

지반공동 긴급복구 재료의 팽창 및 강도특성에 관한 연구

A Study on Expansion and Strength Characteristics of Material for Emergency Restoration in Ground Cavity

한진규¹, 유용선², 김동욱³, 박정준⁴, 홍기권^{5*}

Jin-Gyu Han¹, Yong-Sun Ryu², Dongwook Kim³, Jeong-Jun Park⁴, Gigwon Hong^{5*}

¹Nonmember, General manager, Chemius Korea Co., Ltd., 152., Ohyang-gil, Gonjiam-eup, Gwangju-si, Gyeonggi-do, 464-944, Republic of Korea

²Member, President, Chemius Korea Co., Ltd., 152., Ohyang-gil, Gonjiam-eup, Gwangju-si, Gyeonggi-do, 464-944, Republic of Korea

³Member, Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, Korea

⁴Member, Principal Researcher, Incheon Disaster Prevention Research Center, Incheon Natl. Univ., 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, Korea

⁵Member, Director, Institute of Technology Research and Development, Korea Engineering & Construction, 126 Guwollam-ro, Namdong-gu, Incheon, 21558, Republic of Korea

ABSTRACT

In this study, the expansion and compressive strength tests of emergency restoration material were carried out to restore cavity causing ground subsidence. The expansion and compressive strength characteristics according to component ratio of main material - hardener and mix proportion of blowing agent - accelerator were analyzed based on the test results. As a result of the relationship of curing time - expansion ratio analyses, it confirmed that expansion ratio decreased with reduced curing time regardless of mix proportion of blowing agent - accelerator in main material, if component ratio of hardener increased. This means that component ratio of the main material - hardener had greatly affected the expansion ratio. The compressive strength characteristics of emergency restoration material confirmed that strength was affected by mix proportion of blowing agent - accelerator. Therefore, it is necessary to apply reasonable component ratio and mix proportion to consider the required injection time, expansion ratio and strength of restoration material, when emergency restoration in ground cavity is required.

요 지

본 연구에서는 지반함몰을 유발하는 지반 내 공동 긴급복구 재료에 대한 팽창 및 일축압축강도 실험을 수행하였으며, 실험결과를 바탕으로 주제-경화제 구성비와 주제 내 발포제-촉진제 배합비에 따른 팽창 및 강도특성을 분석하였다. 먼저, 경화시간-팽창률 관계를 분석한 결과, 주제에 포함된 발포제와 촉진제 배합조건에 상관없이, 경화제의 비율이 높으면, 경화시간을 단축하면서 팽창률을 감소시키는 것으로 평가되었다. 이는 주제-경화제 구성비가 팽창률에 큰 영향을 미치는 것을 의미한다. 팽창재료의 강도특성을 분석한 결과, 발포제와 촉진제 배합비가 팽창재료 강도에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 따라서 긴급복구가 요구되는 경우, 공동의 크기 및 형태 등에 따라 팽창재료의 소요 주입시간, 팽창률 및 요구강도를 고려한 주제-경화제 구성비, 주제 내 발포제-촉진제 배합비의 적용이 필요함을 확인하였다.

Keywords : Ground cavity, Emergency restoration, Expansion material, Compressive strength

Received 2 Jun. 2017, Revised 6 Jun. 2017, Accepted 21 Jun. 2017

*Corresponding author

Tel: +82-31-699-0604; Fax: +82-31-790-3090

E-mail address: gigwon_hong@kecgroup.kr (G. Hong)

1. 서론

지반함몰은 원인에 따라 자연적 현상에 의한 지반함몰과 인위적 현상에 의한 지반함몰로 구분될 수 있다. 전자의 경우에는 석회암이 많은 지역에서 자연적으로 지하수에 의해 석회암의 탄산칼슘이 녹아 지반 내에 공간이 형성됨으로써, 상부지반의 하중을 지지하지 못하게 되어 지반이 함몰되는 현상이며, 싱크홀이라 명명하는 것일 일반적이다(Thiansky, 1999). 후자의 경우에는 Fig. 1과 같이 빈번한 지하공간개발 및 활용으로 지하수 유동에 따른 토사 유출 등에 의해 발생하는 현상으로서, 우리나라의 경우에는 석회암층이 매우 적으며, 주로 화강편마암으로 기반암층이 이루어져 있기 때문에, 석회암 공동에 의한 싱크홀이 발생하기 어려운 것으로 알려진 바 있다(Bae et al., 2017). 즉, 최근 국내에서 빈번하게 발생되고 있는 지반함몰은 상하수관의 손상 등에 의한 토사 유출, 터널 및 지하구조물 시공을 위한 굴착과 같은 지하공간개발 시의 시공관리 부실 등이 대표적인 원인이라 할 수 있다(Park & Park, 2014; Choi et al., 2016).

특히 인구밀집도가 매우 높은 서울시의 경우, 2010년~2014년 상반기에 발생한 3,119건의 지반함몰 사고 중, 하수관 손상에 의한 지반함몰이 전체 발생 건수의 약 85%(2,636건)를 차지하는 것으로 보고된 바 있다(Korea institute of geoscience and mineral resources, 2014). 이와 같이, 노후 관로의 손상에 따른 누수로 인해 지반의 지지력이 저하되면서 지반이 함몰되는 사고가 빈번하게 발생하고 있는 실정이며, 이를 해결하기 위하여 다양한 재료개발 연구가 진행된 바 있다(Lee et al., 2015(a), Lee et al., 2015(b), Ryu et al., 2015).

최근 서울시에서는 공동관리 등급을 만들어 적용 중에 있는데, 이는 Fig. 2에서 보는 바와 같이, 공동의 두께, 폭 및 포장상태 등을 고려하여 관찰대상, 일반복구, 우선복구 및 긴급복구의 4단계로 이루어져 있다(Seoul City, 2016). 관찰대상 등급은 발생된 공동 상부지반의 두께가 충분히 확보되어 있어 지반함몰 발생 가능성이 미미하지만 일정 기간동안 관찰 후 복구가 요구되는 공동을 의미한다. 일반복구 등급은 일정 기간동안 공동이 확대되어 지반함몰의 발생가능 조건에 부합하여 함몰되는 공동을 의미하며, 우



Fig. 1. Example of Ground cavity (Choi et al., 2015)

Observation grade	Normal grade	Priority grade	Emergency grade
Cover depth > 40cm AC thickness > 30cm Width of cavity < 80cm	All cavity except observation, priority and emergency grade cavity	Cover depth 20 ~ 30cm AC thickness 10 ~ 20 cm Width of cavity > 150cm	Cover depth < 20cm AC thickness < 10cm
Road			
A.C			
Grain refining layer			
Sublayer			
Natural ground			
Sewer pipe			

Fig. 2. Ground cavity management grade of Seoul city



(a) Soil filling



(b) Grouting

Fig. 3. Example of existing method for ground cavity restoration

기철 이전까지 복구가 필요한 등급이다. 우선복구 등급은 지반함몰 발생 조건에 부합하는 경우(강우 등) 함몰되는 공동이며, 신속한 대책방안 수립 및 복구가 필요한 등급이다. 마지막으로 긴급복구 등급은 지반함몰의 발생 조건에 충족된 공동을 의미하며, 공동탐사 시에 공동이 확인되면 즉시 복구가 필요한 경우이고, 이때는 4시간 이내에 복구가 필요하다. 이와 같은 공동관리 등급은 국내 도심지 재해의 한 요인으로 작용되고 있는 지반 내 공동의 관리 및 효율적인 복구를 위하여 확산 및 적용이 필요한 실정이다.

한편, 지반함몰을 사전에 예방하기 위해서는 지반 내 공동발생의 방지를 위한 대책방안이 필요하며, 이를 위해서는 지하공간개발 시 관련된 적절한 시공법 적용 및 철저한 시공관리가 최선의 방안이라 할 수 있다. 그러나 이미 생성된 공동의 경우에는 복구방안이 요구되는데, 일반적인 공동 복구방법은 흙메우기와 그라우팅 공법의 적용이다.

먼저, 흙메우기 공법은 현재 주로 사용하는 지반 내 공동 복구기술로서 발생된 공동 주변지역을 통제 한 후, 개착하여 지반함몰을 유발한 공동에 흙을 메우고 다짐 및 상부구조물(도로 등)을 재시공하는 공법이다(Fig. 3(a) 참조). 이는 개착으로 인한 원지반 교란에 따른 지반강도 저하, 시공 과정에 의한 복구시간 지연 및 통행제한으로 인한 민원발생 등의 단점이 있기 때문에, 긴급복구가 어렵다. 또한 공동 주변에서 지하수가 존재하는 경우에는 흐름에 따라 주재료인 토사의 유실이 발생할 가능성이 매우 높기 때문에, 공동 복구에 요구되는 토사가 필요 이상으로 사용되어 비경제적이며 비효율적인 복구방법이 될 수 있다. 그리고 토사의 다짐 시 지중매설물에 의해 최적의 다짐이 불가능한 경우가 발생할 가능성이 있다.

그라우팅 공법은 비개착식이라는 용이함과 지반 내 소규모 공동 및 간극까지 충전 가능한 장점이 있지만, 지하수 조건에 따라 재료분리 및 유실의 가능성이 높아 경제성

및 강도저하에 따른 안정성에 문제를 야기할 수 있다. 또한 지반공동 발생 시, 그라우팅 공법 시공을 위한 사전 작업인 플랜트 배치 및 설치 시간으로 복구가 지연될 수 있는 단점을 가지고 있으며, 지반 특성에 따라 각기 다른 채움재료 및 주입기술이 필요하다(Fig. 3(b) 참조).

본 연구에서는 최근 도심지 재해의 주요요인 중 하나인 지반함몰을 유발하는 지반 내 공동에 대하여, 긴급복구가 필요한 경우를 대상으로 기존의 공동 복구방법의 문제점을 해결하고, 공동 관리등급에 부합할 수 있도록 개발된 공동 긴급복구용 팽창재료의 팽창 및 강도특성 평가를 위한 실내실험을 수행하였다. 또한 실험결과를 통해 주제와 경화제로 구성된 개발 재료의 구성비율에 따른 경화시간-팽창률 관계와 함께, 강도특성에 대하여 평가하였다.

2. 실내실험

2.1 실험개요 및 팽창재료 특성

본 실험은 지반 내 공동이 긴급복구 등급인 경우에 적용할 수 있도록 개발된 팽창재료의 경화시간에 따른 팽창률 관계와 강도특성을 평가하기 위하여 수행되었다.

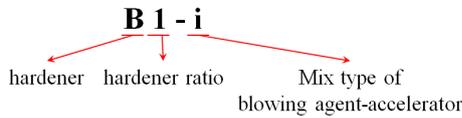
발포제 및 촉진제로 구성된 주제와 경화제로 이루어진 팽창재료(복구재료)의 최대 팽창력은 약 15~35배에 이르며, 팽창 시 수반되는 팽창압에 의해 공동 주변의 이완된 지반에 압력에 의한 다짐효과를 기대할 수 있는 장점이 있다. 즉, 공동 내 팽창에 의해 지반함몰을 유발하는 지반침하 방지효과를 나타낼 수 있으며, 주변 지반의 강도 등과 같은 공학적 특성에 따라 적용할 수 있다.

본 연구에서 요구되는 복구재료는 긴급복구용으로 활용되는 점과 서울시 공동 관리등급을 고려하면 4시간 이내에 복구가 이루어지고 공용상태를 확보할 수 있어야 한

Table 1. Test cases varying mix proportion

A:B ratio	Symbols for different A:B ratios and blowing agent-accelerator mix type	Measurement value
1:1	B1-i, B1-ii, B1-iii, B1-iv, B1-v	Curing time
1:1.5	B1.5-i, B1.5-ii, B1.5-iii, B1.5-iv, B1.5-v	Expansion ratio Compressive strength

Note: Symbols



다. 따라서 최대 1시간 30분 ~ 2시간 이내(서울 시내의 경우, 주야 관계없이 어느 지역이라도 교통량에 따른 이동 거리가 최대 2시간 ~ 2시간 30분 이내 소요)에 팽창 및 강도발현이 이루어질 수 있도록 배합비 산정이 요구되며, 지반 내 공동환경(크기, 형태 등) 및 경제성에 대한 고려도 필요하다. 이에 본 연구를 위해 개발된 팽창재료는 최소 25배 이상 팽창성능이 발현되고, 주입 시간, 주입 메커니즘 및 공동환경(깊이, 온도) 등을 고려하여 경화시간 30분 이내의 발현이 이루어질 수 있도록 품질기준을 마련하였다.

2.2 실험 방법

팽창재료의 제조방법은 액상재료인 각각의 주제와 경화제를 제조용기에 동시에 주입하여 팽창직전까지 충분한 교반을 실시하였으며, 교반 후, 액상의 혼합재료를 평면상의 플레이트에 원형의 형태로 쏟아 상온에서 팽창을 유도하였다. 이 때, 플레이트에 거치된 팽창재료는 직경 약 5cm 정도로 일정하게 하였으며, 팽창재료 적용된 주제와 경화제의 구성비는 1:1 및 1:1.5의 두 가지로 제조하였다. 이와 같은 팽창재료를 발포진행 직후부터 완전 경화되기 까지 방치하였으며, 품질기준에 따라 최대 30분을 초과하지 않도록 하였고, 30분 경과 후에는 육안 및 촉감으로 재료상태를 확인하여 경화(건조)여부를 파악하였다. 또한 경화된 팽창재료의 팽창율을 측정하기 위하여, 기준선이 표기되어 있는 용기에 팽창재료를 넣고, 기준선까지 물(비중=1)을 채운 후 무게(C)를 측정하였다. 이후 팽창재료를 제거하고, 용기의 기준선까지 물을 채운 후 무게를 측정(D)하고, 부피로 환산하였다. 이를 바탕으로 최초 주입된 주제(A) 및 경화제(B)와 경화된 팽창재료의 부피비로 팽창률 $[(C-D)/(A+B)]$ 을 산정하였다.

압축강도의 평가는 팽창률 시험조건과 동일한 방법으로

로 진행하되, 시편획득을 위하여 직경과 높이가 일정한 용기 내에서 팽창을 유도하였다. 또한 팽창재료가 적용된 공동발생구간은 복구 즉시 단시간 내에 공용되어야 하는 점을 고려하여 1일, 2일 및 5일 강도에 대한 일축압축강도 시험(KS F 2314)을 실시하였다.

상기와 같이, 팽창률 및 압축강도 실험은 폴리올을 구성하는 발포제와 촉진제의 배합비에 따라 각각 5 cases, 총 10 cases에 대하여 수행하였으며, 실험종류 및 실험과정은 각각 Table 1 및 Fig. 4에 나타낸 바와 같다. 이 때, 실험결과와의 확인이 용이할 수 있도록, 실험종류에 따른 기호로 나타내었으며, 이는 주제를 기준으로 경화제, 경화제 비율 및 발포제-촉진제 배합종류로 표현하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 경화시간과 팽창률 관계

발포제와 촉진제 배합비에 의한 주제 및 경화제의 구성비에 따른 실험결과를 Table 2에 정리하였으며, 이를 바탕으로 경화시간과 팽창률 관계를 Fig. 5에 나타내었다. Table 2에서 보는 바와 같이, 주제와 경화제 구성비 및 주제 내의 발포제와 촉진제 배합비에 따라 경화시간에 대한 팽창율은 매우 다양하게 나타났다. 먼저, 주제-경화제 구성비가 1:1인 경우, 모든 실험에서 경화시간은 품질기준인 30분 이내인 것으로 확인되었지만, 일부 배합조건인 경우(B1-iii, B1-v)에는 팽창률 품질기준(25배)을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 최소 기준팽창률을 만족하는 B1-i 배합의 경우, 경화시간은 4분인 것으로 확인되었으며, 이를 기준으로 B1-ii 배합은 가장 짧은 시간 내에 가장 높은 팽창률을 나타내었다. 또한 B1-iv 배합의 경우에는 B1-i 배합에 비해 유사한 팽창률을 보였지만 경화시간은 약 1.8

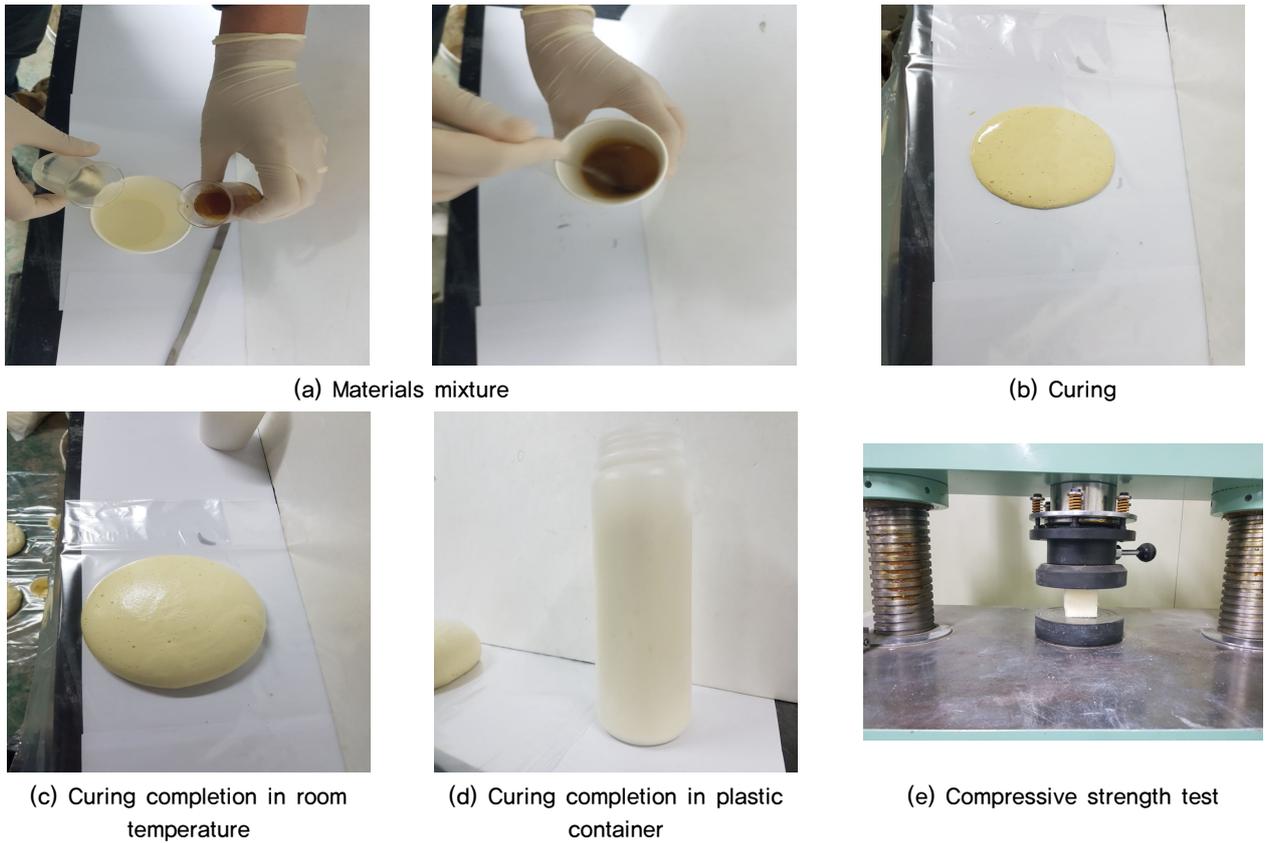


Fig. 4. Test procedure

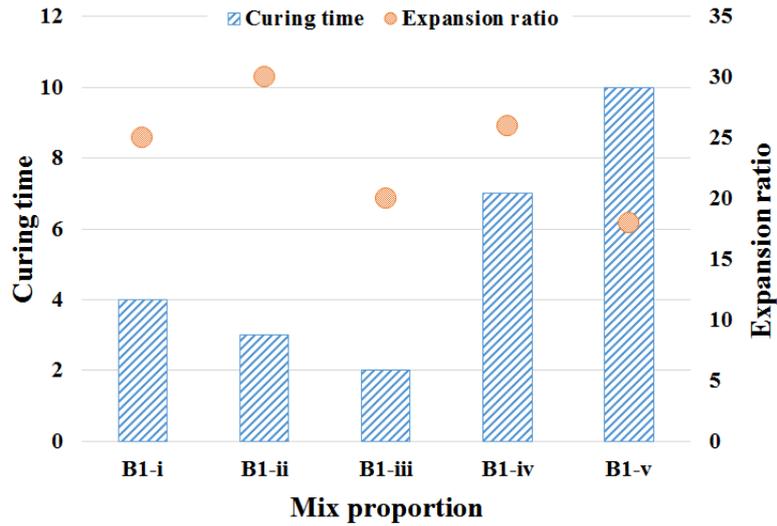
Table 2. Test results

Component ratio (A:B)	Mix proportion	Curing time (min)	Expansion ratio (times)
1:1	B1- i	4	25
	B1- ii	3	30
	B1- iii	2	20
	B1- iv	7	26
	B1- v	10	18
1:1.5	B1,5- i	5	30
	B1,5- ii	4	20
	B1,5- iii	9	18
	B1,5- iv	7	22
	B1,5- v	9	15

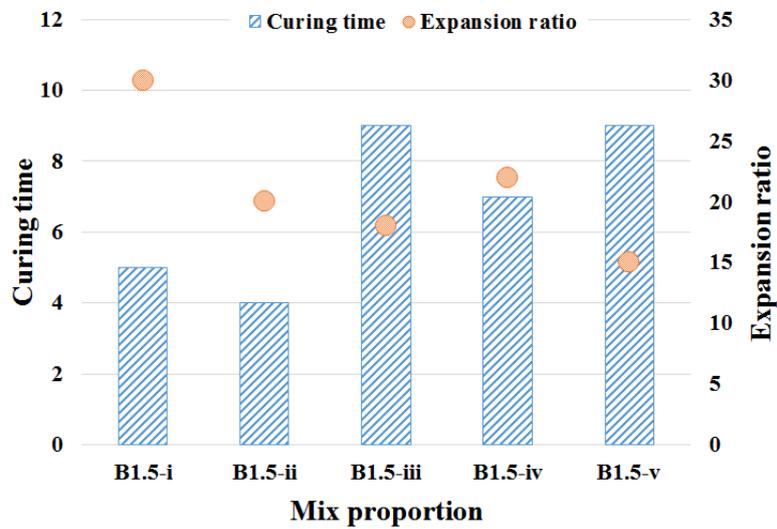
배 지연되는 것으로 확인되었다.

주제-경화제 구성비가 1:1.5인 경우에도 경화시간은 30분 이내로서 품질기준을 만족하는 것으로 나타났지만, B1.5- i 배합을 제외한 모든 실험 case에서 팽창률 기준을 만족하지 못하는 것으로 확인되었다. 또한 B1.5- i 배합은 팽창률이 동일하게 나타난 B1-ii 배합(주제-경화제 구성비 = 1:1)과 비교하면, 경화시간이 약 1.7배로 나타났다. 이와 같이, 품질기준을 무시하고 주제-경화제 구성비에 따

른 유사(또는 동일)한 경화시간 대비 팽창률 또는 유사(또는 동일)한 팽창률 대비 경화시간에 대하여 분석한 결과, 유사한 경화시간 대비 팽창률은 1:1.5 구성비에 비하여 1:1 구성비의 경우가 큰 팽창률이 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 주제에 포함된 발포제와 촉진제 배합비에 상관없이, 경화제의 비율이 높으면, 경화시간을 단축하면서 팽창률을 감소시키기 때문인 것으로 분석되었다.



(a) Component ratio(A:B) = 1:1



(b) Component ratio(A:B) = 1:1.5

Fig. 5. Curing time – expansion ratio relationship

3.2 팽창재료의 강도 특성

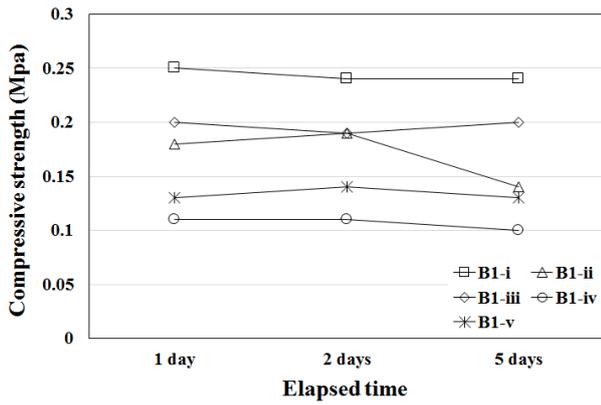
팽창재료의 시간경과에 따른 압축강도 관계를 분석하기 위하여, 주체-경화제 구성비에 의한 압축강도 실험결과를 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타내었다. 본 절에서는 모든 배합 조건에서 경화시간에 대한 품질기준은 만족하였기 때문에, 시간경과 및 팽창율에 따른 강도 특성에 대해 기술하였다.

주체-경화제 구성비가 1:1인 경우, 대부분의 배합조건에서 시간경과에 관계없이 거의 유사한 강도특성을 나타내었지만, B1-ii 배합은 강도변화가 심한 것으로 확인되었고, 이는 다른 실험결과를 감안하면 실험오차인 것으로 추정되었다. 가장 높은 강도를 나타낸 B1-i 배합과 가장 낮

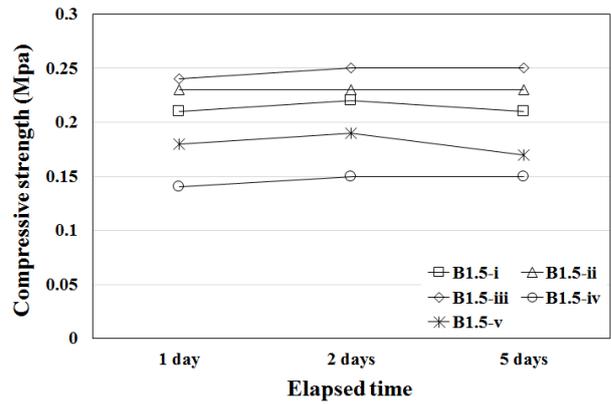
은 강도를 나타낸 B1-iv 배합은 유사한 팽창율을 보였지만, 주체에 포함된 발포제와 촉진제의 배합비에 따라 약 2.3배 ~ 2.4배의 강도 차이가 나는 것으로 평가되었다.

주체-경화제 구성비가 1:1.5일 때에도 배합조건별로 시간경과에 관계없이 거의 유사한 강도특성을 나타내었다. 또한 B1.5-iii 배합이 가장 높은 강도를 나타내었지만, 팽창율 기준을 만족하지 못하는 경우로서, 팽창율 기준을 만족하는 B1.5-i 배합은 B1-i (주체와 경화제 구성비=1:1) 배합의 경우에 비해 약 10% ~ 15% 정도 강도가 감소한 것으로 확인되었다.

상기의 강도특성과 앞서 분석된 경화시간과 팽창률 관계를 바탕으로 주체와 경화제의 구성비 및 배합조건에 따른 팽창재료의 적용성을 분석한 결과, 제시된 품질기준을

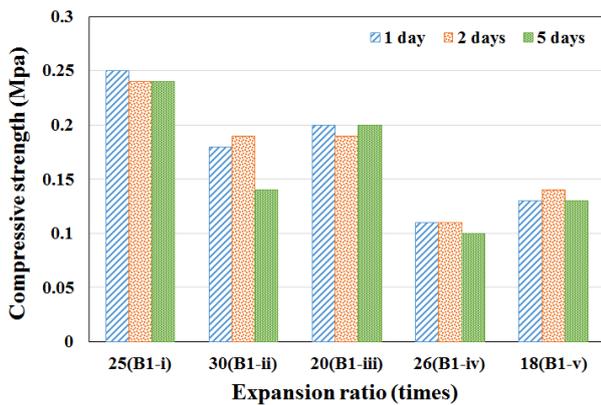


(a) Component ratio(A:B) = 1:1

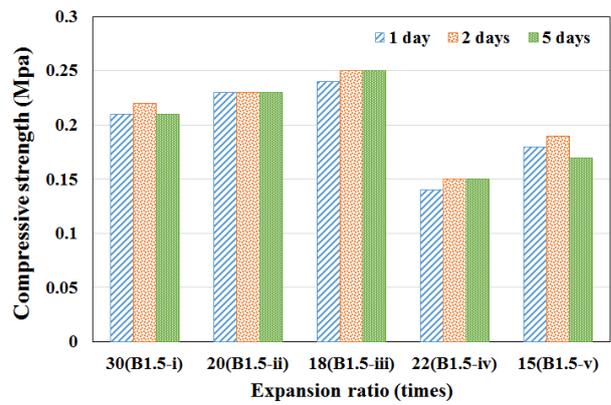


(b) Component ratio(A:B) = 1:1.5

Fig. 6. Results of compressive strength test



(a) Component ratio(A:B) = 1:1



(b) Component ratio(A:B) = 1:1.5

Fig. 7. Compressive strength – expansion ratio relationship

만족하고 가장 높은 강도를 나타낸 B1- i 배합이 가장 적합한 것으로 평가되었다.

4. 결론

본 연구에서는 지반침하에 의한 함몰을 유발하는 지반 내 공동에 대하여, 긴급복구가 필요한 경우를 대상으로 개발된 긴급복구용 팽창재료의 팽창 및 강도특성을 평가하였으며, 이를 요약하면 다음과 같다.

(1) 경화시간-팽창률 관계로부터 주제-경화제 구성비가 1:1인 경우, 모든 배합조건에서 경화시간에 대한 품질 기준은 만족하였지만, 일부 팽창률 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 그리고 주제-경화제 구성비가 1:1.5인 경우에도 경화시간은 만족하였지만, 1종류의 배합조건을 제외하고는 모두 팽창률 기준을 만족

하지 못하였다.

(2) 유사한 경화시간 대비 팽창율은 주제-경화제 구성비가 1:1인 경우에 크게 나타나는 것으로 확인되었으며, 이는 주제에 포함된 발포제와 촉진제 배합조건에 상관없이, 경화제의 비율이 높으면, 경화시간을 단축하면서 팽창률을 감소시키는 것으로 평가되었다. 즉, 주제와 경화제 구성비가 팽창률에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

(3) 압축강도 실험 결과, B1- i 및 B1.5-iii 배합조건이 가장 큰 강도를 나타내었지만 B1.5-iii 배합조건은 팽창률 기준을 만족하지 못하였기 때문에, B1- i 배합이 적용성 측면에서 가장 유리한 것으로 평가되었다. 이는 주제 내 발포제-촉진제 배합비가 팽창재료 강도에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

상기의 결론 바탕으로, 긴급복구가 요구되는 공동의 크

기 및 형태 등에 따라 팽창재료의 주입소요 시간, 팽창률 및 요구강도를 고려한 주체-경화제 구성비, 주체 내 발포제-축진제 배합비 적용이 필요함을 확인할 수 있었다. 또한 팽창재료 주입관을 통해 공동에 주입되기 때문에, 반응후의 경화 및 팽창시간을 주입시스템 요구사항에 반영할 필요가 있을 것으로 판단된다. 이를 바탕으로 보다 다양한 구성비 및 배합조건에 대한 실험을 통해 강도에 대한 품질 기준 수립에 따른 현장적용성 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement under the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government.(Project Number: 16SCIP-B108153-02)

References

1. Bae, Y. S., Kim, K. T., and Lee, S. Y. (2017), "The Road Subsidence Status and Safety Improvement Plans", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.18, No.1, pp.545-552.
2. Choi, S. K., Back, S. I., An, J. B., and Kwon, T. I. (2016), "Geotechnical investigation on causes and mitigation of ground subsidence during underground structure construction", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol.18, No.2, pp.143-154.
3. Choi, Y. W., Choi, H., and Kim, J. M. (2015), "The Mechanism of subsurface cavities and countermeasure of cave-in", Magazine of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol.19, No.4, pp.45-47. (in Korean)
4. Korea institute of geoscience and mineral resources (2014), Research on causes and policy suggestions by sinkhole type, Research report, pp.18-39.
5. Lee, D. Y., Kim, D. M., Ryu, Y. S., and Han, J. G. (2015(a)), "Development and Application of Backfill Material for Reducing Ground Subsidence", Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol.14, No.4, pp.147-158. (in Korean)
6. Lee Y. J., Yea, G. G., Park, S. W. and Kim H. Y. (2015(b)), "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)
7. Park, I. J. and Park, S. H. (2014), "Cause analysis and counterplan for sinkhole", Magazine of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol.14, No.5, pp.12-17.
8. Ryu, Y. S., Han, J. G., Chae, W. R., Koo, J. S., and Lee, D. Y. (2015), "Development of Rapid Hardening Backfill Material for Reducing Ground Subsidence", Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol.14, No.3, pp.13-20. (in Korean)
9. Seoul City (2016), *Road collapse management comprehensive countermeasures reporter briefing*, Seoul City. (In Korean)
10. Thiansky, A. B. (1999), Sinkholes, West-Central Florida, U.S. Geological Survey, Tempa, Florida, pp.121-140.