

塩化物イオン濃度分布に与える降雨の影響及び移流拡散方程式による評価

京都大学工学部 学生会員 ○久保 拓真
京都大学大学院工学研究科 正会員 安 琳

住友生命保険相互会社(元京都大学研究生) 白井 睦弥

1. 序論

沿岸部のコンクリート構造物には塩害という問題があり、コンクリート内部の塩化物イオン濃度分布や塩化物イオンの浸透深さを精度良く予測できるようになることで、この塩害に対してより適切な維持管理を行うことができる。降雨はコンクリート内部の塩化物イオン濃度分布や塩化物イオンの浸透深さに影響を与える要因の一つであるが、この影響についての研究は少ない。本研究では、乾燥方法やサイクル数といった条件を変えながら降雨を模した室内試験を行うことで、コンクリート内部の塩化物イオン濃度分布に与える降雨の影響を調べた。そして、筆者らの研究グループの先行研究¹⁾の計算モデルを応用して試験結果を再現し、計算モデルの妥当性及び塩化物イオン濃度分布、浸透深さについて考察した。

2. 降雨を模した滴下試験

滴下試験には40×40×160 mmの直方体のモルタル供試体(W/C=0.6, 材齢7日)を用い、40×160 mmの側面はエポキシ樹脂で被覆している。塩水での浸漬3時間と乾燥炉での乾燥21時間を全ての供試体に10回繰り返し、繰り返した後の塩化物イオン濃度分布を初期条件とした。その後、表1にある乾燥方法とサイクル数の条件で供試体を3体ずつ用意し、滴下試験を行った。case1が初期条件である。作成した滴下装置を用い、1サイクルの滴下時間は3時間、乾燥時間は21時間とした。滴下には蒸留水を用い、滴下量は毎時間100 mlである。乾燥炉を使用しているcaseがあるのは、同じ時間でより長い乾燥時間を模擬するためである。滴下試験後、各供試体を表面からの深さ10 mm毎に切断し、電位差滴定により塩化物イオン濃度を測定した。塩水浸漬時の重量変化を図1、塩化物イオン濃度分布を図2に示す。図1、図2の値は各条件で用いた3体の供試体の平均値とした。case1と比較すると他のcaseは表面の塩化物イオン濃度が低く、深さ30 mm~50 mmでの塩化物イオン濃度が高くなった。これは、滴下による水分の浸透に伴い表面付近の塩化物イオンがより深部に浸透したためと考えられる。また、塩化

物イオンの浸透深さは45 mm~65 mmとなった。同じ時間でより長い乾燥時間を模擬するために行った乾燥炉による乾燥では、case5がcase4より表面付近では塩化物イオン濃度が低い、より深くまで塩分が浸透していることがわかる。室内乾燥においてcase3がcase2よりも塩分濃度が全体的に低いのは、塩水浸漬の時にcase3がcase2に比べ塩水があまり浸透せず(図1)、試験前の供試体内部の塩分が少なかったためと考えられる。しかし、case2とcase3の塩化物イオン濃度分布の傾向は似ており、10サイクルではあまり変化しないと考えられる。これらの結果から、乾燥時間が長いほど塩化物イオン濃度分布が変化しやすく、より深部まで浸透すると考えられる。

表1 滴下試験の条件

case	乾燥方法	サイクル数[回]
1	—	—
2	室内乾燥 (20℃)	10
3	室内乾燥 (20℃)	20
4	乾燥炉 (50℃)	10
5	乾燥炉 (50℃)	20

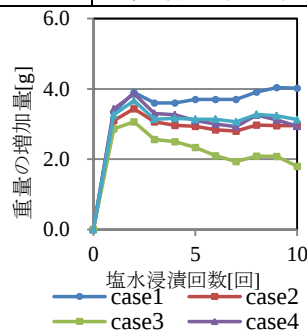


図1 初期塩水浸漬時の質量

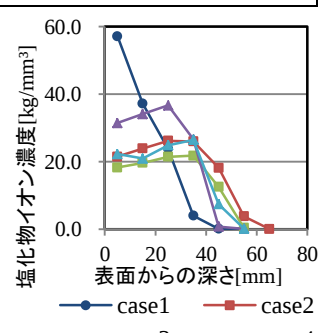


図2 滴下試験後の塩化物イオン濃度分布

3. 移流拡散方程式を用いた計算モデル

先行研究で使用された計算モデルを応用し滴下試験後の供試体内部の塩化物イオン濃度を計算する。この計算モデルは移流拡散方程式を基に有限差分法を用いており、深さのみの一次元領域で塩化物イオン濃度分布を計算するモデルである。

3. 1. 飽和度分布、塩化物イオン濃度分布の計算

コンクリート内の水分の移動拡散によるものだけと

キーワード コンクリート、塩化物イオン濃度分布、移流拡散方程式

〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1 棟 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻構造工学講座橋梁工学分野 TEL 075-383-3170

し Fick の拡散方程式(1)を用い、塩化物イオン濃度 $C_t(\text{mm}^2/\text{s})$ の計算は移流拡散方程式(2)を用いた。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (1)$$

θ : 細孔中の飽和度, x : 浸入面からの深さ(mm),

t : 経過時間(s), $D(\theta)$: 水の拡散係数(mm^2/s)

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = -\nabla \cdot (j_{c,cl} + j_{d,cl}) \quad (2)$$

$j_{c,cl}$ $j_{d,cl}$: 移流, 拡散による流量フラックス($\text{mol}/\text{mm}^2/\text{s}$)

また, 計算モデルの滴下中の境界条件に椿らの研究²⁾によって求められたコンクリート表面で洗い流される塩化物イオン量の式(3)を参考にした。

$$W_s = \alpha \log_{10} t + \beta \quad (3)$$

W_s : 洗い流された塩化物イオンの単位面積当たりの量

α : 入射角度の影響を表す係数(0.11), β : 作用する速度の影響を表す係数(0.1), t : 降雨が当たる時間[min]

3. 2 塩化物イオン濃度分布の計算結果

case1 の飽和度分布及び塩化物イオン濃度分布の計算結果を図4に示す。塩化物イオン濃度分布の結果において試験結果と計算結果が概ね一致しており、この計算モデルが十分な精度を持つことがわかる。またサイクルが増えると、深さ40mm以降で飽和度が収束していくことがわかる。一方、表面から深さ40mmまでの範囲では乾燥前後で飽和度が大きく変化している。塩化物イオンの浸透深さも約40mmであり、飽和度が大きく変化している範囲とほぼ一致していることから、塩化物イオンが浸透する際に移流が大きな影響を与えていたと考えられる。また、飽和度分布から水分の浸透深さは40mm以上であるとわかるが、この水分の浸透深さよりも、飽和度分布の乾燥前後で大きく変化している範囲がより塩化物イオンの浸透深さに大きな影響を与えていると考えられる。

各 case の計算結果と実験によって得られた濃度分布の比較を図5に示す。試験結果と計算結果は傾向が概ね一致したが、表面の洗い流しの効果や移流の影響が実際よりも計算上では大きくなっていたと考えられる。また、各 case の飽和度分布は省略しているが、各 case でも case1 と同様に飽和度分布の乾燥前後で大きく変化する範囲と塩化物イオンの浸透深さが概ね一致し、本モデルにより降雨の影響を受けた塩化物イオン濃度分布を予測できる可能性があると考えられる。試験結果よりも計算結果が表面付近において塩化物イオン濃度が低く、洗い流し効果の影響を再検討する必要がある。

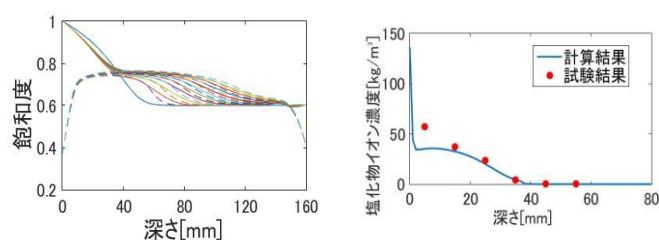


図4 case1 の飽和度分布及び塩化物イオン濃度分布

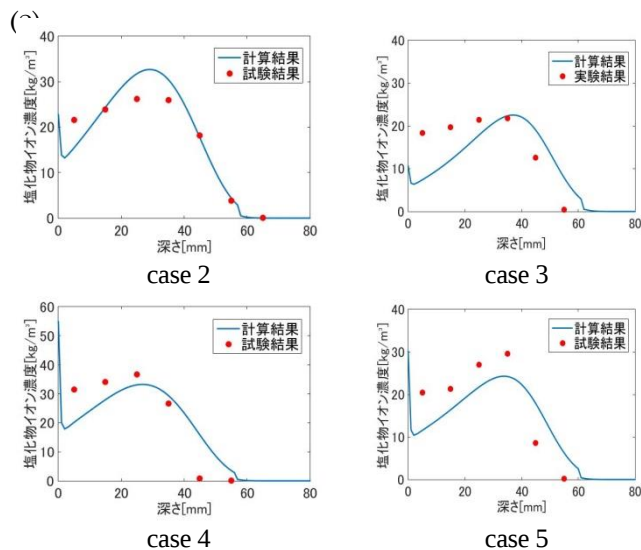


図5 塩化物イオン濃度分布

4. 結論

- 1) 降雨と乾燥のサイクル数が多くなるまたは降雨と乾燥サイクルにおける乾燥期間が長くなるほど、塩化物イオンがより深くまで浸透すると考えられる。
- 2) 計算結果の飽和度分布と塩化物イオンの浸透深さから、乾燥前後で飽和度が大きく変化する範囲において塩化物イオンの移流が起り、塩化物イオンが深部へ浸透すると考えられる。また、飽和度があまり変化しない範囲ではほとんど塩化物イオンが浸透せず、移流があまり起きていないと考えられる。
- 3) 計算結果が実験結果の塩化物イオン濃度と概ね一致しており、本モデルでは降雨の影響を受けた塩化物イオン濃度分布を予測できる可能性があるといえる。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 15H02261 の助成を受けた。

参考文献

- 1) 白井睦弥, 三歩一奏人, 平野裕一, 安琳, 白土博通: 移流拡散方程式による乾湿の激しい環境下でのコンクリート内部の塩化物イオン濃度分布評価, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, V-435, 2017.8
- 2) 椿龍哉, 定月良倫: コンクリート表面に付着した塩化物の表面水流による洗い流し, セメント・コンクリート論文集, No.65, pp.384-391, 2011