

단계성토에 따른 연약지반의 전단강도 및 압밀거동 특성

Characteristics of Shear Strength and Consolidation Behavior of Soft Ground according to Stage Fill

방 성 태[†]

Seongtaek Bang

Received: May 20th, 2020; Revised: June 4th, 2020; Accepted: June 26th, 2020

ABSTRACT : The soft ground in the southwest coastal area composed of marine clay is greatly influenced by sediment composition, particle size distribution, particle shape, adsorption ions and pore water characteristics, tide and temperature. In addition, the geotechnical properties are very complex due to stress history, change in pore water, dissolution process and gas formation. In this study, the physical and mechanical properties of the soft ground were evaluated through field tests and laboratory tests to investigate the strength increase characteristics according to consolidation on the soft ground in the southwest coast. In addition, in order to understand the consolidation behavior of soft ground such as subsidence, pore water pressure, horizontal displacement of soil by embankment load, measuring instruments such as pore water pressuremeter, settlement gauge, inclinometer and differential settlement gauge was installed, and a piezocone penetration test was carried out step by step to confirm the increase in shear strength of the ground. Through this, it was confirmed that the shear strength of the ground is increased according to the stages of filling. In addition, by evaluating the properties of consolidation behavior, strength increase and consolidation prediction by empirical methods and theories were compared to analyze the characteristics of strength increase rate and consolidation behavior in consideration of regional characteristics.

Keywords : Marine clay, Stage fill, Soft ground, Shear strength, Consolidation, Piezocone test

요 지 : 해성점토로 구성된 서남해안 지역의 연약지반은 퇴적물의 성분, 입자크기의 분포, 입자형상, 흡착이온 및 간극수의 특성, 조류, 온도 등에 의해 많은 영향을 받는다. 또한, 응력이력, 간극수의 변화, 용탈과정, 가스형성 등의 지반공학적 특성은 매우 복잡한 양상을 나타내고 있다. 본 연구에서는 서남해안 연약지반을 대상으로 압밀에 따른 강도증가 특성을 규명하기 위하여 현장시험 및 실내시험을 통하여 연약지반의 물리적·역학적 특성을 평가하고 성토하중에 의한 지반의 침하, 간극수압, 수평변위 등 연약지반의 압밀거동을 파악하기 위하여 간극수압계, 침하계, 경사계, 층별침하계 등의 계측기를 설치하고, 지반의 전단강도증가를 확인하기 위해 단계별로 피에조콘 관입시험을 실시하였다. 이와 같은 실험을 통하여 단계별 성토에 따른 지반의 전단강도증가를 확인하고 압밀침하량을 측정하여 기존에 제시된 경험적 방법 및 이론에 의한 강도증가와 압밀측정치를 비교하여 강도증가와 압밀거동을 분석하였다.

주요어 : 해성점토, 단계성토, 연약지반, 전단강도, 압밀, 피에조콘 시험

1. 서 론

최근에 많은 토목공사에 있어서 용지 매입 및 민원 등의 문제로 양호한 토질조건을 가진 지반만을 찾기는 점차 어려워지는 실정이다. 이에 따라 열악한 지반조건을 가진 연약지반 위에 대규모 토목사업이 이루어지고 있다. 그러나 이러한 연약지반은 여러가지 공학적 문제점을 내포하고 있으므로 그 대책에 많은 관심을 가질 필요성이 있다. 연약지반 위에 도로, 교량, 공장 등의 구조물을 설치하게 되면 지반의 과잉침하 및 부등침하, 국지적인 구조물의 손상 등과 기초

지반의 지지력 부족으로 인한 성토의 파괴, 측방유동에 의한 지반의 용기, 지진에 의한 지반의 액상화 및 지지력 감소 등과 같은 많은 문제점이 발생하게 된다(Hong et al., 2000). 국내의 서남해안 지역에는 해성점토층이 넓게 분포되어 있으며 해안지역에서 기반시설물을 설계하고 시공할 때 압축성이 큰 해성점토로 구성된 연약지반의 공학적 특성을 파악하는 일은 매우 중요하다(Lee et al., 2012). 해성점토로 구성된 서남해안 지역의 연약지반은 퇴적물의 성분, 입자크기의 분포, 입자형상, 흡착이온 및 간극수의 특성, 조류, 온도 등에 의해 영향을 많이 받는다. 또한, 응력이력, 간극수의

[†] Lecturer, Department of Construction & Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University (Corresponding Author : bst91@knu.ac.kr)

변화, 용탈과정, 가스형성 등의 지반공학적 특성은 매우 복잡한 양상을 나타내고 있다(Kim et al., 2011). 연약 해성점토는 매우 높은 함수비로 매립되며 원지반 해성점토와는 다른 역학적 거동으로 큰 압밀침하량이 나타나므로 침하량을 지배하는 압밀거동은 매립장 설계 시의 준설, 매립물량의 산정, 호안의 제원 결정과 매립지반의 단장기적인 침하예측이 매우 중요한 설계인자가 되며 이에 대한 정확한 예측이 요구 되어진다(Jun et al., 2008). 이러한 연약지반의 조사는 지반특성 및 퇴적환경, 지반의 응력이력을 파악하여 각 토층의 지반정수를 산정하기 위해 다양한 현장시험과 실내시험으로 이루어진다. 현장시험은 결과를 신속하게 얻을 수 있고 현장조건이 최대한 반영된다는 장점 때문에 많이 사용하고 있다. 특히 연약지반 조사의 경우 피에조콘 관입 시험은 가장 보편적으로 적용되는 현장시험 중 하나로 다양한 지반특성을 비교적 정확하게 파악할 수 있을 뿐만 아니라 연속적인 지층구분 및 다양한 결과를 심도에 따라 일관되게 얻을 수 있어 국내외에서 많이 활용하고 있다(Kim et al., 2009). 또한, 피에조콘 관입시험은 현장시험 중에서 적용성, 경제성 및 신뢰성에 주목받고 있으며, 연약지반에 대한 흙의 분류 및 공학적 특성 등 지반 상태를 종합적으로 평가하는데 널리 이용되고 있다(Park et al., 2012). Kim(1975)은 70년대 중반까지의 조사 및 실험결과를 이용하여 국내 해성점토의 분포와 공학적 특성을 규명하였고 Song(1988)은 서남해안 14개 지역의 토질 물성치와 압축지수의 상관관계를 분석하여 경험식을 제안하였다. 또한, Jeong(2015)은 서해안 지역은 하천에 의해 운반되어온 토사의 성분이 계절 또는 해가 바뀔에 따라 매우 크게 달라져 모래 및 실트 함유량이 많은 층이 서로 교호하여 퇴적되는 매우 불규칙한 분포를 보인다고 발표한 바 있으며, Yoon & Kim(2003)은 경남, 전남 및 경기 지역 해안의 압축지수를 단일 및 다중 회귀분석하여 예측식을 제안하였고 Lunne et al.(1976)에 의해 현장베인전단시험, 등방압밀 비배수 삼축압축시험 및 일축압축시험 등을 이용하여 피에조콘 계수의 다양한 값이 제안되었다. 국내에서는 Lee(1997), Kim et al.(2001)에 의해 연구되어 그 실용성을 확대시키고 있다. 이러한 문제들이 유발되는 연약지반의 특성 및 거동에 대한 많은 연구가 이루어져 지반개량공법에 관한 여러 대안이 제시되고 있지만 대부분이 실내시험을 통한 이론식 및 경험식에 근거하고 있어 현장의 지반 특성과 시공에 따른 영향을 충분히 고려하지 못하기 때문에 연약지반의 거동과 특성에 대한 예측은 그 신뢰성이 결여되어 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 연약지반의 압밀거동을 파악하기 위해 연약지반구간에 간극수압계, 침하계, 경사계, 층별침하계 등의 계측기를 설치하고, 지반의 전단강도증가를 확인하기 위해 원위치 시

험으로 피에조콘 관입시험을 실시하였다. 이를 통하여 단계별 성토에 의한 연약지반의 전단강도증가 및 압밀거동 특성을 분석하여 기존에 제시된 예측이론과 계측자료를 비교하여 강도증가 및 압밀거동의 특성을 평가하고자 한다.

2. 연약지반 처리공법 및 현장계측

2.1 연약지반 처리공법

연약지반상에 토목 구조물 축조 시 문제가 예상되는 구조물 각각의 특성 및 기초지반 조건에 따른 연약지반 처리공법이 필요하다. 연약지반의 처리공법 선정 시의 고려사항으로는 상부하중의 규모 및 형태 그리고 지반의 물리적, 역학적 성질에 의한 압밀침하 문제, 즉 전침하량 및 상대적인 부등침하량, 압밀진행속도 그리고 지반의 전단강도 부족으로 인한 사면의 안정성 외에도 공사용 재료의 투입조건, 장비투입조건, 환경조건, 개량효과에 대한 신뢰도, 시공의 용이성 및 관리측면, 경제성 등이 함께 고려되어야 할 것이다. 본 연구 대상지역의 연약지반은 시공 시 공사용 차량에 대한 주행성 확보, 기초지반의 활동에 대한 방지 및 압밀침하 촉진 등에 문제를 해결하기 위하여 여러 가지 연약지반처리공법을 조합한 합성공법을 적용함이 바람직할 것으로 판단된다. 따라서 대상 연약층 구간에 적용 가능한 처리공법으로 성토작업 시 공사용 차량 및 장비진입에 대한 주행성 확보를 위해 기초지반 보강용 저면 Mat를 포설하고 Mat 상부에 두께 $t=50\text{cm}$ 이상의 Sand Mat 층을 조성하였으며, 성토하중으로 인한 연약지반의 활동 방지 대책공법으로 기초지반 보강 및 활동방지용 고강도 인장 Mat 포설(P.E.T Mat)과 지반의 강도증가 효과를 이용한 단계별 성토공법을 적용하였다.

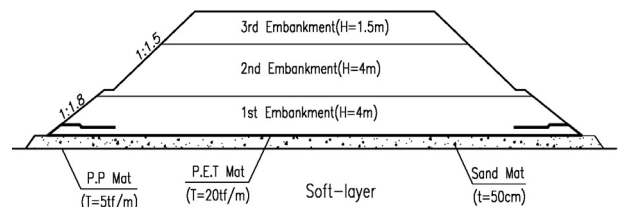


Fig. 1. Soft-layer design section

Table 1. Critical embankment height to investigation condition

Division	Section-1	Section-2	Section-3
Shear strength (C_0)	1.81 tf/m ²	2.10 tf/m ²	2.24 tf/m ²
Soft-layer hickness (m)	6.60	7.50	7.00
Embankment height (m)	4.0	5.0	5.0

2.2 현장계측

2.2.1 계측항목 및 위치선정

연약지반 계측항목의 선정은 성토 규모 혹은 지반조건에 따라서 달라지기 때문에 구체적인 계측 결과의 활용목적, 평가방법을 명확하게 수립한 후 필요한 계측항목을 선정하여야 하며 일반적으로 계측항목 선정에는 설계 시 추정된 변형의 진행 상황 파악과 이를 통한 시공관리, 확인 시추조사와 실내시험결과로부터 지반의 강도증가 및 압밀효과의 확인 등을 고려하여 선정하여야 한다. 일반적인 계측항목은 크게 변형과 압력 두 가지로 구분되며 변형에는 침하와 변위를 관측하여 제체의 안정, 시공속도 및 안정관리의 자료로 활용한다. 또한, 간극수압과 토압을 관측하여 지반처리 공법의 효과판정, 침하의 진행, 안정관리의 자료로 활용한다. 계측위치 선정은 경제성, 시공성을 고려하고 지층구성 및 성토시기 등을 감안하여 지반거동을 대표할 수 있는 최소한의 점으로서 원위치시험 등에 의해서 지반조건이 충분히 파악된 곳과 중요구조물이 인접한 곳, 지반상태와 공법 및 시공재료가 변경되는 지점, 우선적으로 성토가 진행될 곳, 교통량이 많아 이로 인한 하중증가가 있는 곳, 과도한 변위가 우려되는 점 등을 고려하여 대표단면 3곳을 선정하였다.

2.2.2 현장계측기 설치

연약지반상의 도로성토에 대한 현장계측기의 설치에 관한 배치항목은 지표면침하계(침하판) 및 대표단면 간극수압계, 층별침하계, 수위계 및 지중경사계 등으로 분류된다. 계측기 배치간격 및 위치는 Table 2와 같으며 배치계획도는 Fig. 2와 같다.

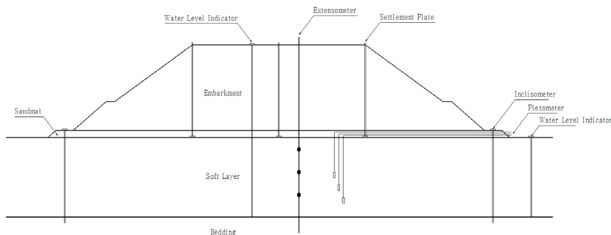


Fig. 2. Description of monitoring system

Table 2. Arrangement of monitoring instrument

Monitoring instrument	Space (m)	Location
Settlement plate	100	Center, Coner
Extensometer	200	Center
Inclinometer	200	Lower of embankment
Piezometer	200	Center
Water level indicator	200	Center

3. 연약지반 특성 현장시험

3.1 연약지반의 공학적 성질

3.1.1 물리적 특성

본 연구지역의 세립토층은 압축성이 큰 점토(CH)와 중간 압축성의 실트(ML)로 구성되어 있다. 점성토의 Consistency는 흙의 소성정도 뿐만 아니라 압축특성의 개략적 추정이 가능하다. 액성한계 분포범위는 37.4~82.4%(평균 48.8%), 소성지수의 분포범위는 7.7~44.0%(평균 19.7%)로 심도별 변화 경향은 액성한계와 소성지수 모두 심도와는 무관한 것으로 평가되었다.

Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 것처럼 본 연구지역의 세립토층에 대한 액성지수의 분포 범위는 0.3~2.2(평균 1.1)로 정규

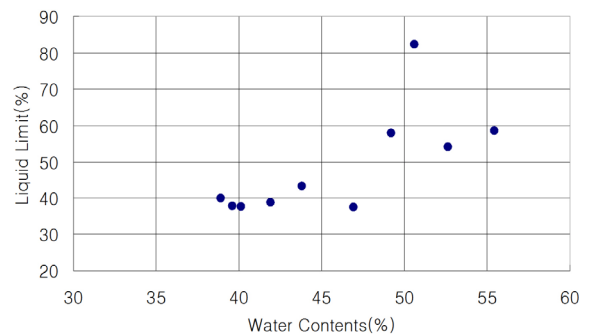


Fig. 3. Water contents vs liquid limits

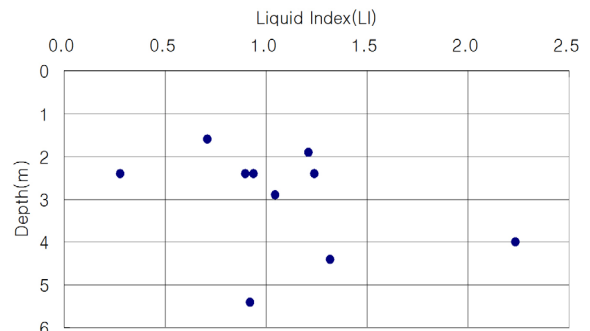


Fig. 4. Depth vs liquid index

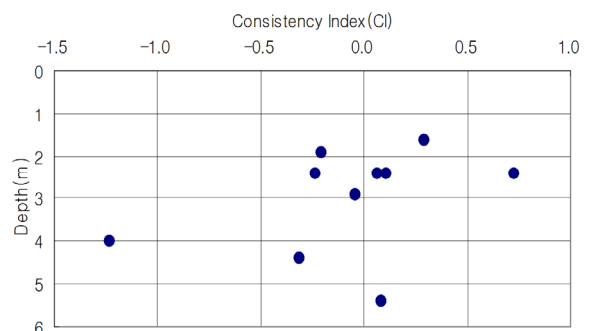


Fig. 5. Depth vs consistency index

압밀점토의 액성지수 기준인 1.0을 중심으로 좌우에 분포하고 있고 연경지수의 분포범위는 -1.2~0.7(평균 -0.1)로 유동상태로 매우 불안정한 상태의 흙으로 판단할 수 있다. 또한 액성지수(LI)에 따르면 $LI \approx 1$ 로 정규압밀점토로 추정되나 압밀시험결과에 의한 과압밀비를 비교하여 보면 심한 과압밀을 나타내고 있어 본 연구지역의 점토는 과압밀점토로 판단되며 액성지수에 의한 결과와 압밀시험에 의한 결과가 상이한 이유는 시료에 포함된 점토광물의 종류가 달라 점토 입자의 표면력이 다르기 때문에 같은 함수비의 시료라도 점토의 상대적인 연경도 값에 차이가 생긴 것으로 판단된다.

3.1.2 역학적 특성

흙의 전단강도 특성은 구조물을 계획하거나 연약지반처리 및 안정성을 검토하는데 있어서 가장 지배적인 요소이다. 일반적으로 전단강도는 심도에 따라 비례 증가하는 경향을 보이나 본 연구지역의 전단강도 특성은 Fig. 6과 같이 심도에 비례하여 증가하지 않고 있으며 삼축압축시험결과는 $1.6 \sim 2.7 \text{tf/m}^2$ 범위에 분포하고 일축압축시험결과는 $1.1 \sim 2.4 \text{tf/m}^2$ 범위에서 심도에 관계없이 분포하는 특성을 보이고 있다.

본 연구지역의 과압밀비 분포 범위는 Fig. 7에 나타난 것

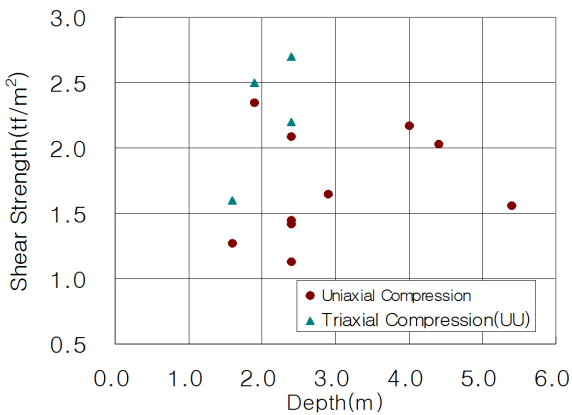


Fig. 6. Depth vs shear strength

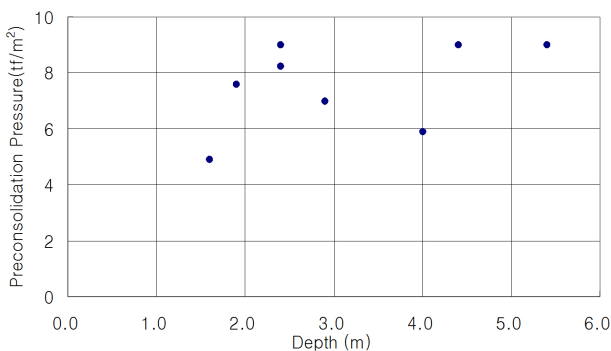


Fig. 7. Depth vs preconsolidation pressure

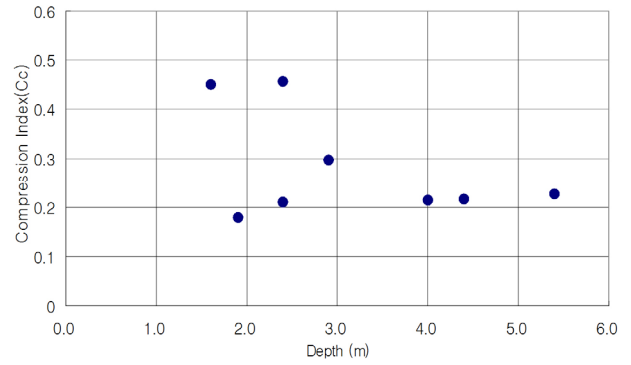


Fig. 8. Depth vs compression index

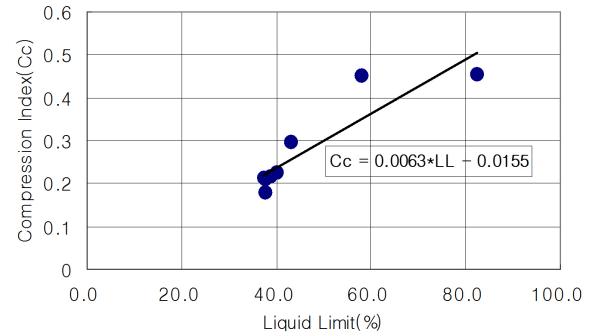


Fig. 9. Liquid limit vs compression index

처럼 1.56~5.39로 과압밀점토의 특성을 보이고 있으며 심도가 증가함에 따라 선행압밀하중도 증가하는 경향을 보이고 있다. Fig. 8, Fig. 9는 압축지수를 심도별, 액성한계별로 나타낸 것으로 심도의 증가에 따른 압축지수의 증가 및 감소 경향은 없으며 액성한계가 증가함에 따라 압축지수도 증가하는 경향을 보이고 있다. 압축지수의 분포범위는 0.178~0.456(평균 0.281)로 나타났으며 압축지수는 시료의 교란정도에 따라 현장조건 상태로서의 압축지수에 비해 기울기가 감소하는 것으로 평가되었다. 따라서 실제 현장 상태에서의 압축지수는 실험실에서 구한 값보다 약간 크게 평가되었다. 시료채취와 시료성형 시의 시료교란을 고려하여 Schmertmann의 수정방법(Schmertmann, 1955)을 통해 보정한 압축지수의 분포 범위는 0.205~0.624(평균 0.355)로 나타났다.

3.2 피에조콘 시험

자연시료를 이용하여 실내에서 행해지는 역학시험으로부터 얻어지는 토질정수는 설계에 중요한 역할을 하고 있다. 그러나, 채취, 운반, 및 시험과정에서 시료가 교란되어 그 정수들이 현장조건을 대표할 수 있는지는 많은 연구자들에 의해 의문 시 되어왔다. 이러한 문제를 극복하기 위해 현장에서 직접 시험을 실시하여 정확한 결과치를 얻기위해 실시되는 것이 원위치 시험이며 연약지반의 연속적인 지층 분포, 간극수압, 마찰각, 비배수 전단강도, 압밀계수, 투수계

수 등의 정보를 얻을 수 있는 대표적인 시험이 피에조콘 시험으로 전자식 콘을 지층에 일정한 속도로 관입시키면서 관입저항치를 측정하고 이로부터 지반의 제반 토질 특성을 파악하는 시험이다. 정적관입시험 또는 콘관입시험이라 명칭되는 이 시험법은 매우 넓은 범위에 걸쳐 적용 가능하지만 대표적인 장점은 보통 1.5m 간격으로 수행되는 표준관입시험과는 달리 연속적인 측정이 가능하므로 지층의 세밀한 분류 및 신뢰성 높은 강도 측정이 가능하다는 점이다. 본 연구에서는 ASTM D 3441 규정에 의하여 2.0cm/sec의 속도로 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 피에조콘의 용량은 10ton

이며 선단부의 단면적은 10cm², 선단부의 각도는 60°인 표준콘으로 Geotech(스웨덴)에서 제작하였으며 일반적인 전자식 콘으로 측정 가능한 콘의 선단 저항치(q_c), 구부 마찰력(f_s)외에 간극 수압 측정이 가능하므로 시추 작업 시 간과할 수 있는 얇은 지층의 존재를 판별할 수 있고, 이 외에 간극 수압소산 시험을 수행함으로써 현 지반의 간극수압 측정이 가능하다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 압밀침하특성

서남해안 지역의 연약점성토 지반의 압밀침하특성을 이룬 침하량과 계측치를 비교하기 위하여 3개소의 대표단면에 대해서 Terzaghi의 일차원 압밀이론에 의한 단계별 압밀도에 따른 계산치와 성토부 중앙에 대한 침하량 계측치를 비교·분석하였다. 분석에 사용된 토질정수는 Table 3과 같으며 Table 4~6에 침하량 계산결과를 나타내었다.

Table 3. Soil parameters used for analysis

Division	Parameters
Sesction-1	e ₀ =1.122, P _c =9.0tf/m ² , C _c =0.256 C _s =0.0473, γ=1.78tf/m ³
Sesction-2	e ₀ =1.142, P _c =9.0tf/m ² , C _c =0.245 C _s =0.0406, γ=1.70tf/m ³
Sesction-3	e ₀ =1.093, P _c =9.0tf/m ² , C _c =0.226 C _s =0.0383, γ=1.780tf/m ³

Table 4. The result of settlement and consolidation duration (1st step)

Drain condition	U (%)	C _v (cm ² /sec)	H (m)	T _v	t		Settlement (cm)
					(day)	(month)	
Double	10	0.02394	6.6	0.0079	0	0.0	1.23
Double	20	0.02394	6.6	0.0314	2	0.1	2.46
Double	30	0.02394	6.6	0.0707	4	0.1	3.69
Double	40	0.02394	6.6	0.1257	7	0.2	4.92
Double	50	0.02394	6.6	0.1963	10	0.3	6.15
Double	60	0.02394	6.6	0.2863	15	0.5	7.38
Double	70	0.02394	6.6	0.4028	21	0.7	8.61
Double	80	0.02394	6.6	0.5671	30	1.0	9.84
Double	90	0.02394	6.6	0.8480	45	1.5	11.07
Double	95	0.02394	6.6	1.1289	59	2.0	11.69

Table 5. The result of settlement and consolidation duration (2nd step)

Drain condition	U (%)	C _v (cm ² /sec)	H (m)	T _v	t		Settlement (cm)
					(day)	(month)	
Double	10	0.02632	6.48	0.0079	0	0.0	2.04
Double	20	0.02632	6.48	0.0314	1	0.1	4.08
Double	30	0.02632	6.48	0.0707	3	0.1	6.12
Double	40	0.02632	6.48	0.1257	6	0.2	8.16
Double	50	0.02632	6.48	0.1963	9	0.3	10.2
Double	60	0.02632	6.48	0.2863	13	0.4	12.24
Double	70	0.02632	6.48	0.4028	19	0.6	14.28
Double	80	0.02632	6.48	0.5671	26	0.9	16.32
Double	90	0.02632	6.48	0.8480	39	1.3	18.36
Double	95	0.02632	6.48	1.1289	52	1.7	19.38

U = Degree of consolidation, C_v = Coefficient of consolidation, T_v = Time factor

Table 6. The result of settlement and consolidation duration (3rd step)

Drain condition	U (%)	C _v (cm ² /sec)	H (m)	T _v	t		Settlement (cm)
					(day)	(month)	
Double	10	0.02840	6.30	0.0079	0	0.0	0.64
Double	20	0.02840	6.30	0.0314	1	0.0	1.28
Double	30	0.02840	6.30	0.0707	3	0.1	1.92
Double	40	0.02840	6.30	0.1257	5	0.2	2.56
Double	50	0.02840	6.30	0.1963	8	0.3	3.2
Double	60	0.02840	6.30	0.2863	12	0.4	3.84
Double	70	0.02840	6.30	0.4028	16	0.5	4.48
Double	80	0.02840	6.30	0.5671	23	0.8	5.12
Double	90	0.02840	6.30	0.8480	34	1.1	5.76
Double	95	0.02840	6.30	1.1289	46	1.5	6.08

U = Degree of consolidation, C_v = Coefficient of consolidation, T_v = Time factor

4.1.1 1단계 성토 후 침하량 비교

본 단계는 과압밀 영역으로 Fig. 10에 나타난 것처럼 3개소의 성토부 중앙의 침하판 계측 결과와 이론치를 비교한 결과 Section-1 지점의 계측치가 제일 크며 이론치가 계측치의 50~92%의 결과를 보이고 있다. 본 단계에서는 Terzaghi의 일차원 압밀이론에 의한 이론치보다 실측치가 크게 나타나고 있음을 알 수 있는데 이는 자연시료의 채취와 운반과정, 시험 시료의 성형과정 등에서의 교란 및 팽창계수와 재압밀계수의 불일치로 인한 것으로 판단된다.

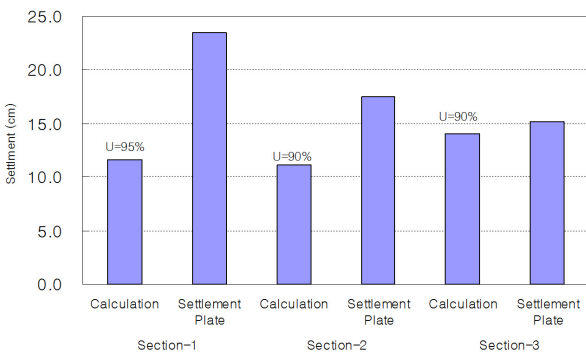


Fig. 10. Compare calculation and monitoring result (1st step)

4.1.2 2단계 성토 후 침하량 비교

본 단계는 정규압밀 영역으로 Fig. 11에 나타난 것처럼 3개소의 성토부 중앙의 침하판 계측 결과와 이론치를 비교한 결과 Section-3 지점의 계측치가 제일 크며 이론치가 계측치의 121~150%의 결과를 보이고 있다.

전반적으로 1단계(과압밀 영역)와 달리 Terzaghi의 일차원 압밀이론에 의한 계산치가 실측치보다 다소 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 자연시료의 채취와 운반과정, 시험 시료의 성형과정 등에서의 교란, 소규모 시료의 전체

란으로 인한 영향, 초기 압밀하중이 압밀곡선에서 압축지수가 과압밀영역에서 정규압밀영역으로 변하는 변곡점 부근에 위치하는 압밀하중 범위에 속하기 때문에 재압축지수에서 압축지수로 급격한 변화로 인하여 과대평가되는 경향과 초기 간극비(e₀)가 재평가되어야 하는 점 등의 원인으로 판단된다.

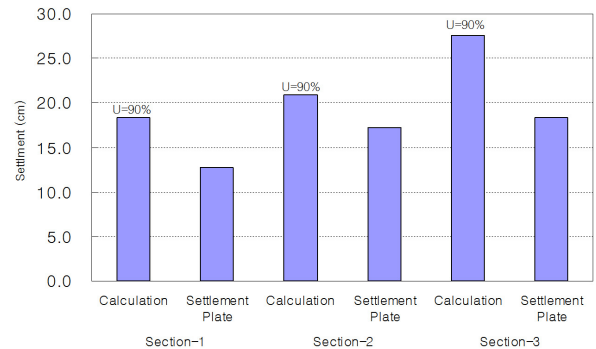


Fig. 11. Compare calculation and monitoring result (2nd step)

4.1.3 3단계 성토 후 침하량 비교

이 단계는 정규압밀 영역으로 Fig. 12에 나타난 것처럼 3개소의 성토부 중앙의 침하판 계측 결과와 이론치를 비교한 결과 Section-3 지점의 계측치가 제일 크며 Section-1 지점의 계측치가 다른 지점과 비교하여 작게 나타나 이론치가 계측치의 128~332%의 결과를 보이고 있다. Section-2 지점을 제외하면 이론치가 계측치의 125~128%로 2단계 성토 후와 거의 동일한 경향으로 Terzaghi의 일차원 압밀이론에 의한 계산치가 실측치보다 다소 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 단계별 압밀 후 초기간극비(e₀)가 재평가 되어야 하는 점과 자연시료의 채취와 운반과정, 시험 시료의 성형과정 등에서의 교란, 소규모 시료의 전체

지층 대표성, 지반의 비등방성, 비균질성 등으로 인한 것으로 판단된다.

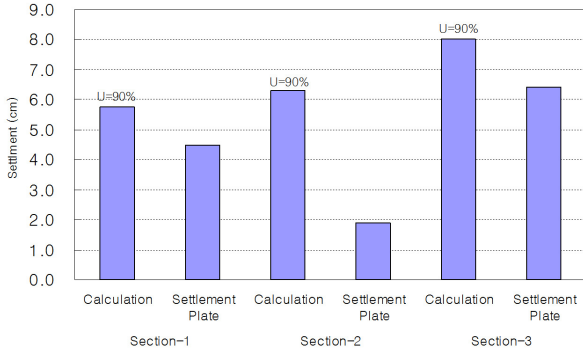


Fig. 12. Compare calculation and monitoring result (3rd step)

4.2 강도증가 특성

연약한 점토층에서는 성토하중의 증가로 인하여 압밀이 진행될 경우에 기초지반의 전단강도가 증가되는데 이때의 전단강도 증가를 실무에 많이 적용되고 있는 이론식과 피에조콘 시험치와 비교·분석을 통하여 적합한 강도증가율을 산정하였다.

4.2.1 피에조콘 시험결과

콘의 선단저항력(q_T)은 점성토의 비배수 강도에 비례하는 것으로 판명되었으며 Eq. (1)과 같은 관계가 있다.

$$q_T = N_k \cdot S_u + \sigma_{v0} \quad (1)$$

여기서, q_T : 콘의 선단저항력, N_k : 콘 지수

S_u : 비배수 전단강도, σ_{v0} : 유효상재하중

Eq. (1)에서 콘지수는 일반적으로 11~19의 범위에 분포하고 있으며 본 연구지역의 비배수 전단강도는 연약한 점토

Table 7. Piezocone test result (embankment height=0m)

Investigation section	Shear strength (tf/m ²)
Section-1	1.80
Section-2	2.20
Section-3	1.80

Table 8. Piezocone test result (embankment height=8.0m)

Investigation section	Shear strength (tf/m ²)
Section-1	6.60
Section-2	6.30
Section-3	8.60

Table 9. Piezocone test result (embankment height=9.5m)

Investigation section	Shear strength (tf/m ²)
Section-1	7.30
Section-2	6.93
Section-3	9.23

에 대해 일반적으로 적용되는 15±5 중 설계상 임계적인 값으로 18을 적용하였다. 피에조콘 실험결과는 Table 7~9에 나타내었다.

4.2.2 경험적 방법에 의한 강도증가

연약점토지반은 압밀과정에서 강도가 증가된다고 하여 Skempton(1986)은 유효상재하중에 비례하며 주어진 지반의 소성지수와 관련이 있다고 하여 Eq. (2)를 제안하였다.

$$\frac{C_u}{P} = 0.11 + 0.0037PI \quad (2)$$

여기서, C_u : 비배수전단강도, P : 유효상재하중

PI : 소성지수

Eq. (2)에 의하면 소성지수가 커질수록 유효상재하중에 따라 비배수전단강도 값이 더 크게 증가하는 것을 나타내고 있다. 또한, Hansbo et al.(1957)은 강도증가율을 액성한계와 관련지어 Eq. (3)을 제안하였다.

$$\frac{C_u}{P} = 0.45LL \quad (\text{단 } LL > 40 \text{ 이상}) \quad (3)$$

여기서, C_u : 비배수전단강도, P : 유효상재하중

LL : 액성한계

이러한 경험식들은 실무에서 간편하게 연약지반의 강도 증가를 예상할 수 있어 지반의 특성에 관계없이 사용하고

Table 10. Strength parameters based on atterberg consistency limits

Equation	Reference	Region of applicability
$\frac{C_u}{P} = 0.11 + 0.0037PI$	Skempton	$II > 10\%$
$\frac{C_u}{P} = 0.045\sqrt{II}$	Bjerrum and Simons	
$\frac{C_u}{P} = 0.005LL$	Karissun and Viberg	$LL > 20\%$
$\frac{C_u}{P} = 0.45LL$	Hansbo	$LL > 40\%$

있다. Table 10은 지금까지 제안된 강도증가율에 대한 경험식을 나타내고 있다.

4.2.3 경험적 방법에 의한 강도증가와 피에조콘 시험 결과의 비교

현장에서 적용하는 흙의 애터버그 한계에 의한 경험적 방법에 따른 강도증가는 Table 11에 나타난 것처럼 2단계 성토 후 계측보고서 및 간극수압소산 시험결과 등을 참고로 압밀도를 90%로 추정하여 구한 강도이고 Table 12는 3단계 성토 후 계측보고서 및 간극수압소산시험 등을 참고로 압밀도를 90%로 추정하여 구한 강도이다.

Table 11. Strength based on atterberg consistency limits after 2nd embankment (tf/m²)

Investigation section	Piezocone	Skempton	Bjerrum and Simons	Karisson and Viberg	Hansbo
Section-1	6.60	3.82	3.76	4.40	4.14
Section-2	6.30	4.66	4.87	5.38	5.06
Section-3	8.60	4.81	5.16	5.93	5.52

Table 12. Strength based on atterberg consistency limits after 3rd embankment (tf/m²)

Investigation section	Piezocone	Skempton	Bjerrum and Simons	Karisson and Viberg	Hansbo
Section-1	6.75	4.19	4.12	4.89	4.58
Section-2	6.93	5.12	5.37	5.98	5.60
Section-3	9.23	5.38	5.79	6.70	6.21

1) Section-1

피에조콘 시험결과 2단계 성토 후의 강도증가율은 367%, 3단계 성토 후의 강도증가율은 111%로 나타났다. 여러 학자들이 제안한 경험적인 강도증가율을 적용하여 전단강도를 추정한 결과와 피에조콘 관입 시험 결과를 비교한 결과는 Fig. 13, 14와 같으며 Section-1의 강도증가량은 Fig. 13

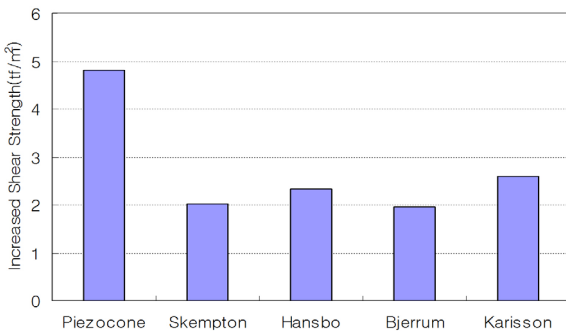


Fig. 13. Compare calculation and piezocone test result (2nd step-section 1)

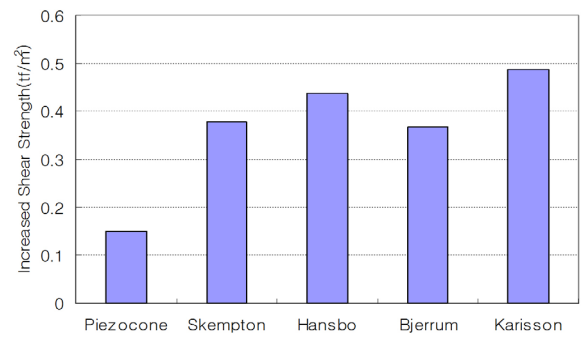


Fig. 14. Compare calculation and piezocone test result (3rd step-section 1)

에 나타난 것처럼 2단계 성토 후 Karisson & Viberg가 제안한 식이 피에조콘 시험치의 54% 정도로 가장 근접하고 있으며 3단계 성토 후에는 Bjerrum & Simon이 제안한 식이 피에조콘 시험치의 244% 정도로 가장 근접하고 있다. 1, 2단계 성토에 의한 강도증가량은 경험적방법에 의한 추정치가 실측치의 41~54%로 과소평가 되나, 3단계 성토에 의한 강도증가량은 경험적방법에 의한 추정치가 실측치의 244~325%로 과대평가 되는 것을 알 수 있었다.

2) Section-2

피에조콘 시험결과 2단계 성토 후의 강도증가율은 286%, 3단계 성토 후의 강도증가율은 110%로 나타났다. 경험적인

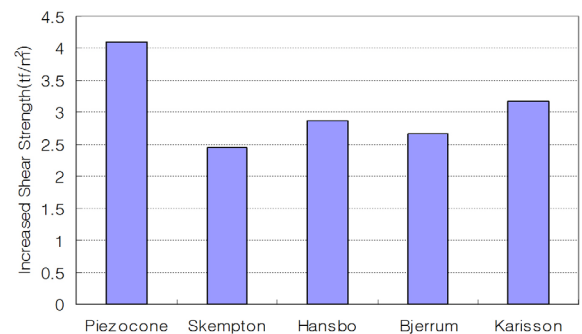


Fig. 15. Compare calculation and piezocone test result (2nd step-section 2)

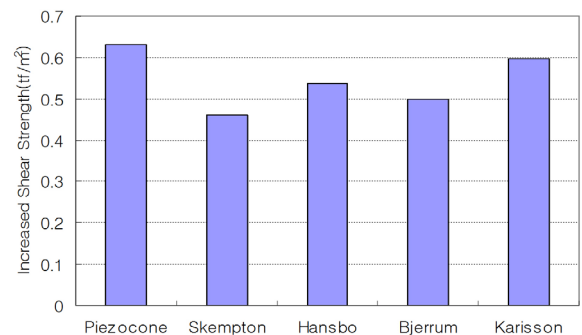


Fig. 16. Compare calculation and piezocone test result (3rd step-section 2)

강도증가율을 적용하여 본 연구구간의 전단강도를 추정한 결과와 피에조콘 시험결과를 비교한 결과는 Fig. 15, 16과 같으며 Section-2의 강도증가량은 Fig. 15에 나타난 것처럼 2단계 성토 후는 Karison & Viberg가 제안한 식이 피에조콘 시험치의 78% 정도로 가장 근접하고 있으며 3단계 성토 후는 Karison & Viberg가 제안한 식이 피에조콘 시험치의 94% 정도로 가장 근접하고 있다. 1, 2단계 성토에 의한 강도증가량은 경험적방법에 의한 추정치가 실측치의 60~78%로 과소평가 되고, 3단계 성토에 의한 강도증가량은 경험적방법에 의한 추정치가 실측치의 73~94%로 약간 과소평가 되는 것을 알 수 있었다.

3) Section-3

피에조콘 시험결과 2단계 성토 후의 강도증가율은 478%, 3단계 성토 후의 강도증가율은 107%로 나타났다. 경험적인 강도증가율을 적용하여 전단강도를 추정한 결과와 피에조콘 시험결과를 비교한 결과는 Fig. 17, 18과 같으며 강도증가량은 Fig. 17에 나타난 것처럼 2단계 성토 후는 Karison & Viberg가 제안한 식이 피에조콘 시험치의 61% 정도로 가장 근접하고 있으며 3단계 성토 후는 Bjerrum & Simon이 제안한 식이 피에조콘 시험치와 동일한 결과를 보이고 있다. 1, 2단계 성토에 의한 강도증가량은 경험적방법에 의

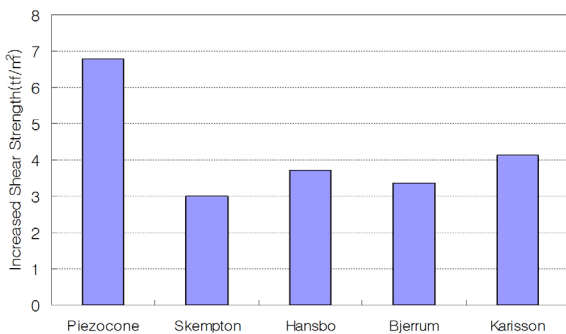


Fig. 17. Compare calculation and piezocone test result (2rd step-section 3)

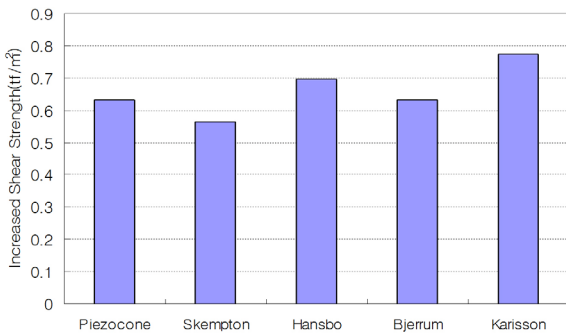


Fig. 18. Compare calculation and piezocone test result (3rd step-section 3)

한 추정치가 실측치의 44~61%로 과소평가 되나, 3단계 성토에 의한 강도증가량은 경험적방법에 의한 추정치가 실측치의 90~123%로 약간 과대평가 되고 있는 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

- (1) 본 연구구간의 1단계 성토 후($P_0 < P_c$) 침하량은 Terzaghi의 일차원 압밀이론에 의한 계산치가 계측치의 50~92% 정도로 압밀이론에 의한 침하량이 계측치보다 과소평가 되었으며, 2단계 성토 후($P_0 \geq P_c$) 침하량은 Terzaghi의 일차원 압밀이론에 의한 계산치가 계측치의 121~150% 정도로 전반적으로 압밀이론에 의한 침하량이 계측치보다 다소 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.
- (2) 3단계 성토 후($P_0 > P_c$) 침하량은 Terzaghi의 일차원 압밀이론에 의한 계산치가 계측치의 128~332% 정도이나 Section-2 지점의 계측치가 다른 지점에 비해 현저히 적어 본 지점을 제외하면 계산치가 계측치의 125~128% 정도로 2단계와 거의 동일한 경향으로 이론에 의한 침하량이 계측치보다 다소 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.
- (3) 본 연구지역의 압밀침하특성으로 Terzaghi의 일차원 압밀이론에 의한 계산치와 계측치를 비교한 결과 압밀이론에 의한 침하량은 과압밀영역에서는 과소평가되고, 정규압밀영역에서 과대평가되는 것으로 분석되었다. 정규압밀영역에서 2단계 성토에 대한 침하량의 경우 이론 침하량이 과대평가되는 원인 중 하나로 압밀하중이 선행압밀하중 부근에 작용할 때 압축지수의 과다함으로 인해 침하량이 과대평가되는 경향을 보이고 있는 것으로 판단된다. 그 외 정규압밀영역에서의 이론 침하량이 크게 나타나는 원인으로는 자연시로 채취와 운반과정, 시험시료의 성형과정에서의 교란, 소규모시료의 전체지층 대표성, 지반의 비등방성, 비균질성 및 전단계의 압밀 후 초기간극비가 재평가되지 않는점 등에 기인한다고 판단된다.
- (4) 피에조콘 시험결과 2단계 성토 후의 강도증가율은 286%~478%, 3단계 성토 후의 강도증가율은 107%~111%로 나타났으며, 액성지수와 소성지수로 추정할 수 있는 경험식과 피에조콘 시험 결과치를 비교한 결과 본 연구지역의 강도증가량은 3개소 모두 2단계 성토 후 시험한 결과는 Karison & Viberg의 제안식이 54~78%(평균 64%)로 시험치에 가장 근접한 결과를 보이며 경험적방법에 의한 추정치가 시험치에 비해 과소평가 되고 있는

것을 알 수 있었고 3단계 성토 후 시험한 결과는 Section-1 지점을 제외하고 4가지 경험식이 모두 실험치의 73~123%의 결과를 보이고 있는 것을 알 수 있었다.

References

1. Hansbo, S. (1957), A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test, Proc. Swedish Geotechnical Institute, No. 14, pp. 42~46.
2. Hong, W. P., Song, Y. S. and Lee, G. H. (2000), Increment of shearing strength of soft clay in Kwangyang, Institute of Technology and Science, Chungang University, pp. 1~12 (In Korean).
3. Jeong, S. G. (2015), Mechanical characteristics of dredged and reclaimed ground with low plasticity from western coastal site, Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol. 14, No. 4, pp. 97~104 (In Korean).
4. Jun, S. H., Yoo, N. J. and Park, B. S. (2008), Evaluation of constitutive relationships and consolidation coefficients for prediction of consolidation characteristics of dredged and reclaimed ground, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 9, No. 6, pp. 31~41 (In Korean).
5. Kim, J. K., Kim, Y. U., Choi, I. G. and Park, Y. M. (2001), Estimation of geotechnical characteristics of the marine clay at Incheon international airport marine clay using piezocone and dilatometer tests, Journal of The Korean Geotechnical Society, Vol. 17, No. 2, pp. 41~49 (In Korean).
6. Kim, S. K. (1975), Engineering characteristics of marine clays in Korea, Proc. of 15th Asian Regional Conference on SMFE, Vol. 1, pp. 35~43.
7. Kim, S. K., Yea, G. G., Kim, K. S. and Kim, H. Y. (2011), Consideration of physical and compression characteristics among western and southern coastal marine clays, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 12, No. 6, pp. 43~51 (In Korean).
8. Kim, Y. H., Jang, J. H., Choi, D. C. and Chun, B. S. (2009), Evaluation of piezocone factors for soft ground in the region of Nakdong river estuary using statistical analysis, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 10, No. 7, pp. 53~66 (In Korean).
9. Lee, S. H., Jung, J. S., Ji Y. H. and Kim, S. M. (2012), A study on the long-term settlements characteristics and settlement prediction of soft ground in west-south region, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 13, No. 4, pp. 77~91 (In Korean).
10. Lee, S. J. (1997), Estimations of Geotechnical Properties from Piezocone Penetration Tests in South Korea, Ph.D. Dissertation, University of Seoul, pp. 42~95 (In Korean).
11. Lunne, T., Eide, O. and De Ruiter, J. (1976), Correlation between cone resistance and vane shear strength in some scandinavian soft to medium stiff clays, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 13, No. 4, pp. 430~431.
12. Park, S. Y., Kim, K. B., Lee, Y. K. and Baek, S. C. (2012), Evaluation of piezocone coefficient of soft grounds in the areas of Gyeonggi and Incheon, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 13, No. 5, pp. 41~49 (In Korean).
13. Schmertmann, J. H. (1955), The undisturbed consolidation behavior of clay, Journal of ASCE, Vol. 120, pp. 1201~1233.
14. Skempton, A. W. (1986), Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure. Relative density, particle size, ageing and overconsolidation, Geotechnique, Vol. 36, No. 3, pp. 425~427.
15. Song, M. S. (1988), Relationship of soil parameters of marine clay in the South Korea, Master's Dissertation, University of Hanyang, pp. 20~35 (In Korean).
16. Yoon, K. L. and Kim, B. T. (2003), Formula of compression index prediction for marine clay in Korea, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 23, No. 3C, pp. 169~176 (In Korean).