

한국 점성토에 대한 토질정수간의 상관성 분석

Correlation Analysis of Soil Parameters on Cohesive Soils in Korea

정철호*

1. 서론

통계적 상관식은 경험에 의하여 성립된 것이 많은데, 이 관계식들에 부여된 제약조건을 잘 이해하지 못하고 설계에 적용함으로써 과다 및 과소설계에 의한 건설원가의 상승과 구조물의 손상 등 제반 문제점이 발생할 수 있다. 압축지수는 토질조사 계획시에 많이 측정하는 것으로 되어 있으며, 이 압축지수는 통계처리에 있어 유효하게 이용된다. 압축지수를 구하기 위하여 수행하는 압밀시험은 많은 시간과 경비가 소요되므로 간단한 실내시험으로 얻어진 기본 물성치로부터 압축지수 및 압축률을 추정하는 방법이 Nishida(1956), Cozzolino(1961), Terzaghi와 Peck(1967), Lambe와 Whitman(1969), Elnaggar와 Krizek(1970), Azzouz et al(1976), Krizek et al(1977) 등에 의하여 제안되어 있다. 여기서 기본 물성치는 자연함수비, 액성한계 및 초기간극비 등이다. Balasubramaniam과 Brenner(1981)에 의하면 간극비로 표현된 일차 회귀방정식은 약 80%의 신뢰도를 나타내고 있으며 간극비 이외의 기본 물성치를 조합하면 신뢰도를 증가시킬 수 있다고 주장하고 있다.

본 연구에서는 한국의 점성토(ML, CL, MH, CH, OH)에 대한 물리적 및 역학적 성질을 조사하고, 소성지수와 액성한계, 압축지수 및 압축률과 자연함수비 액성한계·초기간극비, 표준관입시험치와 일축압축강도, 비배수전단강도와 표준관입시험치의

관계에 대한 토질정수간의 전산통계처리에 의한 상관분석을 실시하고 회귀직선식을 제안하여 기존의 관계식과 비교 검토하였다. 또한 분석결과에 대한 적용의 범위를 선정하였으며, 회귀직선이 상관도상의 전체의 점을 대표하는 유효의 정도를 측정하기 위해 상관계수(correlation coefficient, r)를 구하고, 구해진 상관계수를 F-분포에 의한 방법으로 유의수준(significance level, α)을 검증하였다. 여기에 사용된 현장 및 실내시험자료는 8년간에 걸쳐 대한주택공사에서 실시한 토질조사 결과를 수집 정리한 것이다.

2. 분석자료

상관성 분석에 사용된 토질조사 자료(대한주택공사, 1978-1985)는 앞에서 이미 설명한 바와 같이 8년간에 걸쳐 특별시 및 광역시를 포함하여 18개의 중소 도시에 퇴적되어 있는 점성토층의 지하 0.2-19.0m 깊이 내에서 채취한 불교란시료로부터 구한 것으로 그림1에 토질조사 지역의 지층깊이를 표시하였다.

이와 관련하여 조사한 토질정수는 자연함수비(W_n), 액성한계(LL), 소성한계(PL), 초기간극비(e_0), 압축지수(C_c) 및 일축압축강도(q_u) 등이며, 이들 토질정수로부터 소성지수(PI), 압축률(CR)과 비배수전단강도(C_u)를 산정하고 표준관입시험치(N)는 시료채취심도에 따라 토질주상도를 분석하여 구하였다. 그리고, 각 조사지역에서 채취된 불교란시료의 종류에 따른 물리적 및 역학적 성질에 대한 변화

* 정회원, 대한주택공사 토목구조부장

표 1. 각 조사지역의 불교란시료에 대한 실내 및 현장시험 성과

| 지역 | USCS | $W_n(\%)$ | LL(%) | PI(%) | e_0 | C_c | CR | N-Value | $q_u(kg/cm^2)$ | $C_u(kg/cm^2)$ |
|-----|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|----------------|----------------|
| 서울 | ML,CL,OH | 28.1~61.6 | 33.8~60.1 | 15.2~29.2 | 0.91~1.67 | 0.14~0.45 | 0.07~0.17 | 1~13 | 0.10~1.08 | 0.05~0.54 |
| 인천 | CL,MH | 36.5~40.5 | 33.5~52.8 | 12.2~22.4 | 0.98~1.11 | 0.14~0.31 | 0.06~0.16 | 5~6 | 0.27~0.31 | 0.14~0.16 |
| 광명 | ML | 32.6 | 42.5 | 12.4 | 1.05 | 0.28 | 0.14 | 8 | 0.39 | 0.19 |
| 과천 | ML,CH,MH | 21.2~55.8 | 24.7~50.0 | 17.1~20.4 | 1.22 | 0.34 | 0.15 | 8~15 | 0.37~0.52 | 0.19~0.26 |
| 반월 | ML,MH,CH | 42.9~60.3 | 50.0~65.2 | 15.8~27.9 | 1.21~1.69 | 0.30~0.57 | 0.14~0.21 | 2~7 | 0.12~0.57 | 0.06~0.28 |
| 송탄 | ML,CL | 29.7~52.8 | 42.9~48.0 | 17.0~19.0 | 0.85 | 0.21 | 0.12 | 2~8 | 0.26~0.31 | 0.13~0.16 |
| 조치원 | CL | 41.2 | 38.0 | 13.9 | 1.12 | 0.27 | 0.13 | 6 | 0.38 | 0.19 |
| 공주 | ML | 39.5 | 39.5 | 13.1 | - | - | - | 4 | 0.54 | 0.27 |
| 부여 | ML | 31.3~33.8 | 40.0~44.8 | 12.1~12.5 | 0.88~1.03 | 0.20~0.24 | 0.11~0.12 | 4~12 | 0.36~0.62 | 0.18~0.31 |
| 군산 | CL,CH | 50.1~56.6 | 40.0~57.2 | 26.4~28.1 | 1.47~1.61 | 0.35~0.50 | 0.14~0.19 | - | - | - |
| 이리 | ML,CL | 23.1~39.9 | 39.3~44.2 | 12.1~24.3 | 0.64~1.11 | 0.19~0.26 | 0.09~0.13 | 6 | 0.23~0.48 | 0.12~0.24 |
| 광주 | ML,CL | 19.9~40.5 | 23.5~40.0 | 7.6~11.9 | 0.55~1.17 | 0.11~0.34 | 0.07~0.16 | 3~5 | 0.11~0.44 | 0.06~0.22 |
| 여천 | ML | 35.9~40.7 | 34.2~44.2 | 4.9~12.0 | 0.50~1.10 | 0.12~0.30 | 0.08~0.14 | 3~4 | 0.33 | 0.17 |
| 여수 | MH | 32.0~35.6 | 51.6~56.1 | 22.7~25.4 | - | - | - | - | - | - |
| 부산 | ML,CL,CH,OH | 18.6~68.4 | 23.3~54.4 | 5.1~25.4 | 0.77~1.71 | 0.18~0.39 | 0.09 | 5~23 | 0.35~1.25 | 0.18~0.63 |
| 양산 | CL | 30.5 | 43.1 | 22.5 | 1.24 | 0.48 | 0.21 | 0~1 | 0.20~0.27 | 0.10~0.14 |
| 포항 | ML,CH,OH | 49.6~76.8 | 65.2~78.8 | 13.1~44.7 | 1.66~1.86 | 0.44~0.75 | 0.15~0.27 | 2~17 | 0.09~0.34 | 0.04~0.17 |
| 강릉 | OH | 67.7 | 56.0 | 22.6 | 1.77 | 0.66 | 0.24 | 2 | 0.53 | 0.27 |

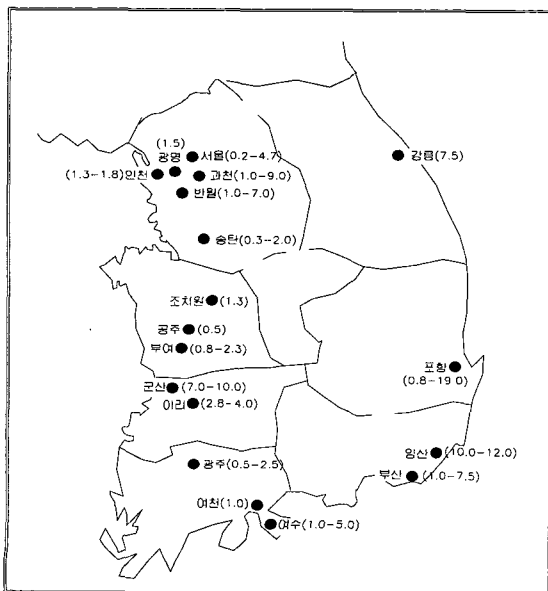


그림 1. 토질조사 지역의 지층깊이(m)

의 범위를 표1에 요약 정리하였다.

3. 토질정수간의 상관성 분석

3.1 소성지수와 액성한계의 관계

액성한계와 소성지수는 세립토의 공학적 특성치와 상호 연관성이 있어 압축성, 투수성 및 연경도 등 흙의 성질에 대한 개략적인 판단자료로 활용할 수 있으며, 소성도를 이용하여 세립토의 종류를 분류할 수 있다. 그림 2는 Casagrande(1948)가 제안한 소성도에 점성토(ML, CL, MH, CH, OH)에 대한 소성지수와 액성한계의 관계를 나타낸 것으로 이들의 관계를 회귀직선식으로 표시하면 식 (3.1)과 같다.

$$PI = 0.51(LL-6.914) \quad (r=0.92, \alpha=0.0) \quad (3.1)$$

기술기사

여기서 r 은 상관계수이고 α 는 유의수준이다. 식 (3.1)을 A-선의 $PI=0.73(LL-20)$ 의 관계식과 비교하여 보면, 액성한계 55%를 기준으로 그 이하에서는 제안식 (3.1)이 큰 값을 보이며 그 이상에서는 작은 값을 나타낸다.

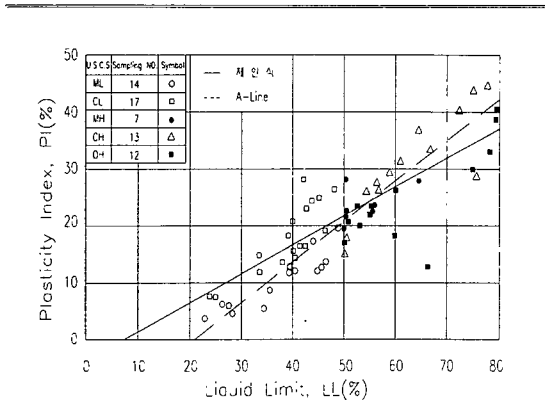


그림 2. 소성지수와 액성한계의 관계

3.2 압축지수와 자연함수비, 액성한계, 초기간극비의 관계

압축지수는 자연함수비, 액성한계 및 초기간극비 등 흙의 기본적인 물성치를 알고 있을 때 기존의 관계식을 이용하여 간편하게 설계에 적용할 수 있다. 그림 3~5는 점성토(ML, CL, MH, CH, OH)의 압축지수와 자연함수비, 압축지수와 액성한계, 압축지수와 초기간극비의 관계를 나타낸 것으로 이들의 관계를 상관분석하여 식(3.2)~(3.4)의 회귀직선식을 얻었다.

$$C_c = 0.007(W_n + 1.43)(r=0.90, \alpha=0.0) \quad (3.2)$$

$$C_c = 0.007 LL(r=0.91, \alpha=0.0) \quad (3.3)$$

$$C_c = 0.286(e_0 - 0.066)(r=0.93, \alpha=0.0) \quad (3.4)$$

식 (3.2)를 Azzouz et al.(1976)이 그리스 및 미국 일부지방의 점토를 대상으로 제안한 $C_c=0.01(W_n-5)(r=0.79)$ 의 상관식과 비교하여 보면, 자연함수비 22%를 기준으로 그 이하에서는 제안식 (3.2)가 큰

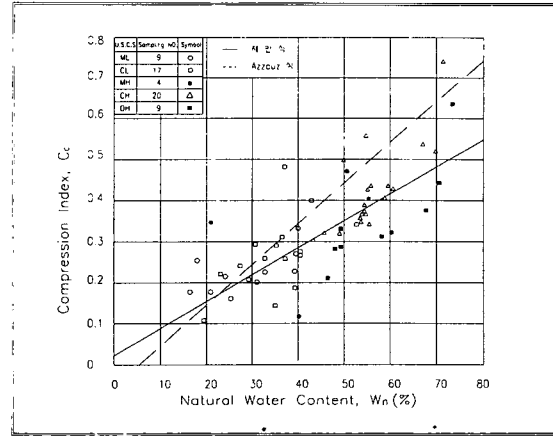


그림 3. 압축지수와 자연함수비의 관계

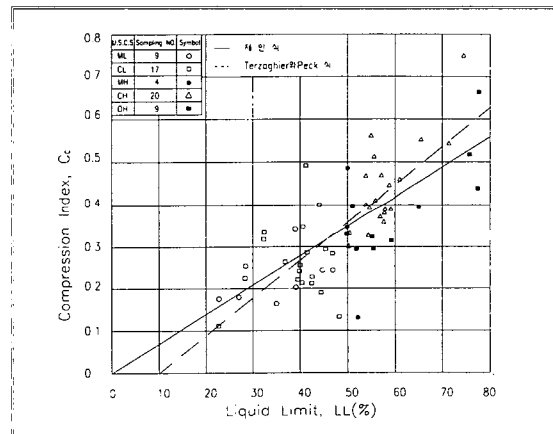


그림 4. 압축지수와 액성한계의 관계

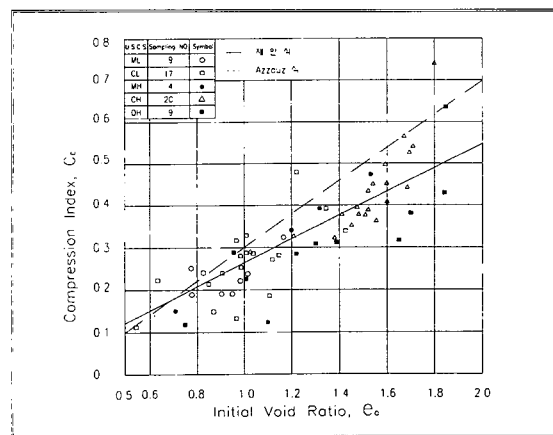


그림 5. 압축지수와 초기간극비의 관계

값을 보이며 그 이상에서는 작은 값을 나타낸다.

식 (3.3)을 Terzaghi와 Peck(1967)이 중간 정도 이하의 예민비를 갖는 교란되지 않은 점토를 대상으로 제안한 $C_c=0.009(LL-10)$ 의 관계식과 비교하여 보면, 액성한계 45%를 기준으로 그 이하에서는 제안식 (3.3)이 큰 값을 보이며, 그 이상에서는 작은 값을 나타낸다. 그리고 Bowles은 1984년 발간한 그의 저서에서 Terzaghi와 Peck(1967)의 회귀직선식은 약 $\pm 30\%$ 의 오차를 갖고 있으며, 예민비 (sensitivity)가 4 이상인 점토에서는 적용할 수 없는 등의 제약조건이 있으나 초기압밀을 추정하는데에 널리 사용되고 있다고 기술하고있다.

식 (3.4)를 Azzouz et al.(1976)이 그리스 및 미국 일부지방의 점토를 대상으로 제안한 $C_c=0.40(e_0-0.25)$ ($r=0.85$)의 상관식과 비교하여 보면, 초기간극비 0.65를 기준으로 그 이하에서는 제안식 (3.4)가 약간의 큰 값을 보이며 그 이상에서는 작은 값을 나타낸다. 특히, 이 제안식 (3.4)의 신뢰도는 86.5%로서 Balasubramaniam과 Brenner(1981)가 주장한 80% 보다 6.5% 더 큰 것으로 분석되었다.

3.3 압축률과 자연함수비의 관계

압축률(compression ratio, CR)이란 체적변형률과 응력($\epsilon_v - \log p'$ 곡선) 사이의 관계에서 처녀압축곡선(virgine compression curve)의 직선부 기울기를 말하며 $CR = \Delta \epsilon_v / \Delta (\log p') = C_c / (1 + e_0)$ 와 같이 정의 된다. 그림 6은 점성토(ML, CL, MH, CH, OH)의 압축률과 자연함수비와의 관계를 나타낸 것으로 이들의 관계를 회귀직선식으로 표시하면 식 (3.5)와 같다.

$$CR = 0.003 (W_n + 10) (r=0.65, \alpha=0.0) \quad (3.5)$$

식 (3.5)을 Azzouz et al.(1976)이 그리스 및 미국 일부지방의 점토를 대상으로 제안한 $CR=0.003(W_n+7)$ ($r=0.68$)과 비교하여 보면, 제안식의 (3.5) 보다 약간의 작은 값을 보이며 서로 평

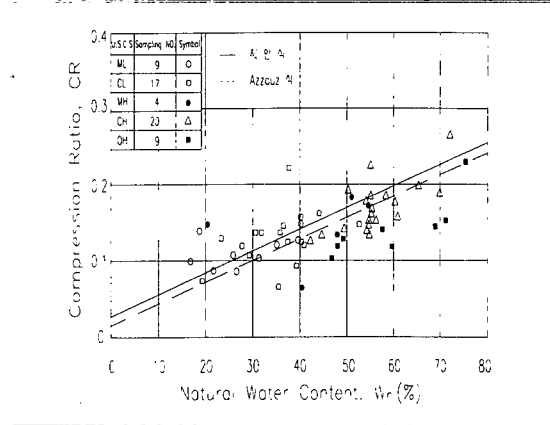


그림 6. 압축률과 자연함수비의 관계

행한 상관관계가 있음을 알 수 있다. 그리고 자연함수비로 표현된 이 관계식은 상관계수가 비교적 낮으나 자연함수비 이외의 기본 물성치를 조합하면 상관계수를 증가시킬 수 있을 것이다.

3.4 표준관입시험치와 일축압축강도의 관계

소성점토의 일축압축강도($q_u = 2C_u$)는 표준관입시험치로부터 비배수 전단강도 C_u 를 개략적으로 추정할 수 있다(Hunt, 1986). 그림 7은 점성토(ML, CL, MH, CH, OH)의 N 치와 일축압축강도의 관계를 나타낸 것으로 이들의 관계를 회귀직선식으로 표시하면 식 (3.6)과 같다.

$$N = 29.41(q_u - 0.204) (r=0.81, \alpha=0.0) \quad (3.6)$$

식 (3.6)을 미 해군시설공병단(NAVFAC, 1971)의 Sowers가 제시한 소성이 낮은 점토 및 점토질 실트를 대상으로 분석한 직선관계와 비교하여 보면, 표준관입시험치 5를 기준으로 그 이하에서는 제안식 (3.6)이 큰 값을 보이며, 그 이상에서는 작은 값을 나타낸다. 그리고 그림 7의 DM-7의 직선에 대한 최소자승법을 적용하여 표준관입시험치(N)의 일축압축강도(q_u)에 관한 회귀직선의 방정식을 구해 보면 $N=13.3q_u$ 로 산정된다.

기술기사

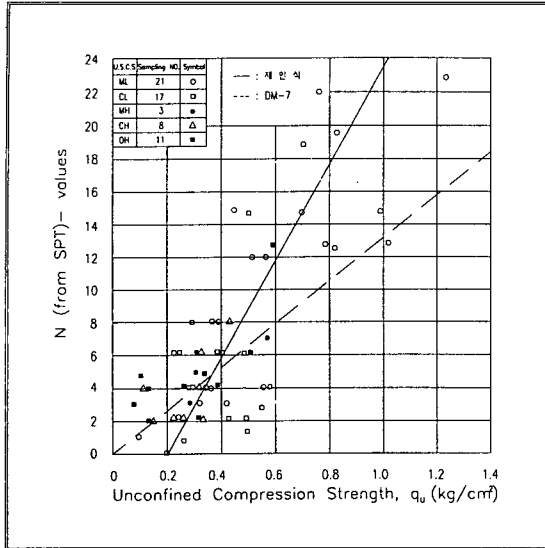


그림 7. 표준관입시험치와 일축압축강도의 관계

3.5 비배수전단강도와 표준관입시험치의 관계

그림 8은 점성토(ML, CL, MH, CH, OH)의 비배수전단강도와 N치의 관계를 나타낸 것으로 이들의 관계를 상관분석하여 식 (3.7)의 회귀직선식을 얻었다.

$$C_u = 0.017(N+6)(r=0.75, \alpha=0.0) \quad (3.7)$$

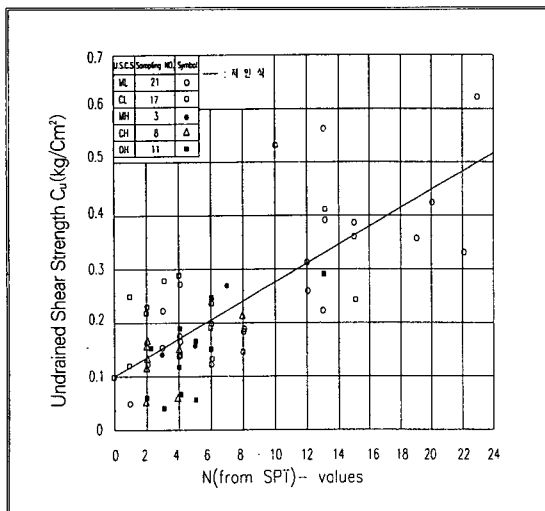


그림 8. 비배수전단강도와 표준관입시험치의 관계

이 (3.7)식의 적용범위는 $N \leq 23$ 으로 한정되어 있으며 N치의 증가에 따라 비배수전단강도도 증가되는 것으로 나타났다.

4. 분석결과에 대한 검토

한국 점성토에 대한 소성지수와 액성한계의 관계는 신뢰도가 85%로서 상관의 정도가 큰 것을 알 수 있다. 압축지수와 자연함수비, 액성한계, 초기간극비의 관계는 신뢰도가 각 81%, 83%, 86.5%로서 Terzaghi와 Peck(1967), Azzouz(1976)등이 제안한 기존의 회귀방정식과 비교하여 상관의 정도가 다소 큰 것으로 나타났다. 이 3개의 제안 식들은 약 $\pm 13.5 \sim \pm 19\%$ 만의 오차를 갖고 있으나, 압축지수에 결정적으로 영향을 끼치는 것은 점토의 구조, 지질학적 이력 등 기타 요인들이므로 이 관련식들을 설계에 적용할때는 세심한 주의가 필요하다. 표준관입시험치와 일축압축강도, 비배수전단강도와 표준관입시험치의 관계는 상관계수가 각 0.81 및 0.75로서 압축지수 및 소성지수와 관련된 기본 물성치들 간의 상관의 정도와 비교하여 다소 낮은 값을 보인다. 이는 표준관입시험에서 추의 낙하고에 대한 정확성의 결여 등과 일축압축시험에서 전단중의 공시체에 대한 시료교란 및 시험중에 약간의 배수가 일어나는 문제점 등이 있기 때문이다. 압축률과 자연함수비의 관계는 분산의 정도가 58%의 크기를 보이므로 액성한계 및 초기간극비 등의 기본물성치를 조합하면 신뢰도가 증가될 수 있을 것이다. 그리고, Bowles(1984)은 압축지수 및 압축률에 관련된 경험식들은 토체의 과거응력이력(선행압밀하중)을 반영하지 못하는 단점이 있다고 논의한 바 있다.

이상과 같이 제반 토질정수간의 상관분석으로 회귀직선식과 상관계수를 구하고, 구해진 상관계수를 F-분포에 의한 방법으로 유의수준으로 검증한 결과 오차발생이 없는 것을 확인하였으며, 실용화를 위하여 적용의 범위를 선정한 결과를 정리하면 표 2와 같다.

표 2. 각 토질정수의 회귀직선식 및 적용범위

| Soil Type | Regression Equation | Correlation Coefficient | No. of Sample | Range of Application |
|---|------------------------|-------------------------|---------------|------------------------------|
| Fine-grained soils (ML, CL, MH, CH, OH) | $PI=0.51(LL-6.914)$ | 0.92 | 63 | $LL \leq 80\%$ |
| | $C_c=0.007(W_n+1.43)$ | 0.90 | 59 | $W_n \leq 80\%$ |
| | $C_c=0.007LL$ | 0.91 | 59 | $LL \leq 80\%$ |
| | $C_c=0.286(e_0-0.066)$ | 0.93 | 59 | $e_0 \leq 1.9$ |
| | $CR=0.003(W_n+10)$ | 0.65 | 59 | $W_n \leq 80\%$ |
| | $N=29.41(q_u-0.204)$ | 0.81 | 60 | $q_u \leq 1.2\text{kg/cm}^2$ |
| | $C_u=0.017(N+6)$ | 0.75 | 60 | $N \leq 23$ |

5. 결론

우리나라 18개 지역에 분포하는 점성토(ML, CL, MH, CH, OH)의 공학적 성질을 파악하고 현장 및 실내시험 성과에 대한 자료의 수를 근거로 제반 토질정수간의 상관분석을 실시하여 회귀직선식에 대한 상관의 정도 및 적용의 범위를 규명한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 압축지수와 자연함수비, 액성한계, 초기간극비의 관계에 있어 회귀직선식에 대한 상관계수의 범위는 0.90~0.93으로서 신뢰도가 81~86.5%로 분석되었다. 이는 기존의 관계식에 비해 상관의 정도가 최소 14.2% 및 최대 18.6% 높은 것으로 산정되었으나, 이 관련식들을 설계에 적용할 때에는 규정된 범위(W_n 및 $LL \leq 80\%$, $e_0 \leq 1.9$)이내에서만 활용해야 한다.
- (2) 표준관입시험치와 일축압축강도, 비배수전단강도와 표준관입시험치의 관계에 대한 상관계수를 비교하여 보면 전자($r=0.81$)가 후자($r=0.75$)보다 0.06 큰 것으로 계상되어 전자를 활용하여 규정된 범위($q_u \leq 1.2\text{kg/cm}^2$)이내에서만 설계에 적용하는 것이 바람직하다.
- (3) 소성지수와 액성한계의 관계는 신뢰도가 84.6%로서 상관의 정도가 큰 것으로 나타났다.

다. 반면에 압축률과 자연함수비의 관계는 분산의 정도가 58%의 크기를 갖는 것으로 구해져 이 상관식은 예비설계시에만 활용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 대한주택공사(1978-1985), 서울 개포동 등 18개지역 지반조사보고서, 서울.
2. Azzouz, A.S., Krizek, R.J. and Corotis, R.B. (1976), "Regression Analysis of Soil Compressibility", *Soils and Foundations*, 16(2): 19-29.
3. Balasubramiam, A.S. and Brenner, R.P. (1981), "Consolidation and Settlement of Soft Clay", Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, pp.541-544.
4. Bowles, J.E. (1984), "Physical and Geotechnical Properties of Soils", Second Edition, McGraw-Hill Book Company, pp.370-372.
5. Casagrande, A. (1948), "Classification and Identification of Soils", *Trans. ASCE*, Vol. 113, pp.901-992.
6. Cozzolino, V.M. (1961), "Statistical Forecasting of Compression Index", *Proc. th Int. Conf. Soil Mech., Found. Eng., Paris*, 1: 51-53.
7. Elnaggar, H.A. and Krizek, R.J. (1970), "Statistical Approximation for Consolidation Settlement", *Highw. Res. Record No. 323*, pp.87-96.
8. Hunt, R.E. (1986), "Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation", McGraw-Hill Book Company, 1986, P.73, P.75.
9. Krizek, R.J., Corotis, R.B. and El-Moursi, H.H. (1977), "Probabilistic Analysis of

한국 점성토에 대한 토질정수간의 상관성 분석

Predicted and Measured Settlements". Can. Geotech.J., 14: 17-33.

10. Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1969). "Soil Mechanics". Massachusetts Institute of Technology, Wiley, New York, p.318.

11. NAVFAC 1971. "Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures". Design Manual DM-7. Naval Facilities Engineering Command, Alexandria, Va, pp.7.1-85 ~ 7.1-88.

12. Nishida, Y. (1956). "A Brief note on Compression Index of Soil". J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, 82(SM3): 1027-1 to 1027-14.

13. Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967). "Soil Mechanics in Engineering Practice". 2nd ed. Wiley, New York, pp.68-73.

현장기술자를 위한 말뚝기초 워크샵

지반공학회 말뚝기초위원회에서는 아래와 같이 현장실무기술자를 위하여 말뚝기초 워크샵을 개최 합니다. 이번 워크샵은 현장 기술자를 위하여 기초적인 내용을 중심으로 구성하였으며 최근 기술동향에 대해서도 발표하오니 회원 여러분들의 많은 참여를 기다립니다.

아 래

1. 날짜 : 1999년 7월 15일 (목) 09:00 - 18:00
2. 장소 : 서울산업대학교 인문사회자연관(구 교양관) 강당 (5층)
3. 회비 : 20,000 원 (학생회원 10,000 원. 비회원 30,000 원)-중식 및 보고서 제공
4. 순서 : 09:00 - 09:30 : 등록

1부 진행 : 정경환 / (주)동아지질

- 09:30 - 09:50 학회장 인사(예정)
- 10:00 - 10:50 말뚝기초 설계를 위한 현장토질 조사법(박태순 / 서울산업대 교수)
- 10:50 - 11:40 말뚝기초 설계기준 고찰(윤길림 / 해양연구소)
- 11:40 - 12:30 대구경 현장 타설말뚝의 설계 개념 및 적용(김원철 / 서영기술단)
- 12:30 - 13:20 중식

2부 진행 : 이승호 / 상지대 교수

- 13:20 - 14:10 재하시험결과를 이용한 말뚝기초 최적화 설계(최용규 / 경성대 교수)
- 14:10 - 15:00 수평말뚝의 해석 및 설계(홍원표 / 중앙대 교수)
- 15:00 - 15:30 휴식
- 15:30 - 16:20 부마찰력을 고려한 말뚝기초 설계 방법(윤여원 / 인하대 교수)
- 16:20 - 17:10 현장타설 콘크리트 말뚝의 품질관리(박종배 / 대한주택공사)
- 17:10 - 18:00 질문 및 폐회 (사회: 홍원표 위원장)

문의처 위 원 장 - 홍원표 교수 (전화: 820-5258, Fax: 817-8050)
 간 사 - 박태순 교수 (전화: 970-6506, Fax: 948-0043)
 지반공학회 - TEL: 3474-4428/7865, Fax: 3474-7379