

# 피에조 콘 관입시험결과에 따른 구속탄성계수, 압밀계수 산정에 관한 연구

## The Estimation of the Constrained Modulus and the Coefficient of Consolidation from the Piezocone Penetration Test Data

이 기 세<sup>†</sup> · 구 남 실<sup>1)</sup> · 한 운 우<sup>2)</sup>

Lee, Kise · Ku, Namshil · Han, Woonwoo

**ABSTRACT :** Using the results of the Piezocone Penetration Test (PCPT) which were executed at the Yangsan-Mulgum site, the applicability of the interpretation methods for estimating the coefficient of consolidation ( $C_v$ ) of soft clay was evaluated. At the same time, laboratory soil tests using the total of 172 undisturbed soft clay samples from the 44 regions of the Yangsan-Mulgum site were performed to study the differency in the coefficient of consolidation ( $C_v$ ) compared to the results of PCPT. The calculated constrained modulus ( $M_c$ ) and coefficient of consolidation ( $C_v$ ) using the results of consolidation laboratory tests which are based upon the consolidation theory of Terzaghi were compared with the predicted constrained modulus ( $M_p$ ) and coefficient of consolidation ( $C_{v-M_p}$ ) from the PCPT. The relationship between the predicted constrained modulus ( $M_p$ ) and the calculated constrained modulus ( $M_c$ ) were showed good correlation. The  $M_p$  by the Jones & Rust method were showed mostly similar to the calculated constrained modulus ( $M_c$ ). The relationship between the coefficient of consolidation ( $C_v$ ) obtained from the consolidation tests and the calculated coefficient of consolidation ( $C_{v-M_p}$ ) were showed a linear relationship. The results of the calculated coefficient of consolidation ( $C_{v-M_p}$ ) were about 54% of the value of the coefficient of consolidation ( $C_v$ ) obtained from the consolidation tests.

**Keywords :** Piezocone, CPT, Coefficient of consolidation, Constrained modulus

**요 지 :** 본 연구는 연약지반의 압밀특성을 나타내는 정수중 하나인 압밀계수( $C_v$ )를 결정하는데 있어 피에조 콘 관입시험(PCPT) 결과의 적용성을 평가하고자 양산-물금지역의 연약지반에서 실시된 피에조 콘 관입시험 자료와 같은 지역 44개소에서 시추한 심도별로 총 172개 자연시료를 사용하여 기본적인 실내토질시험(압밀시험, Atterberg 한계시험, 입도분포시험 등)을 실시하였다. 각 시료의 압밀시험결과를 사용하여 Terzaghi(1943) 압밀 이론으로 구한 구속탄성계수( $M$ ) 및 압밀계수( $C_v$ )를 각 시료에 상응하는 현장 흙에서 실시한 피에조 콘 관입시험(PCPT) 결과로 구한 구속탄성계수 및 압밀계수와 비교·분석하였다. 압밀시험으로 구한 구속탄성계수는 피에조 콘 관입시험으로 구한 구속탄성계수와 높은 상관성을 보였고 Jones & Rust(1995)가 제안한 경험식으로 계산된 구속탄성계수가 본 연구에서 피에조 콘 관입시험으로 구한 구속탄성계수와 유사한 값을 보였다. 압밀시험으로 구한 압밀계수와 콘 관입시험 결과로 구한 압밀계수는 직선적 관계를 보였고 콘 관입시험 결과로 구한 압밀계수 값은 압밀시험으로 구한 압밀계수 값의 54% 정도로 나타났다.

**주요어 :** 피에조콘, 압밀계수, CPT, PCPT, 구속탄성계수, 압밀

## 1. 서 론

현장 지반조사는 측정방법에 따라 그 종류가 매우 다양하다. 그 중 대표적으로 많이 사용되는 방법으로는 표준관입시험(Standard Penetration Test)과 콘 관입시험(Cone Penetration Test)이다. 표준관입시험의 경우 시험방법이 간편하고 흐트러진 시료를 쉽게 채취 할 수 있어 콘 관입시험보다 현장에서 많이 사용되고 있으나, 장비의 상태 및 시험자의 숙련도에 따라 시험자료의 신뢰성이 좌우되며 깊이에 따른 연속적인 지반의 특성자료를 구할 수 없다. 또한 거의

모든 작업이 인력으로 이루어지기 때문에 시험시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 이런 단점을 줄이고 정확하고 신속한 지반조사를 위해 기계적 콘 관입시험(Mechanical Cone Penetration Test)을 보완하여 시험 중에 하중과 수압을 연속적으로 측정하기 위해 전자식 정밀측성센서를 장치한 피에조 콘 관입시험(Piezocone Penetration Tests, PCPT)에 관한 연구와 개발이 활발하게 진행되고 있으며, 이런 연구 결과(김영상, 2002; 박용원 등, 2003; 박찬국 등, 2002; 이강운 등, 2003; 임형덕 등, 2003; 장인성 등, 2001, 2002)에 따라 시험의 신뢰성이 높아져서 여러 현장에서 실제 많이

† 정희원, 대전대학교 토목공학과 교수(E-mail : kiselee@dju.ac.kr)

1) 비회원, 한국토지공사 대전·충남지역본부

2) 정희원, 대전대학교 토목공학과 교수

사용되는 추세이다.

콘 저항값( $q_c$ ), 마찰 저항값( $f_s$ ), 간극수압( $u$ )을 측정할 수 있는 피에조 콘 관입시험의 신속성과 반복성 및 경제성 등의 장점 때문에 최근 이 시험기계의 사용이 증가하고 이에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있다. 특히, 연약지반을 개량하는데 적용된 각각의 공법에 의한 원지반의 개량 효과를 판단하는데 주로 피에조 콘 관입시험을 적용하여 원지반의 강도 증가 여부를 측정하거나 압밀도를 평가하여 개량효과를 판단하는데 비교적 정확하고 신뢰할 수 있는 시험방법으로 평가되고 있다.

이에 본 연구에서는 양산-물금지역의 피에조 콘 관입시험자료(토지공사, 1997, 1998, 1999)를 이용하여 연약지반의 압밀특성 중 관입시험에서 측정된 콘 선단 저항값( $q_c$ ), 마찰저항값( $f_s$ ), 간극수압( $u$ )과 상관관계를 보이는 구속탄성계수(Constrained Modulus,  $M$ ) 및 압밀계수(Coefficient of Consolidation,  $C_v$ )를 회기분석하여 상관관계식을 구하였다. 또한 상관관계식으로 구한 구속탄성계수 및 압밀계수를 Terzaghi(1943)의 압밀이론에 따른 압밀시험 결과로 구한 구속탄성계수 및 압밀계수와 비교하여 피에조 콘 관입시험결과의 압밀특성 산정에 대한 적용성에 대해 논거하였다.

## 2. 피에조 콘 관입시험

본 연구에 사용된 피에조 콘 관입시험 장비는 전기식 콘 장치로서 그 구성은 그림 1에서 보듯이 콘 저항을 측정하는 콘의 선단부와 간극수압을 측정하기 위해 사용되는 다

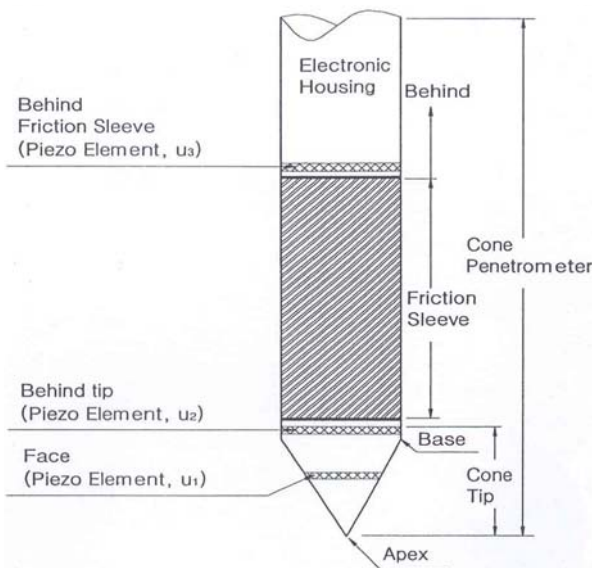


그림 1. 피에조 콘의 간극수압( $u_2$ ) 측정위치

공질 필터와 마찰저항을 측정하는 마찰관(friction sleeve)부로 구성된다.

그림에서 같이 간극수압은 일반적으로 원추면( $u_1$ ), 원추 바로 뒤( $u_2$ ), 그리고 마찰 슬리브 뒤( $u_3$ )에서 측정된다. 그러나 원추선단이나 원추면에 위치한 경우 관입시 필터 손상이나 필터자체의 압축현상으로 간극수압의 측정시 오차 발생 가능성이 크기 때문에 콘 바로 뒤에 위치한 곳에서 측정되는 간극수압( $u_2$ ) 측정방법이 표준형으로 많이 채택되고 있으며 본 연구에서도 표준형 콘을 사용하여 간극수압( $u_2$ )을 측정한 자료가 사용되었다. 또한 시험에는 선단각이 60°이며 콘의 단면적이 10cm<sup>2</sup>이고 마찰관(friction sleeve)의 표면적이 150cm<sup>2</sup>인 피에조 콘을 사용하여 관입속도 2cm/sec ± 0.5cm/sec로 시험을 진행하였다.

## 3. 구속탄성계수 및 압밀계수 산정방법

### 3.1 Terzaghi 압밀이론

상재하중재하에 따라 연약지반에서 시간이 지남에 따라 발생하는 침하량을 계산하기 위해선 압밀계수의 산정이 필수적이다. Terzaghi(1943)의 1차 압밀이론에 의하면 압밀계수는 다음의 식 (1)을 사용하여 구할 수 있으며 식 (1)에 포함된 구속탄성계수는 식 (2)를 사용하여 구할 수 있다.

$$C_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} = \frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{1+e_0}{a_v} = k \frac{M}{\gamma_w} \quad (1)$$

$$M = \frac{1}{m_v} = \frac{2.3(1+e)\sigma'_v}{C_c} \quad (2)$$

여기서,  $C_v$  : 압밀계수(coefficient of consolidation)

$k$  : 투수계수(coefficient of permeability)

$M$  : 구속탄성계수(constrained modulus)

$\gamma_w$  : 물의 단위중량(unit weight of water)

$m_v$  : 체적변화계수(coefficient of volume change)

$e$  : 간극비(void ratio)

$a_v$  : 압축계수(coefficient of compressibility)

$\sigma'_v$  : 유효응력(effective stress)

$C_c$  : 압축지수(compression index)

일반적으로 연약점토의 압밀계수( $C_v$ ) 결정은 흐트러지지 않은 시료를 사용한 압밀시험결과인 시간과 다이얼계이지 값을  $\sqrt{t}$  법 또는  $\log t$  법으로 구한다. 피에조 콘 관입시험의 경우 콘 관입 저항( $q_c$ ), 주변 마찰력( $f_s$ ), 간극수압을 직접적으로 구할 수 있으며 압밀계수는 콘 관입시험으로 얻은 콘 관입저항 값을 사용하여 구속탄성계수를 구한

후 이 값을 식 (1)에 적용하여 구할 수 있다.

### 3.2 경험적 방법

피에조 콘 관입시험을 통하여 압밀계수를 산정하기 위한 구속탄성계수에 관한 연구는 여러 연구자들에 의해 제안되어 왔다(Johnes et al, 1995; Kulhawy et al 1990; Sanglerat, 1972; Senneset et al, 1988). 연구결과 구속탄성계수는 피에조 콘의 콘 저항값과 사이에 식 (3)과 같은 직선적 관계가 있는 것으로 확인하였다.

$$M = \alpha \cdot q_c \quad (3)$$

여기서,  $q_c$  : 콘 선단 저항값  
 $\alpha$  : 상수

대표적인 구속탄성계수와 피에조 콘의 콘 저항값 사이 관계에 대한 연구결과들은 다음과 같다.

#### 3.2.1 Sanglerat의 방법

Sanglerat(1972)는 피에조 콘 관입시험으로 측정된 지반 심도별 콘 저항값과 구속탄성계수 사이의 관계를 표 1에 서와 같이 흙의 종류와 콘 저항값의 범위에 따른  $\alpha$ 값의 범위를 포괄적으로 제시하였다.

#### 3.2.2 Jones & Rust의 방법

Jones & Rust(1995)는 남아프리카 층적 점성토를 대상으로 PCPT를 실시한 결과 구속탄성계수와 콘 저항값 사이의 관계를 설명하는 상수( $\alpha$ )로 2.75±0.55의 값을 제시하였다.

#### 3.2.3 Senneset et al.의 방법

Senneset et al.(1988)은 실트를 대상으로 PCPT를 실시하여 구속탄성계수와 수정 콘 선단 저항값( $q_t$ )과의 상관관

계를 식 (4)와 식 (5)와 같이 제시하였다.

$$q_t < 2.5\text{MPa} \text{ 인 경우 } M = 2q_t \quad (4)$$

$$2.5 < q_t < 5\text{MPa} \text{ 인 경우 } M = 4q_t - 5 \quad (5)$$

단,  $q_t$ 는 수정 콘 선단 저항력이며 식 (6)과 같다.

$$q_t = q_c + (1 - a) \cdot u_2 \quad (6)$$

여기서,  $a$  : 콘 유효면적비  $\left( a = \frac{A_n}{A_c} \right)$

$A_n$  : 로드셀의 횡단면적

$A_c$  : 콘의 설계단면적

또한, 지반이 과압밀상태인 경우와 정규압밀상태인 경우에 대하여 구속탄성계수와 수정 콘 선단 저항값과의 관계를 각각 식 (7)과 식 (8)과 같이 제안하였다.

과압밀 상태인 경우

$$M = \alpha_p \cdot q_n = \alpha_p \cdot (q_t - \sigma_v) \quad (7)$$

여기서,  $\alpha_p$  : 5~15사이의 값

$\sigma_v$  : 연직전응력

$q_n$  : 순 콘 선단저항력

정규압밀 상태인 경우

$$M = \alpha_n \cdot q_n = \alpha_n \cdot (q_t - \sigma_{vo}) \quad (8)$$

여기서,  $\alpha_n$  : 4~8사이의 값(대부분 점성토인 경우)

#### 3.2.4 Kulhawy & Mayne의 방법

Kulhawy & Mayne(1990)은 다양한 종류의 점성토를 대상으로 피에조 콘 관입시험을 실시하여 구속탄성계수와 순 콘 선단 저항값( $q_n = q_t - \sigma_{vo}$ ) 사이의 경험적인 관계식

표 1. 점토질 지반에 대한 구속탄성계수의 산정

$q_c$ (MPa)	$M = 1/m_v = \alpha \cdot q_c$ (MPa)	
$q_c < 0.7$	$3 < \alpha < 8$	Clay of low plasticity(CL)
$0.7 < q_c < 2.0$	$2 < \alpha < 5$	
$q_c > 2.0$	$1 < \alpha < 2.5$	
$q_c > 2.0$	$3 < \alpha < 6$	Silts of low plasticity(ML)
$q_c < 2.0$	$1 < \alpha < 3$	
$q_c < 2.0$	$2 < \alpha < 6$	High plastic silts and Clays(MH, CH)
$q_c < 1.2$	$2 < \alpha < 8$	Organic silts(OL)
$q_c < 0.7$	$1.5 < \alpha < 4$	Peat and organic clays(Pi, OH)
$50 < w < 100$		
$100 < w < 200$		
$w > 200$		
$w = \text{water content}$	$0.4 < \alpha < 1.0$	

인 식 (9)를 제안했다.

$$M = 8.25 \cdot (q_t - \sigma_v) \quad (9)$$

## 4. 구속탄성계수, 압밀계수의 산정

### 4.1 표준압밀시험에 의한 구속탄성계수와 압밀계수의 산정

본 연구 대상지역인 양산-물금지역의 현장에서 실시된 피에조 콘 관입시험과 병행하여 KS F 2307에 규정된 시험 방법에 따라 Thin Wall Tube가 부착된 수압식 시료 채취기 (Hydraulic Sampler)를 사용하여 44개소에서 시추조사를 실시하고 심도별로 총 172개 자연시료를 채취하여 시료의 공학적 성질과 특성을 파악하기 위한 기본적인 실내토질시험 (압밀시험, Atterberg 한계시험, 입도시험, 입도분포시험 등)을 실시하였다. 시험 결과 통일분류법(USCS)에 따르면 대상지역의 흙의 약 80%가 압축성이 낮은 점토(CL)이며, 나머지 20%가 압축성이 높은 점토(CH)로 분류되며 또한 대부분의 점토는 정규압밀상태인 것으로 나타났다. 압밀시험을 포함하는 실내토질시험 결과와 식 (2)를 사용하여 구한 구속탄성계수를 식 (1)에 적용하여 압밀계수를 산정하였다.

### 4.2 선형 회기분석에 의한 구속탄성계수 및 압밀계수의 산정

#### 4.2.1 구속탄성계수

본 연구에 사용된 양산-물금지역의 점토를 사용한 압밀 시험 결과를 식 (2)에 적용하여 구한 계산된 구속탄성계수

( $M_c$ )와 같은 지역에서 실시된 피에조 콘 관입시험결과 값인  $q_c$  사이의 관계는 그림 2와 같으며 두 값이 직선적 관계를 보임을 알 수 있다.

두 값 사이의 선형회기분석 결과 식(10)과 같은 상관관계식을 얻을 수 있으며 식 (10)에서 보듯  $\alpha=3.1847$ 일 때 결정계수( $R^2$ )가 0.9608로 두 변수가 높은 상관성을 보인다.

$$\begin{aligned} M_p &= 3.1847 \cdot q_c \\ R^2 &= 0.9608 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,  $M_p$  : 콘 선단 저항값으로 추정된 구속탄성계수

그림 3은 식 (10)을 적용하여 추정한 구속탄성계수( $M_p$ )와 그에 상응하는 계산된 구속탄성계수( $M_c$ ) 사이의 관계를 나타내며 두 계수가 높은 상관성을 보임을 알 수 있다. 두 값 사이의 선형 회기분석 결과 결정계수( $R^2$ )가 0.9814인 높은 상관관계를 보이는 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} M_p &= 0.9697 \cdot M_c \\ R^2 &= 0.9814 \end{aligned} \quad (11)$$

그 외에도 수정 콘 선단 저항값( $q_t$ )과 순 콘 선단 저항값( $q_n$ )을 각각 계산된 구속탄성계수( $M_c$ )와 관계를 그림 4와 그림 5와 같이 나타낼 수 있으며 계산된 구속탄성계수와 콘 선단 저항값 과 계산된 구속탄성계수와 순 콘 선단 저항값을 사이의 상관관계식은 각각 식 (12)과 식 (13)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} M_p &= 2.5279 \cdot q_t \\ R^2 &= 0.9612 \end{aligned} \quad (12)$$

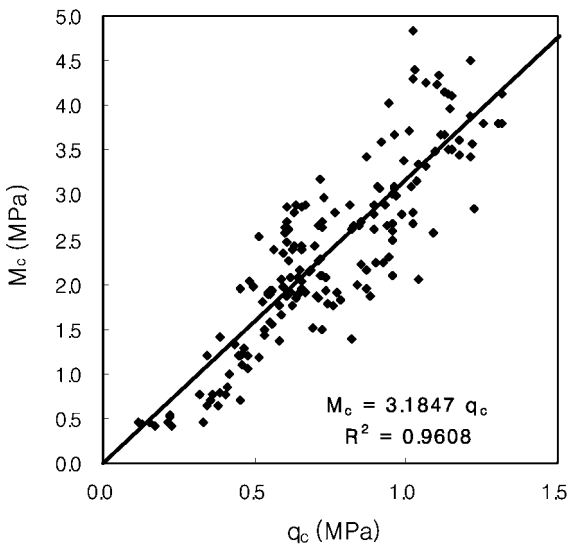


그림 2.  $M_c$ 와  $q_c$  사이의 관계

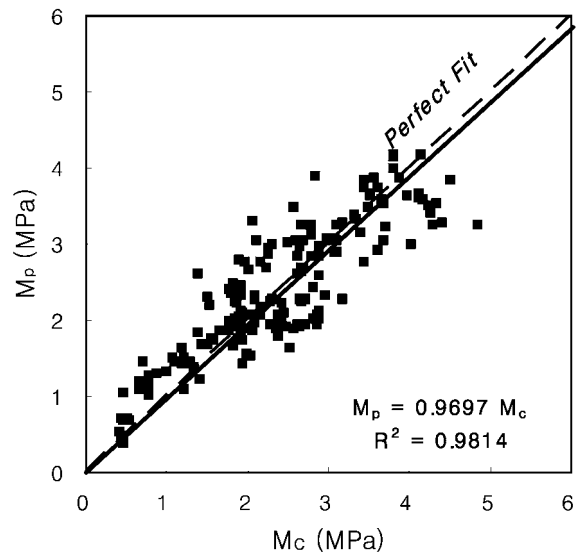


그림 3.  $M_p$ 와  $M_c$ 과의 관계

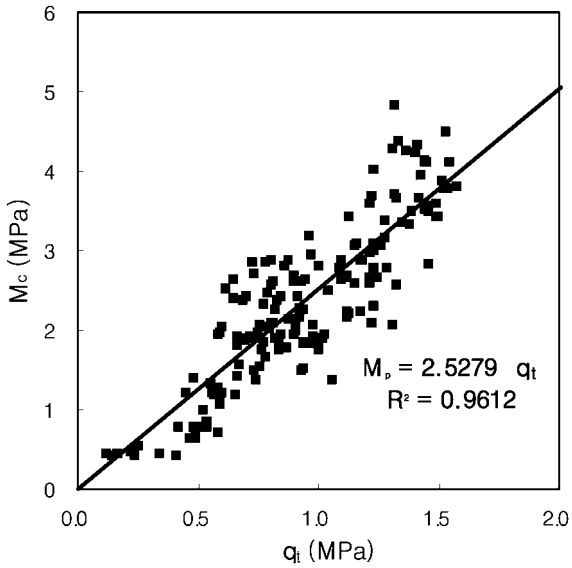


그림 4.  $M_c$ 과  $q_t$  사이의 상관관계

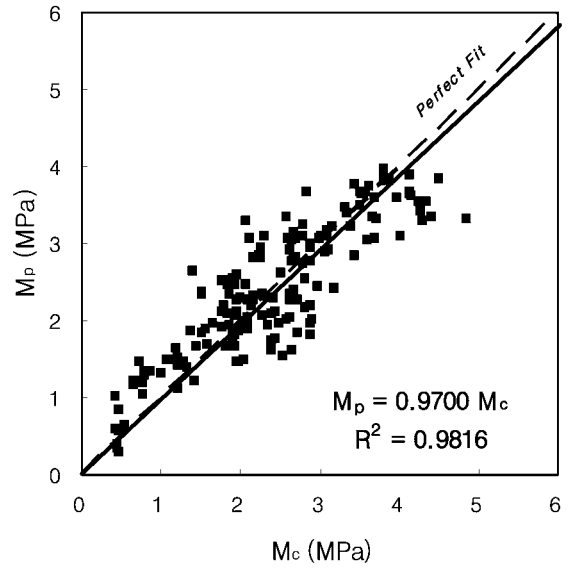


그림 6. 식 (12)에 의한  $M_p$ 와  $M_m$ 과의 상관관계

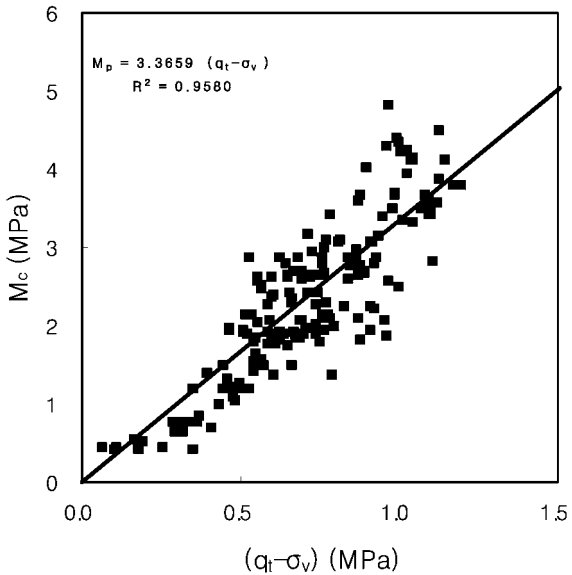


그림 5.  $M_c$ 과  $(q_t - \sigma_v)$  사이의 상관관계

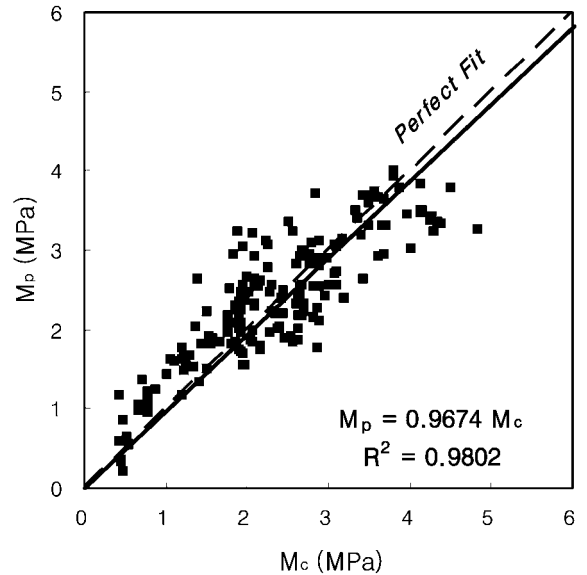


그림 7. 식 (13)에 의한  $M_p$ 와  $M_m$ 과의 상관관계

$$M_p = 3.3659 \cdot (q_t - \sigma_v) \quad (13)$$

$$R^2 = 0.9580$$

그림 6과 그림 7은 각각 식 (12)과 식 (13)로 추정된 구속탄성계수( $M_p$ )와 그에 상응하는 계산된 구속탄성계수( $M_c$ ) 사이의 관계를 나타내며 그림에서와 같이 높은 상관성을 보이며 두 구속탄성계수 사이의 그 통계식은 각각 식 (14)과 (15)이다.

$$M_p = 0.9700 \cdot M_c \quad (14)$$

$$R^2 = 0.9816$$

$$M_p = 0.9674 \cdot M_c \quad (15)$$

$$R^2 = 0.9802$$

추정된 구속탄성계수와 계산된 구속탄성계수 사이 관계를 나타내는 식 (11), 식 (14), 식 (15)를 보면 세 식이 유사한 관계를 보이며 그 중 식 (14)가 미소한 차이나마 추정값과 계산값이 가장 근접한 것으로 나타났다.

#### 4.2.2 압밀계수( $C_v$ )

압밀계수( $C_v$ )는 Terzaghi의 1차 압밀이론에 따른 표준압밀시험을 통하여 구하였다. 압밀시험은 각 깊이에서 채취된 불교란 시료를 대상으로 실시했으며 압밀하중증가에 따라 각 하중단계별로 얻어진 압밀계수( $C_v$ )는 그림 8과 같으며 해석에 사용된 압밀계수는 각 시험별 평균값을 사용하였다. 그리고 피에조 콘 시험으로 구한 콘 선단 저항값( $q_c$ )을 식 (10)에 적용하여 구한 추정된 구속탄성계수( $M_p$ )

값을 식 (1)에 적용하여 압밀계수( $C_{v-M_c}$ )를 구할 수 있다.

압밀시험으로 구한 압밀계수와 식 (10)으로 구한 구속탄성계수를 식 (1)에 적용하여 구한 압밀계수( $C_{v-M_p}$ ) 사이의 관계는 그림 9와 같다. 그림에서 보듯이 결정계수( $R^2$ )가 0.8658로 비교적 상관성이 높은 것으로 나타나며, 식 (1)로 구한 압밀계수( $C_{v-M_p}$ ) 값은 압밀시험으로 구한 압밀계수 값의 약 54% 정도이다. 두 값 사이의 상관관계는 식 (16)과 같다.

$$C_v = 0.5404 \cdot C_{v-M_c}$$

$$R^2 = 0.8658 \quad (16)$$

여기서,  $C_v$  : 표준압밀시험으로 구한 압밀계수

$C_{v-M_c}$  : 식 (1)로 구한 압밀계수

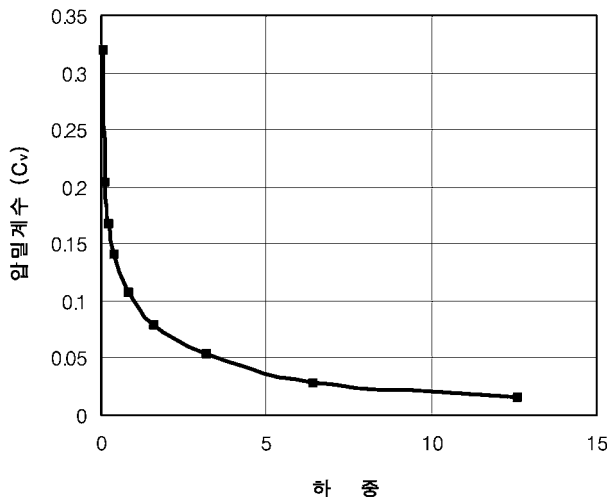


그림 8. 하중증가에 따라 일정한 값에 수렴하는 압밀계수( $C_v$ )

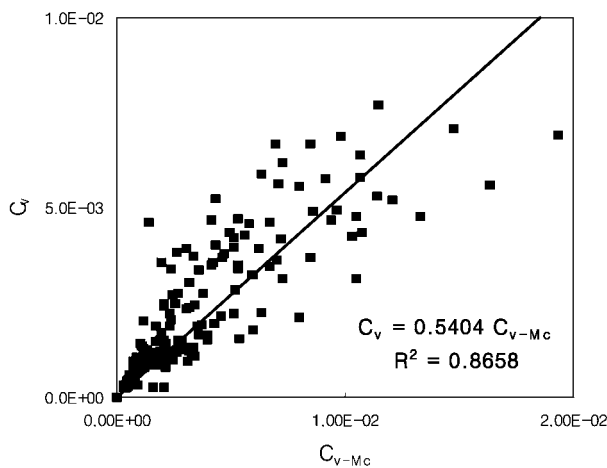


그림 9.  $C_v$ 와  $C_{v-M_c}$ 와의 관계

## 5. 기존 경험식과의 비교 및 분석

### 5.1 구속탄성계수

압밀시험결과 값을 식 (2)에 적용하여 계산된 구속탄성계수( $M_c$ )와 현장시험인 피에조 콘 관입시험 결과를 적용하여 Sanglerat, Jones(1995), Rust(1995), Senneset et al.(1988), Kulhawy & Mayne(1990)등이 구한 경험식으로 추정된 구속탄성계수( $M_p$ )를 비교하였다.

표 2의 해석방법과 경험식에서 제시한  $\alpha$ 값의 범위 내에서 계산된 구속탄성계수에 가장 근접한 추정된 구속탄성계수( $M_p$ )값을 구하였다. 계산된 구속탄성계수와 Sanglerat(1988)의 경험식으로 추정된 구속탄성계수 사이의 관계는 그림 10과 같다. 그림 10에서 점선은 두 값이 일치할 때를 의미하며 두 값 사이에 높은 상관성(결정계수,  $R^2=0.9367$ )을 보이며 그 관계식은 식 (17)과 같다.

$$M_p = 1.1749 \cdot M_c$$

$$R^2 = 0.9367 \quad (17)$$

표 2. 각각의 경험식에서  $M_p$ 를 산정하기 위해 사용한  $\alpha$ 값

해석방법	조 건	$\alpha$
Sanglerat	CL인 경우, $q_c < 0.7$	5.5
	$0.7 < q_c < 2.0$	3.5
	$2.0 < q_c$	1.75
	CH인 경우, $2.0 < q_c$	4
Jones & Rust	-	3.3
Senneset et al.	정규압밀상태	4
Kulhawy & Mayne	-	8.25

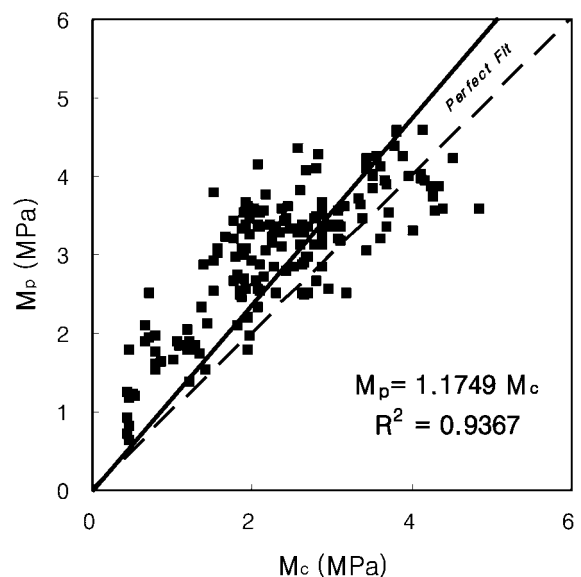


그림 10.  $M_c$ 과 Sanglerat의 식에 의한  $M_p$ 의 비교

그림 11은 Jones & Rust(1995)의 경험식으로 구한 추정된 구속탄성계수와 계산된 구속탄성계수 사이의 관계를 나타낸 것으로 두 값 사이의 상관관계는 식 (18)과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$M_p = 0.9956 \cdot M_c$$

$$R^2 = 0.9608 \quad (18)$$

결과에서 보듯이 추정된 구속탄성계수와 계산된 구속탄성계수가 거의 일치하는 것으로 나타난다.

그림 12는 Senneset et al.(1988)이 제안한 식으로 추정된 구속탄성계수와 계산된 구속탄성계수 사이의 관계를 나타내며 두 변수 간의 관계는 식 (19)와 같고 결정계수 ( $R^2$ )는 0.9580이다.

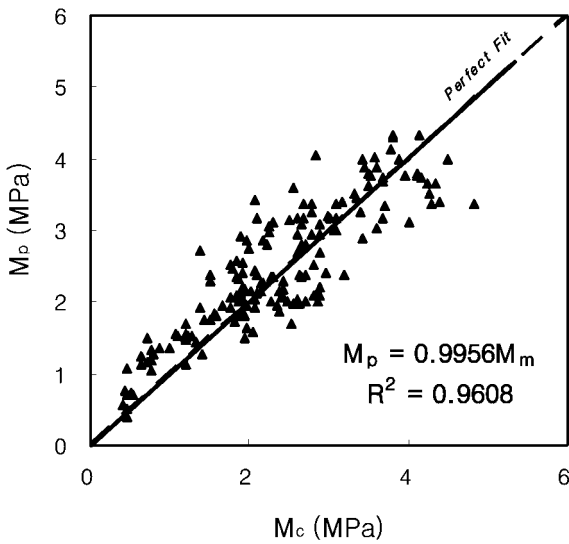


그림 11.  $M_c$ 과 Jones & Rust의 식에 의한  $M_p$ 의 비교

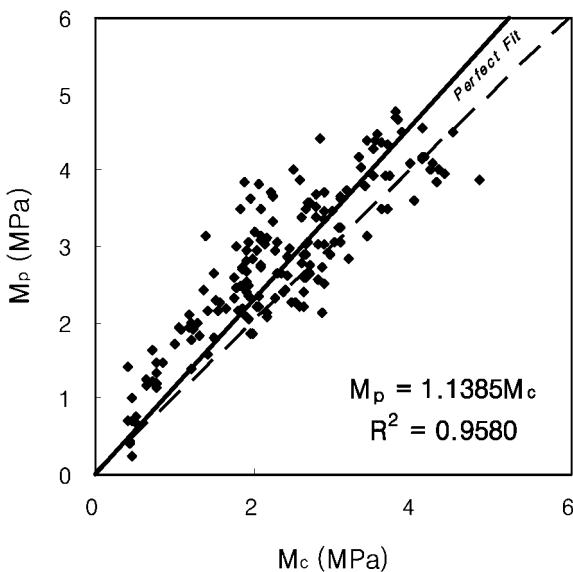


그림 12.  $M_c$ 과 Senneset et al.의 식에 의한  $M_p$ 의 비교

$$M_p = 1.1385 \cdot M_c$$

$$R^2 = 0.9580 \quad (19)$$

이 식은 Sanglerat(1988)이 제안한 식과 유사한 값을 보이며 계산된 값과 비교하여 약 14% 정도 큰 값을 보인다.

그림 13은 Kulhawy & Mayne(1990)이 제안한 식으로 추정된 구속탄성계수와 계산된 구속탄성계수 사이의 관계를 나타내며 두 변수 사이의 상관관계( $R^2=0.9580$ )는 식 (20)과 같다.

$$M_p = 2.3482 \cdot M_c$$

$$R^2 = 0.9580 \quad (20)$$

식 (20)에 나타난 바와 같이 본 연구에서 사용된 4가지 방법의 구속탄성계수 경험식 중에서 추정된 구속탄성계수가 계산된 구속탄성계수와 비교하여 가장 큰 값(2.35배)을 나타낸다.

표 3은 콘 관입시험 결과를 사용한 경험식들로 추정된 구속탄성계수 해석 결과를 요약한 것이다. 표에서 최적의 계산결과는 그림 10~13에서 얻어진 식 (17)~식 (20)으로 추정된 구속탄성계수와 압밀시험결과를 사용하여 계산된 구속탄성계수 사이의 비( $M_p^a/M_c$ )를 의미하며 산술적 계산 결과는 제안된 4종류의 경험식으로 추정된 구속탄성계수를 계산된 구속탄성계수로 나눈 값( $M_p^b/M_c$ )의 평균 과 표준편차를 나타낸다. 표에서 보듯이 Jones & Rust(1995)가 제안한 경험식으로 추정된 구속탄성계수가 본 연구에서 구한 계산된 구속탄성계수와 가장 유사한 값을 보이는 것으로 나타났다.

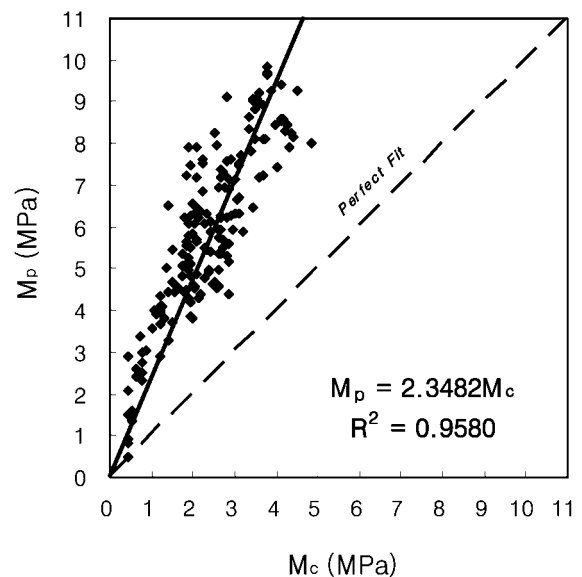


그림 13.  $M_c$ 과 Kulhawy & Mayne의 식에 의한  $M_p$ 와의 비교

표 3. 콘 관입시험 결과를 사용한 경험식들에 의한 추정된 구속탄성계수( $M_p$ ) 해석결과 요약

해석방법	최적의 계산결과		산술적 계산결과( $M_p^b/M_e$ )	
	$M_p^a/M_e$	$R^2$	평균	표준편차
Sanglerat	1.1749	0.9367	1.4441	0.8511
<b>Jones &amp; Rust</b>	<b>0.9956</b>	<b>0.9608</b>	<b>1.1165</b>	<b>0.3304</b>
Senneet et al.	1.1385	0.9580	1.2882	0.5793
Kulhawy & Mayne	2.3482	0.9580	2.6569	2.3688

주)  $M_p^a$  : 식 (17)~식 (20)로 추정된 구속탄성계수  
 $M_p^b$  : 4종류의 기존경험식으로 추정된 구속탄성계수

## 6. 결 론

본 연구는 연약지반의 압밀특성을 나타내는 정수중 하나인 압밀계수( $C_v$ )를 결정하는데 있어 피에조 콘 관입시험(PCPT)결과의 적용성을 평가하고자 양산-물금지역의 연약지반에서 실시된 피에조 콘 관입시험(PCPT) 자료와 같은 지역 44개소에서 시추한 심도별로 총 172개 자연시료를 사용하여 기본적인 실내토질시험(압밀시험, Atterberg 한계시험, 입도분포시험 등)을 실시하였다. 이를 토대로 Terzaghi 압밀 이론에 의한 구속탄성계수 및 압밀계수를 각 시료에 상응하는 현장 흙에서 실시한 피에조 콘 관입시험 결과를 사용하여 구한 구속탄성계수와 압밀계수를 비교·분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

- (1) 기존연구에서 얻은 경험식과 같이 각 시료의 압밀시험 결과를 식 (2)에 적용하여 계산된 구속탄성계수( $M_e$ )와 각 시료에 상응하는 현장 흙에서 실시된 피에조 콘 관입시험 결과인 콘 선단 저항값( $q_c$ ), 수정 콘 선단 저항값( $q_u$ ), 순 콘 선단 저항값( $q_n$ ) 사이에 각각 직선적 상관관계를 보였다.
- (2) 추정된 구속탄성계수( $M_p$ )는 계산된 구속압축계수( $M_e$ )와 높은 상관성을 보이며 Jones & Rust가 제안한 경험식으로 추정된 구속탄성계수( $M_p$ )가 본 연구에서 얻은 계산된 구속탄성계수와 가장 유사한 결과를 보였다.
- (3) 압밀시험으로 구한 압밀계수( $C_v$ )와 콘 관입시험 결과를 적용하여 구한 압밀계수( $C_{v-M_p}$ ) 사이에 직선적 상관관계를 보였으며 콘 관입시험 결과로 구한 압밀계수( $C_{v-M_p}$ ) 값은 압밀시험으로 구한 압밀계수( $C_v$ ) 값의 약 54% 정도를 보였다.

일부 제한된 지역에서 얻은 시험결과를 사용한 해석이지만 연구결과를 보면 현재 연약지반의 특성을 파악하기 위해 많이 사용되는 현장시험방법의 하나인 피에조 콘 관입시험 결과는 압밀특성(구속탄성계수, 압밀계수)을 결정

하기 위해 일반적으로 사용되는 표준압밀시험 결과와 통계적으로 높은 상관성을 보임을 알 수 있다. 이는 압밀특성(구속탄성계수, 압밀계수)을 결정하는데 있어 피에조 콘 관입시험 결과적용의 높은 가능성을 보이는 것으로 판단된다.

압밀시험결과를 사용하여 계산된 구속탄성계수를 적용하여 얻은 구속탄성계수와 콘 저항값으로 구한 압밀계수( $C_{v-M_p}$ )가 압밀시험에 의한 압밀계수값의 약 54% 정도를 보이는데 이 차이는 여기서 사용된 압밀시험에 의한 압밀계수값이 각 하중단계별로 구한값의 평균값을 사용한 것 등을 포함하는 많은 요인에 기인할 수 있다. 그런 까닭에 설계시 콘 저항값으로 구한 압밀계수( $C_{v-M_p}$ )를 그대로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구 이후 국내의 다양한 지역의 연약지반에 대한 피에조 콘 관입시험을 실시하고 이 결과를 실내시험을 통하여 검증하는 연약지반에 대한 압밀특성에 관한 연구가 지속적으로 이루어진다면 여기서 제안된 여러 식들의 신뢰성과 적용성을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

1. 김영상(2002), 피에조콘 소산시험의 초기경향을 이용한 평형 간극수압과 강성지수의 결정, *한국지반공학회 논문집*, 제18권, 제2호, pp. 161~170.
2. 박용원, 구남실, 이상익(2003), 피에조 콘 시험을 이용한 점성토의 압밀계수 추정, *한국지반공학회 논문집*, 제19권, 제4호, pp. 311~320.
3. 박찬국, 송정락, 김수일(2002), 피에조콘 소산시험을 통한 해성연약지반의 압밀특성에 대한 실험적 연구, *한국지반공학회 논문집*, 제18권, 제2호, pp. 137~146.
4. 이강운, 윤길림, 채영수(2003), Piezocone 시험을 이용한 해성점토의 수평압밀 특성 연구, *한국지반공학회 논문집*, 제19권, 제5호, pp. 133~144.
5. 임형덕, 이우진, 김대규(2003), 정규압밀점토에서의 피에조 콘 소산시험을 이용한 수평압밀계수의 산정, *한국지반공학회 논문집*, 제19권, 제5호, pp. 145~154.
6. 장인성, 이선재, 정충기, 김명보(2001), 국내 점성토 지반의 피에조콘 계수, *한국지반공학회 논문집*, 제17권, 제6호, pp.



- 15~24.
7. 장인성, 권오순, 정충기, 김명모(2002), 피에조콘 관입시험 결과와 점성토의 과압밀비의 관계, *대한토목학회 논문집*, 제22권, 제6-C호, pp. 651~659.
  8. 한국토지공사(1997), *양산불금지구 시험시공연구공사 확인단계 Piezocone 관입시험 보고서*, pp. 300~350.
  9. 한국토지공사(1998), *양산불금지구 시험시공연구공사 확인지반조사 보고서*, pp. 320~350.
  10. 한국토지공사(1999), *양산불금지구 시험시공연구공사 완료단계 Piezocone 관입시험 보고서*, pp. 349~370.
  11. Jones, G. A. and Rust, E.(1995), Piezocone Settlement Prediction Parameters for Embankments on Alluvium, *Proc. Intern. Symp. on Penetration Testing, CPT 95*, Linkoping, Sweden, Vol. 2, pp. 501~508.
  12. Kulhawy, F. H. and Mayne, P. H.(1990), *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*. Report-EL-6800. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, August, 306pp.
  13. Sanglerat, G.(1972), *The Penetration and Soil Exploration*. Elsevier, Amsterdam, 464pp.
  14. Senneset, K., Sandven, R., Lunne, T., By, T. and Amundsen, T.(1988), Piezocone Tests in Silty Soil, *Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1*, Balkema Pub, Rotterdam, pp. 955~966.
  15. Terzaghi, K.(1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York, 510pp.

(접수일: 2007. 4. 19 심사일: 2007. 5. 18 심사완료일: 2007. 7. 7)