は、鋼管柱に比べて最大1.5倍程度大きくなる。

6. アルミ柱の耐震設計例

これまでの検討結果を用いて、実際にアルミ柱の耐震設計を実施する。条件は以下の通りとする。

- ・アルミ柱は表2の通りとした。
- ・添架物の取付状況は図2に示す通りとし、線種は表3の通りとした。
- ・固有周期補正乗率のうち、 α_w はアルミ柱の振動試験で得られた実験値（線路直角方向1.47、線路平行方

向1.31)とし、 α_R は1.0とした。

- ・曲げモーメントの限界値は、設計値の2倍とした。
- ・地盤種別はG3地盤とした。
- ・1層ラーメンの高架橋上に建植されているものとし、土木建造物の条件は表6の通りとした。

図12に高架橋の等価固有周期 T_{eq} とアルミ柱の曲げモーメント比（曲げモーメントの限界値に対する断面力の比）との関係を示す。図12において、曲げモーメント比が1未満である場合に、アルミ柱は地震に対して安全であると評価されることを表す。したがって、今回の例においては、高架橋の等価固有周期 T_{eq} が0.31s以上の高架橋上でアルミ柱が採用可能となる。

表 6 耐震設計例に用いる土木構造物の条件

構造物全体系の折れ曲がり震度 k_{heq}	0.6
高架橋の等価固有周期 $T_{eq}(s)$	0.2~1.2
回転水平比 $k_0(rad/m)$	0.0528

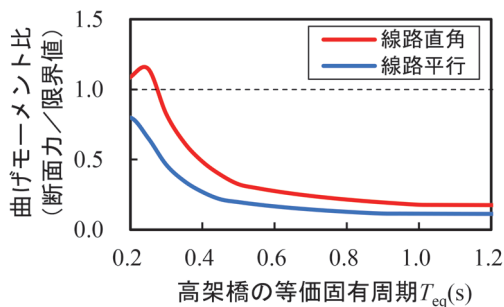


図 12 高架橋の等価固有周期とアルミ柱の曲げモーメント比との関係⁹⁾

7. まとめ

6000系アルミ合金製継目無管（アルミ柱）に電車線路設備耐震設計指針を適用する方法について検討した。その結果は以下の通りである。

- (1) 在来線を想定した装柱条件のアルミ柱の振動実験結果より、添架物によってアルミ柱の固有周期は、線路直角方向で1.5倍程度、線路平行方向で1.3倍程度長くなった。これらの値は、コンクリート柱および鋼管柱の固有周期補正乗率 α_w よりも大きい。
- (2) アルミ柱の交番載荷試験結果より、コンクリート柱や鋼管柱と同様に、アルミ柱の曲げモーメントの限界値を設計曲げモーメントの2倍と設定すればよいことを示した。その場合、曲げモーメントの限界値までアルミ柱の剛性は低下しないことから、剛性低下による固有周期補正乗率 α_R を1.0として問題ないことを確認した。
- (3) アルミニウム合金製照明ポールに用いられている減衰比0.01を採用してアルミ柱の加速度応答スペクトルを作成した。

文献

- 1) 日本アルミニウム協会：アルミニウムハンドブック（第8版），2017

- 2) 土木学会：アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針（案），2015
- 3) 斎藤寛：アルミニウム合金製電車線路支持物，電力と鉄道，鉄道電化協会，Vol.19, No.2, 1969
- 4) 山崎猛志，猿田裕司，山岡正英，中山正博：軽量な電車線支持物用アルミビーム構造の開発，テクニカルフォーラム論文集，日本鉄道電気技術協会，2014
- 5) 鉄道総合技術研究所：電車線路設備耐震設計指針・同解説，鉄道技術推進センター，2013
- 6) 網干光雄，常本瑞樹：地震時における架線振動の影響解析—電柱固有振動数への影響—，電気学会研究会資料，交通・電気鉄道研究会，TER-09-50, pp.27-32, 2009
- 7) 日本産業標準調査会：日本産業規格 JIS A 5373 プレキャストプレストレストコンクリート製品，2016
- 8) 近藤優一，常本瑞樹，中島祐樹，金色貴史，村上智史：添架物の影響を考慮した電柱の固有周期算定手法の提案，J-RAIL2022，電気学会，S6-3-3, pp.416-419, 2022
- 9) 近藤優一，常本瑞樹，金色貴史，中島祐樹：アルミニウム合金製電車線柱の耐震設計，日本鉄道技術協会，JREA，Vol.66, No.12, 2023
- 10) 日本産業標準調査会：日本産業規格 JIS H 4080 アルミニウム及びアルミニウム合金継目無管，2015
- 11) 日本産業標準調査会：日本産業規格 JIS H 4100 アルミニウム及びアルミニウム合金の押出型材，2022
- 12) 日本産業標準調査会：日本産業規格 JIS E 7106 鉄道車両—旅客車用構体—設計通則，2018
- 13) Federico M. Mazzolani, "Aluminium Alloy Structures Second edition," E & FN SPON, pp.59-64, 1994.
- 14) 大倉一郎，長尾隆史，石川敏之，萩澤亘保，大隈新平：構造用アルミニウム合金の応力-ひずみ関係および接合によって発生する残留応力の定式化，土木学会論文集A，Vol.64, No.4, pp.789-805, 2008
- 15) 日本アルミニウム協会：アルミニウム合金製照明ポール設計・製作要領，土木製品開発委員会，2005
- 16) 鈴木辰三郎：金属材料の減衰能に関する研究，日本金属学会誌，No.5, 1944
- 17) 西山徳人，浅野滋：高減衰能金属における内部摩擦の振幅依存性の評価，日本金属学会誌，Vol.65, No.2, pp.109-114, 2001