

지반 공동의 충진을 위한 발포성 경량그라우트재의 공학적 특성

Engineering Properties of Lightweight Foaming Grouting Materials for Underground Cavities

한 우 진¹⁾ · 이 종 섭¹⁾ · 변 용 훈[†]
Woojin Han · Jong-Sub Lee · Yong-Hoon Byun

Received: October 14th, 2017; Revised: October 26th, 2017; Accepted: January 18th, 2018

ABSTRACT : Underground cavities could induce road subsidence, which have been frequently observed in urban areas. Therefore, adequate backfilling materials and the restoring methods of the cavities are required to prevent the road subsidence. The objective of this paper is to evaluate the suitability of backfilling methods using foaming lightweight grouting materials considering the flow values, unit weights, and air contents at slurry and expanded states, and unconfined compressive strengths. The grouting materials consist of water, cement, and foaming agent whose proportions of water, cement, and foaming agent are 25: 25: 1.0 and 25: 25: 1.2. The flow values of the two materials are greater than 200 mm, and their unconfined compressive strengths at 28 days age are smaller than 1.3 MPa. From the results, the two proportions of materials are expected to be effectively used as a backfilling material. However, the material components should be carefully mixed because poor mix of these materials could induce non-homogeneous distribution of air bubbles. The unexpectedly non-homogeneous distribution of air bubbles may induce significant cracks or additional cavities.

Keywords : Road subsidence, Foaming lightweight grouting material, Foaming agent, Flow value, Unconfined compressive strength

요 지 : 최근 도심지 지역에서 도로함몰로 이어질 수 있는 지반 내 공동의 탐사를 수행하고 있으며, 도로함몰을 방지하기 위하여 지반 내 공동의 적절한 충진이 요구되고 있다. 본 논문에서는 발포성 경량그라우트재에 대하여 플로우 시험, 팽창 전후의 단위중량 및 공기량 측정, 그리고 일축압축강도 시험을 수행하여 공동 충진의 적합성과 공학적 특성을 평가하고자 하였다. 배합 재료는 물, 시멘트, 발포제를 사용하였으며, 발포제의 비율을 조절하여 두 가지 배합비로 조성된 시료에 대한 공학적 특성을 평가하였다. 각각의 시험 결과, 두 배합비 모두에서 플로우 값이 200mm 이상인 것으로 측정되고, 28일 일축압축강도가 1.3MPa 이하로 측정되어, 두 배합은 유동성 및 강도의 측면에서 공동 충진에 적합한 재료로 평가되었다. 단, 배합 시 물과 발포제가 충분히 혼합되지 않는 경우 재료 내부에 존재하는 기포가 불균질하게 분포될 수 있으므로 물과 발포제의 혼합 시 주의가 필요하다.

주요어 : 도로함몰, 발포성 경량그라우트재, 발포제, 플로우 값, 일축압축강도

1. 서 론

최근 도심지 내 도로함몰이 빈번하게 발생하고 있으며, 그 횟수가 점점 증가하는 추세이다. 국토부에 따르면 최근 3년간 전국적으로 약 3,000건에 달하는 도로함몰 피해가 발생하였으며, 서울에서 발생한 도로함몰의 원인은 주로 하수관의 노후화에 따른 손상, 지하수위 저하에 따른 토사의 유출 등인 것으로 알려져 있다(Bae et al., 2016; Bae et al., 2017; Lee & Yoon, 2017). 이에 따라, 도로함몰의 저감을 위하여 지반 내 공동 탐사가 수행된 바 있으며, 도로함몰로 발전할 수 있는 공동이 상당량 존재하는 것으로 파악되었다. 이러한 공동이 도로함몰과 같은 재해로 나타나기 이전에,

적절한 충진기술을 적용한 공동의 복구가 요구되고 있다.

도로함몰의 복구 시, 기존에는 모래 및 시멘트계 채움재를 사용하였으나, 이는 재료의 특성 및 시공방법에 따라 도심지에서 적용하기 어려운 점이 있다. 공동의 개착 후 모래를 사용하는 경우, 다짐 시 소음 및 진동으로 인한 피해가 발생할 수 있으며, 지하매설물이 존재 시 매설물 하부의 다짐이 불량하여 재함몰의 원인이 될 수 있다(Cheon et al., 2006). 반면, 시멘트계 채움재 사용 시에는 펌핑을 이용하여 비개착 상태에서 공동의 충진이 가능하다는 장점이 있다. 그러나, 채움재의 유동성이 충분하지 않거나 공동의 형상이 복잡한 경우 완전한 충진이 어려울 수 있으며, 채움재의 강도가 큰 경우 매설물의 보수를 위한 굴착이 어려울 수 있다.

1) School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

† School of Agricultural Civil & Bio-Industrial Engineering, Kyungpook National University (Corresponding Author : yhbyun@knu.ac.kr)

충분한 유동성 및 굴착 가능한 강도를 나타내는 채움재 중, 경량기포콘크리트와 유동성 채움재(Controlled low-strength material, CLSM)가 사용되어 왔다. 경량기포콘크리트는 슬러리에 미리 발생시킨 기포를 혼입하여 배합하는 경량콘크리트의 한 종류로, 보통콘크리트에 비하여 강도와 단위중량이 낮기 때문에 공동 충전, 연약지반 보강, 연직성토, 경량성토재료로 사용된 바 있으며(Byun et al., 1997; Park et al., 1997), 최근에는 현장토를 사용하여 경량화된 성토재 및 뒷채움재로 활용한 연구들이 수행되어 왔다(Lee et al., 2015; Kang, 2016). 공동 충전용으로 사용되는 경량기포콘크리트의 경우 공동에 재료를 주입할 때, 공동 주변에 존재하는 균열 및 공극으로 유출될 수 있으며, 건조수축이 발생하기 때문에 완전한 채움이 어려운 것으로 알려져 있다(Seo, 2010). 유동성 채움재는 ACI Committee 116(2000)에서 장기강도가 8.3MPa 이하인 저강도 콘크리트로 규정하고 있으며, 일반적으로 재굴착을 고려하여 2.1MPa 이하인 것을 사용한다. 최근에는 유동성 채움재에 일반적으로 적용되는 물, 골재, 시멘트의 배합에 산업부산물 및 재활용 가능한 재료를 대체 재료로 치환한 유동성 채움재에 대한 연구가 수행되었으며(Kong et al., 2010; Do et al., 2015; Do & Kim, 2016; Kim et al., 2016), 유동성 채움재의 탄성과 및 전자기파 특성과 일축압축강도의 관계로부터 양생시간에 따른 유동성 채움재의 강도 특성을 평가하는 연구가 수행된 바 있다(Han et al., 2015; Byun et al., 2016; Han et al., 2016a; Han et al., 2016b). 그러나, 기존의 시멘트계 채움재는 경화에 따른 건조수축으로 인하여 작은 공동의 발생 가능성이 여전히 남아 있기 때문에, 이러한 단점을 보완하여 보다 밀실한 충전이 가능한 새로운 특성의 채움재 개발이 필요한 실정이다.

본 논문에서는 공동 충진을 위한 재료로서 체적 팽창이 발생하는 발포성 경량그라우트재의 공학적 특성을 평가하기 위하여, 다양한 시험을 수행하였다. 먼저, 발포성 경량그라우트재의 특성에 대하여 기술하였으며, 플로우 시험, 단위중량 및 공기량 시험, 일축압축강도 시험 등을 수행한 결과를 기술하였다. 마지막으로, 각각의 시험을 통하여 획득된 결과를 바탕으로 공동 충전 재료로서의 적합성을 평가하고자 하였다.

2. 발포성 경량그라우트재

2.1 재료 배합

본 연구에서 사용된 발포성 경량그라우트재는 배합 재료로 보통 포틀랜드 시멘트(이하 시멘트), 발포제, 그리고 물을 사용하였으며, 배합에 사용된 시멘트와 발포제의 화학

Table 1. Chemical components of cement and foaming agent

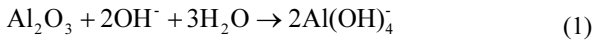
Materials	Cement	Foaming agent
SiO ₂ [%]	18.8	60.4
Fe ₂ O ₃ [%]	4.10	2.75
Al ₂ O ₃ [%]	4.26	20.5
CaO [%]	61.6	3.31
MgO [%]	4.82	1.67
K ₂ O [%]	1.06	0.95
Na ₂ O [%]	1.35	5.13
lg. loss [%]	2.70	5.71

성분비는 Table 1과 같이 구성된다. 시멘트의 구성성분은 CaO가 61.6%, SiO₂가 18.8%로 대부분을 차지하며, MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃를 4~5% 정도 포함하고 있다. 또한, 실험에 사용한 발포제는 SiO₂를 60.4%, Al₂O₃를 20.5%만큼 포함하고 있으며, 그 외의 구성성분으로 NaO, CaO, Fe₂O₃, 그리고 MgO가 약 1~6%의 비율로 존재한다. 시멘트와 발포제는 회색 분말 형태의 재료를 사용하였으며, 그 비중은 각각 3.14와 2.21로 나타났다.

본 연구에서는 물과 시멘트의 비율이 동일할 때 발포제의 양이 증가함에 따라 강도가 감소할 것을 고려하여, 시행착오법을 토대로 목표강도에 따라 발포제의 비율을 달리하여, 물, 시멘트, 발포제를 25: 25: 1.0의 비율로 혼합한 배합비 A와 25: 25: 1.2의 비율로 혼합한 배합비 B와 같이 두 가지의 중량비로 선정하였다. 물과 발포제의 혼합 시 충분한 기포를 발생시키기 위하여 정해진 배합비에서 요구되는 재료의 양에 따라 계량한 물에 발포제를 투입하고 90초간 교반기로 혼합하였다. 그 후, 기포가 충분히 발달된 상태에서 시멘트를 투입하였으며, 시멘트가 서로 응집되지 않도록 60초간 추가로 교반하였다. 여기서 교반시간은 콘크리트 시방서(2009)에서 제안된 일반콘크리트의 배합시간인 60초~90초 이상과 본 연구에서 사용된 발포성 경량그라우트재의 유동성 차이를 토대로 판단하여 결정되었다.

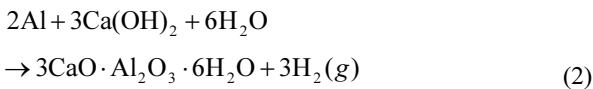
2.2 발포제 특성

배합에 사용된 발포제는 두 가지 과정에 의해 기체를 발생시킨다. 먼저, 물과의 혼합 시 표면에 존재하는 공기가 물과 발포제와 함께 교반되면서 기포를 발생시키는 물리적 과정이 있으며, 시멘트 추가 후 발포제 내에 포함된 알루미늄 분말의 반응에 의한 화학적 과정이 있다. 물리적 과정으로 발생한 기포는 시멘트 혼입 시 공기의 막이 터짐에 따라 그 양이 감소하며, 슬러리에는 미세한 기포가 존재하게 된다. 화학적 과정에서는 발포제에 포함된 알루미늄(Al) 분말이 다음의 Eq. (1)과 같은 반응을 나타낸다.



Al 분말은 공기 중에서 Al_2O_3 의 막으로 둘러싸여 있으며, 강알칼리 상태의 시멘트 페이스트에서 Al_2O_3 의 막으로 코팅된 Al 분말이 존재할 경우, Eq. (1)과 같이 Al_2O_3 의 막이 분해된다.

다음으로, 강알칼리에 노출된 Al은 Eq. (2)와 같이 반응하여 H_2 기체를 발생시키며, 시멘트 페이스트 내부에서 발생된 H_2 기체에 의하여 시료가 팽창하게 되며, H_2 기체는 그라우트재가 응결됨에 따라 공극을 통해 밖으로 빠져나가게 된다(Hwang & Song, 1997; Jung, 2012).



3. 실험 및 결과

본 논문에서는 플로우 시험, 팽창 전후의 단위중량 및 공기량 산정, 그리고 양생 28일 후의 일축압축강도 시험을 수행하여 발포성 경량그라우트재의 공학적 특성을 평가하였다.

3.1 플로우 시험

본 연구에서 사용된 발포성 경량그라우트재의 유동성을 평가하기 위하여, ASTM D 6103(2004)에 따라 플로우 시험을 수행하여 플로우 값을 측정하였다. 플로우 시험은 발포성 경량그라우트재의 배합 후 60초 이내에 평평한 수밀성의 판 위에 올려둔 내경 75mm, 높이 150mm인 실린더형 몰드에 배합된 시료를 채우고, 몰드를 판에서 수직하게 들어올림으로써 수행되었다. 시료가 방사형으로 퍼질 때, 시료가

가장 멀리 퍼진 길이와 그에 대한 수직길이의 평균을 플로우 값으로 결정하였다. ACI Committee 229(1999)에 따르면 플로우 값이 200mm 이상인 경우 고유동성을 나타내는 것으로 판단하며, 이러한 고유동성 재료는 복잡한 구조의 공동 충전 시 주입이 용이하고, 자기 수평성 및 자기 다짐성이 있어 별도의 다짐과정이 필요하지 않은 것으로 알려져 있다.

물, 시멘트, 발포제의 배합비율이 25: 25: 1.0인 경우(배합비 A)와 25: 25: 1.2인 경우(배합비 B)에 대한 플로우 값은 Fig. 1과 같이 각각 575mm와 458mm로 측정되었으며, 두 경우 모두 고유동성 기준인 200mm를 크게 초과하여, 본 연구에 사용된 배합비는 공동 충전에 충분한 유동성을 나타내는 것으로 평가되었다. Saikia et al.(2012)의 결과에 따르면, 시멘트 모르타르는, 기포의 양이 많을수록 플로우 값이 낮게 측정되는 것으로 나타났으며, 이는 본 연구에서 발포제의 양이 더 많은 배합비 B에서 플로우 값이 작게 나타난 근거를 설명해준다.

3.2 단위중량, 공기량 및 팽창률 산정

발포성 경량그라우트재의 슬러리 상태 및 팽창 후 응결 상태에서의 단위중량을 측정하기 위하여 KS F 2409(2016)에 따라 실험을 수행하였다. 먼저, 슬러리 상태에서의 단위중량 측정방법은 다음과 같다. Fig. 2(a)와 같이 내경 140mm, 높이 130mm의 금속제 원통형 용기에 배합된 시료를 약간 넘치도록 채운 후, 수밀성의 투명판으로 용기를 덮었을 때 흘러나온 시료를 제거하고, 시료를 채운 용기와 투명판의 무게를 측정한다. 측정된 용기 및 투명판의 무게를 제외할 때, 시료만의 무게를 산정할 수 있고, 용기의 부피를 고려하여 슬러리 상태에서의 단위중량을 산정하게 된다.

다음으로, 팽창 후 응결 상태에서의 단위중량 측정방법은 다음과 같다. Fig. 2(b)와 같이 금속제 용기에 담긴 시료가

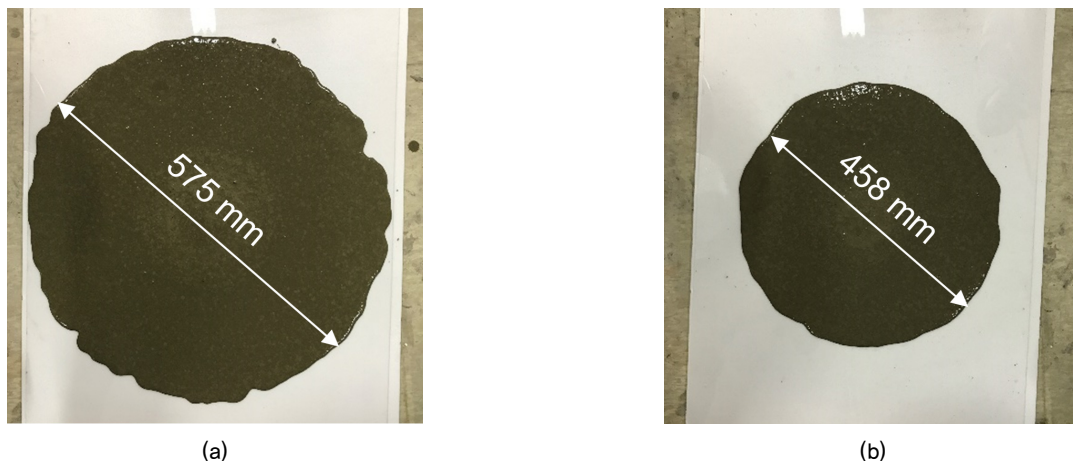


Fig. 1. Flow tests with different foaming agent contents: (a) mixing ratio A; (b) mixing ratio B

발포 작용에 의하여 충분히 팽창할 때까지 용기를 랩으로 덮고 약 1일간 습윤상태에서 양생한다. 팽창이 완료되었을 때, 용기보다 부풀어 오른 시료를 제거하고 용기와 시료의 무게를 측정하여, 팽창이 완료된 시료만의 무게를 산정할 수 있으며, 용기의 부피로 나누어 팽창 후 응결 상태에서의 단위중량을 측정할 수 있다.

질량방법에 의하여 굳지 않은 콘크리트의 공기량을 산정하는 KS F 2409(2016)에 따르면, 시료의 단위중량 측정값 (W)과 시료에 공기가 전혀 없다고 가정했을 때의 이론적 단위중량(T)을 이용하여 Eq. (3)에 나타난 것과 같이 시료 내의 공기량(A)을 산정할 수 있다.

$$A = \frac{T - W}{T} \times 100(\%) \quad (3)$$

여기서, A 는 시료 내의 공기량이며, W 와 T 는 각각 시료의 단위중량 측정값과 시료 내에 공기가 전혀 없다고 가정했을 때의 단위중량이다. 위의 Eq. (3)을 이용하면, 기포를 포함하는 시멘트질 재료의 공기량을 산정할 수 있다(Juillerat et al., 2012; Sang et al., 2015).

또한, 슬러리 상태에서 측정한 단위중량(M_S)과 팽창 후 응결 상태에서 측정한 단위중량(M_E)을 이용하여 팽창 전후 시료의 질량이 동일하다고 가정했을 때의 팽창률, 즉, 이론적 팽창률(V_E/V_S)을 Eq. (4)와 같이 산정할 수 있다.

$$\frac{V_E}{V_S} = \frac{W_E / M_E}{W_S / M_S} = \frac{M_S}{M_E} \quad (4)$$

여기서, V_S , V_E 는 슬러리 상태, 팽창 후 상태에서의 부피이며, W_S , W_E 는 각각의 상태에서의 질량, 그리고 M_S , M_E 는 단위중량이다.

단위중량으로부터 산정된 이론적 팽창률과 발포성 경량 그라우트재의 실제 팽창률을 비교하기 위하여 부피 팽창 실험을 수행하였다. 내경 150mm의 아크릴제 실린더형 용기를 이용하여, 용기 내에 슬러리를 약 200mm의 높이만큼 채운 후 팽창이 완료될 때까지 약 1일간 습윤 양생하였다. 슬러리를 용기에 채운 초기 높이를 L_0 , 시료의 팽창 후 높이를 L 로 선정하여, 실제 팽창률(L/L_0)을 산정하였다.

두 배합비에 대한 슬러리 상태 및 팽창 후 응결상태에서 시료의 단위중량을 측정하고, 측정값에 대한 공기량을 산정하여 Table 2에 정리하였다. 또한, 측정값으로부터 이론적 팽창률을 산정하고, 이를 실제 부피 팽창률의 결과와 비교하였다. 배합비 A 및 B의 슬러리 상태 단위중량은 각각 13.28kN/m^3 및 13.57kN/m^3 , 팽창 후 응결상태의 단위중량은 각각 7.98kN/m^3 및 7.80kN/m^3 으로 서로 유사하게 나타

Table 2. Material properties of the mixed specimens

Mixing ratio		A	B
		25 : 25 : 1.0 (w) : (c) : (f)	25 : 25 : 1.2 (w) : (c) : (f)
Unit weight [kN/m ³]	Slurry	13.28	13.57
	Expanded	7.98	7.80
Expansion ratio [%]	Estimated	149.2	153.2
	Calculated	166.5	174.0
Air contents [%]	Slurry	11.4	9.7
	Expanded	46.8	48.1

w, c, and f denote water, cement, and foaming agent, respectively

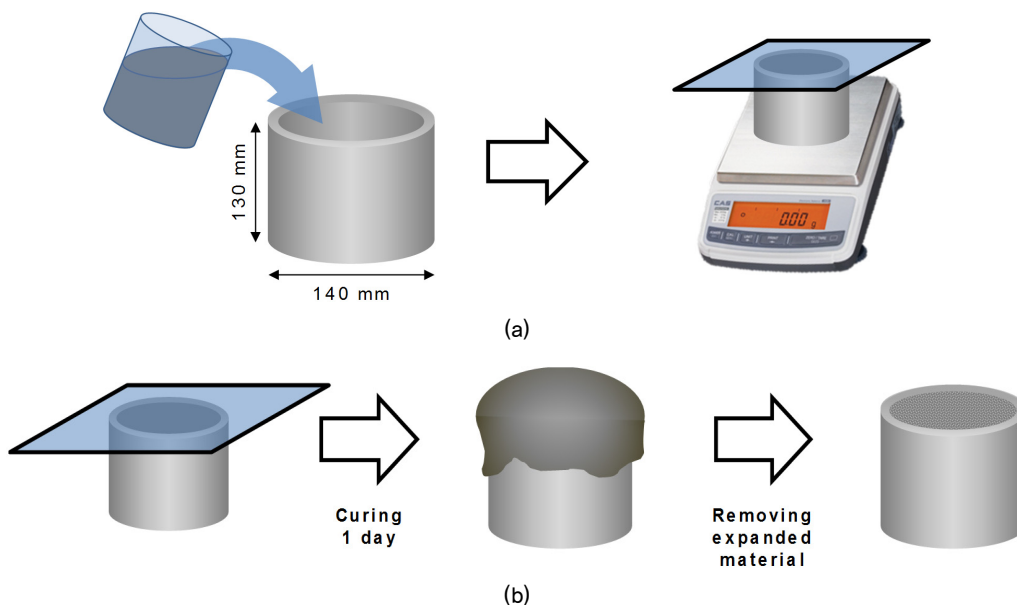


Fig. 2. Test procedures for evaluation of unit weight: (a) slurry state; (b) expanded state

났으며, 두 배합비에서 발포제 함량이 단위중량에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 공기량은 슬러리 상태에서 각각 11.4, 9.7% 팽창 후 응결상태에서 46.8, 48.1%로 측정되어 두 배합비의 경우에 공기량에 대한 발포제 함량의 영향은 미미한 것으로 평가되었다. 또한, 단위중량으로부터 산정된 이론적 팽창률은 Table 2와 같이 각각의 배합비에서 166.5, 174.0%로 산정되었다. 실제 팽창률을 측정하기 위한 실험에서는 Fig. 3과 같이 배합비 A인 경우, 초기 높이 193mm에서 288mm까지 팽창하여 약 149.2%만큼 부피가 증가하였으며, 배합비 B인 경우에는 높이가 205mm에서 314mm까지 증가하여 팽창률이 약 153.2%로 측정되었다. 팽창 후 응결상태에서 단위중량의 경우 배합비 B에서 단위중량이 작게 측정되고 이론적 팽창률이 크게 산정되어, 발포제의 함량이 높은 경우에 팽창 효과가 크다고 판단된다. 실제 팽창률 측정결과에서도 두 배합비의 차이는 적지만 배합비 B의 팽창률이 크게 나타났다.

3.3 일축압축강도

일축압축강도 시험은 ASTM D 4832(2002)에 기초하여 수행하였다. 하중용량 19.62kN의 일축압축시험기를 사용하여 분당 1mm의 재하속도로 시험을 수행하였다. 강도 시험을 위한 공시체는 직경 50mm, 높이 100mm의 시료를 재령 일마다 5개씩 한 시험에 이용하였으며, 강도 측정값의 최대 및 최소를 제외한 3개의 평균값을 해당 재령일의 일축압축강도로 결정하였다. 또한, 강도시험 이전에 공시체의 무게를 측정하여 공시체의 양생 기간에 따른 단위중량을 측정하였다.

지하매설물 설치 및 공동 복구 시 모래의 대체재로서 사용

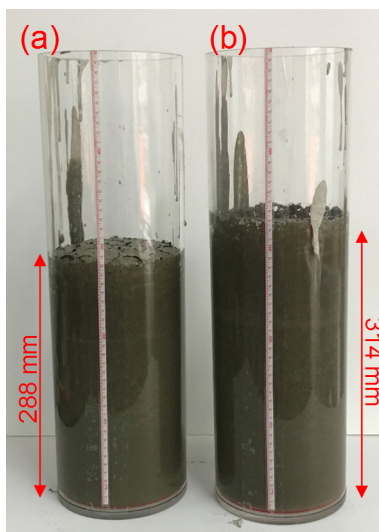


Fig. 3. Expansion tests for foaming agent contents at expanded state: (a) mixing ratio A; (b) mixing ratio B

되는 유동성 채움재(CLSM)의 경우, 일축압축강도의 기준은 재굴착성 및 조기 교통개방 가능성 등을 고려하여 문헌에 따라 다양하게 규정되고 있다. ACI Committee 229(1999)에 따르면 재굴착 시, 굴착 방법에 따라 인력굴착의 경우 0.3MPa 이하의 강도가 요구되며, 기계굴착의 경우 0.7~1.4MPa의 강도를 요구하고 있다. Naik et al.(2004)는 재굴착을 위하여 양생 28일 강도가 0.6~1.3MPa이 요구된다고 제시한 바 있으며, Takahashi et al.(1994), Pons et al.(1998)은 도로 포장과 함께 교통을 정상적으로 개방할 수 있는 최소한의 강도로 0.15MPa을 제시하였다. 일본에서는 매설관 뒷채움 이후 교통의 정상화를 위해 차도 하부에 사용되는 채움재의 강도를 0.13MPa 이상으로 요구하고 있으며(PWRI: Public Works Research Institute, 2007), 각각의 기준을 Fig. 4에 종합하여 나타내었다. 본 논문에서는 재굴착성을 고려하여 시료의 28일 일축압축강도가 1.3MPa 이하가 되도록 기준을 설정하였다.

각 배합비에 따라 제작된 공시체는 랩으로 포장 후 밀폐된 용기에서 습윤양생하였으며, 배합비 A의 시료는 양생 후 1, 3, 7, 14, 그리고 28일에, 배합비 B의 시료는 3, 7, 14, 그리고 28일에 압축강도 및 단위중량을 측정하였다. 각 배합조건에서 양생 일정에 따른 단위중량 변화를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5와 같이 단위중량은 양생기간에 상관없이 배합비 A인 경우가 배합비 B인 경우보다 크게 측정되었으며, 시간이 지남에 따라 배합비 A의 경우는 7.65kN/m³으로, 배합비 B의 시료는 7.16kN/m³으로 수렴하였다. 각 배합조건에서 준비된 시료에 대하여 수행한 일축압축강도 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6과 같이 일축압축강도는 전체적으로 배합비 A의 강도가 배합비 B일 때에 비하여 높게 측정

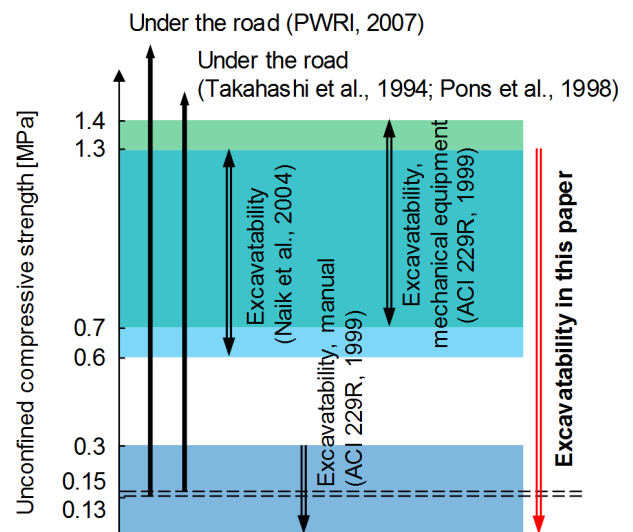


Fig. 4. Specifications for unconfined compressive strength of backfill material

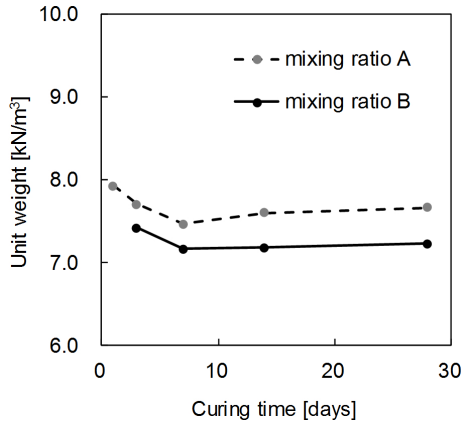


Fig. 5. Unit weight with curing time

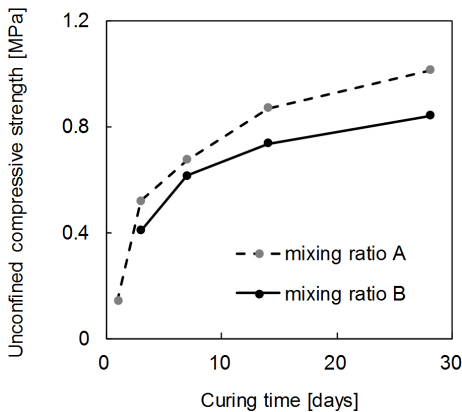


Fig. 6. Unconfined compressive strength with curing time

되었고, 28일 강도는 배합비 A에서 1.01MPa, 배합비 B에서 0.84MPa이 측정되었다. 따라서, 공시체의 단위중량 및 일축 압축강도는 양생기간에 상관없이 발포제 함량이 많을수록 작게 산정됨을 알 수 있다. 두 배합비의 28일 강도는 약 0.2MPa의 차이가 존재하지만 두 경우 모두 재굴착이 가능한 강도로 평가된다. 단, Fig. 6로부터는 조기 교통개방의 기준인 0.13MPa에 도달하는 시간을 판단할 수 없기 때문에, 조기 교통개방을 위해서는 조기 강도발현이 필요하며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 토 의

공동 충전재로써 발포성 경량그라우트재를 평가하기 위하여 가장 중요한 공학적 특성은 시공성을 고려한 유동성과 지하매설물의 보수보강 등 재굴착이 요구되는 경우에 대한 강도 특성이며, 그 기준을 각각 플로우 값 200mm 이상 및 일축압축강도 1.3MPa 이하로 설정하였다. 본 논문에서 평가한 두 가지 배합비의 재료는 유동성 및 강도의 기준을 배합비 A의 경우 플로우 값 575mm와 일축압축강도 1.01MPa

로 만족하며, 배합비 B의 경우 플로우 값 458mm와 일축압축강도 0.84MPa로 만족하여 공동 충전용 재료에 적합한 특성을 보유하는 것으로 판단된다.

발포성 경량그라우트재와 유동성 채움재의 가장 큰 차이점은 체적 팽창에 의한 공동 충전성이다. 유동성 채움재와 달리, 발포성 경량그라우트재는 발포제에 포함된 알루미늄 성분으로부터 H₂ 기체를 발생시켜 재료의 체적이 팽창하고, 공동의 완전한 충전이 가능하도록 한다. 발포성 경량그라우트재는 팽창특성에 의하여 공동을 충전하기 때문에, 온도 등 외부 요인에 의하여 팽창률이 변화할 경우 배합재료의 물량산정 시 오차가 발생할 수 있다. 이때, 이론적 팽창률은 화학반응에 의한 기체의 유출을 고려하지 않은 경우의 팽창률이므로 배합 재료의 물량 산정 시 실제 팽창률보다 크게 산정되는 것을 고려할 필요가 있다. 본 논문에서는 두 가지 배합비에 대한 이론적 및 실제 팽창률을 산정하였으며, 배합비 A에서 이론적 팽창률이 166.5%, 실제 팽창률 149.2%로 측정되어 실제 팽창률은 이론적 팽창률의 89.6%로 나타났다. 배합비 B에서는 이론적 팽창률이 174.0%, 실제 팽창률이 153.2%로 산정되어 실제 팽창률이 이론적 팽창률의 88.0% 수준인 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서 제안된 발포성 경량그라우트재의 현장적용 시, 이론적 팽창률 대비 80~85%의 팽창을 가정하여 배합재료의 물량을 산정한다면 공동의 완전한 충전이 가능할 것으로 예상된다.

물과 발포제 혼합 시 발생하는 기포를 충분히 발생시키지 않은 상태에서 시멘트 배합을 진행할 경우, 시료 내부에 존재하는 미세기포의 분포가 불균질할 수 있으며, 시멘트 투입 후 발포제에 의하여 발생하는 기포의 크기 및 발생속도가 상이하여, 기포가 불균질하게 분포할 수 있다. 특히, 크기가 큰 기포의 경우 슬러리 상부로 떠오르게 되고, 떠오른 기포가 서로 합쳐져 시료에 큰 공극으로 이어질 수 있다. 한 예로, Fig. 7과 같이 충전된 시료 상부에 균열 및 공극이 발생할 수 있으며, 이는 지반 내 미세 공동 또는 도로침하가



Fig. 7. Examples for non-homogeneous air distribution in specimens

지 이어질 수 있는 원인이 될 수 있다. 따라서, 물과 발포제 혼합 시 충분한 시간을 적용하여, 시료내부에 미세기포를 충분히 발달시킬 필요가 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 도로함몰 발생 시 공동 충전 재료로 발포성 경량그라우트재를 적용하기 위하여 물, 시멘트, 발포제의 비율이 다른 두 가지 배합비에서 발포성 경량그라우트재의 적합성을 평가하고자 하였다. 재료의 공학적 특성을 평가하기 위하여 플로우 시험, 단위중량 시험, 공기량 시험, 부피 팽창 실험, 일축압축강도 시험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 플로우 시험은 ASTM D 6103(2004)에 따라 수행하였으며, 두 배합비에서 모두 공동 충전에 용이한 유동성을 갖고 있는 것으로 나타났다.
- (2) 단위중량 시험은 KS F 2409(2016)에서 정한 규격의 용기를 사용하여 측정하였으며, 슬러리 및 팽창이 완료된 각각의 상태에서 두 배합비의 단위중량이 유사하게 측정되어 두 배합비의 단위중량은 발포제 함량의 영향이 거의 나타나지 않은 것으로 평가되었다.
- (3) 단위중량 시험에서 측정된 값과 공기가 시료 내에 포함되어 있지 않다고 가정하였을 때의 단위중량 값에 대한 식을 이용하는 질량방법으로 공기량을 산정한 결과, 두 가지 배합비에서 슬러리 상태의 공기량은 팽창 후 상태에서 보다 작게 나타났으며, 두 배합비의 경우 공기량에 대한 발포제 함량의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.
- (4) 단위중량으로부터 이론적 팽창률을 산정하고, 부피팽창 실험으로부터 실제 팽창률을 산정하여 두 팽창률을 비교하였으며, 이론적 팽창률과 실제 팽창률은 모두 발포제 함량이 많은 배합비에서 큰 값이 산정되었다. 그러나 두 가지 배합비에서 실제 팽창률이 이론적 팽창률의 88~90% 수준으로 유사하게 나타났다.
- (5) 양생 28일 후 일축압축강도 측정 결과, 배합비 A 및 B의 28일 강도는 1.3MPa 이하로 나타났으며, 이는 재굴착이 가능한 강도이지만, 조기 교통개방을 위한 최소강도에 도달하는 기간을 알 수 없기 때문에, 조기 교통개방을 위해서는 조기 강도 발현에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 논문에서 제안된 두 배합비는 공동 충전재로서 요구되는 유동성과 압축강도를 만족하기 때문에 도로함몰에 의한

공동의 충전에 적합한 재료인 것으로 판단된다. 또한, 현장 적용 시, 실제 팽창률이 이론적 팽창률에 비하여 80~85% 발생할 것으로 예상하여 재료의 물량을 산정한다면, 공동의 완전한 충전이 가능할 것으로 기대된다. 단, 배합 시 충분한 혼합이 이루어지지 않는 경우 시료 내 기포가 균질하지 않을 수 있으므로 재료 혼합에 대한 주의가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청의 창업성장-기술개발사업 [S2428415, 발포성 충전재료를 활용한 지반동공(싱크홀)복구기술]과 2017년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2017R1A2B3008466)의 일환으로 수행하였습니다.

References

1. ACI Committee 116 (2000), Cement and concrete terminology, American Concrete Institute, ACI 116R-00, pp. 1~73.
2. ACI Committee 229 (1999), Controlled Low-Strength Materials (CLSM), American Concrete Institute, ACI 229R-99, pp. 1~15.
3. ASTM D 4832 (2002), Standard test method for preparation and testing of Controlled Low Strength Material (CLSM) Test Cylinders, American Society for Testing Materials, pp. 1~5.
4. ASTM D 6103 (2004), Standard test method for flow consistency of Controlled Low-Strength Material (CLSM), American Society for Testing and Materials, pp. 1~5.
5. Bae, Y. S., Shin, S. Y., Won, J. S. and Lee, D. H. (2016), The road subsidence conditions and safety improvement plans in Seoul, The Seoul Institute, pp. 1~60 (in Korean).
6. Bae, Y. S., Kim, K. T. and Lee, S. Y. (2017), The road subsidence status and safety improvement plans, Journal of the Korea Academy Industrial Cooperation Society, Vol. 18, No. 1, pp. 545~552 (in Korean).
7. Byun, K. J., Song, H. W. and Park, S. S. (1997), Development of lightweight foamed concrete using polymer foam agermt, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 9, No. 1, pp. 165~172 (in Korean).
8. Byun, Y. H., Han, W. J., Tutumluer, E. and Lee, J. S. (2016), Elastic wave characterization of controlled low-strength material using embedded piezoelectric transducers, Construction and Building Materials, Vol. 127, pp. 210~219.
9. Cheon, S. H., Jeong, S. S., Lee, D. S. and Kim, D. H. (2006), Mechanical characteristics of accelerated flowable 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).
10. Do, T. M., Kim, Y. S. and Ryu, B. C. (2015), Improvement of engineering properties of pond ash based CLSM with cementless binder and artificial aggregates made of bauxite residue, International Journal of Geo-Engineering, Vol. 6, No. 8.

11. Do, T. M. and Kim, Y. S. (2016), Engineering properties of Controlled Low Strength Material (CLSM) incorporating red mud, *International Journal of Geo-Engineering*, Vol. 7, No. 7.
12. Han, W. J., Lee, J. S., Cho, S. D., Kim, J. H. and Byun, Y. H. (2015), Study on correlation between compressive strength and compressive wave velocity for CLSM according to curing time, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 16, No. 11, pp. 5~11 (in Korean).
13. Han, W. J., Lee, J. S., Byun, Y. H., Cho, S. D. and Kim, J. H. (2016a), Characteristics of shear waves in controlled low strength material with curing time, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 17, No. 3, pp. 13~19 (in Korean).
14. Han, W. J., Lee, J. S., Byun, Y. H., Cho, S. D. and Kim, J. H. (2016b), Study on characteristics of controlled low strength material using time domain reflectometry, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 17, No. 4, pp. 33~37 (in Korean).
15. Hwang, J. Y. and Song, X. M. (1997), Replacing Al powder with Al slag or recycled foil in cellular concrete, *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, Vol. 49, No. 8, pp. 29~30.
16. Juillerat, F. K., Gonzenbach, U. T. and Gauckler, L. J. (2012), Tailoring the hierarchical pore structures in self-setting particle-stabilized foams made from calcium aluminate cement, *Materials Letters*, Vol. 70, pp. 152~154.
17. Jung, M. Y. (2012), Manufacturing technology of the autoclaved lightweight concrete with the ground granulated blast furnace slag, *Review of Architecture and Building Science*, Vol. 56, No. 8, pp. 41~47 (in Korean).
18. Kang, D. K. (2016), Dynamic behavior of quay wall structure backfilled with lightweight air-foamed soil, Ph. D. Thesis, Incheon National University, pp. 146 (in Korean).
19. Kim, Y. S., Dang, M. Q. and Do, T. M. (2016), Studies on compressive strength of sand stabilized by alkali-activated ground bottom ash and cured at the ambient conditions, *International Journal of Geo-Engineering*, Vol. 7, No. 15.
20. Kong, J. Y., Kang, H. N. and Chun, B. S. (2010), Characteristics of unconfined compressive strength and flow in controlled low strength materials made with coal ash, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 1, pp. 75~83 (in Korean).
21. KS F 2409 (2016), Method of test for unit mass and air content of fresh concrete, Korean Standards association, pp. 1~9 (in Korean).
22. Lee, S. M. and Yoon, H. M. (2017), A study for improvement of policy on ground subsidence prevention in urban areas, *Seoul Studies*, Vol. 18, No. 1, pp. 27~42 (in Korean).
23. Lee, Y. J., Yea, G. G., Park, S. W. and Kim, H. Y. (2015), Behavior characteristics of underground flexible pipe backfilled with lightweight foamed soil, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 14, No. 1, pp. 43~50 (in Korean).
24. Naik, T. R., Kraus, R. N., Chun, Y., Siddique, R. and Botha, E. D. (2004), Properties of flowable self-compacting slurry using quarry by-products and ponded CCPs, *Special Publication*, Vol. 221, pp. 523~538.
25. Park, S. S., Song, H. W. and Byun, K. J. (1997), Mechanical properties of lightweight foamed concrete using polymer foam agent, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 9, No. 1, pp. 173~181 (in Korean).
26. Pons, F., Landwermyer, J. S. and Kerns, L. (1998), Development of engineering properties for regular and quick-set flowable fill, *The design and application of controlled low-strength materials (Flowable fill)*, ASTM International, pp. 67~86.
27. Public Works Research Institute (2007), Manual for utilization of liquefied stabilized soil, Gihodo Shuppan Co., Ltd., pp. 121 (in Japanese).
28. Saikia, N., Cornelis, G., Cizer, Ö., Vandecasteele, C., Van Gemert, D., Van Balen, K. and Van Gerven, T. (2012), Use of Pb blast furnace slag as a partial substitute for fine aggregate in cement mortar, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol. 14, No. 2, pp. 102~112.
29. Sang, G., Zhu, Y., Yang, G. and Zhang, H. (2015), Preparation and characterization of high porosity cement-based foam material, *Construction and Building Materials*, Vol. 91, pp. 133~137.
30. Seo, D. W. (2010), Engineering characteristics of lightweight foamed concrete used for backfill of the structure, Master's thesis, Hanyang University, pp. 58 (in Korean).
31. 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.