

報告 実構造物を対象とした複合劣化に関する影響因子の定量評価

轟 俊太郎*1・曾我部 正道*2・谷村 幸裕*3・松橋 宏治*4

要旨： 内的塩害と中性化による複合劣化は、中性化の進行に伴って鉄筋近傍で塩化物イオンの濃縮が生じるため、相乗的に鉄筋の腐食を早める。そのため、多くの研究が行われているが、実構造物の変状の発生と進行は、コンクリートの品質等のばらつきや環境条件、施工条件等の影響を大きく受けることが知られている。本報告では、実構造物を対象とした調査結果から複合劣化に関する影響因子やそのばらつきを定量的に把握した。

キーワード： 複合劣化、鉄道ラーメン高架橋、かぶり、中性化のばらつき、初期塩化物イオンのばらつき

1. はじめに

コンクリートの練混ぜ時に混入した塩化物による劣化は内的塩害と呼ばれ、高度経済成長期前後に建設された RC 構造物の代表的な変状要因の一つとして挙げられる。この内的塩害は、年数が経つとともに中性化と複合して RC 構造物に影響を及ぼす。内的塩害と中性化の複合劣化は、中性化の進行に伴って鉄筋近傍で塩化物イオンの濃縮が生じるため、早期劣化を引き起こす原因となる。そのため、メカニズムの解明¹⁾や劣化予測手法の開発²⁾³⁾、複合劣化を受ける RC 構造物のライフサイクル評価⁴⁾など様々な研究がなされている。

一方で、実構造物の変状の発生と進行は、コンクリートの品質等のばらつきや環境条件、施工条件等の影響を大きく受けることが知られている。このため、変状を的確に評価するためには、これらの影響に基づいた検討が必要である。しかし、実構造物を対象としたデータが十分に整備されているとは言い難く、例えば鉄道構造物等維持管理標準・同解説⁵⁾で現在用いられている劣化予測モデルは室内実験や短期の暴露試験等²⁾から得られたものである。そのため、今後、精度の高い予測モデルを確立していくためには、実構造物を対象とした系統的な実績データの蓄積が不可欠であると考えられる。

このような背景から、本研究では、経年 32 年の RC 高架橋に対して調査を実施し、劣化因子のばらつきや環境条件、施工条件等の影響を定量的に分析した。

2. 調査の概要

2.1 調査対象構造物

高度経済成長期にあたる 1976 年に竣工されたラーメン高架橋 5 基 (1R1,1R2,2R1,2R2,2R3) を対象とする。調査時点の経過年数は、5 基共に 32 年であった。起点方か

ら 1R1,1R2, 2R1,2R2,2R3 と連続した高架橋である。構造形式は、1R1 が 1 層 2 柱 3 径間の両張出し式、1R2 が 1 層 2 柱 3 径間の片張出し式、2R1,2R2,2R3 については 2 層 2 柱 3 径間の片張出し式である。図 - 1 に本論文で重点的に調査を行った 1 層 2 柱 3 径間の両張出し式高架橋 (1R1) の概略形状を示す。1R1 の周辺状況は、起点を背に左側が水田、右側が家屋であった。1R2 は、左側が水田、右側が木々に囲まれた小高い丘であった。2R1,2R2,2R3 は、両側とも水田に囲まれ、日当たりの良い条件であった。表 - 1 に各高架橋の諸元を記載した。今回調査した高架橋 5 基共にコンクリート配合に関する設計仕様は同様であった。例えば、最大水セメント比 W/C は 55% であった。調査対象部材は柱とした。事前に行った目視調査により、柱に多数の腐食ひび割れが観察され、箇所によっては大きな領域での剥離剥落が認められた。数ヶ所の事前検査によって柱内部から $2.07\text{kg/m}^3 \sim 2.48\text{kg/m}^3$ の高濃度の塩化物イオンが検出された。今回調査した高架橋は海岸からの距離が 1km 以上であることから、建設時の段階から海砂などの使用によってコンクリートに塩化物イオンが混入したと考えられる。また、中性化深さは 23.2mm ~ 39.3mm であった。鉄道構造物等維持管理標準・同解説においては、塩化物イオン濃度が 0.6kg/m^3 以上かつ中性化残りが 25.0mm 以上の場合、劣化要因を内的塩害と中性化の複合劣化としている。事前調査から得られた結果はこの細目に該当するものであり、調査対象とする構造物の劣化要因は、内的塩害と中性化の複合劣化であると推定された。

2.2 調査項目および調査方法

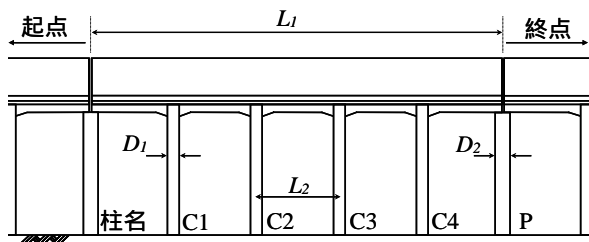
かぶりは、磁気式の電磁誘導法を用いて計測した。建設時から内在する塩化物イオン (以降、初期塩化物イオン) 濃度は、集塵装置付きドリルを用いて試料を採取し、

*1 (財) 鉄道総合技術研究所 構造技術研究部 コンクリート構造 工修 (正会員)

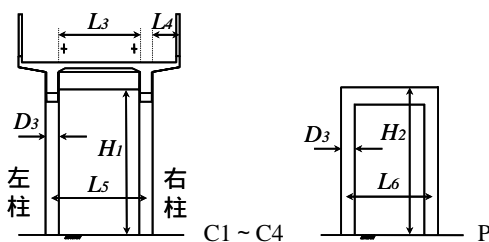
*2 (財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 構造力学 博士 (工) (正会員)

*3 (財) 鉄道総合技術研究所 構造技術研究部 コンクリート構造 室長 博士 (工) (正会員)

*4 パシフィックコンサルタンツ (株) 交通技術本部 鉄道部 保全計画グループ 工修 (正会員)



(a) 側面図



(b) 断面図(起点方から見た図)

図 - 1 1層2柱3径間の両張出し式高架橋の概略形状

表 - 1 ラーメン高架橋諸元

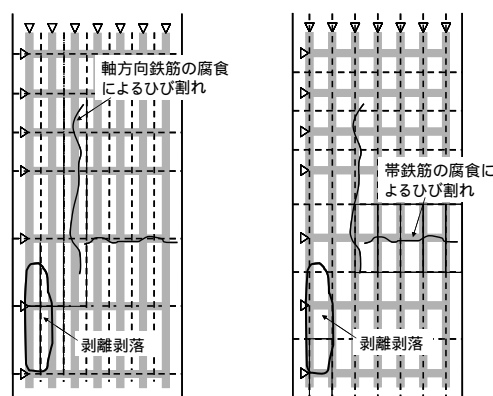
高架橋名		1R1	1R2	2R1,2R2,2R3
経年		25		
構造形式	接続形式	両張	片張	片張
	層数・柱数・径間数	1・2・3	1・2・3	2・2・3
高架橋1基スパン L_1 (m)		40	32	32
線路方向スパン L_2 (m)		8.00	8.00	8.00
中間スラブ L_3 (m)		2.40	2.40	2.40
張出しスラブ L_4 (m)		1.00	1.00	1.00
線路直角方向スパン L_5 (m)		3.15	3.15	3.15
橋脚線路直角スパン L_6 (m)		3.15	---	3.15
横梁下面の高さ H_1 (m)		7.50	7.50	7.80
橋脚高さ H_2 (m)		8.00	---	8.00
線路方向高架橋柱幅 D_1 (m)		0.75		
線路方向橋脚柱幅 D_2 (m)		1.20		
線路直角方向柱幅 D_3 (m)		0.75		
設計かぶり C (mm)		75		
設計基準強度 f'_{ck} (kg/m^3)		24		
最大水セメント比 (%)		55		
粗骨材の最大寸法 (mm)		25		
周辺状況(起点方から左,右)		田, 家	田, 丘	田, 田
線路方向の方位(起点方を北)		北北東	北北東	北北東

電位差滴定法 (JIS A1154) により測定した。なお, 測定用試料は, 中性化による濃縮の影響を受けていないと考えられるコンクリート表面から 80mm ~ 100mm の深さから採取した。また, 中性化による濃縮の程度と分布を調査するために, 4 箇所からコアを採取した。採取したコ

アは, コンクリート表面から 0mm ~ 20mm, 20 mm ~ 40mm, 40 mm ~ 60mm, 60 mm ~ 80mm, 80 mm ~ 100mm の 5 試料にスライスし, 試料毎に粉碎した後, 電位差滴定法により全塩化物イオン濃度を測定した。

中性化深さは, ビット径 24mm のドリルを用いて穿孔し, エアスプレー等により孔内を清掃した後, フェノールフタレイン 1% 溶液を噴霧して, コンクリート表面から発色点までの距離を測定した。1 孔につき 4 箇所を計測し, その平均を調査箇所の中性化深さとした。

本論文では, 柱の変状の度合いを示すために, 変状率を定義し測定した。次節に示した測定位置から領域を分割し, それを 1 区間とする(次節, 図 - 3)。1 区間内を軸方向鉄筋と帯鉄筋のピッチに合わせ各々メッシュで区切り, メッシュ内でのひび割れ・剥離剥落を判定する。ひび割れ・剥離剥落と判定された変状箇所数を全メッシュ数で割った値を変状率とした。図 - 2 にその概要を示す。点線で囲まれた範囲をメッシュ単位とする。帯鉄筋の腐食によると思われる変状と軸方向鉄筋の腐食によると思われる変状に分けて変状率を求める。



(a) 軸方向鉄筋の変状箇所 (b) 帯鉄筋の変状箇所

図 - 2 変状測定方法

2.3 測定位置

図 - 3 に測定位置, 表 - 2 に測定箇所数を示す。柱高さ方向の測定を行ったものを詳細調査, 柱下部のみの調査を行ったものを簡易調査とする。詳細調査の位置は, コンクリートの打継目直上に値する横梁下面からの距離 0.75m, コンクリートの打継目直下に値する横梁下面からの距離 1.50m, それより下は 1.50m 間隔で測定を行った。簡易調査の位置は 横梁下 6.00m の位置(地上 1.5m)とした。中性化深さの詳細調査は, 合計 8 本について行った。その内, 2 本については柱の各方向 4 面で調査を行った。中性化深さの簡易調査では, 障害物等によって調査が行えない場合を除き, 可能な限り柱の各方向 4 面について行った。初期塩化物イオンの測定用試料は, 各々の柱の内面のみを採取した。

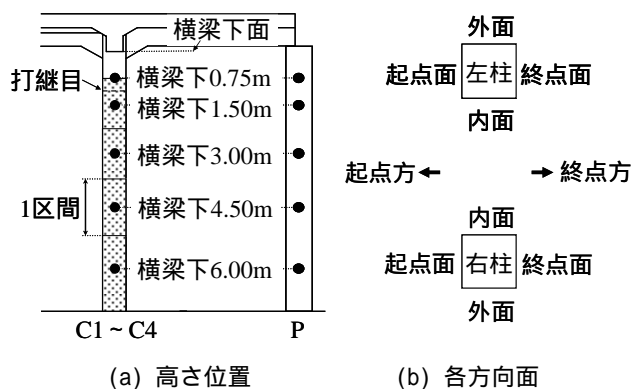


図 - 3 測定位置

表 - 2 測定箇所数

高架橋名		1R1	1R2	2R1	2R2	2R3	合計
中性化深さ	詳細	4面	2	---	---	---	2
	内面	2	2	---	---	---	4
	簡易	4面	6	6	3	3	1
塩化物イオン濃度	詳細	内面	4	2	---	---	6
	簡易	6	6	3	3	1	19

3. 調査結果

3.1 かぶり

図 - 4 にかぶりの高架橋・橋脚毎の分布を示した。縦の一点鎖線は高架橋・橋脚の境である。各方向4面のかぶりの平均値及び最大値と最小値を示した。最大値と最小値の差が大きいものは、鉄筋カゴの回転もしくは芯ずれが生じているものと考えられる。設計図書から読み取れる設計かぶりは75mmであったが、1高架橋・橋脚毎の平均値は、それよりも小さく、60mm~73mmであった。

3.2 中性化深さ

(1) 高架橋・橋脚毎の中性化深さのばらつき

施工条件や環境条件等に影響を受け中性化速度が異なるという報告がある⁶⁾。ここでは、マクロ的な視点から、柱1本毎と高架橋・橋脚1基毎に中性化深さのばらつきを検証する。図 - 5 に中性化深さの高架橋・橋脚毎の分布を示した。縦の一点鎖線は高架橋・橋脚の境で、横の点線は各高架橋の平均値である。

柱1本毎の平均値は18.8mm~38.5mmで、変動係数は0.07~0.38であった。また、高架橋・橋脚1基毎の平均値は23.7mm~32.3mmで、変動係数は0.19~0.34であった。橋脚Pの変動係数は0.25~0.38であり、高架橋の柱と比較しばらつきが大きい結果となった。

(2) 柱高さ方向の中性化深さ

図 - 6 に柱高さ方向の中性化深さ分布を示す。ここでは、面方向による環境条件の影響が出ないように、詳細調

査した柱の内面のみのデータを記載した。測定位置が高くなるほど中性化深さが大きくなる傾向を示した。この傾向は、中性化に及ぼす影響因子についての論文⁶⁾と一致している。原因は、打継目直下でのブリーディングによる品質低下と自重によるコンクリートの締め固め作用等とされている。図 - 7 に各柱の打継目直下と柱下部の中性化深さの関係を示した。打継目直下の中性化深さはすべて柱下部よりも大きな値となり、その比は1.25程度となった。柱の高さ方向を対象とした場合、この影響を受け、大きくばらつくと考えられる。

(3) 面方向の中性化深さ

図 - 8 に柱の外表面と内表面の中性化深さの関係を示した。なお、柱の外表面は張出しスラブにより柱上部で雨が遮られるものの、周辺に遮断物がある場合を除き、雨がかりを受けにくい。一方、柱の内表面は中間スラブ等により雨がかりを受けにくい。1R1及び1R2は起点方から右側に家や丘があり日照を遮る時間帯が多く見受けられた。そのため、1R1と1R2の左柱を1R左として、右柱を1R右として図 - 8 に特記した。25箇所中22箇所内面の方が大きい結果となった。外表面の中性化深さに対する内表面の中性化深さの比は平均1.46となった。1R左において、その比は平均1.27であり、1R右において、平均1.69であった。日照条件の悪い右柱はその差が大きくなっていった。これは、右柱外表面が常に湿潤状態に保たれていることから、中性化深さが小さい値となると考えられる。各方向4面の中性化深さの平均値を図 - 9 に示す。内面が最も大きく、外面が最も小さい値をとり、終点面及び起点面はその中間の値となった。このように、面方向や周辺の環境条件によるコンクリートの湿潤状態の違いが、中性化深さに影響を及ぼすと考えられる。

(4) 初期塩化物イオン濃度と中性化深さの関係

室内実験では、初期塩化物イオン濃度が大きいほど、中性化の進行速度が大きくなるという報告がある⁷⁾。図 - 10 に初期塩化物イオン濃度と中性化深さの関係を示す。測定値は大きくばらつき、初期塩化物イオン濃度と中性化深さの相関関係はあまり明確ではない。実構造物

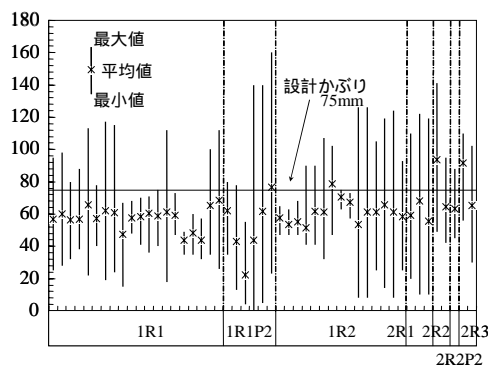


図 - 4 高架橋・橋脚毎のかぶり分布

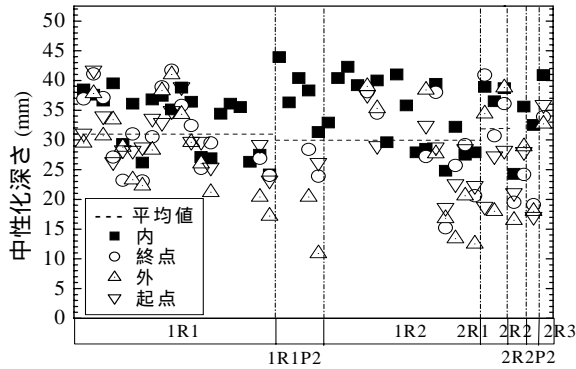


図 - 5 高架橋・橋脚毎の中性化深さ分布

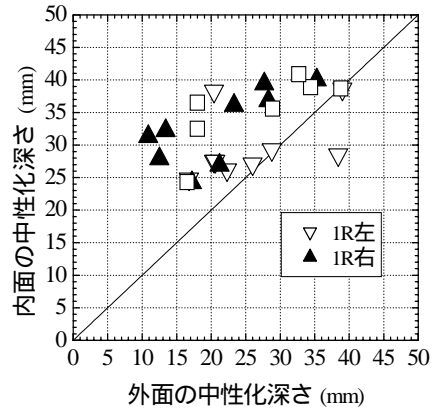


図 - 8 面方向による中性化深さ

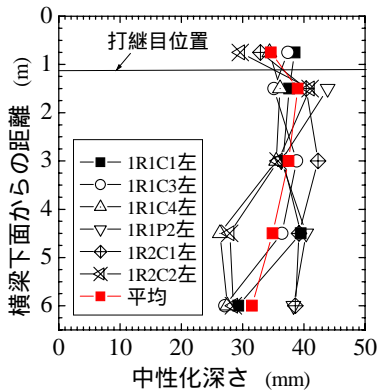


図 - 6 柱高さ方向の中性化深さ分布

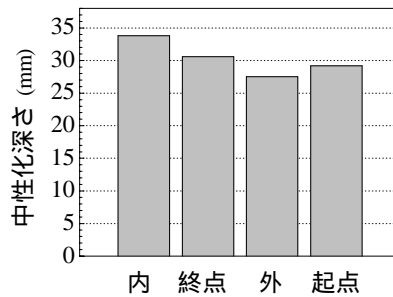


図 - 9 各方向4面の平均中性化深さ

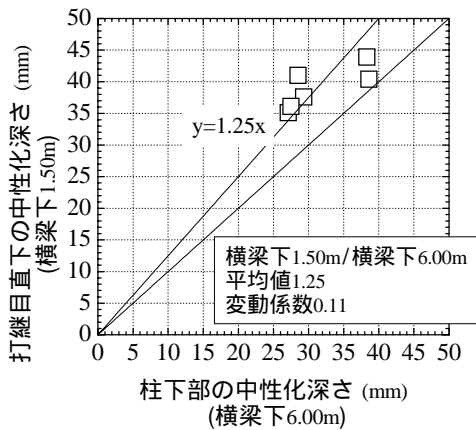


図 - 7 柱の高さ方向の中性化深さ

を対象とした今回の調査では室内実験ほど明確な関係は認められなかった。この理由として、中性化速度は前述したように環境条件や施工条件、コンクリートの品質等によって影響を受けるため、実構造物ではこれらの影響の方が卓越すると考えられる。

3.3 塩化物イオン濃度

(1) 中性化による塩化物イオンの濃縮

採取したコアより得られたコンクリート表面からの距離と塩化物イオン濃度の関係を図 - 11 に示した。ピーク位置の塩化物イオン濃度と 80mm ~ 100mm 位置での塩

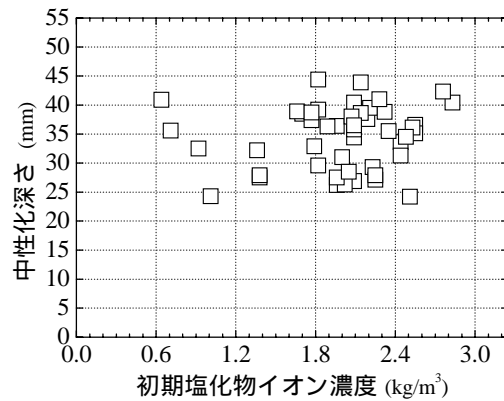


図 - 10 初期塩化物イオン濃度と中性化深さの関係

化物イオン濃度の比は、2.0~2.7 倍となった。既存の研究から¹⁾²⁾、中性化によって濃縮を受けた塩化物イオンは、ピーク値で初期塩化物イオン濃度の 2.0~3.0 倍程度となるとされており、今回の結果は同様な値となった。中性化深さが大きくなるにつれ、約 30mm~50mm の位置にあったピークが、約 50mm~70mm の位置へと濃縮されるような傾向が認められる。

(2) 高架橋・橋脚毎の初期塩化物イオン濃度のばらつき

図 - 12 に初期塩化物イオン濃度の高架橋・橋脚毎の分布を示した。起点方から順に測定箇所毎にすべてプロットしている。一点鎖線は高架橋の境を示している。横の

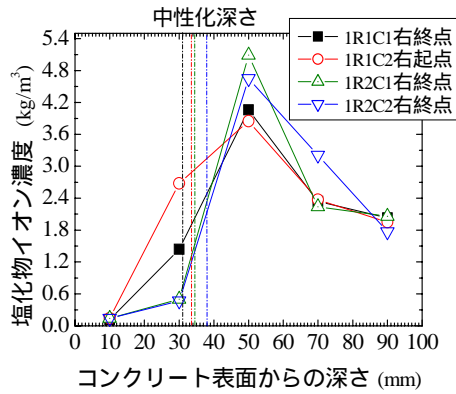


図 - 11 中性化による塩分濃縮分布

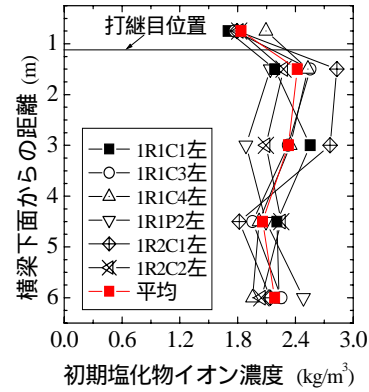


図 - 13 初期塩化物イオン濃度分布

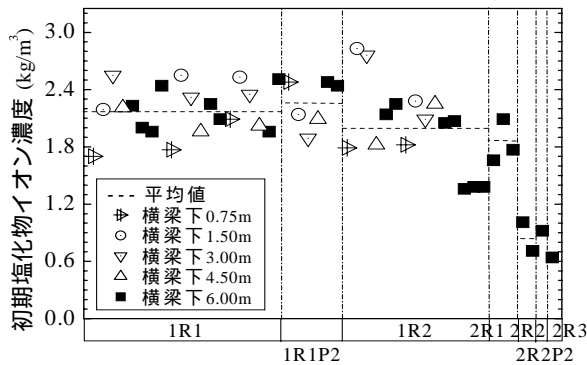


図 - 12 高架橋・橋脚毎の塩化物イオン濃度分布

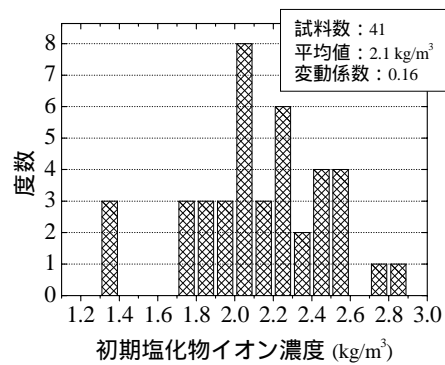


図 - 14 初期塩化物イオン濃度の度数分布

点線は各高架橋の平均値である。高架橋・橋脚1基毎の平均値は $0.64\text{kg/m}^3 \sim 2.25\text{kg/m}^3$ で、変動係数は $0.11 \sim 0.25$ であった。データ数の少ない高架橋 2R2 を除くと変動係数は、1 高架橋当り 0.22 程度におさまると考えられる。高架橋 1R2 は、起点方の柱(C1,C2)で平均値が $2.07 \sim 2.27$ 、終点方の柱(C3,C4)で平均値が $1.36 \sim 1.38$ と同じ高架橋内でも大きなばらつきが認められた。

(3) 柱高さ方向の初期塩化物イオン濃度のばらつき

詳細調査の結果に基づき、初期塩化物イオン濃度の柱高さにおけるばらつきについて検討する。図 - 13 に柱高さ方向の初期塩化物イオン分布を示した。打継目直上の初期塩化物イオン濃度は他の位置と比較し小さな値となる傾向を示した。これは、打継目直上と直下でコンクリートの品質が違うこと等、種々の要因が考えられる。このため、打継目直上の値を無視すると、柱1本毎の変動係数は $0.05 \sim 0.21$ であることから、柱高さ方向の初期塩化物イオン濃度のばらつきは、 0.21 程度以下となる。6 箇所中 4 箇所打継目直下よりも柱下部の値が小さい傾向がみられ、打継目直下に対する柱下部の初期塩化物イオン濃度比の平均は 1.11 であった。中性化のような明確な柱高さ方向の影響はなく、コンクリート中の塩化物イオンのばらつきに起因するものと考えられる。

施工時に練り混ぜられた骨材の違いがないと考えられる高架橋 1R1 と高架橋 1R2 の初期塩化物イオン濃度を

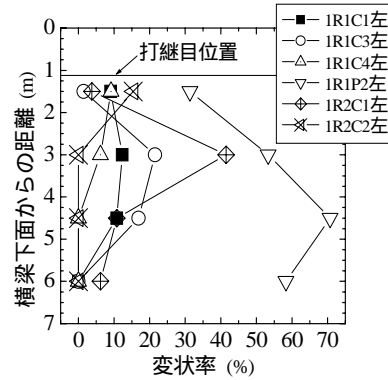


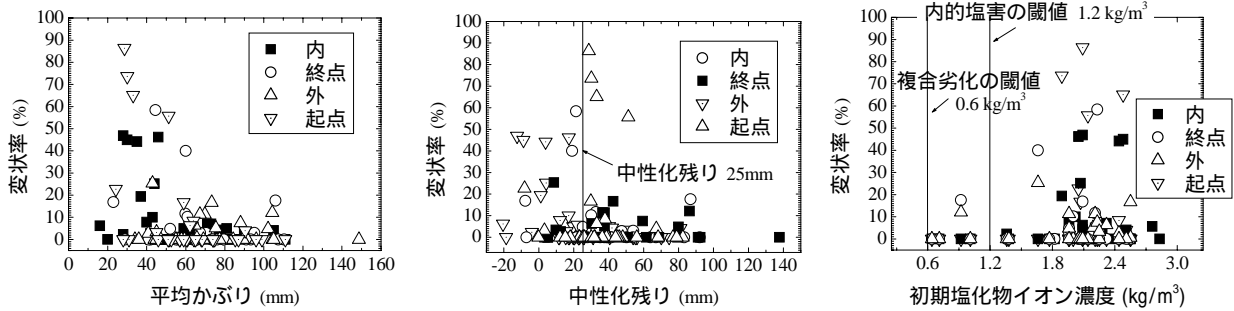
図 - 15 柱高さ方向の変状率分布

まとめて整理した。その結果を図 - 14 に示す。データ数が少ないため断定は出来ないものの正規分布に適合するものと考えられる。

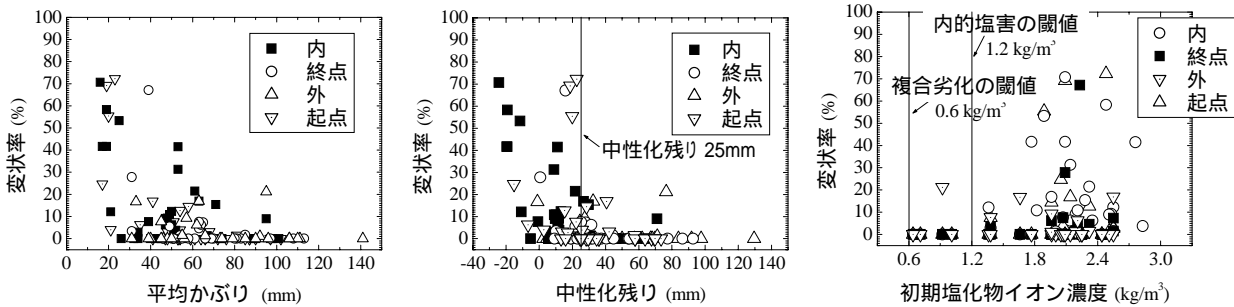
3.4 変状率

図 - 15 に高さ方向の変状率分布を示した。打継目直下で中性化深さは大きくなる傾向を示し、初期塩化物イオン濃度は柱高さ方向で大きな変動はなかった。しかし、打継目直下で変状率が最大となるものは 1R2C2 左と 1R1C4 左のみであった。これは、スラブによって雨がかりが少ないこと、柱下部に水分が溜まりやすいことが考えられる。

図 - 16 に変状率と平均かぶり、中性化残り、初期塩化



(a) 軸方向鉄筋の変状と変状因子の関係



(b) 帯鉄筋の変状と変状因子の関係

図 - 16 変状率と変状要因

物イオン濃度の関係を示す。ここでいう中性化残りとは、平均かぶりと中性化深さの差である。各面における平均かぶりと変状率は関連が強いことが伺える。平均かぶり20mm以下でも各変状率が小さいものが存在するものの、変状率が高いものはほぼかぶりが小さいと考えてよい。帯鉄筋では、中性化残り25mm付近を境に変状率が高くなる傾向になる。塩化物イオン濃度の観点からみると1.6kg/m³以上で変状率が高くなる傾向にある。変状率と各因子には相関関係が認められるものの、大きなばらつきが生じていた。ここにも周辺環境の影響や施工条件等の影響が関与していると思われる。

4. 結論

- (1) 中性化深さは、柱高さ方向において、打継目直下で大きく、柱下部で小さくなる傾向を示し、その比は平均1.25となった。
- (2) また、面方向において、外面の中性化深さに対する内面の中性化深さの比は平均1.46となった。面方向や周辺の環境条件によるコンクリートの湿潤状態の違いが、中性化深さに影響を及ぼすと考えられる。
- (3) 初期塩化物イオン濃度は、中性化深さと比べばらつきが小さく、0.22程度以下となった。その分布は正規分布に適合するものと考えられる。
- (4) 変状率と劣化因子の関係から、平均かぶりと変状率は関連が強いことが伺える。

参考文献

- 1) 小林一輔：コンクリートの炭酸化に関する研究，土木学会論文集，No.433/V-15，pp.1-14，1991.8
- 2) 鳥取誠一，宮川豊章：中性化と初期塩化物イオンの複合的影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測，土木学会論文集，No.802/V-69，pp.181-196，2005.11
- 3) 佐伯竜彦，植木聡，嶋毅：塩害と中性化の複合による塩化物イオンの浸透予測モデルの構築，土木学会論文集，No.697/V-54，pp.131-142，2002.2
- 4) 武田均，小山哲，丸屋剛：複合劣化を受けるRC構造物のライフサイクルの評価，大成建設技術センター報，第38号，pp.28-1-28-13，2005
- 5) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)コンクリート構造物，pp.87-95，2007.1
- 6) 谷村幸裕，長谷川雅志，曾我部正道，佐藤勉：鉄道RCラーメン高架橋の中性化に関する耐久性照査法の適用に関する研究，土木学会論文集，Vol.760/V-63，pp.147-157，2004.5
- 7) 塩化物を含むコンクリート中における鉄筋腐食と中性化との関係：岸谷孝一，小林一輔，櫻野紀元，宇野祐一，コンクリート工学年次論文集，Vol2，No.1，pp.77-83，1991