

지오그리드 감쌈 Stone Column 제작 방안에 대한 실험적 연구

Laboratory Investigation on Construction Method of Geogrid Encased Stone Column

이 대 영¹ Lee, Dae-Young

유 충 식² Yoo, Chung-Sik

Abstract

This paper presents the results of a laboratory investigation on construction method of geogrid encased stone column (GESC). In order to analyze effects of load carrying capacity and geogrid deformation characteristics of GESC, a series of medium scale unconfined compression tests with different overlay methods and reduced model tests were performed. The test results show that the method of overlap provides a simple and effective method of encasement construction. It is also found that geogrid encasement construction using method of overlap has important factor which can be applied to field tests. The geogrid encasement method related to effect of reinforcement is presented by laboratory test results.

요 지

본 논문에서는 지오그리드 감쌈쇄석말뚝 공법의 현장적용을 위한 지오그리드 감쌈 제작방법에 관한 실험적 내용을 다루었다. 지오그리드 감쌈 제작방법에 따른 지오그리드 쇄석기둥의 지지력 증가 특성과 변형특성 평가를 위해 중대형 압축시험을 수행하였다. 실험결과를 통해 지오그리드 감쌈 제작시 지오그리드 겹침 제작은 효율적인 방법임을 알 수 있으며, 쇄석기둥 상부영역에서 지오그리드 감쌈 제작방법에 따른 접합부위의 품질관리 방안이 중요함을 알 수 있다. 실험결과를 통해 현장적용시 GESC의 충분한 보강효과를 발휘하기 위한 지오그리드 감쌈 제작 방안을 제시하였다.

Keywords : Laboratory testing, Geogrid encasement, Overlay, Reinforcement, Stone columns

1. 서 론

연약지반 공사현장에서 모래를 대신해서 자갈이나 쇄석을 이용하여 지반을 개량하여 지반강도를 높이는 공법인 쇄석기둥 공법(Stone Column Method)은 철도, 도로, 항만시설물, 성토구조물등 상부구조물의 하중을 지지하기 위한 연약지반 보강에 효율적인 공법으로 알려져 있다.

연약지반 내의 쇄석기둥 형성은 압밀 축진을 위한 연직배수재료의 역할 및 쇄석의 높은 강성으로 인해 상부 구조물 하중의 많은 부분을 지지하여 침하제어 효과를 유도하는 등 많은 장점이 있는 것으로 알려져 있다 (Barksdale 등, 1983). 그러나 쇄석기둥 공법은 과도한 상부 구조물 하중에 의해 연약지반내에서 쇄석기둥의 팽창과괴가 발생하며 지반조건에 따라 과도한 침하가 발생하는 단점이 존재한다.

1 정회원, 한국건설기술연구원 지반공학연구실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engrg. Division, KICT.)

2 정회원, 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ., csyoo@skku.edu, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

최근 들어 연약지반내에서 모래 또는 쇄석말뚝의 상부 팽창파괴 및 침하를 감소시켜 지반의 지지력 증가를 위해 모래말뚝이나 쇄석말뚝을 토목섬유로 감싸는 공법(goesynthetic-encased stone column, GESG)에 관한 많은 연구가 수행되었다(AI-Joulani 1995; Kempfert et al 1999, 2002; Raithel et al 2001; Alexiew et al. 2000, 2003; Murugesan and Rajagopal 2006; 이대영 등 2006a,b; 유충식 등 2007; Geniel and Bouazza 2009).

토목섬유 감쌌 쇄석말뚝에 관한 기존의 연구들은 모형실험과 유한요소해석등을 통해 토목섬유 감쌌 쇄석기둥의 하중전이 특성, 침하거동, 팽창억제 등 토목섬유 보강 메카니즘 규명 등에 관한 기초 연구가 진행되고 있다. 기존의 연구들을 살펴보면 Paul 등(2004)은 연약지반에 설치된 고압축 미네랄 골재, 모르타르, 콘크리트 칼럼과 토목섬유보강 모래기둥, 지오그리드 보강 스톤칼럼의 지지력 특성, 배수효과 등을 평가 하였으며, 지오그리드 보강 스톤칼럼의 실대형 일축압축시험을 통해 지오그리드 감쌌 부위의 전단응력 설계 방안을 제시 하였다. Trunk 등(2004)은 지오그리드로 보강된 쇄석 및 자갈, 모래 혼합 기둥을 진동 다짐 공법을 사용하여 형성한후 실대형 실험을 수행하여 지오그리드 및 주변지반의 응력 변형거동을 평가하였다. 이대영 등(2006a)과 Murugesan and Rajagopal(2007), Geniel and Bouazza (2009) 등은 실내모형실험을 통해 토목섬유 감쌌 쇄석기둥이 토목섬유의 구속효과로 인해 쇄석기둥의 팽창파괴를 억제하여 지지력을 향상시켜 주며, 쇄석기둥 상부 영역에서 감쌌효과가 최대로 발휘되어 하중지지효과가 있음을 제시하였다. Yoo and Kim(2009)은 2차원 및 3차원 응력-간극수압 연계 유한요소 해석 모델기법을 이용하여 GESG의 2, 3차원 모델링 기법에 따른 효과 분석과 연약지반 성토조건에서의 배수효과 및 하중지지특성에 관한 연구를 수행하여 현장설계시 적용할 수 있는 기초자료를 제시하였다.

토목섬유 감쌌 쇄석말뚝의 연구들은 GESG공법의 하중지지 특성 및 침하감소효과를 통해 현장적용시 설계 반영할 수 있는 기초자료를 제시하고 있으나, 현장적용시 GESG설치를 위한 지오그리드 감쌌쇄석기둥의 제작방안에 대한 연구는 수행되지 않고 있다. 이대영 등(2006a, 2006b)은 모형실험 및 실내시험을 통해 GESG 최대팽창 방향 변형은 상부 벌징(bulging)영역에서 발생하며, 토목섬유 감쌌부위의 파단은 쇄석기둥의 상단부 접합부위에서 발생하며 충분한 접합강도를 고려하여야 하며

GESG의 시험시공 및 현장적용을 위한 지오그리드 감쌌 부위의 제작방법에 대한 연구 필요성을 제안하였다.

이에 본 연구에서는 지오그리드 감쌌 방법에 따른 지오그리드 쇄석기둥의 지지력 증가 특성과 변형특성을 고찰하고 효율적인 지오그리드 감쌌 제작방안을 제시하기 위한 목적으로 실내실험을 수행하였다. 하중재하에 따른 지오그리드감쌌 부위의 변형특성을 고찰하기 위해 중대형 비구속 압축실험을 수행하였으며, 지오그리드 감쌌 겹침방법에 따른 보강효과를 고찰하였다. 실험결과를 통해 GESG의 거동특성을 평가하였으며, 지오그리드 현장적용시 GESG의 충분한 보강효과를 발휘하기 위한 지오그리드 감쌌 쇄석기둥 제작방안을 제시하였다.

2. 쇄석기둥 감쌌 지오그리드 원형인장력(Ring tension force)

GESG 공법은 토목섬유로 쇄석말뚝의 외경을 감쌌 쇄석기둥의 횡방향 변형을 구속시켜 침하를 감소시켜주는 연약지반 보강공법이다. 지오그리드 감쌌으로 인한 보강 메카니즘은 지오그리드로 쇄석기둥을 감쌌 보강함에 따라 연직하중에 대한 쇄석기둥의 지지력이 최대 로 발휘된 이후 수평방향으로 전이되는 하중을 지오그리드가 수평내압에 저항하는 역할을 하게 된다. 쇄석기둥의 변형을 구속시켜주는 역할을 하는 쇄석기둥의 둘레방향 지오그리드에 발생하는 저항력을 원형인장저항력(Ring tension force, F_R) 이라 한다. GESG공법의 현장 적용 및 설계를 위해 지오그리드인장력 산정은 공법의 안정성 뿐만 아니라 경제적 설계를 위해 매우 중요한 요소이다. Paul and Ponomarjow(2004)는 단위셀 개념을 이용하여 지오그리드로 보강된 쇄석기둥지반의 지지력 증가와 쇄석기둥의 하중분담효과를 통해 지오그리드 원형인장력 산정방안을 제시하였다.

쇄석기둥에 연직하중 재하시 응력은 쇄석기둥과 지반의 수평력으로 변환되어 쇄석기둥의 수평방향 응력($\sigma_{h,c}$)와 수평방향 토압($\sigma_{h,s}$)이 발생한다. 쇄석기둥에서 발생하는 측면응력은 주동토압으로 상부하중과 쇄석의 하중에 의해 기둥의 중간깊이에서 발생하는 연직응력으로 계산되며, 지반의 수동토압 또한 지반 중간층에서의 응력으로 다음과 같은 식 (1), (2)로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{h,c} = \sigma_{v,c} K_{ac} + \sigma_{c,c} K_{ac} \quad (1)$$

$$\sigma_{h,s} = \sigma_{v,s} K_{ps} + \sigma_{s,s} K_{ps} \quad (2)$$

여기서 $\sigma_{c,c}$: 쇄석기둥의 자중에 의해 발생하는 쇄석
기둥 연직응력

$\sigma_{s,s}$: 지반의 자중에 의해 발생하는 지반의
연직응력

K_{ac} : 쇄석기둥의 주동토압 계수

K_{ps} : 지반의 수동토압 계수

연약지반 시공되는 경우 수평토압은 매우 작으며 지오그리드에 의한 수평방향 인장응력 $\sigma_{h,geo}$ 는 수평토압대신 쇄석기둥의 응력 p_i 에 저항하게 되며 Kessel-formula로부터 유추(그림 1 참조)하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_t = \sigma_{h,geo} = F_R / A_L \quad (3)$$

여기서, F_R : 인장저항력

A_L : 지오그리드 전체 스트립 감쌈 면적
($A_L = 2 \cdot \Sigma A_{geo}$)

A_{geo} : 지오그리드 스트립 한 개의 단면적

이때 $\sigma_{h,geo}$ 에 지오그리드 전체면적을 곱해서 산정한 힘을 지오그리드 원형인장저항력(Ring tension force, F_R)로, F_R 은 지오그리드가 선형탄성 거동을 한다는 가정하에 식 (4)와 같이 지오그리드 강성 J 와 변형률 ϵ_{geo} 의 곱으로 표현할 수 있으며, 식 (3)과 (4)의 관계에서 식 (5)

가 유도된다.

$$F_R = J \times \epsilon_{geo} = J \times \frac{\Delta r_{geo}}{r_{geo}} \quad (4)$$

$$\sigma_{h,geo} = \frac{J}{A_L} \times \frac{\Delta r_{geo}}{r_{geo}} \quad (5)$$

여기서 ϵ_{geo} : 지오그리드 변형율

J : 지오그리드 축강성

Δr_{geo} : 지오그리드 감쌈 반경의 증가량

r_{geo} : 지오그리드 감쌈 반경

3. 중대형 압축실험

중대형 압축실험은 하중재하시 지오그리드 감쌈 쇄석기둥에 발생하는 파괴형태와 변형특성을 고찰하고 지오그리드 감쌈방법에 따른 보강효과를 평가를 통해 효율적인 지오그리드 감쌈 제작방안을 고찰 할 목적으로 수행되었다. 일반적으로 쇄석기둥은 지반내에 설치되어 지반의 구속력에 따른 영향을 받게 되지만, 본 실험에서는 비구속 상태의 압축실험을 수행함에 따라 하중재하시 지오그리드에 발생하는 변형 상태를 육안으로 관찰할 수 있으며, 지오그리드 감쌈 접합부위의 파괴형태 및 구조적 안정성을 평가를 통해 최적 감쌈 제작방안을 평가하는데 목적이 있다. 본 연구에서는 최대입경 25mm, 40mm 쇄석 2종류와, 최대입경 20mm 재활용 골재를 채움재로 사용하였으며, 감쌈방법에 따른 보강효과 평가를 위해 10% 겹침과 30% 겹침에 대한 실험을 수행하였다.

3.1 실험재료

실험에 사용된 쇄석재료는 석산에서 모암을 파쇄하여 생산한 골재로 경기지역의 석산에서 생산된 재료로 도로노반, 철도노반 등에 사용되고 있다. 본 실험에서는 국내에서 주로 생산되는 25mm, 40mm 쇄석과 고속도로 및 일반포장도로의 기층재료, 토목공사의 성토재료로 사용되는 최대입경 20mm이하의 KS 2종 순환골재를 대상으로 선정하였다.

실험에 사용된 지오그리드는 폴리에스터 재질의 두께 1.2mm, 메시크기 30mm×30mm의 스트립형태로 격자형으로 교차시켜 레이저 등으로 용접한 결합형 지오그리드로 최대인장강도 120kN/m의 고강도 지오그리드

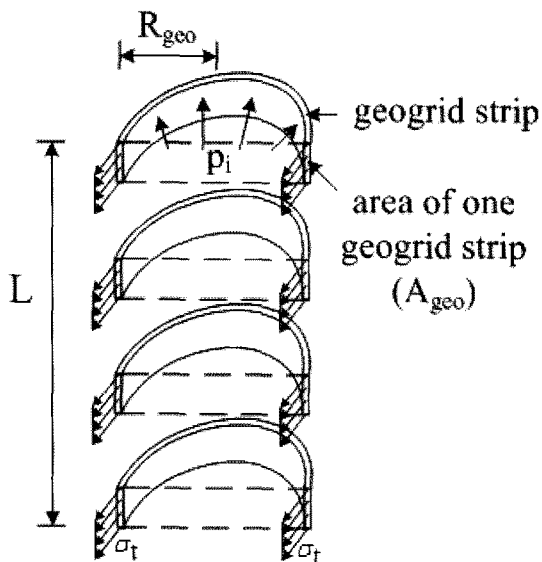


그림 1. 원형인장응력(ring tension stresses) 선정(Paul and Ponomarjow, 2004)

표 1. 쇄석의 기본 물성

구분	최대입경, mm	비중, Gs	흡수율, %	내부마찰각, $\phi(^{\circ})$
쇄석	25	2.50	0.87	54
	40	2.69	1.12	55
순환골재	20	2.32	4.76	47

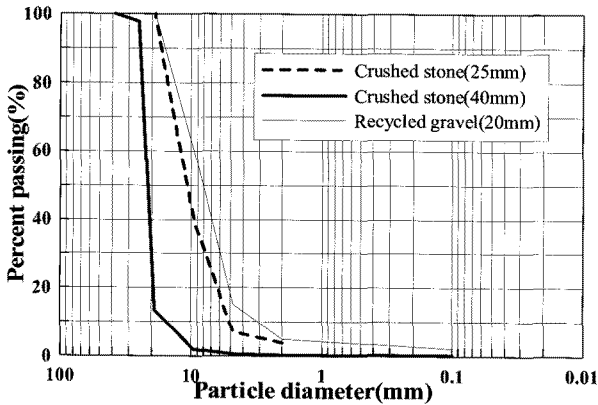


그림 2. 쇄석의 입도분포 곡선

를 사용하였다. 또한 본 연구에서는 쇄석기둥 채움재로 사용되는 쇄석과 순환골재의 공학적 특성을 평가하기 위해 체분석, 비중, 흡수율, 대형직접전단시험을 수행하였다. 표 1과 그림 2는 본 실험에 채움재로 사용된 쇄석골재의 기본특성과 입도분포 곡선을 보여주고 있다.

3.2 GESC 제작

지오그리드 감쌈 쇄석기둥의 제작은 폭 2m 롤모양의

지오그리드를 직경 0.25m의 원형 기둥형태로 감싸 지오그리드가 중첩되어 겹쳐지도록 제작하였다. 지오그리드 감쌈 기둥의 높이는 0.8m로 제작하였으며, 지오그리드 감쌈 제작은 지오그리드 겹침(overlap)부위에 지오그리드 수직리브를 수직방향으로 엮음(stitched)형태로 보강하여 지오그리드 슬리브를 제작하였다. 감쌈제작방법에 따른 보강효과 평가를 위해 10% 겹침과 수직리브 2열로 엮어 보강한 경우와 30%겹침과 수직리브 6열로 엮어 보강한 경우에 대한 실험을 수행하였다. 지오그리드 감쌈 제작이 완료된 후 지오그리드 리브에 쇄석을 1/3 채운 후 다짐봉으로 다짐을 하였으며, 총 3회에 걸쳐 쇄석을 채운 후 다짐을 통해 1.5t/m³의 밀도로 GESC를 제작하였다. 그림 3은 지오그리드를 30% 겹쳐 제작한(검은색 실선 겹침면적) 지오그리드 감쌈 제작 슬리브를 보여주고 있다.

3.3 하중재하 및 계측장치

압축실험에 사용된 재하장치는 그림 4에서 보는 바와 같이 최대용량 200t의 UTM을 이용하였다. 하중재하장

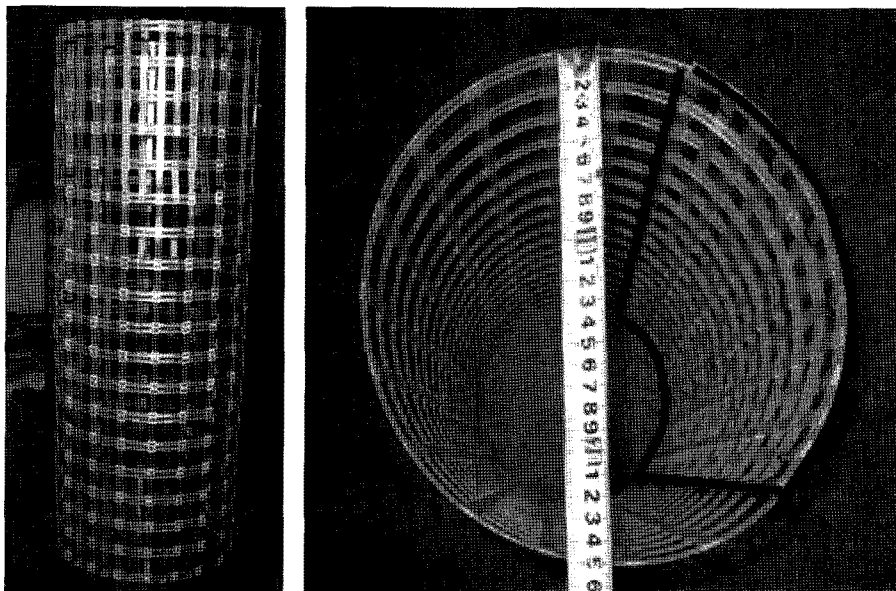


그림 3. 지오그리드 감쌈 슬리브

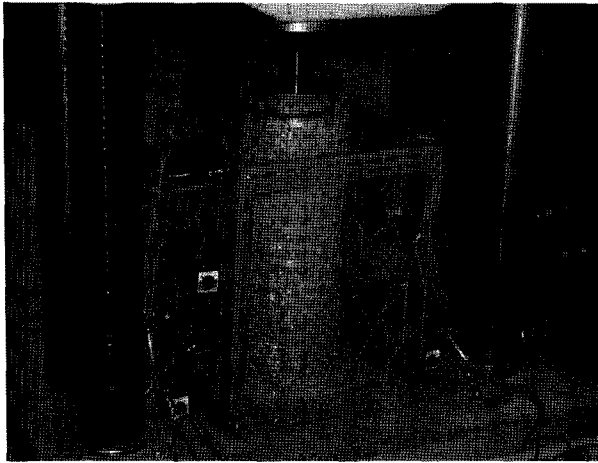


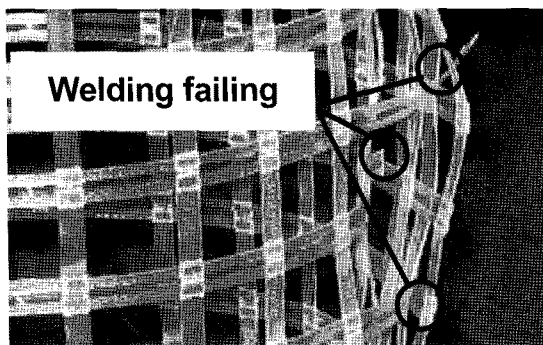
그림 4. 쇠석기둥 압축시험장치

치 베이스 플레이트에 쇠석기둥을 위치시킨 후 하중재하판은 쇠석기둥의 직경과 동일한 직경 250mm의 steel plate를 사용하였다. 하중재하시 GESC의 횡방향 변형을 측정하기 위해 계측 프레임의 좌우 측면에 상부로부터 0.25H간격으로 LVDT를 각각 3개씩 설치하였으며 지오그리드의 인장 변형을 측정하기 위해 일정간격으로 스트레인 게이지를 부착하였다. GESC의 수직변위는 100mm 용량의 LVDT를 사용하여 측정하였으며, 데이터 로거를 통해 데이터를 측정하였다. 초기 하중재하시 편심이 발생하지 않도록 수평을 유지하였으며, 실험 하중재하 속도는 1-2mm/min으로 하여 하중재하에 따른 GESC의 거동을 평가하였다.

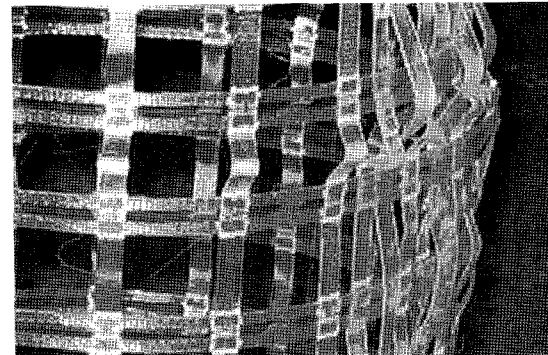
4. 결과 분석 및 고찰

4.1 지오그리드 슬리브 변형형태

GESC 거치 후 초기 하중재하시 쇠석입자의 재배열



(a) 변형형태 1



(b) 변형형태 2

그림 5. 지오그리드 감쌈 변형형태

및 쇠석입자간의 맞물림이 발생하며 지속적인 하중재하로 인해 쇠석기둥에 전달된 하중이 지오그리드의 횡방향 변형을 일으키게 된다. 지오그리드에 발생하는 인장변형의 증가는 지오그리드 감쌈으로 쇠석에 구속력을 증가시켜주는 것을 나타내며, 본 실험을 통한 최대인장변형($\epsilon_{h,max}$)은 쇠석기둥의 상부 영역에서 0.01%로 매우 작게 나타났다. 이러한 원인으로서는 지오그리드 감쌈 부위의 변형형태를 통해 평가할 수 있는데, 하중재하에 따른 지오그리드의 인장력이 충분히 발휘되기 전에 감쌈부위의 파손이 발생하였기 때문으로 판단된다. 실험 결과를 통해 상부 하중으로 인해 지오그리드 감쌈에 발생하는 변형형태는 다음과 같이 두가지 형태로 구분할 수 있다(그림 5 참조).

① 변형형태 1

지오그리드 슬리브 감쌈 겹침 10%의 경우 하중 증가 시 지오그리드 리브의 절단이나 인장파괴가 발생하지 않으나, 지오그리드 감쌈 부위 상부리브 접합부위(welded)의 부분적인 탈락 및 감쌈 부위 수직리브 보강부분이 파손되는 파괴형태이다(그림 5(a) 참조). 이러한 파괴형태의 원인으로 감쌈 부위의 겹침이 충분하지 못하고 지오그리드 겹침부위의 수직리브 보강이 충분하지 못해 감쌈 접합강도 부족으로 판단된다. 상부 하중증가에 따른 쇠석기둥에 발생하는 횡 방향 변형에 저항하는 지오그리드의 인장력이 충분히 발휘되기 전에 지오그리드 감쌈 부위 상부에서 리브접합 부위 및 수직리브 보강부분의 파손이 발생하게 된다.

② 변형형태 2

지오그리드 감쌈 겹침 30%의 감쌈부위의 겹침과 수직리브의 보강이 충분한 경우 골재와 지오그리드의 맞

물림 효과와 리브보강 효과로 인해 하중증가시 겹침 보강부위의 파단이 발생하지 않는다. 지속적인 하중증가시 겹침부위의 파손은 발생하지 않으며 지오그리드 수직 리브의 압축변형이 발생하며(그림 5(b) 참조), 극한 하중에서 지오그리드 리브의 인장파괴가 발생하는 파괴형태가 발생한다. 이러한 파괴태의 원인으로서는 지오그리드의 인장저항력을 초과하는 하중 재하시 또는 모난 형상의 쇄석으로 인해 지오그리드 리브의 부분적인 절단(Gniel and Bouazza, 2010)으로 인한 인장강도 저하로 인해 발생하게 된다.

4.2 GESC 횡방향 변형

그림 6은 지오그리드 감쌈 방법을 10%겹침 보강된 GESC의 극한하중에 따른 횡방향 변위 발생 결과를 나타내고 있다. GESC 최대 횡방향변형($\delta_{h,max}$)은 각각 9.8mm, 12.1mm, 13.7mm로 쇄석종류에 따라 각각 관계없이 상부 0.25H깊이에서 가장 크게 발생하였으며 쇄석기둥 상부에서 하부로 갈수록 횡방향 변형(δ_h)이 감소하는 형

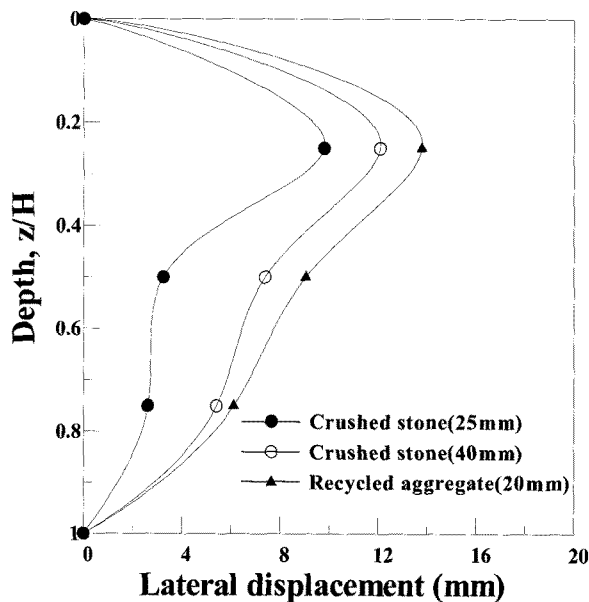


그림 6. GESC 횡방향 변형

표 2. 실험결과

실험종류	쇄석종류	겹침(overlap) %	변형형태	최대 하중 kN	최대인장변형 ($\epsilon_{h,max}$), %	인장저항(F_R) kN/m
1	쇄석 (25mm)	10	변형형태 1	18	0.0067	0.16
2	쇄석 (40mm)	10	변형형태 1	16.5	0.0087	0.21
3	재활용골재 (20mm)	10	변형형태 1	18.2	0.01	0.25

태를 보이고 있다. 이러한 결과는 앞서 제시한 축소모형 실험을 통한 지오그리드 변형 특성과도 유사한 경향을 보이는 것으로 쇄석기둥 상부에서 주로 발생하는 팽창 파괴(bulging failure)영역에서 횡방향 변형과 이로인해 발생하는 지오그리드의 인장저항력이 가장 크게 나타나는 것을 의미한다. 실내압축실험을 통해 하중재하시 발생하는 채움재의 횡방향 변형을 지오그리드의 인장 구속력으로 억제시켜주며, 수직하중이 지오그리드의 접합강도를 초과할 시 GESC의 최대 변형 발생부위인 상부 0.25H 부근에서 감쌈 겹침 부위에서 파단이 발생하는 것을 알 수 있다(그림 5(a) 참조). 이러한 결과를 통해 지오그리드 감쌈 제작시 최대변형발생 부위의 변형특성을 고려한 지오그리드의 인장저항력 산정과 감쌈제작 방법에 대한 품질관리가 매우 중요한 것으로 나타났다.

4.3 GESC 하중지지특성

표 2는 지오그리드 겹침 10%로 감쌈 제작된 GESC의 중대형 압축실험 결과를 나타내고 있다. 실험결과 GESC 최대하중은 쇄석에 따라 16.5kN~18.2kN으로 최대입경 40mm의 쇄석의 최대하중이 25mm쇄석과 재활용 골재에 비해 10%정도 작게 나타났는데 이는 쇄석 입자크기에 따른 채움재의 맞물림(interlocking)으로 인한 공극의 영향으로 판단된다. 하중 증가에 따른 GESC의 파괴형태는 하중재하에 따른 쇄석채움재의 압축으로 인한 수평변위 증가와 더불어 부분적으로 지오그리드 리브 접합부위의 리브가 떨어져 나가는 현상이 발생함에 따라 하중이 일시적으로 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이고 있으며, 최대하중에서 지오그리드감쌈 겹침부위의 파손으로 인한 파괴형태를 보이고 있다. 이러한 파괴형태는 앞서 설명한 바와 같이 지오그리드 감쌈부위 겹침부쪽으로 인한 접합부위의 강도 저하로 인해 발생됨을 알 수 있다.

또한 본 연구에서는 지오그리드에 발생하는 최대인장변형($\epsilon_{h,max}$)과 인장저항력을 평가하기 위해 GESC의

깊이별위치를 스트레인이계이지를 부착하여 측정하였다. GESC의 인장 저항력(F_R)은 식 (4)에 따라 실험을 통해 측정된 지오그리드 인장 최대인장변형($\epsilon_{h,max}$)에 지오그리드의 축강성(J)을 곱하여 계산하였다. 최대인장변형($\epsilon_{h,max}$)은 쇄석기둥의 상단부위에서 0.0067%~0.001%로 나타났으며, GESC의 인장 저항력(F_R)은 0.16kN/m~0.25kN/m로 인장변형율이 최대로 발생하는 쇄석기둥의 상부에서 최대로 측정되었다. 이러한 결과는 쇄석기둥에서 팽창과파괴가 발생하는 영역에서 지오그리드의 인장변형이 최대로 발생됨에 따라 지오그리드의 구속력이 발휘됨을 의미하며, 지오그리드의 $\epsilon_{h,max}$ 이 0.01% 미만으로 작게 발생된 것은 변형형태 고찰에서 관찰했듯이 지오그리드의 인장력이 충분히 발휘되기 전에 지오그리드 감쌈부위 겹침부족으로 인한 접합부위 파괴가 먼저 발생하였기 때문으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 지오그리드의 인장저항력으로 인한 구속효과를 충분히 발휘하기 위해서는 지오그리드 감쌈 부위의 충분한 겹침과 보강을 통해 접합부위의 강도를 확보하여야 함을 알 수 있다.

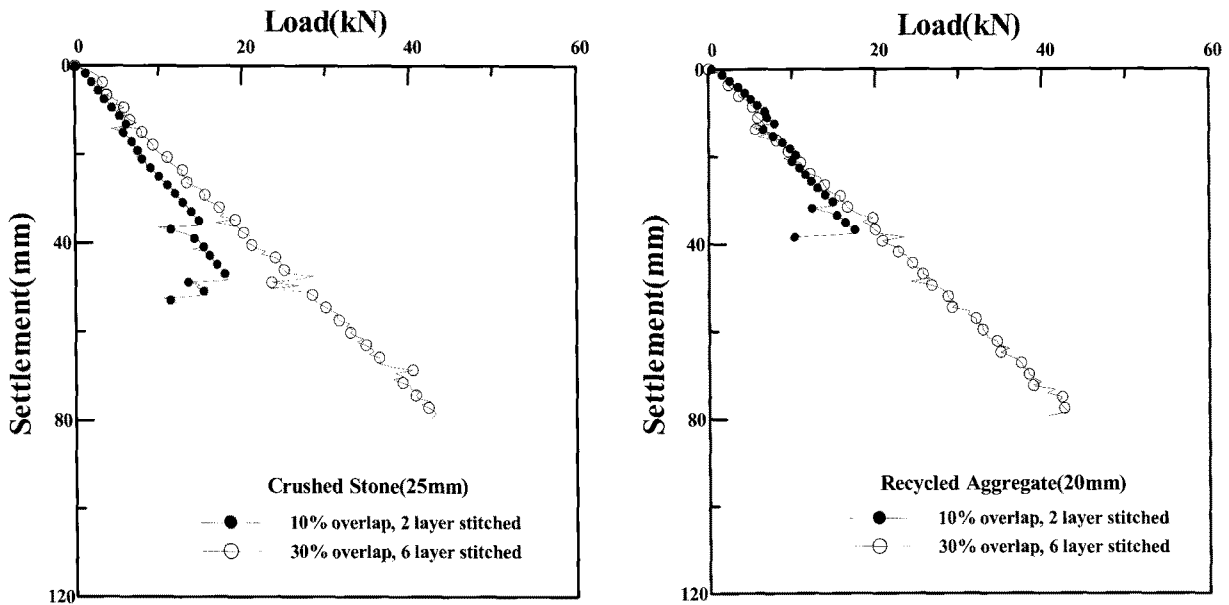
4.4 감쌈방법에 따른 GESC 하중지지특성

그림 7은 지오그리드를 10%, 30%겹쳐 감쌈 GESC의 하중-침하 곡선을 비교하고 있다. 감쌈부위를 겹침 30%와 지오그리드 수직리브 6열로 보강한 GESC의 경우 압

축시험시 변위계 용량과 하중재하장치의 제약으로 수직변위가 약 80mm 발생하는 시점에서 실험을 종료하였다. 그림 7에서 관찰할 수 있는 바와 같이 지오그리드를 30% 겹침 보강한 경우 최대하중이 약 43kN/m로 10% 겹침 보강한 경우의 최대하중 18kN/m에 비해 약 2.4배 이상 하중지지 효과가 있음을 알 수 있다. 지오그리드겹침 면적의 증가는 겹침부위와 쇄석의 충분한 마찰저항 및 맞물림효과로 인한 감쌈부위 강도증가로 나타남을 알 수 있다. 이러한 경향을 고려할 때 동일 인장강도의 지오그리드를 이용하여 제작한 GESC의 경우라도 감쌈 겹침방법에 따른 감쌈부위 제작방안에 따라 하중지지 특성의 차이가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 실험결과를 통해 지오그리드 감쌈 쇄석기둥의 현장적용시 하중지지특성 개선을 위해서는 지오그리드 감쌈 제작방법이 매우 중요한 요소임을 알 수 있으며, 하중재하로 인해 발생하는 횡방향 변형을 제어할 수 있는 적정 인장강도의 지오그리드사용과 충분한 겹침(overlay)을 이용한 보강 방법이 효과적임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 현장에서 GESC의 적용을 위한 연구의 일환으로 지오그리드 감쌈제작방법과 하중재하시 지오그리드 감쌈 쇄석기둥에 발생하는 변형특성 및 파괴메카니즘에 대한 이해가 우선되어야 함에 따라 하중



(a) 25mm 쇄석채움재 사용 GESC

(b) 20mm 재생골재 사용 GESC

그림 7. GESC 봉합 방법에 따른 압축강도

재하시 지오그리드 파괴형태를 육안으로 관찰할 수 있는 중대형 비구속 압축실험을 수행하였다. 실험을 통해 지오그리드의 파괴형상, 접합부위 보강방법에 따른 강도특성 평가 및 지오그리드 감쌈 제작방안을 제안하였으며 실험결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 지오그리드 감쌈제작시 감쌈부위의 겹침 방법이 겹침부위와 쇄석의 마찰 및 맞물림 효과로 인해 접합강도를 증가시켜 주는 효과가 있음을 알 수 있다.
- (2) 하중재하에 따른 GESC의 변형 형태는 감쌈제작시 겹침 부족으로 인한 접합부위의 파손이 발생하는 파괴 형태와, 충분한 겹침과 접합부위의 보강으로 인해 접합부위의 파괴는 발생하지 않고 지오그리드 리브의 파단 및 인장파괴가 발생하는 파괴형태로 구분할 수 있다. GESC파괴형태 고찰을 통해 지오그리드 감쌈 제작시 충분한 겹침과 접합부위의 보강이 필요함을 알 수 있다.
- (3) 10%겹침 보강된 GESC의 최대횡방향변형($\delta_{h,max}$)은 쇄석종류에 관계없이 상부 0.25H에서 가장 크게 발생하였으며 기둥 상부에서 하부로 갈수록 변위가 감소하는 형태를 보이고 있다. 이러한 결과는 앞서 제시한 축소모형실험을 통한 지오그리드 변형 특성 과도 유사한 경향을 보이는 것으로 쇄석기둥 상부에서 주로 발생하는 팽창파괴(bulging failure)영역에서 횡방향 변형과 지오그리드의 인장저항력 가장 크게 발생하는 것을 의미하며 GESC제작시 상부영역의 품질관리가 매우 중요함을 나타낸다.
- (4) 겹침방법에 따른 지오그리드 30%겹침과 지오그리드 수직리브 6열로 보강한 경우 최대하중이 10%겹침과 수직 리브 2열 보강에 비해 약 2.4배 강도증진 효과가 있음을 알 수 있다. GESC 현장적용시 하중 지지특성 개선을 위해서는 지오그리드의 인장저항력을 충분히 발휘할 수 있는 적정 인장강도의 지오그리드사용과 충분한 겹침(overlay)감쌈 제작방법 중요한 요소임을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 2005년 건설핵심기술연구개발사업(C105A1000017-05A0300-01720)지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 이대영, 송아란, 유충식 (2006a), “지오그리드 보강 Stone Column의 파괴메카니즘 및 지지력 특성-축소모형실험을 통한 고찰”, *한국지반공학학회논문집*, 제 22권 10호, pp.1078-1084.
2. 이대영, 유충식, 박시삼, 이부락 (2006b), “지오그리드 보강 쇄석기둥의 강도특성에 관한 실험적 연구”, *한국지반공학학회 가을학술 발표회*, pp.1078-1084.
3. 유충식, 송아란, 김선빈, 이대영 (2007), “연약지반에 시공된 지오그리드 보강 쇄석기둥 공법의 유한요소 모델링”, *한국지반공학학회 논문집*, 제 23권 10호, pp.133-150.
4. Alexiew, D., Horgan, G.J., and Brokemper, D. (2003), “Geotextile encased columns(GEC): load capacity & geotextile selection, Sweden”, *BGA International Conference on Foundation*.
5. Al-Joulani, M. (1995), “Laboratory and analytical investigation of sleeve reinforced stone columns”, *Ph.D. Thesis*, Carleton University, Canada.
6. Barksdale, R.D., and Bachus, R.C. (1983), “Design and construction of stone columns”, *U.S. Federal Highway Administration Report FHWA A/RD-83/026*.
7. Gneil, J and Bouassa, A. (2009), “Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns”, *Geotextile and Geomembranes* 27(3), pp.167-175.
8. Gniel, J. and Bouazza, A. (2010), “Construction of geogrid encased stone columns: A new proposal based on laboratory testing”, *Geotextile and Geomembranes* 28, pp.108-118.
9. Kempfert, H.G., Raithe, M. and Jaup, A. (1999), “Model tests for analysis of the bearing and deformation behaviour of column foundation”, *Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure*, pp.1521-1526.
10. Kempfert, 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.
11. Murugesan, S., and Rajagopal, K. (2006), “Geosynthetic-encased stone column; Numerical evaluation”, *Geotextiles and Geomembranes*, pp.349-358.
12. Murugesan, S., and Rajagopal, K. (2007), “Model tests on geosynthetic-encased stone columns”, *Gesynthetics International*, Vol.14, No.6, pp.346-354.
13. 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.
14. Raithe, M., and Kempfert, H. G. (2000), “Calculation models for dam foundations with and geotextile-coated sand columns”, *Proc., GeoEngineering 2000*, Technomic, Melbourne, Australia.
15. Trunk, G., Heerten, A., Poul, A., and Reuter, E. (2004), “Geogrid wrapped vibro stone columns”, *EuroGeo3*, pp.289-294.
16. Yoo, C. and Kim, S. B. (2009), “Numerical modeling of geosynthetic-encased stone column”, *Gesynthetics International*, Vol.16, No.3, pp.116-126.

(접수일자 2010. 10. 14, 심사완료일 2010. 12. 29)