

국내 화강 풍화대 지반의 표준관입시험 N 값과 프레스미터시험 결과의 상관관계에 대한 사례 분석

Case Study of Correlation between the SPT- N Value and PMT Results Performed on Weathered Granite Zone in Korea

이 승 환¹ Lee, Seung-Hwan 백 성 하² Baek, Sung-Ha
송 영 우³ Song, Young-Woo 정 충 기⁴ Chung, Choong-Ki

Abstract

Weathered granite zone exists in most regions of Korea and it is often used as a bearing stratum of geotechnical structures. So it is very important to estimate the characteristics of weathered granite zone. SPT (Standard penetration test) is usually performed to investigate the characteristics of the weathered zone because undisturbed samples suitable for laboratory testing are hardly retrieved. PMT (Pressuremeter test) can reliably evaluate the in situ stress-strain behavior, but it is rarely conducted because of their high cost and time-consuming procedure. In this study, the correlation between the SPT- N values and the PMT results, obtained from the weathered granite zone, was analyzed. Empirical equations for pressuremeter modulus (E_m) and limit pressure (P_L) were suggested and compared with the previous research.

요 지

국내 다수의 지역에 분포하는 화강 풍화대 지반은 지반구조물의 주요 지지층으로 활용되고 있으므로 화강 풍화대의 지반특성을 평가하는 것은 중요하다. 풍화대 지반은 실내시험을 위한 불교란 시료를 채취하는 것이 어렵기 때문에 일반적으로 표준관입시험(SPT: Standard penetration test)을 통해 지반특성을 평가하고 있다. 프레스미터시험(PMT: Pressuremeter test)은 풍화대 지반의 응력 - 변형률 거동을 신뢰도 높게 평가하는 대표적인 현장시험이지만 소요 시간과 비용의 제약으로 제한적인 시험만을 수행하고 있다. 본 연구에서는 화강 풍화대에서 수행된 SPT- N_{60} 값과 PMT 결과의 상관성 분석을 수행하였으며, $N_{60} - E_m$ (E_m : Pressuremeter modulus)과 $N_{60} - P_L$ (P_L : Limit pressure) 관계식을 제안하였고 선행 연구 결과와 비교 분석하였다.

Keywords : Correlation, PMT, Site characterization, SPT, Weathered granite zone

1 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ.)
2 정희원, 한국건설기술연구원 미래융합연구본부 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Future Technology and Convergence Research, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology, Tel: +82-31-910-0096, Fax: +82-31-910-0031, sunghabaek@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)
3 정희원, 서울대학교 건설환경종합연구소 연구원 (Member, Research Associate, Institute of Construction and Environmental Engrg., Seoul National Univ.)
4 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ.)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

화강암은 국내 지반 분포 면적의 약 35%를 차지하는 대표적인 암종이며 풍화토와 풍화암을 포함하는 화강 풍화대 지반은 도로, 교량, 터널 등 대부분의 주요 건설 사업에서 지반 구조물의 지지층으로 활용되고 있으므로 화강 풍화대의 지반특성 및 지반정수를 평가하는 것은 구조물의 성능과 안전성 확보를 위해 중요하다.

풍화대 지반은 주로 현장시험을 통해 지반특성을 평가한다. 최근 삼중관 배럴과 같이 풍화대 시료의 교란을 최소화하여 연속 시료를 채취할 수 있는 기법들이 적용되고 있지만 기술적인 제약으로 일반적으로 수행되고 있지 않으며 시료 운반 및 시편 제작 과정에서 발생하는 교란에 의해 실내시험에 적합한 불교란 시료를 충분히 확보하기 어려운 실정이다. 또한, 실내시험의 해석적인 차원에서 침두값을 기준을 적용하는 암반과 달리 흙과 암반의 중간적인 특성을 보이는 풍화대에 대해서는 기준이 되는 시험방법과 해석방법이 아직 제시되어 있지 않은 실정이다. 반면, 현장시험의 경우 원지반의 교란을 최소화하므로 지반특성을 신뢰도 있게 평가할 수 있다. Clayton et al.(1995)은 불교란 시료 채취가 어려운 지반(stoney soils, sands, gravels and weak rock)에 대해 현장 시험을 통한 지반정수 평가가 필수적임을 밝힌 바 있다.

풍화대에 적용하는 대표적인 현장시험으로는 표준관입시험(SPT: Standard penetration test)과 프레스미터시험(PMT: Pressuremeter test)이 있다. 시추조사 시 동시에 수행되는 SPT는 시험의 간편성 및 경제성으로 인해 국내 외적으로 가장 널리 사용되고 있으며, 축적된 데이터를 바탕으로 제시된 경험식을 이용하여 내부마찰각, 일축압축강도, 탄성계수 등 지반정수의 추정 및 기초 지지력 산정과 지반 액상화 평가에 활용된다. Terzaghi(1948)는 N_{60} 값을 이용하여 점토 연경도 및 일축압축강도, 모래의 상대밀도와 마찰각을 제시하였으며 현재까지 지반 분류 및 설계정수 평가 등에 사용되고 있다. Yoshinaka(1968)와 Schmertmann(1978)은 점토부터 자갈까지 수행한 표준관입시험과 공내재하시험 결과를 바탕으로 $N_{60} - E_m$ 의 관계를 제시한 바 있다. Meyerhof(1956)은 N 값을 이용한 얇은 기초의 지지력 산정법을 제안하였고, Seed et al.(1985)은 진동저항응력비 산정법을 제안하였으며 현재까지 기초 지지력 산정 및 액상화 평가 시 활발히 적용되고 있다. 그러나 대부분의 경험식은 토사지반에서 측정된 SPT- N 값을 바탕으로 제안되었으며, 풍화대

지반에 SPT 수행 시 관입량이 매우 작기 때문에 기존 제안식을 이용하여 풍화대 지반특성을 평가하는 경우 주의하여야 한다. PMT는 시추공 내에서 지반의 방사방향 응력 - 변형률 거동을 평가하는 시험으로, 측정된 압력 - 변위 곡선으로부터 원지반의 정지토압, 의사탄성영역(pseudo-elastic zone)의 탄성계수(E_m : Pressuremeter modulus), 극한압력(P_L : Limit pressure)을 산정할 수 있다. 의사탄성영역의 탄성계수는 얇은기초의 침하량 및 수평 지반반력계수 산정 등에 활용되며 극한압력을 이용하여 지반의 강도정수, 얇은기초의 지지력, 말뚝기초의 연직방향 및 횡방향 지지력 등을 평가할 수 있다. 토사부터 연약한 암반까지 광범위한 지반에 적용할 수 있으며 특히, 풍화대 지반과 같이 암과 토사의 전이 지층에도 적용성이 우수하다. 그러나 SPT에 비해 상대적으로 시험 소요 시간이 길고 비용이 비싸기 때문에 제한적인 시험만을 수행하고 있으며 소규모 현장의 경우 생략하는 경우도 있다.

기존 연구자들은 비교적 간편하고 경제적인 SPT 결과를 이용하여 지반특성을 신뢰도 높게 평가하기 위해 현장에서 측정한 SPT- N 값을 에너지 효율 60% 보정된 N_{60} 과 PMT 결과로 도출한 E_m , P_L 의 상관성 분석 연구를 수행하였다. Yoshinaka(1968)와 Schmertmann(1978)은 점토부터 자갈까지 수행한 시험 결과를 바탕으로 $N_{60} - E_m$ 의 선형관계를 제안하였으며 Gang et al.(2018)은 국내 지반(모래, 점토, 실트, 자갈, 풍화토)에서 수행된 시험결과를 사용하여 $N_{60} - E_m$ 의 선형관계를 제시한 바 있다. Chiang and Ho(1980)은 홍콩의 화강 풍화대 지반을 대상으로 $N_{60} - E_m$, $N_{60} - P_L$ 비선형관계식을 제안하였으며 이외에도 Yagiz et al.(2008), Bozbey and Togrol(2010)와 Cheshomi(2015)는 각각 실트질 점토, 사질토, 실트질 모래를 대상으로 $N_{60} - E_m$, $N_{60} - P_L$ 의 관계식을 제안한 바 있다. 그러나, 대부분의 기존 연구는 SPT- N_{60} 값 50 이하의 토사 지반을 위주로 수행되었으며, 50 이상의 단단한 풍화대 지반, 특히 국내 화강 풍화대를 대상으로 수행한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 SPT- N_{60} 값을 이용한 국내 화강 풍화대의 의사탄성영역(pseudo-elastic zone)의 탄성계수(E_m : Pressuremeter modulus), 극한압력(P_L : Limit pressure) 평가의 적합성을 검토하였다. 국내 2개 현장에서 수행한 SPT과 PMT 결과를 이용하여 $N_{60} - E_m$, $N_{60} - P_L$ 관계식을 제안하였고 선행 연구 결과와 비교 분석하였다.

2. 연구대상 지역

본 연구는 화강 풍화대 지층이 발달한 국내 2개 지역 (G-site, S-site)에서 수행되었다. 총 4공(GBH-1, GBH-2, SBH-1, SBH-2)의 시추 조사를 수행하였으며 각 현장에서 지반 층상 조사 및 SPT를 위해 1공(GBH-1, SBH-1), PMT를 위해 1공(GBH-2, SBH-2) 씩 시추하였다. 연구 지역의 지층 정보 및 SPT와 PMT 시험 위치는 Fig. 1에 나타내었다.

SPT는 ASTM D1586의 규정에 준수하여 예비타, 본타 1, 본타 2의 단계로 나누어 수행하였으며 예비타(초기 15cm 관입 시 타격수)를 제외한 본타의 합을 측정하였다. 50타 이상의 타격 시 30cm 관입량이 측정되지 않는 경우 50타에 해당하는 관입량을 측정하였으며, 연속된 10회의 타격에도 관입량이 발생하지 않는 경우 SPT를 종료하였다. 조사 결과 G-site는 지표 하부 25m 심도까지 두꺼운 층적토 층이 확인되었으며 이후 SPT-N 값 50타 이상의 단단한 풍화토 층과 풍화암 층이 각각 25

m~26m, 26m~39m에 분포하였다. 심도 31.5m 이후 SPT 시험이 불가하였으며, 삼중관 배럴을 이용하여 암 코어를 회수하였고, 39m 이후 모암이 화강암인 연암이 출현하였다. S-site는 풍화토와 풍화암 층이 각각 지표에서 7m, 7m~25m 심도에 분포하였으며 심도 1m를 제외한 대부분의 풍화대에서 SPT-N 값 50타 이상의 값이 측정되었고, 심도 25m에서 모암이 화강암인 연암이 출현하였다.

GBH-2와 SBH-2 시추공은 각각 GBH-1, SBH-1 시추공과 1m 이격하여 조사하였다. 풍화대 지층에서 1.5m~2m 심도 간격으로 PMT를 수행하였으며, 공벽의 교란을 최소화 하기 위해 시험 심도까지 풍화대 시료를 채취한 직후 시험을 진행하였다. PMT는 OYO 사의 Elastometer-2 장비를 사용하였으며 시험 방법 및 계측 데이터 보정은 OYO사에서 제공한 매뉴얼과 ASTM D4719에 준수하여 수행하였다.

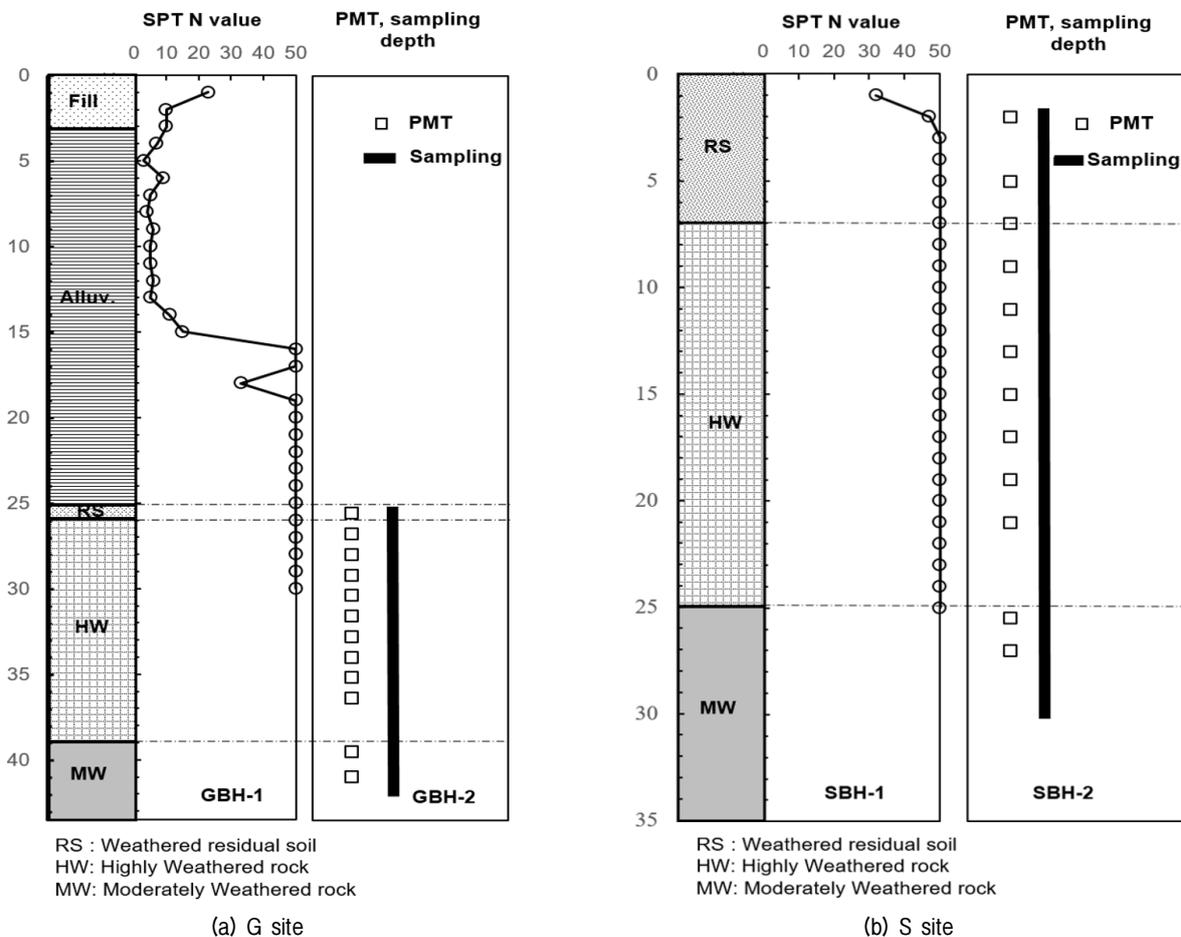


Fig. 1. Subsurface information with in situ test

3. 표준관입시험 및 프레스미터시험 결과

3.1 표준관입시험 결과(SPT- N_{60})

두 현장의 풍화대 지반에서 수행한 SPT 결과는 SBH-1 시추공의 심도 1m를 제외한 모든 시험에서 50타 타격 후 관입량이 30cm 미만으로 평가되었다. SPT- N 값은 30cm 관입 시 타격수로 정의되므로 본 연구에서는 SPT- N 값의 선형 증가 외삽을 가정하여 측정된 N 값을 30cm 관입 시 타격수로 환산한 N 값을 활용하였다(식 (1)). 환산 N 값은 국내외 다수 연구에서 적용된 바 있다(Do et al., 2012; Sun et al., 2006; Choi et al., 2010; Suzuki et al., 1993; Dasaka et al., 2012).

$$\text{환산 } N \text{ (blows)} = 50 \times \frac{30}{50 \text{회 타격 시 관입량 (cm)}} \quad (1)$$

SPT- N 값을 활용하기 위해서는 여러 영향요인에 대한 보정이 필요하며, 일반적으로 에너지 전달율, 연직유 효율력, 시추공 직경, 샘플러 종류, 룯드 길이에 대해 보정을 수행하도록 제안되어 있다. Kovacs and Salomone (1982)는 에너지 전달율이 SPT- N 값에 가장 큰 영향을 주는 요인임을 밝힌 바 있으며, Schmertmann and Palacios (1979)는 에너지 보정식을 제안하였다(식 (2)). 연직유 효율력 보정의 경우 액상화에 대한 간이 평가를 하는

경우에 한하여 적용하는 것이 바람직하다고 제안된 바 있으며(Korea Expressway Corporation, 2002; Korean Geotechnical Society, 2003), ASTM D6011에서는 사질 토지반에 한정하여 적용할 것을 추천하였다. 이외 시추공 직경, 샘플러 종류, 룯드 길이에 대한 보정계수는 Skepmpton(1986)이 제안한 값을 일반적으로 사용하고 있다. 그러나 본 연구에서는 에너지 보정만을 적용한 N_{60} 을 바탕으로 제안된 기존 경험식들과의 비교 분석을 위해 시험에 사용한 장비의 에너지 전달율만을 고려하여 에너지 효율 60%에 상응하는 N_{60} 으로 보정하였다(식 (2)). Lee et al.(2001)은 N 값을 이용한 지반정수 추정 시 신뢰도 확보를 위해 에너지 보정을 수행하여야 한다고 제안한 바 있으며, 기 제안된 대부분의 경험식이 1950~1960년대부터 개발된 것으로 당시의 에너지에 상응하는 N 값으로 보정할 것을 추천하였다.

$$N_{60} \text{ (blows)} = N_m \times \frac{ETR(\%)}{60} \quad (2)$$

여기서, N_{60} 은 에너지효율 60%로 보정된 N 값, N_m 은 측정된 N 값, ETR (Energy transfer ratio)은 해머의 에너지 전달율을 의미한다. 본 연구에서는 실제 에너지 효율을 측정하지는 않았으나, 동일한 장비의 타 현장에서 수행한 에너지 효율 시험 결과를 차용하여 77.3%를 적용하였다. 해머의 낙하 속도에너지 비, 룯드의 상태에 따

Table 1. The measured N_{60} , E_m and P_L

Site	Layer	Measured N	N_{60}	E_m (MPa)	P_L (MPa)
G site	RS ¹⁾	50/12	161	33.4	6.7
	HW ¹⁾	50/6	322	446.7	12.9
		50/3	644	536.3	78.2
		50/4	483	718.9	50.5
		50/4	483	714.3	50.1
S site	RS ¹⁾	47	61	29.9	2.4
		50/23	84	7.8	1.2
	HW ¹⁾	50/7	276	88.3	15.4
		50/6	322	85.7	18.4
		50/4	483	94.0	10.6
		50/5	387	205.5	20.6
		50/4	483	458.7	29.1
		50/4	483	478.6	22.9
		50/5	387	498.1	25.3
50/4	483	283.7	25.2		

¹⁾ RS = Residual soil, HW = Highly weathered rock

라 에너지 효율은 달라질 수 있으나, 본 연구에서 사용한 SPT 장비는 자동 타격시스템을 적용하여 낙하 속도 에너지 비에 따른 영향은 미비하며(Korea Expressway Corporation, 2002), 동일한 룯드를 사용하여 시험을 수행하였으므로 타 현장에서 측정한 에너지 효율과 큰 차이가 없을 것으로 판단하였다.

본 연구에서 측정한 N_{60} 값과 심도별 변화 추이를 Table 1 및 Fig. 3에 나타내었다. G-site와 S-site의 풍화대 지반에서 각각 164~644, 61~483의 분포로 나타났으며, 전반적으로 심도가 깊어질수록 증가하는 경향을 확인하였다. 또한, 풍화도 지층에서 총 3회(G-site: 1회, S-site 2회)의 소량의 시험으로 나타난 결과이기는 하나 풍화도 지층에 비해 풍화암 지층에서 N_{60} 값이 급격히 증가하는 추세를 확인하였다.

3.2 프레셔미터시험 결과(E_m 과 P_L)

PMT 결과로 압력 - 반지름 곡선을 도시할 수 있으며, 이로부터 의사탄성영역(pseudo-elastic zone)의 탄성계수(E_m : Pressuremeter modulus), 극한압력(P_L : Limit pressure)을 평가할 수 있다. 본 연구에서 수행한 PMT는 선굴착 방식으로 압력 - 반지름 곡선은 전형적인 3단계의 거동을 나타내었다(Fig. 2a). Fig. 2a의 각 단계별 설명은 다음과 같다.

- Non-contact and disturbed zone: 프루브(probe)가 공벽에 닿지 않거나, 시추 과정 중 교란된 지반과 접촉하여 압력을 거의 받지 못하는 상태
- Pseudo-elastic zone: 원지반 정지토압(P_0) 이상의 압

력이 재하되어 프루브가 공벽에 완전히 밀착된 상태로 압력 - 반지름 곡선의 선형구간

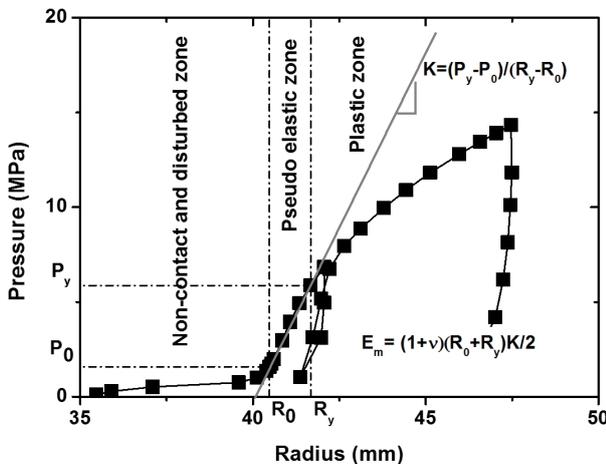
- Plastic zone: 항복압(yield point, P_y) 이상의 압력이 재하되어 변위의 변화율이 증가하는 상태로 압력 - 반지름 곡선의 비선형구간

E_m 은 의사탄성영역의 탄성계수이며 시추공벽의 수평방향 압력에 따른 초기 선형구간의 변형 특성을 나타낸다. P_L 은 시추공벽의 지반이 파괴 상태에 도달하였을 때의 압력을 의미하며, 압력-변위 곡선 상 초기 탄성영역 및 소성영역을 지나 재하 압력의 증가 없이 변위가 지속적으로 발생하는 압력으로 정의된다. 단, 실제 시험 시 시험장비 용량의 한계로 P_L 에 도달하기 어려우므로 프루브 부피가 초기 부피(P_0 에 해당하는 부피)의 두배에 도달하도록 재하한 압력을 P_L 로 정의하며 Fig. 2b와 같이 압력 - 부피의 역수($1/V$) 곡선을 선형 외삽하여 결정한다(ASTM D4719). E_m 과 P_L 의 산정식은 각각 식 (3)과 식 (4)와 같다.

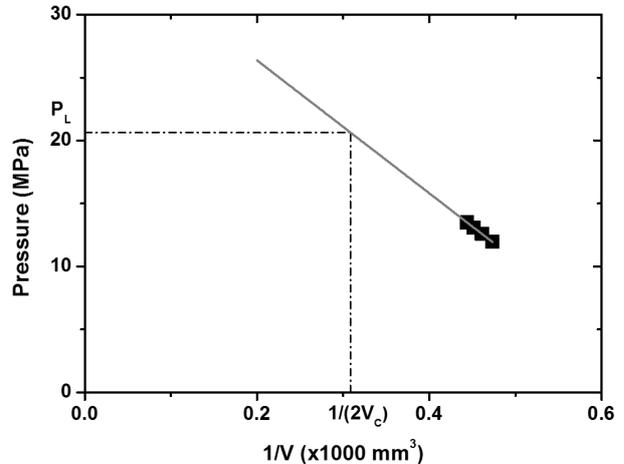
$$E_m = (1 + \nu) \cdot r \cdot \frac{\Delta P}{\Delta R} \quad (3)$$

$$P_L = P|_{at V=V_L}, V_L = 2V_c \quad (4)$$

여기서, ν 는 포아송 비, P 는 재하압력, R 은 프루브 반경이며 r 은 ΔR 산정 시 사용한 반경 값들의 중간값이다. V_L 은 P_L 에 해당하는 부피이며 V_c 는 프루브의 초기 부피(P_0 에 해당하는 부피)이다. 본 연구에서 사용한 장비는 반경(R)을 측정하므로 P_L 값 산정 시, 프루브의 높이를 동일하다고 가정하여 부피(V)를 산정하였다.



(a) Interpretation of E_m



(b) Interpretation of P_L

Fig. 2. Interpretation of PMT curve measured at 13 m depth in SBH-2

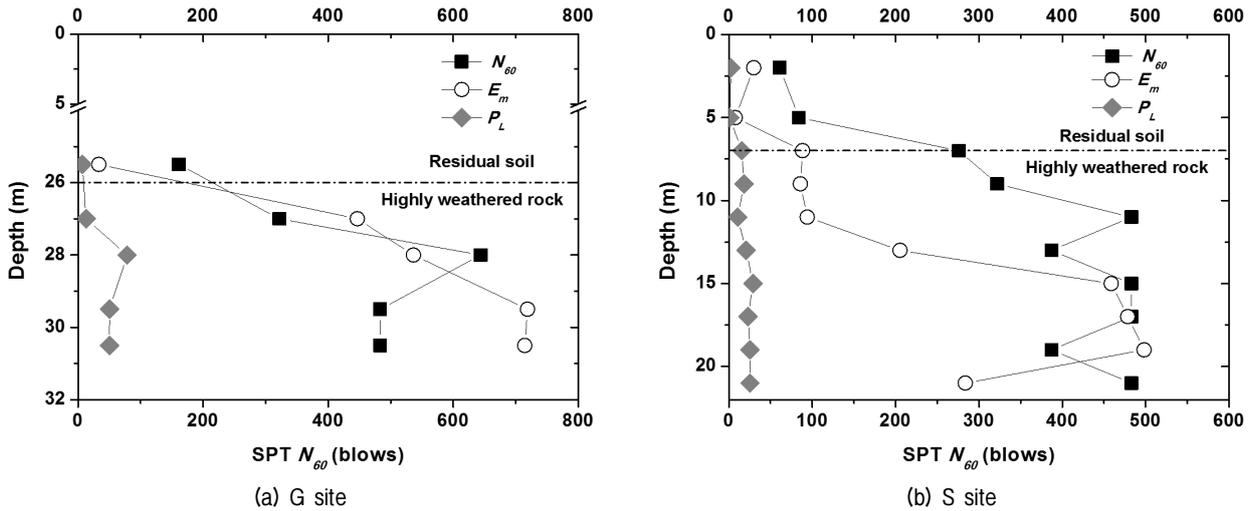


Fig. 3. The distribution of N_{60} , E_m and P_L with depth

본 연구에서 측정한 E_m , P_L 값의 심도별 변화 추이를 Table 1 및 Fig. 2에 나타내었다. E_m 값은 G-site와 S-site의 풍화대 지반에서 각각 33.4MPa~718.9MPa, 7.8MPa~498.1MPa의 분포로 나타났으며, P_L 값은 두 지역에서 각각 6.7MPa~78.2MPa, 1.2MPa~40.3MPa의 분포로 나타났다. E_m , P_L 값 모두 N_{60} 값의 분포와 유사하게 전반적으로 심도가 깊어질수록 증가하였고 풍화토 지층에 비해 풍화암 지층에서 급격히 증가하는 추세를 확인하였다.

4. SPT- N_{60} 값과 PMT 시험 결과 분석

4.1 SPT- N_{60} 값과 E_m , P_L 의 상관관계

에너지 효율 60%로 환산한 N_{60} 값과 PMT로 측정된 E_m , P_L 의 상관관계를 Fig. 4에 도시하였다. E_m , P_L 값 모

두 N_{60} 값과 log - log scale 그래프에서 선형적인 관계로 나타났으며 결정계수(R^2)가 각각 0.73, 0.84 로 비교적 좋은 상관도를 보였다(식 (5), 식 (6)). 단, N_{60} 값 약 450 (50타/3.3cm) 이상에서 측정된 E_m , P_L 값은 분산 정도가 크므로 단단한 풍화암 지반의 PMT 결과를 추정 할 경우 주의해야하며 개략적인 참고값으로 활용하는 것이 적합할 것이다. Benoit, J. and Howie, J. A.(2014)는 SPT 결과, 50회 타격 시 1inch 관입되는 지반과 100회 타격 시 1inch 관입되는 지반의 특성 차이에 대한 의문을 제기하면서 단단한 풍화대 지반에서 수행된 SPT 결과의 불확실성과 결과 해석의 어려움을 제시한 바 있다.

$$E_m = 0.0097(N_{60})^{1.7049}, R^2=0.73 \quad (5)$$

$$P_L = 0.0030(N_{60})^{1.4946}, R^2=0.84 \quad (6)$$

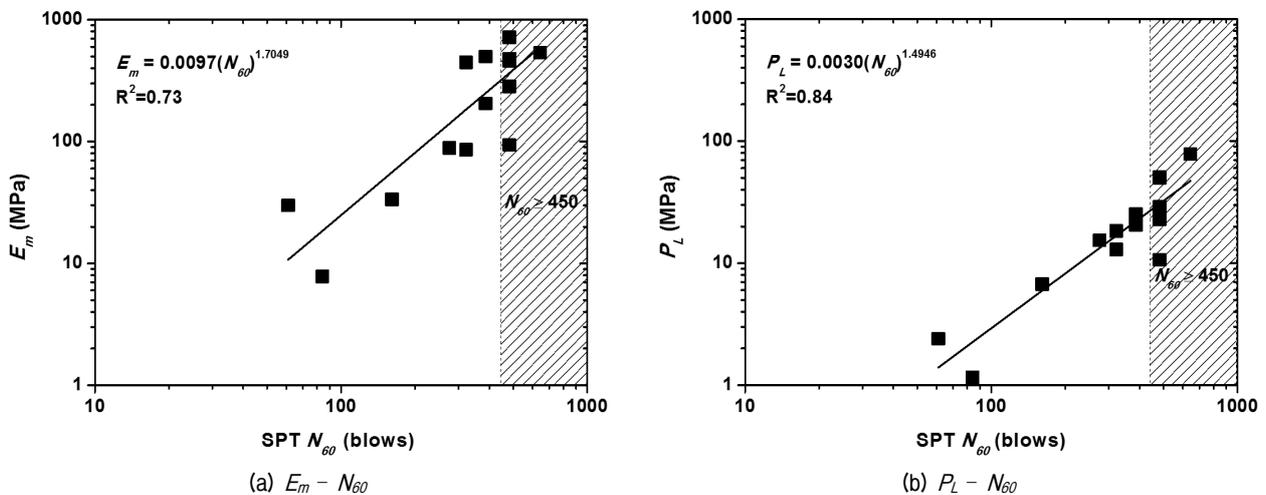


Fig. 4. The relationship between PMT results (E_m and P_L) and SPT- N_{60}

4.2 기존 제안식과의 비교 분석

본 연구에서 도출한 N_{60} 값과 E_m , P_L 의 상관관계를 기존 연구자들의 제안식과 비교 분석하였다. 기존 연구자들은 간편하고 경제적인 SPT 결과를 이용하여 지반특성을 신뢰도 높게 평가하기 위해 N_{60} 값과 E_m , P_L 의 상관관계에 대한 연구를 수행하였다(Table 2).

본 연구에서 도출한 $N_{60} - E_m$ 의 관계식 (5)를 평가하기 위해 Schmertmann(1978), Chiang and Ho(1980), Ohya et al.(1982)와 Gang et al.(2018)의 제안식과 비교하였다. 서울시 지반조사 편람(2006) 등에 제시된 Schmertmann (1978)의 제안식은 국내에서 가장 일반적으로 적용하고 있으며, 본 연구에서는 풍화대 지반에 적용하기 위해 모래질 자갈 지반에 제안된 계수의 중간값($\alpha = 13.5$)을 적

용하였다. Chiang and Ho(1980)의 제안식은 본 연구 지반과 유사한 홍콩 지역 화강 풍화대 지반에서 수행한 시험 결과를 바탕으로 제안되었으며, Ohya et al.(1982)과 Gang et al.(2018)은 각각 사질토 지반과 국내 지반(사질토, 점성토, 실트, 자갈, 풍화토)에서 수행된 시험 결과를 사용하여 관계식을 제안하였다. Fig. 5a는 본 연구의 $N_{60} - E_m$ 관계식과 측정값을 기존 제안식과 함께 도시한 것이다. Schmertmann(1978)과 Gang et al.(2018)의 제안식은 본 연구에서 도출한 관계식에 비해 E_m 값을 과대 평가하고 Ohya et al.(1982)의 제안식은 과소 평가하는 것으로 나타났으며 Chiang and Ho(1980)의 제안식은 N_{60} 값 260(50타/6cm)을 기준으로 E_m 값을 과대·과소 평가하였다. 실측된 E_m 값은 대부분 기존 제안식의 상한(Schmertmann, 1978)과 하한(Ohya et al., 1982)

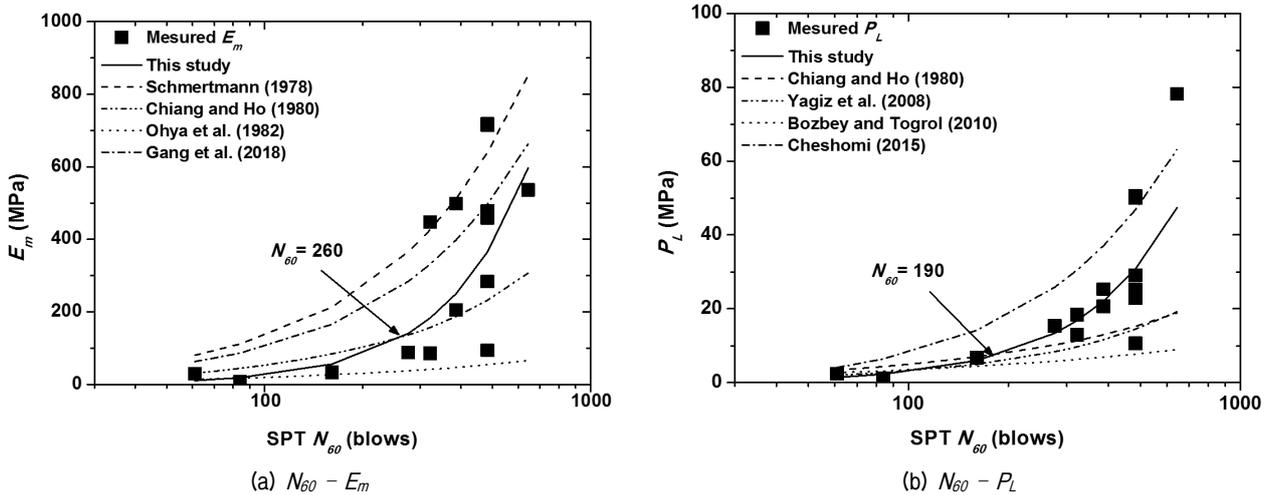


Fig. 5. Comparison of the relationship $N_{60} - E_m$ and $N_{60} - P_L$ with previous research

Table 2. Empirical relationship between N_{60} , E_m and P_L by previous researches

Soil type	Empirical equations		Researchers
	E_m	P_L	
Sand, clay, gravel, silt	E_m (kgf/cm ²) = 7N	—	Yoshinaka (1968)
Sandy silt, sand, gravel	E_m (kgf/cm ²) = αN ²⁾	—	Schmertmann (1978)
Completely weathered granite	E_m (MPa) = 0.5832(N) ^{0.9687}	P_L (MPa) = 0.1668(N) ^{0.7307}	Chiang and Ho (1980) ¹⁾
Sandy soil	E_m / P_a (MPa) = 9.08(N) ^{0.66} ³⁾	—	Ohya et al. (1982)
Silty clay	E_m (kPa) = 388.67N + 4554	P_L (kPa) = 29.45N + 219.7	Yagiz et al. (2008)
Sandy soil	E_m (MPa) = 1.33(N) ^{0.77}	P_L (MPa) = 0.33(N) ^{0.51}	Bozbey and Togrol (2010)
Silty sand	E_m / P_a (MPa) = 9.8N - 94.3 ³⁾	$P_L / P_a = N - 20.8$ ³⁾	Cheshomi (2015)
Sand, clay, gravel, silt, RS ⁴⁾	E_m (kgf/cm ²) = 10.5N	—	Gang et al. (2018)

¹⁾ The empirical equation was found by digitizing the linear regression line in the original article.

²⁾ $\alpha = 4$ (silt or sandy silt), 7 (medium sand), 10 (coarse sand) and 12~15 (sandy gravel, gravel)

³⁾ $P_a = 1$ atm

⁴⁾ RS = Residual soil

범위에 포함되었으나, N_{60} 값 약 450(50타/3.3cm) 이상의 범위에서는 변동폭이 매우 큰 것으로 나타났다.

본 연구에서 도출한 $N_{60} - P_L$ 의 관계식(식 (6))을 평가하기 위해 Chiang and Ho(1980), Yagiz et al.(2008), Bozbey and Togrol(2010)와 Cheshomi(2015)이 제안한 관계식과 비교하였다(Fig. 5b). Cheshomi(2015)의 제안식은 본 연구에서 도출한 관계식에 비해 P_L 값을 과대 평가하였으며 Yagiz et al.(2008)과 Bozbey and Togrol(2010)의 제안식은 P_L 값을 과소 평가하였다. Chiang and Ho(1980)의 제안식은 N_{60} 값 190(50타/8cm)을 기준으로 P_L 값을 과대·과소 평가하였다. 실측된 P_L 값은 대부분 기존 제안식의 상한(Cheshomi, 2015)과 하한(Bozbey and Togrol, 2010) 범위에 포함되었으나, N_{60} 값 약 450(50타/3.3cm) 이상의 범위에서는 변동폭이 매우 큰 것으로 나타났다.

기존 연구자들의 제안식과 본 연구에서 도출한 관계식은 대부분 상당한 차이를 보였으며, 이는 기 제안된 관계식을 도출할 때 분석한 대상 지반의 종류와 N_{60} 값의 범위가 다르기 때문으로 판단된다. 본 연구의 대상 지반은 화강 풍화대이며 대부분 150 이상의 N_{60} 값을 갖는 단단한 지층이나, 기 제안식은 대부분 N_{60} 값 50 이하의 사질토 및 점성토를 대상으로 도출되었다.

본 연구에 사용한 자료의 N_{60} 값 범위는 60~650으로 대부분 단단한 풍화암 지반의 자료이다. 연약한 풍화토에서 단단한 풍화암까지의 $N_{60} - E_m$, $N_{60} - P_L$ 관계를 평가하기 위해 본 연구의 대상 지반과 동일한 화강 풍화대를 대상으로 수행된 Chiang and Ho(1980)의 분석자료(N_{60} 값 범위: 10~130)와 본 연구에서 사용한 자료를

통합하여 분석하였다(Fig. 6). 식 (5)와 식 (6)은 $N_{60} - E_m$, $N_{60} - P_L$ 관계식이며 결정계수(R^2)가 각각 0.79, 0.86로 비교적 좋은 상관도를 갖는 것으로 확인되었다. 통합분석 결과는 N_{60} 값 10~650의 자료를 통해 도출한 것으로 연질에서 경질의 풍화대 지반의 E_m , P_L 값 추정에 활용할 수 있다. 단, 통합분석 결과는 국내와 홍콩 화강 풍화대의 지역적 특성으로 인한 차이가 반영되지 않았으며, N_{60} 값 450 이상에서 E_m 과 P_L 의 변동폭이 크므로 참고 값으로 활용하는 것을 추천한다.

상관성 분석을 통해 제시된 관계식은 동일한 지질조건(geology setting)에서 도출한 지역적 상관관계(local correlation)가 중요하므로(Phoon and Kulhway, 1999), 추가적인 연구를 통해 국내 풍화대에 적합한 관계식을 도출하는 것이 필요하다. 또한, SPT 시 샘플러의(split spoon sampler) 관입이 어려운 N_{60} 값 450(50타/3.3cm)의 단단한 풍화대에서 측정된 E_m , P_L 값의 변동성이 크게 나타나므로 단단한 풍화대의 E_m , P_L 값 추정 시 SPT- N_{60} 의 적용 유무에 대해 보다 심도있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

$$E_m = 0.3616(N_{60})^{1.0780}, R^2=0.79 \quad (5)$$

$$P_L = 0.0791(N_{60})^{0.9220}, R^2=0.86 \quad (6)$$

5. 결론

본 연구에서는 SPT- N_{60} 값을 이용하여 화강 풍화대의 의사탄성영역(pseudo-elastic zone)의 탄성계수(E_m :

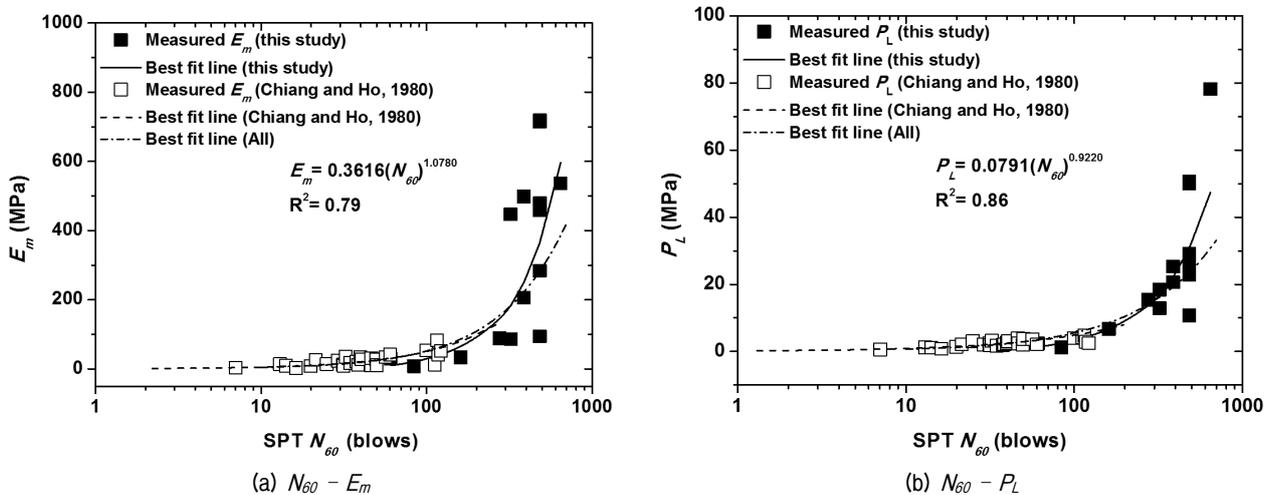


Fig. 6. Comparison of the relationship $N_{60} - E_m$ and $N_{60} - P_L$ with Chiang and Ho (1980) results

Pressuremeter modulus)와 극한압력(P_L : Limit pressure) 평가의 적합성을 검토하였다. 국내 2개 현장에서 수행한 SPT와 PMT 결과를 이용하여 $N_{60} - E_m$, $N_{60} - P_L$ 관계식을 제안하였고 선행 연구 결과와 비교 분석하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

- (1) PMT로 측정한 E_m , P_L 값 모두 N_{60} 값과 log - log scale 그래프에서 선형적인 관계로 나타났으며 결정계수(R^2)가 각각 0.73, 0.84로 비교적 좋은 상관도를 갖는 것으로 확인되었다. 단, N_{60} 값 약 450(50타/3.3cm)에서 측정된 E_m , P_L 값은 분산 정도가 크므로 본 관계식을 적용하여 단단한 풍화암 지반의 PMT 결과를 추정 할 경우 주의해야하며 개략적인 참고값으로 활용하는 것이 적합하다.
- (2) Schmertmann(1978)과 Gang et al.(2018)의 제안식은 본 연구에서 도출한 관계식에 비해 E_m 값을 과대 평가하고 Ohya et al.(1982)의 제안식은 과소 평가하는 것으로 나타났으며 Chiang and Ho(1980)의 제안식은 N_{60} 값 260(50타/6cm)을 기준으로 E_m 값을 과대·과소 평가하였다. 실측된 E_m 값은 대부분 기존 제안식의 상한(Schmertmann, 1978)과 하한(Ohya et al., 1982) 범위에 포함되었으나, N_{60} 값 약 450(50타/3.3cm) 이상의 범위에서는 변동폭이 매우 큰 것으로 나타났다.
- (3) Cheshomi(2015)의 제안식은 본 연구에서 도출한 관계식에 비해 P_L 값을 과대 평가하였으며 Yagiz et al. (2008)와 Bozbey and Togrol(2010)의 제안식은 P_L 값을 과소 평가하였다. Chiang and Ho(1980)의 제안식은 N_{60} 값 190(50타/8cm)을 기준으로 P_L 값을 과대·과소 평가하였다. 실측된 P_L 값은 대부분 기존 제안식의 상한(Cheshomi, 2015)과 하한(Bozbey and Togrol, 2010) 범위에 포함되었으나, N_{60} 값 약 450(50타/3.3cm) 이상의 범위에서는 변동폭이 매우 큰 것으로 나타났다.
- (4) 본 연구의 대상 지반과 유사한 홍콩 지역 화강 풍화대를 대상으로 $N_{60} - E_m$, $N_{60} - P_L$ 관계식을 제안한 Chiang and Ho(1980)의 분석자료(N_{60} 값 범위: 10~130)와 본 연구에서 사용한 자료(N_{60} 값 범위: 60~650)를 통합하여 분석한 결과, $N_{60} - E_m$, $N_{60} - P_L$ 관계는 결정계수(R^2)가 각각 0.79, 0.86로 비교적 좋은 상관도를 갖는 것으로 확인되었다. 단, 본 분석 결과는 국내와 홍콩 화강 풍화대의 지역적 특성으로 인한 차이가 반영되지 않았으며, N_{60} 값 450 이상에서 E_m 과 P_L 의 변동

폭이 크므로 참고값으로 활용하는 것을 추천한다.

본 연구에서 분석한 화강 풍화대 지반의 $N_{60} - E_m$, $N_{60} - P_L$ 관계는 기 제안된 관계식과 차이를 보였다. 특히, 상관성 분석을 통해 제시된 관계식은 동일한 지질조건(geology setting)에서 도출한 지역적 상관관계(local correlation)가 중요하므로, 추가적인 연구를 통해 국내 풍화대에 적합한 관계식을 도출하는 것이 필요하다. 또한, SPT 시 샘플러의(split spoon sampler) 관입이 어려운 N_{60} 값 450(50타/5cm)의 단단한 풍화대에서 측정된 E_m , P_L 값의 변동성이 크게 나타나므로 E_m , P_L 값 추정 시 SPT- N_{60} 의 적용 유무에 대해 보다 심도있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원을 통하여 지원된 건설기술연구사업 ‘케이블교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 가설공법 개발(과제번호: 19SCIP-B119960-04)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한, 서울대학교 건설환경종합연구소의 지원으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사합니다.

참고문헌 (References)

1. Choi, Y.K., Kwon, O.S., Lee, J.S., Choi, S.S., and Jang, S.M. (2010), "An Analysis on Co-relationships between In-situ Investigation Methods and End Bearing Capacity of a Drilled Shaft Socketed into the Weathered Zone", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.30, No.2C, pp.95-107.
2. Do, J.N., Hwang, P.J., Chung, S.R., and Chun, B.S. (2011), "Analysis on Relation of S-wave Velocity and N Value for Stratum in Chungcheong Buk-do", *Journal of the Korean Geo-environmental Society*, Vol.12, No.10, pp.13-22.
3. Gang, B.J., Hwang, B.S., and Cho, W.J. (2018), "Empirical Estimation of Soil Constants Using Standard Penetration Test N Value", *Journal of the Korean Geo-environmental Society*, Vol.19, No.6, pp.5-12.
4. Korea expressway corporation (2002), "Normalizations of the Standard Penetration Test".
5. Lee, S.G. (1993), "Weathering of Granite", *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol.29, No.4, pp.396-413.
6. Lee, W. J., Yu, J. M., and Ryu, D. H. (2001), "Energy Correction and Use of Standard Penetration Test N Value", *In Proceeding of '01 Korean Geotechnical Society Fall Conference*, Seoul, pp.241-264.
7. Seoul metropolitan (2006), "Site investigation manual".
8. Sun, C.G., Kim, B.H., and Chung, C.K. (2006), "Investigation on Weathering Degree and Shear Wave Velocity of Decomposed Granite Layer in Hongsung", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*,

- Vol.26, No.6C, pp.431-443.
9. ASTM (2007), "Standard test methods for prebored pressuremeter testing in soils".
 10. ASTM (2011), "Standard test method for standard penetration test (SPT) and split-barrel sampling of soils",
 11. ASTM (2011), "Standard practice for determining the normalized penetration resistance of sand for evaluation of liquefaction potential".
 12. Benoît, J. and Howie, J. A. (2014), "A View of Pressuremeter Testing in North America", SOILS and ROCKS, 211.
 13. Bozbey I and Togrol E (2008), "Correlation of Pressuremeter and SPT Test Results in Sandy and Clayey Soils", *In: Proceedings of 12th National Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Konya (in Turkish) pp.217-228.
 14. Cheshomi, A. and Ghodrati, M. (2015), "Estimating Menard Pressuremeter Modulus and Limit Pressure from SPT in Silty Sand and Silty Clay Soils. A Case Study in Mashhad, Iran", *Geomechanics and Geoengineering*, Vol.10, No.3, pp.194-202.
 15. Chiang, Y. C. and Ho, Y. M. (1980), "Pressuremeter Method for Foundation Design in Hong Kong", *In Proceedings of the Sixth Southeast Asian Conference on Soil Engineering*, pp.31-42.
 16. Clayton, C. R., Matthews, M. C., and Simons, N. E. (1995), "Site investigation: A handbook for engineers", Blackwell Science.
 17. Dasaka, S. M. and Zhang, L. M. (2012), "Spatial Variability of in Situ Weathered Soil", *Géotechnique*, Vol.62, No.5, pp.375-384.
 18. Korean Geotechnical Society, (2003), "Interpretation and application of the site investigation results".
 19. Kovacs, W. D. and Salomone, L. A. (1982), "SPT Hammer Energy Measurement", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.108, No.4, pp.599-620.
 20. Meyerhof, G. G. (1956), "Penetration Test and Bearing Capacity of Cohesionless Soils", *Journal of Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, Vol.82, No.SM1, pp.1-19.
 21. Ohya S, Imai T, and Matsubara M (1982), "Relationship between N value by SPT and LLT Pressuremeter Results", *Proceedings*, 2. European symposium on penetration testing, pp.125-130.
 22. OYO corporation (2008), "Operation manual model-4018 elastometer-2 indicator".
 23. Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H. (1999), "Evaluation of Geotechnical Property Variability", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, No.4, pp.625-639.
 24. Schmertmann, J. H. (1978), "Use of the SPT to measure dynamic soil properties, dynamic geotechnical testing", ASTM SPT 654, American Society for Testing and Materials, pp.341-355.
 25. Schmertmann, J. H. and Palacios, A. (1979), "Energy Dynamics of SPT", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.105, No.8, pp.909-926.
 26. Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., and Chung, R. M. (1985), "Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations", *Journal of the GED*, ASCE, Vol.111, No.GT12, pp.1425-1446.
 27. Skempton, A. W. (1986), "Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Aging and Overconsolidation", *Geotechnique*, Vol.36, No.3, pp.425-447.
 28. Suzuki, Y., GOTO, S., Hatanaka, M., and Tokimatsu, K. (1993). "Correlation between Strengths and Penetration Resistances for Gravelly Soils", *Soils and Foundations*, Vol.33, No.1, pp.92-101.
 29. Yagiz S, Akyol E, and Sen G (2008), "Relationship between the Standard Penetration Test and the Pressuremeter Test on Sandy Silty Clays: A Case Study from Denizli", *Bull Eng Geol Environ*, Vol.67. No.3, pp.405-410.
 30. Yoshinaka, R. (1968), "Lateral Coefficient of Subgrade Reaction", *Civil Engineering Journal*, Vol.10, No.1, pp.32-37.

Received : August 19th, 2019

Revised : October 30th, 2019

Accepted : November 5th, 2019