

論文 端島共通試験を踏まえた腐食促進試験方法の検討

尾崎 勇太^{*1}・今本 啓一^{*2}・田中 章夫^{*3}・澁井 雄斗^{*4}

要旨：長崎県端島で行われている共通試験をはじめとする暴露試験と同様な結果が迅速に得られるような、実験室における鉄筋腐食促進試験の提案と検討を行った。塩化物イオン量の異なる試験体を用意し、高温湿潤環境で 40℃と 60℃の温度 2 種類と乾湿繰り返しの試験を行った。乾湿繰り返しでは腐食促進試験としては十分な腐食を確認でき、高温湿潤環境でも 60℃ではある程度の腐食を確認できた。かぶりの違いを考慮した端島の共通試験のデータとの比較では、22 週間の乾湿繰り返しの端島の共通試験の 2～4 年に相当する腐食を確認することができた。

キーワード：塩害、鋼材腐食、端島、促進試験

1. はじめに

長崎県端島（軍艦島）は、1916 年に国内最初の鉄筋コンクリート造高層集合住宅が建設され、以降 70 棟を超える鉄筋コンクリート造集合住宅群が残っていることから、文化財・観光資源として注目されている。一方で、外洋に面しており周囲を海に囲われていることから、台風による高潮や飛来塩分の影響を受けるため、鉄筋コンクリート構造物群の塩害による劣化進行は極めて深刻である。そのため、2016 年より共通試験を開始し、さまざまな補修工法を施した試験体の暴露試験が行われている¹⁾²⁾。実構造物の部材を想定した鉄筋入りのコンクリート試験体に対して多くの補修工法を施し暴露試験を行うことで、有効な補修工法を検討している。しかしながら、実環境下での暴露試験は一般的に長い年月をかけて行われているものが多い。先に挙げた共通試験においても試験開始から 8 年目（2023 年現在）を迎えており、補修工法・材料の性能評価を早期に把握することができれば、劣化の進行が著しい環境でも適応できる有効な補修工法・材料の検討を迅速に行うことができると考えた。

そこで、実環境下に対応する鉄筋腐食促進試験方法の提案を行うことを最終目的とし、本研究では、高温湿潤環境下と塩水への浸漬と乾燥を繰り返す乾湿繰り返し環境下において鉄筋腐食促進試験を実施した。試験体質量、自然電位、ひび割れ幅の測定を行い、促進環境条件による腐食の違いを比較するとともに、端島での共通試験のひび割れ幅の推移との比較検討を行った。

2. 共通試験

2.1 試験体概要

コンクリートの調合を表-1 に示す。水セメント比 W/C：79.1%や塩化物イオン Cl⁻の添加量 5.0kg/m³ は、端

島の実構造物より採取したコアにより実施した調査結果²⁾を参考に決定された。コンクリート打込み後は材齢 4 日で脱型し、温度 20℃で気中養生を行った。

試験体は 150×500×100mm とし、鉄筋（SS400 相当の磨き丸鋼、直径 16mm）を試験体中央かぶり 30mm の位置に 1 本設置した（図-1）。暴露面および腐食モニタリング用の円形開口部（φ50mm×2 か所、φ130mm×1 か所）以外は、保護材として合成樹脂エナメル塗料を用いて被覆した。鉄筋の片端に腐食モニタリングに必要なリード線をねじで接続させた。試験体数は 3 体とし、試験体 1 は 2018 年 10 月に、試験体 2 は 2021 年 10 月に回収し、現在は試験体 3 のみ暴露試験継続中である。

表-1 調合表

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				Cl ⁻ (外割) (kg/m ³)
		W	C	S	G	
79.1	54.0	200	253	1004	877	5.0

W:水(上水道水)

C:セメント(普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm³)

S:細骨材(大井川水系陸砂 表乾密度 2.58g/cm³)

G:粗骨材(青梅産 硬質砂岩砕石 表乾密度 2.65g/cm³)

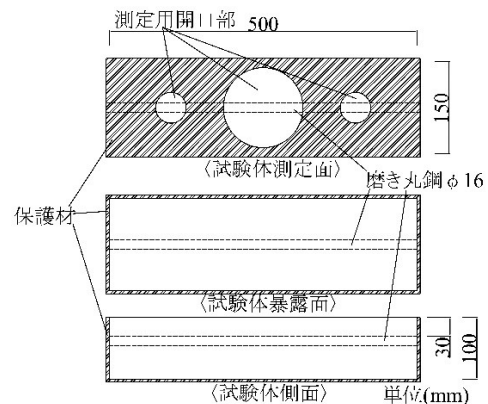


図-1 共通試験の試験体寸法

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻（学生会員）

*2 東京理科大学 工学部建築学科教授 工博（正会員）

*3 日本工業大学 建築学部建築学科准教授 工博（正会員）

*4 日本建築総合試験所 材料部材料試験室（正会員）



図-2 設置場所

2.2 試験方法

図-2 に設置場所を示す。暴露試験は 2016 年 10 月に開始され、2018 年 10 月までは端島北部に位置する 69 号棟屋上で試験体暴露を行った（写真-1）。現在では測定作業の安全を考慮し、70 号棟グラウンドに試験体に移設され、暴露試験が継続されている（写真-2）。

自然電位および最大ひび割れ幅の測定を実施した。それぞれの測定方法を以下に示す。測定は基本的に半年に 1 回実施している。

(1) 自然電位

照合電極の種類は、硫酸銅電極を用いて測定した。照合電極の先端に十分に湿らせたスポンジをつけてコンクリート面の導通を確保している。暴露面の反対側の面に用意した腐食モニタリング用の開口部 3 か所で測定し、それらの平均値を求めた。

(2) 最大ひび割れ幅

ひび割れ幅は任意の 5 箇所においてクラックスケールを用い目視にて測定し、その最大値を採用した。

2.3 試験結果

暴露 2 年経過した時点と暴露 5 年経過した時点の試験体の様子を写真-3 に示す。暴露 5 年になると鉄筋に沿って発生したひび割れの様子が写真からも確認できる。

自然電位の測定結果を図-3 に示す。自然電位は暴露開始時には-400mV ほどであったが、1 年足らずで-500mV を下回り、その後はやや上下を繰り返しつつ-500~-600mV で推移している。

最大ひび割れ幅の測定結果を図-4 に示す。ひび割れは暴露開始から 1.5 年で発生し、早いものは暴露 5 年で 0.60mm に到達している。

鉄筋の質量減少率は、2018 年 10 月に回収した試験体 1 を解体し鉄筋を取り出すことで測定された暴露 2 年の試験体のデータである。暴露 2 年の試験体 1 の鉄筋質量減少率は 1.13% であった。

3. 鉄筋腐食促進試験

3.1 試験概要

(1) 試験体概要

コンクリートの調合を表-2 に示す。既往の研究³⁾において塩分浸透量はかぶり 20mm を超えると水セメント



写真-1 69号棟屋上設置



写真-2 70号棟グラウンド設置状況

暴露年数	ひび割れ発生状況
2 年	
5 年	

写真-3 暴露期間ごとの様子（試験体 2）

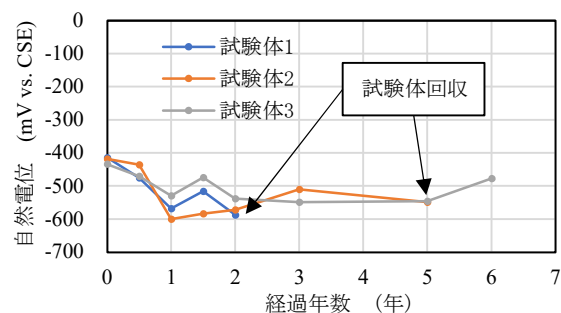


図-3 自然電位の推移

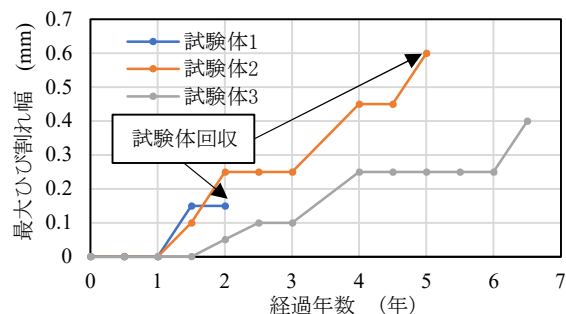


図-4 最大ひび割れ幅の推移

比の影響は小さいことが示されていることから、鉄筋腐食促進試験では一般的なコンクリートの水セメント比 W/C : 60.0%、単位水量 180kg/m³、塩化物イオンとして 0kg/m³、1.5kg/m³、5.0kg/m³ の 3 種類を外割添加し、添加量の違いによる影響を検討した。鉄筋（SS400 相当磨き丸鋼、直径 13mm）は上述の端島に暴露したものと同等のものを、試験体中央かぶり 20mm の位置に 1 本設置した（図-5）。試験面を除く 5 面はシリコンシーラントを用いて保護した。また、鉄筋片端に自然電位測定のためのねじを接続させた。

(2) 腐食促進方法

腐食促進方法は表-3 に示すとおり、常に一定の温湿度環境下とした高温湿潤環境と塩水への乾湿繰り返しとの2パターンとし、高温湿潤環境については温度を2種類とした。各腐食条件につき、試験体を2体用いた。

高温湿潤環境は、飽和塩化カリウム水溶液を用いて相対湿度が常に80%RH以上になるように設定した容器を準備した。この容器に試験体を入れ、さらにその容器を定温恒温器に設置し、温度を40℃と60℃に設定し常時一定の環境下になるようにした。乾湿繰り返しは、濃度3%の塩水に3日間浸漬したのち4日間乾燥させる7日間の工程を1サイクルとした。試験は定温恒温器内で行い、浸漬期間も乾燥期間も常に温度は60℃に設定した。なお、乾燥期間中の相対湿度の調整は実施せず、およそ30%RHであった。浸漬する際は、試験体の試験面を下にしてかぶりまで塩水に浸るようにした。乾燥の際は、定温恒温器内で試験面が下になるように設置した。

試験は22週間行い、その経過の測定を行った。

(3) 測定項目

測定項目は、試験体質量、自然電位、最大ひび割れ幅の3項目とした。高温湿潤環境では、1週間に1度の測定を基本とし、変化が少ない期間は2週間に1度など測定間隔を調整して実施した。各測定期間の質量を測定開始時の試験体質量で減じ、測定開始時の試験体質量で除した値を百分率にすることで、質量変化率を算出した。乾湿繰り返しでは浸漬前と浸漬後において測定を行い、表面が湿っている状態では測定しにくい最大ひび割れ幅は浸漬前にのみ行った。自然電位および最大ひび割れ幅の測定方法は前述の共通試験と同様とした。

3.2 腐食促進後の測定

(1) 鉄筋の腐食面積率・質量減少率の測定

鉄筋の腐食面積率・質量減少率は、乾湿繰り返しの腐食促進を22サイクル行った試験体の鉄筋を用いて測定した。鉄筋を取り出す試験体は、塩化物イオン量ごとに1体ずつとした。鉄筋は万能試験機を用いて、試験体を解体することで取り出した。

腐食面積率は、クリアフィルムに、取り出した鉄筋の腐食箇所を写し取り、画像処理をして全体・腐食部分のピクセル数をそれぞれ求め算出した。腐食面積率の算出は式(1)により算出した。

$$\text{腐食面積率} = \frac{\text{鉄筋腐食面積}}{\text{鉄筋全表面積}} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

腐食面積率を測定した鉄筋は除錆液に4日間浸漬し、1日おきに付着した錆をブラシでこすり落とすことで錆を取り除いた。除錆液は、クエン酸水素二アンモニウム10%水溶液を使用した。鉄筋の溶出防止のために、2-ベンゾチアゾール1%アルコール溶液をクエン酸水素二アン

表-2 調合表

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
		W	C	S	G
60.0	46.0	180	300	793	991

W:水(上水道水)

C:セメント(普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm³)

S:細骨材(大井川水系陸砂 表乾密度2.59g/cm³)

G:粗骨材(青梅産 硬質砂岩砕石 表乾密度2.65g/cm³)

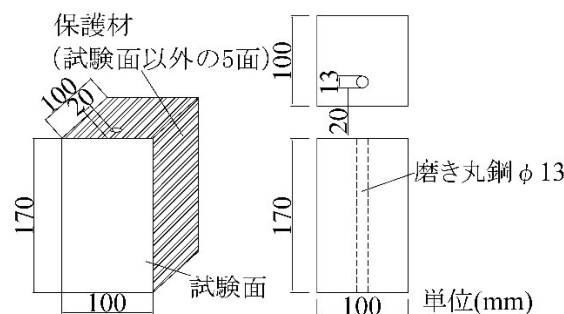


図-5 鉄筋腐食促進試験の試験体寸法

表-3 試験体の水準および記号

促進環境		塩化物イオン量(kg/m ³)					
		0		1.5		5.0	
		記号	本数 (体)	記号	本数 (体)	記号	本数 (体)
高温 湿潤	40℃			J40-1.5	2	J40-5	2
	60℃			J60-1.5	2	J60-5	2
乾湿繰り返し 60℃		K-0	2	K-1.5	2	K-5	2

モニウム水溶液1000mlに対して15ml添加した。除錆した鉄筋は質量を測定し、式(2)により質量減少率を算出した。

$$\text{質量減少率} = \frac{\text{腐食前質量} - \text{腐食後質量}}{\text{腐食前質量}} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

(2) 全塩化物イオン量の測定

鉄筋を取り出した各試験体のコンクリート部分について、試験面から0~20mm、20~40mmおよび40~60mmの3カ所で試料を採取して分析に用いた。採取した試料中の全塩化物イオン濃度は、JIS A 1154に準拠し、電位差滴定法により測定した。

3.3 試験結果

3.3.1 腐食促進試験結果

各測定項目において試験体のばらつきが小さかったため、以下では、各腐食条件につき用意した2体の試験体の平均をとってデータを整理した。各腐食条件とデータ名は表-3に示す通りである。

(1) 試験体質量変化率

試験体の質量変化率を図-6に示す。これによると、乾湿繰り返し環境下にある試験体に質量は乾湿の影響を受けて増減するが、高温湿潤環境における試験体と比較すると全体的に質量変化が大きい。また、高温湿潤環境下では温度60℃、塩化物イオン量5.0kg/m³のJ60-5試験

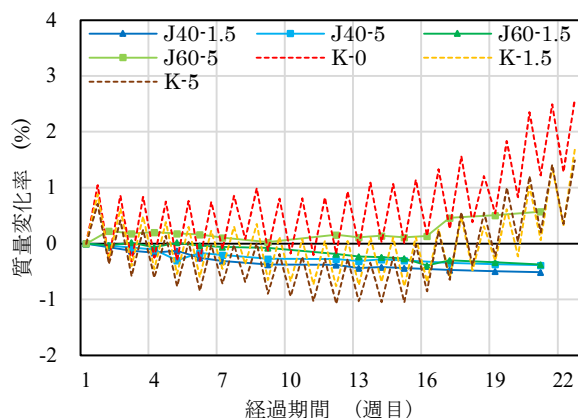


図-6 試験体質量変化率の推移

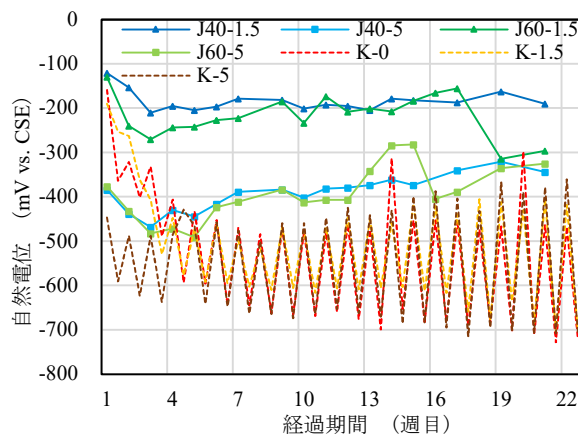


図-7 自然電位の推移

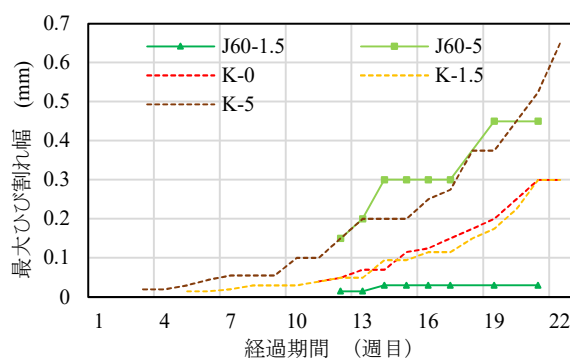


図-8 最大ひび割れ幅の推移

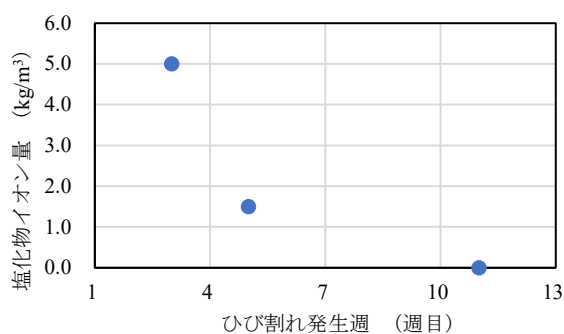


図-9 乾湿繰り返しひび割れ発生時期

体のみ 16 週から試験体質量が大幅に増加している。一方、乾湿繰り返し試験体は、試験開始直後では質量が減少している傾向がみられるが、15 週前後から増加方向に変化している。

(2) 自然電位

図-7 に、自然電位の測定結果を示す。全体として、乾湿繰り返しの方が高温湿潤環境と比較すると自然電位が卑となる傾向があった。一方、高温湿潤環境において、添加した塩化物イオン量の違いによる差が見られ、 1.5kg/m^3 の J40-1.5 および J60-1.5 試験体は自然電位が 200mV 程度で推移しており、評価上は腐食が進行しにくい環境であったことが推測されるが、この原因として塩分による潮解性の影響も考えられるため、この点について今後検討を進めてゆきたいと考える。

(3) 最大ひび割れ幅

試験開始から 22 週間が経過した時点での試験体を写真-4, 5 に示す。これらの結果より、鉄筋に沿ってひび割れが発生していることが確認できる。

最大ひび割れ幅の測定結果を図-8 に示す。 40°C の高温湿潤環境ではいずれの塩化物イオン量においても 22 週までひび割れの発生が目視にて確認できていない。一方、 60°C の高温湿潤環境ではひび割れが発生しており、J60-5 試験体では、高温湿潤環境下の中では最も早くひび

割れが発生し、最終的に 0.45mm にまで達した。J60-1.5 試験体ではひび割れが発生したもの、ひび割れ幅は 0.03mm にとどまり、鉄筋の腐食によるひび割れではなかった。

乾湿繰り返し試験では、すべての試験体でひび割れ発生を確認できた。塩化物イオン量 5.0kg/m^3 の試験体ではひび割れ幅の増加が顕著で、 0.65mm にまで達し、その傾向は 60°C の高温湿潤環境と近似しており、塩化物イオン量 5.0kg/m^3 では促進環境の影響は小さいと考えられる。塩化物イオン量 0kg/m^3 と 1.5kg/m^3 の試験体では、ともに 0.30mm にまで到達しており、ひび割れ幅に関しては違いがほとんど見られなかった。また、13 サイクル以降でひび割れ幅の増加速度が速くなっており、図-6 において、試験体の質量が増加傾向を示したサイクルと一致し、ひび割れ幅が大きくなるとともに、湿潤時にひび割れから水分が供給されたことが推測される。一方、図-9 に示すように、ひび割れの発生時期は 1.5kg/m^3 の試験体の方が早く、塩化物イオン量の違いによる差が生じたと考えられる。乾湿繰り返しでは、ひび割れが発生したのち、 0.10mm を超えたあたりからひび割れ幅の増加速度が速い傾向が見られる。



写真-4 J60-5 (試験終了時)



写真-5 K-5 (試験終了時)

3.3.2 促進試験後の測定結果

(1) 鉄筋腐食状況

乾湿繰り返し環境下の試験体から鉄筋を取り出し、腐食状況の確認を行った。図-10 に、鉄筋腐食面積率の測定結果を示す。腐食面積率は90%以上と、鉄筋表面はほとんど腐食していた。塩化物イオン量の違いによる差はほとんど確認できなかった。

図-11 に、鉄筋質量減少率の測定結果を示す。塩化物イオン量が 0kg/m^3 と 1.5kg/m^3 では約6%で、ほとんど違いを確認できなかった。一方、塩化物イオン量 5.0kg/m^3 では約7.6%と質量減少率が高くなった。塩化物イオン量が 1.5kg/m^3 程度では鉄筋腐食に大きな影響は与えないが、 5.0kg/m^3 ほどでは腐食に影響を与えるとわかる。

(2) 乾湿繰り返し後の塩化物イオン含有量

試験終了時の試験体内部の塩化物イオン含有量について測定を行った。その結果を図-12 に示す。表層に近いほど塩化物イオン量が高い。試験体 K-5 (塩化物イオン添加量 5.0kg/m^3) の方が試験体 K-0 (塩化物イオン添加量 0kg/m^3) よりも全体的に高い傾向が認められた。しかし、両者の差は塩化物イオン添加量の差である 5kg/m^3 もなく、内在塩分が塩化物の浸透に及ぼす影響は限定的であると想定される。これは、ひび割れの進行によって塩化物が侵入しやすい環境になっていたためと考えられる。

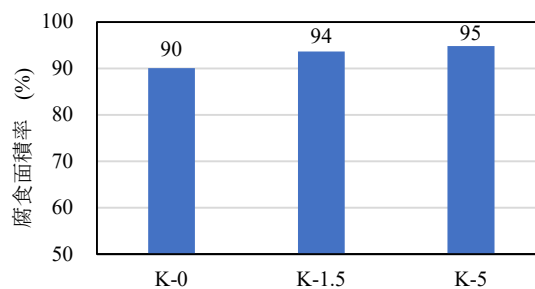


図-10 鉄筋腐食面積率

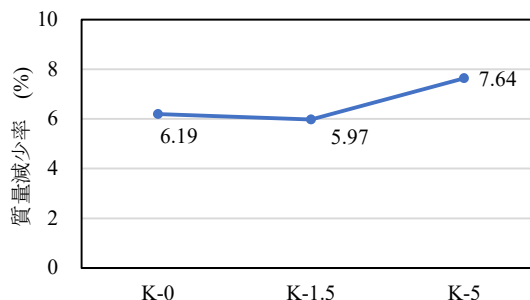


図-11 鉄筋質量減少率

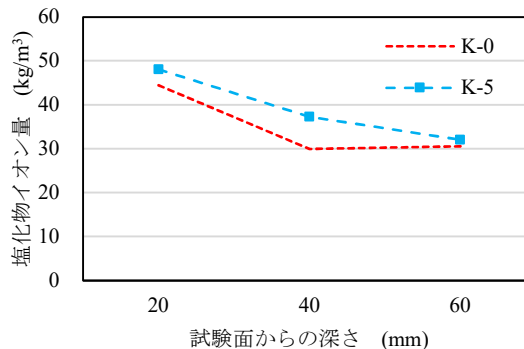


図-12 全塩化物イオン量測定結果

4. 考察

4.1 腐食促進試験

3章の試験結果をもとに、腐食促進試験に有効な試験条件について考える。ひび割れ幅や自然電位の測定結果から、塩化物イオンを含有した状況では、乾湿繰り返しは高温湿潤と比較しても腐食が促進しやすい環境であったといえる。60℃の高温湿潤環境においてもひび割れが発生し自然電位の低下がみられたことから、乾湿繰り返しと同様とはいえないまでも鉄筋腐食の環境としては十分であったことが考えられる。また、乾湿繰り返しについてひび割れ幅や鉄筋質量減少率の測定結果から、塩化物イオン添加量 1.5kg/m^3 では腐食に及ぼす影響は塩化物イオン添加量 0kg/m^3 と同等程度であるが、塩化物イオン添加量 5.0kg/m^3 では腐食促進効果が高いことを確認した。

4.2 端島環境との比較

ここでは、端島環境下での測定結果と促進試験結果を比較検討する上で、コンクリート表面に生じた腐食ひび割れ幅に着目した。コンクリート部材の補修の要否の境界条件は部材表面でのひび割れの発生時点としている場合が一般であり、ひび割れが発生した時点で補修を行っている場合も多く、腐食ひび割れは目視にて確認が可能である。このため腐食ひび割れ幅に着目することが、新しい補修工法・材料などを検討する時に簡便に評価が可能な指標になると考えた。

表-4 かぶりとひび割れ幅⁶⁾よりデータ抜粋

水セメント比 (%)	内在 塩化物 イオン量 (kg/m ³)	暴露期間 (年)	ひび割れ幅 (mm)		(かぶり 30mmのひ び割れ幅) (かぶり 20mmのひ び割れ幅)
			かぶり 20mm	かぶり 30mm	
50	4.54	15	1.20	0.25	0.21
55	4.68	9	1.40	0.40	0.29
		20	2.50	0.90	0.36

ここで、腐食ひび割れ幅に及ぼす影響としてコンクリートの調合（水セメント比あるいは圧縮強度）、かぶりおよび鉄筋径などが考えられる。水セメント比が大きくなる（圧縮強度が低くなる）とともに鉄筋腐食量が大きくなる傾向はあるが、鉄筋腐食量に及ぼす影響はかぶりよりも小さいことが示されている⁴⁾ことから、今回はかぶりについて着目した。既往の研究⁵⁾ではかぶりが小さくなると鉄筋腐食度が大きくなり、特にかぶりが20mm以下になると鉄筋腐食度が大きくなることが示されている。

そこで、かぶりが腐食ひび割れ幅に及ぼす影響について検討するため、既往の研究⁶⁾よりかぶりとひび割れ幅のデータを収集した。その結果を表-4に示す。かぶり20mmの試験体の方が同時期のひび割れ幅が大きい。かぶり30mmにおけるひび割れ幅は20mmのものと比較して、約0.3倍となっていることがわかる。安全側に考慮するため、かぶりが20mmから30mmになるとひび割れ幅は0.36倍になると仮定し、データ比較を行った。

今回の腐食促進試験のひび割れ幅のデータを、上記に倣って0.36倍に補正したものを図-13に示す。共通試験のデータとの比較のため、塩化物イオン量5.0kg/m³の試験体のデータのみ表示した。ひび割れが最も進行していた乾湿繰り返し塩化物イオン量5.0kg/m³の試験体でも最終的なひび割れ幅が0.20mmを超えるほどになった。

図-4に示す端島環境下で実施した共通試験の腐食ひび割れ幅0.10mmに到達する年数は1～2年、ひび割れ幅0.20mmに到達する年数は2～4年で到達している。今回もっとも腐食促進が早い条件だった乾湿繰り返し（7日間）試験で22サイクルは、端島環境下での暴露年数2～4年に相当すると考えられる。

鉄筋腐食促進実験は継続しており、さらなるひび割れ進行を考慮したデータ比較を行うことで、ひび割れ幅の推移の推定や最適な補修工法の判定基準などを確立していく予定である。

5. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

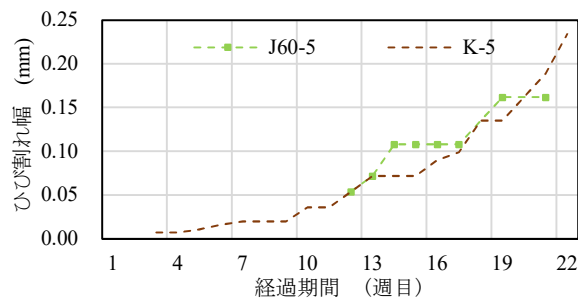


図-13 ひび割れ幅推移(補正後)

- (1) 促進試験方法として、塩化物イオン添加量 5kg/m³とし、温度 60℃で、濃度 3%の塩水に 3 日間浸漬したのち 4 日間乾燥させる 7 日間の工程を 1 サイクルとした乾湿繰り返し試験が最も腐食を促進する結果となった。この場合、22 サイクルが端島共通試験での屋外暴露の 2～4 年間に相当する。
- (2) 高温湿潤環境でも温度 60℃、相対湿度 80% R.H.以上とすると 0.1mm のひび割れ幅に到達するまでは乾湿繰り返しに近い腐食環境になる。

謝辞

本研究にあたり、JCI 危急存亡状態のコンクリート構造物対応委員会（委員長：岩波光保東京工業大学教授）の皆様、東京理科大学のエルドンオチル助教・清原千鶴プロジェクト研究員にご助力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 澁井雄斗，今本啓一，濱崎仁，下澤和幸：厳しい塩害環境下における RC 部材の補修効果検証のための屋外暴露試験，コンクリート工学会年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1432-1437，2020
- 2) 今本啓一ほか：端島（軍艦島）における補修工法共通試験，コンクリート工学，Vol.58，No.4，pp.281-288，2020
- 3) 新井哲三：塩分環境下での鉄筋の腐食機構，コンクリート工学，Vol.25，No.11，pp.34-39，1987
- 4) 元路寛，関博：鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究，土木学会論文集，No.669/V-50，pp.161-171，2001
- 5) 梶田佳寛：建築物における被害の実態，コンクリート工学，pp.68-72，1987
- 6) 掛川勝，梶田佳寛，松林裕二，鹿毛忠継：コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす各種要因の影響に関する長期屋外暴露試験，日本建築学会構造系論文集，第 77 巻，第 672 号，pp.143-151，2012