

## 연약지반에 시공되는 지오그리드 감쌘 스톤컬럼의 하중지지 특성

### Load Carrying Capacity of Geogrid-Encased Stone Columns in Soft Ground

유 충 식<sup>1</sup> Yoo, Chung-Sik  
김 선 빈<sup>2\*</sup> Kim, Sun-Bin

#### ABSTRACT

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 an 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.

#### 요 지

본 논문에서는 수치해석적 접근을 통해 연약지반에 시공되는 지오그리드 감쌘 스톤컬럼의 하중지지 특성을 고찰한 내용을 다루었다. 지오그리드로 감쌘 스톤컬럼의 보강효과에 대해 검증된 유한요소모델을 이용하여 축대칭 및 3차원 응력-간극수압연계해석을 토대로 매개변수 연구를 수행하였다. 해석결과를 종합한 결과 지오그리드로 감쌘 스톤컬럼의 하중지지 특성이 향상되는 경향을 나타내었다. 아울러 보강재의 감쌈길이와 축강성이 지오그리드 감쌘 스톤컬럼의 주된 설계변수가 되며, 지오그리드 보강효과를 극대화 할 수 있는 지오그리드의 임계감쌈길이 및 임계강성이 존재하는 것으로 나타났다.

**Keywords** : Bearing capacity, Soft ground, Stone column, Geogrid, Finite element method

#### 1. 서 론

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 최근 들어 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, 쇄석말뚝(stone column)공법의 활용도가 증가하고 있다. 특히 지오그리드 감쌘 쇄석말뚝(Geogrid Encased Stone Column, GESC) 공법은 쇄석이

나 자갈과 같은 조립재로 채워진 기둥을 고강도 지오그리드로 감싸 쇄석기둥의 강도증진 및 변형을 감소시켜 지반 및 구조물을 보강하는 공법(AI-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 쇄석말뚝의 하중지지력 증대 방안으로서 지오그리드 감쌘 쇄석말뚝(geogrid-encased stone column, GESC)공법에 대한 기초적인 연구가 수행된 바 있다. GESC 공법에 대한 기초연구로서 이대영 등(2006)은 실험적 연구를 통해 GESC 공법의 하중지지력 발현 메커니즘을 고찰하였으며 임의 하중재하조건에서 GESC의 하중지지력

1 정회원, 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.)

2\* 비회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 (Non-Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ., E-mail: ksb9677@hanmail.net)

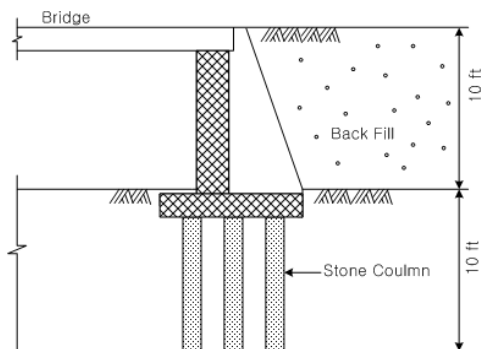
극대화는 상부 3D 정도의 벌징영역에 대한 감쌈으로 실현할 수 있다는 결과를 보고한 바 있다. 한편, 최근 들어 유충식 등(2007)은 3차원 응력-간극수압 연계 유한요소해석 모델을 이용하여 GESC의 연약지반 성토 조건에서의 배수 및 침하제어 효과에 대한 기초적인 연구를 수행한 바 있다.

위의 연구들은 GESC 현장 적용성 확보를 위한 기초적인 연구들로서 매우 유익한 결과를 제시하고는 있으나 연약지반 조건 및 감쌈 조건 등이 변화하는 조건에서의 보강 효과에 대한 정량·정성적 평가 지표 등 현장적용에 필요한 구체적인 결과를 다루고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 GESC 현장 적용성 확보를 위한 정량적 DB 구축의 일환으로 연약지반 내 구조물 기초로 적용되는 경우에 대한 다양한 시공조건에 대해 매개변수 해석을 수행하고 GESC 설계시 적용할 수 있는 지오그리드 감쌈효과에 대한 정량적 결과를 제시하였다.

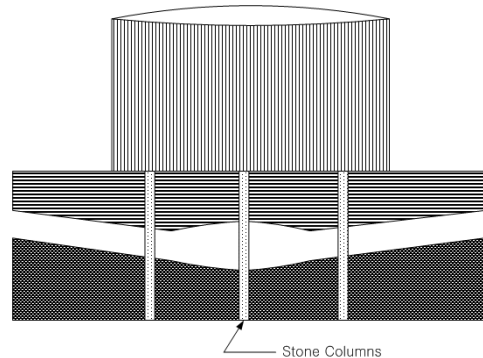
## 2. GESC 적용 시공조건

### 2.1 대상 구조물

쇄석말뚝 공법은 개발초기에는 연약지반 개량공법으로 적용하기 보다는 상부 구조물을 지지하는 말뚝으로서 적용되었으며, 현재에도 동남아 등지에서는 교량의 교대 지지 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 유한요소 해석을 수행하였다.



(a) 교대 지지용 기초



(b) 유류저장 탱크 기초

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 전체감쌈 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.

## 3. 모형실험을 통한 유한요소모델 검증

### 3.1 모형실험

지오그리드 감쌈 스톤컬럼의 하중지지 특성에 관한 수치해석적 고찰을 위해 수행하는 유한요소해석 모델의 적합성 여부를 확인하는 차원에서 표준사로 조성한 지반에

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)   |

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,

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  |

서 지오그리드 감쌈조건 및 비감쌈 조건에 대한 모형실험을 수행하였다. 토조의 규모는 그림 2에서 보이는 바와 같이 180×78×150cm(가로×세로×높이)이며, 지반조성은 쇄석기둥의 길이인 80cm의 높이까지 강사장치를 이용하여 모래로 균질하게 조성하였다. 모래는 주문진 표준사를 사용하였으며, 강사시 평균 70%의 상대밀도를 유지하도록 하였다.

쇄석기둥 및 지오그리드 감쌈 쇄석기둥에 대한 모사는 di Prisco et al.(2006)의 모형지반 조성방법을 적용하였다. 먼저 외경 10.4cm, 길이 100cm의 파이프를 케이싱으로 사용하여 파이프 입구를 막아 모래가 유입되지 않도록 하여 토조중앙에 위치시킨 후 강사장치를 토조 저면에서 50cm 상부에 위치시켜 모래를 강사하여 지반을 조성하였다. 80cm 높이까지 지반을 조성을 완료한 후 케이싱 내부에 쇄석 골재를 20cm까지 채우고 케이싱을 해당 높이만큼 인발하였으며, 쇄석 골재에 15회 다짐을 실시하여 쇄석기둥이 지반의 구속력을 받을 수 있도록 하였다. 이 과정을 4회 반복하여 모형지반 상부까지 쇄석기둥을 조성하였다.

재하에 사용된 mat는 두께 1.5cm, 길이 14cm×14cm(가로×세로) 규격의 재하판으로 쇄석기둥 상부에 수평이 되도록 거치하였으며, 재하는 변위제어방식으로 1mm/분의 속도로 하중이 전달되도록 하였다. 실험 중 계측은 로드셀과 지오그리드에 설치한 스트레인 게이지를 이용하여 재하하중과 지오그리드의 변형율을 각각 계측하였다. 그림 2는 이와같은 모형실험 토조장치의 구성을 나타내고 있

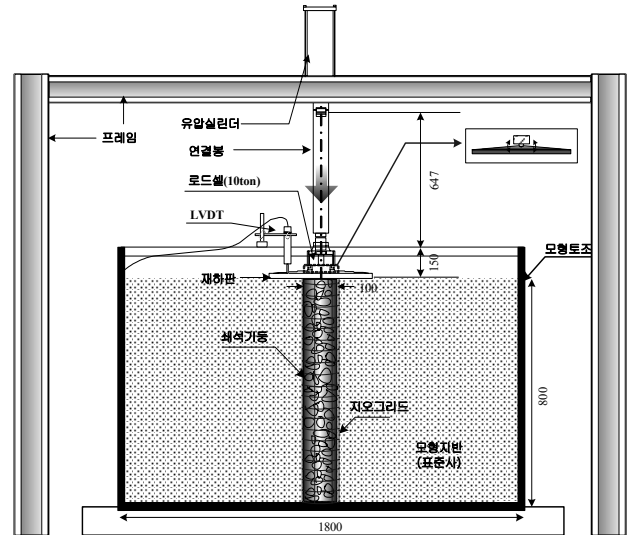


그림 2. 모형실험 토조장치

며, 모형실험 과정을 그림 3에 나타내었다.

### 3.2 모형실험 모델검증

검증을 위한 유한요소모델은 ABAQUS v6.7-1을 사용하여 그림 2의 축소모형을 구현하여 그림 4와 같이 3차원으로 모델링하였다. 모델의 이산화에 위해 쇄석기둥과 모형지반은 3차원 8절점 요소(C3D8)를 적용하였으며, 지오그리드는 3차원 멤브레인요소(M3D4)를 이용하여 모델링하였다. 변위경계조건으로 수평경계에는 수평변위를 구속하였으며, 바닥면은 연직변위를 구속하였다. 한편, 재료모델링에 있어 모래지반과 쇄석기둥은 Mohr-Coulomb 모델

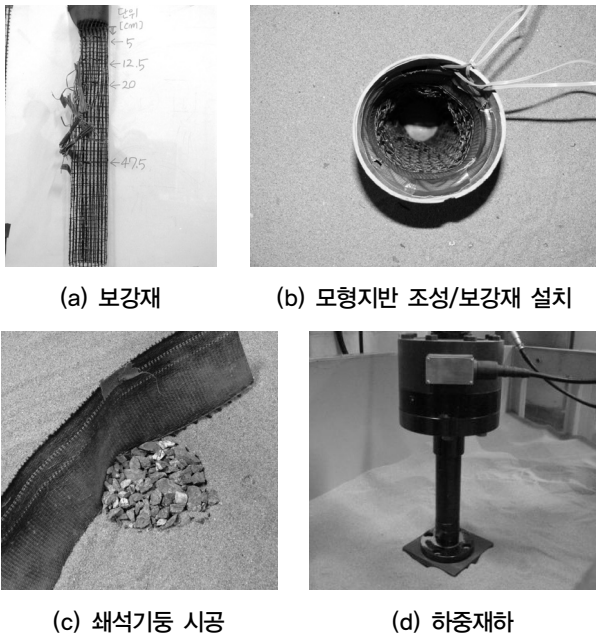


그림 3. 모형실험 과정

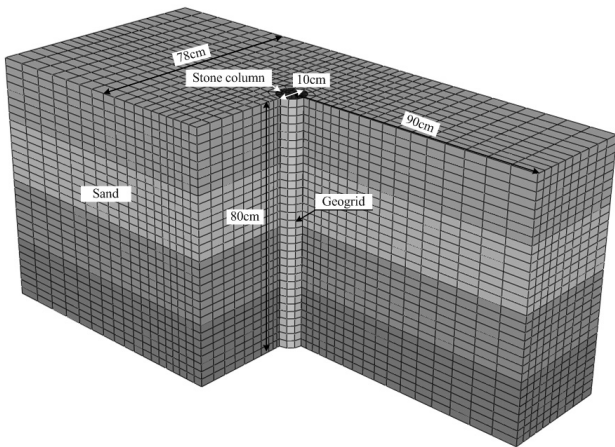
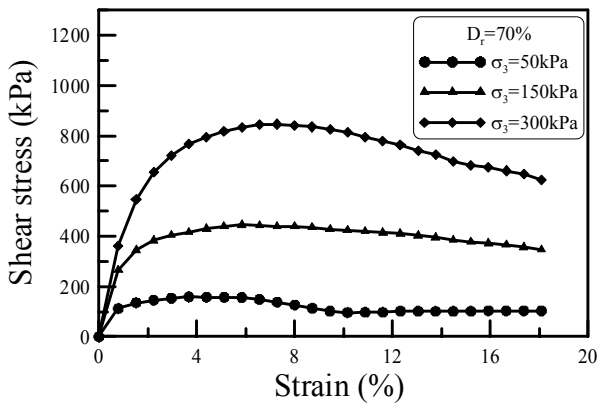
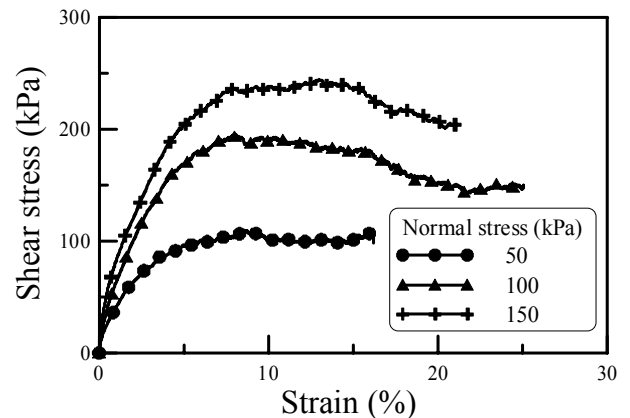


그림 4. 검증에 사용된 유한요소모델



(a) 모형지반( $D_r = 70\%$ )의 삼축압축시험 결과



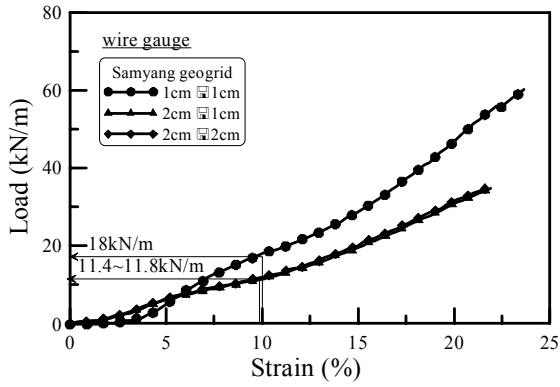
(b) 쇄석골재(직경 25mm)의 직접전단시험 결과

그림 5. 모형지반 및 쇄석골재 전단시험 결과

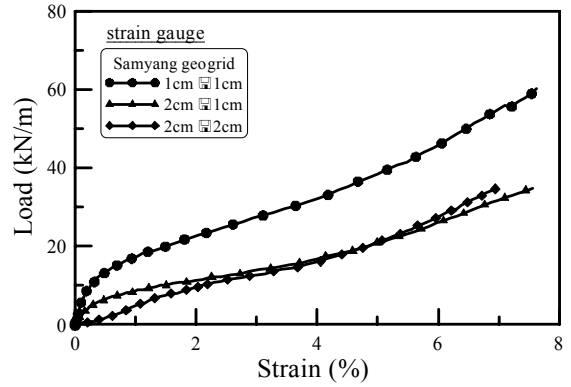
을 적용하였으며, 지오그리드와 재하판 mat는 선형탄성모델을 적용하였다.

아울러 모형실험에 사용된 재료에 대한 물성을 결정하기 위해 모래 및 쇄석, 지오그리드에 대한 삼축압축시험, 직접전단시험 및 광폭인장시험 등을 수행하였다. 먼저 상대 밀도 70%로 조성한 모형지반의 물성을 산정하기 위한 모래의 삼축압축시험 결과(그림 5(a))로부터 Mohr-Coulomb 모델의 전단강도 정수와 탄성계수를 산정하였다. 산정결과 내부마찰각은 약 38°, 탄성계수는 구속압 수준에 따라 1% 변형을 발생시 할선탄성계수를 고려하여 10,000~30,000kPa 범위로 해석에 적용하였다. 쇄석기둥 조성에 사용된 재료는 직경 25mm의 입도분포가 좋은 쇄석골재인데, 그림 5(b)의 직접전단시험 결과 내부마찰각이 52°로 평가되어 이를 해석에 적용하였다. 모형실험에 사용된 보강재의 인장하중에 대한 축강성을 확인하기 위해 수행한 광폭인장시험은 원시료(1cm×1cm)와 위사(주인장) 방향을 상사한 상사조건 I(2cm×1cm), 위사와 경사를 모두 상사한 상사조건 II(2cm×2cm)를 대상으로 시험을 수행하였다. 그림 6의 시험결과를 토대로 각 시험조건에 대한 인장강도를 분석한 결과 원시료는 60kN/m, 상사조건 I의 경우 34.8kN/m, 상사조건 II는 34.6kN/m로 나타났으며, 상사로 인한 보강재의 축강성은 10% 변형을 발생기준으로 114~118kN/m로 산정되었다. 본 모형실험에서는 축소율을 고려하여 3cm×1cm로 상사된 보강재를 적용하였으며, 이에 따라 해석에 적용한 보강재의 축강성은 인장시험 결과로부터 80kN/m로 추정하였다.

이와같은 모형실험에 사용된 각 재료에 대한 물성산정 결과로부터 해석에 적용한 수치를 표 3에 정리하였다.



(a) global strain



(b) local strain

그림 6. 지오그리드 광폭인장시험 결과

표 3. 모형실험 검증 적용물성

| 구분       | 단위중량,<br>$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 변형계수,<br>E(kPa) | 프아송비,<br>$\nu$ | 점착력,<br>c(kPa) | 내부마찰각,<br>$\phi$ (°) | 축강성,<br>J(kN/m) |
|----------|--|-----------------|----------------|----------------|----------------------|-----------------|
| 쇄석       | 20                                     | 80,000          | 0.3            | 0.1            | 52                   | -               |
| 모래지반     | 20                                     | 10,000~30,000   | 0.2            | 0.1            | 38                   | -               |
| 지오그리드    | 1                                      | 100,000         | 0.3            | -              | -                    | 80              |
| 재하판(mat) | 20                                     | $2 \times 10^8$ | 0.3            | -              | -                    | -               |

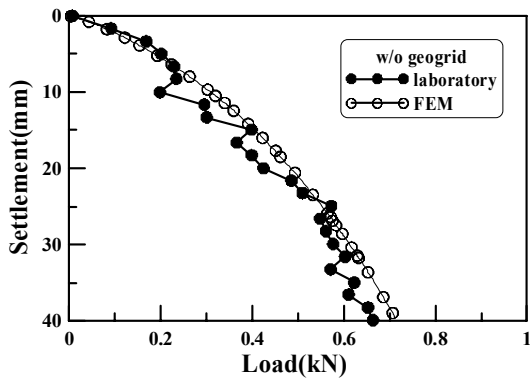
모형실험 조건에 대한 유한요소해석 결과 그림 7에서 보이는 바와같이 모형실험 결과의 하중-침하관계와 유사한 거동을 하는 것으로 나타나 본 연구에서 적용한 유한요소모델의 적합성을 확인하였다.

#### 4. 유한요소해석 매개변수 연구

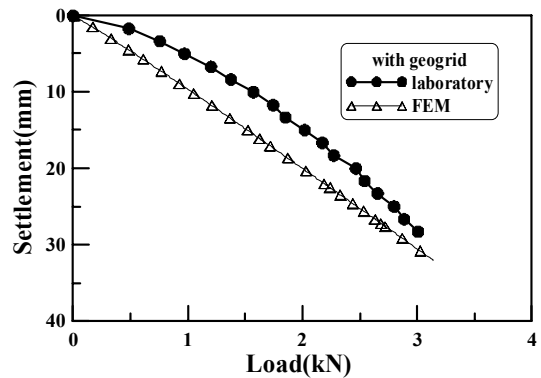
##### 4.1 해석모델링

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

먼저 단일쇄석말뚝에 대한 해석 모델링에 있어 말뚝 중심축을 기준으로 축대칭조건이 성립되므로 2차원 축대칭 모델링을 수행하였다. 그림 8에서 제시한 바와 같이 경계 조건의 설정에 있어 좌우측면은 수평방향 변위를 구속하였으며 바닥면은 수평, 연직방향 변위를 구속하였다. 한편, 연계해석에 필요한 초기 수리 경계조건의 설정에 있어 초기지하수위를 점토층 상부에 위치하도록 하였으며, 재하 하중에 의한 과잉간극수압은 점토층 상부에서의 간극수압이 '0'이 되도록 하여 소산되도록 하였다. 해석의 편의상 쇄석기둥은 지오그리드와 함께 점토층에 매입된 상태로 모델링하였다(wished-in-place). 시공과정 모델링에서 재하하중은 1일 동안 재하되는 경우로 하였으며 하중재하

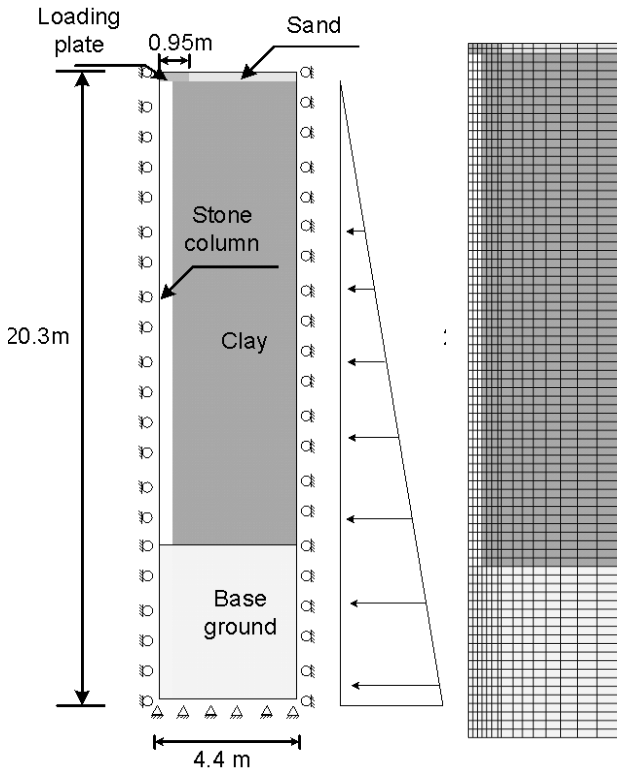


(a) 지오그리드 미보강 조건(SC)



(b) 지오그리드 보강조건(GESC)

그림 7. 모델검증 결과



(a) 축대칭 해석모델 및 경계조건 (b) 해석 메쉬

그림 8. 단일 쇄석말뚝 해석 모델링

완료 후에는 압밀과정은 모델링에 포함시키지 않았다.

한편, 모델의 이산화에서 연약지반과 하부 지지층, 쇄석말뚝, 그리고 모래층은 축대칭 4절점 응력-간극수압 연계요소(CAX4P)로 모델링하였으며 성토체는 가감적분 요소(CAX4RP)로 모델링하였다. 지오그리드에 대한 모델링은 멤브레인 효과로 인한 보강효과를 구현하기 위해 ABAQUS

에서 제공하는 멤브레인 요소(MAX1)를 이용하였다.

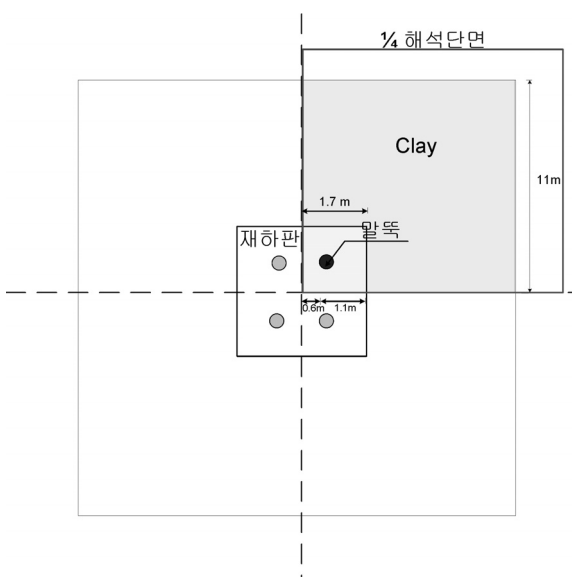
또한 재료 모델링에 있어 연약지반은 Modified Cam-Clay(MCC) 모델을 적용하여 압밀시 연약점토지반의 침하특성이 모사되도록 하였으며, 쇄석말뚝은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 지오그리드 및 재하판은 탄성거동을 하는 것으로 가정하였다. 하중재하는 직경 1.92m의 재하판에 점진적으로 증가 시키는 하중조절 방법을 적용하였다.

무리쇄석말뚝의 경우 다음의 그림 9(a)에서와 같이 말뚝 길이방향으로 두 축에 대해 대칭조건이 성립되므로 1/4 단면에 대한 3차원 모델링을 수행하였다. 모델의 이산화에서 연약지반과 하부 지지층, 쇄석말뚝, 그리고 모래층은 8절점 가감적분 응력-간극수압 연계요소(C3D8RP)로 모델링하였으며, 지오그리드는 3차원 멤브레인요소(M3D4)를 이용하여 모델링하였다. 변위경계조건에 있어서 수평 경계면은 각각 수평방향 변위를 구속하였으며, 바닥면은 수평 및 연직방향 변위를 구속하였다. 수리경계조건 및 재료모델링은 앞서 단일쇄석말뚝과 동일하게 모델링하였다. 한편 말뚝에 작용되는 하중은 가로·세로폭이 1.7m인 재하판을 이용하여 점진적으로 하중이 증가하는 되도록 모델링하였다. 다음의 표 4는 본 연구에서 해석에 적용된 물성치를 정리하였다.

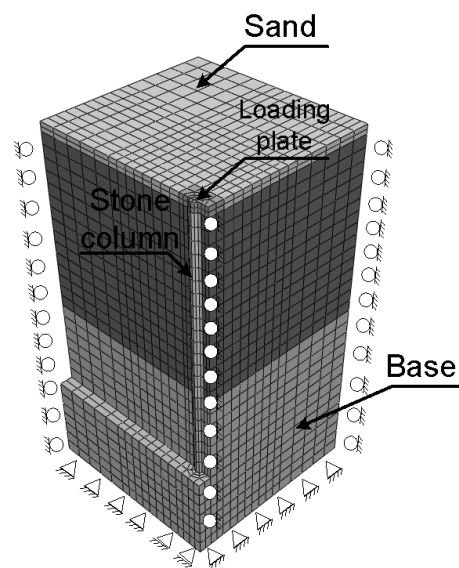
## 4.2 매개변수해석 결과 및 고찰

### 4.2.1 GESC 하중지지 메카니즘

GESC 하중제어 메카니즘을 고찰을 위해 무보강 쇄석



(a) 3차원 해석 영역



(b) 1/4단면 해석메쉬 및 경계조건

그림 9. 무리 쇄석말뚝 해석모델링

표 4. 해석에 적용된 특성치

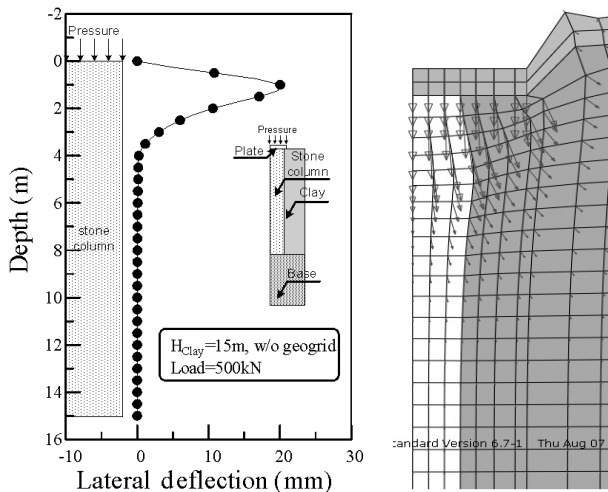
| 구분    | 단위중량, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 변형계수, E(kPa)   | 프아송비, $\nu$ | 점착력, c(kPa) | 내부마찰각, $\phi$ (deg) | 투수계수, k(cm/s)         |
|-------|-------------------------------------|--|-------------|-------------|---------------------|-----------------------|
| 제방    | 18                                  | 15,000   | 0.3         | 33          | 3                   | -                     |
| 모래    | 19                                  | 15,000   | 0.3         | 28          | 3                   | -                     |
| 쇄석말뚝  | 15                                  | 40,000   | 0.3         | 40          | 5                   | $1.16 \times 10^{-2}$ |
| 점토층   | 19                                  | $\lambda = 0.2, \kappa = 0.02, M = 1, a_o = 30/50/70, e = 1.0$ |             |             |                     | $1.16 \times 10^{-6}$ |
| 지오그리드 | J=1000, 2500, 4000kN/m              |  |             |             |                     |                       |

말뚝과 지오그리드로 감싼 쇄석말뚝에 대해 하중-침하 특성 및 응력집중비에 대한 고찰을 통해 지오그리드 감쌈효과가 쇄석말뚝의 하중지지력에 어떠한 영향을 미치는지 검토하였다.

다음 그림 10과 11은 지오그리드 감쌈효과에 대한 메카니즘 분석을 위한 해석결과로서 연약지반 두께 15m에 시

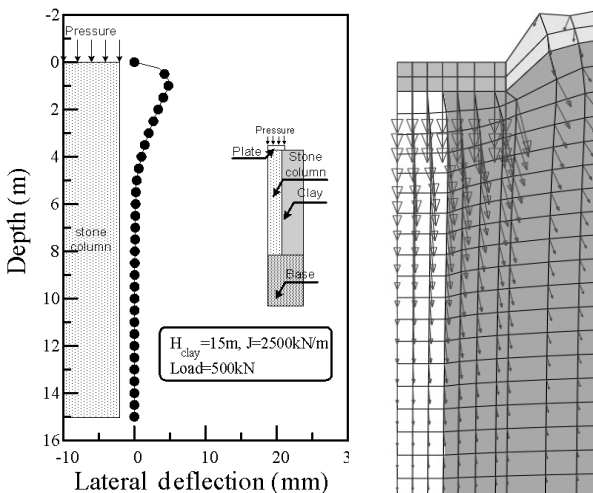
공된 무보강 쇄석말뚝(그림 10) 및 지오그리드(축강성 2500kN/m 적용) 감쌈 쇄석말뚝(그림 11)의 해석결과를 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 각각의 결과 모두 상부 0~3m(0D~3.7D) 범위에서 벌징현상이 발생하며 이와 함께 침하가 유발되는 메카니즘을 보이고 있다. 각각의 결과를 비교하면 지오그리드 감쌈조건인 경우(그림 11(a)) 최대 수평변위가 약 5mm로 지오그리드 무보강 조건(그림 10(a))의 최대 수평변위 20mm에 비하여 75%가량의 벌징 억제효과가 발휘되는 것으로 나타나고 있는데, 주변 지반의 벡터양상에서도 이러한 양상을 잘 관찰할 수 있어 하중 지지력이 향상될 수 있음을 알 수 있다.

그림 13은 하중-침하 및 하중-응력집중비 변화 경향을 보여주고 있다. 그림 12와 같이 재하판에서 침하를 측정하였고, 응력집중비 산정을 위한 응력 산정지점은 상부에서부터 2D 되는 지점에서 측정하였다. 그림 13에서 관찰할 수 있는 바와 같이 지오그리드 무보강의 경우 재하 초기에 하중이 증가함에 따라 침하와 응력 집중비는 점차적으로 증가하나 재하 하중이 약 250kN을 넘어 서면서 침하



(a) 쇄석말뚝 수평변위 (b) 벡터 양상

그림 10. 무보강 단일쇄석말뚝의 변위발생 양상



(a) 쇄석말뚝 수평변위 (b) 벡터 양상

그림 11. GESC 단일말뚝의 변위발생 양상

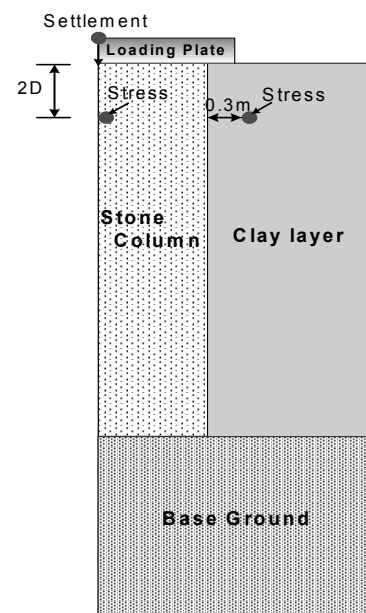


그림 12. 침하 및 응력 측정

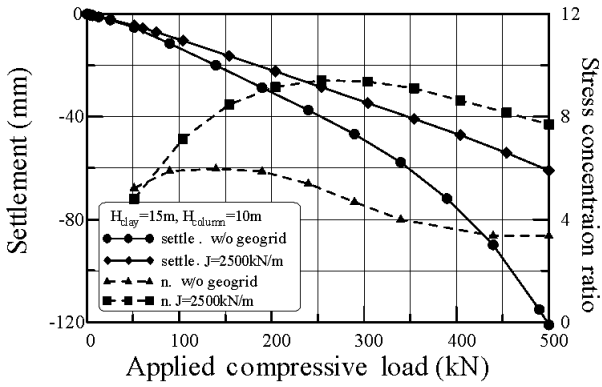


그림 13. 하중-침하-응력집중비 관계

는 이전보다 급격히 증가하게 되고 그와 동시에 응력 집중비는 4~6 범위 내에서 점차 수렴하다 감소하는 경향을 나타낸다. 즉 쇄석말뚝의 별징으로 인해 침하증가와 응력 집중비 감소 현상이 동시에 일어나는 것으로 분석되었다. 반면 강성 2500kN/m의 지오그리드가 설치된 GESG의 경우 지오그리드 무보강 지반에서 보였던 급격한 침하 감소 현상은 나타나지 않으며 응력 집중비는 6~10 사이에 분포하며 하중에 대해 보다 안정적인 거동을 하고 있음이 나타났다. 이러한 결과는 지오그리드 감쌈에 대한 보강효과를 단적으로 나타내는 것으로서 하중재하 조건에서도 GESG가 매우 효율적으로 적용될 수 있음을 보여주는 결과라고 하겠다.

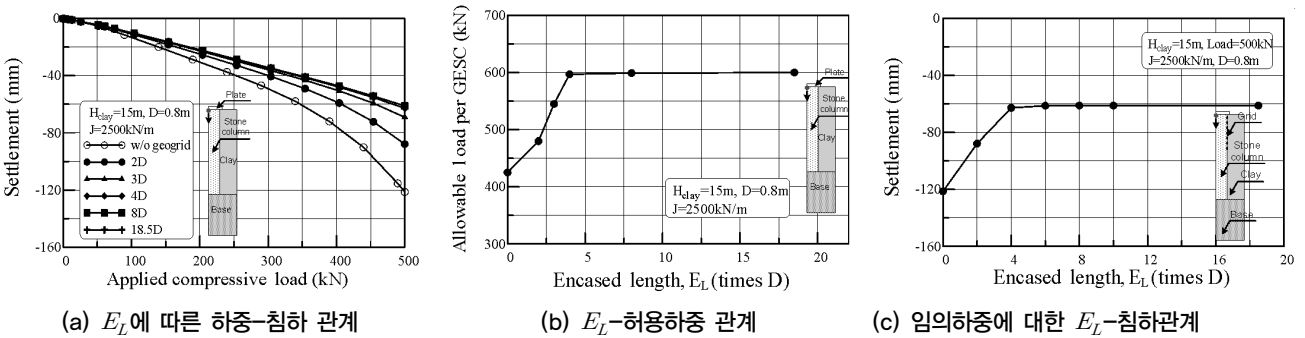
#### 4.2.2 지오그리드 감쌈 효과

##### 1) 단일 쇄석말뚝

지오그리드 감쌈길이( $E_L$ )에 따른 하중-침하관계를 보여주고 있는 그림 14를 관찰하면 보이는 바와 같이 감쌈길이 증가할수록 임의하중에서의 침하가 감소되는 경향을 보여주고 있어 전반적으로 하중지지력이 증가하는 경향을 잘 관찰할 수 있다. 한편, 극한하중과 임의하중(500kN)에서의 침하량을 토대로 감쌈길이 영향을 나타내는 그림 14(b)와 그림 14(c)에서는 감쌈길이 4D 이상에서는 감쌈길이에 따른 차이를 보이지 않고 있어 임계감쌈길이는  $(E_L)_{cr} \approx 4D$  정도로 간주할 수 있는 것으로 나타났다.

그림 15의 쇄석말뚝 직경( $D$ ) 변화에 따른 감쌈길이별 하중-침하 그래프를 관찰한 결과 지오그리드 감쌈길이 4D 이상인 조건에서 전체 감쌈 보강상의 침하값에 수렴하는 경향을 나타내었다. 이 결과를 통해 쇄석말뚝의 직경에 따른 임계감쌈길이의 차이는 없는 것으로 나타났다.

앞서 기본 지반조건에 대해서 임계 감쌈길이가 4D 정도로 분석되어 임계 감쌈조건에 있어 지오그리드의 강성에 따른 쇄석말뚝의 하중지지력 변화경향을 고찰하기 위해 지오그리드 강성을 변화시켜 검토를 수행하였다. 그림 16과 17은 지오그리드 강성에 따른 하중-침하곡선 및 임의 침하량(80mm)에서의 재하하중을 나타내고 있는데 보이는

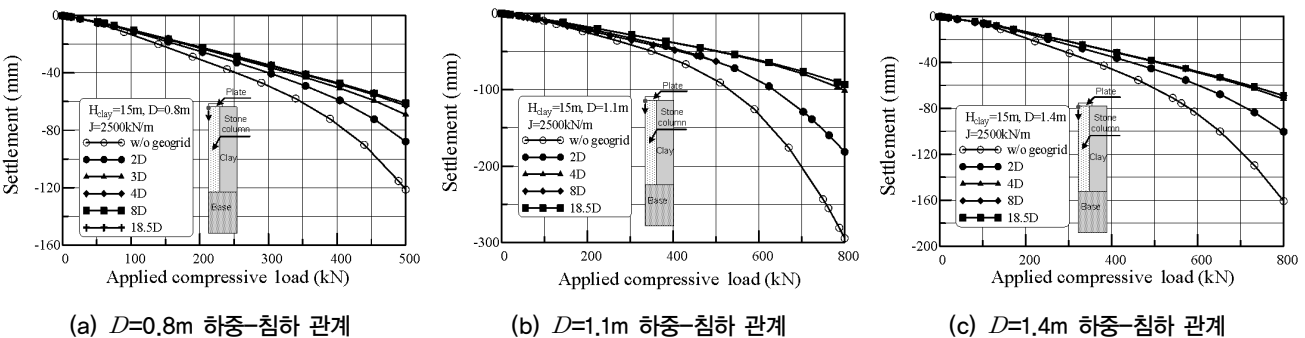


(a)  $E_L$ 에 따른 하중-침하 관계

(b)  $E_L$ -허용하중 관계

(c) 임의하중에 대한  $E_L$ -침하관계

그림 14. 지오그리드 감쌈길이( $E_L$ )에 따른 하중-침하 관계



(a)  $D=0.8m$  하중-침하 관계

(b)  $D=1.1m$  하중-침하 관계

(c)  $D=1.4m$  하중-침하 관계

그림 15. GESG 직경( $D$ )에 따른 하중-침하 곡선



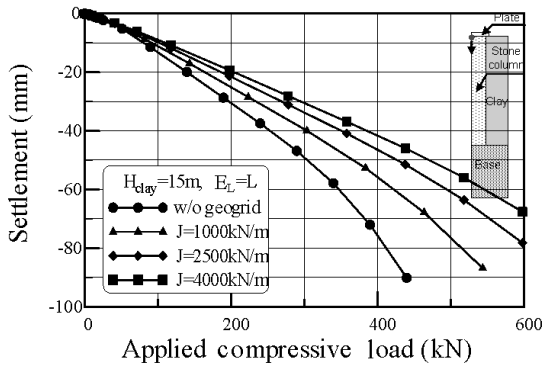


그림 16.  $J$ 에 따른 하중-침하 관계

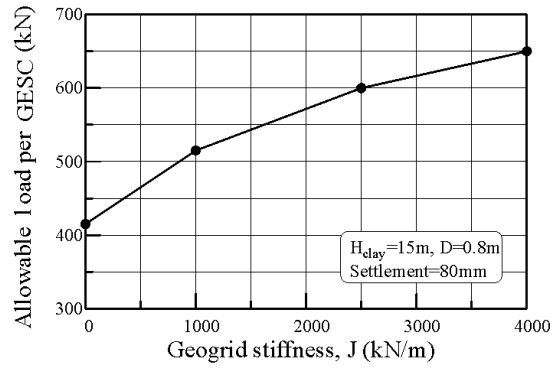


그림 17.  $J$ 에 따른 허용하중

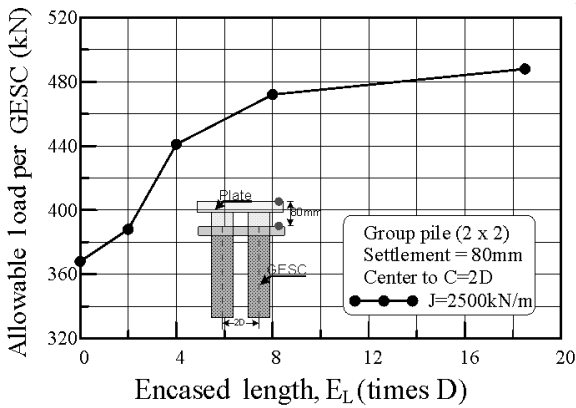
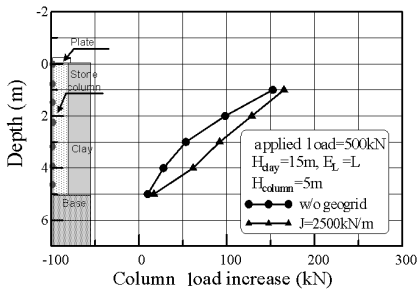


그림 21.  $E_L$ 에 따른 무리쇄석말뚝의 허용하중

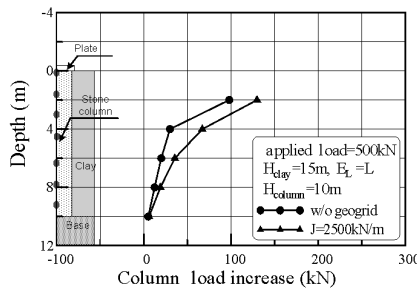
바와 같이 지오그리드의 강성이 증가 할수록 하중-침하곡선의 기울기가 증가하고 임의 침하 수준에서의 재하하중

이 증가하는 경향을 보이고 있어 지오그리드 강성 또한 중요한 설계변수인 것으로 분석되었다. 한편, 그다지 뚜렷하게 나타나지는 않으나 지오그리드의 강성이 증가할수록 임의 침하량에 대한 재하하중이 증가하는 속도가 감소하는 것으로 나타나고 있으며 임계강성으로서 2500~3000kN/m 정도를 취할 수 있는 것으로 나타났다.

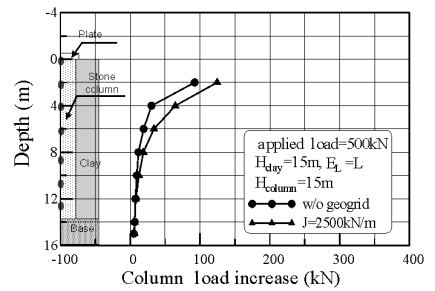
GESC는 연약지반 개량을 위한 목적 뿐 아니라 구조물 기초로 활용될 경우에서도 응력집중비는 매우 중요한 설계인자가 될 수 있다. 그림 18과 그림 19는 각각 하중재하시 말뚝내 하중 및 인접 지반의 응력 발생을 지오그리드 무보강의 경우와  $J=2500\text{kN/m}$ 의 지오그리드로 전체를 감싼 경우에 대해 보여주고 있다. 이 그림에서 잘 관찰할 수 있는 바와 같이 지오그리드로 감쌈에 따라 쇄석말뚝으로



(a) 쇄석말뚝 5m

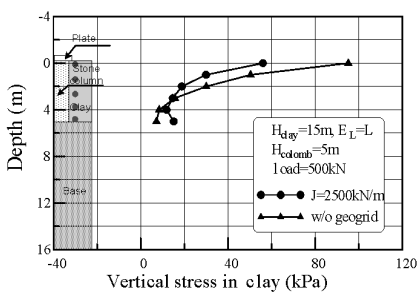


(b) 쇄석말뚝 10m

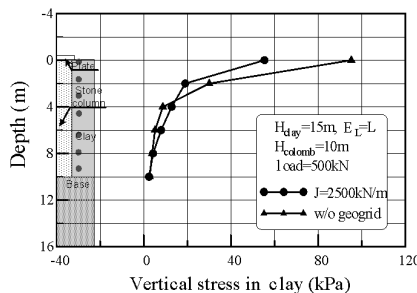


(c) 쇄석말뚝 15m

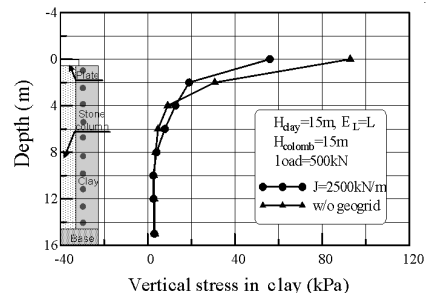
그림 18. 보강여부에 따른 쇄석말뚝 연직하중



(a) 쇄석말뚝 5m



(b) 쇄석말뚝 10m



(b) 쇄석말뚝 15m

그림 19. 보강여부에 따른 쇄석말뚝 인접지반내 수직응력

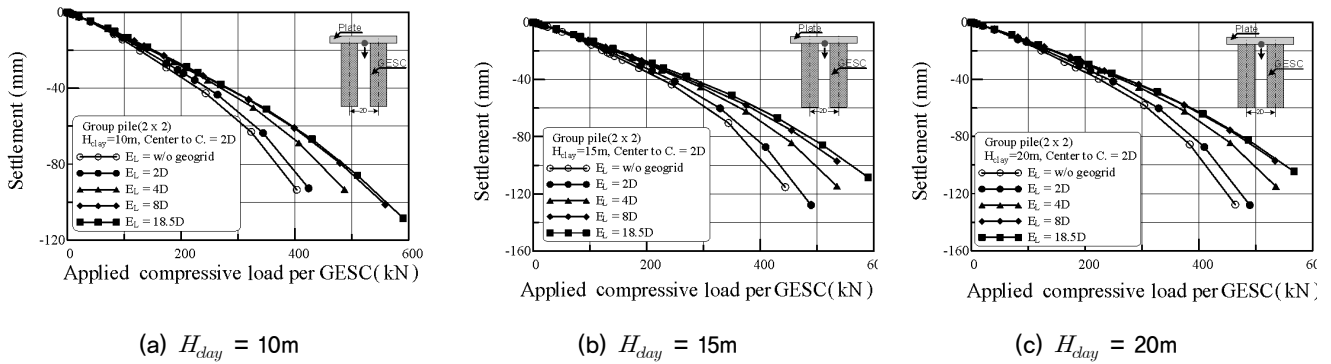


그림 20. 무리 쇄석말뚝의  $E_L$ 에 따른 하중-침하 관계 곡선

전달되는 하중은 증가하고(최대 30kN) 주변 지반에 증가되는 응력은 감소(최대 30~40kPa)하는 경향을 보이고 있다. 이는 곧 지오그리드로 감쌈 보강을 실시함으로써 결국 응력집중비가 증가함을 나타내는 것으로서 GESG의 하중 지지력 증가 메커니즘을 보여주는 결과라 할 수 있다.

## 2) 무리 쇄석말뚝

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 20은 감쌈길이에 따른 하중-침하 관계를 연약지반 두께별로 보여주고 있다. 모든 곡선에서 나타나듯 감쌈길이 8D에서 값이 수렴하는 경향을 보였으며, 이러한 경향은 그림 21에서 보다 잘 관찰할 수 있는데, 침하량이 80mm에서의 감쌈길이-극한지지력과의 관계 그래프에서 감쌈길이 8D 이후 최대 감쌈길이의 결과에 수렴하는 경향이 두드러졌다.

이러한 결과는 단일 쇄석말뚝의 임계 감쌈길이 4D와는

다소 상이한 결과이며, 이는 단일 쇄석말뚝의 거동 메커니즘과 다르게 무리 쇄석말뚝의 넓어진 재하면적에 의해 지반 내부의 전단면이 하향이동하기 때문으로 판단된다. 이러한 메커니즘은 그림 22에서 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 23은 연약지반 특성 및 두께 등의 시공조건 변화에 따라 지오그리드의 임계 감쌈길이( $E_L$ )와 강성( $J$ )을 검토하기 위한 것으로서 각각의 시공조건에 대한 하중-침하 관계로부터 허용하중을 설계인자와 비교한 그림이다. 먼저, 그림 23(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 23(a)의 결과를 살펴보면 연약지반 특성과 관계없이 감쌈길이 8D 이후부터는 전체 감

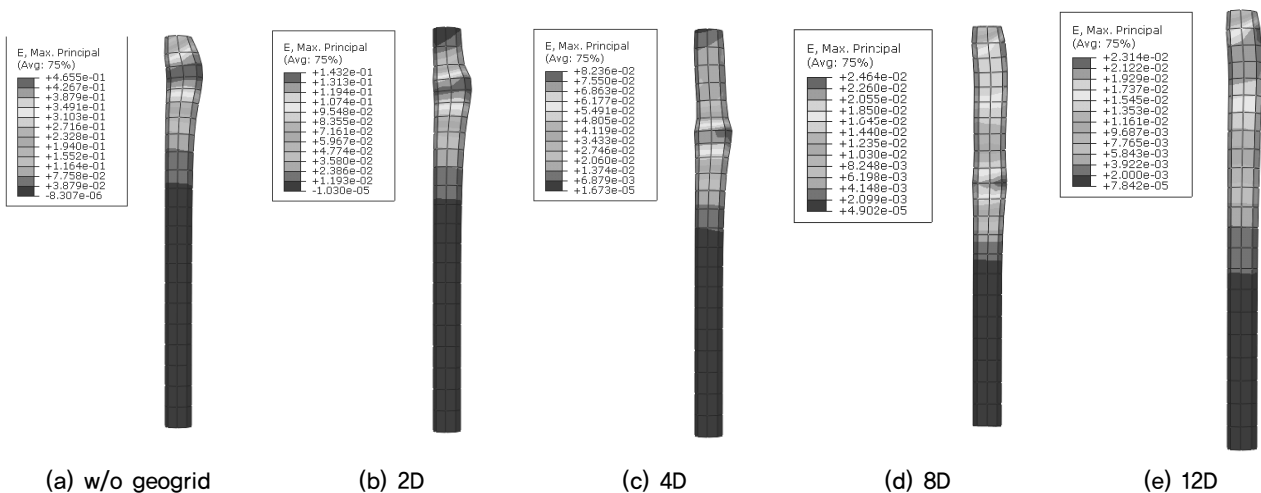
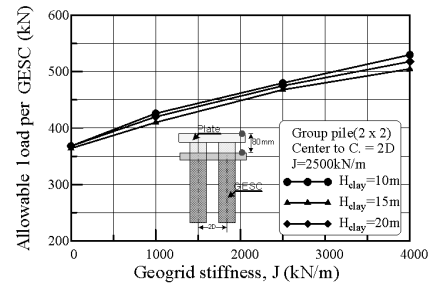
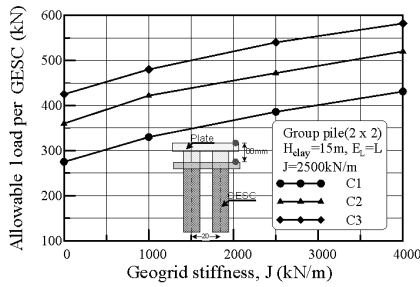
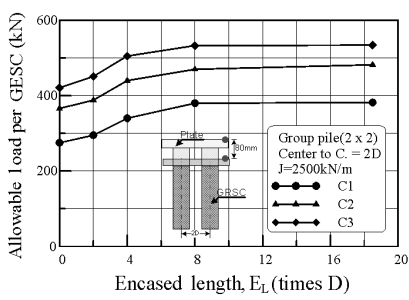


그림 22. 감쌈길이에 따른 2×2 무리 쇄석말뚝의 변형용 컨투어



(a) 연약층 특성 및  $E_L$ 에 따른 허용하중

(b) 연약층 특성 및  $J$ 에 따른 허용하중

(c)  $H_{day}$  및  $J$ 에 따른 허용하중

그림 23. 무리 쇄석말뚝의 시공조건 변화에 따른 허용하중 비교

삼조건과 침하량이 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림 23(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 증가 폭은 점차 감소해 2500~3000kN/m 범위를 임계치로 볼 수 있는 것으로 나타나 실무 적용시에는 경제성을 고려한 설계가 필요할 것으로 판단되었다.

그림 23(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( $H_{day}$ )에 따라서는 두드러진 특징을 발견할 수 없어 GESG 설계시 주요 고려항목과는 무관한 것으로 평가되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 최근 들어 현장 적용이 활발해 지고 있는 쇄석말뚝 공법의 개량공법으로서 개발된 지오그리드 감쌈 쇄석말뚝(GESG) 공법의 현장 적용성 확보를 위한 연구를 수행하였다. GESG 현장 적용성 확보를 위한 정량적 DB 구축의 일환으로 다양한 시공조건에 대한 해석을 수행하고 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 결

과는 다음과 같이 요약된다.

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.

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 말뚝본수 등의 쇄석말뚝 설계조건과 지오그리드 강성 및 감쌈길이를 고려하여야 함을 나타내며 점토층 두께와는 무관하게 보강효과를 일정한 수치를 적용할 수 있음을 의미한다.

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 4D 정도로 나타났으며, 지오그리드의 임계 강성은 약 2500kN/m 정도로 나타났다. 한편, 무리 쇄석말뚝의 경우 임의 시공조건에 대해 임계강성은 단일 쇄석말뚝과 유사한 수준이나 임계 감쌈길이는 말뚝의 본수와 간격, 기초재하판의 크기 등에 따라 달라질 수 있다.

## 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.

## 참고문헌

1. 유충식, 송아란, 김선빈, 이대영 (2007), “연약지반위에 시공되는 지오그리드 보강 쇠석기둥 공법의 유한요소모델링”, *한국지반공학회논문집*, 제23권, 10호, pp.133-150.
2. 이대영, 송아란, 유충식 (2006), “지오그리드 보강 스톤컬럼의 파괴메커니즘 및 지지력 측정: 축소모형실험을 통한 고찰”, *한국지반공학회논문집*, 제22권, 10호, pp.121-129.
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. Ai-Joulani, M. (1995), *Laboratory and analytical investigation of sleeve reinforced stone columns*, Ph.D. Thesis, Carleton University, Canada.
5. Hibbitt, Karlsson and Sorensen. (2007), *Abaqus users manual, Version 6.7.*, Inc. Pawtucket, Providence, R.I.
6. Kempfert, H. G., Wallis, P., Raithel, M., Geduhn, M. and McClinton, R. G. (2002), “Reclaiming land with geotextile-encased columns”, *Geotechnical fabrics Report*, Vol.20, No. 6, pp.34-39.
7. 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.

(논문접수일 2008. 11. 8, 심사완료일 2008. 11. 28)