» 연구논문 «

지반 함몰 복구용 저강도·고유동 충전재로서 기포콘크리트 연구 및 현장적용

마영* · 김범석* · §우양이** · 정경현* · 송헌영***

*재인스기초건설(주), **(주)에이지, ***동부엔지니어링(주)

Field Applicability and Manufacturing of Foam Concrete as Filler with the Low-strength and High-flow for Repair System of Ground Subsidence

Young Ma*, Beom-Seok Kim*, §Yang-Yi Woo**, Kyung-Hun Jung* and Hun-Young Song***

*Jaeins Foundation Construction Co., LTD. Songpa-gu, Seoul 05538, Korea

**Research Center, AZ Co., Ltd., Chungcheongnam-do 33415, Korea

***Dongbu Engineering, 372, Hangang-daero, Yongsan-gu, Seoul 04323, Korea

요 약

본 연구는 산업부산물을 다량 활용하여 지반 함몰 발생시 긴급 복구를 위한 저강도·고유동 경량기포 콘크리트의 최적배합을 설정하고, 이를 현장에 적용하여 가능성을 평가하기 위한 연구이다. 실험의 변수로는 배합수 대비 기포제의 혼입률과 페이스트 용적대비 기포의 혼입률이며, 실험을 통하여 선정된 최적배합으로 현장적용을 통한 기포특성을 평가하였다. 실험결과 배합수 대비 최적의 기포제 혼입률은 10%가 가장 효율적이라 판단되었으며, 페이스트 대비 선발포된 기포의 혼입률은 170%에서 목표를 만족하였다. 그러나, 현장적용 시 안정적인 품질확보를 위하여 기포 혼입률은 140%로 현장의 배합에 적용하였다. 친환경 결합재를 이용한 저강도·고유동 경량기포 콘크리트의 현장적용 결과 목표성능을 모두 만족하여 지반복구용 배합 및 공법으로서의 가능성을 확인하였다. 그러나 기포 및 페이스트간의 분리로 인한 상하부의 품질편차가 발생함에 따라 이의 개선을 위한 후속연구가 요구된다.

주제어 : 싱크홀, 기포 콘크리트, 투수계수, 저강도 고유동 충전재, 순환 유동층 보일러 플라이애시

Abstract

The objectives of this study were to identify the optimal mix of foam concrete with the low-strength and high-flow for the repairing ground subsidence situation emergently by utilizing a large amount of industrial by-products and evaluate the possibility by applying it to the site. The factors of the experiment were the mixing ratio of mixing water and a foaming agent and the mixing ratio of foam over paste volume. The optimal mix identified by the experiment was applied to the field and basic properties were evaluated. The results of the experiment showed that the optimal mixing ratio of mixing water and the foaming agent was 10%. Moreover, when the mixing ratio of pre-foam over paste volume was 170%, it satisfied the target. However, to ensure stable quality when applying to the field, the foam mixing ratio was set 140% for the field application. The field application test of foam concrete with the low-strength and high-flow using an eco-friendly binder satisfied all target performances. Therefore, the possibility of using it as a mixture and construction method for a ground repair system is confirmed. However, there was a quality deviation between the upper part and the lower part due to the separation between foam and paste. Consequently, further studies are needed to improve it.

Key words : sinkhole, foam concrete, permeability coefficient, CLSM, CFBC ash

· Received : December 11, 2019 · Revised : February 10, 2020 · Accepted : February 14, 2020

§ Corresponding Author : Yang-Yi Woo (E-mail : wooyi@daum.net)

Department of R & D Center, AZ Co., Ltd., 26, Gwansangongdan-gil, Jupo-myeon, Boryeong-si, Chungcheongnam-do 33415, Korea
©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

2014년 석촌 지하차도 입구에서 3개월 내에 5곳의 도로함몰로 촉발된 싱크홀(Sinkhole)이란 용어의 사용을 시작으로, 최근 도심지와 폐광산 등에서 지하 공동부가 빈번히 발생하고, 매년 20%씩 증가하여 2017년은 1,683건으로 산정되며, 이에 따라 국민의 불안감은 급상승하고 있다.

싱크홀은 지질학적 용어로 석회암의 주성분인 탄산칼슘이 이산화탄소가 녹아있는 빗물이나 지하수에 의해 용해되어 지반 내에 공동이 발생하여 지표층이 침하되거나 함몰되어 땅이 꺼지는 자연현상을 의미한다. 그러나 도심지에서 발생하고 있는 도로함몰은 석회암 지역에서 발생하고 있는 싱크홀과는 지하공동발생 메커니즘과 그 원인이 다르다. 도심지 층적층 내에서 공동이 발생하는 원인은 주로 노후된 지하매설물의 파손이나 대형 굴착공사 및 지하구조물에 의한 지하수 영향으로 흙이 유실되기 때문이다¹⁾.

석촌 지하차도와 백석동에서 일어난 지반침하하는 모두 인간의 편의를 위한 개발행위에 따른 안전사고다. 두 사고처럼 공사 도중에 일어나는 것도 있지만, 대부분의 지반함몰은 노후 상·하수도 주변에서 발생하는 것으로 분석되고 있다. 서울시에 따르면 국내 도심지 지반 함몰 발생의 약 84%가 하수관 손상으로 인한 것으로, 무리한 인접 굴착 공사가 14%, 상수관 손상이 2%로 그 뒤를 잇는다. 따라서 노후된 하수관을 교체하지 않으면 노후화는 계속 진행될 수밖에 없으며, 향후 그로인한 지반 함몰의 발생량은 증가할 것으로 판단된다.

하수관 손상에 의한 지반함몰은 잠재적 위험성을 내포하고 있으며, 빠른 차량 통행을 위해 긴급복구가 필요하며 추후 정밀조사를 통해 대책공법을 선정하는 것이 필요하다. 지반함몰의 공동발생 등으로 관련 부분의 긴급 보수 등에 대한 새로운 기술의 요구와 연구의 필요성이 있으나, 현재는 이를 대처하지 못하고 자갈이나 흙 등으로 공간을 충전하고 콘크리트로 상부를 마감하는 것과 같이 응급대처 방식으로 공사를 마무리하고 있는 것이 현실이다.

일반적인 싱크홀의 복구방법은 자갈이나 흙을 이용한 다짐 공법과 약액, 시멘트 등 주입재료를 사용한 그라우팅 공법을 통하여 복구하는 공법, 최근 현장 발생토 등의 저장도 채움재를 사용한 공법²⁾ 등이 사용 및 연구되고 있다.

그러나 위 방법 모두 지하수의 유출시 일체화되지못한 지반구조와 낮은 투수 계수로 인하여 현장의 토양조건을 반영하지 못한 대처 방법으로 향후 지하수 흐름의 변화로 공동이 재발할 수 있는 개연성이 잠재한다 할 수 있다. 따라서 전국 각지의 도심지와 폐광산 등에서 발생하는 지반 침하 등에 대한 국민 불안 해소를 위한 지반 침하 안전대책마련이 요구되는 시점이다.

본 연구에서는 이와 같은 지반함몰 발생시의 신속한 복구공법으로서 지반안정화를 위한 저장도 일체형 투수 기층을 형성할 수 있는 경량기포 콘크리트를 연구하고, 이를 타설하는 공법 연구의 일환이다. 저장도 경량콘크리트를 제조하기 위한 결합재로서 산업부산물을 다량(결합재의 90% 이상) 활용한 페이스트에 선발포 된 기포를 혼합하여 CLSM(저강도 유동화 채움재, Controlled Low Strength Material)의 낮은 강도인 1MPa 이상의 강도 및 10⁻⁴cm/sec 이상의 투수성능을 갖는 콘크리트의 최적의 배합조건 설정을 목표로 한다.

CLSM은 최근 천연재료의 고갈 문제 해결과 산업부산물 유효활용을 증대를 위한 지반안정화 공법으로, 본 연구에서는 철강산업 부산물 및 전력산업부산물을 다량 활용한 결합재 제조에 적합한 공법이다³⁾.

최적 배합조건 설정을 위한 실험조건으로서 선발포를 위한 기포제의 희석비, 페이스트 대비 기포 혼입률을 변수로 압축강도, 투수성능, 공극구조를 평가하였다. 또한 지반함몰을 재현한 공동구의 현장적용을 통한 적용성 평가로 경량기포콘크리트 지반채움재를 이용한 지반함몰의 보수공법의 적용에 관한 기초 연구자료를 제시하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 실험의 경량기포 콘크리트 제조를 위해 사용된 실험재료는 크게 페이스트와 선발포 기포로 구분된다. 첫 번째로 페이스트를 위한 결합재는 다량의 산업부산물 활용을 위해 시멘트용 혼화제로서 가장 일반화된 3종 고로슬래그 미분말(Ground granulated blast furnace slag, 이하 GGBS)과 유동성 증대를 위하여 석탄 화력 발전 부산물인 플라이애시(Fly ash, 이하 FA)를, 반응성 개선을 위한 유동층 플라이애시(Circulating fluidized bed combustion

Fig. 1. Particle shape of binder(SEM X 5,000).

Table 1. Chemical composition of the binders used in paste(XRF)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Ig.loss	Etc.	SUM
GGBS	32.0	13.7	0.9	43.2	3.4	2.3	0.5	0.4	0.0	2.1	1.5	100
FA	56.0	13.2	8.9	5.2	1.2	1.0	2.8	0.6	1.5	8.2	1.4	100
CFBC ash	37.6	18.8	4.3	14.1	3.6	2.3	1.2	3.1	0.6	13.0	1.4	100

ash, 이하 CFBC ash)를 사용하였다. 또한 초기강도 확보를 위하여 소량의 OPC를 사용하였으며 그 배합비는 선행연구⁴⁾를 통하여 얻어진 최적배합을 적용하였다. 페이스트의 유동성 개선을 위하여 국내 'D'사의 고성능 감수제를 결합재량 대비 0.1% 사용하였으며, 기포 및 페이스트의 재료분리로 인한 침강방지를 위하여 결합재의 0.01%의 침강방지제를 첨가하여 물결합재비 50%의 페이스트를 제조하였다. 실험에 사용된 각각의 결합재의 형상과 조성분석은 주사전자 현미경(Scanning Electron Microscope)과 X-선 형광분석법(X-ray Fluorescence Analysis)을 사용하였고, 그 결과를 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 결합재로 사용된 재료의 입자 사이즈 및 분포를 분석하기 위하여 레이저 타입의 PSA(Particle size analyzer)를 이용하여 습식으로 측정된 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 1의 SEM 이미지와 Table 1의 산화물 조성표로 볼 수 있듯이 석탄화력 부산물인 FA와 CFBC ash는 조성 및 입형에서 큰 차이를 보인다. FA는 높은 SiO₂ 함량을 가지고, 구형의 입형으로 콘크리트의 유동성 개선을 위해 사용되어지나, CFBC ash는 상대적으로 낮은 800-900°C에서 얻어지게 되어 입자 형태가 부정형이 많고, 연소 중 탈황효과로 일반 FA 대비 높은 CaO 함량과 SO₃ 함량을 갖는다. CaO는 생석회 상태로 존재하여 콘크리트에 일부 첨가시 자기 수경성을 보여 초기 반응성을 개선한다고 알

Fig. 2. Particle size distribution of the binders used in paste.

려져 있다⁵⁾. GGBS는 1,600°C 이상의 고온용융 후 배출되어 상대적으로 강열감량이 낮으나, 2.1%는 분쇄시 추가된 석고에 의한 강열감량 값으로 보이며, 비정제 FA 및 상대적으로 저온가열된 CFBC ash는 각각 8.2 및 13%로 높은 강열감량 값을 보인다.

OPC에 90% 이상 대체되는 위 3개의 결합재는 모두 Fig. 2에 보여지는 바와 같이 평균 입자 사이즈가 10 μ m 내외로 OPC와 유사한 3~4,000cm²/g의 분말도를 갖는 미분말을 사용하였다.

두 번째로 기포 콘크리트의 공극을 형성하기 위한 기포제는 안정적인 기포 형성을 위하여 국내 'H'사의 pH 7±1, 비중 1±0.05, 고형분 3%의 독립 기포용 기포제를 사용하

Table 2. Experiment plan

	Test factor	Test levels	Test items
Experiment I	Foaming agent content	0.5, 2, 4, 6, 10, 15, 20, 30%	<ul style="list-style-type: none">• Unit weight• Foam shape change
Experiment II	Foam content in paste	140%, 170%, 200%	<ul style="list-style-type: none">• Flow• Bulk density• Porosity• Compressive strength• Permeability coefficient
Experiment III	Field-cast test

Fig. 3. Pre-foaming process.

였다. 실험에 사용된 기포제는 동물성 기포제가 갖는 장점인 기포의 안정성을 가지면서도, 단점인 냄새가 없는 무색무취의 장점을 갖는 제품이다.

2.2. 실험계획 및 방법

2.2.1. 실험계획

도심지의 지반함몰 보수를 위한 경량기포 콘크리트 최적배합 선정을 위한 실험으로서의 실험계획을 Table 2에 나타내었다. 실험은 크게 3level로 구분되며, 실험I은 경량기포콘크리트용 기포제의 최적 사용율 선정을 위한 실험이다. 실험 II는 매트릭스를 형성할 페이스트 대비 기포의 용적비율을 변수로 하여 선행연구⁴⁾를 통하여 결정된 페이스트 배합에 적용함으로써 경량기포 콘크리트의 배합을 최종 설정하고자 하였다. 또한 실험 I,II를 통해 선정된 경량기포콘크리트를 이용하여 실험 III에서 5m×5m×깊이 2m의 지반함몰 재현 Mock-up 테스트에 적용하여 현장적용 가능성을 평가하였다.

2.2.2. 시험체 제작 및 측정방법

기포는 Fig. 3에 나타난 재료 및 정량공급 펌프와 기포기를 이용하여 제조된다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 선택된 기포와 별도 믹싱된 페이스트를 혼합하여 각각의 측정용 몰드에 기포콘크리트를 타설 및 성형하고 20±2°C, 습도 60%의 항온항습실에 재령에 따라 양생하여 각 재령

Fig. 4. Pre-foaming foam con. making process.

에 시험항목별로 측정된다.

실험 I의 기포의 단위용적중량은 5L의 용기에 발포된 기포의 중량을 측정하여 실제 페이스트 혼합시 용적대비 중량으로 하여 혼합하였다. 기포의 시간에 따른 형상변화는 광학 현미경을 이용하여 기포의 형상을 이미지화하였다.

실험 II의 기포 콘크리트의 플로우는 KS F 4039 현장 타설용 기포콘크리트의 시험방법에 준하여 안지름 80mm, 높이 80mm인 아크릴 원통을 이용하여 측정하였다. 또한 겉보기밀도 및 공극률은 KS F 2459의 절대 건조 겉보기 밀도 및 공극률 측정방법에 준하여 측정하였으며, 압축강도 시험은 KS F 2405에 준하여 Ø10cm×20cm의 실린더 몰드에 제작된 시험체를 재령 1일 탈형 후 항온항습실에서 기건양생 하고, 재령 3, 7, 28일에 측정하였다. 투수계수는 KS F 2322 흙의 투수계수 측정방법에 준하여 압축강도 측정용 실린더 몰드를 Ø10cm×5cm 높이로 재령일

Fig. 5. Specimen for field test.

에 절단하고, 표면을 폴리싱한 시험체를 이용하여 재령 3, 7, 28일에 측정하였다.

2.2.3. 현장타설 방법

실험 I, II를 통해 선정된 최종 경량기포 콘크리트 배합을 통하여 현장의 적용성을 검토하고자 Fig. 5의 왼쪽 사진과 같이 5m×5m×깊이 2m의 공동구간을 재현하여 타설하고, 오른쪽 사진과 같이 1m×1m×1m의 거푸집에 타설하여 시험체의 상중하 재료의 침강분리와 타설된 콘크리트의 코어링을 통한 결보기 밀도, 압축강도 및 투수계수를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 기포제의 혼입량 선정 실험

사용된 독립기포용 동물성기포제의 최적사용량을 판단하기 위하여 혼입률을 0.5, 2, 4, 6, 10, 15, 20, 30%로 변화시켜 발생된 기포의 단위중량을 측정하고자 하였다. 단위중량이 높은 것은 기포에 물이 많이 포함되어 있는 것을 나타낸다. 따라서 충전재의 W/C를 최대한 일정하게 조절하기 위해 단위중량이 낮은 기포제 희석농도를 선정하여 기포를 제조하고자 하였다.

실험의 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 실험결과 기포제의 혼입량이 소량씩 투입되어도 증가율에 따라 단위용적은 급격히 감소하나, 기포제 혼입량이 10% 이상으로 투입될 경우에는 단위용적증량 감소에 한계가 존재한다. 기포제에 의한 선발포 품의 형성을 위한 단위용적측면에서는 10% 초과 기포제 사용은 비효율적이라 판단된다. 따라서 기포제 희석농도를 10%로 하여 기포를 제조하여 경량 기포 충전재 제조에 사용하고자 한다.

기포제 혼입량에 따른 생성기포의 형상비교와 시간에 따른 소포 및 기포의 결합을 통한 사이즈의 변화를 관찰하

Fig. 6. Unit weight according to the foaming agent content.

고자 현미경을 통하여 기포의 형상을 이미지화하였고, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

기포기에서 제조 직후의 기포의 사이즈는 기포제 함량이 낮을수록 최대 5mm 이상의 큰 사이즈의 기포도 형성된 것을 볼 수 있다. 그러나 기포제의 함량이 높아질수록 초기 제조 시 1mm 이하의 작고 균질한 사이즈의 기포를 형성한 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 기포제의 희석농도가 높으면 기포의 단위중량이 낮아지는데, 적은 수량으로 많은 기포를 형성하는 것으로서 기포막의 두께가 얇은 것을 의미한다⁶⁾.

그러나 시간이 지남에 따라 기포는 인접한 기포와 결합하여 기포 사이즈는 점점 커지고 약 10분이 지나면 기포는 5mm 이상으로 커져간다. 그 과정에서 기포막은 얇아지고, 배액에 따라 액상의 분리가 발생하여 기포는 불안정한 상태를 보인다. 또한 기포의 경시변화에 미치는 다양한 인자 중 기포제의 농도는 기포의 안정성과 관련이 있다. 기포제 농도가 증가할수록 기포가 쉽게 소포되지 않는데, 그 이유는 기포 입자간의 액막의 점도가 커서 구상의 기포를 형성하여 액의 유하로 인해 액막이 얇아져 다면체구조로 변하는 시간이 지연되기 때문이다⁷⁾.

기포가 이와 같은 상태에서는 페이스트와 혼합되었을 때 기포의 소포 및 결합이 촉진되어 안정된 기포 다공체를 얻을 수 없게된다. 따라서 기포기에서 기포를 제조한 후에는 즉시 페이스트와 혼합하여 경량기포 콘크리트 시험체 제조에 사용해야 안정된 경량 기포 콘크리트 충전재를 제조할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2. 페이스트량 대비 기포 첨가량 선정 실험

실험 I을 통하여 선정된 기포제 함량 10%를 이용하여

Fig. 7. Foam shape change according to foaming agent content.

Table 3. Test results of experiment II

	Flow (mm)	Absorption ratio (%)	Porosity (%)	Absolutely density (kg/L)	Bulk density (kg/L)	Permeability coefficient (cm/sec)	Compressive strength(MPa)		
							3day	7day	28day
140%	185	70.0	55.7	1.79	0.80	1.2×10^{-2}	0.99	1.08	1.43
170%	185	79.7	57.3	1.77	0.72	5.2×10^{-1}	0.84	0.87	1.02
200%	196	85.8	60.1	1.76	0.70	4.7×10^{-1}	0.49	0.54	0.74

기포를 제조하고 실험 II의 페이스트 대비 기포 혼입률 실험에 적용하였다. 기포 혼입률은 KS F 4039 현장 기포콘크리트의 구분중 가장 활용율이 높은 0.6품의 겉보기 비중(0.5-0.7)을 타겟으로 페이스트 용적대비 기포율을 계산하여 140%, 170%, 200%의 기포를 페이스트와 혼합하여 시험체를 제조하였다. 제조된 시험체를 대상으로 한 실험 II의 측정 결과를 Table 3에 나타내었다.

첫번째 실험결과로서 굳지않은 상태에서의 유동성은 KS F 4039 현장타설용 기포콘크리트의 플로우 값 기준인 180mm 이상을 모두 만족하였다.

두 번째 측정항목으로 경화된 경량기포 콘크리트의 공극형상을 Fig. 8에 나타내었다. 내부 기공은 거대기공과 미세기공이 있으며, 미세기공은 인접한 미세기공과 결합하여 기공 성장이 일어난다. 그리고 거대기공은 인접한

거대기공과 충돌하며 기공간 막이 파괴되어 연속기공을 형성하며, 이러한 연속기공은 투수성 향상에 기여하게 된다. 공극의 형상은 세 시험체 모두 일부는 독립기포상태를 유지하고 있으나, 경화전 기공간의 결합으로 인한 공극의 확장으로 선발포 폼 대비 기포사이즈가 커지고 연속공극을 형성하고 있는 것을 볼 수 있다. 독립기포 대비 연속공극은 수분의 유입시 연속적인 배출로를 형성함으로써 높은 투수계수 발현에 기여함에 따라 누수에 대한 지반층의 안정화가 가능할 것이라 판단된다.

또한 기포 혼입률이 낮을수록 공극사이의 벽을 형성하는 두께가 두꺼워 매트릭스의 강도발현에 기여할 수 있다.

세 번째 항목으로는 Table 3에 나타낸 기포의 정량화 수치인 공극률과 겉보기밀도 측정결과를 Fig. 9의 그래프에 나타내었다. 혼합된 기포율이 증가할수록 기포콘크리

Fig. 8. Pore structure of Foam concrete according to foam content against the paste volume($\times 1,000$).

Fig. 9. Porosity and bulk density according to foaming agent content.

트의 공극률과 겉보기 밀도는 감소하나, 기포 혼입에 따라 예상된 초기 공극률과 겉보기밀도와는 차이를 보인다.

일반적으로 플라이애시 혹은 바텀애시에 포함되어있는 미연탄소는 높은 다공질로 기포를 흡착한다고 알려진 바있다⁸⁾. 따라서 위 초기 예상된 공극률 및 겉보기 밀도와 실제 측정된 시험체의 결과값의 차이는 페이스트내 결합재로 사용된 FA와 CFBC ash에 다량 포함되어 있는 미연탄소분에 의한 기포의 소모 및 결합에 의한 차이로 판단된다. 그러나 그로인해 형성된 연속기포로 투수계수 증대에 기여할 수 있다.

네 번째 측정항목으로 기포 혼입량에 따른 겉보기 밀도와 압축강도의 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 기포 콘크리트의 압축강도는 시험체의 겉보기 밀도와 밀접한 관계를 갖는다. 그래프에 나타난 바와 같이 기포 혼입량이 증가할수록 절전밀도는 감소하며, 압축강도는 비례적인 관계를 나타내는 것을 볼 수 있다. 문헌에 의하면 충전재 (CLSM)의 강도는 재령 28일 양생 후 0.1~0.5MPa 정도 이면 지하공동 충전재로서 충분하다고 알려져 있다^{9,10)}.

Fig. 10. Compressive strength and bulk density according to foaming agent content.

Fig. 11. Porosity and permeability coefficient according to foaming agent content.

따라서 충분한 강도로서 본 연구의 목표강도는 재령 28일 1MPa로 설정하였다. 측정된 실험결과로서 기포율 170%로 겉보기 밀도가 0.7kg/L 정도로 1MPa를 만족할 수 있는 것을 확인하였다.

다섯 번째 측정항목으로 투수계수를 측정하였으며, 투수계수와 공극률의 관계를 Fig. 11에 나타내었다. 지반의

상하수 유출시에 지반침하를 방지하기 위한 충전기법으로 기포콘크리트의 투수계수 목표는 $1 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 이상으로 설정하였다¹¹⁾.

그러나 측정결과 연속공극 형성을 통하여 기포율 3수준 시험체 모두 설정값보다 큰폭으로 높은 투수계수를 보였다. 특히 기포율 170% 시험체의 경우가 가장 높은 투수계수를 보여 도심지의 지반함몰시의 보수공법에 적용하기 위한 목표기준인 압축강도와 투수계수를 모두 만족하였다. 불투수성 그라우트 또는 채움재와 달리 지하수 또는 지하로 스며드는 우수가 충전재 내부를 통해서 지하로 이동하게 되며, 따라서 불투수 충전재에서 발생하는 유로의 변경에 의한 토양의 유실 등이 일어나지 않으며, 일정한 강도를 가지고 있고 일체화된 소재로서 재료의 유실이 일어나지 않기 때문에 싱크홀 등 지반 함몰 예방을 위한 공법으로 적용이 가능하다.

기포혼입률에 따른 투수계수는 공극률이 증가하는 높은 기포 혼입률일수록 높은 투수계수를 보이는 것이 바람직하나, 기포의 혼입량 및 공극률이 높다고 하더라도 공극의 구조에 따라 투수계수에 차이를 보일 수 있다. 형성된 기포가 독립기포인지와 연속기포인지 여부에 따라 영향을 받기 때문에 공극률과 투수계수와의 경향 불일치는 향후 공극구조의 분석연구를 통하여 보완할 예정이다.

이로써 실험 II를 통해서 얻은 기준을 모두 만족하는 결과는 기포 혼입률 170%가 최적의 결과로 판단된다. 그러나 실험실 실험결과 유동성, 압축강도 및 투수계수를 기포 혼입률 140%, 170%가 모두 만족함에 따라서 현장 적용시 기포콘크리트의 상하부의 분리에 의한 물성저하를 고려하여 충분한 물성을 확보한 140% 배합을 선정하여 현장에 적용하였다.

3.3. 경량 기포콘크리트 선정배합을 이용한 현장적용

실험을 통하여 선정된 경량기포콘크리트 배합으로 현장에 재현된 공동구간에 적용한 사진을 Fig. 12에, 현장 적용된 기포콘크리트의 압축강도와 겉보기 밀도를 Fig. 13에, 겉보기 밀도와 투수계수를 Fig. 14에 각각 나타내었다.

Fig. 12의 현장적용 사진에서 볼 수 있듯이 현장 적용시 폼 콘크리트내 페이스트의 침하로 인한 기포의 상승으로 상하부의 비중차와 그에 따른 압축강도의 차이를 볼 수 있다. 현장에서 타설된 기포콘크리트에서 샘플을 채취하

Fig. 12. Field test using foam concrete.

Fig. 13. Compressive strength and bulk density of field test using foam concrete.

Fig. 14. Bulk density and permeability coefficient of field test using foam concrete.

여 상,중,하부의 각각의 겉보기 밀도 및 압축강도를 측정하였다. 측정된 샘플의 재령 7일, 28일 강도를 Fig. 13에 나타내었다.

상,중,하부 시험체의 절건밀도 측정결과 하부의 절건 밀도가 0.88kg/L 이며 상부 시험체의 절건밀도는 0.71kg/L 로 기포의 상승 및 페이스트의 침하로 인한 재료의 분리를 보인다. 절건밀도에 따라 압축강도에 기여하는 매트릭스

차에 기인하여 압축강도도 재령 28일 상하부는 1.3MPa와 2.0MPa로 큰 차이를 보인다.

기포 함량차에 따른 절건밀도의 차이는 결과적으로 투수계수에도 영향을 준다. 현장 적용된 폼 콘크리트의 상부 시험체는 상승된 기포와 기포의 결합을 통한 연속공극으로 10배에 가까운 투수계수 차이를 보이는 것을 Fig. 14를 통하여 확인할 수 있다.

친환경 결합재를 이용한 기포콘크리트 배합을 이용하여 현장적용 결과 상,중,하부 시험체 모두 목표로 설정된 압축강도 및 투수계수를 모두 만족하였으나, 페이스트와 기포의 비중차로 인한 재료 분리에 기인된 물질 편차로 균질한 품질을 확보하기에는 어려움이 있었다. 따라서 후속 연구를 통하여 타설된 지반의 위치에 따른 안정적인 품질 확보가 가능하도록 기포의 분리저항성을 갖는 배합연구가 요구된다. 이에 후속연구로서 초기 빠른 경화를 통한 기포 안정화를 위해 속경성 재료로서 CSA를 첨가한 연구를 진행하고자 하며, 이는 별도의 논문을 통하여 발표될 예정이다.

4. 결 론

본 연구는 결합재의 90% 이상을 산업부산물을 사용하여 도심지의 지반 공동부 발생시 긴급복구용 경량기포 콘크리트를 제조하기 위한 최적 배합조건 설정 연구이다. 본 연구의 실험결과를 토대로 얻어진 결론은 아래와 같다.

- 1) 선행연구를 통하여 얻어진 페이스트 배합에 선발포 방식의 폼을 형성하기 위한 최적의 기포제 혼입량 선정 실험결과, 기포 제조 직후 1mm 내외의 균일한 사이즈의 독립기포를 형성하면서 가장 효율적인 사용량은 10%의 혼입이 적절한 것으로 나타났다.
- 2) 독립기포용 동물성 기포제 10%를 혼합하여 제조된 기포콘크리트는 결합재로 사용된 FA내의 미연탄소에 의해 소포 및 기포의 결합으로 연속공극을 형성하여 투수 성능 개선에 기여하였다.
- 3) 1MPa 이상의 압축강도와 투수계수 1×10^{-4} cm/sec을 만족하는 기포의 혼입률은 페이스트 대비 170%로서 재령 28일에 1MPa를 만족하고 투수계수 5.2×10^{-1} cm/sec의 우수한 투수성을 발현하였다.
- 4) 최종 선정된 경량기포콘크리트 배합을 이용하여 현장

적용성을 평가한 결과, 상,중,하부 위치에 따른 시험체의 압축강도, 투수계수는 목표로 설정된 값을 만족하여 현장적용 가능성을 확인하였다. 그러나 기포 및 페이스트의 분리에 기인된 위치별 품질편차가 발생함에 따라 추후 연구를 통하여 기포의 안정화 및 재료분리 저항성을 위한 연구가 요구된다.

감사의 글

본 논문은 국토교통부의 지원으로 수행한 사업(18CTAP-C143696-01-000000)을 기반으로 하였으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Research Reports, 2014 : Cause Investigation and Policy Suggestion Study by Sinkhole Type.
2. Hyunsu, Cho, 2013 : A development of CLSM with coal ash for conduit backfills, Hanyang university ph. D. thesis
3. Hyejin, Lee, 2012 : Compressive strength characteristics of lightweight foamed controlled low strength material (CLSM) using coal ash, Hanyang Master's thesis
4. Yang-yi, Woo, Keun-bae, Park, 2019 : Study on optimum mixture of industrial by-products for lightweight foamed filler production by mixture experimental design, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 7(1), pp.37-43.
5. Jongtak, Park, Hongseob, Oh, 2018 : A study on the pozzolan reactivity and mechanical characteristic of blended portland cements using CFBC fly ash, J Rec Const Resources, 6(3), pp.207-213.
6. Jiyong, Jeong, 2011 : Properties of foamed concrete according to using methods and types of foaming agent. Kongju National University PhD thesis.
7. Choe, Kongl, 2010 : Development of autoclaved light-weight foamed concrete using bottom ash and waste concrete powder, Kongju National University PhD thesis.
8. Jinman, Kim, Eungu, Kwak, Sunghyun, Cho, et al., 2009 : Decision of optimized mix design for lightweight foamed concrete using bottom ash by statistical procedure, Journal of the Korea concrete institute, 21(1), pp.3-11.
9. Hayashido, Yasushi, Shinohara, Masaki, Yoshitake, Hideki, 2013 : Development of Filler for Underground Cavities "SMART GROUT" Using Granulated Blast Furnace Slag, JFE Research journal 31, p.58

10. Jeong-Ryol, Shin, Jae-Im, Park, An-Ho, Lee, et al., 2015 : Characteristics of light weight mixed soil using eco-friendly solidification material, Autumn Conference of the Korean society of railway

11. Yong-Sun, Ryu, Jin-Gyu, Han, Woo-Ri, Chae, et al., 2016 : Development of rapid hardening backfill material for reducing ground subsidence, J. Korean Geosynthetics Society, 14(3), pp.13-20.

마 영

- 건국대학교 농공학과 학사
 - 현재 재인스기초건설(주) 상무이사
-

김 범 석

- 홍익대학교 토목공학과 석사
 - 현재 재인스기초건설(주) 부장
-

우 양 이

- 군산대학교 공과대학 신소재공학과 공학박사
 - 현재 (주)에이지 부사장 / 기술연구소장 / 기술사
-

정 경 현

- 중앙대학교 건설환경공학과 학사
 - 현재 재인스기초건설(주) 과장
-

송 현 영

- 중앙대학교 건설사업관리(CM) 석사
 - 현재 동부엔지니어링(주) 기술연구소 책임연구원
-