

순환골재를 사용한 알칼리활성화 슬래그-레드머드 흙포장재의 특성

Properties of Alkali-activated Slag-Red Mud Soil Pavement Using Recycled Aggregate

강석표^{1*}Suk-Pyo Kang^{1*}

(Received August 29, 2016 / Revised September 12, 2016 / Accepted September 13, 2016)

Red mud is an inorganic by-product produced from the mineral processing of alumina from Bauxite ores. the development of alkali-activated slag-red mud cement can be a representative study aimed at recycling the strong alkali of the red mud as a construction material. This study is to investigate the optimum water content, compressive strength, moisture absorption coefficient and efflorescence of alkali-activated slag-red mud soil pavement according to the recycling fine aggregate content. The results showed that the optimum water content, moisture absorption coefficient and efflorescence area of alkali-activated slag-red mud soil pavement increased but the compressive strength of that decreased as the recycled fine aggregate content increased.

키워드 : 알칼리활성화 슬래그-레드머드 흙포장재, 순환골재, 최적 함수비, 물흡수계수, 백화

Keywords : Alkali-activated slag-red mud soil pavement, Recycled aggregate, Optimum water content, Moisture absorption coefficient, Efflorescence

1. 서론

최근 지방 자치단체를 중심으로 문화탐방로, 자전거도로 및 주차장(광장) 등을 건설하면서 친환경적이고 정서적인 안정감을 주는 흙포장재의 보급이 확대되고 있다. 국내 흙포장 시장규모는 2012년부터 2014년까지의 조달청 나라장터 계약금액을 근거로 평균하여 산출한 결과 평균 약 2,500억원으로 분석된다.

천연 흙포장의 경우 천연 황토 또는 마사토에 시멘트 또는 고화재와 같은 결합재를 혼합하여 다짐하는 방법으로 시공되어지고 있다. 그러나 흙의 재질 자체가 시멘트의 수화작용과 잘 맞지 않기 때문에 콘크리트와 비교하여 상당히 고가이지만 내구성이 현저히 저하되어 흙포장 자체에 대한 부정적인 이미지를 심어주고 있는 실정이다.

이와 같은 고가의 낮은 내구성을 지닌 천연 흙포장재를 대체할 수 있는 방법으로서 보오크사이트 원광석에서 생산되는 알루미늄의 선광과정에서 발생하는 무기질 부산물인 레드머드를 활용하고

자 하는 연구가 국내에서 이루어지고 있다(Kang 2015). 레드머드는 자체적으로 pH 11 이상의 매우 높은 알칼리성 무기질 폐기물로서, 원상태에서 주변 생태계에 악영향을 끼치게 되므로 적절한 처리가 필요하다. 그러나 레드머드에 10~15% 함유되어져 있는 Na₂O는 슬래그나 알루미늄 규산염 광물이 해리되어 축중합을 통해 안정한 수화물을 생성하기 위한 자극제나 촉진제로서 액상 규산나트륨(sodium silicate) 대신 활용 가능하거나 지연제로서 인산나트륨(sodium phosphate) 대신 활용 가능하여 각종 건설자재로서의 재 활용이 가능하다(Daniel 2011; Pontikes 2013).

강알칼리성의 레드머드를 건설산업용 촉진제로서 활용하고자 하는 연구로서 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트가 국내외적으로 발표되고 있다. 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트는 알칼리활성화 시멘트 연구의 일환으로서 시멘트 조성에서 알칼리 자극제, 고로슬래그와 레드머드로 구성되어져 있으며, 포틀랜드시멘트를 사용하지 않는 클링커 프리 시멘트(Clinker Free Cement)를 의미한다. 유사한 시멘트계 재료로서 알칼리활성화 슬래그시멘

* Corresponding author E-mail: ksp0404@empal.com

¹우석대학교 건축학과 (Department of Architecture, Woosuk University, Chungcheongbuk-do, 27841, Korea)

Table 1. Experimental plan and mix design

ASRC* Binder(%)	RM/B**(%)	Recycled aggregate(%)	Water content(%)	W/B(%)	Test items
15	7.5	0	Optimum water content	Changed by the optimum water content	- Compressive strength - Moisture absorption coefficient - Efflorescence
		25			
		50			
		75			
		100			

*ASRC : Alkali-activated slag red mud cement, **RM/B : Red mud / ASRC Binder

트, 알칼리활성화 슬래그-플라이애시시멘트, 알칼리활성화 슬래그-포틀랜드시멘트 등이 있다. 알칼리활성화 슬래그-레드머드시멘트는 레드머드를 액상 규산나트륨 또는 가성소다와 같은 고로슬래그미분말의 자극제로서 활용하고자 하는 것으로서 2000년 초반 중국에서 처음으로 발표되었다(Pan 2002; Pan 2003). 국외의 경우 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트는 알칼리자극제, 고로슬래그와 레드머드로 구성되어 있으며, 보통 포틀랜드시멘트와 비교하여 초기강도 발현특성이 우수하고 화학저항성이 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나 알칼리자극제로서 수산화나트륨 수용액(NaOH)과 규산나트륨 수용액(Na_2SiO_3)과 같은 강알칼리성 액상 촉진제를 사용함으로써 제조원가가 상승되고 취급상의 애로사항이 발생되어 활용측면에서 제한적이었다. 반면 국내의 경우 자극제로서 고가의 액상 자극제 대신 활용 가능한 분말 산업부산물을 레드머드와 함께 활용하고자 하는 연구가 수행되어지기도 하였다(Kang 2012; Kwan 2016).

한편 시멘트 및 콘크리트 연구자들에게 백화는 구조적으로 문제가 되지 않는다는 근거로 상대적으로 적은 관심과 연구가 이루어지고 있다. 그러나 알칼리활성화 시멘트의 경우 백화에 매우 취약하고 심한 경우에는 구조적으로 문제가 될 수도 있는 유해한 백화가 발생되기도 한다. 특히 나트륨 계열의 자극제를 사용하는 알칼리활성화 결합재는 백화에 더욱 취약한 것으로 알려져 있다. 이것은 미반응 상태로 존재하는 Na_2O 가 증가할수록 $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 증가하고 알칼리활성화 결합재의 생성물인 알루미노실리케이트 구조에서 나트륨 이온이 상대적으로 쉽게 이동할 수 있어 포틀랜드 시멘트와 비교하여 백화발생에 매우 취약한 것으로 알려져 있

다(Dowa 2003; Kanj 2012; Zhang 2014).

따라서 본 논문은 산업부산물인 레드머드를 건설산업에 활용하기 위한 연구의 일환으로서 건설폐기물로부터 제조되어진 순환골재를 알칼리활성화 슬래그-레드머드 흙포장재에 활용하고자하는 기초자료를 제시하고자 하였다. 이를 위하여 순환골재 대체율에 따른 알칼리활성화 슬래그-레드머드 건식 흙포장재의 최적함수율, 압축강도, 흡수율, 백화발생 특성에 대하여 비교·검토하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 논문에서는 순환골재 대체율에 따른 알칼리활성화 슬래그-레드머드 흙포장재의 특성을 검토하고자 Table 1에 나타난 바와 같이 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트에 순환골재를 0, 25, 50, 75, 100% 대체한 건식 흙포장재에 대하여 최적 함수비, 압축강도, 흡수계수, 백화발생을 비교·검토하였다. 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트는 고로슬래그 기반 알칼리 활성화 시멘트에 레드머드를 7.5% 대체하였으며, 이를 흙포장재에 대하여 중량비로 15% 사용하였다. 혼합수는 각 배합별 다짐에 의한 함수비를 구한 후 최적 함수비를 산정하여 결정하였다.

2.2 사용재료

2.2.1 결합재

본 논문에서 사용한 알칼리활성화 슬래그 시멘트의 물리 화학적

Table 2. Physical properties and chemical composition of binder

Type of binder	Specific surface area (cm^2/g)	Density (g/cm^3)	Ig. loss	Chemical composition(%)					
				SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
C ¹⁾	3,144	3.15	1.32	21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2
AAS ²⁾	4,058	2.83	2.23	22.1	8.9	1.4	54.9	3.3	5.2

1) C: Ordinary portland cement 2) AAS: Alkali-activated slag cement

Table 3. Properties of red mud

Color	Moisture content ratio(%)	pH	Density (g/cm ³)	Specific surface area(m ² /g)	Average particle diameter(μm)	Chemical composition(wt.%)							
						SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
Red	10.2	11.0	3.50	23.53	2.75	38.8	16.1	22.8	3.4	0.2	0.0	10.0	0.4

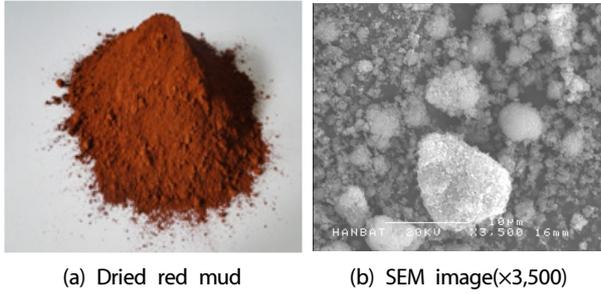


Fig. 1. Image of red mud

성질을 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하여 Table 2에 나타내었다.

알칼리활성화 슬래그 시멘트는 국내 C사에서 시제품으로 제조된 고로슬래그미분말을 기반으로 하는 알칼리활성화 슬래그 시멘트를 사용하였다. 알칼리활성화 슬래그 시멘트의 화학조성은 SiO₂ 22.1%, Al₂O₃ 8.9%, CaO 54.9%, SO₃ 5.2%로서 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하여 Al₂O₃ 및 SO₃의 조성비율이 높고 CaO의 조성비율이 낮은 것으로 나타났다. 알칼리활성화 슬래그 시멘트의 비표면적은 4,058cm²/g, 밀도는 2,83g/cm³로서 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하여 비표면적은 높은 반면 밀도는 작은 것으로 나타났다. 본 논문에서 사용한 알칼리활성화 시멘트의 물리·화학적 물성을 Table 2에 나타내었다.

2.2.2 레드머드

레드머드(Red mud)는 보오크사이트 원광석으로부터 수산화알루미늄(Al(OH)₃) 및 산화알루미늄(Al₂O₃)을 제조하는 공정에서 발생하는 산업부산물이다. 국내의 경우 레드머드는 Bayer Process를 통하여 Al₂O₃ 1톤을 생산하면 함수율 40~60%의 슬러지 상태로 대략 2톤이 발생되며, 발생량은 국내 발생량의 대부분을 차지하고

있는 K사에서만 연간 약 20만톤이 슬러지 상태로 발생되고 있다. 본 논문에서 사용한 레드머드는 함수율 40~60%의 상태로 배출되고 있는 슬러지를 함수율 10%내외로 건조 및 분쇄시켜 Table 3 및 Fig. 1에 나타난 적색의 미분말 상태로 사용하였다.

레드머드 화학조성은 대부분 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃가 약 80%를 차지하고 있으며, 레드머드가 황토색으로 나타나게 하는 Fe₂O₃는 22.8%를 차지하고 있다. 또한 레드머드가 건설재료로서 활용시 백화의 원인으로 작용하는 Na₂O는 10.0%를 차지하고 있다. 이는 보오크사이트 원석으로부터 알루미늄을 추출하는 과정에서 수산화나트륨(NaOH)을 추출액으로 사용하기 때문에 미회수 수산화나트륨 용액이 잔사인 레드머드에 다량 존재하였기 때문으로 이로 인하여 레드머드의 pH가 11.0의 강알칼리성을 나타내고 있다.

건조 레드머드의 물리적 특성은 함수율 10.2%의 건조분말로서 진밀도는 3.50g/cm³로서 시멘트와 비교하여 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 또한 건조 레드머드의 비표면적은 23.53m²/g, 평균 입경은 2.75μm로서 레드머드의 입도분포를 나타낸 시멘트, 플라이 애시, 고로슬래그미분말 등의 평균입경 20~30μm와 비교하여 약 1/10에 해당되며 마이크로시멘트 평균입경 4~6μm보다도 작은 것으로 나타났다.

2.2.3 골재

본 연구에서 사용한 순환골재는 건설폐기물 중간처리업체인 천안에 위치하고 있는 Y사에서 생산되어지고 있는 순환골재를 사용하였다. 본 논문에서 사용한 순환골재 및 부수 잔골재의 물리적 특성을 Table 4에 나타내었으며 골재의 체가를 시험 방법(KS F 2502)에 의한 입도분포곡선을 Fig. 2에 나타내었다.

Table 4. Properties of fine aggregate

Type	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	0.08mm sieve passing(%)	Fineness modulus	Solid volume percentage (%)	Contents of impurity (%)		Amount of clay mass(%)	Stability (%)
						Organic	Inorganic		
Crushed aggregate	2.59	1.31	1.18	2.92	58.92	-	-	-	5.6
Recycled aggregate	2.41	4.11	2.08	2.91	57.63	0.16	0.63	0.43	6.01
Standard for recycled aggregate(KS F 2573)	More than 2.2	Less than 5.0	Less than 7.0	-	More than 53	Less than 1.0	Less than 1.0	Less than 1.0	Less than 10

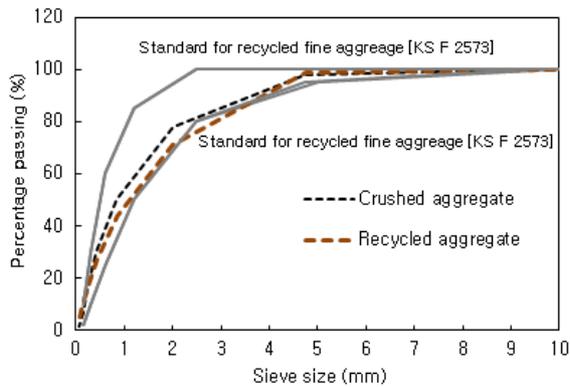


Fig. 2. Particle size distribution

2.3 실험방법

2.3.1 최적 함수비

흙포장재는 함수비에 따라 다짐의 효과 및 건조밀도가 달라진다. 함수비가 증가함에 따라 흙속의 물이 윤활제 역할을 하게 되어 다짐효과가 높아지고 건조밀도가 높아지는데 최대 건조밀도가 얻어질 때의 함수비를 본 논문에서의 최적 함수비로 설정하였다. 본 논문에서는 최적 함수비(w_{opt} , O.M.C)를 산정하기 위하여 흙포장재의 배합 후 경화까지 시간이 소요되는 점을 감안하여 다짐방법은 KS F 2312의 A 다짐방법에 의한 반복법으로 실시하였다. 사용한 몰드의 내경(D)은 10.0cm, 높이(h)는 12.7cm로 체적은 1,000cm³이다. 래머는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 직경 5cm, 낙하고 30cm, 무게는 2.5kgf이며, 총당 25회로 3층 다짐을 실시하였다.

흙포장재의 다짐에 의한 함수비(w)를 구하고 다음 식에 의하여 습윤밀도 및 건조밀도를 산출 한 후 다짐곡선에 따라 최대 건조밀도 및 최적 함수비를 결정하였다.

$$Y_t = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (1)$$

여기서, Y_t 는 습윤밀도(g/cm³)이며, M_2 는 다진 후의 전체 질량(g)이며, M_1 는 몰드와 밀판의 질량(g)이며 V 는 몰드의 용량(cm³)이다.

$$Y_d = \frac{Y_t}{1 + \frac{w}{100}} \quad (2)$$

여기서, Y_d 는 건조밀도(g/cm³)이며, Y_t 는 습윤밀도(g/cm³)이며, w 는 함수비이다.

2.3.2 압축강도

건식 흙포장재의 압축강도 시험체 제작은 흙콘크리트 단체표준 규격(SPS-KSCICO-001:2013)에 준하여 계획된 흙포장재 배합에 산출된 최적 함수비에 의한 함수량을 혼합하여 팬타입 믹서로 3분간 혼합한 후 토출하여 $\Phi 10 \times 20$ cm 몰드에 Fig. 3에서 나타난 바와 같은 래머를 사용하여 제작하였다. 래머는 직경 5cm, 낙하고 30cm, 무게는 2.5kgf이며, 총당 25회로 3층 다짐을 실시하였다. 압축강도 시험은 제작한 공시체를 7일 및 28일 기건 양생 후 KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험방법에 의하여 측정하였다.

2.3.3 흡수율

다공질의 친수성을 갖고 있는 건축 재료가 물과 접촉하면 모세관 현상을 통해 기공의 내부로 물이 흡수 된다. 물론 표면 장력의 대소에 따라 흡수되는 물의 양이 달라지지만 일반적으로 초기에는 많은 양의 물이 흡수되고 시간의 흐름에 따라 점차 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 물 흡수 현상을 다음과 같이 지수적으로 수식화 할 수 있다(Lee 2001).

$$m = c \cdot t^n \quad (3)$$

이미 많은 실험을 통하여 그 지수 값이 $n=1/20$ 이라는 것이 입증되었다. 즉, 단위 면적 당 물 흡수량 m (kg/m²)은 시간 t 와 포물선적 관계를 갖는다. 따라서 물 흡수량 m 을 y 축으로, 그리고 실용적 측면을 고려하여 시간 t 의 x 축을 $t^{1/2}$ 로 나타내면 물 흡수량과 시간과의 관계를 1차원 직선으로 표시할 수 있다.

$$m = w \cdot t^{1/2} \quad (4)$$

여기서, m (kg/m²)은 단위 면적당 물흡수량이며, t (h)는 물흡수 시간이며, w (kg/m² · h^{1/2})는 물흡수계수이다.

식 (3)의 기울기 W 를 “물 흡수계수”라 한다. 물 흡수계수가 큰 재료일수록 같은 시간에 많은 양의 물을 흡수함을 의미하며 하며, 무기질 건설재료의 수밀성을 평가하는 지표로 사용되고 있다(Lee 2001).

본 논문에서의 흙포장재 흡수율 시험은 KS F 2609 「건축 재료의 물 흡수 계수 측정 방법」에 준하여 실시하였다. 흙포장재 흡수율 시험체 제작은 건식 흙포장재의 압축강도 시험체 제작과 동일하게 $\Phi 10 \times 20$ cm 몰드에 직경 5cm, 낙하고 30cm, 무게는 2.5kgf의 래머로 25회 1층 다짐을 실시하여 제작하였다. 제작된 흙포장재

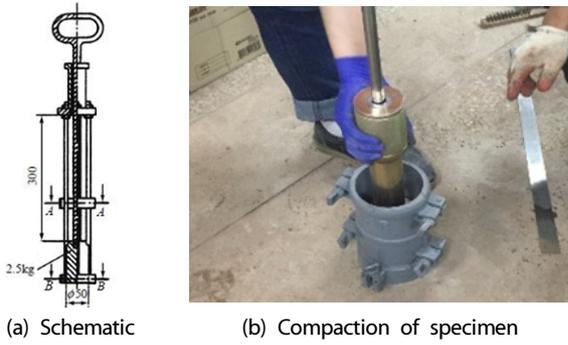


Fig. 3. Rammer for compaction

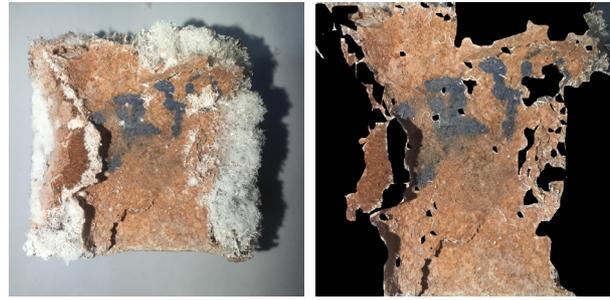


Fig. 4. Specimen of efflorescence

Table 5. Degree of efflorescence

Degree	Efflorescence area
I	None
II	Less than 10%
III	Above 10%, less than 30%
IV	Above 30%, less than 50%
V	Above 50%

시험체를 온도 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대 습도 $65 \pm 5\%$ 의 표준 상태에서 향량이 될 때까지 건조하였다. 시험체의 측면은 에폭시로 방수 처리하고, 약 20°C 의 물에 2~10mm 정도의 깊이로 담근 후 10분, 30분, 1시간, 6시간, 24시간에 시험체의 질량을 측정하였다. 흡수량을 흡수면의 단위면적당 물흡수량(kg/cm^2)으로 환산하여 시간 t1/2에 따라 표시하고 4개 이상의 측정값이 일직선상에 위치하면 흡수시험을 종료하였으며, 직선의 기울기를 물흡수계수로 산정하였다.

2.3.4 백화 시험

본 논문에서의 백화 시험은 일본 건재시험센터에서 개발한 시멘트계 재료의 백화시험 방법에 준하여 실시하였다.

흙포장재 백화 시험체 제작은 건식 흙포장재의 압축강도 시험체 제작과 동일하게 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 몰드에 직경 5cm, 낙하고 30cm, 무게는 2.5kgf의 래머로 25회 1층 다짐하여 제작하였다. 제작된 흙포장재 시험체를 20°C , 다습조건에서 1일 양생 후 탈형하고, 1일동안 80°C 건조하였다. 시험편의 측면을 파라핀으로 실링처리한 후 증류수에 침지하고, 7°C , 50% 조건에서 14일 침지하였다. 80°C 에서 1일 동안 건조한 후 사진 촬영하여 백화현상을 측정하였으며 백화면적은 '페인트넷' 프로그램을 이용하여 면적을 구한 후 Fig. 4에 나타난 바와 같이 화상처리하여 정량화하였다. 또한 백화 발생 등급을 Table 5에 나타난 바와 같이 백화 발생 면적 비율에 따라 5등급으로 구분하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 최적함수비

순환골재 대체율에 따른 알칼리활성화 흙포장재의 최적 함수비 및 최대 건조밀도는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 최적 함수비 9.3~9.7% 수준, 최대 건조밀도 $1.968 \sim 2.036\text{t}/\text{m}^3$ 수준으로서 흡수율이 큰 순환골재 대체율이 클수록 최적 함수비는 다소 증가하고 최대 건조밀도는 다소 감소하는 경향을 보이고 있으나 대체율에 따른 큰 차이는 보여지지 않고 있다.

순환골재 대체율 0%의 경우 최적 함수비 9.3%, 최대 건조밀도 $2.035\text{t}/\text{m}^3$, 순환골재 대체율 25%의 경우 최적 함수비 9.7%, 최대 건조밀도 $2.018\text{t}/\text{m}^3$, 순환골재 대체율 50%의 경우 최적 함수비 9.8%, 최대 건조밀도 $2.036\text{t}/\text{m}^3$, 순환골재 대체율 75%의 경우 최적 함수비 9.8%, 최대 건조밀도 $2.002\text{t}/\text{m}^3$, 순환골재 대체율 100%의 경우 최적 함수비 9.8%, 최대 건조밀도 $1.968\text{t}/\text{m}^3$ 로 나타났다.

3.2 압축강도

순환골재 대체율에 따른 압축강도는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 순환골재 대체율이 증가할수록 압축강도는 감소하였다. 흙포장 단체표준규격과 비교하면 가장 높은 성능기준인 주차장용 압축강도 18MPa를 만족시키는 시험체는 재령 7일에서는 순환골재 대체율 0%만 여유있게 만족하고 있었으나 재령 28일에서는 모든 시험체가 만족하는 것으로 나타났다. 재령 7일 압축강도의 경우 순환골재 대체율 0%에서 21.2MPa, 25%에서 17.0MPa, 50%에서 18.2MPa, 75%에서 17.8MPa, 100%에서 17.0MPa를 나타내고 있어 순환골재 대체율이 높아질수록 다소 감소하였지만 감소 폭은 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 재령 28일 압축강도의 경우 순환골재 대체율 0%에서 36.4MPa, 25%에서 30.8MPa, 50%에서 29.7MPa, 75%에서 25.5MPa, 100%에서 30.0MPa를 나타내었다.

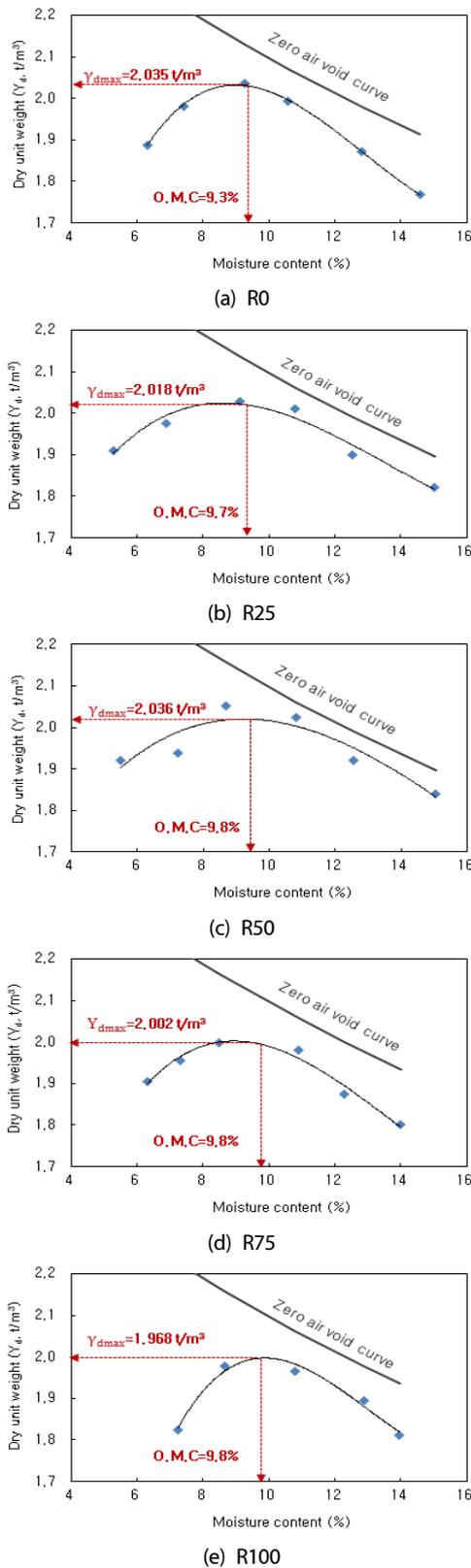


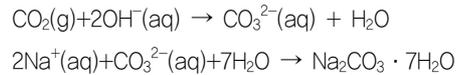
Fig. 5. Optimum water content

3.3 물흡수계수

순환골재 대체율에 따른 물흡수계수는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 순환골재 대체율이 증가할수록 물흡수계수는 증가하는 것으로 나타났다. 순환골재 대체율에 따른 물흡수계수 비교 평가 결과 순환골재 대체율 0%에서 0.067, 25%에서 0.087, 50%에서 0.137, 75%에서 0.416, 100%에서 0.587로 나타나고 있다. 순환골재 대체율이 증가할수록 물흡수계수가 높아지며 특히 순환골재 대체율 75% 이상에서 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 순환골재의 흡수율이 부순 잔골재와 비교하여 약 4배정도 높기 때문에 경화된 상태에서도 골재의 흡수율이 흙포장재의 물흡수계수에 영향을 미친 것으로 판단된다. 이는 수분과 접하기 쉬운 흙포장재의 환경적인 조건을 고려할 경우 동결융해에 취약할 수 있는 잠재적인 인자를 가지고 있다고 사료된다(Lee 2001; Kropp 1995).

3.4 백화시험

보통 포틀랜드 시멘트에 레드머드를 대체한 시험체 백화는 레드머드에서 공급되는 Na와 대기중의 CO₂ 가스가 반응하여 생성되는 일반적인 알칼리탄산염 백화인 Na₂CO₃ · H₂O이다. 이는 NaOH 및 물유리와 같은 나트륨계 자극제로부터 Na가 충분히 공급되어 발생하는 지오폴리머 백화물질의 생성메커니즘과 유사하다(Dowa 2003; Kanj 2012; Zhang 2014).



결합재로서 알칼리활성화 시멘트에 레드머드를 사용한 시험체에서 발생한 백화는 레드머드에서 공급되는 Na와 알칼리활성화 시멘트의 자극제로서 사용된 탈황석고에서 공급되는 SO₃가 반응하여 생성되는 Na₂SO₄가 주를 생성된다.

순환골재 대체율에 따른 백화 발생특성은 Table 6에 나타난 바와 같이 순환골재 대체율이 증가할수록 백화발생이 증가하는 경향을 보였다. 순환골재 대체율 0%의 백화발생비율은 0.18%로서 II등급, 25%는 7.12%로서 II등급, 50%는 12.39%로서 III등급, 75%는 26.99%로서 III등급, 100%는 30.28%로서 III등급으로 구분되었다.

백화발생 주요 인자인 Ca 및 Na 함유량은 골재에서 공급되지 않는다면 동일한 결합재 및 레드머드에서 공급된다. 동일한 결합재 및 레드머드 양을 사용할 경우 백화발생 인자의 함유량이 동일하게 되고 백화발생은 경화체 내의 물리적 특성에 좌우될 것이다.

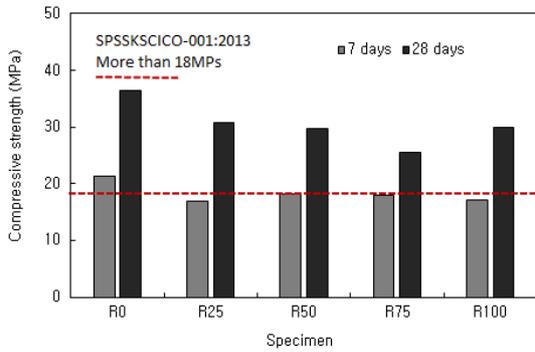


Fig. 6. Compressive strength

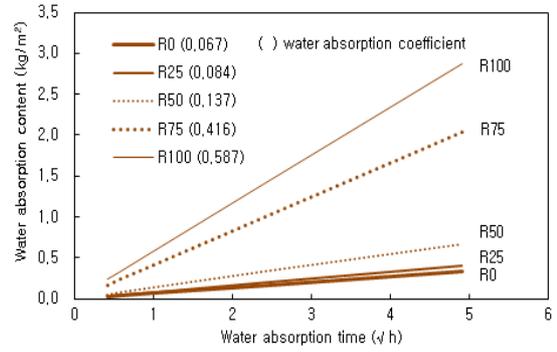


Fig. 7. Particle size distribution

Table 6. Efflorescence characteristics

Specimen	R0	R25	R50	R75	R100
Efflorescence image					
Area(%)	0.18	7.12	12.4	26.9	30.2
Degree	II	II	III	III	IV

특히 물흡수계수가 증가할수록 백화를 발생시키는 경화체 내의 가용성 염이 쉽게 용해되고 콘크리트 표면으로 이동하는 이동량이 증가되어 백화발생면적이 증가된 것으로 사료된다.

5. 결론

순환골재 대체율에 따른 알칼리활성화 슬래그-레드머드 건식 흙포장재의 최적함수율, 압축강도, 흡수율, 백화발생 특성에 대하여 비교·검토한 결과는 다음과 같다.

- 순환골재 대체율에 따른 알칼리활성화 흙포장재의 최적 함수비 및 최대 건조밀도는 흡수율이 큰 순환골재 대체율이 클수록 최적 함수비는 다소 증가하고 최대 건조밀도는 다소 감소하는 경향을 보이고 있으나 대체율 증가에 따른 큰 차이는 보이지 않고 있다.
- 순환골재 대체율이 증가할수록 압축강도는 감소하였으며, 28일 압축강도는 흙포장 단체표준규격의 가장 높은 성능인 주차장용 압축강도 기준인 18MPa을 모두 만족하는 것으로 나타났다.
- 순환골재 대체율이 증가할수록 물흡수계수가 높아지고 순환골재 대체율 75% 이상에서 크게 증가하는 것으로 나타났는데 이는 골재의 흡수율이 흙포장재의 물흡수계수에 영향을 미친 것

으로 판단된다.

- 순환골재 대체율이 증가할수록 백화발생이 증가하는 경향을 보이고 있었으며, 이는 물흡수계수가 증가할수록 백화를 발생시키는 경화체 내의 가용성 염이 쉽게 용해되고 콘크리트 표면으로 이동하는 이동량이 증가되어 백화발생면적이 증가된 것으로 사료된다.

References

Chang, J.J., Yeih, W., Chung, T.J., Huang, R. (2016), Properties of pervious concrete made with electric arc furnace slag and alkali-activated slag cement, *Construction and Building Materials*, **109(15)**, 34–40.

Daniel, V.R., Joao, A.L., Marcio, R.M. (2011). Potential use of natural red mud as pozzolan for portland cement, *Materials Research*, **14(1)**, 66–66.

Dowa, C., Glasser, F.P. (2003). Calcium carbonate efflorescence on portland, cement and building materials, *Cement and Concrete Research*, **33**, 147–154.

Gonga, C., Yang, N. (2000). Effect of phosphate on the hydration

- of alkali-activated red mud slag cementitious material, *Cement and Concrete Research*, **30**, 1013-1016.
- Kang, S.P. (2012). A study on the usability of red mud as activator of alkali-activated cementless binder, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, **28(11)**, 133-140 [in Korean].
- Kang, S.P. (2015). A study on the field applicability evaluation alkali-activated soil pavement using red mud, *Proceeding of the Korean Institute of Building Construction*, **15(1)**, 95-97 [in Korean].
- Kani, E.N., Allahverdi, A., Provis, J.L. (2012). Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan, *Cement & Concrete Composites*, **34**, 25-33.
- Kropp, J. (1995). *Performance Criteria for Concrete Durability*, E&FN Spon, London, 103-111.
- Kwon, S.J., Kang, S.P. (2016). Strength and pore characteristics of alkali-activated slag-red mud cement mortar used polymer according to red mud content, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **20(2)**, 26-33 [in Korean].
- Lee, M., Lee, J. (2001). Concrete's water tightness evaluation based on water absorption coefficient theory, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, **17(2)**, 75-83 [in Korean].
- Pan, Z., Cheng, L., Lu, Y., Yang, N. (2002). Hydration products of alkali-activated slag-red mud cementitious material, *Cement and Concrete Research*, **32**, 357-362.
- Pan, Z., Li, D., Yu, J., Yang, N. (2003). Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mud-slag cementitious material, *Cement and Concrete Research*, **33**, 1437-1441.
- Pontikes, Y., Angelopoulos, G. N. (2013). Bauxite residue in cement and cementitious applications : Current status and a possible way forward, *Resources, Conservation and Recycling*, **73**, 53-63.
- Zhang, Z., Provis, J.L., Reid, A., Wang, H. (2014). Fly ash-based geopolymers: The relationship between composition, pore structure and efflorescence, *Cement and Concrete Research*, **64**, 30-41.

순환골재를 사용한 알칼리활성화 슬래그-레드머드 흙포장재의 특성

레드머드는 보옥사이트 원광석에서 생산되는 알루미늄의 선광과정에서 발생하는 무기질 부산물이다. 인 레드머드를 활용하고자 하는 연구가 국내에서 이루어지고 있다. 강알칼리성의 레드머드를 건설산업용 촉진제로서 활용하고자 하는 연구로서 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트가 국내외적으로 발표되고 있다. 본 논문은 순환골재 대체율에 따른 알칼리활성화 슬래그-레드머드 건식 흙포장재의 최적함수율, 압축강도, 흡수율, 백화발생 특성에 대하여 비교·검토하였다. 그 결과 순환골재 대체율이 증가할수록 알칼리활성화 슬래그-레드머드 흙포장재의 최적 함수비, 물흡수계수, 백화면적은 증가하고 압축강도는 감소하였다.