

지오그리드로 보강된 성토지지말뚝의 보강 및 아칭효과분석

Reinforcement Effectiveness and Arching Effect of Geogrid-Reinforced and Pile-Supported Roadway Embankment

*1 신은철 Shin, Eun Chul

*2 오영인 Oh, Young In

*3 이동현 Lee, Dong Hyun

Abstract

A pilot scale filed model test and 2-D numerical analysis was conducted to evaluate the effectiveness of constructing a geogrid-reinforced and pile-supported embankment system over soft ground to reduce differential settlement, and the results are presented herein. Three-by-three pile groups with varying the space between pile were driven into a layer of soft marine clay and a layer of geogrid was used as reinforcement over each pile group. 2-D numerical analysis has been conducted by using the FLAC-2D(Fast Lagrangian Analysis of Continua) program for same condition of field model test. The settlement, vertical stress, and strain of geogrid due to the construction of embankment were measured at various locations. Based on the field model test and numerical analysis results, pile reinforcement generated the soil arching at the midspan of pile cap and the geogrid reinforcement helps reduce the differential settlement of the soft ground by tensile strength of geogrid. Also for $D/b \geq 6.0$, the effectiveness of geogrid reinforcement in reducing settlement is negligible.

요 지

본 연구에서는 지오그리드로 보강된 성토지지말뚝의 보강 및 아칭효과를 분석하기 위하여 실험모형 시험과 2차원 평면변형 수치해석을 수행하였다. 연약지반 상 지오그리드로 보강된 성토지지말뚝의 실험 모형 시험은 3×3 콘크리트말뚝을 말뚝간격변화에 따라 연약지반에 타입하고 지오그리드를 포설한 후, 침하량, 수직하중, 지오그리드의 스트레인을 계측하였다. 또한 2차원 수치해석은 범용 유한차분해석 프로그램인 FLAC 2D를 이용하여 실험모형 시험에 대한 비교해석을 실시하였다. 각각의 실험모형 시험 및 수치해석결과, 말뚝 보강에 의한 지반의 아칭효과는 말뚝캡 중앙부에서 가장 크게 발생하였으며, 말뚝-지반-지오그리드의 강성차이로 인하여 지오그리드에 인장력이 유발되고 지오그리드 인장력발생에 의한 하중전이로 전체 지오그리드 및 성토지지말뚝 보강지반의 부등침하가 급격히 감소하였다. 또한, 말뚝간격에 따른 보강효과는 말뚝간격 $D/b \geq 6.0$ 일 경우 보강효과가 거의 없는 것으로 도출되었다.

Keywords : Geogrid, pile-supported embankment, arching effect, differential settlement, numerical analysis

*1 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 부교수 (Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental System Eng., University of Incheon)

*2 농업기반공사 농어촌연구원 농공기술연구실, 선임연구원 (Senior Researcher, Agricultural Engineering Division, Rural Research Institute, KARICO)

*3 CTC(주) 전무이사, 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과 박사수료 Executive Director, CTC Co. Ltd, Candidate of Ph. D. Dept. of Civil and Environmental System Eng., Graduate School, University of Incheon

1. 서론

연약지반 상에 축조되는 성토도로 및 제방의 지지력보강과 침하를 저감시킬 목적으로 성토지지말뚝을 설치하는 공법은 국내외적으로 많은 연구와 현장 적용이 이루어져 왔다. 그러나 아칭현상을 유발하여 상재하중을 전달하고, 말뚝사이에서 발생하는 부등침하가 성토도로 및 제방의 상부까지 전달되는 것을 방지하기 위하여 말뚝의 설치간격을 좁게 하거나 말뚝캡의 형상과 크기를 확대해야하는 어려움이 있다 (Magnan, 1994, Hartlen and Wolski, 1996). 따라서 많은 현장실무자들과 연구자들은 일반적인 성토지지말뚝의 시공 및 경제적 난점을 해소하기 위하여 토목섬유 보강재를 복합적으로 적용시키는 방법을 연구·분석하였으며, 토목섬유보강재와 성토지지말뚝이 효과적인 복합체로 거동하고 지지력보강과 특히 부등침하방지에 상당한 효과가 있음을 발견하였다.

지오그리드로 보강된 지지말뚝에 대한 연구는 1980년대 초반부터 연구되어지기 시작하였으며, 그림 1(a)는 Reid 등(1984)에 의하여 보고된 교대접근도로에 적용된 예를 나타낸 것이다. Tsukada 등(1993)은 그림 1(c)에서 보는바와 같이, 성토도로 제방의 노상보강을 위하여 지오그리드로 보강된 성토지지말뚝공법 적용한 예에 대하여 연구보고 하였다. 또한, Russel and Pierpoint(1997), Han(1999), Collin(2003) 등은 다양한 형태의 실험적 연구를 통하여 단일층 또는 다층의 토목섬유 보강층이 말뚝상부에서 하중을 전달하는 보조 거동을 하며, 토목섬유 보강재를 인장된 멤브레인 이론(tensioned membrane theory)을 통한 거동해석방법과 간략한 설계이론들을 제안하였다. 또한, Han and

Gabr(2002)는 수치해석기법을 통하여 단일 말뚝간격에서 토목섬유 보강재 강성에 따른 보강효과에 대하여 보고하였다. 토목섬유로 보강된 성토지지말뚝공법은 수평방향의 토목섬유보강재와 수직방향의 성토지지말뚝이 복합적인 하중전달매체(load transfer platform)로 거동하며 토목섬유 보강재는 말뚝과 말뚝을 연결하는 상대적으로 단단한 인장매체역할을 하여, 전체 성토도로 및 제방의 부등침하를 방지한다. 그러나, 토목섬유로 보강된 성토지지말뚝 공법은 토목섬유 보강재에 발생하는 유발인장력, 토목섬유 보강재 종류 및 말뚝간격에 따른 아칭효과 등 다양한 설계인자에 대한 연구가 미비한 실정이며, 간략한 보강재의 인장강도 검토 및 경험적 요소로 설계 및 시공되고 있다(Rogbeck 등, 1998, Jenner 등, 1998).

본 연구에서는 지오그리드로 보강된 성토지지말뚝에 대한 현장모형시험 및 수치해석적 연구를 수행하였다. 현장모형시험에서는 침하계, 토압계, 스트레인게이지 등을 통하여 토목섬유보강 성토지지말뚝의 거동을 계측하였으며, 수치해석은 유한차분해석 프로그램인 Flac 2-D를 이용하여 현장조건을 모델링하여 해석을 수행하였다. 각각의 계측결과와 해석결과를 바탕으로 말뚝설치간격에 따른 침하감소효과와 말뚝과 말뚝사이에 발생하는 아칭효과에 대하여 분석하였다.

2. 하중전달 메커니즘

일반적인 성토지지말뚝의 경우, 부등침하발생으로 인하여 성토제체 내에 전단응력이 유발되어 말뚝으로 전달되는 응력은 증가하며, 연약지반으로 전달되는 응력은 감소하게 된다. 이러한

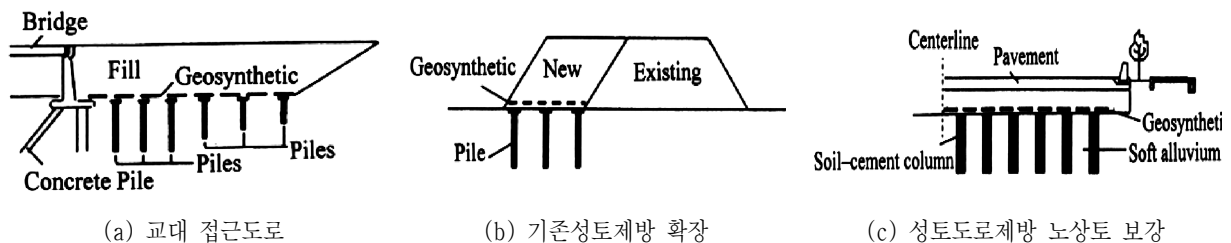


그림 1. 토목섬유로 보강된 지지말뚝시스템 (Han and Gabr, 2002)

하중전달 메커니즘을 Terzaghi(1943)는 흙의 아칭효과라고 하였으며, McNulty(1965)는 다양한 실험결과를 바탕으로 아칭효과의 발생정도를 다음 식(1)과 같이 제안하였다.

$$\rho = \frac{q_b}{q_0 + \gamma H} \quad (1)$$

여기서, q_b 는 말뚝캡 사이에 재하되는 상재하중이며, q_0 는 성토제방상부에 작용하는 상재하중, γ 는 성토체체의 단위중량, H 는 성토고를 나타낸다. 지오그리드로 보강된 성토지지말뚝의 하중전달 메커니즘은 그림 2와 같이 인장된 멤브레인 이론을 통하여 설명할 수 있다. 토목섬유로 보강된 성토지지말뚝 시스템의 상호관계는 기본적으로 말뚝 $\gamma H + q_0$ 캡 사이로 작용하는 하중 q_s 가 상재하중 보다 작아지는 흙의 아칭효과를 통하여 상재하중을 지지하며, 각각 재료의 강성차이로 인한 부등침하는 토목섬유 보강재의 횡방향 인장력을 통하여 감소된다. 본 연구에서는 McNulty(1965)에 의하여 제안된 흙의 아칭효과 분석식을 통하여 지오그리드로 보강된 성토지지말뚝의 아칭효과를 분석하였으며, 침하량 분석을 통하여 토목섬유 보강재의 보강효과를 분석하였다.

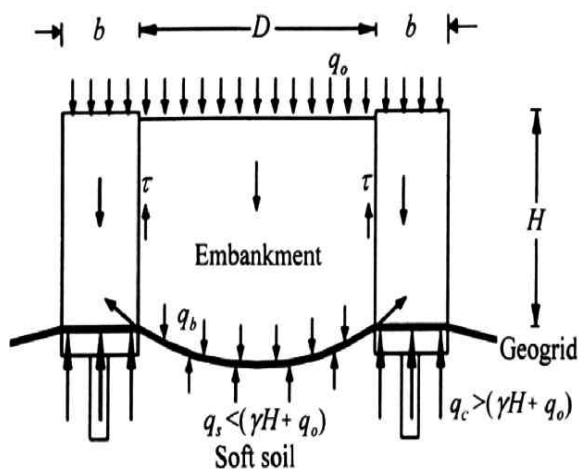


그림 2. 인장된 멤브레인 이론

3. 현장모형실험

3.1 현장모형실험 조건 및 지반조성

본 연구의 현장모형실험은 말뚝간격, 지오그리드 보강 유무에 따른 성토높이별 시험을 실시하였다. 단계별 성토 및 보강단면도는 그림 3에 나타난 바와 같으며, 그림 4는 현장모형실험 평면도를 나타낸 것이다. 현장모형실험 지별 조건은 표 1에 나타나 있는 것과 같이 첫 번째 지반은 연약지반에 말뚝만 말뚝캡 직경의 3배의 간격으로 타입 하였다. 두 번째 지반은 아무런 보강도 하지 않은 연약지반 그 자체이며, 나머지 세가지 지반은 말뚝과 지오그리드로 보강한 지반으로서 각각 말뚝캡 직경의 3배, 4배, 5.33배($D/b=3, 4, 5.33$)의 간격으로 말뚝을 타입한 후에 지오그리드를 포설하였다. 그림 5와 그림 6은 말뚝타입 및 계측기 설치모습을 나타낸 것이다.

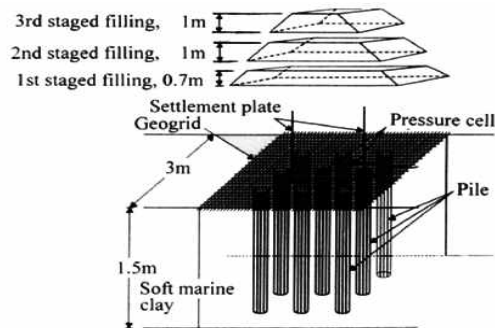


그림 3. 현장모형실험 단면도

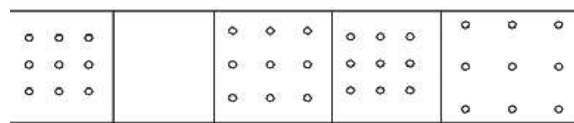


그림 4. 현장모형실험 평면도

표 1. 현장실험 지반의 구성조건

실험조건 \ 실험지반번호	1	2	3	4	5
말뚝 보강 여부	○	·	○	○	○
말뚝 간격(m)	0.45	·	0.60	0.45	0.80
지오그리드 보강 여부	×	×	○	○	○



그림 5. 말뚝 타입 완료



그림 6. 지오그리드포설 및 침하계 설치

3.2 사용재료

본 연구의 현장모형실험에 사용된 토사재료는 연약지반조성에 사용된 해성점토와 성토재료로 사용된 화강풍화토가 있다. 또한 보강말뚝은 직경 10cm 인 철근 콘크리트로 제작하여 사용하였으며, 지반보강용 지오그리드는 Tensar(BX1100)제품을 사용하였다. 성토하부 연약지반조성에 사용된 시료의 자연함수비는 32%였으며, 비중은 2.68로 나타났다. 아터버그한계 시험결과 액성한계(LL)는 31.8%, 소성한계(PL) 24.4%, No. 200체 통과량은 95%를 상회하는 CL로 표현되는 소성이 낮은 유기질 점토(실트질 점토)로 판명되었다. 화강풍화토는 지반조성 등의 흙구조물 재료로서 널리 이용되며, 우리나라에 가장 널리 분포되어 있는 흙으로 자연함수비는 13.53%이고, 비중은 2.72로 도출되었다. 토사재료의 특성값은 표 2와 같으며, 각각 시료의 입도분포곡선은 그림 7에 나타낸 바와 같다 또한 그림 8은 화강풍화토의 다짐곡선을 나타낸 것이다. 보강재로 사용된 지오그리드는 최대인장강도가 250kN/m인 양방향 지오그리드로 공학적 특성은 표 3에 나타낸 바와 같다.

표 2. 연약지반 및 성토재료 특성

특성값	지오그리드
폴리머 재질	Polypropylene
지오그리드 종류	Biaxial
격자크기(mm)	25(MD), 33(CD)
리브두께(mm)	0.76
최대인장강도(kN/m)	250(MD), 400(CD)
2% 신장시 인장강도(kN/m)	4.1(MD), 6.6(CD)
5% 신장시 인장강도(kN/m)	8.5(MD), 13.4(CD)

표 3. 지오그리드의 특성

특성값	해성점토	화강풍화토
자연함수비, w_n (%)	32%	13.5%
비중, G_s	2.68	2.72
균등계수, C_u	17.6kN/m ³	2.29
곡률계수, C_c	-	1.23
최대건조밀도, γ_{dmax}	-	18.4kN/m ³
최적함수비, w_{opt}	17.0%	12.5%
액성한계, LL	31.8%	-
소성한계, PL	24.4%	-
통일분류법	CL	SP-SM

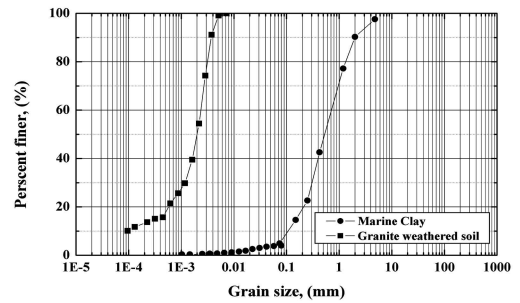


그림 7. 사용재료의 입도분포곡선

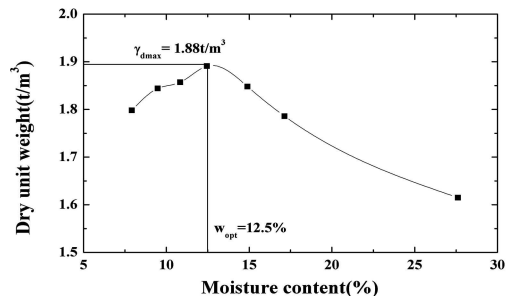


그림 8. 화강풍화토의 다짐곡선

3.3 현장실험 계측 및 결과분석

각각의 보강조건과 성토높이에 따른 연약층과 성토층 사이의 응력분포, 침하량, 지오그리드의 변형률을 파악하기 위하여 침하판 및 토압계를 제작하였으며, 지오그리드에 스트레인 게이지를 부착하였다. 그림 9는 현장계측기 설치 및 스트레인게이지의 위치도를 나타낸 것이다. 그림 10과 그림 11은 성토단계에 따른 침하량의 변화곡선을 나타낸 것이다. 말뚝간격 $D/b=3.0$ 이며 지오그리드 보강지반의 침하량이 가장 작게 나타났다. 또한, 침하판의 설치위치(수평, 대각선방향)에 따른 침하량 변화는 성토단계별로 큰 차이를 보이지 않으며, 말뚝 타설간격 및 지오그리드 보강여부에 따라 상호 동일한 경향을 보이고 있다. 그림 12는 성토고 변화에 따른 말뚝과 말뚝사이에서의 수직응력계측 결과를 나타낸 것이며, 그림 13은 말뚝간격 및 성토고에 따른 아칭효과를 분석한 결과로 말뚝간격이 증가함에 따라 아칭효과도 감소하는 것으로 나타났으며, 말뚝만 보강한 지반의 아칭효과가 지오그리드 보강지반에 비하여 가장 크게 발생되었다. 이러한 현상은 지오그리드 보강에 따른 응력집중이와 아칭영역 내에 지오그리드 보강에 따른 불연속

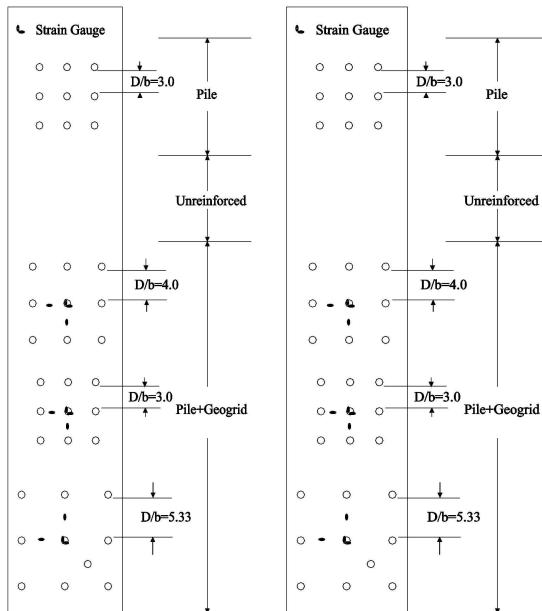


그림 9. 현장계측기 위치도

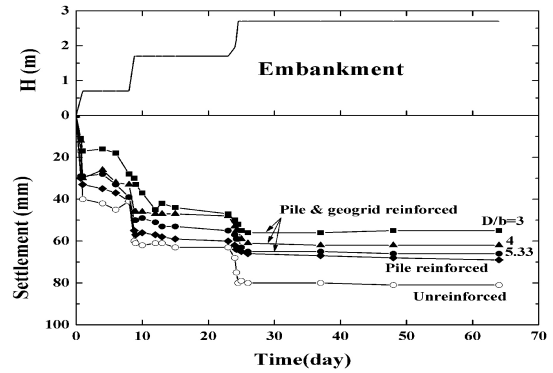


그림 10. 성토고에 따른 침하량(수평방향)

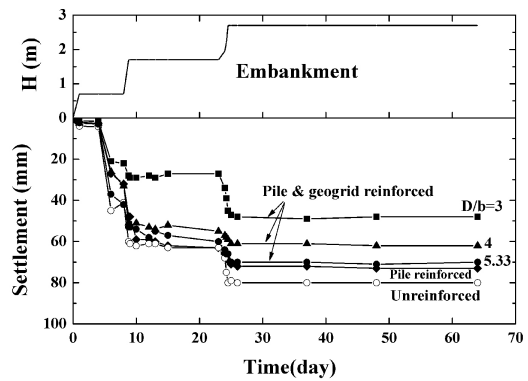


그림 11. 성토고에 따른 침하량(대각선방향)

면이 발생되어 아칭효과가 감소한 것으로 판단된다. 그러나, 침하감소 효과에 비하여 상대적으로 아칭효과 감소폭이 약 5% 내외로 미소하여 지오그리드로 보강된 성토지지말뚝의 아칭효과 발현에 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

그림 14와 그림 15는 성토고 변화에 따른 말뚝캡 상단과 말뚝 사이에서의 변형률계측결과를 나타낸 것이다. 1차 성토하중 재하 시, 말뚝상부에서는 말뚝간격이 넓어짐에 따라 변형률의 변화가 0.055%~1.11%까지 발생되었으며, 2차 성토 시에는 0.69%~2.98%까지, 3차 성토 시에는 0.93%~3.47%까지 발생되었다. 계측결과에서 보는바와 같이, 토목섬유로 보강된 성토지지말뚝의 하중전달 메커니즘을 잘 반영하고 있는 것으로 상재하중 재하에 따라 말뚝사이의 지오그리드는 처짐이 발생되며, 처짐이 진행됨에 따라 상재하중은 말뚝캡으로 전달되어 말뚝캡 상부의 수직응력이 가장 크며, 지오그리드 인장에 따른 변형률도 크게 발생하는 것이다.

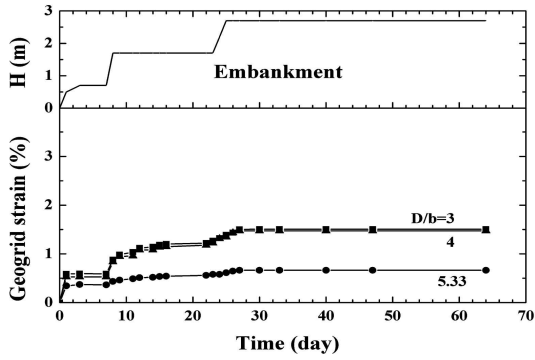


그림 12. 성토고에 따른 수직응력(말뚝사이)

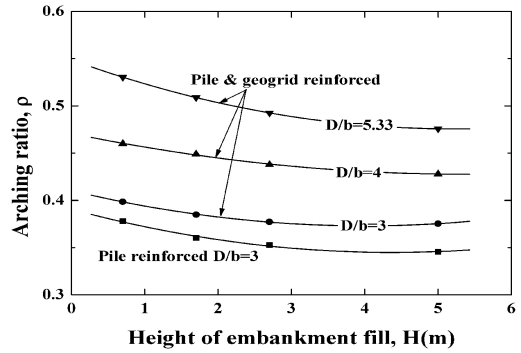


그림 13. 성토고에 따른 아칭효과

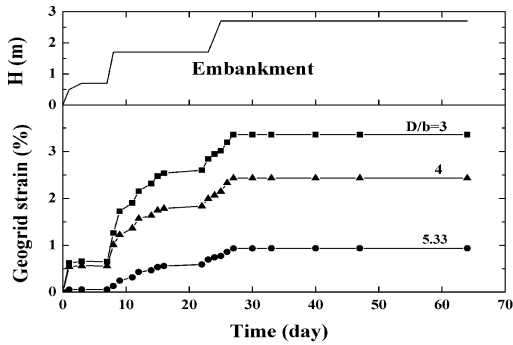


그림 14. 지오그리드의 스트레인(말뚝캡)

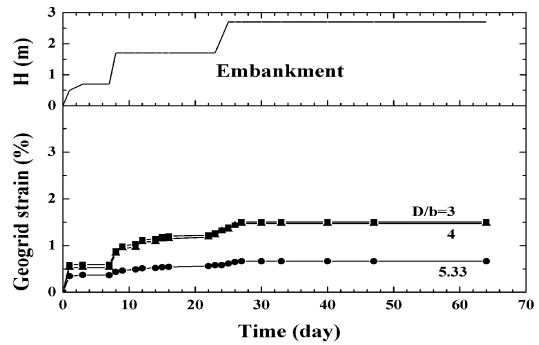


그림 15. 지오그리드의 스트레인(말뚝사이)

4. 수치해석

4.1 수치모델링

본 연구에서는 지오그리드로 보강된 성토지지말뚝의 수치해석적 연구를 위하여 FLAC 2-D 프로그램을 사용하였으며, 해석모델의 유한요소망은 축대칭으로 현장모형실험의 조건과 동일하게 모델링하였다. 그림 16은 수치해석을 수행한 유한요소망을 나타낸 것으로 말뚝간격에 따라 각각 수치모델링 단면을 구성하였으며, 성토체체의 성토고를 0.7, 1.7, 2.7, 5.0m까지 변화시키며 각각의 단면에 대하여 해석을 수행하였다. 수치해석 모델의 크게 연약지반, 성토체체, 말뚝, 지오그리드로 구분되며, 각각의 구성방정식은 연약지반과 성토체체는 쌍곡선 근사 비선형 탄성모델인 Duncan and Chang(1970)모델을 적용하였으며, 말뚝은 선형탄성재료, 지오그리드는 케이블(cable)모델로 고려하였다. 표 4는 각각의 구성재료

의 입력변수를 나타낸 것이며, 토목섬유 보강재인 지오그리드의 크리프영향은 경계조건 단순화를 위하여 고려하지 않았다. 또한, 경계면 요소영향은 일반적인 보강토옹벽 내에서의 인발마찰 거동과 달리 연약지반 보강 시 지반 및 보강재가 복합매체 형태로 처짐 및 변형이 발생되므로 경계면 요소로 모델링하지 않고 완전부착된 것으로 모델링하였다.

표 4. 수치해석 입력변수

재료	입력변수
연약지반	$\gamma = 1.5\text{tf/m}^3$, $\psi' = 0$, $R_f = 0.7$, $m = 0.4$, $c' = 1.0\text{kPa}$, $E = 1960\text{kPa}$, $\nu = 0.2$
성토체체	$\gamma = 1.8\text{tf/m}^3$, $\psi' = 35$, $R_f = 0.7$, $m = 0.2$, $c' = 1.0\text{kPa}$, $E = 49\text{MPa}$, $\nu = 0.3$
말뚝	$\gamma = 2.4\text{tf/m}^3$, $\psi' = 50$, $E = 24\text{GPa}$, $\nu = 0.18$
지오그리드	$a = 2.5e-5\text{m}^2$, $E = 8000\text{kPa}$

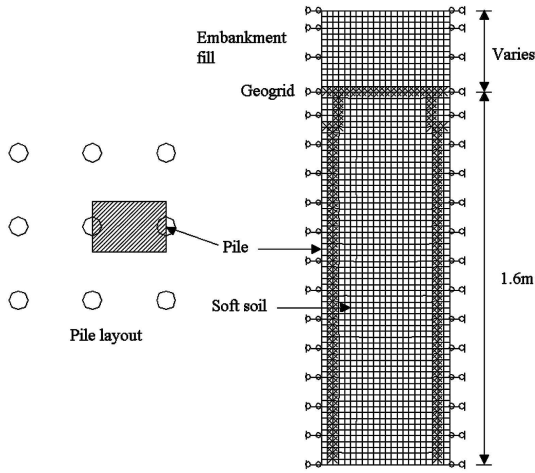


그림 16. 해석모델의 유한요소망

4.2 수치해석 결과 및 분석

그림 17은 성토고 변화에 따른 말뚝캡 레벨에서의 말뚝캡 상단과 말뚝과 말뚝사이에서의 최대침하량을 도식한 것이다. 말뚝캡 위치에서의 최대침하량은 지오그리드에 의한 응력전이가 없는 말뚝만 보강한 경우가 가장 작게 발생하였다. 말뚝사이 중앙부에서의 침하량은 말뚝간격이 $D/b=3$ 이고 지오그리드를 보강한 경우의 최대침하량이 가장 작게 발생되었으며, $D/b=5.33$ 이고 지오그리드로 보강한 지반이 말뚝만 보강한 지반에 비하여 최대침하량이 크게 도출되었다. 이러한 결과는 말뚝만 보강된 지반에서 아칭효과가 가장 크게 효과적으로 발생되었기 때문인 것으로 사료되며, 상대적으로 지오그리드 보강지반은 보강재의 아칭효과 간섭으로 인하여 최대침하량이 크게 나타난 것으로 판단된다. 그림 18은 말뚝간격과 성토고 변화에 따른 부등침하량 해석결과 나타낸 것으로 말뚝만 보강한 지반이 부등침하가 가장 크게 발생하였으며 지오그리드 보강에 따라 부등침하량이 감소하며, 말뚝간격 $D/b=3.0$ 이고 지오그리드로 보강한 경우가 부등침하량이 가장 작게 발생되었다. 최대침하량분석에 의하면 말뚝만 보강한 지반의 아칭효과에 비하여 지오그리드의 보강효과가 크게 나타나지 않았으나, 부등침하량 분석결과, 지오그리드 보강에 따라 부등침하량이 급격히 감소됨을 알 수 있다.

그림 19와 그림 20은 성토고 변화에 따라 말뚝캡과 말뚝사이에서 발생하는 수직응력변화와 아칭효과에 대한

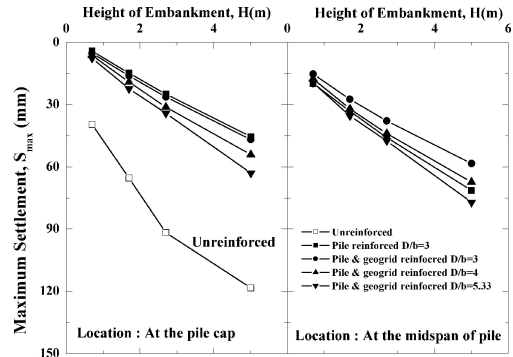


그림 17. 수평방향 위치에 따른 최대침하량 비교

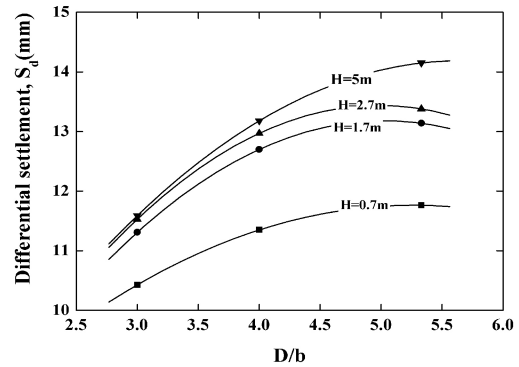
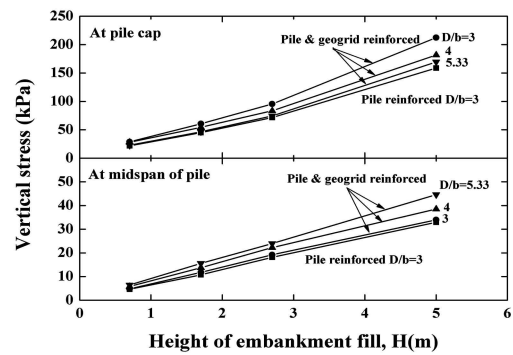


그림 18. 말뚝간격에 따른 부등침하량



19. 성토고에 따른 수직응력변화

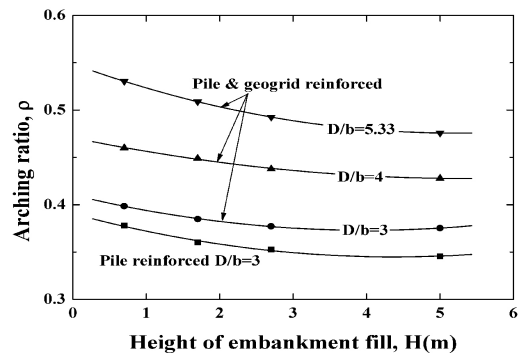


그림 20. 수치해석 결과에 따른 아칭효과

분석결과를 나타낸 것으로 말뚝캡 상단에서는 말뚝간격 $D/b=3$ 이고 지오그리드를 보강한 경우가 수직응력이 가장 크게 발생되었으며, 지오그리드에 의한 하중전이가 없는 말뚝만 보강한 경우가 가장 작게 발생되었다. 반면, 말뚝 사이에서는 지반의 아칭효과로 인하여 말뚝만 보강한 경우가 수직응력이 가장 작게 발생되었으며, 지오그리드로 보강한 경우, 응력전이 효과가 가장 좋은 말뚝간격 $D/b=3$ 인 경우의 수직응력이 가장 작으며, 말뚝간격이 증가할수록 수직응력도 증가하는 것으로 도출되었다. 이러한 현상은 성토고 증가에 따른 아칭효과는 말뚝으로만 보강된 경우, 아칭효과가 가장 크게 발생되어 말뚝사이에서의 수직응력이 작게 발생되며, 지오그리드로 보강한 경우는 지오그리드의 인장 및 하중전이를 통하여 아칭효과가 감소하기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 지오그리드로 보강된 성토지지말뚝에 대한 현장모형실험 및 수치해석적 연구를 수행하였다. 침하량 결과를 바탕으로 성토고 증가와 말뚝 설치간격에 따른 보강효과를 분석하였으며, 말뚝캡 상단과 말뚝과 말뚝사이에 발생하는 수직응력 결과를 바탕으로 아칭효과에 대하여 분석하였으며, 전체 연구를 통하여 도출한 결론은 다음과 같다.

1. 현장모형실험 결과, 말뚝타설 간격이 증가함에 따라 지오그리드 보강효과가 감소하는 것으로 도출되었으며 말뚝간격 $D/b=3.0$ 일 때 최대의 보강효율이 있는 것으로 나타났다. 또한, $D/b=6$ 이상일 경우 지오그리드 보강효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 말뚝간격 및 성토고에 따른 아칭효과는 말뚝간격 D/b 가 증가함에 따라 감소하며 말뚝만 보강한 지반의 아칭효과가 지오그리드 보강지반에 비하여 큰 것으로 나타났다. 이러한 현상은 지오그리드 보강으로 인하여 아칭영역 내에 불연속면이 발생되어 아칭효과를 감소시키는 것으로 판단된다.
2. 수치해석에 따른 침하량 분석에 의하면 최대침하량은 말뚝만 보강한 지반이 아칭효과가 우세하여 지오그리드의 보강효과가 크게 나타나지 않았으

나, 부등침하량 분석결과, 지오그리드 보강에 따라 부등침하량이 급격히 감소되는 것으로 나타났다. 또한, 아칭효과는 상기 언급한 현장모형실험 결과와 동일한 경향으로 나타났다. 따라서 본 연구를 통하여 수행된 수치해석기법을 통하여 지오그리드로 보강된 성토지지말뚝의 보강효과 및 아칭효과에 대하여 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Collin, J. G. (2003), "NHI Ground Improvement Manual-Technical Summary #10 : Column Supported Embankments".
2. Duncan, J. M., and Chang, C. Y. (1970), "Nonlinear analysis of stress and strain in soil", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol. 96(5), pp.1629~1652.
3. Han, J.(1999), Design and construction of embankments on geosynthetic reinforced platforms supported by piles, Proceedings, 1999 ASCE/PaDOT Geotechnical Seminar, Hershey.
4. Han, J. and Gabr, M. A. (2002), "Numerical analysis of geosynthetics-reinforced and pile supported earth platforms over soft soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.128(1), pp.44~53.
5. Hartlen, J. and Wolski, W.(1996). Embankments on Organic Soils, Elsevier, pp.424.
6. Jenner, C.G., Austin, R.A. and Buckland, D.(1998), "Embankment Support Over Piles Using Geogrids", Sixth International Conference on Geosynthetics, pp.763~766.
7. Magnan, J.(1994), "Methods to reduce the settlement of embankments on soil clay : a review, Foundations and Embankments Deformations", ASCE, Geotechnical Special Publication, No.40, pp.77~90.
8. McNulty, J. W.(1965), "An Experimental Study of Arching in Sand", Rep. No. I-674, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps. of Engineer, Vicksburg, Miss., 170.
9. Reid, W. M., and Buchanan, N. W. (1984), "Bridge approach support piling", *Piling and Ground Treatment*, Thomas Telford Ltd., London, pp.267~274.
10. Rogbeck, Y., Gustavsson, S., Soedergren, I. and Lindquist, D.,(1998), "Reinforced Piled Embankments in Sweden-Design Aspects", 1998 Sixth International Conference on Geosynthetics, pp.755~762.
11. Russell, D., and Pierpoint, N.(1997), "An Assessment of Design Methods for Piled Embankment", *Ground Engineering*, November, 30(11), pp.39~44
12. Terzaghi, K. (1943), "Theoretical Soil Mechanics", Wiley, New York, pp.62~75.
13. Tsukada, Y., Isoda, T., and Yamanouchi, T. (1993), "Geogrid subgrade reinforcement and deep foundation improvement", Proceedings of Geosynthetics Case Histories, International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Committee TC9, Yono City, Japan, pp.158~159.