

京都大学 学生会員 ○内藤 智大 正会員 高谷 哲
 正会員 山本 貴士 フェロー会員 宮川 豊章

1. 研究目的

近年、ASRの抑制対策として、亜硝酸リチウム(LiNO₂)をコンクリートに内部圧入する工法が用いられるようになってきている。この際、コンクリート内部に十分な亜硝酸イオン(NO₂⁻)が浸透していれば、防錆効果を発揮すると考えられるが、NO₂⁻の浸透に関する検討は少ない。そこで、本研究では、様々な削孔間隔、削孔深さでLiNO₂の圧入を行い、LiNO₂圧入工法におけるNO₂⁻の浸透性状の検討を行った。また、その結果を元にNO₂⁻の浸透予測モデルの構築を試みた。

2. 実験概要

供試体は600×400×150mmまたは400×400×150mmの角型供試体とした。供試体内部には鉄筋を150mmピッチで直交配筋し、実構造物のスラブを模擬した。使用したコンクリートのW/Cは62%、圧縮強度は28.8N/mm²、引張強度は3.03N/mm²であった。LiNO₂の圧入は、供試体かぶり面に直径10mmの削孔を施したのち、0.8MPaの圧力をかけて行った。実験要因は、削孔間隔3種類(200, 300, 400mm)、削孔深さ2種類(75, 100mm)とし、表-1に示す4パターンの実験を行った。LiNO₂の目標圧入量は各供試体ともに400ml(492g)とし、122時間圧入を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 圧入量と呈色反応

圧入終了後、各圧入容器からのLiNO₂圧入量を求めた結果を表-2に示す。さらに供試体を切断し、切断面に呈色液TDIを塗布してNO₂⁻の浸透状況を確認した。江良らの研究¹⁾から、呈色反応の程度を反応大、反応中、反応無に分け、それぞれの境界部でのNO₂⁻濃度を順に20kg/m³、15kg/m³とした。各供試体の呈色反応大および呈色反応中の範囲を測定した結果を表-3に示す。

表-1 供試体一覧

削孔深さ (mm)	削孔間隔 (mm)	200	300	400
	75	CASE 1	CASE 3	CASE 4
100		CASE 2	-	-

表-2 亜硝酸リチウム圧入結果

	LiNO ₂ 圧入量(ml)	LiNO ₂ 圧入量(g)	平均NO ₂ ⁻ 濃度(kg/m ³)
CASE 1	104	128	4.6
	120	148	
CASE 2	160	197	6.3
	196	241	
CASE 3	12	15	0.4
	13	16	
CASE 4	192	236	4.5
	185	228	

表-3 呈色反応大および中の範囲

	反応大	反応中
CASE 1	0~46mm	46~54mm
	0~50mm	50~59mm
CASE 2	0~60mm	60~70mm
	0~60mm	60~69mm
CASE 4	0~51mm	51~61mm
	0~58mm	58~72mm

注) 表中の値は削孔中心からの距離

3.2 浸透予測式の検討

LiNO₂内部圧入により、ある程度内部までNO₂⁻が浸透することを考える。まず圧力勾配下における流束Jは以下の式により表現できると考えられる²⁾。

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} + C \frac{dP}{dx} \tag{1}$$

ここに、D: 拡散係数、C: NO₂⁻濃度、P: 圧力である。圧入により、つり合い状態になったと仮定してJ=0、圧力勾配dP/dxを一定と仮定し圧力に関する係数K_p=dP/(dx・D)としてまとめ、さらに各圧入孔における圧入量と削孔周面積の関数として表すと、NO₂⁻濃度C(x)は次式により表現できる。

$$C(x) = k \frac{W_p}{A_p} \exp[K_p x] \tag{2}$$

ここに、 k : 圧入に関する係数、 w_p : NO_2 圧入量(g)、 A_p : 削孔孔面積(mm^2)である。いずれの CASE においても呈色反応から求めた濃度勾配が概ね等しいため、 K_p については同じ値を使用できる可能性が高い。そこで式(2)を用いて係数 k を求めるトライアルを行ったところ、 $K_p=0.02$ と定め、 k を適切に定めることが出来れば、図-1 のように精度良く実験結果を表現できることが分かった。ここで用いた k の値を w_p/A_p で整理した結果を図-2 に示す。図を見ると、圧入に関する係数 k は単位面積当たりの圧入量 w_p/A_p の関数として次式により表現できることが分かる。

$$k = 2000 \exp \left[-12 \frac{w_p}{A_p} \right] \quad (3)$$

3.3 浸透と拡散

本実験で得られた NO_2 浸透モデルの整合性を確認するために、実験諸元の異なる江良らの実験について同様の解析を行った結果を図-3 の実線で示す。江良らの実験では、1つの削孔につき 9.77kg の LiNO_2 を圧入しており、削孔直径 20mm 、深さ 800mm であったため、解析には $W_p=3390\text{g}$ 、 $A_p=16000\text{mm}^2$ を用いた。圧入のみを考慮した予測は、呈色反応とややずれていることが分かるが、これは江良らが圧入 126 日後に呈色反応試験を行ったためと考えられる。圧力浸透のみに加え、126 日間の拡散現象を考慮した。コンクリート中の NO_2 の拡散係数については知見が少なく定めるのが困難なため、塩化物イオンの拡散係数($1.5\text{cm}^2/\text{年}$)を用いて拡散方程式を解いた結果を図-3 の破線に示す。拡散を考慮することにより、ある程度江良らの実験結果を再現できていることが確認できる。

4. 結論

- 1) 圧力浸透モデルで、 LiNO_2 圧入による NO_2 の浸透状況を表現できる可能性があることが示された。
- 2) 本実験の範囲内では、圧力に起因する係数 K_p は同じ値を用いることができ、圧入に関する係数 k は削孔単位面積当たりの実圧入量を用いて評価できることが分かった。
- 3) 江良らの実験結果と違いが生じたのは、圧入後の拡散で NO_2 が移動したことが原因と考えられ、今後圧入後の NO_2 の拡散について検討が必要である。

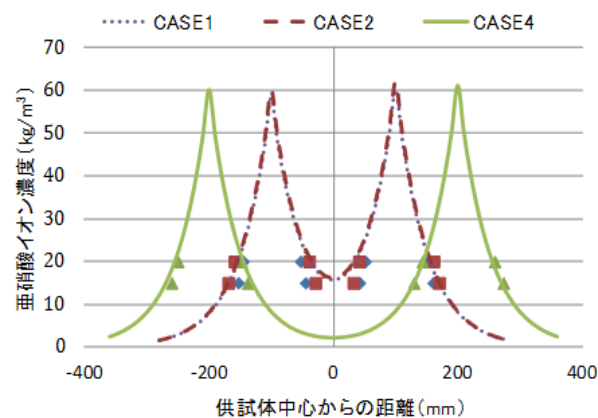


図-1 呈色反応結果と解析結果

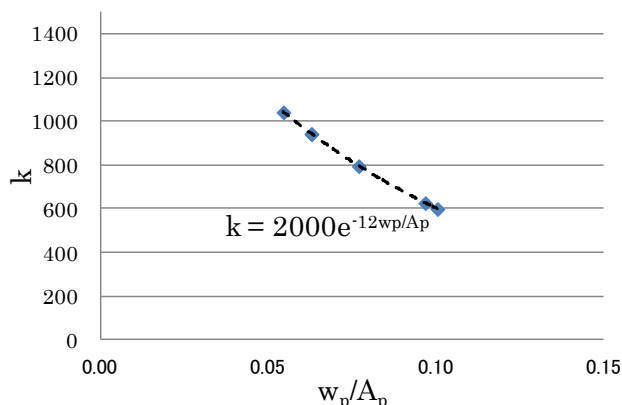


図-2 圧入に関する係数 k と単位面積当たりの圧入量 w_p/A_p の関係

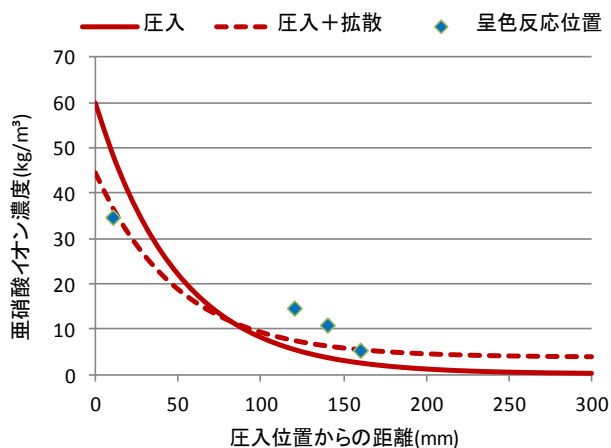


図-3 本実験で得られた浸透モデルを用いた江良らの実験に対する解析結果

参考文献

- 1) 江良和徳：リチウムイオン内部圧入による ASR 抑制効果に関する研究，京都大学博士論文，2010
- 2) 小岩昌宏，中嶋英雄：材料における拡散—格子状のランダムウォーカー，内田老鶴圃，2009