

지오그리드 보강 쇄석 말뚝 공법의 유한요소해석 모델링

Finite Element Modeling of Geogrid-encased Stone Columns in Soft Clay

유 충 식 ¹	Yoo, Chung-Sik	송 아 란 ²	Song, Ah-Ran
이 대 영 ^{3*}	Lee, Dae-Young	김 선 빈 ⁴	Kim, Sun-Bin
박 시 삼 ⁵	Park, Si-Sam		

ABSTRACT

This study presents a modeling approach for geogrid-encased stone column(GESC) method which is widely used in Europe as an alternative to conventional pile foundations. Several benefits of using the stone column method include sound performance, low cost, expediency of construction, and liquefaction resistance, among others. Recently, geosynthetic-encased stone column approach has been developed to improve load carrying capacity through increasing confinement effect. The aim of this research is to establish a systematic approach for modeling of GESC and to form a database for the fundamentals of GESC. This paper presents details of 3D modeling of GESC together with the general behavior of GESC.

요 지

본 연구에서는 유럽 등지의 해외에서는 일반적인 파일기초의 대안으로 연약지반에서 적용되고 있는 지오그리드로 보강된 쇄석기둥공법(GESC)의 유한요소해석 모델링에 관한 내용을 다루었다. 쇄석기둥 공법은 경제성 및 시공성 측면에서 효율적이며 이와 함께 액상화 방지에도 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 최근 들어 더욱 발전된 형태인 지오그리드 감쌈 쇄석기둥 공법(GESC)에 관한 연구가 진행되고 있는 실정이다. 본 연구의 목적은 GESC공법의 3차원 유한요소해석 모델링기법을 확립하고 이에 대한 거동특성에 관한 데이터베이스 수립에 두었다. 본 논문에서는 3차원 유한요소해석 모델링에 대한 상세내용과 GESC의 침하특성 효과를 평가하였다.

Keywords : Stone column method, Consolidation settlement, Finite element analysis, Geogrid, Soft clay

1. 서 론

연약지반 개량 공법으로 사용되고 있는 샌드 컴팩션(Sand Compaction)공법은 모래의 부족으로 인한 환경문제와 상부구조물 하중 재하시 팽창파괴가 발생하며, 쇄석기둥 공법은 쇄석기둥의 강성과 투수효과 뛰어난 장점이 있으나, 연약지반에 시공시 하중에 대한 말뚝의 별장파괴가 주로 발생하고 쇄석입자가 연약층과 뒤섞이는 문제점이 있다. 이에 대한 대체공법으로서 일부 유럽지역에서는

하천지역의 초연약 지반에 제방을 성토하기 위해 지오텍스 타일(Geotextile)로 쇄석기둥 또는 모래기둥을 감싸서 시공하는 GEC(Geotextile-encased Column) 보강공법을 기초에 적용하고 제방을 성토하는 시공사례가 보고되고 있다(Raithel 등, 2001; Alexiew 등, 2003). GEC 공법과 관련된 연구로는 실내모형실험연구를 통한 거동특성 및 지지력 특성 평가(Kempfert 등, 1999; Sharma and Phanikumar 2005; Prisco 등, 2006)와 유한요소해석을 통한 연구(Raithel and Henne, 2000) 및 현장시공(Brokemper 등, 2006)을 통한 연구가

1 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ.)
2 비회원, 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ.)
3* 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원 (Senior Researcher, Geotechnical Engrg. Research Dept., KICT, dylee@kict.re.kr)
4 비회원, 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ.)
5 정회원, (주)GS건설 기술연구소 선임연구원 (Senior Researcher, GS Construction and Ltd.)

수행된 바 있으며 이들 연구를 토대로 본 공법의 우수성이 보고된 바 있다.

이와 유사한 공법으로서 쇄석기둥(Stone Column) 공법을 보완하는 차원에서 지오그리드 감쌘 쇄석기둥에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 고강도 지오그리드로 감싸 측면 구속력을 증가시킴으로써 쇄석기둥의 지지력 증가 효과를 얻을 수 있는 장점이 있는 공법이다(그림 1). 지오그리드 보강 쇄석기둥 공법에 관한 연구로는 실내시험을 통한 지오그리드 보강 쇄석기둥의 거동특성 및 강도 특성 평가(Al-Joulani, 1995; Trunk 등, 2004 ; Paul and Ponomarjow, 2004; 이대영 등, 2006b)와 유한요소해석을 통한 하중-지지특성 평가(Murugesan and Rajagopal, 2006; 이대영 등, 2006a)등 기초적인 연구가 수행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 지반보강공법 연구의 일환으로 국내연약지반에 적용할 수 있는 지오그리드 감쌘 쇄석기둥 공법(Geogrid Encased Stone Column, GESC)에 대한

거동 특성 연구의 일환으로 이에 대한 3차원 모델링 기법에 대한 연구를 수행하였다.

2. 유한요소해석

2.1 해석 조건

본 연구에서 다룬 기본 시공조건은 그림 2에 보이는 바와 같이 연약지반 두께가 10m로 쇄석기둥이 연약지반을 관통하여 암반층에 지지되는 것으로 간주하였고, 치환율은 GEC나 쇄석기둥공법이 5~30%의 범위로 적용됨을 감안하여 10% 치환율을 기본조건으로 선정하였다. 제방은 중심축을 기준으로 대칭이므로 반단면만을 대상으로 고려하였으며, 제방의 성토고에 있어서 일반적으로 10m이상의 경우는 고성토로 분류하므로 이보다 작은 6m를 기본조건으로 하였다. 지오그리드는 일반적으로 연약

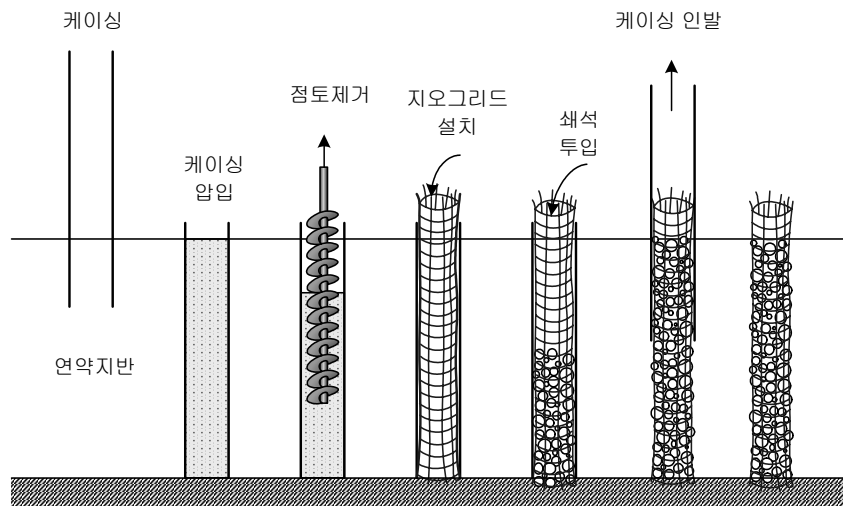


그림 1. GESC 공법 시공과정

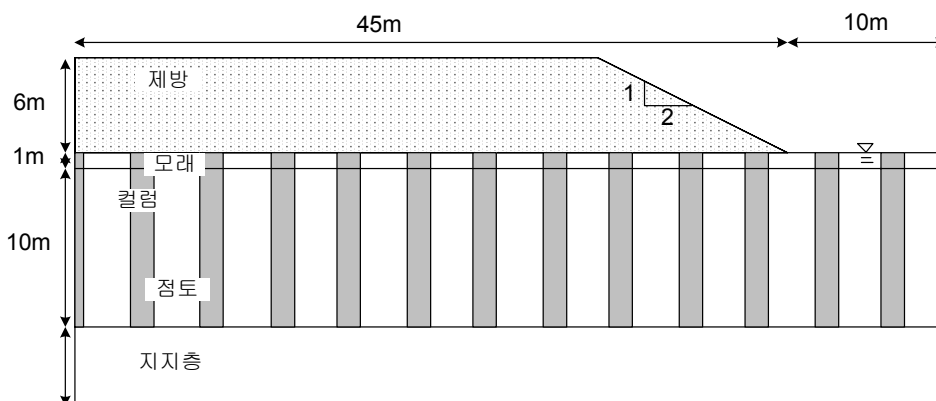


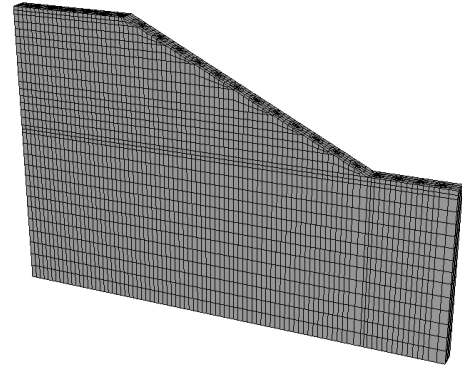
그림 2. 대상조건 단면도

지반 보강에 적용되는 강성 2500kN/m가 적용되는 것으로 모사하였다.

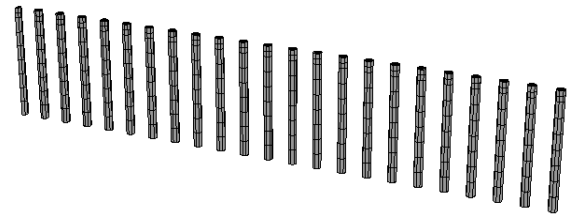
2.2 유한요소해석 모델링

본 해석의 매개변수 연구는 유한요소해석 상용프로그램 ABAQUS 6.4-1을 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 압밀거동 평가와 연계해석이 가능한 유한요소해석 프로그램의 활용이 필수적이며, 특히 점토지반 구성모델에 있어 Modified Cam-Clay(MCC) 모델 적용과 지오그리드 모사에 멤브레인 요소의 적용이 핵심 모델링 방법이다.

해석단면은 그림 3에 보이는 바와 같이 제방의 중심축을 기준으로 대칭을 이루는 점을 고려하여 우측 반단면에 대해서 3차원 모델링을 하였으며, 두께방향으로는 쉐석기



(a) 전체 유한요소망



(b) 쉐석기둥

그림 3. 해석에 적용된 3차원 유한요소망

표 1. 제방성토 시공단계

단계	시공조건	시간(일)	성토
step 1	초기조건구현 • 측면변위경계조건부여 • 우측수리경계 no-flow	-	
step 2	1단계 재하 • 성토고 2m • 점토층상부 간극수압 '0'	15	
step 3	압밀 • 과잉간극수압 소산	10	
step 4	2단계 재하 • 성토고 4m	15	
step 5	압밀 • 과잉간극수압 소산	10	
step 6	3단계 재하 • 성토고 6m • 시공직후	15	
step 7	압밀 • 과잉간극수압 소산 • 시공완료 후 거동	SS	

등이 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 해석단면의 측면을 수평방향변위구속, 바닥면은 수평, 연직방향 변위를 구속하였으며, 수리 경계조건은 초기조건에서 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 성토 이후부터 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.

모델의 이산화에 있어 지반과 쇄석기둥, 제방은 3차원 8절점 고체요소(C3D8R, C3D8P)를 적용하였으며, 지오그리드는 그림 5와 같은 3차원 4절점 멤브레인 요소(M3D4)로 모델링하였다. 멤브레인 요소에서 양의 면(SPOS)은 법선방향에 대해 절점이 반시계 방향으로 정렬된 면이고, 반대면은 음의 면(SNEG)이 된다. 지오그리드는 (b)에서와 같이 쇄석기둥의 바깥면과 지반 사이에 삽입되어 가로 세로 연결선을 따라 인장력이 작용하는 재료로서 풍선과 같이 면에 수직인 방향으로의 외력에는 저항하지 못하고 선을 따라 힘을 전달하는 멤브레인 요소로의 모델링이 적합하다. GESC에 적용되는 지오그리드는 쇄석기둥의 벌집과

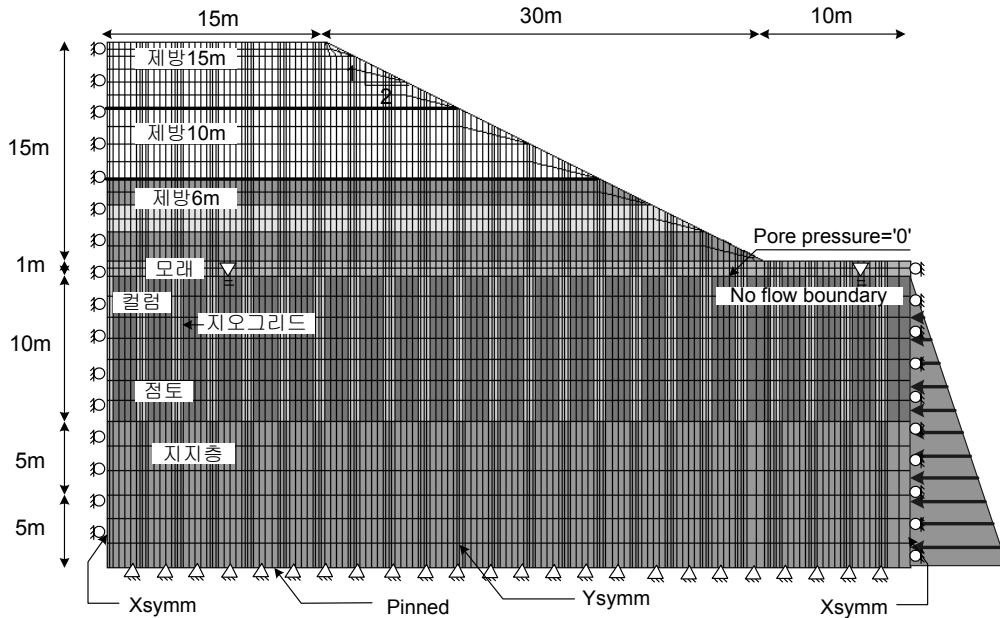


그림 4. 해석에 적용된 유한요소망(치환율 10%)

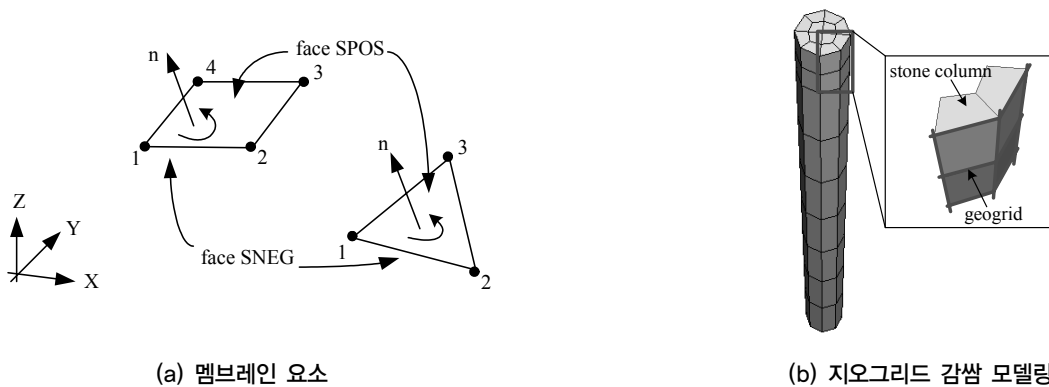


그림 5. 지오그리드 모델링

괴에 저항하는 역할을 하므로 지오그리드 유발인장력은 둘레방향의 멤브레인 변형으로부터 산정된다. 지오그리드의 두께는 1mm로 선정하였고 단면 변형률은 포아송비 ν 로 정의한 두께의 비선형 관계식은 식 (1)과 같다. 여기서 포아송비가 0.5인 경우는 재료의 비압축성을 나타내고, $\nu=0$ 은 두께의 변화가 없음을 나타낸다.

$$\frac{t}{t_o} = \left(\frac{A}{A_o} \right)^{-\frac{\nu}{1-\nu}} \quad (1)$$

여기서, A = 멤브레인의 기준면 면적, ν =포아송비

재료 모델링에 있어서 앞서 언급한 바와 같이 점토층은 MCC모델을 적용하였으며, 다른 지층과 제방, 쇄석기둥은 Mohr-Coulomb Hardening 모델을 적용하였고, 지오그리드는 탄성거동을 하는 것으로 가정하였다. Modified Cam-Clay 모델은 5개의 변수로 정의되며 이들 변수 중 Plastic slope λ , Elastic slope κ 는 $e-\ln p$ 그래프의 기울기를 나타내는 것으로 압밀이론에서의 C_e , C_s 에 해당하는 변수로 볼 수 있으며 점토층의 발생 침하량과 관계가 있다(6). Critical state stress

ratio M 과 Initial yield surface size a_o 은 그림 6에 보이는 바와 같이 MCC의 항복면을 정의하는 변수로 M 은 점토층의 파괴시 내부마찰각으로 산정할 수 있으며, a 는 식 (2)에 따라 점토층의 응력상태와 간극비의 관계로 하중이력 특성을 결정하는 변수가 된다.

$$a_o = \frac{1}{2} \exp \left(\frac{e_1 - e_o - \kappa \ln p_o}{\lambda - \kappa} \right) \quad (2)$$

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

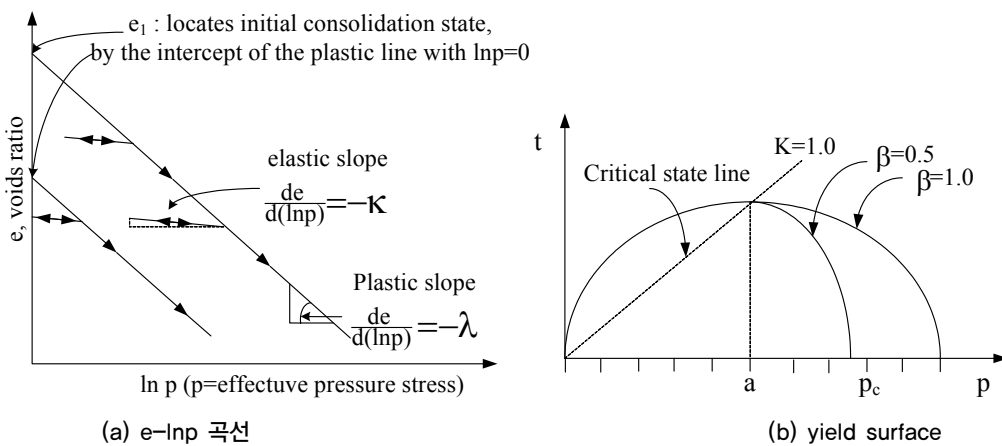


그림 6. MCC 모델 변수의 정의

표 2. 해석 적용물성

구분	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$E(\text{kPa})$	ν	$c(\text{kPa})$	$\phi(\text{deg})$	$k(\text{cm/s})$
제방	18	15,000	0.3	33	3	-
모래	19	15,000	0.3	28	3	-
쇄석 기둥	unsat	19	40,000	40	5	-
	sat	15	40,000	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	$J=2500\text{kN/m}$		

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

3. 결과 분석 및 고찰

3.1 GESG의 하중지지 메카니즘

본 장에서는 GRSC공법 적용지반과 무처리 지반, 쇄석기둥 공법 적용지반에 대해서 하중지지력과 침하량을 비교하여 쇄석기둥 치환 및 지오그리드 보강으로 나타나는 효과를 분석하고 연약지반에서 GESG의 영향에 대한 연구를 수행하였다. GESG의 기본조건은 표 3에 나타난 바와 같다.

1) 침하억제 효과

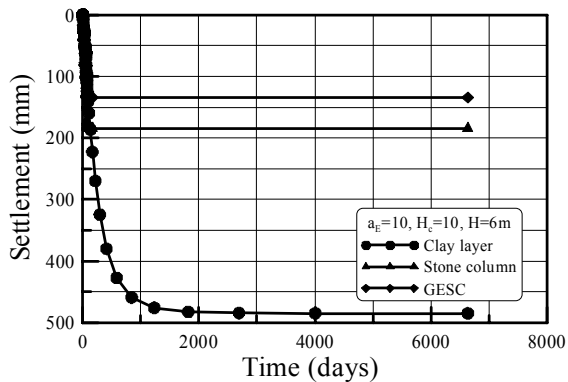
그림 7은 시간에 따른 침하량 발생경향을 나타낸 것으로 (a)에서 전혀 보강하지 않은 연약지반에 성토시 최종침하량은 484mm가 발생하며, 무처리 지반 침하량 대비 쇄

석기둥 공법은 62%, GESG는 72%의 침하량 감소효과가 현저하게 나타난다. 또한 침하량 수렴시점에 있어서도 쇄석기둥 공법과 GESG는 그림 7 (b)에 보이는 바와 같이 70일 이후 침하량이 수렴하나, 점토층은 1500일정도 이후부터 수렴하는 경향을 보이기 때문에 압밀완료기간 단축 효과가 지대하다. GESG는 지오그리드 보강으로 쇄석기둥의 별칭과괴에 저항하여 침하량을 더 감소시킬 수 있으며, 지오그리드 강성에 따라 그 효과는 증대될 수 있다.

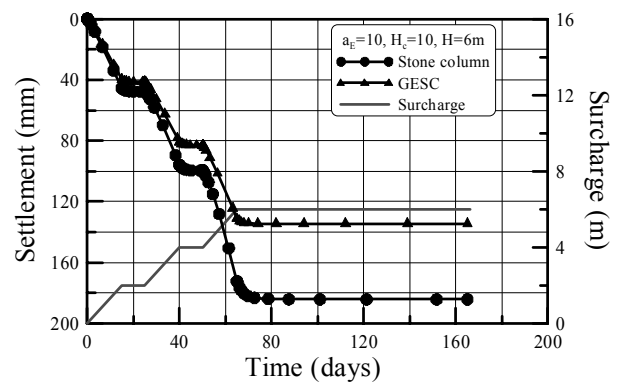
성토하중으로 압밀이 진행됨에 따라 과잉간극수압이 소산되면서 지반의 유효응력은 증가한다. 이 때 유효응력의 증가는 침하발생과 연관되므로 그림 8(a)와 같이 유효응력이 100kPa까지 계속적으로 증가하는 무처리 지반에서 침하량이 가장 크게 발생하고, 침하량이 가장 작은 GESG에서 유효응력 증가가 가장 작다.

표 3. GESG 기본 해석조건

구분	치환율, a_E	점토층 두께, H_c	제방 성토고, H	지오그리드 강성, J
GESG 기본조건	10%	10m	6m	2500kN/m

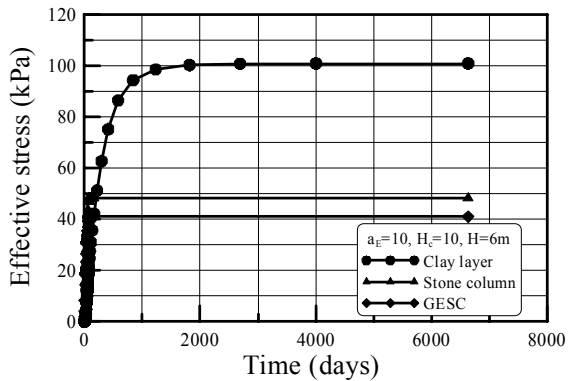


(a) 무처리, 쇄석기둥공법, GESG 비교

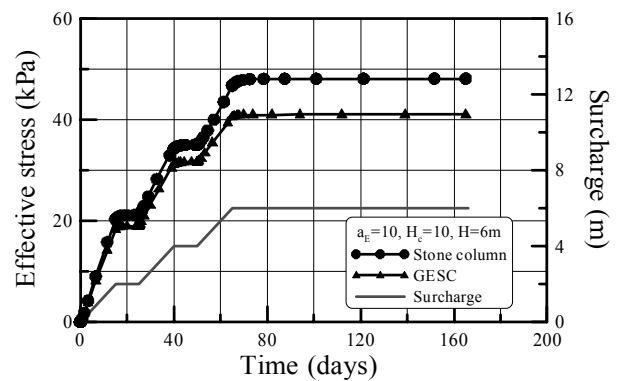


(b) 쇄석기둥공법, GESG 비교

그림 7. 시간-침하량 관계



(a) 무처리, 쇄석기둥공법, GESG 비교



(b) 쇄석기둥공법, GESG 비교

그림 8. 연직응력 증가경향

그림 9는 제방중심에서부터 지반상부의 발생응력을 시공단계별로 나타낸 것으로 쇄석기둥과 지반의 응력분담을 보여주고 있다. 압밀완료 후 점토지반에서 증가하는 응력은 63kPa 발생한 데 비해 쇄석기둥에서의 응력증가는 376kPa로 나타나 쇄석기둥에서의 하중증가가 뚜렷이 확인되며 제방 성토하중의 대부분은 쇄석기둥에 의해 지지되는 것으로 판단된다. 따라서 점토지반에는 전체 성토고에 비해 상대적으로 적은 하중이 작용하게 되어 GESC 보강지반은 침하량이 작게 발생할 수 있게 된다.

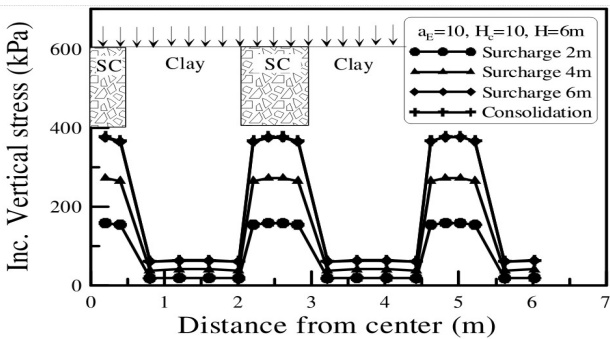
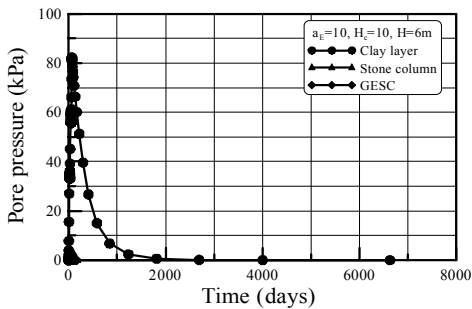


그림 9. 지반과 쇄석기둥의 응력분담

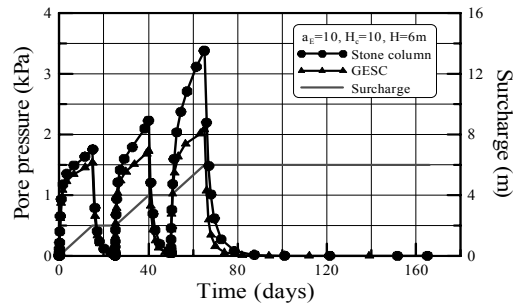
2) 과잉간극수압의 소산

6m의 제방시공은 15일 동안 2m 성토 후 10일 압밀유도를 3회 반복하여 성토완료 후 100일동안 지속한 결과로 과잉간극수압이 최대 발생하는 점토층 하부에서 측정한 결과를 비교한 결과 무처리 지반의 경우 하중재하에 따른 과잉간극수압이 GESC보다 23배 가량 발생하며 소산되는 속도가 매우 느리게 진행되었다. 반면 쇄석기둥 공법과 GESC는 동일한 쇄석기둥을 활용하므로 과잉간극수압의 발생경향 차이가 1kPa이하로 발생하는 것으로 나타났다. 성토하중이 증가할수록 쇄석기둥의 과잉간극수압 크기는 점진적으로 증가하나 GESC는 이보다는 기울기가 작게 발생하며, 이것은 하중에 대해서 쇄석기둥이 파괴되지 않고 형태를 유지할 때 배수능력이 지속될 수 있음을 보여주는 결과이다.

깊이에 따라 발생하는 점토층에서의 경향을 보여주는 그림 11은 압밀이론에 근거한 과잉간극수압과 유효응력의 관계로 파악될 수 있으며 (b)의 과잉간극수압은 성토직후 발생한 과잉간극수압으로 그림 10 (b) 10일 동안의 압밀기간동안 완전히 소산되는 과정이 단계 성토되는 동안

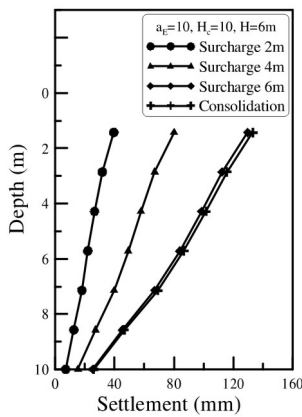


(a) 무처리, 쇄석기둥공법, GESC 비교

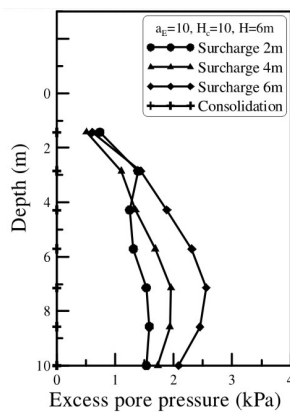


(b) 쇄석기둥공법, GESC 비교

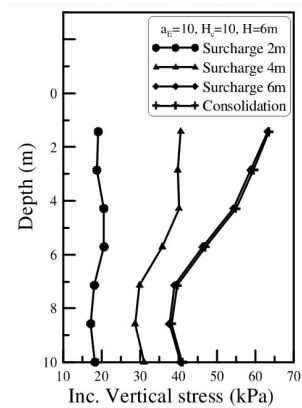
그림 10. 과잉간극수압 발생



(a) 침하



(b) 과잉간극수압



(c) 연직응력

그림 11. 깊이에 따른 점토층의 경향

표 4. 결과 비교

구분	무처리 지반	쇄석기둥 공법	GESC 공법
최종 침하량(mm)	485	184(62%감소)	134(72%감소)
과잉간극수압(kPa)	82	3.4(96%감소)	2.1(97%감소)
증가한 연직유효응력(kPa)	101	48(52%감소)	41(59%감소)

반복되므로 0.5~2.5kPa의 범위 내에서 발생하며, 연직응력은 성토하중 재하에 대해 증가하고 있으며 사실상 쇄석기둥의 영향으로 과잉간극수압의 발생이 작기 때문에 간극수압 소산으로 증가하는 연직응력의 크기 또한 작으며 그림 8 (b)에서도 확인할 수 있다. 한편 지반상부에서의 침하량과 연직응력 증가가 크게 나타나며 깊이 7m이후부터 연직응력은 일정하게 유지되는 것으로 보아 상부보강이 점토지반의 응력분담을 감소시킬 수 있다고 판단된다.

GESC의 기본조건과 무처리 지반, 쇄석기둥 공법 적용시의 결과를 정리한 표 4는 무처리 지반의 결과에 대비하여 쇄석기둥 공법과 GESC공법 적용시 효과를 비교한 결과이다. 이 때 침하량은 62~72%감소하였으며 GESC의 경우 지오그리드 보강으로 쇄석기둥 공법보다 침하량이 더 작게 발생하였으며 적용하는 지오그리드 강성에 따라 그 효과는 증대될 수 있다. 과잉간극수압은 96~97%로 쇄석을 통한 배수효과가 크기 때문에 시공기간 단축에 효율적인 장점이 있으며 따라서 과잉간극수압 소산으로 증가하는 유효응력이 작기 때문에 전체적으로 증가한 연직유효응력 또한 무처리 지반보다 52~59%의 감소경향이 나타나는 것으로 분석되었다.

4. 결론

본 연구에서는 유럽 등지의 해외에서는 일반적인 파일 기초의 대안으로 연약지반에서 적용되고 있는 지오그리드 보강된 쇄석기둥공법(GESC)의 유한요소해석 모델링에 관한 내용을 다루었다. 본 논문에서는 3차원 유한요소해석 모델링에 대한 상세내용과 GESC의 침하 및 배수 특성에 대한 내용은 다음과 같이 요약될 수 있다.

GESC공법의 모델링에 있어서 단위셀 개념보다는 1열-모델링 기법이 적당한 것으로 나타났으며 평면상의 간격을 토대로 모델링이 가능하다.

지오그리드는 측방 벌징을 모델링할 수 있는 멤브레인 형태의 요소를 적용하여 모델링이 가능하며 시공과정에 대한 단계별 모델링을 통해 연약지반의 배수 특성 모델링

이 가능하며 수정 Cam-Clay 모델을 이용하여 연약지반 모델링시 연약지반의 압밀 침하 특성에 대한 현실적이 모델링이 가능하다.

GESC 보강지반에서의 제방성토 및 압밀 완료 후의 최종침하량은 동일한 제방 시공조건을 적용한 무처리 지반의 침하량 대비 72%의 침하량 감소효과가 나타났으며 성토 후 발생하는 과잉간극수압은 무처리 지반의 경우에 비해 97%의 감소율을 보이는 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 2005년 건설교통부가 출연한 고강도 지오그리드 보강 Stone Column 공법의 실용화 연구(과제번호 : C105A1000017-05A0300-01700) 및 한국과학재단의 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-2004-000-10953-0)에 의한 것이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이대영, 김선빈, 송아란, 유충식(2006a), “지오그리드 보강 Stone Column의 장·단기 하중 지지특성-유한요소해석을 통한 고찰”, 2006 한국지반공학회 봄 학술발표회.
2. 이대영, 송아란, 유충식(2006b), “지오그리드 보강 Stone Column의 파괴 메카니즘 및 지지력 특성 -축소모형실험을 통한 고찰”, 한국지반공학회논문집, 제22권, 제10호, pp.121-129.
3. Alexiew, D., Horgan, G.J. and Brokemper, D. (2003), “Geotextile encased columns (GEC): load capacity & geotextile selection, Sweden”, BGA International Conference on Foundation.
4. Al-Joulani, M. (1995) *Laboratory and analytical investigation of sleeve reinforced stone columns*, Ph.D. Thesis, Carleton University, Canada.
5. Brokemper, D., Sobolewski, J. and Alexiew, D. (2006), “Design and construction of geotextile encased columns supporting geogrid reinforced landscape embankments; Bastions Vijfwal Houten in the Netherlands”, *Geosynthetics -8th ICG*, 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., Raithe, 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”, *Geosynthetics -8th ICG*, pp.1681-1684.

9. Paul, A., and Ponomarjow, A. (2004), "The bearing behaviour of geogrid reinforced crushed stone columns in comparison to non-reinforced concrete pile foundations", *EuroGeo3*, pp. 285-288.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Schweiger, H.F. and Pande, G.N., (1986), "Numerical analysis of stone column supported foundations", *Computers and Geotechnics*, Vol.2, Issue 6, pp.347-372.
14. Sharma, R. S. and Phanikumar, B. R. (2005). "Laboratory study of heave behavior of expansive clay reinforced with geopiles", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp.512-520.
15. Tan, S.A. and S. Tjahyono, (2006), "Practical modelling of stone-column reinforced ground", *KGS fall conference*, Daegu, Korea, pp.291-311.
16. Trunk, G., Heerten, A., Poul, A. and Reuter, E. (2004), "Geogrid wrapped vibro stone columns", *EuroGeo3*, pp.289-294.

(논문접수일 2007. 1. 5, 심사완료일 2007. 3. 5)