

습윤-건조 반복작용에 노출되는 옹벽의 거동에 관한 수치해석 연구

Numerical Investigation into Behavior of Retaining Wall Subject to Cycles of Wetting and Drying

유 충 식¹ Yoo, Chung-Sik

Abstract

This paper presents the results of a numerical investigation into the behavior of retaining wall subject to cycles of wetting and drying due to rainfall. The stress-pore pressure coupled finite element modeling strategy was first established for stimulating the wall behavior. A series of finite element analyses were then performed on a range of conditions including different rainfall and backfill conditions. The results indicated that the rainfall intensity was the primary influencing factor for the wall behavior. Also revealed was that the pre-rainfall condition determines the magnitudes and the distribution of matric suction which in fact has a significant impact on the behavior of wall during a major rainfall. This result demonstrates the importance of incorporating the pre-rainfall condition for numerical modeling of walls during heavy rainfall. Practical implications of the findings from this study are discussed in great detail.

요 지

본 논문에서는 계절적 환경변화로 인한 습윤-건조 반복과정에 노출되는 옹벽의 시간 의존적 거동에 대한 수치 해석 연구 내용을 다루었다. 이를 위해 먼저 습윤-건조 과정에 노출되는 옹벽에 대한 응력-간극수압 연계해석 기반의 모델링 기법을 정립하였으며 이러한 모델링 기법을 토대로 다양한 옹벽조건 및 강우조건에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 그 결과 다양한 강우 특성 중 옹벽의 거동에 미치는 주된 영향인자는 강우강도로 나타났다. 한편, 강우가 발생하기 이전 선행하는 선행강우는 지반내 포화도, 즉 모관흡수력, 분포를 좌우하는 것으로 나타나 지반구조물의 안정성은 선행강우량에 의해 큰 영향을 받는 것으로 검토 되어 강우로 인한 습윤-건조 반복 사이클에 노출되는 옹벽구조물의 거동 예측시 선행강우량에 대한 현실적인 평가가 매우 중요한 것으로 검토되었다.

Keywords : Retaining wall, Rainfall, Stress-pore pressure coupled finite-element analysis, Matric suction

1. 서 론

옹벽을 포함한 지반구조물은 시공 후 사용연한동안 계절적 우기 및 건기를 거치면서 습윤-건조과정을 반복적으로 거치게 된다. 지구 온난화 및 기후변화로 인해 최근에는 이러한 계절적 환경 변화 강도가 증가하는 추

세에 있으며 따라서 지반구조물 또한 계절적 환경변화에 대응할 수 있도록 설계·시공·유지관리 기술이 정립되어야 한다(You and Shin 2011).

계절적 환경 변화에 의한 습윤-건조는 옹벽 배면 토사내의 모관흡수력(matrc suction)을 변화시키며 따라서 불포화토 관점에서 볼 때 전단강도를 변화시키는 근본

¹ 정회원, 성균관대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ., Tel: +82-31-290-7518, Fax: +82-31-290-7549, csyoo@skku.edu, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 7월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

적인 요인으로 작용한다. 이러한 모관흡수력의 변화는 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.

이와 관련된 연구로는 주로 강우에 의한 사면 안정성에 관련된 연구가 대부분이다. 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 변화시 사면의 안전율 변화에 관한 연구를 수행하고 관련 이론을 정립한 바 있다. 이와 아울러 Cheuk et al.(2005)은 홍콩 지역에서 발생하는 집중 강우를 대상으로 성토사면의 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 고찰한바 있다. 이들 연구는 강우와 사면 안정성에 관련된 메카니즘에 유용한 결과를 제시하고 있다.

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. 가장 최근 들어 Yoo and Shin(2011)은 계절적 환경변화가 화강풍화토의 지반공학적 특성에 미치는 영향에 대한 요소수준(element level)의 연구 측면에서 습윤-건조 반복과정이 화강풍화토의 입자구조와 역학적 특성에 미치는 영향을 고찰한 바 있다.

위에 제시한 기존의 연구에서는 습윤-건조 반복작용이 흙의 물리적 역학적 특성변화 및 사면의 안정성 관점에서 중요한 결과를 제시하고 있으나 습윤-건조 반복작용에 노출되는 옹벽의 거동에 관한 구체적이고 종합적인 연구는 매우 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 계절적 환경변화가 지반구조물에 미치는 영향에 대한 메카니즘 고찰의 일환으로 옹벽구조물을 대상으로 반복되는 습윤 및 건조과정이 옹벽의 거동특성에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구를 수행하고 그 결과를 중

합적으로 분석하였다.

2. 응력-간극수압 연계해석 모델링

2.1 응력-간극수압 연계해석 기본이론

본 연구에서는 범용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus (Abaqus 2009)를 사용하였으며 Abaqus에서 채택한 응력-간극수압 연계해석 기법에 대한 이론적 배경은 다음과 같다.

습윤-건조 과정은 결국 토체내 간극수압의 변화를 가져오며 따라서 토체의 역학적 거동을 지배하는 유효응력의 변화를 가져오게 되므로 응력과 간극수압이 연계된 해석(stress-pore pressure coupled analysis)을 수행하여야 현실적인 평가가 가능하다. 연계해석에서는 지반을 다상재료(multiphase material)로 간주하고 유효응력 개념을 적용하여 거동을 표현하며 유효응력 σ' 는 다음의 식 (1)로도 나타낼 수 있다.

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

여기서, χ 는 물-입자 간 표면장력과 포화도에 관한 계수로 0과 1사이의 값을 가지게 되는 값이며 공기압 u_a 를 일반적인 대기압으로 간주하고 요소내 흡착수(trapped fluid)가 존재하는 경우 유효응력 σ' 를 흡착수의 함수로 나타내면 흡착수의 평균응력 \bar{p}_t ,와 흡착수의 간극률 n_t 에 관한 아래의 식 (2)로 표현된다.

$$\sigma' = (1 - n_t)\sigma - n_t p_t I \quad (2)$$

한편, 연계해석에서 다공성 매질에 대한 평형방정식은 가상일의 원리를 이용하여 전응력의 형태로 표현하면 식 (3)으로 정리될 수 있다.

$$\int_V \sigma : \delta \epsilon dV = \int_S t \cdot \delta v dS + \int_V (\hat{f} - f_w) \cdot \delta v dV + \int_V (sn + n_t) \rho_w \cdot \delta v dV \quad (3)$$

여기서, δv = 가상의 속도

$\delta \epsilon = sym(\partial \delta v / \partial x) =$ 가상의 변형률

$t =$ 단위 면적당 면력(surface traction)

$\hat{f} =$ 단위 체적당 체력(body force)

$$f_w = (sn + n_i)\rho_w g$$

s = 포화도
 n = 간극률
 ρ_w = 물의 질량
 g = 중력가속도

식 (3)의 해를 얻기 위해 $\beta^N = \text{sym}\left(\frac{\partial \delta N^N}{\partial x}\right)$ 로 표현되는 보간함수(interpolation function) $N^N(S_i)$ 을 이용하면 가상의 속도는 $\delta v = N^N \delta v^N$, 가상의 변형률은 $\delta \varepsilon = \beta^N \delta v^N$ 로서 보간이 가능하며, 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\delta v^N \int_V \beta^N : \sigma' dV = \delta v^N \left[\int_S N^N \cdot t dS + \int_V N^N \cdot f \delta v dV + \int_V (sn + n_i)\rho_w N^N \cdot g dV \right] \quad (4)$$

각 변에 있는 δv^N 를 소거하면 좌변 항은 내력(internal force)을, 우변 항은 외력(external force)을 나타내며 따라서 위 식 (8)에 대한 해가 응력과 간극수압이 연계된 해석 결과가 된다. 위와 같이 응력-간극수압 연계해석에서는 지반의 응력-변형 관계를 나타내는 구성방정식과 더불어 불포화토의 모관흡수력과 포화도, 그리고 모관흡수력과 투수성의 관계 등 다양한 관계식이 필요하게 된다. 한편, 토체내 간극수의 흐름에 대한 거동은 Darcy의 법칙 혹은 Forchheimer의 법칙을 사용하여 모사할 수 있는데 여기서 Forchheimer의 법칙은 간극수의 흐름의 속도가 빠를때 적용하며 Darcy의 법칙은 Forchheimer의 법칙의 선형 버전이라고 할 수 있다(식 4).

$$snv_w = -\hat{k} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (5)$$

여기서, snv_w 는 토체의 단위 면적을 통해 흐르는 물의 체적 흐름 속도이며 \hat{k} 는 토체의 투수계수, 그리고 Φ 는 간극수두를 의미한다. 투수계수는 토체의 포화도 s 에 따라 달라지며 포화된 토체의 투수계수를 k 라고 할 때 $\hat{k} = s^3 k$ 의 관계를 갖는다(Nguyen and Durso 1983).

2.2 옹벽의 습윤-건조과정 모델링

본 연구에서 다루고자한 옹벽구조물 배면 토체의 습윤-건조 작용은 결국 강우로 인해 발생하는 물의 침투(infiltration)와 시간 경과에 따른 건조과정을 의미한다고 하겠다. 따라서 본 연구에서는 습윤과정과 건조과정에 대한 현실적인 모델링 방안을 강구하였다. 구체적인 내용은 다음과 같다.

2.2.1 강우 및 배수 모델링

본 연구에서 강우는 해석 도메인의 지표면에 단위시간당 침투량을 지정하는 방법으로 모델링하였다. 즉, 아래 Fig. 1에서와 같이 강우가 침투하는 지표면의 직각방향에 단위 침투량을 “DSFLOW”로 지정하고 유효 침투속도(pore fluid effective velocity)로 표현하여 시간당 강우가 모델링 될 수 있도록 하였다. 여기서 DSFLOW는 Abaqus의 명령어로서 단위 시간당 유입량을 지정할 수 있다.

한편 뒤채움흙 내에 유입되는 강우는 옹벽의 전면벽체를 통해서 배수가 되는 것으로 모델링하였으며 이때 벽체 외부면에 “배수경계(drainage-only-boundary)”를 지정하여 모델링하였다(Fig. 1). 여기서 배수경계조건은 Pagano(1997)가 제안한 방법으로서 아래 Fig. 2와 같이 포화된 표면에는 ‘0’의 간극수압이 되어야 한다는 요구조건을 만족하도록 characteristic value인 $\frac{k}{\gamma_w c}$ (여기서 c 는

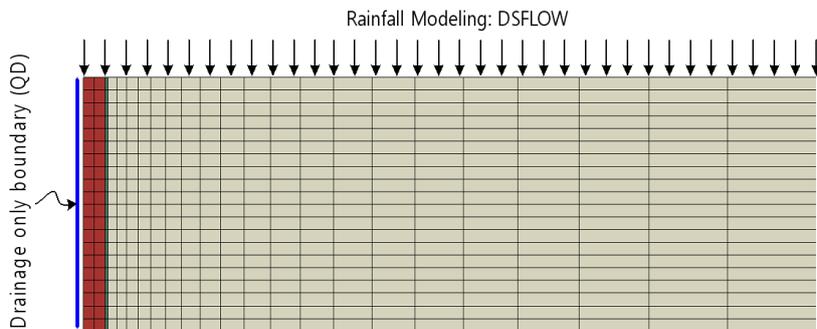


Fig. 1. Rainfall and drainage modeling

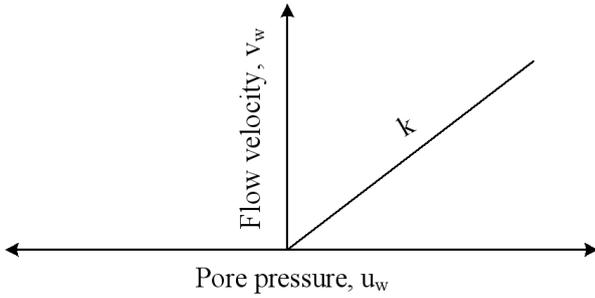


Fig. 2. Concept of drainage-only boundary condition

상수) 보다 매우 큰 투수계수를 부여하는 방법으로 모델링하였다.

2.2.2 배수로 인한 건조과정 모델링

강우로 인한 습윤과정의 모델링이후에는 배수로 인한 건조과정에 대한 모델링이 이루어져야 한다. 건조로 인해 토체내에는 모관흡수력이 증가하게 되며 이러한 과정을 해석 모델링에서 적절히 반영할 수 있어야 한다. 토체내 유입된 물이 일정기간 동안 자연 배수되어 포화도가 감소하는 경우 입력한 SWCC를 토대로 모관흡수력이 회복되는 과정이 반영될 수 있도록 모델링하여 건조과정을 모델링하였다. 다만 본 연구에서는 대기중 수분의 증발로 인한 건조과정은 모델링하지 않았다.

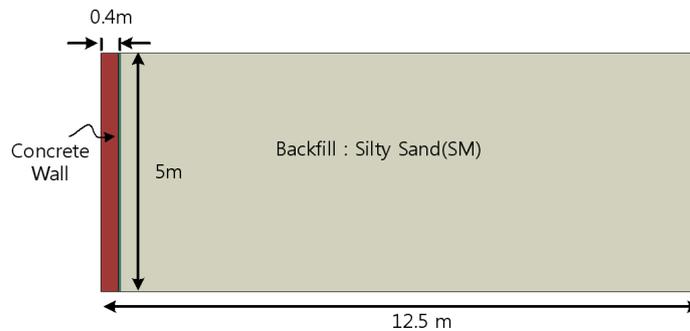


Fig. 3. Geometry of wall considered

3. 매개변수 연구

3.1 대상 구조물 및 해석조건

본 해석에서 고려한 옹벽 조건은 아래 Fig. 3과 같으며 세립분을 20%정도 포함하는 실트질 모래(SM)로 뒤채움 되는 것으로 가정하였다. 다양한 강우조건 및 건조조건을 고려하기위해 Table 8에서와 같이 다양한 조건을 도출하였으며 이때 강우조건으로는 강우강도(I_r), 강우지속시간(D_r), 그리고 선행강우량(P_r) 등을 고려하였다. 해석에서는 Exsorption-Absorption 기반의 응력-간극수압 연계해석기법 및 강우 및 배수 모사 기법이 옹벽 배면의 뒤채움흙에 발생하는 습윤-건조 반복작용을 제대로 모사할 수 있는지에 대한 검토가 가능하도록 하였다.

3.2 해석 모델링

해석모델링에서는 벽체 및 뒤채움흙을 2차원 8절점 가감적분 응력-간극수압 평면변형률요소 CPE8RP를 사용하여 이산화 하였다. 아울러 벽체와 뒤채움구간 접촉면에 인터페이스 요소를 적용하여 접촉면 거동을 모사하였다. 재료의 역학적 모델링에 있어 벽체는 탄성재료로

Table 1. Cases considered for wetting and drying condition

Condition	Total Precipitation (mm)	Time Duration (day)	Rainfall Intensity (m/day)	Wetting-Drying Cycle
Q300D10C1	300	10	0.03	1
Q300D10C3	300	10	0.03	3
Q300D10C6	300	10	0.03	6
Q300D05C2	300	5	0.06	2
Q300D02C2	300	2	0.15	2
Q450D10C2	450	10	0.045	2
Q600D10C2	600	10	0.06	2
Q180D1.5C2	180	3	0.06	2

Table 2. Geotechnical properties of backfill

Property	Backfill	Concrete Wall
Density, $\gamma(kN/m^3)$	18	23
Cohesion, $c'(kPa)$	5	N/A
Internal friction angle, $\phi'(^{\circ})$	25	N/A
Young' s modules, $E(MPa)$	20	23,000
Coefficient of Permeability, $k(m/s)$	1×10^{-6}	0.5
Initial void ratio, e_o	0.8	0.5

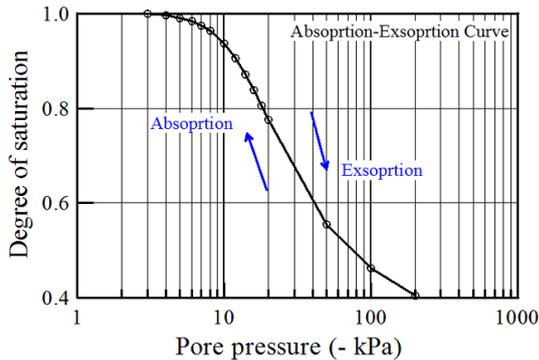


Fig. 4. Soil water characteristic curve of backfill soil

가정하였으며 뒤채움흡수는 비연계 흐름법칙(non-associated flow rule)을 따르고 유효응력에 근거한 Mohr-Coulomb 항복기준이 적용된 탄소성 모델을 이용하여 모델링하였다. Table 6에서는 옹벽 구성요소의 역학적·수리학적 특성을 정리하고 있으며 Fig. 4는 뒤채움흡수의 함수특성

곡선을 보여주고 있다. 한편, 흙의 함수특성은 일반적으로 물을 흡수(absorption)할 때와 배출(exsorption)할 때 다소 다른 거동을 보이거나 본 연구에서는 흡수와 배출 경로가 동일한 것으로 가정하였다. 또한, 함수특성 한편, 흙의 투수계수가 포화도에 따라 달라지는 특성을 고려하기 위해 불포화상태에서의 투수계수는 포화투수계수 대비 포화도의 세제곱에 비례하는 것으로 가정하였다(Abaqus 2009).

경계조건 설정에 있어 Fig. 5에서와 같이 우측경계면(CD)은 벽체전면으로부터 12.5m 거리에 연직방향(y) 변위를 허용하는 롤러를 설치하여 설정하였으며 하단경계(BC)에는 수평방향(x) 및 연직방향(y) 변위가 구속되는 힌지를 설치하였다. 우측경계면의 위치는 예민도 분석을 통해 경계면 설정이 해석결과에 영향을 미치지 않도록 설정하였다. 한편 응력-간극수압 연계해석에서 필요한 수리학적 경계조건으로 CD면과 BC면에 no-flow 경계조건을 부여하였으며 AB면에 배수경계(drainage-only boundary)를 부여하여 배수가 되도록 하였다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 DSFLOW를 이용하여 AC면에 직각 방향의 시간당 강우를 모사하였다.

3.3 해석 순서

본 해석에서는 먼저 응력해석을 통해 옹벽 시공과정

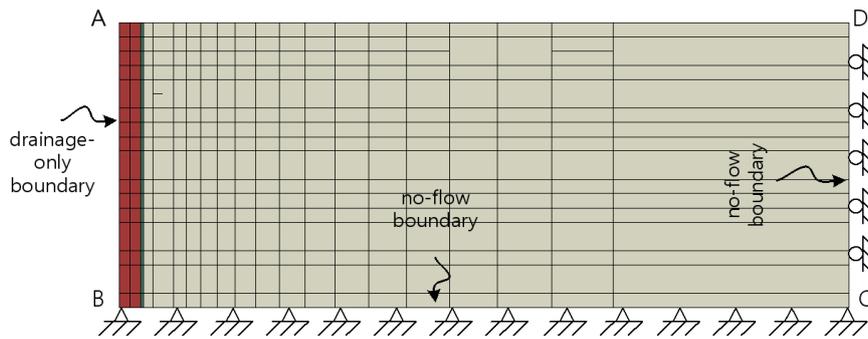


Fig. 5. Finite element model

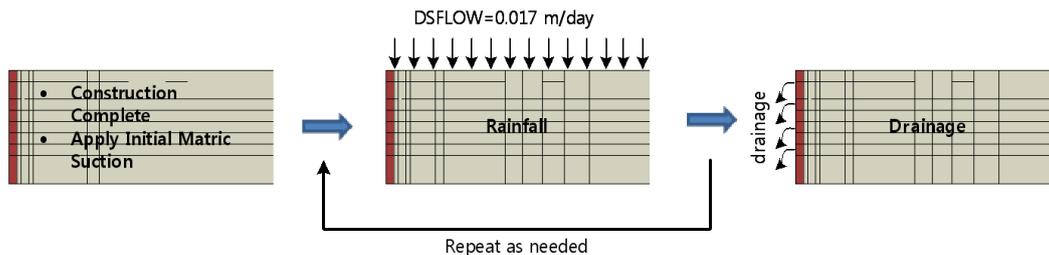


Fig. 6. Simulation of wetting and drying process

직후 응력상태를 조성한 후 앞서 기술한 바와 같이 AD 면에 강우강도에 해당하는 단위 강우량을 DSFLOW를 적용하여 습윤과정을 모사하였으며 이후 벽체면에 지정한 drainage-only flow 경계면으로부터 자연배수가 발생하여 건조과정을 모사하였다. 한편, 본 해석과 같은 응력-간극수압 연계해석에서는 뒤채움구간에 대한 시공 후 초기 모관 흡수력을 부여하여야 하는데 이때 필요한 초기 모관 흡수력으로 $u_w = -20 kPa$ 을 적용하였다. Fig. 6에서는 해석 순서를 개념도의 형태로 보여주고 있다.

한편, 시간도메인에서의 응력-간극수압 연계해석에서 너무 작은 시간증분을 적용할 경우 해석결과가 수렴하는데 어려움이 발생할 수 있으며 이러한 현상을 피하기 위해서 초기 시간 증분 Δt 는 아래 식 (10)을 사용하여 산정한 후 해석에 적용하였다(Abaqus 2009).

$$\Delta t > \frac{\gamma n^o}{6k_s k} \frac{ds}{du} (\Delta l)^2 \quad (6)$$

여기서, γ 는 물의 단위중량, n^o 는 초기 간극률, k 는 포화 투수계수, k_s 는 투수계수-포화도 관계, ds/du 는 간극수압 변화에 따른 포화도 변화율, 그리고 Δl 는 유한요소의 평균 길이를 의미한다. 본 해석에 채택한 모델에 있어서 요소의 평균길이 약 $\Delta l = 0.5 m$ 을 식 (10)에 적용할 경우 $\Delta t = 0.01 day$ 이 산정되어 이를 해석에 적용하였다.

4. 결과 분석 및 고찰

4.1 강우 특성에 따른 옹벽의 거동 특성

4.1.1 강우강도(I_r)의 영향

Fig. 7은 강우강도 I_r 가 옹벽의 변위 거동에 미치는 영향을 벽체 최대 변위를 이용하여 보여주고 있다. 앞서

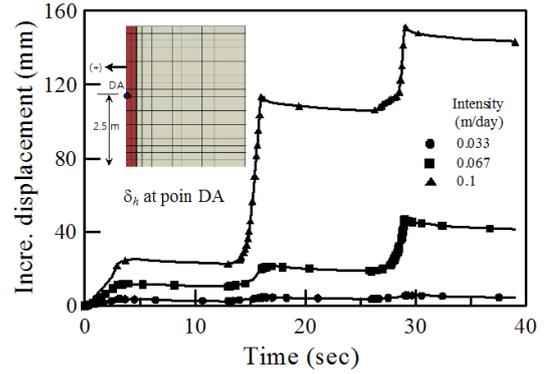


Fig. 7. Time variation of wall displacement with I_r .

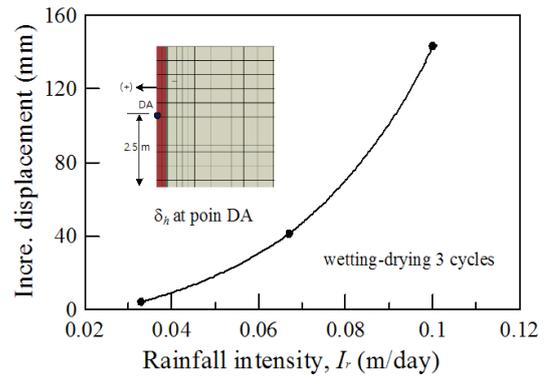


Fig. 8. Variation of incremental wall displacement with I_r .

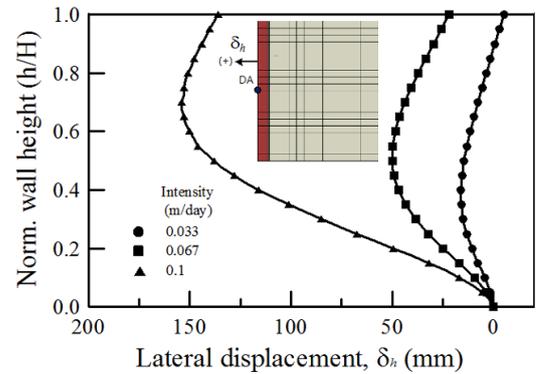


Fig. 9. Variation of lateral wall displacement profile with I_r .

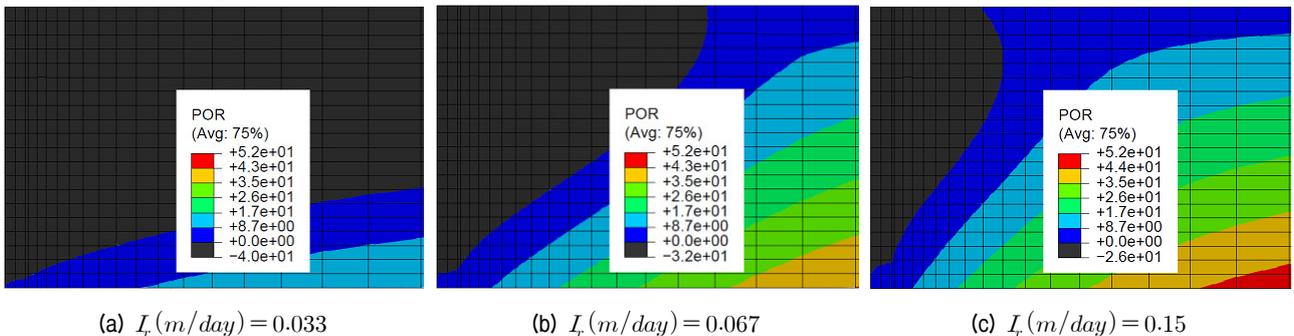


Fig. 10. Variation of pore pressure distribution with I_r (unite : kPa)

기술한 바와 같이 해석에서는 강우강도 $I_r(m/day) = 0.033, 0.067, 0.15$ 의 조건에 대해 습윤(강우) 및 건조 기간은 각각 5일 및 10일로 고정시켰으며 총 세 사이클이 반복되는 경우를 고려하였다. 이 그림에서 관찰할 수 있는 바와 같이 강우강도가 증가할수록 벽체 변위는 증가하는 것으로 검토되었으며 Fig. 8에서와 같이 최대 벽체 변위는 강우강도가 증가할수록 증가속도 또한 증가하는 비선형의 형태를 따르는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 강우강도에 따른 벽체 수평변위 프로파일을 나타내는 Fig. 9에서 또한 관찰할 수 있다.

한편, Fig. 10에서는 습윤-건조 세 사이클 경과 후 옹벽내 과잉간극수압 분포를 보여 주고 있는데 보이는 바와 같이 강우강도가 증가할수록 뒤채움구간의 과잉간극수압이 현저히 증가하고 특히 $I_r(m/day) = 0.15$ 의 조건에 있어서는 벽체에 근접한 구간을 제외하고는 양의 과잉간극수압이 발생하는 것으로 나타나 뒤채움구간에 큰 수압이 발생할 수 있는 것으로 검토되었다.

4.1.2 강우지속시간(D_r)의 영향

기존의 연구에 의하면 동일한 강우량이라 하더라도 강우지속시간이 다를 경우 옹벽의 안정성에 미치는 영향이 달라지는 것으로 보고된 바 있다. 본 연구에서는 1회 습윤사이클에 있어 강우량 Q_{tot} 를 200mm로 고정시키고 강우지속시간을 3일, 5일, 10일로 변화시키며 해석을 수행하고 강우지속시간의 영향을 고찰하였다.

먼저 지속시간에 따른 벽체 변위 발생이력을 보여주고 있는 Fig. 11에서는 동일한 총강우량에 대한 지속시간이 증가할수록 벽체 변위가 감소하는 경향을 보여주고 있으며 이러한 경향은 최대변위를 지속시간에 따라 도시하고 있는 Fig. 12에서 잘 관찰할 수 있다. 즉, 동일한 강우량 발생시 지속시간이 변한다는 것은 결국 강우

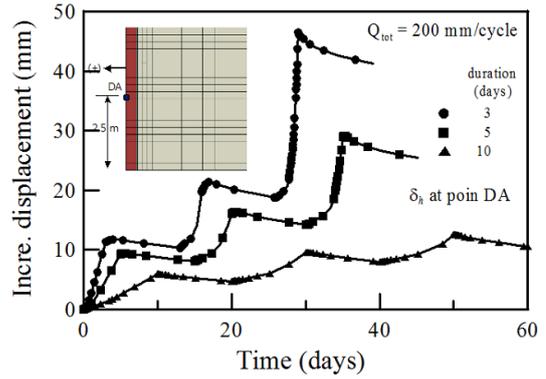


Fig. 11. Time variation of wall displacement with D_r

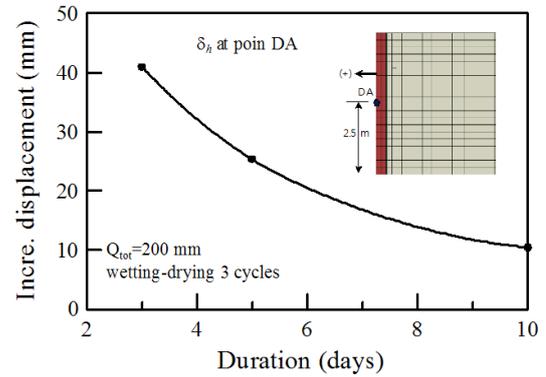


Fig. 12. Variation of maximum wall displacement with D_r

강도가 변하는 것으로서 동일한 강우량이라 하더라도 지속시간이 짧을수록, 즉 강우강도가 클수록, 옹벽구조물에 미치는 영향이 크다는 것을 보여준다고 하겠다. 이러한 경향은 최종 사이클 습윤단계에서 뒤채움구간의 과잉간극 수압 분포도를 보여주고 있는 Fig. 13에서 잘 관찰할 수 있는데 지속시간이 증가할수록 뒤채움흙에 침투한 강우가 배수할 수 있는 시간이 확보되어 과잉간극수압이 감소하는 것으로 나타나 강우의 영향이 줄어드는 경향을 잘 보여주고 있다.

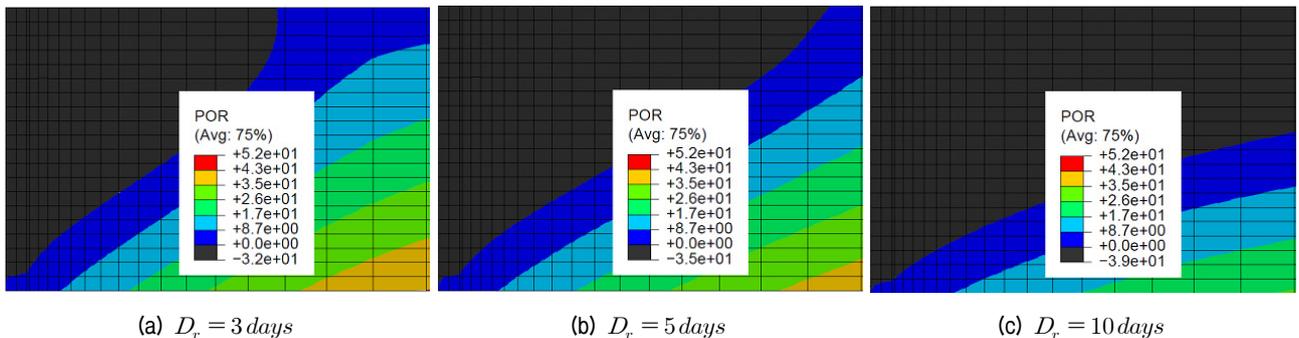


Fig. 13. Variation of pore pressure distribution with D_r (unite : kPa)

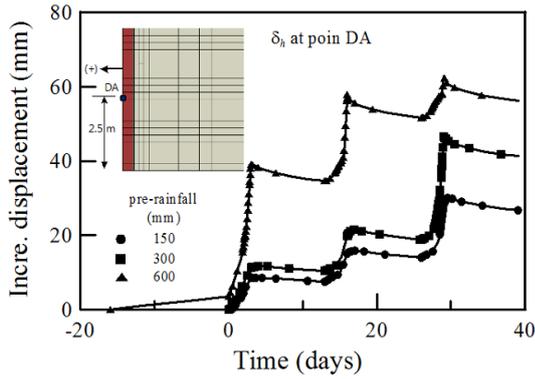


Fig. 14. Time variation of wall displacement with P_r

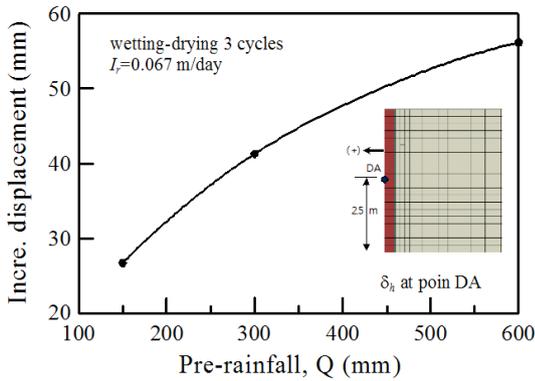


Fig. 15. Variation of maximum wall displacement with P_r

4.1.3 선행강우량(P_r)의 영향

2011년 여름에 발생한 우면산 산사태의 사례에서도 관찰한 바와 같이 강우시 지반구조물의 안정성은 강우 발생 이전에 지반의 포화도를 좌우하는 선행강우량에 의해 큰 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 이러한 측면에서 본 강우 발생이전의 선행강우량에 따른 옹벽의 거동 특성을 검토하였으며 이때 총 200mm의 강우가 5일 동안 발생하고 10일 동안 건조되는 습윤-건조 사이클이 총 3회 반복되는 경우를 대상으로 하였다. 선행 강우

로는 본 강우 발생이전 50일 동안 $P_r = 150\text{ mm}, 200\text{ mm}, 300\text{ mm}$ 가 발생하는 조건을 고려하였다.

Fig. 14는 선행강우량에 따른 벽체 변위 발생 이력을 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 선행강우량이 증가할수록 벽체 변위가 증가하는 경향을 잘 관찰할 수 있으며 최대벽체변위를 선행강우량에 대하여 도시한 Fig. 15에서도 P_r 이 증가할수록 최대 변위가 최대 두 배 정도로 증가하는 경향을 잘 관찰할 수 있다. 선행강우량에 따른 세 번째 사이클 습윤 종료시 뒤채움구간 간극수압 분포도를 보여주고 있는 Fig. 16에서 또한 선행강우량이 증가할수록 간극수압 또한 증가하는 경향을 뚜렷하게 보여주고 있다. 이러한 경향은 본 강우가 발생하기 이전의 선행강우는 지반내 포화도, 즉 모관흡수력, 분포를 좌우하므로 강우시 지반구조물의 안정성에 큰 영향을 미치는 인자임을 의미하며 따라서 강우로 인한 습윤-건조 반복사이클에 노출되는 지반구조물의 거동 예측시 선행강우에 대한 현실적인 평가가 매우 중요함을 나타낸다고 하겠다. 다만 본 결과는 단일 뒤채움층에 대해 국한된 내용으로서 뒤채움층의 종류에 따라 그 영향이 달라질 수 있으며 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4.2 뒤채움층의 투수계수에 따른 옹벽의 거동 특성

임의 강우시 지반구조물의 거동은 뒤채움층의 역학적-수리학적 특성에 좌우된다. 따라서 본 연구에서는 옹벽시공시 사용되는 뒤채움층의 투수계수(K_s)에 따른 영향을 검토하였다. 검토에서는 총 200mm의 강우가 5일 동안 발생하고 10일 동안 건조되는 습윤-건조 사이클이 총 3회 반복되는 경우를 대상으로 하였다. 한편, 뒤채움층으로는 모래와 실트질 모래 두 가지를 고려하였으며 상호 직접적인 비교를 위해 두 흙의 응력-변형률-강도

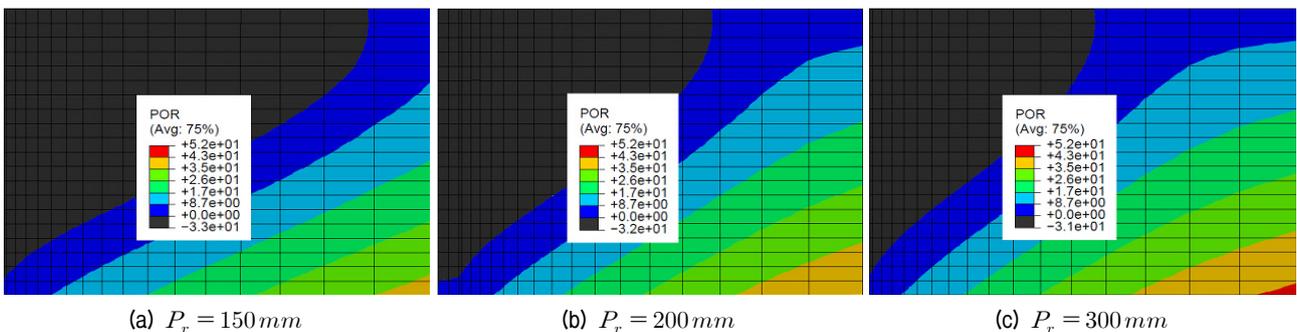


Fig. 16. Variation of pore pressure distribution with P_r (unit: kPa)

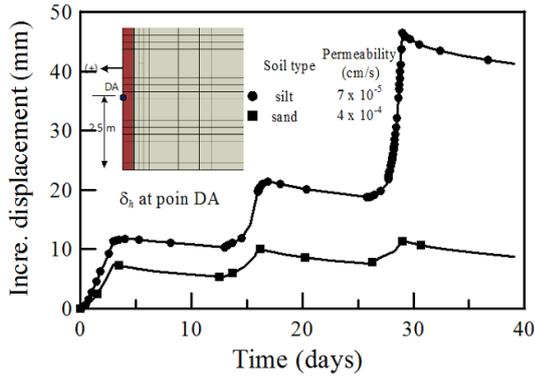


Fig. 17. Time variation of wall displacement with K_s

특성은 동일하되 투수계수만 변화시키며 해석을 수행하였다(Fig. 17참조).

Fig. 17에서는 습윤-건조 사이클 동안의 시간에 따른 벽체 변위(시공 후 증분량) 변화 경향을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 실트질 모래로 시공된 옹벽의 경우 습윤-건조 사이클 진행에 따라 최대 46mm 정도의 추가 변위가 발생하는 것으로 나타났으나 모래의 경우 10mm 정도의 추가변위만 발생하는 것으로 검토되었다. 이러한 경향은 모래의 경우 충분한 배수가 이루어질 뿐만

아니라 임의 포화도에서 상대적으로 큰 모관흡수력이 유지되는 관계로 뒤채움구간에 큰 유효응력을 유지할 수 있기 때문이며 따라서 계절적 습윤-건조 영향을 최소화하기 위해서는 모래질 흙을 뒤채움흙으로 활용하는 것이 바람직함을 보여주고 있다. 이러한 경향은 변위거동을 보여주고 있는 Fig. 18과 마지막 습윤사이클 최종 단계에서의 간극수압 분포를 나타내고 있는 Fig. 19에서도 잘 관찰할 수 있는데 특히 간극수압분포의 경우 보이는 바와 같이 투수계수가 작은 실트질 모래의 경우 옹벽의 주동영역은 불포화상태로 유지되나 주동영역 외측에는 양의 간극수압이 작용하는 것으로 나타나고 있어 토압 증가의 원인이 될 수 있는 것으로 검토되었다. 반면 투수계수가 큰 모래의 경우 옹벽 배면이 거의 불포화 상태로 유지되어 유효응력을 크게 유지할 수 있어 옹벽의 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 계절적 환경변화로 인한 습윤-건조 반복과정에 노출되는 옹벽의 시간 의존적 거동에 대한 수

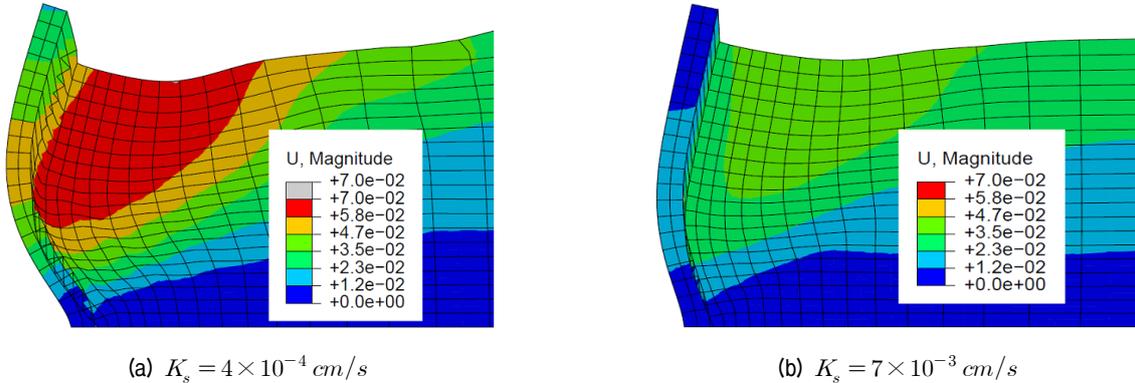


Fig. 18. Effect effect of K_s on deformation behavior (*unit*: m)

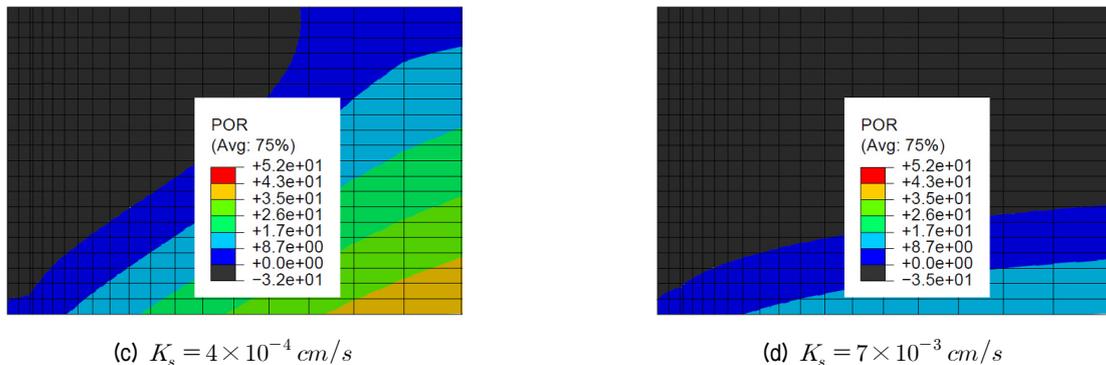


Fig. 19. Effect effect of K_s on pore water pressure distribution (*unit*: kPa)

치 해석 연구 내용을 다루었다. 이를 위해 먼저 습윤-건조 과정에 노출되는 옹벽에 대한 응력-간극수압 연계해석 기반의 모델링 기법을 정립하였으며 이러한 모델링 기법을 토대로 다양한 옹벽조건 및 강우조건에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 매개변수 연구에서는 강우강도(I), 강우지속시간(D), 그리고 선행강우량(P) 등을 변수로 고려하였으며 실트질 모래로 뒤채움 되는 옹벽의 경우에 대해 이러한 강우특성 인자의 정량·정성적인 영향에 대한 검토를 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 검토한 다양한 강우 특성 중 옹벽의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 강우강도로 나타났다. 강우강도가 증가할수록 뒤채움구간의 과잉간극수압이 현저히 증가하고 매우 큰 강우강도 (i.e., $I_r(m/day) = 0.15$)에서는 벽체에 근접한 구간을 제외하고는 양의 과잉간극수압이 발생하는 것으로 나타나 뒤채움구간에 잔류 수압이 발생할 수 있는 것으로 검토되었다.
- (2) 본 강우가 발생하기 이전 선행하는 선행강우는 지반내 포화도, 즉 모관흡수력, 분포를 좌우하는 것으로 나타나 지반구조물의 안정성은 선행강우량에 의해 큰 영향을 받는 것으로 검토되었으며 따라서 강우로 인한 습윤-건조 반복사이클에 노출되는 지반구조물의 거동 예측시 선행강우량에 대한 현실적인 평가가 매우 중요할 것으로 판단된다.
- (3) 뒤채움흙의 종류에 따른 경향을 검토한 결과 임의 강우강도에 대해 실트질 모래로 뒤채움한 경우 옹벽의 주동영역은 불포화상태로 유지되나 주동영역 외측에는 양의 간극수압이 작용하는 것으로 나타나고 있어 토압 증가의 원인이 될 수 있는 것으로 검토되었다. 반면 모래의 경우 옹벽 배면이 거의 불포화 상태로 유지되고 이에 따른 모관흡수력으로 인해 큰 유효응력을 유지할 수 있어 옹벽의 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 모래질흙으로 뒤채움 하는 경우가 세립분을 포함하는 흙의 경우보다 습윤-건조 반복작용에 따른 영향을 최소화 할 수 있는 것으로 검토되었다.
- (4) 본 연구에서는 뒤채움흙이 물의 흡수(absorption)시 및 배출(exsorption)시 동일한 함수특성을 보이는 것

으로 단순화하였으며 이러한 단순화가 해석결과에 다소의 영향을 미쳤을 것으로 판단되나 이에 대한 구체적인 영향에 대해서는 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. Abaqus, Inc. (2009), Abaqus user's manual, version 6.7. Abaqus, Inc., Pawtucket, Providence, R.I.
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. Nguyen, H. V, and Durso, D. F. (1983), Absorption of water by fiber webs: an illustration of diffusion transport. *Tappi Journal*, Vol.66, No.12, pp.18-30.
5. Pagano, L. (1997), "Steady State and Transient Unconfined Seepage Analyses for Earthfill Dams", *ABAQUS Users' Conference*, Milan, pp.557-585.
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. 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.
8. Yoo, C. and Shin, B. N. (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.
9. 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.23-32.
10. 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.
11. 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.

(접수일자 2012. 7. 4, 심사완료일 2013. 1. 17)