

연직배수공법에 있어서 제강슬래그의 재활용을 위한 투수성 연구

Considerations of Permeability of Converter Slag for Recycling in vertical drainage method

이광찬¹⁾, Kwang-Chan Lee, 정규향²⁾, Gyu-hyang Jeong,
김영남³⁾, Young-Nam Kim, 이문수⁴⁾, Moon-Soo Lee

¹⁾ 동신대학교 공과대학 토목공학과 겸임강사, Additional Job Instructor, Dept of Civil Eng, Dong-Shin Univ.

²⁾ 전남대학교 대학원 농공학과 박사과정, Graduate student, Dept of Agricultural Eng, Chon-Nam Univ.

³⁾ (주) 동아기술공사 지반부 전무이사, Managing Director, Geotechnical Eng. Div., Dong-A Eng. Co., Ltd.

⁴⁾ 전남대학교 농과대학 농공학과 교수, Professor, Dept of Agricultural Eng, Chon-Nam Univ.

SYNOPSIS : The permeability of converter slag, replacing material of sand mat on improving soft clay foundation, was evaluated in the laboratory. The effects of grain size, flow water time and aging were investigated using sea and fresh water. Converter slag being submerged with fresh water, the coefficients of permeability in A and B samples less than 10mm grain sizes were measured as $6.52 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ and $5.99 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$, while changed as $1.88 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$, $3.86 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ under sea water condition. Also, the condition of turbulent flow may exit and was experimentally identified from the relationship between hydraulic gradient and seepage velocity. After 180 days on using sea water, the coefficients of permeability of sample A and B samples decreased ten times smaller than those initial values. And after that time continually decreased as for till 360 days. The reduction of permeability coefficient was considered to influence filled with voids in high-calcium quicklime(CaO). However, in-situ coefficient of permeability was practically satisfactory.

Key Words : Converter Slag, Aging effect, Hydraulic gradient CaO, Coefficient of Permeability

1. 서론

일반적으로 골재는 포장공사에 많은 양이 소요되는데 특히 최근 표층뿐만 아니라 보조기층 재료, 구조물 뒤채움 재료로 많이 이용 되어왔다. 그러나 골재의 고갈과 환경보전 강화에 따른 석산개발의 어려움으로 양질의 천연골재를 얻기가 점차 어렵게 되어가고 있는 현실에 즈음하여 90년대에는 슬래그로 대체 되어 가는 과정으로 전환되는 시기라고 할 수 있다. 그러나 제강 슬래그는 일반적으로 염기도가 높고 비중이 큰 철, 망간 등의 유기금속을 함유하고 있기 때문에 여러 슬래그들 중에서 그 자체의 강도가 높다고 할 수 있지만 제조방법에 따라 풍화에 대한 저항성이 크거나 작으며 만약, 팽창된다면 공학적으로 불안정하므로 건설재료로 이용이 제한되어 왔다고 할 수 있다. 그러나 최근 여러 학자들의 연구에 의하면 제강슬래그(일명 전로 slag)는 시멘트와 매우 유사한 물질로서 무해성 물질임이 확인되었고(방봉찬, 1997) 또한 자원으로써 유용성이 입증되어 도로용 골재, 시멘트 원료, 성토용 골재 및 혼화 재료로 널리 사용되고 있으며, 특히 일본을 비롯한 여러 선진국에서도 이를 치환공법, 선행재하공법, Drain 공법, Sand Compaction Pile 공법, Cell 호안 및 호안의 중립재 등까지 확장되어 널리 활용되고 있는 것으

로 필자는 인식하고 있다(原田詔二, 1997). 그러나 우리 나라와 같이 좁은 국토에 해안매립과 같은 대규모 연약지반 처리공사가 이루어지면서 개량공사에 사용되는 샌드 매트용 모래의 적절한 공급이 불가피하게 되고 공사진행에 어려움이 있고 이에 즈음하여 대체 재료의 확보는 중요한 관심사라는 이야기를 종종 들어 왔다. 이와 같은 관점에서 전로 슬래그 중 제강 슬래그를 연약지반 처리시 복토점 Sand Mat 대체 재료로서의 사용성 가능 여부에 대해 기초연구를 시도한 것이다. 현재까지 연구보고에 의하면 통상 사질토(암석덩어리 또는 파쇄암, 자갈, 입경이 큰 모래질)의 흐름은 Darcy 법칙이 적용되지 않고 난류 흐름이 적용된다고 보고되고 있어(Harr, 1962, Lane, 1964), 슬래그도 이러한 영향을 받을 것으로 보고 세심한 관심을 갖고 시험을 실시하였다. 본 연구에서는 슬래그가 사용될 지역의 특수성을 고려해 해수와 담수에 사용될 경우의 슬래그의 투수계수 특히 시간경과에 따른 투수계수의 변화에 많은 관심을 갖고 샌드매트 대체 재료로서의 이용 가능한가를 실내시험과 현장시험을 통해 파악하였으며 또한 이를 지반개량시 실제로 사용했던 현장에서의 침하량도 함께 검토하였다.

2. 각국의 재활용 현황

특히 선철(즉 무쇠)에서 인을 제거하고 얻어진 제강슬래그는 우선적으로 철을 회수하고 철 성분이 풍부한 슬래그는 원료를 절약하기 위하여 다시 제철소 내부로 반송시켜 재사용하며 철 성분이 낮은 슬래그는 토목공사용 재료로 다시 이용되기도 하는데 선철을 전로에서 정련시 발생하는 것이 전로 슬래그이며 반면에 고철을 전기로에서 정련시 발생하는 것을 전기로 슬래그라고 지칭한다. 각국의 재활용 현황은 다음의 표 1, 2, 3과 같다.

특히 프랑스나 독일에서는 도로건설용으로 사용하기 위하여 유리석회(CaO)성분을 4%이하로 규제하고 있는 것이 주목할만하다. 그러나 국내에서는 슬래그 기층 및 보조기층 설계 지침서(1982)가 제정되고 고로 슬래그의 재활용은 활발한데 비하여 제강 슬래그는 철광석 회수에 국한될 뿐 대부분 매립재료로 활용되고 있고 90년 후반부터 연약지반 개량에 필요한 선행재하공법과 복토 재료점 S/M 대체재료로 활용을 시도하고 있는 추세이다.

표 1. 세계각국의 제강슬래그 생성량과 이용현황

| 국 가 | 조 강 (A) | 슬래그 생성량 (B) | 슬래그 이용량 | | | | | B/A (kg/t) | C/B (%) |
|-----|------------|-------------------|---------|-------|-------|-------|-------|---------------|------------|
| | | | 계(C) | 도로 | 비료 | 재이용 | 기타 | | |
| 프랑스 | - | - | 2,235 | - | 2,235 | - | - | - | - |
| 벨기에 | 13,424 | 2,402 | 2,052 | 10 | 1,827 | 215 | - | 179 | 85 |
| 소 련 | - | 24,000 | 10,160 | 8,500 | 560 | 1,100 | - | - | 42 |
| 미 국 | - | - | 7,711 | 6,940 | - | - | 771 | - | - |
| 호 주 | 7,953 | 1,433 | 1,433 | 390 | - | 270 | 773 | 180 | 100 |
| 일 본 | 111,000 | 14,760 | 14,760 | 1,390 | 320 | 2,800 | 9,330 | 132 | 100 |

표 2. 제강슬래그 발생 및 재활용 현황

| 구 분 | | 1994년 | | | 1995년 | | | 1996년 | | | 비 고 |
|-------------|-------------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | 포항 | 광양 | 일본 | 포항 | 광양 | 일본 | 포항 | 광양 | 일본 | |
| 발 생 량 | 전 로 | 1,504 | 1,800 | 9,851 | 1,645 | 1,857 | 10,439 | 1,803 | 2,060 | 4,708 | |
| | 전기로 | 87 | - | 2,668 | 84 | - | 3,549 | 80 | - | 1,749 | |
| | 계 | 1,591 | 1,800 | 12,519 | 1,729 | 1,857 | 13,988 | 1,883 | 2,060 | 6,457 | |
| 재 활 용 | 재활용 | 437 | 536 | 2,208 | 458 | 488 | 2,430 | 371 | 948 | 1,779 | 철은 회수 |
| | 도로 및 철도용 | - | - | 1,465 | - | - | 2,578 | - | - | 1,204 | |
| | 시멘트용 | 541 | - | 526 | 514 | - | 670 | 496 | - | 383 | |
| | 토목용 | - | - | 3,549 | - | - | 4,237 | 915 | - | 1,594 | 호안공사 |
| | 기타 | 43 | 35 | 2,222 | 67 | 18 | 2,139 | 7 | 47 | 789 | |
| 합 계 | | 1,021 | 571 | 9,970 | 1,039 | 506 | 12,054 | 1,789 | 695 | 5,753 | |
| 매 립 | | 570 | 1,229 | 2,549 | 690 | 1,351 | 1,934 | 94 | 1,365 | 704 | |

표 3. 오스트리아와 벨기에의 제강슬래그 재활용율

| 사 용 목 적 | Austria (%) | Belgium (%) |
|----------|-------------|-------------|
| 재 활 용 | 6.2 | 25 - 65 |
| 도 로 | 24.9 | 0 - 40 |
| 콘크리트골재 | 0.4 | 0 |
| 시멘트 산업 | 4.1 | 0 - 10 |
| 뒷 채 음 재 | 20.8 | - |
| 토목, 항만건설 | - | 0 - 60 |
| 비 료 | 2.1 | - |
| 매 립 | 41.5 | 0 - 40 |

3. 시험재료의 특성

3.1 화학적 및 물리적 성질

제강슬래그의 성분 중 석회(산화칼슘)는 실리케이트(silicate)상, 베스타이트(wüstite)상 등으로 구성되어 있고 일부는 미용해 상태의 Mg, Mn, Fe 등을 포함한 라임(lime)상 (일명 유리석회를 의미)으로 되어 있다. 여러 가지 화학적 구성성분을 파악하기 위해 EDXA 분석(Electron Dispersed X-ray Analysis)을 의뢰하여 분석한 결과 Ca, Si는 각각 40.63%, 7.0%이고 에이징 처리 후에는 33.22%, 4.37%로 감소한 경향을 보이고 해사의 경우 Si는 44.22%로 슬래그에 비해 다소 크게 나타났다. 이를 종합한 화학적 성분 결과는 표

4와 같이 시험종료 후 다공판에 쌓인 라임상의 유리석회의 EDXA성분 분석한 결과도 표 5에 나타낸다. 또한 전술한 표 5에서 담수를 통과한 경우 Si와 Ca는 각각 6.88%, 11.77%이고, 해수 통과시 Si와 Ca이 각각 0.31%, 5.46%로 차이를 보이는데 이들 성분 중 Ca는 물과 반응하여 팽창 가능성이 있다고 보고되어 시간의 경과에 따라 투수성을 감소시키는 원인으로 간주하여 시험도중 많은 관심을 가져야할 인자로 판단하였다. 왜냐하면 해사에는 Ca가 전혀 검출되지 않기 때문이다.

표 4. 제강슬래그의 화학성분 조사 결과(EDXA)

(단위 : %)

| 종류 원소 | 제강슬래그 | | 일반 해사 | | 에이징후 제강슬래그 | |
|----------|--------|--------|--------|--------|------------|--------|
| | 중량 백분율 | 원소 백분율 | 중량 백분율 | 원소 백분율 | 중량 백분율 | 원소 백분율 |
| O | 45.79 | 66.79 | 43.44 | 58.20 | 43.57 | 55.53 |
| Na | - | - | 0.57 | 0.53 | - | - |
| Mg | 0.84 | 0.8 | 1.56 | 1.37 | 0.78 | 0.66 |
| Al | 0.81 | 0.7 | 3.10 | 2.46 | 0.67 | 0.51 |
| Si | 7.00 | 5.82 | 44.22 | 33.75 | 4.37 | 3.17 |
| S | 0.63 | 0.46 | - | - | 0.94 | 0.6 |
| Cl | - | - | 1.99 | 1.21 | - | - |
| K | 0.35 | 0.21 | 3.17 | 1.74 | - | - |
| Ca | 40.63 | 23.65 | - | - | 33.22 | 16.90 |
| Ti | 0.73 | 0.36 | - | - | - | - |
| Mn | 0.35 | 0.15 | - | - | 0.43 | 0.16 |
| Fe | 1.91 | 0.8 | 1.95 | 0.75 | 3.27 | 1.20 |
| Cu | 0.41 | 0.15 | - | - | 0.27 | 0.09 |
| In | 0.54 | 0.11 | - | - | - | - |

표 5. 제강슬래그 라임상의 화학성분실험 결과

(단위 : %)

| 종류 원소 | 담수 사용시 | | 해수 사용시 | |
|----------|--------|--------|--------|--------|
| | 중량 백분율 | 원소 백분율 | 중량 백분율 | 원소 백분율 |
| O | 33.16 | 31.87 | 30.08 | 45.16 |
| Na | - | - | 15.66 | 16.36 |
| Mg | - | - | 8.79 | 8.68 |
| Al | 1.09 | 0.62 | - | - |
| Si | 6.88 | 3.77 | 0.31 | 0.27 |
| S | 0.23 | 0.11 | 0.68 | 0.51 |
| Cl | 0.14 | 0.06 | 36.33 | 24.61 |
| K | 0.37 | 0.15 | 1.51 | 0.93 |
| Ca | 11.77 | 4.52 | 5.46 | 3.27 |
| Ti | - | - | - | - |
| Mn | - | - | - | - |
| Fe | 0.14 | 0.04 | - | - |
| Cu | 0.15 | 0.04 | - | - |
| In | - | - | - | - |

그림 1은 슬래그의 입상구조를 확인하기 위해 입경 0.16mm의 슬래그를 전자현미경을 이용하여 50배, 500배 확대 촬영한 것이다.

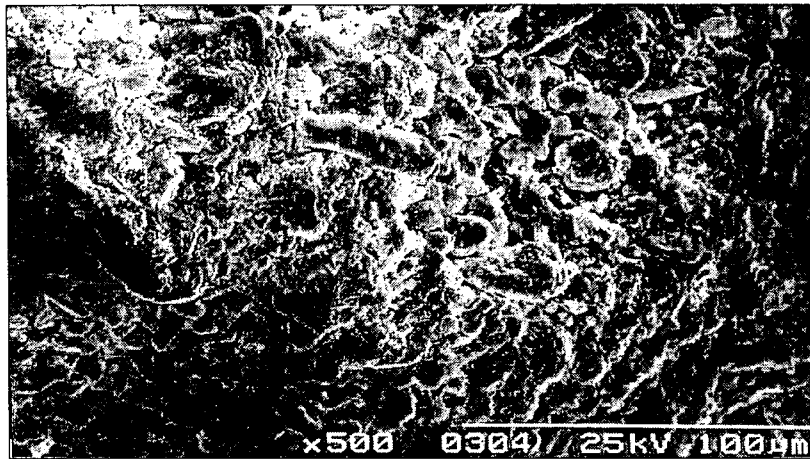
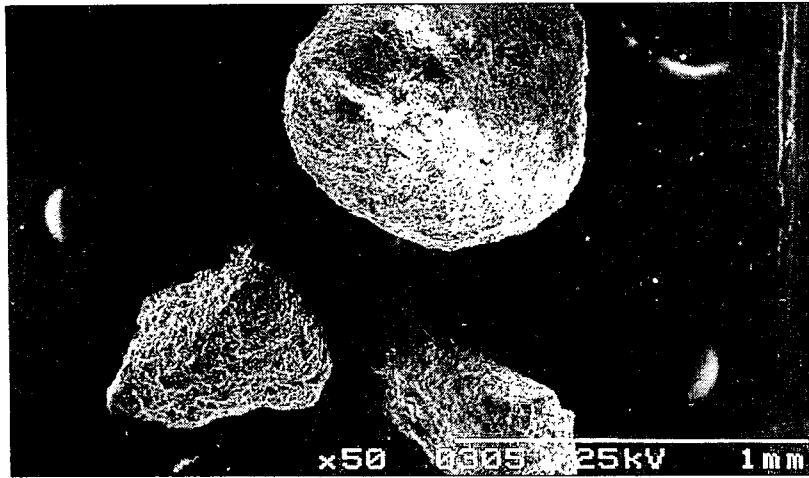


그림 1. 0.16 mm 슬래그 입자의 전자 현미경 사진(상 50배, 하 500배)

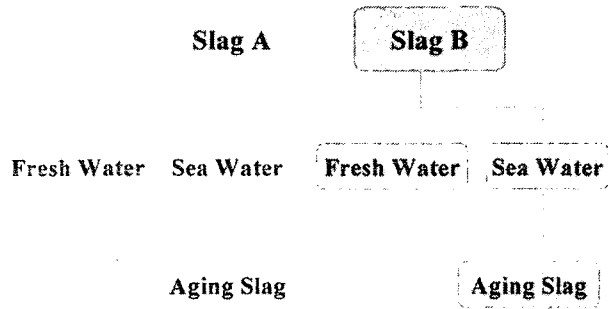
본 연구에 사용된 입경 10mm 미만인 제강 슬래그의 물리적 성질은 표 6과 같고 그리고 표 7은 특히 투수성에 영향을 주는 #200체 통과량 유무와 제안된 샌드매트의 시방규정에 의거하여 입경별 A시료와 B시료로 구분, 선별하여 시험에 이용하였다. ..

표 6. 제강슬래그의 물리적 성질

| 구 분 | Gs | w_n (%) | L_i (%) | #200통과량(%) | C_u | C_g | USCS |
|-----|------|-----------|-----------|------------|-------|-----------|---------|
| 시험값 | 3.22 | 3.69 | 16 | 3~7 | 14 | 0.8 ~ 1.0 | SW ~ SM |

표 7. 시험에 이용된 슬래그 종류

| 시험항목 \ 종류 | | A시료 | B시료 |
|--------------------------------|-------------|------|------|
| 통 | 9.60mm | 99 | 96 |
| 과 | 6.30mm | 94 | 82 |
| 백 | 4.75mm | 91 | 65 |
| 분 | 2.36mm | 65 | 33 |
| 울 | 425 μ m | 30 | 2 |
| (%) | 75 μ m | 7 | 0 |
| w | | 3 | 2.3 |
| γ_d (t/m ³) | | 1.92 | 1.91 |
| SP (%) | | 4.5 | 3.2 |
| e_0 | | 0.72 | 0.72 |



참고) 실내투수시험 과정

3.2 국내외 Sand Mat 시방규정

현재까지 국내외에서 연약지반 처리시 사용되고 시방화된 Sand Mat(즉 S/M)의 입경별 범위를 표 8에 나타내었다. 이 표에서 특히, #200체 통과율이 중요한자로 평가된다. 또한 제강 슬래그, 해사 그리고 육사(land sand)의 입도시험 결과와 슬래그 A, B시료의 입도시험 결과와 기계안된 JIS과 ASTM의 규정과 함께 그림 2에 나타내었다. 입도시험에 사용되는 제강 슬래그는 200번체 통과율이 2~7%이고 유효입경 D_{10} 은 0.1~0.15mm이고 그리고 D_{60} 은 1.5~2mm이며 균등계수 평균값 C_u 는 14, 곡률계수 C_g 는 0.8~1.0의 값을 갖는다. 그림을 상세히 살펴보면 ①과 ②는 ASTM의 시방규정으로 ①은 샌드매트의 상한선이고 ②는 하한선의 입도곡선으로 규정되어 있는데 슬래그 B와 에이징 처리한 B시료의 입도 곡선과 좋은 대응성을 보이며 ③과 ④는 JIS의 규정으로서 ③은 역시 상한선이고 ④는 하한선으로서 슬래그 A와 에이징 처리한 A시료와도 역시 좋은 대응성을 보이고 있으며 해사(sea sand)와 육사(land sand)도 이 범위에 들고 있어 입도시험 결과만으로 판단할 때 슬래그 입경 제한이 이루어진다면 양호한 투수계수가 측정될 수 있을 것으로 판단된다.

표 8. 시방화된 국내외 Sand Mat의 입경범위

| 미도로국 | | 일본토목학회 | | 한국도로공사 | |
|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|
| S/M 입경 | 통과율(%) | S/M 입경 | 통과율(%) | S/M 입경 | 통과율(%) |
| 3/8" (9.5mm) | 80~100 | No.4(4.75mm) | 100 | No.4(4.75mm) | 100 |
| No.8(2.36mm) | 5~50 | No.8(2.36mm) | 98 | No.8(2.36mm) | 75~100 |
| No.30(0.6mm) | 0~20 | No.16(1.2mm) | 95 | No.16(1.2mm) | 40~85 |
| No.50(0.3mm) | 0~5 | No.50(0.3mm) | 56 | No.50(0.3mm) | 2~30 |
| No.200(0.074mm) | 5~10 | No.100(0.14mm) | 30 | No.100(0.14mm) | 0~7 |
| | | No.200(0.074mm) | 5미만 | No.200(0.074mm) | 3미만 |

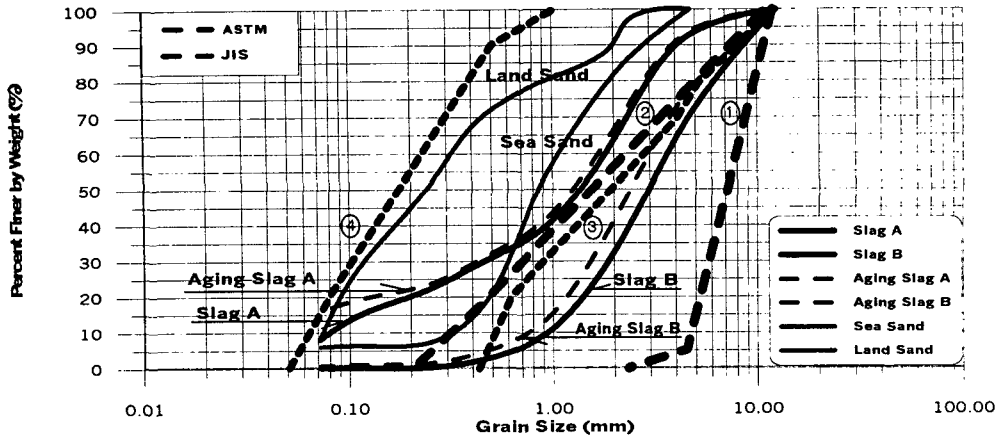


그림 2. 제강슬래그, 해사, 육사 샌트메트의 입도곡선

4. 시험

슬래그 입경을 최대 10mm로 제한하고 투수용 공시체는 직경 150mm, 높이 170mm가 적정할 것으로 판단되어 CBR 몰드를 시험용 공시체로 준비하였다. 또한 측벽을 타고 흐르는 물의 흐름을 방지하기 위하여 수 많은 시행착오를 거친 후 황토(투수계수가 1.0×10^{-7} cm/sec 이하)를 이용하여 몰드내 2cm 두께의 측벽을 형성해 가면서 시험용 시료를 준비하였다. 또한 공시체의 포화는 상향 또는 하향 침투를 번갈아 반복 실시한 후 메스실린더로 1000cc가 유출구로 나올 때 포화된 것으로 보고 시험을 실시하였다. 또한, 동수경사의 변화를 조정하기 위해 높이 400mm, 직경 150mm인 ELE 표준 투수시험기도 사용되었다. 이와 같이 투수길이를 크게 한 이유는 통상 자갈 크기의 입경을 갖는 입자를 난류상태의 흐름이라고 보고되어 있어 이 흐름의 한계 입경을 찾기 위해 A시료의 슬래그를 입경에 따라 No.1 시료는 12.7mm~9.5mm, No.2 시료는 9.5mm~6.7mm, No.3 시료는 6.7mm~4.8mm, No.4 시료는 4.8mm~4.0mm, No.5 시료는 4.0mm~2.3mm, No.6 시료는 2.4mm~0.8mm, No.7 시료는 0.8mm~0.42mm, 7단계로 분류하여 투수시험을 반복 실시하였다. 현재까지 연구 보고에 의하면 통상 사질토(암석덩어리, 자갈, 입경이 큰 모래질)의 흐름은 Darcy법칙이 적용되지 않고(즉 층류에 한정) 난류 흐름이 적용된다고 보고되어 있어, 특별한 관심을 갖고 시험을 실시하였다. 또한 해수를 사용한 투수시험 결과와 담수(하천수 또는 빗물)를 사용해서 얻은 결과를 상호 비교하였으며, 6개월 후의 투수계수를 예측하기 위해 에이징 과정(항온수조에서 80℃에서 4일간 증기로 수화반응을 촉진)후 같은 시험을 반복하여 투수계수를 결정하였고 이 때의 투수계수를 15℃로 보정하였다.

5. 결과 분석 및 고찰

5.1 입도결과에 의한 고찰

입경으로부터 투수계수를 구하는 방법은 입경이 비교적 균질한 사질토에 대하여 사용하고 있는데 체분석을 통해 구한 입경을 중심으로 시험 전에 투수계수를 예측하기 위해서 각종 경험식과 비교해 보았다. 일반적으로 사질토는 크고 작은 입경의 입자로 구성되어 있고, 또 다짐도(간극비)도 다르기 때문에 입경으로 구해진 투수계수는 개략적인 값을 나타낸다. 표 9는 토립자의 입경, 간극의 크기와 관련있는 문헌상의 제안공식과 시험실에서 구한 입도결과를 이에 적용하여 구한 투수계수 값을 나타낸 것이다. 표 9를 살펴보면 Terzaghi식(일본토질공학핸드북, 1963, 하천모래)을 제외한 NAVFAC(1982, DM-7.1, 모래 또는 모래섞인 자갈), Creager(일본토질공학핸드북, 1965, 일반 사질토)의 경험식에 의한 투수계수는 각

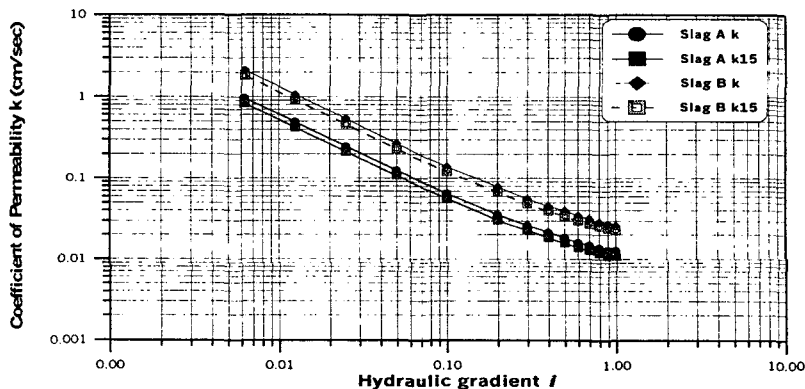
각 $1.28 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$, $1.4 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 값이 나타났다. 후술하겠지만 결과적으로 기존 경험식은 제한된 입도와 간극비를 중심으로 한 값이기는 하나 재료의 특성이 상이한 제강 슬래그의 개략적인 투수계수를 결정하는데도 적용 가능할 것으로 보고 있지만 특히 한편으로 입도 결과만을 고려하지 않고 재료의 특성만을 고려할 때는 다소 무리가 있을 것으로 본다.

표 9. 기존 경험식으로부터 투수계수 추정

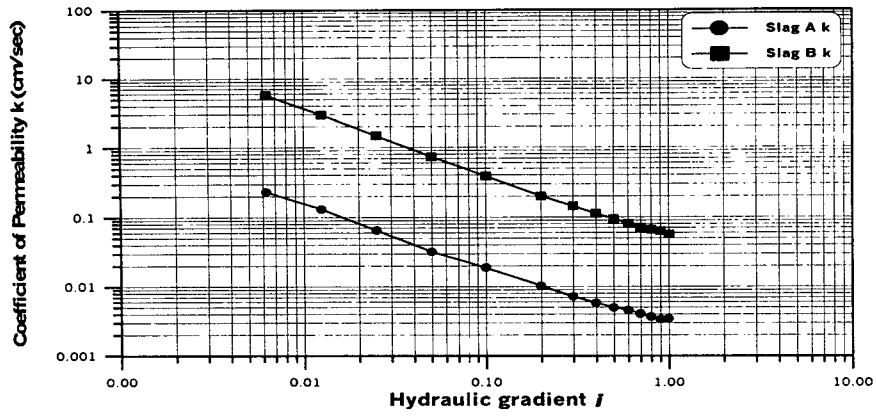
| 제안자 | 적용 토질 | 경험식 | 계산값 |
|----------|--------------|--|--|
| Terzaghi | 하천 모래 | $k = \frac{C_T}{\mu} \left(\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 d_{10}^2$ | $C_T = 10$, $n = 42(\%)$ $d_{10} = 0.01$, $k = 10.706 \text{ cm/s}$ |
| NAVFAC | 모래 및 모래섞인 자갈 | 유효입경 D_{10} , Cu 이용 | $k = 1.28 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ |
| Creager | 사질토 | 입경 D_{20} 이용 | $k = 1.4 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ |

5.2 담수, 해수 사용시 투수성 변화

그림 3은 슬래그의 균등계수(C_u)가 14이고 # 200체 통과백분율이 7%(A시료)인 제강슬래그와 균등계수가 4이고 #200체를 통과백분율이 0%(B시료)인 시료에 대해 담수와 해수를 사용하여 얻은 투수계수 변화를 나타낸 것이다. 담수사용시 동수경사가 0.1일 때 A시료의 투수계수는 각각 $4.50 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$, $5.99 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 의 값을 보이는 반면에 해수 사용시 A시료의 투수계수는 $2.0 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$, B시료는 $3.9 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 으로 나타나 통상의 중립질 모래의 투수성을 나타냈다. 그리고 동수경사(i)가 증가함에 따라 투수계수는 감소하며 특히 A시료는 담수보다 해수 사용시 다소 감소하는 경향을 보이지만 B시료는 A시료와는 반대 결과를 나타내고 있는데 #200체 통과량이 물의 흐름을 방해한 것으로 추정되며 목하 연구 중에 있다. 그림 4는 담수(a)와 해수(b)를 사용할 때 동수경사와 유속과의 관계를 나타내는 것인데 동수경사(i)가 0.1~0.2의 범위에서 굴곡 되고 있는 것을 알 수 있다. 이는 물에 작용되는 관성력과 점성력의 차이에 따라 천이영역에서 난류영역으로 바뀌는 경사로 지금까지의 시험결과에서 확인되고 있다. 그림 5는 그림 3과 4의 결과를 동수경사와 유속의 관계를 종합하여 나타낸 것이다. 그림내의 일반 중립질 모래에서의 흐름거동과 같이 직선으로 나타나지 않고 동수경사 0.2이상에서 유속 $v = k' i^{1/n}$ 의 관계가 성립되며 여기서 k' 는 흐름에 관계된 형상계수이다. 그리고 이를 양변에 log를 취하여 정리하면 $\log(i) = n \cdot \{\log(v) - \log k'\}$ 의 관계가 성립된다. 그림에서 담수를 사용한 경우 슬래그 A와 B에서 n 은 각각 2.58, 2.32이고 해수를 사용한 경우는 2.96, 2.93이고 $1/n$ 의 값은 0.33~0.43의 범위를 갖는다. 이는 Anadakrishnan, M and Varadajulu, G. H(1963)의 중립질 모래, 자갈이나 쇄석 등의 연구결과에 의하면 n 값이 1보다 크면 난류흐름이 지배된다는 보고와 일치하므로 슬래그내의 유체흐름도 천이영역을 지나 난류상태의 흐름이 지배하지 않는가 추정된다.

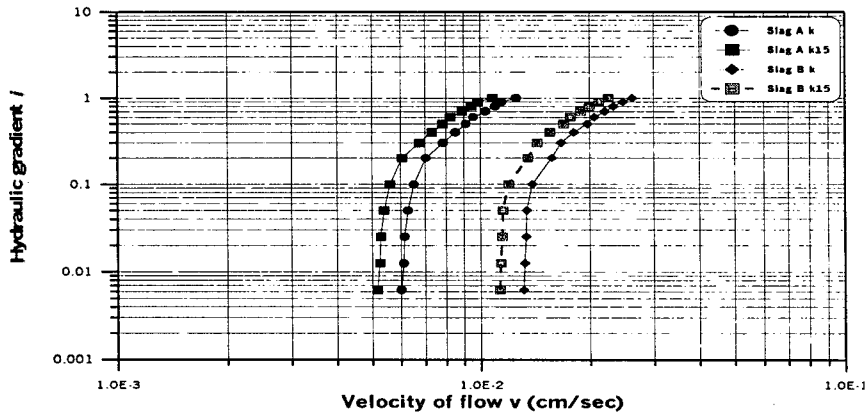


(a) 담수 사용시

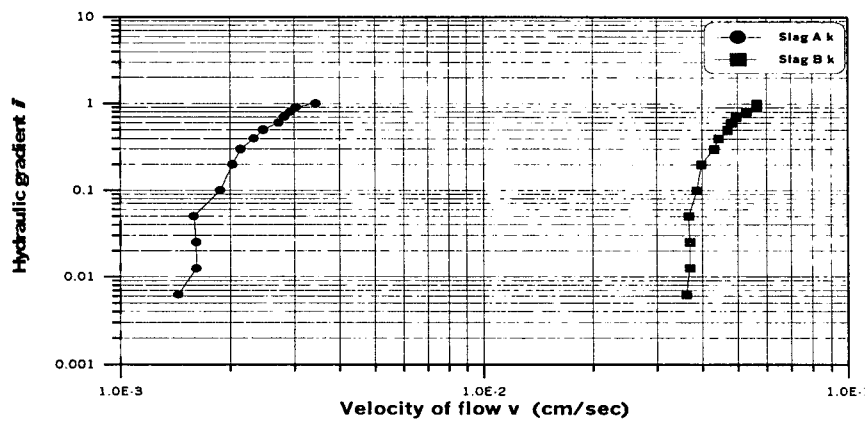


(b) 해수 사용시

그림 3. 투수계수와 동수경사의 관계



(a) 담수 사용시



(b) 해수 사용시

그림 4. 동수경사와 유속의 관계

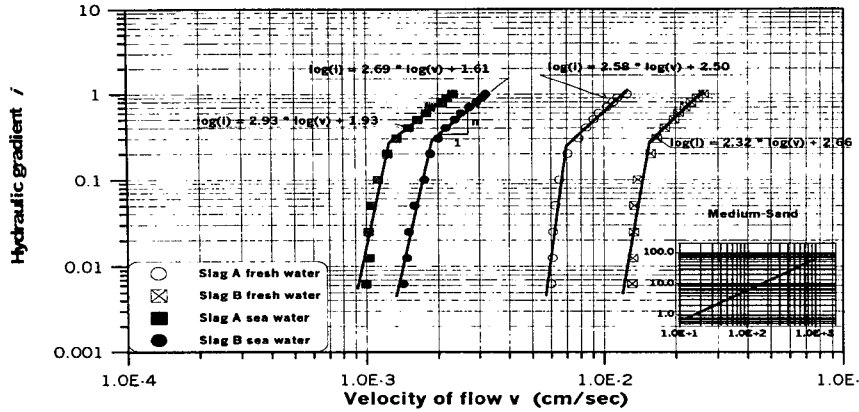


그림 5. 그림 3, 4의 결과를 모래의 경우와 비교

5.3 에이징 처리 후 투수성의 고찰

슬래그의 CaO는 $2CaOFe_2O_3$, $2CaOSiO_2$, $2CaOAl_2O_3$, $3CaOP_2O_5$, 유리 CaO, 용출된 CaO의 형태로 슬래그 내에 존재한다. 이중 수화반응에 의한 팽창붕괴를 발생하는 유리석회는 0.1~2%정도 포함되어 있다. 또한 슬래그 표면의 유리석회는 물 (H_2O)과 반응하여 제강 슬래그 입자에 미세 균열을 발생시키고 미세 균열을 통해 물이 침투하여 재차 $Ca(OH)_2$ 로 되는데 그 분화되는 과정을 그림 6에 나타낸다. 참고로 그림 7은 제강 슬래그가 투수시험도중 팽창성 여부를 확인하기 위해 시험결과인데 자연상태(즉 A, B시료)에서는 3%이후에도 약간 팽창성이 감소한 것을 확인할 수 있으나 에이징 처리를 실시하면 1%이후에 안정상태임을 알 수 있다. 그림 8(a, b)은 에이징 처리 후 담수와 해수 사용시의 투수계수와 동수경사의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 담수 사용시 $i=0.1$ 에서 A시료의 투수계수 K_{15} 는 $2.42 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 며 B시료의 경우는 $1.39 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 로 감소하였으며 해수 사용시도 A시료는 $1.76 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$, B시료는 $1.12 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 로 변화하였다. 그리고 그림 9는 에이징 처리 후 담수와 해수 사용시의 유속과 동수경사의 관계를 나타낸 것인데 동수경사에 따라 유속이 증가하는 경향을 엿볼 수 있다. 이는 에이징 처리 후 흐름을 방해하는 유리칼슘이 물과 반응할 때 수산화 칼슘으로 반응이 촉진되어 나타난 것으로 판단된다.

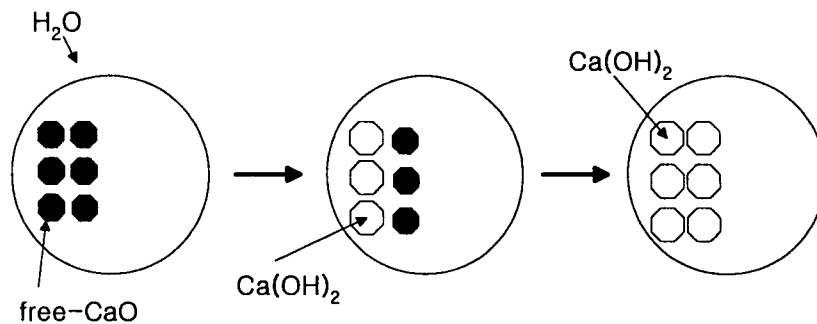


그림 6. Free CaO의 에이징 과정

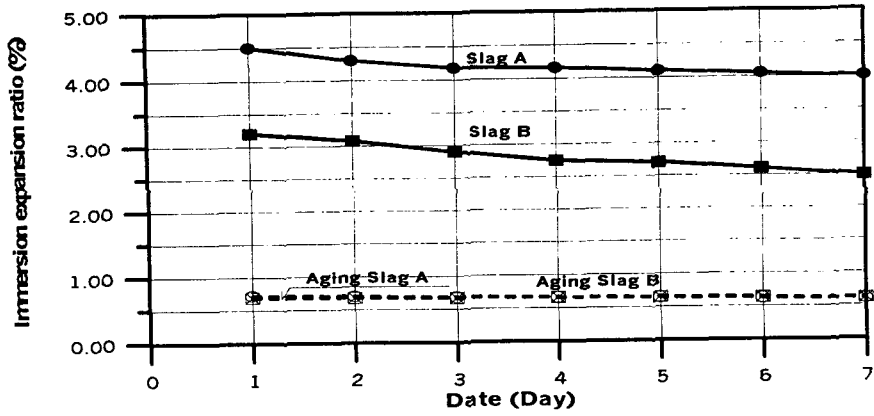
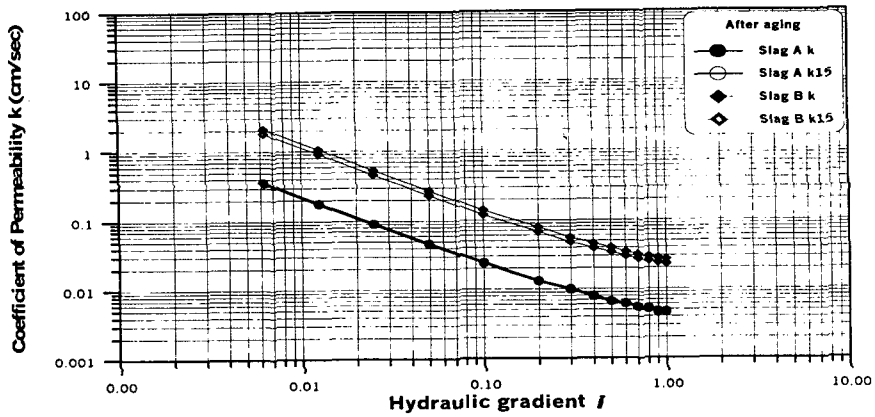
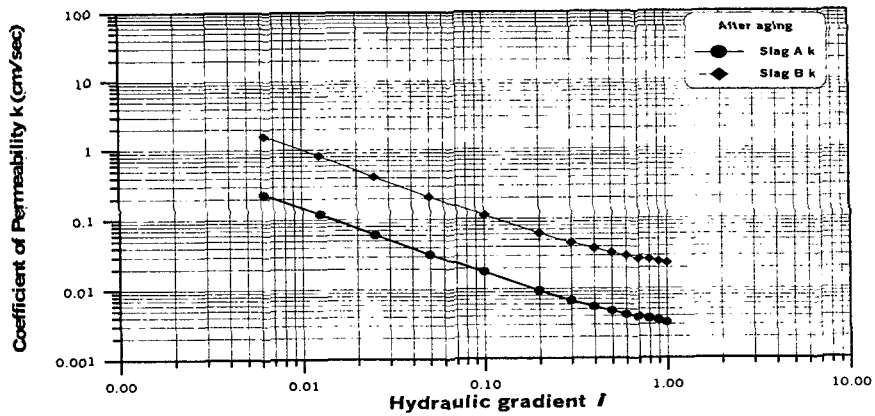


그림 7. 제강 슬래그의 팽창안정성 시험결과



(a) 담수 사용시



(b) 해수 사용시

그림 8. 에이징 처리후 투수계수와 동수경사의 관계 (a), (b)

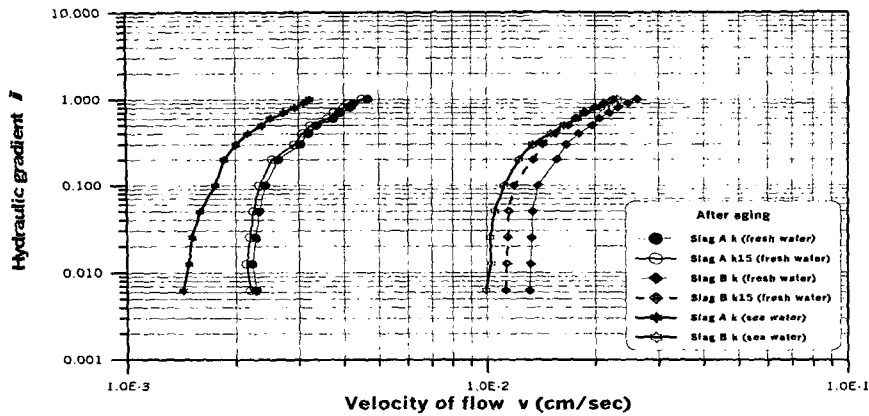


그림 9. 에이징 처리후 유속과 동수경사의 관계

5.4 일반 육사와 해사 그리고 Slag 투수성의 비교

그림 10은 육사와 해사의 투수성을 상호 비교한 것이다. 해사의 경우, 담수와 해수에 대하여 차이가 나타나지 않으며 동수경사 0.1일 때 투수계수는 $2.43 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 의 값을 가지고 반면에 육사의 경우에는 다소 차이를 나타냈다. 육사의 경우를 해수 사용시, A시료의 투수계수와 비교할 때 동일한 값을 보이고 다만, B시료와는 차이를 나타낸다. 그러나 입도를 제한한 B시료의 투수계수는 해사의 투수계수와 유사함을 보였다(표 10). 그림 11은 육사와 해사의 유속과 동수경사의 관계를 상호 비교한 것이고 표 10은 해사와 육사 그리고 제강슬래그의 동수경사가 0.1에 대한 투수계수의 시험결과를 요약한 것이다. 제강슬래그는 담수를 사용할 경우가 해수를 사용할 경우보다 투수성이 양호하고 자연상태에 존재한 경우의 시료는 수화반응이 촉진되어 에이징 처리 후에는 투수성에서 큰 차이를 나타내지 않았다. 그리고 입도를 제한한 B시료가 A시료보다 투수성이 크게 나타났으며 육사보다 입경이 큰 해사가 해수 사용시 상대적으로 투수성이 좋았다. 특히 B시료는 해사의 그것과 유사한 투수성을 보였다.

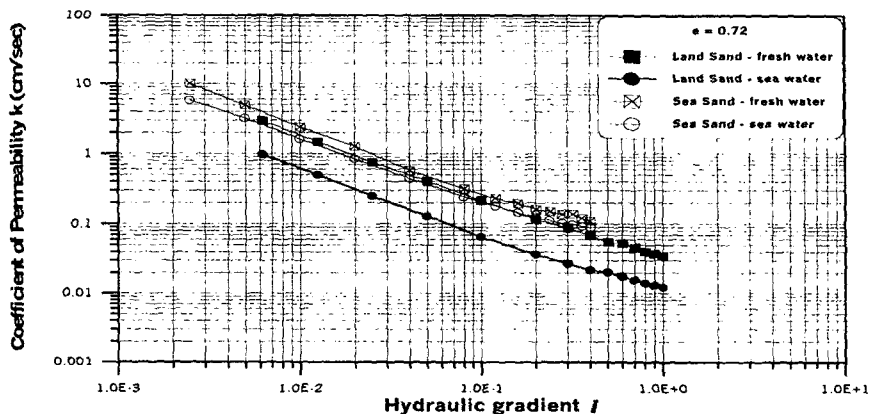


그림 10. 육사와 해사의 투수성 비교

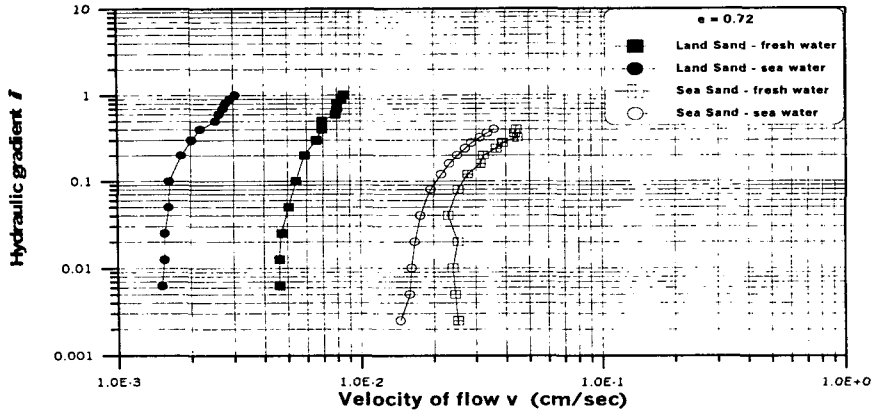


그림 11. 육사와 해사의 유속과 동수경사의 관계

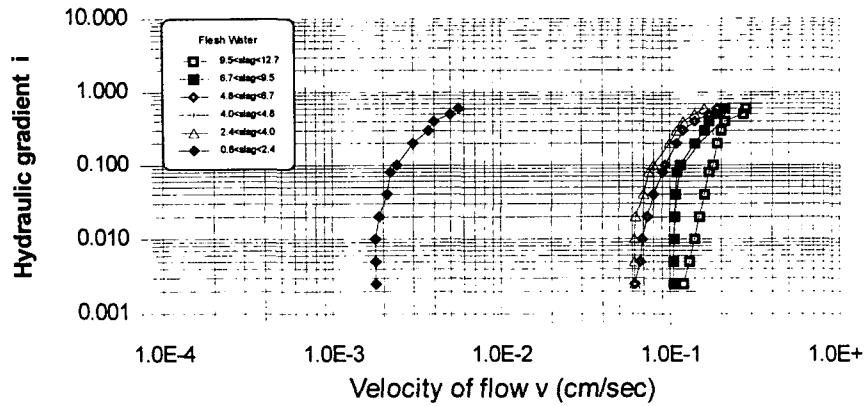
표 10. 해사, 육사 그리고 제강슬래그의 투수계수 비교

(단위 : cm/sec)

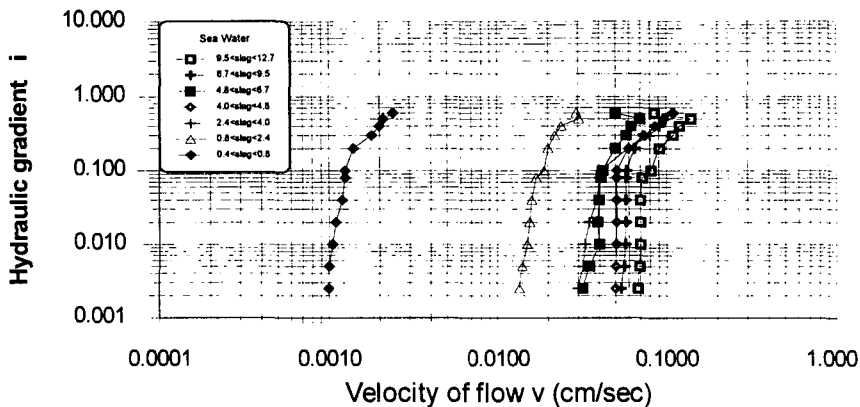
| 재 료 | 용도별 | 해수 사용시 | | 담수 사용시 | |
|----------|-----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | 자연상태 | 에이징 처리후 | 자연상태 | 에이징 처리후 |
| 제강 슬래그 A | | 1.88×10^{-2} | 1.76×10^{-2} | 6.52×10^{-2} | 2.42×10^{-2} |
| 제강 슬래그 B | | 3.86×10^{-1} | 1.12×10^{-1} | 5.99×10^{-1} | 1.39×10^{-1} |
| 육 사 | | 6.48×10^{-2} | - | 2.40×10^{-1} | - |
| 해 사 | | 2.3×10^{-1} | - | 2.43×10^{-1} | - |

5.5 동수경사와 유속의 관계

그림 12(a, b)는 담수와 해수 사용시 입경별 동수경사와 유속과의 관계를 나타낸 것인데 투수시험시 동수경사(수두차 h)를 작은 값부터 변화시켜 얻은 결과이다. 입경별 시험결과를 유심히 관찰해 보면 i 가 0.1을 전후로 굴곡되는 점을 확인할 수 있다. 이 굴절점보다 작은 경사의 범위에서는 직선 경사가 이론적으로 1이 되어야 하나 12이상의 값을 나타내며 슬래그의 투수시험시 동수경사가 변함에 따라 유속은 크게 변화하지 않음을 알 수 있으며 동수경사가 작은 부분에서는 i 가 0.1에 가까울 때까지 마찰저항이 크게 발생하는 것으로 생각된다. 특히 제강 슬래그의 공극 자체는 매우 작고 서로 불규칙하게 연결되어 있으며 보습성이 다소 있으므로(즉 CaO 때문) 일정시간 동안 흐르지 않고(그림에서 ◆는 예외) 일정 수두차가 형성되면 동수경사와 유속의 관계에서 비례관계가 성립된 것 같다. 따라서 대부분의 슬래그내의 물의 흐름은 전술한 그림 12의 경우에서처럼 i 가 0.1이하인 범위에 있어 흐름은 층류에서 난류로 바뀌는 천이 영역으로 추정되며 동수경사 i 가 미세하게 변화하는 부분에서는 Darcy의 법칙이 성립될 것으로 추정했지만 절곡점(즉 $i > 0.1$)보다 큰 경사의 범위에 있어서는 직선 경사가 1보다 크므로 슬래그 속의 물의 흐름은 난류상태가 되어 이미 Darcy 법칙은 성립되지 않는다는 것을 시사하고 있는 것으로 이해된다. 다만 곡선의 경사가 변화하는 점의 동수경사를 굴곡동수경사 i_c 라 하면, i_c 의 값은 10^{-1} 이 되고, 입경별 시료의 값이 변화하는 동시에 흐름도 난류상태로 바뀌는 것으로 추정할 수 있다. 즉 제강 슬래그의 흐름은 작은 동수경사에 있어 층류에서 난류영역으로 이동하기 때문에 층류와 난류 양면에서 고찰해 갈 필요가 있다고 생각한다. 해수를 이용한 시험에서도 담수에서처럼 한계동수경사는 10^{-1} 의 값을 보이지만 유속은 담수에 비해 작은 값을 보이고 있다. 추후 시험결과가 축적되면 이러한 변화 의미가 정도 높게 판단될 것으로 생각된다.



(a) 담수 사용시



(b) 해수 사용시

그림 12. 입경별 슬래그의 담수, 해수 사용시 동수경사와 유속의 관계(a,b)

5.6 실내시험에 의한 시간경과에 따른 투수성 평가

담수와 해수를 이용하고 A시료와 B시료를 일정한 시간 간격으로 시험한 결과를 각각 그림 13과 그림 14에 나타낸다. 시험개시 후 시간이 경과(180일 까지)되면서 투수계수의 감소하는 경향이 둔화되고 그 후 일정하게 수렴해 가는 경향을 볼 수 있다. 특히, 담수 사용시 A시료는 k 값이 $1/10$ (즉 6.52×10^{-2} cm/sec에서 1.35×10^{-2} cm/sec로 감소)로 감소하고 B시료는 그 보다 작은 변화를 보이는 반면에 해수 사용시 A 시료 투수계수 (k)값이 $1/10$ (즉 1.88×10^{-2} cm/sec에서 1.83×10^{-3} cm/sec)로 감소하고 B 시료도 3.86×10^{-1} cm/sec에서 2.72×10^{-2} cm/sec로 감소하는 경향이 확인되고 있다. 이와 같이 #200체 통과량의 유무와 시간경과에 따라 변화하는 원인은 다음과 같이 유추할 수 있다.

1) 침투압(수압)에 의하여 세립분(Free CaO)이 하부로 이동하여 집적되거나 2) 관성의 법칙과 점성력의 차이, 즉 제강 슬래그의 간극에는 굴곡된 부분이 많고 상당히 복잡하기 때문에 유로도 복잡할 것으로 보며, 3) 장시간 투수시험을 행하면 기포가 투수시료에 축적되어 투수단면이 감소되거나 불포화 상태로 존재할 가능성이 있고, 4) 현탁수나 세립분이 유출될 때 투수성이 역으로 증대하는 경향이 있을 수 있다. 즉 1)의 경우는 위에서 설명한 A시료와 B시료의 차이에서 확인되며 또한 시험종료 후 공시체 내의 다공관에 CaO가 집적되었으며 2)의 경우 굴곡부에 있어서 관성력은 직진하려고 하기 때문에 부분적으로 관성력과 점성력의 균형이 깨져 난류상태 흐름(즉 $i=0.1$ 에서 0.2 로 전환)이 발생할 것으로 판단된다. 또한, 슬래그 내의 흐름은 관속의 흐름에 비해서 작은 동수경사에 의해 난류흐름이 지배되고 그리고 유속의 차이가 발생된다는 사실을 시험 결과에서 확인되고 있다. 그리고 3)과 4)와 같은 원인들도 관여할 가능성도 있을 것으로 추론해 볼 수 있다.

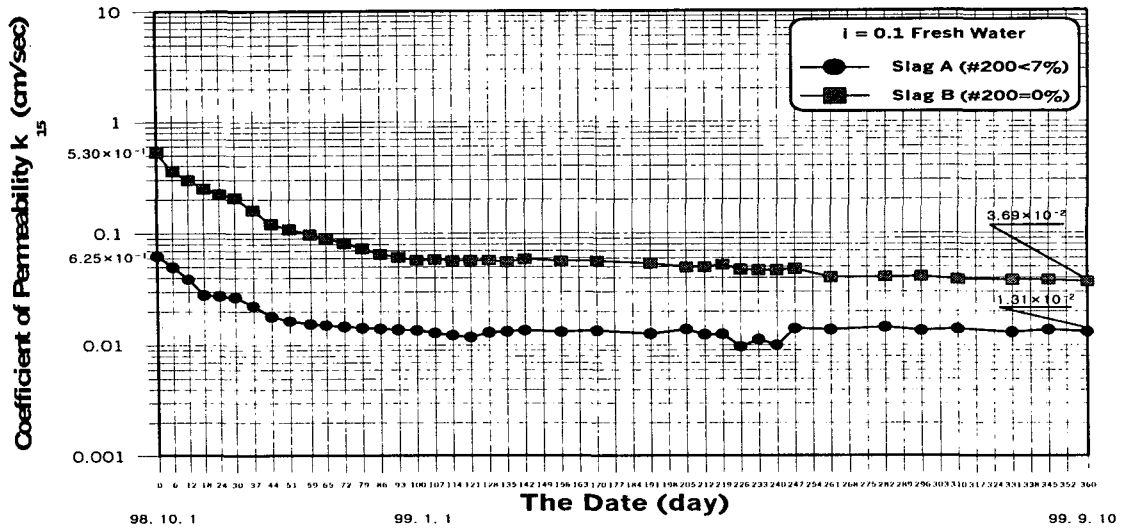


그림13. 담수 사용시 시간경과에 따른 투수성변화

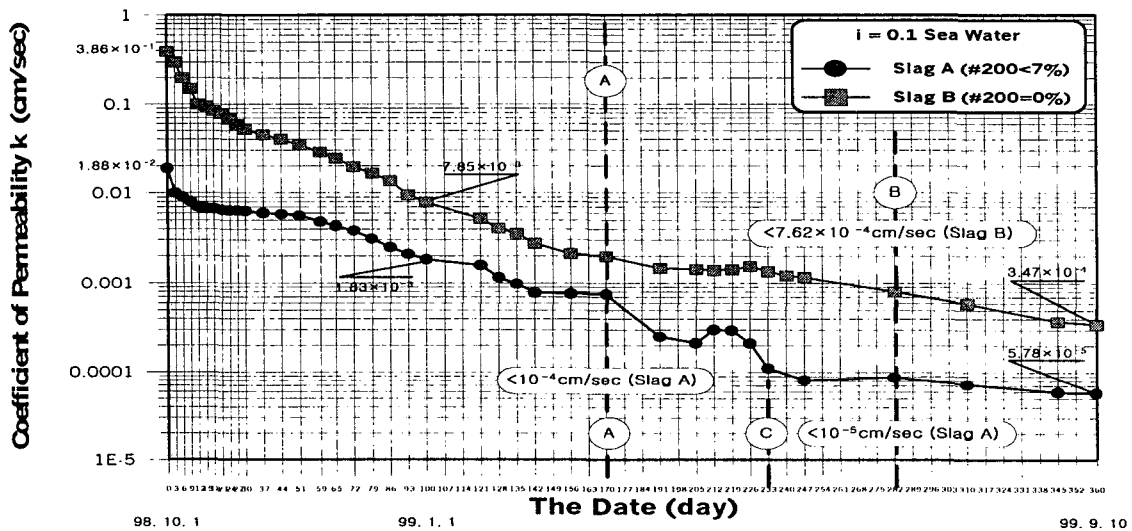


그림14. 해수 사용시 시간경과에 따른 투수성변화

5.7 현장시험에 의한 시간경과에 따른 투수성 평가

표 11은 지금까지 발표된 자연토 또는 자연지반에서의 토질 종류에 따른 k 값과 투수성 여부를 판단하는 기준을 제안하고 있어(Terzaghi and Peck, 1968) 본 연구 결과와 대비하여 귀중한 자료로 이용 할만한 가치가 있다고 생각된다.

표 11. 투수성 판단

| 투수성 판단 | k 값 (cm/sec) | 토 질 | 비 고 |
|--------|--|-------------------|-----|
| 우 수 | $> 1 \times 10^{-1}$ | 중간 내지 조립자갈 | |
| 보 통 | $1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-3}$ | 모래, 세립질 모래 | |
| 낮 다 | $< 1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-5}$ | 실트질 모래, 오염된 모래 | |
| 매우 낮다 | $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-7}$ | 조밀한 실트, 세립질 사암 | |
| 불 투수성 | $< 1 \times 10^{-7}$ | 균질한 점토, 절리가 없는 이암 | |

표 12는 Casagrande 와 Fadum(1940)이 제안한 것인데 k 값에 따른 투수특성과 배수특성 등을 판단자료로 활용하기 위해 참고로 나타낸 것인데 금해 시험결과와도 대비해 불만한 가치가 있다고 판단되어 (Jumikis, 1962) 이의 내용과의 연관성을 후술한다.

표 12. 배수특성 판단

| | | | |
|---------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| k 값 | $10^{-2} \sim 10^{-4}$ cm/sec | $< 10^{-4} \sim 10^{-6}$ cm/sec | $< 10^{-7}$ cm/sec |
| 배수 특성 | 우수(good drainage) | 빈약(poor drainage) | 실제적으로 불투수 |
| 흙댐이나 제방에의 적용성 | 투수(pervious) | 불투수(impervious) | |

세계적으로 저명한 여러 지반 전문가(예컨대, Leonard, Spangler, Peck, Hansen, Mitchell, Sowers 등) 들도 상기의 표 12에서 제시된 값을 투수특성을 파악하는데 귀중한 자료로 이용되어 왔다는 사실에 주목할 필요가 있다. 또한 본 연구의 현장투수시험 결과(표 13. 360일 전 슬래그 포설 초기에 현장 투수성을 평가하여 나타낸 것임. 제강 슬래그 투수성 학술 연구 용역, 한국지반공학 최종 보고서 pp.67에서 인용)에서도 해수와 담수에 상관없이 시험오차를 감안하더라도 $\alpha \times 10^{-2}$ cm/sec 전후의 값을 보여 투수성이 양호하거나 우수하며 게다가 배수관점에서도 우수(Good drainage)한 것으로 평가되었다.

표 13. 담수와 해수사용시 현장투수시험 결과 비교 (360일 전)

(단위 : cm/sec)

| 시험공 번호 | 담수 - 1회 | | 담수 - 2회 | | 담수평균 k_{15} | 해수 | | 평균 k_{h15} |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | k_h | k_{h15} | k_h | k_{h15} | | k_h | k_{h15} | |
| 1 | 1.31×10^{-1} | 1.11×10^{-1} | 3.23×10^{-1} | 2.59×10^{-1} | 2.27×10^{-1} | 2.83×10^{-1} | 2.02×10^{-1} | 2.46×10^{-1} |
| 2 | 1.03×10^{-0} | 8.75×10^{-1} | 1.03×10^{-0} | 8.27×10^{-1} | 1.03×10^{-0} | 1.07×10^{-0} | 7.6×10^{-1} | 1.04×10^{-0} |
| 3 | 8.83×10^{-1} | 7.51×10^{-1} | 1.09×10^{-1} | 8.76×10^{-1} | 9.89×10^{-1} | 1.02×10^{-1} | 7.29×10^{-1} | 1.00×10^{-0} |
| 4 | 2.97×10^{-1} | 2.52×10^{-1} | 2.83×10^{-1} | 2.27×10^{-1} | 2.90×10^{-1} | 2.89×10^{-1} | 2.05×10^{-1} | 2.89×10^{-1} |
| 5 | 9.75×10^{-2} | 8.28×10^{-2} | 1.41×10^{-1} | 1.13×10^{-1} | 1.19×10^{-1} | 8.14×10^{-2} | 5.80×10^{-2} | 1.06×10^{-1} |
| 6 | 9.66×10^{-1} | 8.21×10^{-1} | 1.03×10^{-0} | 8.24×10^{-1} | 9.98×10^{-1} | 9.39×10^{-1} | 6.89×10^{-1} | 9.78×10^{-1} |
| 7 | 3.59×10^{-1} | 3.05×10^{-1} | 4.51×10^{-1} | 3.62×10^{-1} | 4.05×10^{-1} | 4.62×10^{-1} | 3.28×10^{-1} | 4.24×10^{-1} |
| 8 | 4.67×10^{-1} | 3.96×10^{-1} | 4.48×10^{-1} | 3.59×10^{-1} | 4.57×10^{-1} | 3.39×10^{-1} | 2.41×10^{-1} | 4.18×10^{-1} |
| 9 | 9.00×10^{-1} | 7.65×10^{-1} | 9.15×10^{-1} | 7.33×10^{-1} | 9.08×10^{-1} | 8.93×10^{-1} | 6.36×10^{-1} | 9.03×10^{-1} |
| 10 | 2.94×10^{-1} | 2.35×10^{-1} | 3.27×10^{-1} | 2.62×10^{-1} | 3.10×10^{-1} | 1.65×10^{-1} | 1.18×10^{-1} | 2.62×10^{-1} |

5.8 360일 후 현장의 투수시험 결과

360일전 지반조건은 대략 동일하지만 다만 Surchage로 인한 H만 증가한 상태인 지층에 Casing (ϕ 50mm)를 매입(preboring 실시 후)하고 지반의 교란의 영향을 최소화하기 위하여 매입 후 1주일 후에 해수와 담수를 번갈아 가며 현장 투수성을 평가하였다. 물론 시험방법과 접근방법에 따라 다소 의견의 차이는 있을 수 있지만 그 결과는 평균적으로 담수 사용시수평 k 값은 1.19×10^{-2} cm/sec이고 연직 k 은

8.90 × 10⁻³cm/sec이며 해수사용시 수평 *k*값은 1.04 × 10⁻²cm/sec이고 연직 *k*값은 4.75 × 10⁻³cm/sec이다. 360일 후 동일한 지점에서 측정된 결과 연직은 6.83 × 10⁻³cm/sec, 수평은 1.12 × 10⁻²cm/sec이었다. 물론 이러한 *k*값은 측정시의 온도에 따라 약간의 차이가 있지만 해수나 담수사용에 관계없이 평균적으로 볼 때 수평 *k* = 1.12 × 10⁻²cm/sec이고, 연직 *k* = 6.83 × 10⁻³cm/sec로 평가되었다.

물론 전술한 표 11, 12의 연구결과와 대비해 볼 때 투수성은 우수 내지 보통이며, 배수특성은 양호한 것으로 평가할 수 있다. 고로 현행의 S/M(Sand mat) *k*값이 10⁻³cm/sec이상으로 규정하고 있는 값과 근사한 값을 보여 배수나 투수성에는 문제가 없는 것으로 평가할 수 있다. 특히 장시간 실시되는 실내 시험에서는 CaO 문제 발생여부를 확인할 수 있지만 이와 반대로 현장에서는 CaO 잔존여부를 투수시험 도중 확인 할 수가 없으며 또한 시험도중 인근 집수정에서 배출되는 간극수(압밀수)의 pH측정결과 12 ~ 13의 범위로 측정되었으며 순수한 해수의 pH는 8 ~ 9범위를 갖는 것으로 확인되었다. 이러한 결과로 추측해 볼 때 하부로 이동된 CaO가 간극수와 결합되어 pH의 상승을 부추겼을 것으로 생각되지만 현장 Slag의 배수성이나 투수성에는 문제가 없을 것으로 본다.

다음 표 14는 360일 후 제강슬래그의 현장투수시험결과를 평균하여 나타낸 것인데 표를 상세히 살펴보면 담수사용시 평균 *k*₁₅는 1.17 × 10⁻² ~ 8.99 × 10⁻³cm/sec범위로 측정되고 반면, 해수사용시 평균 *k*₁₅는 1.04 × 10⁻² ~ 4.39 × 10⁻⁴cm/sec로 측정되어 담수사용시 투수계수보다 1/10 정도 작게 평가되는 경향이 있다.

표 14. 담수와 해수 사용시 현장 투수 시험 결과 비교(360일)

(단위 : cm/sec)

| 시험 공 번호 | 담수 평균 <i>k</i> | 담수 평균 <i>k</i> ₁₅ | 해수 평균 <i>k</i> | 비 고 |
|----------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|-----|
| 1 (수평) | 1.43 × 10 ⁻² | 1.38 × 10 ⁻² | 1.10 × 10 ⁻² | |
| 1-1 (수평) | 2.35 × 10 ⁻³ | 2.61 × 10 ⁻³ | 3.19 × 10 ⁻³ | |
| 1-2 (연직) | 1.33 × 10 ⁻² | 1.48 × 10 ⁻² | 8.61 × 10 ⁻³ | |
| 2 (수평) | 1.31 × 10 ⁻² | 1.26 × 10 ⁻² | 9.83 × 10 ⁻³ | |
| 3 (연직) | 1.70 × 10 ⁻³ | 1.75 × 10 ⁻³ | 4.39 × 10 ⁻⁴ | |
| 4 (수평) | 1.07 × 10 ⁻² | 1.04 × 10 ⁻² | 1.04 × 10 ⁻² | |
| 5 (수평) | 1.49 × 10 ⁻² | 1.44 × 10 ⁻² | 1.19 × 10 ⁻² | |
| 6 (연직) | 1.21 × 10 ⁻² | 1.17 × 10 ⁻² | 8.74 × 10 ⁻³ | |
| 7 (수평) | 1.46 × 10 ⁻² | 1.40 × 10 ⁻² | 1.12 × 10 ⁻² | |
| 7-1 (수평) | 6.34 × 10 ⁻³ | 7.05 × 10 ⁻³ | 5.13 × 10 ⁻³ | |
| 8 (수평) | 9.44 × 10 ⁻³ | 9.38 × 10 ⁻³ | 8.01 × 10 ⁻³ | |
| 9 (연직) | 1.95 × 10 ⁻³ | 2.03 × 10 ⁻³ | 1.20 × 10 ⁻³ | |
| 10 (수평) | 9.33 × 10 ⁻³ | 8.99 × 10 ⁻³ | 1.06 × 10 ⁻² | |
| 2m 수평 평균 | 1.23 × 10 ⁻² | 1.19 × 10 ⁻² | 1.04 × 10 ⁻² | |
| 2m 연직 평균 | 7.26 × 10 ⁻³ | 7.57 × 10 ⁻³ | 4.75 × 10 ⁻³ | |
| 4m 수평 평균 | 4.35 × 10 ⁻³ | 4.83 × 10 ⁻³ | 4.16 × 10 ⁻³ | |

상기의 표 14 중 시험공 번호 3, 6, 9번은 수직 Casing에서 투수계수를 측정한 값이고 그 외에는 수평 투수계수를 측정한 값을 의미한다.

6. S/M 대체 재료로서의 타당성 검증(현장에의 적용)

이상의 실내시험과 현장시험의 결과로부터 S/M 재료로서의 사용성 여부를 직접적으로 검증하기 위하여 실제 현장에서 S/M 대체 재료로 포설된 현장(Slag 포설)과 Sand mat가 포설되어 있는 현장을 대상으로 시간경과에 따른 침하량을 검토하였다. 그림 15는 S/M이 없고 바로 Slag로 대체한 경우로서 하중-시간-침하량 관계를 나타낸 것이다. 그림을 상세히 살펴보면 상재하중 초기에는 순간침하가 뚜렷하게 나타나나 그 이후로 침하가 순조롭게 발생되고 있음을 시사하고 있다. 당초 이 지반은 원지반 점성토 지반위에 준설을 6.5m가량 실시한 후 연약지반개량을 시도한 것이다. 그림 16은 슬래그를 포설하지 않고 통상적으로 사용된 Sand mat를 사용한 경우로서 하중과 시간-침하량 관계를 나타낸 것이다. 설계시 예상했던 침하량과 계측침하량(즉 지표면 침하량)을 함께 비교한 것인데 그림 15와 그림 16의 모든 경우에 있어서 계획했던 침하량과 좋은 대응성을 보이고 있어 Slag의 배수나 투수특성이 Sand mat와 동일한 투수기능이 발휘되고 있음을 확인할 수 있다.

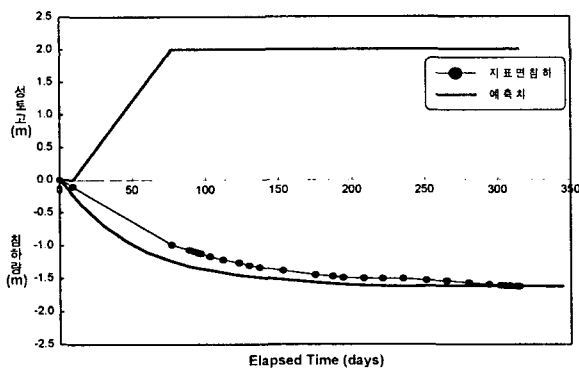


그림 15. 하중-시간-침하량 관계(S/M이 없는 경우)

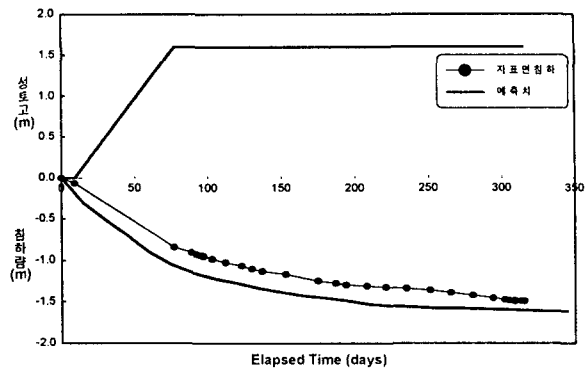


그림 16. 하중-시간-침하량 관계(S/M이 있는 경우)

7. 결론

본 연구는 제강 슬래그를 대상으로 해수와 담수를 사용하여 실내시험과 현장시험을 실시하고 시간 경과에 따른 투수계수의 변화를 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

7.1 실내시험에 의한 고찰

- 1) 담수 사용시, 10mm미만 입경에 대해 투수시험한 결과 No.200체 통과량이 7%(A시료)인 슬래그의 동수경사 $i=0.1$ 에서 투수계수(k_{15})는 $4.50 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 이고 No.200체 통과량이 0%(B시료)인 슬래그의 투수계수(k_{15})는 $1.20 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 로 측정되었다. 또한, 해수 사용시 10mm미만 입경에 대해 투수 시험한 결과 A시료의 투수계수(k_{15})는 $1.88 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 이고 반면에 B시료의 투수계수(k_{15})는 $3.86 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 로 측정되었으며 현재 샌드 매트용으로 사용되는 해사의 투수계수는 $2.3 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 로 측정되어 해사의 그것과 유사한 값을 보였다.
- 2) 해수 사용시 침투유속과 동수경사의 관계에서 층류에서 난류로 변하는 사실이 확인되었는데 10mm미만의 입경에서는 동수경사가 0.1~0.2에서 난류흐름으로 전환되는 경향을 보였다.
- 3) 해수를 사용하여 360일 동안의 시간경과에 따른 투수계수의 변화를 검토한 결과, A시료의 투수계수는 $1.88 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 에서 $5.78 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 로 감소한 반면에 B시료의 투수계수는 3.86×10^{-1}

cm/sec에서 3.74×10^{-4} cm/sec로 감소한 것으로 나타나는데 이는 유리석회(CaO)가 Ca(OH)_2 로 전환되어 하부 다공석판에 퇴적된 것으로 판명되었다.

4) 담수사용시 360일 시간경과에 따른 투수계수는 A시료의 경우 6.25×10^{-1} cm/sec에서 1.31×10^{-2} cm/sec로 감소하고 B시료는 5.30×10^{-1} cm/sec에서 3.69×10^{-2} cm/sec로 감소하는데 해수보다 담수쪽이 적게 나타난다.

7.2 현장시험에 의한 고찰

- 1) 현장투수시험결과(40mm이하 포설지역) 담수사용시 투수계수 k_{15} 는 $1.09 \times 10^0 \sim 9.75 \times 10^2$ cm/sec를 보였으며, 해수사용시 투수계수는 $1.04 \times 10^0 \sim 8.14 \times 10^{-2}$ cm/sec를 보여 담수사용시 그것과 유사한 경향을 보였다.
- 2) 360일 후에 40mm이하 포설된 지역(즉, 0.074mm(#200체 통과량=7%) ~ 40mm)에서 실시한 현장투수시험 결과, 해수와 담수에 상관없이 수평 k 는 1.53×10^{-2} cm/sec ~ 2.61×10^{-3} cm/sec이고 연직 k 는 1.48×10^{-2} cm/sec ~ 4.08×10^{-4} cm/sec의 범위로 즉, 평균 수평 k 값은 1.12×10^{-2} cm/sec이고 연직 k 값은 6.16×10^{-3} cm/sec로 측정되는 반면에 슬래그 아래 모래층에 근입된 경우(즉 Sand Mat층, 일명 S/M이라고 호칭) 평균 수평 k 는 7.05×10^{-3} cm/sec ~ 2.61×10^{-3} cm/sec으로 평가되었다.
- 3) 이상의 결과와 토질역학의 여러 가지 특수성을 감안해 볼 때 실제 슬래그의 투수성이나 배수성에는 문제가 되지 않는다고 평가되지만 실제로 사용된 현장에서 보다 많은 실측 Data를 분석하여 설계시 예측했던 압밀이 계획대로 진행되고 있는가를 시험시공등을 통해확인할 필요가 있고 (일부는 확인되고 있지만)또한 이것이 확인된다면 S/M(Sand Mat) 대체 재료로 사용 가능하다.

7.3 시공시 현장에서 극복할 사항

- 1) 수직 배수재 타입의 어려움이 예상되어 이에 따른 적정입도와 #200체 통과량을 7%로 제한하거나
- 2) 사용 전 CaO를 허용치이하(즉 20%이하)로 제한할 필요가 있다고 보며
- 3) 실적사례가 집적되면 1)과 2)를 시방화하거나 체계화되길 기대한다.

☞ 감사의 글

본 연구는 1998년 산학협동 『광호개발(주)와 한국지반공학회』의 연구비 지원으로 이루어진 것으로 이에 깊은 감사의 뜻을 전하며 또한 현장시험에 적극 지원해주신 한국컨테이너 부두공단 최귀봉 실장과 광호개발 최병주 부장께도 감사드립니다.

8. 참고문헌

1. 대한토목학회(1985), “제강슬래그를 사용한 아스팔트 포장 설계·시공지침”, pp.53~66
2. 방봉찬(1997), “해양수산업에서의 전로슬래그의 활용”, 한국자원싸이크링학회 강연집, pp.83~96.
3. 이문수, 오재화, 이광찬, 허준희(1998), “제강슬래그의 투수성 연구”, 한국농공학회 학술발표회 논문집, pp.414~418
4. 이광찬, 이문수(1998), “재활용을 위한 전로 슬래그의 투수성 고찰(1)”, 한국지반공학회 논문집, Vol. 15. No. 4, pp.69~83
5. 이문수(1999), “제강슬래그의 투수성에 관한 학술연구 최종보고서”, 한국지반공학회, pp.13~73

6. 포항산업과학연구원(1999), “슬래그계 연약지반 개량재 개발”, pp.18~167
7. 原田詔二(1997), “일본에 있어서의 제강슬래그 활용의 현황”, 한국자원싸이크링학회 강연집, pp.63~82
8. 酒井武郎·川北粮(1960), “放射流式透水試験機による土の透水の測定法”, *土と基礎*, Vol.8, No.5, pp.274~284.
9. 松尾新一郎·木幕敬二(1970), “碎石の透水性に関する実験”, *土と基礎*, Vol.18, No.2, pp.5~10.
10. 且味勳·橋本保(1976), “砂の透水試験”, 第11回土質工學研究發表會講演集, pp.137~140.
11. 高田直俊·小林一三(1984), “自然堆積土層の透水性の異方性”, 日本土木學會第 39回年次學術講演회講演論文集, pp.199~200.
12. 小鯛圭一(1985), “粒狀堆積物の透水性：間隙率と透水性の關係”, *土質工學會誌*, Vol.33, No.3, pp.61~64
13. 土質工學會(1990), *土質試驗法の方法と解説*, pp.271~286
14. 大関一郎(1997), “製鋼slagの資源化の現状と課題, 製鋼slagの發生量低減”, 日本製鋼協會, *製鋼 slagの基礎と應力 研究會*
15. Harr, R.C.(1960), “Seepage requirements of filters and previous bases”, *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.86, No.5, pp.15~32
16. Harr, R.C.(1962), *Seepage, drainage & flownet* 2th, Wiley Interscience.
17. Singh, A.(1964), “Soil Engineering in theory and Practice”, *Geotechnical testing and instrumentation*, pp.101~105
18. Lane, K.S.(1964), “Laminar and turbulent flow of water through sand”, *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.90, pp.171~176
19. Anadakrishnan, M. and Varadarajulu, G.H.(1963), “Laminar and turbulent flow or water through sand”, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.98, No.1, pp.311~325
20. Allan, F.R. and John, A.C.(1979), *Groundwater*, Prentice Hall, pp.69~76
21. Mantel D.G.(1994), “investigation into the hydraulic activity of five granulated blast slag and furnace slags with eight different portland cements”, *ACI Journal of Material*, Vol. 91, No.5, pp. 471~477