

慶南海岸地域 軟弱粘土의 土質特性과 壓縮指數와의
相關性에 관한 研究

A Study on the Relationship between the Physical Properties of Soil and the
Compression Index of Soft Clay in Gyungnam Coastal Region

장정욱* · 최성민** · 박춘식**

Jeong Wook Jang, Seong Min Choi and Choon Sik Park

要 旨 : 본 연구는 경남해안지역 연약점토의 토질특성과 압축지수와의 관계를 알아보기 위해 김해지역 82개소, 진해지역 18개소, 거제지역 27개소의 불교란 상태의 시료를 채취하여 물성실험 및 역학실험을 실시하였다. 그 결과, 경남해안지역 연약점토의 압축지수는 Terzaghi & Peck이 제안한 경험식을 적용할 수 없음을 알 수 있었다. 경남해안지역 연약점토의 압축지수는 자연함수비, 액성한계, 초기간극비와 상관성이 있었으며, 이들 중 압축지수는 초기간극비와 상관성이 가장 컸다. (1) 경남해안지역 연약점토의 압축지수는 $C_c=0.74(e_0-0.7)$ 로 나타낼 수 있다. (2) 경남해안지역 연약점토의 압축지수와 팽창지수와의 관계는 $C_s=(1/8-1/15)C_c$ 이다.

핵심용어 : 압축지수, 팽창지수, 초기간극비, 액성한계, 소성지수, 연약점토

Abstract □ This study analyzed the relationship between the physical properties of soil and the compression index of the soft clay in Gyungnam coastal region. Tests of physical and mechanical properties of soil have been carried out under the undisturbed condition at 82 Gimhae, 18 Jinhae and 27 Geojespecimens. The result showed that Terzaghi & Peck's empirical equation of the compression index were not applicable. The compression index of soft clay in Gyungnam coastal region was correlated with the water contents, the liquid limit and the initial void ratio. Among these, the initial void ratio showed the highest correlation with the compression index of soft clay in Gyungnam coastal region and the relationship is shown in the following. (1) The compression index of soft clay in Gyungnam coastal region is represented as follows: $C_c=0.74(e_0-0.7)$ (2) The relationship between compression index and the swelling index in Gyungnam coastal region is represented as follows: $C_s=(1/8-1/15)C_c$.

Keywords : compression index, swelling index, initial void ratio, liquid limit, plasticityindex, soft clay

1. 서 론

우리 나라의 서·남해안에 분포하는 연약지반은 국토의 균형 있는 개발과 효율적인 이용증대를 위하여 많은 학자와 기술자들의 연구개발과 관심의 대상이 되어왔다. 이 연약지반상에 성토나 구조물을 설치할 경우 침하량은 중요한 문제로 대두된다. 침하량의 결정이 부정확할 경우에는 많은 경제적인 손실을 초래하게 된다.

침하량 결정시 가장 중요한 인자는 압축지수(C_c)이고 압축지수는 압밀시험을 통해 구할 수 있다. 그러나 압밀시험은 많은 시간과 노력을 필요로 하며, 경우에 따라서는 시료채취가 용이하지 않을 경우도 많다. 그러므로 많은 학자들과 기술자들이 흙의 가장 기본적인 성질인 자연함수비(W_n), 액성한계(LL), 초기간극비(e_0), 소성지수(I_p) 등과 압축지수와의 관계를 규명하여 간단한 물리적 시험만으로도 압축지수를 추정할 수 있는 경험식을 개발해 왔다.

*청주대학교 지구환경시스템공학과(Dept. of Geo-environmental and system Eng., Chongju University, Chongju 360-764, Korea)

**창원대학교 토목공학과(Dept. of Civil Engineering, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea)

이들 식중 일부는 특정지역, 특정토질에만 적용되는 경우도 있고 또한 전반적인 흙에 대해 적용 가능한 것도 있다.

그러나 흙의 거동특성은 주변 환경과 같은 지역적인 특성에도 상당한 영향을 받기 때문에 제안되어진 경험식들을 그대로 경남해안지역에 존재하는 점성토에 적용함에는 여러 가지 문제가 발생할 수 있다.

따라서 본 연구는 경남해안지역에 분포하고 있는 연약 점성토를 대상으로, 대표적인 시료(김해지역 82개소, 진해지역 18개소, 거제지역 27개소)를 불교란 상태에서 채취한 후, 실내토질시험을 통하여 물리적 특성 및 역학적 특성을 조사하였다. 그 결과 경남해안지역 점성토의 기본 물성값과 압축지수와의 상관관계를 검토하고, 회귀분석기법을 이용하여 상관관계식을 제안하였다. 그리고 압밀시험 결과 본 연구에서 사용된 모든 점성토 시료는 정규압밀 점토인 것으로 판명되었다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 표준압밀시험기를 이용하여 실내 압밀 시험을 수행하였다. 시료 상·하부에 설치된 다공판에는 미세입자의 클로깅(clogging) 방지를 위하여 여과지(filter paper)를 사용하였으며, 시료와 압밀링 사이는 주면마찰력을 최소화시키기 위하여 실리콘그리스(silicone grease)로 윤게 처리하였다.

그리고 압밀은 일차원적으로 이루어졌으며, 하중은 재하지대를 사용하여 가하고 압축량은 정밀한 변형량 측정 장치로 측정하였다. 시험하는 동안 시료는 포화상태를 유지시키기 위하여 물 속에 잠기게 하였으며 1단계 재하시간은 24시간으로 하고 각 단계별 압력은 2배씩 증가시켰

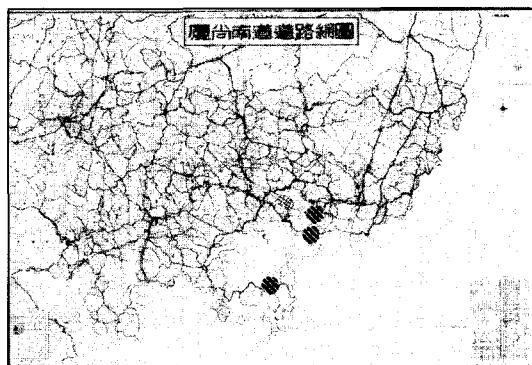


Fig. 1. Location of sample obtained.

Table 1. Outline of sampling

	시료채취심도(m)	지하수위(m)	비고
김해	2.4~14.0	0.0~3.2	해안인접지역
진해	1.6~13.4	0.0~1.5	해저면
거제	0.6~5.4	0.0~1.2	해저면

다. 그리고 최종단계 압밀 종료후에는 압력을 제한하면서 팽창량 또한 측정하였다.

3. 시료채취 위치 및 개요

본 연구에 사용된 시료의 채취위치, 심도, 지하수위는 아래 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 물리적 특성

김해지역 일대에서 채취한 시료의 물리적 특성으로, 함수비는 60.01%~106.10%까지 넓은 범위로 분포하고 액성한계는 대부분이 50%이상이고 소성지수는 15.10~51.10으로 일반적인 흙보다는 큰 값을 나타내었다. 액성한계와 소성지수가 크게 나타나는 것은 연구에 사용된 시료에 포함된 점토광물이 입경이 작고 전기적 성질이 활발한 광물이라는 것을 의미한다. 흙의 분류는 대개 소성이 큰 CH~MH에 속하였다.

김해지역 점성토의 컨시스턴시특성을 소성도상에 나타내면 Fig. 2와 같으며, 데이터의 분산정도는 크나 대부분

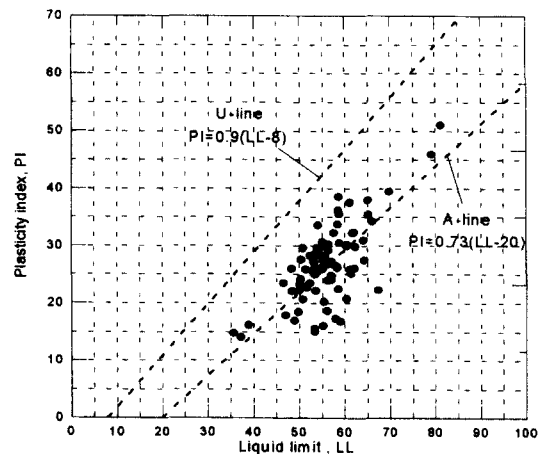


Fig. 2. Plasticity Chart(Gimhae).

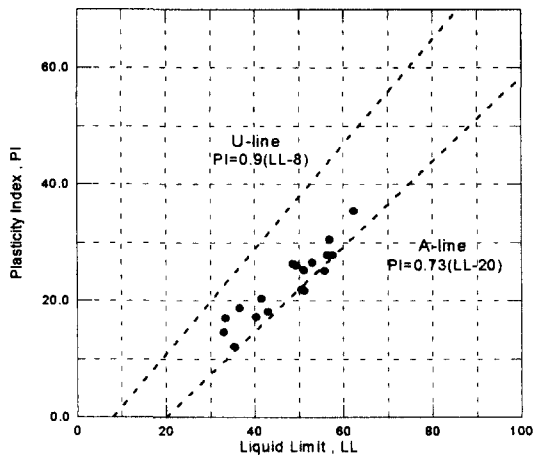


Fig. 3. Plasticity Chart(Jinhae).

이 A-Line 근처에 분포하고 있었으며 최소자승법으로 근사하여 나타낸 선은 Casagrande가 제안한 A-Line과 거의 유사하다.

진해지역 연약점토의 물리적 특성치는 자연함수비가 44.76%~62.3%까지 분포하며 액성한계는 33.0%~62.3%, 소성지수는 12.2~35.5의 분포를 보였다. 진해지역의 컨시스턴스특성을 소성도상에 나타내면 Fig. 3과 같으며 대부분이 A-Line 부근에 분포되어 있음을 알 수 있다.

거제지역 연약점토의 물리적 특성치는 자연함수비가 35.51%~93.25%까지 분포하고 액성한계는 30.2%~64.7%까지로 대부분이 50% 이하에 존재하며 소성지수는 11.3~25.8의 분포를 보인다. 거제지역의 컨시스턴스특성을 소성도상에 나타내면 Fig. 4와 같으며 진해지역과 마찬가지로

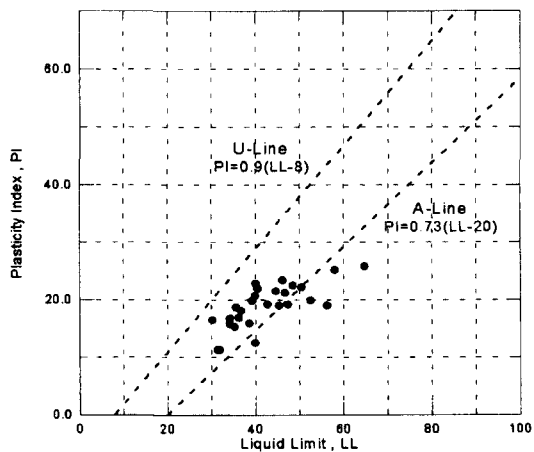


Fig. 4. Plasticity Chart(Geoje).

A-Line 부근에 데이터들이 분포되어 있음을 알 수 있다.

4.2 역학적 특성

경남해안지역에 분포하고 있는 연약점토의 전단강도 및 압밀정수를 구하기 위하여 일축압축강도시험과 표준압밀시험을 수행하였다. 일축압축시험결과, 김해지역 일대에서 채취된 시료의 평균 일축압축강도는 0.23 kg/cm² 정도이고, 압밀시험결과 선행압밀압력(P_c)은 0.223~0.987 kg/cm² 범위의 값을 가지며, 압축지수(C_c)는 평균 1.360으로 일반적인 점토의 압축지수보다 큰 값을 나타내었다. 팽창지수(C_s)는 0.057~0.136 범위의 값으로 평균 0.112의 값을 나타내며 압축지수와의 관계는 $C_s=(1/8-1/15)C_c$ 을 보였다.

진해지역의 연약점토에 대한 일축압축강도는 평균 0.23 kg/cm² 정도로 김해지역의 일축압축강도와 비슷하였다. 압밀시험 결과 선행압밀압력(P_c)은 0.170~1.375 kg/cm²의 범위를 가지며 압축지수(C_c)는 0.263~1.448로 평균 0.836이고, 팽창지수(C_s)는 0.055~0.133의 범위로 평균 0.083의 값을 나타내었으며, 압축지수와의 관계는 $C_s=(1/7-1/15)C_c$ 로 나타났다.

거제지역의 연약점토에 대한 일축압축강도는 평균 0.11 kg/cm² 정도로 김해지역, 진해지역의 일축압축강도보다 낮은 값을 보였다. 그 이유는 시료의 채취심도가 다른 지역에 비해 낮기 때문이라고 사료된다. 압밀시험결과 선행압밀압력(P_c)은 0.135~0.363 kg/cm²의 범위를 가지며 압축지수(C_c)는 0.299~1.058로 평균 0.583이고 팽창지수(C_s)는 0.021~0.091의 범위로 평균 0.052이며 압축지수와의 관계는 $C_s=(1/8-1/14)C_c$ 을 보였다.

5. 각 지역별 토성치와 압축지수와의 관계

본 연구 대상지역인 김해, 진해, 거제지역의 토질시험성과를 회귀분석 이론에 적용하여 자연함수비, 액성한계, 초기간극비와 압축지수와의 관계를 일차원적으로 나타내었으며 기존의 연구 결과와 비교하여 그래프에 나타내었다.

5.1 김해지역의 압축지수 관계식

5.1.1 자연함수비와 압축지수

자연함수비와 압축지수와의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림으로부터 압축지수는 자연함수비가 커짐에 따라 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다. 또한 Moran *et al.* (1958)의 관계식과는 차이가 있음을 알 수 있다.

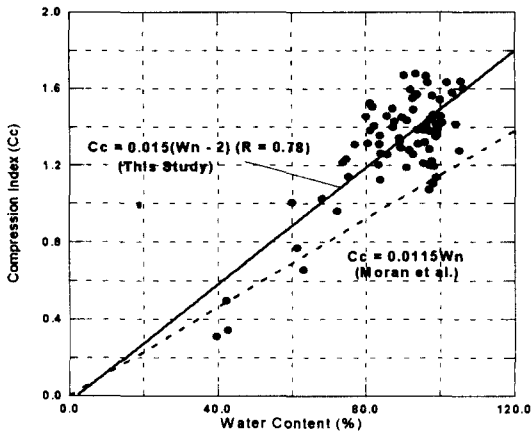


Fig. 5. Relationship between Water Content and Compression Index(Gimhae).

자연함수비와 압축지수와의 관계식은 식 (1)과 같이 나타났으며, 상관계수(R)는 0.78이다.

$$C_c = 0.015(W_n - 2) \quad (1)$$

5.1.2 액성한계와 압축지수

Fig. 6는 액성한계와 압축지수와의 관계를 나타내고 있다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 압축지수는 액성한계가 커짐에 따라 증가하는 경향을 알 수 있다. 또한, 김해지역 연약점토의 압축지수가 일반적으로 사용되는 Terzaghi & Peck(1948)의 식 $C_c=0.009(LL-10)$ 보다 액성한계의 영향을 더 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

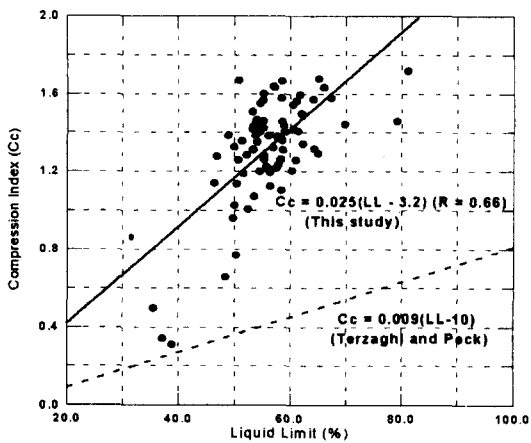


Fig. 6. Relationship between Liquid Limit and Compression Index(Gimhae).

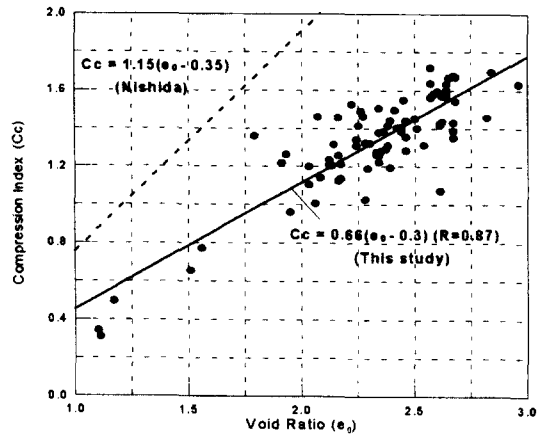


Fig. 7. Relationship between Void Ratio and Compression Index (Gimhae).

액성한계와 압축지수와의 관계식은 식 (2)과 같으며, 상관계수(R)는 0.66을 보였다.

$$C_c = 0.025(LL - 3.2) \quad (2)$$

5.1.3 초기간극비와 압축지수

초기간극비와 압축지수와의 관계를 Fig. 7에 나타내었으며, 그림으로부터 초기간극비가 클수록 압축지수가 증가함을 알 수 있다. 간극비와 압축지수와의 상관관계식은 식 (3)과 같으며, 상관계수(R)는 0.87로 초기간극비와 압축지수와의 상관성이 다른 물성값에 비하여 높다는 것을 알 수 있었다.

$$C_c = 0.66(e_0 - 0.3) \quad (3)$$

5.2 진해지역의 압축지수 관계식

5.2.1 자연함수비와 압축지수

Fig. 8에 자연함수비와 압축지수와의 관계를 나타내었다. 이 지역의 압축지수는 자연함수비가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있고 상관관계식은 식 (4)과 같으며, 상관계수(R)는 0.87이다.

$$C_c = 0.016(W_n - 12.5) \quad (4)$$

5.2.2 액성한계와 압축지수

액성한계와 압축지수와의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 다소 데이터가 분산되어 있으나 액성한계가 증가함에 따라 압축지수도 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한, 진해지역의 압축지수는 Terzaghi & Peck

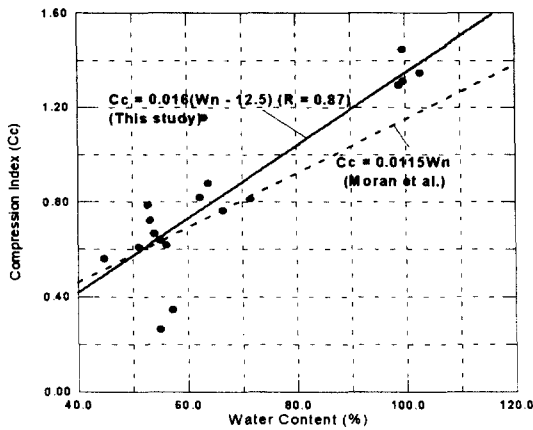


Fig. 8. Relationship between Water Content and Compression Index(Jinhae).

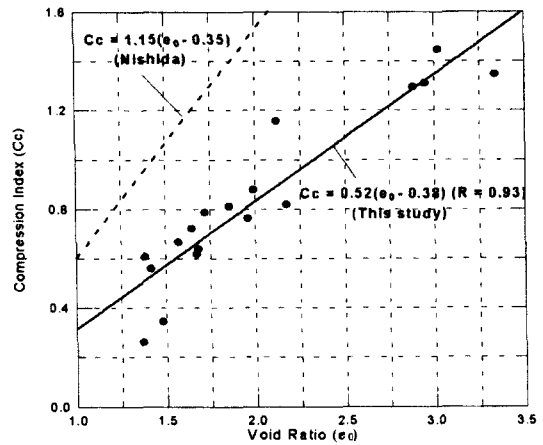


Fig. 10. Relationship between Void Ratio and Compression Index(Jinhae).

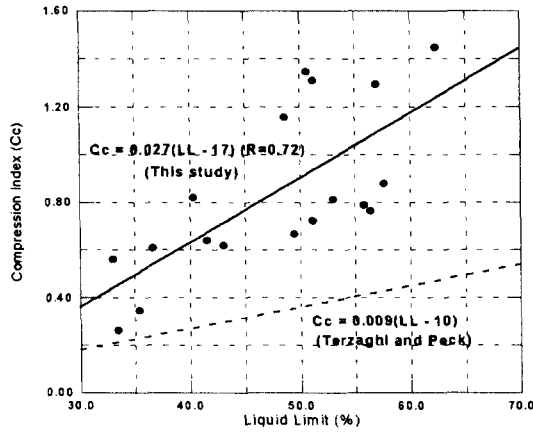


Fig. 9. Relationship between Liquid Limit and Compression Index(Jinhae).

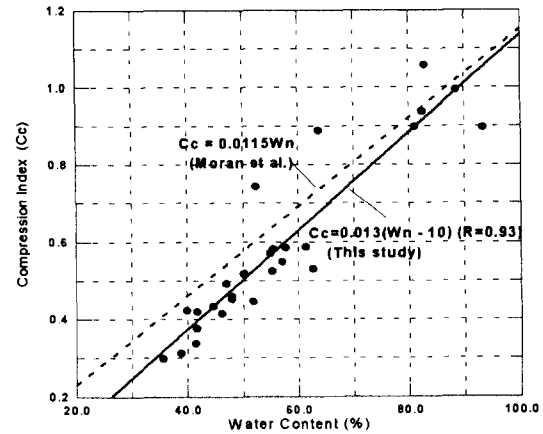


Fig. 11. Relationship between Water Content and Compression Index(Geoje).

(1948)의 관계식을 적용할 수 없다는 것을 Fig. 9을 보면 알 수 있다. 액성한계와 압축지수와의 관계식은 식 (5)와 같으며 상관계수(R)는 0.72이다.

$$C_c = 0.027(LL - 17) \quad (5)$$

5.2.3 초기간극비와 압축지수

Fig. 10은 진해지역 점성토의 초기간극비와 압축지수와의 관계를 나타내고 있다. 초기간극비와 압축지수와의 관계식은 식 (6)과 같으며, 또한 상관계수(R)는 0.93을 보여 이 지역 점성토의 압축지수 값이 초기간극비와 비교적 높은 상관성이 있음을 보이고 있다.

$$C_c = 0.52(e_0 - 0.38) \quad (6)$$

5.3 거제지역의 압축지수 관계식

5.3.1 자연함수비와 압축지수

거제지역 점성토의 자연함수비와 압축지수와의 관계를 Fig. 11에 나타내었다. 이 그림으로부터 거제지역 점성토의 경우, 압축지수 값과 자연함수비의 상관성이 비교적 높게 나타남을 알 수 있으며, 타지역 점성토와 같이 자연함수비가 증가함에 따라 압축지수도 증가함을 보이고 있다.

자연함수비와 압축지수와의 상관관계식은 식 (7)과 같으며 상관계수(R)는 0.93이다.

$$C_c = 0.013(W_n - 10) \quad (7)$$

5.3.2 액성한계와 압축지수

거제지역 점성토의 액성한계와 압축지수와의 관계를

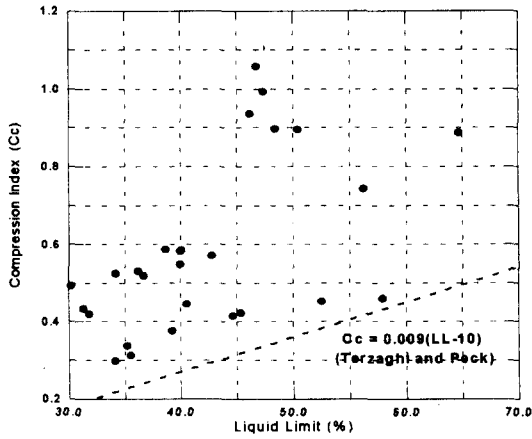


Fig. 12. Relationship between Liquid Limit and Compression Index(Geoj).
 Compression Index (Cc)
 Liquid Limit (%)
 $C_c = 0.009(LL-10)$
 (Terzaghi and Peck)

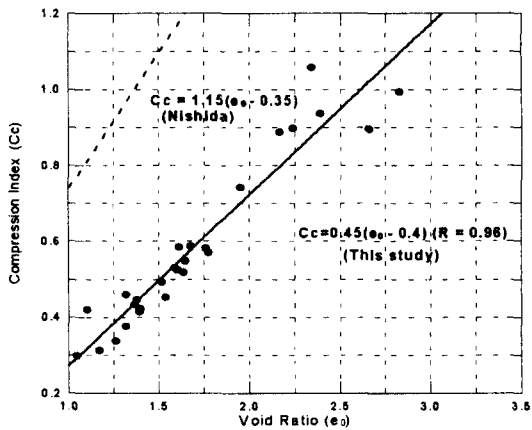


Fig. 13. Relationship between Void Ratio and Compression Index(Geoj).
 Compression Index (Cc)
 Void Ratio (e_0)
 $C_c = 1.15(e_0 - 0.35)$
 (Nishida)
 $C_c = 0.45(e_0 - 0.4)$ ($R = 0.98$)
 (This study)

Fig. 12에 나타내었다. 데이터의 분산이 심해서 관계식을 도출하기는 어려웠으나, 데이터들이 Terzaghi & Peck(1948)이 제시한 관계식보다 위에 분포한다는 것을 알 수 있다.

5.3.3 초기간극비와 압축지수

Fig. 13은 거제지역 점성토의 초기간극비와 압축지수와 의 관계를 나타낸 것이다. 거제지역도 김해, 진해지역과 마찬가지로 압축지수 값이 초기간극비와 가장 상관성이 높다는 것을 알 수 있다.

거제지역 연약점성토의 압축지수와 초기간극비와의 관계식은 식 (8)과 같으며, 상관계수(R)는 0.96으로 높은 값을 보였다.

$$C_c = 0.45(e_0 - 0.4) \tag{8}$$

Table 2. Empirical equation of the regional compression index

지역	상관식
김포 · 인천지역	$C_c = 0.008LL - 0.0349$
	$C_c = 0.0145W_n - 0.3438$
	$C_c = 0.286e_0 - 0.1028$
아산만지역	$C_c = 0.0136LL - 0.23$
	$C_c = 0.0135W_n - 0.245$
	$C_c = 0.5144e_0 - 0.2769$
군산 · 장항지역	$C_c = 0.0094LL + 0.0877$
	$C_c = 0.0094W_n - 0.1837$
	$C_c = 0.4646e_0 - 0.1372$
목포지역	$C_c = 0.0069LL + 0.1508$
	$C_c = 0.0086W_n + 0.0713$
	$C_c = 0.3894e_0 - 0.0322$
여천 · 광양지역	$C_c = 0.0085LL + 0.0894$
	$C_c = 0.0103W_n - 0.0138$
	$C_c = 0.4216e_0 - 0.0895$
김해 · 부산지역	$C_c = 0.0095LL + 0.1087$
	$C_c = 0.0135W_n - 0.1635$
	$C_c = 0.4954e_0 - 0.1737$

6. 결과분석 및 고찰

현재 국내에서도 서·남해안의 연약지반을 중심으로 많은 경험식들이 제안되어 있다. Table 2는 각 지역별 경험식들을 정리한 것이며, 지역별 상관관계식에 차이가 있음을 알 수 있다.

Fig. 6, Fig. 9, Fig. 12에서와 같이 액성한계로 압축지수(C_c)를 산정할 경우, 본 연구대상 지역 연약점성토의 압축지수는 현재 액성한계로 압축지수를 추정하는 식 중 가장 보편화된 $C_c = 0.009(LL-10)$ (Terzaghi & Peck(1948))보다 크게 나왔다.

또한 Fig. 14에서 보는바와 같이 Nishida(1976)가 제시한 $C_c = 1.15(e_0 - 0.35)$ 와 Hough(1957)가 제시한 $C_c = 0.29(e_0 - 0.27)$, 임(1982)이 제시한 경험식인 $C_c = 0.4(e_0 - 0.46)$ 를 적용할 경우, Nishida(1976)의 경험식은 경남지역 연약점토의 압축지수를 과대평가하고 Hough(1957), 임(1982)의 경험식은 과소평가하게 된다. Fig. 15와 같이 자연함수비로 압축지수를 추정하는 Moran et al.(1958), Azzouz et al.(1976)의 $C_c = 0.015W_n$, $C_c = 0.01(W_n - 5)$ 를 적용할 경우 함수비가 40%~60%사이일 경우에는 어느 정도 적용이 가능하나 함수비가 60%이상일 경우에는 경남해안지역 연약점토의 압축지수를 과소평가하게 된다.

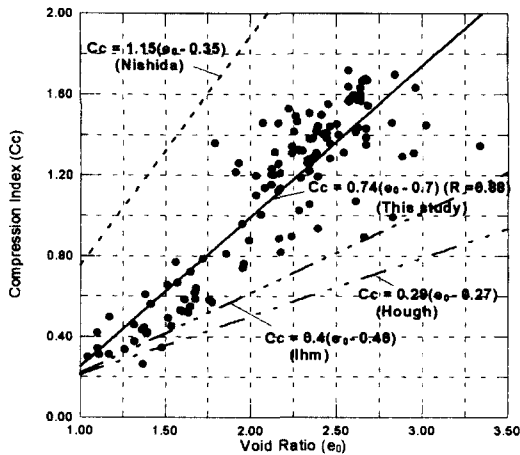


Fig. 14. Various Compression Index(due to Void Ratio).

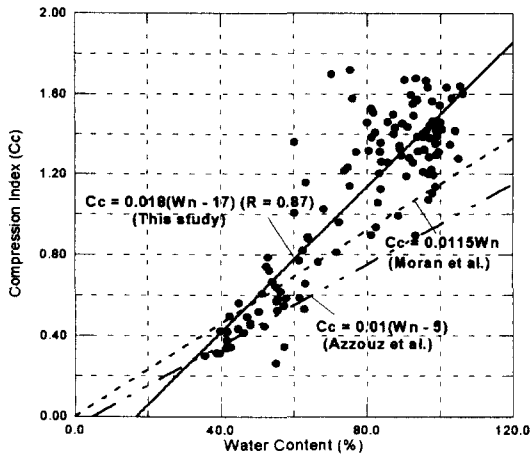


Fig. 15. Various Compression Index(due to Water Content).

Table 3. The Result of Regression Analysis

지역	상관식	상관계수(R)
김해지역	$C_c=0.015(W_n-2)$	0.78
	$C_c=0.7(e_0-0.34)$	0.89
진해지역	$C_c=0.016(W_n-12.5)$	0.87
	$C_c=0.52(e_0-0.38)$	0.93
거제지역	$C_c=0.013(W_n-10)$	0.93
	$C_c=0.45(e_0-0.4)$	0.96
경남(김해+진해+거제)지역	$C_c=0.018(W_n-17)$	0.87
	$C_c=0.74(e_0-0.7)$	0.88

자연함수비, 초기간극비와 압축지수와의 관계식을 Table 3에 나타내었다. 액성한계와 압축지수와의 관계식은 다른 물성치에 비하여 상관성이 비교적 낮게 나타났기 때문에

이 표에서는 생략하였으며, 압축지수는 초기간극비와 상관성이 가장 높다는 것을 표로부터도 알 수 있다.

7. 결 론

경남해안지역(김해, 진해, 거제)의 연약점성토를 불교란 상태에서 채취하여 물리적, 역학적 시험을 수행하였다.

그 결과로 경남해안지역 점성토의 기본 물성치와 압축지수와의 상관관계에 대해서 검토하고, 회귀분석기법을 이용하여 기본 물성치로부터 경남해안지역에 적용 가능한 압축지수 추정식을 정립하고자 분석해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구 대상 지역인 경남해안지역 연약점 성토의 압축지수는 Terzaghi & Peck(1948) 이 제안한 $C_c=0.009(LL-10)$ 으로는 추정 할 수가 없었다.

(2) 경남해안지역 연약점성토의 압축지수를 자 연함수 비를 변수로 하는 Moran *et al.*(1958), Azzouz *et al.*(1976)의 관계식을 적용할 경우, 함수비가 60%이상일 때에는 경남해안지역 연약점성토의 압축지수를 과소평가하게 된다.

(3) 김해, 진해, 거제지역 점성토의 압축지수는 타 물성치보다 초기간극비와 가장 상관성이 높음을 알 수 있었다.

(4) 김해, 진해, 거제지역의 데이터를 통합하여 초기간극비와 압축지수와의 관계를 알아본 결과, 상관계수(R)가 0.88인 다음과 같은 식을 얻을 수 있었다.

$$C_c = 0.74(e_0 - 0.7)$$

(5) 경남해안지역 연약점성토의 압축지수와 팽창지수와의 관계는 다음과 같았다.

$$C_c = \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{15}\right) C_c$$

참고문헌

김승환, 1998, 토성치의 상관관계에 의한 압축지수 결정방법과 그 신뢰성에 관한 연구, 공학석사 학위논문, 경희대학교.

박성영, 오다영, 1998, 국내 연약지반의 지역 별 공학적 특성(1), 대한토목학회지, 제46권, 제9호, pp. 69-79.

박성영, 오다영, 1998, 국내 연약지반의 지역 별 공학적 특성(2), 대한토목학회지, 제46권, 제10호, pp. 46-57.

신은철, 이규진, 신방응, 1995, 인천해안지역에 분포하는 해성점토의 토질특성, 한국지반 공학회, 학술발표회 논문집, pp. 15-20.

유능환, 유연택, 박승범, 1988, 섬진강하구지역의 충적점토

- 에 대한 토질공학적 특성연구(I), 대한토목공학회지, 제4권 제1호, pp. 37-46.
- 입철웅, 1982, 우리나라 점토의 압축지수의 계수결정에 관한 연구, 서울대학교 대학원 공학석사학위논문, 서울대학교
- 최성민, 2001, 경남지역 연약점토의 토질특성과 압축지수와 의 상관성에 관한 연구, 공학 석사 학위논문, 창원대학교.
- 최성민, 박춘식, 2000, 김해지역 연약점토의 토질특성과 압축지수와의 상관성에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 399-402.
- Azzouz, A.S., Krizek, R.J. and Corotis, R.B., 1976, Regression analysis of soil compressibility, *Soils and Foundation*, Japan Society of Soil Mechanics and Foundations Engineering, Tokyo, Japan.
- Braja M. Das, 1990, *Principles of Foundation Engineering*, PWS Publishing Company, Boston.
- Hough, B.K., 1957, *Basic Soils Engineering*, The Ronard Press Company New York, pp. 114-115.
- Moran, Proctor, Mueser and Rutledge, 1958, Study of deep soil stabilization by vertical sand drains, Contract No. NOY-88812, Bureau of Yards and Docks, Department of the Navy, Washington D.C.
- Skempton, A.W., 1944, Note on Compressibility of Clays, *Quarterly Journal of the Geotechnical Society of London*, Vol. 100, July, pp. 119-135.
- Terzaghi, K. and Peck, R., 1948, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley and Sons, Inc, New York N.Y.

Received August 27, 2001

Accepted September 10, 2001