

SCP 보강 점성토 지반의 지지력 및 응력분담특성

Characteristics of Bearing Capacity and Stress Concentration of Clay Ground Improved with Sand Compaction Piles

유 남 재¹ Yoo, Nam-Jae

박 병 수² Park, Byung-Soo

정 길 수³ Jeong, Gil-Soo

고 경 환⁴ Koh, Kyung-Hwan

김 지 성⁵ Kim, Ji-Sung

Abstract

This paper is the results of experimental and numerical works on the investigating design factors influencing the bearing capacity, the ratio of stress concentration, and the failure mechanism of the clay ground improved with sand compaction piles (SCP). In order to find the behavior of the clay ground improved with SCP, extensive centrifuge model experiments were carried out for each of the SCP replacement ratio of 20, 40, and 70%, the non-plastic fine contents in sand of 5, 10, and 15%, and the ratio of the improved width to the loaded area (W/B) of 1, 2, and 3. The commercially available software of FEM, CRISP, was used to analyze test results by performing numerical estimations. In these numerical analyses the sand compaction piles and the clay ground were simulated as a linear elastic and plastic constitutive model and the modified Cam-clay model, based on Critical State Soil Mechanics, respectively.

요 지

본 논문은 SCP로 보강된 점성토 지반의 파괴메카니즘 및 응력분담비, 지지력등에 미치는 설계변수에 대한 실험적 수치적 연구 결과이다. SCP로 보강된 점성토 지반의 거동을 알아보기 위하여 SCP의 치환율을 20, 40, 70%로 변화시키고, 비소성 세립분 함유량을 5, 10, 15%로 변화시켰으며 하중재하폭에 대한 지반개량폭의 비를 1, 2, 3으로 변화시키는 광범위한 원심모형실험을 실시하였다. 한편, 원심모형실험 결과를 모사하기 위하여 상용 유한요소 프로그램인 CRISP을 이용하였으며, 수치해석시 모래다짐말뚝은 탄소성모델로 점토지반은 한계상태이론에 기초한 수정 Cam-clay 모델을 사용하였다.

Keywords : Area replacement ratio, Centrifuge model test, Sand compaction pile, Stress concentration ratio

1. 서 론

최근 연약지반상에 대형구조물을 시공하는 경우가 증가추세에 있으며 지진시 관성력이나 파도에 의한 파

압 등 큰 수평력을 받는 항만구조물을 축조하기 위해 연약지반을 모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile)으로 개량하려는 설계 및 시공이 활발하게 진행되고 있다. 이러한 연약 점성토 지반에 타설된 SCP공법은 모래말

1 정회원, 강원대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Kangwon National Univ.)

2 정회원, 강원대학교 토목공학과 연구원 (Member, Researcher, Dept. of Civil Eng., Kangwon National Univ., bspark84@kangwon.ac.kr)

3 정회원, 강원대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Kangwon National Univ.)

4 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 (Member, Samsung Corp.)

5 정회원, 삼성중공업(주) 건설사업부, 차장 (Member, Samsung Heavy Industries co., Civil Construction Div., Deputy General Manager)

뚝과 점토지반이 복합지반을 형성하여 지반의 전단강도와 지지력이 증대되며, 측방변위억제, 압밀침하 감소 등의 효과가 발생되고 있다. SCP공법은 1955년 일본에서 특허권을 등록한 일에서 시작되어 충격식 모래다짐말뚝 개발, 진동기 개발등의 과정을 거쳐 현재의 SCP공법의 기초가 확립되었다.

국내의 경우 1984년 광양제철소 기초지반 조성시 샌드드레인과 SCP공법을 병용하여 연약지반개량을 실시한 이래(해양수산부, 1999) 최근의 경우 모래다짐말뚝공법이 호안 안벽 시설물의 효과적인 기초 처리 공법으로 제시되고 있다. SCP공법은 국외, 특히 일본에서 많은 연구 성과가 발표되었는데 Kimura 등(1983)은 원심모형실험기를 이용한 실내모형실험으로부터 개량폭과 개량심도, 파괴메카니즘의 관계를 검토하였으며 Masaaki 등(1990)은 저치환율로 개량된 복합지반에 대하여 개량폭과 재하속도, 상대밀도를 변화시킨 원심모형실험을 실시하여 복합지반의 파괴거동을 연구 발표하였다.

한편, SCP가 타설된 복합지반의 설계에 있어서 중요한 요소는 치환율에 따른 응력분담비를 결정하는 것으로 Aboshi 등(1970)은 대형삼축시험을 실시하여 응력분담비는 압밀이 진행함에 따라서 커지며 압밀완료시 응력분담비는 4~7의 범위값을 나타낸다고 하였으며, Yamagachi 등(1977)은 복합지반에서 모래말뚝주위의 점토지반 상태에 따라 응력분담비를 구하는 방법을 제안하여 하중이 증가함에 따라 3~7의 값을 나타낸다고 하였다. Matsuo(1968)는 점성토 미개량 지반과 모래말뚝에 의한 복합지반의 압밀시험을 실시하여 모래말뚝의 응력분담과 압밀촉진효과를 발표하였다. 복합지반은 하중재하시 전단변형과 압밀변형으로 인한 응력집중이 복합하여 압밀이 진행됨에 따라 응력분담이 달라지며, 응력분담에 미치는 영향 인자가 불명확하기 때문에 현재 설계시 응력분담비는 실제 현장경험에 의존하여 2~6(보통 3)범위 안에서 결정하고 있는 실정이다(해양수산부, 1999).

국내에서는 Shin 등(1991)은 제철소 건설시 SCP공법의 타당성을 검증하기 위한 현장실험을 실시하여 SCP공법 적용후 표준관입시험을 통하여 전단강도가 크게 증가함을 확인하였으며, 김병일 등(2000)은 수치해석을 통하여 치환율에 따른 응력분담비의 변화를 알아보았다. 김재권 등(2002)은 실내모형실험을 통하여 치환율에 따라 응력분담비가 증가하는 것을 규명하였으며 홍

의준 등(2003)은 복합지반에 대한 3차원 수치해석을 통하여 치환율이 증가함에 따라 응력분담비가 증가하고 침하량은 감소하는것을 발표하였다.

현재 국내에서는 항만공사 등에서 안전측으로 70% 이상의 고치환율 SCP공법으로 설계 및 시공이 이루어지고 있는 실정으로 모래자원의 부족현상으로 인한 모래자원의 경제성을 극복하기 위하여 저치환율 SCP공법으로 대체가 요구되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 모래자원의 부족에 따른 경제성과 하중재하폭에 대한 개량폭의 적정범위 등을 규명하기 위하여 SCP의 치환율과 200번체 통과량의 세립분 함유량, 하중재하폭에 대한 지반개량폭비를 변화시킨 광범위한 매개변수적 원심모형실험과 수치해석을 실시하여 하중-침하특성, 응력분담비, 파괴메카니즘 등 전반적인 복합지반의 거동을 비교 분석하고자 하였다.

2. SCP공법의 응력분담비와 치환율

SCP공법에 의해 개량된 복합지반에 하중이 작용할 경우 그림 1과 같이 변형이 작은 모래말뚝에 원지반보다 큰 응력이 집중하게 되고 연약층이 그 나머지를 분담하게 되며, 이 응력의 비를 응력분담비(n)라 하며 식 (1)과 같이 정의 할 수 있다.

$$n = \frac{\sigma_s}{\sigma_c} \quad (1)$$

여기서, n : 응력분담비

σ_s : 모래말뚝내의 유효상재압

σ_c : 점성토 지반내의 유효상재압

여기서, 복합지반에 하중이 작용할 때 평균응력은 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

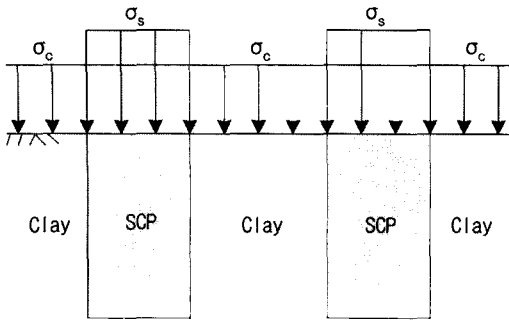
$$\sigma(A_s + A_c) = \sigma_s A_s + \sigma_c A_c \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_s \left(\frac{A_s}{A_c + A_s} \right) + \sigma_c \left(\frac{A_c}{A_c + A_s} \right) \\ &= \sigma_s a_s + \sigma_c \left[\frac{(A_c + A_s) - A_s}{A_c + A_s} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

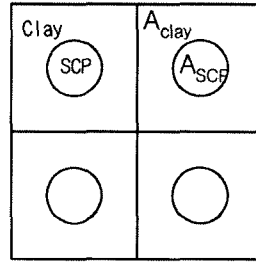
여기서, σ : 평균응력

a_s : 치환율

A_s : 모래말뚝단면적

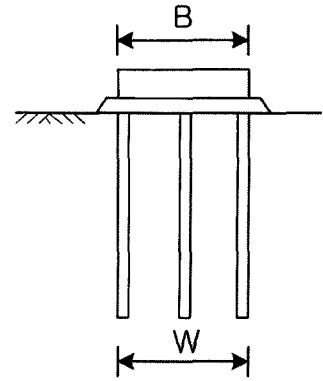


응력분담비



$$a_s = \frac{A_{SCP}}{A_{Clay}}$$

치환율



개량폭비=W/B

그림 1. SCP공법의 응력분담비, 치환율, 개량폭비

A_c : 점토의 분담면적

한편, 그림 1에 도시한 바와 같이 치환율(a_s)은 SCP와 점토지반의 면적비를 나타내며 개량폭비(W/B)는 하중재하폭과 지반개량폭의 비를 나타낸다.

3. 실내실험

SCP공법은 점토와 모래말뚝의 복합지반으로 형성되어 있기 때문에 모래말뚝의 강도, 치환율(a_s), 개량폭비, 기초와 개량범위의 위치관계, 모래말뚝의 선단부지지 지반조건, 원지반의 강도분포, 외력조건, 압밀조건, 하중의 재하속도, 대상구조물의 종류와 기하학적 형상 등 다양한 요인에 의해 영향을 받으나 본 연구에서는 상기의 제 요인중에서 모래말뚝의 No.200체 통과 비소성 세립분 함유량, 개량폭비(W/B), 치환율 등을 달리하여 중력가속도 50G로 원심모형실험을 실시하였고 실험내용을 표 1에 나타내었다.

표 1. 원심모형 실험내역

| 치환율(%) | 세립분 함유량(%) | 개량폭비 (W/B) | 중력수준 | 비고 |
|--------|------------|------------|------|----|
| 20 | 5 | 2 | 50G | |
| 40 | 5 | 2 | 50G | 기준 |
| 70 | 5 | 2 | 50G | |
| 40 | 10 | 2 | 50G | |
| 40 | 15 | 2 | 50G | |
| 40 | 5 | 1 | 50G | |
| 40 | 5 | 3 | 50G | |

3.1 원지반 및 모래다짐말뚝의 성형

모형지반에 사용된 시료는 부산인근에서 채취한 해성점토로서 기본물성은 표 2에 나타난 바와 같고, 시료를 액성한계 2배의 함수비로 교반시켜 압밀토조(폭 45 cm, 길이 20 cm, 높이 40 cm)에 투기한 후, 압밀토조 상부에 4.9, 9.8, 19.6 kN/m²의 공기압력을 단계적으로 가하여 7일 정도 예비압밀을 실시하여 예비압밀 완료 후 20 cm 높이의 원지반을 조성하였다.

모래다짐말뚝은 원통형 관(내경 2 cm)에 일정한 함수비의 주문진 표준사를 투입하여 진동대 위에서 90%의 상대밀도를 갖는 모래말뚝을 만든 후 물로 포화시켜 동결하였다. 한편, 모래말뚝의 세립분 함유량은 200번체를 통과한 실리카 세립분을 이용하여 조절하였다.

3.2 복합지반의 성형 및 계측기 설치

복합지반은 예비압밀이 종료된 원지반을 탈착하여 원심모형토조에 부착한 후 50G의 원심력장에서 지중압밀을 실시하여 실물규모 10 m에 상당하는 높이 약 20

표 2. 주문진 표준사와 점토의 기본물성

| 구 분 | | 주문진표준사 | 점토 |
|------|-------|--------|------|
| 비 중 | G_s | 2.60 | 2.72 |
| 액성한계 | LL, % | NP | 43.0 |
| 소성한계 | PL, % | NP | 23.6 |
| 소성지수 | PI, % | NP | 19.4 |
| 균등계수 | C_u | 1.2 | 12.5 |
| 곡률계수 | C_c | 1.0 | 3.6 |
| 통일분류 | USCS | SP | CL |

cm의 정규압밀 점토지반을 제작하였으며 이때, 점토층 중심부에 간극수압계를 매설하여 과잉간극수압의 소산을 확인하였다.

자중압밀 종료 후 1G상태에서 모래말뚝을 타설한 후, 하중재하시 기초 및 지반에 발생하는 연직변위량 및 수평 변위량을 측정하기 위하여 변위계를 설치하였고, 모래말뚝과 점토지반의 응력분담비를 알아보기 위하여 모래다짐말뚝과 점토지반의 표면에 직경 6.5 mm의 토압계를 매설하는 한편, 점토층 중간 깊이에서 개량지반의 바깥방향으로 부터 1 cm, 4 cm, 9 cm 위치에 간극수압계를 매설하여 위치별 과잉간극수압 변화를 측정하였다. 한편, 연직하중 재하에 따른 모형지반의 활동선을 관찰하기 위하여 원심모형실험기에서 자중압밀 완료 후 모형토조의 전면 벽체를 탈착하여 일정 격자상에 Marker를 매설하여 활동선을 관찰하였다.

3.3 연직하중 재하장치

연직하중의 재하는 그림 2에 도시한 바와 같이 연직하중 계측용 로드셀(Load Cell)을 매개체로 하여 하중재하장치 로드케에 강결하여 재하중 발생하는 재하판의 회전 및 수평변위를 구속하고 있는 하중재하장치를 사용하여 2 mm/min.으로 하중을 재하하였다. 하중재하판은 하중

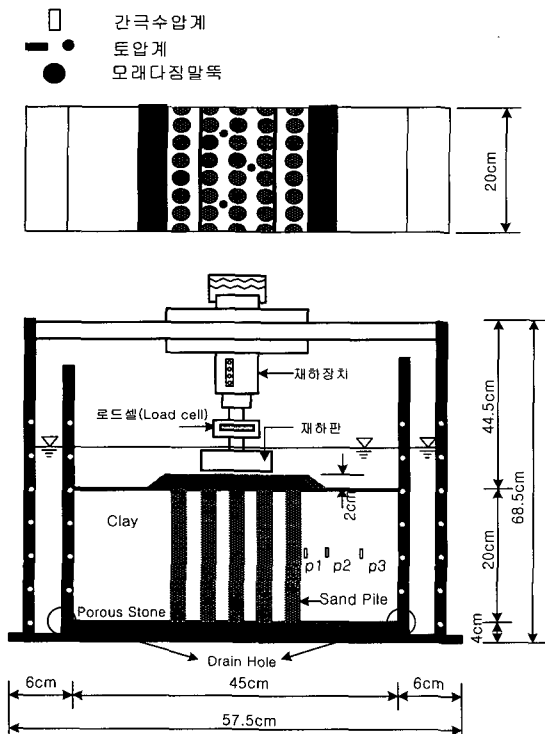


그림 2. 연직하중 재하시험 모식도

재하시 토조바닥면에 영향이 미치지 않도록 지반높이의 약 1/3에 해당하는 폭 7 cm의 알루미늄 재질의 모형 강성 기초를 사용하여 저면을 거칠게 만들고 개량지역 중앙의 3열의 모래말뚝을 재하하는 위치에 설치하였다.

4. 수치해석

모래다짐말뚝이 타설된 복합지반의 거동을 규명하고 원심모형실험결과를 비교 분석하기 위하여 수치해석을 실시하였다. 수치해석은 범용 지반해석 FEM 프로그램인 SAGE CRISP(2000) 프로그램을 이용하여 실시하였다. CRISP 프로그램은 Cambridge 대학에서 개발된 유한요소 프로그램으로 국내외에서 연약점토지반의 압밀 거동 해석에 많이 사용되고 있다.

4.1 복합지반의 유한요소 모델링

복합지반에 대한 수치해석은 그림 3의 흐름도에 나타

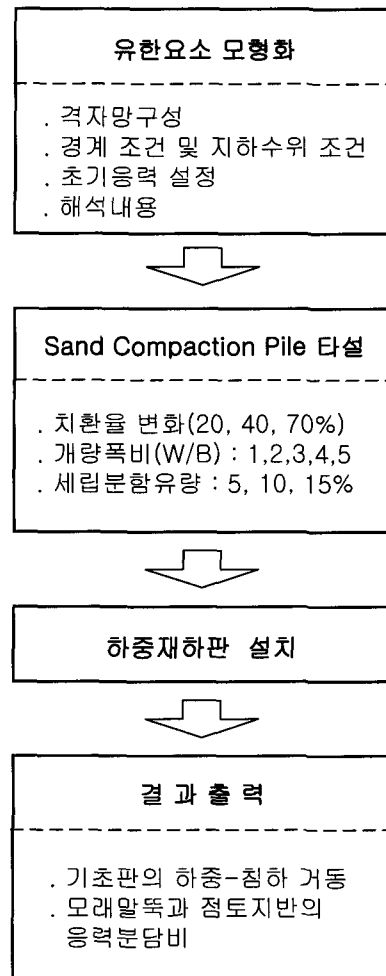


그림 3. 수치해석 흐름도

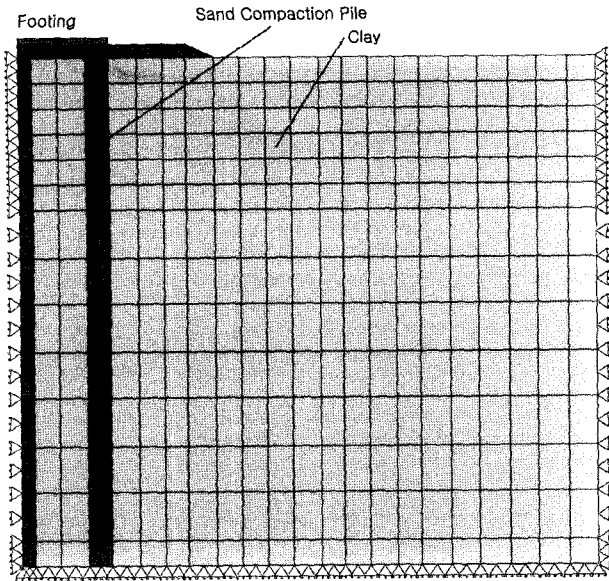


그림 4. 유한요소 격자망(치환율 40%)

낸 바와 같이 지반의 범위와 물성치, 지하수위 및 변위 경계조건, 지반의 초기응력 등을 설정한 후, 치환율을 고려한 SCP를 설치하고 하중을 재하하여 점토지반과 SCP에 발생하는 응력과 하중-침하 관계 등을 정리하였다. 그림 4는 대표적으로 치환율 40%에 대하여 수치해석에 사용된 유한요소 격자망과 변위경계조건을 나타낸 것으로 그림에 나타낸 바와 같이 원심모형실험 결과를 비교하기 위한 수치해석은 2차원 평면변형 조건으로 해석을 수행하였으며, 모형지반의 좌우 대칭성을 이용하여 모형토조의 1/2만을 격자로 구성하여 해석하므로써, 컴퓨터의 메모리와 계산시간을 단축시켰다. 유한요소격자망은 358절점 320요소로서 모형지반의 좌·우측은 수평변위를 구속하였으며 바닥면은 연직변위를 구속하였다.

또한, 지반의 지표면에 수위가 위치하는 것으로 하였고, 양면배수조건으로 해석을 수행하였다.

4.2 모델 입력매개변수 선정

모래말뚝으로 사용된 주문진 표준사의 구성모델은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 압밀배수(CD)의 삼축압축시험을 실시하여 이 모델의 매개변수인 탄성계수(E)와 포아송비(ν), 내부마찰각, 점착력등의 값을 구하였다. 해석에 사용된 탄성계수값은 그림 5에 나타낸 바와 같이 삼축압축시험으로부터 평균유효주응력-탄성계수값을 회귀분석하여 초기지반의 응력상태, $p = \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{3}$ 에 상응하는 값을 구하여 사용하였다.

해석에 사용된 모래다짐말뚝의 매개변수들을 표 3에

표 3. SCP의 Mohr-Coulomb 모델 변수값

| 변수 | 내용 | 값 | |
|--------------------|-------|--------------|-----------|
| E_o (kN/m^2) | 탄성계수 | No.200 = 5% | 9.48E+03 |
| | | No.200 = 10% | 10.41E+03 |
| | | No.200 = 15% | 14.47E+03 |
| ν | 포아송비 | 0.3 | |
| c_o (kN/m^2) | 점착력 | 0 | |
| ϕ | 내부마찰각 | 43 | |

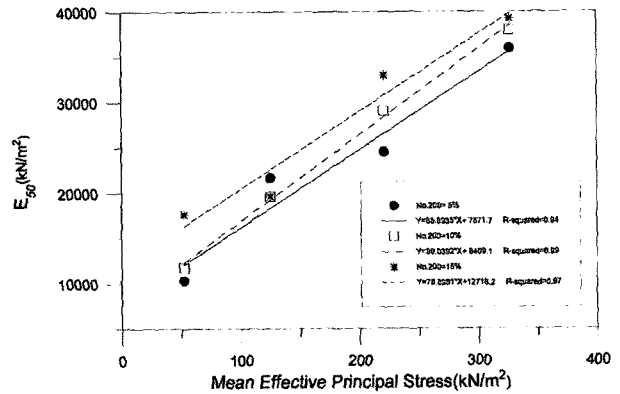


그림 5. 평균유효주응력에 대한 모래의 탄성계수 변화

표 4. 점토의 수정 Cam-clay 모델 변수값

| 변수 | 내용 | 값 |
|-----------|--|--------|
| λ | $\nu - \ln p$ 공간의 압축지수 | 0.226 |
| κ | $\nu - \ln p$ 공간의 팽창지수 | 0.0422 |
| e_{cs} | $\nu - \ln p$ 공간에서 $p'=1kPa$ 일때 한계상태선의 간극비 | 2.233 |
| M | $q-p$ 공간에서 한계상태선의 기울기 | 0.941 |
| ν | 포아송비 | 0.3 |

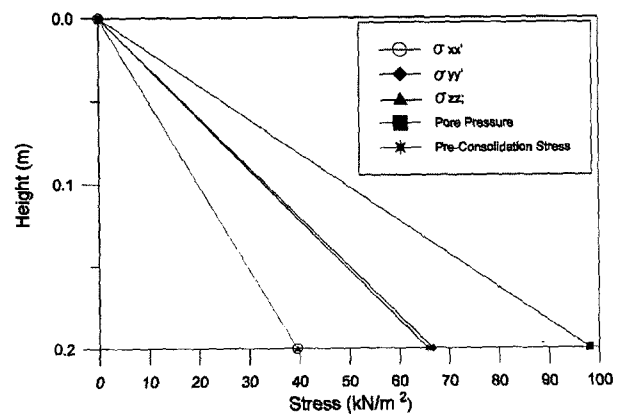


그림 6. 초기응력 분포

나타내었다.

한편, 연약점토지반은 Roscoe와 Burland(1968)등이 제안한 수정 Cam-clay 모델을 사용하였다. 표준압밀시

험 및 압밀비배수(CU)의 삼축압축시험으로부터 구한 모델의 변수값은 표 4에 나타내었으며 지반의 초기연직 유효응력, 수평유효응력 등을 그림 6과 같이 가정하여 입력하였다.

5. 결과분석

5.1 모래다짐말뚝의 치환율 변화

모래다짐말뚝의 비소성 세립분 함유량 5%, 개량폭비 (W/B)가 2일때를 기준으로 치환율을 20, 40, 70%의 3가지로 변화시킨 원심모형실험과 수치해석 결과를 바탕으로 하중-침하 특성, 응력분담특성에 대한 분석을 실시하였다.

5.1.1 하중-침하 특성

치환율을 변화시킨 원심모형실험과 수치해석의 하중-침하곡선을 그림 7에 나타내었다. 그림에 보여진 바와 같이 치환율 20, 40%에 대한 실험결과와 수치해석 결과가 아주 좋은 일치를 보였다. 그러나, 치환율 70%에 대한 것은 침하량이 0.4 mm 이후 수치해석과 실험값에 많은 차이를 나타내었는데 이러한 이유는 실험시 70%의 높은 치환율로 인하여 말뚝 중심간 간격이 좁아짐에 따라 말뚝을 간격별로 타설하지 못하고 치환율을 고려한 강제치환으로 지반을 개량하였기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 실험에서 획득한 항복하중강도를 보면 치환율이 20, 40, 70%에 대하여 각각 37.3, 46.1, 99.7 kN/m^2 로 나타나 70% 치환율에서 항복하중값이 급격하게 증가하였음을 알 수 있다. 여기서, 항복하중값은 그림 8과 같이 하중(P)-침하(s) 곡선의 값을 Log P-Log

s의 관계로 도시하여 변곡점을 구한 결과이다.

치환율을 변화시킨 원심모형실험결과, 실험결과와 수치해석 모두 치환율이 증가함에 따라 항복지지력값도 증가하였고, 초기탄성영역의 기울기도 증가하는 것으로 나타났다.

5.1.2 응력분담특성

그림 9에 침하량에 따른 SCP 및 점토지반의 수직응력의 변화를 도시하였다. 수직응력은 SCP 및 점토의 상부에 설치한 토압계를 이용하여 측정하였고 샌드매트에 의한 초기응력은 제외하여 순수하게 상재하중의 재하에 의해 발생한 응력을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 SCP의 경우는 지반의 침하와 함께 점진적으로 토압이 증가하는 것으로 나타났고 치환율 40% 일때 점토의 경우는 그 증가 정도가 작고 치환율 20%에서는 초기 12mm의 침하발생시 까지만 증가 할 뿐 그 후로는 약간 감소하고 있다. 이는 점토지반이 소성항복 상태에 도달하여 더 이상의 응력을 분담하지 못했기 때문인 것으로 판단된다.

그림 10에 치환율에 따른 침하-응력분담비 곡선을 도시하였다. 그림에 보여진 바와 같이 치환율 40%의 결과는 실험과 수치해석 결과가 잘 일치하였으나 치환율 20%는 많은 차이를 나타내었다. 실험으로부터 얻은 응력분담비는 치환율 40%일 때 약 2.5~5.5의 범위로 분포하였고 치환율 20%에서는 약 1.2~3.0정도로 치환율이 40%인 경우가 치환율 20%에 비하여 응력분담비가 크게 산정되었으나 침하량이 30mm를 넘어서는 치환율 20%인 경우가 더 큰 응력분담비가 산정되었다. 한편, 치환율이 40%인 경우 지반 침하에 따라 응력분담비가 점진적으로 감소하고 있으나 치환율이 20%인 경우는

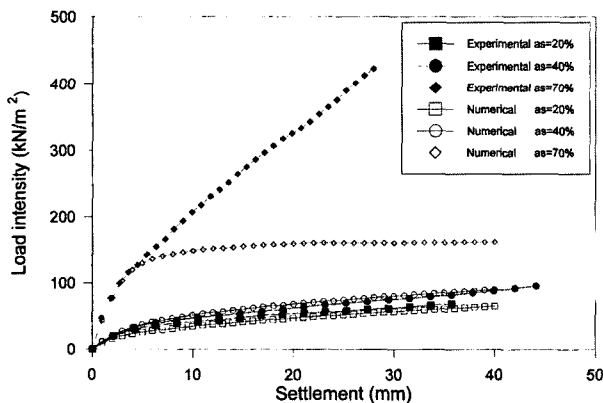


그림 7. 치환율 변화에 대한 하중-침하 곡선

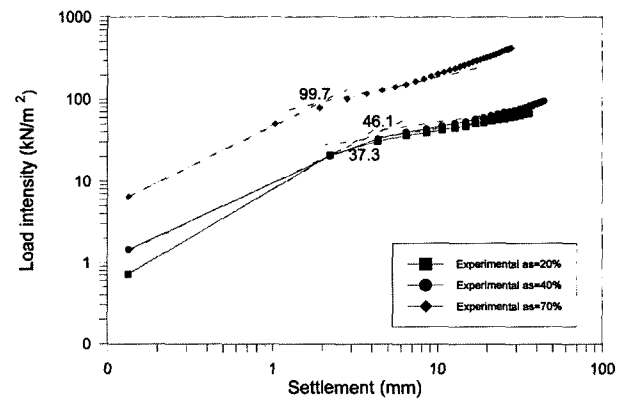


그림 8. 치환율 변화에 대한 항복하중값의 결정

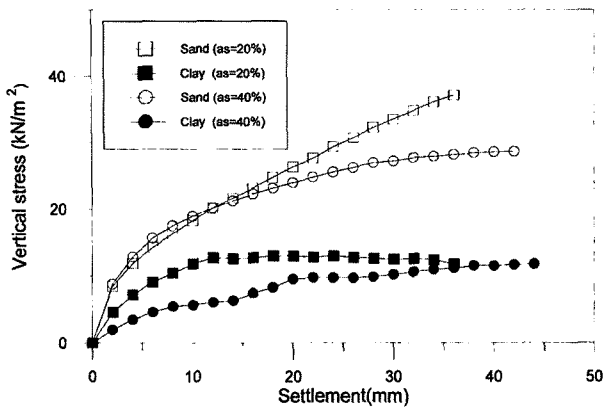


그림 9. 치환율에 따른 모래와 점토에 작용하는 토압

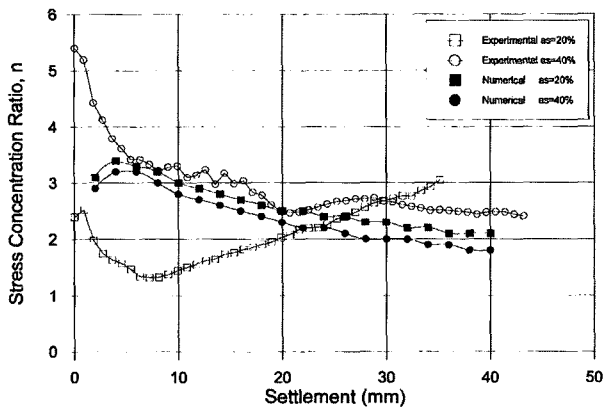


그림 10. 치환율에 따른 침하-응력분담비 곡선

침하량 8mm 부근 까지만 감소하고 그 이후로는 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 치환율 40%의 실험 결과와 같이 일반적으로 지반의 침하에 따라 응력분담비 값이 점진적으로 감소하는 것으로 보고된 바 있는데 (Kang 등, 2004), 이와 같은 경향은 SCP 복합지반이 항복에 도달한 이후 응력의 일부가 아직 항복이 발생하지 않은 점토지반으로 전이되어 점토의 수직응력이 증가하기 때문이다. 그러나 본 연구에서 관찰된 치환율 20%인 경우는 이와는 반대의 경향으로 그림 9에서와 같이 치환율 20%일때 점토지반의 수직응력은 12mm의 지반 침하 이후로는 소성항복이 발생하여 약간 감소할 뿐 거의 일정하게 유지하는데 비하여 SCP의 수직응력은 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

5.2 모래다짐말뚝의 세립분 변화

세립분을 다량 포함하고 있는 모래에 대한 모래다짐말뚝 재료로서의 적용성을 알아보기 위하여 치환율 40%, 개량폭비 2에 대하여 모래의 No.200체 통과량을 5, 10,

15%로 변화시켜 실험을 실시한 후 수치해석을 통하여 하중-침하특성, 응력분담비 등에 대한 복합지반의 거동을 분석하였다.

5.2.1 하중-침하 특성

그림 11에 No. 200번체 통과량의 비소성 세립분을 5, 10, 15% 변화시킨 원심모형 실험결과를 수치해석 결과와 비교하여 도시하였다. 수치해석과 마찬가지로 실험시 획득한 항복하중강도는 세립분 함유량이 5, 10, 15%로 증가함에 따라 각각 46.1, 60.8, 78.5 kN/m²로 나타나 지지력이 증가하는 것으로 나타났으며 하중-침하 곡선의 초기접선기울기 또한 급하게 증가하였다.

이렇게 세립분 함유량이 증가할수록 극한지지력 값이 증가한 이유는 세립분 함유량 5, 10, 15%에 대한 삼축압축시험 결과 내부마찰각이 42~47°, 43~46°, 44~47°로 각각 나타나 세립분이 증가할수록 내부마찰각이 증가하였고, 초기탄성 기울기 또한 증가하였기 때문에 세립분에 의한 간극의 충전효과와 입자의 역맞물림(Interlocking)에 의한 모래말뚝의 전단강도 증가에 의해 극한지지력이 증가한 것이다.

그러나, 본 연구는 모래말뚝의 재료로서 입자가 균등한 주문진표준사를 사용하였기 때문에 이 연구결과는 제한적으로 사용되어야 할 것으로 판단되며, 일반 강모래와 같이 입도가 양호한 모래에서의 세립분 함유율에 따른 추가적인 연구가 요구된다.

5.2.2 응력분담특성

세립분 함유량 5, 15%에 대한 모래다짐말뚝과 점토지반의 침하-응력분담비 곡선을 그림 12에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 원심모형실험에 의한 결과는

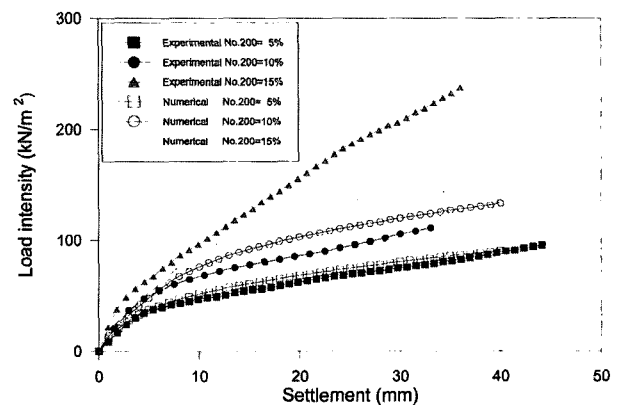


그림 11. 세립분 함유량에 따른 하중-침하 곡선

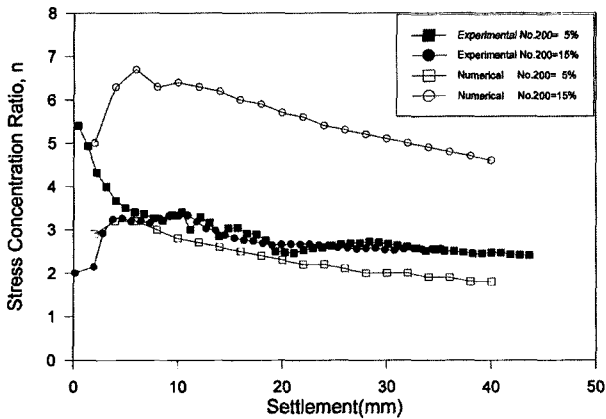


그림 12. 세립분 함유량에 따른 침하-응력분담비 곡선

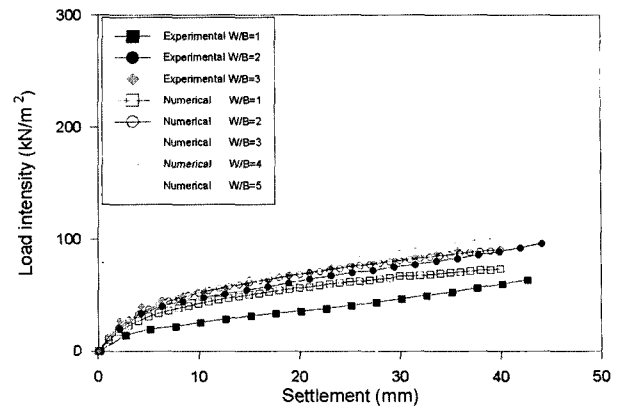


그림 13. 개량폭비에 하중-침하 곡선

초기값을 제외하고는 세립분 함유량에 따라 응력분담비의 변화가 거의 유사한 값으로 나타났으나 수치해석에 의한 결과를 살펴보면 세립분 함유량이 5, 15%에 대하여 응력분담비는 약 1.5~3.5, 5~6.5의 범위로 각각 나타나 세립분 함유량이 증가할수록 응력분담비는 증가하는 것으로 나타났는데 이러한 결과 또한 세립분이 증가할수록 모래말뚝의 강성이 증가되었기 때문에 모래말뚝에 응력의 집중된 것이다. 한편, 세립분 함유량이 5%의 경우는 수치해석과 실험에 의한 응력분담비 값의 범위가 유사하게 나타났으나 세립분 함유량이 15%일 때는 수치해석에 의한 응력분담비 값이 매우 크게 나타났는데 이는 세립분 함유량 15%일때의 SCP의 탄성계수 값이 점토에 비하여 상대적으로 크게 입력된 것에 기인된 것으로 판단된다.

5.3 모래다짐말뚝의 개량폭비에 따른 재하실험

모래다짐말뚝의 치환율 40%, 세립분 함유량 5%을 기준으로 하여 개량폭비(W/B)를 1, 2, 3으로 변화시킨 원심모형실험과 개량폭비(W/B)를 1, 2, 3, 4, 5의 5가지로 변화시킨 수치해석을 실시하였다. 이러한 해석결과를 가지고 하중-침하 특성, 응력분담특성등에 대한 복합지반의 거동 분석하였다.

5.3.1 하중-침하 특성

모래다짐말뚝의 개량폭비를 변화시킨 원심모형실험과 수치해석결과를 비교하여 하중-침하 곡선을 그림 13에 나타내었고 이에 해당하는 항복하중강도 값을 표 5에 요약하였다. 원심모형실험과 수치해석 결과 모두 개량폭비가 증가할수록 극한지지력이 증가하는 것으로

표 5. 개량폭비에 따른 복합지반의 항복하중강도

| 개량폭비(W/B) | 항복하중강도 (kN/m^2) | | | | |
|-----------|---------------------|------|------|------|------|
| | 1B | 2B | 3B | 4B | 5B |
| 실험 | 22.6 | 46.1 | 49.0 | - | - |
| 수치해석 | 34.3 | 46.1 | 48.1 | 50.0 | 51.0 |

나타났다. 원심모형실험결과에 따르면 개량폭비를 1B에서 2B로 개량하였을 때 항복지지력은 $22.6 kN/m^2$ 에서 $46.1 kN/m^2$ 로 약 100% 증가하였으나 2B에서 3B로 증가하였을 때는 $46.1 kN/m^2$ 에서 $49.0 kN/m^2$ 로 약 5% 정도 증가하는데 그쳤다.

또한 수치해석결과도 1B에서 2B로 개량하였을 때 약 35% 정도 지지력이 증가하였으나 3B, 4B, 5B로 개량하였을 때는 극한지지력이 미소하게 증가하였다. 이러한 결과는 개량폭 2B를 전후하여 최대의 개량효과를 얻어진다고 한 Kimura 등(1985)에 의한 연구결과와 일치하는 것으로 그의 타당성을 확인할 수 있었다. 또한 재하 종료시의 재하판의 침하량은 40 mm 전후이며 침하량 3~5 mm에서 항복 하중에 도달하였다.

5.3.2 응력분담특성

그림 14에 개량폭비(W/B) 1, 2, 3의 변화에 대한 침하량-응력분담비 곡선을 나타내었다. 수치해석 및 실험결과에 대한 전반적인 경향성은 침하량과 하중이 증가함에 따라 응력분담비는 감소하는 경향성을 보여주고 있다. 실험결과 개량폭비(W/B)가 커질수록 응력분담비는 증가하며 개량폭비에 따라 항복하중강도를 나타내는 침하량 3~4 mm에서의 응력분담비는 3.5~3.9의 범위를 분포하고 있다. 또한, 개량폭비에 따른 하중-침하 곡선의 변화와 함께 항복하중시점 이후 응력분담비는 점차 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

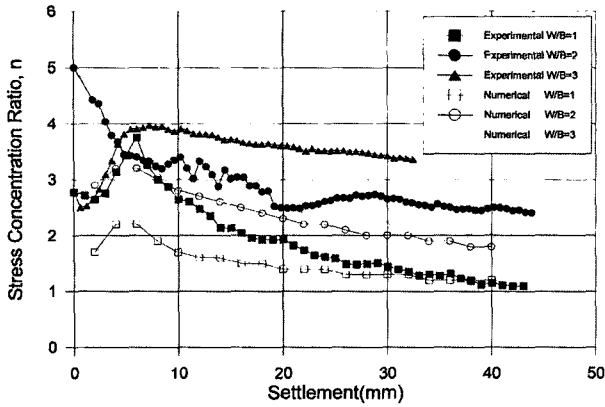


그림 14. 개량폭비에 따른 침하량-응력분담비 곡선

한편, 항복하중시점 이후 응력분담비의 감소는 모래 말뚝의 항복 이후 점토로 응력분산이 이루어진 것으로 판단되며, 항복하중 이후 큰 침하를 유도하여 응력분담비의 분포를 관찰한 결과 응력분담비는 1~3.5의 범위에 분포하였고, 항복하중 시점에서의 응력분담비와 큰 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 또한, 개량폭비(W/B)의 증가에 따른 응력분담비의 증가는 개량폭에 따른 말뚝 간 점토의 수평구속력에 의한 모래말뚝의 수평저항력이 증가하여 말뚝의 응력집중효과가 증가하므로써 항복하중시점 이후 개량폭이 증가할수록 응력분담비가 크게 분포하는 것으로 판단된다.

5.4 과잉간극수압 특성

복합지반에 매설한 간극수압계(PPT)의 위치는 그림 2에 나타낸 바와 같이 가장 우측에 타설된 모래말뚝으로부터 1 cm(PPT1), 4 cm(PPT2), 9 cm(PPT3) 위치에 해당되는 곳으로 총 3개를 매설하였다.

그림 15, 16은 치환율 20, 40%, 개량폭비(W/B) 2일 때 하중재하시의 과잉간극수압-하중 곡선으로 그림에 보여진 바와 같이 재하판의 중심에 가까운 간극수압계 PPT1이 PPT3보다 크게 측정되었다. 또한, PPT2와 PPT3은 하중의 증가와 거의 같은 비율로 상승하고 있는 것으로 나타나 하중의 재하를 시작할때부터 종료시까지 점토지반은 비배수조건에 있음을 알 수 있다. 그러나, 모래다짐말뚝에 가장 가까운 곳에 매설된 간극수압계 PPT1은 항복하중의 시점에서 간극수압이 증가하지 않았음을 나타내어 하중재하시 배수조건에 있었다는 것을 알 수 있다.

그림 17은 치환율 70%일 때 하중재하시의 과잉간극수압-하중 곡선을 보여주고 있다. 실험결과 모래다짐말

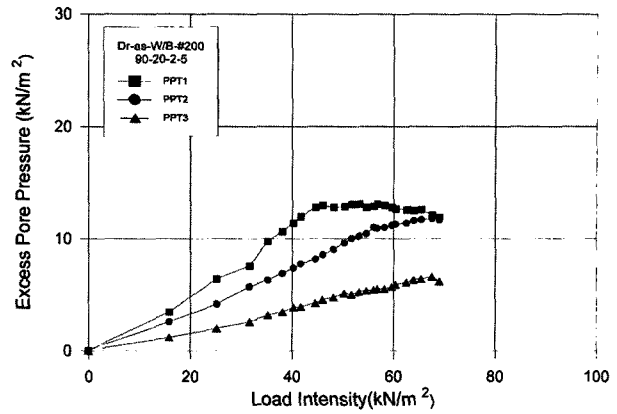


그림 15. 위치별 과잉간극수압-하중 곡선($a_s=20\%$, W/B=2, No.200 =5%)

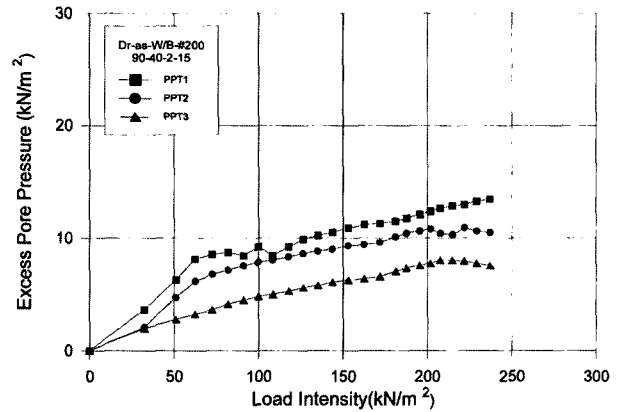


그림 16. 위치별 과잉간극수압-하중 곡선($a_s=40\%$, W/B=2, No.200 =15%)

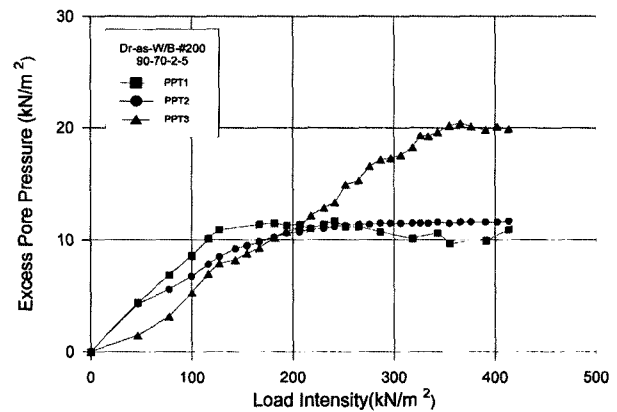


그림 17. 위치별 과잉간극수압-하중 곡선($a_s=70\%$, W/B=2, No.200 =5%)

뚝으로부터 가장 먼곳에 매설된 간극수압계 PPT3은 하중증가와 함께 거의 같은 비율로 과잉간극수압이 상승한 것으로 측정되어 비배수 조건에 있는 것을 알 수 있으며, 모래말뚝에 가까운 곳에 매설된 PPT1, PPT2는 항복하중 시점에서 급격한 간극수압의 감소를 나타내고

있다. 이와 같이 급격한 간극수압의 감소는 70%의 높은 치환율에 따라 배수효과를 증가시켜 점토지반의 압밀에 의한 강도증진 효과를 한층 높여주는 것으로 판단된다.

한편, 각각의 실험조건에 대한 하중재하시 과잉간극수압의 전체적인 경향을 살펴보면, 말뚝부근의 과잉간극수압(PPT1)은 하중증가와 함께 증가하다 항복 하중의 시점에서 간극수압의 증가가 보이지 않으며, 말뚝 바깥부분의 과잉간극수압(PPT2, PPT3)은 하중증가와 거의 같은 비율로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 여기서, 말뚝부근의 점토지반은 배수조건에 있다는 것을 알 수 있으며, 말뚝 바깥부분의 점토지반은 완전 비배수 조건에 있는 것을 확인 할 수 있다. 한편, 복합지반의 압밀에 의한 강도증진효과를 분석하기 위해서는 완전 배수 조건에서 완속재하시험을 수행하여야 하며, 완전배수조건에 해당하는 재하속도를 적절히 선정해야 할 것이다.

5.5 지반변형 및 파괴메카니즘

그림 18, 19는 연직재하시험시 큰 변형을 유도한 후



그림 18. 파괴형태($a_s=40\%$, $W/B=2$, No.200=5%)

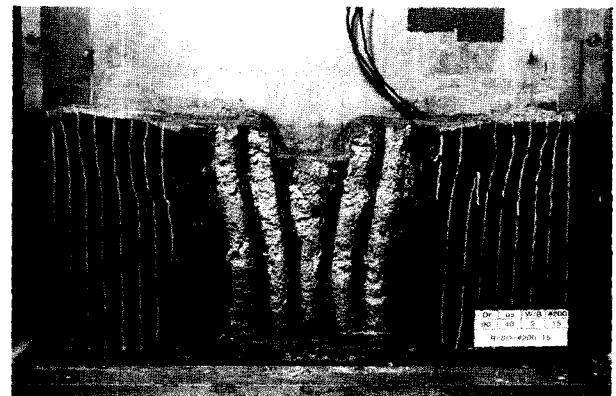


그림 20. 파괴형태($a_s=40\%$, $W/B=2$, No.200=15%)



그림 19. 파괴형태($a_s=40\%$, $W/B=2$, No.200=10%)

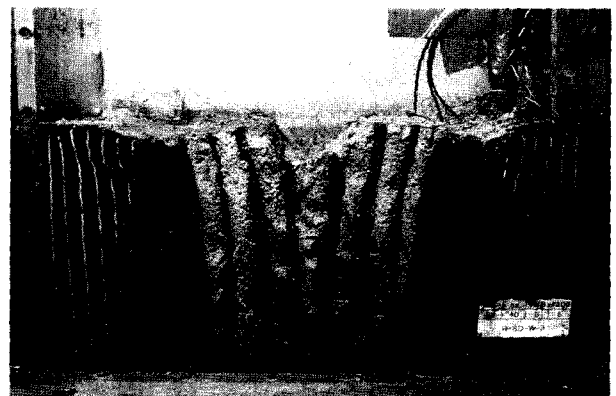


그림 21. 파괴형태($a_s=40\%$, $W/B=3$, No.200=5%)

모형토조를 해체하여 모형지반 중앙의 모래말뚝의 파괴상태를 나타낸 것으로, 재하판 아래 모래말뚝 상부로부터 $2D \sim 2.5D$ (D =말뚝직경) 깊이에서 말뚝의 명료한 전단면이 나타나고 있다. 또한, 재하판 외측의 좌우 각각 2열의 모래말뚝은 수평방향으로 변형하고 있지만 원형활동은 발생하지 않았으며, 말뚝상부를 기준으로 말뚝길이의 2/3정도 즉, 상부로부터 $6D \sim 6.5D$ 부근에서 수평변위가 시작되는 것을 볼 수 있다. 이와같이 과다수평변위의 발생은 하중재하시 재하판이 복합지반의 파괴시점을 지나 깊이 40 mm 정도의 강제침하에 의한 원인으로 판단되며 수평변위의 크기는 $0.75D \sim 1.5D$ 정도로 발생하였다. 한편, 하중 재하시 강제 침하에 의한 재하판 주변에서 점토지반의 용기가 발생하였으며 모형토조의 전면판을 탈착 후 일정한 격자상의 Marker를 매설하여 점토지반의 활동선을 관찰한 결과 미세한 활동선의 진행을 관찰할 수 있었다.

한편, 그림 20, 21은 상기의 그림과 달리 모래말뚝의 명료한 전단면은 보이지 않았으며, 재하판 주변에서 점토지반의 용기발생과 모래말뚝의 전체적인 수평변위를

확인할 수 있었다. 또한, Marker에 의한 관찰결과 지반의 국부전단파괴를 관찰할 수 있었다. 이와같은 실험결과로부터 20~40%의 치환율을 SCP복합지반에서 파괴메카니즘은 팽창파괴(Bulging Failure)가 선행이 되고 점진적으로 활동파괴면의 진행에 따라서 국부전단파괴가 발생하는 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 SCP의 설계 및 시공에 중요한 요소인 지지력, 응력분담비, 파괴메카니즘 등에 미치는 영향을 알아보고자 SCP의 치환율, 비소성 세립분 함유량, 개량폭비를 변화시킨 일련의 원심모형실험과 수치해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) SCP의 치환율을 20, 40, 70%로 변화시킨 원심모형 실험과 수정 Cam-clay 모델의 점성토지반과 탄소성 모델의 SCP를 사용한 수치해석에 의한 하중-침하 곡선을 비교한 결과 좋은 일치를 보였으며, 두 결과 모두 치환율이 증가할수록 항복하중강도와 초기접선 탄성계수가 증가하였다.
- (2) SCP의 비소성 세립분 함유율이 증가할수록 지지력이 증가하는 것을 확인하였으며, 이것은 비소성 세립분에 의한 간극의 충전효과와 입자의 억몰입에 의한 모래말뚝의 강도증가에 기인한 것이다.
- (3) 개량폭비를 변화시킨 실험과 수치해석 결과 개량폭비가 증가함에 따라 SCP 보강지반의 지지력은 증가하는 경향을 보였으나, 개량폭비가 2일때 최대개량효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.
- (4) 수치해석결과 치환율의 변화에 따른 응력분담비의 변화는 치환율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었고, 모래말뚝에 집중되어 있는 응력이 모래말뚝의 항복으로 인하여 점성토 지반으로 응력이 전이됨에 따라 침하량이 증가할수록 응력분담비는 감소하는 경향을 나타내었다.
- (5) 비소성 세립분 함유량이 5, 15%로 증가할수록 응력분담비는 각각 1.5~3.5, 5~6.5의 범위로서 세립분 함유량이 증가할수록 응력분담비도 증가하는 경향을 나타내었으며 이는 SCP의 강성이 증가하였기 때문이다.
- (6) 재하시험 종료후 SCP와 점토지반의 파괴상태를 확인한 결과, 모래말뚝 상부로 부터 SCP직경의 2~2.5배 깊이에서 말뚝의 명료한 전단면이 발생하였으

며 Marker에 의한 점토지반에 발생한 활동선의 관찰결과 국부전단 파괴가 발생하였음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 삼성중공업(주) 건설사업부의 산학연구지원에 의해 실시된 연구성과의 일부이며 이에 감사를 표합니다.

참고 문헌

1. 김병일, 박용원, 윤길림, 조성환 (2000), "모래다짐말뚝(SCP)으로 개량된 연약지반의 유한요소해석", 대한토목학회논문집, 제20권, 제4-C호, pp.357-366.
2. 김재권, 홍의준, 김수일, 정상섭 (2002), "연약지반에 타입된 모래다짐말뚝의 하중-침하 특성", 대한토목학회논문집, 제22권, 제4-C호, pp.423-432.
3. 홍의준, 김재권, 정상섭, 김수일 (2003), "연성하중을 받는 모래다짐말뚝(SCP)의 거동분석", 한국지반공학학회논문집, 제19권 4호, pp.223-233.
4. 해양수산부 (1999), 대수심방파제 및 연약지반 관련기술(II), 해양수산부.
5. Aboshi, H., Yoshikuni, H., and Harada, K. (1970), "Ko-consolidation of clay with large sand pile", *The 5th Conf. of JSSMFE*, pp.397-400.
6. Kang, Y., Yun, J. Y., Chang, W. H., and Kim, H. T. (2004), "Evaluation of ultimate bearing capacity on granular compaction pile considering various stresses in a ground", *Jour. of KGS.*, 20(2), 115-124.
7. Kimura, T., Nakase, A., Saitoh, K., and Takemura, J. (1983), "Centrifuge tests on sand compaction piles improvement", *Proc. 7th ACSMFE*, (1), pp.225-260.
8. Kimura, T., Nakase, A., Kusakabe, O., and Saitoh, K. (1985), "Behavior of soil improved by sand compaction piles", *Proc. 11th International Conf. Soils and Foundations Journal*, Vol.2, pp. 1109-1112.
9. Masaaki, T., and Masaki, K. (1990), *Bearing capacity of clay ground improved by sand compaction piles of low replacement area ratio*, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.2, pp.119-147.
10. Matsuo, M., Inaba, N., and Teramura, M. (1968), *Research on bearing capacity of composite ground (part 1)*, Tsuchi to Kiso, Vol.16, No.12, pp.11-19.
11. Roscoe, K. H., and Burland, J. B. (1968), "On the generalized stress-strain behavior of wet clays", *Proc. of Eng., Plasticity*, Cambridge, Cambridge University Press, England, pp.535-609.
12. SAGE CRISP (2000), *User's guide and technical reference guide*, SAGE Engineering Ltd.
13. Shin, E.C., Shin, B.W., and Das, B.M. (1991), "Sand compaction piles for the construction of a steel mill complex", *GEO-COAST91*, pp.381-386.
14. Yamagachi, H., and Murakami, Y. (1977), "On stress distribution of composite ground", *The 11th Conf. of JSSMFE*, pp.543-546.

(접수일자 2004. 9. 14, 심사완료일 2005. 2. 14)