

피에조콘 관입시험(CPTu)을 이용한 콘계수(N_{KT}) 산정 및 설계 사례



이 종 범
(주)한국종합기술 상무
(jbumlee@kecc.co.kr)



김 창 현
(주)한국종합기술 이사
(kimchang@kecc.co.kr)



박 수 범
(주)한국종합기술 부장
(parksbv@hanmail.net)

1. 개요

최근 들어 국내에서도 연약지반 조사의 중요성이 부각되면서, 다양한 지반조사 기법들이 소개되어 적용되고 있다. 그중 피에조콘 관입시험(Piezoocone Penetration Test, CPTu)은 현재 유럽 및 북미 등 전 세계적으로 많이 시행되고 있는 지반조사 방법으로 룯드(Rod)에 콘 저항체를 부착하고 지반에 삽입한 상태에서 관입이나 인발 또는 회전시키면서 그 저항을 측정하여 지층의 분류, 시추공 사이의 지층변화 파악 등 다양한 지반특성을 비교적 정확하게 구할 수 있을 뿐만 아니라 연속적인 측정으로 인하여 지층 구분을 원활하게 할 수 있고, 다양한 결과를 심도에 따라서 일관되게 얻을 수 있기 때문에 국내외에서 크게 활용되고 있는 실정이다. 특히 비배수 전단강도와 콘 관입저항의 연관성은 피에조콘 관입시험이 개발된 이후 가장 많이 연구되고 있다.

그러나, 피에조콘 관입저항치를 이용하여 이론적인 해석방법으로 비배수 전단강도를 도출하는 방법은 매우 어렵고 지반의 특성치를 광범위하게 고려하지 못하기 때문

에 경험적 해석방법을 주로 사용하고 있다.

따라서, 본 고에서는 국내 서해안 지역 및 부산 서낙동강 지역에서 체계적인 현장시험 및 실내시험과 함께 수행한 CPTu 결과를 이용하여 국내지반에 적용된 피에조콘 계수를 산정 및 설계사례를 분석하였다.

2. CPTu를 이용한 피에조콘 계수 산정

2.1 콘관입시험 특성

피에조콘 관입시험은 흙의 여러 가지 성질을 동시에 측정할 수 있으며, 현장시험 수행시 획득할 수 있는 토질정수 및 특성은 다음과 같으며, 이중 1), 2), 3)항은 타 조사시험으로는 획득하기 어려운 피에조콘만의 특성이다.

- 1) 연속적인 지층주상도 및 비배수강도 산정
- 2) 수평방향 압밀특성 파악
- 3) 점토층 내의 샌드심(sand seam) 파악
- 4) 지반개량 전후의 전단강도 파악

- 5) 응력경로 및 과압밀비 측정
- 6) 간극수압 측정

2.2 피에조콘 계수 산정방법

CPTu로부터 비배수전단강도를 산정하기 위해서는 피에조콘계수를 이용하게 된다. 즉, CPTu시 측정되는 원추 관입 저항력 또는 간극 수압은 점성토의 비배수 전단강도와 밀접한 관계가 있으며, 그 관계를 피에조콘계수를 이용하여 설정함으로써 비배수전단강도를 결정하게 된다. 피에조콘계수는 적용방법에 따라 다음의 3가지로 구분된다.

(1) 전체 선단저항치를 이용한 방법

Schmertmann(1978)은 말뚝의 관입이 콘의 관입과 유사하다고 생각하여 식 (1)과 같이 비배수전단강도 산정 방법을 제안하였다.

$$S_u = q_c - \frac{\sigma_{vo}}{N_k} \quad (1)$$

여기서, q_c : 원추관입 저항력
 σ_{vo} : 전응력
 N_k : 무차원 콘계수

그러나, 간극수압을 측정하는 다공질 필터가 그림 1과 같이 원추 바로 뒷면에 위치한 피에조콘을 이용할 경우 q_c 는 간극수압 영향을 받기 때문에, Lunne et al.(1986)은 다공질 필터의 면적을 고려한 q_T 를 이용하여 식 (2)와 같이 S_u

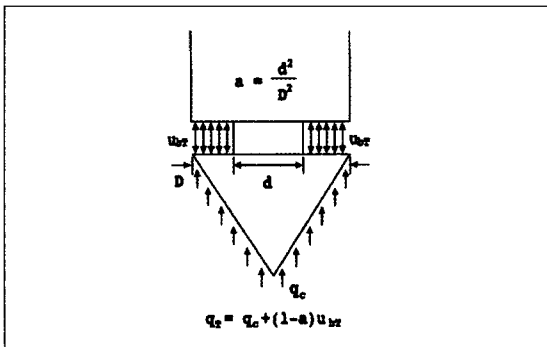


그림1. 부등단면적 효과

를 산정할 것을 제안하였다.

$$S_u = \frac{q_T - \sigma_{vo}}{N_{kT}} \quad (2)$$

여기서, q_T : 부등단면적 효과를 고려한 원추 관입 저항력
 N_k : 수정 전응력 무차원 콘계수

(2) 유효 선단저항치를 이용한 방법

Campanella 등(1982)은 식 (3)과 같이 원추 관입 저항력에서 간극수압을 뺀 값, 즉 유효응력개념으로 비배수 전단강도를 산정하는 방법을 제안하였다.

$$S_u = \frac{q_T - u_{bt}}{N_{qu}} \quad (3)$$

여기서, u_{bt} : 측정된 간극수압
 N_{qu} : 유효응력 콘계수

(3) 과잉간극수압을 이용하는 방법

Vesic(1972), Randolph와 Wroth(1979), Campanella 등(1985)은 공동팽창이론을 이용하여 식 (4)와 같이 비배수 전단강도를 피에조콘 관입시험에서 측정된 과잉간극수압의 형태로 나타내었다.

$$S_u = \frac{u_{bt} - u_o}{N_{du}} \quad (4)$$

여기서, u_o : 정수압
 N_{du} : 간극수압 콘계수

(4) 적용방법

상기 3가지 경험적인 방법 적용에 있어 비배수강도 측정 시험을 콘관입시험과 병행하여 각 경우마다 경험적인 관계식을 수립하는 것이 바람직하다. 따라서, Lunne 등(1997)은 다음과 같이 추천하고 있다.

1) 콘관입시험 결과만으로 비배수전단강도를 추정하고자하는 경우 전체선단저항치(q_T)를 이용하고, N_{kT} = 15~20정도의 값을 적용한다. 단, 정규압밀점토 및

피에조콘 관입시험(CPTu)을 이용한 콘계수(N_{kt}) 산정 및 설계 사례

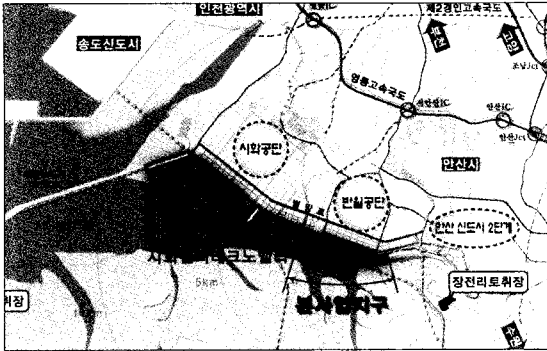


그림 2. 조사지역

과압밀점토의 경우 콘계수는 10이하, 굳은 점토의 경우 30정도까지 높아 질 수 있다. 또한, 매우 연약한 점토와 같이 전체단단 저항치의 신뢰성이 낮은 경우 비배수 강도는 과잉간극수압으로부터 추정하는 것이 바람직하다.

- 2) 지반조사 규모가 커서 다른 현장 또는 실내시험이 병행될 예정이라면 그 지반에 맞는 특정한 경험식을 수립하고 이용한다.

3. 서해안지역 N_{KT} 산정사례

3.1 조사지역

표 1. 지반조사 현황

현장	조사항목		현장	조사항목	
	조사항목	수량		조사항목	수량
시	시추조사	56공	토질	기본물성	330회
	피에조콘	58회		일축압축	66회
	간극수압소산	21회		삼축(UU)	34회
	연속 U.D 채취	7공		삼축(CU)	35회
	연속 배인	8공		Rowe Cell	7회
	D.M.T	4공		CK ₆ J	6회
	간극수압 계측	3공		C.R.S	6회
상기항목 외 다수 수행			상기항목 외 다수 수행		

본 현장은 그림 2와 같이 경기도 안산시 신길동, 대부분 일원으로 총면적 3,170천평의 단지조성공사 현장으로, 전체공구는 1~5공구로 구분되며, 이중 본 현장인 5공구(647천평)는 연약지반상에 성토 후 단지조성을 목적으로 한다.

3.2 지반조사

본 현장의 지반특성을 조사하기 위해 그림 3 및 표 1과 같이 시추조사 56개소, 피에조콘시험 58회, 현장배인시험 8회, 실내시험(삼축압축 포함) 등을 실시하였다.

지반조사결과 상부로부터 해성점토층, 사질토층, 자갈층, 풍화대 및 기반암의 순으로 분포하고있으며, 상·하부 해성점토층은 실트질점토(CL, CH), 점토석인 실트로(ML)

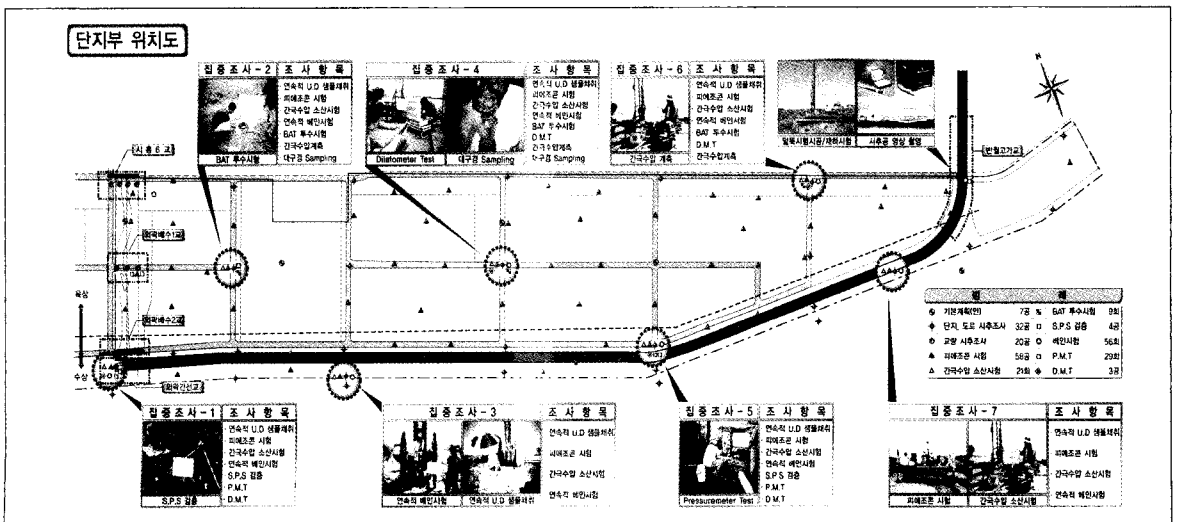


그림 3. 지반조사 현황

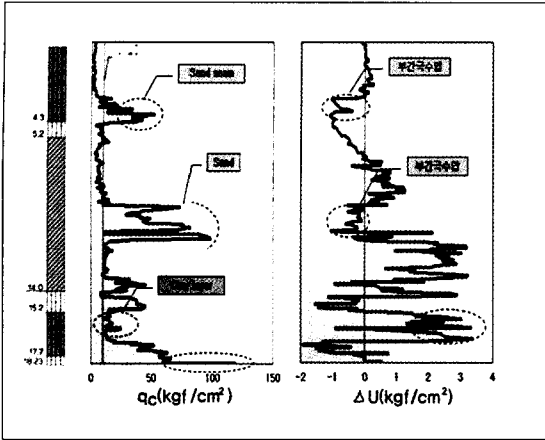


그림 4. 지층단면도

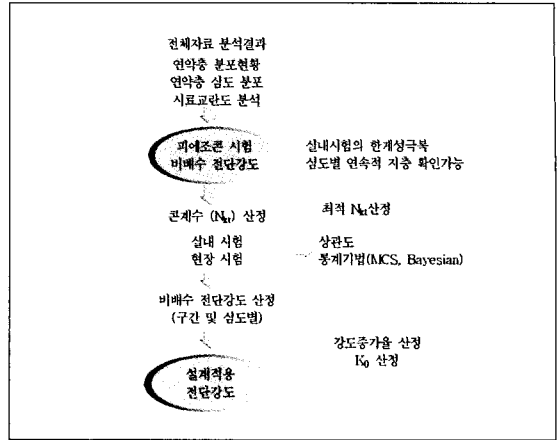
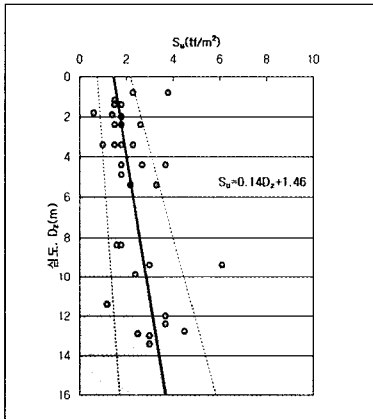
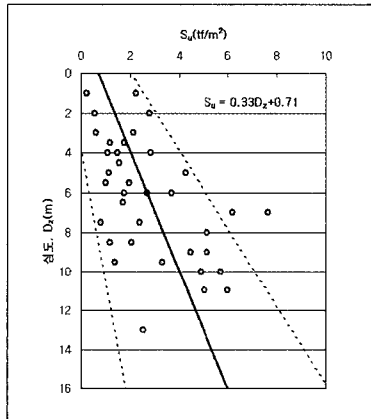


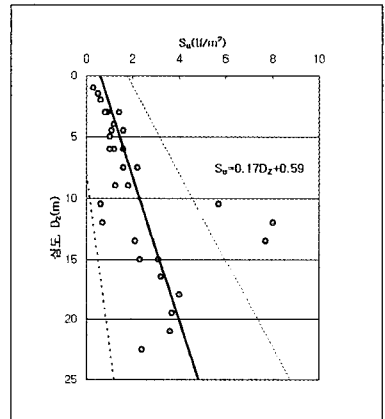
그림 5. 분석흐름도



UU-Test



DMT



Vane Test

그림 6. 심도별 비배수전단강도 분포

로 2.0m~18.5m의 층후로 구성되어 있고, 사질토층의 경우 1.0m~6.4m의 층후로 분포하고 있다. 그림 4는 시추조사 결과와 피에조콘 관입시험 결과를 심도별로 나타내고 있다. 시추조사 결과 GL-5.2m~14.0m 구간은 연약점토 (CL)로 구성되어 있으나, 피에조콘 관입시험 결과 시추조사에서 확인하지 못한 해성점토층 중간부에 콘관입 저항치가 상승하고 부의 간극수압이 작용하는 사질층이 분포하고 있음을 알 수 있다.

3.3 피에조콘 계수(N_{cr}) 산정

그림 5는 합리적인 피에조콘계수(N_{cr}) 산정을 위한 분석

흐름을 나타내고 있으며 아래의 방법으로 콘계수를 산정하였다.

3.4 심도별 비배수 전단강도 특성

콘계수 산정을 위해서 비배수 전단강도 시험인 베인시험, Dilatometer Test, 비압밀 비배수 삼축압축시험을 실시하였다. 그림 6에서 보는바와 같이 각 시험에서의 비배수 전단강도는 심도별 증가하는 양상을 보이며, 삼축 압축 시험의 경우 심도별 전단강도 분포의 상관성은 59.1%, Dilatometer Test는 54.7%, 베인시험은 52.8%의 상관성을 나타내고 있다.

피에조콘 관입시험(CPTu)을 이용한 콘계수(N_{kT}) 산정 및 설계 사례

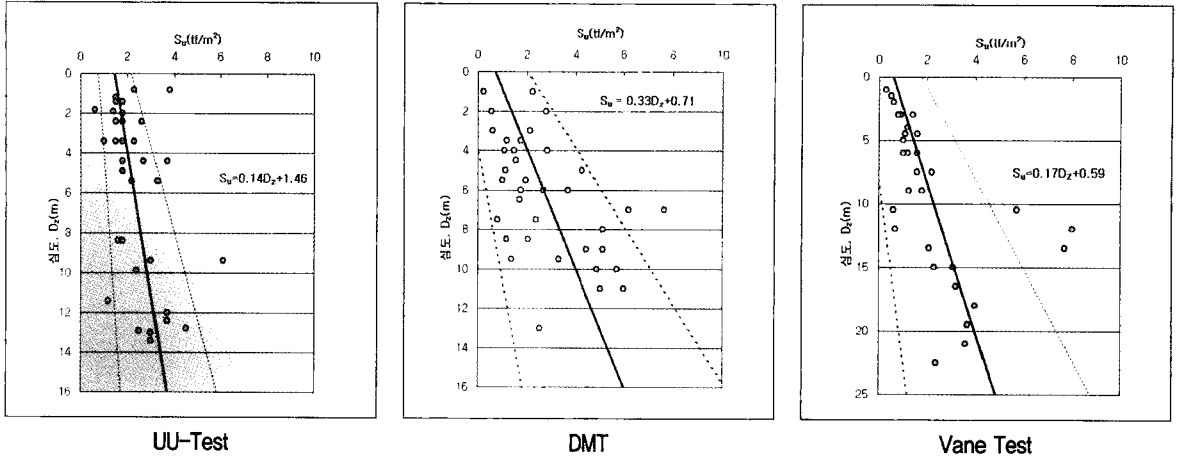


그림 7. 상관성 분석에 의한 콘계수 산정결과

3.5 각 시험별 콘계수 산정

콘계수 산정은 심도별 비배수 전단강도와 콘관입저항치와의 상관성 분석을 통해서 산정하였으며 그림 7과 같이 산정하였다. 각 시험별 상관성 분석결과 콘계수(N_{kT})는 삼축압축시험의 경우 20.27, Dilatometer Test의 경우 24.1, 베인 시험의 경우 17.54로 각각 산정되었으며, Dilatometer Test의 상관성이 82%로 가장 높게 나타났으나, 전체적으로 상관성이 낮게 나타났다. 이 현상은 각 시험에 따른 오차, 시료채취시 발생하는 교란 및 심도 별 분포하고 있는 샌드심(Sand Seam) 등의 영향으로 사료된다.

3.6 통계분석에 의한 콘 계수 산정

상기와 같이 여러 가지 원인에 의한 영향성 및 오차등을 보완하기 위하여 통계기법을 적용하여 각 시험별로 실시하였다. 신뢰성 향상을 위한 통계기법은 랜덤 샘플링 기법(Random Sampling Technique)인 몬테카를로 시뮬레이션 기법(Monte Carlo Simulation Technique)을 적용하였으며, 정규분포곡선을 위하여 상관성이 크게 벗어난 데이터는 분석에서 배제시켜 실시하였다. 통계분석은 각 시험별로 산정된 콘계수의 평균 및 표준편차를 가지고 2000개의 자료를 무작위로 추출하여 시험별로 산정하였다.

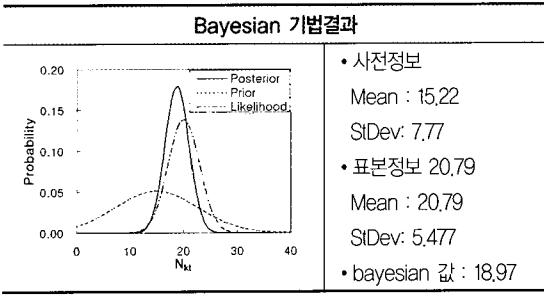
표 2는 Monte Carlo 통계분석결과를 나타내고 있다. 통

계분석결과 콘계수(N_{kT})는 삼축압축시험의 경우 18.97, 베인 시험의 경우 17.71, Dilatometer Test의 경우 24.95로 산

표 2. Monte Carlo Simulation Technique 결과

시험방법	MCS결과	분석결과
UU시험		- 데이터수 : 2000개 - 콘계수 : 18.97 - 표준편차 : 5.67
DMT		- 데이터수 : 2000개 - 콘계수 : 24.95 - 표준편차 : 5.67
Vane Test		- 데이터수 : 2000개 - 콘계수 : 17.71 - 표준편차 : 5.67
UU+Vane +DMT		- 데이터수 : 2000개 - 콘계수 : 20.79 - 표준편차 : 5.477

표 3. Bayesian 기법산정



정되었으며, 각각의 비배수강도 시험결과를 통합 분석한 결과는 20.79와 표준편차가 5.477로 가장 작은 편차를 보였다.

Random Sampling Technique을 이용한 콘계수를 산정한 결과 콘계수는 국내 서해안 지역에서 산정된 콘계수 값들과 비교하여 비교적 높은 쪽으로 산정되었다.

표 3은 산정된 값의 신뢰성 향상을 위하여 국내외의 제안된 콘계수값들을 사전정보로, 금회 시험자료들을 표본정보인 우도함수(Bayesian) 기법을 적용하여 과업구간의 콘계수값을 산정하였다.

Bayesian 통계에 사용된 사전정보는 국내 외 제안된 콘계수값들을 채택하였으며, 그 값들 중 상한 및 하한 값들을 제외한 값들 중 정규분포특성을 보인 값들을 이용하여 사전정보로 채택하였다. 또한, 우도함수인 표본정보는 Monte Carlo Simulation Technique 결과 가장 낮은 표준편차를 보인 전체 통합한 자료를 적용하여 사전 확률 값을 보장하도록 하였다. Bayesian 통계분석 결과 콘계수는 18.97로 산정되어 본 과업구간에 콘계수(N_{kt})를 19로 적용하였으며 심도별 비배수전단강도 산정에 이용하였다.

4. 부산지역 N_{kt} 산정사례

4.1 조사지역

본 현장은 그림 8과 같이 부산 서낙동강 주변 약 10km 구간이다. 본 현장의 점성토에 대한 피에조콘계수를 결정하기 위하여 피에조콘 관입시험을 시행하였고, 비배수 전

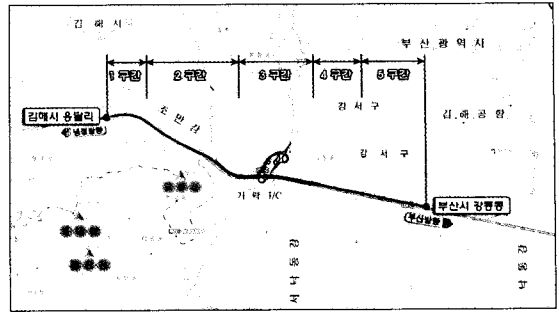


그림 8. 조사지역

표 4. 지반조사 현황 구간

구간	콘관입 시험 횟수	소성지수 (%)	점토층의 두께(m)	통일 분류 기호	기준비배수 전단강도 측정방법
1구간	5회	23~26	2.6~13.5	CH, CL	FVT
2구간	8회	11~37	1.0~36.5	CH, CL, ML	FVT
3구간	11회	9~33	31.0~50.8	CH, CL	FVT
4구간	7회	13~36	24.0~34.5	CL	FVT
5구간	4회	38~12	12.0~30.0	CH, CL, ML	FVT

단강도를 측정하기 위하여 현장 베인 전단시험을 시행하였다.

4.2 지반조사

본 현장의 지반특성을 조사하기 위해 표 4와 같이 구간별로 35회의 피에조콘시험, 62회의 현장베인시험, 실내시험 등을 실시하였다.

지반조사결과 전 구간에 걸쳐 점토층상부에 실트질 모래층이 존재하며, 점토층 하부에는 모래섞인 자갈층이 분포한다. 1구간의 경우 2.6~13.5m, 2구간의 경우 1.0~36.5m, 3구간의 경우 31.0~50.8m, 4구간의 경우 24.0~34.5m, 5구간의 경우 12.0~30.0m 두께로 점토층이 분포하며, 실내시험을 통하여 나타난 대상 지반은 소성지수(I_p)가 대부분 40%미만인 저소성 점토로서 통일분류법에 따르면 주로 CL로 분류되며, 과압밀비는 대부분 3.0미만으로 정규압밀되어 있는 것으로 나타났다.

4.3 심도별 피에조콘 관입시험 결과

피에조콘 관입시험(CPT_u)을 이용한 콘계수($N_{k,T}$) 산정 및 설계 사례

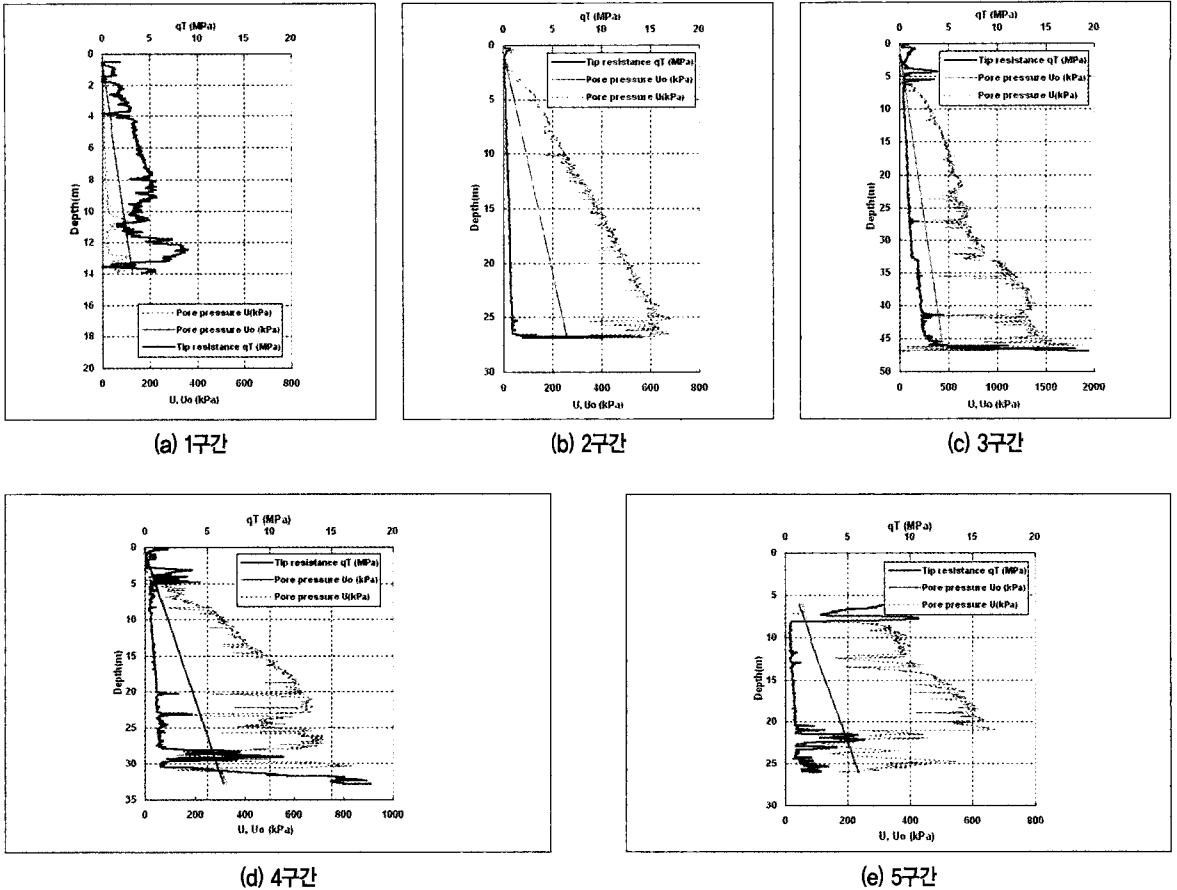


그림 9. 구간별 대표 피에조콘 관입시험 결과

그림 9는 구간별로 대표적인 피에조콘 관입시험 결과를 나타낸 것으로, 피에조콘 계수의 결정을 위한 변수로 q_T , u_b , q_{T-u_b} 를 심도에 따라 도시하였다.

4.4 콘계수 산정

본 연구에서는 부산지역의 점성토지반에 대한 CPT_u를 실시하였으며, 이와 비교 기준이 되는 비배수 전단강도의 결정을 위하여 현장배인 전단시험을 실시하였다. 비배수 전단강도는 점성토의 고유한 특성치가 아니므로 시험방법에 따라 다른 값을 가질 수 있으며, 그에 따라 피에조콘 계수 또한 변화할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 비배수 전단강도 측정방법에 따른 영향은 고려하지 않고 현장배인 전단시험을 통하여 얻은 비배수 전단강도를 통하여 점성

토의 특성에 따른 영향만을 고려하여 피에조콘 계수를 결정하였다.

시험에서 얻어진 CPT_u결과와 현장배인전단시험에서 얻어진 s_u 의 상관관계는 그림10과 같이 나타내었다.

그림10의 자료들을 표본의 정규분포로 가정하면, 신뢰도 80%에 대한 모집단의 평균은 아래 식과 같은 범위에 있다. 따라서 부산지역의 점토에 대한 평균 피에조콘 계수 및 신뢰도 80%일 때 신뢰구간은 표 5와 같다.

$$-1.28 \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq m \leq +1.28 \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

여기서, σ 는 표준편차,

n 은 자료의 개수, 그리고 m 은 모집단의 평균이다.

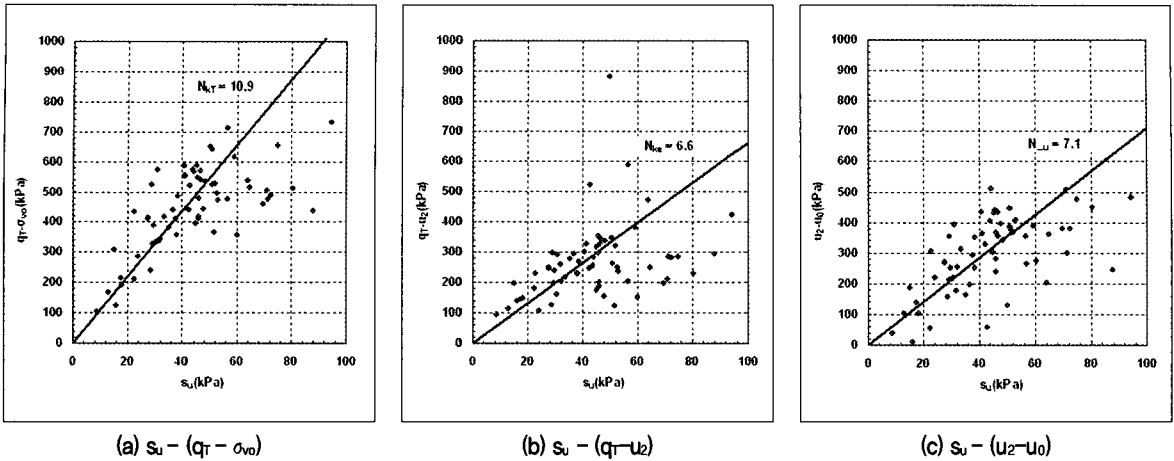


그림 10. CPTu결과와 기준 비배수 전단강도와와의 관계

표 5. 콘계수 산정결과

N_{kT}	N_{ku}	N_{du}
9.9~11.9	5.7~7.5	6.2~8.0

이선재(1997)의 연구에 의하면 국내지반의 피에조콘 계수는 $N_{kT} = 9 \sim 14$, $N_{du} = 2 \sim 10$, $N_{ku} = 6.0 \sim 7.2$ 의 값을 가지는 것으로 나타났다. 본 시험구간인 부산지역의 결과 또한 이와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났으며 특히, 기존 연구결과에 비해 그값의 편차가 상당히 작게 나타났다.

동일지역의 지반은 동일한 지반 형성과정과 퇴적이력 때문에 그 공학적 특성이 유사하게 나타난다. 따라서, 피에조콘 계수도 지역별로 다르게 나타날 수 있으며, 본 시험구간이 부산지역 전체의 지반을 대표한다고 하기에는 무리가 있을 수 있지만 향후 개략적인 부산지역 점성토의 피에조콘 계수의 활용적 측면에서 의미를 가질 것으로 판단된다.

5. 결론

국내 서해안 지역 및 부산 서낙동강 지역에서 체계적인 현장시험 및 실내시험과 함께 수행한 CPTu 결과를 이용하여 국내지반에 적용된 피에조콘 계수를 경험적인 방법을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 피에조콘 관입시험을 이용하여 점성토층 사이에 존재

하는 샌드심(Sand Seam)층의 확인이 가능하였다.

- 2) 사회지역에 분포하고 있는 점토층에 대한 피에조콘을 이용한 비배수전단강도 평가를 위한 피에조콘계수를 각종 시험 및 통계분석을 통해 산정 결과 $N_{kT} = 19$ 로 분석되었다.

- 3) 부산 점성토 지반의 비배수 전단강도 산정을 위한 피에조콘 계수는 $N_{kT} = 10.9(\pm 1.0)$, $N_{ku} = 6.6(\pm 0.9)$, $N_{du} = 7.1(\pm 0.9)$ 로 나타났다. 여기서, 괄호속 수치는 신뢰구간 80%를 나타낸다.

- 4) 국내의 지역별 제안값 및 산정된 콘계수값들을 비교해 볼 때 오차의 범위가 크게 나타나는 것을 알 수 있었으며, 그 원인은 기준비배수강도시험의 신뢰성, 지반이력, 퇴적환경 등의 여러가지 요인들로 사료된다.

- 5) 정확한 콘계수 산정을 위해서는 기준이 되는 비배수 전단강도의 신뢰성 향상 및 지역적 특성 등을 고려하여 적용하여야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 이선재, "피에조콘을 이용한 국내지반의 공학적특성 연구", 서울대학교 공학박사 학위 논문(1997),
2. 장인성외 3인, "국내점성토 지반의 피에조콘 계수", 한국지반 공학회(2001),제17권6호, pp15~24.

3. 윤길림, 이규환(2004), "토목·건설기술자를 위한 콘관입시험의 활용 및 지반설계", 구미서관, pp51-121
4. 김영상, "피에조콘 소산시험을 이용한 연약지반의 신뢰성 있는 압밀특성 추정", 한국과학기술원 박사학위 논문(1998).
5. 윤길림외 3인, "CPT를 이용한 비배수전단강도 평가", 한국지반공학회(1996)가을학술세미나, pp.321-326
6. Geotech AB(1998), Geotech cone penetration test(CPTu) equipment user manual, pp.5-6
7. Lunne,T, P.K.Robertson & J.J.M.Powell,(1997), Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, Blackie Academic & Professional.
8. Baligh, M. M.(1975), "Theory of deep site static cone penetration resistance," Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Cambridge, Mass., Publication No.R7 5-56.
9. Campanella, R. G., Robertson, P. K., Gillespie, D. G. and Greig, J.(1985), "Recent developments in insitu testung of soil," Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol. 2, pp.849-854

2008 가을학술발표회 논문모집 및 사전등록 안내

2008년 가을학술발표회를 10월 10일(금)~11일(토) 양일간 전남대학교에서 개최합니다. 이와 관련하여 학생세션과 포스터세션의 논문을 모집하오니 회원 여러분의 많은 참여를 바랍니다.

- 일 시 : 2008년 10월 10일(금) ~ 11일(토) / (1일 학술발표회, 1일 현장견학)
- 장 소 : 전남대학교
- 형 식 : ① 초청강연, 세션별 주제 토론 (기술위원회 운영 세션)
 ② 포스터 세션 발표 (회원전체 대상)
 ③ 학생세션 (우수 발표 시상/상장 및 상품)
 ④ 국제세션
 ⑤ 해외세션
 ⑥ 현장견학

◎ 사전등록안내

사전등록기간 : 2008년 9월 1일(월) ~ 9월 30일(화)

홈페이지(<http://www.kgshome.or.kr>)로 접속 → 참가등록신청 → 참가자 인적사항 입력(회원검색, 비회원 직접입력) → 결제방법 선택 → 최종 입력현황 확인 → 결제

◎ 등록비 안내

구 분	사전등록 (2008년 9월 1일 ~ 9월 30일)	현장등록
정회원	40,000원	60,000원
학생회원	20,000원	30,000원
비회원	60,000원	80,000원

- 기타 공문하신 사항은 학회사무국(02-3474-4428)으로 문의하시기 바랍니다.