論文 コンクリートのひび割れ部における中性化と鉄筋腐食に関する研究

大竹淳一郎*1·橋本真幸*2·早野博幸*3·栩木 隆*4

要旨:本論文では、ひび割れを有するコンクリートの促進中性化試験を行い、以下のことを 明らかにした。ひび割れを有するコンクリートは、促進環境に曝されると即座に中性化がひ び割れの先端部まで到達した。さらにこの環境下で散水噴霧を行うと、ひび割れ幅に応じて 中性化の進行に違いが生じた。このとき、供試体に埋設したみがき棒鋼には、散水中性化の 環境でひび割れ幅が 0.05mm 以上の場合に腐食が生じた。これらの結果から、ひび割れの発 生が予想されるコンクリート構造物の中性化を照査する場合、そのひび割れ幅と立地環境と を考慮して検討する必要があることが示唆された。

キーワード:ひび割れ、中性化、散水、鉄筋腐食、自然電位、性能照査

1. はじめに

コンクリート標準示方書¹⁾(以下,「示方書」 という)の性能照査型への移行とともに、コン クリート構造物は,各耐久性照査項目を満足す ることが必須条件となった。一般的な耐久性の 照査は、既往の方程式や予測式を用いて可能で ある。しかし,示方書 [施工編] では温度応力 解析などにより,施工時の段階で構造物にひび 割れの発生が予測されるとき、耐用期間の耐久 性を照査する方法が十分に示されていない。ま た発生するひび割れが、各耐久性照査項目に対 して, 有害であるか無害であるかの判断基準も 明らかになっていない。そのような耐久性項目 のひとつとして、今回中性化に着目した。示方 書[施工編]での中性化の照査には「中性化深 さの設計値のばらつきを考慮した安全係数(一 般には 1.15) / が取り入れられている。この係 数は,「許容ひび割れ幅以下であれば,中性化進 行に与える影響は大きくないことを勘案してい る」とされている。しかし既往の文献²⁾により, ひび割れ幅の大きさは初期の中性化深さに影響 を及ぼす結果が示されている。

以上の背景から、本研究は初期に発生したひ

び割れを有する供試体の,中性化と鉄筋腐食と の関係を実験的に検討し,既往の研究などと比 較することで,今後の中性化照査技術の向上に つなげてゆくことを目的とした。

2. 実験

2.1 供試体

ひび割れを有する供試体の形状および型枠平 面図を図-1 に示す。10×10×40cm 型枠に間仕 切りを設けて5等分し,それぞれにステンレス 板と腐食判定用の鉄筋(研磨,脱脂後のみがき 棒鋼を使用)を配置した。表-1に示す配合のモ ルタルを型枠上面より流し込み,材齢1日で脱 型と同時にステンレス板を引き抜くことで初期 ひび割れを模擬した。その後は材齢2週まで 20℃一定の恒温室にて封かん養生を行い,さら に温度20℃,湿度60%の恒温恒湿室にて材齢4 週まで保管したのち曝露を開始した。なおひび 割れの幅と深さは,ステンレス板の厚さ(0.05,

(W/C55%のみ 0.2), 0.3, および 0.6mm) と長 さ (30, 50mm) を変えることによって調節し た。

ひび割れ部の中性化の測定には, A-A 断面お

*1	太平洋セメント	(株)	中央研究所技術企画部技術情報チーム(正会員)
*2	太平洋セメント	(株)	中央研究所研究開発部高性能コンクリートチーム 工修(正会員)
*3	太平洋セメント	(株)	中央研究所技術企画部技術情報チーム 工修(正会員)
*4	太平洋セメント	(株)	中央研究所技術企画部技術情報チームリーダー(正会員)



表-1 モルタル配合

よび B-B 断面の供試体を用い,ひび割れのない 健全部の測定には C-C 断面の供試体を用いた。

鉄筋の腐食は,埋設した鉄筋の自然電位,お よび試験後の供試体から取り出した鉄筋の腐食 面積率を測定することで評価した。

2.2 曝露方法

本実験では、供試体の曝露を表-2に示すよう に JIS A 1153の促進中性化試験と同じ条件の 「CO₂ 曝露」、およびこれと同一環境で1日あ たり2時間の散水噴霧を行う「散水曝露」とし た。

2.3 試験方法

本報告では以下の項目について試験を行った。 1)中性化深さ;供試体をひび割れと直交する方 向に割裂した後,割裂面にフェノールフタレ イン1%エタノール溶液を噴霧し,表面から 未着色部の先端までの距離を,ひび割れ部の 中性化深さとして評価した。ひび割れのない 健全な供試体については通常の測定方法と同 様に評価した。測定は材齢1,4,8,13 およ び 26 週で行った。

- 2)自然電位 ; 散水曝露供試体を対象に, 飽和 カロメル電極により材齢 4, 8, 13 および 26 週において測定した。
- 3)鉄筋腐食 ;取り出した鉄筋の腐食部を透明 フィルムに写し取り,腐食面積率を算出した。 測定は材齢 1,4,8,13 および 26 週で行った。

表-2 供試体曝露方法

	CO2濃度(%)	温度(℃)	湿度(%)	散水噴霧量
CO2曝露	5.0	20	60	なし
散水曝露	5.0	20	通常時60, 散水時100	1.0m ³ 槽内で約 3L/min(2hr/日)

3. 結果と考察

3.1 健全部の中性化深さ

図-2には、C-C断面における中性化深さの測 定結果を示す。一般に水分の存在により中性化 の進行が遅れることは知られており、本実験に おいてもこの現象が確認された。CO2曝露によ るW/C=65%供試体の材齢13週以降の中性化が 急激に増加したのは、中性化が鉄筋位置に達し た後、鉄筋とコンクリートとの界面を炭酸ガス が容易に回り込んだためと考える。これらの結 果から√t 則による中性化速度係数を算出する と表-3のようになり、W/Cにかかわらず中性化 速度係数の散水/CO2曝露相対比は 35%程度の 値を示した。



図-2 健全部における中性化深さと材齢との関係(上:CO2曝露,下:散水曝露)

表3	健全部における中国	生化读度係数
10 0	(性工目) しのいの て)	工心处决尔效

実験条件		中性化速度係数 (mm/√週)			
W/C(%)		45	55	65	
曝露	(a)CO ₂	2.49	2.80	6.19**	
方法	(b)散水	0.91	0.97	2.25	
散水/CO2比(%)		36.5	34.6	36.3	

※材齢8週までの結果から算出

3.2 ひび割れ部(A-A 断面)の中性化深さ

A-A 断面の供試体により、ひび割れ部の中性 化深さを測定した。図-3には、CO2曝露による 材齢4,26週の中性化深さの測定結果を示す。 これによるとひび割れ部の中性化深さは、W/C にはあまり影響を受けず、またひび割れ幅の大 きさにはわずかに影響を受ける程度であり、ひ び割れの有無によって支配されるといえる。材 齢4週で、中性化深さがひび割れ深さとほぼ同 じ値になったことから、たとえひび割れ幅が小 さくても,炭酸ガスは容易にひび割れ中を進入 して先端部まで到達すると考えられる。材齢26 週の中性化深さで比較すると W/C=55, 65%は 鉄筋位置には達しなかったものの 40mm 程度を 示し、W/C=45%はこれらよりも 5~10mm 程度 小さい値を示した。したがって、ひび割れ部の 中性化深さは、ごく初期の段階でひび割れ先端 に到達し、その後は W/C の影響を受けて進行す ると思われる。なお、ひび割れ先端部以降の中 性化の進行は、既往の研究²⁾と同様に緩やかに なる傾向が見られた。



図-3 CO₂ 曝露によるひび割れ幅と中性化深さの関係(上:材齢4週,下:材齢26週)

図-4には、散水曝露による材齢4,26週の中 性化深さの測定結果を示す。前述の通り、健全 部では散水により中性化が大幅に抑えられるこ とが確認された。しかし本結果により、ひび割 れ幅が大きくなるにつれて散水による中性化抑 制効果が薄れてゆくことが分かった。この現象 は、ひび割れ中の水分の挙動が中性化に対して 何らかの作用をしていると思われた。



図-4 散水曝露によるひび割れ幅と中性化深さの関係(上:材齢4週,下:材齢26週)

そこで、散水曝露による W/C=55%の供試体 の材齢と中性化深さとの関係をひび割れ幅ごと に表した測定結果を図-5 に示す。この図では、 ひび割れ幅が0.3mmの材齢8週における測定結 果のように、中性化深さが一時的に戻る現象が 見られた。これは既往の報告³⁾にもあるように、 乾湿繰り返しによる水酸化カルシウムの逆拡散 が作用したためと思われる。

ひび割れ幅 0.05mm の供試体が,中性化深さ の変動が小さく中性化深さが小さかったのは, 散水によりひび割れに浸入した水は抜け難いた め,乾湿繰り返しが生じ難いことと,炭酸ガス の進入を妨げたことが要因になったと思われる。





3.3 ひび割れ部(B-B 断面)の中性化深さ

B-B 断面の W/C=55%の供試体による材齢と 中性化深さとの関係を図-6 に示す。これまでの 結果と同様に, CO2 曝露の場合は,初期に中性 化深さがひび割れ先端(鉄筋位置)まで急速に 達すること,そして散水曝露の場合は,ひび割 れ幅が小さいほど中性化の進行が抑制されるこ となどがこの図から分かる。



図-6 B-B 断面における材齢と中性化深さとの 関係(上:CO₂曝露,下:散水曝露)

中性化の進行は $\int t$ 則により表されるのが一 般的であるが、これまでの結果からひび割れ部 において $\int t$ 則でフィッティングできないこと は明らかである。ひび割れ部の中性化はごく初 期の段階で鉄筋位置まで達し、その後の進行が 遅くなる傾向を示すことから、試みとしてかぶ りが上限となる exp 関数を用いた式(以下、「exp 式」という)に近似させた。中性化の進行が一 様である水準については、従来の $\int t$ 則で近似 させた。それぞれの近似係数と決定係数は**表**-4 のようになった。なお、exp 式には上限値があ るため、この式の適用範囲はかぶりよりも浅い 部分の中性化に限られる。

唱電	ひび幅		決定		
啄路	(mm)	式	а	b	係数 R ²
	0	\sqrt{t}	2.80	—	0.89
CO	0.05	\sqrt{t}	13.3		0.87
CO_2	0.3	exp	50	1.06	0.96
	0.6	exp	50	1.78	0.93
	0	\sqrt{t}	0.97		0.90
#4-1	0.05	\sqrt{t}	4.2		0.79
肞小	0.3	\sqrt{t}	11.8	—	0.90
	0.6	exp	50	0.62	0.96
		14	hts	LLIEA	

表-4 中性化深さの式による近似(W/C=55%)

※√t: a√t, exp: a(1-e^{bt}) t: 材齢(週)

3.4 鉄筋腐食への影響

B-B 断面による鉄筋の腐食状況を確認した結 果を表-5 に示す。近年の報告⁴⁾では,ひび割れ 幅が 0.1mm のときに中性化による鉄筋の腐食 が認められている。しかし,本実験では中性化 のみでは鉄筋に腐食は見られなかった。散水曝 露ではA-A 断面および健全部のC-C 断面の供試 体には腐食が生じなかったが,ひび割れが鉄筋 に達している B-B 断面には腐食が確認された。

B-B 断面の材齢と鉄筋腐食面積率との関係を 図-7 に示す。本測定結果からは、ひび割れ幅と 腐食面積率との関係は明確に示されなかったも のの、ひび割れ幅が 0.3mm の場合に材齢ととも に腐食が進むことが確認できた。この結果は、 既往の研究・調査⁵⁾において鉄筋の腐食が起こ る判断の目安とされるひび割れ幅 0.2~0.3mm と同じ傾向であったと考える。

表-5 鉄筋腐食測定結果(材齢26週)

W/C	ひび割れ	陈五	腐食面積率(%)	
(%)	幅(mm)	的田	CO_2	散水
	なし	C-C	0.0	0.0
55	0.05	B-B	0.0	1.68
33	0.3		0.0	17.8
	0.6		0.0	16.0



図-8は、散水曝露供試体による、自然電位と 腐食面積率との関係を示した図である。なお、 自然電位の値は、照合電極として銅硫酸銅電極 を用いた場合の単位(V vs.CSE)に換算するた めに、全ての測定値に-0.074(V)を加えた。



図-8 自然電位と腐食面積率との関係

ASTM C 876 による腐食性評価として,自然 電位が-0.35(V vs.CSE)以下の値を示すと 90%以 上の確率で腐食が生じ,-0.2(V)~-0.35(V vs. CSE)では不確定であるとしている。本実験では -0.2(V vs.CSE)近傍から腐食が認められ,-0.3(V vs.CSE)より卑な側ではほぼ全ての鉄筋に腐食が生じたことから,上述のASTMの基準よりも少し貴な側で腐食が起きたといえる。

3.5 中性化残りと鉄筋腐食

B-B 断面による,散水曝露における中性化残 りと腐食面積率との関係を図-9 に示す。図中横 軸の 0mm は鉄筋の位置を示す。

既往の文献⁶によると、一般の環境下では中 性化残りが 10mm を下回ると鉄筋腐食の恐れが あるとされている。本実験では、ひび割れ幅が 大きい供試体は、材齢 1 週から 4 週の間に中性 化が一気に進行し、この間に鉄筋が腐食したと 考えられるため、ひび割れ幅ごとのデータから は、腐食限界の中性化残りは明確に確認できな かった。しかし、全体的にグラフを見ると、中 性化残りが 10~20mm より小さくなると腐食が 始まる傾向を示している。





4. まとめ

本研究から得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 散水曝露による健全部の中性化速度は、 CO2曝露の約35%になった。
- (2) ひび割れを有する場合,初期段階で中性化 がひび割れの先端部に達し,その後は緩や かに進行した。散水を行うとひび割れ部の 中性化は,ひび割れ幅が小さいほど遅くなった。
- (3) 中性化深さと材齢との関係は、ひび割れ幅
 が 0.05mm 以下の場合、√t 則による近似が

可能であった。0.6mm 以上の場合はひび割 れ深さを上限とする exp 式に近い傾向を示 した。なお,0.3mm の場合は曝露条件によ り適用式が異なった。

- (4) 中性化のみでは鉄筋に腐食が生じなかった。 散水を行うことで、ひび割れ幅が 0.05mm のときにはわずかに、0.3mm を超えると顕 著に腐食が確認された。
- (5) 自然電位による腐食の判断は-0.2(V vs. CSE)程度が目安となり、ASTMの基準より も少し貴な側で起こった。
- (6)本実験により、ひび割れ部の中性化進行および鉄筋腐食は、ひび割れ幅と曝露環境に影響を受けることが明らかとなった。今後は、実際のひび割れ形状や曝露環境などを考慮した評価方法により検討したい。

参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書,2002
- 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, Vol.20, No.2, pp979-984, 1998
- 大賀宏行,佐伯竜彦,長滝重義:乾湿繰り 返しを受けるコンクリートの中性化に関す る研究,セメント・コンクリート論文集, No.43, pp.418-423, 1989
- 4) 橋口大輔,添田政司,大和竹史:初期に導入したひび割れがコンクリートの耐久性へ及ぼす影響に関する研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp729-734,2004
- 5) 阿部保彦:ひび割れ幅がコンクリートの中 性化深さに及ぼす影響に関する文献調査結 果,コンクリート構造物のリハビリテーシ ョンに関するシンポジウム論文集,pp.7-14, 1998
- 6) 岸谷孝一,西澤紀昭ほか編:コンクリート 構造物の耐久性シリーズ 中性化,技報堂 出版,1986