

격벽형 중력식 2열 합성소일벽(BSCW)공법을 적용한 연약점토지반의 거동에 대한 수치해석적 연구

A Numerical study on Behavior of Soft Clay Soils with Installed Buttress Type Self Supporting Composite Wall

김 동 관¹ Kim, Dongkwan 정 현 석² Jung, Hyun-Seok
최 향 석³ Choi, Hangseok 원 종 목⁴ Won, Jongmuk

Abstract

In this study, the displacement of soft clay layer with installed Buttress type Self supporting Composite Wall (BSCW) was investigated using numerical method. The model was validated using the field displacement data at the front center of BSCW and parametric analysis of the model was implemented at varied cohesion, elastic modulus of 3 different clay layers (soft, medium, and stiff). In addition, parametric study was also performed for varied center-to-center distance of bottom cement grouting columns installed by jumbo special pattern (JSP) method. The results of parametric study demonstrated that the displacement of BSCW is the most significant in soft clay layer and low center-to-center distance of grouting columns is required at relatively low elastic modulus of clay layer.

요 지

본 연구에서는 수치해석을 이용해 격벽형 중력식 2열 합성소일벽(BSCW) 공법의 변위에 대해 분석하고 고찰하였다. 수치해석 모델은 BSCW 앞면 중심부의 현장 변위 데이터를 통하여 검증되었고 세 가지 다른 점토지반(soft, medium, stiff)의 점착력 및 탄성계수에 대한 매개변수 해석을 수행하였다. 또한 Jumbo Special Pattern 공법을 이용한 저면 시멘트 칼럼의 Center-To-Center 간격에 대한 매개변수 해석도 수행하였다. 매개변수 해석 결과, BSCW의 변위는 연약 점토 지반에서 가장 크게 나타났고, 낮은 탄성계수를 가진 지반인 경우 낮은 Center-to-Center 간격이 요구되었다.

Keywords : Buttress type self supporting composite wall, Clay layer, Cohesion, Elastic modulus, Parametric study

1. 서 론

우리나라는 3면이 바다로 둘러싸인 국토형태를 가지

고 있는 국가로서 건설부지의 부족으로 해안가 지반 또는 매립지와 같은 연약지반에서의 건설에 대한 시공 및 수요가 증가하고 있다. 수요의 증가에 따라 연약지반에

1 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정수로 (Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg. Korea Univ.)

3 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

4 정회원, 울산대학교 건설환경공학부 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Ulsan, Tel: +82-52-259-2279, jmwon@ulsan.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

서 최적 사용성을 갖는 가시설공법 및 기존 사용되던 공법의 단점을 보완한 가시설공법에 대한 연구도 많이 시행되고 있다.

흙막이 가시설 공법에서 많이 사용되는 공법에는 일반적으로 Strut공법과 Earth anchor공법 등이 있다. 두 공법은 쓰임 및 적용성이 다양하여 국내에서 많이 사용된다. 그러나, Strut공법의 경우 다수의 버팀보와 중간 말뚝의 간섭으로 굴착 및 구조물의 작업성을 저하시키고 버팀보와 중간 말뚝의 설치에 따른 추가 시공기간의 소요로 공기가 증가하는 등의 시공성의 문제점과 버팀보와 중간 말뚝의 존재로 인해 굴착공사가 어렵기에 목표 굴착보다 과굴착 되어 변위가 크게 발생하는 안정성의 문제점이 있고(Oh, 2014) Earth anchor공법은 다수의 앵커체 시공에 따른 작업성의 저하, 앵커체의 인접대지 침범, 가시설 주변 지중매설물 존재 시 시공 불가 등 시공성의 문제점과 앵커체의 설치 시 정착부의 인장력에 대한 품질 불안정의 안정성 문제등이 발생한다(Yhim and Lee, 1999). 그 결과, 시공기간 단축과 지지력 확보를 위한 공법 개발이 요구되었고 본 연구의 격벽형 중력식 2열 합성소일벽(BSCW)공법이 개발되었다.

BSCW공법은 Soil-Cement Wall(SCW)을 전열과 후열에 간격을 형성하여 시공하고 형성된 간격 사이에 Jumbo Special Pattern(JSP)공법으로 보강하여 SCW와 JSP공법이 하나의 중력식 벽체로서 지지력을 확보하도록 하고, 굴착 저면의 수동측 부분에 추가적인 JSP공법 시공으로 보강하여 작업공간내에 추가 구조물없이 지지력을 확보하기 위해 개발된 공법이다. 본 공법은 해안매립지반, 연약점토지반 등에서 시공되고 있으나 좀 더 폭넓은 현

장 적용성 및 안정성을 확인하기 위해서는 BSCW공법의 수치해석 모델 개발이 요구된다. 그러나 현재 BSCW공법에 대한 수치해석적 연구는 진행된 사례가 없다.

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램 MIDAS GTS NX를 이용하여 BSCW공법에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 현장계측데이터를 통해 수치해석모델의 검증은 수행하였으며 검증된 수치해석모델로 BSCW공법 사용의 주된 지반인 연약점토지반의 대표적 물성치(탄성계수, 점착력)를 이용하여 매개변수해석을 하였다. 또한 BSCW공법의 시공비 산정에 중요한 JSP공법에 의한 배면과 저면 Column의 Center-to-Center(CTC)간격에 대한 매개변수해석을 수행하였다.

2. BSCW공법

격벽형 중력식 2열 합성소일벽(BSCW)공법은 Fig. 1과 같이 2열 흙막이벽(SCW in Fig. 1)을 설치하고 흙막이벽 사이 무근 방식의 중간 보강 격벽을 일정 간격으로 시공한 후 상부를 지지보와 브레이싱으로 일체화시킨 구조 형식이다. BSCW공법은 Strut공법이나 Earth anchor공법에 비해 버팀보와 중간말뚝 또는 앵커체가 필요 없어 시공성이 우수하고 2열의 흙막이벽과 중간 보강 격벽의 상부 지지보와 브레이싱에 의한 일체화로 안정성이 우수하다. 일반적으로 BSCW공법은 준설 매립지나 해성 퇴적층과 같은 연약지반이나 인접대지 간섭으로 앵커 시공 불가시 많이 이용된다. 또한 인접대지와 의 여부를 고려한 단면의 폭과 앵커를 조합하여 현장여건에 맞는 설계가 가능하다.

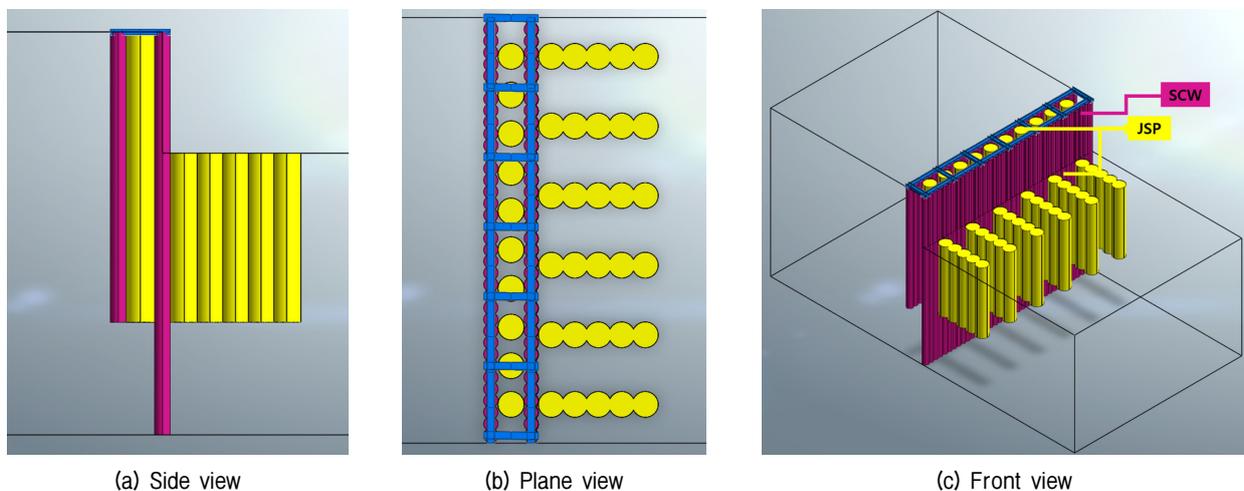


Fig. 1. Schematic drawing of Buttress type Self-supporting Composite Wall (BSCW)

3. 현장실험

수치해석 모델 검증에 이용된 BSCW의 현장 변위 데이터는 목포 오룡지구 32블럭 공사에 적용된 BSCW에 설치된 지중경사계를 이용하여 측정하였다. 지중경사계의 위치는 2열 중 후면SCW에 부착하여 측정하였고, 변위데이터 계측은 총 28일간 1주일 간격으로 4번 수행하여 최종변위값을 평형상태 변위 값으로 가정하여 수치해석 모델 검증에 이용하였다. 현장 지반은 표준관입시험(SPT) 및 시추 조사를 수행하여 깊이별 지층분포를 확인하였고, GL(-)0m~GL(-)18m은 실트질 점성토로 매우 연약한 점성토에서 연암층 직전 견고한 점성토가 나타나는 분포를 보였고, GL(-)18m이하에서는 연암층을 가지는 점성토가 지배적인 지반으로 확인되었다. 현장 지반의 물성치는 현장배인시험을 통해 점착력(c)과 Downhole test를 통해 포아송비(μ), 단위중량(γ)을 획득하였고 각각 $c=10.8\sim 17.1\text{kPa}$, $\mu=0.353\sim 0.365$, $\gamma=17\text{kN/m}^3$ 로 나타났다. 이는 일반적인 흙의 포아송비($\mu=0.3\sim 0.4$) 및 단위중량의 범위($\gamma=16\sim 19\text{kN/m}^3$)에 포함된다(Purkar and Kute, 2015). 따라서 모델 검증을 위한 수치해석 모델에는 $c=10\text{kPa}$, $\mu=0.35$, $\gamma=17\text{kN/m}^3$ 을 지반 물성치로 이용하였다.

4. 수치해석

4.1 Geometry

요소망은 SCW와 JSP공법 주변을 조밀하게 그 외 구

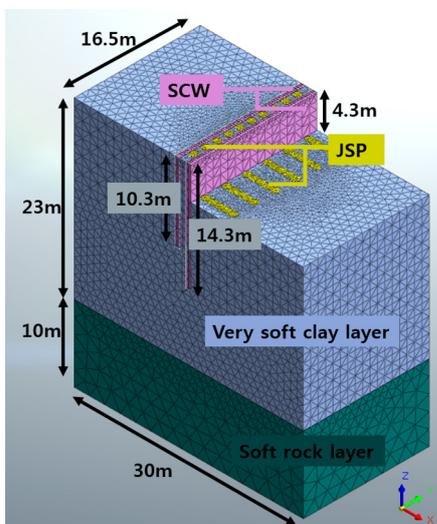


Fig. 2. FEM model mesh geometry

조물로부터 멀어지는 지반의 요소는 비교적 크게 형성하였다. 각각의 요소는 지반(Mohr-coulomb 모델), 지반에 비해 강도가 큰 재료인 SCW와 JSP공법은 Elastic 모델로 적용하였다. 경계조건은 Fig. 2를 기준으로 하단면은 힌지, 상부면을 제외한 측면은 롤러로 적용하고 시공 단계는 현장 조건과 같은 후열SCW-전열SCW-배면 JSP공법-저면JSP공법-굴착(4.3m)의 단계로 적용하였다. 굴착은 굴착단계별로 변화양상을 확인하기위해 4단계(1m-1m-1m-1.3m)로 적용하였다. 3차원 내의 지반보강 효과를 모사하는 JSP공법의 간격은 현장과 같은 조건으로 배면의 경우 1.5m, 저면의 경우 2.7m로 모델링하였다. 수치해석의 변위데이터는 전열SCW의 중앙(y방향 8m)의 변위를 기준 변위로 설정하였다. 또한 수치해석 모델의 효율성을 위해 y방향 크기에 따른 변위 값을 산정하고 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3과 같이 y방향이 12m~30m 일 때 모델의 크기에 따른 변위 차이는 발생하지 않았으나 본 연구에서는 JSP공법의 CTC(배면=2m~5m, 저면=3m~6m)간격에 대한 매개변수해석을 위해 16.5m 크기의 모델을 사용하였다(Table 1).

4.2 물성치 및 모델 검증

수치해석에 이용한 지반과 SCW, JSP공법의 물성치는 Table 2에 정리하였다. 일반적인 점토층의 내부마찰각은 $20^\circ\sim 30^\circ$ 로서(Budhu, 2010) 내부마찰각의 경우 20° 일 때와 30° 일 때의 변위데이터를 비교한 결과, 0.6%의 극소한 변위증감폭이 나타났고, 따라서 중간값 25° 를 수치해석모델에 적용하였다. 지반의 점착력은 현장배인

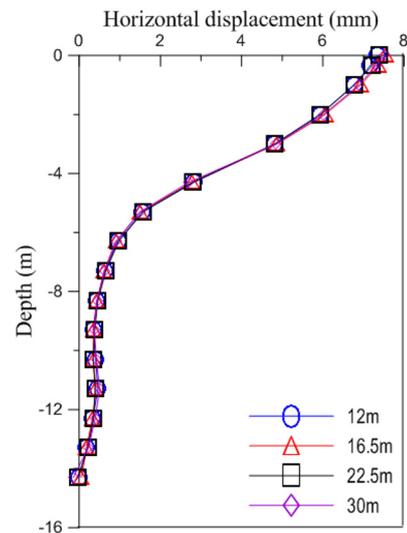


Fig. 3. Size effect of the numerical model

Table 1. Dimensions of each section in the numerical model

Name	Size
Very soft clay	16.5m (Width) × 30m (Length) × 23m (Height)
Soft rock	16.5m (Width) × 30m (Length) × 10m (Height)
Lead SCW	0.55m (Width) × 16.5m (Length) × 14.3m (Height)
Back SCW	0.55m (Width) × 16.5m (Length) × 10.3m (Height)
Behind JSP	1m (Diameter) × 10.3m (Height)
Bottom JSP	1m (Diameter) × 6m (Height)
Excavated volume	16.5m (Width) × 15m (Length) × 4.3m (Height)

Table 2. Properties used in each section for model validation

Section	Property				
	c (kPa)	φ (°)	E (GPa)	μ (-)	γ (kN/m ³)
Very soft clay	10	25	0.02	0.35	17
Soft rock	30	38	20	0.3	23
SCW	-	-	1	0.2	21
JSP	-	-	1.4	0.2	21

Note: c=cohesion, φ=internal friction angle, E=modified elastic modulus, μ=poison's ratio, γ=unit weight

시험을 통해 산출된 $c=10.83 \sim 17.06\text{kPa}$ 의 범위에서 안전측으로 10kPa 을 적용하였고 연암층의 탄성계수와 포아송비는 문헌(서울시 지반조사편람, 2006)을 통해 안전측의 값으로 선정하였다. 또한 SCW와 JSP의 탄성계수는 일축압축강도(SCW=1.5MPa, JSP=3.0MPa)와 단위중량을 이용한 식 (1)를 통해 산출하였다(Obe et al., 2019).

Fig. 4에서 깊이 16.5m 부근은 고결 점토로 구성되어 있어 N값이 높아지는 경향이 나타났으나 공법시공 전 점토층 위에 매립층을 형성하는 시공 조건을 고려하여

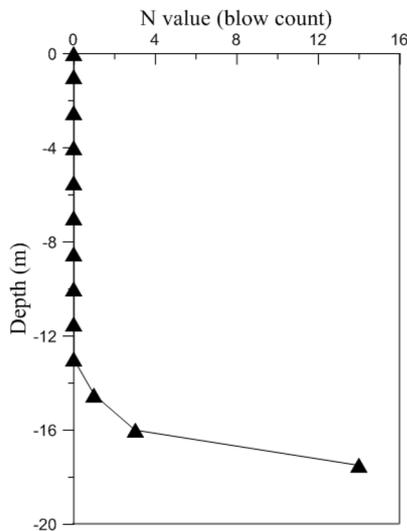


Fig. 4. Standard penetration test result

점토층의 높이는 기존 SPT에서 나온 결과보다 큰 23m로 설정하고 연약 점토지반(very soft clay layer in Fig. 2)에는 위에서 설정한 점착력과 내부마찰각을 적용하였다. 연약 점토층의 탄성계수(E_s)의 경우 정규압밀점토에서 점착력과 탄성계수의 관계(식 (2))를 이용하여 $2,500\text{kPa}$ 으로 산출하였다(Korean Geotechnical Society, 2009). 그러나, 본 수치해석은 재하(Load)가 아닌 제하(Unload)를 모사하는 수치해석으로서 재하에서의 기율기 압축지수(C_c)와 제하에서의 기율기 팽창지수(C_e)의 비를 통해 점토층의 탄성계수를 보정하였다. 현장점토지반시료의 압밀시험을 통해 압축지수와 팽창지수는 각각 0.615, 0.077로 산정되었고 C_c/C_e 의 비는 8으로 산출되어 E_s 를 8배를 증가시킨 보정탄성계수(E) $20,000\text{kPa}(0.02\text{GPa})$ 을 적용하였다(Lee, 2013).

$$E_c = 0.043\gamma^{1.5}\sqrt{q_u} \quad (1)$$

$$E_s = 250c \quad (2)$$

Fig. 5에서와 같이 현장에서 계측된 변위가 수치해석으로 구한 변위보다 모든 깊이에서 크게 나타났으나 같은 경향을 나타내었다. 현장계측변위가 더 크게 나타난 이유는 수치해석 모델에서는 모사가 불가능한 저면 JSP 공법 시공 시 인접지반의 용기 현상 때문인 것으로 사료된다. 하지만 두 결과 모두 전역 SCW의 상부에서 가장

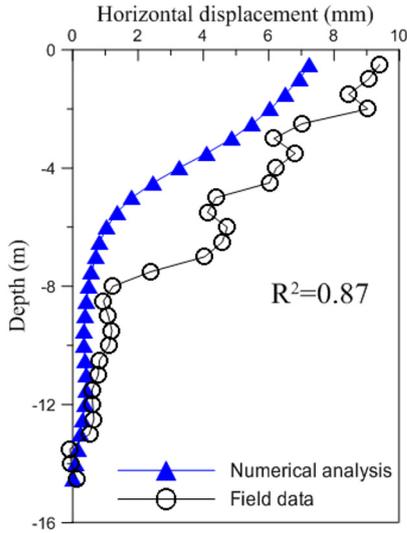


Fig. 5. FEM model validation

큰 변위가 발생하였고 하부로 갈수록 변위가 줄어드는 경향을 보였다. 잔차제곱합(residual sum of square)과 데이터 분산의 합(total sum of square)를 이용하여 결정 계수(R^2)를 산정하였고(Fig. 5) 이를 통해 검증된 모델을 매개변수 해석에 이용하였다.

4.3 영향 매개변수 선정

SCW사이에 시공되는 배면JSP공법과 굴착저면에 시공되는 저면JSP공법이 지지성능을 담당하는데 JSP공법은 Fig. 1에서와 같이 일정한 간격을 두고 시공한다. 간격이 줄어들수록 강성은 증가하나 많은 시공비가 소모되므로 JSP공법의 CTC에 따른 BSCW공법의 거동특성의 검토가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 다양한 점토지반과 저면JSP공법의 CTC을 변수로 선정하여 매개변수 해석을 수행하였다.

다양한 점토지반(soft, medium, stiff clay)에 대한 해

석은 탄성계수와 점착력을 변화시키면서 고려하였다. 16~160MPa 범위의 탄성계수(E)(Hunt, 1986)와 0~100kPa 범위의 점착력(c)(Terzaghi and Peck, 1996)을 변수로 선정하여 수행하였고(Table 3), BSCW 공법이 가장 많이 적용되는 연약 점토지반(very soft clay or soft clay)에 대한 세분화한 매개변수 해석에는 $E=16\sim32$ MPa, $c=2.5\sim10$ kPa을 이용하였다(Table 4).

BSCW공법에서 배면과 굴착저면에 시공되는 JSP공법 중 배면JSP공법은 SCW와 중력식 벽체로서의 거동으로 지지력 및 휨에 대한 저항력을 발현하고 저면JSP공법은 수동측에 위치하여 추가적인 보강공법으로서 안정성에서 중요하다. 또한, BSCW 공법의 경제성 역시 시공비가 높은 JSP공법이 좌우한다고 할 수 있다. 따라서, JSP공법의 배면 CTC(2, 3, 4, 5m)과 저면 CTC 간격(3, 4, 5, 6m)에 따른 BSCW의 변위를 지반의 4가지 탄성계수(2,000, 5,000, 10,000, 20,000kPa)에 대해 수행하였다.

5. 결과 및 토의

5.1 지반 특성에 따른 거동

다양한 점토지반에 대한 해석결과는 Fig. 6과 같다. soft clay에서 최대변위는 19.79mm로 medium clay 최대 변위의 4배, stiff clay 최대변위의 7.7배가 발생하였다. 모든 케이스에서 최대 변위는 가장 상부에서 발생하였으며 soft clay에서 $E=16000$ kPa, $c=0$ kPa일 때 나타난 최대 변위(19.79mm)는 연성 흙막이벽의 최대 허용변위량인 $0.003H$ (12.9mm, $H=$ 굴착고($H=4.3$ m))를 초과하는 것으로 나타났다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016)(Fig. 6(a)). 또한 $c=2.5$ kPa인 경우 $E=16,000$ kPa일 때 구간에서 상부의 변위가 최대 허용변위량과 매우 근

Table 3. Range of unconfined compressive strength, cohesion, and Elastic modulus (Terzaghi and Peck, 1996; Hunt, 1986)

Property	Very soft	Soft	Medium	Stiff
q_u (kPa)	< 2	25~50	50~100	100~200
$(q_u/2) = c$ (kPa)	< 25	12.5~25	25~50	50~100
E (MPa)	< 12.5	16 ~ 32	32 ~ 64	64 ~ 160

Note: q_u =unconfined compressive strength

Table 4. Parameter of parametric study

Parameter	E_s (kPa)	E (kPa)	c (kPa)
Value	2,000, 2,500, 3,000, 3,500, 4,000	16,000, 20,000, 24,000, 28,000, 32,000	2.5, 5, 7.5, 10

Note: E_s =Field elastic modulus, E =modified elastic modulus, c =cohesion

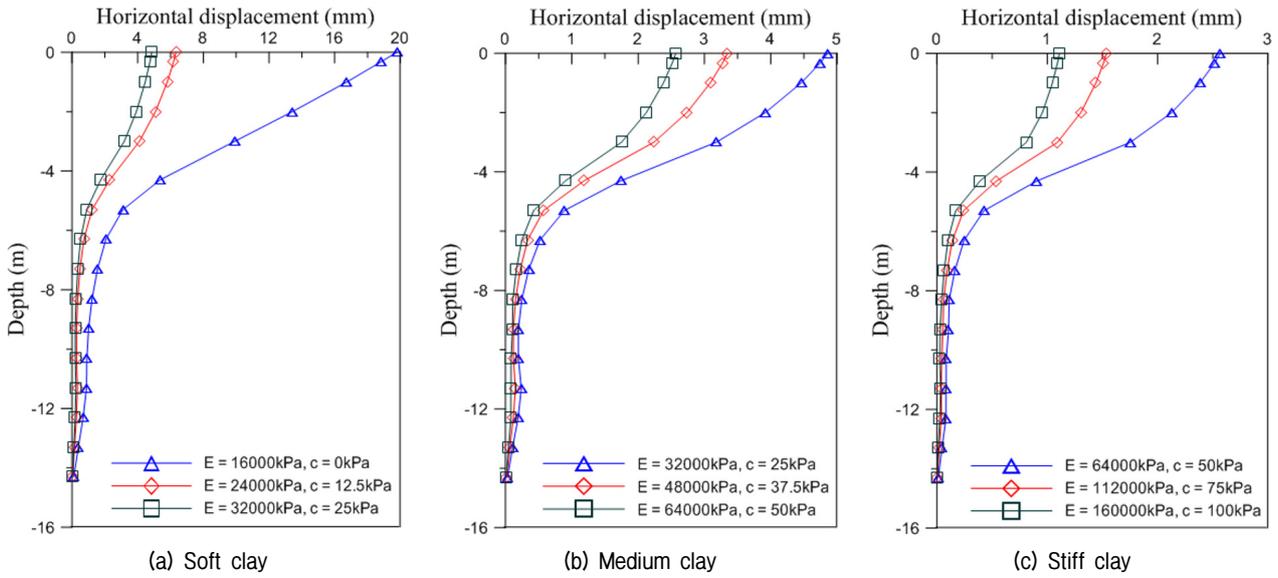


Fig. 6. Horizontal displacement of BCSW in soft, medium and stiff clay

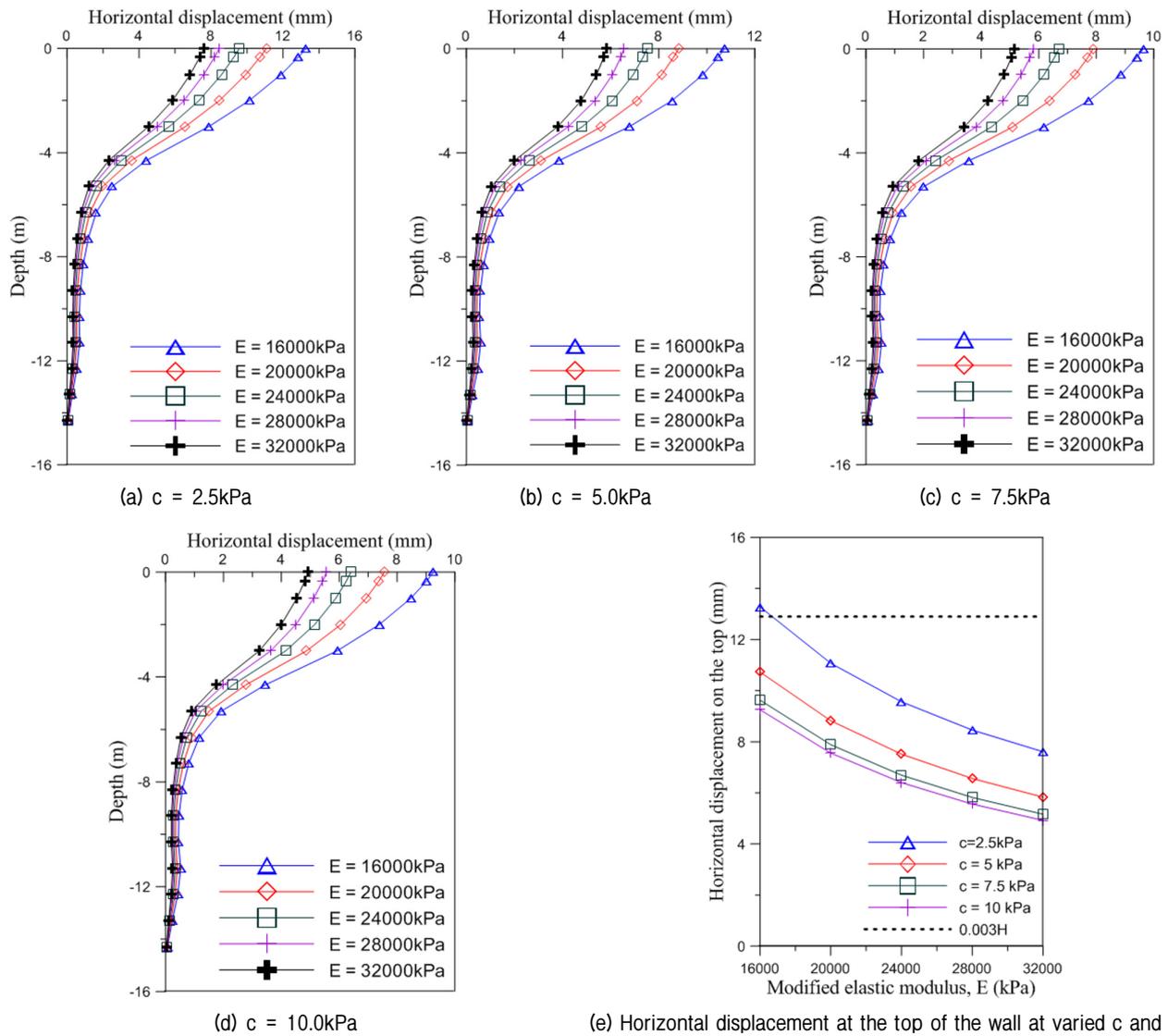


Fig. 7. Horizontal displacement of BSCW at varied c and E in soft clay layer

접해 있는 것을 볼 수 있다(Fig. 7(e)). 이는 상대적으로 큰 안전률이 필요한 경우 연약지반층에서는 변위에 대한 검토가 요구됨을 뜻한다. 따라서 연약지반에 BSCW 공법 적용 시 변위 제어를 위해 추가적인 보강공법 또는 CTC 조정을 통한 보강검토가 필요할 것으로 판단된다. 반대로 medium clay나 stiff clay에서는 변위가 최대 허용변위량 대비 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Soft clay의 매개변수해석 결과, 지반의 c와 E가 커질수록 지반의 강성의 증가로 최대변위는 감소하고 벽체를 기준으로 상부와 하부의 변위 차이가 감소하였다(Fig. 7). 이러한 경향은 SCW벽체 수동측에 존재하는 저면 JSP공법에 의해 벽체 하단에서 변위제어효과가 발생되어 상단에서의 변위 증감폭이 하단 변위 증감폭에 비해

큰 변위가 발생한 것으로 추측된다. 또한, $E=16,000\text{kPa}$ 에서 $c=0$ (Fig. 6(a)), 2.5, 5, 7.5, 10kPa(Fig. 7(e))인 경우 상부의 변위데이터를 통해 변위가 c값의 증가와 비선형적으로 반비례 함을 알 수 있다. $c>10\text{kPa}$ 인 경우 c에 의한 변위의 변화량은 줄어들 것으로 예상된다.

5.2 JSP 설치 간격에 따른 거동

배면 JSP공법과 저면 JSP공법의 CTC에 대한 매개변수 해석결과를 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 도시하였다.

Fig. 8에 도시된 것과 같이 배면 JSP는 상대적으로 낮은 $E(E=2,000\text{kPa})$ 에서 CTC(3m→4m) 증가 시 변위증가율이 큰 폭의 증가율을 보였고 E가 큰 지반에서는

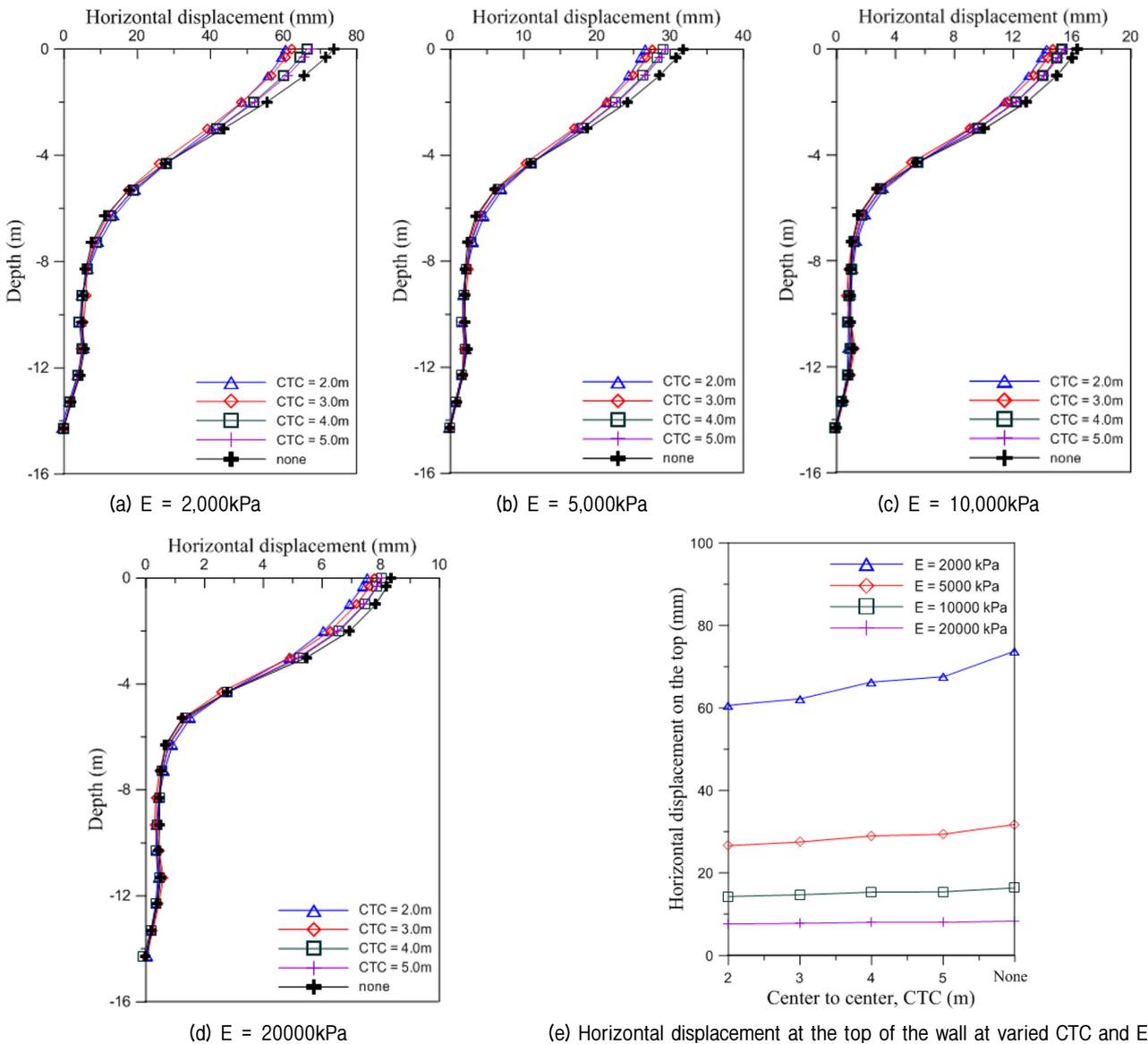


Fig. 8. Horizontal displacement of BSCW at varied CTC of behind JSP

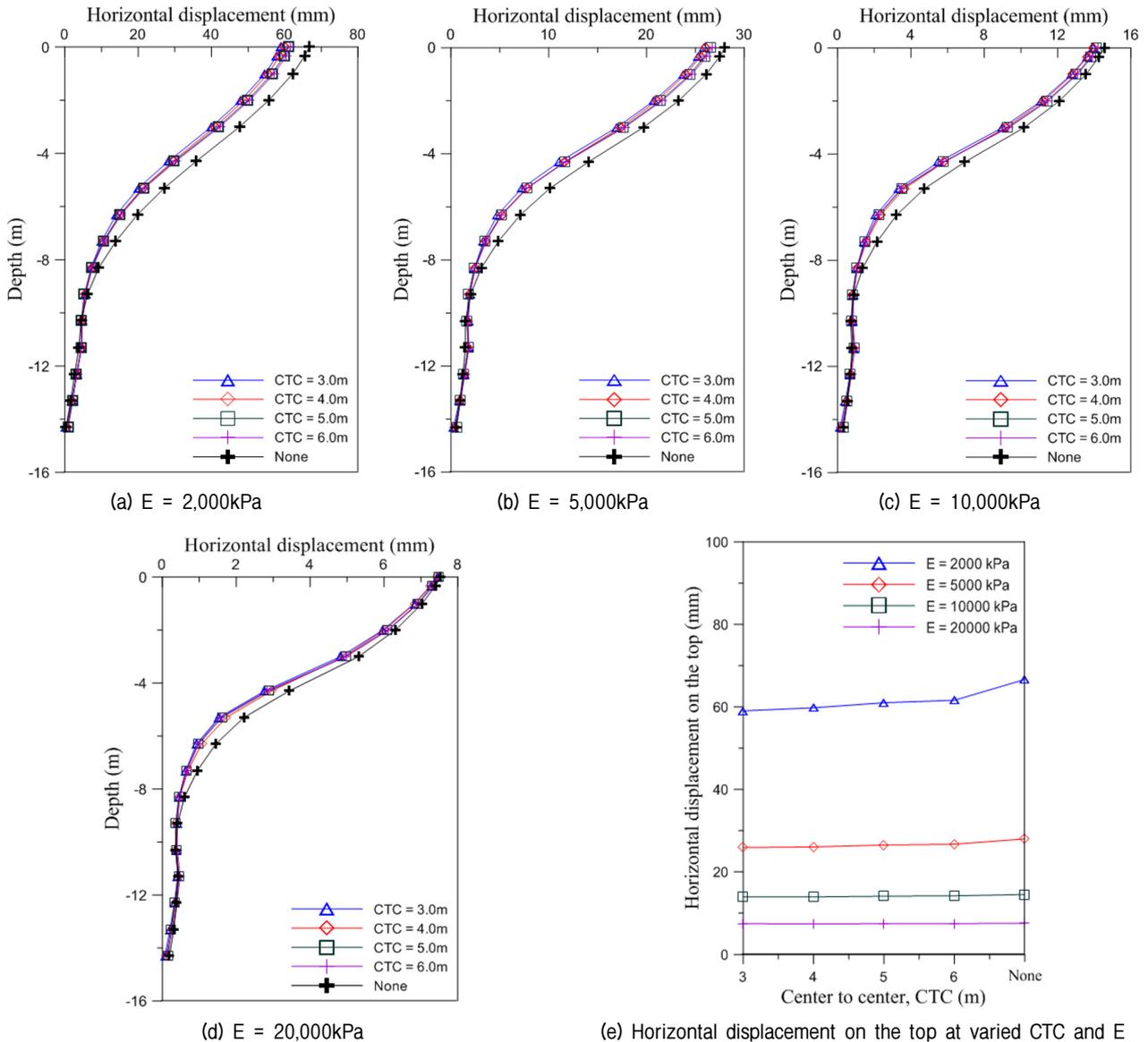


Fig. 9. Horizontal displacement of BSCW at varied CTC and E (Bottom JSP)

CTC이 변위에 끼치는 영향이 E가 낮은 지반에서보다 작은 것을 알 수 있다.

Fig. 9에 도시된 것과 같이 저면 JSP공법의 CTC에 따른 BSCW의 변위는 지반의 탄성계수가 커질수록 CTC의 영향이 감소한다. 이것은 위에서 언급된 배면 JSP공법의 CTC에 따른 경향과 일치한다. 하지만 Fig. 8(e)와 Fig. 9(e)에서 볼 수 있듯이 변위의 차이가 가장 크게 나타나는 BSCW 윗부분의 CTC에 따른 변위의 차이는 배면 CTC 간격이 더 크게 나타났다. 이는 BSCW의 지지력 발현에 배면 JSP공법이 더 큰 영향을 발휘하는 것으로 해석될 수 있다. 가장 큰 변위증가율은 배면의 경우 6.55%($E=2,000\text{kPa}$, CTC 3m에서 4m로 증가) 저면의 경우 2.07%($E=2,000\text{kPa}$, CTC 4m에서 5m로 증가)로 나타

났다. 하지만 Fig. 8과 Fig. 9에 도시된 결과와 Fig. 7에 나타난 결과를 비교해볼 때 연약 지반의 물성치(c와 E)가 CTC보다 BSCW의 변위에 끼치는 영향이 훨씬 더 큰 것으로 판단된다. 따라서 BSCW의 설계 시 대상 지반의 정확한 물성치 산정이 요구된다 할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 연약지반에 주로 이용되는 격벽형 중력식 2열 합성소일벽(BSCW)공법에 대한 수치해석 연구를 수행하고 주어진 지반 조건과 JSP공법의 CTC 간격에 따른 BSCW의 변위를 산정하고 고찰하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 이용한 BSCW수치해석 모델은 현장 변위데이터와의 비교를 통한 모델 검증은 수행하였고 검증 결과를 토대로 BSCW수치해석 모델이 BSCW의 거동 예측에 효과적으로 이용될 수 있음을 확인하였다.
- (2) 다양한 점토지반과 연약점토지반 물성치(탄성계수, 점착력)에 대한 매개변수 해석을 통해 탄성계수와 점착력이 감소할수록 저면JSP공법에 의해 하단부 변위는 제어되고 상단부 변위가 증가하는 변위형태가 나타나는 것을 확인하였다. 또한 지반이 상대적으로 낮은 점착력과 탄성계수를 가지는 경우 BSCW의 변위가 연성 흙막이 변위 최대변위량기준을 초과하므로 추가보강공법 적용 및 다른 흙막이 공법 적용이 필요할 것으로 판단된다.
- (3) JSP공법의 CTC에 대한 매개변수해석결과, CTC 증가에 따른 변위 증가는 지반의 탄성계수와 관계없이 배면JSP공법이 저면JSP공법보다 더 크게 나타났다. 하지만 CTC에 따른 변위량의 변화는 지반물성치에 따른 변위량의 변화보다 훨씬 작게 나타났다. 또한 점착력과 탄성계수가 작을수록, 즉 지반의 강도정수가 작을수록 변위가 증가하는 경향이 나타났고 따라서 BSCW공법 설계 시 점토 지반의 정확한 물성치 산출이 요구된다.
- (4) CTC에 대한 매개변수해석 결과로 저면JSP공법가 변위에 미치는 효과는 미미한 것으로 나타났다. 따라서 점성토 지반의 탄성계수가 5,000kPa 이상인 경우, 2열의 흙막이 벽체만으로 충분한 지지력을 발휘한 것으로 판단된다. 추후 JSP의 설치 효과 극대화 에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 국토교통기술촉진연구사업(노후 구조물의 운영 중 지하공간 확장 시 경제성 10% 향상을 위한 확장형 강관파일 적용된 뜬구조 역타공법의 설계 및 시공법 개발, 19CTAP-C152159-01)과, (주)대안소일텍의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Budhu, M. (2010), *Soil mechanics and foundations (3rd edition)*, John Wiley & Sons, New York, pp.282.
2. Hunt, R. E. (1986), *Geotechnical Engineering Practices*, McGraw-Hill, New York, pp.134.
3. Jeonnam Development Corporation (2013), *Ground Investigation Report for the land development project of O-ryong District in Nam-ak New Town*, pp.102.
4. Korean Geotechnical Society (2009), *Design criteria of structural foundation*, pp.251.
5. Lee, I. M. (2013), *Principles of soil mechanics*, second edition, CIR, Korea, pp.311.
6. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), *Standard specification: measurement during construction*, KCS 11 10 15, pp.51.
7. Oh, S. (2014), *Study on improvements for the prevention of collapse during the excavation*, Master Thesis, Hanyang University, pp.31.
8. Purkar, M. S. and Kute, S. (2015), "Finite Element Analysis of a Concrete-rigid Wall Retaining a Reinforced Backfill", *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.6, No.1, pp.14.
9. Ravindra, K. Dhir Obe, Jorge de Brito, Rui V. Silva, and Chao Qun Lye (2019), *Sustainable Construction Materials: Recycled Aggregates*, Woodhead Publishing, Cambridge, pp.320.
10. Terzaghi, K., Peck, R. B., and Mesri, G. (1996), *Soil mechanics in engineering practice*, John Wiley & Sons, New York, pp.22.
11. Yhim, S. S. and Lee, J. S. (1999), "Determination of Initial Prestress Force of Earth Anchors in Rock on Excavation", *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol.19, No.3-1, pp.178.

Received : August 3rd, 2019

Revised : September 17th, 2019

Accepted : October 15th, 2019