

팽창약액시트를 이용한 지중응력 특성에 관한 연구

Characteristics of Soil Stress using Expansion Liquid Sheet

Hyounhoi Kang^{a,1}, Juho Kim^b, Yoonseok Chung^{2,c}, Jeongjun Park^{d,3*}

^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 Korea Conformity Laboratories, 7, Nambusunhwan-ro 319-gil, Seocho-gu, Seoul, Korea

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

ABSTRACT

In this study, to investigate the strength enhancement and stress transfer effect of the inflatable chemicals used in the recovery of soft ground or partial settlement, the dilatant solution was prepared and classified by measuring the density and the earth pressure in the sand ground. The inflation reinforcing agent was prepared by injecting into a separate impervious vacuum sheet by dividing into a relatively high expansion group and a low expansion group, and a cementation experiment was performed in the lower part of the homogeneously formed model ground.

As a result, reinforcing effect was shown up to about 15cm above the expansion reinforcement, and the soil pressure showed a compaction tendency similar to the concentrated load of 1.150 ~ 11.298t/m².

KEYWORDS

Expansion liquid
Underground stress
Compaction
Earth pressure
Expansion pressure

본 연구에서는 연약지반이나 부분침하의 복원에 사용되는 팽창약액의 지반내 강도증진 및 응력전달효과를 알아보기 위하여 팽창성능을 구분한 팽창약액을 제작하여 모래지반내의 밀도 및 토압을 측정하여 분석하였다. 상대적 고폽창군과 저팽창군으로 구분하여 별도의 불투수 진공시트에 주입하여 팽창보강제를 제작하고 이를 균질하게 조성된 모형지반하부에서 고결실험을 시행하였다. 이 결과 팽창보강제 상부 약 15cm까지 보강효과가 나타났고, 토압의 분석결과 1.150~11.298t/m²의 집중하중과 유사한 다짐경향이 나타났다.

팽창액
지중응력
다짐
토압
팽창압

© 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. 82-2-3415-8736. Email. yschung24@kcl.re.kr

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

ARTICLE HISTORY

Received Dec. 12, 2016

Revised Dec. 12, 2016

Accepted Dec. 22, 2016

1. 서론

도시 인구가 과밀화 되고 산업화를 통하여 도시화가 진행되어 주택난·교통난·급수난·청소문제와 같은 여러 가지 도시문제가 발생하면서 지하매설물 등 지하공간으로의 공공시설물이 지하화 되고 있는 실정이다. 이에 최근 도심지에서는 공동발생에 따른 지반함몰이 지속적으로 발생함에 따라, 국민의 불안감이 확산되고 있으며, 서울시의 경우 지하공동에 따른 도로 침하 및 함몰의 발생이 2014년 기준으로 약 3,300여건이 나타나고 있다(The Seoul Institute, 2016).

지반함몰의 원인으로는 인근지역의 대규모 토목공사 및 지하구조물의 노후화, 지하수의 변화 등의 복합적인 원인으로 발생하는 것이 학계의 공통적인 주장이다. 지반함몰은 발생시기 등에 대하여 각종 계측장비와 사전의 이상징후를 통해 예측이 가능할 수 있으며, 현재의 복구방법은 흙의 되메우기 및 그라우팅 등이 적용되고 있으나, 현재의 복구방법들은 많은 시간과 공간적 제약을 받고 있다. 지반 내에서 발생하는 공동 발생에 대한 메커니즘에 대해서는 현재 많은 연구가 진행되고 있지만, 아직까지는 지하공동 탐사분석기술, 영향인자 규명 및 지하공동 복구방법에 대한 연구는 매우 미흡한 상황이다(Panno et al., 2004).

지반의 함몰이나 공동의 경우, 내부 토립자의 손실로 인한 중심부 및 인접부의 강도가 손실되어 지지층의 효과가 감소된다. 따라서 팽창기능제가 적용된 시트를 사용할 경우 팽창압력이 이완영역과 토립자 및 모래와 혼용을 할 경우 채움재의 결속력을 증가시켜 복합적으로 지하공동 및 함몰내부의 다짐공사를 최소화 될 것 판단된다(Jaron et al., 2010).

따라서 본 연구에서는 팽창기능제의 팽창압력을 이용하여 지반의 다짐효과를 확인하고자 모형 토조를 이용하여 팽창성능이 다른 3가지의 경우를 비교하여 다짐영역 및 지중응력 분석하고, 팽창시트를 이용한 지반함몰 긴급복구 실용화를 위한 기초자료로 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 기존 지반함몰 및 공동복구 기술

(1) 흙메우기 공법

흙메우기 공법은 현재 가장 많이 사용하는 지반함몰 복구 기술로서 함몰발생 주변의 교통을 통제한 후, 지반을 개착하여 지반함몰이 발생한 곳에 흙을 메우고 다시 다짐을 한 후, 상부구조물을 재시공하는 공법이다. 이는 개착으로 인한 원지반 교란에 따른 지반강도 저하 및 시공 과정이 복잡하고 공기가 길어져 공사비가 증가하며, 통행제한으로 인한 민원이 발생하는 단점이 있다. 또한 지반함몰 발생주변의 지하수 흐름이 나타나는 경우에는 주 재료인 토사의 유실이 발생할 가능성이 매우 높기 때문에, 함몰지역 복구에 필요한 토사 이상이 사용되어 비경제적이며 비효율적인 복구방법이라 할 수 있다. 그리고 토사의 다짐시 지중매설물에 의해 최적의 다짐이 불가능한 경우가 발생할 가능성도 있다(Fig. 1(a)).

(2) 그라우팅 공법

그라우팅 공법은 비개착식이라는 용이함과 지반 내 소규모 공동 및 간극까지 충전 가능한 장점을 가지고 있지만, 환경오염 등의 문제점을 가지고 있다. 이는 공법 특성상 지반 내부에 시멘트계 충전재와 함께 약액을 주입하게 되는데 지반과 직접적으로 맞닿아 있고 작용 면적이 넓어 충전재료에서의 중금속 유출의 우려가 있다. 실제로 과거에 일부 검증되지 않은 충전재료의 활용으로 인하여 발암물질인 6가크롬(Cr^{6+})의 유출사태가 보고된 바 있다(Yang et al., 2014; Nam et al., 2013; Hong and Han, 2016).

즉, 충전재가 오랜 시간동안 지반에 노출되어 지하수 흐름으로 인해 오염원이 광범위하게 확산될 가능성이 있고, 흙메우기 공법과 동일하게 지하수 흐름에 기인하여 충전재의 재료분리와 유실 가능성이 높아 경제성 및 강도저하에 따른 안전성에 문제를 야기할 수 있으며(Jeon and Jeon, 2015), 지반공동 및 지반함몰 발생시, 그라우팅 공법 시공을 위한 사전 작업인 그라우팅 플랜트 배치 및 설치 시간으로 복구가 지연될 수 있는 단점을 가지고 있다(Fig. 1(b)).



(a) Back-fill method



(b) Grouting method

Fig. 1 Ground depression recovery method

2.2 상대밀도

상대밀도(Relative density) D_r 이란 사질토의 조밀하거나 느슨한 정도를 나타내는 값이며, 식(1)로 표현할 수 있다.

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1)$$

여기서, e = 자연상태에서의 흙의 간극비

e_{\max} = 가장 느슨한 상태에서의 흙의 간극비

e_{\min} = 가장 조밀한 상태에서의 흙의 간극비

D_r 값은 가장 느슨한 상태에서 0이고 가장 조밀한 상태의 흙에서는 1이 되며, Table 1에서와 같이 상대밀도에 따라 사질토를 구분할 수 있다.

식(2)의 건조단위중량의 정의를 이용하여 다음과 같이 상대밀도를 나타낼 수도 있다.

$$D_r = \frac{\gamma_d - \gamma_{d\min}}{\gamma_{d\max} - \gamma_{d\min}} \frac{\gamma_{d\max}}{\gamma_d} \quad (2)$$

여기서, γ_d = 자연상태에서의 흙의 건조단위중량

$\gamma_{d\min}$ = 가장 느슨한 상태(e_{\max})에서의 흙의 최소건조단위중량

$\gamma_{d\max}$ = 가장 조밀한 상태(e_{\min})에서의 흙의 최대건조단위중량

Table 1. Sandy soil condition according to relative density

Relative density(%)	Earth condition
0 ~ 20	Very loose
20 ~ 40	loose
40 ~ 60	Normal
60 ~ 80	Dense
80 ~ 100	Very dense

3. 시험 방법 및 결과

3.1 사용 재료

(1) 시험 시료

본 연구에 사용된 모래는 최대건조단위중량 15.64kN/m^3 , 최소건조단위중량은 14.62kN/m^3 의 주문진 표준사이고 다짐시험에 필요한 시료의 물리적 특성을 확인하기 위하여 ASTM규정에 따라 체분석(D 6913-14)과 비중 시험(D 891-09)을 실시하였고, 표준사의 입도분포곡선과 입도특성은 각각 Fig. 2와 Table 2에 나타내었다.

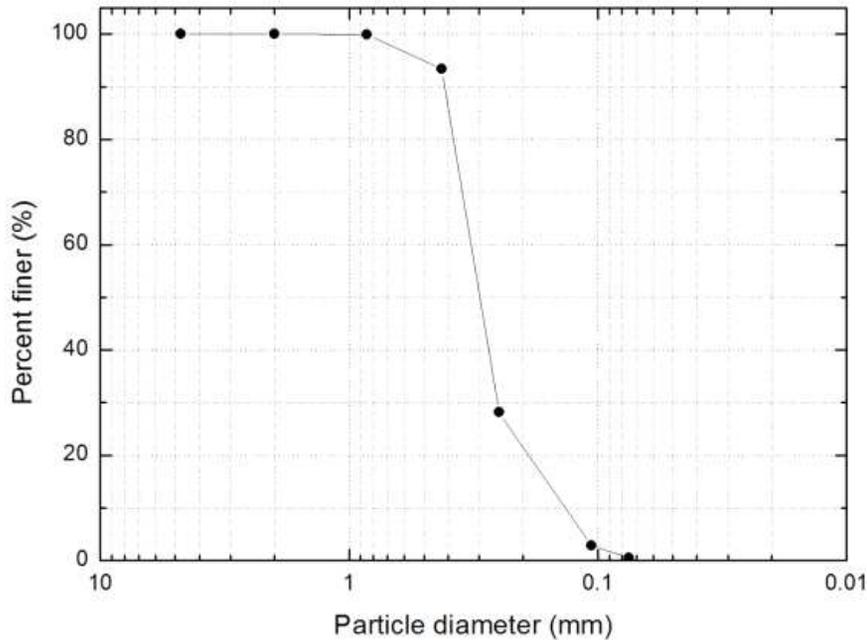


Fig. 2 Grain size distribution curve of Jumunjin sand

Table 2. Properties of Jumunjin sand

D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	Coefficient of uniformity(C_u)	coefficient of curvature(C_c)	Passing No.200 sieve (%)	Soil classification based on USCS
0.274	0.409	0.506	1.85	1.21	0.074	Poorly graded sand (SP)

(2) 시험장치 및 방법

본 연구에 사용된 모형시험 장치 구성은 토조, 토압계 및 데이터로고(TDS-530), 재하판으로 구성되어 있다. 토조의 길이는 길이 800mm, 폭 300mm, 높이 600mm 크기의 아크릴과 강철프레임을 이용하여 제작하였다. 정격용량 2000gf/cm^2 (PCG-2KS)인 토압계를 이용하여 지중응력을 측정하고, 측정값은 데이터로고를 이용하여 저장했다. 상부의 구속을 위하여 재하판과 아크릴판을 이용하여 구속하였다. 팽창기능제는 총 3종류의 발포약액을 사용하였고, 시트의 크기는 $200 \times 170\text{mm}$ 로 4면이 열융착하여 진공상태로 밀봉하였다.

본 실험은 지반 공동에 느슨해진 이완영역을 모사하기 위하여 상대밀도 60%의 지반을 조성하였다. 팽창기능제 시트에서 50mm, 100mm, 150mm, 200mm, 250mm 씩 연직방향으로 설치하였으며, 실험의 계획은 Table 3, 실험단면도는 Fig. 3에 각각 나타내었다.

Table 3. Plan of Experiment

Classification	Contents		
Expansion agent	Low expansion A	Middle expansion B	High expansion C
Amount of agent	154g, 231g, 308g	77g, 154g 231g	77g, 154g
Expansion sheet	Nylon + linear low-density polyethylene		
Condition	Vacuum state		

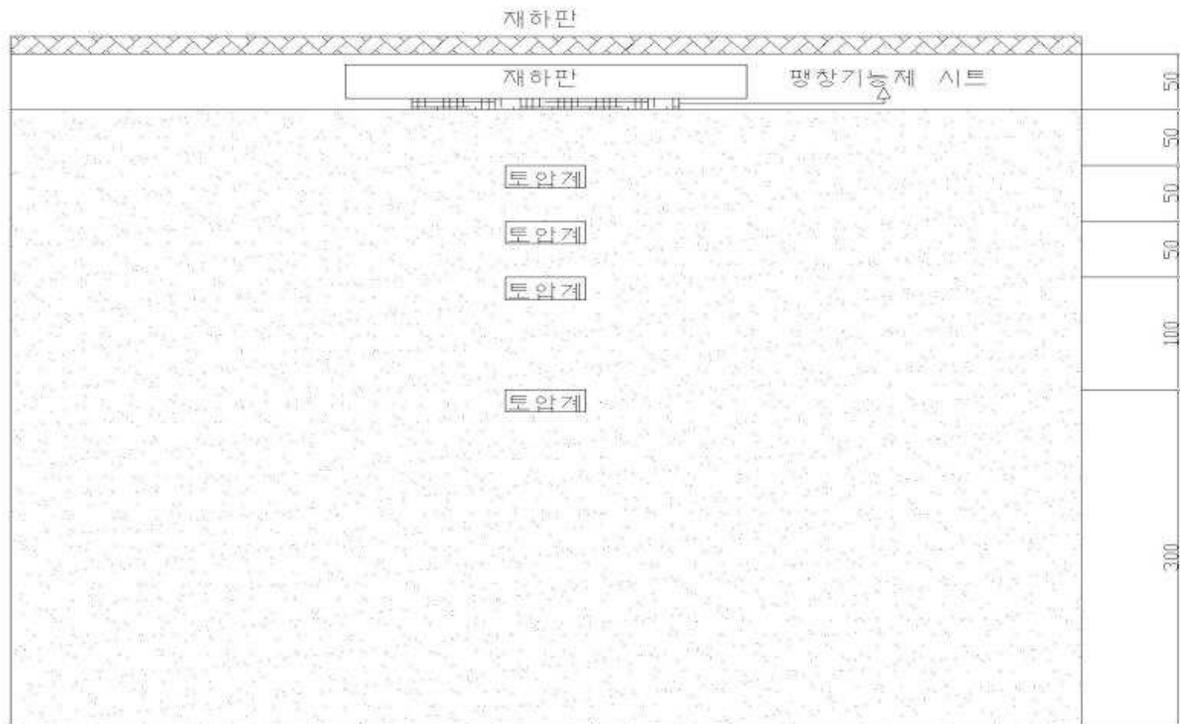
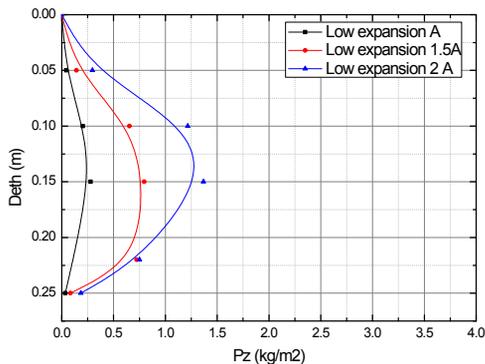


Fig. 3 Schematic of model test box section

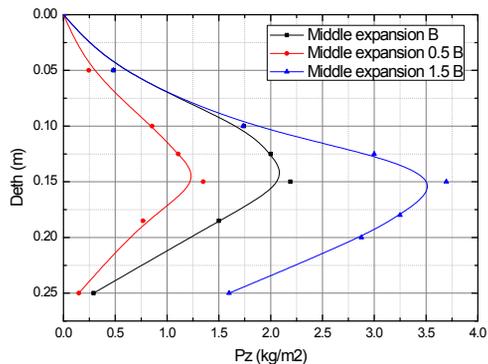
3.2 시험결과

(1) 액상 주입량에 따른 토압변화

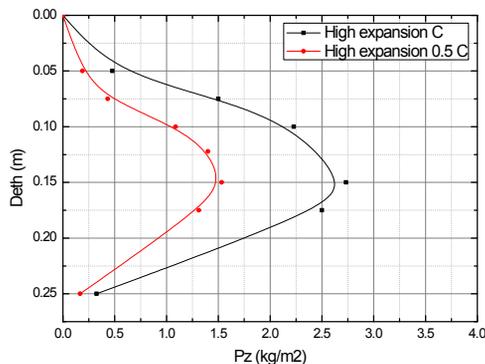
Fig. 4는 각 시험군에서 팽창약액의 주입량에 따라 토압발현 강도의 변화를 나타낸 것이다. 즉, 저팽창 발포약액의 경우 주입량에 따라 약 180%, 중팽창 발포약액의 경우 약 165%, 고팽창 발포약액의 경우 약 178%의 토압이 증가하였다. 실험군 모두 진공상태 시트의 팽창약액이 반응하여 팽창압이 발생함에 따라 토압이 일정비율로 증가되는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Low expansion A



(b) Middle expansion B



(c) High expansion C

Fig. 4 Earth pressure according to the infusion

(2) 액상의 종류에 따른 토압

Fig. 5는 각 액상의 종류에 따라 팽창능력을 나타낸 것으로 저팽창 발포약액 A는 약 585%, 중팽창 발포약액 B는 약 1135%, 고팽창 발포약액은 약 1535%의 능력을 가지고 있다. 토압의 증가량과 최대팽창능력의 비로 환산하였을 때, A 약액은 0.047, B 약액은 0.193, C 약액은 0.178로 중팽창 발포약액 B가 가장 효율적인 것으로 나타났다.

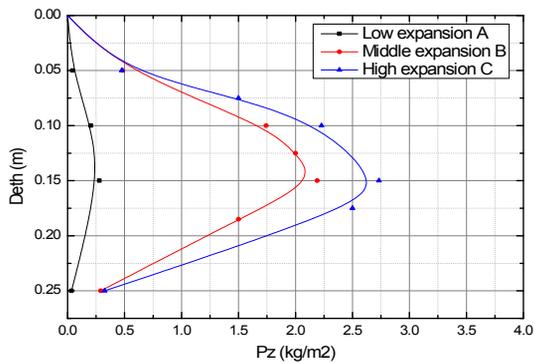


Fig. 5 Earth pressure as expansion liquid type

(3) 발포약액의 지중응력 증가 간편 예측

Fig. 6에 나타난 바와 같이 본 연구에서의 팽창에 따른 하중분포결과는 Boussinesq 이론에 의한 집중하중 및 등분포하중이 직하부에 발생할 때의 하중분포 양상이 다르게 나타났다. 즉, 지표면에 발생한 상재하중과의 연직방향 이격거리가 가까울수록 높은 수치가 측정되어야 하나, Boussinesq 이론에서의 상재하중 직하 발생지점에서 수평방향으로 이격됨에 따른 하중분포 양상을 나타내었다. 이는 발포약액의 팽창방향과 더불어 생성되는 고결 형태가 타원형임에 따라 응력분포가 불균형하게 이루어져 수평방향의 이격에 따른 분포양상을 보이는 것으로 판단된다.

따라서, 이러한 응력의 발생형태를 간편하게 예측하기 위해 측정도압의 경향을 집중하중으로 단순화하였다. 즉, Fig. 6은 집중하중의 변수를 변화하여 가장 유사한 하중분포 경향선을 나타낸 것이다. 이에 따라 산정된 집중하중의 강도 및 이격거리는 Table 4에 나타내었다. 그 결과 하중강도는 A약액의 경우 1.150t/m², B약액은 9.059t/m², C약액은 11.298t/m²로 나타났고 이격거리는 약 0.18 m으로 도출되었다.

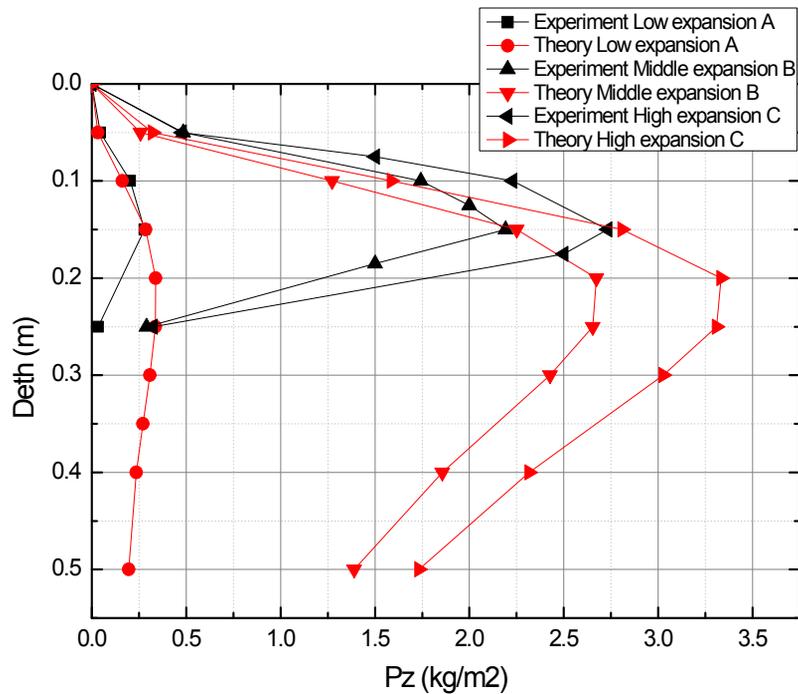


Fig. 6 Load distribution comparison of experimental and theoretical method

Table 4. Experiment Plan

Classification	Quantity	Load strength(t/m ²)	Separation distance(m)
Low expansion A	154g	1.150	about 0.18
Middle expansion B	154g	9.059	about 0.18
High expansion C	154g	11.298	about 0.18

4. 결론

본 연구에서는 느슨한 사질토지반을 조성하고 팽창시트를 이용하여 하중재하시 지중응력의 변화를 측정하는 실험을 수행하였으며, 측정값을 Boussinesq의 이론식을 적용하여 지반에 전달되는 응력분포를 추정하였다. 분석 결과를 토대로 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 팽창약액의 주입량에 따라 시험군 모두에서 약 170%정도의 토압이 증가하는 것으로 나타났다. 각각 팽창약액의 폴리올 성분은 같고, 진공시트의 체적안에서 팽창을 하여 일정한 토압증가를 보이는 것으로 판단된다. 팽창시트의 방향성과 팽창성이 확보되고, 신장력이 높다면 팽창약액의 양을 늘려서 다짐효과를 증대시킬 수 있을 것으로 기대된다.
- (2) 팽창능력과 토압증가량을 확인하였을 때, 중팽창 발포약액이 가장 좋은 효율을 보였고, 다음으로는 고폽창, 저팽창 발포약액의 순으로 나타났다. 저팽창 발포약액보다 약 4배정도의 토압이 증대되는 것을 확인하였다.
- (3) 팽창시트의 방향성 및 팽창성 등으로 인하여 일반적인 점하중과 등분포하중의 지중응력 증대결과와 상이한 점을 확인하였다. Boussinesq의 지표 연직절점하중이 작용 할 때의 지반내 응력을 산정하는 방정식을 통하여 응력의 발생형태를 간편하게 예측하였다. 저팽창 발포약액 A은 $1.150t/m^2$, 중팽창 발포약액 B은 $9.059t/m^2$, 고폽창 발포약액 C은 $11.298t/m^2$ 의 다짐효과가 있으며, 시트의 팽창방향에서 약 0.18 m에서 다짐의 효과가 있을 것으로 판단된다.

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

- Hong, K.K. and Han, J.G. (2016). "Non-removable ground joint emergency recovery technology using water-soluble polymer-based filling material." *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 15(4). pp. 6-9.
- Jaros, M.B., James, G.M., Gewanlal, C. (2010). "Multi-layer geosynthetic-reinforced embankment over potential sinkholes for a Rapid Rail Link in South Africa." 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, pp. 1555-1559.
- 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.
- Nam, J.W., Byun, Y.S. and Chun, B.S. (2013). "Evaluation of the applicability of CLSM by numerical method and field test." *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 14, No. 7, pp. 5-12.
- Panno, S.V., Greenberg, S.E., Weibel, C.P. and Gillespie, P.K. (2004). "Guide to the Illinois Caverns State Natural Area: Illinois State Geological Survey.", *GeoScience Education Series* 19, p.106.
- The Seoul Institute (2016). *The Road Subsidence Condition and Safety Improvement Plan in Seoul*.
- Yang, K.H., Park, J.J., Kim, Y.H., Byun, Y.S., Lee, E.J., Chun, B.S. (2014). "A Study on the Ground Reinforcement of Jeju Scoria Layer by Chemical Grouting." *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 15(2), pp. 75-82.