

연약지반에 시공되는 지오그리드 감쌈 스톤컬럼의 하중 지지 메카니즘에 관한 연구

Investigation on Support Mechanism of Geogrid-Encased Stone Columns in Soft Ground

유 충 식¹ Yoo, Chung-Sik

김 선 빈² 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 improvement. A number of cases were analyzed using a 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 provides additional confinement effect that reduces vertical stress in the soft ground, thus resulting in less excess pore water pressures and associated settlement. 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 연약지반 성토시 지반보강 공법으로 적용되는 지오그리드 감쌈 스톤컬럼공법의 하중지지 메카니즘에 대한 내용을 다루었다. 이를 위해 연약지반 성토 시공과정과 지오그리드 감쌈 스톤컬럼의 배수 및 보강 효과를 현실적으로 모사할 수 있는 3차원 응력-간극수압 수치해석 모델을 이용하여 다양한 시공조건에 대한 해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 그 결과, 임의 시공조건에 있어 지오그리드 감쌈으로 발현되는 구속효과로 인해 스톤컬럼의 강성이 증가되어 상부 성토하중의 주변 연약지반으로의 하중분담율을 감소시키고 따라서 과잉간극수압 및 이에 따른 침하량이 감소되는 것으로 나타났다. 이러한 효과는 지오그리드 감쌈길이 및 강성 등 보강조건에 좌우되는 것으로 나타났으며 임의 시공조건에 있어 보강효과를 최대로 확보할 수 있는 임계감쌈길이와 임계강성이 존재하는 것으로 분석되었다.

Keywords : Finite element method, Geogrid, Soft ground, Stone column, Stress-pore pressure coupled analysis

1. 서 론

최근 들어 산업의 발달로 인한 철도, 도로, 항만구조물의 확충 등 인프라 구축으로 인해 국토 개발의 필요성이 날로 증가하고 있다. 특히 좁은 국토면적과 삼면

이 바다로 둘러싸인 국내 지형적 특성상 해안 및 내륙 연약지반의 활용을 통한 효율적인 국토이용이 절실한 실정이다. 그러나 연약지반에 성토 및 상부구조물 하중 재하시 압밀침하 및 과도한 전단변형 등에 적절히 대처하기 위한 연약지반 개량 공법의 적용은 필수적이다.

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

2 정회원, 성균관대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ., shoul@hanmail.net, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

스톤컬럼공법은 연약지반의 부분적 치환공법으로서 연약지반 성토에 있어서 신속한 시공이 가능하게 한다. 스톤컬럼공법의 주된 연약지반 보강 메카니즘은 배수 촉진과 지반강성 증대라고 할 수 있다. 즉, 쇄석이나 자갈로 시공되는 스톤컬럼은 높은 배수성을 가지므로 급배수로 인한 압밀침하를 촉진할 수 있고 스톤컬럼이 가지고 있는 높은 강성으로 인해 성토하중의 많은 부분을 지지하게 되어 침하제어 효과를 가지게 된다. 일반적으로 스톤컬럼은 연약지반을 관통하여 지지층까지 시공되거나 충분한 지지력이 확보된 연약대까지만 시공되는 floating 파일로 시공되기도 한다. 이러한 스톤컬럼의 주된 파괴메카니즘은 벌징파괴(bulging failure)로서 주로 구속력이 부족한 상부 2~3D(D=스톤컬럼 직경)에서 발생하게 된다(Madhav et al. 2006). 따라서 스톤컬럼의 하중 지지력은 상당부분 주변에서의 구속효과와 매우 밀접한 관계가 있다. 최근 들어 스톤컬럼 및 조립토 말뚝(granular pile)의 하중지지력 증가를 위한 방안으로서 조립토 말뚝의 주변을 지오텍스타일로 감싸는 공법에 대한 많은 연구가 진행된 바 있다(Kempfert et al., 1997, 2002; Raithel et al. 2001; Alexiew et al. 2003; Paul and Ponomarjow, 2004; Murugesan and Rajagopal 2006). 국내에서도 스톤컬럼의 하중지지력 증대 방안으로서 지오그리드로 감싸는 공법, 지오그리드 감쌈 스톤컬럼(geogrid-encased stone column, GESC)공법에 대한 기초적인 연구가 수행된 바 있다. 그림 1은 국내에서 수행된 GESC 시험시공 현장 사진으로서 시공순서를 보여주고 있는데 지오그리드 삽입을 위한 케이싱 삽입을 제외하고는 일반 스톤컬럼공법과 동일하게 적용할 수 있다. 이러한 GESC 공법에 대한 기초연구로서 이대영 등(2006)은 실

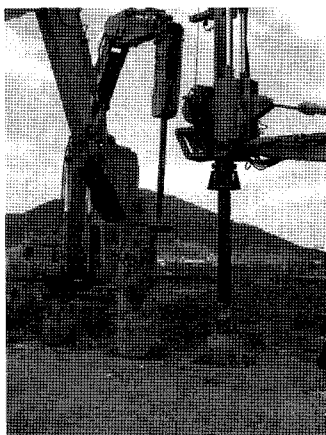
험적 연구를 통해 GESC 공법의 하중지지력 발현 메카니즘을 고찰하였으며 임의 하중재하조건에서 GESC의 하중지지력 극대화는 상부 3D 정도의 벌징영역에 대한 감쌈으로 실현할 수 있다는 결과를 보고한 바 있다. 한편, 최근 들어 유충식 등(2007)은 3차원 응력-간극수압 연계 유한요소해석 모델을 이용하여 GESC의 연약지반 성토 조건에서의 배수 및 침하제어 효과에 대한 기초적인 연구를 수행한 바 있다.

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 현장 적용에 필요한 구체적인 결과를 다루고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 GESC 현장 적용성 확보를 위한 정량적 DB 구축의 일환으로 다양한 시공조건에 대한 해석을 수행하고 GESC 설계시 적용할 수 있는 지오그리드 감쌈효과에 대한 정량적 결과를 제시하였다.

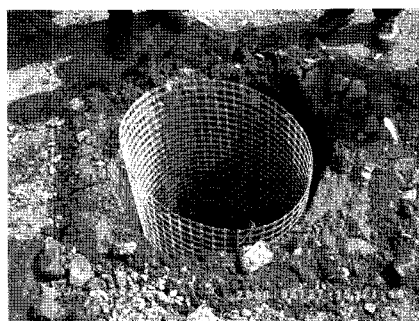
2. GESC 적용 현장조건 및 매개변수 연구

2.1 현장조건

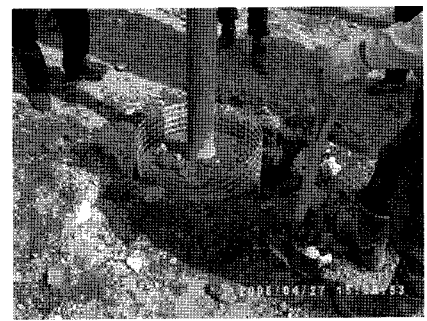
본 연구에서는 유충식 등(2007)의 연구에서 고려한 조건을 적용하였다. 즉, 그림 2에 나타난 바와 같이 비배수 전단강도가 50kPa 정도인 두께 10~20m의 연약지반 상부에 높이 6~15m, 하부 폭 45m의 제방이 제방경사 2H:1V 경사로 시공되는 경우를 대상으로 하였다. 연약지반 보강을 위해 직경 0.8m의 GESC가 치환율 5~15%로 시공되며 GESC는 연약층을 관통하여 하부 지지층



(a) 선굴착 및 케이싱 삽입



(b) 지오그리드 설치



(c) 쇄석투입 및 디짐

그림 1. GESC 시공예시(한국건설교통기술평가원, 2006)

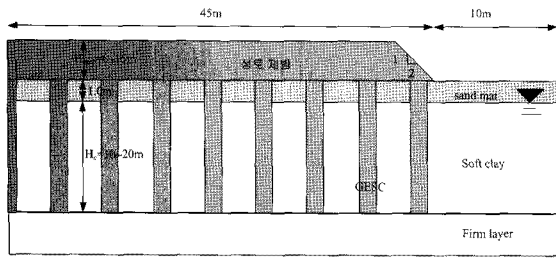


그림 2. 대상 현장 단면도

에 지지되는 것으로 간주하였다.

2.2 매개변수 연구

GESC의 다양한 설계조건에 따른 하중지지메카니즘을 고찰하기 위해 본 연구에서는 현장조건과 GESC 시공조건에 대한 매개변수연구를 수행하였다. 즉, 연약지반 두께(H_c), 성토높이(H_{emb}) 등 연약지반 현장조건과 더불어 지오그리드 감쌈길이(E_L) 및 강성(J), 치환율(R_R) 등 GESC 설계인자를 변화시켜 다양한 조건을 도출한 후 이러한 시공 및 설계인자와 GESC 하중지지 메카니즘의 상관관계를 고찰하였다. 표 1은 본 연구에서 고려한 매개변수의 변화 조건을 요약하고 있다.

3. 유한요소해석

3.1 해석 모델링

연약지반위의 제방성토 시공 문제는 성토로 인한 연약지반내 과잉간극수압 발생 및 소산, 이에 따른 압밀현상 등이 해석 모델링에서 현실적으로 다루어져야 하며, 따라서 이러한 문제에 대한 해석을 위해서는 응력-간극수압이 연계되는 해석모델링이 수행되어야 한다. 본 연구에서는 지반-지하수 상호작용 및 시공과정 등에 대한 모델링이 효율적으로 수행될 수 있는 범용 유한요소해석 프로그램 Abaqus (Abaqus, 2007) 사용하였다.

본 연구에서 대상으로 하는 스톤컬럼 적용 현장은 일반적으로 스톤컬럼이 일정한 간격으로 넓은 면적에 시공되므로 단위셀에 대한 모델링이 가능하다(유충식 등 2007) 본 연구에서는 보다 광의적인 GESC 하중지지메카니즘을 고찰하기 위해 전체 단면에 대한 해석을 수행하였다. 즉, 해석 모델링에 있어 그림 2에서 보이는 바와 같이 시공조건이 제방 중심을 기준으로 좌·우 대칭조건이 성립되는 관계로 우측 반 단면을 해석모델링에 포함시켰으며 연약지반 개량 시공조건 특성상 평면에 직각방향으로 동일한 조건이 반복되는 일종의 평면변형을 조건이 성립되므로 GESC 단일 행에 대한 3차원 모델링을 수행하였다.

변위 경계조건에 있어서 해석단면의 좌·우측면은 수평방향 변위를 구속하였으며, 바닥면은 수평, 연직방향 변위를 구속하였다. 한편, 평면에 수직인 종방향면은 종방향 변위를 구속하여 평면변형조건이 성립되도록 하였다. 한편, 연계해석에 필요한 수리 경계조건의 설정에 있어 초기 및 시공 중 지하수위를 점토층 상부에 위치하도록 하였으며 성토하중에 의한 과잉간극수압은 점토층 상부에서의 간극수압이 '0'이 되도록 하여 소산되도록 하였다. 또한 해석의 편의상 스톤컬럼은 지오그리드와 함께 점토층에 매입된 상태인 것으로 간주하고(wished-in-place), 제방 성토가 이루어지는 것으로 모델링하였다.

한편, 모델의 이산화에서 연약지반과 하부 지지층, 스톤컬럼, 그리고 모래층은 8절점 가감적분 응력-간극수압 연계요소 (C3D8RP)로 모델링하였으며 성토체는 8절점 가감적분 응력요소 (C3D8R)로 모델링하였다. 한편, 지오그리드의 모델링에 있어서 지오그리드의 멤브레인 효과로 인한 보강효과를 구현하기 위해 ABAQUS에서 제공하는 멤브레인 요소(M3D4)를 이용하여 모델링하였다(유충식 등 2007). 한편, 재료 모델링에 있어 연약지반은 Modified Cam-Clay (MCC) 모델을 적용하여 압밀시 연약점토지반의 침하특성이 모사되도록 하였으며, 제방 및 하부지층, 그리고 스톤컬럼은 Mohr-Coulomb

표 1. 시공 및 설계조건에 대한 매개변수 범위

매개변수	범위
연약지반 두께, H_c	10, 15, 20m
성토고, H_{emb}	6, 10, 15m
치환율, A_E	5, 10, 15%
지오그리드 강성, J	1000, 2500, 4000kN/m
지오그리드 감쌈길이 E_L	2D, 4D, 6D, 10D, 12D, 14D, L(전체감쌈)

모델을 적용하였다. 한편, 지오그리드는 탄성거동을 하는 것으로 가정하였다. 한편, 본 연구에서 고려한 세 종류의 연약지반에 대한 MCC 모델 파라미터는 본 연구를 수행하는 과정에서 실시한 ○○지역의 연약지반의 지반조사결과를 바탕으로 선정하였으며 스톤컬럼 및 성토체 모델링에 필요한 재료 모델 파라미터는 유충식 등(2007)에서 적용한 결과를 사용하였다. 그림 3과 표 2에서는 각각 해석에 적용된 유한요소해석 모델과 본 연구에서 적용한 해석 적용물성을 정리하였다.

3.2 시공과정 모사

연약지반위에서 이루어지는 성토문제의 현실적인 해석 모델링을 위해서는 해석에서 실제 현장에서 이루어지는 시공과정에 대한 상세한 모델링이 수반되어야 한다. 본 연구에서는 응력 및 지하수위 초기조건 확보 후에 단계별 성토가 이루어지는 것으로 가정하였으며 각 단계별로 2m의 제방이 15일에 걸쳐 성토되며 성토 후 10일의 방치시간을 갖는 것으로 가정하고 이에 대한 모델링을 수행하였다.

3.1절과 3.2절에 제시된 해석 모델링 기법은 저자들

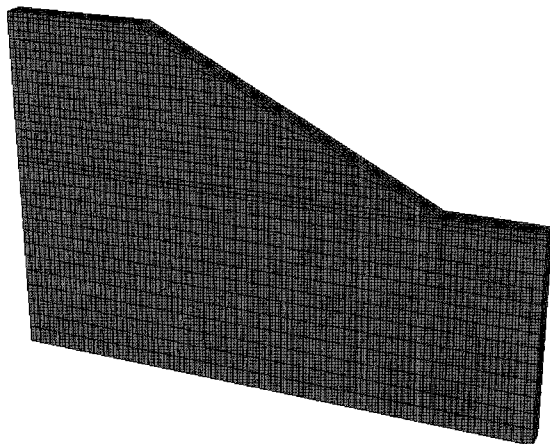


그림 3. 유한요소해석 모델

표 2. 해석에 적용된 특성치

구분	γ (kN/m ³)	E (kPa)	ν	c (kPa)	ϕ (deg)	k (cm/s)
제방	18	15,000	0.3	3	33	-
모래	19	15,000	0.3	3	28	-
스톤컬럼	20	40,000	0.3	5	40	1.16×10^{-2}
점토층	19	$\lambda^1 = 0.2, \kappa^2 = 0.2, M^{\beta} = 1, \alpha_0^4 = 50, e^5 = 1.0$			1.16×10^{-6}	
지오그리드	J=1000, 2500, 4000kN/m					

주) λ^1 =plastic slope, κ^2 =elastic slope, M^{β} =critical stress ratio, α_0^4 =initial yield surface size, e^5 =void ratio

이 수행한 기존 연구에서 검증된 바 있으며 구체적인 내용은 유충식 등(2007)에 기술되어 있다.

4. GESC 하중지지 메카니즘

GESC 하중제어 메카니즘 고찰을 위해 스톤컬럼이 전 길이에 대해 지오그리드로 감싸지는 조건에 대해 성토시 과잉간극수압, 침하, 유효응력 등에 대한 고찰을 통해 지오그리드 감쌈효과가 스톤컬럼의 하중지지력에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 내용을 종합적으로 검토하였다.

4.1 침하제어 메카니즘

그림 4는 두께 10m의 연약지반위에 치환율 5%로 스톤컬럼이 설치되고 상부에 높이 10m의 제방이 시공되는 경우에 있어서 시간에 따른 간극수압, 침하, 지오그리드 스트레인 발생 추이를 보여주고 있다. 여기서는 $J=1000 \sim 4000 \text{ kN/m}$ 범위의 지오그리드가 적용된 결과를 도시하고 있는데 보이는 바와 같이 간극수압 및 침하 변화경향에서 지오그리드 감쌈의 효과를 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 즉, 그림 4(a)에서는 성토에 따른 과잉간극수압(Δu) 증가 및 소산의 과정이 나타나 있는데 지오그리드의 강성이 증가할수록 과잉간극수압이 작게 발생되어 $J=4000 \text{ kN/m}$ 의 지오그리드 적용시 과잉간극수압을 일반 스톤컬럼 대비 최대 40%정도 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 여기서의 과잉간극수압은 인접 두 GESC 중앙부에서 측정된 것으로서 결국 지오그리드 감쌈으로 인한 구속력 증가효과로 인해 스톤컬럼의 하중지지력이 증가됨에 따라 점토층의 성토하중 부담율이 감소되기 때문으로 이해할 수 있다. 한편, 지오그리드 감쌈효과가 제공하는 스톤컬럼 강성증대는 과잉간극수압의 감소와 더불어 그림 4(b)에서와 같이 침

하제어 효과를 갖게 한다. 즉 그림 4(b)에서는 성토시 시간-침하 관계 변화경향을 보여주고 있는데 여기서 보이는 바와 같이 지오그리드 강성이 증가할수록 침하량이 감소하는 경향을 관찰할 수 있으며 $J=4000\text{ kN/m}$ 지오그리드 적용시 일반 스톤컬럼 대비 40% 정도의 침하 억제 효과를 얻을 있는 것으로 분석되었다. 지오그리드의 스톤컬럼 보강 효과는 성토 및 압밀 진행에 따라 스톤컬럼을 감싸고 있는 지오그리드의 원주방향 스트레인(hoop strain)이 최대 4%정도(치환율 5%의 경우)까지 발생하는 경향을 보여주고 있는 그림 4(c)에서 보다 뚜렷하게 확인할 수 있다.

앞에서 기술한 바와 같이 스톤컬럼을 지오그리드로 감쌀 경우 지오그리드는 주변지반이 제공하는 구속력 이외의 추가적인 구속력을 제공하게 되어 스톤컬럼의 강성을 증대시키는 효과를 가져오며 결국 성토시 스톤컬럼의 성토하중 분담율은 증가하게 된다. 이는 곧 주변 연약층에 작용하는 응력을 감소시킴으로써 유발되는 과잉간극수압을 감소시키고 따라서 압밀침하를 감소시키는 역할을 하며 스톤컬럼의 강성증가로 인한 하중지지력 증대는 추가적인 침하제어 효과를 제공한다. 이러

한 경향이 그림 5에서 관찰할 수 있는데 여기서는 스톤컬럼 설계시 매우 중요한 설계인자로 사용되는 아래 식 (1)로 제시되는 응력집중비(n)를 지오그리드 강성에 따라 나타내고 있다.

$$\text{응력집중비 } (n) = \frac{\text{스톤컬럼의 연적응력}}{\text{연약지반의 연적응력}} \quad (1)$$

여기서의 응력집중비는 점토층 상부 1m 하부지점에서 측정된 결과를 제시하였으며 보이는 바와 같이 임의 치환율에 있어 지오그리드의 강성이 증가할수록, 즉 구속 효과가 증가할수록, 응력집중비가 최대 75% 증가하는 경향을 보여주고 있다[그림 5(a)]. 한편, 그림 5(b)에서 관찰할 수 있는 바와 같이 이러한 응력집중비는 임의 감쌈조건에 있어 성토높이가 증가할 수록, 즉 하중수준이 증가할수록, 다소 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 GESC 설계에 있어서는 일반 스톤컬럼공법에 비해 응력집중비를 상향조정하여 적용할 수 있을 것으로 판단되며 이는 곧 일반 스톤컬럼 공법 대비 GESC 설치물량을 감소시킬 수 있음을 의미함으로써 결국 GESC의 높은 경제성을 의미한다고 하겠다.

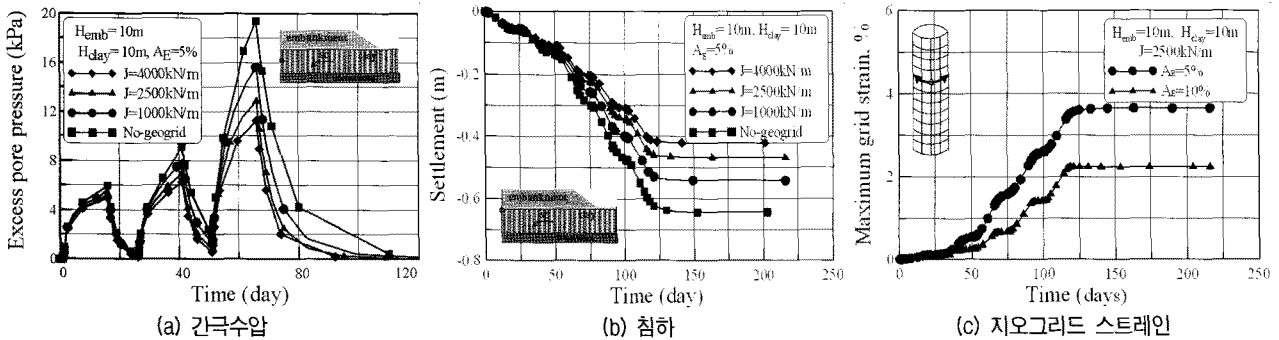


그림 4. 지오그리드 강성에 따른 간극수압 및 침하 변화 경향

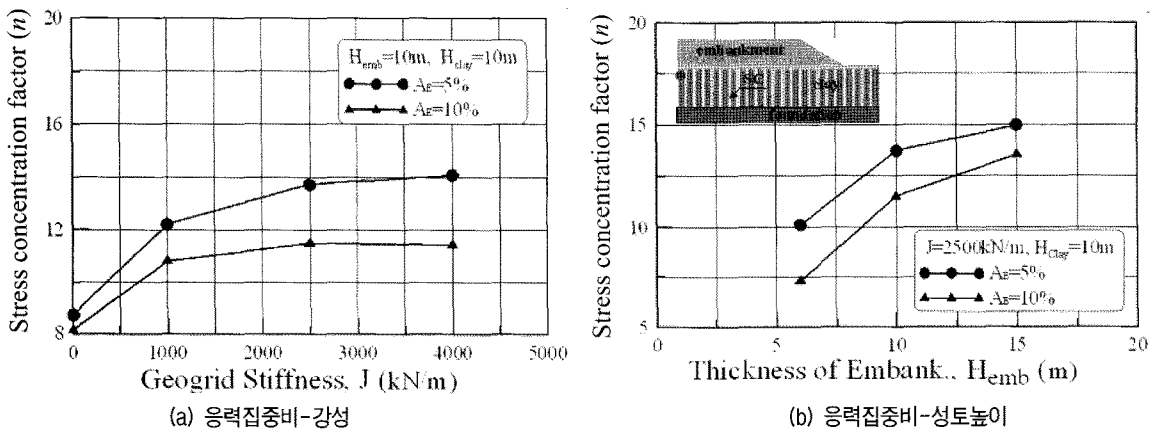


그림 5. 지오그리드 강성 및 성토높이에 따른 응력집중비 변화경향

4.2 침하비 및 응력집중비

1) 침하비

그림 6에서는 점토층 두께가 $H_c = 10m$ 인 경우에 있어 성토높이 $H_{emb} = 6, 10, 15m$ 로 시공되는 경우에 대해 치환율에 따른 침하비(β) 변화경향을 다양한 강성의 지오그리드가 적용된 경우에 대해 나타내고 있다. 여기서 침하비 β 는 GESC 적용 조건의 최종침하를 스톤컬럼이 적용되지 않은 무처리 지반의 침하량으로 정규화시킨 수치로서 침하측정 위치는 제방 중앙으로 하였다. 이 그림에서도 지오그리드 감쌈효과를 뚜렷하게 관찰할 수 있는데 보이는 바와 같이 성토높이에 따라 다소의 차이는 있으나 본 연구에서 고려한 지오그리드 강성 범위에 있어서 GESC는 일반 스톤컬럼 대비 침하량을 30~45% 정도 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

그림 7은 그림 6의 성토 높이 $H_{emb} = 6m$ 조건에 대해 치환율 및 점토층 두께(H_c)에 따른 침하비 변화 경향을 다양한 지오그리드 강성에 대해 나타내고 있다. 이 그림에서 관찰할 수 있는 흥미로운 경향은 임의 지오그리드 강성에 대해 치환율에 따른 침하비 변화경향이 점토층 두께와 거의 무관하게 나타나는 경향으로서 이는 GESC의 지오그리드 보강효과 평가시 주 변수로서 치환율과 지오그리드 강성을 고려하여야 함을 나타내며 점토층

두께와는 무관하게 보강효과를 일정한 수치로 제시할 수 있음을 나타낸다고 하겠다.

2) 응력집중비

한편, 그림 8에서는 다양한 높이의 제방이 성토되는 경우에 대해 지오그리드 강성에 따른 응력집중비 변화 경향을 나타내고 있다. 이 그림에서 관찰할 수 있는 경향은 먼저 지오그리드 강성이 증가할 수록 응력집중비가 증가하나 일정한 강성 이상에서는 응력집중비가 수렴하는 경향을 보이고 있어 임계강성(J_{cr})이 존재하는 것으로 나타났으며 임계강성은 성토높이에 관계없이 약 $J_{cr} = 2500 kN/m$ 로 분석되었다. 또한 하나의 흥미로운 경향은 임의의 강성을 가진 지오그리드로 감싼 경우에 있어 치환율이 작을수록 응력집중비가 증가하는 경향으로서 이는 GESC 공법을 적용하는데 있어 치환율이 작을때 지오그리드 감쌈효과가 뚜렷해짐을 의미한다.

그림 9는 그림 8의 결과를 재 구성한 것으로서 여기서는 지오그리드 강성에 관계없이 응력집중비는 성토높이가 증가할수록, 즉 하중수준이 증가할수록, 증가하는 경향을 보이고 있는데 이는 응력집중비는 스톤컬럼과 연약점토의 강성비에만 좌우되는 것이 아니라 성토 하중의 수준에 따라 달라질 수 있음을 의미하는 것으로서 따라서 GESC 적용현장의 응력집중비는 치환율, 지

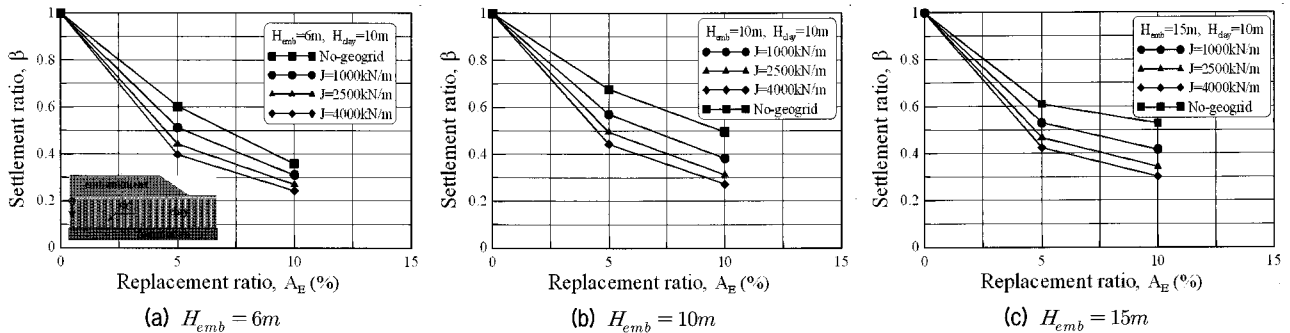


그림 6. 성토높이에 따른 침하비 변화경향

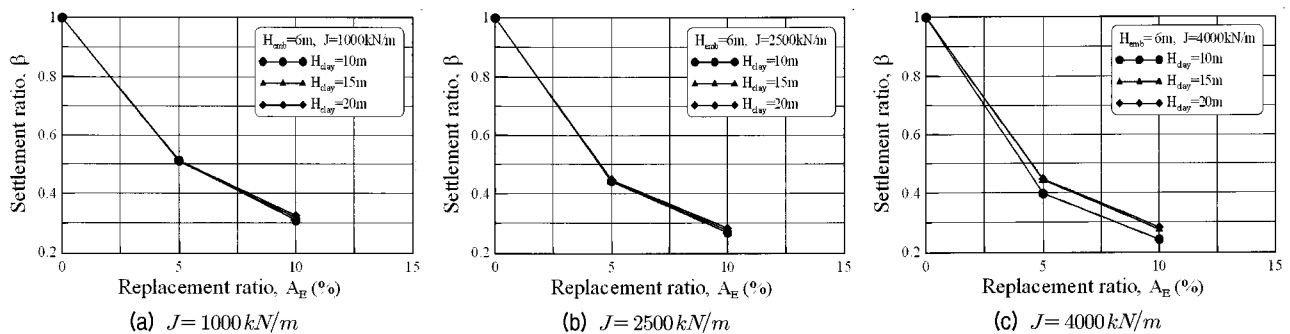


그림 7. 지오그리드 강성에 따른 침하비 변화 경향

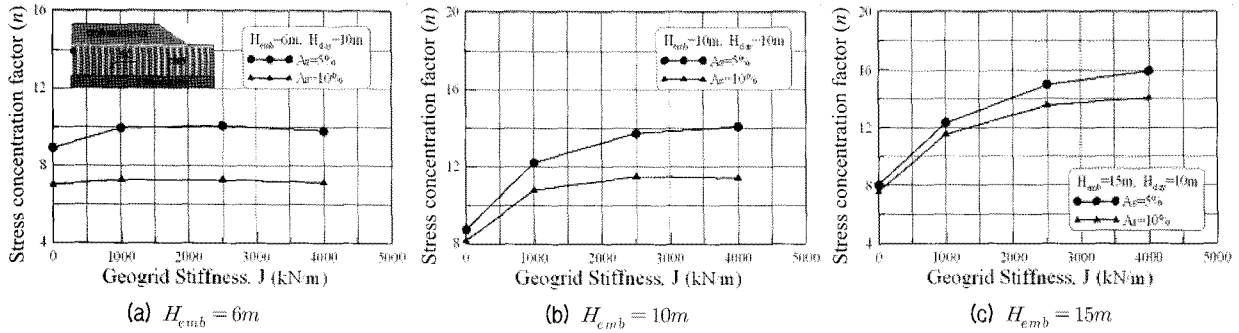


그림 8. 다양한 성토높이에서의 응력집중비-지오그리드 강성 관계

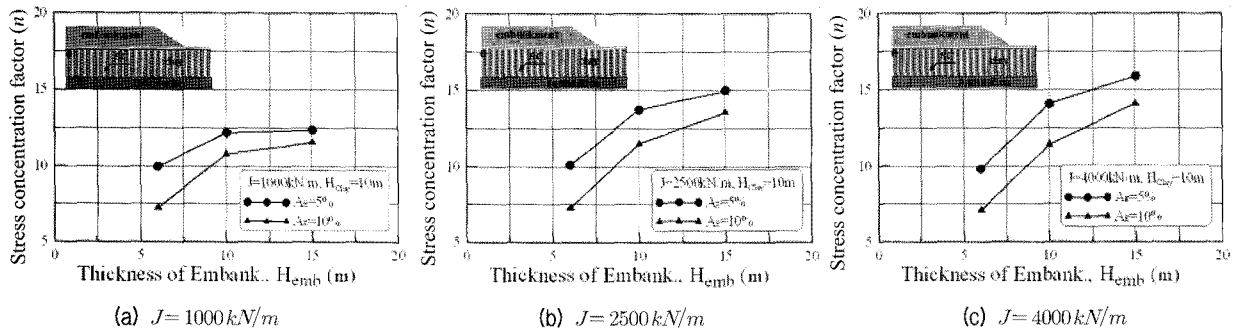


그림 9. 다양한 지오그리드 강성에 대한 응력집중비-성토높이 관계

오그리드 강성, 성토높이를 고려하여 산정하여야 할 것으로 판단된다.

앞서 언급한 바와 같이 응력집중비는 스톤컬럼 설계시 매우 중요하게 간주되는 항목으로서 Barksdale과 Bachus (1983)은 일반 스톤컬럼공법에 있어 다양한 시공조건에 대한 응력집중비(n)을 그림 10과 같이 제시한 바 있다. 본 연구에 대한 조건의 경우 스톤컬럼과 점토층의 변형 계수비가 약 12 정도 되므로 약 $n \approx 3 \sim 4$ 정도를 기대할 수 있으나 그림 8에서 관찰할 수 있는 바와 같이 GESC의 경우 지오그리드의 강성에 따라 최대 14 정도

까지 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이러한 경향은 앞서 언급한 바와 같이 결국 지오그리드 보강으로 인해 스톤컬럼의 강성이 증가하는 효과 때문으로 이해할 수 있다.

5. 임계감쌈길이 및 임계강성

5.1 임계감쌈길이

기존의 연구(Murugesan and Rajagopal 2006, 이대영 등, 2006)에서는 스톤컬럼, 혹은 조립토말뚝의 경우 상부 3-4D 정도를 보강(감쌈)으로서 그 효과를 극대화 할 수 있는 것으로 보고하고 있다. 이들 대부분의 연구에서는 단순 하중 재하 조건(단기하중조건)으로서 조건은 본 연구에서 다루고 있는 성토하중 재하시 장기 침하 시공조건과는 다소 차이가 있다고 할 수 있다.

그림 11(a)는 $H_{emb} = 10m$, $H_c = 15m$, 그리고 $A_E = 10\%$ 조건에 있어 지오그리드 감쌈길이(E_L)에 따른 침하 발생 경시 변화를 보여주고 있다. 이 그림에서 보이는 바와 같이 E_L 가 증가할 수록 침하량이 감소하나 $E_L \geq 12D$ 에서는 침하량이 수렴하는 경향을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 무처리 지반의 과잉간극수압으로 정규화한 과잉간극수압비($\Delta u_{max, \geq SC} / \Delta u_{max, untreated}$) 변화경향을 보

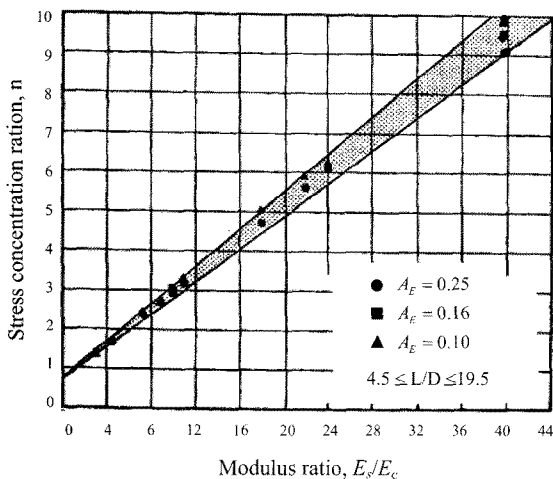


그림 10. 응력분담비와 치환율 관계(Barksdale and Bachus, 1983)

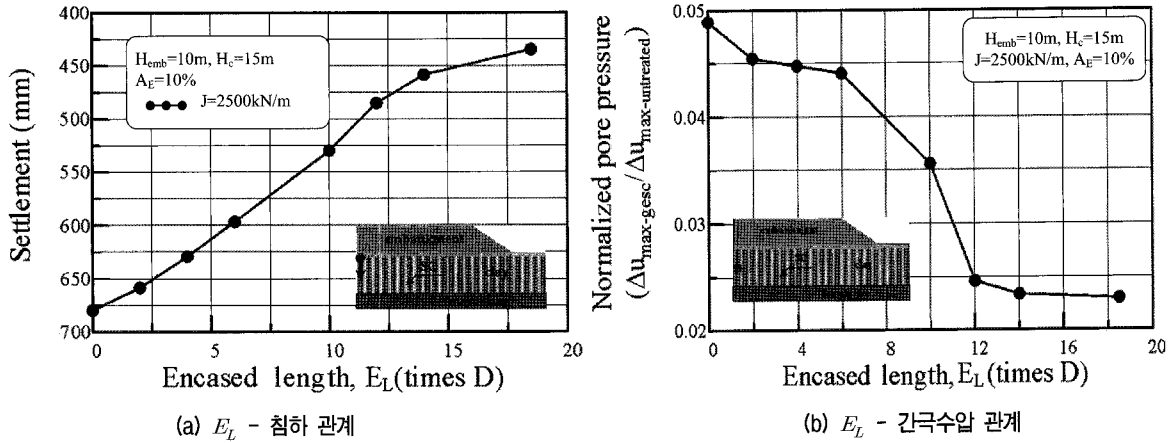


그림 11. 지오그리드 강성에 따른 간극수압 및 침하 변화 경향

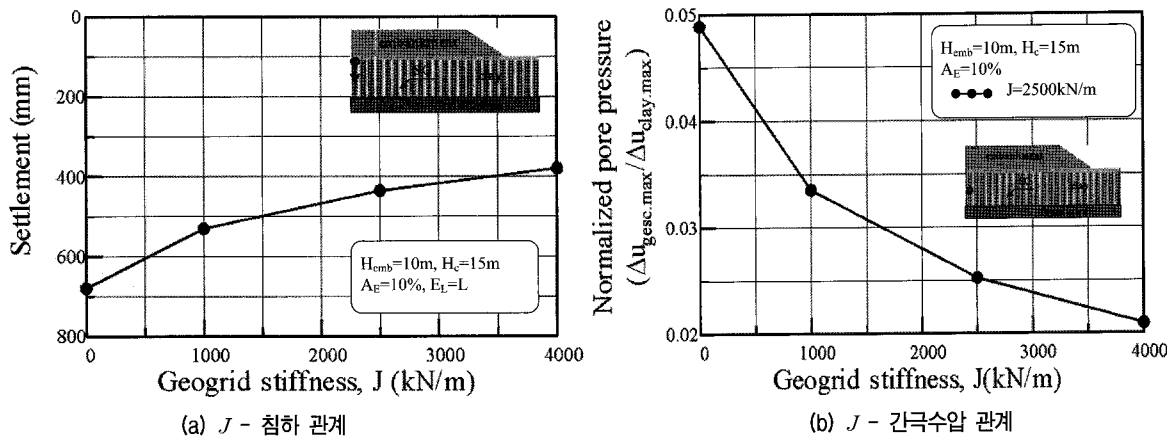


그림 12. 지오그리드 강성에 따른 간극수압 및 침하 변화 경향

여주고 있는 그림 11(b)에서도 잘 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 스톤컬럼을 전 길이에 대해 감싸지 않더라도 상부 $E_L \approx 12D$ 정도 감쌈으로서 보강효과를 극대화할 수 있음을 의미하는 것인데 앞서 언급한 단순하중 재하 조건의 임계치인 $(E_L)_{cr} \approx 3D$ 와 매우 상이한 것으로 나타났다. 따라서 GESG 임계감쌈길이는 하중 조건(즉, 단기 또는 장기)에 따라 선별하여 적용하여야 할 것으로 판단된다.

5.2 임계강성

그림 12는 $H_{emb} = 10m$, $H_c = 15m$, 그리고 $R_R = 10\%$ 조건에 있어 지오그리드 강성(J)에 따른 침하 및 과잉간극수압비 $\Delta u_{max, \geq SC} / \Delta u_{max, untreated}$ 발생 경시 변화를 보여주고 있다. 이 그림에서도 침하 혹은 과잉간극수압과 지오그리드 강성의 관계는 선형의 관계가 아니라 비선형의 관계를 보이며 침하관계에서와 같이 뚜렷하지는 않으나 대략 $J \approx 2500 kN/m$ 에서 침하나 과잉간극수압

이 수렴하는 경향을 보이고 있다. 이는 $J \approx 2500 kN/m$ 를 임계강성으로 간주할 수 있음을 의미하는 것으로서 임의 시공조건에 있어 보강효과를 극대화하면서 경제성을 확보하는 차원에서 임계강성에 해당하는 지오그리드를 선정하여 적용하는 것이 중요함을 의미한다고 하겠다.

6. 결론

본 연구에서는 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 가상의 현장조건에 대한 3차원 응력-간극수압 연계해석을 수행하고 그 결과를 토대로 GESG 적용시 침하 및 응력, 간극수압 등을 종합적으로 분석하여 하중지지 메커니즘을 고찰하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 아래와 같이 요약된다.

- (1) GESc 적용시 지오그리드 감쌈은 연약지반내 과잉 간극수압을 감소시키며 $J=4000\text{ kN/m}$ 의 지오그리드 적용시 과잉간극수압을 일반 스톤컬럼 대비 최대 80%정도 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 과잉간극수압의 감소는 일반 스톤컬럼 대비 40% 정도의 침하 억제 효과를 얻을 있는 것으로 나타났다.
- (2) 임의 치환율에 있어 지오그리드의 강성이 증가할수록, 즉 구속효과가 증가할수록, 응력집중비가 최대 75% 증가하였으며 이러한 응력집중비는 임의 감쌈 조건에 있어 성토높이가 증가할 수록, 즉 하중수준이 증가할수록, 다소 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 GESc 적용 스톤컬럼 설계에 있어서는 일반 스톤컬럼공법에 비해 응력집중비를 상향조정하여 적용할 수 있을 것으로 판단되며 이는 곧 일반 스톤컬럼 공법 대비 GESc 설치 물량을 감소시킬 수 있음을 의미함으로써 결국 GESc의 높은 경제성을 확보할 수 있다.
- (3) 임의 지오그리드 강성에 있어 치환율에 따른 침하비 변화경향을 분석한 결과 침하비는 점토층 두께와 거의 무관하게 나타났다. 이는 GESc의 지오그리드 보강효과 평가시 주 변수로서 치환율과 지오그리드 강성을 고려하여야 함을 나타내며 점토층 두께와는 무관하게 보강효과를 일정한 수치를 적용할 수 있다.
- (4) 본 연구에서 적용한 현장조건의 경우 일반 스톤컬럼의 경우 약 응력집중비가 $n \approx 3 \sim 4$ 정도이나 GESc의 경우 지오그리드의 강성에 따라 최대 14 정도까지 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 응력집중비는 스톤컬럼과 연약점토의 강성비에만 좌우되는 것이 아니라 치환율, 지오그리드 강성, 성토높이를 고려하여 산정하여야 하는 것으로 분석되었다.
- (5) 임의 시공조건에서 지오그리드 보강효과를 극대화 할 수 있는 지오그리드의 임계감쌈길이 및 임계강성이 존재하며 본 연구에서 고려한 시공조건에서는 각각 $(E_L)_{cr} \approx 12D$ 및 $J_{cr} \approx 2500\text{ kN/m}$ 로 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.

참고 문헌

1. 유충식, 송아란, 김선빈, 이대영 (2007), “연약지반위에 시공되는 지오그리드 보강 쇠석기둥 공법의 유한요소모델링”, *한국지반공학회논문집*, 제23권, 제10호, pp.133-150.
2. 이대영, 송아란, 유충식 (2006), “지오그리드 보강 스톤컬럼의 파괴메카니즘 및 지지력 측정: 축소모형실험을 통한 고찰”, *한국지반공학회논문집*, 제22권, 제10호, pp.121-129.
3. Abaqus users manual, Version 6.7., 2007, Hibbit, Karlsson, and Sorensen, Inc., Pawtucket, Providence, R.I.
4. 한국건설교통기술평가원 (2006), “고강도 지오그리드 보강 Stone Column공법 실용화 연구”, 135p.
5. Alexiew, D., Horgan, G.J., and Brokemper, D. (2003), “Geotextile encased columns (GEC): load capacity & geotextile selection, Sweden.” *BGA International Conference on Foundation*.
6. Barksdale, R. D. & Bachus, R. C. (1983), “Design and construction of stone column” Volume I, *FHWA/RD-83/026*.
7. Kempfert, H.G., Jaup, A., and Raithel, 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., 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.
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. 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.

(접수일자 2008. 10. 8, 심사완료일 2008. 12. 20)