

## 풍쇄전로슬래그의 연직배수재 활용성에 관한 실험적 연구

### An Experimental Study on the Applicability of Precious Slag Ball as Vertical Drains

권정근<sup>1)</sup> · 임종철<sup>†</sup> · 김우경<sup>2)</sup>

Kwon, Jeong-Geun · Im, Jong-Chul · Kim, Woo-Kyoung

**ABSTRACT** : To investigate the applicability of Precious Slag Ball as the alternative material such as vertical drains, it is necessary to check the drainage effect of it in the field construction. In order to attain a successful design it is important to predict problems encountered in field construction. Accordingly, in this study the laboratory tests were executed under different conditions before applying of the field. 4 cases including Precious Slag Ball, sand+Precious Slag Ball, pack Precious Slag Ball and sand as vertical drains were conducted, and under the base of the laboratory tests the field test was executed and analyzed. By the upper results it is apposite to use Precious Slag Ball as vertical drains.

**Keywords** : Precious slag ball, Vertical drains, Sand drain, Pack drain, Alternative material

**요지** : 연직배수재로의 대체재로 풍쇄전로슬래그의 적용가능성을 판단하기 위해서는 현장시공을 통해 배수효과를 확인하는 것이 필요하다. 그러나 성공적인 설계를 위해서는 현장시공 전에 발생가능한 문제점들을 미리 예측하는 것이 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 현장시공 전 다양한 조건에서 발생가능한 문제점들을 분석하기 위해 실내모형실험을 실시하였다. 실내모형실험은 연직배수재로 풍쇄전로슬래그, 모래+풍쇄전로슬래그, 팩슬래그, 모래 중 4경우에 대해 실험을 수행하였으며, 실내모형실험결과를 바탕으로 현장시험시공을 실시하여 분석하였다. 실내모형실험과 현장시험시공을 통해 연직배수재용 모래대용으로 풍쇄전로슬래그가 사용가능한 것으로 판단되었다.

**주요어** : 풍쇄전로슬래그, 연직배수재, 샌드드레인, 팩드레인, 대체재료

## 1. 서 론

현재 지반개량 시 사용되고 있는 모래는 그 물량을 확보하기가 어려워 각 현장에서 고가로 구입하여야 하는 등 대체자원의 확보가 절실한 것이 현실이다. 모래대체재로서 가장 활발히 적용되고 있는 재료는 철강 슬래그로 국내에서는 이광찬 등(2000)이 전로 슬래그의 투수성에 대한 연구를 통해 샌드매트용 모래의 대체 재료로의 이용 가능성 여부를 연구하였다. 또한 이문수 등(1999)은 연직배수공법으로 제강 슬래그의 적용성에 관해 연구하였으며, 문용현(1987)은 도로의 기층 및 보조기층 재료로 고로 슬래그의 이용에 관해 연구하였다. 김주한(1983)은 슬래그 혼합토의 전단강도에 관한 연구를, 정진교(1989)는 전기로 슬래그 기동공법에 관한 연구를 수행하였다. 이런 철강 슬래그는 고로슬래그(서냉슬래그, 수쇄슬래그)와 제강슬래그(전로슬래그, 전기로슬래그)로 나눌 수 있으며, 제강 슬래그는

종류, 조성의 다양성, 풍화, 팽창, 붕괴성 등의 성질 때문에 재자원화율이 낮고 슬래그의 매립처리 및 재활용 용도가 제한되어 있어 재활용대책이 시급한 실정인 것으로 보고되고 있다(박춘성, 2009). 풍쇄전로슬래그는 이런 제강슬래그를 SAT(Slag Atomizing Technology)라는 신공법을 적용하여 불안정한 용융상태의 제강슬래그로부터 안정된 분자구조로의 친환경제품으로 제조한 것이다. 본 연구에서는 샌드드레인 대체재로서 풍쇄전로슬래그의 적용가능성을 분석하기 위해 실내모형실험이 수행되었으며 실내모형실험을 통해 풍쇄전로슬래그를 연직배수재로 사용하였을 때의 연직배수기능을 모래 100%로 시공한 샌드드레인의 연직배수기능과 비교·분석하였다. 또한 풍쇄전로슬래그가 연직배수재로 사용되었을 배수과정에서 주변점토에 의한 Clogging현상(점토입자에 의해 연직배수재가 막히는 현상)으로 배수기능이 저하되지 않을 것인지에 대해 분석하였다. 배수기능의 비교·분석을 위해 4종류의 실내모형

1) 정희원, 부산대학교 토목공학과 박사과정

† 비희원, 부산대학교 토목공학과 정교수(E-mail : imjc@pusan.ac.kr)

2) 정희원, 부산대학교 토목공학과 석사과정

실험과 물리시험이 수행되었으며, 실내모형실험 결과를 바탕으로 현장시험시공을 실시하여 그 계측결과를 분석하고 실내모형실험의 결과와 비교·분석하여 풍쇄전로슬래그의 연직배수재로서의 적용가능성을 평가하였다.

## 2. 풍쇄전로슬래그

국내에서 슬래그는 80년대 중반부터 산업폐기물 재활용의 일환으로 토목 재료로의 이용법에 대한 연구가 진행되고 있으며, 슬래그 부산물을 자원화하기 위한 광범위한 연구 개발이 시작되어 현재까지 많은 성과를 거두고 있다. 포항제철·동서개발과 대한 토목학회에서 제강슬래그를 사용한 아스팔트보조설계·시공지침(한국건설기술연구원, 1985), 고로슬래그 기층 및 보조기층 설계·시공지침(대한토목학회, 1982), 복합슬래그 기층 및 보조기층 설계·시공지침(한국도로포장공학회, 1989)이 발표되었다. 그러나 고로슬래그의 경우 거의 100% 재활용이 되었으나 제강슬래그의 경우 46%만이 재활용되고 있다(이광찬 등, 2000). 전로슬래그는 일반적으로 염기도가 높고 비중이 큰 철, 망간 등의 유기 금속을 함유하고 있기 때문에 여러 슬래그 중에서 그 자체의 강도가 높다고 할 수 있지만 제조 방법에 따

라 풍화에 대한 저항성이 크거나 작으며 만약 팽창된다면 공학적으로 불안정하므로 건설재료로 이용이 제한되었다. 그러나 이런 제강슬래그를 SAT(Slag Atomizing Technology)라는 신공법을 적용하여 불안정한 용융상태의 제강슬래그로부터 안정된 분자구조로의 친환경제품으로 제조한 것이 풍쇄전로슬래그이다. 풍쇄 공정은 용융슬래그를 고압의 공기압 분사하여 슬래그를 미립화하는 단계로 구성되어 있다. 일본에서는 풍쇄전로슬래그를 오래 전부터 생산하여 판매해 왔고 주로 선박용 연마재료 및 각종 골재의 용도로 제품화하여 판매해 오고 있으며 품질도 우수한 것으로 알려져 있다. 그림 1과 같이 공기압에 의해 날려간 거리에 따라 생성된 풍쇄전로슬래그의 입경의 범위는 다양하게 된다(그림 2 참조). 또한 환경적 영향 검토를 위해 폐기물 공정 시험법, EPT법, MET법에 의하여 풍쇄전로슬래그의 용출시험을 실시한 결과, 풍쇄전로슬래그는 매우 청정한 재료인 것으로 나타났다(한국지반공학회, 2005). 현재 국내에서는 이상수 등(2006)에 의해 풍쇄전로슬래그의 콘크리트 잔골재로서의 적용가능성에 관해 연구하였으며, 신은철 등(2009)에 의해 샌드매트로의 적용가능성에 관해 연구하였다. 2000년 이전까지만 해도 슬래그를 샌드드레인 공법처럼 슬래그를 배수재로 사용한 예는 없었으며(이광찬 등, 2000), 현재도 활발하게 적용되고 있지는 않다.

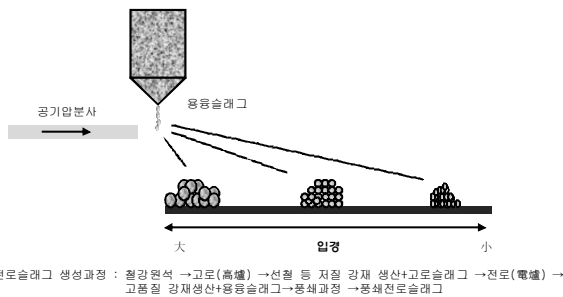


그림 1. 풍쇄전로슬래그의 생성과정



그림 2. 풍쇄전로슬래그의 입도별 모양

## 3. 연직배수공법

연직배수공법은 1926년 미국의 엔지니어 Daniel E. Moran에 의해 개발되어 캘리포니아주에서 최초로 시공되었으며, 그 후 Barron(1948)등에 의해 이론적인 해석법이 확립되면서 세계적으로 널리 사용되게 되었다. 국내의 경우 1975년 창원기계공업 단지조성 공사에 처음으로 소개(김수삼 등, 1976)되어 지금까지 연약지반공사의 주요수단이 되어 왔다. 연직배수공법으로는 연직 배수재의 형태에 따라 크게 샌드드레인과 밴드드레인으로 나눌 수 있으며, 샌드드레인에는 다시 재료의 종류에 따라 샌드드레인, 쇄석드레인 등으로 나뉘며, 압밀 시 드레인 단면의 단절 등을 방지하기 위해 팩으로 드레인을 감싼 팩드레인으로 구분된다. 밴드드레인은 플라스틱보드드레인과 기타 드레인등으로 분류된다.

연직배수재 적용 시 방사형 압밀이론(Radial Consolidation Theory)이 적용되는데 기본개념은 과잉간극수압이 연직방향은 물론, 방사방향으로 소산되도록 하여 압밀을 촉진시키는 것이다. 이러한 방사형 압밀방정식은 Terzaghi(1943)의 1차원 압밀이론을 기본으로 하여 Rendulic(1936) 및

Barron등에 의해 발전되었는데, 점토의 투수계수 및 체적 압축계수가 압밀 중에 변하지 않는다는 가정하에서 식 (1)과 같은 편미분 2차 방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + C_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (1)$$

여기서,  $u$ =임의 깊이 임의 시점에서의 과잉간극수압,  $z$ =깊이,  $r$ =반경,  $t$ =압밀시간,  $C_v$ =연직방향의 압밀계수 ( $\frac{H^2 T_v}{t}$ ),  $T_v$ =연직방향의 시간계수,  $H$ =배수거리,  $C_h$ =방사방향의 압밀계수 ( $\frac{D_c^2 T_h}{t}$ ),  $T_h$ =방사방향의 시간계수,  $D_c$ =영향원의 지름

그림 3은 연직배수재 적용지반의 단면을 개략적으로 보여주고 있다.

Barron은 배수저항(well resistance)과 교란효과(smear effect)를 고려하지 않고 이상적인 조건하에서 수평방향에 대한 평균압밀도를 제시하였으며, 그 후 Yoshikuni(1974)는 Barron의 식을 수정하여 배수저항을 고려하였다. 한편 Barron의 이론에서와 같이 이상적인 경우의 연직배수에 대한 해석에는 배수재 자체의 투수성이 무한하다고 가정하였으나, 실제의 경우에는 배수재의 투수성은 유한하므로 배수용량은 제한되며, 또한 배수재 설치 시의 지반교란으로 투수계수 및 압밀계수가 감소하고 압축성이 증가하게 되는 교란영역이 형성되므로 이에 따라 압밀이 지연된다. 따라서 Hansbo(1979)는 배수재 주변을 교란영역과 비교란영역으로 구분하고 배수저항과 교란효과를 모두 고려하여 Barron의 식을 수정하였다. 그 후 Onoue(1988)는 연직배수공법의 설계를 위한 가장 일반적인 방정식을 제시하였는데 이것은 Yoshikuni의 이론식을 수정한 것으로 배수저항과 교란효과를 모두 고려한 간단한 방정식이다.

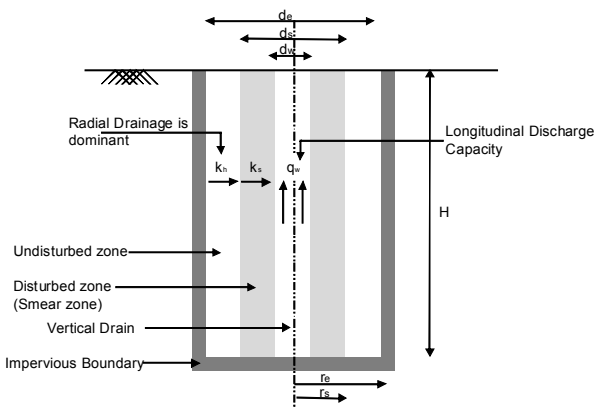


그림 3. 연직배수의 개념도(Holtz 등, 1991)

## 4. 실내모형실험

### 4.1 실험조건 및 방법

풍쇄전로슬래그(이하 표현의 간소화를 위해 풍쇄전로슬래그를 슬래그로 표기)의 연직배수재로의 적용가능성을 현장시험시공을 통해 확인하기 전에 발생가능한 문제점을 분석하기 위해 실내모형실험이 수행되었다. 본 연구에 사용된 실내 모형실험장치는 실린더 및 덮개는 하중재하 시 변형이 발생하지 않도록 강철로 제작하였으며, 내부 피스톤 역시 변형이 발생하지 않도록 충분한 강성을 가지도록 제작되었다. 또한 양면배수를 위해 피스톤 및 하부 바닥은 다공질로 제작되었으며, 하중 재하 시 실린더와 피스톤의 마찰이 최소화될 수 있도록 그리스를 충분히 도포하였다. 장치개략도는 그림 4와 같으며 실험장치는 기능에 따라 압밀 실린더, 저수탱크, 하중재하장치, 계측장치로 구성된다(유상호, 1996). 일반적으로 드레인 타설간격은 샌드드레인이 1.5~4.5m의 범위로 2.0~2.5m의 범위가 가장 많이 사용되며 약 70% 정도를 차지하고 있다. 밴드드레인의 경우는 0.5~2.5m의 범위로 1.0~1.5m의 범위가 가장 많아 약 70% 정도를 차지하고 있다. 샌드드레인의 타설직경은 40~50cm, 팩드레인의 경우 12cm, 카드보드드레인은 안전계수를 고려하여 5cm(환산지름)를 사용하고 있다. 본 연구에서는 샌드드레인의 대체제로 슬래그를 사용하고자 하며 실내모형실험 시 연직배수재의 직경은 25mm로 제작하여 연직배수재로 형성하였다. 본 연구에서 배수재의 직경을 25mm로 제작한 이유는 본 실험은 샌드드레인 대비 슬래그의 연직배수재로서의 배수성능을 판별하기 위한 것으로 직접전단시험결과 샌드드레인과 슬래그의 전단저항력이 달라 배수재의 직경이 증가할 경우 정확한 상호비교가 어려울 것으로 판단되었으며, 실제 샌드드레인의 타설 직경 대비 설치간격이 최대 10배 가량이므로 본 실험에서

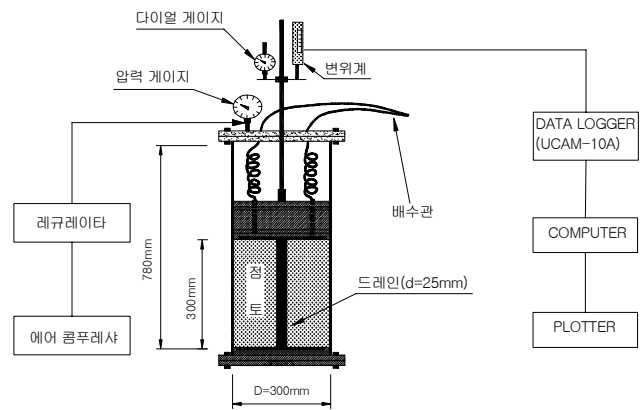


그림 4. 모형 실험장치

표 1. 실내모형실험의 항목별 실험개요

| 실험항목             |              | 실험목적  |
|------------------|--------------|---|
| 모래(Sand Drain)   |              | 기존에 사용하던 Sand Drain의 배수기능과 슬래그에 의한 배수기능, 그리고 모래와 슬래그를 동일 비율로 혼합하였을 때의 배수기능 등을 비교 분석함으로써 슬래그가 대체 재료로서 타당성이 있는가를 실내모형실험 상으로 평가할 수 있다. |
| 슬래그              | Without Pack |   |
|                  | With Pack    |   |
| 모래 50% + 슬래그 50% |              |   |

도 이를 적용하여 실험을 수행하였다.

슬래그의 연직배수재로서의 적용가능성을 판단하기 위해 모래 100%, 부피에 대한 백분율로 모래 50%+슬래그 50%, 슬래그 100%의 총 3개의 시료를 제작하여 실내모형 실험을 수행하였다.

또한 팩드레인으로서 기능을 비교·분석하기 위해 슬래그 100% 시료에 팩의 설치 및 미설치하여 실내모형실험을 수행하였다. 표 1은 실내모형실험 종류 및 항목별 실험개요를 나타낸 것이다.

본 연구에서 수행된 실내모형실험의 실험과정은 다음과 같다.

㉠ 자연상태의 양질의 해성점토를 #10체에 통과시키면서 패각, 이물질 등을 제거한다. ㉡ 이렇게 제작된 점토의 함수비는 약 100% 정도로 일정하도록 해수를 첨가하여 교반기로 충분히 교반한다. ㉢ 드레인재로만 배수가 이루어지도록 하기 위해 드레인 직경 내부가 구멍 난 비닐을 다공질판 위에 덮고 여과지를 깬다. ㉣ 실린더를 조립한 후 다공질판을 포화시키고 밀판에 배수파이프를 연결한다. ㉤ 실린더 내면과 피스톤 O링 주위에 마찰을 줄이기 위해 실리콘 그리스를 바른다. ㉥ 드레인재를 소요 높이(30cm)로 확보하기 위해 가이드 봉(외경 25mm)을 실린더 중앙에 고정한다. ㉦ 봉 주변을 함수비 약 100%의 점토로 30cm 높이까지 채워 공시체를 제작한다. ㉧ 뚜껑을 덮고 진공펌프로 부압을 가하여 12시간 탈기한다. ㉨ 탈기 후 뚜껑을 열고 피스톤에 비닐과 여과지를 깔고 실린더에 조립한다. ㉩ 뚜껑과 피스톤에 배수 파이프를 연결하고 저수통을 설치한다. ㉪ 변위계와 다이얼 게이지를 설치한다. ㉫ 압밀 압력을 증가시키기 전 점토의 안정화를 위해 48시간 방치한다. ㉬ 배수밸브를 열고 정밀 레귤레이터를 조작하여 압밀압력을 가하면서 시간에 따른 침하량을 측정한다. 하중의 재하는 콤프레샤로부터 공급된 공기압을 레귤레이터로 제어하여 재하한다. 하중단계는 40, 80, 160kPa의 3단계로 하였다. 실험의 종료는 레귤레이터의 공기압을 빼어 하중을 제거하고 압밀실린더로부터 압밀된 시료를 분리해 낸다. 그리고 공시체의 높이를 측정하고 드레인재로부터 수평방사방향으로 2cm마다 함수비를 측정한다. 또한 드레인재와 점토를 분리하여 드레인재 내부에 점토입자가 혼입

되어 드레인재가 막히는 현상인 Clogging의 발생여부를 관찰하였다.

## 4.2 요소시험 결과분석

본 실험에 사용한 점토 및 연직배수재의 기본물성시험 결과와, 연직배수재의 직접전단시험 결과, 그리고 투수시험결과는 표 3~5와 같다. 연직배수재의 기능은 지반 내의 간극수를 신속히 탈수시켜야 하며 연약지반 내의 토립자를 보존할 수 있는 필터의 역할을 가져야 한다. 이를 만족하기 위해 드레인재의 입도 범위 및 투수계수에 관한 규정이 재정되어 있으며 대표적인 샌드드레인재의 입도분포 범위는 일본 규정과 캘리포니아주의 시방규정을 들 수 있다. 일본의 규정은 Skempton이 제안한 입도분포로서 샌드드레인재는 균등계수  $C_u > 3$ , #200체 통과량은 3%이하,  $D_{15}=0.1 \sim 0.84\text{mm}$ ,  $D_{85}=0.84 \sim 5.0\text{mm}$ 로 규정되어 있고 샌드매트재는  $k > 1.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ,  $D_{15}=0.074 \sim 0.84\text{mm}$ ,  $D_{85}=0.4 \sim 5.0\text{mm}$ 로 규정되어 있다. 캘리포니아주의 시방규정은 Skempton이 제시한 드레인용 입도 분포곡선과 유사하나 통과량 5% 이상에서의 입경을 비교적 크게 규정하고 있다(김상규, 1994). 연직배수재의 투수계수에 대한 규정은 뚜렷하지 않고 압밀의 속도와 밀접한 관계가 있는 것으로 생각된다.

현재 우리 나라에서는 드레인재로서의 적합성을 입도 분포와 투수계수(보통 일본 규정에 준함 ; 샌드매트의 경우는  $k > 10^{-3} \text{cm/sec}$ , 샌드드레인의 경우는 보통 샌드매트와 동일한 규정 적용)만으로 판단하고 있으나 정확한 실내 모형실험과 현장 실험을 통해 드레인재로서의 사용 여부를 결정해야 할 것이다.

현재 국내에서 적용하고 있는 대부분의 연직배수재에 대한 규정은 일본 지반공학회에서 권장하고 있는 입도 및 투수계수 규정을 따르고 있는 실정이다. 그러나 투수시험은 드레인재의 투수성을 검토하기 위해 이용하지만 현재 우리나라에서는 모래의 경우에 투수시험을 행하는 경우가 적고 입도분포를 조사해 재료의 적합 여부를 판단하고 있는 실정이다. 정수위투수시험은 간극비의 영향에 의해 그 값이 달라짐으로 본 연구에서는 실제 모형실험에서 드레

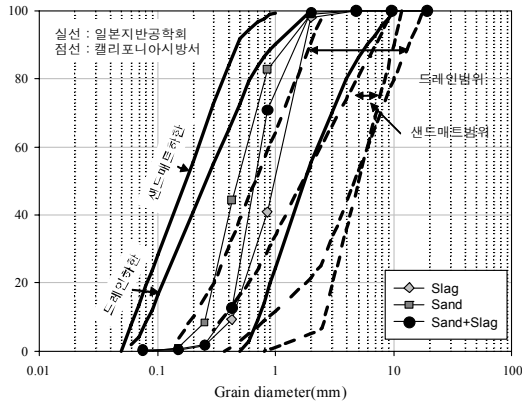


그림 5. 실험에 사용된 연직드레인 재료의 입도분포

인재 삽입 시 낙하고 30cm를 유지하여 실험하였으며 투수 시험에 사용된 재료의 경우도 낙하고 30cm를 유지하여 투수 시험을 수행하였다. 표 5와 같이 투수 시험 결과 모든 실험 재료의 투수 계수가 시방 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 본 실험에 사용된 모래, 슬래그, 모래+슬래그의 입도 분포는 그림 5와 같으며 일본지반공학회가 제안하고 있는 연직배수재로서의 규정에 만족하고 있는 것으로 나타났다

표 2. 샌드드레인용 재료(軟弱地盤對策技術總覽編集委員會, 1993)

| 모래                      |            |
|-------------------------|------------|
| 항목                      | 표준값        |
| 74 $\mu$ m(No.200)체 통과량 | 3%이하       |
| $D_{85}$                | 1~5mm      |
| $D_{15}$                | 0.1~0.75mm |

(주)  $D_{85}, D_{15}$ 란 각각 입도곡선에 있어서 통과중량백분율이 85% 및 15%에 상당하는 재료의 입경을 말한다.

표 3. 점토 및 슬래그의 물성시험 결과

| 점토(CH) |       | 비중   |      |      |                     |
|--------|-------|------|------|------|---------------------|
| 액성한계   | 소성한계  | 점토   | 모래   | 슬래그  | 모래+슬래그<br>(체적비 1:1) |
| 53.4%  | 27.7% | 2.67 | 2.62 | 3.70 | 3.26                |

표 4. 연직배수재의 직접전단시험 결과

| 시료     | 밀도( $g/cm^3$ ) | 건조시        | 포화시        | 비고                  |
|--------|----------------|------------|------------|---------------------|
|        |                | $\phi$ (°) | $\phi$ (°) |                     |
| 모래     | 1.61           | 45.0       | 44.8       | 밀도는 설치 드레인재의 밀도와 동일 |
| 모래+슬래그 | 1.83           | 40.0       | 38.0       |                     |
| 슬래그    | 2.10           | 42.4       | 36.0       |                     |

표 5. 정수위 투수시험 결과

| 시료     | 투수계수, $k$ ( $cm/sec$ ) | w비 고                                      |
|--------|------------------------|---|
| 모래     | $5.56 \times 10^{-2}$  | 투수계수규정<br>$k > 1.0 \times 10^{-3} cm/sec$ |
| 모래+슬래그 | $1.14 \times 10^{-1}$  |   |
| 슬래그    | $3.39 \times 10^{-1}$  |   |

(日本土質工學會, 1988).

### 4.3 압밀실험결과분석

압밀압력에 따른 각 실험의 시간-침하곡선은 그림 6~8과 같으며 압밀압력별로 구분하여 정리하면 다음과 같다. 그림 6~8에서 압력단계가 높아질수록 팍슬래그의 압밀침하 경향이 슬래그와 같아지는데 이는 압밀압력단계가 증가할수록 팍슬래그 단면이 팽창, 파단되어 팍의 필터기능이 상실되어 나타나는 현상인 것으로 판단된다.

각 압밀도에 대한 압밀시간을 모래를 1로 하여 계산하면 그림 9~11과 같다. 각 연직 배수재를 사용하였을 때 압밀시간은 그림 6~그림 8에서 구한 값이다.

낮은 압력단계인  $40kPa$ 에서는 각 연직배수재의 압밀소요시간비는 거의 동일한 것으로 나타난다. 그리고  $80kPa, 160kPa$ 에서는 모래에 비해 모래+슬래그, 슬래그는 시간비가 1.5~2.0 정도가 되는 것으로 나타났다. 그러나 팍슬래그인 경우는 비교적 시간비가 모래와 동일한 것으로 나타나 배수재로서의 효과가 더 나은 것으로 보인다.

높은 압밀압력단계에서 슬래그의 시간비가 모래에 비해

증가하는 것은 배수재로 설치한 슬래그가 시간이 흐름에 따라 해수에서 부분적으로 굳어지는 경향을 보이고 이러한 경향이 배수기능을 어느 정도 떨어뜨리는 것으로 판단된다. 그러나 허준희(1999)의 제강 슬래그에 관한 투수성의 실험적 연구에 의하면 담수에서 보다 해수에서 투수계수가 낮게 나타나고 100일 경과 시 해수에서 투수계수가

저하하는 것으로 나타난다고 하는 연구와 더불어 본 과업에서는 Pack을 설치한 경우에는 그러한 경향이 거의 나타나지 않았다. 따라서 시간이 흐름에 따라 드레인재의 일부가 뭉쳐지는 현상 자체가 배수기능을 저하시키는 것인지에 대해서는 향후 현장실험으로 확인할 필요가 있을 것으로 생각된다.

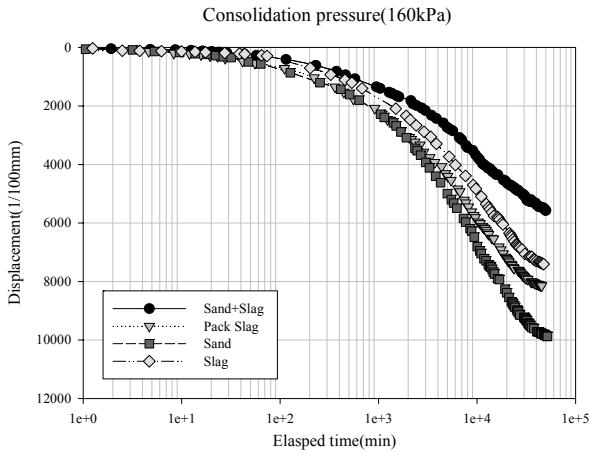


그림 6. 압밀압력 160kPa인 경우의 시간-침하곡선

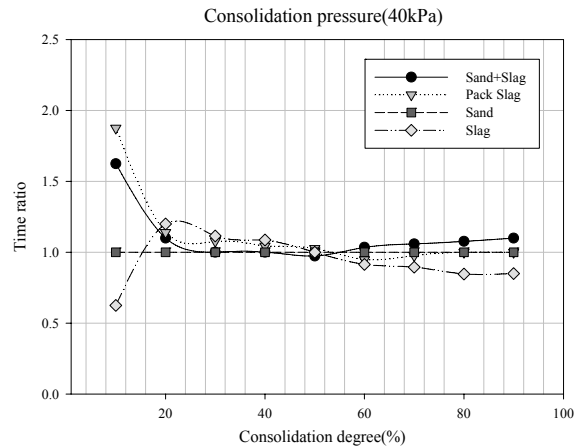


그림 9. 각 압밀도에 소요되는 시간(40kPa)

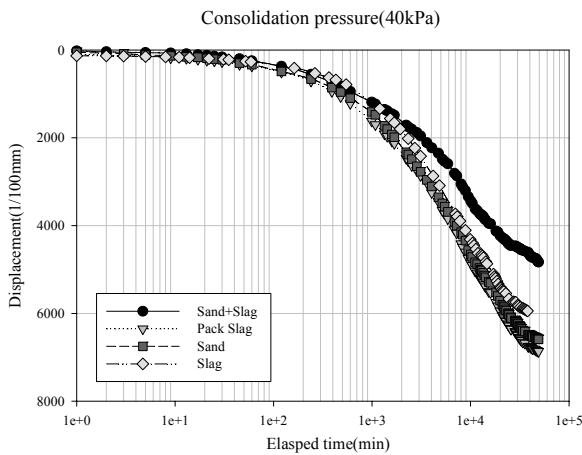


그림 7. 압밀압력 40kPa인 경우의 시간-침하곡선

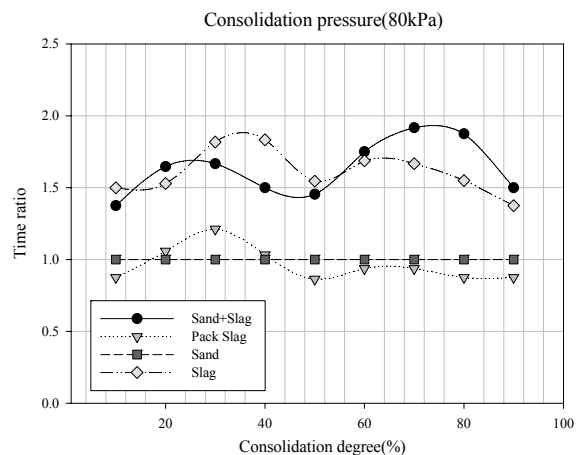


그림 10. 각 압밀도에 소요되는 시간(80kPa)

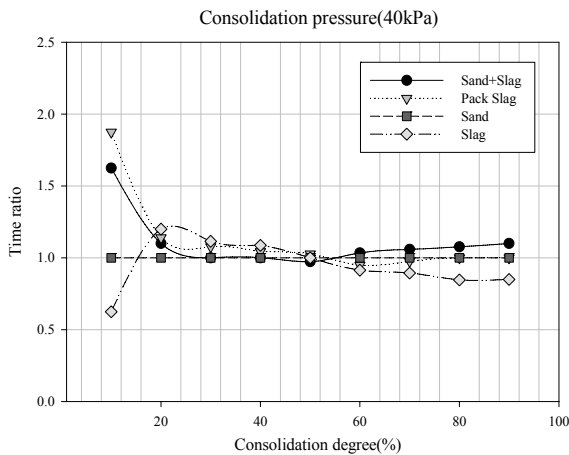


그림 8. 각 압밀도에 소요되는 시간(40kPa)

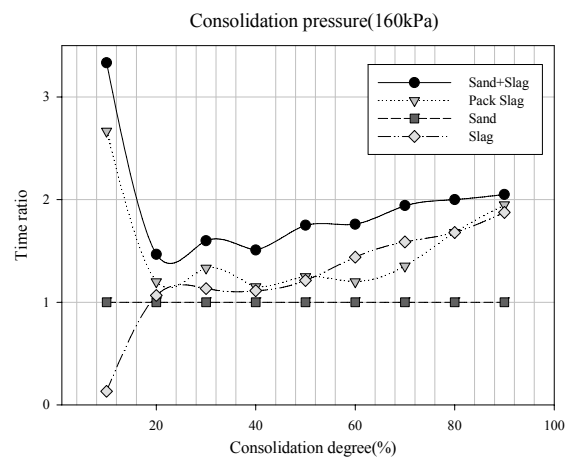


그림 11. 각 압밀도에 소요되는 시간(160kPa)

표 6. 모래 사용 시의 압밀시간을 1로 할 때의 압밀시간 비교

| 압밀 압력 | 40(kPa) |          |     |      | 80(kPa) |          |     |      | 160 (kPa) |          |     |      |
|-------|---------|----------|-----|------|---------|----------|-----|------|-----------|----------|-----|------|
|       | 모래      | 모래 + 슬래그 | 슬래그 | 팩슬래그 | 모래      | 모래 + 슬래그 | 슬래그 | 팩슬래그 | 모래        | 모래 + 슬래그 | 슬래그 | 팩슬래그 |
| 압밀시간비 | 1.0     | 1.1      | 0.9 | 1.0  | 1.0     | 1.5      | 1.4 | 0.9  | 1.0       | 2.1      | 1.9 | 2.0  |

각 압밀도에 대한 압밀시간을 모래를 1로 하여 압밀압력에 따른 모래+슬래그, 슬래그, 팩슬래그의 압밀시간을 계산하면 표 6과 같으며 표 6을 이용하여 각 연직배수재 사용 시의 압밀압력에 따른 압밀시간을 정리하면 그림 12와 같다. 그림 12에서 알 수 있듯이 40kPa에서는 슬래그와 팩슬래그의 90% 압밀도에 이르는 시간비가 각각 0.85, 1.0으로 모래와 유사내지는 더 양호한 것으로 나타났으며, 80kPa 압밀압력에서 역시 팩슬래그의 압밀시간비가 0.875로서 모래보다 더 양호한 나타나고 있다. 그러나 160kPa에서는 시간비가 모래에 비해 다소 길어지는 경향을 나타내고 있지만 현장 적용에 의한 실질적인 침하분석이 필요할 것으로 판단된다.

압밀완료 후의 시료를 절단하여 확인한 결과 드레인재 내부로 점토가 끼어드는 현상(Clogging 현상)은 나타나지 않았다. 점토와 드레인재가 구분되어 점토시료 절단 시 드

레인재가 그대로 흘러내렸으며, 그 내부는 점토가 전혀 끼어들지 않는 것으로 나타났다. 단지 드레인 기둥의 원주상 표면에 있는 1개의 입자 정도가 점토와 붙어 있는 정도로 불과하였다.

### 5. 현장실험

실내모형실험 및 요소실험결과와 함께 현장실험을 통해 슬래그의 연직배수재로의 대체시공 가능성을 판단하고자 광양 CTS YARD현장에서 시험시공을 실시하였다. 성토가 완료되는 전 과정에 걸쳐 계측이 수행되었으며 모래와 슬래그의 배수기능을 비교·분석하기 위해 두 지역으로 나누어 시공하였다. 그림 13은 연구대상 현장의 시험시공 평면도이다.

시험시공 위치에서의 성토현황 및 지층현황을 그림 14에 나타내었다. 모래 또는 슬래그의 시공간격은 2.25m, 직경 40cm로 약 30m의 길이로 시공되었다. 지반은 실트질 점토가 약 10m 가량 형성되어 있다.

계측계획은 지중경사계 1개소, 층별침하계 2개소, 침하판 14개소, 지하수위계 3개소가 설치되었다. 침하판은 총 14개소 중 슬래그 8개 지점(S-11~S-18), 모래 6개 지점(S-19~S-24)에 대해 설치되었고, 그 중 성토고가 비슷한 지점을 선정하여 상호 비교·분석하였다. 비교지점은 S-13(슬래그)과 S-23(모래), 그리고 S-12, S-17, S-18(슬래그)과 S-20(모래)의 계측데이터를 분석하였다. 그림 15~18은 성토 경과일수에 따른 성토고와 침하량의 관계를 나타낸 것으로 성토고, 압밀층의 두께 등의 차이를 생각한다면 모래

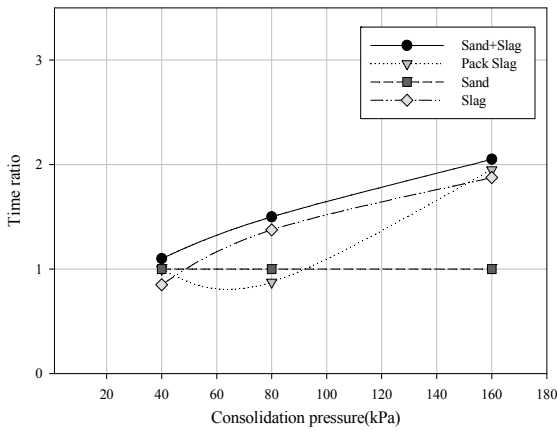


그림 12. 압밀압력에 따른 90% 압밀 시의 압밀시간 비교

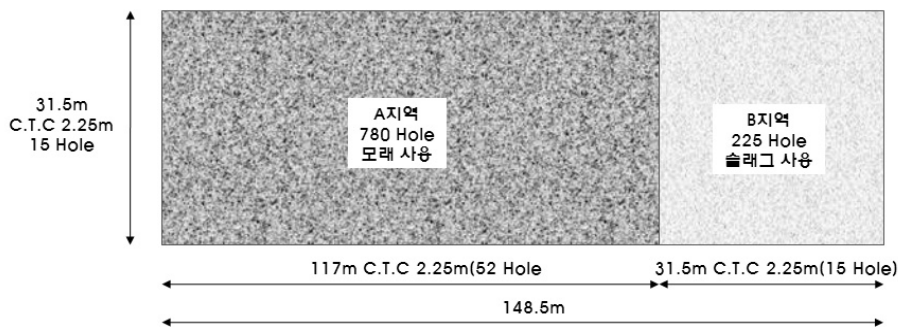


그림 13. 시험시공 평면도

와 슬래그의 시공위치에서의 침하에 대한 엄밀한 비교·분석은 그 의미가 떨어질 것이다. 그러나 그림 15의 분석결과 경과일-침하량 그래프에서 슬래그로 시공된 S-13의 경

우 압밀침하가 거의 수렴되는 양상을 나타내고 있는 반면 모래로 시공된 S-23은 아직 잔류압밀침하가 진행되고 있는 것으로 나타났다. 경과일에 따른 침하량 곡선의 형태를

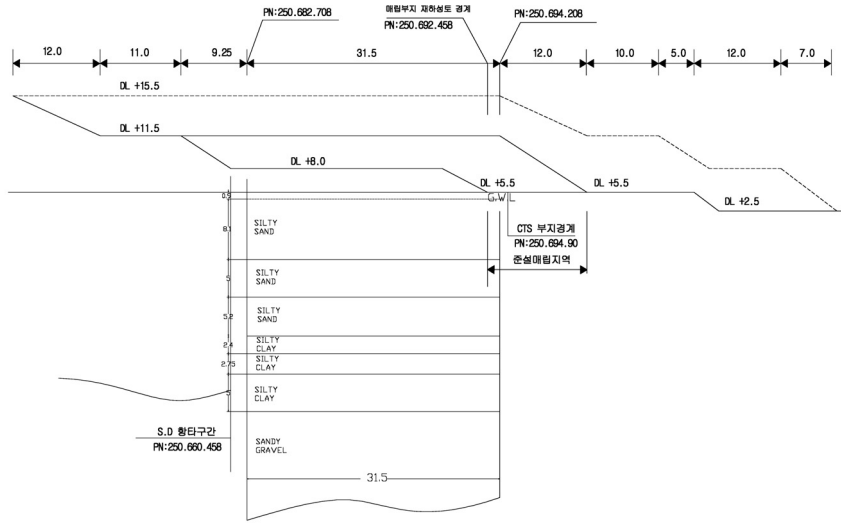
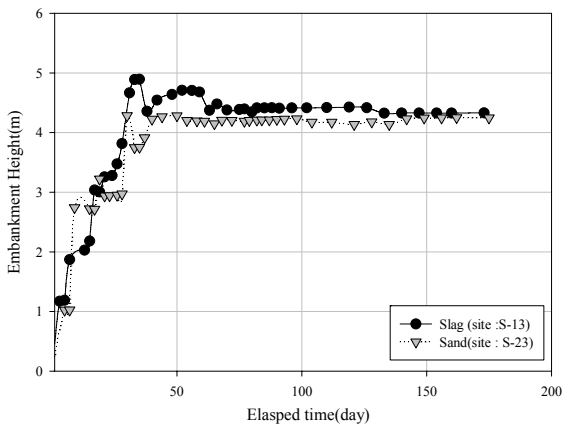
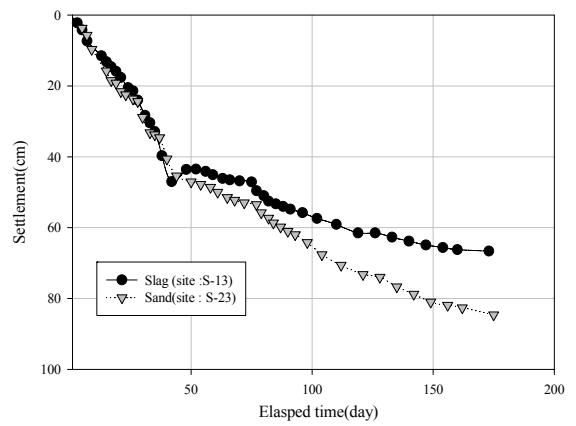


그림 14. 시험시공 위치의 성토현황 및 지층도

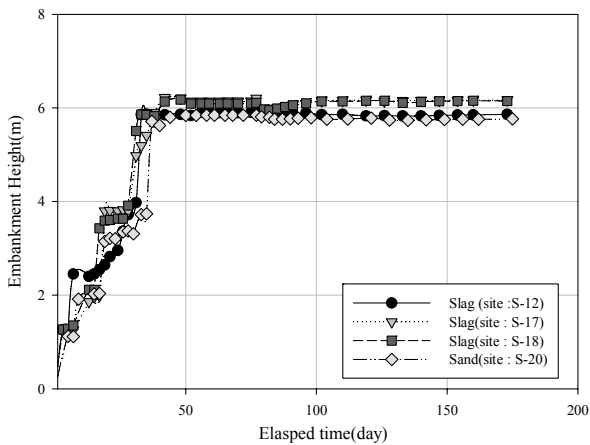


(a) 성토고-경과일 관계

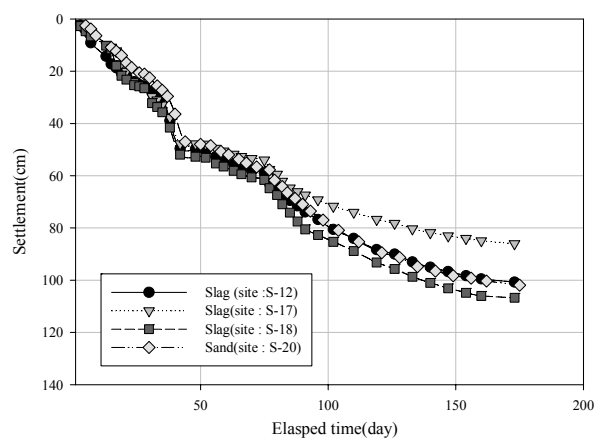


(b) 침하량-경과일 관계

그림 15. 모래와 슬래그의 성토고(모래(S-23), 슬래그(S-13))



(a) 성토고-경과일 관계



(b) 침하량-경과일 관계

그림 16. 모래와 슬래그의 성토고(모래(S-20), 슬래그(S-12, 17, 18))



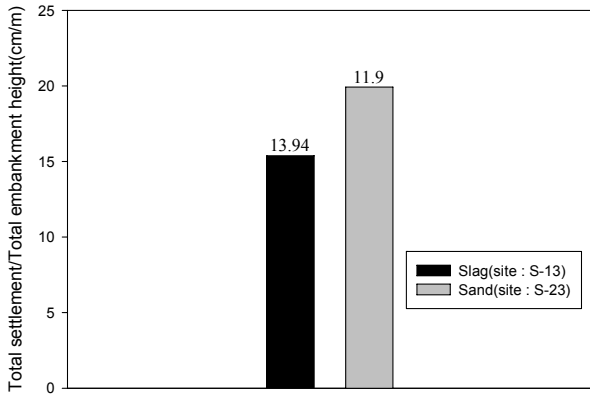


그림 17. 모래(S-23)와 슬래그(S-13)의 총성토고에 대한 총침하량의 비교

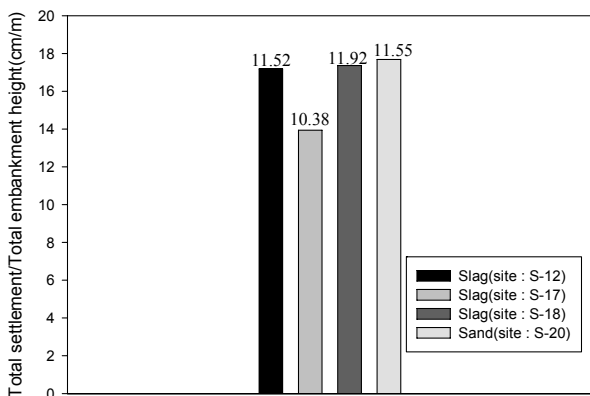


그림 18. 모래(S-20)와 슬래그(S-12, 17, 18)의 총성토고에 대한 총침하량 비교

살펴보면 슬래그(S-13)가 모래(S-23) 보다 빨리 수렴하는 경향을 나타내고 있다. 그림 16에서도 일일성토량과 총 성토고가 유사한 지점에서의 압밀침하량 계측결과를 상호 비교해보면 슬래그와 모래의 침하곡선의 형태는 유사한 것으로 나타나고 있으며, 가장 빠르게 수렴경향을 보이고 있는 것이 S-17(슬래그)로 모래와 유사하거나 슬래그가 압밀침하의 수렴이 더 빠르다는 것을 보여주고 있다.

그림 17 및 그림 18은 그림 15와 그림 16의 결과를 경과일수에 따른 최종성토고와 최종침하량의 비로 나타내 것이다. 압밀침하층의 정확한 성질 비교는 어렵지만 현재까지 발생한 총 압밀침하량을 비교해보면 그림 17에서 슬래그를 연직배수재로 사용한 위치에서의 침하량은 모래에 비해 약 77.2%에 해당하는 침하량을 나타내고 있고, 그림 18에서도 슬래그가 모래에 비해 78.8~98.2%의 압밀침하량을 나타내고 있다. 그림 15 및 그림 16에서도 언급하였듯이 슬래그 층의 침하량이 그 양적으로는 적게 나타나지만 압밀침하의 수렴성을 더 빠른 것으로 나타나 슬래그를 샌드드레인 공법에서 모래대용으로 사용해도 무방할 것으로

판단된다.

이상의 결과를 종합적으로 살펴보면 슬래그는 샌드드레인 공법에서 모래 대체 재료로서 그 투수기능에 있어 우수한 것으로 판단이 된다. 특히 슬래그가 연직배수재로 설치될 경우에 슬래그 자체가 시간이 흐름에 따라 지지기둥으로서의 기능을 하여 장기적인 침하량을 감소시키는 경향을 나타낸다. 즉, 압밀침하의 수렴이 조기에 나타나는 것이 해수에 장시간 방치하였을 경우 슬래그가 서로 응집되어 작은 크기의 입자 덩어리를 형성하는 성질에 기인하는 것으로 추정된다.

## 6. 결 론

최근에 연직배수재로 사용되고 있는 모래의 고갈로 인하여 대체재로서 풍쇄전로슬래그의 연직배수재로서의 타당성을 총 4경우(모래, 모래+슬래그, 슬래그, 팩슬래그)의 실내모형실험을 통하여 분석하였다. 또한 풍쇄전로슬래그와 모래를 연직배수재로서 현장에 각각 시험시공하고 성토 후 경과일수에 따른 압밀침하량 곡선을 분석하여 그 효과를 확인하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 풍쇄전로슬래그의 입도분포는 일본지반공학회가 제시하는 연직배수재의 기준을 만족하였으며, 투수계수 역시 배수재로서의 기준을 만족하는 것으로 나타났다.
- (2) 압밀압력 40kPa에서는 슬래그와 팩슬래그의 90% 압밀도에 이르는 시간비가 각 0.85, 1.0으로 모래와 유사 내지는 더 양호한 것으로 나타났으며, 80kPa 압밀압력에서 역시 팩슬래그의 압밀시간비가 0.875로서 모래보다 더 양호한 나타나고 있다. 그러나 160kPa에서는 시간비가 모래에 비해 다소 길어지는 경향을 나타내고 있어 보다 정확한 판단을 위해서는 현장실험이 필요할 것으로 판단된다.
- (3) 높은 압밀압력단계에서 슬래그의 시간비가 모래에 비해 증가하는 것으로 나타났고 일부 덩어리로 뭉쳐지는 경향을 보였다. 이러한 경향이 투수성을 떨어뜨릴 것 인지에 대해서는 향후 현장실험을 통해 실제 압밀압력 하에서 추가로 확인되어야 할 것이다.
- (4) 압밀시간이 흐름에 따라 배수재로 설치한 슬래그가 일부 덩어리로 뭉쳐지는 경향을 보인다. 그리고 허준희(1999)의 연구에 의하면 담수보다 해수에서 투수계수가 감소하고 담수에서도 시간이 흐름에 따라 투수계수가 감소된다고 한다. 또한 현장계측자료의 중간분석 결과, 연직배수재로서 모래를 시공한 영역에서의 침하

경향과 슬래그를 시공한 영역에서의 침하경향이 유사한 것으로 나타났다. 이러한 경향을 고찰하면 시간이 경과함에 따라 슬래그가 부분적으로 뭉쳐지는 현상이 배수기능을 저하시킬 것인지에 대해서는 재고의 여지가 있는 것으로 판단되며 향후 현장계측 분석을 통해 확인하여야 할 것이다.

- (5) 압밀완료 후의 시료를 절단하여 확인한 결과 드레인재 내부로 점토가 끼어드는 현상(Clogging 현상)은 나타나지 않았다. 점토와 드레인재가 구분되어 점토시료 절단 시 드레인재가 그대로 흘러내렸으며, 그 내부는 점토가 전혀 끼어들지 않는 것으로 나타났다. 단지, 드레인 기둥의 원주상 표면에 있는 1개의 입자 정도가 점토와 붙어 있는 정도에 불과하였다.
- (6) 성토고가 비슷한 현장계측 지점들의 데이터 분석결과 모래와 슬래그의 침하량 및 침하양상에 별 차이가 없었으며,  $\frac{\text{총침하량}}{\text{총성토고}}$ 의 값을 비교해 본 결과 모래에 비해 78.8~98.2% 값으로 나타났다. 이는 정확하게 조사할 수 없는 성토고와 경과일수, 압밀층 두께 등의 차이, 슬래그 재료의 장기적인 특성 등에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 성토고가 비슷한 현장계측 지점들의 데이터 분석결과, 재하초기에는 모래와 슬래그의 침하량 및 침하 양상에 별 차이가 없었으나, 시간이 흐름에 따라 모래를 시공한 위치에서보다 슬래그를 시공한 위치에서 압밀침하의 수렴성이 더 좋은 것으로 나타났다. 상기의 내용들을 종합해 볼 때, 샌드드레인 공법에서의 연직배수재용 모래 대용으로 풍쇄전로슬래그가 사용가능한 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 김상규(1994), 토질시험, 동명사, pp. 77~84.
2. 김수삼, 전유석(1976), 창원종합기계공업기지 적현단지 연약지반 처리공사보고, 대한토목학회지, Vol. 1, No. 24, pp. 15~30.
3. 김주한(1983), 슬래그 혼합토의 전단강도에 관한 연구, 석사학위논문, 단국대학교, pp. 1~5.
4. 대한토목학회(1982), 고로슬래그 기층 및 보조기층 설계·시공지침, 대한토목학회, pp. 1~67.
5. 문용현(1987), 도로의 기층 및 보조기층 재료로서 고로 슬래그 이용에 관한 연구, 석사학위논문, 건국대학교, pp. 1~5.

6. 박춘성(2009), 풍쇄슬래그의 샌드매트 대체가능성 평가를 위한 실험적 연구, 석사학위논문, 인천대학교, pp. 2~3.
7. 신은철, 이운현, 유정훈(2009), 풍쇄 슬래그를 이용한 샌드매트 대체재 개발에 관한 연구, 한국토목섬유학회 논문집, Vol. 8, No. 2, pp. 55~62.
8. 유상호(1996), 쇄석잔사를 사용한 팩드레인공법 관한 연구, 석사학위논문, 부산대학교, pp. 21~22.
9. 이광찬, 이문수(1999), 재활용을 위한 전로슬래그의 투수성 고찰(I), 한국지반공학회논문집, Vol. 15, No. 4, pp. 69~83.
10. 이광찬, 정규향, 김영남, 이문수(2000), 연직배수공법에 있어서 제강슬래그의 재활용을 위한 투수성 연구, 한국지반공학회 연약지반처리위원회 학술세미나, pp. 12~31.
11. 이상수, 송하영, 김을용(2006), 풍쇄슬래그 잔골재를 사용한 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구, 한국건축시공학회지, Vol. 6, No. 3, pp. 107~114.
12. 정진교(1989), 전기로(제강) 슬래그 기동공법에 관한 연구, 석사학위논문, 동아대학교, pp. 1~6.
13. (주)포스코건설(2005), S/D의 개량사 대체시공 가능성 판단을 위한 시험연구, 한국지반공학회, pp. 21~27.
14. 한국건설기술연구원(1985), 제강슬래그를 사용한 아스팔트보조설계·시공지침, 한국건설기술연구원, pp. 1~53.
15. 한국도로포장공학회(1989), 복합슬래그 기층 및 보조기층 설계·시공지침, 한국도로포장공학회, pp. 1~32.
16. 허준희(1999), 제강슬래그 투수성 건설공사 연약지반 개량공사 채분석 시험, 석사학위논문, 전남대학교, pp. 56.
17. 한국지반공학회(2005), S/D의 개량사 대체시공 가능성 판단을 위한 시험연구 연구보고서, 한국지반공학회, pp. 21~27.
18. 日本土質工學會(1988), 軟弱地盤 對策工法, pp. 89~119.
19. 森北出版株式會社(1993) : 연직드레인工法, pp. 21~35.
20. Barron, R.A.(1948), Consolidation of Fine-grained Soils by Drain Wells, *Transaction, ASCE*, Vol. 113, pp. 718~754.
21. Hansbo, S.(1979), Consolidation of Clay by Band-shaped Prefabricated Drains, *Ground Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 59~66.
22. Holtz, R.D., Jamiolkowski, M.B., Lancelotta, R. and Pedroni, R.(1991), *Prefabricated Vertical Drains: Design and Performance*, C.I.R.I.A. Ground Engineering Report, Butterworth-Heinemann, Oxford, p. 52.
23. Onoue, A.(1988), Consolidation by Vertical Drain Taking Well Resistance and Smear into Consideration, *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 28, No. 4, pp. 165~174.
24. Rendulic, L.(1936), *Porenziffer und Porenwasserdruck in Tonen*, *Der Bavingenieur*, Vol. 17, pp. 559~564.
25. Terzaghi, K.(1943), *Theoretical Soil Mechanics*, Wiley, New York, pp. 265~296.
26. Yoshikuni, H. and Nakanodo, H.(1974), Consolidation of Soils by Vertical Drain Wells with Finite Permeability, *Soils and Foundations*, Vol. 14, No.2, pp. 35~46.

(접수일: 2010. 11. 8 심사일: 2010. 11. 11 심사완료일: 2011. 2. 10)