

피에조콘 소산시험의 초기경향을 이용한 평형간극수압과 강성지수의 결정

An Ambient Pore Pressure and Rigidity Index from Early Part of Piezocone Dissipation Test

김 영 상* Kim, Young-Sang

Abstract

This paper describes a systematic way of simultaneously identifying the ambient pore pressure and the rigidity index ($=G/s_u$) of soil by applying an optimization technique to the early part of piezocone dissipation test result. An analytical solution developed by Randolph & Wroth(1979) was implemented in normalized form to express the build-up and dissipation of excess pore pressures around a piezocone as a function of the rigidity index. An ambient pore pressure and optimal rigidity index were determined by minimizing the differences between theoretical and measured excess pore pressure curves using optimization technique. The effectiveness of the proposed back-analysis method was examined against the well-documented performance of piezocone dissipation tests(Tanaka & Sakagami, 1989), from the viewpoints of proper determination of selected target parameters and saving of test duration. It is shown that the proposed back-analysis method can evaluate properly the ambient pore pressure and the rigidity index by using only the early phase of the dissipation test data. Also, it is shown that the proposed back-analysis method permits the horizontal coefficient of consolidation to be identified rationally. Consideration for strain level of back-analyzed rigidity index shows that it corresponds to at least intermediate to large strain level.

요 지

본 논문은 최적화기법을 이용하여 현장에서 수행된 피에조콘 소산시험의 초기 경향으로부터 평형간극수압과 지반의 강성지수(G/s_u)를 역해석하는 기법에 관하여 기술하였다. 피에조콘 관입으로 인해 콘 주변에 발생된 초기 과잉간극수압의 크기 및 분포, 그리고 연속된 간극수압 소산과정은 Randolph & Wroth(1979)가 제안한 해석적 해를 이용하여 지반의 강성지수의 함수로 표현되었다. 제안된 기법에서는 주어진 강성지수에 대해 정규화 된 이론 소산곡선과 평형간극수압으로 정규화 된 피에조콘 관측 소산곡선이 가장 일치하도록 하는 평형간극수압과 지반의 강성지수가 최적화 기법을 이용하여 결정되었다. 제안된 기법을 압밀이 진행중인 지반에서 관측된 피에조콘 소산시험 결과(Tanaka & Sakagami, 1989) 해석에 적용하였고 역해석된 평형간극수압과 현장에서 관측된 평형간극수압의 크기를 비교하였다. 또한 제안된 기법으로 얻어진 지반의 강성지수와 평형간극수압을 바탕으로 수평압밀계수를 추정하였으며 일차원 압밀실험 결과와 비교하였다. 그 결과 제안된 기법이 지반에 잔류하는 평형간극수압의 크기를 매우 정확하게 예측함을 알 수 있었고 역해석 된 강성지수를 이용한 압밀계수의 추정이 타당함을 알 수 있었다. 또한 얻어진 강성지수의 변형률수준에 관한 검토결과 피에조콘 해석을 위한 강성지수는 중간 또는 대변형 상태의 변형상태에 해당하는 값을 사용하는 것이 타당할 것으로 판단되었다.

* 정회원, (주)현대산업개발 토목설계팀 과장 (Member, Manager, Civil Engrg., Team, Hyundai Development Company, geoyoungkim@hyundai-dvp.com)

1. 서론

피에조콘 소산시험으로부터 압밀특성을 추정하기 위해서는 시험위치의 정확한 정수압 상태와 지반의 적절한 강성지수가 요구된다. 그러나, 대상지반이 압밀 진행 중이거나 지형적인 원인에 의하여 피압수가 존재할 경우 정수압 이외에 추가적인 잔류간극수압이 존재하게 되어 평형간극수압은 정수압과 잔류간극수압의 합으로 나타나며 피에조콘 해석 시 이를 무시할 경우 해석상 오류를 포함하게 된다(Baligh & Levadoux, 1980). 이러한 경우 피에조콘을 이용하여 관입 시 발생된 과잉간극수압이 완전히 수렴할 때까지 소산시험을 수행함으로써 시험 위치의 평형간극수압을 확인할 수는 있으나 소산과정이 수렴될 때 까지 소요되는 시간이 매우 길고, 특히 투수계수가 작은 점토지반의 경우에는 며칠에 걸친 소산에도 불구하고 완전한 수렴 값에 도달되지 않는 경우도 있어 시간과 비용면에서 비효율적이다. 이를 개선하기 위하여 황대진과 김철웅(1997)은 지반침하 관리이론인 쌍곡선법, 호시노법, 아사오카법을 이용하여 피에조콘 소산시험 관측결과를 해석함으로써 최종 평형간극수압의 수렴값 결정에 관한 연구를 수행하였고 이중 호시노법이 사용가능 할 것으로 평가한 바 있다. 국외에서는 Tanaka & Sakagami(1989)가 지반이 압밀진행 중이어서 정수압 이외의 잔류간극수압이 존재하는 경우, 피에조콘 관입 시 관측되는 간극수압은 정수압성분, 콘 관입으로 유발된 전단에 의한 성분, 그리고 잔류간극수압 성분으로 구성된다고 주장하고 소산시험이 아닌 관입 시 관측된 간극수압으로부터 잔류간극수압을 예측하는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\Delta u_c = u_{\max} - \Delta u - u_0 \quad (1)$$

여기서, Δu_c : 잔류간극수압, u_{\max} : 관입간극수압,

$$\Delta u = \Delta u_s = \frac{3}{4}(q_T - \sigma_{v0}) \text{ : 전단에 의한 성분, } u_0 \text{ : 정수압}$$

또한, Rust & Clayton(1999)은 강성지수($I_R=G/s_u$)가 100인 지반에 대해 Randolph & Wroth(1979)의 정규화된 형태의 해석적 해와 반복법을 이용하여 소산시험으로부터 정수압 결정 연구를 수행하였으며 이를 Tailing

Dam에서 수행된 피에조 콘 소산시험에 적용한 바 있다.

한편, 지반의 전단탄성계수와 비배수전단강도의 비로 정의되는 강성지수($I_R=G/s_u$)는 공동확장이론과 변형률경로법을 이용하는 해석분야에서 중요한 요소로 말뚝지력 산정외에도 피에조콘을 이용한 압밀계수 및 비배수전단강도 해석 등 다양한 분야에 요구된다. 그러나, 알려진 바와 같이 콘 관입시 주변 지반에 유발되는 다양한 수준의 변형을 분포와 전단탄성계수의 변형률의존성(strain dependency)은 콘 해석 문제에 있어서 대표적인 전단탄성계수의 선택을 어렵게 한다. 최근 Danziger 등(1997), Schnaid 등(1997)은 다양한 변형률수준에서의 전단탄성계수를 이용한 압밀계수 추정결과와 압밀실험 결과를 비교함으로써 G_{50} (항복응력의 50%에 해당하는 응력의 할선탄성계수)가 타당함을 주장하였다. 또한 비배수전단강도 역시 지반의 고유한 값이 아니라 전단속도(strain rate), 과압밀비, 그리고 변형률 연화 등에 영향을 받고 수행되는 시험법에 따라서 2배 이상 쉽게 변하는 값으로 이로인해 강성지수의 결정은 더욱 어렵게 된다(Baligh & Levadoux, 1980).

본 논문에서는 피에조콘 소산시험의 초기 소산경향에 최적화기법을 적용함으로써 시험이 수행되는 위치의 평형간극수압과 지반의 강성지수를 동시에 역해석하는 기법을 제안하였다. 제안된 방법을 압밀 진행중인 연약지반 현장에서 수행된 피에조콘 소산시험 결과의 해석에 적용하였으며 역해석된 평형간극수압과 현장에서 관측된 평형간극수압을 비교하였다. 또한 역해석된 평형간극수압과 최적 강성지수를 바탕으로 수평압밀계수를 추정하였으며 그 결과를 일차원 압밀실험으로 얻어진 압밀계수 값과 비교하였다. 전술한 바와 같이 강성지수는 사용된 전단탄성계수의 변형률수준에 의해 그 값이 달라지므로 본 연구에서 제안된 기법으로 역해석된 강성지수의 변형률수준에 대하여 검토하고 피에조콘 해석에 적절한 변형률수준에 대하여 토론하였다.

2. 피에조콘 소산시험에 대한 해석적 해

Randolph & Wroth(1979)는 그림 1과 같이 실린더형 관입체의 관입으로 주변지반에 발생하는 과잉간극수

압(u_e)과 반경방향 변형(outward radial movement, ξ)을 예측하는 해석적인 해를 제안하였다. 이들은 무한영역을 대상으로 수행되던 기존의 해석과 달리 과잉간극수압의 소산과정 중 과잉간극수압이 도달할 때 까지는 그 이상에 과잉간극수압이 존재하지 않는 특정 반경(r^*)을 도입하였고 그 크기를 소성영역(R)의 5~10배로 제안하였다. 소성영역 내에 로그분포로 유발되는 초기 과잉간극수압의 분포식 (1)에 대하여 시간에 따른 과잉간극수압 소산의 해석적 해는 식 (2)와 같이 베셀함수(Bessel function)로 표현되며 가정된 바[식 (3)]와 같이 특정반경 r^* 이상에는 과잉간극수압이 존재하지 않는다. 반경방향 변형 ξ 에 대한 해는 Randolph & Wroth (1979)에 의해 제시되었다.

$$u_{ei} = 2s_u \ln(R/r), \quad t=0 \quad (1)$$

$$u_e = \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-\alpha_n^2 t} C_0(\lambda_n r), \quad r_0 \leq r \leq r^* \quad (2)$$

$$u_e = 0, \quad r > r^* \quad (3)$$

여기서, $B_n = \frac{4s_u}{\lambda_n^2} \frac{[C_0(\lambda_n r_0) - C_0(\lambda_n R)]}{[r^{*2} C_1^2(\lambda_n r^*) - r_0^2 C_0^2(\lambda_n R)]}$; $C_i(\lambda_n r) = J_i(\lambda_n r) + \mu_n Y_i(\lambda_n r)$; J_i 와 $Y_i=1, 2$ 종 베셀함수(Bessel functions of first and second kind); $\alpha_n = \lambda_n r_0$; $r^* = 5 \sim 10 R$; $R/r_0 = \sqrt{G/s_u}$; $r_0 =$ 실린더형 관입체의 반경(여기서는, 피에조콘 반경); $s_u =$ 비배수전단강도.

위 변수들 중 λ_n 와 μ_n 는 다음의 경계조건(4), (5)으로부터 결정될 수 있으며 베셀함수의 특성 상 무한히 많은 해가 존재하나 Randolph & Wroth(1979)에 의하여 처음 50개의 해만을 이용함으로써도 충분한 정도(accuracy)를 얻을 수 있음이 증명되었다.

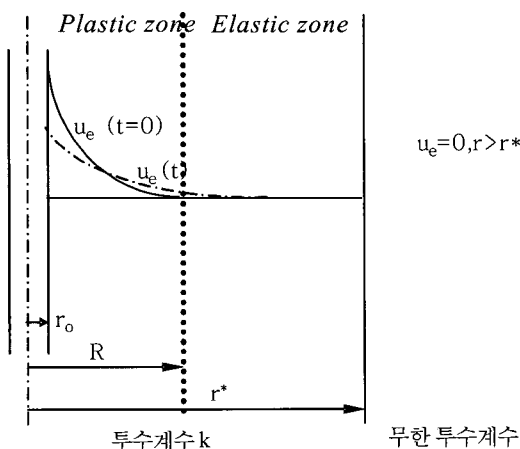


그림 1. 실린더형 관입체 주변의 초기 간극수압 분포 (Randolph & Wroth, 1979)

$$\xi = 0 \text{ at } r=r_0 \text{ for } t \geq 0 \quad (4)$$

$$u_e = 0 \text{ at } r=r^* \quad (5)$$

그러나, 이들 50개의 λ_n 와 μ_n 값 중에 중복된 해가 존재하거나 빠지는 경우가 발생하지 않도록 주의하여야 하며 본 연구에서는 Newton 반복법을 사용하여 초기 50개의 해를 효율적이고 정확히 산출하도록 하였다. 대표적인 특정반경 r^* 에 대한 해는 Levadoux(1980)에 소개되어 있다. 식 (2)에 포함된 시간 t 를 식 (6)과 같이 정의되는 정규화 된 무차원 시간 T 로 대체하고 시간계수 $T=0$ 에서의 초기 과잉간극수압(u_{ei})으로 과잉간극수압(u_e)을 정규화 함으로써 이론시간계수와 정규화 된 과잉간극수압 $T-U_T$ 관계가 간단히 유도될 수 있다.

$$T = \frac{c \cdot t}{r_0^2} \quad (6)$$

$$U_T = \frac{u_e}{u_{ei}} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-\alpha_n^2 T} C_0(\lambda_n r)}{\sum_{n=1}^{\infty} B_n C_0(\lambda_n r)} \quad (7)$$

여기서, $C_0(\lambda_n r) = J_0(\lambda_n r) + \mu_n Y_0(\lambda_n r)$, $n=1, 2, 3, \dots, 50$

이때, 식 (7)에 포함된 변수 λ_n 와 μ_n 는 특정반경 $r=r^*$ 에서의 경계조건[식 (5)]에 관련되어 결정되며, 특정반경 r^* 의 크기는 강성지수에 따른 소성영역의 5~10배이므로 정규화 된 이론소산곡선[식 (7)]은 결국 강성지수 I_R 에 의존된다. 대표적인 강성지수에 대한 이론해는 그림 2와 같다. Rust & Clayton (1999)은 그림 2의 Randolph & Wroth (1979) 해 중에서 특정 강성지수 $I_R=100$ 인 경우의 이론소산곡선을 기준으로 관측된 과잉간극수압 곡선을 반복적인 방법으로 일치시킴으로써 평형간극수압

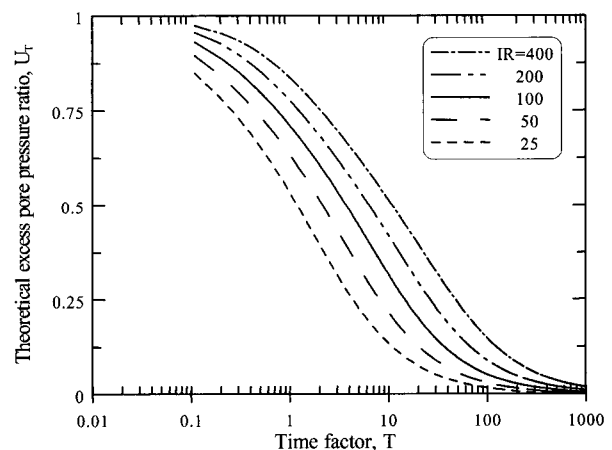


그림 2. 강성지수 I_R 에 따른 이론적인 과잉간극수압 소산곡선

을 결정하는 방법을 제안하였다. 따라서, 지반의 강성지수 I_R 이 이와 유사한 경우에는 사용될 수 있으나 지반의 강성지수 값이 이와 다른 경우에는 평형간극수압이 실제와 다르게 추정된다. 그러므로, 올바른 평형간극수압의 결정을 위해서는 강성지수의 변화를 반드시 함께 고려하는 것이 타당하며 특히 국내 지반의 경우 실내실험을 통해 추정된 강성지수가 100이하인 경우가 빈번하여 이에 대한 고려가 필수적이다(김영상과 이승래, 1998; 김영상, 2001). 또한, Rust & Clayton (1999)이 이용한 단순 반복법으로 2개 이상의 다변수에 대한 최적의 해를 도출하는 것은 많은 노력과 시간을 요구하거나 사실상 가능하지 않을 수 있으며 본 연구에서 사용된 최적화기법은 이와 같은 다변수 최적화 문제에 대해서 매우 탁월한 것으로 평가된다.

3. 피에조콘 소산시험에서 관측된 간극수압 해석법

$u(t)$ 를 현장 피에조콘 소산시험으로부터 관측된 시간 t 에서의 관측 간극수압이라 하고 u_0 를 그 위치에서의 정수압이라 하면 일반적으로 피에조콘 해석 시 이용되는 정규화된 과잉간극수압 U 는 초기 과잉간극수압에 대한 시간 t 에서의 과잉간극수압의 비로 다음 식 (8)과 같이 정의된다.

$$U = \frac{u_e(t)}{u_{ei}} = \frac{u(t) - u_0}{u_i - u_0} \quad (8)$$

과잉간극수압 비 U 는 정의에 따라 $t=0$ 일 때 (즉, $u(t) = u_i$) $U=1$ 의 값을 가지며 과잉간극수압이 모두 소산되어 간극수압 $u(t)$ 가 정수압 u_0 에 도달하면 $U=0$ 이 된다.

4. 최적화문제로의 정식화와 수평압밀계수 추정

최근 Kim 등 (1997), 김영상 (2001)은 최적화기법을 적용함으로써 피에조콘 및 딜라토미터 소산시험 해석을 통하여 보다 신뢰성 있는 현장 수평압밀계수를 추정할 수 있음을 보였다. 또한 Kim & Lee (2000)에 의하면 최적화기법을 통해 얻어진 수평압밀계수는 기존의 방법들을 통하여 얻어진 값과 비교해 수평압밀계수를 결정하는 소산도에 영향을 받지 않고 매우 일관성이 있으며, 특정 소산도가 아닌 소산경향 (dissipation trend)을 반영하기 때문에 고 소산도에서의 간극수압의 거동 예측에 적합하다. 그러나 이러한 이전 연구에서 지반의 평

형간극수압과 강성지수는 알고 있는 값으로 전제되었으며 본 연구에서는 이러한 값들의 역해석을 목표로 하고 있어, 얻어진 결과는 기존의 연구결과를 보다 의미있게 할 것으로 사료된다.

평형간극수압과 강성지수의 역해석을 위한 최적화문제의 정식화는 다음 식 (9)와 같이 정의되는 목적함수를 최소화하는 문제로 표현될 수 있다.

$$f(x) = \sum_{n=1}^{N_t} (U_T^n - U^n)^2 \rightarrow \text{최소화} \quad (9)$$

여기서, $f(x)$: 목적함수, $x = (u_0, I_R)$: 설계변수, N_t : 과잉간극수압 비를 비교하는 총 시간단계의 수, U^n : 피에조콘에서 관측된 과잉간극수압 비 [식 (8)]; U_T^n : 이론적인 과잉간극수압 비[식 (7)].

식 (9)의 최적화 문제로 정식화 된 평형간극수압과 강성지수의 역해석 문제는 비구속 최적화 문제에 가장 효율적인 것으로 알려진 BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) 기법을 이용하여 해결될 수 있다. 이 기법에서는 설계변수로 선정된 평형간극수압 (u_0)과 강성지수 (I_R)를 목적함수가 감소하는 방향으로 최소화 될 때까지 연속적으로 변화시키며 최적의 해를 찾는다.

이때, 식 (7)의 이론적인 과잉간극수압 비 U_T 는 주어진 무차원 시간계수 T 에 따라 계산되므로 동일한 시간계수 T 에서의 비교를 위해서는 피에조콘에서 얻어진 관측 간극수압의 관측시간 t_0 동일한 무차원 시간계수로 환산될 필요가 있다. 피에조콘 관측시간 t 는 다음 식 (10)과 같이 50% 소산도에서의 이론시간계수 T_{50}^+ 와 50% 소산도에 도달하는데 소요되는 시간 t_{50}^+ 을 바탕으로 무차원의 시간계수로 환산될 수 있다. 여기서, + 기호는 최적화 과정 중에서 최적 해의 후보(trial solution)로서 사용된 평형간극수압 u_0 과 강성지수 I_R 에 관련된 시간계수와 도달시간을 의미한다.

$$T = \frac{c \cdot t}{r_0} = \frac{T_{50}^+}{t_{50}^+} \cdot t \quad (10)$$

여기서, T_{50}^+ =후보 강성지수(trial rigidity index, $I_{R, \text{trial}}$)에 대한 50% 소산도에서의 시간계수; t_{50}^+ =후보 평형간극수압(trial ambient pore pressure, $u_{c, \text{trial}}$)을 기준으로 한 50% 소산도에 도달하는 소요시간; t =실제 간극수압의 관측시간.

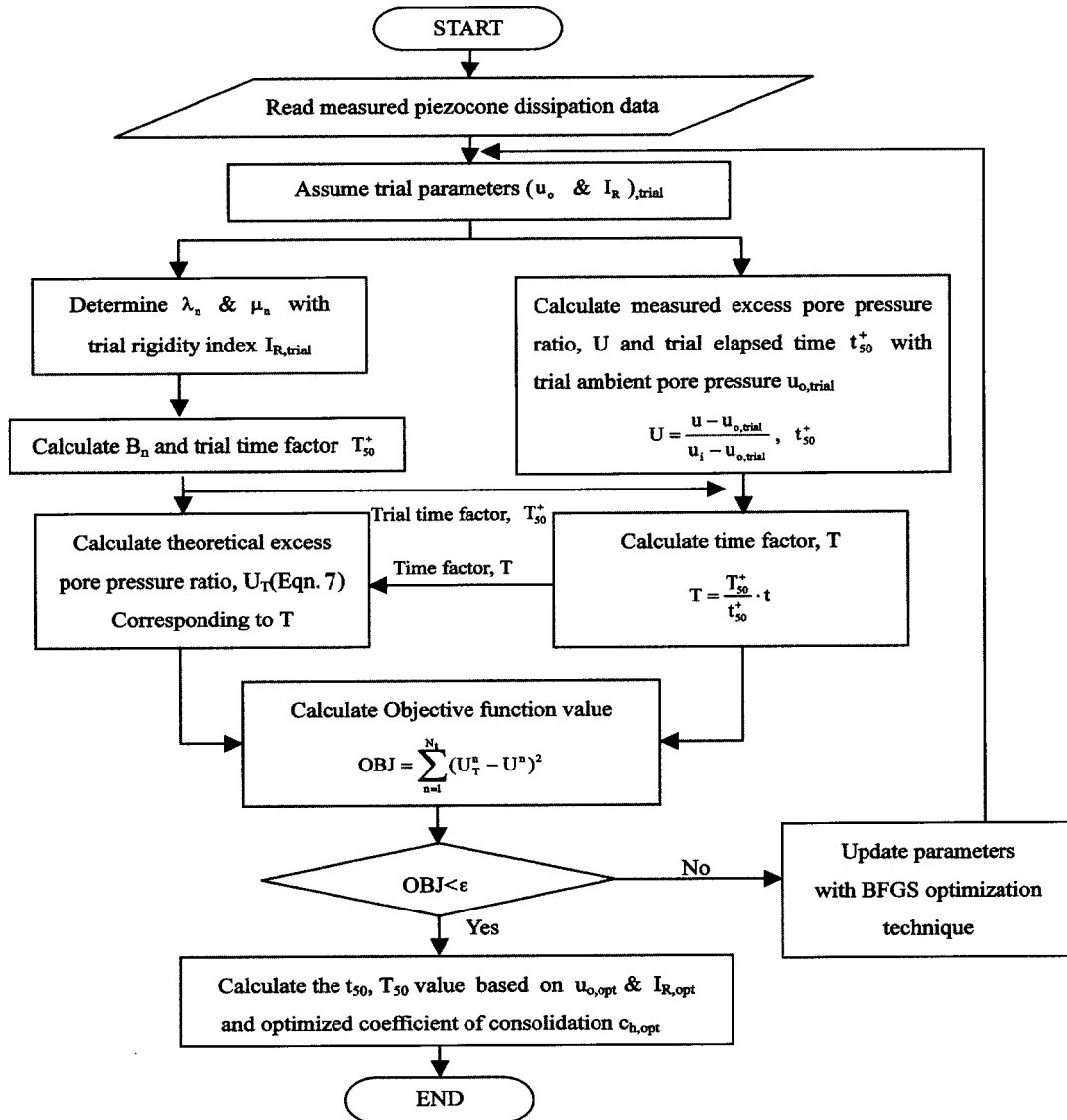


그림 3. 제안된 역해석 기법의 흐름도

제안된 역해석기법의 흐름도가 그림 3에 나타나 있다. 피에조콘으로부터 관측된 간극수압 소산곡선은 가정된 평형간극수압을 이용하여 정규화된 과잉간극수압 비 U 의 형태로 표현된다. 한편, 가정된 강성지수에 대해서 이론적으로 계산된 과잉간극수압 비 U_T 와의 차이가 최소화 될 때까지 최적화기법에 의하여 평형간극수압과 강성지수가 연속적으로 개선되며 일정한 수렴조건을 만족하는 평형간극수압과 강성지수가 최적의 값으로 결정된다. 일단 최적의 평형간극수압과 강성지수에 도달되면 프로그램은 반복작업을 마치게 되며 최적 해로 결정된 평형간극수압 $u_{o,opt}$ 을 기준으로 정규화 된 관측간극수압 곡선으로부터 50% 도달시간 t_{50} 이 결정되고 최적 강성지수 $I_{R,opt}$ 에 대한 Randolph & Wroth (1979)의

해석적 해로부터 50% 소산도에서의 이론시간계수 T_{50} 값이 결정되어 다음의 식 (11)로부터 최적의 수평압밀 계수가 계산된다.

$$c_h = \frac{T_{50}}{t_{50}} \cdot r_0^2 \quad (11)$$

여기서, T_{50} : 최적화 된 강성지수 $I_{R,opt}$ 에 대한 50% 소산도에서의 이론시간계수; t_{50} : 최적화된 평형간극수압 $u_{o,opt}$ 을 기준으로 50% 소산도에 도달하는 소요시간; r_0 : 피에조콘 반경(=1.785cm).

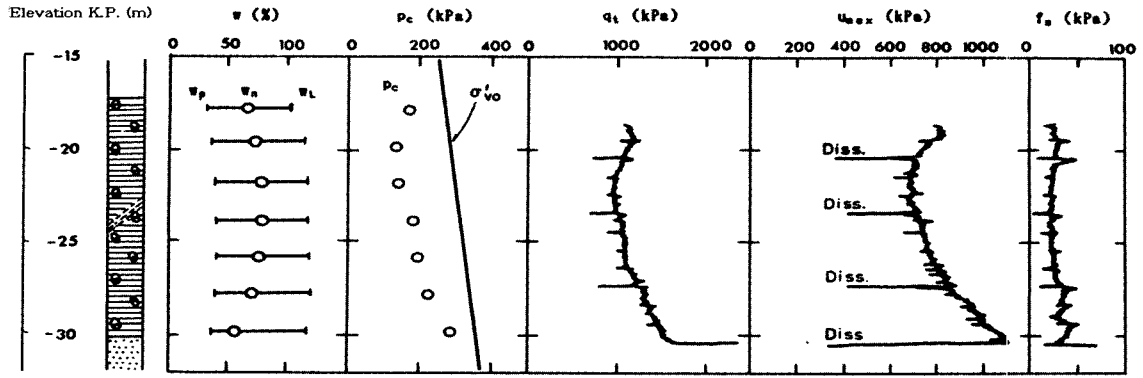


그림 4. 고베항 피에조콘 관입시험 결과와 기초물성 값(Tanaka & Sakagami, 1989).

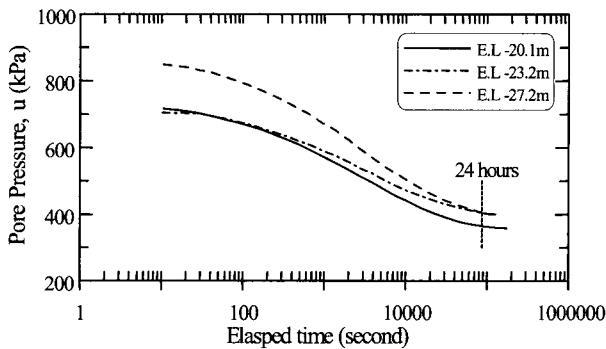


그림 5. 고베항에서 수행된 소산시험 결과(Tanaka & Sakagami, 1989)

표 1. 역해석 결과와 관측값의 비교

Elevation (m)	역해석 결과			관측 값	
	$u_{o,opt}$ (kPa)	$l_{R,opt}$	목적함수 값	u_o^* (kPa)	l_R^{**}
-20.1	375	273	5.75×10^{-4}	358	400
-23.2	388	276	8.96×10^{-4}	398	
-27.2	414	268	9.74×10^{-4}	399	

* u_o : Tanaka & Sakagami(1989), ** 海底地盤(일본지반공학회, 1995) G_o-s_u 자료로부터 결정된 값

5. 제안된 역해석 기법의 적용

5.1 역해석 결과 및 수평압밀계수

제안된 역해석기법을 Tanaka & Sakagami (1989)에 의해 압밀진행 중인 오사카해안의 해성점토 지반에서 수행된 피에조콘 소산시험 해석에 적용하였다. 피에조콘 관입 및 소산시험이 실시된 대상지역은 오사카해안 북단에 위치한 고베항(kobe port)으로 그림 4에 나타난 바와 같이 소성이 상대적으로 낮은 상하단의 일부분을 제외하고는 대상지역의 17~30m 깊이에 균질하고 연약한 해성점토가 위치해 있다. 그림 4에는 대상지반의 액소성 한계와 자연함수비, 일차원 압밀시험결과로 얻어진 선형압밀하중과 유효상재하중 $p_c - \sigma'_{vo}$ 관계, 그리고 피에조콘 관측값이 나타나 있다. $p_c - \sigma'_{vo}$ 관계로부터 대상지반 점토층의 선형압밀하중이 재하된 유효상재하중에 미치지 않아 압밀 진행중임을 알 수 있다. 점토층 내에서 소산시험이 실시된 곳은 총 4개소로 E.L. -20.1, -23.2, -27.2, -30m이나 이중 E.L. -30m에서 수행된 소산시험은 모래층에서 수행된 것으로 해석에서 제외되었다.

그림 5는 E.L. - 30m 깊이를 제외한 나머지 깊이에서의 간극수압 소산곡선들로 모두 24시간이상 관측된 결과들이다. 대상지반은 소성이 크며 투수계수가 10^{-9} m/s 이하의 점토층으로 관측된 간극수압이 24시간 이후에도 완전히 수렴된 경향을 보이지는 않으나 수렴에 가까운 거동을 보이는 시점에서 관측이 종료되었음을 알 수 있다.

역해석된 평형간극수압과 강성지수 값이 관측된 평형간극수압 및 강성지수 값과 함께 표 1에 정리되어 있다. 관측 및 역해석된 평형간극수압 모두 그 크기가 소산시험이 수행된 위치의 정수압 [대상지반의 Elevation은 K.P+1m가 고베항의 평균해수면(mean sea level)과 일치]에 비해 매우 커서 압밀 진행중임을 확인할 수 있다. 관측 평형간극수압 값은 Tanaka & Sakagami (1989)가 수행한 피에조콘 수렴값이며, 관측 강성지수는 동일한 고베항의 전단탄성계수와 비배수전단강도 관계로부터 추정된 값으로 자세한 사항은 5.2에 기술하였다.

역해석 결과 얻어진 평형간극수압 값들은 피에조콘 관측결과와 2.5~4.7%의 미미한 차이만을 보이며 매우 일치하는 결과를 나타내고 있다. 그림 6은 역해석된 결과와 함께 피에조콘 관측결과, 대상지반에 매설된 피에조미터로부터 관측된 평형간극수압, Tanaka & Sakagami (1989)가 제안한 관입간극수압을 이용한 평형간극수압

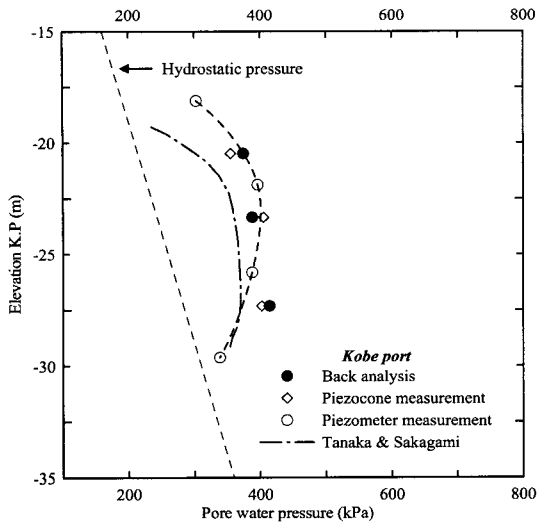


그림 6. 평형간극수압 비교

예측결과 [식 (1)참조]를 함께 도시한 결과이다. 피에조미터 관측결과 대상 점토지반의 중앙부에 보다 큰 잔류간극수압이 존재하는 것으로 나타났으며, 관측값들을 평균적으로 연결한 점선에 역해석 결과가 피에조콘 소산시험 결과와 함께 매우 근접하게 나타남을 알 수 있다. 또한 Tanaka & Sakagami (1989)의 예측결과와 비교할 때, 제안된 역해석기법이 잔류간극수압이 존재하는 경우의 평형간극수압을 보다 타당하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다. Tanaka & Sakagami (1989)의 예측결과와 식 (1)은 오사카만에 존재하는 유사한 콘시스턴시 (consistency) 특성을 갖는 정규압밀 점토의 전단특성 $\Delta u = \Delta u_s = \frac{3}{4}(q_T - \sigma_{vo})$ 을 바탕으로 잔류간극수압을 예측하고 있으나, 그 차이가 작지 않은 것으로 나타나는 다른 특성을 갖는 지역의 지반에 적용할 경우 전단특성에 대한 확인이 반드시 동반되어야 할 것으로 판단된다.

역해석 된 강성지수 값들은 268~276 사이의 좁은 범위에 일관성 있게 추정되었으며 G_0-s_u 관계로부터 결정된 값 400에 비해서는 67~69% 수준에 해당하는 값들이다. 역해석 된 강성지수와 관측값의 차이에 관해서는 5.2에서 변형률수준을 중심으로 논하고자 하며, 여기서는 관측 강성지수 결정에 사용된 전단탄성계수가

표 2. 평형간극수압을 얻기위해 요구되는 관측시간 비교

Elevation (m)	현장관측 (Seconds)	역해석을 위해 입력된 관측시간 (Seconds)
-20.1	175,992	1,931
-23.2	124,777	2,724
-27.2	127,017	2,724

표 3. 압밀계수 비교

Elevation (m)	본 연구 c_h (cm ² /s)	c_v (海底地盤, 1995) (cm ² /s)
-20.1	0.016	0.001 (정규압밀영역 평균값) 0.01 (과압밀영역 평균값)
-23.2	0.011	
-27.2	0.014	

seismic-콘 결과로부터 얻어진 값으로 10^{-6} 정도의 저변형 상태에서의 최대 전단탄성계수 G_{max} 값이므로 계산된 강성지수 400 역시 최대 강성지수 값을 밝혀준다.

역해석기법의 효율성은 역해석에 필요한 입력자료의 획득을 위한 현장에서의 관측시간과 실제 현장에서의 관측시간을 비교함으로써 분명하게 나타난다. 표 2에는 역해석을 위해 입력된 간극수압의 관측시간과 현장에서 수렴된 평형간극수압 값을 얻기 위하여 실제로 소요된 관측시간이 비교되어 있다.

피에조콘을 통한 압밀특성 추정 시 통상 요구되는 관측 소산도가 50%이고 Kim & Lee (2000)에 의하면 50% 소산도까지의 입력만으로도 역해석을 통한 신뢰성있는 수평압밀계수의 예측이 가능하기 때문에, 본 연구에서도 역해석에 필요한 입력 소산자료의 관측시간은 초기 과잉간극수압의 50% 소산도까지가 이용되었다. 표 2에서 현장관측을 통하여 평형간극수압의 확인까지 걸리는 시간이 2,117~2,933분 (1.5~2일) 임에 비하여 역해석에 요구되는 관측시간은 32~45분으로 표 1과 그림 6에서 나타난 바와 같이 정확한 평형간극수압을 예측하면서도 요구되는 관측시간이 매우 짧아 시간적인 면에서 보다 효율적임을 알 수 있다.

표 3에는 역해석으로 얻어진 평형간극수압과 최적의 강성지수를 바탕으로 식 (11)로 계산된 수평압밀계수가 나타나 있다. 비교대상으로는 고베항에서 채취된 불교란 시료에 대해 수행된 일차원 압밀실험 결과로, 얻어진 연직압밀계수는 선형압밀하중을 기점으로 정규압밀 영역에서 급격한 감소가 있는 것으로 나타났으며 정규압밀 및 과압밀 영역의 연직압밀계수 평균값이 비교되어 있다(海底地盤, 1995).

본 연구에서 역해석 된 평형간극수압과 최적 강성지수를 바탕으로 얻어진 수평압밀계수는 정규압밀 영역보다는 과압밀 영역의 평균 연직압밀계수에 가까우며 평균값보다 1.1~1.6배 (평균 1.36배) 정도 큰 것으로 추정되었다. 현재까지 피에조콘 소산시험으로부터 얻어지는 압밀계수가 어떤 응력수준에 해당하는 것인지 명확한 결론이 내려진 바가 없으나, Baligh & Levadoux (1980)

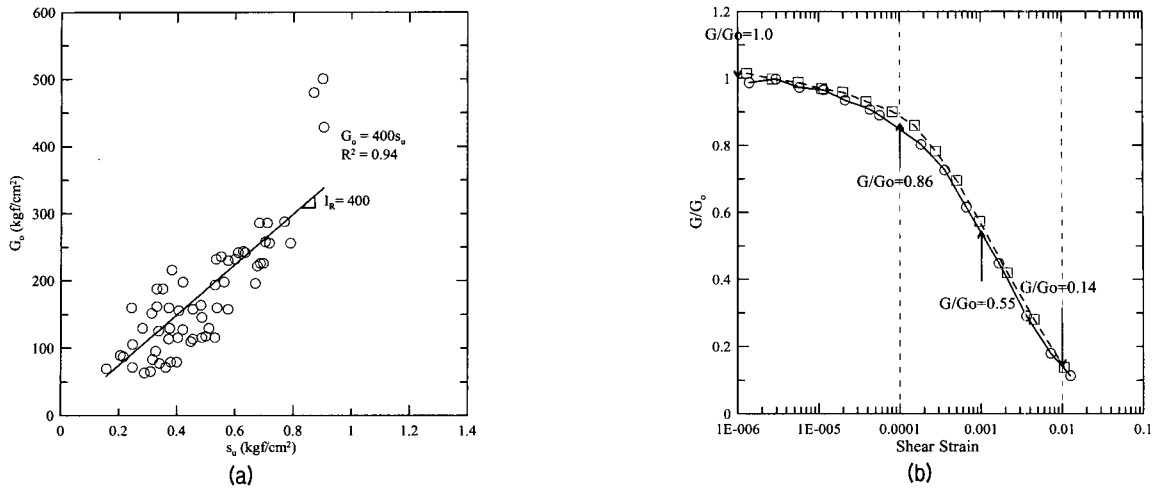


그림 7. 고배향 지반의 전단탄성계수-전단변형률-비배수전단강도 관계: (a) $G_0 \sim s_0$ 관계; (b) $G/G_0 \sim \gamma$ 관계

이후, 소산초기에서 50% 소산도 전까지는 콘관입으로 발생된 과잉간극수압이 존재하는 제하단계 (unloading stage)로 과압밀 영역에서의 값으로 판단하는 것이 설득력을 얻고 있다. 또한 연직방향과 수평방향의 압밀특성의 이방성을 고려한다면 역해석으로 추정된 물성을 이용한 수평압밀계수 추정이 타당한 것으로 판단된다.

5.2 역해석 된 강성지수의 변형률수준에 대한 고찰

본 절에서는 역해석기법을 통해 추정된 강성지수의 변형률 수준에 대해 논하고자 한다. 지난 20여년간 콘관입 뿐만 아니라 관입관련(deep penetration) 문제를 실제적으로 모사하는 기법으로 알려져, 국내의 지반공학자들에게 사용되어 온 변형률경로법 (Strain Path Method; Baligh & Levadoux, 1980, 1986)은 Boston Blue Clay의 강성지수 500에 해당하는 변형률과 초기과잉간극수압을 형성하고 소산과정을 모사함으로써 이론해가 제시되었다. 따라서, 이 결과는 이와 유사한 강성지수를 가진 흙에 대하여 적합하며 일반적으로 이와같이 강성이 크지 않은 국내지반에 적용할 경우 추정된 수평압밀계수가 과대평가 되므로 사용에 주의하여야 한다. 한편 Teh & Houlsby (1991)는 변형률경로법에서는 지반의 강성지수 G/s_u 에 따라 초기 변형률과 간극수압이 달라질 뿐 아니라 연속된 소산과정에도 큰 영향을 미침을 보이고 이를 개선하기 위하여 일반화된 탄성-완전소성 구성관계를 이용하여 강성지수를 포함하는 수정된 시간계수 $T^* = c_h \cdot t / (r_0^2 \cdot \sqrt{I_R})$ 를 제안하였다. 그러나 결국 사용자는 강성지수의 선택을 요구받고 있으며 따라

서 압밀계수 추정의 성패는 올바른 강성지수(또는 전단탄성계수)의 선택에 달려있다고 할 수 있다.

본절에서는 제안된 역해석기법으로 얻어진 강성지수와 유사한 값을 주는 전단탄성계수의 변형률수준을 비교함으로써 역해석된 강성지수의 변형률수준에 대한 간접적인 검토를 수행하였다. 그림 7은 고배향에서 실시된 seismic-콘 실험결과 전단탄성계수 G_0 와 비배수전단강도 s_u 의 관계 그리고 채취된 불교란 시료를 이용한 공진주 실험결과인 전단탄성계수 비 G/G_0 - 전단변형률 γ 의 비선형 관계를 표시하고 있다(海底地盤, 1995). 표 3에 사용된 관측값 강성지수 400은 그림 7(a)에서 보여지는 바와 같이 전단탄성계수 G_0 와 비배수전단강도 s_u 사이의 선형회귀분석을 통하여 얻어진 값으로, 비배수전단강도의 영향을 고려하지 않고 변형률에 따른 전단탄성계수만의 변화만을 고려하면 G_0 는 seismic-콘으로부터 얻어진 값으로 10^6 수준의 저변형률수준에 해당하므로 $I_R=400$ 은 결국 그림 7(b)의 $G/G_0=1.0$ 인 지점에서 얻어진 값으로 생각할 수 있다. 역해석 된 강성지수의 변형률수준을 비교하기 위하여 비선형 관계를 보이고 있는 G/G_0 - γ 관계에서 네가지 다른 변형률수준에 - 0.0001%, 0.01%, 0.1%, 1% - 대한 G/G_0 값을 선택하고 강성지수를 계산하여 표 4에 정리하였다.

다양한 변형률수준에서 계산된 강성지수와 역해석에서 얻어진 최적 강성지수를 비교하면, 역해석된 강성지수는 범위(268~276)는 G_0 의 67~69% 수준이며 변형률수준은 0.01%~0.1% (0.05%정도) 범위로 중간변형률 수준 이상인 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 피에조콘 해석을 위한 강성지수 결정 시 지반에 유발되는 다양한

표 4. 다양한 변형률수준에서의 강성지수와 역해석된 강성지수 비교

변형률수준	G/G ₀	G'	I _R =G/s _u	I _{R,opt}
0.000001	1	400s _u	400	268~276
0.0001	0.86	344s _u	344	
0.001	0.55	220s _u	220	
0.01	0.14	56s _u	56	

* G₀=400s_u를 적용하여 얻어진 값

변형률수준을 평균적으로 고려할 수 있도록 G₅₀을 사용할 것을 추천한 기존연구자들 (Robertson & Campanella, 1983; Roy 등, 1982; Schnaid 등, 1997; Danziger 등, 1997)의 주장에 부합하는 것으로 판단된다.

결국 본 연구에서 제안된 역해석기법은 관측된 간극수압의 전반적인 소산과정을 가장 잘 표현할 수 있는 피에조콘 주변지반의 평균적인 강성지수를 제공하며, 이는 간극수압 소산과정 시 주변지반의 다양한 응력-변형률 수준을 평균적으로 고려하는 것으로 생각될 수 있다. 제안된 역해석기법을 이용한 최적 강성지수 값의 추정과 꾸준한 실험자료의 축적으로 강성지수 선택을 위한 추가적인 실내실험 없이 신뢰성 있는 압밀계수를 추정할 수 있다면 시간과 비용면에서 효율적일 것으로 판단되며 이를 위한 신뢰성 있는 실험자료의 축적이 요구된다.

6. 결론

본 연구에서는 최적화기법을 적용함으로써 50% 소산도까지의 피에조콘 소산시험 결과를 바탕으로 현장의 평형간극수압과 최적의 강성지수를 역해석 할 수 있는 기법이 제안되었다. 또한, 이를 바탕으로 수평압밀계수 계산이 이루어졌으며 실제 문제에 적용하여 그 타당성을 검증하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 주요 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 제안된 역해석기법은 50%의 초기 소산자료만을 바탕으로 장시간 관측되어야 하는 현장지반의 평형간극수압을 매우 정확하며 효율적으로 예측할 수 있으며 이는 압밀 진행중으로 잔류간극수압이 존재하는 지반의 평형간극수압 예측을 통하여 검증되었다.
- (2) 제안된 역해석기법으로는 소산곡선의 초기부분으로부터 평형간극수압과 동시에 최적 강성지수 I_R을 예측할 수 있다. 역해석된 강성지수의 변형률수준에

대한 고찰로부터 큰 해석을 위한 전단탄성계수 선정 시 중간변형에서 대변형률수준에 해당하는 값을 사용하는 것이 보다 적절한 것으로 판단되었다.

- (3) 이상의 평형간극수압과 최적 강성지수를 바탕으로 예측된 수평압밀계수는 실내 일차원 압밀실험에서 얻어진 결과와 비교할 때, 제하영역(unloading stage)의 평균적인 압밀계수에 보다 가까운 값으로 지반의 이방성을 고려한다면 매우 정확한 예측이 이루어짐을 알 수 있었다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 김영상(2001), “등가반경과 최적화기법을 이용한 딜라토미터 소산 시험 해석법”, 한국지반공학회는논문집, 제17권, 제5호, pp.43~50.
2. 김영상, 이승래(1998), “콘 선단부 뒤에서 관측된 간극수압 소산 곡선을 이용한 수평 압밀계수 결정”, 한국지반공학회는논문집, 제14권, 제4호, pp.141~149.
3. 황대진, 김철웅(1997), “피에조콘 간극수압 소산시험에 관한 연구”, 한국지반공학회는논문집, 제12권, 제6호, pp.25~36.
4. 海底地盤(1995), 日本地盤工學會 關西支部, pp.101~181.(in Japanese).
5. Baligh, M. M., Levadoux, J. N.,(1980) *Pore pressure dissipation after cone penetration*, MIT. Dept. of Civil Engineering, Report R.80-1, Cambridge, MA, 367 pp.
6. Baligh, M. M., Levadoux, J. N.(1986), “Consolidation after undrained piezocone penetration. II: Interpretation”, ASCE, JGED, Vol.112, No.7, pp.727~744.
7. Danziger, F.A.B., Almeida, M.S.S., and Sills, G.C.(1997), “The significance of the strain path analysis in the interpretation of piezocone dissipation data”, *Geotechnique*, Vol.47, No.5, pp.901~914.
8. Kim, Y. S., Lee, S. R., and Kim, Y. T.(1997), “Application of an Optimization Design Technique for Determining the Coefficient of Consolidation by Using Piezocone Test Data”, *Computers and Geotechnics*, Vol.21, No.4, pp.277~293.
9. Kim, Y. S., Lee, S. R.(2000), “Prediction of long-term pore pressure dissipation behavior by short-term piezocone dissipation test”, *Computers and Geotechnics*, Vol.27, No.4, pp.273~287
10. Levadoux, J. N.(1980), *Pore Pressures in Clays due to Cone Penetration*, Ph. D., Dissertation, M.I.T, p.753(pp.620~624).
11. Randolph, M. F., Wroth, C. P.(1979), “An Analytical Solution for the Consolidation around a Driven Pile”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.3, pp. 217~229.
12. Robertson, P. K., Campanella, R. G.(1983), “Interpretation of

- Cone Penetration Tests, Part II: clay", *Canadian Geotechnical Journal*, 20, pp.734~745.
13. Roy, M., Tremblay, M., Tavenas, F., and Rochelle, P. L.(1982), "Development of pore pressures in quasi-static penetration tests in sensitive clay", *Canadian Geotechnical Journal*, 19, pp.124~138.
 14. Rust, E., Clayton, C. R. I.(1999), "Interpretation of Incomplete Dissipation Data from Piezocone Tests", *Proceedings of Institutions of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, Vol.137, April, pp.97~103.
 15. Schnaid, F., Sills, G. C., Soares, J. M., and Nyirenda, Z.(1997), "Prediction of the coefficient of consolidation from piezocone tests", *Canadian Geotechnical Journal*, 34, pp.315~327.
 16. Tanaka, Y., Sakagami, T.(1989), "Piezocone testing in underconsolidation clay", *Canadian Geotechnical Journal*, 26, pp.563~567.
 17. Teh, C. I., Houlsby, G. T.(1991), "An Analytical study of Cone Penetrometer Test in Clay", *Geotechnique*, Vol.41, No.1, pp.17~34.

(접수일자 2002. 3. 8, 심사완료일 2002. 4. 11)