

피조콘 관입저항치(q_c)를 이용한 연약지반 심도결정에 관한 연구

A Study on the Determination of Depth of Soft Ground by Cone Resistance

신윤섭¹⁾, Yun-Sup Shin, 김민철²⁾, Min-Choul Kim, 김연정³⁾, Yeon-Jung Kim, 김영웅⁴⁾, Young-Ung, Kim

¹⁾ (주)유신코퍼레이션 건설기술연구소 기초연구실 대리, Geotechnical Research Institute of Yooshin Corporation

²⁾ (주)유신코퍼레이션 지반공학부 차장, Geotechnical Engineering Division of Yooshin Corporation

³⁾ (주)유신코퍼레이션 지반공학부 상무, Geotechnical Engineering Division of Yooshin Corporation

⁴⁾ 인천국제공항공사 공항시설팀 팀장, Airport Facilities Department Incheon International Airport Corporation

개요(SYNOPSIS) : Recently, piezocone penetration test is frequently conformed in order to estimate the characteristics of soft ground with standard penetration test, generally used in the past. The soil characteristics, such as cone penetration resistance, friction resistance and excessive pore water pressure, can be evaluated continuously through the piezocone penetration test.

In Incheon International Airport 2nd phase site preparation, standard penetration test and piezocone penetration test were used in order to increase the confidence for determination of soft ground depth. And the compressible layer was determined by the comparison between the preconsolidation pressure and the designed increase pressure.

As the results, the relation between standard penetration test and piezocone penetration test shows $q_c=(1.09\sim1.63)N$ at the soft ground, determined by 5/30 N value. And $q_c=(1.21\sim1.98)N$ was shown at the point of compressible layer, evaluated by the preconsolidation pressure.

These results were applied to determination for the depth of soft ground and to design the improvement for the soft clay.

Key words : Piezocone penetration test, Standard penetration test, Preconsolidation pressure, Soft ground depth,

1. 서론

산업발전에 따른 국토의 확장, 농경지 확보 및 국가기간시설물의 설치 시 제한된 국토를 효율적으로 활용하기 위해서 최근 서해안을 중심으로 연약지반에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 향후 연약지반에 대한 지속적인 연구 및 개발은 불가피한 실정이다. 연약지반에 하중이 작용하면 지반의 간극비가 감소하면서 침하가 발생하게 되는데 연약한 점토지반의 경우 장기적이 침하거동이 예상되어 지반개량 설계 및 꾸준한 계측관리가 요구되고 있다. 이러한 연약지반의 거동특성은 흙 입자 성분 및 연약지반 심도에 따라 달라지므로, 합리적이고 경제적인 연약지반 개량 설계를 위해서는 흙 입자에 대한 분석과 연약지반 심도 결정이 매우 중요하다.

본 연구에서는 인천국제공항 2단계 부지조성공사 지반조사와 관련하여 하부지반의 지층상태를 파악하고 설계를 위한 연약지반 심도 결정시 그 신뢰도를 향상시키기 위해서 표준관입시험(N)과 피조콘시험(q_c)을 수행하였다. 일반적으로 연약지반 심도를 결정할 때에는 기존에 조사된 문헌이나 자료를 바탕으로 기준이 되는 표준관입저항치나 콘관입저항치를 결정하고, 이를 바탕으로 연약지반 심도를 결정하게 된다.

본 연구에서는 연약지반 심도 및 선행압밀하중을 기준으로 인천국제공항 부지조성공사 지반조건에 적합한 표준관입저항치와 피조콘 관입저항치 관계를 분석하고, 연약지반심도 결정시 기준이 될 수 있는 피조콘 관입저항치치를 결정하고자 한다.

2. 기본이론

2.1 연약지반 기준

일반적으로 연약지반이란 연약토로 이루어진 지반을 말하며, 연약토는 강도가 약하고 압축되기 쉬운 흙을 말한다. 연약지반 결정 시 중요한 것은 연약한 정도에 대한 문제인데 이것은 연약지반에 가해지는 하중에 의해 결정된다고 할 수 있다. 즉, 지반의 연약성에 대한 평가는 연약지반에 축조되는 구조물의 규모라든지 하중강도에 따라 변화하기 때문에 상대적인 의미로 해석 및 평가하는 것이 바람직하다.

일반적으로 연약지반은 점토나 실트와 같은 미세한 입자가 많고 부드러운 흙, 간극이 큰 유기질토, peat 및 느슨한 모래 등으로 구성된 토층이며, 이러한 토층은 두께가 두꺼울수록, 지하수위가 높을수록, 상부에 퇴적된 토층의 두께가 얇아 적은 토피압을 받을수록 공학적으로 문제가 많이 발생하게 된다.

연약지반을 구성하는 흙은 매우 다양하며, 토층이나 토질에 따라 정량적으로 구분하기는 어려우나 연약지반을 개략적으로 구분하면 다음 표와 같다.

표 1. 연약지반판정기준 (일본토목공법 연구회)

구분	연약층두께(m)	N치	qc (kg/cm ²)	qu (kg/cm ²)	비고
이탄질 및 점성질 지반	D ≤ 10	4 이하	8 이하	0.6 이하	
	D ≥ 10	6 이하	12 이하	1.0 이하	
사질토		10 이하	40 이하	-	

표 2. 토질특성에 따른 연약지반 판단 기준 (한국도로공사, 구조물설계기준)

지반 구분	토층 및 토질 구분			토질 정수			
				Wn(%)	e _s	qu(kg/cm ²)	N치
이탄질 지반	고 유기질토	Peat	섬유질 고압축토	300이상	7.5이상	<0.4	<1
		흑니	분해가 진척된고 유기질토	300-200	7.5-5.0		
점토질 지반	세립토	유기질토	소성도 A선 이하의 유기질토	200-100	5.0-2.5	<1.0	<4
		화산회질 점토	소성도 A선이상, 화산회질 2차 퇴적점성토				
		Silt	소성도 A선이하 Dilatancy대	100-50	2.5-1.25		
		Clay	소성도 A선위 Dilatancy대				
사질지반	사질토	SM, SC	#200번체 통과량 15-50%	50-30	1.25-0.8	≅ 0	<10
		SP-SC	#200번체 통과량 15%이하	<30	<80		
		SW-SW					

2.2 피조콘 관입시험(Piezocone test)

지반조사 시 많이 시행되고 있는 현장시험방법 중에 하나인 피조콘 관입시험은 결과의 정확성 및 시험의 신속성과 경제성이 있어 매우 우수한 방법으로 인정받고 있다. 피조콘 관입시험은 흙을 육안으로 관찰할 수 없다는 단점을 가지고 있음에도 불구하고 원추관입저항력(q_c), 슬리브의 마찰저항력(f_s), 콘이 관입될 때 발생하는 간극수압(u)을 측정 수 있으므로 연약지반 조사 시 많이 활용되고 있다.

피조콘 관입시험을 통해서 연약지반의 비배수 전단강도특성 및 지반의 배수특성을 파악할 수 있으며, 또한 지층의 연속적인 조사를 통하여 지층변화에 따른 지층분류를 비교적 정확하게 수행할 수 있다.

피조콘 관입시험은 단면적 10cm², 선단각 60°인 콘을 사용하여 관입속도는 2cm/sec ± 0.5cm/sec를 유지하여 시험하여야 한다. 시험 시 중요한 사항은 콘의 포화상태를 유지하면서 시험을 수행하여야 하며 정확한 Calibration 단계를 거쳐 측정값의 오차를 최소화하여야 한다.

피조콘 관입시험시 포화단계 및 Calibration 단계는 다음과 같다.

표 3. 토질특성에 따른 연약지반 판단 기준 (한국도로공사, 구조물설계기준)

Piezocone의 포화 단계	Calibration 단계
①일반적으로 필터(filter) 부분은 대형 수조에서 5~24시간 정도 방치하여 포화시킨다.	①Load cell 장치로 Dead weight와 Pressure를 조정한다.
②다공 필터를 대형 진공로 속에 소형 초음파기를 설치하여 30~50°C의 글리세린 속에 담근다.	②Pressure chamber로 간극수압을 조정한다.
③사운딩이 끝날 때마다 다시 포화시킨다.	③콘을 1m 깊이의 지중에 약 30분간 관입하여 지중의 온도와 같아졌을 때 시험을 시행하거나, 지중의 온도와 같은 온도의 물 속에서 15~30분간 담근 후 시행한다.
④점성토층의 사운딩 시험 후에는 교체를 원칙으로 한다.	

2.3 표준관입저항치(N)와 콘관입저항치(q_c) 관계

현장 Sounding 시험인 표준관입시험과 피조콘시험 결과를 비교하여 상호간의 관계를 평가하고자 하는 연구는 Meyerhof 및 Robertson 등에 의해 오랜 기간동안 수행되어왔다. 또한 Robertson & Campanella는 입도분포(D₅₀)에 따른 피조콘관입저항치와 표준관입저항치의 관계를 다음과 같이 분석하였다.

표 4. 표준관입저항(N)과 콘관입저항치(q_c) 관계

제안자	관계식
Meyerhof (1956)	$q_c = (2.5 \sim 5.5) N \approx 4N$
Robertson et al	$q_c = (1.0 \sim 9.0) N$
Robertson & Campanella (1983)	$q_c = (1.0 \sim 8.0) N$

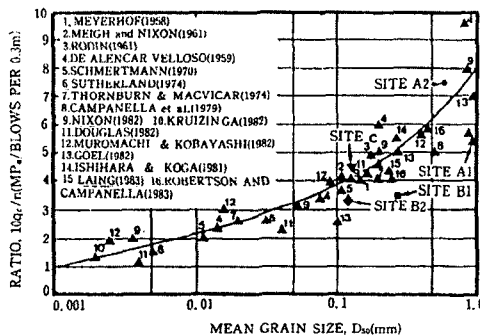


그림 1. Robertson & Campanella(1983)

표준관입저항과 피조콘관입저항과의 관계는 재료의 특성에 따라 다양한 결과를 나타내고 있으며 다소 넓은 분포 범위를 제시하고 있다. 표준관입저항치와 피조콘관입저항치의 관계는 지역 및 현장여건에 따라 상이하게 나타나므로 일률적인 기준을 적용하기에는 무리가 있다.

그러므로 본 현장에서는 조사된 자료를 바탕으로 현장여건에 맞는 표준관입저항치와 피조콘관입저항치의 관계를 파악하여 연약지반 심도결정 시 기준이 될 수 있는 피조콘 관입저항치 기준을 결정해야 한다.

3. 평가 방법

3.1 연약지반 심도 기준

연약지반 심도를 기준으로 표준관입저항치와 피조콘관입저항치관계를 평가하는 방법은 지역에 따라 기준이 되는 동일 심도에서 각각의 저항치를 비교하므로 연속성 있게 조사한 콘관입저항치 자료를 활용하는 방법이다.

- ① 먼저, 표준관입저항치를 이용하여 적정 기준에 따라 연약지반 분포를 파악하고 지역에 따라 평균 연약지반 심도를 결정한다.
- ② 연약지반에서 표준관입저항치와 피조콘관입저항치와의 관계를 파악하기 위하여 심도에 따른 피조콘관입저항치 분포를 연속적으로 파악한다.
- ③ 표준관입저항치를 기준으로 산정한 연약지반 평균 심도와 동일한 심도에서 피조콘관입저항치의 평균 값을 산정한다.
- ④ 이러한 결과를 바탕으로 표준관입저항치(N 치)와 피조콘관입저항치(q_c)와의 관계를 산정한다.

3.2 선행압밀하중(P_c') 기준

연약지반 상에 선행압밀하중 이상의 하중이 작용할 때 지반은 과도한 압축이 발생하며, 이러한 압축이 발생하는 위치를 파악하여 표준관입저항치와 피조콘관입저항치를 비교하는 방법이다. 이러한 방법으로 표준관입저항치와 피조콘관입저항치와의 관계를 평가하는 방법은 심도에 따라 연속적인 분석은 어렵지만, 작용하는 하중에 따른 연약지반의 심도를 결정하고, 직접 설계에 적용한 불교란시료를 이용하여 각각의 저항치 관계를 비교한다는 장점이 있다.

- ① 시추조사 시 채취한 불교란 시료의 위치를 파악하고 심도별로 정리·분석한다.
- ② 연약지반에서 채취한 불교란시료의 압축시험을 통하여 선행압밀하중(P_c')을 산정한다.
- ③ 동일한 위치에서 장래 계획된 설계하중에 의한 예상증가하중(ΔP)을 계산하여 선행압밀하중과 비교한다.
- ④ 예상증가하중이 선행압밀하중 보다 작으면 압축은 재압축지수(C_r) 기울기에 따른 거동이 예측되므로 이를 연약층으로 평가할 수 없다.
- ⑤ 예상증가하중이 선행압밀하중 보다 큰 경우 압축은 압축지수(C_c)에 영향을 받게되므로 이를 연약층으로 간주할 수 있으며, 이 위치에서의 표준관입저항치와 콘관입저항치를 비교하여 연약지반 심도 결정시 기준을 설정한다.

3.3 평가 대상지역 및 시험수량

연약지반 심도 기준 및 작용하는 설계하중과 관련하여 선행압밀하중 기준으로 피조콘관입저항치를 분석한 지역은 다음과 같다. 평가 지역에서는 시추조사와 실내시험을 위해 불교란시료를 채취하였으며 피조콘시험을 통하여 콘 관입저항치를 산정하였다.

표 5. 평가 대상지역 및 시험수량

평가 지역	시추조사 (회)	불교란시료 채취(회)	피조콘시험 (회)
3월주로 남측	30	65	25
3월주로 중앙	50	52	45
3월주로 북측	8	12	4
여객계류장	12	17	18
계	100	146	92

4. 결 과

4.1 연약지반 심도 기준 결과

평가 지역별 표준관입저항치(N=5)를 기준으로 연약지반 심도를 결정하였고, 동일한 심도에서 피조콘 관입저항치의 평균값을 산정하였다. 평가 지역별 연약지반 심도를 기준으로 표준관입저항치에 따른 피조콘 관입저항치 값을 분석한 결과는 다음과 같다.

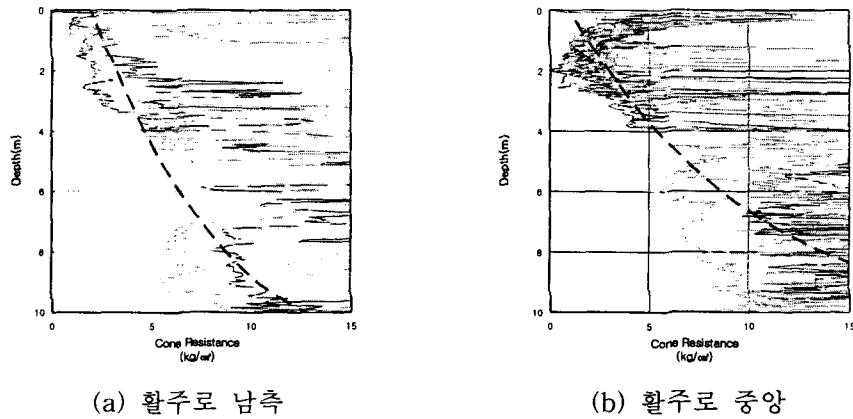


그림 2. 심도에 따른 N치와 q_c 관계

평가 결과 활주로 남측과 중앙의 N치 5까지의 평균 심도는 각각 7.5m, 4.0m로 나타났으며 이 심도에서 피조콘 관입저항치는 각각 평균 8.14kgf/cm^2 , 5.45kgf/cm^2 를 나타내었다.

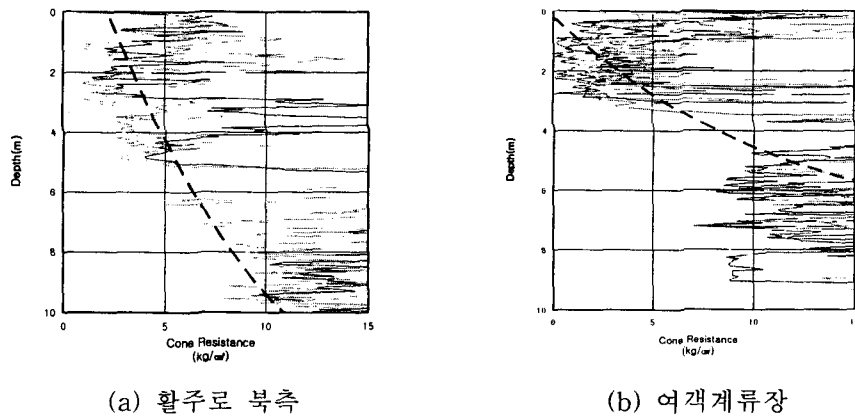


그림 3. 심도에 따른 N치와 q_c 관계

평가 결과 활주로 북측과 여객계류장의 N치 5까지의 평균 심도는 각각 4.9m, 3.0m로 나타났으며 이 심도에서 피조콘 관입저항치는 각각 평균 5.51kgf/cm^2 , 5.55kgf/cm^2 를 나타내었다. 이러한 결과를 정리하면 다음과 같다.

표 6. 대상지역 평가 결과

위 치	연약층평균 심도 (m)	N치	q_c (kgf/cm ²)	q_c/N
활주로 남측	7.5	5	8.14	1.63
활주로 중앙	4.0	5	5.45	1.09
활주로 북측	4.9	5	5.51	1.10
여객계류장	3.0	5	5.55	1.11
분 석	▶ 연약지반 심도에 따른 N와 q_c 와의 관계 ⇒ $q_c = (1.09 \sim 1.63)N$			

4.2 선행압밀하중(P_c') 기준 결과

지반에 선행압밀하중 이상의 하중이 작용할 때 지반은 과도한 압축이 발생하여 연약지반 거동을 나타내므로 평가 지역에 따라 시추위치별로 선행압밀하중과 예상증가하중을 비교하여 연약지반 거동을 나타낼 수 있는 위치를 선별하였다.

선행압밀하중은 하중에 따른 간극비 곡선을 통해 산정할 수 있으며, 예상증가하중은 노체 및 노상의 매립, 포장체 시공, 항공기 하중 등에 의해서 결정되며 다음과 같이 표시할 수 있다.

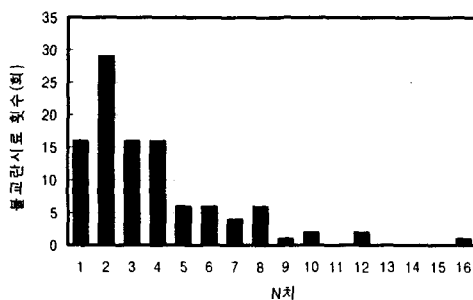
$$\text{예상증가하중}(\Delta P) = \text{매립하중}(\Delta P_1) + \text{포장체}(\Delta P_2) + \text{운하중}(\Delta P_3) + \text{기타}$$

평가지역별 선행압밀하중과 예상증가하중의 값의 범위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

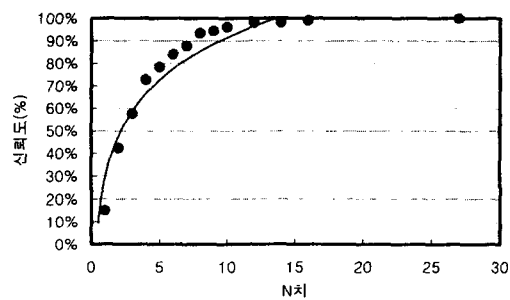
표 7. 선행압밀하중 및 예상증가하중

위 치	선행압밀하중 (P_c' , tf/m ²)	예상증가하중 평균값 (ΔP , tf/m ²)		
		활주로	착륙대	유도로
제3활주로 남측	4.6~12.8	15.65	11.07	11.02
제3활주로 중앙	3.3~22.2	15.91	10.83	12.87
제3활주로 북측	3.0~10.3	17.86	-	14.12
여객 계류장	2.7~16.1	12.89		

일부 지점을 제외하고는 예상증가하중(ΔP)이 선행압밀하중(P_c')에 비해 크게 산정되었으며, 이를 기준으로 연약지반 거동이 예상되는 지점의 표준관입저항치(N치) 분포를 나타내면 다음과 같다.



(a) 표준관입저항치 분포



(b) 표준관입저항치 누적분포

그림 4. 표준관입저항치 분포

일반적으로 지반의 설계정수는 현장시험결과 및 지반에서 비교관 시료를 채취하여 실내시험을 수행하여 결정하게 된다. 실제 본 인천국제공항 부지조성 설계시 반영된 연약지반의 표준관입저항치의 범위는 1~10정도(5이하 지점이 전체의 70%)이며, 반영된 표준관입저항치의 기준으로 피조콘 관입저항치와의 관계를 분석하여 연약지반 심도 결정시 기준을 마련할 수 있다. 그러나 표준관입저항치와 피조콘관입저

항치를 기준으로 설정한 연약지반 심도 기준은 설계 후 시공시 계측관리를 통하여 검증되어야 할 것이라 판단된다.

예상증가하중(ΔP)이 선행압밀하중(P_c')에 비해 크게 산정되어 연약지반 거동이 예상되는 지점의 표준관입저항치와 피조콘관입저항치를 비교하면 다음과 같다.

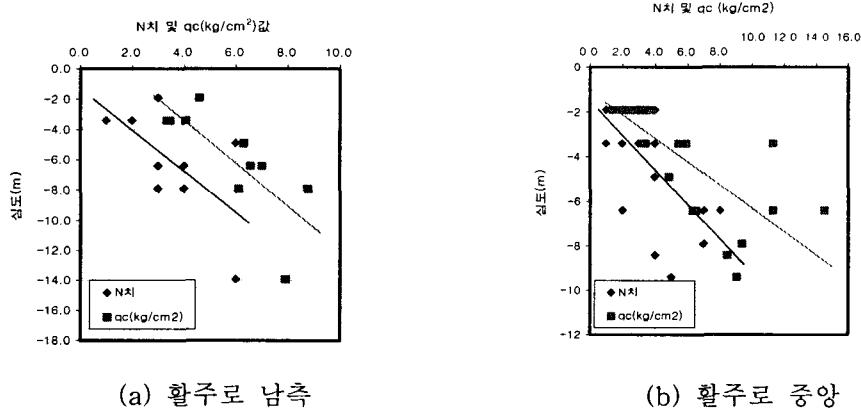


그림 5. N치와 q_c 관계

평가 결과 활주로 남측과 중앙의 N치 평균은 각각 3.4, 3.22로 나타났으며 이 심도에서 피조콘 관입저항치는 각각 5.81kgf/cm^2 , 5.27kgf/cm^2 을 나타내었다.

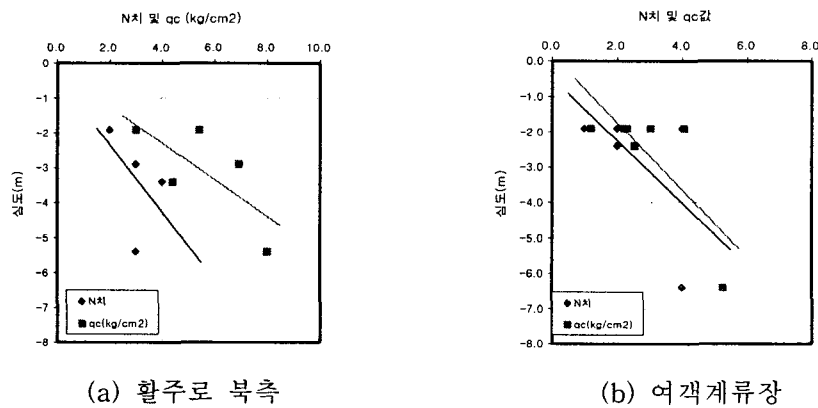


그림 6. N치와 q_c 관계

또한 활주로 북측과 여객계류장의 N치 평균은 각각 2.80, 2.43을 나타내었으며 이 심도에서 피조콘 관입저항치는 각각 5.55kgf/cm^2 , 2.94kgf/cm^2 을 나타내었다.

이러한 결과를 정리하면 다음과 같다.

표 8. 대상지역 평가 결과

위 치	N치 평균	$q_c(\text{kg/cm}^2)$ 평균	q_c / N
활주로 남측	3.40	5.81	1.71
활주로 중앙	3.22	5.27	1.64
활주로 북측	2.80	5.55	1.98
여객계류장	2.43	2.94	1.21
분 석	▶ 연약지반 심도에 따른 N와 q_c 와의 관계 ⇒ $q_c = (1.21 \sim 1.98)N$		

5. 결 론

본 인천국제공항 2단계 부지조성 공사에서는 연약지반 심도 결정시 표준관입시험(N치)과 피조콘관입 시험(q_c 값)을 수행하였으며, 이들의 관계를 비교하여 연약지반 심도 결정시 적절한 기준을 마련하였다.

1. 연약지반 심도를 결정하는 과정에서 N치와 q_c 값의 관계는 현장 여건에 따라 상이할 수 있으므로, 평균 연약지반심도와 선행압밀하중(P_c')을 기준으로 현장 조건에 적합한 표준관입저항치와 피조콘관입 저항치의 관계 산정이 필요하다.
2. 평가 대상 지역별로 일정한 표준관입저항치($N=5$)를 기준으로 평균 연약지반심도를 결정하여, 동일한 심도에서 피조콘관입저항치를 값을 분석한 결과 $5.45\sim 8.14\text{kgf/cm}^2$ 의 분포를 나타내어 $q_c=(1.09\sim 1.63)N$ 의 관계를 나타내었다.
3. 또한, 선행압밀하중 이상의 하중이 작용하여 연약지반 거동이 예상되는 지점의 표준관입저항치와 피조콘관입저항치 관계를 분석한 결과 $q_c=(1.21\sim 1.98)$ 의 관계를 나타내었다.
4. 이러한 결과를 반영하여 인천국제공항 2단계 부지조성 연약지반 설계에서는 시공시 안전율을 고려하여 $q_c=(2.0)N$ 에 근거하여 q_c 값 10kgf/cm^2 을 기준으로 연약지반 심도를 결정하였으며, 이는 설계 후 시공 시 계측관리를 통하여 검증되어야 할 것이라 판단된다.

참 고 문 헌

1. 한국지반공학회(1994), 지반조사 결과의 해석 및 이용, pp 61~72.
2. 박 찬국, 송 정락, 김 수일 (2002), "피조콘 소산시험을 통한 해성연약지반의 압밀특성에 대한 실험적 연구", 한국지반공학회 논문집, Vol 18, No. 2, pp. 137~146
3. 김 영상(1999), "피조콘 소산시험을 이용한 연약지반의 신뢰성 있는 압밀특성 추정", 박사학위 논문, 한국과학기술원.
4. 김 종국, 성 기광, 김 학중, 김 영웅 (2000), "인천국제공항지역의 피조콘조사와 결과의 적용" 한국 지반공학회 논문집, Vol 16, No. 2, pp. 115~123
5. T. Lunne, P. K. Robertson & J. J. M. Powell(1997), "Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice", Blackie Academic & Professional.
6. Campanella, R. G., Robertson, P. K., (1998), "Current Status of the Piezocone Testing", 1st International Conference on Penetration Testing, Disney World.