한국지반공학회논문집 제21권 8호 2005년 10월 pp. 63 ~ 72

성토제 하부에 매설된 사석층의 침투특성

Seepage Characteristics of Embedded Rock Layer Under the Earth Fill

이 행 우[1] Lee, Haeng-Woo
장 병 욱[2] Chang, Pyoung-Wuck

Abstract

Rocks are dumped to soft marine ground in order to improve trafficability and construction conditions in the tideland reclamation construction sites. Though this rock layer under earth fill has caused in a serious seepage problems after construction, seepage behaviors of this embankment structure is not correctly investigated. Water flow through rock layers is, in general, known as Non-Darcy's flow. However, the embedded rock layer under earth fill is not known whether its flow is governed by Darcy's or Non-Darcy's law. Therefore, a numerical analysis, laboratory model test and filed investigations were performed for analyzing the those seepage characteristics in this research. Results show that there is significance of 95% of confidence between observed heads and seepage rates, and the calculated ones by SAMTLE which is developed under the assumption that the water flows through the two-layer system obey the Darcy's flow. And after operating the hydraulic gradient(i) of 0.10~0.55 upon laboratory model, these seepage characteristics of the embedded rock layer show that Reynolds Numbers are less than 10 and the relationship between these velocities of rock layer(v) and hydraulic gradients(i) is linearly proportional with more than 0.79 of the coefficient of correlation (R^2). And the Reynolds Number of the velocity calculated by the relation of $v = ki$ in the embedded rock layer of ○○ sea dike is 1~6. It shows also laminar flow. Based on these results, it is concluded that the seepage characteristics of embedded rock layer under earth fill can be laminar and Darcy's flow.

요 지

해안매립 및 방조제 공사 시 바닥사석은 장비의 이동성 및 현장 시공성을 개선하기 위하여 포설된다. 그러나 공사 완료 후 이러한 바닥사석층은 상부 구조물에 치명적인 침투피해의 원인으로 작용하나 이러한 바닥사석층에 대한 침투특성이 규명되지 않아 바닥사석층이 있는 구조물의 정확한 침투거동 파악이 곤란하다. 보통 사석층내의 침투는 Non-Darcy 흐름으로 알려져 있지만, 성토층 등 지중에 매설된 사석층 내의 침투는 Darcy 흐름 또는 Non-Darcy 흐름인지는 아직까지 명확히 파악되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 성토지반에 매설되어 있는 사석층의 침투특성을 파악하기 위하여 수치해석, 실내모형실험, 현장조사 등 다각적인 방법으로 접근하였다. 그 결과 성토지반내 사석층의 침투는 Darcy 흐름으로 가정하고 유도한 해석모형에 의해 계산한 침윤선과 실내모형에서 실측한 침윤선을 서로 비교한 결과 95%(α=0.05) 신뢰구간에서 유의성이 있었으며, 실내모형실험에서 구한 유속에 대한 레이놀즈 수가 10미만의 층류이고, 유속과 동수경사가 비례관계로 나타났다. ○○ 방조제를 대상으로 바닥사석층까지 보링을 하고 측정한 투수계수와 동수경사로부터 계산한 Darcian 유속에 대해서는 레이놀즈 수가 1~6 범위의 층류로 나타났다. 이상의 결과로 보아 성토지반에 매설되어 있는 사석층내의 침투는 층류의 Darcy 흐름일 가능성이 높다고 판단된다.

Keywords : Darcy's flow, Embedded rock layer, Non-Darcy's flow, Seepage characteristics, Two-layer seepage analysis model (SAMTLE)

1 정회원, 농업기반공사 농어촌연구원 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Rural Research Institute, KARICO, hwlee@karico.co.kr)
2 정회원, 서울대학교 농업생명과학대학 교수 (Member, Professor, School of Biological Resources & Materials Engineering, Seoul Nat'l Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다. 단, 건전한 토의 문화 정착을 위하여 학회에서 내용을 조정할 수 있음을 알려드립니다.

1. 서 론

연안해안 및 하천의 연약지반을 매립하여 부지를 조성할 때 지반의 지지력 확보 및 장비의 이동성을 향상시키기 위하여 자갈 및 사석을 우선 투하한 후 그 위를 흙으로 성토한다. 특히 바다를 막아 내부을 개발하는 간척사업의 방조제 공사는 조위가 반복되고 유속이 큰 상태에서 체절을 하기 때문에 체절구간에서의 원지반 세굴 문제가 심각하다(농업기반공사, 1995, 이행우 등, 2004). 실제 현장에서는 이러한 원지반 세굴을 방지하기 위해 바닥보호사석층을 넓게 포설하여 사석 및 콘크리트 블록 등으로 체절을 한 후 내측의 바닥보호사석층 위에 성토를 해 결국 투수성이 큰 사석층이 성토층 하부에 매설된 상태가 된다(이행우, 2005).

이와 같이 매립지반 및 방조제는 투수성이 큰 사석층과 투수성이 낮은 흙 성토층으로 이루어진 이층으로 구성되어 있다. 성토층 하부에 사력질이 놓이게 되므로써 발생할 수 있는 문제점은 조위의 변화에 따라 바닥사석층으로 해수가 유통되어 매립지반내 지하수위의 상승과 하락이 반복 되므로써 지반의 강도가 저하되고 부등침하를 야기해 구조물의 안전에 영향을 줄 수 있다. 최근에는 바다에 폐기물 매립장을 건설하는 사례가 많은데 조위의 변화에 따라 매립장으로부터 침출수가 발생해 바다를 오염시키는 사례가 종종 보고되고 있다. 특히 해일을 방어하는 방조제 바닥사석층으로 해수가 유입되어 담수호 염도를 증가시키고 제체에도 파이핑 피해 등 안전에 심각한 문제를 야기한 사례가 많다(한신공영, 2004). 이러한 피해를 정확히 진단하고 대책을 수립하기 위해서는 침투현상을 정확히 해석해야 한다. 흙층과 사석층이 각각 개별 층으로 구성된 구조물의 경우, 흙층은 Dacy 흐름 법칙을 따르지만 사석층은 Non-Darcy 흐름특성을 보인다(최흥식, 2004; Li 등, 1998). 하지만 사석층이 원지반 및 흙성토층에 매설되어 흙-사석 이질층으로 구성된 제방의 침투해석은 매설된 사석층를 투과하는 흐름이 Darcy 또는 Non-Darcy 흐름인지를 규명하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 다음과 같은 3가지 방법으로 성토층 하부에 매설된 사석층의 침투특성을 분석하였다.

(1) 성토층 하부의 자갈층내 흐름이 Darcy 법칙을 따르는 것으로 가정하고 개발된(이행우 등, 2005a) 수치해석모형을 적용하여 적용성의 여부에 따라 Darcy, Non-Darcy 흐름을 판별하였다.

(2) 투수성이 완전히 다른 이층 성토구조물을 재현한 실내모형실험에서 성토층 하부 자갈층내의 흐름 유속으로부터 흐름특성을 직접 분석하였다.

(3) ○○방조제 바닥사석층까지 보링을 하고 현장투수시험에 의해 바닥사석층의 투수계수를 구하여 유속을 계산하고 레이놀즈 수를 구하여 층류 또는 난류 흐름을 판별하였다.

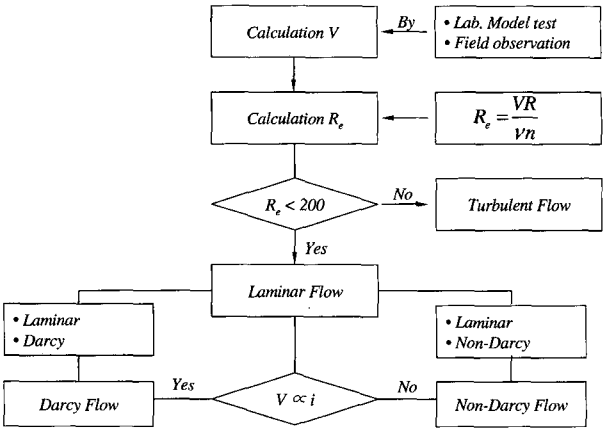


그림 1. 물의 흐름특성 판별

2. Darcy, Non-Darcy 흐름판정

유체의 흐름특성은 흐름에 대한 유속을 측정하여 식 (1)에 의해 레이놀즈 수를 구한 다음, R_e< 200 흐름은 층류, $R_e \geq 200$인 흐름은 난류로 구분한다(최흥식, 2004; Li 등, 1998).

$$R_e = \frac{vR}{\nu n} \tag{1}$$

여기서, R_e : 레이놀즈 수
v : 유체의 유속
R : 유체의 통과 매체 입자의 평균수리심
n : 유체의 통과 매체의 공극율
ν : 유체의 동점성 계수

그림 1에서 보는 바와 같이 Darcy 흐름조건은 층류이고 유속과 동수경사가 그림 2의 Zone I와 같이 직선인 비례관계가 나타나는 흐름이다. 이에 반해 Non-Darcy 조건은 난류 또는 Zone III과 같이 유속과 동수경사가 비례관계가 성립하지 않는 흐름이다. 그림 2의 Zone II는 Darcy 흐름에서 Non-Darcy 흐름으로 변하는 천이구역이다.

보통 흙속의 흐름은 층류로, 사석, 자갈, 굵은 모래속의 흐름은 난류흐름으로 간주한다(Taylor, 1948). Darcy(1856)는 층류에서의 흐름이론을 식 (2)와 같이 정립하였다.

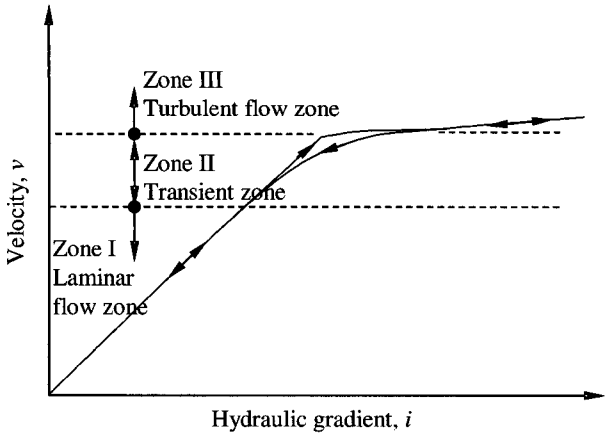


그림 2. Darcy, Non-Darcy 흐름조건

$$v = ki \tag{2}$$

여기서, v : 흙속의 물의 유속(m/s)

k : 포화상태에서 투수계수(m/s)

i : 동수경사

식 (2)에서 동수경사(hydraulic gradient) i는 두 지점 간의 수두차를 거리로 나눈 값이다. 즉 흙속의 모든 유체의 흐름 유속은 수두경사에 비례하고 그 비례상수는 투수계수(coefficient of permeability)이다. 따라서 난류의 흐름은 Darcy의 흐름법칙을 따르지 않는다.

2.1 수치해석

2.1.1 수치모형의 개발

흙층 하부에 있는 사석층의 침투특성을 분석하기 위하여 우선 사석층의 흐름이 Darcy 법칙을 따르는 것으로 가정하고(Polubarinova -Kochina, 1962) 수치해석모형(SAMTLE)을 개발하였다(이행우 등, 2005a).

그림 3에서와 같이 흙층 하부 사석층을 하류부 세굴여부에 따라 경사지지 않은 구간(LL′)과 경사진 구간(L′L″)으로 나누고 식 (3), (4)와 같이 침윤선에 대한 지배방정식을 유도하였다.

LL′ 구간; $$\frac{dx}{dh} + \frac{(k_r - k_e)}{q} h_r + \frac{k_e}{q} h = 0 \tag{3}$$

L′L″ 구간; $$\frac{dx}{dh} - \frac{(k_e - k_r)\, i}{q} x + \frac{k_e}{q} h = 0 \tag{4}$$

식 (3), (4)를 직접 적분하여 식 (5), (6)을 유도하고,

LL′ 구간;

$$x_{n+1} - x_n = -\left(\frac{k_r - k_e}{q}\right) h_r (h_{n+1} - h_n) - \frac{k_e}{2q}(h_{n+1}^2 - h_n^2) \tag{5}$$

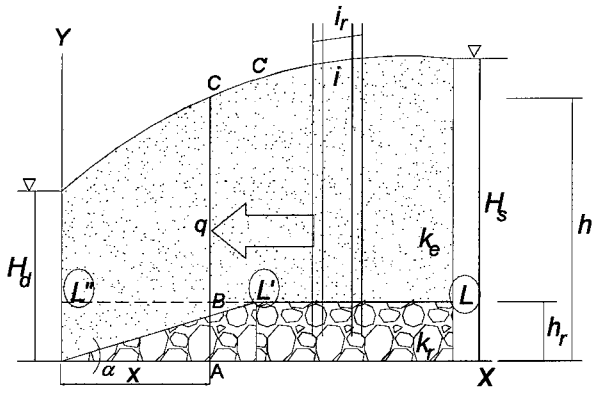


그림 3. 이층 성토 제방의 침투모델

L′L″ 구간;

$$h + \frac{(k_r - k_e)}{k_e} ix - \frac{q}{(k_r - k_e)i} = C^* e^{-\frac{(k_r - k_e)i}{q} h} \tag{6}$$

L′L″ 구간의 식 (6)에서 $\frac{q}{(k_r - k_e)i}$항은 실제 매립지반이나 방조제에선 침윤선에 미치는 영향이 1cm 미만이므로 무시하고(이행우, 2005) 식 (7)을 최종적으로 유도했다.

L′L″ 구간;

$$h + \frac{(k_r - k_e)}{k_e} ix = C^* e^{-\frac{(k_r - k_e)i}{q} h} \tag{7}$$

2.1.2 수치모형의 적용

개발된 수치 모형의 적용성을 검토하기 위하여 그림 4와 같이 실내모형을 제작하였다.

성토 재료로는 준설사(DS), 입도가 균일한 하상모래(RS), 준설사와 하상모래를 1 : 1로 혼합한 혼합토(MS)

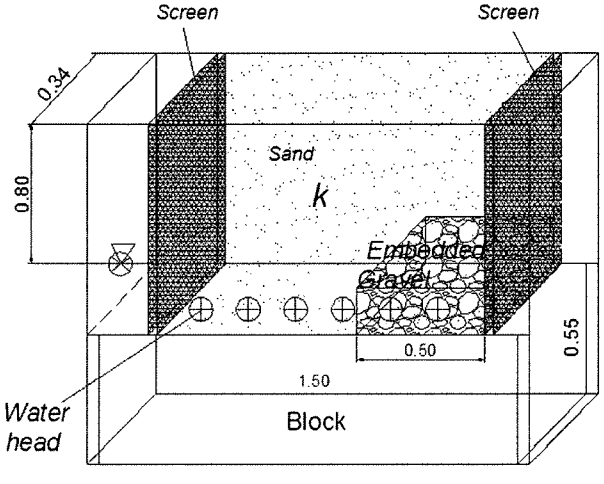


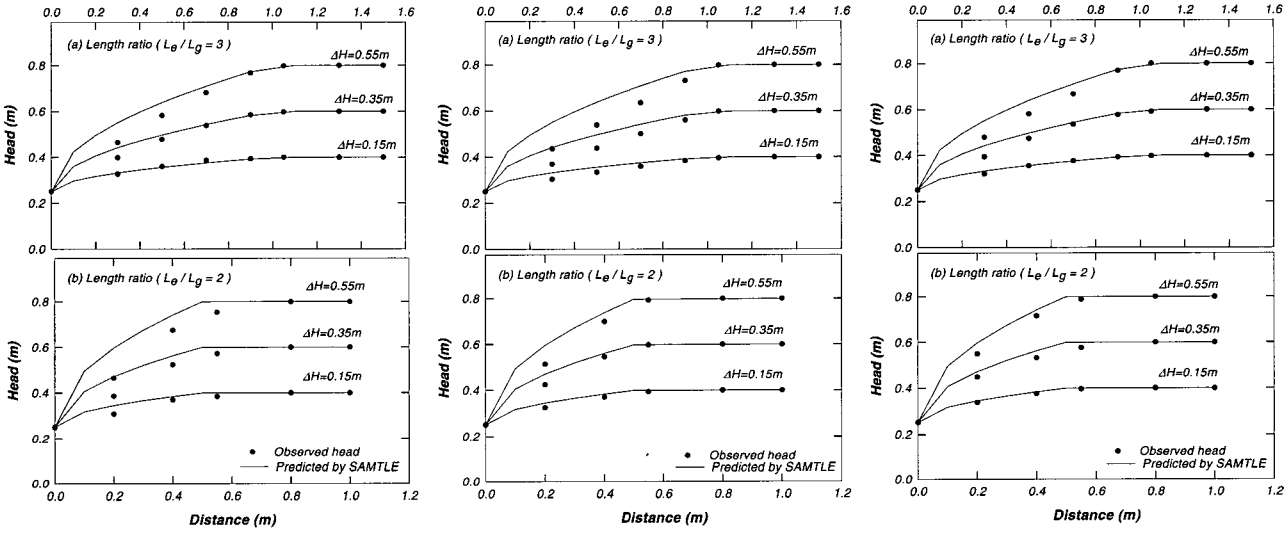
그림 4. 제작모형 모식도(Non scale)

에 대하여 하부 상류측에 0.5m × 0.2m 자갈층을 깔고 수리모형실험을 하여 0.2m 간격으로 침윤선을 측정하였다(이행우 등, 2005b).

새만금 준설사는 실트분이 함유된 균등한 입도를 가진 세립질 모래로서, 통일분류법상 실트질 모래(SM)로 분류되었다. 강모래는 입도가 균일한 모래로 통일분류법상 입도가 불량한 모래(SP)이다.

준설사와 강모래 혼합토는 준설사와 비슷한 물리적 특성을 갖으며 통일분류법상 실트질 모래(SM)로 분류되었다. 본 모형실험에 사용한 성토재료에 대하여 KS F 2312의 A 다짐을 실시한 결과 새만금 준설사는 최적함수비 13.8%에서 최대건조밀도 15.19kN/m^3, 강모래는 13.0%에서 16.66kN/m^3, 혼합토는 14.2%에서 16.17kN/m^{3}로 나타났다(이행우 등, 2005).

그림 5는 측정한 침윤선과 식 (5)와 (7)로부터 계산한 침윤선의 값을 비교하여 도시하였다. 그 결과 자갈층 상부 성토층에 나타난 침윤선은 계산값과 측정값이 잘 일치하였으나 하류부에는 차이가 남을 볼 수 있다. 이는 개발된 수치식이 투수성이 완전히 다른 이층 성토구조물내 침윤선을 계산하는 식이기 때문에 단일층으로 형성되어 있는 하류부는 두값이 차이가 나는 것으로 판단된다. 이를 통계적 수치로 분석한 결과를 표 1에 나타냈다. 표 1은 측정치와 계산치와의 차이가 정규분포를 따른다고 가정하고 가설과 검정의 기법을 이용하여 수치식의 적용성을 검토한 결과이다. 모형에서 측정한 수두와 계산한 침윤선의 높이와의 차이는 평균 0.0015~0.041m, 표준편차는 4.38 × 10^{-3}~4.88 × 10^{-2}m로 나타났으며, 상호 상관계수는 0.97~0.99로 상관성이 높다. 또한



(a) 준설사(DS) (b) 하상모래(RS) (c) 혼합토(MS)

그림 5. 실측한 수두와 계산된 침윤선의 비교

표 1. 실측한 수두와 계산된 침윤선의 적합성 비교분석

성토 재료	수두 (i)	실측값 VS 계산값, m		상관계수 (R^2)	검 정		적 용	
		평균차(Ho)	표준편차(s)		α=0.1	α=0.05	α=0.1	α=0.05
준설사 (MS)	0.37	2.195E-02	3.274E-02	0.987	2.194E-02	2.738E-02	No	Yes
	0.23	8.088E-03	1.559E-02	0.993	1.045E-02	1.304E-02	Yes	Yes
	0.10	1.535E-03	4.777E-03	0.996	3.200E-03	3.994E-03	Yes	Yes
하상모래 (RS)	0.37	4.060E-02	4.882E-02	0.971	3.271E-02	4.082E-02	No	Yes
	0.23	2.385E-02	2.966E-02	0.974	1.987E-02	2.480E-02	No	Yes
	0.10	9.582E-03	1.101E-02	0.980	7.373E-03	9.202E-03	No	No
혼합사 (MS)	0.37	2.201E-02	3.053E-02	0.988	2.045E-02	2.553E-02	No	Yes
	0.23	1.130E-02	1.625E-02	0.992	1.088E-02	1.358E-02	No	Yes
	0.10	1.596E-03	4.385E-03	0.997	2.938E-03	3.666E-03	Yes	Yes

※ 가설검정에서 α-위험율은 Ho-Ha = 0에서 0.05로 계산하였음.

신뢰구간 95%(α=0.05)에서는 하상모래(k = 3.0 × 10^{-4}m/s)에서 동수경사 0.10을 제외하고는 적합한 것으로 나타났다.

방조제의 경우 성토재료의 투수성이 k = 1.0 × 10^{-7}m/s 이하로 본 모형실험에서 사용한 하상모래 보다 작기 때문에 95%의 신뢰구간에서 적용성이 있는 것으로 나타났다.

따라서 흙층 하부에 자갈층의 흐름을 Darcy 법칙을 따른다고 가정한 수치식이 실측한 값과 적합성이 있는 것으로 나타나, 성토층에 매설된 자갈층내 물의 이동은 Darcy 흐름으로 간접 추론하였다.

2.2 실내모형실험

2.2.1 실험방법

자갈층내 흐름 유속을 측정하기 위하여 그림 4의 모형에 모든 투과 유량이 자갈층을 통과 하도록 자갈층 상부와 자갈층 상류부 스크린에 아크릴판을 붙였다. 2.1항에서 사용했던 3가지 흙과 자갈을 같은 규모로 사용하여 다음과 같은 방법으로 자갈층내 흐름유속을 구하였다.

(1) $\triangle t$ 시간 동안 자갈층을 통과하는 침투유량 Q를 구하여 식 (8)에 의하여 성토층에 매설되어 있는 길이 0.50m 높이 0.20m의 사석층($d = 19 \sim 26$mm)내의 흐름유속을 계산했다.

$$V_g = Q / A_g \tag{8}$$

여기서, V_g : 사석층내의 흐름유속(m/s)
Q : 단위시간당 침투유량(m^3/s)
A_g : 사석층의 단면적(m^2)

(2) 침투유량은 그림 4의 모형장치에서 $\triangle t$ 시간동안 하류의 배출구에서 배출되는 양을 측정하여 식 (9)와 같이 계산했다.

$$Q = V / \triangle t \tag{9}$$

여기서, V : 배출구에서 배출되는 양(m^3)

(3) 사석층에 설치한 피에조미터관의 수두를 측정하여 동수경사를 계산하였다.

2.2.2 실험결과 및 분석

2.2.1항에서 계산한 사석층내의 유속과 동수경사를 그림 6에 도시하였다.

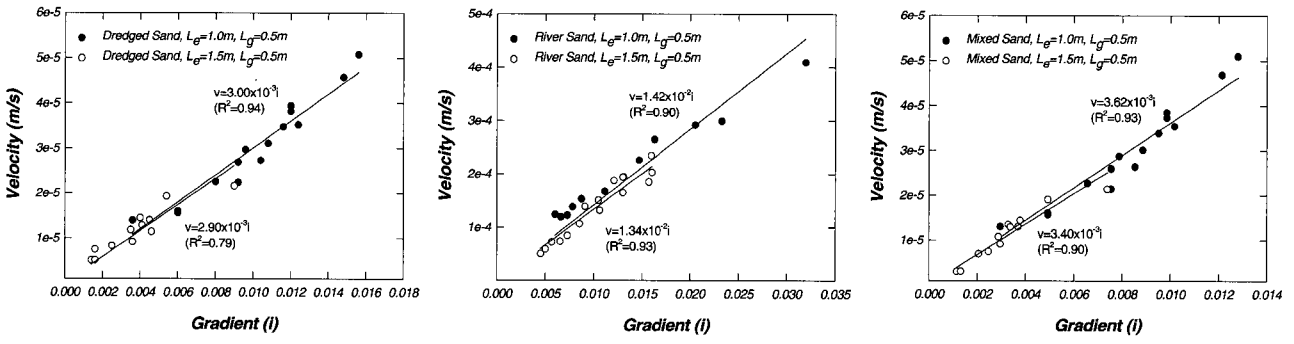
그림에서 L_e는 성토층의 길이, L_g는 자갈층의 길이이다.

본 모형실험에서 투수성이 다른 3가지 재료의 성토층에 매설되어 있는 자갈층 내의 흐름유속을 식 (8)에 의하여 구하고 그 유속을 식 (1)에 대입하여 레이놀즈 수를 구한 결과 10 미만의 층류로 나타났다(이행우 등, 2005). 그림 6에서 보는 바와 같이 수두경사와 속도와의 관계는 상관계수 0.90이상 직선관계를 보이고 있다. 이는 자갈층내 흐름이 Darcy의 법칙을 따르는 것으로 볼 수 있다.

2.3 사례지구 조사

2.3.1 대상지구

흙-사석 이질층 방조제의 침투특성 분석을 위하여 ○○방조제를 대상지구로 선정하였다. 대상지구의 기본조사, 설계서, 토질 및 지질 보고서와 끝막이 보고서 등을 면밀히 검토하고 현장답사를 실시하여 바닥사석의



(a) 준설사(DS) (b) 하상모래(RS) (c) 혼합토(MS)

그림 6. 자갈층내 유속과 동수경사 관계

분포, 해수 침투량 등을 고려하여 설계당시 측점 No 89+50 단면을 분석단면으로 정하였다. 대상지구 해역에서의 조위 특성은 대조차는 8.020m, 소조차는 3.445m이며 평균조차는 5.701m이다. 일주조는 반일주조의 약 1/5을 점하며 거의 규칙적으로 1일 2회의 간조 및 만조가 일어나고 있다. 이 해역에서 조석의 형태수는 0.20정도의 반일주조형의 조석으로 창조와 낙조시간은 6시간 12분씩으로 거의 일정하게 일어난다. 기준항인 인천항과의 조시차는 20분이 빠르고, 조고비는 1.101이며 평균해면은 EL(+)0.131m이다(한신공영, 2004).

2.3.2 바닥사석의 입경

본 연구 대상지구 No.89+50 지점의 바닥사석층의 계획폭은 22m이다. 바닥사석층으로 사용된 사석의 비율은 규격석(0.2～0.3m)을 이용한 돌망태 50%, 500～2,000kg의 거석 50%인 것으로 나타났다. 거석의 비율은 500～900kg이 25%, 910～2,000kg이 25%이다(농업기반공사, 2002). 돌망태 1개당 무게는 평탄부 2,000kg, 경사부에서는 4,000kg 정도이다. 이와 같은 바닥보호사석재의 투입률을 기초로 하여 실제 투하된 바닥사석재의 입경별 사용량을 추적하였다. 식 (10)을 이용하여 사석의 중량을 입경으로 환산하였다. 표 2는 바닥보호사석 입경별 사용률이다. 표 2의 사석의 중량별 사용률(%)은 중량별로 일정하게 사용했다는 가정 하에 계산하였다.

$$W=\frac{\pi}{6}\cdot\rho_s\cdot D_s^3 \tag{10}$$

여기서, W : 사석의 중량(kg)

ρ_s : 사석의 밀도(≒2,600kg/m^3)

D_s : 사석을 구로 간주한 직경(m)

식 (10)에서 D_s를 구하면 다음과 같다.

$$D_s=(\frac{6}{\pi}\cdot\frac{1}{\rho_s}\cdot W)^{(1/3)} \tag{11}$$

식 (11) 에서 구한 D_s를 공칭직경(D_n)으로 환산하는 식은,

$$D_n=CD_s \tag{12}$$

식 (12)에서 C는 환산계수로 사석의 경우 보통 0.806을 사용한다(농림부, 2003).

표 2의 결과를 가지고 바닥보호 사석의 입경분포도를 구하면 그림 7과 같다. 그림 7에서 보는바와 같이 바닥보호공으로 사용한 사석의 공칭직경 D_n은 0.16～0.92m이고, 평균직경은 0.24m이다.

표 2. ○○방조제 바닥보호사석 중량별 사용률

중량 (W, kg)	환산직경 (D_s, m)	공칭직경 (D_n, m)	투하율 (%)	사용률 (%)	누 가 사용률 (%)
돌망태	0.2	0.16	50	0.25	0.25
	0.3	0.24		0.25	0.50
500	0.71	0.58	25	0.05	0.55
600	0.76	0.61		0.05	0.60
700	0.80	0.64		0.05	0.65
800	0.83	0.67		0.05	0.70
900	0.87	0.70		0.05	0.75
1,000	0.90	0.73	25	0.023	0.77
1,100	0.93	0.75		0.023	0.80
1,200	0.96	0.77		0.023	0.82
1,300	0.98	0.79		0.023	0.84
1,400	1.00	0.81		0.023	0.86
1,500	1.03	0.83		0.023	0.89
1,600	1.05	0.85		0.023	0.91
1,700	1.08	0.87		0.023	0.93
1,800	1.10	0.88		0.023	0.95
1,900	1.12	0.90		0.023	0.97
2,000	1.14	0.92		0.023	1.00

2.3.3 보링단면

방조제의 성토층 구조 및 침투특성을 파악하기 위하여 No. 89+50 단면에서 시추조사를 실시하였다. 보링위치는 그림 8에서 보는 바와 같이 1차 사석단면으로부터 평균 10m지점에 위치한 도로중앙(EL(+)6.84m)과 도로중앙에서 담수호측으로 20m 떨어진 사면(EL(+)3.90m)

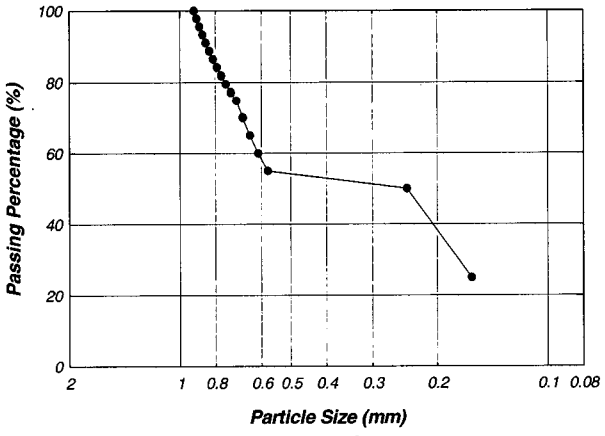


그림 7. ○○방조제 바닥보호사석 입경분포 곡선

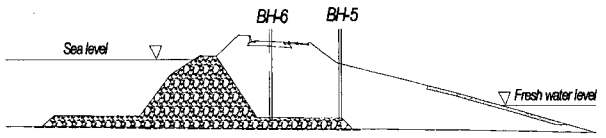


그림 8. ○○방조제 시추단면(No 89+50)

에서 실시하였다. 시추 깊이는 바닥사석층을 통과하여 원지반 2m까지 보링하여 도로에서는 17m, 호측 사면에서는 12m이다.

2.3.4 표준관입시험

시추과정에서 성토층의 강도와 지층상태를 파악하기 위하여 1.5m 깊이마다 표준관입시험을 실시하였다. 표준관입시험결과 성토층 상부는 비교적 단단한 상태이나 하부로 내려갈수록 조위의 변화에 따라 침윤선의 상승과 하강으로 비교적 느슨한 상태로 형성되어 있다. 그림 9는 표준관입시험의 N치와 보링결과를 바탕으로 주상도를 나타냈다.

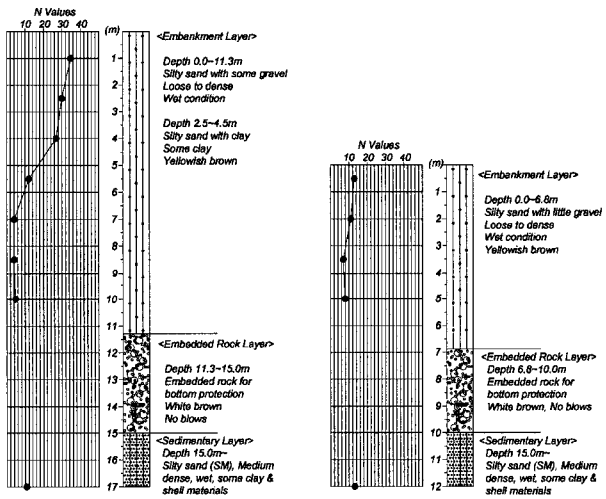


그림 9. ○○방조제 주상도(No 89+50)

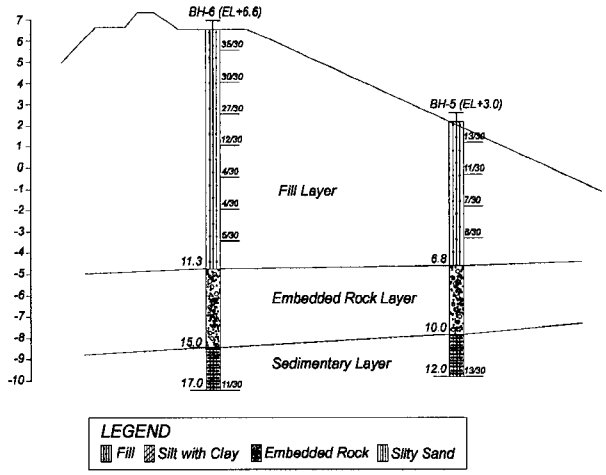


그림 10. ○○방조제 지층단면도(No 89+50)

그림 10은 주상도와 보링결과를 바탕으로 도시한 지층상태이다. 그림 10에서와 같이 바닥사석층은 도로부에서는 11.3m, 사면부에서는 8.8m 하부에 2.2~3.7m의 두께로 시공되었다.

2.3.5 현장투수계수 측정

흙 성토층 및 바닥사석층의 투수계수를 구하기 위하여 그림 11과 같이 정수위법으로 현장에서 투수시험을 실시하였다.

정수위법에 의한 투수시험시 투수계수를 측정하는 방법은 지하수위 위치에 따라 식 (11), (12)와 같이 구한다.

1) 시험구간(L)이 지하수위 하부일 때, 투수계수 k (cm/sec)는,

$$k = \frac{Q}{2\pi L(HG+HW)} LN\left(\frac{L}{2R} + \sqrt{1+\left(\frac{L}{2R}\right)^2}\right) \qquad (11)$$

2) 시험구간(L)이 지하수위 상부일 때, 투수계수 k (cm/sec)는,

$$k = \frac{Q}{2\pi L(HD+HW)} LN\left(\frac{L}{2R} + \sqrt{1+\left(\frac{L}{2R}\right)^2}\right) \qquad (12)$$

여기서, Q : 주수량(cm^3/s)

L : 시험구간(cm)

R : 케이싱 반경(cm)

HG : 지하수위 심도(cm)

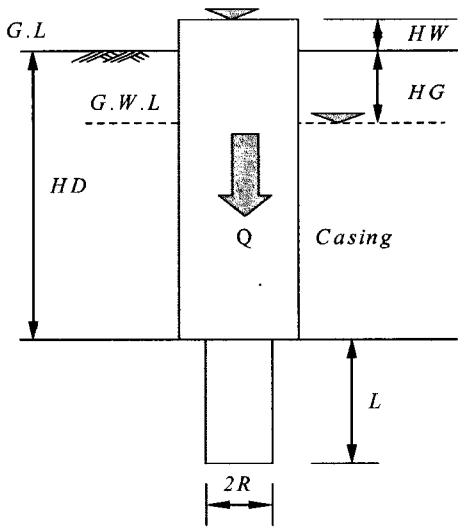


그림 11. 정수위법에 의한 현장투수시험

표 3. ○○방조제 현장투수시험 결과

구 분	단위	BH-5		BH-6		
Test Depth	m	5-6	7-8	4-5	9-10	12-13
Test Length	cm	100	100	100	100	100
G.W. Level	cm	100	60	70	200	620
Casing R.	cm	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
Quantity	l	70	845	31	58	530
Time	sec	300	300	300	300	300
Flow Rate	ml/s	233	2,817	103	193	1,767
HW	cm	50	50	50	50	50
HG	cm	100	60	70	200	620
HD	cm	500	700	400	900	1200
K	cm/s	8.10E-3	1.33E-1	4.49E-3	4.03E-3	1.37E-2
Remarks		흙 성토층	바닥사석층	흙 성토층	흙 성토층	바닥사석층

HW : 케이싱내 수두의 상단높이(cm)

HD : 케이싱 심(cm)

○○방조제 No. 89+50 단면의 BH-5, 6 공에 대한 현장 투수시험에 의한 투수계수 산정결과를 표 3에 정리하였다. 표 3에서 보는바와 같이 ○○방조제의 No. 89+50 단면의 BH-5, 6공에서 실시한 현장투수시험 결과 성토층의 투수계수 k는 4.03×10^{-5}~8.10×10^{-5}m/s로 나타났고, 바닥사석층의 투수계수 k는 1.33×10^{-4}~1.37×10^{-3}m/s로 나타났다.

2.3.6 조위변화에 따른 공내수두 변화

○○방조제 No. 89+50 단면의 BH-5, 6 공 보링조사를 끝내고 ⌀50mm PVC 파이프를 바닥사석층 상단에 걸치도록 설치하고 그림 12의 수위측정 센서로 공내 수두를 측정하였다.

BH-5, 6공에서 수두측정은 2004년 7~8월에 조위 4 Cycles 걸쳐 실시하였으며, 그중 조사기간동안 조위가 가장 높게 나타난 8월1일에서 8월2일에 걸쳐 측정한 결과를 그림 13에 나타냈다. 그림 13에서 보는 바와 같이 바닥사석층내 수두변화는 조위변화에 민감하게 반응하며 이는 바닥사석층이 해측과 직접 연결되어 있음을 알 수 있다.

2.3.7 바닥사석층내의 흐름유속

바닥사석층 상단까지 매설한 PVC 파이프 내에 그림 14의 유속측정센서를 그림 15와 같이 넣고 유속을 측정하였다.

유속계의 제원은 일본 ALEC ELECTRONICS CO., LTD. 사가 개발한 제품으로 0.005~0.25m/s 범위에서 ±0.005m/s 정도를 가지고 있다. 바닥사석층에서 직접 유속을 측정한 결과 사석층내의 유속이 유속계의 측정 Range 0.005m/s 이하로 나타나 측정이 불가하여 본 연

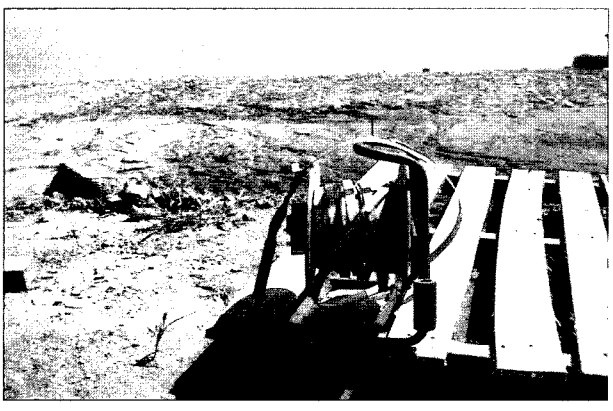


그림 12. 수위 감지기

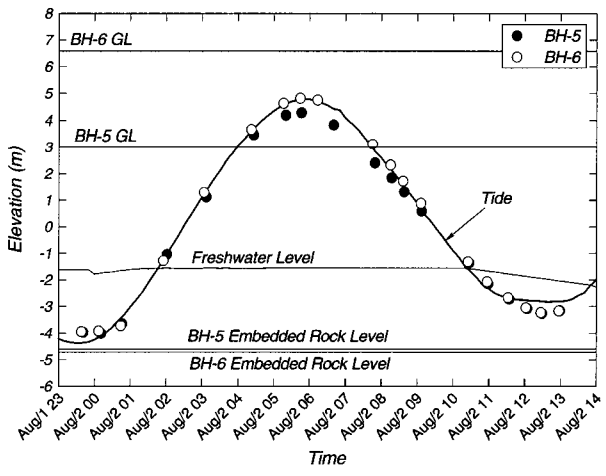


그림 13. 조위변화에 따른 공내 수두변화

표 4. Darcian 유속으로 계산한 레이놀즈 수

조위, 공내 수두				동수경사 $(i=\frac{\triangle h}{L})$		레이놀즈 수 $(R_e=\frac{vR}{\nu n})$				비 고
Tide	BH-6	BH-5	$\triangle h$	L	i	V, m/s	R,m	n	R_e	
Rising	2.00	1.70	0.30	20	0.0015	2.06E-6	0.041	0.45	2	Laminar
	2.50	2.15	0.35	20	0.0175	2.40E-6	0.041	0.45	2	Laminar
	3.00	2.70	0.30	20	0.015	2.06E-6	0.041	0.45	2	Laminar
	3.50	3.20	0.30	20	0.015	2.06E-6	0.041	0.45	2	Laminar
	4.00	3.75	0.25	20	0.0125	1.71E-6	0.041	0.45	1	Laminar
	4.50	4.15	0.35	20	0.0175	2.40E-6	0.041	0.45	2	Laminar
Decreasing	4.50	3.50	1.00	20	0.05	6.85E-6	0.041	0.45	6	Laminar
	4.00	3.00	1.00	20	0.05	6.85E-6	0.041	0.45	6	Laminar
	3.50	2.90	0.60	20	0.03	4.11E-6	0.041	0.45	4	Laminar
	3.00	2.30	0.70	20	0.035	4.80E-6	0.041	0.45	4	Laminar
	2.50	2.00	0.50	20	0.025	3.43E-6	0.041	0.45	3	Laminar
	2.00	1.70	0.30	20	0.015	2.06E-6	0.24	0.45	2	Laminar

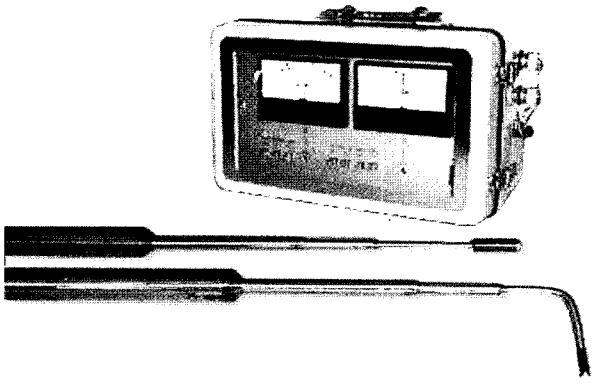


그림 14. 유속측정 센서

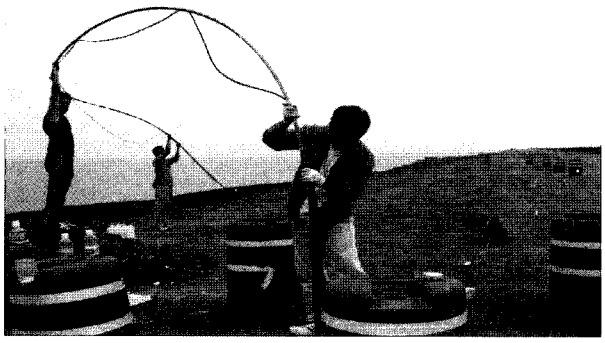


그림 15. 유속측정 장면(BH-5)

구의 대상 사석층내의 흐름은 층류인지 난류인지 알 수 없었다.

표 4는 표 3의 현장투수시험으로 구한 바닥사석층의 투수계수 중 큰 값, k=1.37×10^{-2}cm/s와 그림 13의 BH 5, 6공의 수두에서 동수경사를 구하여 식 (2)에 대입하여 유속을 계산하고 레이놀즈 수를 구한 결과이다.

표 4에서 보는바와 같이 레이놀즈 수는 1~6으로 층류로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 성토제 하부에 매설되어 있는 사석층의 침투특성을 분석하기 위하여 3가지 방법으로 접근하였다. 첫째 성토제 하부 사석층내의 흐름이 Darcy 법칙을 따른다고 가정하여 침윤선 계산식을 유도하고 실내모형실험의 침윤선 측정값과 비교하였고, 둘째 실내모형실험을 실시하여 성토층 하부 자갈층의 흐름유속을 계산하고 레이놀즈 수와 유속과 동수경사와의 관계를 파악하였다. 마지막으로 ○○방조제를 대상지구로 하여 2공을 바닥사석층까지 보링하고 현장투수계수와 공내 수두를 측정하였으며, 아울러 사석층내 유속을 직간접으로 측정 또는 계산하여 레이놀즈 수를 구하였다. 본 연구를 통하여 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 성토제 하부의 사석층내의 물의 이동을 Darcy 흐름으로 가정하고 유도한 침윤선 계산식으로 구한 침윤선과 실내모형실험으로 측정한 침윤선이 95%(α=0.05) 신뢰구간에서 유의성이 있는 것으로 나타나 성토층에 매설되어 있는 사석층내의 물의 이동이 Darcy 흐름임을 간접 확인하였다.

(2) 실내모형실험의 측정한 유량과 수두로부터 계산한 유속에 대한 레이놀즈 수는 10미만의 층류로나타났

으며, 유속과 동수경사가 비례관계인 것으로 보아 성토층 하부의 자갈층내 흐름은 Darcy 법칙을 따르는 것으로 판단된다.

(3) ○○방조제를 대상으로 바닥사석층에 유속센서기를 삽입하여 유속을 측정한 결과 ±0.005m/s의 정도를 갖는 센서기에 유속이 검측 되지 않아 흐름특성이 파악이 곤란하였다. 하지만 현장투수시험으로 구한 투수계수로부터 계산한 유속은 1.71×10^{-6}~1.85×10^{-6}m/s로 이에 대한 레이놀즈 수는 1~6로 나타났다.

(4) 이상의 결과, 성토제 하부에 매설되어 있는 사석층내의 흐름을 $v=ki$로 계산된 유속에 대해서는 층류로 나타났으며, 또한 실내모형실험결과와 Darcy 흐름으로 가정하고 개발된 수치모형의 검증 결과를 근거로 성토제 하부에 매설되어 있는 사석층내의 침투는 층류의 Darcy 흐름일 가능성이 높다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 농림부 (2003), *'03 새만금지구 수리실험보고서*, 농업기반공사, pp.172-183.
2. 농업기반공사 (1995), *한국의 간척*.
3. 농업기반공사 (2002), *화옹방조제 끝막이 보고서*.
4. 이행우, 장병욱, 장웅희, 정인영 (2004), 바닥사석층의 통수에 따른 성토제체 침윤선 변화연구, *2004 한국농공학회 학술발표논문집*(CD), No.045.
5. 이행우 (2005), *방조제 바닥사석층의 규모 및 통수성에 따른 제체 침투특성 연구*, 서울대학교 박사학위논문.
6. 이행우, 장병욱 (2005a), 2층 성토제 침투해석모형(SAMTLE)의 개발 및 적용, *대한토목학회 논문집*, 제25권, 제5C호, pp.353-360.
7. 이행우, 장병욱, 장웅희, 김시운 (2005b), 성토층 하부의 자갈층 유·무에 따른 침투특성 변화, *한국농공학회논문집*, 제47권, 제4호, pp.53-61.
8. 최홍식 (2004), 호안제체에서 Non-Darcy 흐름해석, *한국수자원학회 논문집*, 제37권, 제2호, pp.97-96.
9. 한신공영 (2004), *화옹지구 방조제 침출수 원인분석 및 대책방안 연구*, 농업기반공사.
10. Li, B., Garga, V.K., and Davies, M.H. (1998). Relationship for non-Darcy flow in rockfill. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.124, No.2, pp.206-212.
11. Polubarinova-Kochina, P. Y. (1962), *Theory of Ground Water Movement*, Translated from the Russian by J. M. Roger De Wiest, Princeton University Press, New Jersey, pp.284-297.
12. Taylor, D.W. (1948), *Fundamentals of soil mechanics*. John Wiley and Sons Inc, New York.

(접수일자 2005. 5. 12, 심사완료일 2005. 9. 24)