

암반지층 굴착벽체 발생토압에 대한 단계별 굴착깊이의 영향

Effect of Step-Wise Excavation Depth on the Earth Pressure against an Excavation Wall in Rock Mass

손 무 락¹ Son, Moorak

솔로몬 아데도쿰² Adedokun, Solomon

Abstract

This paper examined the effect of step-wise excavation depth on the earth pressure against an excavation wall in rock mass. Numerical parametric studies were conducted based on the Discrete Element Method (DEM) to carry out the problems in rock mass. Controlled parameters included step-wise excavation depth, rock types, and joint conditions (joint shear strength and joint inclination angle). The magnitude and distribution characteristics of the induced earth pressure in a jointed rock mass were investigated and compared with Peck's earth pressure for soil ground. The results showed that the earth pressure against an excavation wall in rock mass were highly affected by different rock and joint conditions, and the effect of step-wise excavation depth increased as a rock type is deteriorated more. In addition, it was found that the earth pressure against an excavation wall in rock mass might be considerably different from Peck's empirical earth pressure for soil ground.

요 지

본 논문은 암반지층에 설치되는 굴착벽체에 발생하는 토압에 대한 단계별 굴착깊이의 영향을 조사한 것이다. 암반지층에서 발생하는 문제들을 다루기 위해 개별요소법에 근거한 수치해석적 매개변수해석을 수행하였다. 수치해석은 매개변수로서 단계별 굴착깊이, 암반종류 및 절리조건(절리면의 전단강도 및 절리경사각)을 고려하였다. 암반지층에서 발생된 토압과 토사지반에서의 경험토압인 Peck토압이 서로 비교되었다. 비교결과 암반지층에서 발생된 토압은 암반의 종류 및 절리조건에 따라서 크게 영향을 받았으며, 단계별 굴착깊이의 영향은 암반상태가 나빠질수록 증가하는 것으로 나타났다. 더불어, 암반지층에 설치된 굴착벽체에 발생하는 토압은 토사지반에 대한 Peck의 경험토압과는 크게 다를 수 있다는 결과를 얻었다.

Keywords : Rock excavation, Earth pressure, Step-wise excavation, Rock type, Joint condition

1 정회원, 대구대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Daegu Univ., Tel: +82-53-850-6527, Fax: +82-51-850-6529, mson@daegu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 비회원, 대구대학교 토목공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Daegu Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

다양한 시설물 건축을 위해 행해지는 각종 지반굴착 공사들은 주변 환경에 다양한 문제점들을 야기하고 있으며, 특히 굴착벽체에 작용하는 토압의 잘못된 산정은 굴착구조물의 붕괴로 이어질 수 있고 결국에는 공사중단, 법적소송 및 보상문제 등의 상당한 시간 및 경제적 손실을 초래할 수 있다. 따라서 지반굴착 시 설치되는 굴착벽체 자체에 대한 안전을 확보하는 것은 물론, 야기되는 관련 문제점들을 최소화 하는 것은 경제적 및 사회적 측면에서 매우 중요한 일이라 판단된다. 지반굴착벽체의 안전을 확보하고 관련 문제점들을 최소화하기 위해서는 지반의 거동특성 및 설치되는 굴착벽체들의 전반적인 거동을 충분히 이해해야 할 뿐만 아니라, 지반/굴착벽체 상호작용에 대한 폭넓은 이해가 수반되어야 할 것이다. 지반굴착문제의 설계 및 시공수준 향상과 관련한 연구중의 하나는 굴착벽체 구조물의 안전성과 경제성을 확보하기 위해 설계 시 벽체에 적용하는 겉보기 토압 산정에 관한 것이다. 지반굴착공사로 인한 굴착벽체의 토압 및 거동에 관한 연구는 국내·외에서 많이 수행되었으나, 대부분 토사지반을 대상으로 하고 있다. 또한, 굴착벽체의 설계를 위해 필요한 토압은 지반-벽체 및 버팀구조의 복잡한 상호거동으로 인해 토압분포에 대한 이론적인 해법이 존재하지 않고 현장계측이나 모형실험을 통해 경험적 또는 실험적으로 파악되어 제시되었다. 이렇게 제시된 토압은 벽체 및 현장 경계조건

등에 따라 실제 벽체를 따라 발생하는 토압분포와는 같지 않아 겉보기토압(apparent earth pressure)이라 명명한다. 겉보기토압에 관한 연구는 주로 국외에서 수행되었으며, 대표적인 현장계측 등을 통한 연구로는 Peck(1969) 및 Tschebotarioff(1973) 등(Fig. 1)이 있다.

이와 같이 제시된 겉보기 토압들은 일반적으로 실제 현장에서 측정되는 토압보다 크게 나타나는데 이는 제시된 겉보기 토압이 현장에서 측정된 최대토압과 안전성을 고려하여 보수적인 값으로 제시되었기 때문이다. 상기에서 언급한 겉보기토압은 사질토 또는 점성토지반으로 이루어진 단일지층에서 획득된 계측자료를 토대로 제시되었기 때문에 실제 지층구조가 다양하고 특히 토사지반이 아닌 암반지층으로 구성된 현장에 적용하기에는 많은 제한성이 따르는 것으로 지적되어 왔다. 이를 반영하여 다층지반으로 이루어진 현장에서의 겉보기토압에 대한 연구가 계속결과를 토대로 다수 수행되었으며 대표적인 연구로는 Lee and Jeon(1993), Chae and Moon(1994), Hong and Yoon(1995), Jeong and Kim(1997) 및 Yoo and Kim(2000) 등의 연구를 들 수 있다. 이와 같은 연구의 대부분은 벽체, 지반 및 시공조건에 따른 토압의 정량적인 분포 및 산정방법을 제시하기보다는 굴착현장에서 계측된 토압분포 및 크기를 기존의 국외연구자가 제시한 값과 비교하고 상기 언급한 토사지반 겉보기토압의 국내지반에의 적용성을 검토하는데 주안점을 두고 있다. 그럼에도 불구하고 이러한 연구들과 관련연구의 결과가 제시하는 중요한 의미는 암반층을 포함한 다층지반 등에서의 토압분포가 기존에 제시된 경험토압분포와 다를 수 있다는 것이며, 특히 절리를 포함한 암반지층에서의 토압분포 및 크기에 관련한 연구가 시급히 필요하다는 것을 지적하고 있다(Lee, 2004). 암반지층에서의 토압과 관련한 연구는 국내·외를 불문하고 거의 이루어지지 않았고 대부분 기존 토사지반의 경험토압을 암반지층에서의 굴착벽체의 보호 및 관리를 위해서 준용하여 적용하고 있거나 개략적인 암반분류를 통해 물성치를 조정하여 토압을 산정하고 있는 실정이다.

하지만, 국내 지층조건상 얇은 깊이에서 암반층이 출현하고 굴착깊이 또한 점점 깊어지고 있는 상황에서 절리가 형성된 암반지층에서 암반 및 절리조건 등을 반영한 토압에 관한 체계적인 연구는 그 필요성이 매우 시급한 것으로 판단된다. 이러한 상황을 반영하여 최근에 관련연구들(Son and Yoon, 2011; Son, 2013; Son and Park,

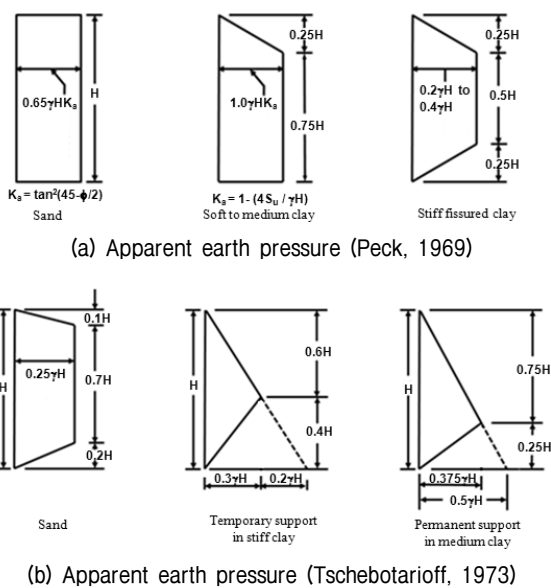


Fig. 1. Apparent earth pressure in soil ground

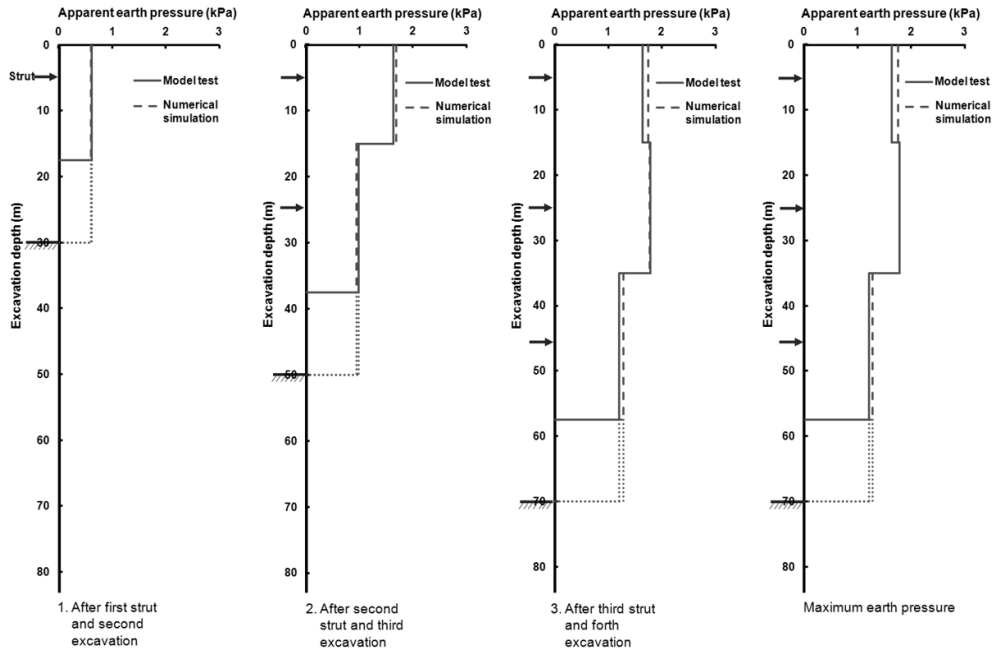


Fig. 2. Comparison between a physical model test and its numerical simulation

2013)이 수행되었으며, 연구결과, 절리가 형성된 암반지층에서 굴착벽체에 발생하는 토압은 암반종류, 절리조건 및 굴착벽체 등에 따라서 큰 영향을 받고 토사지반에서의 토압과는 크게 다를 수 있다는 것을 보여주었다.

본 연구는 상기 관련연구들의 연장선위에 있으며, 특히 기존 연구에서 다루지 않았던 단계별 굴착깊이의 영향에 대해서 암반 및 절리 전단강도, 절리경사각을 달리 하면서 조사하였다. 본 연구의 결과는 향후 암반지층에서의 토압에 관한 관련정보를 유용하게 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 수치해석적 매개변수 연구

본 연구에서 사용한 수치해석 접근방법은 기존 관련 연구(Son, 2013)에서 이미 구체적으로 설명하였지만 연구의 전반적인 이해를 위해 간략히 다시 언급하고자 한다. 본 연구에서는 암반블록 자체의 거동보다 절리의 거동에 의해 전체적인 거동이 지배되는 절리형성 암반지층을 고려하기 위해 개별요소법(DEM)에 근거한 해석을 수행하였다. 해석 프로그램은 UDEC(Universal Distinct Element Code, 2004)을 사용하였으며, 해석에 사용된 암반블록은 탄성체로 모델링하였으며, 절리면의 거동은 Coulomb Slip Model을 이용하여 모델링 하였다. 이와같은 수치해석적 접근방법은 Son and Park(2013)이 수행한 1/10 규모의 모형실험과 그것에 대한 시뮬레이션결

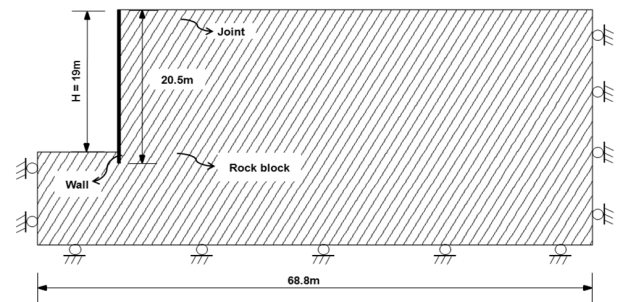


Fig. 3. Numerical modeling (a case of one joint set, joint spacing of 1 m, and joint inclination of 60°)

과를 비교함으로써 검증된 바 있다(Fig. 2).

수치해석에 사용된 해석모델은 가로 68.8m, 높이 31.5m의 크기로 모델링하였으며, 굴착벽체는 20.5m의 깊이로 설정되고 굴착깊이는 19.0m, 굴착폭은 20.0m로 가정하였다(Fig. 3).

해석에서 굴착벽체 및 버팀대(strut)는 탄성체로 가정하였으며, 굴착벽체와 암반의 인터페이스에서의 거동은 Coulomb Slip Model을 이용하여 해석하였다. 최외각 Boundary에 대해선 변위구속을 통해 경계조건을 부여하였으며, $K_v = 0.5$ 의 조건으로 초기응력을 부여한 후 수치해석을 실시하였다.

다양한 매개변수 해석을 위해 암반블록의 종류를 경암, 연암, 풍화암으로 구분하였으며, 각 암반에 해당되는 절리 물성치는 양호, 보통, 불량에 해당되는 물성치를 부여하였다(Table 1 및 2 참조). 각 암반에 있어서 물

Table 1. Numerical analysis condition

Rock type	Wall	Joint spacing (m)	Joint condition				Joint inclination angle (°)	Step-wise excavation depth (m)
			Good	Fair	Poor	—		
Hard rock	H-pile+timber lagging	1.0	Good	—	—	—	0, 30, 60, 90	3, 4, 5
Slightly weathred rock		1.0	—	Fair	—	—	0, 30, 60, 90	3, 4, 5
Moderately weathered rock		1.0	—	—	Poor	—	0, 30, 60, 90	3, 4, 5

Table 2. Properties of wall, rocks, joints, and interfaces in numerical analysis

case	Wall EI ($MPa \cdot m^4$)	Rock and Joint								Interface between wall and rock				Reference
		Rock				Joint				Interface		Interface		
		E_r (MPa)	ν	γ_r (t/m^3)	c, σ_t (MPa)	ϕ (°)	k_n (MPa/m)	k_s (MPa/m)	c, σ_t (MPa)	ϕ (°)	k_n (MPa/m)	k_s (MPa/m)		
Hard rock	23.20	1.0×10^5	0.2	2.7	0	50	2.33×10^5	0.96×10^5	0	33	2.33×10^5	0.96×10^5	Joint condition: Good (RMR=85)	
Slightly weathered rock		1.0×10^4	0.22	2.6	0	40	2.33×10^4	0.95×10^4	0	27	2.33×10^4	0.95×10^4	Joint condition: Fair(RMR=61)	
Moderately weathered rock		1.0×10^3	0.25	2.5	0	35	2.33×10^3	0.93×10^3	0	23	2.33×10^3	0.93×10^3	Joint condition: Poor(RMR=44)	

EI = flexural stiffness of walls E_r = elastic modulus of rocks ν = Poisson ratio; γ_r = unit weight of rocks; c = joint or interface cohesion; σ_t = tensile strength of the joint or interface; ϕ = friction angle of the joint or interface; k_n = normal stiffness of the joint or interface; k_s = shear stiffness of the joint or interface.

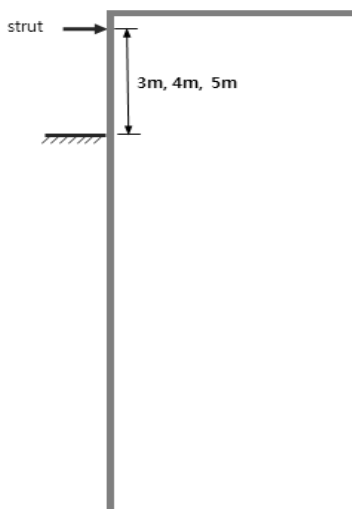


Fig. 4. Step-wise excavation depth

성치를 포함하여 암반블록과 절리간의 수직 및 전단강성의 산정은 Son and Yoon(2011)에 자세히 제시되어 있으며, 암반블록과 벽체간의 수직 및 전단강성은 벽체의 종류 및 시공방법 등에 따라서 차이가 날 수도 있지만 대표적인 값을 측정하기 어려운 점이 있어 암반블록과 절리간의 강성과 동일하게 가정하였다. 또한, 절리면에서의 채움물질 등으로 인한 점착력은 없는 것으로 가정

하였다. 각 해석경우에 있어서 절리경사각(수평면에서 시계반대방향으로 측정)은 0°, 30°, 60°, 및 90°를 고려하였으며, 단계별 굴착깊이는 버팀대 설치위치 지점에서 3m, 4m, 및 5m를 각각 고려하였다(Fig. 4). 절리간격은 모든 경우에 있어서 1m로 가정하였다.

수치해석은 암반에서의 시공조건 및 단계굴착에 따른 토압분포 및 크기를 반영하도록 수행하였다. 단계별 굴착깊이가 3m인 경우, 총 8단계로 굴착을 수행하였다. 1단계에서는 굴착벽체를 설치하고, 2단계에서 최초 1m 굴착한 후 굴착면위 0.5m지점에 1단 strut을 설치하고, 3단계부터 차례로 3m씩 추가굴착을 하고, 굴착면위 0.5m 지점에 strut을 설치하는 순서로 총 19m를 굴착하였으며 최종굴착단계에서는 strut를 설치하지 않았다(Fig. 5 참조). 단계별 굴착깊이가 4m 및 5m인 경우에 있어서도 추가굴착 깊이만 달리할 뿐 동일한 방법으로 해석을 수행하였다.

본 연구에서 사용된 굴착벽체는 H-pile+토류판 벽체이며, 굴착벽체의 형상이 실제현장에서 벽체에 발생하는 토압 및 변위에 대하여 큰 영향을 미치지 않지만 수치해석에서는 모델링의 접합부 등에서의 응력집중 현상등과 같은 영향으로 수치해석 결과에 큰 영향을 가져

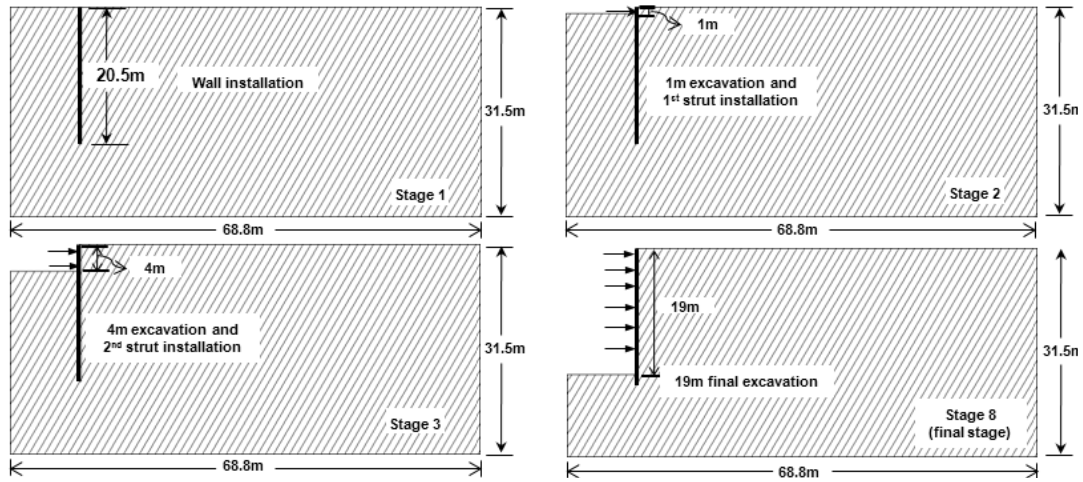


Fig. 5. Example of sequential excavation stages in the numerical simulation (step-wise excavation depth of 3 m, joint inclination of 60°)

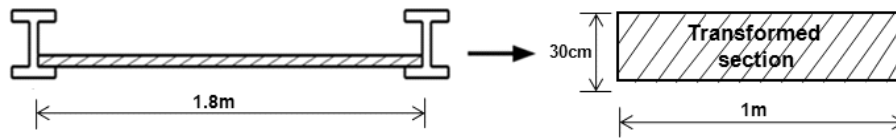


Fig. 6. Transformed section of a soldier pile and timber lagging

올 수 있고, 실제 벽체의 형상을 수치해석에서 완벽하게 모사하기란 어려운 점이 많아 본 수치해석에서는 Fig. 6과 같이 환산단면으로 치환하여 적용하였다.

3. 발생토압의 크기 및 분포특성 비교

Fig. 7은 경암에서 단계별 굴착깊이 및 절리경사각별 발생된 겉보기토압과 $\phi=35^\circ$ 인 모래지반을 가정한 Peck의 경험토압 비를 비교한 것이며, Fig. 8은 각 단계별 굴착깊이 및 절리경사각에서 발생한 총 토압과 Peck의 경험토압 분포에 의한 총 토압의 크기를 상호 비교한 것이다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 경암에서는 단계별 굴착깊이에 관계없이 절리경사각 60°를 제외하곤 토압이 Peck 토압과 비교하여 아주 작게 발생함을 알 수 있다. 절리경사각 60°에서는 발생토압이 크게 증가하였는데, 이는 절리면에서 활동이 유발되었기 때문이다. 절리경사각 60°에서 굴착깊이에 따른 토압분포를 살펴보면 전반적으로 상부에서 보다 큰 토압이 발생한 반면, 하부로 갈수록 발생토압이 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 상부지층에서는 구속효과가 작아 블록의 활동변위가 크게 발생한 반면, 깊이가 증가할수록 구속효과가 증가하여 블록의 활동변위를 억제하였기 때문인 것으로 판단

된다. 단계별 굴착깊이에 따른 발생토압을 비교해 보면 절리면에서 활동이 일어나지 않은 절리경사각에서는 굴착깊이의 영향이 나타나지 않은 반면, 절리면에서 활동이 일어난 경우에는 굴착깊이가 증가할수록 벽체상단부에서는 보다 큰 토압이 발생한 반면, 벽체하단부에서는 보다 작은 토압이 발생하였다. 경암지반에서 각 해석경우에 있어서 발생한 총 토압과 토사지반의 총 토압의 비를 살펴보면(Fig. 8 참조) 절리면에서 활동이 발생하지 않은 경우의 총 토압비는 0.05보다도 작음을 알 수 있으며, 절리면에서 활동이 발생한 경우의 총 토압비는 0.7정도로 증가함을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 총 토압비는 단계별 굴착깊이에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 연암에서 단계별 굴착깊이 및 절리경사각별 발생된 겉보기토압과 $\phi=35^\circ$ 인 모래지반을 가정한 Peck의 경험토압 비를 비교한 것이며, Fig. 10은 각 단계별 굴착깊이 및 절리경사각에서 발생한 총 토압과 Peck의 경험토압 분포에 의한 총 토압의 크기를 상호 비교한 것이다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이 경암지반에서와 마찬가지로 절리경사각 60°를 제외하곤 토압이 Peck 토압과 비교하여 여전히 작게 발생함을 알 수 있지만 경암지반에서 발생한 토압과 비교해 보면 발생토압이 상대적으로 증

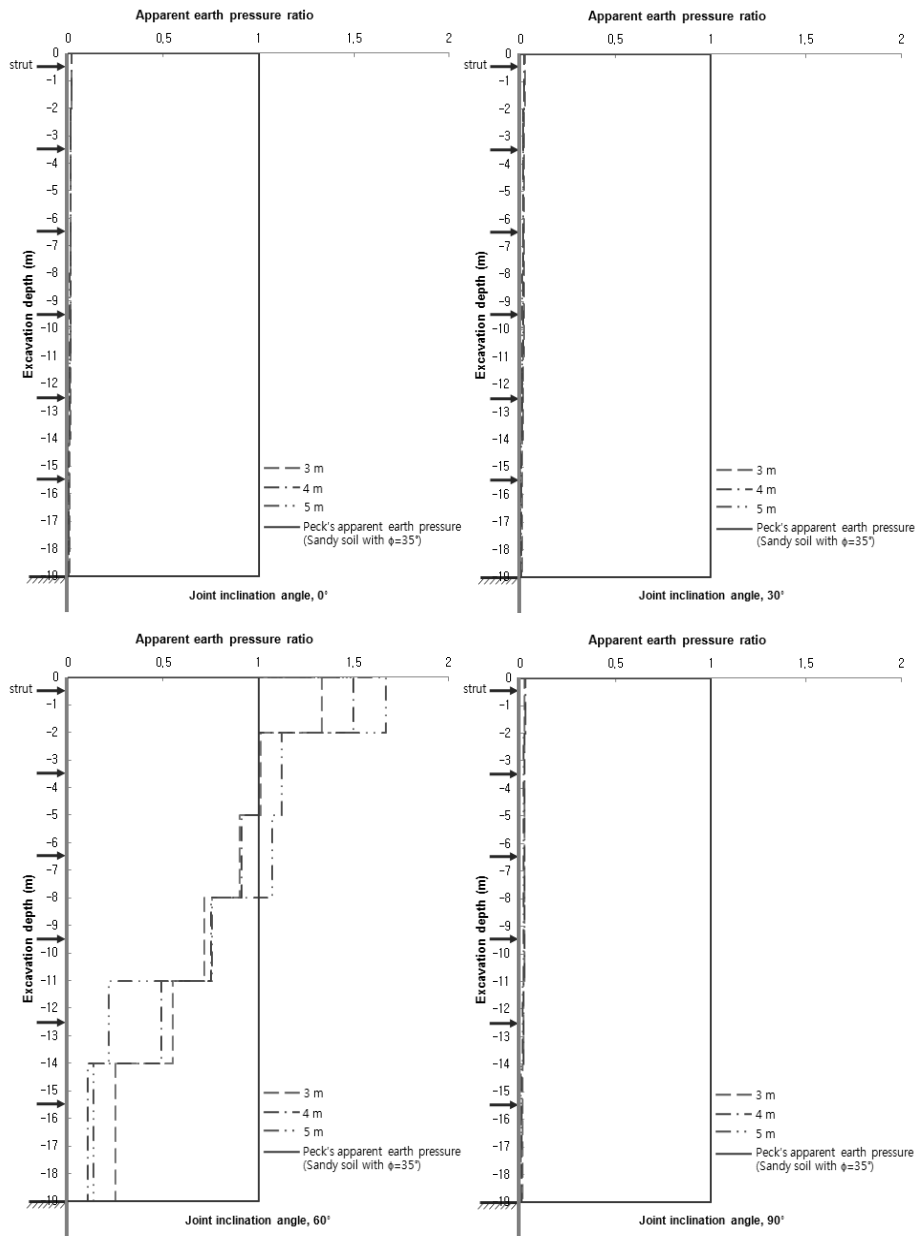


Fig. 7. Earth pressure distribution and magnitude in hard rock

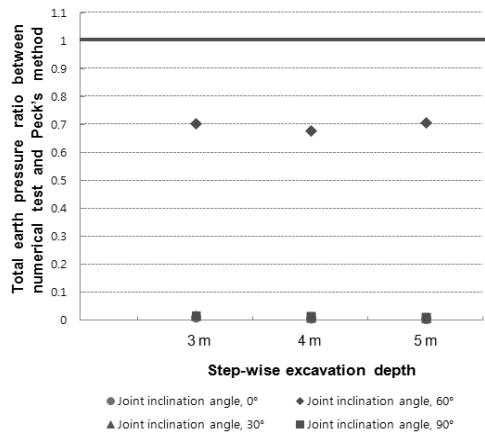


Fig. 8. Total earth pressure ratio between induced earth pressure and Peck's earth pressure (Hard rock)

가된 것을 알 수 있다. 절리경사각 60° 에서 발생한 토압 또한 경암지반에서와 유사한 토압분포를 나타내었다. 연암지반에서 각 해석경우에 있어서 발생한 총 토압과 토사지반의 총 토압의 비를 살펴보면(Fig. 10 참조) 절리면에서 활동이 발생하지 않은 단계별 굴착깊이가 3m 인 경우 총 토압비는 0.1에서 0.2 사이에 분포함을 알 수 있으며, 단계별 굴착깊이가 증가할수록 총 토압비는 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 이유는 단계별 굴착깊이가 증가할수록 굴착벽체가 보다 크게 변형되어 암반블록에 보다 큰 탄성변위를 허용하였기 때문인 것으로 판단된다. 절리면에서 활동이 발생한 경우

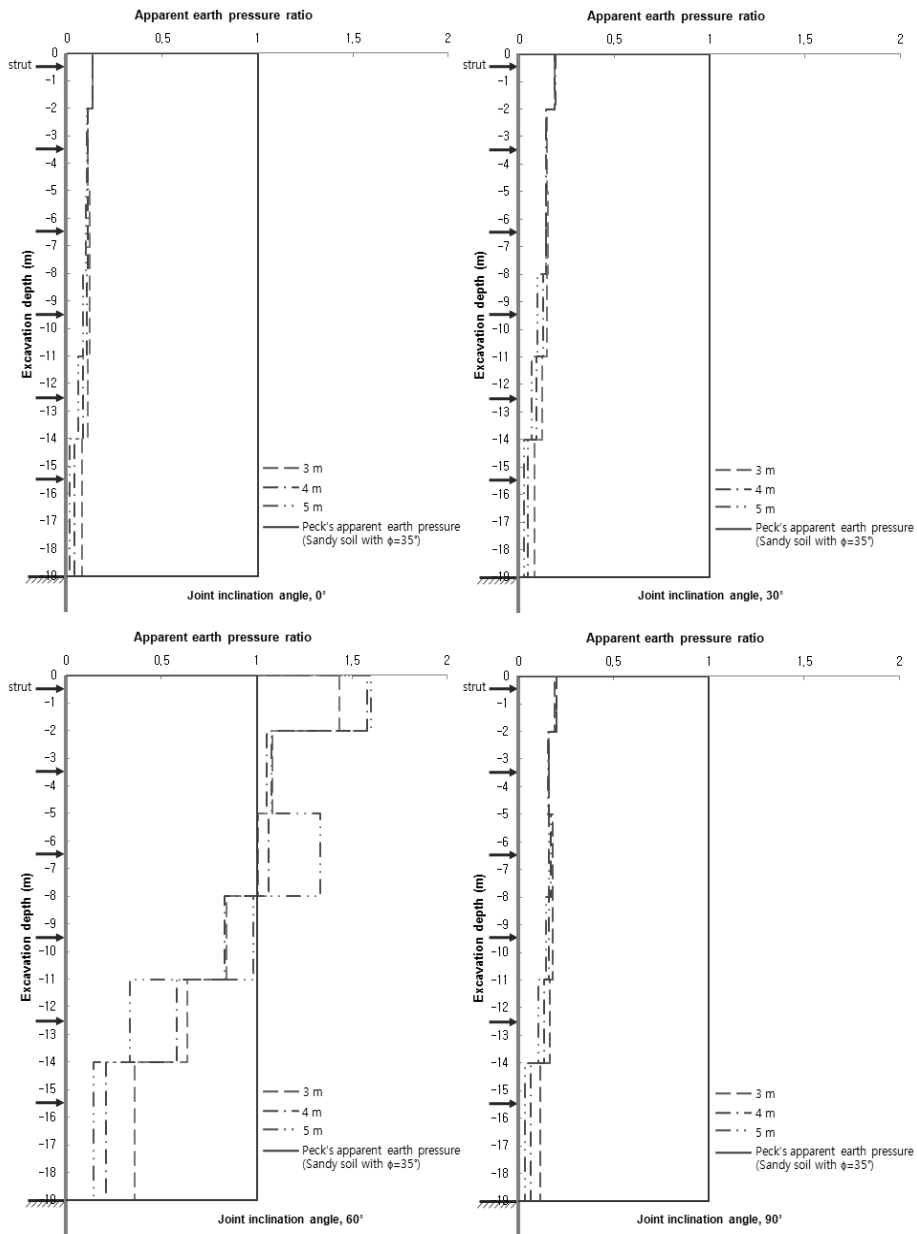


Fig. 9. Earth pressure distribution and magnitude in slightly weathered rock

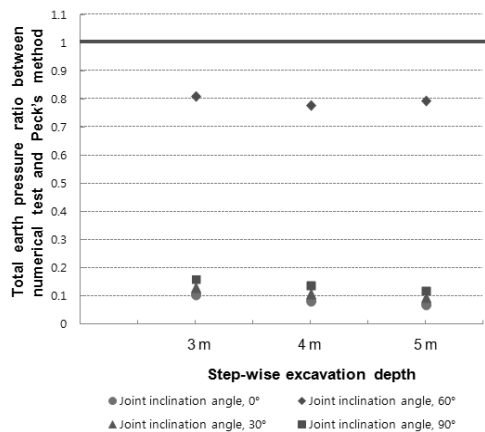


Fig. 10. Total earth pressure ratio between induced earth pressure and Peck's earth pressure (Slightly weathered rock)

의 총 토압비는 약 0.8정도까지 증가함을 알 수 있으며, 단계별 굴착깊이의 영향은 미미한 것으로 나타났다.

Fig. 11은 풍화암에서 단계별 굴착깊이 및 절리경사 각별 발생된 겉보기토압과 $\phi=35^\circ$ 인 모래지반을 가정한 Peck의 경험토압 비를 비교한 것이며, Fig. 12는 각 단계별 굴착깊이 및 절리경사각에서 발생한 총 토압과 Peck의 경험토압 분포에 의한 총 토압의 크기를 상호 비교한 것이다.

Fig. 11에서 보는 바와 같이 풍화암지반에서 발생한 토압은 경암 및 연암지반에서의 토압과 비교하여 절리면에서 활동이 발생하지 않은 경우에 크게 증가한 것을

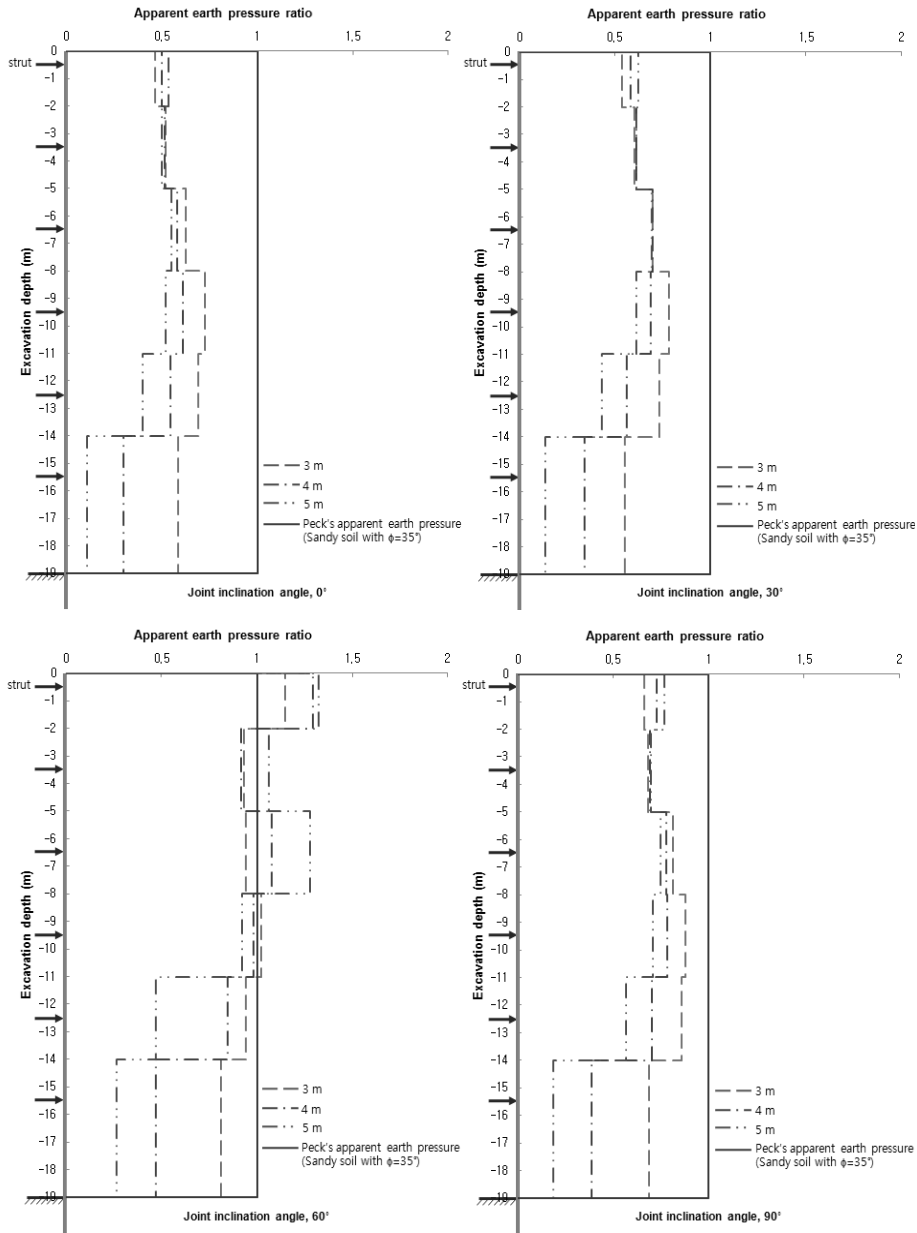


Fig. 11. Earth pressure distribution and magnitude in moderately weathered rock

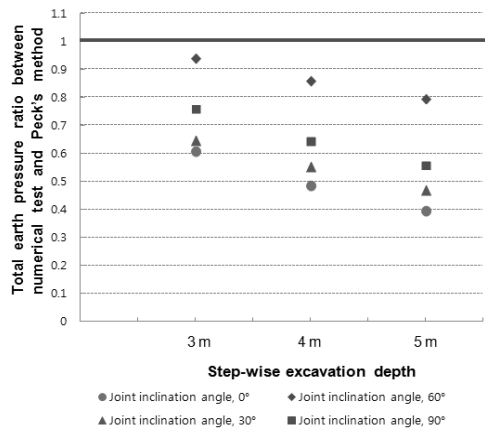


Fig. 12. Total earth pressure ratio between induced earth pressure and Peck's earth pressure (Moderately weathered rock)

알 수 있다. 절리면에서 활동이 발생하지 않은 경우만을 비교해 보면, 절리경사각이 증가할수록 토압 또한 증가되어 발생함을 알 수 있다. 이러한 이유는 절리경사각에 따른 암반블록간의 전단저항의 크기와 수직굴착에 의한 암반블록의 수평방향으로의 변형정도에 기인한 것으로 판단된다. 다시말해, 초기 평형의 응력상태에서 수직굴착으로 인해 절리경사각 90°의 수직절리를 가진 암반블록들이 전단저항의 큰 영향없이 수평방향으로 변위하려는 경향이 절리경사각 0°나 30°의 암반블록간의 상대적으로 큰 전단저항에 의해 변위가 억제되는 경우보다 더 크게 발생했기 때문인 것으로 판단된다. 발생된

토압분포는 굴착벽체 상단부에서는 단계별 굴착깊이에 크게 영향을 받지 않았지만 굴착벽체의 하단부에서는 단계별 굴착깊이가 작을수록 보다 큰 토압이 발생하였다. 절리면에서 활동이 유발된 절리경사각 60°에서 발생한 토압분포는 경암 및 연암지반과 비교하여 벽체 상단부에서 발생한 토압과 벽체 하단부에서 발생한 토압의 차이가 전반적으로 감소하는 경향을 나타냈으나, 단계별 굴착깊이가 증가할수록 그 차이 또한 증가하는 것으로 나타났다. 다시 말해서, 암반상태가 나빠짐에 따라 암반블록의 활동변위에 대한 구속효과의 영향이 줄어들고 하부지층까지 암반블록이 상대적으로 보다 큰 변형을 겪는다는 것을 알 수 있지만 단계별 굴착깊이가 증가할수록 이와같은 영향은 감소하는 것으로 나타났다. 풍화암지반에서 각 해석경우에 있어서 발생한 총 토압과 토사지반의 총 토압의 비를 살펴보면(Fig. 12 참조) 절리면에서 활동이 발생하지 않은 단계별 굴착깊이가 3m인 경우 총 토압비는 0.6에서 0.75사이에 분포함을 알 수 있으며, 단계별 굴착깊이가 5m로 증가한 경우 총 토압비는 0.4에서 0.55로 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과는 고려된 단계별 굴착깊이의 범위내에서 단계별 굴착깊이가 증가함에 따라 굴착벽체가 상대적으로 크게 변형되어 암반블록간에 보다 큰 유발 전단저항력이 발생하였기 때문인 것으로 판단된다. 절리면에서 활동이 발생한 단계별 굴착깊이가 3m인 경우 총 토압비는 0.95정도로 나타났으며, 단계별 굴착깊이가 5m로 증가한 경우 총 토압비는 약 0.8로 감소하였다.

이상의 해석결과에서 살펴본 바와 같이 암반지층에서의 토압분포는 토사지반에서의 경험토압분포와 크게 다를 수 있다는 것을 확인하였으며, 본 연구를 통해 절리를 포함한 암반지층에서의 토압분포 및 크기는 암반상태 및 절리조건에 따라서 크게 차이가 날 수 있다는 것을 또한 확인하였다. 이와 더불어 발생토압에 대한 단계별 굴착깊이의 영향은 암반상태가 나빠질수록 그 영향이 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 토대로 할 때 향후 암반지층에 설치되는 굴착벽체에 대한 설계토압은 경제성과 안전성을 고려할 때 해당지층의 암반상태 및 절리조건, 굴착조건 등을 고려하여 산정하여야 할 것으로 나타났다.

4. 결론

암반지층에 설치되는 굴착벽체에 발생하는 토압에

관하여 수치해석적 매개변수연구를 수행하였다. 매개변수로는 단계별 굴착깊이, 암반종류 및 절리조건(절리강도, 절리경사각)을 고려하였으며, 각 해석경우에 발생된 토압과 Peck에 의해 제시된 토사지반에서의 경험토압을 비교분석 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 경암과 연암지반에서는 절리면에서 활동이 발생하지 않는 한 발생토압은 토사지반에서의 토압과 비교하여 단계별 굴착깊이 및 절리경사각에 관계없이 아주 작은 것으로 나타났다. 하지만, 절리면에서 활동이 발생한 절리경사각 60°의 경우 발생토압은 다른 경우보다 크게 증가하는 것으로 나타났다. 토사지반의 토압과 비교할 때, 경암지반의 경우 절리면에서 활동이 발생하지 않은 경우의 총 토압비는 0.05보다도 작게 나타났으며, 절리면에서 활동이 발생한 경우의 총 토압비는 0.7정도로 증가함을 알 수 있었다. 경암에서 총 토압비는 단계별 굴착깊이에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 연암지반의 경우 절리면에서 활동이 발생하지 않은 단계별 굴착깊이가 3m인 경우 총 토압비는 0.1에서 0.2사이에 있는 것으로 나타났으며, 단계별 굴착깊이가 증가할수록 총 토압비는 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 절리면에서 활동이 발생한 경우의 총 토압비는 약 0.8정도로 증가함을 알 수 있었으며, 단계별 굴착깊이의 영향은 매우 작은 것으로 나타났다.
- (2) 풍화암지반에서는 경암 및 연암지반과 비교하여 발생토압이 크게 증가하였으며, 절리면에서 활동이 발생하지 않는 경우의 발생토압과 절리면에서 활동이 발생한 경우의 발생토압의 차이는 다른 암반과 비교하여 크게 줄어들었다. 이로부터, 암반상태가 나빠질수록 발생토압은 경암 및 연암과 비교하여 절리면에서 활동이 발생하지 않은 경우에는 전반적으로 크게 증가하나 절리면에서 활동이 발생한 경우에는 토압증가량은 상대적으로 크지 않음을 알 수 있었다.
- (3) 풍화암지반에서 발생한 토압을 토사지반의 토압과 비교할 때 절리면에서 활동이 발생하지 않은 단계별 굴착깊이가 3m인 경우 총 토압비는 0.6에서 0.75사이에 분포함을 알 수 있었으며, 단계별 굴착깊이가 5m로 증가한 경우 총 토압비는 0.4에서 0.55로 감소하였다. 절리면에서 활동이 발생한 단계별 굴착깊이가 3m인 경우 총 토압비는 0.95정도로 나타

났으며, 단계별 굴착깊이가 5m로 증가한 경우 총 토압비는 약 0.8로 감소하였다. 이러한 결과는 고려된 단계별 굴착깊이의 범위내에서 단계별 굴착깊이가 증가함에 따라 굴착벽체가 상대적으로 크게 변형되어 암반블록간에 보다 큰 유발 전단저항력이 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.

- (4) 암반지층에서의 토압분포는 토사지반에서의 경험토압분포와 크게 다를 수 있다는 것을 확인하였으며, 절리를 포함한 암반지층에서의 토압분포 및 크기는 암반상태 및 절리조건에 따라서 크게 차이가 날 수 있다는 것을 또한 확인하였다. 이와 더불어 발생토압에 대한 단계별 굴착깊이의 영향은 암반상태가 나빠질수록 그 영향이 증가하는 것으로 나타났다.
- (5) 본 연구의 결과는 다양한 굴착조건, 암반 및 절리조건 중에서 제한된 경우에 해당되는 것으로서 향후 다른 조건들에 대한 보다 확장된 연구가 계속되어야 할 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 본 연구의 결과는 암반지층에 설치되는 굴착벽체에 발생하는 토압과 관련하여 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌 (References)

1. Chae, Y. S. and Moon, I. (1994), Earth pressure on retaining wall by considering local soil condition. Korean Geotechnical Society '94 fall conference paper, Korean Geotechnical Society, pp. 129-138. Y.T.
2. Hong, W. P. and Yoon, J. M. (1995), Lateral Earth Pressures Acting on Anchored Retention Walls for Underground Excavation. Korean Geotechnical Society Journal, Vol.11, No.1, pp.63-77.
3. ITASCA Consulting Group, Inc. (2004), *Universal Distinct Element Code*, User's Manual, Version 4.0, Minneapolis, Minnesota, U.S.A.
4. Jeong, E. T. and Kim, S. G. (1997), Case study of earth pressure distribution on excavation wall of multi-layered soil. Korean Geotechnical Society '97 spring conference paper, pp.78-80
5. Lee, S-M. (2004), "Cut & Cover Tunnel. Urban Railway Almanac (2)", Seoul Subway Construction Headquarter., pp.417-429.
6. Lee, J. G. and Jeon, S. G. (1993), Earth pressure distribution on wooden wall during multi-layered soil excavation. Korean Geotechnical Society, Vol.9, No.1, pp.59-68.
7. Peck, R.B. (1969), "Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground", State-of-the-Art report, Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State-of-the Art Volume, pp.225-290.
8. Son, M. (2013), "Earth pressure on the support system in jointed rock mass", Canadian Geotechnical Journal, Vol.50(5), pp.493-502.
9. Son, M. and Park, J. (2013), "Physical model test and numerical simulation of excavation wall in jointed rock mass", Canadian Geotech. Journal (under review).
10. Son, M. and Yoon, C. (2011), "Characteristics of the Earth Pressure Magnitude and Distribution in a Jointed Rockmass", Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol.31(6), pp.203-212.
11. Tschebotarioff, G.P. (1973), Foundations, Retaining and Earth Structures, 2nd Ed., MGH.
12. Yoo, C. S. and Kim, Y. J. (2000), "Deep excavation in soil, including rock with layers on retaining wall and apparent horizontal displacement of earth pressure", Korean Geotechnical Society Journal, Vol.16, No.4, pp.43-50.

Received : September 27th, 2013

Revised : November 19th, 2013

Accepted : February 3rd, 2014