

강우시 보강토 옹벽의 안정성에 관한 수치 해석 연구

Numerical Investigation on the Stability of Reinforced Earth Wall during Rainfall

유 충 식¹ Yoo, Chung-Sik

김 선 빈² Kim, Sun-Bin

한 준 연³ Han, Joon-Yeon

Abstract

This paper presents the results of numerical investigation on the stability of reinforced earth wall during rainfall. A series of limit-equilibrium based slope stability analyses within the framework of unsaturated shear strength, coupled with transient seepage analyses, were conducted with due consideration of rainfall characteristics in Korea. It is shown that the factor of safety of the reinforced wall during rainfall decreases with time due to decreases in the suction in the reinforced as well as retained zones. Also revealed is that the decrease in the factor of safety depends not only on the backfill soil type but also on the rainfall characteristics. Practical implications of the findings were discussed.

요 지

본 연구에서는 국내 여름철 장마기간 강우조건에 대해 보강토 구조물의 안정성을 정량적으로 분석하고 이에 대한 대책을 마련하기 위한 연구의 일환으로서 국내 강우자료를 바탕으로 보강토 옹벽에 대해 다양한 매개변수 연구를 수행하였다. 이를 위해 가상의 보강토 옹벽 시공조건에 대해 국내 강우 특성을 토대로 다양한 강우조건에 대한 부정류 침투해석을 수행하고 그 결과를 불포화토 전단강도가 고려된 한계평형해석 기반의 사면안정해석에 반영하여 강우시 시간에 따른 안전율 변화 경향을 고찰하였다. 그 결과 보강토 옹벽의 안정성은 강우시 보강토체 및 배면토체의 모관흡수력 저하로 인해 위협받을 수 있는 것으로 나타났으며 강우가 안정성에 미치는 영향은 뒤택음흡의 종류 및 강우특성에 영향을 받는 것으로 분석되었다.

Keywords : Reinforced earth wall, Seepage analysis, Slope stability analysis, Suction, Transient flow, Unsaturated shear strength

1. 서 론

최근에 들어 국내 여름철 강우 특성은 국지화 및 집중화로 특정지을 수 있다. 이로 인해 최근 5년간 여름철 강우시 많은 토류 구조물이 붕괴된 것으로 보고되고 있다.

이러한 여름철 토류구조물 붕괴사고는 강우의 침투로 인한 모관흡수력 감소로 인한 흙의 전단강도 감소 및 하중 지지력 감소에 그 원인이 있다(유충식 등, 2004, 2005; Koerner & Soong, 2001; Yoo & Jung, 2005). 즉, 식 (1)과 같이 정의 되는 불포화토의 유효응력 σ' 은 강우로 인해

1 정회원, 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수 (Member, Prof. Dept. of Civil & Envir. Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

2 정회원, 성균관대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Member, Graduate Student. Dept. of Civil & Envir. Engrg., Sungkyunkwan Univ., ksb9677@hanmail.net, 교신저자)

3 성균관대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 (Graduate Student. Dept. of Civil & Envir. Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

모관흡수력($u_a - u_w$)이 감소하면 유효응력 또한 감소하여 식 (2)로 정의 되는 불포화토의 Mohr-Coulomb 파괴규준 (Fredlund 등, 1978)에 근거한 전단강도 또한 감소하여 강우시 사면 등 토류구조물의 안정성은 감소하게 된다.

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

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2)$$

이에 국내외 많은 연구자들이 강우시 자연 혹은 인공사면의 안전율에 관한 연구를 수행해 온바 있다. 예를 들어 Tsaparas 등(2004)은 강우시 발생하는 산사태의 영향인자에 관한 연구를 수행하여 흙의 침투특성과 강우강도 등 다양한 영향인자들이 산사태에 미치는 영향을 고찰하였다. 한편, Chen 등(2003)은 홍콩 지역을 대상으로 강우시 발생하는 성토사면의 붕괴 메카니즘을 흙의 불포화 특성과 연계하여 분석하였다. 또한 Zhan & Ng(2004)는 해석적 접근 방법으로 불포화토에 있어서의 강우 침투에 관한 메카니즘을 규명한 바 있다. 최근의 연구로는 Rahardjo 등(2007)의 연구를 들 수 있는데 이들은 사면을 대상으로 사면의 기하조건, 흙의 특성 및 투수계수, 강우 특성에 대한 매개변수 연구를 수행하고 그 결과를 통해 이들 영향인자와 사면의 안전율 변화에 대한 특성을 고찰하였다. 이러한 대부분의 연구는 홍콩 또는 열대지방의 사면과 강우조건을 대상으로 수행되었으며 옹벽, 특히 우리나라에서 많이 시공되고 있는 보강토 옹벽에 대한 구체적인 연구는 수행되지 않고 있어 이에 대한 구체적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 이러한 관점에서 국내 여름철 장마기간 강우조건에 대해 보강토 구조물의 안정성을 정량적으로 분석하고 이에 대한 대책을 마련하기 위한 연구의 일환으로서 국내 강우자료를 바탕으로 보강토 옹벽에 대해 다양한 매개변수 연구를 수행하였다. 이를 위해 불포화토 개념이 접목된 유한요소해석 개념의 부정류해석을 수행하였으며 이를 불포화토 전단강도 개념에 근거한 한계평형해석과 연계시켜 강우가 보강토 옹벽의 안정성에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 최근 국내 강우특성

장마기간 동안의 강수량은 우리나라 연 평균 강수량의 70~80%를 차지하는 것으로 알려져 있다. 기상청 자료를 토대로 한 최근 4년간의 집중강우 기간 강우량을 조사한 결과 표 1에서 보이는 바와 같이 지역별로 다소 차이가 있어 적게는 570mm, 많게는 1300mm 가량이며, 이에 대한 평균 수치는 700~1000mm인 것으로 조사되었다. 이러한 강우 수치는 보강토 구조물을 비롯한 다양한 토류구조물의 안정성에 지대한 영향을 미칠 수가 있으므로 설계와 시공시 이에 대한 고려가 반드시 필요함을 보여주고 있다.

3. 매개변수 연구

3.1 대상 보강토 옹벽

본 연구에서는 국내 여름철 집중강우시 보강토 옹벽

표 1. 국내 여름철 총강우량 분포 (단위 : mm)

구분	서울	부산	대전	목포	강릉	
2007년	7월	274.1	275.7	301.5	191.9	311.2
	8월	237.6	373.5	128.1	222.6	158.9
	9월	241.9	549.9	210.2	426.5	503.3
	소계	753.6	639.8	1199.1	841.0	973.4
2006년	7월	168.5	131.0	175.4	191.9	757.8
	8월	1014	531.0	591.7	333.3	204.1
	9월	121.2	113.6	68.0	177.7	88.3
	소계	1303.7	835.1	775.6	702.9	1050.2
2005년	7월	269.4	209.6	314.4	209.7	218.7
	8월	285	463.3	211.3	197.1	201.0
	9월	313.3	499.5	177.0	143.1	557.5
	소계	867.7	702.7	1172.4	549.9	977.2
2004년	7월	510.7	383.5	91.7	375.4	224.5
	8월	193.3	391.0	249.0	351.4	404.1
	9월	198.7	198.3	231.2	226.4	503.4
	소계	902.7	571.9	972.8	953.2	1132

의 안정성 변화에 관한 매개변수 연구를 위해 그림 1에 제시되어 있는 높이 7.9m의 옹벽을 고려하였다. 그림 1에서 보이는 바와 같이 해석 대상 보강토 옹벽은 장기설

계인장강도가 20kN/m인 지오그리드가 길이 0.7H, 연직 간격 600mm로 포설되는 것으로 가정하였다.

3.2 매개변수 조건

매개변수 연구에서는 아래 표 2에서와 같이 강우강도 (I_r)와 강우지속기간(t), 그리고 뒤채움흙 종류를 영향인자로 간주하고 이들의 조합으로 형성된 세 개의 시리지를 고려하였다. 즉, 매개변수 선정시 강우조건은 앞서 2004년에서 2007년까지 국내 5개 지역에 대한 강우특성을 조사한 결과를 토대로 3개월 동안 내린 총 강우량 700~1500mm 범위에 대한 해석을 수행하였으며, 뒤채움흙으로는 우리나라에서 일반적으로 화강풍화토를 뒤채움흙으로 활용하는 상황을 고려하여 SW와 SM으로 분류되는 화강풍화토를 대상으로 선정하였다.

한편, 뒤채움흙으로는 국내 시공환경을 고려하여 배수가 양호한 SW에 해당하는 흙과 배수성이 좋지 않은

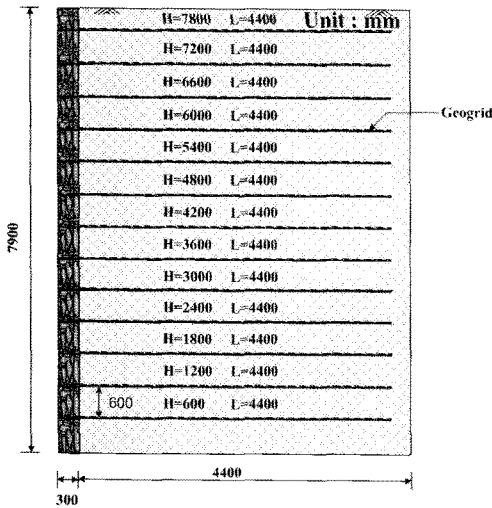
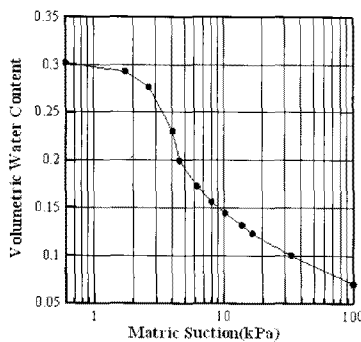


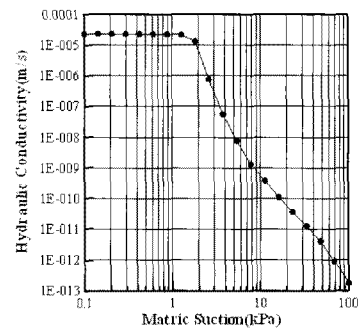
그림 1. 검토대상 옹벽 제원

표 2. 매개변수 해석조건

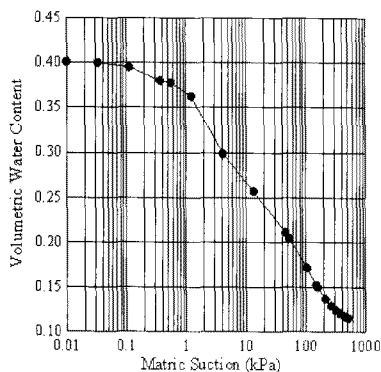
시리즈	매개변수 항목	해석조건	뒤채움흙	비고
A	강우강도(I_r)	$I_r = 20, 50, 100\text{mm/day}$	SM, SW	강우지속기간 10일
B	강우 지속기간(t)	$t = 5, 10, 20\text{days}$		총 강우량 500mm
C	3개월간 총강우량(R_t)	$R_t = 700, 900, 1100, 1300, 1500\text{mm}$		강우지속기간 3개월



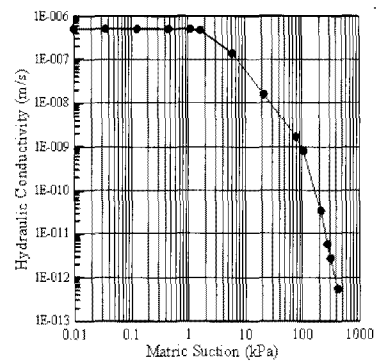
(a) SWCC(SW)



(b) 투수계수곡선(SW)



(a) SWCC(SM)



(b) 투수계수곡선(SM)

그림 2. 뒤채움흙의 SWCC 및 투수계수곡선

SM에 해당하는 흙을 고려하였다. 각 뒤채움흙에 대한 역학적 특성과 불포화 수리 특성은 아래 그림 2에 제시한 바와 같다. 여기서 불포화 투수 특성은 본 연구에서 고려되는 SW와 SM에 해당되는 흙에 대해 일반적으로 보고되는 데이터를 활용하였다(GeoStudio 2004).

3.3 해석 모델링

1) 부정류 침투해석

본 연구에서와 같이 강우시 토류구조물에 침투가 발생할 경우 시간경과에 따른 안정성을 고찰하기 위해서는 불포화토 개념의 부정류 침투해석이 필요하다. 본 연구에서는 상용 프로그램 SEEP/W(GeoStudio 2004) 이용하여 유한요소해석을 수행하였으며 이때 적용되는 불포화 흐름의 2차원 지배방정식은 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_w \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) = m_w \rho_w g \frac{\partial h_w}{\partial t} \quad (3)$$

여기서, k_w 와 h_w 는 각각 흙의 투수계수 및 수두, m_w 는 흙의 함수특성을 나타내는 SWCC의 경사, ρ_w 는 물의 단위중량, 그리고 g 는 중력가속도를 의미한다. 식 (3)의 좌변은 Darcy의 법칙에 근거한 흙속에서의 물의 흐름을 나타내며, 우변은 단위시간에서의 흙 속에 존재하는 물의 체적 변화를 의미한다.

그림 3은 대상 옹벽의 부정류 침투해석시 적용한 유한요소모델을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 유한요소해석에서는 해석 모델링에 있어 지반은 4절점 평면변형요소를 적용하였으며 경계조건의 설정에 있어서 하부 기초지반의 측면 경계면(D-E, G-H)에는 지하수위를 고려하여 일정수두조건을 지정하였으며, 하단 경계면에는 'no flux'의 경계조건을 설정하였다. 한편, 지하수위

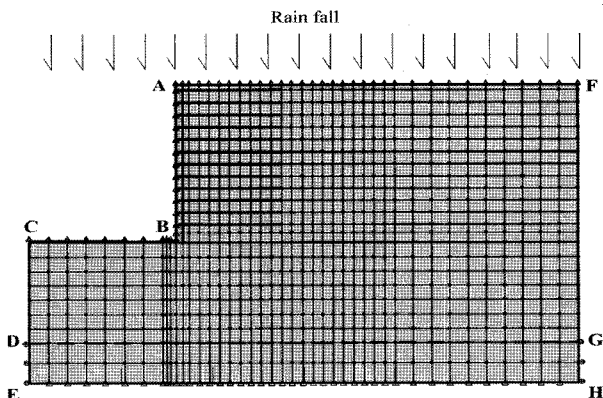


그림 3. 해석에 적용된 유한요소망

는 옹벽 기초 하부 5m에 위치하는 것으로 가정하였으며 고려대상 보강토 옹벽의 전면벽체와 쇄석 배수층은 배수기능이 충분히 발휘되는 경우를 대상으로 하였다.

한편, 부정류 침투해석의 결과는 해석이전 초기 간극수압 분포 결과에 좌우되므로(Blake 2003) 부정류 해석 실시 이전에 아래 제시된 2005년 5~6월의 강우 기록을 이용하여 초기 간극수압 분포를 구현하였다(그림 4).

2) 사면안정해석 모델링

사면안정해석은 SEEP/W를 이용한 침투해석에서 산정된 시간대별 도메인의 간극수압의 결과를 연계하여 불포화토 전단강도 개념의 사면안정해석(Bishop 방법)이 가능한 SLOPE/W(GeoStudio 2004)를 사용하였다. 한편, 사면안정에 있어 필요한 전단강도 정수로서 SW는 $c'=5\text{kPa}$, $\phi'=30^\circ$, 그리고 SM은 $c'=13\text{kPa}$, $\phi'=22^\circ$ 를 적용하였다. 한편, 불포화전단강도 평가에서 필요한 ϕ^b 즉, 모관흡수력에 비례하는 전단강도 증가율을 나타내는 저항각은 기존 연구에 근거하여 두 종류의 흙 공히 $\phi^b=10^\circ$ 로 적용하였다. 그림 5는 침투해석과 사면안정해석의 연계개념을 보여주고 있다.

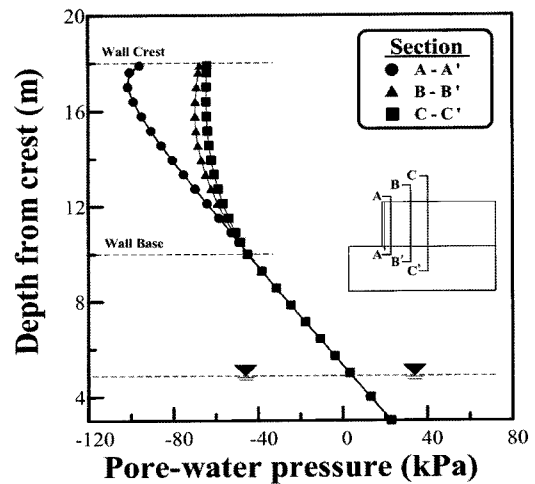


그림 4. 초기 간극 수압 분포도

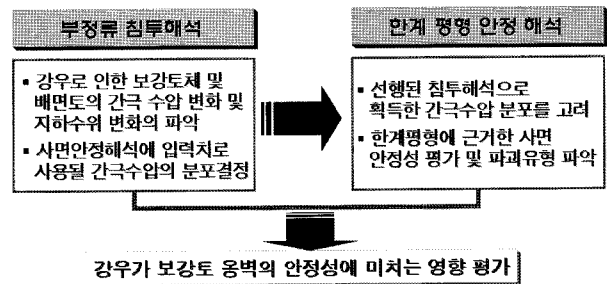


그림 5. 침투해석-사면안정해석 연계 개념

4. 결과 분석

4.1 강우시 안전율 변화 메커니즘

매개 변수 연구에 앞서 강우시 보강토 옹벽의 안전율 변화 메커니즘을 고찰하기 위해 국내 강우 조건을 고려하여 앞서 기술한 보강토 옹벽에 대해 SM에 해당하는 뒤채움흙이 적용된 시공조건에 대한 침투해석 연계 사면안정해석을 수행하였다. 해석에서는 그림 6에서 보이는 바와 같이 ○○지역에 대한 2007년 기상청 강우정보

에서 획득한 7~9월 3달간의 강우기록을 적용하였는데 고려된 강우 조건은 총 강우량이 약 1038mm이며, 최대 강우강도는 144.5mm/day로서 조사되었다.

그림 7은 7~9월 동안의 시간대별 해석 도메인에서의 간극수압 분포 등고선을 보여 주고 있으며 그림 8은 세 단면(단면 A-A', B-B', C-C')에서의 간극수압 변화 경향을 보여 주고 있다. 보이는 바와 같이 7월부터의 강우로 인해 보강토체 및 배면토체에서의 모관흡수력이 점차 소멸되어 9월에는 모관흡수력 전체가 소멸되는 경향을 관찰할 수 있다. 보다 구체적으로 관찰하면 270mm의

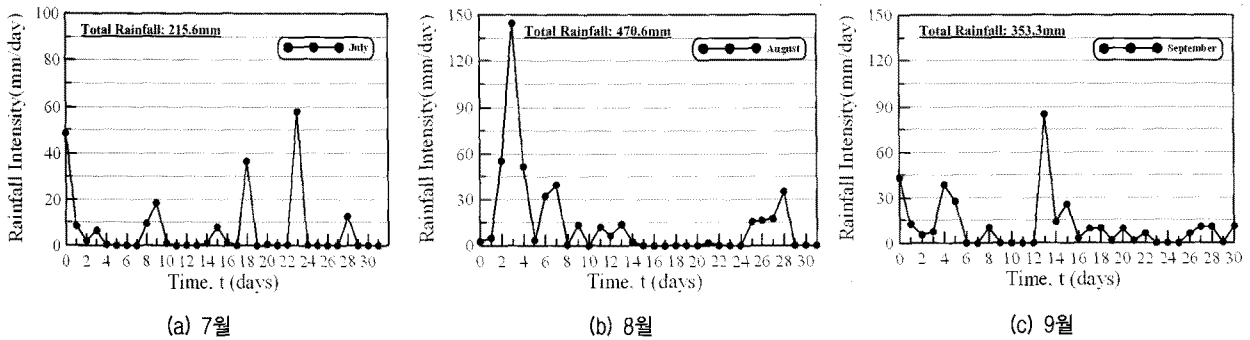


그림 6. 2007년 ○○지역 강우자료(기상청)

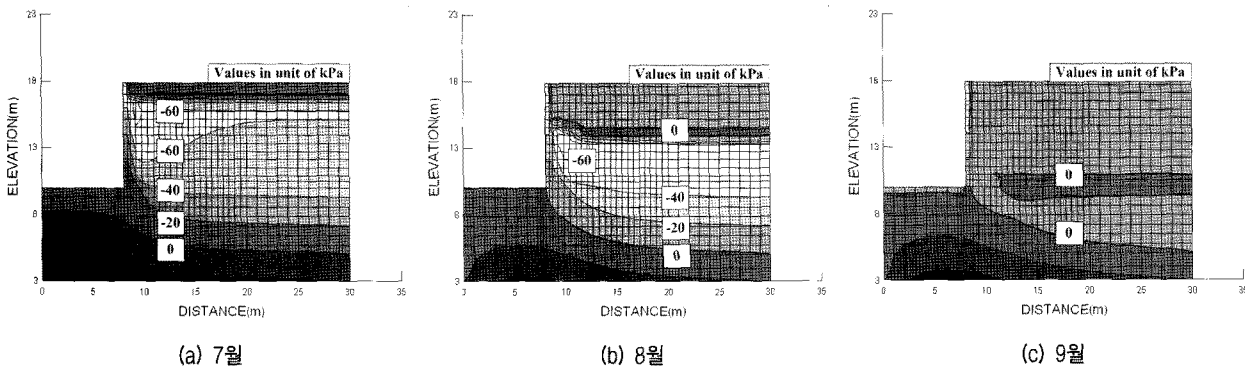


그림 7. 배면 간극수압 분포 및 최소안전율

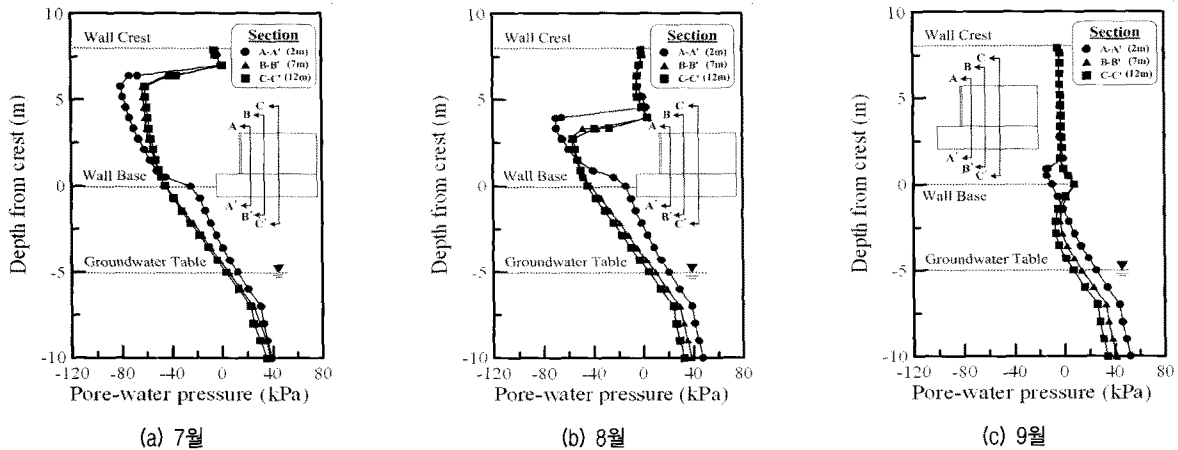


그림 8. 단면별 배면 간극수압 분포

강우가 발생한 7월에는 지표 상부로부터 1.5m 하부지점까지 모관흡수력이 소멸되는 것으로 나타나고 있으며, 470mm가 내린 8월 강우조건에서는 지표 상부로부터 4.0m 하부지점까지 그리고 353mm가 내린 9월 강우 이후 옹벽 최하단 위치까지 모관흡수력이 소멸되는 것으로 나타났다.

위 그림에서 관찰된 강우 침투가 보강토 옹벽의 안전성에 미치는 영향은 강우 기록과 함께 보강토체내 임의 지점에서의 모관흡수력, 전단강도, 그리고 안전율 경시변화를 보여주고 있는 그림 9에서 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 여기서 보강토의 안전율은 내·외적 안정성 및 전반 안정성에 대한 결과로 표현할 수 있으나 보다 일반적인 결과로 표현하기 위해 전반활동에 관한 안전율로서 표현하였다.

먼저 그림 9(b) 및 9(c)에서와 같이 옹벽 배면에서 2, 5, 8m 하단에서의 전단강도는 강우로 인한 모관흡수력의 감소로 인해 최대 35% 정도 감소하는 것으로 나타났으며 안전율 또한 약 1.5에서 1.1정도까지 감소하여 최대 27%정도 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 우리나라에서 3개월 동안의 집중되는 강우는 보강토 옹벽의 안정성에 심각한 영향을 줄 수 있음을 보여주는 것으로서 부적절한 설계 혹은 시공으로 인해 평상시 안전율이 그다지 크지 않은 경우에는 최근 우리나라 여름철 강우시 안정성에 충분히 문제가 발생할 수 있음을 보여주는 결과라고 하겠다. 특히 8월 집중호우(150mm/day) 및 9월 집중호우(80mm/day) 발생 이후의 결과를 보면

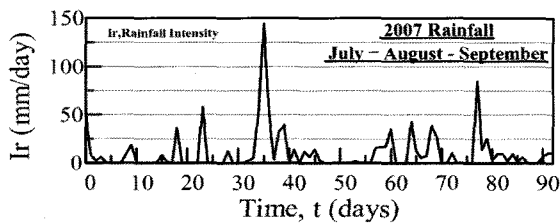
모관흡수력이 급격히 감소함에 따라 해당 지점의 전단강도 및 안전율이 현저히 감소하고 있음을 볼 수 있다. 주목할 만한 사항은 강우 직후가 아닌 집중호우 발생 10일 경과 후에 이 같은 현상이 발생한다는 점인데, 이러한 경향은 보강토체 및 성토체 내부로 물이 침투되는 속도 때문이며 따라서 우리나라와 같이 뒤택음흡수로서 세립분이 많이 포함된 SM 정도의 화강풍화토를 적용하는 경우에는 집중강우 발생 종료 후에 옹벽에 구조적인 문제가 발생할 수 있음을 보여주고 있다.

4.2 안전율 변화 영향인자 분석

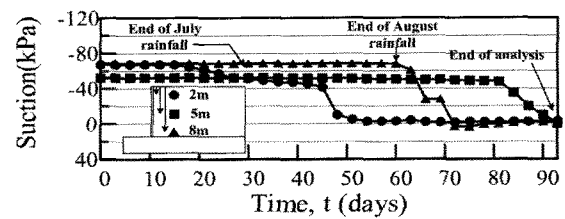
1) 강우강도의 영향

그림 10과 11은 두 종류의 뒤택음흡수에 대해 10일간의 강우시 강우강도 I_r 에 따른 안전율 변화 경향을 보여주고 있다. 즉, 그림 10에서는 20~100mm/day의 강우가 10일간 지속 되는 경우에 있어서 안전율 경시변화를 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 안전율이 SW의 경우 1.35에서 1.0으로 감소되고 SM의 경우 1.4에서 1.1로 감소하는 경향을 보이고 있다. 앞서 관찰한 바와 같이 SW 경우 최소 안전율 발생 시점이 강우 종료시기와 일치하나 SM의 경우 강우 종료 20일 후 발생하고 있는데 이러한 경향은 우리나라와 같이 세립분이 다량 포함된 뒤택음흡수를 사용하는 경우에는 강우로 인한 문제가 강우 종료 후에 발생할 수 있음을 말해 준다고 하겠다.

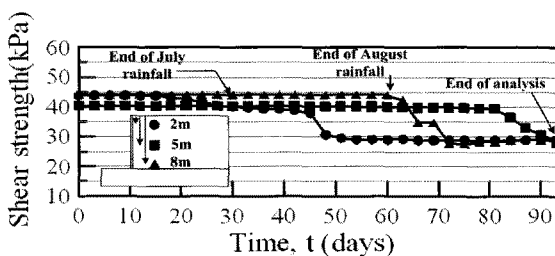
한편 그림 11은 10일 동안의 강우에 대해서 강우강도



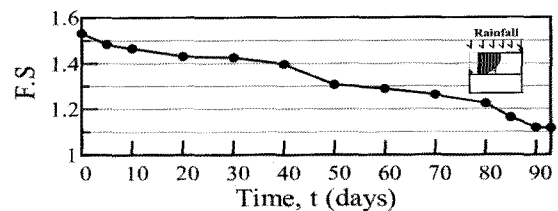
(a) 시간-강우량



(b) 시간-모관흡수력



(c) 시간-전단강도



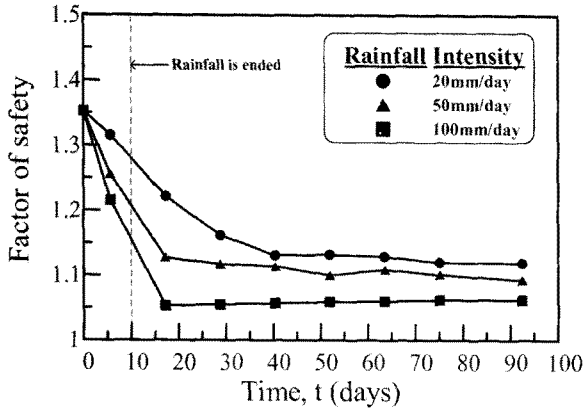
(d) 시간-안전율

그림 9. 시간이력에 따른 강우/모관흡수력/전단강도/안전율 변화

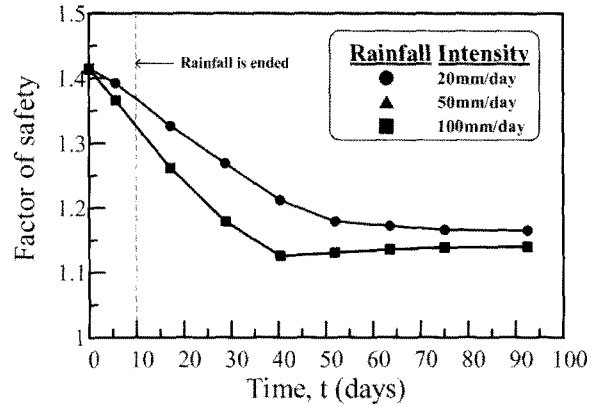
별로 최소 안전율을 변화 경향을 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 20mm/day 이상에서는 안전율을 감소율이 현격히 떨어지는 경향을 보이고 있어 보강토 옹벽의 안전율 감소에 영향을 미치는데 있어 임계 강우 강도가 존재함을 의미한다고 할 수 있으며 이는 Rahardjo 등(2007)의

연구결과와 유사한 것으로 나타났다.

그림 12와 13은 7~9월 90일 동안의 총 강우량에 대한 안전율에 대한 결과를 보여주고 있다. 먼저 총 강우량에 따른 90일 동안의 안전율 경시변화를 보여주고 있는 그림 12에서는 예상할 수 있는 바와 같이 뒤택음흡의

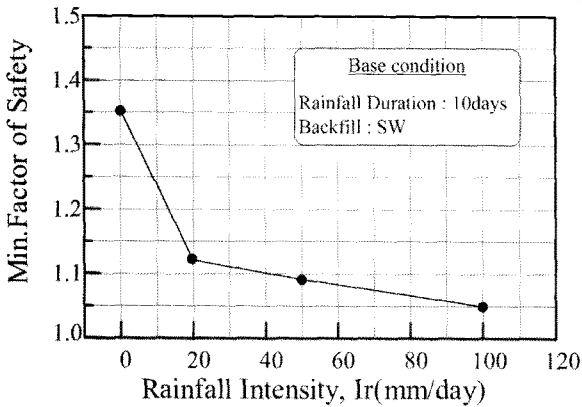


(a) 뒤택음 흡-SW

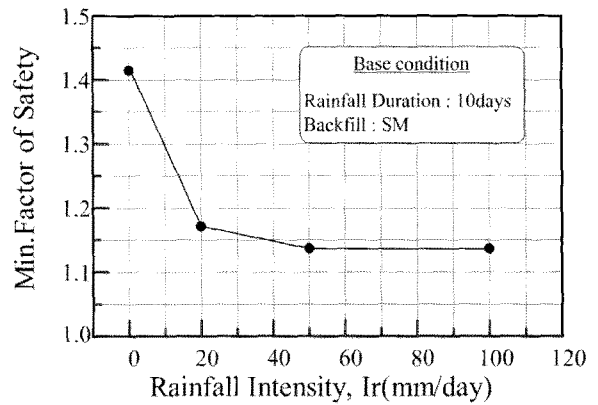


(b) 뒤택음 흡-SM

그림 10. 강우강도에 따른 안전율 경시변화(강우 지속기간 : 10일)

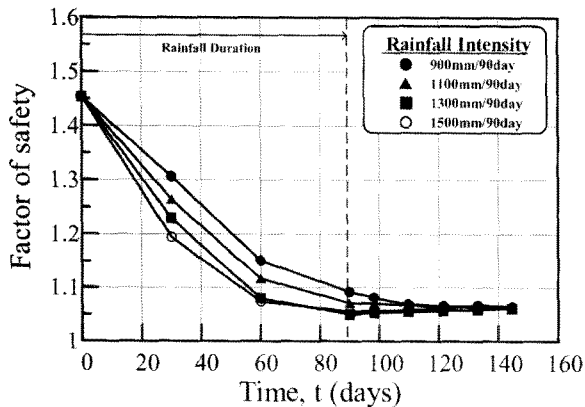


(a) 뒤택음 흡-SW

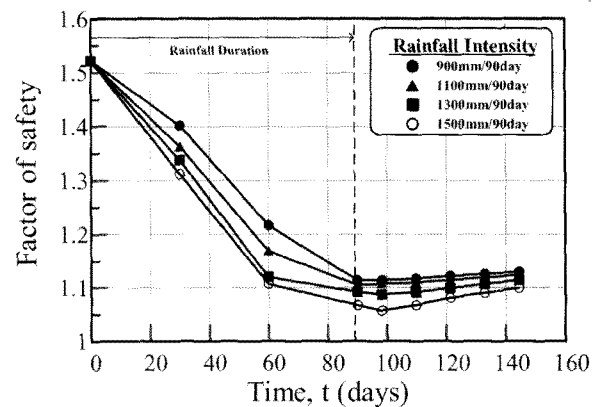


(b) 뒤택음 흡-SM

그림 11. 강우강도에 따른 최소안전율 변화(강우 지속기간 : 10일)



(a) 뒤택음 흡-SW



(b) 뒤택음 흡-SM

그림 12. 시간이력에 따른 안전율 변화 추이(강우지속기간 : 90일)

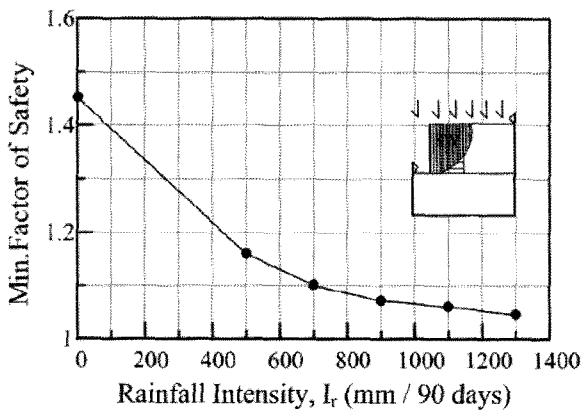
종류에 관계없이 총 강우량이 클수록 안전율 감소정도가 큰 것으로 나타났다. 여기서 관찰할 수 있는 흥미로운 경향은 강우 개시 후 임의의 시간에서의 총 강우량 변화에 따른 안전율 차이가 가장 크게 발생하는 시점이 강우 종료가 아니라 강우 종료 이전이라는 점이다. 즉, 뒤택음흙에 관계없이 강우 종료시(강우 개시 후 90일) 보다는 그 사이 기간, 즉 강우 개시 후 30~60일 경과 시점에서 크게 발생하는 경향을 보이고 있으며 그 차이가 가장 크게 나타나는 시점은 침투에 상대적으로 많은 시간이 요구되는 SM 뒤택음흙에서 다소 늦은 것으로 관찰되었다.

한편, 그림 13은 그림 12에서의 결과에서 최소 안전율을 추출하여 도시한 총 강우량에 따른 최소안전율 변화 경향을 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 두 종류의 뒤택음흙 공히 90일 동안 500mm 정도의 강우 발생시, 즉 강우 강도 6mm/day에서 안전율이 최소 안전율에 근접하는 것으로 나타나고 있어 앞서 관찰한 바와 같이

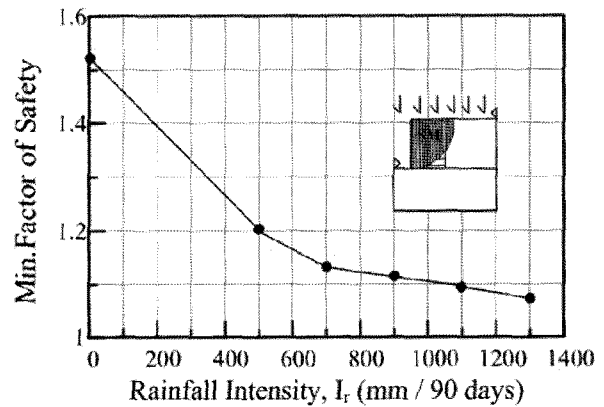
강우 강도 증가에 따른 최소안전율 변화 경향이 선형적인 관계가 아니라 임계치가 존재하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 경향은 우리나라 강우 환경에서 강우로 인한 보강토 옹벽의 안전율 감소가 무시할 수 없을 의미하는 것으로서 보강토체 내의 강우 유입을 억제하거나 유입시에도 충분한 안전율 확보를 위한 설계가 필요함을 보여준다고 하겠다.

2) 강우지속기간의 영향

그림 14는 총 500mm의 강우에 대해 강우기간이 안전율에 미치는 영향을 두 종류의 뒤택음흙에 대해 보여주고 있다. 이 그림에서는 두 가지 경향을 확인할 수 있는데 먼저 SW의 경우 강우지속기간에 따른 별 차이를 보이지 않고 있어 강우지속기간이 안전율에 그다지 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났으며 강우기간에 관계없이 강우시작 후 15일경에 안전율이 최소가 되는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 SW의 경우 대부분의 강우

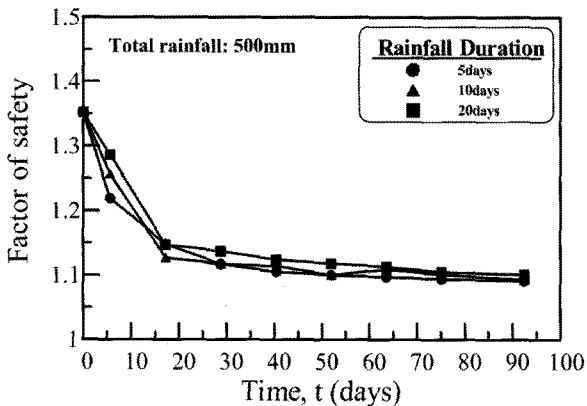


(a) 뒤택음흙-SW

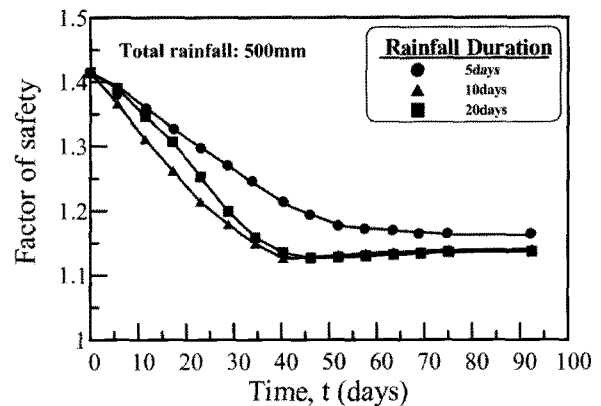


(b) 뒤택음흙-SM

그림 13. 강우강도에 따른 최소안전율 변화(강우지속기간 : 90일)



(a) 뒤택음 흙-SW



(b) 뒤택음 흙-SM

그림 14. 강우지속기간에 따른 안전율 분포(총강우량 500mm)

가 강우 발생 직후 보강토체와 배면토에 유입되기 때문 이라고 할 수 있다. 반면, SM의 경우 강우기간이 길수록 안전율 감소량이 큰 것으로 나타나고 있어 강우기간에 따라 안전율이 상당한 차이를 보이고 있다. 또한 강우시 작 후 40일 경과 후에 안전율이 최소가 되는데 이러한 경향은 앞서 기술한 바와 같이 SM의 투수성이 작기 때문에 강우기간이 짧을 경우 유입되는 강우의 양이 작기 때문이라고 할 수 있다.

이러한 경향에 근거할 때 우리나라와 같이 세립분 함유량이 많은 화강풍화토를 뒤채움흙으로 사용하는 경우에 있어서 임의 강우량이 단기간에 걸쳐 발생하는 경우보다 장기간에 걸쳐 발생하는 경우가 보강토 옹벽의 안정성에 더 큰 영향을 미친다고 할 수 있다. 이러한 경향으로 부터도 배수성이 양호한 양질의 뒤채움흙을 사용하는 것이 보강토 옹벽의 강우시 안정성 확보에 매우 중요하다는 점을 보여준다고 하겠다.

3) 안전율 감소율

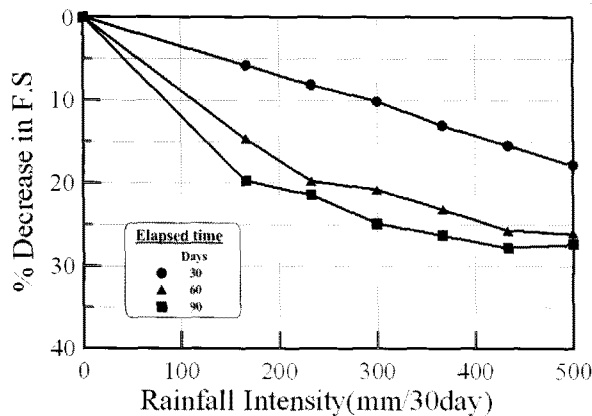
그림 15는 본 연구에서 수행한 매개변수 연구결과를 종합·정리한 것으로서 임의 강우강도에 있어서 지속시간별 안전율 감소율을 정리하고 있다. 전반적인 경향을 살펴보면 강우 지속시간이 짧을수록 강우강도에 따른 안전율 변화가 선형의 관계를 따르는 경향을 보여주고 있으며 강우 지속시간이 길수록 강우강도의 따른 변화가 거의 소멸되는 임계강우강도가 뚜렷해지는 경향을 보여주고 있다. 여기에 정리한 결과는 임의 강우 조건에서 강우로 인한 안전율 감소 정도를 유추할 수 있는 데이터로서 설계시 적용한 안전율에 해당 강우조건에 대한 감소율을 곱해줌으로써 강우시 안전율을 유추하는

데 활용할 수 있다.

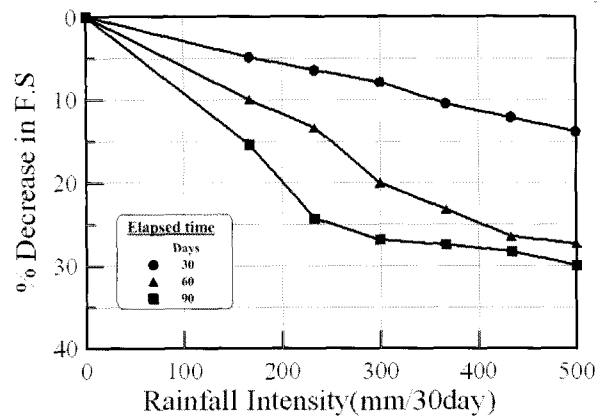
5. 결론

본 연구에서는 국내 여름철 장마기간 강우조건에 대해 보강토 구조물의 안정성을 정량적으로 분석하고 이에 대한 대책을 마련하기 위한 연구의 일환으로서 국내 강우자료를 바탕으로 보강토 옹벽에 대해 다양한 매개변수 연구를 수행하였다. 이를 위해 가상의 보강토 옹벽 시공조건에 대해 국내 강우 특성을 토대로 다양한 강우조건에 대한 부정류 침투해석을 수행하고 그 결과를 불포화토 전단강도가 고려된 한계평형해석 기반의 사면 안정해석에 반영하여 강우시 시간에 따른 안전율 변화 경향을 고찰하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 강우가 지속됨에 따라 보강토체 및 보강토 배면에 강우가 침투하여 모관흡수력 및 유효응력이 감소되어 옹벽의 안전율이 점차 감소하게 된다.
- (2) 강우강도가 클수록 옹벽의 안전율 감소 정도가 증가하며, 강우지속기간 보다는 총 강우량이 옹벽의 안정성에 더 큰 영향을 미친다.
- (3) 배수성이 상대적으로 양호한 SW에 해당하는 뒤채움흙의 경우 강우로 인한 최소 안전율 발생 시점이 강우 종료시기와 일치하나 배수성이 다소 불량한 SM에 해당하는 뒤채움흙의 경우 강우가 종료한 후 일정기간 경과 후 발생하는데 따라서 우리나라와 같이 세립분이 다량 포함된 뒤채움흙을 사용하는 경우에는 강우로 인한 문제가 강우 종료 후에 발생할 수 있다.



(a) 뒤채움 흙-SM



(b) 뒤채움 흙-SW

그림 15. 강우 조건별 안전율 감소율

(4) 배수성이 양호한 뒤채움흙의 경우 임의 강우량에 대해 강우지속기간이 안전율에 큰 영향을 미치지 않으나 배수성이 다소 불량한 뒤채움흙의 경우 임의 강우량이 단기간에 걸쳐 발생하는 경우보다 장기간에 걸쳐 발생하는 경우가 보강토 옹벽의 안정성에 더 큰 영향을 줄 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국 과학재단 기초과학연구사업 특정기초연구(과제번호 R01-2004-000-10953-0), 건설교통부가 출현한 고강도 지오그리드 보강 Stone Column 공법의 실용화 연구(과제번호 : C105A1000017-05A0300-01700) 및 (주)동양건설산업의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 유충식, 정혜영, 정혁상 (2005), 집중강우시 발생한 블록시 보강토 옹벽의 붕괴사례, 한국토지반공학회, 한국지반공학회논문집, 제21권 4호, pp.135-43.
2. 유충식, 정혁상, 정혜영 (2004), 강우로 인한 보강토 옹벽의 붕괴 사례에 관한 연구, 한국토목섬유학회 2004년 가을 토목섬유 학술발표회 논문집, pp.51-59.
3. Chen, H., Lee, C.F., and Law, K.T. (2003), "Causative Mechanisms of Rainfall-Induced Fill Slope Failures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130(6), 593-602.
4. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, A. (1978), "Shear strength of unsaturated soils", *Can. Geotech. J.*, Ottawa, 15, pp.313-321.
5. Fredlund, D. G., Xing, A., and Juang, S. (1994), "Predicting the permeability functions for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve", *Can. Geotech. J.*, Ottawa, 31, pp.533-546.
6. GeoStudio (2004), "User's guide for SEEP/W and SLOPE/W, Version 6.0", Geo-Slope International, Calgary, Canada.
7. Koerner, R. M. and Soong, T. Y. (2001), "Geosynthetic reinforced segmental retaining walls", *Geotextiles and Geomembranes*, 19(6), 359-386.
8. Tsaparas, I., Rahardjo, H., Toll, D.G., Leong, E.C. (2002), "Controlling parameters for rainfall-induced landslides", *Computers and Geotechnics*, 29(1), 1-27.
9. 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*, 133(12), 1532-1543.
10. Zhan, L.T. and Ng, C.W.W. (2007), "Analytical Analysis of Rainfall Infiltration Mechanism in Unsaturated Soils", *International Journal of Geomechanics*, 4(4), 273-284.

(접수일자 2008. 5. 29, 심사완료일 2008. 11. 12)