

비개착식 지반공동 긴급복구를 위한 충전재료 개발에 관한 기초 연구

Fundamental study on the development of Filling materials for Trenchless Emergency Restoration of Ground cavity

유남재¹, 한중근^{2*}, 이강일³

Nam-Jae YU¹, Ju-Hyun Choi^{2*}, Kang-Il Lee³

¹Member, Deputy General Manager, Korea Conformity Laboratories, 85, Danbang-ro, Namdong-gu, Incheon, 21591, Republic of Korea

²Member, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Urban Design and Study, Chung-Ang Univ., 84, Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Republic of Korea

³Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 11-1, Sundan-dong, Pocheon-si, Gyeonggi-do, 11159, Republic of Korea

ABSTRACT

Recently, there have been a lot of incidents related to ground sinks in urban areas, but restoration work is complicated and inconvenience due to on-site control, and particularly, grouting and soil filling are generally applied as recovery measures, but when the grouting or the soil filling is carried out, material segregation phenomenon occurs in the ground or a lot of restoration amount is often required, depending on the state of sinks and the existence of groundwater under the ground and the soil can be lost due to the flow of the ground water, and thus the purpose of this study is to develop a pouch-type filler applied to a trenchless method for emergency reinforcement of the ground sinks with the aim of quick recovery of the ground sink in urban areas, and as a result, it was confirmed that compression strength and the expansion ratio were different according to the temperature of ground water and the compression strength and the expansion ratio could be controlled by mixing alumina powder.

요 지

최근 도심지에서 지반함몰이 많이 발생하고 있으며 복구작업시 현장 주변 통제로 매우 복잡하고 불편하고 복구대책 공법으로 그라우팅 및 흙메우기 공법이 적용되고 있지만 지반 내 지하수위의 존재 및 공동상태에 따라 재료분리 현상이 발생하거나 많은 양의 복구재료가 요구되는 경우가 많고 지하수의 흐름에 따라 지반 내에서 유실되는 경우도 발생하고 있어 본 연구는 도심지에서 지반함몰이 발생하고 신속하게 복구하는 것을 목표로 지반공동의 긴급보강을 위해 비개착식 공법에 적용할 파우치형 충전재를 개발하는 것으로 지하수의 온도에 따라 충전재의 압축강도 및 팽창비가 다른 것과, 알루미늄나 파우더의 혼합을 통해 압축강도와 팽창률을 조절할 수 있음을 확인했다.

Keywords : Ground sink, Trenchless emergency restoration, Alumina powder, Hydrophilic polymer

1. 서 론

본 연구에서는 최근 세계 도심지에서 지반함몰이 대체적으로 발생하고 있다. 이러한 지반침하가 과거와 다르게

지속적으로 발생하고 특히, 세계 도심지에서 발생률이 크게 나타나고 있고, 국내 또한 도심지에서 지반 침하 발생률이 증가하며 사회적으로 큰 문제가 되고 있다. 복구를 위해 많은 시간과 재료를 투자하지만 지반 내 지하수위의 존재 및 균열 상태에 따라 많은 재료와 복구양이 요구되며 지반 내에서 재료분리 및 유실되는 경우가 대부분 나타나는 것으로 확인되었다. 또한, 현재 흙메우기 및 그라우팅 복구방법으로 대부분 진행하기 때문에 시공 과정이 매우 많고 지

Received 22 May. 2017, Revised 13 Jun. 2017, Accepted 18 Jun. 2017

*Corresponding author

Tel: +82-2-820-5253; Fax: +82-2-816-4160

E-mail address: jghan@cau.ac.kr (J.-G. Han)

반합물이 재발될 우려가 생겨 문제가 되며, 많은 충전재를 넣어 보강해야 되기 때문에 비용의 문제를 가지고 있다.

2. 비개착식 지반공동 긴급복구 개념

2.1 기존의 지반함몰 복구 공법

현재 발생된 지반함몰 복구 방법으로는 개착 후 흙메우기 및 그라우팅 공법이 주로 적용되고 있다.

개착 후 흙메우기는 현재 주로 사용하는 공법으로 공동이 생긴 도로 주변을 통제 한 후, 지반함몰이 일어난 도로를 개착하여 손실된 공동에 흙을 메우고 다짐을 한 후, 상부구조물(도로 등)을 재시공하는 방법으로, 개착으로 인한 원지반 교란에 따른 지반 강도 저하, 시공 과정이 복잡하고 공기가 길어져 공사비가 증가하며, 통행제한으로 인한 민원발생 등의 단점이 있다. 또한 공동 발생주변에 지하수의 흐름이 발생하는 경우 주재료인 토사의 유실이 발생할 가능성이 매우 높기 때문에, 공동 복구에 요구되는 필요 이상의 토사가 사용되어 비경제적이며 비효율적인 복구방법의 원인이 될 수 있으며 토사의 다짐 시 지중매설물에 의해 최적의 다짐이 불가능한 경우도 발생할 가능성이 있다.

한편 그라우팅 공법은 비개착식이라는 용이함과 작은 지반 내 간극까지 충전 가능한 장점이 있지만, 환경오염 등의 문제점을 지니고 있다. 이는 공법의 특성상 지반 내부에 시멘트계 충전재와 함께 약액을 주입하게 되는데 지반과 직접적으로 맞닿아 있고 작용 면적이 넓어 충전재료에서 중금속 유출의 우려가 있으며, 실제로 과거에 일부 검증되지 않은 충전재료의 활용으로 인하여 발암물질중 하나인 6가 크롬(Cr)의 유출사례가 보고된 바 있다. 즉, 충전재가 오랜 시간동안 지반에 노출되어 지하수 흐름으로 인해 오염원이 광범위하게 확산될 가능성이 있으며 또한 흙메우기와 동일하게 지하수 흐름에 기인하여 충전재의 재료분리와 유실 가능성이 매우 높아 경제성 및 강도저하에 따른 안정성에 문제를 야기할 수 있다. 그리고 지반 공동, 지반침하 및 지반함몰 발생 시 그라우팅 공법 시공을 위한 사전 작업인 그라우팅 플랜트 배치 및 설치 시간으로 보수 및 보강이 늦어질 수 있다.

2.2 수용성 폴리머를 이용한 지반함몰 복구 공법

수용성 폴리머를 이용한 지반함몰 복구공법은 수용성 폴리머 파우치 내부에 충전재료(무기질계 혼화재)를 채움

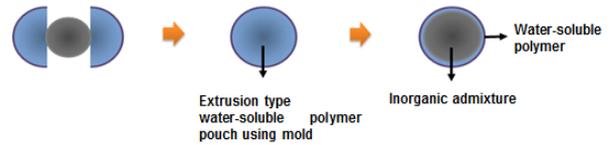


Fig. 1. Schematic description of hydrophilic (water-soluble) polymer

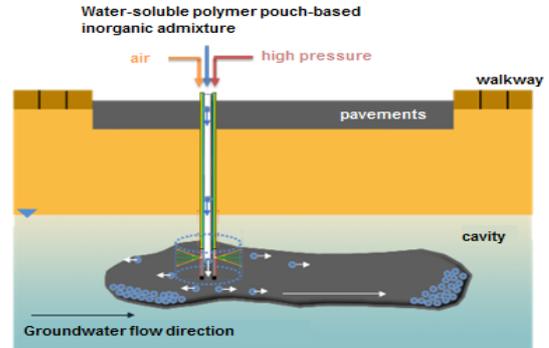


Fig. 2. Concept of non-open cut injection method

으로서 지반함몰 발생 또는 이를 유발하는 공동 확인 시, 긴급 복구가 가능한 충전재료를 개발하는 것이다.

수용성 폴리머 기반의 파우치는 시간의존성을 반영하여 표면부에서 물과 파우치가 먼저 반응을 일으켜 반응지역에 따른 유실 전에 파우치가 수용됨으로서 파우치의 점착성분이 공동 내 토사 유출구를 Seal 처리함으로써 충전재 유출을 막고 내부에서의 무기질혼화재가 강도발현을 통하여 노체 구성 토사와 유사한 지반강도를 안정적으로 구현 할 수 있는 긴급복구가 가능한 기술이며 그 개요도는 Fig. 1과 같다.

무기질계 혼화재가 채워진 수용성 폴리머 기반의 파우치는 사전에 제작이 되며 기존 그라우팅 공법과 같이 시공을 위한 플랜트 설치에 소요되는 시간이 없기 때문에 현장 공정을 줄임으로서 공기를 단축시킬 수 있을 뿐만 아니라 공동복구에 소요되는 재료의 불필요한 사용을 줄일 수 있기 때문에, 경제성 확보가 가능할 것으로 예상되며 개발된 수용성 폴리머 파우치 내부에 충전재료를 이용한 지반함몰 긴급복구 공법의 개념도는 Fig. 2와 같다.

3. 무기질계 혼화재

3.1 무기질계 혼화재 선정기준

지반 함몰의 발생을 예측할 수 없는 상황에서 긴급복구 공사는 발생 후 즉시 복구를 요하는 공사로서 피해확대 방지, 교통 방해 요소 및 2차 피해 방지 등의 목적에서 일시

적으로 응급공사에서 처리하는 경우에 해당한다.

긴급복구공사에서 우선적으로 고려되어야 사항은 짧은 공사시간에 목포로 하는 품질기준을 만족하는 재료이어야 하며 수용성 폴리머 파우치에 내부에 충전되는 무기질 혼화재는 재료 공급이 원활하고, 쉽게 넣을 수 있고 강도발현을 위한 재료와 항상 건조한 상태를 유지하고 현장 적용성이 우수해야 한다.

지반 충전재 및 표층 처리에 많이 사용되는 흙-시멘트는 흙을 주변에서 쉽게 구할 수 있지만 파우치의 크기에 따른 입도를 선별해야 하고 시멘트와 결합되는 재료이므로 건조 상태가 유지되어야 하며 흙의 종류에 따라 많은 종류의 배합설계가 요구되는 단점이 있다.

또한 화력발전소에서 미분탄(微粉炭)을 연소한 후 부산물로 발생하는 회(재)인 플라이애쉬(Fly Ash)와 하수 슬러지 및 준설토는 특정 지역에서 생산되어 운반과 건조조정이 필요하다.

3.2 무기질계 혼화재 정의

긴급복구 공사에 있어 조기강도가 확보되어야 하며 이러한 성능을 충족하기 위해서 조강 포틀랜드 시멘트 및 초속경 시멘트가 있다(Jung., 1998).

조강 포틀랜드 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하여 C₃S를 많이 C₂S를 적게 함유하고 있으며 미분쇄를 하여 분말도를 4,000~4,500cm²/g하고 있으며 조강 포틀랜드 시멘트의 재령1일 강도는 보통 포틀랜드 시멘트 3일 강도와 비슷하다. 초속경 시멘트는 보통 포틀랜드시멘트에 존재하지 않는 수화활성도가 높고 안정한 수화물을 생성시키는 3CaO·3Al₂O₃·CaSO₄을 다량 함유하고 있어 수화반응시 매우 빠른 속도로 침상 결정의 3차원적 망목구조를 형성하는 고허산염의 Calcium sulfoaluminate 수화물(Ettringite)을 생성시켜 수시간 내에 높은 강도를 발현하게 된다. 조강 포틀랜드 시멘트는 시멘트 분말도를 초속경 시멘트는 Calcium sulfoaluminate의 수화반응을 각각 이용해서 강도발현을 하는 것으로 조강 포틀랜드 시멘트는 일(day) 강도라면 초속경 시멘트는 시간(hour)의 단위에서의 강도 개념으로 판단된다. 본 연구에서는 긴급복구용으로 시간 개념의 강도 발현이 되는 초속경 시멘트를 선정하였다.

본 연구에서는 수용성 폴리머 파우치 내부에 충전재료인 시멘트와 잔골재 및 혼화재를 혼합하여 지반공동을 채

우는 것으로 한국산업표준(KS)의 콘크리트 용어(KS F 1004 : 2004)에는 그라우트는 시멘트 풀 또는 모르타르를 사용하여 틈이나 공극을 충전하는 재료이며 모르타르는 시멘트, 물 및 잔골재, 경우에 따라서는 이들에 혼화 재료를 혼합하여 반죽한 것으로 규정되어 있어 충전재료의 정의는 모르타르로 규정 한다.

3.3 무기질계 혼화재 충전율

수용성 폴리머 파우치 내부에 무기질계 혼화재를 채워서 지반 공동내에 이 충전재를 주입하여 원지반 강도 발현을 통해 긴급 복구하는 것이 최종 목표이기 때문에, 주입 후 수용성 폴리머의 충전율을 확인할 필요가 있다. 주입재의 충전율이 확인되어야 무기질계 혼화재의 팽창률을 설정하여 원하는 만큼 공동을 채울 수 있도록 조절할 수 있기 때문이다. 이를 위해 이론적인 충전율을 계산하였으며, 모형 주입재를 이용한 실내실험을 통해 실 충전율을 확인하였다.

3.4 무기질계 혼화재의 강도 설정

무기질계 충전재는 응급복구에 사용되고 응급복구 후 재 굴착이 용이 해야 하며 이러한 목적과 부합되는 것으로 저강도 콘크리트 개념을 지반공학에 적용하여 만들어진 CLSM(Controlled Low-Strength Materials)이 있다. CLSM은 저강도 콘크리트 개념을 지반공학에 적용하여 만들어지는 것으로 CLSM, 강도조절 채움재, 다짐조절 채움재, 유동성 플라이애쉬 등으로 명명 되고 있다(Lim et al., 2011). 미국재료학회 ASTM D 4832에서 CLSM은 흙보다 큰 강도이며 8.4MPa 미만의 강도로 대부분에 적용할 수 있는 일반적인 강도는 350-700 kPa로 규정하고 있으며 미국 콘크리트 학회(ACI Committee 116R)에서는 유동성 채움재를 재령 28일 압축강도가 1200psi (8.4MPa)이하를 갖는 재료로 정의하고 있다.

그러나 Amon(1990)등의 연구자들은 향후 재굴착이 예상되는 경우에는 압축강도가 150psi(1.05 MPa)이하가 되어야 한다고 주장하고 있으며 Sumio Horiuchi(1996)은 인공섬 축조시 필요한 강도를 122psi(0.84MPa)로 산정한 바 있다.

또한 지반 침하 방지용 고화재(표층 고화재)에 사용되는 25톤 덤프트럭의 경우 만차시 약 57tf이며 소요지지력

Table 1. Unconfined Compressive Strength at 28 days of CLSM

Researcher or proposer	Compressive strength
Edward T. Harrigan (2008)	• 350~1,000kPa (51~145psi)
NRMCA (1995)	• Open cut : equal to or less then 1,034kPa (150psi) • Non open cut : equal to or more then 1,034kPa (150psi)
N. Rajendran (1994)	• equal to or less then 2,068kPa (300psi)
ASTM (1997)	• hand excavation : 1,380kPa (200psi) • machine excavation : 345kPa (50psi)
Tarun R. Naik, Rudolph N. Kraus (2002)	• 620~1,310kPa (90~190psi)
Amster K. Howard, Jennifer L. Hitch (1999)	• equal to or more then 500kPa (73psi)
Sumio Horiuchi (1996)	• Light weight back-filling : 490kPa (71psi) • Build an artificial island : 840kPa (122psi)

은 1MPa 정도로 산정되며 앞에서 언급한 내용들을 검토한 결과 재 굴착이 예상되는 강도(1.05MPa)와 ASTM에서 일반적으로 적용할 수 있는 범위(0.35-0.7MPa)를 고려하여 목표강도는 6시간 기준에서 일축압축강도 0.7~1.0MPa로 규정하였다.

4. 시험내용

긴급보강을 위한 저항도 보강재 재료 선정에 있어서 크게 5가지 측면(재료공급측면, 사용성측면, 제조적측면, 경제적측면, 현장적용성)에서 고려하였다. 또한 연구에서 개발될 보강재는 공동에 채워지는 충전재로서 공동부의 지중응력과 비슷한 압축강도를 확보하기 위해 목표 압축강도를 0.7~1.0MPa로 설정하였다.

역학적·물리적·환경적 특성 평가를 위해 압축강도, 투수계수, 팽창성 및 내화학적, 오염물 용출, pH시험 등을 수행하였다.

지반함몰 등으로 발생하는 공동에 사용될 충전재는 지하수의 온도에 영향을 받으며 동결기 및 하절 등의 상황에 맞게 지표 부근의 지하수 온도 15°C 및 20°C를 무기질 혼화재의 양생온도로 설정하였다.

4.1 시료특성

4.1.1 초속경 시멘트

초속경 시멘트는 경화속도가 빠르고 저온에서도 짧은 시간(시공 후 2~3시간) 안에 최소의 실용강도를 발현할 수 있으며 장기간에 걸쳐서도 안정된 강도발현이 지속된

다. 또한 콘크리트의 경화시간이 응결지연제(setting retarder) 등을 첨가함으로써 자유롭게 조절될 수 있고 특히 블리딩이 없고 침하량이 작다는 등의 특징을 지니고 있다(Park, 2009).

초속경시멘트는 속경성을 반현하는 구성광물에 따라 C₁₁A₇·CaF₂를 주성분으로 하는 알루미늄아계(AC계), C₁₂A₇·CaF₂를 주성분으로 하는 비정질 알루미늄아계(C₁₂A₇) 그리고 CSA를 주성분으로 하는 아원계(Hauyne)로 구분된다(MKE, 2010).

초속경 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트에는 존재하지 않는 수화활성도가 높고 3CaO·Al₂O₃·CaSO₄을 다량 함유하고 있어 수화 반응 시 매우 빠른 속도로 높은 강도를 발현할 수 있다. 즉 초속경시멘트가 물과 접촉하면 C₁₁A₇·CaF₂광물은 곧바로 용해되어 C₃S(Calcium silicate)의 수화에 의해 유리된 수산화칼슘(Ca(OH)₂) 및 별도로 용해된 황산칼슘(CaSO₄)과 신속하게 반응하여 칼슘 알루미늄아이트(calcium aluminate) 수화물 및 알루미늄아이트(aluminate) 수화물을 생성한 후 다시 수분 내에 첨가된 유리석고와 반응하여, 에틀린자이트(ettringite)라는 미세한 침상결정을 생성하여 빠른 조기강도를 발현하게 되는 것이다. 이러한 침상의 에틀린자이트에 의해 발생하는 팽창력은 콘크리트의 물성개선에 유효하게 작용하며, 이를 콘크리트의 내구성에 손상을 미치지 않도록 작용하기 위해서는 시멘트가 수화하여 경화·팽창하는 시기를 맞추는 것이 중요하다(Seo et al., 2010).

시멘트는 국내 U사 제품의 비중 2.91, 분말도 5,984cm²/g의 초속경 시멘트를 사용하였으며 물리적 특성은 다음 Table 2와 같다.

Table 2. Quality of ultra rapid hardening Cement

Test	Unit	Test method	Result	
1. SO3	%	KS L 5204	11,8	
2. ignition loss	%	KS L 5204	2,9	
3. specific gravity	—	KS L 5110	2,91	
4. soundness(aggregate)	%	KS L 5107	0,05	
5. fineness	cm ² /g	KS L 5106	5,984	
6. setting time	initial setting time	min	KS L 5103	29
	final setting time	min	KS L 5103	34

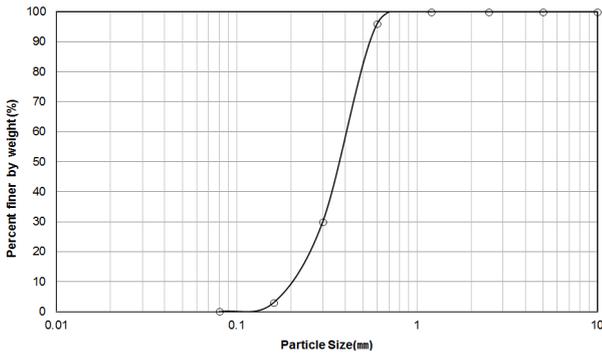


Fig. 3. Particle size distribution of fine aggregate

4.1.2 잔골재

잔골재의 입도는 건축공사표준시방서 및 한국산업표준 KS F 2578을 기준으로, 최대치수 2.5mm 이하의 해사를 사용하였다.

4.2 시험내용

수용성 폴리머로 제작한 파우치의 직경 크기가 약 30mm로 예상되고, 잔골재 모래 입자의 크기는 2.5mm이하의 것을 사용하므로 수침 시험용 몰드 직경은 50mm로 산정하

였다. 그리고 수용성 폴리머 파우치가 물에 의해 용해되므로 충전재에 물을 흡수하는 형태를 모사하기 위하여 아크릴 재질로 원주형으로 만들고 하부 및 옆면에 2mm 크기의 구멍을 내고 내부표면에 토목섬유를 부착하여 공시체를 제작하였다.

4.3 표준온도 조건

4.3.1 압축강도 및 팽창률

본 연구에서 조기강도 확보 및 수용성 폴리머의 충전율에 따른 팽창률을 확보하기 위하여 석고 및 알루미늄을 사용하였으며 양생온도는 20°C 조건에서 압축강도 및 팽창률 시험을 수행하였으며 시험에 사용된 배합은 Table 2와 같다.

사전 연구를 통하여 시멘트와 잔골재의 양은 300kg과 1800kg으로 설정하였으며, 시멘트는 앞에서 언급한 국내 U사의 초속경 시멘트이며 팽창재는 일본 D사 CSA #20 제품으로 분말도는 2000g/cm², 알루미늄 파우더는 독일 B사 그리고 폴리카본산계 유동화재의 혼화재 사용하였다.

시험 결과 석고가 혼합되지 않은 알루미늄에서 팽창이

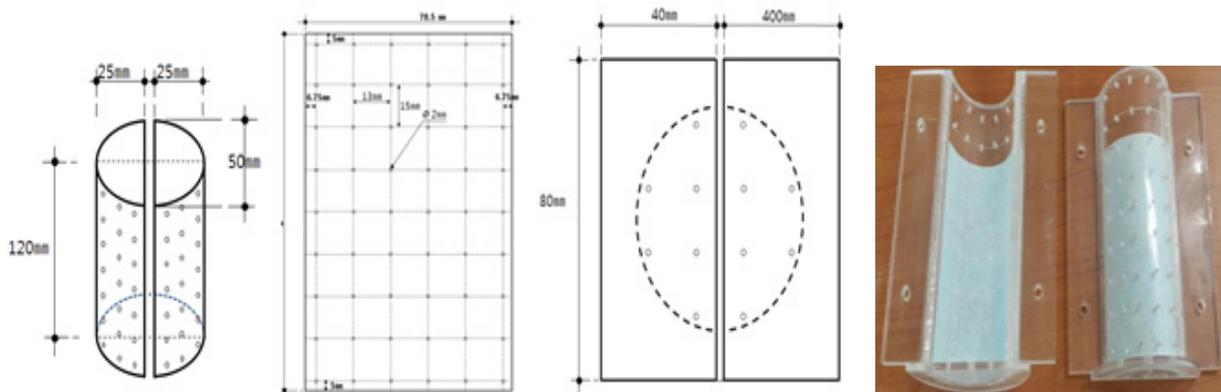


Fig. 4. Pictorial description of mold pattern for immersion test

Table 3. Formulation table at standard temperature condition

Category		C 300-B	C 300-R	C 400-B	C 400-R
Cement (kg)		300	300	400	400
Fine aggregate (kg)		1800	1800	1800	1800
Expansive additives 3% (g)		9,00	9,00	12	12
Gypsum 3% (g)		-	9,00	-	12,00
Mineral admixture 0,1% (g)		0,30	0,30	0,40	0,40
Alumina (g)	5,0%	15,00	15,00	20,00	20,00
	10,0%	30,00	30,00	40,00	40,00
	15,0%	45,00	45,00	60,00	60,00

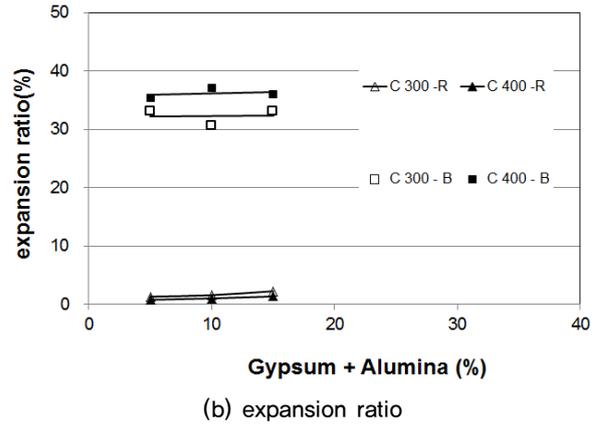
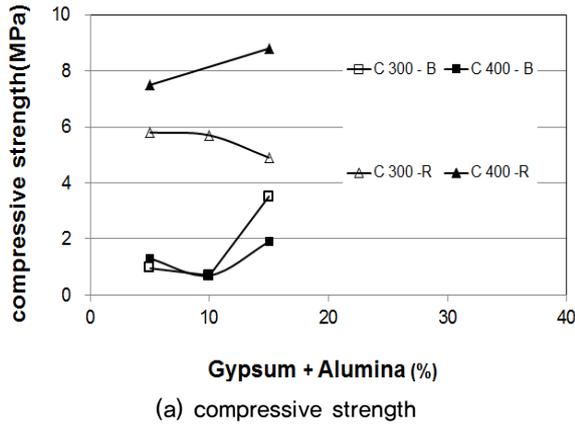


Fig. 5. Test results at standard temperature condition

많이 발생하였으나 팽창부분은 무른 상태로 관찰되었으며 석고 성분이 혼합된 경우에 강도가 높고 팽창률이 적은 것으로 분석되었다. 석고 성분이 초기 강도발현을 위한 작용으로 팽창을 저해하는 것으로 분석된다.

Fig. 5의 (a) C300-R에서는 알루미나 혼입양이 증가할수록 팽창압이 많이 발생되고 경화체를 밀어내는 반응의 결과로 예측되며 이러한 결과는 Fig. 5 (b)에서 석고가 혼입되지 않은 C300-B에서 팽창율이 높은 것을 알 수 있다.

4.3.2 투수시험

압축강도 및 팽창률 시험 결과 C300-B, C300-R에 대하여 ASTM D 5084의 시험 방법으로 투수성을 평가한 결과 $\alpha \times 10^{-8}$ 으로 분석되었다(Table 4).

4.3.3 내화학적시험

내화학적 시험 결과 0.1~1.1%의 질량 변화율을 보이

고 있으며 그 결과는 Table 5와 같다.

4.3.4 오염물 용출시험

오염물 용출시험에서는 C300-B에서 카드뮴이 C400-R에서 구리의 성분이 검출되었지만 그 기준치를 초과하지 않는 것으로 분석되었다(Table 6).

4.3.5 pH시험

pH 시험 결과 11.7~12.4의 범위로 모르타르나 콘크리트의 범위와 비슷한 결과를 나타내고 있다(Table 7).

4.4 저온 조건

4.4.1 예비시험

1) 저온에서 강도 발현을 위한 혼화제 사용

저온에서 시멘트의 수화반응을 촉진하기 위하여 혼화제 즉, 수산화나트륨(NaOH)과 생석회(CaO)가 사용되며

Table 4. Permeability depending on the existance/absence of limestone

Category	C300-B	C300-R
permeability (cm/sec)	2.6×10^{-8}	1.4×10^{-8}

Table 5. Result of Chemical resistance test

Category		initial weight (g)	weight after the chemical resistance test (g)	percent change of weight (%)
C300-B	300-5	234,602	235,259	0.3
	300-10	239,688	242,115	1.0
	300-15	246,791	247,158	0.1
C400-B	400-5	206,407	207,455	0.5
	400-10	214,974	215,242	0.1
	400-15	235,769	236,111	0.1
C300-R	300-5	305,165	306,614	0.5
	300-10	280,185	283,247	1.1
	300-15	259,161	261,909	1.1
C400-R	400-5	223,701	225,738	0.9
	400-10	-	-	-
	400-15	234,102	236,205	0.9

Table 6. Result of contaminant dissolution test

Test	unit	Limit of detection	Result			
			C300-B	C400-B	C300-R	C400-R
oil	%	<5%	Not detected	Not detected	Not detected	Not detected
lead	mg/L	<3 mg/L	0.16	Not detected	Not detected	0.04
cadmium	mg/L	<0.3 mg/L	Not detected	Not detected	Not detected	Not detected
copper	mg/L	<3 mg/L	0.079	0.074	0.051	0.060
arsenic	mg/L	<1.5 mg/L	Not detected	Not detected	Not detected	Not detected
hexavalent chromium	mg/L	<1.5 mg/L	Not detected	Not detected	Not detected	Not detected
mercury	mg/L	<0.005 mg/L	Not detected	Not detected	Not detected	Not detected
Cyanide	mg/L	<1 mg/L	Not detected	Not detected	Not detected	Not detected
tri-chloro ethylene	mg/L	<0.3 mg/L	Not detected	Not detected	Not detected	Not detected
tetra-chloro ethylene	mg/L	<0.1 mg/L	Not detected	Not detected	Not detected	Not detected
Organophosphorus compound	mg/L	<1 mg/L	Not detected	Not detected	Not detected	Not detected

Table 7. Result of contaminant pH test with Powder type

Category	C300-B	C400-B	C300-R	C400-R
pH	12.3	12.4	11.7	11.8

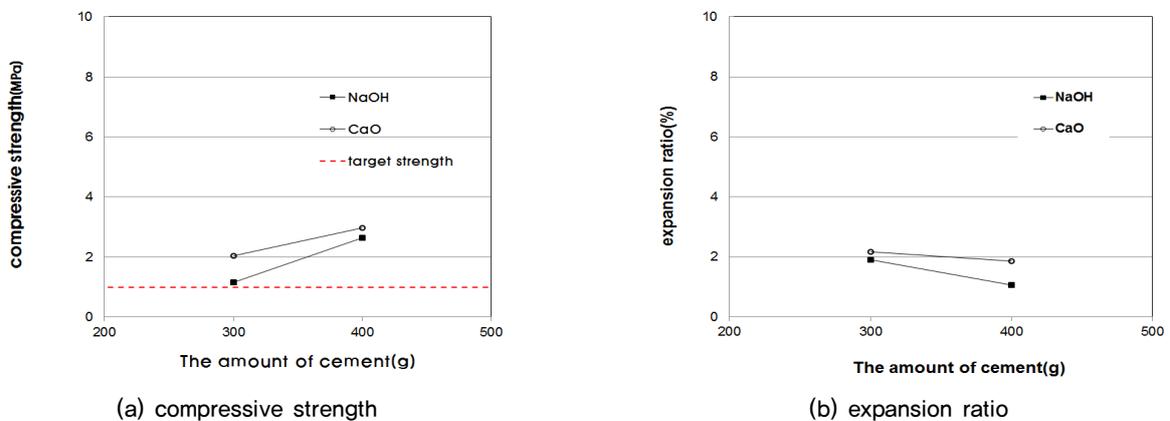
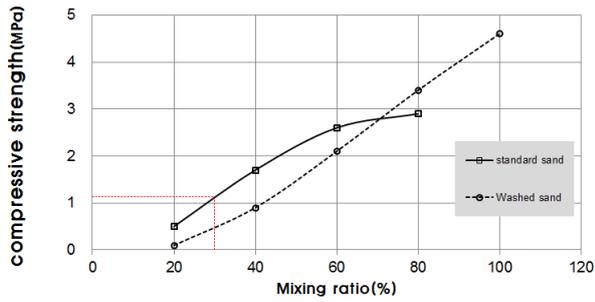
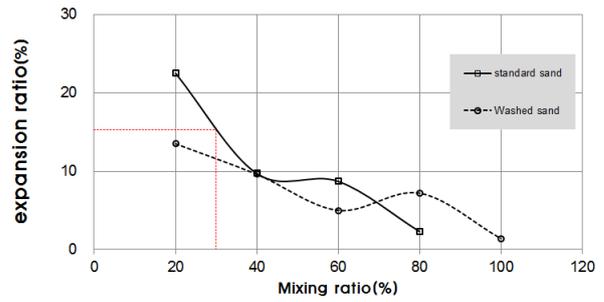


Fig. 6. Effect of NaOH and CaO

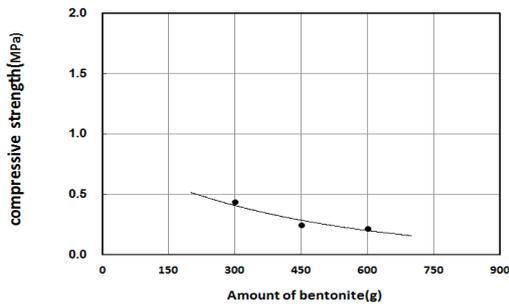


(a) compressive strength

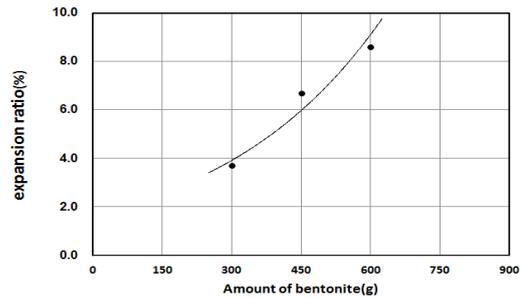


(b) expansion ratio

Fig. 7. Effect of the ratio of ultra rapid hardening cement and high early strength cement



(a) compressive strength



(b) expansion ratio

Fig. 8. Effect of bentonite

예비시험 단계에서 시멘트량을 300kg 및 400kg에 대하여 혼화재를 0.1% 사용하여 각각 예비시험을 수행하였으며 시험결과 시멘트량 300kg의 시험조건에서 6시간 기준 압축강도는 2.0MPa, 팽창률은 2.3%를 나타내어 목표강도를 만족하는 것으로 분석되었으나 초기 압축강도가 적으면 팽창률이 더 향상될 것으로 판단된다(Fig. 6).

2) 강도저감 및 팽창률 향상을 위한 조강시멘트 사용

앞서 예비시험의 분석 결과에서 알 수 있듯이 목표강도에 접근하고 팽창률을 향상시키는 방안으로 조기강도는 확보되면서 장기강도 증가는 더디고 팽창률을 향상시키기 위하여 초속경시멘트 사용량을 줄이고 조강시멘트의 양을 늘려서 혼합비율에 따른 예비시험을 수행하였으며 3:7의 비율이 목표강도에 가장 근접하며 이때의 팽창률은 약 15%로 예측되었다(Fig. 7).

3) 벤토나이트를 활용한 실험

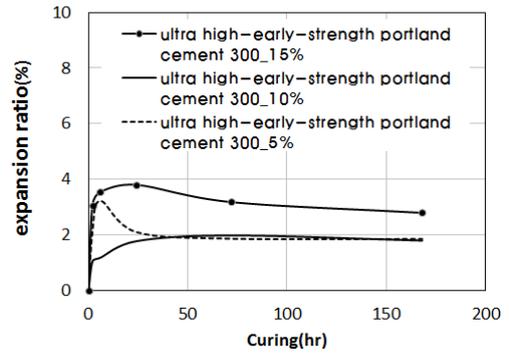
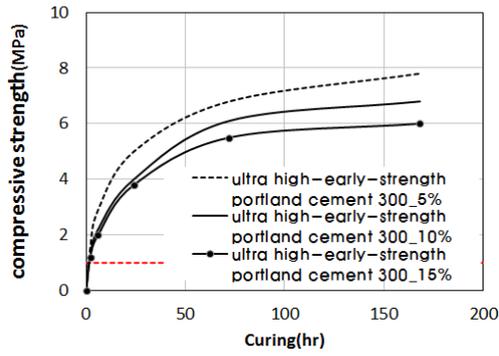
앞에서의 연구에서는 알루미늄을 이용하여 팽창성을 확인하였으나, 좀 더 높은 팽창성을 기대하기 위하여 건설 재료로 많이 사용되는 있는 벤토나이트를 활용하였으며

시멘트량의 100%, 150%, 200%의 비율로 혼합하였다. 시험결과 벤토나이트가 150% 및 200%의 조건에서는 시료에 균열이 발생하였으며, 벤토나이트 100%조건에서는 초속경시멘트, 초속경시멘트+조강시멘트의 시험조건에서 보다 균질한 팽창을 나타내는 것으로 확인되었으며 벤토나이트 양이 적은 조건에서 압축강도는 크며 팽창률은 적은 것으로 분석되었다(Fig. 8).

4.4.2 본시험

1) 초속경시멘트

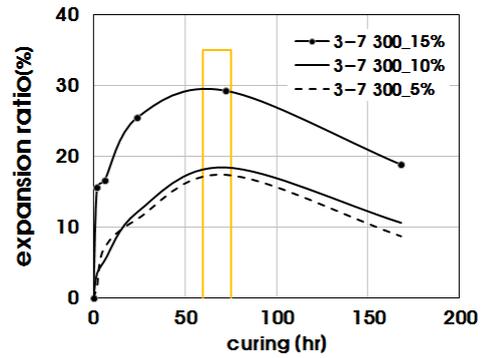
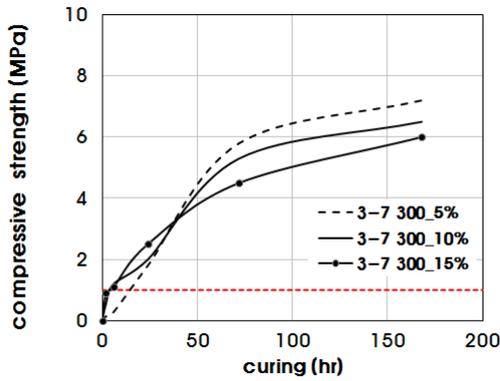
초속경시멘트와 생석회 양은 일정하게 하고 알루미늄 파우더의 혼입량의 변화에 따른 압축강도 및 팽창실험에 대한 결과 알루미늄 파우더의 혼입량이 많을수록 압축강도는 작고, 팽창률은 크게 나타났으며 압축강도 시험결과 6시간 기준에서 목표강도 1.0MPa를 만족하며 이때의 팽창률은 1.2%~3.5%사이에서 측정되었으며 알루미늄 파우더의 혼입량이 10% 및 15%일 때 초기 압축강도가 비슷한 경향을 나타나고 있으며 팽창비는 5%, 10%에서 24시간 이후의 팽창률이 비슷한 결과를 나타내고 있다(Fig. 9).



(a) compressive strength

(b) expansion ratio

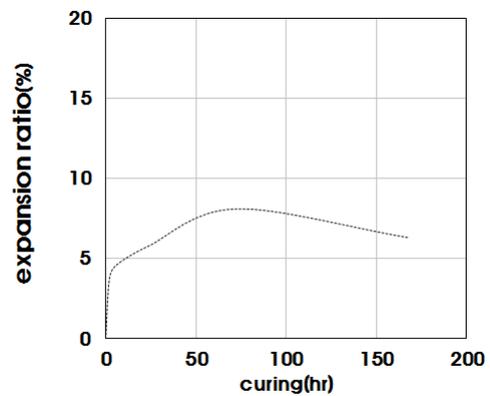
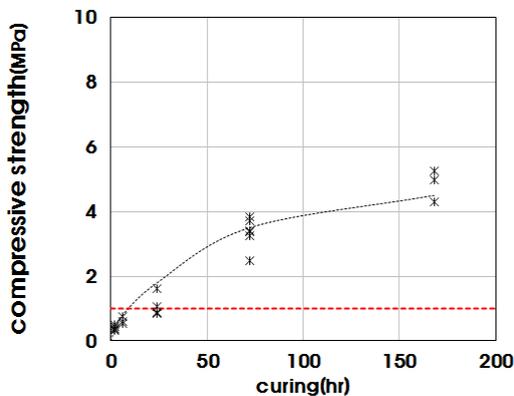
Fig. 9. Test result of ultra rapid hardening cement



(a) compressive strength

(b) expansion ratio

Fig. 10. Effect of alumina addition to ultra rapid hardening cement + high early strength cement



(a) compressive strength

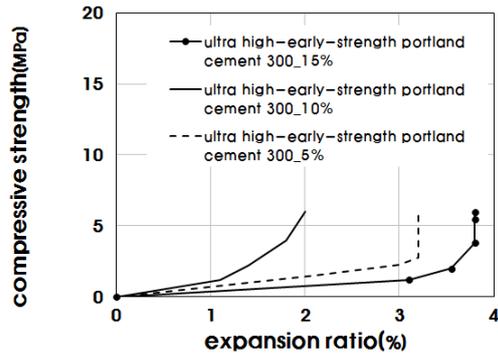
(b) expansion ratio

Fig. 11. Test result of ultra rapid hardening cement + bentonite

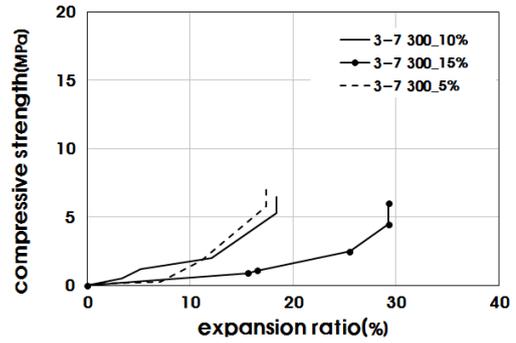
2) 초속경 시멘트+조강시멘트

알루미나 파우더의 혼입량이 5%에서 목표 압축강도에는 미달되었으며 10% 및 15%에서 1.1MPa를 나타내어 목표 압축강도를 만족하는 것으로 분석되었다. 팽창률 측정 결과 양생시간의 경과에 따라 팽창이 진행되고 60~75시간에서 높은 팽창률을 보이고 있으며 이후 감소하는 경향

을 보이고 있으며 수렴하는 시간을 확인하는 것이 필요하다. 이는 초속경시멘트와 조강시멘트를 혼합된 것으로 초속경시멘트와 조강시멘트의 반응 시간의 차이에 기인하는 것으로 판단된다(Fig. 10).



(a) ultra rapid hardening cement + alumina



(b) ultra rapid hardening cement + high early strength cement

Fig. 12. Relationship between compressive strength and expansion ratio

3) 초속경 시멘트+벤토나이트

초속경 시멘트와 벤토나이트를 1:1 비율로 혼합하고 생석회 1% 사용하여 압축강도 및 팽창실험에 대한 결과 압축강도는 6시간 기준에서 0.7MPa로 목표강도에는 미달되었으나, 이때의 팽창률은 5%로 분석되었다. 본 조건에서 공시체의 팽창에 따른 균질성이 매우 좋은 것으로 나타났으며 목표강도 달성을 위하여 혼화재의 사용량을 늘이는 방법 등이 고려되어야 할 것이다(Fig. 11).

4) 압축강도와 팽창률의 관계

압축강도와 팽창률의 관계에서 목표 팽창률이 정해지면 지반조건과 현장여건에 따라 적절한 배합비를 선정하기 위하여 Fig. 12에 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 보강재의 기준 정립 및 선정과 역학적·물리적·환경적 특성 평가를 위하여 여러 실험을 수행했으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 긴급복구공사에서 우선적으로 고려되어야 사항은 짧은 공사시간에 목표로 하는 품질기준을 만족하는 재료여야 하며 수용성 폴리머 파우치에 내부에 충전되는 무기질 혼화재는 재료 공급이 원활하고, 쉽게 넣을 수 있고 강도발현을 위한 재료와 항상 건조한 상태를 유지하고 현장 적용성이 우수해야 한다.
- (2) 수용성 폴리머 파우치 내부에 충전재료인 시멘트와 잔골재 및 혼화재를 혼합하여 지반공동을 채우는 것으로 충전재료의 정의는 모르타르로 규정 한다.

- (3) 양생온도는 20°C 조건에서 석고 및 알루미늄을 사용하여 압축강도 및 팽창률 시험을 수행하였으며 석고를 혼합하지 않고 알루미늄을 사용하는 조건에서 팽창률이 높았으나 팽창부분은 무른 상태로 관찰되었으며 석고 성분이 혼합된 경우에 강도가 높고 팽창률이 적은 것으로 분석되었다. 석고 성분이 초기 강도발현을 위한 작용으로 팽창을 저해하는 것으로 분석되었다.
- (4) 석고의 유무에 관계없이 투수계수는 $\alpha \times 10^{-8}$, 내화학성 시험에서 0.1~1.1%의 질량 변화율, pH 시험 결과 11.7~12.4의 범위로 모르타르나 콘크리트의 범위와 비슷한 결과를 나타내고 있으며 오염물 용출시험에서 석고가 혼합되지 않은 C300-B에서 카드뮴이 석고가 혼합된 C400-R에서 구리의 성분이 각각 검출되었지만 그 기준치를 초과하지 않는 것으로 분석되었다.
- (5) 지하수온도 조건에 따라 상온과 저온조건으로 배합에 따른 압축강도 및 팽창율을 확인하였으며, 저온에서 압축강도와 팽창률의 관계로부터 제시된 그림을 활용하여 지반조건 및 현장여건에 따라 배합비를 적용할 수 있다.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial support from the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport/Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (Grant number: 15SCIP-B108153-01).

References

1. Jung, J. D. (1998), "Concrete Material Engineering", Bosungkag,

- pp. 54.
2. Korea Conformity Laboratories (2014), "*Performance Evaluation of Grout for Off shore Wind Power structure*", Research Report.
 3. Lim, J. G., Kim, Y. J., and Chun, B. S. (2011), "*Application of Artificial Neural Networks for Prediction of the Flow and Strength of Controlled Low Strength Material*" Korean Geo-technical Society Vol. 27, No. 1, pp. 18.
 4. Park, D. H. (2009), "*A Study on the Environmentally Friendly and Durable Characteristic of Inorganic Grouting Material*", Hanyang University Graduate School, Doctorate Thesis.
 5. Ministry of Knowledge Economy (2010), "*The Standardization Technology for the Environmental-Friendly Utilization of Pond-Ash*", Research Report.
 6. Seo, D. W., Kim, H. Y., Kim, K. M., and Chun, B. S. (2010), "*Engineering Characteristics of Plasticizer Lightweight Foamed Concrete according to Changes of Mixing Ratio*", Korea Geo-Environmental Society, Vol. 11, No. 4, pp. 33-42.