

제지애쉬 고화제로 안정처리된 연약지반의 도로노상토 적용에 관한 연구

Application of Paper Sludge Ash-Stabilized Soft Ground for Subgrade Soil

신은철[†] · 박수영¹⁾

Eunchul Shin · Sooyoung Park

Received: May 10th, 2018; Revised: May 16th, 2018; Accepted: May 29th, 2018

ABSTRACT : The southwestern part of Korean Peninsula, which length is about 13,000 km, is largely formed with soft cohesive soil ground and when it is developed, the low bearing capacity and excessive settlement of soft ground give many problems. In particular, a lot of clayey soil is deserted due to high moisture content and weakness, and areas formed with soft ground. In this study it was performed unconfined compression test, CBR tests, laboratory frost heaving test, and wheel tracking test in order to determine the optimum mixture ratio of paper sludge ash added chemical stabilizer with soft soil for consideration of its frost heaving and strength characteristics. As a results of the above experiments, when the soft soil is mixed with 6% of chemical stabilizer to improve the soft soil for utilizing as a subgrade soil material. It is satisfied the quality standard of fill materials, and the results of this research are expected to be used as an appropriate usage standard for utilization of on-site soil generated.

Keywords : Soft ground, Paper sludge ash, Unconfined compression strength, Shear Strength, Frost heave, Wheel tracking test

요 지 : 해성점토가 주를 이루고 있는 연안지역에서는 높은 함수비와 많은 세립토 함유로 매립 및 투기도 많은 어려움이 따르고 있고 시공에 있어 성토재의 부족이라는 또 다른 문제에 직면하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 제지애쉬 첨가 고화제를 혼합한 현장발생 유용토의 동상특성이나 강도특성을 고려한 배합비를 결정하기 위해 혼합토의 광물학적 분석은 물론 배합비에 따른 강성의 변화를 분석하기 위한 일축압축강도실험을 수행하였다. 또한 현장발생토의 고화처리 효과를 검증하고 노상재료의 활용성을 평가하기 위해 동상시험과 휠트래킹시험을 수행하였다. 그 결과, 제지애쉬 첨가 고화제를 6% 혼합할 경우 전반적으로 흙쌓기 재료의 품질기준을 만족하는 것으로 나타났으며 본 연구 결과가 현장발생토의 활용에 대한 적합한 사용기준으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 연약지반, 제지애쉬, 일축압축강도, 전단강도, 동상, 휠트래킹 시험

1. 서 론

우리나라는 국토의 효율적인 활용과 개발 이익의 증대를 위해 연안이나 호소지역을 매립하는 사례가 지속적으로 증가하고 있다. 우리나라 최초의 전국해안선조사(해양수산부, 2014) 결과에 따르면 국내의 총 해안선 길이는 14,963km로 이 중 강원, 경북, 제주를 제외한 서남해안은 약 13,500km로 연약한 점토층으로 형성되어 있다. 이러한 연약 점토층은 각종 개발공사 시 침하와 지지력 등에서 많은 문제를 유발해 왔다.

이러한 연약지반을 개량하기 위해 대규모 단위의 연직배수공법이나 선재하공법 등이 적용되고 장비의 주행성이나 현장의 시공여건을 개선하기 위한 방안으로 치환공법 혹은 표층처리공법을 적용하기도 한다. 특히 치환공법이나 표층처리공법의 경우 현장에서 발생하는 토사를 사토 처리하기

위해 추가적인 비용이 발생하며, 양질의 토사를 외부에서 유입해야 하는 부수적인 문제가 발생된다. 따라서 해안 연약지반 공사에서 주로 사토되고 있는 유용 점토를 다양한 개량기술을 이용하여 현장에서 재활용하는 방법에 대한 심도 있는 연구가 절실히 필요하다.

최근 친환경 저탄소 녹색성장 기술개발과 관련하여 친환경적인 자원의 개발 및 재활용기술이 부각되고 있다. 이러한 기술 중 하나인 화학적 안정처리는 연약지반에서 발생하는 점토를 양질의 토사로 개량하는 공법으로 석회, 시멘트, 고화제 등을 주재료로 하여 강도개선에 직접적인 영향을 준다. 이에 따라 고화제, 플라이애쉬, 저회분(bottom ash), 기타 산업부산물을 친환경적으로 개량하여 연약지반에 활용하기 위한 연구가 활성화 되고 있다. 특히, 고화제는 포졸란 물질, 시멘트, 무수석고, 칼슘설펜포인트계 화합물 등을 혼합하여 시멘트의 사용량을 줄이면서 강도증진효과 및 팽창저감효

† Department of Civil and Environmental Engineering, College of Urban Science, Incheon National University (Corresponding Author : ecshin@inu.ac.kr)

1) Department of Civil and Environmental Engineering, College of Urban Science, Incheon National University

과를 발휘할 수 있도록 개발되고 있으며 증금속 흡착효과 등을 기대할 수 있는 친환경적인 제품 개발에 관한 연구가 진행되고 있다.

일반적으로 노체는 상부에 놓이는 노상과 포장체를 충분히 지지하면서 현장 발생토사를 사용하여 주변 환경과 외력에 대해 안정적으로 대응할 수 있는 구조물이 되도록 해야 한다. 따라서 연약지반에서 포장층의 강성 등 공학적·화학적 특성의 개선은 경제적인 측면뿐만 아니라 지지력이나 침하, 투수 특성 등의 안정적인 설계와 시공을 위해 충분히 검토되어야 한다.

또한 포장층은 일반적으로 외기온도가 0°C 이하에서 지속적으로 유지되면 표층지반의 동결이 시작되면서 지중의 간극수도 점진적으로 동결하기 시작한다.

지중수분의 동결면으로의 이동(모세관현상)으로 ice lence (빙정)가 생기고 이로 인한 구조물의 피해가 유발되고 있으므로 이러한 피해를 방지하기 위해 동상성이 큰 흙을 동상 피해가 적은 쇄석, 자갈 등의 재료로 바꾸어 시공하는 방안이 이용되고 있다.

국내의 도로에서 발생하는 파손형태는 주변환경과 반복하중 조건에 의한 소성변형과 다양한 균열로 나타나며, 이로 인해 설계수명에 도달하기 전에 발생되어 도로 포장구조의 유지관리에 막대한 영향을 주고 있다(Cho et al., 2003). 일반적으로 도로의 소성변형은 차량에 의한 외부요인뿐 아니라 도로 구조와 관련된 여러 내부적인 인자가 주요한 발생원인인 것으로 알려져 있다. 이러한 포장구조의 변형거동을 평가하기 위하여 다양한 방법에 의해 규명이 이루어지고 있으며 최근에는 휠트래킹 시험을 통한 연구가 진행되고 있다.

본 연구의 목적은 제지애쉬와 시멘트계 고화물질로 구성된 고화제의 개선효과와 적정 배합비를 결정하는데 있으며, 이를 위해 혼합토의 광물학적 분석은 물론 배합비에 따른 강성의 변화를 분석하기 위해 일축압축강도실험을 수행하였다. 또한 현장발생토의 고화처리 효과를 검증하고 노상재료의 활용성을 평가하기 위해 동상시험, 노상토지지력시험 휠트래킹시험을 수행하였고 SEM촬영 및 방사선회절분석을 통해 혼합토의 강도증진을 도모하는 물질에 대한 분석을 수행하였다.

2. 화학적 지반안정처리

연약지반이란 도로제방 및 건설 구조물과 같은 인공적인 하중을 자연 상태로는 지지할 수 없는 지반을 말한다. 이러한 연약지반을 개량하는 방법에는 지반의 조건 및 개량목적, 시공조건에 따라 여러 가지 방법이 있다.

지반의 안정화를 위하여 사용되는 재료는 대표적으로 시멘트, 석회, 플라이애쉬(fly-ash), 고화제 등이 있으며 화학적인 안정처리에 널리 사용된다. 화학적 안정처리는 화학적 첨가제와 토사 사이에 발생하는 안정화 화학반응에 의하여 토사의 물리적 및 공학적 특성을 개량하는 방법이다. 화학적 첨가제와 토사 사이에 발생하는 대표적인 화학적인 반응은 양이온 교환(cation exchange), 수화반응(hydration reaction), 포졸란반응(pozzolanic reaction), 경화반응 및 탄화반응 등이 있다. 그 중에서도 현장에서 발생하는 불량토사를 최대한 직접 활용하여 노상의 재료로 사용하기 위한 목적으로 고화제를 사용하고 있으며, 현재 국내에서 생산되는 고화제는 대부분이 시멘트계 고화제이고 고화제의 종류는 크게 분말형과 액상형으로 분류할 수 있다.

2.1 양이온 교환반응에 의한 강도 증진효과

점토광물은 층상적인 구조적 특징과 관련되어 양이온이 교환되는 특성을 지닌다. 양이온의 교환은 제올라이트 다음으로 높은 양이온의 교환능력(Cation Exchange Capacity)을 나타내며 특히 베미큘라이트(vermiculite)와 몬모릴로나이트(montmorillonite)가 월등한 교환능력을 지니고 있다. 각각의 교환하는 능력은 이온가에 따라 Eq. (1)과 같은 특성을 지니고 있다.

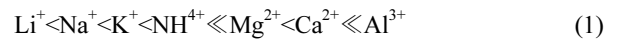


Fig. 1은 양이온의 교환(cation exchange)과정을 모식도로 나타낸 것으로서 점토 내에 확산 이중층의 교환효과를 발휘하여 석회의 Ca²⁺와 흙의 H⁺, Na⁺의 사이에서 이온의 교환이 발생된다. 특히 석회 등의 공급은 흙속에 풍부한 Ca²⁺를 공급하여 주고 이것으로 인하여 양이온의 교환이 일어나게 되며, 점토의 확산 이중층(diffuse double layer)이 줄어들어 지반의 강도가 증가된다.

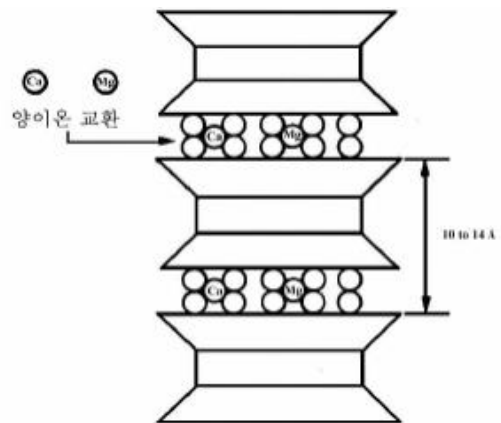


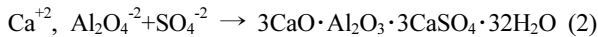
Fig. 1. Cation exchange concept

2.2 포졸란반응에 의한 2차 지반강화효과

포졸란(pozzolan)은 실리카질 혼화제이며 물과 자체적으로 반응하여 경화하는 성질은 갖고 있지 않지만, 포졸란의 알루미늄실리케이트($\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), 가용성 유리질 실리카(SiO_2) 등이 시멘트의 수화에 의하여 발생하는 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)과 상온에서 반응하여 불용성 규산칼슘 수화물을 생성하는 작용을 한다. Ca^{2+} 가 흙속에서 오랫동안 $\text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2$ 와 반응하여 CSH(I), CSH(II)를 형성하는데 이를 포졸란 반응이라 한다.

포졸란 반응은 장기적인 화학반응으로 2차적 화합물질인 칼슘알루미네이트 수화물(CAH)과 칼슘실리케이트 수화물(CSH)을 생성함으로써 수화물이 오랜시간에 걸쳐 고화되어 강도발현 효과가 높게 나타난다. 또한 수화물의 생성으로 공극을 충전하기 때문에 기존의 공극이 감소하여 흙의 구성이 밀실해지므로 내구성, 수밀성, 화학적 저항성을 증가시킨다. 상대적으로 포졸란 반응은 수산화칼슘을 소비하기 때문에 알칼리가 낮아져서 중성화가 빨리 진행될 수 있다.

포졸란 점토를 유기질토에 사용하려면 석회를 추가하여 반응시키면 안정된 지반을 구축할 수 있다. 또한, 포졸란 반응은 소성지수(PI), 액성한계(LL) 및 수축한계(SL)를 감소시키고 워커빌리티, 소성한계(PL) 및 전단강도를 증가시켜 석회와 토립자 사이에서 장기적으로 흙의 내구성 및 강도를 증진시킨다. 플라이애쉬의 포졸란 반응은 Eq. (2)에서 Eq. (4)와 같다.



3. 제지애쉬의 재료적 특성 분석

3.1 사용재료의 물리적 특성

3.1.1 흙 시료의 물리적 특성 분석

고화제 첨가에 따른 개량토의 특성을 평가하기 위해 경기도 ○○대교 근처에서 채취한 해성점토에 대하여 한국산업규격(KS)의 시험방법에 따라 비중, 입도분포, 애터버그한계, 다짐시험 등 기본적인 물리적 특성 시험을 수행하였으며, 요약하면 Table 1과 같다.

대상 흙 시료는 50%의 자연함수비를 가지는 세립토로서 No.200체의 통과 백분율이 99.4%이고, 액성한계 및 소성한

Table 1. Physical characteristics of soil

Properties	Result
Natural water content (w_n)	50%
Specific gravity (G_s)	2.682
Aterberg limit (%)	LL=35.9%, PI=12.29%
U.S.C.S	CL
Unconfined compression strength (q_u)	0.8 kPa
Optimal water content (w_{opt} , %)	17.6%
Maximum dry unit weight ($\gamma_{d(max)}$)	16.7 kN/m^3

계는 각각 35.9%, 12.29%로 나타나 통일분류법(USCS)에 의해 저압축성의 점토(CL)로 분류된다.

3.1.2 제지애쉬의 물리적 특성 분석

본 연구에 활용된 고화제는 고함수토 전용으로 해안점토와 같은 고함수비의 토양을 신속하고 효과적으로 고화시켜 현장토의 재활용에 사용하기 위한 목적을 가지고 있다. 따라서 고화과정을 통해 고함수토에 대한 탈수와 감소효과로 성질을 개량함으로써 현장발생토의 재활용이 가능하도록 할 수 있다. 또한 시멘트가 가지고 있는 6가 크롬 등의 환경적인 문제를 최소화한 제품으로 친환경적인 특성이 보장 되었다.

Table 2는 고화제와 보통포틀랜드 시멘트의 화학성분을 분석한 것으로, 사용된 고화제는 제지애쉬 50%와 고화제 50%를 혼합한 혼합재료에 대해 성분분석을 수행한 결과이다.

본 연구에 사용된 제지애쉬는 종이를 생산하는 과정에서 발생하는 제지 슬러지의 수분을 제거하고 소각로에서 소각 후 포집되는 인공 포졸란 재료로 수화열과 건조수축의 감소, 양호한 포졸란 반응, 강도증진 등의 효과로 다양하게 사용되어지고 있는 재료이다.

제지애쉬는 $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{CaO}$ 가 주 구성성분으로 전체의 약 80%를 차지하고 있으며 $\text{SO}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{MgO}, \text{K}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O}$ 가 그 외의 성분을 이루고 있고 주로 구형의 입자로 구성되어 있다. 2차 첨가재로 사용된 제지애쉬는 여러 장점을 가지고 있으나 강도나 내구성 측면에서 불리하지만 시멘트계 고화제가 구형의 제지애쉬 입자 사이에서 규산3석회 등과 같은 집합체를 형성하게 되며, 혼합고화제의 CaO의 양이 증가되

Table 2. Chemical composition of stabilizer

Sort of Stabilizer	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fineness (cm ² /g)	Specific gravity
Cement	61.38	21.07	5.92	3.78	2.93	1.95	2,800±500	3.05
Paper sludge	26.30	37.05	19.65	0.59	12.39	-	-	-
Stabilizer	65	15	10	4	3	3	3,200±500	2.5~2.8



Fig. 2. View of stabilizer

는 것으로 확인되어 강도발현에 영향을 준다. Fig. 2는 제지 애쉬가 섞인 고화제의 전경을 나타낸다.

4. 고화토의 공용성 평가

제지애쉬를 혼입하여 화학적 안정처리한 해성점토의 노상토 재료로서의 적용성을 평가하기 위해 혼합률에 따른 일축압축강도, 노상토지지력시험(CBR), 실내동상시험을 수행하였다.

4.1 고화토의 최적혼합비 선정

4.1.1 일축압축강도시험 결과 및 분석

본 연구에서 사용한 고화제는 분말로 흙의 다짐 시험방법(KS F 2312)으로 얻은 최적함수비와 최대건조단위중량의 결과 값을 이용하여 시험조건을 결정하였다.

고화제를 첨가하였을 때 시간경과에 따른 강도변화특성을 분석하기 고화제 혼합율은 2%, 4%, 6%, 8%, 10%의 범위로 선정하였고, 각각의 경우마다 3개의 공시체를 제작하여 3일, 7일, 14일, 21일, 28일동안 양생하여 일축압축강도 시험을 수행하였다. 공시체의 크기는 직경 5cm, 길이 10cm로서 1:2의 비율이고 공시체의 단면을 고르게 하기 위해 석고를 이용하여 캡핑(capping)하였다.

Fig. 3은 고화제의 양생일과 혼합비에 따른 일축압축강도를 나타낸 것이다. 해성점토에 대하여 고화제의 혼합비율이 높을수록 일축압축강도는 증가하는 경향을 보이며, 고화제의 혼합비가 0%~6%의 범위에서는 증가폭이 큰 반면 6%~10%의 범위에서는 일축압축강도의 증가폭이 크지 않은 것으로 분석된다.

고화제를 혼합한 해성점토의 강도특성을 분석하기 위해서는 양생기간과 혼합율에 따른 일축압축강도의 증가율을

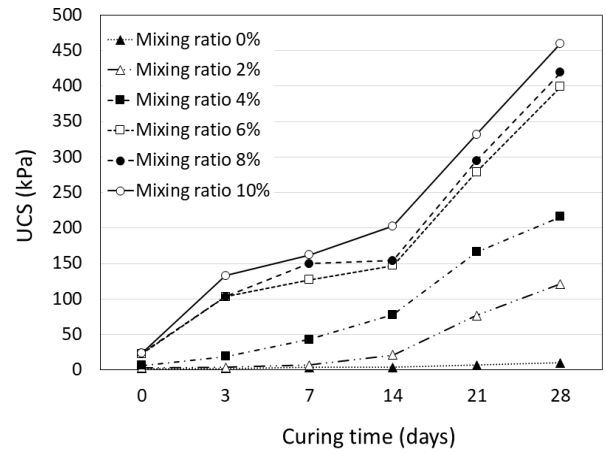


Fig. 3. Unconfined compressive strength with curing time

분석할 필요가 있다. Eq. (5)와 Eq. (6)은 일축압축강도의 증가율을 산정하는 과정을 나타낸 것으로서, 양생기간에 대해서는 28일에 발현된 강도를 최대치로 설정하여 이에 대한 각각의 양생기간에 해당하는 일축압축강도의 비를 백분율로 나타낸다. 또한 고화제 혼합률에 대해서는 10%의 혼합률에 대한 일축압축강도를 최대치로 설정하고 이에 대한 각각의 혼합비에 해당하는 일축압축강도의 비를 백분율로 나타내었다.

$$R_c = \frac{q_{ui}(i = 0.3, 7, 14, 21, 28)}{q_{u(28days)}} \times 100\% \quad (5)$$

$$R_m = \frac{q_{ui}(i = 0.2, 4, 6, 8, 10\%)}{q_{u(10\%)}} \times 100\% \quad (6)$$

Fig. 4는 고화제를 혼합한 공시체의 양생기간에 따른 일축압축강도 증가율을 나타낸 것이다. 모든 혼합비 조건에서 양생기간이 증가함에 따라 일축압축강도 증가율이 증가하는 것으로 나타났다. 고화제를 혼합하지 않은 조건에서 압

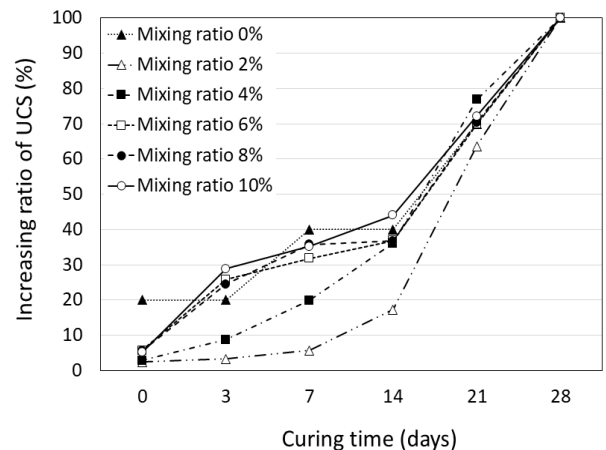


Fig. 4. Increasing ratio of UCS according to curing time

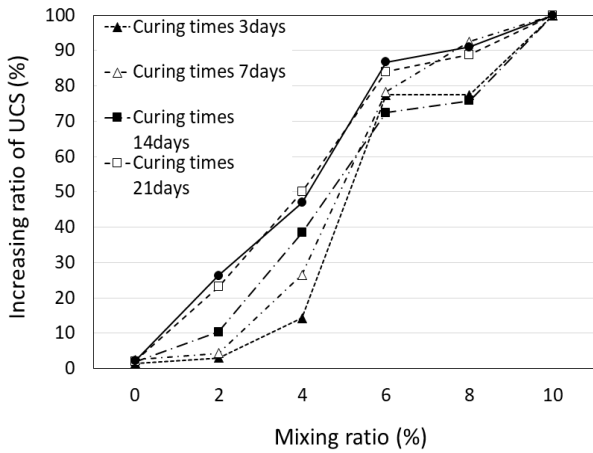


Fig. 5. Increasing ratio of UCS according to Mixing ratio

축강도가 증가하는 것은 양생기간동안 공시체의 수분이 감소하였기 때문이라 분석되고, 양생기간이 0인 공시체에서 일축압축강도가 증가하는 것은 고화제를 첨가함에 따라 공시체의 함수비가 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 5는 공시체의 양생기간에 따른 일축압축강도 증가율을 나타낸 것이다. 양생기간 0일-14일의 경우 일축압축강도 증가율이 완만하게 증가하여 최대일축압축강도의 약 40%가 발현되는 한편, 14일 이후 일축압축강도의 증가율은 현저하게 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타난다. 고화제를 혼합한 해상점토의 소요강도를 확보하기 위해서는 양생기간에 따른 강도증가율을 고려하여 최소 14일 이상의 양생기간이 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 고화제 혼합비에 대한 일축압축강도 증가율을 나타낸 것이다. 고화제의 혼합비가 증가할수록 일축압축강도의 증가율은 증가하는 것으로 나타났다. 고화제 혼합율이 0%-6%범위에서 공시체의 최대 일축압축강도는 약 70%-90%이고 6% 이후의 혼합비에서는 일축압축강도의 증가율이 크지 않은 것으로 분석된다. 고화제의 혼합률이 높아질수록 해상점토의 노상토로서 재료적 성질은 개선되지만 일축압축강도 증가비가 6%일 때 가장 경제적인 것으로 사료된다.

4.1.2 고화제의 실내동상실험 결과 및 분석

도로는 동상으로 인해 노상이 팽창하거나 융해된 빙층이 노상이나 노반을 약화시키는 대표적인 피해유형으로 나눌 수 있다. 일반적으로 동결은 지반이 팽창하고 융해된 물이 토층을 포화시키며, 차량의 반복적인 운행으로 인해 증가된 인장응력이 노상의 변형을 증가시켜 거북등 균열이나 표층부의 박리는 물론 대규모 변형을 유발시키게 된다.

본 연구에서는 고화제로 개량된 해상점토가 동결-융해에 대한 저항성을 높이거나 도로의 기층재나 노상재로 적용할 수 있는지를 확인하기 위해 실내 동상시험을 수행하였다.



Fig. 6. Frost heaving test using temperature controller

Fig. 6은 실내동상실험의 전경을 나타낸 것이다.

Table 3은 ASTM, JGS, TRRL기준의 실내동상시험의 특성을 나타내고 Table 4는 TRRL 동상민감성 판정기준을 나타낸다. 각 실험방법 기준들은 한번에 실험할 수 있는 시료의 개수, 동결방향, 몰드크기, 지하수 유입조건, 포화조건 등 많은 부분에서 차이점이 있다(Ryu, 2013). 국내에서는 Kang et al.(2013), Shin et al.(2009) 등이 동결 시 배수조건에 따른 동상예측, 동결토의 물리적 역학적 특성변화와 부동수분 특

Table 3. Characteristics of frost heaving test

Type	ASTM (D5918-06)	JGS (0171, 0172)		TRRL
Freezing type	One side temperature falling type	One side temperature falling type		One side temperature falling type
Direction of freezing	Top→bottom	Bottom →top		Top→bottom
Material of mold	Acrylic	Acrylic		Brass
Size of specimen	D=146mm H=150mm	0171	D=60mm H=20-40mm	D=100mm H=150mm
		0172	D=1,000mm H=50mm	
Condition of influent water	Closed system	Open system		Open system

Table 4. Judgment of frost heave sensitivity

Judgment	Frost Heave ratio (%)	Frost heave rate (mm/hr)
Negligible frost susceptibility (NFS)	less than 12	Less than 0.375
Possibly frost susceptibility (PFS)	over 12	over 0.375

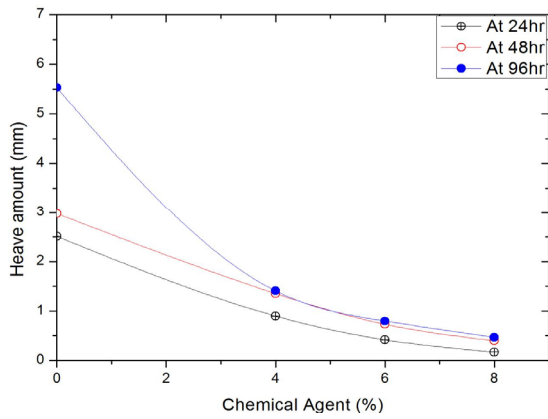


Fig. 7. Heave amount according to freezing time

성, 도로동상방지층의 효용성 등 실내실험과 현장 실험을 통하여 동결토의 지반공학적 특성에 대한 연구를 수행한 바 있다.

현장 발생 해성점토와 시멘트계고화제를 혼합한 혼합토를 대상으로 실내 동상시험을 수행한 결과, 지속시간 100시간 동안 발생한 각 공시체의 최대 동상팽창량은 Fig. 7과 같다. TRRL기준에 따르면 24시간, 48시간, 96시간에 대한 동상팽창량은 각각 9mm, 18mm, 36mm로 판정할 수 있다. 이 기준에 따른 고화제 혼합토의 동상민감성은 모든 혼합비에 서 민감하지 않은 것으로 분석되며 이는 해성점토가의 입자가 미립하여 모관상승이 잘 이루어지지 않았기 때문이라 분석된다. 다만 고화제를 혼합하기 전과 후의 동상팽창량이 현저하게 차이나는 것으로 볼 때 고화제가 동상 민감성 개선에 어느 정도는 영향을 미친다고 판단할 수 있다.

4.2 공용성 평가

4.2.2 노상토지지력 평가

C.B.R값은 비행장과 도로와 같은 가요성 포장 설계나 지반의 지지력 판정을 하는데 이용하며 포장면 밑에 있는 보조기층이나 기층 또는 노상의 재료강도, 팽창성, 압축성 및 포화로 인한 강도손실 등과 같은 특성을 나타내는 반경험적인 수치이며 예상이 되는 차륜하중과 관련시켜서 각각의 재료 두께를 결정하는 기본 자료가 된다. 또한 C.B.R값은 성토, 노상, 철도노선 등의 다짐관리 또는 성토의 시공 중 중장비의 주행성판정 등의 기준으로 규정하고 있으며, 각각의 재료에 따라 그 값을 얻을 수 있는 개략적인 범위가 있다. C.B.R값과 공학적인 분류법으로 분류한 흙 지반의 대비로 포장하부의 재료를 결정하는데 적용한다(Kim, 2015; Park & Kim, 2003).

흙 종류에 따른 노상토의 C.B.R과 지반조건기준을 이용하여 고화제로 처리한 흙의 용도를 결정하고, 고화제 혼합

에 의한 지지력 증가를 판단하기 위하여 KS F 2320에 의하여 C.B.R시험을 진행하였다. 노상토지지력은 노상토, 노반 재료의 지지력 특성을 표현하는 지수로 지름 5.0cm의 원주형 피스톤을 공시체 또는 지반면에 동일한 속도로 관입하여 관입량 2.5cm나 5.0cm에 대한 하중강도와 표준하중강도의 비를 백분율로 표시한 값이다. 일반적으로 노상토의 설계에는 C.B.R 값을 사용하며, 노반재의 설계에는 수정C.B.R이 적용된다. C.B.R값을 산정하기 위해서는 관입시험으로부터 산정한 하중을 피스톤의 단면적으로 나눈 하중강도를 산출하여 관입량-하중강도 관계로 표현한다. 이 때 3차 곡선이라면 변곡점에서 접선을 작도하여 이 접선이 y=0축과 만나는 값을 수정원점으로 수정한 관입량 2.5cm 및 5.0cm 일 때의 하중강도를 각각 70kgf/cm^2 , 105kgf/cm^2 로 나누어 100을 곱하여 Eq. (7)과 같이 각각 2.5mm 및 5.0mm 때의 C.B.R 값을 산정한다.

$$CBR = \frac{\text{하중강도}}{\text{표준하중강도}} \times 100(\%) \quad (7)$$

현장발생토의 노상토로서의 활용가능성을 평가하기 위해 관입시험을 진행하였다. 고화제의 적정 혼합비는 일축압축시험을 통해 가장 효율적인 혼합비로 6%를 결정하고 각각 10회, 25회, 55회 다짐시험을 수행하였으며, 다짐시험을 통해 얻은 최적함수비에 맞추어 공시체를 제작하였다.

Table 5는 노상토지지력비(CBR)를 나타낸 것이다. 앞서

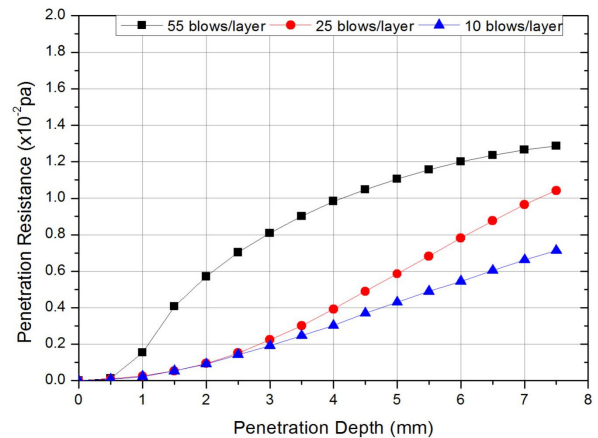


Fig. 8. Results of CBR test

Table 5. Results of CBR test

Amount of penetration	Number of blow			Standard load (kN)
	10 (kN)	25 (kN)	55 (kN)	
2.5 (mm)	0.28	0.3	1.38	13.4
5.0 (mm)	0.845	1.15	2.17	19.9
CBR (%)	4.246	5.778	10.9	

산정한 최적혼합비 6%의 고화제가 혼합된 혼합토에 대한 노상토지지력실험 결과, CBR값이 10.9로 노상토에서 요구하는 지지력 값인 10 이상인 것으로 평가되어 성토재의 기준에 만족하고 있음을 확인하였다. 따라서 현장에서 발생하는 해성점토 유용토를 노상토 재료로 활용하기 위해 시멘트계 고화제를 6% 혼합할 경우, 흙 쌓기 재료의 품질기준을 만족하는 것으로 나타났으며 현장발생토의 활용에 대한 적합한 사용기준으로 활용할 수 있을 것이라 사료된다.

4.3 휠트래킹 시험 결과 및 분석

동적반복하중재하실험(wheel tracking test)은 자동차 바퀴에 해당하는 주행 차륜을 비롯한 자동차 하중을 근거로 설계된 접지압, 주행속도 및 주행거리, 하절기 고온의 조건 등을 반영한 시험으로써 동적하중에 의하여 침하된 도로의 변형 깊이를 측정할 수 있는 시험이다. 이러한 장비를 이용하여 주어진 환경에서 동적 안정도와 변형량을 산출할 수 있다.

본 연구에서는 실내실험을 통하여 고화제 첨가에 의한 지반개량의 적용성 평가를 위하여 KS F 2374의 시험법을 참고하여 침하량을 산출하여 비교하는 실험을 수행하였다.

고화제 혼합토를 노상토로 사용할 수 있는지를 평가하기 위한 방법으로 반복하중에 의한 침하량에 대하여 분석하는 휠트래킹 실험기를 이용한 실험을 수행하였다. 공시체 몰드는 1번 mm의 길이가 (300±5) mm인 정사각형으로 두께 190mm의 공시체를 다질 수 있는 몰드를 사용하였고, 시험 차륜 하중은 686 N으로 고정시켜 시험하였다. 시험 중 시험차륜의 하중이 일정하게 유지되더라도 접지압의 분포에 따라 안정도가 변화하므로 일정 시간에 대해 동일 하중에 따른 접지압을 측정 후 항상 동일한 접지압을 유지할 수 있도록 하였다. 변형량 측정은 최초에 중심부를 통과한 때, 다이얼 게이지의 눈금을 원점으로 하며 30초 마다 침하 깊이를 측정 기록하고 변형량-시간 곡선 중 곡선이 직선으로 변하는 변곡선 구간에서 변형률이 일정하게 변하는 45분, 60분 구간의 15분간 변형량을 측정하여 분석한다.

$$RD = \frac{d_{60} - d_{45}}{15} \quad (8)$$

여기서, RD는 변형속도로 시간(분)당 변형량 mm/min으로 표시되며, d_{60} 은 60분에서의 변형량(mm)을 d_{45} 는 45분에서의 변형량(mm)을 나타낸다.

본 연구에서는 일축압축시험을 통해 결정된 적정배합비 6%의 고화제를 첨가한 현장유용 해성점토의 공용성을 평가

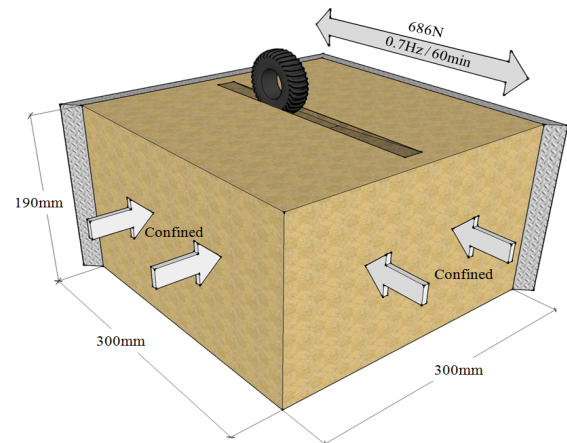
하기 위해 고화처리된 지반에서 침하량의 변화를 산정하였으며, 혼합토의 재령 일수를 28일로 설정하였다. Fig. 9(a)는 동적반복하중재하 시험의 개요를 나타내고 있으며, Fig. 9(b)는 휠트래킹 시험 현황을 보여주고 있다.

동적 안정도(DS: Dynamic Stability)는 공시체의 표면이 1mm 변형할 때 소요되는 시험 차륜의 통과 횟수를 지칭하며 Eq. (4-5)에 의해 산정한다.

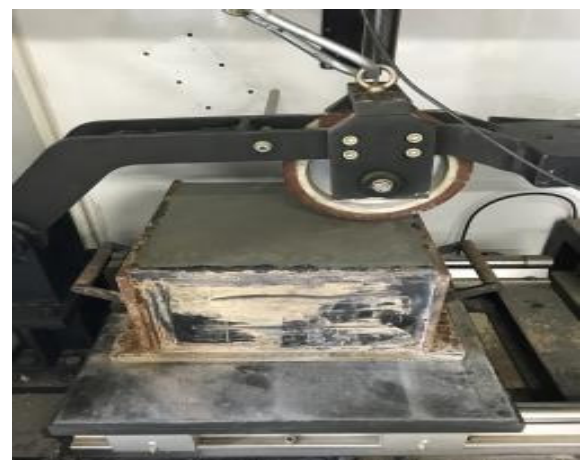
$$DS = 42 \times \frac{t_2 - t_1}{d_2 - d_1} \times C \quad (9)$$

여기서, DS는 동적 안정도(회/mm), d_1 은 t_1 (일반적으로 45분)에서의 변형량(mm), d_2 는 t_2 (일반적으로 60분)에서의 변형량(mm), C는 크랭크에 의한 변속 구동형 시험기를 사용한 경우의 보정 계수는 1.0이다.

실험결과 45분 시점의 변형량은 5.3mm, 60분에서의 변형량은 5.34mm인 것으로 나타났다. 따라서 상기식을 통한 산정결과 대상 혼합토지반의 변형속도는 0.0026mm/min



(a) Diagram of wheel tracking test



(b) View of wheel tracking test

Fig. 9. Wheel tracking test

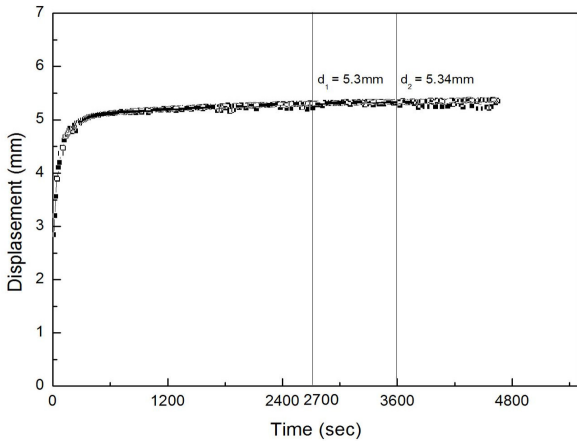


Fig. 10. Result of wheel tracking test

인 것으로 분석되었다.

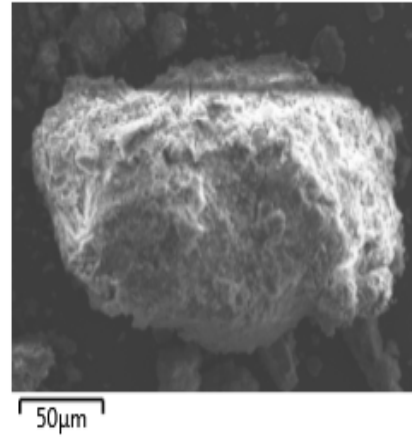
또한 총 변형량(mm)은 최초로 시험 차륜이 중심부를 통과한 1회차를 0으로 결정하고, 다짐 횟수가 2,520회(60분 소요)일 때의 침하 깊이를 기록하는 것으로 실험이 종료된 60분에서 5.34mm로 나타났다.

국토교통부(2015)의 아스팔트 혼합물 생산 및 시공 지침에 의하면 동적안정도의 기준값을 750회/mm로 정하고 있으며, 일본 Honshu-Shikoku교 시방기준은 에폭시 아스팔트의 동적안정도가 5,000 이상 나올 경우 안정적이라고 판단하고 있다(Eom, 2014).

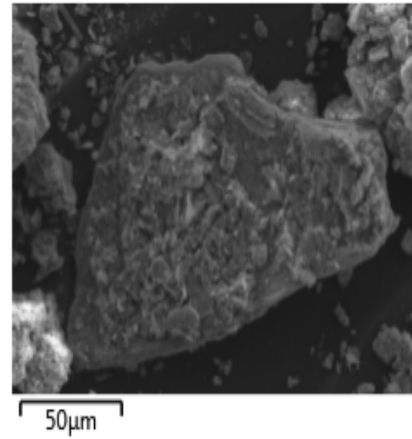
따라서 상기 식으로부터 대상지반의 동적안정도가 15,750회/mm인 것으로 산정되었으므로 실험대상 고화토가 기준을 만족하고 있으며 소성변형에 대한 저항성이 커서 높은 안정도의 값을 나타내는 것으로 나타났다. 이러한 값은 배합비 6%의 고화처리 지반이 노상토로서 공용성을 갖고 있음을 판단할 수 있다.

5. SEM 촬영 및 방사선회절분석

방사선회절분석은 정성분석과 정량분석 방법으로 나뉘며, 정성분석이란 미지 물질과 기지물질의 회절도형을 비교하여 물질에 대해 판정하는 방법으로 일반적으로 사용되는 방법이다. 방사선 회절분석은 흙 속의 성분변화 확인 및 반응상태를 파악하는데 매우 효과적이다. XRD(X-Ray Diffraction) 분석법은 빛의 회절특성을 이용하여 특징선에 대한 원소를 추정하는 방법으로 입자의 회절각(2θ)과 회절강도(I)값을 활용하여 면간격(d)을 구하며 기지물질의 회절도형을 확인할 수 있는 JCPDS 데이터와 비교하는 방법으로 특징선에 대한 반응물질을 추정한다. 이와 같은 XRD는 X선의 회절무늬가 결정물질에 따라 독특한 형태를 보이므로 결정질 화합물을



(a) Marine clay



(b) Stabilized soil

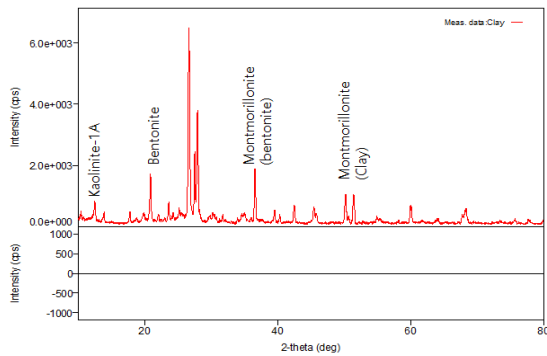
Fig. 11. Results of SEM analysis

정성적으로 확인하기 위한 간단하고 명료한 방법이다(Oh, 2008).

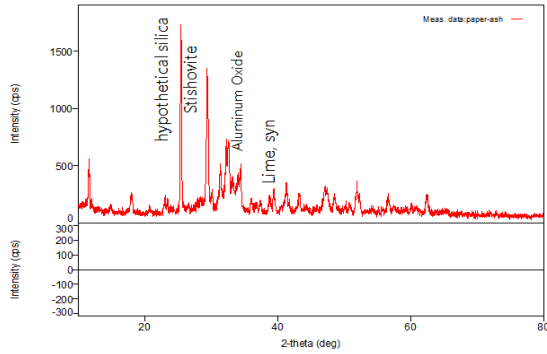
고화제를 점토에 첨가하는 경우 포졸란반응이 이루어지면서 흙의 경화가 진행된다. 이러한 경화과정을 규명하고 결정질 화합물을 확인하기 위해 본 연구에서는 해성점토시료와 고화제를 6% 혼합한 시료에 대해 XRD 분석을 수행하였다. 또한 해성점토 및 시멘트계 고화제의 혼합으로 인한 시료의 경화거동을 분석하기 위해 공시체의 표면형상과 평균 결정립의 크기를 SEM(주사전자현미경)을 이용하여 분석하였다. 분석은 원지반에 고화제를 혼합하고 습윤양생 7일 후에 자연건조를 한 시료를 균일한 분말로 제작하여 실시하였다. Fig. 11은 해성점토와 고화제로 개량한 해성점토의 SEM촬영 결과를 나타낸다.

Fig. 12는 XRD회절분석결과를 나타낸 것이다. 해성점토의 주요 성분은 α -석영, 시멘트 계 고화제는 석영과 알민산 규소, 산화칼슘이나 이중석고 등의 수화물로 구성되어 있는 것으로 분석되었다.

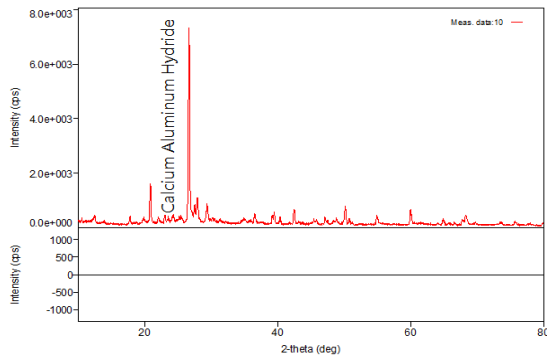
7일 재령 후의 분석결과, 고화제를 혼합한 시료의 경우



(a) Marine clay



(b) Stabilizer



(c) Stabilized soil

Fig. 12. Results of XRD analysis

재령 초기에 CAH계의 알민산석회화합물(Ettringite, $d\text{\AA}3.88$)이 형성되기 시작하였으며 시멘트화합물의 경우 수화반응이 일어나면서 알민산석회는 이중석고와 결합하여 알민산유산석회 화합물을 형성하여 침상형태의 결정구조를 형성하는 것으로 나타났다.

포졸란반응 생성물인 CSH계의 규산칼슘 석회수화물($d\text{\AA}3.88$)의 경우 시멘트계 고화제 첨가 시 초기재령에서 생성되었으며 장기재령에서 더 크게 형성되는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 현장에서 발생하는 유용토를 대상으로 고

화제를 활용한 화학적인 지반개량을 수행하여 지반공학적·동토공학적 특성을 개선하고 이에 따른 노상재료의 공용성을 평가하기 위해 고화제의 배합비별로 일축압축시험과 실내 동상실험을 실시하고 지지력시험과 휠트래킹 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 시멘트계 고화제를 혼합한 현장 발생 해성점토에 대한 일축압축강도를 평가해본 결과, 고화제의 혼합비에 따른 강도의 증가비가 배합비 6%에서 가장 두드러지며, 6% 이후 증가비가 급격히 감소하는 경향을 나타내었으며 모든 재령에서 동일한 경향을 보였다.
- (2) 재령 28일 강도에 대한 강도 발현율을 재령과 배합비별로 분석한 결과, 고화제의 혼합비가 6%를 상회하는 경우 강도비가 확연히 증가되는 추세를 나타내었다. 또한 재령에 따른 강도의 변화에 따르면 고배합비에서는 초기강도의 발현도가 상대적으로 높아 저배합비에 비해 재령에 따른 증가비의 급격한 상승은 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이상의 분석으로부터 조기강도 발현의 측면에서도 고화제의 배합비 6%가 뚜렷한 강도발현 효과를 보이는 것으로 확인하였다.
- (3) 동상실험을 통해 해상점토는 TRRL의 판단기준에 의하면 기본적으로 동상에 대하여 민감하지 않은 흙으로 분류되나, 고화제를 이용한 안정처리 시 동상민감성이 현저하게 감소되는 경향을 나타내어 동상방지층으로도 충분히 활용가능할 것이라 판단된다.
- (4) 일축압축 및 동상실험 결과를 토대로 시멘트계 고화제가 6% 혼합된 현장 유용토의 공용성을 평가하기 위해 노상토지지력평가를 수행한 결과, 수정CBR은 10 이상으로 평가되어 성토재료로서의 기준을 상회하는 것으로 나타났다. 또한 휠트래킹시험을 수행한 결과, 동적안정도가 15,750회/mm인 것으로 산정되어 소성변형에 대한 저항성이 크고 높은 안정도의 값을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 6%의 배합비는 현장 발생토의 개량을 통해 노상토로의 활용가치를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

이상과 같이 본 연구에서는 현장에서 발생하는 점토를 적절한 화학적 첨가제의 혼합을 통하여 도로노상토로 활용이 가능하다는 것을 공학적으로 검증하였으며, 특히 고화제의 적정 배합비에 대해 강도와 동토공학적 특성을 통해 확인하였다. 향후에는 도로노상토를 비롯한 뒷채움재 및 성토재료의 활용가능성에 대한 연구가 요구되며 현장 시공을 위한 기계화와 자동화에 대한 연구도 필요할 것으로 판단되며, 현장여건을 통해 직접적으로 개량 설계에 적용할 수 있는

강도나 지지력비 등의 예측식에 대한 연구가 후속적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 인천대학교에서 지원하는 교내과제(2017-0365) “제지애쉬를 활용한 연약지반개량에 관한 연구”의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. ASTM D5918-06 (2006), Standard test methods for frost heave and thawing weakening susceptibility of soils, American Society for Testing Materials, pp. 401~412.
2. Cho, S. D., Lee, D. Y., Kim, J. H. and Kim, N. H. (2003), Evaluation of the permanent deformation behavior on geosynthetics-reinforced asphalt pavement by using the wheel tracking tests, Journal of the Korean Geosynthetics Society, Vol. 2, No. 3, pp. 83~90 (In Korean).
3. Eom, D. Y. (2014), Comparison of performance on epoxy asphalt mixtures using various epoxy resins, Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology, pp. 1~33 (In Korean).
4. JGS 0171 (2003), 凍上性判定のための土の凍上試験方法, 地盤工学会基準, 日本地盤工学会.
5. JGS 0172 (2003), 凍上性判定のための土の凍上試験方法, 地盤工学会基準, 日本地盤工学会.
6. Kang, J. M., Kim, Y. S. and Lee, J. G. (2013), Evaluation method of frost heave for unsaturated soils, Journal of the Korean Geosynthetics Society, Vol. 1, No. 12, pp. 93~1001 (In Korean).
7. Kim, K. S. (2015), Drainage analysis and applicability evaluation of PET aggregate, Ph D. dissertation, Incheon National University, pp. 1~123 (In Korean).
8. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2015), Guidelines for the production and construction of asphalt mixtures.
9. Ministry of Maritime Affairs and Fisheries (2014), 제2차 연안 정비(변경) 기본계획 수립 연구보고서.
10. Oh, S. B. (2008), Comparative analysis on reinforcement effect by chemical stabilization for soft clay, Master's thesis, Incheon National University, pp. 1~76 (In Korean).
11. Park, H. K. and Kim, K. R. (2003), A study of correlation between soil characteristic and CBR value by experimented method, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 4, No. 1, pp. 41~48 (In Korean).
12. Ryu, B. H. (2013), Deformation factors and behavior characteristics of the water supply pipeline during ground freezing, Ph D. dissertation, Incheon National University, pp. 55~56 (In Korean).
13. Shin, E. C., Park, J. J. and RYU, B. H. (2009), Geotechnical characteristics of frost-susceptibility soil using modified freeze-thaw apparatus, Journal of the Korean Geosynthetics Society, Vol. 8 No. 1, pp. 53~59 (In Korean).