

# 3차원 형상을 고려한 점성토 지반 원형 수직구 굴착 중 히빙에 대한 안전율 산정을 위한 연구

강석준<sup>1</sup> · 조계훈<sup>2</sup> · 김정태<sup>3</sup> · 김한성<sup>4</sup> · 홍은수<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>비회원, KAIST 건설 및 환경공학과 석사과정

<sup>2</sup>정회원, KAIST 건설 및 환경공학과 교수

<sup>3</sup>비회원, KAIST 건설 및 환경공학과 박사과정

<sup>4</sup>비회원, 주식회사 에이치비씨 대표이사

<sup>5</sup>비회원, KAIST 건설 및 환경공학과 연구부교수

## A study for calculating factor of safety against basal heave during circular vertical shaft excavation in clay considering 3D shape

Seok-Jun Kang<sup>1</sup> · Gye-Chun Cho<sup>2</sup> · Jung-Tae Kim<sup>3</sup> · Han-Sung Kim<sup>4</sup> · Eun-Soo Hong<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Master's Course, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST

<sup>2</sup>Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST

<sup>3</sup>Ph.D. Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST

<sup>4</sup>President, HBC Inc.

<sup>5</sup>Research Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST

\*Corresponding Author : Eun-Soo Hong, neshong@kaist.ac.kr

### Abstract

Considering the stability of the ground in the process of excavation design is essential because there is a risk of basal heave due to the load of the surrounding ground during the vertical excavation. However, calculation of the factor of safety for basal heave should be performed with two-dimensional equation, and the equation cannot reflect three-dimensional shape of vertical excavation. In this study, an equation for factor of safety for the basal heave was proposed with considering the effect of three-dimensional shape. It is confirmed that the equation can more appropriately reflect the basal heave stability 3D circular vertical excavation than the existing equation. Using the equation proposed in this study, it is possible to derive an appropriate factor of safety according to the 3D excavation shape during the circular vertical shaft excavation.

**Keywords:** Circular vertical shaft, Basal heave, Factor of safety, 3D effect, Numerical analysis

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association  
20(4)717-729(2018)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.4.717>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received June 5, 2018

Revised June 21, 2018

Accepted June 26, 2018



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 © 2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

[www.kci.go.kr](http://www.kci.go.kr)

## 초 록

연약지반 수직구 굴착 중에는 주변 지반의 하중으로 인한 굴착면의 히빙이 발생할 위험이 있기 때문에 굴착 설계 시 지반 안정성에 대한 고려가 필수적이다. 그러나 연약지반 히빙 안전율 산정은 2차원 산정식으로 수행하여야 하므로 수직구의 3차원 형상을 고려하지 못하는 문제가 있다. 본 연구에서는 수직구 굴착 시 히빙 안전율에 대한 선행 연구를 보완하여 3차원 효과를 반영하는 히빙에 대한 안전율 식을 제안하였으며, 해당 식이 기존 식에 비해 3차원 원형 수직구 굴착에서의 히빙 안정성을 더 적절하게 반영할 수 있음을 확인하였다.

**주요어:** 원형수직구, 히빙, 안전율, 3차원 효과, 수치해석

## 1. 서론

전력구, 통신구, 지하철과 같은 터널의 건설에 필수적인 수직구 굴착은 가시설을 선행 시공한 후 진행되며 이때 지하수위 저감, 가시설 변형 또는 지하수 유출로 인한 지반 침하(Aksoy, 2008) 등 공학적 문제가 발생할 가능성이 있다. 더불어 연약지반에서 중국 상하이의 기초 굴착 사례(Tan and Wang, 2013)와 공동구 연구단에서 연구중인 수직구 외주면 선행굴착 등(Center for Utility Tunnel, 2015; Hong et al., 2016)에서와 같이 지지층까지 선행 시공된 가설구조물 없이 톱다운(top-down)으로 구조물을 시공하며 지반을 굴착하는 경우 굴착면이 용기하는 히빙 현상이 발생할 가능성이 크므로 이에 대한 고려가 반드시 추가되어야 한다.

흙막이, 널말뚝 등의 히빙 안정성 검토는 주로 Terzaghi and Peck (1948)이나 Bjerrum and Eide (1956) 등이 제시한 히빙 안전율 산정식을 활용하여 수행하며 이러한 산정식은 2차원 한계평형 개념을 바탕으로 제시되었다. 그러나 선행 시공된 가설구조물이 없는 톱다운 수직구 시공의 경우 기존의 안전율 산정식에 의한 히빙 검토는 아칭현상 등 3차원적 거동을 충분히 반영하지 못하므로 안전율을 과소평가할 가능성이 크다. 수직구 굴착과 관련된 이전의 연구는 주로 수직구 외벽에 작용하는 토압의 분포 특성(Kim et al., 2009; Kim et al., 2012; Shin et al., 2005)과 그로 인한 벽체 변형(Shin and Sagong, 2007), 그리고 그것을 고려한 원형수직터널 설계 방법(Shin et al., 2010) 등에 대한 연구가 대부분이며, 연약지반을 대상으로 하는 수직구 굴착 중 지반 안정성에 대한 문제를 고려하는 연구는 상대적으로 부족하다. 지금까지 선행 시공된 가설구조물이 없이 수직구를 톱다운으로 시공하며 그 내부를 굴착하는 방법은 지반이 매우 단단한 경우 일부 수행 되었으며 연약지반을 대상으로 하는 경우는 거의 없어 히빙 안정성에 대한 연구가 거의 이루어지지 않았다. 지반 안정성에 대한 이전 연구에서는 터널 완공 후 지하수 침투에 대한 문제를 고려하였으나(Kim et al., 2011) 터널 시공 중 발생하는 문제에 대한 고려가 부족하다. 그러나 우리나라 서남부 지역과 같이 연약지반에서 지반을 굴착하며 수직구, 우물통 등을 톱다운 시공이나 압입을 하는 경우 설계단계에서 아칭현상 등 3차원 효과를 고려하는 히빙 안정성을 반드시 확인 하여야 한다.

본 연구의 목적은 설계단계에서 3차원 효과를 고려하는 히빙 안정성 검토를 할 수 있도록 3차원 원형 수직구에 적용이 가능한 안전성 검토 방법을 제안하는 것이다. 3차원 수치해석을 수행하여 점성토 지반에서 수직구 굴착에

따른 지반의 안전을 변화를 분석하였으며, 선행 연구에서 유도된 점성토 지반에서의 2차원 히빙 안전을 산정 식을 원형 수직구의 형상적 특성을 고려한 3차원 히빙 안전을 산정 식으로 개선하여 제안하였다. 비록 수치해석을 바탕으로 수직구의 안정성을 검토하였으나 전체적인 안전율의 변화 양상은 실제 원형 수직구 굴착과 유사할 것으로 사료되며 추후 다른 연구에도 충분히 기여할 수 있을 것으로 보인다.

## 2. 2차원 히빙 안전을 산정식 현황

### 2.1 한계평형법 - 응력 평형

히빙 안전을 산정식은 주로 한계평형법을 따라 파괴면을 직선, 원호, 대수나선 등으로 가정하여, Coulomb의 파괴기준에 따라 파괴가 발생하는 상황을 모사하여 파괴를 일으키는 작용력(driving force)과 지반의 저항력(resisting force)사이의 비율로 안전율을 정의하였다. 한계평형법을 이용하여 히빙 안전을 산정식을 유도한 가장 대표적인 연구는 Terzaghi and Peck (1948)으로, 균일한 점성토 지반에서 굴착 폭의  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  배의 반지름을 가지는 원호 모양의 파괴면을 가정하였다. 또한 벽체의 변형이나 벽체와 지반 사이의 마찰은 존재하지 않는다는 가정을 통해 히빙에 대한 지반 지지력과 작용력만을 고려하였다. 지반의 지지력으로는 말뚝기초의 지지력 상수와 흙막이의 폭, 그리고 흙의 점착력을 곱하여 표현하였으며, 히빙을 발생시키는 힘으로는 주변 지반의 하중과 상재하중을 고려하였다(식(1)). Fig. 1은 식의 유도 과정에서 가정된 흙막이의 시공 모습에 대한 개념도이다. 이 산정식은 2차원 흙막이 시공에 대한 고려를 통해 도출되었기 때문에 3차원 수직구 굴착에 대해 적용하기에는 어려움이 있다. 여기서  $c$ 는 점착력 $[t/m^2]$ ,  $\gamma$ 는 단위 중량 $[t/m^3]$ ,  $H$ 는 굴착 깊이 $[m]$ ,  $B$ 는 굴착 직경 $[m]$ , 그리고  $q$ 는 상재 하중 $[t/m^2]$ 을 의미한다.

$$F.S. = \frac{5.7c}{\gamma H - \frac{\sqrt{2}cH}{B} + q} \quad (1)$$

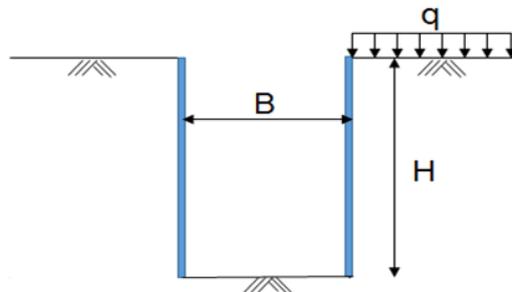


Fig. 1. Schematic diagram for derivation (Terzaghi and Peck, 1948)

## 2.2 한계평형법 - 모멘트 평형

Bjerrum and Eide (1956)은 균일한 점토질 지반에서 지지대(strut) 유무에 따른 중심지점을 설정하고, 그 지점을 기준으로 하여 벽체의 회전 모멘트를 계산하였으며, 지반을 미소 토체 조각으로 분할하여 각 조각이 가지는 모멘트를 적분하는 과정으로 안전율 산정식을 유도하였다(Fig. 2, 식 (2.1), 식 (2.2)). 여기서  $c$ 는 점착력 $[t/m^2]$ ,  $\gamma$ 는 단위 중량 $[t/m^3]$ ,  $H$ 는 굴착 깊이 $[m]$ ,  $B$ 는 굴착 직경 $[m]$ ,  $\alpha$ 는 지지대와 굴착면 사이의 각도 $[rad]$ , 그리고  $q$ 는 상재 하중 $[t/m^2]$ 을 의미한다. Fig. 2에서  $s_u$ 는 파괴면을 따라 형성되는 지반의 점착력,  $H_s$ 는 지표면에서 지지대까지의 거리,  $H_e$ 는 지표면에서 굴착면까지의 거리,  $H_d$ 는 벽체가 굴착면 하부로 관입된 깊이,  $d\theta$ 는 미소토체의 중심각,  $r$ 은 파괴원의 반지름,  $W$ 는 주변 지반의 하중을 의미한다. 이 산정식 또한 2차원 사례만을 고려할 수 있으며, 3차원 형상이나 아칭 효과에 대한 고려는 반영되지 않았다.

$$F.S. = \frac{2\pi c}{\gamma H + q} \text{ (with strut)} \tag{2.1}$$

$$F.S. = \frac{(\pi + 2\alpha)c}{\gamma H + q} \text{ (without strut)} \tag{2.2}$$

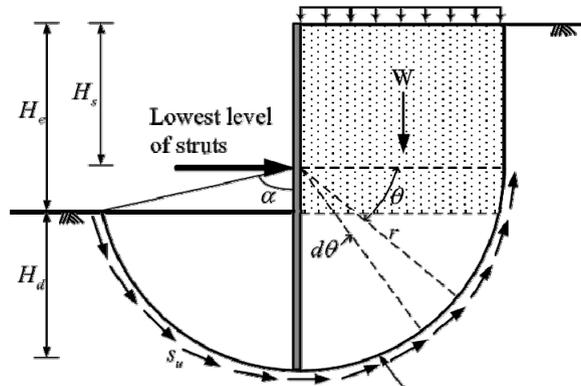


Fig. 2. Schematic diagram for derivation (Bjerrum and Eide, 1956)

## 3. 3차원 히빙 안전율 산정식 제안

### 3.1 3차원 형상의 고려

선행 연구의 한계점을 극복하기 위해 수직구 굴착과 같은 3차원 형상에 대한 효과를 적절히 반영할 수 있도록 기존 식을 보완하는 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 현재까지도 일부 수직 굴착 공사에서 설계에 사용되고 있는 Terzaghi and Peck (1948)이 제시한 식 (1)을 바탕으로 하였다. 이 식은 2차원 형태만 고려 가능하고 굴착 형

상에 따른 지반 지지력(bearing capacity)의 변화를 고려하지 못한다는 한계가 있지만 굴착면의 모양에 따른 지반 지지력 산정이 식의 유도 과정에 포함되어 있기 때문에 Bjerrum and Eide (1956)에 비해 3차원 형상에 대한 적용이 용이하다.

Fig. 3에서와 같이 히빙을 유발하는 작용력으로는 외부 상재하중과 주변 지반의 무게가 있다. 지반의 지지력은 굴착 폭과 지반 강도 정수인 점착력으로 결정되며, 굴착면의 모양에 따라 다른 지반 지지력 상수를 적용한다.

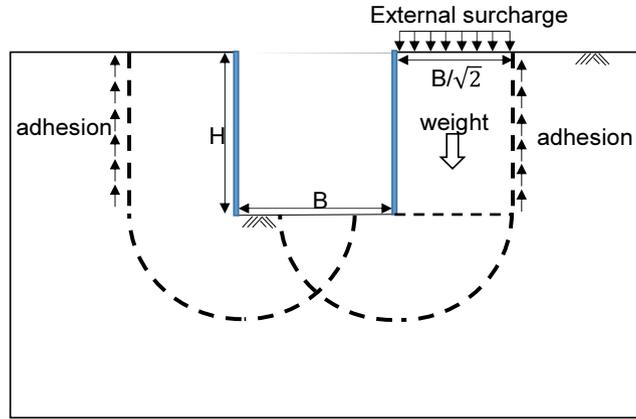


Fig. 3. Conceptual diagram of driving force and resisting force (Terzaghi and Peck, 1948)

본 연구에서는 3차원적인 고려를 위해 굴착면과 주변 지반을 미소 토체로 분할하였다(Fig. 4). 히빙에 영향을 미치는 주변 지반의 범위는 수직구 벽체로부터 내경(B)의  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  배 떨어진 위치까지이며, 그에 따른 주변 지반의 무게, 상재하중(q), 점착력(c)을 고려하면 기존 식에서 적용된 요소들이 Table 1과 같이 나타낼 수 있다. 지반 지지력은 굴착의 깊이나 내경에 따라 달라지기 때문에 3차원 수치해석을 통해 형상비(H/B)에 따른 변화를 분석하였다. 3차원 원형 수직구 굴착의 형상적 특성을 반영하는 히빙에 대한 작용력  $F_d$  (driving force)와 저항력  $F_r$  (resisting force)은 미소 토체를 고려했을 때 각각 식 (3), 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 c는 점착력[t/m<sup>2</sup>],  $\gamma$ 는 단위 중량[t/m<sup>3</sup>], H는 굴착 깊이[m], B는 굴착 직경[m], q는 상재 하중[t/m<sup>2</sup>],  $N_c$ 는 지반 지지력(bearing capacity), 그리고  $d\theta$ 는 미소 토체의 중심각을 의미한다.

$$F_d = \gamma H \left[ \left( \frac{B}{\sqrt{2}} + \frac{B}{2} \right)^2 - \left( \frac{B}{\sqrt{2}} \right)^2 \right] d\theta + q \left[ \left( \frac{B}{\sqrt{2}} + \frac{B}{2} \right)^2 - \left( \frac{B}{\sqrt{2}} \right)^2 \right] d\theta - cH \left( \frac{B}{\sqrt{2}} \right) d\theta \quad (3)$$

$$F_r = N_c \left[ \left( \frac{B}{\sqrt{2}} - \frac{B}{2} \right)^2 - \left( \frac{B}{2} \right)^2 \right] d\theta \quad (4)$$

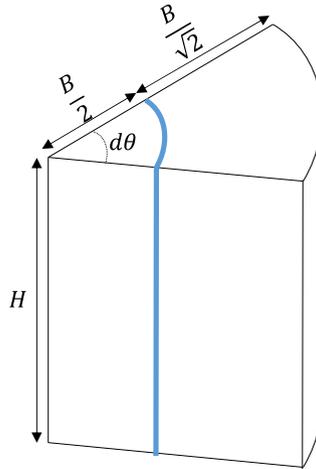


Fig. 4. Conceptual diagram for considering 3D geometry

Table 1. Modified elements in factor of safety equation

	Conventional equation (2D)	Proposed equation (3D)
Soil body weight	$\gamma H \frac{B}{\sqrt{2}}$	$\gamma H \left[ \left( \frac{B}{\sqrt{2}} + \frac{B}{2} \right)^2 - \left( \frac{B}{\sqrt{2}} \right)^2 \right] d\theta$
Resisting force due to cohesion of soil	$cH$	$cH \left( \frac{B}{\sqrt{2}} \right) d\theta$
External surcharge	$q \frac{B}{\sqrt{2}}$	$q \left[ \left( \frac{B}{\sqrt{2}} + \frac{B}{2} \right)^2 - \left( \frac{B}{\sqrt{2}} \right)^2 \right] d\theta$
Bearing capacity	$5.7c$	$N_c$
Failure surface	A line with length of $\frac{B}{\sqrt{2}}$	A plane with area of $\left[ \left( \frac{B}{\sqrt{2}} + \frac{B}{2} \right)^2 - \left( \frac{B}{\sqrt{2}} \right)^2 \right] d\theta$

식 (3)과 식 (4)를 바탕으로 안전율 산정식을 구할 수 있으며( $F.S. = \frac{F_r}{F_d}$ ), Terzaghi and Peck (1948)에서 제안한 2차원 히빙 안전율 식의 한계점을 보완하기 위해 3차원 형상적 특성을 고려한 3차원 원형수직구 굴착 시 3차원 형상을 고려하는 히빙에 대한 안전율 산정식을 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 히빙에 대한 작용력과 지지력에 대해 변형된 세부 요소는 Table 1에 제시하였다. 여기서  $c$ 는 점착력[t/m<sup>2</sup>],  $\gamma$ 는 단위 중량[t/m<sup>3</sup>],  $H$ 는 굴착 깊이[m],  $B$ 는 굴착 직경[m],  $q$ 는 상재 하중[t/m<sup>2</sup>], 그리고  $N_c$ 는 지반 지지력(bearing capacity)을 의미한다.

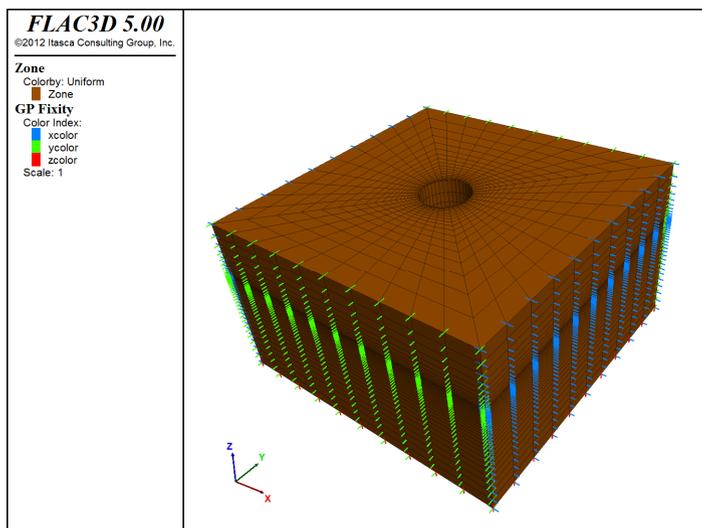
$$F.S. = \frac{1.07 N_c}{\gamma H - \frac{0.59cH}{B} + q} \quad (5)$$

### 3.2 지반지지력 $N_c$ 의 고려

단위 면적에 따른 지반 지지력은 점착력에 비례하며 굴착의 형상에 따라 달라진다. 기존 2차원 식은 상수(5.7)와 점착력의 곱으로 지반 지지력을 정의하였기 때문에 굴착 형상의 변화를 고려하지 못하였다는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 통하여 3차원 효과가 반영되는 지반 지지력  $N_c$ 를 산정하고자 하였다. 수치해석은 3차원 수치해석 프로그램인 FLAC 3D를 이용하여 연구를 수행하였다. FLAC 3D에서 안전율 도출을 위해 사용하는 방법은 강도감소법으로, 지반의 강도 정수인 비배수 전단강도와 마찰각을 일정 비율로 낮추면서 셀간의 미분방정식을 연산하고 수치해석 모델이 소성변형을 보일 때 파괴되었다고 가정하여 안전율을 정의한다. FLAC 3D에서 안전율을 계산하기 위해 진행되는 과정은 Table 2와 같다. 수치해석 모델링은 일반적인 점성토 지반을 대상으로 하는 원형 수직구 굴착 상황을 모사하도록 설계되었다. 경계 효과를 무시하기 위해 수직구 굴착 지점으로 부터 경계까지의 거리를 내경의 6배 이상으로 선정하였으며, 경계조건으로는 경계면의 수직 방향만을 고정하였다(Fig. 5). 효과 수치해석에 사용된 지반 특성치는 Table 3과 같다.

**Table 2.** Process of numerical analysis

Steps for numerical analysis
1. Formation of zones for initial ground / Entering properties
2. Application of gravity / Equilibrium reached
3. Simulation of vertical excavation
4. Installation of the lining as supports
5. Calculation of differential equations to find the factor of safety



**Fig. 5.** Numerical modeling

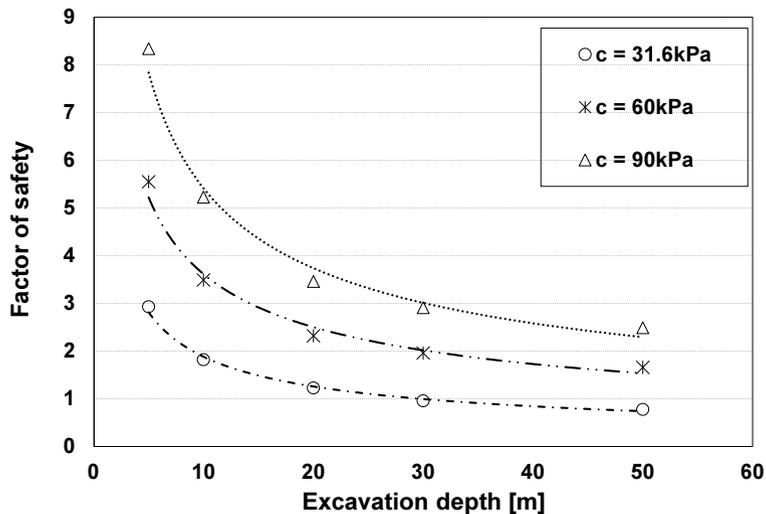
**Table 3.** Input values in numerical modeling

Numerical model	Mohr-Coulomb model
Shear modulus [Mpa]	0.5
Bulk modulus [MPa]	1.1
Poisson's ratio	0.3
Friction angle [degree]	0.1
Density [ton/m <sup>3</sup> ]	2.0

3차원 수치해석 프로그램을 이용하여 지반 지지력의 변화 양상에 대해 분석하기 위해 지반 지지력에 영향을 미치는 주요 인자인 점착력(c), 굴착 깊이(H), 그리고 굴착 반경(B)을 매개변수로 선정, 수치해석을 수행하였다. 각 매개변수는 Table 4에 나타난 값으로 입력되었다. 수치해석 결과 도출된 안전율은 굴착 깊이의 증가에 따라 감소하였으며, 점착력이 높을수록, 굴착 반경 작을수록 더 큰 안전율 분포가 확인되었다(Fig. 6, Fig. 7).

**Table 4.** Input values for parametric study

Soil properties		Excavation shape			
Cohesion, c [kPa]	31.6	Excavation depth, H [m]	5	Excavation diameter, B [m]	5
	60.0		10		10
	90.0		20		20
30			20		
		50	20		



**Fig. 6.** Factor of safety variation with increasing depth - effect of cohesion (B = 10 m)

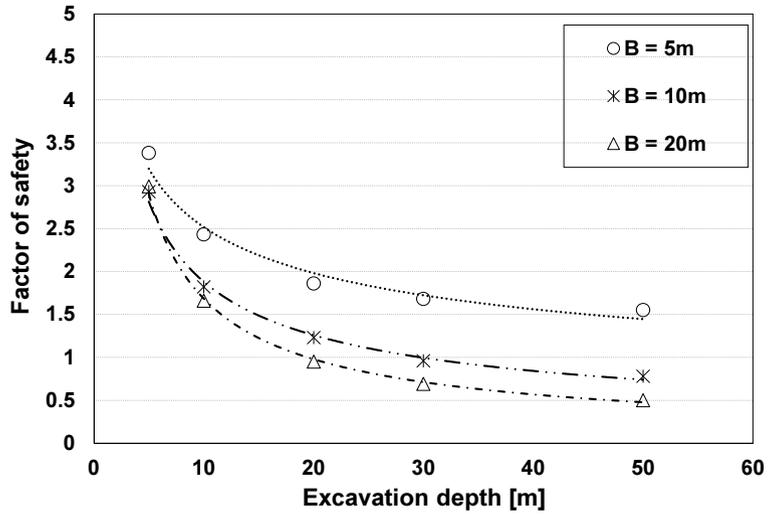


Fig. 7. Factor of safety variation with increasing depth - effect of diameter ( $c = 31.6$  kPa)

지반 지지력  $N_c$ 의 변화 양상을 파악하기 위해 제안된 식과 수치해석에서 도출된 안전율 값을 이용하여 수직구 굴착의 형상비(굴착 깊이/굴착 반경,  $H/B$ )에 따른 지반 지지력의 변화를 분석하였다. 식 (5)를 변형하여 지반 지지력( $N_c$ )에 대한 식으로 표현하면 식 (6)과 같다. 수치해석 결과를 이용하여 단위 면적에 해당하는 지반 지지력 상수의 변화를 분석한 결과, 형상비( $H/B$ )에 따라 일정하게 증가하는 추세가 확인되었으며, 다양한 점착력( $c$ )과 굴착 내경( $B$ )을 입력하여 지반 지지력 상수의 변화를 확인한 결과에서도 유사한 경향이 나타났다(Fig. 8, Fig. 9). 이 결과를 통해 형상비 증가에 따른 지반 지지력 식 (7)을 도출할 수 있으며, 이 식을 식 (5)에 대입하여 일정한 굴착 반경을 유지하면서 굴착을 진행할 때 굴착 심도에 따라 증가하는 지반 지지력을 고려하는 안전율 식을 도출하였다(식 (8)).

$$N_c = \frac{F.S. \left[ \gamma(H-d) - \frac{0.59cH}{B} + q \right]}{1.07} \quad (6)$$

$$N_c = \left[ 2.7 \left( \frac{H}{B} \right) + 6.83 \right] c \quad (7)$$

$$F.S. = \frac{1.07c \left[ 2.7 \left( \frac{H}{B} \right) + 6.83 \right]}{\gamma(H-d) - \frac{0.59cH}{B} + q} \quad (8)$$

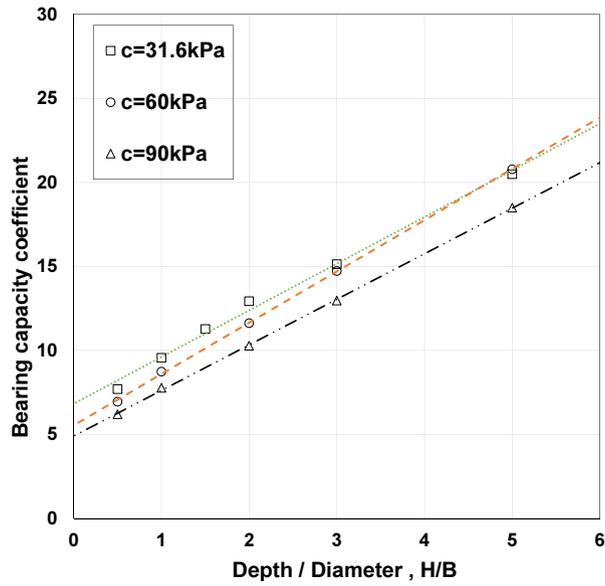


Fig. 8. Bearing capacity coefficient variation with increasing depth - effect of cohesion (B = 10 m)

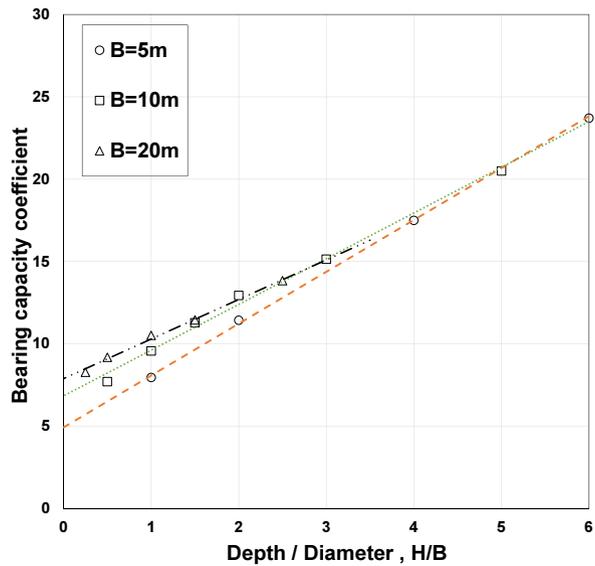


Fig. 9. Bearing capacity coefficient variation with increasing depth - effect of diameter (c = 31.6 kPa)

#### 4. 3차원 히빙 안전을 산정식의 검증

본 연구에서 제안된 3차원 히빙 안전을 산정식을 검증하기 위해 수치해석을 통해 도출된 안전율 값과 기존 산정식(2D), 새롭게 제안된 산정식(3D)으로부터 계산된 안전율 값을 비교하였다. 수치해석은 3차원 모델링을 기반

으로 한계평형법을 이용하여 안전율을 도출해내기 때문에 실제 수직구 굴착에서의 히빙을 적절히 반영한다. 따라서 새로 제안된 산정식의 검증으로 수치해석을 통해 도출되는 안전율과 산정식으로 계산한 안전율 값을 비교하여 그 값들이 일치하는 정도를 확인함으로써 산정식을 검증하였다(Fig. 10). 기존 2차원 산정식의 경우 전체적으로 3차원 수치해석보다 작은 안전율 값을 도출하며, 그 분포가 불규칙하므로 3차원 현황에 대한 반영이 부족함을 알 수 있다. 따라서 기존의 2차원 산정식은 실제 안전율을 과소평가하여 과다설계를 유도할 가능성이 크다. 그러나, 본 연구에서 제안한 식은 3차원 수치해석 결과와 매우 유사한 값을 도출하며 분포 또한 규칙적이므로 3차원 원형 수직구 굴착 시 히빙에 대한 안전율에 대해 비교적 적절한 값을 도출하는 것을 확인할 수 있다.

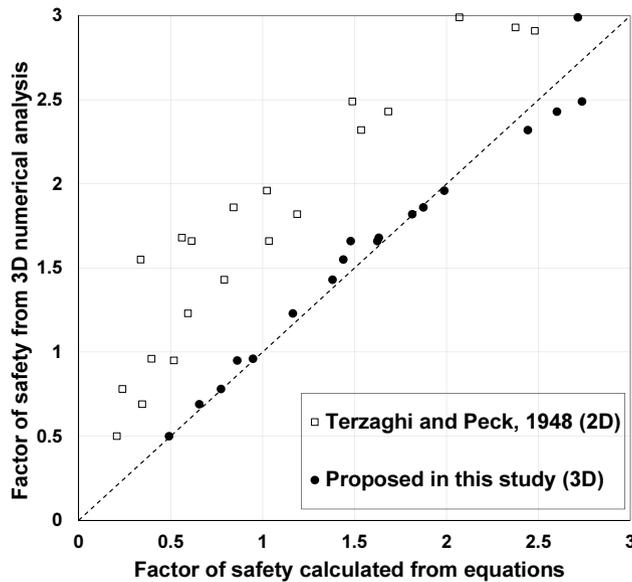


Fig. 10. Comparison of factor of safety from numerical analysis and equations

## 5. 결론

본 연구는 점토질 지반에서 원형 수직구 굴착 시 3차원 효과를 고려하는 히빙 안정성 검토를 위한 방법을 제안하는 것을 목적으로 수행되었다. 히빙에 대한 안정성을 판단할 수 있는 안전율 산정식을 제안하기 위해 3차원 형상에 대한 이론적인 고려와 수치해석을 이용한 매개변수 연구가 수행되어 기존에 수행된 연구가 가지는 한계점들을 보완하여 3차원 현황을 반영하는 안전율 산정식이 제안되었다. 새롭게 제안된 안전율 산정식은 3차원 수치해석 결과와 비교함으로써 검증되었다. 본 연구에서 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

1. 기존의 히빙 안전율 산정식의 접근 방식을 이용하고 3차원 형상을 고려하여 원형 수직구 굴착 시 히빙에 대한 작용력과 저항력을 산정하는 수식을 새롭게 제안하였다. 또한 수치해석을 이용한 매개변수 연구를 수행하여

굴착 형상비에 따른 지반 지지력의 변화를 반영하는 안전율 산정식을 최종적으로 제안하였다.

2. 수치해석을 통해 도출된 안전율 값과 기존 2차원 식, 3차원 산정식을 이용해 계산한 안전율 값을 비교한 결과, 기존 2차원 식에 비해 본 연구에서 제안된 식이 3차원 원형 수직구 굴착의 히빙 안정성 검토에 더 적합함을 확인할 수 있다.
3. 본 연구는 수치해석을 바탕으로 수직구의 안정성을 검토하였으나 전체적인 안전율의 변화 양상은 실제 원형 수직구 굴착과 유사할 것으로 사료되며 이러한 연구방법은 추후 다른 연구에도 충분히 기여할 수 있을 것으로 사료된다.
4. 향후 수직구 굴착 현장에서 활용되기 위해서는 실험형 실험이나 현장 계측의 결과를 이용한 추가적인 연구가 필요하다.

## 감사의 글

This research was supported by a grant (18SCIP-B105148-04) from the Construction Technology Research Program funded by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport of the Korea government and by Korea Minister of Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) as 「U-city master and Doctor Course Grant Program」.

## References

1. Aksoy, C.O. (2008), "Chemical injection application at tunnel service shaft to prevent ground settlement induced by groundwater drainage: A case study", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 45, No. 3, pp. 376-383.
2. Bjerrum, L., Eide, O. (1956), "Stability of strutted excavations in clay", *Geotechnique*, Vol. 6, No. 1, pp. 32-47.
3. Center for Utility Tunnel (2015), *Development of core technology for urban small-diameter utility tunnel construction*.
4. Hong, E.S., Cho, G.C., Baak, S., Jun, H.W. (2016), "Rapid construction technique development for vertical shafts of utility tunnels", *Proceedings of the KTA 2016 Annual Spring Conference*, Seoul, pp. 129-130.
5. Kim, D.H., Lee, D.S., Kim, K.Y., Lee, Y.H., Lee, I.M. (2009), "Earth pressure acting on vertical circular shafts considering arching effects in c- $\phi$  soils: I. Theory", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 11, No. 2, pp. 117-129.
6. Kim, D.H., Lee, K.H., Lee, I.M. (2011), "Seepage-induced behavior of a circular vertical shaft", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 13, No. 6, pp. 431-450.
7. Kim, K.Y., Lee, D.S., Jeong, S.S. (2012), "Analysis of earth pressure acting on vertical circular shaft

- considering arching effect (I): a study on centrifuge model tests”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 2, pp. 23-31.
8. Shin, Y.W., Kim, S.S., Kim, Y.J. (2010), “Development of design charts for concrete lining in a circular shaft”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 12, No. 2, pp. 165-175.
  9. Shin, Y.W., Park, T.S., Lee, I.K. (2005), “A method of estimating earth pressure on a shaft wall and ground settlement caused by excavation”, *Proceedings of the KSCE Tunnel Committee Special Conference*, pp. 151-167.
  10. Shin, Y.W., Sagong, M. (2007), “A rational estimating method of the earth pressure on a shaft wall considering the shape ratio”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 9 No. 2, pp. 143-155.
  11. Tan, Y., Wang, D. (2013), “Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in Shanghai soft clay. I: Bottom-up construction of the central cylindrical shaft”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 139, No. 11, pp. 1875-1893.
  12. Terzaghi, K., Peck, R. (1948), *Soil mechanics in engineering practice*, John Wiley and Sons, New York.