

뒤채움재로 사용된 산업폐기물 유동화 처리토의 강도 및 토압특성

Strength and Earth Pressure Characteristics of Industrial Disposal Flowable Filling Materials Utilizing Backfiller

방 성 태[†]

Seongtaek Bang

Received: September 18th, 2020; Revised: October 26th, 2020; Accepted: February 8th, 2021

ABSTRACT : Due to population growth and industrial development, the amount of industrial waste is increasing every year. In particular, in a thermal power plant using finely divided coal, a large amount of coal ash is generated after combustion of the coal. Among them, fly ash is recycled as a raw material for cement production and concrete admixture, but about 20% is not utilized and is landfilled. Due to the continuous reclamation of such a large amount of coal ash, it is required to find a correct treatment and recycling plan for the coal ash due to problems of saturation of the landfill site and environmental damage such as soil and water pollution. In recent years, the use of a fluid embankment material that can exhibit an appropriate strength without requiring a compaction operation is increasing. The fluid embankment material is a stable treated soil formed by mixing solidifying materials such as water and cement with soil, which is the main material, and has high fluidity before hardening, so compaction work is not required. In addition, after hardening, it is used for backfilling or filling in places where compaction is difficult because higher strength and earth pressure reduction effect can be obtained compared to general soil. In this study, the possibility of use of fluidized soil using high water content cohesive soil and coal ash is considered. And it is intended to examine the flow characteristics, strength, and bearing capacity characteristics of the material, and to investigate the effect of reducing the earth pressure when applied to an underground burial.

Keywords : Industrial disposal materials, Coal ash, Fly ash, Flowable filling materials, Earth pressure

요 지 : 인구증가와 산업발달로 산업폐기물의 발생량은 매년 증가하고 있으며, 미분된 석탄을 사용하는 화력발전소에서는 석탄의 연소 후에 많은 양의 석탄회(ash)가 발생된다. 이 중 비산재(fly ash)는 시멘트 제조 원료 및 콘크리트 혼화재 등으로 재활용되고 있으나, 약 20%는 활용되지 못하고 매립되고 있다. 이러한 많은 양의 석탄회가 지속적으로 매립됨으로 인해 매립지의 포화문제와 토양 및 수질오염 등의 환경오염 문제로 석탄회의 올바른 처리와 재활용 방안의 모색이 필요하다. 최근 지하구조물 공사와 고성토부의 교대 뒤채움 공사 등 장소가 협소하여 다짐작업이 어려운 공사가 증가하고 있으며 특히, 복토 및 뒤채움 작업은 굴착과정 중 자연지반의 교란을 수반하기 때문에 복토에 따른 철저한 다짐관리가 구조물과 지반의 안정에 필수적이다. 그러나 배후지반이 협소하거나 적절한 다짐장비의 부족, 과다짐으로 인한 구조물의 손상 등의 문제로 인하여 다짐관리가 어려운 실정이다. 따라서, 최근에는 다짐작업이 필요하지 않으면서도 적절한 강도를 발휘할 수 있는 유동성 성토재료의 사용이 증가하고 있다. 유동성 성토재료는 주재료인 토사에 물과 시멘트 등의 고화재를 혼합하여 조성된 안정처리토로서 경화되기 전에는 높은 유동성을 지니고 있어 다짐작업이 필요하지 않으며, 경화 후에는 일반 토사에 비해 높은 강도와 지중매설물에 작용하는 토압 감소효과를 얻을 수 있기 때문에 다짐이 곤란한 장소에서의 퇴비우기나 충전 등에 활용되고 있다. 본 연구에서는 고풍수비의 점성토와 산업폐기물인 석탄회를 활용한 유동화 처리토의 사용 가능성을 평가하기 위하여 재료의 유동 특성, 강도, 지지력 특성을 분석하고 지중매설물에 적용 시 토압감소 효과를 규명하고자 한다.

주요어 : 산업폐기물, 석탄회, 플라이애쉬, 유동화 처리토, 토압

1. 서 론

급속한 산업화와 인구증가, 대량소비에 따른 산업체의 폐기물은 국내외에 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 산업 폐기물 중 석탄의 연소과정에서 발생하는 석탄회는 산업폐

기물로서 막대한 처리비용과 함께 매립장의 부족 등 여러 가지 문제점을 야기시키고 있어 산업폐기물의 처리 및 재활용에 대책에 대한 연구가 필요하다(Park et al., 2010). 석탄회는 연소가스와 비산되어 집진기로 포집되는 비회(fly ash, 비산재)와 보일러 하부에 낙하되는 저회(bottom ash, 바닥

[†] Lecturer, Department of Construction & Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University (Corresponding Author : bst91@knu.ac.kr)

재)로 크게 구분할 수 있다. 이 중 비회는 전체의 약 75~80%를 차지하며, 대부분 시멘트 제조 원료 및 콘크리트 혼화재 등으로 재활용되고 있으나, 약 20%는 활용되지 못하고 매립되고 있다(Korea coal ash recycling association, 2013). 이러한 많은 양의 석탄회가 지속적으로 매립됨으로 인해 매립지의 포화문제와 토양 및 수질오염 등의 환경파괴의 문제로 인해 석탄회의 올바른 처리와 재활용 방안의 모색이 필요한 실정이다(Jo et al., 2018). 플라이애쉬는 석탄을 연료로 하는 화력발전소에서 미분탄을 약 1,400~1,500°C의 고열로 연소시켰을 때 탄분이 용해되어 고온의 연소가스와 더불어 이를 급격히 냉각시키면 표면장력에 의해 구형으로 생성되는 미세한 분말이다. 플라이애쉬는 수산화칼슘과 산소에서 반응하여 포졸란 반응을 하기 때문에 활용성이 높다. 이러한 플라이애쉬는 포졸란 반응이 극히 크며 입자의 비표면적이 시멘트와 거의 같기 때문에 시멘트 대체제, 장기강도 확보, 내구성 증진 및 수화열 감소 등에 좋은 재료로 알려져 있다(Jo et al., 2005). 현재 석탄회를 활용하여 유동성 충전재를 지반에 활용한 연구는 매립석탄회 중 주로 저회를 활용한 연구가 주를 이루고 있으며 석탄화력발전소에서 대량으로 매립되는 비회에 대한 연구는 부족한 실정이다(Chae et al., 2014).

최근 통신구, 전력구, 공동구 등 지하구조물 공사와 고성토부의 교대 뒷채움 공사 등 장소가 협소하여 다짐작업이 어려운 공사가 크게 증가하고 있다. 그러나 배후지반이 협소하거나 구조물과 지반이 인접한 경우 적절한 다짐장비의 부족, 과다짐으로 인한 구조물의 손상 등의 문제로 인하여 다짐관리가 어려운 실정이다. 따라서, 최근에는 다짐작업이 필요하지 않으면서도 적절한 강도를 발휘할 수 있는 유동성 성토재료의 사용이 증가하고 있으며 적절한 유동성 성토재를 개발하기 위하여 토공에 부적당한 것으로 여겨졌던 점성토, 실트 등의 세립토를 이용하기 위한 연구가 수행되고 있다. 특히 해안지역과 같이 지반조건이 열악한 지역에서는 복토 및 뒤채움 작업을 위하여 양질의 성토재의 반입이 필수적이기 때문에 시간적, 경제적 손실을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 반출되는 토사로 인한 환경적 문제까지 초래할 수 있어 건설잔토와 산업폐기물을 재활용하는 방안이 추진되고 있다.

본 연구에서는 뒤채움재로서 건설현장에서 발생하는 고함수비의 점성토와 산업폐기물인 석탄회를 활용하여 유동화 처리토로서의 사용 가능성을 평가하기 위하여 재료의 유동 특성 및 강도특성, 지지력 특성을 분석하고 지중매설물에 적용 시 토압감소 효과를 규명하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 석탄회

석탄회는 석탄화력발전소에서 석탄이 연소한 후에 남은 분말형태의 재로서 석탄재의 상당량이 해안 매립용으로 처분되었으나 최근에는 시멘트 대체 재료로서의 경제적 시공 및 산업폐기물 재활용이라는 관점에서 양질의 석탄회가 사용되고 있으나 그 사용량은 많지 않은 실정이다. 석탄회 콘크리트는 보통 콘크리트에 비해서 경제성이 높고 워커빌리티 향상 및 단위수량을 감소시키는 효과가 있으며, 블리딩 및 재료의 분리가 작고 수화열의 완화로 발열량이 작아진다. 또한 내구성, 수밀성 및 해수에 대한 화학적 저항성이 커지게 되고 장기강도를 증진시키는 효과를 얻을 수 있다(Shin et al., 2001).

2.2 유동화 처리토

유동화 처리토는 경화되기 전에는 높은 유동성을 지니고 있어 다지기 곤란한 시공장소에서 되메우기나 충전 등에 성토 및 복토 작업이 간편하고 타설 후에는 보통 토사에 비하여 높은 강도를 유지할 수 있어 지중매설과 옹벽 뒤 채움재로서 사용이 크게 증대하고 있다. 또한 고성토부의 교대나 터널복공의 공동부와 같이 부등침하의 가능성이 크고, 큰 토압이 작용하는 장소에는 구조물을 효율적으로 계획할 수 있는 특징이 있다. 유동화 처리토의 제조는 주재료인 토사에 물과 고화재를 혼합시켜 제조하며 기존의 뒤채움재는 다짐을 통하여 적절한 밀도와 강도를 얻는데 반하여 유동성 재료는 유동특성과 시간에 따라 강도가 발현되는 특성을 지니고 있다. 따라서 구조물 시공 시 부적절한 다짐으로 인하여 발생하는 토압문제와 지중구조물인 원형매설관 주변 및 하부의 부적절한 다짐으로 인하여 발생하는 문제 등을 해결할 수 있다. 또한, 이전에는 토공에 부적당했던 고함수비의 점성토, 실트 등도 뒤채움 재료로 이용할 수 있는 것으로 알려져 있다. 내구성 면에서는 표류수, 침투수에 의한 침식이 잘 발생하지 않는 것으로 알려져 있어 공동화를 방지 할 수 있으며 경화 후 높은 점착력을 발휘한다.

2.3 배합비의 결정

유동화 처리토를 이용한 뒤채움 작업 시 뒤채움 공간과 지중구조물 사이의 공간을 완전히 채울 수 있는 유동성을 확보하여야 하며 시공 후 재굴착 여부에 따라 인력굴착이 가능한 경우 0.7MPa 이하, 장비로 재굴착이 가능한 경우

0.77~2.1MPa 그리고 비굴착 시에는 2.1MPa 이상의 강도를 발현할 수 있어야 한다(ACI, 1994). 유동화 처리토의 배합설계는 혼합물의 성분, 설계강도, 유동성 등에 좌우되며 원지반 토사의 물리적 특성(입도분포, 입자 거칠기, 함수비, 비중), 고결재 및 첨가재의 특성이 큰 영향을 미친다. 따라서 배합설계는 사용 전에 실내시험을 통하여 결정하고 시공 시에 일정한 혼합비가 유지될 수 있도록 주의하여야 한다. 유동화 처리토는 사용시료와 물, 고화재의 조합에 의해서 최소한의 흐름특성을 만족시키는 최소수량을 나타내어야 하며 재료의 공극이 최소가 되도록 최소의 물시멘트비로 배합하여야 하고 재료의 분리가 일어나지 않도록 하여야 한다. 흐름특성을 석탄회의 양으로 조절할 수 있으나 석탄회의 양이 지나치게 많으면 재료의 점성이 커져서 배합하는데 오랜 시간이 소요되는 단점이 있다. 따라서 시공 후 재굴착이 가능한 강도와 흐름특성을 고려한 배합비의 결정이 요구된다.

2.4 지중구조물의 토압이론

지중에 매설된 관에는 흙의 자중이나 차량 또는 구조물로 인한 상재하중이 작용하며 지진이나 부등침하로 인하여 상향 인발하중이 작용하는 경우도 있다. 관매설 시의 설계 기준은 강성관과 연성관의 경우로 구분하며 강성관은 연직하중이 작용해도 변형이 거의 생기지 않아 관 자체강도에 의해 지지되지만 연성관은 관 자체의 강도는 작으나 연직하중을 받으면 관의 측벽에 수평방향의 변형이 생겨서 주위 흙으로부터 토압이 작용하여 지지강도가 크게 증가한다(White & Layer, 1960). 지중매설관이나 지하 지중구조물 등을 설계할 때 고려하는 하중으로는 구조물의 사하중, 활하중, 토압, 수압, 충격, 종·횡하중, 양압력, 원심하중 등이 있는데 이들 중에서 특히 되메움한 흙의 자중에 의해 지중구조물 상부에 작용하는 연직토압과 측면에 작용하는 수평토압이 비중이 크다. 지중구조물의 상부슬래브에 작용하는 연직토압은 지중구조물의 강성에 따라 다르게 작용하므로 각 지중구조물의 특성에 따라 강성 지중구조물과 연성 지중구조물로 나누어 토압을 결정해야 한다.

2.4.1 강성 지중구조물

강성 지중구조물이란 구조물의 상부슬래브에 처짐이 발생되지 않는 경우를 말한다. 이러한 강성 지중구조물의 상부슬래브에 작용하는 연직토압은 외부측면 되메움과 슬래브 상부 성토지반의 압축성에 따라 다르게 작용한다. 성토지반의 침하와 상대변위가 발생하는 경우는 일반적으로 지중구조물 양측과 상부는 같은 지반으로 되메움하지만 침하

가 발생하는 압축성 지층의 높이가 서로 다르므로 그 침하량은 지중구조물 상부는 적고 양측은 크게 발생한다. 따라서 양자간에 상대변위가 발생하게 되어 지중구조물 상부지반에 하향마찰력이 작용하여 성토지반의 무게보다 큰 연직토압이 작용하게 된다. 이와 같은 경우에는 Marston Spangler의 연직토압이 적용된다(Marston, 1930; Spangler, 1947).

$$P_v = K_b \cdot \gamma \cdot B_o \quad (1)$$

여기서, P_v : 연직토압(t/m^2)

K_b : Marston Spangler의 정지토압계수

γ : 흙의 단위중량(t/m^3)

B_o : 지중구조물 저면 폭(m)

2.4.2 연성 지중구조물

연성 지중구조물의 상부슬래브에 처짐이 발생하여 지중구조물 상부지반의 침하량이 양측의 침하량보다 커지는 경우에는 마찰력이 작용하게 되며 지중구조물에 작용하는 연직토압은 성토지반의 자중보다 작아진다. 지중구조물, 부벽 식용벽, 지하외벽과 같이 강성이 충분히 큰 구조물은 변형이 작아서 주동토압보다는 정지토압에 가까워지므로 보통 수평토압은 정지토압을 사용한다. 수평토압 계산식은 일반적으로 주동토압보다 크게 산정한다. 수평토압계수 K_h 는 성토지반의 다짐방법에 따라 다르며, 실제의 현장지반이 비균질한 사질토와 점토의 혼합토이므로 토압계수 $K_h=0.5$ 를 사용하는 경우가 많다.

$$P_h = K_h \cdot \gamma \cdot h \quad (2)$$

여기서, P_h : 수평토압(t/m^2)

K_h : 수평토압계수

γ : 박스 구조물 측면 흙의 단위중량(t/m^3)

h : 지표로부터의 거리(m)

3. 실험장치 및 방법

3.1 시료의 물리적 성질

3.1.1 석탄회

본 연구에서는 〇〇화력발전소에서 발생된 비회를 사용하였으며 물리적인 성질은 Table 1과 같다.

Table 1. Physical properties of fly ash

Physical properties	Unit	Fly ash
Unite water ratio	%	1.8
Finess	cm ³ /g	3,657
Specific gravity	-	2.22
Wetness	-	0.2

3.1.2 현장발생토

본 연구에 사용된 현장발생토는 충남 ○○천 하구의 바다와 접한 바닥에서 채취한 것으로서 Table 2는 현장토의 물리적인 특성을 보여주고 있으며 비중 2.53, 액성한계 33.8%, 소성한계는 27.3%, 자연함수비는 43.18%로 나타났다.

Table 2. Physical properties of clay

Physical properties	Symbol	Unit	Clay
Moisture content	w_o	%	43.18
Liquid limit	W_L	%	33.80
Plastic limit	W_P	%	27.30
Plastic index	I_P	-	6.50
Specific gravity	G_s	-	2.60

3.1.3 사질토 지반

모형실험에 사용된 사질토의 물리적인 특성은 Table 3과 같으며 KS F 2301에 의거하여 입도시험을 수행한 결과 균등계수는 3.25, 곡률계수는 0.94로 빈입도의 모래로서 통일 분류법상 SP로 분류된다.

Table 3. Physical properties of sand

Physical properties	Symbol	Unit	Sand
Maximum dry density	γ_{dmax}	kN/m ³	17.4
Minimum dry density	γ_{dmin}	kN/m ³	13.8
Specific gravity	G_s	-	2.60
Uniformity coefficient	C_u	-	3.25
Coefficient of gradation	C_c	-	0.94
USCS	-	-	SP

3.1.4 고화재

본 연구에 사용된 고화재는 준설풍토와 같이 자연함수비가 매우 높은 흙을 빠른 시간내에 고화시켜 뒤채움재 및 성토재 등으로 재활용할 목적으로 사용하고 있으며 탄산칼슘($CaCO_3$)과 실리카(SiO_2)로 구성되어 있다. 고화재를 사용한 뒤채움 재료의 환경에 대한 영향을 평가하기 위하여 pH특성시험을 수행한 결과 pH값이 7.09로 중성을 나타내었다.

3.2 실험장치 및 방법

산업폐기물 유동화 처리토의 공학적 특성을 알아보기 위하여 일축압축시험, 유동성시험, C.B.R시험을 수행하였으며 실제 매설구조물에 적용 시 토압감소효과를 평가하기 위하여 모형토조에 의한 토압시험을 수행하였다. 시험조건은 Table 4와 같다.

Table 4. Experimental condition (weight ratio)

Test type	Fly ash mixing ratio (%)	Stabilizer ratio (%)
Flow test		
CBR test	20, 40, 60	10
Model test		
Unconfined compression test	0, 20, 40, 60	8, 10, 12

3.2.1 유동성 시험

본 연구에서는 고화재 및 현장토의 혼합비에 따른 유동화 처리토의 유동성 확인을 위하여 ACI committee 229에서 규정하고 있는 ASTM D 6103(2004) 규정에 의거하여 유동성 시험을 수행하였다. 흐름값 측정 시에는 시료의 중심을 지나는 최소값, 최대값을 측정하여 평균값을 사용하였으며 실험 시 바닥재의 기울임이 유동성에 영향을 미치지 않도록 수평유지에 주의하였다. 현장토, 석탄회, 고화재량은 각각의 배합조건에 따라 배합시킨 후 함수비만을 변화시켜 퍼짐이 23cm를 만족하는 함수비를 측정하여 이를 최소 요구 함수량으로 결정하였다.

3.2.2 일축압축시험

일축압축시험은 측압을 받지 않는 상태에서 공시체에 축하중을 가하여 전단파괴 시켜서 시료의 강도를 결정하는 방법이다. 본 연구에서는 KS F 2314 규정에 의거하여 현장발생토와 석탄회의 배합비, 고화재량을 변화시켜 가면서 일축압축강도시험을 수행하였다. 시험조건은 현장토와 석탄회를 0, 20, 40, 60%의 비율로 혼합하고 고화재를 현장토 중량대비 8, 10, 12%로 변화시켜 가면서 시료를 제작하였다. 시료의 함수비는 유동성 시험으로부터 구한 유동성 확보에 요구되는 최소요구함수량으로 배합하였다. 또한 일축압축강도는 향후 재굴착을 고려하여 0.7MPa(28일 양생) 이하로 설정하였다.

3.2.3 C.B.R시험

3.2.3.1 흡수팽창시험

흡수팽창시험은 홍수나 갑작스러운 지하수위의 상승으로 함수비가 증가할 때 성토의 안정성을 조사하기 위하여

96시간의 수침동안의 시료의 팽창여부를 측정하는 시험이다. 성토체의 파손 원인은 차량 통행으로 인한 파손, 연약지반의 부등침하, 히빙현상 등이다. 팽창률이 클수록 지반에 침투되는 수분이 많으며 지중 온도가 영하이면 수분이 많을수록 아이스렌즈가 쉽게 형성되므로 동상이 발생할 확률이 높아진다. 또한 동상이 빈번한 지반의 경우에는 동상으로 인한 부피팽창으로 성토체에 치명적인 손상을 줄 뿐아니라 연화현상, 히빙현상으로 인하여 전단강도 손실을 예상할 수 있다. 따라서 팽창률을 통하여 히빙현상, 동상 및 연화현상의 영향을 간접적으로 알 수 있다. 시험을 위한 공시체는 CBR 몰드에 현장토 중량대비 고화재 10%, 플라이애쉬를 20, 40, 60%로 변화시켜 제작한 후 시험을 수행하였다.

3.2.3.2 관입시험

관입시험은 도로의 설치두께를 구하기 위한 CBR값을 구하는 시험으로서 성토체의 침수조건을 형성한 후 지지력을 평가하기 위한 시험이다. 본 연구에서는 유동화 처리토에 대한 관입시험을 통하여 플라이애쉬 및 고화재의 혼합비에 따른 CBR값의 범위를 알아보기 위하여 KS F 2320에 의거한 시험을 수행하였다.

3.2.4 토압측정시험

유동화 처리토를 이용하여 실제 구조물에 적용 시 강도 증가와 토압감소 효과를 평가하기 위하여 지중매설관을 대상으로 모형실험을 수행하였다. 실험은 일반 다짐토와 비교하기 위하여 사질토와 플라이애쉬 및 고화재의 배합비를 달리하여 수행하였다. 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 1에 나타나 있는 것과 같이 모형박스, 연직토압과 수평토압을 측정할 수 있는 토압계, 모형 매설관, EPS bedding재로 구성되어 있다. 모델박스의 제원은 높이 300mm, 가로 280mm, 세로 180mm이며, 두께 1cm의 투명아크릴판을 이용하여 제

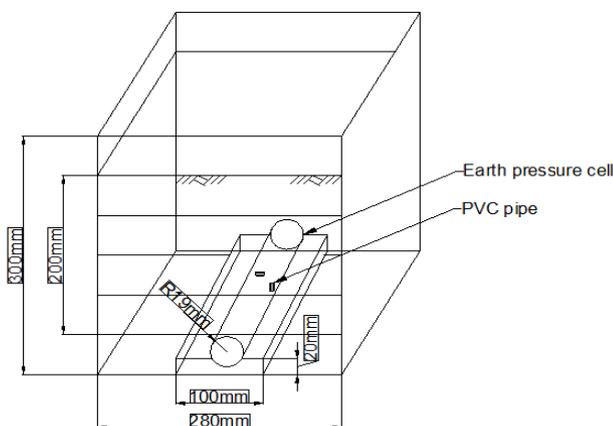


Fig. 1. A schematic of model testing device

작하였다. 매설암거는 외경 38mm, 내경 32mm, 길이 175mm의 모형 파이프를 사용하였으며 토조내 유동화처리토의 압력과 다짐에 있어서 충분한 강성을 발휘할 수 있도록 제작하였다.

3.2.4.1 모래지반의 실험방법

모래지반의 경우 실제 지반을 모사하기 위하여 시료를 자연함수비 8~10% 범위 내에서 물을 배합하였으며 시험 완료 후 상, 중 하부에서 각각 시료를 채취하여 이를 확인하였다. 지반조성 시 다짐은 최대건조단위중량의 90%로 실시하였으며, 각 층별로 균일한 조성을 위하여 다짐두께가 5cm가 되도록 2.5cm씩 2회로 나누어 다짐을 실시하였다.

3.2.4.2 유동화 처리토 지반의 실험방법

유동화 처리토 지반의 경우 다짐이 필요 없으므로 유동성 실험에서 얻어진 최소함수비 범위 안에서 각각의 시료를 배합하였다. 고화재 혼합비는 현장토 중량대비 10%로 고정시키고 플라이애쉬 혼합비를 20, 40, 60%로 변화시켜가며 토압을 측정하였다. 유동화 처리토의 타설은 유입부 직경 15cm, 유출부 직경 4cm의 원추형 깔때기를 이용하여 타설면 상부 5cm의 높이에서 실시하였으며, 각 층별 타설 완료 후 즉시 토압을 측정한 후 바로 다음 단계로 이동하였다. 퇴매움 완료 후 1분간 정치한 후 시간 단계별 토압을 측정하였으며, 1시간이 경과된 후부터는 10분 단위로 2일간 토압을 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 최소 요구 함수비

현장토와 플라이애쉬의 배합비를 변화시켜가며 유동성 시험을 실시한 결과 유동성 시험 시 23cm 정도의 동일한 흐름특성을 보이는 함수비는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2의 곡선은 최소한의 유동성 확보를 위한 최소수량요건을 만족하는 점을 연결한 선으로 최소의 공극재료가 동일성을 지니면서도 재료의 분리가 일어나지 않도록 하는 점이다. 따라서 유동화 처리토의 작업성, 균질한 배합, 재료분리 등을 방지하기 위하여 유용하게 사용할 수 있다. 또한 유동곡선 상부의 플라이애쉬 혼합비가 많은 영역은 점성 크기 때문에 균질한 혼합을 위해서는 많은 시간이 소요되므로 실제 구조물에 적용 시 공기가 증가되거나 특수한 장비가 필요하기 때문에 적합하지 않다. 따라서, 본 연구에서 사용된 현장토와 플라이애쉬를 활용한 재료의 유동성을 확보

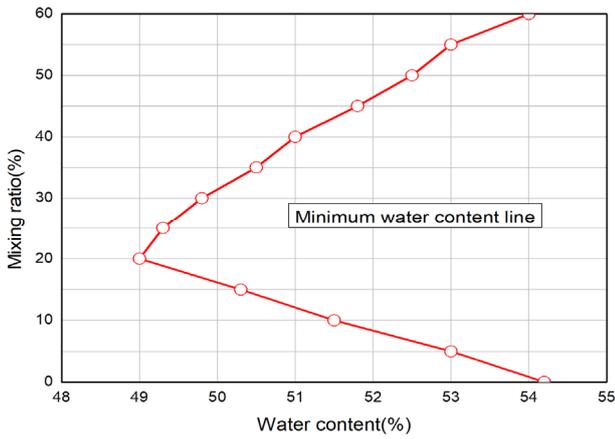


Fig. 2. Flow properties of flow fills

하기 위해서는 각 배합비에 따라 유동곡선의 우측 영역내의 배합비가 적절한 것으로 판단된다.

4.2 일축압축 강도특성

유동화 처리토를 뒤채움재로 사용하여 재굴착 가능한 경우 0.7MPa 이하의 일축압축강도를 가지도록 하는 것이 일반적이다(ACI, 1994). 이처럼 유동화 처리토를 콘크리트와 같은 강성체로 목표강도를 계획하지 않는 것은 사용하는 용도가 벽체뒤채움 및 복토재로 사용하기 때문에 큰 강도를 필요로 하지 않고 유동성을 확보하기 위해서는 낮은 강도를 유지하여야 하기 때문에 유동성 채움재는 콘크리트와 달리 높은 강도를 필요로 하진 않는다. Fig. 3은 배합조건에 따른 일축압축강도 실험결과를 나타낸 것이다. 그림에 나타나듯이 고화재의 혼합비가 증가할수록 일축압축 강도가 증가하는 것을 알 수 있으며 고화재의 혼합비 10% 이후로 강도증가율이 감소하는 것을 알 수 있었다. 고화재 혼합비가 증가할수록 강도증가율은 123.9~204.8%, 109.2~132.2%로 나

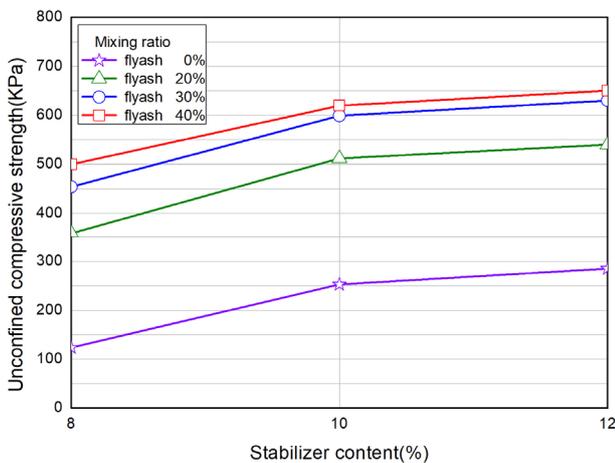


Fig. 3. Unconfined compressive strength with variation of stabilizer content

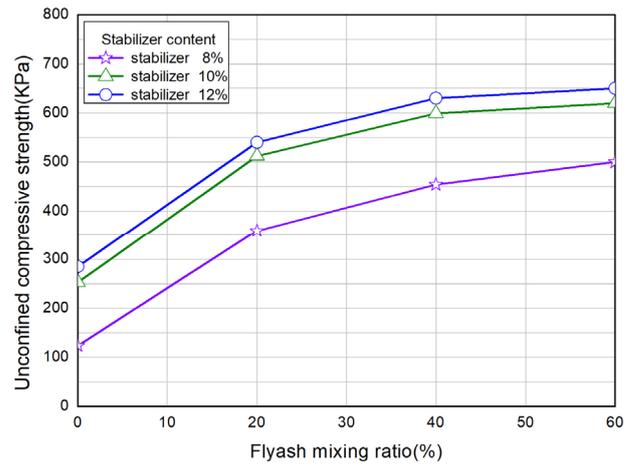


Fig. 4. Unconfined compressive strength with variation of flyash mixing ratio

타나 고화재의 혼합비가 증가할수록 강도는 개선되지만 과다한 고화재의 투입은 강도증가 효과가 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 4는 플라이애쉬의 혼합비에 따른 강도특성을 나타낸 것으로서 플라이애쉬의 혼합비가 증가할수록 일축압도 강도도 증가하는 것을 알 수 있으며 본 연구에서 설정한 기준강도인 0.7MPa 이하를 모두 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 산업폐기물인 석탄회와 현장토를 활용한 유동화 처리토는 저강도의 유동성 성토재료로서 사용이 가능한 것으로 나타났다.

4.3 팽창특성

CBR 시험 중 흡수팽창시험은 수침 시의 성토재료의 팽창정도를 판단하기 위한 시험으로 Fig. 5는 흡수팽창시험결과를 나타내고 있다. 시험결과 팽창률은 부(負)의 값을 보이는데 이는 수침 초기에 상재하중에 의한 수축으로 판단되며

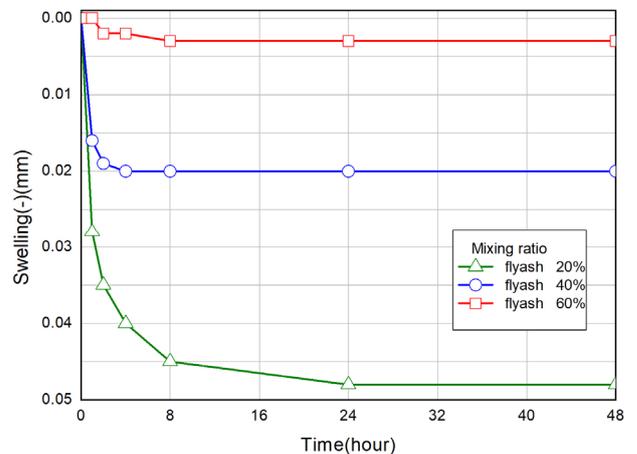


Fig. 5. Swelling properties with variation of immersion time

현장토와 플라이애쉬의 배합비에 따라 약간의 차이를 보였으며 플라이애쉬의 혼합비가 증가할수록 침하가 덜 일어나는 것을 알 수 있었다. 또한 모든 경우에 있어서 24시간 이후에 수축팽창의 변화는 일어나지 않는 것으로 나타났다. 침하율은 고화재의 혼합비를 10%로 고정시키고 플라이애쉬의 혼합비를 20, 40, 60%로 변화시켜가며 실험한 결과 혼합비 20%의 경우가 0.04 9%, 40%의 경우가 0.02%, 60%의 경우가 0.002%로 나타나 플라이애쉬의 혼합비가 증가할수록 침하율은 감소하는 것으로 나타났다. 일반적으로 팽창량이 1% 이하인 경우 노상재료로서 양호한 것으로 알려져 있는 것을 감안한다면 모든 시험에 있어서 유동화 처리토의 팽창량은 성토재 사용기준에 만족하는 것으로 나타났다.

4.4 지지력특성

유동화 처리토의 관입시험은 96시간 수침하여 흡수팽창량을 측정한 후 15분간 정치 후 관입량에 따른 하중강도를 측정하였다. Table 5는 플라이애쉬 혼합비에 따른 CBR값의 결과를 나타내고 있으며 관입량이 증가할수록 관입저항은 증가하며 혼합비에 따라 증가하는 것으로 나타났다. CBR값의 범위는 14.46~20.89%로 나타났고 혼합비 60%의 경우가 20.89%로 가장 큰 CBR값을 나타내었다. 따라서 CBR값은 플라이애쉬의 혼합비에 의한 영향을 받는 것으로 생각되며 시방서 기준에서 구조물 뒤채움재의 CBR값 기준치를 10 이상으로 규정하는 것으로 볼 때 본 연구에 사용된 유동화 처리토는 모두 이 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

Table 5. CBR value with variation of mixing ratio

Flyash mixing ratio	20%	40%	60%
CBR (%)	14.46	19.05	20.89

4.5 토압특성

유동화 처리토의 토압 특성을 파악하기 위하여 지중매설관을 대상으로 지반조건을 사질토와 유동화 처리토로 변화시키고 되메움 높이에 따른 수평토압과 수직토압을 측정하였다.

4.5.1 사질토 지반의 토압 특성

Fig. 6은 사질토 지반의 되메움 높이에 따른 연직 토압 및 수평토압 특성을 나타낸 것이다. 모형실험 결과와 이론상의 정지토압을 비교하여 본 결과 되메움 높이에 따라 토압이 최대 1.8배 증가하였으며 실험에 의한 연직토압이 이론상의 토압보다 약 1.6배 크게 나타났다. 이러한 경향은 지

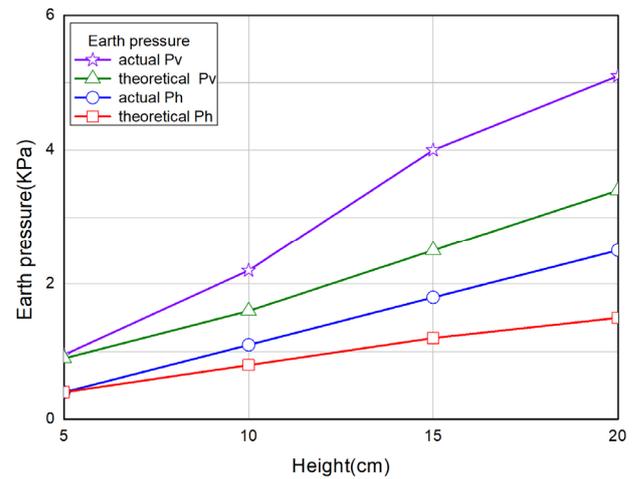


Fig. 6. Earth pressure of height for sand

반조성 시 90%의 다짐도를 얻기 위하여 실시한 다짐으로 인하여 토압이 증가한 것으로 판단된다. 뒤채움 시 사질토 지반에서 다짐을 실시할 경우 토압분포에 영향을 주며 토압이 증가하는데 이는 다짐 전 토압과 다짐이 실시되는 과정 중의 토압, 다짐이 제거되는 과정에서 토압의 변화 발생하며 잔류응력이 다짐으로 인한 토압 증가분이라 판단된다.

4.5.2 유동화 처리토 지반의 토압특성

Fig. 7~8은 되메움 높이에 따른 유동성 처리토의 연직토압 및 수평토압 특성을 나타낸 것이다. 그림에 나타나듯이 되메움 높이와 플라이애쉬의 혼합비가 증가함에 따라 연직토압 및 수평토압이 증가하는 것을 알 수 있다. 연직토압의 경우 되메움 높이에 따라 최대 4.6배, 수평토압의 경우 최대 6.3배 증가하는 것을 알 수 있었으며 플라이애쉬의 혼합비에 따른 토압은 연직토압의 경우 1.1~1.3배, 수평토압은 1.3~3.3배 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 동일한 플라

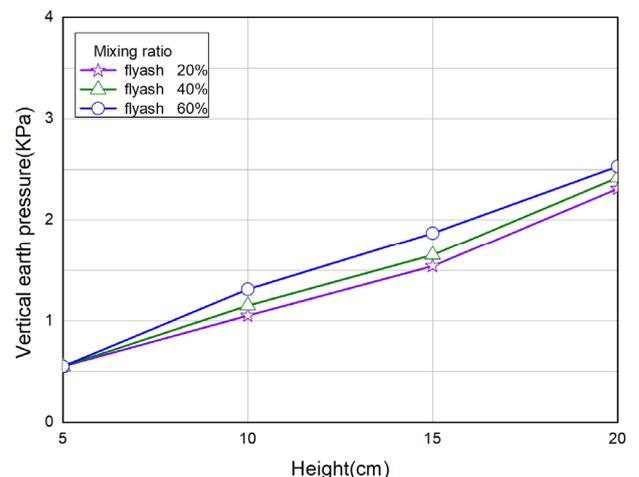


Fig. 7. Vertical earth pressure of height for flowable fill

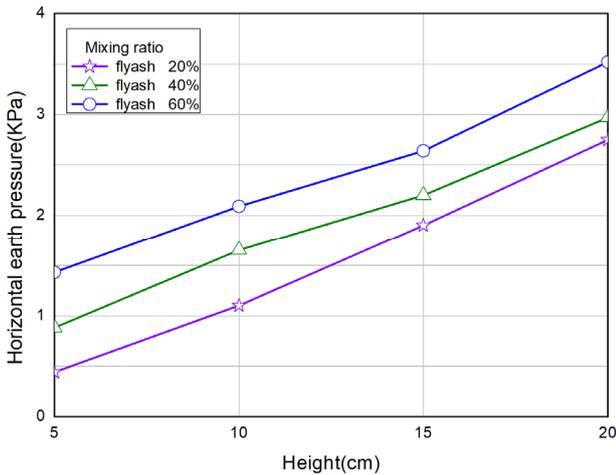


Fig. 8. Horizontal earth pressure of height for flowable fill

이래쉬 혼합비에서 연직토압과 수평토압의 차이는 수평토압이 최대 2.6배 큰 것을 알 수 있었는데 이는 유동화 처리토의 고유동성으로 인한 것으로 판단되며 이와 같은 경향은 되메움의 높이가 클수록 더욱 뚜렷해지는 것으로 나타났다.

4.5.3 사질토 지반과 유동화 처리토 지반의 토압비교

유동화 처리토는 경화될 때까지는 액압이 작용하며 시간이 지남에 따라 구조물에 작용하는 압력은 사라지는 경향을 나타낸다. 시간이 경과됨에 따라서 배합량에 따라서 차이는 있지만 연직 및 수평토압은 모두 되메움 완료 후 6시간까지는 감소를 하다가 1일 경과 시까지 증가를 하였으며 2일이 경과되면서 일정 토압으로 수렴하는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 사질토 지반과 유동화 처리토 지반의 수렴토압을 비교한 것으로서 유동화 처리토의 경우 사질토 지반의 경우보다 모두 작은 값으로 수렴되는 것으로 나타났으며 플라이애쉬의 혼합비가 60%의 경우 수평토압은 모래지반

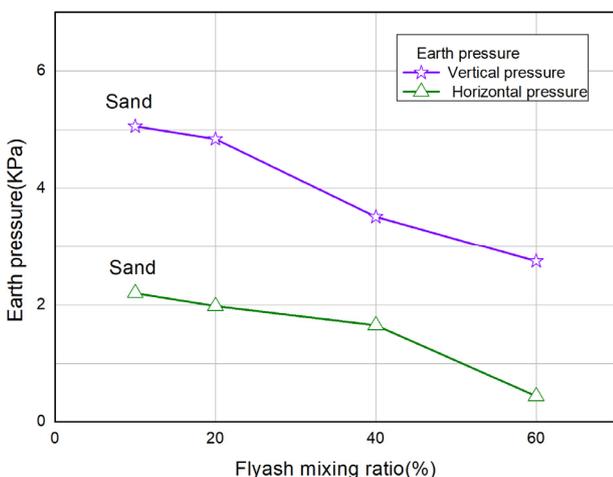


Fig. 9. Comparison of earth pressure reduction

의 경우보다 80%의 토압경감 효과를 보였으며 연직토압 또한 모래지반의 약 54% 정도로 토압이 감소되는 것으로 나타났다.

5. 결 론

고함수비의 현장토와 산업폐기물인 플라이애쉬를 이용한 유동화 처리토의 역학적 특성을 규명하고 뒤채움재료로서의 사용 가능성을 확인하고자 강도시험 및 모형토압시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 유동화 처리토의 강도시험 결과 플라이애쉬 및 고화재의 혼합비가 증가할수록 일축압축 강도가 증가하는 것을 알 수 있었으며 강도증가율은 고화재의 혼합비가 10%인 경우 123.9~204.8%, 20%인 경우 109.2~132.2%로 나타나 고화재의 혼합비가 증가할수록 강도는 개선되지만 과다한 고화재의 투입은 강도증가 효과가 크지 않음을 알 수 있었다. 또한 배합비에 따른 최대 강도는 0.68MPa로 나타나 뒤채움 후 재굴착이 가능한 0.7MPa 이하의 강도 조건을 모두 만족하는 것으로 나타났다.
- (2) 수침 시 팽창특성은 플라이애쉬의 혼합비가 증가할수록 침하율은 감소하는 것으로 나타났으며 유동화 처리토의 팽창량은 1% 이하로서 뒤채움재 사용기준에 적합한 것으로 나타났다. 또한 수침 후 지지력은 구조물 뒤채움재의 CBR 기준치인 10%를 상회하는 것으로 나타나 침수에 따른 지지력은 양호한 것으로 나타났다.
- (3) 모형토조 실험 결과 플라이애쉬의 혼합비에 따른 토압은 연직토압의 경우 1.1~1.3배, 수평토압은 1.3~3.3배 증가하는 것을 알 수 있었으며 동일한 플라이애쉬 혼합비에서 연직토압과 수평토압의 차이는 수평토압이 최대 2.6배 큰 것을 알 수 있었는데 이는 유동화 처리토의 고유동성으로 인한 것으로 판단된다.
- (4) 유동성 처리토 지반의 토압은 사질토 지반에 비하여 수평토압은 최대 80%, 연직토압은 약 54% 정도의 토압경감 효과가 있는 것을 알 수 있었다.

References

1. ACI Committee 229 (1994), Controlled low strength materials (CLSM), American Concrete Institute, 229R-2, pp. 1~12.
2. ASTM (2004), Standard test method for flow consistency of controlled low strength material (CLSM), ASTM D 6103, pp. 1~3.

3. Chae, D. H., Kim, K. O., Shin, H. Y. and Cho, W. J. (2014), Dynamic characteristics of liquidity filling materials mixed with reclaimed ash, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 15, No. 4, pp. 5~11 (In Korean).
4. Jo, B. W., Park, J. B. and Koo, J. G. (2005), Experimental study for fracture characteristic of new building materials with recycled ash, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 17, No. 2, pp. 255~261 (In Korean).
5. Jo, Y. K., Kim, C. S., Nam, S. Y., Jo, S. H., Lee, H. W. and Ahn, J. W. (2018), Properties evaluation and flowability of controlled low strength materials utilizing industrial by-products, *Journal of Energy Engineering*, Vol. 27, No. 4, pp. 64~69 (In Korean).
6. Korea Coal Ash Recycling Association (2013).
7. Marston, A. (1930), The theory of external loads on closed conduits in the light of the latest experiments, *Bul*, No. 96, Iowa Engineering Experiment Station, Ames, Iowa.
8. Park, C. W., Lee, H. G. and Kang, T. S. (2010), Evaluation of durability characteristics of high performance shotcrete using fly ash, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 3, pp. 305~311 (In Korean).
9. Shin, B. W., Lee, J. K., Bang, S. T. and Yea, I. D. (2001), Earth pressure characteristics of flowable fill recycling disposal materials, *Proceedings of Korean Geo-Environmental Society*, pp. 47~52 (In Korean).
10. Spangler, M. G. (1947), Underground conduits - An appraisal of modern research, *Transaction ASCE*, Vol. 113, June, pp. 316~374.
11. White, H. L. and Layer, J. P. (1960), The corrugated metal conduit as a compression ring, *Proc. HBR*, Vol. 39, pp. 389~397.