

## 피에조 콘 시험을 이용한 점성토의 비배수 강도 추정

### Estimation of Undrained Shear Strength Using Piezocone Test

박 용 원\*<sup>1</sup> Park, Yong-Won  
구 남 실\*<sup>2</sup> Gu, Nam-Sil  
이 상 익\*<sup>3</sup> Lee, Sang-Ik

#### Abstract

Undrained shear strength of clay deposit is one of the most important properties in the design of geotechnical structures. The use of piezocone test is rapidly growing due to its merit that can measure the in-situ undrained shear strength continuously with less error. The reliability of the shear strength from piezocone test depends upon the cone factor applied. Many researchers have suggested different ranges of values for the factors. This study performs to find out the validity of the suggested values in Korea and their characteristics related to the mechanical properties of clay. Piezocone tests were performed at the site of pilot project of ground improvement at Yangsan-Mulgeum Gyeongnam to investigate the characteristics of piezocone factors. The piezocone factors ( $N_{kt}$ ,  $N_{ke}$ ,  $N_{du}$ ) based on the undrained shear strength from quick triaxial compression test are generally within the suggested range. And there appears considerable relations between undrained shear strength and ( $N_{kt}$ ,  $N_{ke}$ ,  $N_{du}$ ) and between preconsolidation pressure and ( $N_{kt}$ ,  $N_{ke}$ ), while plasticity index, rigidity index and friction ratio do not show any relations with cone factors. The results also reveal that factor  $N_{du}$  shows higher reliability than factors  $N_{kt}$  and  $N_{ke}$ , which show smaller standard deviation, breadth of change and scattering.

#### 요 지

연약지반에 축조되는 구조물 설계에 매우 중요한 지반 특성치인 점토지반의 비배수 전단강도를 깊이에 따라 연속적으로 측정할 수 있는 현장 원위치 시험법으로서 피에조 콘의 활용도가 점점 높아지고 있다. 피에조 콘 시험으로 추정되는 비배수 강도의 신뢰성은 이에 적용되는 콘 계수 값의 신뢰성에 크게 의존한다. 콘 계수에 대한 여러 연구자들의 제안이 우리의 실정에 맞는지 검증하고 점토지반의 특성에 따른 콘 계수 값의 변화 특성을 파악하여 콘 계수 선정에 대한 합리적인 기준을 마련하는 것이 이 연구의 목적이다. 이 연구는 경남 양산물금 지역의 해성점토층을 대상으로 피에조 콘 시험과 비교란 시료에 대한 실내 전단강도시험(일축압축시험, 비압밀 비배수 삼축압축시험)과 암밀시험을 실시하였다. 시험 결과를 이용하여 콘 계수와 점토의 여러 역학적 특성치(비배수 전단강도, 선행암밀압력, 소성지수, 간극수압비, 강성지수, 마찰비)의 관계를 고찰하여 콘 계수 값의 합리적 선정을 위한 기준을 마련하고자 하였다. 연구 결과로부터 얻은 결론으로서는, 상관관계가 비교적 높은 특성치의 작은 비배수 전단강도와 콘 계수( $N_{kt}$ ,  $N_{ke}$ ,  $N_{du}$ ), 선행암밀압력과 ( $N_{kt}$ ,  $N_{ke}$ ), 간극수압비( $B_q$ )와 ( $N_{ke}$ ,  $N_{du}$ )이었고, 선행암밀압력과 ( $N_{du}$ ),  $B_q$ 와 ( $N_{kt}$ )는 상관 관계가 나타나지 않았으며, 소성지수, 강성지수, 그리고 마찰비도 콘 계수와 상관 관계가 없는 것으로 나타났다. 또한, 비압밀 비배수(UU) 삼축압축시험으로 구한 점토의 비배수 전단강도를 기준으로 할 때, 여러 제안자들이 제안한 피에조

\*1 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Myohgji Univ.)

\*2 정회원, 명지대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Myohgji Univ., Gooo@iklc.co.kr)

\*3 정회원, (주)상지엔지니어링 과장 (Member, Manager, Sanglee Engrg., Co. LTD.)

콘 시험결과를 이용한 비배수 전단강도 추정에서  $N_{du}$ 가 다른 두개의 콘 계수보다 선행압밀압력의 크기에 상관없이 변화폭, 표준편차 및 분산도가 모두 작아서 신뢰성이 가장 높게 나타났다.

**Keywords :** Cone factor, Piezocone test, Undrained shear strength

## 1. 서론

비배수 전단강도는 개량공법을 적용하는 연약지반 지역 등에서 강도 증가율 산정, 성토후의 사면안정해석 등을 실시하거나 기초 설계 등에 이용되는 주요 지반정수이다. 연약지반에서 대부분 계측시스템으로 지반개량 효과를 평가하고 있으나 계측기 설치 등의 제반 문제점으로 지반개량 효과를 판단하는데 어려움이 있으므로 원위치 시험으로 지반의 개량효과 확인을 보완하는 것이 현재의 추세이다. 지반 개량효과를 확인하기 위한 지반의 전단강도 시험방법으로서 실내시험은 시료 교란과 현장의 응력조건을 재현하기 어렵다는 문제가 있으므로 최근에는 토질정수를 원위치에서 직접 측정하는 현장시험 실시 빈도가 점점 증가되고 있다. 원위치 시험 장비로 주로 사용되고 있는 피에조 콘 시험기는 조사결과가 정밀하므로 점성토 지반에서 토층분류, 과압밀비, 비배수 전단강도, 압밀계수 등 광범위한 지반정수를 연속적으로 얻을 수 있는 신뢰성이 높은 장비로 알려져 있다. 피에조 콘을 지반에 관입하면서 측정된 콘 선단지 지력( $q_c$ )과 과잉간극수압( $u_2$ )으로 비배수 전단강도를 추정할 때에 적용하는 콘 계수 값은 지반의 비배수 전단강도 추정치의 신뢰도를 좌우한다. 피에조 콘 계수는 극한 지지력 이론(Schmertmann, 1978), 공동 팽창이론(Vesic, 1972; Chen & Mayne, 1993) 또는 변형률 경로법(Baligh, 1975; Teh, 1987; Teh & Houlsby, 1991)을 이용하여 구하는 해석적 방법이 있고, 현장 및 실내시험으로 얻어진 기준 비배수 전단강도에 의하여 구하는 경험적인 방법이 있다. 피에조 콘 시험으로부터 비배수 전단강도를 추정할 때 사용되는 콘 계수 결정에 관한 경험적 방법을 통하여 실시한 연구는 해외에서는 1980년대부터 본격적으로 시행(Senneset 등, 1982; Lunne 등, 1985; Robertson 등, 1986; Aas 등, 1986; Karlsrud 등, 1996)한 바 있으며, 국내에서는 1990년대 후반부터 시행(이선재, 1997; 장인성 등, 2001)하고 있다. 그러나 콘 계수를 구하는 해석적 방법의 경우 흙의 특성 등을 정확하게 반영하기 어려우며, 또한, 경험적인 방법을 통하여 산정된

피에조 콘 계수가 넓은 범위로 분포되거나 아무 조건없이 단순 제시되는 경우에는 동일 지역이나 지역에 따라 다른 흙의 공학적 특성(불균질성 등)과 기준 비배수 전단강도 산정 시험방법에 따라 콘 계수가 다르게 나타나므로 실제 사용하기에는 어려움이 따르고 있다. 따라서, 지반 특성변화나 시험방법에 따라서 콘 계수가 변동성이 있기 때문에 국내 지반에 적합한 콘 계수 결정을 위해서는 지반의 특성 파악과 기준 비배수 전단강도 결정 시험 방법에 대하여 지역별로 충분한 연구가 필요하다. 이 연구는 경남 양산물금 지역의 연약지반처리 시험시공지역에서 피에조 콘 시험과 채취한 시료에 대한 실내 전단강도시험을 실시하고, 그 결과를 상호 비교·분석하여 점성토의 비배수 전단강도 추정에 적용되는 콘 계수에 대하여 제안된 여러 해들을 비교 연구하고, 여러 가지 토질 물성치와 콘 계수의 관계를 고찰하였다.

## 2. 콘계수 관련 이론

### 2.1 콘 선단 저항력의 기본식

콘 관입시험으로부터 점성토의 비배수 전단강도를 추정하기 위한 이론적인 해석 방법은 고전적인 지지력 이론, 공동 팽창이론 및 변형률 경로법 등이 있으나, 일반적으로 식 (1)과 같이 콘 선단 저항치와 점성토의 비배수 전단강도 관계로 추정하는 방법을 사용하고 있다.

$$q_c = N_c \cdot s_u + \sigma_o \quad (1)$$

여기서,  $q_c$  = 콘 선단저항치,  $N_c$  = 콘계수(이론치),  $\sigma_o$  = 콘 선단 위치의 상재압력이다.

### 2.2 피에조 콘을 이용한 비배수 전단강도 추정식

피에조 콘 관입시험으로부터 점성토의 비배수 전단강도를 추정하는데 적용되는 경험적인 방법은 아래와 같이 크게 3가지( $N_{kt}$ ,  $N_{ke}$ ,  $N_{du}$ )로 구분된다.

### 2.2.1 전체 선단저항치를 이용하는 방법

Schmertmann(1978)은 말뚝과 콘의 관입이 유사함을 이용하여 전체 콘 선단 저항치로 부터 식 (2)와 같은 비배수 전단강도 추정 방법을 제안하였다.

$$s_u = \frac{(q_c - \sigma_{vo})}{N_k} \quad (2)$$

여기서,  $s_u$  = 비배수 전단강도,  $N_k$  = 무차원 계수인 콘계수(경험치),  $\sigma_{vo}$  = 연직 전응력이다.

이 때, 콘계수  $N_k$ 는 실내시험결과와 비교 분석한 결과 대체적으로 10~20사이에 분포하고 있는 것으로 알려져 있으며, Robertson & Campanella(1988)는 평균적으로  $N_k$ 값은 15를 사용할 것을 제안하였다. 그리고 Lunne 등(1985)은 간극수압 측정을 위한 다공질 필터가 콘 선단부(cone tip) 바로 뒷면에 위치한 피에조 콘( $u_2$ )을 사용할 경우  $q_c$ 는 간극수압의 영향을 받기 때문에 그림 1과 같이 부등 단면적비(area ratio)를 고려, 식 (3)과 같이  $q_t$ 를 수정하여 비배수 전단강도를 추정할 것을 제안하였다.

$$s_u = \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{N_{kt}} \quad (3)$$

여기서,  $q_t$  = 수정된 콘의 선단저항치 [ $q_t = q_c + u_2(1-a)$ ],  $\sigma_{vo}$  = 연직 전응력,  $N_{kt}$  = 전응력 피에조 콘 계수,  $q_c$  = 측정된 콘의 선단저항치,  $u_2$  = 측정된 간극수압,  $a$  = 부등 단면적비(=  $A_n/A_c$ )이다.

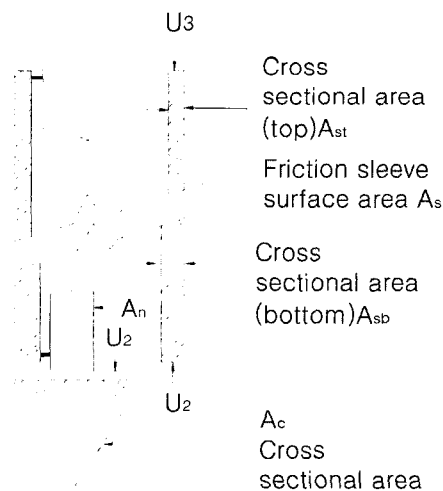


그림 1. 피에조 콘의 부등 단면적 효과

Aas 등(1986)은  $N_{kt}$ 를 구할 때 비압밀 비배수(UU)삼축압축시험, 직접전단시험, 삼축인장시험으로 각각 얻은 비배수 전단강도를 산술 평균하여 적용하도록 하였으며, 이들은  $N_{kt}$ 와 소성지수, 비배수 강도 사이의 관계를 분석하여 소성지수 3~50% 이하에서  $N_{kt}$ 는 8~16 사이에 있음을 제시하였다.

### 2.2.2 유효 선단저항치를 이용하는 방법

유효 선단저항치는 측정된 콘관입 저항치( $q_c$ )로부터 콘 선단부 바로 뒤에서 측정된 간극수압( $u_2$ )을 뺀 값이며 유효응력 개념으로 비배수 전단강도를 추정하는 방법은 Seneset 등(1982)에 의해 최초로 소개 되었고 Campanella 등(1982)은 식 (4)와 같이 수정하여 제안하였다.

$$s_u = \frac{q_e}{N_{ke}} = \frac{(q_t - u_2)}{N_{ke}} \quad (4)$$

여기서,  $q_c$  = 유효 선단저항치,  $q_t$  = 유효 단면적에 의해 수정된 콘 관입저항치,  $u_2$  = 콘 선단부 뒤에서 측정된 간극수압,  $N_{ke}$  = 유효응력 피에조 콘 계수이다.

Seneset 등(1982)은  $N_{ke}$ 값을 대체로 9±3 정도로 제안하였으나 후에 Lunne 등(1985)과 Robertson 등(1986)의 연구결과는 값이 매우 넓은 범위(1~13)에 분포하고 있었으며, 간극수압비( $B_q$ )와 관련이 있다고 하였다. Karlsrud 등(1996)은 양질의 블록 샘플로 이방압밀 비배수(CAUC) 삼축압축시험을 실시하여 비배수 전단강도를 구한 다음 이 결과를 이용한 콘 계수와 간극수압비의 상관 관계로부터 분산도가 상대적으로 낮은  $N_{ke}$ 값(약 2~9)을 제시하였다.

### 2.2.3 과잉간극수압을 이용하는 방법

Vesic(1972), Randolph & Wroth(1979), Campanella 등(1985)은 공동 팽창이론을 기본으로 하여 이론적인 접근방법에 의해 비배수 전단강도를 식 (5)와 같이 추정할 것을 제안하였다.

$$s_u = \frac{\Delta u_o}{N_{du}} (\Delta u_o = u_2 - u_o) \quad (5)$$

여기서,  $N_{du}$  = 간극수압 피에조 콘 계수,  $u_o$  = 정수압,  $u_2$  = 측정된 관입 간극수압이다

$N_{\Delta u}$ 는 OCR, 예민비, 강성지수( $G/s_u$ )에 따라 변하는 계수이며 공동 팽창이론을 이용한 이론적인 해는 2~20사이에 분포하고 있다. Lunne 등(1985)은 북해 점토에 대해 삼축압축시험(CAUC)을 수행하고 여기서 얻어진 비배수 전단강도를 콘 관입시험으로부터 얻은 과잉 간극수압과 비교 분석한 결과  $N_{\Delta u}$ 는 4~10사이에 분포하고 있다고 하였다.

### 2.3 기존에 제안된 경험적인 콘 계수

표 1은 국내의 연약지반을 대상으로 현장 및 실내시험을 통하여 경험적인 콘 계수( $N_{kt}$ ,  $N_{ke}$ ,  $N_{\Delta u}$ )를 제안한 결과를 나타낸 것이다. 표 1에 나타낸 바와 같이 경험적인 방법으로 결정된 피에조 콘 계수들의 범위는 차이를 보여 주고 있음을 알 수 있다.

## 3. 연구 대상지역 및 시험

### 3.1 지반조건

이 연구 대상지역은 경남 양산물금에 위치한 연약지반 개량공법 시험시공을 완료한 구역으로 지층 구조는 최상부에 매립층, 그 아래에 점성토층, 모래 섞인 자갈, 풍화암층의 순서로 구성되어 있으며, 점성토층은 매우 연약한 상태이고 색조는 짙은 암회색이며, 확인된 층두

께는 18.8~30m를 나타내고 있다. 실내시험은 단계 I(연직드레인 시공전), 단계 II(개량효과 확인단계), 단계 III(완료단계)의 순서로 실시하였으며, 단계 I 시험결과는 자연함수비 31.5~78.5%, 비중 2.56~2.73, 소성지수 10~35%, NO.200 번체 통과율 15.0~99.8%로 나타났다. 또한, 일축압축강도는 0.04~0.95kg/cm<sup>2</sup>, 삼축압축시험의 비배수 전단강도는 0.07~0.47kg/cm<sup>2</sup>, 통일분류법으로 대부분 CL, CH 등으로 분류되었다. 표 2는 단계 I의 토질시험결과를 나타낸다. 이 연구에서 단계 I은 개량공법 시공전, 단계 II는 확인단계, 단계 III은 완료단계를 나타낸다.

이 연구 대상지역에 적용된 연약지반 개량공법으로는 팩 드레인, 페이퍼 드레인, 메나드 드레인과 프리로딩 공법이며, 표 3에 간단히 나타냈다.

### 3.2 피에조 콘 관입시험

피에조 콘 시험은 네덜란드 Fugro 사의 콘으로 선단면적 10cm<sup>2</sup>, 15cm<sup>2</sup>, 슬리브 표면적 150cm<sup>2</sup>, 200cm<sup>2</sup>, 선단 각 60°, 로드셀 용량 50kN, 75kN인 2종류의 콘을 사용하여 ASTM(1979)의 규정에 따라 개량공법 구역별로 단계 I, 단계 II, 단계 III에서 각 공법별 대표 지점에서 실시하였다. 피에조 콘으로 선단 저항력( $q_c$ ), 주면마찰력( $f_s$ ) 및 간극수압( $\Delta u$ )을 측정하였으며, 토층을 2cm 두께로 측정하여 선단 저항력과 간극수압으로 콘 계수를 산

표 1. 기존에 제안된 경험적인 피에조 콘 계수(이선재, 1997)

콘 계수	범위	비교 비배수 전단강도 결정 시험방법
$N_{kt}$	10~25	UU, CIUC, CAUC, FVT
$N_{ke}$	9.3~17.2	UU, CIUC, CAUC, FVT
$N_{\Delta u}$	1.7~4.4	UU, CIUC, CAUC, FVT

주) UU : 비압밀 비배수 삼축압축시험, CIUC : 등방압밀 비배수 삼축압축시험, CAUC : 이방압밀 비배수 삼축압축시험, FVT : 현장배인시험

표 2. 단계 I의 토질시험결과

$w_n$ (%)	$G_s$	LL(%)	PI(%)	#200 통과율(%)	$q_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$s_u$ (UU)(kg/cm <sup>2</sup> )	USCS	OCR
31.5~78.7	2.56~2.73	28.8~55.5	10~35	15.0~99.8	0.04~0.95	0.07~0.47	CL, CH	0.1~1.71

표 3. 개량공법 현황

공 법 명	타입 심도(m)	타입 간격(m)	개량 기간(month)	최종 성토고(m)
Menard Drain	25.5	1.0×1.0	12	8.0
Pack Drain	25.5	1.0×1.0	12	8.0
Paper Drain	25.5	1.0×1.0	12	8.0
Preloading	-	-	12	8.0

표 4. 콘 관입시험 수량

공법명	단계 I	단계 II-1	단계 II-2	단계 III
Pack Drain	1	1	1	1
Menard Drain	1	1	1	1
Paper Drain	1	1	1	1
Preloading	1	1	1	1

정하였다. 이 연구는 성토 후 5개월이 경과하여 단계 II (개량효과 확인단계) 조사를 실시하였고, 지반처리 후 압밀도 90% 이상 경과하여 단계 III(완료단계) 조사를 실시하였다. 표 4는 단계별 콘 관입시험 수량을 나타낸다.

#### 4. 피에조 콘 시험 결과 분석

각 단계별 실내시험 및 피에조 콘 시험을 실시한 후 비배수 전단강도 추정 방법별로 콘 선단저항력 및 과잉간극수압에 의하여 콘 계수를 산정하여 비교·분석하였다.

##### 4.1 기준 비배수 전단강도 산정

콘 시험 결과만을 이용하여 비배수 전단강도를 추정할 때는, 여러 연구자들이 제안한 콘 계수의 분포 범위가 넓어서 그 지반에 적합한 값을 선정하기가 어렵다. 따라서 실내시험으로 구한 비배수 전단강도를 기준으로 하여 단계별로 적합한 콘 계수를 선정하였다. 이 연구에서는 삼축압축시험(UU)에 의한 비배수 전단강도를 이용하였으

표 5. 깊이에 따른 기준 비배수 전단강도 추세식

시험 단계	추세식(kg/cm <sup>2</sup> )	비고
단계 I	$s_u = 0.0411 + 0.01452 \cdot z(m)$	시공 전
단계 II	$s_u = 0.0150 + 0.0284 \cdot z(m)$	확인 단계
단계 III	$s_u = 0.1347 + 0.0252 \cdot z(m)$	완료 단계

며, 깊이에 따른 기준 비배수 전단강도 분포(그림 2)는 표 5에 추세식으로 나타났다. 그림 2에서 일축압축강도의 경우는 단계 I(시공전)과 5개월 경과 후인 단계 II(확인 단계)의 강도가 비슷한 분포를 보이나, 삼축압축시험의 경우는 5개월 경과 후인 단계 II(확인 단계)의 강도와 단계 III(완료 단계)의 강도 분포가 비슷하게 나타났다. 이와 같은 원인은 여러 가지 복합적인 요인이 있지만, 이 중에서 시료채취에서 부터 시험완료시까지의 시료 교란이 가장 큰 영향일것으로 판단되며, 마찬가지로 실내시험중에는 시료의 포화로 인하여 일축압축시험보다는 삼축압축시험에서 교란이 시료의 상태에 따라 클것으로 사료된다. 또한, 지반의 불균질성의 영향으로 같은 지역이라도 지반개량에 따른 지반강도 증가 효과를 정확하게 판단하기에는 어려움이 있다.

##### 4.2 피에조 콘 시험 결과

이 연구대상 지역의 피에조 콘 시험과 실내시험결과를 표 6에 나타냈다. 여기서, 비배수 전단강도  $s_u$ 는 과잉간극수압으로부터 산정한 결과이고, 표준편차 및 분산도는 신뢰도 95%의 값을 나타낸다.

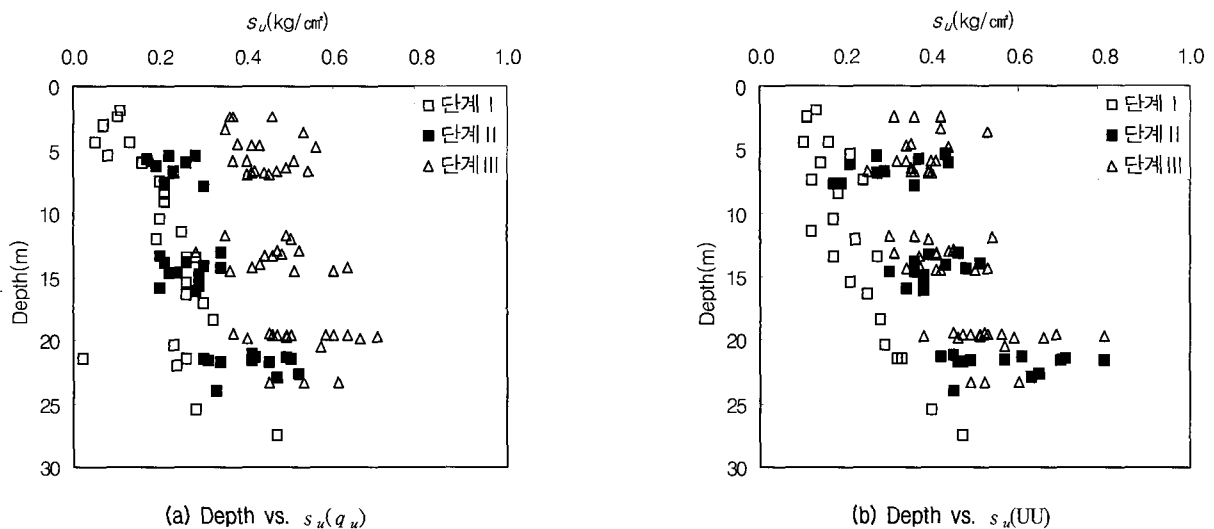


그림 2. Depth vs. 역학시험

표 6. 시험결과 및 통계분석 결과

시험 단계	$N_{kr}$			$N_{ke}$			$N_{\Delta u}$			$s_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$B_a$	$I_r$	$F_r$ (%)	OCR	$p'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	PI (%)	$q_t - \sigma_{vo}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$q_t - u_2$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$u_2 - u_o$ (kg/cm <sup>2</sup> )
	범위 (평균)	표준 편차	분산도	범위 (평균)	표준 편차	분산도	범위 (평균)	표준 편차	분산도										
단계 I	3.8~22.8 (11.4)	1.58	2.53	1.0~21.7 (6.7)	2.64	7.27	1.0~12.0 (9.3)	1.60	3.02	0.224	0.84	32.5	1.80	1.0	0.88	23	3.4	2.0	2.1
단계 II	8.3~22.2 (13.8)	2.36	5.82	5.0~19.8 (10.3)	1.95	3.91	1.0~13.0 (7.0)	1.68	2.83	0.425	0.50	23.98	1.59	0.7	1.16	25	6.1	4.6	2.9
단계 III	10.2~21.5 (15.3)	2.04	4.22	6.6~22.8 (11.6)	1.63	3.01	1.1~13.9 (8.9)	2.01	4.16	0.538	0.57	24.95	2.00	1.1	1.99	26	8.7	6.7	4.7

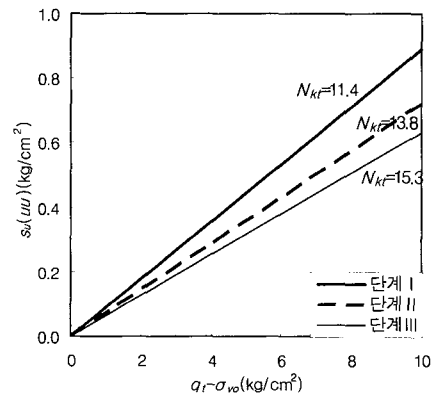
4.3 시험 결과 분석

4.3.1 분석구간 선정

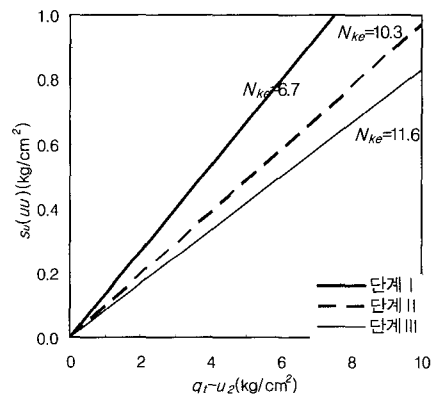
지반에 부분적으로 존재하는 과압밀층 및 조립토층은 연구목적에 적합하지 않으므로 분석에서 제외하고 콘 계수 결정은 연약 점성토층만을 대상으로 하였다.

4.3.2 피에조 콘 계수

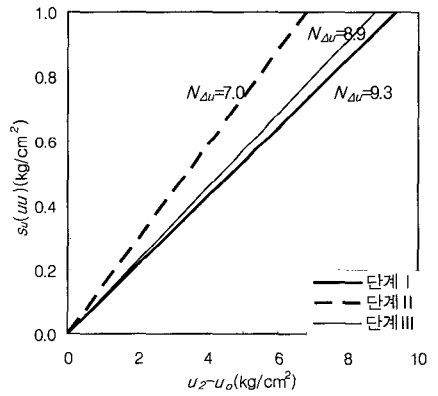
콘 계수 산정에서 비배수 전단강도는 표 5에 제시된 비배수 전단강도 추세식을 적용하였다. 콘의 부등 단면 적비(0.45, 0.59)로 콘 선단저항을 보정하였으며, 전체 선단저항치, 유효 선단저항치, 과잉간극수압을 이용하여 콘 계수를 산정한 결과는 표 6과 같다. 표 6을 보면 전체 선단저항으로 산정한 콘 계수  $N_{kr}$ 는 단계 I은 4~23, 단계 II는 8~22, 단계 III은 10~22사이에 분포하고 있으며, 지반의 압밀이 진행되면서 비배수 전단강도가 증가함에 따라 하한치가 커졌다. 한편, 유효 선단저항으로 산정한 콘 계수  $N_{ke}$ 는 단계 I은 1.0~22, 단계 II는 5~20, 단계 III은 7~23사이에 분포하였으며, 하한치가 약간 작은 것을 제외하고는  $N_{kr}$ 와 비슷한 범위에 분포하였다. 그리고, 과잉간극수압으로부터 산정한 콘 계수  $N_{\Delta u}$ 는 단계 I은 1.0~12, 단계 II는 1.0~13, 단계 III은 1.0~14사이에 분포하여 변화폭이  $N_{kr}$ 나  $N_{ke}$ 에 비하여 좁으며, 전체적으로 1/2 크기의 값을 보였으며,  $N_{kr}$ 나  $N_{ke}$ 와 비교할 때 표준편차 및 분산도가 낮아서 상대적으로 신뢰도가 높음을 알 수 있었다. 기존에 제안된 콘 계수 값들의 범위와 비교할 때  $N_{kr}$ 의 경우는 평균값이 14로 Aas 등(1986)이 제시한 값과,  $N_{ke}$ 는 평균값이 10.0으로 Semmeset 등(1982)이 제시한 값과,  $N_{\Delta u}$ 는 평균값이 8.0으로 Lunne 등(1985)이 제시한 값의 범위에 있음을 알 수 있다. 이는 기준  $s_u$ 의 측정방법이나 시험지반의 특성이 크게 다르지 않기 때문인 것으로 판단된다.



(a)  $s_u$  vs.  $(q_t - \sigma_{vo})$



(b)  $s_u$  vs.  $(q_t - u_2)$



(c)  $s_u$  vs.  $(u_2 - u_o)$

그림 3. CPT<sub>u</sub> 결과 vs. 기준 비배수 전단강도

그림 3은 기존 제안식(3~5)을 통하여 각각의 시험에서 얻어진 피에조 콘 결과와 기준  $s_u$ 의 상관 관계를 나타낸 결과이다. 표 6에 나타낸 바와 같이 지반처리 단계별로 비배수 전단강도 등의 지반특성 변화가 심하지 않기 때문에 그림 3에서 기울기로 나타나는 피에조 콘 계수의 변화폭이 작게 나타난 것이다. 또한, 그림 3의 (a), (b)에서는 단계 I, 단계 II, 단계 III의 순으로 기울기가 감소( $N_{kt}$ ,  $N_{ke}$  값 증가)되나, (c)에서는 기울기가 단계 II,

단계 III, 단계 I의 순서로 나타났다. 이것은 콘계수  $N_{Du}$ 가 단계 II에서는 약간 작게 산정 되었으나 전체적으로 볼때는 단계 I보다는 단계 III이 작게 산정된 것이다. 따라서  $N_{Du}$ 는 지반의 불균질성의 영향을 더 크게 받은 결과로 판단된다.

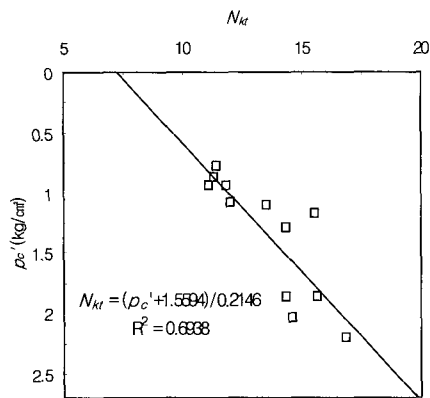
### 4.3.3 선행압밀압력과 콘 계수

그림 4는 선행압밀압력과 콘 계수의 관계를 나타낸 것으로 콘계수  $N_{kt}$ 와  $N_{ke}$ 가 증가함에 따라 선행압밀압력도 함께 증가하여 이들은 서로 각각 식 (6), (7)과 같은 선형관계를 나타내고 있다.

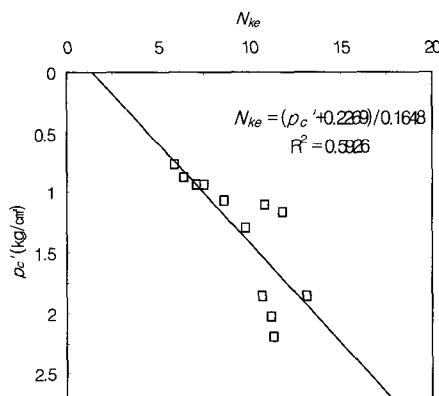
$$N_{kt} = \frac{(p'_c + 1.5594)}{0.2146} \quad (6)$$

$$N_{ke} = \frac{(p'_c + 0.2269)}{0.1648} \quad (7)$$

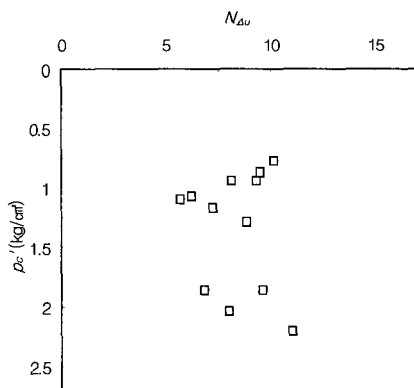
상관계수( $R^2$ )는 0.6938과 0.5926으로 다소 낮은 편이므로 향후 이 분야에 대하여 추가적인 연구를 통하여 적용 가능한 관계식을 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 반면에  $N_{Du}$ 는 선행압밀압력과 뚜렷한 관계를 보이지는 않았다.



(a)  $p'_c$  vs.  $N_{kt}$

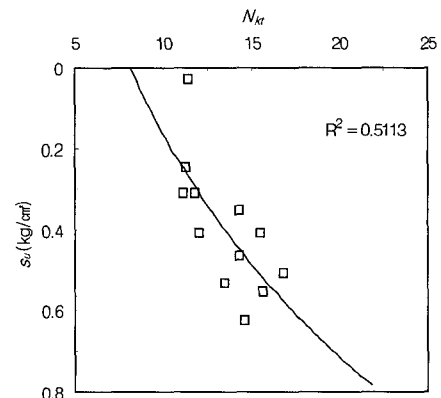


(b)  $p'_c$  vs.  $N_{ke}$

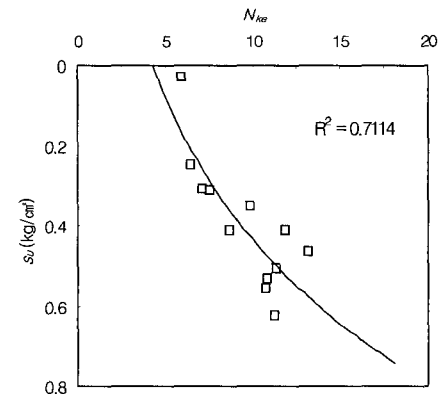


(c)  $p'_c$  vs.  $N_{Du}$

그림 4. 선행압밀압력 vs. 콘 계수



(a)  $s_u$  vs.  $N_{kt}$



(b)  $s_u$  vs.  $N_{ke}$

그림 5. 비배수 전단강도 vs. 콘 계수

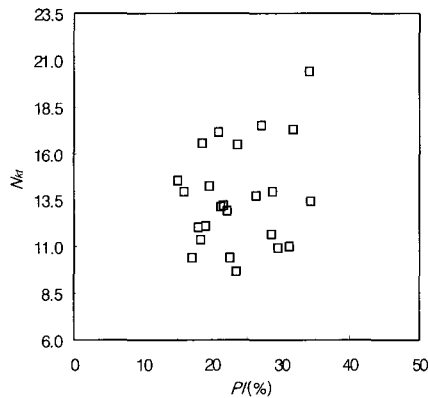
#### 4.3.4 비배수 전단강도와 콘 계수

그림 5는 비배수 전단강도와 콘 계수의 관계를 나타낸 것으로서 콘 계수  $N_{kr}$ 와  $N_{ke}$ 는 비배수 전단강도와 연관성을 나타내어 비배수 전단강도가 증가함에 따라 콘 계수도 함께 증가하였으며, 결정계수( $R^2$ )는 0.5113과 0.7114로 높지 않으나 선행압밀압력과의 관계와 유사한 경향을 나타냈다.

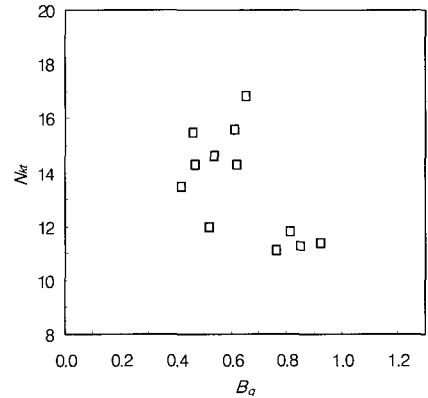
#### 4.3.5 소성지수와 콘 계수

그림 6은 소성지수와 콘 계수의 관계를 나타낸 것이

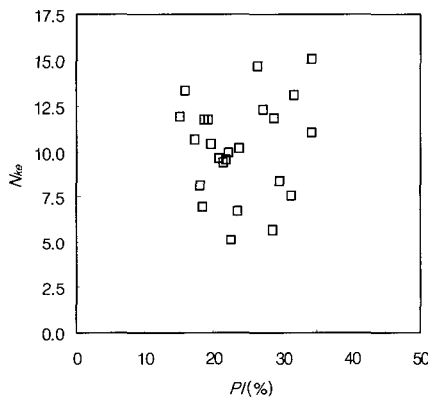
다. 콘 계수  $N_{kr}$ ,  $N_{ke}$ ,  $N_{du}$ 는 모두 소성지수와 뚜렷한 연관성이 없음을 확인할 수 있었다. 이는 소성지수가 피에조 콘 계수에 미치는 영향이 거의 없다고 제안한 La Rochelle 등(1988)의 연구 결과와 일치하는 반면, Aas 등(1986)이  $N_{kr}$ 와 소성지수, 비배수 전단강도 사이의 관계를 분석하여 소성지수 3~50% 이하에서  $N_{kr}$ 는 8~16 사이에 있으며, 소성지수에 따라  $N_{kr}$ 가 증가한다는 연구 결과와는 일치하지 않는 것이다.



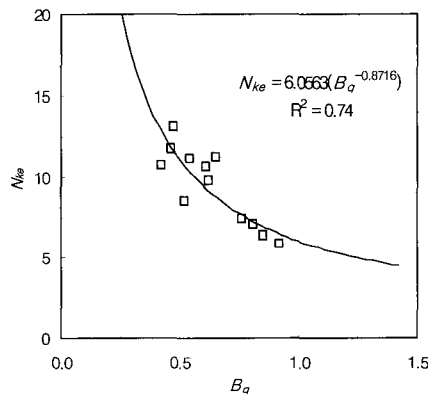
(a) PI vs.  $N_{kr}$



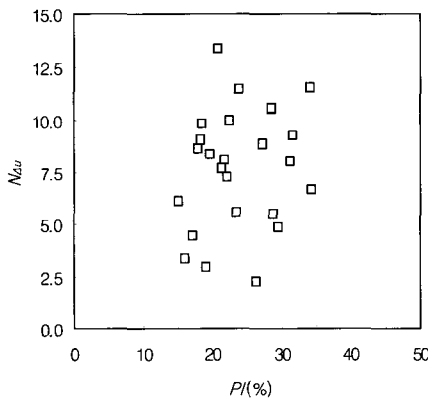
(a)  $B_q$  vs.  $N_{kr}$



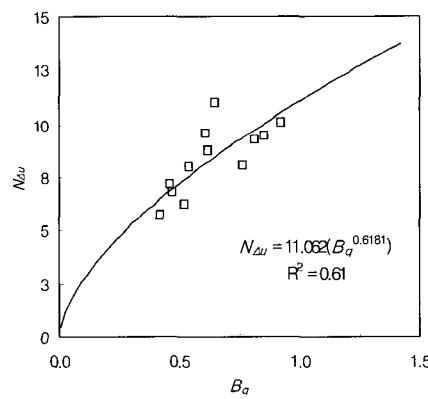
(b) PI vs.  $N_{ke}$



(b)  $B_q$  vs.  $N_{ke}$



(c) PI vs.  $N_{du}$



(c)  $B_q$  vs.  $N_{du}$

그림 6. 소성지수 vs. 콘 계수

그림 7. 간극수압비 vs. 콘 계수



### 4.3.6 간극수압비와 콘 계수

간극수압비와 콘계수와와의 관계를 분석하여 그림 7에 나타내었다. 간극수압비와 콘계수  $N_{kt}$ 는 뚜렷한 연관성을 찾아볼 수 없었으나,  $N_{ke}$ 와  $N_{du}$ 는 그림에 보이는 바와 같이 연관성을 보이므로, 회귀분석을 실시한 결과

$$N_{ke} = 6.06(B_q^{-0.87}) \quad (8)$$

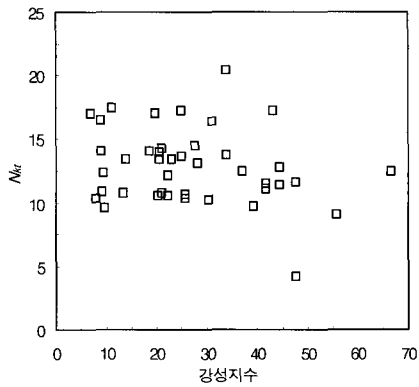
$$N_{du} = 11.06(B_q^{0.62}) \quad (9)$$

의 관계식을 얻을 수 있었다. 선형함수를 통해 나타난 결

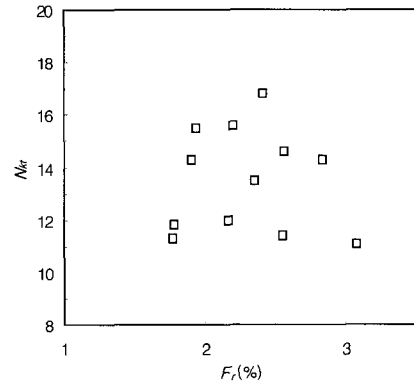
정계수( $R^2$ )는 0.61~0.74로 비교적 양호하게 나타나 적용성이 있을 것으로 예상된다. 이는  $N_{ke}$ 가 간극수압비와 관련이 있다고 제안한 Lunne 등(1985)과 Robertson 등(1986) 및 Karlsrud 등(1996)의 연구결과와 일치하고 있는 것이다.

### 4.3.7 강성지수와 콘 계수의 관계

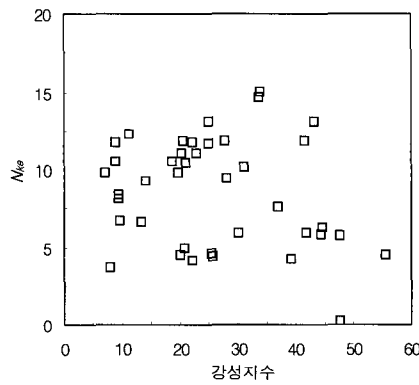
지반의 비배수 전단강도와 전단 탄성계수의 비로 정의되는 강성지수와 콘 계수의 관계를 분석한 결과에 의하면 뚜렷한 연관성은 찾아 볼 수 없었다. 이는 강성지수가 약 10~250 범위에서 증가함에 따라 콘 계수  $N_{kt}$ 도 약



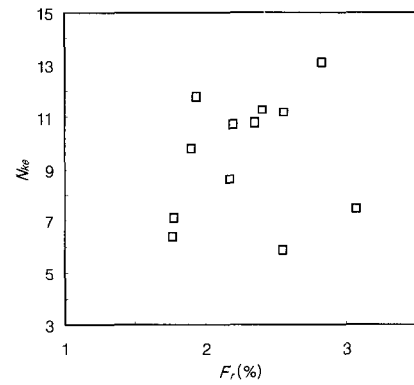
(a)  $I_r$  vs.  $N_{kt}$



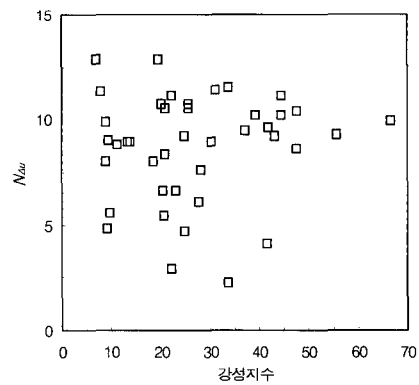
(a)  $F_r$  vs.  $N_{kt}$



(b)  $I_r$  vs.  $N_{ke}$

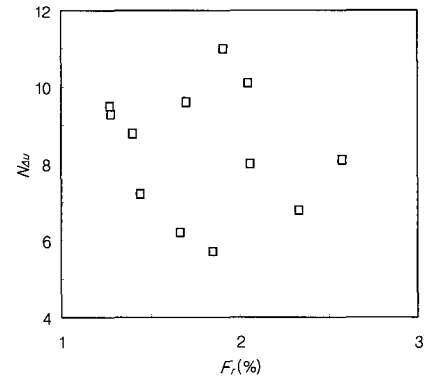


(b)  $F_r$  vs.  $N_{ke}$



(c)  $I_r$  vs.  $N_{du}$

그림 8. 강성지수 vs. 콘 계수



(c)  $F_r$  vs.  $N_{du}$

그림 9. 주면 마찰비 vs. 콘 계수

7.0~11.3 사이에서 함께 증가하여 강성지수와 콘계수  $N_{kt}$ 가 서로 연관성이 있다고 제안한 Vesic(1975)의 이론이나 덴마크의 흙을 사용하여 시험한 결과 강성지수와 콘계수  $N_{kt}$ 가 서로 연관성이 있다고 제안한 Kirsten Luke(1995), 그리고 시험을 통하여 강성지수와 콘 계수가 연관성이 있음을 제안한 Lunne 등(1985)의 이론과는 다르게 나타난 것이다. 여기서, 본 지반의 특성은 위치별로 서로 매우 유사하고, 강성지수는 알려진 바와 같이 비배수 전단강도와는 뚜렷한 연관성이 없으므로 비배수 전단강도가 변화하여도 강성지수와 콘 계수와의 관계는 연관성이 없는 것으로 판단된다.

#### 4.3.8 주면 마찰비와 콘 계수

콘 주면 마찰력과 전응력의 비로 정의되는 콘 주면 마찰비와 콘 계수와의 관계에서도 뚜렷한 연관성은 나타나지 않았다.

### 5. 결론

경남 양산물금 지역의 점성토로 이루어진 연약지반 처리공법 시험시공 지반을 대상으로 피에조 콘 관입시험을 이용하여 점성토의 비배수 전단강도를 추정할 때 적용하는 콘 계수의 특성에 대한 연구 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기준 비배수 전단강도(UU 삼축압축시험으로 측정)로 추정된 콘 계수 값의 범위와 평균치는  $N_{kt}$  : 4~23(평균 14),  $N_{ke}$  : 1~23(평균 10),  $N_{du}$  : 1~14(평균 8)로 나타났으며, 이는 국내의 기존 연구결과와 비교할 때 다소 차이를 보이고 있다.
- (2)  $N_{du}$ 가 다른 두개의 콘 계수보다 선행압밀압력의 크기에 상관없이 변화폭, 표준편차 및 분산도가 모두 작아서 신뢰성이 가장 높게 나타났다. 따라서 국내의 연약점토 지반에서 기준 비배수 전단강도를 산정할 수 있는 시험을 실시하지 않고 콘시험 결과만을 이용하여 비배수 전단강도를 추정하고자 할 때에는 콘 계수  $N_{du}$ 를 적용하는 것이 비배수 전단강도 추정 결과의 신뢰도를 높이는 바람직한 방법으로 판단된다. 이 때 적용하는 콘 계수  $N_{du}$ 의 값은 대략 7~9(평균 8)정도의 값이 적당하다.
- (3) 콘 계수 값과 지반 특성치의 관계를 분석한 결과, 상관관계가 비교적 높은 특성치의 작은 비배수 전단

강도와 콘 계수( $N_{kt}$ ,  $N_{ke}$ ,  $N_{du}$ ), 선행압밀압력( $N_{kt}$ ,  $N_{ke}$ ), 간극수압비( $B_q$ )와 ( $N_{ke}$ ,  $N_{du}$ )이었고, 선행압밀압력( $N_{du}$ ),  $B_q$ 와 ( $N_{kt}$ )는 상관관계가 나타나지 않았으며, 소성지수, 강성지수 그리고 마찰비도 콘 계수와 상관관계가 없는 것으로 나타났다.

### 참고 문헌

1. 이선재(1997), "피에조 콘을 이용한 국내지반의 공학적 특성 연구", 박사학위논문, 서울대학교, pp.50-79.
2. 장인성, 이선재, 정충기, 김명모(2001), "국내 점성토 지반의 피에조 콘 계수", 한국지반공학회는논문집, 제17권 6호, pp.15-24.
3. Aas, G., Lacasse, S., Lunne, T. and Hoeg, K.(1986), "Use of In-situ Tests for Foundation Design on Clay", Proceedings of the ASCE Specialty Conference In-situ '86: Use of In-situ Tests in Geotechnical Engineering, Blacksburg, American Society of Engineers (ASCE). pp.1-30.
4. ASTM.(1979), "Standard Method for Deep Quastic-Static Cone and Friction Penetration Tests of Soils", D3441, American Society of Testing Materials.
5. Baligh, M. M.(1975), "Theory of Deep site Static Cone Penetration Resistance", Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Cambridge, Mass, Publication No. R75-56.
6. Campanella, R. G., Gillespie, D.G. and Robertson, P.K.(1982), "Pore Pressure During Cone Penetration Testing", Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, Vol.2, pp.507~512.
7. Campanella, R. G., Robertson, P. K., Gillespie, D. G. and Greig, J.(1985), "Recent Developments in In-situ Testing of Soils", Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, SanFrancisco, Vol.2, pp.849-854.
8. Chen, B. S. and Mayne, P. W.(1993), "Piezocone Evaluation of Undrained Shear Strength in Clays", Proceedings of 11th Southeast Asian Geotechnical Conference, Singapore, pp.91-98.
9. Karlsrud, K., Lunne, T. and Brattlieu, K.(1996), "Improved CPTU Correlations Based on Block Samples", Nordisk Geoteknikermote, Reykjavik.
10. Kirsten Luke.(1995), "The use of  $c_u$  from Danish Triaxial Tests to Calculate the Cone Factor", International Symposium on Cone Penetration Testing. Volume 2, pp.209-214.
11. La Rochelle, P., Zedbi, P. M., Leroueil, S., Tavenas, F. and Virely, D.(1988), "Piezocone Tests in Sensitive Clay of Eastern Canada", Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando, Balkema Pub., pp.831-841.
12. Lunne, T. and Lacasse, S.(1985), "Use of In-situ Tests in North Sea Soil Investigations", Proceedings of the Symposium : From Theory to Practice in Deep Foundations, Porto Allegre, Brazil, Oct. 1985, Published in : Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Publication, pp.169.
13. Lunne, T., Christoffersen, H. P. and Tjelta, T. I.(1985), "Engineering use of Piezocone Data in North Sea Clays", Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sanfrancisco, Vol.2, pp.907-912.
14. Randolph, M.F., Wroth, C. P.(1979), "An Analytical Solution for the Consolidation around a Driven Pile", International Journal for

- Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, Vol.3, pp. 217-229.
15. Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D. and Greig, J. (1986), "Use of Piezometer Cone Data", Proceedings of the ASCE Specialty Conference In-situ '86 : Use of In-situ Tests in Geotechnical Engineering, Blacksburg, *American Society of Engineers(ASCE)*, pp.1263-1280.
  16. Robertson, P.K., Campanella, R.G., Davies, M.G. and Sy, A. (1988a), "Axial Capacity of Driven Piles in Detail Soils Using CPT", *Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing*, ISOPT-1, Orlando, 2, Balkema Pub., Rotterdam, pp.919-928.
  17. Schmertmann, J. H.(1978), "*Guidelines for Cone Penetration Test Performance and Design*", Federal Highway Administration, Report FHWA-TS-78-209, Washington, July, pp.145.
  18. Senneset, K., Janbu, N. and Svano, G.(1982), "Strength and Deformation Parameters from Cone Penetration Tests", *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*, ESOPT-II, Amsterdam, 2, Balkema Pub., Rotterdam, pp.863-870.
  19. Teh, C. I.(1987), "*An Analytical Study of the Cone Penetration Test*", D. Phil. thesis, Oxford University.
  20. Teh, C. I. and Housby, G. T.(1991), "An Analytical Study of the Cone Penetration Test in Clay", *Geotechnique*, No.41, Vol.1, pp. 17-34.
  21. Vesic, A. S.(1972), "Expansion of Cavities in Infinite Soil Masses", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol.98, SM3, pp.265-290.
  22. Vesic, A. S.(1975), "Principles of Pile Design", *Lecture Series on Deep Foundations*, Sponsored by the Geotechnical Group, BSCE/ASCE, Cambridge, Mass.

(접수일자 2003. 6. 23, 심사완료일 2003. 12. 9)