한국지반공학회논문집 제22권 10호 2006년 10월 pp. 121 ~ 129

지오그리드 보강 Stone Column의 파괴메카니즘 및 지지력 특성 - 축소모형실험을 통한 고찰

Load Carrying Capacity and Failure Mechanism of Geogrid Reinforced Stone Columns : Reduced-Scale Model Tests

이 대 영[1] Lee, Dae-Young
송 아 란[2] Song, Ah-Ran
유 충 식[3] Yoo, Chung-Sik

Abstract

Stone column is one of the ground improvement systems which is being used for accelerating consolidation and increasing bearing capacity for settlement sensitive structures like load embankments, bridge abutments, oil storage tanks etc. The effects of this method are enhancement of ground bearing capacity, reduction of settlement, prevention of liquefaction and prevention of lateral ground movement. Recently, geosynthetic reinforced (encased) stone column approach has been developed to improve its load carrying capacity through increasing confinement effect. Although such a concept has successfully been applied in practice, fundamentals of the method have not been fully explored. This paper presents the results of an investigation on the bearing capacity and failure mechanism of geogrid-encased stone column by model tests. The results of the analyses indicated improved bearing capacity of the geogrid reinforced stone column method over the conventional strone column method with no encasing.

요 지

쇄석기둥 공법은 성토제방, 교량교대기초, 오일탱크와 같은 침하에 민감한 구조물의 지지력 증대 및 압밀 촉진에 효과적인 지반 개량 공법이다. 쇄석기둥 공법은 지반의 지지력 증대, 침하감소, 측방유동 방지 및 액상화 방지 등의 효과를 기대할 수 있다. 최근 들어서는 쇄석기둥의 외벽을 토목섬유로 보강(감쌈) 구속력을 증가시켜 줌으로써 쇄석기둥 지반의 하중지지력을 개선시키는 공법에 대한 관심이 증가하고 있으나, 지오그리드 보강 쇄석기둥 공법에 대한 연구는 체계화되어 있지 않는 실정이다. 본 연구에서는 실내모형실험을 통해 지오그리드로 보강 쇄석기둥의 하중지지력 특성 및 파괴형태를 고찰하였으며, 실험결과를 통해 지오그리드로 보강하지 않은 쇄석기둥공법에 비해 지오그리드 보강 쇄석기둥공법의 지지력 개선효과가 크게 나타남을 알 수 있다.

Keywords : Bearing capacity, Geogrid, Ground improvement, Stone column, Model test

1 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engrg. Research Dept., KICT.)
2 성균관대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Sungkyunkwan Univ.)
3 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept of Civil & Environmental Engrg., Sungkyunkwan Univ., csyoo@skku.edu, 교신저자)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서 론

최근들어 연약지반 공사현장에서 모래 등 천연골재의 수급이 어려워짐에 따라 모래를 대신해서 자갈이나 쇄석을 이용하여 지반을 개량하여 강도를 높이는 공법인 쇄석기둥 공법(Stone Column Method)의 사용빈도가 날로 증가하는 추세이다. 쇄석기둥공법은 쇄석이나 자갈과 같은 조립재로 채워진 기둥으로 연약지반을 약 10~30%의 범위로 치환하여 지반을 개량하는 공법이다. 쇄석기둥의 형성은 압밀 촉진을 위한 연직배수재로의 역할을 하며, 기초나 지진하중에 의해 발생되는 간극수압을 소산시키며, 지반의 지지력 향상, 기초침하 감소, 사면활동의 안정성 확보 등 많은 장점이 있다(Barksdale 등, 1983). 그러나 쇄석기둥 공법은 기초하중에 의해 쇄석기둥 상부에서 팽창파괴가 발생하며 지반조건에 따라 많은 양의 쇄석이 소요되는 단점을 가지고 있다.

최근들어 이러한 쇄석기둥 공법의 단점을 보완하기 위해 토목섬유를 이용하여 기둥을 형성하고 모래 또는 쇄석을 채워 복합지반을 형성함으로써 팽창파괴를 방지하고 침하 감소 및 지지력을 증가시키는 기초적인 연구가 진행되고 있다(Al-Joulani, 1995; Kempfert 등, 2002; Alexiew 등, 2003). Al-Joulani(1995)는 대형삼축시험과 일축압축시험을 통해 지오그리드 보강 granular column의 보강효과를 평가하였으며 시험을 통해 지오그리드 보강은 granular column의 팽창파괴와 횡방향 변형을 감소시켜주어 지지력을 증가시켜 준다고 보고 하였다. Paul 등(2004)은 연약지반에 설치된 고압축 미네랄 골재, 모르타르, 콘크리트 칼럼과 토목섬유보강 모래기둥, 지오그리드 보강 쇄석기둥의 지지력 특성, 배수효과 등을 평가 하였으며, 지오그리드 보강 쇄석기둥의 실대형 일축압축시험을 통해 지오그리드 링의 전단응력 설계 방안을 제시하였다.

Trunk 등(2004)은 쇄석 및 자갈, 모래 혼합 기둥을 지오그리드로 보강 한 후진동 다짐 공법을 사용하여 지오그리드보강 기둥을 조성한 후 대형 압축시험을 통해 지오그리드의 응력 변형거동및 압축강도를 평가하였다. Raithel 등(1999)은 모형실험을 통해 정적 또는 반복하중하에서의 토목섬유로 감싼 보강 모래말뚝 기초의 지지력과 변형거동을 평가하였으며, 토목섬유로 감싼 모래말뚝 지반이 비보강 지반에 비해 침하감소 효과가 있음을 제시하였다.

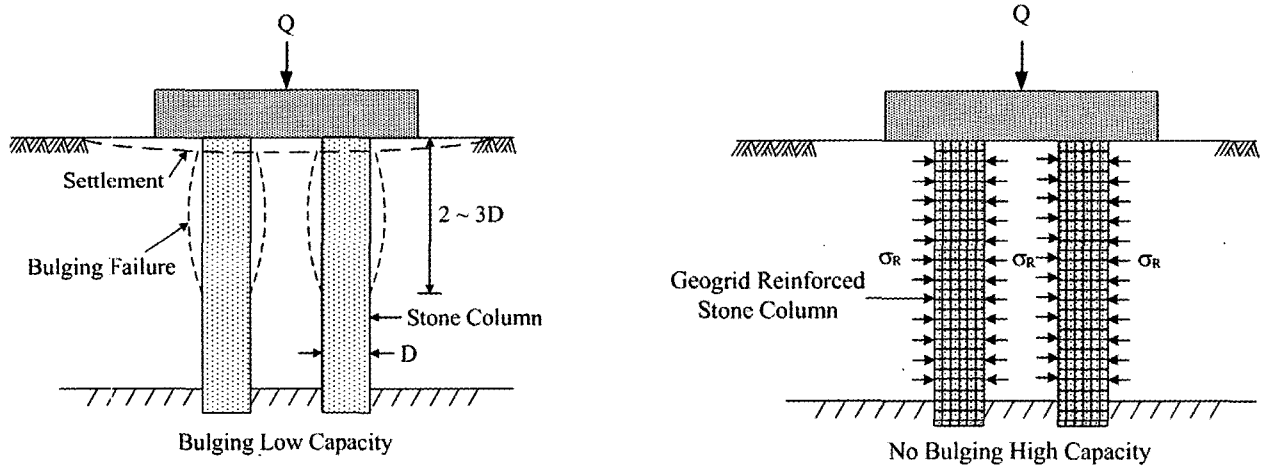
그러나 이러한 기존의 연구는 지오그리드로 감싼 쇄석기둥의 압축시험 및 삼축시험을 통한 지오그리드 망의 변형특성 및 강도특성에 대한 기초적인 연구로 지반조건을 고려한 지오그리드 보강 쇄석기둥의 파괴메카니즘 및 지지력특성에 대한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 사질토 지반에 설치된 지오그리드보강 쇄석기둥(Geogrid Reinforced Stone Column, 이하 GRSC)의 지지력과 변형거동을 분석하기 위해 실내모형실험을 수행하였다. 또한 적정 지오그리드 보강(감쌈)길이를 고찰하기 위해 지오그리드 감쌈 길이의 변화에 따른 지지력 거동을 분석하였다.

2. GRSC 공법

2.1 GRSC 공법 개요

연약지반 개량공법으로 사용되는 쇄석기둥 공법은



(a) 스톤컬럼 벌징파괴(Barksdale 등, 1983)　　(b) GRSC 보강개념(Nabil 등, 1995)

그림 1. 지오그리드 보강여부에 따른 쇄석기둥의 파괴형태

상부 구조물 및 성토하중 재하시 그림 1(a)에서와 같이 쇄석기둥 상부 2.0D~3.0D에서 팽창파괴(bulging failure)가 발생하며 이로인한 과도한 침하 및 지지력 감소는 구조물의 안정성에 영향을 미치게 된다(Hughes 등, 1974 ; Barksdale 등, 1983). GRSC공법은 쇄석기둥에서 발생하는 횡방향 변형을 지오그리드의 구속력으로 억제하여 쇄석기둥의 변형을 감소시켜 지반의 강도를 증진시키는 쇄석기둥 보강공법이다(그림 1(b) 참조). 또한 고강도 지오그리드를 사용함으로써 쇄석, 폐콘크리트, 재활용 골재 등을 채움재로 사용할 수 있으며, 지오그리드 구속효과로 인한 지지력 증가로 쇄석기둥의 직경을 줄이고 설치간격을 늘일 수 있는 경제적인 공법이다.

2.2 지오그리드 인장저항력(Ring Tension Force)

쇄석기둥 등을 지오그리드로 감싸 보강시 지오그리드가 쇄석기둥 주변지반의 수평저항력을 향상시켜 지지력 증가와 침하량을 감소시키는 작용을 하므로 지오그리드의 구속력은 GRSC공법의 지지력 증가에 중요한 역할을 한다. 지오그리드의 인장저항력(Ring Tension Force)은 그림 2에 보이는 바와 같이 쇄석기둥의 주동토압을 지오그리드가 구속하는 힘으로 나타낼 수 있으며, Paul 등(2004)은 지오그리드의 선형탄성거동 가정과 수평방향의 평형방정식을 이용하여 지오그리드 보강으로 인한 지지력의 증가 경향을 평가하였다.

지오그리드의 Ring tension stress, $\sigma_{h,geo}$는 Kessel-formula로부터 유추하여 식 (1)로 정의된다.

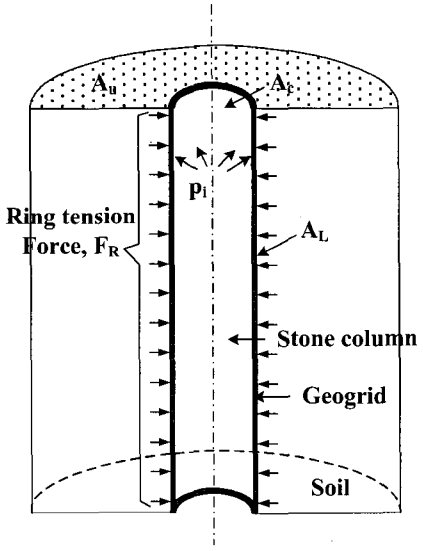


그림 2. Ring Tension Force(Paul 등, 2004)

$$\sigma_t = \sigma_{h,geo} = F_R / A_L \tag{1}$$

여기서, F_R = Ring tension force

A_L = 지오그리드로 감싼 면적

지오그리드가 선형탄성 거동을 한다는 가정 하에 F_R은 지오그리드의 인장강도로 식 (2)와 같이 표현할 수 있으며, 식 (1)과 (2)의 관계에서 식 (3)이 유도된다.

$$F_R = J \times \epsilon_{geo} = J \times \frac{\Delta r_{geo}}{r_{geo}} \tag{2}$$

$$\sigma_{h,geo} = \frac{J}{A_L} \times \frac{\Delta r_{geo}}{r_{geo}} \tag{3}$$

여기서, J = 탄성계수

ϵ_{geo} = 지오그리드 변형률

Δr_{geo} = 지오그리드 감쌈 반경 증가량

r_{geo} = 지오그리드 감쌈 반경

쇄석기둥에 작용하는 주동토압과 지반에 작용하는 수동토압으로부터 쇄석기둥과 지반사이의 수평방향 평형방정식은 식 (4)로 정리할 수 있으며, 앞서 유도한 응력들을 식 (4)에 대입하여 정리한 것이 식 (5)이다.

$$\sigma_{h,c} = \sigma_{h,geo} + \sigma_{h,s} \tag{4}$$

$$\sigma_{v,c} K_{ac} + \sigma_{c,c} K_{ac} = \frac{J}{A_L} \times \frac{\Delta r_{geo}}{r_{geo}} + \sigma_{v,s} K_{ps} + \sigma_{s,s} K_{ps} \tag{5}$$

여기서, $\sigma_{h,c}$= 쇄석기둥의 수평응력

$\sigma_{h,c} = \sigma_{v,c} K_{ac} + \sigma_{c,c} K_{ac}$

$\sigma_{h,s}$= 지반의 수평응력

$\sigma_{h,s} = \sigma_{v,s} K_{ps} + \sigma_{s,s} K_{ps}$

$\sigma_{v,c}$= 쇄석기둥 상부의 연직응력

$\sigma_{v,s}$= 지반 상부의 연직응력

$\sigma_{c,c}$= 상재하중으로 인한 쇄석기둥의 연직응력

$\sigma_{s,s}$= 상재하중으로 인한 지반의 수평응력

K_{ac}= 쇄석기둥에서의 주동토압계수

K_{ps}= 지반에서의 수동토압계수

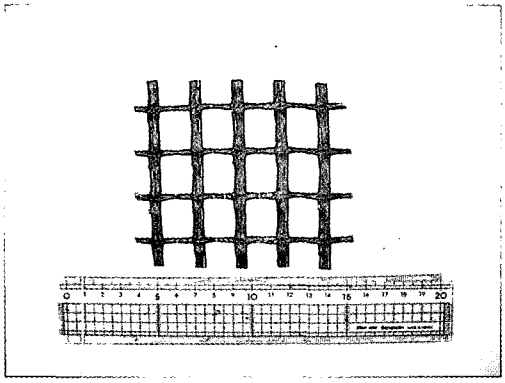
식 (5)로부터 인장저항응력 $\sigma_{h,geo}$를 고려한 말뚝의 최대 연직응력은 식 (6)과 같다.

$$\sigma_{v,c} = \frac{1}{K_{ac}} \left[\frac{J}{A_L} \times \frac{\Delta r_{geo}}{r_{geo}} + K_{ps} (\sigma_{v,s} + \sigma_{s,s}) - \sigma_{c,c} K_{ac} \right] \tag{6}$$

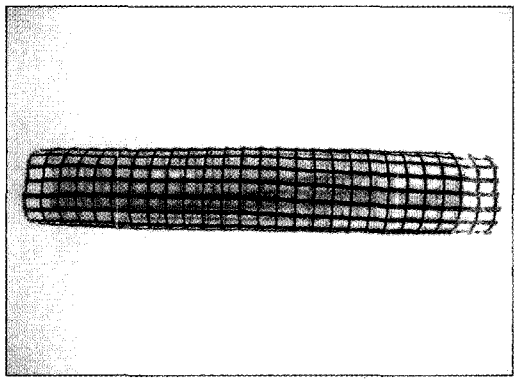
3. 실내모형실험

3.1 실험재료 및 모형실험 조건

사질토 지반에 타설된 쇄석기둥과 GRSC의 상부에 구조물 등의 하중 재하시 쇄석기둥의 지지력 및 파괴거동을 모사하기 위해 실내모형실험을 수행하였다. 사질지반을 모사하기 위해 주문진 표준사를 사용하였고, 쇄석기둥과 GRSC의 채움재로는 최대 직경 10mm의 쇄석을 사용하였다. 실험에 사용된 쇄석의 기본특성 평가를 위해 실내시험(비중, 체분석, 대형직접전단시험)을 수행하였으며, 주문진 표준사는 정혁상(2004)의 실험결과를 참조하였다. 주문진 표준사 및 쇄석의 기본특성은 표 1과 같으며, 각각 시료의 입도분포 곡선은 그림 4에서 나타낸 바와 같다. 보강재로 사용된 지오그리드는 최대 인장강도가 55kN/m로, 지오그리드 보강 쇄석기둥을 모사하기 위해 직경 100mm, 길이 800mm의 지오그리드망을 제작하였다. 지오그리드망을 제작하기 위해 지오그리드의 겹침부위를 플라스틱 케이블로 고정시켰으며, 지오그리드망내에는 쇄석의 이탈을 방지하고 마찰력을 줄이기 위해 지오그리드망 내에 얇은 비닐을 설치하였다. 한편 지오그리드 망의 변형특성을 고찰하기 위해 스트레인 게이지를 설치하여 변형율을 측정하였다. 지오그리드의 기본특성 및 모형지오그리드망은 표 2와 그림 3에 나타낸 바와 같다. 표 3은 본 연구에서 수행한 모형실험 조건을 보여주고 있다.



(a)시험에 사용된 지오그리드



(b) GRSC용 모형 지오그리드망

그림 3. 시험에 사용된 지오그리드

표 1. 주문진표준사 및 쇄석의 기본특성

구분	비중 (Gs)	흡수율 (%)	내부마찰각, ϕ(°)	건조단위중량 (t/m^3)	통일분류법
쇄석 10mm	2.29	1.0	54	-	GP
주문진표준사	2.6	-	40	1.68	SP

표 2. 지오그리드의 기본특성

지오그리드			
제품종류	55/30-20	재질	P.E.T
인장강도	55kN/m	융점	200°C
탄성계수	1700MPa	신율	MAX 12.5%
제품형태	Biaxially Geogrid	Creep	MAX 2%

표 3. 모형 실험조건

형태	쇄석기둥 모형크기	지반상대밀도	재하판	보강형태	변화인자(쇄석기둥 길이, mm)	비 고
단일 쇄석기둥	직경 100mm(D) 길이 800mm(H)	70%	직경 100mm 원형재하판	쇄석기둥	800(8.0D)	지지력 효과 분석
				GRSC	200(2.0D), 400(4.0D), 600(6.0D), 800(8.0D)	
					600(6.0D)-스트레인게이지부착	변형율 측정
			직경 150mm 원형재하판	쇄석기둥	800(8.0D)	파괴형상분석
				GRSC	800(8.0D)	

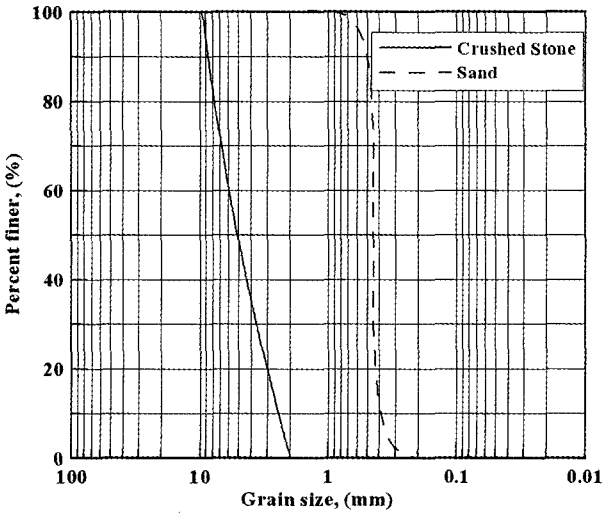


그림 4. 주문진 표준사와 쇄석의 입도분포곡선

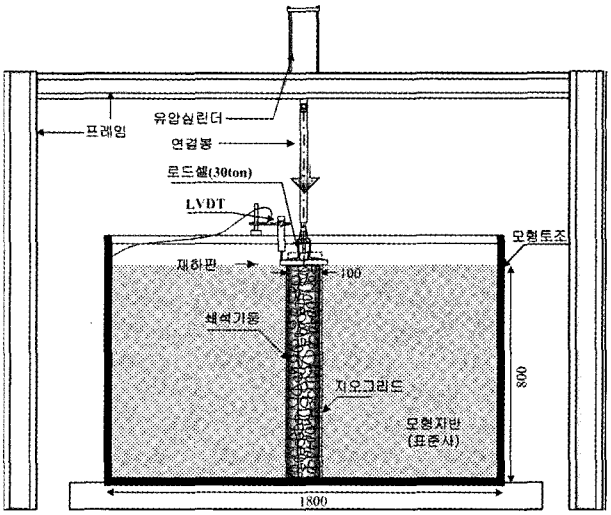
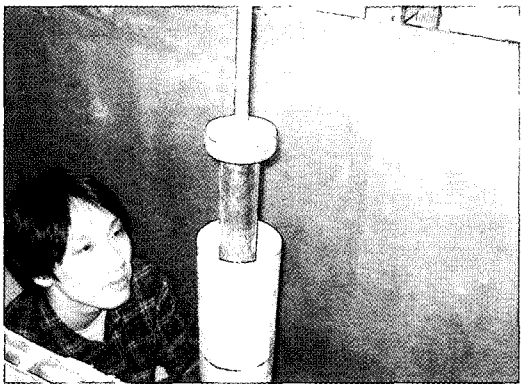


그림 5. 모형실험 장치

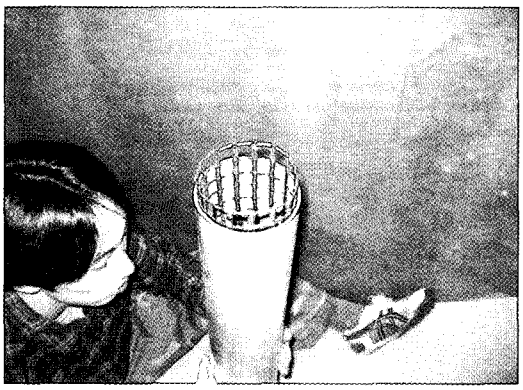
3.2 모형지반 조성 및 시험방법

그림 5는 본 실험에 사용된 모형토조와 시험장치를 보여주고 있는데, 하중재하는 유압실린더를 이용하여 1mm/min의 속도로 재하하였으며 이때 편심 발생을 방지하기 위해 재하판의 수평을 유지하였다. 한편, 작용하중은 파일재하판과 연결봉 사이에 위치한 용량 30ton의 로드셀을 이용하여 측정하였으며, 수직변위는 변위계를 이용하여 측정하였다.

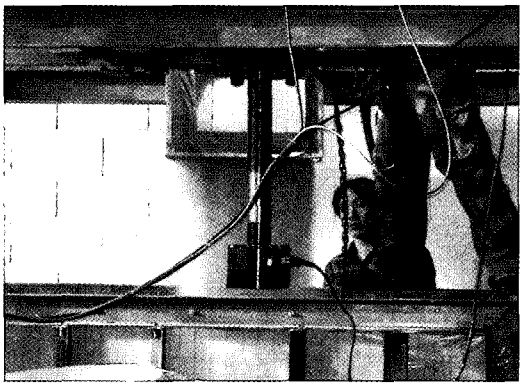
모형실험을 수행하는데 있어 모형지반 조성 후 모형 쇄석기둥을 설치할 경우 말뚝설치 및 수직도 확보에 있어서의 어려움 등이 있어 본 연구에서는 GRSC직경과



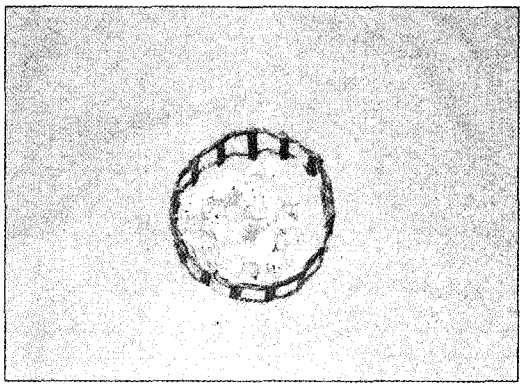
(a) 쇄석기둥(2D=200mm) 설치 및 다짐



(b) GRSC(6D=600mm) 설치 및 다짐



(c) 지반조성



(d) 케이싱 인발 후 GRSC 설치모습

그림 6. 모형토조내 GRSC 설치 모습

같은 100mm PVC관을 설치한 후 소요위치까지 강사장치를 이용하여 지반을 조성하였다. 모형지반의 상대밀도는 70%를 유지하기 예비시험을 통해 도출한 강사높이에 따라 지반을 조성하였으며, 시험 후 토조내에 설치한 캔의 시료를 측정하여 지반의 상대밀도를 확인하여 균질성을 확보하였다. 모형지반 조성후 PVC관 내에 쇄석을 채운 후 다짐기를 이용하여 다진 후 케이싱을 인발하여 쇄석기둥을 형성 하였다. 쇄석기둥 형성 후 편심이 발생하지 않도록 재하판의 수평을 확인한 후 하중을 가하였으며, 2회 반복실험을 수행 후 결과 비교를 통해 반복성을 확인하였다. 그림 6은 보강길이 6.0D인 GRSC 설치모습을 보여주고 있다. 지오그리드 보강길이를 상부 2.0D, 4.0D, 6.0D로 변화시켜 시험하는 경우 그림 6(a)에서와 같이 소요위치만큼 케이싱 내에 쇄석을 채워 다짐을 실시한 후 그림 6(b)와 같이 지오그리드망을 케이싱 안에 넣은 후 쇄석주입과 다짐을 통해 GRSC망을 설치하였다. GRSC 설치 후 강사를 통해 지반을 조성한 후 케이싱을 인발하였다.

또한 본 실험에서는 지오그리드 보강여부에 따른 쇄석기둥의 파괴형상을 고찰하고자 쇄석기둥을 삼축시험용 지름 70mm의 멤브레인을 PVC관에 설치한 후 쇄석기둥을 형성시켜 하중재하시험을 수행하였다. 시험종료 후 쇄석기둥 상단부위 주변지반을 조심스럽게 제거한 후 쇄석기둥의 파괴형상을 관찰하였다.

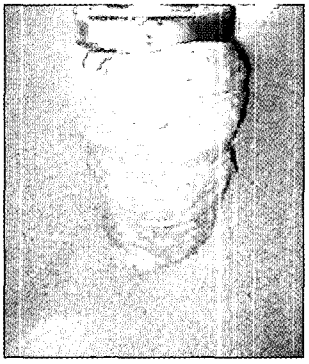
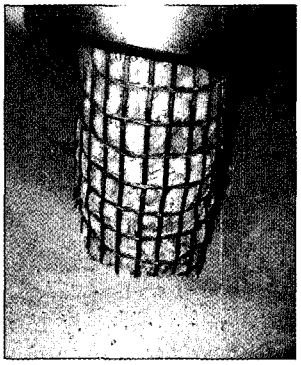
4. 시험 결과 분석

4.1 지오그리드 보강 여부에 따른 파괴형태 고찰

표 4는 실험을 통해 관찰된 단일 쇄석기둥의 파괴 형상을 보여주고 있다. 표 4에서 볼 수 있듯이 지오그리드로 감싸지 않은 쇄석기둥의 파괴형태는 팽창파괴(bulging failure) 형태를 보이고 있는 것으로 나타났다. 횡방향 변형이 최대로 발생하는 지점은 상부로부터 약 1.0D~1.5D로 나타났으며, 팽창파괴 영역은 약 1.0D~.5D의 길이에서 발생하는 것으로 관찰되었다. 이러한 결과는 Hughes 등(1974)과 Barksdale 등(1983)의 연구에 의해 제시된 모래다짐말뚝이나 쇄석기둥의 파괴형태는 팽창파괴를 나타내며, 팽창파괴는 지표아래 직경의 2~3배 깊이에서 발생한다는 연구와 유사한 경향을 나타내고 있다. 또한 횡방향 변형의 최대 발생지점이 상부로부터 쇄석직경의 약 1.0D~1.5D에서 발생하는 경향은 유한요소해석을 통한 선행연구(이대영 등, 2006)의 결과와도 잘 일치하는 경향을 보인다.

한편 지오그리드로 감싼 쇄석기둥(GRSC)의 파괴 형태는 표 4에서 볼 수 있듯이 횡방향 변형이 발생하지 않은 것을 알 수 있었으며, 이는 재하하중단계(150kPa)에서 발생하는 횡방향 변형을 지오그리드망의 구속력으로 억제하였기 때문으로 판단된다. GRSC는 동일하중에서 지오그리드로 보강하지 않은 쇄석기둥에 비해 침하가 약 80% 정도 작게 나타났다. 이러한 결과를 통해 쇄석기둥의 파괴형태는 팽창파괴로 나타났으며, 지

표 4. 쇄석기둥과 GRSC의 파괴 양상

구분	쇄석기둥	GRSC
하중	150kPa	150kPa
침하	125mm	24.5mm
변형형상	팽창파괴(bulging failure)	No bulging
bulging 발생영역	상부 1.0D ~ 2.5D	-
파괴형상		

오그리드로 팽창파괴영역을 감싸줌으로써 횡방향 변형을 억제하고 쇄석기둥의 침하를 감소시켜줄 수 있음을 알 수 있다.

4.2 지오그리드 보강 여부에 따른 하중-침하거동

그림 7은 무보강지반, 쇄석기둥 및 GRSC가 설치된 지반에 대한 모형실험 결과를 하중-침하(q-s)관계로 나타내었다. 그림 7에서 무보강 지반과 쇄석기둥지반은 하중 증가에 따라 침하가 점진적으로 발생하며 뚜렷한 극한하중이 발생하지 않는 거동을 보이고 있으며 GRSC의 경우 하중이 증가함에 따라 변위가 증가하는 경향을 보이다 일정 하중에서 파괴가 발생하는 파괴거동을 보이고 있다. 이러한 결과는 파괴형상에서 살펴보았듯이 수직하중작용시 쇄석기둥에 발생하는 횡방향 변형을 지오그리드의 구속력으로 억제시켜주다가 쇄석에 발생하는 횡방향 응력이 지오그리드의 구속력을 초과함으로써 지오그리드 접합부위의 파단이 발생하기 때문으로 판단된다.

무보강 지반과 쇄석기둥 지반은 GRSC와는 달리 뚜렷한 극한하중을 보이고 있지 않음으로 인해 쇄석기둥 직경(D)의 10%에 해당하는 10mm의 침하발생시의 지지력을 비교하였다. 10mm 침하시 지지력은 무보강 지반의 경우 10.45kPa, 쇄석기둥은 28.67kPa, GRSC는 277.02kPa로 나타났으며 GRSC의 지지력이 쇄석기둥에 비해 약 10배정도 증가하는 것을 알 수 있다.

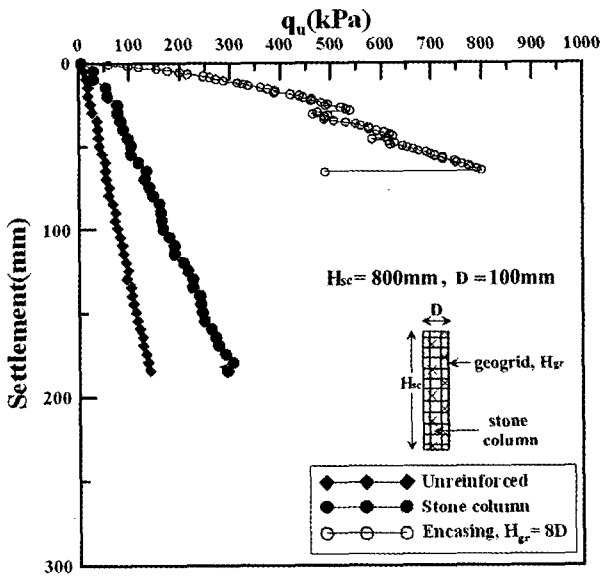


그림 7. 쇄석기둥/GRSC 하중-침하 거동

표 5. 하중단계에 따른 침하

구분		재하하중 (kPa)	
		50	100
하중단계별침하량 (mm)	무보강지반	62.1	136.2
	쇄석기둥	16.2	46.5
	GRSC	1.4	2.5

한편 표 5에서는 GRSC의 침하감소 효과를 평가하기 위해 재하하중 단계(50kPa, 100kPa)에 따른 쇄석기둥의 침하량을 보여주고 있는데, 쇄석기둥에 비해 GRSC의 침하 감소효과가 크게 나타남을 알 수 있다. 모형실험에서 발생할 수 있는 치수효과를 고려할 때 지지력 및 침하감소효과를 정량적으로 평가하는 데는 제약이 있으나 GRSC공법이 지오그리드 보강으로 인한 구속효과로 쇄석기둥에 비해 지지력 증가 및 침하감소에 효과가 있음을 알 수 있다.

4.3 지오그리드망 변형 특성

GRSC에 발생하는 변형율을 평가하기 위해 보강길이 6.0D인 GRSC 상부로부터 1.0D, 2.0D, 3.0D, 4.0D, 5.0D의 위치에 수직, 수평방향으로 10개의 스트레인게이지를 부착하였다. 그림 8은 하중증가에 따라 지오그리드에 발생하는 수직, 수평변형을 나타내고 있다. 그림 8(a)는 지오그리드의 수직 변형을 보여주고 있는데 하중이 증가함에 따라 변형이 증가하는 경향을 보이고 있으며 약 0.6%이내의 변형이 발생함을 알 수 있다. 그림 8(b)는 지오그리드에 발생하는 수평변형을 나타내고 있는데, 수평변형율은 0.3%~1.3%로 상부 1.0D에서 변형이 가장 크게 발생하였다. 이러한 결과는 팽창파괴가 일어나는 상부 1.0D에서 횡방향 변형이 가장 크게 발생하며, 이때 발생하는 횡방향 변형을 지오그리드가 억제시켜주기 때문이다.

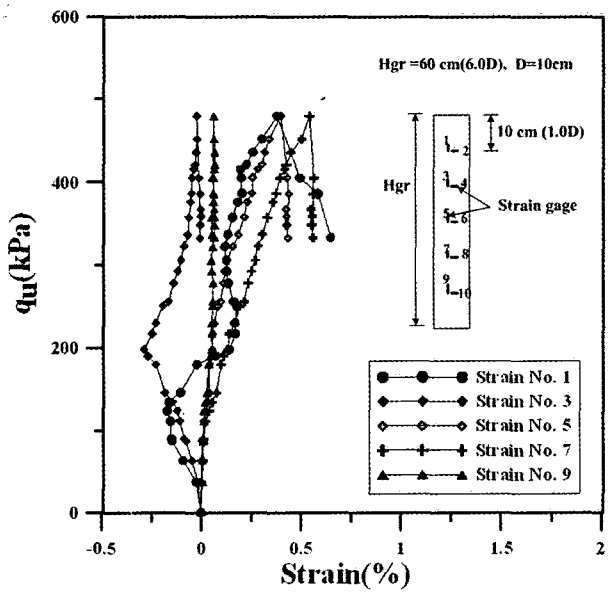
GRSC 파괴시의 하중에서의 지오그리드의 최대 변형율은 1.3%로 나타났으며, 극한하중에서 GRSC의 파괴는 지오그리드의 변형에 의한 파손이 아닌 지오그리드망의 접합부위에서 연결부위 파손으로 인해 발생함을 알 수 있다. 따라서 GRSC의 강도 증진을 위해서는 지오그리드의 변형특성 뿐만 아니라 접합부위의 접합강도 특성을 고려한 변형특성 평가가 이루어져야 할것이다.

4.4 지오그리드 보강 길이(H_{gr})에 따른 하중-침하거동

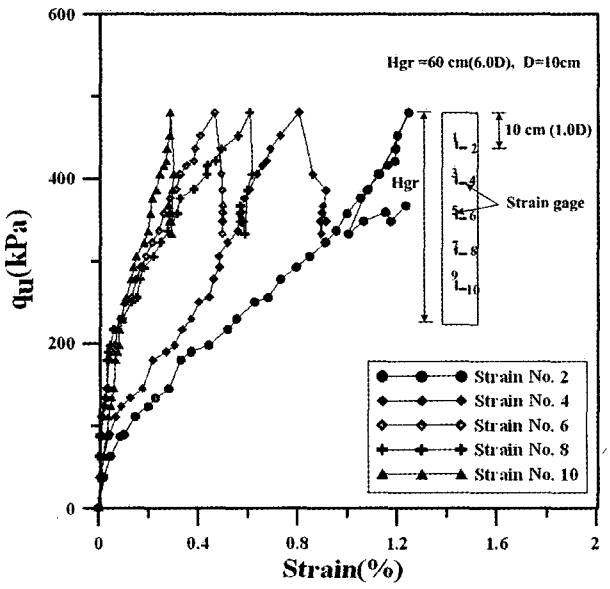
파괴형상 분석과 하중재하시험을 통해 GRSC는 쇄석 기둥의 팽창파괴영역의 횡방향 변형을 억제시켜 지지력을 증가시켜 주는 것으로 나타났다. 따라서 효율적인 지오그리드 보강길이를 고찰하기 위해 지오그리드 보강길이를 상부로부터 2.0D(0.25H), 4.0D(0.5H), 8.0D(H)로 변화시켜 시험을 수행하였으며, 그림 8은 보강길이에 따른 지지력 변화경향을 나타내고 있다. 그림 9에서 보강길이 8.0D는 보강길이 2.0D, 4.0D에 비해 극한 지지력이 10%~15% 증가하는것을 알 수 있다.

표 6은 보강길이에 따른 하중단계에서 침하량을 나타내고 있다. 보강길이 2.0D, 4.0D에 비해 보강길이 8.0D의 침하량이 4~5배 감소하는 것을 알 수 있는데 이는 보강길이 8.0D의 경우 보강부위(2.0D, 4.0D)의 아래 비보강 부분에서 발생하는 횡방향 변형으로 인한 침하를 억제시켜 주기 때문으로 판단된다.

그림 10은 보강길이에 따른 극한지지력 변화경향을 보여주고 있는데 보강길이가 증가함에 따라 극한지지력이 증가하며, 보강길이 4.0D에서 극한지지력이 수렴



(a) 지오그리드 수직 변형



(b) 지오그리드 수평 변형

그림 8. 지오그리드 망의 변형 거동

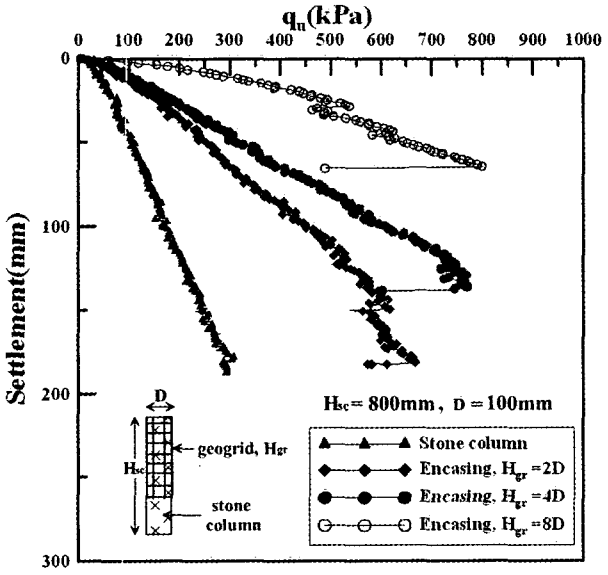


그림 9. 보강길이(H_{gr})에 따른 하중-침하곡선

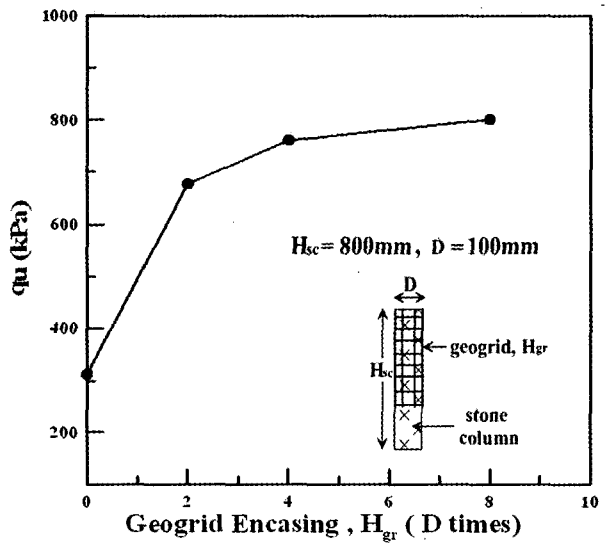


그림 10. 보강길이(H_{gr})에 따른 지지력

표 6. 보강길이(H_{gr})에 따른 하중단계별 침하

구분		재하하중 (kPa)	
		150	300
하중단계별침하량 (mm)	쇄석기둥	91	179
	보강길이(2D)	24	65
	보강길이(4D)	19	45
	보강길이(8D)	5	12

하는 양상을 보인다. 이러한 결과를 통해 적정 지오그리드 보강 길이는 팽창파괴 영역을 보강하는 깊이로 상부로부터 GRSC 직경의 약 4.0D내의 영역을 보강하는 것이 경제적인 보강방법임을 알 수 있다. 따라서 GRSC의 적정 보강길이를 선정하는데 있어서는 극한지지력 뿐만 아니라 지반조건과 침하특성을 고려하여 현장조건에 맞는 적정 보강 길이를 산정하여야 할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 지오그리드로 보강 쇄석기둥(GRSC)의 파괴형상과 하중-침하특성을 고찰하기 위해 실내모형실험을 수행하였다. 또한 GRSC의 적정 보강길이를 평가하기 위해 보강길이를 변화시켜가며 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

(1) 쇄석기둥의 파괴형태는 팽창파괴로 상부로부터 쇄석기둥 직경 1.0~2.5D의 깊이에서 발생하였으며, GRSC는 지오그리드 보강으로 인한 구속효과로 쇄석기둥의 팽창파괴를 억제 하는 것을 알 수 있다.

(2) 쇄석기둥 직경(D)의 10%에 해당하는 10mm의 침하 발생시의 지지력 비교를 통해 쇄석기둥은 28.67kPa, GRSC는 277.02kPa로 GRSC가 쇄석기둥에 비해 약 10배정도 지지력 증가 효과가 있음을 알 수 있었다.

(3) 지오그리드 보강길이에 따른 보강효과는 보강길이가 증가할수록 극한지지력이 증가하는 경향을 보이고 있으나, 보강길이 4.0D의 경우 전체보강(8.0D)의 약 90%의 지지력을 나타내고 있다. 이러한 결과를 통해 적정 보강 길이는 상부로부터 GRSC 직경의 약 4.0D이내의 영역을 보강하는 것이 경제적인 보강방법임을 알 수 있다.

(4) 실내모형실험을 통해 GRSC의 파괴는 지오그리드 자체 변형에 의한 파손이 아닌 지오그리드망의 접합부위에서 연결부위 파손으로 인해 발생함을 알 수 있다. 따라서 GRSC의 강도 증진을 위해서는 지오그리드망 접합부위의 접합강도를 충분히 고려하여야 할 것이다.

(5) 모형실험에서 발생할 수 있는 치수효과를 고려할때 지지력 및 침하감소효과를 정량적으로 평가하는데는 제약이 있으나 GRSC공법이 지오그리드 보강으로 인한 구속효과로 쇄석기둥에 비해 지지력 증가 및 침하감소에 효과가 있음을 알 수 있었으며, 향후 현장시험을 통한 비교 검증연구가 수행되어야 할것이다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. 이대영, 김선빈, 송아란, 유충식 (2006), 지오그리드 보강 Stone Column의 장·단기 하중 지지특성-유한요소해석을 통한 고찰, *2006 한국지반공학회 봄 학술발표회.*
2. 정혁상 (2004), *실대형 실험을 통한 계단식 보강토 옹벽의 거동 특성 분석*, 석사학위논문, 성균관대학교 토목환경공학과, pp.66-69.
3. 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.
4. Kempfert, H.G., Raithel, 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.
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. 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.
7. Hughes, J. M., and Withers, N. J. (1974), "Reinforcing of cohesive soils with stone columns", *Ground Engineering*, Vol.7, No.3, pp.42-49.
8. Raithel, M., Kempert, H. G., and Kirchiner, A. (2001), "Geotextile-encased columns (GEC) for foundation of a dike on very soft soils", *Geosynthetics- 7th ICG*, pp.1025-1028.
9. Al-Joulani, M. (1995), "Laboratory and analytical investigation of sleeve reinforced stone columns", *Ph.D. Thesis*, Carleton University, Canada.
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. Trunk, G., Heerten, A., Poul, A., and Reuter, E. (2004), "Geogrid wrapped vibro stone columns", *EuroGeo3*, pp.289-294.

(접수일자 2006. 6. 21, 심사완료일 2006. 9. 6)