

コンクリート信号機柱の強度評価法の開発

潮見 俊輔* 常本 瑞樹** 飯島 亨***
押味 良和* 大森 達也# 沼田 紘司## 以倉 慶子**

Development of a Strength Evaluation Method for Concrete Signal Poles

Shunsuke SHIOMI Mizuki TSUNEMOTO Toru IJIMA
Yoshikazu OSHIMI Tatsuya OMORI Koji NUMATA Kyoko IKURA

Concrete signal poles, some of which exceed to over 50 years old now, face difficulty for renewal due to increasing aged poles. To solve it, we developed an inspection and evaluation method for concrete signal poles depending on strength estimation of poles. We investigated deteriorations on 303 poles at inland, coastal areas along northern Sea of Japan, and other coastal areas. We confirmed that percentage of deteriorations on poles related steel bars rust and break of bars at the northern coastal area is higher than other areas. We also confirmed that chloride ions concentration inside concrete poles at that area is higher than the concentration limit for rusting. Moreover, we confirmed that strength of poles including broken bars or thin bars is lower than healthy poles by strength test. With those results of investigations and tests, we developed an evaluation method of pole's strength by width and type of deterioration checked by visual inspection work.

キーワード：コンクリート信号機柱，外観検査，強度評価，中性化，塩化物イオン濃度

1. はじめに

色灯式信号機などを支持する信号機柱は、鋼管やコンクリート柱が主に用いられているが、コンクリート信号機柱は、1930年代の鋼材不足に対応した試作に始まり、1950年代以降の自動信号化や継電連動化に伴う信号機柱の新設に伴って日本国内で広く普及した。このうち1960年代から80年代にかけて各線区の自動信号化等に伴い新設された多数の信号機柱は、今後50年以上の経年を迎える時期となる。しかし、多くの信号機柱を製造後の年数で一律に補修や取替を実施していくことは難しく、設備の状態、特に強度を基準とした評価を行い、必要な設備に対してのみ取替を実施することが必要である。

コンクリート柱の劣化状態に基づく強度評価は、これまでに電車線柱を対象とした手法が検討されている¹⁾。本研究では、この手法を基本としながら、信号機柱と電車線柱との構造の違いや信号機柱の維持管理状況を踏まえ、残存強度の推定法と維持管理手法に取り組んだ。本稿では、コンクリート信号機柱の品形および製造年代ご

* 信号・情報技術研究部 信号システム研究室
** 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
信号・情報技術研究部 信号システム研究室（現 東日本旅客鉄道株式会社）
信号・情報技術研究部 信号システム研究室（現 株式会社三工社）

との配筋数の調査結果とこれを踏まえた製造年代推定法、コンクリートのかぶり比較的薄い信号機柱の変状発生や材料に関する現地調査結果、信号機柱の曲げ強度試験結果、およびこれらを踏まえた強度推定法について述べる。また、維持管理のフローと強度に基づく更新判断法について述べる。なお、本稿では以下、「信号機柱」と表記する箇所はコンクリート信号機柱を意味する。

2. コンクリート信号機柱の品形と製造年代

2.1 コンクリート信号機柱の導入経緯と品形の変遷

コンクリート信号機柱は、製造法の確立と日中戦争以降の鋼材不足を受けて1939年頃に試作が行われ、一部線区へ導入されたことが記録されている²⁾。しかし、1943年頃に実施された工事³⁾では木柱による施工が行われており、本格的な導入には至らなかったと推定される。終戦後の1950年頃より信号機の新規設置が行われる自動信号化工事が再開され、更に1958年には旧国鉄の仕様書としてコンクリート信号機柱が制定された⁴⁾。このことから、信号機柱の本格普及は概ね1950年代後半以降と推察される。

1955年以降の規格制定経緯の文献調査、製造業者A、Bの2社へのヒアリング、および信号機柱の現地調査等により得られた、信号機柱の品形、製造年代、鉄筋本数とテーパ（直径の変化率）の関係を表1に示す。

特集：信号通信技術

1939（昭和14）年の試作柱、および1958（昭和33）年以前に製造された信号機柱は、何れも柱下部のテーパが1/50（1m離れた2地点の外周差62.8mm）であることが確認された。前者は柱上部にテーパが変化する形状上の特徴がある一方、後者はテーパが一定であることから、外観上で判別することが可能である。後者の信号機柱は頂部にピンナックル（図1）を有するものと有さないもの2種類を確認しているが、いずれも鉄筋本数やピンナックル以外の形状は共通している。また、1958年より1965（昭和40）年に製造されたものはテーパ1/75（1m離れた2地点の外周差41.9mm）、1965年以降のものはテーパ1/100（同31.4mm）であることを確認した。

旧国鉄の仕様書や受入規格上では形状および強度に関する規程が行われているが、鉄筋本数の規定は行われていない。そのため、特にテーパ1/100の信号機柱については、製造会社ごとに製造年代によって鉄筋本数の見直しが行われた。調査の結果、1965年以降に製造されたテーパ1/100の信号機柱は、年代および製造会社ごとに鉄筋本数が異なる柱が6種類存在することが確認された。

2.2 製造年代の推定

信号機柱は建植時に目視できる高さに図2のような品形と製造年が表記されている。このうち、塗装による表記が採用されていた柱については、経年劣化により表記が消失する場合が多い。維持管理上、製造年の把握と経年管理に支障をきたすほか、本研究の実施上も信号機柱の劣化状況と経年の関係を把握する上で課題となること

表1 信号機柱の製造年代と設計

| 年 | 製造業者 | 参照規格 (試作) | 鉄筋数(下部) | | | | テーパ | 備考 |
|---------|------|--------------|------------|----|----|-----|-------|-----------------------|
| | | | 7m | 8m | 9m | 10m | | |
| 1939 | - | - | 24 (9.5m柱) | | | | 1/50 | |
| ~1958 | - | なし | 24 | 24 | - | - | 1/50 | |
| 1958~65 | - | 仕様書 | 22 | 26 | 24 | - | 1/75 | |
| 1965~67 | - | - | 48 | - | - | - | 1/75 | RC, 鉄筋φ4 |
| 1968~75 | A社 | JRS | 20 | 20 | 20 | 28 | 1/100 | PC 塗装表記 (~2017) |
| 1975~91 | | | 18 | 22 | 22 | 22 | | |
| 1991~ | B社 | JRS | 16 | 16 | 16 | 16 | 1/100 | 銘板つき |
| ~1995 | | | 6 | - | - | - | | |
| 1995~ | | | 8 | - | - | - | | |

RC：鉄筋コンクリート、PC：プレストレストコンクリート



図1 ピンナックル



塗装表記

銘板表記



図2 製造年表記の例

が判明した。

そこで、製造年代毎の鉄筋本数やテーパの差異に着目した製造年代推定法と、製造年代推定に用いる鉄筋本数の計数法について検討を行った。図3に製造年代の推定フローを示す。製造年代はテーパ測定のほか、電磁誘導法等による鉄筋探査により、信号機柱の1/2周または1周あたりの鉄筋本数を計数することで推定を行う。電磁誘導法による鉄筋探査は土木分野で一般的であるが、信号機柱の鉄筋は、間隔が30mm程度と狭く、かつ表面から18mm前後の浅い位置に存在するため、土木分野用の鉄筋探査装置をそのまま適用することが困難であった。そこで、検知感度が低く鉄筋深度に応じた電圧を出力するセンサ、および信号機柱との離隔を一定に保つプローブを組み合わせた計数装置（図4）を試作した。この手法を国内303箇所の信号機柱に適用した結果、全体の8割程度の信号機柱で提案手法により鉄筋の計数と年代推定が可能であることを確認した。なお、計数ができない全数の2割の箇所は、柱側面に設備されたケーブル等により全周の1/2周以上の表面をセンサで走査できない箇所であった。これらについては、同一駅構内または駅間の他の信号機柱から年代の推定を行った。

3. コンクリート信号機柱の現地調査

3.1 調査目的、対象および方法

信号機柱の劣化と設置環境や経年、鉄筋の腐食に影響しうるコンクリートの中酸化状況を把握することを目的

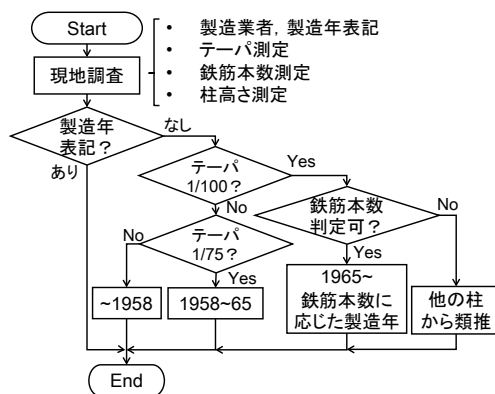


図3 製造年代の推定フロー

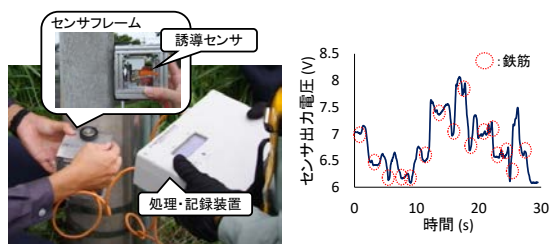


図4 鉄筋本数計数装置

として、国内 17 線区の 303 本の信号機柱を対象とした現地調査を実施した。

表 2 に 2.2 節に述べた年代推定法もしくは銘板表記により得られた製造年代および地域区分毎の設備数を示す。調査対象線区は、既往の研究結果を踏まえ⁵⁾、鉄筋コンクリートの劣化影響因子となる飛来塩分量が異なる海岸部 A（北日本の日本海沿岸部）、海岸部 B（その他地域の沿岸部）および内陸部に分類した。なお、調査した信号機柱の約 10% は固定されたケーブル等により、鉄筋本数の推定に必要な 1/2 周の走査が不可能なため、近隣の信号機柱から製造年代の推定を行っている。

調査は、目視による変状調査、鉄筋本数およびテープの測定、信号機柱と装柱物の高さ測定、中性化の調査を実施した。目視による変状調査については、図 5 に示す 7 種類の変状と、強度に影響する配線穴加工に注目して調査結果の整理を行った。

また、飛来塩分量の多い海岸部 A の信号機柱 8 箇所、および内陸部の信号機柱 2 箇所について、塩化物イオン量を測定するため、現地または撤去品に対してコンクリートのサンプルの採取を行った。

3.2 変状の発生と経年、設置環境

主要な 7 種類の変状のいずれかが認められた信号機柱の割合の経年による変化を、設置環境毎に整理した結果を図 6 に示す。これらの変状は経年により増加し、かつ飛来塩分量が多い海岸部 A の発生割合は、同じ経年

の他地域に比べて高い傾向が得られた。この傾向は鉄筋腐食による劣化の初期に認められる縦ひび割れ等でも同様の傾向であった（図 7）。なお、劣化が進行した状況である浮き・はく離やはく落の発生割合は海岸部 A の 1965～75 年製で高い（図 8）。ただし、海岸部 A の信号機柱は定期的な更新が実施されているため、多くのサンプル数が得られていない。なお、海岸部 B および内陸部では経年により変状の発生率が概ね増加していることから、劣化の進行は経年に影響するものと推察される。なお、調査した範囲での製造メーカーによる傾向の違いは認められなかった。

また、1958 年以前に製造された信号機柱の 9 柱中 2 柱で横ひび割れが認められた（図 9）。コンクリート柱の横ひび割れは、柱自体の強度低下、もしくは柱の強度に対して過大な荷重が作用した際に生じる変状といわれている。これ以外の 301 柱については横ひび割れが認められていないことから、調査した信号機柱の大半、特に 1958 年の仕様書制定以降の全数については、設置環境で作用する風等の荷重に対して十分な強度を有していることを確認した。

表 2 調査箇所と調査数量

| 分類 | ～1958 | 1958～65 | 1965～75 | 1975～91 | 1991～ | 合計 |
|------|-------|---------|---------|---------|-------|-----|
| 内陸 | 9 | 7 | 51 | 40 | 29 | 136 |
| 海岸 A | 0 | 0 | 11 | 31 | 49 | 91 |
| 海岸 B | 0 | 0 | 33 | 20 | 23 | 76 |
| 合計 | 9 | 7 | 95 | 91 | 101 | 303 |

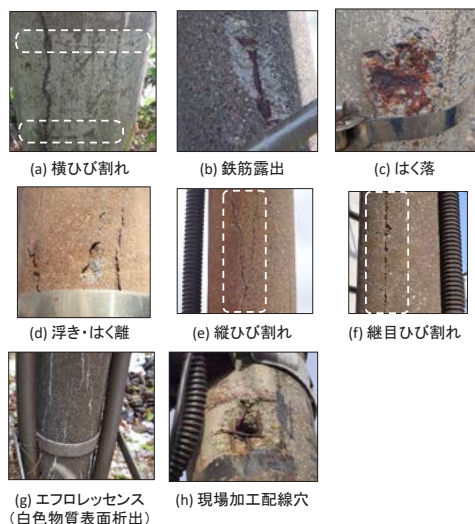


図 5 主要な変状と配線穴加工

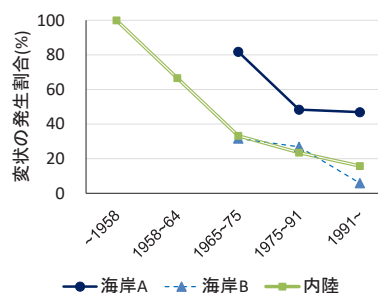


図 6 変状の発生割合と地域

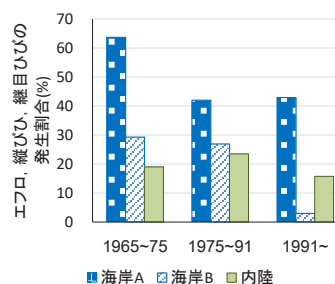


図 7 変状の発生割合（縦ひび割れ等）

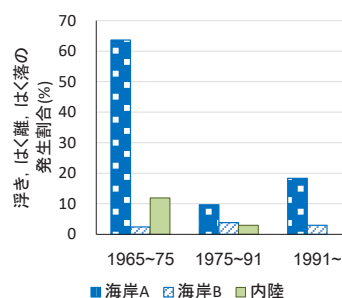


図 8 変状の発生割合（浮き・はく離等）

特集：信号通信技術

3.3 コンクリートの中性化

コンクリートの中性化状況について、271 柱を対象に中性化検査装置による深さ 1mm の穿孔と、フェノールフタレイン溶液の噴霧による紫色の発色によりアルカリ性の判定を行った。図 10 に噴霧後の穿孔箇所状況を示す。全ての調査箇所でアルカリ性を示す紫色の発色を示したことから、信号機柱に使用するコンクリートの内部については、設置環境や経年によらずアルカリ性を保っていると判断できる。したがって、信号機柱についてはコンクリートの中性化による鉄筋の腐食は起こりにくいと推察される。

3.4 コンクリート内の塩化物イオン濃度

変状が多い傾向が認められた海岸部 A について、飛来する塩化物イオンがコンクリートに浸透して鉄筋を腐食させる塩害が想定される。そこで、内陸部の撤去品 2 柱（番号①, ②）、海岸部 A の現用設備 8 柱（番号③～⑩）について深さ 5mm から 30mm まで 5mm 間隔の深さでコンクリートのサンプルを採取し、塩化物イオン量を確認した。表 3 に採取箇所の製造年代と塩化物イオン量の分析結果を示す。

鉄筋の腐食が開始する腐食発生限界塩化物イオン量は、普通ポルトランドセメントを用いた場合、水セメン

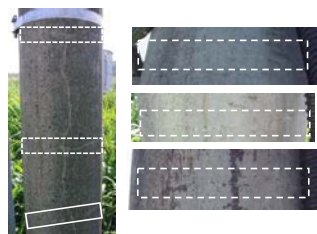


図9 横び割れ



図10 中性化検査（アルカリ性の場合紫に発色）

表3 コンクリート内の塩化物イオン量

| 調査箇所 | 測定深度 (mm) | 測定深度 (mm) | | | | | |
|--------------|-----------|-----------|------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0～5 | 5～10 | 10～15 | 15～20 | 20～25 | 25～30 |
| ① 内陸, 1966年* | | 1.59 | 0.82 | 0.50 | 0.55 | 0.40 | 0.37 |
| ② 内陸, 1971年* | | 0.84 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.17 | 0.20 |
| ③ 海岸, 1992年* | | 9.22 | 9.90 | 7.32 | 4.39 | 3.65 | 1.54 |
| ④ 海岸, 1985年* | | 6.50 | 4.39 | 3.37 | 2.93 | 2.60 | 2.01 |
| ⑤ 海岸, 2007年* | | 3.92 | 1.29 | 0.55 | 0.25 | 0.22 | 0.22 |
| ⑥ 海岸, 1992年* | | 6.62 | 5.73 | 4.94 | 3.22 | 2.38 | 1.64 |
| ⑦ 海岸, 1992年* | | 5.58 | 4.19 | 3.20 | 3.22 | 2.21 | 0.97 |
| ⑧ 海岸, 1985年* | | 10.69 | 9.05 | 5.98 | 4.71 | 2.68 | 3.10 |
| ⑨ 海岸, 1985年* | | 7.66 | 6.70 | 5.13 | 2.83 | 2.53 | 2.51 |
| ⑩ 海岸, 1992年* | | 6.37 | 5.23 | 4.74 | 2.83 | 1.29 | 2.13 |

単位容積重量は 2480kg を用いて計算、
塩化物イオン量の単位は kg/m³
* 印箇所は鉄筋本数にて推定される期間の中間の値を表記

ト比から算出できる⁶⁾。信号機柱の水セメント比 W/C を 0.40 と想定した場合の発生限界塩化物イオン量を求めると、2.2kg/m³ となる。設計の鉄筋のかぶり厚は 18mm であり、この位置で塩化物イオン量が鉄筋腐食の発生限界塩化物イオン量の 2.2kg/m³ を超えている調査箇所は、③, ④, ⑥～⑩の 7 箇所であった。

4. 曲げ耐力試験

4.1 試験の概要

信号機柱の適切な強度評価のため、曲げ耐力試験により信号機柱の曲げ強度を確認した。試験は 17 本の供試体に対して、JIS A 5363 に準拠した図 11 に示す頂部から 250mm の位置に載荷する方法で実施した。供試体は、大きな変状がない新品と営業線からの撤去品、新品に対して変状を模擬した加工（鉄筋切断、切削）を行ったもの、撤去品で配線を柱内に通線するために鉄筋切断を伴う穴加工が施工時に行われたものとした。

4.2 試験結果

表 4 に試験結果を示す。大きな変状が認められない撤去柱 (No.1～6) および新品柱 (No.8～10) の設計曲げモーメント M_d に対する破壊曲げモーメント M_m の比の平均値はそれぞれ、2.41～3.21, 2.71～2.93 であっ

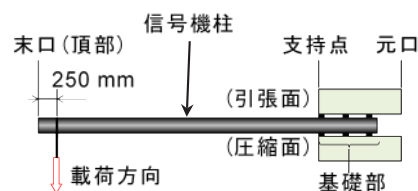


図11 信号機柱の曲げ耐力試験

表4 曲げ耐力試験供試体および試験結果

| No. | 供試体 | 柱長 | 製造年 | 支持点における曲げモーメント [kN·m] | | M_m/M_d |
|-----|---------------------|----|---------|-----------------------|----------|-----------|
| | | | | 設計 M_d | 破壊 M_m | |
| 1 | 撤去柱 | 8m | 1976 | 15.4 | 42.8 | 2.78 |
| 2 | | 7m | 1967～75 | 13.4 | 32.3 | 2.41 |
| 3 | | 7m | 2014 | 13.4 | 40.6 | 3.03 |
| 4 | | 7m | 1992 | 13.4 | 42.3 | 3.16 |
| 5 | | 7m | 2014 | 13.4 | 43.0 | 3.21 |
| 6 | | 7m | 2014 | 13.4 | 38.5 | 2.87 |
| 7 | 撤去柱 (配線穴加工) | 7m | 1965～67 | 13.4 | 25.4 | 1.89 |
| 8 | 新品柱 | 7m | 2017 | 13.4 | 36.6 | 2.73 |
| 9 | | 7m | 2017 | 13.4 | 36.3 | 2.71 |
| 10 | | 7m | 2017 | 13.4 | 39.2 | 2.93 |
| 11 | 新品柱 | 7m | 2017 | 13.4 | 29.3 | 2.19 |
| 12 | (鋼材 1 本切断) | 7m | 2017 | 13.4 | 31.7 | 2.36 |
| 13 | 新品柱 | 7m | 2017 | 13.4 | 23.9 | 1.78 |
| 14 | (鋼材 3 本切断) | 7m | 2017 | 13.4 | 23.3 | 1.73 |
| 15 | 新品柱 | 7m | 2017 | 13.4 | 14.6 | 1.09 |
| 16 | (鋼材 5 本切断) | 7m | 2017 | 13.4 | 17.0 | 1.27 |
| 17 | 新品柱 (鋼材 5 本 30% 切削) | 7m | 2017 | 13.4 | 33.0 | 2.46 |

た。これに対して、配線穴加工が行われた撤去柱 (No.7) の M_m/M_d は 1.89 であった。また、新品柱に鉄筋切断を施した柱の M_m/M_d は切断 1 本, 3 本, 5 本でそれぞれ, 2.19 ~ 2.36, 1.73 ~ 1.78, 1.09 ~ 1.27 であった。また鋼材 5 本切削の場合の M_m/M_d は 2.46 であった。

図 12 に新品柱の鉄筋を切断して強度を低下させた場合の曲げ耐力試験結果を、コンクリート柱の設計に用いられている文献 7 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。変状がない状態の破壊曲げモーメントを基準とした場合の試験結果と計算結果の傾向は概ね一致した。このことから、信号機柱についても断面耐力計算により鉄筋切断による強度低下割合を予測することが可能といえる。

5. 信号機柱の点検と強度評価

5.1 外観検査による維持管理フロー

信号機柱の外観の変状傾向、塩害地域における塩化物イオンの影響と変状予測、および信号機柱の曲げ強度試験と強度計算の結果に基づき、現在実施されている信号機柱の外観検査結果から信号機柱の補修や取替の要否を判定する維持管理フローを提案した (図 13)。

維持管理フローは、以下の 3 項目から構成される。

- (1) 設備諸元データ (台帳) の作成
- (2) 外観検査
- (3) 検査結果の評価

(1) の設備諸元データとして、信号機柱の高さ、テーパ、鉄筋本数から決定される品形および製造年代、装柱物によって決定される作用する風荷重を予め取得する。品形については鉄筋本数を含めて調査することで、製造年代をより詳細に把握することが可能となる。簡易的には柱高さとテーパの調査により、経年 50 年以上の信号機柱の抽出が可能である。風荷重については、装柱物の種類や高さから計算することが望ましい。

(2) の外観検査は、図 5 に示した信号機柱の鉄筋腐食や強度に係わる変状や加工について、目視によりその有無や数量、周方向の大きさを把握し記録する。飛来塩分量が多い箇所においても変状は数年~数十年の時間で進

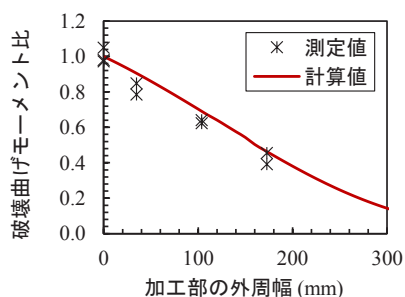


図 12 曲げ耐力試験結果と計算値の比較

行することから、外観検査は各鉄道事業者で現在実施している周期を基本としてよい。

(3) の検査結果の評価は、(1) の設備諸元データ、(2) の外観検査結果に基づいて実施する。変状の相互関係と評価対象とすべき変状を図 14 に示す。変状のうち、横ひび割れについては、信号機柱の強度低下もしくは信号機柱が具備する強度を超過する荷重の作用により生じる変状のため、ひび割れの大小や数を問わず、更新対象として判断する。縦ひび割れから鉄筋露出までの変状については、進行性の変状であることから、適切な補修により変状の進行を抑えることが期待できる。これらの変状のうち、縦ひび割れ等については鉄筋腐食の程度は小さく、初期強度を保つと判断できることから、強度評価は実施せず継続使用が可能と判断する。一方、浮き・はく離、はく落については鉄筋の腐食による断面積減少の可

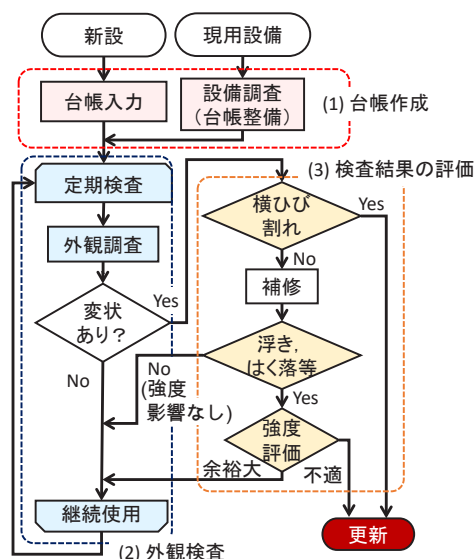


図 13 コンクリート信号機柱の維持管理フロー

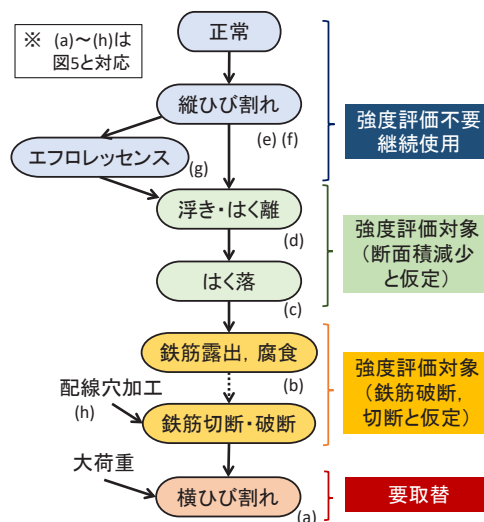


図 14 変状の相互関係と強度評価対象

特集：信号通信技術

能性があり、鉄筋露出や配線穴加工箇所は鉄筋の破断や切断が生じているものと仮定して、残存強度の推定と評価を実施する。

5.2 残存強度の推定と評価

信号機柱の鉄筋切断や断面積減少を伴う変状を対象に実施する残存強度の推定は、図15および以下に示す手順により実施する。

- (1) 損傷外周率 ϵ_d の算出
- (2) 強度評価シートを用いた残存強度の推定
- (3) 風荷重との比較による評価

(1) の損傷外周率 ϵ_d は、損傷箇所の外周幅 w_{dam} から得られる損傷した鉄筋本数 N_{dam} と鉄筋の全数 N_b に対する割合であり、損傷を受けた鉄筋本数が同じであっても、鉄筋の全数が少ない（密度が低い）信号機柱では損傷外周率 ϵ_d は大きくなる。

(2) の強度評価シートは、鉄筋切断時と鉄筋断面積減少時の、損傷外周率 ϵ_d と信号機柱の残存曲げ強度の推定値 M_y の関係をそれぞれ曲げ強度試験および強度計算

の結果に基づいて示したものである。変状が浮き・はく離、はく落の場合と、鉄筋露出や配線穴加工の場合で残存強度の推定値 M_y は異なる。なお、断面積減少は信号機柱や電車線柱の現地調査の実績より30%と設定した。

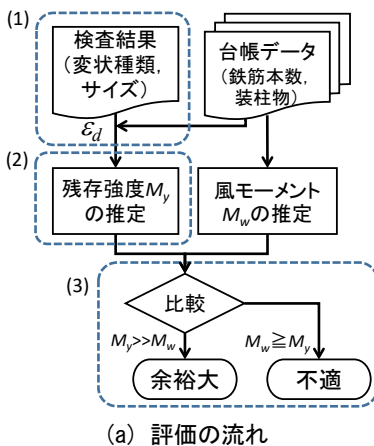
(3) の評価では、推定残存強度 M_y と、評価対象の信号機柱の風による曲げモーメント M_w の比較を行う。 $M_w > M_y$ の場合は強度不足であるので取替対象とする。また、 M_w に対して M_y が十分大きい信号機柱は曲げ破壊に対する安全率を有すると判断できる。ただし、損傷鉄筋数 N_{dam} が増えた場合に推定残存強度 M_y が大きく低下し、曲げモーメント M_w を下回るおそれがある信号機柱は要注意設備として管理し、将来的には取替を計画することが望ましい。計画的な信号機柱の更新を行う場合は、 M_y - M_w や N_{dam} を優先順位の指標として用いることができる。

6. まとめ

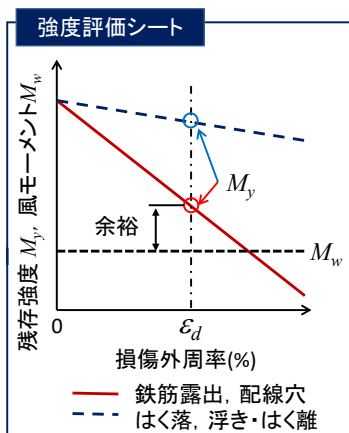
本稿では、コンクリート信号機柱を対象とした、製造年代推定法と残存強度推定法、外観検査による維持管理手順および強度に基づく取替判断法について述べた。コンクリート信号機柱の更新や修繕の要否判断に対するニーズは、今後高経年の柱が増加する中で高まると考える。本稿で提案した手法が、これら信号機柱の維持管理の一助になることを願う。最後に、本研究の実施にあたりご協力頂いた各位に感謝申し上げる。

文献

- 1) 常本瑞樹, 清水政利, 近藤優一, 工藤輝大, 上田洋, 飯島亨: コンクリート電柱の取替判定方法, 鉄道総研報告, Vol.31, No.2, pp.47-52, 2017
- 2) 櫻井豊三: 鉄筋コンクリート信号柱に就て(上), 保安, Vol.4, No.5, 1939
- 3) 人見明: 山陽本線〇〇操車場〇〇驛間自動閉塞信号機増設工事の概況と特色, 信号, Vol.16, No.3, 1943
- 4) 新品紹介 電気信号機柱(遠心力鉄筋コンクリート柱), 信号保安, Vol.14, No.7, 1959
- 5) 西川和廣, 田中良樹: 土木研究所資料 飛来塩分量全国調査(IV) —飛来塩分量の分布特性と風の関係—, 土木研究所資料第3175号, 1993
- 6) 2018年度制定コンクリート標準示方書[維持管理編], (公社)土木学会, 2018
- 7) 三浦一郎: 軸方向荷重をうけるPCくいの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



(a) 評価の流れ



(b) 強度評価シートによる残存強度の推定

図15 残存強度の推定と評価