

제강슬래그의 연직배수재로서의 활용에 관한 연구 The Application of Converts Slag for Vertical Drains

김용수¹⁾, Yong-Soo Kim, 정승용²⁾, Seung-Yong Jung, 한기현³⁾, Ki-Hyun Han, 김수삼⁴⁾, Soo-Sam Kim

¹⁾ 중앙대학교 대학원 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Eng. Chung-Ang Univ.

²⁾ 지구환경전문가그룹 선임연구원, Senior Researcher, Expert Group for Earth & Environment

³⁾ 포항산업과학연구원 자원활용연구팀 수석연구원, Principle Researcher, Material Utilization Research Team
Research Institute of Industrial Science & Technology

⁴⁾ 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng.,
Chung-Ang Univ.

SYNOPSIS : In this study, it was to investigate the possibility to use the converts slag, by product in producing steel as a substitute material with sand that is used for a civil construction materials, in developing techniques to use converts slag to improve soft clay ground. To do this, it was investigated the physical and mechanical properties of the converts slag as a civil construction material. For this, cylindrical cell consolidation with a single vertical drains and large scale soil box test were performed. Through large scale soil box test, the applicability of the converts slag to the present vertical drain techniques which is dependent on sand and plastic drains was studied. As a result of that, it was found that the shape of inserted drains was maintained after completing a consolidation process of a soft clay with slag drains. In addition, we could find that the slag drains showed the similar results with sand drains in soft clay by analyzing the effect of acceleration of consolidation.

Key words : Converts slag, Vertical drains, Cylindrical cell consolidation test, Large scale soil box test

1. 개요

철광석, 코크스, 석회석을 원료로 하여 고로에서 선철을 만들어 내는 소결 및 제선 공정과 이들을 원료로 하여 전로에서 철강을 제조하는 제강 공정에서는 많은 양의 폐기물인 슬래그(Slag)가 발생하게 되며 이중 약 46%만이 재활용되고 나머지는 매립처리하는 실정이다. 국가적으로 제철소에서 발생하는 제강 슬래그의 처리문제는 폐기물 재활용을 통하여 직·간접적으로 환경보전을 도모하고, 폐자원을 활용함으로써 부존자원의 수명을 연장시키며, 저렴한 가격으로 재활용 제품을 이용할 수 있다는 점에서 볼 때 좀 더 적극적으로 대처해야 할 과제이다.

따라서, 본 연구에서는 연약지반 개량을 위하여 제강 슬래그를 활용하는 기술을 개발함에 있어서 기존의 토목공사용 재료인 모래의 대체 재료로서 철강 생산시 부산물인 제강 슬래그의 이용 가능성을 파악하였다. 이를 위해서는 토목 공사재료로서 제강 슬래그의 물리·역학적 특성을 파악함과 동시에 이의 적용성을 파악하기 위해 배수재 설치에 따른 지반의 압밀 특성 조사시험으로 단일의 배수재를 설치한 원통형 토괴의 압밀특성을 조사하는 원통형 압밀시험과 배수재 상호간의 역할에 의해 압밀을 유도하는 배수시험으로 대형 토조를 사용한 압밀시험을 실시하여 기존의 모래 또는 플라스틱 배수재에 의존하던 연직 배수공법에 있어서 제강 슬래그의 활용가능성을 파악하였다.

2. 제강 슬래그의 발생 및 공학적 특성

2.1. 제강 슬래그의 발생

제철 과정에서 발생되고 있는 고체상태의 폐기물에는 슬래그, dust, 슬러지 등이 있으며, 이 중에서 양적으로 가장 많이 배출되고 있는 것은 슬래그로서 연간 약 1,200만톤이 발생하고 있다. 슬래그는 크게 제선 슬래그(고로 슬래그)와 제강 슬래그로 대별될 수 있으며, 제선 슬래그는 현재 거의 전량이 활용되고 있으나 제강 슬래그는 일부분만이 재활용되고 대부분이 매립되고 있는 실정이다. 선철은 탄소(C), 실리콘(Si), 망간(Mn), 인(P) 등의 성분들로 이루어져 있으며 이와 같은 불순물(약 4~5 % 함유)을 제거하여 연성이 있는 강을 제조하는 제강 공정이 필요하다. 이러한 불순물을 제거하기 위하여 혼합한 석회가 불순물과 결합하여 제강 슬래그가 되어 배출되며 CaO, SiO₂ 및 철분(Fe, FeO, Fe₂O₃)이 주성분이고, 그 밖에 Al₂O₃, MgO, MnO, P₂O₅ 등이 함유되어 있다. 포항 및 광양제철소에서 발생하는 제선 및 제강 슬래그의 연도별 발생현황을 나타내면 <Table 1>과 같다.

<Table 1> 연도별 슬래그 발생 현황 (단위:천톤, KSC:'96.4 ~ '97.3)

년 도	구 분	제선 슬래그	제강 슬래그
1996	포항	4,088	1,804
	광양	4,503	2,061
1997	포항	4,049	1,960
	광양	4,485	2,465
1998	포항	3,963	1,948
	광양	4,188	2,233

2.2. 제강 슬래그의 공학적 특성

본 연구에서는 포항종합제철에서 발생된 제강 슬래그(As Received Slag 및 Reoxidized Slag)를 대상으로 한국공업규격(KS F)에 의거하여 시험을 실시하였고 <Table 2>와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

<Table 2> 제강 슬래그의 공학적 특성

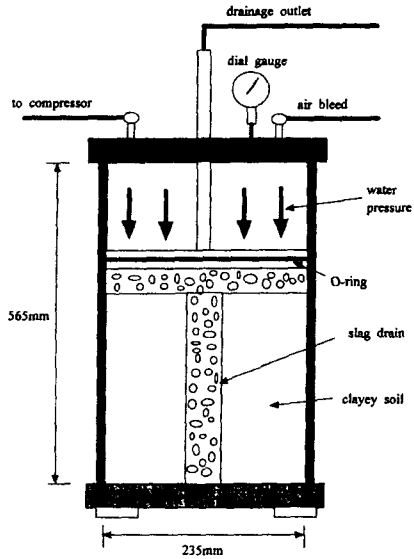
구 분		시 료		단 위	
시험방법	항 목	제강(As Received) Slag	재산화(Reoxidized) Slag		
비중시험	--	3.07	3.62	--	
입도시험	통과 백분율에 해당하는 직경	D ₁₀	0.18	0.18	mm
		D ₃₀	0.71	0.29	mm
		D ₆₀	2.1	0.39	mm
	균등계수 (C _u)	1.32	1.14	--	
	곡률계수 (C _w)	11.67	2.17	--	
정수위 투수시험	투수계수 (k)	3.44 × 10 ⁻³ ~ 3.81 × 10 ⁻³	7.70 × 10 ⁻³ ~ 8.63 × 10 ⁻³	cm/sec	
	시간경과투수계수	6.1 × 10 ⁻³ → 1.1 × 10 ⁻³	변화 없음	cm/sec	
직접전단시험	내부마찰각 (φ)	46	38	°	
pH 시험	담수	12	11.8	--	
	해수	11.3	9.9	--	

3. 시험 개요

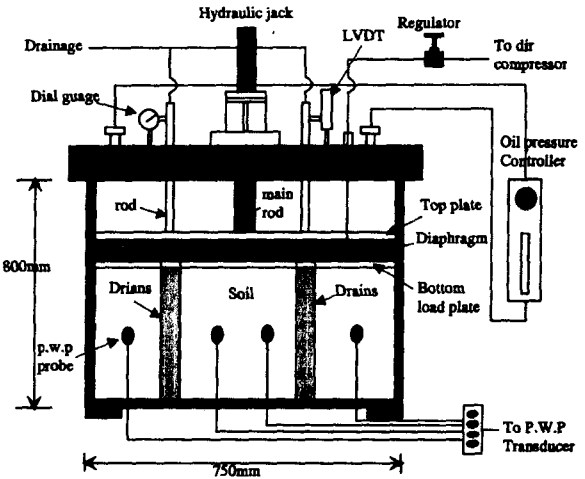
3.1. 원통형 압밀시험

본 연구에서 사용된 원통형 셀(Cell) 압밀 시험장치는 <Fig. 1>과 같이 내경이 23.5cm, 높이가 56.5cm 의 원통형 아크릴 셀로 이루어져 있으며, 원통형 셀 내에 연약 점성토 시료를 포설하고 50kPa의 압력으로 1차압밀 종료시점까지 예압밀 시킨 후 실내에서 제작된 소형 멘드럴을 이용하여 슬래그를 타입하였다. 하중은 시료 상부면의 재하판에 액압을 작용시킴으로서 하중을 전달하여 일정 변형을 조건에서 압

밀이 발생되도록 하였다. 본 시험기를 이용하여 하중 단계별 시료의 압밀 침하량은 재하판의 연직 변형량을 다이얼 게이지(Dial Gauge)로 읽어서 측정하였으며, 시료의 압밀이 완료되면 시험기를 해체하여 점토시료를 꺼낸 다음 배수재를 중심으로 배수재로부터의 거리별 및 시료의 높이별 함수비를 측정함으로써 위치에 따른 배수효과의 영향을 검토하였고, 압밀이 종료된 상태의 시료내 배수재의 변형형상을 조사하였다



<Fig. 1> 원통형 셀 압밀 시험장치의 개략도



<Fig. 2> 대형 토조 시험장치의 개략도

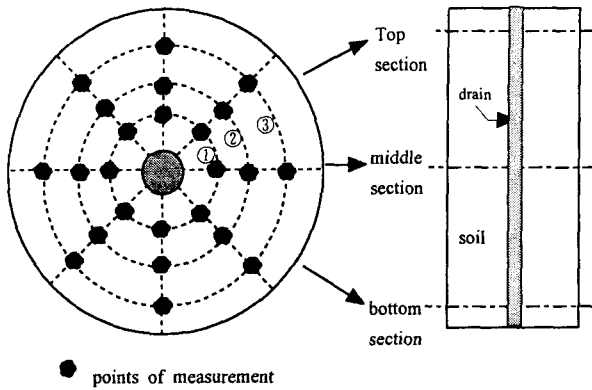
3.2. 대형 토조 압밀시험

대형토조 시험은 사각의 강철 프레임으로 이루어진 대형의 압밀 및 배수시험으로서 단일의 배수재를 사용한 원통형 압밀시험과는 달리 배수재간의 상호작용에 의한 배수재 타설지반의 배수·압밀 거동을 모델화 한 시험으로서 지반내에 다수의 배수재를 타입하고 상재압을 가하였을 경우 발생하는 지반의 압밀 거동 및 이로 인한 과잉간극수압의 변화를 조사하는 것을 목적으로 하고 있다.

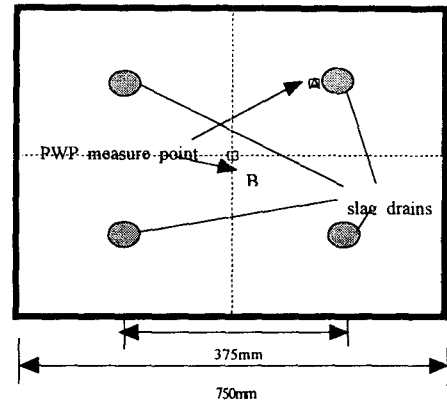
본 연구에 사용된 시험기기는 <Fig. 2>에서 보는 바와 같이 750×750×800mm의 정사각형 단면을 가진 강재로 구성되어 있으며, 하중은 에어 콤프레셔의 공기압을 이용하여 대형토조 시험기의 상부캡과 연결된 다이아 프레임을 통해 가압판에 전달되도록 구성되어 있고, 다이아 프레임의 최대 변위가 한정되어 있기 때문에 시료의 침하량이 크게 발생되어 제한 범위를 넘게되는 경우 다이아 프레임이 최대로 팽창되므로 이때는 유압장치를 이용하여 상부 보조판을 하향 조정할 수 있도록 구성되어 있다. 재하 하중에 의해 발생하는 연직 방향의 침하량은 장치의 상부에서 다이얼 게이지와 LVDT로 측정할 수 있도록 되어 있고, 과잉간극수압의 변화를 측정하기 위하여 시료 내부의 소정의 위치에서 간극수압 측정용 Probe를 삽입시키고 이와 연결된 간극수압 Transducer에 의하여 디지털(Digital)로 표시기로 나타나는 값을 읽도록 되어 있다. 이 때의 침하량과 과잉간극수압의 변화는 디지털 표시기에 연결된 퍼스널 컴퓨터(Personal Computer)에 의하여 자동으로 계측기록이 이루어지도록 하였다.

3.3. 함수비 및 과잉간극수압 측정위치

원통형 압밀시험 종료후 최종 함수비의 분포를 측정하기 위하여 <Fig. 3>에 나타난 바와 같이 시료를 상부, 중부, 하부의 3개층으로 나누어 각 층마다 시료의 중앙을 중심으로 24개 지점씩 총 72개 지점의 함수비를 측정하였다. <Fig. 4>는 토조내의 배수재 배치방법과 간극수압측정 Probe의 위치를 설명한 것으로 간극수압의 측정은 2개의 위치에서 실시하며, 각각 A, B지점이라고 할 때 A지점은 배수재와 가장 인접한 위치, C지점은 배수거리가 가장 먼 토조의 정 중앙 지점에 간극수압 Probe를 설치하였다.



<Fig. 3> 함수비 분포의 측정지점



<Fig. 4> 슬래그 배수재 배치 방법 및 측정지점

3.4. 시험 시료

본 연구에서 사용된 시료는 남해안 광양만 지역에서 채취된 해성 점성토로서 시료를 교란된 상태로 채취하여 실내 실험실에서 습윤 상태의 흙 그대로 #10번체로 체가름을 실시하였고, 이와 동시에 시료 채취지점과 동일한 위치에서 운반되어 온 해수를 첨가하여 입자간의 포화도를 높이면서 액성 한계의 1.5배정도의 함수비를 갖는 고풍수비 상태로 시료를 준비하였다. 그 후 슬러리 상태의 시료를 50kPa의 하중을 가하여 1차압밀 종료시점까지 예압밀 시킨 후 본 시험을 실시하였다. 본 시험에 사용된 시료의 토질특성은 <Table 3>에 제시되어 있는 바와 같다. 배수재로는 제강 슬래그(As Recived Slag)와 재산화 슬래그를 사용하였으며, 제강 슬래그를 연직 배수재로 사용하기 위하여 Jaw Crusher를 사용하여 모래와 비슷한 입경으로 파쇄하여 시험을 실시하였다. 또한 기존에 많이 이용된 샌드 드레인의 압밀촉진 효과와 비교하기 위하여 주문진 표준사를 이용한 수평 배수 압밀시험을 실시하였고, 이와 같이 시험에 사용된 배수재 재료의 사양 및 재료 특성은 <Table 4>에 제시된 바와 같다.

<Table 3> 대상 시료의 토질 특성

Classification	Properties	Classification	Properties
soil classification	CL	liquid limit (LL)	38.54(%)
percent passing No.200 sieve	96.7(%)	plastic limit (PL)	22.13(%)
dry unit weight	1.1(t/m ³)	plastic index (PI)	16.41(%)
specific gravity(G _s)	2.467		

<Table 4> 시험에 사용된 배수재 특성

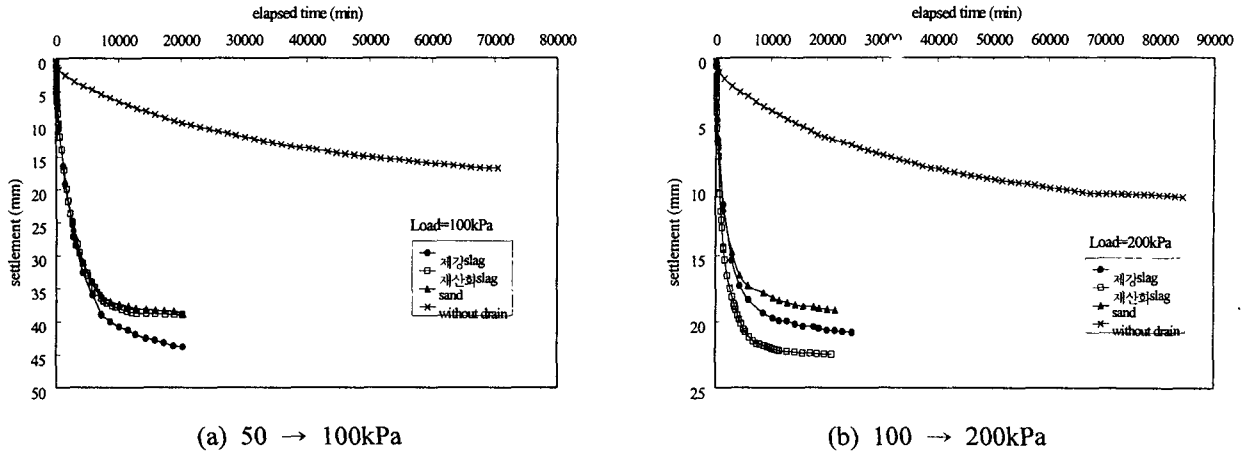
Drain Specimen	Permeability (cm/sec)	Size (φ)	Cross Sectional Areas (cm ²)
제강(As Received) Slag	3.44 × 10 ⁻³ ~ 3.81 × 10 ⁻³	4.4	15.21
재산화(Reoxidized) Slag	7.70 × 10 ⁻³ ~ 8.63 × 10 ⁻³	4.4	15.21
Sand	1 × 10 ⁻³	4.4	15.21

4. 시험 결과 및 고찰

4.1. 원통형 압밀시험 결과

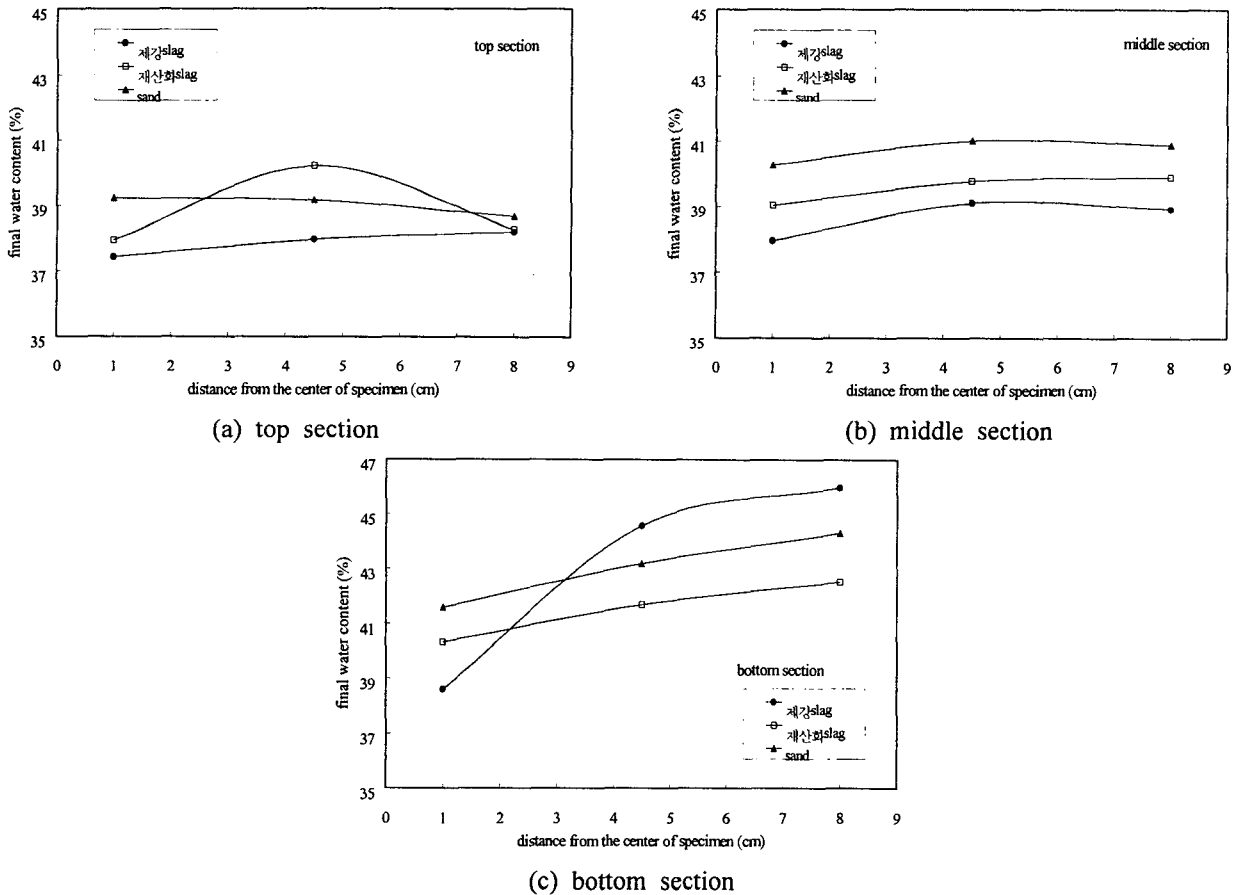
<Fig. 5>에서 보는 바와 같이 하중단계 100kPa 및 200kPa에 대해서 각 재료별 침하 곡선을 배수재가 설치되지 않은 무처리 시료의 연직 압밀침하와 비교해 보면, 슬래그 및 샌드 드레인을 설치함으로 인한 압밀촉진 효과는 재료의 차이에 상관없이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있으며, 무처리 시료의 압밀 소요시간은 배수재가 설치되어 있는 경우에 비하여 상당한 차이로 지연되고 있음을 알 수 있다. 배수재가 설치된 경우에 있어서도 1차압밀 종료시점은 제강 슬래그, 재산화 슬래그, 샌드 드레인이 재료간의

차이가 거의 없음을 알 수 있고 압밀 침하량은 재하 하중이 100kPa에서는 제강 슬래그 배수재를 타입한 경우가 가장 크게 나타났으나 200kPa의 하중 단계에서는 재산화 슬래그가 가장 큰 침하량을 나타내는 것을 알 수 있었다.



<Fig. 5> 배수재 종류별 시간 - 침하 관계

시험종료 후 시험기를 해체하여 시료를 배수재 중심을 향하여 종단면으로 조심스럽게 자른 후 그 형상을 육안으로 관찰한 결과 배수재는 시료바닥까지 원통형의 형상을 유지하고 있었음을 확인할 수 있었고, 기존의 PBD와 같이 절곡되거나 횡방향 변형 없이 그 위치를 그대로 유지하고 있었음을 알 수 있었다. 압밀시험 종료후 최종 함수비의 분포를 측정하기 위하여 시료를 상부, 중부, 하부의 3개층으로 나누어 각 층마다 시료의 중앙을 중심으로 24개 지점씩 총 72개 지점의 함수비를 측정하였다.



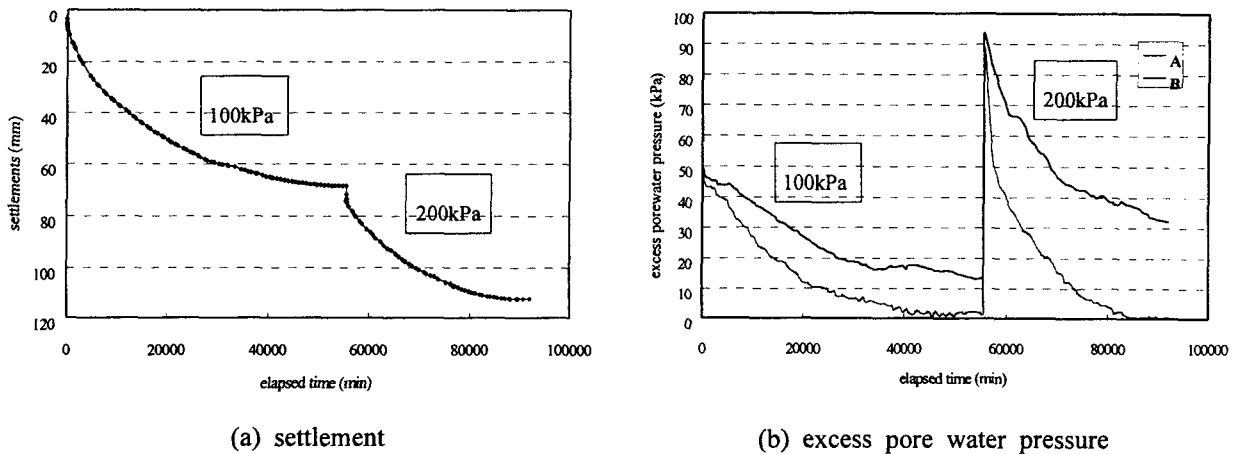
<Fig. 6> 시험 종료 후 함수비의 분포

<Fig. 6>은 시료의 깊이와 중앙으로부터의 거리에 따른 함수비의 분포를 보여주는 것으로, 그림에서 각 거리별 함수비는 각 측정 층에서 배수재로부터 거리가 동일한 8개 지점의 함수비를 평균하여 나타낸 것이다. 함수비 측정결과 시료의 상부에서는 상부 배수층의 영향으로 수평방향의 함수비 편차가 거의 없는 것으로 나타났지만 중부, 하부에서는 시료의 중앙에 가까울수록 함수비가 낮은 경향을 나타내고 있어서, 배수재로부터 거리가 가까울수록 그 위치의 과잉간극수압소산이 보다 빠르게 진행되었을 것으로 추측할 수 있다. 제강 슬래그의 경우 시료 하부지점에서 수평방향에 따른 함수비 변화의 차이가 약 0.8%/cm 정도로 다른 재료에 비하여 비교적 크게 나타났지만 전체적인 관점에서 볼 때 재료의 종류에 따른 성능의 차이는 크지 않은 것으로 판단되었다.

시료의 외곽부로 갈수록 배수재들 간의 약간의 재료적인 차이가 발생하고 있고, 재산화 슬래그가 다른 재료에 비하여 전체적인 거리 및 깊이별 개량분포도가 좋은 것으로 나타났다. 하지만, 본 시험에서는 시험방법이 강성의 재하판을 사용함으로써 일정 변형을 조건으로 하중을 재하하기 때문에 실제 현장 지반조건에서 시험을 실시할 경우 다소 상이한 응력 분포를 나타내었을 가능성도 배제할 수 없으며, 이로 인하여 함수비 분포가 달라질 수도 있으나, 이보다는 오히려 셀 내측벽의 마찰에 의한 작용으로 시료 외곽부 내에 잔류되었을 수도 있는 과잉간극수압의 영향이 보다 큰 영향인자일 것으로 사료된다.

4.2. 대형 토조 압밀시험 결과

배수재의 타설 간격은 각 슬래그 배수재의 중심간의 거리로서 375mm이며, 사각형 배치이므로 영향원, d_e 는 423mm이며 타설간격비, $n(=d_e/d_w)$ 은 9.6으로 산정되었고, <Fig. 7>은 각 하중단계에서 발생한 연직 변형량과 과잉간극수압의 변화를 나타낸 것이다.

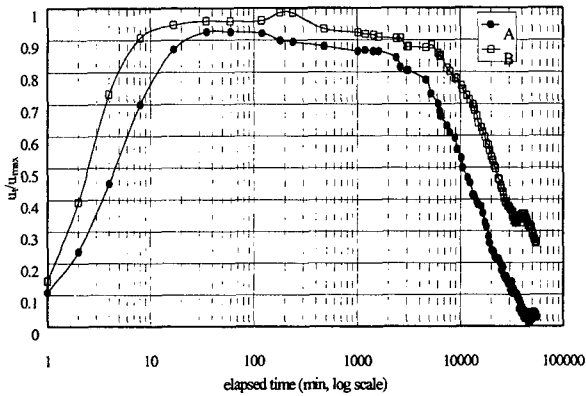


<Fig. 7> 각 하중단계시 침하와 과잉간극수압의 변화

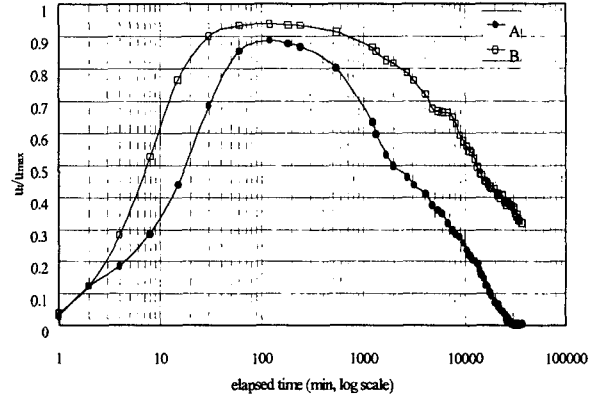
<Fig. 7>에서 \sqrt{t} 법에 의한 90% 압밀도에 도달하는 시간은 100kPa의 경우 약 46,000분, 200kPa의 경우 약 35,000분으로 산정 되었다. 그림에서 제시된 바와 같이 배수재가 타설됨으로 인하여 배수재 거리별 과잉간극수압은 측정 위치에 따라 차이가 나타남을 알 수 있으며 배수재로부터 가까운 위치에 있는 A 지점이 B점에 비하여 빠른 소산 속도를 보여주고 있다.

<Fig. 8>은 시간에 따른 과잉간극수압을 재하 하중으로 정규화 한 것으로 그림에서 A와 B는 앞에서 제시된 바와 같이 배수재 거리별로 설치된 간극수압 측정위치를 나타내고 있다. 재하와 동시에 증가하기 시작한 과잉간극수압은 간극수압 Probe의 위치가 시료의 중간높이에 위치하기 때문에 점성토인 시료의 특성상 최대 과잉간극수압에 도달하는데에는 약 30~100분의 시간지연이 있는 후에 발현되었고, 이후 거의 일정하게 유지되다가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 1차압밀 종료시점에 가까운 부분에서 과잉간극수압의 변화는 다소 불규칙한 거동을 보여주고 있는데, 이는 2차압밀에 의한 시료의 구조적인 변화에 따른 것으로 추측되며 최대 간극수압의 크기는 시료가 고함수비이고 균질한 상태의 흙이므로 재하되는 연직 하중의 크기와 거의 동일한 수준의 값을 나타내고 있으나, 약간 작은 경향이 있다. 이는 배수

재를 설치함으로 인하여 최대 간극수압에 도달하기 이전에 배수재에 의한 간극수압 소산이 동시에 발생하기 때문에 최대값이 발현되지 못한 것으로 사료되며, 또 다른 이유로서 재하관의 구조상 공기압에 의해 팽창되는 고무튜브와 시험기벽면간, 그리고 시료의 압밀침하가 발생됨에 따라 시료와 벽면간의 마찰력이 유발되어 하중전달시 약간의 하중이 상쇄되었을 가능성도 있을 수 있다. 특히, 100kPa에서 간극수압계수가 0.92~0.96정도이고 200kPa의 경우 0.88~0.93정도로서 하중이 커짐에 따라 간극수압계수가 작아지는 것으로 보아 하중이 증가할 수록 시료와 벽면간의 마찰력이 증가되기 때문에 이때의 영향이 보다 커지는 것으로 사료된다.



(a) 100kPa

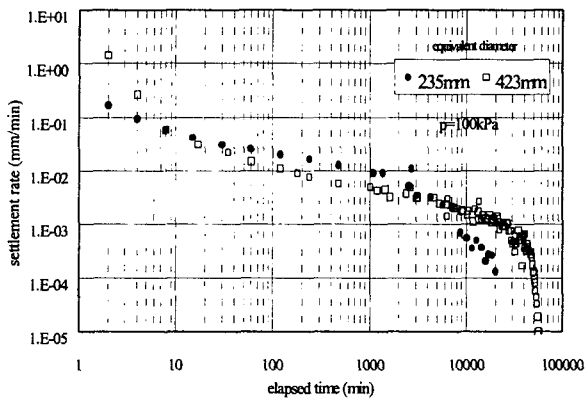


(b) 200kPa

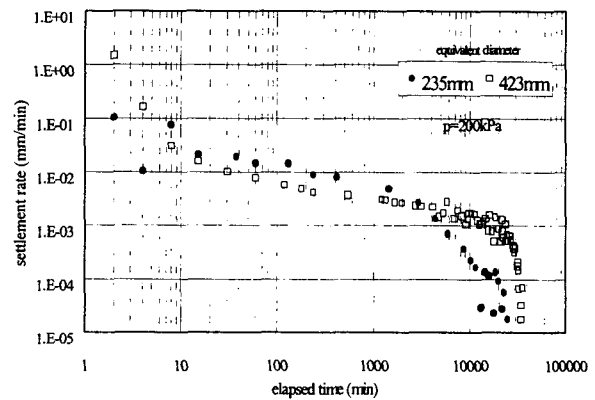
<Fig. 8> 시간에 따른 과잉간극수압의 변화

4.3. 압밀속도의 비교 분석

<Fig. 9>는 압밀시료의 두께와 영향원, d_e 의 크기가 다른 조건에서의 시간-침하 속도의 관계곡선을 비교하기 위하여 제강(As Received) 슬래그를 이용한 원통형 압밀시험과 대형토조 시험결과를 함께 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 각 영향원의 크기별 침하 속도의 변화를 살펴보면 1차구배에 있어서는 큰 차이는 없지만, 2차구배가 나타나는 시점이 다르게 나타나기 때문에 단면이 클수록 이때의 시간이 증가되는 것을 알 수 있다. 이는 Lun & Parkin(1985)이 연직 방향의 압밀시험을 실시한 결과 2차구배가 발생하는 시간은 시료 두께의 제곱(H^2)과 근사적으로 비례한다는 연구결과와 비교하여 볼 때, 시험 방법이 상이하고 시료의 두께 또한 현저히 작기 때문에 이를 정량적으로 본 시험과 비교하는 것은 무리일 것으로 판단되나, 대체적인 경향은 비슷하게 나타남을 알 수 있다.

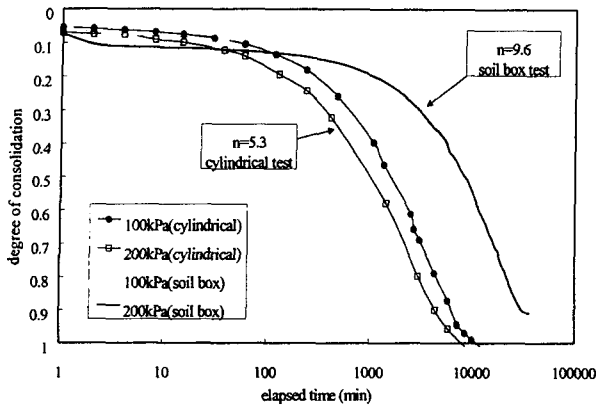


(a) 100kPa



(b) 200kPa

<Fig. 9> 조건이 다른 경우의 시간과 침하 속도의 관계



<Fig. 10> 시간과 압밀도와의 비교 곡선 (제강 슬래그)

<Fig. 10>은 제강(As Received) 슬래그에 대한 원통형 압밀시험 및 대형토조 시험의 시간별 압밀도의 비교를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 간격비, n값이 약 1.8배이상 큰 토조시험이 원통형 압밀시험에 비하여 압밀도가 50%일 때 측압에 따라서 5~6배, 압밀도가 90%에 도달하였을 때는 이보다 증가되어 약 6.5~9.5배 정도의 시간만큼 압밀 속도가 느려지고 있음을 보여주고 있다.

5. 결론

제강 슬래그를 토목 공사재료로서 이용하기 위하여 제강 슬래그의 물리·역학적 특성을 파악함과 동시에 이의 적용성을 파악하기 위해 단일의 배수재를 설치한 원통형 압밀시험과 배수재 상호간의 역할에 의해 압밀을 유도하는 대형 토조 압밀시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 제강(As Received) 슬래그 및 재산화(Reoxidized) 슬래그를 대상으로 정수위 투수시험을 실시한 결과 제강 슬래그의 투수계수는 $3.44 \times 10^{-3} \sim 3.81 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$, 재산화 슬래그는 $7.70 \times 10^{-3} \sim 8.63 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 정도를 나타내고 있으며 이는 일반적인 중립질 모래의 투수성인 $10^{-1} \sim 10^{-3} \text{cm/sec}$ 이내의 범주에 속하는 것을 알 수 있었다.
- 2) 원통형 셀 압밀시험에서의 경우 슬래그 배수재를 타설한 연약 점성토의 압밀 완료 후의 변형 형상을 살펴본 결과 슬래그 배수재는 시료바닥까지 원통형의 형상을 유지하고 있음을 확인할 수 있었고, 슬래그 드레인과 샌드 드레인은 유사한 압밀 촉진 효과가 나타나는 것을 알 수 있었다.
- 3) 제강 슬래그를 대상으로 원통형 압밀시험과 대형 토조 압밀시험의 시간별 압밀도를 분석한 결과 간격비(n)가 1.8배 큰 대형 토조 압밀시험이 원통형 압밀시험에 비하여 압밀도가 50%일 때 측압에 따라서 5~6배, 압밀도가 90%에 도달하였을 때는 약 6.5~9.5배 정도의 시간만큼 압밀 속도가 느려지고 있음을 알 수 있었다.
- 4) 슬래그는 연약 지반 개량효과에 있어서 샌드 드레인과 유사한 결과를 보이므로 그 적용성이 충분한 것으로 사료되나, 이러한 결과는 본 시험방법이 실제 현장에서의 타설 깊이나 조건과 비교해 볼 때 현저하게 규모가 작고, 본 연구의 대상지반에 한정되는 결과이므로 실제 현장 타설시 이러한 경향이 발생하는가에 대해서는 현장시험시공 등을 통하여 검증되어야 할 필요성이 있다고 사료된다.

참고문헌

1. 김수삼, 이인형(1991), "연약지반의 설계와 개량공법 실무", 전략개발원
2. 강민수(1998), "영향인자를 고려한 연직배수기술의 개발에 관한 연구", 중앙대 대학원, 박사학위논문
3. 포항종합제철(주)(1991), "철강 슬래그(slag)의 재생 이용 활성화 방안"
4. Atkinson, M. S., P. J. Eldred(1981), "Consolidation fo Soil using Vertical Dains", *Geotechnique* 31, No.1
5. Barron, R. A.(1948), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", *Trans. ASCE*, Vol. 113, No. 2346, pp. 718~742
6. Hansbo S., Jamiolkowski M. & Kok L.(1981), "Consolidation by Vertical Drains", *Geotechnique* 31, No.1
7. Yoshikuni H., Nakandodo H.(1975), "Consolidation of a clay cylinder with external radial drainage", *Soils and Foundations*, Vol.15, No.1, Mar.
8. 大關彰一郎(1997), "電氣爐 · 製鋼slag의資源化의現狀と課題, 製鋼slagの發生量低減と資源化", 日本鐵鋼協會, 鐵鋼slag의基礎と應用研究會