

コンクリート電柱の取替判定方法

常本 瑞樹* 清水 政利* 近藤 優一*
工藤 輝大** 上田 洋*** 飯島 亨#

Replacement Criteria of Concrete Poles

Mizuki TSUNEMOTO Masatoshi SHIMIZU Yuichi KONDO
Teruhiro KUDO Hiroshi UEDA Toru IJIMA

Concrete poles for electric railways are load-supporting members which support overhead contact lines and its fittings, etc., and the required strength of them is determined in consideration of the load according to its service condition. For the judgement of necessity of its replacement due to its deterioration at the time of the maintenance work, it is important to know whether it has the required strength. Since concrete poles started to be used as electric-railway poles on a full scale, 50 years or more have passed. Therefore, the grounds and standards are desired for their planned replacement according to the deterioration conditions of poles. In this paper, we clarified the main deterioration processes of concrete poles from the result of the field survey on commercial lines, and the bending and the material tests of disused poles. And, we proposed a replacement judging flow of the poles.

キーワード：電気鉄道，電柱，取替，コンクリート，保守，強度，劣化

1. はじめに

コンクリート電柱は，日本においては1922年に現場打ちのものが開発され，鉄道にも使用された。工場生産による遠心成形のものは，生産が始まったのは1934年であり，1951年に木材需給対策が閣議決定した頃から電化柱として本格的に使用されるようになった¹⁾。当初は鉄筋が非緊張の柱（RC柱）であったが，鉄筋を緊張したプレストレストコンクリート柱（PC柱）が1960年ごろから使用されるようになり，1970年以降はほとんどがPC柱となった。コンクリート電柱が鉄道電化柱として本格的に使用されてから50年以上経過し，劣化状況に応じた計画的な取替のための根拠や基準が求められている。

電柱は，電車線などを支持する強度部材であり，電車線の質量だけではなく地震や風圧による荷重，その他使用条件に応じた荷重を考慮して所要の強度が決定される。このことから，コンクリート電柱の保全においては劣化状況に対して所要の強度を有しているか否かの判断が最も重要となるものの，現状では外観状況のみでの取替要否判定に留まっている。また，取替年数の目安については，

一般に60年程度とされているものの明確な根拠はない。

本論文では，営業線における現地調査，撤去電柱の曲げ耐力試験や材料分析の結果より，コンクリート電柱の主な劣化過程を解明するとともに，強度評価および材料評価による電柱の保全判定フローを提案した。

2. コンクリート電柱の性能

図1に，コンクリート電柱の断面図例を示す。コンクリートは引張荷重に弱く，圧縮荷重に強いことから，コンクリート電柱においては主に圧縮方向強度を分担している。また，内部の鉄筋（鋼材）を腐食などから保護する役割もある。鉄筋は，コンクリートが弱い引張荷重を主に分担している。

強度の基準としては，「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」第四十一条3の解釈基準24²⁾においては，予想される荷重に対してコンクリート電柱の破壊荷重は2倍以上（安全率2）とされている。また，JIS A 5373³⁾においては，コンクリート電柱はひび割れ試験曲げモーメン

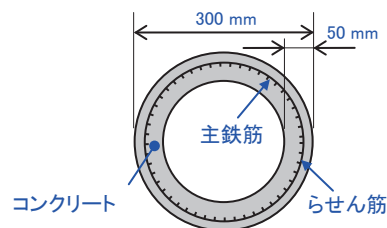


図1 コンクリート電柱断面図例

* 電力技術研究部 電車線構造研究室
** 材料技術研究部 コンクリート材料研究室
(現 総務部)
*** 材料技術研究部 コンクリート材料研究室
(現 研究開発推進部)
材料技術研究部 コンクリート材料研究室

特集：電力技術

トの2倍載荷時に破壊してはならないとされている。そのため、コンクリート電柱の選定にあたっては、設計時に予想される荷重以上のひび割れ試験曲げモーメントの電柱を採用する。なお、ひび割れ試験曲げモーメントは、電車線路設備の設計において“設計曲げモーメント”と呼ばれることから、本論文においてもこの呼称での記載とする。

3. 営業線における電柱劣化調査

コンクリート電柱（以下、「電柱」と記す）の劣化状況を把握するため、営業線において外観調査を実施した。調査電柱は合計475本であり、調査時の経年は1～56年である。図2に、経年ごとの調査電柱数を示す。調査箇所は、事業者において沿岸部や内陸部を含む劣化状況が顕著な線区、試験用の撤去電柱を選定するため撤去予定の電柱がある線区を中心とした。このため、調査結果は全体傾向よりも変状が観測される割合が多くなると予想されたが、安全側の評価になるため問題ないものとした。

図3に、劣化変状が観測された電柱数の経年ごとの割合を示す。また、図4に調査電柱数475本に対する各種劣化変状が観測された電柱数の割合を示す。最も多い劣化変状は「型枠継目ひび割れ」であり、約4割の電柱で観測された。その他、観測割合が多い順に「縦ひび割れ」、「エフロレッセンス」、「はく離」、「はく離かつ鉄筋露出」、「鉄筋露出（かぶり不足等）」、「横ひび割れ」であった。図5に、電柱劣化状況例を示す。各変状について、観測本数が多い順に以下に記す。

(1) 型枠継目ひび割れ

図5(a)のように、製造時に用いる型枠の継目部に沿ったひび割れもしくは大きなすき間である。

(2) 縦ひび割れ

図5(b)のように、型枠継目部以外で垂直方向（長手方向）に生じたひび割れである。

(3) エフロレッセンス

図5(b),(c)のように、電柱中空部に滞留した雨水がひび割れ箇所等から外部へしみ出す際にコンクリート中のカルシウムを溶解して析出するものである⁴⁾。

(4) はく離

かぶりコンクリートがはく離した状態である。また、

図5(d)のように、コンクリートが浮いた状態のものも、内部ではく離しているものとしてこの分類に含めている。
(5) はく離かつ鉄筋露出

図5(d)のように、かぶりコンクリートがはく離し、内部の鋼材が露出している状態である。

(6) 鉄筋露出（かぶり不足等）

図5(e)のように、上記の「はく離かつ鉄筋露出」とは異なり、電柱表層付近に鉄筋が露出しているものである。かぶりについては、過去の日本工業規格（JIS A 5309「遠心力プレストレスコンクリートポール」1954年制定、2000年廃止）では主鉄筋に対して15mm以上、現在のJIS A 5373³⁾では9mm以上となっている。そのため、このような鉄筋露出は製造不良によるものと考えられる。

(7) 横ひび割れ

図5(f)のように、水平方向（円周方向）に生じたひび割れである。横ひび割れの原因としては、過去に過大な曲げ荷重が加わった場合や、現状で設計値以上の荷重が加わっている場合などが考えられる。

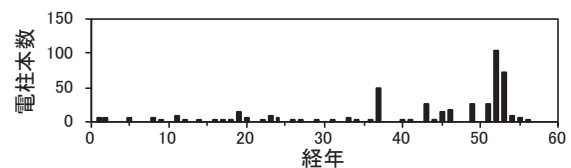


図2 経年ごとの電柱調査数

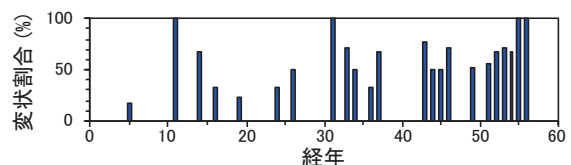


図3 経年ごとの変状柱割合

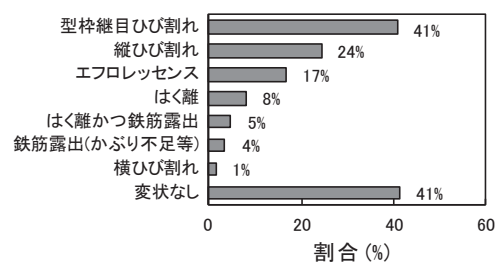


図4 劣化変状の割合

(各項目の本数) / (調査電柱数 475 本)

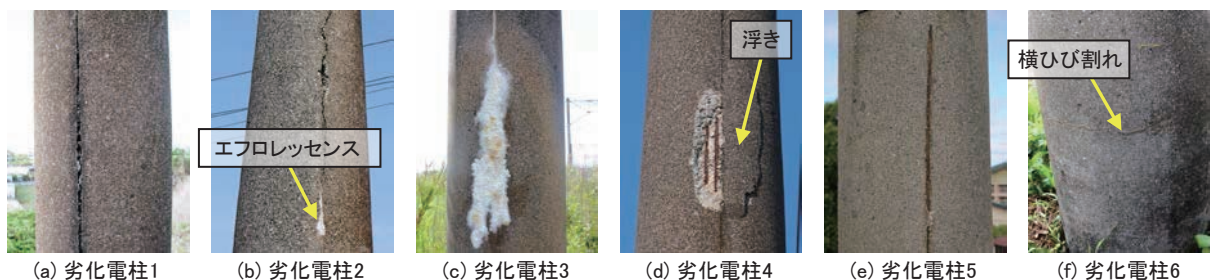


図5 現地調査における電柱劣化状況例

4. 撤去電柱の曲げ耐力試験

電柱の曲げ強度を把握するため、営業線より撤去した電柱の曲げ耐力試験を実施した⁵⁾。試験電柱は32本であり、経年は33～54年（撤去時）である。

(1) 試験方法

曲げ耐力試験は、JIS A 5363⁶⁾に準拠して実施した。図6に、試験装置概略を示す。電柱を固定して、頂部から250 mmの位置に載荷する。

(2) 試験結果

主な破壊形態は、圧縮側のかぶりコンクリートの圧壊および主鉄筋の座屈による曲げ破壊であった。

図7に、経年と破壊曲げモーメント M_m と設計曲げモーメント M_d の比(M_m/M_d)の関係を示す。図7では、試験電柱を以下のように3項目に分類した。

- ・変状なし：変状がない柱
- ・変状あり：変状が観測された柱
- ・補修：補修された柱

図7より、 M_m/M_d はすべての電柱で基準値である2以上である。また、経年による強度低下の傾向などはみられなかった。分類ごとでは、「変状なし」は平均2.96(2.74～3.52)、「変状あり」は平均2.66(2.19～3.49)、「補修」は平均2.85(2.62～2.97)であり、「変状なし」の平均値に対して「変状あり」や「補修」は低い値であった。

5. 材料特性試験

撤去電柱について材料劣化状況を把握するため、各種試験および調査を実施した。

5.1 中性化深さ

コンクリートの中性化とは、製造時には強アルカリ性であるコンクリートが、大気中の二酸化炭素などの影響によりアルカリ性が失われる現象である。これによる強度低下はないものの、鉄筋部まで中性化が進むと鉄筋腐食の原因となるため注意が必要となる。

(1) 試験電柱

対象電柱は合計60本であり、曲げ試験時に破壊部を調査した電柱が10本、後述の内部鉄筋調査において試験した電柱が15本、後述の中性化検査装置を用いて試験した電柱が35本である。経年は33～55年（撤去時）である。試験箇所フェノールフタレイン溶液を噴霧し、赤紫色の着色がない場合を中性化しているものとした。

(2) 試験結果

図8に、経年と中性化深さ試験結果の関係を示す。経年52年の1本で中性化深さが5 mmであったが、それ以外の電柱は中性化深さ1 mm未満であった。図8には、文献4)を参考にした中性化進行の予測結果も示してい

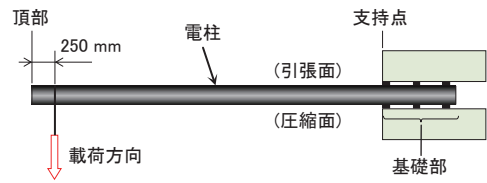


図6 曲げ耐力試験実施状況

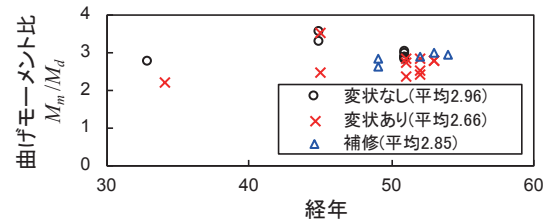


図7 経年と曲げ強度の関係

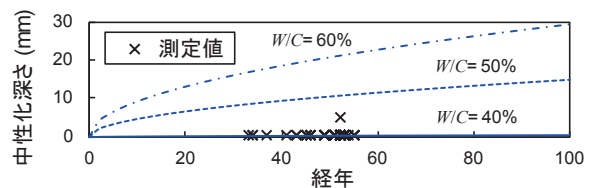


図8 経年と中性化深さの関係

る。予測結果より、中性化進行はコンクリートの水セメント比(W/C)が大きく影響し、 W/C が40%以下では中性化がほとんど進行しないことがわかる。一般土木構造物のコンクリート(W/C : 50～60%程度)に比べて遠心成形の電柱の W/C は小さく、配合で35%程度、実質で22～23%程度⁴⁾であることから、測定値のほとんどが経年によらず1 mm未満であることと一致する。

5.2 塩化物イオン

塩化物イオンは、海からの飛来塩分などにより建植後にコンクリートに浸透する場合と、製造時から材料に含まれている場合がある。ここでは、前者を取り扱うこととする。塩化物イオンの浸透により、内部鉄筋位置の塩化物イオン濃度が一定量を超えると鉄筋が腐食しやすい状況となる。これによる鉄筋腐食および腐食生成物の体積膨張に伴うひび割れ、かぶりコンクリートはく離などを「塩害」という⁷⁾。

(1) 試験電柱

試験電柱は、建植場所が比較的沿岸部に近く、型枠継目ひび割れが生じている3本を選定した。

- ・No.1：東貝塚構内，海岸から約2.2 km，建植1968年，経年45年（撤去時）
- ・No.2：塩屋～垂水，海岸から約50 m，建植1962年，経年51年（撤去時）
- ・No.3：市来構内，海岸から約1.2 km，建植1970年，経年43年（撤去時）

(2) 試験方法

塩化物イオン量の調査は、JIS A 1154⁸⁾のイオンクロ

特集：電力技術

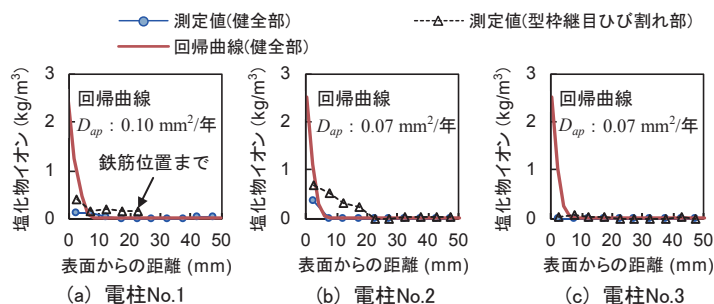


図9 塩化物イオン浸透試験結果（5箇所の平均値）

マトグラフ法に準拠して実施した。各電柱について、コンクリート採取用ドリルにより表面から内部へ5 mmごとに試料を採取した。測定箇所は、各電柱において変状のない健全部と型枠継目ひび割れ部とした。

(3) 試験結果

図9に、塩化物イオン量の測定結果を示す。図9には、フィックの拡散方程式による測定値の回帰曲線も示す。ただし、拡散方程式はひび割れがない場合に当てはめるものであることから、回帰曲線は健全部の測定値のみ対象とし、型枠継目ひび割れ部については回帰曲線を示していない。深さ x [mm]、建植時からの時刻 t [年] における塩化物イオン濃度 $C(x, t)$ [kg/m³] は式(1)で表される⁷⁾。

$$C(x, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 C_0 は表面における塩化物イオン濃度 [kg/m³]、 D_{ap} は塩化物イオンの見かけの拡散係数 [mm²/年]、 erf は誤差関数である。

各電柱について式(1)による回帰曲線から同定した D_{ap} の値は、電柱 No.1, No.2, No.3 でそれぞれ 0.10, 0.07, 0.07 mm²/年であった。なお、 C_0 は文献7) を参考に海岸から 100 m の値 (2.5 kg/m³) を用いた。図10に、同定した D_{ap} のうち最大（最も拡散が早い）の 0.10 mm²/年を用いて、塩化物イオン浸透予測をした結果を示す。経年 100 年時の予測結果より、鉄筋位置において鉄筋が腐食しやすい環境である塩化物イオン量 1.2 kg/m³ 以上⁷⁾ とならないことから、健全部では塩化物イオンは浸透するものの問題とはならないことを確認した。

一方、ひび割れ部については、塩化物イオン量によらず鉄筋腐食が進行する可能性がある。3本中2本の電柱で型枠継目ひび割れ部は鉄筋位置まで塩化物が浸透していることから、沿岸部などでは早急なひび割れの対処が鉄筋腐食防止に有効であるといえる。

5.3 内部鉄筋調査

鉄筋劣化状況を把握するため、かぶりコンクリートをはつり、鉄筋の腐食状況等を確認した。試験電柱は15本である。図11のように、変状が認められない電柱では、

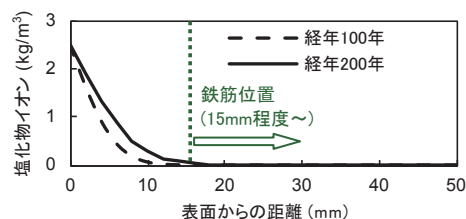


図10 塩化物イオン浸透予測

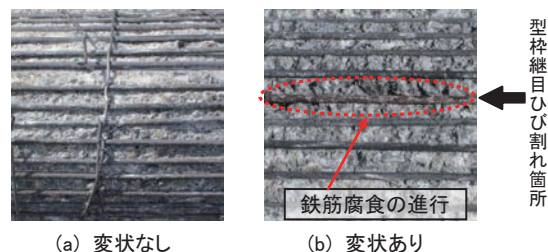


図11 鉄筋腐食状況調査結果

鉄筋腐食は進行しておらず、健全な状態であることが確認された。一方、型枠継目ひび割れや鉄筋露出などの変状が認められる電柱では、変状箇所直下の鉄筋腐食が進行しているが、それ以外の鉄筋の腐食は軽微であることが確認された。

6. 保全手法の検討

6.1 コンクリート電柱の主な劣化過程

営業線における電柱調査結果より、「型枠継目ひび割れ」を除外した場合には「縦ひび割れ」が最も多い。ここで、ひび割れは以下の3つに分類される⁹⁾。

- ・鉄筋腐食先行型：中性化や塩害等による鉄筋腐食による体積膨張に伴い生じるひび割れ
- ・ひび割れ先行型：乾燥収縮などによるひび割れが生じ、その箇所から鉄筋腐食等の材料劣化が起こるもの
- ・劣化ひび割れ型：アルカリシリカ反応など材料自体の劣化によるひび割れ

現地調査や材料特性試験結果より、一般の土木構造物と比較して電柱は中性化進行や塩化物イオン浸透が極めて遅いことを明らかにした。また、アルカリシリカ反応によるひび割れが生じている柱が1本みられたが、これは文献4)における調査では観測されていないことから稀な例であり、他のひび割れは異なる要因であると考えられる。このことから、電柱の主なひび割れは、「ひび割れ先行型」であると考えられる。

ひび割れの要因としては、「型枠継目ひび割れ」は製造方法に起因し、また「縦ひび割れ」は一般に「ひび割れ先行型」ひび割れの要因とされる乾燥収縮や温度ひび割れその他、製造時の内部空隙などの可能性が考えられる。また、現地調査結果より、「縦ひび割れ」に続いて多く

観測されたエフロレッセンス、はく離や鉄筋露出については、当該箇所では型枠継目ひび割れや縦ひび割れが生じた後に変状が現れたと考えられる。

以上より、電柱の主な劣化過程は「ひび割れ先行型」であり、まずひび割れ（型枠継目ひび割れ含む）が生じ、その箇所から鉄筋腐食等の変状が発生すると考えられる。

6.2 コンクリート電柱の残存強度

曲げ耐力試験において、外観変状が認められない柱について、かぶりコンクリートはく離加工、鉄筋切断加工をそれぞれ3本施して測定した⁵⁾。その結果と電柱の設計に用いられている文献¹⁰⁾を参考にした断面耐力計算による残存強度予測結果と比較した。計算値と測定値について変状がない状態の強度を基準（残存強度:1）として、残存強度を比較した。測定値については、曲げ耐力試験における変状なしの電柱9本の平均値（ $M_m / M_d = 2.96$ ）を加工電柱の残存強度基準値とすることとした。図12に示すように、測定値と計算値は概ね良い一致がみられたことから、本手法によるかぶりコンクリートはく離や鉄筋切断の状況に応じた残存強度予測が可能であると考えられる。

6.3 コンクリート電柱の材料評価

材料試験の結果より、一般の土木構造物と比較して電柱のコンクリートは代表的な材料劣化とされる中性化進行や塩化物イオン浸透が極めて遅いことを明らかにした。中性化進行は水セメント比（ W/C ）が大きく影響し、また塩化物イオンの見かけの拡散係数 D_{ap} も W/C が影響する。電柱は遠心成形されるため W/C が低いことが1つの特長であり、これにより中性化進行や塩化物イオン浸透に対して高い耐性を有していると考えられる。

材料評価方法としては、 W/C を測定できれば中性化進行や塩化物イオン浸透に対して高い耐性を有していることの判定ができるものの、営業線における測定は難しいと考えられる。そこで、中性化深さを測定することによる W/C の適否判断方法を検討した。

中性化深さ測定としては、ドリル法やコア抜きなどがあるが、強度部材である電柱の損傷は可能な限り小さくすることが重要である。測定結果より中性化深さは1 mm 程度であり、電柱のかぶりは15 mm 程度であることを考慮すると、柱表面1 mm 程度を精度良く調べる必要がある。そこでドリル法を検討したものの、市販のインパクトドリルでは先端が鋭角になっていることから最大切削深さが1 mm 以上となってしまう、また毎回安定して所要の深さを切削することは難しい。そこで、図13に示す「中性化検査装置」を開発した。先端が平らなドリルや切削量調整ストップにより、容易に柱表面1 mm 程度を精度良く切削することが可能である。中性化

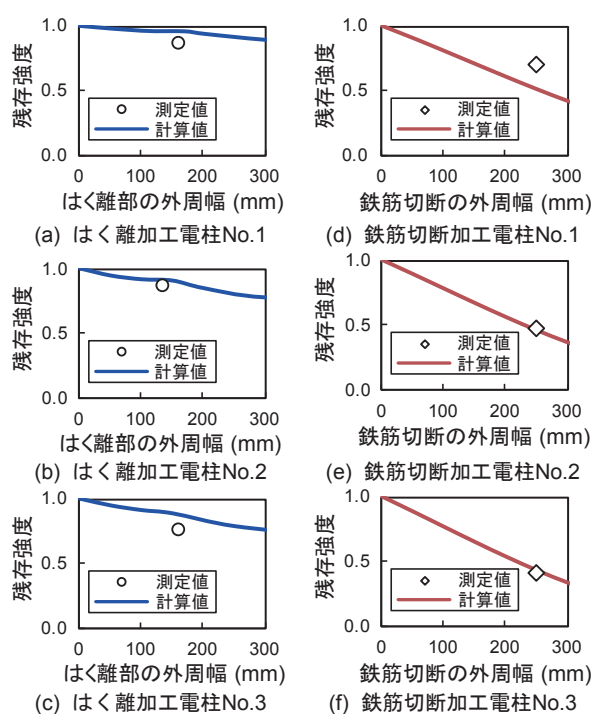


図12 残存強度比較結果

が1 mm 以上進んでいる電柱については、材料劣化が疑われることから詳細な検査が必要となる。本装置の特長は、「判定精度良」、「検査後処理不要」、「可搬性良」、「判定個人差小」などである。

6.4 電柱保全判定フローの提案

以上の研究成果より、電柱保全判定フローを提案した。図14にその概要を示す。

①主な劣化過程はひび割れ先行型であることから、まず外観上の変状を確認する。

【無：②材料評価】，【有：変状分類（3章参考），変状部寸法等を記録して③強度評価】

②外観変状がない場合には、中性化検査装置を用いた検査による材料評価判定を実施する。

【良：継続使用】，【否：経過観察，補修，取替計画】

基本的には一度実施して【良】判定であれば、次回検査で実施する必要はなく、ある程度経年が経ってから実施すればよい。例えば図8より、一般土木構造物のコンクリート（ W/C ：50～60%程度）で中性化深さが5 mm 程度進行する経年10年以降が考えられる。中性化が1 mm 以上進んでいる電柱については、材料劣化が疑われることから詳細な検査が必要となる。

③外観変状がある場合には、強度評価シートを用いた強度評価判定を実施する。

【良：経過観察，補修，取替計画】，【否：取替（補強）】

※図14では品種10-19-C45の例を示しているが、その他一般的な品種の強度評価シートを用意している。

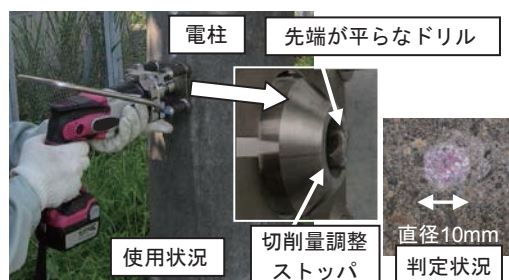


図13 電柱中性化検査装置

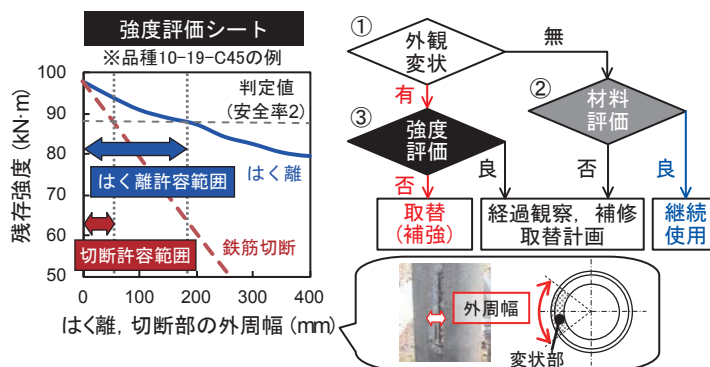


図14 電柱保全判定フローの概要

＜強度評価について＞

強度評価については、まず電柱の図面と製造会社設計値を入手して、図面から強度評価シートを作成する。強度評価の判定値は、省令の解釈基準²⁾より当該電柱で予想される荷重に対する安全率2とする。初期強度（残存強度1）は、基本的には製造会社設計値とする。はく離や鉄筋切断部の外周幅が、強度判定値以上となる許容範囲内であれば【良】判定となる。なお、鉄筋切断条件の外周幅は「(鉄筋切断本数) × (鉄筋間隔)」とする。ただし、製造会社の設計値や図面が入手できない場合には、以下の対応方法が考えられる。

(1) 図面あり・製造会社設計値なしの場合

図面から初期強度を計算し、強度評価シートにより判定する。

(2) 図面なし・製造会社設計値ありの場合

まず、電柱の外径を測定する。そして、鉄筋切断は寸法等によらずほぼ同等の残存強度低下傾向であるから、一般的な条件を参考として強度評価シートにより判定する。はく離は、安全側の評価として、電柱の厚さが薄い条件として強度評価シートにより判定する。かぶりを考えると考慮する厚さは40 mm程度でよいと思われる。

(3) 図面・製造会社設計値ともない場合

強度評価シートは(2)の場合と同様に考える。初期強度はJIS A 5373³⁾より、設計曲げモーメントの2倍とする。

7. まとめ

コンクリート電柱の営業線における現地調査、撤去電柱の曲げ耐力試験や材料分析の結果より主な劣化過程を解明するとともに、コンクリート電柱の保全判定フローを提案した。主な結果は以下のとおりである。

- (1) 営業線におけるコンクリート電柱の主な劣化変状は、475本の電柱調査結果より多い順に「型枠継目ひび割れ」、「縦ひび割れ」、「エフロレッセンス」、「はく離」、「はく離かつ鉄筋露出」、「鉄筋露出（かぶり不足等）」、「横ひび割れ」であった。
- (2) 曲げ耐力試験結果より、撤去電柱は設計曲げモーメントの2倍以上の強度を有していた。経年による強度低

- 下傾向はみられなかったが、変状がない電柱と比較して、変状や補修がある電柱は強度低下傾向がみられた。
- (3) コンクリート電柱の中性化進行や塩化物イオン浸透は一般の土木構造物と比較して極めて遅い。
 - (4) コンクリート電柱の主な劣化過程は、まずひび割れが生じ、そのひび割れ箇所から鉄筋腐食等が進行する「ひび割れ先行型」であることを明らかにした。
 - (5) 以上の研究成果より、コンクリート電柱の保全判定フローを提案した。主な劣化過程はひび割れ先行型であることから、まず外観上の変状を確認し、変状がある場合には強度評価シートによる強度評価判定、変状がない場合には中性化検査装置を用いた検査による材料劣化評価判定で健全度を評価する。

謝 辞

試験の実施に際してご指導、ご協力いただきました九州旅客鉄道株式会社、西日本旅客鉄道株式会社の関係各位に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 鉄道電化協会：コンクリートポールハンドブック，1958
- 2) 電気関係技術基準調査研究会：解説 鉄道に関する技術基準（電気編），日本鉄道電気技術協会，2014
- 3) 日本工業規格 JIS A 5373，2016
- 4) 上田，他：コンクリート電柱の劣化診断と維持管理，鉄道総研報告，Vol.18，No.10，2004
- 5) 常本，他：コンクリート電柱の劣化時における曲げ強度評価，J-RAIL2016，S2-1-5，2016
- 6) 日本工業規格 JIS A 5363，2016
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，丸善，2013
- 8) 日本工業規格 JIS A 1154，2012
- 9) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針，日本コンクリート工学協会，2009
- 10) 三浦：軸方向荷重をうける PC くい破壊曲げモーメント，セメント・コンクリート，No.293，pp.25-32，1971