

해성점토의 압밀구성관계

Constitutive Relation of Consolidation for Marine Clay

차 경 섭** · 장 병 옥* · 원 정 윤***
Cha, Kyung Seob · Chang, Pyoung Wuck · Won, Jeong Yun

Abstract

Most soft ground in the southern and western coasts in Korea consists of very compressible alluvial deposits. Four samples in these alluvial deposits were selected to manifest the constitutive relations of consolidation.

A series of tests were performed to investigate void ratio - effective stress relation and void ratio - coefficient of permeability relation on soil samples obtained at Haenam, Jindo, Mankyung, and Janghung. Permeabilities by CRS theory were similar to directly measured data, but those of indirectly computed by C_v shows differences. Several models about compressibility and permeability were compared with test data.

I. 서 론

흙의 압밀 거동을 예측하기 위해서는 현장조건과 함께 재료의 압축특성과 투수특성에 대한 이해가 필요하다. 이러한 특성들은 일반적으로 경험적으로 얻어지는 간극비-유효응력 및 간극비-투수계수 관계로 표현되고 있다. 국외에서는 압밀구성관계를 적용하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔지만, 국내의 압밀관련 연구들 중 압밀구성관계에 대한 실험적 연구는 미미한 실정이다. 국외에서의 연구들 또한 특정한 형성과정을 가지는 특정 점토에 대한 성과들로서 한정된 범위에서만 유효할 뿐 서로 다른 조건과 환경에서는 다른 구성관계를 나타낼 것이다(Tavenas, 1983). 따라서, 국내의 흙에 대해 압축성과 투수성에 대한 실제적인 자료를 바

탕으로 한 합리적인 압밀구성관계의 정립이 필요하다고 할 수 있다.

압축성 및 투수특성을 실측된 거동과 유사하도록 수학적 함수로 표현하고자 하는 많은 연구들이 있어 왔다. 압축특성에 대해서는 간극비-하중사이의 로그선형관계가 널리 사용되고 있으며 근래에는 보다 복잡한 식 즉, 로그함수, 지수함수, 멱함수 등의 관계들이 제시되고 있다. 또한 투수특성에 대해서는 간극비-투수계수 사이의 로그선형관계가 널리 사용되고 있으나, 여러 학자들에 의해 새로운 관계들이 제안되어 왔다.

한편, 최근 여러 학자들은 기존의 Oedometer 시험기법에 비해 다양한 하중조건 및 경계조건을 구현할 수 있고 짧은 시간에 시험을 수행할 수 있는 일정변형률속도(constant rate of strain, CRS) 압

* 서울대학교 농업생명과학대학

** 서울대학교 대학원

*** (주)쏘일테크 엔지니어링

키워드 : 일정변형률속도 압밀시험(CRS), 압밀구성관계, 투수성, 압축성, 해성점토

밀시험을 이용하여 압밀해석 연구를 수행하였다. Hamilton과 Crawford(1959)는 최초로 일정변형률 속도 압밀시험(이하 CRS 시험)을 수행하였으며, Smith와 Wahls(1969)는 처음으로 이론해를 발표하였다. 그 후 Samarasinghe 등(1982)은 CRS 시험을 통하여, 연약점토의 투수특성을 분석하였으며, Tavenas 등(1983)은 C_v 에 의하여 간접적으로 구해지는 투수계수의 값이 유효하지 않음을 지적하였으며, CRS 시험을 통하여, 연약점토의 압축특성 및 투수특성을 분석하였다. 국내에서도 최근 CRS 시험에 의한 압밀해석연구가 수행되고 있으며, 유 등(1993)은 CRS 시험에 의한 연약점토의 압밀특성을 분석하였으며, 이 등(1998)은 CRS 시험 및 Oedometer 시험을 이용하여 해성점토의 압밀특성을 연구하였다.

본 연구에서는 압밀구성관계를 밝히기 위하여 서·남해안의 해남, 진도, 장흥, 만경강 등에서 채취한 연약점토를 이용하여 Oedometer 시험 및 CRS 시험을 수행하고, 응력상태에 따른 투수계수를 직접 측정하였다. 이를 토대로 투수계수 산정 방법들을 비교하고 나아가 제시된 몇 가지 압축모형 및 투수모형들을 실험결과와 비교·분석하고자 한다.

II. 재료 및 시험방법

1. 재 료

본 연구에서는 중·저소성의 시료를 선정하여 압밀구성관계를 살펴보고자 하였다. 시료의 물성치는 Table 1과 같고, 시료에 대한 입도분석 결과는 Fig. 1과 같다. 네 가지 시료 모두 통일분류법 상으로 CL에 해당하며, 200번체 통과량은 전부 95% 이상이며, 실트질 점토에 해당한다.

2. 시험방법 및 장치

본 연구에서는 먼저, 투수계수측정방법에 따른 투수계수를 비교하고자 Oedometer 압밀시험과 CRS 시험 및 직접투수계수측정을 실시하였으며,

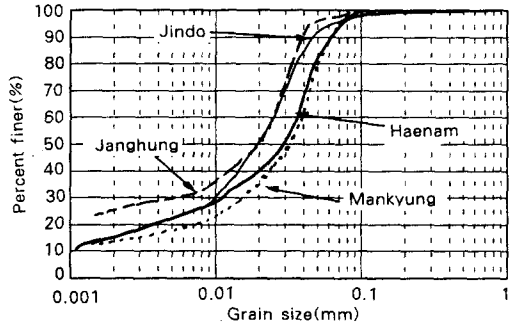


Fig. 1. Grain size distribution

Table 1. Physical properties of soils

Location	Haenam	Janghung	Jindo	Mankyung
Sampling depth(m)	2~3	0~1	5~5.4	0~1
Natural water content (%)	54.4	32.3	41.2	34.8
Liquid limit(%)	44.3	29.7	36.7	28.8
Plasticity index	21.2	9.6	16.7	11.7
Specific gravity	2.7	2.7	2.70	2.64
USCS	CL	CL	CL	CL

다음으로, 해남, 진도, 만경, 장흥 등 4가지 시료에 대한 간극비-유효응력 및 간극비-투수계수관계를 비교·분석하기 위하여, CRS 시험, 그리고 직접투수계수측정시험을 시행하였다. CRS 시험시 각 시료에 대한 변형률 속도를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Rate of strain of soils

Location	Haenam	Janghung	Mankyung	Jindo
Rate of strain (mm/h)	0.5	0.25	0.3	0.3

CRS 시험은 ASTM D 4186-89에 의하여 수행하였고, 시험 조건으로서 시료의 포화를 위해 100kPa의 배압을 가하였으며 이때 측정된 B 값은 각각 0.97 이상이었다. Oedometer 시험은 KS F 2316에 의하여 수행하였으며, 하중 증가비 1로서, 24시간 재하하였고, 8단계로 압밀을 실시하였다. 직접투수계수측정시험은 CRS 압밀시험 중 직접투수계수를 측정하였으며 그 방법은 다음과 같다.

① Oedometer 시험과 동일한 각 하중단계에서 CRS시험을 중단시킨다.

② 응력상태를 유지시키면서 두 개의 배압밸브를 통하여 수두차를 발생시킨다.

③ 배압밸브를 통하여 유입·유출량이 일정해지는 정상상태에서 시간에 따른 배수량을 측정한다.

압밀시험 및 투수시험을 수행하기 위하여 Rowe Cell type의 압밀시험장치를 사용하였다. 임의의 변형률속도를 시료에 가할 수 있으며, 배수를 조절할 수 있고, 하부에 설치된 간극수압계를 통하여 압밀도중에 간극수압을 측정할 수 있다. 또한, B값이 일정해질 때까지 측차 배압을 가하거나 압밀을 시작하기 전에 가한 유효응력을 조절하여 포화시킬 수 있으며, 초기의 낮은 압력단계를 포함하여 미세한 하중조절이 쉬운 장점이 있다. 압밀링의 직경은 63.5mm이고, 높이는 19.1mm이다.

III. 결과 및 고찰

1. 투수계수 계산방법 비교

CRS 시험중의 직접투수시험측정을 실시하여 투수계수를 측정하였으며, 해남 시료에 대해서 변형

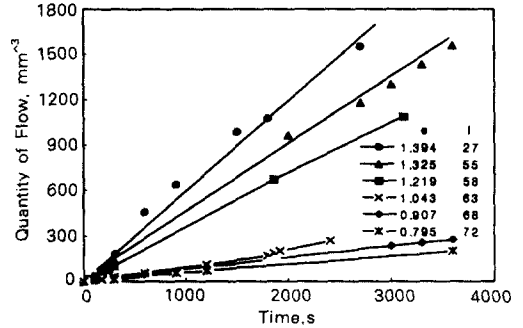
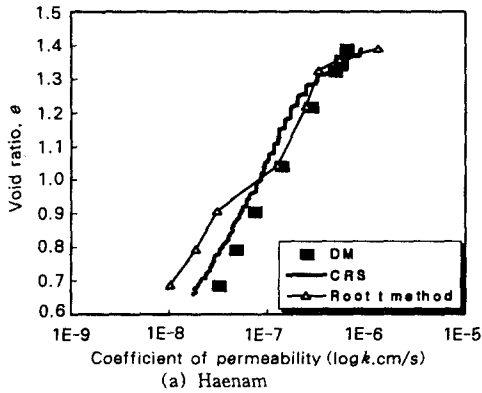
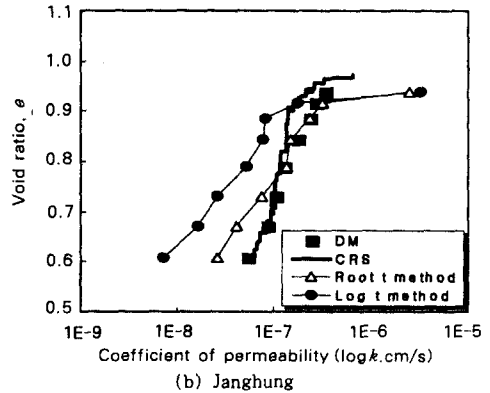


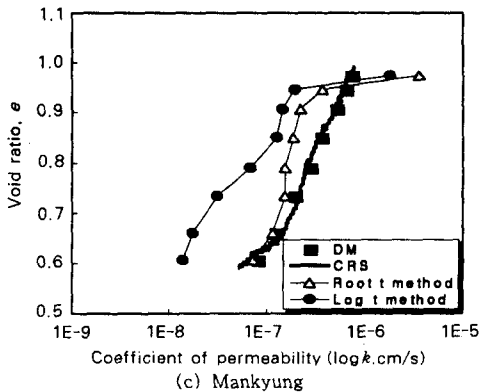
Fig. 2. Constant-head permeability tests(Haenam)



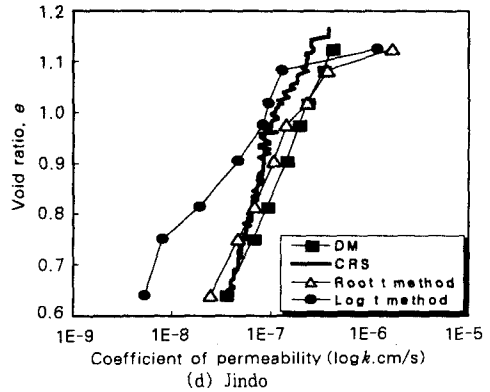
(a) Haenam



(b) Janghung



(c) Mankyung



(d) Jindo

Fig. 3. Coefficient of permeability and void ratio for CRS theory, root t method, log t method and direct measurement

를 속도가 0.5mm/h인 경우를 예를 들어 유량과 시간과의 관계곡선을 Fig. 2에 표시하였다. 약 1시간 동안 측정하였으며, 그 결과 그림에서 보듯이 시간에 따른 유량이 선형관계를 나타내었다.

CRS 시험시 측정된 시료높이 및 간극수압으로부터 투수계수를 구하는 식은 다음과 같다.

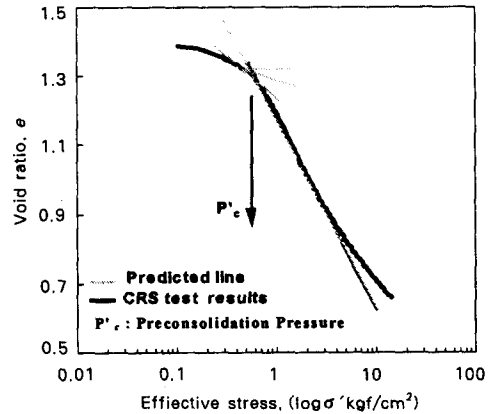
$$k = \frac{1}{2} \frac{rH^2 \gamma_w}{u_h} \dots\dots\dots(1)$$

여기서, u_h 는 과잉간극수압이며, r 은 변형률 속도이고, H 는 시료의 높이이다. Fig. 3은 4가지 시료에 대한 직접 투수시험결과와 CRS 시험에서 식(1)에 의한 이론해 및 Oedometer 압밀시험에서 Root t 법 및 Log t 법에 의해서 도해적으로 구한 C_v 로부터의 투수계수를 비교한 그림이다.

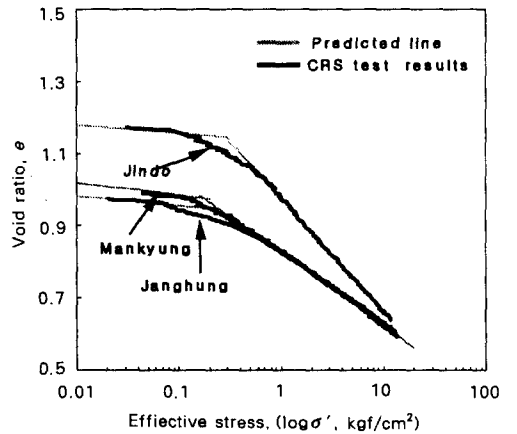
Oedometer 압밀시험에서 간접적으로 구한 투수계수 값들은 직접 측정된 투수계수와 조금씩 차이를 보였다. Oedometer 압밀시험에서 간접적으로 구한 투수계수의 경우, 선행압밀하중 부근에서 급격한 변화를 나타냈으며, 최대 10배 정도의 차이를 보였다. 또한, Log t 법에 의하여 도해적으로 구한 압밀계수에 의해 간접적으로 구한 투수계수 값이 더 큰 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이에 반해, CRS 시험에서 식(1)에 의하여 구한 투수계수의 경우, 매우 근소한 차이를 나타내고 있으며, 낮은 유효응력에서는 다소 차이를 나타내나, 점차 유효응력이 증가함에 따라 거의 동일한 값을 나타내었다.

2. 유효응력-간극비 관계

일반적으로 가장 널리 사용되는 $e - \log \sigma'$ 관계는 Fig. 4(b)에서처럼 정규압밀영역에서의 직선적인 관계를 잘 표현할 수 있으며 선행압밀하중과 압축 지수 등을 구할 수 있다는 장점을 가지고 있지만, Fig. 4(a)에서처럼 압밀곡선이 "S"자형태를 띄는 경우 전체 응력 범위에서 압밀거동을 대표하기 힘들다는 단점을 가지고 있는 것으로 나타났다.



(a) Haenam soil



(b) Jindo, Mankyung, Janghung soils

Fig. 4. Compressibility relations of soils

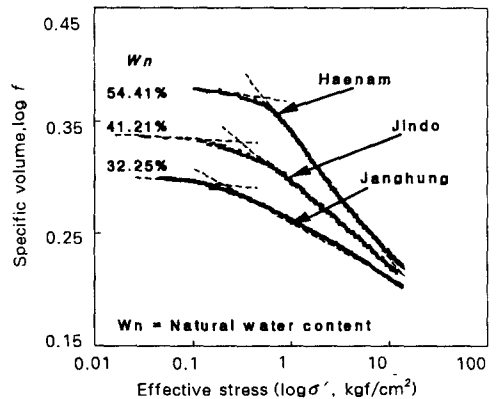


Fig. 5. $\log f - \log \sigma'$ relation curves of soils

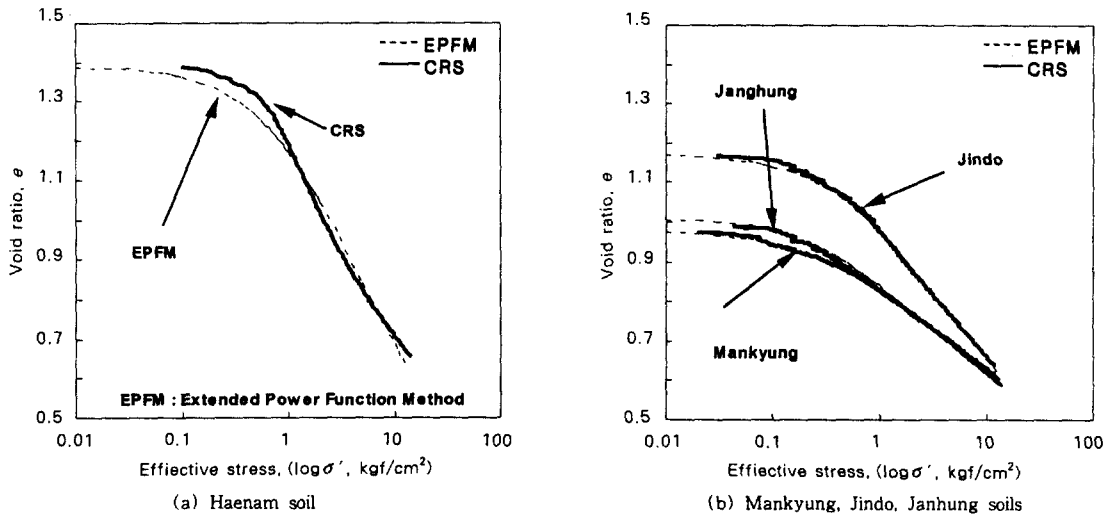


Fig. 6. Compression relations of soils from extended power function method

다음으로 Oikawa(1987)가 제시한 간극비-비체적, $\nu(=1+e)$, 관계에 적용하였다(Fig. 5). 이 모형은 고탄수비의 시료에 적합한 모형으로 제시된 것이다. 적용한 시료 모두 두 개의 직선으로 분리할 수 있으며, 앞의 관계에서 "S"자형을 나타내던 해남시료도 선형으로 근사되었다. 이 관계에서는 선형압밀하중을 쉽게 구할 수 있다.

한편, Fig. 6에서는 최근 Liu 등(1991)에 의하여 제시된 수학적 모형인 확장멱함수 ($e = A(\sigma' + Z)^B$)에 적용하였다. 초기 간극비가 낮은 시료일수록

시험결과와 정확하게 일치하는 경향을 보이고 있으며, 초기간극비가 클수록 낮은 압력의 범위에서 다소 차이를 보이고 있고, 특히 "S"자형의 압밀곡선에 대해선 낮은 압력의 범위에서 다소 차이가 발생하였다. 확장멱함수 모형은 전체 유효응력 범위에 걸쳐 단일한 식으로 압축거동을 표현할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

3. 간극비 - 투수계수 관계

Fig. 7에서 $e - \log k$ 관계를 시험결과에 적용하

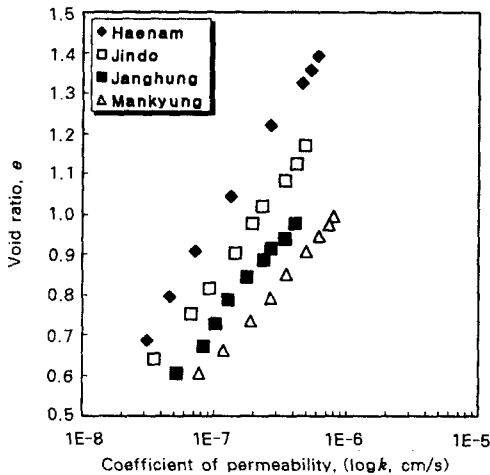


Fig. 7. Permeability relations of samples

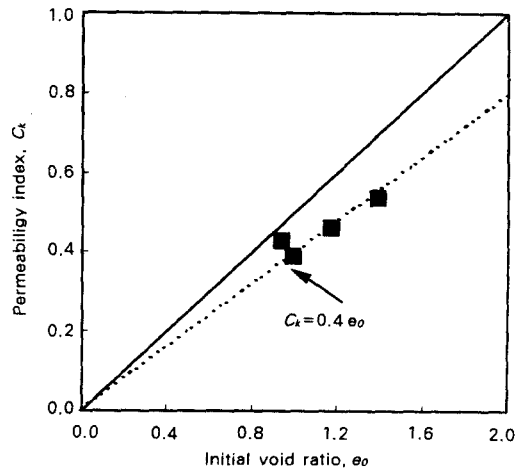


Fig. 8. Permeability index relations of initial void ratio

였다. 4 가지 시료 모두 주어진 하중 조건에서 간극비와 투수계수간에 대수관계가 나타났다. $e - \log k$ 관계에서 투수계수는 초기 간극비가 커짐에 따라 증가하였으며, 초기간극비 e_0 간의 관계를 적용해 본 결과, 대략 $C_k \approx 0.4e_0$ 의 값으로 나타났으며, 차 후 연구가 더 필요할 것으로 판단된다(Fig. 8).

Samarasinghe는 다음 식(2)와 같이 간극비-투수계수 관계를 제안하였는데, 시험결과를 적용하여 Fig. 9에 제시하였다.

$$k = C \frac{e^n}{(1+e)} \dots\dots\dots(2)$$

여기서, 식(2)에서 n 은 흙의 형태에 의존하는 상수이며, C 는 투수계수 k 와 동일한 단위를 가지는 상수이며 기율기를 의미한다. 위의 $e - \log k$ 관계에서 직선으로 도시된 해남 및 진도 시료 등이 약간의 곡선의 모양을 띄었고, 이는 이 관계식이 변형이 큰 경우 곡률을 고려하기 위한 식이므로 오히려 $e - \log k$ 에서 선형으로 나타나는 시료에 대해서는 약간 곡률을 가지게 되는 것으로 판단되었다. 마지막으로, 본 실험의 결과를 $\log e - \log k$ 관계(Mesri & Olson, 1971)에 적용해 보았으며, 그 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 네 가지 시료에 적

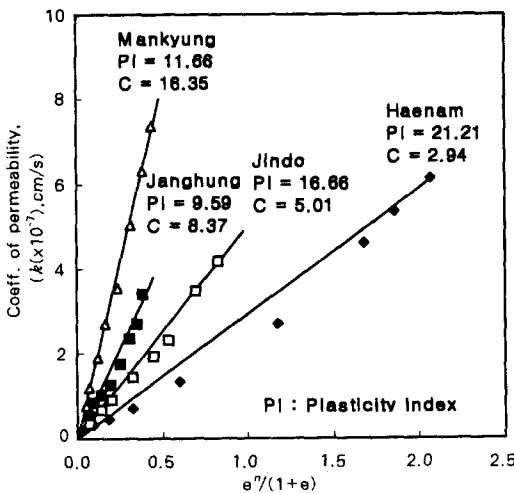


Fig. 9. $\frac{e^n}{(1+e)} - k$ relations of soils

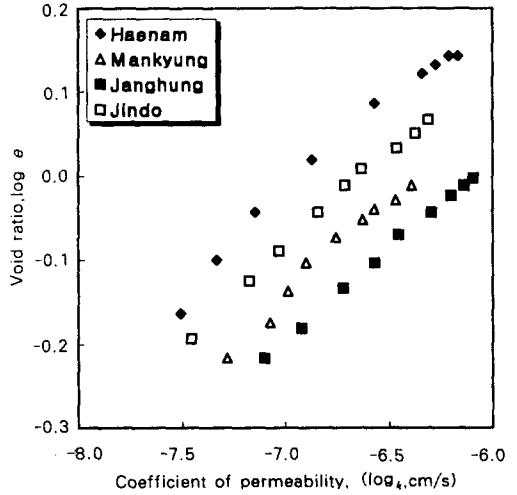


Fig. 10. $\log k - \log e$ relations of soils

용해 본 결과 $\log e - \log k$ 관계가 선형성이 감소하는 경향으로 나타났다. 이 관계를 $e - \log k$ 관계에서 선형적으로 표현되지 않은 압축성이 큰 경우에 적용하는 식이므로, 본 실험 결과를 적용한 결과 오히려 대수관계에서 선형성이 감소하는 것으로 나타났다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 우리나라 서·남해안 해성 충적 점토에 대하여 압밀 구성관계를 정립하기 위한 기초연구로서 해남, 진도, 장흥, 만경 등 4가지 연약 점토 시료에 대하여 일정변형률속도 압밀시험 및 직접 투수시험을 실시하여, 투수시험방법에 따른 투수계수값을 비교하였으며, 압축성과 투수성에 대하여 비교·분석하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Oedometer 압밀시험으로부터 구한 C_v 에 의해 간접적으로 구한 투수계수값은 실측치에 비해 작은 값을 나타내었으며, CRS 시험에 의한 투수계수값은 낮은 유효응력하에서는 실측치와 다소 차이를 나타내었으나, 유효응력이 증가할수록 직

접 측정된 투수계수와 거의 동일한 값을 나타내었다.

2. 압축특성에 대하여, $e - \log \sigma'$ 관계 및 확장역함수 모형의 경우 압축성이 작고, 정규압밀영역에서 선형인 만경, 장홍, 진도 점토에 대하여 잘 표현하였으며, $e - \log \sigma'$ 관계는 선행압밀하중, 압축지수등을 비교적 간편하게 구할 수 있으며, 확장역함수의 경우 실험결과와 거의 동일하게 표현할 수 있었다. 간극비-비체적 관계의 경우 4가지 시료에 대해서 모두 두 개의 직선으로 나타낼 수 있었으며, 쉽게 선행압밀하중을 구할 수 있었다. 그러나, $e - \log \sigma'$ 관계 및 확장역함수 모형의 경우, 해남시료에 대해서는 실험결과치와 다소 차이를 나타내었다. 따라서, 압축모형의 경우 진도, 장홍, 만경 시료의 경우 $e - \log \sigma'$ 관계가 적합하였으나, 해남시료에 대해서 간극비-비체적 관계만이 가장 유효하였다.

3. 투수특성에 대하여, 간극비-투수계수 관계를 표현하는 방법으로서 $e - \log k$ 관계, Samarasinghe 가 제시한 $k - C \frac{e^n}{(1+e)}$ 관계, 그리고 $\log e - \log k$ 관계에 대하여 적용한 결과, 중·저 소성의 4가지 시료에 대해서 $e - \log k$ 관계가 가장 선형적인 것으로 나타났으며, 이때 투수지수는 $C_k \approx 0.4 e_0$ 의 관계를 나타내었다.

4. 시료에 따라 적합한 관계 모형을 적용해야 할 것으로 판단되며, 향후 보다 많은 시료에 대한 실험적인 자료가 충분히 축적되어 국내지반에 적합한 압밀구성관계의 정립이 필요하다.

참 고 문 헌

1. 유남재, 박순규, 김영길, 이명옥, 1993, "일정변위 압밀시험에 의한 연약점토의 압밀특성 산정", 한국지반공학회 춘설·매립 위원회 학술 발표집 제2집, pp. 20~29.
2. 원정운, 장병옥, 1998, 8, "확장역함수모형을 이용한 일차원 비선형 압밀속도 모형의 개발", 한국지반공학회, pp. 181~190.
3. 이우진, 임형덕, 이원재, 1998, 10, "일정변형률 및 표준압밀시험을 이용한 해성점토의 압밀특성 연구", 한국지반공학회, pp. 47~60.
4. 차경섭, 1999, 2, "해성점토에 대한 압밀구성관계 연구", 석사학위논문, 서울대학교.
5. Duncan, J. M., 1993, "Limitations of Conventional Analysis of Consolidation Settlement", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 9, pp. 1333~1359.
6. Liu, J. C., Znidarcic, D., 1991, "Modeling One-Dimensional Compression Characteristics of Soils.", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, No. 1, pp. 162~169.
7. Mesri, G., and Olson R. E., 1971, "Mechanism controlling the permeability of clays", Clays and Clay Minerals, Vol.19, pp. 151-158.
8. Mesri, G., Feng, T.W., Ali, S., Hayat, T.M., 1994, "Permeability Characteristics of soft clays", XIII ICSMFE, New Delhi, India, pp. 187~192.
9. Oikawa, H., 1987, "Compression curve of soft soils", Technical Note, Soils and Foundations, JSSMEF, Vol. 27, No. 3, pp. 99~104.
10. Samarasinghe, A. M., Huang, Y. H., and Drenvich, V. P., 1982, "Permeability and Consolidation of Normally Consolidated Soils", Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 108, No. GT6, pp. 835~850.
11. Sheahan, T. C., Watters, P. J., 1997, "Experimental Verification of CRS Consolidation Theory", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No. 5, pp. 430~437.
12. Smith, Ronald E., Wahls, Harvey E., "Consolidation under constant rates of strain", 1971, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division Proceeding of the American Society of Civil Engineers, pp. 519~539.
13. Tavenas, F., Jean P., Leblond P., and

- Leroueil S., 1983, "The Permeability of natural soft clays. Part II: Permeability characteristics", Canadian Geotechnical journal, Vol. 20, pp. 645~660.
14. Umehara Yasufumi and Zen Kouki, 1980, "Constant Rate of Strain Consolidation for Very Soft Clayey Soils", Soils and Foundations, JSSMFE., Vol. 20, No.2, pp. 79~94.
15. Yoshikuni, H. , Moriwaki, T., Ikegami, S., & Xo, T., 1995, "Direct determination of permeability of clay from constant rate of strain consolidation tests", Compression and Consolidation of Clayey soils, pp. 609~614.