

모래다짐말뚝으로 개량된 복합지반의 거동에 관한 원심모형실험 - 응력집중을 중심으로 -

Centrifugal Model Test on the Behaviors of Composite Ground Improved with Sand Compaction Piles - Focused on Stress Concentration of SCPs -

배우석* · 오세욱** · 신방웅***

Bae, Woo Seok · Oh, Se Wook · Shin, Bang Woong

Abstract

In this study, centrifugal model tests were performed to evaluate the stress sharing between SCP and surrounding clayey soil at composite ground improved by sand compaction pile with the low area replacement ratio. The SCPs were formed by the "frozen pile" method and pressure cells were installed on pile and surrounding clayey soil to observe stress sharing characteristics. As a result of centrifugal tests, it is shown that the value of stress concentration ratio is mainly affected by area replacement ratio, loading condition and elapsed time.

Keywords : sand compaction pile, stress concentration ratio, low replacement area ratio

요 지

본 연구에서는 저치환율의 모래다짐말뚝으로 개량된 복합지반에서 SCP와 주변지반 사이의 응력 분담 효과를 평가하기 위하여 원심모형시험을 수행하였다. 모래다짐말뚝은 동결법에 의해 형성하였으며, 응력분담거동을 관찰하기 위하여 말뚝과 주변점토지반에 압력계를 설치하였다. 원심모형실험결과, 응력집중비는 주로 하중조건과 면적치환비 그리고 경과시간에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 모래다짐말뚝, 응력집중비, 저치환율

1. 서 론

복합지반은 모래말뚝과 지반이 서로 다른 강성을 지니므로 지반 상부의 하중은 모래 말뚝에 집중되며, 연직의 집중응력에 대항한 말뚝의 마찰저항력과 점성토의 점착력이 활동면에서 발휘되어 전단응력에 저항하게 된다. 또한, 모래다짐말뚝의 설계는 지금까지 복합지반에서 말뚝과 점토의 침하가 동일하다고 가정하는 등변형률 이론을 근간으로 하고 있으며, 보고된 많은 실내 및 현장 시험 결과가 70% 이상의 고치환율이고 강성제하를 통해 변위를 구속하고 있는 것으로 나타났다.

더욱이 국내의 경우 골재 사용량은 매년 5% 이상의 증가 추세를 나타내며, 개발가능 골재의 부존량은 향후 20~30년 정도로 보고되고 있다. 이러한 부존자원의 한계 및 환경규제의 강화와 연약지반의 개발확대로 모래의 사용량이 지속적으로 증대되어 골재의 수급 상황이 나날이 악화되어 가고

있는 상황이다.

Alamgir 등(1996)은 보강지반의 설계에서 응력집중비를 적용함에 있어 단일값을 사용하는 것은 합리적이지 않으며 예측에 있어서 상당한 오류를 범할 수 있음을 해석적 방법을 통해 주장한 바 있다. 또한, Kimura 등(1991)은 원심모형실험을 통하여 여러 가지 하중형태에 따른 모래말뚝으로 보강된 지반의 역학적 거동을 분석하였으며, Rahmen 등(2000)은 해안구조물의 뒷채움 하중으로 인해 발생하는 모래다짐말뚝 시공지반의 변위 양상을 Centrifuge를 통하여 관찰하였다.

국내에서는 유승경(2003a)이 복합지반의 역학거동은 모래말뚝이나 점토지반 중 어느 하나에 좌우되는 것이 아니라 상호간의 역학거동에 의해 결정되며, 그 중 가장 큰 영향을 미치는 요소 중의 하나가 응력집중비인 것으로 제안한 바 있다. 또한, 김재권 등(2003)은 연성하중을 받는 복합지반에 대한 모형실험과 해석을 통하여 모래말뚝과 지반의 변위차가 응력에 미치는 영향에 대해 관찰하였다.

*정회원 · 청주대학교 토목환경공학과 겸임교수(E-mail: old1007@hanmail.net)

**정회원 · 영재이앤씨 이사(E-mail: osw2379@hanmir.com)

***정회원 · 충북대학교 총장(E-mail: president@chungbuk.ac.kr)

지금까지 발표된 복합지반에서의 응력집중비는 주로 현장 실측치와 해석을 통해 제안되어 오고 있어 국내의 현장조건에 대한 값은 정량화되어 있지 않다. 또한, 이론적인 정해가 없는 이유는 응력의 전이 형태가 연약지반과 모래말뚝의 정량적 성질에 크게 영향을 받고 있기 때문으로 지반과 말뚝의 상대적인 거동과 상호작용이 크게 영향을 미치고 있기 때문이다. 이러한 응력집중비의 문제는 제안된 현장계측치 조차도 말뚝의 보강 위치, 측정심도, 계측장치의 설치위치, 지반의 종류 등에 따라 서로 다른 값을 나타내고 있다는 것에 있다. 그러므로 좀 더 합리적인 설계정수의 획득을 위해서는 다양한 대상 현장에 대한 정확한 모형을 수행하거나 시험시공이 이루어져야 할 것이다.

따라서, 본 연구에서는 모래다짐말뚝으로 보강된 성토체 표면부의 복합지반을 대상으로 치환율과 말뚝의 배열방법, 성토체의 재하조건을 시험 변수로 G-level에 따른 원심모형실험을 실시하여 저치환 시 말뚝과 지반에 작용하는 응력의 분담비율을 비교·평가함으로써 연약지반의 보강을 위한 모래다짐말뚝공법의 효과적인 활용에 기여할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다.

2. 원심모형실험

2.1 시료의 특성

본 연구에서는 모형지반의 모사를 위하여 익산 지역에 분포하고 있는 해성 점토를 이용하였다.

배수층과 모형모래말뚝은 균등한 입도를 가지는 주문진 표준시료를 사용하였으며, 표준시는 0.21mm의 유효경을 가지며 균등계수와 곡률계수가 각각 1.18과 1.02를 가지는 것으로 나타났다. 실험에 사용된 대상시료의 원지반 특성을 파악하기 위해 비교란 시료에 대해 실내실험을 실시하여 표 1에 제시한 실험결과가 도출되었다.

표 1. 점토지반의 물리적 성질

USCS	CL
No.200 체 통과량(%)	89
액성한계 LL(%)	45.2
소성지수 PI(%)	27.0
자연함수비 α (%)	39.9
비중	2.68
단위중량 (kN/m^3)	17.43
점착력(kPa)	18.6
압축계수	0.47

2.2 실험장치

원심모형실험은 높은 중력가속도장을 이용하여 현장의 응력상태를 재현함으로써 원형 구조물과의 상사성을 모사할 수 있는 실험이다. 본 연구에서 사용한 충북대학교의 원심모형 시험기의 개요도는 그림 1과 같으며, 주요 제원은 표 2와 같다.

그림 2는 실험에 사용된 모형토조로 벽면마찰과 부식을 최소화하기 위해 스테인레스를 이용하여 52(B)×18(L)×35(H) cm로 제작하였으며, 전면은 고강도 아크릴판을 이용하여 변

표 2. 원심모형장치의 주요제원

Model	Dong-Ah 1000-1(Dong -Ah & Seikensha)
G-range	1 to 200g at 920mm
Motor	10 HP hydraulic motor
Working radii	1,280mm - center to basket floor
RPM range	0 ~ 500 rpm
Payload capacity	25g · ton
Test package size	500mm×500mm×300mm in max
Electrical pick-ups	24 slip rings

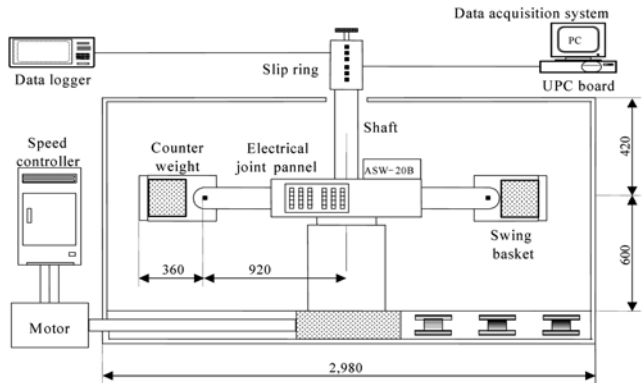


그림 1. 원심모형시험장치



그림 2. 모형토조의 설치상태

형의 관찰이 가능하도록 하였다.

지표면의 변위는 50mm의 범위를 갖는 일본 Midori사의 Potentiometer(이하 POT)를 이용하였으며, 압밀의 진행을 파악하기 위하여 일본 동경측기사의 200kPa 용량의 간극수압계를 설치하였다. 또한, 말뚝체로의 응력이동을 계측하기 위하여 성토체 시공 전 점토지반과 모래말뚝의 상부에 압력계가 설치되었으며, 시험 중의 이동을 방지하기 위하여 압력계 밑면에 지지판을 부착하였다. 시험에 사용된 토압계는 100kPa, 200kPa 용량을 가진 일본 TML사의 PDA-PA 모델로 직경 6mm, 두께 2mm의 초소형 계측장치를 사용하였다.

성토체 상부와 선단부의 연직 변위량과 과잉간극수압, 수직응력의 변화 등 실험결과는 데이터로거와 PC용 UPC 보드로 취득하였다.

2.3 실험방법

본 연구는 모래다짐말뚝으로 보강된 복합지반의 응력의 변화를 구명하는 것이 목적이므로 균질한 강도를 갖는 지반의

조성과 균일한 말뚝체의 형성에 주의를 기울였다.

2.3.1 모형지반의 조성

모형지반은 불순물이 제거된 익산 점토를 함수비가 액성한계의 1.5배가 되도록 물을 혼합하여 교반하여 약 2개월 동안 방치한 후 혼합된 슬러리를 모형토조 내에 재성형하여 원심모형시험기 상에서 70G의 조건으로 1차압밀이 종료되는 시점까지 90분간 지중압밀하여 조성하였다.

지중압밀된 모형지반은 배인 시험결과 평균 4~5kPa의 비배수전단강도를 나타내었으며, 재성형 지반의 단위중량은 17.25~17.50kN/m³의 범위를 나타내었다.

토조 벽면의 마찰을 최대한 배제하기 위하여 실리콘 그리드계의 액상 실리콘을 충분히 도포하였으며, 지중압밀의 종료 시점을 파악하기 위하여 그림 3과 같이 간극수압계를 슬러리를 거치하기 전에 부착하였다. 또한 압력계는 성토체의 시공 전 점토지반과 말뚝의 상부에 설치되었으며, POT는 성토체를 시공한 후 지반의 표면에 설치하였다.

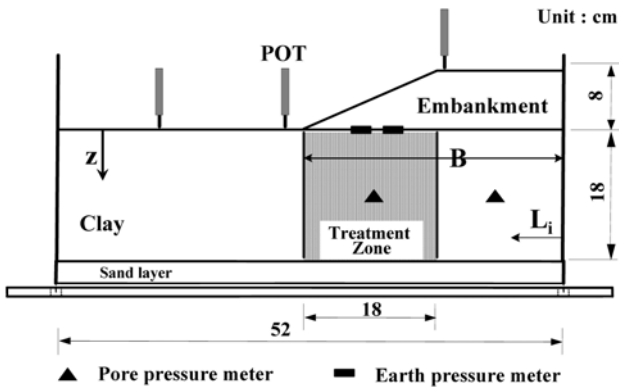


그림 3. 모형토조 및 계측기 설치 상세도

지중압밀이 종료된 후 지반의 변동이 최소화될 수 있도록 고정하고 전면에 설치된 이크릴을 분리하였다. 노출된 점성토층의 전면에는 거동의 분석을 위하여 국수를 이용한 격자망(marked grid)을 2x2cm의 간격으로 전면에 설치하였으며 분리된 이크릴판에 재차 액체상 실리콘을 도포한 후 조심스럽게 재결합하였다.

2.3.2 모래말뚝 설치

모형 모래말뚝은 말뚝의 수직도를 유지하고 균일한 직경을 유지할 수 있는 “동결말뚝” 방법을 이용하였다. Lee 등 (2001)에 의한 연구결과에 의하면 동결모래말뚝은 주변지반의 함수비가 다소 증가되는 단점을 가지고는 있으나 연약 점토층을 효과적으로 치환할 수 있으며, 상대밀도를 측정할 결과 80~85% 수준을 유지하고 있는 것으로 보고되고 있다. 동결말뚝은 등분된 내경 15mm, 길이 200mm의 PVC 파이프를 조립한 후 일정량의 표준사를 소정의 함수비로 다져 넣었으며 조성된 말뚝은 물속에서 포화시켜 냉동장치에서 동결되었다. 말뚝은 12시간 이상 동결되어 작업성을 확보한 후 조립된 파이프를 해체하여 취득하였다.

압출된 동결말뚝을 저속 오거형 드릴로 천공된 구멍에 삽입하여 말뚝체를 형성하였으며 중앙부 좌측에서 외측방향으로 시공하여 말뚝 설치로 인한 지반의 용기를 최소화 하였

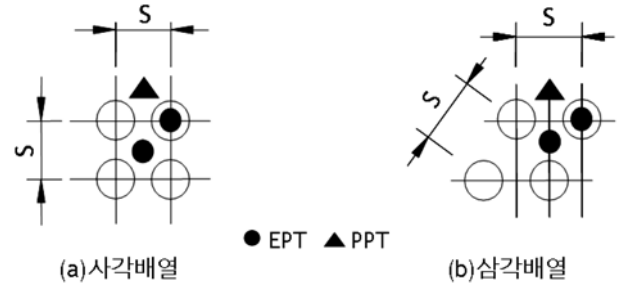


그림 4. 모래다짐말뚝의 배열

다. 모래말뚝의 배열은 정사각형과 정삼각형 배치로 계획되었으며 치환율에 따른 말뚝의 간격은 표 3과 같다.

지반의 보강이 완성된 후 지표면을 정리하고 기 성형된 성토체를 대상위치에 시공하였다. 성토체는 화강풍화토를 사용하여 일정한 밀도를 지닐 수 있도록 형틀을 사용하여 실험 전에 미리 최종성토체의 제원을 갖도록 성형하였다. 성토체를 시공한 후 변형 측정을 위한 POT를 거치하고 계측장치를 단자에 연결한 후 지반의 설치로 인한 과잉간극수압의 발생과 응력의 안정화를 위하여 40G 이하로 과잉간극수압이 소산될 때까지 재압밀하였다.

2.3.3 원심모형실험

지반의 조성 및 계측장치의 설치가 완료된 후 본 압밀재하 실험은 무보강과 치환율 10, 20, 40%에서 최대 80G의 조건으로 가속되었으며, 가속은 지반활동과 파괴를 모사하기 위하여 급속하게 이루어 졌다. 표 3은 본 연구에 수행된 모형실험의 종류와 조건을 보여준다.

표 3. 원심모형실험 상세

	재하조건	배열방식	a_s (%)	S (mm)
T1	연성재하	삼각배열	0	-
T2	연성재하	삼각배열	10	45.2
T3	연성재하	삼각배열	20	32
T4	연성재하	삼각배열	40	23
T5	강성재하	삼각배열	0	-
T6	강성재하	삼각배열	10	45.2
T7	강성재하	삼각배열	20	32
T8	강성재하	삼각배열	40	23
T9	연성재하	사각배열	0	-
T10	연성재하	사각배열	10	50
T11	연성재하	사각배열	20	30
T12	연성재하	사각배열	40	20

모형실험은 등변형률과 자유변형률 조건을 모사하기 위해 성토체의 하부조건을 변형이 가능한 풍화토와 변형이 발생되지 않는 강성체를 사용하였으며, 배열방식을 삼각과 사각으로 변화를 주었고 치환율을 무보강에서 40%까지 변경하여 총 12회 실시하였다.

3. 응력 분담 거동

본 연구에서는 저치환율 보강된 복합지반에 대해 말뚝의

배열과 하중의 재하형태, 치환율을 변화시켜가며 원심모형실험을 실시하고 이에 따른 모래말뚝과 점토지반에서의 응력의 변화를 측정하여 분석하였다.

3.1 시간에 따른 연직응력의 변화

실험 결과는 최종시간 t_f 에 대한 현재시간 t 의 시간비(t/t_f)로 나타내어 정규화 하였다. 그림 5~7에 보여 지는 바와 같이 모래말뚝이 점토지반에 비해 상대적으로 큰 응력의 전달이 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 응력의 집중현상은

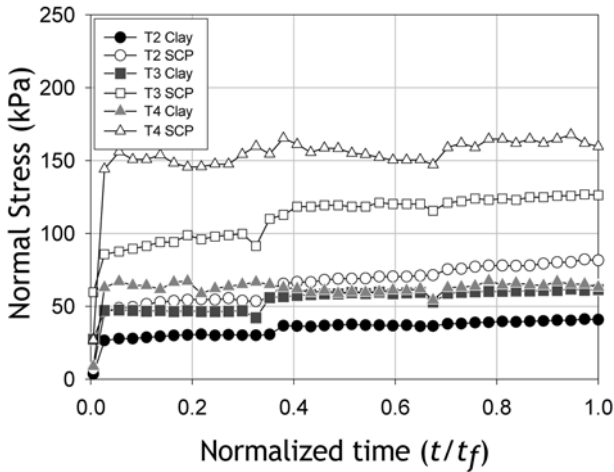


그림 5. 시간에 따른 연직응력의 변화(T2-T4)

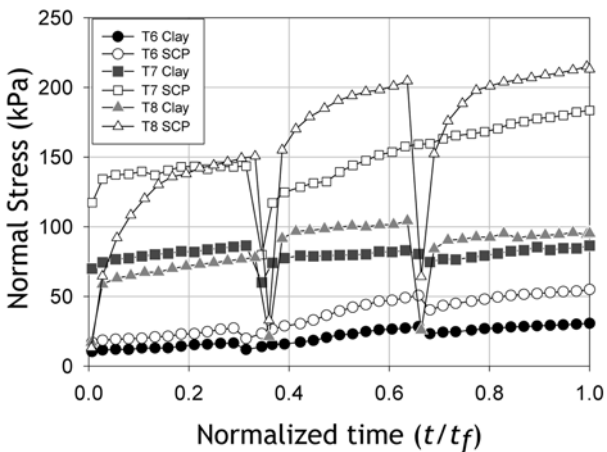


그림 6. 시간에 따른 연직응력의 변화(T6-T8)

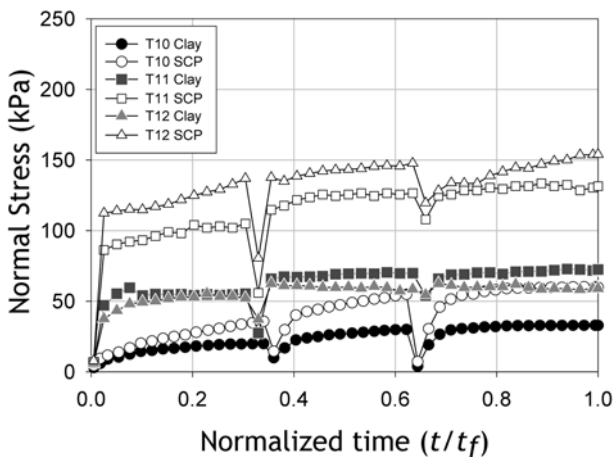


그림 7. 시간에 따른 연직응력의 변화(T10-T12)

치환율이 증가할수록 더욱 더 뚜렷해지며 이러한 현상은 연성하중 재하 시 지반의 차등적인 침하로 아칭현상이 발생되어 상대적으로 지반부의 응력 전달이 감소하고 주변 점성토층의 구속으로 인하여 말뚝과 지반의 경계부로 전달되는 응력이 점차적으로 증가하기 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

이러한 응력거동에 대하여 유(2003)는 점토부의 구속에 의한 일반화전단응력의 감소로 평균유효응력이 증가하기 때문이라고 밝히고 압밀 초기의 과잉간극수압의 소산에 의한 유효응력의 증가가 응력의 집중으로 거의 모래에서 발생하고 이로 인한 말뚝체의 파괴로 재하압력에 대한 지지메카니즘이 상실되고 이에 따른 점토부 유효응력의 증가가 구속응력의 증가로 이어진다. 이러한 점토부 응력의 증가는 결과적으로 모래말뚝의 다이러턴시 효과를 유발하여, 복합지반의 거동이 모래말뚝의 다이러턴시 거동과 점토의 압밀거동의 상호작용에 의해 지배된다고 제안하고 있다.

이러한 정의는 재하초기 말뚝체 상부의 연직응력이 점성토층에 비해 매우 큰 폭으로 증가하고 있으며, 시간 경과에 따른 증가율이 말뚝체가 점토지반에 비해 큰 것을 통해 확인할 수 있다. 또한, 이러한 거동은 말뚝의 배열형태에 관계없이 G-level이나 치환율이 증가함에 따라 뚜렷하게 나타나므로 시간에 따른 연직응력의 변화를 통하여 압밀 즉 시간의 경과에 따라 응력이 말뚝체로 집중되는 현상을 확인할 수 있다. 단, 그래프상의 변곡점은 중력수준에 따른 지반의 거동을 정량적으로 파악하기 위해 작동을 중지하고 검측 한 후 재가동하는 과정에서 응력이 감소되었다가 다시 증가되는 과정에 의해 발생된 것으로 분석 시 변곡점 부위의 값을 생략한 후 응력집중비를 산정하므로 영향을 미치지 않는다.

3.2 시간경과에 따른 응력집중비의 변화

그림 8~10은 모래말뚝의 배열과 재하형태별로 시간에 따른 응력집중비의 변화를 보이고 있다. 응력집중비는 그림 5~7의 점성토층과 모래말뚝의 연직응력의 비로 산정하였으며, G-level의 증가에 따른 재하시간과 하중강도를 모사하였다.

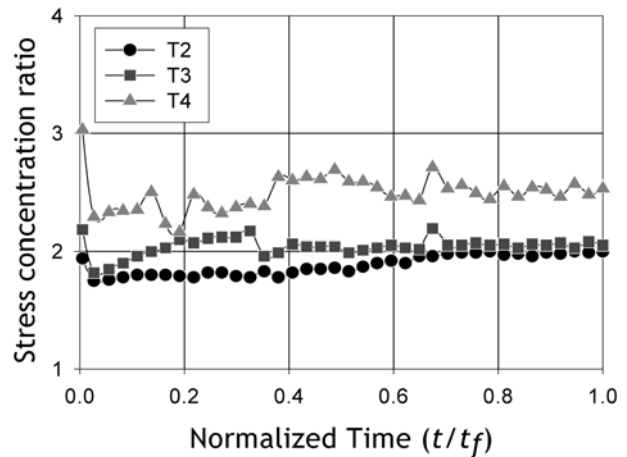


그림 8. 시간에 따른 응력집중비의 변화(T2-T4)

그림 8과 같이 연성하중을 받는 삼각배열 복합지반의 응력집중비는 일정한 중력수준에 도달하기 전의 불안정한 값을 제외하면 대략 1.79~2.53의 범위에 존재하고 있으며, 치

환율이 증가함에 따라 8~30%의 증가를 보이고 있다.

그림 9는 강성재하 조건 일 때의 응력 변화 양상으로 시간에 따른 지속적인 증가경향을 보이며, 1.62~2.15의 범위를 나타내고 치환율의 증가에 따라 9~15%의 증가 경향을 보이고 있다.

그림 10은 연성하중을 받는 사각배열 구조의 복합지반에 대한 시험 결과로 응력의 변화 양상은 연성재하 시 삼각배열 보강지반과 유사한 경향을 나타내고 있으며, 응력집중비는 1.69~2.37의 범위로 치환율의 증가에 따라 각각 8, 40%의 증가율을 보이고 있다. 여기서, 일정 G-level에 이르는 압밀 초기의 왜곡된 곡선부는 재가속에 따른 측정오차이며 시간이 증가함에 따라 안정화되어 가고 있는 것으로 나타났다.

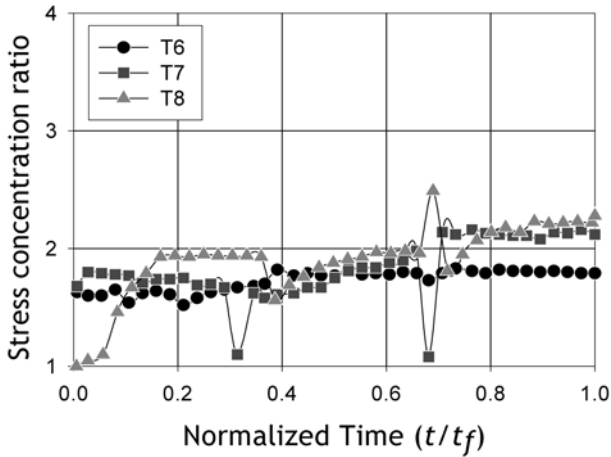


그림 9. 시간에 따른 응력집중비의 변화(T6-T8)

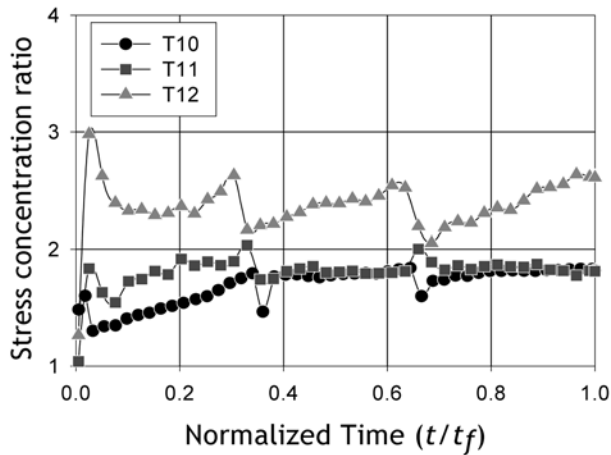


그림 10. 시간에 따른 응력집중비의 변화(T10-T12)

그림 8~10과 같은 양상은 치환율이 증가함에 따라 말뚝 사이 간격이 감소하여 지반의 구속효과가 증가함으로 모래 말뚝으로의 응력전이가 더욱 크게 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 40%이하의 저치환율 범위 내에서는 치환율이 증가할수록 응력집중비가 증가하는 것을 알 수 있으며, 압밀이 진행됨에 따라 배수에 따른 비배수전단강도의 변화로 응력의 전이거동이 영향을 받아 응력집중비의 변화가 발생하는 것으로 나타났다.

3.3 응력집중비의 변화

말뚝체와 주변지반의 연직응력 분포를 통하여 모래다짐말

뚝으로 보강된 성토 사면 하부의 복합지반에 연성하중이 재하되는 경우 점토지반과 말뚝체의 경계부에서 응력이 말뚝체로 전이되는 현상이 발생하며, 이러한 현상은 치환율이 증가할수록 더욱더 심화되어 이에 따른 응력집중 효과가 증가하고 있음을 알 수 있다.

또한, 응력집중비는 미소하나 시간 또는 압밀의 진행에 따라 서서히 증가하는 경향을 보이고 있으므로 재하 초기와 안정화 후의 응력 집중 현상이 서로 다른 메커니즘을 나타내고 있다.

그림 11과 같이 실험결과는 저치환율의 개량 범위에서 배열상태나 재하방식에 관계없이 치환율이 증가함에 따라 응력집중비가 증가하고 있는 것으로 나타났다. 특히, 강성재하의 경우 응력집중비가 평균 1.73~1.99로 지반과 말뚝부에 작용하는 응력의 크기가 유사하여 치환율에 따라 약 9~15%의 증가율을 보이는 반면 연성재하의 경우 8~40%의 응력집중비 증가율을 보이므로 강성재하 시의 응력 분담 효과가 상대적으로 감소되는 것으로 관찰되었다.

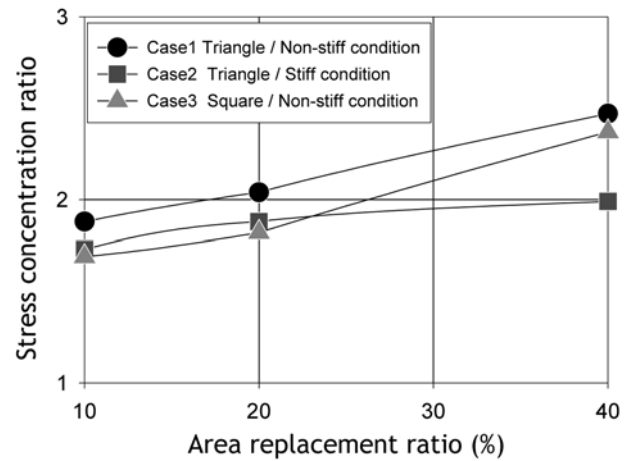


그림 11. 치환율에 따른 응력집중비의 변화

강성재하 조건의 경우 말뚝과 점성토지반이 균등한 침하가 발생되어 연성재하방식에 비해 응력의 전이 현상이 감소되어 모래말뚝에 응력이 증가됨과 동시에 점성토층에 발생하는 응력도 증가하게 되므로 응력집중비의 증가율이 감소되는 현상이 발생되었다.

유(2003)가 일련의 수치해석을 통해 개량지반의 역학적 거동이 모래의 다일러턴시와 점토의 압밀거동의 상호작용에 의해 지배된다고 밝힌 바 있듯이, 응력 집중 효과는 복합지반의 거동에 영향을 미칠 수 있는 재하 방식과 재하 응력의 크기, 압밀도, 재하시간 등 여러 가지 요인에 따라 변화하는 것으로 나타났다.

그림 12와 같이 응력집중비의 변화를 분석하여 보면 저치환율인 10~50%의 범위 내에서는 치환율이 증가함에 따라 응력집중비가 증가하나 50% 이상의 고치환율에서는 응력집중비가 일반적으로 감소하고 있으며, 대부분 1~3의 범위를 제안하고 있다(김기홍, 2004).

표 4는 원심모형 시험을 통한 예측결과와 실측된 침하감소계수 산정식으로부터 역산된 값(법과 점토지반내의 모래 말뚝이 주변지반에 의해 구속되어 파괴가 일어나지 않을 시의 응력 상태에서부터 제안된 식 (1)과 같은 Rao & Ranjan

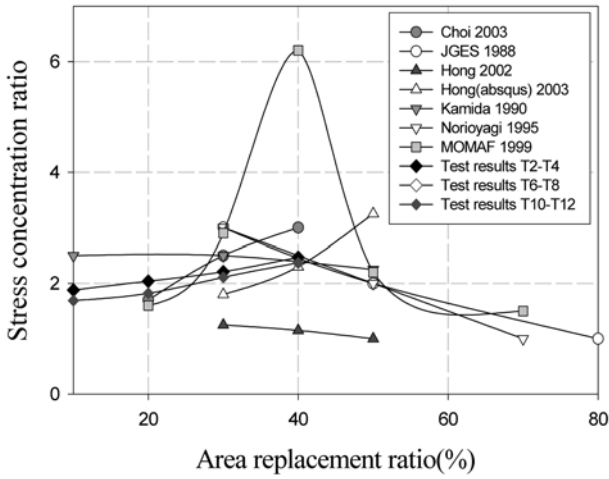


그림 12. 응력집중비의 비교

(1985)의 경험식(m_{MAX})에 의한 최대응력집중비를 비교하고 있다.

$$m = q_p/q_s = E'_p/E'_s \quad (1)$$

여기서, E'_p 와 E'_s 는 보정 탄성계수로 각각 $E'_p = E_p \{ \sigma_m / \sigma_1 \}^{0.5}$, $E'_s = E_s \{ \sigma_m / \sigma_1 \}^{0.5}$ 이며, σ_m 은 한계깊이의 연직응력이다. 또한 침하감소계수는 미개랑지반의 실측침하량에 대한 보강후 침하량의 비를 이용하여 산정하였다.

표 4. 응력집중비의 비교

	a_s (%)	원심모형실험결과	β 법	m_{MAX}
T2	10	1.88	1.60	2.98
T3	20	2.04	2.20	3.11
T4	40	2.47	1.88	3.69
T6	10	1.73	2.53	2.80
T7	20	1.88	2.30	3.11
T8	40	1.99	2.36	3.32
T10	10	1.69	1.91	3.01
T11	20	1.82	2.10	3.09
T12	40	2.37	2.41	3.35

산출된 결과와 같이 응력집중비는 1.6~3.69의 범위를 나타내어 다소 불규칙하지만 치환율의 증가에 따라 증가하며 강성재하 시에 비교적 작은 값을 보이는 것으로 나타났다. 제안식과 역산법에 의한 결과는 실험결과와 1.7~78.1%에 이르는 오차를 보이고 있어 기존의 이론적인 산정 방법들이 복합지반의 말뚝 배열형태나 재하조건 등을 정확히 고려하지 못하여 실험결과와 부합되지 못하고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 저치환의 모래다짐말뚝으로 보강된 복합지반에 대한 원심모형실험을 실시하고 치환율과 경과시간에 따른 모래말뚝과 점성토지반의 연직응력 변화를 측정하여 응력의 분담작용을 비교·평가하였다.

1. 실험결과 모래말뚝이 점토지반에 비해 상대적으로 큰 응력의 전달이 이루어지고 있으며, 치환율이 증가할수록 더

욱 더 뚜렷해짐을 확인하였다. 이러한 현상은 연성하중 재하 시 지반의 차등적인 침하로 지반의 전단응력이 감소하고 주변 점성토층의 구속으로 인하여 말뚝과 지반의 경계부로 전달되는 응력이 점차적으로 증가하기 때문에 발생되는 것으로 판단된다.

2. 재하초기 모래말뚝의 연직응력이 점성토층에 비해 매우 큰 폭으로 증가하고 있으며, 시간 경과에 따른 증가율이 말뚝체가 점토지반에 비해 큰 것으로 나타나 압밀이 진행됨에 따라 응력이 모래말뚝으로 집중되고 있는 현상을 확인할 수 있다. 또한, 이러한 거동은 말뚝의 배열형태에 관계없이 치환율이 증가함에 따라 뚜렷하며 강성재하인 경우에 더욱 확인한 응력의 증가 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.
3. 40% 이하의 저치환의 범위 내에서 응력집중비는 치환율이 증가할수록 증가하며, 시간 또는 압밀의 진행에 따라 서서히 증가하는 경향을 보여 재하 초기와 안정화 후의 응력 집중 현상이 서로 다른 메커니즘을 나타낸다. 따라서 응력집중비는 모래말뚝과 점토의 장기적인 거동에 따라 영향을 받고 있음을 알 수 있다.
4. 강성재하의 경우 응력집중비가 치환율에 따라 약 9~15%의 증가율을 보여 연성재하에 비해 응력 분담 효과가 상대적으로 작은 것으로 관찰되었으며, 이러한 현상은 모래말뚝에 전달되는 응력이 증가되면서 점성토층에 발생하는 응력도 동시에 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

참고문헌

김기홍(2004) 원심모형시험에 의한 모래다짐말뚝으로 보강된 연약지반의 변형 특성, 박사학위논문, 충북대학교.

김기홍, 신방웅, 배우석, 오세욱(2003) 모래다짐말뚝으로 개량된 연약지반의 거동에 관한 원심모형실험 개량영역의 변위를 중심으로-, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제23권, 제4-C호, pp. 249~257.

김재권, 홍의준, 김수일, 정상섭(2003) 연약지반에 타입된 모래다짐말뚝의 하중-침하 특성, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제22권, 제4-C호, pp. 423~432.

유승경(2003a) 저치환 모래다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력분담 거동에 대한 실험적 연구, 한국지반공학회는논문집, 한국지반공학회, 제19권 5호, pp. 253~261.

유승경(2003b) 저치환 SCP에 의한 복합지반의 압밀과정중에 발생하는 응력분담거동과 그 메커니즘, 한국지반공학회는논문집, 한국지반공학회, 제19권 5호, pp. 301~310.

Alamgir, M., Miura, N., Poorooshasb, H. B., and Madhav, M. R. (1996) Deformation analysis of soft ground reinforced by columnar inclusions, *Computers and Geotechnics*, Vol. 18, No. 4, pp. 267~290.

Kimura, T., Takemura, J., Suemasa, N., and Horo-oka, A. (1991) Mechanical behavior of soft clay improved with sand compaction piles, *Proceedings of the 9th Asian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, pp. 577~94.

Lee, F. H., Ng, Y. W., and Yong, K. Y. (2001) Effects of installation on sand compaction piles in clay in the centrifuge, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 24, No. 3, pp. 314~323.

Rahman, Z., Takemura, J., Masayuki, K., and Yasumoto, K. (2000) Experimental study on deformation of soft clay improved by low replacement ratio SCP under backfilled caisson loading, *Soils and Foundations*, Vol. 40, No. 5, pp. 19~35.

(접수일: 2005.7.31/심사일: 2005.9.5/심사완료일: 2005.12.14)