토목섬유 및 메타카올린 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토의 강도 특성

The Strength Properties of Cement-Bentonite Soil Mixtures with Geosynthetics and Metakaolin

이재득* · 연규석** · 김광우** · 김용성***,†

Lee, Jae-Deuk · Yeon, Kyu-Seok · Kim, Kwang-Woo · Kim, Yong Seong

ABSTRACT

In the present study, an investigation has been made on the application of cement-bentonite soil mixtures as the countermeasure against leachate produced by buried animal carcasses. For this purpose, the strength characteristics of the cement-bentonite soil mixtures mixed with geotextile and metakaolin. After the mixtures with different contents of the cement (0 %, 10 %), bentonite (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %), and weathered soil (100 %, 95 %, 90 %, 85 %, 80 %) were prepared, metakaolin and geotextile were added with different contents (metakaolin : 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % of the cement weight; geotextile : 0 %, 0.5 %, 1 %, 1.5 %, 2 %). Experimental results suggested that the early strength of the mixture increases due to the pore filling, the hydration acceleration, and the pozzolan reaction when metakaolin of 5~10 % of the cement weight was added. In addition, the compressive strength increase when 0.5~1 % geotextile contents were added, and the above these contents, the rate of strength increase was gradually decreased because of the fibrous tangles.

Keywords: Bentonite; cement; fiber; metakaolin; compressive strength

1. 서 론

최근 발생한 구제역에 의한 매몰지 현황 조사에 따르면 2010년 발생한 구제역은 소, 돼지의 수는 148개소 5387농가에 약 348만두, 조류 인플루엔자에 의해 243농가 닭·오리 541만두가 매몰되어 197개소의 매몰지가 조성되었다. 경북도 993개 (11. 1. 24 기준) 매몰지 중 경북도의 요청에 따라 정비가 필요한 89개 매몰지에 대해 전문가가 참여하는 실태조사 결과 45개 매몰지는 (복합 6개소, 침출수오염차단 16개소, 사면 안전성 보강 23개소 우수배제 필요 16개소) 차수벽·우수차단시설 등의 조치가 필요한 것으로 나타나는 등 침출수로 인한 토양 및 지하수 오염 문제가 대두 되고 있다 (Headquarter for disaster and safety countermeasures, 2011).

한편, 국내 폐기물 발생량의 대부분이 매립에 의존하고 있기 때문에 2차적인 환경 문제를 일으키지 않기 위해서는 차수재의

역할이 매우 중요하다. 국내 폐기물관리법 시행규칙 제 35조 (폐기물 처리시설의 설치기준)에 의하면, 고밀도폴리에틸렌이나 이에 준하는 재질의 토목합성수지 라이너를 사용하는 경우 토목합성수지 라이너 하부에는 점토 또는 점토광물 혼합토 등을 다져 투수계수가 1×10^{-7} cm/sec가 되도록 점토·벤토나이트 등의 차수재를 두께 50 cm 이상 (지정폐기물을 매립하는 경우에는 1미터 이상)인 라이너를 설치할 것으로 규정하고 있다. 미국의 환경청기준 (USEPA)에 따르면 위생매립지에 건설될 점토차수재가 투수계수 10^{-7} cm/sec 이하의 기준을 만족시키기 위해서는 흙 차수재료는 세립토의 함유량이 20 % 이상 소성지수 10 % 이상 이어야 한다. 또한 자갈 함유량이 10 %를 초과할 경우 초과분은 스크린하여 제거하고, 흙 시료 내에는 지름 2.5~5 cm 이상의 암편이 섞여있을 경우 이를 제거해야 한다.

1970년대에 쓰레기 매립장의 차수재를 개발하기 시작한 이후 국외에서는 점토 차수재 및 인공혼합 차수재에 관한 연구가 활발히 진행되었으며, 체적 팽창율과 비표면 면적이 큰 벤토나이트를 사용하는 방법 등이 제안되었다 (Auvinet and Hiriart, 1980; Lundgren, 1981; Chapuis, 1981). 국내에서는 Kim et al. (2000)이 벤토나이트와 시멘트가 매립장 차수층의 투수성과 압축강도에 미치는 영향에 대하여 연구한 바 있으며, Kim and Kim (2006)은 화강풍화토-벤토나이트 혼합토의 공학적 특성에 대하여 주목하였다.

* 강원대학교 대학원 지역건설공학과

** 강원대학교 지역건설공학과 교수

*** 강원대학교 지역건설공학과 부교수

† Corresponding author Tel.: +82-33-250-6463

Fax: +82-33-251-6463

E-mail: yskim2@kangwon.ac.kr

2012년 10월 31일 투고

2012년 11월 22일 심사완료

2012년 11월 22일 게재확정

시멘트 혼합토에 대한 연구로는 Consoli et al. (2009)이 시멘트 혼합토의 강도 및 섬유 보강효과를 검토 하였으며, Ramezaniapour and Jovin (2012)은 메타카올린을 보조재로서 사용했을 때 시멘트의 강도와 콘크리트의 내구성의 영향에 대하여 연구하였다. 국내에서도 단섬유를 사용한 시멘트 혼합토의 일축압축강도 특성, 메타카올린을 사용한 콘크리트의 공극구조와 압축강도 특성 등에 관한 연구가 진행된 바 있다 (Park et al., 2008; Yeo et al., 2006)

본 연구에서는 토사계 혼합 차수재를 이용한 가축 매몰지 침출수 대책공법으로 시멘트-벤토나이트 혼합토를 활용하는 방안을 검토하기 위하여, 토목섬유 및 메타카올린 첨가에 따른 시멘트-벤토나이트 혼합토의 강도 특성을 비교·분석하고, 이를 매몰지 차수재로 활용하는데 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 사용재료

본 연구에 사용된 혼합토는 OO대학교 인근 산지에서 채취한

Fig. 1 Grain size distribution curve

풍화토를 사용하였으며, 벤토나이트는 D사의 Na형 (IS-Super)을 사용하였고, 메타카올린 (MK-100)과 토목섬유 (Nycon Fiber)는 N사의 것을 사용하였다. 또한 혼합토의 고화제로서 D사의 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

Table 1 및 Fig. 1은 본 연구에 사용된 흙의 기본 물성 및 입도분포곡선을 나타내며, Table 2는 시멘트의 역학적 특성을 나타낸다. Table 3 및 Fig. 2는 사용된 토목섬유의 제원과 형상을 나타내며, Table 4은 각각 사용된 시멘트 및 벤토나이트, 메타카올린의 역학적 특성과 화학적 성분을 나타낸다.

Table 1 Physical properties of used soil

USCS	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Specific gravity	OMC (%)	Dry unit weight (g/cm³)
SM	33.9	NP	2.678	16 %	1.81

Table 2 Mechanical properties of normal portland cement

S.G	Setting time		Compressive strength (MPa)		Fineness (cm²/g)
	Initial (M)	Final (H:M)	7 days	28 days	
3.17	> 60	< 10	44.4	59.3	3745

Fig. 2 Nycon fiber

Table 3 Physical properties of nycon fiber

Length (mm)	Diameter (μm)	Regain of allowance (%)	Specific gravity	Melt point	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)
19	23~36	Dry 4.5	1.14~1.16	210 °C over	800	3.5

Table 4 Mechanical properties of cement, bentonite and metakaolin (Unit: %)

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Surface area (cm²/g)	Specific gravity
Cement	20.5	5.0	62.3	3.6	2.1	-	3.4	-	3,475	3.17
Bentonite	59.1	17.7	2.89	2.03	-	-	-	1.85	< 4,800	2.34
Metakaolin	52.0	40.0	1.2	0.5	-	1.0	3.0		10,000	1.53

Table 5 Mix designs of Cement-Bentonite Soil Mixtures (%)

Cement-soil-bentonite mixture (100 %)			Nycon fiber (N)	Metakaolin (M)
Cement (C)	Soil (S)	Bentonite (B)	N/(C + S + B)	M/C ₁₀
0	100	0	0	0
	95	5	0.5	5
	90	10	1	10
	85	15	1.5	15
	80	20	2	20
10	90	0	0	0
	85	5	0.5	5
	80	10	1	10
	75	15	1.5	15
	70	20	2	20

※ C₁₀은 흙 100 % 중량의 10 %에 해당하는 시멘트량을 의미

2. 배합설계 및 제작

가. 배합

시멘트-벤토나이트 혼합토의 배합설계는 기존 연구 (Park et al., 2003; Choi et al., 2012; Kim et al., 2000)를 참고하여 토질역학 분야에서 주로 사용되는 혼합토의 전체 중량에 대한 중량비로 결정하여 최적 함수비를 구하였다. 벤토나이트 (0, 5, 10, 15, 20 %), 풍화토 (100, 95, 90, 85, 80 %), 시멘트 (0, 10 %)를 혼합한 혼합토에 메타카올린 (시멘트 중량비 0, 5, 10, 15, 20 %) 또는 토목섬유 (혼합토 총 중량의 0, 0.5, 1, 1.5, 2 %)를 첨가하여 실험 하였으며, 이때 사용된 토목섬유는 19 mm의 단사를 사용하였다. 혼합토의 배합설계는 Table 5와 같다.

나. 다짐

각 시료의 최적함수비 및 최대건조밀도 산출을 위한 다짐은 KS F 2312의 A다짐에 준하여 실시하였다. 강도측정을 위한 공시체 제작 시에도 A다짐 방법에 의하여 다짐에너지를 계산하여 3층 25회 다짐으로 다짐에너지가 일정하도록 조절하였다.

다. 공시체 제작

다짐시험에서 산출된 최적함수비와 최대건조단위중량을 기준으로 하여 수량 및 물량을 산정한 후 다짐 시험과 동일한 수준의 다짐에너지를 나타낼 수 있도록 $\phi 50 \times 100$ mm 몰드에 재료를 투입하고 3층으로 나누어 다짐을 실시하였으며, 재령에 따른 강도 특성을 구명하기 위하여 재령 0, 3, 7일 및 28일 동안 양생을 실시하였다.

3. 시험방법

가. 일축압축강도 시험

일축압축강도시험은 KS F 2314 (흙의 일축압축시험 방법)에

Fig. 3 Variable head permeability test

준하여 재령 0, 3, 7일 및 28일에 $\phi 50 \times 100$ mm인 공시체를 연 엔지니어링사의 일축압축시험기를 사용하여 1 mm/min의 속도로 하중을 재하 하여 측정하였다.

나. 투수시험

투수시험은 KS F 2322 (변수위 투수시험)에 준하여 투수시험용 몰드에 공시체를 다져 28일간 습윤 양생실에서 양생한 후에 각 시료별로 투수시험을 진행 하였다. 투수계수가 작은 흙의 경우 암밀시험으로 투수계수를 구하는 방법을 적용할 수 있으나 시료에 시멘트가 혼합되어 있어 재령 28일 시료는 경화가 상당 부분 진행된 이후이므로 부득이하게 변수위 투수시험을 적용하였다 (Fig. 3 참조).

III. 결과 및 고찰

1. 일축압축강도 특성

가. 토목섬유 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토의 강도 특성

시멘트-벤토나이트 혼합토의 토목섬유 혼합률에 따른 일축압축 강도의 영향을 분석하기 위하여 시멘트-벤토나이트 혼합토 공시체를 제작한 후 일축압축시험을 실시하였다. Fig. 4는 토목섬유 첨가에 따른 벤토나이트 혼합토의 재령 0, 3, 7 및 28일 강도를 나타내며, Fig. 5는 Fig. 4의 경우에 추가적으로 시멘트가 더해진 시멘트-벤토나이트 혼합토의 시험 결과를 나타낸다.

시멘트를 혼합하지 않은 벤토나이트 혼합토의 경우 3일 강도 대비 7일 및 28일 강도는 3.78배 및 8.8배로 기록되어 혼합토의 강도 증진이 재령 28일까지 지속적으로 증가하는 경향을 나타내

(a) 0 curing days

(a) 0 curing days

(b) 3 curing days

(b) 3 curing days

(c) 7 curing days

(c) 7 curing days

(d) 28 curing days

(d) 28 curing days

Fig. 4 Compressive strength of Bentonite-Soil mixtures with Fiber

Fig. 5 Compressive strength of Bentonite-Cement-Soil mixtures with Fiber

었다. 시멘트-벤토나이트 혼합토의 경우는 3일 강도를 기준으로 하여 재령 7일 및 28일 강도는 1.29배 및 1.85배 증가하였고 시멘트를 혼합하지 않은 경우에 비해 2~3배 이상의 높은 강도를 갖음을 알 수 있다. 이와 같은 강도의 증가는 시멘트의 포졸란 반응과 벤토나이트의 팽창성으로 혼합토가 보다 밀실해져 강도가 증가한 것으로 보이며, 재령이 경과할수록 이러한 반응이 지속되는 한 강도는 증가 경향을 나타낼 것으로 판단된다.

재령 0일의 벤토나이트 0 %와 비교하면 벤토나이트 5~20 %를 첨가하였을 때 강도 값이 1.15~1.79배 증가되는 경향을 나타내었다. 재령 3일, 7일 및 28일에서도 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 강도가 증가하고 있으나 혼입률이 10 %를 초과하면서 부터는 강도가 감소하였다. 이러한 경향은 특히 시멘트를 첨가하였을 때 뚜렷이 나타났고 시멘트-벤토나이트 혼합토의 재령 28일에서 벤토나이트 15 % 이상 혼합시 강도가 크게 감소하였다. 벤토나이트 혼합토가 압축강도가 높게 나타나는 원인은 혼합토에 많은 모래질이 함유되어 있고 여기에 벤토나이트가 첨가됨으로서 사질토의 간극을 채워 높은 점성이 이들 간의 점착력 증가로 이어져서 강도가 증가하는 것으로 보인다.

Fig. 4~5에서 섬유 혼입률이 증가함에 따라 강도가 일정수준까지 증가하다 감소하는 경향을 나타냈으며, 섬유 1 % 첨가시 전 반적으로 가장 높은 강도 값을 기록하였다. 시멘트를 넣지 않은 경우보다 시멘트 10 % 혼합시 섬유 혼합에 따른 강도 증진 효과는 탁월하였는데, 섬유 1 % 혼합비에서 압축강도는 1.7배 정도 차이를 나타내었다.

최대 강도를 기록한 벤토나이트 10 %, 섬유 1 %에서 0일 강도를 기준으로 3, 7일 및 28일 강도는 5.5배, 14.8배 및 40.5배의 강도 증가를 나타내었다. 또한 재령 28일에서는 토목섬유를 첨가하지 않은 경우에 비해 토목섬유 0.5, 1, 1.5, 2 % 첨가한 경우 강도 증진 효과는 1.06, 1.38, 1.12, 1.08배를 기록하여 토목섬유 1 % 첨가시 강도 증진 효과가 탁월하였다.

시멘트-벤토나이트 혼합토에 토목섬유 추가에 따른 연구 결과는 국내·외에서 찾기 힘들지만 섬유 혼합토에 대한 연구는 많은 편으로 Prabaker et al. (2002) 및 Park et al. (2003)에 따르면 섬유 보강은 모래질 흙의 압축강도 개선에 탁월하나, 섬유재의 함유량이 어느 적정 값을 넘어서게 되면 내부마찰각의 감소로 인해 흙과 섬유재의 interlocking이 감소하여 강도가 저하하게 된다. Cho and Kim (1995)은 섬유혼합 보강토에서 섬유함량이 증가될수록 일축압축강도는 지속적으로 증가되나 섬유함량이 1~2 % 이상이 되면 혼합된 섬유의 양이 많아 섬유의 엉킴 현상이 점점 심해지며, 섬유와 흙의 마찰력에 의한 전단특성 보다는 흙을 포함한 섬유들의 엉켜진 형태의 전단특성이 나타나기 때문에 강도 증가율이 점차 감소하는 경향을 보인다고 하였다. 본 연구는 시멘트-벤토나이트 혼합토에 토목섬유를 추가한 경우로서

Prabaker et al. (2002), Park et al. (2003), Cho and Kim (1995)의 연구와는 재료적 측면에서 차이가 있다. 토목섬유를 보강재로 활용한 측면은 유사한 것으로 볼 수 있으며 압축강도 시험에서도 섬유 혼합비가 1 % 이상일 때 섬유의 엉킴 현상으로 인하여 강도 저하 현상이 발생하는 유사한 결과를 얻었다. 따라서 현장에서 섬유 혼합토를 활용할 경우 1 % 이하로 적용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

나. 메타카올린 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토의 강도 특성

Fig. 6 및 7은 메타카올린 혼입에 따른 벤토나이트 혼합토 및 시멘트-벤토나이트 혼합토의 0, 3, 7 및 28일 강도를 나타낸다. 시멘트를 혼합하지 않은 벤토나이트 혼합토의 경우 3일 강도를 기준으로 7일 및 28일 강도는 3.78~8.8배 증가하였으나 시멘트를 혼합한 시멘트-벤토나이트 혼합토에서는 1.37~1.97배를 기록하였다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 벤토나이트 혼합토의 강도는 시멘트를 첨가하였을 때 시멘트와 메타카올린의 포졸란 반응으로 인해 강도가 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 재령 초기의 압축강도는 메타카올린을 혼합함으로써 시멘트량이 상대적으로 적고 메타카올린의 활성반응이 진행되지 않았기 때문에 강도는 크지 않으나, 재령 3일 이후의 압축강도는 메타카올린의 잠재수경성과 포졸란 반응에 의해 강도발현이 크게 증가되는 것을 알 수 있다 (Moon et al., 2005).

벤토나이트 혼입량 증가에 따른 경향은 섬유 혼입에 따른 결과와 비슷한 것으로 판단된다. 재령 0일의 경우 메타카올린 및 시멘트의 포졸란 반응이 일어나지 않아 강도변화가 없는 것으로 보이나 재령 3일이 되면 벤토나이트 혼합비 10 %에서 강도가 크게 증가되고, 전체적으로 높은 강도의 증진을 나타내며, 시멘트-벤토나이트 혼합토는 벤토나이트 혼합토 보다 약 2.5~4.7배 높게 나타났다.

메타카올린 혼입량에 따른 강도 변화는 재령 3일 이후 모든 배합에서 메타카올린 10 %를 혼입하였을 때 최대의 강도를 나타내었다. Fig. 7에서 살펴보면 메타카올린 첨가로 인한 강도의 증진을 확인할 수 있는데, 특히 재령 28일에서 메타카올린을 첨가하지 않은 혼합비 0 %에 비해 혼합비 5, 10, 15, 20 %의 강도 증가는 각각 1.13, 1.36, 1.26, 1.09배를 나타내었다. 이것은 메타카올린과 시멘트가 서로 반응하여 포졸란 반응이 활발히 일어난 결과로 보여진다.

메타카올린은 시멘트에 비하여 CaO 가 적고 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 가 주 성분으로 시멘트 수화생성물인 수산화칼슘과 반응하여 칼슘실리케이트 및 칼슘알루미네이트 수화물을 생성시키는데, 메타카올린의 분말도가 시멘트에 비해 큰 값이므로 시멘트 입자사이를 채워주는 마이크로 필러 효과로 인해 강도가 증가한 것으로

(a) 0 curing days

(a) 0 curing days

(b) 3 curing days

(b) 3 curing days

(c) 7 curing days

(c) 7 curing days

(d) 28 curing days

(d) 28 curing days

Fig. 6 Compressive strength of Bentonite-Soil mixtures with Metakaolin

Fig. 7 Compressive strength of Bentonite-Cement-Soil mixtures with Metakaolin

(a) Fiber mixed

(b) Metakaolin mixed

Fig. 8 Compressive strength characteristics of cement-bentonite soil mixtures

사료된다.

Fig. 4~7에서 토목섬유 및 메타카올린 보다 벤토나이트의 함량이 강도에 큰 영향을 주었으며, 시멘트를 첨가함으로써 보다 큰 강도의 증진이 이루어진 것으로 보인다.

토목섬유 첨가시와 메타카올린 첨가시의 시멘트-벤토나이트 혼합토의 강도를 비교했을 때 메타카올린 첨가시 강도가 조금 크게 나타나는데, 이는 메타카올린의 분말도가 풍화토 및 벤토나이트에 비해 큰 값이므로 혼합토의 입자사이를 밀실하게 하여 토목섬유 첨가시에 비해 강도가 크게 나타난 것으로 보인다.

Fig. 8(a)는 토목섬유 첨가시 시멘트-벤토나이트 혼합토의 강도특성을 나타내며, 토목섬유 보강으로 인해 공시체의 연성이 증가하여 최대강도 이후의 거동특성이 취성적인 파괴거동을 감소시키며 연성파괴 양상을 보였고, 파괴점 또한 명확히 나타나지 않았다.

Fig. 8(b)는 메타카올린 첨가시 시멘트-벤토나이트 혼합토의 메타카올린 혼입율에 따른 강도특성을 보여주며, 메타카올린 혼

(a) Fiber

(b) Metakaolin

Fig. 9 Failure modes of the bentonite-cement-soil mixtures

합시 파괴점은 토목섬유 첨가시에 비해 높으며, 강도 증가 경향이 나타났다. Fig. 8(b)에서 보는 바와 같이 메타카올린 첨가 시 시멘트-벤토나이트 혼합토는 최대 일축압축 강도를 넘었을 때 취성파괴 경향을 보였다.

Fig. 9는 토목섬유 혼합 시와 메타카올린 혼합 시 시멘트-벤토나이트 혼합토의 파괴 형상을 보여준다. Fig. 9(a)는 섬유의 혼입으로 인하여 미세균열의 수가 많아져 강도의 분산이 나타났고 파단면 또한 섬유의 혼입으로 인하여 공시체 내부에서 변형 및 압축강도 등에 대한 개선효과가 있는 것으로 판단된다. Fig. 9(b)는 강도에 큰 영향을 미칠 수 있는 균열이 상단부터 하단까지 직선형으로 발생하면서 파괴되었다.

Fig. 9(a)에서 토목섬유 보강으로 인해 최대 일축압축 강도에서의 변형률이 증가하였으며, 단섬유가 파괴과정에서 변형 및 압축강도의 증가에 기여하는 효과가 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 9(b)에서 상·하단 직선형의 일정 크기 이상의 종방향 균열은 취성파괴와 관련이 있는 것으로 판단된다.

2. 투수특성

일축압축강도 시험 결과를 토대로 최적의 배합비로 판단되는 벤토나이트 10 %, 시멘트 10 %, 풍화토 80 %의 혼합토에 시멘트 중량의 10 %에 해당하는 만큼 메타카올린을 첨가하여 메타카올린 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토에 대한 투수시험을 수행하였다. 또한 벤토나이트 10 %, 시멘트 10 %, 풍화토 80 %의 혼합토에 혼합토 총 중량의 1 %에 해당하는 토목섬유를 첨가하여 토목섬유 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토에 대한 투수시험을

Table 6 The permeability characteristics of soil mixtures

Case	Cement-bentonite soil mixture with geosynthetics		Cement-bentonite soil mixture with metakaolin	
	0	10	0	10
Cement (%)				
Permeability (cm/sec)	1.14E-7	9.93E-8	7.8E-8	6.32E-8

수행하였다. Table 6은 토목섬유 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토 및 메타카올린 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토의 28일 후의 투수계수를 나타낸 것이다.

국내 폐기물관리법 시행규칙 제 35조 (폐기물 처리시설의 설치기준)에 의하면, 고밀도폴리에틸렌이나 이에 준하는 재질의 토목합성수지 라이너를 사용하는 경우 토목합성수지 라이너 하부에는 점토 및 점토광물 혼합토 등을 다져 투수계수가 1×10^{-7} cm/sec가 되도록 점토 및 벤토나이트 등의 차수재를 두께가 50 cm 이상 (지정폐기물을 매립하는 경우에는 1미터 이상)인 라이너를 설치할 것으로 규정하고 있다.

본 연구에서의 변수위 투수시험 결과에 따르면 메타카올린 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토는 폐기물 관리법에서 지정하는 투수계수를 만족하였으며 특히 KS F 2322 (변수위 투수시험)에 준하여 시험을 수행하였으므로 차수재의 두께가 12.7 cm이며, 이는 폐기물 처리시설의 설치기준인 차수재의 두께 50 cm 보다 작아 경제성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다. 다만, 적용 가능성 등에 대해서는 현장시험 등 추가적인 연구를 수행한 후 최종적인 판단을 내릴 수 있을 것으로 사료된다.

토목섬유 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토는 시멘트 혼합비 10 % 일 때에는 폐기물 관리법에서 지정하는 투수계수를 만족하였으며, 시멘트를 혼합하지 않은 경우도 실험오차를 고려할 때 폐기물 처리시설의 설치기준을 거의 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 현장에서 벤토나이트 혼합토를 차수재로 사용할 경우에는 토사 중량의 10 % 내외의 시멘트를 적정량을 혼합하여 사용하는 것이 차수성 개선에 도움이 될 것으로 판단된다.

본 투수시험 결과 메타카올린 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토는 메타카올린 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토 보다 투수계수가 낮아 시멘트-벤토나이트 혼합토에 메타카올린을 첨가하는 경우 차수성 증진 효과를 기대할 수 있는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구는 가축매몰지 침출수 대책공법으로 토목섬유 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토 및 메타카올린 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토를 활용하기 위한 기초적 연구로서 혼합토의 일축압축강도 및 투수 특성을 비교 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 시멘트-벤토나이트 혼합토에 혼합토 총 중량의 0, 0.5, 1, 1.5, 2 %에 해당하는 만큼 토목섬유를 첨가하여 압축강도를 측정한 결과, 토목섬유를 첨가하지 않은 0 %에 비해 1.06, 1.38, 1.12, 1.08배 강도 증진 효과를 나타내었고, 토목섬유 혼합비 1 %에서 최대강도를 나타내어 시멘트-벤토나이트 혼합토에 토목섬유를 첨가할 경우 혼합토 총 중량의 1 %가 적절한 혼합비로 판단된다.

2. 시멘트-벤토나이트 혼합토에 시멘트 중량의 0, 5, 10, 15, 20 %에 해당하는 만큼 메타카올린을 첨가하여 압축강도를 측정한 결과, 메타카올린을 첨가하지 않은 0 %에 비해 1.13, 1.36, 1.26, 1.09배 강도 증진 효과를 나타내었고, 메타카올린 혼합비 10 %에서 최대강도를 나타내어 시멘트-벤토나이트 혼합토에 메타카올린을 첨가할 경우 시멘트 중량의 10 %가 적절한 혼합비로 판단된다.

3. 시멘트-벤토나이트 혼합토는 섬유 혼합에 따라 취성적인 파괴거동이 연성적으로 바뀌었으며, 섬유혼입으로 인해 공시체 내부의 변형에 대한 개선효과가 있는 것으로 판단된다.

4. 시멘트 및 벤토나이트 10 %, 풍화토 80 %의 혼합토에 시멘트 중량의 10 %에 해당하는 메타카올린을 첨가한 경우 및 시멘트 및 벤토나이트 10 %, 풍화토 80 %의 혼합토에 혼합토 총 중량의 1 %에 해당하는 토목섬유를 첨가한 경우에 대한 투수시험 결과, 폐기물관리법에서 지정하는 투수계수를 만족하고 차수재의 두께도 얇아 경제적이므로 현장에서도 이러한 배합비를 준용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

본 연구에서 다루지 못한 토목섬유 및 메타카올린 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토의 인장강도 특성, 미세구조 특성 및 현장 적용 가능성 등에 대해서는 현장시험을 포함한 추가적인 연구를 통해 심도 있는 검토를 수행할 계획이다.

본 연구는 농림수산식품기술기획평가원 생명산업기술개발사업 (과제번호: 111112-1) 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Auvinet, G. Y., and G. Hiriart, 1980. An Artificial Cooling Pond for the Rio Escondido Coal Fired Power Plant. Proceedings, ASCE Symposium on Surface Water Impoundments, Minneapolis 2: 1089-1098.
2. Choi, M. K., B. S. Beum, and Y. M. Kim, 2012. Reinforced Effect of Staple Fiber for Soil-Waste Stone Sluge. *Korean Geo-Environmental Society* 13(8): 45-55

- (in Korean).
3. Consoli, N. C., M. A. Vendruscolo, and F. D. Rosa, 2009. Fiber Reinforcement Effects on Sand Considering a Wide Cementation Range. *Geotextiles and Geomembranes* 27(3): 196-203.
 4. Chapuis, R. P., 1981. Permeability Testing of Soil-Bentonite Mixtures, Proceedings. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, *Stockholm* 4: 744-745.
 5. Cho, S. D., and J. M. Kim, 1995. The Experimental Study on Engineering Properties of Fiber-Reinforced Soil. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 11 (2): 107-120 (in Korean).
 6. Headquarter for disaster and safety countermeasures, 2011. Disaster Prevention Report. 1-4.
 7. Kim, C. K., S. H. Jung, J. C. Kim, W. K. Park, and W. B. Cho, 2008. A Study on the Use of Soil Sealant of Stone Sludge Mixing Soil. *2003 Geosynthetics Conference* 2008(10): 2211-2214 (in Korean).
 8. Kim, D. M., and K. Y. Kim, 2006. An Engineering Characteristics of Weathered Granite Soil-Bentonite Mixtures. *Korean Geo-Environmental Society* 7(6): 45-56 (in Korean).
 9. Kim, S. M., H. E. Youm, and N. W. Lim, 2000. Effect of Bentonite and Cement on Permeability and Compressive Strength of the Compacted Soil Liner. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 22(3): 498-504 (in Korean).
 10. Lundgren, T. A., 1981. Some Bentonite Sealants in Soil Mixed Blankets. Proceedings. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, *Stockholm* 2: 349-354.
 11. Moon, D. J., J. E. Ju, J. H. Jo, H. J. Kang, and Y. W. Choi, 2005. Strength Properties of Mortar Containing Metakaolin. *Korea Concrete Institute Conference* 17(1): 639-642 (in Korean).
 12. Prabaker, J., and R. S. Sridhar, 2002. Effect of Random Inclusion of Sisal Fiber on Strength behaviour of Soil. *Construction and Building Materials* 16: 123-131.
 13. Park, S. S., Y. S. Kim, S. G. Choi, and S. E. Shin, 2008. Unconfined Compressive Strength of Cemented Sand Reinforced with Short Fibers. *The KSCE Journal of Civil Engineering* 28(4C): 213-220 (in Korean).
 14. Park, Y. K., K. S. Cha, and P. W. Chang, 2003. Effect of Short-Fiber Reinforcement on the Unconfined Compressive Strength of Soil. *The Spring 2003 Geosynthetics Conference* 2003(4): 187-193 (in Korean).
 15. Ramezaniapour, A. A., and H. B. Jovein, 2012. Influence of Metakaolin as Supplementary Cementing Material on Strength and Durability of Concretes. *Construction and Building Materials* 30: 470-479.
 16. Yeo, D. K., N. W. Kim, J. H. Song, and J. S. Bae, 2006. A Study on the Pore Structure and Compressive Strength of Concrete Using Metakaolin. *The KSCE Journal of Civil Engineering* 26(5): 927-934 (in Korean).