

ORIGINAL ARTICLE

한계상태설계법 지반정수 산정을 위한 풍화대 강도특성 측정장치의 개발 및 현장적용에 관한 연구

김기석¹, 김종훈², 최성웅^{3*}

¹(주)희송지오텍 대표이사, ²(주)강일엔지니어링 상무, ³강원대학교 공과대학 에너지자원·산업공학부(에너지자원공학) 교수

Development and Field Application of Apparatus for Determination of Limit State Design Strength Characteristics in Weathered Ground

Ki Seog Kim¹, Jong Hoon Kim², and Sung-oong Choi^{3*}

¹CEO, Heesong Geotek, Co., Ltd.

²Director, Kang-il Engineering, Co., Ltd.

³Professor, Dept. of Energy Resources Engineering, Kangwon National University

*Corresponding author: choiso@kangwon.ac.kr

Received: April 20, 2020

Revised: April 23, 2020

Accepted: April 24, 2020

ABSTRACT

Applying the limit state design method to geotechnical structures, accuracy and reliability of its design are mainly affected by parameters for geotechnical site characteristics, such as unit weight, Poisson's ratio, deformation modulus, cohesion and frictional angle. When the structures are located in weathered ground, especially, cohesion and frictional angle of ground are closely related with decision of parameters for structures' load and ground's resistance. Therefore, the accurate determination of these parameters, which are commonly obtained from field measurement, such as borehole shear test, are essential for optimum design of geotechnical structures. The 38 case studies, in this study, have been analyzed for understanding the importance of these parameters in designing the ground structures. From these results, importance of field measurement was also ascertained. With these evaluations, an apparatus for determining the strength characteristics, which are fundamental in limit state design (LSD) method, have been newly developed. This apparatus has an improved function as following the ASTM suggestion. Through the field application of this apparatus, the strong point of minimizing the possibility of error occurrence during the measurement has been verified and authors summarized that the essential parameters for LSD can be qualitatively obtained by this apparatus for determination of strength characteristics of weathered ground.

Keywords: Limit State Design (LSD) method, Cohesion, Frictional angle, ASTM, Weathered ground, Strength characteristics

초록

지반구조물에 대한 한계상태설계법의 적용에 있어서 단위중량, 포아송비, 변형계수, 점착력 및 내부마찰각 등은 설계의 정확성 및 신뢰도 향상에 매우 큰 영향을 미치는 지반특성값이다. 특히 풍화토 및 풍화암 등 풍화대에 지반구조물이 위치하게 될 경우 이들 지반특성값 중에서도 점착력과 내부마찰각이 구조물과 지반의 하중 및 저항계수를 판정하는데 매우 높은 연관성이 있으며 따라서 공내전단시험과 같은 현



장시험으로부터 구해지는 이들 지반정수의 정확한 산정은 지반구조물의 최적설계를 좌우하는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 국내 38개 시공사례 분석을 통해 이들 지반정수들의 설계적용 사례를 검토, 현장시험의 중요성을 확인하였으며 이를 토대로 ASTM에서 규정하는 모든 표준절차를 반영하는 새로운 풍화대 강도특성 측정장치를 개발하였다. 또한 본 장비의 현장적용을 통해 시험장비 및 시험자의 주관적 오류에 의한 오차발생 가능성을 최소화한 장비의 개선성능을 확인하였으며, 이를 토대로 한계상태설계법의 적용 시 핵심 지반특성값의 정량적 산정을 위한 기틀을 마련하였다.

핵심어: 한계상태설계법, 점착력, 내부마찰각, ASTM, 풍화대, 강도특성

1. 서론

암반공학 및 지반공학 분야에서의 기초구조물 설계에 관한 최근의 국제동향을 살펴보면 국제표준화기구(ISO)에 의한 설계표준 뿐만 아니라 미국 도로교통협회(AASHTO)의 교량설계 시방기준 및 유럽연합의 설계코드 등에 한계상태설계법(Limit State Design, LSD)이 널리 포함되고 있음을 확인할 수 있다(ISO 2394, 2015, Minnesota DOT Bridge Office, 2018).

일반적으로 한계상태설계법은 북미지역에서 주로 사용되는 하중저항계수설계법(Load and Resistance Factor Design, LRFD)과 유럽지역에서 주로 사용되는 유로코드(Eurocode)로 구분되는데(US Department of Transportation Federal Highway Administration, 2015, European Commission, 2013), 하중저항계수설계법은 모델에 의해 계산된 저항값(또는 강도값)에 재료나 설계모델의 불확실성을 반영하기 위하여 총저항값에 저항계수를 곱해주는 방법인 반면, 유로코드는 설계저항값 및 강도값을 정의하기 위해 필요한 다양한 설계정수들에 각각 부분안전계수를 적용함으로써 저항값의 불확실성을 반영하는 방법이라 요약할 수 있다.

그동안 국내에서는 경험적으로 결정된 하중모델과 계수들로부터 안전도를 확보하는 허용응력법(Working Stress Design method, WSD)이나 극한강도설계법(Ultimate Strength Design method, USD)이 주로 적용되어 왔으며, 이 경우 경험에 근거한 획일적인 안전율을 적용함으로써 하중과 지반의 불확실성을 명확히 고려하지 못하는 단점이 종종 지적되어 왔다(국토교통부, 2016, Elzaroug, 2013). 그러나 최근에는 국내에서도 한계상태설계법을 통해 하중과 지반의 불확실성을 적절히 반영할 수 있는 하중계수와 저항계수를 사용함으로써 구조물의 사용 목적과 중요도에 따른 최적 설계로의 전환이 이루어지고 있는 추세이다(국토교통부 국토교통과학기술진흥원, 2014, 정경자 외, 2017).

특히, 한계상태설계법을 이용하여 TBM 터널 세그먼트를 설계할 경우, 하중-저항계수와 관련한 지반물성과 세그먼트의 안정성 분석을 위한 지반정수(지반물성×저항계수)의 정량적 도출은 설계의 신뢰성 및 경제성 확보 차원에서 매우 중요한 요건이다. 그런 점에서 터널설계 시 이완하중 및 지반스프링 산정에 필수적으로 요구되는 지반정수, 즉 단위중량, 변형계수, 포아송비, 점착력 및 내부마찰각 등의 정확한 산정은 한계상태설계법의 근간이 된다고 할 수 있다. 그중에서 실내시험 결과값과 현장시험 결과값의 차이가 매우 커서 현장상황에 크게 좌우되는 점착력과 내부마찰각은 부재의 안정성 해석에 가장 큰 영향을 미치는 변수로서 높은 신뢰도가 요구된다(한국암반공학회 외, 1999).

따라서 본 연구에서는 한계상태설계법에 의한 지반구조물 설계 시 핵심변수로 요구되는 단위중량, 변형계수, 포아송비, 점착력 및 내부마찰각 등에 대한 기존의 설계반영값과 실제 측정값과의 차이를 계룡건설의 현장조사 자료를 포함한 총 38개의 사례를 분석함으로써 경제적이고 신뢰성 높은 설계를 위한 지반정수의 적용기준을 제고하고자 한다(주)계룡건설, 2015, (주)단우기술단, 2009, (주)단우기술단, 2009, 대림산업(주), 2015, 대림산업(주), 2014, 대림산업(주), 2013, 대림산업(주), 2013, 대림산업(주), 2012, 대림산업(주), 2011, 대림산업(주), 2009, 대림산업(주), 2008, 대림산업(주), 2007, 대림산업(주), 2007, 동부건설(주), 2009, 동부건설(주), 2008, 동부엔지

니어링(주), 2009, 두산건설(주), 2007, 두산건설(주), 2009, 삼성물산(주), 2013, 삼성물산(주), 2011, 삼성물산(주), 2009, 삼성물산(주), 2009, (주)삼안, 2013, SK건설(주), 2013, SK건설(주), 2012, SK건설(주), 2009, SK건설(주), 2009, SK건설(주), 2007, (주)제일엔지니어링, 2006, 현대건설(주), 2014, 현대건설(주), 2010, 현대건설(주), 2007, 현대산업개발(주), 2010, 현대산업개발(주), 2010, 현대산업개발(주), 2009, 현대산업개발(주), 2008, 현대산업개발(주), 2007, 현대산업개발(주), 2007).

특히 이들 중에서 유의미한 결과를 나타내는 풍화토 및 풍화암에 대한 점착력과 내부마찰각의 정량적 산정을 위해 기존의 국내의 장비 대비 우수성과 개선사항이 포함된 풍화대 강도특성 측정장치를 개발, 현장적용 시험을 통해 시험장비의 특성 및 바람직한 측정방법을 검토하고자 한다.

2. 한계상태설계법에서의 지반특성값

2.1 한계상태설계법

현재 국내에서 적용되고 있는 한계상태설계법은 확률론과 신뢰성 이론에 근거하여 구조물이 한계상태를 벗어날 가능성을 적정 수준으로 제한하는 설계법이며, 유로코드의 LSD와 미국의 AASHTO LRFD를 근간으로 하여 제정된 바 있다. 따라서 구조물의 파괴 확률에 기반하여 부재별로 과다 또는 과소 설계를 줄일 수 있는 합리적인 설계법으로 평가받고 있다. 즉, Fig. 1에서 보는 바와 같이 모델에 의해 계산된 저항값(또는 강도값)은 확률밀도함수로 표현되며, 이때의 지반특성값은 식 (1)에서와 같이 변동계수와 편향계수에 관여된다(Becker, 2006).

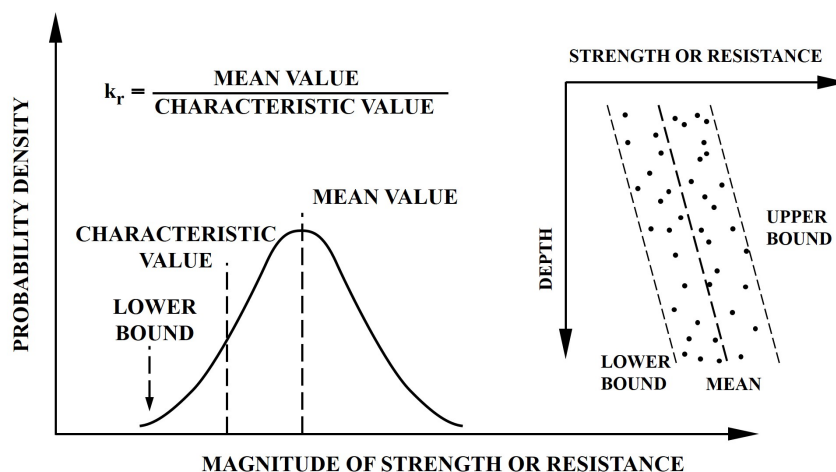


Fig. 1. Definition of geotechnical site characteristics in limit state design method (Becker, 2006)

$$X_k = \mu(X) [1 - k_r \cdot V(X)] \quad (1)$$

여기서, X_k 는 지반특성값, $\mu(X)$ 는 평균값이며, k_r 과 $V(X)$ 는 각각 시험개수와 확률분포에 따른 편향계수(k_r) 및 변동계수($V(X)$)이다.

이들 지반특성값을 평가하기 위해 다양한 제안식이 제시되고 있는데, 그중에서 국내외적으로 널리 사용되는 식은 다음과 같다.

- EN 1990(Eurocodes, 2013)의 제안식

EN1990: Basis of Design 의 제안식은 식 (2)와 같다.

$$X_k = \mu(X) - 1.645\sigma(X) = \mu(X)[1 - 1.645 V(X)] \quad (2)$$

여기서, $\mu(X)$ 는 평균값, $\sigma(X)$ 는 표준편차, $V(X)$ 는 변동계수이며, X 와 계수 1.645는 5% 신뢰수준을 나타낸다.

- Student(1908)의 제안식

Student(1908)는 평균값의 95% 신뢰도에 대하여 다음의 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$X_k = \mu(X) - \frac{t}{\sqrt{N}}\sigma(X) \quad (3)$$

여기서, t 는 시험수량(N)에 좌우되는 변수이다.

- Ovesen(1995)의 제안식

Ovesen(1995)은 시험수량(N)이 무수히 많은 경우를 적용하여 식 (3) 대신 식 (4)를 제안하였다.

$$X_k = \mu(X) - \frac{1.645}{\sqrt{N}}\sigma(X) \quad (4)$$

- Schneider(1997)의 제안식

Schneider(1997)는 위의 식들을 단순화시켜 식 (5)와 같이 제안하였으며, 이는 Ovesen(1995)의 제안식에서 $N = 11$ 일 때 두 식은 유사한 값을 보임을 알 수 있다. 이후 Schneider(1999)는 이를 상한값과 하한값으로 표현하는 제안식을 추가하기도 하였다.

$$X_k = \mu(X) - 0.5\sigma(X) \quad (5)$$

이들 제안식은 지반특성값을 합리적으로 산정하기 위해 제안되고 있으나, 경우에 따라 경제적인 측면을 강조하거나 또는 보수적인 측면을 강조하는 경향이 있어 특정 방법을 전용하는 것은 현실적으로 쉽지 않다.

2.2 지반특성값의 평가

한계상태설계법을 설계에 적극 반영하고 있는 유럽 및 미국의 지반특성값 평가 과정을 간략히 살펴보면, 유럽의 경우 유로코드

기준에 따라 평균, 표준편차, 변동계수를 이용하여 지반특성값을 평가하고 있으며, 이때 변동계수는 구조물의 특성에 따라 달리 적용하고 있다. 즉, 사면안정해석과 같이 얇은 기초에 대한 지지력을 평가할 경우에는 식 (4)에서처럼 시험횟수(N)를 반영하고 있으나, 댐체 등과 같이 상대적으로 깊은 기초에 대한 지지력을 평가할 경우에는 식 (4)의 $\frac{1.645}{\sqrt{N}}$ 대신 1.645를 계수로 반영함으로써 시험횟수에 대한 영향을 배제하여 적용하고 있다(Eurocodes, 2013). 이는 다시 말해 얇은 기초에 대한 지반특성값의 산정함에 있어 시험횟수의 중요성을 반증한다고 할 수 있다.

미국의 경우에는 지반특성값의 평가 시 설계변수의 변동성과 불확실성에 기반한 저항계수의 선정, 현장 및 실내시험으로부터 설계변수 내의 불확실성을 정량화하는 기법을 적극 반영하고 있는데, 설계변수의 변동성과 불확실성의 원인으로는 부지 선정 단계, 설계기법 선정 단계, 시공 단계 등에서 다양하게 발생할 수 있으나 이들 변동성과 불확실성을 감소시키기 위한 가장 좋은 방법은 많은 시험을 통한 시험값의 신뢰도 향상임을 강조하고 있다(Minnesota DOT Bridge Office, 2018). 따라서 최소 3회 이상의 시험수량을 제안하고 있으며, 현장 사정상 그렇지 못할 경우에는 설계자의 경험과 판단에 근거하여 변동계수를 추정토록 하고 있다.

3. 국내 지반에 대한 지반특성값 평가 및 분석

3.1 국내 지반에 대한 지반특성값 평가

한계상태설계법의 적용 시 핵심 지반특성에 해당하는 단위중량, 포아송비, 변형계수, 점착력 및 내부마찰각의 국내 주요 지층별 분포특성을 파악하기 위해 계룡건설의 현장조사 자료(계룡건설, 2015)를 포함한 총 38개의 사례를 조사하였으며 이들 다섯 가지 변수들에 대해 각각 통계분석을 수행하였다.

Fig. 2는 이들 통계분석의 한 예로서 풍화도 및 풍화암에 대한 점착력의 분포특성에 대한 분석 사례이다.

Table 1에서는 이들 38개 현장조사 사례의 측정결과와 함께 설계에서 통상적으로 사용하고 있는 기준(국토부 도로설계편람 및 서울시 지반조사편람 등)에 의한 제안값을 비교하였다.

분석결과, 단위중량의 경우, 연암층에 대한 측정값의 상한값이 제안값에 비해 다소 높은 경우를 제외하고는 측정값과 제안값이 거의 같은 것으로 분석되었다. 포아송비의 경우, 현장시험에 의한 측정이 용이하지 않은 관계로 연암 및 경암 등 기반암을 대상으로 한 실내시험 측정값이 제시되고 있으며, 연암에 대해서는 측정값과 제안값의 범위가 거의 유사하나, 경암의 경우에는 측정값의 상한값이 다소 높은 것으로 분석되었다. 변형계수의 경우, 대부분 공내재하시험으로 측정된 결과값으로서, 충적층에 대해서는 측정값과 제안값의 범위가 대략 유사하나, 풍화암 이상에 대해서는 측정값의 범위가 제안값에 비해 크게 나타나며, 특히 경암의 경우 그 차이는 매우 크게 나타난다.

한편, 점착력의 경우, 기반암에 대해서는 실내시험결과를, 풍화도 및 풍화암에 대해서는 공내전단시험의 결과를 제시하고 있으며, 실내시험결과와 비교하여 제안값 대비 측정값의 차이가 매우 크게 나타나나 이는 실내시험의 결과이므로 적절한 감쇠계수의 적용이 필요한 것으로 판단된다. 그러나, 풍화도 및 풍화암에 대한 점착력의 경우에는, 제안값의 범위가 100~300 kPa로 매우 넓은 반면, 측정값은 19.5~37.0 kPa (풍화암의 경우)로서 범위가 상대적으로 좁게 나타남을 알 수 있다. 또한 내부마찰각의 경우, 대체적으로 제안값에 비해 측정값의 범위는 상한값이 좀더 높거나 (풍화도의 경우) 또는 하한값이 좀더 낮은 등 (풍화암의 경우) 범위가 넓게 나타나는 경향이 있다. 따라서 신뢰성 있는 지반특성값의 적용을 위해서는 제안값의 적용 보다 측정값의 적용이 요구됨을 시사한다.

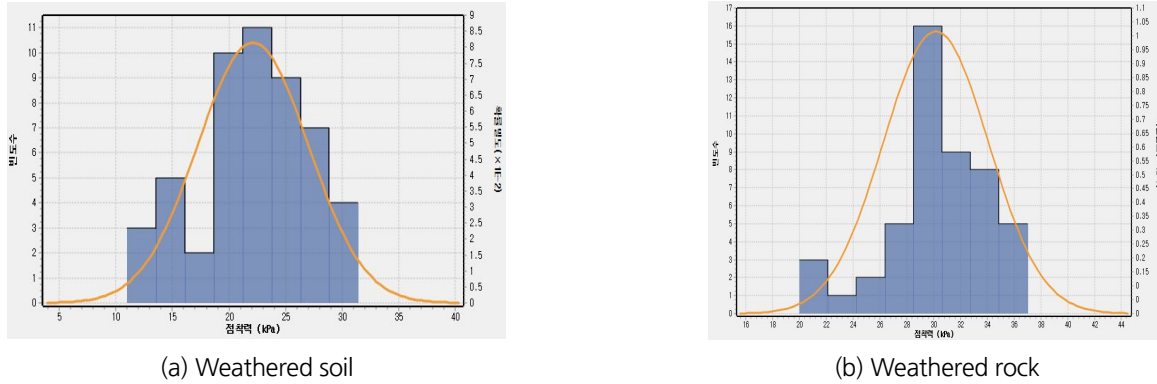


Fig. 2. Statistical analysis of measured cohesion value

Table 1. Summary of measured parameters for geotechnical site characteristics.

Layer	Suggested value by references	Range of measured value	Average	Standard deviation	Coefficients of variation	Number of data
Unit weight (kN/m ³)						
Dredged soil	17.0~19.0	16.7~18.7	17.6	0.581	0.033	13
Clay	17.0~19.0	16.1~17.8	17.2	0.669	0.039	8
Alluvial Sand	17.0~19.0	16.3~19.1	17.9	0.598	0.033	19
Gravel	18.0~19.0	17.3~19.6	18.5	0.666	0.036	10
Weathered soil	17.0~20.0	18.0~19.8	19.0	0.502	0.026	20
Weathered rock	20.0~22.0	19.4~22.0	20.7	0.841	0.036	27
Soft rock	23.0~25.0	23.3~28.2	25.7	0.903	0.035	114
Hard rock	24.0~27.0	25.0~27.9	26.4	0.588	0.035	177
Poisson's ratio						
Soft rock	0.25~0.30	0.18~0.34	0.27	0.035	0.132	78
Hard rock	0.20~0.25	0.16~0.35	0.24	0.037	0.156	113
Deformation modulus (MPa)						
Alluvial Clay	2~24	0.7~9.0	3.9	1.898	0.477	22
Sand	10~55	20.1~67.6	42.8	16.732	0.391	8
Weathered soil	50~200	30.0~91.5	50.7	17.289	0.341	17
Weathered rock	100~200	68.7~794.0	351.3	150.978	0.430	58
Soft rock	200~400	1,071.0~5,900.0	2,973.0	1,128.6	0.380	75
Hard rock	400~4,000	2,390.0~36,100.0	13,016.2	5,931.4	0.456	118
Cohesion (kPa)						
Weathered soil	<30	11.0~31.4	22.1	4.892	0.221	51
Weathered rock	100~300	19.5~37.0	30.3	3.781	0.125	48
Soft rock	300~600	5,800~35,200	17,581.8	7,518.3	0.428	22
Hard rock	400~2,000	4,000~38,100	20,963.4	7,634.6	0.365	82
Frictional angle (degree)						
Weathered soil	25~30	22.4~34.0	28.4	2.646	0.093	68
Weathered rock	30~35	24.0~37.2	32.0	2.513	0.078	48
Soft rock	35~40	34.6~62.0	48.4	5.729	0.118	37
Hard rock	40~45	42.4~63.0	52.3	4.226	0.081	108

3.2 지반특성값 평가 결과

Table 2는 이들 38개 현장조사 사례분석을 통해 검토된 다섯 가지 지반특성값의 설계값과 식 (3)~(5)로 제안되는 한계상태설계법에서의 지반특성값의 제안값을 비교하여 나타낸 것이다. 단위중량의 경우 이들 제안식에 의한 값과 실제 설계에 반영된 값의 차이는 대동소이하나, 포아송비의 경우 최대 6.5%, 변형계수의 경우 최대 37%, 그리고 점착력의 경우 최대 5% 가량 하향평가되어 적용되었음을 알 수 있으며, 내부마찰각의 경우는 오히려 최대 10% 가량 상향평가되어 적용되었음을 알 수 있다.

결론적으로 Table 1과 2의 국내 38개 사례에 대한 측정결과 및 설계값의 적용사례와, 한계상태설계법에서 핵심적으로 적용되는 지반특성값 제안식을 통한 지반특성값의 산정을 통해, 지금까지 국내 지반특성분석에서 적용되어 오던 설계값의 정량화의 필요성을 간과할 수 없다.

다시 말해 지금까지 국내에서 일반적으로 적용되어 온 도로설계편람(국토해양부, 2012) 및 서울시 지반조사편람(서울특별시, 1996) 등과 같은 기준안에 의해 제안되는 지반특성값의 경우 기준안 제정 당시 국외 지반을 기준으로 평가한 결과를 인용한 것이 많기 때문에, 경제성 및 신뢰성 높은 설계를 위해서는 반드시 국내 지반에 대해 실제로 측정된 값을 바탕으로 한 객관적이고 공학적인 지반특성값의 적용이 필수적이다.

Table 2. Comparison of parameters for geotechnical site characteristics by each suggested method

Layer	Design value	by Student (1908)	by Ovesen (1995)	by Schneider (1997)
Unit weight (kN/m ³)				
Weathered soil	19.00	18.80	18.82	18.75
Weathered rock	20.00	20.42	20.43	20.28
Soft rock	25.00	25.56	25.56	25.25
Hard rock	26.00	26.33	26.33	26.11
Poisson's ratio				
Soft rock	0.27	0.26	0.26	0.25
Hard rock	0.23	0.23	0.23	0.22
Deformation modulus (MPa)				
Weathered soil	40.0	43.8	44.2	42.5
Weathered rock	300.0	365.8	366.3	323.4
Soft rock	2,000.0	2,756.1	2,758.6	2,408.7
Hard rock	10,000.0	12,110.7	12,117.8	10,050.3
Cohesion (kPa)				
Weathered soil	20.0	21.0	21.0	19.7
Weathered rock	30.0	29.4	29.4	28.4
Frictional angle (degree)				
Weathered soil	30.0	27.9	27.9	27.1
Weathered rock	32.0	31.4	31.4	30.7

4. 풍화대 강도특성 측정장치의 개발 및 현장적용

4.1 개발배경

지반구조물 설계 시, 지반의 안정성을 판단하고 분석하기 위해서는 각종 지반정수의 결정이 필수적이다. 이들 지반정수 중에서도 특히 강도정수를 구하기 위해 실내시험 또는 현장시험이 적용된다. 일축압축시험, 인장강도시험, 삼축압축시험 및 전단시험 등과 같은 실내시험에서는 반드시 현장에서 채취된 시료를 이용해야 하는 반면, 표준관입시험, 콘관입시험 및 공내전단시험과 같은 현장시험의 경우 현장상황에 따라 다를 수는 있으나 별도의 시료채취과정없이 시험이 가능하므로 현장상황을 더욱 적극적으로 반영할 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이, 한계상태설계법을 적용한 지반구조물 설계 시, 하중-저항계수와 관련한 지반특성값과 구조물의 안정성 해석을 위한 설계값(지반특성값×저항계수)의 신뢰성 있는 도출이 필수적임을 38개 국내현장사례분석을 통해 알 수 있었으며, 현지지반에 대한 직접 측정에 의한 지층별 지반특성값의 획득의 중요성을 알 수 있었다.

특히 그중에서도 도심지 공동구 시공대상 지반을 예로 살펴볼 경우, 구조물의 설치 심도의 대부분을 차지하게 될 풍화대 지반의 특성을 판단함에 있어서 현장시료 채취의 어려움 등으로 인해 직접전단시험과 같은 실내시험보다는 불확실성이 최대한 제거된 공내전단시험과 같은 현장시험으로 측정된 값을 설계에 직접 반영하여야 한다.

이와 같이 시추조사 시 불교란 시료의 채취가 거의 불가능한 풍화대 지반에 대해 강도정수를 측정하기 위해 공내전단시험을 수행할 경우, ASTM에서 제안하는 방법(Suggested Method for Performing the Bohrhole Shear Test: ASTM Subcommittee D18.02)에 의한 시험장치와 시험방법을 준용하여야 한다(Lutenegger & Hallberg, 1981, Lutenegger, 1987).

현재 국내에서 사용하고 있는 공내전단시험장치의 경우 미국 업체에서 판매하고 있는 Borehole Shear Tester (Handy Geotechnical Instruments, Inc., 2020)이거나 국내업체에서 제작하여 판매하고 있는 장비가 있다.

본 연구에서는 ASTM에서 규정하는 공내전단시험의 시험규정을 최대한 준수하면서 동시에 시험자에 의한 주관적 오차발생 가능성을 최소화 하기 위해 자동측정 시스템을 도입함으로써 정확성과 신뢰성이 확보된 지반특성값을 산정하기 위한 개선된 장비를 개발코자 한다.

4.2 측정장치 개발

Fig. 3은 ASTM에서 규정하는 시추공 내 직접전단시험에서의 수직응력과 전단응력의 작용특성과, 이를 실험적으로 적절히 반영하기 위한 장치의 특성을 설명하는 그림이다. 즉 그림에서 보는 바와 같이 ASTM의 규정에 의하면 시추공 내에 수직응력(σ)과 전단응력(τ)을 발생시키기 위해서는 수직방향으로의 하중(F_{σ_n})과 전단방향으로의 하중(F_{τ})이 정확히 반영되어야 하며, 이때 전단판의 면적은 5 in^2 (32.3 cm^2)이어야 하고 전단판을 구성하는 톱니는 25개의 60° 췌기가 0.1 in (2.5 mm)의 간격으로 제작되어야 하고, 전단판의 상승속도는 0.051 mm/sec 을 유지하여야 한다. 이러한 전단판의 형상과 제원 및 시험규정은 Cambell & Hudson (1969) 및 Thorley et al.(1970)에 의한 이론을 근거로 하고 있어 공내전단시험의 신뢰도 확보를 위해서는 반드시 지켜져야 할 기준이다.

따라서 본 연구에서는 Lutenegeger & Hallberg(1981)에 의한 ASTM 표준절차에 최적화된 시험장비 및 시험방법의 적용을 위해, 전단판의 면적, 전단판을 구성하는 톱니의 개수 및 형상, 0.051 mm/sec의 전단판 상승속도를 제어할 수 있는 자동장치 및 디지털게이지를 통한 시험의 일관성을 확보할 수 있도록 기능이 개선된 풍화대 강도특성 측정장치를 개발하였다(Figs. 4, 5). 또한 현장 시험의 각종 조건과 시험진행 상황 및 결과 등이 자동으로 기록될 수 있는 S/W도 함께 개발함으로써, 시험의 정확성 및 자료의 축적이 용이하도록 하였다(Fig. 6).

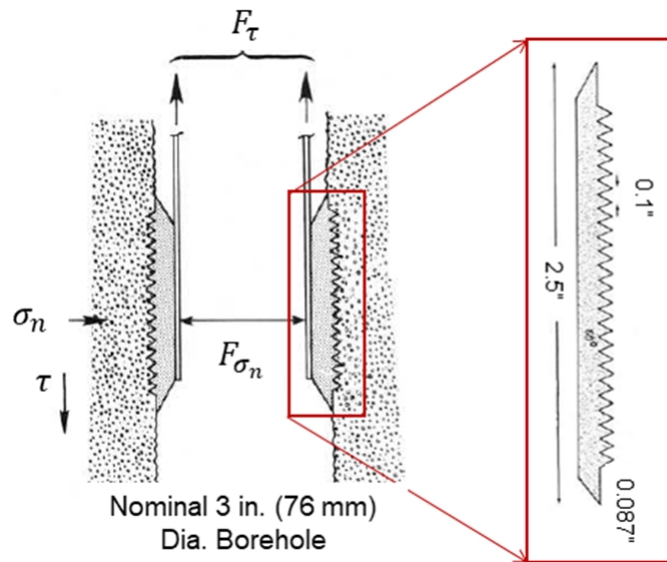


Fig. 3. Dimension of shear plate suggested by ASTM (modified from Lutenegeger & Hallberg (1981))

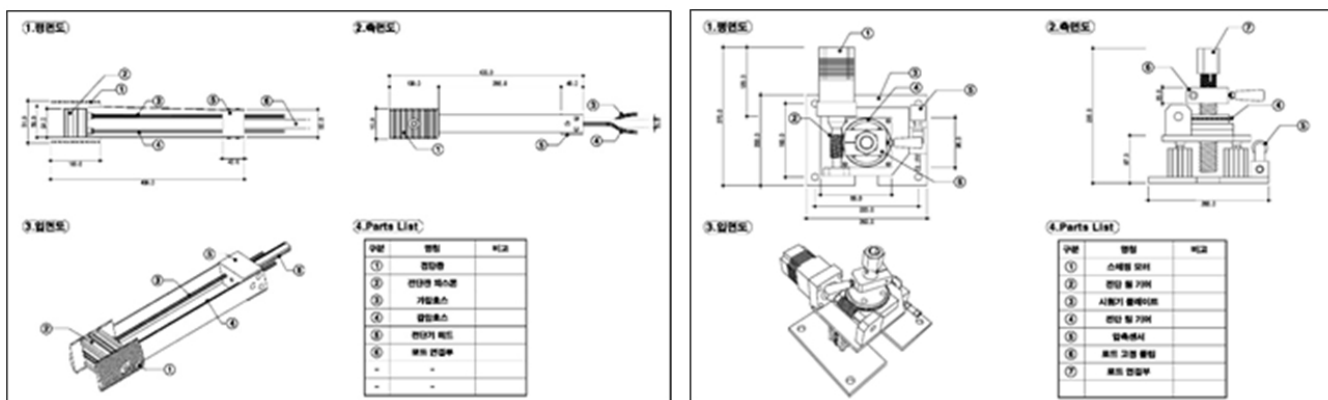
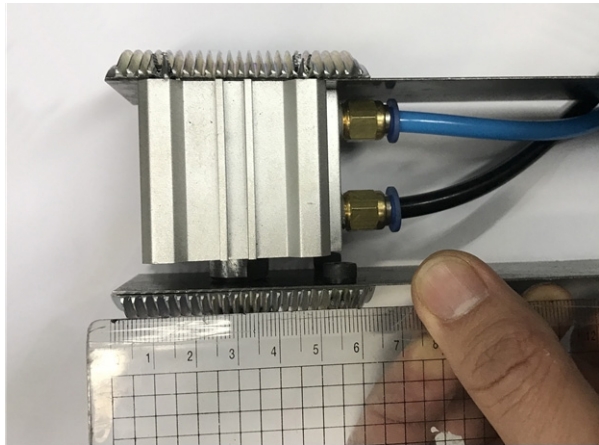
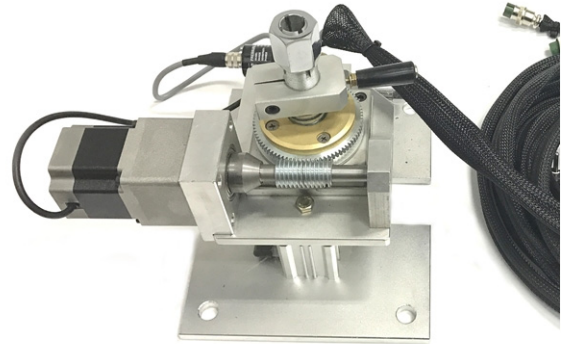


Fig. 4. Details of developed borehole shear tester

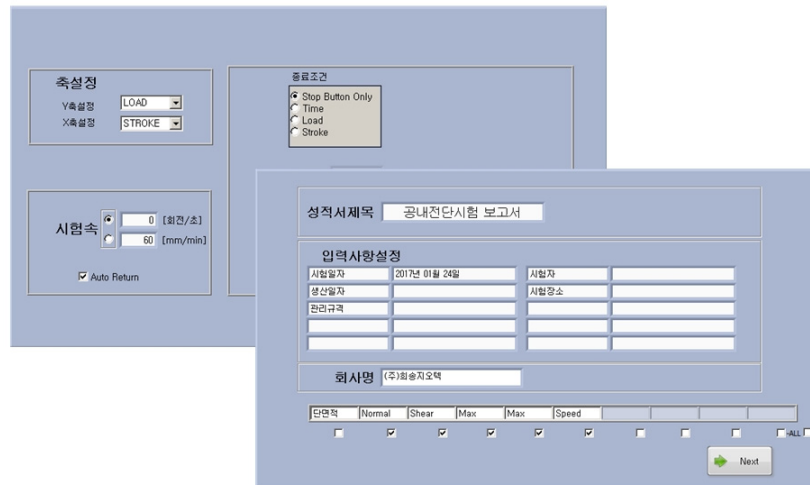


(a) Shear plate

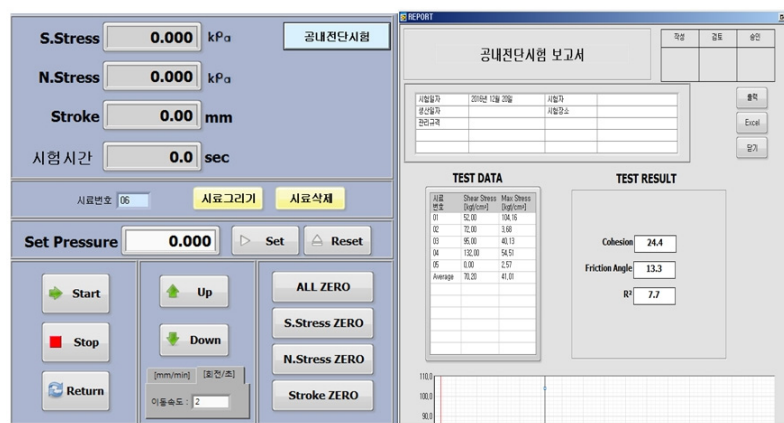


(b) Stepping motor

Fig. 5. Photos of major parts of developed borehole shear tester



(a) Setup for borehole shear test



(b) Summary of test result

Fig. 6. Examples of developed S/W for borehole shear test

4.3 현장 적용

개발된 풍화대 강도특성 측정장치의 성능분석을 위해 현장시추조사 직후 동일한 지층에 대해 본 연구에서 개발된 자동모드 시험과 기존의 방법에 의한 수동모드 시험을 병행 실시하여 각 시험법에 따른 강도특성 양상을 비교 분석하였다. 각 시험조건은 Table 3에 정리한 바와 같으며, 모든 시험에 대한 시험구간의 선정은, 시험예정구간을 먼저 선정한 후 표준관입시험을 수행하여 지층의 N값이 확인된 경우에 한해 50 cm를 추가 굴진하여 시험구간으로 선정하는 방법으로 진행하였다.

Table 3. Summary of each method for borehole shear testing

Method	A method*	M method**
Borehole diameter	NX (76 mm)	
Boring method	Anhydrous boring	
Dimension of shear plate	Area: 32.3 cm ² , Wedge interval: 2.5 mm, No. of Wedge: 25 (same to ASTM suggestion)	
Shear plate step-up method	Controlled by auto-program	Manual handling
Shear plate step-up speed	0.051 mm/s	2 round/sec (theoretically 0.051 mm/s)
Normal stress loading method	Controlled by auto-program	

* A method: automatic mode.

** M method: manual mode.

Table 4는 3개의 시험공에 대해 각각의 방법으로 측정한 결과이며, Fig. 7은 현장측정 모습이다.

Table 4. Results of borehole shear tests by automatic and manual methods

Borehole No.	Layer	Depth (GL.-m)	N-value	Test method	Cohesion (kPa)	Frictional angle (°)	Experimenter
BH-1	Weathered soil	8.3	11/30	M	13.8	29.3	L
	Weathered soil	8.5		A	16.8	28.8	
	Weathered soil	9.3	14/30	M	18.2	27.2	
	Weathered soil	9.5		A	18.1	27.5	
	Weathered soil	10.3	25/30	M	19.4	28.7	
	Weathered soil	10.5		A	19.5	30.4	
	Weathered soil	11.3	38/30	M	21.8	30.1	
	Weathered soil	11.5		A	22.3	31.3	
BH-2	Weathered soil	8.3	13/30	M	16.2	27.9	K
	Weathered soil	8.5		A	16.4	28.3	
	Weathered soil	9.3	19/30	M	15.7	32.4	
	Weathered soil	9.5		A	17.8	31.3	
	Weathered soil	10.3	29/30	M	19.2	31.1	
	Weathered soil	10.5		A	19.3	28.6	
BH-3	Weathered soil	9.3	13/30	M	15.9	28.4	C
	Weathered soil	9.5		A	17.6	30.1	
	Weathered soil	10.3	22/30	M	17.4	29.5	
	Weathered soil	10.5		A	18.8	29.4	
	Weathered soil	11.3	43/30	M	20.1	31.4	
Weathered soil	11.5	A		20.9	31.9		



(a) Setting the shear plate



(b) Measuring the parameters

Fig. 7. Photos of borehole shear testing

4.4 현장시험 결과분석

Table 4에서 정리하여 나타낸 바와 같이 총 3개의 시추공에 대해 20회의 공내전단시험을 수행한 결과, 점착력과 내부마찰각의 분포양상을 N값의 범위와 함께 정리하면 Table 5와 같다.

본 시험결과가 제시하는 유의미한 결과는, 측정값 자체보다는 측정값의 표준편차에 있다. 즉, 점착력의 경우 자동에 의한 방법으로 측정된 경우 수동 방법에 비해 0.6~1.2 kPa 가량 크게 측정되고 있으며, 내부마찰각의 경우 자동인 경우가 0.5~0.8° 가량 크게 확인되고 있으나, 표준편차의 경우 자동측정방법에 비해 수동측정방법의 경우가 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

다시 말해, 시험자에 따라 또는 동일한 시험자라 하더라도 시험수행 상황에 따라 일관적이지 않은 경우가 발생할 가능성이 높음을 알 수 있으며, 풍화대 강도특성의 측정에 있어 매우 큰 요인으로 작용하는 전단판의 상승속도의 정량적 조정의 중요성이 확인됨을 알 수 있다.

따라서 현실적으로 한정된 시험수량으로 시험을 수행할 수밖에 없는 많은 경우에 최소한의 시험수량으로 신뢰성 있는 강도특성값을 측정, 제공하기 위해서는 시험자 및 시험방법의 오류에 의한 오차발생을 최소화할 수 있는 장비의 성능이 확보되어야 할 것이다.

Table 5. Comparison of cohesion and frictional angle by each method

Range of N-value	Cohesion (kPa)			Frictional angle (°)		
	Range	Ave.	S/D	Range	Ave.	S/D
Automatic method						
N ≤ 15	16.8~18.1	17.2	0.768	27.5~30.1	28.7	1.090
15 < N ≤ 30	17.8~19.5	18.9	0.759	28.6~31.3	29.9	1.176
N > 30	20.9~22.3	21.6	0.990	31.3~31.9	31.6	0.424
Manual method						
N ≤ 15	13.8~18.2	16.0	1.80	27.2~29.3	28.2	0.883
15 < N ≤ 30	15.7~19.4	17.9	1.74	28.7~32.4	30.4	1.652
N > 30	20.1~21.8	21.0	1.20	30.1~31.4	30.8	0.919

5. 고찰

본 연구에서는, 최근 암반공학 및 지반공학 분야에서 지반의 특성과 지반구조물의 반응특성을 능동적이고 정량적으로 설계함으로써 경제성과 안정성이 함께 제고될 수 있는 한계상태설계법의 지반특성값 산정과정을 연구의 시발점으로 삼았다.

일반적으로 한계상태설계법에 의한 지반구조물 안정성 해석에서 단위중량, 포아송비, 변형계수, 점착력 및 내부마찰각은 핵심 지반특성값이며, 이 중에서도 주로 현장시험에 의해 설계값이 제공되고 동시에 구조물의 안정성 해석에 지대한 영향을 미치는 것으로 알려진 점착력과 내부마찰각은 더욱 정량적으로 산정되어야 할 지반정수이다.

이와 관련하여 총 38개의 최근의 국내 지반조사 사례보고서를 검토한 결과, 대개 통상적으로 적용되어 온 기준에 의해 각 지층에 대한 이들 지반정수값을 적용하고 있음을 확인할 수 있었으며 이는 국내에서 지금까지 적용해 온 허용응력법 또는 극한강도설계법에 의해 측정된 지반특성값보다 보수적인 설계값을 적용해 온 결과이다.

따라서 국내 지반구조물 설계 분야에서 최근 각광받고 있는 한계상태설계법을 면밀히 적용하기 위해서는 한계상태설계법의 근간이 되는 여러 가지 제안식들에서 알 수 있듯이 해당 지반정수에 대한 정확한 측정과 가능한 많은 시험수량의 확보가 절대적이다.

따라서 본 연구에서는 풍화대 강도특성 측정장치를 ASTM 기준 규격을 충실히 준용함과 동시에, 현실적인 시험수량의 한계에 따른 오차발생 가능성을 최소화시킬 수 있는 자동화 장치를 병합한 새로운 강도특성 측정장치를 개발하여 현장시험을 통해 장비의 성능을 확인하였다.

즉, 동일한 지반에 대해 기존에 국내외에서 사용중인 장비에 의한 측정값과 본 연구에서 ASTM의 전단판 설계기준 등을 만족하게 개발한 장비에 의한 측정값의 절대적인 비교 분석은 수행할 수 없었으나, 개발 장비의 자동화 시스템 적용과 기존 장비와 같이 자동화를 적용하지 않은 경우에 대한 비교 시험 결과, 자동화를 통한 시험자의 오차발생 가능성을 최소화시킴으로써 현실적인 시험수량의 제약에도 불구하고 정량적이고 신뢰성이 확보되는 지반특성값의 제공이 가능함을 확인할 수 있었다.

이러한 사실은 향후 국내외적으로 더욱 활발한 적용이 예상되는 한계상태설계법에 있어서 가장 핵심적인 입력변수의 불확실성을 제거한다는 점에서 대단히 중요한 핵심기술일 것이다.

6. 결론

북미지역에서의 하중저항계수설계법과 유럽지역에서의 유로코드로 대별되는 한계상태설계법이 국내에서도 적극 도입되면서 구조물에 대한 하중계수와 지반 자체의 저항계수를 정량적으로 파악, 이를 설계에 반영함으로써 구조물의 사용 목적과 중요도에 따른 최적 설계로의 전환이 이루어지고 있다.

본 연구에서는 이러한 한계상태설계법에서 지반의 저항계수를 정량적으로 평가함에 있어 핵심 지반정수인 단위중량, 포아송비, 변형계수, 점착력 및 내부마찰각 등이 실제 설계에서 어떻게 적용되어 왔는지를 검토하기 위해 38개의 국내 시공사례를 분석하였으며, 이를 통해 지반안정성 해석에 주도적인 역할을 하는 점착력과 내부마찰각의 직접 측정에 대한 중요성을 확인할 수 있었다. 따라서 이들 지반특성값을 높은 신뢰수준으로 측정하기 위해 ASTM에서 규정하는 장비 및 측정방법의 기준을 최대한 준용할 수 있는 풍화대 강도특성 측정장치를 개발하였으며, 본 장비의 현장적용을 통해 개발된 장비의 성능분석을 수행하였다. 이상의 연구에 따른 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 총 38개의 현장조사 사례에서 확인된 측정값과 도로설계편람(또는 지반조사편람)에 의한 제안값을 비교한 결과, 비교적 유사한 범위를 나타내는 단위중량과 달리, 포아송비는 경암의 경우 측정값의 상한 범위가 제안값의 상한 범위보다 높게 나타나는 것으로 분석되었으며, 변형계수 또한 풍화도 이상의 암반에 대해 측정값의 범위가 제안값의 범위보다 넓게 나타나는 것으로 분석되었다.
- 2) 기반암에 대해서는 실내시험결과를, 풍화도 및 풍화암에 대해서는 공내전단시험의 결과를 제시하고 있는 점착력의 경우, 공내전단시험으로 제시되는 풍화도 및 풍화암에 대해서는 제안값의 범위가 100~300 kPa인 반면, 측정값의 범위는 19.5~37.0 kPa로 나타나 제안값에 의해서는 매우 보수적인 설계값이 반영되어 왔음을 알 수 있으며, 내부마찰각의 경우는 제안값에 비해 측정값의 범위가 오히려 넓게 나타나는 경향을 확인하였다. 즉, 풍화도 및 풍화암에 대한 공내전단시험으로부터 구해지는 점착력과 내부마찰각은 측정값과 제안값 사이에 특정한 관계계수가 보이지 않는 점에서 신뢰도 높은 지반특성값의 제시를 위해서는 직접측정에 의한 정량값의 제공이 필요함을 알 수 있다.
- 3) 풍화대 강도특성 측정장치는 ASTM 표준절차에 따라 전단판의 면적, 전단판을 구성하는 톱니의 개수 및 형상, 전단판의 상승속도 제어를 위한 자동장치 등을 반영하여 개발되었으며, 본 장비에는 별도의 프로그램을 삽입하여 현장시험조건과 시험 상황 및 결과 등이 자동 기록됨과 동시에 보고서 발행까지 이루어지도록 하였다.
- 4) 개발된 풍화대 강도특성 측정장치의 현장적용이 3개의 시추공에 대해 수행되었으며 총 20회의 공내전단시험을 통해 기존의 장비와 같이 수동 작업으로 진행되는 경우와 본 연구에서 개발된 자동 작업으로 진행되는 경우를 각각 별도로 수행하였으며, 각 시추공에 대해 시험자를 달리하여 시험을 수행하였다.
- 5) 3개 시추공에 대한 현장적용 결과, 자동 작업의 경우 수동 작업에 비해 점착력의 경우 0.6~1.2 kPa 가량, 내부마찰각의 경우 0.5~0.8° 가량 크게 나타나고 있으며, 점착력 및 내부마찰각 모두 수동 작업에 의한 표준편차가 자동 작업에 의한 표준편차보다 크게 나타나고 있음을 확인하였는 바, 이는 시험자에 따라 또는 동일한 시험자라 하더라도 시험수행 상황에 따라 일관적이지 않은 경우가 발생할 가능성이 높음을 의미하는 값이며, 따라서 풍화대 강도특성의 측정에 있어 매우 큰 요인으로 작용하는 장비 내 전단판의 상승속도의 정량적 조정의 중요성이 확인됨을 알 수 있다.

대부분 현장시험에 의해 산정되는 풍화도 및 풍화암 지반의 점착력과 내부마찰각은, 한계상태설계법에서의 핵심 지반특성값이며 설계의 신뢰도 및 정확성 향상을 위해 반드시 직접 측정에 의해 제시되어야 할 것이다. 또한 현실적으로 한정된 수량으로 시험을 수행할 수밖에 없는 경우를 감안할 때 시험자의 주관적 오류 또는 시험장비의 기계적 오류에 의한 오차발생을 최소화하고 최소한의 시험수량으로도 자료의 신뢰성을 확보할 수 있는 시험장비 및 시험방법의 현장적용이 반드시 확보되어야 할 것이다.

사사

본 연구는 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 건설기술 연구개발 사업인 “도심지 소단면 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술(15SCIP-B10514-01)” 과제의 지원을 받아 수행되었음.

REFERENCES

- Becker, D.E., 2006, Limit state design based codes for geotechnical aspects of foundation in Canada, Proc. of Taipei 2006 International Symposium on New Generation Design Codes for Geotechnical Engineering Practice, Taipei, Vol. 1. pp.3-4.
- Cambell, D.B. and Hudson, W.R., 1969, The determination of soil properties In Situ, Research Report 89-7, Center for Highway Research, Univ. of Texas-Austin, 61p.
- Elzaroug, O., 2013, Design of Reinforced Concrete Beams by Ultimate Strength According to Different Codes, Proc. of 12th Arab Structural Engineering Conference.
- Eurocodes, 2013, EN 1990: Basis of Design, www.eurocodes.jrc.ec.europa.eu.
- European Commission, 2013, Eurocode 7; Geotechnical Design Worked examples, JRC Scientific and Policy Reports, www.eurocodes.jrc.europa.eu.
- Handy Geotechnical Instruments, Inc. 2020, Borehole Shear Tester, www.handygeotech.com.
- ISO 2394, 2015, General principles on reliability for structures, www.iso.org.
- Lutenegger, A.J., "Suggest Method for Performing the Borehole Shear Test" Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 10, No. 1, March 1987, pp. 19-25.
- Lutenegger, A.J. and Hallberg, G.R., "Borehole Shear Test in Geotechnical Investigations" Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM STP 740, R.N. Yong and F.C.Townsend, Eds., American Society for Testing and Material, 1981, pp.566-578.
- Minnesota Department of Transportation Bridge Office, 2018, LRFD Bridge Design Manual, www.dot.state.mn.us.
- Ovesen, N.K., 1995, Eurocode 7 for geotechnical design, Proceedings of Bengt B. Broms Symposium on Geotechnical Engineering, Singapore, Vol.1. pp.333-360.
- Schneider, H.R., 1997, Definition and determination of characteristic soil properties, Proceedings of XII International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Hamburg, Balkema, Rotterdam, Vol.1, pp. 2271-2274.
- Schneider, H.R., 1999, Determination of characteristic soil properties, Proceedings of 12th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Amsterdam, Balkema, Rotterdam, Vol.1, pp.273-281.
- Student, 1908, The probable error of a mean, Biometrika, Vol.6. pp.1-25.
- Thorley, A., Broise, Y., Calhoon, M.L., Zeman, Z.P., and Watt, W.G., 1970, In situ investigations in soil and rocks, Institute of Civil Engineers, London, pp.155-165.
- US Department of Transportation Federal Highway Administration, 2015, Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Highway Bridge Superstructures, Reference Manual, www.fhwa.dot.gov.
- 국토해양부, 2012, 도로설계편람.
- 국토교통부, 2016, 강교 설계기준 (허용응력설계법), 국가건설설계기준 KDS 24 14 30, 117p.
- 국토교통부 국토교통과학기술진흥원, 2014, 표준화를 위한 구조물 기초 설계기준의 정비연구 최종보고서, 건설교통기술촉진사업 기술 표준화, 319p.
- 서울특별시, 1996, 지반조사편람.
- 정경자, 남문석, 박영호, 조성민, 안재형, 2017, 도로교량 매입말뚝의 한계상태설계법 적용방안 연구, 한국도로공사 도로교통연구원, 2017년도 연구보고서, 151p.
- 한국암반공학회, 한국지구물리탐사학회, 한국자원연구소, 1999, 건설기술자를 위한 지반조사 및 시험기술, 암반공학기술강좌, 799p.
- (주)계룡건설, 2015, 주암댐 도수터널 시설 안정화 건설공사.
- (주)단우기술단, 2009, 인천지하철 2호선 205공구 기본설계(T/K).
- (주)단우기술단, 2009, 인천도시철도 2호선 203공구 실시설계.

- 대림산업(주), 2015, 충주댐 치수능력증대(T/K)건설공사 실시설계.
- 대림산업(주), 2014, 충주댐 치수능력증대 건설공사.
- 대림산업(주), 2013, 철도시험선로 건설공사.
- 대림산업(주), 2013, 평화의 댐 치수능력증대(TK)실시설계중 지반조사.
- 대림산업(주), 2012, 평화의 댐 치수능력증대(TK)기본설계 지반조사.
- 대림산업(주), 2011, 안동-임하댐 연결공사 기본설계.
- 대림산업(주), 2009, 경인운하 제6공구 시설공사(T/K) 기본설계.
- 대림산업(주), 2008, 안동댐 비상여수로 건설공사 실시설계.
- 대림산업(주), 2007, 안동댐 비상여수로 건설공사 기본설계.
- 대림산업(주), 2007, 영천-상주고속도로 민간투자사업 지반조사.
- 동부건설(주), 2009, 낙동강 살리기 20공구(창녕,의령,합천지구).
- 동부건설(주), 2008, 고속국도 제60호선 동홍천-양양간 11공구.
- 동부엔지니어링(주), 2009, 인천도시철도 204공구 건설공사 T/K 설계.
- 두산건설(주), 2007, 대구광역시 대로2-44호선 교량신설공사.
- 두산건설(주), 2009, 주암댐 비상여수로 건설공사 일괄입찰 설계.
- 삼성물산(주), 2013, 수도권 제2외곽순환(화도-양평간)고속도로 제3공구 건설공사 기본설계.
- 삼성물산(주), 2011, 서해선 홍성~송산 복선전철 제4공구 건설공사 기본설계.
- 삼성물산(주), 2009, 압해-임태(2공구) 도로건설공사 기본설계.
- 삼성물산(주), 2009, 대구도시철도 3호선4공구(팔달로구간).
- (주)삼안, 2013, 에코델타시티 3구간 건설공사 기본 및 실시설계.
- SK건설(주), 2013, 중앙선 도담~영천 복선전철 제2공구 실시설계.
- SK건설(주), 2012, 중앙선 도담~영천 복선전철 제2공구 기본설계.
- SK건설(주), 2009, 인천도시철도 2호선 203공구 기본설계.
- SK건설(주), 2009, 호남고속철도 제1-2공구 노반신설 기타공사.
- SK건설(주), 2007, 충주시 하수관거정비 임대형 민자사업(BTL).
- (주)제일엔지니어링, 2006, 안동시 관내 국도대체우회도로(교리-수상) 실시설계.
- 현대건설(주), 2014, 진접선(당고개-진접)복선전철 3공구.
- 현대건설(주), 2010, 대곡~소사 복선전철 민간투자시설사업 실시설계.
- 현대건설(주), 2007, 고속국도 60호선 춘천-양양(동홍천-양양) 14공구.
- 현대산업개발(주), 2010, 수도권 고속철도 수서~평택 제4공구 건설공사 실시설계.
- 현대산업개발(주), 2010, 부산-마산 복선전철 민간투자시설사업.
- 현대산업개발(주), 2009, 서울지하철 9호선 3단계 919공구 기본설계.
- 현대산업개발(주), 2008, 서울지하철 9호선 2단계 916공구 실시설계.
- 현대산업개발(주), 2007, 서울지하철 9호선 2단계 916공구 기본설계.
- 현대산업개발(주), 2007, 인천청라지구 경제자유구역 개발사업 5공구.