

성토층 하부의 자갈층 유·무에 따른 침투특성 변화

Seepage Characteristics of Embankment as with/without Gravel Layer under the Earth Fill

이 행 우* · 장 병 옥** · 장 응 희* · 김 시 운***

Lee, Haeng Woo · Chang, Pyoung Wook · Chang, Woong Hee · Kim, See-Woon

Abstract

A series of laboratory tests was carried out for analyzing of seepage characteristics of two-layers embankment model which consists of gravel and earth fill layers. Gravel layers were built under the earth fill for a half and one-third width of earth fill of the model. Permeability of earth fill was ranged between $5.00 \times 10^{-5} \sim 3.00 \times 10^{-4}$ m/s. The tests were performed with hydraulic gradients(i), 0.10~0.55. From the test results, hydraulic head of earth fill with gravel layer was 1.6 times higher than that of earth fill without gravel layer. Seepage rate was increased up to 4~22 times and safety factor for piping was decreased to 13~43 % comparing the earth fill with gravel layer to that without gravel layer. The gravel layer under the earth fill could, in general, give some serious seepage problems to seadike embankment.

Keywords : Two-layer earth fill, Gravel layer, Water head, Seepage rate, Piping

I. 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 위에 흙으로 성토한다. 특히 바다를 막아 내부

를 개발하는 간척사업의 방조제 공사는 조위가 반복되고 유속이 큰 상태에서 체절을 하기 때문에 체절구간에서의 원지반 세굴 문제가 심각하다.^{5),10)} 실제 현장에서는 이러한 원지반 세굴을 방지하기 위하여 바닥보호사석층을 넓게 포설하고 사석 및 콘크리트 블록 등으로 일차체절을 한 후 내측의 바닥보호사석층위에 성토를 하기 때문에 투수성이 큰 사력질층이 흙 성토층 하부에 매설된 상태가 된다.

이와 같이 매립지반 및 방조제는 투수성이 큰 사석층과 투수성이 낮은 흙층으로 이루어진 이층의 성토 구조물이다. 방조제 흙층 하부에 사력질이 놓이게 되어 발생할 수 있는 문제점은 조위의 변화에 따라 사력질층으로 해수가 유입되어 흙 성토층에

* 농업기반공사 농이촌연구원
** 서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부
*** 농업기반공사 예산지사
* Corresponding author. Tel.: +81-31-400-1782
Fax: +81-31-400-1611
E-mail address: hwlee@karico.co.kr

침윤선 상승과 하락이 반복됨으로써 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 사례도 종종 보고되고 있다. 특히 방조제에서 바닥사석층으로 해수가 유입되어 담수호 염도를 증가시키고 제체에도 파이핑 피해 등 안전에 심각한 문제를 야기한 사례가 많다.^{4),9)} 하지만 현재까지의 연구는 흙 성토층 하부의 투수성이 큰 자갈층내의 통수에 따른 피해에 대한 사례보고 수준으로 구체적인 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 투수계수가 $5.00 \times 10^{-5} \sim 3.00 \times 10^{-4}$ m/s인 3가지 흙층과 그 하부에 자갈층으로 구성된 성토구조물의

상하류에 0.10~0.55의 동수경사를 작용시켜 흙 성토층에 나타나는 침투특성의 변화를 비교분석하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 재 료

가. 물리적 특성

실내 모형실험에 사용된 재료는 새만금 준설해사(DS)와 입도가 균일한 강모래(RS), 준설사와 강모래를 1:1로 섞은 혼합토(MS)를 사용하였으며, 자갈은 부안산 쇄석을 사용하였다. 재료의 물리적 특성 실험결과 새만금 준설사는 실트분이 함유된 균등한 입도를 가진 세립질 모래로서, 통일분류법상

Table 1 Physical properties of materials for model test

Materials	Physical properties		Values		
			DS	RS	MS
Soil	Uniformity coefficient (C_u)		2.6	1.5	2.9
	Curvature coefficient (C_c)		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
	U.S.C.S		SM	SP	SM
	Compaction test (by KS F 2312)	γ_{dmax} (kN/m ³)	15.19	16.66	16.17
		O. M. C (%)	13.8	13.0	14.2
	Permeability, k (average, $\alpha \times 10^{-5}$ m/s)		5.0	30.0	7.5
Gravel	Gravel size (mm)		19~26		
	Specific gravity (G_s)		2.62		
	Unit weight (r_s , kN/m ³)		16.07		
	Fineness modulus (F.M)		6.94		
	Abrasion rate (%)		16.8		
	Water absorption (%)		0.78		
	Porosity (n)		0.45		
	Mean hydraulic radius, R (m)		0.0038		

※ DS: Dredged Soil, RS: River Sand, MS: Mixed Soil with DS and RS as 1 : 1

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. 자갈의 간극률 측정실험은 2,150 ml의 용기에 수침시킨 자갈을 넣고 물을 부어 측정하는 실험을 3차례 반복 실시하여 평균값을 구하였다. 수침시킨 자갈은 마른 천으로 표면의 물기를 닦은 다음 사용하였다. Table 1과 Fig. 1은 사용한 재료의 물리적 특성 및 입도분포 곡선이다.

나. 역학적 특성

본 모형실험에 사용한 성토재료에 대하여 KS F

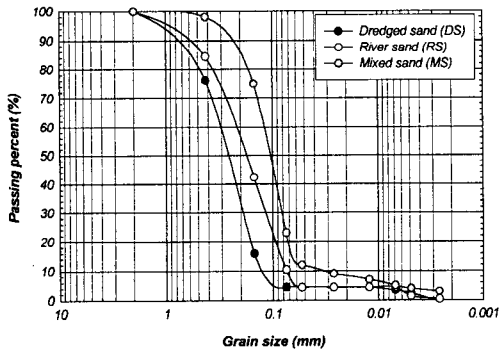


Fig. 1 Grain size distribution curves of soil DS, RS and MS

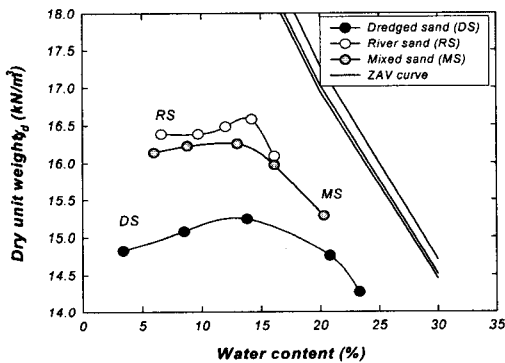


Fig. 2 Compaction curves of soils by KS F 2312 A method

2312의 A 다짐을 실시한 결과 Fig. 2에 나타난 바와 같이 새만금 준설사는 최적함수비 13.8%에서 최대건조밀도 15.19 kN/m³, 강 모래는 13.0%에서 16.66 kN/m³, 혼합토는 14.2%에서 16.17 kN/m³로 나타났다.

2. 실험방법

가. 모형제작

흙층 하부 자갈층내의 통수에 따른 침투특성을 분석하기 위하여 Fig. 3과 같이 모형을 제작하였다. 모형은 나비 1.90 m, 높이 1.0 m, 폭 0.34 m이며, 하류측 칸막이벽을 이동하여 성토층 단면을 1.50 (x) 0.8 m, 또는 1.0 (x) 0.8 m로 변형이 가능하도록 제작하였다. 모형은 단순히 흙층 하부의 자갈층의 유·무에 따른 흙층에 미치는 침투 영향을 파악하기 위한 것으로 실제 구조물을 대상으로 한 상사법칙을 적용하지 않았다. 모형의 재질은 스테인리스 스틸로 골격을 세우고 벽체는 아크릴 판으로 붙였다. 전면 아크릴 판에 바다에서 0.10 m 높이에서 0.20 m 간격으로 수두를 측정 할 수 있는 피에조미터 관(ø6 mm)을 설치하였다.

자갈층의 단면은 나비 0.50 m, 높이 0.20 m로 모형의 오른쪽 상류부에 설치하였으며 단면성형이 가능하도록 철망으로 프레임을 만들었다. 아울러 자갈층 상부 흙 성토층에서도 수두 측정이 가능하도록 바닥에서 0.30 m 높이에 0.20 m 간격으로

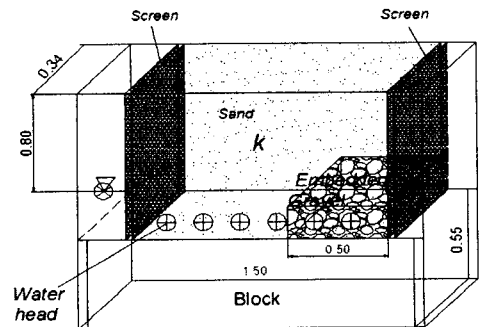


Fig. 3 View of laboratory model test device

수두 측정관 2개를 추가로 설치하였다.

또한 상·하류의 수위를 조절 할 수 있도록 개폐 밸브를 상류의 0.40, 0.60, 0.80 m, 하류의 0.25 m 높이에 설치하였다.

나. 실험방법

성토층의 투수성과 자갈층의 유·무에 따른 성토층의 침투특성을 분석하기 위하여 상류 수조 수위가 0.8, 0.6, 0.4 m에 위치했을 때 그 위치에 있는 밸브를 열고 물을 일정시간 물을 흘려보내 정수위를 유지한 채 침투유량과 수두관의 수두를 측정하였다. 아울러 성형된 흙 성토층의 투수계수를 구하기 위하여 침투유량을 측정하였다. 실험에서 하류부 밸브는 항상 열어 수위를 0.25 m로 고정하였다. 실험조건을 요약하면 Table 2와 같다.

Table 2 Test conditions of laboratory model test

Classification	Gravel	Sand	Water level	Remarks
Trial case	With Without	3 different <i>k</i> Height: 0.8 m width: 1.0, 1.5 m	Left: 0.25 m Right: 0.40, 0.60, 0.80 m	

성형된 성토층은 물다짐으로 성형하였기 때문에 침투시험이 끝나고 성토부 표층에서 0.2, 0.4, 0.6 m 심도에서 시료를 채취하여 단위중량과 함수비를 구했고, 흙 성토층의 투수계수를 다음 식 (1)로 구하였다.

$$k = \frac{2Q\Delta x}{b(h_1^2 - h_2^2)} \dots\dots\dots (1)$$

III. 결과 및 고찰

1. 수두의 변화

본 연구에서는 모형의 성토층 내에 자갈층의

유·무 및 성토층 재료의 투수성과 성토층 나비의 변화에 따른 성토층 내의 수두의 변화를 알아보았다. Fig. 4는 흙 성토층의 재료가 준설사인 경우 수두별로 자갈층 유·무에 따른 수두 변화를 도시한 것이다. 하상모래 및 혼합토도 준설사와 비슷한 양상이 나타났으며, Table 3에 이를 정리하여 나타냈다. Fig. 3에서 보는바와 같이 자갈층이 있는 경우가 자갈층이 없는 경우 보다 성토층의 수두가 최대 1.6배 높게 나타났다. 이는 흙층 하부에 있는 자갈층이 상류의 높은 수두를 그대로 받아 상부 흙층에 전가 시킨 결과라 판단된다. Table 3에서와 같이 모형 상류의 수위가 높을수록 수두차는 더 컸으며, 또한 자갈층 전면의 성토층의 나비가 짧은 경우 수두차가 더 크게 나타났다. 이는 자갈층이 없을 경우, 흙 성토층의 나비가 짧을수록, 상·하류의 수두차가 클수록 침윤선의 저하폭이 크나, 자갈층이 있는 경우 자갈층의 상류부가 수조와 직접 연결되어 있어 수조의 수위를 그대로 전달 받아 자갈층 유·무에 따른 흙 성토층의 수두변화가 큰 것으로 판단된다.

Table 3 Head difference (Δh) with/without embedded gravel layer (unit: m)

Soil	H (m) L (m)	Head difference (Δh)		
		0.8	0.6	0.4
Dredged sand (DS)	1.5	0.204	0.126	0.062
River sand (RS)	1.5	0.213	0.121	0.047
Mixed sand (MS)	1.5	0.137	0.075	0.050
Dredged sand (DS)	1.0	0.238	0.152	0.058
River sand (RS)	1.0	0.234	0.150	0.055
Mixed sand (MS)	1.0	0.261	0.261	0.050

2. 침투유량 변화

Fig. 5은 본 모형실험을 통하여 측정한 침투유량의 변화를 성토층 재료별, 수두차별, 나비의 변화

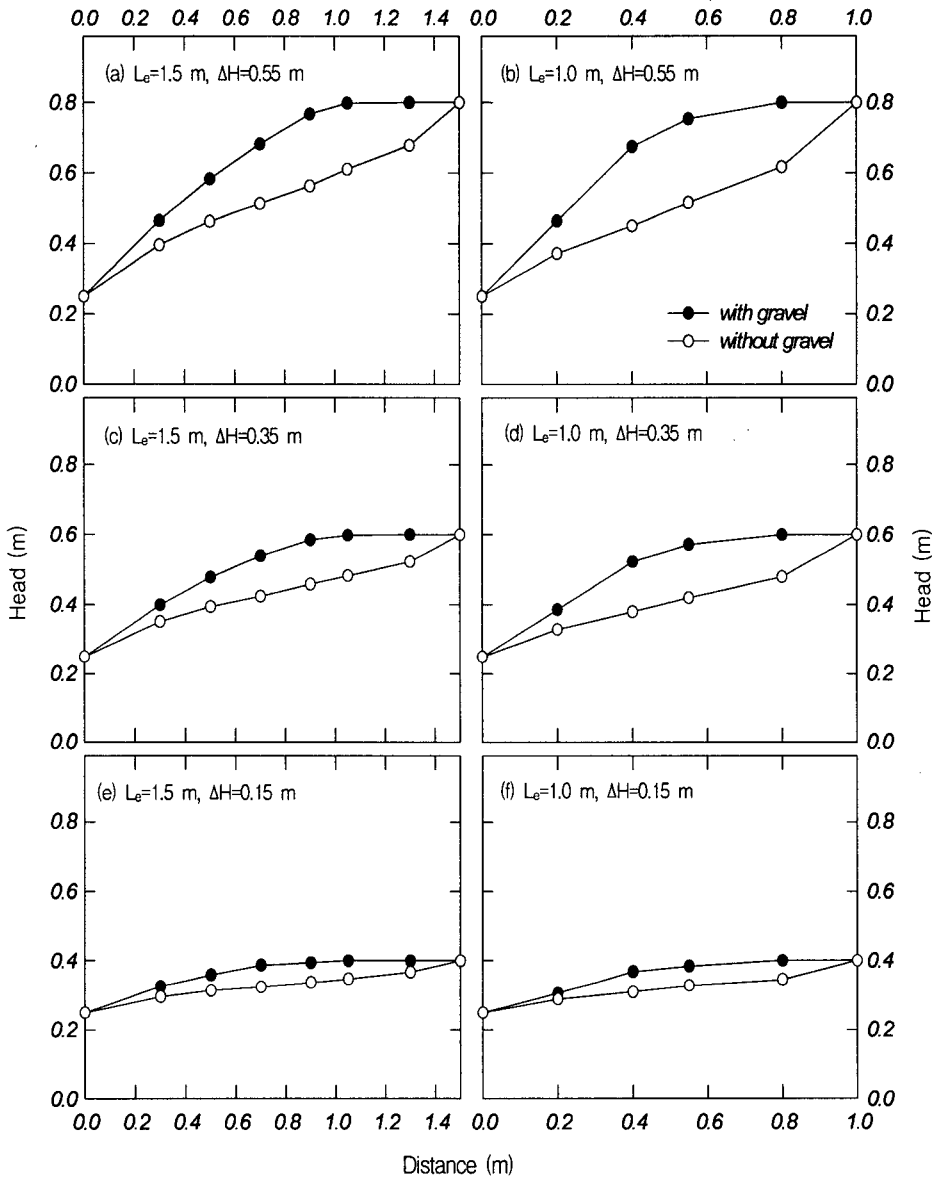


Fig. 4 Changes in piezometric head in dredged soil with/without embedded gravel layer with different hydraulic gradient ($L_e = 0.5$ m).

및 자갈층의 유·무에 따른 침투유량 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 $L_e/L_g = 1$ 은 자갈층 상부에 흙 성토층이 있고 전면에는 흙 성토층이 없는 경우이며, $L_e/L_g = \infty$ 인 경우는 $L_e/L_g = 3$ 단면에서 자갈층이 없는 경우이다. Fig. 5에서 보

는바와 같이 침투유량은 바닥사석층의 유·무와 성토층의 나비에 따라 침투유량이 큰 차이를 나타낸다. Table 4는 이를 정리하여 나타냈다.

Table 5에서 보는바와 같이 혼합토의 경우 성토층 하부에 자갈층이 있을 때 없는 경우에 비해 침

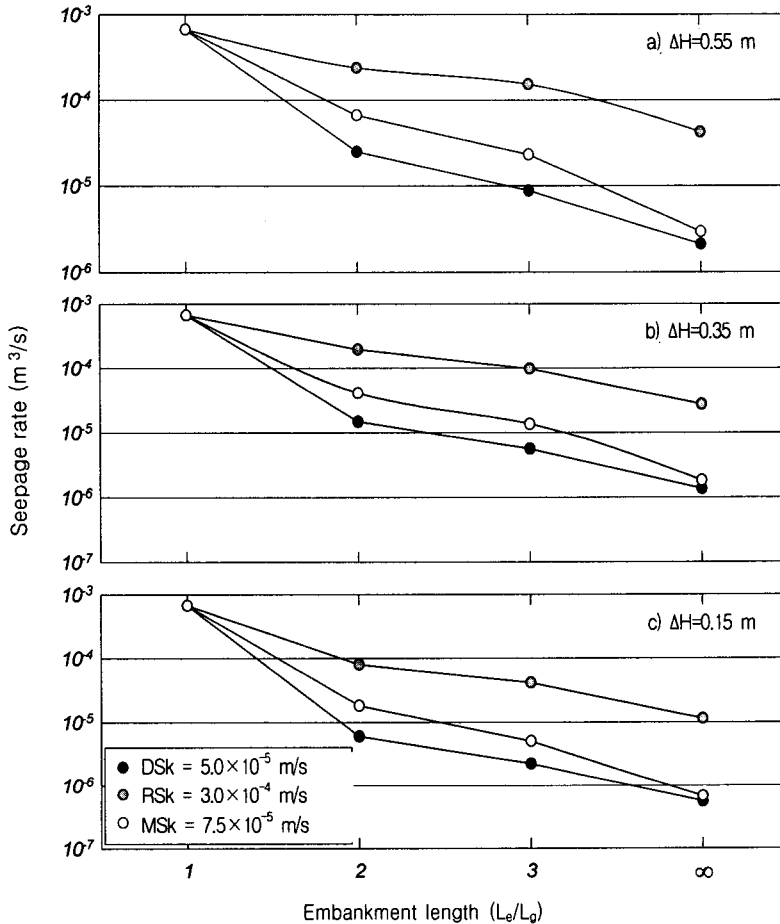


Fig. 5 Seepage rate of the model with 3 different soils and 3 three different heads ($\Delta H=0.55, 0.35, 0.15$ m) with embedded gravel layer

투유량의 차이가 다른 재료에 비하여 상대적으로 크다. 세부적으로 살펴보면 준설사의 경우 L_e/L_g (성토층의 나비 대 자갈층 나비의 비)가 3일 때 침투유량은 자갈층이 없는 경우의 침투유량에 비해 대략 4배 정도 크고, L_e/L_g 가 2 일 때는 7~8 배 정도 크게 나타났다. 강 모래의 경우는 L_e/L_g 가 3인 경우의 침투유량은 자갈층이 없는 경우의 침투유량에 비해 대략 4배 정도 크고 L_e/L_g 가 2 인 경우는 자갈층의 유·무에 따른 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 혼합토의 경우 L_e/L_g 가 3인 경우의 침투유량은 자갈층이 없는 경우의 침투

유량에 비해 대략 7~8배 정도 크고 L_e/L_g 가 2 인 경우는 15~22배 정도로 증가 하였다. 이상에서 살펴본 바와 같이 성토층 하부에 자갈층 유·무 및 성토층의 길이에 따라서 침투유량의 변화가 크게 나타났다.

3. 파이핑 안전율 변화

본 실내실험에서 흙 성토층 하부에 자갈층이 있는 경우와 자갈층이 없는 경우의 수두곡선으로부터 최대 동수경사를 구하여 식 (2)의 한계동수경사에 의한 방법으로 파이핑 안전율을 구하였다.

Table 4 Comparison of seepage rates as embankment width ratio (L_e/L_g)

Soil	Inlet head (m)	Without gravel layer Seepage rates, m ³ /s (I)		With gravel layer Seepage rates, m ³ /s (II)		Rate (II/I)	
		$L_e = 1.5$ m	$L_e = 1.0$ m	$L_e = 1.5$ m	$L_e = 1.0$ m	$L_e = 1.5$ m	$L_e = 1.5$ m
Dredged sand	0.8	2.11E-6	3.26E-6	8.79E-6	2.50E-5	4	8
	0.6	1.35E-6	2.00E-6	5.61E-6	1.48E-5	4	7
	0.4	5.56E-7	8.72E-7	2.27E-6	6.10E-6	4	7
River sand	0.8	4.22E-5	3.74E-4	1.52E-4	2.37E-4	4	1
	0.6	2.74E-5	2.32E-4	9.79E-5	1.95E-4	4	1
	0.4	1.15E-5	8.91E-5	4.17E-5	8.08E-5	4	1
Mixed sand	0.8	2.96E-6	4.45E-6	2.30E-5	6.63E-5	8	15
	0.6	1.81E-6	2.31E-6	1.36E-5	4.12E-5	7	18
	0.4	6.76E-7	8.40E-7	5.12E-6	1.84E-5	8	22

$$F_s = \frac{i_{cri}}{i_{max}} \dots\dots\dots(2)$$

여기서, i_{cri} : 한계동수경사 ($i_{cri} = \frac{r_{su}}{r_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$)

i_{max} : 실제 수두곡선에서 나타나는
최대동수경사

성토 재료별로 자갈층의 유·무에 따른 파이핑 안전율을 구하여 Table 5에 나타냈으며, 자갈층이 있는 경우 파이핑 안전율 감소율을 구하여 나타냈다.

Table 5에서 보는바와 같이 준설사의 경우 자갈층이 없는 경우 $L_e=1.5$ m 경우 수두에 따라 파이핑 안전율은 1.6~6.0으로 나타났으나, 동일단면에서 자갈층이 있는 경우 1.3~3.6으로 나타났으며 상대적으로 자갈층이 없는 경우의 안전율 보다 20~40% 감소하였다. $L_e=1.0$ m 일 때 자갈층이 없는 경우 1.2~5.0, 자갈층이 있는 경우는 0.9~2.9로 상대적으로 30~43%가 감소하여 성토단면이 작을 경우 안전율 감소율이 더 크게 나타났다.

강 모래의 경우는 $L_e=1.5$ m 일 때 자갈층이 없는 경우 2.1~6.1, 자갈층이 있는 경우는 1.5~5.3으로 나타나 재료의 배수성이 좋아 준설사에 비해 안전율이 높았으며, 자갈층의 유·무에 따른 감소

율도 13~26%로 준설사에 비해 작았다.

준설사와 강 모래 혼합토의 경우도 투수성이 준설사와 크게 차이가 나지 않아 준설사 결과와 비슷한 양상을 보였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 상대적인 투수성의 차가 큰 이질성토층에서 침투특성을 파악하기 위하여 실내 모형 실험을 실시하고, 본 모형실험에서, 자갈층의 유·무, 성토층 재료의 투수성, 성토층 단면의 나비에 따라 성토층에 나타나는 침투특성을 비교분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 성토층 하부에 자갈층이 존재할 때 존재하지 않는 경우에 비해 수두는 최대 1.6배 정도 높게 나타났다. 흙 성토층의 나비가 짧을수록 상하류의 수두차가 클수록 수두차가 크게 나타났다.

2. 자갈층이 성토층 하부에 존재 할 때 존재하지 않는 경우에 비해 침투유량은 4~22배 정도 크고, 파이핑 안전율은 13~43% 감소하였으며, 흙 성토층의 투수성이 작을수록 침투유량의 변화와 파이핑 안전율의 감소폭이 크게 나타났다.

Table 5 Safety factors of piping for different soils and heads

Soil	G_s	L_e (m)	Gravel W/O	W_w (g)	γ_t (kN/m ³)	w_w (g)	w_s (g)	w (%)	γ_d (kN/m ³)	R.C	e	S	i_{cri}	Head (m)	i	F.S	
Dredged sand (DS)	2.67	1.5	Without	530.6	18.64	46.8	37.61	0.24	15.01	0.99	0.75	0.88	0.96	0.8	0.61	1.6	
														0.6	0.39	2.5	
														0.4	0.16	6.0	
		1.0													0.8	0.77	1.2
															0.6	0.48	2.0
															0.4	0.19	5.0
		1.5	With	525.2	18.54	64.1	49.98	0.28	14.42	0.95	0.82	0.92	0.92		0.8	0.72	1.3
															0.6	0.50	1.8
															0.4	0.26	3.6
		1.0													0.8	1.03	0.9
															0.6	0.75	1.2
															0.4	0.32	2.9
River sand (RS)	2.64	1.5	Without	455.6	16.09	41.91	36.47	0.15	13.93	0.84	0.86	0.46	0.88	0.8	0.43	2.1	
														0.6	0.28	3.2	
														0.4	0.15	6.1	
		1.0													0.8	0.07	13.6
															0.6	0.03	26.8
															0.4	0.01	80.3
		1.5	With	480.5	16.87	53.31	47.21	0.13	15.01	0.9	0.73	0.47	0.95		0.8	0.62	1.5
															0.6	0.40	2.4
															0.4	0.18	5.3
		1.0													0.8	0.12	8.2
															0.6	0.06	16.9
															0.4	0.02	55.8
Mixed soil (MS)	2.72	1.5	Without	555.8	1.52	83.42	68.61	0.22	16.09	0.96	0.66	0.89	1.04	0.8	0.62	1.7	
														0.6	0.40	2.6	
														0.4	0.16	6.5	
		1.0													0.8	0.07	16.0
															0.6	0.03	31.4
															0.4	0.01	94.3
		1.5	With	574.9	20.21	66.27	54.88	0.21	16.77	1.00	0.59	0.95	1.08		0.8	0.76	1.4
															0.6	0.48	2.2
															0.4	0.23	4.6
		1.0													0.8	1.18	0.9
															0.6	0.06	17.4
															0.4	0.02	56.9

3. 이상의 결과로 보아 성토층에 자갈층이 있는 경우가 없는 경우에 비해 전반적으로 침투문제에는 불리한 것으로 나타났으며, 흙 성토층의 나비 및 투수성에 따라라도 침투특성의 변화가 크게 나타났다.

References

1. Abt, S. R., Ruff, J. F., and Wittler, R. J. 1991. "Estimating flow through riprap." *Journal of Hydrology, Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 5, pp. 670-675.

2. George, G. H. and Hansen, D., 1992. "Conversion between quadratic and power law for non-Darcy flow." *Journal of Hydrology, Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 5, pp. 792-797.
3. Hu, Q. and Li, B., 1988. "Studies on the simulation of overtopped rockfill dams." *Internal Report*, Nanjing Hydraulic Research Institute.
4. Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation and Hanshin Engineering & Construction Company, 2004, Causes Analyses and Countermeasures of Sea Water Intrusion through Hwaong Seadike (in Korean).
5. Lee, H. W., Chang P. W., Chang, W. H., Chung, I. Y. 2004, "Changes in Phreatic Line of Embankment by Flow in Bottom Riprap", Proceeding of Korean Society of Agricultural Engineers Symposium, Taejeon, Korea, October. (in Korean).
6. Lee, H. W, 2005, Seepage Characteristics of Sea Dike depending on the Size and Permeability of Embedded Rock Layer under Earth Fill, Ph.D thesis. Seoul National University (in Korean).
7. Li, B., Garga, V. K., and Davies, M. H., 1998. "Relationship for non-Darcy flow in rockfill." *Journal of Hydrology, Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 2, pp. 206-212.
8. McCorquodale, J.A., Hannoura, A.A., and Nasser, M.S. (1977). "Hydraulic conductivity of rockfill." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 16, No. 2, pp. 123-137.
9. Ministry of Agriculture & Forestry and Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation, 2002, A Study on the Method of Preventing Piping for the Hwaong Seadike (in Korean).
10. Rural Development Corporation, 1995, Tideland Reclamation in Korea (in Korean).
11. Taylor, D. W., 1948. *Fundamentals of soil mechanics*. John Wiley and Sons Inc, New York.