

지오키리드 보강 Stone Column의 장·단기 하중 지지 특성 - 유한요소해석을 통한 고찰 Short - and Long-term Load Carrying Capacity of Geogrid Reinforced Stone Column - A numerical investigation

이대영¹⁾, Daeyoung Lee, 김선빈²⁾, Sunbin Kim, 송아란³⁾, Ahran Song, 유충식⁴⁾, Chungsik Yoo

¹⁾ 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Eng. Dept., KICT

²⁾ 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.

³⁾ 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.

⁴⁾ 성균관대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ

SYNOPSIS : 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 successfully applied in practice, fundamentals of the method have not been fully explored. This paper presents the results of an investigation on the loading carrying capacity of geogrid-encased stone column using a series of 2D finite element analyses. The results of the analyses indicated improved short- and long-term carrying capacity of the geogrid-encased stone column method over the conventional stone column method with no encasing.

Key words : Soft clay, Geogrid, Ground improvement, Stone column, Finite element method

1. 서 론

최근들어 산업의 발달로 인한 철도, 도로, 항만구조물의 확충 등 인프라 구축으로 인해 국토 개발의 필요성이 날로 증가하고 있다. 특히 좁은 국토면적과 삼면이 바다로 둘러싸인 국내 지형적 특성상 해안 및 내륙 연약지반의 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 공사기간의 과다, 환경문제 유발, 유지관리비용 증가 등의 문제가 동반하여 나타나는 실정이다. 최근 독일 등 유럽 일부 국가에서는 이러한 기존의 연약지반 처리공법의 단점을 보완하기 위하여 토목섬유로 보강한 모래, 쇠석기둥(stone column)공법의 활용도가 증가하고 있다. 특히 지오키리드 보강 쇠석기둥(Geogrid Reinforced Stone Column, GRSC) 공법은 쇠석이나 자갈과 같은 조립재로 채워진 기둥을 고강도 지오키리드로 감싸 쇠석기둥의 강도증진 및 변형을 감소시켜 지반 및 구조물 보강이 가능한 공법으로 도로지반, 사면, 성토제방, 교대기초, 해상구조물 기초, 암거, 하수관거, 철도노반, 대규모 오일탱크 및 플랜트 기초, 연약지반 보강 등에 광범위하고 효율적으로 사용되고 있다 (Al-Joulani, 1995).

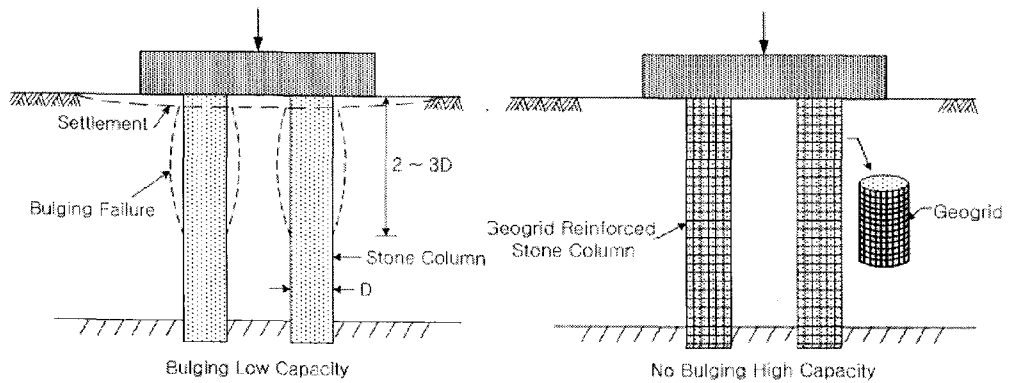
본 연구에서는 이러한 토목섬유로 보강한 쇠석기둥(GRSC) 공법의 국내 적용을 위한 연구차원에서

GRSC의 장단기 하중지지 특성을 고찰하고자 하였다. 이를 위해 점토지반을 대상으로 하여 유한요소해석에 의한 매개변수 연구를 수행하였으며, 그 결과를 종합하여 기존 쇄석말뚝과의 장·단기 하중지지 특성 비교 및 대상 지반조건에 따른 지오그리드의 임계강성을 도출하였다.

2. GRSC공법의 기본개념

GRSC공법은 모래 등 천연골재 대체 재료인 쇄석, 폐콘크리트, 재생골재 등을 사용하여 쇄석기둥을 형성하고 고강도 지오그리드로 쇄석기둥을 감싸 지오그리드의 구속력에 의한 보강효과로 인해 지지력 증가, 지반침하감소, 구조적 안정성 확보 및 액상화 방지, 연약지반 강도 증진, 공기단축에 효과가 있는 경제적인 공법으로 알려져 있다.

GRSC 공법은 그림 1과 같이 지오그리드의 구속효과로 인해 쇄석기둥의 강도증가를 유도하는 반면 변형을 감소시켜 Bulging 파괴를 억제함으로써 상부 재하하중에 효율적으로 저항하는데 초점이 맞추어진 공법이며, 아울러 지오그리드 사용으로 인한 강도증가로 쇄석기둥의 직경 및 설치간격을 줄이는 것이 가능하다.



(a) Bulging failure of long stone column (b) Geogrid reinforced stone column
(After Barksdale and Bachus, 1983) (Nabil M.A. Al-Joulani, 1995)

그림 1. 지오그리드 보강여부에 따른 stone column의 파괴형태

3. 유한요소해석

3.1 해석조건

본 연구에서는 현장에서 일반적으로 적용되는 조건을 고려하여 그림 2와 같이 연약점토 지반의 개량을 위해 직경(D) 1.0m의 쇄석기둥(Stone Column)이 깊이 10m 하부의 암반층까지 근입되는 조건을 대상으로 하였으며, 지오그리드 보강시 두께는 5mm로 선정하였다. 재하조건은 시공조건에 따라 연약지반 전반에 성토하는 경우와 쇄석기둥 상부에 구조물로 하중이 재하되는 경우를 고려하였으며, 지오그리드 보강효과에 대한 장·단기 하중지지 특성 비교를 위해 단기와 장기조건에 대한 해석을 각각 수행하였다. 쇄석기둥 상부에 구조물로 하중이 재하되는 경우는 그림 1과 같이 쇄석기둥 상부에 매트기초가 설치되도록 하였다. 표 1과 표 2는 본 연구에서 고려한 기본 해석조건과 해석에 적용한 역학적·수리학적 특성을 정리하여 보이고 있다. 아울러 원지반 점토의 비배수 전단강도에 따른 지오그리드의 임계강성을 도출하기 위하여 표 3과 같은 해석조건을 추가하여 수행하였다.

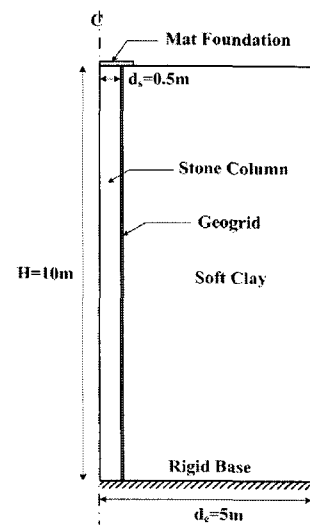


그림 2. 해석 조건

표 1. 기본 해석조건

구분	재하조건		초기 지하수위
	성토하중(kPa)	쇄석기둥 집중하중(kPa)	
단기조건	500	600	-
장기조건(1년)	500	600	지표위치

표 2. 원지반, 쇄석기둥 및 지오그리드 역학적·수리학적 특성

구분	단위중량 (kN/m ³)	점착력(kPa)		내부마찰각(°)		팽창각(°)		변형계수 (kPa)	프아송비		투수계수 (cm/sec)
		비배수	배수	비배수	배수	비배수	배수		비배수	배수	
Soft Clay	20	30	0	0	30	0	30	9,000	0.49	0.30	1×10 ⁻⁷
Stone Column	20	10		42		35		80,000	0.30		1×10 ⁻³
Geogrid	1	-		-		-		J=10,000kN/m	0.30		-

표 3. 원지반 점토의 비배수 전단강도에 따른 지오그리드의 임계강성 도출을 위한 해석조건

점토의 비배수 전단강도 (kPa)	지오그리드의 축강성 (kN/m)
30	0, 500, 2000, 6000, 10000, 14000, 20000
50	0, 500, 2000, 6000, 10000, 14000, 20000
70	0, 500, 2000, 6000, 10000, 14000, 20000

3.2 해석 모델링

3.2.1 사용 프로그램

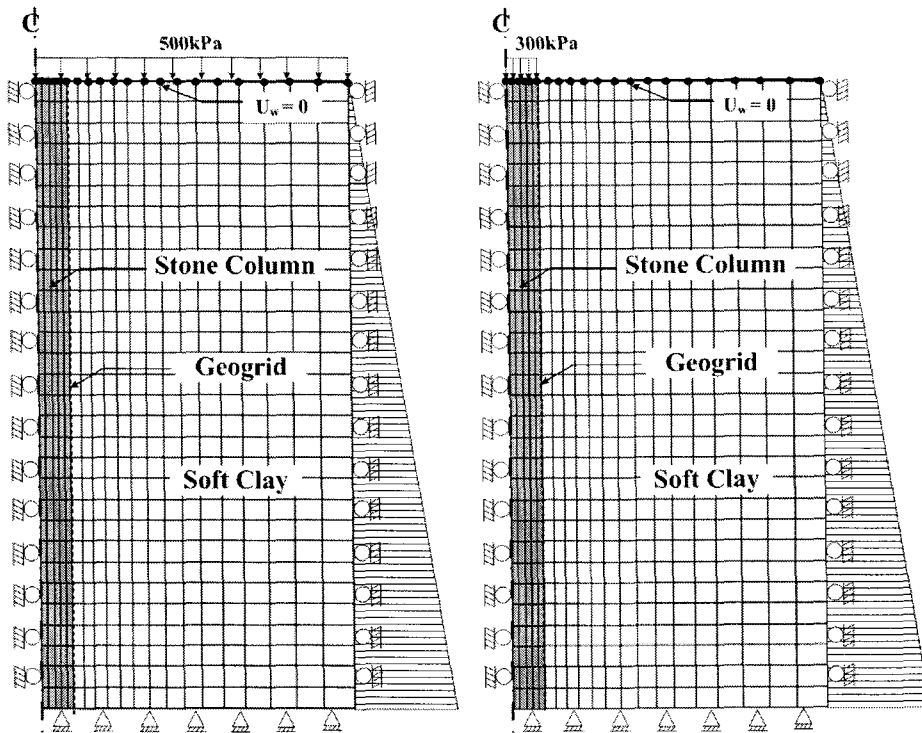
해석 프로그램은 범용 유한요소 해석 패키지인 ABAQUS 6.4-2를 사용하였다. ABAQUS는 토목 및 기계 등 다양한 분야에 적용되는 프로그램으로서 특히 지반공학분야에서 다양한 흙의 구성모델을 제공하고 소성거동 모사에 대한 알고리즘이 효율적이어서 지반구조물의 항복 후 거동 평가에 효율적임과 아울러서 효율적인 응력-간극수압 연계해석 알고리즘을 채택하고 있다는 장점이 있다.

3.2.2 대상구간의 모형화

해석영역의 모델링에 있어서 해석의 편의상 쇄석기둥과 지오그리드는 원지반에 매입된 상태인 것으로 간주하였으며 쇄석기둥 중심축에 대해 축대칭인 점을 감안하여 1/2 단면에 대한 축대칭 모델링을 하였다. 원지반 및 쇄석기둥의 이산화는 축대칭 4절점 가감적분 고체요소, 혹은 축대칭 4절점 가감적분 응력 간극수압 연계 고체요소(CAX4R/CAX4RP)를 적용하였으며, 매트기초는 빔요소(B22), 지오그리드는 쇄석기둥의 구속효과를 모사하기 위하여 축대칭 2절점 멤브레인 요소(MAX1)을 적용하여 모델링 하였다. 멤브레인 요소(membrane element)는 휨강성 없이 평면상에 유발되는 힘만을 전달할 수 있는 요소로서 풍선이나 지오그리드와 같이 두께가 얇고 축방향 힘의 전달이 필요한 부분에 적용이 가능하다. 그림 3은 해석에 적용한 유한요소 모델을 보여주고 있다.

변위에 대한 경계조건으로 중심축과 영향반경 측면은 수평방향으로의 변위를 구속하였으며 바닥면은 연직방향의 변위를 구속하였다. 수리적 경계조건으로 측면경계와 하부경계에는 초기조건으로 부여한 수압이 일정하게 유지되도록 하였으며, 아울러 연계해석 과정에서 하중재하시 지표를 통하여 배수가 이루어지도록 하기 위해 하중 재하단계에서 지표 각 절점의 간극수압이 “0”이 되도록 모델링 하였다.

재료 모델링에 있어 원지반과 쇄석기둥은 Mohr-Coulomb 항복기준을 따르는 비연계(non-associated) 탄소성 재료로 가정하였으며, 지오그리드와 매트기초는 탄성으로 가정하였다. 표 2에서 보이는 바와 같이 원지반 점토의 물성은 검토조건에 따라 배수/비배수 전단강도를 구분하여 사용하였으며 단기검토에 있어서는 전응력 해석을, 장기검토에 있어서는 응력-간극수압 연계해석을 수행하였다.



(a) 성토하중이 작용하는 조건 (b) 쇄석기둥 집중하중이 작용하는 조건

그림 3. 해석 모델링 및 유한요소망 (장기해석)

4. 결과 분석 및 고찰

4.1 단기 하중 지지특성

4.1.1 쇄석기둥에 집중하중이 재하되는 경우

그림 4~그림 9는 교대 기초부 하부를 쇄석기둥으로 보강하는 경우와 같이 쇄석기둥 상부에 구조물로 하중이 재하되는 경우 지오그리드의 감쌈(encasing) 여부에 대한 해석결과를 보이고 있다. 먼저 쇄석기둥의 수평변위를 깊이에 따라 도시하고 있는 그림 4를 관찰하면 지표로부터 약 1D(D:쇄석기둥 직경) 하부 지점에서 bulging 현상이 나타나고 있음을 볼 수 있는데 그 크기를 비교한 결과 지오그리드로 보강하는 경우 bulging이 4배 이상 감소하는 것으로 나타났다. 또한 지표침하는 그림 5에서 나타난 바와 같이 지오그리드 보강시 약 33% 정도의 감소율을 나타내고 있다. 그림 6은 쇄석기둥 주변 지반의 전단응력을 지오그리드 보강 유무에 따라 비교하고 있으며, 비교결과 기둥 상부에서의 전단응력 감소율이

2~3배 가량 나타나는 것으로 분석되었다. 지오그리드의 변형률의 경우 그림 7에서 깊이에 따라 도시하고 있으며, 최대 유발지점은 지표에서 1D 하부 위치로서 수평과 수직 각각 0.25%, 0.35% 정도로 나타나고 있다. 아울러 그림 8의 쇄석기둥 중앙부에서의 하중-침하 관계에서도 지오그리드 보강시 쇄석기둥의 침하는 보강하지 않은 경우와 비교하여 약 50% 감소함을 볼 수가 있다. 이러한 현상으로부터 재하하중과 지반조건 등에 따라 정량적인 차이가 있을 수 있으나 지오그리드 보강을 통해 쇄석기둥의 강도증진을 꾀하는 한편 변형은 감소시켜 쇄석기둥의 bulging 파괴를 억제하는 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 9는 지오그리드 축강성과 원지반 점토의 비배수 전단강도에 따른 침하감소율을 정리한 것으로 지오그리드를 보강하지 않은 경우를 기준으로 산정한 결과이다. 이를 분석하면 쇄석기둥을 지오그리드로 보강시 지오그리드의 축강성 증가에 따라 침하감소율이 증가하는 양상을 확인할 수 있으며, 원지반 점토의 비배수 전단강도가 50kPa 이내인 범위에서는 그 수치가 작을수록 효과는 큰 것으로 나타나고 있다. 따라서 설계시 하중조건과 경제성을 고려하여 지오그리드의 축강성을 결정하는 것이 타당하다.

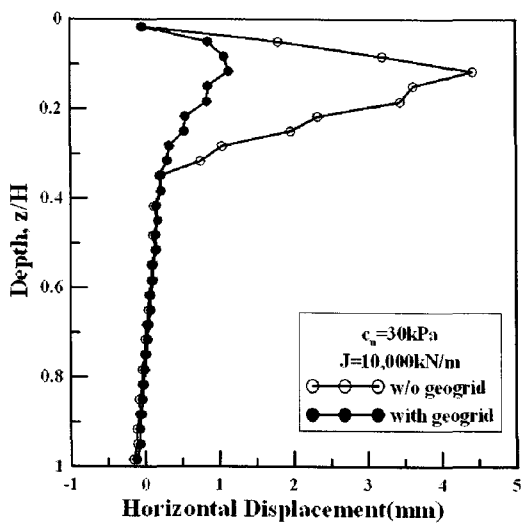


그림 4. 쇄석기둥 수평변위

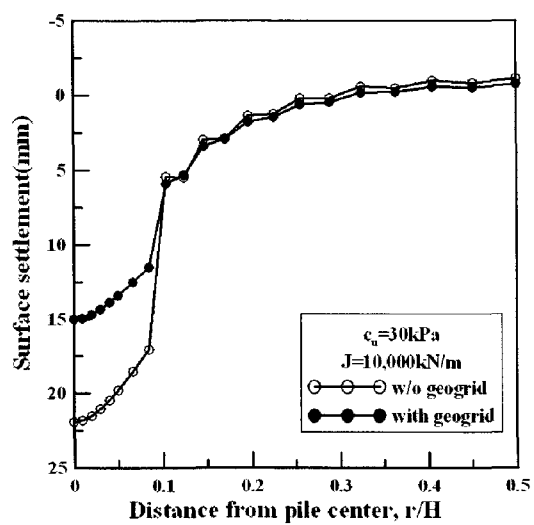


그림 5. 지표침하

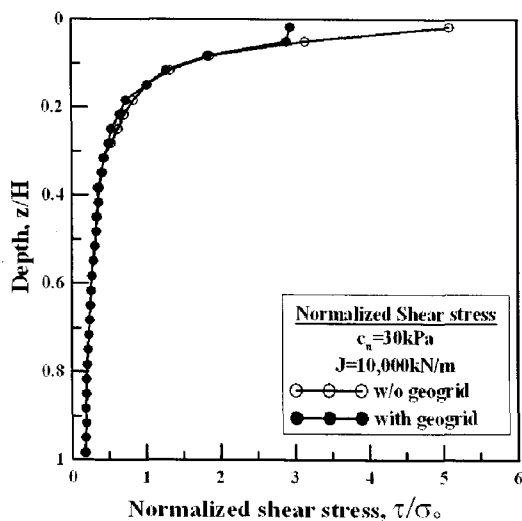


그림 6. 쇄석기둥 주변지반 전단응력

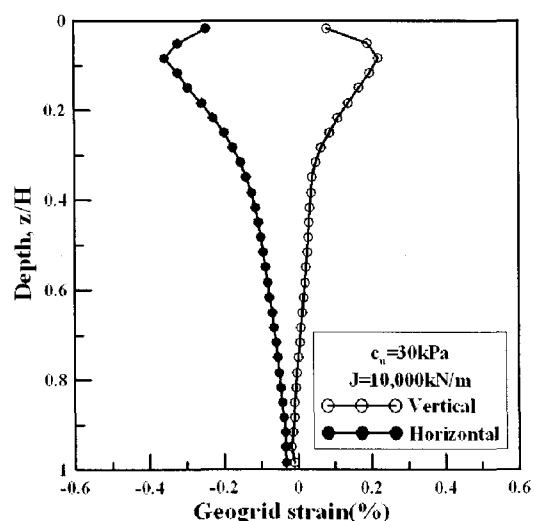


그림 7. 지오그리드 변형률

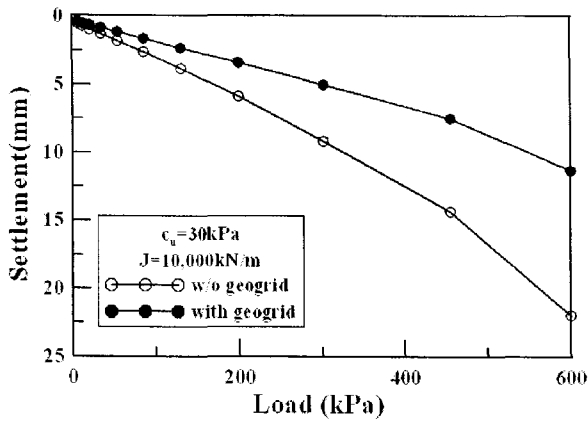


그림 8. 쇠석기둥의 하중-침하 곡선

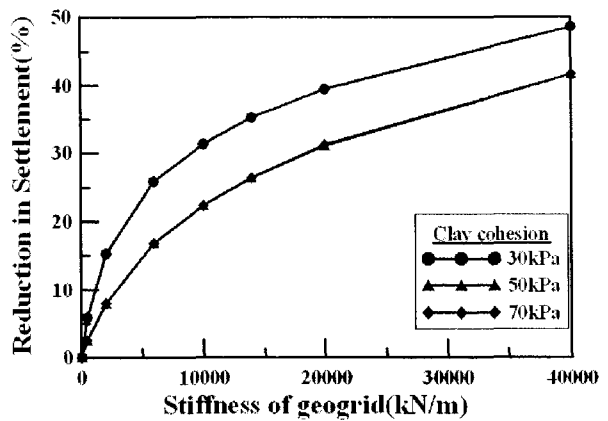


그림 9. 지오그리드의 강성에 따른 침하감소율

4.1.2 연약지반에 성토하중이 재하되는 경우

그림 10~그림 15는 연약지반 상부에 성토하중이 재하되는 경우, 즉 성토제방 하부를 쇠석기둥으로 보강하여 연약지반을 개량하고자 하는 경우 지오그리드의 감쌈(encasing) 여부에 대한 해석결과를 보이고 있다. 그림에서 보이듯이 쇠석기둥의 수평변위와 지표침하, 주변지반의 전단응력 등 전반에 걸쳐 쇠석기둥 상부에 하중이 재하되는 조건과 비교하여 효과가 작게 나타나고 있다. 지오그리드 보강여부에 관계없이 쇠석기둥의 수평변위는 1~2mm 내외로 발생하며, 지표침하 감소율은 약 7%인 것으로 나타났다.

그림 15는 그림 9와 같이 지오그리드 축강성과 원지반 점토의 비배수 전단강도에 따른 침하감소율을 정리한 결과이다. 이를 분석하면 쇠석기둥을 지오그리드로 보강시 앞선 결과와 마찬가지로 지오그리드의 축강성에 따라서 침하감소율이 증가하는 양상을 보이나 쇠석기둥 상부에 하중이 재하되는 경우에 비하여 2배 가량 작은 증가율을 나타내었다.

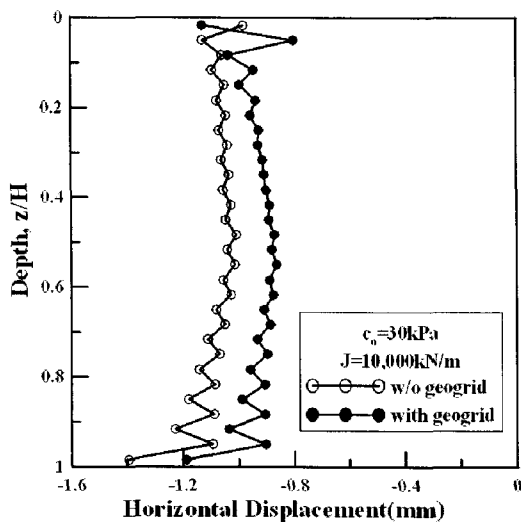


그림 10. 쇠석기둥 수평변위

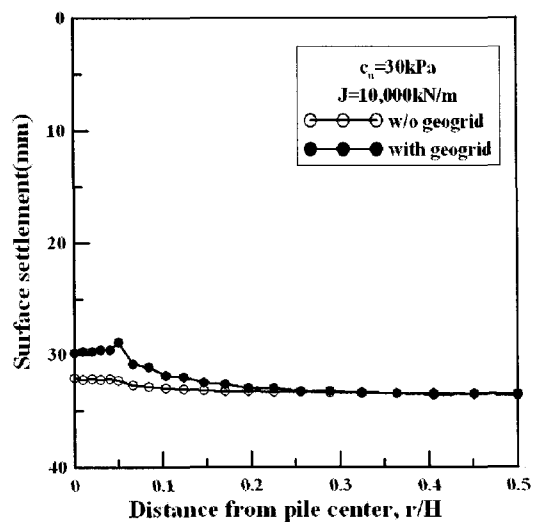


그림 11. 지표침하

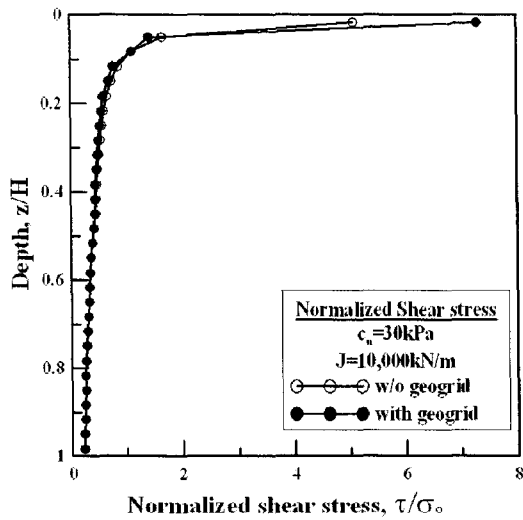


그림 12. 쇄석기둥 주변지반 전단응력

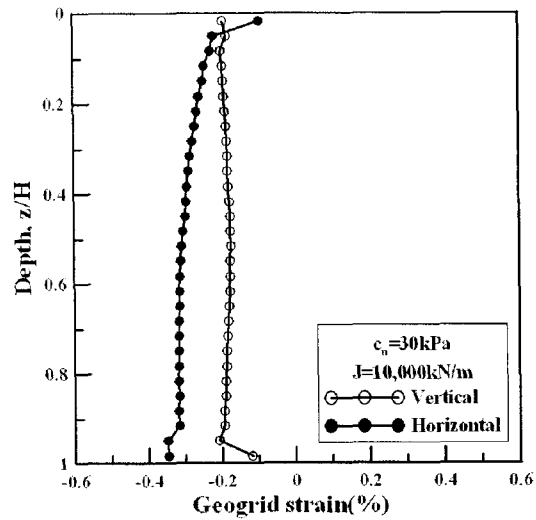


그림 13. 지오그리드 변형률

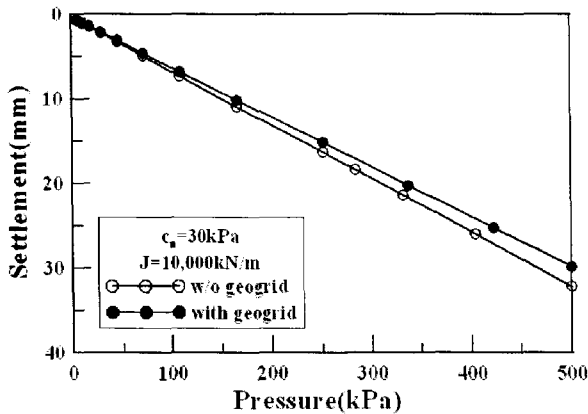


그림 14. 쇄석기둥의 하중-침하 곡선

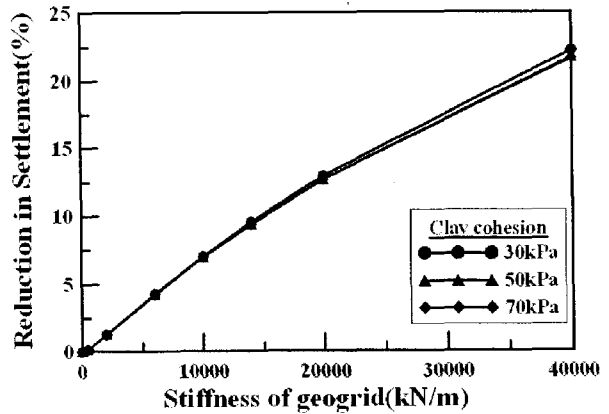


그림 15. 지오그리드의 강성에 따른 침하감소를

4.2 장기 하중 지지특성

4.2.1 쇄석기둥에 집중하중이 재하되는 경우

그림 16~그림 20은 쇄석기둥 상부에 구조물로 하중이 재하되는 경우 지오그리드의 감쌈(encasing) 여부에 대해 장기적인 쇄석기둥의 장기거동특성 분석 결과를 보이고 있다. 먼저 쇄석기둥의 수평변위를 깊이에 따라 도시하고 있는 그림 11을 관찰하면 지오그리드를 보강하지 않은 경우 지표로부터 약 1D~2D(D:쇄석기둥 직경) 하부 지점에서 7mm 정도의 bulging 현상이 나타나고 있음을 볼 수 있으나 지오그리드로 구속하는 경우 1mm 이내로 감소하는 것으로 나타나고 있다. 지표침하의 경우 지오그리드 구속 여부에 따라 각각 30mm, 20mm로 나타나 지오그리드 보강시 33% 정도의 침하 감소율을 나타내었다. 그림 18에서 보이는 쇄석기둥 주변 지반의 전단응력을 비교하는 경우 지오그리드 보강에 따라 기둥 상부에서의 전단응력이 단기 검토시와 유사하게 2배 정도 감소하는 것으로 분석되었다. 한편 지오그리드의 변형률은 지표하부 1D 지점에서 최대 발생하고 깊이에 따라 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며, 수직성분은 0.2%, 수평성분이 0.4%로 최대 나타났다.

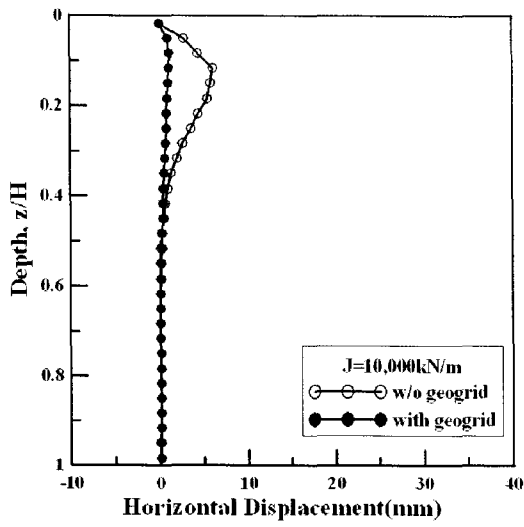


그림 16. 쇄석기둥 수평변위

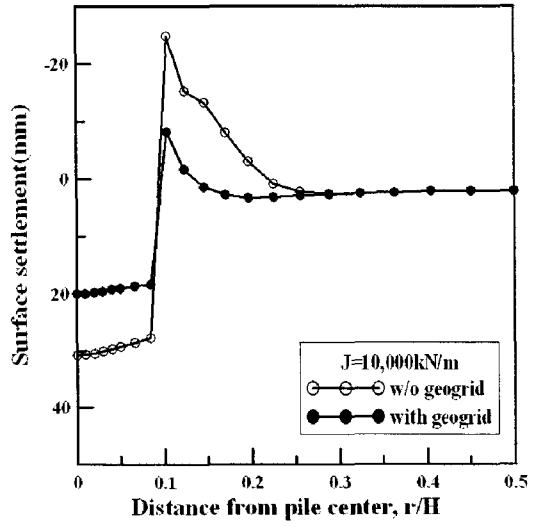


그림 17. 지표침하

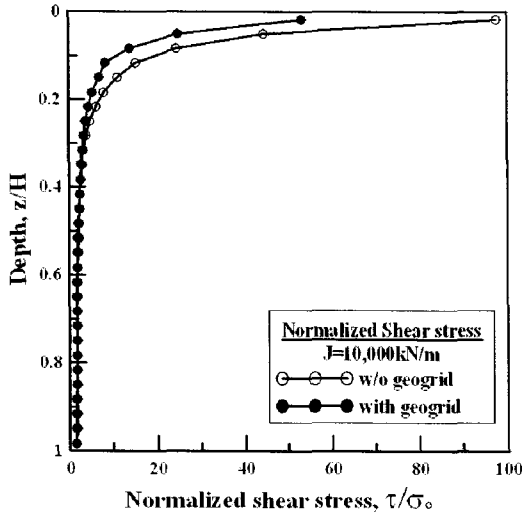


그림 18. 쇄석기둥 주변지반 전단응력

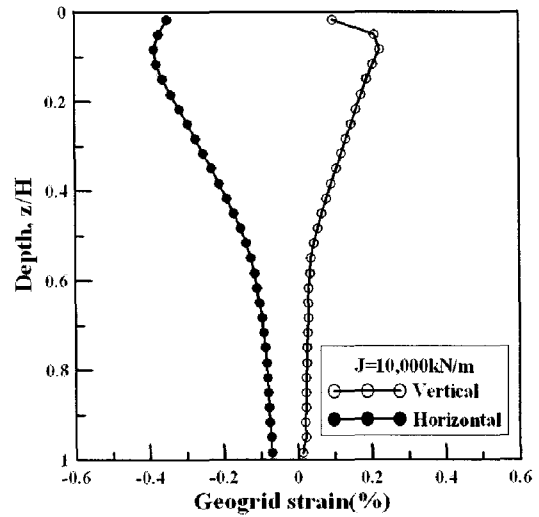


그림 19. 지오그리드 변형률

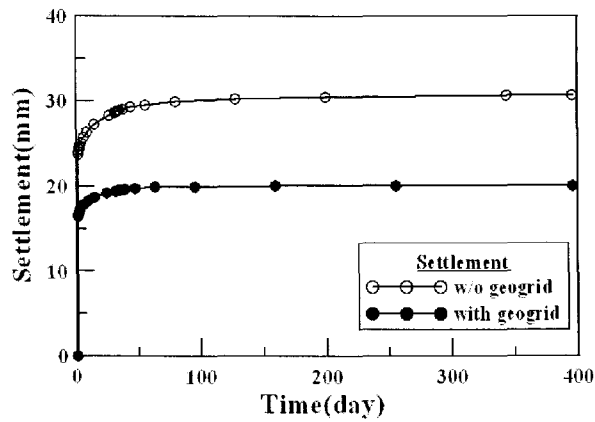


그림 20. 쇄석기둥의 시간에 따른 침하곡선

4.2.2 연약지반에 성토하중이 재하되는 경우

그림 21~그림 25는 연약지반 상부에 성토하중이 재하되는 경우에 대한 장기검토시 해석결과를 보이고 있다. 그림 21의 쇄석기둥의 깊이에서 따른 수평변위는 단기 검토시 1mm 내외로 발생하는 것과는 달리 장기 검토시에는 전반적으로 10~30mm 가량이 발생하며 특히 지오그리드를 보강하지 않은 경우 지표에서 0.5D 범위 이내에서 수평변위가 급격히 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그림 23과 그림 24의 쇄석기둥 주변지반의 전단응력과 쇄석기둥 중심에서의 하중-침하 곡선을 보면 단기시 검토와는 달리 전단응력 및 침하량이 5배~6배 가량 현저하게 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 연약지반 상부의 성토하중으로 인하여 점토가 압밀침하가 발생하였기 때문이며 따라서 쇄석기둥의 침하도 증가한 것으로 파악된다. 쇄석기둥 중앙부에서의 하중-침하 관계로부터 지오그리드 보강시 쇄석기둥의 침하는 단기 검토에서 약 7% 감소하나 장기 검토에서는 33% 가량 감소함을 볼 수가 있어 장기적인 측면에 있어 지오그리드 보강을 통해 침하억제 효과가 큰 것을 알 수 있다. 장기검토시 지오그리드의 변형률은 횡방향 변형률이 깊이에 따라 점차 증가하는 경향을 보여 최대 3.5% 정도 발생하며, 종방향 변형은 매우 미소한 것으로 나타났다.

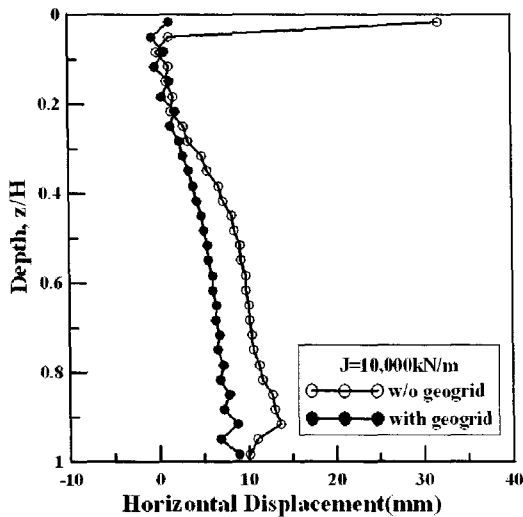


그림 21. 쇄석기둥 수평변위

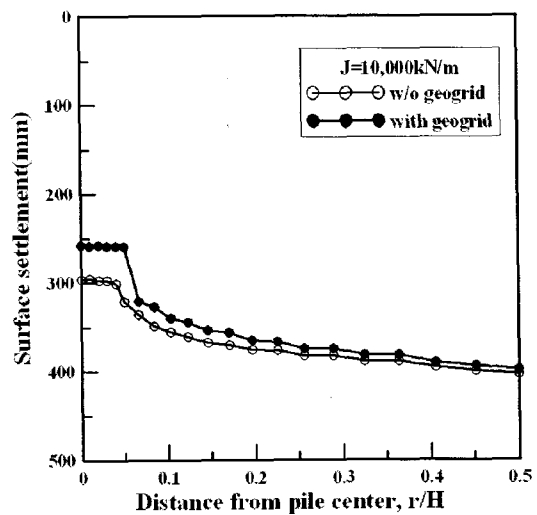


그림 22. 지표침하

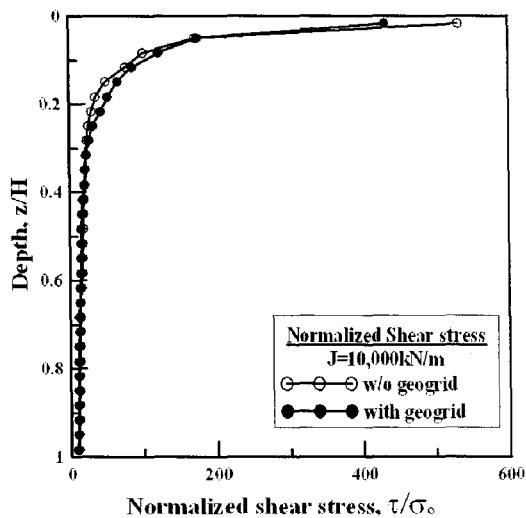


그림 23. 쇄석기둥 주변지반 전단응력

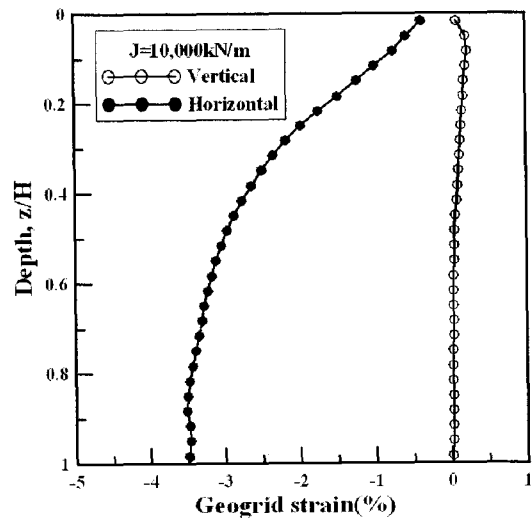


그림 24. 지오그리드 변형률

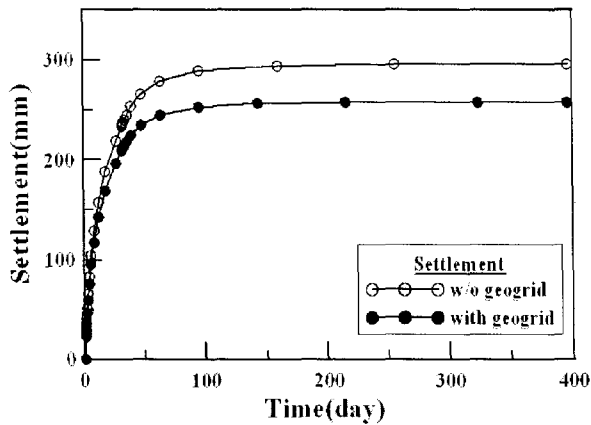


그림 25. 쇠석기둥의 시간에 따른 침하곡선

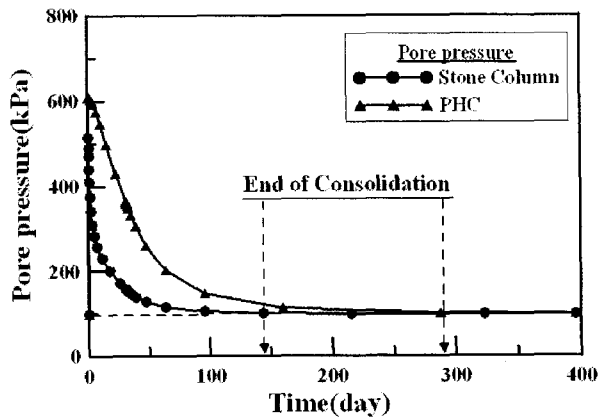


그림 26. 쇠석기둥의 압밀촉진 효과

한편, 그림 26은 쇠석기둥과 일반 콘크리트 말뚝을 각각 사용하는 경우 상재하중 재하시 말뚝의 근입 지점에서의 간극수압을 시간에 따라 도시한 것이다. 보이는 바와 같이 압밀이 완료되는 시간, 즉 하중 재하 후 간극수압이 원상태로 회복하는 시간을 비교하면 일반 콘크리트 파일을 사용한 경우 280일 가량 소요된 반면 쇠석기둥을 사용한 경우에는 140일 정도에 완료되는 것으로 나타나 쇠석기둥의 압밀촉진 효과 또한 기대할 수 있는 것으로 확인되었다.

5. 결론

본 연구에서는 지오그리드로 보강한 쇠석기둥(GRSC) 공법의 국내 적용을 위한 연구차원에서 GRSC의 장단기 하중지지 특성을 고찰하였다. 이를 위해 점토지반을 대상으로 하여 유한요소해석에 의한 매개변수 연구를 수행하였으며, 결과를 종합하여 기존 쇠석말뚝과의 장·단기 하중지지 특성 비교 및 대상 지반조건과 지오그리드의 축강성에 따른 침하감소 효율을 검토하였다. 다음은 그 결과를 요약하고 있다.

- 지오그리드 보강을 통해 쇠석기둥에 구속효과를 제공하여 bulging 파괴를 억제함에 따라 하중지지력 증진 효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.
- 단기점토시 쇠석기둥 상부에 집중하중이 재하된 경우가 연약지반 상부에 성토하중을 재하한 경우에 비하여 다소 보강효과가 큰 것으로 분석되었다.
- 성토하중을 재하한 경우 단기거동 뿐만 아니라 장기거동 측면에 있어 주변지반의 강도증진 및 침하억제에 지대한 역할을 하는 것으로 분석되었다.

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.

참고 문헌

1. 천병식(2004), "단일쇠석말뚝의 지지력 및 침하특성에 관한 연구", 2004 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.1741-1746

2. ABAQUS users manual, Version 6.5. (2005). Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc., Pawtucket, Providence, R.I.
3. Barksdale, R. D. & Bachus, R. C. (1983), "Design and construction of stone column" Volume I, FHWA/RD-83/026,
4. M.Alamgir, N.Miura, H.B.Poorooshasb & M.R.Madhav(1996), "Deformation analysis of soft ground reinforced by columnar Inclusion", Computers and Geotechnics, Vol.18, No.4, pp.267-290.
5. M.A. Al-Joulani (1995), "Laboratory and analytical investigation of sleeve reinforced stone columns", Ph.D. Thesis, Civil Eng., Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada