

ひび割れと鉄筋界面からの中性化進行に及ぼす乾湿繰返しの影響

芝浦工業大学 学生会員 ○小林 良輔 東京大学生産技術研究所 正会員 西村 次男
東京大学生産技術研究所 正会員 加藤 佳孝 芝浦工業大学 正会員 勝木 太

1. はじめに

コンクリート構造物に発生するひび割れは、構造物の劣化を促進する要因であると認識されており、これまでも多くの検討結果が報告されている¹⁾。実構造物を考えた場合、コンクリートの表面には乾燥収縮、アルカリ骨材反応などの様々な原因によってひび割れが発生する。ひび割れが発生すると、劣化因子（二酸化炭素、塩化物イオンなど）がひび割れからコンクリート内部に浸透しやすくなり、早い段階で鉄筋が腐食すると考えられている¹⁾。そこで本研究では、劣化要因の一つである中性化に着目し、実際の環境下を模擬した乾湿繰返しがひび割れからの中性化進行に及ぼす影響を実験的に検討した。

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm^3 、比表面積 $3300\text{cm}^2/\text{g}$ 、略号C)
高炉スラグ微粉末	高炉スラグ微粉末4500 (密度 2.91g/cm^3 、比表面積 $4310\text{cm}^2/\text{g}$ 、略号BS)
細骨材	(密度 2.63g/cm^3 、F.M2.90)
粗骨材	(密度 2.70g/cm^3 、F.M6.83 最大寸法20mm)
AE剤	マイクロエア303A
AE減水剤	ボソリスNe70

表-2 示方配合

配合記号	W/C (%)	s/a (%)	スラグ置換率 (%)	単位量(kg/m^3)						混和剤			
				W	C	BS45	S	G	AE(g)	AE減水 (ml)	スラン プ(cm)	Air(%)	
PL	50	43	—	179	448	—	667	986	4480	4480	13	7	
BS	50	43	45	171	188	154	742	1010	3420	3420	13	6	

PL：普通ポルトランドセメント
BS：高炉スラグ微粉末4500

表-3 要因と水準

要因	水準
養生	湿潤養生28日
ひび割れ幅	0.1mm、0.2mm、0.5mm
環境条件	case1、case2

2. 実験概要

実験で用いた材料を表-1、配合を表-2、実験要因と水準を表-3に示す。供試体は $100\times 100\times 180\text{mm}$ の角柱供試体とした。打設後24時間で脱型を行い、初期養生として湿潤養生28日間の後、圧縮試験機により割裂した。その後、表面ひび割れ幅、内部ひび割れ幅を均等に制御するために、割裂面に $3\times 3\text{mm}$ 程度の厚さの異なるテフロンシートを均等に6箇所にした。シートの厚さは0.1mm、0.2mm、0.5mmの3種類とした。次に再び割裂した供試体を合わせ、5面をアルミテープでシールして外部の影響を受けない状態とし、残った1面をひび割れ面とした。供試体の作成方法を図-1に示す。本試験では中性化促進試験槽と水中の2種類の環境を設け、供試体がおかれる環境の周期を変えることにより、ひび割れからの中性化進行における水分および二酸化炭素濃度の影響を検討した。周期の種類は2種類とし、case1は中性化促進6日、水中1日、case2は促進12日、水中2日を1サイクルとし、供試体の乾湿繰返しを

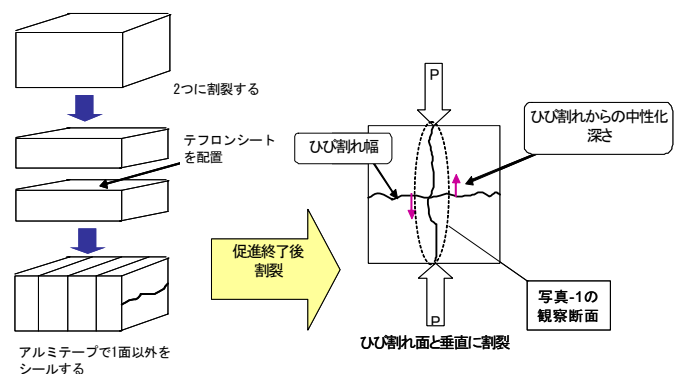


図-1 供試体作成方法

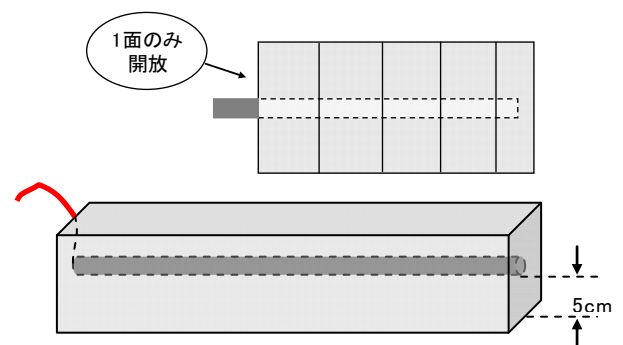


図-2 供試体概要

行った。二酸化炭素濃度の種類は case1 で 1%, 5%, 及び室内気中暴露(0.03%)の 3 条件, case2 で 5%とした。材齢 4 週, 8 週, 16 週, 32 週, 54 週とし, 設定した期間促進した後, 材齢ごとに供試体をひび割れ面と垂直に割裂した。その断面にフェノールフタレイン 1%溶液を吹付け, 非発色部を中性化部とし, 中性化深さをノギスで測定した。健全部においては開放面から供試体内部方向を中性化深さとした。

ひび割れが鉄筋まで到達した場合の中性化の進行と鉄筋腐食を観察するために, 1 側面のみ鉄筋をむき出しにし, 残りの 5 面をアルミテープで保護した (図-2 上図参照)。環境条件は case2 と同じである。

また, 中性化が鉄筋腐食に及ぼす影響を検討するために, ひび割れの存在しない鉄筋コンクリート供試体を作成した (図-2 下図参照)。内部に D10mm の異形鉄筋をかぶり 5cm の位置に配置し, 端部にリード線を繋げ自然電位測定で鉄筋腐食を把握できるようにした。環境条件は case2 と同じである。

3. 実験結果

3.1 健全部の中性化について

健全部の PL の中性化深さの推移を図-3 に, 中性化速度係数を表-4 に示す。図-3 には, 魚本・高田式²⁾ (式(1)) を適用した結果も合わせて示してある。表-4 から BS と PL を比べると BS のほうが中性化の進行が速い。これはセメントを高炉スラグで置換した場合, 水和反応時に水酸化カルシウムが消費されるため, 細孔溶液の pH 保持能力が低下するからである。case1, case2 の 5%促進を比較すると case2 の方が中性化進行していることがわかる。これは 2 週間単位で見ると case2 が水中に入れる回数が 1 回に対し case1 は 2 回のため, 中性化促進中でも高含水状態が続き, 結果として中性化が抑制されていると考えられる。また, 魚本・高田式 (式(1)) の予測結果よりも中性化の進行が遅いが, これは魚本・高田式が乾湿繰り返しを考慮していないためだと考えられる。

$$X = (2.804 - 0.847 \log C) \times e^{(8.748 - 2563/T)} \times (2.94WC - 101.2) \times 10^{-2} \times \sqrt{Ct} \quad (1)$$

X : 中性化深さ(mm), C : 炭酸ガス濃度(%), WC : 水セメント比(%), T : 絶対温度(T), t : 経過時間(週)

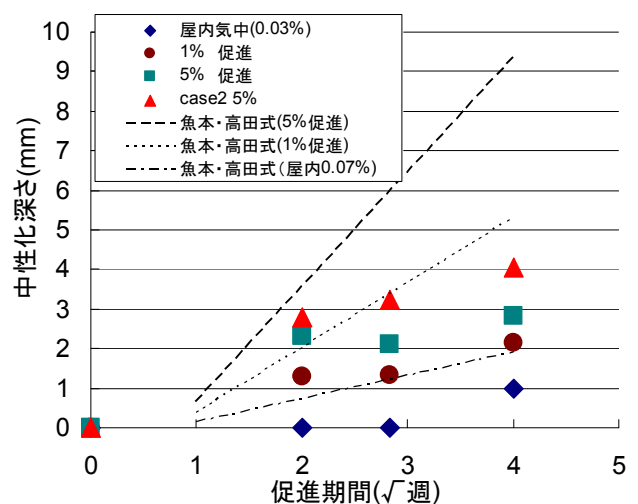


図-3 各環境条件における中性化深さ

表-4 中性化速度係数

材齢(週)	中性化速度係数(mm/√週)					
	PL-50-屋内	PL-50-1%	PL-50-5%	BS-50-屋内	BS-50-1%	BS-50-5%
8	0.13	0.40	1.35	0.41	0.80	1.79
16	0.17	0.50	1.12	0.37	1.12	1.94

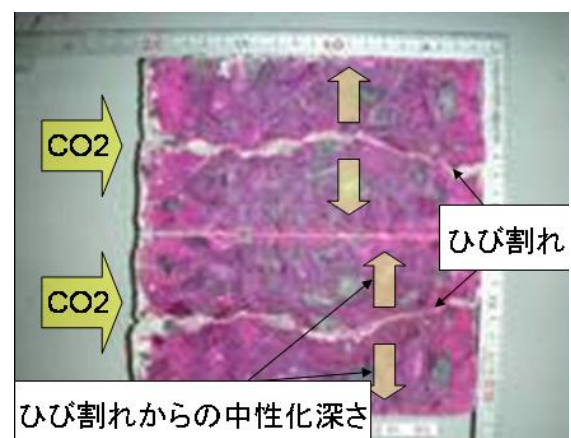
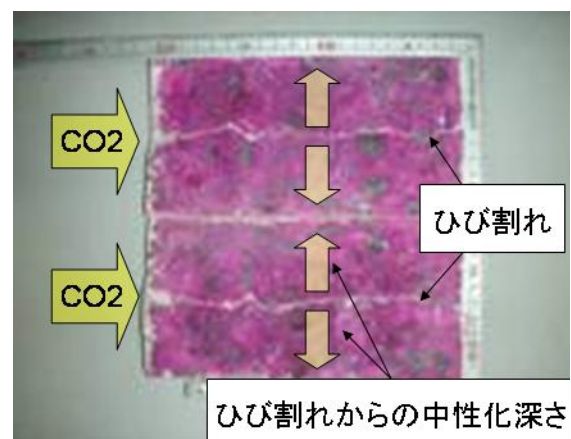


写真-1 ひび割れ面内部の中性化の様子 BS 5%促進
(上:促進期間 8weeks 下:促進期間 16weeks)

3.2 ひび割れ内部の中性化について

供試体をひび割れ面と垂直に割裂し、ひび割れ面から内部への中性化の検討を行った。評価方法として促進終了後、**図-1**に示すように割裂を行い、断面の観察を行った。**写真-1**に示すようにひび割れ面から内部への中性化を観察することは、ほとんど確認できなかった。水中期間では、ひび割れ内に水が進入し、その後の中性化期間では、ひび割れ内から水分が逸散すると考えられるが、本研究で設定した乾湿繰返しの条件下では、ひび割れ内に水分が残留し、結果としてひび割れ面から内部への二酸化炭素の浸透が抑制されたと考えられる。そこで、水分の残留程度を把握するために、水中環境後の供試体の質量減少量を計測した。本来であれば、ひび割れ内部の水量減少を計測すべきであるが、その計測は非常に難しく、本研究では供試体全体の質量変化を計測した（**図-4** 参照）。何れの環境条件もひび割れ幅は0.5mmであり、ひび割れ内に入る水分量は概ね均一であるはずだが、促進環境毎に僅かながら差が見られる。いずれにしても、中性化期間終了時点の6日後において、全環境条件において水分が完全に逸散していないことがわかる。前記したとおり、本計測では、ひび割れ内部のみを対象としていないため、今後詳細な検討が必要であるが、中性化期間中水分がひび割れ内に残留している可能性があり、その結果、中性化の進行が抑制されたと考えられる。今後、ひび割れ内部からの中性化を確認するためには長期材齢の確認、含水状態から乾燥するまでの時間やひび割れ内部の乾燥状態を再度検討する必要がある。

3.3 鉄筋近傍の中性化について

写真-2は促進試験12週を終了した各配合の鉄筋周辺部の様子である。これより鉄筋周辺での中性化の進行が顕著に見られる。各配合を比較するとPLで水セメント比が小さいものが中性化の進行が遅く、BSが早い傾向を示した。**図-5**に鉄筋近傍と健全部の中性化の進行の違いについて示した。

健全部に比べ鉄筋近傍のコンクリートの中性化進行が明らかに速いことがわかる。これはマトリックス部と比較して遷移帯と呼ばれる物質の通りやすい領域が形成されている⁴⁾ため、そこから炭酸ガスが浸透したものだと考えられる。最も中性化の進行が

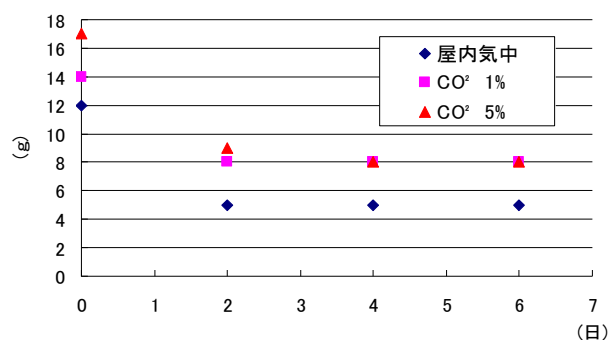


図-4 各環境条件における水中後の乾燥促進中の質量減少(ひび割れ幅 0.5mm)

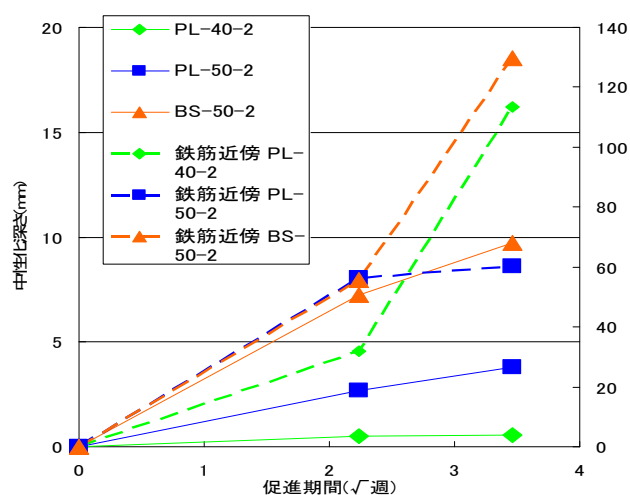


図-5 鉄筋近傍及び健全部中性化深さ推移

表-5 中性化速度係数

		5週	12週
健全部	PL-40-2	0.22	0.16
	PL-50-2	1.20	1.09
	BS-50-2	3.25	2.57
鉄筋近傍	PL-40-2	11.84	32.77
	PL-50-2	25.18	17.36
	BS-50-2	24.95	37.48

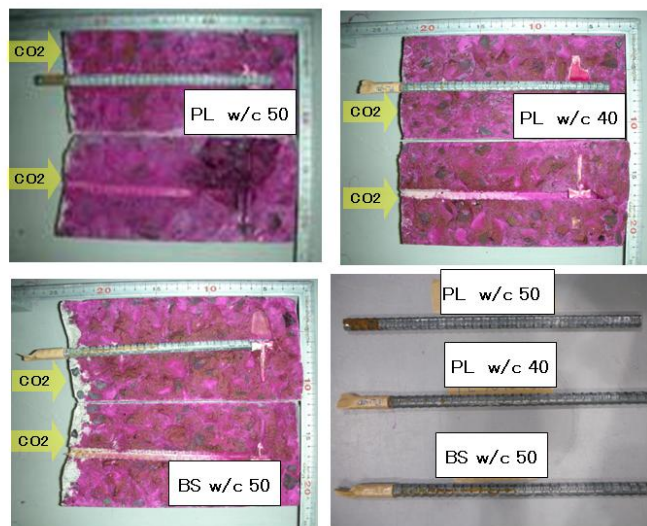


写真-2 鉄筋近傍の中性化進行及び鉄筋腐食状況

遅い PL, W/C 40%の供試体の健全部は殆ど中性化していないが、鉄筋近傍では中性化が進行していることからこの影響を確認できる。表-5 は、材齢 5 週および 12 週のそれぞれにおいて計算した中性化速度係数の結果であるが、健全部と比較して鉄筋近傍の方が非常に大きい値を示しており、中性化速度が速いということが分かる。前記したように、W/C 40%の場合は、材齢に応じて異なるが数 10 倍から数 100 倍、鉄筋近傍の中性化速度係数が大きくなっている。なお、材齢の経過とともに中性化速度係数が大きくなった供試体は、鉄筋が発錆、膨張し、コンクリートと鉄筋の界面の付着が弱くなったことも要因であると考えられる。

腐食状況に関しては、12 週経過後ではむき出し面に近い所からの発錆が確認でき、鉄筋腐食についても中性化の進行と同様な傾向となることが明らかになった。また、打ち込み面とは反対の面から鉄筋の腐食が見られるのは、水が打ち込み面方向に上がるのを鉄筋が防ぎ、そこに水分が溜まり、脆弱部を形成したものだと考えられる。

3.4 中性化が鉄筋腐食に及ぼす影響

前述したとおり、乾湿繰り返しを受けた場合、中性化の進行は魚本・高田式を用いた予測結果よりも小さいという結果が得られている。現在 12 週の材齢では魚本・高田式によると PL で 8mm と予測され、かぶりの 5cm 程度まで中性化の進行は至っていないと予測できる。表-6 に示した自然電位による鉄筋腐食推定基準と図-6 に示した自然電位を比較してみても鉄筋腐食の目立った傾向は見られていない。よって今後も実験を継続し、中性化の進行及び鉄筋腐食の状況を確認する必要がある。

4. まとめ

ひび割れ幅が 0.5mm と比較的大きなひび割れであっても、本研究で設定した乾湿繰り返し条件下では、ひび割れからの中性化の進行は確認することができなかった。これは、ひび割れ内の水分逸散が遅く、ひび割れからの二酸化炭素の浸透を妨げたためと考えられるが、今後も詳細な検討をしていく必要がある。

鉄筋近傍では中性化の進行が、健全部と比べて数

表-6 自然電位による鉄筋腐食推定基準⁵⁾

自然電位	推定
-200mVより貴	90%以上の確立で腐食なし
-200~-350mV	不確定
-350mVより卑	90%以上の確立で腐食あり

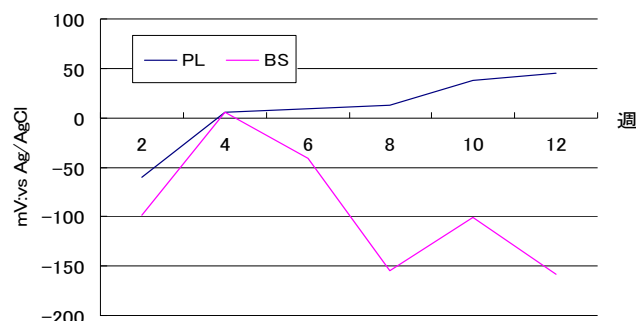


図-6 自然電位計測の推移

10 倍から場合によっては数 100 倍速く進行し、結果として内部の鉄筋も早期に腐食していた。

中性化が鉄筋腐食に及ぼす影響については、本実験では試験期間が短く中性化進行が鉄筋まで至らなかった。今後、長期的な計測を実施していく予定である。

謝辞

本研究では東京大学生産研究所岸・加藤研究室にて行ったものであり、同研究室の皆様にご協力いただいたことに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 伊代田岳史, 矢島哲司, 魚本健人: コンクリートのひび割れが中性化速度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol20, №2, pp979-984, 1998
- 2) 魚本健人, 高田良章: コンクリートの中性化速度に及ぼす要因, 土木学会論文集, №451, V-17, pp.119-128, 1992
- 3) 小松直人: ひび割れ発生時期とその後の環境条件の相違が中性化の進行に及ぼす影響, 土木学会関東支部, 平成 19 年度技術研究発表会論文
- 4) 魚本健人: コンクリート構造物のマテリアルデザイン, オーム社, 2007.7
- 5) 中川元宏 宮川豊章 服部篤史: 中性化を主因とする鉄筋腐食の自然電位による推定に関する実験的研究, 土木学会論文集No.781/ V66, 21-34, 2005.2