

유동성 뒷채움재로 사용하기 위한 플라이애쉬-폐주물사 혼합재료의 특성 연구 Engineering Properties of Fly Ash-WFS Mixed Materials as a Flowable Backfill

이관호¹⁾, Kwan-ho Lee, 이인모²⁾, In-mo Lee, 조재윤³⁾, Jae-yun Cho, 윤여준⁴⁾, Yea-joon Yoon

¹⁾ 경성대학교 건설환경공학부 조교수, Assitant Professor, Dept. of Civil Engrg., Kyung Sung Univ.

²⁾ 고려대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Korea Univ.

³⁾ 동의 공업대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., Dongui Univ.

⁴⁾ (주)청석 엔지니어링 사원, Engineer, Chung-Suk Engineering Co., Ltd.

SYNOPSIS : The objective of this study is to present engineering properties required in use of co-mixtures of fly ash and WFS(Waste Foundry Sand)'s, which are presently used as fill or flowable backfill. The fly ash, generated at the Tae-An thermoelectric power plant, was used in this research and was classified as Class F. Green Sand, Furane Sand, and Coated Sand, which had been used at a foundry located in Pusan, were used. Laboratory experiments were performed to obtain the physical properties of the co-mixture of fly ash and WFS. The range of permeability for all the co-mixtures was from 3.0×10^{-3} cm/s to 6.0×10^{-5} cm/s. The unconfined strength of the 7-day cured specimens composed of Green Sand reached 94% of that of 28-day cured specimens but for the 7-day cured specimens composed of, respectively, Furane Sand and Coated Sand, only 64% and 66% of the strength of the 28-day cured specimens were reached. Results of the consolidated-undrained triaxial test showed that the specimens composed of Furane Sand showed a distinct increase of the internal friction angle, while the other specimens showed negligible increase. In the case of 28-day cured specimens, specimens composed of Furane Sand showed an internal friction angle of 41.8° , while specimens of Green and Coated Sand showed those of 33.5° and 35.0° , respectively. From the shrinkage test, the shrinkage ratios of all specimens did not exceed 0.25%.

Key words : controlled low-strength material(CLSM), fly-ash, flowable backfill, waste foundry sand

1. 서론

산업폐기물 중 플라이애쉬는 석탄을 연료로 쓰고 있는 화력발전소들로부터 연간 200만 톤 이상 발생되나 이중 15%정도만이 콘크리트 혼화재, 시멘트 원료, 벽돌이나 기와 제조 등의 한정된 분야에 활용되고 있을 뿐이다. 나머지 발생량은 대부분 화력발전소에 인접한 매립부지를 조성, 물과 혼합하여 매립하고 있는 실정이다. 또한, 주물단지의 주물공장들은 주물공정의 부산물인 폐주물사(Waste Foundry Sand, WFS)의 처리시 주물사의 초기 구입비와 비슷한 부산물 처리 비용을 지출하고 있고, 이로 인해 제품의 경쟁력이 저하되고 있는 실정이므로, 이의 적절한 처리 및 재활용 방법의 개발이 시급하다.

기존의 뒷채움재는 다짐을 통해 적절한 밀도 및 강도를 얻는데 반해, 본 연구에 이용된 시료는 시공 초기에는 self-leveling(유동성) 특성을 보이고, 시간에 따라 강도가 발현되는 CLSM 특성을 지반공학 구조물에 적용하는 것이다. CLSM의 뒷채움재 적용시 다짐이 필요하지 않고, 따라서 옹벽 시공시 다짐으로 인해 발생하는 토압문제와 지하매설물 시공시 원형매설관 주변 및 하부의 부적절한 다짐으로 인해 발생하는 문제 등을 해결할 수 있다. 이에 본 연구에서는 플라이애쉬 및 폐주물사를 옹벽 및 지하매설물 뒷채움재로 사용하기 위한 적절한 배합비 및 이에 대한 기본물성치를 제시하고자 한다. 또한, 모형 및 현장시험을 통해 유동성 뒷채움재의 현장 적용성을 추후에 제시하고자 한다.

2. 시험시료 및 시료배합비 결정

2.1 시험시료

2.1.1 플라이애쉬

본 연구에서 사용된 플라이애쉬는 태안화력발전소에서 발생한 것이며, 시멘트에 혼합하기 위해 정제하기 바로 전 단계의 것으로 그 화학적 조성은 [표 1]과 같다. 본 플라이애쉬는 Class F에 해당하며, 비중은 2.17이다.

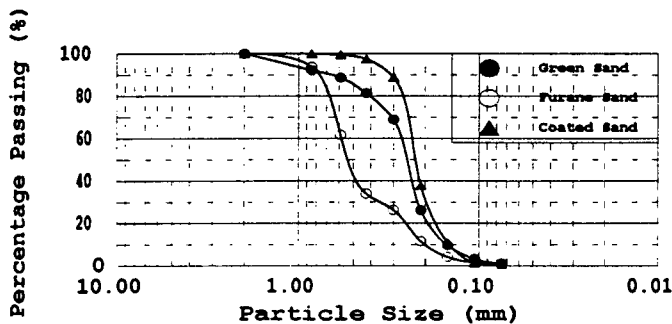
2.1.2 폐주물사

본 연구에서 사용된 폐주물사의 종류는 생형사(Green Sand), 후란사(Furane Sand), 코티드사(Coated Sand)로 주형 및 사용된 점결제에 따라 분류된다. 생형사는 벤토나이트와 물이 점결제로서 사용된 주물사이며, 후란사는 유기물질, Coated Sand는 무기물질이 점결제로서 사용된 주물사이다. 각 폐주물사 종류에 따른 입도분포는 [그림 1]에 나타내었다. 비중시험결과 각 폐주물사의 비중은 생형사는 2.3772, 후란사는 2.4587, 그리고 코티드사는 2.4239로 나타났다. 폐주물사의 XRF(X-ray Refraction) 결과는 [표 1]과 같다. [표 1]을 보면, 원재료가 모래인 만큼 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃가 90%이상 차지함을 볼 수 있으며, 특히 코티드사의 경우 페놀 수지 등으로 코팅되어 있으므로, 시험 준비중에 손실되는 양이 상대적으로 많음을 알 수 있다.

[표 1] 플라이애쉬 및 각 폐주물사의 화학적 조성

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	L.O.I.
플라이애쉬	60.33	24.78	3.82	1.06	0.00	2.39	0.84	0.86	0.59	0.50	4.84
생형사	80.74	7.92	2.75	0.22	0.00	0.71	0.48	2.27	1.43	0.02	3.46
후란사	87.04	5.45	0.91	0.19	0.00	0.19	0.04	2.67	0.66	0.01	2.85
코티드사	81.50	5.31	1.41	0.08	0.00	0.16	0.00	2.91	0.59	0.01	8.01

※ L.O.I. : Loss On Ignition



[그림 1] 각 폐주물사의 입도분포

[표 2] 각 폐주물사의 입도분포에 따른 분류

구분	생형사	후란사	코티드사
D ₁₀	0.14	0.20	0.14
D ₃₀	0.21	0.34	0.20
D ₆₀	0.25	0.57	0.22
C _u (균등계수)	1.79	2.85	1.57
C _c (곡률계수)	1.26	1.01	1.30
분류	Poorly graded	Gap graded	Poorly graded

2.1.3 시멘트

본 연구에서 사용된 시멘트는 KSL 5201에서 규정한 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

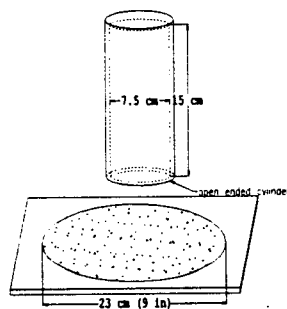
2.2 시료의 배합방법

본 연구의 실험을 위한 시료의 배합비는 다음과 같은 과정을 통하여 결정되며, 시험 전체에 걸쳐 폐

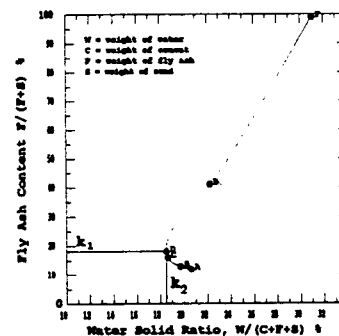
주물사는 1일 노건조한 후 사용하여 폐주물사의 함수비의 차이로 인한 시험오차를 줄이도록 하였다. 유동성 옹벽 뒷채움재를 쓸 경우 500~700 kPa의 일축압축강도를 가지도록 하는 것이 일반적이며, Janardhanam(1992), Naik(1997)의 경우 690 kPa (100 psi), 일본의 Hakucho Ohashi (Muroran Bay Bridge) Project의 시행 중에 발표된 Horiuchi(1992), Kawasaki(1992)의 연구에서는 200 kPa로 시료의 목표강도를 잡았다. 본 연구에서는 시료의 목표강도를 550kPa으로 정하여, 시멘트양이 되도록 적게 포함 되도록 하여, 비용이 적게 들도록 하였다.

2.2.1 Flow Test

본 연구에서는 Nantung(1993)이 제안한 시험방법을 이용하였다. [그림 2]에서 보는 바와 같이 ϕ 7.6cm×15.2cm(3in×6in)의 한쪽이 개방된 실린더에 시료를 그 표면이 편평하도록 완전히 채운 후, 표면이 매끄러운 유리판에 위에 부어, 퍼진 재료의 지름이 20~30cm를 만족하는 배합비를 결정하였다. 부은 시료의 퍼진 정도는 시공 초기에 시료가 자기수평능력(Self-Leveling) 및 적절한 유동성을 갖게 하는 중요한 특성치이다. 본 연구에서 실시한 방법은 초기에 시멘트와 폐주물사의 양을 고정시키고, 물과 Fly Ash의 양을 번갈아 늘리면서 퍼짐 특성이 20~23cm를 만족하는 점들을 구하여, [그림 3]과 같은 곡선을 얻었다. 특히, 시공초기에 시료의 흐름특성을 결정하는 입자크기가 매우 세밀하고 등근 Fly Ash의 영향을 고려하여야만 한다.



[그림 2] Flow Test용 몰드



[그림 3] PMWD의 결정

2.2.2 배합비의 결정

[그림 3]의 플로우곡선은 흐름시험시 약 20~23cm 정도의 동일한 흐름특성을 보여주고, D점은 최소 수량요건을 만족하는 점으로 매우 중요한 의미를 갖게 된다. 이러한 점을 PMWD(Point of Minimum Water Demand)라 하며 주어진 폐주물사와 플라이애쉬의 조합에 대해서 최소한의 흐름 특성을 만족시키는 최소 수량(水量)을 나타낸다. 이러한 PMWD는 재료의 공극이 최소가 되도록 최소의 물-재료비 (Water-Solid Ratio)를 나타내며, 재료가 동질성(Homogeneity)을 나타내면서도 분리(Segregation)가 일어나지 않도록 하는 점이다. 흐름특성을 플라이애쉬의 양으로 조절할 수도 있으나, 플라이애쉬의 양이 지나치게 많아지게 되면, 재료의 점성이 매우 커져 배합하는데 시간이 오래 소요되는 단점이 있다.

Flow Test의 결과로서 k_1 , k_2 , k_3 를 [식 1], [식 2], [식 3]으로부터 얻게 된다.

$$k_1 = \frac{F}{(F+S)} \quad (1)$$

$$k_2 = \frac{W}{(C+F+S)} \quad (2)$$

$$k_3 = \frac{W}{C} \quad (3)$$

여기서, F = 단위부피당 플라이애쉬의 무게 (kg/m^3)

S = 단위부피당 모래의 무게 (kg/m^3)

W = 단위부피당 물의 무게 (kg/m^3)

C = 단위부피당 시멘트의 무게 (kg/m^3)

뒷채움재 내에 존재하는 공기의 양이 무시할 수 있을 정도로 적다고 가정할 때, 각 재료의 부피의 합은 단위 부피(1m³)가 되게 된다.

$$\frac{W}{1000G_W} + \frac{F}{1000G_F} + \frac{S}{1000G_S} + \frac{C}{1000G_C} = 1 \quad (4)$$

여기서, G_W = 물의 비중 (= 1)
 G_F = 플라이애쉬의 비중
 G_S = 모래의 비중
 G_C = 시멘트의 비중

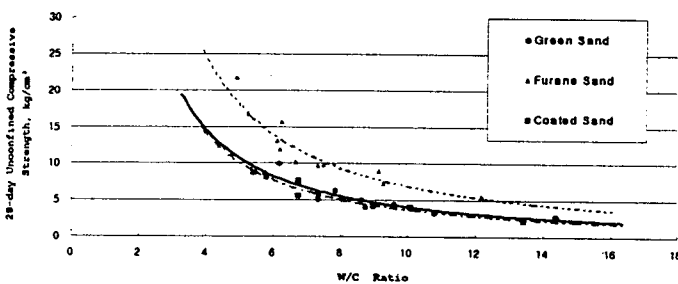
[식 1], [식 2], [식 3]으로부터 S와 W에 관한 [식 5], [식 6]를 구할 수 있다.

$$S = \frac{F(1-k_1)}{k_1} \quad (5) \quad W = \frac{F}{\left(\frac{k_1}{k_2} - \frac{k_1}{k_3}\right)} \quad (6)$$

[식 4]는 [식 3], [식 5], [식 6]을 이용하여 k₁, k₂, k₃와 각 재료의 비중값으로 F를 표현할 수 있다.

$$F = 1000 / \left\{ \frac{k_2(k_3G_C+1)}{k_1G_C(k_3-k_2)} + \frac{1}{G_F} + \frac{1-k_1}{k_1} \times \frac{1}{G_S} \right\} \quad (7)$$

Flow Test와 일축압축시험결과로 물시멘트비와 일축압축강도간의 관계를 얻을 수 있다. 이로부터, 고정된 일축압축강도에 해당하는 물시멘트비를 얻을 수 있으며, [식 5], [식 6], [식 7]을 이용하여 k₁, k₂, k₃를 얻을 수 있다. [그림 4] 및 [표 3]은 조재운(1999)의 실험결과로부터 얻은 그래프와 그 것을 f(x)=a·x^b의 형태의 식으로 나타낸 값으로 여기서 물시멘트비의 상·하한치는 시료의 강도가 최소 550kPa, 최대 1035kPa을 갖도록 하는 경계값이다.



[그림 4] 물시멘트비와 일축압축강도(28일)의 관계

[표 3] 각 폐주물사에 따른 파라미터

	생형사	후란사	코티드사
k ₁	0.111	0.216	0.209
k ₂	0.319	0.240	0.281
k ₃	5.11	7.44	4.91
G _F	2.17	2.17	2.17
G _C	3.15	3.15	3.15
G _S	2.3772	2.4587	2.4239

3. 시험방법

3.1 시험 시료의 제작

투수시험, 일축압축시험, 삼축압축시험을 시행하기 위하여 본 연구에서는 지름이 5cm이고, 길이가 15cm가 되도록 몰드를 제작하였다. 그러나, 시료를 몰드에서 벗겨내는 과정에서 양단부가 불가피하게 깨지게 되므로, 이에 대한 성형이 필요하며 따라서 실제길이는 12.5cm 내외가 되도록 하였다. 주물공장 에서 바로 배출되는 폐주물사에는 잔류된 주물조각들이 섞여 있고, 주물과정에서 생긴 이물질이 함유되

어 있어, 시험 시 시료의 일관성을 유지하기 위하여 No.10(2mm)체에 걸러 하루를 건조기에서 건조시킨 후에 배합하였다. 그리고, 몰드에 모르타르를 붓고 1~2일이 지나면 자립할 수 있을 정도로 경화되므로, 몰드를 떼어낸 후 양생시켰다.

[표 4] 각 폐주물사에 따른 중량 성분비(φ5cm×15cm mold)

	생형사		후란사		코티드사	
	Weight (g)	Percentage (%)	Weight (g)	Percentage (%)	Weight (g)	Percentage (%)
Fly ash	42.43	8.1	94.95	17.1	84.70	15.7
WFS	339.84	64.7	344.63	61.9	320.55	59.5
Water	126.99	24.2	107.69	19.4	118.27	21.9
Cement	15.81	3.0	9.15	1.6	15.65	2.9
Total	525.07	100.0	556.42	100.0	539.17	100.0

3.2 투수시험 방법

사용한 장비는 Trautwein Soil Testing Equipment사의 제어 패널(Control Panel)과 Flexible-Wall Permeameter를 사용하였다. 본 투수시험은 변수두 시험(Falling Head Test)으로 실시하였다. 시료를 포화시키는 방법은 먼저 시료에 진공압을 가하여 시료로부터 최대한 공기를 제거한 후 천천히 물을 주입하여 포화시키는 방법을 사용하였다. 화강풍화토나 실트 입경의 일반 흙과 비슷한 $(1.092 \sim 2.192) \times 10^{-5}$ cm/sec의 투수계수를 가지는 시료를 이용한 투수계수 시험시 가할 수 있는 동수경사는 ASTM(1993) 시방서 기준에 따라 최대 5를 이용하였고, 이에 대한 추가 수두로서 입수측에 4kPa의 압력을 가하였다.

3.3 일축압축시험 방법

사용장비는 일본 Marui사에서 생산된 Unconfined Compression Apparatus를 사용하였다. Head(1982)가 제안한, 지름 5cm인 시료에 대하여 일반적인 압축속도는 2mm/min, 즉 분당 1.6%정도의 변형율로 압축시험을 수행하였다.

3.4 삼축압축시험 방법

본 시험에 사용된 장비는 C. K. Chan 등(1981, 1990)에 의해 개발된 자동 삼축압축시험기(The Automated Triaxial Testing System; C.K.C Type)를 사용하였다. Taylor(1941)가 제안한 방법(시료의 길이가 직경의 2배 이상)을 따라 φ5×12.5cm로 시료를 성형하였으며, 본 시험에서는 시료를 포화시키기 위해서 진공법(Vacuum supply)과 배압법(Back pressure)을 병행하여 사용하였다. 일반적으로 삼축시험에서의 재하율은 전단 전의 압밀 데이터를 기초로 구하게 되어 있으나, 본 시료는 압밀이 발생하지 않으므로 일반적으로 풍화잔적토에서 시행하는 재하율인 0.2%/min으로 압축을 실시하였다. 압밀비배수 시험(CU test)을 실시하였으며, 시료포화 후 전단을 시행하였다.

3.5 수중에서의 팽창 측정 방법

시험시료는 강도시험에서 사용한 몰드를 사용하여 제작하였고, 28일 양생된 공시체를 건조기에서 하루동안 완전히 건조시킨 후, 다시 물을 흡수시켜 팽창시험을 수행하였다.

3.6 양생 중의 수축량 측정 방법

본 시험은 콘크리트 투수시험용인 φ15cm×30cm 몰드를 사용하여 양생 기간 중의 시료의 수축량을 측정하였으며, 시료에서 충분히 물이 빠져나간 후 측정이 가능하므로, 2일 후부터 측정하였다.

4. 시험결과

4.1 투수시험

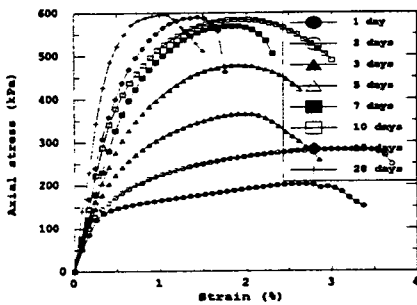
[표 5]을 보면, 생형사와 코티드사에 비해 후란사가 근소한 차이지만 투수계수가 큼을 볼 수 있는데, 후란사는 입자가 다른 폐주물사에 비해 크고 뭉쳐져 있어 배합 시 공극이 많이 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 생형사는 입자가 작고 생형사에 섞여 있는 벤토나이트의 영향으로 비교적 적은 범위의 투수계수를 나타냄을 볼 수 있다.

[표 5] 투수시험결과

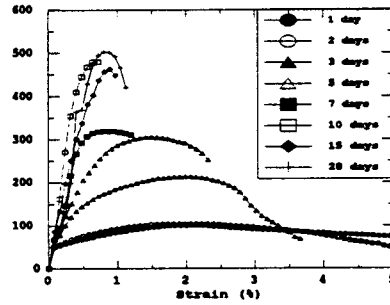
	생형사	후란사	코티드사
투수계수 ($\times 10^{-9}$ cm/s)	3.06 ~ 4.15	4.10 ~ 5.99	3.71 ~ 4.89

4.2 일축압축시험

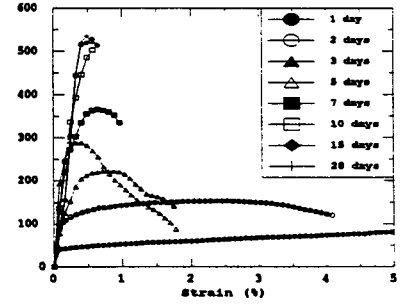
본 시험에서 구한 각 시료의 양생 기간에 따른 변형률-응력 관계를 [그림 6], [그림 7], [그림 8]에 나타내었다. 이 때, 파괴는 시료가 최대압축강도를 나타낼 때로 정의하였으며, 본 시험에서 구한 비배수탄성계수 E_U 값은 각 곡선에서의 Tangent Modulus가 아닌 Secant Modulus로 정의하였다. 점결제로서 벤토나이트가 섞인 생형사 시료가 가장 단시간 내에 자립이 가능하였으며, 시멘트의 배합량이 가장 적고 입자가 큰 후란사 시료가 초기 강도가 가장 늦게 발현되었다.



[그림 5] 변형률-응력의 변화 (생형사)

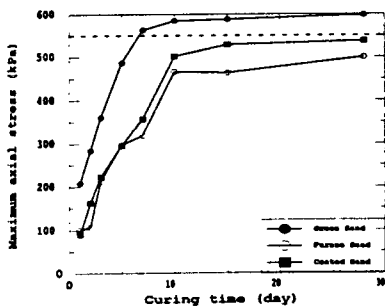


[그림 6] 변형률-응력의 변화 (후란사)

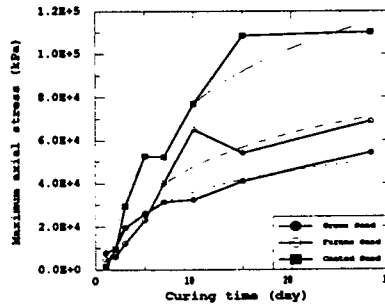


[그림 7] 변형률-응력의 변화 (코티드사)

[그림 5], [그림 6], [그림 7]를 보면, 시료의 압축성이 작은 생형사와 후란사의 경우 변형률 3%이내에서 파괴가 발생하며, 코티드사의 경우는 6%이내에서 파괴가 발생함을 볼 수 있으며, 양생 정도에 따른 파괴상태는 각 폐주물사가 양생기간 2일까지는 연성파괴(Ductile failure)를, 그 이후부터는 취성파괴(Brittle Failure)를 보여주었다. 시험에 이용한 시료의 28일 일축압축강도를 550 kPa를 가지도록 배합하였고, 약 $\pm 9\%$ 정도의 오차 범위내에서 일축압축강도를 보여주었다. 양생기간에 따른 강도증가는 [그림 8]와 같으며, 비배수탄성계수의 변화는 [그림 9]와 같다. [그림 9]는 각 폐주물사 종류에 따른 E_U 값의 변화를 자연로그 추세선을 이용하여 결정하였고, 이에 대한 식을 [표 9]에 나타내었다.



[그림 8] 최대압축응력의 변화



[그림 9] 비배수탄성계수의 변화

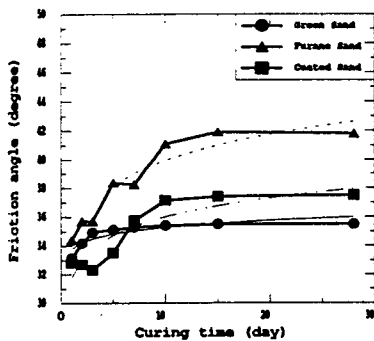
[표 6] 양생기간에 따른 E_U 값을 나타낸 추정식

	추정식 (kPa)	R^2
생형사	$14004 \ln x + 3830.1$	0.86
후란사	$22562 \ln x - 4315.5$	0.88
코티드사	$36886 \ln x - 7984$	0.95

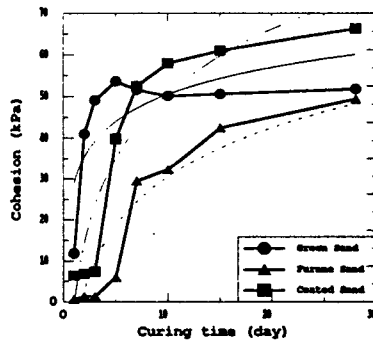
4.3 삼축압축시험

삼축시험에 있어서 파괴의 정의가 중요시되는데, 본 시료의 특성상 각 폐주물사의 경우 일반적으로 양생 3일까지는 변형율이 커짐에 따라 압축응력이 커지는 양상을 나타내나, 그 이후부터는 압축 초기에 최대압축응력을 나타낸 후, 점차적으로 감소하는 양상을 나타낸다. 따라서, σ_1/σ_3 로 파괴를 정의할 경우, 음의 간극수압이 발생하지 않으면서 압축응력이 증가하는 압축초기로 파괴를 정의하게 되므로 시료의 강도를 과소 평가할 우려가 있어, 본 시험에서는 최대압축응력이 발생할 때를 파괴로 정의하였다. 양생기간에 따른 뒷채움재의 응력-변형을 거동을 보기 위해, 강도특성은 Mohr파괴기준에 따라 구하였다. 양생기간에 따른 강도정수의 변화는 [그림 10], [그림 11]에 나타내었으며, 이를 보면 양생기간에 따라 내부 마찰각의 증가는 후란사 시료만이 뚜렷이 증가하는 경향을 보이나 생형사나 코티드사에 대해서는 그리 큰 증가를 보이지는 않았음을 보여 주고 있으며, 전단 시 시료가 파괴되면서 Dilation의 영향이 전단면에 미치지 않음을 보여주고 있다. 또한, 모든 시료가 15일 이후에 일정한 값으로 수렴하므로 수치 해석 시 필요한 강도정수는 이 값들을 사용함이 옳을 것으로 판단된다.

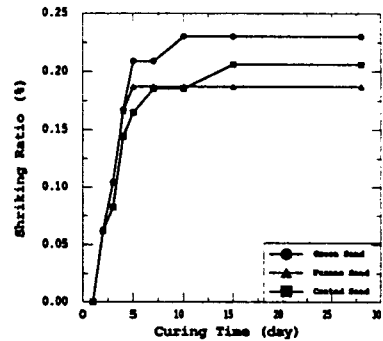
양생기간 15일 이상의 시료파괴 시 주목할 만한 점은 파괴 시 -95 kPa 정도의 큰 음의 간극수압이 발생한다는 점이다. 이는 시료 파괴 시 Dilation에 의한 부피 팽창에 의해 발생한다는 이유보다는 본 시료가 뚜렷한 전단면이 발생하고, 시료가 멤브레인을 밀어내면서 시료 내에 압력이 감소하여 음의 간극수압이 발생했다. 내부 마찰각과는 달리 점착력은 적은 범위에서 증가함을 보이고 있으며, 생형사 시료의 경우 점착력은 2일 이후부터 크게 증가하여 28일 강도의 70%이상을 보이며, 5일 이후에는 거의 증가하지 않는다. 후란사 시료와 코티드사 시료의 경우에는 10일 이후에도 34.6%, 27.5%정도의 점착력이 증가함을 보이고 있다.



[그림 10] 내부마찰각의 변화



[그림 11] 점착력의 변화



[그림 11] 수축율의 변화

5.4 수중에서의 팽창량

28일 양생 시료에 대해서 시행한 본 시험 결과는 먼저 공기 중에서 양생시킨 시료를 건조기에서 건조시킨 후와 이를 수중에 거치시켰을 때의 체원을 측정하여 비교하였으나 거의 팽창·수축이 발생하지 않았다.

5.5 양생시 수축량

수축량의 측정결과는 [그림 11]과 같다. 이 결과에 따르면 양생 5일 동안의 수축량이 28일 양생 중에 발생한 수축량의 80%이상임을 알 수 있다. 특히, 후란사의 경우 5일 이후에 수축이 거의 일어나지 않음을 볼 수 있으며, 모든 시료의 수축량은 시료의 최초길이의 0.25%이하로 발생함을 볼 수 있다.

6. 결론

본 연구는 산업 폐기물인 플라이애쉬 및 폐주물사를 배합하여 옹벽 및 지하매설물의 뒷채움재로 사용하기 위한 강도정수 및 물리적 특성을 구하는 것을 목적으로 하였으며, 실제 현장에서 사용하는 것을 목적으로 하여 양생기간에 따른 재료의 강도증특성을 규명하는데 역점을 두었다.

투수시험 결과, 4×10^{-5} cm/s 정도로 나타났으며, 이는 $1.0 \sim 1 \times 10^{-3}$ cm/s 정도의 투수계수를 갖는 모래와 1×10^{-6} cm/s 정도의 투수계수를 갖는 점토의 중간 정도이다. 일축압축시험 결과, 생형사의 경우 7일 양생 시 최대압축강도가 28일 양생 시 강도의 94%정도이므로 양생 7일이면 목표로 하는 강도가 거의 발현됨을 알 수 있다. 반면, 후란사와 코티드사의 경우 각각 64%, 66%정도를 나타내었으며, 이러한 차이를 나타내는 것은 생형사의 점결제로 사용되는 벤토나이트의 영향이 큰 것으로 판단된다. CIU 삼축 시험 결과, 후란사의 경우에는 일정하게 내부마찰각이 증가하는 양상을 나타내나 나머지 시료에 대해서는 크게 증가하는 양상을 나타내지는 않았다. 28일 양생시료에 대해서 생형사의 경우 33.5° , 후란사의 경우는 41.8° , 그리고 코티드사의 경우는 35.0° 정도를 나타내었다. 점착력은 3일 이후에 큰 증가를 보이는 것으로 나타났다. 수분 흡수 시 팽창은 거의 일어나지 않는 것으로 나타났고, 양생 중 시료의 수축은 0.25% 이내로 매우 적은 양이 발생하며, 따라서 옹벽 뒷채움재로서의 시공후 뒷채움재의 수축으로 인한 문제는 없을 것으로 판단된다. 다만, 구속압력을 가지지 않는 완전 건조된 시료를 물에 갑자기 넣을 경우 시료의 파괴가 일어난다는 점이다. 이는 두 가지 이유로 생각해 볼 수 있다. 첫 번째 이유는 물과 접촉 시 시료 안의 공기가 급속하게 빠져나가면서 시료의 구조를 약화시킬 수 있다는 점이며, 두 번째 이유는 시료 내의 모세관 현상에 의한 물의 급속한 흡수로 인해 입자 사이에 물의 흐름이 발생하면서 순간적으로 점착력이 크게 감소할 수 있다는 점이다. 특히, 이러한 현상은 시료에 구속압력을 가하지 않을 때 발생할 수 있고, 어느 정도의 구속 압력을 가하면서 물로 포화시키는 시험, 즉 삼축압축시험 및 투수시험의 경우는 이러한 현상이 발생하지 않았다는 점에서 옹벽 또는 지하매설물과 같이 구속압력이 존재하는 구조물에서 이러한 문제는 그리 우려할 일이 못된다고 판단된다.

끝으로, CLSM 특성을 이용한 폐주물사-플라이애쉬 혼합물의 유동성 뒷채움재 이용은 버려지는 자원의 재활용뿐만 아니라, 지반공학 구조물에서 부적절한 다짐으로 인해 발생하는 문제를 해결할 수 있는 유용한 재료 및 시공법이 될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 조재윤(1998), 플라이애쉬-폐주물사 혼합재료의 대한 토의
- ASTM (1993), *Soil and Rock*
- Head, K. H (1982), *Manual of soil laboratory testing*, Pentech Press
- Horiuchi, S., Taketsuka, M., Odawara, T., and Kawasaki, H.(1992), "Fly-ash Slurry Island: I. Theoretical and Experimental Investigations", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 4, No. 2, May, pp. 117~133
- Janardhanam, R., Burns, F., and Peindl, R. D. (1992), "Mix design for flowable fly-ash backfill material", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 4, No. 3, August, pp. 252~263
- Naik, T. R., and Singh, S. S. (1997), "Flowable slurry containing foundry sands", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 9, No. 2, May, pp. 93~102
- Nantung, T. E.(1993), "Design Criteria for Controlled Low Strength Materials", Ph. D. Thesis, School of Civil Engrg., Purdue University, Aug., pp 344
- Taylor, D. W.(1941), *Seventh Progress Report on Shear Research to US Engineers*, MIT