

매립석탄회를 혼합한 유동성 충전재의 동적거동특성

Dynamic Characteristics of Liquidity Filling Materials Mixed with Reclaimed Ash

채 덕 호¹⁾ · 김 경 오²⁾ · 신 현 영²⁾ · 조 완 제[†]

Deokho Chae · Kyoungoo Kim · Hyunyoung Shin · Wanjei Cho

Received: November 1st, 2013; Revised: November 13th, 2013; Accepted: December 17th, 2013

ABSTRACT : Recently, there have been various lifeline installations constructed in the underground space of urban area due to the effective use of land. For newly installed lifelines or the management of the installed lifelines, many construction activities of excavation and backfilling are observed. Around these area, there are possibilities of collapse or excessive settlement due to the leaking of the pipe or unsatisfactory compaction of backfill material. Besides, construction costs can be saved since the on-site soils are used. The application of this liquidity filling material is not only to the lifeline installation but also to underpin the foundation under the vibrating machinery. On the evaluation of the applicability of this method to this circumstance, the strength should be investigated against the static load from the machine load as well as the vibration load from the activation of the machine. In this study, the applicability of the liquidity fill material on the foundation under the vibrating machinery is assessed via uniaxial compression and resonant column tests. The liquidity filling material consisting of the on-site soils with loess and kaolinite are tested to investigate the static and dynamic characteristics. Furthermore, the applicability of the reclaimed ash categorized as an industrial waste is evaluated for the recycle of the waste to the construction materials. The experimental results show that the shear modulus and 7 day uniaxial strength of the liquidity filling material mixed with reclaimed ash show higher than those with the on-site soils. However, the damping ratio does not show any tendency on the mixed materials.

Keywords : Liquidity filling materials, Dynamic characteristics, Reclaimed ash, Foundation under the vibrating machinery

요 지 : 최근 도심지의 구조물 건설 시 다양한 라이프라인이 공간의 효율적인 활용 측면에서 지중에 매설되고 있으며, 이러한 라이프라인의 신설 및 유지보수 등을 위해 굴착이나 뒤채움 작업이 빈번하게 이루어지고 있다. 라이프라인 매설 시 지반을 굴착하며, 매설 후 채움재 모래를 사용하여 되메움을 하는 것이 일반적이다. 이러한 경우 통신관, 가스관, 상하수도 등의 관하부와 측면 좁은 공간의 뒤채움은 다짐작업이 어려우며, 다짐작업 시 토사의 특성상 추가적으로 침하가 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 미국 및 일본 등과 같은 선진국에서 건설 발생토를 재활용하여 잔토처리 비용을 줄이고, 충분한 유동성을 확보한 유동성 채움재가 사용되고 있다. 또한 지중 매설관 건설 외에도 기초 하부 지반에도 유동성 채움재를 활용할 수 있을 것으로 판단되며, 특히 기계 기초 하부 지지층이 연약한 경우, 유동성 채움재를 적용하여 빠른 시간 안에 지반을 개량하는 목적에 적합할 것으로 판단된다. 특히 기계 기초 하부 지지층의 경우, 단순한 기계 하중에 의한 정적 지지력 산정뿐만 아니라 기계의 진동에 의한 동적 하중이 가해지므로 기초 하부 지지층의 동적거동특성이 평가되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 유동성 채움재를 기계 기초 지지층으로 활용하는데 있어서의 적용성을 판별하기 위해 국내에서 일반적으로 볼 수 있는 점토와 황토를 현장발생토로 가정하여 세립분 함량을 달리한 유동성 채움재의 강도 및 동적 거동특성을 파악하였다. 또한 현장 발생토를 대신하여 산업 폐기물인 매립석탄회를 활용하여 유동성 채움재를 조성하여 그 성능을 비교하였다. 그 결과, 매립석탄회를 혼합하여 사용한 경우, 일반적인 건설발생토를 사용한 경우보다 높은 7일 재령 강도와 전단탄성계수를 보였다.

주요어 : 유동성 채움재, 동적특성, 매립석탄회, 기계 기초 지지층

1. 서 론

도심지의 구조물 건설 시 전기, 수도, 가스 등의 공급시설, 하수, 전신전화 등의 다양한 라이프라인이 공간의 효율적인 활용 측면에서 지중에 매설되고 있다. 이러한 라이프

라인의 신설, 개보수, 유지 보수 등을 위해서 굴착, 매설, 뒤채움 작업이 빈번하게 이루어지며, 작업 과정 중 뒤채움을 한 도로 포장 하부에서 노후 관로의 누수나 다짐 불량으로 인한 침하발생 및 함몰 사고가 자주 발생하고 있다. 일본의 경우 연간 약 2,000 건의 함몰사고가 발생하는 것으로 보고

1) Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

2) Civil Research Team, DAEWOO E&C

† Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University (Corresponding Author : jei0421@dankook.ac.kr)

되고 있으며, 우리나라의 경우도 도로 및 지반 함몰 사고가 심심치 않게 보도되고 있다(Cho, 2005).

대부분의 지중 매설 공사 시 굴착 잔토 처리용 사토장이 필요하나 사토장의 확보에 어려움이 많으며, 건설 잔토를 폐기물로 처리하는 경우 처리비용이 추가로 발생하게 된다. 라이프라인 매설을 위한 굴착 후, 되메움을 하는 경우 채움재 모래를 사용하게 되는데 통수관, 가스관, 상수도관 등의 관 하부와 좁은 공간의 뒤채움은 다짐작업이 어려우며, 다짐을 하더라도 토사의 특성상 추가 침하가 발생하기 때문에 재포장 후에 굴착 부위를 따라 균열이 발생하고 우수에 의한 수분이 침투하여 포장 및 매설 관로의 수명을 단축하는 원인이 되고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위한 방법 중 하나가 유동성 채움재로, 미국 및 일본 등과 같은 선진국에서는 건설 발생토를 재활용하여 잔토처리 비용을 줄이고, 충분한 유동성을 확보하여 고화되는 특성을 가진 재료로 매설관로의 뒤채움을 하고 있다.

미국 콘크리트학회(ACI Committee 229, 1994)에서는 모래, 시멘트, 비회(Fly ash), 물, 혼화제로 구성된 유동성 채움재를 저강도 강도조절 재료, Controlled Low Strength Materials 라고 명칭하고 그에 대한 규정을 제시하였다. 일본에서는 건설 발생토에 물과 고화재를 혼합하여 슬러리 상태로 처리한 것을 유동화 처리토라 명칭하고 사용하고 있다. 이러한 유동화 처리토 및 저강도 강도조절 재료와 같은 유동성 채움재는 현장 발생토에 급결성 고화재와 물을 적절히 혼합하여 초기에는 물과 고화재의 영향으로 충분한 유동성을 가지며, 짧은 시간 내에 고화재 성분이 양생되어 원하는 강도까지 증진시키게 된다.

이러한 유동성 채움재를 사용함으로써, 현장 발생토를 재활용하여 잔토 처리비 및 양질의 토사 구입비용을 절감할 수 있으며, 유동성에 의하여 자기 다짐 및 자기 수평 능력(Self-leveling)에 의해 다짐작업이 필요 없게 된다. 또한 다짐작업을 하지 않기 때문에 공사 시 진동 및 소음에 의한 환경 피해를 줄일 수 있다. 추가적으로 다짐작업에 필요한 공간을 확보할 필요가 없으므로 굴착 폭을 줄일 수 있으며, 토압 경감에 따른 관 두께를 줄일 수 있고, 강관을 연성관으

로 교체 사용 가능하며, 공사비 절감에도 매우 효과적이다. 또한 급결성 고화재로 인하여 지반의 차수 및 지수 성능을 향상시키게 된다.

지중 매설관 건설 외에도 기초 하부 지반의 보강에 유동성 채움재를 활용할 수 있을 것으로 판단되며, 특히 기계 기초 하부 지지층이 연약한 경우, 유동성 채움재를 적용하여 빠른 시간 안에 지반을 개량하는 목적에 적합할 것으로 판단된다. 특히 기계 기초 하부 지지층의 경우, 단순한 기계하중에 의한 정적 지지력 산정뿐만 아니라 기계의 진동에 의한 동적 하중이 가해지므로 기초 하부 지지층의 동적거동특성이 평가되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 유동성 채움재를 기계 기초 지지층으로 활용하는 데 있어서의 적용성을 판별하기 위하여 국내에서 일반적으로 볼 수 있는 점토와 황토를 현장발생토로 가정하여 세립분 함량을 달리한 유동성 채움재의 강도 및 동적거동특성을 파악하였다. 또한 현장 발생토를 대신하여 산업 폐기물인 매립석탄회를 활용하여 유동성 채움재를 조성하여 그 성능을 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 매립석탄회

석탄 화력발전소에서 미분탄을 연소 후 부산물로 발생하는 회(재)를 말하며, 석탄회의 발생위치에 따라 비회(Fly ash), 저회(Bottom ash)로 구분할 수 있다. 비회는 미분탄을 연소 후 발생하는 발전소 부산물로 집진기에서 포집되는 미분말 형태로서 전체 석탄회 발생량 중 약 75~80%를 차지한다. 저회는 미분탄이 화력발전소 보일러 내에서 연소할 때 괴상 또는 입자의 입경이 큰 회 성분을 보일러의 하부로 낙하 되어 남은 회를 말하며, 전체 석탄회 중 약 10% 정도 차지한다(Korea coal ash recycling association, 2013).

또한 우리나라 10개의 석탄 화력발전소에서 발생하여 회사장(Ash pond)에 폐기되고 있는 지정 폐기물인 석탄회는 연간 840만 톤을 상회할 것으로 전망된다. Table 1과

Table 1. Annually generated and recycled amounts of domestic coal combustion by-products (Jung et al., 2011)

	2006	2007	2008	2009
Fly ash generated amount	478.3	496.2	619.0	684.3
Bottom ash generated amount	103.6	105.5	141.9	151.0
Generated amount	584.1	601.5	761.1	835.3
Recycled amount (%)	66.5 (388.7)	70.0 (421.6)	66.0 (501.8)	64.1 (535.8)
Fly ash recycled amount (%)	74.2	79.5	76.3	67.9
Bottom ash recycled amount (%)	32.6	25.7	20.8	47.1

(unit : 10,000 tonf)

같이 국내 석탄회 처리현황을 보면 석탄회의 약 66.7 %가 재활용되고 33.4 %는 매립되고 있으며, 재활용되는 양에서 약 85.7 %가 시멘트, 콘크리트 등의 원료로 사용되고 있다.

반면 석탄회는 총 발생량의 70 % 미만이 이용되어 재활용 실적이 비교적 저조하고 운용 중인 회사장의 규모가 발전소 용량에 훨씬 미달되고 있는 실정으로 대부분 슬러리 상태로 발전소 주위 또는 해안 근처의 회사장에 막대한 경비로 폐기되고 있는 실정이다.

석탄회는 폐기물로 분류되었기 때문에 지반 분야 재활용과 관련하여 공학적인 성질에 대한 연구와 환경적인 안정성을 평가하기 위한 연구가 주로 수행되었다. 석탄회를 성토재에 적용할 경우, 침출특성을 규명하기 위하여 현장조건을 실내에서 재현한 연속식 용출시험(column leaching test), 회분식 용출시험(batch leaching test), 흙 두께 변화에 따른 침출특성, 국내외 수질기준과의 연구(Kim et al., 1995)와 재활용 물질로 사용할 경우 유해물질에 의한 환경오염 가능성 여부에 대한 연구(Jung et al., 2011)가 이루어졌다. 석탄회를 대규모로 활용하기 위해 시멘트와 물에 석탄회를 주성분으로 하여 혼합 후 시간의 경과에 따라 강도 증가를 확인하였고(Kim et al., 2010), 경량기포유동화재를 개발하여 기존의 유동화재 보다 단위중량을 낮추고 교대 및 옹벽 등의 뒤채움에 적용 가능한 경량성과 유동성을 파악하여 적용성을 검토하였다(Lee et al., 2011).

현재 석탄회를 지반에 활용한 연구는 매립석탄회 중 주로 저회를 활용한 연구가 주를 이루고 있다. 매립석탄회 중 저회를 혼합한 연구는 많이 이루어지고 있으나 석탄 화력발전소에서 대량으로 매립되는 매립석탄회 비회와 저회에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다.

2.2 유동성채움재

유동성 충전재는 다짐조절 충전재(Controlled Density Fill, CDF), 강도조절 충전재(Controlled Strength Fill, CSF), 유동성 플라이애쉬(Flowable ash) 등으로 불린다. 현재 유동성 뒤채움재에 대한 국내 규정은 없으나 일본 동경전력(Tokyo Electric Power Company R&D Center, 1996)과 미국 콘크리트 학회(ACI Committee 229, 1994)의 기준을 살펴보면 유동성, 일축압축강도, 블리딩율과 침하에 대한 규정으로 유동성 뒤채움재의 기준을 정하고 있다. 특히 일본 기준의 경우, 퇴매움 이후 빠른 공사 준공을 위하여 1시간과 4시간의 일축압축 강도 기준을 정하고 있으며, 또한 28일 강도의 상한값을 규정함으로써 재굴착 시의 편리성을 보장하는 내용을 포함하고 있다.

90년도 이후 미국, 일본, 대만 등에서는 현장에서 발생하

는 굴착잔토, 비회 및 폐주물사, 시멘트 및 혼화제를 차별적으로 혼합하여 시공목적에 적합한 유동성 및 강도발현이 가능한 급결형 유동화 저장도 뒤채움재에 대한 연구가 진행되었다(Takahashi et al., 1994). 국내에서도 현장발생토와 급결형 유동화처리재를 활용한 지중매설관, 옹벽 등의 뒤채움재에 관한 연구가 진행된 바 있다(Park et al., 2004; Cheon et al., 2006; Cho et al., 2007). 기존의 유동성 뒤채움재에 관한 연구는 주로 배합비에 관한 연구로 대상 건설 발생토 및 고화재의 종류에 따른 유동화 처리토의 특성에 관한 연구가 주를 이루었다(Cheon et al., 2006; Ahn et al., 2008). 이는 유동화 처리토의 사용 목적이 지중매설관 및 옹벽 등의 뒤채움이었으므로 빠른 시간 내에 고결화가 되어야 하며, 고결된 이후 추후 재굴착을 통한 매설관 관리가 용이할 수 있도록 낮은 강도의 유지를 확인하는 연구가 대부분이었다.

또한 유동성 충전재는 주로 모래, 시멘트, 비회와 물을 적절히 혼합하면 초기에는 물과 비회의 영향으로 충분한 유동성(Flowability)을 갖게 되며, 시간이 지나면서 시멘트 성분의 양생으로 원하는 강도까지 강도를 증진 시킬 수 있다(Cho, 2007). 최근 들어 석탄회를 대규모로 활용하기 위해 시멘트와 물에 석탄회를 주성분으로 하여 혼합한 유동성 충전재로 사용하기 위해 연구가 진행 중에 있다(Won & Lee, 2001, Seo et al., 2010; Kong et al., 2010; Lee et al., 2007).

현재 석탄회를 활용하여 유동성 충전재를 지반에 활용한 연구는 매립석탄회 중 주로 저회를 활용한 연구가 주를 이루고 있고 채움재로서 활용성을 높이기 위하여 플로우 시험과 일축압축시험을 통하여 시료의 배합비와 강도특성을 파악하는 연구가 이루어졌다. 매립석탄회 중 저회를 혼합한 연구는 많이 이루어지고 있으나, 석탄 화력발전소에서 대량으로 매립되는 매립석탄회 비회와 저회에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다. 또한 매립석탄회를 혼합한 유동성채움재는 지하매설관이나 옹벽 등의 연구가 이루어지고 있으나, 연약한 하부 지지층에 플랜트 등의 기계 기초가 시공되어 기계 진동으로 인한 거동특성은 문제를 야기할 소지가 크므로 이에 대한 대책수립이 필요하다.

3. 실험

3.1 사용시료

본 연구에서는 유동성 충전재 타설 지반을 구조물(기계) 기초로 적용하기 위하여 강도 특성과 내진성능에 대해 일축 압축시험과 공진주시험을 수행하였다.

국내에는 아직 유동성 채움재에 대한 규정이 제정되지

않아 일본 동경전력(Tokyo Electric Power Company R&D Center, 1996)과 미국 콘크리트 학회(ACI Committee 229, 1994)의 기준에 따라 시료의 배합비를 산정하였다. 기존의 유동성 채움재의 활용 목적인 지중 매설관 뒤채움과는 달리 본 연구에서는 기계 기초 하부 지반 개량과 내진 성능 개선이 목적이므로 1시간, 4시간, 3일 강도의 최저값과 28일 강도의 최대값에 대한 규정의 적용은 하지 않았으며, 대신 재령일수 7일일 때의 일축압축강도를 평가하여 강도에 대한 특성을 살펴보았다.

유동성 기준의 경우 직경 80 mm, 높이 80 mm의 일본 도로공단 규격 실린더몰드(JHS A 313)와 미국 ASTM 기준의 직경 11.8 mm, 높이 23.6 mm의 실린더몰드를 사용한다. 본 연구에서는 미국 31.5 mm 이상, 일본 180~300 mm의 기준을 설정하여 기준치에 부합되는 배합비 범위에 만족하도록 하였다. 또한 직경 50 mm, 높이 500 mm의 폴리에틸렌 실린더를 제작하여 블리딩 실험을 실시하여 일본 기준인 1 % 이하를 만족하도록 배합비를 결정하였다. 사용된 시료는 점토와 황토를 현장발생토로 가정하여 매립석탄회를 혼합하여 성형하였다. 이러한 과정으로 결정된 시료의 배합조건은 Table 2와 같다.

모든 배합조건으로 재성형된 시료에 대하여 비중시험(KS F 2308), 흙의 액소성 시험(KS F 2303)을 하여 결과를 Table 3에 나타내었다.

일축압축시험(KS F 2314)은 재령 7일의 시료로써 직경 50 mm, 높이 100 mm의 시료를 사용하였고, 비파괴 시험인 공진주 시험 수행 후, 시험기를 해체하여 하나의 사용 시료에 총 3회 시험을 하였다. 또한 사용시료의 동적거동특성을 평가하기 위해 공진주 시험을 수행하였다. 공진주 시험은

직경 50 mm, 높이 100 mm의 시료를 사용하였고 구속압 증가에 따른 영향은 고형화된 시료의 경우 미미한 것으로 판단되어 전체적인 거동을 규명하는 부분에서는 무시할 수 있을 것으로 판단되어 100 kPa로 시험하였다.

4. 실험결과

4.1 일축압축시험

본 연구에서는 배합조건을 달리한 시료의 강도특성을 알아보기 위해 일축압축시험을 통하여 다음과 같은 결과를 확인하였다. 실험의 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

일축압축강도(q_u)를 보면 점토혼합시료는 혼합비율 10 %에서 4.92 MPa의 일축압축강도를 보이고 있고, 혼합비율 70 %에서 11.29 MPa의 일축압축강도를 보이고 있다. 황토 혼합시료의 경우, 혼합비율 10 %에서 2.11 MPa의 일축압축강도를 보이고 있고, 혼합비율 70 %에서 4.79 MPa의 일축압축강도를 보여 점토혼합시료의 절반 정도의 강도를 나타내었다. 또한 점토혼합시료에서 혼합비율을 30 %, 50 %, 70 % 적용하였을 경우, 10 MPa의 일축압축강도를 보여 혼합비율의 증가에 따른 강도증가는 나타나지 않았다. 마찬가지로 황토혼합시료의 경우에도 혼합비율에 따른 강도증가는 나타나지 않았으며, 혼합비율 30 % 이상의 경우 5 MPa의 일축압축강도를 나타내었다.

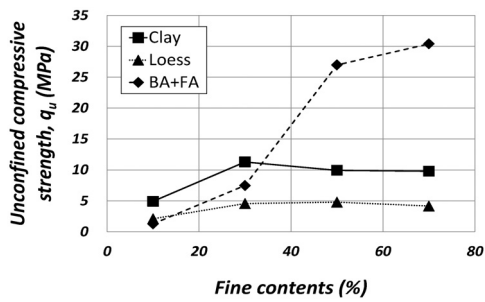
저희에 비회를 혼합한 시료(Ash혼합시료)에서의 일축압축강도(q_u)는 혼합비율 10 %에서 1.28 MPa의 일축압축강도를 보이고 있고, 혼합비율 70 %에서는 30.40 MPa의 일축압축강도를 보이고 있다. 점토 및 황토혼합시료의 강도와는

Table 2. Mixing conditions of remolded samples

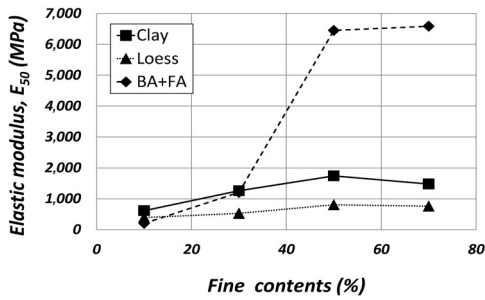
Samples	Mixing condition			
	NO.	Sand (%)	Clay (%)	W/C
Sand + Clay	1	90.0	10.0	4.55
	2	70.0	30.0	
	3	50.0	50.0	
	4	30.0	70.0	
Sand + Loess	NO.	Sand (%)	Loess (%)	W/C
	1	90.0	10.0	4.41
	2	70.0	30.0	
	3	50.0	50.0	
4	30.0	70.0		
Bottom Ash + Fly Ash	NO.	B.A (%)	F.A (%)	W/C
	1	90.0	10.0	3.15
	2	70.0	30.0	
	3	50.0	50.0	
4	30.0	70.0		

Table 3. Index properties of soils

Samples	NO.	GS	PI	USCS	Dry unit weight (tf/m ³)
Sand + Clay	1	2.59	N.P	-	1.61
	2	2.56	N.P	-	1.45
	3	2.54	N.P	-	1.18
	4	2.53	2.15	MH	1.06
Sand + Loess	1	2.60	N.P	-	1.60
	2	2.60	N.P	-	1.54
	3	2.60	N.P	-	1.60
	4	2.60	8.90	ML	1.20
Bottom Ash + Fly Ash	1	2.24	N.P	-	1.18
	2	2.24	N.P	-	1.44
	3	2.32	N.P	-	1.60
	4	2.32	N.P	-	1.58



(a) Unconfined compression strength



(b) Elastic modulus (E_{50})

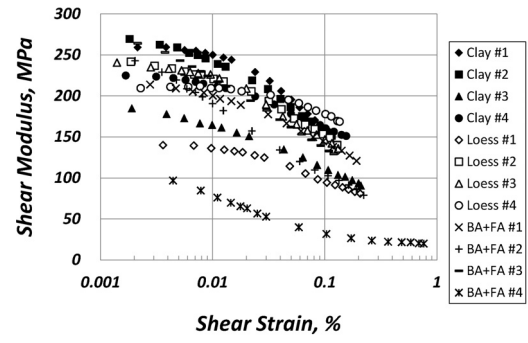
Fig. 1. Unconfined compression strength results

달리 혼합비율에 따른 강도 증가 현상이 발견되었으며, 비회를 70 % 혼합한 경우, 같은 혼합비율의 황토혼합시료와 비교하여 6배, 점토혼합시료와 비교하여 3배가량 높은 일축 압축강도를 보이고 있다.

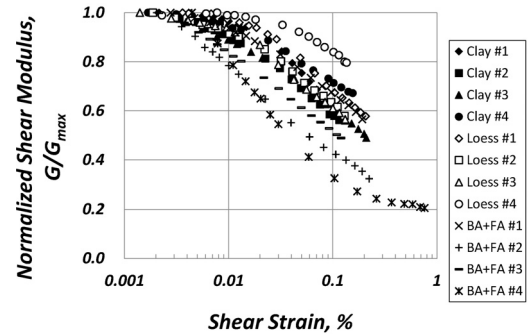
4.2 공진주 실험 결과

점토, 황토, 저회+비회와 혼합한 시료의 동적 물성치 특성을 평가하기 위한 공진주시험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻어 Fig. 2에 나타내었다.

점토가 혼합된 시료의 전단탄성계수는 저변형률(0.01 %)에서는 약 31 %의 감쇠를 보이고 있고 변형률이 커질수록 큰 감쇠를 보여 고변형률(0.1 %)에서는 약 45 %로 감쇠를 보였다. 점토성분의 혼합비율이 커질수록 전단탄성계수는 작아지는 경향을 확인하였고, 점토의 혼합비율 50%(모래+점토 #3)에서 가장 낮은 전단탄성계수를 보이고 있다. 황토 혼합시료의 전단탄성계수는 약 42 %의 차이를 보이고 있고 변형률이 커지면서 약 47 %의 차이를 보이고 있다. 점토혼합시료와는 달리 황토혼합시료는 혼합비율 10 %에서 가장 작은 전단탄성계수 값을 보이고 있지만 다른 혼합비율에서는 뚜렷한 경향은 나타나지 않았다. Ash혼합시료의 경우, 저변형률에서는 63 %의 전단탄성계수 차이를 보이고 있고 변형률이 커질수록 약 78 %의 차이를 보이고 있다. 비회의 혼합비율이 70 %인 시료(BA+FA #4)는 점토나 황토의 같은 혼합비율을 가진 시료에 비해 최대 6배가량 높은 강도를



(a) Shear Modulus



(b) Normalized shear modulus, G/G_{max}

Fig. 2. Resonant column testing results

보이고 있어 0.005 % 이하의 저변형률에서의 전단탄성계수 값을 획득하지 못하여 Fig. 2(a)와 같은 경향을 보이는 것으로 판단된다. 이 경우를 제외하면 저변형률에서는 약 19 %의 전단탄성계수 차이를 보이고 변형률이 높아질수록 약 29 %의 차이를 보인다.

또한 모든 시료의 변형률에 따른 정규화 전단탄성계수를 보면 모든 시료가 변형률이 증가할수록 정규화 전단탄성계수는 감소하고 있다. 점토가 혼합된 시료는 변형률 0.01 %에서 정규화 전단탄성계수가 약 3~11 %까지 감소하고 있고 변형률 0.1 %에서는 약 30~40 % 정도의 감소를 보이고 있다. 점토가 70 % 혼합된 시료에서 변형률이 증가하여도 정규화 전단탄성계수는 다른 시료에 비하여 큰 값을 보이고 있고 점토가 30 % 혼합된 시료에서 가장 작은 값을 보이고 있다. 황토가 혼합된 시료에서는 변형률 0.01 %에서 정규화 전단탄성계수가 약 0~9 %까지의 감소를 보이고 있고, 변형률 0.1 %에서는 15~40 % 정도까지 감소를 보인다. 70 %의 황토가 혼합된 시료에서 가장 큰 정규화 전단탄성계수 값을 보이고 있고 50 % 혼합된 시료에서 가장 작은 정규화 전단탄성계수 값을 보인다. Ash가 혼합된 시료에서는 변형률 0.01 %에서 약 6~20 %의 정규화 전단탄성계수 값의 감소를 보이고 변형률 0.01 %에서는 약 30~70 %의 감소를 보이고 있다. 변형률 0.1 %에서는 약 30~67 %의 정규화 전단탄성계수 값의 감소를 보이는데 이는 유동화제에 의한

여 고결된 시료로서 강성이 큰 재료이기 때문에 판단된다.

또한 조립질 사질토로 공진주시험(구속압 100 kPa)을 수행한 자료(Kim & Choo, 2001)와 본 연구에서 획득한 정규화 전단탄성계수를 비교하면 Ash 계열이 혼합된 시료를 제외하고 시료의 비선형성이 조립질 사질토보다 작은 것을 알 수 있었다. 대체적으로 조립질 사질토는 정규화 전단탄성계수가 변형률 0.1 %에서 0.5 MPa 정도로 감소하고, 본 연구에서 수행된 점토와 황토가 혼합된 시료에서는 0.6 MPa로서 비선형성이 더 작게 나타났다. 이는 유동화 제어 의한 지반 재료의 고형화로 인하여 상대적으로 큰 전단변형률에서도 그 강성의 감쇠 정도가 작게 나타난 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 급속채움공법인 유동성 충전재 공법을 기계 기초 지지층으로 활용하기 위하여 점토혼합시료, 황토혼합시료, 석탄회혼합시료에 대하여 혼합비율을 달리하여 일축압축시험 및 공진주시험을 수행하여 강도 특성 및 동적 물성치를 확인하였다. 시험 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 점토혼합시료와 황토혼합시료, 석탄회혼합시료의 일축 압축시험 결과, 점토 및 황토혼합시료는 세립분을 30 % 까지 혼합하였을 때 강도 및 강성은 증가하는 경향을 보이지만 30 % 이상의 세립분 혼합비율이 증가할수록 강도 및 강성의 뚜렷한 증가는 나타나지 않았다. 또한 점토혼합시료는 황토혼합시료에 비해 큰 강도 및 강성을 보이고 세립분 혼합비율 증가와 관계없이 최대 2배 이상의 강도 및 강성을 보이고 있다. 반면 석탄회 혼합시료는 비회의 함유량이 증가할수록 강도 및 강성이 커지는 경향을 보이고 있으며, 점토혼합시료 보다 최대 3 배 이상, 황토혼합시료 보다 최대 6배 이상의 큰 강도 및 강성을 보이고 있다.
- (2) 점토혼합시료와 황토혼합시료, 석탄회혼합시료의 공진 주 실험 결과를 살펴보면 점토 및 황토를 혼합한 시료의 전단탄성계수는 초기강성에 비해 변형률이 커질수록 큰 감쇠를 보이고 황토가 혼합된 시료에서는 혼합비율 10 %에서 가장 작은 최대전단탄성계수를 보이고 있지만 다른 점토성분의 혼합비율에서는 뚜렷한 경향은 나타나지 않았다. 저회와 비회가 혼합된 시료의 경우, 전단탄성계수는 점토와 황토를 혼합한 시료와 비교하였을 때 감쇠 폭이 비교적 크게 나타났다.

- (3) 변형률에 따른 정규화 전단탄성계수를 통하여 전단변형률에 따른 전단탄성계수의 비선형성을 살펴보면, 세립분 혼합비율에 따른 특별한 경향은 나타나지 않았다. 점토혼합시료와 황토혼합시료의 경우 유사한 비선형성을 나타내었으며, 석탄회혼합시료의 경우 다른 두 혼합시료보다 상대적으로 큰 강성의 비선형성을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 (2011-0013147)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. ACI Committee 229 (1994), Controlled low strength materials (CLSM). American Concrete Institute, 229R-2, pp. 1~12.
2. Ahn, D. W., Jang, N. J., Cho, D. H., KIm, S. S. and Park, Y. D. (2008), Mixing characteristics of flowable material using blast furnace slag cement, Korean Society of Civil Engineers Conference, pp. 2192~2195 (in Korean).
3. Cheon, S. H., Jeong, S. S., Lee, D. S. and Kim D. H. (2006), Mechanical characteristics of accelerated plowable backfill materials using surplus soil for underground power utilities, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 26, No. 5, pp. 303~312 (in Korean).
4. Cho, D. H. (2005), Application of liquefied stabilization method using in-situ soil, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 53, No. 10, pp. 119~125 (in Korean).
5. Cho, D. H., Han, S. J., Kim, J. Y. and Kim, S. S. (2007), A experimented study on the estimation of optimum mixing ratio and the behavior for backfill by the flowable material using surplus soil, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 27, No. 3, pp. 175~184 (in Korean).
6. Jung, David., Kang, Y. Y., Yeon, J. M., Park, H. Y., Kim, Y. J., Yoo, H. Y., Yoon, C. W., Kim, M. S. and Shin, S. K. (2011), Determination of hazardous characteristics of PCDDs/DFs, PCBs, HCB, PAHs and phenols in coal ash, Journal of the Korea Solid Wastes Engineering Society, Vol. 28, No. 8, pp. 841~848 (in Korean).
7. Kim, H. S., Hong, S. W., Cho, S. D. and Kim, J. H. (1995), The assessment of water quality contamination following the utilization of coal ash as fill material, Journal of the Korean Geotechnical Engineering Society, Vol. 11, No. 3, pp. 5~15 (in Korean).
8. Kim, J. H., Cho, S. D., Kong, J. Y., Jung, H. S. and Chun, B. S. (2010), Curing characteristics of controlled low strength material made with coal ashes, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 11, No. 11, pp. 77~85 (in Korean).
9. Kim, D. S. and Choo, Y. W. (2001), Dynamic deformation characteristics of cohesionless soils in Korea using resonant

- column tests, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 17, No. 5, pp. 115~128 (in Korean).
10. Kong, J. Y., Kang, H. N. and Chun, B. S. (2010), Unconfined compressive strength and flow in controlled low strength materials made with coal ash, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 26, No. 1, pp. 75~83 (in Korean).
 11. Korea Coal Ash Recycling Association (2013), www.coalash.or.kr.
 12. Lee, K. H., Kim, J. D., Hyun, S. C., Song, Y. S. and Lee, B. S. (2007), Deformation behavior of underground pipe with controlled low strength materials with marine dredged soil, *Journal of the Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol. 7, No. 5, pp. 129~137 (in Korean).
 13. Lee, S. J., Lee, J. H., Chae, H. Y. and Chun, B. S. (2011), Characteristics of the lightweight foamed CLSM(Controlled Low-Strength Materials) with coal ash, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 12, No. 10, pp. 73~82 (in Korean).
 14. Park, J. H., Lee, K. H., Jo, J. Y. and Kim, S. N. (2004), Deformation characteristics of underground pipe with in-situ soil CLSM, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 20, No. 3, pp. 129~139 (in Korean).
 15. Seo, D. W., Kim, H. Y., Kim, K. M. and Chun, B. S. (2010), Characteristics of plasticizer lightweight foamed concrete according to changes of mixing ratio, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 11, No. 4, pp. 33~42 (in Korean).
 16. Takahashi, M, Ito, H. Abe, H. and Tanaka, H. (1994), A study of fluidity requirement for slurry backfill material using surplus soil, 1st Symposium on Soil Improvement, The Society of Materials Science, pp. 67~86.
 17. Tokyo Electric Power Company R&D Center (1996), Backfilling Method Using Slurry Material, pp. 152~174.
 18. Won, J. P. and Lee, Y. S. (2001), Properties of controlled low-strength material containing bottom ash, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 13, No. 3, pp. 294~300 (in Korean).