

침하저감효과를 위한 고강도 지오그리드 보강 Stone Column 공법에 관한 연구 A Study on the Geogrid Reinforced Stone Column System for Settlement Reduction Effect

박시삼¹⁾, Si-Sam Park, 이훈연²⁾, Hoon-Hyun Lee, 유충식³⁾, Chung-Sik Yoo, 이대영⁴⁾, Dae-Young Lee, 이부락⁵⁾, Boo-Rak Lee

¹⁾ GS건설(주) 기술본부 연구개발팀 선임연구원, Senior Research Enger., Technical Division, GS E&C Corp.

²⁾ GS건설(주) 기술본부 담당, General Manager, Technical Division, GS E&C Corp.

³⁾ 성균관대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Sungkyuengwan Univ.

⁴⁾ 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotech. Engrg., Division, K.I.C.T.

⁵⁾ (주)일양산업 대표이사, President, Ilyang Co., Ltd.

SYNOPSIS : Recently construction work in Korea, demands of favorable condition ground had been increased with industrialization acceleration and economic growth. However, because of limited land space, it was so hard to ensure favorable condition grounds that construction work proceeds until soft ground area on plans of road, railroad and industrial complex. In this case, soft ground improvement was required such as a stone column method. 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, evaluates the stone columns reinforced by geogrid for settlement reduction and wide range of application of stone columns. Triaxial compression tests were conducted for evaluation which is about behavior characteristics of stone column on replacement rate. Then, 3-dimensional numerical analysis were conducted for application of stone column reinforced by geogrid as evaluate behavior characteristics and settlement reduction effect of stone column reinforced by geogrid on reinforcing depth change of geogrid.

Key words : Geogrid, Settlement reduction effect, Stone column, Triaxial compression test

1. 서 론

최근의 국내건설공사는 산업화의 가속 및 경제 성장과 더불어 지반조건이 양호한 용지의 수요가 점점 증가되고 있으나, 국토사용의 제한성 등으로 인해 지반조건이 양호한 용지 확보가 어려운 실정이다. 따라서 도로, 철도 및 산업단지 등의 계획에 있어, 연약지반 분포지역까지 건설공사가 진행되고 있다. 이러한 경우 연약지반개량이 불가피하게 되어 쇄석말뚝(stone column) 공법 등과 같은 연약지반개량공법이 적용되고 있다. 쇄석말뚝공법은 비교적 강성이 크고 압축성이 작은 쇄석 등을 이용하여 다짐말뚝을 형성, 연약지반을 개량하는 공법으로서 최근 들어 그 활용빈도가 크게 증가하고 있다. 그러나 쇄석말뚝의 경우 횡방향 구속 압력이 충분하게 발휘되지 않는 지반에서는 팽창과괴(bulging failure)에 대한 저항이 없어 적용이 불가능하게 된다. 따라서 본 연구에서는 팽창과괴를 억제하여, 쇄석말뚝의 활용성을 크게 향상시킬 수 있는 고강도 지오그리드 보강 쇄석말뚝공법을 개발하였으며, 개발된 공법의 적용성을 살펴보기 위한 기초연구의 일

환으로 삼축압축시험을 수행하였다. 삼축압축시험을 토대로 골재 치환율 및 구속압 변화에 따른 쇄석말뚝의 거동특성을 살펴보았으며, 아울러 유한요소해석을 통한 3차원 수치해석을 시행하여, 지오그리드 보강심도 변화에 따른 고강도 지오그리드 보강 쇄석말뚝공법의 거동특성 및 침하저감효과를 평가해 보았다.

2. 고강도 지오그리드 보강 쇄석말뚝

2.1 고강도 지오그리드 보강 쇄석말뚝의 구성

Huges와 Withers (1974, 1975)는 모형실험을 통해 일반적인 쇄석말뚝의 주된 파괴형태는 지반의 전단강도가 최소인 지점에서 발생하는 팽창파괴임을 제안하였으며(그림 1), Aboshi 등(1979) 및 Juran 등(1991)은 말뚝 상단부분을 강관스커트로 보강하거나 재료에 시멘트를 혼합하는 방법이 말뚝의 지지력을 증가시키는 방법임을 제시한바 있다. 이러한 연구사례를 토대로, 본 연구에서는 팽창파괴 억제를 위한 강관스커트 보강 및 시멘트 혼합방법에 비해 시공성 및 경제성 등이 우수한 고강도 지오그리드 보강 쇄석말뚝공법을 개발하였으며(그림 2), 본 공법의 경우 고강도 지오그리드의 구속효과로 인해 팽창파괴가 상당부분 억제되어 쇄석말뚝의 지지력 및 침하량이 상당부분 개선될 수 있을 것으로 판단된다.

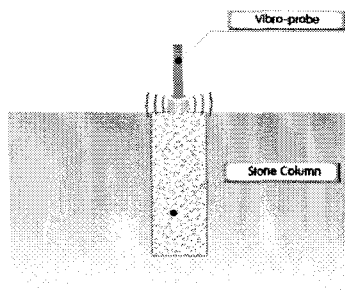


그림 1. 일반 쇄석말뚝

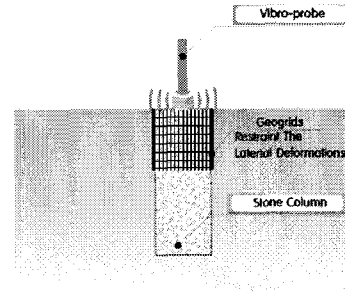
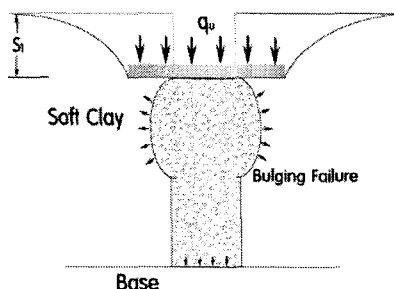


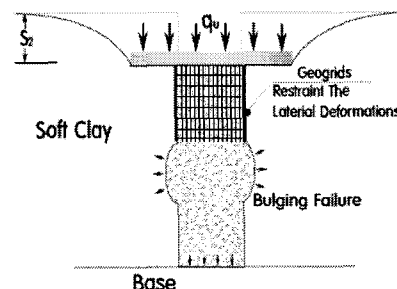
그림 2. 고강도 지오그리드 보강 쇄석말뚝

2.2 지오그리드 보강 쇄석말뚝의 침하저감방안

일반적인 쇄석말뚝과 지오그리드 보강 쇄석말뚝에 하중이 작용하는 경우의 모식도는 그림 3과 같다.



(a) 일반 쇄석말뚝



(b) 고강도 지오그리드 보강 쇄석말뚝

그림 3. 팽창파괴 모식도

도시된 바와 같이 동일한 지반조건을 가질 때, 동일한 하중(q_u)이 쇄석말뚝에 작용하는 경우, 일반 쇄석말뚝의 경우 구속응력이 작은 상부에서 팽창파괴가 발생하기 때문에 과도한 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 쇄석말뚝으로 치환된 복합지반의 거동특성을 살펴보기 위해, 치환율 및 구속응력 조건별로 삼축압축시험기를 이용하여 압밀-비배수 삼축압축시험을 시행하였다. 일반적인 쇄석말뚝의 삼축압축시험 결과를 이용하여 복합지반 공시체의 하중-변위특성을 분석하여 지지력 등에 대한 분석을 시행하였다.

3.2 복합지반 공시체 제작

삼축압축시험에서 사용된 복합지반 중 원지반은 인천 송도해안도로 건설현장에서 채취한 점토시료를 사용하였으며, 쇄석으로 사용된 시료는 미연방도로국(FHWA, 1983)에서 추천하는 입도분포에 부합하도록 #4체를 통과하고 #10체에 남는 시료를 사용하였다. 삼축압축시험에서 복합지반으로 사용된 점성토와 쇄석시료의 물리적 특성은 표 1에 요약, 정리하였다.

표 1. 대상시료의 물성

구분	G_s	$w(\%)$	$\gamma (KN/m^3)$	$\phi(^{\circ})$	$c (KN/m^2)$	ν	-
쇄석시료	2.61	9.2	17.5	36	0	0.30	-
구분	#200 통과량	$LL(\%)$	$FL(\%)$	$PI(\%)$	$w(\%)$	G_s	USCS
점토시료	97.7	33.7	22.4	11.4	43.2	2.653	CL~ML

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.

천공시 유출되는 시료는 공시체의 함수비(ω)와 비중(G_s)을 측정하였고, 쇄석말뚝의 조성 후 복합지반 공시체의 길이(L)와 무게(W)를 측정하였다. 본 연구에 사용된 삼축압축시험기의 전경과 시험전경은 그림 4 및 그림 5와 같다.

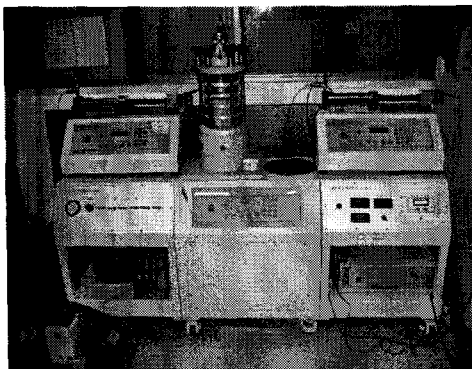


그림 4. 삼축압축시험기 전경

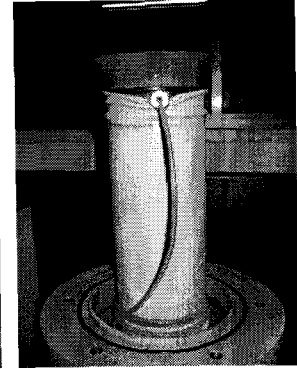
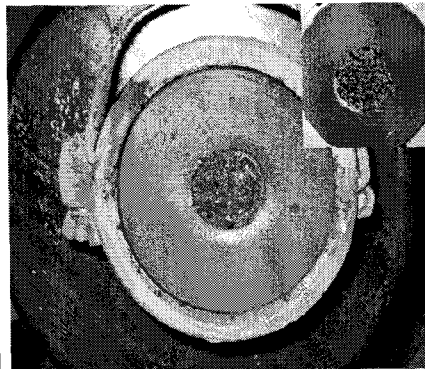


그림 5. 복합지반 조성 후 전경 및 삼축기 안치 전경

조성된 복합지반 시료는 표준삼축압축시험법에 의거 시험을 진행하였으며, 지반조건은 치환율 4%, 9% 및 16%인 조건으로 결정하였다. 공시체는 축압조건(150kPa, 200kPa, 250kPa)의 3가지 압력 하에서 등방압밀을 진행하였으며, 등방압밀 종료시 전단시험을 시행하였다. 전단시험은 변형률제어 방식으로 0.5 mm/min의 속도로 소성변형구간의 정확한 파악을 위해서 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.

3.4 삼축압축시험 결과분석

일반적인 쇄석말뚝의 거동특성을 알아보기 위해 시행한 삼축압축시험의 시험전 시료형태 및 시험종료 후 복합지반 파괴형태는 그림 6에 나타내었다. 아울러 쇄석말뚝의 보다 정확한 변형거동을 살펴보기 위하여 복합지반의 중앙부를 절단하여 쇄석말뚝과 원지반간의 접촉부 변형을 그림 7에 나타내었다. 그림 7에 나타난 바와 같이 시험결과 쇄석말뚝의 주된 파괴형태는 팽창파괴형태임이 확인되었다.

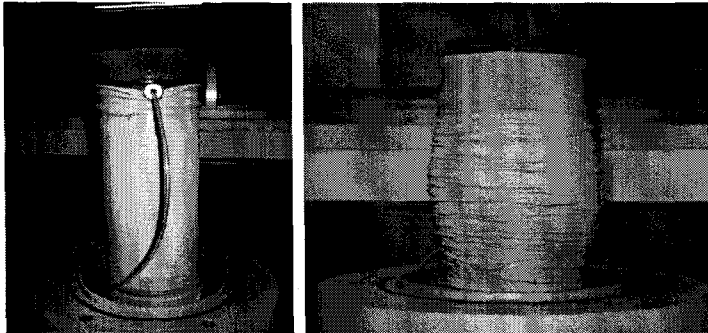


그림 6. 시험전 및 시험후 시료형상

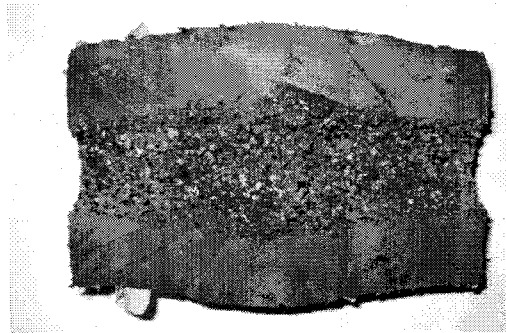


그림 7. 복합공시체 파괴 후 단면형상

치환율 4%, 9% 및 16% 조건의 복합공시체의 구속압력별 하중-침하특성 정리하면 그림 8과 같다. 그림 8을 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 확인해 보았다.

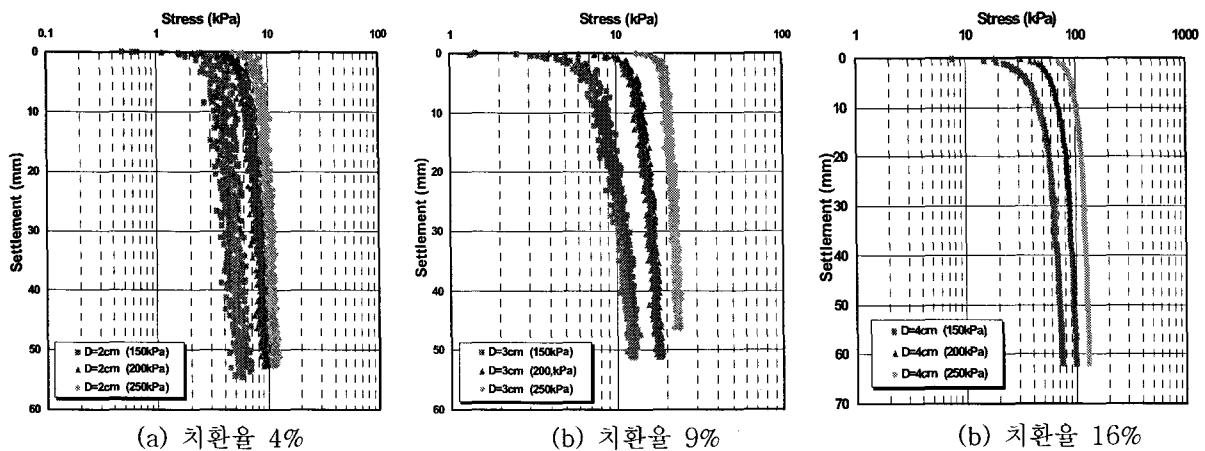


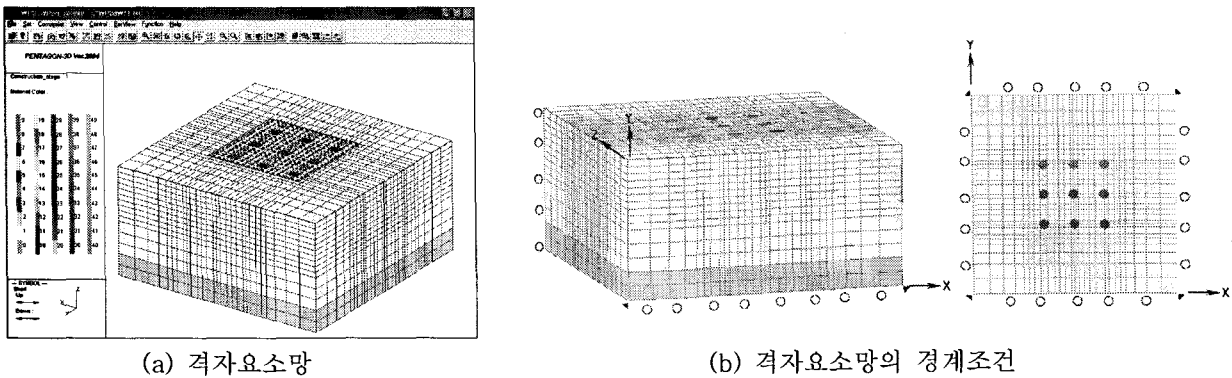
그림 8. 삼축압축시험에 따른 하중-침하 거동분석

4. 3차원 수치해석을 통한 지오그리드 보강 쇄석말뚝의 적용성 평가

4.1 3차원 수치해석 개요

본 연구에서는 고강도 지오그리드 보강 쇄석말뚝의 적용성을 평가해보기 위해, 유한요소해석 프로그램 인 *PENTAGON 3D program*을 이용하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 상호 비교를 목적으로 일반적인 쇄석말뚝을 적용하는 경우와 지오그리드 보강 쇄석말뚝을 적용하는 경우에 대해서 수행하였다. 아울러 지오그리드의 최적의 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 Model을 사용하였다. 수치해석에 지반 및 말뚝은 8절점 고체요소(solid element)를 사용하였으며, 강성재하판을 모델링 하여 재하판 위로 단계하중을 재하하여 해석을 수행하였다. 수치해석에 적용된 말뚝은 3×3의 배열로, 말뚝간격 2.0m, 지름 1.0m 및 길이 8.0m로 가정하였으며, 재하판은 10.0m×10.0m의 크기로 가정하여 판요소(shell element)로 적용하여 수치해석을 수행하였다. 또한 지오그리드의 경우 판요소로 적용하였으며, 해석시 회전변위를 구속하여 모델링 하였다. 연약층의 두께는 8.0m, 연약층 하부에 풍화암층이 존재하는 것으로 가정하였으며, 그림 9(a)는 수치해석에 적용된 격자요소망의 형상, 그림 9(b)는 격자요소망의 경계조건에 대한 개요도이다.



(a) 격자요소망

(b) 격자요소망의 경계조건

그림 9. 3차원 수치해석 격자요소망 및 경계조건

말뚝과 지반의 경계조건은 좌우 측면은 롤러를 두어 x방향 및 y방향 변위를 구속하였으며, 지반의 하단 면만을 z방향 변위를 구속하였다. 수치해석에 적용된 각 단계별 작용하중은 표 2에 요약, 정리되어 있다. 또한 수치해석에 적용된 Modified Cam-Clay Model 지반 특성값과 말뚝재하판 재료 등의 입력값은 표 3에 요약, 정리되어 있다.

표 2. 수치해석에 적용된 단계별 작용하중

작용하중	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	6단계	7단계	8단계	9단계	10단계	계
kPa	9.81	19.62	29.43	39.24	49.05	49.05	49.05	49.05	98.10	98.10	490.50

표 3. 수치해석에 적용된 입력 특성값

구분	γ , kN/m ³	E , kPa	ϕ , °	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
재하판	77.01	2.06e8	-	-	0.167	-	-	-	t=0.3	3.0	Elastic

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

수치해석에 적용된 고강도 지오그리드의 경우, 폐 PET를 주재료로 사용하는 TOTO 그리드를 이용하였으며, 지오그리드의 광폭인장강도 시험결과를 이용하여 지오그리드의 탄성계수 등의 강도특성특성치를 결정하였다. 본 수치해석에 적용된 지오그리드의 형상은 그림 10에 나타내었으며, 광폭인장강도 시험결과를 이용하여 추정된 지오그리드의 응력-변형률 관계곡선은 그림 11에 나타내었다. 아울러 본 수치해석에 적용된 지오그리드의 입력 특성치는 표 4에 정리하였다.

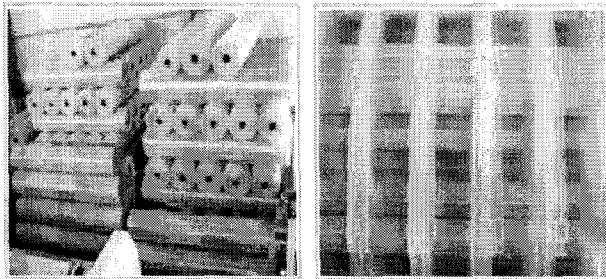


그림 10. 해석에 적용된 지오그리드

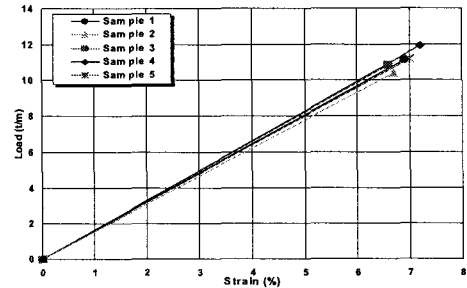


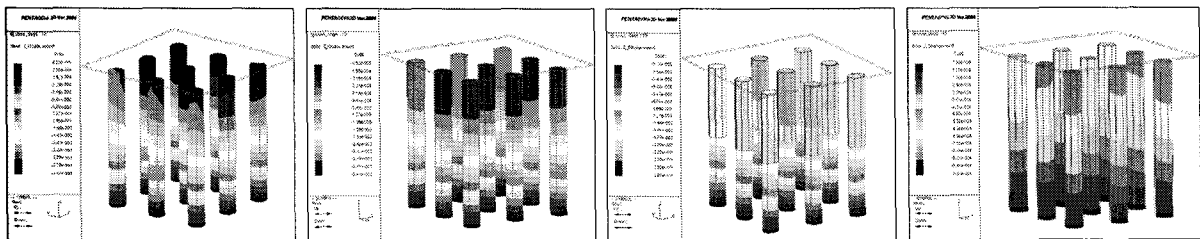
그림 11. 지오그리드의 응력 변형률 곡선

표 4. 지오그리드 특성값

구분	γ	E	ν	t	구성모델
적용값	1.00 kN/m ³	1.65e6 kPa	0.35	0.007 m	Elastic

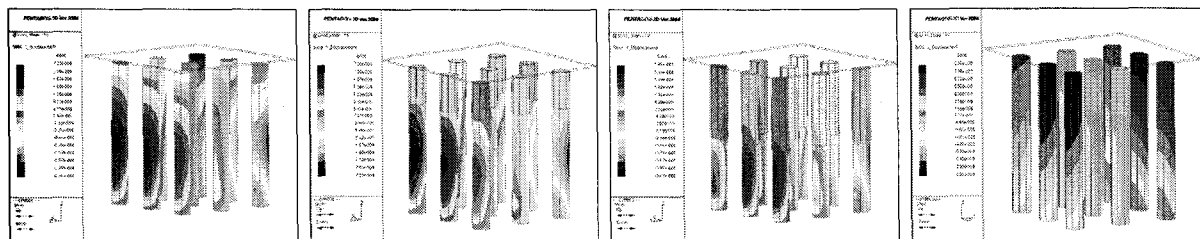
4.2 3차원 수치해석 결과분석

지오그리드 보강 쇄석말뚝의 횡방향 변형억제 및 침하 저감효과를 확인하기 위해 수행한 3차원 수치해석결과는 그림 12 및 13과 같다. 그림 12는 하중재하에 따른 쇄석말뚝의 연직변위 발생형태를 나타낸 변위분포도이며, 그림 13은 하중재하에 따른 쇄석말뚝의 수평변위 발생형태를 나타낸 변위분포도이다. 그림 12의 내용을 살펴보면 지오그리드로 쇄석말뚝을 보강하는 보강심도가 깊어짐에 따라서 쇄석말뚝의 전체 침하량은 감소하는 것으로 확인되었다. 아울러 그림 14의 하중재하에 따른 쇄석말뚝의 수평변위 형태를 살펴본 결과, 쇄석말뚝의 주된 변형거동은 팽창의 형태라는 것이 확인되었다.



(a) 무보강 (b) 2D 보강 (c) 4D 보강 (d) 전체보강

그림 12. 쇄석말뚝의 연직변위 발생형태



(a) 무보강 (b) 2D 보강 (c) 4D 보강 (d) 전체보강

그림 13. 쇄석말뚝의 수평변위 발생형태

무보강 일반 쇄석말뚝의 경우에는 말뚝 상부에서 수평변형이 비교적 크게 일어나며, 지오그리드 보강심도가 증가함에 따라서 수평변형이 점차로 감소하는 양상을 보이는 것으로 나타났다. 말뚝의 2D까지 지오그리드로 보강하는 경우에는 지오그리드로 보강하지 않은 하부 쇄석말뚝에서 수평변형이 비교적 크게 나타났으나, 말뚝의 4D까지 지오그리드로 보강하는 경우에는 쇄석말뚝 상단부의 수평변형을 크게 억제하는 것으로 나타났으며, 말뚝의 팽창형태의 변형 역시 지오그리드로 보강하지 않은 하부 쇄석말뚝에서 발생하는 것으로 확인되었다. 아울러 지오그리드로 쇄석말뚝 전체를 보강하는 경우에는 침하 저감효과가 비교적 명확하게 나타났으며, 말뚝의 수평변형 역시 팽창형태가 아닌 전체적으로 균등하게 변형되는 형태로 나타났다.

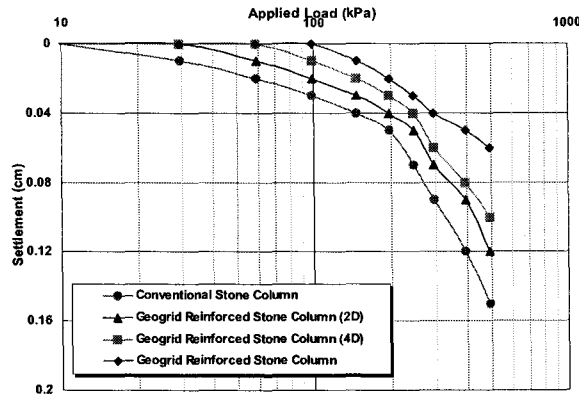


그림 14. 쇄석말뚝의 하중-침하곡선

수치해석결과를 토대로 작성된 그림 14의 하중-침하량 곡선을 살펴보면, 쇄석말뚝에 지오그리드를 보강함에 따라 침하량이 감소하는 것으로 나타났으며, 지오그리드의 보강심도가 깊어질수록 침하감소효과가 더욱 큰 것으로 평가되었다.

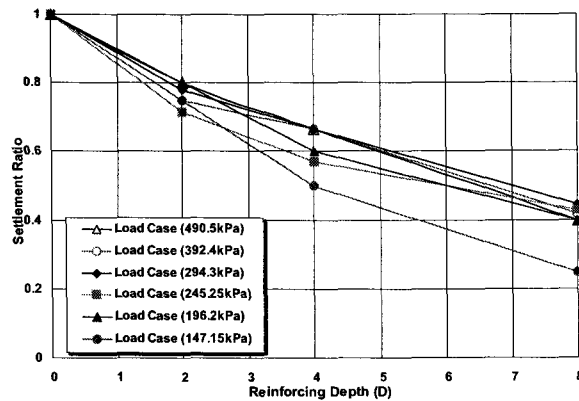


그림 15. 보강심도에 따른 침하비

아울러 그림 15의 보강심도에 따른 침하비를 분석한 결과, 보강심도가 2D인 경우의 전체침하비는 0.71~0.80 정도로 나타나 약 20% 정도의 침하감소효과가 있는 것으로 평가되었다. 또한 보강심도가 4D인 경우 및 쇄석말뚝 전체길이를 보강하는 경우의 침하비는 각각 0.5~0.67 및 0.25~0.44 정도로 평가되어, 침하감소효과는 각각 33% 및 56% 정도인 것으로 평가되었다. 전반적으로 보강심도가 깊어짐에 따라 침하비가 감소하여 침하감소효과가 우수한 것으로 평가되었으며, 쇄석말뚝에 작용하는 하중이 상대적으로 작을 경우에는 침하감소효과가 더 좋은 것으로 평가되었다. 이와 같은 수치해석결과를 종합적으로 분석한 바, 상대적으로 구속응력이 작은 쇄석말뚝 상부를 지오그리드로 보강하는 경우에는 쇄석말뚝의 팽창과괴의 상당부분을 억제할 수 있으며, 침하량도 큰 폭으로 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 쇄석말뚝의 상부에 하중이 가해질 경우 발생할 수 있는 팽창과괴 억제를 위해 쇄석말뚝의 주변을 고강도 지오그리드로 감싸 보강하는 고강도 지오그리드 보강 쇄석말뚝 공법을 개발하였으며, 이에 대한 적용성을 평가해보기 위해 먼저 삼축압축시험을 통해 구속압에 따른 변위감소효과를 살펴보았다. 아울러, 3차원 유한요소해석 프로그램을 사용하여 고강도 지오그리드 쇄석말뚝공법의 침하량감소효과 등을 확인해 보았으며, 본 연구를 통해 얻어진 주요내용을 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) 삼축압축시험결과를 이용하여 치환율 4%, 9% 및 16%인 조건의 복합공시체의 구속압력별 하중-침하 특성을 분석한 결과, 구속압이 증가함에 따라 쇄석말뚝의 지지력이 증가하는 것으로 나타나, 쇄석말뚝의 주변을 고강도 지오그리드로 보강할 경우 쇄석말뚝의 지지력이 증가할 수 있을 것으로 예상된다.
- (2) 3차원 수치해석결과를 살펴보면, 일반적인 쇄석말뚝에 상재하중이 가해졌을 경우 대부분의 쇄석말뚝의 직경(D)의 2배~3배에 해당하는 깊이에서 팽창과괴가 발생하는 것으로 나타났으며, 고강도 지오그리드를 보강한 쇄석말뚝의 경우 팽창과괴가 상당부분 억제되어 침하량이 상당부분 억제되는 것으로 평가되었다(그림 12 및 13).
- (3) 보강심도에 따른 침하량 감소효과를 분석한 결과, 보강심도가 2D인 경우 20% 정도, 보강심도가 4D인 경우 33% 정도, 쇄석을 전체 보강했을 경우 56% 정도인 것으로 평가되었다(그림 15).
- (4) 본 연구의 내용을 종합적으로 분석한 바, 상대적으로 구속응력이 작은 쇄석말뚝 상부를 지오그리드로 보강하는 경우에는 쇄석말뚝의 팽창과괴의 상당부분을 억제할 수 있으며, 침하량도 큰 폭으로 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김홍택, 황정순, 강인규, 고용일(1999), "강관스커트 보강 조립토 군말뚝의 극한 지지력 평가에 관한 연구", **한국지반공학회 논문집**, Vol.15, No.1, pp.79~98.
2. 황정순, 김홍택, 김승욱, 고용일(2005), "횡방향 변형을 고려한 침하량 평가기법의 제안", **한국지반공학회 논문집**, Vol.21, No.3, pp.149~157.
3. 황정순, 김홍택, 김정호, 이상경, 이형규(2005), "조립토 다짐말뚝에 대한 현장재하시험 결과 및 간편 침하량 산정방법의 제시", **한국지반공학회 논문집**, Vol.21, No.3, pp.159~168.
4. 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.*
5. 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.*
6. Huges, J. M. O., Withers, N. J., and Greenwood, D. A. (1975), "A Field Trial of the Reinforcing Effect of a Stone Column in Soil," *Geotechnique, Vol. 25, No. 1, pp.31~44.*
7. 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.*
8. 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.*