

# 점성토의 유한요소해석에서 전단파라미터에 따른 성토 및 굴착 거동

## Embankment and Excavation Behaviour with Shear Parameters of Soft Clayey Soil in FEM

김 병 일<sup>1</sup> Kim, Byung Il 최 찬 용<sup>2</sup> Choi, Chanyong  
홍 강 한<sup>3</sup> Hong, Kang Han 한 상 재<sup>4</sup> Han, Sang Jae

### Abstract

In this study, the in-situ stress, strength and stress-strain characteristics with shear parameters (UU, CU,  $\overline{CU}$ ) are analytically evaluated and the stability analyses are carried out under loading/unloading conditions. The in-situ stress and the stress-strain behaviour may become different according to input shear parameters in finite element analyses with construction step, Especially, if the internal friction angle in Mohr-Coulomb model is set to zero, the in-situ stress and the stress-strain behaviour might not be properly predicted. The results from CU parameter of total stress analysis have no significant difference with the results from CU of effective stress analysis. Therefore, in the numerical analysis for soft ground, CU parameters can be applied to predict in-situ stress and stress-strain behaviors. In addition, the calculation method was proposed to determine the shear parameter of Mohr-Coulomb model, which is corresponding to the shear strength equivalent to that of in-situ soil.

### 요 지

본 연구에서는 연약지반에서의 재하/제하에 대한 안정해석과 응력-변형 해석시 전단 파라미터(UU; Unconsolidated Undrained, CU; Consolidated Undrained(전응력),  $\overline{CU}$ ; Consolidated Undrained(유효응력))에 따른 초기 지중응력, 강도, 응력-변형 특성을 평가하였다. 시공단계를 고려한 유한요소 해석시 입력하는 전단 파라미터에 따라 초기 지중응력과 이후 해석 결과가 달라질 수 있음을 확인하였다. 특히, Mohr-Coulomb 모델의 입력 파라미터인 내부마찰각( $\Phi$ )을 0으로 입력하여 초기 지중응력과 이후 응력-변형 거동을 해석할 경우 잘못된 결과를 도출 할 수 있다는 것을 확인하였다. 전응력 파라미터, CU를 초기 및 전단시 일괄 적용한 해석과 유효응력 파라미터, CU에서 전응력 파라미터, CU로 변경한 해석 결과가 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서, 연약지반에 대한 수치해석시 CU 파라미터를 적용하여도 초기 지중응력과 이후 응력-변형 거동에 큰 차이 없이 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 실무에서 적용하기 편한 방법으로 실제 흙의 거동과 동일한 강도를 갖는 Mohr-Coulomb 모델의 전단 파라미터를 산정하는 방법을 제안하였다.

**Keywords** : Soft ground, Shear parameter, Embankment, Excavation

1 정회원, ㈜지구환경전문가그룹 기술연구소 소장 (Member, Research Director, EGE)

2 정회원, 한국철도기술연구원 책임연구원 (Member, Korea Railroad Research Institute, Tel: +82-31-460-5317, Fax: +82-31-460-5032, [cychoi@krii.re.kr](mailto:cychoi@krii.re.kr), Corresponding author, 교신저자)

3 정회원, ㈜지구환경전문가그룹 기술연구소 차장 (Member, General Manager, EGE)

4 정회원, ㈜지구환경전문가그룹 대표이사 (Member, President, EGE)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

국내에서는 항만배후단지 개발 및 삼각주 퇴적층 횡단 철도 등 연약지반상의 성토 및 굴착이 활발히 진행되고 있다. 연약지반상의 성토 및 굴착을 위해서는 시공 단계를 고려한 안정해석 및 응력-변형 해석이 수행되어야 하는데, 유한요소해석 프로그램을 주로 활용한다.

시공단계를 고려한 유한요소 해석시 초기 지중응력 산정과 성토 및 굴착에 따른 전단거동을 평가하기 위해서는 시공단계에 따른 적절한 전단 파라미터를 입력하여야 한다. 유한요소 해석의 결과에 대한 신뢰도는 입력되는 전단 파라미터에 따라 크게 영향을 받는데, 국내에서는 UU해석이 안전측이라 간주하여  $\Phi=0$ 해석을 관행적으로 수행하고 있는 실정이다(Smart rail, 2009; Kim, 2005; Park, 2003). 그러나,  $\Phi=0$  해석은 초기 지중응력과 시공단계별 강도를 적절하게 구현할 수 없는 경우도 있다. 해석 조건에 따라 CD 시험을 수행하기도 하나 시험 기간이 매우 길고 실제 투수계수가 매우 작아 성토 및 굴착시 과잉간극수압이 발생하는 점성토를 대상으로 하는 연약지반 개량 시에는 적용하기 어려운 점이 있다. 이와 같이 다양한 해석 조건을 적절하게 구현하면

서 변형 및 강도 특성을 합리적으로 평가할 수 있는 전단 파라미터의 선정이 필요하다.

본 논문에서는 실제 시공이 진행되고 있는 현장에서의 지반정수와 설계 단면 등을 활용하여 연약지반 상의 성토 및 굴착시 입력 전단 파라미터에 따른 초기 지중응력 특성 및 이후 재하/제하에 따른 거동을 해석적으로 평가하여 제시하고자 하였다. 또한, 시공단계를 고려한 안정해석 및 응력-변형 해석시 입력해야 하는 전단 파라미터 산정방법을 제안하였다.

## 2. 입력정수 및 해석조건

### 2.1 입력정수 및 전단 파라미터

본 논문에서 적용한 지반정수는 OO-OO 복선전철 사업 구간에서 OO항 배후철도와 접속하는 구간의 특성치이다. 본 구간에서의 연약점토층은 대체로 N치 0~2/30로 매우 연약한 것으로 확인되며, 27.5~28.6m의 두께로 분포한다. 또한, 연약점토층 하부 퇴적사질토는 주로 실트질 모래와 자갈질 모래이며, N치 20/30 이상의 매우 견고한 층으로 4.9~8.8m의 두께로 분포한다.

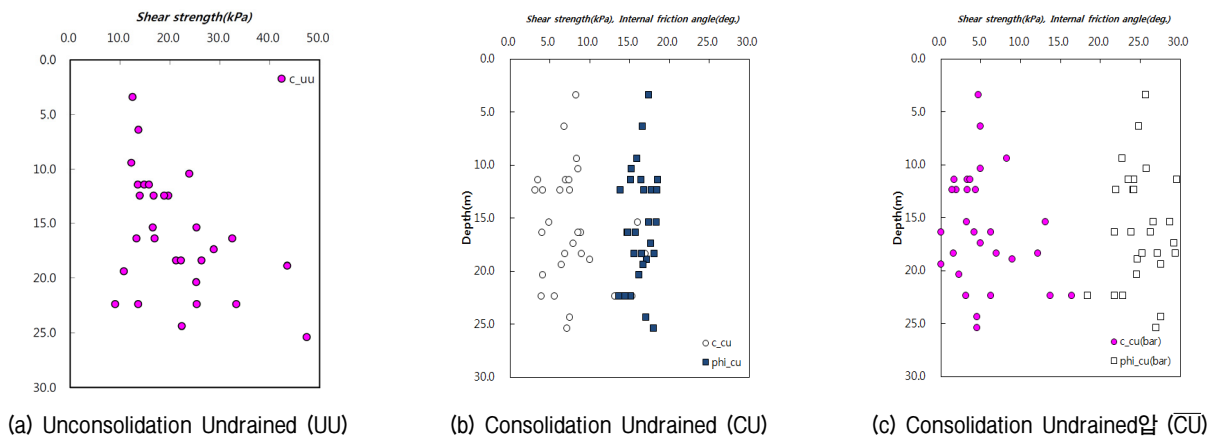


Fig. 1. Test results (Smart rail, 2016)

Table 1. Input parameters (Variable)

Parameters	UU parameters		CU parameters		CU parameters		Soft Soil parameters		
	Cohesion, c <sub>uu</sub>	Internal friction angle, phi <sub>uu</sub>	Cohesion, c <sub>cu</sub>	Internal friction angle, phi <sub>cu</sub>	Cohesion, c'	Internal friction angle, phi'	Compression index, Cc	Swelling index, Cs	Initial void ratio, eo
Unit	kPa	°	kPa	°	kPa	°	-	-	-
Value	21.0	0	7.8	16.4	5.3	25.2	0.274	0.0274	2.06
Model	Mohr-Coulomb						Modified Cam-Clay		

Table 2. Input parameters (Fixed) (Smart rail, 2016)

Parameters	Embankment material				Clay	
	Unit weight, $\gamma$	Cohesion, $c$	Internal friction angle, $\phi$	Young's modulus, $E$	Unit weight, $\gamma$	Young's modulus, $E$
Unit	kN/m <sup>3</sup>	kPa	°	kPa	kN/m <sup>3</sup>	kPa
Value	16.0	5.0	30.0	3.5E04	15.0	1.0E03
Model	Mohr-Coulomb				See Table 1	

Parameters	Sand				Sheet pile	
	Unit weight, $\gamma$	Cohesion, $c$	Internal friction angle, $\phi$	Young's modulus, $E$	Unit weight, $\gamma$	Axial stiffness, $EA$
Unit	kN/m <sup>3</sup>	kPa	°	kPa	kN/m <sup>3</sup>	kN
Value	18.0	0.0	30.0	2.5E04	76.0	8.1E04
Model	Mohr-Coulomb				Liner elastic	

Note 1) Young's modulus, E is estimated from compression index (Lambe and Whitman, 1969)

Fig. 1은 본 논문에서 고려한 지반의 실제 삼축압축시험 결과를 심도별로 제시한 것이고, 그 결과를 바탕으로 관련 파라미터(Table 1)를 평균하여 산정하였다. CU, CU의 내부마찰각 역시 각 심도값을 평균하여 적용하였다. 하부 모래층의 특성은 해당 과업의 설계 지반정수를 사용하였다(Table 2).

## 2.2 해석 조건

본 논문에서의 수치해석은 범용 유한요소 해석 프로그램인 Plaxis 8.2(Plaxis bv, 2002)를 사용하였으며, 해석 조건은 Table 3과 같다. 전단 파라미터의 산정방법 및 결과를 조합하여 총 5가지의 해석을 수행하였다. 시공 단계는 연약점토 10.0m인 원지반 점토층을 대상으로 2.0m를 성토한 후 시트파일을 설치하고, 2.0m를 굴착

하는 조건으로 수행하였다. 각 단계별로 발생하는 과잉 간극 수압은 완전히 소산시킨 후 다음 단계 해석을 수행하였다. 성토 및 굴착 폭은 20.0m를 적용 하였다. Table 3에서 초기 지중응력 항은 초기 지중응력을 계산하기 위해 적용하는 파라미터이고, 재하/제하시 응력은 성토 및 굴착시 적용하는 파라미터이다. Plaxis에서는 초기 지중응력 계산을 위한 파라미터와 재하/제하시 파라미터를 변경할 수 있어 실제 연약지반상의 성토, 굴착 거동과 유사한 Case 4를 추가하였다. Case 1~Case 4는 유한요소해석시 가장 일반적으로 적용되는 Mohr-Coulomb 모델(탄성 완전 소성 거동)을 적용하였고, Case 5의 경우 연약지반 해석에서 예측 결과의 신뢰도가 높다고 알려진 Modified Cam-Clay 모델(탄성 변형경화 소성 거동, 본 프로그램에서는 Soft Soil Model, 이하 MCC 모델)과 동일한 해석모델이다.

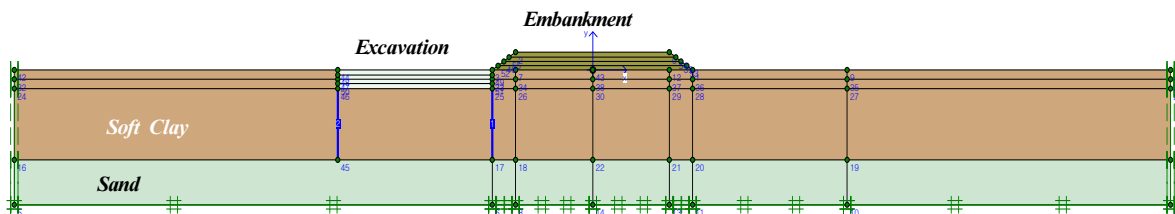


Fig. 2. Analysis section (embankment and excavation)

Table 3. Shear parameters and constitutive models with analysis case

Case name	In-situ stress	Loading/Unloading stress	Constitutive model
CASE 01	UU parameter	UU parameter	Mohr-Coulomb
CASE 02	CU parameter	CU parameter	Mohr-Coulomb
CASE 03	CU parameter	CU parameter	Mohr-Coulomb
CASE 04	CU parameter	CU parameter	Mohr-Coulomb
CASE 05	CU parameter	CU parameter	Soft soil

Fig. 2는 수치해석 단면으로 OO-OO 복선전철 지중 조건 및 성토와 굴착 조건을 고려한 것이다. 연직면위는 성토체 하부 원지반에서 측정하였으며, 수평면위는 성토체 끝단에 설치된 Sheet pile 위치에서 측정하였다.

### 3. 초기 지중응력 특성과 전단거동

#### 3.1 초기 지중응력

Table 4에는 초기 지중응력에 대한 해석 결과를 심도 별로 제시한 것이다. Case 1은  $\Phi=0^\circ$ 의  $K_0=1.0$ 인 등방 압밀 조건이므로 연직응력과 수평응력이 동일한 것이다. Case 2의 경우 Plaxis에서 정지토압계수로 Jacky 공식,  $1 - \sin\phi$ 를 이용하므로  $K_0 = 1 - \sin(16.4) = 0.72$ 로 해석된 것이며, Case 3~Case 5는  $K_0 = 1 - \sin(25.2) = 0.57$ 로 해석된 것이다.

해석 결과가 일반적인 지반공학계 계산과 일치하므로 초기 지중응력은 각 조건별로 정확하게 시뮬레이션 되었음을 알 수 있다.

#### 3.2 초기 지중응력과 전단 파라미터간의 상관관계

전 절에서는 입력된 전단 파라미터에 따라 초기 지중

응력이 다르게 예측된다는 것을 확인하였다. 따라서, 초기 지중응력에 따른 이후의 전단거동을 예측하는 것은 연약지반 상의 성토 및 굴착시의 시공 단계별 거동을 평가하는데 있어 유용한 자료가 될 것이다.

연약지반 거동을 위한 수치해석시 일반적으로  $\Phi=0^\circ$  해석이 보수적인 결과를 예측하므로 관행적으로  $\Phi=0^\circ$  을 입력하여 해석한다. 그러나, Fig. 3에 제시된 바와 같이 시공단계를 고려한 유한요소 해석의 경우 전단 파라미터, 초기 지중응력 및 하중재하 조건(성토, 굴착)에 따라 거동이 상이함을 보이고 있다.

Condition 1의 경우 초기 지중응력이 CU 파라미터 ( $c=7.8\text{kPa}$ ,  $\Phi=16.4^\circ$ )와 UU 파라미터( $c=21.0\text{kPa}$ ,  $\Phi=0^\circ$ )의 교차점보다 작은 응력상태에 있는 경우(낮은 심도)로 성토 및 굴착시 UU강도가 CU 강도보다 클 수 있음을 나타낸다. Condition 2의 경우 초기 지중응력이 CU 파라미터와 UU 파라미터의 교차점에 위치한 경우(중간 심도)로 성토시에는 CU강도가 UU강도보다 크고, 굴착시에는 UU강도가 CU강도보다 클 수 있음을 보이고 있다. Condition 3의 경우 초기 지중응력이 CU 파라미터와 UU 파라미터의 교차점보다 높은 응력상태에 있는 경우(깊은 심도) 성토 및 굴착시 CU강도가 UU강도보다 크다는 것을 나타내고 있다.

Table 4. Analysis results for In-situ stress

Vertical stress		Horizontal stress		Coefficient of earth pressure	
Case	Vertical stress under clay, Syy		Horizontal stress under clay, Sxx		Stress ratio, Sxx/Syy
	Effective stress (kPa)	Total stress (kPa)	Effective stress (kPa)	Total stress (kPa)	
Case 1	50.0	150.0	50.0	150.0	1.00
Case 2	50.0	150.0	35.9	135.9	0.57
Case 3	50.0	150.0	28.7	128.7	
Case 4	50.0	150.0	28.7	128.7	
Case 5	50.0	150.0	28.7	128.7	

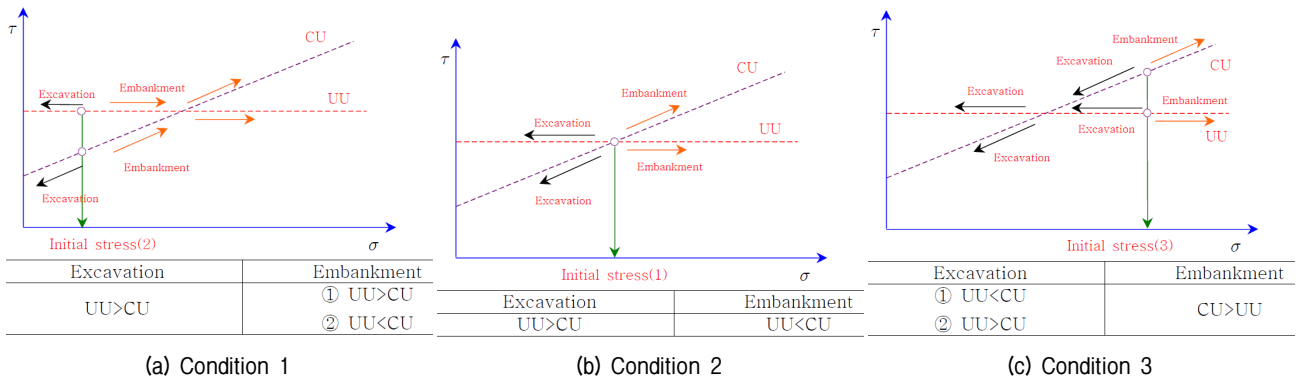


Fig. 3. Strength characteristics of embankment and excavation with in-situ parameter and shear parameters

이상의 결과로부터 연약지반에 대한 시공단계별 수치해석시 입력 전단 파라미터도 중요하지만, 계산되는 초기 지중응력과 그 값을 계산하기 위한 파라미터 역시 매우 중요함을 알 수 있다.

Fig. 4(a)에는 본 논문에서의 해석 조건중 Case 1과 Case 2~5로 구분되는 초기 지중응력상태에서부터 전단시의 응력경로(응력증분)를 예상하여 도시해 본 것이다. Case 1은 등방압밀 상태에서 전단시 UU강도까지 접근하는 것이고, Case 2~5는  $K_0 \neq 1.0$ (이방압밀)인 조건에서 CU, CU강도까지 접근하는 것이다. Case 1의 전단응력 증분이 Case 2~5의 전단응력 증분보다 크다는 것을 알 수 있다. 이는 성토 및 굴착시 전단강도와 전단

응력의 비로 표현되는 안전율이 Case 1에서 가장 크게 도출될 수 있다는 것을 의미한다. 이는 이후 4절에서도 증명된다.

Fig. 4(b)에는 본 논문의 Case 1~Case 4에 해당되는 Mohr-Coulomb 모델의 전단시 응력경로를 실제 유효응력 경로와 함께 도시하여, 전단 파라미터에 따른 해석 강도를 살펴보았다. ①, ③은 Fig. 5(a)에서 설명한 바와 같지만, ②와 같이 CU 파라미터를 적용하게 되면 실제 강도보다 더 큰 강도를 해석상 적용하게 되고, ④와 같이 UU 파라미터를 적용하게 되면 실제 강도와 동일한 강도를 적용할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 그러나, ④의 경우 시공단계별로 강도 증가를 고려할 수 없기

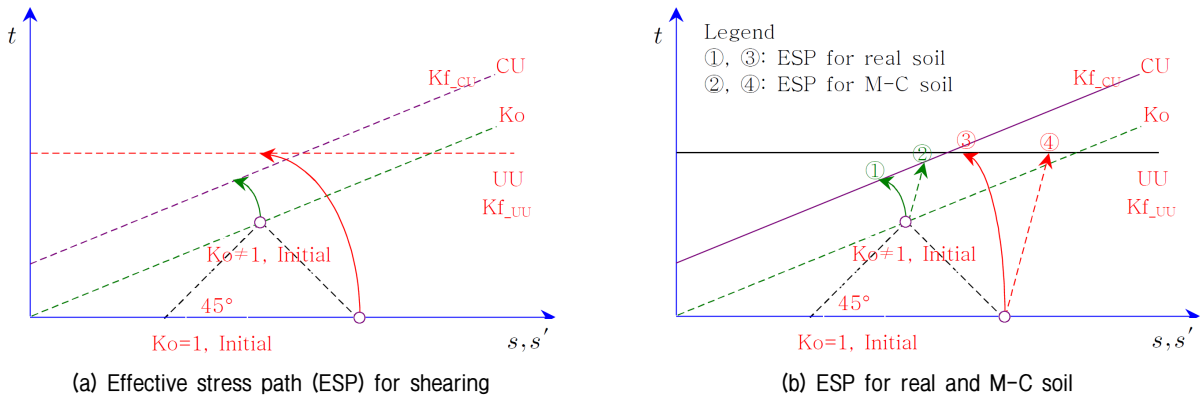


Fig. 4. Stress path with in-situ stress

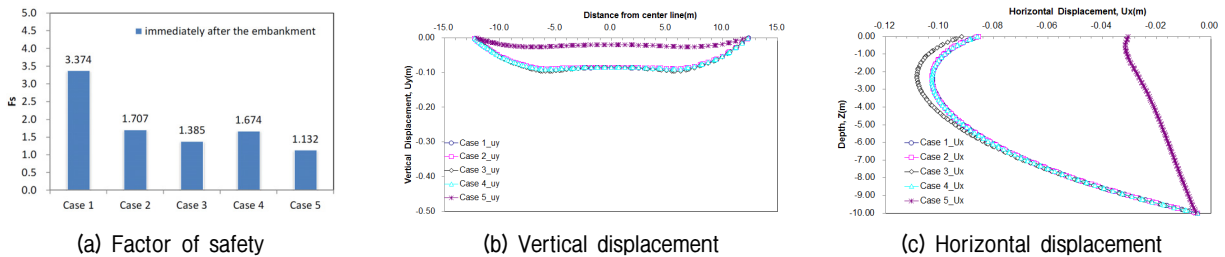


Fig. 5. The characteristics of FS, displacement immediately after embankment

때문에 각 시공 단계별 UU 강도를 강도증가율(CU 결과로부터 산정)을 고려하여 변경해야 하는 문제점을 가지고 있다. 만약, 강도를 변경하지 않는다면 낮은 성토 단계에서는 안전율이 과대 평가되고, 높은 성토 단계에서는 과소 평가될 수 있다.

Fig. 4(a)와 4(b)로부터 만약, 초기 지중응력이 동일한 위치에서 시작되는 전단이라면 CU 파라미터는 과대 예측된 강도를 적용하게 될 것이고, 초기 지중응력이 다른 위치에서 시작되는 전단이라면 UU가 파괴에 도달하는 허용 전단응력 증분이 더 크다는 것을 알 수 있었다. 이 하에서는 이를 해석 결과로부터 확인하고자 하였다.

#### 4. 성토시의 거동

##### 4.1 안전율, 침하, 변위 특성

연약지반상의 성토시의 거동을 평가하고자 각 조건 별로 한계성토고 이하로 성토를 수행하였으며, 성토 직후의 안전율, 침하, 변위를 Fig. 5에 제시하였고, 성토 후 과잉간극수압이 완전히 소산된 후의 안전율, 침하, 변위를 Fig. 6에 제시하였다. 이때 원호활동 안전율은 강도감소법으로 산정하였다.

Fig. 5에 제시된 바와 같이 안전율은 Case 1이 가장 크게 도출되었다. 그 이유는 Fig. 4에서 설명한 바와 같이 초기 지중응력상태(등방압밀)와 강도 파라미터간의 차가 가장 크기 때문이다. 초기 동일한 파라미터가 적용되는 M-C 모델인 Case 3과 MCC 모델인 Case 5가 비교적 작은 값을 나타내었다. 원지반의 침하(지표 침하)와 변위는 Case 5가 가장 작게 예측되었다. Case 5는 Case 1~4와 달리 탄성계수가 아닌 압축지수로 계산하기 때문이다. 본 결과로부터 연약지반상의 성토시 비배수 침하 및 변위는 충분할 개수, 층 분할 개수 등 다양한 인자에 영향을 받을 수 있으나 본 사례에서는 탄성계수로 침하량을 산정하는 Mohr-couloumb 보다는 압축지수로

산정하는 Modified cam-clay 방법이 작게 예측될 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 6에 제시된 바와 같이 성토 후 과잉간극수압이 완전히 소산되었음에도 불구하고 안전율은 Case 1이 가장 크게 도출되었다. 그 이유는 Fig. 5에서 설명한 바와 같이 초기 지중응력상태와 강도 파라미터간의 차가 가장 크기 때문이다. 과잉간극수압의 소산에 의한 강도 증가를 고려할 수 있는 Case 2~5는 성토 직후보다 증가하였고, Case 1은 강도 변화가 없는 상태에서 전단응력이 증가하여 안전율이 감소하였다. 성토 직후 비배수 변위에서 압밀을 허용한 과잉간극수압 완전 소산 이후 Case 5의 원지반 침하(지표 침하)가 가장 크게 나타났다. 이는 Case 1~4는 탄성계수를 이용하여 침하를 계산하지만, Case 5의 경우 압축지수로 계산하기 때문이다. 수평변위는 성토 직후 큰 차이를 보였던 Case 1~4와 Case 5가 근접하고 있는 것으로 예측되었다. 특히, 안전율, 침하, 변위 모두에서 전응력 파라미터, CU를 적용한 Case 2와 유효응력 파라미터,  $\bar{C}_U$ 에서 전응력 파라미터, CU로 변경되는 Case 4가 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이는 CU 파라미터를 적용하여도 초기 지중응력과 이후 전단거동을 잘 예측함을 나타내는 것이다.

##### 4.2 응력경로 특성

성토시 응력경로는 성토체 직하부(Point B1, Fig. 7 참조)의 경우 Fig. 9에 제시된 것이 일반적이다(Atkinson, 1993, 2014). A', B', C'이 유효응력경로(ESP)이고, A, B, C가 전응력경로(TSP)이다. 이때, A'→B'은 비배수 조건에서 성토, B'→C'은 압축시의 거동이다. 시공 직후 간극수압,  $u_i$ 은 초기 양의 과잉간극수압( $\bar{u}_i$ )으로 인해 최종 간극수압,  $u_{\infty}$ 보다 크다. 배수를 허용하게 되면, 전응력이 거의 일정한 상태에서 간극수압이 회복되어  $u_{\infty}$ 에 도달하게 된다.

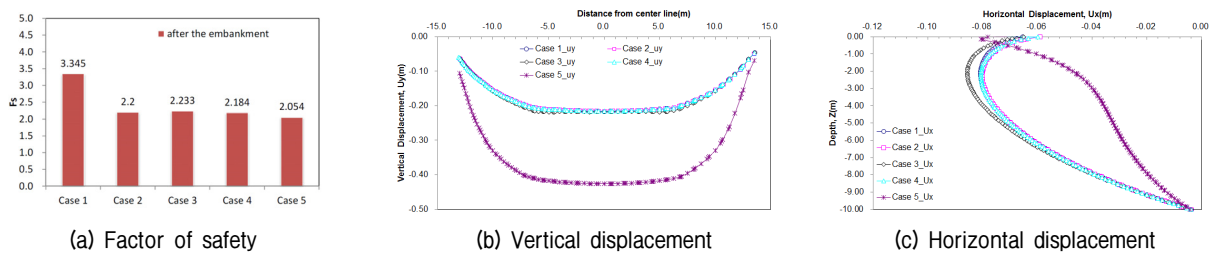


Fig. 6. The characteristics of FS, displacement after embankment

Fig. 8에는 각 조건별 응력경로를 도시하였다. Point A1가 굴착면 하부(본 조건에서는 굴착하지 않음)이고, Point B1가 성토체 중앙 하부이므로 Point A1는 인접지반 성토시 원지반의 응력경로에 해당한다. 초기 입력된

전단 파라미터에 따라 Case 1은 등방압밀 조건에서 시작되는 응력경로를, Case 2~5는 이방압밀 조건에서 시작되는 응력경로를 나타내고 있다. 모든 경우에서 있어서 응력경로의 형태가 유사한 것으로 나타났는데, 그 이

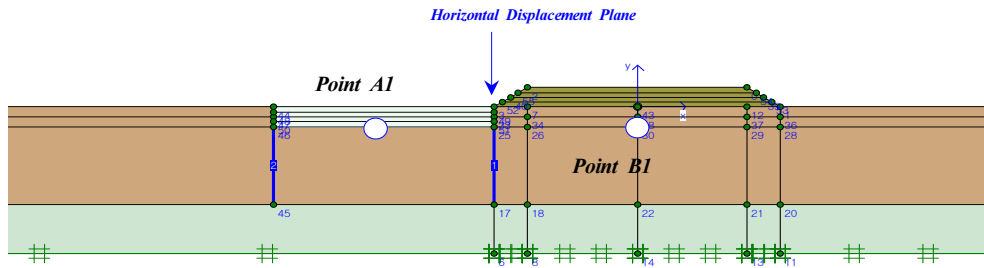


Fig. 7. Interested point and plane for numerical analysis

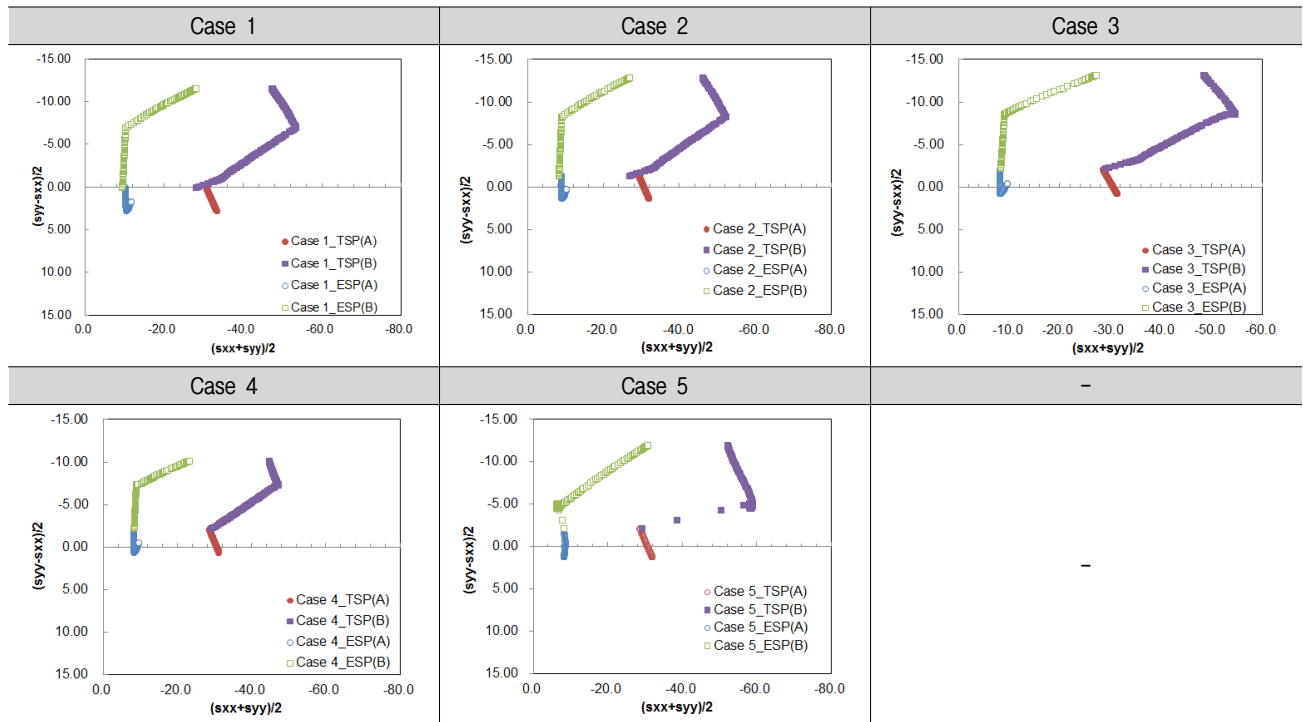


Fig. 8. Stress path for embankment

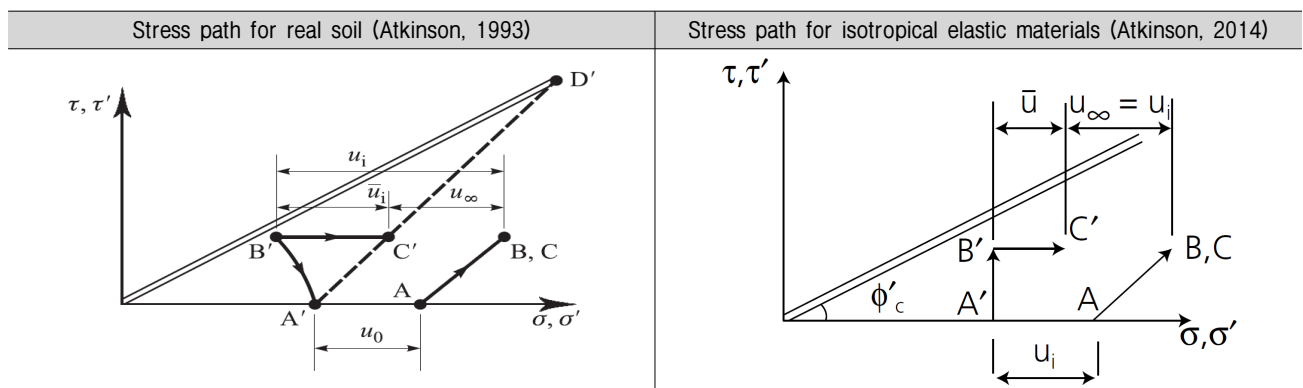


Fig. 9. Stress path for real and M-C soil during embankment

유는 성토에 의한 재하시 응력증가량은 전단 파라미터의 영향을 크게 받지 않기 때문이다. 각 위치에서 발생되는 과잉간극수압은 전응력경로(TSP)와 유효응력경로(ESP)의 차이로 확인 할 수 있는데, Case 5에서 가장 큰 것으로 나타났다. 이로 인하여 Case 5의 압밀 침하량이 가장 크게 해석되었음을 알 수 있다.

## 5. 굴착시의 거동

### 5.1 안전율, 침하, 변위 특성

각 조건별로 한계굴착고 이내로 굴착을 수행하였으며, 굴착 직후의 안전율, 침하, 변위를 Fig. 10에 제시하였고, 성토 후 과잉간극수압이 완전히 소산된 후의 안전율, 침하, 변위를 Fig. 11에 제시하였다.

Fig. 10에 제시된 바와 같이 안전율은 Case 1이 가장 크게 도출되었다. 그 이유는 Fig. 4에서 설명한 바와 같이 초기 지중응력상태와 강도 파라미터간의 차가 가장 크기 때문이다. 비배수 조건에서 원지반의 용기(지표 용기)와 변위는 Case 5가 가장 작게 예측되었다. 이는 성토시와 반대로 Case 1~4는 재하시 탄성계수를 이용하여 용기를 계산하지만, Case 5의 경우 팽창지수로 계산하기 때문이다.

전응력 파라미터, CU를 적용한 Case 2와 유효응력 파라미터, CU에서 전응력 파라미터, CU로 변경되는 Case

4가 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이는 CU 파라미터를 적용하여도 초기 지중응력과 이후 전단거동을 잘 예측함을 나타내는 것이다.

Fig. 11에는 굴착 후 과잉간극수압을 완전히 소산시켰을 때의 결과이다. 안전율은 굴착 직후와 동일하게 Case 1이 가장 크게 산정되었다. 과잉간극수압의 소산에 의한 강도 증가를 고려할 수 있는 Case 2~5는 굴착 직후보다 증가하였다. 성토 직후 비배수 변위에서 압밀을 허용한 과잉간극수압 완전 소산 이후 Case 5의 원지반 용기가 가장 작게 나타났고, 일부 위치에서는 침하가 발생하였다. 이는 Case 1~4는 탄성계수를 이용하여 침하를 계산하지만, Case 5의 경우 굴착직후 팽창지수로 용기를 계산하고, 간극수압 소산시 응력조건에 따라 압축지수와 팽창지수로 계산하기 때문이다.

성토시에는 Case 5가 가장 큰 지표침하를 나타내었지만, 굴착시에는 가장 작은 용기를 나타내었다. 이는 굴착시 적용되는 팽창지수가 압축지수의 1/10배이므로 굴착시 탄성계수도 재하시 탄성계수가 아닌 재하시 탄성계수로 적용되어야 하지만(이인모, 2014), M-C 모델에서는 이를 구현할 수 없기 때문에 반대의 경향이 나타난 것이다. 일반적으로 재하시 탄성계수가 재하시 탄성계수의 5~7배 정도(Kempfert, H. G., Gebreselassie, B., 2006)임을 고려하면 이를 고려한 모델을 사용하여도 위의 결론은 타당할 것으로 판단된다.

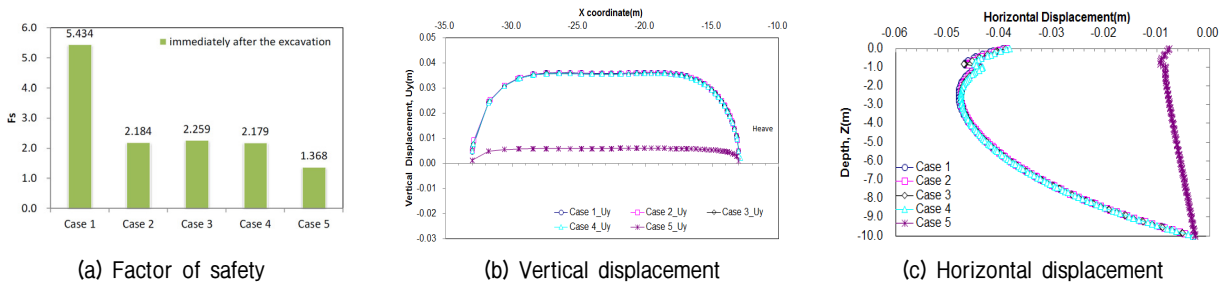


Fig. 10. The characteristics of FS, displacement immediately after excavation

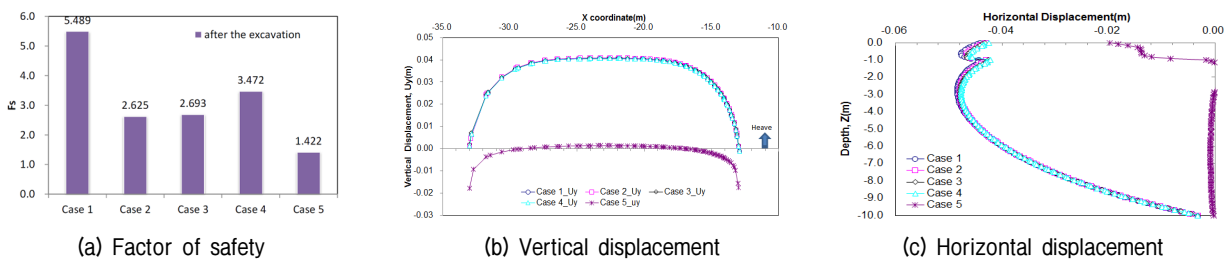


Fig. 11. The characteristics of FS, displacement after excavation



## 5.2 응력경로

굴착시 응력경로는 굴착면 하부의 경우 Fig. 13의 비고에 제시된 것이 일반적이다(Atkinson, 1993, 2014). A', B', C'이 유효응력경로(ESP)이고, A, B, C가 전응력경로(TSP)이다. 이때, A'→B'은 비배수 조건에서의 굴착, B'→C'은 팽창시의 거동이다. 시공 직후 간극수압,  $u_i$ 은 굴착으로 인한 팽창에 의해 부의 과잉간극수압이 발생하기 때문에 최종 간극수압,  $u_c$ 보다 작다. 배수를 허용하게 되면, 전응력이 거의 일정한 상태에서 간극수압이 회복되어  $u_c$ 에 도달하게 된다.

Fig. 12는 굴착시 응력경로를 제시한 것이다. 해석 결과는 일반적인 굴착시의 응력경로를 나타내고 있다. Point A1가 굴착면 하부이고, Point B1가 성토체 중앙 하부(본 조건에서는 성토하지 않음)이므로 Point B1는 인접지반 굴착시 원지반의 응력경로에 해당한다.

Case 1의 경우 성토체 중앙 하부(Point B1)의 유효응력 경로에서 축차응력이 Case 2~5보다 작은 것으로부

터 굴착 인접 지반의 전단거동이 과소평가될 수 있음을 예상할 수 있다.

## 6. 성토 후 굴착시의 거동

성토 후 굴착은 자연사면굴착이 아닌 Sheet Pile 흠막이벽 설치후 굴착을 의미한다. 또한, 성토 후 과잉간극수압을 완전 소산시킨 후 굴착을 실시하였다. 굴착 직후의 안전율, 침하, 변위를 Fig. 14에 제시하였고, 굴착 후 과잉간극수압이 완전히 소산된 후의 안전율, 침하, 변위를 Fig. 15에 제시하였다.

Fig. 14에 제시된 바와 같이 안전율은 Case 1이 가장 크게 도출되었다. 그 이유는 Fig. 4에서 설명한 바와 같이 초기 지중응력상태와 강도 파라미터간의 차가 가장 크기 때문이다. 또한, Case 2~5의 경우 성토만 실시한 경우, 굴착만 실시한 경우, 성토 후 굴착을 실시한 경우에 따라 안전율의 변화가 크지 않은 반면, Case 1의 경우 큰 변화를 보이고 있다. 이는 시공 단계에 따른 응력

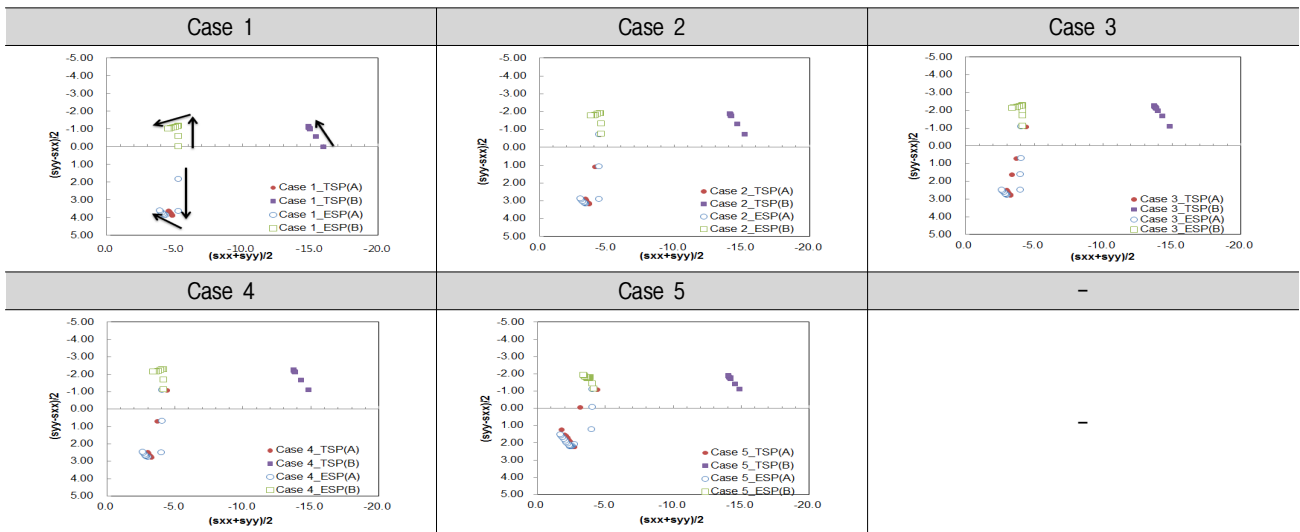


Fig. 12. Stress path for excavation

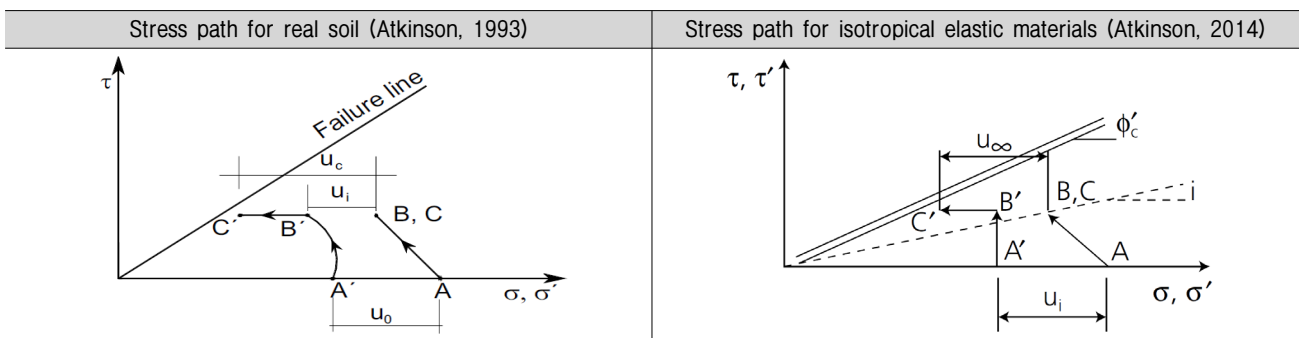
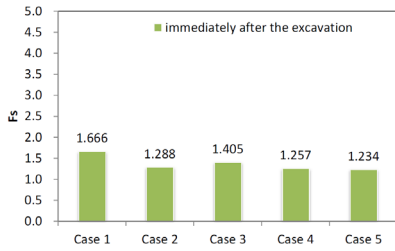
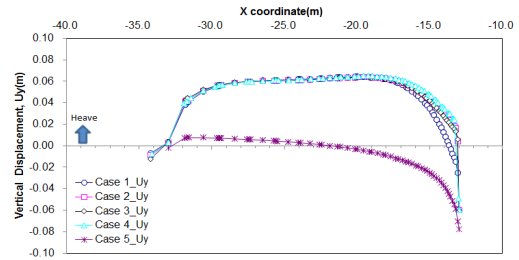


Fig. 13. Stress path for real and M-C soil during excavation

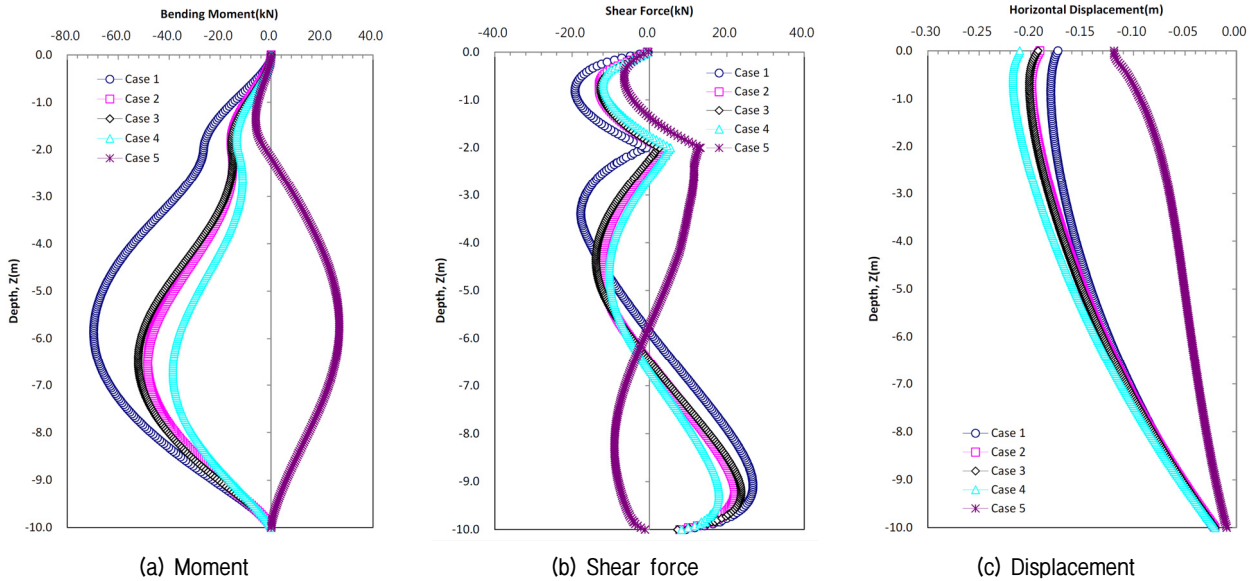


(a) Factor of safety



(b) Vertical displacement

Fig. 14. The characteristics of FS, displacement immediately after excavation



(a) Moment

(b) Shear force

(c) Displacement

Fig. 15. The behaviour of wall immediately after excavation

의 변화에 대응하여 Case 2~5는 기준 강도가 변화되는 반면, Case 1의 경우 내부마찰각=0 조건으로 강도 특성이 변화되지 않기 때문이다.

원지반의 용기(지표 용기)와 흙막이 벽의 변위는 Case 5가 가장 작게 예측되었다. 이는 이미 설립된 바와 같이 Case 5만이 제하시의 지반정수를 고려할 수 있기 때문이다.

굴착 직후 Sheet Pile 흙막이벽의 부재력과 변위를 Fig. 15에 제시하였다. 전단력 및 모멘트는 굴착면인 2.0m까지 지반응력이 해방되면서 토압이 Sheet pile에 작용하는 거동을 보였다. Case 1에서 가장 큰 전단력과 모멘트가 발생하였는데, 이는  $K_0=1.0$  조건, 즉 굴착에 의한 연직응력과 동일한 값의 수평응력이 감소하여 Case 2~5보다 큰 수평력이 작용하였기 때문이다.

변위의 경우 Case 5에서 가장 작게 나타났는데, 이는 용기와 동일하게 팽창지수에 의한 변위가 발생되므로 가장 작은 값이 나타난 것이다. 이와 유사한 실측 사례

가 Shin(2009)에 의해 제시된 바 있는데, 연약 점성토 지반에서 굴착이 이루어질 경우 배면의 연약층에 대한 압밀이 사전에 이루어지는 것( $K_0$  조건 유사)과 그렇지 않은 상태(등방압밀 조건 유사)에서의 시공중 지중수평 변위 발생량을 비교한 결과, 압밀이 완료된 후 굴착공사를 진행하는 경우가 압밀중인 구간에 비하여 평균적으로 60% 이하의 변위만 발생하는 것으로 측정되었다고 하였다.

Fig. 16에는 성토, 굴착 후 과잉간극수압이 완전히 소산되었을 때의 결과이다. 안전율은 Case 1이 가장 크게 도출되었다. 안전율의 변화를 살펴보면 Case 1의 경우 굴착 직후와 비교하여 변화가 없고, Case 2~4의 경우 감소하는 경향을 보였다. 이는 굴착시에는 과잉간극수압이 완전히 소산된 후가 굴착 직후보다 원호활동 안전율은 미미하지만 작다고 제시한 Atkinson(1993)의 결과와도 동일한 것이다.

굴착 후 과잉간극수압 소산 후 Sheet Pile 흙막이벽의

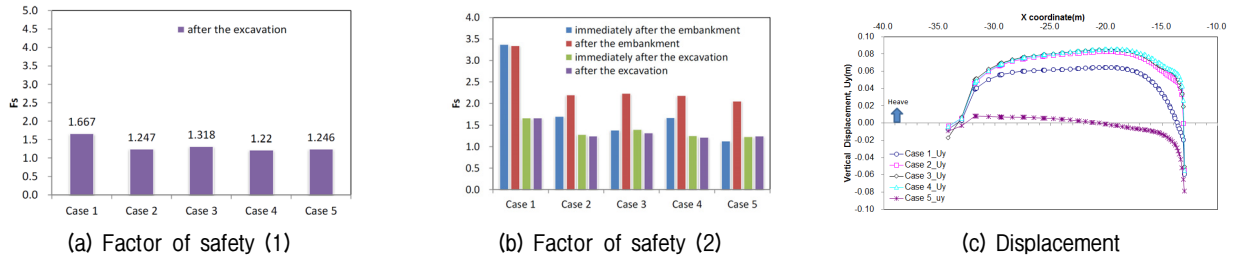


Fig. 16. The characteristics of FS, displacement after excavation

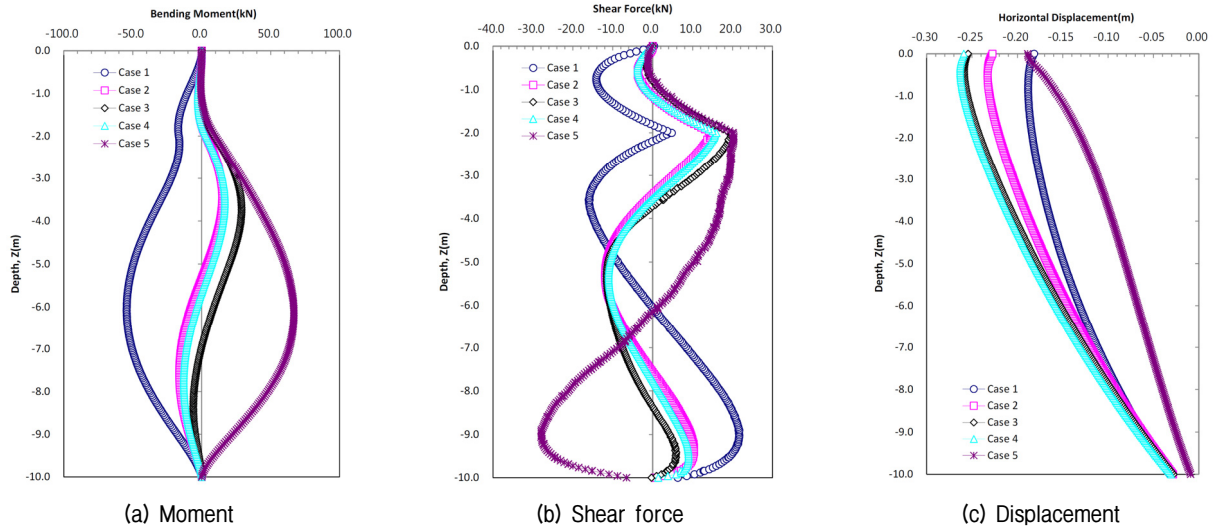


Fig. 17. The behaviour of wall after excavation

부재력과 변위를 Fig. 17에 제시하였다. 전단력 및 모멘트는 굴착면인 2.0m까지 지반응력이 해방되면서 토압이 Sheet pile에 작용하는 거동을 보였다. 굴착 직후와 달리 Case 5에서 가장 큰 전단력과 모멘트가 발생하였고, Case 2~4가 Case 5에 근접하는 경향을 보였다. 또한, 전응력 파라미터, CU를 적용한 Case 2와 유효응력 파라미터,  $\overline{CU}$ 에서 전응력 파라미터, CU로 변경되는 Case 4가 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이는 CU 파라미터를 적용하여도 초기 지중응력과 이후 흙막이 벽의 거동을 잘 예측함을 나타내는 것이다. 변위의 경우 Case 5에서 가장 작게 나타났는데, 이는 용기와 동일하게 팽창지수에 의한 변위가 발생되므로 가장 작은 값이 나타난 것이다. 추가적으로 수평방향 변위는 순수 성토와 순수 굴착에서 Case 1~4와 Case 5가 큰 차이를 보였던 것과는 달리 Sheet Pile 휨강성의 영향으로 인해 모든 경우에 있어 근접하는 경향을 보였다. 이로부터 국외 (EAB, 1994)에서 굴착시 전응력, CU 파라미터를 사용하고 있는 것이 큰 문제가 없음을 확인하였다.

## 7. 고찰 및 제언

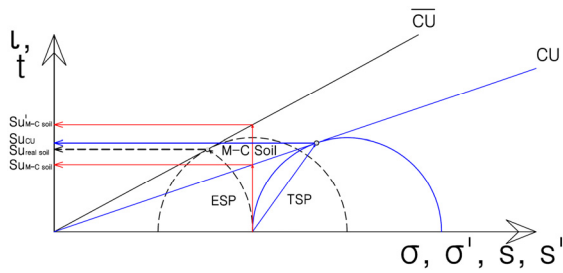
연약지반상의 성토, 굴착에 관한 수치해석 결과로부터 초기 지중응력 계산시 UU 파라미터를 입력하고자  $\Phi=0$ 을 입력하고 이후 전단해석을 실시하면 실제와 다른 해석 결과를 도출 할 수 있음을 알 수 있었다. 일반적으로 연약지반에서의 유한요소 해석시 M-C 모델을 적용하여 시공 단계를 고려한 안전율 계산을 수행하는데 있어, UU 파라미터를 입력하면 초기 지중응력과 단계별 강도 변화를 고려할 수 없어 안전율이 높게 산정될 수 있다. 이에 시공 단계별 강도 변화를 정확하게 고려할 수 있는 방법을 Fig. 18에 제시하였다. 그림에 제시된 바와 같이 실내 시험에서 수행된 CU,  $\overline{CU}$  결과를 그대로 적용하면 해석시 강도를 잘못 평가할 수 있기 때문에 Fig. 18(b)와 같이 평면변형조건에서의 M-C 모델(수직 경로, Parry, 2004)에 대한 등가의 전단 파라미터를 산정해서 적용해야 한다. Fig. 18(c)와 (d)는 삼축압축 조건 (1:3 경로, Parry, 2004)에 대한 산정 방법이다. 그러나, 등가의 전단 파라미터를 결정하기 위해서는 실험시의

데이터를 재분석하여 산정하여야 하므로 시간과 노력이 필요하다.

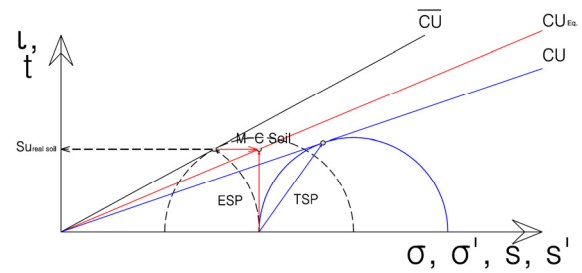
본 논문에서 Case 2~Case 4는 올바른 등가 전단 파라미터의 최소와 최대에 해당한다.  $\overline{CU}$ 를 이용하면 최대 강도, CU를 이용하면 최소 강도이고, 등가 전단 파라미터는 그 사이에 존재한다. 실제 해석 결과에서도 전응력 파라미터, CU를 적용한 Case 2와 유효응력 파라미터

터,  $\overline{CU}$ 에서 전응력 파라미터, CU로 변경되는 Case 4가 큰 차이를 보이지 않고 있다(Table 5 참조).

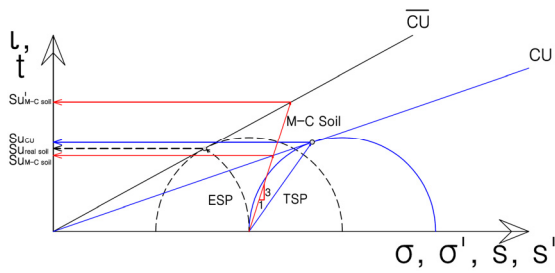
이는 CU 파라미터를 적용하여도 초기 지중응력과 이후 응력-변형 거동을 잘 예측함을 나타내는 것이다. 따라서, 초기 지중응력과 시공 단계별 강도 특성을 유한요소 해석에서 구현할 때, 실험 결과를 그대로 활용할 수 있는 CU 결과를 등가 전단 파라미터로 산정할 것을 제



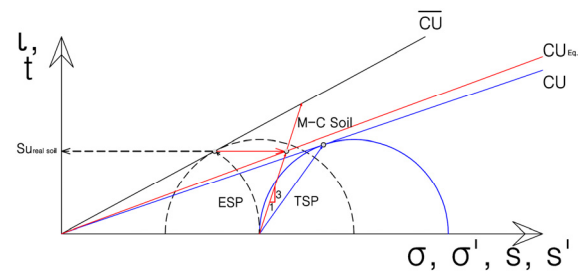
(a) Strength characteristics with shear parameters: plane strain condition



(b) Equivalent shear parameters: plane strain condition



(c) Strength characteristics with shear parameters: triaxial compression condition



(d) Equivalent shear parameters: triaxial compression condition

Fig. 18. Strength characteristics and equivalent parameters with shear parameters

- $S'_{u, M-C \text{ soil}}$  : Input parameters for M-C Model (Drained parameter for CU)
- $S_{u, CU}$  : Strength of real soil under total stress
- $S_{u, real \text{ soil}}$  : Strength of real soil under effective stress
- $S_{u, M-C \text{ soil}}$  : Input parameters for M-C Model (CU)
- $CU_{Eq.}$  : Equivalent parameter

Table 5. Comparison for the factor of safety between CASE 2 and Case 4

Case name	Immediately after embankment	After embankment	Immediately after excavation	After excavation
CASE 02	1.707	2.200	1.288	1.247
CASE 04	1.674	2.184	1.257	1.220

Table 6. Recommendations for estimating the equivalent parameters

Estimation method using by CU parameters	Estimation method using by strength ratio with depth
<p>(a) Isotropic</p>	$\tan \alpha_{cu} = \frac{S_u}{P_0'} = \frac{S_u}{\text{Depth}} \times \frac{1}{\gamma} = \sin(\phi_{cu, M-C \text{ -Oskomb}})$ <p>Where, <math>\alpha_{cu}</math> : Slope on <math>p, q</math> stress field,</p> <p><math>\frac{S_u}{P_0'}</math> : Strength ratio</p> <p><math>\phi_{cu, M-C \text{ -Oskomb}}</math> : Equivalent M-C angle</p>
<p>(b) Ko-consolidation</p>	

안한다. Table 6에는 실험 결과(CIU, CKoCU) 및 강도 증가율을 이용하여 본 논문에서 제안한 등가 전단 파라미터를 결정하는 방법을 제시한 것이다.

본 논문에서 제안한 방법은 독일의 EAB(1994)에서 제안한 굴착시 CU 파라미터 적용을 성토 및 강도 증가율 고려까지 확장한 것으로 실무 적용시 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 또한, 해석 조건이 평면변형조건이라면 2방향의 변형만 허용하므로 구속조건의 차이에 의해서 평면변형 시험에 의한 강도정수가 삼축압축시험(등방)에 의한 값에 비하여 더 크게 산정됨을(Ladd et al., 1974; 신중호, 2015) 고려하면 평면변형조건에 대하여 삼축압축시험에 의한 강도정수를 사용하게 되면 안전측의 설계가 되므로 등가 전단파라미터보다 작은 CU 파라미터를 적용하여도 오차는 더 감소할 것이다.

## 8. 결론

본 논문에서는 연약지반에서의 성토, 굴착시 적용 전단 파라미터에 따른 초기 지중응력과 강도 변화 그리고 구성모델에 따른 시공 단계별 안전율, 변위 등을 해석적으로 평가하였다.

시공단계를 고려한 유한요소 해석시 입력하는 전단 파라미터와 구성모델에 따라 초기 지중응력 이후 전단 해석이 달라질 수 있음을 확인하였다. 특히,  $\Phi=0$ 을 입력하여 초기 지중응력과 이후 응력-변형 거동을 예측할 경우 시공 단계를 모사하는 수치해석 단계에서 지반개량에 의한 전단강도의 증가를 고려할 수 없어 변위 및 원호활동 안전율이 과대/과소평가되므로 시공단계를 구현하는 수치해석에서는 CU 파라미터를 적용해야 할 것으로 사료된다. 또한, 전응력 파라미터, CU를 적용한 Case 2와 유효응력 파라미터,  $\bar{C}U$ 에서 전응력 파라미터, CU로 변경되는 Case 4가 큰 차이를 보이지 않아 전응력 파라미터의 사용 가능성을 제시하였다.

실제 흙의 거동과 동일한 강도를 갖는 전단 파라미터를 산정하는 방법과 실무에서 적용하기 편리한 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 실제 시공 사례 등과 비교하여 적용성을 확인해야 할 필요는 있지만, 국외(EAB, 1994)에서 굴착시 제안되어 적용되고 있는 방향 후 실무에서 적용하기에 매우 유용할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 철도기술연구사업 호남고속철도 테스트베드를 활용한 인프라 통합모니터링 시스템 구축 및 소음저감장치 고도화(16RTRP-C114169-01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌 (References)

1. Atkinson, J. (1993), "An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations", McGraw-Hill Book Company Europe.
2. Atkinson, J. (2014), "Fundamentals of Ground Engineering", CRC Press.
3. EAB (1994), "Empfehlungen des Arbeitskreis", augruben der Deutschen Gesellschaft fur Geotechnik. 3rd ed., Ernst & Sohn, Berlin.
4. Hettler, A., Leibnitz, S., and Biehl, F. (2002), Zur kurzzeitstandsicherheit beiin weichen boden. Heft 9, pp.612-619.
5. Kempfert, H. G. and Gebreselassie, B. (2006), Excavations and foundations in soft soils.
6. Kim, C. S. (2005), A study on back analysis of consolidation settlement of soft soil, Chon nam University, Master of Science
7. Ladd, C., Foot, R., Ishihara, K., Schlosser, F., and Poulos, H. (1977), Stress-deformation and strength characteristics. In Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, 10-15 July 1977. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Japan. Vol.2, pp. 421-494.
8. Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1969), Soil Mechanics, John Wiley & Sons.
9. Lee, I. M. (2014), Principles of Soil Mechanics, CIR.
10. Park, C. W. (2003), A study on determination of consolidation settlement in soft ground with the titled load, Changwon University, Master of Science.
11. Parry, R. H. G. (2004), Mohr Circles, Stress Paths and Geotechnics, Second Edition, Spon Press
12. Plaxis bv (2002), Plaxis version 8.2 tutorial manual.
13. Shin, J. H. (2015), Geomechanics and Engineering I, CIR.
14. Shin, S. J. (2009), Consolidation of soft ground on lateral deformation during excavation, Hanyang University, Master of Science.
15. Smart Rail (2016), Busan new port double track line project.

Received : October 16<sup>th</sup>, 2017

Revised : January 3<sup>rd</sup>, 2018

Accepted : January 23<sup>rd</sup>, 2018