

報告 鉄筋腐食によるかぶりコンクリート剥落の実態調査

轟 俊太郎^{*1}・曾我部正道^{*2}・谷村幸裕^{*3}・松橋宏治^{*4}

要旨：経年 30 年程度の鉄道高架橋に対して調査を実施し、ひび割れと剥離剥落形態、鉄筋の腐食状態を確認した。また、かぶりと剥落幅の関係、かぶりと剥落角度の関係、ひび割れ発生と剥離剥落発生の閾値について基礎的な検討を行なった。本調査では、剥落幅は、概ね 180mm 以下であった。また、かぶりが大きくなると剥落角度が小さくなる傾向を示し、剥落角度は、概ね 60 度～80 度であった。調査時点では、かぶり c と鉄筋径 d の比 c/d が 3.0 以下となると、剥離剥落の発生率が大きくなる傾向が見られた。

キーワード：鉄筋腐食、剥離剥落形態、剥落幅、剥落角度、ひび割れ発生と剥離剥落発生の閾値

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)構造物の劣化現象の一つとして、塩害や中性化に起因する鉄筋腐食が挙げられる。鉄筋腐食による生成物の膨張は、コンクリート表面のひび割れやかぶりコンクリートの剥離剥落を生じさせる。特にかぶりコンクリートの剥離剥落は、部材耐力の低下や美観上の問題のみならず、第三者被害を及ぼす可能性があるため、的確な対処が求められている。そのため、かぶりコンクリートの剥離剥落の発生機構の解明¹⁾やFEM解析に基づく剥離剥落発生時期の予測^{2),3)}など様々な研究がなされている。しかし、実構造物を対象とした現地調査データから剥離剥落形態に関して論じた研究^{1),4),5)}は少ないのが実状である。剥離剥落のメカニズムの解明には、室内実験や短期暴露等^{2),3)}から得られた知見と共に、実構造物を対象とした実績データとの比較検討が重要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 30 年程度の鉄道 RC ラーメン高架橋に対して調査を実施し、ひび割れや剥離剥落形態の観察を行い、健全、ひび割れ、剥離と判定された箇所において、鉄筋のはつり出しを実施して、鉄筋の腐食状態を確認した。また、既往の研究^{1),5)}からかぶりと剥落幅もしくは剥落角度に関係性があることが報告されている。また、FEM 解析等の基礎データの収集を目的として、かぶりと剥落幅の関係、かぶりと剥落角度の関係、ひび割れ発生と剥離剥落発生の閾値について検討を行なった。

2. 調査概要

2.1 調査対象構造物

経年が 30 年程度経過した RC 高架橋(A, B, C)を対象とした。以下に、各ラーメン高架橋の概要を示す。

(1) A 高架橋及び B 高架橋

表 - 1 に高架橋諸元を示す。調査対象部位は、高欄である。高欄内部(中性化の濃縮を受けていないと考えられる表面から 70mm ~ 100mm の深さ)から 1.21 ~ 2.21kg/m³(データ数: 50 箇所)の塩化物イオンが検出された。A 及び B 高架橋は、離岸距離が 2.5km の位置にあることから、飛来塩分はないと推定され⁶⁾、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、

表 - 1 高架橋諸元

構造物名称	竣工年	経年	調査数量	調査部位
A高架橋	1979年	27年	13枚	高欄
B高架橋	1980年	26年	6枚	高欄
C高架橋	1973年	36年	4本	柱

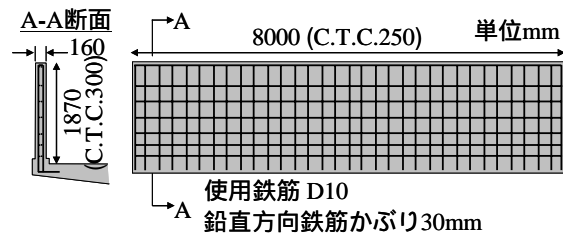


図 - 1 A 及び B 高架橋の高欄配筋図

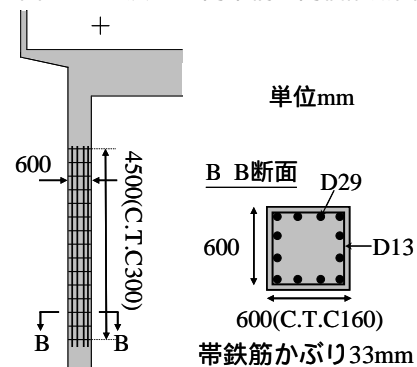


図 - 2 C 高架橋の柱配筋図

*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 研究員 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 主任研究員 博(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(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)

6.7mm～13.7mm(データ数:50箇所)であった。1.2kg/m³以上の塩化物イオンが含有していることから、A及びB高架橋の劣化要因は内的塩害もしくは中性化と内的塩害の複合劣化と推定された。

図-1にA及びB高架橋の高欄配筋図を示す。高欄の収縮目地間の長さは標準8000mmで、高さは1700～1900mm、幅は160mmである。この8000mm間隔で区切られた高欄を1枚と定義した。使用鉄筋は鉛直方向鉄筋、水平方向鉄筋ともにD10である。鉛直方向鉄筋の配置間隔は250mm、水平方向鉄筋の配置間隔は300mmである。鉛直方向鉄筋が外側に配置されており、鉛直方向鉄筋かぶりりは30mmである。既設鉄道高架橋のRC高欄としては最も一般的な構造である。

(2) C高架橋

表-1にC高架橋の諸元を示す。対象部位は、柱である。柱内部(中性化の濃縮を受けていないと考えられる表面から80mm～100mmの深さ)から0.16～0.30kg/m³(データ数:3箇所)の塩化物イオンが検出された。データ数は少ないものの、内的塩害の影響は小さいと考えられる。また、飛来塩分が少ないと考えられる地域に位置し、且つ離岸距離は1.0km以上であることから、飛来塩分の影響は小さいと考えられる⁶⁾。中性化深さは、8.4～31.6mm(データ数:17箇所)であった。以上より、C高架橋の劣化要因は、かぶり不足または中性化であると推定された。図-2にC高架橋の柱配筋図を示す。鉄筋径は、軸方向鉄筋D29、帯鉄筋D13である。軸方向鉄筋間隔は160mm、帯鉄筋間隔は300mmである。帯鉄筋かぶりりは33mmである。

2.2 調査方法

(1) かぶり

図-3に鉛直方向鉄筋かぶりりと剥落幅の算出方法を示す。鉄筋のかぶりりは、電磁誘導法を用いて測定した。高欄では、鉛直方向鉄筋について高さ方向に3側線のかぶりり測定を実施した。図-3に示すように、これら3側線(図-3中の実線)の測定結果から100mmピッチで放物線補間によって、測定箇所以外の鉛直方向鉄筋かぶりりを算出した。図-4に帯鉄筋かぶりりと剥落幅の算出方法を示す。柱では、2側線の帯鉄筋かぶりりを測定し、100mmピッチで実測箇所以外の帯鉄筋かぶりりを線形補間によって算出した。

(2) 剥落幅

図-3、図-4に示すように、100mmピッチで剥落幅を測定した。剥落幅は100mmピッチ内の剥落幅の最大値と最小値を計測し、それらの平均の値と定義した。なお、剥落は、かぶりりコンクリートが完全に剥がれ落ち、鉄筋が露出している箇所とした。また、剥離は、点検ハンマーによって、浮きと判定された箇所とした。

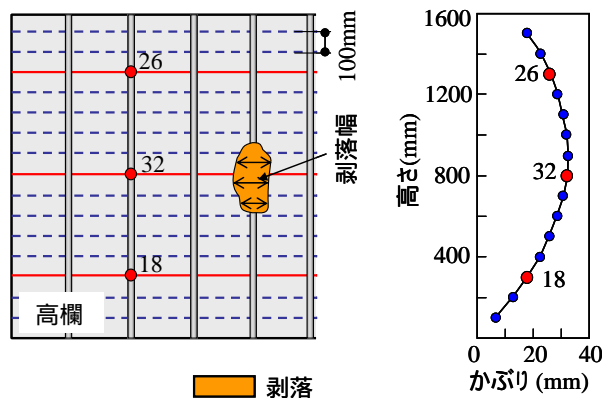


図-3 鉛直方向鉄筋かぶりりと剥落幅の算出

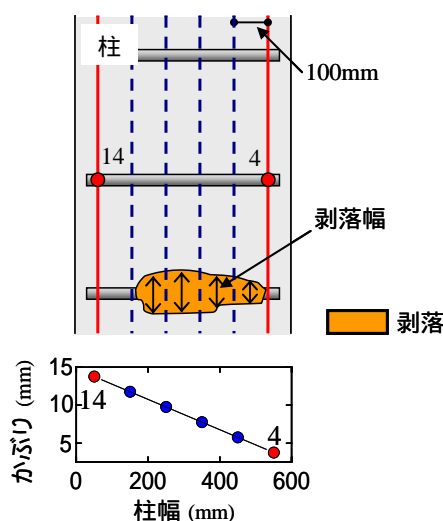


図-4 帯鉄筋かぶりりと剥落幅の算出



写真-1 高欄上部(A及びB高架橋)



写真-2 高欄下部
(A及びB高架橋)



写真-3 ひび割れと剥離剥落
(A及びB高架橋)

(3) はつり出し

A 及び B 高架橋を対象として、健全、ひび割れ、剥離箇所を鉄筋はつり出しを実施した。

3. 調査結果

3.1 ひび割れと剥離剥落形態

写真 - 1 に高欄上部の剥離剥落箇所、写真 - 2 に高欄下部の剥離剥落箇所、写真 - 3 にひび割れと剥離剥落箇所を示す。A 及び B 高架橋を対象とした現地目視調査により、高欄上部及び高欄下部に剥離剥落が多数観察された。高欄上部の剥離剥落は、コンクリート打設時における鉄筋のずれによるかぶり不足が原因であると考えられる。また、高欄下部の剥離剥落原因は、型枠設置のずれによるかぶり不足であると考えられる。写真 - 3 に示すように、かぶりが小さい箇所では剥離剥落が生じ、かぶりが大きくなるとひび割れになるような傾向にある。発生しているひび割れが、腐食ひび割れであるか乾燥収縮によるものかは判定できなかった。しかし、剥離剥落箇所先端から連続してひび割れとなるパターンが多数観察されたことから、腐食によるひび割れの可能性が大きいと推察した。鉛直方向鉄筋、水平方向鉄筋ともに D10 を使用していることから、剥離剥落箇所は全て外側に配置されている鉛直方向鉄筋部で生じていた。

写真 - 4 に柱の剥離剥落箇所を示した。帯鉄筋部でコーン状の剥離剥落が生じていた。剥離剥落箇所先端から連続してひび割れとなるパターンは観察できなかった。

3.2 鉄筋の腐食状態

図 - 5 に鉄筋はつり出しによる鉄筋腐食度の確認結果を示す。鉄筋腐食度の判定基準は、既往の文献⁷⁾に従った。健全 14 箇所、ひび割れ 10 箇所、剥離 4 箇所の鉄筋をはつり出した。図 - 5 より、ひび割れ及び剥離剥落箇所では腐食度 以上となっていることがわかる。また、コンクリート表面は健全であっても内部で腐食が進んでいるものが 1/3 以上程度存在することがわかった。

写真 - 5 に目視により、ひび割れと判定された箇所の鉄筋腐食の例を示す。かぶりコンクリート側で主に鉄筋が腐食している傾向が観察された。縦に配筋される鉛直方向鉄筋部での剥離剥落であったため、鉄筋腐食に及ぼすブリーディングの影響はないものと考えられる。そのため、コンクリート表面に近い方の鉄筋表面は、ひび割れ面から水や酸素といった外部からの劣化因子が浸入しやすいため、腐食の進行が早いと考えられる。

写真 - 6 にひび割れと剥離が鉄筋材軸方向に連続して発生している箇所の鉄筋をはつり出した例を示す。剥離部ではコンクリート表面側に集中して断面欠損を伴う腐食が確認された。一方、ひび割れ部では剥離箇所に近い位置で腐食が観察されたものの、剥離箇所から離れた



写真 - 4 柱 (C 高架橋)

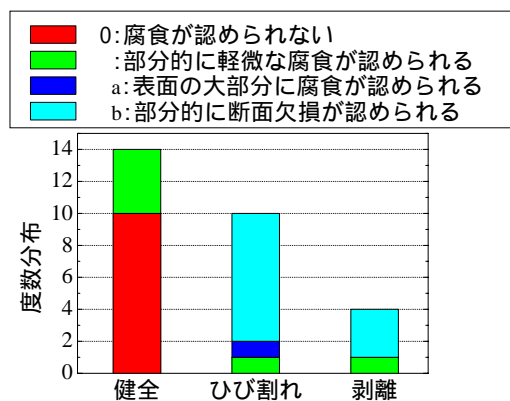


図 - 5 鉄筋はつり出しによる鉄筋腐食度



写真 - 5 ひび割れ箇所での鉄筋はつり出し

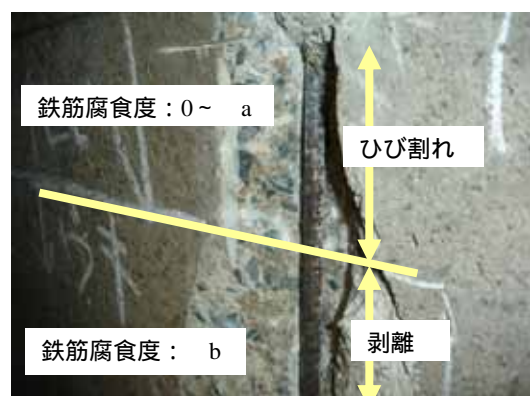


写真 - 6 ひび割れ及び剥離箇所での鉄筋はつり出し

位置（写真上部）ではひび割れが発生していたにも関わらず、腐食がほとんど進行せず健全な状態であった。

写真 - 7 に点検ハンマーにより、剥離と判定された箇所の鉄筋腐食の例を示す。コンクリート表面側に集中して全体的に腐食が進行していた。

健全と判定された箇所の鉄筋腐食は、部分的な発生であったため、定性的に腐食箇所を把握できなかった。

鉄筋腐食量の定量化には至っていないが、ひび割れ箇所及び剥離箇所において、鉄筋の腐食はコンクリート表面側に集中して発生している状態が観察された。



写真 - 7 剥離箇所での鉄筋はつり出し

3.3 かぶりと剥落幅の関係

図 - 6 に A 及び B 高架橋におけるかぶりと剥落幅の関係を示す。かぶり c を鉄筋径 で無次元化した c/ϕ を横軸とした。縦軸の剥落幅 B は、剥離剥落の原因となるひび割れがコンクリート表面に到達した箇所を鉄筋と直行した線上で 2 箇所選択し、結んだ幅とした。かぶりと剥落幅についての相関は見られず、ばらつきがあった。高欄毎のかぶりと剥落幅の関係を見るために、例として、高欄 RB6 (高架橋 B の起点方から 6 枚目) を図中に示した。同一高欄においても、ばらつきがあった。

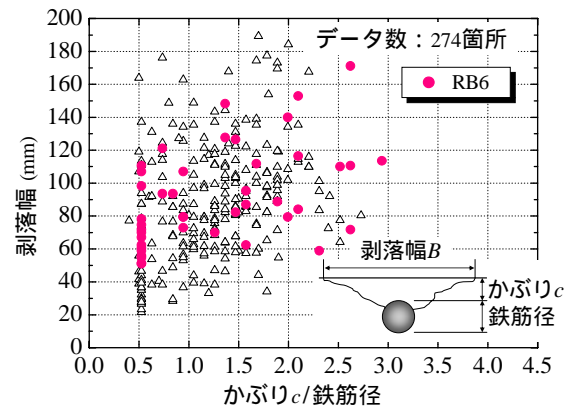


図 - 6 かぶりと剥落幅の関係 (A 及び B 高架橋)

図 - 7 に C 高架橋におけるかぶりと剥落幅の関係を示す。A 及び B 高架橋と比べ、かぶりが大きくなるほど剥落幅が大きくなる傾向にあった。しかし、A 及び B 高架橋と比べデータ数が少ないため、継続的にデータ収集を行い、検討を進めていく必要がある。

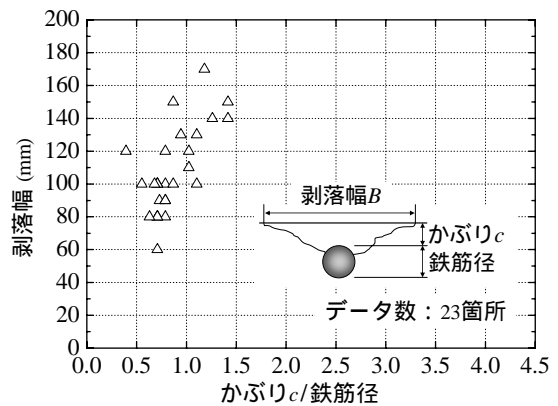


図 - 7 かぶりと剥落幅の関係 (C 高架橋)

本調査において 剥落幅は概ね 180mm 以下であった。

3.4 かぶりと剥落角度の関係

図 - 8 及び図 - 9 にかぶりと剥落角度の関係を示した。横軸は、かぶり c を鉄筋径 で無次元化した c/ϕ とした。縦軸の剥落角度 θ は、図中の位置とし、かぶり c と剥落幅 B から以下のように定義した。

$$\tan \theta = \frac{B - \phi}{2 \cdot c} \quad (1)$$

高欄 RA5 (高架橋 A の起点方から 5 枚目) 及び高欄

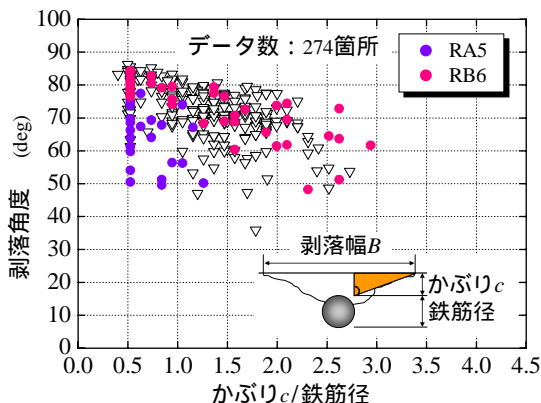


図 - 8 かぶりと剥落角度の関係 (A 及び B 高架橋)

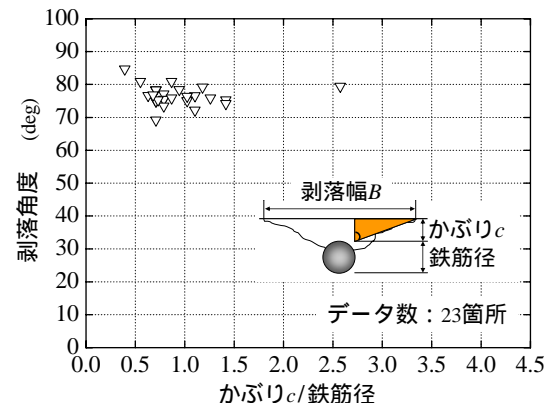


図 - 9 かぶりと剥落角度の関係 (C 高架橋)

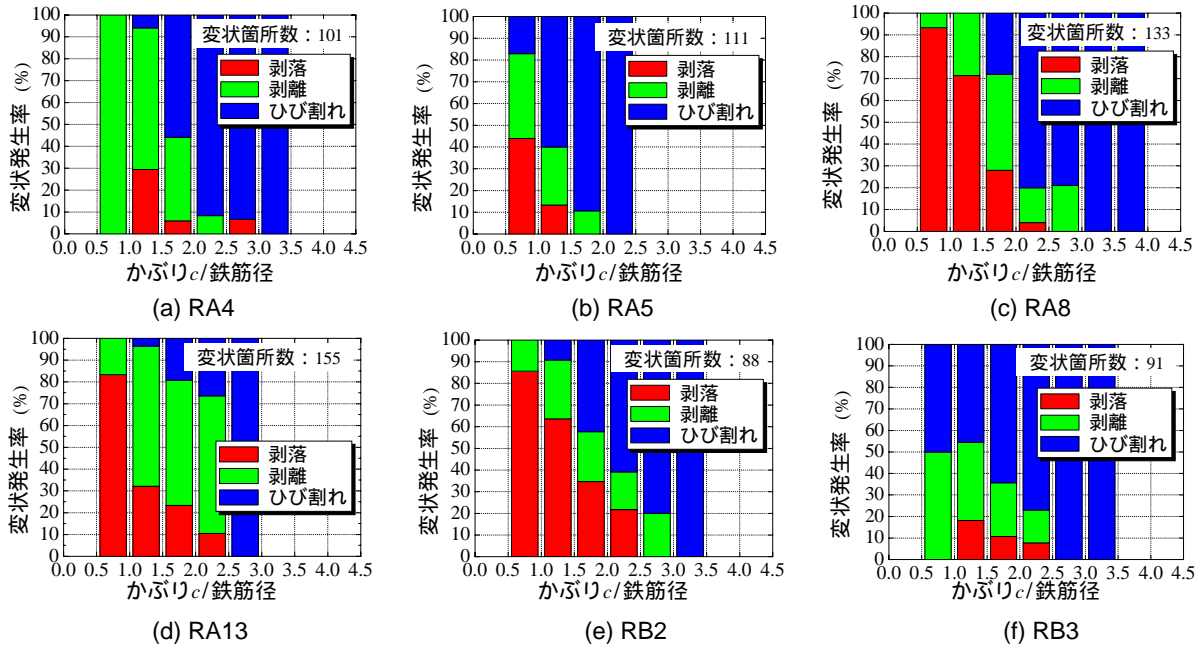


図 - 10 変状発生率

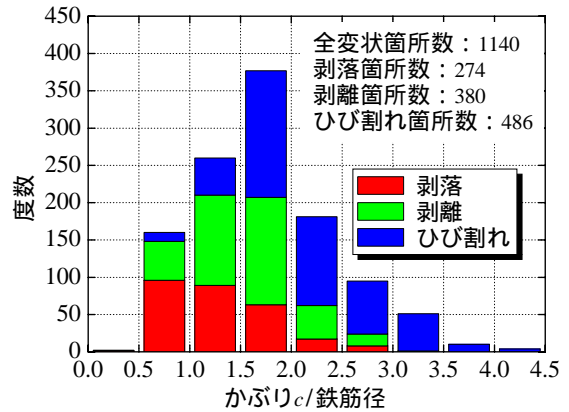
RB6 (高架橋 B の起点方から 6 枚目) を図中に示した。高欄 RA5 (高架橋 A の起点方から 5 枚目) のようにばらつきが大きいものもあった。しかし、高欄 RB6 (高架橋 B の起点方から 6 枚目) では、かぶりが大きくなると剥落角度が小さくなる傾向がみられた。概ねかぶりが大きくなると剥落角度が小さくなる傾向を示した。剥落角度は概ね 60 度 ~ 80 度であった。

3.5 変状の発生割合

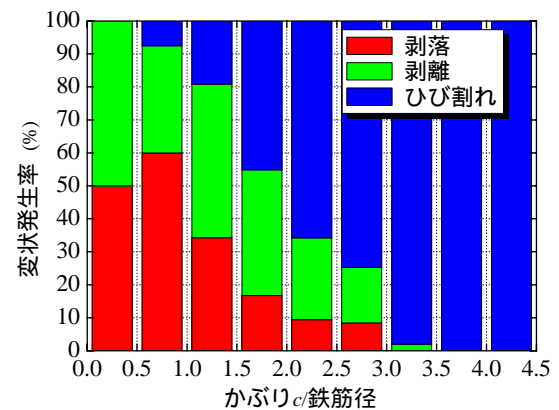
図 - 10 に変状箇所数が多い順に、高架橋 A の 4 高欄 RA4, RA5, RA8, RA13 (例, RA4: 高架橋 A の起点方から 4 枚目), 高架橋 B の 2 高欄 RB2, RB3 (例, RB2: 高架橋 B の起点方から 2 枚目) の変状発生率を示した。なお、 c/d を 0.5 毎に 1 区間とし、1 区間において変状の発生率を 100% として表示した。また、図 - 11 にデータ数の多い A 及び B 高架橋を対象とし、全高欄の変状箇所を集計した結果を示した。上図は変状の度数分布、下図は変状発生率である。図 - 10 をみると、全ての高欄で、かぶりが薄い箇所では剥離剥落が発生している率が大きく、かぶりが厚くなる毎にひび割れが発生する率が大きくなる傾向が見られた。全高欄の変状箇所を集計した図 - 11 から、その傾向が見られた。ひび割れと剥離剥落の発生関係に明確な閾値は見られなかった。

3.6 ひび割れ発生と剥離剥落発生の閾値

図 - 12 に示すように、堤、松島¹⁾は、剥離剥落の原因となるひび割れ (以降、剥離ひび割れ) と鉄筋直上に発生するひび割れ (以降、鉄筋軸ひび割れ) の発生関係をかぶり厚さの相違によって生じる応力集中問題として捉え、弾性論からその発生関係を導いている。そこでは、かぶり c と鉄筋径 d で表される $(2c+d)/d$ が 3.0 以上



(a) 変状の度数分布



(b) 変状発生率

図 - 11 変状の度数分布と変状発生率 (A 及び B 高架橋)

の場合 ($c/d > 1.0$) には鉄筋軸ひび割れ、3.0 以下の場合 ($c/d < 1.0$) には剥離ひび割れが発生するとしている。また、Browne⁵⁾は、 $c/d = 1.5$ を閾値として、 $c/d > 1.5$ の

時は鉄筋軸ひび割れ, $0.5 < c / < 1.5$ の時は剥離ひび割れとしている。一方で, 本調査では, 図 - 6, 図 - 7 をみると, A 及び B 高架橋では, $c /$ が 3.0 以下で, かぶりコンクリートの剥落が生じている結果であった。また, C 高架橋においては, $c /$ が 1.5 以下で, 剥落が発生する結果であった。既往の研究^{1),5)}と比べ, 本調査結果では $c /$ が大きくなった。つまり, よりかぶりが厚い箇所では剥落が起こっていた。また, A 及び B 高架橋の全高欄の変状箇所を集計した図 - 11 をみると, $c / = 3.0$ の値は, ひび割れ発生と剥離剥落発生との閾値とは言い難い。よって, 本調査では, A 及び B 高架橋で $c /$ が 3.0 以下, C 高架橋で $c /$ が 1.5 以下で剥離剥落が発生していたが, ひび割れ発生と剥離剥落発生との閾値とは考えにくく, 経年が進むにつれ, よりかぶりが大きい箇所では剥離剥落が発生する可能性がある。既往研究^{1),5)}と本調査結果に違いが生じた原因としては, 以下のようなものが推定される。

(1) 直行鉄筋の拘束による応力状態の違い

堤, 松島ら¹⁾は, 弾性論に基づき導出したひび割れ発生と剥離剥落発生との閾値 $c / = 1.0$ を電食実験等により検証している。実験では, 単一の鉄筋を 600mm × 600mm × 400mm のコンクリート断面に埋め込み, ひび割れパターンを整理している。これらの研究と実構造物との違いについては, 当該腐食鉄筋の背面において直行する鉄筋が挙げられる。堤, 松島らの実験¹⁾では, コンクリート表面側から腐食鉄筋の背面側にも貫通するひび割れが観察されている。一方で, 荒木³⁾らは, 鉄道高架橋床版部を想定して配筋を行った供試体を作成し, 剥離剥落形態を分析している。荒木³⁾らの論文において, 腐食鉄筋の背面に直行して配置される鉄筋が, 背面側に進展するひび割れを拘束することによって, コンクリート表面側にひび割れの進展が集中する可能性を指摘している。荒木³⁾らの研究においては, $c / = 2.0$ においても剥離剥落が生じている。

(2) 鉄筋の局所的な腐食の影響

既往研究^{1),3)}では, 鉄筋腐食は鉄筋周囲に一様な内圧をコンクリートに与えるものと仮定している。一方で, 写真 - 5 を始めとして, ひび割れ箇所の鉄筋腐食はコンクリート表面側に集中していた。鉄筋の腐食により鉄筋軸ひび割れが生じ, そこから劣化因子が浸入して腐食が局所化したのか, 或いは, 収縮で当初よりひび割れが生じており, 劣化因子の浸入と腐食の局所化が進んだものかは定かではない。いずれにしても剥落が生じた時点では, 鉄筋の腐食は一様ではなく, 表面側に腐食生成物が集中することによって, コンクリート表面側に内圧が生じていたと推察される。これは写真 - 6, 写真 - 7 を始めとするひび割れ及び剥離箇所の鉄筋腐食状況からも裏付けられる。

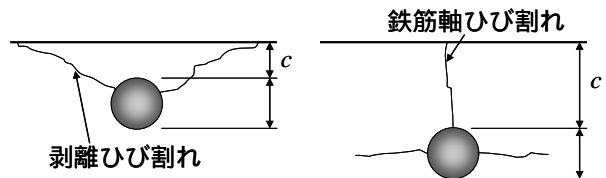


図 - 12 ひび割れパターン¹⁾

4. まとめ

経年 30 年程度の鉄道 RC ラーメン高架橋に対して現地調査を実施し, ひび割れと剥離剥落形態, 鉄筋の腐食状態, かぶりと剥落幅の関係, かぶりと剥落角度の関係, ひび割れ発生と剥離剥落発生との閾値について基礎的な検討を行なった。本調査で得られた結果を以下に示す。

- (1) ひび割れ箇所及び剥離箇所の鉄筋腐食は, コンクリート表面側に集中して進行していた。
- (2) 本調査では, 剥落幅は概ね 180mm 以下であった。
- (3) かぶりが大きくなると剥落角度が小さくなる傾向を示し, 剥落角度は概ね 60 度 ~ 80 度であった。
- (4) 調査時点では, 剥離剥落は, A 及び B 高架橋で $c /$ が 3.0 以下, C 高架橋で $c /$ が 1.5 以下となると, 剥離剥落の発生率が大きくなる傾向が見られた。

今後, 実構造物に対して現地調査を継続的に実施し, 調査結果を基に FEM 解析による検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 堤知明, 松島学, 村上祐治, 関博: 腐食ひび割れの発生機構に関する研究, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.159-166, 1996.2
- 2) K.Yokozeki, K.Motohashi, K.Okada and T.Tsuzumi: A Rational Model to Predict the Service Life of RC Structures in Marine Environment, Forth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, pp.777-782, 1997
- 3) 荒木弘祐, 服部篤史, 宮川豊章: 鉄筋の腐食膨張によるかぶりコンクリートの剥離現象とその予測, 土木学会論文集, No.802/V69, pp.209-222, 2005.11
- 4) 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調査研究, 土木学会論文集, No.711/V-56, pp.125-134, 2002.8
- 5) R.D.Browne: Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection, and Repair of Offshore and Coastal Structures, ACI SP-65, pp.169-204, 1980.8
- 6) (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 - コンクリート構造物, 丸善, 2004.4
- 7) 山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会: 山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会報告書, 2000.7