

論文 鉄道高架橋における鉄筋かぶりおよび中性化深さの実態と変状発生との相関

永野 匡敏^{*1}・岸 利治^{*2}

要旨：鉄筋かぶりは、鉄筋コンクリート構造物の機能やコンクリート片の剥離・剥落による公衆安全性を確保するために重要な要素である。本稿では、鉄筋かぶりの施工誤差に着目し、建設ブロックや構造体、部位といった単位で鉄筋かぶりの実態を調査した。その結果、鉄筋かぶりは、コンクリート片の剥離・剥落をはじめとする変状に対して強い相関が見られた。

キーワード：鉄筋かぶり、非破壊検査、中性化深さ、健全性評価

1. はじめに

鉄筋かぶりは、鉄筋コンクリート構造物（以下、RC 構造物）の機能や公衆安全性を確保するために重要な要素である。東日本旅客鉄道（株）（以下、JR 東日本）が管理する RC 構造物は、建設後、長期間経過した構造物が多く、維持管理に関する問題が顕在化している。そのため、RC 構造物の健全性をどう把握するかが課題となっている。特に、近年では鉄筋腐食によるコンクリート片の剥離・剥落が報告されており、その原因の一つに鉄筋かぶりの不足があげられる。現在、鉄筋かぶりは、設計段階で施工誤差を考慮した値を用いる。しかし、建設時は、その当時の基準に従い、鉄筋・型枠後のコンクリートの打ち込み時に生じる施工上の不具合によって、鉄筋かぶりの不足が生じるなど、建設時に施工誤差を考慮していなかったことも考えられる。

そこで、本稿では、実構造物（高架橋）の鉄筋かぶりの実測調査を行い、鉄筋かぶりの実態を把握するとともに、鉄筋かぶりによる構造物全体の健全性評価を実施した。

2. 基本調査

2.1 部位ごとの鉄筋かぶり調査

(1)調査対象構造物

調査対象は、JR 東日本が保有する割合が多い 1970 年～1980 年までに建設された高架橋とした。このうち、過去 10 年間にコンクリート片の剥離・剥落の報告事例がある高架橋で、高所作業車による至近距離からの調査が可能な高架橋 A（経年 37 年）の 1 径間とした。また、比較対象として、同年に建設された近傍の高架橋のうち、これまでに

コンクリート片の剥離・剥落の報告事例が無く、過去の検査記録で健全と判定されている高架橋 B（経年 37 年）の 1 径間も対象とした。

(2)調査部位

調査部位は、コンクリート片が剥離・剥落する可能性があるすべての部位とし、高架橋の高欄、地覆、張出スラブ、中間スラブ、縦梁、横梁、柱である。調査部位と測点を表-1 と図-1 に示す。

表-1 調査部位と測点数

部位	凡例	測点数	測点位置
高欄	◎	2 測点×3 測点断面=6 測点	スラブ下面から 1.0m の高さ
地覆	△	2 測点×3 測点断面=6 測点	
張出スラブ	▲	2 測点×3 測点断面=6 測点	
中間スラブ	□	3 測点×1 測点断面=3 測点	
縦梁	■	3 測点×3 面×2 本（左右）=18 測点	3 面=側面 2 面+下面 1 面
横梁	◇	2 測点×3 面×2 本（前後）=12 測点	3 面=側面 2 面+下面 1 面
柱	◆	4 測点（前後左右）×4 本=16 測点	GL から 1.5m の高さ

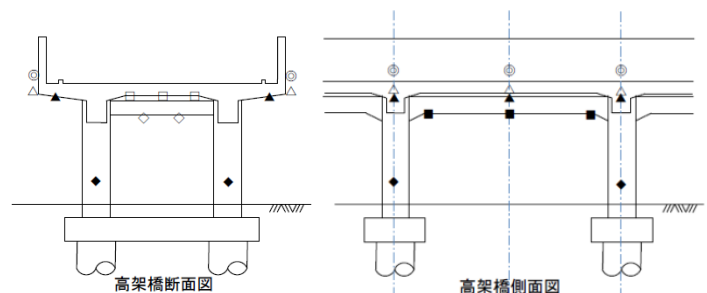


図-1 測点の概略図

(3)調査項目および方法

a)鉄筋かぶり

鉄筋かぶりの測定は、RC 構造物のかぶりに対し高い精度で測定が行えると報告¹⁾がある電磁誘導法（プロフォメーター5）を用いて、非破壊で行った。なお、1 測点当りの鉄筋かぶりの測定は、JR 東日本の土木工事標準仕様書に定めるコンクリー

*1 東日本旅客鉄道(株) 東京支社 施設部 工事課 (正会員)

*2 東京大学生産技術研究所 教授 博(工) (正会員)

ト表面状態の検査に基づき、鉄筋本数として8～10本程度を計測した。

b)変状の有無

変状（浮き、剥離・剥落、鉄筋露出など）の有無は、鉄筋かぶりの測定時に併せて近接目視で確認した。なお、変状有りの箇所とは、浮きや剥離・剥落とその形跡、鉄筋が露出している箇所が測点の周囲150mm程度の範囲に有するかを判断基準とした。一方で、変状無しの箇所とは、前述の範囲で変状が確認できなかった箇所である。

2.2 調査結果と考察

(1)部位ごとの鉄筋かぶり

部位ごとの鉄筋かぶりを図-2に、ばらつきを定量的に把握するため標準偏差を表-2に示した。個別の構造物（高架橋A・高架橋B）としても各部位とも鉄筋かぶりの実測値にばらつきが表れた。標準偏差は、3.4～19.3mmとなっており、柱、梁、高欄のばらつきが大きかった。特に、柱は2つの高架橋とも4面それぞれにばらつきが顕著に表れる結果となった。これは、建設時に鉄筋と型枠の位置がずれたことに起因すると考えられ、同様なことが梁の側面や高欄といった側面に型枠を設ける部位に生じやすいと推察できる。

また、かぶりが最も薄い部位はいずれも地覆で、高架橋Aにおいては地覆のかぶりの平均値がコンクリート表面検査の判定基準²⁾となる25mmを満たしておらず、変状（浮き）も確認された。

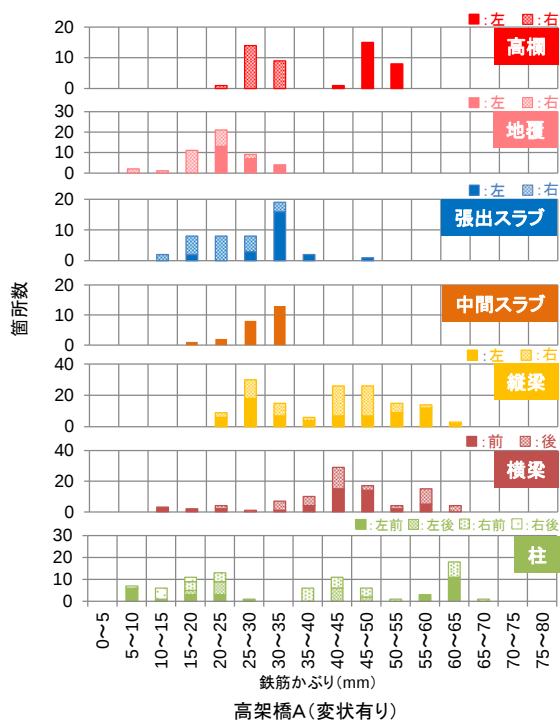


図-2 部位ごとの鉄筋かぶり

表-2 部位ごとの鉄筋かぶりと標準偏差

(mm)					(mm)						
		平均	最大	最少	標準偏差			平均	最大	最少	標準偏差
高架橋A	高欄	39	54	24	10.2	高架橋B	高欄	44	58	27	7.9
	地覆	22	32	5	5.6		地覆	28	37	17	4.4
	張出スラブ	26	45	12	7.2		張出スラブ	33	44	23	6.2
	中間スラブ	29	33	19	3.4		中間スラブ	38	43	32	3.4
	縦梁	40	63	21	11.1		縦梁	50	71	21	11.2
	横梁	43	61	12	11.2		横梁	50	68	35	9.3
	柱	36	67	5	19.3		柱	42	65	15	9.6

(2)鉄筋かぶりと変状の有無との関係

変状が確認された地覆について、鉄筋かぶりと変状の有無との関係を図-3に示す。鉄筋かぶりが25mm未満で変状が高い確率で確認され、鉄筋かぶりが小さいほど、変状発生の割合が高いことが示された。本調査で得られた鉄筋かぶりと変状の有無との関係は、石橋、古谷らの研究結果と一致する³⁾。

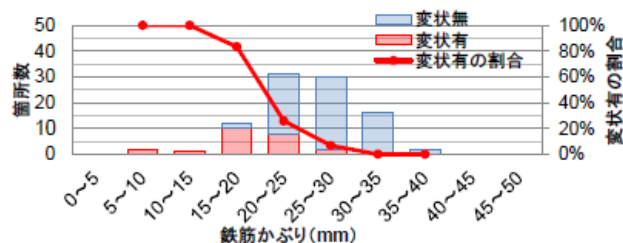
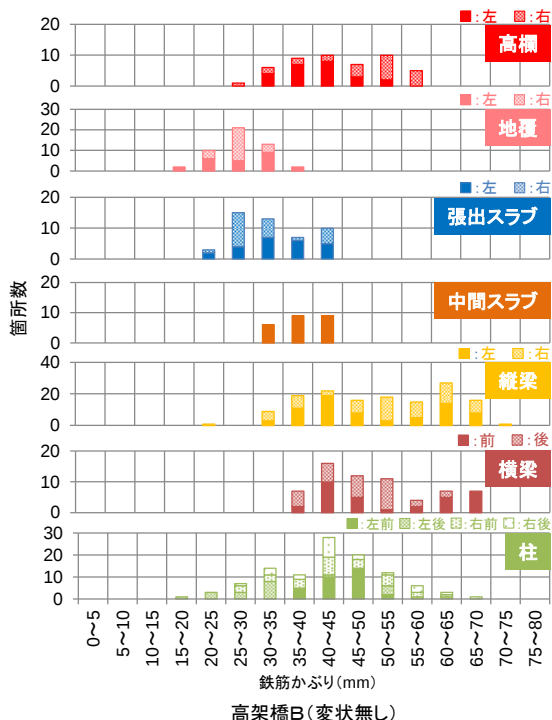


図-3 鉄筋かぶりと変状の有無（地覆のみ）

以上の基本調査の結果から、鉄筋かぶりはばらつくことが前提条件とした上で、剥離・剥落をはじめとする変状のリスクが高まる部位の絞り込みを行うため、鉄筋かぶりの平均値と標準偏差、更に雨水の影響を考慮した上で表-3に示す調査項



目の優先度を判定した。その結果、高欄、地覆、張出スラブの鉄筋かぶりを実測することが構造物の実態を評価するために効果的であることがわかった。これを受けて、鉄筋かぶりの実測値が構造体や建設ブロック単位での傾向と健全性を評価する基本データとしての有効性を確認するため、3つの部位の実測値の取得を目的とした実態調査を実施することにした。

表-3 調査項目の優先度判定と判定基準

	かぶり 平均値	かぶり 標準偏差	雨水影響	判定 ○:2点 △:1点 ×:0点
高欄	×	△	○	3
地覆	○	△	○	5
張出スラブ	△	△	△	3
中間スラブ	×	×	×	0
縦梁	×	○	×	2
横梁	×	○	×	2
柱	×	○	×	2

※判定基準

項 目	要 素	基 準
かぶりの平均値	値の平均	基準値 (25mm) 以下: ○ 設計値 (30mm) 以下: △ 設計値 (30mm) 以上: ×
かぶりの標準偏差	値の平均	10mm以上: ○ 5mm~10mm: △ 5mm以下: ×
雨水の影響		あり: ○ 場合によってあり: △ なし: ×

3. 鉄筋かぶりの実態調査

3.1 構造体および建設ブロック単位の鉄筋かぶり調査

(1)調査対象構造物

調査対象構造物は、2. 基本調査と同様であり、過去10年間にコンクリート片の剥離・剥落の報告事例がある高架橋 C・D (ともに経年37年) とした。また、比較対象として、2. 基本調査同様、これまでにコンクリート片の剥離・剥落の報告事例が無く、社内の検査記録で健全と判定されている高架橋 E・F (ともに経年37年) も調査対象構造物とした。

表-4 調査部位と測点数

●構造体単位

部位	測点色	測点数
高欄	■	4 測定断面×2 測点=8 測点
地覆	■	4 測定断面×1 測点=4 測点
張出スラブ	■	4 測定断面×1 測点=4 測点

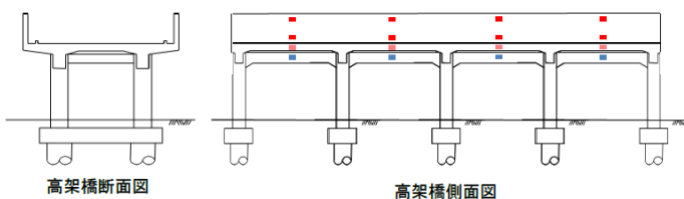
●建設ブロック単位 (10 構造体の高架橋の場合)

部位	測点色	測点数
高欄	■	10 測定断面×2 測点=20 測点
地覆	■	10 測定断面×1 測点=10 測点
張出スラブ	■	10 測定断面×1 測点=10 測点

(2)調査部位

調査部位は、2. 基本調査より調査項目の優先度として高いと判定した高欄、地覆、張出スラブである。調査部位と測点を表-4と図-4に示す。今回は、高架橋の延長方向に対する傾向の分析を目的としたいことから、構造体単位では4径間の構造体に4つの測点断面(3径間は3つの測点断面となる)を設け、建設ブロック単位では1構造体の2径間目の中心部を測点断面に設定することにした。また、高欄は上部と下部で鉄筋の密度が異なることから測点を2測点設けることにした。

●構造体単位



●建設ブロック単位

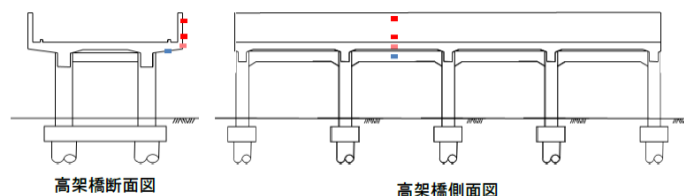


図-4 測点の概略図

(3)調査項目および方法

a)鉄筋かぶり

2. 基本調査と同様とした。

b)中性化深さ (ドリル法)

中性化深さの測定は、φ10mm のドリルによる削孔粉を、フェノールフタレイン1%溶液を噴霧したろ紙で受け、ピンク色に発色した時点で削孔を中止してその深さをノギスで計測した。合計3孔の平均値を調査部位の中性化深さ⁴⁾とした。なお、中性化深さの測定箇所は、構造体単位の調査の際に高欄で実施した。

c)変状の有無

2. 基本調査と同様とした。

3.2 調査結果と考察

(1)構造体および建設ブロック単位の鉄筋かぶり

構造体単位の鉄筋かぶりを図-5に、建設ブロッ

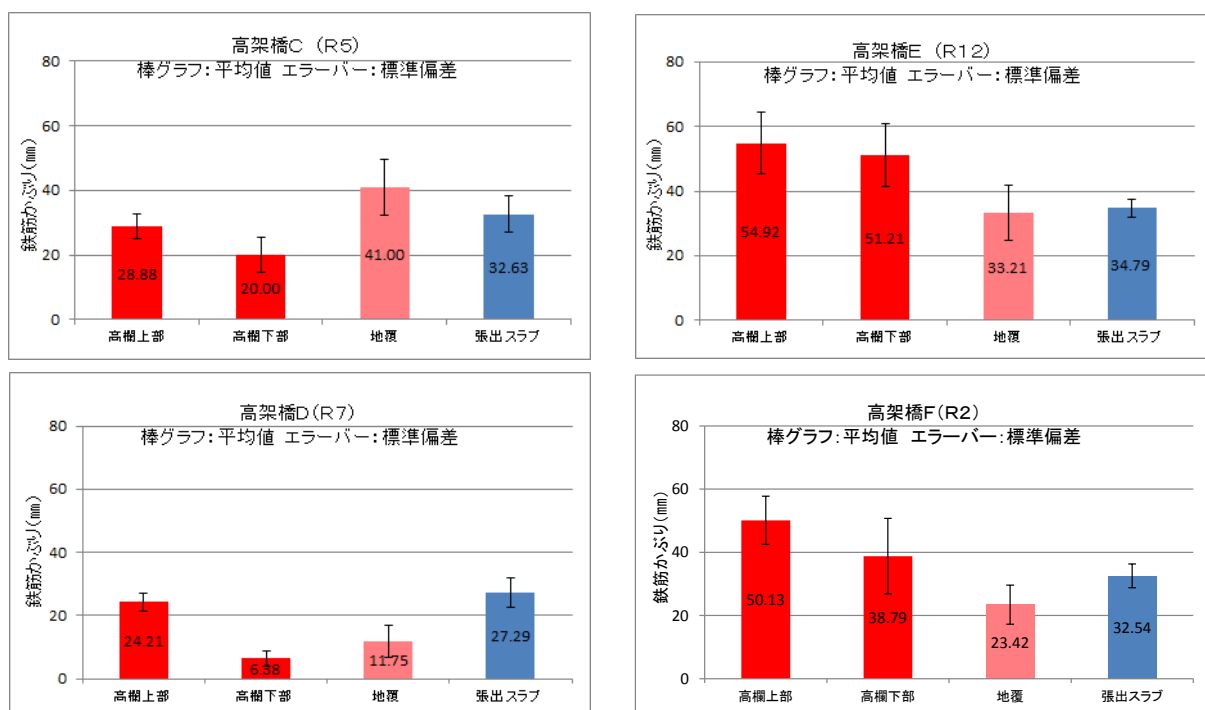


図-5 構造体単位の鉄筋かぶり
(高架橋 C・D: 変状有り, 高架橋 E・F: 変状無し)

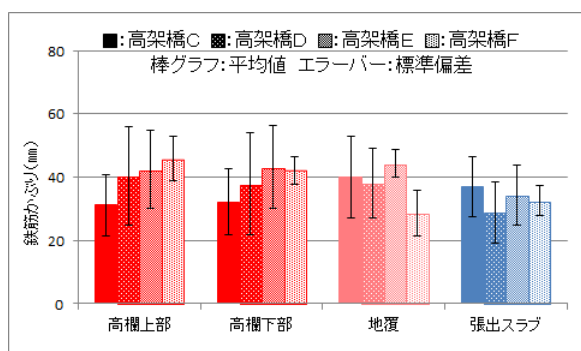


図-6 建設ブロック単位の鉄筋かぶり

ク単位の鉄筋かぶりを図-6に示す。過去に剥離・剥落の報告事例がある高架橋 C・D は、報告事例がない高架橋 E・F よりも鉄筋かぶりが薄いことが実測データから読み取れた。しかしながら、すべての部位でばらつきが大きいことがわかり、実測値の平均値と標準偏差のみで RC 構造物の健全性を評価することは困難であることがわかった。そのため、鉄筋かぶりによって構造物の健全性を評価するためには、最低でも 1 径間あたり 1 測点の頻度で鉄筋かぶりを実測し 1 径間単位の評価が必要であると考えられる。

同様に、建設ブロック単位でも、変状の有無による鉄筋かぶりの平均値および標準偏差に有意性はなく、評価する対象構造物の範囲を広げること傾向はさらに弱まるものと推察した。

(2)鉄筋かぶりと変状の有無との関係

高架橋 C と高架橋 D の鉄筋かぶりと変状の有無の関係を図-7に示す。2. 基本調査と同様、鉄筋

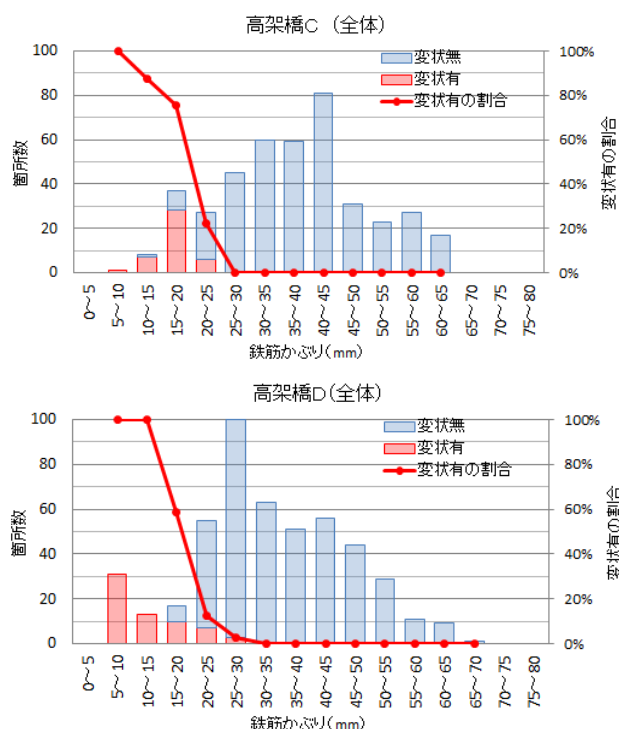


図-7 鉄筋かぶりと変状の有無

かぶりが 30mm 以下で変状が確認され、25mm 以下で変状発生割合が高いことが示された。これにより、鉄筋かぶりの実測値が構造物の健全性を評価する上で重要なデータであることが実証できた。

図-8に示す部位ごとの鉄筋かぶりと変状の有無の関係では、20mm～30mm の範囲に示す変状有の割合より、地覆よりも高欄下部の方が剥離・剥落などの変状が発生する割合が高いことが示され

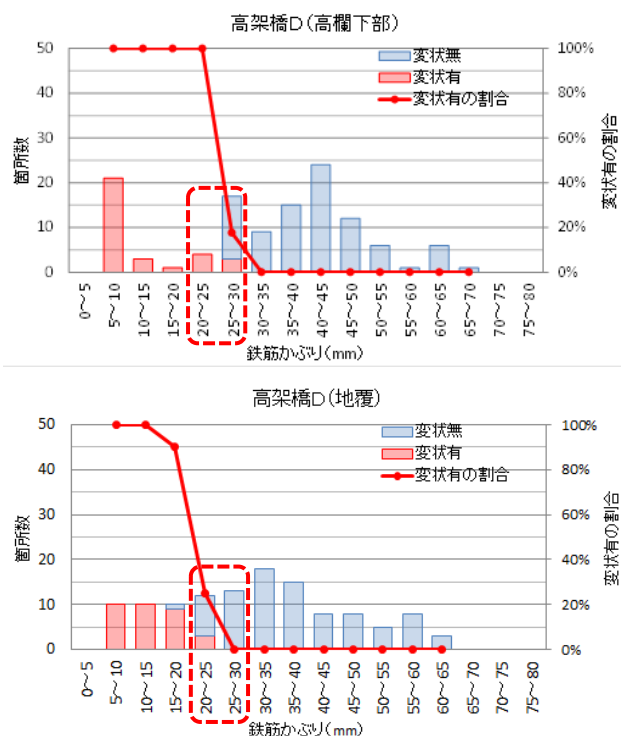


図-8 部位ごとの鉄筋かぶりと変状の有無

た。この傾向が生じた要因として、以下のことが考えられた。a):地覆と高欄の配合条件(強度)の違いによって生じたコンクリートの品質(緻密さ)の差によるものと推察され、鉄筋腐食に不可欠な水の供給が地覆に比べ高欄の方が容易であったこと。b):高欄下部は、構造上、地覆から延びる鉄筋との継手部分であり、かつ高欄の基部となるため設計段階で鉄筋の密度が高まる。そのため、鉄筋工や型枠工による施工の“しにくさ”からかぶり不足が生じやすい部位である可能性が高い。高欄下部は、鉄筋腐食による変状発生リスク管理上、実態を把握すべき最優先の部位と推察できる。

(3)鉄筋かぶりと中性化深さとの関係

鉄筋かぶりと中性化深さの関係について変状の有無との相関を図-9に示す。中性化深さが進行してなくても鉄筋かぶりが小さければ変状は生じ(a点)、反対に中性化が進んでも十分な鉄筋かぶりが確保されていれば変状は生じない(b点)場合があることが示された。

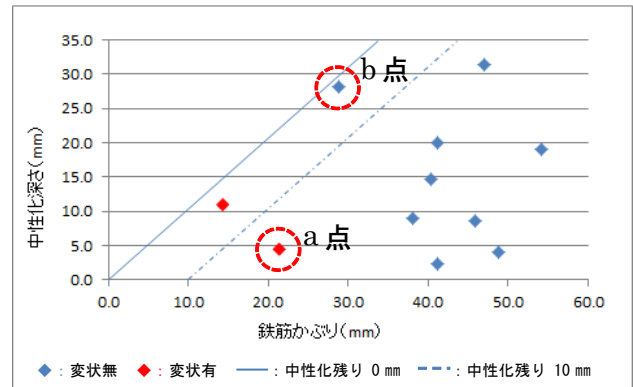
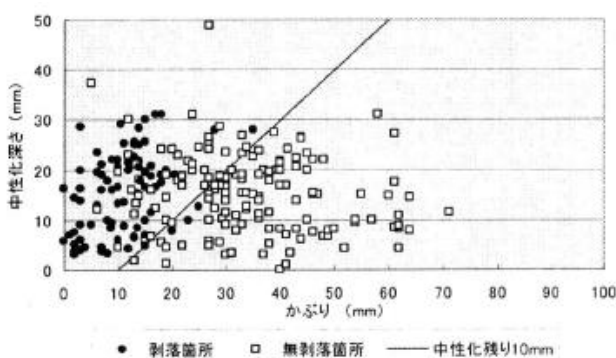
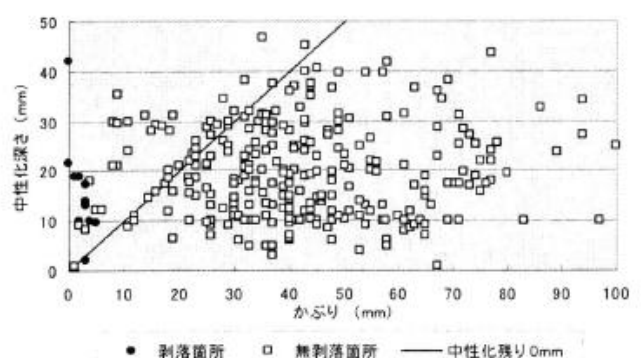


図-9 鉄筋かぶりと中性化深さとの関係

石橋、古谷らの研究³⁾では、図-10に示す通り、コンクリート片の剥落と中性化残り(実測の鉄筋かぶりと中性化深さの差)、雨水との関係を示している。これは、雨水等の影響を受ける箇所ではおおむね中性化残り 10mm でコンクリート片の剥落が生じており、一方、雨水等の影響を受けない箇所では中性化深さが鉄筋位置まで到達し、かつかぶりが 5mm 未満と極端に小さい箇所のみで、コンクリート片の剥落が生じているという報告である。しかしながら、この図を別の視点から見ると、雨水等の影響を受けない箇所はもとより、雨水等の影響を受ける箇所でも、中性化が相当に進んでいるにもかかわらず剥落が生じていない箇所も相当数存在していることが分かり、注目すべき事実で



(a) 雨水等の影響を受ける箇所



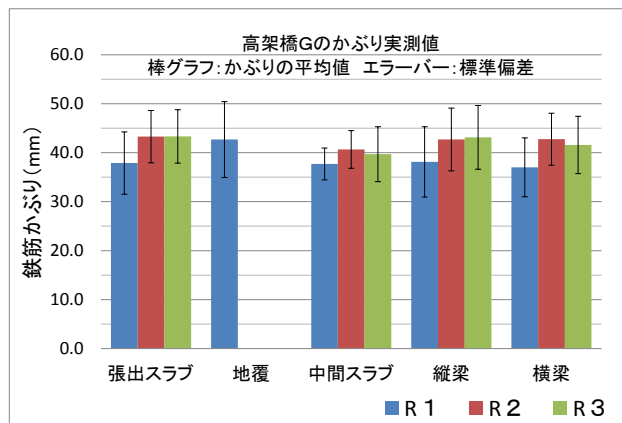
(b) 雨水等の影響を受けない箇所

図-10 コンクリート片の剥落と中性化残り、雨水等との関係³⁾

あるといえる。すなわち、中性化深さに基づく剥落判定の閾値よりも危険側の状況になっているにもかかわらず剥落が生じていない箇所も多く存在していることになる。このことは、RC 構造物の健全性を評価する上で、中性化深さを絶対視することは危険であり、場合によっては中性化深さの情報が攪乱因子となりうる可能性があると考え、本稿では中性化深さを評価要素とすることを見送ることとした。

4. 近年新設した RC 構造物の鉄筋かぶりの状況

JR 東日本では、2005 年 4 月の土木工事標準仕様書の改訂に伴い、型枠脱型後のコンクリート表面状態の検査の際に非破壊による鉄筋かぶりの実測を取り入れた。



図ー11 高架橋 G の鉄筋かぶり

近年、新設した高架橋 G (2014 年しゅん功) の鉄筋かぶりを図ー11 に示す。いずれの部位も鉄筋かぶりは検査合格値となる 25mm を満たしており、適正な鉄筋かぶりが確保されていることを確認している。また、供用中の現在においても、鉄筋かぶりの不足に起因する亀裂や浮きなどの変状が生じたという報告はない。

5. まとめ

鉄筋かぶりによって鉄道高架橋の健全性を評価するために、鉄筋かぶりと中性化深さの実態と変状発生との相関について検討を行った。その結果をまとめると以下の通りとなる。

- (1) 鉄筋かぶりと変状箇所数の関係は、鉄筋かぶりが 25mm 未満の箇所で変状が生じており、鉄筋かぶりが 25mm 以上の箇所ではほとんど見られない。
- (2) 鉄筋かぶりは、コンクリート片の剥離・剥落をはじめとする変状に対して極めて相関が高く、精度の高い健全性の評価が可能であることが確認できた。
- (3) 鉄筋かぶりは、高架橋ごとにばらつきが大きく、また同一構造体、同一建設ブロックにおいてもばらつきが大きいことがわかった。
- (4) 中性化深さは、剥落判定の閾値よりも危険側であっても剥落が生じない箇所になる場合が多いことから、変状との相関やその有意性について再確認する必要がある。
- (5) 2005 年 4 月以降に新設された RC 構造物は、非破壊によるコンクリート表面状態の検査の導入によって、適正な鉄筋かぶりが確保されている。

参考文献

- 1) 宇野匡和, 曾我部正道, 長谷川淳史, 仁平達也: 各種鉄筋探査機の鉄道構造物への適用性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書, 施工編, 2012 年制定
- 3) 石橋忠良, 古谷時春, 浜崎直行, 鈴木博人: 高架橋等からのコンクリート片剥落に関する研究, 土木学会論文集 No.711/V-56, 2002.8
- 4) 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, 平成 19 年 1 月
- 5) 岸谷孝一, 西澤紀昭, 他編: コンクリート構造物の耐久性シリーズ 中性化, 技報堂出版, 1986.4
- 6) 斉藤俊樹, 石橋忠良, 米内昭夫: 寒冷地の既設 RC 橋梁構造物の劣化度調査, コンクリート工学年次論文報告書, vol.11, No.1, 1989