



# 휴대용 정적 콘 관입시험을 통한 저수지 제방 토양의 다짐, 강도 특성 및 사면 안정성 예측

## Prediction of Compaction, Strength Characteristics for Reservoir Soil Using Portable Static Cone Penetration Test

전지훈<sup>a</sup> · 손영환<sup>b,†</sup> · 김태진<sup>c</sup> · 조상범<sup>d</sup> · 정승주<sup>e</sup> · 허준<sup>f</sup> · 봉태호<sup>g</sup> · 김동근<sup>h</sup>

Jeon, Jihun · Son, Younghwan · Kim, Taejin · Jo, Sangbeom · Jung, Seungjoo · Heo, Jun · Bong, Taeho · Kim, Donggeun

### ABSTRACT

Due to climate change and aging of reservoirs, damage to embankment slopes is increasing. However, the safety diagnosis of the reservoir slope is mainly conducted by visual observation, and the time and economic cost are formidable to apply soil mechanical tests and slope stability analysis. Accordingly, this study presented a predicting method for the compaction and strength characteristics of the reservoir embankment soil using a portable static cone penetration test. The predicted items consisted of dry density, cohesion, and internal friction angle, which are the main factors of slope stability analysis. Portable static cone penetration tests were performed at 19 reservoir sites, and prediction equations were constructed from the correlation between penetration resistance data and test results of soil samples. The predicted dry density and strength parameters showed a correlation with test results between  $R^2$  0.40 and 0.93, and it was found to replace the test results well when used as input data for slope stability analysis ( $R^2$  0.8134 or more, RMSE 0.0320 or less). In addition, the prediction equations for the minimum safety factor of the slope were presented using the penetration resistance and gradient. As a result of comparing the predicted safety factor with the analysis results,  $R^2$  0.5125, RMSE 0.0382 in coarse-grained soil,  $R^2$  0.4182 and RMSE 0.0628 in fine-grained soil. The results of this study can be used as a way to improve the existing slope safety diagnosis method, and are expected to be used to predict the characteristics of various soils and inspect slopes.

**Keywords:** Portable static cone penetration test; dry density; cohesion; internal friction; slope stability

### 1. 서론

최근 자연재해로 인한 사면 슬라이딩, 침하 등 저수지 제체 사면의 피해가 꾸준히 발생하고 있으며, 기후변화로 인한 극한강우의 빈도, 강도 증가로 저수지 제체 사면의 취약성이 증가하고 있다 (Heo et al., 2022). 또한, 약 86%의 저수지가 50년 이상의 공용 연수를 나타내고 있어 저수지의 노후화에 따른 유지관리 및 보강방안이 필요한 실정이다 (KRC, 2020). 이러한 문제는 2000~2016년 4,119개 저수지에 대한 안전진단 결과 D등급 비율이 23.3%를 차지하거나, 2020년에는 집중호우로 인하여 경기도 이천시 소재 산양저수지, 경기도 안성시 북좌저수지가 붕괴되는 등 다양한 사례를 통하여 나타나고 있다 (Jeon & Bang, 2021; Heo et al., 2022). 이에 따라, 국내 농업용 저수지를 관리, 운영하는 한국농어촌공사와 지방자치단체에서는 제방 사면에 대한 안전점검을 정기적으로 수행하고 있으나 시설물별 상태를 육안 관찰을 통하여 확인하고 있으므로 현장의 안전 상태에 대한 정량적 파악이 어렵다. 저수지 제체에 대한 안전진단을 위하여, 다양한 토질시험을 수행하여 제방 사면의 기초물성과 다짐도, 전단강도 등을 파악한 후 이를 반영한 사면 안정성 해석 결과를 활용할 수

<sup>a</sup> Ph.D. Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

<sup>b</sup> Professor, Department of Rural Systems Engineering and Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

<sup>c</sup> Ph.D. Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

<sup>d</sup> MD Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

<sup>e</sup> Undergraduate Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

<sup>f</sup> Researcher, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

<sup>g</sup> Assistant Professor, Department of Forest Science, Chungbuk National University

<sup>h</sup> Postdoctoral Researcher, Graduate School of Agriculture, Kyoto University

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4585, Fax: +82-2-873-2087

E-mail: syh86@snu.ac.kr

Received: May 01, 2023

Revised: May 25, 2023

Accepted: June 08, 2023

있다. 그러나, 이러한 과정에는 많은 시간과 인력, 경제적 비용이 발생하므로 적절한 보수 시기를 놓칠 우려가 있고 시설물 피해 직후의 신속한 대응에 부적합하며, 전국 저수지 개소수와 안전진단에 할당된 인력, 예산 규모를 고려하면 더욱 적용이 어렵다. 따라서 저수지 제체 안전진단 시 짧은 시간과 적은 인력, 비용을 투입하여 제체 사면의 안정성을 정량적으로 파악할 수 있도록 현장에서 간편하게 수행될 수 있는 시험방법이 도입될 필요가 있다.

한편, 휴대용 콘 관입시험은 현장에서 적은 인력으로 간편하게 수행될 수 있으며, 시험 방법에 따라 일정한 관입 속도를 유지하여 저항치를 산정하는 휴대용 정적 콘 관입시험 (Portable Static Cone Penetration Test, PSCPT), 관입 시마다 일정한 하중을 가하여 타격 당 관입 깊이를 기록하는 휴대용 동적 콘 관입시험 (Portable Dynamic Cone Penetration Test, PDCPT)으로 구분된다. 최근에는 노상의 강도, 회복탄성계수 등을 측정할 수 있도록 휴대용 동적 콘 관입시험기를 개선, 개량하는 연구도 수행되고 있다 (Byun & Kim, 2019; Lee et al., 2019). 휴대용 정적 콘 관입시험의 경우 휴대용 동적 콘 관입시험보다 장비가 경량이고 지점 당 소요 시간이 짧아 저수지 사면에 적용 시 더 넓은 면적과 많은 지점을 고려할 수 있다는 장점이 있다. 휴대용 콘 관입시험을 통하여 획득된 관입 저항값은 CBR 값 (Kleyn, 1975; Livneh, 1993), 표준관입시험 N치 (Kim & Park, 2006; Lee & Lee, 2014; Lee & Cho, 2020) 예측에 활용되어왔으며, 최근에는 노상토의 탄성계수 (Kim, 2015), 액상화 가능성 (Dwipa et al., 2020) 등 다양한 지반 특성 예측이 가능한 것으로 보고되고 있다. 특히, Lee & Lee (2008)에서는 댐 사면에 휴대용 동적 콘 관입시험 결과를 적용하여 성토재의 강도정수를 예측하는 방법을 제시하였으나, 사면 안정성 해석 시 주요한 입력자료이며 제방 안전 상태에 직접적인 영향을 미치는 현장밀도에 대하여 고려하지 않았다는 한계가 있다. 또한 Park et al. (2012)에서는 휴대용 콘 저항값을 이용하여 모래의 상대밀도와 내부마찰각을 추정하는 연구를 수행하였으나, 2종의 토양 시료를 밀도별로 성형, 실내시험을 수행하여 현장에 바로 적용하기 어렵다는 한계가 있다. 더불어, 저수지 제방 사면의 설계 및 안정성 평가에 주로 활용되는 사면 안전율을 구하기 위해서는 각각의 제방마다 예측된 강도정수를 적용하여 별도로 사면 안정성 해석을 수행하여야 하므로 이에 따른 시간적, 경제적 비용이 추가로 발생할 수 있다. 따라서, 저수지 제방의 신속한 안전진단을 가능케 하기 위해서는 휴대용 콘 관입시험 결과를 활용한 사면의 안전율 산정 기법이 제시될 필요가 있다. 이를 위해서는 먼저 실내시험을 통하여 산출된 토양의 물성과 지반의 다짐도, 전단강도 값을 휴대용 콘 관입시험 결과와 비교하여 저수

지 제방에서 휴대용 콘 관입 시험을 통한 토양 특성의 예측 방법의 적용성을 확인하여야 한다. 이후, 콘 관입 저항치로부터 예측된 토양 특성과 실내시험 결과를 반영한 사면 안정성 해석을 각각 수행하고 결과를 비교하여야 한다.

따라서, 본 연구에서는 국내 저수지 현장에 대한 휴대용 정적 콘 관입시험을 수행하여 그 결과를 분석하고, 현장 시료의 실내시험 결과와의 상관성을 평가하여 휴대용 콘 관입시험을 이용한 저수지 제방의 다짐도 및 전단강도 예측 방법을 제시하였다. 또한, 휴대용 콘 관입시험을 이용하여 예측된 다짐도와 전단강도를 반영한 사면 안정성 해석을 수행하여 휴대용 콘 관입시험을 통한 저수지 제방의 사면 안정성 예측 기법을 제시하고, 이를 실내시험 결과치를 활용한 해석 결과와 비교하여 그 적용성을 평가하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 연구대상지

휴대용 정적 콘 관입시험 대상지로 2022년 한국농어촌공사 정밀안전진단 대상 지구 중에서 지역별 분포를 고려하여

Table 1 Specifications of research sites

Site (Abbreviation)	Downstream slope
Chungbuk-A (CB-A)	1 : 2.0
Chungbuk-B (CB-B)	1 : 2.4
Chungnam-A (CN-A)	1 : 2.1
Chungnam-B (CN-B)	1 : 2.0
Chungnam-C (CN-C)	1 : 2.4
Gangwon-A (GW-A)	1 : 1.8
Gangwon-B (GW-B)	1 : 2.5
Gyeongbuk-A (GB-A)	1 : 2.0
Gyeongbuk-B (GB-B)	1 : 2.0
Gyeongbuk-C (GB-C)	1 : 2.3
Gyeonggi-A (GG-A)	1 : 2.3 (Upper slope), 1 : 1.5 (Lower slope)
Gyeonggi-B (GG-B)	1 : 2.4 (Upper slope), 1 : 2.2 (Lower slope)
Gyeongnam-A (GN-A)	1 : 2.0
Gyeongnam-B (GN-B)	1 : 2.2
Gyeongnam-C (GN-C)	1 : 2.0
Jeonbuk-A (JB-A)	1 : 2.2
Jeonbuk-B (JB-B)	1 : 2.0
Jeonnam-A (JN-A)	1 : 2.5
Jeonnam-B (JN-B)	1 : 2.0

도별로 2개소 이상이 되도록 농업용 저수지 19개소를 선정하였다. 다음 Table 1은 대상지 선정 결과와 각각의 약칭, 대상지별 한국농어촌공사 정밀안전진단보고서로부터 획득한 하류사면 경사를 나타낸다.

### 2. 휴대용 정적 콘 관입시험 방법

휴대용 정적 콘 관입시험 위치는 제방 길이의 1/3, 2/3, 제방 높이의 1/2 지점으로 선정하였으며, 지점별로 관입깊이 5 cm 마다 저항값을 기록하였다. 저항값은 관입 속도에 따라 상이하게 나타나므로 본 연구에서는 시험 시 콘 관입시험에 일반적으로 적용되는 관입속도 20 mm/s (Kim et al., 2008)를 유지하도록 하였다. 휴대용 정적 콘 관입시험에 이용된 장비와 구성품은 다음 Fig. 1과 같다.

다음 식 (1), (2)와 같이 동력계 (0.981 kN) 지시값에 따라 가해지는 하중을 구할 수 있으며, 이 하중에 콘 면적을 나누어 관입 저항값 ( $q_c$ , MPa)을 산출하였다.

$$y = 0.0270x \tag{1}$$

$$q_c = 10x/a \tag{2}$$

여기서,  $y$ 는 게이지의 지시값 (mm),  $x$ 는 하중 (kN),  $a$ 는 콘의 면적 ( $6.45 \text{ cm}^2$ )이다.

### 3. 대상지 토양의 실내 물성시험 방법

실내 물성시험에 활용된 토양 시료는 반복시험에 의한 정밀성 확보를 위하여 대상지별로 식생 및 유기질 표토를 제거

한 후 5~15 cm 깊이에서 2개의 시료를 채취하였다. 채취지점은 제방 길이의 1/3, 2/3, 제방 높이의 1/2 지점으로 선정하였다. 또한, 채취 깊이와 동일하게 현장 들밀도시험을 수행하고, 실험실에서 토양 시료에 대한 다짐시험 및 직접전단시험을 수행하여 대상 제체 하류사면 성토 재료의 다짐 및 강도 특성을 평가하였다. 다음으로 대상지별 토양 시료의 현장 건조밀도와 다짐시험 결과로부터 상대다짐도 (Relative compaction,  $R_C$ )를 산출하였으며 방법은 다음 식 (3)과 같다.

$$R_C = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d_{max}}} \times 100 (\%) \tag{3}$$

여기서,  $R_C$ 는 시료의 상대다짐도 (%),  $\gamma_d$ 는 시료의 건조밀도 ( $\text{kN/m}^3$ ),  $\gamma_{d_{max}}$ 는 다짐곡선으로부터 얻은 시료의 최대 건조밀도 ( $\text{kN/m}^3$ )이다. 각각의 시험은 아래 Table 2에 기술된 시험 기준에 따라 수행되었다.

**Table 2** Indoor test items and standards for soil

Items	Standards
Sampling	KS F 2317
In-situ density test	KS F 2311
Particle size distribution test	KS F 2302
Liquid limit, plastic limit test	KS F 2303
Classification of soil	KS F 2324
Soil compaction test	KS F 2312
Direct shear test	KS F 2343

No.	Items	Quantity
1	Handle (d=12mm)	1
2	Rod	17
3	Handle (d=18mm)	1
4	Handle (steel)	1
5	Ring dynamometer	1
6	Cone ( $6.45\text{cm}^2$ )	3
7	Spanner (13mm)	2
8	Accessory kit	1
9	Metal bar	2
10	Spanner (19mm)	2
11	Nut	1
12	Rod case (metal)	1
13	Dynamometer case (wood)	1
14	Calibration report	1



**Fig. 1** Components of PSCPT equipment

#### 4. 휴대용 정적 콘 관입시험을 통한 토양의 밀도와 강도정수 예측

먼저, 휴대용 정적 콘 관입시험은 실내시험용 시료 채취 및 현장시험이 수행된 지점에서 5 cm 깊이 간격 저항치를 측정하고, 인력으로 관입이 가능한 범위와 실내시험 시료의 채취 깊이, 현장 들밀도시험이 수행된 심도를 고려하여 5, 10, 15 cm 깊이에서의 관입저항치 평균을 예측에 활용하였다. 또한, 토양 시료의 분류 결과에 따라 조립토, 세립토 각각의 예측이 가능하도록 하였다. 이후, 시료의 건조밀도를 휴대용 정적 콘 관입시험 결과로부터 얻은 대상지별 선단저항값과 각각 비교하여 회귀분석을 수행하였다. 회귀식 구성 시 지수, 거듭제곱, 선형 3종의 개형에 대하여 Microsoft Excel에서 제공하는 Solver 기능을 활용, 각각 평균제곱근오차 (RMSE, Root mean square error)가 가장 작도록 계수 및 지수를 최적화하였다. 이로부터 도출된 3개의 회귀식 중에서 가장 작은 평균제곱근오차를 갖는 식을 휴대용 정적 콘 관입시험을 통한 제방 다짐도 예측식으로 선정하였다. 상기 방법과 유사하게, 토양 시료에 대한 직접전단시험 결과로부터 얻은 점착력 (Cohesion, kPa) 과 내부마찰각 (Internal friction angle, °)을 각각 휴대용 콘 관입시험 결과와 비교, 회귀분석하여 강도정수 예측식을 구성하고, 이를 제시하였다. 다음 Table 3은 콘 관입 저항치( $q_c$ , MPa) 를 변수로 하는 점착력  $C(q_c)$ , 내부마찰각  $\phi(q_c)$ , 건조밀도  $\gamma_d(q_c)$  예측식의 형태를 나타낸다.

다음 식 (4)는 평균제곱근오차의 산출과정이다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (H(x_i) - y_i)^2} \quad (4)$$

여기서,  $m$ 은 데이터의 개수,  $H(x_i)$ 는 예측값,  $y_i$ 는 실험값이다.

**Table 3** Forms of prediction equations for soil strength parameters, dry density

	Function
Prediction equation	$y(q_c) = C(q_c)$ (kPa) or $\phi(q_c)$ (degree) or $\gamma_d(q_c)$ (kN/m <sup>3</sup> )
Linear	$y(q_c) = a \times q_c + b$
Exponential	$y(q_c) = a \times e^{b \times q_c} + c$
Power	$y(q_c) = a \times q_c^b + c$

#### 5. 휴대용 콘 관입시험을 통한 제방 사면 안정성 예측

제방 사면 안정성 예측 방법을 도출하기 위하여, 한국농어촌공사의 대상지별 정밀안전진단보고서에 제시된 표준단면 도로로부터 제방 길이와 높이, 제정 폭, 상류사면과 하류사면의 경사, 소단의 위치와 폭 등을 반영한 도면을 구성하였다. 이후, 토양 시료에 대한 현장밀도시험, 직접전단시험결과로부터 얻은 현장 건조밀도, 강도정수 2 set를 각각 예측식 산정 결과로 대체함에 따라 대상지별로 4개의 Case를 구성하였다.

제방 성토재의 습윤단위중량의 경우 현장 함수비를 반영하여 산출, 이용하였으며, 중심 코어와 기반암의 물성은 대상지별 정밀안전진단보고서에서 사면 안정성 검토 시 이용된 값을 사용하였다. 상기 Case별로 MIDAS SoilWorks V560을 이용하여 사면 안정성 해석을 수행하였다. 해석조건은 2D, 한계 평형법 (Limit Equilibrium Method, LEM)을 이용하여 제방 상, 하류사면의 최소 안전율을 산출하였다. 이후, 예측식 산정 결과를 적용하여 산출된 사면 안전율과 시험 결과를 적용하여 산출된 사면 안정성 해석 결과를 비교하였다. 최종적으로 휴대용 정적 콘 관입저항치와 안전율의 상관관계를 확인하고, 제방 다짐도 및 강도정수 산정식 구성 방법과 같이 예측식의 개형과 계수를 결정하여 휴대용 콘 관입시험을 이용한 사면 안전율 산정식을 제시하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 휴대용 정적 콘 관입시험 결과

대상지별 시험지점 각각에 대하여 정적 콘 관입시험을 수행하여, 관입깊이 5 cm, 10 cm, 15 cm에서의 관입저항치 평균값을 얻었으며, 그 결과는 다음 Table 4와 같다.

조사된 정적 콘 관입저항치의 5~15 cm 평균값의 전체 평균은 0.4965 MPa, 최댓값은 0.6816 MPa (GB-C, 지점 2), 최솟값은 0.3521 MPa (GG-B, 지점 1)로 나타났다. 또한, 동일 제방 내에서 각각 편차의 절대값을 확인한 결과, GN-B와 같이 제방 내 타 지점 간 관입저항치가 약 0.0029 MPa 로 큰 차이를 보이지 않는 지점이 있는 반면 CN-B (0.1451 MPa), GW-B (0.1422 MPa)와 같이 큰 편차를 보이는 지점들도 존재하였다. 동일 제방 내에서 콘 관입저항치가 큰 편차를 보이는 경우에는 재료가 동일하다고 가정할 때 다짐도가 균일하지 않을 우려가 있으므로 이에 대한 확인이 필요하다. 이와 같이 제방 사면의 여러 지점에 대하여 휴대용 정적 콘 관입시험을 수행할 경우, 제방 내 관입저항치 편차가 큰 저수지의 경우에는 균일하고 충분한 다짐도를 갖도록 관리하는 데 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

**Table 4** Portable static cone penetration test (PSCPT) results

Site	$q_c$ (Point 1, MPa)	$q_c$ (Point 2, MPa)	Absolute deviation (MPa)
CB-A	0.4187	0.4521	0.0333
CB-B	0.3668	0.4393	0.0726
CN-A	0.4678	0.5472	0.0794
CN-B	0.6551	0.5100	0.1451
CN-C	0.4060	0.4727	0.0667
GB-A	0.4746	0.4599	0.0147
GB-B	0.5158	0.5629	0.0471
GB-C	0.6365	0.6816	0.0451
GG-A	0.4433	0.4746	0.0314
GG-B	0.3521	0.3756	0.0235
GN-A	0.4040	0.3648	0.0392
GN-B	0.4158	0.4187	0.0029
GN-C	0.5198	0.5364	0.0167
GW-A	0.6404	0.6031	0.0373
GW-B	0.6149	0.4727	0.1422
JB-A	0.5158	0.5433	0.0275
JB-B	0.5364	0.4433	0.0932
JN-A	0.6590	0.5923	0.0667
JN-B	0.4246	0.4472	0.0226

## 2. 대상지 토양의 물성시험 결과

각 대상지 지점별 토양 시료의 함수비, 분류결과 및 현장들밀도시험, 다짐시험으로부터 획득한 시료별 건조밀도, 최대 건조밀도와 상대다짐도, 직접전단시험으로부터 획득한 강도 정수는 다음 Table 5와 같다.

토양의 세립분 함량은 10.2~64.3%로 나타났으며, 세립분 함량 50% 이상인 세립질 토양의 경우 전체 시료 38개 중 10개로 모두 저압축성 실트 (ML)로 분류되었다. 나머지 28개는 실트질 모래 (SM) 또는 입도가 불량한 실트질 모래 (SP-SM)로 분류되었다. 관련 설계기준인 필댐 설계기준 (ME, 2022)과 농업생산기반정비사업계획 설계기준 : 필댐편 (MAFRA, 2002)에서는 축제재료 선정 시 작은 압축성, 수용성 물질과 유기물의 미포함, 다짐의 용이성과 다진 상태에서 소요의 투수계수와 전단강도 등을 만족할 것을 정하고 있다. 이에 따라, 세립분 함량 50% 이상인 세립토에 대하여 재료의 적합성을 판단하기 위해서는 투수성과 워커빌리티에 대한 평가가 필요하다. 함수비의 경우, 토양 채취가 하절기 (6~8월)에 수행되어 30% 이상의 고풍수비를 나타내는 시료가 다수 관찰되었다. 토양 시료의 점착력은 4.5~29.3 kPa, 내부마찰각은 24.7~39.5°의 범위로 나타났다. 특히, 상대다짐도 (Relative compaction, 최대건조밀도에 대한 현장건조밀도의 비)의 경우

댐 설계기준 - 필댐 (ME, 2022)에서 권장하고 있는 습윤축 90~95%의 범위에 미달하는 시료가 총 38개 중 31개로 약 81.6%를 차지하였다. 이는 현장들밀도시험이 수행된 심도가 동물 또는 인력의 통행, 바람이나 강우, 식생 피복에 따른 교란이나 유기물 혼입 등에 취약한 표층이었기 때문으로 사료되며, 향후 깊은 심도까지 현장밀도를 측정하여 다짐도를 확인하여야 할 것으로 판단된다.

## 3. 콘 관입시험을 통한 토양 밀도와 강도정수의 예측

토양 시료별 채취지점에서 수행된 5~15 cm 콘 관입저항치 평균값을 이용하여 조립토와 세립토의 점착력, 내부마찰각, 건조밀도 예측식을 구성하였다. 다음 Table 6, Table 7은 각각 조립토와 세립토의 개형별 예측식 계수 및 지수, 예측결과와 시험 데이터 간 비교 결과로부터 결정계수 (Coefficient of determination,  $R^2$ ), 평균제곱근오차 (Root mean square error, RMSE)를 산출하여 나타낸 것이다.

예측식 구성 결과를 살펴보면, 거둬제공 형태의 예측식이 모든 경우에서 가장 작은 평균 제곱근 오차를 나타내어 최종 예측식으로 선정되었으며, 점성토의 점착력 예측식은 선형에서 가장 큰 결정계수를 보였으나 평균 제곱근 오차가 가장 크게 나타나 제외하고, 거둬제공 형태의 예측식을 선정하였

**Table 5** Physical properties of soil

Site	Sample No.	Water contents (%)	Classification	Cohesion (kPa)	Internal friction (degree)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$R_c$ (%)	$\gamma_{d\max}$ (kN/m <sup>3</sup> )
CB-A	1	27.9	SM	5.4	30.3	12.2	78	15.71
	2	25.3	SM	11.2	37.5	13.5	89	15.23
CB-B	1	32.2	ML	11	28.6	11.23	73	15.38
	2	42.4	ML	12.2	25.4	11.71	76	15.47
CN-A	1	20.1	SM	7.1	36.3	14.94	84	17.69
	2	26.5	SM	8.3	34.2	14.71	84	17.58
CN-B	1	15	SM	7.6	39.4	16.28	88	18.46
	2	17.2	SP-SM	8.3	35.4	13.88	75	18.58
CN-C	1	38.2	SM	14.4	25	12.75	80	16.01
	2	24.6	SM	10.4	34.1	14.74	90	16.44
GB-A	1	24	SM	5.1	30	10.69	65	16.32
	2	18.1	SM	11.5	27.6	10.34	74	13.95
GB-B	1	19.6	SM	10.2	34.3	13.28	80	16.54
	2	18.4	SM	13.3	35.3	13.53	82	16.59
GB-C	1	20.7	SM	16.8	33.9	15.88	92	17.21
	2	13.5	SM	18.8	36.3	15.39	89	17.38
GG-A	1	19.4	SM	6.8	35.8	12.54	75	16.75
	2	21.2	SM	8.2	34.1	13.73	82	16.67
GG-B	1	33.5	SM	4.5	31.1	10.77	62	17.47
	2	31.7	SM	6.9	33.4	12.02	68	17.62
GN-A	1	35.9	ML	7.9	29.9	11.53	72	15.97
	2	28.5	SM	9.6	24.7	11.39	70	16.26
GN-B	1	33.9	ML	13.8	32	13.07	87	15.09
	2	31.1	ML	14.3	32.2	13.14	86	15.27
GN-C	1	28.5	SM	10.3	29	12.68	83	15.23
	2	26	ML	14.5	26.1	11.28	74	15.26
GW-A	1	18.7	SM	23.2	39.5	17.28	99	17.42
	2	13	SM	10.2	37.3	15.46	88	17.53
GW-B	1	28.2	SM	5.3	37.4	14.6	81	18.06
	2	25.2	SM	6.9	36.9	14.46	80	18.02
JB-A	1	25.5	ML	20.2	25.9	12.02	81	14.8
	2	28.7	ML	21	34.2	13.67	92	14.84
JB-B	1	14.1	SM	8.2	37.3	15.01	90	16.69
	2	19.5	SM	14.5	32.2	14.37	87	16.5
JN-A	1	17.8	ML	29.3	35.8	15.27	94	16.32
	2	24.1	ML	27.1	37.4	14.01	92	15.22
JN-B	1	24.9	SM	8.3	31.2	11.59	71	16.23
	2	21.6	SM	10	32.9	12.19	77	15.89

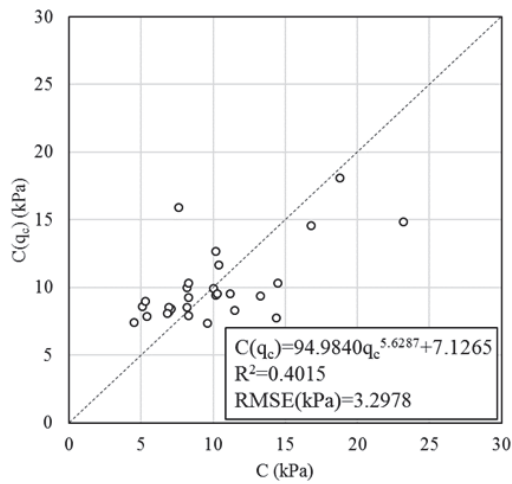
다. 다음 Fig. 2는 선정된 예측식을 통하여 계산된 지점별 점착력, 내부마찰각, 건조밀도 값과 실제 시험 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

**Table 6** Prediction equations of soil strength parameters and dry density using PSCPT data (coarse-grained soil)

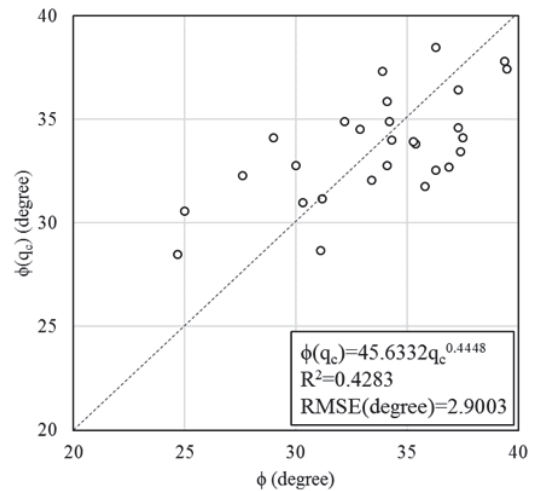
Function		a	b	c	R <sup>2</sup>	RMSE
C(q <sub>c</sub> ) (kPa)	Linear	20.0191	0	-	0.3341	3.5694
	Exponential	0.0377	8.4083	6.5579	0.3998	3.3025
	<b>Power</b>	<b>94.9840</b>	<b>5.6287</b>	<b>7.1265</b>	<b>0.4015</b>	<b>3.2978</b>
φ(q <sub>c</sub> ) (degree)	Linear	29.5408	18.6407	-	0.4152	2.9331
	Exponential	21.8283	0.8470	0	0.4039	2.9615
	<b>Power</b>	<b>45.6332</b>	<b>0.4448</b>	<b>0</b>	<b>0.4283</b>	<b>2.9003</b>
γ <sub>d</sub> (q <sub>c</sub> ) (kN/m <sup>3</sup> )	Linear	16.8223	5.0273	-	0.6405	1.0544
	Exponential	7.2499	1.2241	0	0.6411	1.0536
	<b>Power</b>	<b>15.6908</b>	<b>1.4175</b>	<b>7.5172</b>	<b>0.6419</b>	<b>1.0524</b>

**Table 7** Prediction equations of soil strength parameters and dry density using PSCPT data (fine-grained soil)

Function		a	b	c	R <sup>2</sup>	RMSE
C(q <sub>c</sub> ) (kPa)	Linear	36.9682	0.0000	-	0.9291	3.6405
	Exponential	2.8048	3.6624	0	0.9115	1.9890
	<b>Power</b>	<b>68.7350</b>	<b>1.9285</b>	<b>0</b>	<b>0.9267</b>	<b>1.8066</b>
φ(q <sub>c</sub> ) (degree)	Linear	28.1104	17.2811	-	0.3844	3.1813
	Exponential	0.1700	6.2549	26.7048	0.4261	3.0718
	<b>Power</b>	<b>62.4866</b>	<b>4.5290</b>	<b>27.8102</b>	<b>0.4315</b>	<b>3.0572</b>
γ <sub>d</sub> (q <sub>c</sub> ) (kN/m <sup>3</sup> )	Linear	11.8660	7.0075	-	0.6792	0.7293
	Exponential	0.0860	5.9677	10.9385	0.7165	0.6856
	<b>Power</b>	<b>22.9208</b>	<b>4.2354</b>	<b>11.4060</b>	<b>0.7166</b>	<b>0.6855</b>



(a) Cohesion (coarse-grained soil)



(b) Internal friction (coarse-grained soil)

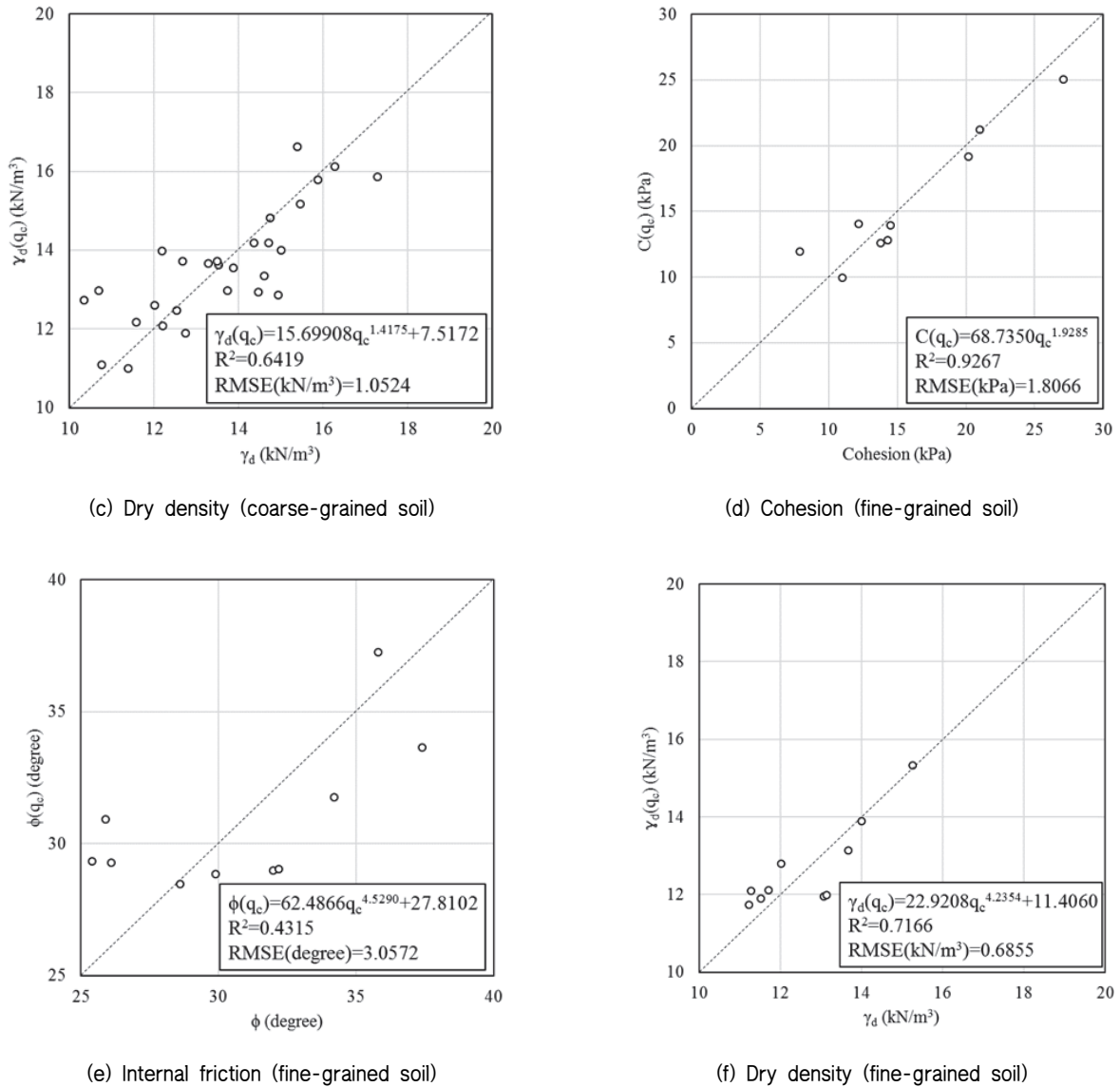


Fig. 2 Comparison between predictions and observations of soil strength parameters (cohesion, internal friction), dry density

조립토의 경우 내부마찰각과 건조밀도가 점착력에 비하여 더 높은 상관성을 나타내는 것을 확인하였으며 세립토의 경우 점착력과 건조밀도가 내부마찰각에 비하여 더 높은 상관성을 보였다. 이는 다양한 종류의 토양을 조립토, 세립토 2종으로 분류하여 예측에 활용하였기 때문에 발생한 한계로 판단된다. 향후 축제재료로 적합한 무기질, 저압축성 토양을 이용하여 다양한 세립분 함량을 갖도록 입도를 조정된 시료를 준비하고, 실내에서 시료별로 다양한 건조밀도를 갖도록 성형하여 충분한 개수의 관입저항치를 얻은 후 이를 예측에 활용하여 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 콘 관입시험을 통한 사면 안정성 예측

먼저, 각 시료의 건조밀도, 점착력, 내부마찰각 시험결과와 예측결과를 각각 입력자료로 하여 산출된 사면의 안전율을 비교하면 Fig. 3과 같다.

위 그림과 같이, 제시된 예측식 산출 결과를 사면 안정성 해석의 성토재 물성치로 활용할 시, 실제 시험 결과를 이용하여 해석하였을 때의 최소 안전율과 높은 상관관계를 갖고, 유사한 값을 나타내는 것을 확인하였다.

다음으로 관입저항치를 이용하여 사면의 안전율을 예측할 수 있도록 예측식을 구성하였으며, 사면 안전율에 큰 영향을 미치는 사면 경사를 수식의 인자로 활용하였다. 조립토, 세립



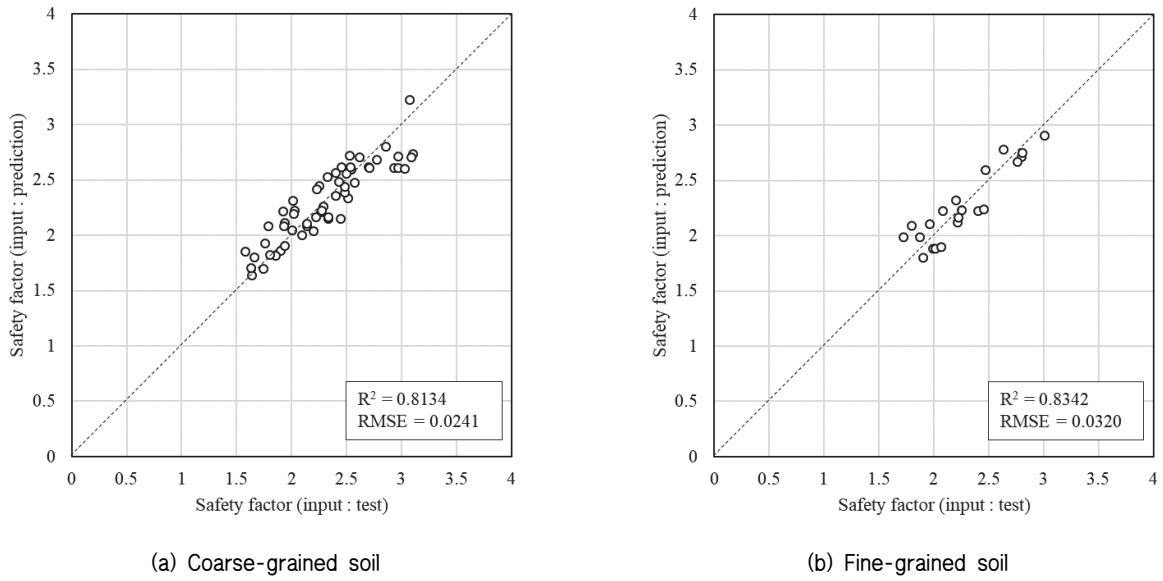


Fig. 3 Comparison of slope safety factors according to properties of embankment materials (test results, prediction results)

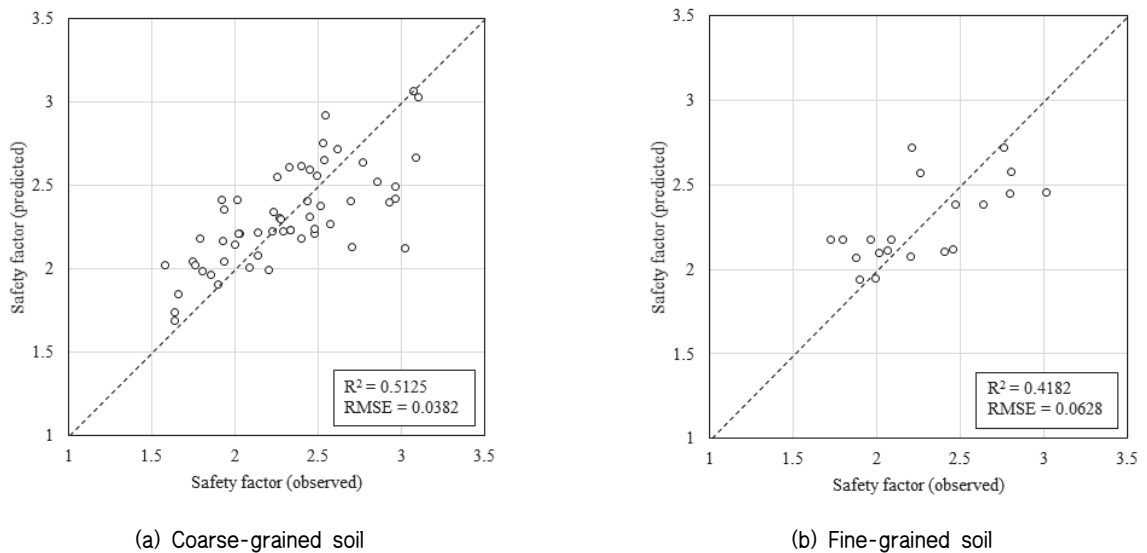


Fig. 4 Comparison of predicted and observed slope safety factors

토에 대하여 각각 구성된 사면 안전율 예측식은 다음 식 (5), (6)과 같다.

$$F_S(q_c, s) = 2.2144q_c^{0.5998}s^{0.5371} - 0.0301 \quad (5)$$

(for coarse-grained soil)

$$F_S(q_c, s) = 9.1947q_c^{0.1611}s^{0.0039} - 5.9009 \quad (6)$$

(for fine-grained soil)

여기서,  $F_S(q_c, s)$ 는  $q_c$ 와  $s$ 를 변수로 하여 산출되는 사면의 최소 안전율,  $q_c$ 는 콘 관입저항치 (MPa),  $s$ 는 사면의 경사 (1:s)이다. 사면 안정성 해석 결과로 산출된 최소안전율과 예측식으로부터 얻은 산출 결과를 조립토, 세립토 각각에 대하여 비교한 결과는 Fig. 4와 같다.

위 결과로부터, 관입저항치와 사면 경사만을 이용하여 조립토와 세립토 각각으로 구성된 제방의 안전율을 간편하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나, 안전율을 직접 예측

하는 것보다 건조밀도, 강도정수를 예측하여 해석한 결과가 실제 안전율과 더 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 이는 예측식에서 고려된 관입저항치와 사면 경사 외에도 소단의 유무 등 사면의 형상, 성토재 및 코어, 기반암의 위치와 물성 등 많은 인자가 종합적으로 고려되어 최소 안전율이 산출되기 때문으로 판단된다. 특히, 세립토의 경우에는 데이터의 수가 비교적 적어 예측식 구성에 필요한 상관관계가 명확히 드러나지 않은 것으로 사료된다. 이에 따라, 향후 다양한 재료와 형상을 갖는 여러 제방에 대하여 많은 콘 관입저항치 데이터를 획득하고, 각각에 대한 사면 안정성 해석 결과를 확보하여 안전율 예측식을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 휴대용 정적 콘 관입시험을 이용하여 국내 저수지 제방의 토양 특성과 사면 안정성을 간편하게 평가할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 연구의 결과는 간편한 휴대용 콘 관입시험을 이용하여 토양 건조밀도와 강도정수, 사면 안전율의 직접적이고 정량적인 예측을 가능케 하여, 기존에 주로 육안 관찰로 수행되던 사면 안전진단 방법을 개선하고, 다양한 사면의 점검과 토양 특성 예측에 활용할 수 있다는 의의가 있다. 향후 다양한 세립분 함량과 건조밀도를 변수로 시료를 성형하여 각각의 관입저항치를 얻고, 이를 활용할 시 건조밀도, 강도정수 예측 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 사면 안정성 예측식의 경우, 여러 제방에 대하여 확보된 콘 관입시험 결과와 실내시험 결과를 이용하여 개선할 수 있을 것으로 사료된다. 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 선정된 농업용 저수지 대상지별로 휴대용 정적 콘 관입시험을 수행하고, 결과를 분석하였다. 관입저항치는 0.3521 ~ 0.6816 MPa, 평균값은 0.4965 MPa로 나타났다. 동일 제방 내에서의 저항치 편차는 0.0029 ~ 0.1451 MPa 로 나타났으며, 실무에서 저항치 편차를 이용하여 사면이 균일한 다짐도를 갖도록 관리할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 휴대용 정적 콘 관입시험 결과와 현장, 실내시험 결과 간 상관성을 확인하고, 조립토, 세립토 각각에 대하여 휴대용 정적 콘 관입저항치를 이용한 토양의 건조밀도, 점착력 및 내부마찰각 예측식을 제시하였다. 조립토의 경우 점착력에 비하여 내부마찰각과 건조밀도를 더 잘 예측하는 것으로 나타났다. 세립토의 경우 점착력과 건조밀도를 내부마찰각보다 더 잘 예측하는 것으로 나타났다.

3. 실내시험으로부터 획득한 토양 시료의 밀도와 강도정수를 이용하여 사면 안정성 해석을 수행하고, 예측식으로 산출된 건조밀도와 전단강도를 이용한 사면 안정성 해석 결과와

비교하였다. 그 결과, 예측치 활용 해석 결과와 시험 결과 활용 해석 결과의 최소안전율이 조립토와 세립토 모두에서  $R^2$  0.8134 이상, RMSE 0.0320 이하의 높은 상관성을 나타내었으며, 상기 예측식으로 구한 토양 건조밀도, 강도정수가 사면 안정성 해석 시 시험 결과를 잘 대체할 수 있음을 확인하였다.

4. 휴대용 콘 관입시험으로부터 획득한 관입저항치와 사면의 경사를 이용하여 저수지 제방의 사면 안정성 예측식을 제시하였다. 예측식을 통하여 산출된 최소안전율과 실제 해석 결과를 비교한 결과, 제방의 안전율을 간편하게 예측할 수 있는 것을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 지원되는 “저수지 제방 콘관입저항값 조사 및 지반정수 상관관계 분석” 및 농촌진흥청 연구사업 (세부과제번호: PJ015747)의 지원에 의해 이루어진 것임.

#### REFERENCES

- Byun, Y. H., and D. J. Kim, 2022. In-situ modulus detector for subgrade characterization, *International Journal of Pavement Engineering*, 23(2): 297-307. doi: 10.1080/10298436.2020.1743291.
- Cassan, M., 1988. Les essais in situ en mécanique des sols, Volume 1 réalisation et interpretation. 2ème edition, 146-151. Eyrolles: Paris.
- Dwipa, R. S., Arya, I. W., Wiraga, I. W., and Pramana, I. M. W., 2020. Evaluation of liquefaction potential using cone penetration test (CPT) and standard penetration test (SPT). *Journal of Physics: Conference Series* 1450(1): 012016.
- Heo, J., T. H. Bong, S. P. Kim, and S. M. Jun, 2022. Assessment of flood vulnerability for small reservoir according to climate change scenario- reservoir in Gyeonggi-do-. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 64(5): 53-65. (in Korean). doi: 10.5389/KSAE.2022.64.5.053.
- Jeon, G. Y., and D. S. Bang, 2021. Improvement of quantitative condition assessment criteria for reservoir embankment safety inspection considering characteristics of small reservoirs in Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 63(5): 27-38. (in Korean). doi: 10.5389/KSAE.2021.63.5.027.

6. KATS (Korean Agency for Technology and Standards), 2021. Standard test method for thin-walled tube sampling of soils : KS F 2317 (in Korean).
7. KATS (Korean Agency for Technology and Standards), 2022a. Test method for particle size distribution of soils : KS F 2302 (in Korean).
8. KATS (Korean Agency for Technology and Standards), 2022b. Test method for liquid limit and plastic limit of soils: KS F 2303 (in Korean).
9. KATS (Korean Agency for Technology and Standards), 2022c. Test method for density of soil particles : KS F 2308 (in Korean).
10. KATS (Korean Agency for Technology and Standards), 2022d. Test method for density of soil in place by sand-cone method : KS F 2311 (in Korean).
11. KATS (Korean Agency for Technology and Standards), 2022e. Test method for soil compaction in laboratory : KS F 2312 (in Korean).
12. KATS (Korean Agency for Technology and Standards), 2022f. Unified Soil Classification System : KS F 2324 (in Korean).
13. KATS (Korean Agency for Technology and Standards), 2022g. Test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions : KS F 2343 (in Korean).
14. Kim, G. S., 2015. Comparison of elastic moduli of subgrade soils using plate loading test, soil stiffness gauge and dynamic cone penetrometer. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 31(3): 63-72. doi: 10.7843/KGS.2015.31.3.63
15. Kim, J. N., and H. G. Park, 2006. A study on the correlation between standard penetration resistance value and static cone penetration resistance value of the soft ground subsurface of Yongdong Area. *Journal of Korean Geo-Environmental Society* 7(5): 13-20. (in Korean).
16. Kim, K., Prezzi, M., Salgado, R., and Lee, W, 2008. Effect of penetration rate on cone penetration resistance in saturated clayey soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(8): 1142-1153. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:8(1142).
17. Kim, Y. S., S. S. Hong, and G. J. Bae, 2011. Bearing capacity of pavement foundation by waste lime material using the dynamic cone penetrometer. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 12(2): 927-935.
18. Kley, E. G., 1975. The Use of the Dynamic Cone Penetrometer(DCP). Report 2/74. Transvaal Roads Department.
19. KRC (Korea Rural Community Corporation), 2020b. Statistical yearbook of land and water development for agriculture. KRC (in Korean).
20. Lee, B. J., and J. K. Lee, 2014. Correlation analysis between DCPT value and SPT value. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society* 15(8). (in Korean). doi: 10.14481/jkges.2014.15.8.23.
21. Lee, J. S., S. Y. Kim, W. T. Hong, and Y. H. Byun, 2019. Assessing subgrade strength using an instrumented dynamic cone penetrometer. *Soils and Foundations*, 59(4): 930-941. doi: 10.1016/j.sandf.2019.03.005.
22. Lee, K. W., and S. D. Cho, 2020. Analysis of application cases and evaluation of effectiveness on portable dynamic cone penetration test (DCPT) to identify the deterioration cause of damaged reinforced earth walls. *Journal of Korean Geosynthetics Society* 19(4): 95-109. (in Korean). doi: 10.12814/jkgss.2020.19.4.095.
23. Lee, M. C., and S. Lee, 2008. Assessment of shear strength parameter for weathered soils using artificial neural network. *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection* 12(3): 147-154.
24. Livneh, M., Ishai, I., and Livneh, N. A., 1995. Effect of vertical confinement on dynamic cone penetrometer strength values in pavement and subgrade evaluations. *Transportation Research Record*, 1-1.
25. MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs), 2002. Agricultural Design Standards - Fill dams (in Korean).
26. ME (Ministry of Environment), 2022. Korean Design Standard (KDS) 54 30 00 : 2022 - Fill dams (in Korean).
27. Park, J. S., Y. H. Son, S. K. Noh, and T. H. Bong, 2012. Estimation of the relative density and internal friction angle for sand using cone-tip resistance of the PCPT. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(4): 137-145. (in Korean). doi: 10.5389/KSAE.2012.54.4.137.