

등가반경과 최적화기법을 이용한 딜라토미터 소산시험 해석법

A New Method for Dilatometer Dissipation Analysis Using an Equivalent Radius and Optimization Technique

김 영 상* Kim, Young-Sang

Abstract

The worldwide spread of the DMT lies on its simplicity, cost effectiveness, rapid and repetitive use for geotechnical engineering practice. Despite the simple equipment and operation, various soil parameters -e.g. K_0 , OCR, c_u , ϕ , k_h , γ , M , u_0 -can be obtained and have been successfully applied to geotechnical design practice. However, most of those parameters were obtained from the calibrated relationship between the real soil parameter and indices from DMT test. Among them, the estimation of horizontal coefficient of consolidation is more complex due to the inherent difficulty in analyzing a plane strain deformation of the soil around DMT blade during its penetration. 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, an optimization technique is applied to estimate the coefficient of consolidation from the Dilatometer p_2 -value dissipation test using an equivalent radius that has the same area with the DMT blade. Using the BFGS optimization technique, the horizontal coefficient of consolidation that minimizes the differences between the predicted and measured excess pore pressures is determined. Validity of the proposed method was confirmed by comparing the obtained horizontal coefficients of consolidation with those of other interpretation methods and oedometer for the Yang-san site. It has been known that proposed method can give more precise horizontal coefficient of consolidation than other methods do. In addition, the possible determination of representative coefficient of consolidation corresponding to entire dissipation process was also shown from the good agreements between measured and predicted excess pore pressures over whole dissipation stage.

요 지

딜라토미터는 실험의 간편성, 경제성, 신속성 및 반복성 등을 바탕으로 현장에서의 지반공학적 물성추정에 보편화 되고 있다. 또한 간단한 장비구성과 손쉬운 사용법에도 불구하고 다양한 지반공학적 물성들 -예로서, K_0 , OCR, c_u , ϕ , k_h , γ , M , u_0 -을 추정할 수 있으며 다양한 지반공학적 설계문제에 성공적으로 적용되어 왔다. 그러나 제안된 관계식들이 대부분 기존실험 결과들과의 비교를 통하여 얻어진 경험적 상관관계이며, 특히 압밀계수 추정에 관한 부분은 관입 시 평면변형 상태의 지반변형으로 인한 관입모사의 복잡성으로 인하여 피에조콘 소산시험 해석을 위해 제안된 이론 해들에 경험적인 가정사항 들을 추가하여 사용하는 반경험적 방법들과 순수한 경험적인 방법이 사용되어 왔다. 본 연구에서는 딜라토미터 관입기의 실제 평면적용 등가의 원형반경으로 고려한 등가반경을 사용하고 최적화기법을 적용함으로써, 소산시험에서 실제 관측된 간극수압(p_2)과 딜라토미터 소산시험을 모사하여 얻어진 예측 간극수압의 차이를 최소화하는 수평압밀계수 추정법을 제안하였다. 제안된 방법을 국내 양산지역에서 수행된 딜라토미터

* 정회원, 현대산업개발 기술연구소 과장, 현 일본 교토대학 방재연구소 특별연구원

소산실험에 적용하였으며 추정된 수평압밀계수 값을 기존의 딜라토미터 수평압밀계수 추정법들과 비교란 시료를 이용한 일차원 실내 압밀실험으로 얻어진 수평압밀계수 값들과 비교검증 하였다. 그 결과 제안된 방법으로 기존의 방법에 비해 실내 압밀실험 결과와 일치하는 수평압밀계수 추정결과를 얻었다. 또한, 제안된 방법으로 얻어진 수평압밀계수는 전 소산도 범위에서 고르게 관측값과 일치하는 소산곡선을 예측하여, 최적화기법을 이용한 딜라토미터 소산시험 해석으로 전 소산과정을 대표하는 압밀계수의 추정이 가능할 것으로 사료된다.

Keywords : Coefficient of consolidation, Dilatometer, Dissipation test, Equivalent radius, Optimization technique

1. 서론

모래지반과 연약 점토지반에서 관측되는 딜라토미터의 재평판압력(deflate pressure) p_2 값이 관입 간극수압(penetration pore pressure) u_p 와 동일하다는 연구자들(Robertson 등, 1988; Lutenegger와 Kabir, 1988)의 보고에 힘입어 지금까지 딜라토미터 소산시험을 이용한 서로 다른 수평압밀계수 추정법들이 개발되어 왔다(Robertson 등, 1988; Schmertmann, 1988; Marchetti와 Totani, 1989).

딜라토미터를 이용한 기존의 수평압밀계수의 추정법은 크게 이론과 경험이 함께 포함되어 있는 DMTC법($p_2 - \log t$ 법과 $C - \sqrt{t}$ 법)과 실험적인 결과만을 바탕으로 제안된 DMTA법으로 나누어 질 수 있다. 먼저 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 있다. 이 방법들은 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.

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

여기서, R=딜라토미터 관입기의 원형 등가반경

순수한 경험법으로 Marchetti와 Totani(1989)에 의하여 제안된 A값을 이용하는 DMTA법이 있으며 관측된 A값을 대수 시간($\log t$) 축에 표현하여 소산곡선의 곡률이 변화하는 시간(t_{flex})으로부터 압밀계수를 추정한다(이승래 등, 2001).

본 연구에서는 이러한 기존의 방법 중 이론적인 해를 포함하고 있는 $p_2 - \log t$ 법과 $C - \sqrt{t}$ 법을 선택하여 가정사항을 검토하고 이를 바탕으로 딜라토미터 소산시험 해석에 보다 적절한 원형 등가반경과 이론 해를 도출하였다. 도출된 등가반경과 이론 해에 최적화기법을 적용함으로써, 이론적으로 예측된 과잉 간극수압이 실제 현장에서 관측된 과잉 간극수압과 50% 소산도까지 가장 잘 일치하도록 하는 수평압밀계수 추정법을 제안하였다. 제안된 방법을 이승래 등(2001)에 의하여 양산지반에서 수행된 딜라토미터 소산시험에 해석에 적용하였으며 추정된 수평압밀계수를 이승래 등(2001)이 보고한 기존의 방법을 적용하여 얻어진 결과 및 비교란 시료를 이용하여 수행된 실내 압밀실험 결과와 비교함으로써 그 유효성을 검증하였다. 또한 얻어진 수평압밀계수를 이용하여 전 소산도 범위의 간극수압 소산거동을 예측하고 관측 값과 비교함으로써 최적화기법의 적용을 통한 전 소산과정을 대표하는 수평압밀계수 추정 가능성에 대하여 기술하였다.

2. 연구배경

이승래 등(2001)은 기존의 딜라토미터 소산시험 해석법들을 이용하여 국내 연약지반에서 수행된 딜라토미터 소산시험 결과로부터 수평압밀계수를 추정하고 각 방법들 간의 결과를 상호 비교하였으며, 현장 및 실내에서 얻어진 실험 결과들을 바탕으로 기존 방법들의 국내 연약지반 적용성을 평가하였다. 그 결과 국내 점토지반의 경우 Robertson 등(1988)이 제안한 $p_2 - \log t$ 법과 Marchetti와 Totani(1989)가 제안한 DMTA법이 매우 유사한 결과를 제공하며 적용성이 좋은 것으로 평가하였다. 미연방도로국 보고서 FHWA(1988)에 제안된 Schmertmann의 $C - \sqrt{t}$ 법은 다른 방법들과 비교하여 일관적으로 3배정도 큰 값을 제공하는 것으로 평가되었으며 그 원인

표1. p_2 -log t 법과 $C-\sqrt{t}$ 법의 비교(이승래 등, 2001)

항 목	p_2 -log t 법	$C-\sqrt{t}$ 법	비 고
등가반경 R	20.57mm 관입기의 평면적을 고려한 등가반경	24.5mm $R^2=600\text{mm}^2$ 로 제안됨	딜라토미터 관입기 평면적 (95mm × 14mm)
이론시간계수 T_{50}	Torstensson(1977)실린더형 공동확장 해	Gupta(1983)연속구형공동확장 해	$C-\sqrt{t}$ 법은 선단부로부터 4R지점의 소산곡선이용

으로는 국내지반의 강성지수, $I_R=G/c_u$ 특성과 함께 간극수압의 초기값과 수렴값의 선정방법, 확대된 등가반경 ($R=24.5\text{mm}$) 등에 있는 것으로 보고하였다.

위의 세가지 방법들 중 순수한 경험법인 DMT법을 제외한 p_2 -log t 법과 $C-\sqrt{t}$ 법은 표 1과 같이 딜라토미터 관입기의 단면적(95mm×14mm)을 원형의 등가반경으로 고려하고 피에조콘 해석을 위해 개발된 이론 해를 채용하여 수평압밀계수를 추정한다. 따라서, 각 방법은 가정된 등가반경의 크기와 사용된 이론 해에서 딜라토미터 소산 시험 해석에 적절한 부분과 부적절한 부분을 가지고 있다.

2.1 원형 등가반경

먼저 등가반경의 크기 면에서, p_2 -log t 법은 실제 관입기 단면적과 일치하는 등가반경($R=20.57\text{mm}$)을 사용하고 있으나 $C-\sqrt{t}$ 법은 $R^2=600\text{mm}^2$ 로 제안해 실제 딜라토미터 관입기의 평면적(95mm×14mm) 보다 확대된 등가반경 ($R=24.5\text{mm}$)을 사용하고 있다. 그러나, Schmertmann (1988)은 딜라토미터 관입기는 선단 각이 16° 로 선단 각이 60° 인 콘 관입기와 비교할 때 최대 체적 및 전단변형율이 3배정도 작다고 보고하였다. 그럼에도 불구하고 Schmertmann은 같은 보고서에 제안된 $C-\sqrt{t}$ 법에 실제 관입기의 단면적보다 확대된 등가반경의 사용을 제안하였으며 그 근거에 대한 명확한 이론적인 배경이 설명되어 있지 않다. 따라서, 명확한 이론적인 근거 없이 확대된 등가반경을 사용하는 것보다는 실제 관입기 단면적과 일치하는 등가반경($R=20.57\text{mm}$)을 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

2.2 이론 시간계수

앞서 기술된 바와 같이 p_2 -log t 법은 Torstensson (1979)의 실린더형 공동확장 해를 사용하고 있으며 $C-\sqrt{t}$ 법은 Gupta(1983)의 연속 구형 공동확장 해 중 선단부로부터 반경의 4배 뒤 지점의 소산곡선을 이용하였는데 이는 강

철 멤브레인의 위치를 고려하기 위한 것이다

그림 1은 딜라토미터의 강철 멤브레인 중심 위치에 설치된 다공질 매체(porous stone)에서 관측된 간극수압과 피에조콘의 다양한 위치에서 관측된 간극수압을 비교한 것이다(Robertson 등, 1988). 그림으로부터 딜라토미터의 멤브레인 중심부에서 관측되는 간극수압은 피에조콘 선단부 바로 뒤에서 관측된 간극수압 u_2 보다는 마찰 측정부(sleeve friction) 뒤에서 관측된 간극수압 u_3 과 일치함을 알 수 있다. 또한 Baligh와 Levadoux(1980)에 의하면 피에조콘 관입 시 관입기 주변의 간극수압의 크기가 콘 선단쪽에서 마찰 측정부 쪽으로 갈 수록 감소하며 연속된 간극수압 소산시험에 있어서도 마찰 측정부 쪽의 소산시간이 선단부 바로 뒤에 비하여 상대적으로 긴 시간이 요구되는 것으로 알려져 있다.

이러한 관측 간극수압 비교연구를 바탕으로 볼 때, 이론 시간계수에 미치는 위치효과를 표현할 수 없는 Torst-

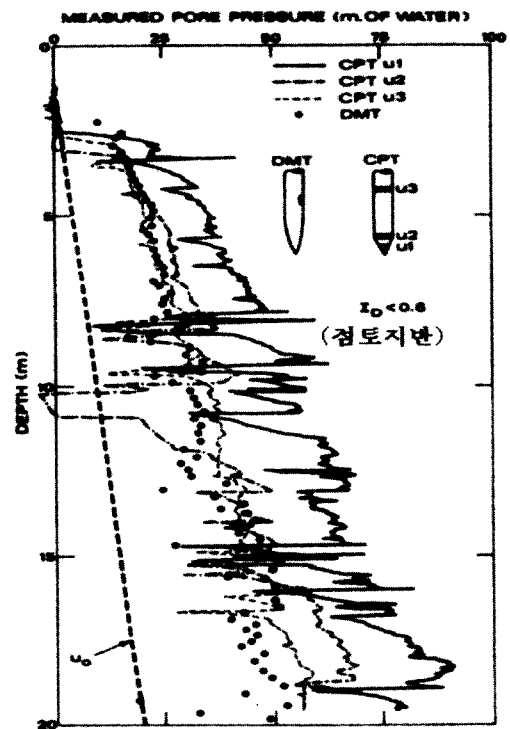


그림 1. 딜라토미터와 피에조콘 관입 간극수압 비교(Robertson 등, 1988)

ensson(1975)의 실린더형 이론 해를 사용하는 것 보다는 $C-\sqrt{t}$ 법에서 사용하고 있는 Gupta(1983)의 해를 이용하는 것이 보다 타당할 것으로 판단된다

위의 검토사항 들을 바탕으로 본 연구에서는 딜라토미터 관입기의 실제 단면적과 동일한 면적의 등가반경 ($R=20.57\text{mm}$)을 이용하고, 위치효과를 고려할 수 있는 Gupta(1983)의 이론 해를 사용하였으며 사용된 간극수압 관측값으로는 관측된 C값을 멤브레인의 강성에 대해 보정한 p_2 값을 사용하여 최적화기법을 이용한 수평압밀계수 추정법을 제안하였다.

3. 수평압밀계수 추정법

3.1 수평압밀계수 추정을 위한 최적화기법

수평압밀계수 추정을 위하여 사용된 최적화기법은 식 (2)와 같이 각 시간단계에서 관측된 과잉 간극수압과 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; Lutenegeger, 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.

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

여기서, x = 설계변수(c_h), NS=계측된 총 시간 단계의 개수, u_e^n =n 시간 단계에서 이론적으로 계산된 과잉 간극수압, U_e^n =n 시간 단계에서 계측된 과잉 간극수압($=p_2-u_0$)

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 과잉간극수압 기준 50% 소산도까지의 과잉 간극수압을 사용하여 수평압밀계수를 추정하였다. 본 연구에서 적용된 최적화기법은 김영상 등(1997), 이승래와 김영상(1998)에 의해 피에조콘 소산시험 해석을

통한 압밀계수의 추정에 성공적으로 적용된 바 있으며, 최적화과정을 통해 얻어진 수평압밀계수는 압밀계수를 추정하기 위하여 사용된 입력소산도의 변화에 대하여 민감하지 않아 보다 일관성 있는 압밀계수를 추정하며 또한 얻어진 압밀계수가 장기 소산거동을 실제에 가깝게 모사하는 것으로 보고되었다.

3.2 초기 과잉간극수압의 분포 및 소산거동 모델링

초기 과잉간극수압의 크기와 공간적인 분포는 알려진 바와 같이 연속적으로 모사되는 소산과정과 소산곡선의 형상에 큰 영향을 미치며 결과적으로 얻어지는 압밀계수를 변화시키는 주요 원인이다. 본 연구에서는 딜라토미터 관입기 멤브레인의 위치를 고려할 수 있도록 Gupta(1983)가 제안한 연속 구형공동 확장이론에 의한 초기 과잉간극수압 모델 [식 (3)]이 사용되었다. 연속 구형공동 확장이론은 관입기의 관입과정을 모사할 수 있으며 실린더형 공동 확장이론과 달리 관입기의 선단 부분에 대한 간극수압 분포를 고려할 수 있다. 자세한 사항은 김영상 등(1997)에 기술되어 있다.

$$u_{eB} = \frac{(u_A - u_{OA}) \left[0.943\alpha_f + 4 \ln \left(\frac{R_p}{r_B} \right) \right]}{\left[0.943\alpha_f + 4 \ln \left(\frac{R_p}{r_A} \right) \right]} \quad (3)$$

여기서, A, B=원형의 등가반경으로 표현된 딜라토미터의 관입으로 주변지반에 형성된 구형공동 내의 간극수압 관측점(A)과 임의의 점(B), $u_{eB} = u_B - u_{OB} = B$ 점의 과잉 간극수압, $u_{OA}, u_{OB} = A, B$ 점에서의 정수압, R_p =소성 영역 반지름($=G/c_u$)^{1/3}, G=전단변형계수, c_u =비배수 전단강도, α_f =Henkel의 파괴 시 간극수압 계수= $0.707(3A_f - 1)$, A_f =Skempton의 파괴 시 간극수압 계수, r_B, r_A =공동의 중심으로부터 각각 B점 및 A점까지의 반지름

$$c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} + c_h \frac{\partial^2 u_e}{\partial r^2} + \frac{c_h}{r} \frac{\partial u_e}{\partial r} = \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (4)$$

여기서, c_v, c_h =연직 및 수평방향 압밀계수, u_e =과잉간극수압, r =중심 축으로부터 반경

식 (3)을 이용하여 등가반경으로 모사된 딜라토미터 관입기 주변에 형성된 초기 과잉 간극수압은 식 (4)의 축대칭 선형-압밀방정식을 사용하여 소산거동이 모사

되었으며 모든 과정은 유한차분법(F.D.M)으로 프로그램되어 있다. 피에조콘과 딜라토메터의 경우와 같이 수평방향의 간극수압 소산이 주도적인 경우, 연직방향 압밀계수를 매우 작은 값을 지정함으로써 수평방향이 주도적인 소산거동을 모사 할 수 있다

딜라토메터 멤브레인의 위치효과를 표현하기 위하여 전체 소산해석 중 선단부로부터 등가반경의 4배 뒤의 절점에서 얻어지는 과잉 간극수압 값을 식 (2)의 이론적으로 계산된 과잉간극수압 u_w^* 으로 사용하였다

4. 제안된 방법의 검증

4.1 수평압밀계수 비교

본 연구에서 제안된 수평압밀계수 추정법을 검증하기 위하여 이승래 등(2001)에 의하여 양산지역에서 수행된 딜라토메터 소산시험 결과 중 6개의 p_2 값 소산거동을 제안된 방법으로 해석하였으며 이승래 등(2001)이 분석한 기존 해석법에 의한 결과 및 불교란 시료를 이용한 실내 압밀시험 결과와 비교하였다. 딜라토메터 소산시험이 수행된 동일한 위치에서 채취된 불교란 시료로부터 얻어진 기본물성 값과 통일분류법상의 흙 분류 결과가 표 2에 정리되어 있다(성주현, 2000).

이지역은 통일분류법상 CL 또는 CH로 분류되며 비교적 균질한 정규압밀 또는 약한 과압밀 점토층이 발달된 지역으로 보고되어 있다(성주현, 2000). 실내 삼축시험결과 지반의 강성지수($E/c_u = 3G/c_u$)는 70~110 정도에 분포하고 있으나, 추후 이승래 등(2001)의 결과와 동일한 조건에서 추정된 압밀계수를 비교하기 위하여 소산해석을 위한 지반의 강성지수는 동일하게 $E/c_u = 100$ 을 적용하였다.

이승래 등(2001)에 의하여 양산지반에서 수행된 딜라토메터 p_2 소산시험 결과가 그림 2에는 나타나 있다. 전

표 2. 양산 시험성토 구간의 실내 기본물성 결과(성주현, 2000)

공(hole)	깊이(m)	비배수전단 강도 c_u (kg/cm ²)	E/c_u	액성한계 (%)	소성 지수	통일분류 기호
양산-1	15	0.62	110	56.3	28.9	CH
양산-1	18	0.70	85	47.3	24.9	CL
양산-2	12	0.53	110	54.1	30.8	CH
양산-2	15	0.62	90	55.4	30.1	CH
양산-3	19	0.88	85	47.3	24.0	CL
양산-3	24	1.3	70	43.4	19.2	CL

체 소산도 범위 중 초기 50% 소산도까지의 소산자료가 수평압밀계수 추정을 위한 입력 소산도(input degree of dissipation)로 사용되었으며 그 이후 거동은 추후 장기 거동 예측에 비교자료로 이용되었다.

표 3에는 제안된 방법으로 얻어진 수평압밀계수가 이승래 등(2001)의 결과와 비교되어 있으며 그림 4에는 이승래 등(2001)이 도시한 방법과 동일하게 $p_2 - \log t$ 법에서 얻어진 수평압밀계수를 기준 축(x축)으로 사용하여 모든 수평압밀계수가 도시되어 있다. 비교 시 기준이 되는 값으로는 딜라토메터 소산시험이 수행된 동일위치에서 채취된 불교란 시료를 이용하여 수행된 일차원 실내압밀시험 결과가 이용되었다. 일반적으로 흙의 이방성으로 인해 수평압밀계수 c_h 는 연직압밀계수 c_v 보다 크다고 알려져 있으나 그 정량적인 관계는 확실히 알려져 있지 않다. 그러나, Lacerda 등(1977)은 여러 형태의 실내 투수시험을 통하여 수평방향과 연직방향의 투수계수가 간극비 e 에 따라 그림 3과 같은 근사적인 관계가 있음을 보고하였고, 흙의 체적압축계수는 등방성($m_h = m_v$)으로 간주될 수 있다는 Parry와 Wroth(1977)의 연구결과를 적용하면 압밀계수 비(c_h/c_v)는 투수계수 비(k_h/k_v)와 동일하게 산정될 수 있다. 본 연구에서는 양산현장의 초기 간극비의 평균값 $e=1.68$ 에 대하여 그림 3으로부터 얻어진 $k_h/k_v=2.2$ 의 관계로부터 실내 압밀시험으로 얻어진 연직압밀계수 c_v 값을 수평압밀계수 c_h 로 환산하여 비교대상으로 사용하였다.

그림 4에서 제안된 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

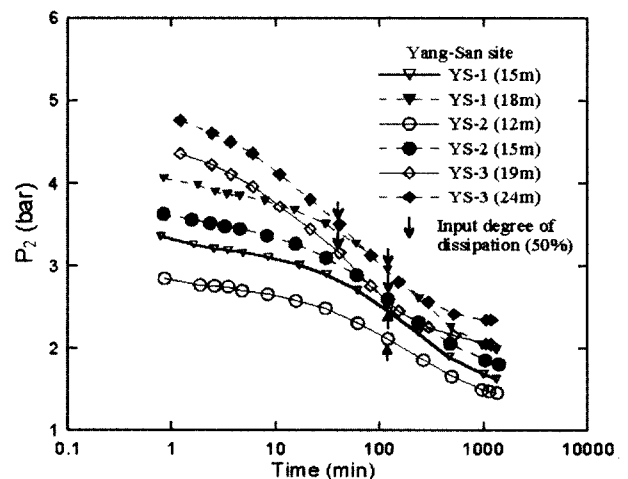


그림 2. 양산지반에서 수행된 딜라토메터 p_2 소산곡선(이승래 등, 2001)

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

위치	본연구	$p_2 - \log t$ 법	$C - \sqrt{t}$ 법	실내 압밀실험*
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

* 실내압밀실험으로 얻어진 연직압밀계수에 $c_v/c_h = 2.2$ 를 적용하여 얻어진 수평압밀 계수

있다. 불교란 시료로부터 얻어진 실내 압밀실험 결과를 기준으로 비교하면, 기존의 $p_2 - \log t$ 법이나 $C - \sqrt{t}$ 법이 수평압밀계수를 과소평가 하거나 과대평가하는 것과 달리 제안된 방법은 실내 압밀실험 값과 매우 일치하는 값을 추정하여 제안된 방법에서 채용하고 있는 등가 반경과 이론 해, 최적화 기법이 타당함을 알 수 있으며 기존의 방법들보다 매우 정확도가 높은 것으로 판단된다. 그림 4의 점선 원으로 표현된 실내 압밀실험 값은 양산-3(19m)의 실내 압밀실험 값으로 전체적인 경향과 다소 동떨어진 경향을 보이고 있으며 그림 2의 양산-3의 소산곡선 들(19m, 24m)의 소산경향과 50% 소산도 도달시간이 거의 유사함을 바탕으로 볼 때 시료 채취 시 시료교란 등의 영향을 받은 것으로 판단된다.

4.2 전 소산도 범위의 간극수압 소산곡선 예측결과

제안된 방법은 기존의 방법들이 특정 소산도(50%)에

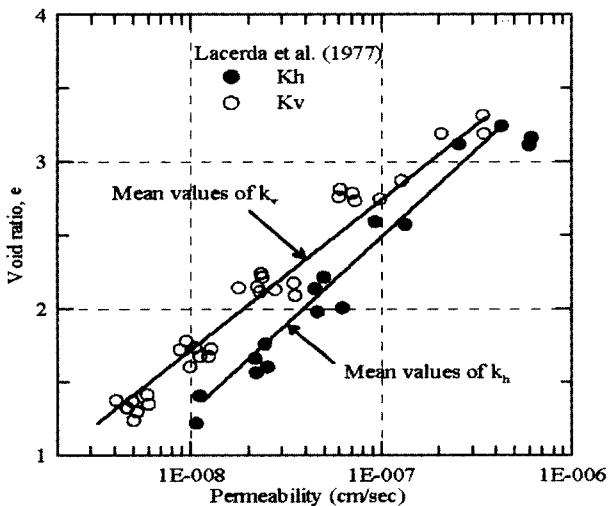


그림 3. 간극비에 따른 연직방향 및 수평방향 투수계수(Lacerda 등, 1977)

서 압밀계수를 결정[식 (1) 참조]함에 비해 최적화기법을 도입함으로써 간극수압 소산시험이 실시된 직후의 소산도부터 50% 소산도에 걸친 간극수압의 소산경향(dissipation trend)에 가장 적합한 압밀계수를 추정한다는 점이 기존 방법과 차별된 점이다.

그림 5는 제안된 방법으로 얻어진 수평압밀계수를 이용하여 등가반경으로 환산된 딜라토미터의 관입과 연속적으로 수행되는 소산시험을 장시간 모사함으로써 얻어진 과잉 간극수압 소산 예측결과를 현장 관측된 결과와 비교한 것으로, 이를 통하여 제안된 방법에서 적용하고 있는 최적화기법, 등가반경, 딜라토미터 관입기 멤브레인의 위치효과 고려의 유효성 등을 압밀계수의 크기뿐 아니라 간극수압 소산거동 측면에서도 확인할 수 있다.

실험의 초기 부분에서 실제 관측 값들이 예측 값에 비해 상대적으로 빠르게 소산되는 부분이 있고 관측 종료 부분에 관측값과 예측값 사이에 미약한 차이가 발견되는 경우도 있으나, 전체적인 경향으로 볼 때 전 소산도 영역에서 고르게 일치하는 결과를 주고 있다. 관측 종료 시의 미약한 차이는 해석을 위한 과잉 간극수압 산정 시 사용된 정수압이 지표면으로부터 소산시험 위치의 깊이까지 선형으로 증가하는 것을 가정하였기 때문이다. 본 연구의 대상 현장인 양산 신도시 시험성토 구간은 지형적인 원인에 의하여 피압수가 발달된 것으로 보고(한영철과 유갑용, 1999)되는 지역이며 해석 시 가정한 것과 같이 지표면에 지하수위가 형성되지 않는 경우를 고려할 때 가정된 정수압과 실제 정수압의 차이가 있을 수 있으며 이것이 소산곡선 종료 시 차이의 원인으로 판단된다. 그러나, 본 연구의 목적이 종료 시 간극수

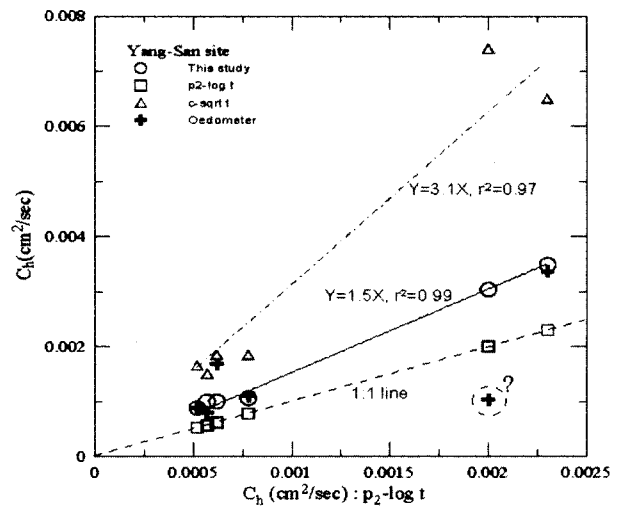


그림 4. 수평 압밀계수 비교

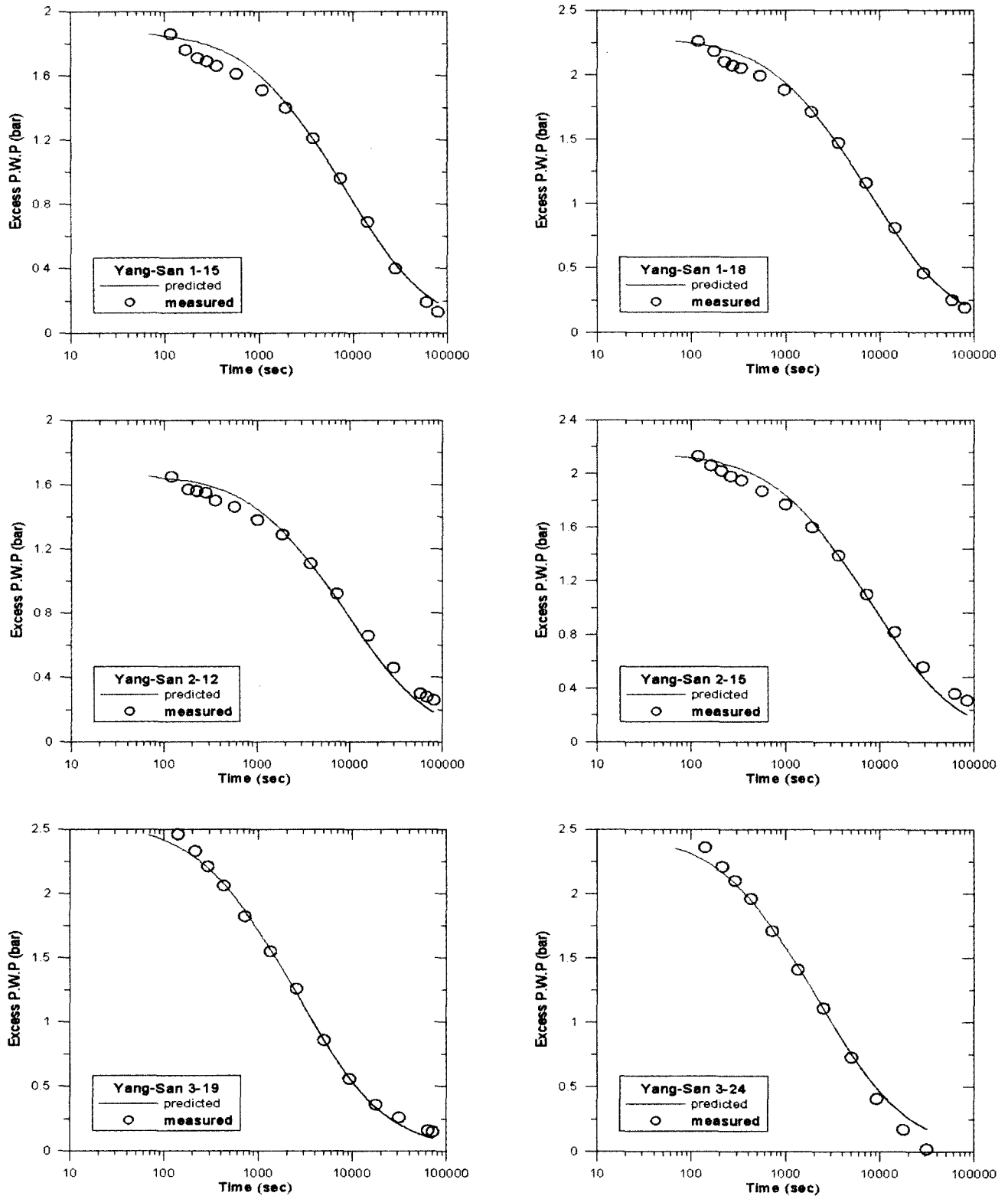


그림 5. 전 소산도 범위에서의 소산거동 비교

압의 예측에 있지 않으므로 이러한 효과가 본 연구결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

그림 5에서 볼 수 있는 간극수압 소산곡선의 전 소산

도 범위에서의 일치경향을 통해 dilatometer 관입기를 원형의 등가반경으로 고려하고 멤브레인의 위치효과 고려한 제안된 방법의 모델링이 지반 공학적으로 유용

함을 확인 할 수 있다. 또한, 이를 통해 제안된 방법과 같이 최적화기법을 이용하여 간극수압의 소산경향(dissipation trend)을 고려한 압밀계수를 추정할 경우, 응력수준(stress level)에 따라 변화하는 압밀계수를 일정한 상수로 추정할 수 밖에 없는 기존 이론들의 단점을 보완하고 전 소산도 범위에서의 간극수압 소산거동을 대표적으로 표현 할 수 있는 수평압밀계수의 결정이 가능할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 딜라토미터 소산시험 해석법들이 포함하고 있는 가정사항들에 대한 검토를 통해서 해석 상에 고려되어야 하는 요소들을 도출하고, 이를 바탕으로 최적화기법을 적용한 수평압밀계수 추정법을 제안하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 주된 결론들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 평면형태의 딜라토미터 관입기를 이용한 소산시험 해석 시, 등가반경의 경우 실제 관입기의 단면적과 동일한 면적을 갖는 반경($R=20.57\text{mm}$)을 사용하고 멤브레인의 위치효과를 고려한 이론 해를 사용하는 것이 적절한 것으로 검토되었다.
- (2) 제안된 방법으로 얻어진 수평압밀계수가 기존의 $p_2 - \log t$ 법이나 $C - \sqrt{t}$ 법이 수평압밀계수를 과소평가하거나 과대평가하는 것과 달리 실내 압밀시험 값과 매우 일치하는 값을 추정하여 제안된 방법에서 채용하고 있는 등가반경과 이론 해, 최적화 기법이 타당함을 알 수 있으며 기존의 방법들보다 매우 정확도가 높은 것을 확인하였다.
- (3) 제안된 방법으로 얻어진 수평압밀계수를 이용하여 전 소산도 범위에서 예측된 간극수압과 현장 관측간극수압의 비교결과, 초기 부분과 일부 시험의 수렴 부분의 미약한 차이를 제외하고는 전 소산도 영역에서 고르게 일치하였다. 이를 통해 제안된 방법과 같이 최적화기법을 이용하여 간극수압의 소산경향(dissipation trend)을 고려한 압밀계수를 추정할 경우, 응력수준(stress level)에 따라 변화하는 압밀계수를 일정한 상수로 추정할 수 밖에 없는 기존 이론들의 단점을 보완하고 전 소산도 범위에서의 간극수압 소산거동을 대표적으로 표현 할 수 있는 수평압밀계수의 결정이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 일본학술진흥원(JSPS; Japan Society for the Promotion of Science)과 (주) 현대산업개발의 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. 김영상, 이승래, 김윤태(1997), "피에조콘 소산시험을 이용한 압밀계수 결정 시 최적화 기법의 적용," 한국지반공학회지, 제13권, 제4호, pp.95~107.
2. 성주현(2000), Flat Dilatometer를 이용한 국내 해안점토 지반의 수평 압밀계수 산정에 관한 연구, 한국과학기술원 석사학위논문, 63p.
3. 이승래, 김영상(1998), "피에조콘 소산시험을 이용한 현장 간극수압 소산거동 예측," 대한토목학회지, 제18권, 제3호, pp.353~359.
4. 이승래, 김영상, 성주현(2001), "딜라토미터를 이용한 수평압밀계수 추정법의 국내지반 적용성 평가," 한국지반공학회지, 제17권, 제4호, pp.153~160.
5. 한영철, 유갑용(1999), "양산물금지구 피압수 특성에 관한 연구," 한국지반공학회 가을학술발표회.
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, 367pp.
7. 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.
8. Lacedar, W. A., Costa-Filho, L. M., and Duarte, A. E. R.(1977), "Consolidation characteristics of Rio de Janeiro soft clay," Proceedings of International Symposium on Soft Clay, Bangkok, pp.231~243.
9. Lutenegeger, A. J. (1988), "Current status of Marchetti dilatometer test," I-ISOPT:137~155.
10. Lutenegeger, A. J. and Kabir, M. G. (1988), "Dilatometer C-reading to help determine stratigraphy," I-ISOPT: 549~554
11. Marchetti, S. and Totani, G. (1989), "C_h evaluations from DMTA dissipation curves," XII ICSMFE: 281~286.
12. Parry, R. H. G. and Wroth, C. P. (1977), "Shear properties of soft calys," Report presented at the Symposium on Soft Clay, Bangkok, Thailand.
13. Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., and By, T. (1988), "Excess pore pressures and the flat dilatometer test," I-ISOPT: 567~576.
14. 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.
15. Torstensson, B.A.(1975), "The pore pressure sounding Equipment". ASCE Specialty Conference on In-situ Measurement of Soil Properties, Raleigh, NC:48~55.

(접수일자 2001. 4. 9)