

論文 ひび割れを有する鉄筋コンクリートの化学的侵食に関する基礎的研究

伊藤 真利子^{*1}・寺林 明日美^{*1}・納口 恭太朗^{*1}・久田 真^{*2}

要旨: 本研究では、鉄筋コンクリートのひび割れ部分における化学的侵食機構を検討するために、ひび割れを有する鉄筋コンクリート供試体に対して各種水溶液の滴下実験を行った。ひび割れ断面を通過した溶液の化学分析、ひび割れ断面および鉄筋の劣化状況を観察することで、滴下溶液の組成や濃度が、ひび割れ部および鉄筋の初期劣化に及ぼす影響の違いについて検討した。その結果、ひび割れ断面の通過によって生じた溶液成分の変化を各種水溶液ごとに明らかにし、鉄筋腐食については定性的な変化を把握することができた。

キーワード: 化学的侵食, ひび割れ, 鉄筋腐食, 滴下実験

1. はじめに

材料, 施工, 環境, 外力等, コンクリート構造物におけるひび割れ発生の要因にはさまざまなものが挙げられるが, コンクリート構造物を供用する上で, ひび割れ発生を避けることは困難であるのが現状である。特に, 鉄筋コンクリート構造物においては, ひび割れの発生により鋼材腐食も促進され, 構造物の耐久性に重大な影響を及ぼすことが知られている。

これまで行われてきたひび割れを有するコンクリートの化学的侵食の研究は, 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ものが多い。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。作用溶液として酸や塩, 地下水模擬溶液等 7 種の溶液を, 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

2.1 使用材料及び配合

セメントには, 普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³, 比表面積 3270cm²/g) を使用した。骨材には, 細骨材として宮城県大和町産山砂 (表乾密度 2.53 g/cm³, 吸水率 2.64%, 粗粒率 2.71%) を, 粗骨材として宮城県丸森町産砕石 (最大寸法 20mm, 表乾密度 2.84 g/cm³, 吸水率 1.32%, 粗粒率 7.01%) を用い, 水セメント比は 55%とした。コンクリートの配合を表-1 に示す。

表-1 コンクリートの配合

W/C	s/a	単位量(kg/m ³)				粗骨材(%)			
		W	C	S	G	5~10mm	10~13mm	13~15mm	15~20mm
55%	39%	174	316	815	1140	30	25	20	25

*1 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻准教授 博(工) (正会員)

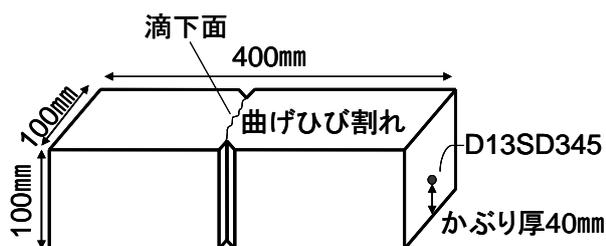


図-1 供試体概要



写真-1 ひび割れの導入

表-2 滴下溶液種類

記号	溶液の種類	濃度	pH
[NC03]	NaCl	3%	6.20
[NC35]	NaCl	飽和(35%)	5.86
[HS]	硫酸水溶液	質量比 0.5%	1.25
[HSN]	酸性雨模擬水	質量比; 硫酸:硝酸=2:1	1.46
[NS02]	Na ₂ SO ₄ 水溶液	2%	6.17
[GW]	地下水模擬溶液	組成;表-3	7.54
[PW]	イオン交換水	-	7.10

表-3 地下水組成

溶質	質量 (mg/l)
NaCl	8.8
NaHCO ₃	51.9
K ₂ SO ₄	2.5
CaCl ₂	13.8
MgCl ₂	2.5
MgSO ₄	15.0

2.2 供試体作製

(1) 寸法・形状

供試体概要を図-1に示す。本実験では100×100×400mmの角柱供試体を用い、かぶり厚を40mmとしてD13SD345の異形鉄筋を配置した。また、供試体中央に、曲げひび割れを誘発する

ためにノッチを設けた。供試体は打設後1日で脱型し、28日間水中養生した。

(2) ひび割れの導入

打設面および底面を支点として、3点曲げ载荷により供試体中央部に曲げひび割れを導入した。その後、一方のノッチ部に丸鋼を設置し、この丸鋼を供試体と長さ400mm、厚さ30mmの鋼板で挟むようにして、最大ひび割れ幅が0.5mmとなるまで写真-1に示すような状態でコの字型ボルトを用いて荷重を加えた。

また、打設面と底面以外の側面はエポキシ樹脂で被覆し、打設面については、ひび割れを中心として100mm×100mm四方の堰を設けた。これは、通水による侵食によりひび割れが閉塞し、作用溶液が溢れてしまうのを避けるためである。

なお、これらの作業の後、供試体を飽水させるため、滴下開始前24時間で水中養生を行った。

2.3 作用溶液の滴下方法と種類

溶液の滴下は、各種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、かぶりとみなした側と反対の面から5~8秒に1滴の速さで滴下した。滴下した作用溶液の種類とpHならびに本文中で用いた記号を表-2に示す。NaCl溶液の濃度は、NC03は海水を、NC35は融雪剤溶解液を想定している。なお、融雪剤の主成分としてNaCl以外のものも使用されているが、本研究では濃度の影響を検討する目的で、NaClを用いた。硫酸イオンを含む溶液に関しては、HSは下水道施設劣化環境を、HSNは酸性雨を想定した。なお、HSNの濃度は、陰イオンのモル濃度の和が0.3%硫酸溶液と同等になるように調整した。NS02はJISに規定されている硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法における濃度の10分の1に設定したものである。また、地下水模擬溶液は青森県北部で採取された地下水中に含まれる成分の分析例を参考にし、PWは比較基準溶液として用いた。

2.4 測定項目

(1) ひび割れ断面を通過した溶液の分析

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。供試体

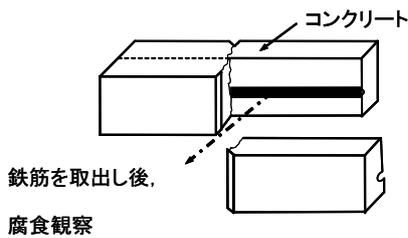


図-2 供試体の割裂方法

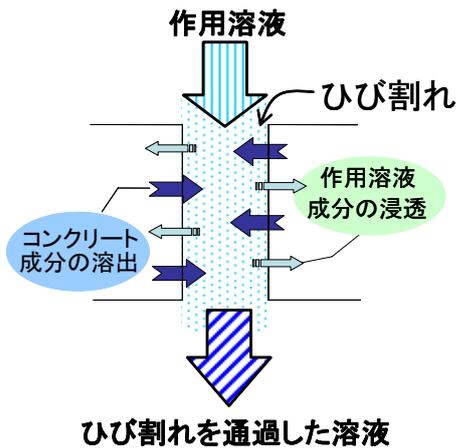


図-3 作用溶液のひび割れ通過

底面から流下する溶液は、24 時間連続的に採取し、全体を均一と考えて、分析用試料とした。試料を採取した後、容器に溜まった溶液を一旦廃棄し、流下した溶液の採取を改めて行った。これを滴下開始直後から 7 日間継続した。滴下開始後 7 日目以降については、6 日経過する毎に 24 時間連続的に採取したものを試料とし、以後同様の操作を繰り返した。採取した溶液は、孔径 $0.2\mu\text{m}$ のフィルターでろ過した後、溶液中の各成分濃度を測定した。濃度測定対象成分および測定方法は、Na, Ca, Si の元素濃度については ICP 発光分光分析装置で、Cl, SO_4^{2-} , NO_3^- の陰イオン濃度についてはイオンクロマトグラフィーで測定した。

(2) ひび割れ断面と鉄筋の観察

作用溶液滴下開始後、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。割裂方向を図-2 に示す。

3. 結果と考察

3.1 概要

作用溶液がひび割れを通過する過程を図-3 の模式図に示す。作用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、作用溶液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作用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て考察を行った。浸透量および溶出量の算出式を以下に示す。

$$X = C_0V - CV \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、X : 浸透量 (mg)

C_0 : 作用溶液の各成分初期濃度 (ppm)

C : ひび割れを通過した溶液の各成分濃度 (ppm)

V : ひび割れを通過した溶液の量(L)

作用溶液中にもともと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、 $-X$ (mg) を溶出量とした。

(1) NaCl 水溶液の滴下による作用溶液成分の変化

ひび割れを通過した溶液量の滴下開始時からの累積値を累積ひび割れ通水量とし、同様に浸透量および溶出量の累積値を累積浸透量、累積溶出量とする。

図-4 に NaCl 水溶液の滴下実験における累積ひび割れ通水量の経時変化ならびに累積ひび割れ通水量と各成分の累積浸透量、累積溶出量の関係を示す。累積ひび割れ通水量の 7 日目までの短期経時変化を見ると、NC35 の方が傾きが小さく、この傾きを維持したまま 7 日目以降も推移した。この傾向は NC03 についても同様である。NC35 は滴下直後から滴下面で NaCl の結晶と思われる物質の析出が見られ、これがひび割れ通水量が減少した原因のひとつと考えられる。しかし、NC03 も NC35 も累積ひび割れ通水量の経時変化が定常的であることから、NaCl の作用に

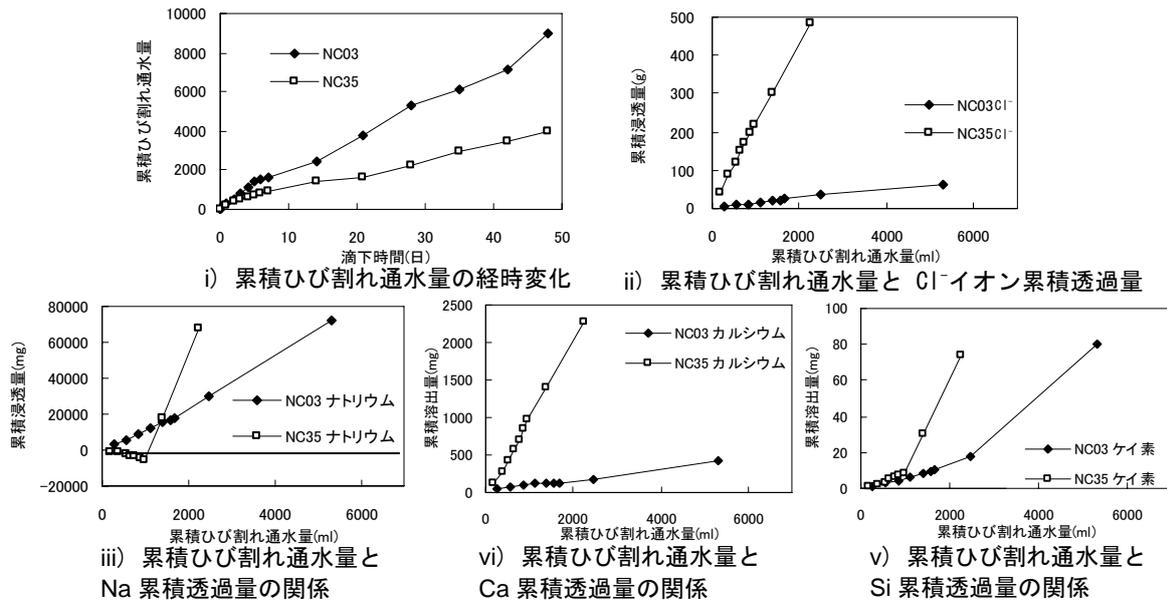


図-4 NaCl 水溶液の滴下による作用溶液成分の変化

よるひび割れ幅の変化は生じていないと考えられる。

浸透成分である Cl⁻は、NC03 の累積浸透量が NC35 の累積浸透量のおよそ 10 分の 1 を保って推移しており、初期塩分濃度もまた、NC03 は NC35 のおよそ 10 分の 1 で一致する。Na については、NC35 では初期においては、溶出と見られる負の値を示す期間があるものの、その後は浸透量が卓越し、NC03 の浸透量を大きく上回った。塩分濃度が大きいほど供試体表面に溶質が析出しやすと考えられ、浸透量の増減に影響を与えた可能性がある。

コンクリート中からの溶出成分である Ca は、NC35 の累積溶出量が NC03 の累積溶出量のおおよそ 10 倍を保って直線的に増加している。つまり、Ca の溶出速度は一定で、かつ NC03 と NC35 の塩分濃度比と Ca の溶出速度比が同じであることがわかる。

一方、Si については、滴下初期段階では溶出量は塩分濃度に依存しないという傾向を示した。しかしながら、時間の経過とともに増加傾向を示し、増加の程度は塩分濃度により違いがみられた。さらに、溶出量は Ca と比較すると総じて少なく、Ca(OH)₂ の溶出が C-S-H の溶出に先行していると考えられる。

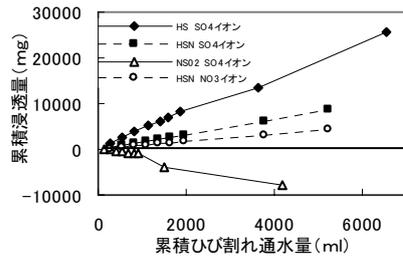
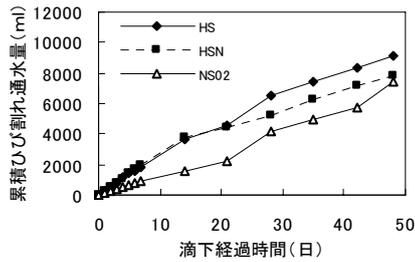
表-4 酸性溶液中の陰イオン濃度

作用溶液	陰イオン	濃度 (g/l)
[HS]	SO ₄ ²⁻	4.74
[HSN]	SO ₄ ²⁻	1.66
	NO ₃ ⁻	0.86

(2) 硫酸系水溶液の滴下による作用溶液成分の変化

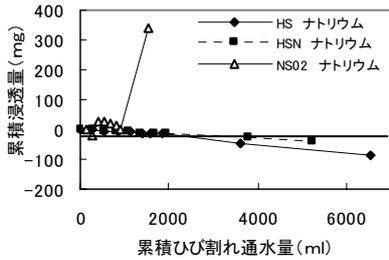
HS、HSN、NS02 をまとめて硫酸系水溶液とした。図-5 に硫酸系水溶液の滴下実験における累積ひび割れ通水量の経時変化ならびに累積ひび割れ通水量と各成分の累積浸透量、累積溶出量の関係を示す。累積ひび割れ通水量の 7 日目までに着目すると、HS と HSN ではほぼ一致するが、NS02 は、この期間からすでに他の溶液よりも通水量の変化が小さかった。NaCl 水溶液の場合と同様に、硫酸系水溶液も累積ひび割れ通水量の経時変化の初期の傾きを維持したまま 7 日目以降も推移した。

HS、HSN において、両溶液中の SO₄²⁻および NO₃⁻の濃度を表-4 に示しているが、HS 溶液中の SO₄²⁻濃度および SO₄²⁻累積浸透量は、それぞれ HSN のおおよそ 3 倍となっており、SO₄²⁻濃度と SO₄²⁻累積浸透量も、ほぼこの倍率を保ちながら

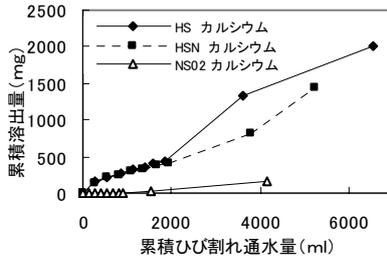


i) 累積ひび割れ通水量の経時変化

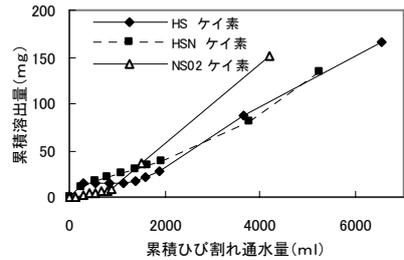
ii) 累積ひび割れ通水量と累積 SO_4^{2-} 浸透量の関係



iii) 累積ひび割れ通水量と累積 Na 浸透量の関係

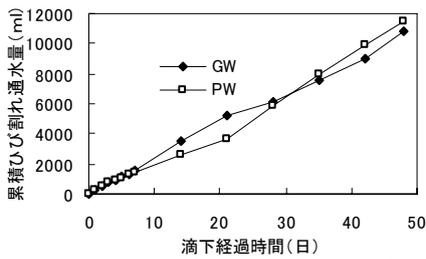


iv) 累積ひび割れ通水量と累積 Ca 溶出量の関係

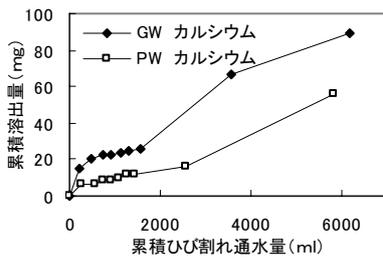


v) 累積ひび割れ通水量と累積 Si 溶出量の関係

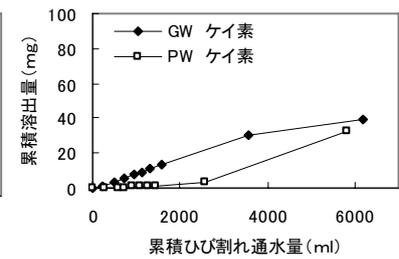
図 - 5 硫酸系水溶液の滴下による作用溶液成分の変化



i) 累積ひび割れ通水量の経時変化



ii) 累積ひび割れ通水量と累積 Ca 溶出量の関係



iii) 累積ひび割れ通水量と累積 Si 溶出量の関係

図-6 地下水および水の滴下による作用溶液成分の変化

推移した。

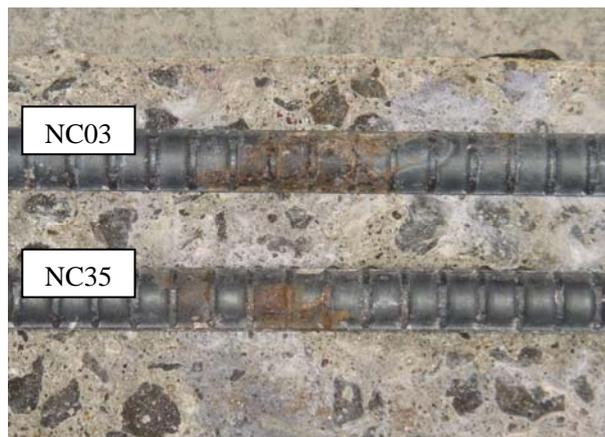
HS, HSN における Na 濃度の変化は、負の値を示しており、このことから、Na はコンクリートから溶出していることがわかる。Na, Ca および Si の溶出量は、作用溶液の濃度が異なっているにもかかわらず、ほぼ一致している。

ここで、溶液の種類と各成分の挙動を整理すると、NSO2 では、 SO_4^{2-} は溶出、Na は浸透が生じているが、HS, HSN では SO_4^{2-} は浸透、Na は溶出しており、NSO2 とは正負の異なる傾向を示した。また、HS, HSN に比べて、NSO2 では Ca の溶出がほとんど認められなかったのが特徴的である。これは、硫酸塩と酸によるコンクリートの劣化のメカニズムの違いや作用溶液の pH の違いなどが原因として考えられる。

硫酸ナトリウム水溶液はセメント水和物との反応により、NaOH が生じて pH が大きくなるという特徴がある。一方、酸性溶液とセメント水和物との反応では NaOH は生じず、pH は低くなり、Ca が溶出しやすい環境になっていたと考えられる。

(3) 地下水および水の滴下による作用溶液成分の変化

GW, PW の滴下においては、滴下する溶液中成分が含まれないか、微量であるため、コンクリートから溶出する可能性のある成分として、Ca および Si に着目した。Ca および Si の累積ひび割れ通水量と、累積ひび割れ通水量と累積溶出量との関係を図-6 に示す。累積ひび割れ通水量の経時変化が初期の傾きのまま定常的に増加して



写真—2 鉄筋の腐食状況

いるのは他の作用溶液と同じである。さらに同一の滴下時間における累積ひび割れ通水量が同等であるため、現時点では地下水の成分がコンクリートに対して影響を及ぼしているとは考えにくい。

なお、GW、PW で Ca の溶出量に違いが見られるものの、他の作用溶液に比べれば微量であるため、有為な差であるか否かを判断するためにはさらに継続した検討が必要である。GW における Si の溶出状況は、PW に比べて滴下初期における溶出速度が大きいのが特徴である。

3.2 鉄筋の腐食性状

所定期間の滴下終了後にコンクリートを割裂して取り出した鉄筋を観察した。滴下 4 週および 8 週経過時点では、NC03 と NC35 および HSN において、ひび割れ部分を中心に腐食が観察された。NC03 と NC35 の、滴下 8 週経過時点でのひび割れ近傍における鉄筋の腐食状況を写真—2 に示す。HSN の鉄筋腐食はごく一部で、4 週時点と 8 週時点で状況を比較したが、両者に大きな違いはなかった。どちらの場合も腐食面積が小さいため、腐食性状の違いについて詳細に調べるとともに、滴下した溶液中の成分の変化と鉄筋腐食との関連性などについて、今後さらに検討する予定である。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 滴下実験を通じ、ひび割れ通過に伴う作用溶液中の成分の変化を作用溶液毎に把握することができた。
- 2) NaCl 水溶液の滴下では、初期塩分濃度と Cl⁻ および Na 浸透量に比例関係は見られないが、初期塩分濃度と Ca の溶出量におおよその比例関係が見出せた。
- 3) HS および HSN の滴下では作用溶液中の SO₄²⁻ 濃度と SO₄²⁻ 浸透量に比例関係が認められたが、Na、Ca および Si の溶出量は SO₄²⁻ 濃度によらなかった。また、NS02 の滴下では SO₄²⁻ の溶出、Na の浸透が生じており、HS、HSN の滴下とは異なる傾向を示した。
- 4) 地下水およびイオン交換水の滴下では Ca の溶出量に違いがあるものの、他の作用溶液に比べて微量である。
- 5) 鉄筋腐食については定性的な結果が得られたが、溶液中の成分変化やコンクリートの劣化進行との関係性について今後検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 水上国男：化学的侵食，技法堂，1986
- 2) 小林一輔：コンクリート構造物の早期劣化と耐久性診断，森北出版，1991
- 3) 小林一輔，宇野祐一，森弥広：酸性雨によるコンクリート構造物の劣化機構に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.564/V-35，pp.243-251，1997.5
- 4) 土木学会：コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究の現状，2003
- 5) 蔵重勲ほか：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

謝辞：本研究は、(財)電力中央研究所 蔵重勲氏ならびに東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 皆川浩助教による実験指導を受けて行いました。ここに記して謝意を表します。