

論文 腐食ひび割れが誘発したかぶりコンクリートの剥離・剥落に対する安全余裕度に関する研究

藤井 智大*1・大下 英吉*2

要旨：現在の維持管理の分野において、鉄筋腐食の生じたコンクリート構造物に対する精度の良い劣化予測手法が確立されていない。このことから、維持管理において実構造物における鉄筋径等のパラメータや腐食ひび割れ性状といった外部変状から構造物の耐荷力について把握する手法の確立は急務である。そこで、本研究ではかぶりコンクリートの剥離・剥落に対するリスクを評価することを目的とし、実構造物を模擬し、試験体を作成し付着試験を行うことで、かぶりコンクリート部分の耐荷力に関する検討を行った。検討を行う際に、実験で得られた最大荷重と付着面積を考慮することで、耐荷力の定性的な評価を可能とした。

キーワード：鉄筋腐食、腐食ひび割れ、腐食膨張圧、ひび割れ性状、剥離・剥落

1. はじめに

我が国では戦後に建設されたコンクリート構造物が経年劣化し、構造性能や耐久性能の大幅な低下が深刻な問題となっている。性能低下の要因は多岐にわたるが、中でも特に塩害や中性化による鉄筋腐食は、鉄筋断面積の減少およびコンクリート内部でひび割れの進展を引き起こす要因である。鉄筋腐食による鉄筋断面積の減少に伴い、構造物の耐荷力が低下することで構造性能が低下する。また、鉄筋の腐食膨張圧によって鉄筋周辺のコンクリートに引張応力が生じ、かぶりコンクリート部分に腐食ひび割れが発生、進展する。これにより、コンクリートの剥離・剥落が発生し、コンクリート落下事故などの第三者被害が生じる。このような事故を未然に防ぐために、定期的な点検に加え、劣化予測手法の確立が急務である。

このような背景から、鉄筋腐食によるかぶりコンクリートの剥離・剥落について数多くの研究が行われている。既往の実験的研究¹⁾では鉄筋腐食膨張圧をモデル化した実験を行い、腐食膨張圧や見かけ上の鉄筋半径の増加量を把握するとともに、かぶりや腐食長さ両者に与える影響について検討を行っている。これにより、剥離に至る鉄筋半径の変化量や腐食膨張圧は、かぶりに正比例することや、腐食長さと指数関数の関係があることが明らかになった。また、既往の解析的研究^{2), 3)}では腐食ひび割れに関する一連の挙動をひび割れが表面に到達する以前を円筒理論で、以後を梁理論と区別することで鉄筋の腐食に伴うコンクリートへのひび割れ進展挙動モデルを構築し、実験結果と比較を行うことでその適用性の検討を行った。これにより、腐食ひび割れから拘束力および腐食率の予測、コンクリート内部でのひび割れ進展距離の算出を可能とするモデルの構築を可能とした。このように剥離・剥落のメカニズムに関して検討を行っている

ものはあるが、実構造物の様々なパラメータからかぶりコンクリート部分の剥離・剥落に対する安全度の検討を行っているものはない。また、コンクリートの健全度評価に際して、腐食ひび割れ幅・長さに基づいているもの^{4), 5), 6)}はあるが、腐食ひび割れの進展モード(以下、腐食ひび割れモードと称す)を特に評価したものはなく、ある一定の幅以上のひび割れの累計長や密度をもって評価されているのが実情である。

そこで本研究では、実構造物における RC 床板を模擬した 10 種類の試験体を作成し、付着試験を行い、得られた結果とパラメータから安全余裕度に関する検討を行うことで、剥離・剥落に対するリスクの評価方法の検討を図る。試験体のパラメータとして、鉄筋腐食率、鉄筋径、かぶり厚さ、水セメント比を用いた。これによりパラメータ毎の関係性から、残存付着強度の評価を行うとともに、腐食ひび割れモードに関連付けることにより安全余裕度の検討を行った。

このことはすなわち、今後の定期的な点検時に、実構造物の配筋状況などの設計条件や鉄筋腐食率、腐食ひび割れの進展状況が既知ならば、かぶりコンクリートの剥離・剥落に対するリスクの評価に通ずることになる。

2. 実験概要

本研究では、10 体の試験体を作成した。これを、電食

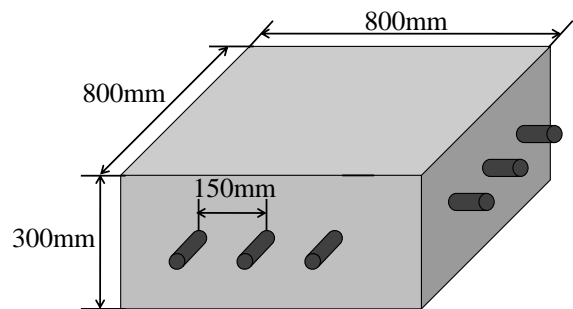


図-1 試験体概要

*1 中央大学 理工学研究科都市環境学専攻 (学生会員)

*2 中央大学 理工学部都市環境学科 教授 工博 (正会員)

試験により鉄筋を腐食させ、付着試験を行うことで最大荷重および付着面積を計測した。

2.1 試験体概要

試験体寸法は図-1 に示すように 800×800×300mm の試験体であり、配筋は格子鉄筋（鉄筋 3 本×3 本）とし、鉄筋間隔を 150mm 間隔とした。また、鉄筋は異形鉄筋を使用した。試験体は、打設後 24 時間で脱型した後に、7 日間湿布養生を行った。本研究では、設定した腐食率が早期に得られ、その制御が比較的容易な電食試験法を採用した。電食試験は図-2 に示すように、5%NaCl 水溶液を満たした水槽内に試験体を浸漬させ、鉄筋を陽極側、銅板を陰極側に接続し、既定の積算電流量に到達するまで通电した。目標腐食率は 10% と 20% とする。なお、本研究において、作成するコンクリートの配合は表-1 に示す通りである。練混ぜ水には鉄筋の腐食を促進させる

ために 5%NaCl 水溶液を使用し、セメントは早強セメントを使用した。電食試験後に、各試験体の腐食ひび割れ進展状況のスケッチを行った。また、本研究では実構造物を模擬し、実験におけるパラメータの選定を行った。パラメータは、鉄筋径、かぶり厚、水セメント比、腐食率の 4 パラメータをそれぞれ設定し、表-2 に示す 10 体の試験体を作成した。本研究においてかぶり厚さを決定するにあたり、既往の研究⁷⁾より腐食ひび割れモードは鉄筋径 ϕ と純かぶり c をパラメータとする式(1)に依存し、式(1)に示す $k < 3.0$ では図-3(a)に示す剥離ひび割れモード、 $k \geq 3.0$ では同図 (b)に示す軸方向ひび割れモードが生じることが報告されている。

$$k = \frac{2c + \phi}{\phi} \quad (1)$$

本研究では、かぶり厚さが 35mm、鉄筋径が 22mm で

表-1 コンクリート配合表

Gmax [mm]	W/C [%]	スランブ [cm]	Air [%]	単位量[kg/m ³]					
				W	C	S	G	混和剤	NaCl
20	40	12	6.0	165	414	667	1027	4.1	8.7
20	60	12	6.0	171	286	773	1010	2.9	9.0

表-2 試験体種類

	鉄筋径 [mm]	かぶり厚さ [mm]	W/C [%]	鉄筋腐食率 [%]	腐食ひび割れモード
D22(35)-W40-10	22	35	40	10	mode II
D22(50)-W40-10		50			mode I
D22(75)-W40-10		75			mode I
D16(35)-W40-10	16	35			mode II
D16(50)-W40-10		50			mode I
D16(75)-W40-10		75			mode III
D22(35)-W60-10	22	35	60		mode II
D22(50)-W60-10		50			mode I
D22(75)-W60-10		75			mode I
D22(50)-W40-20		50	40	20	mode I

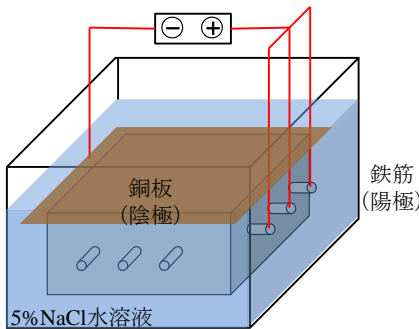
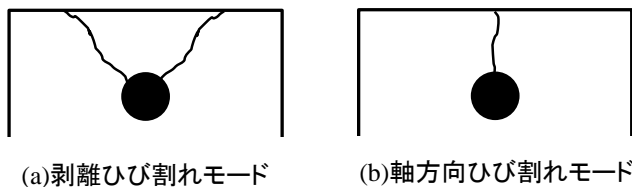


図-2 電食試験概要



(a)剥離ひび割れモード (b)軸方向ひび割れモード

図-3 腐食ひび割れモード

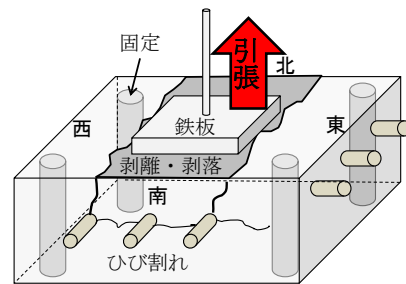
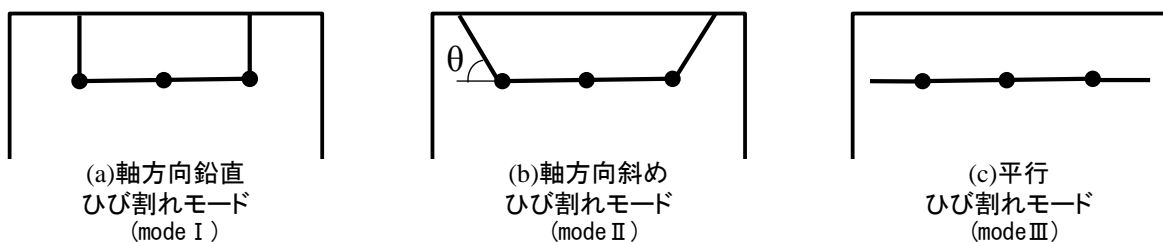


図-5 付着試験概要



(a)軸方向鉛直ひび割れモード (mode I) (b)軸方向斜めひび割れモード (mode II) (c)平行ひび割れモード (mode III)

図-4 電食後の腐食ひび割れモード

k が最小であり、その際の値が 3.0 以上になるよう設定した。すなわち、かぶり面方向に軸方向ひび割れが発生することとなる。図-4 に電食試験後、各試験体で発生した腐食ひび割れモードを示す。本研究において、図-4(a)に示す軸方向鉛直ひび割れモードを mode I、図-4(b)に示す軸方向斜めひび割れモードを mode II、図-4(c)に示す平行ひび割れモードを mode III と呼ぶこととする。かぶり厚さ 35mm の試験体では mode II、かぶり厚さ 50mm の試験体では mode I、かぶり厚さ 75mm の試験体では mode I および mode III であった。このことから、かぶり厚さにより腐食ひび割れモードがある程度決定することが確認できる。

2.2 付着試験概要

鉄筋腐食によってひび割れが生じた試験体を、図-5 のように試験機に設置し、付着試験を行う。図-5 に示すように設置試験体の正面を南面として、西面、北面および東面とした。各試験体、最小かぶり面が西面、東面となるように設置した。試験機で上向きに載荷することにより、かぶりコンクリート部分で剥離・剥落を強制的に発生させる。付着試験を行う際に試験体が動かないようにするため、試験体と試験機をボルトで固定し、載荷用鉄板と試験体をエポキシ樹脂を用いて固定する。また、この鉄板を鋼棒を通して試験機と固定する。載荷は 0.05mm/min の変位制御条件のもとで破壊に至るまで実施した。そして、破壊後の試験体に対して、付着面積お

よび剥離面全体面積の計測を行った。

付着面積は、実験後の剥離面の写真から汎用ソフト image j を用いて算出した。例として、写真-1 に D16(75)W40-10 の試験後の剥離面の写真と画像処理ソフトを用いた処理後の写真を示す。写真-1(a)および(c)から鉄筋腐食が進行することでコンクリート内部にひび割れが生じ、その剥離部分に腐食生成物が流入している箇所は錆色になっていることが確認できる。本研究では、ひび割れ進展領域と腐食生成物の発生領域を等価で扱うこととする。ここで、付着面積とは、付着実験により強制的に剥落させた際にひび割れが進展した面積であり、写真-1 (a)においては灰色の面積であり、写真-1 (b)においては赤色の面積である。これを写真-1 (a)の剥落片側と写真-1 (c) の試験体側で計測を行い、平均化することで付着面積および剥離面全体面積を計測した。

3. 実験結果

付着試験を行い、最大荷重、付着面積および剥離面全体面積の計測を行った。以下に、各種パラメータを用いて最大荷重の評価を行うこととする。

3.1 最大荷重に及ぼす影響評価

3.1.1 各試験体の最大荷重

図-6 に各試験体の最大荷重を示す。図-6 から D22(35)W40-10 以外の試験体では、かぶり厚さ 75mm の試験体の最大荷重が大きくなっていることが確認できる。



写真-1 付着試験後の剥離面

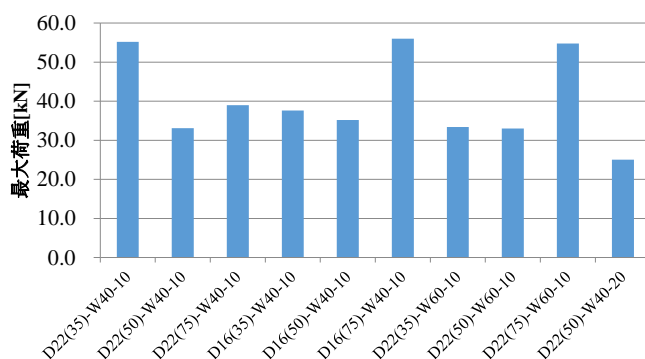


図-6 各試験体の最大荷重

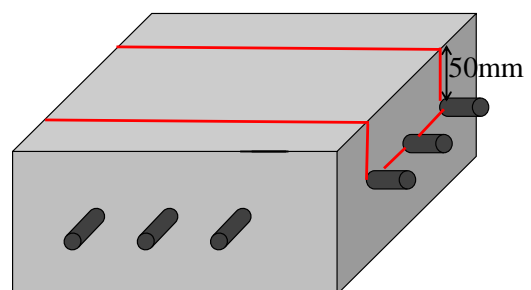


図-7 D22(50)W40-10 と D16(50)W40-10 の破壊形態

かぶり厚さが大きい試験体はかぶり厚さが小さい試験体に比べ、強制的に剥落させる際に働くせん断伝達が大きくなるのが原因であると考えられる。また、鉄筋腐食率が20%の試験体は、10%の試験体に比べて最大荷重が小さくなっていることが確認できる。これは、鉄筋腐食が進行することで、コンクリート内部で剥離面が拡大したことが原因であると考えられる。

3.1.2 最大荷重に及ぼす鉄筋径の影響

図-6よりD22(50)W40-10とD16(50)W40-10の最大荷重はそれぞれ33.10kN、35.20kNであった。また、両試験体ともにひび割れモードはmode Iであり、図-7に示すような同一の破壊形態であった。D16(50)W40-10はD22(50)W40-10と比べて、最大荷重が僅かに大きいことが確認できる。この原因として、鉄筋径が大きくなると発生する腐食生成物の量が多くなるため、腐食ひび割れの進展が顕著にみられることが考えられる。

しかしながら、D22(35)W40-10とD16(35)W40-10では逆の傾向となっている。これは写真-2に示すように、D22(35)W40-10の破壊形態はD16(35)W60-10に比べて剥離面全体が大きいことに加えて、鉄筋径の影響により付着面積の割合が大きいことから最大荷重がD16(35)W60-10と比べて大きいことが原因として考えられる。

3.1.3 最大荷重に及ぼすかぶり厚さの影響

表-2よりD22(35)W60-10、D22(50)W60-10、D22(75)W60-10のひび割れモードはそれぞれmode II、

mode I、mode Iであった。同一ひび割れモードmode IであったD22(50)W60-10とD22(75)W60-10の最大荷重は、D22(75)W60-10の方が大きいことが確認できる。軸方向鉛直ひび割れが生じている試験体(mode I)では、付着試験で強制的に剥落させる際に、軸方向ひび割れ面でのせん断伝達が最大荷重に対して支配的であることが考えられる。D22(50)W60-10に比べてD22(75)W60-10では、せん断伝達の生じる領域がかぶり厚さが50mmから75mmになると大きくなるため、最大荷重が大きいと考えられる。

また、D22(35)W60-10ではmode IIのひび割れモードであり、図-4(b)に示したひび割れ角度 θ が小さくなるほどせん断伝達に比べて劈開挙動が支配的となる。したがって、D22(50)W60-10より最大荷重が小さくなっていることが考えられる。しかしながら、両者の差異は僅かであり、これは、D22(35)W60-10においてコンクリート内部の剥離面全体面積における健全部の割合が、D22(50)W60-10と比べて大きいことが原因として考えられる。

これらのことから、同一軸方向ひび割れであった場合、かぶり厚さが最大荷重に影響を及ぼすことがわかった。

3.1.4 最大荷重に及ぼす水セメント比の影響

図-6よりD22(35)W40-10の最大荷重はD22(35)W60-10の最大荷重と比べて、大きいことが確認できる。これは、水セメント比が小さくなると圧縮強度が大きくなる

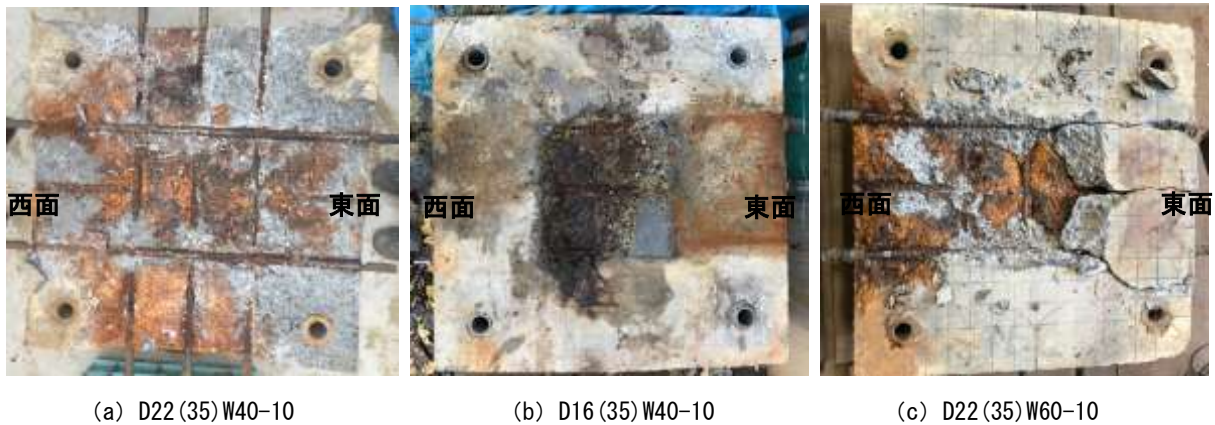


写真-2 付着試験後の破壊形態



写真-3 D22(50)W40-10 および D22(50)W60-10 の剥落片側

ことが原因であると考えられる。写真-2 から D22(35)W40-10 の破壊形態は D22(35)W60-10 に比べて剥離面全体が大きいことに加えて、付着面積の割合が大きいことから最大荷重が D22(35)W60-10 と比べて大きいことも考えられる。

また、図-6 より D22(50)W40-10 の最大荷重は D22(50)W60-10 の最大荷重と比べて、それほど差異がみられない。ここで両試験体の破壊形態は、図-7 と同様であり、それぞれの剥落片側を写真-3 に示す。D22(50)W40-10 と D22(50)W60-10 の最大荷重にそれほど差異が見られない原因として、写真-3 に示すように D22(50)W40-10 が D22(50)W60-10 と比べて付着面積が小さくなっていたことが原因として考えられる。

3.1.5 最大荷重に及ぼす鉄筋腐食率の影響

図-6 より D22(50)W40-20 の最大荷重は D22(50)W40-10 の最大荷重と比べて、小さいことが確認できる。これは、腐食率が 10% から 20% になるとコンクリート内部で鉄筋腐食によるひび割れが進行することで付着面積が小さくなることが原因として考えられる。

3.2 付着面積割合

前節から、付着強度の評価に際して、各種パラメータに加えてひび割れモードおよび破壊形態を考慮して行わなければならない。すなわち、付着試験後の剥離面全体

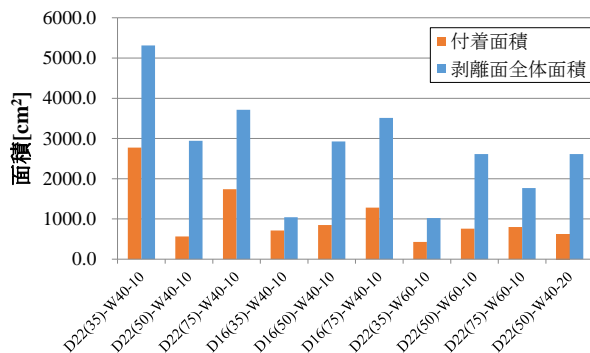


図-8 付着面積および剥離面全体面積

面積における付着面積を把握する必要がある。図-8 に各試験体における付着面積および剥離面全体面積を示す。図-8 より、各試験体の破壊形態は大きく異なるために式(2)に示した付着面積割合を用いて最大荷重を見かけの付着強度（以下、残存付着強度と称す）に換算することが重要である。ここで、図-9 に各試験体における付着面積割合を示す。図-9 を用いて、最大荷重に関する検討を行う。

$$\text{付着面積割合} = \frac{\text{付着面積}[\text{cm}^2]}{\text{剥離面全体面積}[\text{cm}^2]} \quad (2)$$

4. 安全余裕度に関する検討

かぶりコンクリート部分の剥離に対する安全余裕度の検討を行うにあたって、残存付着強度で評価する必要がある。ここでの残存付着強度は付着試験における最大荷重を用いて算出する。付着試験を行い、強制的に剥落させた際に、剥がれたかぶりコンクリート部分の付着面積が最大荷重に及ぼす影響が支配的であることから、最大荷重と付着面積割合を用いて残存付着強度を算出する。ここで、各試験体における最大荷重および付着面積割合を表-3 に示す。

残存付着強度は式(3)に示すように、本研究で行った限

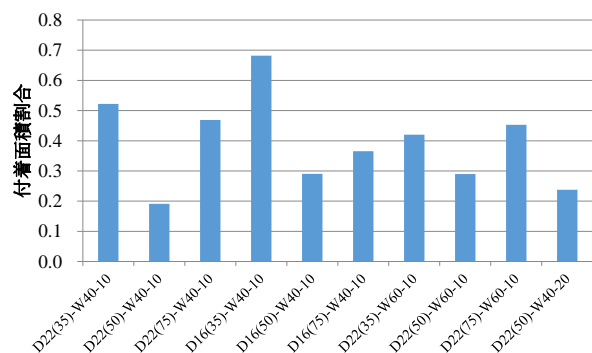


図-9 付着面積割合

表-3 最大荷重および付着面積割合

	最大荷重[kN]	付着面積割合
D22(35)-W40-10	55.19	0.52
D22(50)-W40-10	33.10	0.19
D22(75)-W40-10	39.00	0.47
D16(35)-W40-10	37.60	0.68
D16(50)-W40-10	35.20	0.29
D16(75)-W40-10	56.00	0.37
D22(35)-W60-10	33.40	0.42
D22(50)-W60-10	33.00	0.29
D22(75)-W60-10	54.75	0.45
D22(50)-W40-20	25.06	0.24

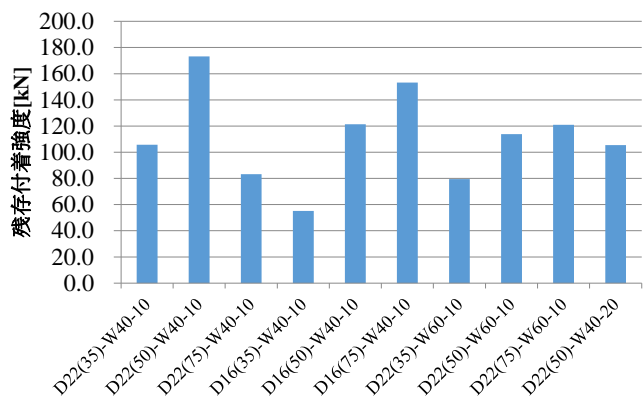


図-10 残存付着強度

定的な条件のもとで、実験で計測した最大荷重と付着面積割合を用い健全全部面積の荷重を残存強度と定義した。

$$\text{残存付着強度}[\text{kN}/\text{cm}^2/\text{cm}^2] = \frac{\text{最大荷重}[\text{kN}]}{\text{付着面積割合}} \quad (3)$$

各試験体における残存付着強度を図-10に示す。図-10からD22(75)-W40-10を除き、いずれの試験体においても、かぶり厚が大きくなると、残存付着強度も比例して増加する傾向がみられた。また、腐食率が10%から20%になると残存付着強度が低くなっている。これは、腐食率が10%から20%になるとコンクリート内部で腐食が進行することで最大荷重が小さくなることが原因である。

また、D22(75)-W40-10がこの傾向と乖離する理由としては、他の試験体に比べて腐食率が高くなり最大荷重が小さいことが考えられる。表-3のかぶり厚さ75mmの試験体においては、付着面積割合にはそれほど差がないが、最大荷重においてはD22(75)-W40-10が他の2体に比べて小さくなっている。このことからD22(75)-W40-10がこの傾向と乖離する理由として、後者の理由が考えられる。

また、当然ではあるが、図-10から水セメント比が大きくなると、残存付着強度が小さくなる傾向がみられた。これは水セメント比が小さくなると、圧縮強度が大きくなることが原因であると考えられる。

以上から、コンクリートかぶり部分の剥離・剥落に対する耐荷力を評価するにあたって、各試験体の破壊形態が異なるため最大荷重ではなく、付着面積および最大荷重を用いて算出した残存付着強度を用いることで定性的な評価の可能性を示した。これにより、コンクリート内部でのひび割れモード、すなわち付着面積の把握が可能であれば、いかなる破壊形態であっても、耐荷力評価が可能である。

5. まとめ

本研究では10体の試験体を作成しパラメータ毎の関係性からコンクリートかぶり部分の剥離・剥落に対する耐荷力の検討をすることを目的とし、付着実験を行い、最大荷重と付着面積割合を用いた残存付着強度を定義した。本研究で得られた結果を以下に示す。

(1) コンクリート内部でのひび割れモードが、最大荷重および残存付着強度に影響を及ぼしていることがわかった。軸方向鉛直ひび割れが生じている試験体では、付着試験で強制的に剥落させる際に、軸方向ひび割れ面でのせん断伝達が支配的であることが考えられる。軸方向斜めひび割れが生じている試験体では、せん断伝達に加えて引張力、また、平行ひび割れが生じている試験体では、引張力が支配的であると考えられる。

- (2) 同一のひび割れモードでは、かぶり厚が大きくなると、軸方向ひび割れ面が大きくなるため、最大荷重および残存付着強度が大きくなる。
- (3) 鉄筋径が大きくなると発生する腐食生成物の量が多くなることで、腐食ひび割れの進展が顕著にみられる。また、水セメント比が大きくなると、残存付着強度が小さくなる傾向がみられた。
- (4) コンクリートかぶり部分の剥離・剥落に対して安全余裕度を評価するに際して、残存付着強度を用いて定性的に評価可能であることを示した。

今後の展望を以下に示す。

- (1) 鉄筋腐食率、鉄筋径、かぶり厚さ、水セメント比のパラメータから、残存付着強度を算出可能とする式を構築する。これにより、コンクリート内部の腐食状況の把握ができれば、コンクリートかぶり部分の残存付着強度を算出でき、コンクリートかぶり部分の自重との比較を行うことで、安全余裕度の検討が可能とする。
- (2) 著者らの作成した鉄筋単体における内部ひび割れ進展距離を算出するモデル³⁾を、複数本の鉄筋に対応させることで、付着面積だけでなく、種々の劣化予測技術の向上に寄与できるものと考えている。

参考文献

- 1) 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, Vol.2005, No.802 V-69, pp.209-222, 2005
- 2) 山崎理美, 大下英吉: 鉄筋腐食が腐食ひび割れおよび拘束圧に及ぼす影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol36, pp.1150-1155, 2014
- 3) 藤井智大, 大下英吉: 鉄筋腐食によるひび割れ幅進展モデルを用いた内部ひび割れ進展距離に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol38, No.1, pp.1137-1142, 2016
- 4) (社) 日本道路協会: 道路トンネル維持管理便覧, 1993.11
- 5) (財) 鉄道総合技術研究所: トンネル補強・補修マニュアル, 1990.10
- 6) 日本道路公団: 設計要領第三集トンネル本体工保全編, 1998.10
- 7) 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