

# 구조물 기초하중 작용시 지오그리드 보강 쇄석말뚝의 하중지지 특성에 관한 수치해석 연구

## Numerical Investigation of Load Carrying Capacity of Geogrid-Encased Stone Columns under Foundation Load

유 충 식<sup>1</sup> Yoo, Chung-Sik

### Abstract

This paper presents the results of a numerical investigation on load carrying capacity of geogrid-encased stone columns to use as load carrying column(s) supporting a foundation load. A validated 3D stress-pore pressure coupled model that can effectively show rapid drainage capability of stone columns and encasement effect of geogrid was adopted and a parametric study was carried out on a number of influencing factors. It is shown that the geogrid encased stone columns can be effectively used as foundation load supporting columns in soft ground. The results of numerical investigation were presented so that the relationship between the load carrying capacity of geogrid-encased stone columns and the influencing factors can be identified. Practical implications of the findings are also discussed.

### 요 지

본 논문에서는 쇄석말뚝의 하중 지지력 향상을 위해 지오그리드를 이용하여 주면을 감싸는 일명 “지오그리드 보강 쇄석말뚝”의 하중지지특성에 관한 내용을 다루었다. 이를 위해 지오그리드 감쌈 쇄석말뚝의 근본적인 기능인 배수 효과와 지오그리드 보강 효과를 현실적으로 모사할 수 있는 3차원 응력-간극수압 수치해석 모델을 이용하여 재하하중에 대한 다양한 시공조건에 대한 매개변수 해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 그 결과, 기존의 연구에서 발표된 성토 하중 조건에서 확인할 수 있었던 장기 하중지지력 향상 효과와 유사하게 재하하중 조건에서도 지지력이 현저히 향상하는 결과를 확인할 수 있어 지오그리드 보강 쇄석말뚝 공법은 연약지반 성토시 적용성 뿐만 아니라 구조물 기초로도 활용성을 확보할 수 있는 것으로 검토 되었다. 해석 결과는 지오그리드 보강 쇄석말뚝의 하중지지력과 영향 인자간의 관계 설정이 가능하도록 제시하였으며 현장적용성 측면에서의 고찰을 시도하였다.

**Keywords :** Finite element method, Foundation, Geogrid, Load carrying capacity, Soft ground, Stone column, Stress-pore pressure coupled analysis

### 1. 서 론

쇄석말뚝 공법은 신속한 배수기능과 연직하중 지지 능력을 토대로 연약지반 개량공법으로서 활발히 적용

되고 있다. 즉, 쇄석이나 자갈로 시공되는 쇄석말뚝은 높은 배수성을 가지므로 급배수로 인한 압밀침하를 촉진할 수 있고 쇄석말뚝이 가지고 있는 높은 강성으로 인해 성토하중의 많은 부분을 지지하여 연약지반에 전

<sup>1</sup> 정회원, 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ., )

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

달되는 하중 감소효과를 발휘하여 침하제어 효과를 가지게 된다(유충식과 김선빈 2008). 이러한 쇄석말뚝에 연직하중이 작용할 경우의 주된 파괴 메카니즘은 벌징 파괴(bulging failure)로서 주로 구속력이 부족한 상부 2~3D(D=쇄석말뚝 직경)에서 발생하게 된다(Madhav et al. 2006). 최근 들어 쇄석말뚝의 상부 벌징현상을 제어하여 하중지지력 증가를 위한 방안으로서 쇄석말뚝의 주면을 지오그리드나 지오텍스타일로 감싸는 공법이(geosynthetic-encased stone column, GESC)적용되고 있으며 이에 관한 많은 연구가 진행된 바 있다(Kempfer et al. 1997, 2002; Raithel et al. 2001; Alexiew et al. 2003; Paul and Ponomarjow, 2004; Murugesan and Rajagopal 2006; 이대영 등 2006, 유충식 등 2007; 유충식과 김선빈 2008; Yoo and Kim 2009). 특히 최근 들어 유충식 등(2007) 및 유충식과 김선빈(2008)은 3차원 응력-간극수압 연계 유한요소해석 모델을 이용하여 GESC의 연약지반 성토 조건에서의 배수 및 침하제어 효과에 대한 기초적인 연구 및 현장 적용성 연구를 수행하여 설계시 적용할 수 있는 기초자료를 제시한 바 있다.

위의 연구들은 연약지반 개량에 적용되는 GESC 공법의 현장 적용성 확보를 위한 기초적인 연구들로서 매우 유익한 결과를 제시하고는 있으나 연약지반 성토하중 조건에 국한하여 연구를 수행하였으며 구조물의 기초로서의 GESC 적용성에 대한 연구는 수행되지 않고 있다. 당초 쇄석말뚝이 경량구조물의 말뚝 기초공법으로서 개발된 것을 감안할 때 구조물 기초로서의 GESC 공법의 적용성에 대한 연구가 필요하다고 하겠다. 이에 본 연구에서는 GESC가 구조물의 기초로 적용되는 시공조건에 대해 GESC의 하중 지지력을 고찰하고 지오그리드 감쌈효과의 정량적 결과를 제시하기 위한 목적

으로 유한요소해석을 이용한 매개변수 연구를 수행한 내용을 다루었다. 즉, 유한요소해석을 이용한 매개변수 연구 결과로부터 단일 쇄석말뚝과 균말뚝 형태로 시공되는 무리쇄석말뚝에 대한 지오그리드 감쌈효과를 분석하고, GESC 설계시 활용이 가능한 정량적 결과를 아울러 제시하였다.

## 2. GESC 적용 대상 구조물 및 적용 조건

### 2.1 대상 구조물

본 연구에서는 쇄석말뚝이 그림 1에서와 같이 상부 구조물을 지지하는 말뚝 기초로서 적용되는 조건을 고려하였다. 현재에도 동남아 등지에서는 교량의 교대지 지용 말뚝기초로 적용되거나(그림 1(a)), 오일 저장탱크 지지 말뚝기초로 적용되기도 한다. 본 연구에서는 이와 같이 상부 구조물의 하중을 지지하는 말뚝기초로서의 적용성 검토에 주목적을 두었으며 다양한 지오그리드 감쌈조건으로 시공되는 단일 말뚝 및 균말뚝을 검토대상으로 하였다.

### 2.2 적용조건

본 연구에서 고려한 지반 및 쇄석말뚝 조건은 우리나라 및 국외의 사례조사를 통해서 결정하였다. 즉, 대상 지반의 경우 최근 수행된 우리나라에서의 연약지반 개량 프로젝트 사례조사를 통해 쇄석말뚝 적용대상 조건인 두께 10~20m, 비배수전단강도( $S_u$ )가  $S_u = 30 \sim 70 kPa$  정도를 갖는 연약지반을 대상으로 선정하였다. 한편, 쇄석말뚝 제원은 유럽 및 동남아 일부 국가 등에서 적용된 시공조건을

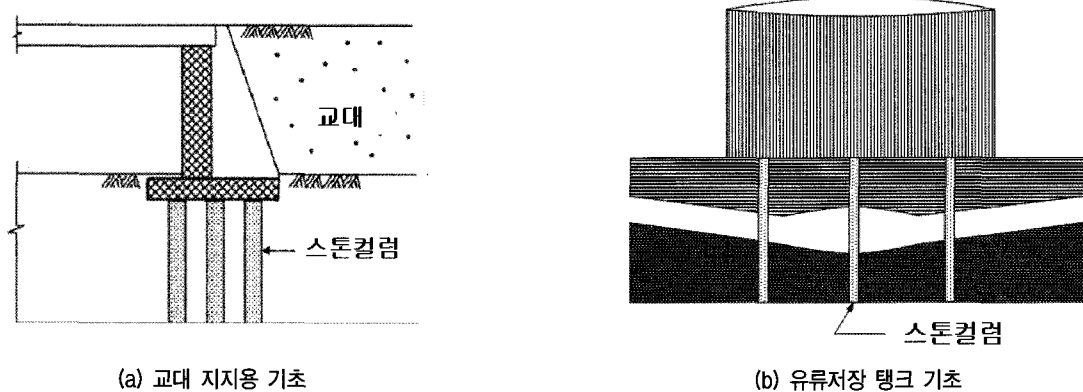


그림 1. GESC 적용대상

고려하여 800~1400mm의 직경을 갖는 쇄석말뚝에 대해 단일말뚝 혹은 2×2 군말뚝 형태로 시공되는 시공조건을 대상으로 하였다. 이때 쇄석말뚝은 연약지반을 관통하여 하부 지지층에 지지되는 조건을 고려하였으며 군말뚝의 경우 말뚝 간격은 2D(D=쇄석말뚝 직경)로 고려하였다.

GESC 공법의 핵심 부재라고 할 수 있는 지오그리드는 국외 적용 사례를 고려하여 축강성  $J = 1000 \sim 4000 \text{ kN/m}$  범위의 폴리에틸렌(PET) 재질의 지오그리드가 적용되는 것으로 가정하였으며 주요 설계인자인 감쌈길이는 말뚝 두부로부터 다양한 길이로 감싸는 조건을 검토하여 지오그리드 설치에 따른 하중 지지력 변화 특성을 검토할 수 있도록 하였다. 한편, 본 연구에서는 GESC의 하중-변위 거동에 주안점을 두고 지오그리드의 축강

성( $J = E \cdot A$ , 여기서  $E =$  지오그리드 탄성계수,  $A =$  단면적)을 지오그리드의 역학적 특성 지수로서 사용하였다. 표 1에서는 본 연구에서 고려한 시공조건을 정리하고 있는데 보이는 바와 같이 다양한 연약지반 두께 및 쇄석말뚝 직경, 그리고 지오그리드 보강 조건을 고려하여 현실적인 시공조건의 고려가 가능하도록 하였다.

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 해석 모델

본 연구에서 고려한 쇄석말뚝 시공조건에 있어 하중 재하시에는 연약지반내 과잉간극수압이 발생하고 시간

표 1. 매개변수별 해석조건

매개변수	해석조건 범위
연약지반 두께, $H_{clay}$	10, 15, 20m
연약지반 압밀특성 (수정 Cam-clay 모델 정수)	$\lambda^{(1)} = 0.2$ , $\kappa^{(2)} = 0.02$ , $M^{(3)} = 1$ , $a_o^{(4)} = 30/50/70 \text{ kPa}$ , $e^{(5)} = 1.0$
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)
말뚝조건	단일말뚝 및 2×2 무리말뚝

주)  $\lambda^{(1)}$ =plastic slope,  $\kappa^{(2)}$ =elastic slope,  $M^{(3)}$ =critical stress ratio,  $a_o^{(4)}$ =initial yield surface size,  $e^{(5)}$ =void ratio

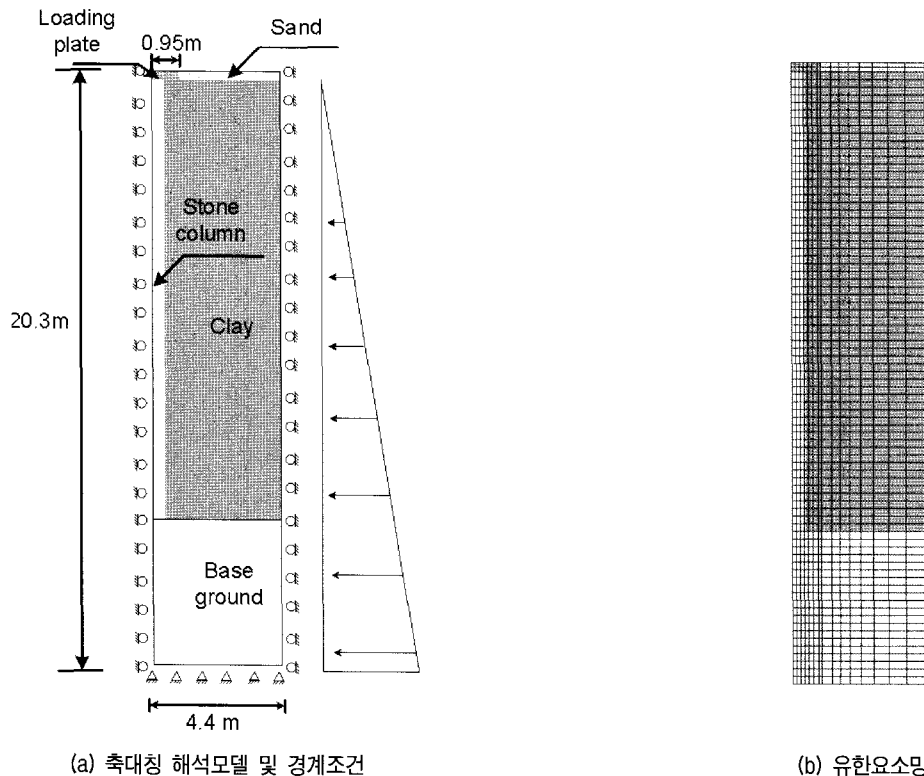


그림 2. 단일쇄석말뚝 모델링

경과에 따른 과잉간극수압 소산 및 지반내 유효응력 증가 현상이 발생하므로 이러한 압밀 현상을 효율적으로 모델링하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 지반-지하수 상호작용 및 시공과정을 응력-간극수압 연계해석 측면에서의 모델링이 효율적으로 수행될 수 있는 범용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus(Abaqus 2007)를 사용하였다.

본 연구에서는 단일 GESC의 및 2×2 GESC의 하중 지지 메카니즘 고찰에 두고 해석 모델을 설정하였다. 그림 2 및 그림 3은 각각 단일말뚝 및 2×2 군말뚝 조건에 대한 GESC 유한요소해석 모델을 보여주고 있다. 먼저 단일 쇄석말뚝의 경우 그림 2에서와 같이 말뚝 중심축을 기준으로 축대칭조건이 성립되므로 2차원 축대칭 모델링을 수행하였다. 한편, 군말뚝의 경우 2차원해석이 불가능하므로 3차원 모델을 채택하고(그림 3) 그림 3(a)에서와 같이 말뚝 길이방향으로 두 축에 대해 대칭조건이 성립되므로 1/4단면에 대한 3차원 모델링을 수행하였다. 한편 측면경계는 단일말뚝의 경우 말뚝 중심에서 말뚝직경의 약 10배 정도 되는 거리에 그리고 군말뚝의 경우 15배 정도 되는 위치에 설치하였다.

변위 경계조건 부여에 있어 좌·우측면은 수평방향 변위를 구속하였으며 바닥면은 수평, 연직방향 변위를 구속하였다. 한편, 연계해석에 필요한 수리 경계조건의 설정에 있어 초기지하수위를 점토층 상부에 위치하도록 하였으며, 점토층 상부에서의 간극수압이 '0'이 되도록

하여 과잉간극수압이 소산되도록 하였다. 해석의 편의상 쇄석기둥은 지오그리드와 함께 점토층에 매입된 상태인 것으로 모델링하였다. 시공과정 모델링에서 재하중은 1일 동안 재하 되는 경우로 하였으며 하중재하 완료 후의 압밀과정은 모델링에 포함시키지 않았다. 따라서 쇄석말뚝의 배수능력을 고려할 때 본 해석에서 얻어지는 하중지지력은 비배수조건과 배수조건의 사이에 놓이는 부분 배수조건에서의 하중지지력으로 간주할 수 있을 것으로 판단된다. 한편 재료 모델링에 있어 연약지반은 수정(modified) Cam-Clay(MCC) 모델을 적용하여 압밀시 연약점토지반의 침하특성이 모사되도록 하였으며, 쇄석말뚝은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 지오그리드 및 재하판은 탄성기둥을 하는 것으로 가정하였다. 하중재하는 재하판에 점진적으로 증가 시키는 하중조절 방법을 적용하였다.

한편, 모델의 이산화에서 단일말뚝의 경우 연약지반과 하부 지지층, 쇄석말뚝은 축대칭 4절점 응력-간극수압 연계요소(CAX4P)로 모델링하였으며 지오그리드는 멤브레인 효과로 인한 보강효과를 구현하기 위해 멤브레인 요소(MAX1)를 이용하였다. 군말뚝의 3차원 모델의 경우 연약지반과 하부 지지층, 쇄석말뚝은 8절점 가감적분 응력-간극수압 연계요소(C3D8RP)로 모델링하였으며, 지오그리드는 3차원 멤브레인요소(M3D4)를 이용하여 모델링하였다. 한편, 본 해석조건의 경우 GESC

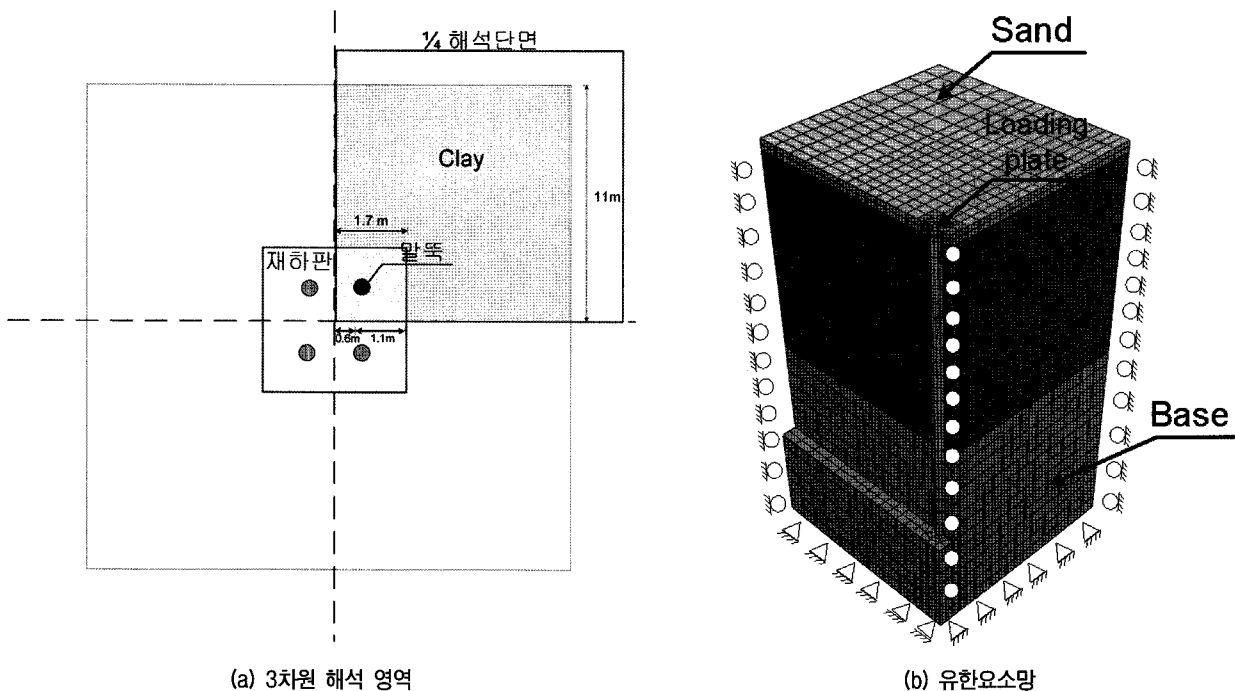


그림 3. 2×2 군쇄석말뚝 모델링

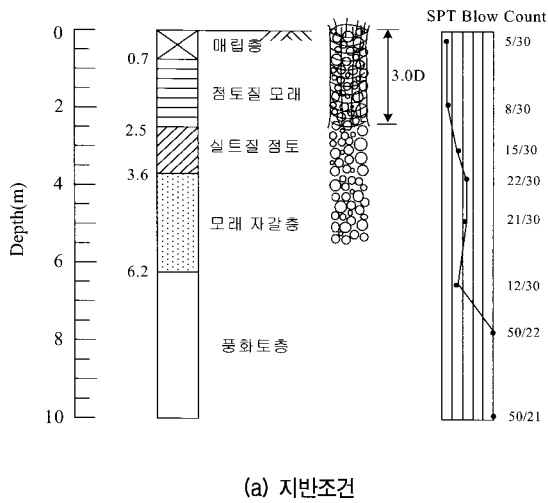
표 2. 해석에 적용된 특성치

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

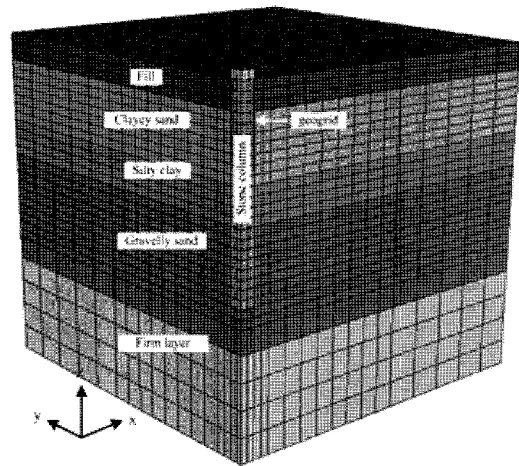
와 인접 연약지반에 연직하중이 작용하는 조건이므로 연직방향으로 일체 거동하는 것으로 간주하고 지오그리드와 쇄석말뚝, 그리고 지오그리드와 연약지반 경계부에 별도의 경계요소는 적용하지 않았다. 지오그리드는 평면에서의 압축저항(in-plane compressive resistance)이 미미하므로 이러한 가정은 타당할 것으로 판단되나 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 표 2는 본 연구에서 해석에 적용된 물성치를 정리하였다.

### 3.2 해석모델 검증

본 연구에서 채택한 유한요소해석 모델의 검증을 위해 제한적이기는 하나 이대영 등(2007)의 연구에서 발표한 GESC 현장재하 시험 결과를 이용하여 모델 검증을 시도하였다. 현장재하시험은 쇄석말뚝공법이 적용되는 경전철 구간(이대영 등 2007)에서 수행하였으며 단일말뚝조건에 대한 재하시험이 수행되었다.

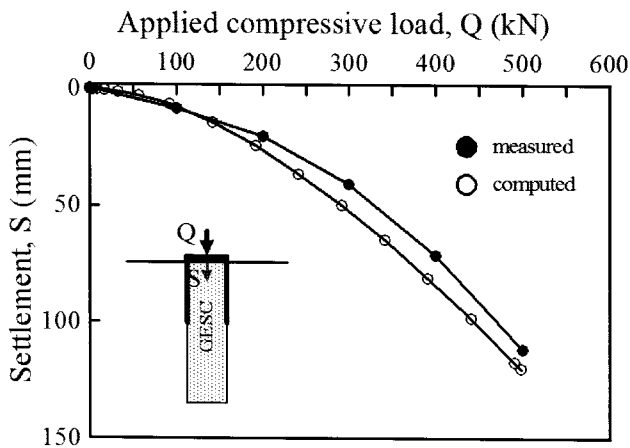


(a) 지반조건

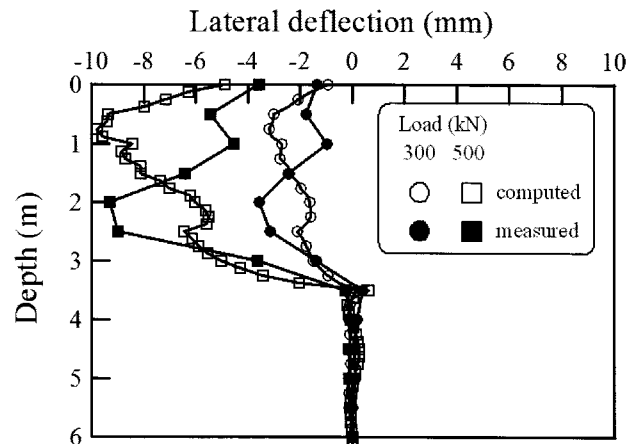


(b) 해석 모델

그림 4. 재하시험 지반조건 및 해석 모델



(a) 하중-침하



(b) 수평변위

그림 5. 해석모델링 결과 비교

현장재하시험은 그림 4(a)에서와 같이 모래질 지층과 연약점토층으로 구성된 다층지반에서 수행되었으며 5m 길이의 직경 0.8m 쇄석말뚝을 강성  $J = 2500kN/m$ 의 지오그리드로 상부 3D 구간을 감싼 GESC에 대해 정재하시험 형태의 재하시험을 수행하였다. 그림 4(b)는 해석에 적용된 해석 모델을 보여주고 있다. 구체적인 지반 조건과 시험조건은 이대영 등(2007)의 논문에서 자세히 기술되어 있다.

그림 5에서는 재하시험 결과와 해석결과를 하중-침하 곡선 및 수평변위 곡선을 이용하여 비교하고 있다. 보이는 바와 같이 유한요소해석 모델링 결과는 다소의 차이는 있으나 유한요소해석에서 모델링할 수 없는 현장시험 중 발생하는 여러 가지 상황과 지반의 불확실성, 시험 중 오류 등을 고려할 때 해석 결과는 재하시험 결과의 비교에 있어 정량적·정성적 측면에서 잘 일치하는 것으로 나타나 본 연구에서 채택한 해석 모델은 타당한 것으로 분석되었다.

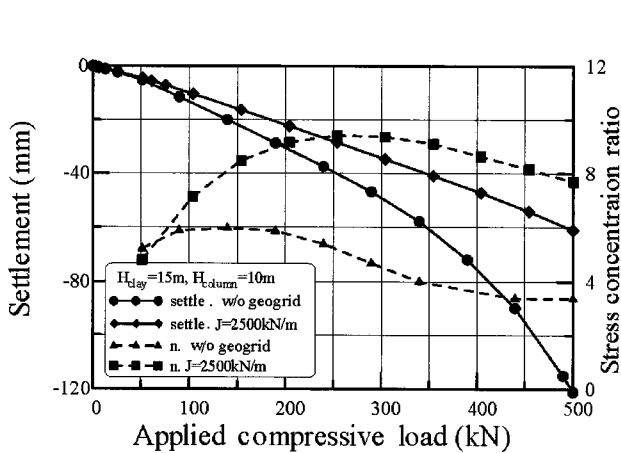
#### 4. 단일 GESC 하중지지 특성

##### 4.1 하중-침하 특성

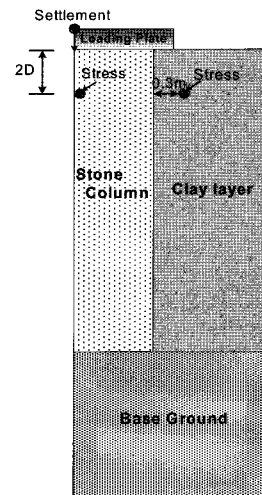
그림 6은 일반 쇄석말뚝과  $J = 2500kN/m$ 의 지오그리드로 쇄석말뚝 전 길이를 감싼 GESC의 하중-침하 및 하중-응력집중비 곡선을 비교하고 있다. 여기서 침하는 말뚝 두부에서의 침하이며 쇄석말뚝 연직응력 대비 지반 내 연직응력을 나타내는 응력집중비(Stress Concentration

Ratio, 이하  $n$ 으로 표기함)는 말뚝 상부에서부터 2D 되는 지점에서 측정하였다. 그림 6에서 관찰할 수 있는 바와 같이 일반 쇄석말뚝의 경우에 비해 GESC의 하중-침하 곡선의 기울기가 30~40%이상 증가하는 것으로 나타나 현저히 향상된 하중지지력을 발휘하고 있음을 관찰할 수 있다. 예를 들어 400kN 재하시 일반 쇄석말뚝의 경우 약 76mm 정도의 침하가 발생하나 GESC의 경우 47mm 정도의 침하가 발생하는 것으로 나타나 성토 하중 조건과 마찬가지로 지오그리드 감쌈으로 인해 쇄석말뚝의 하중지지력을 크게 증가시킬 수 있는 것으로 검토되었다. 한편, 응력집중비의 경우에 있어서도 GESC가 최대  $n = 10$  정도의 값을 보이거나 일반 쇄석말뚝의 경우  $n = 6$ 의 값을 보이고 있는데 이는 GESC가 더 많은 재하하중을 분담함을 의미하는 것으로서 유충식과 김선빈(2008)이 언급한 바와 같이 GESC의 지오그리드 감쌈효과로 인한 쇄석말뚝의 강성증가 효과로 더 큰 하중을 지지하기 때문으로 이해할 수 있다.

한편, 전체적인 경향을 살펴보면 일반 쇄석말뚝의 경우 재하 초기에 하중이 증가함에 따라 침하와 응력집중비는 점차적으로 증가하나 재하 하중이 약 250kN을 넘어 서면서 침하는 이전보다 급격히 증가하게 되고 그와 동시에 응력집중비는 4~6 범위 내에서 점차 수렴하다 감소하는 경향을 나타내는 경향을 보이는데 이는 쇄석기둥의 벌짐으로 인해 침하증가와 응력집중비 감소 현상이 동시에 일어나기 때문으로 판단된다. 반면  $J = 2500kN/m$ 의 지오그리드로 감싸진 GESC의 경우 지오그리드 무보강 경우(w/o geogrid)에서 관찰할



(a) 하중-침하-응력집중비 관계



(b) 침하 및 응력 측정 지점

그림 6. GESC 하중-침하-응력집중비 변화 경향

수 있는 급격한 침하 감소 현상은 나타나지 않으며 응력 집중비는 6~10 사이에 분포하는 것으로 나타나 일반 쇄석말뚝에 비해 재하하중의 많은 부분을 쇄석말뚝이 지지하고 있음을 알 수 있는데 이러한 결과는 지오그리드 감쌈에 의한 보강효과를 단적으로 나타내는 것으로서 하중재하 조건에서도 GESG가 매우 효율적으로 적용될 수 있음을 보여주는 결과라고 하겠다.

그림 7과 그림 8은 각각 다양한 길이의 쇄석말뚝에 대해 하중재하시 말뚝내 하중 및 인접 지반의 연직응력 발생 경향을 일반 쇄석말뚝과 전체감쌈 GESG( $J=2500\text{ kN/m}$ ) 경우에 대해 보여주고 있다. 이 그림에서 잘 관찰할 수 있는 바와 같이 GESG의 말뚝내 연직하중이 일반 쇄석말뚝에 비해 최대 30kN 이상 크게 발생하고 주변 지반에 전달되는 응력은 최대 30~40kPa 작게 발생하는 경향을 보이고 있다. 이는 곧 지오그리드로 감쌈 보강을 실시함으로써 결국 응력집중비가 증가함을 나타내는 것으로서 GESG의 하중지지력 증가 메카니즘을 보여주는 결과라 할 수 있다.

#### 4.2 감쌈조건에 따른 지지력 변화 경향

그림 9는 직경  $D=0.8\text{m}$ 의 GESG에 있어 지오그리드

감쌈길이( $E_L$ )에 따른 하중-침하관계를 보여주고 있다. 이 그림에서 관찰할 수 있는 바와 같이 감쌈길이가 증가할수록 임의하중에서의 침하가 감소되는 경향을 보여주고 있어 성토하중 조건과 유사하게(유충식과 김선빈 2008) 전반적으로 하중지지력이 증가하는 경향을 잘 관찰할 수 있다. 한편, 그림 9(b)와 9(c)에서는 GESG의 극한하중과 임의하중(500kN)에서의 침하량을 토대로 감쌈길이가 하중지지력에 미치는 영향을 보여주고 있다. 여기서의 극한하중은 쇄석말뚝 직경의 10%의 침하를 유발시키는 하중으로 산정하였다. 이 그림들에서 관찰할 수 있는 바와 같이 극한하중 및 임의하중 조건 공히 감쌈길이 4D 이상에서는 거의 일정한 크기의 극한하중 혹은 임의하중을 보이고 있다. 이는 감쌈길이 4D 이상으로 쇄석말뚝을 감싸더라도 더 이상의 지지력 향상 효과를 볼 수 없음을 의미하는 것으로서 임계감쌈길이는  $(E_L)_{cr} \approx 4D$  정도로 간주할 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 임계감쌈길이는 연약지반 성토하중조건에 대해 임계감쌈길이로서  $(E_L)_{cr} \approx 2 \sim 3D$ 를 보고한 유충식과 김선빈(2008)의 연구결과 보다 35~50% 큰 값으로서 GESG의 임계감쌈길이는 하중조건(성토하중 혹은 재하하중)에 따라 달라 질 수 있음을 의미한다고 하겠다.

한편, 그림 10은 쇄석말뚝 직경( $D$ ) 변화에 따른 감쌈

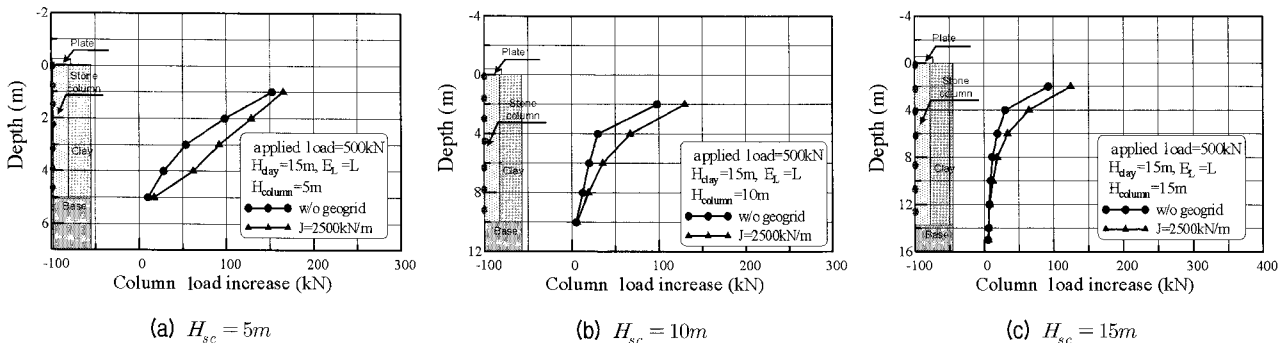


그림 7. 전체감쌈 GESG vs. 일반쇄석말뚝(쇄석말뚝 연직하중)

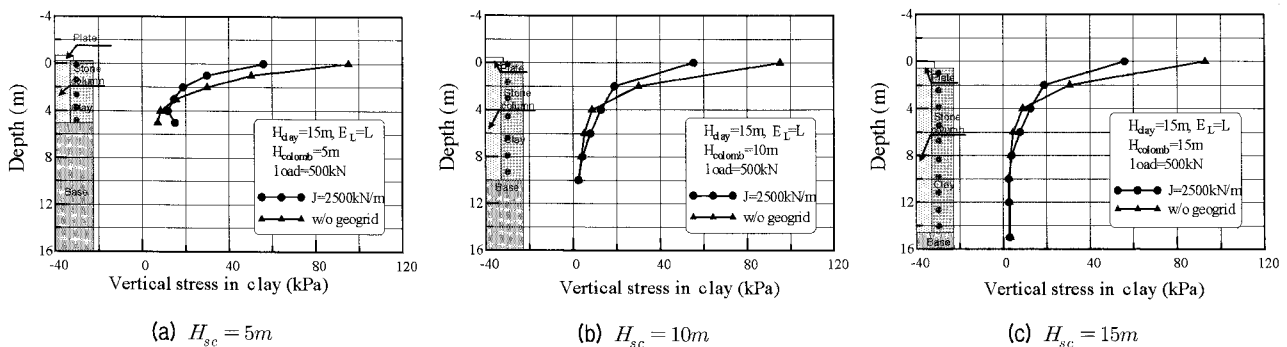
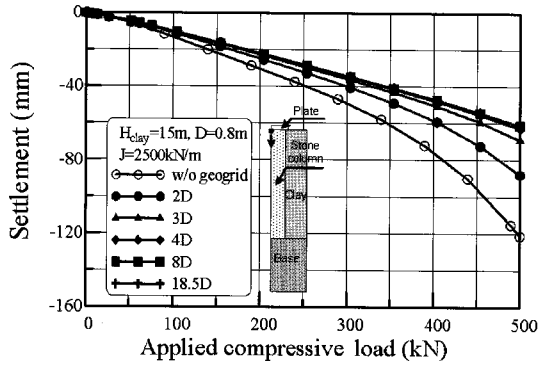
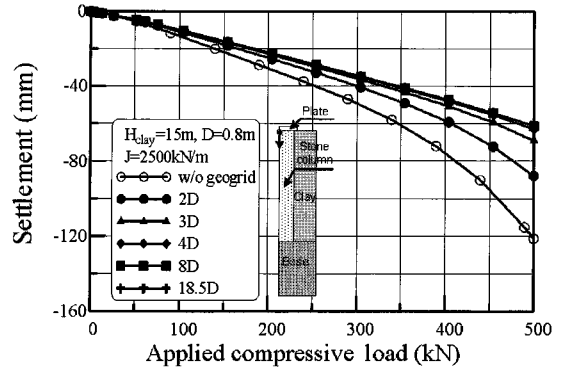


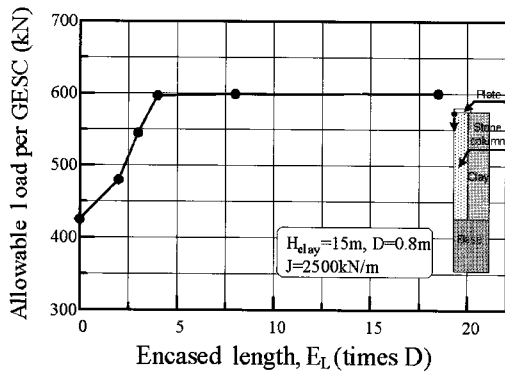
그림 8. GESG vs. 일반쇄석말뚝(지반내 연직응력)



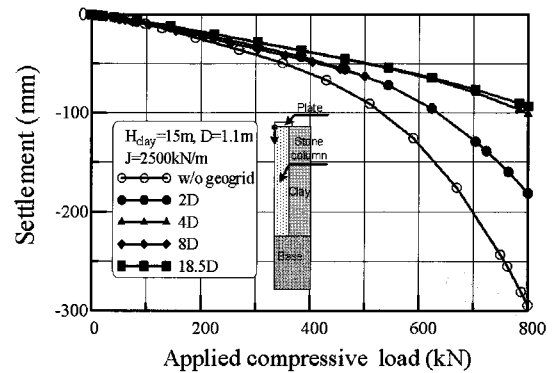
(a)  $E_L$ 에 따른 하중 - 침하 관계



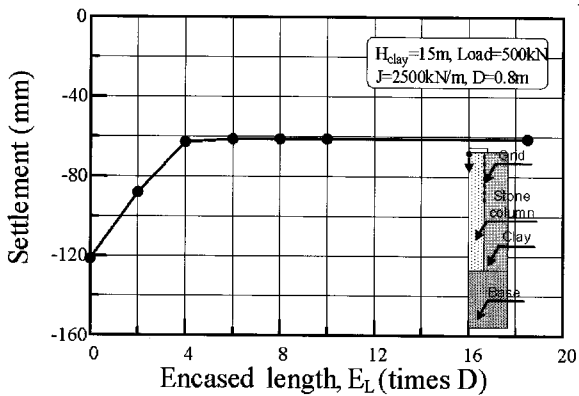
(a)  $D = 0.8m$



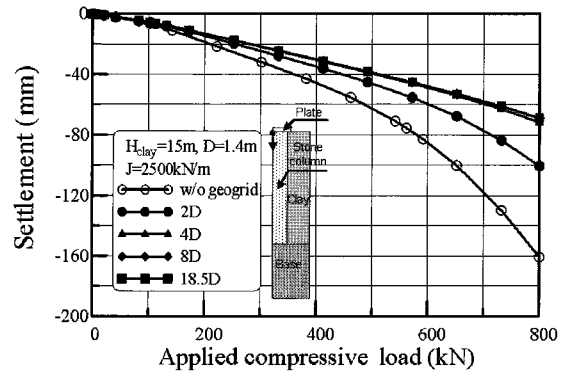
(b)  $E_L$  - 극한하중 관계



(b)  $D = 1.1m$



(c) 임의 하중에 대한  $E_L$  - 침하관계



(c)  $D = 1.4m$

그림 9. 지오그리드 감쌈길이( $E_L$ )에 따른 하중-침하 관계

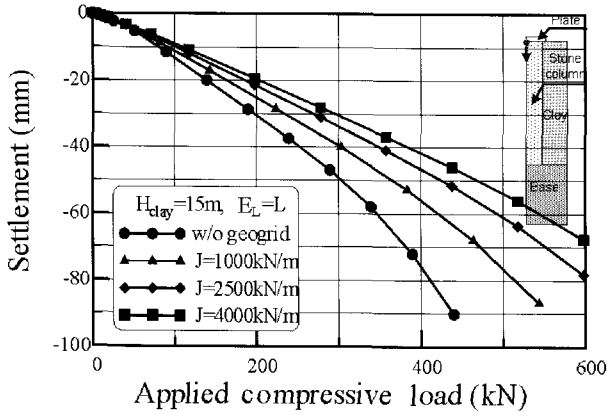
그림 10. GESG 직경( $D$ )에 따른 하중-침하 곡선

길이에 따른 하중-침하 특성을 검토한 결과로서 보이는 바와 같이  $D=0.8m$  조건과 같이 감쌈길이에 따른 하중-침하 특성 변화가 거의 동일한 경향을 보이고 있어 재하하중 조건의 GESG의 임계감쌈길이는 쇄석말뚝 직경에 관계없이  $(E_L)_{cr} \approx 4D$ 을 취할 수 있는 것으로 나타났다.

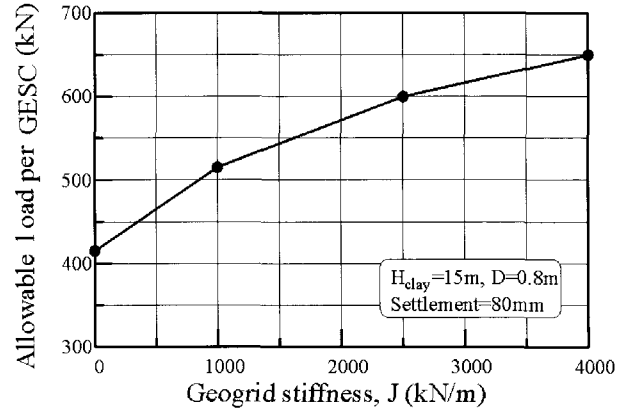
그림 11은  $D=0.8m$ 의 GESG에 있어 지오그리드 강성에 따른 하중-침하곡선 및  $0.1D=80mm$  침하량을 유발시키는 재하하중 변화 경향을 보여주고 있다. 그림 11(a)에서 보이는 바와 같이 지오그리드의 강성이 증가

할수록 하중-침하곡선의 기울기가 증가하며 임의 침하 수준에서의 재하하중이 증가하는 경향을 보이고 있어 연약지반 성토하중조건과 마찬가지로 지오그리드의 강성에 따라 하중-침하특성이 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다. 한편, 그림 11(b)에 제시되어 있는 지오그리드 강성 증가에 따라  $0.1D$  침하량 발생시 재하하중 변화 경향을 살펴 볼 때 지오그리드의 강성 증가에 따라 재하하중 증가율이 다소 감소하기는 하나 뚜렷한 임계치 도달 경향은 보이지 않는 것으로 나타났다.



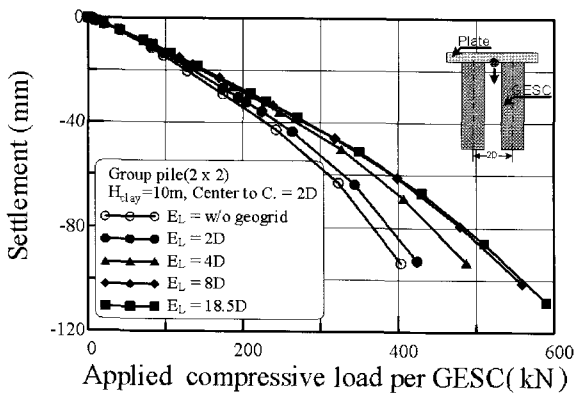


(a) 하중-침하 곡선

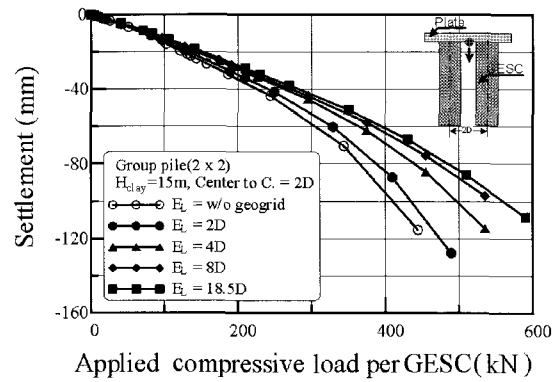


(b) 0.1D 침하시 재하하중

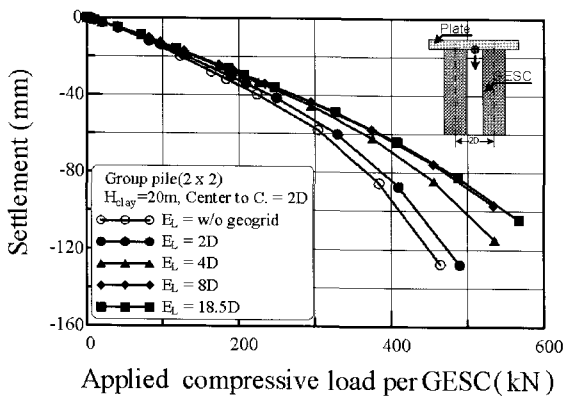
그림 11. 지오그리드 강성에 따른 하중지지 특성



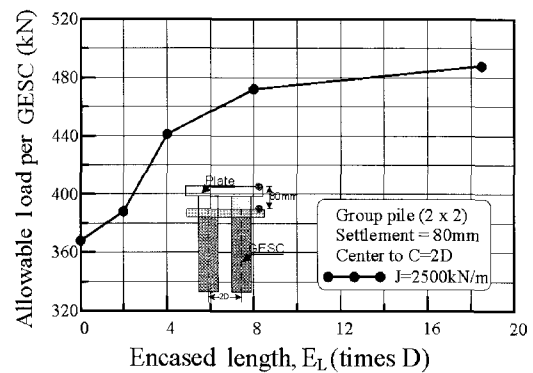
(a)  $H_{clay} = 10m$



(b)  $H_{clay} = 15m$



(c)  $H_{clay} = 20m$



(d)  $E_L$ 에 따른 무리쇄석말뚝의 허용하중

그림 12. 군말뚝 조건의 GESG 하중-침하 관계 곡선

## 5. 군말뚝으로 시공되는 GESG 하중지지 특성

### 5.1 감쌈조건에 따른 하중-침하 특성

그림 12는 다양한 두께의 연약지반 조건에서 군말뚝으로 시공되는 GESG에 대해 감쌈길이에 따른 하중-침하 관계 변화 경향을 보여주고 있다. 여기서의 하중은

쇄석말뚝 1본당 부담하중으로 표현하였다. 이 그림에서 관찰할 수 있는 바와 같이 대부분의 경우 감쌈길이가  $E_L \approx 8D$ 에 도달 하면서 하중-침하곡선이 수렴하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 두께 10m의 연약지반 조건에 대해  $0.1D=80mm$ 에서의 재하하중을 나타내고 있는 그림 12에서 보다 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 이러한 경향을 고려할 때  $2 \times 2$  군말뚝 조건으

로 시공되는 GESG의 임계감쌈길이로서  $(E_L)_{cr} \approx 8D$ 를 취할 수 있는 것으로 판단되는데 이는 단일말뚝 조건의 임계감쌈길이인  $(E_L)_{cr} \approx 4D$ 의 약 두 배에 해당하는 수치이다. 이러한 경향은 그림 13에 제시되어 있는 색색말

뚝 변형을 간투어에서 그 이유를 확인할 수 있는데 보이는 바와 같이 감쌈길이를 4D로 적용할 경우 단일 색색말뚝과는 달리 여전히 별징이 나타나고 있는 반면 감쌈길이 8D에서는 시각적인 별징현상이 소멸되는 경향을

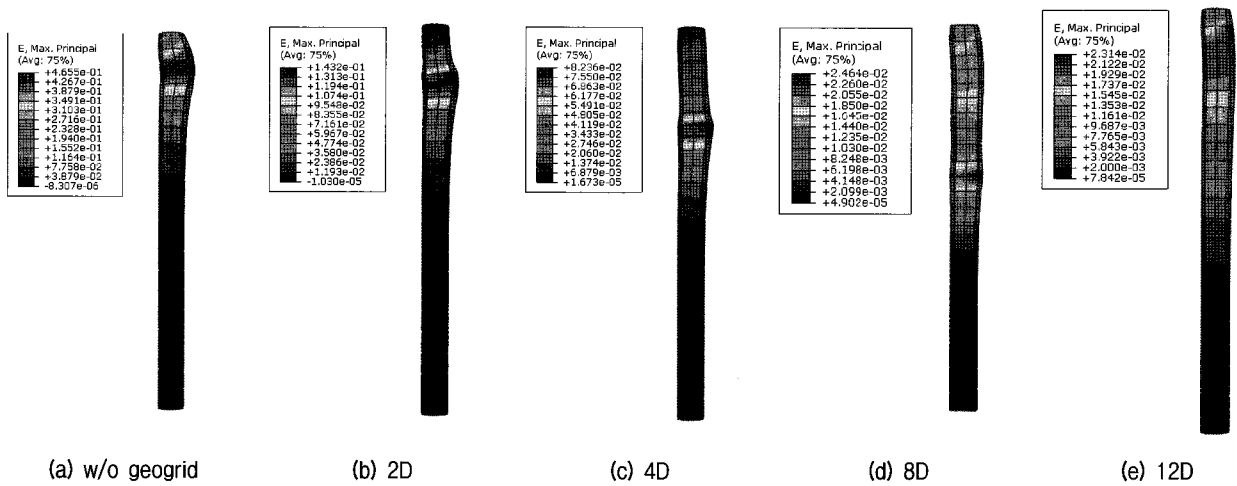


그림 13. 감쌈길이에 따른 균말뚝 조건의 GESG 변형을 간투어

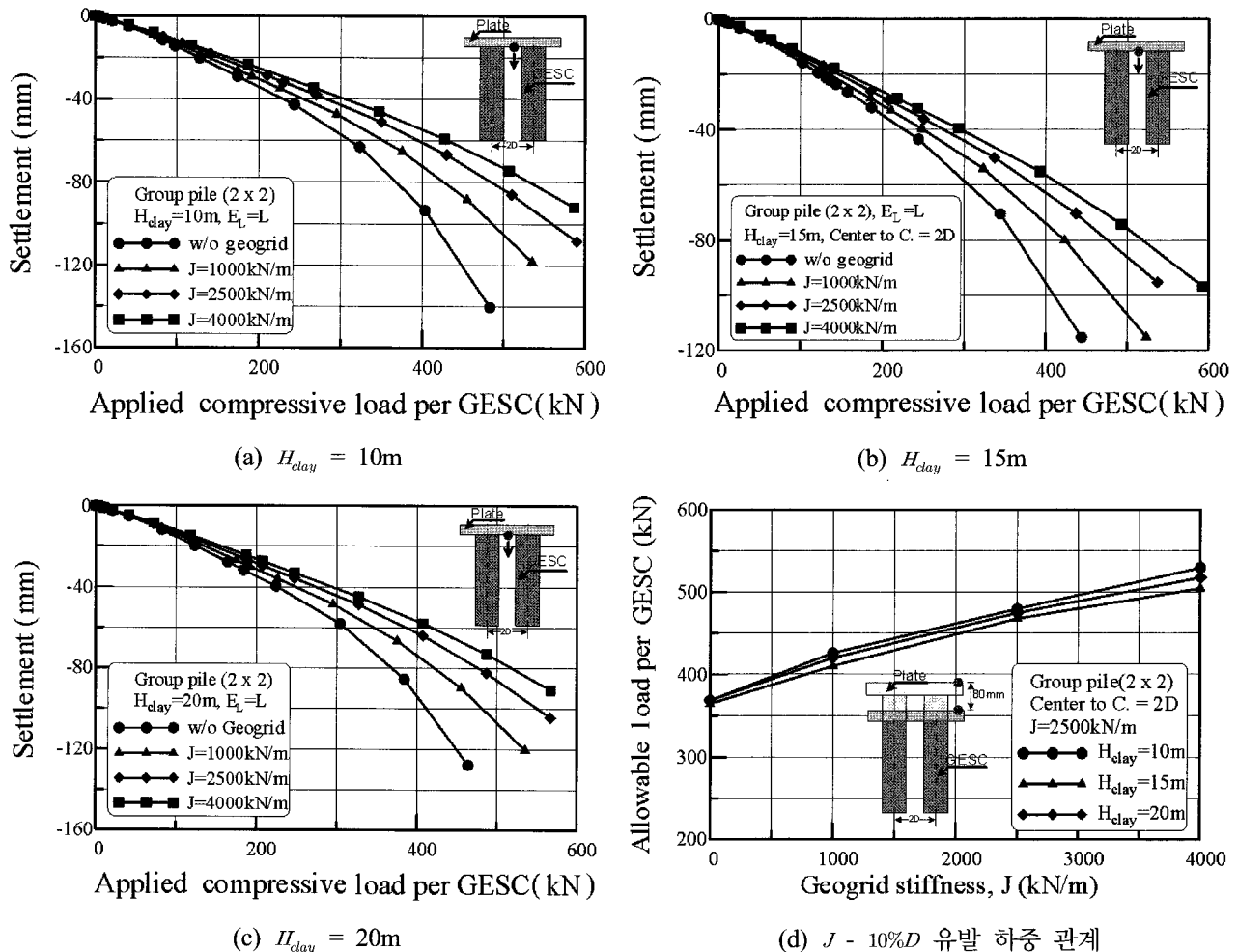


그림 14. 지오그리드 강성에 따른 하중-침하곡선 변화

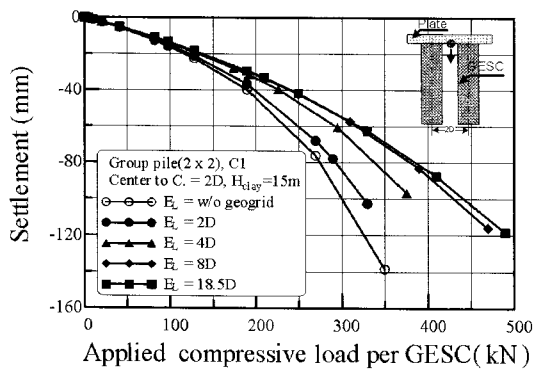
관찰할 수 있다. 이러한 결과는 쇄석말뚝 간의 상호작용에 그 원인이 있는 것으로 판단되며 따라서 적용시 임계감쌈길이는 말뚝 적용 형태(단일말뚝 혹은 군말뚝)를 고려하여 결정하여야 함을 의미한다. 따라서 군말뚝 형태로 적용되는 GESc 적용시 단일말뚝 조건에 비해 감쌈길이를 증가시키는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

그림 14는 다양한 연약지반 조건(두께)에서 지오그리드 강성에 따른 하중-침하곡선과  $0.1D=80mm$  침하 유발하중 변화 경향을 보여주고 있다. 이 그림에서 관찰할 수 있는 경향은 다음과 같이 요약된다. 먼저 단일말뚝의 경우와 마찬가지로 군말뚝 형태의 GESc에 있어서도 지오그리드 강성이 증가함에 따라 하중-침하 곡선 기울기가 증가하는 단일말뚝의 경향을 잘 따르는 것으로 나타나 군말뚝조건으로 시공되는 GESc의 경우에도 지오그리드 강성 증가를 통해 하중지지력을 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다. 한편, 연약지반 두께가 다르더라도 하중-침하 곡선이 거의 유사하게 나타나고 있는데 이는 본 연구에서 다른 쇄석말뚝이 연약지반 전 두께를 관통하는 조건으로 시공되었기 때문에 쇄석말

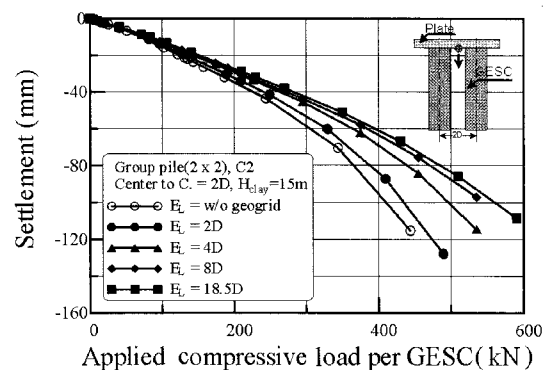
뚝 선단을 통해 대부분의 재하하중을 지지하기 때문으로 판단된다. 이러한 경향은 지오그리드 강성과  $0.1D$  유발 하중 관계를 보여주는 그림 14(d)에서 잘 관찰할 수 있다.

## 5.2 연약지반 과압밀 특성에 따른 변화 경향

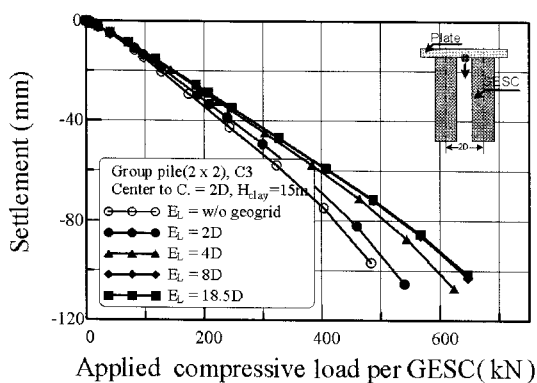
연약지반 자체의 하중지지력은 과압밀특성에 따라 크게 좌우 되므로 과압밀 특성에 따라 감쌈 효과의 변화 여부에 대한 고찰이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 MCC 모델에서 과압밀 정도를 나타내는  $a_o$ (initial yield surface size)가 30, 50, 70  $kPa$  인 지반에 대한 검토를 수행하였다. 그림 15는 연약지반 특성에 따른 감쌈길이별 하중-침하 특성을 정리하고 있는데 전반적으로 지반특성에 관계없이  $E_L \approx 8D$ 에서 하중-침하곡선 및  $0.1D$ 에 해당하는 재하하중 또한 수렴하는 것으로 나타났다. 이는 임계감쌈길이는 지반특성에 관계없이 동일함을 의미한다고 하겠다.



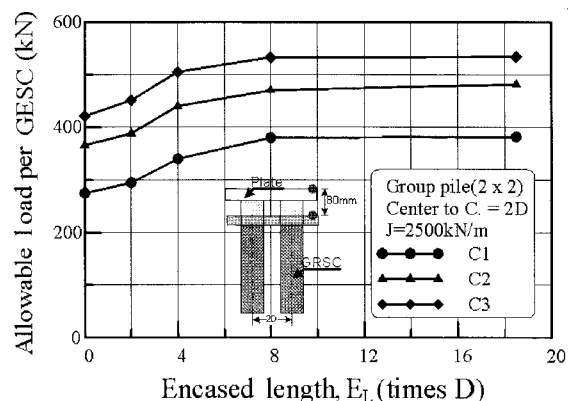
(a)  $a_o = 30 kPa (C1)$



(b)  $a_o = 50 kPa (C2)$



(c)  $a_o = 70 kPa (C3)$



(d) 감쌈길이에 따른 허용하중

그림 15. 연약지반특성 변화에 따른 하중-침하 관계

## 6. 결 론

본 연구에서는 구조물의 기초로 적용되는 지오그리드 감쌈 쇄석말뚝의 하중지지 특성 고찰을 위해 다양한 시공조건에 대한 유한요소해석을 이용한 매개변수 연구를 수행한 내용을 다루었다. 이를 위해 다양한 구조물 기초 적용 조건에 대해 단일말뚝과 군말뚝 조건의 GESC에 대해 2차원 및 3차원 응력-간극수압 연계해석을 수행하고 그 결과를 토대로 재하하중 조건에서의 GESC에 대한 하중지지 메카니즘을 분석하고 감쌈길이 및 강성, 지반특성 변화시 하중-침하 변화 경향을 분석하였다. 본 연구에서 고려한 검토조건 범위에서 확인된 결과는 아래와 같이 요약된다.

재하하중 조건에 있어서도 기존에 발표된 성토하중 조건과 유사하게 지오그리드 감쌈효과는 하중지지력 증가 및 응력집중비 감소로 이어져 전체적인 하중 지지력 향상 효과가 있는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 GESC를 구조물 기초로 효율적으로 적용할 수 있음을 나타내는 것을 의미한다고 하겠다.

단일말뚝 재하하중 조건의 GESC의 경우 최적의 효과를 발휘하는 감쌈길이를 나타내는 임계감쌈길이가 쇄석말뚝 직경의 약  $4D$  정도로 나타나 성토하중 조건 보다 임계감쌈길이가 길어지는 것으로 분석되었으며 군말뚝 조건의 GESC의 경우 약  $8D$  정도로 나타나 군말뚝 시공조건이 단일 말뚝 조건보다 임계감쌈길이가 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 임계감쌈길이는 하중조건(재하하중 또는 성토하중)과 말뚝 시공조건(단일 말뚝 또는 군말뚝)에 따라 달라 질 수 있음을 의미하는 것으로서 GESC의 지오그리드 감쌈 구간 설정시 이러한 점이 감안되어야 할 것으로 판단된다. 따라서 성토하중 보다는 재하하중의 경우, 그리고 단일말뚝 보다는 군말뚝 적용 조건에 있어 보다 증가된 임계감쌈길이를 적용하여야 할 것으로 판단된다. 또한 임계감쌈길이는 연약지반두께나 과압밀특성에는 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 2007년 건설교통부가 출현한 고강도 지오그리드 보강 Stone Column 공법의 실용화 연구(과제번호 : C105A1000017-05A0300-01700), 그리고 한국과학재단의 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-2004-000-10953-0)의 지원으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 유충식, 송아란, 김선빈, 이대영 (2007), “연약지반위에 시공되는 지오그리드 보강 쇄석기둥 공법의 유한요소모델링”, *한국지반공학회는논문집*, 제23권, 10호, pp.133-150.
2. 유충식, 김선빈 (2008), “연약지반위에 시공되는 지오그리드 감쌈 스톤컬럼의 하중지지 메카니즘에 관한 연구”, *한국지반공학회는논문집*, 제24권, 12호, pp.93-101.
3. 이대영, 송아란, 유충식 (2006), “지오그리드 보강 스톤컬럼의 파괴메카니즘 및 지지력 측정: 축소모형실험을 통한 고찰”, *한국지반공학회는논문집*, 제22권, 10호, pp.121-129.
4. 이대영, 유충식, 박시삼, 정선태, 이부락 (2007), “지연약지반에 시공된 지오그리드 감쌈 쇄석기둥의 현장재하시험”, *한국토목섬유공학회 가을학술발표회논문집*, pp.1-12.
5. Abaqus users manual, Version 6.7. (2007), Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc., Pawtucket, Providence, R.I.
6. Alexiew, D., Horgan, G.J., and Brokemper, D. (2003), “Geotextile encased columns (GEC): load capacity & geotextile selection, Sweden”, *BGA International Conference on Foundation*.
7. Kempfert, H.G., Jaup, A., and Raithe, M. (1997), “Interactive behavior of a flexible reinforced sand column foundation in soft soils”, *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.14, No.3, pp.1757-1760.
8. Kempert, H.G., Wallis, P., Raithe, M., Geduhn, M., and McClinton, R. G. (2002), “Reclaiming land with geotextile-encased columns”, *Geotechnical fabrics Report*, Vol.20, No.6, pp.34-39.
9. Murugesan, S., and Rajagopal, K. (2006), “Numerical analysis of geosynthetic encased stone column”, *8th International Conference on Geosynthetics*, pp.1681-1684.
10. Paul, A., and Ponomarjow, A. (2004), “The bearing behaviour of geogrid reinforced crushed stone columns in comparison to non-reinforced concrete pile foundations”, *EuroGeo3*, pp.285-288.
11. Raithe, 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.
12. Yoo, C. and Kim, S.B. (2009), “Numerical modeling of geosynthetic-encased stone column”, *Geosynthetics International*, Vol.16, No.3, pp.116-126.

(접수일자 2009. 8. 24, 심사완료일 2009. 11. 20)