

딜라토미터를 이용한 수평압밀계수 추정법의 국내 지반 적용성 평가

Evaluation of Applicability of Dilatometer Dissipation Test Method for Estimating Horizontal Coefficient of Consolidation in Korean Soft Deposits

이 승 래* Lee, Seung-Rae
김 영 상** Kim, Young-Sang
성 주 현** Seong, Ju-Hyun

Abstract

This paper evaluates the results of *in-situ* horizontal coefficient of consolidation obtained by flat Dilatometer Test (DMT) to confirm the validity of the methods in Korean clay and silty soils.

Three different procedures developed for the evaluation of c_h from the DMT dissipation test were used; two DMT-C methods [p_2 -log t method and $C-\sqrt{t}$ method] and DMT-A method. The results were compared one another for the two soil type case studies in Korea. The results were also compared with not only the c_h results obtained from piezocone dissipation tests but also those of oedometer and rowecell tests. According to the results, two dissipation methods [p_2 -log t and DMT-A methods] except $C-\sqrt{t}$ method give consistent results, and compared with the piezocone test results for the clay site. However, for the silty soil, it might be concluded that only the p_2 -log t method can be applicable.

요 지

딜라토미터를 이용한 현장 수평압밀계수 추정법의 국내 점토지반 및 실트질 지반에의 적용성을 평가하기 위해 국내 점토지반과 실트지반에 대하여 각각 딜라토미터 관입시험 및 소산시험을 수행하였다. 소산시험 결과로부터 DMT-C법 [p_2 -log t 법과 $C-\sqrt{t}$ 법]과 DMT-A법을 이용하여 수평압밀계수를 추정하여 상호비교하였으며 다른 실험방법에서 얻어진 결과들과도 함께 비교하고 평가하였다. 비교대상으로는 동일지반의 현장 피에조콘 소산시험으로 얻어진 수평압밀계수 및 불교란시료에 대하여 수행된 로셀압밀실험 및 일차원 실내압밀실험 결과가 함께 이용되었다.

연구결과 $C-\sqrt{t}$ 법을 제외한 p_2 -log t 법과 DMT-A법은 국내 점토지반에 대하여 상호일치하는 결과를 줄 뿐 아니라 피에조콘 결과와도 비교적 잘 일치하는 수평 압밀계수를 추정하였으며 다른 결과와 비교할 때 신뢰성 있는 결과를 주었다. 그러나 실트질 지반에 대하여는 p_2 -log t 법만이 적용가능할 것으로 판단된다.

Keywords : Coefficient of consolidation, Dilatometer, Dissipation test, Oedometer, Piezocone, Rowecell

1. 서 론

최근 지반구조물 설계시 요구되는 지반 설계변수들을 현장에서 추정하기 위하여 다양한 종류의 현장실험

이 수행되고 있으며 특히, 연약지반의 압밀계수를 추정하기 위한 다양한 장비들과 해석법이 개발되고 있다. 그중 피에조콘과 딜라토미터를 이용한 연약지반의 특성 규명에 관한 연구는 국내에서도 관심의 대상으로

* 1 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

** 2 정희원, 일본 코토대학 방재연구소 특별연구원, 현대산업개발 기술연구소 과장

** 3 정희원, 한국시설안전관리공단 연구원

그간 여러 연구자들에 의하여 연구된 바 있다(김영상 등, 1998; 동부건설-서울대 공동연구, 1995). 그러나, 딜라토미터를 이용한 수평압밀계수의 추정치는 국내 지반공학자들에게 그다지 널리 알려져 있지 않을 뿐 아니라 현재까지도 거의 수행되고 있지 않다. 그 이유로는 딜라토미터 관입기에는 간극수압을 직접 관측할 수 있는 다공질 필터가 설치되어 있지 않고 피에조콘과 같은 자동기록 장치가 개발되어 있지 않기 때문인 것으로 생각된다.

그럼에도 불구하고 국외 여러 연구자들(Robertson 등, 1988; Marchetti와 Totani, 1989; Totani 등, 1998)은 딜라토미터를 이용한 압밀계수 추정법을 제안하여 적용하고 있으며 그 장점으로 다음과 같은 점들을 들고있다. 우선 딜라토미터는 간극수압 측정을 위한 다공질 필터의 미어짐(smearing)과 막힘현상(clogging)이 없으며 필터의 포화와 관련된 오류(loss of saturation)가 없다. 또한 피에조콘의 경우 5mm 정도의 얇은 다공질 필터를 사용하여 지반 내의 간극수압 소산거동을 관측하는 반면 딜라토미터는 반경 60mm의 강철 멤브레인에 작용하는 압력의 시간에 따른 변화를 측정하기 때문에 관입기 주변의 보다 넓은 영역의 평균적인 압밀특성을 관측할 수 있다(Totani 등, 1998).

딜라토미터를 이용한 기존의 수평압밀계수 추정법은 세가지가 있으나 사용되는 측정값을 기준으로 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 먼저 딜라토미터의 A-B-C 관측값 중에서 C값의 연속적인 관측을 이용하는 DMT-C법으로는 Robertson 등(1988)이 제안한 p_2 -log t 법과 Schmertmann (1988)이 개발한 $C-\sqrt{t}$ 법이 있으며, 다른 방법으로는 Marchetti와 Totani (1989)에 의하여 제안된 A값을 이용하는 DMT-A법이 있다. 이 방법들 중 DMT-C법은 직사각형의 관입기 단면 (95mm×14mm)을 등가의 원형으로 고려하고 피에조콘 소산시험 해석을 위해 개발된 이론 해를 사용하는 경험과 이론적인 면이 함께 복합되어 있으며 DMT-A법은 이탈리아의 정규압밀 및 약간 과압밀된 점토지반을 대상으로 얻어진 순수한 경험법이라 할 수 있다.

Totani 등(1998)은 DMT-C법 중 p_2 -log t 법과 DMT-A법을 이용한 현장 압밀계수를 일차원 실내압밀시험 결과와 비교한 바 있으나, 두 방법간의 정량적인 평가는 이루어지지 않았다.

또한 국내에서도 동부건설-서울대학교 공동연구를 통하여 flat 딜라토미터의 국내 점토지반 적용성에 대한 연구가 이루어진 바 있으나, 압밀계수에 대한 연구는 이

루어지지 않았다. 김영상 등(1998)에 의하여는 DMT-C법과 피에조콘 시험에 의한 압밀계수값이 일부 비교된 바 있다.

본 연구는 기존에 제시된 딜라토미터를 이용한 수평압밀계수의 추정법에 대한 비교 연구로서 국내 점토지반 및 국내 서해안 지반에 널리 분포되어 있는 실트질 지반에의 적용성을 검토하고자 각 방법에 의해 얻어지는 결과들의 정량적인 비교를 시도하였다.

비교 대상으로는 현장지반의 압밀특성을 비교적 신뢰성 있게 평가하는 것으로 알려진 피에조콘을 이용한 수평압밀계수 추정결과를 이용하였다. 또한 신뢰성 있는 수평압밀계수를 직접 얻을 수 있는 것으로 알려진 로셀압밀시험 결과와 일차원 실내압밀시험 결과와도 비교하였다. 연구 대상지반으로 점토지반은 양산 신도시 시험성토 구간, 실트지반으로는 영종도 신공항 2단계 공사구간의 실험결과들이 이용되었다.

2. 딜라토미터 소산시험 해석법에 대한 고찰

2.1 DMT-C법

이 방법은 딜라토미터 관입시험 도중 관입을 멈추고 시간에 따라 A-B-C값의 변화를 관측하고 마지막 관측값인 C값의 변화로부터 수평압밀계수를 추정하는 방법으로서 p_2 -log t 법과 $C-\sqrt{t}$ 법이 있다. 먼저 p_2 -log t 법은 Robertson 등(1988)이 제안하였으며 측정된 C값을 강철 멤브레인의 강성에 대하여 보정하여 얻어진 p_2 값을 초기값과 정수압에 대하여 정규화하고 대수 시간축(log t)에 표현한 뒤 50%의 소산이 이루어진 시간 t_{50} 을 얻은 후 식(1)로부터 수평압밀계수(c_h)를 추정한다.

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

여기서 R은 딜라토미터 blade의 직사각형 단면을 피에조콘의 원통형 콘 단면으로 환산한 등가반경이다.

p_2 -log t 법은 측정된 p_2 값이 관입간극수압(penetration pore pressure)과 일치하고 소산시험의 최종 수렴값은 시험위치의 정수압과 일치한다는 가정에 기초하며, 이러한 가정은 여러 연구자들에 의하여 정규압밀 및 약간 과압밀된 점토에 대해 확인된 바 있다(Robertson 등, 1988).

$C-\sqrt{t}$ 법은 미연방도로국(FHWA) 보고서에서 Schmert-

표 1. p₂-log t법과 C-√t 법의 차이점 비교

항목	p ₂ -log t법	C-√t 법	비고
등가반경 R	20.57mm 관입기의 평면적을 고려한 등가반경	24.5mm R ² =600mm ² 로 제안됨	딜라토미터 관입기 평면적 (95mmX14mm)
이론시간계수 T ₅₀	Torstensson (1977) 실린더형 공동확장 해 T ₅₀ = 1.4 ~ 4	Gupta (1983) 연속 구형공동확장 이론 해 T ₅₀ = 1.1 ~ 2	E/s _u =100~400
T ₅₀ XR ²	6 ~ 17	6.6 ~ 12	
50% 소산시간 t ₅₀	정규화 곡선으로부터 결정	측정값의 최적맞춤 (best fit) 곡선으로부터 결정	

mann(1988)이 제안한 방법으로 관측은 p₂-log t법과 동일하게 수행하나 보정된 p₂값이 아닌 측정값 C를 사용하고 대수시간(log t) 축이 아니라 측정값들을 √t 시간 축에 표현하는 점이 다르다. 또한 C-√t법은 정규화 과정을 거치지 않고 관측값들의 최적 맞춤(best fit)곡선을 전후로 연장하여 초기값 C₀ 및 수렴값 C₁₀₀을 선정하고 얻어진 초기값과 수렴값의 차(C₀-C₁₀₀)를 기준으로 50%의 감소가 이루어진 시간 t₅₀을 결정하여 동일한 식(1)로부터 수평압밀계수를 추정한다.

비록 두 방법이 공통적으로 식(1)을 사용하고 있으나 각 항들의 내용이 상이하므로 그 차이점을 정리하면 표1과 같다.

2.2 DMT-A법

이 방법은 Marchetti와 Totani (1989)에 의해 제안되었으며 DMT-C법과 달리 소산시험 시 시간에 따른 A값만의 변화를 관측하며 대수시간축(log t)에서의 A값의 변곡점 (contraflexure point) 시간 t_{flex}를 결정하고 식 (2)로부터 수평압밀계수를 추정하는 방법이다.

DMT-C법에서 관측되는 C값은 A-B-C값을 읽는 과정에 대한 의존성이 있는 것으로 알려져 있으나(Powell 과 Uglow, 1988) DMT-A법은 시간에 따른 A-B-C값을 연속적으로 읽지 않고 A값만을 읽으므로 이러한 영향이 없는 장점이 있다(Totani 등, 1998).

$$c_{h,OC} \approx \frac{5 \sim 10 \text{ cm}^2}{t_{flex}} \quad (2)$$

여기서, t_{flex} = A-log t곡선에서의 변곡점(contraflexure point) 시간식(2)의 분자 5~10cm²의 범위는 이탈리아의 정규압밀 및 약간 과압밀된 점토지반에 대하여 얻어진

실험결과를 바탕으로 결정된 값이며 Marchetti(1997)는 평균적인 값을 얻기 위하여 다음 식(3)을 사용하였다.

$$c_{h,OC} \approx \frac{7 \text{ cm}^2}{t_{flex}} \quad (3)$$

전술한 바와 같이 식(2)와 (3)은 이탈리아 지반의 실험결과를 바탕으로 제안된 것이며 과압밀 영역의 압밀 계수를 추정하는 것으로 제안되어 있으나 얻어진 과압밀 영역의 압밀계수로부터 정규압밀 영역으로의 보정 계수가 제안되어 있지 않다. 또한 국내 연약지반의 경우, 지표면 등 지층의 특정부분만이 과압밀비 2~3정도의 약한 과압밀이며 대부분의 지층이 정규압밀 상태로 보고되고 있다(이선재, 1997).

본 연구에서는 과압밀영역과 정규압밀영역 간의 보정에서 발생할 수 있는 불확실성을 배제하고 국내지반의 정규압밀 성향을 고려하여 정규압밀과 과압밀을 구분하지 않고 식(3)을 적용하였다. 또한, 필자들의 경험에 의하면 분석과정 중 주요변수인 t_{flex} 결정은 매우 간단하게 보이나 해석자의 의견에 따라 대수시간(log t) 축에서 결정된 값의 차이가 추정된 수평압밀계수 결과에 큰 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단되므로 소산곡선의 변곡점 위치가 명확히 판정되는 시간까지 소산시험 관측이 요구된다.

3. 현장적용 및 비교평가

3.1 양산지역(성주현, 2000)

이 지역은 통일분류법상CL 또는 CH로 분류되는 비교적 균질한 점토층이 발달된 지역으로 액성한계가 43.3~55.4% 범위에, 소성지수는 19.2~30.8 범위이며 비배수 전단 강도는 0.53~1.3kg/cm²이다. 삼축실험에서 얻어진 지반의 강성지수(E/s_u=3G/s_u)는 70~110 정도에 분포하고 있어 소산해석을 위한 지반의 강성지수는 E/s_u=100을 적용하였다. 또한 딜라토미터 관입시험의 분석결과, 지표면 2m이하에서는 지반의 과압밀비가 1~3 정도에 분포하고 있어 대상지반이 정규압밀 및 약간 과압밀된 상태에 있음을 알 수 있었다.

딜라토미터 관입시험은 세 지점에서 수행되었으며 한 지점의 관입에서 깊이가 서로 다른 두 지점에서 소산 시험이 수행되어 DMT-C와 DMT-A법 각 6회씩 총 12회

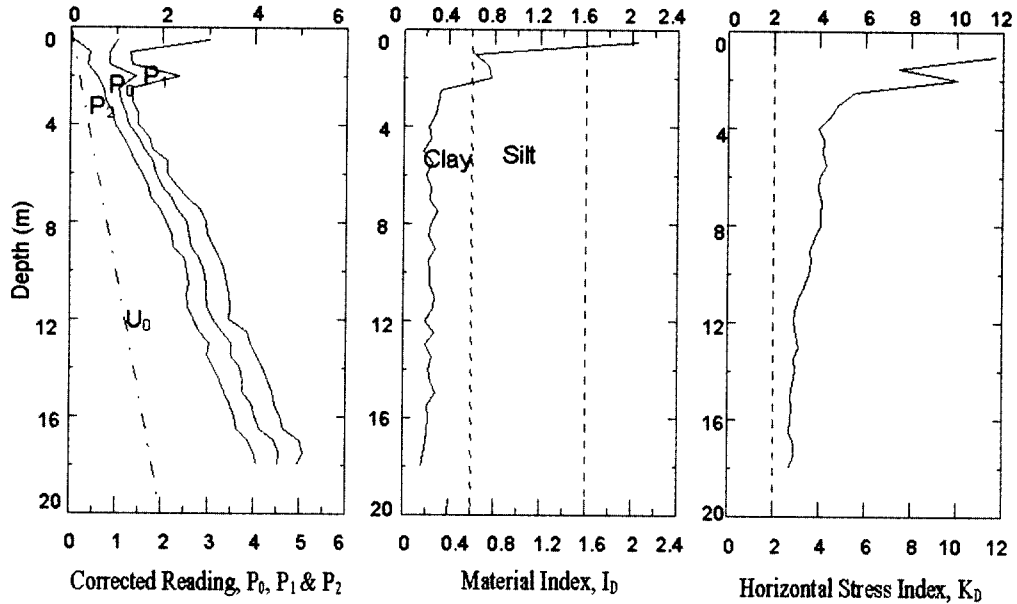


그림 1. 양산지역의 대표적인 dilatometer 관입시험 결과

의 소산시험이 수행되었다. 그리고 동일 현장의 인접지점에서 수행된 네 지점의 피에조콘 소산시험 결과로부터 얻어진 수평압밀계수와 불교란 시료에 대해 수행된 일차원 실내압밀시험 결과들이 함께 비교되었다.

양산지역에서 얻어진 대표적인 관입시험 결과가 그림 1에 나타나 있다. Marchetti(1980)가 제안한 재료지수(material index, I_D)를 바탕으로 한 흙분류가 그림에 점선으로 표시된 바와 같이 지하 2m이하에서는 비교적 균질한 점토층이 존재하고 있음을 알 수 있다. 그림 2에는 같은 대수시간축($\log t$)을 사용하는 p_2 - $\log t$ 법과 DMT-A법의 소산곡선이 모두 비교되어 있다. $C-\sqrt{t}$ 법은 p_2 - $\log t$ 법과 동일한 측정결과를 사용하나 표현방법 만이 상이하므로 생략하였다(성주현, 2000 참조). 양산지반에 대한 소산곡선은 점토지반에서 얻어지는 전형적인 S곡선을 보이고 있으며 p_2 값의 최종 수렴값들은 지표면 지하 수위를 가정하여 산정된 정수압에 거의 수렴하는 결과를 주고 있어 수행된 소산시험이 매우 신뢰성 있음을 알 수 있다.

DMT-C 법들의 소산시험 해석을 위한 이론시간계수 T_{50} 은 표 1에 언급되어 있는 강성지수에 따른 각 이론해의 범위에서 지반의 강성지수 $E/s_u = 100$ 에 대한 해를 각각 사용하였으며 DMT-A법은 식(3)을 사용하였고 피에조콘은 동일한 강성지수에 대한 Torstensson(1975)의 해를 사용하였다. 그림 3은 각 소산곡선을 분석하여 얻어진 수평압밀계수들로, dilatometer p_2 - $\log t$ 법에서 얻어진 수평압밀계수를 x축으로 하여 도시되어 있으며,

피에조콘 소산시험에서 얻어진 수평압밀계수와 일차원 실내압밀시험 결과가 함께 비교되어 있다.

그림 3에 보여지는 dilatometer 수평압밀계수 결과들은 p_2 - $\log t$ 법과 DMT-A법의 경우 그 상관관계가 1:1선상에 있을 정도로 매우 잘 일치하는 결과를 주고 있다. 현장에서 얻어진 피에조콘 수평압밀계수 값과 비교하면 일치하거나 약간 작은 경향이 있으며, 이러한 경향은 dilatometer는 관입 중 발생하는 지반의 변형이 작아 과잉간극수압 크기가 작고 발생한 과잉간극수압이 평면 변형 상태로 소산되므로 피에조콘과 비교할 때 얻어지는 수평압밀계수가 작은 것으로 알려져 있는 것과 일치한다(Robertson 등, 1988). 또한, 실내 일차원압밀시험 결과 얻어진 연직압밀계수 C_v 에 $C_h/C_v = 3$ 의 관계(김영상 등, 1998)를 적용하여 얻은 수평압밀계수와도 비교적 잘 일치하는 경향이 있음을 알 수 있어 국내 점토지반에서 수행된 dilatometer 소산시험의 p_2 - $\log t$ 법과 DMT-A법은 매우 신뢰성 있게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 $C-\sqrt{t}$ 법에서 얻어진 결과들 중 점선 원으로 표시된 일부 결과들은 같은 지점의 다른 dilatometer 소산시험과 비교하여 일관적으로 약 3배가량 큰 값을 주고 있다.

Totani 등(1998)은 논문을 통해 $t_{50}(p_2-\log t) \approx 2t_{flex}$ (DMT-A)라는 관점(즉, DMT-A 소산시험 시 소요되는 소산시간이 짧다는 것)을 가지고 $t_{flex}(DMT-A)-t_{50}(p_2-\log t)$ 의 관계를 얻고자 하였으나 뚜렷한 결론에는 도달하지 못하였다. 본 연구에서도 이러한 가능성에 대하여 검토

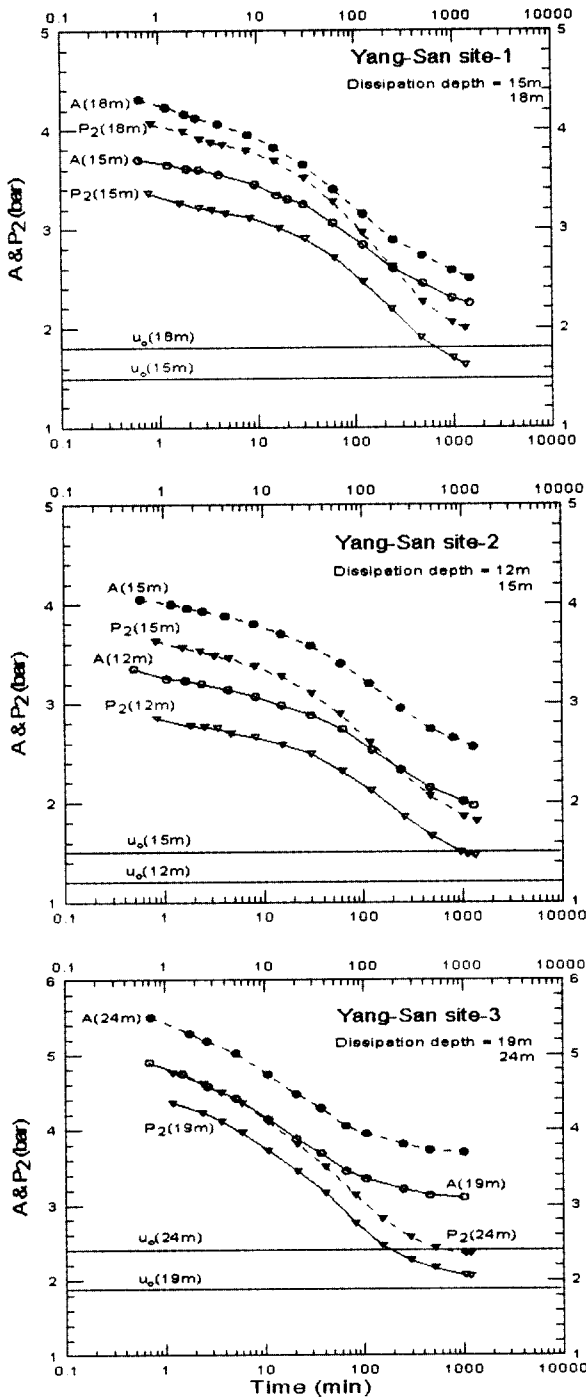


그림 2. DMT-A법과 p₂-log t법의 소산곡선 비교

표 2. 소산곡선 해석에 요구되는 정규화된 소산시간 t₅₀와 t_{flex} 비교*

Point	t ₅₀ (p ₂ -log t)	t _{flex} (DMT-A)	t ₅₀ (C-√t)
YS-1(15m)	1	1.08	0.55
YS-1(18m)	1	1.43	0.68
YS-2(12m)	1	0.98	0.51
YS-2(15m)	1	2.05	0.63
YS-3(19m)	1	1.11	0.45
YS-3(24m)	1	1.25	0.58

*t₅₀ (p₂-log t) 으로 정규화 된 값들임

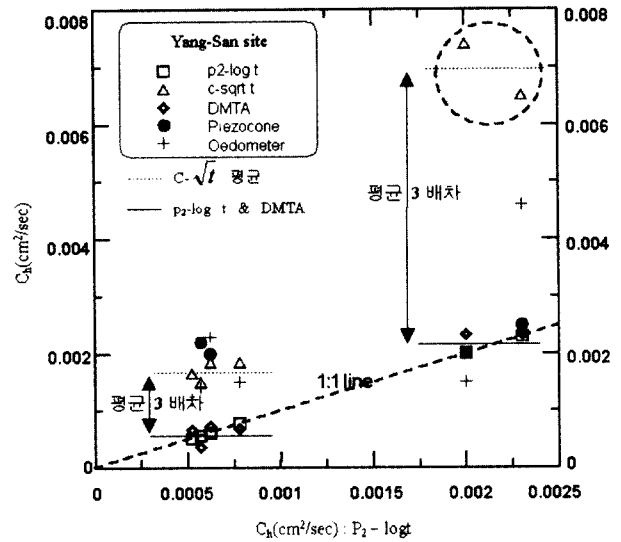


그림 3. 다양한 방법으로 얻어진 수평압밀계수의 비교

하였으나, 표 2에 보이는 바와 같이 p₂-log t법의 t₅₀로 정규화된 t_{flex} 들은 Totani 등(1998)의 예상과 달리 오히려 2배까지 큰 경우도 있어 DMT-A법이 다른 방법에 비하여 소산시간을 단축하는 것으로는 보여지지는 않는다. 또한, C-√t법의 t₅₀은 p₂-log t법의 t₅₀로 정규화될 경우 평균 1/2정도의 소산시간이 소요됨을 알 수 있다.

C-√t법에서는 디라토미터 관입기에 위치한 강철 멤브레인의 위치효과를 고려하기 위하여 Gupta(1983)의 해에서 선단부로부터 반경 4배 뒤의 이론해를 사용하였다. 그러나 필자들의 판단으로 볼 때 초기값 및 수렴값의 선정 시 최적맞춤(best fit) 곡선을 이용하므로 해석자에 따른 초기값과 수렴값의 변동이 있을 수 있으며 이는 50% 소산시간 t₅₀에 영향을 준다. 또한 실제 관입기의 면적 (95mm×14mm)보다 크게 설정되어 있는 등가반경 (R²=600mm²)에 대한 정확한 배경이 설명되어 있지 않다는 불명확한 점이 있다. 이러한 점들은 그림 3에 나타난 바와 같이 C-√t법으로부터 얻어진 결과가 다른 방법들과 비교하여 3배가량 큰 값을 주는 것의 원인의 하나일 것으로 생각된다. 이에 대해서 표 2의 소산시간에

표 3. C-√t 법과 p₂-log t법으로 부터 예상되는 수평압밀계수 비

항목	C-√t 법	p ₂ -log t법
T ₅₀ R ²	6.6~12	6~17
t ₅₀ *	0.5	1
수평압밀계수 (ch= T ₅₀ R ² / t ₅₀)	13.2~24	6~17
수평압밀계수 비 C _h (C-√t)/C _h (p ₂ -log t)	2.2~1.4 (E/s _w = 100~400)	

*양산지역에 대해 표2에서 얻어진 t₅₀(C-√t)/t₅₀(p₂-log t)의 비율임

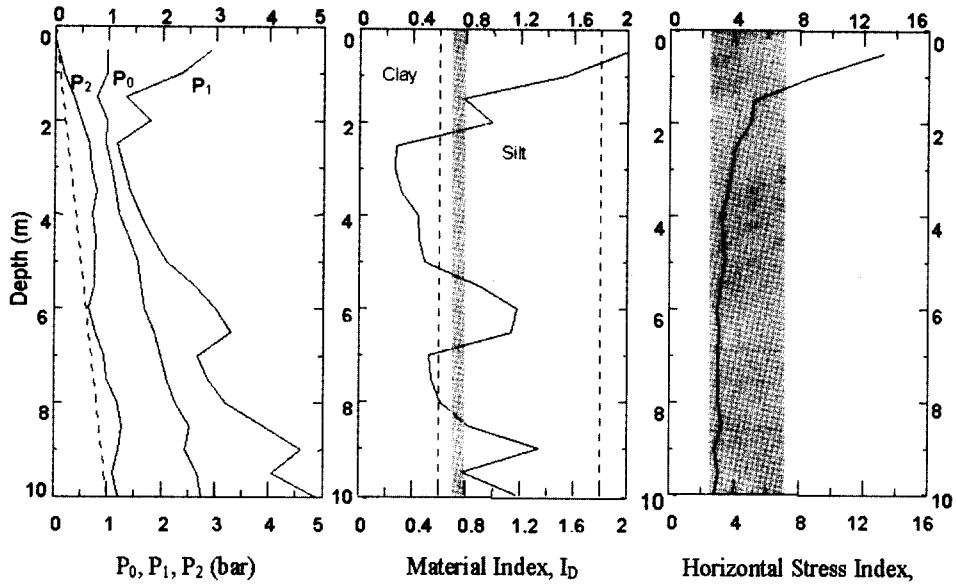


그림 4. 영종도 지역(2)의 대표적인 dilatometer 관입시험 결과

관한 경향과 표1의 $C-\sqrt{t}$ 법과 $p_2-\log t$ 법의 이론 해들을 바탕으로 그림 3에서 보여진 두 방법들의 차이에 대한 원인을 표 3에 개략적으로 예상하여 보았다.

표 3의 결과에 의하면 강성지수가 증가할수록 두 방법의 차이가 줄어들으나 본 연구 대상지반과 같이 낮은 강성지수($E/s_u=100$)의 경우, $C-\sqrt{t}$ 법이 $p_2-\log t$ 법보다 2배 이상 큰 수평압밀계수를 추정할 수 있는 가능성이 있음을 알 수 있다. 따라서 지반의 강성지수가 크지 않은 국내지반에서는 국내지반의 지역적 특성과 함께 $C-\sqrt{t}$ 법 자체의 가정과 해석과정이 영향을 미쳐 다른 해석 방법에 비해 수평압밀계수를 과대평가하는 것으로 판단된다.

3.2 영종도 지역(성주현, 2000)

두번째 대상지역은 영종도 국제공항 2단계 시험구간으로 통일분류법상 소성질 실트ML과 점토CL로 이루어진 지역으로 기본 물성시험 결과 액성한계는 28.4~31.9%이고, 소성지수는 5.4~10.4로 전체적으로 실트성분이 많은 지반이다. 비배수 전단강도는 평균적으로 약 0.4kg/cm^2 의 분포를 보이고 있으며 지반의 강성지수($E/s_u=3G/s_u$)는 평균적으로 약 100으로 조사되었다. dilatometer 관입 시험은 여섯 지점에서 10m 깊이까지 수행 되었으며 그림 4에 보인 바와 같이 재료지수 I_d 를 기준으로 실트로 분류되는 10m 깊이에서 DMT-A와 DMT-C 소산시험이 각각 6회씩 수행되었다.

비교를 위해서 인접한 위치의 같은 깊이에서 6회의 피에조콘 소산시험이 수행되었으며 불교란 시료에 대한 로셀압밀시험, 삼축시험 및 일차원 압밀시험도 수행 되었다.

전술한 바와 같이 dilatometer 소산시험 해석법들은 기본적으로 정규압밀 및 약간 과압밀 된 점토에 대해서는 비교적 확실히 검증되었으나 국내 서해안 지반과 같이 실트질이 많이 포함된 지반에 대해서는 보고된 사례가 드물어 이러한 지반에 대한 적용성 검토가 필요하다. 이 지역에서 수행된 관입시험의 소산곡선 중 $p_2-\log t$ 결과가 그림 5에 나타나 있다.

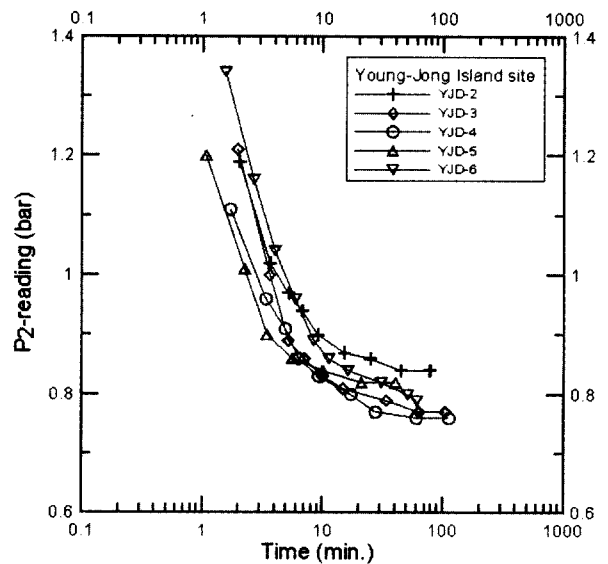


그림 5. $p_2-\log t$ 소산시험 결과 비교

그림 5에 보인 바와 같이 본 지반의 소산시험 결과는 대수시간축 상의 p_2 값이 양산지반과 같은 점토지반과 비교할 때 발생하는 관입간극수압의 크기가 작고, 비교적 빠른 투수특성으로 인해 S형의 소산곡선 형태를 보이지 않는 것으로 판단된다(그림 2 비교). 이 소산곡선들은 관측된 지하수위면으로 부터 추정된 정수압을 기준으로 초기 과잉간극수압에 대해서 정규화되었으며 이로부터 50% 소산도 도달시간 t_{50} 이 산정되었다.

$C-\sqrt{t}$ 법에 대한 해석은 Schmertmann(1988)이 제안한 방법에 따라 해석되었다.

각 방법들의 소산시험을 위한 이론시간계수 T_{50} 은 삼축실험 결과 얻어진 지반의 강성지수 $E/s_u=100$ 에 해당하는 이론 해를 적용하였으며 피에조콘의 경우도 동일한 강성지수에 대한 Torstensson(1975)의 해를 사용하였다. 각 방법들을 이용하여 얻어진 수평압밀계수가 그림 6에 비교되어 있으며 역시 x축은 $p_2-\log t$ 법으로부터 얻어진 수평압밀계수이다.

우선 일차원 실내압밀시험 결과와 로셀 압밀시험 결과가 장소에 따른 큰 변화를 보이지 않는 것을 볼 수 있다. 그러나 딜라토미터 시험 중 $p_2-\log t$ 법과 피에조콘 실험 결과 역시 수평압밀계수가 $0.023\sim 0.041 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 의 좁은 범위 내에 분포하고 있어 실트질 지반에서의 불교란 시료채취 시 발생할 수 있는 최소한의 교란효과를 감안할 때 실내시험 결과들이 비교적 좋은 경향성을 보이는 것으로 평가 할 수 있다. 한편 $p_2-\log t$ 법에 의해 추정된 수평압밀계수는 그림 3(점토지반의 경우)에서 DMT-A 법과 일치하는 경향을 보인 것과 유사하게 실트

질 지반에서는 피에조콘 시험으로부터 얻어진 결과와 1:1선 위에 있을 정도로 매우 좋은 경향을 보이고 있어 딜라토미터 소산시험 중 $p_2-\log t$ 법만이 국내 점토지반 뿐 아니라 실트질 지반에도 그 적용성이 뛰어난 것으로 판단된다.

본 연구 대상지반에서 수행된 DMT-A법은 소산시험 중 압력의 읽음 간격, 가압속도 등을 변화시키며 시험을 수행하였으나 그 결과가 각각의 변화요인에 따라 변하여 일관성이 없거나 소산곡선에 변곡점(contra flexure)이 없는 직선형으로 얻어지는 등 해석방법의 적용이 불가능해 결과에서 제외하였다. 이러한 결과는 DMT-A법을 제안한 Marchetti와 Totani(1989)의 논문에 기술된 non-S 곡선으로 분류된 부분에서도 동일하게 찾아볼 수 있으며, Marchetti와 Totani는 그 원인으로서 지반의 이차압축성, 유기물, 투수특성 등을 주장하였다. 그러나 Marchetti와 Totani가 소산시험을 수행한 지반의 재료특성이 $I_D=0.7\sim 0.8$, $K_D=2.3\sim 7.3$ 으로 Marchetti(1980)의 흙분류 기준에 의하면 그림 4의 음영표시된 부분과 같이 본 연구지반과 유사한 실트질 지반임을 알 수 있다. 이를 바탕으로 볼 때 순수 경험법인 DMT-A법을 제안될 당시 비교대상이 아니었던 실트질 지반에 적용하기 위해서는 보다 많은 자료의 축적과 보정이 요구될 것으로 판단된다.

그림 6의 결과는 점선 원안의 $C-\sqrt{t}$ 법으로 얻어진 수평압밀계수를 제외하면 로셀 압밀시험이 가장 큰 값을 주며 그 다음으로 피에조콘과 딜라토미터, 마지막으로 일차원 실내압밀시험이 가장 작은 값을 주는 것으로 나타났다. 점선 원안의 $C-\sqrt{t}$ 법으로 얻어진 수평압밀계수들의 범위를 그림에 표시된 바와 같이 $p_2-\log t$ 법과 피에조콘 결과의 범위와 비교할 때 약 3배 정도 큰 값을 주는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 영종도 지역에 대하여 얻어진 두 방법 간 소산도달 시간의 비율 $t_{50}(C-\sqrt{t})/t_{50}(p_2-\log t)$ 이 평균적으로 0.45정도이고(양산의 경우는 0.5임) 두지역에 적용된 강성지수 값이 동일($E/s_u=100$)한 점을 고려할 때 그림 3의 양산지역 점토지반에서 나타난 현상과 동일하게 국내 연약지반의 낮은 강성지수 값과 $C-\sqrt{t}$ 법의 가정 및 해석법의 복합적인 원인에 의한 것으로 판단된다.

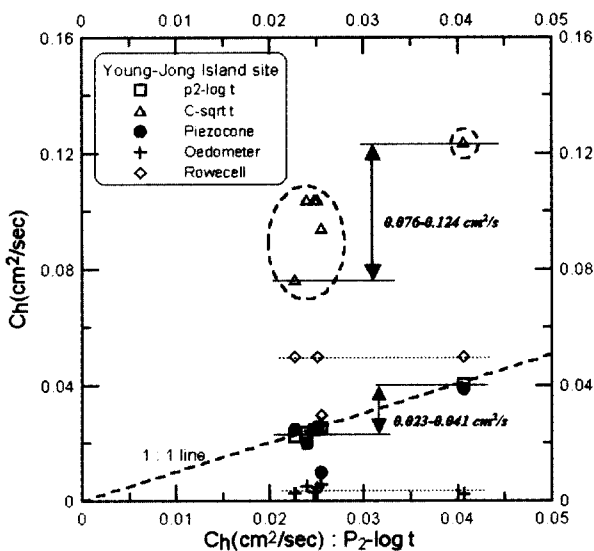


그림 6. 다양한 방법으로 얻어진 수평압밀계수 비교

4. 결 론

- (1) p_2 -log t 법은 국내 점토지반에 적용한 결과 DMT-A 법 뿐 아니라 피에조콘 소산시험으로부터 추정된 현장 수평압밀계수와 매우 일치하는 결과를 주고 있어 국내 점토지반에의 적용성이 뛰어난 것으로 평가되었다. 또한 실트질 지반의 경우에도 일관성 있게 피에조콘 시험결과와 잘 일치하는 결과를 주어 국내 실트질 지반에서 수행되는 딜라토미터 소산시험 해석에도 유용할 것으로 판단된다.
- (2) $C-\sqrt{t}$ 법은 국내 점토지반과 실트지반의 낮은 강성지수에 대해서 다른 딜라토미터 해석법과 비교해 수평압밀계수를 상대적으로 과대평가하는 것으로 나타났다. 그 원인으로는 국내지반의 특성(특히, 강성지수)과 함께 $C-\sqrt{t}$ 법의 등가반경에 대한 가정사항, 초기값 및 수렴값 그리고 소산시간 t_{50} 에 대한 해석법이 영향을 주는 것으로 나타났다.
- (3) DMT-A 법은 이탈리아 점토지반에 대해서 얻어진 경험식임에도 불구하고 정규압밀 또는 약간 과압밀된 국내 점토지반에 대해서는 비교적 잘 적용될 것으로 판단되나 실트질 지반에 적용하기 위해서는 보다 많은 자료의 축적과 보정이 요구된다. 또한 DMT-A 법이 다른 딜라토미터 소산시험보다 소산시간이 짧다는 의견 즉, $t_{50}(\text{DMT-C}) \approx 2t_{\text{flex}}(\text{DMT-A})$ 이라는 경향은 확인되지 않았으며 오히려 p_2 -log t 법의 경우보다 크거나 같은 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김영상, 이승래, 김동수 (1998) “피에조콘과 딜라토미터 시험을 이용한 연약지반 현장특성 비교”, *한국지반공학회 논문집*, 제14권 6호, pp.45-56.
2. 동부건설(주), 서울대학교 공동연구보고서 (1995), *Flat Dilatometer 현장시험을 통한 점토지반의 공학적 성질추정에 관한 연구*.
3. 성주현 (2000), *Flat Dilatometer를 이용한 국내 해안점토 지반의 수평압밀계수 산정에 관한 연구*, 석사학위논문, 한국과학기술원, 63p.
4. 이선재 (1997), *피에조콘을 이용한 국내지반의 공학적 특성 연구*, 박사학위논문, 서울대학교, 157p.
5. 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
6. Marchetti, S. (1980), “In Situ Test by Flat Dilatometer”, *J. of Geotech. Engineering Div., ASCE*, Vol.106, pp.299-321.
7. Marchetti, S. & Totani, G. (1989), “ C_h Evaluations from DMT-A Dissipation Curves”, *XII ICSMFE*, pp.281-286.
8. Powell, J.J.M. & Uglow, I.M. (1988), “Marchetti Dilatometer Testing in UK Soils”, *1st ISOPT*, pp.555-562.
9. Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., & By, T. (1988), “Excess Pore Pressures and the Flat Dilatometer Test”, *1st ISOPT*, pp.567-576.
10. 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 Test Methods and Data Reduction.
11. Torstensson, B.A. (1975), “The Pore Pressure Sounding Equipment”, *ASCE Specialty Conference on In-situ Measurement of Soil Properties*, Raleigh, NC, pp.48-55.
12. Totani, G., Calabrese, M., & Monaco, P. (1998), “In Situ Determination of C_h by Flat Dilatometer (DMT)”, *Proceedings of First International Conference on Site Characterization*, Atlanta, 19~22 April, Vol.2, pp.883-888.

(접수일자 2001. 1. 26)