

딜라토미터 소산시험 해석에 대한 고찰 및 새로운 해석법

An Investigation of Dissipation Analysis for Dilatometer & New Interpretation Method

김영상¹⁾, Young-Sang Kim

¹⁾ 국립 여수대학교 해양시스템학부 전임강사, Lecturer, Division of Ocean System, Yosu National University

SYNOPSIS : Despite of the simple equipment and operation, DMT has been widely used to obtain various soil parameters and those parameters have been successfully applied to geotechnical design practice. Among them, the estimation of horizontal coefficient of consolidation is so useful that many researchs recently have been carried out. However, simulation of the penetration of the DMT blade is complex due to the inherent difficulty on analyzing a plane strain deformation of the soil around blade. Therefore, empirical and semi-empirical methods that use the theoretical solution developed for piezocone with some assumptions have been used to estimate the coefficient of consolidation from Dilatometer dissipation test. In this paper, coefficients of consolidation c_h which were obtained using equivalent radius that is same area with the DMT blade and optimization technique are compared with those obtained from Oedometer test and other interpretation methods. It was found that a new method used in this study can give more precise horizontal coefficient of consolidation than other methods do.

주요어(Key words) : dilatometer, dissipation test, coefficient of consolidation, optimization technique, equivalent radius

1. 서론

모래지반과 연약 점토지반에서 관측되는 딜라토미터의 재평편압력(deflate pressure) p_2 값이 관입 간극수압(penetration pore pressure) u_p 와 동일하다는 연구자들(Robertson 등, 1988; Lutenegro & Kabir, 1988)의 보고에 힘입어 지금까지 딜라토미터 소산시험을 이용한 수평압밀계수 추정법들이 개발되어 왔다(Robertson 등, 1988; Schmertmann, 1988, 1991; Marchetti & Totani, 1989). 딜라토미터를 이용한 기존의 수평압밀계수의 추정법은 크게 이론과 경험이 복합된 DMTC법($p_2 - \log t$ 법과 $C - \sqrt{t}$ 법)과 경험적으로 제안된 DMTA법으로 나눌 수 있다. DMTC법은 딜라토미터의 A-B-C 관측값 중에서 소산시험 시 관측되는 C값의 시간에 따른 감소를 이용하며, 관측된 C값을 딜라토미터 강철 멤브레인의 강성을 보정하여 얻어진 p_2 값을 이용하는 $p_2 - \log t$ 법(Robertson 등, 1988)과 관측된 C값을 그대로 사용하는 $C - \sqrt{t}$ 법(Schmertmann, 1988)이 있으며, 최근 Schmertmann (1991)에 의하여 DMT Digest 12에서 제안된 DMT-A2방법이 있다. 이 방법들은 간극수압으로서 대수시간($\log t$) 축에 표현된 관측값 p_2 또는 제곱근 시간축(\sqrt{t})에 표현된 C값의 50% 소산시간 t_{50} 을 이용하여 다음 식(1)로부터 수평압밀계수를 추정하며, 이때 이론 시간계수 T_{50} 으로 $p_2 - \log t$ 법은 Torstensson(1979)의 실린더형 공동확장 해를 사용하고 $C - \sqrt{t}$ 법은 Gupta(1983)의 연속 구형공동확장 해를 사용한다.

$$c_h = \frac{R_{equ}^2 \cdot T_{50}}{t_{50}} \quad (1)$$

여기서, R_{equ} =딜라토미터 관입기의 원형 등가반경(equivalent radius)이다. 그 외에 순수한 경험법으로 Marchetti & Totani(1989)에 의하여 제안된 A값을 이용하는 DMTA법이 있으며 이 방법에서는 관측된 A값을 대수시간(log t) 축에 표현하여 소산곡선의 곡률이 변화하는 시간(t_{flex})으로부터 다음과 같이 압밀계수를 추정한다(이승래 등, 2001).

$$c_h = \frac{7 cm^2}{t_{flex}} \quad (2)$$

2. 연구배경

이승래 등(2001)은 기존의 딜라토미터 소산시험 해석법 들을 이용하여 국내 연약지반에서 수행된 딜라토미터 소산시험 결과로부터 수평압밀계수를 추정하고 각 방법들 간의 결과를 비교평가 하였다. 그 결과 국내 점토 지반의 경우 Robertson 등(1988)이 제안한 $p_2 - \log t$ 법과 Marchetti & Totani(1989)가 제안한 DMTA법이 매우 유사한 결과를 제공하며 적용성이 좋은 것으로 평가하였다. 미연방 도로국 보고서 FHWA(1988)에 제안된 Schmertmann의 $C-\sqrt{t}$ 법은 다른 방법들과 비교하여 일관적으로 3배정도 큰 값을 제공하는 것으로 평가되었으며 그 원인으로는 국내지반의 강성지수 $I_R=G/s_u$ 특성과 함께 간극수압의 초기값과 수렴값의 선정방법, 확대된 등가반경 ($R=24.5mm$) 등에 있는 것으로 보고하였다. 표 1은 DMTC 각 방법에서 채용한 원형의 등가반경과 사용된 이론 해에 대해 서로 다른 가정사항을 정리한 것이다.

표 1. $p_2-\log t$ 법과 $C-\sqrt{t}$ 법의 비교(김영상, 2001)

항목	$p_2-\log t$ 법	$C-\sqrt{t}$ 법	비고
등가반경 R	20.57mm 관입기의 평면적을 고려한 등가반경	24.5mm $R_2=600mm^2$ 로 제안됨	딜라토미터 관입기 면적 (95mm× 14mm)
이론시간계수 T_{50}	Torstensson (1977) 실린더형 공동확장 해	Gupta (1983) 연속 구형공동확장 해	$C-\sqrt{t}$ 법은 선단부로부터 4R 지점의 소산곡선 이용

3. 새로운 수평압밀계수 추정법

본 연구에서는 딜라토미터 관입기의 실제 단면적과 동일한 면적의 등가반경($R=20.57mm$)을 이용하고, 간극수압 관측위치를 고려할 수 있는 Gupta(1983)의 이론 해를 사용하였다. 사용된 간극수압 관측값으로는 관측된 C값을 멤브레인의 강성에 대해 보정한 p_2 값을 사용하였으며 최적화기법을 이용하여 수평압밀계수를 추정하였다. 이 때 사용된 최적화기법은 식(2)와 같이 각 시간단계에서 관측된 과잉 간극수압(p_2-u_0)과 원형의 등가반경으로 가정된 딜라토미터의 관입 및 소산을 모사하여 얻어진 계산 과잉 간극수압의 차이의 제곱의 합으로 정의된 목적함수 $F(X)$ 가 최소화될 때까지 반복적으로 설계변수를 보정하는 기법이 사용되었다. 선택된 설계변수로는 그간의 여러 연구자들(Robertson 등, 1988; Lutenegger, 1988; Schmertmann, 1988)이 주장하는 바와 같이 딜라토미터 관입기 주변의 소산이 수평방향에 주도적임을 고려하여 수평압밀계수 c_h 가 선택되었다. 목적함수를 최소화하기 위하여 사용된 최적화 알고리즘으로는 비구속 최적화 문제를 해석하는데 가장 효율적으로 알려진 BFGS 기법이 사용되었다.

$$\text{최소화 } F(X) = \sum_{n=1}^{NS} (u_e^n - U_e^n)^2 \quad (3)$$

여기서, X =설계변수(C_h), NS =계측된 총 시간 단계의 개수, $u_e^{n=n}$ 시간 단계에서 계측된 과잉 간극수압 ($=p_2-u_0$), $U_e^{n=n}$ 시간 단계에서 이론적으로 계산된 과잉 간극수압이다. 최적화기법의 적용을 위해서는 식(2)의 u_e^n 과 같이 일정 소산도까지 관측된 과잉 간극수압의 입력이 요구되며, 본 연구에서는 이승래와 김영상(1998)의 연구를 바탕으로 최대 과잉간극수압을 기준으로 50% 소산도까지의 과잉 간극수압 소산곡선을 사용하여 수평 압밀계수를 추정하였다.

4. 현장 적용사례

본 연구에 기술된 수평압밀계수 추정법을 이용하여 이승래 등(2001)이 양산지역에서 수행한 딜라토미터 소산시험 결과를 해석하였으며 이승래 등(2001)이 분석한 기존 해석법에 의한 결과 및 불교란 시료를 이용한 실내 압밀실험 결과와 비교하여 현장 적용성을 검증하였다. 표 2에는 이승래 등(2001)에 의하여 딜라토미터 p_2 소산시험이 수행된 양산지반의 특성이 정리되어 있으며 소산시험 결과는 그림 2와 같다. 그림 2의 전체 소산도 범위 중 초기 50% 소산도까지(그림 2의 ↓)의 소산자료가 본 연구에서 사용한 수평압밀계수 추정을 위한 입력 소산도(input degree of dissipation)로 사용되었다.

표 2. 양산 시험성토 구간의 실내 기본물성 결과

공(hole)	깊이(m)	비배수전단강도 s_u (kg/cm^2)	E/s_u	USCS
양산-1	15	0.62	110	CH
양산-1	18	0.70	85	CL
양산-2	12	0.53	110	CH
양산-2	15	0.62	90	CH
양산-3	19	0.88	85	CL
양산-3	24	1.3	70	CL

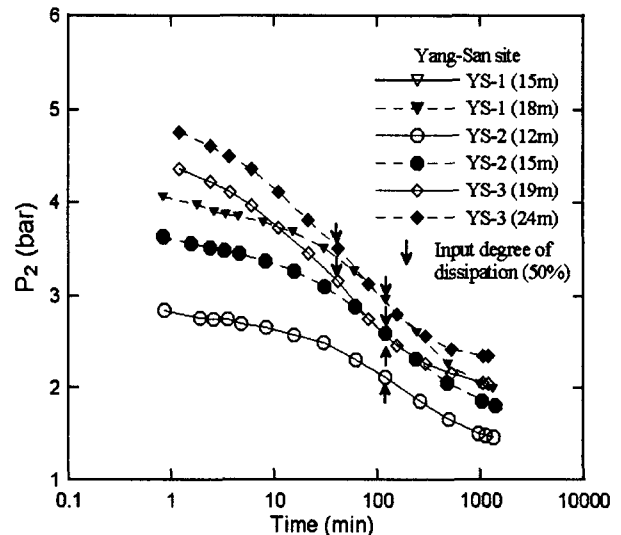


그림 2. 양산지반에서 수행된 딜라토미터 p_2 소산곡선

표 3에는 각 방법으로 얻어진 수평압밀계수가 직접 비교되어 있으며 그림 3에는 p_2 -log t 법을 기준으로 압밀계수가 비교되어 있다. 본 연구에서 사용한 방법으로 얻어진 수평압밀계수들은 결정계수(coefficient of determination) $r^2=0.99$ 이고 기울기가 1.5인 직선으로 표현될 수 있으며, 기존 p_2 -log t 법과 $C-\sqrt{t}$ 법으로 추정된 결과들의 사이에 위치함을 알 수 있다. 불교란 시료로부터 얻어진 실내 압밀실험 결과를 기준으로 비교하면, 기존의 p_2 -log t 법이나 $C-\sqrt{t}$ 법이 수평압밀계수를 다소 과소 또는 과대평가하는 것과 달리, 본 연구에서 사용한 방법은 실내 압밀실험 값과 매우 일치하는 값을 일관성 있게 추정하여 본연구 방법에서 채용하고 있는 등가반경과 이론 해, 최적화 기법이 타당함을 알 수 있다.

표 3. 각 방법으로 추정된 수평압밀계수 비교
($c_h \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$)

위치	본 연구	P ₂ -log t법	C-√t법	Oedometer
양산-1(15m)	1.0	0.6	1.9	1.5
양산-1(18m)	1.1	0.8	1.9	1.0
양산-2(12m)	0.9	0.5	1.7	0.8
양산-2(15m)	1.0	0.6	1.5	0.9
양산-3(19m)	3.0	2.0	7.4	1.0
양산-3(24m)	3.5	2.3	6.5	3.1

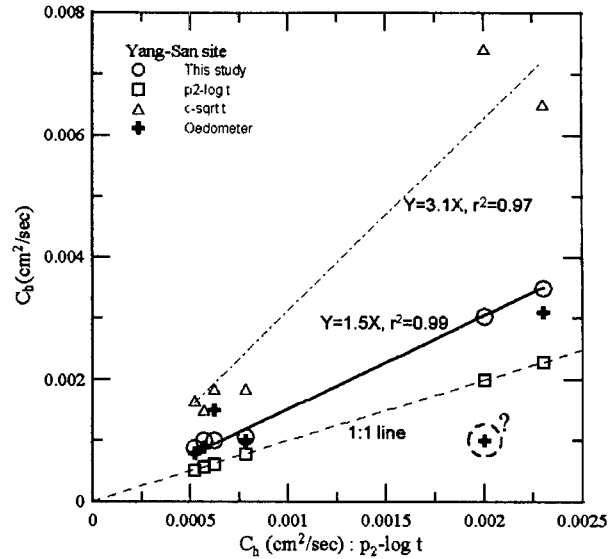


그림 3. 각 방법으로 얻어진 압밀계수 비교

5. 결론

본 연구에서 사용한 등가반경과 최적화기법을 이용하여 얻어진 수평압밀계수가 기존의 해석법과 달리 실내 압밀실험 값과 매우 일치하는 값을 추정하여 정확도가 높은 것으로 평가되었다. 이로부터, 등가반경의 경우 실제 관입기의 단면적과 동일한 면적을 갖는 반경($R=20.57\text{mm}$)을 사용하고 이론해의 경우에는 멤브레인의 위치 효과를 고려한 이론 해를 사용하는 것이 적절함을 알 수 있다.

6. 참고문헌

1. 김영상 (2001), "등가반경과 최적화기법을 이용한 딜라토미터 소산시험 해석법", 한국지반공학회지, 제 17권, 제5호, pp.43-50.
2. 이승래, 김영상, 성주현 (2001), "딜라토미터를 이용한 수평압밀계수 추정법의 국내지반 적용성 평가", 한국지반공학회지, 제17권, 제4호, pp.153-160.
3. Gupta, R. C. (1983), "Determination of the in situ coefficient of consolidation and permeability of submerged soil using electrical piezoprobe sounding", **Ph.D. Dissertation**, Univ. of Florida.
4. Lutenegeger, A. J. (1988), "Current status of Marchetti dilatometer test", **1-ISOPT**: 137~155.
5. Lutenegeger, A. J. and Kabir, M. G. (1988), "Dilatometer C-reading to help determine stratigraphy", **1-ISOPT**: 549~554
6. Marchetti, S. and Totani, G. (1989), "Ch evaluations from DMTA dissipation curves", **XII ICSMFE**: 281~286.
7. Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., and By, T. (1988), "Excess pore pressures and the flat dilatometer test", **1-ISOPT**: 567~576.
8. Schmertmann, J.H. (1988), "Guidelines for Using the CPT, CPTU and Marchetti DMT for geotechnical design", Report No. **FHWA-PA-87-024+84-24** to PennDOT, Vol. III DMT.
9. Schmertmann, J.H. (1991). "Pressure Dissipation Tests. A-B-C vs A2 vs A". **DMT Digest No. 12**, Section 12C, Schmertmann Ed., Dec.
10. Torstensson, B.A. (1975), "The pore pressure sounding Equipment". **ASCE Specialty Conference on In-situ Measurement of Soil Properties**, Raleigh, NC: 48~55.