

축소 모형실험을 이용한 습윤-건조 반복작용이 옹벽 구조물의 거동에 미치는 영향

Effect of Cycles of Wetting and Drying on the Behavior of Retaining Walls Using Reduced-Scale Model Tests

유 충 식¹ Yoo, Chung-Sik

Abstract

This paper presents the results of a reduced-scale physical model investigation into the behavior of retaining walls subject to cycles of wetting and drying due to rainfall infiltration. Reduced-scale model walls equipped with a water spraying system that can simulate the wetting process were first constructed and a series of tests were conducted with due consideration of different rainfall intensities and backfill soil types. The results indicate that cycles of wetting and drying process have adverse effects on the wall behavior, increasing wall deformation as well as earth pressure acting on the wall, and that the first cycle of wetting and drying process has more pronounced effect on the wall performance than the ensuing cycles. It is also shown that the degree to which the wetting and drying cycles affect the wall behavior depends greatly on the backfill soil type, and that the larger the fine contents, the greater is the effect of cycles of wetting and drying on the wall behavior. Practical implications of the findings from this study are discussed in great detail.

요 지

본 논문에서는 계절적 환경변화로 인한 습윤-건조 반복과정에 노출되는 옹벽구조물의 거동에 관한 축소 모형실험 연구 내용을 다루었다. 이를 위해 먼저 습윤-건조 과정을 모사할 수 있는 모형 옹벽 실험 장치를 구축하고 강우강도 및 뒤채움흙의 종류 등을 매개변수로하여 다양한 조건에 대한 실험을 수행하였다. 그 결과 강우로 인한 습윤-건조 반복 과정은 옹벽의 변위를 증가시키고 토압을 증가시키는 등 거동 측면에서 불안정성을 야기시킬 수 있는 인자로 검토되었다. 한편, 전반적으로 첫 번째 습윤-건조 사이클에서 변위가 가장 크게 발생하고 그 이후 습윤 사이클에서의 변위 증가량은 사이클이 진행되면서 감소되는 것으로 관찰되었다. 아울러 이러한 습윤-건조 반복과정의 영향은 뒤채움흙의 종류에 따라 그 정도가 차이나는 것으로 나타났으며 세립분 함유량이 클수록 습윤-건조 반복작용의 영향이 큰 것으로 검토되었다.

Keywords : Reduced scale model test, Retaining wall, Braced excavation, Rainfall infiltration, Wetting and drying, Matric suction

1 정회원, 성균관대학교 건축토목공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil & Architecture Engrg., Sungkyunkwan Univ., Tel: +82-31-290-7518, Fax: +82-31-290-7549, csyoo@skku.edu, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 들어 지구 온난화로 인한 기후 변화는 우리나라 뿐만 아니라 전 세계적으로 우리 일상생활에 영향을 미치는 중요한 이슈가 되었다. 이러한 기후 변화는 국지성 호우 및 이상 강우현상을 초래하여 전 세계 곳곳에 강우로 인한 문제를 야기시키고 있으며 이와 관련하여 지반 구조물 또한 계절적 환경변화에 대응할 수 있도록 설계·시공·유지관리 기술의 정립이 요구되고 있다(Yoo 2011). 즉, 강우로 인해 발생하는 지반구조물의 습윤 과정은 옹벽 배면 토사내의 모관흡수력(matric suction)을 감소시키며 이러한 모관흡수력의 감소는 결국 토압 등 작용외력 및 전단강도 등 저항력의 변화를 유발시키므로 장기적인 시간 의존적 안정성에 많은 영향을 미칠 수 있다. 따라서 옹벽의 장기적인 안정성 관점에서는 이러한 계절적 환경변화로 인한 습윤-건조 반복과정이 지반구조물의 장기 거동에 미치는 영향에 대한 이해가 절대적으로 필요하다고 하겠다(Yoo 2013).

최근 들어 기후 변화로 인한 이슈가 대두됨에 따라 강우가 지반구조물에 미치는 영향에 대한 연구가 불포화토 관점에서 접근되고 있으며 특히 사면 안정성에 관련된 연구가 주를 이루고 있다. 즉, Tsaparas et al.(2002)는 강우가 산사태에 미치는 영향을 연구한 바 있으며 Zhan and Ng(2004)는 수치해석적 접근방법을 이용하여 자연사면을 대상으로 강우강도 및 불포화 특성 변화에 따른 사면의 안전율 변화에 관한 연구를 수행하고 관련 이론을 정립한 바 있다. 이와 아울러 Cheuk et al.(2005)은 홍콩 지역에서 발생하는 집중 강우를 대상으로 성토 사면의 불안정성과 흙의 불포화 특성과의 관계를 분석한 바 있다. 또한 Rahardjo et al.(2007)는 최근 들어 자연사면을 대상으로 사면의 기하조건, 흙의 특성 및 투수계수, 강우특성에 대한 매개변수 연구를 수행하고 그 결과를 통해 이들 영향인자와 사면의 안전율 변화에 대한 특성을 고찰한 바 있다. 아울러 Tohari et al.(2007)은 축소모형실험을 통해 지하수위 상승 및 강우가 사면에 미치는 영향을 파악하였으며 Rahardjo et al.(2010)은 불포화토를 고려한 한계평형해석법을 통해 강우강도가 사면의 안전율에 미치는 영향을 고찰하였다. 최근 들어 Rahimi et al.(2011)은 실측된 강우량과 강우 패턴을 고려한 수치해석적 연구를 통해 강우 패턴에 따라 사면의 안정성이 큰 차이를 보일 수 있다는 점과 동일한 일일 강우량이라도 강우 패턴에 따라 안전율의 차이를 나타

낼 수 있음을 확인하였다.

한편, 국내에서도 불포화토 관점에서 관련연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들어 Lee et al.(2007)은 불포화 사면안정에 미치는 세립분의 영향분석 연구를 수행하였으며 Yoo et al.(2008a, 2008b)은 강우시 보강토 옹벽의 안정성에 대한 연구를 불포화토 관점에서 수행하고 보강토 옹벽의 시간 의존적 안정성에 관한 연구내용을 제시한 바 있다. 아울러 Sagong et al.(2009)은 조립토로 구성된 사면에 있어 토층 두께에 따른 강우의 영향에 대한 평가를 위해 축소 모형실험을 수행한 바 있으며 Lee et al.(2009)은 수치해석적 연구를 통해 강우침투시 강우강도와 포화투수계수가 안전율에 미치는 영향에 관한 연구를 수행한 바 있다. 가장 최근 들어 Yoo(2013)은 계절적 환경변화로 인한 습윤-건조 사이클에 노출되는 옹벽의 거동에 관한 유한요소해석 모델링 기법을 개발하고 매개변수 연구를 수행하여 강우특성에 따른 옹벽의 거동특성을 고찰한 바 있다.

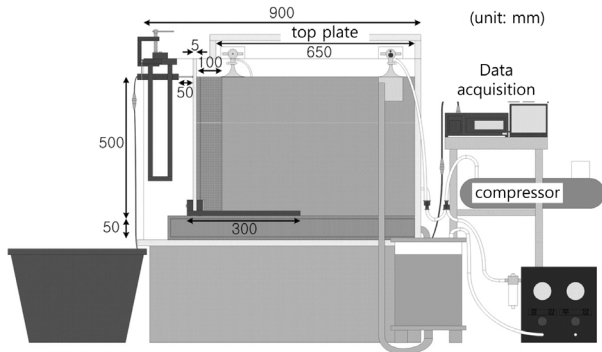
위에 제시한 기존의 연구에서는 습윤-건조 반복작용이 사면 및 옹벽 등에 미치는 중요한 이론적 배경을 마련하는데 큰 역할을 하였다고 할 수는 있으나 옹벽구조물에 대한 구체적인 연구가 수행된 바 없으며 이와 관련된 구체적이고 종합적인 연구는 매우 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 계절적 환경변화가 지반구조물에 미치는 영향에 대한 메카니즘 고찰의 일환으로 일반 옹벽 및 가시설옹벽구조물을 대상으로 습윤 및 건조 반복과정이 옹벽의 거동특성에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 수행하고 그 결과를 종합적으로 분석하였다.

2. 축소 모형 실험

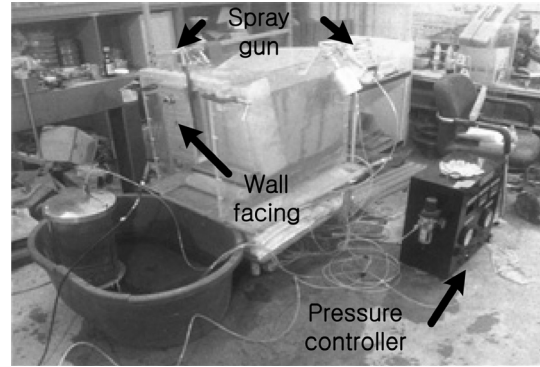
2.1 모형 옹벽 및 강우 시스템

2.1.1 일반옹벽

축소모형실험은 두께 5mm의 아크릴로 구축된 토조를 활용하여 수행하였다. 모형토조 제원은 길이 0.9m, 높이 0.6m, 폭 0.4m이며 두께 20mm의 목재를 이용하여 전면벽체를 구축하였다(Fig. 1). 이때 뒤채움흙과 전면벽체간의 이격된 부분으로 흙입자가 유실되는 것을 방지하기 위해 두께 5mm의 부직포를 벽체 배면에 설치하여 필터의 역할을 하도록 하였다. 한편, 강우 모사를 위해 Fig. 1(b)에서 보이는 바와 같이 스프레이건 및 15마력 컴프레서를 이용하여 분무 시스템을 구축하였으며,

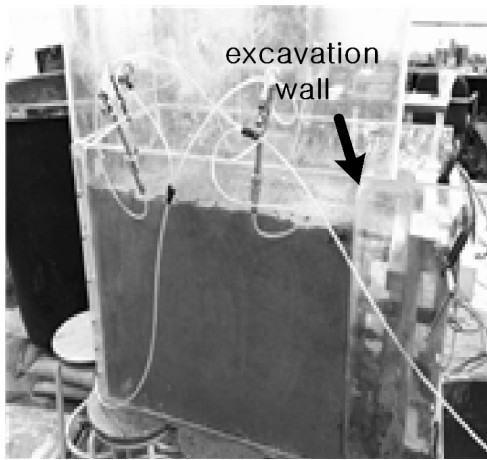


(a) Schematic view

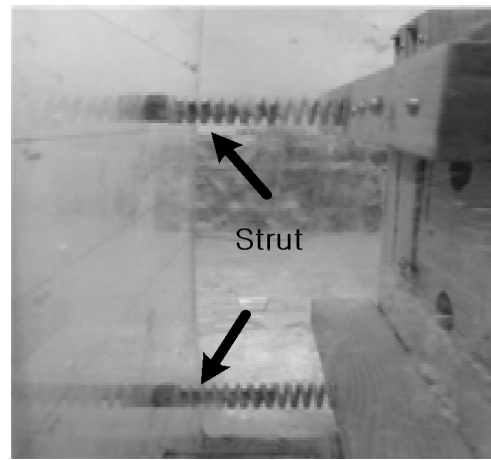


(b) Setup photo

Fig. 1. Reduced-scale model test setup (conventional retaining wall)



(a) Model wall setup



(b) Strut

Fig. 2. Reduced-scale model test setup (braced excavation wall)

이때 스프레이건으로의 물 공급은 물탱크 내부의 공기 압을 조절하여 압력차이로 인해 물탱크 내부에 있는 물이 스프레이 건으로 주입될 수 있도록 하였다. 또한 실험 중에 옹벽전면으로 배수되는 물은 옹벽 전면 수조에 집수되도록 하여 물탱크에 있는 물이 고갈될 경우 물탱크 내부를 부압상태로 만들어 수조에 있는 물이 물탱크로 이동할 수 있도록 고안하였다. 한편, 강우시에는 장기간에 걸친 강우조건을 고려하여 옹벽 배면 상부에 아크릴판을 이용한 덮개를 설치하여 강우시 물이 증발되는 것을 최소화하였다.

한편, 습윤-반복과정의 영향에 대한 평가를 위해 벽체 최상단에 LVDT(Tokyo Sokki, CDP-50)를 설치하고 TDS-303 데이터 로거를 활용하여 지속적으로 측정하여 습윤-반복과정에서 발생하는 벽체의 변위 거동 분석하였다.

2.1.2 시설옹벽

가시설옹벽은 두 단의 버팀보로 지지되도록 구성하

였으며 일반옹벽과 동일한 토조를 활용하여 구축하였다. Fig. 2에서와 같이 흙막이 벽체는 아크릴 판을 이용하여 형성하였으며 스프링계수 11kg/cm의 압축스프링을 활용하여 버팀보를 모사하였다. 강우는 일반옹벽에서 사용된 동일한 시스템을 활용하여 모사하였다.

2.1.3 뒤채움흙 및 강우 시스템

실험에서는 뒤채움흙 혹은 배면토사의 종류에 따른 습윤-건조 반복과정의 영향을 고찰하기 위해 주문진 표준사 및 화강풍화토를 사용하여 축소 모형을 구축하였다. 즉, 일반옹벽의 경우 주문진표준사로 뒤채움을 실시하였으며 가시설옹벽의 경우 모래질의 화강풍화토(Decomposed Granite Soil, DGS)와 #200체 통과량(fine content, FC)을 20%로 증가시킨 실트질 화강풍화토(DGS-FC20)를 이용하여 굴착대상 지반을 구축하였다. 일반옹벽의 경우 주문진 표준사를 일정 높이에서 강사하여 상대밀도 60%로 뒤채움을 실시하였으며 가시설옹벽의 경우 DGS와 DGS-FC20을 10층 다짐을 통해 78%의 다짐도로 굴착지반을

조성하였다. 따라서 일반옹벽 배면토사의 경우 뒤채움 직후의 함수비는 건조상태에 가까웠으며 가시설옹벽의 경우 DGS의 최적함수비인 약 10%내외를 유지하였다.

한편, 아래 Table 1과 2는 각각 주문진 표준사 및 화강풍화토의 지반공학적 특성을 보여주고 있다. 습윤-건조 영향에 대한 보다 구체적인 파악을 위해서는 표준사 및 화강풍화토의 함수특성곡선(soil water characteristics curve) 및 투수계수곡선(hydraulic conductivity function)이 필요하나 실험여건상 포함시키지 못하였다.

2.2 실험 조건 및 방법

2.2.1 습윤-건조과정의 모사

본 연구에서 고찰하고자 하는 옹벽구조물 배면 토체

의 습윤-건조 작용은 결국 강우의 침투(infiltration)와 시간 경과에 따른 건조과정을 의미한다고 하겠다. 따라서 본 연구에서는 습윤과정과 건조과정에 대한 현실적인 모델링 방안을 강구하였으며 이를 위해 최근 3년간 기상정보에 대한 분석을 통해 2011년 7월27일 경기도 동두천에서 측정된 집중강우(Fig. 3)를 모사하였다. 즉, 당시 측정된 1일 강수량 449.5mm을 기준으로 강우시간을 조절하여 강우강도를 변화시키는 방법으로 아래 Table 3과 같은 네 가지 실험조건을 도출하였으며 일반옹벽의 경우 네 가지 실험조건을 모두 수행하고 가시설옹벽의 경우 56L8H 조건에 대한 실험을 수행하였다.

한편 강우로 인한 습윤과정 모사후 건조과정은 24시간 자연건조로 모사하였다. 이때 건조시간은 일반적으

Table 1. Geotechnical properties of Ju Moon Jin Sand

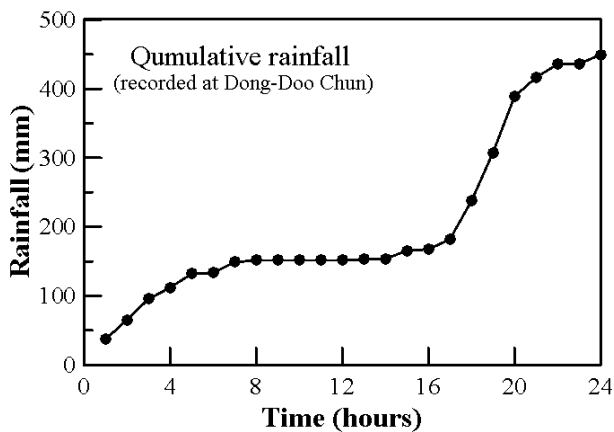
Type	Grain size characteristics	USCS	Dry unit weight	Specific gravity	Cohesion	Internal friction angle
Ju Moon Jin Sand	$D_{10}=0.36$ mm, $C_u = 1.61, C_c = 1.10$	SP	1.68t/m ³	2.6	-	32°

Table 2. Geotechnical properties of decomposed granite soil

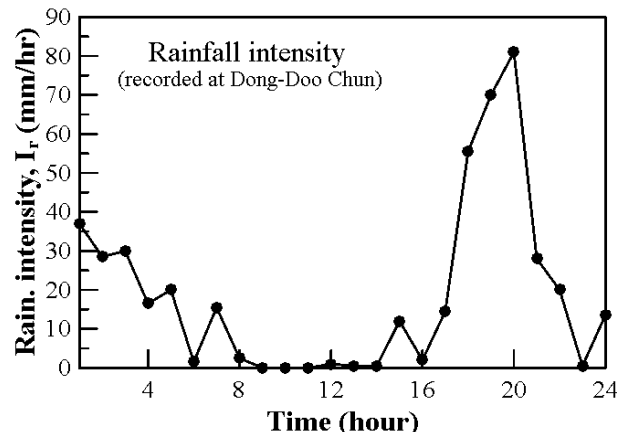
Type	Grain size characteristics	USCS	Max. dry unit weight	Optimum water content	Cohesion	Internal friction angle
Decomposed granite soil	$C_u = 5.29, C_c = 1.02$	SP	18.96 kN/m ³	11.3%	10 kPa	35.3°

Table 3. Cases considered

Case	Rainfall intensity I_r (mm/hr)	Wetting Duration T (hour)	Total rainfall Q (mm)	No. of cycles N_{cy}	Total Duration T (hour)	Retaining wall	Braced excavation
56L8H	56.2	8	449.5	3	96	○	○
28L16H	28.1	16			129	○	
18L24H	18.7	24			144	○	
9L48H	9.4	48			216	○	



(a) Cumulative rainfall



(b) Rainfall intensity

Fig. 3. 2011 Dong-Du Chun rainfall record

로 강우로 인해 사면에 대한 연구를 수행한 Rahardjo et al.(2007)의 연구결과를 반영하여 24시간으로 설정하였으며 이러한 습윤-건조 과정이 총 3회 반복되도록 실험을 수행하였다.

2.2.2 실험 방법

가) 일반옹벽

실험을 수행하는데 있어 강우에 대한 모사 이전 모형 옹벽을 먼저 구축하여 초기조건을 구축하였다. 옹벽 구축시에는 전면벽체를 인위적으로 고정시킨 상태에서 주문진 표준사를 강사하여 60%의 상대밀도로 뒤채움을 수행하였다. 이때 토조 하단부에는 부직포와 주문진 표준사를 이용하여 40mm 두께의 배수층을 형성하였으며 강우는 앞서 언급한 바와 같이 스프레이건을 이용하여 모사하였다. 이때 분사범위를 최대한 하여 균등한 강우가 모사될 수 있도록 하였다.

실험이 진행되는 동안 옹벽의 거동은 벽체 상단에 LVDT를 설치하여 습윤-건조과정에 따른 전 시간대에서의 벽체 변위를 TDS-303 데이터 로거를 활용하여 2초간의 간격으로 수집하였다.

나) 가시설옹벽

가시설옹벽의 경우 버팀보 및 벽체를 설치한 상태에

서 다짐을 통해 지반을 형성한 후 벽체전면의 흠을 제거하는 방법으로 굴착과정을 모사하여 강우 모사전 초기조건을 구축하였다. 이후 강우장치를 토조 상부에 거치시키고 스프레이건에 공기압 및 물 유입 호스를 설치 후 컴프레셔와 수중펌프를 작동시켜 강우 과정을 모사하였다.

습윤-건조에 따른 가시설옹벽의 거동은 벽체 변위계(3개) 및 배면 토압계(1개) 그리고 간극수압계(2개)를 설치하여 관련 데이터를 확보하였으며 이와 아울러 스프링 버팀보 축력은 변위량을 측정하고 이를 스프링계수를 토대로 환산하여 축력 변화를 분석하였다. Fig. 4에서는 계측 센서 위치를 도시하고 있으며 각 계측기의 세부 사양은 Table 4와 같다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 일반 옹벽

3.1.1 강우 강도의 영향

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 강우강도의 영향에 대한 평가를 위해 강우강도를 $I_r = 56.2 \sim 9.4 \text{ mm/h}$ 범위에서 변화시키며 실험을 수행하였다. Fig. 5는 실험

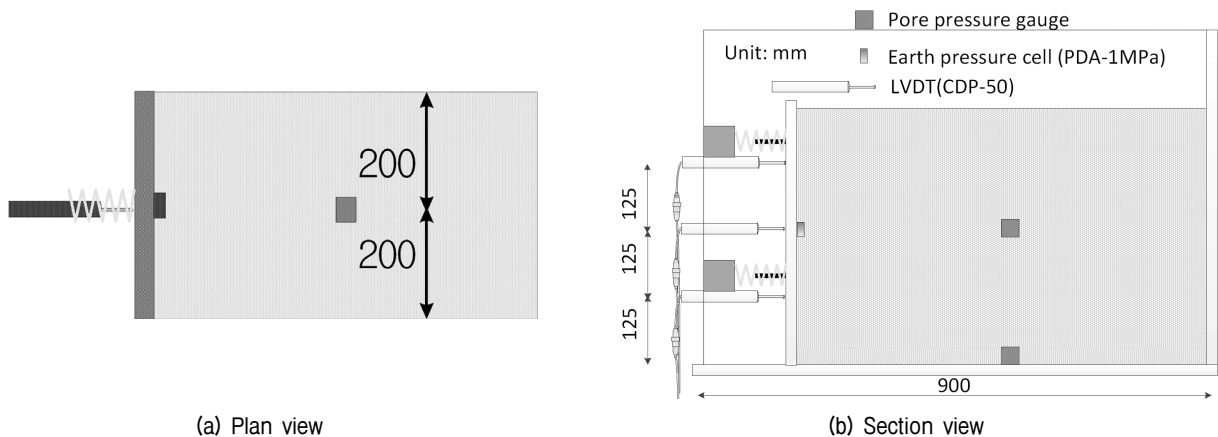


Fig. 4. Instrumentation layout for braced excavation

Table 4. Instrument specifications (braced excavation)

Gauge	LVDT	Earth Pressure sensor	Water Pressure Sensor
Product	CDP-50 (Tokyo Sokki)	PDA-1 MPa (Tokyo Sokki)	BPR-A-200 kPa (Tokyo Sokki)
No. of	3	1	2
Capacity	50 mm	1 MPa	1 MPa
Location	125, 250, 375 mm above base	Behind wall 250 mm above base	35 cm away from wall 0 cm, 250 mm above base

결과를 토대로 전 습윤-건조 사이클에 있어 강우강도 (I_r)에 따른 벽체 변위 발생경향을 보여주고 있다. 여기서 각 실험조건에 대한 범례에서 괄호 안의 숫자는 각 조건별 사이클당 강우시간을 의미한다. 먼저 시간 이력을 보여주고 있는 Fig. 5(a)에서는 강우강도가 증가할수록 벽체 변위가 크게 증가하는 경향을 잘 보여주고 있으며 강우강도에 따른 최대 벽체 변위를 정리한 Fig. 5(b)에서와 같이 강우강도가 5배 증가함에 따라 최대벽체 변위가 9배 이상 증가하는 것으로 측정되었다. 이러한 경향은 수치해석적 연구를 통해 강우강도와 옹벽의 변위의 관계를 고찰한 Yoo(2013)의 연구결과와 잘 일치하는 내용이라고 할 수 있다.

이와 같이 전체적으로 강우로 인해 벽체변위가 증가하는 경향은 수압으로 인한 영향이라기보다는 강우로 인한 모관장력의 감소로 인한 영향을 볼수 있다. 즉, 식 (1)로 정의되는 Bishop(1959)의 불포화토의 유효응력 σ' 에 관한 표현에서 포화도와 같은 개념으로 간주할 수 있는 모관장력 계수 χ 이 증가함에 따라 유효응력이 감소되는 점에 착안할 때 불포화상태의 뒤채움흙에 형성되어 있는 모관장력 $u_a - u_w$ 이 소멸되는 과정에서 유효응력의 감소로 인한 전단강도 저하가 그 원인이라고 할 수 있다.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

여기서, σ 는 전응력, u_a 와 u_w 는 각각 간극내의 공기압 및 수압을 의미한다.

한편, 최근에 자주 발생하는 집중강우를 반영한다고

할 수 있는 **561.8H** 조건에 대한 결과는 배수가 원활한 모래질 흙으로 뒤채움된 옹벽의 경우에도 기후변화로 인한 집중강우시에는 옹벽에 추가 변위가 발생할 수 있으며 강우로 인한 습윤-건조 사이클의 반복으로 인해 옹벽의 장기적인 안정성이 영향을 받을 수 있음을 의미한다고 하겠다. 따라서 최근 우리나라에 자주 발생하는 따라서 향후 성능기반의 옹벽설계를 위해서는 설계연한 동안의 설계 강우강도를 설정하고 이에 대한 영향을 반영하는 시도가 필요하다고 하겠다.

3.1.2 습윤-건조 사이클의 영향

Fig. 6은 세 사이클의 습윤-건조과정이 진행된 각 강우강도에 대한 실험결과를 토대로 각 습윤-건조 사이클에서의 벽체 증분변위 시간 이력곡선을 보여주고 있으며 Fig. 7에서는 각 강우강도별 각 사이클에서의 벽체 증분변위 이력곡선을 보여주고 있다. 따라서 Fig. 6와 Fig. 7은 같은 데이터로 작성된 그래프이다. 이 두 그래프를 종합적으로 관찰하면 강우강도에 관계없이 첫 번째 습윤-건조 사이클에서 벽체 증분변위가 가장 크게 발생하고 그 이후 습윤-건조 사이클에서 발생하는 추가 변위는 사이클이 진행되면서 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 즉, 각 사이클별 최대 증분변위를 나타내고 있는 Fig. 8에서 관찰할 수 있는 바와 같이 강우강도가 56.2mm/h로 가장 큰 **561.8H** 실험 조건의 경우 첫 번째 습윤-건조 사이클에서 약 5mm 정도가 발생하였으나 마지막 세 번째 사이클에서는 2mm 내외의 변위가 발생하는 것으로 분석되었다. 이와 같이 첫 번째 사이클에서 벽체 변위량이 가장 큰 이유는 첫 번째 습윤과정에서

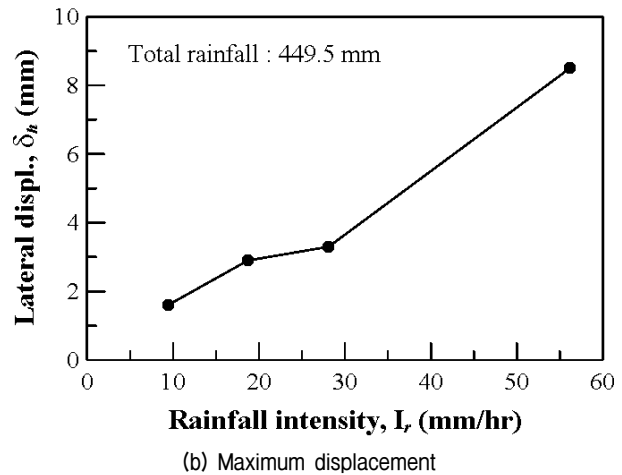
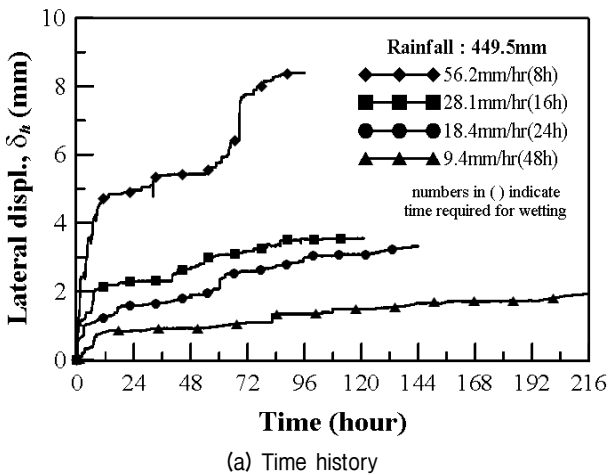


Fig. 5. Effect of rainfall intensity on wall displacement

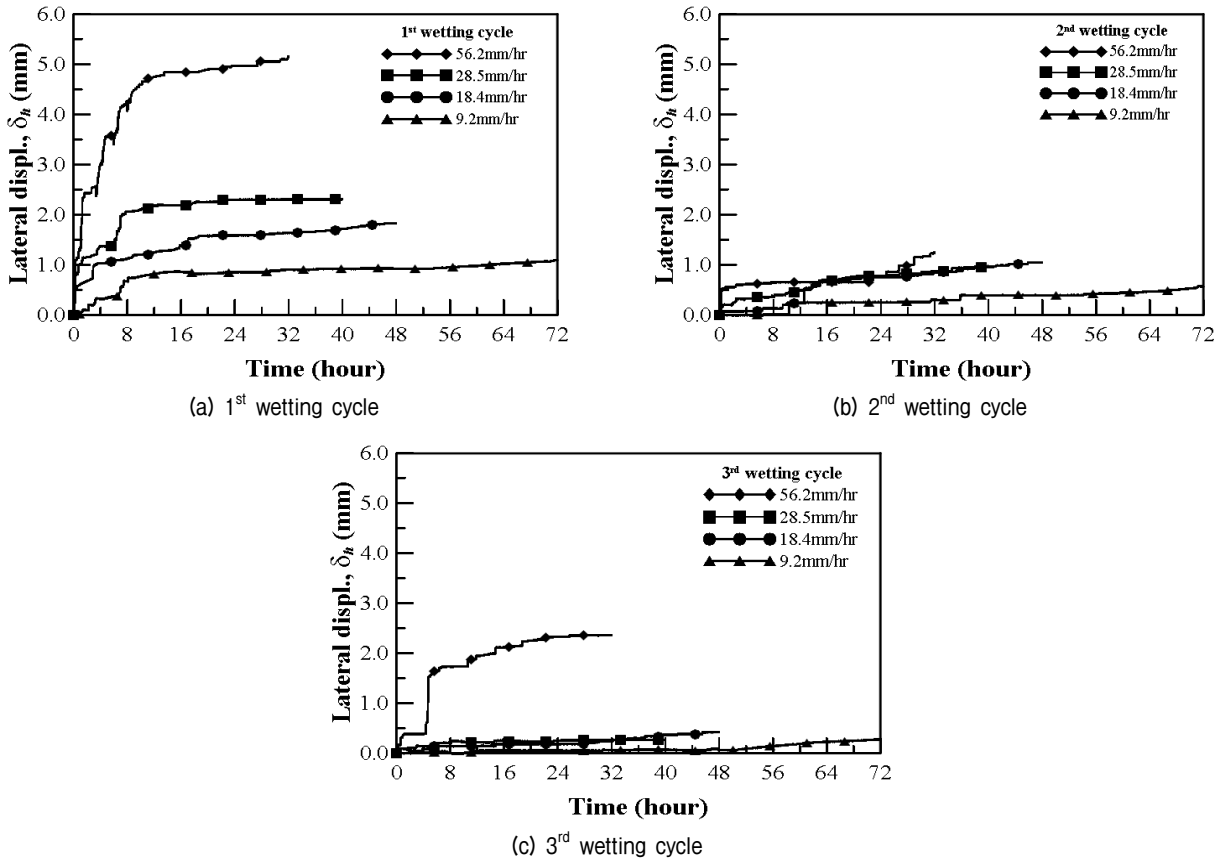


Fig. 6. Time history of incremental wall displacement for each wetting cycle

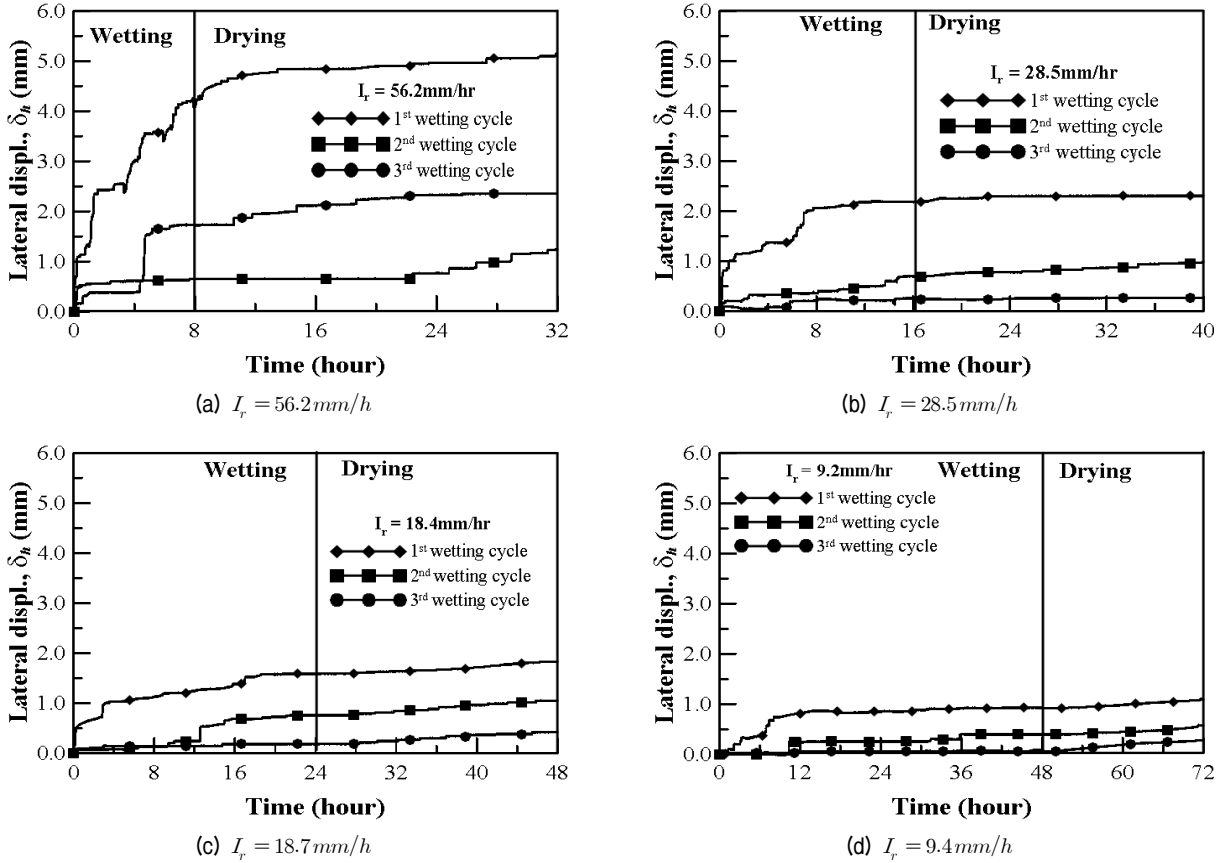


Fig. 7. Variation of displacement-time curve for different wetting-drying cycles (continued)

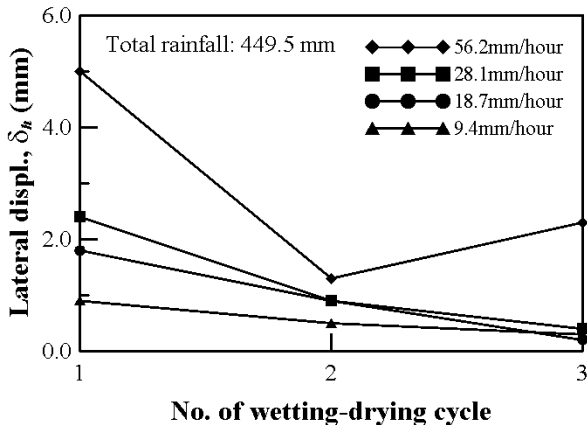


Fig. 8. Incremental wall displacement vs. no. of wetting-drying cycle

발생한 변위가 복원이 되지 않은 상태에서 강우로 인해 재 수침이 되었기 때문으로 판단된다. 한편, 세 번째 사이클에서 **56L8H** 실험 조건에서의 발생변위가 경향을 다소 벗어나는 결과를 보이고 있는데 이에 대한 구체적인 원인은 파악이 불가능하나 실험오차를 반영하는 것으로 판단된다. 이러한 경향을 종합할 때 옹벽의 안정성 측면에서 시공 후 처음으로 겪게 되는 우기가 옹벽의 거동에 중요한 영향을 미치는 인자인 것으로 판단된다.

3.2 가시설옹벽

앞서 기술한 한 바와 같이 가시설옹벽에 대한 실험에서는 배면 토사의 종류에 따른 습윤-건조 사이클 영

향을 고찰하기 위해 화강풍화토 및 화강풍화토의 세립분 함유량을 인위적으로 20%로 증가시킨 조건을 고려하였다.

먼저 Fig. 9에서는 배면토사 종류에 대해 습윤-건조 사이클에 따른 벽체 변위 프로파일을 보여주고 있는데 이 그림에서는 두 가지 중요한 경향을 관찰할 수 있다. 먼저 배면 토사의 종류에 관계없이 습윤-건조 사이클이 진행됨에 따라 벽체변위가 증가하는 경향을 관찰할 수 있으며 세립분 함유량을 인위적으로 20% 정도로 증가시킨 경우에 있어 습윤-건조 사이클에 따른 변위가 더 크게 발생하는 것으로 검토되었다. 각 사이클별 증가량에 있어서는 규칙적인 경향을 보이지는 않으나 전반적으로 가시설옹벽의 경우에 있어서도 굴착 후 강우로 인한 습윤 과정으로 인해 배면 토사의 모관장력이 소멸되면서 전단강도가 감소됨에 따라 벽체변위가 증가할 수 있는 것으로 검토되었다.

한편, Fig. 10에서는 습윤-건조 사이클이 진행됨에 따른 버팀보 축력 변화경향을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 전반적으로 습윤-건조 사이클이 진행됨에 따라 버팀보 축력 또한 증가하는 경향을 관찰할 수 있으며 일반옹벽의 경우에서와 같이 첫 번째 사이클에서의 증가량(최대 45N)이 이후의 사이클에서 증가량보다 현저히 크게 발생하는 경향을 잘 관찰할 수 있다. 또한 배면 토사에 따른 차이를 관찰하면 벽체 변위와 마찬가지로 세립분이 많이 포함된 지반에서 20% 큰 버팀보 축력 증가량을 보였다. 이러한 가시설벽체의 거동은 습윤-건

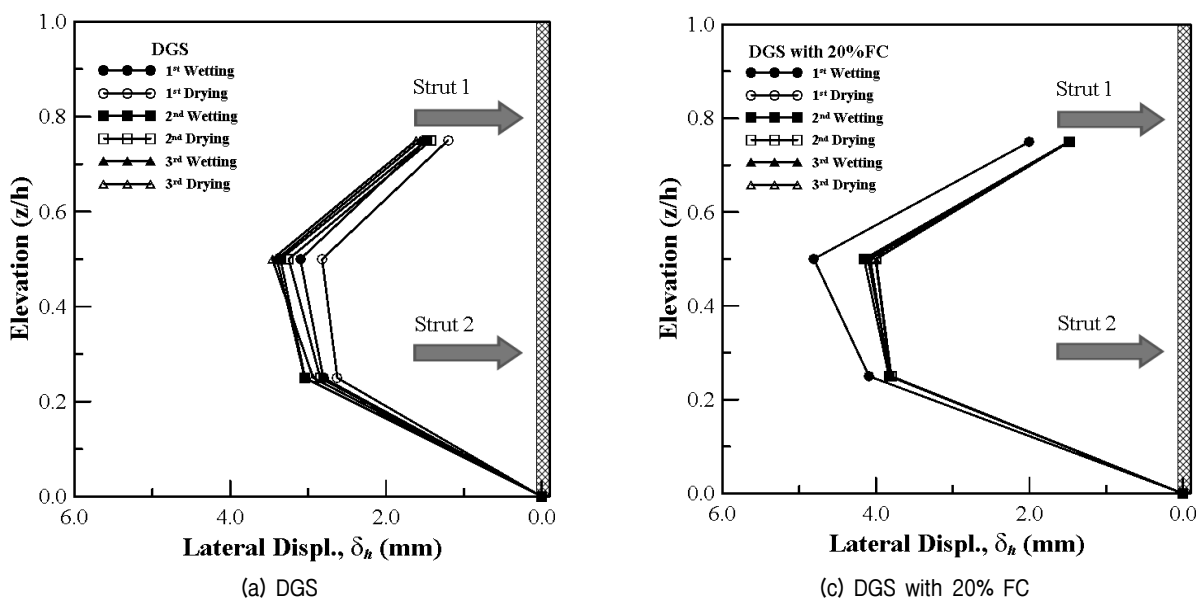
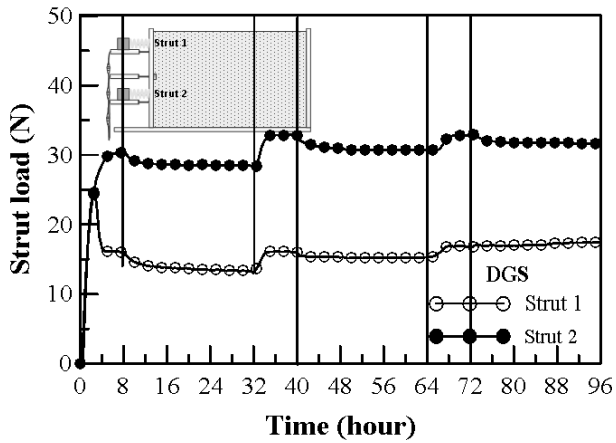
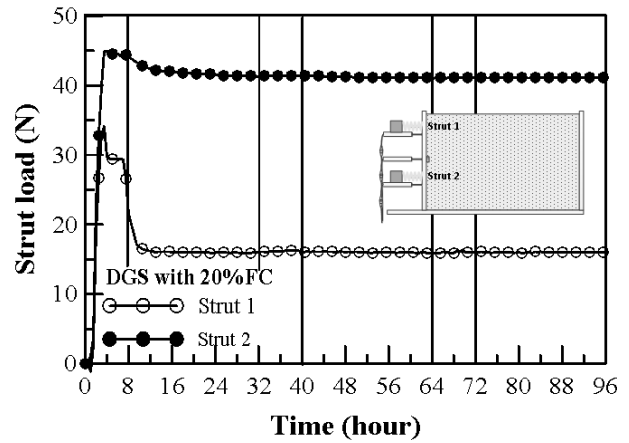


Fig. 9. Progressive development of wall displacement profile with wetting-drying cycles for different retained soils

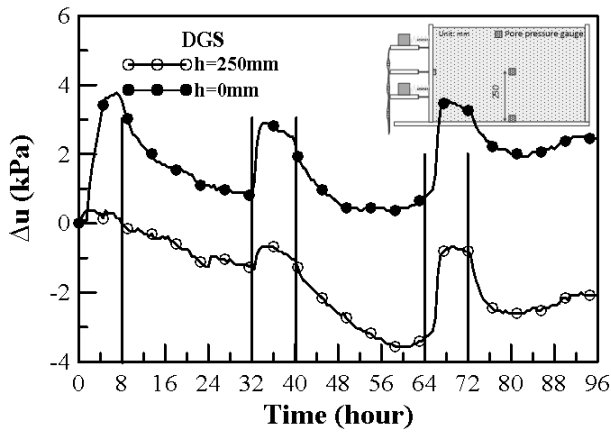


(a) DGS

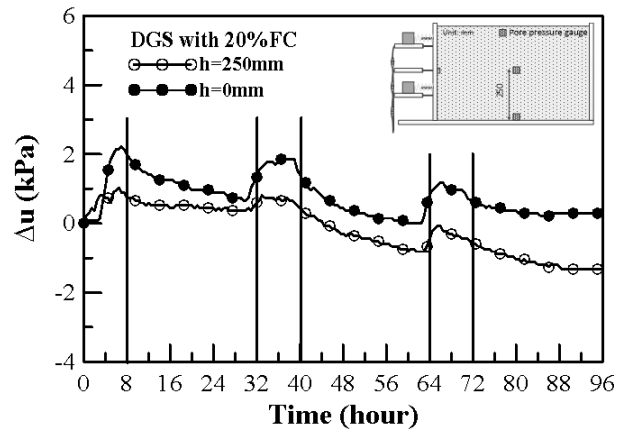


(b) DGS with 20% FC

Fig. 10. Time history of strut load for different retained soils



(a) DGS



(b) DGS with 20% FC

Fig. 11. Time history of pore pressures for different retained soils

조 과정에서 굴착배면지반에서 간극수압이 증가하고 감소하는 주적인 간극수압 변화경향을 반영한다고 할 수 있다. 즉, 가시설옹벽 배면지반내 간극수압변화(Δu) 경향을 나타낸 Fig. 11에서는 습윤-건조 과정에 따른 간극수압의 증가 및 감소 경향을 잘 보여주고 있는데 이러한 과잉간극수압의 변화는 결국 토사의 유효응력의 변화를 가져와 버팀보 축력의 변화에 영향을 미친 것으로 판단된다.

관찰한 바와 같이 가시설옹벽의 경우에 있어서도 일반옹벽과 마찬가지로 습윤-건조 과정이 부과됨에 따라 벽체의 변위 및 버팀보 축력이 증가하는 것을 관찰되었으며 세립분이 많이 함유된 경우 습윤-건조의 영향이 더 큰 것으로 검토되었다. 따라서 국지성 집중호우 등이 기상조건이 예상되는 경우에는 현재 적용하는 겉보기 토압만을 고려하는 현 설계법이 불안전측의 설계가 될 수 있음을 의미하는 것으로서 향후 이러한 국지성 기상조

건을 고려할 수 있는 설계법의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 계절적 환경변화가 지반구조물에 미치는 영향에 대한 메카니즘 고찰의 일환으로 일반옹벽 및 가시설옹벽 구조물을 대상으로 습윤 및 건조 반복과정이 옹벽 구조물의 거동특성에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 수행하고 그 결과를 종합적으로 분석하였다. 이를 위해 먼저 일반옹벽 및 가시설옹벽을 구축하고 이에 강우 모사 시스템을 적용하여 다양한 강우강도 및 지반조건에 대한 실험을 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 주문진 표준사로 뒤채움된 일반옹벽에 대한 실험

결과 강우강도가 증가함에 따라 최대벽체 변위가 증가하는 것으로 검토되어 강우강도가 증가할수록 벽체 변위가 증가하는 것으로 검토되었으며 이러한 경향은 첫 번째 습윤과정에서 발생한 변위가 복원이 되지 않은 상태에서 강우로 인해 재 수침이 되었기 때문에 판단된다. 이러한 경향을 종합할 때 옹벽의 안정성 측면에서 시공 후 처음으로 겪게 되는 우기가 가장 중요한 기간으로 간주되어야 할 것으로 판단된다. 본 실험결과는 강우시 배수가 양호하게 진행되는 조건을 반영하는 것으로 기후변화로 인한 집중강우시에는 배수 시스템이 잘 가동되더라도 옹벽에 추가 변위 발생 등 장기적인 안정성이 영향을 받을 수 있음을 의미한다고 하겠다.

(2) 확장풍화토로 조성된 가시설옹벽에 대한 실험결과 또한 첫 번째 습윤-건조 사이클에서 벽체 증분변위가 가장 크게 발생하고 그 이후 습윤-건조 사이클에서의 변위 증가량은 사이클이 진행되면서 감소하는 경향을 보여 주문진 표준사로 뒤채움한 일반옹벽의 경향과 거의 유사한 것으로 나타났으며 전반적으로 배면토사의 세립분 함유량이 증가할수록 습윤-건조 사이클에 따른 벽체변위 및 버팀보 축력 증가량이 더 크게 발생하는 것으로 검토되었다. 다만 세립분 함유량이 많은 흙의 경우 세립분 함유량이 적은 흙에 비해 첫 번째 사이클 이후의 습윤-건조 사이클에서는 추가 변위 및 축력 증가가 미미한 것으로 나타났는데 이러한 경향은 세립분 함유량에 따른 함수특성의 차이로 인한 것으로 판단되며 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다 한편, 이러한 경향은 국지성 집중호우 등의 기상조건이 예상되는 경우에는 현재 적용하는 겉보기 토압만을 고려하는 현 설계법이 불안전측의 설계가 될 수 있음을 의미하는 것으로서 향후 이러한 국지성 기상조건을 고려하는 설계법의 개발 및 적용이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 일반연구자 지원사업(과제번호 20100008227) 지원으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Bishop, A. W. (1959), The principle of effective stress. Publication 32, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway, pp.1-4.
2. Cheuk, C.Y., Ng, C.W.W., and Sun, H.W. (2005), Numerical experiments of soil nails in loose fill slopes subjected to rainfall infiltration effects. *Computers and Geotechnics*, Vol.32, No.4, pp. 290-303.
3. Lee, K.H., Jeong, S.S., and Kim, T.H. (2007), Effect of Fines on the Stability of Unsaturated Soil Slopes, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.3, pp.101-109.
4. Lee, S.R., Oh, T.K., Kim, Y.K., and Kim, H.C. (2009), Influence of Rainfall Intensity and Saturated Permeability on Slope Stability during Rainfall Infiltration, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.25, No.1, pp.65-76
5. Rahardjo, H., Nio, A. S., Leong, E. C., and Song, N. Y. (2010), Effects of Groundwater Table Position and Soil Properties on Stability of Slope during Rainfall, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.36, No.11, pp.1555-1564.
6. Rahardjo, H., Ong, T.H., Rezaur, R.B., and Leung, E.C. (2007), Factors Controlling Instability of Homogeneous Soil Slope under Rainfall, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.133, No.12, pp.1532-1543.
7. Rahimi, A., Rahardjo, H., Leong, E. C., and M. ASCE. (2011), Effect of Antecedent Rainfall Patterns on Rainfall-Induced Slope Failure, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.137, No.5, pp.483-491.
8. Sagong, M., Yoo, J.H., and Lee, S.J. (2009), Analysis on the Rainfall Triggered Slope Failure with a Variation of Soil Layer Thickness: Flume Tests, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.25, No.4, pp.91-103
9. Tohari, A., Nishigaki, M., and Komatsu, M. (2007), Laboratory Rainfall-Induced Slope Failure with Moisture Content Measurement, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No.5, pp.575-587.
10. Tsaparas, I., Rahardjo, H., Toll, D.G., and Leong, E.C. (2002), Controlling parameters for rainfall-induced landslides. *Computers and Geotechnics*, Vol.29, No.1, pp.1-27.
11. Yoo, C. (2011), Effect of Cyclic Drying-Wetting on Compressive Strength of Decomposed Granite Soils, *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol.10, No.4, pp.11-20.
12. Yoo, C. (2013), Numerical Investigation into Behavior of Retaining Wall Subject to Cycles of Wetting and Drying, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.1, pp.13-22.
13. Yoo, C., Kim, S.B., and Han, J.Y. (2008b), Numerical Investigation on the Stability of Reinforced Earth Wall during Rainfall, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.12, pp.1-12.
14. Yoo, C., Kim, S.B., and Jung, H.S. (2008a), Performance of a Chimney Drain in Reinforced Earth Wall for Reduction of Pore Water Pressure During Rainfall - a Numerical Investigation, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.5, pp.99-106.
15. Zhan, L.T. and Ng, C.W.W. (2004), Analytical Analysis of Rainfall Infiltration Mechanism in Unsaturated Soils. *International Journal of Geomechanics*, Vol.4, No.4, pp.273-284.

Received : July 9th, 2013

Revised : September 21st, 2013

Accepted : November 12th, 2013