

연약 점성토 지반에 시공되는 원형 수직구의 히빙 안정성에 대한 수치해석적 연구

강석준¹ · 조계훈^{2*}

¹학생회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정

²정회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수

Numerical study on basal heave stability of a circular vertical shaft constructed in clay

Seok-Jun Kang¹ · Gye-Chun Cho^{2*}

¹Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

²Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

*Corresponding Author : Gye-Chun Cho, gyechun@kaist.edu

Abstract

When vertical shafts are constructed in soft clay with low strength, there is a risk of basal heave, which causes the excavation surface to heave due to the low bearing capacity of the ground against the imbalance of earth pressure at the excavation surface. Methods of deriving a safety factor have been proposed to evaluate the stability against the basal heave. However, there are limitations in that it is difficult to accurately evaluate the heave stability because many assumptions are included in the theoretical derivation. In this study, assuming that a circular vertical shaft is constructed in soft clay, the existing safety factor equation proposed through a theoretical approach was supplemented. Bearing capacity according to the shaft geometry, inhomogeneity of the soil, and the effect of soil plug were considered theoretically and applied in a previous safety factor equation. A three-dimensional numerical analysis was conducted to simulate the occurrence of basal heave and review the supplemented equation through various case studies. Several series of case studies were conducted targeting various factors affecting heave stability. It was verified that the additionally considered characteristics were properly reflected in the supplemented equation. Furthermore, the effects of each factor constituting the safety factor equation were examined using the results of the numerical analysis performed by simulating various cases. It was confirmed that considering the undrained shear strength increment according to depth had the most significant effect on the calculation of the safety factor.

Keywords: Vertical shaft, Basal heave, Safety factor, Numerical analysis, Soil plug

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
24(3)231-245(2022)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2022.24.3.231>

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received February 28, 2022

Revised April 9, 2022

Accepted April 14, 2022



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 © 2022, Korean Tunnelling and Underground Space Association

www.kci.go.kr

초 록

지반강도가 낮은 연약 점성토 지반을 대상으로 수직구가 시공되는 경우, 굴착면에서의 토압 불균형에 대한 지반의 지지력이 낮아 굴착면이 용기하는 히빙이 발생할 위험이 존재한다. 히빙에 대한 안정성을 평가하기 위해 안전율을 계산하는 방법들이 제안되어왔으나, 이론적인 유도 과정에서 많은 가정사항들이 포함되어 정확한 히빙 안정성 평가가 어렵다는 한계를 가진다. 본 연구에서는 선행 연구를 보완하기 위해 원형 수직구가 연약 점성토 지반에 시공되는 경우를 상정하여 굴착 형상에 따른 지반 지지력의 변화, 지반 점성토의 비균질성, 그리고 관내토의 효과에 대한 이론적 접근을 통해 기존 안전율 제안식을 보완하였다. 보완된 식의 검증과 다양한 사례 연구를 통한 히빙 안정성 검토를 위해 원형 수직구 굴착 시 발생하는 굴착면의 히빙을 3차원 수치해석으로 모사하여 안전율을 도출하였다. 수치해석 및 히빙 안전율 제안식들을 이용하여 다양한 인자의 변화에 따른 히빙 안전율의 변화를 검토한 결과, 본 연구에서 추가적으로 보완된 특성이 3차원 안전율 식 내에 적절하게 반영되었음을 확인하였다. 다양한 사례를 모사하여 수행된 수치해석 결과를 이용하여 수식을 구성하는 인자들이 히빙 안전율에 미치는 영향을 도출하였으며, 깊이에 따른 비배수 전단강도 증가의 고려 여부가 안전율 값 산정에 지배적인 영향을 미치는 것을 확인하였다.

주요어: 수직구, 히빙, 안전율, 수치해석, 관내토

1. 서 론

도심지의 인구 밀집으로 인해 지하공간 개발에 대한 수요가 증가하고 있다. 터널과 같은 지하 시설물의 굴착 및 시공을 위해서는 장비의 반출입구와 환기구 역할을 하는 수직구의 시공이 선행되어야 하기 때문에 다양한 지반을 대상으로 하는 수직구 시공에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 수직구는 일반적인 옹벽과 유사하게 굴착된 지하 영역을 주변 지반과 분리하는 기능을 하는 구조물로, 외벽에 작용하는 토압의 크기를 고려하여 구조적 안정성을 확보할 수 있도록 설계된다(Tobar and Meguid, 2010). 수직구가 연약 점성토 지반에 시공되는 경우에는 굴착 심도가 깊어짐에 따라 굴착면에서의 토압 불균형으로 인해 굴착면이 용기하는 히빙이 발생하여 인명 및 장비 피해를 야기할 위험이 존재한다. 따라서 안전하고 효과적인 수직구 시공 설계를 위해서는 구조적 안정성뿐만 아니라 굴착면 히빙 안정성을 평가할 수 있는 방법이 필요하다(Goh et al., 2008).

수직구의 히빙 안정성은 안전율을 기반으로 정량적으로 평가될 수 있다. 히빙에 대한 안전율은 굴착면에서 히빙에 대한 작용응력과 저항응력의 비율로 정의되며, 한계평형법에 기초한 응력 평형 또는 모멘트 평형을 고려하여 히빙 안전율을 이론적으로 유도하는 방법들이 제안되었다(Terzaghi, 1943; Bjerrum and Eide, 1956; JSA, 1988). 이 연구들은 히빙 안정성에 대한 이론적 접근을 위해 균일한 점성토로 구성된 2차원 무한평면 지반에 시공되는 지중연속벽을 대상으로 히빙에 따른 파괴 양상을 가정하였다(Wu et al., 2014). 상황의 간소화를 위해 많은 가정을 포함하는 선행 연구를 보완하기 위해 관내토의 효과(Hashash and Whittle, 1996), 지반의 불균일성(Hsieh et al., 2008), 지반 강도의 이방성(Su et al., 1998) 및 지반과 구조물간 상호 작용의 영향(Ukritchon et al., 2003)을 평가하기 위해 다양한 수치해석적 연구들이 수행되었다. 그러나 이 연구들은 실험적 연구 또는 현장분석을 통해

이론 및 수치해석적 연구 결과를 정량적으로 검증하기보다는 특정 인자의 정성적 효과를 평가하는 것에 집중하였다. Kang et al. (2018a)은 점성토 지반에서 시공된 원형 수직구에서 발생하는 히빙을 원심모형시험으로 모사하여 관내토가 히빙의 발생뿐만 아니라 히빙 발생 시 주변 지반의 거동 또한 억제함을 확인하였으나, 안전율에 대한 관내토 깊이의 효과에 대해서는 고려하지 못하였다. 원형 수직구의 3차원 형상과 관내토의 효과를 이론식 내에 반영하기 위한 수치해석적 연구(Kang et al., 2018b)가 수행되었으나, 굴착 형상에 따른 지반 지지력의 변화와 지반의 비균질성을 고려하지 못하였다는 한계를 가진다.

본 연구에서는 Terzaghi (1943)가 제안한 안전율 유도 방법을 기반으로 제안된 Kang et al. (2018b)의 3차원 안전율 식에 굴착 형상에 따른 지반 지지력 변화와 깊이에 따른 지반 강도의 비균질성에 따른 효과를 추가적으로 반영하였다. 수정된 식의 검증과 식을 구성하는 각 인자의 히빙 안전율에 대한 효과의 평가를 위해 3차원 수치해석을 통한 사례연구를 수행하였다. 각 사례마다 결정되는 매개변수에 따라 변화된 수치해석 모델을 대상으로 강도 감소법을 이용하여 안전율을 도출하였으며, 선행 연구에서 고려되지 않았던 지반 강도의 비균질성 및 관내토의 효과를 포함하여 수직구 굴착 형상과 지반 강도의 변화에 따른 히빙 안전율의 변화 양상을 검토하였다. 또한, 수치해석 모델과 동일한 상황에 대해 선행 연구에서 제안한 2차원 안전율 식과 본 연구에서 수정된 3차원 안전율 식을 이용하여 계산된 안전율 값들과 수치해석 결과를 비교하여 추가적으로 고려된 이론적 접근의 효용성을 평가하였다.

2. 점성토 지반 원형수직구의 히빙 안전율 이론식 보완

본 연구에서는 선행 연구에서 제안된 히빙 안전율 식의 한계를 보완하기 위해 지반의 비균질성, 굴착 형상에 따른 지반 지지력 변화, 관내토의 효과가 추가적으로 반영하였다. 히빙에 대한 안전율 유도 과정은 선행 연구(Terzaghi, 1943; Kang et al., 2018b)의 방법을 이용하였으며, 히빙에 대한 저항력을 구성하는 지반 지지력과 관내토의 효과에 대한 이론적 접근을 통하여 3차원 원형 수직구의 히빙에 대한 안전율 식을 보완하고자 하였다.

2.1 히빙에 따른 지반 파괴 양상

Terzaghi (1943)는 균일한 2차원의 무한평면으로 가정된 점성토 지반에 위치하는 얇은 기초의 하부 지반 지지력 산정 방법(Bearing capacity method)을 활용하여 히빙 발생 시 파괴 양상을 가정하고 지중연속벽의 바닥면에 작용하는 히빙에 대한 작용력과 저항력의 비율로서 안전율을 유도하였다. 점성토의 내부마찰각을 무시할 수 있다고 가정하여 직각 삼각형 형태의 썩기, 원호, 그리고 뿔 수직구 배면 직사각형 형태의 파괴 영역을 설정하였다(Fig. 1(a)). Kang et al. (2018b)은 이러한 파괴 양상을 원뿔과 구로 구성된 3차원 파괴면으로 조정하여(Fig. 1(b)) 안전율 식을 유도하였다. 본 연구에서는 3차원 원형 수직구에서 발생하는 히빙에 대해 선행 연구에서 제안한 파괴 양상 및 안전율 식의 전개 과정을 이용하였으며, 추가적으로 굴착 형상에 따른 지반 지지력, 지반 강도의 불균질성, 그리고 관내토의 효과를 적용하여 수식을 보완하였다.

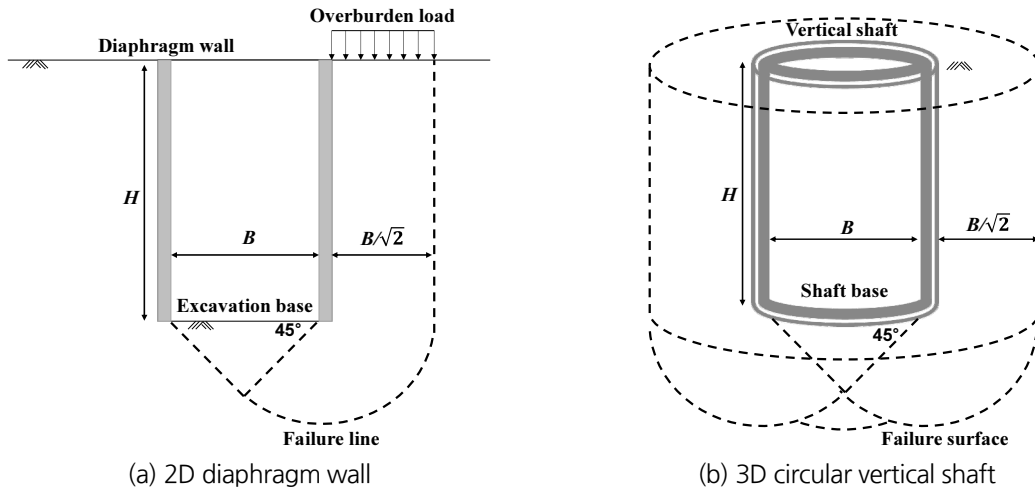


Fig. 1. Failure mechanisms for basal heave

2.2 굴착 형상에 따른 지반 지지력

수직구 굴착면의 지지력은 얇은 기초의 지지력 이론을 이용하여 도출할 수 있다(Terzaghi, 1943; Bjerrum and Eide, 1956). 비배수 조건의 점성토 지반에 대해 마찰각을 무시할 때 정사각형 기초에 대한 지지력 계수(N_c)는 5.7로 계산된다. 다른 형상의 기초의 경우 형상계수(λ_s)를 적용하여 바닥면 형상의 영향을 반영할 수 있으며, 원형 기초에 대해 형상계수는 1.2의 일정한 값으로 제안되었다. 그러나 Cai et al. (2002)은 기초 지반의 지지력이 굴착 형상에 따라 변화함을 확인하였으며, 수직구 굴착 형상에 따라 변화하는 복잡한 파괴 양상으로 인해 이론적인 방법으로 굴착 형상을 고려한 지지력의 변화에 대한 파악이 어렵기 때문에 수치해석적 방법에 기반한 실증적 모델들이 제안되었다(Salgado et al., 2004; Benmoussa et al., 2021). 본 연구에서는 깊이에 따른 원형 기초의 3차원 형상적 특성을 고려한 수치해석적 연구(Salgado et al., 2004)에서 제안된 형상계수를 이용하여 선행 연구에서 상수로 고려되던 지반 지지력 계수(N_c)를 보완하였다. 따라서 굴착면의 지반 지지력(q_u)은 아래와 같이 표현된다.

$$q_u = \lambda_s N_c \cdot c = \left(6.63 + 1.2 \sqrt{\frac{B}{H}} \right) \cdot c \quad (1)$$

여기서, B 는 굴착 직경(m)을, H 는 굴착 심도(m)를, c 는 지반의 비배수 전단강도(Pa)를 의미한다.

2.3 지반 강도의 불균질성

본 연구에서 수직구가 시공되는 지반은 선행 연구와 같이 내부마찰각이 0인 점성토로 간주하였으나, 지반 전체가 균일한 특성을 보인다고 가정하였던 기존 연구들과 달리 깊이에 따른 비배수 전단강도의 변화를 고려하였다.

점성토 지반을 대상으로 수행된 현장 베인 시험 결과(Watabe et al., 2002)에 따르면 비배수 전단강도의 크기는 깊이에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보이며, 아래 식과 같이 표현될 수 있다.

$$c_z = mz + c_0 \quad (2)$$

여기서, c_z 는 깊이 z (m) 지점에서의 비배수 전단강도(Pa)를, m 은 깊이에 따른 비배수 전단강도 증가율(Pa/m)을, c_0 는 지표면에서의 비배수 전단강도(Pa)를 의미한다. 깊이에 따라 증가하는 비배수 전단강도를 Fig. 1(b)에 나타난 수직구 배면 파괴면을 따라 적분함으로써 전단파괴에 대한 저항력을 유도할 수 있다. 수직구 배면 파괴면은 반경이 $(1/2 + 1/\sqrt{2}) \cdot B$ 인 원통형 모양으로 가정되며(Fig. 1(b)), 파괴면을 따라 적분하여 도출된 저항력 $F_{c(out)}$ (N)은 아래 식과 같이 표현된다.

$$F_{c(out)} = \int_0^H c_z dz \cdot \pi(1 + \sqrt{2})B \quad (3)$$

2.4 관내토 효과

수직구 굴착면 하부로 라이닝을 관입시켜 수직구 내부에 관내토를 형성시키는 경우, 히빙의 발생이 억제되는 효과가 있다(Kang et al., 2018a). 히빙 안전율에 대한 선행 연구들은 관내토의 효과로서 관내토 자중의 영향은 반영하였으나, 관내토의 전단파괴에 대한 저항력은 고려하지 않았다(Ukritchon et al., 2003). 본 연구에서는 관내토 설치 시 굴착면 용기에 미치는 영향으로서 자중과 전단강도 모두를 고려함으로써 기존의 식을 보완하였다. 관내토 내부의 파괴 영역을 내부마찰각이 0인 점성토 지반의 파괴 양상으로 가정하면, 전단 파괴에 대한 저항력은 직경이 B 이고 빗변이 관내토 깊이의 $\sqrt{2}$ 배 길이인 원뿔 또는 잘린 원뿔의 옆면을 따라 분포하는 비배수 전단강도의 합으로 나타낼 수 있다(Fig. 2). 관내토에 의해 발생하는 저항력은 관내토 내부에 발생하는 파괴면의 크기와

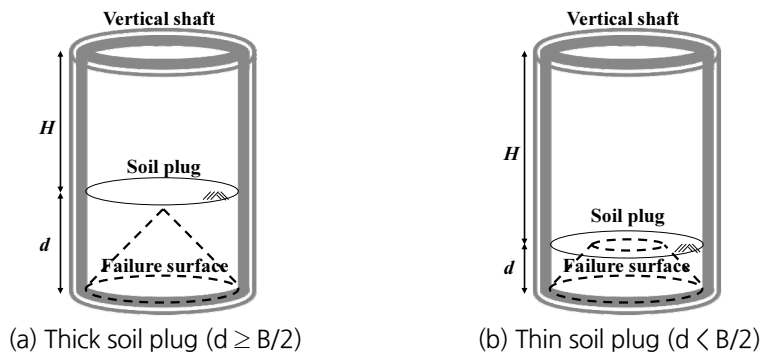


Fig. 2. Assumption for failure shapes in soil plug

깊이에 따라 결정되며, 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$F_{c(plug)} = \int_H^{H+d} c_z dz \cdot \frac{\pi}{\sqrt{2}} B \quad (4)$$

여기서, $F_{c(plug)}$ 는 관내토의 파괴에 대한 저항력(N)을, d 는 관내토의 깊이(m)를 의미한다.

2.4 히빙 안전을 이론식 보완

수직구 히빙 안전율은 굴착면에서 히빙을 발생시키는 방향의 토압으로 인해 발생하는 작용력과 지반 파괴에 대한 저항력의 비율로 정의된다. 작용력(F_d)은 수직방향 굴착에 따라 가정된 파괴면의 상부와 하부에서 작용하는 토압의 차이이며, 심도에 따른 토압에서 관내토의 자중을 뺀 값으로 다음 식과 같이 표현된다.

$$F_d = F_{w(soil)} + F_{surcharge} - F_{w(plug)} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} B(\gamma H + q) \quad (5)$$

여기서, $F_{w(soil)}$ 은 굴착 심도에서 주변 지반의 무게에 의한 작용력(N)을, $F_{surcharge}$ 는 상재하중(N)을, $F_{w(plug)}$ 는 관내토의 자중(N)을, γ 는 흙의 단위중량(N/m^3)을, q 는 단위면적에 작용하는 상재하중(Pa)을 의미한다. 히빙에 대한 저항력은 지반의 지지력과 수직구 배면 및 관내토 내부에 가정된 파괴면에 따라 작용하는 전단 저항력으로 구성된다. 따라서 히빙에 대한 저항력 F_r 은 식 (1)~(4)를 통해 다음 식과 같이 표현된다.

$$F_r = \left(6.63 + 1.2\sqrt{\frac{B}{H}}\right) c_z + \int_0^H c_z dz \cdot \pi(1 + \sqrt{2})B + \int_d^{H+d} c_z dz \cdot \frac{\pi}{\sqrt{2}} B \quad (6)$$

작용력과 저항력의 각 성분들은 원뿔형 파괴면의 면적으로 나누어 파괴면에 작용하는 응력으로 비교된다. 이를 통해 저항응력에 대한 작용응력의 비율로서 안전율(SF)을 다음 식과 같이 유도할 수 있다.

$$SF = \left\{ \left(6.63 + 1.2\sqrt{\frac{B}{H}}\right) c_z + \int_0^{H+d} c_z dz \times \frac{2(2 + \sqrt{2})}{B} + \int_H^{H+d} c_z dz \times \frac{2}{B} \right\} / (\gamma H + q) \quad (7)$$

3. 수치해석을 통한 히빙 안정성 평가 방법

선행 연구를 보완하여 제안된 식 (7)은 여전히 파괴영역의 형상이나 관내토의 효과 등에 대한 간소화 및 가정 사항들을 포함하고 있다. 따라서 제안된 안전율 식의 신뢰성을 평가하기 위해서는 다양한 사례 연구와의 비교를

통한 검증이 필요하다. 그러나 수직구 굴착 시 히빙이 발생하는 순간을 실험적으로 평가하는 것은 매우 어려우며, 지반의 비등방성 등의 불확실성으로 인해 실제 현장 상황을 이론적인 방법으로 제한한 식과 정량적으로 비교하는 것 또한 어렵다. 수직구 시공 과정에서 수집된 현장 측정 데이터를 기반으로 수행된 사례연구(Wu et al., 2014)는 굴착 시공 전체 과정 중 히빙의 발생 여부를 검토하여 안전율 식의 결과와 비교하였으나, 히빙 안정성에 대해 정성적 분석만을 수행하였다. 따라서 본 연구에서는 수직구 굴착 중 히빙이 발생하는 상황을 모사할 수 있는 3차원 수치해석을 통해 안전율을 도출함으로써 다양한 굴착 조건에서 히빙에 대한 안정성을 정량적으로 검토하고자 하였다. 수치해석 결과를 바탕으로 본 연구에서 보완된 안전율 식의 효용성을 검증하였으며, 사례연구를 통해 다양한 인자의 히빙 안전율에 대한 영향을 평가하였다.

3.1 3차원 수치해석 모델

수직구 굴착 시 발생하는 히빙을 모사하고 안전율을 도출하기 위해 점성토 지반에 시공된 3차원 원형 수직구를 모사하여 정적 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 강도감소법을 통한 안전율 계산과 소성 변형을 포함하는 대변형의 모사가 가능한 상용 프로그램인 FLAC3D (ver. 5.0)를 사용하였다.

지반 모델의 경계는 수직구 외벽으로부터 수직구 직경의 3.5배로 설정하여 경계면 효과를 배제시켰으며(Fig. 3(a)), 히빙으로 인한 굴착면의 파괴를 적절히 모사할 수 있는 구성 모델인 Mohr-Coulomb 모델을 사용하여 비배수 조건의 점성토 지반을 모사하였다(Itasca Consulting Group, 2009). 지반 강도 요소인 비배수 전단강도는 깊이 에 따라 선형적으로 증가하도록 식 (2)에 따라 입력하였으며(Fig. 3(b)), 마찰각은 비배수 조건에서의 굴착을 가정하여 0에 가까운 것으로 간주하였다. 밀도, 강성, 푸아송비 등 히빙의 발생과 직접적인 관련이 없는 지반특성은 균일하게 설정하였다. 수치해석 모델에 적용된 지반의 물성은 실험적으로 히빙을 모사한 선행 연구(Kang et al.,

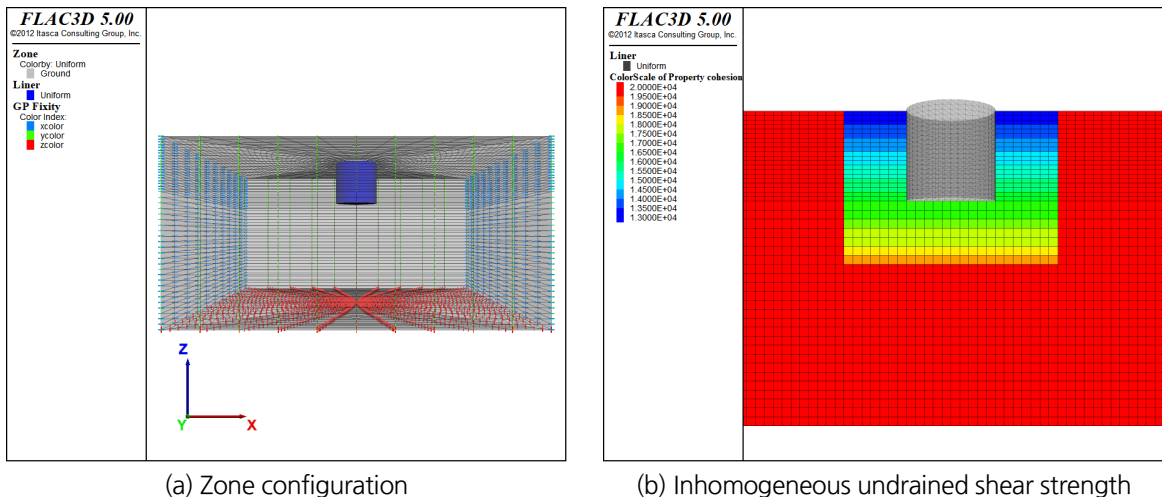


Fig. 3. 3D numerical model for circular vertical shaft in clay

2018a)의 점성토 물성을 근거로 설정되었다(Table 1). 히빙 발생에 의해 형성되는 파괴면 이외의 지반 거동은 히빙에 대한 안정성을 고려할 때 유의미하지 않으며, 안전을 산정에 오류를 야기할 수 있다. 따라서 선행연구(Terzaghi, 1943)에서 가정된 파괴면 형성 범위를 고려하여 수직구로부터 수직구 직경의 $\sqrt{2}$ 배 이상 거리에 위치하는 지반의 비배수 전단강도를 매우 높게 설정함으로써 파괴의 발생을 배제시켰다(Fig. 3(b)).

히빙에 대한 굴착 형상 및 토양 특성의 영향을 검토하는 것에 집중하기 위해 수직구 라이닝의 변형 및 라이닝-점토 접착력의 영향은 무시하였다. 따라서 수직구 라이닝은 주변 지반에 비해 매우 강성이 높고 표면에 고정되도록 모델링하였다. 수직구 라이닝은 굴착된 영역과 지반을 구분하는 역할을 하도록 굴착된 원통형 영역 표면에 shell 요소로 모사하였으며, 수직구의 관입을 통한 관내토의 확보는 굴착면 하부 지반 내부에 관내토 깊이만큼의 shell 요소를 조성하여 수직구 내부의 관내토와 외부 지반을 분리시킴으로써 모사하였다. 수치해석 내 입력된 수직구 라이닝의 물성은 Table 1과 같다.

Table 1. Input properties in the numerical model

Element type		Value
Ground	Constitutive model	Mohr-Coulomb model
	Unit weight (kN/m^3)	19.6
	Undrained shear strength at surface (kPa)	32
	Undrained shear strength increase rate (kPa/m)	0.8
	Friction angle ($^\circ$)	0.1
	Elastic modulus (MPa)	14.0
	Poisson's ratio	0.495
Structure	Constitutive model	Shell-type element
	Elastic modulus (GPa)	30.0
	Poisson's ratio	0.15
	Soil-lining coupling stiffness (GPa)	511.3
	Adhesion (Pa)	0.1

3.2 강도감소법을 이용한 안전을 도출

수치해석 모델의 히빙에 대한 안전율은 강도감소법을 이용하여 계산되었다. 이 방법은 초기 조건의 지반 강도 정수에 강도 감소계수를 적용한 뒤 정해석을 통해 파괴 여부를 판별하기를 반복하여 파괴가 발생하기 위한 감소계수의 최소값을 도출하여 이를 안전율로 도출한다(Itasca Consulting Group, 2009). 반복적으로 적용되는 강도 감소계수 FS_{trial} 는 다음 식들과 같이 적용되어 강도 매개변수인 전단강도(C_{trial}) 및 내부마찰각(Φ_{trial})을 각 정적 해석에 반영한다.

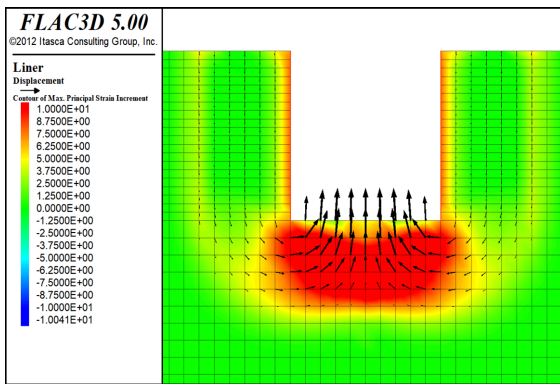
$$c_{trial} = \frac{1}{FS_{trial}} \cdot c_{initial} \quad (8)$$

$$\Phi_{trial} = \arctan\left(\frac{1}{FS_{trial}} \cdot \tan\Phi_{initial}\right) \quad (9)$$

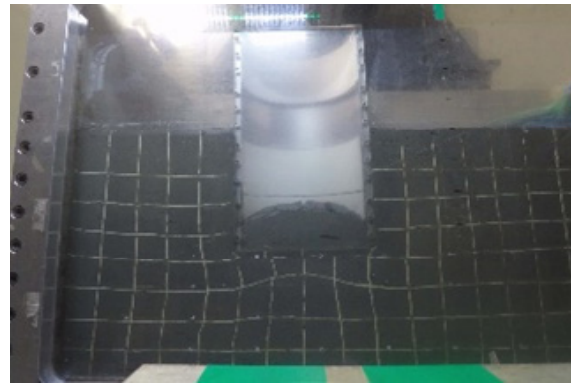
여기서, $c_{initial}$ 은 초기 전단강도를, $\Phi_{initial}$ 은 초기 내부마찰각을 의미한다.

3.3 수치해석을 통한 히빙 발생 및 파괴 양상 검토

수치해석을 통해 히빙을 모사한 결과(Fig. 4(a)), 이론적인 접근 시 가정하였던 바와 같이 히빙 발생으로 인한 파괴면 양상이 원호 형태를 보이는 것을 확인하였다. 이 결과는 원심모형시험을 통해 히빙을 모사한 실험적 연구(Kang et al., 2018a)에서도 공통적으로 확인되었다(Fig. 4(b)). 따라서 내부마찰각이 매우 작은 점성토 지반의 경우, 히빙에 따른 파괴 양상의 이론적 가정이 타당하며, 수치해석을 통한 모사가 히빙 발생 및 주변 지반의 파괴 거동을 적절히 모사함을 확인할 수 있다.



(a) Numerical simulation (this study)



(b) Centrifugal model test (Kang et al., 2018a)

Fig. 4. Basal heave simulation in numerical and experimental methods

4. 히빙 안전율에 대한 사례연구

본 장에서는 3차원 수치해석 모델과 강도감소법을 이용하여 히빙 안전율에 대한 다양한 인자들의 영향을 평가하기 위한 사례연구 결과에 대해 기술하였다. 선행 연구에서 제안한 2차원 히빙 안전율 식(Terzaghi, 1943)과 2장에서 보완한 3차원 안전율 식을 수치해석 결과와 함께 비교하여 각 인자의 히빙에 대한 영향과 추가적으로 고려된 사항들의 타당성을 검토하였다.

4.1 수치해석 수행 사례 설정

수직구 시공 설계에 고려되는 인자 중 히빙 안전율에 영향을 미치는 여러 요인을 대상으로 3장에서 소개된 수치해석 모델을 사용하여 사례연구를 수행하였다. 매개변수로서 분석되는 인자들은 이론적인 배경을 기반으로 제안된 식 (7)을 구성하는 인자들로 선정하였으며, 수직구 히빙 모사를 위해 조성된 수치해석 모델의 물성(Table 1)을 기반으로 Table 2와 같이 해석 케이스를 설정하였다. 수직구 굴착 직경, 굴착 깊이, 지반의 비배수 전단강도, 깊이에 따른 비배수 전단강도 증가율, 지반의 단위중량, 그리고 관내토 깊이에 대해 각 변수가 서로에게 독립적임을 가정하였으며, 각 변수의 변화에 따른 안전율 검토 시, 나머지 인자는 전절에서 히빙 발생을 모사하기 위해 조성한 모델의 조건(Fig. 3, Table 1)과 동일하게 고정시켰다. 한 번의 수치해석 케이스마다 단일 매개변수를 변경하며 각 인자의 안전율에 대한 영향을 검토하였다.

Table 2. Parametric cases for deriving safety factor from numerical simulations

Parameter	Input values for each parametric case					
Shaft depth (m)	2.5	5	10	15	20	25
Shaft diameter (m)	2.5	5	10	15	20	
Undrained shear strength (kPa)	13	22	32	41	51	
Undrained shear strength increasing rate (kPa/m)	0.1	0.4	0.8	1.2	1.6	
Unit weight (kN/m ³)	15.7	17.6	19.6	21.6	23.5	
Soil plug depth (m)	0	1	2	3	4	5

4.2 굴착 형상의 영향

수직구의 굴착 깊이와 직경이 히빙 안전율에 미치는 영향은 Fig. 5와 같다. Fig. 5(a)는 굴착 깊이가 증가함에 따라 굴착면에 작용하는 토압 증가로 인해 안전율이 감소함을 나타내며, 이론식과 수치해석을 통해 도출된 안전

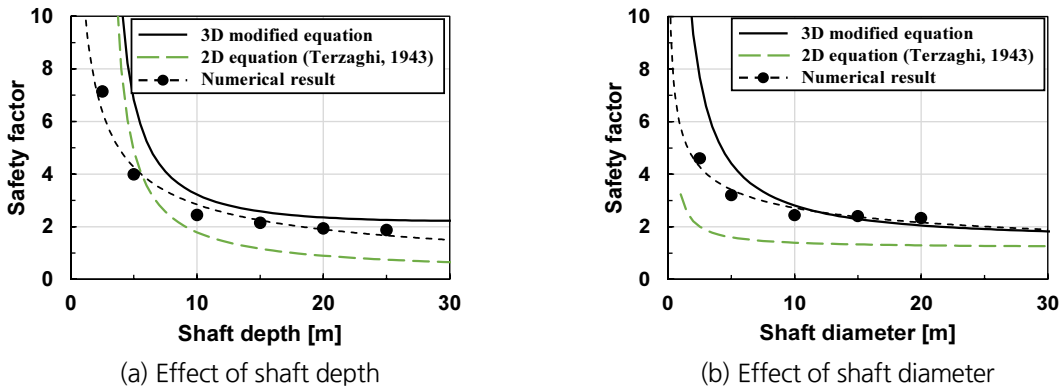


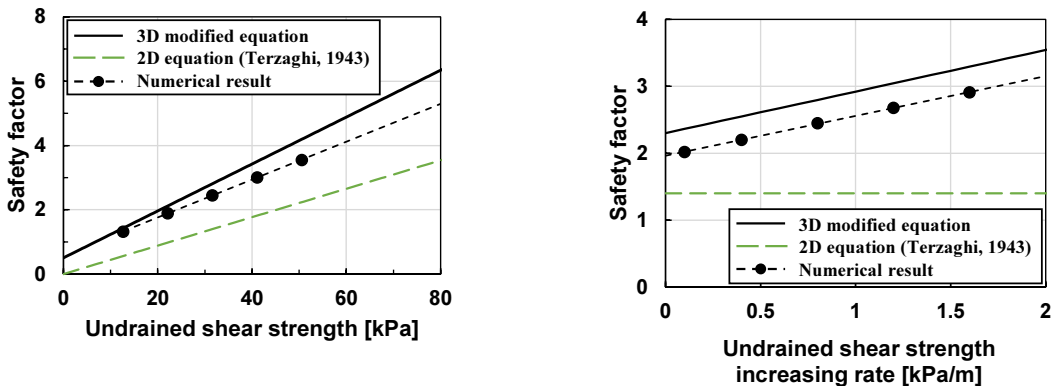
Fig. 5. Safety factor variation according to the shaft geometry

율의 변화 양상이 유사함을 보인다. Fig. 5(b)는 굴착 직경에 따른 안전율의 변화를 나타낸다. 3차원 형상을 고려한 제안식은 Terzaghi의 2차원 안전율 식보다 더 큰 안전율을 도출하였으며 수치해석 결과와 보다 유사한 경향을 보인다.

굴착 형상은 히빙에 따른 파괴 양상과 지지력의 크기에 영향을 미치기 때문에 히빙에 대한 저항력에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 굴착 형상을 나타내는 굴착 직경과 깊이의 비율은 안전율과 깊이 또는 지름의 관계에 영향을 미친다. 본 연구에서 보완된 3차원 안전율 식은 지지력 유도 시 형상계수를 적용하여 굴착 형상의 효과를 보다 적절히 반영하였기 때문에 2차원 식을 사용하여 계산된 결과에 비해 수치해석과 더 유사한 결과를 도출하였을 것으로 예상된다. 그러나, 본 연구에서 활용한 Salgado et al. (2004)의 형상계수 모델은 얇은 원형기초를 대상으로 도출된 연구 결과이기 때문에 원형 수직구 굴착면에서의 지지력 산정에 있어 약간의 불일치가 발생한 것으로 보인다.

4.3 지반 물성의 영향

히빙 안전율 식을 구성하는 인자 중 지반 물성에 해당하는 인자들로는 비배수 전단강도, 깊이에 따른 비배수 전단강도 증가율, 그리고 단위중량이 있다. 지표면에서의 비배수 전단강도와 깊이에 따른 비배수 전단강도 증가율이 안전율에 미치는 영향은 Fig. 6과 같이 나타난다. 안전율은 비배수 전단강도가 증가함에 따라 선형적인 증가 경향을 보였다(Fig. 6(a)). 깊이에 따른 비배수 전단강도의 증가가 반영된 3차원 식과 수치해석 결과들은 서로 유사한 값을 도출하였으며, 일정한 비배수 전단강도를 가정한 2차원 식은 상대적으로 낮은 안전율을 도출하였다. 깊이에 따른 비배수 전단강도 증가율 또한 안전율과 선형적 관계를 보였다. 깊이에 따른 비배수 전단강도의 증가를 고려하지 않는 기존의 2차원 식을 이용해 안전율을 계산할 경우, 비배수 전단강도 증가율이 큰 지반일수록 안전율이 과소평가되기 때문에 히빙 안정성에 대한 예측이 부정확해질 수 있다. 본 연구에서 제안한 3차원 식과 수치해석 결과가 유사함을 통해 깊이에 따른 비배수 전단강도의 증가율이 제안된 식 유도에서 효과적으로 반영



(a) Effect of undrained shear strength

(b) Effect of undrained shear strength increment

Fig. 6. Safety factor variation according to the cohesive characteristics of soil

되었음을 확인할 수 있다.

흙의 단위중량은 수직구 굴착면에 작용하는 토압의 크기를 결정하는 인자로, 단위 중량이 증가할수록 안전율은 감소한다(Fig. 7). 단위중량이 클수록 히빙의 작용력이 증가하며 히빙 안전율 산정 시 저항력을 구성하는 인자들의 영향도를 감소시키면서 비배수 전단강도에 대한 고려 차이로 인해 발생하는 3차원 식과 2차원 식의 안전율 차이가 감소하였다. 따라서 정확한 설계를 위해서는 낮은 단위중량의 지반일수록 저항력에 대한 보다 상세한 고려가 요구될 것으로 보인다.

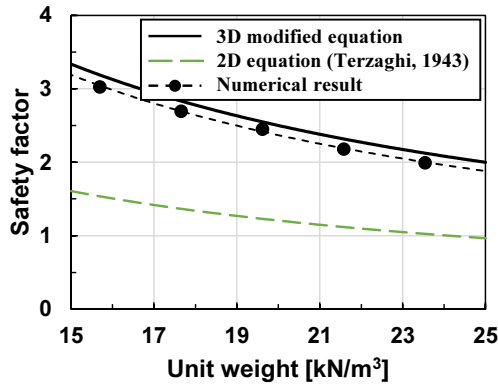


Fig. 7. Effect of unit weight on safety factor

4.4 관내토의 영향

Fig. 8은 관내토 깊이가 안전율에 미치는 영향을 나타낸다. 관내토 깊이가 증가함에 따라 히빙 안전율이 선형적으로 증가하는 경향을 보이며, 본 연구에서 보완된 3차원 식과 수치해석 결과가 유사한 값을 도출함을 확인하였다. 2차원 식으로 계산한 안전율은 타 방법들에 비해 낮은 값을 보였으나, 이 차이를 발생시킨 지배적인 원인은

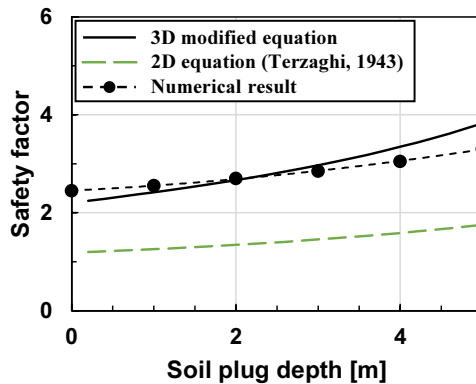


Fig. 8. Effect of soil plug depth on safety factor

깊이에 따른 비배수 전단강도 증가에 대한 고려 여부인 것으로 보이며, 관내토 깊이에 따른 차이는 상대적으로 미미하였다. 따라서 관내토의 자중뿐만 아니라 지지력에 대해 추가적으로 고려하여 식을 보완하는 것에 대한 방법론은 추후 보다 상세한 고려를 포함하는 연구를 통해 검토되어야 할 것으로 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 점성토 지반에 시공된 원형 수직구 굴착 시 히빙 발생에 대한 안정성을 평가하기 위한 방법으로 제안된 기존 안전율 식의 한계를 보완하고자 지반 전단강도의 불균일성, 굴착 형상에 따른 지반 지지력의 변화, 그리고 관내토 깊이의 영향을 추가적으로 적용하였다. 보완된 식의 검증과 안전율 식 구성인자들의 히빙 안정성에 대한 영향 검토를 위하여 3차원 수치해석을 통해 히빙을 모사하였으며, 안전율 식을 구성하는 인자들을 대상으로 하는 사례연구를 수행하였다. 수직구의 굴착 형상, 지반의 물성, 그리고 관내토의 깊이를 변화시키며 수치 해석 모델을 조성하여 각 경우에 대한 안전율을 도출하였으며, 선행 연구에서 제안된 2차원 안전율 식과 본 연구에서 보완된 3차원 안전율 식을 이용하여 수치 모델과 동일한 상황에 대해 계산된 안전율 값들을 비교하였다. 본 연구에서 도출된 결과에 의해 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

1. 굴착 형상에 따른 안전율의 변화 검토 결과, 굴착 심도와 굴착 직경은 독립적인 영향 인자로서 히빙 안전율 변화에 작용하기보다 심도와 직경간 비율에 따라 다른 영향도를 보인다. 원형 기초를 기반으로 제안된 형상계수 모델을 이용하여 지반 지지력 인자를 보완하는 것이 오류를 야기할 수 있으며, 정확한 안전율 산정을 위해서는 원형 수직구를 대상으로 굴착 형상과 지지력의 관계 분석을 통해 도출된 원형 수직구용 형상계수를 반영하여야 한다.
2. 깊이에 따른 비배수 전단강도의 증가 특성을 고려함에 따라 증가되는 안전율의 크기가 타 인자의 영향도에 비해 지배적이다. 해당 특성을 고려하지 않은 선행 연구의 제안식을 사용하여 히빙 안정성 예측 시 실제보다 낮은 안전율을 예측할 수 있을 것으로 예상된다.
3. 흙의 단위중량이 클수록 히빙의 작용력이 증가하며 히빙 안전율 산정 시 저항력을 구성하는 인자들의 영향도를 감소시킨다. 따라서 정확한 설계를 위해서는 낮은 단위중량의 지반일수록 저항력에 대한 보다 상세한 고려가 요구될 것으로 보인다.
4. 관내토 깊이의 히빙에 대한 영향 분석 결과, 관내토 자중에 추가적으로 고려된 관내토의 지지력은 타 인자에 비해 적은 영향을 보였다. 관내토 지지력에 대한 명확한 평가를 위해서는 보다 정밀한 분석을 통한 관내토 깊이의 효과 규명이 필요하다.
5. 본 연구에서 보완된 히빙 안전율 식은 선행 연구에 비해 현실적인 고찰을 통해 제안되었다. 지반 지지력에 대한 3차원 형상적 특성, 지반 불균일성, 관내토 효과 등을 추가적으로 고려하였기 때문에 수직구 굴착 시 예측되는 안전율의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 수행된 미래 지하도시 연구사업의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

저자 기여도

강석준은 데이터 수집, 데이터 해석, 데이터 분석, 원고 작성을 하였고, 조계춘은 연구 개념 및 설계, 원고 검토를 하였다.

References

1. Benmoussa, S., Benmebarek, S., Benmebarek, N. (2021), "Bearing capacity factor of circular footings on two-layered clay soils", *Civil Engineering Journal*, Vol. 7, No. 5, pp. 775-785.
2. Bjerrum, L., Eide, O. (1956), "Stability of strutted excavations in clay", *Geotechnique*, Vol. 6, No. 1, pp. 32-47.
3. Cai, F., Ugai, K., Hagiwara, T. (2002), "Base stability of circular excavations in soft clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128, No. 8, pp. 702-706.
4. Goh, A.T.C., Kulhawy, F.H., Wong, K.S. (2008), "Reliability assessment of basal-heave stability for braced excavations in clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 134, No. 2, pp. 145-153.
5. Hashash, Y.M., Whittle, A.J. (1996), "Ground movement prediction for deep excavations in soft clay", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 6, pp. 474-486.
6. Hsieh, P.G., Ou, C.Y., Liu, H.T. (2008), "Basal heave analysis of excavations with consideration of anisotropic undrained strength of clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 45, No. 6, pp. 788-799.
7. Itasca Consulting Group (2009), *FLAC 3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 dimensions*, user manual (version 5.0), Minneapolis.
8. JSA (1988), *Guidelines of design and construction of deep excavation*, Japan Society of Architecture, Tokyo.
9. Kang, S.J., Cho, G.C., Kim, J.T., Cha, Y., Hong, E.S. (2018a), "An experimental study for the effect of soil plug on the basal heave stability for the vertical shaft excavation in clay", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 20, No. 1, pp. 183-195.
10. Kang, S.J., Cho, G.C., Kim, J.T., Kim, H.S., Hong, E.S. (2018b), "A study for calculating factor of safety against basal heave during circular vertical shaft excavation in clay considering 3D shape", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 20, No. 4, pp. 717-729.
11. Salgado, R., Lyamin, A.V., Sloan, S.W., Yu, H.S. (2004), "Two-and three-dimensional bearing capacity of foundations in clay", *Géotechnique*, Vol. 54, No. 5, pp. 297-306.

12. Su, S.F., Liao, H.J., Lin, Y.H. (1998), "Base stability of deep excavation in anisotropic soft clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 9, pp. 809-819.
13. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical soil mechanics*, John Wiley & Sons, New York, pp. 118-143.
14. Tobar, T., Meguid, M.A. (2010), "Comparative evaluation of methods to determine the earth pressure distribution on cylindrical shafts: a review", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 25, No. 2, pp. 188-197.
15. Ukritchon, B., Whittle, A.J., Sloan, S.W. (2003), "Undrained stability of braced excavations in clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, No. 8, pp. 738-755.
16. Watabe, Y., Tsuchida, T., Adachi, K. (2002), "Undrained shear strength of Pleistocene clay in Osaka Bay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128, No. 3, pp. 216-226.
17. Wu, S.H., Ou, C.Y., Ching, J. (2014), "Calibration of model uncertainties in base heave stability for wide excavations in clay", *Soils and Foundations*, Vol. 54, No. 6, pp. 1159-1174.