

지오그리드 감쌘 쇠석기둥 공법의 장·단기 하중 지지 특성 - 유한요소해석을 통한 고찰

Short- and Long-term Load Carrying Capacity of Geogrid-encased Stone Column - A numerical investigation

이 대 영¹ Lee, Dae-Young

송 아 란² Song, Ah-Ran

김 선 빈³ Kim, Sun-Bin

유 충 식⁴ Yoo, Chung-Sik

Abstract

The stone column method 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 its load carrying capacity through increasing confinement effect. Although such a concept has been successfully applied in practice, fundamentals of the method have not been fully explored. This paper presents the results of an investigation on the load carrying capacity of geogrid-encased stone column using a series of 2D finite element analyses. A parametric study was then conducted for influencing factors such as effect of geogrid encasement, encasement length, geogrid strength, among others. The results of the analyses indicated improved short- and long-term load carrying capacity of the geogrid-encased stone column method has advantages over the conventional stone column method without encasing.

요 지

유럽 등지에서 연약지반 개량 또는 제방기초로서 적용되는 쇠석기둥 공법은 일반적인 파일기초의 대안공법으로 경제성 및 시공성 측면에서 효율적이며, 액상화 방지에도 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 또한 최근 들어서는 더욱 발전된 형태의 지오그리드 보강 쇠석기둥 공법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 이와 관련하여 본 논문에서는 지오그리드 보강 쇠석기둥 공법의 성토하중에 대한 쇠석기둥의 하중지지 특성을 고찰하기 위해 2차원 유한요소해석을 수행하였고, 지오그리드 보강효과, 지오그리드 강성, 지오그리드 감쌈깊이 등 영향인자에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 해석결과로부터 지오그리드 보강은 쇠석기둥 공법의 장·단기 하중지지 특성 개선시켜 주는 것으로 나타났다.

Keywords : Finite element method, Geogrid encasement, Soft clay, Stone column

1. 서 론

최근 들어 산업의 발달로 인한 철도, 도로, 항만구조

물의 확충 등 인프라 구축으로 인해 국토 개발의 필요성이 날로 증가하고 있다. 특히 좁은 국토면적과 삼면이 바다로 둘러싸인 국내 지형적 특성상 해안 및 내륙 연

1 정희원, 한국건설기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Department of Geotechnical Engrg., Korea Institute of Construction Technology)

2 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

3 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

4 정희원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ., csyoo@skku.edu, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 2월 29일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

약지반의 활용을 통한 효율적인 국토이용이 절실한 실정이다. 그러나 연약지반에 성토 및 상부 구조물로 하중이 재하되는 경우 압밀침하 및 과도한 전단변형 등이 유발되므로 이를 적절히 대처하기 위해서는 연약지반 개량 및 기초구조물 보강공법의 적용이 필수적이라 할 수 있다.

연약지반에 철도, 도로, 항만시설물, 성토구조물 등을 건설하는 경우 연약지반을 개량하는 다양한 공법들이 사용되고 있으나 양질의 모래 공급 부족에 따른 환경문제로 인해 대체 재료로써 조립토 말뚝 및 쇄석기둥에 대한 관심이 증가하고 있다. 연약지반 처리 공법으로 쇄석기둥 공법은 지반의 지지력 증가, 액상화 방지 등 여러 장점이 있는 공법이지만 상부 구조물 하중에 의한 팽창파괴에 취약한 문제점이 발생한다. 최근 독일 등 유럽 일부 국가에서는 이러한 기존의 연약지반 처리공법의 단점을 보완하기 위하여 토목섬유를 이용하여 기둥을 형성하고 모래 또는 쇄석을 채워 복합지반을 형성함으로써 팽창파괴를 방지하고 침하 감소 및 지지력을 증가시키는 연구가 활발히 진행되고 있다(AI-Joulani 1995; Kempfert et al. 2002; Alexiew et al. 2003). 특히 지오그리드 감쌈 쇄석기둥(Geogrid-encased Stone Column, GESC) 공법은 쇄석이나 자갈과 같은 조립재로 채워진 기둥을 고강도 지오그리드로 감싸 쇄석에 구속응력을 증가시켜 줌으로써 인해 쇄석기둥의 강도증진 및 변형을 감소시켜 지반 및 구조물 보강이 가능한 공법으로 도로지반, 사면, 성토제방, 교대기초, 해상구조물 기초, 압거, 하수관거, 철도노반, 대규모 오일탱크 및 플랜트 기초, 연약지반 보강 등에 광범위하고 효율적으로 적용될 수 있다(AI-Joulani 1995). 이러한 토목섬유를 이용하여 모래기

둥을 감싸 연약지반을 보강하는 연구는 주로 GEC공법에 국한되어 있으며, 독일 및 유럽 등에서 GEC 공법에 대한 시공사례 및 설계방안이 마련되어 있다(Reithel et al, 2002; Brokemper et al, 2006). 그러나 쇄석을 채움재로 하고 고강도 지오그리드로 감싸 보강하는 GESC 공법에 대한 설계방안 및 시공실적은 전무한 실정이다.

이에 본 연구에서는 지오그리드 감쌈 쇄석기둥(GESC) 공법의 설계 반영을 위한 연구차원에서 GESC의 장단기 하중지지 특성을 고찰하고자 하였다. 이를 위해 점토지반을 대상으로 유한요소해석에 의한 매개변수 연구를 수행하였으며, 그 결과를 종합하여 기존 쇄석말뚝과 지오그리드 감쌈 쇄석기둥의 장·단기 하중지지 특성 비교 및 지오그리드 강성/감쌈깊이에 따른 거동특성을 평가하였다.

2. GESC공법의 기본개념

연약지반 개량공법으로 주로 사용되는 모래 및 쇄석기둥 공법은 상부 구조물 및 성토하중 재하시 그림 1(a)에서와 같이 쇄석기둥 상부 2D~3D에서 팽창파괴(bulging failure)가 발생하며 이로인한 과도한 침하 및 지지력 감소는 구조물의 안정성에 영향을 미치게 된다(Hughes and Withers, 1974; Barksdale and Bachus, 1983). 이러한 쇄석기둥의 횡방향 변형을 억제하기 위해 고강도의 토목섬유로 쇄석기둥을 감싸 보강하여 줌으로써 지반의 구속력을 증가시켜 쇄석기둥의 지지력 증가로 인한 침하감소 공법에 대한 연구가 진행되고 있으며, 지오그리드 감쌈 효과는 쇄석기둥의 횡방향 변형을 억제시켜줌에 따라 효율적이고 경제적인 보강을 위해서는 쇄석기

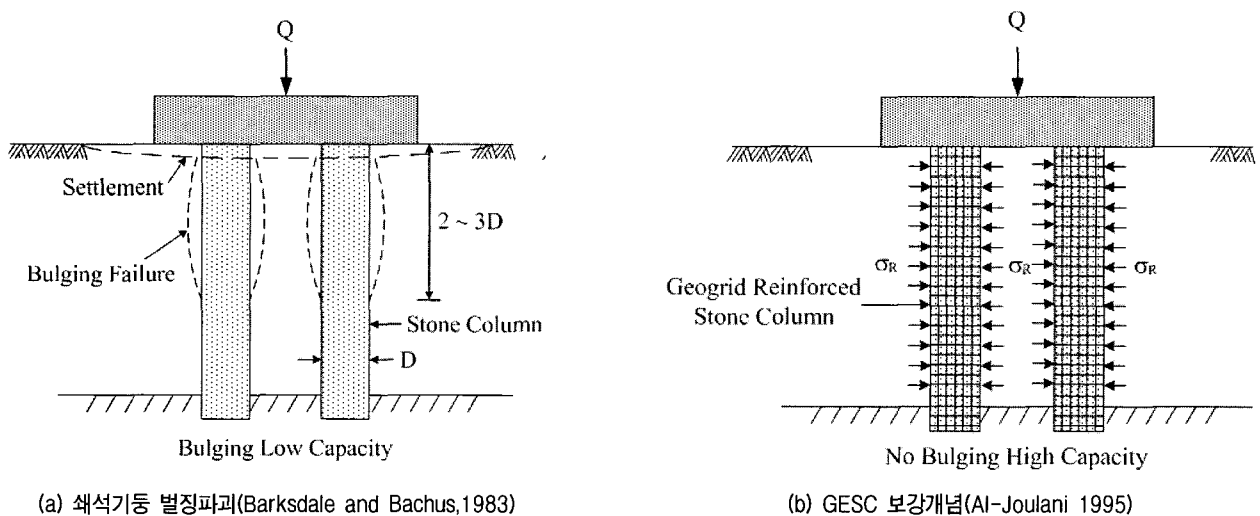


그림 1. 지오그리드 보강여부에 따른 쇄석기둥 파괴형태

등의 최적 감쌈 깊이 범위를 제시하였다(이대영 등, 2006; Murugesan et al, 2006).

GESC 공법의 기본 개념은 그림 1(b)와 같이 지오그리로 쇄석기둥을 감싸 지오그리트 인장강도에 의한 구속효과로 인해 쇄석기둥의 강도증가를 유도하는 반면 변형을 감소시켜 벌징파괴를 억제함으로써 상부 재하하중에 효율적으로 저항하는데 초점이 맞추어진 공법이다. 또한 GESC공법은 고강도 지오그리트의 강성효과로 인해 쇄석, 폐콘크리트, 재생골재 등 다양한 입도의 재료를 사용 할 수 있으며, 부직포로 모래기둥 전체를 보강하는 기존의 GEC공법과는 달리 쇄석기둥의 상부 팽창파괴 영역만을 부분적으로 보강할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 GESC공법은 기존의 토목섬유 보강공법에 비해 토목섬유의 보강 범위를 축소시킬 수 있으며, 기존의 공법에 비해서도 설치간격을 줄여 줌으로써 경제적이고 효율적인 시공이 가능하다.

3. 유한요소해석

3.1 해석모델링

3.1.1 해석대상

본 연구에서는 국외 쇄석기둥 시공 사례(Alamgir 외, 1996; Brokemper 외, 2006; Kempfert와 Raithel, 2002)를 참고하여 현장에서 일반적으로 쇄석기둥이 시공되는

조건을 고려하였다. 본 해석에서 고려한 시공 조건은 그림 2와 같이 연약지반의 개량을 위해 직경 0.8m의 쇄석기둥이 깊이 10m 하부의 지지층까지 근입되는 경우를 대상으로 하였으며, 쇄석기둥 보강용 지오리드의 두께는 1.0mm로 선정하였다. 하중재하는 지반의 압밀 및 제방성토의 시공을 고려하여 연약지반 전반에 성토되는 경우를 고려하였으며 지오그리트 보강효과를 고려하기 위해 성토 직후 및 시공완료 후의 장·단기 하중지지 특성에 관한 해석을 수행하였다. 고려대상 조건은 그림 2에 보이는 바와 같이 전체 단위셀(Unit cell) 면적에 성토고 10m의 자중이 재하되도록 하였다.

3.1.2 모델링

해석에 사용된 프로그램은 범용 유한요소 해석 패키지인 ABAQUS 6.4-1를 사용하였다. ABAQUS는 토목 및 기계 등 다양한 분야에 적용되는 범용프로그램으로서 특히 지반공학분야에서 다양한 흙의 구성모델을 제공하고 소성거동 모사에 대한 알고리즘이 효율적인 프로그램으로 알려져 있다. 또한 지반구조물의 항복 후 거동 평가에 효과적이며 응력-간극수압 연계해석 알고리즘을 채택하고 있다는 장점이 있다.

해석영역의 모델링에 있어서 해석의 편의상 쇄석기둥과 지오그리트는 원지반에 매입된 상태인 것으로 간주하였으며 쇄석기둥과 주변지반의 영향범위는 단위셀 개념을 바탕으로 쇄석기둥 중심축을 기준으로 1/2단면

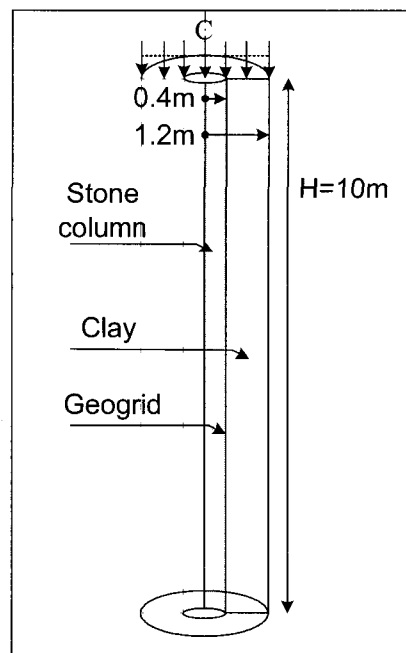
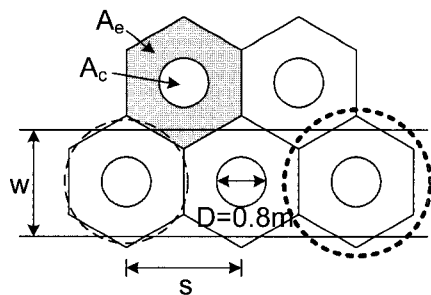


그림 2. 고려대상 조건

에 대한 축대칭 모델링을 하였다. 쇄석기둥은 치환율 10%, 삼각형 배치로 시공하는 조건을 대상으로 하여 측면경계는 중심으로부터 1.5D(=1.2m) 거리에 위치하도록 모델링 하였다. 원지반 및 쇄석기둥의 이산화에는 축대칭 4절점 가감적분 응력-간극수압 연계 고체요소(CAX4RP)를 적용하였으며, 지오그리드는 쇄석기둥의 구속효과를 모사하기 위하여 축대칭 2절점 멤브레인 요소(MAX1)을 적용하여 모델링하였다. 멤브레인 요소는

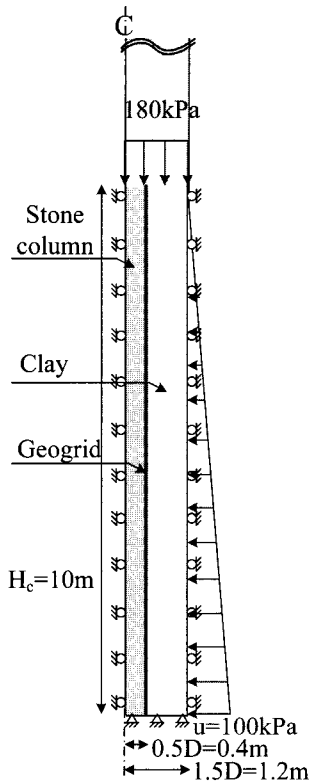


그림 3. 해석모델링 및 유한요소망

휨강성없이 평면상에 유발되는 힘의 전달이 필요한 부분에 적용이 가능한 요소이다. 그림 3은 해석에 적용한 유한요소 모델을 보여주고 있다.

변위에 대한 경계조건으로는 중심축과 영향반경 측면은 수평방향으로의 변위를 구속하였으며 바닥면은 연직방향의 변위를 구속하였다. 수리적 경계조건으로 측면 및 하부경계에는 초기조건으로 부여한 수압이 일정하게 유지되도록 하였으며, 아울러 연계해석 과정에서 하중재하시 지표 및 쇄석기둥을 통하여 배수되도록 하중 재하단계에서 지표의 각 절점 간극수압은 “0”으로 하였으며, 쇄석기둥은 점토층과의 투수계수 차이로 물의 흐름이 발생하도록 모델링하였다.

재료 모델링에 있어서 점토지반은 MCC(Modified Cam-Clay) 모델을 적용하여 침하와 압밀에 관한 연약지반의 특성이 모사되도록 하였다. 본 해석에 사용한 MCC 모델은 Roscoe와 Burland(1968)가 Cam-Clay이론을 수정하여 타원형의 항복곡적(Yield locus)을 갖도록 제안한 모델이다. 식 (1)은 MCC 모델의 항복면을 정의한 식으로 여기서 p'_o 은 선형압밀하중, η 는 q/p' 의 응력비를 나타내고 M은 한계상태 기울기로 점토 고유의 변수이다.

$$\frac{p'}{p'_o} = \frac{M^2}{(M^2 - \eta^2)} \quad (1)$$

MCC모델은 5개의 변수로 정의되며 이들 변수 중 Plastic slope λ , Elastic slope κ 는 e-lnp 그래프의 기울기를 나타내는 것으로 압밀이론에서의 C_e , C_s 에 해당하는 변수로 볼 수 있으며 점토층의 발생 침하량과 관계가 있다. Critical state stress ratio인 M과 Initial yield surface

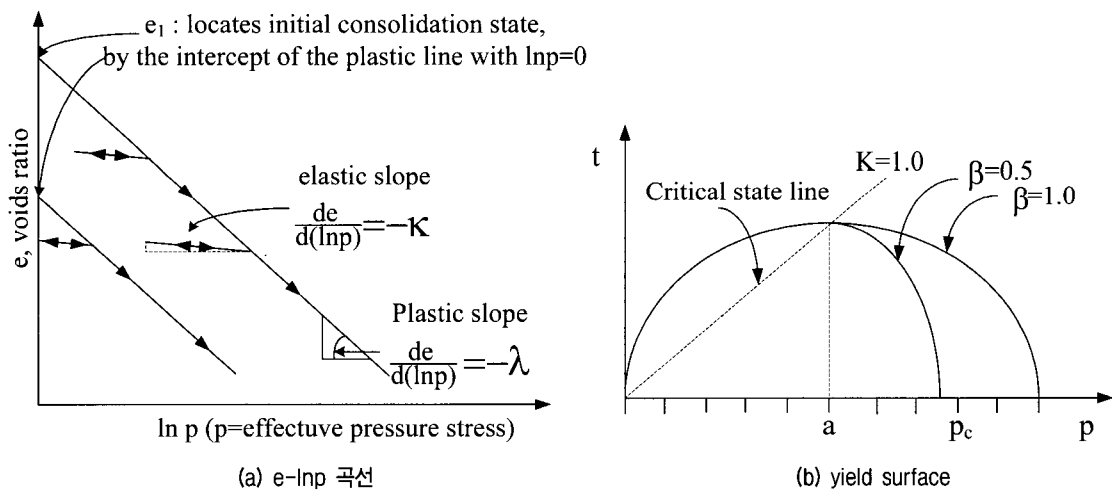


그림 4. MCC 모델 변수의 정의

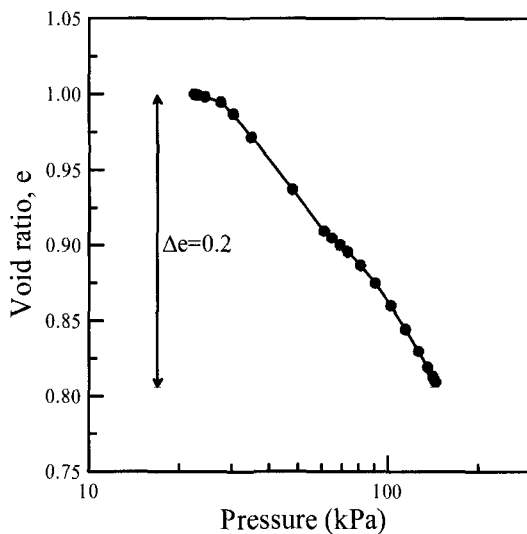
size로 표시되는 a_o 은 그림 4에 보이는 바와 같이 MCC의 항복면을 정의하는 변수로 M은 점토층의 파괴시 내부마찰각으로 산정할 수 있으며, a 는 점토층의 응력상태와 간극비의 관계로 하중이력특성을 결정하는 변수이다.

본 해석에서 점토지반은 표 1에 나타난 바와 같이 정규압밀점토지반의 특성을 갖도록 하였다. 그림 5는 대상현장에 대하여 원지반의 압밀특성을 나타낸 것으로 e - $\log P$ 곡선을 통해 원지반이 정규압밀점토임을 확인할 수 있으며, GESC로 보강하지 않은 경우 하중재하시 압밀침하는 1.2m가량 발생하고 압밀 완료시까지의 시공 후 700일정도의 시간이 필요한 것으로 나타났다. 한편 쇄석기둥은 Mohr-Coulomb 항복규준을 따르는 비연계(non-associated) 탄소성 재료로 가정하였으며, 지오그리드와 성토재는 탄성기둥을 하는 것으로 간주하였다. 하중은 성토고 10m의 성토재를 자중재하 하였으며, 성토

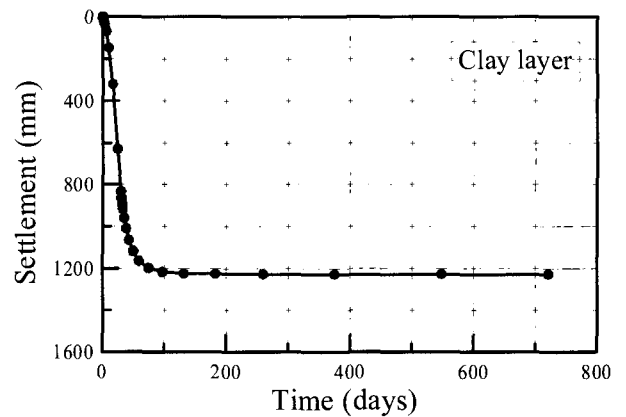
하중의 시공기간은 30일로 하중은 시간에 따라 점진적으로 재하되도록 모델링하였다.

3.2 해석조건

본 연구에서 고려한 장·단기 고려조건은 응력-간극수압 연계해석을 통해 시공직후와 시공 후의 조건으로 분리하여 결과를 분석하였다. 초기 지하수위는 연약지반의 지표에 위치한 것으로 간주하여 성토에 대한 시공을 모델링하였으며 단기조건은 성토가 완료되는 시점으로, 장기 이후 성토로 발생된 과잉간극수압이 완전히 소산되는 시점을 기준으로 하였다. 표 1과 표 2는 해석에 적용한 대상 지반 및 대상조건역학적·수리학적 특성을 나타내고 점토지반과 쇄석기둥의 물성치는 Schweiger & Pande(1986)의 논문을 참고하여 산정하였다. 아울러 원지반 점토의 비배수 전단강도에 따른 지오그리드의 임



(a) e- $\log P$ 곡선



(b) 압밀침하곡선

그림 5. 원지반의 압밀특성

표 1. 대상지반의 역학적·수리학적 특성

구분	단위중량 (kN/m ³)	λ	M	a_o	κ	ν	e	투수계수 (cm/sec)
점토층	20	0.2	1	30	0.02	0.3	1	1.0×10^{-7}

표 2. 대상조건역학적·수리학적 특성

구분	단위중량 (kN/m ³)	변형계수 (kPa)	포아송비	점착력 (kPa)	내부마찰각 (deg)	팽창각 (deg)	투수계수 (cm/sec)
Stone column	20	80,000	0.3	10	42	42	1.0×10^{-3}
Fill	18	15,000	0.3	-	-	-	-
Geogrid	1	J=2,000kN/m	0.3	-	-	-	-

계장성을 도출하기 위해 표 2와 같이 추가 해석을 수행하였으며 그 결과를 분석하였다.

4. 결과분석 및 고찰

4.1 쇄석기둥 공법의 보강 효과

점토지반에 쇄석기둥을 적용함으로써 얻을 수 있는 효과는 크게 두가지로 분석될 수 있다. 첫 번째는 쇄석기둥에 의한 하중지지효과이며 두 번째는 쇄석기둥의 간극에 의한 배수재로서의 효과이다. 그림 6~8은 하중재하에 따른 쇄석기둥 및 지반에 발생하는 침하경향을 보여주고 있다. 하중재하시 침하경향을 살펴보면 무처리 지반의 경우 침하량은 1.5D(1.23m)가량 발생하였으며, 쇄석기둥 공법시 0.75D(0.6m)의 침하량이 발생하는 결과를 알 수 있다. 이러한 결과로부터 쇄석기둥 적용시 쇄석기둥을 적용하지 않은 무처리지반에 비해 침하량을 1/2로 감소시켜 지반 보강효과가 있음을 알 수 있었다. 한편 무처리 지반에서의 침하는 시공직후 전체 침하

량의 67%가 발생하고 시공이후에도 압밀이 계속되면서 나머지 침하량이 발생하게 되며 수렴하기까지 100일 정도가 소요된다. 쇄석기둥이 배수재의 역할을 하는 경우엔 침하량 수렴에는 50일 정도가 소요되며 시공직후 전체 발생 침하량의 84%가 발생하여 전체 침하량은 물론 시공이후의 추가적인 침하량 또한 감소한다. 이러한 결과는 시간에 따른 압밀효과에 의한 것으로 하중재하로 유발된 과잉간극수압의 소산시간과 연관된다. 그림 9에 보이는 바와 같이 무처리 지반에서는 110kPa로 재하하중의 대부분이 과잉간극수압으로 발생하고 서서히 감소하는 데 비해 쇄석기둥 적용시의 과잉간극수압은 10kPa이하로 작게 발생하고 소산도 빠른 속도로 진행된다. 이처럼 쇄석기둥공법은 침하감소와 배수효과를 얻을 수 있지만 건물 등 수직하중 재하시 쇄석기둥에는 횡방향 변형이 발생하게 된다. 이러한 쇄석기둥의 단점인 횡방향 변형을 억제하기 위해 쇄석기둥의 횡방향 변형이 발생하는 주변을 인장강도를 갖는 토목섬유로 감싸 벌징파괴에 대한 저항력을 증진시켜 동일한 조건보다 효율을 높일 수 있는 방안이 요구된다.

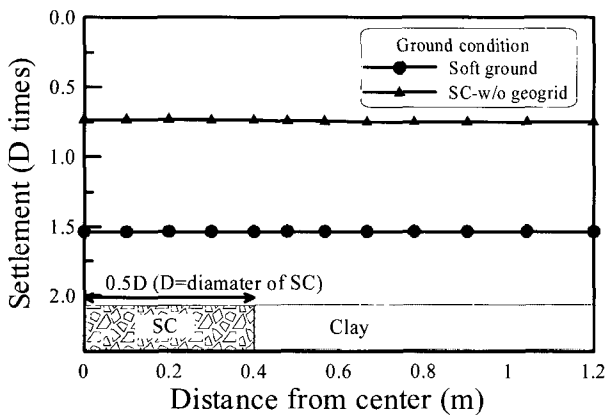


그림 6. 거리에 따른 지표침하

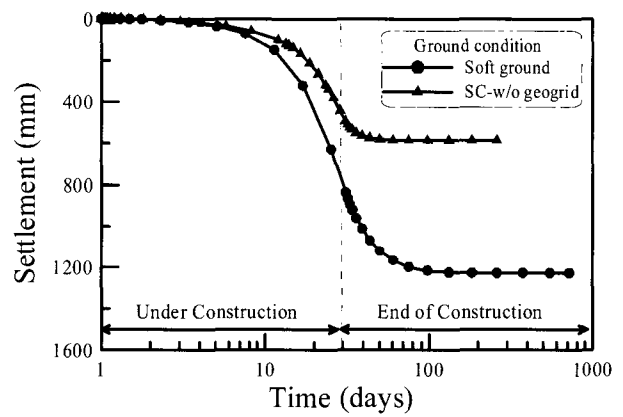


그림 8. 시간에 따른 침하

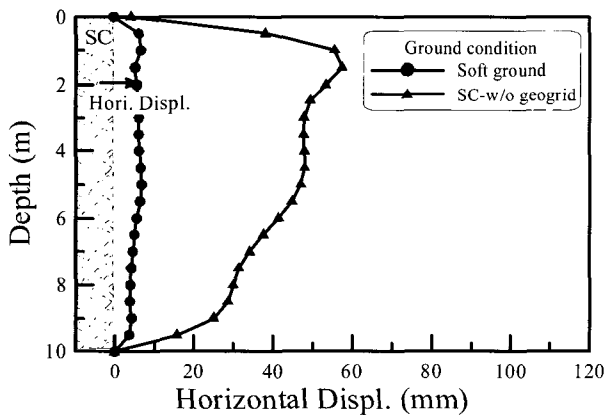


그림 7. 깊이에 따른 수평변위

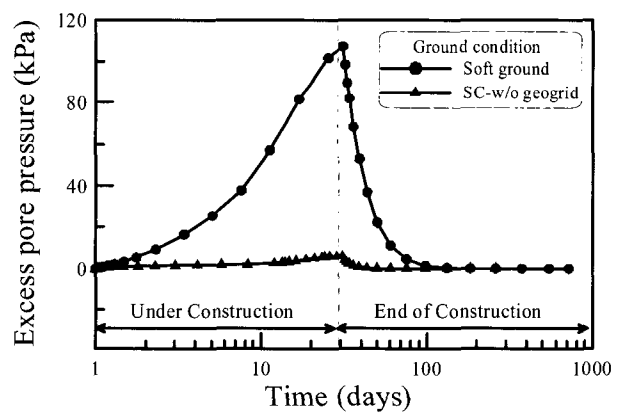


그림 9. 시간에 따른 과잉간극수압 경향

4.2 단기하중 지지특성

성토제방 하부의 연약지반에 적용된 GESC공법의 단기하중 지지특성을 평가하기 위해 성토시공 완료직후의 단기조건하에서 지지특성을 분석하였다. 그림 10은 지오그리드 감쌈여부에 따른 응력발생을 나타낸 것으로 무보강시 대비 지오그리드 보강시의 쇄석응력은 증가하고, 점토에 작용하는 연직응력은 감소되는 것으로 나타났다. 이때 무보강시의 응력집중비(n)는 1.82, 보강시는 3.06로 계산되어 지오그리드 보강시 1.7배정도 쇄석의 응력분담 효율이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 점토에서 유발되는 연직응력의 감소는 지반의 침하량에도 영향을 미치게 되며 그림 10에 나타난 바와 같이 쇄석과 점토지반에서의 침하량 차이는 크지 않지만, 지오그리드 감쌈여부 및 지오그리드 강성에 따라 침하량 발생결과는 달라질 수 있다. 그림 11은 지표에서 재하하중으로 인해 발생하는 지표침하를 나타내고 있는데, 무보강시 침하량은 0.63D(493mm)발생하지만 강성 4000kN/m의 지오그리드로 보강시 0.31D(225mm)로 지오그리드

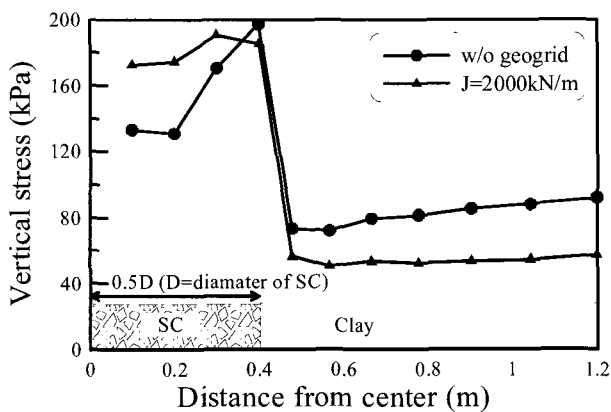


그림 10. 거리에 따른 연직응력(단기)

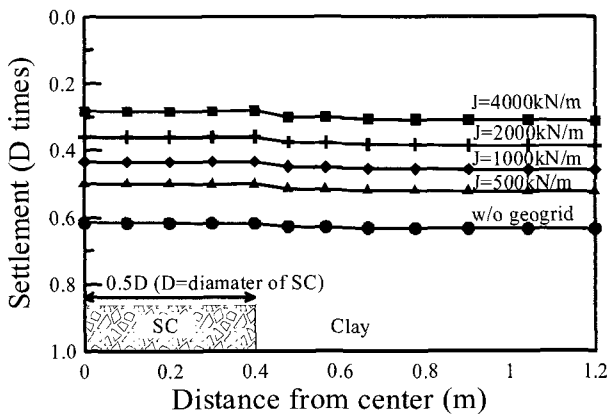


그림 11. 거리에 따른 지표침하(단기)

보강시 50%이상의 침하감소효과를 얻을 수 있다. 이러한 결과를 통해 지오그리드 보강은 쇄석기둥에 구속력을 증가시켜 쇄석기둥의 강성 증가를 통한 응력 분담 효율 증가와 침하감소효과가 나타남을 알 수 있다.

그림 12는 지오그리드 강성의 증가에 따른 침하감소율을 나타낸 것으로 지오그리드의 강성이 증가함에 따라 침하감소율은 점진적으로 증가하고 있지만 침하감소율 60%이하에서 수렴하고 있는 결과를 보여주고 있다. 이러한 결과로부터 지오그리드 강성으로 인한 수평저항력은 쇄석기둥의 허용변형을 이내에서 강도발현이 효율적이며, 지반조건에 따른 지오그리드의 적정강성을 적용하는 것이 경제적인 설계측면에서 중요한 인자임을 알 수 있다. 따라서 본 해석 조건에서 경제적인 적정 지오그리드 강성은 1000kN/m일 때 가장 효율적일 것으로 판단된다.

그림 13~15는 지오그리드의 감쌈조건 및 지오그리드의 강성에 따른 쇄석기둥의 변형특성과 지오그리드의 변형률에 대한 결과를 나타내고 있다. 무보강시 쇄석기둥의 수평변위는 43.6mm로 깊이 1.5m 위치에서 최대로 발생하며 지오그리드 감쌈시의 수평변위는 강성에 따라 7~25mm로 무보강시보다 수평변위를 40%이상 감소시켜주는 것으로 나타났다. 또한 지오그리드 감쌈효과는 쇄석기둥의 하부보다는 횡방향 변형의 영향이 크게 작용하는 깊이 6m까지의 영역에서 보다 크게 나타나고 있다. 깊이에 따른 지오그리드의 변형률은 수평변위 발생과 유사한 경향을 보인다. 이러한 경향은 수평변위 발생은 쇄석기둥의 변형과 관련되며, 지오그리드는 수평방향 인장력으로 쇄석기둥의 변형을 억제하는 역할을 하기 때문으로 볼 수 있다. 따라서 지오그리드의 변형률이 인장파단시의 변형률 이상으로 발생하게 되

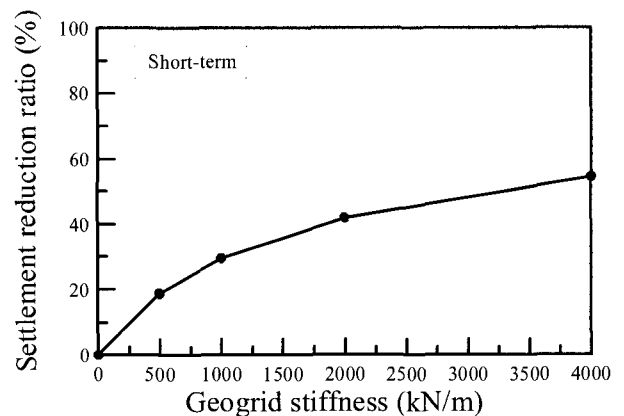


그림 12. 지오그리드 강성에 따른 침하감소율(단기)

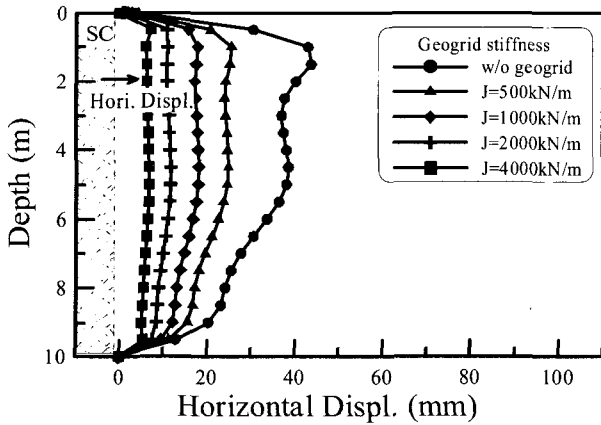


그림 13. 쇠석기둥의 수평변위(단기)

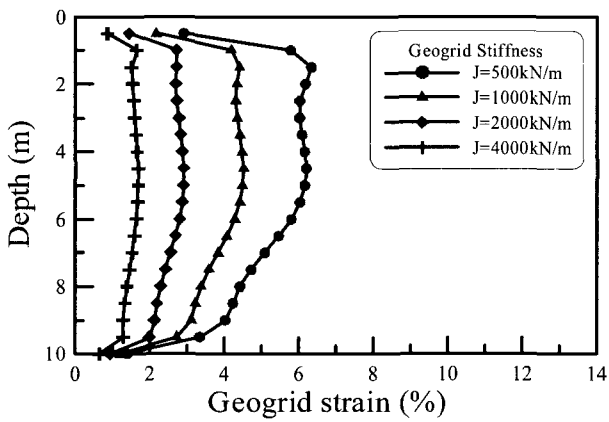


그림 14. 지오그리드 변형률(단기)

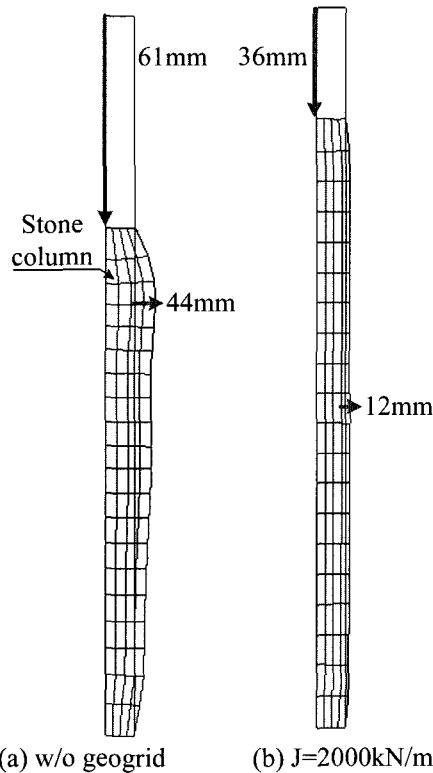


그림 15. 쇠석기둥의 변형

면 감쌈에 의한 보강효과를 기대할 수 없기 때문에 적용하는 지오그리드의 인장파단이 발생하지 않는 변형을 하에서 최소한의 강성을 갖는 지오그리드를 적용이 요구된다. 그림 15는 지오그리드 보강 유무에 따른 쇠석기둥의 변형으로 지오그리드 보강시 성토 후에도 쇠석기둥의 형상이 유지되고 침하와 쇠석기둥의 수평변위 발생을 효과적으로 제어할 수 있음을 확인할 수 있다.

4.3 장기하중 지지특성

4.3.1 지오그리드 강성에 따른 영향

GESC 지반의 장기거동 분석은 시공완료 이후를 대상으로 하였다. 그림 16과 17은 성토하중 재하시 발생된 과잉간극수압이 완전히 소산되어 더 이상 압밀이 발생하지 않는 시점에서의 지표에서의 연직응력과 지표침하를 나타낸 것이다. 연직응력은 시공직후의 단기거동과 마찬가지로 지오그리드 보강시 응력분담효과로 인해 쇠석의 응력이 증가하고 지반에 발생하는 응력이 감소하는 경향을 보이고 있으며, 단기거동시와 정량적인

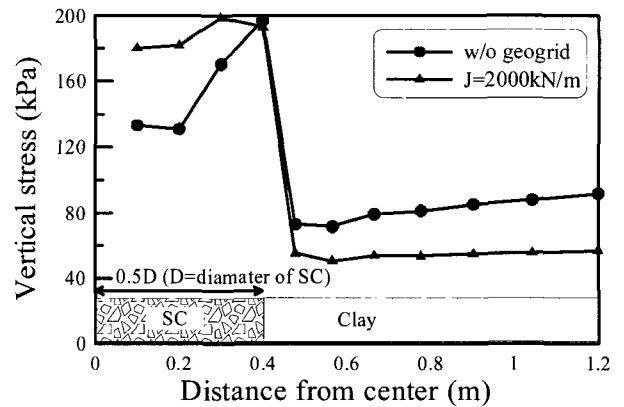


그림 16. 거리에 따른 연직응력(장기)

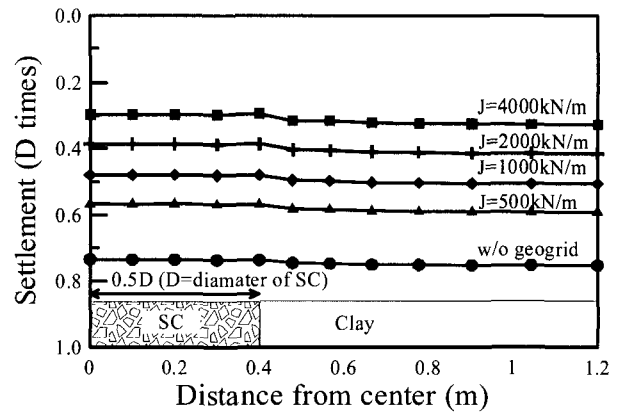


그림 17. 거리에 따른 지표침하(장기)

차이는 크지 않은 것으로 분석되었다.

그림 17에서 볼 수 있듯이 지표침하하는 하중재하 후에도 간극수압이 소산되는 시간동안 압밀이 진행되기 때문에 정량적으로 단기거동시의 침하량보다 5~20%가량 증가하나, 지오그리드 강성 증가에 따라 무보강시에 비해 침하를 20~60% 감소시켜주는 것을 알 수 있다.

그림 18은 쇄석기둥 중심에서의 시간에 따른 침하발생을 도시한 그림으로 시공완료 이후에도 침하량이 증가하다가 수렴하는 경향을 보이고 있다. 앞서 장·단기 지표침하 발생량에 차이가 있는 원인을 이와 같은 시간에 따른 변화에서 찾을 수 있으며, 침하량이 수렴하기까지의 시간은 지오그리드 감쌈 유무와 강성에 따라 달라지는 것으로 분석된다. 그림 19는 수렴된 침하량을 분석하여 지오그리드 강성에 따른 침하감소율로 나타내었다. 단기거동시와 유사하게 지오그리드 강성 1000kN/m 정도를 침하감소율과의 변곡점으로 볼 수 있으며, 시공완료 후에도 추가적인 침하가 발생함에도 불구하고 장기거동시 침하감소율은 단기거동시보다 증가한다.

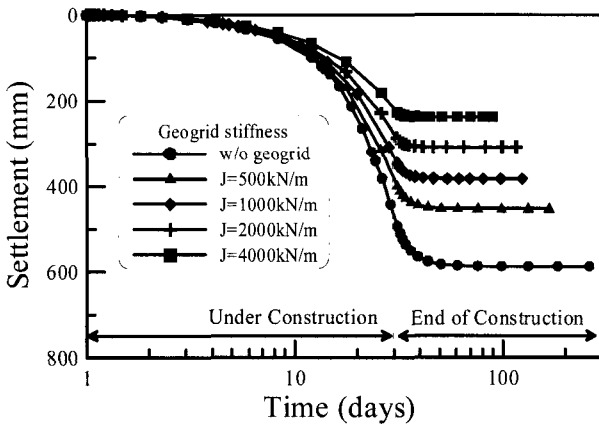


그림 18. 시간에 따른 침하경향

GESC지반에서 쇄석기둥의 깊이에 따른 수평변위는 단기 거동시와 유사하게 7~30mm로 발생하나 무보강시의 수평변위는 57mm로 시공직후보다 30% 증가하였다. 쇄석기둥의 수평변위 발생은 지오그리드에 인장력을 유발하여 그림 21에 보이는 바와 같이 지오그리드 변형률도 시공직후보다 8~20%가량 증가하였다. 이러한 결과를 통해 장기거동시 지표 침하 및 쇄석기둥의 변형이 크게 발생함으로 지오그리드 보강으로 인한 효과가 크게 나타남을 알 수 있으며, 압밀 로 인한 변형을 고려하여 쇄석기둥의 강성을 고려하여 보강을 하여야 함을 알 수 있다.

그림 22는 시간에 따른 과잉간극수압 소산경향을 보이고 있다. 시간에 따라 점진적으로 성토가 진행됨에 따라 과잉간극수압이 점진적으로 증가하는 경향을 볼 수 있으며, 발생한 간극수압은 쇄석기둥을 통해 배수되기 때문에 성토 완료시 최대 6kPa로 성토하중에 비해 상당히 작게 발생한다. GESC 공법은 쇄석기둥의 배수 효과로 성토완료 후 압밀이 완료되는 시간단축에 효과적이

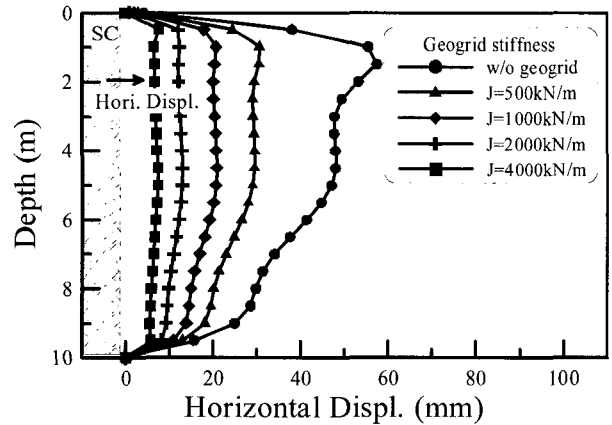


그림 20. 쇄석기둥의 수평변위(장기)

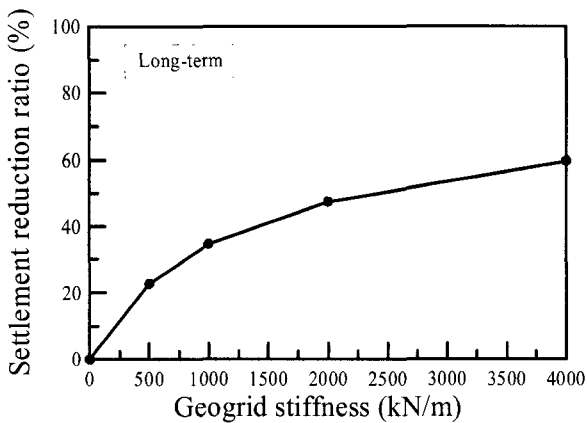


그림 19. 지오그리드 강성에 따른 침하감소율(장기)

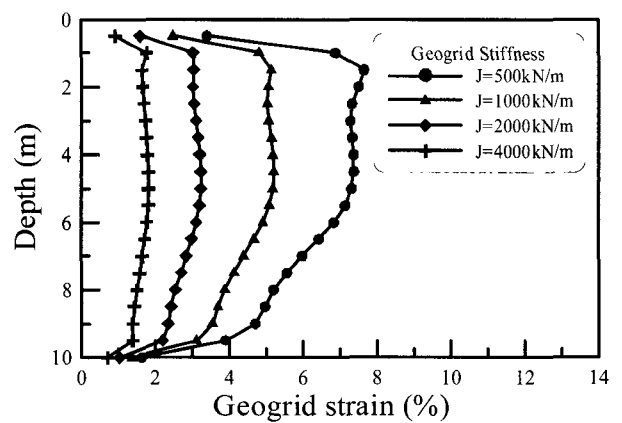


그림 21. 지오그리드 변형률(장기)

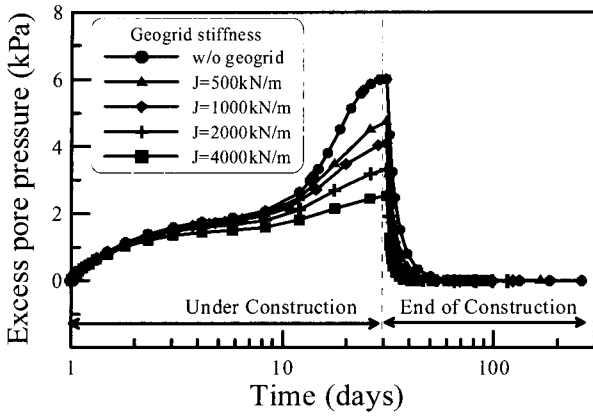


그림 22. 시간에 따른 과잉간극수압

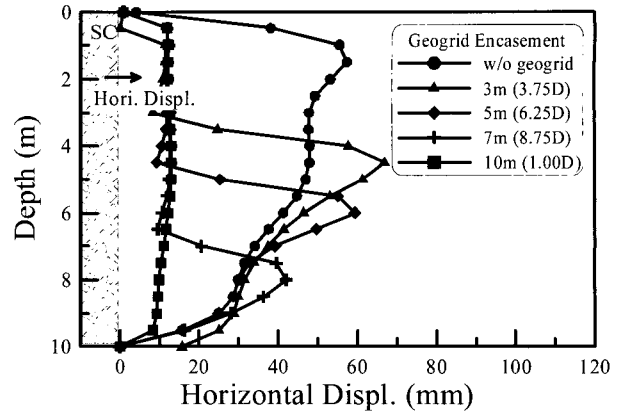


그림 24. 깊이에 따른 수평변위

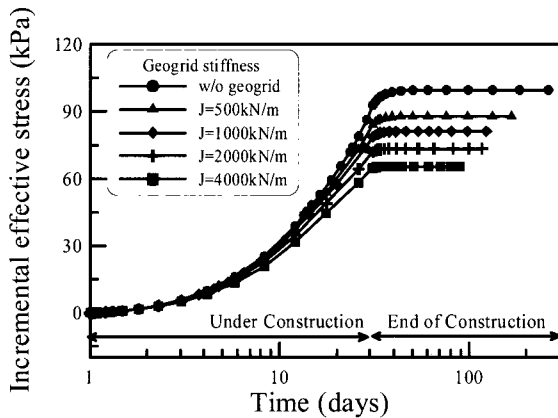


그림 23. 시간에 따른 연직응력의 증가경향

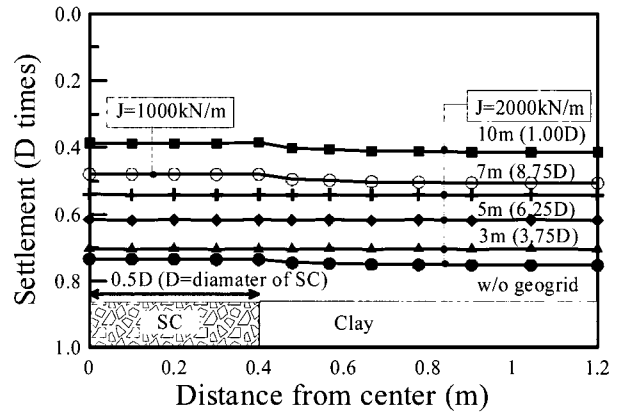


그림 25. 거리에 따른 지표침하

며, 이는 지오그리드가 쇄석기둥의 변형을 억제하여 쇄석기둥의 배수효과를 유지시키기 때문으로 분석된다. 그림 23은 점토지반에서 발생하는 추가적인 유효응력을 시간에 따라 도시한 것으로 성토에 따른 시공중 유효응력이 증가하다가 시공완료 후에는 일정하 수렴하는 경향을 보이고 있다.

4.3.2 감쌈깊이에 따른 영향

지오그리드의 쇄석기둥 감쌈깊이에 따른 영향을 파악하기 위해 강성 2000kN/m의 지오그리드로 상부에서부터 3m, 5m, 7m 깊이까지의 감쌈깊이를 변화시켜가며 결과를 분석하였다. 그림 24는 깊이에 따른 쇄석기둥에서의 수평변위를 나타낸 것으로 부분적인 보강시 감쌈 부분에서는 전체보강 경우와 유사한 수준의 수평변위가 발생하나 보강되지 않은 영역은 7m 보강시를 제외하고는 최대 수평변위가 무보강시보다 크게 나타나 지오그리드 감쌈을 적용함에도 쇄석기둥의 별정파괴 방지에는 효과가 미흡한 것으로 분석된다. 이러한 이유로는 지반이 연약한 경우 지오그리드 보강부위에서는 횡방

향 변형을 억제시켜 주지만 보강하지 않은 부위에서 횡방향 변형이 발생하게 되므로 지반조건에 따라 감쌈깊이에 따른 효과가 다르게 나타나므로 지반특성을 고려하여 적용하여야 함을 알 수 있다. 한편 거리에 따른 지표침하는 감쌈깊이에 따라 무보강시와 전체보강 조건 사이에서 쇄석기둥과 점토지반 모두의 전반적인 차이를 보이고 있으며, 3m 감쌈조건은 무보강시와 유사한 침하량이 발생하여 침하량 감소에 영향을 주지 못하는 것으로 분석되며, 7m 감쌈조건은 1000kN/m 강성의 지오그리드로 전체 보강시와 근사한 침하경향이 나타났다. 이러한 경향은 대상현장의 연약층의 두께가 깊어서 지지층까지 전체감쌈을 하지 못하는 경우 지오그리드 강성을 증가시켜서 지표침하 발생량을 제어하는 데 활용될 수 있다.

그림 26은 지오그리드 감쌈 깊이에 따른 지오그리드의 변형율을 나타내고 있는데 지오그리드는 감쌈영역과 감쌈지 않은 영역의 경계부분을 제외하고는 변형률이 전체보강시 이내로 발생하며 변형률은 최대 4.3%로 감쌈깊이에 따른 차이는 거의 보이지 않는다. 부분보강

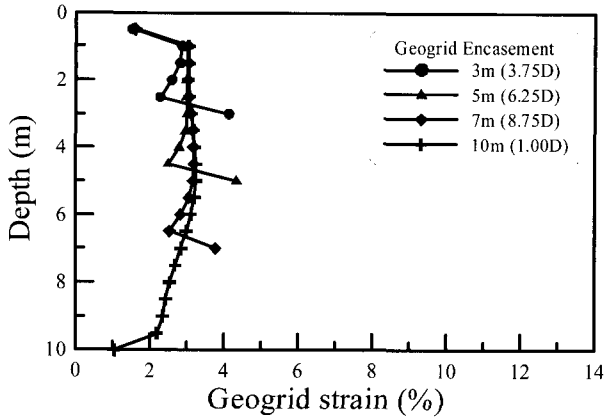


그림 26. 지오그리드 변형률

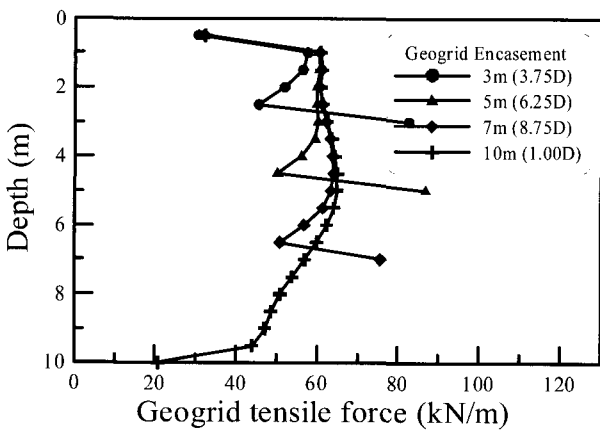


그림 27. 지오그리드 유발인장력

시 감쌈영역과 감싸지 않은 영역의 경계부분에서 지오그리드가 쇄석기둥의 변형으로 인해 휘어지기 때문에 이 위치에서 최대 유발인장력이 발생하게 되며 전체보강시의 최대 유발인장력보다 17~34% 증가하는 것으로 나타났다. 하단부분의 지오그리드를 제외한 나머지 영역은 전체 보강시의 유발인장력 이내로 나타나 지오그리드 자체의 감쌈깊이에 따른 영향의 차이는 크지 않은 것으로 파악되며, 감싸지 않은 영역에 대한 쇄석기둥의 변위 및 침하문제에 대해 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 지오그리드로 보강한 쇄석기둥(GESC) 공법의 설계적용을 위한 연구차원에서 GESC의 장·단기 하중지지 특성을 고찰하였다. 이를 위해 점토지반을 대상으로 유한요소해석을 통해 시공직후 및 압밀 완료 후의 시간에 따른 장·단기 조건과 지오그리드 보강유

무, 지오그리드 강성, 쇄석기둥의 감쌈깊이에 따른 매개변수 연구를 수행하였다. 다음은 그 결과를 요약하고 있다.

- (1) 쇄석기둥은 자체로서 하중지지효과가 있으나 쇄석기둥 상부에 응력집중으로 인해 벌징파괴가 발생한다. 쇄석기둥을 지오그리드로 감싸 보강한 경우 지오그리드의 인장응력이 쇄석기둥에 구속효과를 발휘하여 벌징파괴를 억제함으로써 침하감소와 하중지지력의 증진 효과를 유도한다.
- (2) 단기 거동시 GESC공법은 지오그리드 강성증가에 따라 쇄석기둥 지반에 비해 20~50%의 침하감소 효과가 있으며, 장기 거동시에도 강성에 따라 20~60% 침하감소효과가 있음에 따라 GESC 공법이 연약성토지반의 장기 거동의 안정성에 효과가 있음을 알 수 있다.
- (3) 연약지반내에 적용된 GESC 공법은 장·단기 검토시 성토완료 후 압밀이 완료되는 시간단축에 효과적이며, 이는 쇄석기둥재료의 배수효과 및 지오그리드가 쇄석기둥의 변형을 억제하여 쇄석기둥의 배수효과를 유지시키기 때문으로 판단된다.
- (4) 장·단기 거동시 모두 지오그리드의 강성이 증가함에 따라 침하감소율이 증가하는 것을 알 수 있으며, 지오그리드 강성 $J=1000\text{kN/m}$ 에서 침하감소율이 점차 수렴함에 따라 본 해석 조건에서 경제적인 적정 지오그리드 강성은 1000kN/m 일 때 가장 효율적일 것으로 판단된다. 따라서 경제적인 설계를 위해서는 지반조건에 따른 지오그리드의 적정 강성을 산정하는 것이 필요하다.
- (5) 초 연약 지반이나 지반의 연약층이 깊은 경우 지오그리드의 감쌈깊이가 충분치 않은 경우는 보강효과를 얻기 어려운 것을 알 수 있으며, 지오그리드 감쌈으로 인한 보강효과를 얻기 위해서는 지반조건을 고려한 감쌈깊이를 산정하여야 한다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. 이대영, 송아관, 유충식 (2006), “지오그리드 보강 Stone Column의 파괴메카니즘 및 지지력 특성-축소모형실험을 통한 고찰”, *한국지반공학학회논문집*, 제 22권, 제 10호, pp.121-129.
2. ABAQUS users manual, Version 6.5. (2005), Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc., Pawtucket, Providence, R.I.
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. Alamgir, M., Miura, N., Poorooshasb, H. B., and Madhav, M. R. (1996), “Deformation analysis of soft ground reinforced by columnar Inclusion”, *Computers and Geotechnics*, Vol.18, No.4, pp.267-290.
5. Al-Joulani, M. A. (1995), “Laboratory and analytical investigation of sleeve reinforced stone columns”, Ph.D. Thesis, Civil Eng., Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada.
6. Barksdale, R. D. and Bachus, R. C. (1983), “Design and construction of stone column”, Volume I, FHWA/RD-83/026.
7. Brokemper, D., Sobolewski, R., and 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.
8. Barksdale, R. D. and Bachus, R. C. (1983), “Design and construction of stone column”, Volume I, FHWA/RD-83/026.
9. Hughes, J. M. and Withers, N. J. (1974), “Reinforcing of soil cohesive soils with stone columns”, *Ground Engineering*, Vol.7, No.3, pp.42-49.
10. Kempfert, H. G. and Raithel, M. (2002), “Experiences on Dike Foundations and Land Fills on Very Soft Soils”, Proc. Intern. Workshop ISSMGE, Techn. Committee TC 36 “Foundation in Difficult Soft Soil Conditions”, Mexico City, SMMS, pp.176-181.
11. Murugesan, S. and Rajagopal, K. (2006), “Geosynthetic-encased stone column; Numerical evaluation”, *Geotextiles and Geomembranes*, pp.349-358.
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.347-372.

(접수일자 2006. 4. 25, 심사완료일 2007. 7. 16)