◇ 技術資料 ◇

Sensitivity and Effects of Moving Water Table on Recharge Estimates

이 광 열*

요 지

강우에 의해 발생되는 토양(soil)에서의 Recharge를 구하기 위해 두가지 모델 즉, ((i) Simple Mass Balance Model (ii) Numerical Model : UNSAT 1)을 사용했는데, 이 두 모델들은 불포화상태의 흙 (unsaturated zone : above groundwater table)에서 그의 가정과 개념에 약간의 차이가 있다. Unsaturated Zone에서의 이 두 모델의 적용에 있어서 몇가지 중요한 사항이 지적되고 있는데, 균질의 불포화 영역(unsaturated zone)의 토양에서 Mass Balance Model을 사용함으로써 얻은 Recharge는 UNSAT 1(numerical model)을 통해 얻은 결과와 비교할 때 서로 상이한 결과를 보였다. 또한, Recharge의 계산에 있어서 지하수위의 변화에 따른 영향을 알아보기 위해 Sensitivity Analysis를 수행하였다. 즉, 고정수위(fixed groundwater table)로 가정했을 때 발생되는 오차를 한개의 수리학적 계수(hydraulic parameter)의 함수로 보고 계산을 했으며 이 결과를 그림으로 나타내어 보았다.

이 연구의 결과는 Model Simulation에 있어서 수리학적 경계조건을 결정하는데 큰 도움이 될 것이며, 또한 이 연구에서는 Unsaturated-Saturated Flow Model이나 Drainage Model을 함께 병행시켜 Simulation을 수행하는데 촛점을 두고 있다.

1. 서 론

지하수의 흐름은 강우량의 변화에 영향을 받으며 강우의 영향을 고려하여 Recharge를 계산해야 하는 것은 지하수의 거동을 연구하는데 있어서 기본이 되는 요소이다.

지하수면위 부분(unsaturated zone)에서의 흙의 특성(함수비, 공극비, 투수계수 등)은 강우량에 의해 많은 영향을 받으며, Recharge와 강우량과는 상호관계가 있는 것은 분명한 사실이다.

현재까지 사용되고 있는 대부분의 포화상태 흙에서의 Flow Models로부터 Recharge가 입력자료(input data)로써 요구되거나 그렇지 않으면 강우를 나타내는 어떤 함수로 가정하여 쓰고 있다.

한편, 포화영역(saturated zone)과 불포화영역(unsaturated zone)을 복합한 Model[3]을 사용함으로써 Unsaturated Zone에서 Saturated Zone으로 스며드는 Recharge를 계산할 수도 있다. 수치해석(numerical analysis)방법으로 풀이한 Unsaturated-Saturated Flow Model이 복잡하고 정밀하기는 하나, 이 Model은 사

* 정회원, 선경건설(주) 기술연구소 차장

용하기에 번거로우며 그리고 입력자료들(input parameters)의 정확도에 의해 이 모델의 결과에 대한 정밀도가 결정된다. 따라서, Recharge계산에 영향을 끼치는 수리학적 계수를 재시험하거나 또는 Recharge를 계산하기 위한 간단한 방법을 모색해 보는 것도 유용한 연구가 될수 있을 것이다.

이 연구는 Simple Mass Balance Model의 적합성(predicive capability)을 연구하는데 그 목적을 두고 있다. 임의의 불포화상태의 영역(unsaturated domains)을 가지고 Simple Mass Balance Model의 계산결과와 UNSAT 1(numerical model)의 결과를 비교해 보았는데 현재 쓰이고 있는 대부분의 불포화 영역(unsaturated zone)에서의 수치해석(numerical analysis) 모델이 지하수위의 Fluctuation을 무시했기 때문에, 이번 연구에서는 Recharge의 계산에 있어서 동수위(moving water table)의 영향을 규명하는데 주안점을 두고 분석 하였다.

2. Description of Models

Mass Balance Model :

이 모델에 있어서의 가정은 첫째, 불포화상태 영역(unsaturated zone) 전체는 하나의 Homogeneous한 층이며 둘째, 포화상태영역(saturted zone)으로의 Recharge는 Unsaturated Zone에 저장된 물의 부피(volumetric water contents)에 대한 함수로 나타내어진다는 것이다.

즉,

$$\gamma = K(\theta_u) \qquad (1)$$

여기서

γ = Saturated Zone으로 유입되는 Rechange Rate

θ_u = Unsaturated Zone에서의 평균체적 함수비

$k(\theta_u)$ = 임의의 θ_u에서의 Unsaturated Hydraulic Conductivity

함수비 θ_u는 Mass Balance Model에 의해 산출되는데 그 식은,

$$\theta_{u2} = [\theta_{u1}V_u + A_u \triangle t(q-r)]/V_u \qquad (2)$$

여기서 V_u는 Unsaturated Zone에서의 전체 Volume이며 q는 강수량, 첨자, 1,2는 시간의 증가에 따른 시작과 끝을 의미한다. 또한, A_u는 Unsaturated Zone의 수평단면이다. Mass Balance Model의 가정은 바로 강우의 증력에 의한 흐름이 강우가 있는 경우마다 일어난다는 것이다.

Numerical Model(UNSAT 1) :

UNSAT 1[4]은 Hermitian finite element computer model을 사용하였으며, 이것은 Saturated-Unsaturated Zone에서의 Non-Homogeneous한 흙의 1축 방향의 물의 거동을 Simulation 할 수 있는 Program이다.

이 모델은 불포화-포화상태의 흙체(saturated-unsaturated medium)에서의 수직방향의 흐름식을 나타내는 편미분 방정식을 수치해석(numerical analysis)방법으로 풀이하였다. 이 모델은 Newman과 Dirichlet Type의 Boundary Condition을 만족한다.

이 모델에 또 다른 기능이 있는데 그것은 Unsaturated Zone에서 서로 다른 층(Layer)들의 Properties가 자연스럽게 조금씩 변화하는 것도 Simulation 할 수 있다.

보다 완전한 설명이나 Program, 그리고 그의 Solution을 원하는 독자는 Reference[4]를 참조하기 바란다.

3. Application of the Models

지금까지 설명된 모델들을 네가지 종류의 흙을 가지고 가상의 불포화상태의 흙(unsaturated soils)에 적용했다. 그 Soil Profile은 수문학적 성질(hydrologic characteristics)에서 넓은 범위를 가지고 있다. 즉, 흙의 종류로는 모래, Sandy loam, Silty clay loam, Sity clay 등이다. 여기서 사용된 흙들은 불포화상태의 영역에서 균질한 것으로 가정하고 모델에 적용하였다.

이 모델들을 적용하는데는, Moisture Retention Function(h=f(θ))이나 함수비대 투수계수(hydraulic conductivity)와의 함수관계(K = f(θ))에 대한 지식이 요구되는데 이러한 관계식으로는 여러가지 시험식이 보고되어 있다.(1)(2)(4)(5)

이 연구의 목적을 위하여 Campbell의 실험식을 사용하였으며 그것은 체적함수비(volumetric water content)에 따른 투수계수(hydraulic conducivity)의 관계식을 나타내기 위함이다. 즉,

$$K(\theta_u) = K_S\ (\theta_u/\theta_s)^{(2b+3)} \qquad (3)$$

여기서 K_s는 포화상태에서의 투수계수(hydraulic condutivity)이며, θ_s는 포화상태에서의 체적함수비이며, b는 실험에 의해 구해지는 상수(impirical constant)이다. Clapp과 Hornberger (1978)에 의해 제안된 수문학적 계수들은 이 연구에서 선택된 4가지 흙에 따라 각각 다른 값들을 채택했다. 식(3)은 Mass Balance Model에서 직접적으로 Recharge를 계산하는데 사용되었다.

UNSAT 1에서, Bottom Boundary Condition에는 자유배수(free drainage) 조건을 사용했고, 식(3)을 사용하여 Recharge를 계산했으며, 식(3)은 Unsaturated Zone의 아래 끝부분에서의 함수비(θ)에 상응하는 값을 사용하였다. 26시간의 dry spell 후의 모든 Simulation에서, 강우의 강도는 24시간동안 일정한 것으로 가정했다.

4. Discussion of Results

Sand나 Silty Clay에서의 누적되는 Recharge의 그림은 Fig 1과 Fig 2에 보여지는 바와 같다. 또한, 일정한 범위내에서의 Sandy loam과 Silty clay loam(not shown here)을 통한 Mass Balance Model과 UNSAT 1에 의한 예측결과에 대한 차이는 Fig 1과 2에 나타나 있는 바와 같았다. 그러므로, Fig 2에 보여지는 것과 같이 그림의 윗부분에서의 오차정도를 고려해 볼때, Mass Balance Model에 의한

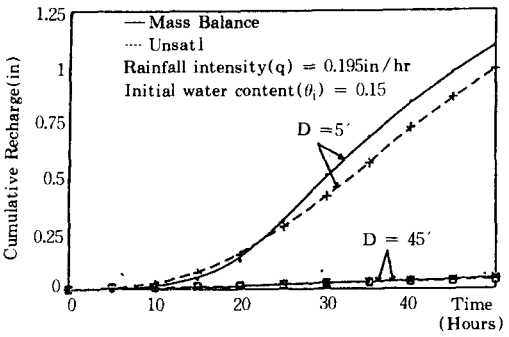

Fig. 1 Comparison of recharge predictions for sand

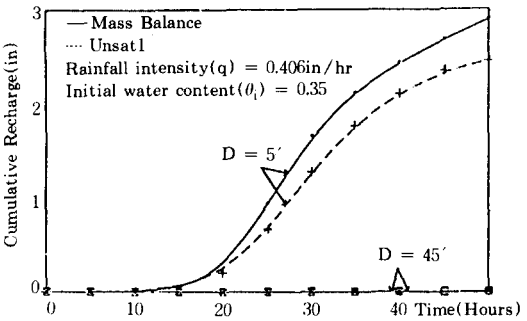

Fig. 2 Comparison of recharge predictions for silty caly

결과가 UNSAT 1에 의한 결과보다 비교적 정확하다는 결론을 얻을 수 있다.

Mass Balance Moldel의 Over prediction은 괄목할만한 사항인데, 그 이유는 중력에 의한 Percolaton을 감소시키는 Capillary Gradients를 계산에 고려하지 않았기때문에 발생되는 오차 때문이다. Capillary Gradient의 영향은 깊이가 낮은 곳보다 깊은 곳에서 현저하다. 균질하고 균등한 초기함수비를 갖는 Profile에서 Simple Mass Balance Model은 수치해석(numerical analysis)에 의한 모델만큼 좋은 예측결과를 가져올 수 있다.

다음으로, Mass Balance Model을 사용하여 Moving Water Table의 영향을 고찰해 보았는데 여기서는 불포화영역(saturated zone)내에서 비배수의 조건으로 가정했다. 매번의 시

간증가 때마다 지하수위(water table)을 결정하는데에 Recharge를 고려 했으며, 따라서 불포화상태의 흙의 깊이(depth of unsaturated zone)는 상대적으로 감소된다. Sand와 Silty caly에서 고정수위와 Moving Water Table의 개념을 사용한 누적 Recharge의 변화는 Fig. 3과 Fig. 4에 나타나 있다.

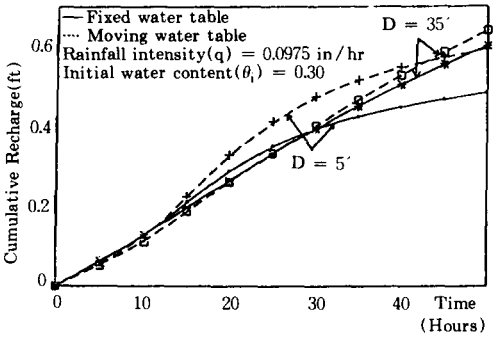

Fig. 3 Effect of moving water table on recharges for sand

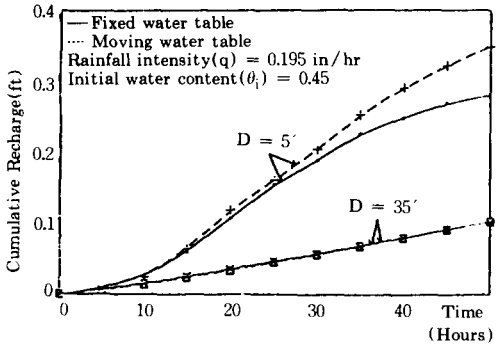

Fig. 4 Effect of moving table on recharges for silty clay

그림에서 보는 바와 같이 고정수위일때의 누적 Recharge는 점차적으로 작게 계산됨을 나타내 보이고 있다. 또한, 여기에는 보여지지 않았지만, Sandy loam과 Silty Caly loam(not shown here)에서의 Simulation 결과에서도 고정수위와 동수위일 때의 차이는 Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 것과 같은 범위에 있었다.

Fig. 5와 Fig. 6에 보여진 바와 같이 고정수위일 때와 동수위일 때와의 사이에 발생되는 error를 Normalized Initial Water Content, S_e $[(\theta_s - \theta)/(\theta_s - \theta_i)]$, 의 항과 Lumped Parameter D/q의 항으로 나타냈다. 여기서, θ_i는

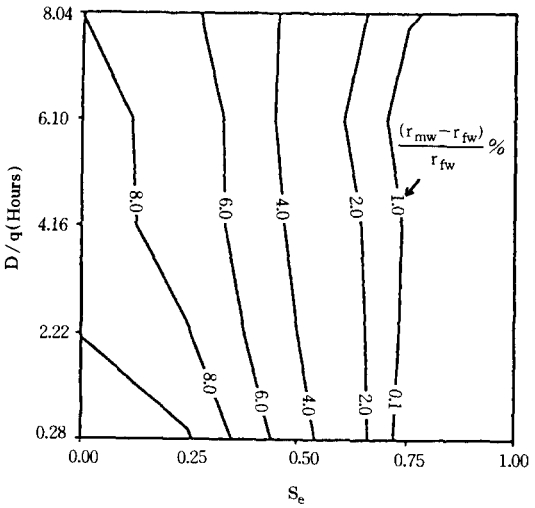

Fig. 5 Contours of percentage error due to fixed water tabel assumption for sand

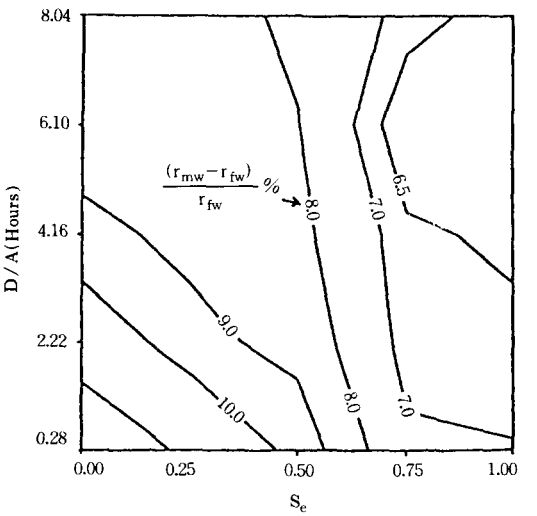

Fig. 6 Contours of percentage error due to fixed water tabel assumption for silty clay

초기체적함수비(initial water content), θ_f는 함수능력(water content at field capacity), D는 불포화층의 깊이, 그리고 q는 평균 강우강도(the average intensity of rainfall)이다.

여러가지 값의 D와 q에 대한 D/q의 비(constant ratio)를 가지고 Simulation을 해본 결과 확연한 결과를 볼 수 있었으며, 따라서 D/q비값은 아주 유효한 측정변수로서 채택될 수 있다는것을 알 수 있다.

하나의 특정한 조건과 주어진 허용오차 범위내에서 지하수 흐름에 대한 어떤 연구과제를 수행하는 경우, 여기에 보여진 그림들을 이용하여 Moving Water Table의 효과를 고려 또는 무시할 수 있는 한계를 결정할 수 있다. 이 그림들은 완전포화-불포화(saturated-unsaturated) Flow 또는 Drainage Model을 조합(coupling)하여 다루는데 기초로 하는 조건들(condition)을 결정하는데 도움이 될 것이다.

5. Conclusions

함수비와 토질조건이 전체적으로 균질(uniform initial moisture content, homogeneous)한 흙의 조건하에서 Simple Mass Balance Method에 의해 계산된 Recharge는 Numerical Model(UNSAT 1)에 의해 계산된 것과 같은 값을 갖지 않는다. 고정수위로 가정했을 때의 결과는 현저한 오차를 보였으며 특히, Shallow Zone일 경우는 더욱 현저했다. 고정수위로 가정하고 계산된 Recharge는 비교적 적게 계산되었는데 그것은 지하수의 거동을 위한 연구에서 바람직하지 못하다.

앞으로 더 필요한 연구로는, Non-Uniform Rainfall Distribution, Heterogenity의 토양조건들 그리고 함수비의 불균등분포(non-uniform antecedent moisture conditions)하에서 Recharge의 변화가 규명되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구를 위하여 Typing을 도와주신 선경건설주식회사에 근무하는 姜 正蛾씨에게 심심한 감사를 표하는 바이다.

참 고 문 헌

1. Campbell, G.S,(1974) "A Simple Method for Determining Unsaturated Conductivity from Moisture Retention Data", Soil Science, Vol. 177, pp. 311-314.
2. Clapp, RB. and Hornberger, G.M.,(1978) "Empirical Equations for some Soil Hydraulic Properties", Water Resources Research, Vol. 14, No. 4, pp. 601-604
3. Freeze, R.A.,(1971) "Three-dimensional, Transient, Saturated-unsaturated Flow in a Groundwater Basin", Water Resources Research, Vol. 7, pp. 347-366,
4. Van, Genuchten(1978) "Numerical Solutions of the One-dimensional Saturated-unsaturated Flow Equation", Research Report 78-WR-09, Water Resources Program, Department of Civil Engineering, Princeton University.
5. Lee, Kwang yeol(1992) "Predictions of Hydraulic Conductivity of Compacted Calys Based on Micro-and Macroscopic Parameters", Ph. D. Dissertation. Stevens Institute of Technology, Hoboken, New Jersery.