

지반보강용 주입재의 성능향상을 위한 초음파 에너지의 활용

문준호¹ · XIN Zhenhua² · 정강복³ · 김영욱^{4*}

¹비회원, 명지대학교 토목환경공학과 박사과정

²비회원, 명지대학교 토목환경공학과 석·박사통합과정

³비회원, (주)도담이앤씨 이사

⁴중신회원, 명지대학교 토목환경공학과 교수

Application of ultrasonic energy to enhance capability of soil improving material

Jun-ho Moon¹ · Xin Zhenhua² · Ghang-bok Jeong³ · Young-uk Kim^{4*}

¹Ph.D. Student, Dept. of Civil and Env. Engr., Myongji University

²Master and ph.D. Student, Dept. of Civil and Env. Engr., Myongji University

³Director, DODAM ENC

⁴Prof., Dept. of Civil and Env Engr., Myongji University

*Corresponding Author : Young-uk Kim, yukim@mju.ac.kr

Abstract

In a performance-based design, the structural safety is estimated from pre-defined damage states and corresponding damage indices. Both damage states and damage indices are well defined for above-ground structures, but very limited studies have been performed on underground structures. In this study, we define the damage states and damage indices of a cut-and-cover box tunnel which is one of typical structures used in metro systems, under a seismic excitation from a series of inelastic frame analyses. Three damage states are defined in terms of the number of plastic hinges that develop within the structure. The damage index is defined as the ratio of the elastic moment to the yield moment. Through use of the proposed index, the inelastic behavior and failure mechanism of box tunnels can be simulated and predicted through elastic analysis. In addition, the damage indices are linked to free-field shear strains. Because the free-field shear strain can be easily calculated from a 1D site response analysis, the proposed method can be readily used in practice. Further studies are needed to determine the range of shear strains and associated uncertainties for various types of tunnels and site profiles. However, the inter-linked platform of damage state - damage index - shear wave velocity - shear strain provides a novel approach for estimating the inelastic response of tunnels, and can be widely used in practice for seismic designs.

Keywords: Inelastic analysis, Cut-and-cover box tunnel, Plastic hinge, Damage state, Damage in

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
19(4)567-576(2017)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2017.19.4.567>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received May 30, 2017

Revised June 27, 2017

Accepted July 11, 2017



This is an Open Access article
distributed under the terms of the
Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2017, Korean Tunnelling and Underground
Space Association

www.kci.go.kr

초 록

본 연구에서는 지반보강용 시멘트-페이스트에 초음파를 조사하여 온도변화, 점도, 일축압축강도, 육안관측 시험을 통해 초음파가 시멘트-페이스트에 어떠한 물리적 특성을 변화시키는지에 대하여 고찰하였다. 실험에 사용된 w/c는 50~100% 까지 다양하게 진행하였으며, 그라우트재의 온도변화는 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 내에서 범위를 벗어나지 않도록 조절하여 실험을 진행하였다. 실험결과 온도변화는 초음파 조사시간에 비례하여 일정하게 증가하였고, 초음파를 조사한 지반보강용 시멘트-페이스트 점도는 최대 40%까지 감소하는 것으로 나타났다. 일축압축강도는 평균 30% 증가하였으며 육안관측시험에서도 초음파를 조사한 시멘트-페이스트의 단면이 공극이 많이 감소하는 양상을 보였다.

주요어: 터널 그라우팅, 초음파, 공동현상, 그라우트재, 일축압축강도, 점도

1. 서론

해저터널 시공 중 단층, 파쇄대 및 미고결층 등의 취약한 지반조건에서 일어나는 문제점(단층과 파쇄대 등은 주요한 해수의 통로가 될 수 있어, 막대한 수압과 용수로 지반의 안정성 크게 저하)을 극복하기 위해 시공 중 그라우팅을 진행한다. 암반에서 그라우팅은 주로 불연속면을 따라 주입되므로 절리의 분포, 거칠기 도는 폭과 같은 절리 인자들이 그라우팅 보강암반의 물성에 큰 영향을 미친다(Kim et al., 2016).

강관단과 같이 터널에서 지반 보강목적으로 사용되는 그라우팅은 그라우트 재료의 물성, 주입압 및 주입 대상지반의 특성에 따라 주입효과, 즉 지반보강의 효과가 결정된다. 특히, 최근 초미립자 시멘트를 이용한 주입재가 다수 개발되어 시공되어 왔으나 풍화가 상당히 진행되거나 불연속면이 심하게 발달된 풍화암~풍화토 경계에 있는 지반에서의 보강을 위해서는 보다 큰 압축강도 및 강성을 지닌 주입재의 개발 필요성이 대두되고 있다(Lim et al., 2008).

다수의 해저터널 시공사례를 보면 보강하지 않은 자연상태의 지반은 터널을 시공할 수 없을 정도로 강도가 약하기 때문에 터널구조물을 유지하고 터널작업 중 안전을 위하여 그라우팅을 통한 지반 및 암반의 강도를 높이고 투수성을 낮추는 처리과정을 거친 후 터널을 굴착해야 한다.

이렇게 해수의 유입제어, 터널 시공중에 지반보강 목적을 충족하기 위해 다양한 그라우팅 재료가 사용되고 있는데, 그라우팅 재료는 크게 물유리계 약액과 시멘트계 약액으로 나눌 수 있다. 물유리계 약액의 경우 협소한 곳에 깊숙이 주입 할 수 있다는 장점이 있는 반면 지반강도를 증대 할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 단점으로 인해 일반적으로 시멘트계 약액은 비약액계 중에서 가장 대표적인 주입재로 활용된다(Sim, 2010; Allan and Philippacopoulos, 1999). 시멘트계 약액의 경우 강도나 경제적인 측면에서 지반 보강 효과가 크기 때문에 가장 보편적으로 활용되는 주입재이지만 조립토 이외의 지반에서는 주입되기 힘들다는 단점이 있다. 또한 침투주입의 영역에서도 보통 포틀랜드 시멘트를 주입재로 사용할 경우 자갈섞인 굵은 모래층 또는 투수계수가 높은 층까지만 침투가 가능하지만, 저점도의 용액형 주입재를 적용할 경우 실트질 모래지반까지 침투주입을 확장시킬 수 있다(Karol, 1990).

시멘트 그라우트 입경은 평균 15~22 μm 이며, 주입재는 사질토나 암반균열 등과 같이 공극이 미세한 지반의 경우 침투성이 떨어져 그라우팅이 잘 이루어지지 않는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 주입이 간편한 그라우팅 재료개발과 적정 주입압 관리기법의 개발 등 그라우팅 재료, 주입장치, 주입성능에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다(Kutzner, 1996). 특히, 시멘트의 분쇄분급기술이 급속히 발전하여 높은 침투력을 발휘할 수 있는 입경의 주입재 제조가 가능하게 되었고, 이를 바탕으로 다양한 특성을 가진 그라우트재를 개발 중에 있다. 초음파를 활용한 그라우트재도 그 중에 하나라고 할 수 있으며, 이를 기점으로 시멘트계 주입재가 가지고 있는 문제점 개선에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다. 물론, 시멘트를 사용하지 않고 무기계 가소성 그라우트등을 사용하여 보강을 하는 사례(Kim et al., 2010) 도 있으나, 2차 환경오염 문제가 발생하지 않는 순수 물리적 처리법에 대한 연구들도 수행되고 있다. Lee et al. (2010)은 진동주입에 의한 그라우트재의 침투성 증대 효과를 확인하기 위하여 모형지반 및 인공 절리면을 대상으로 주입실험을 실시하여 침투깊이가 약 2~5배 증가되는 것을 확인하였으며 진동 주입 시 원활한 침투를 유도할 수 있음을 확인하였다. 또한 Date et al. (2003)은 시멘트계 주입재의 침투능을 증가시키기 위한 진동 주입 모델을 발표하였다. Seo et al. (2015)은 진동에 따른 그라우트재의 강도증진, 확공 효과를 평가하여 10 Hz에서 20 Hz 범위에서 가장 큰 강도를 도출하고 확공시험을 통해 1.11~1.14배 정도 증가되는 것을 규명하였다.

이처럼 진동에 의한 단순 압력증가에 따른 동수경사 변화를 유도하여 침투깊이를 증가시키는 공법들에 대한 연구가 진행되고 있지만 그라우트재의 순수한 물성치들을 변화시켜 성능을 향상시키는 연구는 많이 이루어지지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 시멘트-페이스트의 순수한 물성치들을 변화시켜 성능을 향상시킬 수 있는 초음파를 활용하여 연구를 진행하였다. 초음파의 조사로 인한 공동현상을 이용하여 용존 기체를 방출시키고, 압력변화를 유도하여 물성치를 순수하게 변화시키는 원리로 국내에서도 다양한 분야에서 연구를 진행중이다. Mo et al. (2013)은 초음파와 전기장 처리를 이용하여 하수슬러지 탈수성을 향상시키는 연구를 진행하였고, Park et al. (2011)은 유류오염 토양의 복원을 위하여 초음파의 진동현상을 활용하여 토양세척 공정의 최적화 연구를 진행하였다. 이처럼 여러 분야에서 입자에 물리적 에너지를 가하여 순수 물성치만을 변화시키는 연구가 국내에서 진행되고 있으며, 국외에서는 독일의 Roessler (2009)가 시멘트 페이스트에 초음파를 활용하여 초기강도를 증진시킨 사례를 보여주었다. 따라서, 본 논문에서는 초음파를 활용한 선행연구들을 기초하여 지반보강재로 널리 사용되고 있는 일반 포틀랜드 시멘트와 물의 혼합 재료에 초음파를 가하여 물성치 변화를 고찰하고, 그라우팅 재료로서 침투 및 보강재로서의 가능성을 검토하였다.

2. 실내실험

초음파의 종류에는 단주파, 고주파, 메가소닉 등으로 이루어져 있다. 본 연구에서는 28 kHz 단주파를 사용하였으며, 단주파는 Cavitation을 기반으로 수백기압을 충격력을 가지고 있는 매우 강력한 정재파이다. 회절이 강하다는 특징이 있으며 일반 세척기 용도 등으로 쓰인다. 다음 Table 1은 주파수별 특징을 간략히 정리하였고, Fig. 1

은 실험에 사용한 초음파 bath 시스템을 나타내었다. 초음파 bath 는 컨트롤러를 통해 주파수의 신호를 받아 진동 단자에서 진동을 발생시킨다.

Table 1. Type of ultrasonic

	Single Frequency (28 kHz)	Single Frequency (40 kHz)	High Frequency (100~500 kHz)	Mega sonic (1 MHz)
Theory	Cavitation	Cavitation	Molecular Acceleration	Molecular Acceleration
Particle Acceleration	1500G	2500G	5000G	100000G
Impulsive Force	Hundreds of atmospheric Pressure	Dozens of atmospheric Pressure	Several atmospheric Pressure	-
Standing Wave	Very Powerful	Powerful	Weak	-
Wave Characteristic	Diffusiveness	Diffusiveness	Straightness	Straightness
Usage	Normal	Normal	Precise	Super Precise



Fig. 1. Bath-type ultrasonic processor

시멘트-페이스트에 초음파를 가하게 되면 아래 Fig. 2과 같이 기포가 수축, 팽창을 반복하면서 압력이 매우 커지며 공동현상(cavitation)이 발생하게 된다. 공동현상으로 인해 수축, 팽창이 발생하면서 매우 큰 충격파를 발생하게 되고, 기포의 팽창이 일어나게 되면서 Fig. 3과 같이 서로 붙어 있는 시멘트 클러스터 입자가 깨져 물과 골로루 혼합하게 된다. 이로 인해 입자의 습윤능력을 개선시키며 빠르고 효율적으로 결합 재료와 반응하게 되며 이는 물의 표면장력을 감소에 기인한다고 할 수 있다.

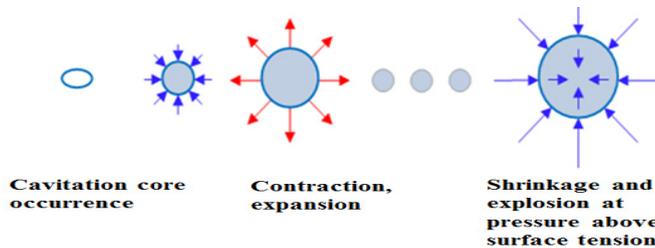


Fig. 2. Principle of ultrasonic



Fig. 3. Freed water molecules with sonication energy

본 논문에서는 초음파를 하나의 에너지 개념으로 보고 그라우트에 영향을 주는 인자들 초음파 출력, 초음파 조사 시간, 시멘트-페이스트 부피 향으로 연관시켜 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$E_{input} = \frac{P \times t}{V_g} \quad (1)$$

여기서, P = ultrasonic power (kW)

t = ultrasonic time (sec)

V_g = grout volume (L)

초음파 에너지에 따른 그라우트의 물성 변화는 초음파의 강도뿐만 아니라 가하는 시간 그리고 시료의 양에 크게 좌우된다. 이를 달리 표현하면 다른 연구(Na et al., 2007)에서 이미 제안한 Specific Supplied Energy라는 term으로 연관시킬 수 있다. 이는 kJ/l로 단위부피당 가한 에너지를 나타내고 있으며 이를 달리 표현하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$E_{input} = \frac{P \times t}{V_g} = \frac{kW \left(= \frac{kJ}{S} \right) \times s}{l} = \frac{kJ}{l} \quad (2)$$

초음파를 가할 경우 온도가 증가하는데, 이에 대한 영향을 최대한 배제하기 위하여 초음파를 가하는 중인 그라우트재의 온도를 최대한 일정(room temp.)할 수 있도록 제어하였다. 즉, 다음 Fig. 4와 같이 초음파를 가하는 처리조 내에 용이게 담긴 그라우트에 에너지가 전달되도록 하였는데, 이 때 처리조의 물을 지속적으로 순환시켜주어 일정 처리조 뿐만 아니라 처리중인 그라우트 내의 온도($23 \pm 2^\circ\text{C}$)가 일정할 수 있도록 하였다.

다음 Fig. 5는 초음파 bath의 출력(power)별 지반보강용 그라우트에 전달되는 음압이다. 초음파 적용성에 관한 판단에 있어 기기에서 발생하는 음파의 강도가 아주 중요한 역할을 담당한다. 따라서 다음 Fig. 5는 이 연구에서



Fig. 4. Experiment to apply energy to grout in ultrasonic treatment bath

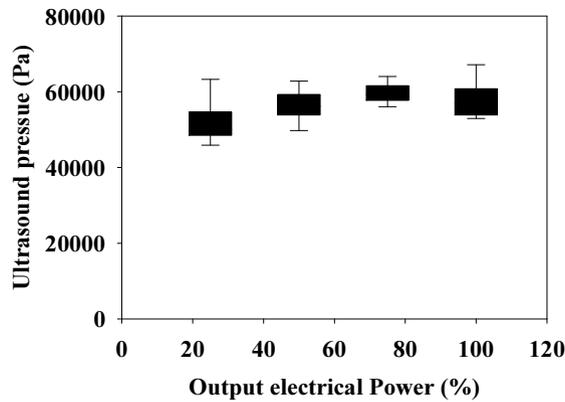


Fig. 5. Acoustic pressure as a function of output power

사용된 기기의 전기적 출력(Watt)에 따른 처리조 내의 음파강도(Acoustic Pressure) 변화를 음압측정기 (Ultraman-300 모델)를 사용하여 각 위치별(상, 중, 하) 9개소를 선정하여 총 27개소를 측정하였다. 측정결과, 신뢰도 90%를 만족함을 알 수 있었다.

실내실험 조건은 Table 2와 같이 설정하여 실험을 진행하였다.

Table 2. Experimental conditions

Experimental conditions
- W/C : 50~100%
- 3d Dry curing, Curing Temperature 24~27°C
- Used SONO MOLD
- Ultrasonic Output (100% Output=1200W) : 25%, 50%, 75%, 100%
- Ultrasonic irradiation time (min) : 0, 1, 3, 5, 7, 10, 20, 30
- Grout Volume 1L, 1.5L

3. 실험결과

초음파 조사시간에 따른 물과 그라우트재의 온도변화 실험을 한 결과, Fig. 6과 같이 공동현상으로 인한 기포의 압축, 팽창이 반복되면서 초음파 조사시간에 비례하여 온도가 상승하는 현상을 확인하였다. 시멘트-페이스트에 초음파를 조사하게 되면 미세한 기포가 생성되었다가 사라지는 현상이 나타나는데, 이는 매우 큰 압력과 순간적 고온 발생하기 때문이다. 실제로 기포가 초음파의 에너지를 받아 수축할 때 수천도의 고온상태가 되지만, 방열 등에 의해 온도 상승이 크지는 않으나, 순간적 고열이 발생하게 되며 실험에서도 시간에 따라 온도가 비례적으로 상승하는 현상을 확인할 수 있었다.

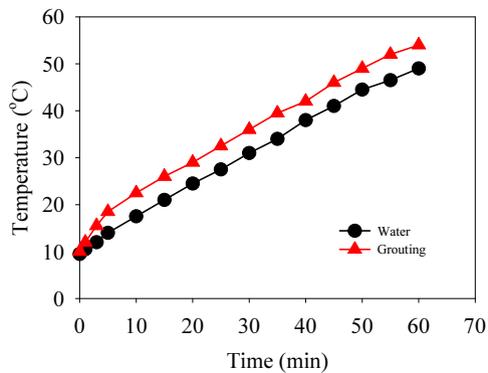


Fig. 6. Temperature experiment of water and grout material

점도실험은 Rheometer (Brookfield SST 모델)를 사용하여 초음파 조사에 따른 변화를 측정하였다. Fig. 7에서 초음파를 조사하였을 때, 기준점(점선:초음파를 조사하지 않은 그라우트재)을 중심으로 전체적인 점도가 감소하다가 일정 에너지 이상 가해졌을 때 점도가 조금씩 증가하는 양상을 보이며 E_{input} 2~7에서 점도가 최대 40% 감소하는 것으로 나타났다.

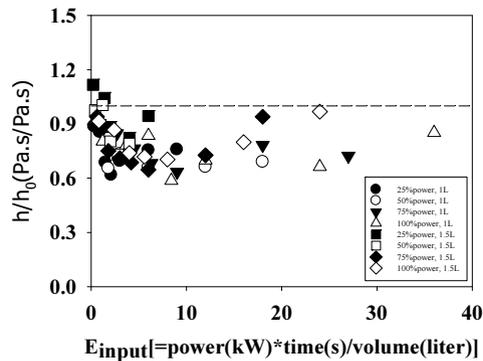


Fig. 7. Viscosity variation with E_{input}

다음 Fig. 8은 초음파 처리 전/후 시멘트-페이스트의 일축압축강도 변화를 고찰하기 위하여 실험한 결과이다. 실험은 KS F 2405F를 기준으로 일축압축강도를 측정하였으며, 양생 및 배합조건은 앞에서 제시한 실험조건과 같다. 공시체 성형의 경우 직경 대 길이비 1:2의 비율로 성형하였고 실험결과는 Fig. 7 같다. 일축압축강도는 E_{input} 5~7에서 비교적 높은 강도치가 나타난 것으로 보이며 초음파 조사에 의하여 크게 증가하는 양상을 보인다. 전체적으로 기준점(점선) 보다 초음파를 가한 그라우트가 평균적으로 20~30% 강도가 증가한 것으로 나타났다.

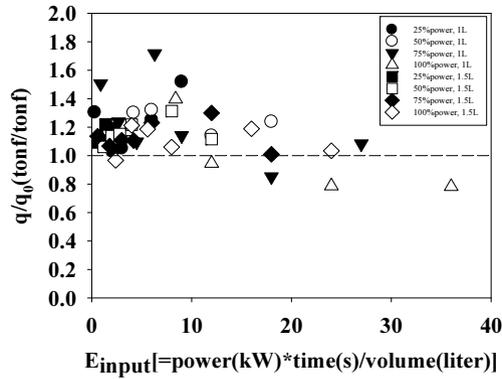


Fig. 8. Uniaxial compressive strength with E_{input}

다음 Fig. 9는 초음파 처리에 따른 시료의 단면 변화를 고찰하였다. 공시체 단면은 최대 x200까지 확대할 수 있는 Dino-lite 현미경을 사용하여 단면의 변화를 비교하였다. 파괴된 그라우트 공시체의 단면을 육안으로 살펴보면, 일반 양생보강재 단면에서는 주로 큰 공극(기포)들이 많았으나 초음파 처리 양생보강재 단면에서는 초음파의 cavitation으로 인해 생성된 공기방울이 폭발하여 일반시료에서 쉽게 볼 수 있었던 공극들을 거의 볼 수 없었다. 또한 사진촬영 부분에 한해 imagej를 사용하여, 공기방울이 차지하는 면적을 계산한 결과, 초음파를 조사하기 전에는 면적이 $5,764 \text{ mm}^2$ 이었으나 초음파를 조사하고 난 뒤에는 202 mm^2 으로 약 96.5%가 줄어들었다.



Fig. 9. Cross sectional comparison of specimen

4. 결론

본 연구에서는 지반보강용 주입재인 시멘트-페이스트에 초음파를 조사하여 물리적 성능을 검토하였다. 일반적으로 쓰이는 포틀랜드 시멘트를 활용하여 온도변화, 점도, 일축압축강도, 육안관측실험을 수행하였으며, 실험에 의해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 시멘트-페이스트에 초음파를 조사하면, 전체적으로 점도가 감소하는 양상이 뚜렷하게 나타난다. 이는 초음파 조사에 따른 진동에너지로 인한 페이스트 내 클러스터의 깨짐 현상이 발생하고 균열된 입자들에 자유간극수의 흡착에 따른 유동성 증가와 클러스터 크기 감소로 인한 전단저항 감소와 동시에 페이스트내의 점도가 감소하는 것으로 판단된다. 주입된 E_{input} 에 따라 최대 40%까지 점도가 감소되어 유동성 확보가 필요한 그라우팅 공법에 적용될 수 있을 것이다.
2. 일축압축강도는 초음파 처리 후의 공시체가 초음파 처리전의 공시체보다 평균 20~30% 증가를 보였다. 이는 초음파 에너지의 진동과 파괴력에 따른 시멘트 클러스터가 파괴되고 잘게 부서어진 입자와 자유간극수 간의 반응으로 인하여 초음파를 가하기 전보다는 광범위한 미싱현상으로 공시체의 밀도가 높아져 강도를 증가시키는 것으로 판단된다.
3. 일축압축강도 실험 후 그라우트 공시체 단면을 육안으로 관찰한 결과 일반 그라우트는 큰 공극들이 많았지만 초음파를 조사한 그라우트에서는 초음파 공동현상으로 인하여 기포들이 수축, 팽창 효과를 통해 큰 공극들은 보이지 않았다. 또한 공기방울을 정량화한 결과, 초음파 조사 후의 면적이 약 96% 감소하는 것을 볼 수 있었다.
4. 연구결과, 본 연구에서 사용된 실험 조건 내에서는 초음파 에너지 E_{input} 5~7에서 일축압축강도의 증가 및 점도가 최적치로 도출되었으며, 초음파 에너지를 활용하면 그라우팅의 침투성 부분이나 강도증진에 활용가치가 높을 것으로 판단된다.
5. 연구결과를 조금 더 정량화 시킨다면 터널의 임반, 지반보강 그라우팅 뿐만 아니라 터널 라이닝의 그라우팅이나 고준위방폐장 등에 초음파 그라우팅 재료를 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술 혁신사업의 “고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발 (17SCIP-B066321-05)” 과제의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

References

1. Allan, M.L., Philippacopoulos, A.J. (1999), “Properties and performance of cement-based grouts for geothermal heat pump application”, U.S. Department of Energy, Washington D.C.

2. Date, K., Wakita, S., Yamamoto, T., NaKashima, Y., Hoshino, Y., Aoki, K., Mito, Y. (2003), "Development of dynamic grouting technique for the ground improvement", Proc. of the ITA World Tunnelling Congress 2003: (RE) Claiming the Underground Space, Amsterdam, The Netherlands, pp. 929-936.
3. Karol, R.F. (1990), "Chemical grouting", 2nd Ed, New York and Basel, Marcel Ekker Inc, pp. 49-54.
4. Kim, D.H., Jung, D.H., Jeong, G.H. (2010), "Evaluation of engineering characteristics and field applicability of inorganic thixotropic-grout for backfilling of shield TBM tail voids", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 12, No. 1, pp. 75-76.
5. Kim, J.W., Hong, E.S., Cho, G.C. (2016), "Assessment of elastic-wave propagation characteristics in grouting-improved rock mass around subsea tunnels", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 2, pp. 75-76.
6. Kutzner, C. (1996), "Grouting of rock and soil, Balkema", Rotterdam, pp. 9-27.
7. Lee, J.S., Lee, I.M., Chung, H.S., Lee, D.S. (2003), "Analysis of ground reinforcement effect using fracturing grouting", Tunnelling Technology, Vol. 5, No. 4, pp. 349-360.
8. Lee, M.S., Kim, J.S., Lee, S.D., Choi, Y.J., Yang, J.M., Lee, I.M. (2010), "Effect of vibratory injection on grout permeation characteristics", Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 26, No. 7, pp. 37-47.
9. Lim, Y.J., Lee, K.H., Kim, H.K., Hong, C.S., Ahn, J.H. (2008), "Development of new micro-cement grouting materials for tunneling", Korean Geotechnical Society, pp. 1559-1570.
10. Mo, W.J., Han, J.S., Ahn, C.M., Yoon, S.Y., Seok, H.J., Kim, C.G. (2013), "Enhancement of dewaterability of sewage sludge by ultrasonification and electric field treatment", Journal of the KSEE, Vol. 35, No. 1, pp. 23-30.
11. Na, S.M., Kim, Y.U., Khim, J.H. (2007), "Physiochemical properties of digested sewage sludge with ultrasonic treatment", Ultrasonics sonochemistry, Vol. 7, pp. 281-285.
12. Park, B.G., Son, Y.G., Hwang, A.N., Kim, J.H. (2011), "Investigation for optimization of ultrasonic soil-washing process for remediation of diesel contaminated soil", Korean society of hazard mitigation, Vol. 11, No. 1, pp. 101-105.
13. Roessler, C. (2009), "Influence of power ultrasound on flow and flow solidification behavior of cement suspensions", Session of the 17th International Building Materials Conference Ibausil.
14. Seo, M.B., Kwon, S.H., Lee, B.J. (2015), "Improvement of grouting by short-period vibration energy", Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 16, No. 7, pp. 35-42.
15. Sim, S.J. (2010), "Analyses of permeation effect in soil due to mixing properties of cement grout", A Master's Thesis, pp. 1-45.