

# 生物分解方法應用於受碳氫化合物污染之 地下水整治——一維數值模擬

## Groundwater Remediation with Biodegradation-- One-Dimensional Numerical Simulation

國立雲林科技大學環境與  
安全工程研究所副教授

溫志超

J.-C. Wen

國立中興大學土木工程  
研究所副教授

陳榮松

R.-S. Chen

私立中原大學土木工程  
研究所碩士

莊宜儂

Y.-L. Chung

### 摘 要

本研究假設微生物濃度為定值，應用邊界層法，將碳氫化合物與氧之濃度隨位置與時間變化之問題，轉換為碳氫化合物與氧之漸變段長度隨時間變化之問題，再行求解。並在很小的時段內，以質量平衡原理估算出根區之後退量，描述入侵前緣移動與根區後退之情形。

研究中發現碳氫化合物濃度( $C_0$ )愈大，氧入侵前緣移動量愈小。同理，氧濃度( $S_0$ )愈大，碳氫化合物入侵前緣移動量愈小。碳氫化合物與氧半飽和常數( $K_C$ 與 $K_S$ )愈小，入侵前緣之間距愈小。故 $S_0$ 增加、 $K_C$ 和 $K_S$ 減小，將有利碳氫化合物污染地下水之生物整治。

**關鍵詞：**邊界層法，生物整治，碳氫化合物。

### ABSTRACT

Groundwater contaminated with hydrocarbon can be remedied by biodegradation process, for its low cost and harmlessness. In this study, a constant microbial concentration is assumed. A model for simulating the process in porous media was developed with the boundary layer theory to approach diffusion and biodegradation processes. In addition, considering the influence of dispersion on the backward movement of the root zones, a moving boundary condition for studying the concentration variation of hydrocarbon and oxygen in the biodegradation process was developed.

It was found that the higher the hydrocarbon concentration ( $C_0$ ), the less the

intrusion of the oxygen concentration. In other words, the higher the oxygen concentration ( $S_0$ ), the less the intrusion of the hydrocarbon concentration. At low value of  $K_c$  and  $K_s$ , the hydrocarbon and oxygen are consumed rapidly as well as the intrusion of leading edges of hydrocarbon and oxygen are seriously restricted. Consequently, an increment of  $S_0$  and decrement of  $K_c$  and  $K_s$  result in an advantage of bio-remediation of groundwater.

**Keywords:** Boundary layer theory, Bio-remediation, Hydrocarbon.

## 一、前言

碳氫化合物因油品地下儲存槽及輸送管線的破裂，或因不當的棄置與傾倒，滲漏至含水層而造成地下水之嚴重污染。在因應之整治策略中，生物復育法所需費用較低，並可將污染物清除到可接受程度(Cole,1995)，為一新興且極富潛力之整治技術，故生物復育法之分解傳輸模式，近年來成為廣受研究的課題。

Bear(1972)以質量守恆之觀點求導出對流-延散方程式，建立污染物在均質等向含水層中，其傳輸過程濃度變化之數學模式，探討地下水流速、污染物與含水層特性對傳輸過程之影響。Alexander 和 Scow(1989)對土壤中微生物分解之動力模式，從參數彌合法(fitting parameter method)到具有物理意義之 Monod kinetics 等模式，作了詳細的說明，並對各種模式之建立方法與適用範圍進行討論。Benfield 和 Molz(1985)以生物膜模式(biofilm model)描述微生物生長型態，探討基質與溶氧之傳輸與生物膜厚度變化情形。Borden 和 Bedient (1986)則以分配型模式(partition model)描述微生物生長型態，並以 Monod kinetics 建立以氧為速率限制因子之條件下，碳氫化合物、氧以及微生物之濃度傳輸數學模式，分析污染物流動範圍與濃度分佈情形。研究中並配合德州一廢棄之餾油廠(United Creosoting Company)之現場試驗資料以驗證其模式之可靠性。然而，此類傳輸模式為固定位置之邊界條件，對於碳氫化合物根區後退之問題無法模擬。

Kembiowski 和 Colthart(1987)以邊界層法

(boundary layer method)求算兩種流體相互入侵的問題，以形狀函數(shape function)描述碳氫化合物與地下水交接處之濃度分佈，並以積分方法轉換至邊界層方程式(boundary layer equation)後再以阮奇庫塔法(Runge-Kutta method)求其數值解。然而，其文章中僅考量碳氫化合物在對流效應(Advective effects)下之其濃度的變化，並未將微生物分解模型考慮進來。

所以本研究期望能結合邊界層理論與生物分解模式，考慮兩種流體根區為一可因應延散效應而退後的邊界條件，進行較符合實際機制的生物分解模擬，以解決以後研究僅止於根區不移動的問題。

本研究假設微生物濃度為定值，以邊界層理論模擬碳氫化合物受微生物分解之傳輸情形，碳氫化合物與氧之濃度分佈如圖 1 所示。此外，本研究考慮因延散作用造成碳氫化合物與氧根區後退之現象，建立移動邊界條件下之生物分解傳輸模式，由於微生物分解作用同時需要碳氫化合物與氧，故此分解作用發生在碳氫化合物與氧漸變段交接處，由漸變段長度之

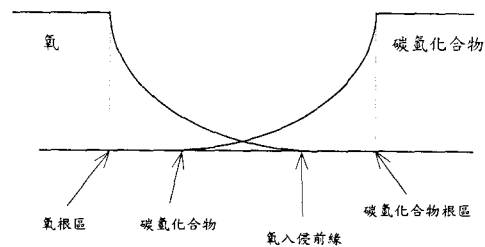


圖 1 以邊界層法描述碳氫化合物與氧入侵問題示意圖

變化，即可了解碳氫化合物與氧受微生物分解之濃度變化情形。

## 二、數學模式求解方法

本研究假設微生物濃度為定值，即在分解過程中，微生物均以背景濃度存在於地下水中。本研究以 Monod 動力模式描述微生物分解效應，配合地下水污染傳輸之對流-延散方程式 (Bear, 1972)，若地下水流場為均勻流速，則本研究之座標系統可取與地下水之均勻流速相等速度而運動的動座標系統，則碳氫化合物及氧相對於座標系統之運動速度即等於零，延散方程式中之對流項可因此而不此存。故多孔介質中碳氫化合物濃度及氧濃度的動力方程式可表示為：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - M_t \cdot k \cdot \left( \frac{C}{K_c + C} \right) \left( \frac{S}{K_s + S} \right) \dots (1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = D \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} - M_t \cdot k \cdot F \cdot \left( \frac{C}{K_c + C} \right) \left( \frac{S}{K_s + S} \right) \dots (2)$$

其中，

$C$  為碳氫化合物濃度 (hydrocarbon concentration)

$S$  為氧濃度 (oxygen concentration)

$K_c$  為碳氫化合物半飽和濃度 (hydrocarbon half saturation concentration)

$K_s$  為氧半飽和濃度 (oxygen half saturation concentration)

$D$  為延散係數 (dispersion coefficient)

$M_t$  為微生物總濃度 (total microbial concentration)

$K$  為單位質量微生物之碳氫化合物最大使用率 (maximum hydrocarbon utilization rate per unit mass microorganisms)

$F$  為氧對碳氫化合物之消耗比率 (ratio of oxygen to hydrocarbon consumed)

$t$  為時間

$x$  為污染物沿流動方向之位置座標

(1)與(2)式為二維二階非線性偏微分方程式 (second-order nonlinear partial differential equations)，不易求得其解析解 (analytical solution)。而在微生物分解過程中，碳氫化合物及氧之根區會不斷向後退，為一種移動邊界條件 (moving boundary condition)。本研究將應用邊界層法以簡化控制方程式求解，並考慮根區後方延散作用之效應。計算方法可概分為下列二個步驟：

(1)在甚小之時段  $\Delta t$  內，可視為固定邊界條件 (fixed boundary condition) 之情形，即此時碳氫化合物根區與氧根區之間距不會隨時間改變。以邊界層法轉換控制方程式並求其數值解，計算在此時段內碳氫化合物及氧漸變段長度之變化，進而求出碳氫化合物及氧入侵前緣之位置。

(2)在此微小時段 ( $\Delta t$ ) 內，以質量平衡 (mass balance) 之關係，計算因延散作用造成碳氫化合物及氧根區之後退量 (即此時允許碳氫化合物根區與氧根區之間距會隨時間而改變)，進而求出碳氫化合物及氧根區之位置。

經過上述(1)、(2)步驟之計算，即可求得在一微小時段  $\Delta t$  中漸變段長度之真正變化情形。不斷重複上述步驟，即可得到微生物分解過程中，碳氫化合物與氧漸變段長度隨時間變化之情形。

### (一) 應用邊界層法轉換控制方程式

以邊界層法描述碳氫化合物與氧之濃度分佈如圖 2 所示。 $L_c$  與  $L_s$  分別代表碳氫化合物與氧漸變段長度，假設  $x \leq 0$  處氧濃度為定值  $S_0$ ， $x \geq L$  處碳氫化合物濃度也為定值  $C_0$ 。如此在邊界層內之碳氫化合物與氧之濃度均為位置 ( $x$ ) 與時間 ( $t$ ) 之函數，邊界條件描述如下：

$$S(x \leq 0, t) = S_0, S(x \geq L_s, t) = 0 \dots (3)$$

$$C(x \leq L - L_c, t) = 0, C(x \geq L, t) = C_0 \dots (4)$$

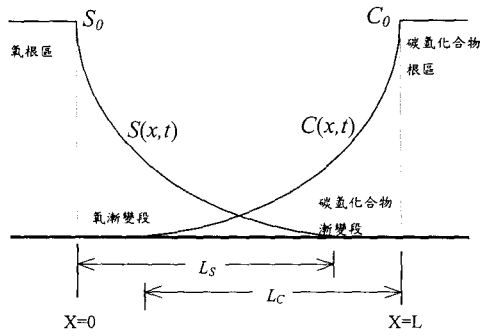


圖 2 碳氫化合物與氧之濃度分佈示意圖

應用邊界層方法，可將漸變段內碳氫化合物與氧之濃度分佈以形狀函數(shape function)描述，分別為：

$$S(x,t) = S_0 G(\xi), \quad 0 \leq x \leq L_s \quad (5)$$

$$C(x,t) = C_0 F(\eta), \quad L-L_c \leq x \leq L \quad (6)$$

$S_0$  與  $C_0$  分別為邊界  $x=0$  與  $x=L$  處之氧濃度與碳氫化合物濃度，而  $\xi$  與  $\eta$  定義如下：

$$\eta = \frac{x - (L - L_c)}{L_c}, \quad \xi = \frac{x}{L_s} \quad (7)$$

$F(\eta)$  和  $G(\xi)$  分別為碳氫化合物與氧之形狀函數，並滿足下列條件：

$$F(0) = 0, \quad F(1) = 1, \quad F'(0) = 0 \quad (8)$$

$$G(0) = 1, \quad G(1) = 0, \quad G'(1) = 0 \quad (9)$$

假設形狀函數為二次，滿足上述邊界條件之形狀函數可寫成：

$$F(\eta) = \eta^2, \quad 0 \leq \eta \leq 1 \quad (10)$$

$$G(\xi) = (1 - \xi)^2, \quad 0 \leq \xi \leq 1 \quad (11)$$

建立上述形狀函數後，將(10)、(11)式代入(5)與(6)式中，再將結果代入(1)與(2)式，並將式中各項對  $x$  積分可得：

$$\int_0^L \frac{\partial C}{\partial t} dx = \int_{L-L_c}^L C_0 \frac{\partial F(\eta)}{\partial t} dx = \frac{1}{3} C_0 \frac{\partial L_c}{\partial t} \quad (12)$$

$$\int_0^L \frac{\partial S}{\partial t} dx = \int_0^{L_s} S_0 \frac{\partial G(\xi)}{\partial t} dx = \frac{1}{3} S_0 \frac{\partial L_s}{\partial t} \quad (13)$$

延散項可寫成：

$$\int_0^L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} dx = \frac{2C_0}{L_c} \quad (14)$$

$$\int_0^L \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} dx = \frac{2S_0}{L_s} \quad (15)$$

微生物項可寫成：

$$\int_0^L \frac{S}{K_s + S} \frac{C}{K_c + C} dx = f(L_s, L_c) \quad (16)$$

其中，

$$f(L_s, L_c) = H - \frac{A(A^4 - A^2B^2 + 2A^2H^2 + B^2H^2 + H^4)}{(A^4 - 2A^2B^2 + B^4 + 2A^2H^2 + 2B^2H^2 + H^4)} \tan^{-1}\left(\frac{H}{A}\right) + \frac{B(B^4 - A^2B^2 + 2B^2H^2 + A^2H^2 + H^4)}{(A^4 - 2A^2B^2 + B^4 + 2A^2H^2 + 2B^2H^2 + H^4)} \tan^{-1}\left(\frac{H}{B}\right) + \frac{A^2B^2H}{(A^4 - 2A^2B^2 + B^4 + 2A^2H^2 + 2B^2H^2 + H^4)} \ln\left[\left(\frac{A^2 + H^2}{A^2}\right) \left(\frac{B^2 + H^2}{B^2}\right)\right] \quad (17)$$

$$A = \sqrt{\frac{K_c}{C_0}} L_c$$

$$B = \sqrt{\frac{K_s}{S_0}} L_s$$

$$H = L_c + L_s - L$$

經過以上之積分轉換後，(1)與(2)式可改寫成：

$$\frac{\partial L_c}{\partial t} = \frac{6D}{L_c} - 3 \frac{M_i k}{C_o} f(L_s, L_c) \dots (18)$$

$$\frac{\partial L_s}{\partial t} = \frac{6D}{L_s} - 3 \frac{M_i k F}{S_o} f(L_s, L_c) \dots (19)$$

(18)與(19)式稱為邊界層方程式(boundary layer equations)。以邊界層法轉換控制方程式，可將原先以  $x$  與  $t$  為自變數(independent variable)之二階偏微分方程式，轉換成僅以  $t$  為自變數之一階微分方程式。即是將原先所討論之碳氫化合物與氧濃度隨位置與時間之變化情形，轉換為漸變段長度  $L_s$  與  $L_c$  隨時間之變化情形。再以阮奇庫塔法(Forsythe et al., 1977)求解(18)與(19)式中的  $L_s$  與  $L_c$ ，進而可得知碳氫化合物與氧濃度變化情形。本方法可減少數值求解(1)及(2)式的困難及電腦記憶體使用空間。

## (二) 計算根區因延散造成之影響

本研究探討碳氫化合物及氧受微生物分解過程中，其邊界( $x=0$  至  $x=L$ )會隨時間而變。而(16)與(17)式僅能描述漸變區內之濃度變化，且為固定邊界之情形，與物理現象不盡相同。因此，考慮在甚小之時段內，先以(16)與(17)式求出碳氫化合物及氧漸變段長度之變化量，再計算根區 (root zone) 後方因延散作用造成邊界之後退量，兩者之和即為此時段內漸變段之真正變化量。

考慮任意時間  $t_i$ ，經過一微小時段  $\Delta t$  後，碳氫化合物及氧之濃度變化如圖 3 所示。虛線表示  $t_i$  時之濃度分佈，粗線表示  $t_i+\Delta t$  時之濃度分佈。 $L_{s0}$  與  $L_{c0}$  分別為  $t_i$  時氧及碳氫化合物之漸變段長度，而  $L_{s1}$  與  $L_{c1}$  則是以阮奇庫塔法求解出來於  $t_i+\Delta t$  時氧及碳氫化合物之漸變段長度。在  $\Delta t$  時段內，因延散作用造成碳氫化合物與氧根區之後退量分別為  $\Delta x_1$  與  $\Delta x_2$ 。其中  $\Delta x_1$  與  $\Delta x_2$  之計算方法如下：

碳氫化合物於  $\Delta t$  時段內通過斷面  $x=L_o$

之質量通量 (mass flux) 為：

$$\Delta M = \left[ D \frac{\partial C}{\partial x} \right]_{x=L_o} \cdot \Delta t = \frac{2DC_o}{L_{c1}} \Delta t \dots (20)$$

參考圖 3，碳氫化合物根區因延散作用而傳入漸變區之質量通量為：

$$\begin{aligned} \Delta M &= C_o \Delta x_1 + \int_{L_o-L_{c1}}^{L_o} C_o \left[ \frac{x-(L_o-L_{c1})}{L_{c1}} \right]^2 dx \\ &\quad - \int_{L_o-L_{c1}}^{L_o+\Delta x_1} C_o \left[ \frac{x-(L_o-L_{c1})}{L_{c1}+\Delta x_1} \right]^2 dx \\ &= \frac{2}{3} C_o \Delta x_1 \dots (21) \end{aligned}$$

(20) 式與 (21) 式相等，故  $\Delta x_1$  可表示如下：

$$\Delta x_1 = \frac{3D}{L_{c1}} \Delta t \dots (22)$$

氧於  $\Delta t$  時段內通過斷面  $x=0$  之質量通量為：

$$\Delta N = \left[ D \frac{\partial S}{\partial x} \right]_{x=0} \cdot \Delta t = \frac{2DS_o}{L_s} \Delta t \dots (23)$$

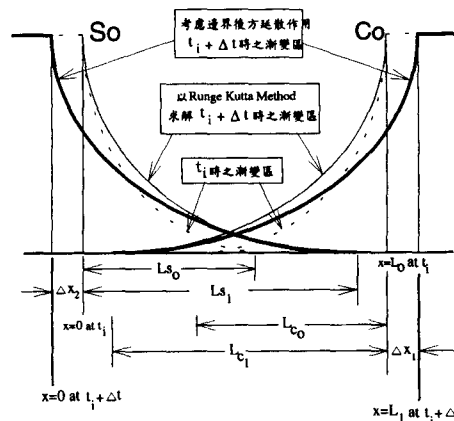


圖 3 於  $t_i$  及  $t_i+\Delta t$  時間之氧及碳氫化合物之漸變區示意圖

參考圖 3，氧根區因延散作用而傳入漸變區之質量通量為：

$$\begin{aligned} \Delta N &= S_o \Delta x_2 + \int_0^{L_{s1}} S_o \left( 1 - \frac{x}{L_{s1}} \right)^2 dx \\ &- \int_{-\Delta x_2}^{L_{s1}} S_o \left( 1 - \frac{x + \Delta x_2}{L_{s1} + \Delta x_2} \right)^2 dx = \\ &= \frac{2}{3} S_o \Delta x_2 \quad \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

(2.23)式與(2.24)式相等，故 $\Delta x_2$  可表示如下：

$$\Delta x_2 = \frac{3D}{L_{s1}} \Delta t \quad \dots\dots\dots (25)$$

考慮延散作用後，碳氫化合物與氧之漸變區長度分別為  $L'_{s1}$  與  $L'_{c1}$ ，

$$L'_{c1} = L_{c1} + \Delta x_1, \quad L'_{s1} = L_{s1} + \Delta x_2 \quad \dots\dots\dots (26)$$

因此，在計算下一時段之  $L_x$  與  $L_c$  之前，漸變區總長度  $L = L_1$  定義如下：

$$L_1 = L_0 + \Delta x_1 + \Delta x_2 \quad \dots\dots\dots (27)$$

對某一時段  $t_i$  而言， $L_0$  代表此時段碳氫化合物與氧根區之總間距， $L_1$  則表示下一時段 ( $t = t_i + \Delta t$ ) 之總間距。

本研究所討論之對象為隨時間移動之邊界條件，一般而言，有兩種常見的座標系統：

(1)全座標系統 (global coordinates system)：

本座標系統以  $t = 0$  時氧漸變區之根區為原點，此原點不隨時間而變。

(2)子座標系統 (local coordinates system)：

本座標系統之原點定在氧漸變區之根區，此原點會隨時間而變。

本研究以全座標系統來描述碳氫化合物與氧之入侵前緣與根區之移動情形。

碳氫化合物入侵前緣之座標為：

$$X_{L_{c1},n} = L_{1,0} + \sum_{i=1}^n \Delta x_{1,i} - L_{c1,n} \quad \dots\dots\dots (28)$$

氧入侵前緣之座標為：

$$X_{L_{s1},n} = L_{s1,n} - \sum_{i=1}^n \Delta x_{2,i} \quad \dots\dots\dots (29)$$

其中，

$X_{L'_{c1},n}$  為碳氫化合物在  $t = n\Delta t$  天時入侵前緣之座標位置，

$L_{1,0}$  為  $t = 0$  天時碳氫化合物與氧根區之總間距，

$L'_{c1,n}$  為碳氫化合物漸變區在  $t = n\Delta t$  天時之長度，

$\Delta x_{1,i}$  為碳氫化合物根區第  $i$  個  $\Delta t$  時段內之移動距離，

$i = 1, 2, 3, \dots, n,$

$X_{L'_{s1},n}$  氧在  $t = n\Delta t$  天時入侵前緣之座標，

$L'_{s1,n}$  氧之漸變區在  $t = n\Delta t$  天時之長度，

$\Delta x_{2,i}$  氧根區在第  $i$  個  $\Delta t$  時段內之移動距離，  
碳氫化合物根區之座標為：

$$X_{rc,n} = X_{rc,0} + \sum_{i=1}^n \Delta x_{1,i} \quad \dots\dots\dots (30)$$

氧根區之座標為：

$$X_{rs,n} = - \sum_{i=1}^n \Delta x_{2,i} \quad \dots\dots\dots (31)$$

其中，

$X_{rc,n}$ ：碳氫化合物在  $t = n\Delta t$  天時根區之座標，

$X_{rs,n}$ ：氧在  $t = n\Delta t$  天時根區之座標，

$X_{rc,0}$ ：碳氫化合物在  $t = 0$  時根區之座標，

建立上述之座標系統，便可清楚地描述碳氫化合物與氧其入侵前緣及根區之移動情形。

### 三、算例

本節針對以上所建立之傳輸模式，以 FORTRAN 語言寫成程式，並配合 RKF45 副程式(Forsythe et al., 1977)，求解在不同之初始濃度與微生物參數時，計算碳氫化合物與氧漸變段之變化情形。碳氫化合物與氧之初始漸變段長度均為 100 公分( $L_s=L_c=100\text{cm}$ )，各濃度值與微生物參數如表 1 所示。

由於微生物參數值分佈範圍很廣，且實驗室所求得之數值在現場之應用上仍有相當的爭議。本研究僅參考國內外相關文獻，在合理之參數範圍內，進行各種計算與分析。

#### CASE 1

圖 4 為 case 1 各參數值所得之結果。由於碳氫化合物對氧之消耗比率( $F$ )等於 1，以致(18)式與(19)式完全相似，且為對稱之邊界條件( $S_0=C_0$ ， $L_{S0}=L_{C0}$ )。因此，碳氫化合物與氧之漸變段以  $x=100\text{cm}$  為軸呈對稱分佈，此一算例的另一目的為用來驗證模式及數值方法的正確性。本節以 case1 為基準，在後續之算例中，每一算例僅改變一個參數值，討論此參數變化對分解過程造成之影響。

#### CASE 2

此處探討碳氫化合物之初始濃度( $C_0$ )對傳輸過程之影響。 $C_0$ 由原先之 5mg/L 增加至 25mg/L，其餘參數維持不變，結果如圖 5 所示。由於本算例中碳氫化合物之濃度遠大於氧，在

表 1 初始濃度與微生物參數一覽表

	$C_0$ mg/L	$S_0$ mg/L	$M_{ho}$ mg/L	$k$ l/day	$F$	$K_r$ mg/L	$K_s$ mg/L	$D$ cm <sup>2</sup> /day
case 1	5	5	0.1	1	1	0.1	0.1	0.6
case 2	25	5	0.1	1	1	0.1	0.1	0.6
case 3	5	25	0.1	1	1	0.1	0.1	0.6
case 4	5	5	1.0	1	1	0.1	0.1	0.6
case 5	5	5	0.1	5	1	0.1	0.1	0.6
case 6	5	5	0.1	1	5	0.1	0.1	0.6
case 7	5	5	0.1	1	1	0.1	10.	0.6
case 8	5	5	0.1	1	1	10.	0.1	0.6
case 9	5	5	0.1	1	1	10.	10.	0.6
case 10	5	5	0.1	1	1	0.01	0.01	0.6

漸變段內之氧會被迅速耗盡，氧之入侵前緣將不易向前移動，而碳氫化合物入侵前緣移動量則較大。由圖 5 可看出，氧入侵前緣之移動相當有限，約 200 天後甚至有後退之趨勢；相反地，碳氫化合物入侵前緣則明顯向前移動。

由本算例可知：碳氫化合物濃度愈高，其入侵前緣移動量愈大，同時減緩了氧入侵前緣之移動。

#### CASE 3

此處探討氧初始濃度( $S_0$ )對傳輸過程之影響。 $S_0$ 由原先之 5mg/L 增加至 25mg/L，其餘參數維持不變，結果如圖 6 所示。本算例中氧濃度大於碳氫化合物濃度，在漸變段內之碳氫化合物將快速被耗盡。由圖 6 可知：氧濃度愈高，其入侵前緣移動量愈大，同時減緩了碳氫化合

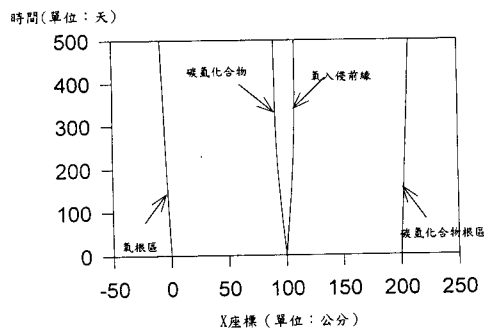


圖 4 case1 中碳氫化合物與氧漸變段位置隨時間變化情形

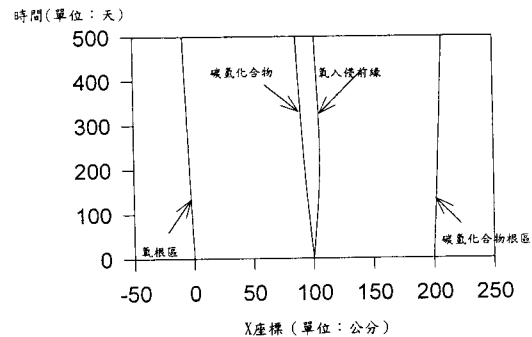


圖 5 case2 中碳氫化合物與氧漸變段位置隨時間變化情形( $C_0$ 加大)

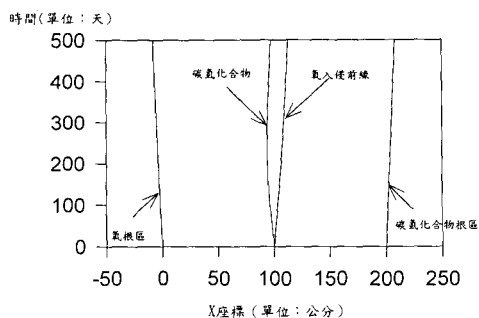


圖 6 case3 中碳氫化合物與氧漸變段位置隨時間變化情形( $S_0$  加大)

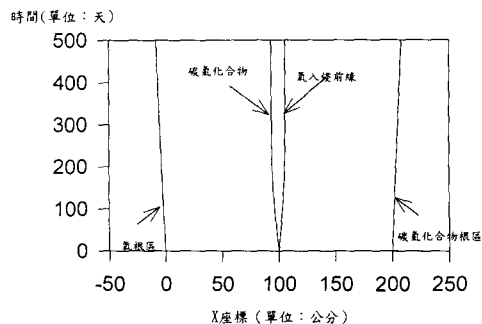


圖 8 case5 中碳氫化合物與氧漸變段位置隨時間變化情形( $k$  加大)

物入侵前緣之移動。本算例之結果與 case 2 呈對稱情形。

#### CASE 4

此處探討微生物背景濃度對傳輸過程之影響。 $M_i$ 由原先之 0.1mg/L 增加至 1mg/L, 其餘參數維持不變, 結果如圖 7 所示。微生物背景濃度愈大, 漸變段內微生物總量愈多, 分解作用愈強烈, 造成漸變段內碳氫化合物與氧迅速被消耗。

比較圖 7 與圖 4 可發現: 微生物背景濃度愈大, 碳氫化合物與氧入侵前緣移動之距離愈小。換言之, 碳氫化合物與氧的消耗量會因微生物的增加而變大。

#### CASE 5

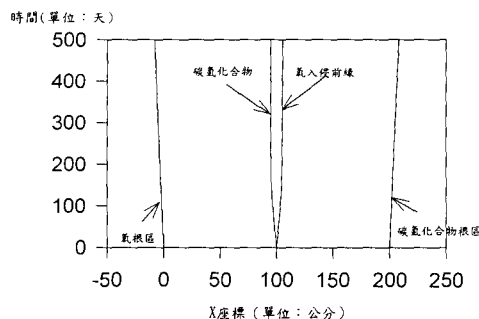


圖 7 case4 中碳氫化合物與氧漸變段位置隨時間變化情形( $M_i$  加大)

此處探討  $k$  值造成之影響。 $k$  由原先之 1 增加至 5, 其餘參數維持不變, 結果如圖 8 所示。 $k$  為單位質量微生物之碳氫化合物最大使用率,  $k$  值愈大, 碳氫化合物消耗量愈多, 氧之消耗量亦愈多。

比較圖 8 與圖 4 可發現:  $k$  值愈大, 微生物分解作用愈強, 碳氫化合物與氧入侵前緣移動量愈小。此情形表示, 只要選擇適當的微生物, 當可促進碳氫化合物與氧的消耗量。

#### CASE 6

此處探討碳氫化合物對氧之消耗比率( $F$ )造成之影響。 $F$  由原先之 1 增加至 5, 其餘參數維持不變, 結果如圖 9 所示。因為,  $F$  僅出現在(19)式, 用以描述生物分解過程中氧之消耗情形。

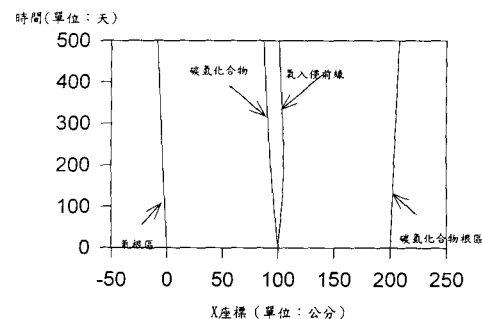


圖 9 case6 中碳氫化合物與氧漸變段位置隨時間變化情形( $F$  加大)



所以， $F$  值愈大，分解過程中微生物對氧之消耗量愈多。

比較圖 9 與圖 4 可發現，本算例中氧入侵前緣移動量大大地減少。故可預見  $F$  愈大，氧之入侵前緣移動量愈小。

### CASE 7

此處探討碳氫化合物半飽和常數  $K_c$  對傳輸過程之影響。 $K_c$  值由 0.1mg/L 增加為 10mg/L，其餘參數維持不變，結果如圖 10 所示。 $K_c$  為碳氫化合物半飽和常數，其值愈小，表示在低碳氫化合物濃度時微生物有較高之生長速率。

比較圖 10 與圖 4 可知，由於  $K_c$  增加，微生物較不活潑，漸變段內碳氫化合物與氧之消耗量較少，故碳氫化合物與氧入侵前緣移動之距離較大。

### CASE 8

此處探討碳氧半飽和常數  $K_s$  對傳輸過程之影響。 $K_s$  值由 0.1mg/L 增加為 10mg/L，其餘參數維持不變，結果如圖 11 所示。 $K_s$  愈大，微生物愈不活潑，漸變段內碳氫化合物與氧之消耗愈慢，故碳氫化合物與氧入侵前緣移動之距離愈大。 $K_s$  對微生物分解過程之影響與  $K_c$  相似。

### CASE 9

此處將再探討半飽和常數  $K_c$  與  $K_s$  對傳輸過程之影響。在本算例中， $K_c$  與  $K_s$  均由 case1 之 0.1mg/L 增加為 10mg/L，其餘參數維持不變，

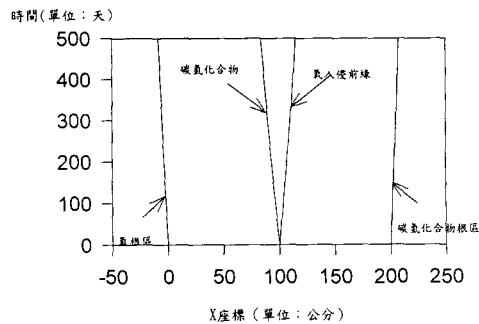


圖 10 case7 中碳氫化合物與氧漸變段位置隨時間變化情形( $K_c$  加大)

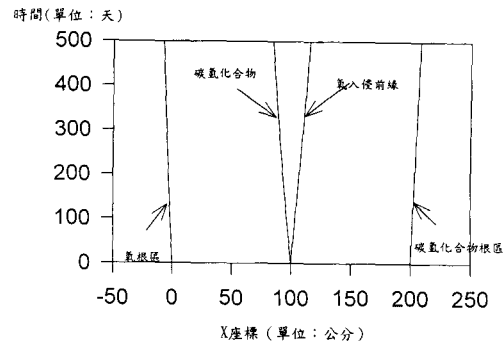


圖 11 case8 中碳氫化合物與氧漸變段位置隨時間變化情形( $K_s$  加大)

結果如圖 12 所示。 $K_c$  與  $K_s$  愈大，分解過程中微生物生長速率愈微弱，故本算例中碳氫化合物及氧之濃度變化主要為擴散之效應，微生物分解僅為次要因素。

比較圖 12 與圖 4 可發現： $K_c$  與  $K_s$  愈大，微生物分解作用愈緩和，碳氫化合物與氧入侵前緣移動量愈大。

### CASE 10

在本算例中， $K_c$  與  $K_s$  均由 case1 之 0.1mg/L 減少為 0.01mg/L，其餘參數維持不變，結果如圖 13 所示。本算例與 case9 恰好相反，由於  $K_c$  與  $K_s$  值減少，微生物在解過程中變得非常活潑，碳氫化合物與氧會被迅速消耗。由圖 13 可發現，因分解作用相當快速，碳氫化合物與氧

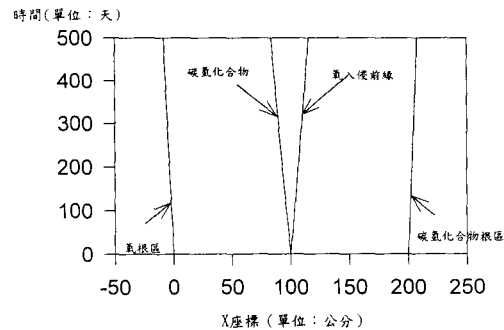


圖 12 case9 中碳氫化合物與氧漸變段位置隨時間變化情形( $K_c$ 、 $K_s$  加大)

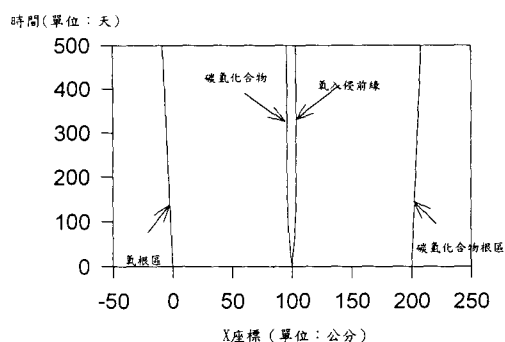


圖 13 case10 中碳氫化合物與氧漸變段位置隨時間變化情形( $K_s$ 、 $K_c$  減小)

入侵前緣移動距離很小，約 200 天後即達穩定狀態，不再向前移動。

#### 四、討論

本研究以邊界層法模擬碳氫化合物在地下水中受微生物分解之傳輸過程，微生物分解之主要機制以 Monod Kinetics 來描述，並以阮奇庫塔法求解漸變段長度變化並考慮延散之效應。因此，探討初始濃度  $C_0$ 、 $S_0$ ，微生物背景濃度  $M_i$  與微生物參數  $K_c$ 、 $K_s$ 、 $F$ 、 $k$ ，將有助於對微生物分解過程之瞭解。

研究發現  $S_0$  愈大，氧入侵量愈多，氧之入侵前緣移動距離愈大。此時，微生物分解作用消耗大量碳氫化合物，故碳氫化合物入侵前緣移動量甚小。 $C_0$  愈大，碳氫化合物入侵量愈多，碳氫化合物之入侵前緣移動距離愈大。而微生物分解作用消耗大量的氧，故氧之入侵前緣移動量甚小。 $M_i$  值愈大，漸變段中微生物分解作用愈強，碳氫化合物與氧將很快被消耗，造成兩者之入侵前緣移動距離愈小。 $k$  值愈大，單位質量微生物對碳氫化合物與氧之消耗量愈多，碳氫化合物與氧入侵前緣之移動距離愈小。 $F$  值愈大，分解過程中氧之消耗量愈多，氧入侵前緣之移動距離愈小。 $K_c$  與  $K_s$  愈小，微生物愈容易分解此種基質，造成微生物生長速率愈快，分解過程愈活潑，並消耗大量碳氫化合物與氧，故碳氫化合物

與氧入侵前緣之移動距離愈小。

由以上之分析可知，若含水層中微生物背景濃度值大( $M_i$  增加)，微生物對碳氫化合物之消耗能力強( $k$  值增加)，而此種微生物易於分解碳氫化合物與氧( $K_c$  與  $K_s$  減小)，並在工程上注入大量溶氧( $S_0$  增加)，此種情況將利於碳氫化合物之清除。

#### 五、結論

本研究建立移動邊界條件下之微生物分解傳輸模式，並探討初始濃度  $C_0$ 、 $S_0$ 、 $M_i$  以及微生物參數  $k$ 、 $F$ 、 $K_s$ 、 $K_c$  對生物分解傳輸過程之影響。

本研究發現  $S_0$  愈大，碳氫化合物入侵前緣之移動量愈小；而  $K_s$  與  $K_c$  愈小，碳氫化合物與氧入侵前緣之移動距離亦愈小。在處理工程問題時，於污染源附近注入濃度較高之溶氧，並利用分解能力較強之微生物，方可較快完成污染物去除之工作。

數學模式建立過程中，Monod kinetics 僅能描述漸變段內碳氫化合物與氧之濃度變化，若碳氫化合物或氧之入侵前緣篡入對方之根區時，則本模式必需加以修正方能使用。

#### 誌謝

本研究承蒙國科會計畫 NSC-86-2621-P-033-002 之補助，謹此致謝。

#### 參考文獻

1. Bear, J., Dynamics of Fluid in Porous Media, Dover Publication, New York, 1972.
2. Alexander, M., and Kate M., Scow, Kinetics of Biodegradation in Soil, in Reaction and Movement of Organic Chemicals in Soils, edited by Sawhney, B. L., and K. Brown, SSSA Special Publication No.22, Wisconsin, pp.243-269, 1989.
3. Benefield, L., and Fred Molz, Mathematical Simulation of a Biofilm Process, Biotechnology and Bioengineering, Vol. 27,

- pp.921-931, 1985.
4. Borden, R. C., and Philip B. Bedient, Transport of Dissolved Hydrocarbons influenced by Oxygen-Limited Biodegradation I. Theoretical Development, Water Resources Research, Vol. 22.No. 13, pp.1973-1982, 1986.
  5. Cole, G. M., Assessment and Remediation of Petroleum Contaminated Sites, Lewis Publishers, Ann Arbor, 1995.
  6. Kemblowski, M. W., and James D. Colthart, An Approximate Solution to the Solute Plume Transport near the Hydrocarbon-Groundwater Interface, Shell Development Company, Huston, Texas, 1987.
  7. Forsythe, G. E., Michael A. Malcolm, and Cleve B. Moler, Computer Method for Mathematical Computations, Prentice-Hall, New Jersey, pp.110-147, 1977.

收稿日期：民國 88 年 4 月 21 日

修正日期：民國 88 年 8 月 24 日

接受日期：民國 88 年 8 月 31 日