論文 酸性雨とひび割れを考慮したコンクリートの中性化進行に関する 解析的検討

岸本 嘉彦*1·佐藤 靖彦*2·鉾井 修一*3

要旨:ひび割れがコンクリートの中性化の進行に及ぼす影響をについて,材料内の熱水分同時移動を考慮可能な中性化進行予測モデルを用いた2次元解析により,周期的に酸性雨を受ける条件下について検討した. 幅 0.4mm,深さ20mmのひび割れ近傍における解析の結果,ひび割れが含水率分布に及ぼす影響は,ひび割れの中心線から10mm以内の範囲であった。ひび割れの中心線から数mm以内の範囲における中性化の進行は,ひび割れも酸性雨もない場合に比して,2.38倍の促進される結果となった。

キーワード:酸性雨,中性化,ひび割れ,液水移動

1. はじめに

種々の荷重や日射の作用による温度差,施工水の蒸発 に伴う乾燥収縮などにより,部材に応力が働くと変形が 起こり,程度が著しい場合にはひび割れが生じる。ひび 割れが発生すると,大気中のCO₂等の流入量を増加させ, コンクリートの中性化を促進する。また,コンクリート のように水分伝導率の小さな材料においては,ひび割れ 部分と一般の壁体での水分移動量に大きな差が生じる¹⁾。

従来,コンクリート構造物が降雨に曝される場合には, 材料表面が飽水状態となるために気体の酸性物質の拡 散が抑制され,中性化の進行は遅くなると考えられてい る²⁾。しかし,その際に降雨は中性と想定されているが,

実際の降雨は、日本国内においても pH 値が 5.6 以下の酸 性雨であることが多い³⁾。その場合、CO₂等が液水に溶 解するプロセスはすでに材料外部で行われており、さら に内部での移動は空隙中の気体拡散ではなく雨水の移 流に依る。そこで既報⁴⁾では、酸性雨が中性化の進行に 及ぼす影響について検討し、透水性が高い場合には降雨 が無い場合に比して、中性化がより速く進行することを 明らかにした。

すなわち,表面にひび割れを有するコンクリート構造 体が酸性雨に曝される場合には,酸性雨により中性化が 促進される可能性がある。

以上のことより、本研究は、既報⁴⁾ で提案した材料内 部の液水移動を考慮可能な中性化進行予測解析モデル を用い、表面にひび割れを有するコンクリート構造物の 中性化の進行に及ぼす酸性雨の影響について検討を行 うものである。



2.1 基礎式

本研究では、中性化反応はコンクリート内部の Ca(OH)₂と外部から溶解する CO₂との間で起きるものと する。

図1に、本解析モデルを模式的に示す。ここでは、材料をセメント硬化体と空隙により構成されるものとし、 セメント硬化体を固相、空隙内に存在する液水を液相、 空隙内の空気を気相と定義する。 CO_2 は気相と液相, $Ca(OH)_2$ は液相と固相にそれぞれ存在するものとする。 気相厚さ L_g と液相厚さ L_l の和は空隙率と等しく、液相 厚さ L_l は、容積含水率 Ψ_w により決定され($L_l=\Psi_{wL}$)、中 性化反応が起こっても固相厚さ L_s は変化しない。

微小要素内の各相における化学物質の濃度分布はそ れぞれ一様とした。

以上の仮定に基づき,各相における化学物質の収支式 は式(1)~式(4)となる。

2. 中性化進行予測モデル

*1	北海道大学	大学院工学研究科環境創生工学専攻	博士研究員	博士(工学)	(正会員)
*2	北海道大学	大学院工学研究科環境創生工学専攻	准教授	博士(工学)	(正会員)
*3	京都大学	大学院工学研究科建築学専攻	教授	工博	(非会員)

$$\frac{\partial C_{gCO_2}}{\partial t} = \nabla \cdot \left(D_{gCO_2} \nabla C_{gCO_2} \right) - \alpha_{gl} \left(f(C_{lCO_2}) - C_{gCO_2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_{ICO_2}}{\partial t} = \nabla \cdot \left(D_{ICO_2} \nabla C_{ICO_2} \right) + \alpha_{gl} \left(f(C_{ICO_2}) - C_{gCO_2} \right) -\nabla \cdot \left(v_l C_{ICO_2} \right) - M_{CO_2} k \left[CO_2 \right]_l \left[Ca(OH)_2 \right]_l$$
(2)

$$\frac{\partial C_{lCa(OH)_2}}{\partial t} = \nabla \cdot \left(D_{lCa(OH)_2} \nabla C_{lCa(OH)_2} \right) + q_{lCa(OH)_2} \Big|_{y=L_{to}} -\nabla \cdot \left(v_l C_{lCa(OH)_2} \right) - M_{Ca(OH)_2} k \left[CO_2 \right]_l \left[Ca(OH)_2 \right]_l$$

$$\frac{\partial C_{lCaCO_3}}{\partial t} = M_{CaCO_3} k \left[CO_2 \right]_l \left[Ca(OH)_2 \right]_l$$
(3)
(4)

式(1)および式(2)において, $f(C_{lco2})$ は液相 CO_2 濃度と 平衡する気相 CO_2 濃度を表している。以下の解析おいて は、 CO_2 の溶解速度は材料内の拡散移動に比して十分大 きく、 CO_2 は気相と液相とで瞬時に平衡すると仮定した。 また、液相に平衡する気相濃度は、次の Henry の法則に より与えられると仮定した。

 $H_{CO_2}C_{gCO_2} = C_{lCO_2}$

20

熱および水分に関しては,式(6)および式(7)に示(分熱水 分同時移動方程式を用いる。なお,水分の収支式には中 性化反応による生成項が含まれる。反応熱は小さいもの として無視した。

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left\{ \left(\lambda + R \cdot \lambda'_{T_g} \right) \nabla T \right\} + \nabla \cdot \left(R \cdot \lambda'_{\mu g} \nabla \mu \right)$$
(6)
$$\rho_w \frac{\partial \psi_w}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\lambda'_{\mu} \nabla \mu \right) + \nabla \cdot \left(\lambda'_T \nabla T \right)$$
$$+ M_{H_2 O} k \left[CO_2 \right]_l \left[Ca(OH)_2 \right]_l$$
(7)

2.2 中性化深さの定義

固相の Ca(OH)₂の液相への溶解は、気相の CO₂が液相 に溶解する速度に対し十分大きいとみなした。従って、 液相の Ca(OH)₂濃度は、その領域の中性化が完了するま で飽和とされ、中性化反応により固相の Ca(OH)₂が消費 される。ここで中性化の完了とは、領域の固相の Ca(OH)₂ が完全に消費されたことを意味する。中性化深さとは、 固相の Ca(OH)₂が完全に消費された領域のうち、材料表 面から最も深い位置までの距離とする。

2.3 移動係数

本解析モデルにおいては、水分化学ポテンシャル勾配 による水分移動係数 λ'_{μ} と温度勾配による水分移動係数 λ'_{T} を含水率の関数として作成し、解析に用いた。

コンクリートの水分移動係数としては、基本的には小 椋⁵⁾ により報告されているものを用いた。すなわち、不 飽和時においては Göran⁶⁾によって測定された湿気伝導 率(0.0006[g/mhmmHg])を、飽和時(水分移動係数の最 大値)には既報⁴⁾ において測定したコンクリートの透水 係数を用いた。相対湿度 98%から飽和にかけての含水状 態における湿気伝導率については、測定値が無いため内 挿により与えた。

表1 各種物性値

<u> </u>			_		-			721						land a s		ム本ケ
			21	台度	٤		노	款		歀	[[]	导≃	۴ł	拡	散1	11 354
		\geq	[k	g/m	1 ³]	[]	kJ/k	gK]	[]	N/n	nK	1]	m^2	's
コンクリート		2300		0.933			1.624									
	CO ₂		1.064								5.75×10 ⁻⁸					
			1	1.904								n _	^{被相} 1.80×10 ⁻⁹			
C	Ca(OF	I) ₂	2	2.24	ļ		\langle	_	_	/		/		1.8	$30 \times$	10-9
16-	r															-
14-	1															A
12-															/	
10-																
									-							Ŀ
										_						F
6-									/		-					
								ί	k-							
4-						-										-
4- 2-			_			_										
4- 2- 0-	0 1	0	20	3	0	40 相	₅ 対湿	i0 夏度	60	 	70	8	0	9	0	100
4- 2- 0-	0 1	0	20	3	0	40 相: 平	5 対湿	i0 夏度 含水	60 [%] ,率I	 曲彩	70 R ⁶⁾	8	0	9	0	100
4- 2- 0- 0-	0 1	0	20	3	0 2	40 相 平	5 対温 資音	。 夏度 含水	60 [%] [率	曲彩	70 (6)	8	0	9	0	100
4- 2- 0- 0	0 1 ↓ 20m	0 0	20	3	0	40 相 平	5 対温 資音	50 建度 含水	60 [%] (率)		70 R ⁶⁾	8	0	9	0	100
4 - 2 - 0 -	0 1	0	20	3	0	40 相: 平	5 対 万 行 行	i0 建度 含水	60 [%] 率I		70 R ⁶⁾	8	0	9	0	100
4 - 2 - 0 -	0 1	0 0	20	3	0	40 相: 平		50 建度 含水	60 [%] [率 [70 k ⁶⁾	8	0	9	0	100
4 - 2 - 0 -	0 1	0 0	20	3	2	40 相: 平	5 対 万 行 行 行	50 建度 含水	60 [%] (ጆ)		70 (6)	8	0	9	0 10 10 10 10	100
4- 2- 0-	0 1	0 0	20	3	2	40 相: 平	5 対湿 衡音	50 夏度 含水	60 [%] :率I		70 (6)	8	0	9	0 10 10 10 10 10	100
4- 2- 0-		0 0	20	3	2	40 相: 平	5 対 済 後 手	50 建度 含水	60 [%] 率I	······	70 (6)	8	0	9	1 10 100 100 100 100 100	100
4- 2- 0-			20	3	2	40 相: 平	5 対	50 建度 含水	60 [%] 运率I		70 k ⁶⁾	8	0	9	0 10 10 10 10 10 10 10 10 10	100
4- 2- 0-	0 1		20	3	2	40 相: 平	5 対 済 後 手	50 建度 含水	60 [%] :率I		70 (6)	8		9	1 0 10 10 10 10 10 10 10 10	100
4- 2- 0-			20	3	2	40 相: 平	·····································	50 建度 含水	60 [%] [率]		70 (6)	8		9	0 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	

図3 解析対象

150mm

 CO_2 等の拡散係数は,既往の文献⁷⁾の実験結果を再現 できるよう決定した⁸⁾。これらの物性値を表1に示す。 また平衡含水率については,Göranによって測定された データを用いた。図2に温度 $20[^{\circ}C]$ における平衡含水率 曲線を示す。計算においては,これを水分化学ポテンシ ャル μ - 容積含水率 Ψ 関係に変換して用いた。

3. 解析対象と計算方法

3.1.解析対象

解析に用いたコンクリート構造体の断面を要素分割 とともに図3に示す。この構造体の表面に深さ20[mm], 幅は深さに関係なく 0.4[mm]一定と仮定したひび割れを 想定した。解析範囲は、X方向(ひび割れの深さ方向) については、材料表面から深さ150[mm]、Y方向につい ては、ひび割れ幅の中心線から100[mm]までの2次元領 域とする。

3.2 境界条件

降雨のパターンは 10 日毎に 6 時間の雨が繰り返され るとした。材料表面,ひび割れ内部では熱,湿気,化学 種の伝達を考慮し,降雨が無い時間は,材料表面側空気 の温湿度を 20[°C], 60[%]とする。このとき,材料表面 の CO_2 濃度に周辺空気と同じ 0.035[%]を与える。

降雨がある時間は、材料表面が飽水状態になると想定 し、材料表面の温湿度を 20[℃], 100[%], 材料表面の CO2 濃度に 3.5[%]を与える。材料内部側(x=150[mm]), 上面側(y=0[mm])および下面側(y=1000[mm])では熱, 水分,各化学種とも移動はないものとする。

3.3 計算方法

数値計算は、有限差分法によって行う。図3に示すように、空間刻みはX方向については、材料表面から深さ50[mm]までの領域において1[mm]とし、50[mm]より深部において10[mm]とした。Y方向については、ひび割れ中心線から10[mm]までの領域において1[mm]とし、それ以外の領域では10[mm]とした。時間刻みは、降雨が無い時間には0.2[s]、降雨がある時間には0.01[s]とした。

ひび割れと酸性雨が中性化の進行に及ぼす影響 1 中性化深さによる比較

ここでは、中性化フロントにおけるアルカリ消費量を 比較することにより、ひび割れ近傍の中性化の進行に及 ぼす酸性雨の影響について検討する。降雨の影響を明確 にするために、含水率の初期条件は全領域において均一 な分布とした。すなわち、材料内全領域の温湿度を 20[℃], 60[%]とし、それと平衡となる含水率(5.4[vol.%])を与 えた。初期中性化深さは0,10[mm]の2水準とする。材 料内の CO₂濃度は 0[%],液相 Ca(OH)₂濃度は、未中性化 領域においては 100[%],中性化完了領域においては 0[%] を与えた。

計算は,助走期間を1日間設け,計21日間行った。 すなわち,開始から24~30時間後,264~270時間後の 期間に降雨を設定した条件(計2回)となる

(a)含水率分布の変化

図4(a)~(d)に計2回の降雨終了時とその10日後の 含水率分布を,それぞれ示す。

図4より,浸透と乾燥を繰り返しながら,徐々に雨水 が材料内部へ移動していることがわかる。ひび割れの影 響と考えられる2次元分布は浸透初期に見られるが,雨 水の浸透深さがひび割れ深さに近づくにつれ,分布の2 次元性が小さくなる。乾燥過程では,浸透深さに関係な く2次元性が見られる。2次元分布を示している範囲は, 浸透後,乾燥後にかかわらず,ひび割れの中心線から10



~15[mm]であることがわかる。

-671-

(b)中性化フロントにおけるアルカリ消費量

初期中性化深さを 0[mm]とした場合には、計算期間中 に中性化フロントが変化したため、材料表面から 0[mm] と 1[mm]におけるアルカリ消費量の変化を、図5(a)、 (b) にそれぞれ示す。

図5(a)より,降雨時にアルカリ消費量が増加し,ひ び割れからの距離にかかわらず,1回目の降雨により表 面の中性化が完了している。図5(b)を見ると,材料表 面から1mmの点においても,降雨によりアルカリ消費 量が増加していることがわかる。しかし,その後の乾燥 過程において勾配が低下し,降雨前の直線の延長線上に 近づく。すなわち,酸性雨による促進劣化は小さいこと がわかる。これは降雨により表面側の含水率が増加し, 気相 CO₂の拡散が抑制されるためと考えられる。

初期中性化深さ 10[mm]の場合の中性化フロントにお けるアルカリ消費量の変化を図6に示す。

図6より、図5と比して乾燥過程時の勾配が小さいこ とがわかる。これは材料表面からの距離が増加すると、 CO₂の拡散量が減少するためである。そのため酸性雨の 影響がとても大きいことがわかる。

図5,図6のどちらにおいても、ひび割れから近いほど酸性雨の影響が大きいわけではないことがわかる。

これは偶角部の両面から液水が浸透する場合には,偶 角の片面を通過する浸透量は,片面からのみ浸透する場 合に比して少ないことが原因として考えられる。すなわ ち,材料表面とひび割れによって偶角部が形成されてお り,偶各部内のどちらかの表面に近い点では,ひび割れ から離れた平面部に比して,その点を通過する液水量が 少なかったと推測される。

また,酸性雨の影響が大きく現れた図6をみると,ひ び割れと酸性雨の複合効果はひび割れの中心線から 10[mm]程度の領域であることがわかる。これは含水率分 布に見られた影響範囲と一致する。

4.2 降雨の有無による比較

ここでは、打設からの中性化の進行に及ぼすひび割れ と酸性雨の影響を検討するために、与える外界条件とし て、降雨無し、周期的な酸性雨、周期的な中性雨の3条 件について検討を行った

打設直後を想定し,初期含水率を飽水状態,初期中性 化深さを0[mm]とした。

計算は,開始時に乾燥過程を100日間設け,その後800日間,計900日間行った。

(a)含水率分布の変化

図7に100日後の含水率分布を示す。図より、表面から40[mm]程度の深さまで含水率の低下が認められる。 40[mm]より深部においては約13[vol.%]一定の分布となっている。この含水率分布を初期条件として、降雨の有



(初期中性化深さ10[mm])

無,種類による影響を検討する。

図8に降雨無しの場合の900日後,図9に降雨有りの 場合の2回目の降雨後,図10に3回目の降雨直前の含 水率分布を,それぞれ示す。降雨が無い条件の場合には, 図7の分布から図8の分布に向かって単調に乾燥するの みである。また,ひび割れの中心線から10[mm]程度,か つ材料表面から20[mm]程度の範囲において,2次元性の ある含水率分布が確認できる。 一方,降雨がある条件の場合には,酸性雨,中性雨の 種別に関係なく,2回目の降雨以降は図9,図10に示 す含水率分布を周期的に繰り返す結果となった。雨水は 材料表面から 30[mm]程度浸透し,10日後には表面から 15[mm]程度までが乾燥している。

(b)中性化深さの進行

ひび割れの中心線から1, 5, 10, 100[mm]の位置にお ける中性化深さの進行を,降雨無し,酸性雨,中性雨の 降雨条件ごとに,それぞれ図11(a)~(c)に示す。

図の横軸は経過時間の平方根であり、これら中性化の 進行は概ね直線と見なせる。すなわち、これら直線の勾 配は、中性化の進行が Fick の第2法則に従うとした場合 の見かけの拡散係数となる。

ひび割れから 1[mm]以外の位置においては,降雨無, 中性雨ともに中性化深さの進行速度に大きな違いは見 られなかった。酸性雨の条件のみ他の2条件よりも中性 化の進行がわずかに速い。酸性雨の場合の見かけの拡散 係数は,降雨無しの場合の1.08倍となった。これは,ひ び割れを考慮せずに酸性雨の影響について検討した既 報の結果⁴⁾と一致している。

一方, ひび割れから 1[mm]の位置においては, ひび割 れの影響を受け, 明確に中性化の進行が促進されている。 ひび割れが有り, 降雨無し, 酸性雨, 中性雨の各条件の 見かけの拡散係数は, ひび割れが無く降雨も無い場合に 比して, それぞれ 2.1 倍, 2.4 倍, 1.3 倍となった。中性 雨の場合は, ひび割れによる促進劣化を受けてはいるが, 降雨の含水率増加による遅延も確認できる。また, ひび 割れと酸性雨を考慮した場合は, ひび割れのみの場合に 比して 1.2 倍の促進劣化となった。

本研究は、材料内部に液水の浸透がある場合、無い場 合の測定に基づき、両条件を再現できるよう決定した係 数を用いた解析的検討である。今後の課題として、実測 結果と比較する必要がある。また、今回の検討は、等温 条件であり、材料内部の乾燥領域が小さい。実構造物が 曝される環境下においては、より含水率の変動が大きく、 酸性雨の影響も大きくなると考えられる。

5. まとめ

本研究は、ひび割れがコンクリートの中性化の進行に 及ぼす影響をについて、材料内の熱水分同時移動を考慮 可能な中性化進行予測モデルを用いた2次元解析により、 周期的に酸性雨を受ける条件下について検討した。

幅 0.4[mm], 深さ 20[mm]のひび割れ近傍における解析 により,得られた知見は以下の通り。

コンクリートが 10 日間ごとに 6 時間の降雨に曝され る条件下では,ひび割れが含水率分布に及ぼす影響は, ひび割れの中心線から 10mm 以内の範囲であった。



ひび割れから数[mm]の範囲においては酸性雨により, ひび割れも酸性雨もない場合に比して,2.4 倍の促進劣 化となった。



記号

C:材料中の濃度[kg/m³],D:拡散係数[m²/s],M:分 子量[kg/mol],L:各相の厚さ[m],R:相変化熱[J/kg], T:温度[K],[CO₂],[Ca(OH)₂]:モル数[mol/m³],c: 比熱[J/kg[°]C], k:反応速度係数[m³/mol・s], v:液水流 速[m/s], α_{gl} :気相と液相との溶解速度係数[1/s], λ :熱 伝導率[W/mK], λ'_{T} :温度勾配による水分移動係数 [kg/msK], λ'_{μ} :水分化学ポテンシャル勾配による水分 移動係数[kg/ms(J/kg)], H:Henry 定数[n.d.], μ :水分化 学ポ テンシャル(自由水基準)[J/kg], ρ , ρ_{w} :コンクリートお よび水の密度[kg/m³], Ψ_{w} :容積含水率[m3/m3]

添字

g:気相,1:液相,s:固相,ls:固相と液相の境界,CO₂: 二酸化炭素,Ca(OH)₂:水酸化カルシウム,CaCO₃:炭酸 カルシウム,H₂O:水

参考文献

- 柳田昌彦, 鉾井修一, 松本衛:「建築材料の水分拡散 特性の測定に関する研究 木材の水分拡散係数の 測定(2)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1407-1408, 1989.
- 2) 佐伯竜彦,長滝重義,大賀宏行,高見浩之:「降雨により水分の供給を受けるコンクリートの中性化」, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.609-614, 1991.
- 環境庁地球環境部監修:「酸性雨 -地球環境の行方 -」, p.145,中央法規, 1998.2.
- 4) 岸本嘉彦,佐藤靖彦,中村麻里亜,鉾井修一:「コン クリートの透水性が中性化の進行に及ぼす影響」, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.951-956, 2007.
- 5) 小椋大輔,松本衛:「自然状態下における地下構造物 とその周囲地盤の熱・湿気性状の解析」,日本建築 学会計画系論文集,第474号,pp.27-36,1995.8.
- Göran.Hedenblad, Moisture Permeability of Mature Concrete, Cement and Cement Paste, Ph.Thesis, Division of Building Materials Lund Institute of Technology, 1993.
- 7) 魚本健人,高田良章:「コンクリートの中性化に及ぼ す要因」,土木学会論文集,No.451/V-17, pp.119-128, 1992.8.
- 岸本嘉彦, 鉾井修一, 原田和典, 高田暁:「壁体内の 熱水分移動を考慮した中性化進行予測モデル」, 日 本建築学会構造系論文集, No. 595, pp.17-23, 2005.9.