

지오그리드 보강 스톤컬럼 공법의 하중 지지 특성

Load-carrying capacity of geosynthetic encased stone columns

유충식¹⁾, Chungsik Yoo, 김선빈²⁾, Sunbin Kim, 이대영²⁾, Dae-Young, Lee, 박선준³⁾, Sun-Joon Park

¹⁾ 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.

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

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

SYNOPSIS : This paper presents the results of numerical investigation on support mechanism of geogrid-encased stone columns for use in soft ground. A number of cases were analyzed using a axial- and 3D stress-pore pressure coupled model that can effectively model construction sequence and drainage as well as reinforcing effects of geogrid-encased stone columns. The results indicated that the geogrid encasement tends to significantly improve the load carrying of a stone column. Also revealed was that such a confinement effect depends on encasement length and stiffness of geogrid. It is also shown that there exist critical encasement length and stiffness of geogrid for a given condition.

Keywords : bearing capacity, soft ground, stone column, geogrid, finite element method

1. 서론

연약지반에 철도, 도로, 항만시설물, 성토구조물 등이 건설될 경우 연약지반 개량을 위해 다양한 공법들이 사용되어 왔지만 많은 공사기간 소요, 환경문제 발생, 유지관리비용 증가로 인한 문제점들이 발생하고 있다. 또한 최근들어 동남아 및 일본에서 대규모 지진이 발생함에 따라 국내에서도 지반구조물 및 해안구조물에 대한 내진설계가 매우 중요해지고 있다. 최근 독일 등 유럽일부국가에서는 기존의 연약지반 처리공법의 단점을 보완하기 위해 토목섬유로 보강한 모래, 쇠석말뚝(stone column)공법의 활용도가 증가하고 있다. 특히 지오그리드 감쌌 쇠석말뚝(Geogrid Encased Stone Column, GESC) 공법은 쇠석이나 자갈과 같은 조립재로 채워진 기둥을 고강도 지오그리드로 감싸 쇠석기둥의 강도증진 및 변형을 감소시켜 지반 및 구조물을 보강하는 공법(Al-Joulani, 1995; Kempfert 등, 2002; Alexiew 등, 2003)으로 도로지반, 사면, 성토제방, 교대기초, 해상구조물 기초, 암거, 하수관거, 철도노반, 대규모 오일탱크 및 플랜트 기초, 연약지반 보강 등에 광범위하고 효율적으로 사용되고 있다.

국내에서도 쇠석말뚝의 하중지지력 증대 방안으로서 지오그리드 감쌌 쇠석말뚝(geogrid-encased stone column, GESC)공법에 대한 기초적인 연구가 수행되고 있는데, 먼저 GESC 공법에 대한 기초연구로서 이대영 등(2006)은 실험적 연구를 통해 GESC 공법의 하중지지력 발현 메카니즘을 살펴보았으며 임의 하중재하조건에서 GESC의 하중지지력 극대화는 상부 3D 정도의 벌징영역에 대한 감쌌으로 실현할 수 있다는 결과를 보고한 바 있다. 또한 유충식 등(2007, 2008)은 3차원 응력-간극수압 연계 유효요소해석 모델을 이용하여 GESC의 연약지반 성토 조건에서의 배수 및 침하제어 효과에 대한 기초적인 연구를 토대로 GESC 현장 적용성 확보를 위해 다양한 시공조건에 대해 DB를 구축하고 GESC 설계시 적용이 가능한 지오그리드 감쌌효과의 정량적 결과를 제안한 바 있다.

한편, 본 논문에서는 이상의 연구들에서 다루지 않은 GESC가 구조물의 기초로 적용되는 시공조건에

대한 지오그리드 감쌈효과의 정량적 결과를 제시하기 위한 목적으로 매개변수 연구를 수행한 내용을 다루었다. 매개변수 해석결과로부터 단일쇄석말뚝과 무리쇄석말뚝에 대한 지오그리드 감쌈효과를 분석하고, GESC 설계시 활용이 가능한 정량적 결과를 아울러 제시하였다.

2. GESC 적용 시공조건

2.1 대상 구조물

쇄석말뚝 공법은 개발초기에는 연약지반 개량공법으로 적용하기 보다는 상부 구조물을 지지하는 말뚝으로서 적용되었으며, 현재에도 동남아 등지에서는 교량의 교대지지용 말뚝기초로 적용되거나[그림 1(a)], 오일저장탱크 지지 말뚝기초로 적용되기도 한다(Al-Joulani, 1995). 본 연구에서는 이와 같이 상부 구조물의 지지말뚝으로 GESC가 연약지반에 시공되는 조건을 고려하여 지오그리드로 감싼 단일쇄석말뚝과 무리쇄석말뚝을 대상으로 유한요소해석을 수행하였다.

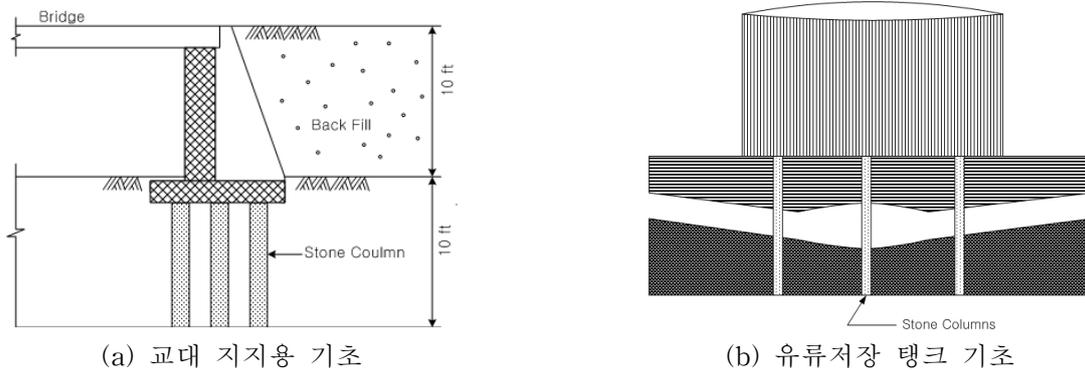


그림 1. 상부구조물 지지 말뚝으로서의 쇄석기둥 말뚝

2.2 시공조건

본 연구에서는 최근 우리나라에서 연약지반 개량 프로젝트 사례조사를 통해 GESC가 적용되는 대상 지반조건을 선정하였다. 10~20m 두께의 비배수전단강도(S_u)가 $S_u = 30 \sim 70 kPa$ 정도를 갖는 연약지반을 대상으로 선정하였다.

쇄석말뚝은 유럽 및 동남아 일부 국가 등에서 적용된 시공조건을 고려하여 말뚝직경을 800~1400mm 범위로 선정하였으며, 단일쇄석말뚝과 2×2 무리쇄석말뚝을 대상으로 하였다. 각각의 쇄석말뚝은 연약지반을 관통하여 하부 지지층에 지지되는 조건이며, 무리말뚝의 경우 말뚝 간격은 2D로 고려하였다.

GESC 공법의 핵심 부재라고 할 수 있는 지오그리드는 현재 국내에서 생산·활용되고 있는 폴리에틸렌(PET) 재질의 지오그리드를 대상으로 하였으며, 감쌈길이는 말뚝 두부에서 2D, 3D, ..., 쇄석말뚝 전체 감쌈 조건 등 종합적으로 검토가 되도록 하였다. 한편, 국내에서 생산되는 지오그리드에 대한 제품조사 결과 지오그리드의 축강성(J)은 1000~4000kN/m 범위로 조사된바 이러한 수치를 본 연구에 적용하였다. 표 1과 2에서는 이와같이 본 논문에서 조건으로 선정한 시공조건을 정리하고 있다.

표 1. 매개변수별 해석조건 - 단일 쇄석말뚝

매개변수	해석조건 범위
연약지반 두께, H_{clay}	10, 15, 20m
연약지반 압밀특성	$\lambda^1 = 0.2, \kappa^2 = 0.02, M^3 = 1, a_o^4 = 30/50/70, e^5 = 1.0$
쇄석말뚝 직경, D	0.8, 1.1, 1.4 m
지오그리드 강성, J	1000, 2500, 4000kN/m
지오그리드 감쌈길이 E_L	무보강, 2D, 3D, 4D, 8D, L(전체감쌈)

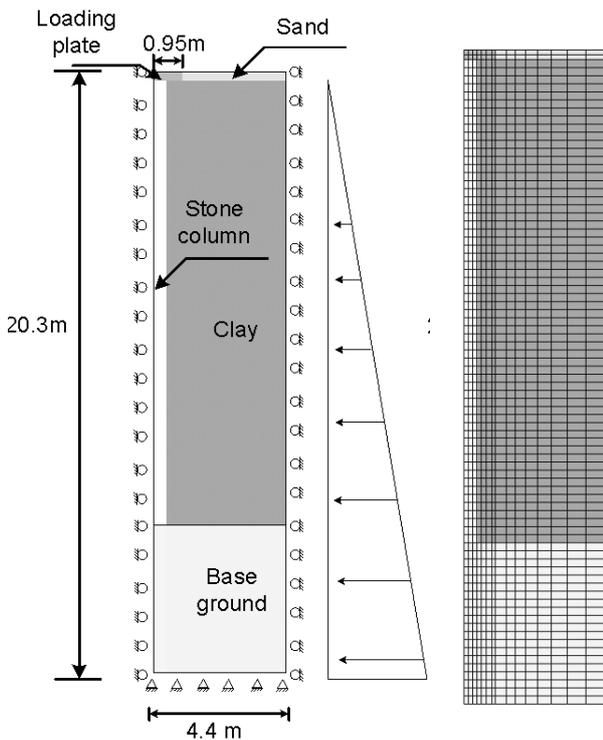
표 2. 매개변수별 해석조건 - 무리 쇄석말뚝

매개변수	해석조건 범위
연약지반 두께, H_{clay}	10, 15, 20m
연약지반 압밀특성	$\lambda = 0.2, \kappa = 0.02, M = 1, a_o = 30/50/70, e = 1.0$
지오그리드 강성, J	1000, 2500, 4000kN/m
지오그리드 감쌈길이 E_L	무보강, 2D, 4D, 8D, L(전체감쌈)
말뚝 수	2 × 2 (4본)
말뚝 간격	2 D

주) λ^1 =plastic slope, κ^2 =elastic slope, M^3 =critical stress ratio, a_o^4 =initial yield surface size, e^5 =void ratio

3. 유한요소해석 매개변수 연구

3.1 해석모델링



(a) 축대칭 해석모델 및 경계조건 (b) 해석 메쉬
그림 2. 단일 쇄석말뚝 해석 모델링

본 연구에서는 유한요소법에 근거한 다목적 구조/지반해석 상용프로그램 ABAQUS v6.7-1을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다.

먼저 단일쇄석말뚝에 대한 해석 모델링에 있어 말뚝 중심축을 기준으로 축대칭조건이 성립되므로 2차원 축대칭 모델링을 수행하였다. 그림 2에서 제시한 바와 같이 경계조건 설정에 있어 좌·우 측면은 수평방향 변위를 구속하였으며 바닥면은 수평, 연직방향 변위를 구속하였다. 한편, 연계해석에 필요한 초기 수리 경계조건 설정에 있어 초기지하수위를 점토층 상부에 위치하도록 하였으며, 재하하중에 의한 과잉간극수압은 점토층 상부에서의 간극수압이 '0'이 되도록 하여 소산되도록 하였다. 해석의 편의상 쇄석기둥은 지오그리드와 함께 점토층에 매입된 상태인 것으로 모델링하였다. 시공과정 모델링에서 재하하중은 1일 동안 재하되는 경우로 하였으며 하중재하 완료 후에는 압밀과정은 모델링에 포함시키지 않았다.

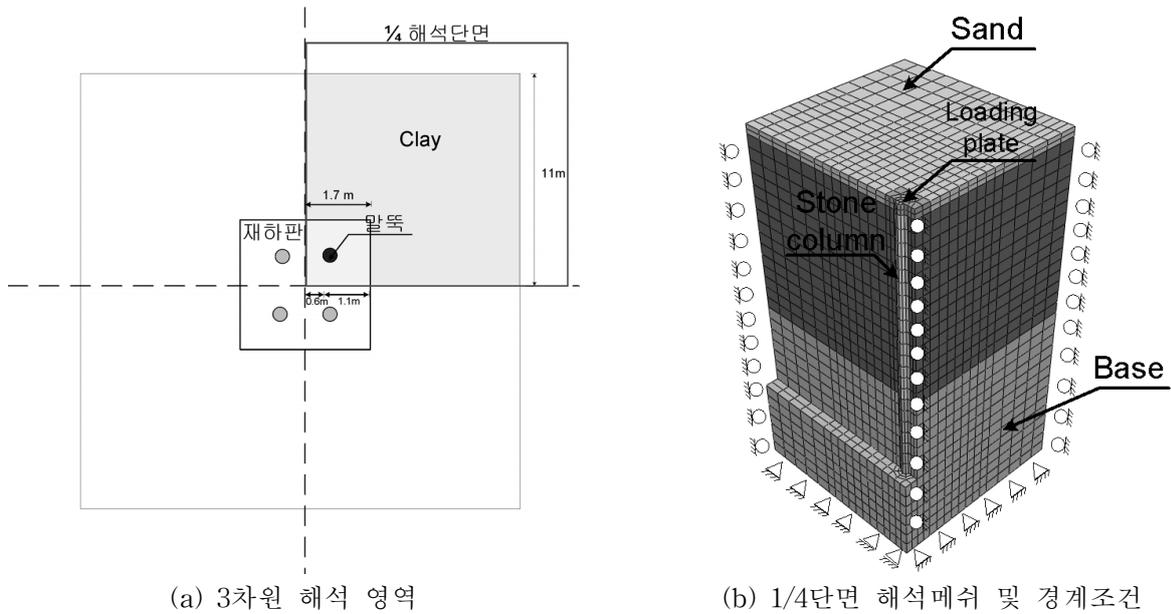
한편, 모델의 이산화에서 연약지반과 하부 지지층, 쇄석말뚝, 그리고 모래층은 축대칭 4절점 응력-간극수압 연계요소(CAX4P)로 모델링하였으며 점토체는 가감적분 요소(CAX4RP)로 모델링하였다.

다. 지오그리드에 대한 모델링은 멤브레인 효과로 인한 보강효과를 구현하기 위해 ABAQUS에서 제공하는 멤브레인 요소(MAX1)를 이용하였다.

또한 재료 모델링에 있어 연약지반은 Modified Cam-Clay(MCC) 모델을 적용하여 압밀시 연약점토지반의 침하특성이 모사되도록 하였으며, 쇄석말뚝은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 지오그리드 및 재하관은 탄성거동을 하는 것으로 가정하였다. 하중재하는 직경 1.92m의 재하관에 점진적으로 증가시키는 하중조절 방법을 적용하였다.

무리쇄석말뚝의 경우 다음의 그림 3(a)에서와 같이 말뚝 길이방향으로 두 축에 대해 대칭조건이 성립

되므로 1/4단면에 대한 3차원 모델링을 수행하였다. 모델의 이산화에서 연약지반과 하부 지지층, 쇄석 말뚝, 그리고 모래층은 8절점 가감적분 응력-간극수압 연계요소(C3D8RP)로 모델링하였으며, 지오그리드는 3차원 멤브레인요소(M3D4)를 이용하여 모델링하였다. 변위경계조건에 있어서 수평경계면은 각각 수평방향 변위를 구속하였으며, 바닥면은 수평 및 연직방향 변위를 구속하였다. 수리경계조건 및 재료 모델링은 앞서 단일쇄석말뚝과 동일하게 모델링하였다. 한편 말뚝에 작용되는 하중은 가로·세로폭이 1.7m인 재하판을 이용하여 점진적으로 하중이 증가하는 되도록 모델링하였다. 다음의 표 3은 본 연구에서 해석에 적용된 물성치를 정리하였다.



(a) 3차원 해석 영역

(b) 1/4단면 해석메쉬 및 경계조건

그림 3. 무리 쇄석말뚝 해석모델링

표 3. 해석에 적용된 특성치

구분	γ (kN/m ³)	E(kPa)	ν	c(kPa)	ϕ (deg)	k(cm/s)
모래	19	15,000	0.3	28	3	-
쇄석말뚝	15	40,000	0.3	40	5	1.16×10^{-2}
점토층	19	$\lambda = 0.2, \kappa = 0.02, M = 1, a_o = 30/50/70, e = 1.0$				1.16×10^{-6}
지오그리드	J=1000, 2500, 4000kN/m					

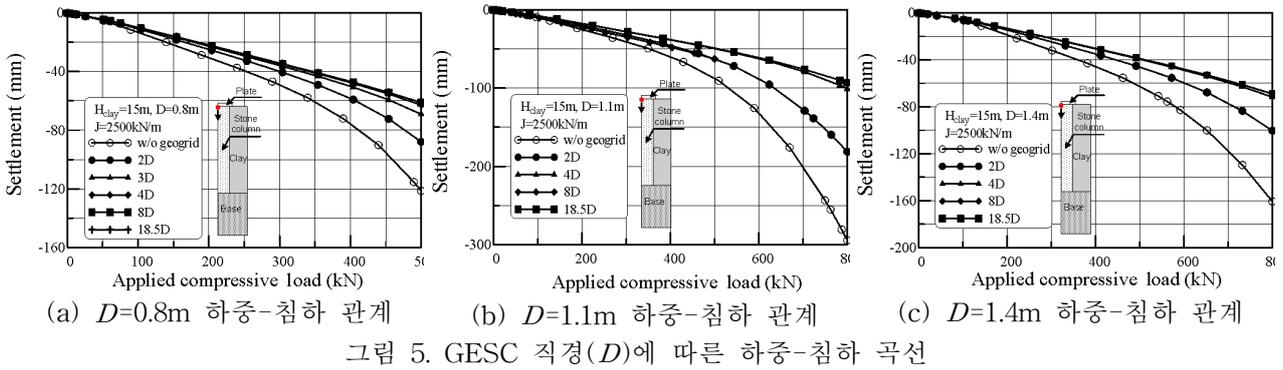
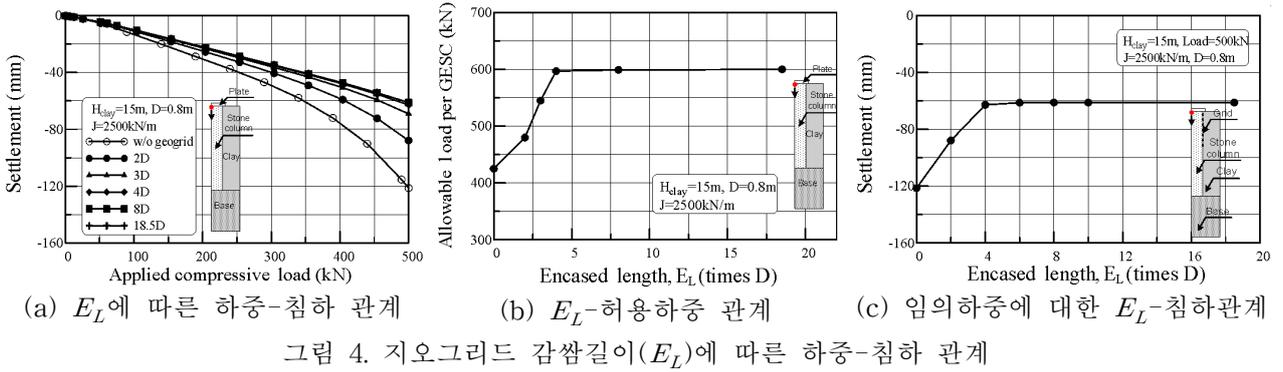
3.2 매개변수해석 결과 및 고찰

3.2.1 단일 쇄석말뚝의 지오그리드 감쌈 효과

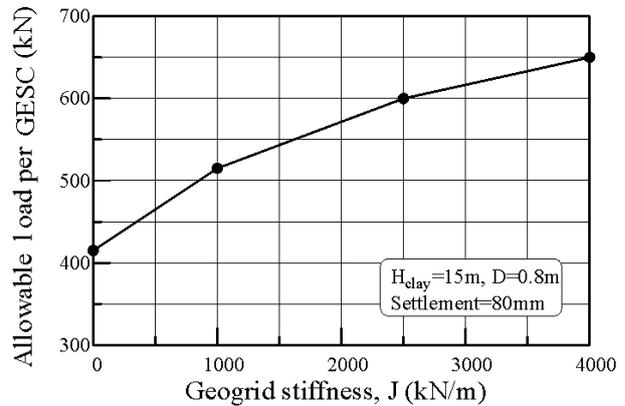
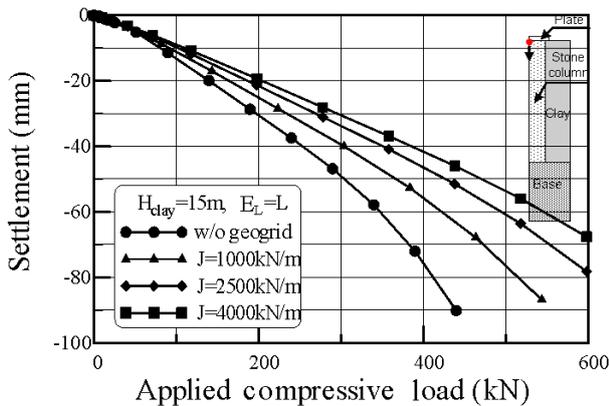
지오그리드 감쌈길이(E_L)에 따른 하중-침하관계를 보여주고 있는 그림 4를 관찰하면 보이는 바와 같이 감쌈길이가 증가할수록 임의하중에서의 침하가 감소되는 경향을 보여주고 있어 전반적으로 하중지력이 증가하는 경향을 잘 관찰할 수 있다. 한편, 극한하중과 임의하중(500kN)에서의 침하량을 토대로 감쌈길이의 영향을 나타내는 그림 4(b)와 그림 4(c)에서는 감쌈길이 4D 이상에서는 감쌈길이에 따른 차이를 보이지 않고 있어 임계감쌈길이는 $(E_L)_{cr} \approx 4D$ 정도로 간주할 수 있는 것으로 나타났다.

그림 5의 쇄석말뚝 직경(D) 변화에 따른 감쌈길이별 하중-침하 그래프를 관찰한 결과 지오그리드 감

얇길이가 4D 이상인 조건에서 전체 감쌈 보강시의 침하값에 수렴하는 경향을 나타내었다. 이 결과를 통해 쇄석말뚝의 직경에 따른 임계감쌈길이의 차이는 없는 것으로 나타났다.



임계 감쌈조건에 있어 지오그리드의 강성에 따른 쇄석말뚝의 하중지지력 변화경향을 고찰하기 위해 지오그리드 강성을 변화시켜 추가로 검토를 수행하였다. 그림 6과 7은 지오그리드 강성에 따른 하중-침하곡선 및 임의 침하량(80mm)에서의 재하하중을 나타내고 있는데, 보이는 바와 같이 지오그리드의 강성이 증가 할수록 하중-침하곡선의 기울기가 증가하며 임의 침하 수준에서의 재하하중이 증가하는 경향을 나타내어 지오그리드 강성 또한 중요한 설계변수인 것으로 분석되었다. 한편, 그림 7에서 지오그리드 강성 증가에 따라 0.1D 침하량 발생시 재하하중 증분은 점차 완만하게 나타나 임계강성으로서 2500~3000kN/m 정도를 취할 수 있는 것으로 나타났다.



GESG는 연약지반 개량을 위한 목적 뿐 아니라 구조물 기초로 활용될 경우에서도 응력집중비는 매우 중요한 설계인자가 될 수 있다. 그림 8과 그림 9는 각각 하중재하시 말뚝내 하중 및 인접 지반의 응력

발생을 지오그리드 무보강의 경우와 $J=2500\text{kN/m}$ 의 지오그리드로 전체를 감싼 경우에 대해 보여주고 있다. 이 그림에서 잘 관찰할 수 있는 바와 같이 지오그리드로 감쌈에 따라 쇄석말뚝으로 전달되는 하중은 증가하고(최대 30kN) 주변 지반에 증가되는 응력은 감소(최대 $30\sim 40\text{kPa}$)하는 경향을 보이고 있다. 이는 곧 지오그리드로 감쌈 보강을 실시함으로써 결국 응력집중비가 증가함을 나타내는 것으로서 GESC의 하중지지력 증가 메카니즘을 보여주는 결과라 할 수 있다.

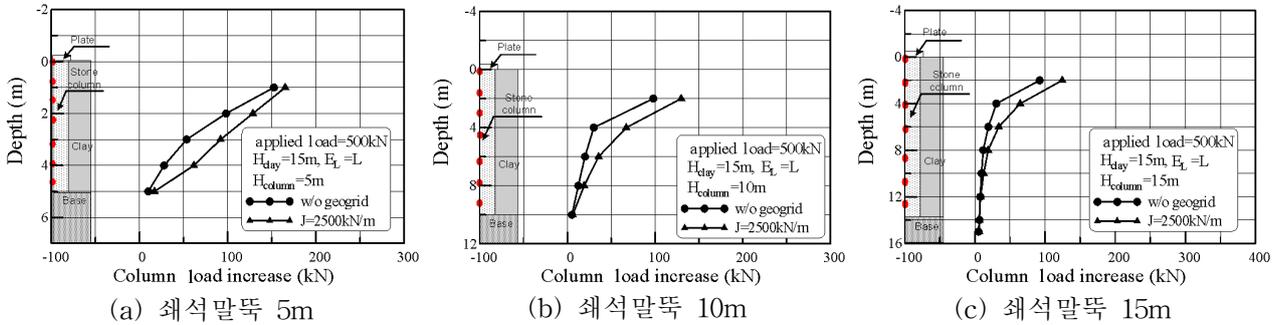


그림 8. 보강여부에 따른 쇄석말뚝 연직하중

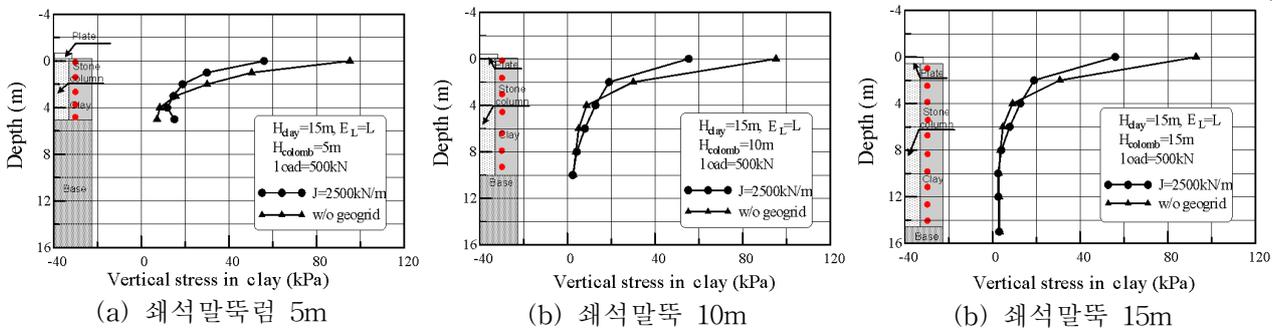


그림 9. 보강여부에 따른 쇄석말뚝 인접지반내 수직응력

3.2.2 무리 쇄석말뚝의 지오그리드 감쌈 효과

앞 절에서 검토된 지오그리드 임계감쌈길이 및 강성조건이 무리 쇄석말뚝에서 동일하게 적용되는지 여부를 확인하기 위하여 연약지반 두께 및 특성 등을 변화시켜 다양한 조건에 대해 검토해 보았다.

그림 10은 감쌈길이에 따른 하중-침하 관계를 연약지반 두께별로 보여주고 있다. 모든 곡선에서 나타나듯 감쌈길이 8D에서 값이 수렴하는 경향을 보였으며, 이러한 경향은 그림 12에서 보다 잘 관찰할 수 있는데, 침하량이 80mm에서의 감쌈길이-극한지지력과의 관계 그래프에서 감쌈길이 8D 이후 최대 감쌈길이의 결과에 수렴하는 경향이 두드러졌다.

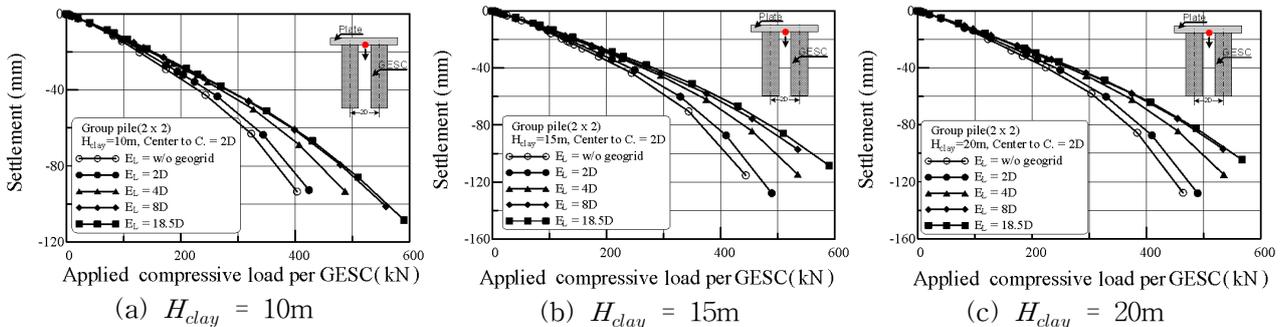


그림 10. 무리 쇄석말뚝의 E_L 에 따른 하중-침하 관계 곡선

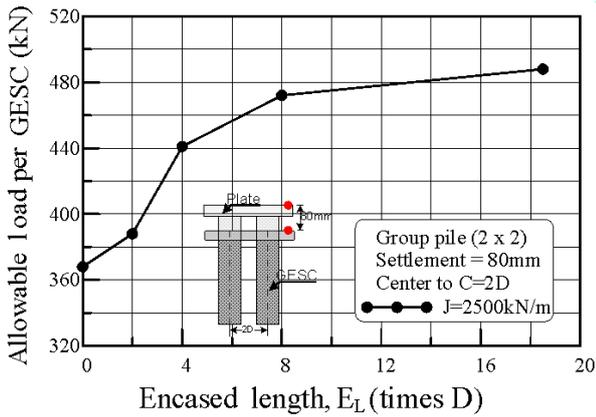


그림 12. E_L 에 따른 무리쇄석말뚝의 허용하중

이러한 결과는 단일 쇄석말뚝의 임계 감쌈길이 4D와는 다소 상이한 결과이며, 이는 단일 쇄석말뚝의 거동 매커니즘과 다르게 무리 쇄석말뚝의 넓어진 재하 면적에 의해 지반 내부의 전단면이 하향이동하기 때문으로 판단된다. 이러한 매커니즘은 그림 13에서 확인이 가능한데, 감쌈길이 4D에서 단일 쇄석말뚝과는 달리 여전히 별징이 나타나고 있는 반면 감쌈길이 8D에서는 시각적인 별징이 사라진 것을 볼 수 있다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 고려한 무리 쇄석말뚝 조건에서 필요한 임계감쌈 범위는 8D 부근임을 알 수 있으며, 아울러 말뚝 본수와 간격 및 기초 재하판 크기 등에 따라 이 결과는 달라질 수 있음을 확인하였다.

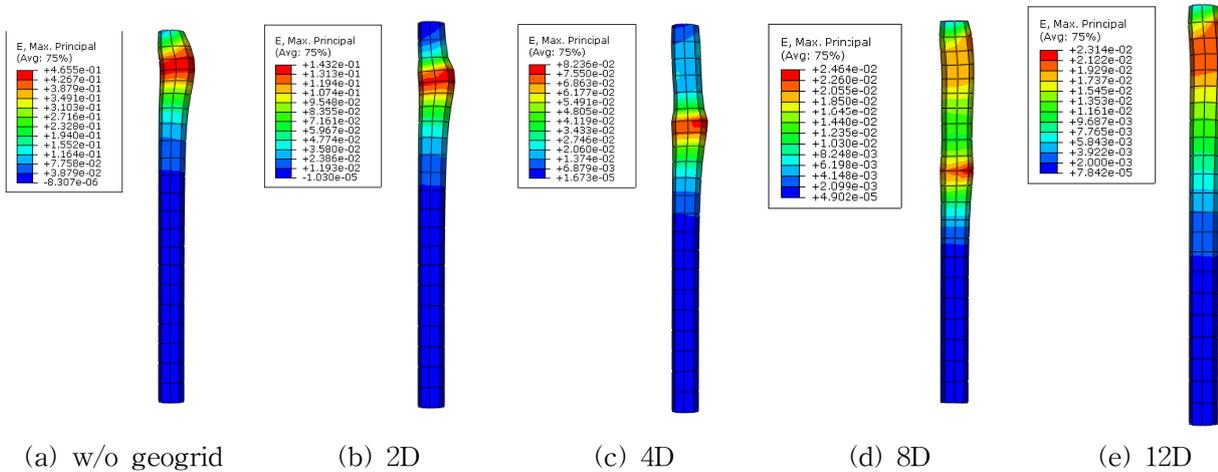
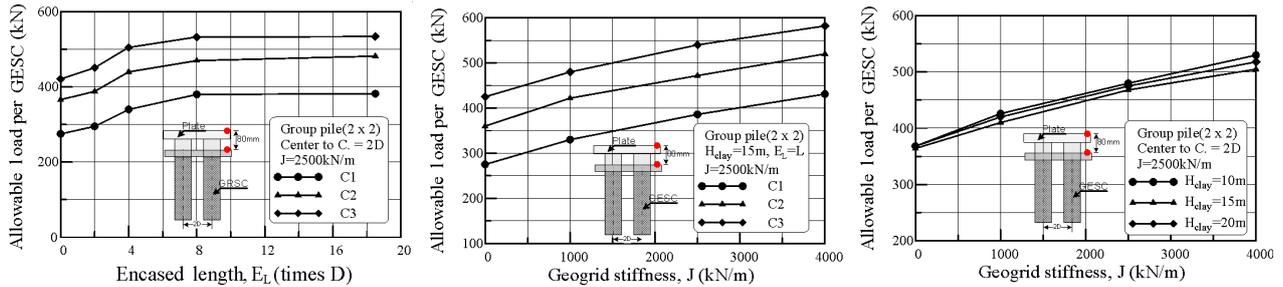


그림 13. 감쌈길이에 따른 2x2 무리 쇄석말뚝의 변형률 컨투어

그림 14는 연약지반 특성 및 두께 등의 시공조건 변화에 따라 지오리드의 임계 감쌈길이(E_L)와 강성(J)을 검토하기 위한 것으로서 각각의 시공조건에 대한 하중-침하 관계로부터 허용하중을 설계인자와 비교한 그림이다. 먼저, 그림 14(a)는 지오그리드 E_L -허용하중의 관계를 연약지반 특성별로 나타낸 것으로 연약지반 특성은 $C1$, $C2$, $C3$ 로 구분하였으며, 각각 점토의 비배수 전단강도는 30kPa, 50kPa, 70kPa 수준이다. 그림 14(a)의 결과를 살펴보면 연약지반 특성과 관계없이 감쌈길이 8D 이후부터는 전체 감쌈조건과 침하량이 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림 14(b)는 연약지반 특성과 지오그리드의 J 에 따른 하중-침하 곡선을 토대로 J 와 허용하중의 관계를 도시한 것이다. 이를 살펴보면 연약지반 강도가 커질수록 침하발생량이 작아 무리 쇄석말뚝의 허용하중이 증가하고 있는데 J 가 커질수록 말뚝의 허용하중 또한 증가하는 것으로 나타났다. 한편, J 가 증가함에 따라 말뚝의 허용하중 증가폭은 점차 감소해 2500~3000kN/m 범위를 임계치로 볼 수 있는 것으로 나타나 실무 적용시에는 경제성을 고려한 설계가 필요할 것으로 판단되었다.

그림 14(c)는 J 변화에 따른 하중-침하의 관계로부터 J -허용하중의 관계를 연약지반 두께별로 나타낸 것이다. 이를 관찰하면 앞서 기술한 바와 같이 J 가 커짐에 따라 무리 쇄석말뚝의 허용하중 또한 증가하는 것으로 나타났으나 연약지반 두께(H_{clay})에 따라서는 두드러진 특징을 발견할 수 없어 GESG 설계 시 주요 고려항목과는 무관한 것으로 평가되었다.



(a) 연약층 특성 및 E_L 에 따른 허용하중 (b) 연약층 특성 및 J 에 따른 허용하중 (c) H_{clay} 및 J 에 따른 허용하중
 그림 14. 무리 쇄석말뚝의 시공조건 변화에 따른 허용하중 비교

4. 결론

본 연구에서는 최근 들어 현장 적용이 활발해 지고 있는 쇄석말뚝 공법의 개량공법으로서 개발된 지오그리드 감쌈 쇄석말뚝(GESG) 공법에 대한 현장 적용성 확보를 위한 연구를 수행하였다. GESG가 구조물의 기초로 적용되는 시공조건에 대해 현장 적용성 확보를 위한 정량적 DB 구축을 목적으로 다양한 시공조건에 대한 해석을 수행하였으며, GESG 설계시 적용할 수 있는 지오그리드 감쌈효과에 대한 정량적 결과를 제시하였다. 이를 위해 상부 구조물의 하중을 지지하는 기초말뚝으로 GESG가 활용되는 가상의 현장조건에 대해 축대칭 모델 및 3차원 모델을 이용하여 응력-간극수압 연계해석을 수행하였다. 아울러 그 결과를 토대로 GESG 적용시 침하 및 응력 등을 종합적으로 분석하여 하중지지 특성을 고찰하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같이 요약된다.

- (1) 지오그리드의 강성이 증가할수록, 즉 구속효과가 증가할수록, 응력집중비가 최대 75%까지 증가하여 침하가 억제될 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서 GESG가 적용된 설계시 일반 쇄석말뚝에 비해 응력집중비를 상향조정하여 적용할 수 있을 것으로 판단되며 이는 곧 일반 쇄석말뚝 공법 대비 GESG 설치 물량을 감소시킬 수 있음을 의미해 높은 경제성 확보가 가능하다.
- (2) 점토층 두께 변화에 따른 하중-침하곡선을 분석한 결과 하중-침하 특성에 있어 점토층 두께는 거의 무관하게 나타났다. 이는 GESG의 지오그리드 보강효과 평가시 주 변수로서 쇄석말뚝의 직경과 간격 및 말뚝분수 등의 쇄석말뚝 설계조건과 지오그리드 강성 및 감쌈길이를 고려하여야 함을 나타내며 점토층 두께와는 무관하게 보강효과를 일정한 수치를 적용할 수 있음을 의미한다.
- (3) 임의 시공조건에서 지오그리드 보강효과를 극대화 할 수 있는 지오그리드의 임계감쌈길이 및 임계강성이 존재하며, 본 연구에서 고려한 단일 쇄석말뚝의 경우 말뚝의 직경과 길이, 연약지반의 특성 및 두께와 관계없이 임계 감쌈길이는 약 4D정도로 나타났으며, 지오그리드의 임계강성은 약 2500kN/m 정도로 나타났다. 한편, 무리 쇄석말뚝의 경우 임의 시공조건에 대해 임계강성은 단일 쇄석말뚝과 유사한 수준이나 임계 감쌈길이는 말뚝의 분수와 간격, 기초재하판의 크기 등에 따라 달라질 수 있다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 유충식, 송아란, 김선빈, 이대영(2007), 연약지반에 시공된 지오그리드 보강 쇠석기둥 공법의 유한요소 모델링, 한국지반공학회, 제23권, 10호, pp.133-150
2. 이대영, 김선빈, 송아란, 유충식(2006), 지오그리드 보강 Stone Column의 장·단기 하중 지지특성-유한요소해석을 통한 고찰, 2006한국지반공학회 봄 학술발표회
3. 이대영, 송아란, 유충식(2006), 지오그리드 보강 Stone Column의 파괴 메카니즘 및 지지력 특성 -축소모형실험을 통한 고찰, 한국지반공학회, 제22권, 10호, pp.121-129
4. ABAQUS users manual, Version 6.7. (2007). Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc., Pawtucket, Providence, R.I.
5. Brokemper, D., Sobolewski, R. & 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
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., Raithel, 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", 8th International Conference on Geosynthetics, pp. 1681-1684.
9. 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
10. 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,
11. 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.
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.347-37.
14. Tan, S.A. and S. Tjahyono, (2006), "Practical modelling of stone-column reinforced ground", KGS fall conference, Daegu, Korea, pp.291-311.