

강우시 보강토 내부 배수가 보강토 옹벽의 안정성에 미치는 영향

Effect of Stability of Reinforced Wall within Drain Layers in the Rainfall

신춘원^{1*}, 유충식²

Chun-won Sin^{1*}, Chung-Sik Yoo²

¹Member, the master's course, School of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan Univ. Natural Sciences Campus, Cheoncheon-dong, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, Korea

²Member, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan Univ. Natural Sciences Campus, Cheoncheon-dong, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, Korea

ABSTRACT

There are natural disasters caused by abnormal climate in the world. In particular, there are frequent disasters such as floods and landslides caused by rainfall in summer. Rainfall will have a major impact on the stability of a retaining wall. If drainage during rainfall activities within the retaining wall is not made properly, permeated water brings a significant increase in pore pressure inside of the backfill soil and reduces the shear strength of the soil. Therefore, research how to install the drainage layers to reduce the infiltrated water inside of the backfill soil is very necessary. In this study, we performed a numerical modeling to find the optimum installation conditions of the location and number of drainage layer related to stability of the reinforced retaining wall during rainfall installed geosynthetics.

요 지

전 세계적으로 이상기후로 인한 자연재해가 이슈가 되고 있다. 특히 여름철 집중 강우로 인한 홍수 및 산사태와 같은 재해가 빈번하게 발생하고 있는데 강우는 옹벽의 안정성에도 큰 영향을 미치게 된다. 만약 강우시 옹벽 내부의 배수활동이 제대로 이루어지지 않는다면 빗물이 뒷채움 흙 내부에 스며들어 옹벽 뒷면의 간극수압이 크게 증가하게 되고 지반의 전단강도를 저하시킨다. 따라서 옹벽 내부의 배수가 원활하게 이루어지도록 배수층을 설치하는 방법에 대한 연구가 매우 필요하다. 본 연구에서는 토목섬유가 설치된 보강토 옹벽에서 배수층의 위치/갯수에 따른 강우시 보강토 옹벽의 안정성에 최적의 시공 조건을 찾는 수치해석 모델링을 수행하였다.

Keywords : Reinforced wall, Drain layers, Geosynthetic

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

전 세계적으로 엘니뇨와 같은 이상기후가 빈번하게 발생하여 폭우와 홍수로 인한 피해 사례가 속출하고 있다. 우리나라도 예외가 아니며 특히, 여름철 태풍과 장마로 인한 지속적 또는 집중 강우에 의한 자연재해가 발생하여 인

적, 물적 피해가 보고되고 있다. 보강토 옹벽의 붕괴 사고 또한 이 시기에 대부분 발생하고 있으며 그 원인으로는 강우시 옹벽 내부에 설치된 배수층이 제 기능을 발휘하지 못하거나 설계보다 강한 강우 상황으로 인해 보강토 옹벽 뒷채움 흙이 포화되고 지반의 전단강도가 크게 작아지기 때문이다. 국내 충남 지역의 보강토 옹벽의 붕괴사고에 대한 사례분석을 실시한 Yoo and Jung (2006) 연구에서는 배수 시스템이 제대로 설치되어 있지 않고 양질의 토사가 아닌 흙으로 뒤채움을 실시한 경우 강우 상황에서 보강토 옹벽 내부로 침투수가 발생하게 되고 이로 인해 보강토 옹벽 내부의 간극수압 증가 및 안정성 악화로 이어지는 메커니즘

Received 12 Jan. 2017, Revised 21 Jun. 2017, Accepted 22 Jun. 2017

*Corresponding author

Tel: +82-31-290-7537; Fax: +82-31-290-7549

E-mail address: scw97212@naver.com (C.-w. Sin)

을 분석하였다. 본 연구에서는 이와 같은 강우로 인한 피해 사례 중 보강토 옹벽의 붕괴 사고에 초점을 맞추고 강우 상황에서 보강토 옹벽 내부에 배수시스템을 설치하여 침투수를 배수시켜 안정성을 도모하는 방법을 고려하였다. Bhattacharjee and Viswanadham(2014)는 일반적인 보강재와 부직포를 설치한 경우와 배수기능이 있는 하이브리드 토목 신소재로 보강한 사면의 거동을 분석하여 투수 계수가 낮은 사면에서 내부의 침투수를 배수시키는 것이 안정성에 미치는 효과를 분석하였으며 다양한 강우 강도 및 강우지속시간 조건에 대한 수치해석을 수행하여 그 효율성을 입증하였다. Thuo et al.(2014)는 부직포를 배수재로 설치한 보강토 옹벽의 거동 중 모세관 현상에 대한 검증을 수행하여 배수 효과를 분석하고 부직포를 모래층 사이에 설치하였을 때 더 효율적인 배수가 가능하다는 것을 실험적, 수치해석적 연구를 통해 입증하였다. 그러나 위의 연구들에서는 각각 연구에서 사용한 배수재를 보강토의 상중하단 3곳에 설치한 후 그 거동을 살펴보았다. 본 연구에서는 보강토 옹벽의 시공성과 경제성을 고려할 때 최적의 배수층 설치 위치 및 개수에 대한 검토가 필요하다고 판단하여 최적의 배수층 설치 시스템을 제안하기 위한 강우상황에서 보강토 옹벽의 안정성을 응력-간극수압 연계 해석 기법을 활용한 수치해석 모델링을 수행하였다.

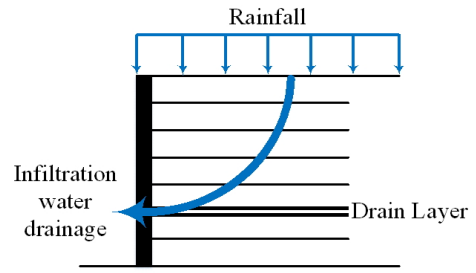


Fig. 1. Reinforced wall within drain layers

배수층을 보강재와 평행하게 설치하여 보강토 옹벽 내부의 침투수를 배수시키는 평면배수 방법에 대하여 가장 효율적인 시공 조건을 도출하기 위하여 세계적으로 효율성이 입증된 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.13을 활용하여 배수층이 설치된 보강토 옹벽을 모델링하고 강우 강도, 배수층의 개수 및 위치를 조합하여 다양한 시공 조건을 모사하였다.

연구수행 순서는 먼저 총 13개의 배수층을 상중하 3개의 set으로 구분하여 최적의 설치 위치를 분석하고 강우강도를 변화시켜 배수효과를 확인하였다. 그리고 최적의 위치로부터 배수층의 설치 개수를 한 개씩 늘려나가는 모델링을 통해 보강토 옹벽 시공의 경제성을 확보하기 위한 최적의 설치 개수를 도출하였다.

1.2 연구 내용 및 범위

2013년에 발간된 보강토 옹벽 설계 시공 및 유지관리 지침에 따르면 설계편 3장에서 다량의 배면 유입수로 뒤채움 흙이 포화되면 흙의 전단강도가 급격히 저하되므로 적절한 배수시설을 설치해야 한다고 명시되어있으나 구체적인 설계방법에 대한 지침은 없는 실정이다.

본 연구에서는 보강토 옹벽의 배수 시스템 중 하나인

2. 해석 대상 조건

2.1 옹벽 제원 및 보강 조건

해석 모델링에 사용된 보강토 옹벽의 제원은 40m×4m 크기의 기초 지반과 0.4m×8m 크기의 보강토 옹벽, 뒷채움 지반을 29.6m×8m로 고려하였다. 보강 조건은 Fig. 2에 나타나있듯 총 13개의 Geogrid를 상하 0.4m 간격으로 길이는 보강토 옹벽 설계 지침에 따라 0.7H인 5.6m 로 배수

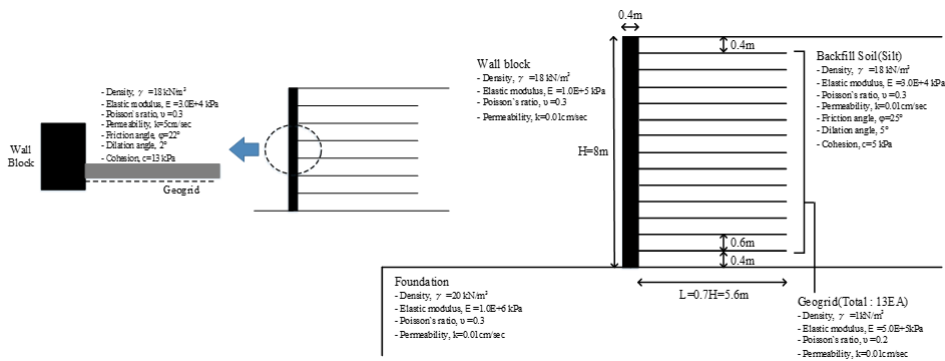


Fig. 2. Specification of reinforced wall within drain layers

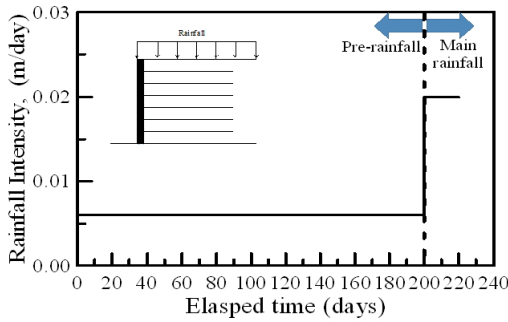


Fig. 3. Specification of reinforced wall within drain layers

층 하단에 포설하였다.

2.2 내부 평면 배수 설치 조건 및 적용 강우 상황

배수층은 설치 조건에 따라 보강재와 같은 위치에 설치되어 강우시 보강토 응벽 내부의 침투수를 배수시키는 역할을 한다. 가장 위험하다고 판단되는 강우 상황은 장마철 장기간 강우가 지속되는 중에 발생함 국지성 집중호우이다. 이 강우 상황을 모사하기 위해 모델링에서는 장기간(200days)동안 0.006m/day의 약한 강우강도를 적용시킨 후 단기간(20days)동안 0.005~0.020m/day의 강우강도를 각각의 해석 case 별로 부여하였다. Fig. 3은 모델링에 적용한 강우 상황 중 단기간 강우 강도를 0.020m/day로 적용한 경우의 시간당 적용한 강우강도의 그래프를 나타내었다.

3. 해석 모델링

3.1 응력-간극수압 연계 해석 기법

강우를 적용한 보강토 응벽의 역학적 거동은 응벽 주변 지반의 유효응력에 지배되므로 응력과 간극수압이 연계된 해석(stress-pore pressure coupled analysis)을 수행하여야만 현실적인 평가가 가능하다.

응력-간극수압의 연계해석에서는 지반을 다상재료(multi-phase material)로 간주하고 유효응력 개념을 적용하여 거동을 표현한다. 지배방정식은 Biot(1955)과 Zienkiewicz와 Shiomi(1984)이 제안한 기본적인 완전 연계 유효응력 과정을 토대로 유도되며 선형 운동량의 평형 및 질량 보존의 법칙과 같은 물리적 법칙을 토대로 다음 식 (1) 및 (2)와 같이 정식화 된다.

$$\sigma_{ij,j} - \rho b_j = -\rho \ddot{u}_i \quad (1)$$

$$n(v_{i,j} + \epsilon_{vwc}) + \dot{u}_{i,i} = 0 \quad (2)$$

식 (1)에서 $\sigma_{ij,j}$ = 전응력; ρ = 흙의 밀도; b_j = 물체력; u_i = 흙입자의 변위이며 식 (2)에서 v = 침투속도; ϵ_{vwc} = 압축으로 인한 간극수의 체적 변형률; 그리고 n = 간극률로 정의된다. 식 (1)과 (2)로 정의되는 물리적 법칙이 흙입자, 간극수, 침투에 대한 구성법칙과 연계되는 과정을 토대로 유도되는 지배 방정식은 해석 대상 도메인에 대한 경계조건 및 초기조건에 따라 해를 찾게 된다.

응력-간극수압 연계해석은 시간개념의 적용여부에 따라 정상류 (steady state) 해석과 부정류 (transient) 해석으로 구분된다. 정상류 해석은 외부환경 변화에 의해 침투가 발생하여 평형상태에 도달한 후에 대한 해석으로서 평형상태에 도달하는 과정에 대한 결과는 얻을 수 없다. 반면에 부정류 해석은 시간개념이 도입된 것으로서 강우 상황을 적용하여 침투가 발생하는 시점에서 평형상태에 도달하는 시점까지 임의의 시간에서의 해를 얻을 수 있다.

3.2 경계조건

Fig. 4에는 모델링에 적용한 경계조건과 모델링의 이산화 모습을 나타내고 있다. 좌우측 경계에는 측면 변위를

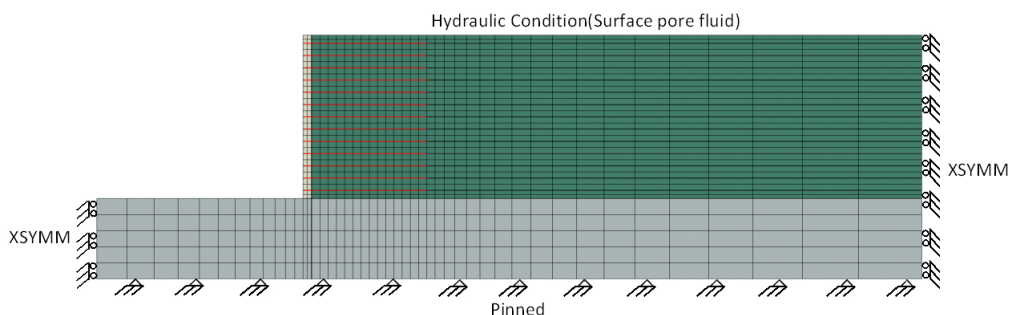


Fig. 4. Boundary condition of modeling

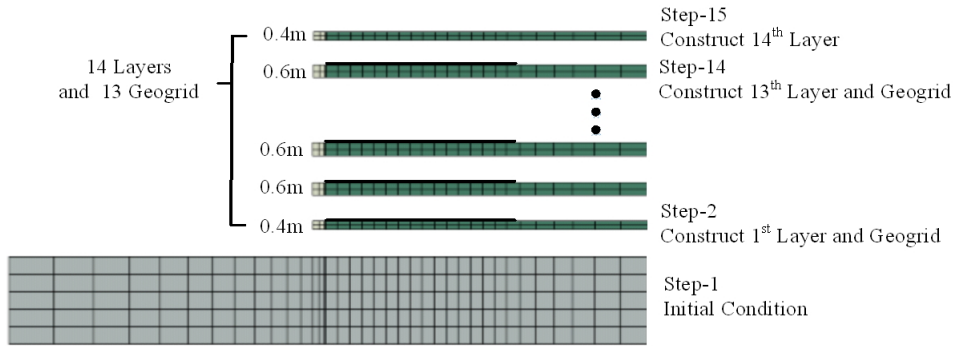


Fig. 5. Simulation of construction

Table 1. Material property

Classification	Density γ [kN/m ³]	Elastic modulus E [kPa]	Poisson's Ratio ν	Permeability k [cm/sec]	Mohr-Coulomb Plasticity		
					Friction angle [°]	Dilation angle [°]	Cohesion
Backfill soil	18	30000	0.3	0.01	25	5	5
Wall (Block)	18	100000	0.3	0.01	-	-	-
Block-Drain				5	-	-	-
Drain	18	30000	0.3	5	22	2	13
Foundation	20	1000000	0.25	0.01	-	-	-
Interface	18	1000	0.3	0.01	-	-	-
Inter-Drain				5	-	-	-
Geogrid	1	500000	0.2	0.01	No compression		

구속하였으며 기초 하단은 고정하였다. 뒷채움 흙의 상단과 기초지반의 상단, 벽체 전면에 수리적 경계 조건을 부여하였으며 이 경계면에 강우강도를 적용시켜 강우 상황을 모사하고 조절하였다.

3.3 시공과정 모사

보강토 옹벽의 시공과정을 모델링에 모사하기 위하여 먼저 기초 지반의 초기 조건을 정립하였다. 그리고 벽체, 인터페이스, 배수층을 1개의 시공층으로 설정하고 각 시공층을 설치한 후 순서대로 쌓아 올려 보강토 옹벽의 시공을 모사하였다. 전체 시공과정 모사가 완료된 후 옹벽과 기초의 상단에 강우를 적용하여 거동을 분석하였다.

3.4 모델링 이산화 및 적용 물성

Fig. 2에서 각 영역의 물성을 그림으로 나타내었고 본 장에서는 표로 적용 물성을 정리하였다. 또한 지반 및 벽

Table 2. Material permeability

Material	k_s	Saturation
Backfill soil	0.545267	0.4
Wall	0.785832	0.68
Foundation		
Interface	1	1
Block-Drain	0.545267	0.01
Drain	0.785832	0.03
Inter-Drain	1	1

체의 이산화에는 3차원 8절점 응력-간극수압 연계 요소 (CPE8RP)와 Mohr-Coulomb 항복규준을 따르는 탄소성 재료로 가정하였으며 보강재는 3차원 트러스 요소(T3D2)와 탄성 재료로 적용하였다.

3.5 해석 case

최적의 배수층 위치와 개수를 분석하기 위하여 해석 case를 선정하고 경향을 분석하였다. 먼저 최적의 배수층

Table 2. Material sorption

Wall, Drain, Interface		Backfill soil, Foundation	
Pore Pressure	Saturation	Pore Pressure	Saturation
-200	0.018573	-200	0.404119
-100	0.022967	-100	0.461895
-50	0.029389	-50	0.554808
-20	0.043933	-20	0.776096
-18	0.046359	-18	0.806155
-16	0.049344	-16	0.838452
-14	0.053128	-14	0.872128
-12	0.058126	-12	0.905693
-10	0.065106	-10	0.937045
-8	0.075695	-8	0.963785
-7	0.083432	-7	0.974753
-6	0.094054	-6	0.983875
-5	0.10963	-5	0.991081
-4	0.134777	-4	0.996401
-3	0.181872	-3	0.999974
-2	0.293669	0	1
-1	0.635339		
-0.9	0.691074		
-0.8	0.748748		
0	1		

위치를 해석하기 위해 drain set을 선정하여 해석을 수행하였고 그 결과를 바탕으로 최적의 배수층 위치인 보강토 옹벽 하단으로부터 배수층 개수를 한 개씩 늘려 가장 효과적인 설치 개수를 검토하기 위한 해석을 수행하였다.

1) Case1 : 최적의 배수층 위치(Drain layers set)

배수층의 효율적인 설치 위치를 찾기 위해서 Fig1에서 나타냈듯이 13개의 배수층을 상단 set1 5개, 중단 set2 4개, 하단 set3 4개로 구분하고 각각의 set 또는 set을 조합하여 다양한 강우강도를 적용시키며 해석을 수행하였다. Fig. 6에 Drain layers set을 그림으로 나타내었고 Table 4

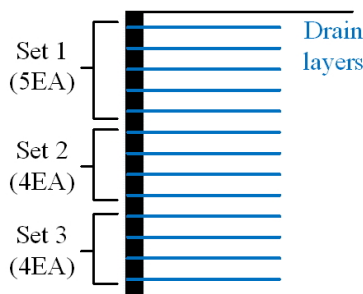


Fig. 6. Design Hydrograph of Sung-Ju Station

에 drain layers set을 이용한 개별적 또는 조합한 case와 그 case에 해당하는 배수층의 개수를 나타내었다.

2) Case2 : 최적의 배수층 개수(Optimum number of drain layers)

보강토 옹벽의 시공성과 경제성을 고려할 때 배수층의 최적 설치 개수를 검토할 필요가 있다. 배수층의 효율적인 설치 개수를 분석하기 위하여 3장에서 자세히 설명할 해석 결과중 하나인 최적의 배수층 설치 위치인 보강토 옹벽의 하단으로부터 보강재의 개수를 1개씩 늘리고 강우강도를 다르게 부여하여 해석을 수행하였다.

4. 해석 결과 분석

4.1 평면 배수 적용시 보강토 옹벽의 거동

배수층 설치 조건에 따른 효과를 분석하기 전에 배수층 설치 유무에 따라 달라지는 보강토 옹벽의 거동을 분석하였다. 비교를 위하여 전체 13개 배수층을 모두 설치한 경우와 모두 설치하지 않은 경우를 강우강도 0.010m/day로 적용하여 해석하였다. Fig. 3은 벽체의 변위를 나타낸 그래프로 배수층을 설치하지 않았을 때 최대 113mm의 변위가 발생하지만 배수층 설치시 최대 60mm가 발생하여 강우상황에서 더 안정적인 상태임을 알 수 있다. 보강재의 변형률에서도 배수층 설치시 더 작은 변형이 발생하는 것을 Fig. 2에서 확인할 수 있다.

강우상황을 적용한 후 시간에 따른 벽체의 변위와 보강재의 최대 유발 인장력 변화를 분석하여 배수층 설치 유무에 따른 보강토 옹벽의 안정성을 강우강도 0.010m/day에서 분석하였다. Fig. 5와 Fig. 6 그래프를 보면 배수층의 설치 효과를 확인할 수 있으며 특히 장기간 강우 상황과 강우 강도가 클 때 안정성에 더 큰 영향을 미친다는 것을

Table 4. Case of drain layers set

Case1	Activation of drain layers	
1	All	13 EA
2	set1	5 EA
3	set2	4 EA
4	set3	4 EA
5	set1&2	9 EA
6	set2&3	8 EA
7	set1&3	9 EA

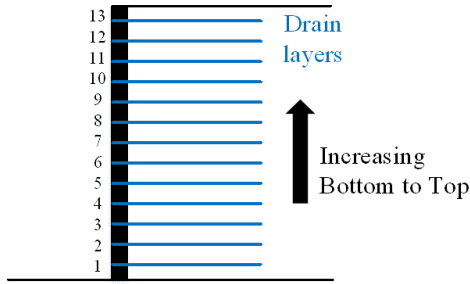


Fig. 7. Number of drain layers

알 수 있다.

보강토 옹벽 벽체로부터 1m, 3m, 5.6m 간격의 뒷채움 흙의 단면에서 간극수압을 분석하여 배수층 설치를 통해 보강토 내부 침투수의 배수가 원활하게 이루어지는지 더 명확하게 확인할 수 있다. 배수층을 설치시 간극 수압이 최대 17kPa, 미설치시에 대비하여 약 40% 감소하였으며 Fig. 5~7의 그래프에 나타내었다.

4.2 배수층 설치 위치에 따른 효과

해석 수행 결과 Fig. 3과 4의 그래프와 같이 set3(옹벽의 하단부에 설치된 경우)이 포함된 case에서 벽체변위 및 보강재의 유발인장력이 작게 나타났다. 또한 set2&3, set1&3, set3의 순서로 보강토 옹벽의 안정성이 높게 나타났으므로 배수층의 가장 효율적인 설치 위치는 보강토 옹벽의 하단으로부터 설치하는 경우로 판단할 수 있다.

Fig. 4와 5는 해석 결과를 set 조합별로 x축을 강우 강도로 하는 벽체 변위 및 보강재의 유발 인장력의 최대값에 대한 그래프로 정리한 것이다. 이 그래프를 통해 보강토 옹벽의 하단에 배수층을 설치한 경우가 벽체의 변위와 유발 인장력이 작게 나오는 것을 더 명확하게 확인할 수 있다.

4.3 배수층 설치 개수에 따른 효과

전체 13개의 배수층을 보강토 옹벽하단으로부터 1개씩 늘려가며 수행한 해석 결과 배수층을 추가로 설치하여도 벽체의 변위와 보강재의 유발 인장력 감소폭이 미미해지는 해석 case를 최적의 배수층 개수로 선정하였다.

Fig. 7과 8은 4개의 다른 강우강도 상황에서 배수층의 개수가 보강토의 안정성에 미치는 영향을 보여주는 그래프이다. 배수층을 5개 설치한 이후로 배수층을 추가 설치하여도 그 효과가 상대적으로 작게 나타났다. 예를 들어 Fig. 7에서 강우강도 0.015인 case를 보면 배수층을 1개에

Table 5. Case of number of drain layers

Activation of drain layers	
Drain layer1	1EA
Drain layer1-2	2EA
Drain layer1-3	3EA
⋮	⋮
Drain layer1-12	12EA
Drain layer1-13	13EA

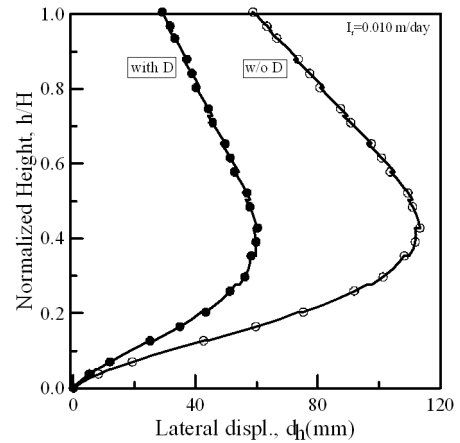


Fig. 8. Displacement of wall face

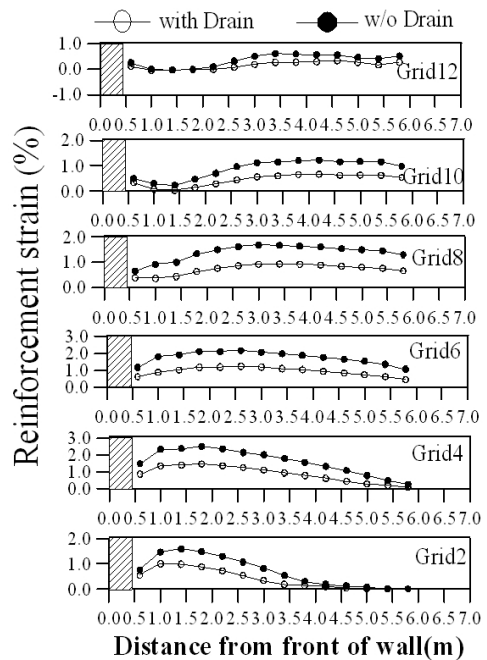


Fig. 9. Strain of geogrid

서 2개로 늘려 설치한 경우 벽체의 변위가 13mm 감소하였는데 5개에서 13개로 늘려 설치하여도 벽체 변위는 10mm 감소하는데 그쳤다.

Fig. 9와 10을 통해서 배수층을 5개 설치한 case를 기준

Table 6. Pore-water pressure analysis cases

Section	Distance from wall face	Time
AA	1 m	End of Pre-rainfall
BB	3 m	Middle of Main-rainfall
CC	5.6 m	End of Main-rainfall

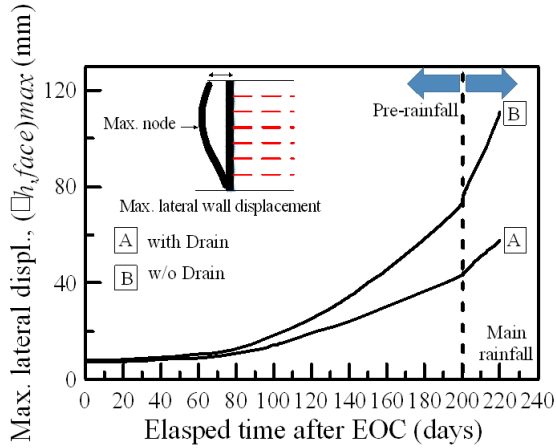


Fig. 10. Time - Displacement of wall face

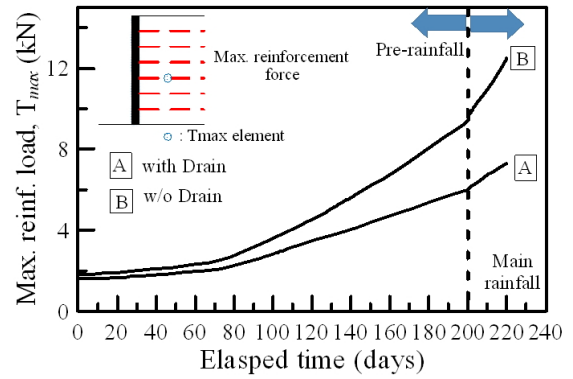


Fig. 11. Time - Tmax of geogrid

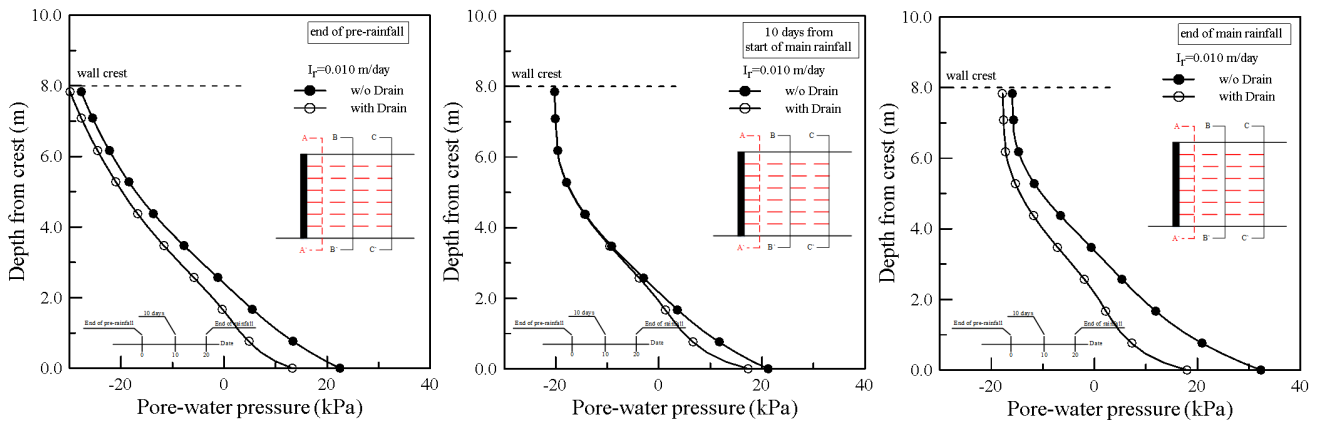


Fig. 12. Pore-water pressure at AA'

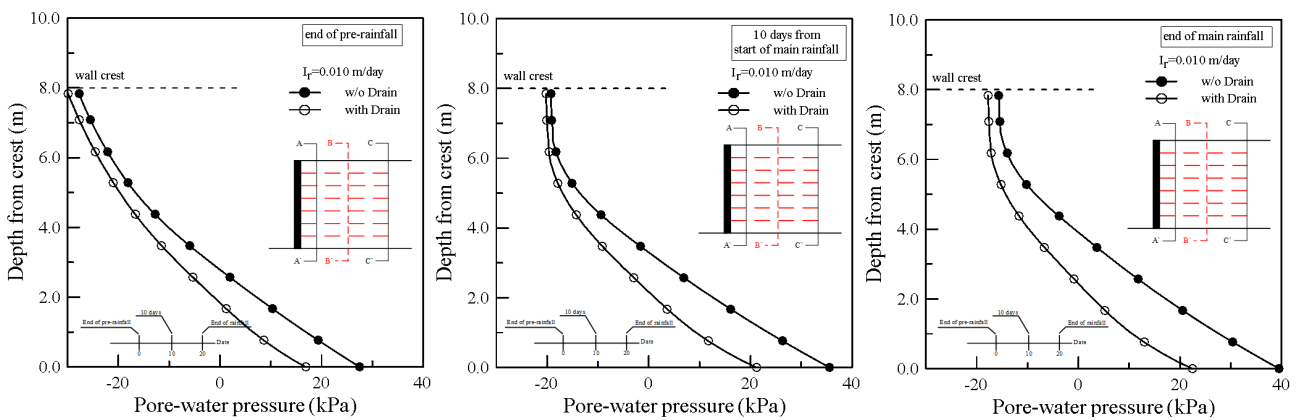


Fig. 13. Pore-water pressure at BB'

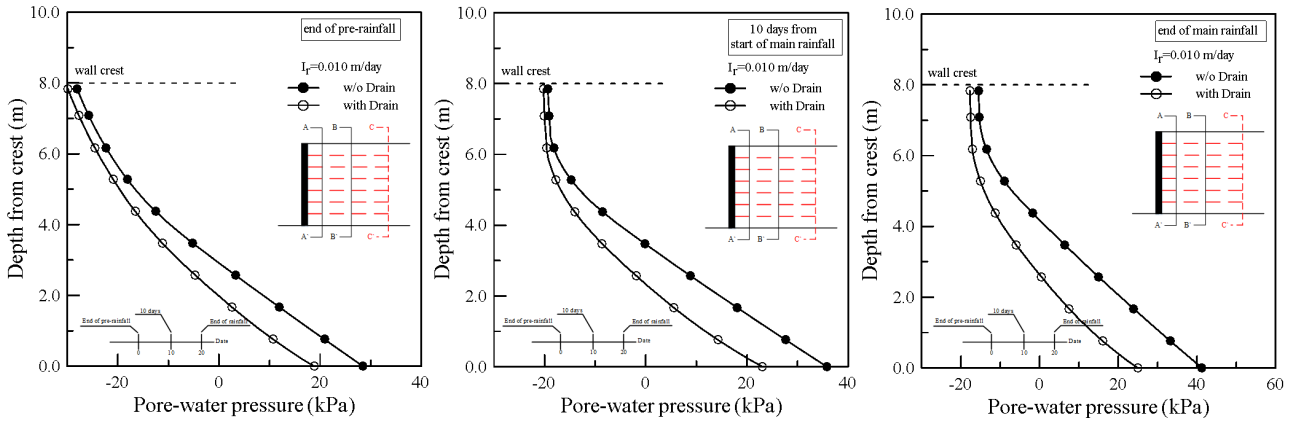


Fig. 14. Pore-water pressure at CC'

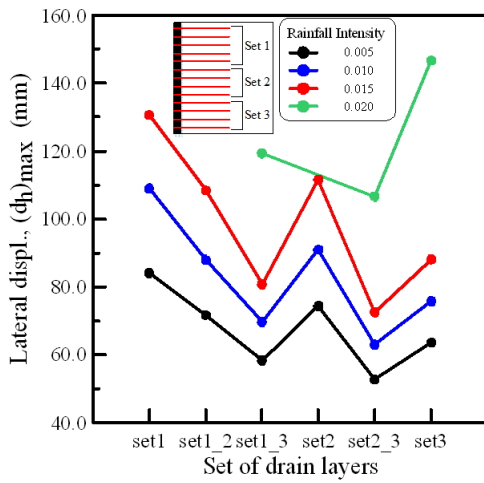


Fig. 15. Displacement – set of drain layers for increasing the rainfall intensity

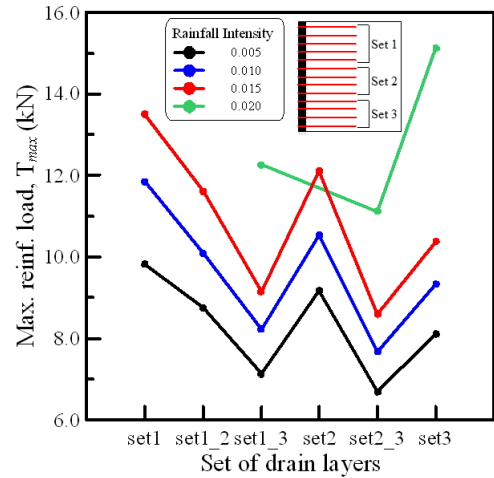


Fig. 16. Maximum tensile load of geogrid – set of drain layers for increasing the rainfall intensity

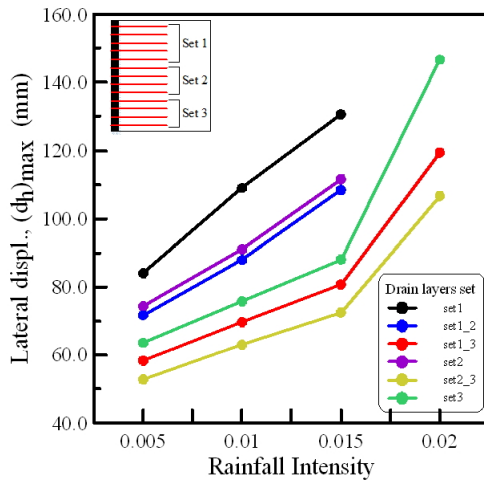


Fig. 17. Displacement – rainfall intensity for different set

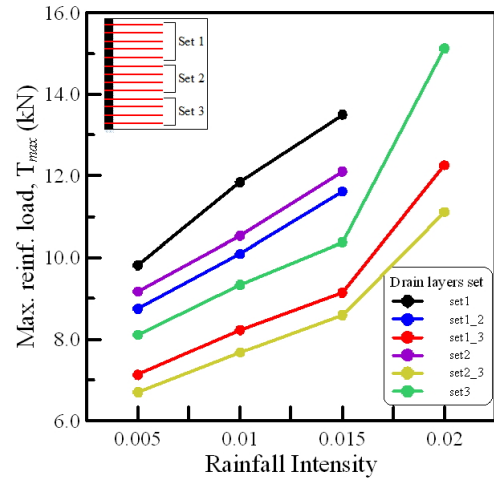


Fig. 18. Maximum tensile load of geogrid – rainfall intensity for different set

으로 적게 설치한 경우와 더 많이 설치한 경우 배수층의 개수가 보강토 옹벽의 안정성에 미치는 영향을 다시 한 번

검토하였다.

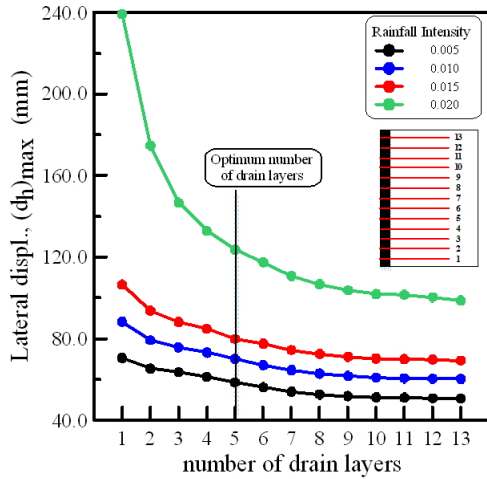


Fig. 19. Displacement–Number of drain layers

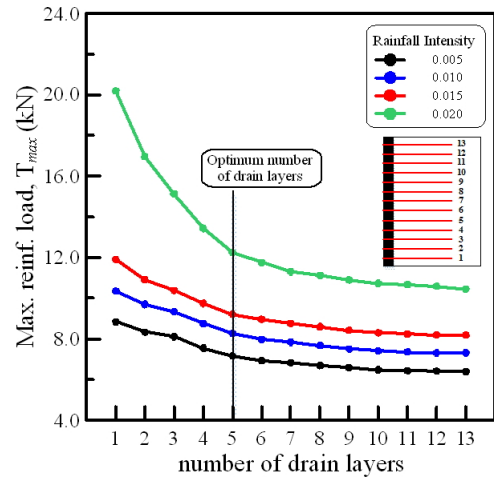


Fig. 20. Maximum reinf. load–Number of layers

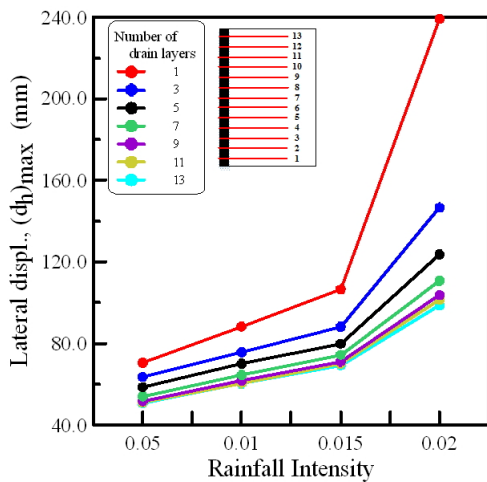


Fig. 21. Displacement–Rainfall intensity

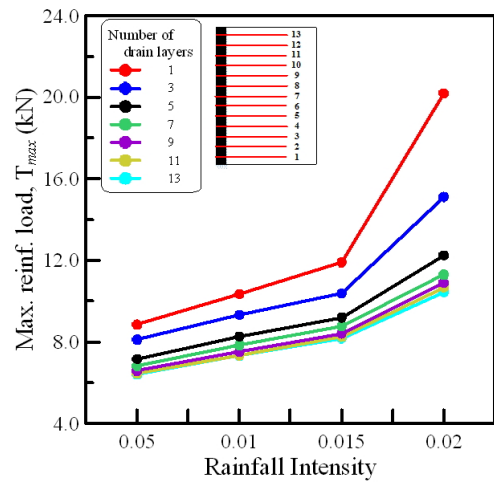


Fig. 22. Maximum reinf. load–Rainfall Intensity

5. 결론

기후 변화로 인해 강우상황에서 보강토 옹벽의 안정성을 고려할 때 배수층의 역할이 매우 중요해졌다. 배수층을 가장 경제적이고 효과적으로 설치하기 위한 모델링을 수행하였고 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 배수층은 보강토 옹벽의 하단으로부터 설치하는 것이 유리하며 설치 개수가 많을수록 더 큰 효과를 발휘한다.
- (2) 보강토 옹벽의 안정성만을 고려할 때는 전체 배수층을 설치하는 경우가 가장 효과적이라고 할 수 있으나 시공성과 경제성을 고려할 때 최적의 배수층 설치 개수는 설치효과가 가장 크게 발휘되는 개수인 8m 보강토 옹벽에 총 13개 중 5개를 설치한 경우이다.

Acknowledgement

This research is supported by Grant No. 2014004636 from the Basic Research Program of the Korea Science & Engineering Foundation. The financial supports are gratefully acknowledged.

References

1. Bhattacharjee, D., Viswanadham. B.V.S. (2015), “Numerical studies on the performance of hybrid-geosynthetic-reinforced soil slopes subjected to rainfall”, *Geosynthetics International* Vol.22, Issue 6, pp.411-427.
2. Biot, M. A. (1955), “Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid”, *J. Appl. Pkys.*, Vol.26, No.2, pp.182-185.

3. Thou, J. N., Yang, K. H., and Huang, C. C. (2015), "Infiltration into unsaturated reinforced slopes with nonwoven geotextile drains sandwiched in sand layers", *Geosynthetics International* Vol.22, Issue 6, pp.457-474.
4. Yoo, C. S. and Jung, H.Y. (2010), "Case History of Geosynthetic Reinforced Segmental Retaining Wall Failure", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.136, Issue 3, pp.546-548.
5. Zienkiewicz, O.C. and Shiomi, T. (1984), "Dynamic behavior of saturated porous media: The generalized Biot formulation and its numerical solution", *Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech.*, Vol.8, pp.71-96.