

지반보강 팽창약액의 팽창성능 및 밀도에 따른 강도특성 평가

Evaluation of strength characteristics according to expansion amount of ground reinforced expanded polyol

Hyounhoi Kang^{a,1}, Kisung Kim^b, Juho Kim^c, Jeongjun Park^{d,2*}

^a UCI Tech Co. Ltd, 313 Inha-ro, Nam-gu, Incheon, Korea

^b UCI Tech Co. Ltd, 313 Inha-ro, Nam-gu, Incheon, Korea

^c UCI Tech Co. Ltd, 313 Inha-ro, Nam-gu, Incheon, Korea

^d Incheon Disaster Prevention Research Center, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, Korea

ABSTRACT

In this study, to quantitatively evaluate the strength characteristics of the inflatable liquid used for the recovery of soft ground or partial settlement, the inflatable liquids were prepared by dividing the inflatable capacity and the strength characteristics were analyzed according to the conditions. The experimental group was divided into two groups: relatively high expansion group and low expansion group. The specimens were prepared by controlling the volume of 10 ~ 30% of the maximum expansion volume, and the strength of the specimens were evaluated. The compressive strength of the high expansion group and low expansion group was about 2.1 times.

KEYWORDS

expanded polyol
strength properties
expansion
performance
ground reinforcement
ground subsidence

본 연구에서는 연약지반이나 부분침하의 복원에 사용되는 팽창약액의 강도특성을 정량적으로 평가하기 위하여 팽창성능을 구분한 팽창약액을 제작하여 강도특성을 조건에 따라 분석하였다. 상대적 고폽창군과 저팽창군으로 구분하여 실험을 실시하였으며, 각각 최대 팽창부피에 대해 10~30%의 부피를 제어한 공시체를 제작하여 강도 평가를 수행한 결과 시간에 따라 강도가 증진되는 것을 확인하였고, 고폽창군과 저팽창군의 압축강도는 약 2.1배의 차이를 보였다.

팽창폴리올
강도특성
팽창성능
지반보강
지반함몰

© 2017 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-32-438-9328. Fax. 82-32-435-4947.

Email. smearjun@hanmail.net

1 Tel. 82-32-438-9328. Email. engfine@daum.net

2 Tel. 82-32-438-9328. Email. smearjun@hanmail.net

ARTICLE HISTORY

Received Dec. 12, 2016

Revised Dec. 13, 2016

Accepted Dec. 22, 2016

1. 서론

1802년 프랑스의 Charles Berignyrk 지반침하 시 수문 기초의 공동부를 보강하기 위하여 기초 하부에 석회와 점토 등의 재료를 주입하여 지반보강을 시작하였다. 1829년 독일의 Wurtzdhk Hoffman이 최초로 하기드록실기 화합물과 이소시아네이트를 반응시킨 폴리우레탄을 개발하였고 이후에 의류, 신발, 침대, 자동차 시트 등의 연질분야와 냉동컨테이너, LNG저장탱크용 단열재 등 경질분야와 더불어 에어클리너, 산업용 필터 등 다양한 분야에서 사용되고 있다(Wood, 1990; Oretel, 1993).

최근 인구증가 및 건설기술의 발달에 따라 개발 대상지를 지정하고 매립을 통하여 대규모의 공업단지, 주거시설, 교통도로시설 등을 조성하고 있다. 국토개발 사업과정에서 연약지반의 보강방법 문제가 중요한 사안으로 대두되고 있고, 효율적이고 경제성이 높은 연약지반 처리공법에 대한 요구가 높아지고 있다. 연약지반을 보강하기 위해서 치환, 탈수, 보강, 다짐, 고결 등의 원리를 이용하여 개량공법들이 적용되고 있고, 이러한 연약지반 개량공법 중 고결의 원리를 이용한 액약주입공법은 공기 단축, 소요강도의 확보, 사도로 인한 환경문제해결, 치환토 부족문제해결 등 다양한 규모의 공사에서 현재 많이 사용되고 있다(Bergado et al., 1990; Duncan and seed, 1986).

최근 서울시를 중심으로 지하시설물이 많이 시공된 도심지에서 상·하수도관의 노후화 등의 원인에 의하여 지반함몰이 발생되고 이에 따른 지반함몰 긴급시공이 필요한 상황이다. 현재 국내의 경우, 이러한 실정을 해결하기 위해 지반함몰 긴급시공을 위한 여러 가지 공법 개발이 진행되고 있다. 그러나 이러한 공법들에 대한 기준이나 성능에 대한 명확한 자료는 부족한 실정이고 이에 대해 보완이 요구되고 있다(The Sooul Institute, 2014).

이에 본 논문에서는 지반의 부등침하 복구를 위해 활용되었던 팽창약액이 지반함몰 긴급시공을 위해 적합하도록 팽창성능을 제어한 제품을 개발하고, 다양한 구속조건에서의 강도특성 및 고결특성을 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 우레탄 계열 약액의 분류 및 특성

우레탄계 약액은 주재인 우레탄폴리머(Urethane Polymer)의 이소시아네트기와 지중의 물이 결합되어 우레탄 수지가 토중에 형성된다. 또한 수화반응과 동시에 발포반응이 일어나 고결체적을 증가시키고 지중에서 구속된 경우 현저하게 강도가 증가된다. 우레탄계 약액은 2액형(비수용성) 약액과 1액형(수용성) 약액 등 2가지가 있으며, 2액형 약액은 배합시 물을 포함하지 않는 주재 및 첨가제로 되어 있어서 지중의 물과 반응하지 않기 때문에 겔타임을 조정할 수 있다. 1액형 약액은 친수성이 있고 물과 반응하기 때문에 지하수의 변화에 따라 겔타임이 변동되는 성질이 있다. 따라서 약액의 특성상 2액형은 지반고결공법에 주로 사용되고, 1액형은 콘크리트 구조물의 균열보수 및 차수용으로 쓰인다(Lee et al. 2015; Kim, 2011; Jeon and Jeon, 2015).

우레탄계열 주입공법에서 2액형 약액은 개량이 필요한 지반의 한정된 범위에 압입볼트(보통 3~6m)를 사용하여 지반의 강도 증대 및 차수효과 증대를 목적으로 지반고결공법에 적용하고, 사용재료, 시공방법에 따라 암반고결공법, 급경화공법 등으로 구분되며, 터널의 보강, 여굴방지 및 효과적인 굴착을 위한 봉락방지, 갱구보강, 균열부 지반과 공동의 충전 등에 주로 이용된다. 우레탄 계열 주입공법의 용도별 재료의 특성은 Table 1과 같다.

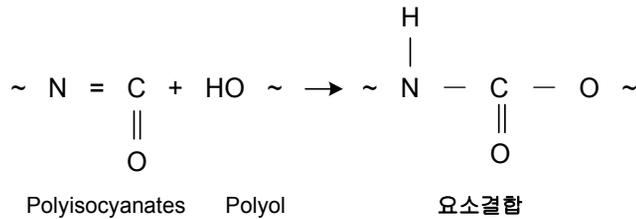
Table 1. Urethane-based Injection Technique Material Characteristics by Usage

Classification		For rock hardening	For rapid hardening	One-part type water-soluble
Appearance	A	Transparent	Lemon yellow	Brown
	B	Brown		
Viscosity(cps)	A	40±5	40±5	100~150
	B	40±5	40±5	
Rise-time		60±10	10±3	60±10
Specific Gravity	A	1.08±0.02	1.10±0.04	1.10±0.03
	B	1.20±0.02	1.20±0.04	
smell		Almost none		
Flammability		Almost none (flash point about 200℃)		
Flexural Strength (×4)		71±5	60±5	25±5
Expansion Ratio (Free Expansion)		× 6-8	× 10-15	more than × 20
Compressive Strength (×4)		45±3	39±3	15±3
Mixing Ratio (A:B)		1:2~3	1:2.5~3.5	-

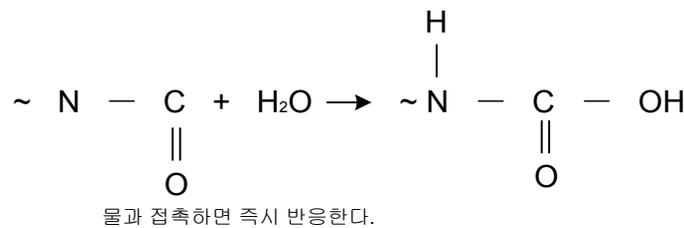
2.2 팽창성 약액의 고결 메카니즘

고결 반응 메카니즘은 폴리올(Polyol) 수산기와 MDI계 이소시아네이트(Isocyanate)로 구성된 용액이 혼합교반의 과정을 통해 요소결합을 하는 것으로 3차원의 망상구조를 형성하며, 이런 가교반응의 주 메카니즘은 중화반응 → 가수반응 → 발포반응 → 가교반응의 순서대로 이루어지며 결합 반응식은 Fig. 1과 같다(Wood, 1990).

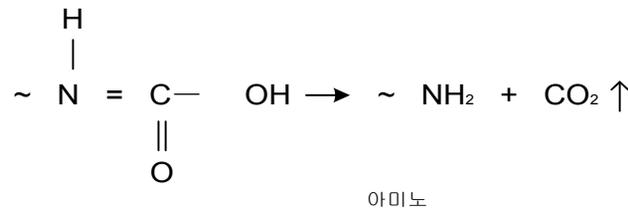
Neutralization reaction



Hydrolysis reaction



Foam reaction



Crosslinking reaction

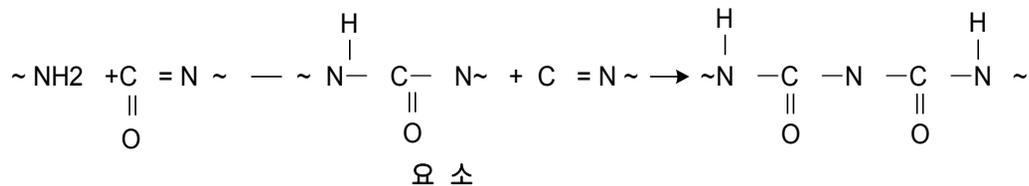


Fig. 1 Reaction Formula of Cementation Reaction

폴리올과 이소시아네이트 혼합물질의 최대 팽창력은 15~35배로 화학반응으로 혼합물질의 팽창압으로 인하여 간극률 감소의 원인이 되는 사전 압축력을 지반에 전달한다. 이러한 압축력으로 인하여 지반침하를 방지할 수 있고, 팽창력과 팽창률은 주변 지반의 토압 정도에 따라 달라진다. 이번 실험에 사용된 폴리올은 10~25배까지 팽창력을 갖는 물질로써 지반의 토압상태에 따라 5배에서 20배까지 팽창이 가능하다.

3. 팽창성 약액의 강도특성 및 고결특성

3.1 실험 개요

이 연구는 지반함몰 발생시 긴급 복구용으로 활용하기 위해 별도로 제작된 팽창성 약액인 고밀도 팽창재료 (High Density Expansion Material; HDEM)의 강도특성 및 고결특성을 규명하기 위해 실험적 연구를 수행하였다. 고밀도 팽창재료는 고화전 액상으로 지반내에 주입하였을 경우 큰 유동성에 의해 간극내 침투, 지하매설물 파손부위 침투 등이 발생하고 이에 따라 긴급 시공시 복구 성능의 예측이 난해한 문제점이 있다. 따라서, 액상을 별도의 재료로 패키징하여 유동흐름을 제어하는 것으로 가정하여, 패키징능에 따라 강도 특성 및 발현속도 경향을 분석하였다.

고밀도 팽창재료를 이용한 물리적 특성을 실내시험을 통하여 분석하였다. 사용재료는 팽창효율을 조정한 고폽창균과 저팽창균의 별도 제작제품으로 별도의 패키징을 통한 동일량 팽창시 유사한 강도특성이 나타나게 제작하였다. 몰드내에 재료들을 구속시켜 최대 팽창부피에서 일정수준으로 압축되는 원형시편을 제작하였다. 이를 통해 구속의 정도, 시간, 실험재료에 따른 강도특성 등을 각각 비교 분석하였으며, 주요 연구방법은 다음에 나타낸 바와 같다.

첫째, 팽창재료의 팽창정도에 따른 공시체를 강도특성을 일축압축강도 시험(KS F 2314)을 통하여 압축강도 특성을 분석하고 이를 밀도조건으로 변환하여 각 재료에 따른 강도특성을 비교 평가하였다.

둘째, 팽창재료의 밀도에 따른 강도특성을 초기강도 및 12시간강도, 1일 강도, 3일 강도로 분류하여 평가하고 이를 통한 시간에 따른 예상 강도특성을 판단하였다.

셋째, 구속의 정도에 따른 강도특성을 재료별로 비교·평가하였다.

3.2 실험 방법

팽창시편은 팽창약액 0.9~1.1, 이소시아네이트 1.4~1.7의 중량 비율로 일정한 시간동안 혼합한 재료로 고화시킨 것이다. 팽창약액과 이소시아네이트를 일정한 혼합비율을 혼합교반하여 액상의 상태로 거푸집을 이용하여 시편을 제작하였다. 팽창재료의 강도를 측정하기 위하여 일축압축 시험방법(KS F 2314)으로 시험을 실시하였다. 이 실험은 구속압을 받지 않은 상태에서 자립하는 시험체의 일방향 일축압축강도를 의미한다.

시편의 모양은 Fig. 2와 같이 지름이 5.0 cm, 높이 10.0 cm인 원기둥이며, 시편의 상부면과 하부면은 평평하게 제작하였다. 측정장비는 HS-179F이며, Fig. 3과 같이 일축압축시험장비는 변형제어식 압축장치, 하중계 및 변위계로 구성되어 있다.



Fig. 2 Compressive Strength Test Specimen



Fig. 3 Apparatus of Compressive Test

Table 2. Item of Compressive Strength Experiment

Classification	Contents	
Expansion agent	A	B
Days	1hr, 12hr, 1day, 3days	
Expansion volume control	10%, 20%, 30%	

시편제작 계획은 Table 2에 나타내었으며, 일축압축강도 측정은 시편의 20%까지 압축변형을 주고, 압축재하를 위하여 일정 속도를 유지하였다. 시험체의 최대압축력을 측정할 수 있도록 하였고, 시험체의 높이의 ±0.1% 허용오차에서 압축량을 측정할 수 있도록 하였다. 변위계는 측정범위가 10mm이상이며 최소 눈금은 1/100mm인 변위계를 사용하였다.

압축 중에 압축량 ΔH 와 압축력 P 를 측정하고, 압축량과 압축력의 측정간격은 응력-변형곡선으로 나타내었다. 압축력의 최대값의 2/3정도로 감소하거나 압축변형이 20%에 도달하면 하중재하를 종료하였다.

시편의 일축압축강도는 식(1)에 따라 산정하였다.

$$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100(\%) \tag{1}$$

- 여기서, ϵ : 시험체의 압축변형(%)
- ΔH : 압축량
- H_0 : 초기 시험체의 높이(cm)

식(2)는 압축변형이 ϵ 일 때의 압축응력을 나타낸 것이다.

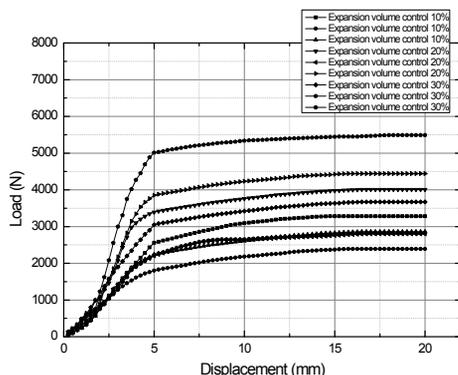
$$\sigma = \frac{P}{A_0} \times \left(1 - \frac{\epsilon}{100}\right) \tag{2}$$

- 여기서, A_0 : $(\pi D_0^2) / 4$
- σ : 압축응력
- P : 압축변형이 ϵ 일 때 시험체에 작용된 압축력
- A_0 : 초기 시험체의 단면적
- D_0 : 초기 시험체의 지름

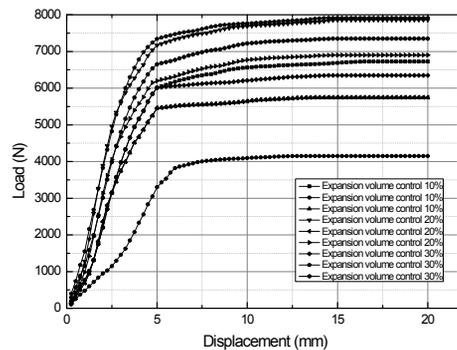
3.3 팽창약액 고결 시편의 강도

각 실험조건에 따라 제작된 공시체에 대해 일축압축강도 시험을 시행하였다. Fig. 4는 공시체의 압력에 따른 변형결과를 나타낸 것으로서, 강도시험을 실시한 경화초기의 강도와 경화시간이 가장 긴 3일 강도 공시체의 결과이다. 각각의 조건에서 구한 강도는 동일조건 3개의 공시체의 평균값을 산정하여 Table 3에 제시하였다. 시료 A는 고펡창 약액이고, 시료 B는 저팽창 약액으로 팽창성능에 따른 강도의 경향을 평가하였다.

실험결과, 모든 공시체에서 완전 파괴의 경향을 나타내지 않고 일정수준에서 수렴하는 경향이 나타났다. Table 3의 압축강도결과 A 실험체의 경우 경화시간과 구속조건에 따라 압축강도는 증가되었고, B 실험체의 경우 시간과 구속조건과 무관하게 같은 압축강도를 발현하는 것을 확인할 수 있었다.



a) 1 hr strength (Low expansion)



b) 3 day (Low expansion)

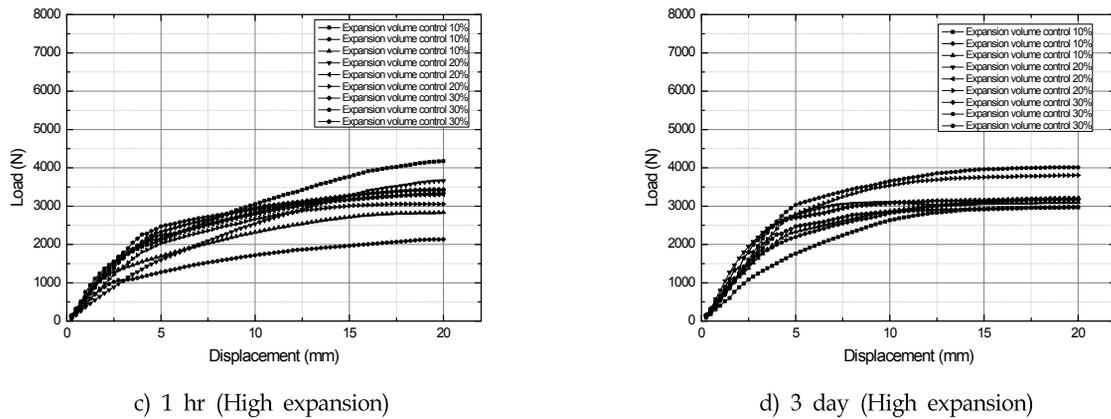


Fig. 4 Result of Strength Test with Expansion Type

Table 3. Strength Results as Expansion Agent and Curing Time

Classification	Contents											
Expansion Agent	A						B					
Time	1hr			72hr			1hr			72hr		
Expansion Volume Control	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%
Compressive Strength(MPa)	1.38	1.62	2.01	2.82	3.48	3.67	1.55	1.7	1.73	1.57	1.72	1.73
Density(g/cm ³)	0.306	0.336	0.367	0.306	0.336	0.367	0.168	0.185	0.201	0.168	0.185	0.201

3.4 팽창약액의 시간에 따른 강도발현 특성

각 조건에서 시간이 경과함에 따라 강도의 발현효율을 판단하기 위해 초기의 강도(1시간)와 비교하여 강도의 증가율을 평가 하였다. Fig. 5는 강도결과를 초기강도와와의 비로 산정하여 시간흐름에 따라 최종 강도 발현속도를 나타낸 것이다. 재료의 종류에 따라 강도의 발현 특성을 분석한 결과 저팽창성 시험군은 시간에 따라 압축강도가 증가하는 경향이 나타났으며, 고폽창성 시험군은 초기발현 강도가 계속 유지되는 특성이 나타났다. 전체적으로 팽창효율이 좋고 밀도가 낮은 고폽창성의 시험군의 경우 최고강도의 발현시간이 상대적으로 짧게 나타남을 알 수 있다. 저팽창성 재료의 경우 액상 반응이 나타나기 위한 액상의 총량이 많아짐에 따라 강도 발현속도가 상대적으로 느림을 알 수 있다.

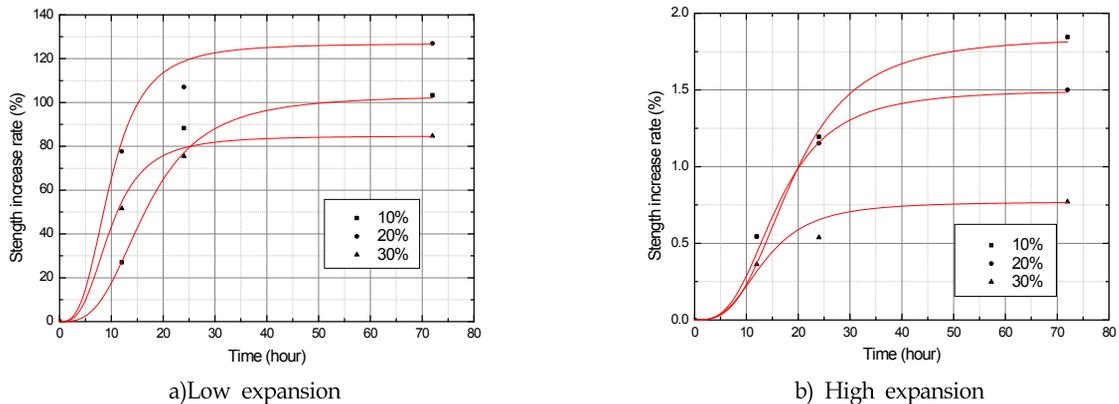


Fig. 5 Strength change rate with time

3.5 팽창약액의 밀도별 시간에 따른 강도특성

Fig. 6은 밀도에 따른 강도의 특성변화를 알아보기 위하여 동일고화시간의 밀도의 조건에 따른 강도를 나타낸 것이다. 고밀도의 조건에서는 고화되는 데 충분한 시간이 필요하고, 저밀도에서는 초기의 강도가 일정히 유지되는 것으로 나타났다.

각 조건에서 시간에 따라 강도가 증가하였으며, 충분한 강도발현에는 약 24시간정도의 시간이 필요하다. Fig. 6-b의 경우 Fig. 6-a의 기울기인 a값으로 나타낸 그래프로 공시체의 밀도에 따른 경화속도를 나타내는 그래프이다. 그래프의 변곡점은 24시간 정도에서 발생하였으며, 24시간까지 급속도로 증가하다 이후 수렴하여 밀도가 조밀한 경우에는 경화시간을 더 확보해야 할 것으로 판단된다.

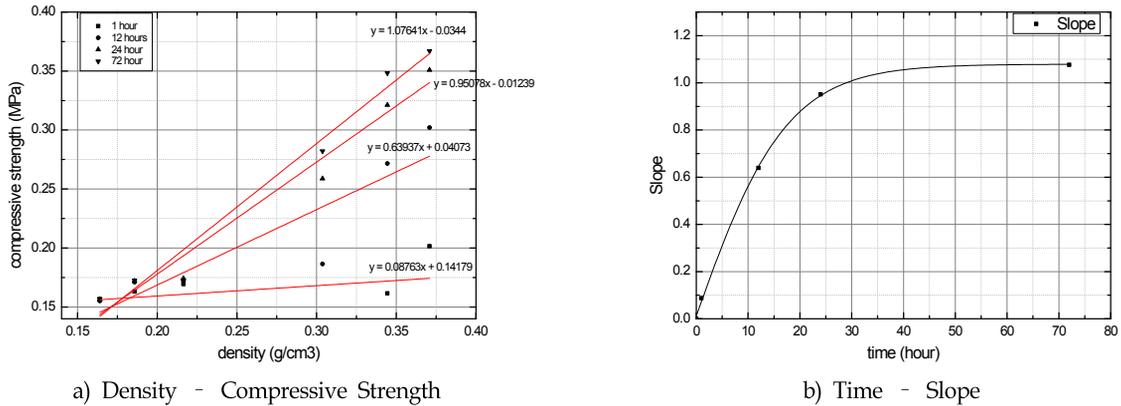


Fig. 6 Strength characteristics with density

4. 결론

본 연구에서는 팽창폴리올을 이용하여 지반함몰 발생시 긴급복구를 위한 저팽창성 시험군과 고폽창성 시험군을 사용하여 시간에 따른 강도변화율과 밀도에 따른 강도변화 특성에 대하여 분석하였다.

- (1) 두 시험군의 일축압축강도를 비교해 본 결과, 두 시험군 모두 시간에 따라서 강도가 증진되는 것으로 나타났다. 저팽창 시험군의 경우는 그 값이 확연히 변화하였고, 고폽창 시험군의 경우에는 강도 증진율이 매우 작게 나타났다. 팽창폴리올과 이소시아네이트의 반응에 있어서 고폽창 시험군은 초기에 반응이 빨라 초기발현강도가 유지되는 것으로 판단되고, 저팽창 시험군의 경우 액상의 총량 또한 많아 시간에 따라 시험체 내부에서 계속 반응이 일어나 시험체 내부를 밀실하게 만들어 시간에 따라 강도가 증진되는 것으로 판단된다.
- (2) 각 조건에서 시간에 따라 강도의 발현율은 고폽창성 시험군의 경우에 초기강도가 최종강도와 약 2%내외에서 차이를 보여 고폽창성 시험군의 반응 속도가 빠르고 강도의 조기발현율이 높은 것으로 판단된다. 저팽창 시험군은 시간에 따라 강도의 변화율은 크게 나타나 초기강도와 최종강도와 약 90~130%까지 증진되는 것을 확인하였다. 저팽창 시험군의 반응 속도는 느리지만 일축압축강도는 고폽창성 시험군에 비해 약 2.1배정도 크게 나타났다.
- (3) 모든 시험군에서 밀도가 높을수록 강도가 증진되었으며, 저밀도의 경우 발현초기 강도가 일정히 유지되었고, 고밀도로 갈수록 시간에 따라 강도가 증가하는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 국토교통기술사업(ICT 유지관리가 가능한 팽창시트를 활용한 저다짐 능동 지반함몰 긴급복구 기술, 16TBIP-C111718-01)의 지원을 받아 수행된 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

References

- Bergado, D.T., Ahmed, S., Sampaco, C.L. and Balasubramaniam, A.S. (1990). "Settlement of Bangna-Bangpakong Highway on soft Bangkok clay." *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 116, No. 1, pp. 136-155.
- Duncan, J. M. and Seed, R.B. (1986). "Compaction-induced Earth Pressures under K_0 conditions." *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.112, No.1, pp.1-21.
- Jeon, C.K., Jeon, J.K. (2015). "Flexural behavior evaluation of two types fiber reinforced shotcrete using round panel test." *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, Vol. 11, No. 4, 607-614.
- Kim, Y.J. (2011). *Engineering Characteristics of Lightweight Foamed Controlled Low-strength Materials with Coal Ash for Backfill*, Ph.D. Dissertation, Hanyang Univ.
- 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 Geosynthetic Society*, Vol.14. No.1, pp.43-50.
- Oretel G. (1993). *Polyurethane handbook*. 2nd ed., Hanser Publisher, New York.
- The Seoul Institute (2014). *Investigation of cause for road sinkage in Seoul city*. Seoul, Korea.
- Wood G. (1990). *The ICI polyurethane book*. 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.