

## 벤토나이트 혼합율에 따른 제강 슬래그 및 슬러지의 투수 특성 변화

우 원 재

충남대학교 대학원 토목공학과 박사과정

## Characteristics of Saturated Hydraulic Conductivity in Steel Making Slag and Sludge according to Mixing Rate of Bentonite

Woo, Won-Jae

Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University

### ABSTRACT

Permeability is important factor in the geotechnical problems, such as seepage discharge and dissipation of excess pore water pressure.

The Kozeny-Carman equation works well for graded soils but serious discrepancies are found in clays. Major factor for these discrepancies is the tortuous flow path and unequal pore size.

To estimate the permeability of fine grained soils, a permeability equation in which swelling potential is coupled with Kozeny-Carman equation is proposed in this study. To verify proposed equation, a series of variable head permeability test was carried out for steel making slag and sludge mixed with bentonite.

The coefficients of permeability which is measured in the laboratory is compared with the values by the proposed equation. From the comparison, it is shown that the proposed equation can predict the coefficient of permeability of clays with satisfaction.

As steel making slag and sludge is industry waste, it is reused as material of road foundation and cement but the rate of use is low. It mixed sodium-bentonite with high swelling property and permeability decrease effect. Then, Admixture investigates reuse possibility as liner of waste fill.

Key word : permeability equation, steel making slag, steel making sludge, bentonite, reuse

### I. 서 론

제강 슬래그와 슬러지는 산업폐기물로서, 제강 슬래그는 연간 300만톤이 발생하며, 현재 노반재 및 시멘트 원료, 토목재료 등으로 약 49% 정도 재생되어 사용되고 나머지는 투기되고 있다(정하

익, 1998). 제강 슬러지는 제철 원료로 대부분 재 활용하고 있으나 토목재료로는 사용되지 않고 있다. 이 두 재료에 투수저감효과와 팽창성이 큰 나트륨계 벤토나이트(sodium-bentonite)를 일정 비율로 혼합하였을 경우 투수의 일반적인 특성을 고찰하고 이에 대한 투수계수식을 유도하고자

한다. 투수계수의 크기는 토립자의 크기와 형상, 간극비, 포화도, 함수비, 다짐 상태, 점토 광물의 함유율, 토립자의 배열 및 물의 밀도, 점성계수 등 많은 인자에 의해 변한다. 이러한 인자들은 흙의 공학적 성질에 영향을 미친다.

다공질 매체의 투수성에 대한 식으로 Kozeny가 제안하고 Carman이 개선한 Kozeny-Carman식이 널리 사용되고 있다. 이 식은 비교적 입도가 균일한 조립토의 투수 예측에는 잘 적용되지만 점토와 같은 세립토의 투수 예측에는 적합치 않다.

본 연구에서는 첫째로, Kozeny-Carman식에 점토의 팽창 포텐셜(swelling potential) 함수를 적용하여 새로운 투수계수식을 유도해 변수위 투수시험으로 측정한 실측값과 유도식에 의한 예측값의 상관성을 분석함으로써 본 연구에서 유도한 투수계수식의 타당성을 검토하고자 한다. 둘째로, 국내 폐기물 매립장 차수재로서의 재활용 가능성을 알아보고자 한다.

## II. 이론적 배경

### 1. 연구동향

1856년 Darcy는 상수도 여과사의 실험으로부터 흙층의 투수법칙을 발견하였다. 이 법칙은 침투속도가 동수구배에 비례하며, 침투유량은 동수경사와 흙의 투수 단면적에 비례하는 것으로 나타내고 있다(Lambe and Whitman, 1979). Zunker는 “모든 흙 입자 사이에 묶여 있는 물은 오직 간극 공간의 일부를 통해서만 침투가 일어난다(Zunker, 1930).”라고 하였으며, Hazen은 “균등한 모래에 대하여 투수계수는 입경의 제곱에 비례한다(Das, 1985)”고 하였다. Cassagrande는 가는 입경에서 중간 정도의 입경을 가진 깨끗한 모래에 대한 투수계수와 간극비에 대하여(Cassagrande, 1937), Scheidegger는 간극의 크기와 투수특성에 대하여 각각 밝혔다(토질공학회, 1982).

Lambe는 세립토의 투수 시험을 최초로 연구하여 일정 다짐에너지 하의 흙의 투수에 대한 다짐 함수비가 갖는 현저한 영향을 정리하였다

(Lambe, 1958).

Kozeny-Carman의 방정식은 비교적 입도가 균질한 조립토의 투수 예측에는 널리 사용되나, Lambe와 Michaels and Lin에 의한 세립토의 투수 예측에는 적합치 않으며, 이는 Non-Darcy 흐름으로 설명될 수 있는데, 유로의 비틀림, 간극 크기의 불균일 등 때문이다(Michaels, 1954).

Lambe는 다짐 점토의 구조 모형을 처음으로 증명하였으며, 각개 점토 입자는 다짐 특성과 흙의 거동에 영향을 주는 단위라는 것을 증명하였다(Lambe, 1958). Barden and Sides에 의한 개별적 연구는 Lambe 연구의 수정을 제안했으며, 양자의 연구는 다짐 점토의 거동과 특성이 변형된 혼합재모형으로 설명될 수 있다(Barden and Sides, 1970).

Darcy 법칙은 동수구배와 침투유속이 비례하는 범위 내에서 적용된다. 침투유속이 작을, 즉 동수구배가 작을 경우에는 비례관계가 성립하나 어느 한도보다 크게 되면 동수구배의 증가에 비하여 침투유속의 증가 비율이 작으므로 비례관계는 성립하지 않는다.

Deryagin and Krylor는 Darcy의 법칙 적용에 하한이 있음을 처음으로 밝혔으며, 어느 값 이상의 동수경사가 되지 않으면 흐름이 생기지 않는다는 것을 관찰하였다(토질공학회, 1982). 이 경사를 시동동수경사(threshold gradient)라 부른다.

Reltov와 Rosa도 압축된 점토에서 이와같은 현상을 발견하였고, Hansbo도 네 개의 불교란 자연 점토에 관한 시험 결과 동수구배가 아주 작을 때 유출속도와 동수경사는 비선형 관계라는 것을 발견하였다(Hansbo, 1960). Scheidegger는 매우 작은 통로에서의 흐름은 Darcy의 법칙을 따르지 않는다고 고찰한 바 있다(Scheidegger, 1957). 그러나 Mitchell은 모든 점을 고려해 볼 때 Darcy의 법칙은 타당한 것으로 결론 지었다(Mitchell, 1992).

현재까지 조립토와 세립토의 투수 특성에 대한 연구는 다수 있어 왔으나, 산업폐기물인 제강 슬래그 및 슬러지에 팽창성 점토를 혼합하였을 때의 투수 특성에 대한 연구는 없었으며

로 본 연구에서는 제강 슬래그 및 슬러지에 벤토나이트를 혼합하였을 때의 투수특성에 대하여 규명하고자 한다.

**2. 점토의 팽창포텐셜**

점토광물 중에서 몬모릴로나이트(montmorillonite)와 버미큘라이트(vermiculite)는 극히 높은 팽창성을 나타낸다(Mitchell, 1992). 그래서 이들 광물을 많이 포함하는 점토는 높은 팽창성을 나타내며, 점토가 팽창하면 그 강도는 감소한다. 몬모릴로나이트의 가장 큰 특징은 물과 접촉하였을 때 건조 상태의 체적에 비해 몇 배로 팽창한다(Young and Warkentin, 1975).

흙의 체적변화는 점토광물의 종류, 함유량, 흡착 양이온의 종류, 입자의 분포 형태와 크기 및 간극수의 성분 등에 의해 결정되며, 점토의 팽창성은 초기 상태 즉, 함수비, 밀도, 입자배열 등과 여러 가지 환경적 요인에 의해 결정되기 때문에 팽창 포텐셜과 팽창에 관계되는 파라미터를 점토의 종류와 함유량에 따라 어떤 유일한 상호관계로 나타내는 것은 불가능하다(Mitchell, 1992).

흙의 팽창 포텐셜( $S_p$ )은 소성지수(PI)와의 관계식으로 표시되며 자연토에서 정확도는  $\pm 35\%$  정도이다(Seed et al, 1962).

$$S_p = 2.16 \times 10^{-3} (PI)^{2.44} \dots\dots\dots(1)$$

식 (1)은 흙의 팽창에 관계되는 모든 조건들을 고려하고 있지 못하지만, 흙의 팽창 포텐셜을 나타내는 다른 관계식보다 더 발전된 관계식이다.

**3. 벤토나이트 혼합율과 간극비**

점토입자는 크기가 작고 형상이 불규칙한 콜로이드라고 할 수 있으며, 입자의 크기가 작을수록 비표면적은 증가되고, 간극의 크기는 줄지만 간극비는 선형적으로 증가한다(Lambe, 1979).

본 연구에서 사용된 주재료인 제강 슬래그와 슬러지의 간극의 크기는 벤토나이트에 비해 상대적으로 크다. 주재료에 벤토나이트를 혼합하

면 주재료의 간극속으로 크기가 작은 벤토나이트가 침입하여 자리잡게되어 유로의 단면적은 감소하고, 간극비가 큰 벤토나이트의 양이 증가함에 따라 간극비는 선형적으로 증가한다.

**4. 벤토나이트의 혼합율과 소성지수**

흙의 애터버그 한계(atterberg limits)는 흙에 함유되어 있는 점토광물의 종류와 함유량, 형상과 치수, 함유된 유기물의 종류와 그 양, 흡착이온의 종류, 전해질의 조성과 그 농도 등에 의해 아주 광범위한 값을 나타낸다. 또한 애터버그 한계는 토립자의 표면에 부착된 물의 양과 밀접한 관계가 있다. 입자의 크기가 작을수록 비표면적이 크게 증가하기 때문에 흡착수의 양은 흙에 존재하는 점토의 양에 따라 크게 영향을 받는다. 표 1은 주요 점토광물의 애터버그 한계를 나타낸 것이다(Cornell University, 1951).

**Table 1. Atterberg limits of clay minerals**

Mineral	Exchangeable Ion	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plasticity Index (%)	Shrinkage Limit (%)
Montmorillonite	Na	710	54	656	9.9
	K	660	98	562	9.3
	Ca	510	81	429	10.5
	Mg	410	60	350	14.7
	Fe	290	75	215	10.3
	Fe <sup>a</sup>	140	73	67	-
Illite	Na	120	53	67	15.4
	K	120	60	60	17.5
	Ca	100	45	55	16.8
	Mg	95	46	49	14.7
	Fe	110	49	61	15.3
	Fe <sup>a</sup>	79	46	33	-
Kaolinite	Na	53	32	21	26.8
	K	49	29	20	-
	Ca	38	27	11	24.5
	Mg	54	31	23	28.7
	Fe	59	37	22	29.2
	Fe <sup>a</sup>	56	35	21	-

Skempton은 여러 종류의 자연토 및 석영모래(quartz sand)와 점토광물을 여러 비율로 혼합하여 점토 혼합율과 소성지수와의 관계가 선형관계라는 것을 밝혔다(Skempton, 1953). 그림 1은

석영모래와 점토광물의 혼합비율에 따른 소성지수를 나타낸 것이다.

본 연구에 사용된 나트륨계 벤토나이트는 그림 1에서 Sodium montmorillonite에 해당한다. 따라서 벤토나이트의 혼합율과 소성지수와 관계는 선형관계가 성립함을 알 수 있다.

액성한계에 비하여 소성한계가 점토광물, 흡착이온, 점토분 함유율의 변화에 대해서 좀더 둔감하기 때문에 소성지수는 점토분 함유율에 거의 정비례하여 증가한다(토질공학회, 1982).

Fig. 1. Relation between plasticity index and clay fraction(Figures in parentheses are the "activities" of the clays)

III. 혼합토의 투수계수 이론식

다공질 매체의 투수성에 대한 식으로 Kozeny가 제안하고 Carman이 개선한 식으로 Kozeny-Carman식은 다음과 같다(Das, 1985).

$$k = \frac{\gamma_w}{k_o T^2 \mu} \frac{1}{S_o^2} \left( \frac{e^3}{1+e} \right) (\text{cm/sec}) \dots \dots \dots (2)$$

- 여기서,  $k$  : 투수 계수(permeability coefficient)
- $\gamma_w$  : 물의 단위중량(unit weight of water)
- $k_o$  : 간극형상계수(pore shape factor)
- $T$  : 비틀림계수(tortuosity factor ; 굴절 경로를 통한 유로길이 / 직선으로 본 유로 길이)

- $\mu$  : 절대점성계수(absolute coefficient of viscosity)
- $S_o$  : 비표면적(specific surface area)
- $e$  : 간극비(void ratio)

식 (2)에서 비표면적  $S_o$ 는 구속되어 있는 흙에서 토립자가 팽창하면 간극이 줄어들고 표면적이 증가한다고 볼 수 있다. 이것은 점토가 수분을 흡수하게 되면 점토입자 주위에 흡착수층(adsorbed water layer)이 형성되며, 점토입자 가까이 있는 물은 강하게 결합되어 있어서 매우 높은 점성을 나타내게 된다. 흡착수는 점토 표면에 강하게 붙어 있기 때문에 고체에 가까운 성질을 가지며, 토립자의 일부로 볼 수 있다.

점토가 팽창한다는 것은 물이 흐를 수 있는 간극이 줄어들고 점토의 표면적이 증가하여 물이 흐를 수 있는 유로(flow path)의 폭이 좁아지는 것이라고 생각할 수 있다.

따라서, 팽창포텐셜( $S_p$ )이 표면적  $S_o$ 의 제곱에 비례하여 증가한다고 가정하면 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_p = f S_o^2 \text{ 또는, } S_o^2 = C \times 2.16 \times 10^{-3} (PI)^{2.44} \dots \dots \dots (3)$$

여기서,  $C$ 는 비례상수이다.

식 (2)에 식 (3)을 대입하면 투수계수는 다음과 같다.

$$k = \frac{1}{k_o T^2 \mu} \left( \frac{1}{C \times 2.16 \times 10^{-3} (PI)^{2.44}} \right) \left( \frac{e^3}{1+e} \right) = \frac{1}{k_o T^2 \mu} \times \frac{1}{C \times 2.16 \times 10^{-3}} \times \frac{1}{(PI)^{2.44}} \times \left( \frac{e^3}{1+e} \right) (\text{cm/sec}) \dots \dots \dots (4)$$

여기서,

$$D = \frac{1}{k_o T^2 \mu} \cdot \frac{1}{C \times 2.16 \times 10^{-3}} \text{ 로 놓으면}$$

$$k = D \cdot \frac{1}{(PI)^{2.41}} \cdot \left( \frac{e^3}{1+e} \right) \dots\dots\dots (5)$$

식 (5)는 그 동안 국내외에서 널리 사용되어 온 Kozeny-Carman의 식에 팽창 포텐셜을 적용한 것으로서 소성지수와 간극비를 알면 투수계수를 예측할 수 있는 장점이 있다. 식 (5)에서 벤토나이트 혼합율에 따른 소성지수와 간극비의 상관관계를 선형으로 보면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$PI = a \cdot R_m + b \dots\dots\dots (6)$$

$$e = c \cdot R_m + d \dots\dots\dots (7)$$

여기서, *PI* : 소성지수, *e* : 간극비

*R<sub>m</sub>* : 벤토나이트 혼합율

*a, b* : 소성지수 계수

*c, d* : 간극비 계수

식 (5)에 식 (6)과 (7)을 대입하면 다음과 같다.

$$k = D \cdot \frac{1}{(a \cdot R_m + b)^{2.41}} \cdot \left[ \frac{[c \cdot R_m + d]^3}{c \cdot R_m + d + 1} \right] \text{ (cm/sec)} \dots\dots\dots (8)$$

식 (8)은 임의의 벤토나이트 혼합율에 대한 제강 슬래그와 슬러지의 투수계수를 예측할 때 쓰일 수 있다.

## IV. 시 험

### 1. 시료 준비

시험에 앞서 제강 슬래그(slag)와 슬러지(sludge)를 공기 건조시킨 후 나무망치로 입자가 파괴되지 않도록 덩어리를 분쇄한 다음 No. 10체를 통과한 시료만을 가지고 시험하였다.

혼합재료는 한국아이엠(주)이 생산한 나트륨계 벤토나이트(sodium-bentonite)를 사용하였다. 시료는 건조로에서 48시간 이상 건조하였으며, 중량비로 혼합하였다. 시험에 사용된 시료의 배합비는 표 2와 같다.

### 2. 슬래그 및 슬러지의 입도 분석

제강 슬래그와 슬러지의 입도 분석 결과는 그림 2와 같으며, 정확도를 기하기 위하여 NO. 200체에서는 wet sieve 하였다.

### 3. 기초 시험

투수시험 결과를 분석하기 위해 비중 시험(KS. F 2308), 액성한계 시험(KS. F 2303), 소성한계 시험(KS. F 2304)을 실시하였다. 시험 결과치의 정확도를 기하기 위하여 4~5회 반복하여 최고값과 최저값은 무시하고 중간값의 평균치를 사용하여 시료의 물리적 성질을 파악하였다. 최적함수비와 건조단위중량을 구하기 위해 KS. F 2312 규정에 의한 A다짐시험을 실시하였

**Table 2.** Results of laboratory testing

Component (%)	Specific Gravity (G <sub>s</sub> )	Liquid Limit (LL)	Plastic Limit (PL)	Optimum Moisture Content (OMC)	Dry Unit Weight(γ <sub>d</sub> )
Slag 95 + B 5	3.71	-	-	16.4	2.167
Slag 90 + B 10	3.62	51.6	19.8	15.8	1.992
Slag 80 + B 20	3.60	109.2	25.1	18.2	1.941
Slag 70 + B 30	3.48	132.7	32.8	18.8	1.865
Slag 60 + B 40	3.34	172.7	38.3	22.0	1.752
Sludge 95 + B 5	4.28	-	-	22.7	2.057
Sludge 90 + B 10	4.38	42.6	22.7	24.3	2.035
Sludge 80 + B 20	4.06	90.0	30.2	24.6	1.924
Sludge 70 + B 30	3.77	105.0	33.9	28.1	1.761
Sludge 60 + B 40	3.67	129.6	36.5	29.2	1.677

B = Bentonite

## V. 시험결과 및 분석

### 1. 건조밀도

슬래그와 슬러지에서 벤토나이트 혼합율에 따른 최대건조밀도 변화를 살펴보면 그림 3에서 보는 바와 같이 벤토나이트의 혼합량이 증가함에 따라 최대건조밀도가 계속해서 감소한다. 이러한 변화를 보이는 이유는 첫째, 본 연구에서 사용한 나트륨계 벤토나이트의 비중이 2.6인 반면, 순수한 슬래그는 약 3.7정도이고, 슬러지는 약 4.4정도로 벤토나이트의 1.4배와 1.7배에 해당하는 비중 값을 갖고 있다. 따라서 벤토나이트의 함유율이 증가할수록 슬래그의 양은 줄어들고, 벤토나이트의 양이 늘어나기 때문에 건조밀도가 감소하는 것으로 생각된다. 즉, 비중이 작은 벤토나이트 첨가에 따른 혼합재의 상대적인 비중감소라고 판단된다. 둘째, 벤토나이트가 물과 접촉함에 따라 벤토나이트 입자의 표면에 흡착수층 및 이중층이 형성되어 체적 팽창으로 인해 단위체적당 밀도가 감소한 것으로 판단된다.

Grain size (mm)

Fig. 2. Cumulative curves displaying particle size distribution in slag and sludge

으며, 시료의 배합비에 따른 결과는 표 2와 같다.

### 4. 공시체 제작 및 투수 시험

다짐 에너지와 투수는 밀접한 관계가 있다. 공시체 성형시 가장 중요한 사항은 다짐 에너지를 일정하게 하여 공시체의 강도를 균일하게 하는 것이다.

다짐시험에서 구한 최적함수비에 해당하는 물을 분무기로 혼합시료에 골고루 분무하면서 잘 혼합한 다음 투수 모듈드를 사용하여 KS. F 2312 A 다짐인 25회 3층 다짐을 실시하였다. 시험의 정확도를 높이기 위해 투수 공시체를 제작할 때마다 함수비와 습윤단위중량을 측정하여 다짐시험 때의 값과 비교하였다. 시험에 사용된 투수 공시체는 높이 12.7cm, 직경 19cm 이고, 용적 997.5cm<sup>3</sup>의 투수 모듈드를 사용하여 성형하였으며, 투수시험은 세립토에 적합한 변수위 투수시험을 실시하였다.

공시체를 성형할 때 투수 모듈드를 다짐 모듈드로 사용하여, 모듈드의 벽을 따라 투수되는 것을 최소화 시켰다. 또한 시료가 투수시험기에 놓인 후 투수시험 동안의 시료의 부피 팽창을 제한하기 위하여 구속시켰다.

Fig. 3. Relation between maximum dry density and mixing rates of bentonite in slag and sludge

### 2. 최적 함수비

슬래그와 슬러지에서 벤토나이트 혼합율에 따른 최적함수비의 변화를 살펴보면 그림 4에서 보는 바와 같이 벤토나이트의 혼합량이 증가함에 따라 최적함수비가 계속해서 선형적으

**Fig. 4.** Relation between optimum moisture content and mixing rates of bentonite in slag and sludge

로 증가한다. 이것은 벤토나이트 혼합량이 증가함에 따라 흡수량이 증가되기 때문인 것으로 판단된다.

벤토나이트 혼합량이 동일한 경우 슬래그 보다 슬러지에서 최적함수비가 더 큰 값을 가지는 것은 슬래그에 비해 상대적으로 슬러지의 흡수량이 더 크기 때문인 것으로 생각된다.

### 3. 간극비

그림 5에서 벤토나이트의 혼합율이 증가함에 따라 간극비가 계속해서 선형적으로 증가하는데 이것은 주재료인 슬래그와 슬러지보다 간극비가 큰 벤토나이트의 혼합율이 증가함에 따

**Fig. 5.** Relation between void ratio and mixing rates of bentonite in slag and sludge

라 간극비는 증가하게 된다.

벤토나이트의 혼합율이 동일할 때 슬러지가 슬래그에 비해 간극비의 값이 큰 이유는 슬래그에 비해 슬러지의 간극비가 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단된다.

그림 5에서 슬래그와 슬러지의 간극비와 벤토나이트의 혼합율과의 상관관계를 나타냈는데 비교적 실험오차가 큰 벤토나이트 혼합율 5%일 때의 슬래그 간극비와 벤토나이트 혼합율 10%일 때의 슬러지 간극비는 제외하고 나타냈다.

### 4. 소성지수

슬래그와 슬러지 모두 벤토나이트 혼합율 5%에서 비소성(non-plasticity)을 나타냈다. 그림 6에서 벤토나이트의 혼합율이 증가함에 따라 소성지수는 계속해서 선형적으로 증가한다. 이것은 소성지수와 점토 함유율과의 선형관계를 밝힌 Skempton의 연구결과와 일치하였다(Lambe, 1958).

**Fig. 6.** Relation between plasticity index and mixing rates of bentonite in slag and sludge

### 5. 혼합토의 투수계수

식 (6)과 식 (7)의 파라미터를 구하여 표 3에 나타냈다.

본 연구에서는 유도한 투수계수식의 타당성을 검토하기 위하여 유도된 식에 의한 예측값과 변수위투수시험에 의한 실측값을 상호 비교하였다.

**Table 3.** Parameter of permeability equation

Parameters Sample	a	b	c	d
Slag	3.50	0.8	$2.786 \times 10^{-3}$	0.791
Sludge	2.37	0.7	$3.013 \times 10^{-3}$	1.058

식 (5)에 계측값을 대입하여 상수  $D$ 값을 결정하고, 식 (8)로 역해석한 예측값과 변수위 투수 시험에 의한 실측값을 그림 7과 그림 8에 나타냈다. 여기서 실측값은 시간경과에 따라 측정된 투수계수 값 중에서 최종적으로 수렴한 투수계수이다. 그림 7과 8에서 슬래그 및 슬러지 혼합재 모두 실측한 투수계수와 식 (8)로 역해석한 투수계수가 비슷한 경향을 가지는 것을 알 수 있다.

**Fig. 7.** Relation between permeability and mixing rates of bentonite in slag

제강 슬래그 및 슬러지에서 벤토나이트 혼합율이 증가함에 따라 투수계수가 점차적으로 감소한다. 이는 물과 접촉한 벤토나이트의 주위에 흡착수층과 확산 이중층이 형성되고, 벤토나이트의 높은 팽창성 때문에 혼합재가 팽창하여 물이 흐를 수 있는 유로의 폭이 축소되었으며, 또한 주재료인 슬래그 및 슬러지의 간극에 상대적으로 입자가 작은 벤토나이트가 채워져 벤토나이트 혼합율이 증가함에 따라 물이 흐를 수 있는 유로(flow path)가 길어졌기 때문인 것

**Fig. 8.** Relation between permeability and mixing rates of bentonite in sludge

으로 판단된다.

제강 슬래그와 슬러지의 벤토나이트 혼합율 5%에서 역해석한 투수계수는 벤토나이트 혼합율 5%에서 비소성이므로 그림 6의 회귀 방정식으로 산출한 소성지수 값을 사용하여 계산된 투수계수이다.

그림 9은 벤토나이트 혼합율에 따른 실측한 투수계수의 변화를 도시한 것이다. 벤토나이트 혼합율이 동일할 때 슬러지가 슬래그 혼합재료보다 투수계수가 더 작게 나타나는데, 이것은 슬래그에 비해 슬러지가 상대적으로 비표면적이 더 크기 때문에 슬러지의 간극의 크기는 더 작아지고 간극비는 증가하기 때문이다. 이러한 슬러지에 입자의 크기가 더 작은 벤토나이트가 혼합되면, 주재료인 슬러지의 간극속을 채우게 되고, 간극속을 채우고 있는 벤토나이트가 물과 접촉하여 흡착수층을 형성하여 흡착수가 벤토나이트 입자 표면을 둘러싸게 된다. 이 흡착수는 점성이 아주 커서 벤토나이트입자의 일부로 생각해도 무방하다. 결국 이 흡착수층으로 인해 구속되어 있는 상태에서 슬러지 혼합재가 팽창하여 슬래그 혼합재 일 때보다 물이 흐를 수 있는 유로의 폭이 더 좁아지고, 더 비틀려져 슬러지 혼합재의 투수계수가 슬래그 혼합재의 투수계수 보다 더 감소한 것으로 판단된다.



**Fig. 9.** Relation between measured permeability and mixing rates of bentonite in slag and sludge

### 6. 차수재료의 재활용 가능성

현재 혼합 차수재료로서 흙벤토나이트 혼합재가 가장 널리 이용되고 있다(정하익, 1998). 국내 일반폐기물 및 특정 폐기물 매립장 적용 차수시설 표준 시방기준에 의하면 투수계수가  $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{cm/sec}$  정도이다(한국지반공학회, 1994). 본 연구에서는 벤토나이트 10~30% 혼합율에서 시방기준에 적합한 투수계수가 실측되었다. 따라서, 슬래그 및 슬러지 혼합재를 폐기물 매립장의 차수재료로서 재활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## VI. 결 론

다공질 매체의 투수성에 대한 Kozeny-Carman식에 팽창 포텐셜(swelling potential)을 적용하여 벤토나이트 혼합재에 대한 투수계수식을 유도하고, 이를 실제 투수시험에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 벤토나이트의 혼합량이 증가함에 따라 최대 건조밀도가 선형적으로 감소하는데, 이는 비중의 상대적인 감소와 벤토나이트의 체적 팽창성에 기인하고 있는 것으로 생각된다.
2. 벤토나이트 혼합량이 커짐에 따라 최적함수비가 증가하는 것은 벤토나이트의 혼합량이 증가함에 따라 흡수량이 증가되기 때문인 것

으로 판단된다.

3. 벤토나이트 혼합율이 증가함에 따라 간극비가 커짐에도 불구하고 투수계수가 작아지는 것은 벤토나이트 입자가 물과 접촉할 때 입자 주위에 흡착수(adsorbed water)층이 형성되어 물이 흐를 수 있는 유로의 폭이 줄어들고, 유로의 길이가 길어져 투수계수가 점차적으로 감소한 것으로 판단된다.
4. 실측한 투수계수와 역해석한 투수계수를 비교한 결과 두 값이 거의 일치하므로써 본 연구에서 유도한 투수계수식의 정확성을 입증해 주고 있다.
5. 산업폐기물인 제강 슬래그 및 슬러지를 혼합 차수재료 재활용 하므로써 유효 이용률을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 정하익. 1998. 지반환경공학. 유림출판사. p.408.
- 土質工學會. 1982. 土質工學 Handbook. 새문출판사. pp.38-60, pp.87-96.
- Barden, L. and Sides, G.R. 1970. "Engineering Behavior and Structure of Compacted Clay". Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. A.S.C.E. Vol.96, No. SM4, Proc. Paper 7397. pp.1171-1200.
- Casagrande. 1937. A. Seepage through Dams, Contribution to soil Mechanics 1925-1940, Boston Society of Civil Engineers. p.295.
- Cornell University. 1951 "Final Report on Soil Solidification Research", Ithaca, N. Y.
- Das, B.M. 1985. Principles of Geotechnical Engineering, PWS. pp.130-150.
- Hansbo, S. 1960. Consolidation of Clay with Special Reference to the Influence of Vertical Sand Drains, Preceedings, 18, Swedish Geotechnical Institute, Stockholm.
- Lambe, T.W. 1958. "The Structure of Compacted Clay", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, A.S.C.E., Vol. 84, No. SM2, Proc. Paper No. 1654. pp.

- 1654-1-1654-34.
- Lambe, T.W., and Whitman, R.V. 1979. Soil Mechanics, Wiley, New York. pp.30-38, pp.44-60, pp.281-303.
- Mitchell, J.K. 1992. Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley & Sons. pp.100-130, 172-189, 228-240.
- Scheidegger, A.E. 1957. The Physics of Flow Through Porous Media, Macmillan, New York 1957.
- Seed, H.B., Woodward, R.J., and Lundgren, R. 1962. Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, A.S.C.E., Vol. 88, No. SM3. pp.53-87.
- Skempton, A.W. 1953. "The Colloidal Activity of Clays", Proc. 3rd Inter. Conf. Soil Mech. Found. Eng. (Switzerland), Vol. I, p.57.
- Young, R.N. and Warkentin, B.P. 1975. Soil Properties and Behaviour, Elsevier Scientific Inc. pp.30-31.
- Zunker, F. 1930. "Das Verhalten des Bodens zum Wasser", Vol. 6 of E Blanck, Handbuch der Bodenlehre. Berlin: Springer.

接受 2000年 3月 17日