

지오그리드와 말뚝에 의한 연약지반 보강효과 Effectiveness of Reinforcement by Geogrid & Pile in Soft Clay

신은철¹⁾, Eun-Chul Shin, 이상혁²⁾, Sang-Hyuk Lee, 이명원³⁾, Myoung-Won Lee

¹⁾ 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수, Prof., Dept. of Civil & Environmental System Engrg, Univ. of Incheon

²⁾ 인천대학교 토목환경시스템공학과 석사과정, M.S Student, Dept of Civil & Environ. System Engrg, Univ. of Incheon

³⁾ 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료, Ph. D. Candidate, Dept of Civil Engineering, Chungbuk National Univ.

SYNOPSIS : It is not easy to find a good soil condition due to the shortage of suitable land for construction work. The earth structure and buildings can be constructed over the soft soil. The soft soil must be treated either using the reinforcement element or dewatering. Most of land reclamation projects are being implemented along the south coast or west coast of the Korean Peninsula. The soils in these areas are covered with the soft marine clay, so soil and site improvement is the most important things to do. Pile foundation at the bottom of embankment can be constructed either in the soft ground or in the soil contaminated area. The purpose of this research is to develop "geogrid-reinforced piled embankment method" to prevent the differential settlement and increase the bearing capacity of soil. In this study, the effectiveness of the geogrid-reinforcement was studied by varying the space between piles and reinforcement conditions. Also, the geotechnical engineering properties of the embankment material and foundation soil were determined through the laboratory tests as well as the field tests. As a result, the site that the pile-spacing $S = 3b$ with geogrid reinforcement is the most effective to reduce the differential settlement and increase load bearing capacity.

KEYWORDS : Geogrid, Pile, Soft ground, Marine clay, Differential settlement

1. 서론

서해안의 대부분과 남해안 일부해역이 수심이 낮고 조간대가 발달하여 전국토의 9.2%, 가용토지의 20% 이상에 이르는 광활한 해역이 간척사업의 가능성이 높은 해역이다. 실제로 1960년대 이후 바다의 공유수면을 매립하는 대규모 간척사업이 상당히 진행되었으며, 현재에도 진행 중에 있다. 이러한 남해안 및 서해안 매립지역은 기초지반이 해성점토로 구성되어 있으며, 이러한 지반에 구조물(제방, 도로성토 등)을 건설해야 하는 경우가 많아지고 있는 실정이다. 현재 해안 매립지역의 기초처리는 대부분 하중을 연약지반 하부 지지층에 전달하는 말뚝 기초로 시공되고 있다. 그러나, 도로나 철로건설 등과 같이 광범위한 성토제방에 말뚝기초처리를 할 경우, 성토 지반의 부등침하를 방지하기 위해서는 보다 많은 말뚝이 필요하며, 말뚝 기초 위에 철근콘크리트 슬래브로 보강한다고 할지라도 많은 노력과 경제적인 손실이 뒤따르게 될 것이다. 치환을 통한 대심도의 연약지반 개량은 비경제적이며 굴토된 초연약 지반의 처

리는 또 다른 환경적인 문제점을 야기시킨다.

이 연구는 연약지반의 말뚝기초처리에 지오그리드를 통한 보강을 접목하여 부등침하를 방지하고, 효과적인 상호 보완관계를 평가하고자 실시하였다. 따라서, 연약지반 내에 지오그리드로 보강된 말뚝기초에 성토하중이 재하 되었을 경우, 말뚝으로 인한 보강효과, 말뚝과 지오그리드로 인한 보강효과, 말뚝간격별 지오그리드로 인한 보강효과를 도출하기 위하여 Pilot Scale 현장시험 시공을 실시하였다. 추가적으로 보다 큰 하중하에서의 보강효과를 상호 비교하기 위하여 평판 재하 시험을 실시하였다. 현장시험시공단면은 그림 1과 같다.

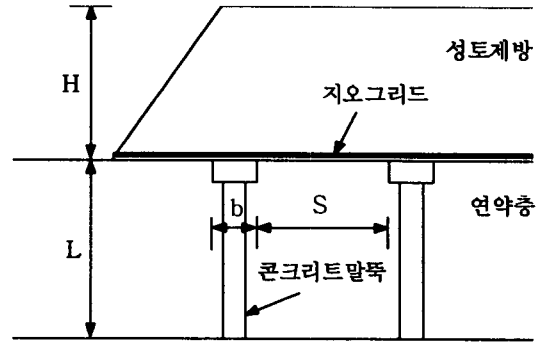


그림 1. 현장시험시공 단면도

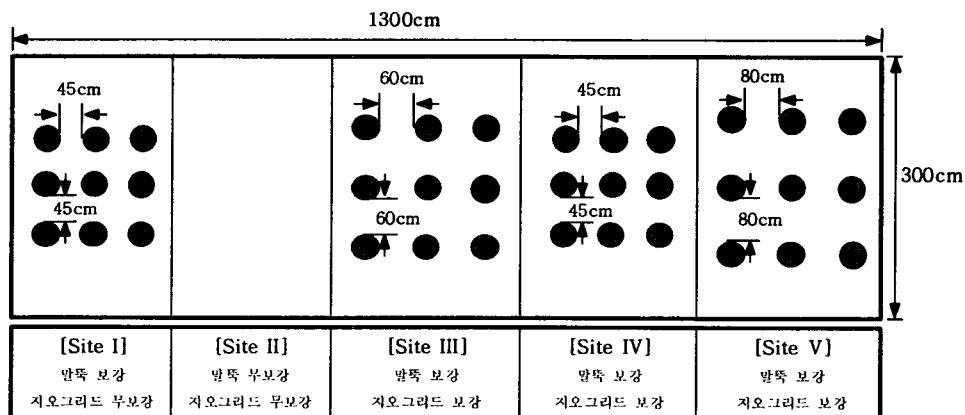
2. 현장 시험 시공 방법 및 조건

기초 연약지반을 해성점토로 구성된 후, 지반의 균질성 및 강도를 파악하기 위하여 휴대용 정적 콘관입시험과 배인시험을 수행하였으며, 각각의 시험조건 및 계획에 따라 Pilot Scale 현장시험시공을 실시하였다. 화강암 풍화토를 사용하여 성토의 최종 높이를 2.7m로 3회에 나누어 실시하였다. 추가적으로 성토층 두께를 0.3m까지 제거한 후 평판재하시험을 통하여 보다 높은 하중에서의 보강 효과를 고찰하여 보았다.

2.1 현장부지 조성 방법

본 연구의 시험 시공 현장은 인천대학교 도서관 신축 부지 현장에 위치한 약 80m²의 공간을 활용하였다. 연약지반은 가로 13m, 세로 3m크기의 직사각형의 지반을 포크레인(0.8m³)을 사용하여 1.5m 깊이로 굴착한 후 약 60m³정도의 해성점토를 되메움하여 연약지반을 조성하였다. 지반의 교란을 고려하여, 흙입자의 재배열을 통한 전단강도와 지반의 균질성이 회복될 수 있도록 3개월의 자중압밀 기간을 두었다. 매립 3개월 후, 전단강도 및 지반의 균질성을 확인하기 위하여 휴대용 정적 콘관입시험과 배인 전단시험을 실시하였으며, 추가적으로 심도별 시료를 채취하여 자연함수비를 측정하였다.

그림 2에 나타난 현장 모식도와 같이, 말뚝의 간격은 시공계획에 따라 타입하였으며, 수직 및 정위치 타입을 위하여 일정깊이(80cm)까지는 핸드 오거로 굴착을 한후, 약 63.5kg의 낙하추를 사용하여 성토 1.5m깊이의 지지층까지 말뚝을 타입하였다. 이때, 말뚝 두부 파손 및 전체적 충격을 방지하기 위하여 우



● RC 말뚝

그림 2. 현장 지반조성 모식도

레탄을 재료로 말뚝쿠션을 만들어서 사용하였다. 말뚝이 지지층까지 타입이 완료된 후 연약층 아래 20cm까지 두부 주변을 굴토하여, 말뚝의 두부를 연약층 아래 10cm까지 철근을 남겨서, 부착성을 좋게 하였고, 전체 캡의 레벨을 맞추어 직경 15cm의 거푸집을 고정, 말뚝캡을 타설·제작하였다. 이때 레벨을 사용하여 말뚝 캡의 상부가 연약층의 높이와 일치하도록 시공하였다. 말뚝 캡이 양생된 후 각 지반별로 말뚝위와 말뚝사이, 연약지반위에 각각 토압계를 침하판도 3개씩 위치시키고, Site III, IV, V에는 지오그리드로 보강한 후 1차성토(0.7m)를 실시하였다.

일정기간동안 침하량 및 토압, 스트레인 변형량을 측정한 후, 2차(1m), 3차(1m)의 추가 성토를 실시하였다. 최종 성토를 완료하고, 침하량, 토압, 스트레인변형량이 작아졌을 때(성토 완료 후 약 3개월), 토층의 높이를 0.3m만 남겨두고 여기에 지반별로 다시 평판재하시험을 실시하여 보다 큰 하중하에서 각 지반의 상대적 보강효과를 파악하였다.

2.2 사용재료 및 모형지반의 특성분석

시험에 사용된 각종 재료의 특성을 살펴보면, 연약지반의 조성을 위하여 해성점토를 사용하였으며, 보강재로는 콘크리트 말뚝과 지오그리드를 성토재료로는 화강암 풍화토를 사용하였다. 표 1에는 해성 점토 및 화강암풍화토, 지오그리드의 기본 물성치 및 특성이 나타나 있으며, 해성점토 및 화강암 풍화토의 다짐곡선과 입도 분포곡선이 그림 3과 4에 각각 나타나 있다. 해성점토는 인천 용현동 APT재건축 현장

표 1. 해성점토, 화강암풍화토의 기본물성 시험결과 및 지오그리드의 특성

해성점토		화강풍화토		지오그리드	
분류	시험결과	분류	시험결과	구분	특성
액성한계(%)	31.8	균등계수(C_u)	6.51	격자크기:	
소성한계(%)	24.4	곡률계수(C_g)	1.27	길이방향(mm)	33
소성지수, PI(%)	7.4	자연함수비(%)	13.53	폭방향(mm)	25.4
자연함수비(%)	32	비중시험	2.72	개구부 비율(%)	74
비중시험	2.68	표준다짐시험	$\gamma_{dmax} = 1.88t/m^3$	연결부 두께(mm)	2.8
표준다짐시험	$\gamma_{dmax} = 1.79t/m^3$		$\omega_{opt} = 12.5\%$	강도 :	
통일분류법	CL	통일분류법	SW	길이방향(kN/m)	291.8(min)
		성토층의 평균	$\gamma_d = 1.7t/m^3$	폭방향(kN/m)	204.3(min)
		건조 단위중량		성분 :	
				폴리프로필렌(%)	99%
				카본 블랙(%)	1%

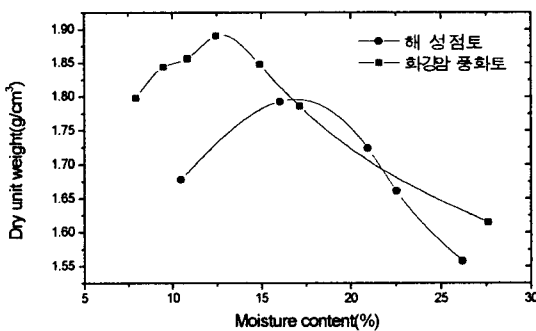


그림 3. 지반조성재료의 다짐곡선

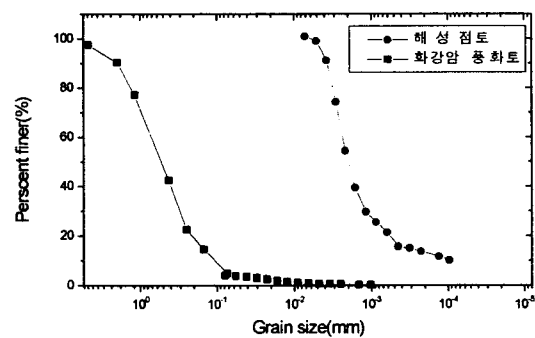


그림 4. 지반조성재료의 입도분포곡선

에서 채취한 해성점토시료로, 자연함수비 시험결과 채취직후 62.3%의 함수비를 나타내었고, 비중은 2.68로 나타났다. 아터버그한계 시험결과 액성한계(LL)는 31.8%였고, 소성한계(PL)는 24.4%를 나타내어, 소성지수(PI)는 7.4%로 통일분류법에 의하여 CL로 나타났다. 성토재료로 사용된 화강암 풍화토의 자연함수비는 13.53%이고, 비중은 2.72이며, 입도 분포시험결과 균등계수는 6.51, 곡률계수는 1.27로 통일분류법에 의하여 SW로 나타났다. 각 성토 때마다 모래치환법에 의한 현장 밀도 시험을 실시하였는데, 그 결과 성토층은 평균 90%의 다짐도를 나타내었다. 다짐장비는 자주식 진동컴팩터(5HP, 5800 rpm, weight 88kg)를 사용하였으며, 25cm 두께마다 10회씩 다짐을 실시하였다. 지오그리드는 Tensar에서 제작한 BX1100 제품 즉, 일반적으로 지반보강용으로 사용되어지는 양측방향 지오그리드를 4m×12m넓이로 포설하였다. 연약지반의 균질성을 확인하기 위하여 실시한 콘관입시험 및 베인전단시험 결과가 그림 5에 나타나 있다. 그림 6에는 심도별 시료를 채취하여 현장 함수비를 측정된 결과가 나타나 있다.

자연 함수비는 표층에서 약 10%로 가장 낮은 값을 보였으며, 토층심도 0.6~1.0m 사이에서는 균질하게 약 30%로 나타났다. 상부에서는 표면 건조에 의하여 함수비가 감소하였고, 하부는 연약층과 풍화암 사이의 배수 효과로 인하여 함수비가 감소된 것으로 판단된다. 그림 5에 나타난 것과 같이 비배수 전단강도가 0.1~0.15t/m², 콘 관입저항값은 0.8~1.1t/m²으로 매우 연약한 지반으로 나타났다. 또한 자연함수비가 액성한계 보다 큰 값을 나타내는 깊이 0.6m~1.2m까지는 컨시스턴시 지수가 0보다 작은 값을 갖는 매우 불안정한 상태이다. 그리고 콘관입저항값(q_c)과 비배수 전단강도(c_u)사이에는 $c_u = 1/\alpha \cdot q_c$ (여기서, $\alpha = 7\sim 8$)의 관계가 성립됨을 알 수 있었다.

타입된 말뚝의 규격은 길이 160cm, 직경 10cm이며, 철근 콘크리트로 30일 수침 양생하여 제작하였다. 말뚝을 제작할 때 거푸집으로 PVC파이프를 사용하였으며 피복두께를 고려 말뚝 중심으로 $\phi 16$ mm이형 철근을 한가닥 배근하였다. 현장에 타입된 말뚝의 개수는 총 36개이며, 추가로 2개의 말뚝을 시험으로 타입하였다. 콘크리트 배합은 시멘트 : 모래 : 자갈의 비율을 1 : 2 : 3으로, 골재는 최대입경 2cm인 콩자갈을 사용하였으며, 슬럼프는 10cm로 제작하였다.

계측기는 이미 기술한 바와 같이, 말뚝위에 작용하는 응력과 말뚝사이 연약지반위에 작용하는 응력을 비교하기 위하여 말뚝위와 말뚝사이 연약지반위에 각각 1개씩의 토압계를 2번 지반을 제외하고 설치하였다. 지오그리드의 변형을 측정하기 위하여 스트레인게이지를 말뚝 위 부분과 말뚝 사이 부분에 부착하였고, 침하판을 말뚝위와 말뚝사이에 설치하였다.

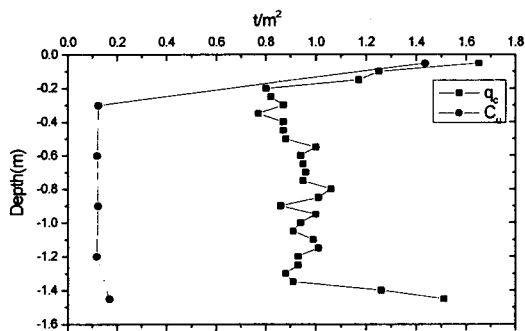


그림 5. 콘저항치(q_c)와 비배수 전단강도(C_u)

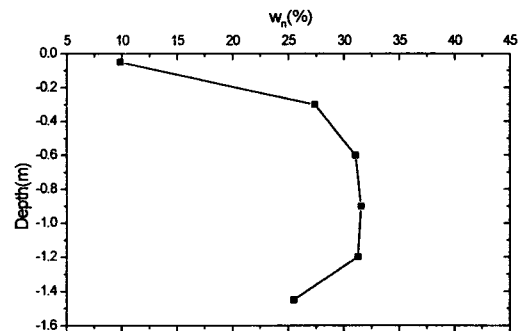


그림 6. 연약지반 심도별 자연함수비

2.3 평판재하시험

보다 큰 재하를 통한 말뚝 간격 및 지오그리드 보강에 따른 지반의 보강효과를 알아보기 위하여 평판재하시험을 실시하였다. 성토 완료 약 3개월 경과 후, 평판재하시험의 하중영향범위를 고려하여 상부의 성토하중을 약 30cm두께만 남겨두고 제거하였다. 평판재하시험을 실시할 때의 단면도는 그림 7에 나타난 바와 같으며, 말뚝으로 보강된 1, 3, 4, 5지반은 중앙 말뚝 위에 평판을 놓고 재하 하였으며, 2지반은 무보강지반으로 지반의 중앙에

평판을 놓고 실험을 실시하였다. 3회의 성토(2.7m)를 통하여 가해진 최종 하중은 약 4.6t/m^2 이었으며, 이로 인한 연약지반의 압밀침하는 최고 17cm까지 발생되었다.

3. 현장 계측결과 및 분석

3.1 침하량의 계측 결과

이 연구에서의 침하량 계측은 각각의 현장 시험 조건에 따른 침하량의 변화를 분석하기 위하여 침하판을 설치하여 계측을 실시하였다. 침하판의 설치위치는 연약지반과 성토층의 경계면에 설치하였으며 말뚝이 타설된 지반에는 말뚝사이의 직각방향의 단간격 위치와 대각선 방향의 장간격 위치에 설치하였다. 그림 8은 지반조건 및 성토단계에 따른 침하량의 변화곡선을 나타낸 것이다. 단계별 성토하중 재하에 따른 압밀 침하량은 1차 성토하중 재하 직후, 전체 성토하중 재하에 따른 총 침하량의 70% 이상이 발생되었다. 각 성토 단계에서 발생된 1차 압밀 침하량의 합은 총 침하량의 약 95%인 것으로 나타났다. 상대적으로 2차 압밀 침하량은 미소한 것으로 나타났다. 1차 성토하중 재하에 따른 침하량이 많이 발생된 것은 해성점토의 압밀침하로 인한 것으로 판단된다. 말뚝의 타입간격에 따른 침하량 변화는 말뚝간격이 $4b$ 까지는 지오그리드의 보강여부에 관계없이 큰 차이를 보이지 않지만, 말뚝 타입간격이 $4b$ 이하일 경우에는 침하량이 급격히 감소하여 보강효과가 크게 나타났다. 즉, 말뚝 타입간격이 $4b$ 이상일 경우에는, 말뚝 타입간격이 상대적으로 넓어, 지오그리드 보강에 따른 하중분산 없이 처짐에 의하여 침하가 발생되었다. 말뚝 타입간격이 $4b$ 이하일 경우, 말뚝이 지오그리드를 구속하여, 성토에 의한 하중이 지오그리드의 인장력으로 분산되어 침하량이 급격히 감소된 것으로 판단된다.

3.2 지오그리드의 변형률 측정 결과

말뚝보강 및 지오그리드 보강여부에 따른 지오그리드의 변형 및 응력 상태를 분석하기 위하여 지오그리드에 스트레인 게이지를 부착하였다. 지오그리드는 어느 정도의 변형이 일어났을 때, 보다 큰 힘을 받기 때문에 지오그리드의 변형률을 측정하는 것은 매우 중요하다. 이 실험에서는 각 지반별로 말뚝 상부에 2개, 말뚝 사이에 2개의 게이지를 부착하여, 성토높이에 따른 지오그리드의 변형을 계측하였다. 그림 9는 계측결과에 따른 변형률 변화곡선을 나타낸 것이다. 말뚝 상부에서의 지오그리드 변형률을 간략하게 살펴보면, 말뚝 간격이 $3b$ 인 지반에서의 변형률은 1차 성토시 말뚝 간격 $4b$ 인 지반과 비슷한 변화를 나타내다가 2차 성토시 부터 상대적으로 크게 변위가 발생되었다. 지오그리드의 변형률 측정결과, 각각의 성토하중 재하시, 말뚝위에 설치된 지오그리드의 변형률이 말뚝사이의 지오그리드에 비하여, 변형률이 많아 인장력이 크게 발생되고 있으며, 상대적으로 말뚝사이의 지오그리드에서는 작은량의 인장력이 발생되었다. 즉, 침하량 계측결과에서 나타난 바와 같이, 말뚝간격이 넓을수록 말뚝사이에 지오그리드는 처짐이 발생되며, 말뚝상부의 지오그리드는 말뚝의 간섭으로 인하여 보다 큰 인장력이 발생하는 것으로 판단된다.

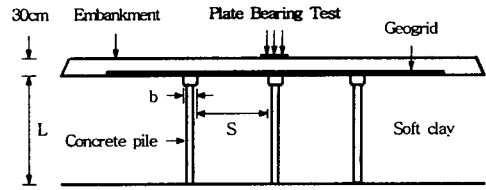


그림 7. 평판재하시험 단면도

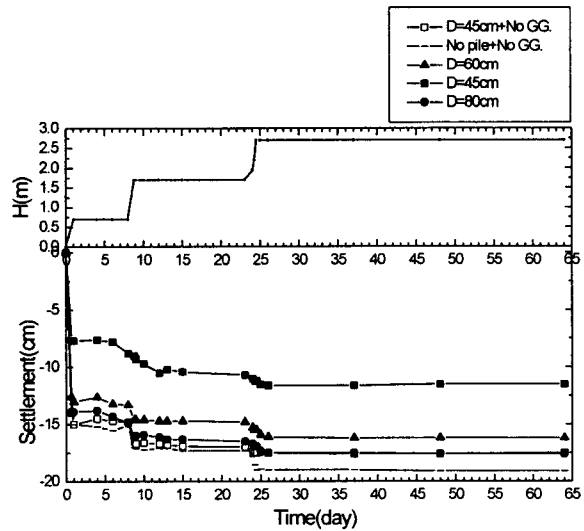
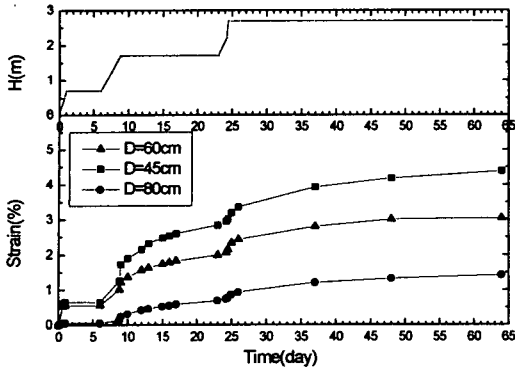
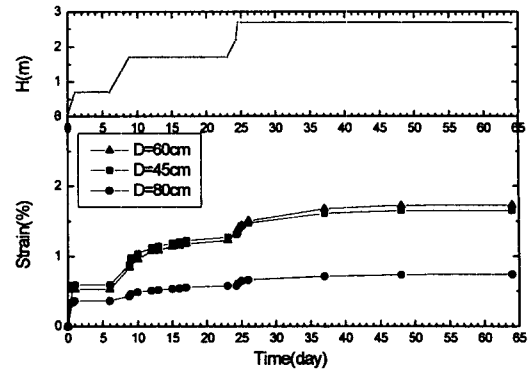


그림 8. 단계별 재방성토에 따른 압밀 침하량



(a) 말뚝 상단부

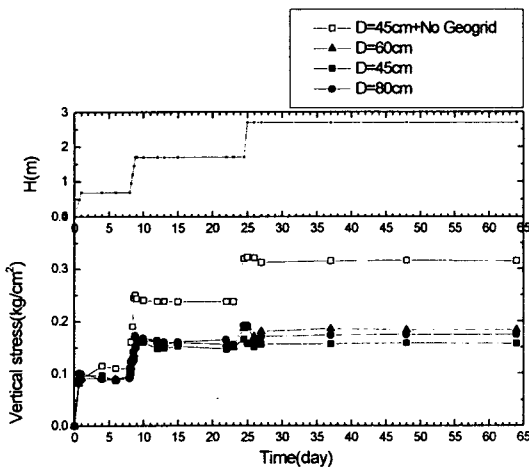


(b) 말뚝사이(연약지반위)

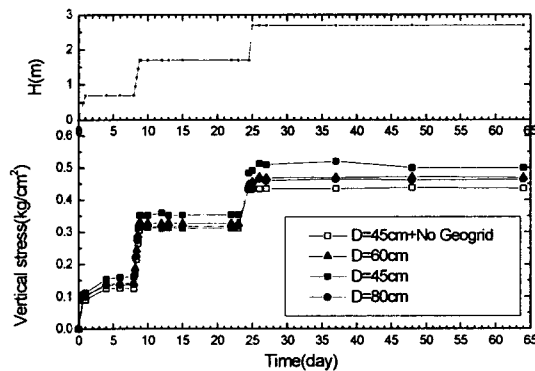
그림 9. 말뚝 상단부에서 지오그리드의 변형률(%)

3.3 토압 측정 결과

말뚝 및 지오그리드의 보강여부에 따른 보강효과와 응력상태를 분석하기 위하여, 말뚝상부와 연약지반 상부에 토압계를 설치하여, 성토하중재하에 따른 토압변화를 측정하였다. 연약지반 상부에 토압계가 놓인 경우, 연약지반 부등침하로 인한 토압계 변형을 막기 위하여, 보호판을 설치하고 그 위에 토압계를 설치하였다. 그림 10은 말뚝상부에 토압계를 설치한 경우와 말뚝사이에 설치한 토압계에 대하여, 성토하중 재하에 따른 토압 측정결과를 나타낸 것이다. 말뚝상부에서의 토압은 말뚝간격이 3b일 경우, 지오그리로 보강한 지반이 보강하지 않은 지반에 비해 1.14배에서 최대 1.3배의 토압을 더 받는 것으로 나타났다. 말뚝사이에서의 토압은 최대 0.5배로 줄어들었다. 이것은 지오그리드 위에 실린 성토하중이 하부 연약지반이 침하를 일으키면서 지오그리드 위의 하중이 말뚝위로 전해진 결과이다. 따라서, 말뚝상부에서의 토압은 보강의 경우 보강하지 않은 지반보다 증가하였고, 말뚝사이에서는 토압이 감소하였다. 지오그리드의 변형률도 토압이 증가함에 따라 증가하는 현상을 나타내고 있다. 지오그리드 보강 지반의 말뚝간격에 따른 말뚝사이에서의 토압변화를 보면 어떤 경향성을 찾을 수 없다. 이것은 말뚝사이에서 연약지반의 침하가 발생하면서 지오그리드 위의 성토가 성토하중으로 인해 지오그리드 격자사이로 밀려나오는 시기가 일정하지 않음으로 인해 발생한 결과로 해석된다. 전체적인 토압변화를 볼 때, 지오그리드로 보강한 지반에 보강하지 않은 지반에 비해 말뚝상부에서의 토압은 증가하고, 말뚝사이에서의 토압은 감소하는 경향을 보였다.



(b) 말뚝사이(연약지반위)



(a) 말뚝위

그림 10. 말뚝 간격에 따른 토압

3.4 평판재하 시험 결과

3.4.1 하중-침하곡선법에 의한 결과 분석

평판 재하 시험의 결과를 이용하여 그림 11에 나타난 것과 같이 하중-침하(P-S)곡선을 도출하였다. 각각의 지반에 따른 항복하중을 비교하여 보면, 보강을 하지 않은 무보강 연약지반에 대하여, 말뚝만 보강하였을 경우, 1.07배의 지지력 증가효과가 있으며, 말뚝과 지오그리드를 동시에 보강한 지반은 말뚝간격에 따라 1.24~1.47배의 보강효과를 나타내었다. 즉, 연약지반에 말뚝을 타입하고, 지오그리드를 보강하는 것이 지지력 증강에 상당한 효과가 있음을 알 수 있다.

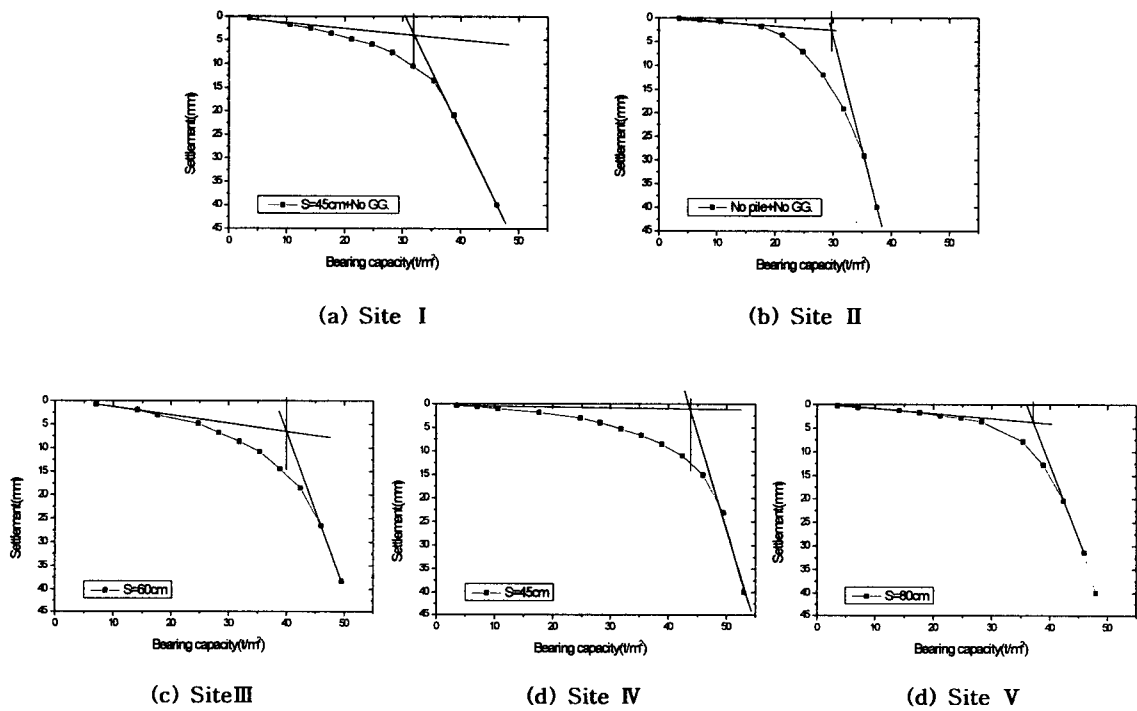


그림 11. 각 지반의 P - S 곡선

항복지지력과 극한지지력에 안전율을 고려한 허용지지력을 비교하여, 표 2에 나타내었다. 허용지지력의 결정은 항복지지력을 2로 나눈값과 극한지지력을 3으로 나눈값 중 작은 값을 선택하였다. 허용지지력에 대한 분석결과도 항복지지력에 의한 결과와 유사하게, 말뚝만 보강된 지반이 무보강지반에 비해 1.27배의 보강효과가 있으며, 말뚝과 지오그리드를 보강한 지반의 경우, 1.33~1.43의 범위를 나타내었다. 또한, 말뚝간격에 따른 보강효과는 말뚝의 간격이 3b일 때 지오그리드로 인한 보강효과가 현저하게 나타났으며, 4b이상일 경우에는 보강효과가 거의 비슷한 값을 나타내었다.

표 2. 안전율을 고려한 현장별 허용지지력

하중결정방법	안전율	No pile, No GG. (t/m ²)	S=45cm, No GG. (t/m ²)	S=45cm (t/m ²)	S=60cm (t/m ²)	S=80cm (t/m ²)	비고
하중-침하곡선법	2	29.78	31.90	43.83	39.99	37.15	항복지지력
	3	30.00	36.55	44.30	39.92	40.25	극한지지력
	-	10.00	12.18	14.76	13.31	13.42	허용지지력

4. 결론

지오그리드로 보강된 말뚝기초위에 성토를 실시하였을 경우 성토하중에 따른 지반 보강효과를 연구하기 위하여 Pilot Scale 현장시험시공을 실시하였다. 기초 연약지반을 해성점토로 조성한 후, 지오그리드의 보강여부와 말뚝의 간격을 다르게 하여 구성하였다. 각각의 조건에 대하여 침하량, 지오그리드 변형률, 토압을 성토하중 재하에 따라 측정하였고, 보다 큰 하중 하에서의 보강효과를 알아보기 위하여 연약지반이 성토에 의한 일정기간 압밀 후, 추가적으로 평판 재하 시험을 실시하였다. 이 실험을 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 침하량 측정결과 기초지반의 단계별 1차 압밀침하량의 합은 총침하량의 약 95%정도이고, 2차 압밀침하량은 상대적으로 적은 5%정도인 것으로 나타났다.
2. 말뚝 간격이 말뚝 캡 직경의 3배일 때 지오그리드의 변형이 상대적으로 크게 일어나면서, 지반 강화현상이 현저하여 침하량이 급격히 감소하였다. 지오그리드 보강 지반은 무보강지반에 비하여 침하량이 약 63%로 37%정도 감소되는 것으로 나타났다.
3. 말뚝 상부에 작용되는 하중이 말뚝사이보다 상대적으로 크게 작용되어 토압은 증가되었으며, 지오그리드의 변형률은 크게 발생되었다. 이러한 현상은 연약지반이 침하 되면서 지오그리드의 하중이 말뚝상부에 전위되었기 때문인 것으로 판단된다.
4. 지오그리드가 말뚝 상부에 위치할 때 연약지반상에 축조된 제방의 기초지반보강 효과는 현저한 것으로 판명되었다.
5. 하중-침하 곡선에 의하여 항복하중을 비교하여 보면, 말뚝만 보강한 지반의 경우, 무보강 지반에 비해 약 1.07배의 지지력 증가를 나타내어 초연약지반의 경우, 말뚝만 보강하여 큰 효과를 얻을 수 없는 것으로 나타났다.
6. 말뚝과 지오그리드를 동시에 보강할 경우, 무보강지반에 비해 1.30~1.47배, 말뚝보강지반에 비해 1.10~1.21배의 허용하중 증가효과를 나타내었다. 즉, 말뚝과 지오그리드를 동시에 보강할 경우, 상당한 지지력의 보강효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.
7. 말뚝 타설 간격에 따른 지지력 보강효과를 살펴보면, 말뚝간격이 3b일 때 지오그리드의 보강효과가 현저히 크게 발생되며, 3b이상일 경우, 지지력 증가량이 완만히 증가하여 거의 비슷한 값을 나타내었다.
8. 상기의 결과를 종합하여 볼 때, 말뚝과 지오그리드를 동시에 보강할 경우, 말뚝과 지오그리드의 상호정착 및 간섭을 통하여 상당히 큰 보강효과를 얻을 수 있으며, 말뚝간격이 약 3b일 때, 최적의 효과를 발휘하는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 홍원표, 윤중만, 서문성(1999), "말뚝으로 지지된 성토지반의 파괴형태", 한국지반공학회논문집, 제 15권, 제 4호, pp.207-220.
2. Broms, B.B. & Wong, I.H.(1985), "Embankment piles", Soil Improvement Methods, Proc., 3rd International Geotechnical Seminar, Nanyang Technological Institute, Singapore, pp. 167-178.
3. Hewlett, W.J. and Randolph, M.F. (1988), "Analysis of piled embankments" Ground Engineering, London, England, 21(3), pp. 12-18.
4. Jenner, C.G. and Austin, R.A., Buckland, D.(1998), "Embankment Support Over Piles Using Geogrids," Sixth International Conference on Geosynthetics, pp.763-766.
5. Kempton, G., Russell, D., Pierpoint, N.D., Jones, C.G.F.P.(1998), "Two- and Three- Dimensional Numerical Analysis of the Performance of Piled Embankments," Sixth International Conference on Geosynthetics, pp 767-772.

6. Low, B.K., Tang, S.K. and Choa, V. (1994), "Arching in piled embankments", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE.*, Vol. 120, No. 11, pp 1917-1937.
7. Maddison, J.D. & Jones, D.B., Bell, A.L., Jenner, C.G.(1998), "Design and performance of an embankment supported using low strength geogrids and vibro concrete columns," *Sixth International Conference on Geosynthetics*, pp. 325-332.
8. Rogbeck, Y., Gustavsson, S., Soedergren, I., Lindquist, D.,(1998), "Reinforced Piled Embankments in Sweden-Design Aspects," *1998 Sixth International Conference on Geosynthetics*, pp. 755-762.
9. Topolnicki, M.(1998), " Case history of a geogrid-reinforced embankment supported on vibro concrete columns," *Sixth International Conference on Geosynthetics*, pp. 333-340.