

고강도 지오그리드로 보강된 Stone Column 공법의 침하감소효과 Settlement Reduction Effect of the Geogrid Reinforced Stone Column System

박 시 삼^{1*} Park, Sis-Am 조 성 한² Cho, Sung-Han
유 충 식³ Yoo, Chung-Sik 이 대 영⁴ Lee, Dae-Young

ABSTRACT

Sand Compaction Pile and Stone Column method have been used in widely during several decades as a technique to reinforce soft soils and increasing ultimate bearing capacity, accelerate consolidation settlement of the foundation ground. Stone column method, making a compaction pile using crushed stone, is a soft ground improvement method. However, stone column method is difficult to apply to the ground which is not mobilized enough lateral confine pressure because no bulging failure resistance. Hence, in present study, development the geogrid reinforced stone column system for settlement reduction and wide range of application of stone columns. To develop this system, triaxial compression tests were conducted for evaluation which is about behavior characteristics of stone column on replacement rate and confine pressure. Then, 3-dimensional numerical analysis were evaluated for application of the GRSC (geogrid reinforced stone column) system as evaluate behavior characteristics and settlement reduction effect of stone column reinforced by geogrid on types and reinforcing depth change of geogrid.

요 지

모래다짐말뚝 및 쇄석말뚝 공법의 경우, 연약지반의 보강, 극한지지력의 증대 및 기초지반의 압밀을 가속화시키기 위한 목적으로 지난 수십 년간 폭넓게 적용되고 있다. 쇄석말뚝공법은 비교적 강성이 크고 압축성이 작은 쇄석 등을 이용하여 다짐말뚝을 형성, 연약지반을 개량하는 공법이지만 횡방향 구속압력이 충분하게 발휘되지 않는 지반에서는 팽창과괴(bulging failure)에 대한 저항이 없어 적용이 불가능하게 된다. 따라서 본 연구에서는 쇄석말뚝의 활용도를 높이기 위해 팽창과괴 및 전단과괴 등을 방지하여 침하량을 상당부분 억제시킬 수 있는 고강도 지오그리드 보강 쇄석말뚝공법을 개발하였다. 본 공법 개발을 위해 삼축압축시험을 통하여 치환율 및 구속압력에 따른 일반적인 쇄석말뚝의 거동특성을 우선 살펴보았다. 아울러 유한요소 해석을 통한 3차원 수치해석을 시행하여 지오그리드의 종류 및 지오그리드 보강심도변화에 따른 지오그리드 보강 쇄석말뚝공법의 거동특성 및 침하저감효과를 평가함으로써 지오그리드 보강 쇄석말뚝의 적용성을 평가해 보았다.

Key words : Stone Column, Geogrid, Triaxial compression test, Settlement Reduction Effect

1. 서 론

최근의 국내건설공사는 산업화의 가속 및 경제 성장과 더불어 지반조건이 양호한 용지의 수요가 점점 증가되고 있으나, 국토의 제한성으로 인하여 지반조건이 양호한 용

지의 확보가 어려워져 도로, 철도 및 산업단지의 계획에 있어서 연약지반 분포지역까지 건설공사가 진행되고 있다. 이러한 경우 연약지반개량이 불가피하게 되어 쇄석말뚝(stone column) 공법 등과 같은 연약지반개량공법이 적용되고 있다. 쇄석말뚝공법과 같은 지반개량공법을 적용

1* 정회원, GS건설(주) 기술본부 선임연구원 (Member, Senior Research Engrn, Technical Division, GS E&C Corp., E-mail: parkss7@gsconst.co.kr)
2 정회원, GS건설(주) 기술본부 수석연구원 (Member, Chief Research Engrn, Technical Division, GS E&C Corp.)
3 정회원, 성균관대학교 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ.)
4 정회원, 건설기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, K.I.C.T)

하는 경우에는 지지력과 침하의 두 가지의 중요한 기초 공학적 문제를 만족하여야 하는데, 최근에는 침하량을 감소시킬 여러 연구들이 진행되고 있다. 쇄석말뚝공법은 비교적 강성이 크고 압축성이 작은 쇄석 등을 이용하여 다짐말뚝을 형성, 연약지반을 개량하는 공법으로서 그 활용빈도가 크게 증가하고 있으나 횡방향 구속압력이 충분하게 발휘되지 않는 지반에서는 팽창파괴(bulging failure) 및 전단파괴(shear failure) 등에 대한 저항이 없어 적용이 불가능하게 된다.

따라서 본 연구에서는 지지력 및 침하량 등에 대한 제어가 가능한 고강도 지오그리드 보강 쇄석말뚝공법을 개발하였으며, 고강도 지오그리드 보강 쇄석말뚝 공법의 경우, 횡방향 구속압력이 충분하지 않은 쇄석말뚝의 상부를 고강도 지오그리드로 보강함으로써 팽창파괴(bulging failure) 및 전단파괴(shear failure) 등을 상당부분 억제할 수 있을 것으로 판단된다. 고강도 지오그리드 보강 쇄석말뚝 공법의 적용성 등을 평가하기 위해, 삼축압축시험을 통하여 구속압 및 치환율에 따른 쇄석말뚝의 거동특성을 우선 알아보았으며, 유한요소해석을 통한 3차원 수치해석을 시행하여 지오그리드의 강성 및 보강심도 변화에 따른 지오그리드 보강 쇄석말뚝공법의 거동특성 및 침하저감효과를 평가함으로써 지오그리드 보강 쇄석말뚝공법의 적용성을 평가해 보았다.

2. 지오그리드 보강 쇄석말뚝

2.1 지오그리드 보강 쇄석말뚝의 구성

Huges와 Withers(1974)는 모형실험을 통해 일반적인 쇄석말뚝의 주된 파괴형태는 지반의 전단강도가 최소인 지점에서 발생하는 팽창파괴임을 제안하였으며(그림 1), Juran 등(1991)은 횡방향 구속압력이 충분하게 발휘되지 않는 지반에서 조립토 다짐말뚝 및 쇄석말뚝과 같은 공법은 적용이 불가능하다고 보고하였다.

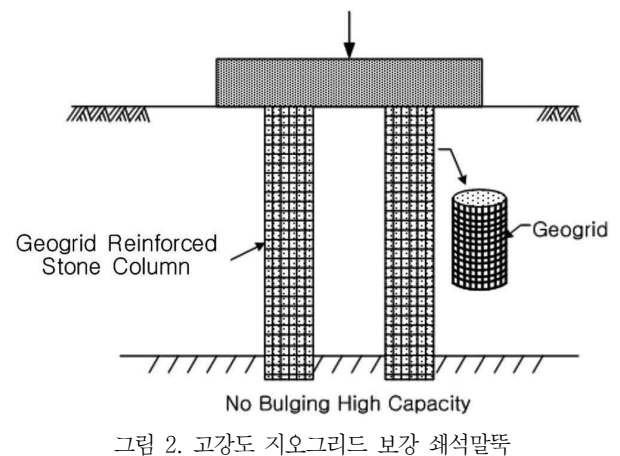
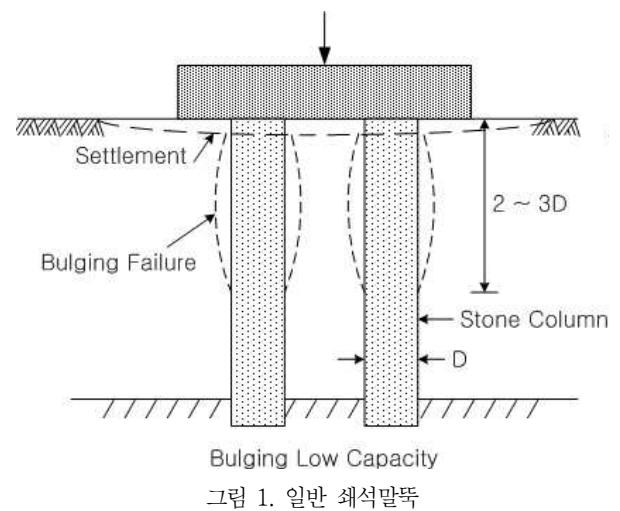
이를 해결하기 위한 방법으로 Aboshi 등(1979), Juran 등(1991)은 말뚝 상단부분을 강관스커트로 보강하거나 재료에 시멘트를 혼합하는 방법이 말뚝의 지지력을 증가시키는 방법임을 제시하였으며, A. Joulani 등(1995) 및 U. Trunk 등(2004)은 쇄석말뚝 주면을 지오그리드로 감싸 보강함으로써 증대되는 전단응력 설계방안 등을 제시한 바 있다. 국내에서는 김 등(1999)이 강관스커트로 말뚝 상단부분을 보

강함으로써 침하량을 감소시키는 방법을 제시한 바 있다.

말뚝상부에 시멘트를 혼합해서 쇄석말뚝을 시공할 경우, 쇄석말뚝의 장점이라 할 수 있는 배수 및 투수의 성능이 크게 저하되어 액상화 등의 내진설계에 있어 어려움이 있으며, 강관스커드의 경우 시공성 및 경제성의 어려움으로 적용사례가 드문 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 쇄석말뚝의 팽창파괴 및 전단파괴 등을 효율적으로 억제하기 위해 고강도 지오그리드로 쇄석말뚝의 주면을 감싸는 새로운 개념의 공법을 개발하였다(그림 2).

2.2 지오그리드 보강 쇄석말뚝의 기본원리

일반적인 쇄석말뚝과 지오그리드 보강 쇄석말뚝에 하중이 작용하는 경우의 모식도는 그림 3 및 그림 4와 같다. 도시된 바와 같이 동일한 지반조건을 가질 때, 동일한 하중(q_u)이 쇄석말뚝에 작용하는 경우, 일반 쇄석말뚝의 경우 구속응력이 작은 상부에서 팽창파괴가 발생하기 때문에 과



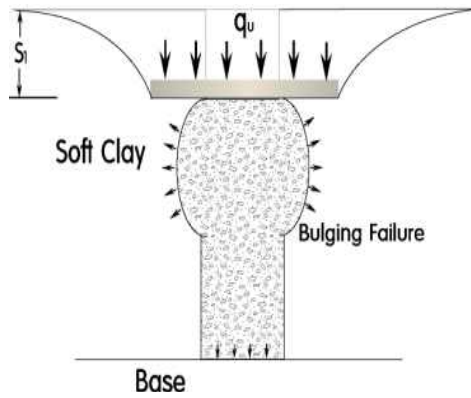


그림 3. 일반 쇄석말뚝 팽창파괴 모식도

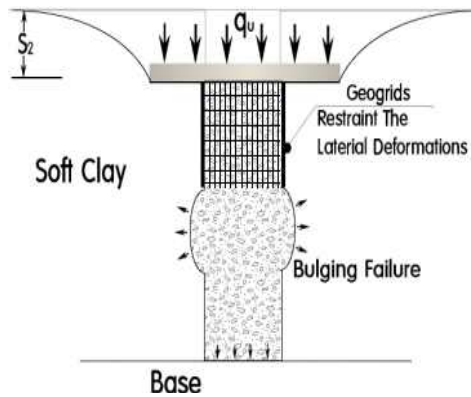


그림 4. 그리드 보강 쇄석말뚝 팽창파괴 모식도

다한 침하량(s_1)이 발생하는 반면, 고강도 지오그리드 보강 쇄석말뚝의 경우 쇄석말뚝의 상부를 지오그리드로 보강함으로써 쇄석말뚝 상부에서 발생하는 팽창파괴를 상당부분 억제할 수 있다. 이러한 효과로 지오그리드 보강 쇄석말뚝은 침하(s_2)량이 일반 쇄석말뚝에 비해 감소하게 된다.

3. 삼축압축시험

3.1 개요

본 연구에서는 연약지반에 쇄석말뚝으로 치환된 복합지반의 거동특성을 살펴보기 위해, 구속압력 조건 및 쇄석말뚝의 치환율 조건별로 삼축압축시험기를 이용하여 압밀

-비배수 삼축압축시험을 시행하였다. 일반적인 쇄석말뚝의 삼축압축시험 결과를 이용하여 복합지반 공시체의 비배수전단응력-변형률, 극한응력, 전단강도의 변화 경향을 정량적으로 파악하였다.

3.2 복합지반 공시체 제작

삼축압축시험에서 사용된 복합지반 중 원지반은 인천 송도해안도로 건설현장에서 채취한 점토시료를 사용하였으며, 쇄석으로 사용된 시료는 쇄석의 치수효과(scale effect, 1/6~1/40)를 고려하여 4번체 통과한 조립토 시료를 사용하였다. 삼축압축시험에서 복합지반으로 사용된 점성토와 쇄석시료의 물리적 특성은 표 1에 요약, 정리하였다.

3.3 삼축압축시험 개요 및 방법

본 연구의 삼축압축시험은 압밀-비배수 조건으로 시행하였으며, 시험에 사용된 원지반시료는 현장에서 채취된 교란 점성토를 운반하여 재성형하여 사용하였다. 점토시료는 현장 지반조건과 최대한 유사하게 하기 위하여 시료 내에 포함된 불순물을 제거한 후, 직경(D)=10cm, 높이(H)=20cm인 콘크리트용 공시체 몰드를 이용하여 몰드내부에 점토지반을 조성하였다. 조성된 점토지반은 몰드 상부에 49.03kPa의 상재압력을 가해서 72시간 동안 압밀하여 정규압밀 점토로 재형성한 후, 쇄석말뚝 시료를 이용하여 쇄석말뚝을 조성하는 방식으로 시험에 사용될 복합지반을 조성하였다. 쇄석말뚝 조성시에는 치환율에 따른 소형 steel 케이싱과 소형 오거를 이용하여 점토지반을 천공함으로써 정확한 쇄석말뚝이 조성되도록 하였다. 쇄석말뚝 다짐도의 경우, 상대밀도 70%로 일정하게 유지되도록 중량-체적 할당법을 적용하여 각 치환율을 고려한 시험몰드를 제작하였다.

천공시 유출되는 시료는 공시체의 함수비(w)와 비중(G_s)을 측정하였고, 쇄석말뚝의 조성 후 복합지반 공시체의 길이(L)와 무게(W)를 측정하였다. 본 연구에 사용된 삼축압축

표 1. 대상시료의 물성

구분	G_s	w (%)	γ_{sat} (KN/m ³)	ϕ (°)	c (KN/m ²)	v	-
쇄석시료	2.61	9.2	17.5	36	0	0.30	-
구분	#200 통과량	LL (%)	PL (%)	PI (%)	w (%)	G_s	USCS
점토시료	97.7	33.7	22.4	11.4	43.2	2.653	CL ~ ML

시험기의 전경과 시험전경은 그림 5 및 그림 6과 같다.

조성된 복합지반 시료는 표준삼축압축시험법에 의거 시험을 진행하였으며, 지반조건은 치환율 4%, 9% 및 16% 인 조건으로 결정하였다. 공시체는 축압조건(150kPa, 200 kPa, 250kPa)의 3가지 압력 하에서 등방압밀을 진행하였으며, 등방압밀 종료 시 전단시험을 시행하였다. 전단시험은 ASTM D 2767-95 기준에 따라 변형률제어 방식으로 수행하였으며, 소성변형구간의 정확한 파악을 위해 0.5mm/min 의 속도로 축 변형률을 25%까지 측정하였다.

일반 삼축압축시험기는 시료 포화를 위해 중앙에 있는 배압공급장치에 의해 배압을 공급하게 되는데, 복합지반의 경우에는 중앙부분에 위치한 쇄석말뚝의 투수계수가 점성토에 비해 상대적으로 크므로 점성토의 포화는 거의 기대하지 못하는 단점이 있다. 그러나 본 연구에서는 이를 보완하기 위해 저면 중심에서 120° 각도의 방사방향으로 20mm, 30mm 및 45mm 떨어진 곳에 총 4개의 배압공급장치를 설치하여 점성토의 포화가 용이하도록 고안하였다 (그림 6).

삼축압축시험시에는 설치된 간극수압계를 통해 B계수

($=\Delta u/\Delta \sigma_3$) 95% 이상 측정되었을 때를 압밀완료시점으로 가정하였다.

3.4 삼축압축시험 결과분석

일반적인 쇄석말뚝의 거동특성을 알아보기 위해 시행한 삼축압축시험의 시험 전 시료형태 및 시험 종료 후 복합지반 파괴형태는 그림 7에 나타내었다. 아울러 쇄석말뚝의 보다 정확한 변형거동을 살펴보기 위하여 복합지반의 중앙부를 절단하여 쇄석말뚝과 원지반간의 접촉부 변형을 그림 8에 나타내었다. 그림 8에 나타난 바와 같이 시험결과 쇄석말뚝의 주된 파괴형태는 팽창파괴형태임을 확인할 수 있었다.

삼축압축시험결과를 이용하여, 치환율 4%, 9% 및 16% 조건의 복합공시체의 축차응력-변형률 관계는 그림 9에 나타내었으며, 구속압력별 하중-침하특성 정리하면 그림 10과 같다. 그림 9의 결과를 살펴보면, 쇄석말뚝은 변형률이 증가함에 따라서 지속적인 변형률 경화거동(strain hardening)을 보이며, 구속압력이 증가함에 따라 최대응력도 증가하는 것으로 나타났다.



그림 5. 삼축압축시험기 전경

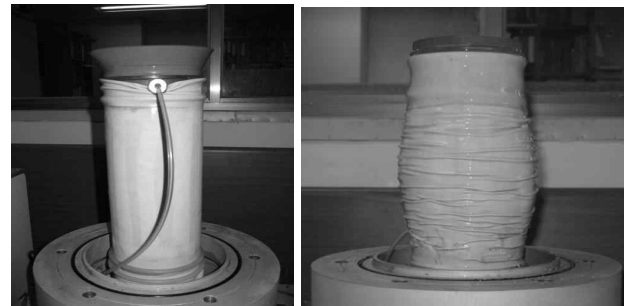


그림 7. 시험전 및 시험후 시료형상

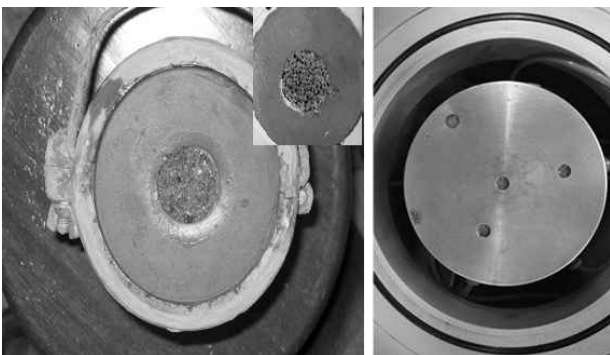


그림 6. 복합지반 조성 후 전경 및 배압공급장치 전경



그림 8. 복합공시체 파괴 후 단면형상

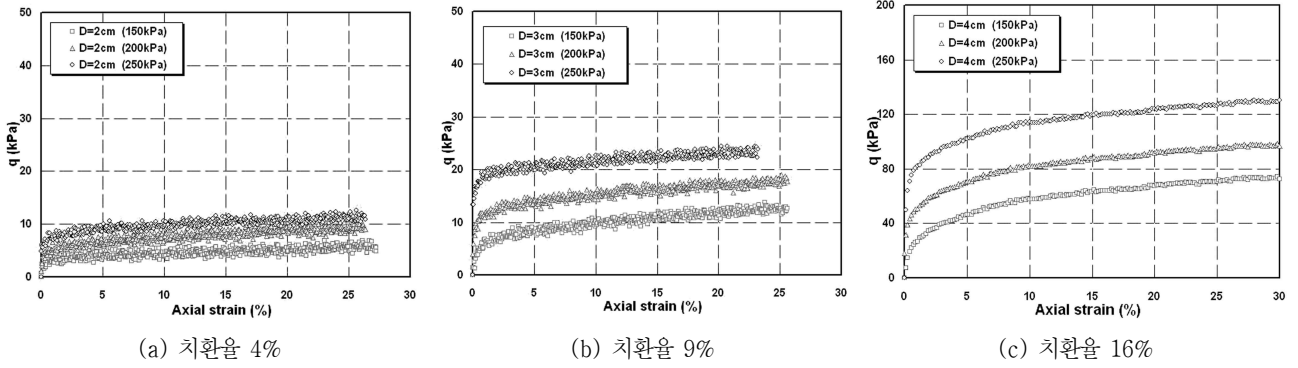


그림 9. 삼축압축시험에 따른 축차응력-변형률 거동분석

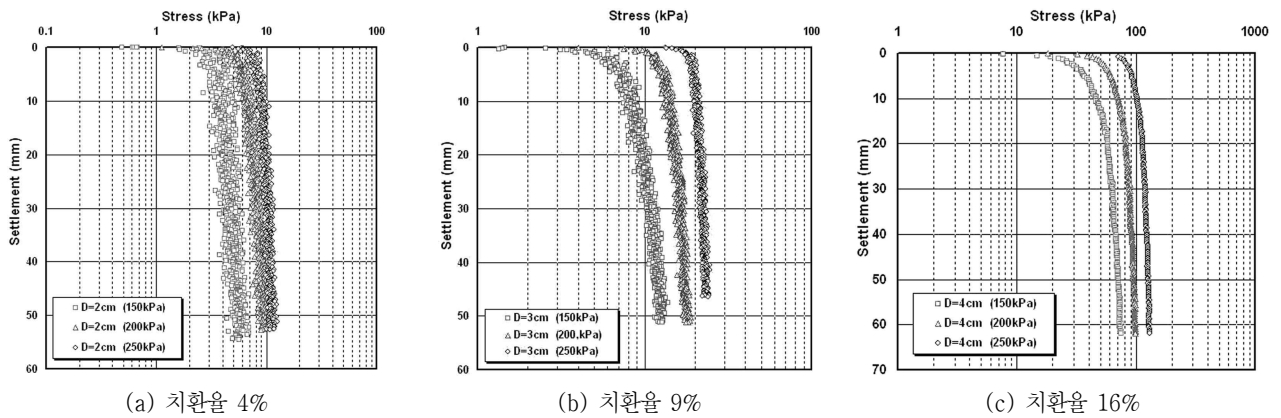


그림 10. 삼축압축시험에 따른 하중-침하 거동분석

그림 10을 살펴보면, 구속압이 증가함에 따라 쇄석말뚝의 지지력이 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 치환율이 증가함에 따라 복합지반의 지지력이 증가하여 침하저감효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 시험을 통해 고강도 지오그리드로 쇄석말뚝을 구속해줄 경우, 침하저감효과가 있을 수 있다는 것을 간접적으로 확인할 수 있었다.

4. 3차원 수치해석을 통한 지오그리드 보강 쇄석말뚝의 적용성 평가

4.1 3차원 수치해석 개요

본 연구에서는 고강도 지오그리드 보강 쇄석말뚝의 적용성을 평가해보기 위해, 유한요소해석 프로그램인 *PEN-TAGON 3D program*을 이용하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 상호 비교를 목적으로 일반적인 쇄석말뚝을 적용하는 경우와 지오그리드 보강 쇄석말뚝을 적용하는 경우에 대해서 수행하였다. 아울러 지오그리드의

효과적인 보강심도 및 보강심도별 침하저감효과 등을 확인해보기 위해, 보강심도를 말뚝직경(D)의 2, 4 및 8배로 변화를 주어 수치해석을 시행해 보았다.

3차원 수치해석에서 지반요소는 일반적으로 연약지반의 거동을 합리적으로 모사하는 것으로 알려진 *Modified Cam-Clay Model*을 사용하였다. 수치해석에 지반 및 말뚝은 8절점 고체요소(solid element)를 사용하였으며, 강성 재하판을 모델링 하여 재하판 위로 단계하중을 작용시키면서 해석을 수행하였다. 수치해석에 적용된 말뚝은 지름 1.0m 및 길이 8.0m로 가정하였으며, 재하판은 2.2m의 크기로 가정하여 판요소(shell element)로 적용하여 수치해석을 수행하였다. 또한 쇄석말뚝에 보강되는 지오그리드의 경우 판요소로 적용하였으며, 해석시 회전변위를 구속하여 모델링 하였다. 연약층의 두께는 8.0m, 연약층 하부에 풍화암층이 존재하는 것으로 가정하였다. 그림 11은 수치해석에 적용된 격자요소망의 형상, 그림 12는 격자요소망의 경계조건에 대한 개요도이다.

말뚝과 지반의 경계조건은 좌우 측면은 롤러를 두어 x 방향 및 y방향 변위를 구속하였으며, 지반의 하단면만을

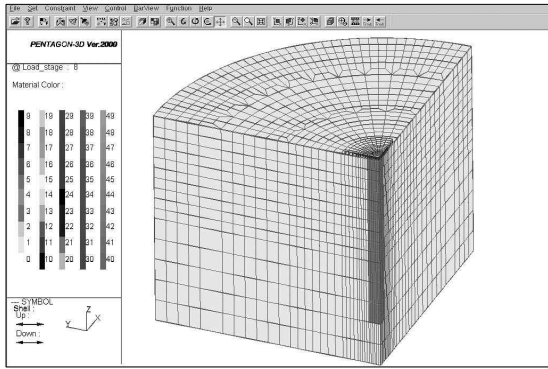


그림 11. 수치해석 격자망 형상

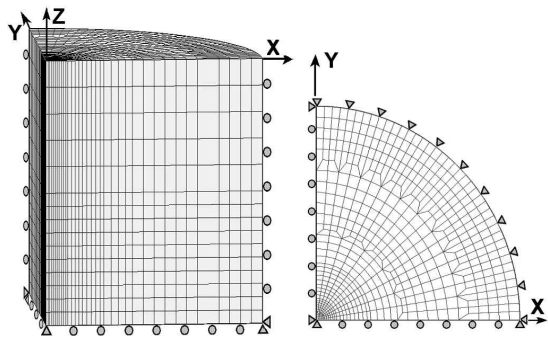


그림 12. 경계조건 개요

z방향 변위를 구속하였다. 수치해석에 적용된 각 단계별로 작용하중은 1단계에는 $9.81kPa$, 2단계에는 $19.62kPa$, 3 단계에는 $29.43kPa$, 4단계에는 $39.24kPa$, 5단계 및 6단계에서는 $49.05kPa$ 등을 단계별로 이전 단계하중에 추가하였으며, 7단계에서 $147.15kPa$ 를 이전 단계 하중에 추가하였다. 또한 수치해석에 적용된 Modified Cam-Clay Model 지반 특성값과 말뚝재하관 재료 등의 입력값은 표 2에 요약 정리되어 있다.

수치해석에 적용된 고강도 지오그리드의 경우, 폴리에

표 2. 수치해석에 적용된 입력 특성값

구 분	$\gamma, kN/m^3$	E, kPa	$\phi, ^\circ$	c', kPa	ν	λ	κ	M	길이 m	직경 m	구성모델
지반	16.55	1794.2	20.4	14.42	0.40	0.239	0.043	0.788	10.0	-	MCC
말뚝	22.56	60822.0	39.0	0.0	0.30	-	-	-	8.0	1.0	MC
재하관	77.01	2.06e8	-	-	0.167	-	-	-	t = 0.3	2.2	Elastic

* MCC : Modified Cam Clay Model , MC : Mohr Coulomb Model

표 3. 지오그리드 강도특성치

구 분	종류	γ	E	ν	t	구성모델
TOTO Grid 적용값	4T	$1.00 kN/m^3$	$7.60e5 kPa$	0.35	$0.007 m$	Elastic
	7T		$1.20e6 kPa$	0.35	$0.007 m$	
	10T		$1.60e6 kPa$	0.35	$0.007 m$	



그림 13. 해석에 적용된 지오그리드

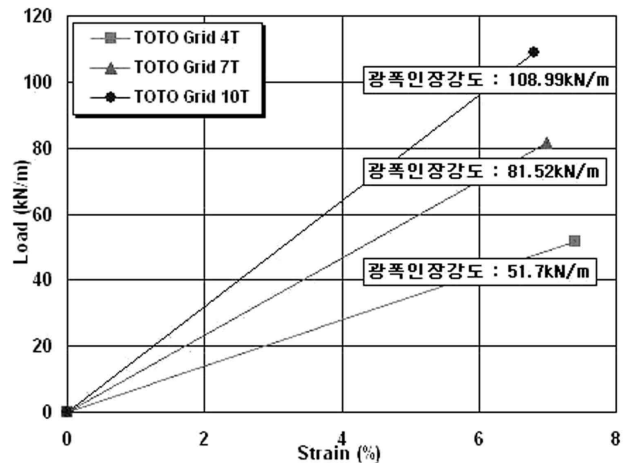


그림 14. 응력-변형률 관계곡선

스테르 레진(resin)을 압출실린더에 통과시켜 평평한 바(bar) 형태로 추출한 후, 냉각, 연신 공정을 통해 스트립(strip) 형태로 제작한 TOTO 그리드를 적용하였다(그림 13). 수치해석시 적용한 TOTO 그리드의 탄성계수 등의 강도특성치는 그림 14에 나타난 3종류 지오그리드의 광폭 인장강도 시험결과 얻어진 응력-변형률 관계곡선을 이용하여 결정하였으며, 본 수치해석에서 적용한 지오그리드의 강도특성치는 표 3과 같다.

4.2 3차원 수치해석 결과분석

지오그리드 보강 쇠석말뚝의 횡방향 변형억제 및 침하 저감효과를 확인하기 위해 수행한 3차원 수치해석결과는 그림 15 및 16과 같다. 그림 15는 하중재하에 따른 쇠석말뚝의 연직변위 발생형태를 나타낸 변위분포도이며, 그림 16은 하중재하에 따른 쇠석말뚝의 수평변위 발생형태를 나타낸 변위분포도이다. 그림 15의 내용을 살펴보면 지오그리드 보강심도가 깊어짐에 따라, 쇠석말뚝의 전체 침하량은 감소하는 것으로 확인되었다. 아울러 그림 16의 하중재하에 따른 쇠석말뚝의 수평변위 형태를 살펴본 결과, 쇠석말뚝의 주된 변형거동은 팽창의 형태라는 것이 확인되었다.

무보강 일반 쇠석말뚝의 경우에는 말뚝 상부에서 수평 변형이 비교적 크게 일어나며, 지오그리드 보강심도가 증가함에 따라서 수평변형이 점차로 감소하는 양상을 보이는 것으로 나타났다. 말뚝의 2D까지 지오그리드로 보강하는 경우에는 지오그리드로 보강하지 않은 하부쇠석말뚝에서 수평변형이 비교적 크게 나타났으나, 말뚝의 4D까지 지오그리드로 보강하는 경우에는 쇠석말뚝 상단부의 수평변형을 크게 억제하는 것으로 나타났으며, 말뚝의 팽창형태의 변형 역시 지오그리드로 보강하지 않은 하부 쇠석말뚝에서 발생하는 것으로 확인되었다. 아울러 지오그리드로 쇠석말뚝 전체를 보강하는 경우에는 침하 저감효과가 비교적 명확하게 나타났으며, 말뚝의 수평변형 역시 팽창형태

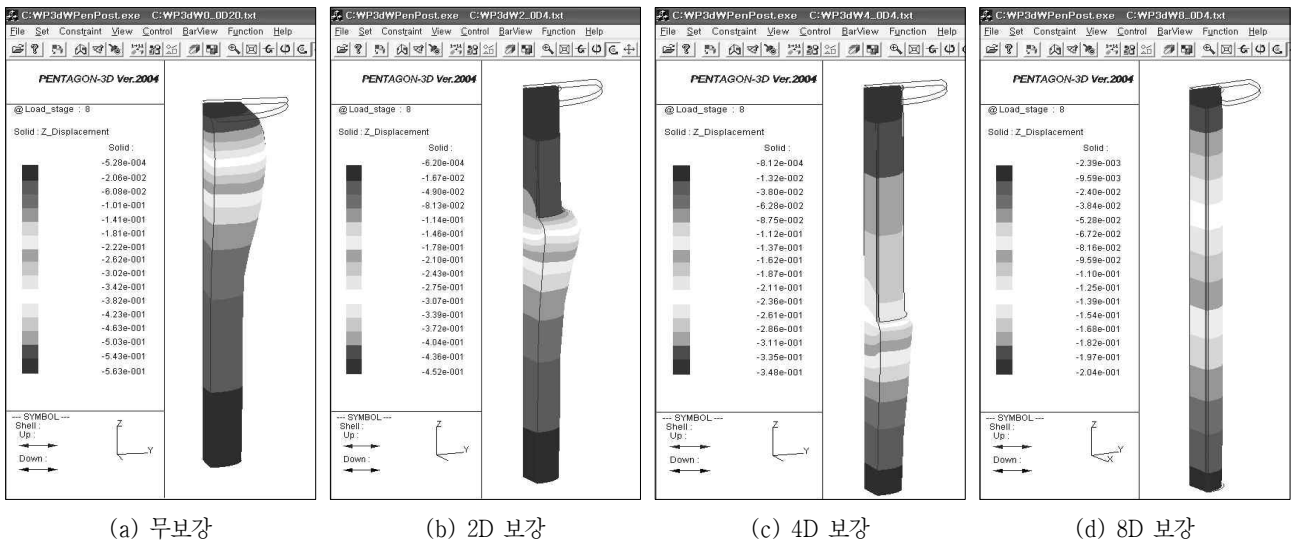


그림 15. 쇠석말뚝의 연직변위 발생형태

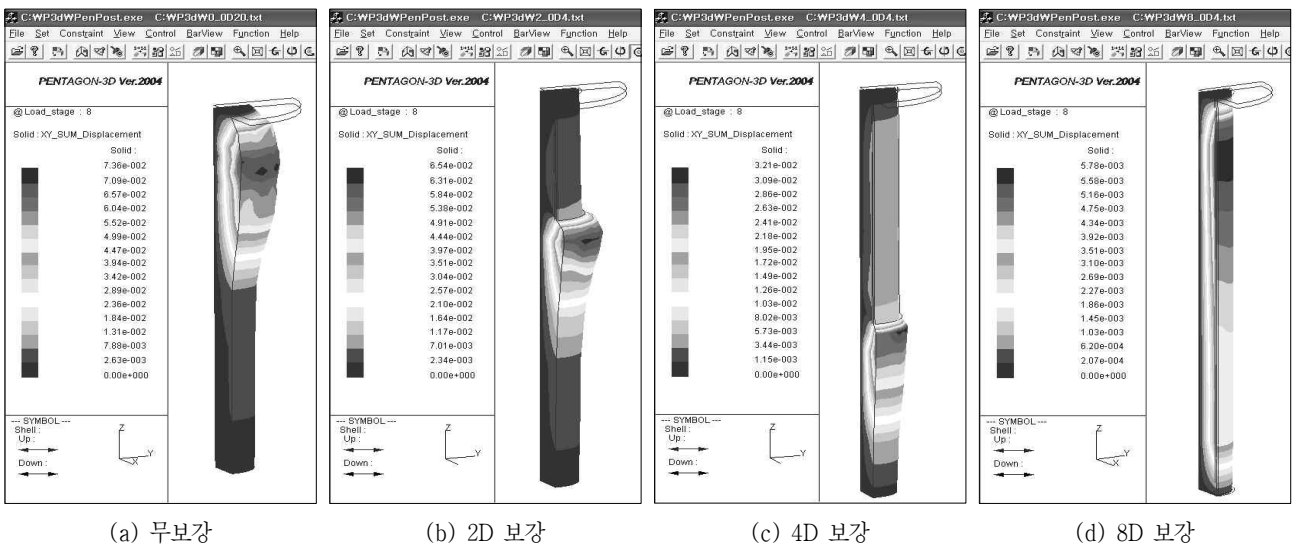
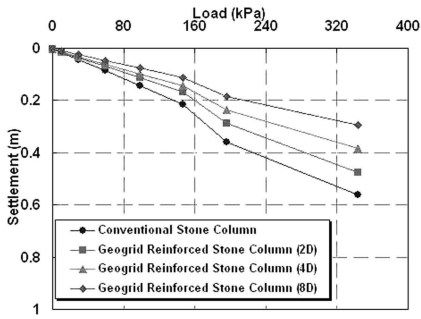
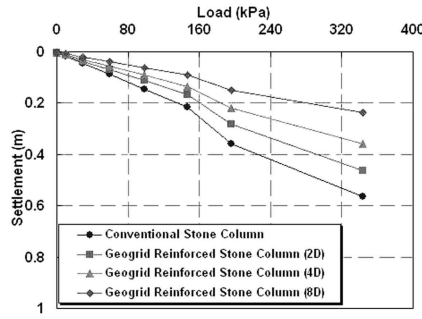


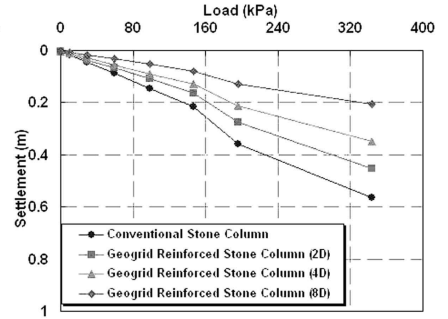
그림 16. 쇠석말뚝의 수평변위 발생형태



(a) 지오그리드 4T

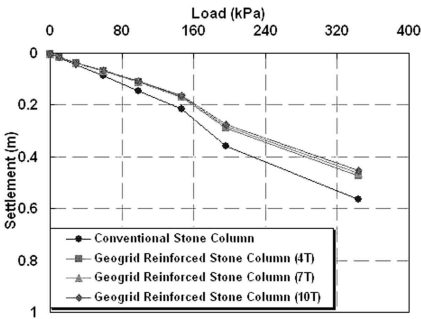


(b) 지오그리드 7T

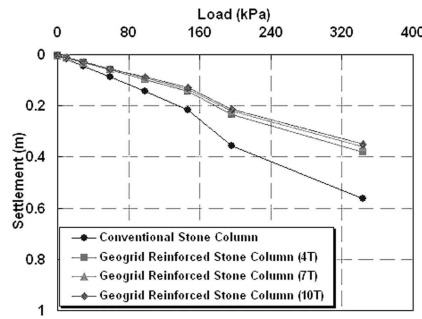


(c) 지오그리드 10T

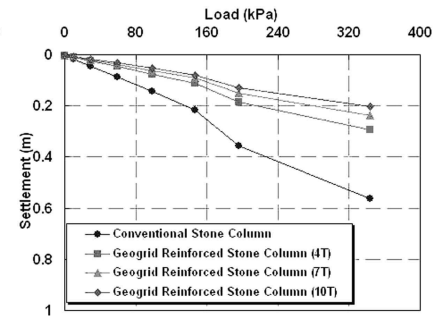
그림 17. 보강심도에 따른 하중-변위곡선



(a) 2D 보강

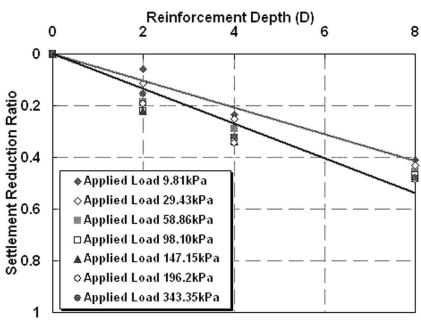


(b) 4D 보강

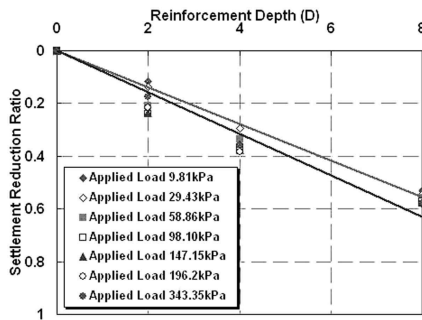


(c) 8D 보강

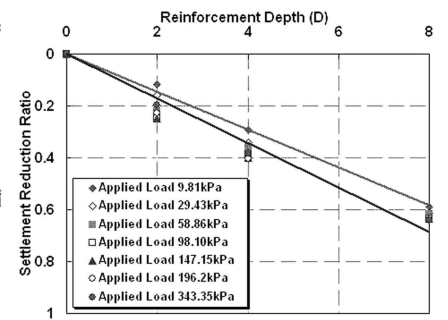
그림 18. 지오그리드 종류에 따른 하중-변위곡선



(a) 지오그리드 4T



(b) 지오그리드 7T



(c) 지오그리드 10T

그림 19. 지오그리드 보강심도별 침하저감비

가 아닌 전체적으로 균등하게 변형되는 형태로 나타났다.

그림 17의 하중-침하량 곡선을 살펴보면, 쇄석말뚝에 지오그리드를 보강함에 따라 침하량이 감소하는 것으로 나타났으며, 지오그리드가 4T, 7T 및 10T인 경우 모두 지오그리드의 보강심도가 깊어질수록 침하감소효과가 더욱 큰 것으로 평가되었다. 지오그리드의 강성변화에 따른 쇄석말뚝의 하중-변위곡선을 살펴보면(그림 18), 지오그리드의 강성이 4T, 7T 및 10T로 증가함에 따라서 쇄석말뚝의 침하량이 감소하는 것으로 확인되었으나, 지오그리드의 강성이 증가함에 따라 쇄석말뚝의 침하량이 크게 감소

하지는 않는 것으로 나타나 쇄석말뚝의 침하저감효과에 크게 영향을 미치는 요소는 지오그리드의 보강심도인 것으로 판단된다. 아울러 그림 19의 보강심도 및 그리드 강성에 따른 침하저감비를 분석한 결과, 보강심도와 그리드 강성이 증가할수록 침하저감비는 증가하는 것으로 나타났다. 4T의 지오그리드로 보강할 경우, 보강심도를 2D, 4D 및 8D로 증가함에 따라 전체 침하감소효과는 각각 16.4%, 30.0% 및 45.8% 정도인 것으로 평가되었다. 7T의 지오그리드를 쇄석말뚝의 2D, 4D 및 8D로 보강하는 경우의 침하저감비는 0.189, 0.344 및 0.562로 나타났다. 10T의 지

오그리드를 쇠석말뚝에 보강하는 경우에는 보강심도가 2D, 4D 및 8D로 증가함에 따라서 각각 20.2%, 36.7% 및 62.4%의 침하감소효과가 있는 것으로 평가되었다.

전반적으로 지오그리드의 보강심도가 깊어짐에 따라 침하비가 감소하여 침하감소효과가 우수한 것으로 평가되었으며, 동일한 보강심도에서는 지오그리드의 강성이 증가함에 따라서 쇠석말뚝의 침하를 감소시키는 것으로 평가되었다. 이와 같은 수치해석결과를 종합적으로 분석한 바, 상대적으로 구속응력이 작은 쇠석말뚝 상부를 지오그리드로 보강하는 경우에는 쇠석말뚝의 팽창과괴의 상당부분을 억제할 수 있으며, 침하량도 큰 폭으로 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 향후 실대형 삼축압축시험 및 현장시험 등을 토대로 고강도 지오그리드 보강 쇠석말뚝 공법의 적용성을 평가할 예정이며, 수치해석결과 및 시험결과 등을 토대로 본 공법에 적합한 안정해석기법을 제시할 예정이다.

5. 결 론

본 연구에서는 쇠석말뚝의 상부에 하중이 가해질 경우 발생할 수 있는 팽창과괴 억제를 위해 쇠석말뚝의 주면을 고강도 지오그리드로 감싸 보강하는 고강도 지오그리드 보강 쇠석말뚝 공법을 개발하였으며, 이에 대한 적용성을 평가해보기 위해 먼저 삼축압축시험을 통해 구속압에 따른 변위감소효과를 살펴보았으며, 3차원 유한요소해석 프로그램을 사용하여 침하량감소효과 등을 확인해 보았다. 본 연구를 통해 얻어진 주요내용을 요약, 정리하면 다음과 같다.

1. 삼축압축시험결과를 이용하여 치환율 4%, 9% 및 16% 인 조건의 복합공시체의 구속압력별 하중-침하특성을 분석한 결과, 쇠석말뚝은 변형률이 증가함에 따라서 지속적인 변형률 경화작용(strain hardening)을 보이며, 구속압이 증가함에 따라 쇠석말뚝의 지지력이 증가하는 것으로 나타나, 쇠석말뚝의 주면을 고강도 지오그리드로 보강할 경우 구속압 증가에 따른 쇠석말뚝의 지지력이 증가할 수 있을 것으로 예상된다.
2. 수치해석결과를 살펴보면, 일반적인 쇠석말뚝에 상재 하중이 가해졌을 경우 대부분의 쇠석말뚝의 직경(D)의 2배~3배에 해당하는 깊이에서 팽창과괴가 발생하는 것으로 나타났으며, 고강도 지오그리드를 보강한 쇠석말뚝의 경우 팽창과괴가 억제되어 침하량이 상당부분 감소되는 것으로 평가되었다.
3. 쇠석말뚝에 지오그리드를 보강함에 따라 침하량이 감

- 소하는 것으로 나타났으며, 지오그리드가 4T, 7T 및 10T인 경우 모두 지오그리드의 보강심도가 깊어질수록 침하감소효과가 더욱 큰 것으로 평가되었다. 또한, 지오그리드의 강성이 4T, 7T 및 10T로 증가함에 따라서 쇠석말뚝의 침하량이 감소하는 것으로 확인되었다.
4. 본 연구의 내용을 종합적으로 분석한 바, 상대적으로 구속응력이 작은 쇠석말뚝 상부를 지오그리드로 보강하는 경우에는 쇠석말뚝의 팽창과괴의 상당부분을 억제할 수 있으며, 침하량도 큰 폭으로 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 추진하는 2005년 건설핵심 기술연구개발사업의 일환으로 지원된 연구비로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김홍택, 황정순, 강인규, 고용일 (1999), “강관스커트 보강 조립토 균말뚝의 극한 지지력 평가에 관한 연구”, 한국지반 공학회 논문집, 제15권, 제1호, pp.79-98.
2. Aboshi, H., Ichimoto, E., Enoki, M., and Harada, K. (1979), “The Compozer, a Method to Improve Characteristics of Soft Clays by Inclusion of Large Diameter Sand Columns”, *Proceeding of International Conference on Soil Reinforcement*, Paris, France, Vol.1, pp.211-216.
3. Huges, J. M. O. and Withers, N. J. (1974), “Reinforcing Soft Cohesive Soil with Stone Columns”, *Ground Engineering*, Vol.7, No.3, pp.42-29.
4. Juran, I., and Riccobono, O. (1991), “Reinforcing Soft Soils with Artificially Cemented Compacted-Sand Columns”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.117, No.7, pp.1042-1060.
5. Juran, I., and Guermazi, A. (1991), “Settlement Response of Soft Soils Reinforced by Compacted Sand Columns”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp.930-943.
6. N. Al-Joulani and G. E. Bauer (1995), “Lab-ratory Behaviour of Sleeve- Reinforced Stone Columns”, *Geosynthetics '95*, pp.1111-1123.
7. U. Trunk, G. Heerten, A. Poul and E. Reuter (2004), “Geogrid wrapped vibro stone columns”, *EuroGeo3*, pp.289-294.

(논문접수일 2006. 2. 18, 심사완료일 2006. 3. 15)