

소산실험 결과를 이용한 연약지반의 압축지수 추정

Estimation of Compression Index in Soft Soils using Dissipation Test Results

박영환¹⁾, Young-Hwan Park, 강병준²⁾, Beong-Joon Kang, 이준환³⁾, Jun-Hwan Lee

¹⁾ 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

²⁾ 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

³⁾ 연세대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

SYNOPSIS : In this study, new parameter related with compression index was derived from piezocone test results. It is assumed that the consolidation coefficient obtained by piezocone test is concerned with the volume change during piezocone dissipation. Based on that assumption, new parameter in terms of consolidation coefficient from piezocone test was introduced. The new parameter from piezocone test and the compression index from laboratory consolidation test shows linear relationship.

Key words : piezocone test, consolidation coefficient, compression index

1. 서 론

피에조콘을 이용한 연약지반의 소산실험은 지반의 압밀특성을 알아내는데 쓰이는 대표적인 원위치 실험이라고 할 수 있다. 소산실험의 결과인 과잉간극수압의 시간에 따른 소산은 주로 압밀계수를 산정하는데 쓰이고 있으며, 현재까지 많은 연구가 이루어져 왔다(Torstensson, 1975; Torstensson, 1977; Baligh와 Levadoux, 1980; Houlsby와 The, 1988; Teh와 Houlsby, 1991). 하지만, 연약지반의 압밀특성을 대표하는 또 다른 물성치인 압축지수에 대해서는 연구가 부족한 것이 사실이다.

압축지수와 다양한 지반물성 사이의 연관성을 찾으려는 노력은 일찍부터 많은 학자들에 의해서 시도되었다. 이러한 연구 성과들은 크게 단일 지반변수를 포함하여 제안된 경험식과 복합 지반변수를 포함하여 제안된 경험식으로 나눌 수 있다. 단일 지반변수를 포함하는 경험적인 관계 도출의 시도는 주로 액성한계 LL, 초기간극비 e_0 , 그리고 자연함수비 w_n 을 이용하는 방향으로 이루어져 왔다(Skempton, 1944; Terzaghi와 Peck, 1967; Mayne, 1980; Nishida, 1956; Cozzolino, 1961; Sowers, 1970; Azzouz et al., 1976; Koppula, 1981; Herrero, 1983). 복합 지반변수를 포함하여 제안된 경험식의 경우, Azzouz et al.(1976)에 의해 678개의 실험결과를 분석하는 과정에서 제안되었으며, 그 후로 많은 학자들에 의해 경험적인 접근이 시도되었다(Koppula, 1981; Rendon-Herrero, 1983; Nagaraj와 Murty, 1985; Al-Khafaji와 Andersland, 1992).

국내의 경우, 송만순(1988)이 우리나라 서·남해안의 14개 지역에서 과거 8년 동안 시행된 토질조사 성과 중에서 554개의 자연시료에 대한 토질 물성치와 압축지수의 상관관계를 검토하여 적합한 압축지수 추정을 위한 경험식을 단일변수 형태로 경기·전남·경남의 3개 권역별로 제안하였다. 윤길림과 김병탁(2003)은 국내 해성점토의 불교란 시료에 대한 1800여개의 압밀실험 결과를 근거로 하여 새로운 압축지수의 산정을 위하여 단일 및 다중회귀 통계분석 기법을 이용한 경험식들을 제안한 바 있다. 또한, 김병탁 등(2003)은 국내 11개 지구의 점토에 대한 실내실험결과에서 얻어진 압축지수에 대해 오류 역전과 신경망(EBPNN)을 이용하여 통계적 회귀분석의 정확도를 높일 수 있는 연구를 수행한 바 있다.

하지만, 압밀현상은 외부에서 가해진 응력이 과잉간극수압으로 발현되고 시간에 따라 소산되는 과정을 나타내는 것이기 때문에, 소산결과로부터 압밀계수를 산정하는 이론들의 경우 소산이 진행됨에 따라 발생하는 주변지반의 입자 재배열과 같은 요인으로 인한 국부적인 밀도변화 등으로 설명되는 유효응력의 변화에 따른 부피변화에 대한 부분들은 고려하지 않은 것도 주목할 필요가 있는 사실이다.

본 연구에서는 과잉간극수압의 소산결과로부터 압축지수를 간접적으로 추정할 수 있는 방법을 모색하고자 하였으며, 국내 대표적인 해성 점성토지반을 선정하여 이를 대상으로 수행된 지반조사 및 물성실험, 그리고 피에조콘을 이용한 소산실험 결과를 이용하여 압축지수의 특성과 유사한 값을 도출하고 비교란 시료를 이용한 실내압밀실험으로부터 구해지는 압축지수와 비교·분석하였다.

2. 소산결과로부터 산정된 압밀계수와 압축지수

Houlsby와 Teh(1988)는 Terzaghi-Rendulic의 비혼합 압밀이론을 이용하여, 다음과 같은 수평압밀계수의 산정식을 제안하였다.

$$C_h = \frac{T^* r_0^2}{t} \sqrt{I_R} \quad (1)$$

여기서, C_h 는 수평압밀계수, T^* 는 수정시간계수, t 는 압밀소요시간, r_0 는 콘의 반경, I_R 은 강성지수이다.

또한, 일반적으로 실내압밀실험으로부터 구해지는 압축지수는 다음의 식으로 설명할 수 있다.

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log \Delta \sigma'} \quad (2)$$

여기서, C_c 는 압축지수, e 는 간극비, σ' 은 유효응력이다. 식 (1)이 만들어진 기본 가정 사항은 Terzaghi의 1차원 압밀이론에서와 같이 소산이 진행되는 동안 부피의 변화는 일정한 값으로 가정하고 있다. 하지만, 압밀계수는 시간계수를 통하여 압밀도와 연결되고, 압밀도는 압밀이 진행되는 과정에서 부피의 변화와 응력의 변화 모두를 나타내는 값이기 때문에, 압밀계수는 시간에 따라 변화하는 부피 변화의 특성도 함께 나타내고 있음은 주지의 사실이다.

식 (1)에서 동일한 압밀도를 고려한 하나의 시점을 가정할 경우, 흙 입자 사이의 간격이 클 때 해당 압밀도에 도달하기까지 걸리는 시간은 흙 입자 사이의 간격이 작을 때에 비하여 짧을 것이다. 또한, 입자 간의 간격이 큰 지반은 압축성이 크고, 그렇지 않은 지반은 압축성이 작을 것이다. 하지만, 부피와 시간의 관계는 소산실험 결과로부터 직접 구해지는 것이 아니기 때문에, 앞에서 가정한 압밀계수는 시간에 따른 부피의 변화와도 관계가 있다고 가정할 경우, 식 (1)에서 양변에 시간을 곱해주면, 우변은 상수인 시간계수와 콘의 반경, 그리고 강성지수만 남게 된다. 우변의 차원이 길이의 제곱이 되므로, 공간적인 변화를 나타낸다고 가정하면 식 (2)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_c \propto \frac{C_h \times t}{\log \Delta \sigma'} \quad (3)$$

식 (3)에서 분모항에 있는 유효응력은 소산실험이 진행되는 동안 감소하는 과잉간극수압이 콘 주변 지반의 유효응력으로 전환된다고 생각할 수 있다. 또한, 일반적으로 소산결과를 통해서 압밀계수를 산정하는 압밀도는 50%가 적정하다고 알려져 있으므로(Baligh와 Levadoux, 1986; Robertson et al. 1992; F. Schnaid et al. 1997), 식 (3)은 다음의 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_c \propto \frac{C_{h,50} \times t_{50}}{\log \Delta u_{50}} \quad (4)$$

식 (4)의 우변에 나타난 항은 소산실험 결과를 통해서 모두 얻을 수 있는 값이며, 압밀계수가 시간에 따른 부피변화를 나타낸다는 가정만을 가지고 도출해낼 수 있는 식이다.

3. 실험결과 및 결과비교

앞에서 언급한 식을 적용하기 위해 국내의 해성연약지반이 분포하고 있는 지역 중, 광양(KY), 영종도(YJ) 그리고 부산신항(BS)에서 실시된 소산실험과 실내압밀실험 자료를 획득하여 본 연구에 적용하였다. 각 현장에서 비교적 균질한 점성토 지층을 대상으로 하여, 시추조사와 피에조콘 관입실험, 그리고 간극수압 소산실험을 실시하였으며, 소산실험을 실시한 위치와 심도에서 얇은 관(thin wall tube) 샘플러를 이용하여 비교란시료를 채취하여 실내실험을 수행하였다. 실내실험은 압밀특성을 산정하기 위하여 표준압밀실험을 수행하였고 강도특성을 산정하기 위하여 일축압축실험을 수행하였고, 기본물성실험도 병행하여 수행하였다. 강성지수(I_R)를 산정하기 위한 할선탄성계수 E_{50} 은 비배수상태의 탄성계수(E_w)의 1/3로 계산하였으며, 본 연구에서 수행한 역학실험 및 물성실험의 결과는 표 1과 같다.

표 2는 각 소산실험의 위치와 심도에 맞는 실내압밀실험의 결과와 소산실험의 압밀도 50%에서 Hously와 Teh(1988)의 소산모델에서 제시한 방법에 의해 각각 식 (1)을 이용하여 압밀계수를 나타낸 것이다. 압밀계수를 구하는데 필요한 강성지수는 표 1에 나타난 값을 사용하였다. BS지역의 경우 하나의 소산실험 결과에 주변지반에서 채취한 시료가 2개 이상인 경우는 비교란 시료를 기준으로 하여 실험 지역을 구분하였다.

그림 1은 각 지역 별로 소산실험 결과를 나타낸 것이다. 수직축은 과잉간극수압의 크기를 나타내며, 수평축은 과잉간극수압이 소산되는데 걸리는 시간의 제곱근을 나타낸다. 광양 지역을 제외하고는 지역 별로 초기과잉간극수압의 발현 크기가 유사하며, 광양 지역의 다른 두 결과와 다른 결과는 원지반 상태가 아닌 압밀에 의한 개량이 이루어진 후에 실시한 소산실험 결과이기 때문으로 보인다.

그림 2는 표 2에 나타난 실내압밀실험으로부터 구해진 압축지수를 수직축으로 하고, 식 (4)의 우변에

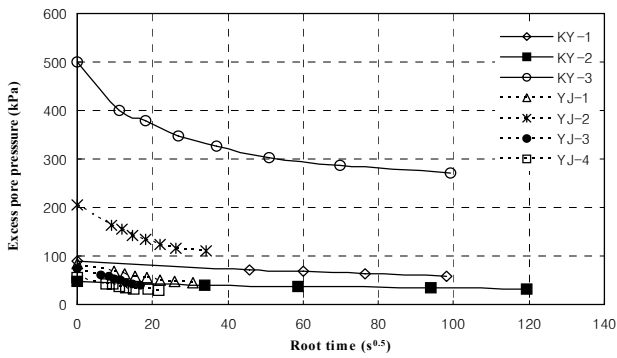
표 1. 역학실험 및 물성실험 결과

현장	실험 지역	심도(m)	$s_u(t/m^2)$	$E_{50}(t/m^2)$	I_R	LL	PI	통일분류법
KY	KY-1	15.9	1.50	125	83	88.4	59.7	CH
	KY-2	9.9	0.30	14	46	71.4	14.0	CH
	KY-3	16.5	4.25	360	85	82.2	13.3	CH
YJ	YJ-1	4.9	1.83	51	28	27.9	6.2	CL
	YJ-2	13.9	4.38	110	25	39.9	5.4	CL
	YJ-3	6.5	3.15	82	26	28.4	6.1	CL
	YJ-4	3.2	1.87	50	27	25.6	6.7	ML
BN	BS-1	28.4	3.45	694	201	77.4	47.1	CH
	BS-2	28.4	5.40	388	72	66.6	37.5	CH
	BS-3	29.4	7.45	1037	139	93.8	61.2	CH
	BS-4	32.4	5.10	754	148	71.9	42.1	CH
	BS-5	33.4	4.50	397	88	56.5	29.8	CH
	BS-6	38.4	5.65	500	89	75.0	40.9	CH
	BS-7	41.4	3.00	189	63	34.4	18.5	CL
	BS-8	28.9	4.35	198	46	55.8	32.3	CH
	BS-9	29.4	4.40	414	94	92.7	60.5	CH
	BS-10	40.9	6.45	1252	194	78.1	45.5	CH
	BS-11	41.4	5.86	285	49	76.9	49.0	CH

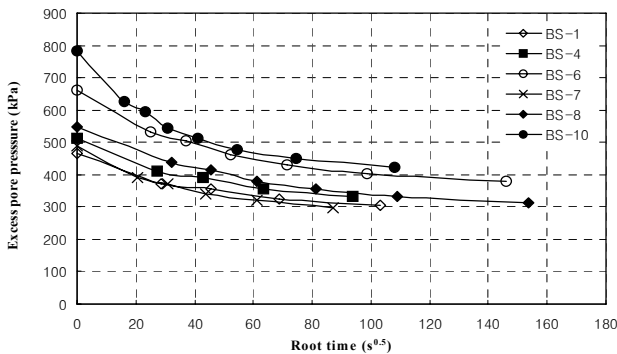
표현한 항을 수평축으로 하여 나타낸 것이다. 세 현장의 모든 데이터를 포함하는 선형회귀분석의 상관 계수(R^2)값이 0.4247로 비교적 낮은 값을 나타내고 있으나, 전반적으로 비례관계를 보여주고 있다.

표 2. 압밀실험과 소산실험의 결과

현장	실험 지역	심도(m)	실내압밀실험결과			소산실험결과	
			$C_v(\text{cm}^2/\text{s})$	e_0	$C_c(\text{m-kN})$	$t_{50}(\text{sec})$	$C_{h,50}(\text{cm}^2/\text{s})$
KY	KY-1	16.0	1.81E-03	2.27	0.537	9649	7.35E-04
	KY-2	10.0	3.86E-04	2.19	0.306	14250	3.71E-04
	KY-3	16.5	4.08E-04	1.60	0.367	1380	5.18E-03
YJ	YJ-1	4.4	2.40E-04	0.89	0.083	340	1.14E-02
	YJ-2	13.1	4.24E-03	0.95	0.086	330	1.18E-02
	YJ-3	6.4	7.21E-03	1.02	0.141	130	2.99E-02
	YJ-4	3.4	7.21E-03	1.02	0.141	170	2.28E-02
BS	BS-1	30.0	2.87E-04	1.59	0.316	10650	1.03E-03
	BS-2	30.0	3.60E-04	1.48	0.241	10650	6.18E-04
	BS-3	30.0	1.07E-03	1.85	0.517	10650	8.60E-04
	BS-4	32.5	7.82E-04	1.50	0.276	8790	1.07E-03
	BS-5	32.5	9.19E-04	1.70	0.392	8790	8.30E-04
	BS-6	37.5	5.75E-04	1.74	0.367	5100	1.43E-03
	BS-7	40.0	1.95E-03	0.92	0.156	3750	1.64E-03
	BS-8	31.5	8.06E-04	1.34	0.231	6609	7.92E-04
	BS-9	31.5	1.51E-03	1.80	0.402	6609	1.14E-03
	BS-10	40.0	7.76E-04	1.69	0.341	1680	6.44E-03
	BS-11	40.0	7.65E-04	1.42	0.281	1680	3.22E-03



(a) 광양 및 영종도 지역



(b) 부산 지역

그림 1. 지역별 소산실험결과

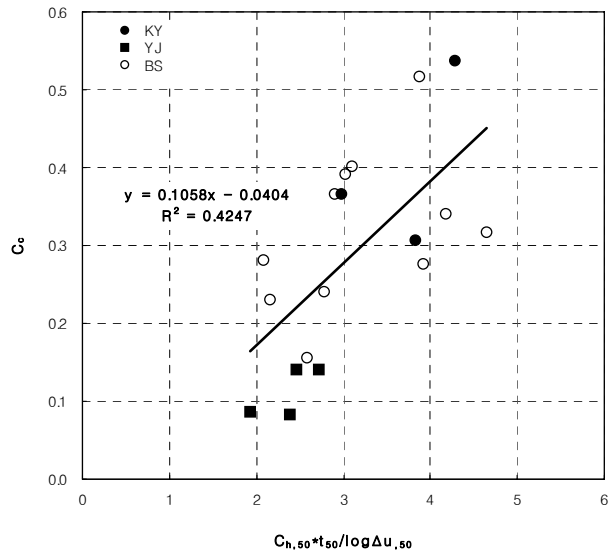


그림 2. 실측 압축지수와의 비교

4. 결 론

본 연구에서는 피에조콘 소산실험 결과로부터 얻어지는 값으로부터 압축지수의 특성과 유사한 값을 도출하고자 하였다. 이를 위해, 압밀계수를 시간에 따른 부피의 변화도 설명할 수 있는 항으로 가정하였으며, 국내의 해성연약지반으로부터 수집한 실내실험 및 현장실험 결과를 바탕으로 제안된 경험적인 방법을 검증하고자 하였다. 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 압밀계수가 시간에 따른 부피의 변화를 나타내는 것으로 가정할 경우, 소산실험에서 얻어지는 결과만으로도 압축지수의 특성과 유사한 값을 표현하는 항을 나타낼 수 있다.
2. 채택된 현장의 실험결과로부터 제안된 항과 압축지수는 대체로 비례하는 관계를 보였으나, 선형회귀 분석의 상관계수(R^2)값이 0.4247로 비교적 낮은 값을 나타내고 있어, 추가적인 자료 수집 및 연구가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 주관 “2005년도 지역특성화 연구개발 사업 : 해안 매립 공간 확보기술”의 과제로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김병탁, 김영수, 배상근 (2003) “압축지수의 추정을 위한 인공신경망 적용과 경험식 제안”, **한국지반공학회 논문집** 17(6), 25-36.
2. 송만순 (1988) “우리나라 해성점토의 토질계수의 상관관계”, 석사학위논문, **한양대학교**.
3. 윤길림과 김병탁 (2003) “국내 해양지반에 적합한 압축지수 예측식 제안”, **대한토목학회 논문집**, 23(3C), 169-176.
4. Al-Khafaji, A. W. N. and Andersland, O. B. (1992) "Equations for Compression Index Approximation, *J. Geotech. Engrg. ASCE*, 118(1), 148-153.
5. Azzouz, A. S., Krizek, R.J., and Corotis, R. B. (1976) "Regression Analysis of Soil Compressibility", *Soil and Foundations*, Tokyo, Japan, 16(2), 19-29.
6. Baligh, M. M., and Levadoux, J. N.(1980) "Pore Pressure Dissipation after Cone Penetration", *MIT. Dept. of Civil Engineering*, Report R.80-1, Cambridge, MA, p.367.
7. Cozzolino, V. M. (1961) "Statistical Forecasting of Compression Index", *Proc., 5th int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Paris, France, Vol. 1, 51-53.
8. F. Schinaid, G. C. Sills, J. M. Soares, and Z. Nyirenda (1997) "Predictions of the coefficient of consolidation from piezocone tests." *Can. Geotech. J.* 34: 315-327.
9. Herrero, O. R. (1983) "Universal Compression Index Equation: Closure", *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 109(5), 68-73.
10. Houlsby, G. T., and Teh, C. I.(1988) “Analysis of the Piezocone in Clay”, *ISOPT I*, Orlando, Florida, Vol.2, 777-783.
11. Koppula, S. D. (1981) "Statistical Estimation of Compression Index", *Geotech. Testing J.*, 4(2), 68-73.
12. Levadoux, J. N., and Baligh, M. M.(1986) “Consolidation after Undrained Piezocone Penetration I: Prediction”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, vol.112, No.7, 707-725.
13. Levadoux, J. N., and Baligh, M. M.(1986) “Consolidation after Undrained Piezocone Penetration II: Interpretation”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, vol.112, No.7. 726-737.
14. Mayne, P. W. (1980) "Cam-clay Predictions of Undrained Strength", *J. Geotech. Engrg. Div. ASCE*, 106(11),

1219-1242.

15. Nishida, Y. (1956) "A Brief Note on Compression Index of Soil", *J. Soil Mech. and Found. Eng., ASCE*, 82(3), 1-14.
16. Nagaraj, T. and Murty. B. S. R. (1985) "Prediction of the Preconsolidation Pressure and Recompression Index of Soils", *Geotech., Testing J.*, 8(4), 199-202.
17. Robertson, P. K., J. P. Sully, D. J. Woeller, T. Lunne, J. J. M. Powell, and D. G. Gillespie (1992) "Estimating Coefficient of Consolidation from Piezocone Tests", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.29, 539-550.
18. Rendon-Herrero, O. (1983) "Universal Compression Index", *J. Geotech. Engrg. Div. ASCE*, 109(10), 1349.
19. Skempton, A. W. (1944) "Notes on the Compressibility of Clays", *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, Vol. 100, 119-135.
20. Sowers, G. B. (1970) "Introductory Soil Mechanics and Foundations", 3rd Ed., *The Macmillan Company*, London, England.
21. Teh, C. I., and Houlby, G. T.(1991) "An Analytical Study of Cone Penetrometer Test in Clay", *Geotechnique*, Vol.41, No.1, 17-34.
22. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967) "Soil Mechanics in Engineering Practice", 2nd Ed., *John Wiley and Sons Inc.*, New York.
23. Torstensson, B. A.(1975) "The Pore Pressure Sounding Equipment", *Proceedings of ASCE Specialty Conference on In-situ Measurement of Soil Properties, Raleigh, N.C.*, Vol. II, 48-55.
24. Torstensson, B. A. (1977) "The Pore Pressure Probe", *Proceedings of Geoteknikkdagen, Tapir Foreleg*, Oslo.