성토층에 매설된 사력질층의 침투특성에 대한 실험적 연구
An Experimental Study on Seepage Characteristics of Embedded Gravel and Rock Layer in the Embankment

이행우[1], Haeng-Woo Lee, 장병욱[2], Pyoung-Wuck Chang, 장웅희[3], Woong-Hee Chang, 원정윤[4], Jeong-Yun Won

[1] 농업기반공사 농어촌연구원 책임연구원, Principal Researcher, Rural Research Institute, KARICO
[2] 서울대학교 농업생명과학대학 교수, Professor, School of Biological Resources & Materials Engineering, Seoul Nat'l Univ.
[3] 농업기반공사 농어촌연구원 연구원, Researcher, Rural Research Institute, KARICO
[4] 텍사스 Austin 대학 토목공학과 박사후과정, Doctoral Research Fellow, Dept. of Civil Eng., Univ. of Texas at Austin

개요(SYNOPSIS) : For the purpose of studying on the seepage characteristics of embedded gravel layer in embankment, laboratory model tests were carried out. The embedded layer under embankment was 19~26mm diameter of gravel and those embankment materials were Saemangum dredged sand, river sand and mixed(1:1) sand with dredged and river one. Those permeability coefficients of three different sands are 5.00×10^{-5}, 3.00×10^{-4}, 7.50×10^{-5}m/s, respectively. Seepage characteristics of these results are as follows;

1) The Reynolds number of water flow through embedded gravel layer in three different permeable soils is less then 10, it is laminar flow.

2) These flow velocities through embedded gravel layer in soils are in proportion to these hydraulic gradients, it is Darcy flow.

3) These Darcian permeability coefficients of water flow through embedded gravel layer in soils show as 2.95×10^{-3}, 1.38×10^{-2}, 3.33×10^{-3}m/s, respectively, by varying permeability of embankment soils and embankment lengths. It is approximately 100 times of those permeability coefficients of embankment materials.

주요어(Key words) : Seepage Characteristics, Gravel Layer, Reynolds Number, Darcy Flow, Non-Darcy Flow

1. 서 론

연안 해안 및 하천의 연약지반을 매립하여 부지를 조성할 때 지반의 지지력 확보 및 장비의 이동성을 향상시키기 위하여 자갈 및 사석을 우선 투하한 다음 그 위로 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 세굴

을 방지하기 위하여 바닥보호사석층을 넓게 포설하여 사석 및 콘크리트 블록 등으로 체절을 한 후 내측의 바닥보호사석층위에 성토를 해 결국 투수성이 큰 사력질층이 성토층 하부에 매설된 상태가 된다(이행우, 2005).

이와 같이 매립층 및 방조제는 투수성이 큰 사석층과 투수성이 낮은 흙 성토층으로 이루어진 이질층으로 구성되어 있다. 흙 성토층의 흐름특성은 Dacy 법칙을 따르지만 사력질층은 Non-Darcy 흐름특성을 보인다(최흥식, 2004; Li 등, 1998). 따라서 흙-사석 이질층의 침투해석은 이질층내를 투과하는 흐름이 Darcy 또는 Non-Darcy 흐름인지를 규명하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 실내모형 실험을 통하여 성토층내에 매설된 사력질층의 침투특성을 분석 하고자한다.

2. 사력질층내의 유속(V)-수두경사(i) 관계식 고찰

흙층을 통과하는 물의 흐름은 $v = ki$인 Darcy 흐름법칙을 따르지만 많은 수공 학자들은 입자가 큰 사력질층내의 흐름은 Darcy 흐름법칙을 적용하는 것에 이의를 제기하고 자갈 및 사석층내의 흐름특성을 연구하기 시작하였다. 이론적 접근 방법은 사석층내의 흐름을 마찰력이 큰 관수로의 흐름 이론과 Taylor(1948)의 평균수리심(mean hydraulic radius) 이론에 바탕을 두고 있다. 많은 수공학자들은 rock fill 댐과 같은 구조물에서 rock fill 내에서의 흐름은 난류이며 Non-Darcy 흐름이라고 규정하고 수두경사-평균유속($i-V$)의 관계를 유도하였다. 수두경사와 평균유속을 정립하는 물리적인 변수로는 사석의 크기, 간극율, 그리고 입자의 형상 등을 들 수 있다. (McCorquodale 등, 1977; Li 등, 1998). Li 등(1998)은 기존에 제시된 수두경사와 평균유속의 관계식을 표 1과 같이 정리 하였다.

표 1. 사력질층내의 수두경사(i)와 흐름 유속(V) 관계(Adapted from Li 등, 1998)

Author	Equation	Remarks
Ergun(1952)	$i = 150\frac{(1-n)^2\nu}{gn^3d^2}V + 1.75\frac{(1-n)}{dgn^3}V^2$	
Ergun-Reichelt	$i = 212\frac{M^2\nu(1-n)^2}{gn^3d^2}V + 1.57\frac{M(1-n)}{gdn^3}V^2$	Modified Ergun(1952) Eq.
Wilkins(1956)	$i = \frac{0.0465\,V^{1.85}}{R^{0.925}n^{1.85}}$	R= $d/10$(Parkin 1991)
McCorquodale et al.(1978)	$i = \frac{70\nu}{gnR^2}V + \frac{0.81}{g\sqrt{n}\,R}V^2$	For crushed rockfill(Hansen 1992)
Stephenson(1979)	$i = \frac{800\nu}{d^2gn}V + \frac{4}{dgn^2}V^2, \quad i = -\frac{K_tV^2}{gdn^2}$	K_t=4 for rock fill; K_t=2 for semirounded stone; K_t=1 for smooth polished marbles
Martins(1990, 1991)	$i = \frac{V^2(1-n)}{0.56^2n^3gd}$	Uniform Rock Material, $C_u = 1$
Li and et al (1998)	$i = \frac{12\nu}{gnR^2}V + \frac{0.38}{Rgn^2}V^2, \; i = \frac{0.4\,V^2}{gRn^2}$	Fully turbulent flow $R \geq 200$

※ n : Porosity　　ν : Kinematic viscosity
R : Mean hydraulic radius　　K_t : Shape and material factor
g : Gravity acceleration　　M : Wall effect coefficient
d : Average diameter

흙의 간극사이로 투과하는 물의 흐름은 $i = \frac{1}{k}v$로 수두경사와 흐름유속간의 비례관계가 있으나 사력질층내의 물의 흐름은 표 1에서 보는바와 같이 흐름유속의 2차식이나 멱함수형태로 나타나며 함수의 계수는 사석의 크기, 간극율, 그리고 입자의 형상 등 물리적 변수와 흐름유체의 점성등으로 나타낼 수 있다. 통상적으로 동수경사와 흐름유속간의 관계가 비례관계가 성립하면 Darcy 법칙을 따르는 것으로 보고 그렇지 않으면 Non-Darcy 흐름으로 간주한다. 따라서 흙층을 통한 물의 흐름은 Darcy 흐름이고 사력질을 통과하는 물의 흐름특성은 Non-Darcy으로 볼 수 있다. 그러나 성토층에 매설된 사력질층내의 흐름은 어떤 특성을 보일지에 대한 연구는 아직 미흡하다.

3. 모형실험 및 결과분석

3.1 모형실험

3.1.1 실험장치

성토층에 매설된 사력질층의 흐름특성을 규명하기 위하여 그림 1과 같이 실험장치를 제작하였다.

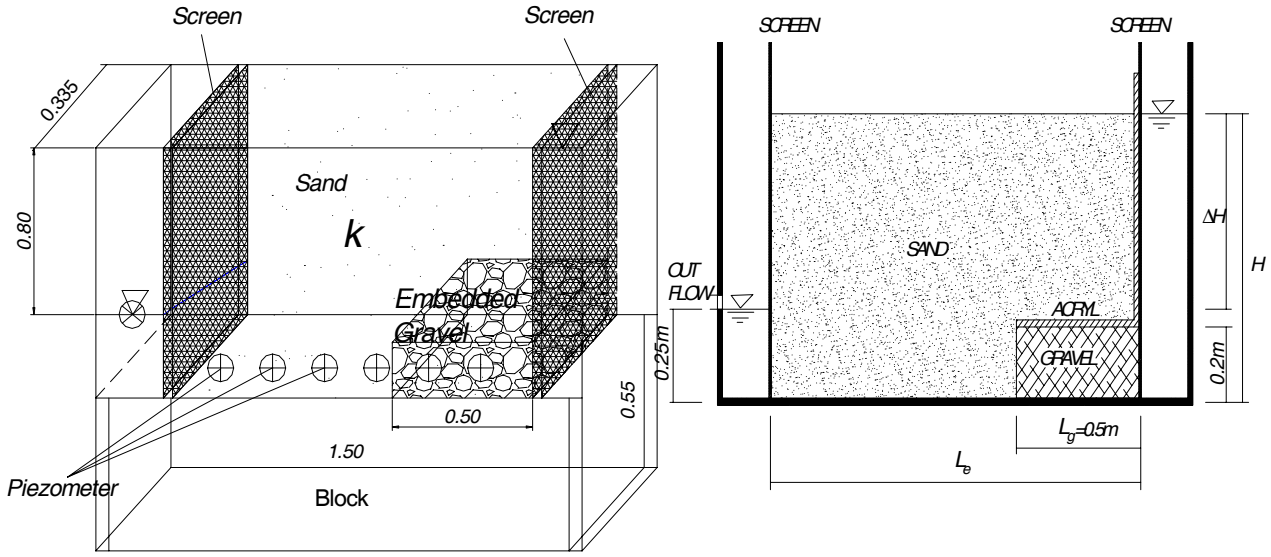

그림 1. 실내 모형장치

모형의 성토층은 0.8m 높이에 최대길이 1.5m까지 재현이 가능하며 사력질층은 좌측에서 0.2m 높이에 0.5m 길이로 매설할 수 있도록 장치를 만들었다. 모형장치의 프레임은 철재를 사용하였으며 벽면은 아크릴판으로 제작하였다. 모형의 우측에는 정수위가 가능하도록 성토층 하부에서 0.4, 0.6, 0.8m 높이에 밸브를 설치하였으며 좌측에는 배수위를 일정하게 유지하도록 0.25m 높이에 역시 밸브를 설치하였다. 또한 사력질층 및 흙 성토층에 걸리는 수두를 측정하기 위하여 성토층 하부 바닥에서 0.1m 높이에 0.20m 간격으로 총 6개의 ∅5mm 피에조미터관을 설치하였다.

3.1.2 성토층 및 사력질층 형성

실내 모형실험에 사용된 성토 재료는 새만금 준설해사(DS)와, 입도가 균일한 강모래(RS), 준설사와 강모래를 1:1로 섞은 혼합토(MS)를 사용하였으며, 사력질은 부안산 쇄석자갈을 사용하였다. 재료의 물리적 특성 시험결과 새만금 준설사는 실트분이 함유된 균등한 입도를 가진 세립질 모래로서, 소성이 없으며, 통일분류법상 실트질모래(SM)로 분류되었고, 강모래는 입도가 균일한 모래로 소성이 없고 통일분류

법상 SP이다. 또한 준설사와 강모래 혼합토는 준설사와 비슷한 물리적 특성을 갖고 통일분류법상 SM으로 분류되었다. 표 3은 사용한 재료의 물리적 특성이며, 그림. 2는 성토 재료로 사용한 흙의 입도분포곡선이다.

표 3. 성토재료 및 사력질의 물리적 특성

Materials	Physical properties		Values		
			DS	RS	MS
Soil	Uniformity Coefficient (C_u)		2.6	1.5	2.9
	Curvature Coefficient (C_g)		1.5	0.8	7.9
	Atterberg Limits(%)	Liquidity Limit (LL) Plasticity Index (PI)	NP	NP	NP
	Specific Gravity (G_s)		2.67	2.64	2.72
	Permeability Coefficient, x 10^{-5}(m/s)		5.00	30.00	7.50
	U.S.C.S		SM	SP	SM
	Compaction Test (by KSF 2312)	$\gamma_{d\max}(KN/m^3)$	15.19	16.66	16.17
		O. M. C (%)	13.8	13.0	14.2
Gravel	Gravel Size(mm)		19-26		
	Specific Gravity (G_s)		2.62		
	Unit Weight (Υ_t, KN/m^3)		16.07		
	Fineness Modulus (F.M)		6.94		
	Abrasion Rate(%)		16.8		
	Water Absorption(%)		0.78		
	Porosity (n)		0.45		

※ DS : Dredged Soil, RS : River Sand, MS : Mixed Soil with DS(1), RS(1)

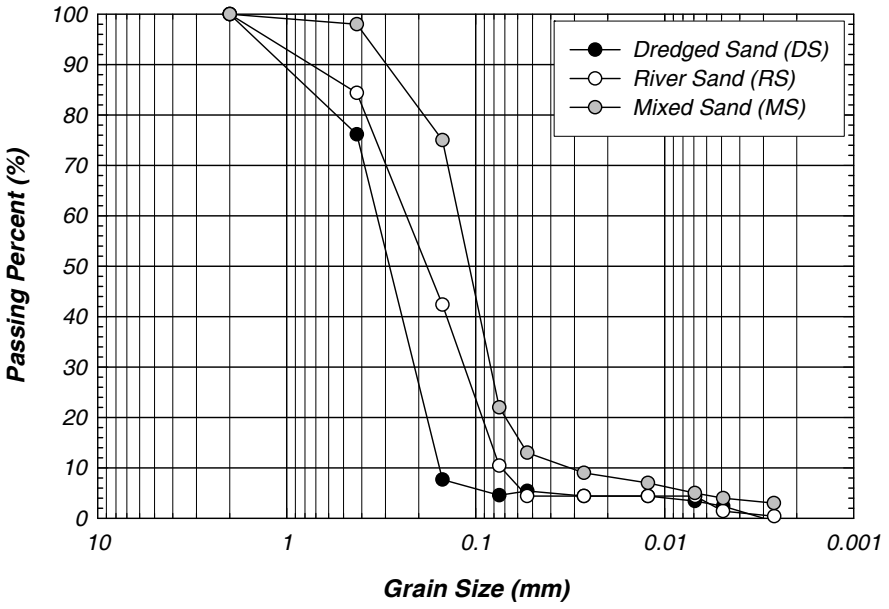

그림 2. 성토 재료로 사용한 흙의 입도분포곡선

본 모형실험에 사용한 성토재료에 대하여 KS F 2312에 의하여 A 다짐을 실시한 결과 그림 3 에 나타낸 바와 같이 새만금 준설사는 최적함수비 13.8%에서 최대건조밀도 15.19KN/m^3, 강 모래는 13.0%에서 16.66KN/m^3, 혼합토는 14.2%에서 16.17KN/m^3로 나타났다.

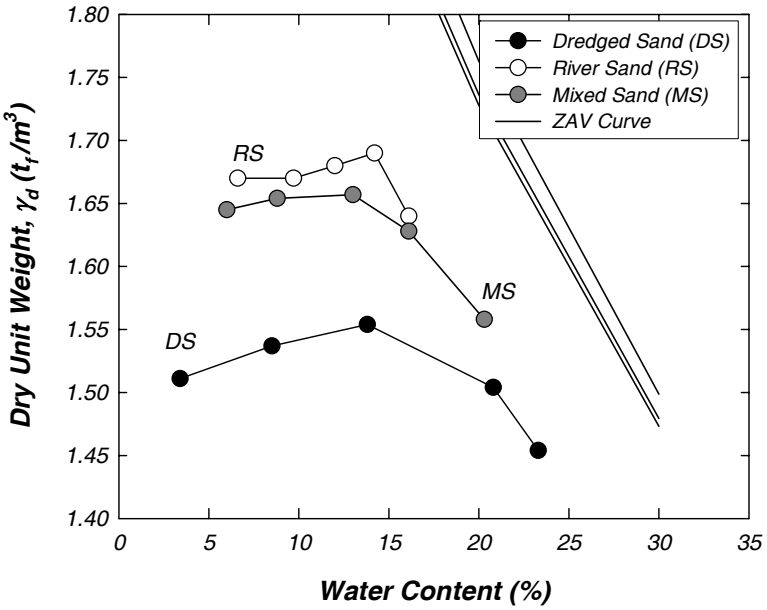

그림 3. 사용재료의 다짐특성곡선(by KS F 2312 A 방법)

3.1.3 실험방법

자갈층내의 흐름 유속을 측정하기 위하여 모든 투과 유량이 자갈층을 통과 하도록 그림. 1과 같이 자갈층 상부와 자갈층위 상류부 스크린을 아크릴판으로 물의 흐름을 차단하고 다음과 같은 방법으로 자갈층내 흐름유속을 구하였다.

(1) $\triangle t$ 시간 동안 자갈층을 통과하는 침투유량 Q를 구하여 식 (1)에 의하여 성토층에 묻혀있는 길이 0.50m 높이 0.20m의 사력질층($d=19\sim26$mm)내의 흐름유속을 계산했다.

$$V_g = Q/A_g \tag{1}$$

여기서, V_g : 사력질층내의 흐름유속(m/s)

Q : 침투유량(m^3/s)

A_g : 사력질층의 단면적(m^2)

(2) 침투유량은 식 그림 1 의 모형장치에서 $\triangle t$ 시간동안 하류의 배출구에서 배출되는 양을 부피를 측정하여 계산하였다.

$$Q= V/\triangle t \tag{2}$$

(3) 사력질층에 설치한 피에조미터관의 수두를 측정하여 동수경사를 계산하였다.

3.2 실험결과 및 분석

3.2.1 사력질층내 유속(V)-수두경사(i) 관계 분석

3.1.3항에서 계산한 사력질층내의 유속과 동수두경사를 그림 4 ~ 6에 도시하였다. 그림에서 L_e는 성토층의 길이, L_g는 사력질층의 길이이다.

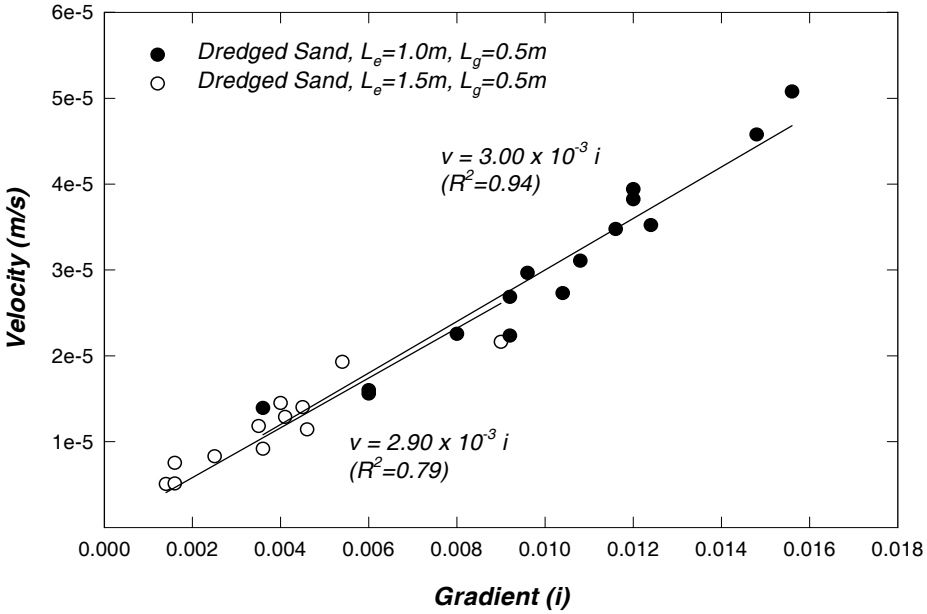

그림. 4 새만금 준설사에 매설되어 있는 사력질층의 수두경사와 유속과의 관계

그림 4 ~ 6 에서 보는바와 같이 수두경사와 속도와의 관계는 상관계수 0.90이상 직선관계를 보이고 있다. 이 직선관계식의 계수는 성토층의 계수에 따른 사력질층내의 투과흐름에 대한 투수계수이다. 본 모형실험에 의해 성토층에 매설되어 있는 사력질층의 투수계수는 성토층이 준설사, 강모래, 혼합토에서 각각 2.95×10^{-3}, 1.38×10^{-2}, 3.33×10^{-3}m/s로 나타났다.

3.2.2 사력질층내 흐름 특성분석

본 모형실험에서 투수성이 다른 3가지 재료의 성토층에 매설되어 있는 사력질층의 식 (1) 으로 계산한 흐름유속에 대해 레이놀즈 수를 구해보면 10미만의 층류로 나타났다. 또한 표 1에서와 같이 양단의 수위차에의해 유발된 흐름에 대해 사력질층내에 걸리는 수두경사와 흐름유속과의 관계가 비례관계가 아닌 2차식 또는 멱함수 형태의 곡선으로 나타나는 Non-Darcy 흐름특성을 보이나, 흙 성토층에 매설된 사력질층의 흐름은 Darcy 흐름인 흙 성토층의 영향으로 그림 4 ~ 6에서 보는 바와같이 직선인 비례관계인 것으로 보아 Darcy 흐름으로 판단된다.

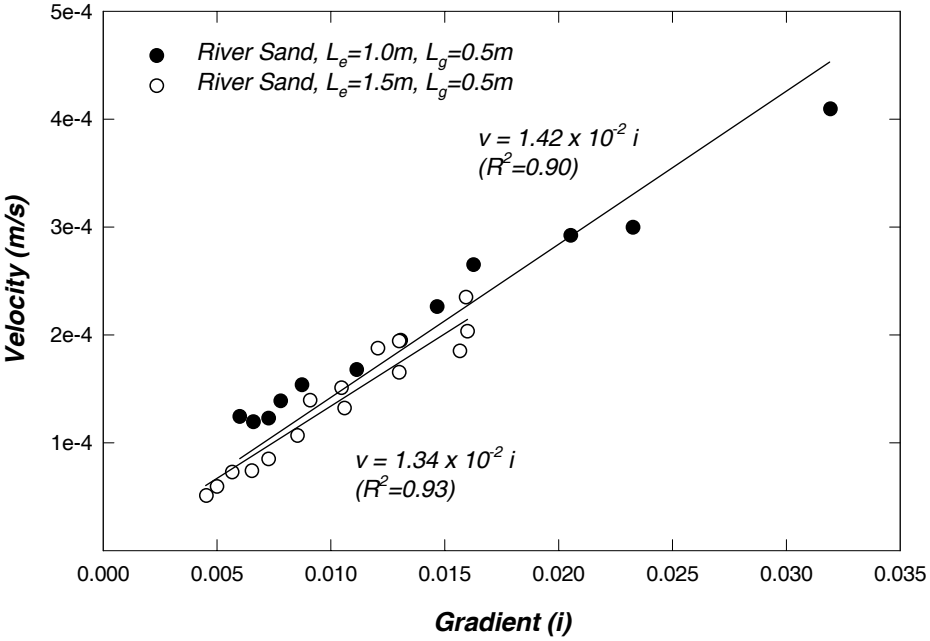

그림 5. 강 모래에 매설되어 있는 사력질층의 수두경사와 유속과의 관계

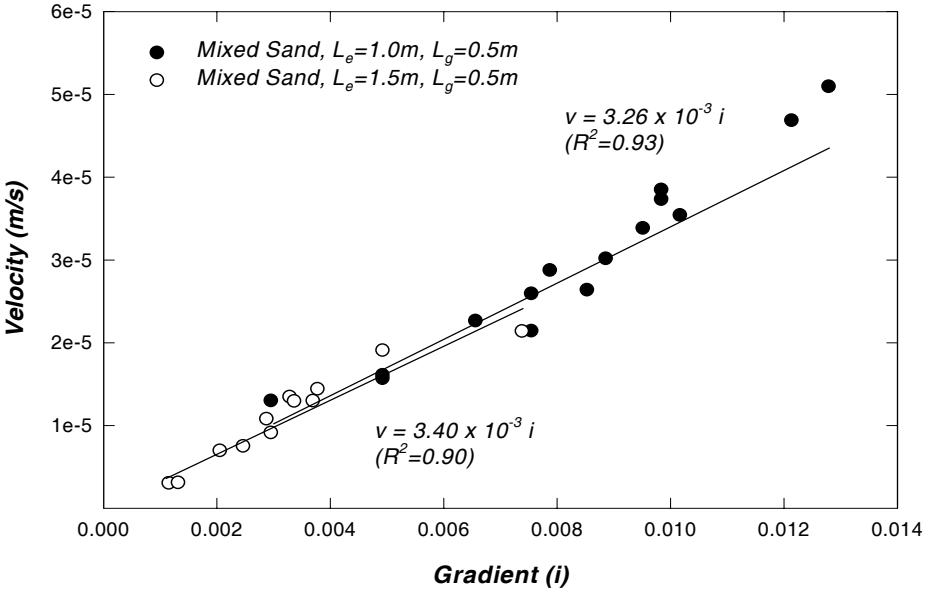

그림 6. 혼합토에 매설되어 있는 사력질층의 수두경사와 유속과의 관계

4. 결론

성토층 재료의 투수성이 각각 5.00×10^{-5}, 3.00×10^{-4}, 7.50×10^{-5}m/s인 새만금 준설사, 강모래, 준설사와 강모래의 1 : 1 혼합한 혼합토에 0.5 x 0.2m의 층으로 매설되어 있는 사력질층내의 흐름특성을 분석 하고자 실내 모형실험을 실시하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1) 3가지 재료의 성토층에 매설되어 있는 사력질층의 흐름에 대한 레이놀즈 수는 10미만의 층류로 나타났다.
2) 성토층에 매설되어 있는 사력질층의 흐름에 대해 흐름유속과 수두경사가 비례관계인 것으로 보아

Darcy의 법칙을 따르는 것으로 분석되었다.

3) 성토층에 매설되어 있는 사력질층의 Darcian 투수계수는 3가지 재료의 성토층 투수계수의 100배정도인 각각 2.95×10^{-3}, 1.38×10^{-2}, 3.33×10^{-3}m/s로 나타났다.

참고문헌

1. 농업기반공사(1995), 한국의 간척
2. 이행우, 장병욱, 장웅희, 정인영(2004), “바닥사석층의 통수에 따른 성토제체 침윤선 변화연구”, 한국농공학회 학술발표논문집.
3. 이행우(2005), “방조제 바닥사석층의 규모 및 통수성에 따른 제체 침투특성 연구”, 서울대하교 박사학위논문
4. 최흥식(2004), “호안제체에서 Non-Darcy 흐름해석”, 한국수자원학회 논문집, 제37권, 제2호, pp. 97-96.
5. Li, B., Garga, V.K., and Davies, M.H. (1998). "Relationship for non-Darcy flow in rockfill." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 124, No. 2, pp. 206-212.
6. McCorquodale, J.A., Hannoura, A.A., and Nasser, M.S. (1977). "Hydraulic conductivity of rockfill." *J. Hydr. Res.,* Vol. 16, No. 2, pp. 123-137.
7. Taylor, D.W.(1948). *Fundamentals of soil mechanics.* John Wiley and Sons Inc, New York.