

論文 87 年間供用された RC 鉄道高架橋スラブの劣化因子分析

松岡 弘大^{*1}・仁平 達也^{*2}・伊藤 正憲^{*3}・山田 久美^{*4}

要旨：コンクリート構造物の長寿命化においては、長期供用を想定した劣化予測が必要不可欠である。本論文では、87 年間の長期に渡り供用された RC 鉄道高架橋の中間スラブを対象として現地調査を行い、長期供用後の変状状態、かぶり、中性化深さに関するデータを得た。また、維持管理標準における劣化予測モデルに基づき、劣化因子に関する分析を行った。その結果、はく離、はく落の変状率にはかぶりが大きく影響を及ぼす等、既存報告と統合的な特徴を確認した。さらに、鉄筋腐食速度における補正係数の比較結果から、当該スラブでは雨水の影響により鉄筋腐食速度が 1.1~1.5 倍程度速くなることが示唆された。

キーワード：RC 鉄道高架橋, 中間スラブ, 現地調査, 劣化因子分析

1. はじめに

コンクリート構造物で発生するひび割れ、はく離、はく落等の変状を適切に管理するため、鉄道構造物等維持管理標準・同解説¹⁾(以下、維持管理標準)では、鋼材の腐食速度を用いた劣化予測モデルが提案されている。当該モデルはあくまで安全側の仮定に基づいており、調査結果等から適宜補正することを前提としている。また、これまでに実構造物への適用事例も蓄積しつつある^{2), 3)}。今後の長寿命化を踏まえると、これまでに適用実績の少ない供用期間 50 年以上のコンクリート構造物に対する実績データの蓄積が重要となる。特に長期供用下においては鉄筋の腐食進行期間が相対的に長くなる。このことから変状発生に対しては、かぶり等の条件とともに、コンクリート中へ浸透する水分等の鉄筋腐食速度に対する変動要因^{4), 5)}が大きく影響すると考えられる。

以上を踏まえ、本論文では長期間供用されたコンクリート構造物への劣化予測モデルの適用、およびこれを通じた劣化因子の把握を目的として以下の検討を行った。

- (1) 供用開始後 87 年が経過した RC 鉄道高架橋のスラブ部材を対象に現地調査を実施し、はく離、はく落等の変状発生傾向と劣化要因を把握する。
- (2) 調査結果と劣化予測モデルに基づき、主な劣化因子がはく離、はく落の発生に及ぼす影響を把握する。
- (3) 劣化予測における補正係数を利用して雨水が鉄筋腐食速度に及ぼす影響の巨視的な評価を行う。

2. 調査概要

2.1 調査対象

表-1 に対象構造物の概況を、図-1 に対象径間と調査部材の概略図を、写真-1 に対象部材と類似形式構造

物の写真をそれぞれ示す。対象構造物は旧東急東横線渋谷一代官山間に位置する 4 径間連続 RC ラーメン高架橋である。昭和 2 年に竣工し、調査時点で建設後 87 年が経過している。本調査では、径間長約 9m の第二径間中間スラブ下面を対象とした。最外縁の橋軸直角方向鉄筋はφ19 であり、150mm 間隔で配置されている。図-1(b)に示すように、当該構造物は片側(海側)のみに縦梁を有する。このため、調査対象の中間スラブは縦梁のない山側のみが雨水に晒されてきた可能性が高い。なお、対象構造物は撤去予定があったため点検を頻繁に実施するこ

表-1 構造物の概況

構造形式	しゅん工	経年	対象部材	周辺環境
4 径間 RC ラーメン高架橋	1937 年 (昭和 2 年)	86	中間スラブ	市街地

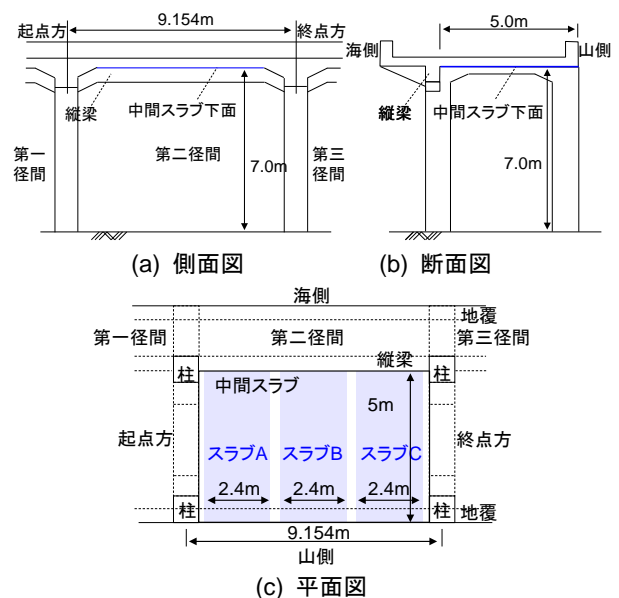


図-1 対象構造物と調査部材の概略図

*1 公益財団法人鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 構造力学 研究員 博士(工学) (正会員)

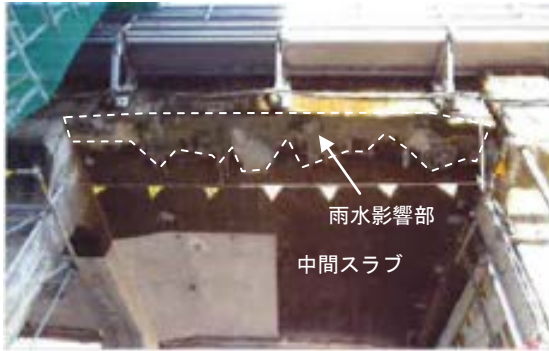
*2 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造技術研究部 コンクリート構造 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*3 東急建設株式会社 技術研究所 土木研究室 室長 博士(工学) (正会員)

*4 東急電鉄 鉄道事業本部 工務部 土木課 課長補佐



(a) 対象部材の概観



(b) 類似形式構造物の概観

写真-1 対象高架橋の概観

とで、剥落防止対策等の補修工事は実施せず、そのためスラブの山側端部に水切りは設置されていない。分析に際しては、図-1(c)に示すように対象スラブ下面を橋軸方向に3分割してスラブA~Cを設定し、それぞれ評価を行った。対象構造物の建設位置と建設年代から、塩分の影響は無視できると考え、調査項目には含めていない。

2.2 調査方法

図-2に中間スラブ下面を対象に実施した調査概要を示す。本論文では、図に示すように橋軸直角方向鉄筋の間隔を基準に1辺150mmの評価単位メッシュを設けて、統計的な評価を実施した。

目視点検は、点検ハンマーを併用し、メッシュごとにひび割れ、はく離、はく落の有無を整理した。

鉄筋のかぶりは、レーダ法(電磁波法)により各橋軸直角方向鉄筋の位置出しを行い、電磁誘導法により各橋軸直角方向鉄筋について、5測線のかぶり測定を実施した。これら5測線の測定結果から各メッシュにおける橋軸直角方向鉄筋のかぶりを線形補完により算出した。

中性化深さは、ビット径 $\phi 25$ のドリルを用いて削孔を行い、孔内に1%フェノールフタレイン溶液を噴霧して1孔につき4箇所を測定した。中性化深さはその空間的分布⁶⁾、⁷⁾を把握する目的で、スラブAにおいて橋軸直角方向に50mm間隔でライン状に測定した。また、スラブB

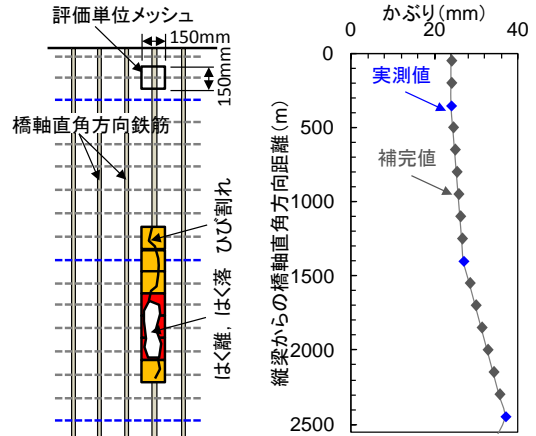
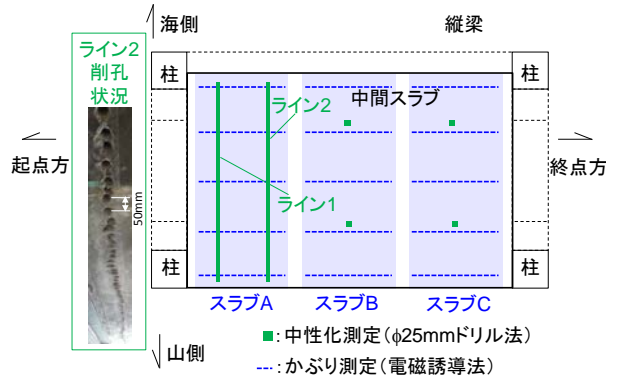


図-2 中間スラブの調査概要

およびスラブCでは海側と山側の2点において同様の手法で中性化深さを測定した。

現地調査による変状率、かぶり、中性化深さは、スラブA~Cごとに平均値、標準偏差、変動係数を算出するとともに、各スラブ内での空間分布について分析を行った。

2.3 劣化予測方法

図-3に維持管理標準における劣化予測モデル¹⁾の概念図を示す。維持管理標準では、変状過程を「潜伏期」、「進展期」、「加速期(前期、後期に区分)」、「劣化期」と区分している。それぞれの区分の閾値となるひび割れ発生、はく離、はく落発生を鉄筋の腐食深さで判定している。また、その鋼材の腐食深さは、鉄筋のかぶり c と鉄筋径 ϕ で定められている。

表-2に本論文の対象部材における変状予測モデルの定義を示す。本論文で検討した変状の原因は、中性化であると推定されることから、これに基づく劣化予測モデルを採用した。文献2)でも指摘されているように、鉄筋の腐食速度は非常にばらつきが大きい。このことから、維持管理標準においても適宜調査により補正することを推奨している。本論文でも現地調査結果を基本として、鉄筋腐食速度 dr/dt を修正し劣化予測を行う。

鉄筋腐食速度 dr/dt を補正するために、文献2)と同様

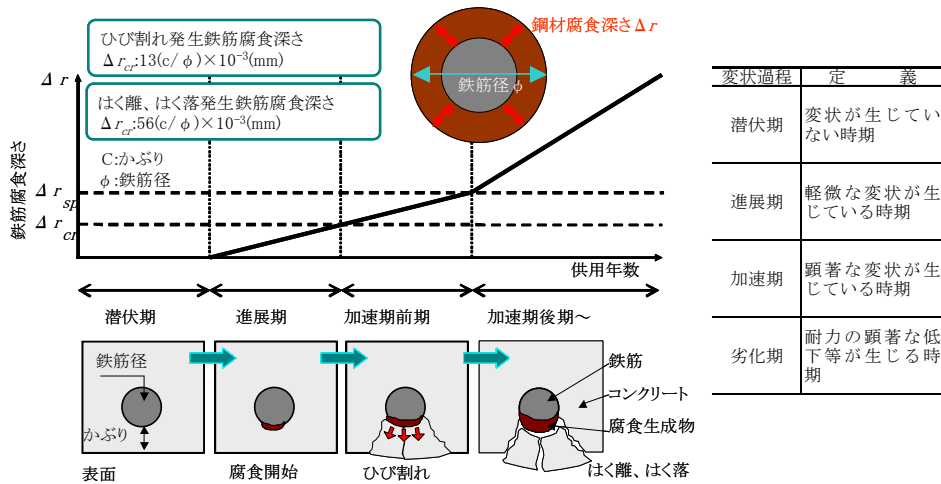


図-3 変状予測モデル²⁾の概念図

表-2 変状予測モデルの定義

変状原因	各期終了時の鉄筋腐食深さ Δr (mm)		鉄筋の腐食速度 dr/dt (mm/年)
	進展期	加速期前期	
中性化	進展期	$\Delta r_{cr} = 13(c/\phi) \times 10^{-3}$	3.0×10^{-3}
	加速期前期	$\Delta r_{sp} = 56(c/\phi) \times 10^{-3}$	

ここに、 c : かぶり (mm), ϕ : 鉄筋径 (mm) dr/dt : 鉄筋の腐食速度 (mm/年) W/C : 水セメント比

に、メッシュ単位で集計した目視による変状率と、腐食速度をパラメータとした劣化予測による変状率を比較し、両者が一致するように腐食速度に補正係数を乗じることで、巨視的に腐食速度を算出した。劣化予測における各メッシュの腐食速度のばらつきは、モンテカルロシミュレーション⁸⁾により算出した。

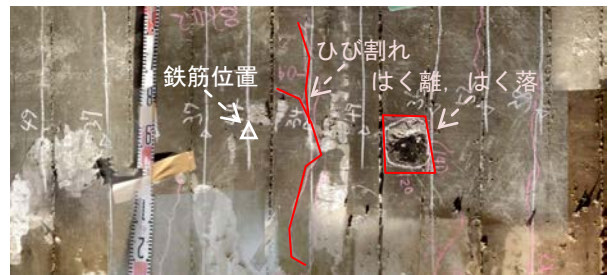
一方、上述したようにコンクリート内部の鉄筋腐食の進行は、コンクリート表面から浸入する水の影響が大きいことが指摘されている⁶⁾。しかしながら、維持管理標準の劣化予測モデルには、この影響は考慮されていない。本論文で対象とした中間スラブは、片側にしか縦梁を有しておらず、山側のみに雨水の影響が混在していると推定される。これに着目し、中間スラブを後述するスラブ端部とそれ以外の2つのグループに区分し、雨水の影響を鉄筋腐食速度の補正係数の観点から巨視的に評価することを試みる。

3. 調査結果

3.1 変状調査結果

写真-2はスラブAの目視調査の例を示す。電磁波法により特定した橋軸直角方向鉄筋の位置(図中△印)を基準とし、電磁誘導法によりかぶりを把握するとともに、目視および点検ハンマーにて表面のひび割れ、はく離、はく落状況を確認し、チョークにて記録した。

表-3にスラブAの目視調査結果集計の例を示す。デジタルカメラで撮影した目視点検調査の結果から、評価メッシュごとに、無損傷、ひび割れ、はく離、はく落を区分して変状率を算出した。表から、縦梁のないスラブ



△ : 鉄筋位置 数字 : かぶり 〃 : ひび割れ, □ : はく離、はく落

写真-2 スラブAの目視調査結果の例

表-3 スラブAの目視調査結果例

縦梁からの距離[m]	鉄筋No.										集計値		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ひび割れ率	はく離はく落率	変状率
0.05											0.14	0.00	0.14
0.20											0.14	0.00	0.14
0.35											0.14	0.14	0.29
0.50											0.14	0.14	0.29
0.65											0.43	0.00	0.43
0.80											0.29	0.00	0.29
0.95											0.43	0.00	0.43
1.10											0.29	0.00	0.29
1.25											0.30	0.00	0.30
1.40											0.10	0.10	0.20
1.55											0.00	0.10	0.10
1.70											0.20	0.00	0.20
1.85											0.10	0.00	0.10
2.00											0.10	0.00	0.10
2.15											0.20	0.00	0.20
2.30											0.20	0.00	0.20
2.45											0.10	0.00	0.10
2.60											0.20	0.00	0.20
2.75											0.10	0.00	0.10
2.90											0.20	0.00	0.20
3.05											0.20	0.00	0.20
3.20											0.30	0.00	0.30
3.35											0.29	0.00	0.29
3.50											0.00	0.14	0.14
3.65											0.00	0.14	0.14
3.80											0.00	0.14	0.14
3.95											0.29	0.14	0.43
4.10											0.43	0.14	0.57
4.25											0.00	0.43	0.43
4.40											0.14	0.43	0.57
4.55											0.14	0.57	0.71
4.70											0.43	0.57	1.00
4.85											0.14	0.86	1.00
5.00											0.00	1.00	1.00
全体											0.31	0.13	0.33

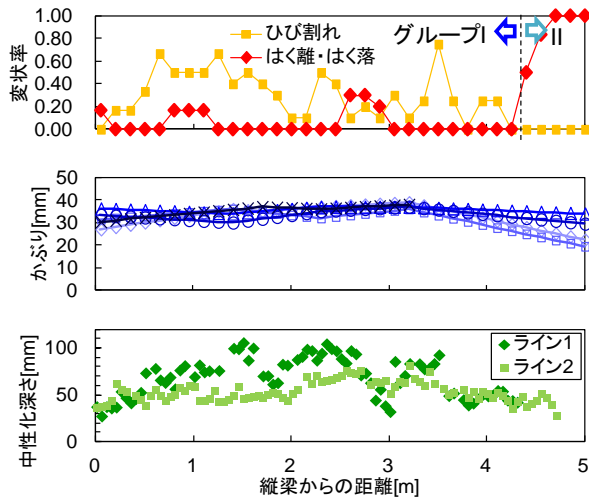


図-4 スラブ A の調査結果

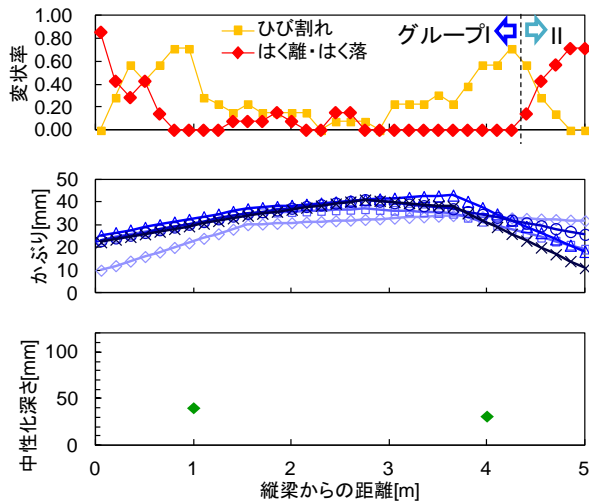


図-5 スラブ B の調査結果

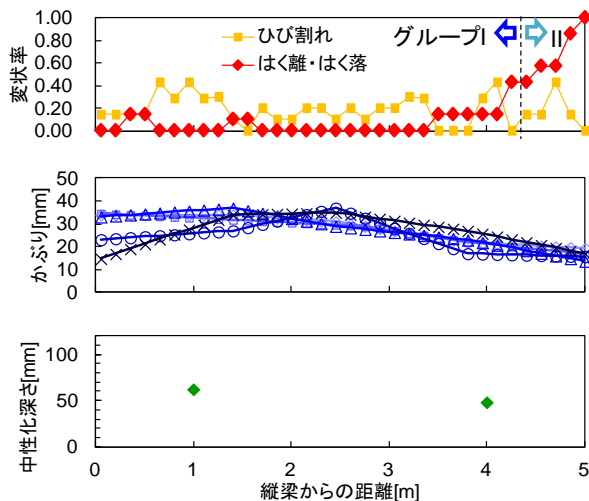


図-6 スラブ C の調査結果

A の山側端部（縦梁からの距離 5m 付近）にはく離，はく落の発生が集中していることがわかる。

図-4 から図-6 にはスラブ A～C で調査したひび割れ，はく離，はく落の変状，かぶり，中性化深さをそれ

表-4 かぶり調査結果の統計量

調査箇所	区分	平均[mm]	標準偏差[mm]	変動係数
スラブA	グループI	35.1	3.08	0.09
	グループII	28.2	5.10	0.18
	全体	34.5	3.82	0.11
スラブB	グループI	33.1	6.75	0.20
	グループII	22.1	7.90	0.36
	全体	32.0	7.62	0.24
スラブC	グループI	29.6	4.89	0.17
	グループII	18.4	3.25	0.18
	全体	28.2	6.00	0.21

グループ I： ループ I 以外の部分

グループ II： 雨水の影響が想定される部分

表-5 中性化深さ調査結果の統計量

調査箇所	区分	平均[mm]	標準偏差[mm]	変動係数
スラブA	グループI	60.9	17.80	0.29
	グループII	44.0	4.88	0.11
	全体	59.9	17.91	0.30
スラブB	全体	35.5	6.36	0.18
スラブC	全体	54.0	9.90	0.18

グループ I： ループ I 以外の部分

グループ II： 雨水の影響が想定される部分

ぞれ縦梁から距離で整理した結果を示す。なお，変状率は各スラブの橋軸方向に集計した結果を示している。また，かぶりは各スラブの代表的な 5 本の橋軸直角方向鉄筋について示している。

図-4 から図-6 の上段に示すひび割れ，はく離，はく落の変状率から，表-3 に示したスラブ A のみならず全スラブの傾向として，山側端部（縦梁から 5m 地点）から 0.5m 程度までの範囲は，はく離，はく落の変状率が極めて高くなっている。後にこのような端部の変状率に関する影響分析を行うために，縦梁側をグループ I，端部側をグループ II と定義した。スラブ周りの空気流動解析等を援用することで，グループ区分の境界をより正確に設定できると考えられるが，本論文の範疇を大きく超えるため，簡易的にいずれのスラブでも変状率が高くなり始める縦梁からの距離 4.3m（山側端部から 0.7m）を境界として設定した。特にグループ II では，縦梁および水切りがないことで，かぶりや中性化深さ以外にも雨水の影響が想定される。

図-4 から図-6 の中段に示すかぶりの調査結果から，かぶりは約 10～50mm の範囲でばらつくとともに，山側および海側の両端部で小さくなる傾向が確認できる。この傾向は，各図に示したはく離，はく落の変状率の傾向とも類似している。このことから，長期供用に伴って発生するはく離，はく落に関しても，過去の報告²⁾と同様に，かぶりの影響が大きいことを確認できる。

図-4 から図-6 の下段に示す中性化深さに関しては，特に中間スラブ中央部で 100mm を超えるような箇所も存在することがわかる。また，図-4 のスラブ A ライン 1 およびライン 2 の結果から，中性化深さは海側，山側で小さくなっており，橋軸直角方向に凸型の分布形状で

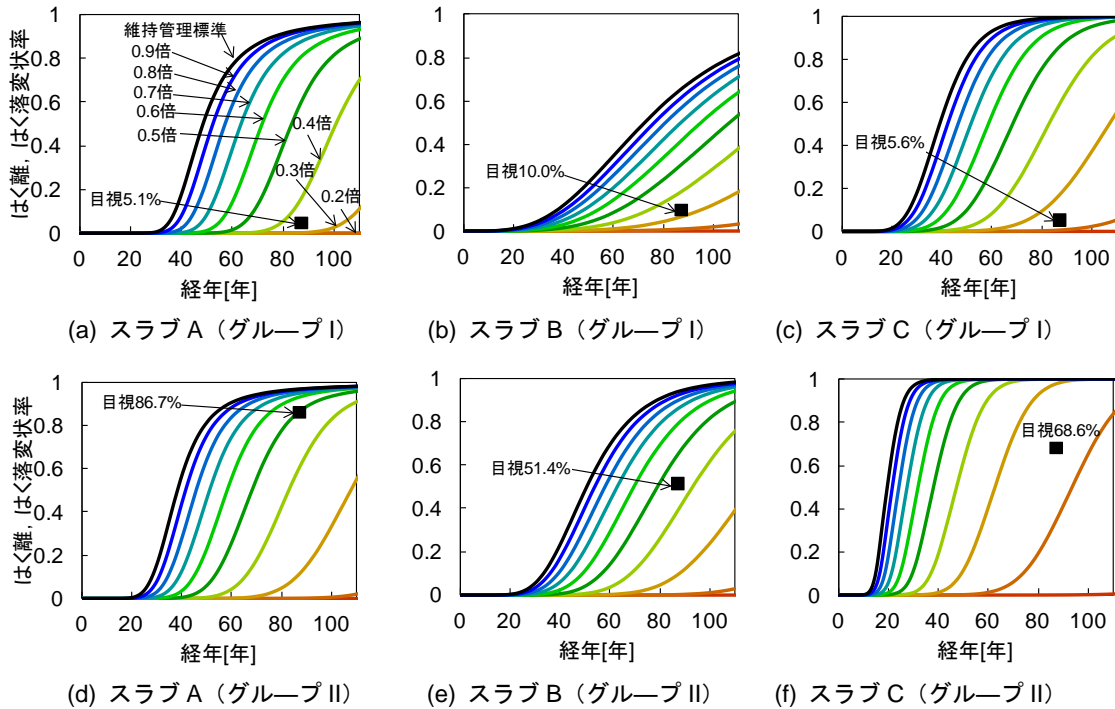


図-7 はく離, はく落に関する劣化予測結果

あることが確認できる。この傾向を図-4 上段に示したはく離, はく落の変状率と比較すると, 中性化の進行が早い箇所ほどはく離, はく落の発生率が低く, 中性化に関する一般的な認識と必ずしも一致しない。長期供用下のコンクリート構造物では, 鉄筋の腐食進行期間長くなることで, 中性化の進行がはく離, はく落の発生に及ぼす影響が相対的に小さくなる可能性が考えられる。

表-4 にはスラブ A~C のかぶりの平均, 標準偏差および変動係数を, 表-5 にはスラブ A~C の中性化深さの平均, 標準偏差および変動係数をそれぞれ示す。かぶりによる影響を踏まえたうえで, 雨水による影響を評価するために, 図-4 から図-6 に示したグループ I と II について, それぞれ統計値を算出した。表-4 から, 雨水の影響が想定されるグループ II のかぶりは, 平均値で比較した場合でも, グループ I よりも 7~10mm 程度小さくなってることがわかる。また, 全体の平均値はいずれもグループ I に近い値となっており, 山側端部のグループ II が他と比べて特異であることが確認できる。表-5 の中性化深さについても表-4 のかぶりと同様の傾向が見られるが, 前述したように, 得られている変状率の分布とは逆の傾向であった。

3.2 劣化予測モデルに基づく劣化因子の推定

図-7 にはく離, はく落に関する劣化予測結果を示す。各スラブのグループ I, II について, 表-4, 5 に示した平均値および変動係数を用いてそれぞれ 1000

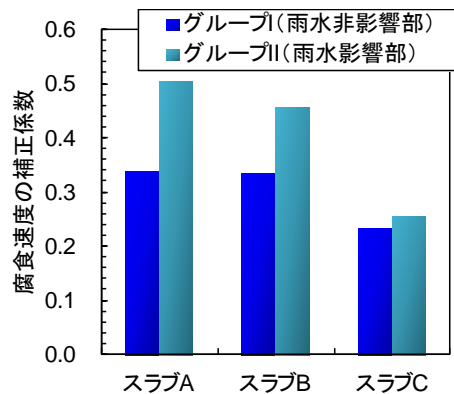


図-8 グループ間の腐食速度の補正係数の違い

回のモンテカルロシミュレーションを行い, はく離, はく落の変状率を算出した。なお, 中性化深さについては, グループで区分したとしても, はく離, はく落発生をより正確に表すことはできないため, モンテカルロシミュレーションには全調査結果の平均と標準偏差を用いた。また, 劣化予測の前提となっている補正については, 表-2 に示した腐食速度 (3.0×10^{-3} (mm/年)) を 0.1~0.9 倍まで 0.1 刻みで変化させて推計することとした (以下, 補正係数)。同図(a)~(c)のグループ I と同図(d)~(f)のグループ II を比較するとかぶりの平均値の相違により, 同図(d)~(f)のグループ II の方が早期に変状率が高くなる傾向を確認できる。また同図には, 目視調査により算出したはく離, はく落の変状率を合わせて示している。いずれも維持管理標準の予測

結果を下回っており、85年を超える長期供用に対しても安全側の予測になっていることが確認できる。

図-8 にグループ間に見られる補正係数の相違を示す。既存と高欄を対象とした検討結果²⁾では、補正係数は0.5を下回るものが7割程度であると報告されている。図-8 から、算出した補正係数は既存の報告と傾向が異なるものではなく、供用年数の増加に伴う極端な精度の低下は確認できない。グループ間の相違に着目すると、グループⅠの補正係数は、雨水の影響が想定されるグループⅡの補正係数と比較して、小さい値であることが確認できる。端部で小さい傾向を示したかぶりの影響は、劣化予測モデルを通じてすでに考慮されているため、両者の相違は、グループⅡのみに大きく影響を及ぼす雨水に起因すると考えられる。グループⅡの補正係数はグループⅠと比べて1.1倍～1.5倍となっており、雨水により当該中間スラブの鉄筋腐食速度が1.1倍～1.5倍程度速くなっていると推察される。

4. おわりに

本論文では、85年を超える長期供用後のRC鉄道高架橋中間スラブに着目し、現地調査および劣化予測モデルを用いた劣化因子に関する分析を実施した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 現地調査を行い長期供用後のRC鉄道高架橋中間スラブにおける、変状状態、かぶり、中性化深さに関するデータを得た。
- (2) 当該中間スラブにおけるはく離、はく落の変状率は縦梁がなく雨水の影響が想定される山側の端部から0.7mの範囲で特に高くなる傾向を確認した。
- (3) 当該スラブのかぶりは橋軸直角方向の端部で小さく、山側の端部から0.7mの範囲の平均値は、他と比較して、5～10mm程度小さいことを確認した。
- (4) 現地調査結果から、はく離、はく落の発生率はかぶりが小さいほど高い傾向にあった。また、中性化深さが腐食発生限界を超えた長期供用下の中間スラブでは、中性化深さがはく離、はく落の発生に及ぼす影響が小さいことが示唆された。
- (5) 維持管理標準の劣化予測モデルを適用した結果、長期供用のコンクリート構造物であっても、予測結果は安全側であるとともに、変状率を評価するための腐食速度の補正係数は0.2～0.5程度である

ことを確認した。

- (6) 劣化予測モデルにおける補正係数の比較結果から、雨水の影響により、当該スラブでは巨視的な鉄筋腐食速度が1.1～1.5倍程度速くなることが示唆された。

雨水の影響については、今後、端部からの距離や水切りの有無、コンクリート表面の水跡等、台帳や目視で確認できる指標に着目した分析を実施し、鉄筋腐食速度の補正係数として簡易にその影響を考慮する手法の提案を目指す。

参考文献

- 1) 財団法人 鉄道総合技術研究所編：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、丸善、2007
- 2) 曾我部正道、谷村幸裕、松橋宏治、宇野匡和：鉄道高架橋のRC高欄の変状調査とその劣化予測、コンクリート工学、Vol.47, No.8, pp.16-24, 2009
- 3) 松橋宏治、宇野匡和、谷村幸裕、曾我部正道：中性化が進行した既設鉄道高架橋の詳細な調査と劣化予測法に関する一考察、土木学会第62回年次学術講演会概要集、pp.107-108, 2007
- 4) 高谷哲、中村士郎、山本貴士、宮川豊章：コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響、土木学会論文集 E2, Vol.69, No.2, pp.154-165, 2013
- 5) 松田芳範、井口重信、山田章史：実構造物における中性化と鉄筋腐食に関する一考察、コンクリート構造物の補修、補強、アップデート論文報告集、第14巻、pp.483-488, 2014
- 6) 松橋宏治、谷村幸裕、曾我部正道、川村力：RC高架橋スラブ下面の中性化深さ分布に関する一考察、土木学会第60回年次学術講演会概要集、pp.213-214, 2005
- 7) 松岡弘大、曾我部正道、仁平達也、河村佳英：RC高架橋スラブ下面の中性化速度係数の空間分布、コンクリート工学年次論文集、Vol.36, No.2, pp.1279-1284, 2014
- 8) SANCHAROEN, P. and UOMOTO, T.: Life Cycle Repairing Cost Considering of Deterioration Prediction Model, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.25, No.2, pp.1639-1644, 2006