

## 반복강우에 의한 풍화토층 절토사면 침투특성에 관한 연구

이정엽\* · 김승현 · 최지용 · 구호본

한국건설기술연구원 지반연구실

### Infiltration Characteristics of a Weathered Cut-Slope during Repetition Rainfall

Jeong-Yeob Lee\*, Seung-Hyun Kim, Ji-Yong Choi, and Ho-Bon Koo

Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Div., Korea Institute of Construction and Technology

강우는 사면 붕괴에 영향을 미치고 있는 요인 중의 하나이다. 최근 기후변화에 집중강우가 빈번하게 발생하고 있으며, 단시간에 많은 양의 강우강도와 반복적인 강우특성을 가지고 있다. 강우가 발생하게 되면 강우의 대부분은 사면 법면을 따라 유출되지만, 일부는 지반 내로 침투하게 되며, 침투수는 주로 얇은 파괴를 유발시키는 것으로 알려져 있다. 하지만, 본 연구에서는 우기 시 빈번하게 발생하는 반복적인 게릴라성 강우로 인한 침투가 사면 안정성에 어떠한 영향을 미치고 있는지 다양한 조건에서 유한요소해석법을 이용하여 침투특성을 분석하였다. 분석 결과, 강우 주기가 짧고 반복횟수가 많을수록 사면 내부에 침투의 영향이 크게 작용하며, 짧은 시간의 강우에도 침투 영향을 고려할 필요가 있는 등 사면 관리자의 침투에 대한 주의 깊은 관심이 필요하다.

**주요어** : 침투, 집중강우, 절토사면

In recent years, intensive rainfall has occurred with increasing frequency due to climate change, and has had an effect on slope failure. Such rainfall is intense and occurs repeatedly. During the rainfall, most of the water flows along the slope face, but some seeps into the soil, inducing surface failure of the slope. In this study, the infiltration characteristics of intensive rainfall are analyzed under various conditions to evaluate its effect on slope stability, using the Finite Element Method. As a results of this study, the shorter rainfall period and the more rainfall repetition number, the bigger effect of rainfall infiltration is and although the duration of rainfall is short, infiltration effect of rainfall is necessary to be considered on slope stability.

**Key words** : infiltration, intensive rainfall, cut-slope

## 서 론

최근 우리나라에서는 우기 시 기상이변에 의한 집중강우로 인적·물적피해가 다수 발생하고 있다. 이러한 집중강우는 국지적으로 단시간에 많은 양을 발생시키고 있으며, 강우지속시간 종료 후 다시 집중강우가 발생하는 반복적인 주기를 가지는 것이 특징이다.

강우는 사면 붕괴를 유발하는 중요한 요소로 간주된다. 실제로 강우가 많이 발생하는 우기철에는 안정되어 있던 사면이 불안정화되어 붕괴가 빈번히 발생하고 있다. 강

우가 발생하게 되면 강우의 대부분은 지표유출이 되어 단 시간에 흘러나가며 일부는 지반내로 침투하게 된다. 이때 지표로 유출되는 우수는 법면의 세굴 및 표층의 유실 등을 유발시키나 이것이 사면붕괴의 직접적인 원인은 되지 못한다. 하지만 지반내로 침투한 우수는 그 절대량의 크기가 작을지라도 시간이 지남에 따라 지반내의 간극수압이 증가하여 지반의 전단강도를 감소시켜 사면의 안전율을 저하시키는 요인이 된다(신승우, 1990).

국내 토사사면은 집중강우에 의하여 파괴가 일어날 가능성이 많고 이로 인하여 막대한 재산피해와 인명피해가

\*Corresponding author: yeupi@kict.re.kr

일어날 수 있다. 이에 따라 국내 · 외 경우에도 강우침투에 대해 다양한 해석방법을 통해 침투에 대한 연구가 진행되고 있다(김문경, 1997; 김상규와 김영목, 1991; 박성재 등, 1995; Fourier et al., 1999; Fredlund and Rahardjo 1995; Ng and Shi, 1998; Spierenburg et al., 1995).

본 연구에서는 우기 시 빈번하게 발생하는 반복강우로 인한 침투가 사면 안정성에 어떠한 영향을 미치는지 강우 강도, 강우지속시간, 강우종료시간, 상부자연사면 경사 등 다양한 조건을 변화시켜 풍화토층 절토사면 내 침투특성을 Geo-slope사에서 개발한 유한요소해석법인 Seep/w(ver. 7.0)를 통해 분석하고자 한다.

**강우시 사면 붕괴구조**

사면 붕괴는 외적/내적인 불안정 요인으로 구분할 수 있다(Terzaghi, 1950).

외적인 불안정 요인으로는 지형의 기하학적 변화, 토피 하층의 증가, 하층의 제거, 충격/진도, 인접한 호수 또는 저수지의 수위강화 및 강우 등이 있으며, 내적인 불안정 요인으로는 진행성 파괴, 풍화작용, 물의 침투로 용해 등이 있다.

이와 같이 강우와 침투는 사면 안정에 영향을 미치는 요인으로 작용하고 있다.

강우 발생 시 사면이 불안정화되어 붕괴되는 과정은 연직침투 과정, 불투수층 평행침투 과정 및 붕괴 등의 3 단계로 구분할 수 있다(Fig. 1).

연직침투 과정은 강우가 사면 토층 내에 침투하면서 형성된 침윤선이 시간 경과와 함께 연직방향으로 강하하는 과정이며, 불투수층 평행침투 과정은 침윤선이 불투수층에 도달한 후 압반과 평행한 방향의 침투가 발생하는 과정이다. 마지막으로 침윤선의 연직침투와 상승된 지하수위의 평행침투는 사면 하단부로 갈수록 크게 나타나며 한계수위 형성 위치에서 붕괴가 발생하게 된다(홍원표, 1996).

**해석단면 및 해석 조건 결정**

본 연구를 위해 풍화토층 절토사면의 해석단면은 모든 조건에서 동일한 분석이 수행되도록 높이 15 m, 높이 5 m 마다 폭 1 m의 소단, 1:1.0 경사도를 이루는 단일 단면을 이용하였고, 상부자연사면 경사 변화에 따른 분석을 위해 0°~30° 범위에서 10°간격으로 구분하였다. 지하수위는 사면높이 0 m 지점에 분포하는 것으로 설정하였다(Table. 1, Fig. 3).

강우조건과 지반 강도정수는 임의로 선정하였으며, 지반 강도정수의 경우 풍화토의 지반 강도정수 범위 내에서 선정하였다.

**게릴라성 강우에 따른 침투특성 분석**

**강우강도 변화에 따른 침투특성 및 안전율 변화**

동일한 상부자연사면 경사에서 강우강도 변화에 따른 침투특성 분석을 실시하였다(Fig. 2). 강우조건은 총 강우지속시간 48 hr로 설정하였으며, 침투수의 상한을 나타내는 유선인 침윤선은 강우지속시간 3 hr마다 분석하였다. 분석결과 강우가 발생하게 되면 상부자연사면에서 발생한 침윤선은 동일한 매질의 단면에서 강우강도에 비례하여 하강 심도가 증가하는 경향을 보인다. 또한, 침윤선이 지하수위와 접하기 전까지는 법면 상부에 침윤선이 형성되어 있으나, 지하수와 접하게 되면서 급격히 법면 전반에 침투수가 영향을 미치는 경향을 보인다.

**강우종료 경과시간에 따른 침투특성**

동일한 강우강도에서 강우지속시간이 48 hr 발생 후 96 hr의 강우종료시간에 따른 침투특성 분석을 실시하였다(Fig. 3). 강우지속시간 완료 직후 침윤선은 사면 높이 0 m 지점의 지하수위와 만나게 된 후로서 경과시간이 지남에

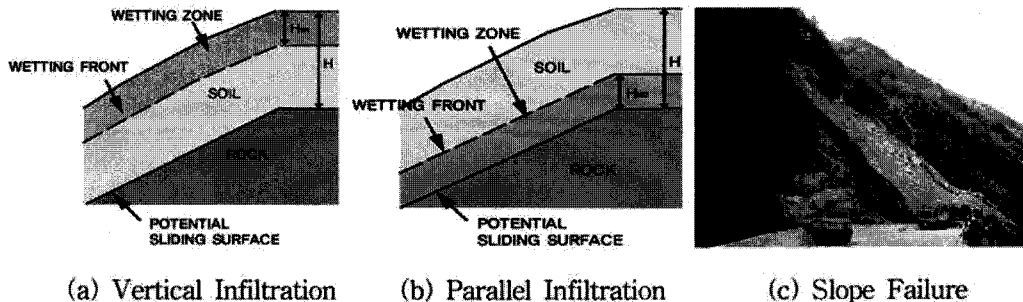
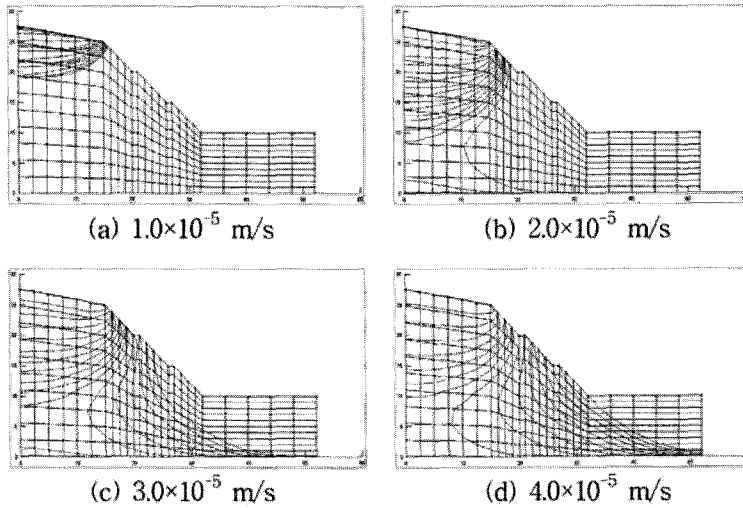


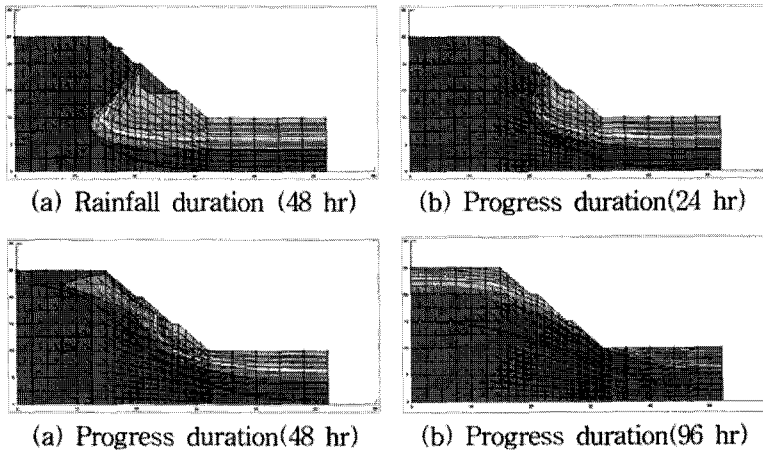
Fig. 1. Process of slope failure.

**Table 1.** Slope section and analysis condition.

Section					
Condition	slope type	height (m)	grade (°)	berm width (m)	grade of upper slope
Application	soil	15	45	1	0°, 10°, 20°, 30°
Rainfall Condition					
Condition	hydraulic conductivity (m/s)	rainfall intensity		groundwater level (m)	
		(m/s)	(mm/hr)		
Application	$4.3 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-5}$ , $2.0 \times 10^{-5}$	36, 72	0	
		$3.0 \times 10^{-5}$ , $4.0 \times 10^{-5}$	108, 144		
Strength Parameter					
Condition	unit weight ( $t/m^3$ )	cohesion ( $t/m^3$ )		angle of internal friction (°)	
Application	1.9	2.0		30	



**Fig. 2.** Infiltration characteristics related to a change in rainfall intensity.



**Fig. 3.** Infiltration characteristics due to the progress duration of rainfall end.

따라 점차 최초 지하수위로 수렴해 가고 있음을 알 수 있다. 이때, 체적함수비 등고선도와 침투 방향 벡터는 침윤선을 따라 사면 하부로 집중되는 것을 알 수 있다. 이는 사면 관리자가 강우 종료 후 법면 상부에서 수리 흔적이 관찰되지 않아도 법면 내 침투 흔적이 노출되는지 파악하는 등 사면 안정성에 침투수의 영향을 고려할 필요가 있다고 판단된다.

**강우지속시간과 강우량의 상관성**

동일한 강우량의 조건에서 강우지속시간과 강우량과의 상관성을 분석하였다. 이때, 12 hr 동안 강우지속시간의 강우량을 기준으로 동일한 강우량 조건을 만족시키기 위해 강우지속시간과 강우종료시간이 등간격으로 반복 발생한다는 가정으로 실시하였다(Fig. 4). 즉, 강우지속시간 2 hr 경우는 2 hr 간격으로 총 6회가 반복강우가 발생하고, 6 hr 경우는 6 hr 간격으로 총 2회가 발생하게 된다. 분석결과

침투수가 영향을 미치는 법면 높이는 거의 동일하게 관찰되었다. 또한, 법면 내 침윤선이나 체적함수비 분포는 강우지속시간이 짧지만 반복강우 횟수가 많은 경우가 지하수위에 더 근접하게 나타났다. 즉, 동일한 강우량의 경우 침투 영향은 강우주기가 짧고 반복횟수가 많을수록 사면 내부에 크게 작용한다고 볼 수 있다.

**강우지속시간과 강우종료시간의 상관성**

동일한 상부자연사면 경사에서 강우지속시간(4 hr)과 강우종료시간(8 hr) 간격을 일정하게 반복시켜 침투특성 분석을 실시하였으며, 총 분석시간은 24 hr이다(Fig. 5). 분석결과 강우지속시간이 강우종료시간보다 짧게 반복적으로 발생하여도 강우종료시간 동안에는 여전히 사면이 침투의 영향을 받고 있으며, 강우종료시간 횟수가 증가할수록 직전 강우지속시간 내 발생된 침투의 영향으로 점차 사면 안정성에 침투가 영향을 미친다고 판단된다.

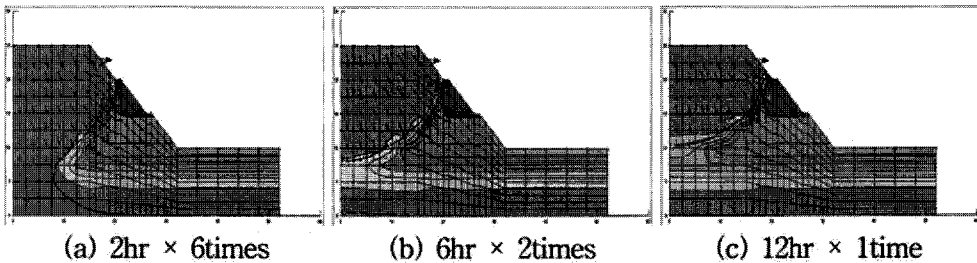


Fig. 4. Interrelationship of rainfall duration and rainfall..

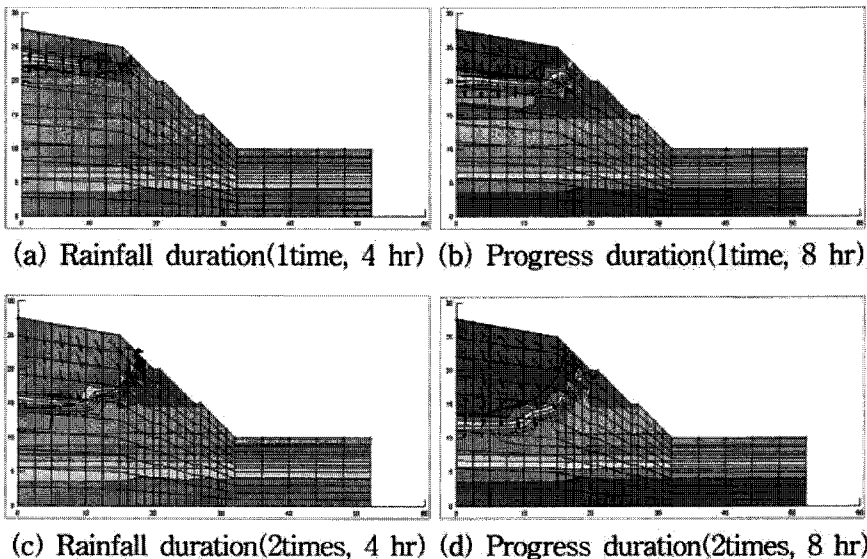


Fig. 5. Infiltration characteristics due to the repeat count.

**상부자연사면 경사에 따른 침투특성**

동일한 강우강도를 기준으로 상부자연사면의 변화에 따른 침투특성 분석을 실시하였다. 침윤선은 강우지속시간 3hr마다 도시된 것이며, 총 강우지속시간은 48hr이다. 강우초기 침윤선은 공통적으로 상부자연사면 경사와 거의 유사한 경사로 형성되다가 경과시간에 따라 법면을 통해 침투수의 유출로 인해 절토사면 상부는 조밀하고 배면으로 갈수록 원호형상을 보이고 있다(Fig. 6).

상부자연사면 경사의 변화에 대한 침윤선이 지하수위와 만나게 되는 시간을 산출하였다(Fig. 7). 침윤선과 지하수위의 접하는 시간의 기준은 침투로 인해 생성된 원호형상의 침윤선이 사면 높이 0m에 도달하는 시간으로 설정하였다. 산출결과 상부자연사면 경사와 침윤선이 지하수위에 도달하는 시간은 비례적인 관계의 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 침투속도보다는 단지 동일한 지하수위에서 상부자연사면의 경사가 증가할수록 증가 단면적만큼의

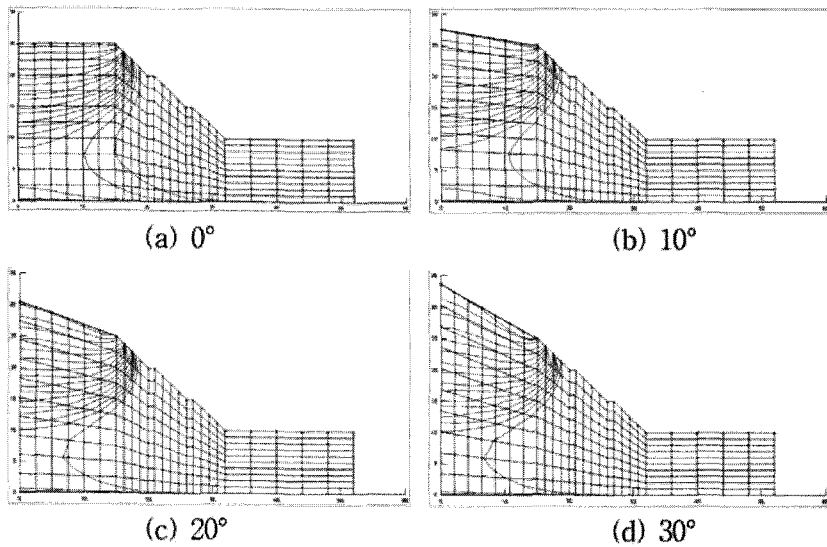


Fig. 6. Infiltration characteristics for various gradients of the upper slope.

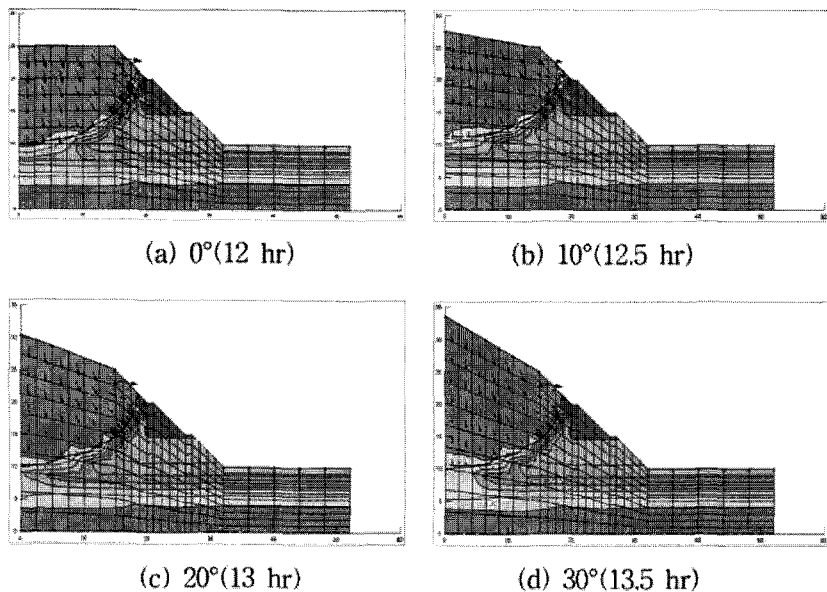


Fig. 7. Groundwater level arrival time of saturation line for various gradients of upper slope.

해석상 물량 증가에 기인한다고 볼 수 있어, 절대적인 상관성은 없을 것으로 판단된다. 하지만, 공통적으로 사면 최상단 소단부를 중심으로 침윤선이 형성되어 있고, 체적 함수비 등고선이 조밀하게 집중되어 있으므로, 소단과 법면의 경계부의 안정성에도 유의해야 할 것이다.

## 결 론

(1) 강우강도가 증가할수록 침투 심도는 증가를 하고 있으며, 침투수가 지하수위와 만나게 되면 법면 전반에 영향을 미쳐 안전율도 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다.

(2) 강우가 종료되면 사면 상부에서부터 침투의 영향이 감소되지만, 시간의 경과에 따라 사면 내에서 침투수의 이동이 발생하는 경향을 보이고 있어, 강우 종료 후에도 침투에 의한 사면 안정성을 지속적으로 주의할 필요가 있다.

(3) 동일한 강우량이 발생하는 경우 강우가 지속적으로 발생하는 경우보다 강우주기가 짧고 반복횟수가 많을수록 사면 내부에 크게 작용하는 경향을 보인다.

(4) 짧은 강우지속시간과 긴 강우종료시간이 반복되면 침투의 영향이 사면 내 누적되는 특성을 보이고 있으므로, 짧은 강우지속시간이 발생하여도 침투 영향을 고려할 필요가 있다.

(5) 소단이 생성되어 있는 경우 침투의 영향으로 인한 소단과 법면의 경계부 안정성에 유의해야 할 것이다.

## 참고문헌

- 김문겸, 1997, 지하수 흐름을 고려한 지하구조체의 탄소성해석에 대한 전·후 처리기법의 개발, 전산구조공학회, 학술발표회, 79-84.
- 김상규, 김영목, 1991, 강우로 인한 사면 불안정, 대한토질공학회지, Vol. 7, 53-64.
- 박성재, 최재영, 정두휘, 유영인, 정경환, 1995, FEM을 이용한 시간의존적, 포화상태의 지하수흐름의 해석, 토목학술발표회 논문집, 353-356.
- 신승오, 1990, 사면 내 침투해석, 한구토지공사, 3(3), 64-71.
- 홍원표, 1996, 강우시 사면안정해석법에 관한 연구, 대한토목학회, 195-198.
- Fourier, A. B. Rowe, D. and Bloght, G. E., 1999, The effect of infiltration on the stability of the slopes of a dry ashdump, Geotechnique, 49(1), 1-13.
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H, 1995, Soil Mechanics for Unsaturated Soils, Jon Wiley & Sons Inc, 6-13.

- Ng, C. W. and Shi, Q, 1998, A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage, Computer and Geotechnics, 22(1), 1-28.
- Spierenburg, S. E. J. and van Esch, J. M, 1995, Slope stability during infiltration, Proceedings of the First Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, 309-314.
- Terzaghi K, 1950, Mechanics of landslides, Application of Geology to Engineering Practice, Berkely Volume, G.S.A, 83-123.

2010년 11월 8일 원고접수, 2010년 12월 14일 게재승인

### 이정엽

한국건설기술연구원 지반연구실  
411-712, 경기 고양시 일산구 시민대로 1190  
Tel: 031-910-0526  
Fax: 031-910-0561  
E-mail: yeupi@kict.re.kr

### 김승현

한국건설기술연구원 지반연구실  
411-712, 경기 고양시 일산구 시민대로 1190  
Tel: 031-910-0524  
Fax: 031-910-0561  
E-mail: sshkim@kict.re.kr

### 최지용

한국건설기술연구원 지반연구실  
411-712, 경기 고양시 일산구 시민대로 1190  
Tel: 031-910-0101  
Fax: 031-910-0561  
E-mail: chjy@kict.re.kr

### 구호본

한국건설기술연구원 지반연구실  
411-712, 경기 고양시 일산구 시민대로 1190  
Tel: 031-910-0217  
Fax: 031-910-0561  
E-mail: hbkoo@kict.re.kr