

## 풍쇄전로슬래그의 연직배수재 활용성에 관한 실험적 연구

### An Experimental Study on the Applicability of Converter Slag by wind fracture as Vertical Drains

권정근<sup>1)</sup>, Jung-Keun Kwon, 임종철<sup>2)</sup>, Jong-Chul Im, 박이근<sup>3)</sup>, Lee-Keun Park

1) 부산대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, E-mail : zion0102@hanmail.net

2) 부산대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University

3) 부산대학교 생산기술연구소 선임연구원, Doctor, Researcher of Pusan National University

**SYNOPSIS** : Recently it is difficult to secure sand used in the improvement of soft ground, and so it is necessary to find alternative materials. For this reason many researchers are studying and trying to find new substitute materials. One of the materials is considered as converter slag by wind fracture which is generated in the production of steel manufacture by electric circuit. It is environment friendly since it is a recycled material and economical since it is cheaper than sand. To investigate the applicability of converter slag by wind fracture as the alternative material such as vertical drains, it is necessary to check the drainage effect of this in the field construction. In order to attain an successful design it is important to predict problems encountered in field construction. Accordingly, in this study the laboratory test was executed under different conditions in advance of applying of the field. A total of 4 cases including slag, sand+slag, pack slag and sand as vertical drains was conducted, and at the base of the laboratory test the field test was executed and analyzed.

**Key words** : Converter slag by wind fracture, Vertical drains, Applicability as vertical drains

## 1. 서 론

지반개량 시 사용되고 있는 모래는 그 물량을 확보하기가 어려워 각 현장에서 고가로 구입하여야 하는 등 대체자원의 확보가 절실한 것이 현실이다. 이에 제강 전로에서 발생하는 풍쇄전로슬래그를 지반개량사로 대용하기 위한 연구노력을 하고 있으며, 이는 자원 재활용면에서 특히 유리하며 버려지고 있는 자원을 활용하는 측면이기 때문에 환경적으로도 유리하다고 볼 수 있다. 또한, 경제적인 면에서도 전로슬래그를 일정한 입자로 생산하는 공정에 소요되는 비용만을 계산해보면 현재의 모래 구입비용에 비해 경제성이 매우 높다.

풍쇄전로슬래그로 천연골재를 대체할 수 있을지에 대한 가능성 여부를 판단하기 위해서는 현장시험에서의 그 효과를 확인하는 것이 가장 중요하다. 이를 위해서는 현장 적용에 앞서 실제 적용 시 발생할 가능성 있는 문제점들을 인지하고, 그들에 대한 대책을 세우는 것이 바람직하다. 여러 문제점들에 대한 다양한 조건들을 우선적으로 실내에서 실내모형실험을 실시하고 이들 문제점들에 대한 해결책을 확보한 후 실제에 적용하는 것이 합리적이며, 경제적인 접근방법이라고 볼 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 실내모형실험을 실시하여 풍쇄전로슬래그를 Sand Drain 또는 Pack Drain에 대

용할 경우 발생할 수 있는 문제점을 현장 시험시공 전에 파악하였고, 더욱 완성도 높은 현장시험을 할 수 있도록 하였다. 또한, 실내모형실험의 결과분석을 통해 연직배수재로서의 이용가능성이 높다고 판단되어 현장시험시공을 실시하였으며, 개량사 대체 재료로서의 검증을 실시·분석하였다. 이하에서는 풍쇄 전로슬래그를 슬래그로 약식 표기하였다.

## 2. 실내 모형실험

### 2.1 실험장치

실내 모형실험장치는 실린더 및 덮개는 강철로 제작하였으며, 내부 피스톤은 MC를 사용하여 재하시 실린더와 피스톤의 마찰이 최소화될 수 있도록 그리스를 충분히 도포하였다. 장치개략도는 그림 1과 같다. 실험장치는 기능에 따라 압밀 실린더, 저수탱크, 하중재하장치, 계측장치로 구성된다.(임, 1995)

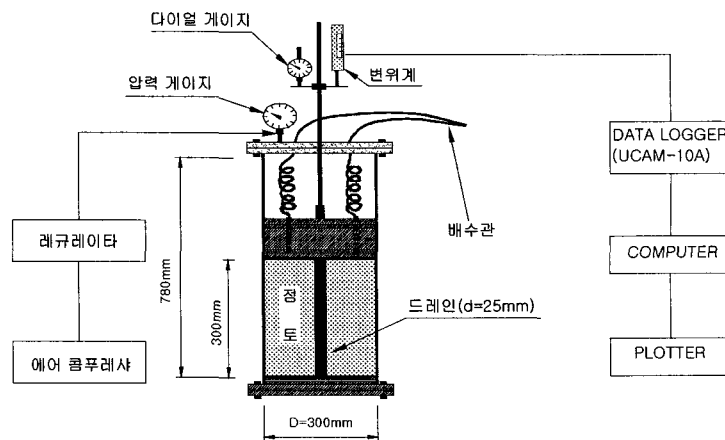


그림 1. 모형 실험장치

### 2.2 실험조건

#### 2.2.1 점토 및 연직배수재의 물리적 성질

본 실험에 사용한 점토 및 연직배수재의 물성시험결과와, 연직배수재의 직접전단시험 결과, 그리고 투수시험결과는 표 1~표 3과 같다. 투수시험결과 3개의 시료 모두 투수계수규정을 만족하는 것으로 나타났다.(김, 1994)

표 1. 점토 및 슬래그의 물성시험 결과

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

표 2. 연직배수제의 직접전단시험 결과

시료	밀도 ( $g/cm^3$ )	건조시		포화시		비고
		점착력 ( $kgf/cm^2$ )	$\Phi(^{\circ})$	점착력 ( $kgf/cm^2$ )	$\Phi(^{\circ})$	
모래	1.43	0	45.0	0	44.8	밀도는 설치 드레인재의 밀도와 동일
모래+슬래그	1.83	0	40.0	0	38.0	
슬래그	2.10	0	42.4	0	36.0	

표 3. 정수위 투수시험 결과

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

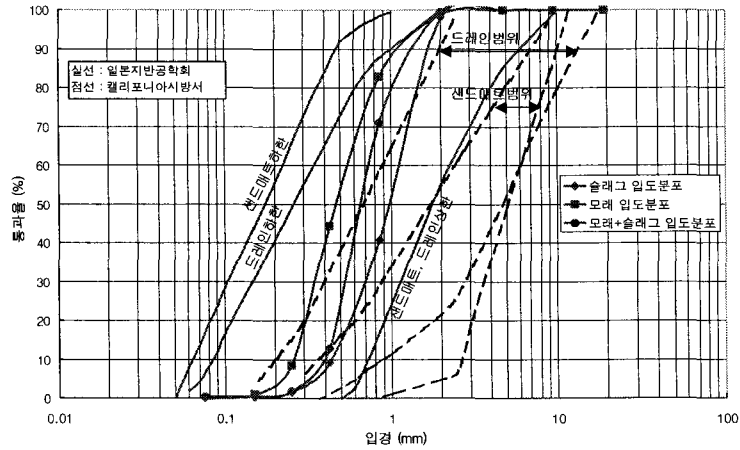


그림 2. 실험에 사용된 연직드레인 재료의 입도분포

본 실험에 사용된 모래, 슬래그, 모래+슬래그의 입도분포는 그림 2와 같으며, 일본지반공학회가 제안하고 있는 연직배수재로서의 규정에 만족하고 있는 것으로 나타난다.(日本土質工學會,1988)

### 2.2.2 실험종류

연직배수재 규정에 타당하다고 판단되는 구포사와 슬래그를 사용하여 이 둘을 섞은 경우와 슬래그를 Pack으로 시공한 경우 등 모두 4 cases에 대해서 실내모형실험을 실시하였다. 실험의 항목별 개요를 간략하게 나타내면 표 4와 같다.

표 4. 실내모형실험의 항목별 실험개요

실험항목		실험목적	실험방법
모래(Sand Drain)		기존에 사용하던 Sand Drain의 배수기능과 슬래그에 의한 배수기능, 그리고 모래와 슬래그를 동일 비율로 혼합하였을 때의 배수기능 등을 비교 분석함으로써 슬래그가 대체재료로서 타당성이 있는 가를 실내모형실험 상으로 평가할 수 있다.	대형압밀시험기 내에 점토를 채우고 그 중앙에 연직배수재를 설치하고, 공기압에 의한 재하로 압밀을 진행한다. 압밀이 진행과정에서 연직배수재로 사용된 각 재료의 배수기능성을 파악할 수 있게 된다.
슬래그	Without Pack		
	With Pack		
모래 50% + 슬래그 50%			

## 2.3 실험방법

### 2.3.1 공시체의 제작

- ㉠ 자연상태의 양질의 점토를 #10체에 통과시키면서 패각, 이물질 등을 제거한다.
- ㉡ 이렇게 제작된 점토의 함수비는 약 100%정도로 함수비가 일정하도록 교반기로 충분히 교반하여 여러 군데에서 함수비를 측정한다.
- ㉢ 드레인재로만 배수가 이루어지도록 하기 위해 드레인 직경 내부가 구멍 난 비닐을 다공질판 위에 덮고 여과지를 깐다.
- ㉣ 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
- ㉫ 배수밸브를 열고 정밀 레귤레이터를 조작하여 압밀압력을 가한다.
- ㉬ 시간에 따른 침하량을 측정한다.

### 2.3.2 하중의 재하

- 1) 하중은 콤프레샤로부터 공급된 공기압을 레귤레이터로 제어하여 재하한다. 하중단계는 0.40, 0.80, 1.6  $kgf/cm^2$ 의 3단계로 하였다.
- 2) 시간에 따른 침하량을 측정한다.

### 2.3.3 실험종료

- 1) 레귤레이터의 공기압을 빼어 하중을 제거한다.
- 2) 압밀실린더로부터 압밀된 시료를 분리해 낸다.
- 3) 공시체의 높이를 측정한다.

4) 드레인재로부터 수평방사방향으로 2cm마다 함수비를 측정한다.

## 2.4 실험 결과 및 분석

### 2.4.1 시간~침하곡선

압밀압력에 따른 각 실험의 시간~침하곡선은 그림 3~그림 5와 같은데, 압밀압력별로 구분하여 정리하면 다음과 같다.

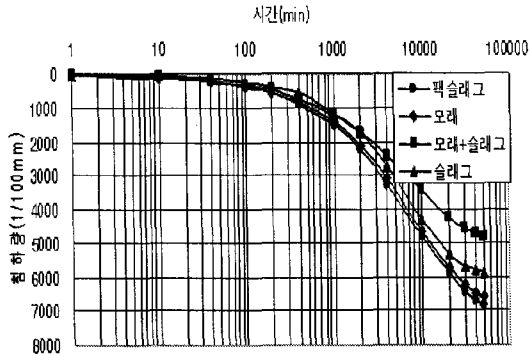


그림 3. 압밀압력  $0.4 \text{ kgf/cm}^2$ 인 경우의 시간-침하곡선

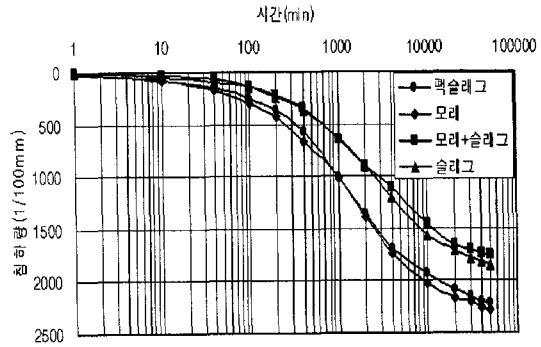


그림 4. 압밀압력  $0.8 \text{ kgf/cm}^2$ 인 경우의 시간-침하곡선

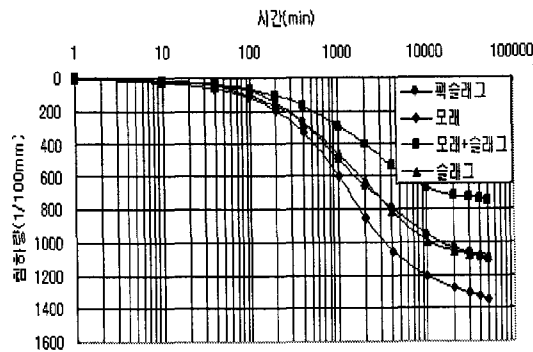


그림 5. 압밀압력  $1.6 \text{ kgf/cm}^2$ 인 경우의 시간-침하곡선

그림 3~그림 5에서 압력단계가 높아질수록 펍슬래그의 압밀침하 경향이 슬래그와 같아지는데, 이는 압밀압력단계가 증가할수록 펍슬래그 단면이 팽창, 파단되어 펍의 필터기능이 상실되어 나타나는 현상인 것으로 판단된다.

### 2.4.2 압밀도에 따른 압밀시간

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

낮은 압력단계인  $0.4 \text{ kgf/cm}^2$ 에서는 각 연직배수재의 압밀소요시간비는 거의 동일한 것으로 나타난

다. 그리고,  $0.8 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $1.6 \text{ kgf/cm}^2$ 에서는 모래에 비해 모래+슬래그, 슬래그는 시간비가 1.5~2.0정도가 되는 것으로 나타났다. 그러나, 팩슬래그인 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 경과시 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.

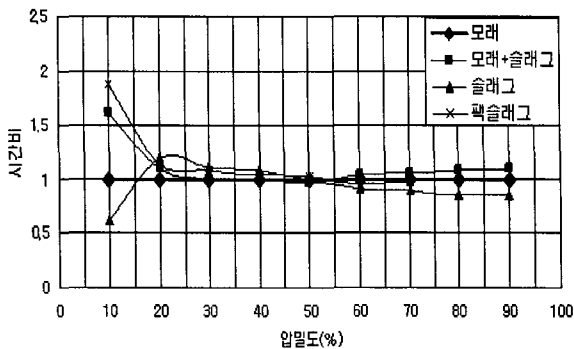


그림 6. 압밀압력  $0.4 \text{ kgf/cm}^2$ 일 때, 각 압밀도에 소요되는 시간

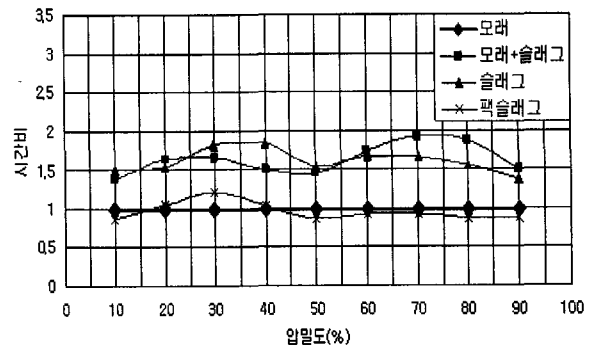


그림 7. 압밀압력  $0.8 \text{ kgf/cm}^2$ 일 때, 각 압밀도에 소요되는 시간

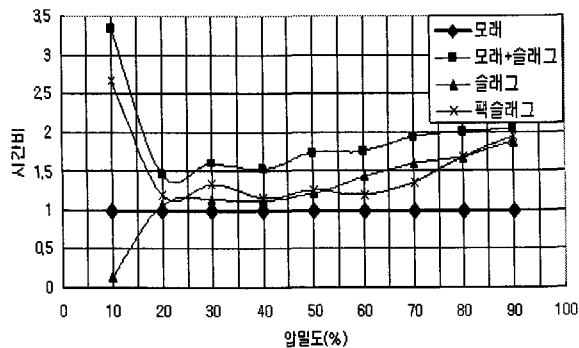


그림 8. 압밀압력  $1.6 \text{ kgf/cm}^2$ 일 때, 각 압밀도에 소요되는 시간

각 압밀도에 대한 압밀시간을 모래를 1로 하여, 압밀압력에 따른 모래+슬래그, 슬래그, 팩슬래그의 압밀시간을 계산하면 표 5와 같다.

표 5. 모래 사용 시의 압밀시간을 1로 할 때의 압밀시간 비교

압밀압력	0.4 ( kgf/cm <sup>2</sup> )				0.8 ( kgf/cm <sup>2</sup> )				1.6 ( kgf/cm <sup>2</sup> )			
	모래	모래+슬래그	슬래그	팩슬래그	모래	모래+슬래그	슬래그	팩슬래그	모래	모래+슬래그	슬래그	팩슬래그
압밀시간비	1.0	1.10	0.85	1.00	1.0	1.5	1.375	0.875	1.0	2.05	1.875	1.95

이 표에서, 압밀압력에 따라 압밀시간비가 다를 수 있다.  
표 5를 이용하여, 각 연직배수재 사용 시의 압밀압력에 따른 압밀시간을 정리하면 그림 9와 같다.

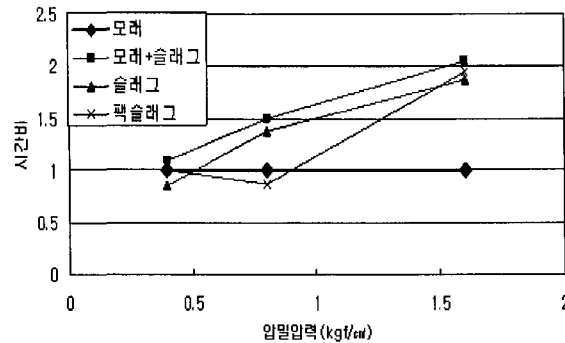


그림 9. 각 연직배수재 사용 시의 압밀압력에 따른 90%압밀시의 압밀시간 비교

그림 9에서 알 수 있듯이 0.4 kgf/cm<sup>2</sup>에서는 슬래그와 팩슬래그의 90%압밀도에 이르는 시간비가 각각 0.85, 1.0으로 모래와 유사해지는 더 양호한 것으로 나타났으며, 0.8 kgf/cm<sup>2</sup>압밀압력에서 역시 팩슬래그의 압밀시간비가 0.875로서 모래보다 더 양호한 나타나고 있다. 그러나 1.6 kgf/cm<sup>2</sup>에서는 시간비가 모래에 비해 다소 길어지는 경향을 나타내고 있지만 현장적용에 의한 실질적인 침하분석이 필요할 것으로 판단된다.

### 2.4.3 압밀에 따른 Clogging 현상

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.

## 3. 현장시험

### 3.1 현장시공

실내시험결과를 바탕으로 슬래그의 연직배수재로서의 적용 가능성 여부를 평가하여 현장시험을 실시하였다. 현장시험은 슬래그 8개 지점, 모래 6개 지점에 대해 수행하였고, 그 중 성토고가 비슷한 지점을

선정하여 상호 비교 분석하였다.

### 3.2 계측결과 분석

그림 10~그림 13은 경과일수에 따른 성토고와 침하량을 상호 비교한 것이다.

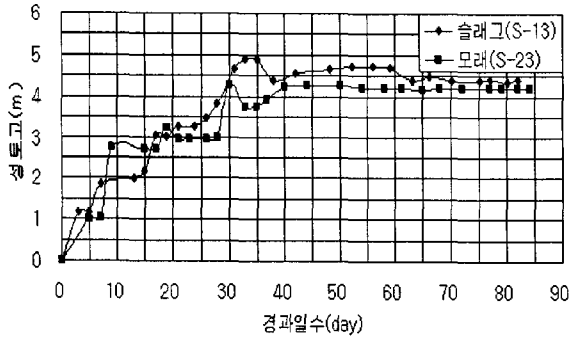


그림 10. 모래와 슬래그의 성토고

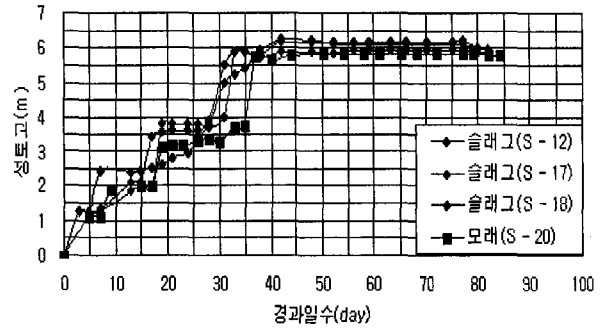


그림 11. 모래와 슬래그의 성토고

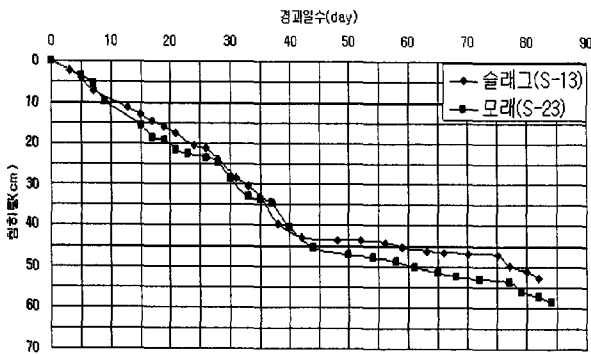


그림 12. 모래와 슬래그의 침하량 비교

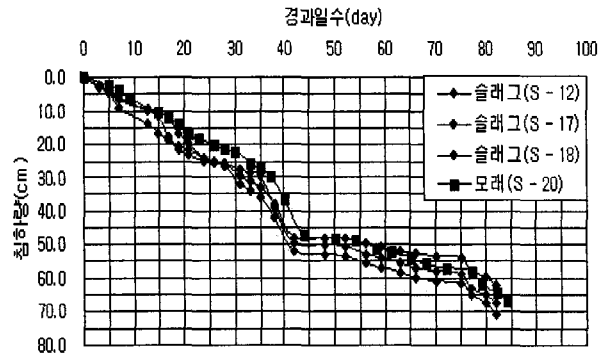


그림 13. 모래와 슬래그의 침하량 비교

그림 10~그림 13은 총 성토고와 일일 성토량이 서로 비슷한 조건에서 모래와 슬래그의 침하양상이 서로 비슷함을 나타내고 있다.

그림 14와 그림 15는 총침하량 / 총성토고 로 모래에 대한 연직배수재로서 슬래그의 기능을 분석한 것이다.



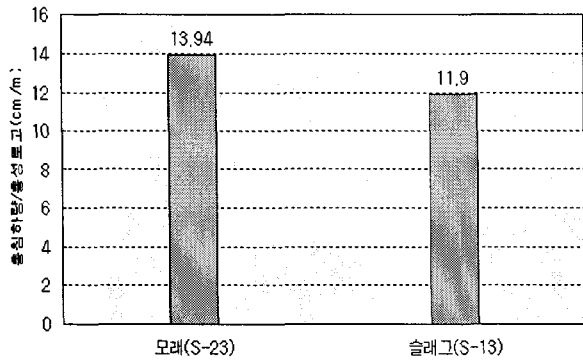


그림 14. 모래와 슬래그의 성토고에 대한 침하량 비교

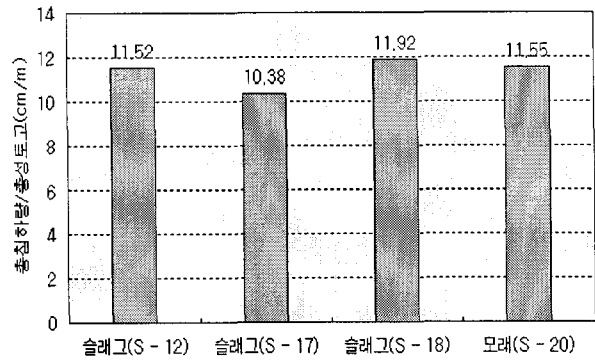


그림 15. 모래와 슬래그의 성토고에 대한 침하량 비교

그림 14에서 슬래그는 모래의 약 85%에 해당하는 침하량을 보였고, 그림 15에서는 모래에 비해 90~103%의 침하량을 나타내는 한편, S-12와 S-18지점은 모래보다 같거나 더 큰 침하량을 나타내어 슬래그를 모래대용으로써 연직배수재로서의 사용가능성이 확보되는 것으로 판단된다. 그러나 앞으로 지속적인 계측을 통해 장기적인 거동에 대한 분석이 필요할 것이다.

#### 4. 결론

최근에 모래의 고갈로 인하여 대체재료로서 풍쇄전로슬래그의 연직배수재로서의 타당성 검토를 위하여 총 4 cases(모래, 모래+슬래그, 슬래그, 팍슬래그)의 실내모형실험을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 풍쇄전로슬래그의 입도분포는 일본지반공학회에서 제시하는 연직배수재의 기준을 만족하였으며, 투수계수 역시 배수재로서의 기준을 만족하는 것으로 나타났다.
- 3)  $0.4 \text{ kgf/cm}^2$ 에서는 슬래그와 팍슬래그의 90%압밀도에 이르는 시간비가 각 0.85, 1.0으로 모래와 유사해지는 더 양호한 것으로 나타났으며,  $0.8 \text{ kgf/cm}^2$  압밀압력에서 역시 팍슬래그의 압밀시간비가 0.875로서 모래보다 더 양호한 나타나고 있다. 그러나  $1.6 \text{ kgf/cm}^2$ 에서는 시간비가 모래에 비해 다소 길어지는 경향을 나타내고 있어 보다 정확한 판단을 위해서는 현장실험이 필요할 것으로 판단된다.
- 4) 높은 압밀압력단계에서 슬래그의 시간비가 모래에 비해 증가하는 것으로 나타났고, 일부 덩어리로 뭉쳐지는 경향을 보였다. 이러한 경향이 투수성을 떨어뜨릴 것인지에 대해서는 향후 현장실험을 통해 실제 압밀압력하에서 추가로 확인되어야 할 것이다.
- 5) 압밀시간이 흐름에 따라 배수재로 설치한 슬래그가 일부덩어리로 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.
- 6) 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 표면

- 에 있는 1개의 입자 정도가 점토와 붙어 있는 정도에 불과하였다.
- 9) 성토고가 비슷한 현장계측 지점들의 데이터 분석결과 모래와 슬래그의 침하량 및 침하양상에 별 차이가 없었으며,  $\frac{\text{총침하량}}{\text{중성토고}}$ 의 값을 비교해 본 결과 모래에 비해 85~103%값으로 어떤 지점은 모래보다 같거나 더 큰 침하량을 나타내어 슬래그를 모래 대응으로써 연직배수재로 사용해도 타당할 것으로 판단된다. 그러나 앞으로 지속적인 계측을 통해 장기적인 거동에 대한 분석이 필요할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 김상규, 토질시험, 1994, pp 77~84.
2. 임종철, 유상호, 강낙안, 양윤모, 쇄석잔사를 사용한 펌프드레인공법 개발에 관한 연구, 1995, pp. 1~78.
3. 허준희, 제강슬래그 투수성 건설공사 연약지반 개량공사 체분석 시험, 전남대학교 대학원 석사논문, 1999
4. 日本土質工學會(1988) : "軟弱地盤 對策工法", pp. 89~119
5. 森北出版株式會社(1993) : 연직 드레인 工法