

연약지반에서 지오그리드 보강 쇄석기둥 공법의 설계 영향인자에 관한 연구 A Study on Design Factors of Geogrid-Encased Stone Column in Soft Ground

유충식¹⁾, Chungsi Yoo, 송아란²⁾, Ahran Song, 김선빈³⁾, Sunbin Kim, 이대영⁴⁾, Daeyoung Lee

- 1) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.
- 2) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사졸업, Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.
- 3) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.
- 4) 한국건설기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engrg. Research Dept., KICT

SYNOPSIS : This paper presents the results of investigation on the influencing factors for GESC(Geogrid-Encased Stone Column) method in soft ground. A parametric study was then conducted on the influencing factors such as replacement ratio, geogrid stiffness and thickness of soft ground using stress-porepressure coupled analysis. The results indicate that the relationship between these parameters and settlement ratio, and the relationship between these parameters and stress concentration factor can be identified.

Key words : finite element method, geogrid, ground improvement, soft clay, stone column

1. 서 론

항만과 인접한 연약지반에 시공되는 제방이나 도로, 활주로와 같은 구조물의 시공은 연약지반보강 및 기초처리문제를 동반하게 되며 특히 항만에서의 수송로를 건설하기 위한 제방기초에는 성토하중 지지와 압밀침하문제를 동시에 해결할 수 있는 공법이 적용되어야 한다. 연약지반 개량 공법으로 사용되고 있는 샌드 컴팩션(Sand Compaction)공법은 모래의 부족으로 인한 환경문제와 상부구조물 하중 재하시 팽창 파괴가 발생하며, 쇄석기둥 공법은 쇄석기둥의 강성과 투수효과 뛰어난 장점이 있으나, 연약지반에 시공시 하중에 대한 말뚝의 벌징파괴가 주로 발생하고 쇄석입자가 연약층 내부로 분산되는 문제점이 있다. 이미 일부 유럽지역에서는 하천지역의 초연약 지반에 제방을 성토하기 위해 지오텍스타일(geotextile)로 쇄석기둥 또는 모래기둥을 감싸서 시공하는 GEC(geotextile-encased column) 보강공법을 기초에 적용하고 제방을 성토하는 시공사례가 보고되고 있다(Kempfert, 1996; Alexiew 등, 2003). GEC 공법은 채움재와 지오텍스타일의 강성으로 연약지반을 보강하여 기존 샌드 컴팩션 공법에 비해 침하량 감소와 지지력의 증가효과를 얻을 수 있는 공법이다. 토목섬유로 모래기둥 및 조립토 기둥을 감싸 침하량을 감소시켜 지반의 지지력을 증가시키는 공법에 관한 기존의 연구로는 실내모형실험연구를 통한 거동특성 및 지지력 특성 평가(Kempfert 등, 1999; Sharma와 Phanikumar 2005; Prisco 등, 2006)와 유한요소해석을 통한 연구(Raithel과 Henne, 2000) 및 현장시공(Reithel 등, 2002; Brokemper 등, 2006)을 통한 연구가 있다.

GEC 공법은 기존 샌드 컴팩션 공법에 비해 침하를 감소시키고 지지력을 증가시키는 장점이 있는 공법이지만 적용 대상이 비배수 전단강도 10kPa 이하의 초연약지반에 국한되며, 채움재로 모래를 사용함에 따라 천연골재의 부족으로 인한 환경문제를 유발할 수 있다. GEC공법의 적용 지반과 해외 시공사례를 국내지반조건에 적용하기에는 지반특성과 적용여건이 동일하지 않으므로 국내지반을 대상으로 사전에 설계인자의 적용범위에 대한 검토가 필요하다.

최근 들어 기존 쇄석기둥의 강성 및 배수효과의 장점과 연약지반 시공시 하중에 대한 벌징파괴의 발생을 억제시켜 침하를 감소시키고 지지력을 증가시켜주는 지오그리드 감쌈 쇄석기둥에 대한 연구가 활발히

진행되고 있다. 이러한 공법은 연약지반 및 사질토 지반에 적용될 수 있으며, 모래를 대체하여 쇄석, 재활용 골재, 폐콘크리트 등 시공재료의 강성이 큰 채움재를 사용하여 고강도 지오그리드로 감싸 측면 구속력을 증가시킴으로써 쇄석기둥의 지지력 증가 효과를 얻을 수 있는 장점이 있는 공법이다. 지오그리드 보강 쇄석기둥 공법에 관한 연구로는 실내시험을 통한 지오그리드 보강 쇄석기둥의 거동특성 및 강도 특성 평가(AI-Joulani, 1995; Trunk 등, 2004 ; Paul과 Ponomarjow, 2004; 이대영 등, 2006)와 유한요소해석을 통한 하중-지지특성 평가(Murugesan과 Rajagopal, 2006)등 기초적인 연구가 수행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 지반보강공법 연구의 일환으로 국내연약지반에 적용할 수 있는 지오그리드 감쌈 쇄석기둥 공법(Geogrid Encased Stone Column, GESC)의 설계기법 개발을 위한 연구측면에서 3차원 유한요소해석을 토대로 국내 ○○지역의 연약지반을 대상으로 하여 GESC 공법 적용시 설계 영향인자에 관한 고찰을 하였다.

2. 유한요소해석

2.1 대상조건 및 매개변수

본 연구에서는 연약지반에 GESC공법으로 지반보강을 실시한 후 연약지반 상부에 제방을 성토하는 조건을 대상으로 하였다. 다양한 시공조건을 구현하기 위해 연약지반 두께와 제방의 성토고를 변화시켰고, GESC공법의 적용효과에 대한 영향인자로 쇄석기둥의 치환율과 지오그리드 강성에 대해 분석하였다. 이에 기본 시공조건은 그림 1에 보이는 바와 같이 연약지반 두께가 10m로 쇄석기둥이 연약지반을 관통하여 암반층에 지지되는 것으로 간주하였고, 치환율은 GEC나 스톤컬럼공법이 5~30%의 범위로 적용됨을 감안하여 10% 치환율을 기본조건으로 선정하였다. 제방은 중심축을 기준으로 대칭이므로 반단면만을 대상조건으로 고려하였으며, 제방의 성토고에 있어서 일반적으로 10m이상의 경우는 고성토로 분류하므로 이보다 작은 6m를 기본조건으로 하였다. 지오그리드는 일반적으로 연약지반 보강에 적용되는 강성 2500kN/m가 적용되는 것으로 모사하였다. 표 1은 매개변수별 해석조건을 정리한 것이다.

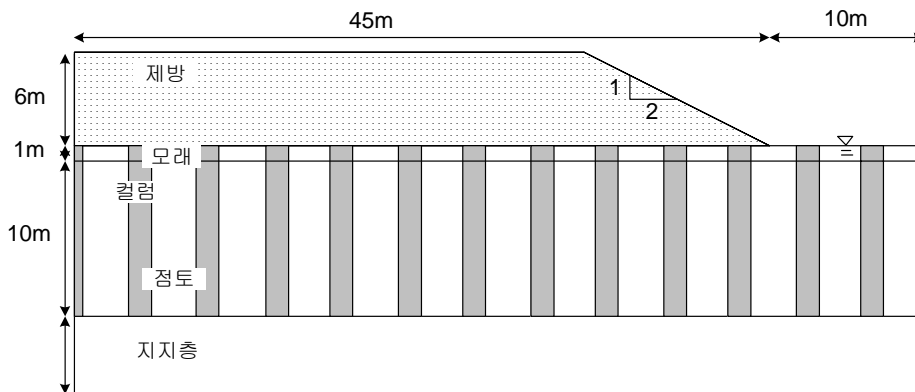


그림 1. 대상조건 단면도

표 1. 매개변수별 해석조건

매개변수	해석조건 범위
연약지반 두께, H_c	10, 15, 20m
성토고, H	6, 10, 15m
치환율, A_E	5, 10, 15%
지오그리드 강성, J	1000, 2500, 4000kN/m

2.2 유한요소해석 모델링

본 해석의 매개변수 연구는 유한요소해석 상용프로그램 ABAQUS 6.7-1을 사용하여 수행되었다. ABAQUS는 토목 및 기계 등 다양한 분야에 적용되는 프로그램으로서 다양한 흙의 구성모델을 제공하고 해석 알고리즘이 효율적인 장점을 갖고 있다. 또한 본 연구는 점토지반을 대상으로 하기 때문에 압밀 거동 평가와 연계해석이 가능한 유한요소해석 프로그램의 활용이 필수적이다.

해석단면은 그림 2와 3에서 보이는 바와 같이 제방의 중심축을 기준으로 대칭을 이루는 점을 고려하여 우측 반단면에 대해서 3차원 모델링을 하였으며, 두께방향으로는 쇄석기둥이 반복적으로 배치되므로 치환율과 간격에 의한 두께로 1열을 모델링하였다. 지층조건은 지지층과 점토층으로 구성되며 점토층 상부에 1m의 모래층을 쌓고 제방이 1:2의 경사로 성토되는 것으로 간주하였다. 변위 경계조건은 해석 단면의 측면을 수평방향변위구속, 바닥면은 수평, 연직방향 변위를 구속하였으며, 수리 경계조건은 초기 조건에서 점토층 상부의 지하수위 위치에 no-flow 경계를 부여하여 수압이 일정하게 유지되도록 하였다. 해석단면이 대칭이므로 우측경계에서만 물이 유입되도록 하였으며, 모래층에서 성토로 발생한 과잉간극수압이 소산되는 과정을 모사하기 위해 모래층 하부의 간극수압을 '0'으로 설정하였다. 해석의 편의상 쇄석기둥은 지오그리드와 함께 점토층에 매입된 상태인 것으로 간주하고, 시공단계는 성토이후부터 모사하였다. 시공조건은 2m씩 단계별 성토를 하는 것으로 모사하였고 각 단계별로 성토기간은 15일, 성토 후 10일 동안 기다려 과잉간극수압을 소산시킨 후 다음 단계의 성토를 진행하도록 하였으며, 성토 완료후 과잉간극수압이 '0'이 되어 압밀이 완료될 때까지 시간을 충분히 두었다.

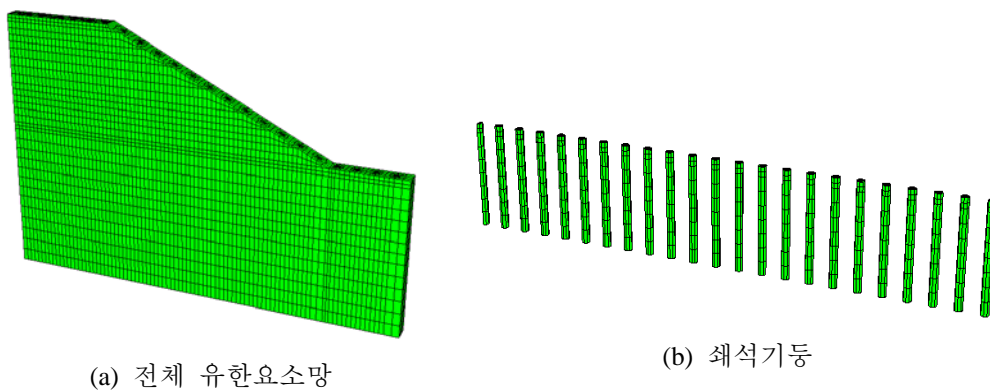


그림 2. 해석에 적용된 3차원 유한요소망

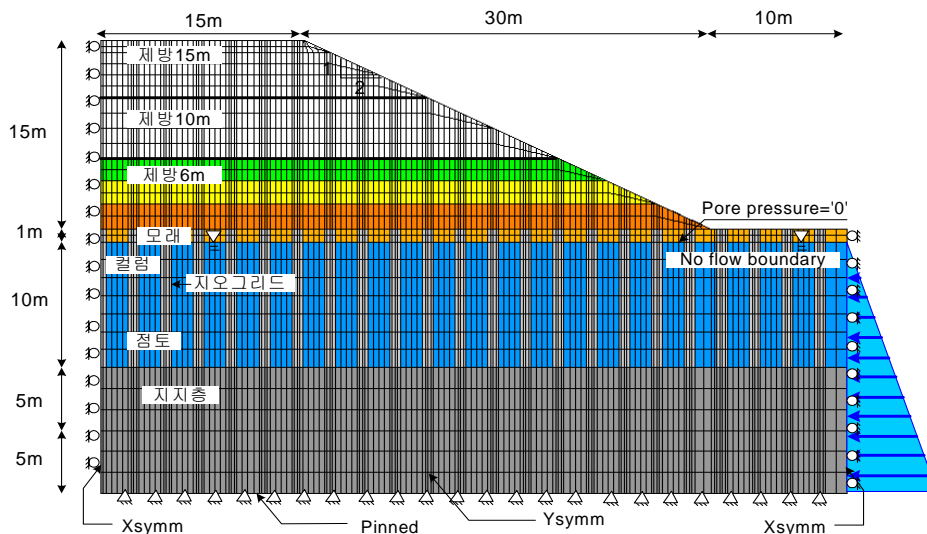


그림 3. 해석에 적용된 유한요소망 (치환율 10%)

본 논문에서 연약지반은 Roscoe와 Burland(1968)에 의해 제안된 Modified Cam-Clay(MCC) 구성모델을 적용하여 침하와 압밀에 관한 점토지반의 특성이 모사되도록 하였으며, 다른 지층과 제방, 쇄석기둥은 Mohr-Coulomb Hardening 모델을 적용하였고, 지오그리드는 탄성거동을 하는 것으로 가정하였다.

점토층은 ○○지역의 연약지반의 지반조사결과를 바탕으로 MCC모델의 선행압밀하중관련 변수에 따라 물성을 적용하였으며, Tan과 Tjahyono(2006)의 논문을 참조하여 제방 및 모래물성을 산정하였고 지지층은 변위가 발생하지 않도록 충분히 견고하게 하였다. 쇄석의 물성은 성균관대에서 수행한 실내시험(이대영, 2006) 및 국내외 관련논문을 참조(Schweiger와 Pande, 1986; Han과 Gabr, 2002)하여 선정하였다. 지오그리드는 일반적으로 연약지반에 적용되는 지오그리드의 강성을 참조하여 범위를 선정하였다(Kempfert, 1999). 표 2에서 해석 적용물성을 정리하였다.

표 2. 해석 적용물성

구분	γ (kN/m ³)	E(kPa)	ν	c(kPa)	ϕ (deg)	k(cm/s)	
제방	18	15,000	0.3	33	3	-	
모래	19	15,000	0.3	28	3	-	
쇄석 기둥	불포화	19	40,000	0.3	40	5	-
	포화	15	40,000	0.3	40	5	1.16×10^{-2}
지지층	15	100,000	0.3	40	100	1.16×10^{-6}	
지오그리드	1	2,500,000	0.3	J=2500kN/m			

구분	γ (kN/m ³)	λ	M	a_o	κ	ν	e	k(cm/s)
점토층	15	0.2	1	50	0.02	0.3	1	1.16×10^{-6}

기타 모델링에 관한 상세한 내용은 유충식 등(2007)에 상세히 기술되어 있다.

3. GESc의 영향인자에 따른 영향

3.1 치환율의 영향

임의의 대상현장에 GESc의 적용시 설계항목은 쇄석의 종류, 쇄석기둥의 직경, 배치와 간격 결정과 쇄석기둥 보강에 적용할 지오그리드의 강성, 압밀기간, 시공방법 등의 변수가 있지만 이들 중 본 논문에서는 주요 설계인자로 쇄석기둥의 배치 및 간격과 관계된 치환율과 쇄석기둥 감쌈에 적용되는 지오그리드의 강성의 영향에 관한 매개변수 연구를 수행하였다. 먼저 본 절에서는 쇄석기둥과 지반의 면적비로 산정된 치환율에 따른 영향을 비교하였다. 앞서 GESc와 스톤컬럼 공법의 비교결과에서도 분석된 바와 같이 GESc 적용시 지지력과 압밀에 대한 효과가 우수한 것으로 분석되었으며, GESc는 지오그리드 보강으로 동일한 설계기준에 대해서 기존의 스톤컬럼 공법보다 저치환율로의 시공이 가능하여 쇄석기둥의 수량 감소 효과가 예상된다. 기존의 관련논문 조사 결과 제방의 성토고 및 지반조건에 따라 치환율은 5~30%의 범위로 시공되는 것으로 조사되었으며(Kempfert 등, 2002), 본 연구에서는 GESc가 저치환율로 시공이 가능한 점을 고려하여 5, 10%의 치환율에 대한 영향을 분석하였다. 쇄석기둥이 삼각형 배치로 시공되는 경우를 대상으로 하여 식 (1)을 이용하여 표 5.3과 같이 치환율에 따라 간격을 결정하고 시공되는 단면에 대한 해석을 수행하였다.

$$a_s = \frac{A_s}{A} = 0.907 \left(\frac{D}{s} \right)^2 \quad (1)$$

여기서, D=쇄석기둥 직경, s=쇄석기둥 중심간 간격

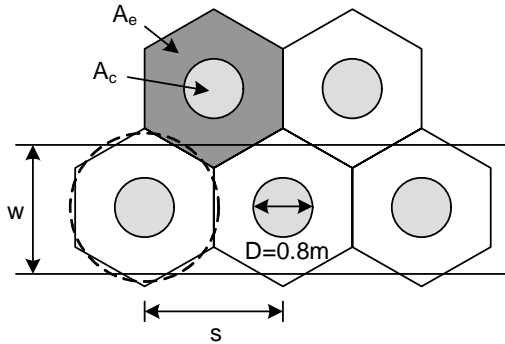


그림 4. 치환율과 간격

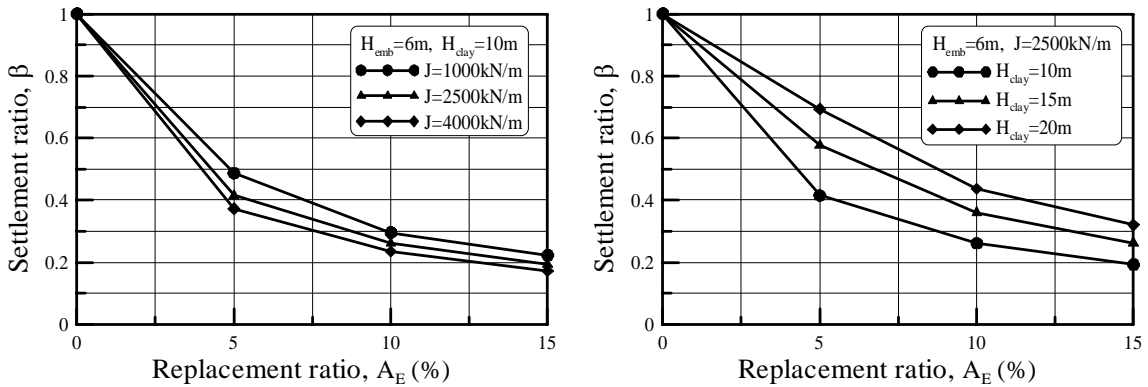
표 3. 치환율에 따른 간격

치환율(%)	s(m)	w(m)
5	3.41	2.95
10	2.41	2.09
15	1.97	1.71

연약지반에서 쇄석의 치환율과 침하량의 관계는 지오그리드 강성과 성토하중, 점토층의 두께가 일정하고 쇄석기둥의 치환율을 5, 10 15%로 변화시킨 조건에서 침하비 β 를 이용하여 그림 5와 같이 나타내었다.

$$\text{침하비 } \beta = \frac{\text{GESC 지반에서의 침하량}}{\text{무처리 지반에서의 침하량}} \quad (8)$$

쇄석기둥은 말뚝기초와 같은 효과를 나타내기 때문에 치환율이 높을수록 지반의 지지력이 증대되고, 침하량을 감소시키는 역할을 하게 된다. 점토층 두께 10m, 성토고 6m 조건의 그림 5(a)에서 GESC지반은 무처리 지반보다 50%이상의 침하량 감소효과가 있고 치환율 10%부터 침하비가 수렴하는 것으로 분석되며, 5(b)는 점토층 두께에 따른 침하비 결과를 나타낸 것으로 50%의 침하량 감소효과를 얻기 위해서는 10m 점토층에서는 4.0%, 20m 점토층에서는 8.5%이상의 치환율을 적용하는 것이 적절한 것으로 분석되었다. 이와 같이 시공조건에 따른 치환율과 침하비의 관계로부터 연약지반의 두께에 따른 적정 치환율의 결정이 가능할 것으로 판단된다.



(a) 지오그리드 강성영향

(b) 점토층의 두께영향

그림 5. 치환율과 침하비의 관계

GESC 보강지반의 쇄석기둥 치환율은 연약지반의 압밀시간과 관계된다. 그림 6은 시간에 따른 과잉 간극수압의 소산경향을 비교한 그림으로 치환율 10%와 15%의 경우 최종 성토하중 재하직후부터 과잉간극수압이 0.01kPa이하로 소산되는 시기까지 10~20일이 소요되는 데 반해 5%의 경우는 50일 이상의 시간이 필요하다. GESC 지반은 무처리 지반에 비해 공사기간의 단축효과가 매우 크지만, 성토고와 연약지반의 두께가 두꺼워질수록 설계시 치환율의 결정이 매우 중요한 요소가 될 수 있다.

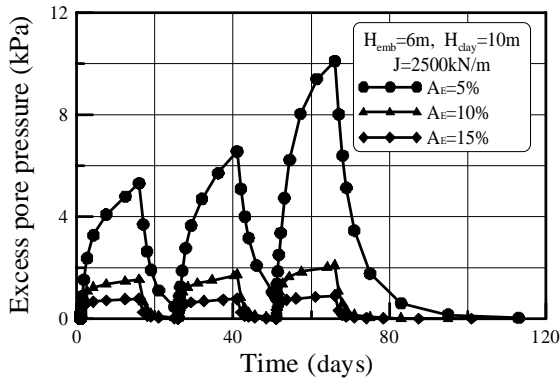


그림 6. 시간에 따른 간극수압 비교

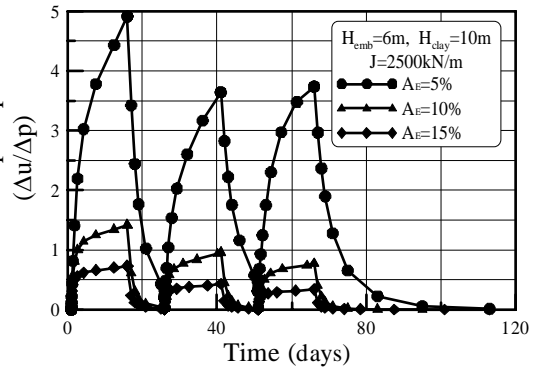


그림 7. 정규화한 간극수압 발생경향

3.2 지오그리드 강성의 영향

지오그리드 강성에 따른 응력집중비를 산정하기 위해 각 조건에서의 쇄석과 지반의 응력은 점토층의 중앙에서 측정하였다. 그림 8은 점토층 두께에 따라 각 조건의 점토층 중앙에서의 응력 측정 위치를 보여주고 있다. 응력은 대상단면의 중앙에 위치한 쇄석기둥 요소와 인접하여 있는 연약지반의 요소에서 측정하였으며, 성토하중으로 증분되는 응력크기로 비교하기 위해 성토완료 후와 성토전의 응력 차이로 응력집중비를 산정하였다.

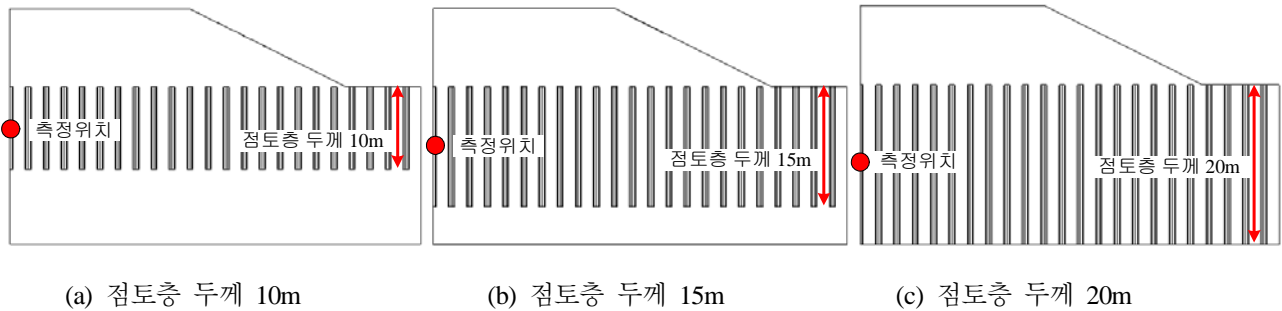


그림 8. 점토층 두께에 따른 응력 측정위치

표 4. 지오그리드 강성과 응력집중비 관계를 위한 해석조건

고정조건	성토하중 H=10m
변수	치환율 $a_s=5,10,15\%$, 점토층 두께 $H_c=10,15,20m$
관계분석	지오그리드 강성 $J=0, 1000, 2500, 4000kN/m$ 와 응력집중비 n 의 관계

지오그리드 강성과 응력집중비 관계를 위한 해석조건은 표 4와 같이 정리하였다. 10m의 일정한 성토하중 하에서 치환율과 점토층의 두께의 현장 및 시공조건이 달라지는 경우에 있어서 지오그리드 강성과 응력집중비의 관계는 그림 9와 같이 분석되었다.

그림 9에서 보이는 바와같이 GESG에서의 응력집중비는 13.6~18.5의 범위에 있으며, 지오그리드 강성이 커질수록 점토층 두께에 관계없이 응력집중비 또한 대체적으로 증가하는 경향이 나타나고 있다.

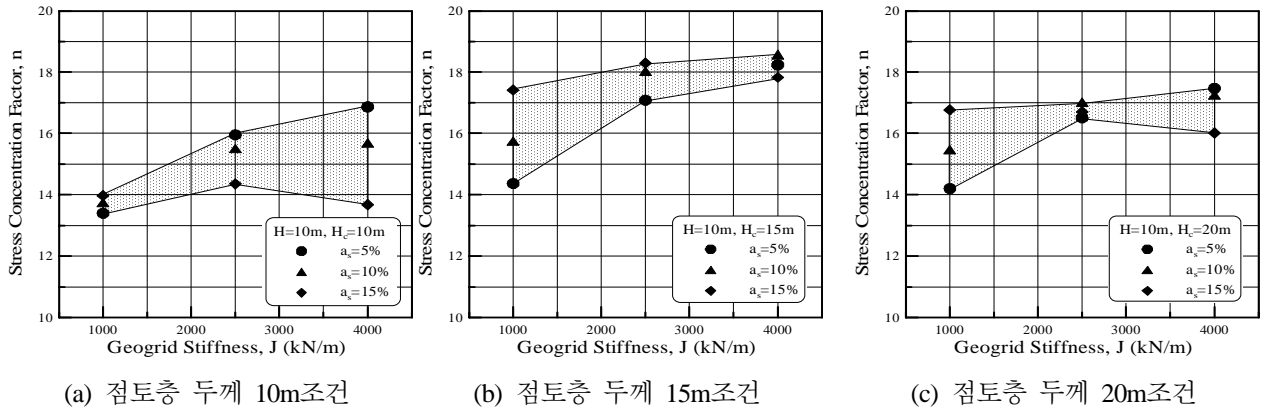


그림 9. 지오그리드 강성과 응력집중비의 관계

그림 10은 지오그리드의 강성을 일정하게 적용한 경우 연약층 두께와 응력집중비의 관계를 나타낸 것이다. 점토층이 15m인 경우 응력집중비가 가장 크게 나타나고 있는데, 이는 응력집중비 산정시 성토로 유발되는 응력을 사용하기 때문에 측정위치의 차이에 따른 영향으로 볼 수 있다. 대체적으로 점토층의 두께가 두꺼워질수록 응력집중비는 증가하는 경향을 보이고 있다. 응력집중비는 $n = \sigma_s / \sigma_c$ 이므로 점토층 두께가 두꺼울수록 쇄석기둥의 하중분담비율이 증가되는 것으로 분석될 수 있다. 한편 낮은 성토고에서는 점토층 두께에 따른 응력집중비의 편차는 4정도로 두께와 함께 치환율에 따라 변화정도가 큰 반면, 고성토고에서는 상대적으로 점토층의 두께가 응력집중비의 변화에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

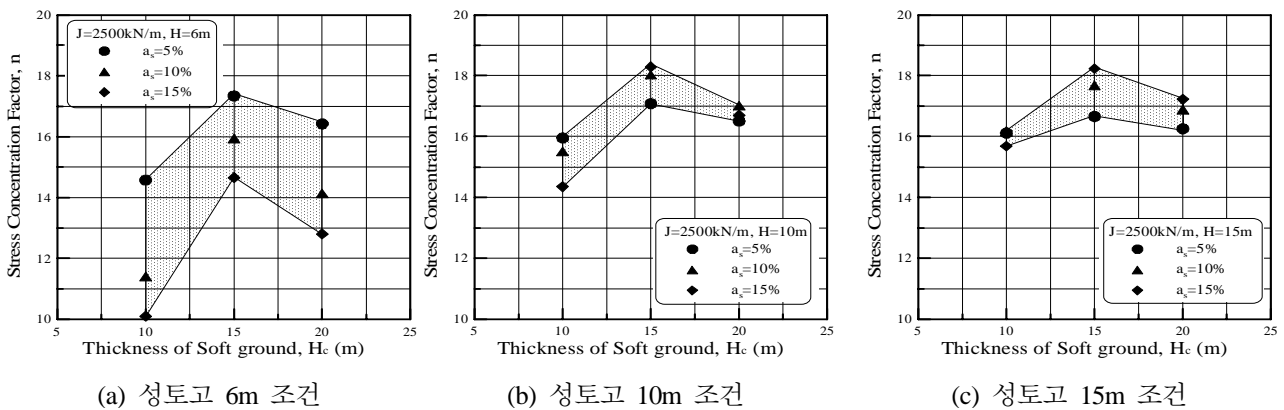


그림 10. 연약점토층 두께와 응력집중비의 관계

5. 결론

본 연구에서는 GESG의 연약지반 적용시 설계 영향인자에 관한 고찰을 하였다. 이를 위해 실제 현장 점토지반을 대상으로 3차원 유한요소해석을 수행하였으며, 치환율과 지오그리드 강성에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 다음은 그 결과를 요약하고 있다.

- (1) 시공조건에 따른 치환율과 침하비의 관계를 분석한 결과 쇄석 기둥의 치환율이 일정 수준을 확보하는 경우 침하비가 수렴하는 것으로 나타나 연약지반의 두께에 따른 적정 치환율의 결정이 가능할 것으로 판단된다.
- (2) GESG 보강지반의 쇄석기둥 치환율은 연약지반의 압밀시간과 관계되어 성토고와 연약지반의 두께가 두꺼워질수록 설계시 치환율의 결정이 매우 중요한 요소가 될 수 있다.
- (3) GESG에서의 응력집중비는 지오그리드 강성이 커질수록, 그리고 점토층의 두께가 두꺼워질수록 증

가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과로부터 점토층 두께가 두꺼울수록 쇄석기둥의 하중분담 비율은 증가하게 된다.

- (4) 5m 내외의 낮은 성토고에서는 점토층 두께에 따른 응력집중비의 편차가 큰 반면, 10m 이상의 고성토고에서는 상대적으로 점토층의 두께가 응력집중비에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2005년 건설교통부가 출연한 고강도 지오그리드 보강 Stone Column 공법의 실용화 연구(과제번호 : C105A1000017-05A0300-01700)에 의한 것이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 유충식, 송아란, 김선빈, 이대영(2007), 연약지반에 시공된 지오그리드 보강 쇄석기둥 공법의 유한요소 모델링, 한국지반공학회, 제23권, 10호, pp.133-150
2. 이대영, 김선빈, 송아란, 유충식(2006), 지오그리드 보강 Stone Column의 장·단기 하중 지지특성-유한요소해석을 통한 고찰, 2006한국지반공학회 봄 학술발표회
3. 이대영, 송아란, 유충식(2006), 지오그리드 보강 Stone Column의 파괴 메카니즘 및 지지력 특성 -축소 모형실험을 통한 고찰, 한국지반공학회, 제22권, 10호, pp.121-129
4. ABAQUS users manual, Version 6.7. (2007). Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc., Pawtucket, Providence, R.I.
5. Brokemper, D., Sobolewski, R. & Alexiew, D. (2006), "Design and construction of geotextile encased columns supporting geogrid reinforced landscape embankments; Bastions Bijfwal Houten in the Netherlands", Geosynthetics, J. 8th ICG, Yokohama, Japan, pp. 889-892
6. Han, J. and Gabr, M.A. (2002), "Numerical analysis of geosynthetics-reinforced and pile supported earth platforms over soft soil", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 128, Issue 1, pp.44-53
7. Kempfert, H.G., Raithel, M. & Jaup, A. (1999), "Model tests for analysis of the bearing and deformation behaviour of column foundations", *Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure*, Barends et al.(eds), Balkema, Rotterdam, pp. 1521-1526
8. Murugesan, S., and Rajagopal, K.(2006). "Numerical analysis of geosynthetic encased stone column", 8th International Conference on Geosynthetics, pp. 1681-1684.
9. de Prisco, C., Galli, A., Cantarelli, E. and Bongiorno, D.,(2006). "Geo-reinforced sand columns: Small scale experimental tests and theoretical modelling", *Geosynthetics -8th ICG*, pp.1685-1688
10. Raithel, M., Kempert, H. G., and Kirchner, A. (2001), "Geotextile-encased columns(GEC) for foundation of a dike on very soft soils", *Geosynthetics- 7th ICG*, pp. 1025-1028,
11. Raithel, M., and Henne, J.(2000), "Design and numerical calculation of a dam foundation with geotextile coated sand columns", *Ground Improvement Geosystems; Grouting Soil Improvement*, pp. 413-420.
12. Roscoe, K.H. and Burland, J.B. (1968), "On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay", in *Engineering Plasticity*, J. Heyman and F.A. Leckie(Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, pp. 535-609
13. Schweiger, H.F. and Pande, G.N., (1986), "Numerical analysis of stone column supported foundations", *Computers and Geotechnics*, Vol. 2, Issue 6, pp.347-37.
14. Tan, S.A. and S. Tjahyono, (2006), "Practical modelling of stone-column reinforced ground", KGS fall conference, Daegu, Korea, pp.291-311