

屋内環境下における鉄筋コンクリートの腐食再現試験

東日本旅客鉄道(株) 高橋 健太
 北陸地方整備局 永井 新悟
 東日本旅客鉄道(株) 木戸 素子
 東日本旅客鉄道(株) 須田 聡

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物を長期的に活用するためには、鉄筋の腐食状況を把握することが重要である。しかし屋内環境下における鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食の進行について明確に示された試験データが少ないのが現状である。このような環境下での鉄筋の腐食度を推定する手法を開発することができれば、既設の鉄筋コンクリート構造物のメンテナンスや新設工事においてコストダウンの効果が期待できる。

そこで屋内環境下での鉄筋腐食に影響を与える要因としてコンクリート内部における湿度変化に着目し、鉄筋の腐食状況を把握することを目的とした。試験としては①水蒸気コンクリート内部の水蒸気の浸透速度を確認するための試験、②中性化後における湿度変化による鉄筋腐食量の関係性を確認するための試験、③屋内環境コンクリート構造物の内部における温湿度計測を実施した。今回この3つの試験結果について報告する。

2. 水蒸気浸透試験

2-1. 水蒸気浸透試験方法

コンクリート内部への水蒸気の浸透状況及び浸透速度を確認することを目的として実施することとした。試験項目を表-1に示す。水蒸気浸透試験を行う前に作製した試験体を用いて、圧縮強度試験、コンクリートの表層透気試験及び表面吸水試験を実施し、浸透速度との関係性を検証する。

表-1. 試験項目

試験項目	試験数量	備考
練混ぜ	3バッチ	水セメント比3水準
スランプ	3回	
空気量	3回	
試験体作製	27本	□10×10×40cm
圧縮強度用供試体作製	9本	一般骨材(φ10×20cm)3配合×3本
圧縮強度試験	9本	
表層透気試験	9回	Torrent
表面吸水試験	9回	SWAT
水蒸気浸透試験	1式	

表-2. 試験体諸元

骨材の種類	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ 範囲 (cm)	空気量 範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位数 (kg/m ³)				混和剤
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G20	
一般骨材	20	12±2.5	4.5±0.5	50.0	45.4	175	350	784	967	AE剤
				65.0	47.5	175	269	851	967	
				80.0	48.7	175	219	893	967	

表-2に試験体諸元を示す。作製する試験体は、角形のコンクリート試験体とし、一般的な骨材(細骨材:静岡県大井川水系陸砂,粗骨材:東京都青梅産砂岩砕砂)を使用した。W/Cの違いによる浸透速度の変化に着目し、それぞれ水セメント比を50, 65, 80%と3水準設定した。

試験体内部の湿度変化を把握するために湿度計をコンクリート内部に埋設した。埋設深度は表層から15mm, 25mm, 35mm, 50mmと4深度とした。温湿度計を試験体に埋設後、水蒸気を浸透させる面を除く5面についてはエポキシシールで保護し、浸透面以外からの湿度影響を与えないようにした。(図-1参照)

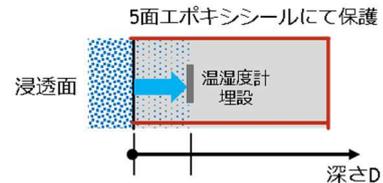


図-1. 作製試験体について

測定フローを図-2に示す。測定方法としては各深度における湿度変化についてモニタリングを実施した。実施方法としては打設後、材齢14日まで封かん養生を行った後に脱型し、60°Cで炉乾燥を行った。試験体内部の水分が一樣になるように材齢28日まで20°C60%の恒温恒湿で養生を行い、コンクリート内部の湿度分布を確認した上で試験を開始した。20°C90%の環境下にて試験体の内部湿度が90%になるまでの日数、到達後20°C60%の環境下にてコンクリート内部の湿度が60%に達するまで各深度における温湿度測定を行った。

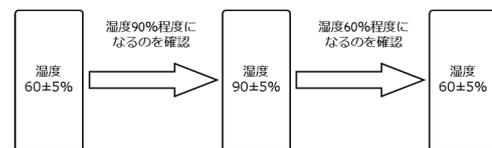


図-2. 水蒸気浸透試験測定フロー

2-2. 水蒸気浸透試験結果

まず圧縮強度結果を表-3に示す。W/Cを3水準変化させた試験体毎に圧縮強度に違いが見られる。圧縮強度の16.0~35.1N/mm²の範囲にあり、JIS A 5308に規定される普通コンクリートの強度範囲を概ね網羅している。

表-3. 圧縮強度試験結果

供試体種別	W/C (%)	記号	質量		圧縮強度		見掛けの密度	
			m (g)	Fc (N/mm ²)	ρ (g/cm ³)			
					各値	平均	各値	平均
一般骨材	50.0	50-①	3403	35.3	35.1	2.21	2.21	
		50-②	3415	35.7		2.22		
		50-③	3387	34.3		2.20		
	65.0	65-①	3393	25.3	24.6	2.20	2.20	
		65-②	3409	24.9		2.22		
		65-③	3402	23.5		2.19		
	80.0	80-①	3319	16.3	16.0	2.17	2.17	
		80-②	3311	15.7		2.16		
		80-③	3333	15.9		2.17		

表層透気試験結果を表-4に示す。一般骨材を用いて作製したコンクリートの評価判定は最も水セメント比の小さい配合(W/C:50%)において【劣】、その他の配合(W/C:65%, 80%)においては【極劣】となった。水セメント比が大きくなるにしたがって透気係数は大きくなり、水セメント比との間に相関性が認められた。

表-4. 表層透気試験結果

供試体種別	W/C (%)	記号	表面水分率 (%)	透気係数 (×10 ⁻¹⁰ m ² /s)		透気深さ (mm)	透気性 クレード	評価判定
				各種				
				各値	平均			
一般骨材	50.0	50-①	4.3	5.9	73	4	劣	
		50-②	4.4	3.8	62	4	劣	
		50-③	4.5	2.9	59	4	劣	
	65.0	65-①	4.0	13	99	5	極劣	
		65-②	4.1	25	113	5	極劣	
		65-③	4.0	28	120	5	極劣	
	80.0	80-①	4.3	51	161	5	極劣	
		80-②	4.3	42	146	5	極劣	
		80-③	3.7	36	136	5	極劣	

次に表面吸水試験結果を表-5に示す。表面吸水試験の評価判定結果は、いずれも【劣】であったが、表層透気試験と同様に水セメント比が大きくなるにしたがって10分時点での表面吸水速度は大きくなり水セメント比との間に相関性が認められた。

表-5. 表面吸水試験結果

供試体種別	W/C (%)	記号	表面水分率 (%)	累積吸水量 (ml)	10分時点での表面吸水速度: P600 (ml/m ² /s)		評価指標 (ml/m ² /s)	評価判定
					各種			
					各値	平均		
一般骨材	50.0	50-①	4.3	3.8	0.97	0.250以下 (良)	劣	
		50-②	4.4	3.74	0.93		劣	
		50-③	4.5	3.73	0.97		劣	
	65.0	65-①	4.0	4.45	1.07	0.250~0.500 (一般)	劣	
		65-②	4.1	4.64	1.07		劣	
		65-③	4.0	4.7	1.14		劣	
	80.0	80-①	4.3	4.54	1.24	0.500以上 (劣)	劣	
		80-②	4.3	4.48	1.25		劣	
		80-③	3.7	5.20	1.46		劣	

水蒸気浸透試験結果より、単位面積あたりにおける通過する物質の移動速度の大きさを示す拡散係数の算出を行った。算出方法としてはフィックの第一法則により求めた。算出した拡散係数を表-6に示す。試験結果より内部湿度を高める状況を浸入・湿度を下げていく状況を浸出としてW/Cが大きくなるにつれて拡散係数が大きくなる傾向となった。また、浸入の方が浸出と比較して、拡散係数が高い傾向を示した。

表-6. 拡散係数一覧

条件	項目	W/C50%	W/C65%	W/C80%
浸入	表面水蒸気量 (kg/m ³)	0.0058	0.0064	0.0061
	見掛けの拡散係数 (cm ² /y)	103.0	101.0	156.5
浸出	表面水蒸気量 (kg/m ³)	0.0041	0.0035	0.0032
	見掛けの拡散係数 (cm ² /y)	13.1	26.9	51.8

図-3に算出した拡散係数を用いて各条件における水蒸気量と深度の関係を示す。拡散係数より求めた水蒸気量の変化は、浸入状態である内部相対湿度60%のコンクリートを相対湿度90%の環境下に半年間(182日間)湿度変化を受けたことを想定した場合、コンクリートの内部の湿度変化する最大深度はW/C80%の配合で55mmという結果となった。

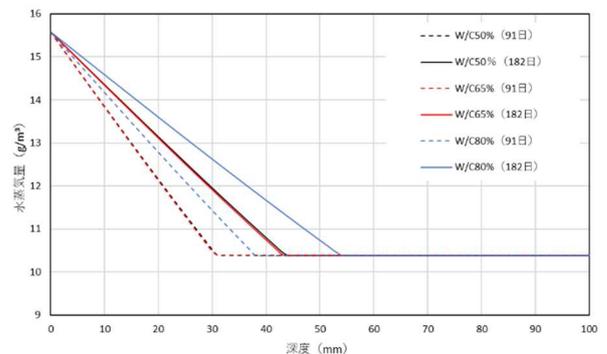


図-3. 試験体毎の水蒸気量と深度の関係 (182日間後)

水蒸気変化量と深度の関係を図-4に示す。相対湿度90%~60%の条件において場合の深度への影響を試算した。その結果、湿度変化が起こりえる鉄筋かぶり位置は、水セメント比によって異なるが、一般的に使用されるW/C50%の場合、半年間に1サイクルの場合200mm程度、1年間で1サイクルの場合、300mm程度まで湿度変化が発生することが分かった。

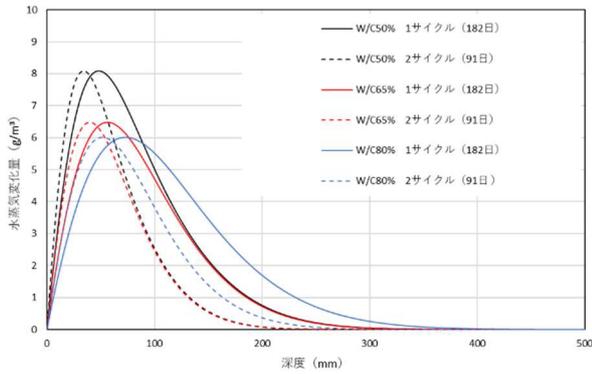


図-4. 水蒸気変化量と深度の関係

3. 鉄筋腐食度確認試験

3-1. 鉄筋腐食度確認試験方法

中性化後に乾湿繰返しを受けた場合における鉄筋腐食度を確認することを目的として鉄筋腐食度確認試験を実施する。試験項目を表-6に示す。使用した試験体のコンクリート配合を表-7に示す。作製した試験体は約80年前のコンクリート構造物を再現したコンクリート有筋試験体であり、この試験体に促進中性化を行い、表層から30～40mm中性化させた。(未中性化試験体含む)

乾湿繰返し条件は、既往の研究⁽¹⁾を参考に高湿度(40℃, 90%)1週間、低湿度(15℃, 60%)1週間で1サイクルと設定し、試験を実施した。今回鉄筋の取出しは8, 10, 16, 20サイクルで鉄筋の取出しを行い、自然電位の値を確認後、鉄筋をはつり出し、鉄筋全体を写真撮影し、鉄筋観察を実施した。鉄筋の腐食面積測定及び試験体作製前の鉄筋の単位質量との差から腐食減少量を算出した。

表-6. 試験項目数量

試験項目	試験数量	備考
促進中性化試験	12本	□10×10×40cm
鉄筋の取出し	15本	3本は未中性化試験体
鉄筋観察	15本	写真撮影含む
鉄筋腐食面積測定	15本	
鉄筋腐食量測定	15本	

表-7. コンクリート配合

骨材の種類	粗骨材 最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					スランブ (cm)	空気量 (%)	
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G40 G25 G20				
信濃川水系骨材	40	53.5	36	168	314	674	742	-	498	18	0.8

3-2. 鉄筋腐食度確認試験結果

はじめに乾湿繰返し条件での鉄筋箇所の温湿度を測定した結果を図-5に示す。モニタリング測定の結果、コンクリート内部の温度は、ほぼ時間差なく層内温度に追

随しているのに対し湿度は時間差があることがわかる。

特に今回の設定条件である低湿度60%および高湿度90%に対し、鉄筋箇所の湿度は低湿度で70～75%となり、高湿度で75～80%程度の変化であったことがモニタリングの結果から明らかとなった。

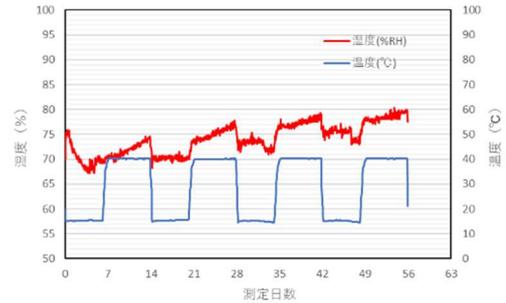


図-5. コンクリート内部温湿度変化

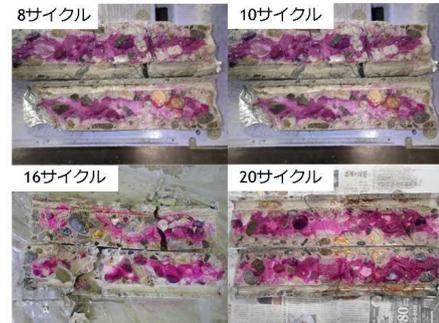


図-6. 解体した試験体の中性化状況

次に鉄筋を取り出した際に、解体したコンクリート面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、中性化の進行状態を確認した状況を図-6に示す。中性化させた試験体は、いずれも鉄筋の近傍まで中性化が進行していることが確認された。

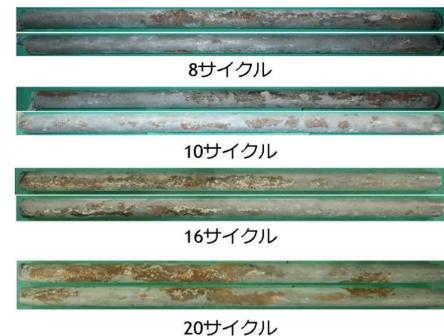


図-7. 取り出した鉄筋腐食状況

鉄筋を取り出した8サイクルから20サイクル目における鉄筋の腐食状況の一例を図-7に示す。各サイクルで取り出した鉄筋の表面観察を行った結果、いずれの鉄筋も発生した錆びは緻密な錆であり、浮き錆び等は確認されなかった。また、コンクリートにもひび割れやさび汁の発生は認められなかった。

表-8. サイクル毎における平均腐食面積率及び腐食減少率

サイクル	腐食面積率(%)	腐食減少率 (%)
8	10.6	0.04
10	6.0	0.04
16	12.7	0.06
20	22.4	0.08

表-8 にサイクル毎における腐食面積率と腐食量の平均を示す。試験体毎にばらつきはあるがサイクルを繰り返すとともに腐食面積率及び腐食減少量は増加している傾向が見られた。試験終了サイクルにおいては腐食面積率については平均で 22.4%であり、腐食減少量は最大でも 0.08%であった。除錆後の鉄筋には孔食等は確認されず健全な状態であった。

4. 現地温湿度計測

屋内コンクリートの内部温湿度測定を実施した。対象としては約 80 年前の屋内コンクリート構造物に小径コアおよびドリル削孔後、温湿度計を埋設した。(図-8 参照) 深度は、鉄筋近傍 (70mm) と表層側 (25mm) とし、2019 年 9 月から 1 年間計測を実施した。

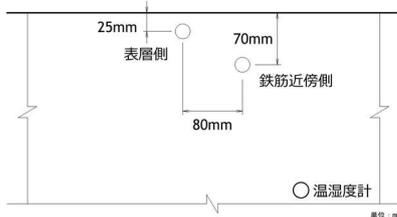


図-8. 温湿度計設置位置図

温度測定結果を図-9 に示す。計測の結果、内部温度については深度によって大きな違いは認められなかった。次に湿度測定結果より算出した水蒸気量を図-10 に示す。水蒸気量は最低で 6g/m^3 、最高で 30g/m^3 程度であった。特に 7 月～9 月の気温の高い時期に深度による差があった。また、コンクリート内部の乾湿繰返しサイクルは概ね 1 サイクル/年であることを確認した。



図-9. 現地温度計測結果

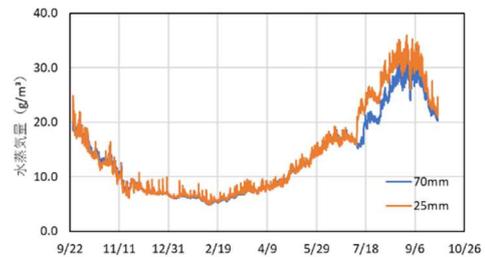


図-10. 現地水蒸気量結果

5. まとめ

水蒸気の浸透速度は水セメント比の増加に伴い高くなる傾向があることが確認された。しかし、一般的に使用される水セメント比 50～60%のコンクリートにおいてはその差は小さなものであった。この結果から水蒸気の浸透速度はコンクリートの細孔径や細孔量の影響度は限定的であるため、今後はコンクリートの劣化程度に着目し、乾燥収縮などのひび割れの有無や多寡により水蒸気の浸入速度等を確認し、水蒸気の浸透速度との関係を把握する必要があると考えられる。

鉄筋腐食度試験においては、20 サイクルまでにおいて腐食減少量は 0.08%と極めて小さく、中性化が鉄筋近傍まで進行した場合においても一般的に使用限界とされている加速期 (後期) ⁽²⁾まで鉄筋腐食が進行しないことが分かった。また現地計測結果より乾湿繰返しが 1 サイクル/年であることから、これらの知見を組み合わせると 20 サイクル程度であれば中性化したコンクリートであっても構造体に影響を及ぼす鉄筋の腐食減少量まで到達しないと考えられる。また、構造上影響を及ぼす腐食減少量に明確な規定はないが、コンクリート棒鋼の製造時の許容誤差が 5%⁽³⁾であり、この値を耐久設計上の限界量としている場合が多い。今後は得られた知見を活かして、現地条件に合わせた試験条件で試験データを蓄積し、加速期までのサイクル数を明らかにし、鉄筋腐食との関係性を把握する必要がある。

参考文献

- (1) Qi Lukuan 1・関博 2・高木言芳 3 中性化したコンクリートにおける乾湿繰返し作用による鉄筋腐食に関する研究 土木学会論文集 No. 697/ V-54, 1-11, 2002. 2
- (2) 一般社団法人地域環境資源センター「農業集落排水施設におけるストックマネジメントの手引き (案)」
- (3) コンクリート標準示方書「維持管理編:劣化現象・機構別」土木学会 [2013 年制定]