

슬래그 다짐말뚝으로 개량된 복합지반의 지지력 및 파괴메카니즘에 관한 원심모형실험

Centrifuge Model Test on the Bearing Capacity and Failure Mechanism of Composite Ground Improved with Slag 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 presents experimental and numerical research results of centrifuge model tests performed to investigate the geotechnical engineering behavior of slag compaction pile as a substitute of sand compaction pile. For centrifuge model tests, bearing capacity of composite soil improved with slag compaction piles, stress concentrations in-between pile and soft clay, settlement characteristics, and failure modes were investigated with slags differing in their relative density. A slag was found to be a good substitute for a sand since the slag compaction pile model showed a greater yield stress intensity up to 30% than the sand compaction pile model under the identical testing conditions. Stress concentration ratio tended to increase with the relative density of slag pile and the clear shear lines in the piles were observed at the depth of $2D \sim 2.5D$ (D =dia. of model pile) from the top of the piles after loading tests. Numerical analysis with a software of CRISP, implemented with the modified Cam-clay model, was carried out to simulate the results of centrifuge model test. Test results about characteristics of load-settlement curves and stress concentration ratio are in relatively good agreements with numerical estimations.

요 지

본 논문은 모래다짐말뚝의 대체재로 제강슬래그를 다짐말뚝으로 사용하여 그에 따른 지반공학적 거동을 조사하기 위하여 원심모형 실험을 수행한 실험적 수치적 연구 결과이다. 제강슬래그의 상대밀도를 변화시킨 원심모형실험을 수행하여 그의 지지력 변화, 말뚝과 점토지반 사이의 응력분담비, 침하특성, 파괴메카니즘에 대하여 조사하였다. 원심모형실험결과, 슬래그다짐말뚝의 상대밀도가 증가할수록 지지력이 증가함을 확인하였으며 동일조건인 모래다짐말뚝 보다 약 30% 정도 항복하중강도가 크게 나타나 모래 대체 재료로서 효과가 있을 것으로 나타났다. 또한, 슬래그다짐말뚝의 상대밀도가 증가할수록 응력분담비는 증가하였으며 재하시험후 활동선 관찰결과 말뚝상부로 부터 $2D \sim 2.5D$ 깊이에서 말뚝의 명료한 전단면이 발생하였다. 한편, 수정 Cam-clay 모델을 사용한 상용프로그램 CRISP을 이용하여 원심모형실험결과를 모사하였다. 하중-침하 곡선과 응력분담비의 특성에 대한 해석결과는 실험결과와 비교적 근접하였다.

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

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

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

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

4 정희원, 삼성물산(주) 건설부분 (Member, Samsung Corp.)

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

1. 서론

연약지반을 개량하기 위한 대책공법으로는 샌드드레인 공법이나 모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile)공법등이 많이 사용되고 있다. 모래다짐말뚝공법은 1966년 일본운수성에서 강제치환공법이 개발되어 해상시공에도 적용되기 시작하였고(Matsuo, 1967), 국내의 경우 1984년 광양제철소 기초지반 조성시 샌드드레인과 SCP 공법을 병용하여 연약지반개량을 실시한 이후 모래다짐말뚝공법은 호안 안벽 시설물의 효과적인 기초 처리 공법으로 제시되고 있다(해양수산부, 1999). 그러나 모래다짐말뚝 재료로서 양질의 모래를 사용하고, 각종 토목공사로 인해 천연 모래량이 점점 고갈되어 감에 따라 이를 대체할 새로운 재료가 필요하게 되었다.

최근, 자원의 재활용에 대한 연구 중, 슬래그의 건설용 골재활용에 관한 연구가 활발히 진행중에 있다. 슬래그는 선철 제조공정에서 생성되는 고로슬래그와 제강공정에서 생성되는 제강슬래그로 분류되는데, 고로슬래그는 현재 국내에서 가장 많이 발생되고 있으나 거의 전량이 활용되고 있고, 제강슬래그는 60% 정도까지는 재활용되고 있으나 나머지 40%정도는 매립되고 있는 실정이다(제강슬래그협회, 2000). 제강슬래그는 그 성상으로 볼 때 천연의 모래와 같은 입상재료로 취급이 가능하고 또 모래와 비교해 단위체적중량 및 내부마찰각이 큰 토질역학적 특성이 있다. 이러한 토질역학적 특성을 이용하여 일본, 독일 등에서는 제강슬래그를 항만공사, 호안공사 및 해양구조물의 제작은 물론 항만공사 시 케이슨의 속채움 등에 적용하고 있다. 이와 같이 모래다짐말뚝의 재료인 양질의 모래를 구하기 어려운 경우에 개량말뚝 자체에 큰 강도를 얻기 위해 슬래그 또는 쇠석을 사용하기도 한다.

이미혜(1999)는 SCP의 다짐말뚝 채움재로서 슬래그의 적용성을 규명하기 위하여 슬래그 복합지반에 대한 시험을 수행한 결과, 압밀 및 전단저항 거동에 있어서 모래와 유사한 결과를 보여주어 SCP의 모래 대체재로 슬래그의 사용이 가능하다고 하였다.

김영수 등(2001)은 쇠석대신 제강슬래그를 활용한 Stone Column공법의 적용성을 검토하고 이를 SCP공법과 비교하기 위하여 현장시험시공을 실시하므로써 슬래그를 이용한 Stone Column 공법의 지지력이 향상됨을 보고하였다. 천병식(2001)은 배수재로 사용되는 모래 대체재료로 슬래그의 활용성을 알아보기 위하여 슬

래그의 Clogging 및 Piping 발생여부 및 내적안정성을 평가하여 지반조건에 따라 배수기능을 충분히 발휘할 수 있다고 하였다.

따라서, 본 연구에서는 연약지반개량을 위해 다짐말뚝의 재료로 모래 대신 제강슬래그를 사용한 슬래그다짐말뚝에 대한 원심모형실험을 실시하여 복합지반의 지지력, 응력분담특성 및 파괴메카니즘을 알아보고자 하였다. 이 공법은 점토와 슬래그말뚝의 복합지반으로 형성되어 있기 때문에 슬래그말뚝의 강도, 치환율, 개량 폭비 등 다양한 요인에 의해 영향을 받으나 본 연구에서는 슬래그말뚝의 상대밀도를 50, 70, 90%로 달리하여 원심모형실험을 실시하였다.

2. 응력분담비

SCP공법에 의해 개량된 복합지반에 하중이 작용할 경우 그림 1과 같이 변형이 작은 모래말뚝에 원점토 지반보다 큰 응력이 집중하게 되고, 원점토 지반층이 그 나머지를 분담하게 되어 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 : 점토 지반내의 유효상재압

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

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

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

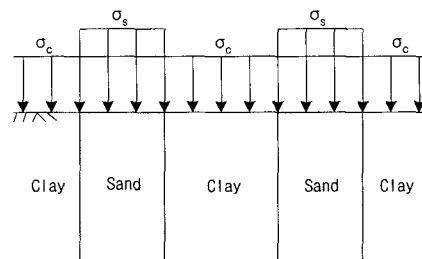


그림 1. 복합지반의 응력분담비

여기서, σ : 평균응력
 a_s : 치환율
 A_s : 모래말뚝단면적
 A_c : 점토의 분담면적

위 식을 다시 정리하며 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \sigma_s \cdot a_s + \sigma_c(1 - a_s) \quad (4)$$

한편, 식 (1)을 다시 쓰면, $\sigma_c = \frac{\sigma_s}{n}$ 와 같고 이 식을 식 (4)에 대입하면 다음과 같다.

$$\sigma = \sigma_s \cdot a_s + \frac{\sigma_s}{n}(1 - a_s) \quad (5)$$

위 식 (5)를 다시 쓰면 식 (6), (7)과 같이 모래말뚝내의 유효상재압과 점성토 지반내의 유효상재압을 각각 나타낼 수 있다.

$$\sigma_s = \frac{n \cdot \sigma}{1 + (n-1) \cdot a_s} = \mu_s \cdot \sigma \quad (6)$$

$$\sigma_c = \frac{\sigma}{1 + (n-1) \cdot a_s} = \mu_c \cdot \sigma \quad (7)$$

여기서, μ_s = 응력집중계수 $\left(\frac{n}{1 + (n-1) \cdot a_s} \right)$,
 μ_c = 응력감소계수 $\left(\frac{1}{1 + (n-1) \cdot a_s} \right)$.

복합지반은 하중재하시 전단응력과 압축응력이 작용하게 되고, 전단변형과 압밀변형으로 인한 응력집중이 복합하여 연약층의 압밀이 진행됨에 따라 응력분담이 달라지며, 응력분담에 미치는 영향 인자가 불명확하다. 따라서, 응력분담비는 실제 현장경험에 의존하여 2~6 (보통 3)범위 안에서 결정하고 있으며 SCP공법이 실제 현장중심으로 개발된 공법이기에 때문에 응력분담비에 대한 정해는 없고 일본에서 발표된 문헌에 의하면 현장 계측의 값 역시 계측위치에 따라 다르게 나타난다고 하였다(해양수산부, 1999).

3. 실내실험

연약지반에 타설된 슬래그다짐말뚝의 지지력 및 파괴메카니즘 등을 알아보기 위하여 점토와 슬래그의 기본물성실험과 슬래그다짐말뚝의 상대밀도를 변화시킨 원심모형실험을 실시하였다.

연약지반을 모사하기 위하여 사용된 시료는 남해안과 서해안일대 3개 지역에서 채취한 점토시료를 혼합하여 사용하였고, 슬래그는 선철공정에 따라 고로슬래그와 제강공정에서 생성되는 제강슬래그로 분류되나 본 연구에서는 제강슬래그를 사용하였으며 표 1에 점토와 제강슬래그의 기본물성 실험결과를 나타내었고 그림 2에 입도분포를 나타내었다.

한편, 슬래그다짐말뚝의 상대밀도를 결정하기 위하여 최대, 최소단위중량시험을 실시하였다. 최대단위중량시험은 직경 15cm, 높이 35cm의 몰드에 일정중량의 시료를 넣고 10 kN/m²의 상재하중을 올려놓은 후 진동

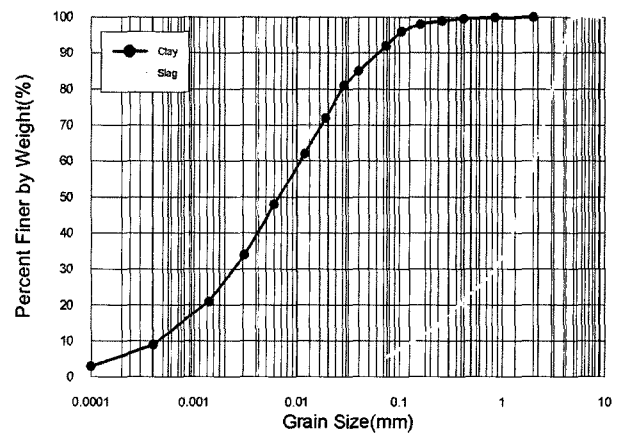


그림 2. 점토와 슬래그의 입도분포곡선

표 1. 슬래그와 점토의 기본물성

구 분		슬래그	점토
비 중, G _s		3.49	2.72
액 · 소성 한 계	LL, %	NP	43.0
	PL, %	NP	23.6
	PI, %	NP	19.4
입 도 분 석	C _u	21	-
	C _c	2.8	-
	통일분류법	SW	CL

표 2. 슬래그의 건조단위중량

시 험	상대밀도(%)		
	50	70	90
건조단위중량 γ_d (kN/m ³)	19.61	20.69	21.87
최대 건조단위중량 γ_{dmax} (kN/m ³)	22.57		
최소 건조단위중량 γ_{dmin} (kN/m ³)	17.35		
최대간극비 e_{max}	0.973		
최소간극비 e_{min}	0.517		

대를 이용하여 50 Hz 조건으로 8분이상 진동을 가한 다음 체적을 측정하여 최대단위중량을 계산하였다. 최소 단위중량시험은 ASTM 4254 규정에 명시된 바와 같이 2,000 cm³ 용량의 실린더에 일정중량의 건조시료를 투기한 다음 용기를 흔들어서 시료를 재배열시킨 다음 높이를 측정하여 최소단위중량을 구하는 방법을 사용하였다. 최대, 최소단위중량시험결과를 표 2에 나타내었다.

3.1 원지반 성형

모형지반에 사용된 점토시료는 불순물을 제거한 후 함수비가 액성한계의 2배가 되도록 해수와 혼합하여 직육면체의 압밀토조(폭 200mm, 길이 450mm, 높이 400mm)에 투기한 후, 압밀토조 상부에 4.9, 9.8, 19.6 kN/m²의 공기압력을 단계적으로 가하여 7일 정도 예비압밀을 실시하여 원지반을 조성하였다.

3.2 슬래그다짐말뚝의 성형

슬래그다짐말뚝은 내경 20mm 원통형 몰드에 일정함수비의 슬래그를 넣고 그 위에 하중추를 올려놓은 다음 진동대를 이용 진동다짐을 실시하여 소정의 상대밀도를 갖는 슬래그말뚝을 성형하였다. 이후 함수비를 증가시킨 다음 동결시켜 말뚝설치시 단면이 유지될 수 있도록 하였다. 이와 같은 동결공법을 적용할 경우 과도한 함수비는 동결시 시료 팽창후 해빙시 시료수축의 문제가 발생하며, 동결을 위하여 일반 냉장고를 사용하는 경우에는 동결후 쉽게 녹기 때문에 말뚝을 점토지반에 관입하는데 문제가 있었다. 이와 같은 문제를 보완하기 위하여 비교적 낮은 함수비로 말뚝을 적신후 급속냉동기를 사용하여 -40℃ 이하로 동결시키므로써 비교적 장시간 동결상태를 유지할 수 있었다.

3.3 복합지반의 성형 및 계측기 설치

예비압밀이 종료된 시료를 원심모형시험용 토조에 장착한 후 50G의 원심력장에서 자중압밀을 실시하여 실물규모 10m에 상당하는 높이 약 20cm의 정규압밀 점토지반을 제작하였으며 이때, 점토층 중심부에 간극수압계를 매설하여 과잉간극수압의 소산을 확인하였다.

50G에서 자중압밀이 종료된 점토시료에 1G 상태에서 모형말뚝을 설치하기 위하여 그림 3(a)와 같은 천공

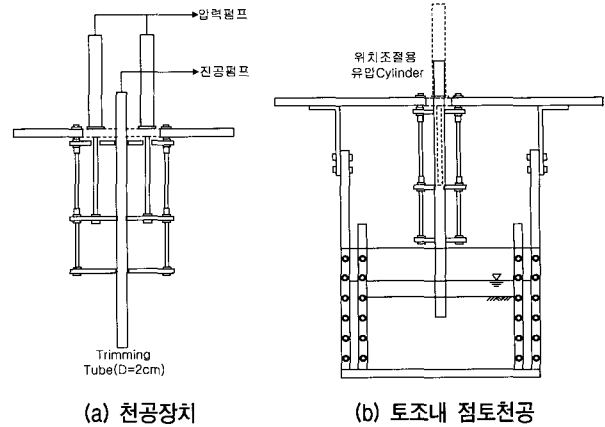


그림 3. 말뚝타설을 위한 천공장치

장비를 이용하였다. 그림 3(b)에서 보는바와 같이 2개의 유압실린더의 이동속도를 조절하여 Trimming Tube를 관입한 다음 튜브에 진공압을 가해 점토를 추출한 다음 튜브를 제거하고 동결시킨 모형 슬래그다짐말뚝을 관입하므로써 말뚝관입에 따른 지반교란을 최소화하고 말뚝의 수직관입을 유지할 수 있었다.

슬래그다짐말뚝은 개량폭비 2와 치환율 40%에 해당하는 5행×8열의 정사각형 배열로 모형지반에 설치하였다(그림 4 참조). 1G상태에서 슬래그다짐말뚝을 타설한후, 하중재하시 기초 및 지반에 발생하는 연직변위를 측정하기 위하여 변위계를 설치하였고, 슬래그다짐말뚝과 점토지반의 응력분담비를 알아보기 위하여 그림 4에 나타난 바와 같이 슬래그다짐말뚝과 점토지반의 표면에 직경 6.5mm의 소형 토압계를 매설하는 한편, 점토층 중간 깊이에서 개량지반의 바깥쪽으로 부터 1cm, 4cm, 9cm위치에 간극수압계를 매설하여 위치별 과잉간극수압 변화를 측정하였다.

3.4 Marker

연직하중 재하에 따른 모형지반의 파괴형상을 관찰하기 위하여 모형토조의 전면판을 분리한후 일정 격자상으로 삶은 국수를 이용하여 Marking을 실시한 다음 전면판을 재부착하였다.

3.5 연직하중재하장치

실험에 사용된 토조는 폭 575mm, 높이 685mm의 알루미늄으로서 그림 4와 같으며 연직하중의 재하를 위하여 재하용량 3ton의 재하장치를 부착하였으며 이 때 기

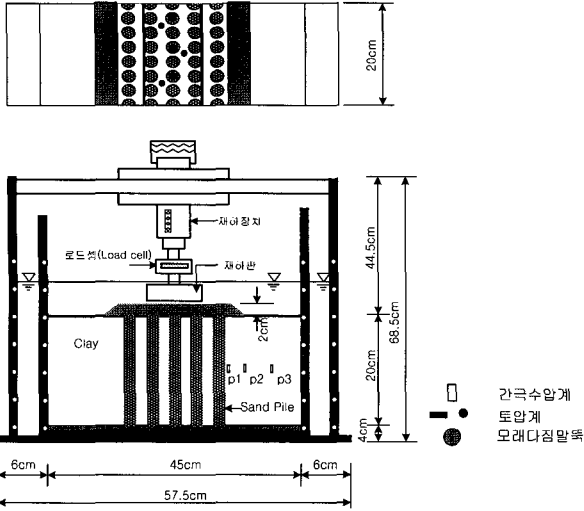


그림 4. 연직하중 재하시험 모식도

표 3. 원심모형실험의 종류

실험 종류	상대밀도(%)	치환율(%)	말뚝재료
SLAG50	50	40	슬래그
SLAG70	70	40	슬래그
SLAG90	90	40	슬래그
SAND90	90	40	모래

초는 하중재하시 토조바닥면에 영향이 미치지 않도록 지반높이의 약 1/3에 해당하는 폭 70mm의 알루미늄 재질의 모형 강성기초를 사용하여 2mm/min.의 속도로 하중을 재하하였다.

표 3은 본 연구에서 수행한 원심모형실험의 종류를 나타낸 것으로 치환율 40%에 대하여 슬래그의 상대밀도를 50, 70, 90%로 변화시킨 원심모형실험 3회와 동일한 치환율 조건에서 말뚝의 재료를 모래를 사용한 실험 1회 등 총 4회의 원심모형실험 종류를 나타내었다.

4. 수치해석

슬래그다짐말뚝이 타설된 복합지반의 원심모형실험결과를 검증하기 위하여 수치해석을 실시하였다. 수치해석은 범용 지반해석 프로그램인 SAGE CRISP(2000)프로그램을 이용하여 실시하였다. 슬래그다짐말뚝은 Mohr-Coulomb의 탄소성 모델을 사용하였으며 압밀배수(CD)의 삼축압축시험을 실시하여 이 모델의 매개변수인 탄성계수(E)와 포아송비(ν), 내부마찰각, 점착력 등의 값을 구하여 표 4에 나타내었다. 한편, 연약점토지반은 Roscoe와 Burland(1968) 등이 제안한 수정 Cam-clay모델을 사용하였다. 표준압밀시험과 압밀비배수(CU)의 삼축압축시험으로부터 구

표 4. 슬래그의 Mohr-Coulomb모델 변수 결과값

변수	상대밀도(%)		
	50	70	90
탄성계수(kN/m^2)	6.11E+03	8.16E+03	9.84E+03
포아송비	0.27	0.25	0.22
내부마찰각(Degree)	48	49	51

표 5. 점토의 수정 Cam-clay모델 변수 결과값

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

한 모델의 변수 결과값을 표 5에 나타내었다.

4.1 유한요소격자망 및 경계조건

수치해석에 사용된 유한요소격자망과 변위 경계조건을 그림 5에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 수치해석시 3차원 슬래그다짐말뚝을 등가벽체로 고려하여 2차원 평면요소로 모델링하여 해석하였으며, 모형지반이 좌우대칭이므로 모형토조의 1/2만을 격자로 구성하였다. 유한요소격자망은 358절점 320요소로서 모형지반의 좌,우측은 수평변위를 구속하였고 바닥면은 연직변위를 구속하였다.

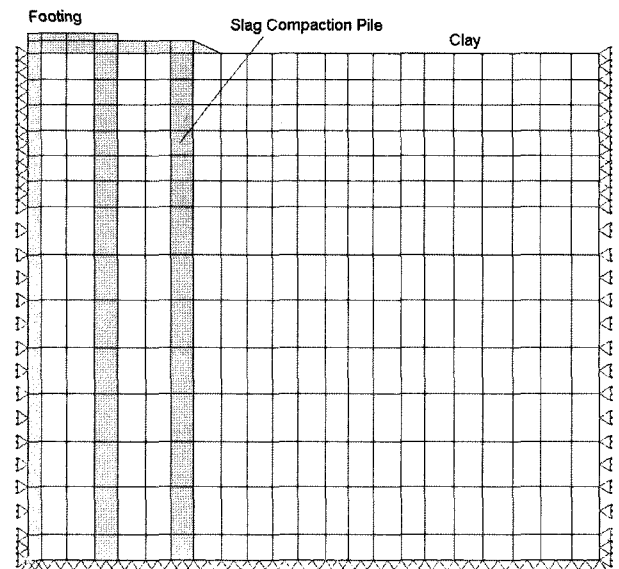


그림 5. 유한요소 격자망 및 경계조건

한편, 지반의 지표면에 수위가 위치하는 것으로 하여 해석을 수행하였다.

5. 결과분석

5.1 하중-침하 특성

슬래그다짐말뚝의 치환율 40%, 개량폭비 2인 실험조건하에서 슬래그 상대밀도를 50, 70, 90%로 변화시키는 원심모형의 연직재하실험을 실시하여 얻은 하중-침하 곡선을 수치해석 결과와 비교하여 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 보는 바와 같이 수치해석 결과가 실험결과보다 다소 크게 나타났으나 전반적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 슬래그의 상대밀도가 50, 70, 90%로 증가함에 따라 슬래그다짐말뚝의 강성도 및 전단강도가 증가하여 하중-침하 곡선의 초기기울기가 증가하였으며 항복하중강도는 각각 43.2, 47.1, 59.8 kN/m^2 로 증가하였다.

한편, 그림 6에 현재 연약지반개량에 주로 사용되고 있는 모래다짐말뚝(SCP)과 슬래그다짐말뚝의 지지력을 비교하기 위하여 동일한 조건(상대밀도 90%, 치환율 40%, 개량폭비 2)에 대한 모래다짐말뚝의 원심모형실험을 실시하여 슬래그다짐말뚝의 하중-침하 곡선과 함께 비교 도시하였다. 그림에 보여진 바와같이 모래다짐말뚝의 항복하중강도는 약 46.1 kN/m^2 으로 슬래그의 약 59.8 kN/m^2 에 비교할 때 슬래그의 극한지지력이 약 30%정도 크게 나타났다.

그림 7은 본 연구에 사용된 제강슬래그의 정수위투수 실험 결과 경과일수에 따른 투수계수의 관계를 나타낸 것이다. 상대밀도 50, 70, 90%의 경우 각각에 대하여 투수계수는 $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 에서 $3.6 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 로, $9.3 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 에서 $2.3 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 로, $4.7 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 에서 $1.7 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 로 각각 감소하였다. 이와 같은 결과로 부터 제강슬래그의 투수성은 경과시간이 길수록, 상대밀도가 클수록 저하하는 경향이 있음을 알 수 있다. 따라서, 제강슬래그를 다짐말뚝으로 사용하는 경우에 시공초기에는 적정의 통수능을 지닌 말뚝의 기능을 유지할 수 있으나 시간이 경과할수록 제강슬래그의 포졸란 효과에 따른 입자간의 응집에 의한 투수계수의 감소 때문에 배수재로서의 기능은 감소할 것으로 판단된다.

따라서, 연약지반의 개량공법으로 사용되는 샌드드

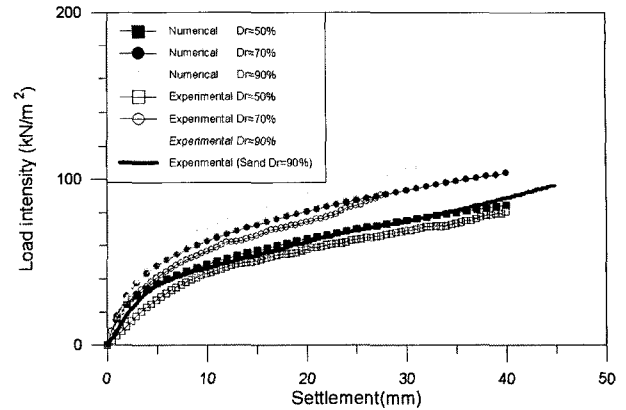


그림 6. 상대밀도 변화에 따른 하중- 침하 곡선

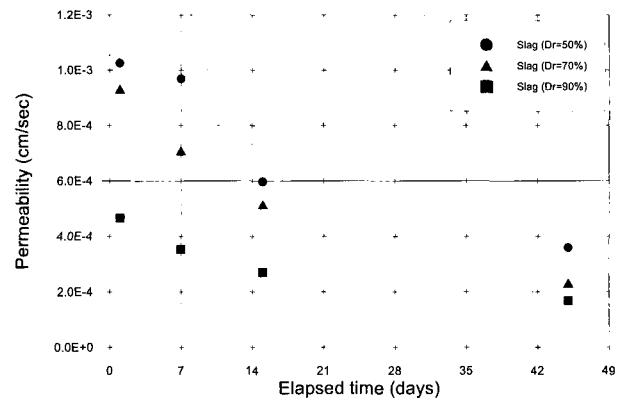


그림 7. 슬래그의 투수계수 - 경과시간 관계

라인, 모래다짐말뚝 공법은 압밀축진 효과는 있으나 수평지하중에 대한 저항력이 약하고 수직하중에 대하여 지지말뚝으로서의 역할을 할 수 없는 경우에 모래대체 재료로 사용한 슬래그말뚝은 경제성과 시공성인 측면에서 효과가 있을 것으로 보여진다. 그러나 제강슬래그의 시간경과에 따른 투수계수가 감소하는 경향이 있으므로 그의 배수재로서 통수능 기능에 대한 적합성에 관한 연구와 환경에 미치는 영향에 대한 연구의 필요성이 요구된다.

5.2 토압특성

그림 8은 상대밀도 50, 70, 90%의 변화에 따라 슬래그와 점토가 받는 토압을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 상대밀도가 증가할수록 점토와 슬래그가 받는 토압은 증가하였으며 특히 슬래그는 강성의 증가로 인하여 점토와 비교하여 크게 증가하는 것을 알 수 있고 토압분포로부터 지반항복은 하중재하후 약 3~5mm 정도의 연직변위에서 항복하는 것을 볼 수 있다.

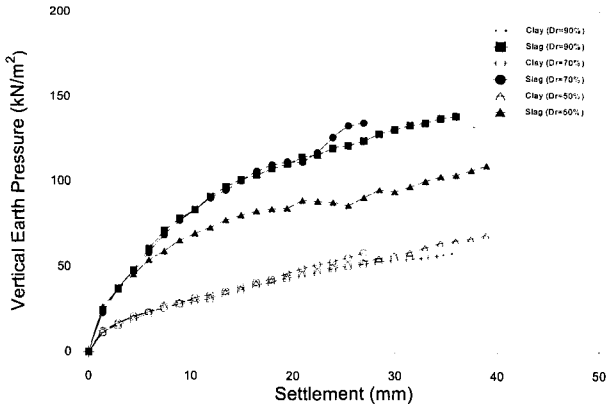


그림 8. 토압-침하 곡선

5.3 응력분담특성

그림 9는 상대밀도가 변화할 때 슬래그말뚝과 점토지반이 받는 응력분담비의 변화를 침하량에 따라 도시하였다. 실험결과를 보면 하중을 가한 직후에는 자료의 분산이 있으나 대체적으로 응력 분담비가 2.0정도의 값에서 하중이 증가하면서 침하가 증가함에 따라 상대밀도 70%와 90%인 경우에는 응력분담비가 다소 증가하여 3.0의 값을 갖다가 감소하는 경향이 있는 반면에 상대밀도 50%인 경우에는 응력분담비가 2.0의 값에서 침하가 증가하면서 점진적으로 감소하여 1.5정도의 값에 수렴함을 알 수 있다. 전반적으로 슬래그 다짐 말뚝의 상대밀도가 증가할수록 응력분담비는 증가하는 경향을 나타내며 하중이 증가할수록 침하량이 증가함에 따라 응력분담비는 감소하는 경향을 보인다. 수치해석결과를 보면 침하량이 증가함에 따라 응력분담비는 감소하는 경향을 현저히 나타내었는데, 이는 침하량이 증가함에 따라 슬래그말뚝이 받고있던 응력이 점토로 전이됨에

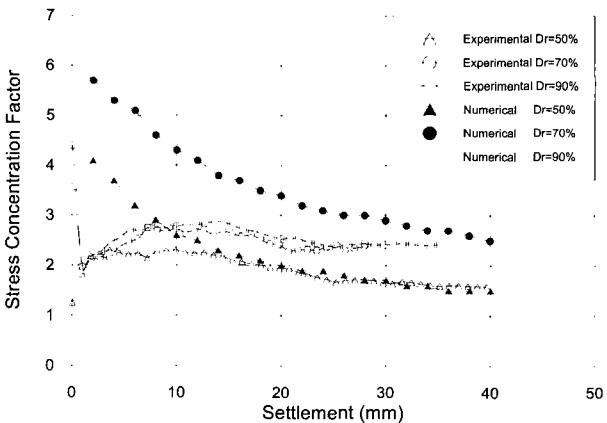


그림 9. 침하-응력분담비 곡선

따라 응력분담비가 감소하는 것으로 보여진다. 이와 같은 현상은 강성의 슬래그말뚝에서 집중된 기초 하중응력이 하중 증가에 따라 말뚝의 수평변위 발생으로 강성도가 감소되면서 응력의 분산이 발생함에 따른 것으로 판단된다. 상대밀도 50%일 때 실험에서 측정된 응력분담비와 수치해석 결과가 침하량 10cm 이후 잘 일치하는 것으로 나타났으나 상대밀도 70, 90%에 대한 것은 많은 차이를 보였다. 이러한 차이는 Masaaki와 Masaki(1990)의 상대밀도에 따른 응력분담비의 변화가 3~7의 범위를 나타낸 것과 비교할 때, 슬래그말뚝의 상대밀도가 커짐에 따라 응력은 슬래그말뚝에 더욱 집중되어 말뚝사이 점토에 작용하는 응력이 저감되므로 수치해석 결과는 슬래그말뚝의 상대밀도가 증가할수록 응력분담비가 약 2~7로 커지는 경향성을 나타내었으나 실험값은 초소형의 계측기 사용으로 인하여 상대밀도 70, 90% 실험시 계측값이 다소 작게 측정된 것으로 보여진다.

5.4 응력집중계수, 응력감소계수

그림 10, 11에 응력집중계수(μ_s)와 응력감소계수(μ_c)

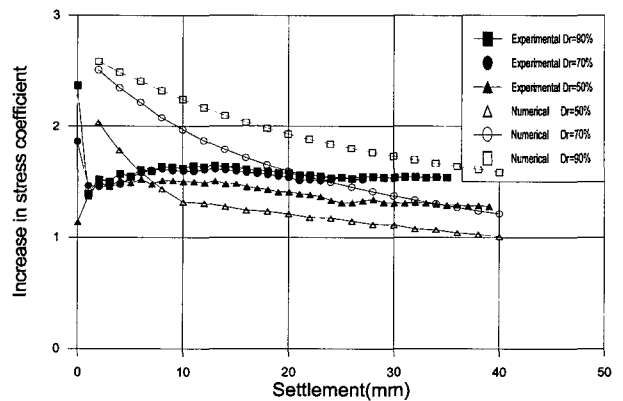


그림 10. 침하-응력집중계수

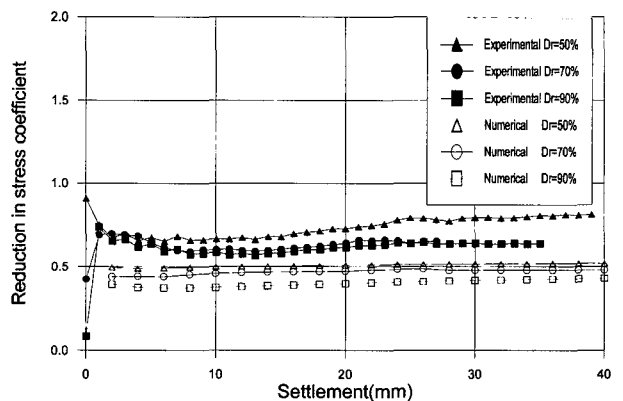


그림 11. 침하-응력감소계수

를 나타내었다. 응력집중계수는 침하량에 따라 감소하는 경향성을 나타내어 응력분담비의 경향과 매우 유사한 경향을 나타내었고, 실험으로부터 획득한 응력감소계수는 약 0.5~0.8의 범위로 밴드형태로 일정한 값을 유지하고 있으며 수치해석에 의한 응력감소계수는 실험값보다는 다소 낮으나 0.4~0.5의 값 사이에 분포하였다.

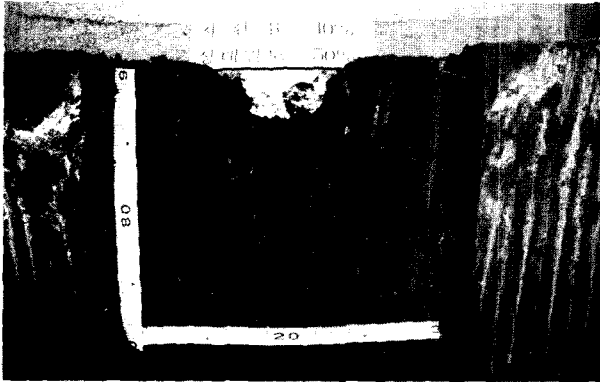


그림 12. 슬래그말뚝의 파괴형태(Dr=50%)

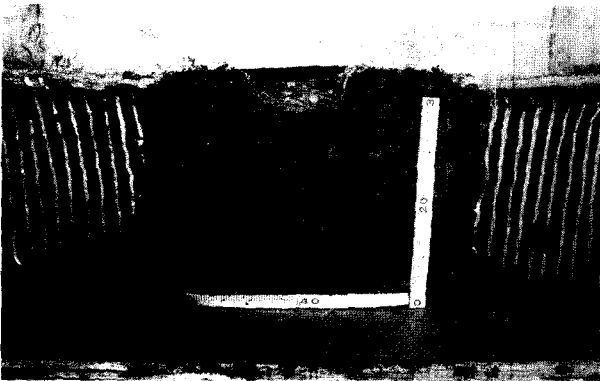


그림 13. 슬래그말뚝의 파괴형태(Dr=70%)



그림 14. 슬래그말뚝의 파괴형태(Dr=90%)

5.5 변형특성 및 파괴메카니즘

그림 12~14는 상대밀도 50, 70, 90%에 대한 슬래그말뚝의 연직재하시험 종료후 촬영한 모형지반으로 전단활동면을 알아보기 위해 지반항복 후에도 약 40~50mm 정도의 연직변위를 충분히 발생시킨 후에 모형지반을 해체하여 촬영한 지반의 변형상태이다

실험결과 3가지 경우 모두가 하중재하로 인하여 기초판이 복합지반에 관입됨에 따라 지표부근의 말뚝에서 좌, 우 수평력이 발생하여 하부지반과 비교할 때 좌, 우로 지반의 수평변위가 발생하였음을 관측할 수 있다. 또한, 재하판 아래 슬래그말뚝 상부로부터 약 2D~3D 깊이에서 말뚝의 전단활동선이 명료하게 나타나 Hughes와 Withers(1974)등에 의해 측정된 연약지반상에 쇄석기둥의 팽창파괴 형태와 같게 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 제강슬래그의 상대밀도를 50, 70, 90%로 달리한 슬래그다짐말뚝에 대한 원심모형실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 슬래그말뚝의 상대밀도가 50, 70, 90%로 증가할수록 항복하중강도는 각각 43.2, 47.1, 59.8 kN/m^2 으로 증가하였다.
- (2) 동일한 조건의 상대밀도 90%에 대한 모래다짐말뚝과 슬래그다짐말뚝의 원심모형실험결과, 슬래그다짐말뚝의 항복하중강도가 모래다짐말뚝보다 약 30%정도 크게 나타나 모래 대체 재료로서 효과가 있을 것으로 보여진다.
- (3) 제강슬래그의 정수위투수실험 결과 시간경과에 따라 투수계수가 감소하는 것으로 나타나 그의 배수재로써 통수능 기능에 대한 적합성에 관한 연구와 환경에 미치는 영향에 대한 연구의 필요성이 요구된다.
- (4) 슬래그 다짐 말뚝의 상대밀도가 증가할수록 응력분담비는 증가하는 경향을 나타내며 하중이 증가할수록 침하량이 증가함에 따라 슬래그말뚝이 받고있던 응력이 점토로 전이되어 응력분담비는 감소하는 경향을 나타내었다.
- (5) 재하시험 종료후 Marker에 의한 활동선을 관찰한 결과, 말뚝상부로부터 2D~2.5D 깊이에서 말뚝의

명료한 전단면이 발생하였다.

- (6) 원심모형실험에 대한 수치해석결과 응력분담특성은 실험과 차이를 나타내었으나 하중-침하 특성은 실험과 좋은 일치율을 나타내어 향후 연약지반상의 슬래그다짐말뚝의 하중-침하 거동 예측이 가능함을 보였다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. 김영수, 방인호, 박영화, 차주석, 김건태 (2001), "제강슬래그를 활용한 Stone column 공법의 현장시험시공 사례연구(III)", 2001

대한토목학회 학술발표대회논문.

2. 이미혜 (1999), 다짐말뚝 채움재로서 슬래그의 적용성 연구, 명지대학교 대학원 토목공학과 공학석사학위논문.
3. 제강슬래그협회 (2000), 제강슬래그 항만공사용 이용안내서, 포항종합제철.
4. 천병식 (2001), 동제련 슬래그 골재의 토목공사에의 활용, 동제련슬래그의 건설용 골재활용 심포지움, 한국건설기술연구원.
5. 해양수산부 (1999), 대수심방파제 및 연약지반 관련기술(II), 해양수산부.
6. Hughes, J.M.O. and Withers, N.J. (1974), "Reinforcing of soft cohesive soils with stone column", *Ground Engineering*, Vol.7, No.3, May, pp.42-49.
7. 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.
8. Matsuo, M. (1967), "Stability analysis of clay improved with sand piles", *Tsuchi to Kiso*, Vol.15, No.12, pp.27-35.
9. Roscoe, K. H and Burland, J. B. (1968), "On the generalized stress-strain behavior of wet clays", *Proceedings of Eng., Plasticity*, Cambridge, Cambridge University Press, England, pp.535-609.
10. SAGE CRISP (2000), *User's guide and technical reference guide*, SAGE Engineering Ltd.

(접수일자 2004. 8. 23, 심사완료일 2005. 1. 22)