

## 제주도 현무암 석분슬러지를 포함한 시멘트 혼합체의 투수특성

### Permeability Characteristics of Cement Mixtures with Powdered Sludge of Basalt in Jeju Island

이양규<sup>1</sup>, 윤중만<sup>2\*</sup>, 송영석<sup>3</sup>, 김기영<sup>4</sup>, 홍기권<sup>5</sup>

Yang-Gyu Lee<sup>1</sup>, Jung-Mann Yun<sup>2</sup>, Young-Suk Song<sup>3</sup>, Ki-Young Kim<sup>4</sup>, Kikwon Hong<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Daelim University College, Imgoklo 29, Dongan-gu, Anyang Gyungg Province, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member, Professor, Department of Construction Information System, ShinAnsan University, 135 Shinansandeahak-ro Danwon-gu, Ansan, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, Principal Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahang-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

<sup>4</sup>Member, General Manager, Jeju Free International City Development Center, 213-4 Cheomdan-ro, Jeju City, Jeju Special Self-Governing Province, Republic of Korea

<sup>5</sup>Member, Research Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Urban Design and Study, Chung-Ang Univ., 84, Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, 156-756, Republic of Korea

#### ABSTRACT

In this study, the coefficient of permeability for cement mixtures including the powdered sludge of basalt, sand or fly ash with different mixed ratios was measured in order to reuse the powdered sludge of basalt in Jeju Island as the cut off materials. As the permeability test results, the coefficient of permeability for the cement mixtures with fly ash was increased with increasing the fly ash contents. The amount of fly ash in the cement mixtures should be mixed with less than 8 %. Meanwhile, the coefficient of permeability for the cement mixtures with sand was increased with increasing the sand contents. The amount of sand in the cement mixtures should be mixed with less than 40 %. According to the comparison result of cement mixtures including fly ash or sand, it is more advantageous to put the sand into the cement mixtures, rather than mixing the fly ash.

#### 요 지

본 연구에서는 제주도 내에서 발생하는 현무암 석분슬러지를 차수용 재료로 재활용하기 위하여 현무암 석분슬러지, 시멘트 및 모래 혹은 플라이애쉬(fly ash)를 교반하여 각 혼합비별 투수계수를 측정하였다. 측정결과 플라이애쉬가 포함된 시멘트 혼합체의 경우 플라이애쉬의 함량이 증가함에 따라 시멘트 혼합체의 투수계수는 증가하며, 시멘트 혼합체를 차수재로 활용하기 위해서는 플라이애쉬 함량이 약 8%이하로 적용되어야 한다. 한편 모래가 포함된 시멘트 혼합체의 경우 모래의 함량이 증가함에 따라 시멘트 혼합체의 투수계수는 증가하며, 시멘트 혼합체를 차수재로 활용하기 위해서는 모래의 함량이 약 40%이하로 적용되어야 한다. 플라이애쉬 혹은 모래가 혼합된 석분슬러지 시멘트 혼합체를 서로 비교한 결과 차수재로 재활용하기 위해서는 플라이애쉬를 혼합하는 것 보다는 모래를 혼합하는 것이 더 유리함을 알 수 있다.

**Keywords** : Powdered sludge of basalt, Fly ash, Sand, Coefficient of permeability, Cut off material

#### 1. 서 론

최근들어 천연석재의 가공물을 각종 토목용 자재로 사용하는 사례가 증가하고 있다. 채석장에서 채취한 원석은 절삭, 가공, 연마의 과정을 거치면서 약 60% 정도가 폐석

Received 6 Nov. 2015, Revised 22 Dec. 2015, Accepted 23 Dec. 2015

\*Corresponding author

Tel: +82-31-490-6155; Fax: +82-31-490-6075

E-mail address: myun@sau.ac.kr (J.M. Yun)

이나 석분슬러지가 된다. 석분슬러지는 침전과 응집, 탈수 과정을 거친 후 최종적으로 산업폐기물로 분류되어 폐기된다(Waste Control Act, 2003). 이러한 석분슬러지가 방류되거나 살포되면 지표나 지중의 공극이 메워져 지표수의 지중침투, 지하수의 흐름, 공기의 소통이 원활하게 이루어지지 않아 생태계에 악영향을 끼치게 된다. 따라서 석분슬러지는 주로 개발된 채석장 주변의 원지반토와 혼합하여 채석장내 복구토로 활용되고 있다(Song et al., 2012).

제주도내 현무암 석분슬러지의 연간 발생량은 약 17,000톤에 이르며, 이를 산업폐기물로 처리하기 위하여 추가적인 비용이 발생하고 있다. 현무암의 가공과정에서 배출되는 석분슬러지를 산업폐기물로 처리하는 과정에서 기업에는 경제적 손실이 발생하게 되고, 제주도에는 산업폐기물의 증가로 인한 환경오염 문제가 발생하게 된다(Ko, 2014).

최근 국내외에서는 석재산업에서 폐기물로 처리되고 있는 석분슬러지로 인하여 야기되는 문제점을 개선하고, 환경오염문제를 해결하기 위하여 석분슬러지를 각종 건설재료로서 재활용 하고자하는 방안이 모색되고 있다. Ueno et al.(1996)은 석분슬러지와 소석회를 혼합하여 도로의 보조기층 혹은 기층의 재료로 재활용하기 위한 공학적 특성을 평가하였다. Celik and Marar(1996) 및 Almeida et al. (2007)은 잔골재를 석분슬러지로 치환한 콘크리트의 압축강도와 휨강도를 측정하여 석분슬러지의 적용성을 검토한 바 있다. Kim & Song(2007)은 석분토와 원지반토를 혼합하여 도로 보조기층재로 활용하기 위한 연구를 수행하였으며, Suh et al.(1995)은 석분토와 시멘트를 혼합하여 도로용 포장재로 활용하기 위한 연구를 수행한 바 있다. 그리고 Ma et al.(2004)은 석분토를 그라우팅 재료와 혼합하여 터널의 공동부 충전재로서 활용하기 위한 연구를 수행한 바 있다.

기존 연구의 경우 석분슬러지는 주로 시멘트와 혼합하

여 도로의 보조기층 및 기층 재료, 그라우팅 재료 등으로 재활용하고자 하였다. 또한 석분슬러지가 혼입된 콘크리트의 압축강도와 인장강도를 대상으로 다양한 실험과 연구결과가 제시되었다. 그러나 투수성이 매우 낮은 석분슬러지를 활용하여 불투수성 재료 혹은 차수용 재료로 재활용하기 위한 연구는 매우 부족한 상태이다. 그러나 최근 들어 제주도 현무암 석분슬러지를 차수재로서 재활용하기 위하여 석분슬러지 혼합토의 물리적 특성과 투수특성에 대한 실험적 연구가 수행된 바 있다(Kim et al., 2015).

따라서 본 연구에서는 제주도 내에서 발생하는 현무암 석분슬러지를 차수용 재료로 재활용하기 위하여 현무암 석분슬러지, 시멘트 및 모래 혹은 플라이애쉬(fly ash)를 교반하여 각 혼합비별 투수계수를 측정하고, 석분슬러지 함량에 따른 현무암 석분슬러지 혼합토의 투수계수 변화 특성을 조사하고자 한다.

## 2. 시험재료

본 연구에서는 제주도의 현무암 석분슬러지, 시멘트 및 플라이애쉬에 대한 공학적 특성을 조사하기 위하여 각종 실내시험을 수행하였으며, 실험방법은 한국산업규격(KS) 기준을 준용하였다.

### 2.1 현무암 석분슬러지

Table 1은 제주도 현무암 석분슬러지의 공학적 특성을 나타낸 것이다. 현무암 석분슬러지의 비중은 2.92로서 일반적인 토사에 비해 크게 나타났으며, 액성한계는 22.67%, 소성한계는 17.97%이며, 소성지수는 4.70으로 소성이 작다.

현무암 석분슬러지의 입도분포곡선은 Fig. 1에 도시하였으며, 석분슬러지 입자의 직경은 대부분 0.1mm 이하인 것으로 나타났다. 현무암 석분슬러지는 흙과 다르므로 토

Table 1. Engineering properties of powdered sludge (Kim et al., 2015)

Materials		Powdered sludge
Specific gravity (Gs)		2.92
Consistency	Liquid limit (LL, %)	22.67
	Plastic limit (PL, %)	17.97
	Plastic index (PI)	4.70
Compaction	Optimum moisture content (%)	21.57
	Max. dry unit weight (g/cm <sup>3</sup> )	1.65
Coefficient of permeability (cm/sec)		3.91E-06

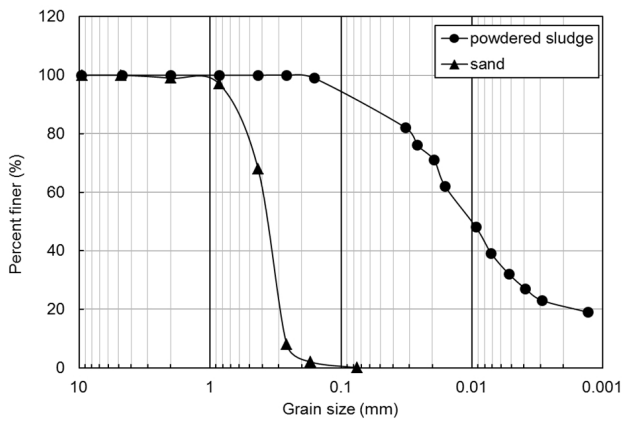


Fig. 1. Grain size distribution curve of powdered sludge

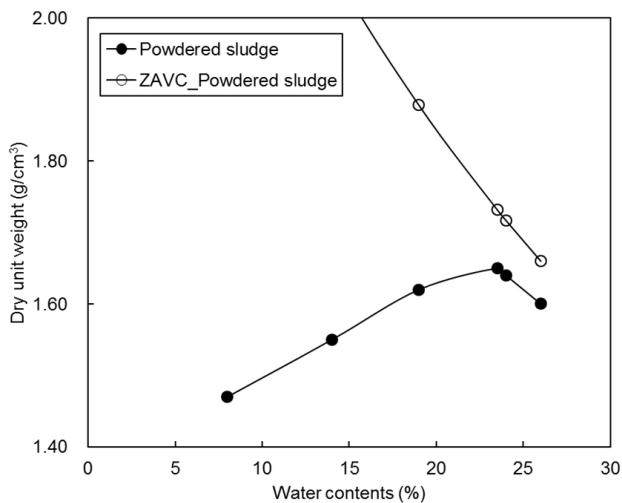


Fig. 2. Compaction test result of powdered sludge

질의 분류기준을 적용하기는 어려우나 통일분류법(USCS)에 의하여 분류하면 무기질의 실트 및 매우 가는 모래인 ML과 소성이 보통이하인 무기질 점토인 CL과 유사한 것으로 나타났다. 한편 현무암 석분슬러지의 다짐곡선은 Fig. 2에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 최적함수비는 21.6%, 최대건조단위중량은  $1.65\text{g/cm}^3$ 으로 나타났다.

현무암 석분슬러지의 화학적 특성을 살펴보면 pH는 약 8.67로 나타나 약알칼리성을 띠고 주성분은  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 가 78.39%로 주종을 이루고 있는 것으로 나타났다.  $\text{SiO}_2$  및  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 는 경화과정 중에 형성되는  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여 터버모라이트(*tobermorite* :  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )를 형성하며,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 경우  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 를 형성하며 석고와 반응하여 에트링가이트(*ettringite*)를 형성하는 포졸란 반응을 일으킨다.

## 2.2 모래

모래는 일반적으로 건설현장의 잔골재로서 주로 사용된다. 실험에 사용된 모래는  $100^\circ\text{C}$ 이상에서 24시간 이상 완전히 건조된 시료를 사용하였으며, 모래의 입도분포 곡선은 Fig. 1에 함께 도시하였다. Table 2는 모래의 물리적 특성을 나타낸 것으로 비중은 2.62이며, 최대 및 최소건조단위중량은 각각  $1.68\text{g/cm}^3$  및  $1.37\text{g/cm}^3$ 이다. 한편 토질분류기준인 통일분류법(USCS)에 의하여 분류하면 SP로 분류되었다.

## 2.3 시멘트와 플라이애쉬

현무암 석분슬러지 혼합재료의 배합시 경화를 목적으로 사용된 시멘트는 국내에서 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 포틀랜드 1종 보통시멘트를 사용하였다. 플라이애쉬는 입자가 대부분 구형으로 되어 있어 시멘트와 골재의 혼합시 접촉면에서 베어링과 같은 작용을 하여 시멘트와 골재 사이의 마찰저항을 줄여주므로 워커빌리티(*workability*)를 개선시키는 역할을 한다. Table 3 및 Table 4는 본 연구에서 사용된 시멘트와 플라이애쉬의 화학적 조성과 물리적

Table 2. Physical properties of sand

Materials		sand
Specific gravity (Gs)		2.62
Density	Max. dry unit weight ( $\text{g/cm}^3$ )	1.68
	Min. dry unit weight ( $\text{g/cm}^3$ )	1.37
Grain size	Coefficient of uniformity, $C_u$	21.57
	Coefficient of curvature, $C_c$	1.65

Table 3. Chemical composition of cement and fly-ash

Constituent	cement	fly-ash
Silicon dioxide, $\text{SiO}_2$ (%)	18.6	53.3
Aluminium oxide, $\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	4.1	23.0
Ferric oxide, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	2.8	5.3
Calcium oxide, $\text{CaO}$ (%)	65.2	6.8
Magnesium oxide, $\text{MgO}$ (%)	3.8	1.1
Sulfur trioxide, $\text{SO}_3$ (%)	3.4	0.8
Loss on ignition (%)	2.0	4.6

Table 4. Physical properties of cement and fly-ash

Contents	cement	fly-ash
Specific gravity ( $\text{g/cm}^3$ )	3.04	2.24
Fineness (Blain) ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	4,210	4,232

특성을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 화학적 구성성분을 살펴보면 보통 포틀랜드시멘트의 경우 산화칼슘, 이산화규소, 알루미늄, 산화마그네슘 등의 순서로 많이 포함되어 있으나 플라이애쉬의 경우 이산화규소, 알루미늄 산화칼슘, 산화철 등의 순서로 많이 포함되어 있는 것으로 나타났다. 그리고 포틀랜드시멘트와 플라이애쉬의 비중은 각각 3.04, 2.24이며, 분말도는 각각  $4,210\text{cm}^2/\text{g}$ ,  $4,232\text{cm}^2/\text{g}$ 인 것으로 나타났다.

### 3. 투수시험 장치 및 시험방법

본 연구에서는 현무암 석분슬러지와 시멘트의 혼합재료에 대한 투수계수를 측정하기 위하여 투수시험장치를 새롭게 고안 및 제작하였으며, 석분슬러지와 시멘트의 혼합재료에 모래 혹은 플라이애쉬(fly ash)를 교반하여 각 혼합비별 투수계수를 측정하고자 한다. 석분슬러지와 시멘트 혼합재료에 포함된 모래 혹은 플라이애쉬의 혼합비는 Table 5에 나타내었다. 석분슬러지와 시멘트 혼합재료에 포함된 모래와 플라이애쉬의 혼합비는 중량대비 0%, 20%, 40%, 60%, 80%로 하여 시험편을 제작하였다.

현무암 석분슬러지 혼합재료의 경우 석분슬러지의 최적 다짐조건을 고려하여 투수시험을 위한 시료를 제작하였다. 시료는 직경 10cm, 높이 20cm의 몰드를 사용하여 중공원통형(hollow cylinder)으로 제작하였다. 몰드에 시료를 넣은 상태에서 24시간 이상 습윤 양생한 후 항온 양생수조에서  $23\pm 2^\circ\text{C}$ 의 온도로 수중양생을 실시하였다.

Fig. 3은 투수시험 용기내부에 설치되는 시험체의 모습을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 석분슬러지 혼합재료로 성형 및 양생이 완료된 시험체는 투수시험 용기 내부에 위치하게 된다. 시험체는 받침대에 올려놓고 시

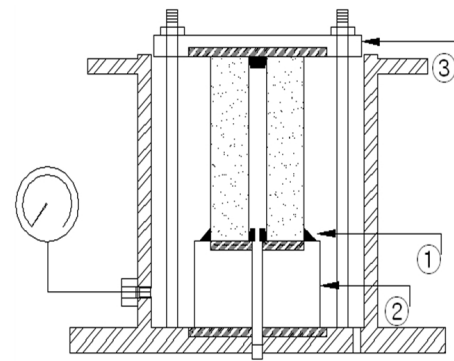


Fig. 3. Set up the specimen in the container of the permeability testing system

험체와 받침대 접촉부위의 간극을 실리콘으로 봉하였다. 그리고 상부 캡을 이용하여 시험체를 고정하였다. 이와 같이 시험체를 투수시험 용기 내에 고정시키고 물을 채운 후 1시간 동안 실제 시험시 가해지는 수압보다 큰 수압을 유지시킨다. 이는 시험편의 패킹여부를 확인하고 포화상태를 만드는 역할을 한다. 이러한 작업을 마치면 실험준비가 완료된다.

실험준비가 끝나면 1시간 정도 포화를 시킨 후 액화질소를 이용한 압력조절 레귤레이터를 이용하여 수압을 조절한다. 소정의 수압에 도달하면 다시 한번 투수시험 용기의 수압을 확인하고 메스실린더와 저울을 이용하여 일정한 시간동안의 유량을 측정한다. Fig. 4는 본 시험을 위하여 고안된 외압식 콘크리트 혼합체의 투수시험장치이다. 그림에서 보는 바와 같이 본 실험장치는 가압장치, 투수시험 용기 및 측정장치로 구분할 수 있다. 가압장치는 액화질소를 이용한 가압펌프, 축압 수조로 이루어져 있으며, 액화질소는 레귤레이터와 밸브를 통하여 일정한 압력으로 축압수조 상단에 주입되고 이 압력을 이용하여 축압 수조에 있는 물을 일정한 수압으로 밀어주게 된다. 이 수압은

Table 5. Mixed ratio of powdered sludge mixtures

Materials	Powdered sludge (%)	Cement (%)	Fly-ash (%)	Sand (%)
Sludge Cement Fly-ash	50	50	0	-
	48	32	20	-
	42	18	40	-
	32	8	60	-
	18	2	80	-
Sludge Cement Sand	50	50	-	0
	48	32	-	20
	42	18	-	40
	32	8	-	60

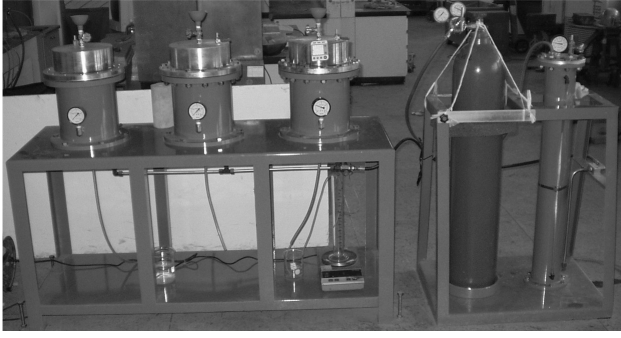


Fig. 4. Panoramic view of the permeability testing system

투수시험 용기 내로 그대로 전달되도록 하였다.

#### 4. 시험결과 및 분석

현무암 석분슬러지를 차수용 재료로 재활용하기 위하여 석분슬러지, 시멘트 및 플라이애쉬 혹은 모래를 교반하여 각 혼합비별 투수계수를 측정하고, 다양한 조건에 대한 시멘트 혼합체의 투수특성을 고찰하고자 한다.

##### 4.1 플라이애쉬가 포함된 시멘트 혼합체의 투수특성

###### 4.1.1 재령일에 따른 영향

시멘트 혼합체의 재령일에 따른 투수특성을 조사하기 위하여 플라이애쉬의 함량을 중량대비 각각 0%, 20%, 40%, 60% 및 80%로 증가시키면서 석분슬러지와 시멘트를 혼합한 시험체를 제작하여 투수시험을 수행하였다. 그리고 시험체의 재령일이 각각 7일, 14일 및 28일인 경우를 대상으로 투수시험을 실시하였다. Fig. 5는 플라이애쉬가 포함된 시멘트 혼합체의 재령일에 따른 투수계수의 변화

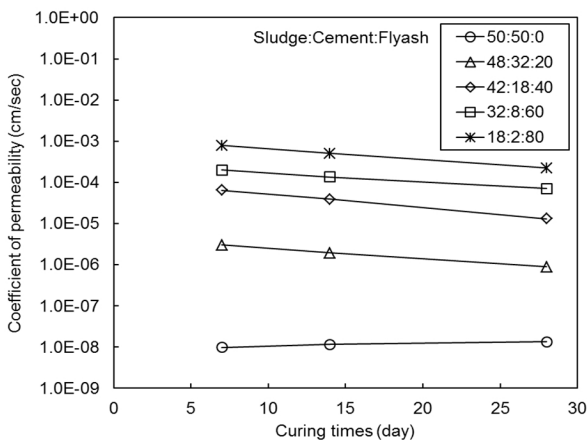


Fig. 5. Permeability of cement mixtures including fly ash for various curing times

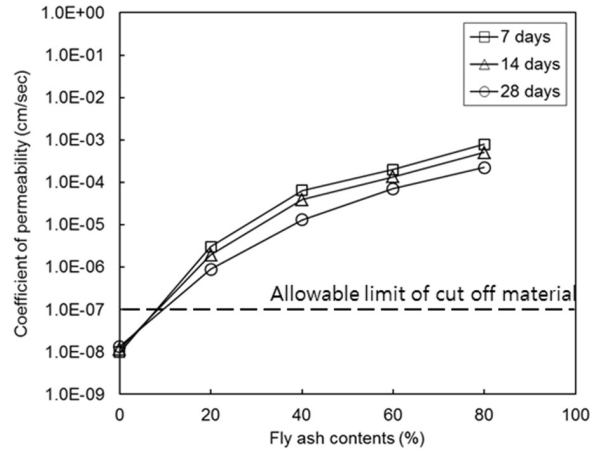


Fig. 6. Permeability of cement mixtures for various fly ash contents

를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 재령일이 증가함에 따라 플라이애쉬가 포함된 시멘트 혼합체의 투수계수는 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 플라이애쉬가 포함되지 않은 시멘트 혼합체는 재령일에 관계없이 비교적 일정한 투수계수를 나타내고 있다.

###### 4.1.2 플라이애쉬 함량에 따른 영향

시멘트 혼합체의 플라이애쉬 함량에 따른 투수특성을 조사하기 위하여 플라이애쉬의 함량을 중량대비 각각 0%, 20%, 40%, 60% 및 80%로 증가시키면서 석분슬러지와 시멘트를 혼합한 시험체를 제작하여 투수시험을 수행하였다. Fig. 6는 재령일이 각각 7일, 14일 및 28일 인 경우 시멘트 혼합체의 플라이애쉬 함량에 따른 투수계수의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 플라이애쉬의 함량이 증가함에 따라 시멘트 혼합체의 투수계수는 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 플라이애쉬 함량이 40%이하에서는 시멘트 혼합체의 투수계수가 크게 증가하였으나 플라이애쉬 함량이 40%이상에서는 혼합체의 투수계수가 상대적으로 작게 감소함을 알 수 있다. 한편 차수재로서 활용하기 위한 투수계수 허용기준은  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하이다. 시험결과를 토대로 플라이애쉬를 포함한 시멘트 혼합체를 차수재로 활용하기 위해서는 플라이애쉬 함량은 약 8%이하로 적용하여야 한다.

#### 4.2 모래가 포함된 시멘트 혼합체

###### 4.2.1 재령일에 따른 영향

시멘트 혼합체의 재령일에 따른 투수특성을 조사하기

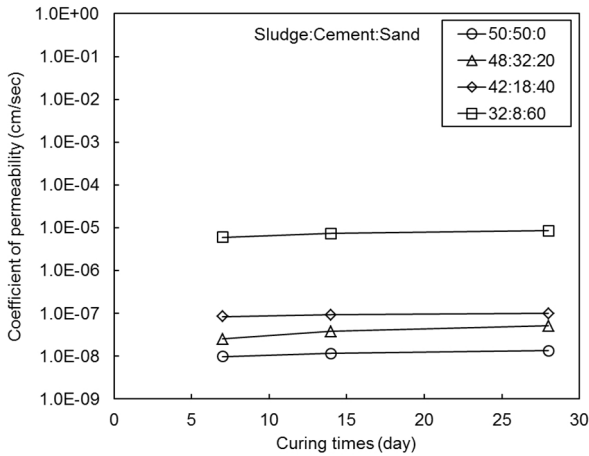


Fig. 7. Permeability of cement mixtures including sand for various curing times

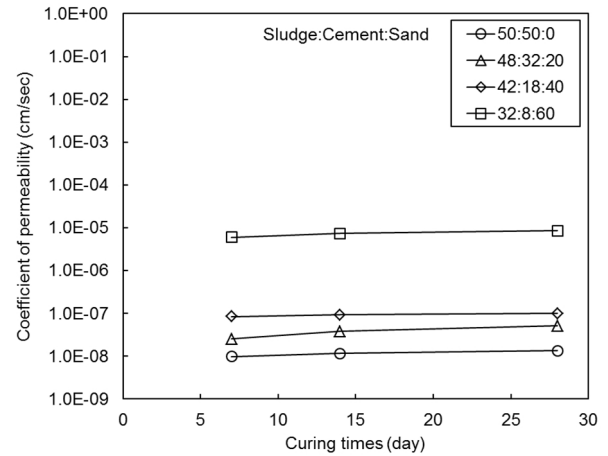


Fig. 9. Comparison for permeability of cement mixtures including fly ash or sand

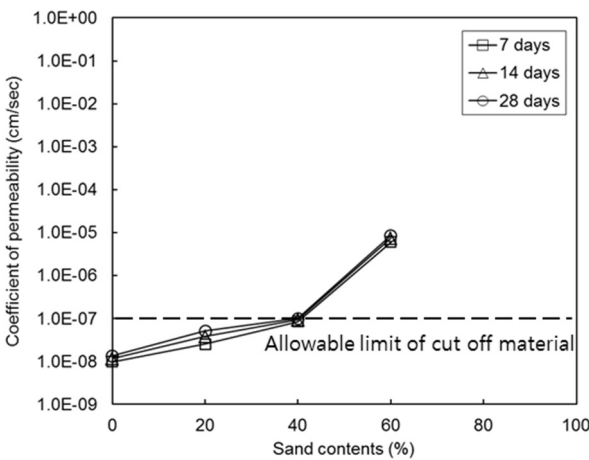


Fig. 8. Permeability of cement mixtures for various sand contents

위하여 모래의 함량을 중량대비 각각 0%, 20%, 40% 및 60%로 증가시키면서 석분슬러지와 시멘트를 혼합한 시험체를 제작하여 투수시험을 수행하였다. 모래의 함량이 80%인 경우 시험체 제작이후 수중 양생과정에서 시험체가 파괴되어 시험에서 제외하였으며, 시험체의 재령일은 각각 7일, 14일 및 28일인 경우를 대상으로 투수시험을 실시하였다. Fig. 7은 모래가 포함된 시멘트 혼합체의 재령일에 따른 투수계수의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 재령일이 증가함에 따라 모래가 포함된 시멘트 혼합체의 투수계수는 미소하게 증가하거나 일정한 것으로 나타났다. 따라서 모래가 포함된 시멘트 혼합체의 경우 재령일에 따른 영향이 거의 없는 것으로 판단할 수 있다.

#### 4.2.2 모래 함량에 따른 영향

시멘트 혼합체의 모래 함량에 따른 투수특성을 조사하

기 위하여 모래의 함량을 중량대비 각각 0%, 20%, 40% 및 60%로 증가시키면서 석분슬러지와 시멘트를 혼합한 시험체를 제작하여 투수시험을 수행하였다. Fig. 8은 재령일이 각각 7일, 14일 및 28일 인 경우 시멘트 혼합체의 모래 함량에 따른 투수계수의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 모래의 함량이 증가함에 따라 시멘트 혼합체의 투수계수는 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 특히 모래 함량이 40%이상에서 시멘트 혼합체의 투수계수가 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 한편 차수재로서 활용하기 위한 투수계수 허용기준과 시험결과를 토대로 모래를 포함한 시멘트 혼합체를 차수재로 활용하기 위해서는 모래의 함량은 약 40%이하로 적용하여야 한다.

#### 4.3 시멘트 혼합체의 투수계수 비교

시멘트 혼합체에 포함된 플라이애쉬 혹은 모래의 함량에 따른 투수계수를 서로 비교하기 위하여 재령일 28일이 지난 시험체의 투수시험결과를 함께 도시하였다. Fig. 9는 동일한 플라이애쉬와 모래의 혼합조건에서 시멘트 혼합체의 투수계수를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 플라이애쉬가 함유된 혼합체의 투수계수 증가량이 모래가 함유된 혼합체의 투수계수 증가량보다 상대적으로 크며, 각각의 함유량이 증가함에 따라 두 혼합체의 투수계수 차이는 크게 증가됨을 알 수 있다. 따라서 석분슬러지 시멘트 혼합체를 차수재로 활용하기 위해서는 플라이애쉬를 혼합하는 것 보다는 모래를 혼합하는 것이 더 유리한 것으로 나타났다.

## 5. 결론

본 연구에서는 제주도 내에서 발생하는 현무암 석분슬러지를 차수용 재료로 재활용하기 위하여 현무암 석분슬러지, 시멘트 및 모래 혹은 플라이애쉬(fly ash)를 교반하여 각 혼합비별 투수계수를 측정하고, 석분슬러지 함량에 따른 시멘트 혼합재료의 투수계수 변화특성을 조사하였다. 이에 대한 실험결과 및 분석내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 본 실험에 사용된 제주도 현무암 석분슬러지의 비중은 2.92로서 일반적인 토사에 비해 크며, 소성지수는 4.7로 소성이 작은 편이다. 그리고 통일분류법(USCS)에 따르면 현무암 석분슬러지는 소성이 낮은 실트(ML) 및 소성이 낮은 점토(CL)로 구분할 수 있다.
- (2) 플라이애쉬가 포함된 시멘트 혼합체에서는 재령일이 증가함에 따라 투수계수가 감소하며, 플라이애쉬가 포함되지 않은 시멘트 혼합체에서는 재령일에 관계없이 비교적 일정한 투수계수를 갖는다.
- (3) 플라이애쉬가 포함된 시멘트 혼합체의 경우 플라이애쉬의 함량이 증가함에 따라 투수계수는 증가함을 알 수 있으며, 시멘트 혼합체를 차수재로 활용하기 위한 플라이애쉬의 적정 함량은 약 8%이하이다.
- (4) 모래가 포함된 시멘트 혼합체의 경우 재령일에 따른 투수계수의 변화가 미소하거나 일정하므로 재령일에 따른 영향이 없음을 알 수 있다.
- (5) 모래가 포함된 시멘트 혼합체의 경우 모래의 함량이 증가함에 따라 투수계수는 증가하며, 시멘트 혼합체를 차수재로 활용하기 위한 모래의 적정 함량이 약 40%이하이다.
- (6) 석분슬러지 시멘트 혼합체를 차수재로 활용하기 위해서는 플라이애쉬를 혼합하는 것 보다는 모래를 혼합하는 것이 더 유리한 것으로 나타났다.

## References

1. Almeida, N., Branco, F.A. and Santos, J.R. (2007) "Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures", *Building and Environment*, Vol.42, No.2, pp.810-819.
2. Celik, T. and Marar, K. (1996) "Effects of crushed stone dust on some properties of concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.26, No.7, pp.1121-1130.
3. Kim, K.S. and Song, Y.S. (2007) "Recycle possibility of the stone dust in quarry as subbase layer materials of the road", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.17, No.2, pp.279-287. (in Korean)
4. Kim, K.Y., Lee, K.I., Yun, J.M., Song, Y.S. and Kim, T.H. (2015) "Permeability characteristics of soils mixed with powdered sludge of basalt", *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol.14, No.2, pp.89-94. (in Korean)
5. Ko, D.W. (2014) Verification of capacity of dry-mortar recycled blast sludge as functional finishing material, *The magazine of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol.5, No.4, pp.21-28. (in Korean)
6. Ma, S.J., Kim, D.M., Ahn, S.C. and Lee, S.U. (2004) "Development of fillers for underground cavity -Experiment with stone dusts as a main material-", *Journal of Korea Solid Wastes Engineering Society*, Vol.22, No.1, pp.67-78. (in Korean)
7. Song, Y.S., Kim, K.S. and Woo, K.S. (2012) "Stability of embankments constructed from soil mixed with stone dust in quarry reclamation", *Environmental Earth Sciences*, Vol.67, pp.285-292.
8. Suh, Y.C., Park, K.H., Nam, Y.K. and Lee, S.H. (1995) "A study on the determination of the layer coefficient of the cement-treated-screenings base for the asphalt pavement", *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol.15, No.5, pp.1233-1239. (in Korean)
9. Ueno, K., Yokoyama, Y. and Imaizumi, S. (1996) "Fundamental study on development of valuable reuses of Ohya stone dust", *Proc. 2<sup>nd</sup> International Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, Japan, pp.939-944.
10. Waste Control Act (2003), *Article 2 of Chapter 1*. (in Korean)