

II-91 不飽和浸透流における溶質の拡散・分散係数に関する実験的研究

三菱金属中央研究所 正会員 佐々木 康夫
 埼玉大学 工学部 正会員 佐藤 邦明
 福井大学 工学部 正会員 福原 輝幸

はじめに

農業・産業廃棄物による埋立、酸性雨といった土壌汚染問題が広域的な環境汚染の一つとして注目されている。この種の汚染物質の地下での移行においては地下水が関与しているが浸透流における溶質移行に関する争点はかならずしも良く判明していない。今回、この点に注目し、不飽和浸透流における溶質の移行について二つの実験を実施したのでその結果を報告する。

1. 実験手法と実験装置

実験は大別して二つの場合を行い、一つは砂層カラム中の定常不飽和浸透流中に溶質が鉛直浸透する場合の分散流（実験パターンB）であり、他は飽和溶質中に定常不飽和状態で淡水が排除置換する場合の分散流（不飽和浸透流のブリーチ現象・実験パターンA）である。これに加え溶質の飽和鉛直浸透流中の淡水移流分散流（飽和浸透流のブリーチ現象・実験パターンC）の場合も行った。いずれの実験も装置は図-1に示す様な直径0.2m、長さ1.5mの円筒カラムと降雨発生装置、上・下部オーバーフロ-装置などから成るものを用いた。カラム充填砂は平均粒径（ d_{50} ）が0.17mm、比重2.642の豊浦標準砂である。実験手順を実験パターンAの不飽和浸透流のブリーチ現象の場合について述べると、①円筒カラム中に0.1mづつ標準砂を突き固めつつ充填する。②所定濃度の塩水を下部オーバーフロ-槽をカラム上端より幾分高くし給水して、砂層全体を均一塩濃度にする。③下部オーバーフロ-槽を下ぐ排水しつつ降雨装置に塩水を送り塩水をぶら下り数時間放置して浸透流量が定常になるのを待つ。④砂層の不飽和浸透流が定常になった事を確認し速やかに降雨装置への供給を塩水から淡水に切換え実験を開始する。⑤適当な時間間隔でカラムに付している試料採取孔から一定量の砂を取り定量純水に入れ濃度を測定する。

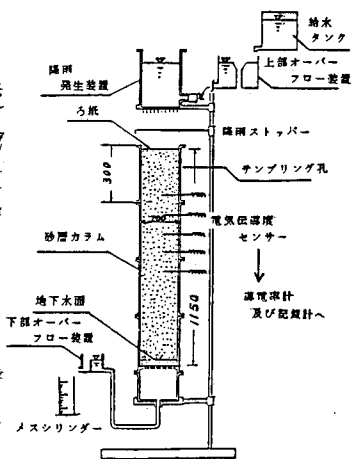


図-1 実験装置略図（単位mm）

表-1 実験パターンと結果

実験パターン	実験ケース	湛水位 (cm)	降雨強度 R (mm/h)	平均飽和度 S_a (%)	平均孔隙比 e_m	平均流速 V_m (cm/s) $\times 10^{-3}$	分散係数 D_x (cm ² /s) $\times 10^{-4}$		
[A] 不飽和浸透法 (淡水降雨: ブリーチング)	UV-1	0	37	48.5	0.69	4.50	4.50		
	2		30	43.8	0.69	4.76	2.11		
	3		40	47.5	0.69	6.83	6.22		
	[B] 不飽和浸透法 (浴質降雨: 浸透)		UN-1	0	13	41.3	0.65	2.15	10.0
			2		16	41.3	0.65	2.73	27.1
3		42	48.0		0.70	5.78	12.6		
4		18	41.3		0.71	2.91	2.58		
5		52	48.4		0.69	7.31	83.2		
[C] 飽和浸透法 (淡水降雨: ブリーチング)	SW-1	1.5	38	100	0.69	2.38	1.09		
	2	2.5	38	100	0.69	2.52	2.38		
	3	0.5	21	100	0.69	2.18	0.47		

2. 実験結果

各実験パターンの実験条件と結果およびその例を表-1、図-2,3,4に示した。表中の分散係数は実験パターンAのブリーチングの場合には(3)式の境界・初期条件の下で(4)式から、実験パターンBの場合には(1)式の境界・初期条件の下での解(2)式からそれぞれ求めた。

$$\left. \begin{aligned} C(0, t) &= C_0 \quad t \geq 0 \\ C(\infty, t) &= 0 \quad t \geq 0 \\ C(x, 0) &= 0 \quad x > 0 \end{aligned} \right\} (1) \quad \frac{C}{C_0} = f(x, t) \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} C(0, t) &= 0 \quad t \geq 0 \\ C(\infty, t) &= C_0 \quad t \geq 0 \\ C(x, 0) &= C_0 \quad x > 0 \end{aligned} \right\} (3) \quad \frac{C}{C_0} = 1 - f(x, t) \quad (4)$$

ただし

$$f(x, t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x - Ut}{2(D_x t)^{1/2}} \right\} + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{Ux}{D_x} \right) \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x + Ut}{2(D_x t)^{1/2}} \right\}$$

である。

ここに、 C :濃度、 U :浸透流速、 D_x :浸透方向分散係数、 t :時間、 x :座標、である。 U は不飽和浸透流の場合には $U = g/A \cdot \lambda \cdot S \cdot t$ 、飽和浸透流の場合には $U = g/A \cdot S \cdot t$ (g :浸透流量、 A :カラム断面積、 λ :空隙率、 S :飽和度)となる。

図-2は実験パターンA(淡水降雨:ブリーチング)の降雨強度30mm/Hの例で採取位置を固定し、その位置での時間的濃度変化を表わしたもので採取点ごとにBest fitさせた理論曲線と合せて示してある。各採取位置で幾分異なるが5分前後で塩分は淡水に置換されており、図-4に示す定常飽和流における置換に要する時間の半分程度になつてゐる。図-3は実験パターンB(塩水降雨:浸透)の降雨強度52mm/Hの例で、図-2、4の場合と反対に採取時間を固定して各深さごとの濃度の差(塩水の浸透フロントの時間的変化)を測定したものである。この例では降雨強度は大きく浸透流速が速いためもあるが分散係数 D_x は他に比べかなり大きくなつてゐる。この傾向はこのパターンに共通しており、同じ定常不飽和浸透流のブリーチング(パターンA)に比べ数倍になつてゐるとともにパターンCに対しては1桁程大きくなつてゐる。図-4は実験パターンC(定常飽和流:淡水降雨)の降雨強度21mm/Hの例でパターンAと同じ採取位置を固定して測定したものである。塩分が淡水に置換される時期は40分前後を示し、同程度の降雨強度でも定常不飽和流に比べかなり長時間を要してゐる。これは降雨強度が同じでも、浸透流速は飽和状態の方が小さくなるためである。図-5は今回行った実験結果から求めた D_x/ν と Re 数の関係を示したもので差つた値が今回の結果で、○印と□印が定常不飽和浸透流の場合、△印が定常飽和流のそれである。定常不飽和浸透流の場合、定常飽和流に比べ、数倍から2桁近く大きくなつてゐる。また、同じ定常不飽和流の場合でも塩水降雨の方が淡水降雨の場合よりほとんどの例で大きい。分散係数 D_x とレイノルズ数 Re の関係は $D_x/\nu = a Re^n$ の形式で表現され、今回の定常不飽和流の場合 $a = 486.88$ 、 $n = 1.56$ となつた。一方、定常飽和流の場合には定常飽和流における Harleman-Rumer の示した $D_x/\nu = 0.66 (Rd_{50})^{1.2}$ の回帰線付近にはプロットされず、定常不飽和流の場合の回帰線との間でやや定常不飽和流の回帰線寄りにプロットされた。

図-2は実験パターンA(淡水降雨:ブリーチング)の降雨強度30mm/Hの例で採取位置を固定し、その位置での時間的濃度変化を表わしたもので採取点ごとにBest fitさせた理論曲線と合せて示してある。各採取位置で幾分異なるが5分前後で塩分は淡水に置換されており、図-4に示す定常飽和流における置換に要する時間の半分程度になつてゐる。図-3は実験パターンB(塩水降雨:浸透)の降雨強度52mm/Hの例で、図-2、4の場合と反対に採取時間を固定して各深さごとの濃度の差(塩水の浸透フロントの時間的変化)を測定したものである。この例では降雨強度は大きく浸透流速が速いためもあるが分散係数 D_x は他に比べかなり大きくなつてゐる。この傾向はこのパターンに共通しており、同じ定常不飽和浸透流のブリーチング(パターンA)に比べ数倍になつてゐるとともにパターンCに対しては1桁程大きくなつてゐる。図-4は実験パターンC(定常飽和流:淡水降雨)の降雨強度21mm/Hの例でパターンAと同じ採取位置を固定して測定したものである。塩分が淡水に置換される時期は40分前後を示し、同程度の降雨強度でも定常不飽和流に比べかなり長時間を要してゐる。これは降雨強度が同じでも、浸透流速は飽和状態の方が小さくなるためである。図-5は今回行った実験結果から求めた D_x/ν と Re 数の関係を示したもので差つた値が今回の結果で、○印と□印が定常不飽和浸透流の場合、△印が定常飽和流のそれである。定常不飽和浸透流の場合、定常飽和流に比べ、数倍から2桁近く大きくなつてゐる。また、同じ定常不飽和流の場合でも塩水降雨の方が淡水降雨の場合よりほとんどの例で大きい。分散係数 D_x とレイノルズ数 Re の関係は $D_x/\nu = a Re^n$ の形式で表現され、今回の定常不飽和流の場合 $a = 486.88$ 、 $n = 1.56$ となつた。一方、定常飽和流の場合には定常飽和流における Harleman-Rumer の示した $D_x/\nu = 0.66 (Rd_{50})^{1.2}$ の回帰線付近にはプロットされず、定常不飽和流の場合の回帰線との間でやや定常不飽和流の回帰線寄りにプロットされた。

図-2は実験パターンA(淡水降雨:ブリーチング)の降雨強度30mm/Hの例で採取位置を固定し、その位置での時間的濃度変化を表わしたもので採取点ごとにBest fitさせた理論曲線と合せて示してある。各採取位置で幾分異なるが5分前後で塩分は淡水に置換されており、図-4に示す定常飽和流における置換に要する時間の半分程度になつてゐる。図-3は実験パターンB(塩水降雨:浸透)の降雨強度52mm/Hの例で、図-2、4の場合と反対に採取時間を固定して各深さごとの濃度の差(塩水の浸透フロントの時間的変化)を測定したものである。この例では降雨強度は大きく浸透流速が速いためもあるが分散係数 D_x は他に比べかなり大きくなつてゐる。この傾向はこのパターンに共通しており、同じ定常不飽和浸透流のブリーチング(パターンA)に比べ数倍になつてゐるとともにパターンCに対しては1桁程大きくなつてゐる。図-4は実験パターンC(定常飽和流:淡水降雨)の降雨強度21mm/Hの例でパターンAと同じ採取位置を固定して測定したものである。塩分が淡水に置換される時期は40分前後を示し、同程度の降雨強度でも定常不飽和流に比べかなり長時間を要してゐる。これは降雨強度が同じでも、浸透流速は飽和状態の方が小さくなるためである。図-5は今回行った実験結果から求めた D_x/ν と Re 数の関係を示したもので差つた値が今回の結果で、○印と□印が定常不飽和浸透流の場合、△印が定常飽和流のそれである。定常不飽和浸透流の場合、定常飽和流に比べ、数倍から2桁近く大きくなつてゐる。また、同じ定常不飽和流の場合でも塩水降雨の方が淡水降雨の場合よりほとんどの例で大きい。分散係数 D_x とレイノルズ数 Re の関係は $D_x/\nu = a Re^n$ の形式で表現され、今回の定常不飽和流の場合 $a = 486.88$ 、 $n = 1.56$ となつた。一方、定常飽和流の場合には定常飽和流における Harleman-Rumer の示した $D_x/\nu = 0.66 (Rd_{50})^{1.2}$ の回帰線付近にはプロットされず、定常不飽和流の場合の回帰線との間でやや定常不飽和流の回帰線寄りにプロットされた。

参考文献

- 1) 佐藤邦明・村岡浩爾・伊藤洋:不飽和浸透流における溶質分散係数の測定, 土質工学会誌「土と基礎」, 33-2 (325), No 1511 PP 45~50, 1985

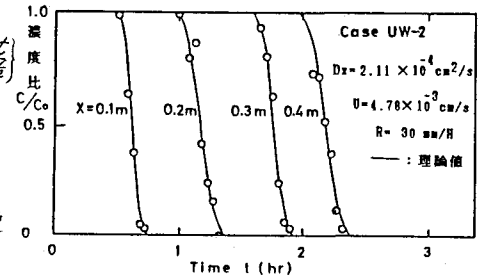


図-2 実験結果の一例 (Case UW-2)

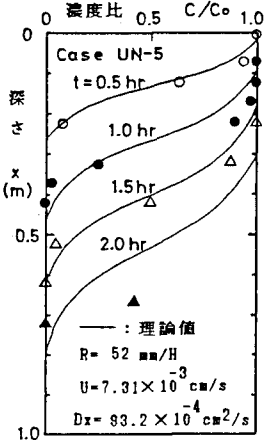


図-3 実験結果の一例 (Case UN-5)

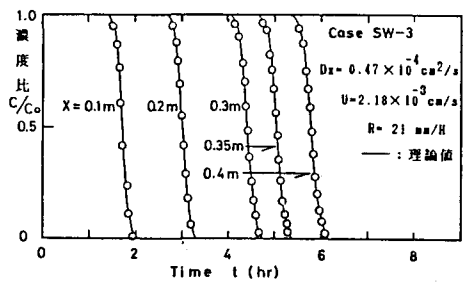


図-4 実験結果の一例 (Case SW-3)

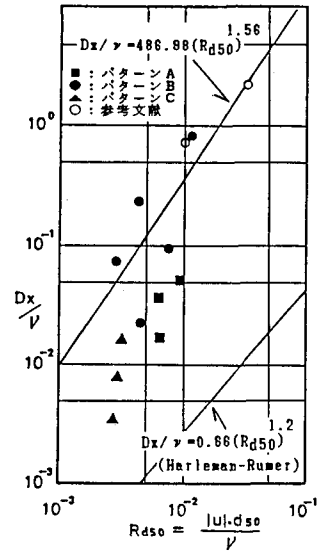


図-5 D_x/ν と Re 数の関係