

# 쏘일네일링의 인발저항에 대한 LRFD 저항편향계수 산정

## Estimation of LRFD Resistance Bias Factors for Pullout Resistance of Soil-Nailing

손 병 두<sup>1</sup> Son, Byeong-Doo  
임 희 대<sup>2</sup> Lim, Heui-Dae  
박 준 모<sup>3</sup> Park, Joon-Mo

### Abstract

Considering the conversion of the Korea Construction Standards to Limit State Design (LSD), we analyzed the resistance bias factor for pullout resistance, as a part of the development of the Load and Resistance Factor Design (LRFD) for soil nailing; very few studies have been conducted on soil nailing. In order to reflect the local characteristics of soil nailing, such as the design and construction level, we collected statistics on pullout tests conducted on slopes and excavation construction sites around the country. In this study a database was built based on the geotechnical properties, soil nailing specifications, and pullout test results. The resistance bias factors are calculated to determine the resistance factor of the pullout resistance for gravity and pressurized grouting method, which are the most commonly used methods in Korea; moreover, we have relatively sufficient data on these methods. We found the resistance bias factors to be 1.144 and 1.325, which are relatively conservative values for predicting the actual ultimate pullout resistance. It showed that our designs are safer than those found in a research case in the United States (NCHRP Report); however, there was an uncertainty,  $COV_R$ , of 0.27-0.43 in the pullout resistance, which is relatively high. In addition, the pressurized grouting method has a greater margin of safety than the gravity grouting method, and the actual ultimate pullout resistance determined using the pressurized grouting method has low uncertainty.

### 요 지

본 연구에서는 국가건설기준이 한계상태설계법으로 전환됨에 따라 현재 연구기반이 미약한 쏘일네일링의 LRFD 설계법 개발의 일환으로 인발저항에 대한 저항편향계수를 분석하였다. 쏘일네일링의 설계 및 시공 기술수준 등 지역적 특성을 반영하기 위하여 국내 비탈면과 굴착공사에서 수행된 인발시험 자료를 수집하고, 지반특성, 쏘일네일링의 제원, 인발시험 결과 등으로 구성된 데이터베이스를 구축하였다. 쏘일네일링의 인발저항에 대한 저항계수를 보정하기 위하여 국내에서 가장 많이 이용되며 비교적 자료수가 충분한 중력식과 가압식 그라우팅공법의 인발저항에 대한 저항편향계수를 산정하였다. 저항편향계수는 1.144~1.325으로 실제 극한인발저항력을 비교적 보수적으로 예측하고 있으며 미국의 연구사례(NCHRP Report)보다 안전측으로 설계가 이루어지고 있으나, 인발저항력에 대한 불확실성은

1 정희원, 충남대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Chungnam Univ.)

2 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Chungnam Univ.)

3 정희원, 동국대학교 건설환경공학과 전문연구원 (Member, Research Fellow, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Dongguk Univ., Tel: +82-2-2260-8737, FAX: +82-2-2260-8753, jmparksoil@hotmail.com, Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

$COV_R=0.27\sim 0.43$ 으로 비교적 큰 것으로 나타났다. 또한 가압식 그라우팅공법은 중력식 그라우팅공법에 비해 내재된 안전여유가 많으며, 실제 발휘되는 극한인발저항력의 불확실성이 낮은 것으로 분석되었다.

**Keywords :** Soil nailing, Load and Resistance Factor Design, Pullout test, Ultimate pullout resistance, Resistance bias factor

## 1. 서론

쏘일네일링공법은 급경사의 자연 비탈면과 굴착면의 안정성을 증대시킬 목적으로 인장 및 전단응력, 휨모멘트에 저항할 수 있는 철근 또는 강관 보강재를 지반 속에 삽입하여 지반강도를 증가시키고 동시에 발생변위를 억제시킴으로써 전체적으로 비탈면의 안정성을 향상시키는 공법이다. 이 공법은 1972년 프랑스에서 철도 비탈면 보강에 최초로 시공되었으며, 국내에는 1993년에 대구 동아일보 사옥의 지하 터파기 벽체에 처음으로 적용된 이후 지하굴착분야 및 비탈면 보강 등에 보편적으로 사용되고 있다.

초기의 쏘일네일링공법은 경험적으로 적용되어 왔으나, 1970년 후반 Stocker et al.(1979)이 기존의 굴착면 안정해석법을 수정하여 보강된 토체와 보강되지 않은 토체에 대한 활동면을 두 개의 직선 형태로 가정한 한계평형해석법을 제안하고, Shen et al.(1981)의 대규모 모형실험을 통해 파괴면의 형상이 벽체 최하단을 통과하는 곡선형태임이 밝혀지고, Scholsser(1983)이 보강재의 인장력, 전단력 및 휨강성 등에 의한 영향을 모두 고려한 일반적인 해석을 시도함으로써 본격적인 이론개발이 시작되었다. 이후 Juran et al.(1990)은 쏘일네일링 벽체의 파괴지점을 유도하기 위한 한계평형해석법을 한 단계 발전시켰으며, 이는 현재 보강토 벽체 설계에 기본적으로 사용되고 있는 이론과 거의 유사하다. 이후 Grassler and Gudehus(1981), Guilloux and Schosser(1984) 등이 많은 모형실험을 통한 실험적 연구가 수행되었다.

국내·외 쏘일네일링 설계기준에서는 네일로 보강된 벽체 및 비탈면에서 발생 가능한 파괴형태를 크게 외적 파괴와 내적파괴, 전면판의 파괴로 구분하여 안정성을 검토하도록 규정하고 있다. 외적파괴는 네일로 보강된 토체와 주변 지반에서 원호, 이중썩기, 단일썩기 형태의 활동면을 따라 발생하는 파괴로 기존의 한계평형법을 이용한 비탈면 안정해석법을 수정하여 검토하며, 내적

파괴는 네일에 작용하는 인장하중에 대하여 네일 재료 자체의 파단과 파괴면 바깥쪽의 저항영역에 근입된 네일의 인발파괴를 검토한다. 전면판의 파괴는 네일 머리에 작용하는 인장력과 전면판 배면에 작용하는 토압에 대하여 전면판의 휨파괴와 네일 두부 주변에 발생하는 국부전단파괴를 검토한다.

국내에서 쏘일네일링의 설계는 네일 및 보강체의 극한저항력을 기준안전율로 나눈 허용저항력이 작용하중 이상인지를 판단하는 허용응력설계법(MLTMA, 2011a)을 기준으로 수행되고 있으나, 유럽과 미국에서는 하중력 또는 저항력에 각각 안전계수를 적용하는 부분안전계수설계법을 적용하고 있다. 유럽의 경우 영구하중, 가변하중, 수압, 네일력, 우발하중(지진력) 등의 하중특성값에 하중계수를 곱한 설계하중이 자중, 흙의 전단저항력과 흙-네일간의 상호작용, 흙-네일 간의 단위주면마찰력, 네일의 강도 등 각각의 저항특성치를 부분안전계수로 나눈 설계저항력 이하가 되도록 규정하고 있다. 미국의 설계기준(Lazarte et al., 2003)은 고정하중, 활하중, 토압, 풍하중, 지진하중 등의 하중조합에 따라 하중특성값에 100~150%에 해당하는 하중계수를 곱하여 설계하중을 결정하여 저항력과의 비로 안전율을 산정하고, 각 파괴모드에 대한 최소안전율기준을 만족하는지를 확인한다. 즉, 유럽의 설계기준은 지반과 네일의 상호작용에 의한 보강효과와 하중 및 저항과 관련된 불확실성을 고려한 부분안전계수를 적용하고 있으며, 미국의 설계기준은 국내 허용응력설계법과 거의 유사하지만 시공 중 또는 공용기간 중에 작용할 것으로 예상되는 하중들의 발생특성에 따라 합리적으로 조합하여 설계에 적용하고 있다.

FHWA(미연방도로국)에서는 교량의 하부구조물 기초설계에 대한 하중저항계수설계법(LRFD)에 쏘일네일링에 관한 설계코드를 포함시키기 위하여 쏘일네일링 설계와 시공에 대한 매뉴얼(Byrne et al., 1998)을 발표하였으나, 쏘일네일링 벽체에 대한 데이터베이스 부족으로 허용응력설계법의 안전율을 저항계수로 맞추는

방식으로 저항계수를 산정하여 수록되었으며, AASHTO LRFD 교량설계 시방서(AASHTO, 2002)에는 포함되지 못하였다. 이후 미국 고속도로관련 시설물 연구 프로그램(NCHRP Report 701)(Lazart, 2011)에서는 쏘일네일링이 시공된 32개소 현장에서 수행된 153개의 현장인발시험 데이터베이스를 수집하여 인발저항력에 대한 저항계수를 보정하였다. 그러나 이 연구에서는 저항계수 보정과정에서 필수적으로 요구되는 예측저항력을 표준적인 설계절차를 거치지 않고, 일률적으로 검증시험하중의 두 배를 예측인발저항력으로 추정하는 한계가 있었다.

본 연구에서는 국내 쏘일네일링공법에 관한 학술논문 및 현장인발시험보고서 등으로부터 29개소 현장에서 수행된 125개의 현장인발시험 결과를 데이터베이스로 구축하고, 인발저항의 불확실성을 통계학적으로 분석하여 신뢰성이론에 기반한 저항계수를 보정함으로써 국내 기술수준을 반영한 쏘일네일링공법의 한계상태설계기준 제정을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 하중저항계수설계법

### 2.1 LRFD 저항계수

지반 구조물 설계에 관한 하중저항계수설계의 방법론은 1990년 대 초 Barker et al.(1991)에 의해 시작되었으며, 미 도로교통국(AASHTO)에서는 기존의 허용응력설계법을 대체할 수 있는 LRFD 교량설계 시방서(AASHTO, 2002)를 발간하였다. 하중저항계수설계법 시방서에서는 한계상태를 식 (1)과 같이 정의하고, 저항계수에 공칭저항(극한저항)을 곱한 저항능력이 하중계수에 공칭하중을 곱한 설계하중 이상을 만족하도록 규정하고 있다. 또한 FHWA(2001)에서는 하중 및 저항의 통계학적 특성과 목표신뢰도지수를 고려한 신뢰성이론에 기반한 저항계수를 식 (2)와 같이 유도하였다.

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n = R_r \quad (1)$$

$$\phi = \frac{\lambda_R \left( \gamma_{QD} \frac{Q_D}{Q_L} + \gamma_{QL} \right) \sqrt{\frac{1 + COV_{QD}^2 + COV_{QL}^2}{1 + COV_R^2}}}{\left( \lambda_{QD} \frac{Q_D}{Q_L} + \lambda_{QL} \right) \exp(\beta_T \sqrt{\ln[(1 + COV_R^2)(1 + COV_{QD}^2 + COV_{QL}^2)])}} \quad (2)$$

여기서,  $\eta_i$ 는 하중 수정계수,  $\gamma_i$ 는 하중계수,  $\gamma_{QD}$ ,  $\gamma_{QL}$ 은

고정하중과 활하중의 하중계수,  $Q_i$ 는 공칭하중,  $Q_D$ ,  $Q_L$ 은 사하중과 활하중,  $Q_D/Q_L$ 은 고정하중과 활하중의 비,  $\phi$ 는 저항계수,  $R_n$ 은 공칭저항,  $R_r$ 은 저항계수가 적용된 저항값(설계저항),  $\beta_T$ 는 목표신뢰도지수,  $\lambda_{QD}$ ,  $\lambda_{QL}$ ,  $\lambda_R$ 은 고정하중, 활하중 및 저항편향치의 평균값  $COV_{QD}$ ,  $COV_{QL}$ ,  $COV_R$ 은 고정하중, 활하중, 저항편향치의 변동계수이다.

하중계수( $\gamma_{QD}$ ,  $\gamma_{QL}$ )와 하중편향계수( $\lambda_{QD}$ ,  $\lambda_{QL}$ )는 구조분야의 시방서에 제시된 상부구조물에 대한 시방서를 따르므로 저항계수는 하중비( $Q_D/Q_L$ )와 목표신뢰도지수( $\beta_T$ ) 범위에 대한 저항편향계수( $\lambda_R$ )와 변동계수( $COV_R$ )의 저항분포로 산정할 수 있다(Nowak, 1999; Paikowsky et al., 2010). 따라서 저항계수는 저항편향치의 평균값과 변동계수에 대한 함수가 되므로 신뢰성 높은 저항계수를 보정하기 위해서는 쏘일네일링 설계 시 예측된 인발저항력과 인발시험으로부터 측정된 극한인발력의 비로 정의되는 인발저항에 대한 저항편향계수 및 변동계수를 정확히 결정하는 것이 중요하다.

### 2.2 저항편향계수

하중저항계수설계법에서는 공간적 불확실성, 조사의 불확실성, 설계 및 해석모델의 불확실성 등 저항의 불확실성을 저항편향계수와 변동계수로 정량화하여 저항계수 보정에 이용하고 있으며, 저항편향계수와 변동계수는 예측된 극한지지력과 실측된 극한지지력의 비를 이용하여 식 (3)과 같이 정의한다.

$$\lambda_{R_i} = \frac{R_{m_i}}{R_{n_i}}, \lambda_R = \frac{\sum \lambda_{R_i}}{N}, COV_R = \frac{\sigma_R}{\lambda_R} \quad (3)$$

여기서,  $\lambda_{R_i}$ 는 저항편향치,  $R_{m_i}$ 는 측정된 저항값,  $R_{n_i}$ 는 예측된 저항값(공칭저항),  $\lambda_R$ 은 저항편향치의 평균값(저항편향계수),  $COV_R$ 은 저항편향치의 변동계수,  $\sigma_R$  저항편향치의 표준편차이다.

저항편향치의 평균값( $\lambda_R$ )은 실제 극한지지력에 대한 극한지지력 이론식의 평균적인 내재적 보수성을 나타내는 값이며, 저항편향치의 변동계수( $COV_R$ )는 저항편향치의 평균값에 대한 표준편차의 비로서 저항편향치의 불확실성을 정량화한 값이다. 저항편향계수와 변동계수는 저항계수 보정에 있어 한계상태설계에서 요구되는 불확실성을 반영하는 가장 중요한 역할을 하므로

본 연구에서는 실제 저항력을 측정하기 위한 인발시험 데이터를 수집하고, 확률통계학적 분석을 수행하였다.

### 3. 쏘일네일링의 인발시험

#### 3.1 국내·외 인발시험 기준

쏘일네일의 현장 인발시험은 일반적으로 네일 선단에 점진적으로 하중을 증가시켜 주면마찰력 부족으로 인해 발생하는 네일 두부의 변위를 측정하는 것으로 쏘일네일링이 설치된 구조물이 수명기간 동안 과도한 변위의 발생없이 설계하중에 견디는지를 확인하기 위하여 실시한다.

인발시험의 규정과 적용성은 프랑스의 Clouterre 프로젝트 보고서(Clouterre, 1993)에서 기술되기 시작하여 FHWA의 쏘일네일링 현장 감독자 매뉴얼(Porterfield et al., 1994)에서 시험회수와 시기, 정착길이 등이 구체적으로 제시되고 있으며, 국내에서는 건설공사 비탈면 표준시방서(MLTMA, 2011b)과 한국시설안전공단(KISTEC, 2014), 한국도로공사(KHC, 2003) 등 여러 기관에서 시험시기와 횡수, 천공 및 네일길이 등의 시방규정을 정하고 있다. 그러나 시험위치나 시험횡수 등을 현장여건에 따라 감독자의 검토에 의해 가감할 수 있고, 천공 및 네일의 길이는 최소 2m 이상으로만 규정하고 있어 실제 설계와 상이한 조건에서 시험될 가능성도 있다. 또한 시공 후 확인인발시험이 어려운 경우에 시공 전 수행된 극한인발시험으로 대체할 수 있는 등 품질관리 기준이 해외 시방서에 비하여 부족하다.

#### 3.2 인발시험의 종류

각 국의 인발시험 기준은 공통적으로 쏘일네일 시공 전 계획단계에서는 예비인발시험(preliminary test) 또는 극한인발시험(ultimate test)을 수행하며, 시공 초기에는 검증인발시험(conformity test, verification test), 시공 중 또는 시공 후에는 확인인발시험(inspection test, proof test)을 수행한다. 모든 시험은 지반과 그라우트 사이의 주면마찰저항력을 측정하기 위하여 수행되며, 시험 중 장기적인 안정성을 확인하기 위한 크리프시험(creep test)이 병행되기도 한다.

하지만 시험방법 및 시험빈도, 정착길이, 최대 허용인발력 등에서는 차이를 보이고 있으며, 특히 시험빈도에

서 많은 차이를 보인다. 프랑스에서는 쏘일네일로 보강된 면적에 따라 시험수량을 차등 적용하도록 규정하고 있으며, FHWA에서는 쏘일네일의 총 시공수량의 일정 비율에 대해 인발시험을 수행하도록 규정하고 있다. 또한 프랑스에서는 시공 전과 초기에 수행되는 극한인발시험을 중요시하고 있으며, FHWA에서는 확인인발시험에 집중하는 경향을 보인다.

국내에서는 쏘일네일 보강이 필요한 지반조건이 대체적으로 비슷한 경우가 많으므로 프랑스에서 적용하는 보강면적 기준을 준용하고, 시험빈도는 과거 경험적으로 실시되어 온 시험횡수를 조정하여 결정하였다. 그러나 국내 인발시험 기준은 해외 기준과 비교하여 동일한 보강면적과 시공수량에 대하여 극한인발시험과 확인인발시험 횡수가 일반적으로 1/2~1/3에 불과한 실정이다.

#### 3.3 인발시험의 방법

쏘일네일의 인발시험방법은 변위제어방식과 하중제어방식으로 구분된다. 변위제어방식은 변위속도를 1mm/min으로 조절하면서 인발하중을 가하며, 네일두부에서 5mm 변위가 발생할 때 까지는 0.1mm(또는 6초)마다 하중값을 읽고, 이후 잔류하중에 이를 때까지는 0.5mm(또는 30초)마다 하중값을 읽는다. 최대 하중이 나타나지 않을 경우에는 1mm 변위를 발생시키는데 하중증가가 1% 미만일 경우 인발시험을 종료한다. 하중제어방식은 예상 파괴하중(한계인발력)의 10%씩 증가시키며 각 하중 단계에서 정해진 시간간격에 대한 변위값을 읽는다.

크리프 변위가 예상되는 일반토사나 점토지반에서는 인발시험 중에 크리프시험을 병행하여 실시할 수 있다. 프랑스 기준에서는 파괴하중의 70% 단계에서 180분 동안 수행되며, FHWA에서는 설계시험하중의 150% 단계에서 60분간 수행된다.

프랑스 기준에서는 변위제어방식과 하중제어방식을 모두 규정하고 있으나 FHWA에서는 하중제어방식만을 기술하고 있다. 국내 시방서에서는 변위제어 및 하중제어방식으로 수행 가능하다고 기술하고 있으나, 변위제어방식에서는 변위속도에 따라 전동펌프 등이 필요한 현장 여건을 고려하여 하중제어방식의 시험을 수행하는 것으로 규정하였다. 하지만 문헌연구를 통한 인발시험방법을 살펴보면, 시험결과와 분석 및 최대인발하중의 결정 측면에서 변위제어방식이 보다 정확하고 편리

하기 때문에 국내 연구자들은 변위제어방식을 많이 사용하고 있는 것으로 나타났다.

### 3.4 극한인발시험

극한인발시험은 파괴가 발생하는 최대하중을 기준으로 단계별 하중을 재하하기 때문에 예상되는 파괴하중을 사전에 결정하여야 한다. 파괴하중은 변형율제어시험에서 결정된 한계 허용인발력( $T_{LE}$ )으로부터 결정하거나 지반조사 등을 통하여 쓰일네일의 극한주면마찰력을 이용하여 산정한다. 또는 조건이 비슷한 주변 네일의 인발시험 결과로부터 확인된 파괴하중을 사용할 수 있다.

국내에서는 대부분 지반조사 결과를 이용하여 쓰일네일의 극한주면마찰저항력을 예측하고 있으며, 실내시험에 의한 지반분류, 표준관입시험과 공내재하시험으로부터 얻어진 표준관입저항치와 한계압력을 주로 이용하고 있다. 지반조사 결과를 이용하는 경우에는 변형율제어시험 또는 주변의 인발시험 결과를 이용하는 경우보다 실제 극한인발저항력을 예측하는 정확성이 떨어지기 때문에 많은 불확실성을 갖게 되므로 이에 대한 분석이 필요하다.

### 3.5 확인인발시험

확인인발시험은 실제 보강용으로 시공된 쓰일네일 개수의 약 5% 정도에 대해 실시하며, 확인인발시험은 설계 주면마찰력을 갖도록 제대로 시공되었는지를 확인하는 것이 주목적이므로 설계하중의 125~150%를 가한다. 즉, 하중의 재하단계와 지속시간은 극한인발시

험과 동일하게 수행하되 시험하중을 조절하여 쓰일네일의 파괴를 유발시키지 않으므로 파괴에 이르는 극한인발저항력을 측정할 수 없다. 따라서 확인인발시험으로부터 얻어진 하중-변위 곡선은 탄성구간 내에 있는 것을 기준으로 하므로 항복 및 극한인발하중을 찾을 수 없으므로 한계상태설계법을 위한 데이터베이스에는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

## 4. 인발시험의 데이터베이스 구축 및 분석

### 4.1 개요

신뢰성이론을 적용하여 저항계수를 보정하기 위해서는 설계방법에 내재된 불확실성을 정량화하여 반영하여야 하므로 통계학적 분석이 가능한 만큼의 인발시험 데이터가 수집되어야 한다. 쓰일네일링의 인발저항에 대한 저항계수를 보정하기 위한 연구가 FHWA(Lazart, 2011)의 지원으로 수행되었지만 저항편향계수 결정과정에서의 표준적인 예측저항력을 적용하지 않았으며, 국내 쓰일네일링의 공법특성, 설계 및 시공수준, 지반특성 등 많은 요소에서 상이하므로 지역적 특성을 고려한 저항계수 보정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 국내 쓰일네일링공법에 관한 학술논문 및 현장인발시험보고서 등으로부터 수집된 125개의 현장인발시험 결과를 데이터베이스로 구축하고, 인발저항의 불확실성을 정량화한 저항편향계수 및 변동계수를 분석하였다.

### 4.2 데이터의 수집 및 분석

쓰일네일링의 인발저항에 대한 데이터베이스를 구축

Table 1. Database component of soil nailing

Category	Components
Geotechnical conditions	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Site location, structure type, slope angle</li> <li>• Soil/Rock type, boring log and description</li> <li>• SPT blow count (N), PMT critical pressure</li> <li>• Unit weight, shear strength, shear resistance angle</li> <li>• Drawings and specifications of soil nails</li> </ul>
Soil nailing data	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soil nailing type, grouting method</li> <li>• Nail material, Nail bar diameter (<math>D_B</math>), Nail install angle</li> <li>• Diameter of drill-hole (<math>D_{DH}</math>)</li> <li>• Nail total length (<math>L_t</math>), Bonded length (<math>L_B</math>)</li> </ul>
Pullout test data	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Design load or test design load (DL)</li> <li>• Load applied to the soil nail (P)</li> <li>• Displacement at the nail head (<math>\Delta_t</math>)</li> <li>• Estimated pullout resistance (Q)</li> </ul>

하기 위해서는 실제 극한인발저항력을 평가하기 위한 극한인발시험 자료와 극한인발저항력 예측에 필요한 쏘일네일의 제원, 지반특성 자료가 수집되어야 하므로 데이터베이스 항목을 Table 1과 같이 구성하였다.

쏘일네일의 인발시험 데이터베이스에는 국내·외에서 전통적으로 시공되고 있는 중력식쏘일네일링공법(38%)

을 비롯하여, 밀실한 그라우팅 효과를 발현하기 위한 가압식쏘일네일링공법(30%), 앵커의 보강 메커니즘을 차용하여 초기 변위 및 침하를 감소시키기 위한 프리텐션 쏘일네일링공법(13%)과 선단확장형 쏘일네일링공법(9%) 등으로 구성되었다(Table 2). 하중저항계수설계법의 저항편향계수를 결정하기 위해서는 각 보강공법별로 표

Table 2. Summary of soil nailing database

DB component	Type	Number of case	Distribution ratio (%)
Soil nailing method	Gravity-grouting nail	48	38
	Pressurized-grouting nail	38	30
	Pressurized-grouting steel pipe nail	3	2
	Multi nail	2	2
	End-expanded nail	11	9
	Wedge type removable nail	5	4
	Post-tensioned removable nail	2	2
	Pre-tensioned nail	16	13
Soil nail application	Land development (excavation)	70	56
	Road, Railway, Tunnel (slope)	34	27
	Unknown	21	17
Grouting method	Gravity-grouting	79	63
	Pressurized-grouting	46	37
Soil type	Colluvium	6	5
	Sandy silt	6	5
	Sand, Gravel	8	6
	Weathered soil	57	46
	Weathered rock	36	29
	Soft rock	12	10
SPT N value	$4 < N \leq 10$ (Loose)	13	10
	$10 < N \leq 30$ (Medium)	10	8
	$30 < N \leq 50$ (Dense)	19	15
	$N \geq 50$ (Very dense)	75	60
	Unknown	8	6
Nail material	Rebar nail	114	91
	Steel pipe nail	11	9
Nail install angle	5°	5	4
	10°	13	10
	15°	36	29
	25°	4	3
	30°	6	5
	Unknown	61	49
Diameter of drill-hole	100 mm	85	68
	105 mm	32	26
	115 mm	8	6
Diameter of nail	25 mm	44	35
	29 mm	38	30
	32 mm	4	3
	40 mm	3	2
	Etc. (multi nail, steel pipe)	36	29

준화된 인발저항력 산정법이 필요하며, 통계학적 의미를 부여할 수 있도록 최소한 30개소 이상의 인발시험 데이터가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 인발시험 자료가 비교적 많고, 극한단위주면마찰력으로부터 예측된 인발저항력을 산정할 수 있는 중력식(44개소)과 가압식(39개소) 그라우팅공법을 적용한 쏘일네일에 대한 저항편향계수를 산정하였다.

쏘일네일링의 인발시험은 주택단지, 산업시설 등의 굴착공사(56%), 도로, 철도, 터널의 비탈면공사(27%) 등에서 수행되었으며, 전통적인 쏘일네일링의 그라우팅공법인 중력식(63%)과 최근 적용사례가 증가하고 있는 가압식(37%) 그라우팅공법을 적용한 것으로 나타났다. 쏘일네일은 주로 풍화토(46%)와 풍화암(29%) 지반에 설치되었으며, 표준관입저항치(N)는 대부분 30 이상(75%)으로 분포하였다.

데이터베이스로 구축된 네일의 재료는 건설공사 비탈면 표준시방서(2011)에서 권장하고 있는 이형철근(91%)을 가장 많이 사용하고 있으며, 25~29mm 직경의 네일(75%)이 주로 이용되고 있는 것으로 나타났다. 네일의 설치각도는 5~15°(43%)를 주로 적용하는 것으로 나타났으나 문헌에서 명확하게 기술하지 않은 경우(49%)가 많았다.

흙과 그라우트 사이의 주면마찰력과 관련된 천공직경은 100~105mm(94%)가 일반적으로 적용되고 있으며, 정착장은 풍화토 및 풍화암 지반에서 가장 효과적으로 알려진 3~5m(44%)가 많이 적용되었다.

### 4.3 극한인발저항력의 예측

쏘일네일의 설계 시 극한인발저항력은 네일 재료 자체의 파단(식 (4))에 대한 저항력과 파괴면 바깥쪽의 저항영역에 근입된 네일에서 발휘되는 인발저항력 중에서 최소값으로 한다. 인발저항력은 지반과 그라우트 사이의 주면마찰저항, 네일과 그라우트 사이의 주면마찰저항으로 식 (4)~(5)와 같이 구분된다.

$$T_{ug} = \pi \cdot D \cdot L_e \cdot \tau_u \quad (4)$$

$$T_{uf} = \pi \cdot d \cdot L_e \cdot \tau_f \quad (5)$$

여기서,  $T_{ug}$ 는 지반과 그라우트 사이의 극한인발저항력(kN),  $T_{uf}$ 는 보강재와 그라우트 사이의 극한인발저항

력(kN), D와 d는 각각 천공직경(m)과 보강재의 유효직경(m),  $L_e$ 는 마찰저항력을 발휘하는 보강재의 길이(m),  $\tau_u$ 는 지반과 그라우트 사이의 단위극한주면마찰저항력(kN/m<sup>2</sup>),  $\tau_f$ 는 보강재와 그라우트 사이의 단위극한주면마찰저항력(kN/m<sup>2</sup>)이다.

지반과 그라우트 사이의 단위극한주면마찰저항력( $\tau_u$ )은 쏘일네일링의 시공방법 및 지반의 종류, 표준관입저항치, 공내재하시험의 한계압을 이용하는 경험적인 방법이 있으며, 실제 극한인발시험에 의해서도 얻을 수 있다. Clouterre(1991) 보고서에서는 중력식 그라우팅, 저압그라우팅, 타입식 등의 시공방법과 사질토, 자갈, 실트/점토, 이회토, 풍화암 등 지반종류에 따라 그룹을 나누고, Fig. 1과 같이 한계압에 따른 극한주면마찰력 도표를 제시하였다. 이 도표를 이용하기 위해서는 공내재하시험에 의해 한계압이 결정되어야 하지만 국내에서는 주로 표준관입시험을 수행하기 때문에 실제 이용사례는 찾아보기 어려웠다.

Elias and Juran(1988, 1991)은 로터리 천공, 타입식, 고압 그라우트, 오거 굴착 등 쏘일네일링의 시공방법과 점토, 실트, 실트질모래, 모래질자갈, 풍화토, 암반 등 지반종류에 따른 극한단위주면마찰저항력을 제안하고 있으며, Table 3에 국내에서 가장 일반적으로 적용되고 있는 시공법(rotary-drilled)에 대한 극한단위주면마찰저항력을 나타내었다. FHWA의 쏘일네일 벽체의 설계 및 시공 매뉴얼(Byrne et al., 1998)에서는 쏘일네일링의 시공방법과 사질토, 점성토, 암반 종류에 따른 극한단위주면마찰력 범위를 제안하고 있다. 일본도로공단(JHPC, 2002)에서는 기준에 넓은 범위로 제안된 모래 및 모래

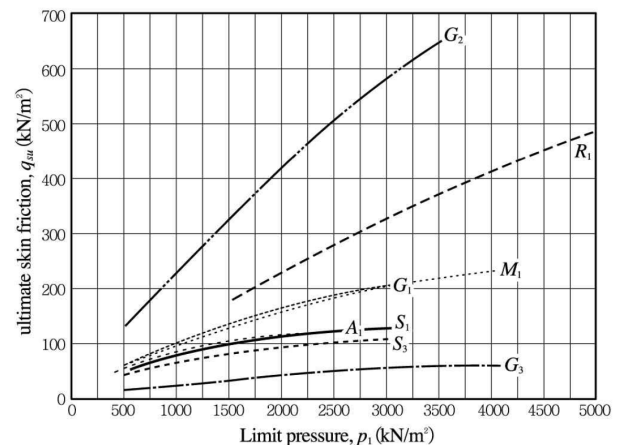


Fig. 1. Relationship between ultimate skin friction and limit pressure of soil conditions (Clouterre, 1991)

자갈에 대한 극한단위주면마찰력을 5단계의 표준관입 저항치 5단계로 세분하여 제시하였다.

국내에서도 이와 유사하게 그라우팅 형식과 정착지반의 종류에 따른 주면마찰저항을 Table 4와 같이 제시하였다. 주면마찰저항은 국내에서 인정받은 네일 관련 신기술공법의 현장시험 결과들을 토대로 한국시설안전공단(KISTEC, 2014)에서 제시한 것으로 해당 신기술공법의 품질 확인만을 목적으로 한 인발저항력을 고려하여 계산한 값으로서 원래 지반에서 발휘되는 주면마찰저항 값을 과소평가하게 되어 과다설계를 야기할 수 있으므로 참고자료로만 활용하도록 권고하고 있다. 따라서 본 연구에서는 검증되지 않은 신기술공법의 자료보다는 국내·외에서 가장 많이 적용되고 있는 Elias and Juran(1991)의 단위극한주면마찰저항력을 이용하여 극한인발저항력을 예측하는 것이 합리적이라고 판단된다.

또한 시공방법과 지반의 종류에 따라 극한주면마찰저항력을 경험적으로 결정하는 방법은 간편하지만 저항력의 범위가 크고 상황에 따라서 차이가 많이 발생하므로 예측된 극한인발저항력은 많은 불확실성을 내포할 것으로 예상된다.

쏘일네일의 극한인발저항력은 수집된 인발시험 데이터베이스로 구축된 천공직경, 정착길이, 네일직경과 Table 3에 제안된 단위극한주면마찰저항력을 이용하여 산정하였으며, 중력식과 가압식 쏘일네일에 대한 극한인발저항을 Fig. 2에 나타내었다. 본 연구에서 수집된 쏘일네일의 인발저항력은 대부분 시공 전 예비설계, 시험시공 중 원지반에서 수행된 인발시험으로부터 얻어졌으며, 쏘일네일에 전단력과 모멘트가 발생할 정도로 비탈면 또는 벽체의 변위가 발생되지 않은 미소변형 상태로 간주하고, 인발저항력 산정 시 정착길이는 그라우팅 길

Table 3. Estimated nominal bond resistance for soil nails in soil and rock (Elias and Juran, 1991)

Material	Construction method	Soil/Rock type	Nominal bond resistance (kN/m <sup>2</sup> )
Rock	Rotary drilled	Marl/limestone	310.3~399.9
		Phyllite	103.4~310.3
		Chalk	517.1~620.5
		Soft dolomite	413.7~620.5
		Fissured dolomite	620.5~999.7
		Weathered sandstone	206.8~310.3
		Weathered shale	103.4~151.7
		Weathered schist	103.4~172.4
		Basalt	517.1~620.5
		Slate/hard shale	310.3~413.7
Cohesionless soil	Rotary drilled	Sand/gravel	103.4~179.3
		Silty sand	103.4~151.7
		Silt	62.1~75.8
		Piedmont residual	41.4~117.2
		Fine colluvium	75.8~151.7
Fine-Grained soil	Rotary drilled	Silty clay	34.5~48.3

Table 4. Unit ultimated bond strength estimates for nail in soil and rock (KISTEC, 2014)

Grout type	Soil/Rock type	Unit ultimated bond strength (kN/m <sup>2</sup> )
Gravity-grouting	Soft rock	208~264
	Weathered rock	223
	Weathered soil	48
	Soil	86~111
Pressurized-grouting	Hard rock	334~336
	Soft rock	270~333
	Weathered rock	44~319
	Fractured zone	336
	Weathered soil	44~220



이로 적용하였다. 예측된 극한인발저항력은 정착길이에 비례하는 것으로 나타났으며, 동일한 정착길이인 경우 전단강도가 큰 지반에서 극한인발저항력은 크게 예측되었다.

#### 4.4 극한인발저항력의 실측

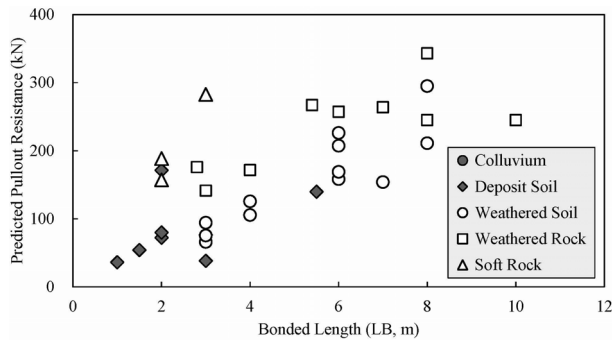
쏘일네일링의 실제 극한인발저항력은 극한인발시험으로부터 얻어진 하중-변위곡선을 이용하여 도해적으로 구한다. 지반과 그라우트 사이의 주면이 파괴상태에

도달하면 하중은 더 이상 증가되지 않고 감소하게 되며 지속적으로 변위만 발생하므로 하중-변위곡선은 일반적으로 Fig. 3과 같은 형태로 나타난다. 극한인발저항력은 더 이상의 하중을 저항하지 못하는 지반상태에서의 하중값 또는 시험최대 하중값으로 하거나 두 개의 직선으로 얻어진 교점의 하중으로 결정하였으며, 중력식과 가압식 그라우팅으로 시공된 쏘일네일의 실측 극한인발저항력을 Table 5에 나타내었다.

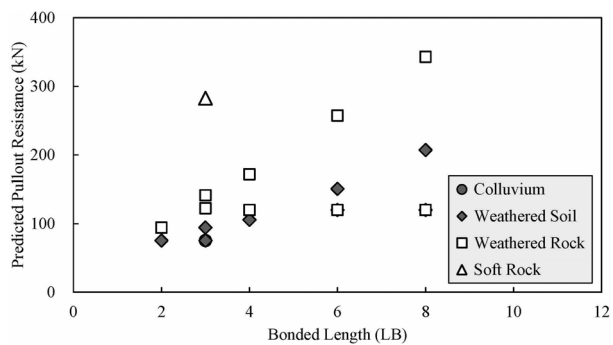
### 5. 저항편향계수

#### 5.1 저항편향계수 분석

설계 시 예측된 극한인발저항력과 극한인발시험으로부터 얻어진 실측 극한인발저항력의 비로 정의되는 저항편향계수를 산정하였다. 중력식 그라우팅공법이 적용된 쏘일네일의 인발저항에 대한 저항편향계수와 변동계수는  $\lambda_R = 1.164$ ,  $COV_R = 0.41$ , 가압식 그라우팅공법의 저항편향계수는  $\lambda_R = 1.446$ ,  $COV_R = 0.28$ 로 산정되



(a) Gravity-grouting soil nail



(b) Pressurized-grouting soil nail

Fig. 2. Predicted pullout resistance according to bonded length ( $L_B$ )

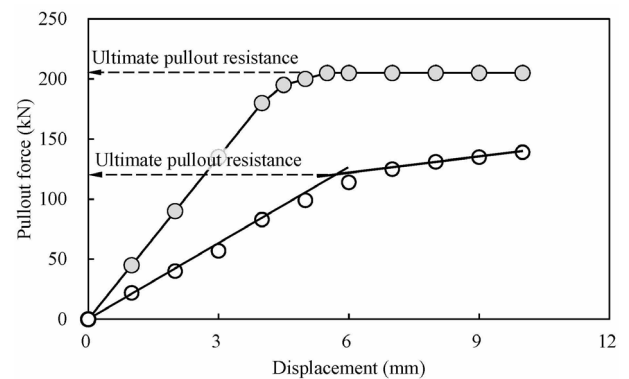


Fig. 3. Estimated ultimate pullout resistance from ultimate pullout test

Table 5. Measured ultimate pullout resistance data

Grout / Soil type		Ultimate pullout resistance (kN)	
		Range	Average
Gravity-grouting	Colluvium soil	84~106	91.67
	Deposit soil	30~240	133.67
	Weathered soil	37~240	143.36
	Weathered rock	37~306	198.36
	Soft rock	180~325	268.75
Pressurized-grouting	Colluvium	82~102	91.00
	Weathered soil	89~250	159.86
	Weathered rock	93~343	218.31
	Soft rock	305~320	312.50

었다(Fig. 4).

Table 6은 국내 인발시험에 의해 산정된 저항편향계수와 NCHRP(Report 701)에서 제안된 쏘일네일링의 인발저항에 대한 저항편향계수를 비교한 것으로 미국의 연구결과보다 저항편향계수와 변동계수가 비교적 높은 것으로 나타났다. 즉, 국내에서는 쏘일네일링의 극한인발저항력을 비교적 보수적으로 예측하고 있지만, 극한인발저항력의 예측과 실측값의 불확실성은 더 큰 것으로 분석되었다.

중력식과 가압식 그라우팅공법 모두 저항편향계수가 1.0 이상으로 실제 극한인발저항력을 보수적으로 예측하고 있는 것으로 분석되었으며, 이는 동일한 예측방법(Table 3)으로 극한인발저항력을 예측할 경우 실제 극한인발저항력은 가압식 그라우팅공법에서 높게 나타난다는 것을 의미하며 한국시설안전공단에서 제시한 주변마찰저항력(Table 4)의 경향과 유사하다.

저항편향계수의 변동계수는 중력식 그라우팅공법보다 가압식 그라우팅공법에서 낮게 산정되었으며, 중력식 그라우팅공법의 불확실성이 크므로 설계 시 예측된

극한인발저항력보다 실제 극한인발저항력이 낮을 가능성이 있음을 의미한다. 따라서 쏘일네일링의 인발저항에 대한 저항계수는 중력식 그라우팅의 저항계수가 가압식 그라우팅보다 낮게 보정될 것으로 예상된다.

## 5.2 저항편향계수의 통계학적 특성

하중저항계수설계법에서 저항계수를 구성하는 하중과 저항의 편향계수는 로그정규분포로 가정하여 유도되었으므로 저항편향계수의 로그정규분포에 적합성을 정규확률지를 이용하는 방법으로 검토하였다. 정규확률지 상에 이론적인 로그정규분포를 실선, 정규분포를 점선으로 Fig. 5에 도시하였으며, 이론적인 확률분포선 주변에 저항편향계수가 군집되어 정규분포 및 로그정규분포 가정을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 이론적인 확률분포와 저항편향계수의 확률분포 값을 비교한 결과 확률분포의 중심부와 꼬리부분을 중심으로 로그정규분포에 더 잘 어울리는 것으로 검토되었다.

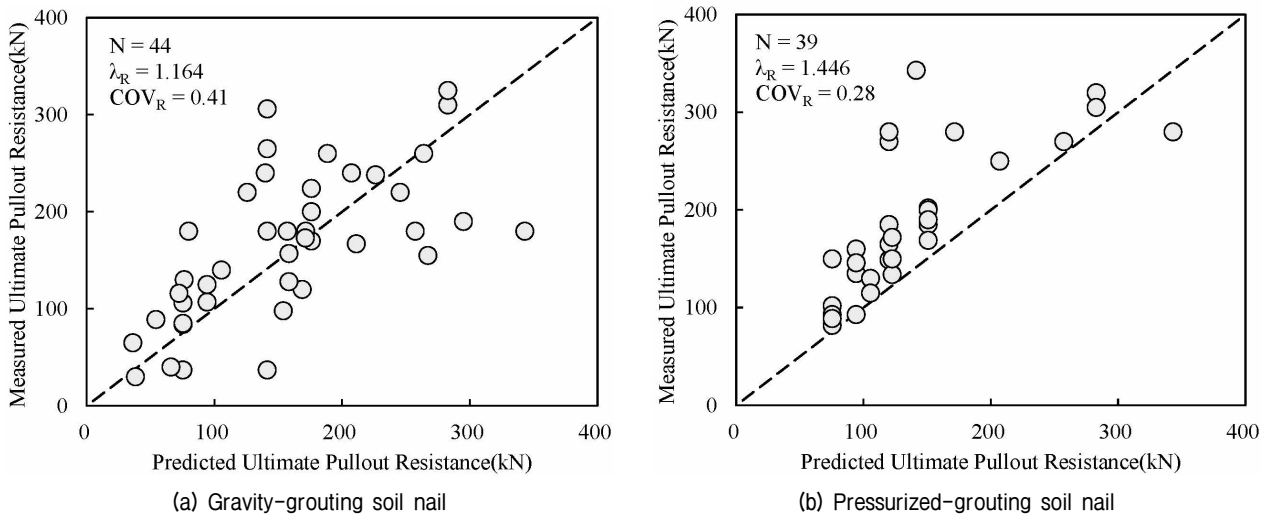
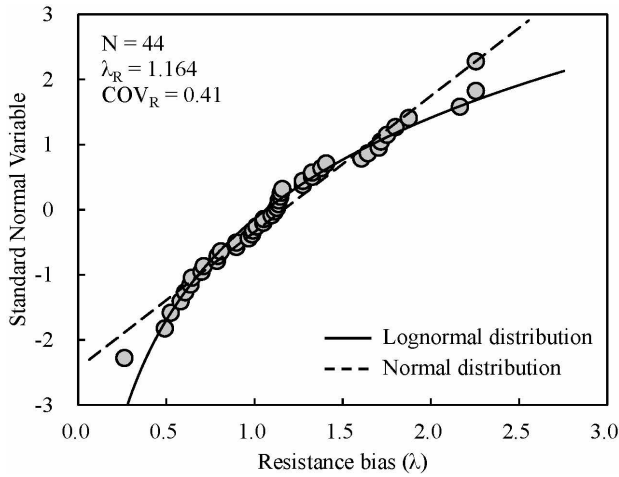


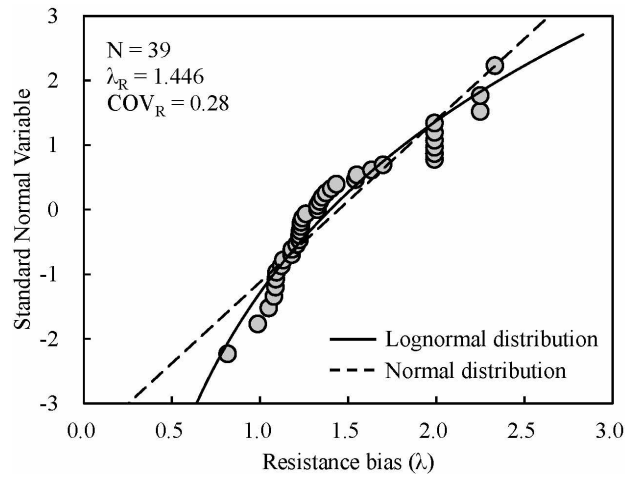
Fig. 4. Resistance bias factor of ultimate pullout resistance

Table 6. Comparison of resistance bias factor on the this study and NCHRP

Study area	Material / Construction method	Number of data	Mean ( $\lambda_R$ )	Standard deviation ( $\sigma_R$ )	Coeff. of variation ( $COV_R$ )
NCHRP	Sand and Sand/Gravel	82	1.050	0.25	0.24
	Clay/Fine-Grained	45	1.033	0.05	0.05
	Rock	26	0.920	0.18	0.19
	All	153	1.050	0.22	0.21
This study	Gravity-grouting	44	1.164	0.48	0.41
	Pressurized-grouting	39	1.446	0.40	0.28



(a) Gravity-grouting soil nail



(b) Pressurized-grouting soil nail

Fig. 5. Standard normal quantile for resistance bias data

## 6. 결론

본 연구에서는 쏘일네일링의 인발저항에 대한 저항계수를 보정하기 위한 연구의 일환으로 국내에서 수행된 인발시험자료를 수집하여 데이터베이스를 구축하고 저항편향계수와 변동계수를 산정하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 쏘일네일링의 인발저항에 대한 저항편향계수는 단위극한주면마찰력을 이용한 표준적인 설계절차에 의해 예측된 극한인발저항력과 국내 인발시험에 의해 실측된 극한인발저항력의 비로 정의하여 산정하였으며, 저항편향계수는 그라우팅공법에 따라  $\lambda_R = 1.144 \sim 1.325$ 로 실제 극한인발저항력을 보수적으로 예측하고 있는 것으로 분석되었다.
- (2) 국내에서 설계 및 시공되는 쏘일네일링의 인발저항력은 미국의 사례보다 비교적 안전측으로 수행되고 있으나, 인발저항에 대한 불확실성은 큰 것으로 나타났다.
- (3) 국내에서 가장 많이 적용되고 있는 가압식 그라우팅공법은 중력식 그라우팅공법에 비해 저항편향계수가 높고, 변동계수는 낮아 동일한 설계절차를 적용할 경우에 가압식 그라우팅공법에 내재된 안전여유가 많으며, 실제 발휘되는 극한인발저항력의 불확실성이 낮으므로 저항계수는 높게 보정될 것으로 판단된다.

## 참고문헌 (References)

1. AASHTO (2002). *LRFD Bridge Design Specifications*, 2nd Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
2. Barker, R. M., Duncan, J. M., Rojiani, K. B., Ooi, P. S. K., Tan, C. K., and Kim, S. G. (1991), *NCHRP Report 343: Manuals for the design of bridge foundations*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC., p.A-27.
3. Byrne, R. J., Cotton, D., Porterfield, J., Wolschlag, C., and Uebliacker, G. (1998), *Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Wall*, FHWA-SA-96-069R, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
4. CLOUTERRE (1993), *Recommandations CLOUTERRE 1991 - Soil Nailing Recommendations 1991*, English Translation, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.
5. Elias, V. and Juran, I. (1988), *Manual of Practice for Soil Nailing*, Preliminary draft, USA DTp, FHA Contract DTFH-61-85-C-00142.
6. Elias, V. and Juran, I. (1991), *Soil Nailing for Stabilization of Highway Slopes and Excavations*, Publication FHWA-RD-89-198, Federal Highway Administration, Washington D.C.
7. FHWA (2001), *Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Highway Bridge Substructures, Reference Manual and Participant Workbook*, NHI Course No. 132068, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
8. Gassler, G. and Gudehus, G. (1981), "Soil Nailing - some Aspect of a New Technique", *Proceedings of Xth ICMSFE*, Stockholm, pp.665-670.
9. Guiloux, A. and Schlosser, F. (1984), "Soilnailing, Practical Application", *Symposium on Soil and Rock Improvement Techniques, Geotextiles, Reinforcement Earth and Modern Piling Methods*, Bangkok.
10. Juran, I., G. Baudrand, K. Farrag, and V. Elias (1990), "Kinematical Limit Analysis for Design of Nailed Structures", *Journal of Geotechnical Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.116, No.1, pp.54-72.
11. KHC (2003), *Guideline of Pullout Test for Slope Reinforcement Anchor and Nail*, Korea Highway Corporation, South Korea, pp.4-19.

12. KISTEC (2014), Construction Slope Reinforcement Anchor and Nail Designs Commentary, Korea Infrastructures Safety Cooperation, South Korea, pp.17-38.
13. Lazarte, C. A., Elias, V., Espinoza, D. R., Paul, P. E., and Sabatini, P. J. (2003), *Geotechnical Engineering Circular No. 7 - Soil Nail Walls*, FHWA-IF-03-017, Federal Highway Administration, Washington, D.C., pp.63-151.
14. Lazarte, C. A. (2011), *NCHRP Report 701: Proposed specifications for LRFD soil-nailing design and construction*, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, DC., p.54.
15. MLTMA (2011a), *Design Standards for Slope in Construction*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, South Korea, pp.41-46.
16. MLTMA (2011b), *Standard Specifications for Slope in Construction*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, South Korea, pp.71-80.
17. Nowak, A. S. (1999), *NCHRP Report 368: Calibration of LRFD Bridge Design Code*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
18. Paikowsky, S. G., Canniff, M. C., Lesny, K., Kisse, A., Amaty, S., and Muganga, R. (2010), *NCHRP Report 651: LRFD design and construction of shallow foundations for highway bridge structures*, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, DC., pp.61-66.
19. Porterfield, J. A., Cotton, D. M., and Byrne, J. (1994), *Soil Nailing Field Inspectors Manual - Soil Nail Walls*, FHWA-SA-93-068, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
20. Schlosser, F. (1983), "Analogies et difference dan le component et le calcul des ourages de soutenelement en terre armee et par clouage du sol", *Sols et Fondations 184*, Annales ITBTP, no.418, pp.8-23.
21. Shen, C. K., Bang, S., and Hermann, L. R. (1981), "Ground Movement Analysis of Earth Support System", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol.107, No.GT12, pp.1609-1624.
22. Stocker, M. F., Korber, G. W., Gassler, G., and Gudehus, G. (1979), "Soil Nailing", *International Conference on Soil Reinforcement: Reinforced Earth and other Techniques*, Paris, pp.469-474.
23. JHPC (2002), *Design and Construction Guidelines for Reinforced Soil Structures*, Japan Highway public Corporation, Japan Road Association.

Received : August 7<sup>th</sup>, 2015

Revised : September 16<sup>th</sup>, 2015

Accepted : September 16<sup>th</sup>, 2015