

## 점토지반에 적용된 저회다짐말뚝의 치환율에 따른 압밀침하특성 및 전단특성

### Characteristics for Consolidation and Shear Strength of Bottom Ash Compaction Pile According to Replacement Ratio in Clay

박 세 현<sup>1)</sup> · 지 성 현<sup>2)</sup> · 천 병 식<sup>†</sup>

Park, Sehyun · Jee, Sunghyun · Chun, Byungsik

**ABSTRACT** : The necessity of effective and economical improvement for soft ground is required more and more as mountains form 70% of country. The soft ground improvement methods for ocean development are sand compaction pile method, displacement method are applied to the soft ground improvement from ocean development pre-loading method, air pressure method, well point method, pack drain method, quicklime pile method etc. Among them, the sand compaction pile method, has many problems such as the economical problem on importing materials due to the lack of sand and destroying the nature while collecting sand. To replace the sand with other alternative materials, a study on the bottom ash compaction pile method because the bottom ash has the similar engineering properties with sand. Therefore, in this study, after compose the complex soil with a replacement rate of 10~80% and a large direct shear test, shear test, consolidation test with replacement rates of bottom ash are performed to estimate whether its shear and consolidation characteristics are suitable for the alternative material of compaction pile method. As a result of test, Shear Strength Parameters tend to be increased in accordance with the increase of replacement ratio of bottom compaction pile, and Settlement Reduction Factor and  $t_{90}$  tend to be decreased.

**Keywords** : Bottom ash, Bottom ash compaction pile, Large scale direct shear test, Consolidation test

**요 지** : 국토의 70%를 산이 차지하고 있는 우리나라의 여건으로 볼 때 효율적이고 경제적인 연약지반 개량의 필요성이 점차 높아지고 있다. 해양개발을 위한 연약지반개량 공법에는 모래다짐말뚝공법, 치환공법, 프리로딩공법, 대기압공법, 지하수위 저하공법, 팩드레인공법, 생석회말뚝공법 등이 있는데, 그 중 모래다짐말뚝공법은 모래의 수급이 어려워져 수입하는 등의 경제적인 문제점과 모래채취로 인한 자연 훼손의 문제점을 야기하므로 이에 대한 대책공법이 시급한 실정이다. 최근, 모래와 공학적 성질이 유사한 화력발전소 부산물인 저회를 대체 재료로 활용하기 위한 연구가 이루어지고 있으나 연약지반 개량 재료로 활용하기 위한 연구는 미미한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 10~80%의 치환율로 복합지반을 조성하여 대형직접전단시험, 전단시험, 표준압밀시험을 실시한 후 저회다짐말뚝의 전단특성과 압밀특성을 규명하였다. 연구결과 저회다짐말뚝의 치환율이 증가에 따라 전단강도 정수는 증대하고, 침하저감 계수 및  $t_{90}$ 은 감소하는 경향이 나타났다.

**주요어** : 저회, 저회다짐말뚝, 대형직접전단시험, 압밀시험

## 1. 서 론

최근 급속한 산업발전과 국민 생활수준 향상에 따른 에너지 사용량이 증가함에 있어서 산업부산물이 기하급수적으로 늘어나고 있는 실정이다. 산업부산물 중 석탄회는 화력발전소에서 발생하는 산업폐기물로서 그 발생량이 상당히 많은 양이 발생한다. 현재 원활한 전력수급을 위해 화력발전소가 증가함에 따라 석탄회 발생량이 2010년에는 약 700만톤에 못 미칠 것으로 전망된다(환경부, 2008). 석탄회는 비회와 저회로 분류되며 비회는 콘크리트 혼화용 재료로

정제되어 사용되고 있는 반면에 저회는 대부분 폐기 매립되고 있는 실정이다. 석탄회를 재활용해야 하는 이유는 우리나라의 좁은 국토여건으로 볼 때 현재 우리나라 화력발전소 주변에는 이미 막대한 양의 석탄회가 폐기 매립되어 있어 앞으로 발생 될 석탄회를 폐기 매립시키기 위한 석탄회 매립장이 부족한 상황이고, 석탄회를 자원으로 재활용하면 실질적으로 경제적 이득이 고려되어진다. 석탄회 매립장의 부족 및 자원 재활용으로 인한 이유로 인해 석탄회의 재활용에 대한 연구가 사회 전단에 걸쳐 계속 진행되고 있으나 석탄회 발생량에 비해 국내에서의 석탄회 재활용 실적은 미미

1) 정희원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정

2) 정희원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

† 정희원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

한 상태이다(권혁두, 2008). 그 중 저회는 대부분 회처리장에서 매립되는 실정이므로 산업부산물인 아닌 부가가치가 있는 산업재료로 전환시키는 방법이 필요하다.

한편, 국내 연약지반개량공법의 일종인 모래다짐말뚝(sand compaction pile)은 느슨한 모래나 점토로 된 연약지반에 모래를 압입하여 비교적 큰 모래말뚝을 다져 시공하는 지반개량공법이다. 유럽 및 북미에서는 모래대신 쇠석을 이용하는 소위 쇠석기둥(stone column)공법이 많이 적용되고 있다. 말뚝재료가 모래인 경우에는 밀도증대와 액상화 방지, 수평저항력 증가 등의 효과가 있으며, 점토지반에서는 원지반과 다져진 모래말뚝이 복합지반을 형성함으로써 지반의 전단강도 및 지지력 증대, 측방변위 억제, 압밀침하 저감효과 등을 얻을 수 있다(藤田圭一, 1995).

복합지반에 대한 연구는 村山(1957)이 처음으로 모래다짐말뚝에 의한 복합지반의 역학적특성에 대하여 언급하였으며 말뚝 타설로 인한 점성토의 교란과 드레인 효과에 의한 강도 증가 및 지지력 특성에 대하여 제안하였다. 국내에서 문대중 등(1999)은 연약지반개량을 목적으로 점토지반에 모래다짐말뚝을 사용하는 경우에 지반개량목적에 부합되는 적절한 치환율을 결정하기 위해 치환율 변화에 따른 모형토조시험과 대형직접전단시험을 실시하였다. 또한, 김재권(2003)은 현장상태와 유사한 연성변형(free strain)상태로 변형이 일어날 때 모래말뚝과 지반의 상호작용을 분석하기 위하여 치환율을 변화시키면서 모형토조시험을 실시하였다.

이에 본 연구에서는 모래 및 쇠석 등의 조립재료의 대체 재료로써 화력발전소 부산물인 저회를 활용하여 연약지반개량에 적용 가능한 다짐말뚝의 재료로 제안을 하기 위한 실내시험을 실시하였다. 기본물성시험, 직접전단시험, 대형직접전단시험, 압밀시험을 치환율별로 실시하여 복합지반의 전단특성 및 압밀특성을 규명하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 조립재료 다짐말뚝공법의 개량원리

모래다짐말뚝이 연약한 점성토층에 다수 조성되어 이루어

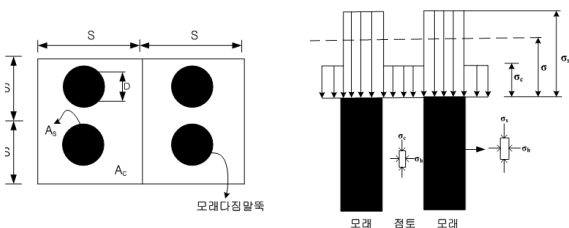


그림 1. 복합지반의 기본 개념

어진 복합지반 위에 하중이 재하된 경우, 점성토와 압축 조성된 모래말뚝과는 그 물리적, 역학적 성질이 서로 다르기 때문에 각각 분담하는 응력이 다르며, 모래다짐이 점토지반보다 큰 응력을 분담하게 되는 것이다. 이 때문에 점성토에 발생하는 응력이 대폭 감소하게 되고, 지지력 증대, 침하감소 등의 효과로 연약지반의 개량이 가능하게 된다(村山, 1962). 복합지반의 기본 개념은 그림 1과 같이 지반위에 평균응력  $\sigma$  재하되어 지반반력으로 말뚝에  $\sigma_s$ 의 응력이 발생한다.

또한 각각의 면적  $A_s$ ,  $A_c$ 의 범위 내에서 응력이 일정하다고 하면 식(1)과 같이 얻어진다.

$$\sigma A = \sigma_s A_s + \sigma_c A_c \quad (1)$$

( $m = \sigma_s / \sigma_c$ )를 이용하여 식 (1)을 변형하면 식 (2)와 (3)과 같은 관계를 얻을 수 있다. 식 (2)는 점토지반의 응력감소계수이고, 식 (3)은 모래지반의 응력감소계수이다.

$$\frac{\sigma_c}{\sigma} = \frac{A}{mA_s + A_c} = \frac{1}{(m-1)a_s + 1} = \mu_c \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_s}{\sigma} = \frac{mA}{mA_s + A_c} = \frac{m}{(m-1)a_s + 1} = \mu_s \quad (3)$$

여기서,  $a_s$  : 치환율( $A_s/A$ )

$\mu_c$  : 응력감소계수

$\mu_s$  : 응력증가계수

$A_s$  : 모래말뚝 면적

$A_c$  : 점토지반 면적

$m$  : 응력분담비

식 (1), (2), (3)을 조합하면 복합지반에 대한 기본적인 식 (4)와 같이 얻어진다(Matsuo 등, 1967; Aboshi 등, 1979).

$$u_s a_s + u_c (1 - a_s) = 1 \quad (4)$$

한편, 하중이 가해지는 동안 복합지반에 전단응력과 압축응력이 작용하게 되고, 전단변형과 압밀변형에 의한 응력분담이 복합적으로 발생하게 된다. 연약층의 압밀이 진행됨에 응력분담비는 달라지며, 응력분담에 미치는 영향 인자가 불명확하기 때문에 그 값은 현장 경험에 의존하여 결정하고

표 1. 치환율과 응력분담비(일본토질공학회, 1988)

치환율(%)	모래다짐말뚝의 내부마찰각( $\phi_s$ )	응력분담비(m)
0~0.4	30°	3
0.4~0.7	30°	2
0.7~	30~35°	1

있다. 따라서 표 1에서 보는 바와 같이 치환율과 응력분담 비를 어떻게 결정하느냐에 따라 복합지반의 강도는 상당히 달라지므로 응력분담비의 정확한 산정은 복합지반강도 산정에 매우 중요하다.

### 3. 실내시험

저회다짐말뚝과 점토 복합지반의 전단특성 및 압밀침하 특성을 규명하기 위해 토질역학시험, 대형직접전단시험, 직접전단시험, 표준압밀시험을 실시하였다.

#### 3.1 실내시험 방법

##### 3.1.1 저회의 물리적 시험

본 연구에 사용된 재료는 영흥화력에서 부산된 저회를 사용하였다. 시험 전 시험대상 저회의 특성을 파악하기 위하여 입도분석시험(KS F 2302), 연경도를 측정하기 위한 Atterberg 한계시험(KS F 2303), 비중시험(KS F 2308), 투수계수를 측정하기 위하여 정수위투수시험을 실시하였다.

##### 3.1.2 대형직접전단시험

대형직접전단시험에 관한 명확한 시험법이 정립되어 있는 않으나 보통 직접전단시험을 기준으로 하여 시험되고 있다.

우선 직경 0.3m, 높이 0.35m의 전단상자에 점토를 채워 넣

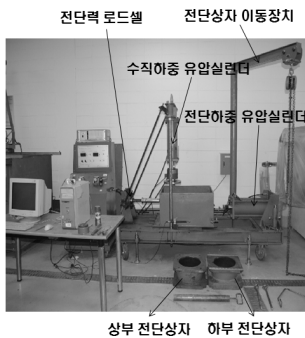


그림 2. 대형직접전단시험 장치

표 2. 대형직접전단시험 제원

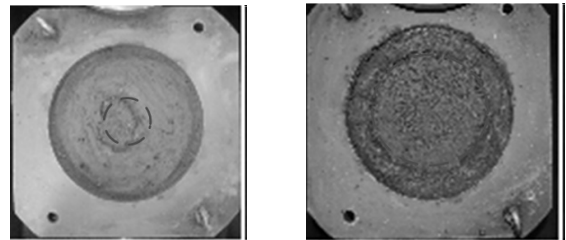
장비크기	제원	
		2100mm(L)×1700mm(D)×1850mm(H)
최대 하중	수평	500kPa
	연직	200kPa
변위계	수평	200mm
	연직	100mm
전단 상자 크기	d=300mm	h=350mm

은 후 미리 제작된 치환율 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%의 아크릴원형통을 인발하면서 진동다짐을 한 뒤 복합지반을 조성하였으며 치환율별로 압밀도 90%에 도달한 후 수직하중을 100kPa, 150kPa, 200kPa로 변화시켜 0.1 mm/min의 전단속도로 시험을 수행하였다. 대형직접전단시험의 시험장치와 제원은 그림 2, 표 2와 같다.

또한 시험용 치환율별 복합지반 시료는 그림 3과 같고 치환율 10%, 50%를 선정하여 나타내었다.

##### 3.1.3 직접전단시험

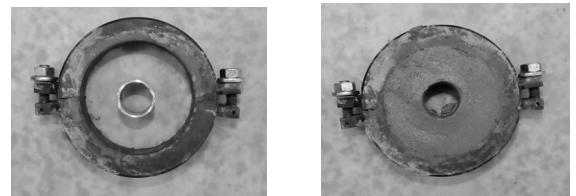
대형직접전단시험을 이용하여 저회말뚝의 치환율별 강도특성을 알아본 후 직접전단시험(KS F2343)을 이용하여 대형직접전단시험과 비교분석하기 위해 치환율에 따라 실험을 수행하였으며 각 시료에 대한 물성치는 앞서 소개한



(a) 치환율 10%

(b) 치환율 50%

그림 3. 시험용 치환율별 복합지반 시료



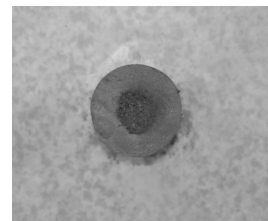
(a) 몰드중앙에 케이싱 배치

(b) 주변에 점토 충전



(c) 다짐봉을 이용한 저회충전

(e) 동결이 완료된 몰드 추출



(f) 동결된 저회말뚝의 전경

그림 4. 동결법을 이용한 공시체 몰드제작 과정

바와 동일한 값으로 진행하였다. 대형직접전단시험과 비교를 하기 위한 몰드제작에서 몰드의 직경과 높이가 상당히 작으므로 인발시 점토지반의 교란이 상당할 것으로 사료된다. 따라서 그림 4에서 보는 바와 같이 동결법을 이용하여 24시간 동결을 시킨 후 해동이 된 후에 실험을 진행하였으며 치환율을 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%로 변화시키면서 시험을 실시하여 수직하중 100kPa, 150kPa, 200kPa로 변화시켜가며 시험을 실시하였다.

### 3.1.4 압밀시험

복합시료에 대해 압밀시험을 수행하여 치환율에 따른 간극비( $e$ )계산, 압밀시간, 압축지수( $C_c$ ), 압밀계수( $C_v$ ), 체적압축계수( $m_v$ ), 투수계수( $k$ )을 산정하였으며  $e$ -logP곡선, 치환율에 따른 침하저감계수, 압밀도가 90%에 도달하는 시간관계 및 응력분담비 관계를 파악하여 압밀촉진, 침하저감효과를 파악한 후 다짐말뚝 채움재로서 적용성을 검토하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 직접전단시험의 시험방법과 동일하게 동결법을 이용한 시험법을 사용하였으며 표준압밀시험에서 저회말뚝 모식도는 그림 5와 같고 치환율별 복합시료 전경은 그림 6에 나타난다.

## 3.2 복합지반 제작

점토지반을 조성하여 저회다짐말뚝을 설치하고 복합지반에서의 치환율별 저회말뚝의 영향을 평가하기 위해 표 3에서

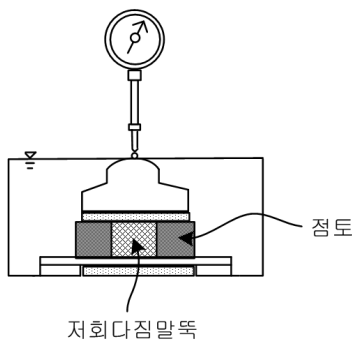


그림 5. 압밀시험 저회말뚝 모식도



(a) 치환율 10% (b) 치환율 50%

그림 6. 시험용 치환율별 복합지반 시료

나타낸 바와 같이 복합지반을 모사하였다. 사용된 점토는 부산 신항만 시공현장의 해안 퇴적점토를 채취하여 조개껍질 등의 불순물을 제거한 후, 액성한계 이상의 함수비 상태에서 완전 재성형하여 시험을 하였다. 성형한 시료의 함수비는 대략 30%정도에 해당하며 간극비는  $e=0.7\sim 0.75$  정도이다.

## 4. 시험결과 및 분석

### 4.1 저회의 물리적 시험

저회의 물리적 시험결과는 그림 7 및 표 4에서 보는 바와 같이 흙의 통일분류법에 SW, 비중은 2.27,  $C_u=8.0$ 으로 나타나 모래다짐말뚝에 사용되는 모래의 기준(표 5)을 만족하는 것으로 나타나 공학적 특성이 유사하므로 다짐말뚝의 대체재료로서 연구가능하다고 판단된다.

표 3. 점토의 물리적 특성

구분	특성치
비중	2.68
액성한계(%)	42
소성한계(%)	25
습윤밀도( $kN/m^3$ )	2.02
최대건조단위중량( $kN/m^3$ )	1.754
통일분류	CL

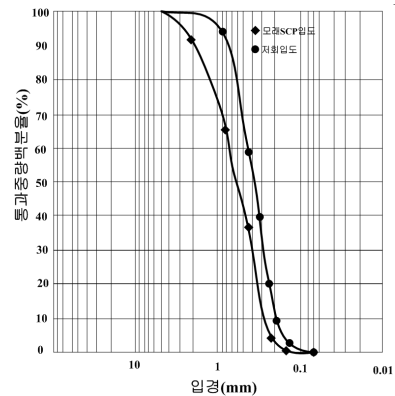


그림 7. 모래다짐말뚝에 사용되는 모래와 저회의 입도분석

표 4. 물리적 시험 결과

물리적 성질	저회
USCS, 통일분류법	SW
비중, $G_s$	2.27
No.4 통과량(%)	99.37
No.200 통과량(%)	2.86
균등계수, $C_u$	8.0
곡률계수, $C_g$	2.0
투수계수(cm/sec)	$1 \times 10^{-3}$ 이상

표 5. 모래다짐말뚝에 사용되는 모래기준

구분	기준(한국도로공사 토공편)
통일분류	SP
D <sub>15</sub> (mm)	0.1~0.9
D <sub>85</sub> (mm)	1~8
균등계수, C <sub>u</sub>	1.66
No.200체 통과율(%)	3% 이하
비 중	2.61
투수계수(cm/sec)	1×10 <sup>-3</sup> 이상

## 4.2 다짐특성

○○화력발전소에서 채취한 저회를 A다짐과 D다짐 시험 방법(KS F 2312)에 의한 다짐시험을 실시하였다. 그림 8에서 보는 바와 같이 A다짐의 경우 최대건조단위중량 12.95kN/m<sup>3</sup> 최적함수비 23.30%, D다짐의 경우 최대건조단위중량 14.54 kN/m<sup>3</sup>, 최적함수비 16.30%로 나타났으며, 일반적인 토사와 같이 다짐에너지의 증가에 따라 최대건조단위중량은 증가하고 최적함수비는 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 다짐곡선에서 보는 바와 같이 밀도가 완만한 경향을 나타내어 함수비의 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

## 4.3 대형직접전단시험

조립질을 재료로 하는 다짐말뚝에서 지지력에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 내부마찰각이다(이대수 등, 2005). 따라서, 대형직접전단 실험을 통하여 점착력(c) 및 내부마찰각( $\phi$ )을 저회의 치환율 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%에 따라 산정하였으며, 그 결과는 그림 9(a)에서 보는 바와 같이 저회의 강도정수( $\phi = 43.53^\circ, c = 0$ )으로 보통의 모래의 경우( $\phi = 30 \sim 33^\circ, c = 0$ )보다 내부마찰각이 크게 나타났으며, 저회의 치환율은 그림 10에서 보는 바와 같이 치환율이 증가할수록 그 차이는 미미하지만 전단강도 정수가 증대하는

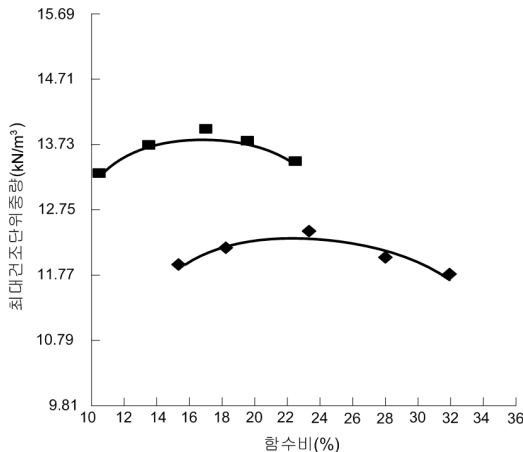
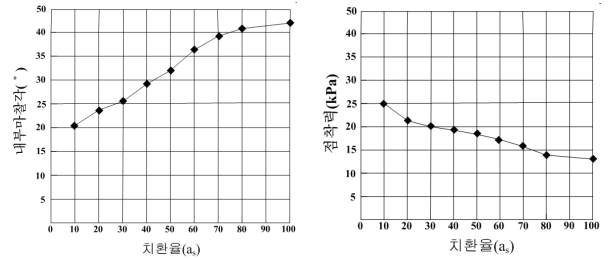


그림 8. 저회의 다짐시험 결과



(a) 치환율에 따른 내부마찰각 (b) 치환율에 따른 점착력

그림 9. 저회 치환율에 따른 내부마찰각 및 점착력 변화

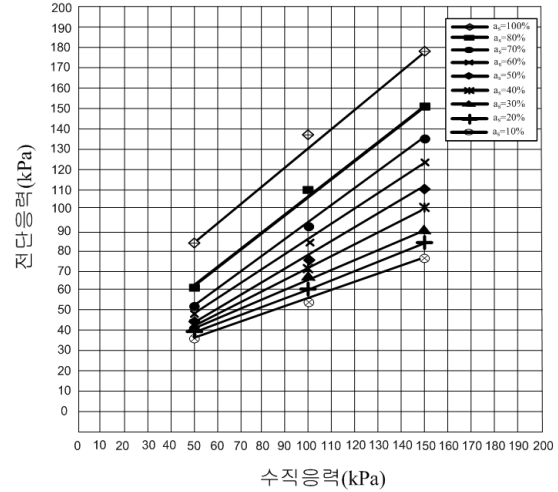


그림 10. 치환율에 따른 수직응력-전단응력 그래프

경향을 나타냈다. 이는 저회의 치환율이 증대될수록 복합지반에서 저회입자의 전단특성 반영 비율이 커진 것으로 사료된다.

## 4.4 직접전단시험

직접전단 시험 결과는 그림 11, 12와 같이 나타났으며, 치환율별 점토와 저회다짐말뚝 복합지반의 전단강도 정수는

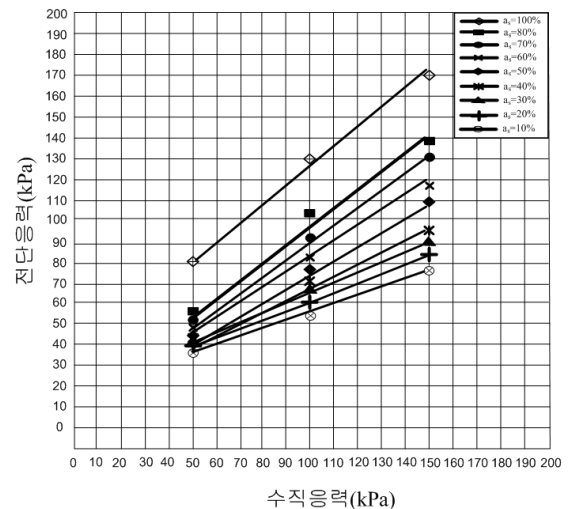
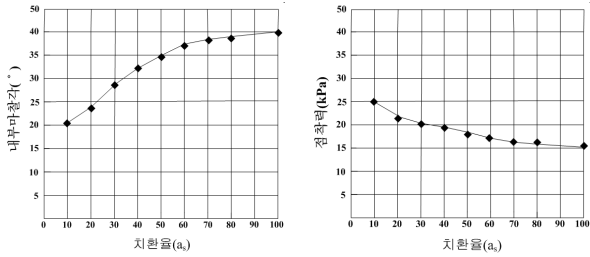


그림 11. 치환율에 따른 수직응력-전단응력 그래프



(a) 치환율에 따른 내부마찰각 (b) 치환율에 따른 점착력

그림 12. 저회 치환율에 따른 내부마찰각 및 점착력 변화

대형직접전단시험 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. 저회다짐말뚝의 치환율이 증가할수록 점착력은 감소하고, 내부마찰각은 증대하는 경향을 나타내었는데, 치환율 50% 이상에서는 거의 유사한 경향을 나타내었다.

### 4.5 압밀시험

복합지반의 치환율별 압밀시험 결과를 e-logP 곡선으로 나타내면 그림 13과 같다. 치환율이 증가할수록 간극비의

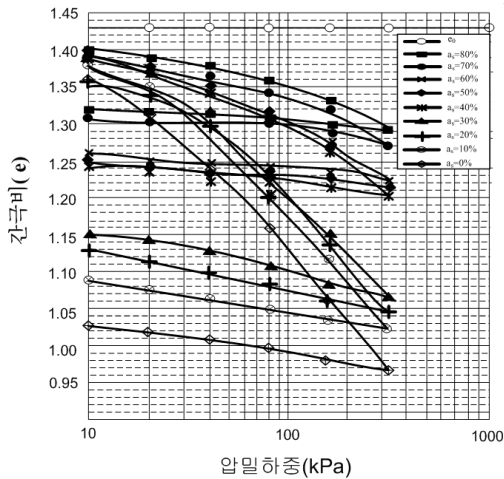


그림 13. 저회-점토지반의 e-logP곡선

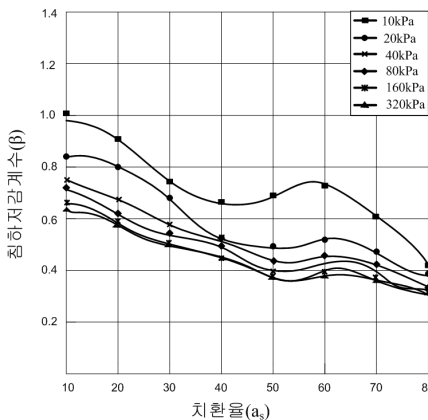


그림 14. 치환율에 따른 침하저감계수

감소효과를 확인 할 수 있었고, 치환율 30%에 비해 40%일 때, 간극비가 약 20% 감소됨을 확인할 수 있었다. 또한, 치환율 40%와 60%일 때의 곡선이 유사한 형태로 나타났다. 또한 치환율이 40%이상인 경우 효과가 현저히 줄고 있음을 알 수 있다.

그림 14는 압밀시험에서 얻은 압밀하중, 치환율 그리고 침하저감계수의 관계를 나타낸 것이다. 전반적으로 복합지반의 침하저감계수는 치환율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이나, 치환율이 40~60% 범위에서 대략 일정한 값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 그림 13에 나타난 압밀곡선 (e-logP)에서도 알 수 있으며, 40~60% 범위내의 치환율에서는 하중 변화에 따른 침하저감이 유사함을 알 수 있었다. 또한, 침하저감계수는 각 치환율 증가에 따라 대체로 감소하나, 40kPa 이상에서는 거의 유사한 경향을 나타내었다.

그림 15는 재하 압력별 저회다짐말뚝의 치환율과 압밀도가 90%에 도달하는 시간관계를 각각 나타 낸 것이다. 복합지반의 압밀도가 90%에 도달되는 시간은 치환율이 40%를 넘으면 거의 일정해지는데, 이는 표준압밀시험의 경우 시료 두께가 작아 수평배수와 연직배수가 거의 동시에 발생하여

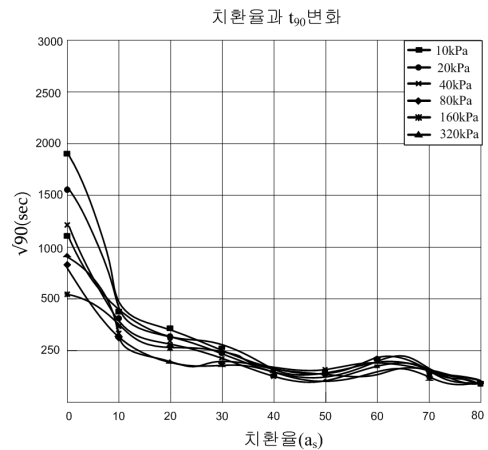


그림 15. 저회-점토치환율과 t<sub>90</sub>의 관계

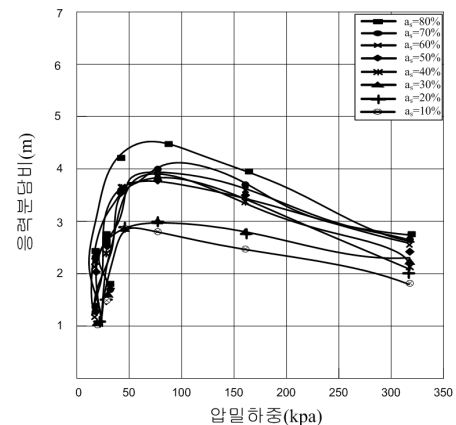


그림 16. 치환율 및 응력분담비 관계

드레인재로써의 압밀 기여도가 상대적으로 작기 때문인 것으로 판단된다.

그림 16은 침하저감계수를 이용하여 응력분담비를 식 (2)를 이용하여 산정한 후, 치환율에 따른 하중변화와 응력분담비의 변화를 나타낸 것이다. 복합지반의 치환율에 따라 응력분담비도 다소의 변화가 있으나, Aboshi 등(1979)의 연구결과와 유사한 2~4의 범위로 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 모래다짐말뚝공법에 사용되는 모래 대체 재료로 공학적 성질이 유사한 저회를 선정하여 복합지반에 적용되는 저회말뚝의 치환율에 따른 전단강도 특성 및 압밀 특성에 대한 기초적 연구로 대형직접전단시험과 직접전단 시험 및 압밀시험을 통하여 공학적 특성을 규명하고자 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 대형직접전단시험 및 직접전단시험 결과 저회의 전단 강도정수가 보통의 모래보다 크게 나타났으며, 저회의 치환율이 증가할수록 그 차이는 미미하지만 전단강도 정수가 증대하는 경향을 나타내었다. 이는 저회의 치환율이 증대될수록 복합지반에서 저회입자의 전단특성 반영 비율이 커지기 때문으로 사료된다.
- (2) 복합지반의 압밀시험 결과, 치환율이 증가할수록 간극비의 감소효과가 두드러지는 가운데 저회-점토복합지반의 저회 치환율이 40~60%일 때  $e\text{-log}P$ 곡선이 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있었다.
- (3) 응력분담비는 40%이상의 치환율에서 큰 차이를 보이지 않고 있으며, 응력분담비는 대략 2~4의 범위에 있는 것으로 나타내는 것을 알 수 있었다.
- (4) 압밀도가 90%도달하는 시간관계를 측정한 결과, 치환율이 40%이상이면 거의 일정해 짐을 알 수 있었는데, 이는 압밀시험의 경우 시료두께가 작아 수평배수와 연직배수가 거의 동시에 발생하기 때문에 드레인재로써의 압밀 기여도가 상대적으로 작기 때문인 것으로 판단된다.

- (5) 저회는 모래와 공학적인 성질이 유사하여, 앞으로 모래가 차지하는 재료의 상당부분을 저회로 대체하게 되면, 연약지반 개량 시 상당량의 저회가 소요될 수 있으며, 모래에 비해 가격이 저렴하므로 경제성이 우수할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20091020100060, 석탄회를 활용한 경량 유동성채움재(Flowable Fills) 제조공정 개발).

## 참 고 문 헌

1. 권혁두(2008), *지반보강 및 차수 그라우팅재료로서의 Bottom Ash 활용에 관한 연구*, 박사학위논문, 서울시립대학교, pp. 2~3.
2. 김재권(2003), *연약지반에 타입된 모래다짐말뚝의 하중전이 특성에 관한 연구*, 박사학위논문, 연세대학교 pp. 25~32.
3. 문대중(1999), *모래다짐말뚝(SCP)의 거동특성 해석을 위한 실험적 연구*, 석사학위논문, 명지대학교, pp. 15~28.
4. 이대수, 김경열, 홍성연, 조화경, 황성춘(2005), 대형직접전단 시험을 이용한 조립재료의 전단거동 특성(I), *한국지반공학회 논문집*, Vol. 21, No. 6, pp. 81~91.
5. 환경부(2008), *제4차 자원재활용 기본계획*, pp. 100~102.
6. 日本土質工學會(1988), *軟弱地盤對策工法, 調査設計から施工まで*, pp. 127~128.
7. 藤田圭一(1995), *軟弱地盤對策工法聽記述, 同和記述*, pp. 701~717.
8. 村山朔郎(1957), *Sand Compaction Pile による軟弱地盤の改良 (コンポーザ工法)*, 大阪建設業協會講演會資料, pp. 1~7.
9. 村山朔郎(1962), *粘性土に對するパイプロコンポーザ工法の考察, 建設機械化, 日本建設機械化協會, Vol. 150, pp. 10~15.*
10. Aboshi, H., E. Ichimoto, M. EnoKi, and K. Harada(1979), The Compozer Method to Improve Characteristics of Soft Clays by Inclusion of Larhe Diameter Sand Columns, *Proceedings, International Conference on Soil Reinforcement: Reinforce Earth and Other Techniques*, Paris, Vol. 37, No. 2, pp. 211~216.
11. Mastuo, M., Kuga, S. and Maekawa, Y.(1967), Properties of Clay Installed Sand Pile, *Japan Society of Civil Engineering*, No. 141, pp. 42~55.

(접수일: 2010. 5. 24 심사일: 2010. 6. 8 심사완료일: 2010. 6. 20)