

대형 Calibration Chamber System을 이용한 $\sigma_v' - D_r - N$ 상관관계 연구 A Study of $\sigma_v' - D_r - N$ Correlation using Large Calibration Chamber System

최성근¹⁾, Sung-Kun Choi, 김상인²⁾, Sang-In Kim, 이충호³⁾, Chung-Ho Lee, 김동후⁴⁾, Dong-Hoo Kim, 이우진⁵⁾, Woo-Jin Lee

^{1),2)} 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea University

³⁾ (주)헤인ENC 전무, Executive Director, Hyein E&C Co., Ltd

⁴⁾ (주)대영엔지니어링 상무, Director, Daeyoung Engineering Co., Ltd

⁵⁾ 고려대학교 사회환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea University

SYNOPSIS : Using KUCCS, which enables real-time monitoring and controlling, the various boundary condition and in-situ field stress condition was simulated, to derive the correlation among $\sigma_v' - D_r - N$ in domestic sandy soils. Soil specimens, having various relative density and confined stress, were formulated to evaluate N-value from the SPT. and Pile Driving Analyzer, PDA, was employed as a measuring device for the energy transfer efficiency in the rod. From the quantitative analysis of N-value, the correlating equation, $N_{60}/D_r^2 = 16.35 + 14.45\sigma_v'$ was obtained on the basis of Skempton's method(1986). More reliable soil parameters can be obtained from the N-value by using this study which considered regional characters and the correlation among $\sigma_v' - D_r - N$.

Key words : SPT, KUCCS, relative density, overburden pressure, N value

1. 서 론

표준관입시험(SPT, standard penetration test)은 시험방법이 간편하고, 오랜 기간 연구되어진 성과물을 통한 경험적 활용도가 높기 때문에 널리 사용되는 지반조사 기법 중의 하나이며, 지금도 지반공학 설계분야의 표준관입시험치(N)에 대한 의존도는 상당히 높다고 할 수 있다.

그러나 현재 사용되고 있는 지반정수와 N값의 관계식 대부분이 국외 연구결과를 바탕으로 형성되었으며, 시험방법의 특성상 지반 및 현장조건에 많은 영향을 받으므로 이에 대한 합리적인 검증절차를 거치지 않고 사용되는 N값과 이를 통한 지반정수의 산정은 신뢰도 부분에 상당한 문제점을 내포하고 있다.

본 연구는 자연상태의 다양한 경계조건 및 현장응력상태를 구현할 수 있으며, 실시간 모니터링을 통한 응력 및 경계조건의 제어가 가능한 KUCCS(Korea University Calibration Chamber System)을 이용한 표준관입시험을 실시함으로써 현장의 주 영향요소 중 연직응력(σ_v')—상대밀도(D_r)—N값의 상관관계를 연구하여 향후 국내지반 특성을 반영한 신뢰성 있는 지반정수—N값 관계를 정립하는 것을 목적으로 한다.

2. 이론적 배경

표준관입시험의 N값은 대상 지반의 특성을 파악하여 지반 분류 및 연약지반의 판정 그리고 액상화 판정 등의 다양한 목적으로 활용된다. 따라서 N값과 지반정수 간의 상관관계에 대한 많은 연구들이 수행되어져 왔으며, 사질토의 경우 지반의 상대밀도(D_r), 응력상태, 그리고 입도와 광물특성 등이 N값에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

2.1 N값과 상대밀도(D_r)의 상관관계

사질토 지반의 상대밀도가 N값에 미치는 영향은 Terzaghi(1948)를 비롯하여 현재까지 많은 학자들에 의해 연구되어지고 있다. 그림 1은 Skempton(1986)이 현장 및 실내 실험 결과를 바탕으로 N값과 상대밀도(D_r)와의 상관관계를 나타낸 것으로 N값은 모래의 입경, 입도분포, 응력상태 등의 다른 특성에 의한 영향도 받지만 상대밀도(D_r)에 대해서는 2차 함수 형태와 유사한 일정한 상관관계가 있음을 주장하였다.

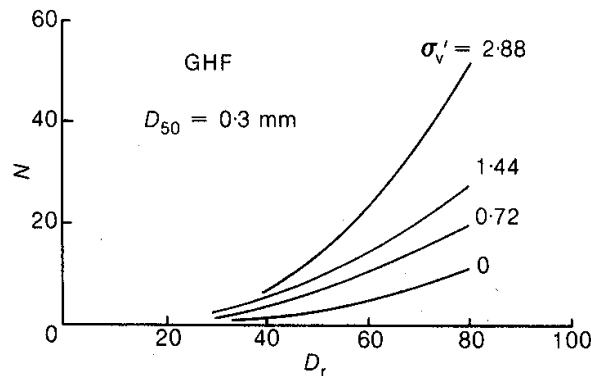


그림 1. N- D_r 상관관계(Skempton, 1986)

2.2 N—상대밀도(D_r)—응력상태(σ'_v) 상관관계

상대밀도에 의한 영향과 더불어 지반의 응력상태가 N값에 미치는 영향에 대한 연구도 수행되어졌다. Meyerhof(1957), Skempton(1986) 등은 다음 식 (1)과 같은 상관관계를 제시하였는데, Skempton(1986)의 연구결과에 의하면 a는 aging 효과의 영향을, b는 사질토 응력이력의 영향을 받는 것으로 평가되었으며, 그 값은 사질토의 특성이나 입경과 관계가 있는 것으로 보고되었다.

$$\frac{N_{60}}{D_r^2} = a + b\sigma'_v \quad (1)$$

Skempton(1986)은 실내시험을 통해 구속압 및 상대밀도를 조절하고 각각의 시료에 대해 입경을 조사하여 구속압과 상대밀도에 대한 상관관계에 대해서 다음 그림 2와 같이 나타내었다

a/b의 값의 경우 aging 효과가 없는 NC sand의 경우 대략 fine and medium relative density에 대해서는 1, dense coarse sand에 대해서 2로 나타난다. 이를 바탕으로 다음과 같이 상재하중을 보정해주는 상수 C_N 을 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$N_1 = C_N N \quad \begin{array}{l} \text{fine and medium sand} \quad C_N = \frac{2}{1 + \sigma'_v} \\ \text{dense and coarse sand} \quad C_N = \frac{3}{2 + \sigma'_v} \end{array} \quad (2)$$

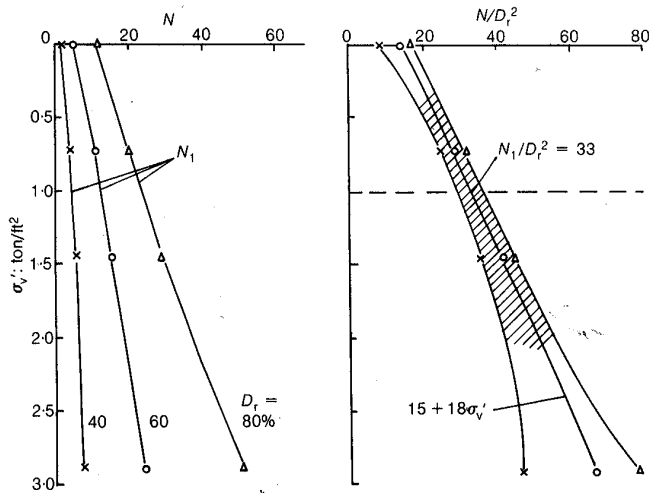


그림 2. $\sigma'_v - N/D_r^2$ 상관관계 (Skempton, 1986)

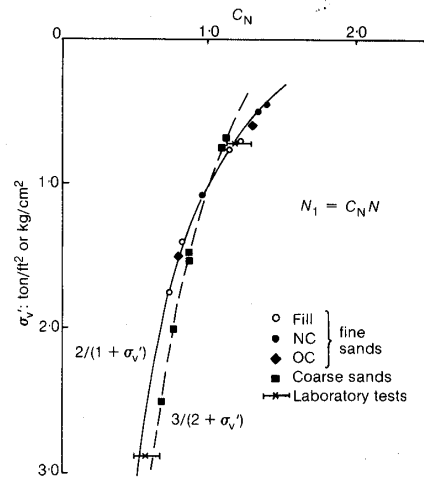


그림 3. $C_N - \sigma'_v$ 상관관계 (Skempton, 1986)

3. KUCCS를 이용한 실내 표준관입시험

3.1 연구수행 흐름

KUCCS(Korea University Calibration Chamber System)를 이용한 실내 표준관입시험의 연구수행 흐름은 다음 그림 4와 같은 절차를 통하여 수행되었다.

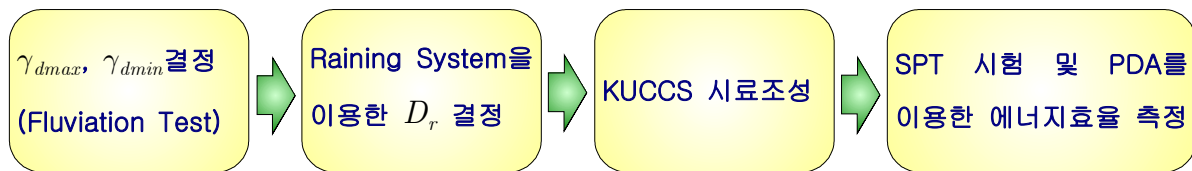


그림 4. KUCCS를 이용한 실내 표준관입시험 연구수행 흐름

3.2 사질토 최대·최소 건조단위중량 시험

사질토의 조밀한 상태나 느슨한 상태를 나타내는 상대밀도를 추정하기 위해서는 대상 사질토의 최대·최소 건조단위중량을 구해야 한다. 최대·최소 건조단위중량을 구하는 실내시험을 ASTM에 소개되어 있으며, 많은 보완을 통해 새로운 시험법 또한 개발되었다.

본 연구에서는 Fluviation Test(Miura and Toki, 1982)를 이용하여 최대건조단위중량을 산정하였다. Fluviation Test의 시험장비는 그림 5와 같으며, 상부 shutter와 체의 조합을 다르게 하여 수행한 시험 결과를 분석하여 건조단위중량곡선을 plot함으로써 최대건조단위중량을 결정한다. 이 시험법의 장점은 ASTM에서 제시하는 방법에서 발생할 수 있는 시료분리 및 입자파쇄 현상을 최소화하여 현실성 있는 최대건조단위 중량을 추정하는 것이라고 할 수 있다.

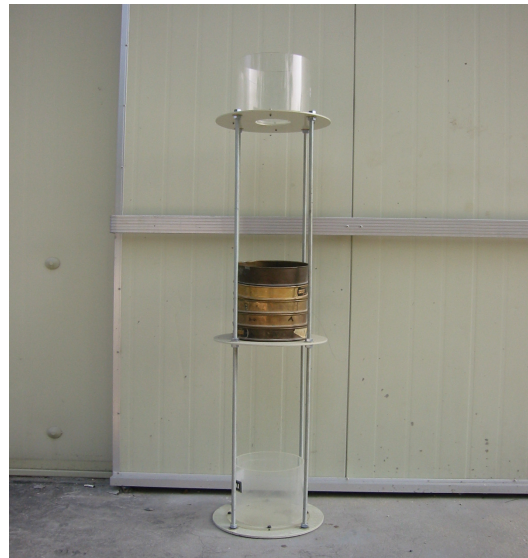
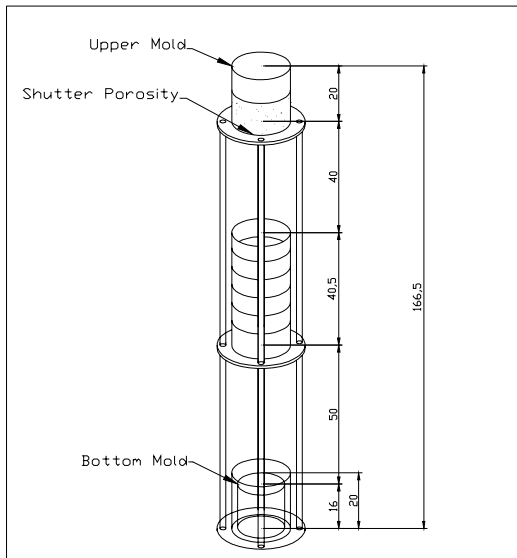


그림 5. Fluviation Test

3.3 Raining System을 이용한 상대밀도 결정 시험

Calibration Chamber를 통한 표준관입시험을 위해 특정 상대밀도의 시료조성이 필요하다. 이를 위하여 Raining system을 개발하고 모의시험을 통해 각 각의 상대밀도에 필요한 조건을 결정하였다. Raining System은 직경 1.2m에 높이 2m의 cylinder형 tube와 upper storage tube 및 Shutter Plate 그리고 Upper Cover Plate로 구성되어 있다(그림 6).

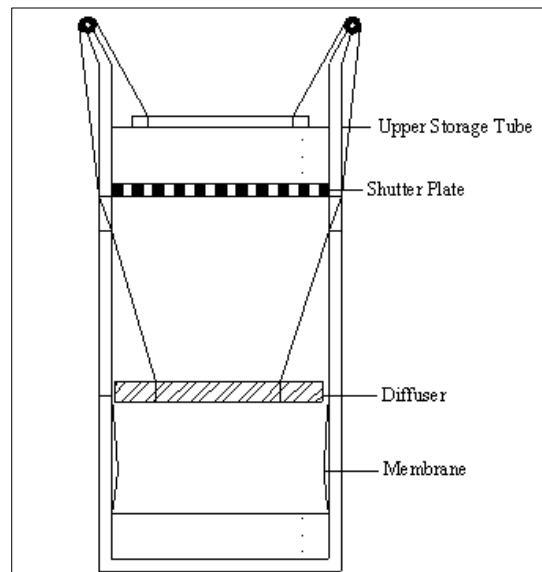


그림 6. Raining System

Upper Storage Tube의 바닥은 시료가 낙하할 수 있는 개폐장치(Shutter Plate)로 구성되어 있으며, 이 개폐 장치는 시료가 낙하되는 양을 조절할 수 있다. Raining System의 중간에 위치한 체는 시료의 균일한 낙하를 위한 분산 역할을 하며, 체와 연결된 상부 cover plate는 시료량이 줄어들면서 그 위치가 낮아져 체를 끌어당김으로써 체와 낙하되어 쌓인 시료간의 높이를 일정하게 유지시켜주는 역할을 한다.

3.4 KUCCS(Korea Univ. Calibration Chamber System)을 이용한 표준관입시험

Calibration Chamber System은 그림 7과 같이 높이 1m 직경 1.2m의 chamber와 하부 piston, adapter가 연결된 top plate로 구성되어 있다. Specimen의 응력 상태를 조절할 수 있도록 측면의 Chamber tube는 이중벽으로 구성되어 있고(그림 8), 응력은 tube의 inner cell, outer cell, 그리고 하부 piston과 연결된 control panel에서 조절 한다.

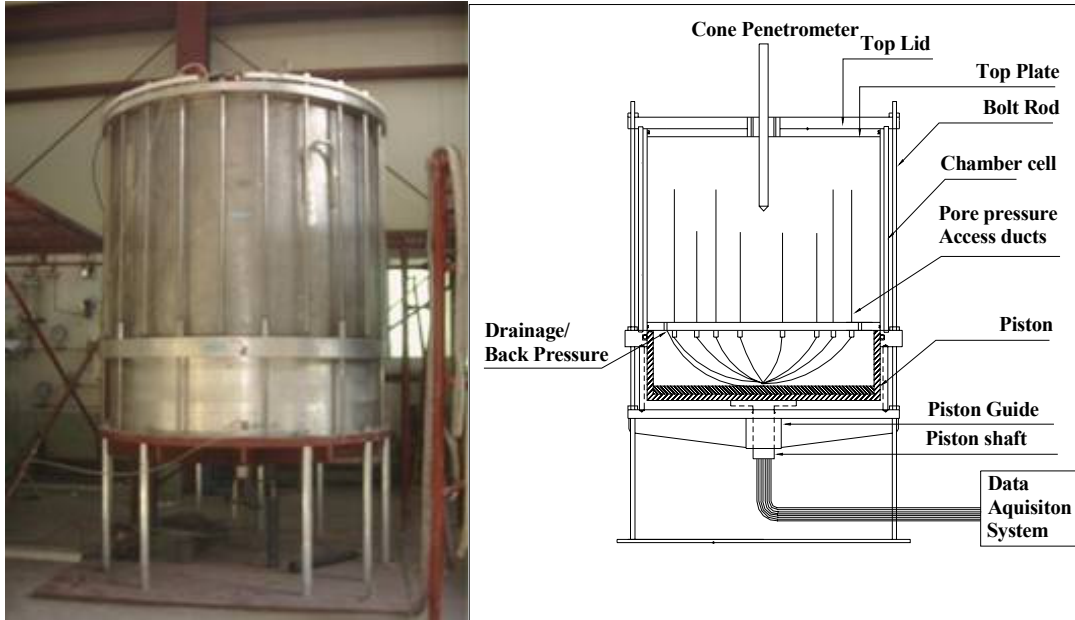


그림 7. KUCCS(Korea Univ. Calibration Chamber System)

소정의 상대밀도로 조성된 Calibration Chamber 시료에 가압하여 상재하중을 재하한 후 그림 8.과 같이 Top plate에 설치된 표준관입시험용 adapter를 통하여 표준관입시험을 실시하였다. 표준관입시 룯드에 전달되는 항타에너지를 측정하기 위하여 그림 9의 PDA(Pile Driving Analyzer)를 사용하였다.



그림 8. Calibration Chamber에서의 표준관입시험

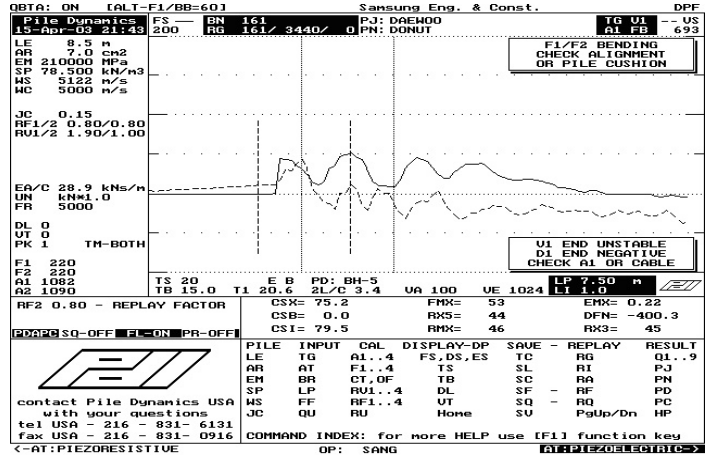


그림 9. PDA(Pile Driving Analyzer)

4. 시험 결과 및 분석

4.1 상대밀도 및 상재하중에 따른 사질토의 N값 시험결과

상대밀도와 구속압에 따른 N값과 룯드길이 및 SPT 룯드 에너지효율에 의해 보정된 N_{60} 값의 결과는 다음 표 1과 같다. 그림 10은 상대밀도와 상재하중에 따른 N_{60} 의 분포를 나타낸 것이다.

상대밀도 (%)	단위중량 (ton/m^3)	구속압 (kg/cm^2)	N치	$N_{60\text{avg}}$.
40	1.568	1.0	7	5
		2.0	11	8
		3.0	14	11
60	1.627	1.0	15	12
		2.0	21	17
		3.0	26	22
80	1.690	1.0	20	15
		2.0	36	30
		3.0	48	38

표 1. $D_r - \sigma'_v$ 에 따른 사질토의 N 값 시험결과

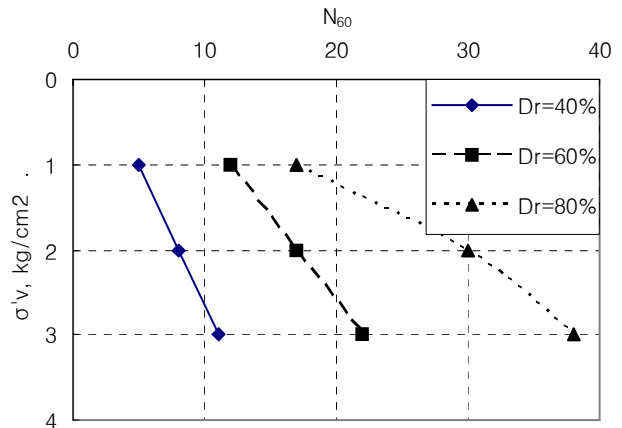


그림 10. $D_r - \sigma'_v$ 에 따른 N_{60}

4.2 유효상재하중(σ'_v)과 N_{60} / D_r^2 상관관계

Skempton(1986)이 제시한 유효상재하중과 N_{60}/D_r^2 간의 상관식의 형태로 시험사질토에 대한 유효상재하중과 상대밀도에 따른 N 값의 상관식을 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{N_{60}}{D_r^2} = 16.35 + 14.45\sigma'_v \quad (3)$$

앞의 결과를 Skempton(1986)의 연구와 비교하면 다음 그림 11과 같다. 이를 분석하면 본 시험에 사용된 사질토는 aging 효과 없는 NC sand의 결과와 유사함을 알 수 있으며, 이 결과를 이용하면 동일한 지반에 대하여 응력조건과 표준관입시험 N값을 알면 그 지반의 상대밀도가 분포를 파악할 수 있다.

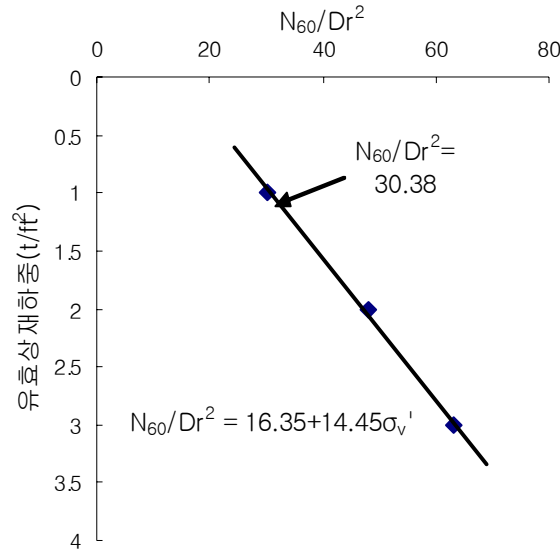


그림 11. $\sigma_v' - N_{60} / D_r^2$ 상관관계

4.3 상대밀도(D_r)와 N값의 상관관계 비교분석

상대밀도와 N값 상관관계를 알아보기 위해 Skempton(1986) 식에 의해 구해진 a, b를 이용하여 상재하중 보정계수 C_N 을 구한 후 $(N_1)_{60}$ 을 산출하여 그림 12에 나타내었다. 그림 12의 데이터는 Skempton (1986)의 현장 및 실내실험 결과와 비교한 것으로 연구에 사용된 사질토의 유효입경(D_{50})이 0.28mm로 0.23mm에 비하여 약간 크에도 불구하고 N값은 상대적으로 낮은 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이는 실험상의 미세한 오차 또는 입자 특성과 관련 있을 것으로 판단된다.

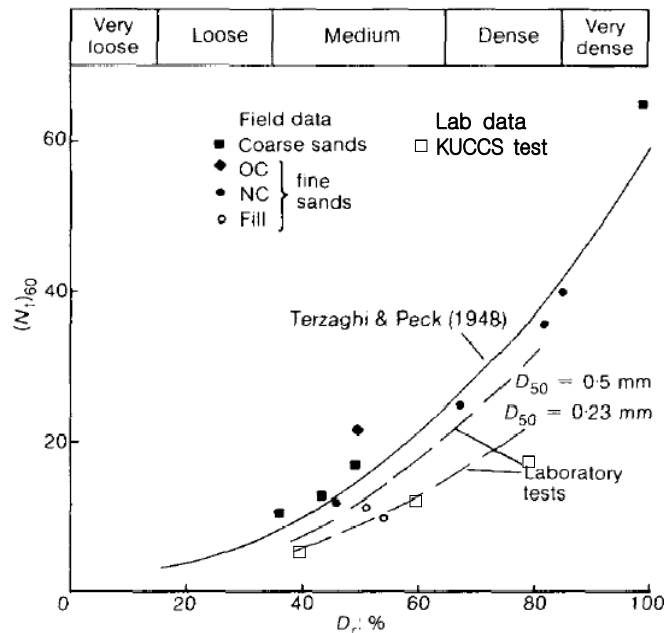


그림 12. $(D_r) - N_{1,60}$ 상관관계

5. 결론

KUCCS(Korea University Calibration Chamber System)을 이용하여 상대밀도(40%, 60%, 80%)와 연직응력(100kPa, 200kPa, 300kPa)을 제어한 대상 시료에 표준관입시험을 실시하여 이들 영향요소와 N값의 상관관계를 연구한 결과는 다음과 같다.

- (1) 시험에 사용된 사질토의 연직응력(σ_v')—상대밀도(D_r)—N값의 상관관계를 분석한 결과 Skempton(1986)이 제안한 관계식 $N_{60}/D_r^2 = a + b\sigma_v'$ 에 부합하는 $N_{60}/D_r^2 = 16.35 + 14.45\sigma_v'$ 으로 것으로 나타났으며 특히, a/b값이 약 1.1정도로 aging 현상이 발생되지 않은 fine and medium sand의 특성과 유사한 것으로 판단된다.
- (2) 결과를 분석하여 상재하중 보정계수인 C_N 을 추정하고 유효입경(D_{50})을 기준으로 기존 연구와 비교 분석한 결과, 본 연구에 사용된 사질토는 유효입경에 비하여 상대적으로 낮은 N값을 나타내는 것을 볼 수 있었다. 이는 입자의 특성 및 기타 시험방법의 차이에서 비롯된 것으로 판단된다.
- (3) 본 연구결과를 통하여 지역적 특성을 반영한 사질토 지반의 N값 영향요소들을 파악하였으므로, 향후 연구 시 이러한 결과를 활용하여 대상 지반의 연직응력(σ_v') — 상대밀도(D_r)— N값의 상관관계를 도출하면 N값을 이용한 지반정수 산정의 신뢰성은 증대될 것이다.

6. 감사의 글

본 연구는 건설교통부 2004년 건설핵심기술연구개발사업 C104A1000009-04A0200-00900에 의해 지원되었습니다. 이에 감사드립니다.

7. 참고문헌

1. 안신환, 이원제, 이우진 (2000), “표준관입시험 해머의 종류에 따른 룯드 에너지 전달률”, **한국지반공학회**, 제 16권, 제 3호, pp,119~129
2. 안신환, 이원제, 이우진 (1998), “지반조사 분야:PDA 를 이용한 표준관입시험의 에너지전달효율 측정”, **한국지반공학회**, 1998 봄학술발표회 논문집
3. 이우진, 유재명, 조성민, 류동현 (2001), "표준관입시험의 에너지 전달을 산정방법 비교", **대한토목학회**, 2001학술발표회 논문집
4. Meyerhof, G. G. (1957), "Discussion on Research on determining the density of sands by spoon penetration testing", *Proc. 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, England, 3, 110.
5. Miura S. and Toki S. (1982), "Sample Preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand", *Soils and Foundations*, vol. 22, No. 1, pp.61~77
6. Skempton A. W. (1986), "Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation", *Geotechnique* vol. 36, NO. 3, pp.425~447
7. Willam F, Marcuson III and Wayne A. Bieganousky (1977), "SPT and Relative Density in Coarse Sands", *Journal of the geotechnical engineering division*, pp.1295~1310