

지오그리드 감쌌 쇄석기둥 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 쇄석기둥 공법은 일반적인 파일기초의 대안공법으로 경제성 및 시공성 측면에서 효율적이며, 액상화 방지에도 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 또한 최근 들어서는 더욱 발전된 형태의 지오그리드 보강 쇄석기둥 공법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 이와 관련하여 본 논문에서는 지오그리드 보강 쇄석기둥 공법의 성토하중에 대한 쇄석기둥의 하중지지 특성을 고찰하기 위해 2차원 유한요소해석을 수행하였고, 지오그리드 보강효과, 지오그리드 강성, 지오그리드 감쌌깊이 등 영향인자에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 해석결과로부터 지오그리드 보강은 쇄석기둥 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 정회원, 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 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ., esyoo@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(Al-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 쇄석기둥의 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 적용될 수 있다(Al-Joulani 1995). 이러한 토목섬유를 이용하여 모래기

둥을 감싸 연약지반을 보강하는 연구는 주로 GESC공법에 국한되어 있으며, 독일 및 유럽 등에서 GESC 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

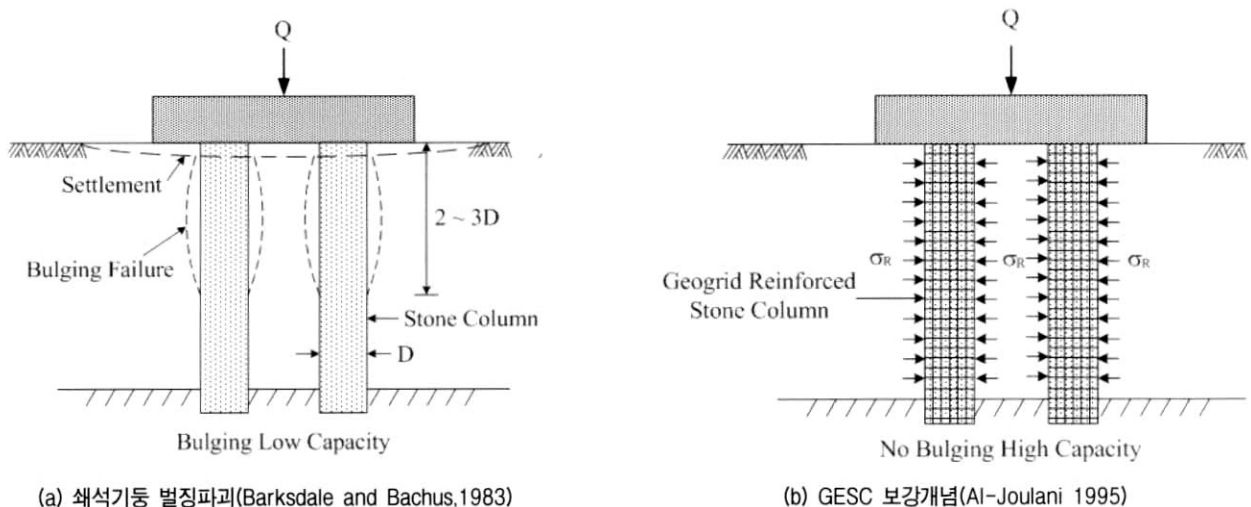


그림 1. 지오그리드 보강여부에 따른 쇄석기둥 파괴형태

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

GESC 공법의 기본 개념은 그림 1(b)와 같이 지오그리드로 쇄석기둥을 감싸 지오그리드 인장강도에 의한 구속효과로 인해 쇄석기둥의 강도증가를 유도하는 반면 변형을 감소시켜 벌징파괴를 억제함으로써 상부 재하하중에 효율적으로 저항하는데 초점이 맞추어진 공법이다. 또한 GESC공법은 고강도 지오그리드의 강성효과로 인해 쇄석, 폐콘크리트, 재생골재 등 다양한 입도의 재료를 사용할 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 지오그리드 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 지오그리드는 원지반에 매입된 상태인 것으로 간주하였으며 쇄석기둥과 주변지반의 영향범위는 단위셀 개념을 바탕으로 쇄석기둥 중심축을 기준으로 1/2단면

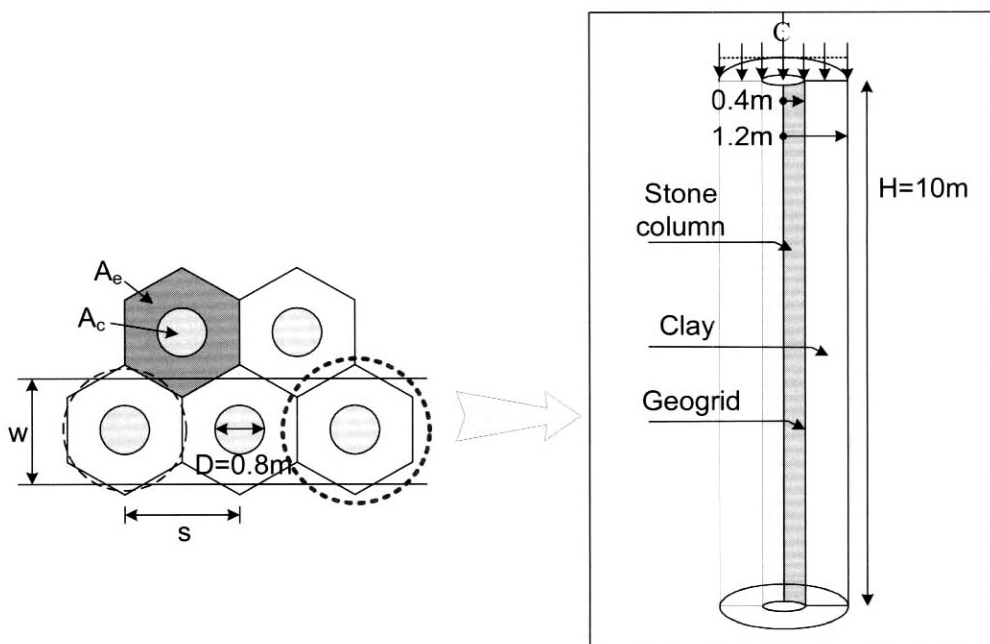


그림 2. 고려대상 조건

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 가압적분 응력-간극수압 연계 고체요소 (CAX4RP)를 적용하였으며, 지오그리드는 쇄석기둥의 구속효과를 모사하기 위하여 축대칭 2절점 멤브레인 요소(MAX1)을 적용하여 모델링하였다. 멤브레인 요소는

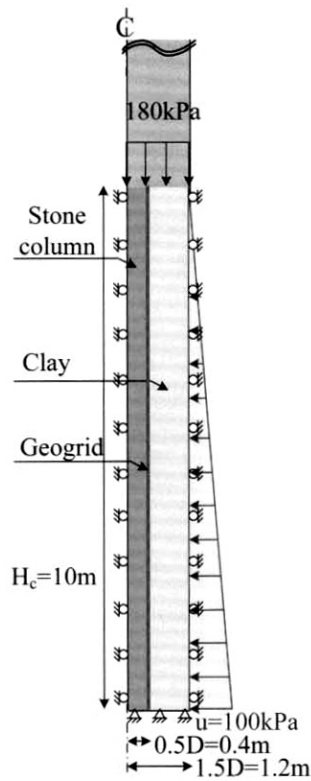


그림 3. 해석모델링 및 유한요소망

힘강성없이 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 항복궤적(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 $e-\ln p$ 그래프의 기울기를 나타내는 것으로 압밀이론에서의 C_c , C_s 에 해당하는 변수로 볼 수 있으며 점토층의 발생 침하량과 관계가 있다. Critical state stress ratio인 M과 Initial yield surface

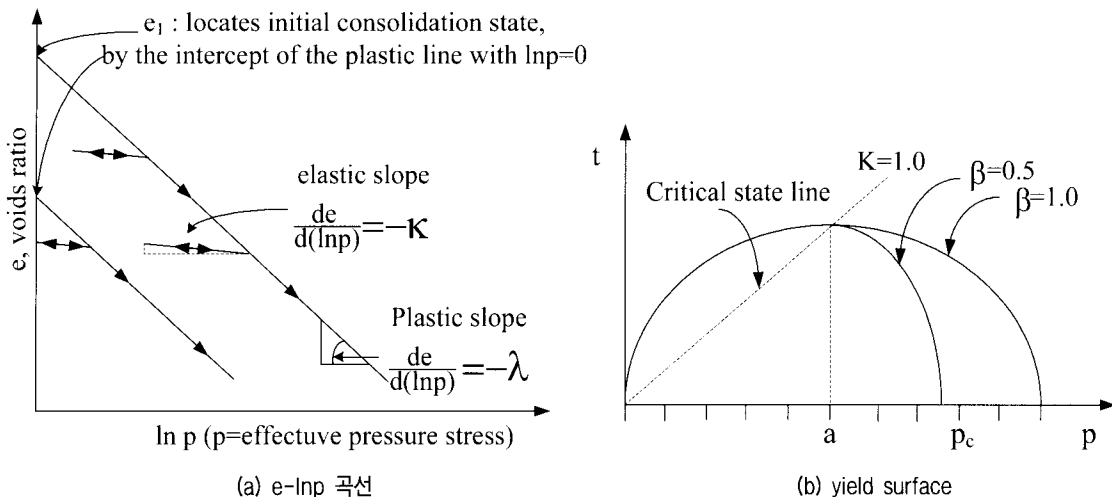


그림 4. MCC 모델 변수의 정의

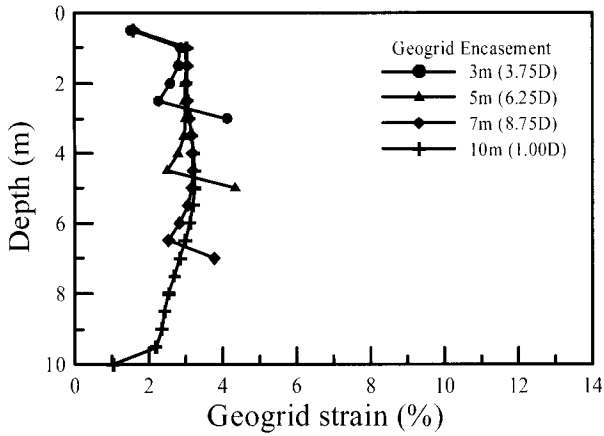


그림 26. 지오그리드 변형률

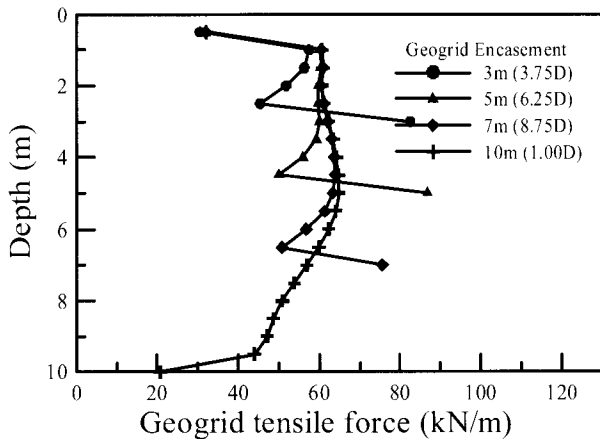


그림 27. 지오그리드 유발인장력

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 침하감소효과가 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 점토시성토완료 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, 송아란, 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 Bijfval 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 Raithe, 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)