

鉄筋コンクリートに生じたひび割れを通過する各種溶液の組成変化に関する研究

東北大学 学生会員 ○伊藤 真利子
 東北大学 学生会員 納口 恭太郎
 東北大学 正会員 皆川 浩
 東北大学 正会員 久田 真

1. 背景と目的

ひび割れを有する鉄筋コンクリートの化学的侵食についての研究は種々存在し、酸性雨や塩分移動等、様々な劣化要因に着目して行われている。しかしながら、ひび割れを通過する溶液の種類と溶液中の各種イオン濃度の変化との関係、またはコンクリートの劣化性状および鉄筋腐食との関係は明らかにされていない。そこで本研究では、ひび割れ部での化学的侵食に関する基礎的研究として、種々の溶液をひび割れ部に滴下し、溶液の違いが鉄筋コンクリートの劣化過程に与える影響を検討することを目的とした。酸や塩、地下水模擬水溶液等 7 種類の溶液を、それぞれ鉄筋コンクリート供試体のひび割れ部に滴下し、ひび割れを通過した溶液の成分分析、ひび割れ断面の劣化性状および鉄筋の腐食状況の観察を行った。

2. 実験概要

本研究ではまず、W/C=55 %、寸法 100×100×400 mm、かぶり厚を 40 mm として D13SD345 の異形鉄筋を配置した鉄筋コンクリート角柱供試体を作製した。供試体中央部に曲げひび割れを導入した後、供試体と鋼板の間に支点となる丸鋼をひび割れに沿うように設置し、ひび割れ幅が最大 0.5mm となるまで供試体と鋼板をコの字型ボルトで締め付けた。

実験は、溶液を封入したポリタンクを 60 滴/ml で

滴下する点滴装置と接続し、5~8 秒に 1 滴の速さでひび割れ部に滴下して行った。溶液の種類と pH ならびに本文中で用いた記号を表-1 に示す。なお、地下水模擬水溶液は、青森県北部で採取された地下水の成分の分析例を参考にした。

ひび割れ断面を通過して供試体底面から流下する溶液を採取し、化学分析を行った。分析用溶液は、供試体下面から流下する溶液を 24 時間収集したものから採取した。採取時期は滴下開始 7 日目までは 1 日毎に、滴下開始 7 日目以降は 1 週間毎とした。採取した溶液はろ過した後、化学分析に供した。pH については pH メータで、Ca, Si の元素濃度については ICP 発光分光分析装置で測定した。また、溶液滴下開始から 8 週を経過した時点で供試体を割裂し、ひび割れ断面の劣化性状を観察した。さらに、割裂した供試体から鉄筋を取り出し、鉄筋の腐食状況を観察した。

3. 結果と考察

溶液がひび割れを通過する過程を図-1 に示す。溶液が滴下面からひび割れを通過して底面より流下する場合、溶液の成分がコンクリートへ浸透する現象と、コンクリートの成分が溶液中に溶出する現象が生じると考えられる。本研究では、浸透と溶出に着目した。浸透量および溶出量の算出式を以下に示す。

$$X = C_0 V - C V \dots\dots\dots (1)$$

表-1 溶液の種類

分類	記号	溶液の種類	想定溶液	質量濃度	pH
NaCl 水溶液	[NC03]	NaCl 水溶液	海水	3 %	6.20
	[NC35]	NaCl 水溶液	融雪剤溶解液	飽和(35 %)	5.86
硫酸系水溶液	[HS]	硫酸水溶液	下水道施設劣化環境	0.5 %	1.25
	[HSN]	酸性雨模擬水	酸性雨	※1	1.46
	[NS02]	Na ₂ SO ₄ 水溶液	JIS 規定骨材安定性試験方法 10 分の 1 濃度	2 %	6.17
地下水および水	[GW]	地下水模擬水溶液	地下水	組成; ※2	7.54
	[PW]	イオン交換水	比較基準溶液	—	7.10

※1 H₂SO₄=1.73, HNO₃=0.86 (g/l)
 ※2 NaCl=8.8, NaHCO₃=51.9, K₂SO₄=2.5, CaCl₂=13.8, MgCl₂=2.5, MgSO₄=15.0 (mg/l)

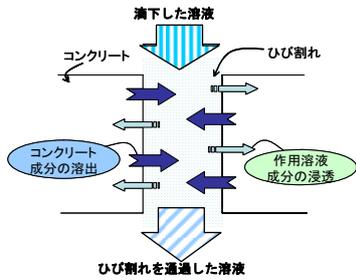


図-1 溶液のひび割れ通過の概念図

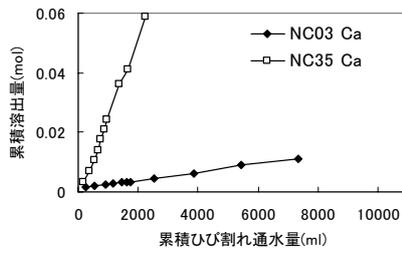


図-2 NaCl 水溶液の Ca 累積溶出量

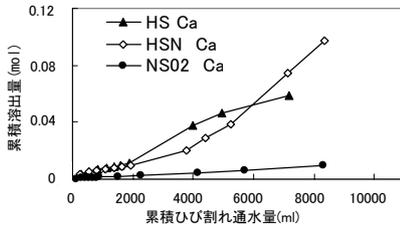


図-3 硫酸系水溶液の Ca 累積溶出量

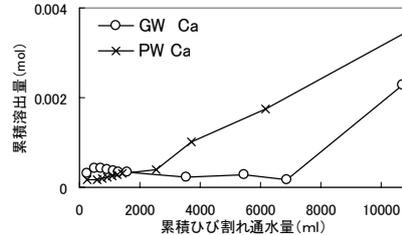


図-4 地下水および水の Ca 累積溶出量

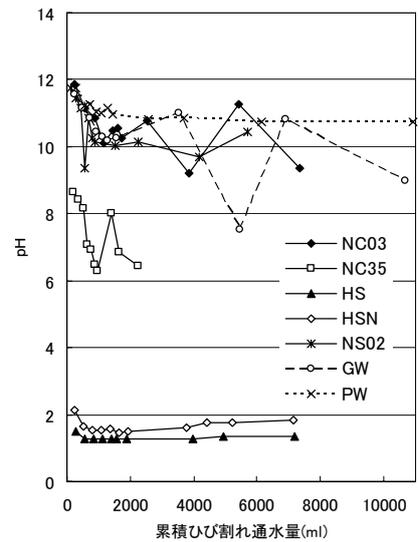


図-5 ひび割れ通過後の溶液の pH

ここに、 X : 浸透量 (mol), C_0 : 作用溶液の各成分初期濃度 (mol/L), C : ひび割れを通過した溶液の各成分濃度 (mol/L), V : ひび割れを通過した溶液の量(L). 滴下する溶液中に本来含まれていない成分については $C_0 = 0$ とした. (1)式において, X が正となった成分はコンクリートへの浸透が生じており, X が負となった成分はコンクリートからの溶出が生じている. コンクリートからの溶出が生じている場合, $-X$ を溶出量とした.

(1) ひび割れを通過した溶液の化学分析結果

ひび割れを通過した溶液の量の累積値を累積ひび割れ通水量とし, NaCl 水溶液, 硫酸系水溶液および地下水および水の滴下による Ca の溶出量の累積値と累積ひび割れ通水量との関係を図-2~図-4 に示す. また, ひび割れ通過後の溶液の pH と累積ひび割れ通水量との関係を図-5 に示す.

図-5 より NaCl 水溶液のひび割れ通過後の pH は滴下前よりも大きい値で推移している. また図-2 より NC35 の Ca 累積溶出量は NC03 のおよそ 10 倍であり, 滴下前の NaCl 水溶液の濃度比と一致する. NaCl 水溶液の滴下では, NaCl 水溶液とセメント水和物のイオン交換反応により, 水に易溶の $CaCl_2$ および $NaOH$ が生成する. このため NaCl 濃度が高いほどひび割れを通過した溶液の Ca 溶出量が大きくなり, pH も上昇したと考えられる.

図-5 より硫酸系水溶液のうち HS および HSN は滴下前溶液の pH が低く, 図-3 より Ca の溶出量が他の溶液と比較して大きくなった. これは HS および HSN

では, セメント水和物と溶液が反応しても OH^- は生じにくく, ひび割れを通過する溶液が低 pH に保たれ, コンクリートへの劣化作用が大きくなることを示している. 一方, NS02 では溶解度の低い石こうと $NaOH$ の生成による高 pH 雰囲気により, Ca の溶出量は HS, HSN と比較して小さくなったと考えられる.

地下水および水の滴下では, 図-4 より Ca 溶出量が小さい. これは滴下前溶液の pH が他の溶液よりも高く, またセメント水和物と反応する溶液中イオン量が少ないためであると考えられる. また, GW の含有イオンはセメント水和物と反応して Ca 溶出を抑制する可能性¹⁾があり, このために PW よりも Ca 溶出量が小さくなったものと考えられる.

なお, 全ての溶液において Si の溶出が確認されたが, Ca 溶出量と比較して Si 溶出量は少なく, セメント水和物のうち C-S-H よりも主として $Ca(OH)_2$ から Ca が溶出しているものと考えられる.

(2) 鉄筋の腐食

NaCl 水溶液を滴下した供試体において鉄筋の腐食が確認された. また, NaCl 溶液と比較して腐食面積が小さいものの, HS および HSN の滴下においても鉄筋腐食が確認された. Cl^- を含まず, かつ pH が高い NS02, GW, PW では鉄筋腐食は認められなかった.

参考文献

1) 蔵重勲ら 地下水含有成分がセメント硬化体の溶脱に及ぼす影響 第61回年次学術講演会 講演概要集 pp. 283-290, 2006. 9