

사질토 지반에 시공되는 지오그리드 보강 쇄석말뚝의 지지력 거동특성

Load Carrying Capacity of Geosynthetic-Reinforced Stone Column in Cohesionless Ground

유 충 식¹ Yoo, Chung-Sik

송 아 란² Song, Ah-Ran

김 선 빈³ Kim, Sun-Bin

이 대 영⁴ Lee, Dae-Young

Abstract

This paper deals with the bearing capacity behaviour of geosynthetic-reinforced stone column (GRSC) constructed in soft ground, as part of an investigation regarding the applicability of GRSC in Korea. In this study, two-dimensional finite element analyses were performed to investigate the effect of relevant design factors on the bearing capacity behaviour. The parametric study is performed for various influencing factors. The results indicated that the geogrid encasement tends to significantly improve the load carrying capacity of a stone column. Also found were that the geogrid encasement length and its stiffness significantly affect the load carrying capacity behaviour of GRSC, and that the encasement length of three times the stone column diameter is sufficient in mobilizing the full reinforcement effect. Practical implications of the findings are discussed.

요 지

본 논문에서는 사질토 지반에 시공되는 고강도 지오그리드 보강 쇄석말뚝(Geosynthetic-Reinforced Stone Column, GRSC)의 다양한 영향인자 검토를 통한 지지력 거동특성을 다루었다. 본 연구는 GRSC의 국내 적용을 위한 사전연구로서 대형 구조물의 기초지지 말뚝으로 적용시를 대상으로 2차원 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소해석 결과 GRSC와 쇄석말뚝(Stone Column, SC)의 비교를 통해 지오그리드 보강이 지지력 증가에 현저히 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 지반강도와 쇄석기둥 직경, 지오그리드 강성에 대해 지지력은 증가하는 것으로 나타난 반면, 감쌈길이에 대해서는 3D(D=쇄석기둥 직경)이상의 감쌈에 대해 지지력이 수렴하는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 GRSC 적용시 효율적인 지오그리드 보강의 최적조건을 제안하였다.

Keywords : Bearing capacity, Geosynthetic, FEM, Soft ground, Stone column

1. 서 론

최근 해안을 중심으로 한 사회기반시설의 확충으로 대규모 항만시설이나 간척지의 산업단지조성, 도로, 공

항 등의 대형 토목공사가 꾸준히 증가하고 있다. 따라서 연약지반 상에 시공되는 대형 항만 구조물의 기초설계 및 시공시 구조물의 지지력 확보와 침하의 최소화를 통한 안정성의 문제가 매우 중요하다고 할 수 있다. 현

1 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof. Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

2 성균관대학교 토목환경공학과 연구원 (Researcher. Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

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

4 정회원, 한국건설기술연구원 국토지반연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Department of Geotechnical Engrg., Korea Institute of Construction Technology, dylee@kict.re.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

재 연약지반보강에 주로 적용되고 있는 SCP공법은 양질의 모래 공급 부족현상과 환경문제로 어려움을 겪고 있는 실정에 있으며, 아울러 재료의 대체재로서 조립토 말뚝의 적용에 대한 관심이 증가하였다. 한편 국외에서는 조립토 말뚝에 대한 연구 결과 현장계측, 실내시험, 수치해석을 이용하여 파괴형태에 따른 지지력과 침하량의 산정식이 제안되었다(Barksdale and Bachus, 1983; Aboshi and Suematsu, 1985).

또한 조립토 말뚝 공법의 단점을 보완하고 지반보강 효과를 증진시키기 위해 독일 등 일부 유럽국가에서는 토목섬유로 모래기둥 둘레를 보강한 GEC(Geotextile Encased Column)공법에 대한 연구 및 현장적용이 활발히 이루어 지고 있다. 이러한 연구는 토목섬유 보강으로 인한 보강효과 및 복합지반의 강도특성에 관한 연구가 진행되었으며(Kempfert et al., 1999), 지오그리드 인장 저항강도를 고려한 GRSC 복합지반의 지지력 산정방안을 제시하였다(Paul and Ponomarjow, 2004). 그러나 국내의 경우 MLPP(Marine Large Pack Pile)와 같은 토목섬유 보강 말뚝에 대한 적용성 연구가 수행된 바 있으나(이상익 등, 2005) 고강도 지오그리드를 이용한 구조물의 기초지지 말뚝으로서의 GRSC 국내현장 적용사례 및 연구는 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 지오그리드 보강효과를 고려한 GRSC의 지지력 특성 분석을 위해 구조물의 기초로서 사질토 지반에 시공되는 단일 말뚝 GRSC를 대상으로 하여 2차원 유한요소해석을 수행하였다. 즉, 국내 GRSC 적용시 직면 가능한 문제에 대한 구체적인 설계제안을 하기 위해 지오그리드 보강시의 영향인자인 감쌈길이, 지오그리드 강성, 지반강도, 쇄석기둥 직경에

대한 매개변수 연구를 수행하였다. 이를 토대로 매개변수가 GRSC의 지지력 거동특성에 미치는 영향을 고찰하였으며, 아울러서 임계감쌈길이와 지오그리드의 적정강성에 대해 제안하였다.

2. 조립토 말뚝과 GRSC의 메카니즘 고찰

2.1 단일 조립토 말뚝의 지지력

조립토 말뚝은 상부 구조물의 기초로서 적용되어 복합지반의 지지력을 증진시키기 때문에 지반개량에 널리 이용된다. 조립토 말뚝의 시공은 굴착 후 조립토를 넣고 다지는 Compaction pile과 같은 공법으로 이루어지며, 일반적으로 연약지반을 관통하여 지지층에 선단이 위치하도록 하나 연약지반이 두껍게 존재하는 경우엔 지반 내에서 충분한 깊이를 갖도록 시공한다(Madhav and Vanitha, 2006). 그림 1은 조립토 말뚝으로 개량된 복합지반 상에 구조물이 시공되거나 압밀성토될 때의 단일 조립토 말뚝의 파괴유형을 분류한 것이다(Barksdale and Bachus, 1983).

그림 1(a)는 조립토 단일말뚝에서 가장 많이 발생하는 파괴유형인 벌징파괴(bulging failure)로 이는 하중에 대해 말뚝이 항복하기 시작하면 주변지반으로 하중이 전이되어 말뚝의 주동파괴응력과 수평토압응력의 평형상태가 되는 과정에서 하중재분배가 이루어지면서 발생하는 파괴유형이다(Handy, 2001). 따라서 벌징파괴에 대해서 지지력을 향상시키기 위해서는 말뚝의 주동파괴응력에 대해서 지반의 수평저항력을 증가시킴으로써 파괴에 대한 지반의 침하량 감소 및 지지력 증대 효과를

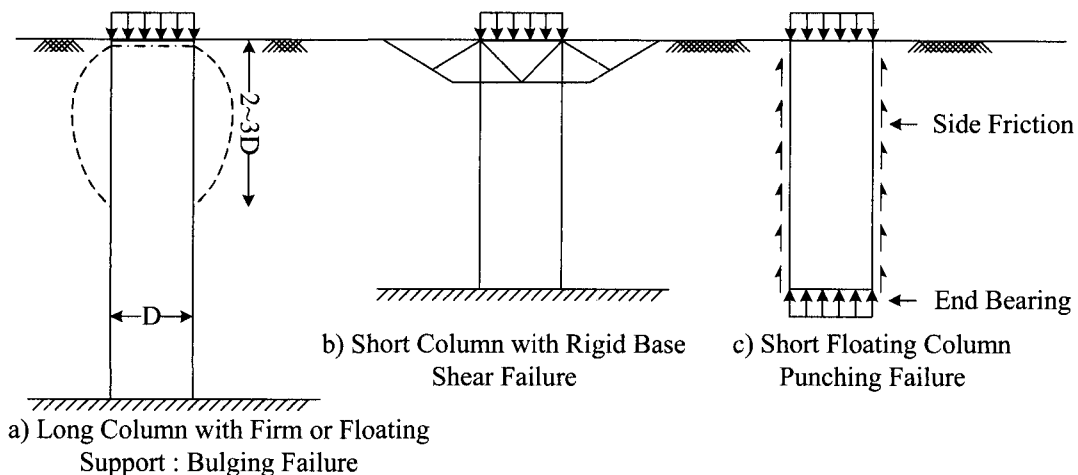


그림 1. 단일 조립토 말뚝 파괴 메카니즘(Barksdale and Bachus, 1983)

얻을 수 있다. 별장파괴에 대한 극한지지력 산정방안은 Greenwood(1970), Vesic(1972), Danye and Nagaraju(1975), Hughes and Witheres(1974), Madhav et al.(1979)에 의한 제안식이 있다. 한편, 그림 1(b)는 얇은기초에서의 파괴 처럼 말뚝에 재하되는 하중에 대해 지지하고 있던 조립 토 말뚝 내에서 갑자기 파괴가 발생하여 파괴면이 지표 면까지 확장될 것으로 보는 파괴유형으로 전반전단파괴 (general shear failure)라 하며 Madhav and Vitkar(1978)의 제안식이 있다. 또한 말뚝이 상당히 느슨한 지반에 의해 지지되고 있을 경우 지반의 파괴면은 지표까지 도달 하지 않으며 그림 1(c)와 같은 형태로 파괴가 발생한다.

2.2 GRSC의 보강 개념

GRSC공법은 그림 2와 같이 쇄석기둥에서 발생하는 횡방향 변형을 억제하기 위해 고강도의 토목섬유로 쇄석기둥을 감싸 보강하여 좁으므로 지반의 구속력을 증가시켜 쇄석기둥의 지지력 증가시키는 보강 공법이다. GRSC 공법의 기본 개념은 그림 3과 같이 지오그리드로 쇄석기둥을 감싸 지오그리드 인장강도에 의한 구속효과로 인해 쇄석기둥의 강도증가를 유도하는 반면 변형을 감소시켜 별장파괴를 억제함으로써 상부 재하하중에 효율적으로 저항하는데 초점이 맞추어진 공법이다. 또한 GRSC공법은 고강도 지오그리드의 강성효과로 인해 쇄석, 페콘크리트, 재생골재 등 다양한 입도의 재료를 사용할 수 있으며, 부직포로 모래기둥 전체를 보강하는 기존의 GEC공법과는 달리 쇄석기둥의 상부 팽창 파괴 영역만을 부분적으로 보강할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 GRSC공법은 기존의 토목섬유

보강공법에 비해 토목섬유의 보강 범위를 축소시킬 수 있으며, 기존의 공법에 비해서도 설치간격을 줄여 좁으므로 경제적이고 효율적인 시공이 가능하다.

3. 유한요소해석

3.1 해석모델링

3.1.1 대상

본 연구에서는 사질토 지반의 상부에 물류센터나 항만시설과 같은 구조물 기초로서 GRSC를 시공하는 조건을 대상으로 하였다. 이에 GRSC는 직경 1.0m의 쇄석기둥이 10m 지반을 관통하여 암반층에 지지되는 것으로 간주하였고, 지오그리드의 감쌈길이는 쇄석직경 대비로 변화시켰다. 구조물의 하중은 쇄석기둥 상부의 매트기초를 통해 GRSC 쇄석기둥에 재하되는 것으로 모사하였다.

3.1.2 대상의 모델링

본 해석에서는 유한요소해석 상용프로그램 ABAQUS 6.4-1(ABAQUS users manual, Version 6.5, 2005)을 사용하였다. ABAQUS는 토목 및 기계 등 다양한 분야에 적용되는 프로그램으로서 특히 지반공학 분야에서 다양한 흙의 구성모델을 제공하고 소성거동 모사에 대한 알고리즘이 효율적이어서 지반구조물의 항복 후 거동 평가에 적합하게 활용될 수 있다. 해석영역의 모델링에 있어서 해석의 편의상 쇄석기둥이 지오그리드, 매트기초와 함께 원지반에 매입된 상태인 것으로 간주하였다. GRSC 단일말뚝은 원기둥 형태이므로 중심축에 대해

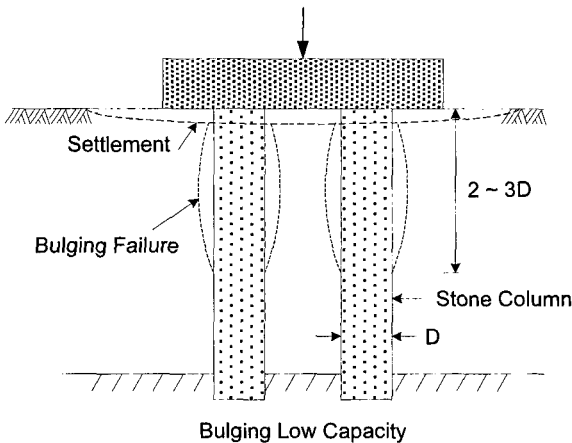


그림 2. 쇄석기둥 별장파괴(Barksdale and Bachus,1983)

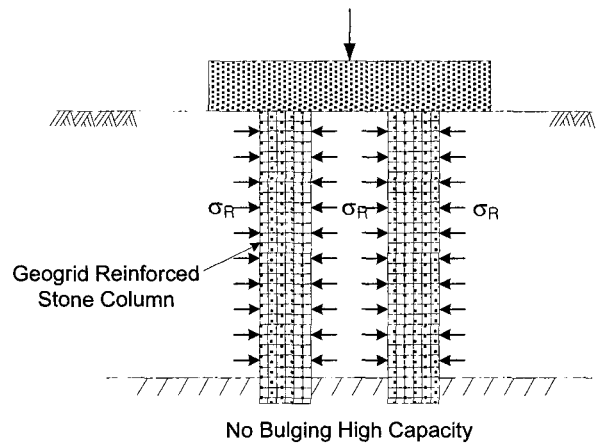


그림 3. GRSC 보강개념(AI-Joulani 1995)

축대칭 형상을 이루는 점을 고려하여 우측 반단면에 대해 축대칭 2차원 해석을 수행하였고, 변위 경계조건은 쇄석기둥 중심에서 5D(D=쇄석기둥직경)를 영향범위로 하여 수평방향변위 구속, 바닥은 쇄석기둥의 지지층의 수평, 연직 방향의 변위를 구속하여 설정하였다. 구조물의 하중은 매트기초 위에 가하여 말뚝의 중심을 통해 전달되도록 하였다.

모델의 이산화에 있어 지반과 쇄석기둥은 축대칭 4절점 가감적분 요소(CAX4R)를 적용하였으며, 매트기초는 빔요소(B22), 지오그리드는 축대칭 2절점 멤브레인 요소(MAX1)로 모델링하였다.

지오그리드를 모델링한 축대칭 멤브레인 요소(Axi-symmetric membrane element)는 그림 5(b)에서와 같이 원기둥 형태로 감싸는 선형으로 표현되며, z방향 힘에 의한 휨강성에 저항하지 못하고 r방향으로 유발되는 힘을

전달하는 요소이다. 축대칭 요소로 적용되었기 때문에 원통형 좌표평면 r, z, θ 평면에 정의될 수 있으나 2차원 평면에서 θ 방향의 변형은 0이므로 r-z 평면에 대해서 변위 u_r 과 u_z 로 변형이 표현된다. 지오그리드의 두께는 5mm로 선정하였고, 단면 변형률은 포아송비 ν 로 정의한 두께의 비선형 관계식은 식 (2)와 같다. 여기서 포아송비가 0.5인 경우는 재료의 비압축성을 나타내고, $\nu=0$ 은 두께의 변화가 없음을 나타낸다.

$$\frac{t}{t_0} = \left(\frac{A}{A_0} \right)^{-\frac{\nu}{1-\nu}} \quad (2)$$

여기서, A=멤브레인의 기준면 면적, ν =포아송비

한편 재료모델링에 있어서 지반과 쇄석기둥은 비관련 흐름규칙(non-associated flow rule)을 따르는 Mohr-Coulomb

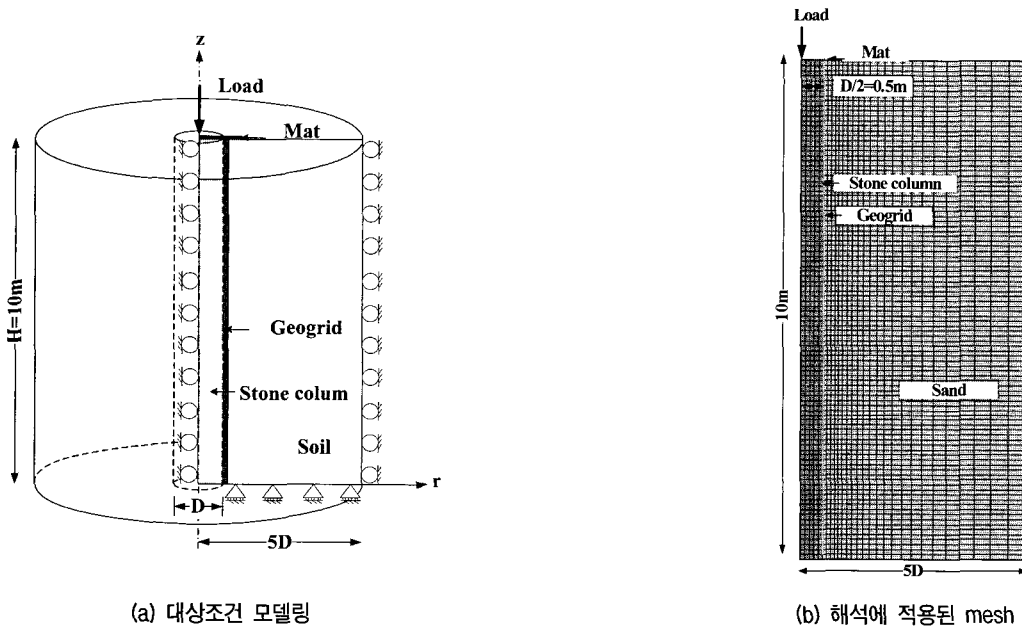


그림 4. 대상조건 모델링과 해석에 적용된 mesh

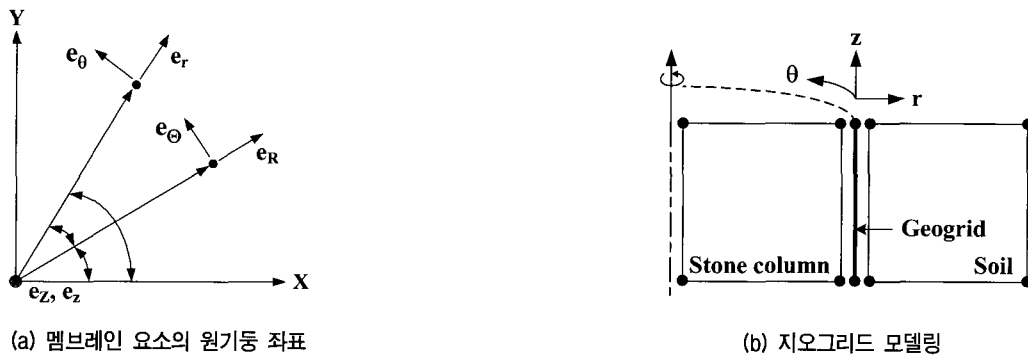


그림 5. 멤브레인 요소의 좌표와 모델링한 지오그리드 개요도

Hardening 모델을 적용하였고, 지오그리드와 매트기초는 탄성거동을 하는 것으로 가정하였다. 해석에 적용된 지반탄성계수는 깊이에 따라 변화함을 나타내기 위해 지반을 10층으로 나누어 식 (3)을 이용하여 층별로 적용하였으며, 내부마찰각은 일반적인 사질토의 물성을 적용하였다. 쇄석의 물성은 쇄석기둥으로 보강한 지반에 대한 연구논문을 참조하였으며(Schweiger and Pande, 1986; Han and Gabr, 2002), 지오그리드는 지반보강용 지오그리드의 제원(표 1)과 광폭인장강도 시험결과(그림 6)로부터 산정한 강성 500kN/m를 적용하였다. 해석

적용물성은 표 2에 정리하였다.

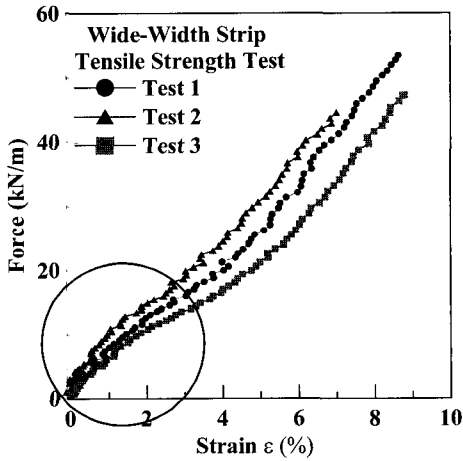
$$E = KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (3)$$

3.2 매개변수연구

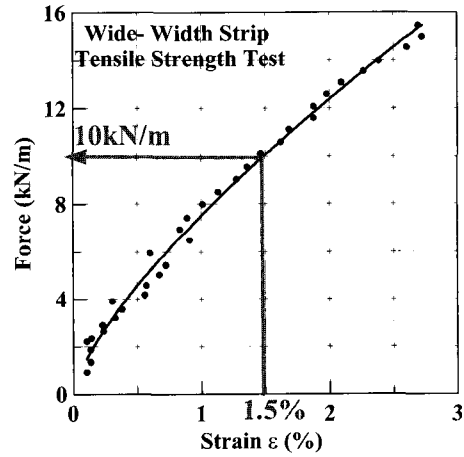
본 연구에서는 GRSC의 지지력에 영향을 미치는 인자들을 파악하기 위해 지반조건, 쇄석기둥 직경, 지오그리드 감쌈길이, 지오그리드 강성 등에 대한 매개변수 연구를 먼저 수행하였으며, 현장 적용시 지오그리드 보강의 최적조건을 도출하기 위하여 지오그리드의 임계감쌈길이와 적정 지오그리드 강성에 대해 분석하였다. 표 3은 국외 시공사례에서 일반적으로 적용되는 조건을 토대로 본 연구에서 적용한 매개변수 연구조건을 보여주고 있다.

표 1. 지오그리드 제원

| | | | |
|------|-------------------|-------|-----------|
| 제품종류 | 55/30-20 | 재질 | P.E.T |
| 인장강도 | 55kN/m | 용접 | 200°C |
| 탄성계수 | 1700MPa | 신율 | Max.12.5% |
| 제품형태 | Biaxially Geogrid | Creep | Max. 2% |



(a) 광폭인장강도시험결과 그래프



(b) 광폭인장강도시험결과의 변형률 3%내의 확대 그래프

그림 6. 지오그리드 광폭인장강도 결과

표 2. 해석 적용물성

| 구분 | E (kPa) | ν | c (kPa) | ϕ (°) | ψ (°) | γ (kN/m ³) | J (kN/m) |
|-------|--|-------|---------|------------|------------|-------------------------------|-----------|
| 쇄석기둥 | 80,000 | 0.3 | 10 | 42 | 35 | 20 | - |
| 지오그리드 | 1×10^5 | 0.3 | - | - | - | 1 | 500, 2000 |
| 매트 | 3×10^6 | 0.3 | - | - | - | 1 | - |
| 지반 | 6742 (0~1m) 11677 (1~2m) 15075 (2~3m) 17837 (3~4m) 20225 (4~5m) 22360 (5~6m) 24307 (6~7m) 26110 (7~8m) 27797 (8~9m) 29386 (9~10m) | 0.3 | 1 | 35 | 10 | 20 | - |

$E = KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n$
 $K = 300,$
 $n = 0.5$

표 3. 매개변수 연구조건

| 조건 | 내부마찰각 ϕ (°) | 쇄석기둥 직경(m) | 지오그리드 강성, J(kN/m) | 감쌈길이, H_{gr} (m) |
|----------|------------------|---------------|------------------------|--------------------|
| 감쌈길이 | 35 | 1.0 | 500 | 0, 1, 3, 5, 10 |
| 지오그리드 강성 | 35 | 1.0 | 1000, 2000, 3000, 5000 | 10 |
| 지반조건 | 30, 35 | 1.0 | 2000 | 10 |
| 쇄석기둥 직경 | 35 | 0.6, 0.8, 1.0 | 500 | 10 |

4. 결과 및 분석

4.1 하중-변위 특성

본 절에서는 쇄석기둥과 GRSC의 하중-변위 특성을 고찰하여 지오그리드 보강으로 인한 쇄석기둥의 지반보강효과를 검토하였다. 쇄석기둥에 집중하중이 작용하는 경우 상부 중심점에서의 하중-침하곡선은 그림 7과 같다. 그림 7에서 보이는 바와 같이 지오그리드로 보강되지 않은 쇄석기둥(SC)은 직경의 0.2D인 200mm의 침하

가 발생한 후 2000kN에서 하중 증가 없이 급격히 추가적인 침하가 발생하는 것으로 나타나는 경향을 보이거나 GRSC의 경우 지속적인 하중지지 양상을 보이고 있다.

그림 8은 2000kN의 동일하중 수준에서의 쇄석기둥과 지반의 변형된 형상을 보이고 있다. 지오그리드 보강이 없는 쇄석기둥에 대한 그림 8(a)의 상부 쇄석기둥의 벌징과 하중재하부의 침하를 그림 8(b)의 GRSC와 비교하면 지오그리드 보강으로 인한 쇄석말뚝의 벌징영역이 감소됨을 볼 수 있으며 이러한 경향은 그림 9의 변위벡터

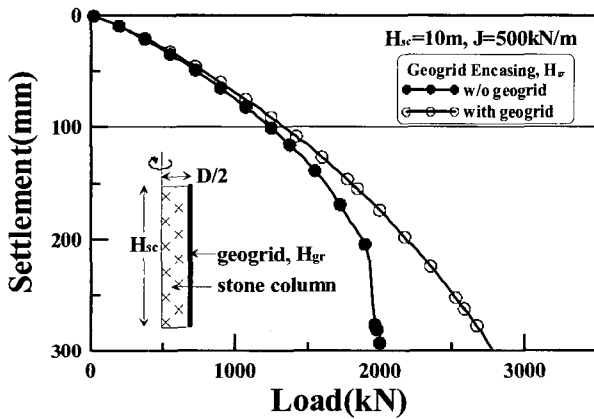
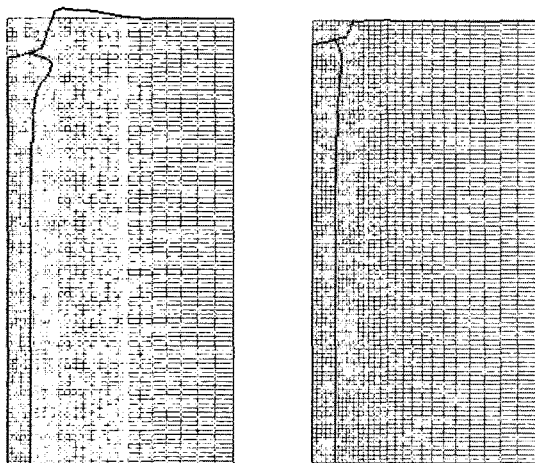
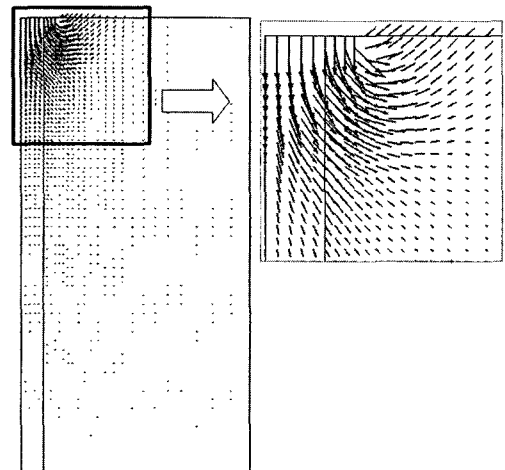


그림 7. 하중-침하 곡선

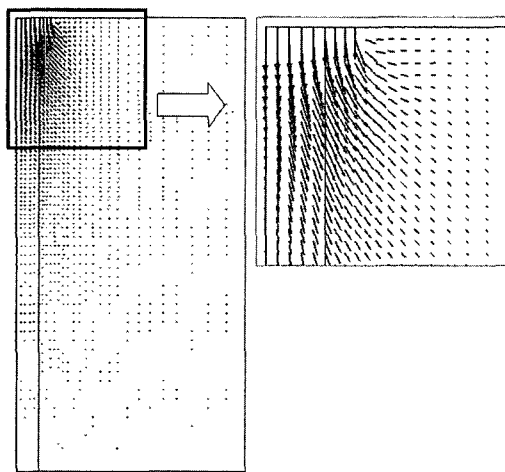


(a) Stone column (b) GRSC

그림 8. 동일하중에서의 변형 비교



(a) Stone column



(b) GRSC

그림 9. 동일하중에서의 변위벡터 비교

터 확대그림에서도 잘 관찰되고 있다.

쇄석기둥의 수평변위를 깊이에 따라 도시하고 있는 그림 10에서는 지표와 2D(D:쇄석기둥 직경) 지점 사이의 벌징 현상이 관찰되며, 마찬가지로 그림 11에서도 축차응력이 동일한 범위에서 320kPa, 440kPa로 4D 이하의 영역보다 3~4배 크게 나타나고 있다. 지오그리드로 구속하는 경우 수평변위는 158mm에서 51mm로 60%의 감소효과를 나타내고 있으며, 이러한 원인은 하중 재하시 쇄석기둥에서 발생하는 벌징파괴를 지오그리드가 억제함으로써 지지력의 향상은 물론 주변지반으로의 영향이 최소화되기 때문으로 판단된다.

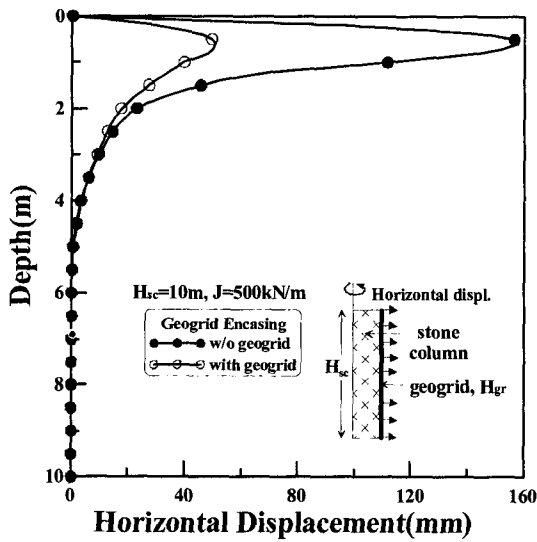


그림 10. 수평변위

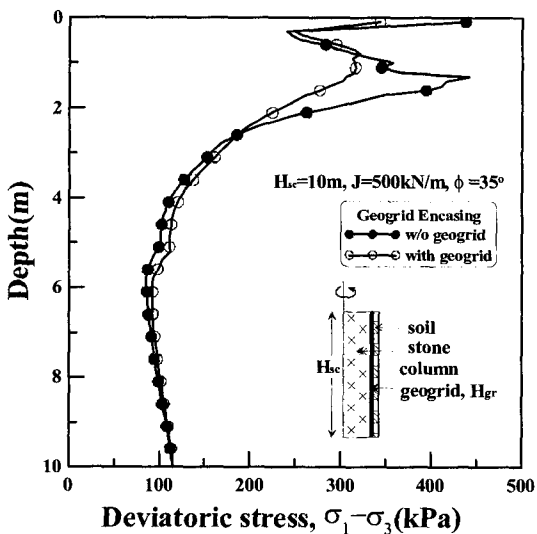


그림 11. 쇄석기둥 측면지반의 축차응력

4.2 하중-변위 특성 영향인자

GRSC공법은 지오그리드 보강으로 쇄석기둥의 벌징 파괴를 억제하여 지지력을 향상시킴을 4.1절에서 확인하였다. 본 절에서는 GRSC의 하중-특성에 영향을 미치는 인자에 대한 파악을 위해 지오그리드의 감쌈길이와 강성, 지반조건과 쇄석기둥 직경 등 다양한 인자에 대하여 그 영향을 검토하였다.

4.2.1 감쌈길이

지오그리드 보강시 감쌈길이는 1D 보강과 전체보강인 10D 경우를 비교하여 그 영향을 분석하였다. 그림 12에서 말뚝직경의 10%에 해당하는 침하량일 때의 하중인 1375kN과 1500kN을 지지력으로 산정하여, 쇄석기둥주변지반의 축차응력, 수평변위와 지오그리드 변형률 변화를 각각 검토하였다. 감쌈길이에 대한 영향으로

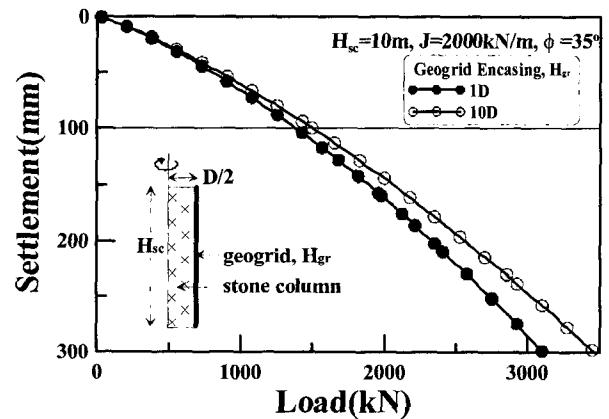


그림 12. 하중-침하 곡선

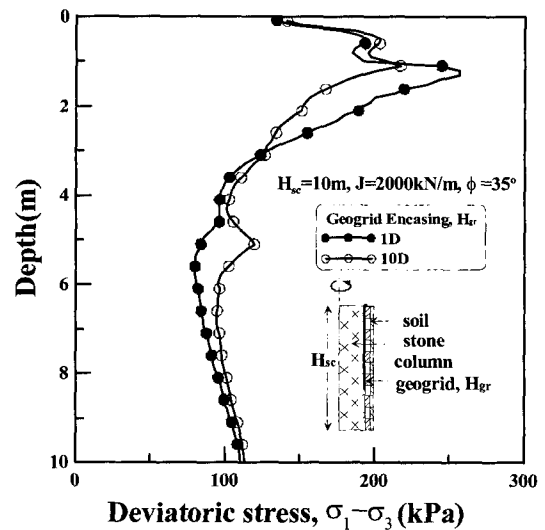


그림 13. 쇄석기둥 측면지반의 축차응력

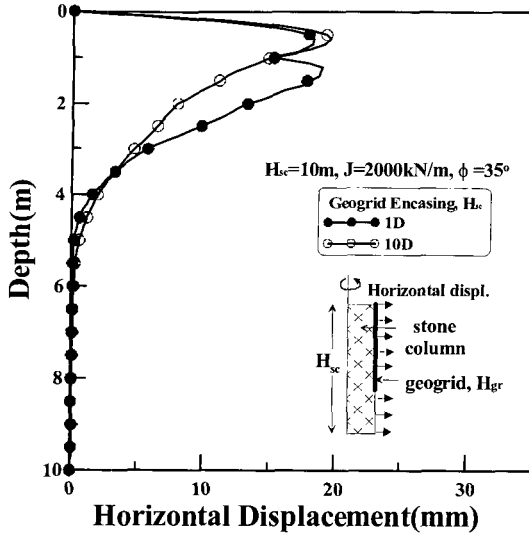


그림 14. 수평변위

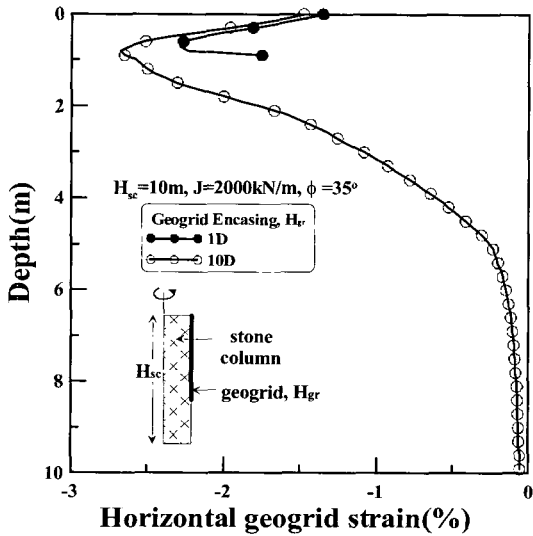


그림 15. 지오그리드 수평변형률

축차응력은 1D 보강시 그림 13과 같이 보강영역 하부에서 최대값 260kPa을 나타내며, 그림 14의 수평변위 또한 1D 보강시 1D이하의 영역에서 수평변위 최대값 19mm가 발생하며 주변지반에의 영향면적이 확장되었다. 또한 그림 15에서 1D보강의 지오그리드 수평변형률은 1.35~2.14%의 범위에 존재하며, 이러한 경향은 지오그리드로 감싸지 않은 영역이 취약부가 되어 벌집파괴에 대해 지오그리드가 수평저항력을 발휘하지 못하는 것으로 판단된다.

4.2.2 지오그리드 강성

쇄석기둥을 구속하는 지오그리드 구속력은 지오그리드 강성의 영향을 받는다. 따라서 본 절에서는 GRSC의

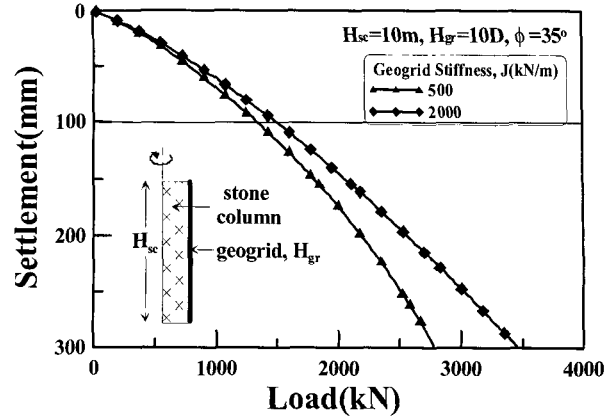


그림 16. 하중-침하 곡선

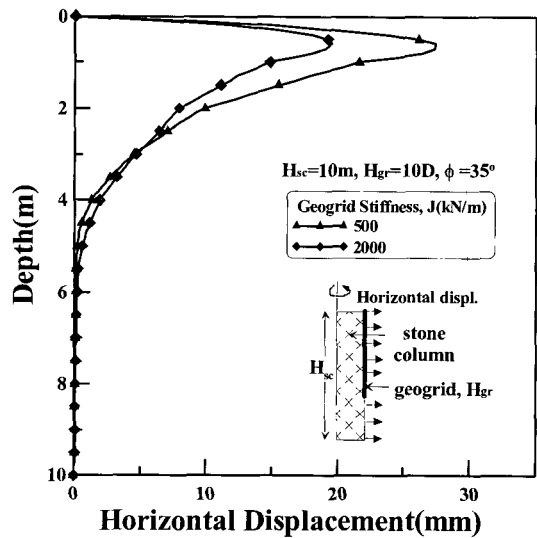


그림 17. 수평변위

하중-침하 특성에 영향을 미치는 인자의 검토로서 지오그리드 강성에 따른 영향을 검토하였다. 그림 16의 하중-침하곡선에서 침하량이 직경의 10%에 해당하는 하중 하에서 수평변위와 지오그리드의 변형률을 지오그리드 강성 500kN/m와 2000kN/m에 대해서 비교하였다. 그림 17과 19에서 강성 2000kN/m 지오그리드로 보강시 500kN/m인 경우보다 수평변위와 연직변형률이 각각 약 30% 감소하는 결과를 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 지오그리드 강성이 보강효과에 영향을 미치며 보강시 과다 또는 과소설계가 되지 않도록 하기 위해서는 쇄석기둥 주동토압에 대한 적절한 수평저항력을 산정할 수 있는 적강성의 지오그리드를 적용하여 설계되어야 한다. 지오그리드에 의한 수평저항력은 허용변형률 이내에서의 강도발현에 따라 달라지기 때문에 시공조건에 대한 적정 강성의 지오그리드 선택은 경제적인 설계측면에서 중요인자가 된다.

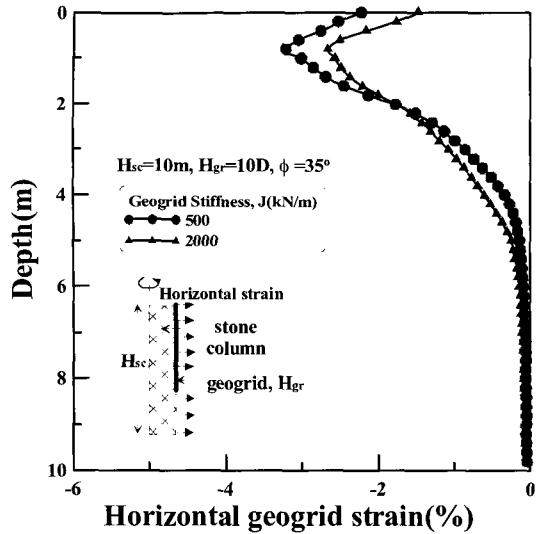


그림 18. 지오그리드 수평변형률

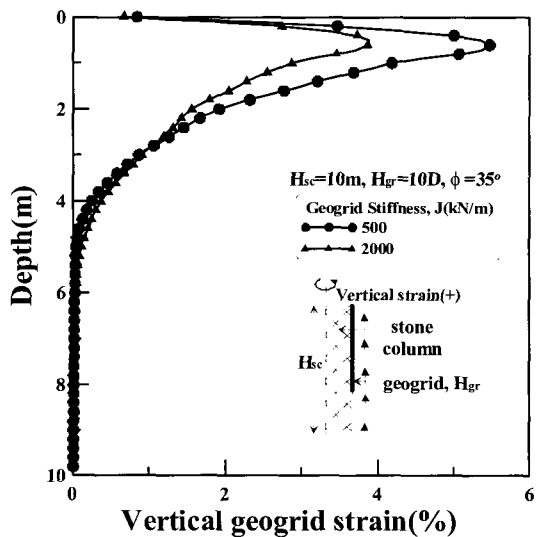


그림 19. 지오그리드 연직변형률

4.2.3 쇄석기둥 직경

GRSC에서 시공조건에 따른 하중-침하 특성 분석을 위해 쇄석기둥의 직경을 0.6, 0.8, 1.0m의 세 가지 조건으로 변화시킴에 따른 지지력 거동을 분석하였다. 쇄석기둥의 직경을 확장함에 따라 지반의 치환면적이 넓어지고 하중에 대한 지지면적이 확대되어, 하중 지지력과 주변지반에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

다음 그림 20은 쇄석기둥의 직경을 0.6, 0.8, 1.0m로 변화시킴에 따른 하중-침하 곡선을 보여주고 있는데 직경의 10%에 해당하는 100mm 침하 시 하중은 각각 995kN, 1200kN, 1350kN으로 직경이 증가함에 따라 지지력이 증가하는 경향을 알 수 있다. 또한 그림 21~25은 임의 하중 2000kN일 때의 GRSC 거동을 비교한 결과를 보여주

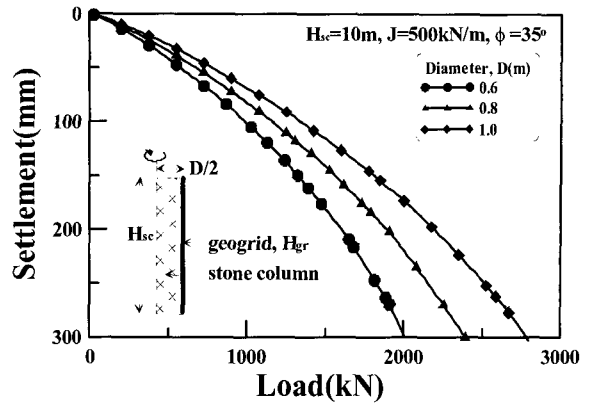


그림 20. 하중-침하 곡선

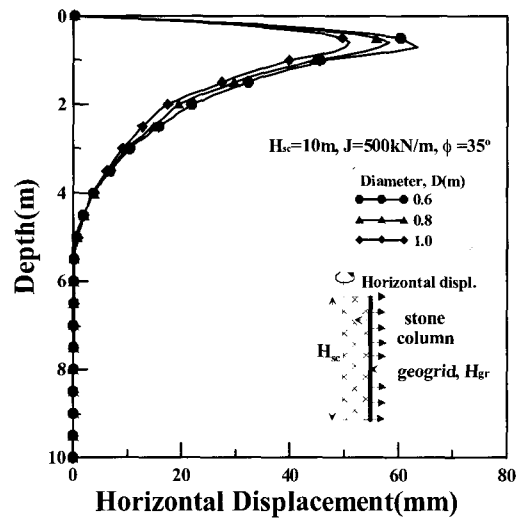


그림 21. 수평변위

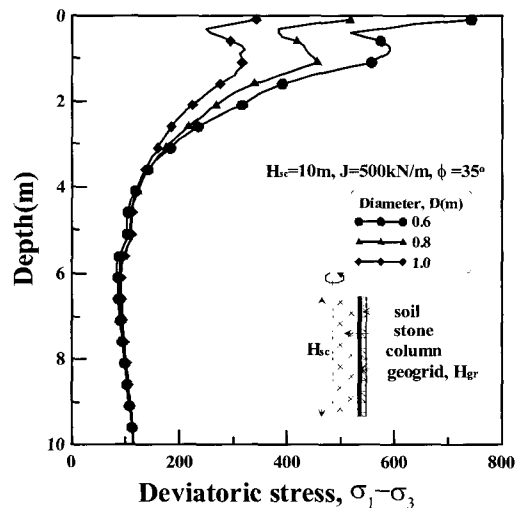


그림 22. 쇄석기둥 축면지반의 축차응력

고 있다. 그림 21~22에서 알 수 있듯이 직경이 0.6m에서 1.0m로 증가함에 따라 수평변위는 63mm에서 50mm로 감소하였고, 축차응력도 45% 감소한 경향을 보인다. 그

림 23의 지표침하 역시 298mm에서 174mm로 침하량이 42% 감소하였으며, 특히 그림 24와 25에서 지오그리드 변형률은 60%나 감소하여 직경변화에 따른 경향을 보여준다. 이러한 경향은 직경이 증가함에 따라 쇄석기둥

의 지지력 또한 증가하였기 때문에, 주변지반에 미치는 영향은 물론, 말뚝 자체의 변형도 감소하는 것으로 판단된다. 또한 지오그리드의 변형은 쇄석기둥의 직경에 대한 영향이 크게 작용하는 것으로 분석되었다.

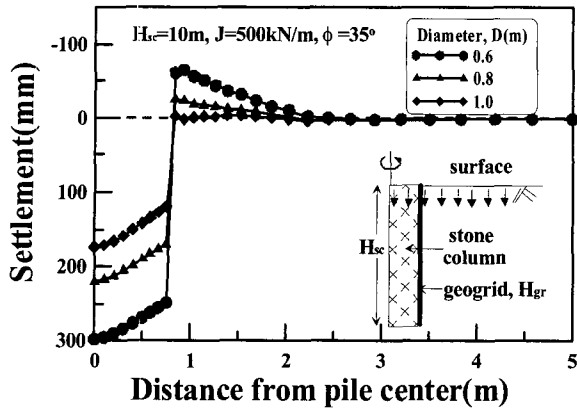


그림 23. 지표침하

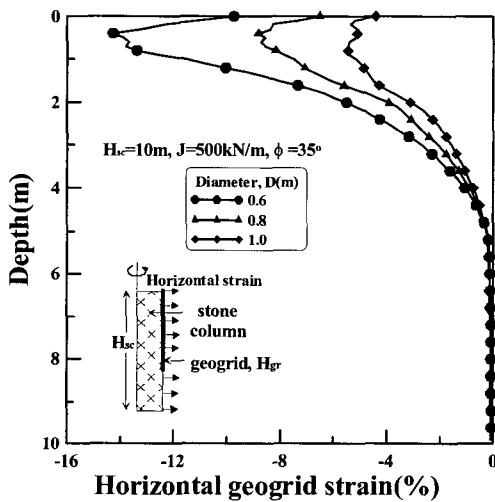


그림 24. 지오그리드 수평변형률

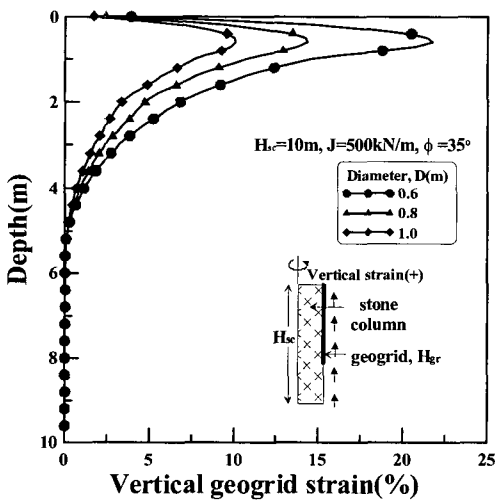


그림 25. 지오그리드 연직변형률

4.2.4 지반조건

본 절에서는 GRSC가 시공되는 지반조건에 대한 하중-침하 특성을 통해 GRSC 지지력 보강효과를 분석하였다. 이를 위해 내부마찰각 30°와 35°인 지반에 임의 하중 2000kN이 작용되는 경우에 대해서 지표침하, 쇄석기둥 수평변위, 쇄석기둥 주변지반의 축차응력을 검토하여 지반의 변화경향을 분석하였다. 그림 26은 지반조건에 따른 하중-침하곡선으로 여기서 직경의 10% 침하량분석법으로는 동일조건인 지반분석이 어려우므로 임의 하중 2000kN이 작용하는 경우를 기준으로 하였다. 먼저 그림 27은 쇄석기둥 중심으로부터 거리에 따른 지표침하곡선으로 쇄석기둥 중심에서의 침하량 차이는 35mm가 발생하여, 지반강도가 작은 경우 벌짐으로 인한 주변지반의 솟아오름이 발생하는 것으로 판단된다.

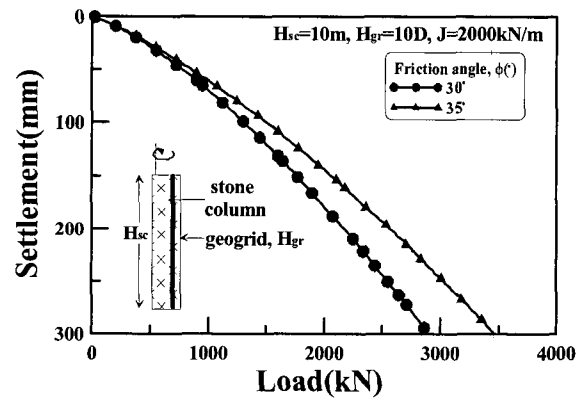


그림 26. 하중-침하 곡선

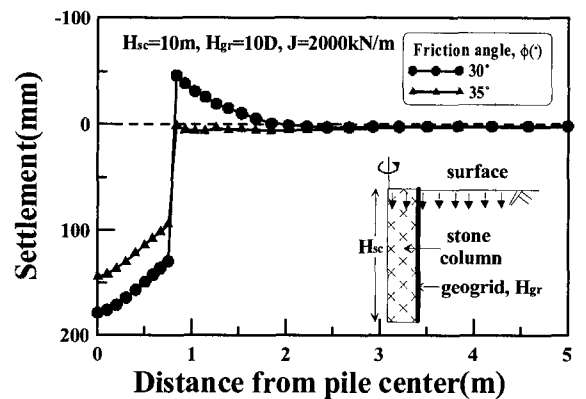


그림 27. 지표침하 곡선

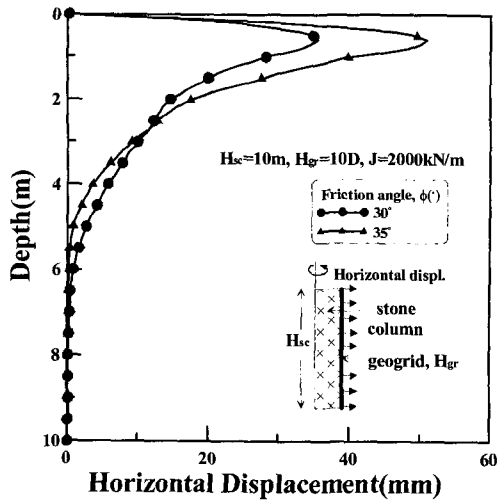


그림 28. 수평변위

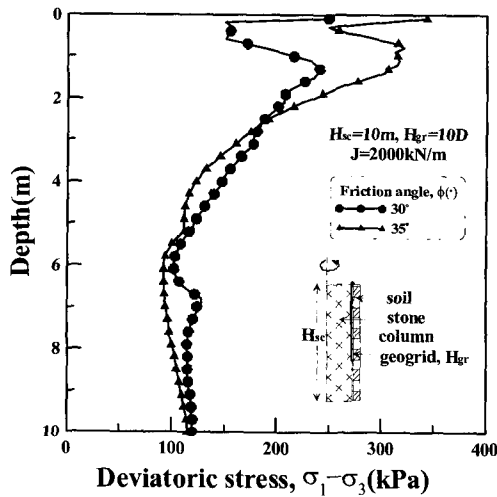
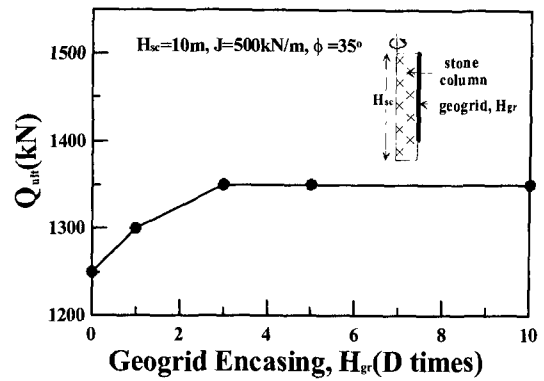


그림 29. 쇄석기둥 측면지반의 축차응력

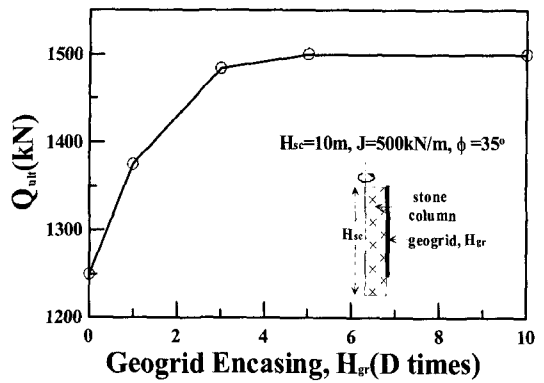
그림 28~29는 수평변위와 축차응력에 있어서도 지표에서 깊이 4D지점까지 지반조건에 따른 차이가 나타나고 있으며 4D 이후의 깊이에서는 영향이 작은 것으로 나타나 지반강도가 작을수록 상부에서의 보강이 더 중요시되는 것으로 분석된다.

4.3 입계감쌈 조건

조립토 말뚝의 벌징파괴는 상부 2~3D에서 발생하는 것으로 알려져 있으며(Barksdale and Bachus, 1983), 앞선 결과들에서 공통적으로 최대벌징지점은 1D부근, 벌징영역은 4D 이내로 분석된 바 있다. 파괴에 저항하기 위한 수평저항력을 유도하기 위해서는 쇄석기둥 상부 구속이 필요하며, 이에 그림 30과 31은 지오그리드로 벌징영역을 보강하는 최적의 길이 선정을 위해, 상부에서

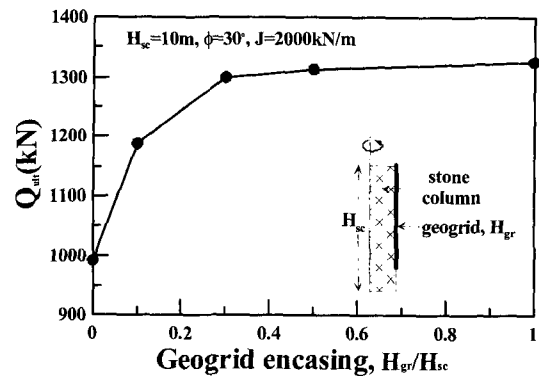


(a) J=500kN/m

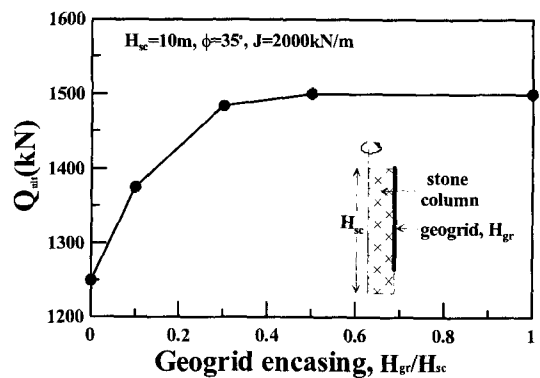


(b) J=2000kN/m

그림 30. 지오그리드 강성에 따른 감쌈길이의 영향



(a) $\phi=30^\circ$



(b) $\phi=35^\circ$

그림 31. 지반 내부마찰각에 따른 감쌈길이의 영향

부터 감쌈깊이를 변화시킴에 따른 지지력의 변화경향을 도시한 것이다. 직경의 10% 침하량에 해당하는 지지력에 대해 분석한 것으로, 감쌈깊이 3D부터 지지력이 수렴하는 양상을 보이므로 경제적인 설계를 위한 본 해석조건에서의 임계감쌈깊이는 3D로 분석되었다. 실험 결과를 통해 경제적인 감쌈 깊이를 선정하기 위해서는 지반조건 및 시공조건을 고려하여 감쌈깊이를 선정해야 할 것이다.

4.4 지오그리드강성에 따른 영향

그림 32는 지반의 내부마찰각 변화시 지오그리드 강성에 따른 지지력의 증가경향을 나타낸 것이다. 사실토 지반의 내부마찰각이 30°와 35°인 조건에 대해 미보강시 대비 지오그리드 강성 2000kN/m 사용하여 보강시 지지력이 각각 33%와 20% 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과로부터 미보강시 대비 강성 2000kN/m의 지오그리드 보강시 지반조건에 대한 지지력 증가효과

는 상대적으로 강도가 작은 지반에서 더 효율적인 것임을 알 수 있다. 또한 지오그리드의 강성이 증가함에 따라 지지력도 증가하는 경향을 보이고 있으나, 일정수준 이상의 강성에서는 지지력 증가 효과가 수렴하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향으로 볼 때 경제적인 설계를 위해서는 상부 구조물의 하중에 대해 요구되는 지지력에 대한 지오그리드의 적정 강성 선정이 필요함을 알 수 있다.

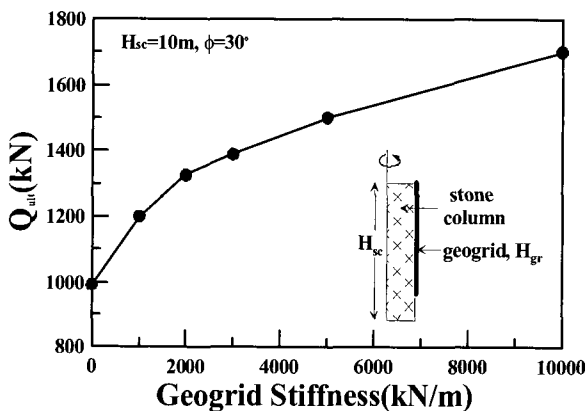
5. 결론

본 연구에서는 GRSC 공법 적용을 위한 기초연구로써 먼저 조립토 말뚝의 파괴 메카니즘과 지지력 산정방안을 고찰하였고, 2차원 유한요소 해석을 통하여 GRSC로 인한 지반보강효과에 대해 정리하였다. 이에 GRSC의 영향인자로 감쌈깊이, 지오그리드 강성, 쇄석기둥 직경, 지반조건에 대한 하중-침하 지지력 특성을 분석하였다. 본 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

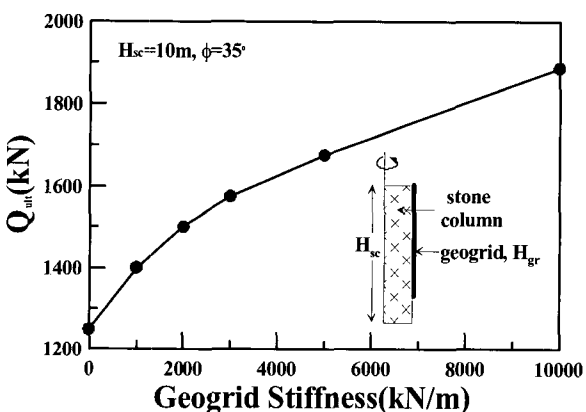
- (1) GRSC 공법 적용시 쇄석말뚝의 벌징파괴가 억제되므로 일반 쇄석기둥과 비교시 하중-침하 곡선과 쇄석기둥의 변형, 변위벡터로부터 지오그리드 보강으로 쇄석기둥의 수평변위가 감소하고 지지력이 증가함을 알 수 있다.
- (2) 경제적인 설계를 위한 지오그리드 보강시 본 연구에서 적용한 지반을 대상으로 임계감쌈깊이는 3.0D로 나타났으며, 쇄석기둥 직경과 대상지반조건의 영향을 고려하여 임계감쌈깊이를 결정하여야 할 것이다.
- (3) 쇄석기둥 시공 지반의 지지력은 지오그리드 강성에 대해 증가하는 양상을 보이나 일정수준의 강성을 기준으로 지지력의 증가율이 달라지고, 시공조건에 따라서도 지오그리드 강성에 대해 지지력이 변화하므로 경제적인 시공을 위해서는 시공지반에 요구되는 지지력에 대한 적정 강성의 지오그리드 선정이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2005년 건설교통부가 출연한 고강도 지오그리드 보강 Stone Column 공법의 실용화 연구(과제번호 : C105A1000017-05A0300-01700)와 한국과학재단의



(a) $\phi = 30^\circ$



(b) $\phi = 35^\circ$

그림 32. 지오그리드 강성에 따른 지지력

목적기초연구(과제번호 : R01-2004-000-10953-0)지원으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 이상익, 박용원, 임철용, 김일곤 (2005), "해상 대구경 팩 말뚝 공법의 압밀 및 지지력 특성에 관한 실험적 연구", *한국지반공학회 논문집*, 제21권, 제5호, pp.197-205.
2. ABAQUS users manual, Version 6.5 (2005), Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc., Pawtucket, Providence, R.I.
3. Aboshi, H. and Suematsu, N. (1985), "Sand compaction pile method: state-of-the-art paper", *In Proceedings of the 3rd International Geotechnical Seminar on Soil Improvement Methods*, Nanyang Technological Institute, Singapore, pp.38-44.
4. Al-Joulani, M. (1995), "Laboratory and analytical investigation of sleeve reinforced stone columns", Ph.D. Thesis, Carleton University, Canada.
5. Barksdale, R.D. and Bachus, R.C. (1983), "Design and construction of stone columns", U.S. Federal Highway Administration Report FHWA/RD-83/026.
6. Datye, K.R. and Nagaraju, S.S. (1975), "Installation and Testing of Rammed Stone Columns", *Proceedings, IGS Specialty Session, 5th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bangalore, India, pp.101-104.
7. Greenwood, D.A. (1970), "Mechanical Improvement of Soils Below Ground Surface", *Proc., Ground Engineering Conference, Institution of Civil Engineers*, pp.11-22.
8. 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.
9. Handy, R.L. (2001), "Does Lateral Stress Really Influence Settlement", *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127, No.7, pp.623-626.
10. Hughes, J.M. O., Withers, N.J., and Greenwood, D.A. (1975), "A Field Trial of Reinforcing Effects of Stone Columns in Soil", *Geotechnique*, Vol.25, No.1, pp.31-44.
11. 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.
12. Madhav, M.R. and Vitkar, P.P. (1978), "Strip Footing on Weak Clay Stabilized with a Granular Trench or Pile", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, pp.605-609.
13. Madhav, M.R., Iyengar, N.G.R., Vitkar, R.P., and Nandia, A. (1979), "Increased Bearing Capacity and Reduced Settlements Due to Inclusions in Soil", *Proc., International Conference on Soil Reinforcement: Reinforced Earth and Other Techniques*, Vol.II, Paris, pp.329-333.
14. Madhav, M.R. and Vanitha, L. (2006), "Analysis and Design of Granular Pile (Stone column) Reinforced Ground", *ATC-7 Workshop on Stone Column in Soft Deposits*, Busan, Korea.
15. 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.
16. Vesic, A.S. (1972), "Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, Vol.98, No.SM3, pp.265-290.

(접수일자 2006. 7. 13, 심사완료일 2007. 5. 25)