

다양한 시험 방법을 이용한 서해안 송도 지역에 분포하는 실트질 모래의 최대 전단탄성계수 평가

Evaluation of Maximum Shear Modulus of Silty Sand in Songdo Area in the West Coast of Korea Using Various Testing Methods

정 영 훈¹ Jung, Young-Hoon

권 형 민² Kwon, Hyung-Min

이 강 원³ Lee, Kang-Won

정 충 기⁴ Chung, Choong-Ki

김 명 모⁵ Kim, Myoung-Mo

Abstract

Maximum shear modulus of soil is a principal parameter for the design of earth structures under static and dynamic loads. In this study, the statistical data of maximum shear moduli of silty sands in Songdo area in the west coast of Korea evaluated by various field and laboratory tests - standard penetration test (SPT), cone penetration test (CPT), self-boring pressuremeter test (SBPT), downhole test (DH), seismic cone penetration test (SCPT) and resonant column test (RC) were analyzed. Based on the measurement of shear moduli using DH which is known as maximum value at very small strain, the new empirical correlations between shear moduli and SPT or CPT values were proposed. Predictions of maximum shear moduli using the proposed correlations were compared with the data obtained from DH. The good agreement confirmed that the proposed correlations reasonably predicted the maximum shear moduli of silty sands in the area.

요 지

흙의 최대 전단탄성계수는 동적/정적 지반구조물 설계에서 중요하게 다루어야 하는 기본 토질상수이다. 본 연구에서는 서해안 송도 지역의 실트질 모래에 대해 표준관입시험, 콘관입시험, 자가굴착식 공내재하시험, 다운홀 시험, 탄성파 탐사 콘관입시험, 공진주 시험 등을 수행하여 최대 전단탄성계수를 구하고 그 결과를 통계적으로 분석하였다. 다운홀 시험을 기준으로 표준관입시험 및 콘관입시험에 대한 경험식으로 구한 최대 전단탄성계수를 비교하고 새로운 경험식을 제안하였다. 제안식으로 구한 전단탄성계수는 다운홀 시험 결과와 비교적 잘 일치하였으며, 제안식을 이용하여 적절히 지반의 최대 전단탄성계수를 평가할 수 있음을 확인하였다.

Keywords : CPT, Down hole test, Maximum shear modulus, Small strain, SPT

1 정회원, 노스웨스턴대학 박사후연구원 (Member, Post-doctorial fellow, Northwestern Univ., j-young-hoon@northwestern.edu)

2 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, School of Civil, Urban and Geoenvironment system, Seoul National Univ., kkwonss2@snu.ac.kr)

3 한국가스공사 연구개발원선임연구원 (Senior Researcher, R & D Center, Korea Gas Corporation)

4 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Urban and Geoenvironment system, Seoul National Univ.)

5 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Urban and Geoenvironment system, Seoul National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

흙의 최대 전단탄성계수(G_{max})는 지진과 관련된 동적 문제뿐만 아니라 미소 변형 영역에서의 정적 문제에도 중요하게 다루어야 할 기본 토질 상수이다. 그림 1에서 보인 바와 같이 흙의 강성은 변형률 수준 $10^{-4}\%$ ~ 1% 내에서 심한 비선형성을 보이며, 이러한 비선형성을 지반구조물 설계 시 고려하기 위해서는 먼저 매우 낮은 변형률 수준에서의 최대 전단탄성계수를 평가해야 한다. 최대 전단탄성계수는 현재 다양한 현장 및 실내 시험 방법에 의해 측정되고 있다. 현장 시험 중에서는 일반적으로 다운홀 시험(down hole test), 크로스홀 시험(cross hole test)과 같이 동적 전단파 속도를 측정하는 방법이 이용되고 있으며, 이 방법들이 지반의 가장 낮은 변형률 수준에서의 강성, 즉 최대 전단탄성계수를 가장 정확하게 측정할 수 있다고 알려져 있다. 실내 시험에서는 주로 공진주 시험(resonant column test)을 이용하여 채취된 불교란 또는 재성형한 시료의 최대 전단탄성계수를 직접 측정한다. 이 밖에도 표준관입시험 및 콘관입시험 결과들에 경험식을 적용하여 최대 전단탄성계수 값을 평가할 수 있다.

현재 지반의 최대 전단탄성계수를 평가할 수 있는 시

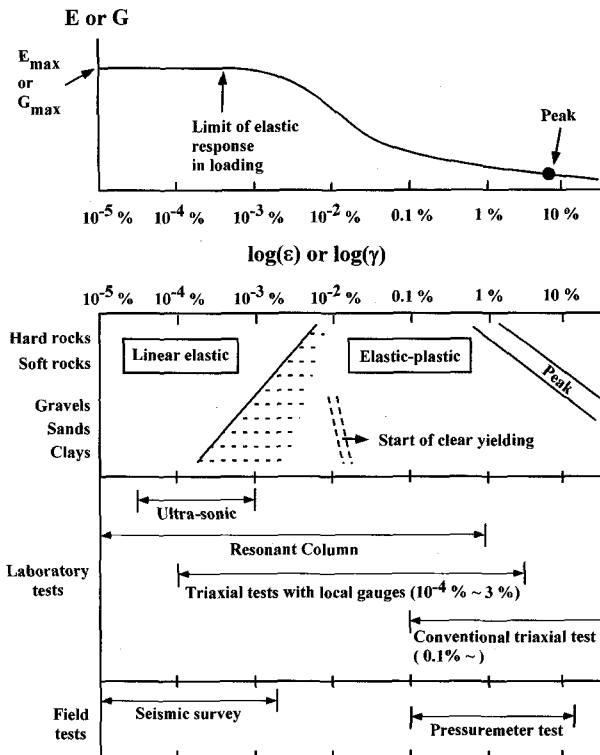


그림 1. 변형률에 따른 지반 강성의 변화와 시험 방법

험 방법은 많이 존재하지만, 대개의 경우 과업의 시간-경제적 제약으로 인해 한두 종류의 시험만을 실시하게 된다. 따라서 특정 시험만을 이용하여 신뢰할 수 있는 최대 전단탄성계수를 평가하기 위해서는, 우선 동일 위치에 대한 다양한 시험 결과를 서로 비교하여 각 방법별 결과의 상호 관계와 각 방법의 결과들에 대한 신뢰성을 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 서해안 송도 지역의 실트질 모래에 대해 수행된 다양한 현장 및 실내 시험 결과로부터 최대 전단탄성계수를 평가하고 결과 간의 상관관계를 통계적으로 분석하였다. 또한 통계 분석 결과를 이용하여 서해안 송도 지역의 실트질 모래에 대해 표준관입시험 또는 콘관입시험으로부터 최대 전단탄성계수를 산정하는 경험식을 새롭게 제시하였다.

2. 연구 대상 부지의 지반 특성 및 시험 위치

연구 대상 부지는 인천 송도 근해에 위치한 해상 준설 매립 지반으로 약 10m 두께의 준설 매립층과 빈해성 퇴적물로 이루어진 퇴적층으로 이루어져 있다. 퇴적층은 대개 느슨한 실트질 모래로 이루어져 있으며 5.0~10.0m의 두께로 분포되어 있고, 그 상부의 매립층에는 점토, 실트, 모래층이 다양한 두께로 교차되며 분포하고 있다. 대상 부지의 기반암은 지표면에서 약 35m 깊이에 존재하며 그 상부는 심하게 풍화되었다.

대상 부지의 평면도와 시험 위치는 그림 2에 도시하였다. 대상 부지의 총 면적은 990,000m²(1,200×825m)이며 총 5개소(Site A, B, C, D, E)에서 각종 현장 시험 및 시료 채취를 실시하였다. 대상 부지에서 총 다섯 종류의 현장 시험 - 1) 표준관입시험, 2) 콘관입시험, 3)

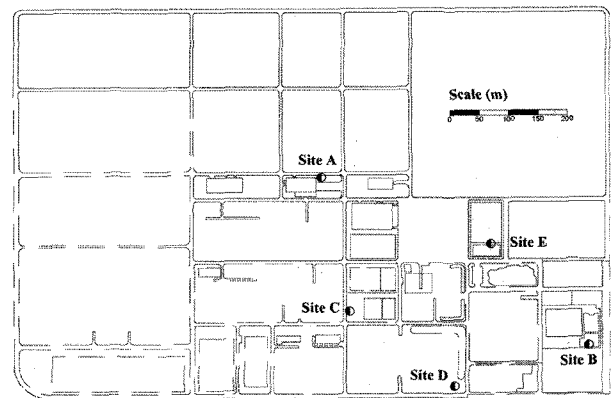


그림 2. 대상 부지 내 현장 시험 위치

자가굴착식 공내재하시험, 4) 다운홀 시험, 5) 탄성과 탐사 콘관입시험 - 을 실시하였으며, 각 시험에 대한 자세한 내용은 3장에 기술하였다. 5개소 중 3개소(Site A, C, D)에 대해서만 5종류의 현장 시험을 모두 실시할 수 있었으며, 따라서 시험 방법 간 비교는 Site A, C, D에 대해서만 수행하였다.

3. 시험 방법에 따른 최대전단탄성계수의 평가

3.1 표준관입시험(SPT)

표준관입시험(standard penetration test, SPT)은 시험의 간편성과 다양한 지반에 대한 뛰어난 적용성으로 인하여 국내 지반조사에서 가장 많이 쓰이는 시험방법이다. 본 연구에서는 KS규격(KSF2307)에 따라 표준관입시험을 수행하여 에너지 보정을 수한한 결과를 이용하였다. 표준관입시험의 결과인 N치와 전단파 속도 및 최대 전단탄성계수와와의 관계는 여러 연구자들에 의해 제안된 바 있다(Imai and Tonouchi, 1982; 선창국, 2004). 본 연구에서는 선창국(2004)이 국내 지반을 종합적으로 평가하여 제안한 식 (1)을 이용하여 N_{60} 값으로부터 최대 전단탄성계수를 구하였다.

$$G_{\max} = 4.297\rho N_{60}^{0.80} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

여기서 ρ 는 흙의 밀도(soil density)이며 단위는 ton/m^3 이다.

3.2 콘관입시험(CPT)

콘관입시험(cone penetration test, CPT)은 단면적 10 cm^2 의 콘을 2 cm/sec 의 속도로 지중에 관입하면서 선단 저항력(q_c), 주변 마찰력(f_s), 간극수압(u_2)등을 측정하여 지반의 여러 가지 공학적 특성을 평가하는 시험 방법이다. 이 시험방법은 깊이에 따라 연속적인 시험결과를 얻을 수 있으며 부가적인 센서를 장착하여 다양한 시험을 수행할 수 있는 장점을 지니고 있다. 본 연구에서 CPT는 한국도로공사의 궤도 탐재형 트럭시스템(GPMS)를 이용하여 KS규격(KSF2592)에 따라 수행하였다(조성민 등, 2004). 표준관입시험과 마찬가지로 콘관입시험 결과를 이용하여 최대 전단탄성계수를 평가하는 방법이 여러 연구자들에 의해 제시되어 있다(Mayne and Rix, 1993). 본 연구에서는 Rix and Stokoe(1992)가 제안

한 식 (2)를 이용하여 q_c 값으로부터 최대 전단탄성계수를 산정하였다.

$$G_{\max} = 1.634(q_c)^{0.25}(\sigma'_{v0})^{0.375} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

여기서 σ'_{v0} 은 해당 깊이에 대한 연직 유효 응력이며, q_c 와 σ'_{v0} 의 단위는 kPa이다. 또한 본 연구에서는 콘관입 시험 중 얻은 선단 저항력, 주변 마찰력, 간극수압 측정 결과를 이용하여 대상 지반의 지층 분류를 실시하였다. 이에 대한 자세한 내용은 4.1절에 기술하였다.

3.3 자가굴착식 공내재하시험(SBPT)

공내재하시험(pressuremeter test)은 지반 내 특정 심도에 방사방향으로 팽창하는 프루브(probe)를 위치시킨 후 공기압 또는 수압을 이용하여 프루브를 팽창시키고 이때의 압력과 부피 변화 또는 변위를 직접 측정하는 시험 방법이다. 이 시험 방법은 현장 상태의 응력-변형률 거동을 직접 측정할 수 있는 장점이 있다. 공내재하시험은 굴착 방식에 따라 선굴착식 공내재하시험(pre-boring pressuremeter test, PBPT)과 자가굴착식 공내재하시험(self-boring pressuremeter test, SBPT)으로 구분되며, 본 연구에서는 교란효과가 작은 자가굴착 방식으로 시험을 수행하였다. 최대 전단탄성계수는 초기 굴착 시에 발생할 수 있는 교란 효과를 고려하여 그림 3과 같이 제하-재재하의 결과로부터 결정하였다. 즉, 제하-재재하로부터 얻은 응력-변형률 곡선을 이용하여 변형률 0.1% 범위의 할선탄성계수를 구하고, 이로부터 최대 전단탄성계수를 평가하였다(Bellotti et al. 1989).

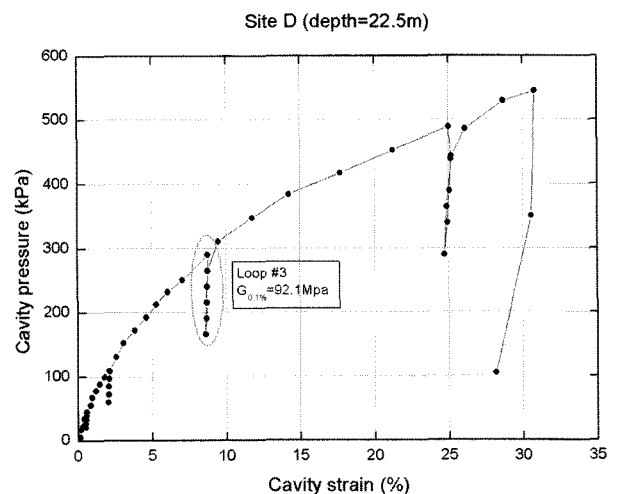


그림 3. SBPT의 결과를 이용한 G_{\max} 의 산정예(Site D)

3.4 다운홀시험(DH)

다운홀 시험(down hole test, DH)은 공내 탄성과 시험의 일종으로 지반에 시추공을 형성한 후, PVC 관과 같은 공벽을 유지시킬 수 있는 케이싱을 삽입한 뒤 수신기(receiver)를 일정 간격으로 내리면서 지표면의 발진자(source)로부터 발생된 전단파 및 압축파의 속도를 지중에서 측정하는 시험방법이다. 본 연구에서는 수신기를 1.5m 간격으로 내리면서 다운홀 시험을 수행하였으며, 심도별 전단파의 초기 도달 시점 및 각 심도간 도달 시차는 전단파의 극성을 이용한 교차법을 이용하여 평가하였다. 전단파의 전달 속도 분석에는 결정된 신호 도달 시점 및 시차를 토대로 직접 계산이 가능한 직접법과 간접법 및 수정 간접법 등의 역산해석 방법으로 각각 전단파 속도를 구하였으며, 이 값들의 평균치로부터 식(3)을 이용하여 최대 전단탄성계수를 결정하였다.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

여기서 ρ 는 흙의 밀도이며, V_s 는 다운홀시험으로 구한 전단파 속도이다.

3.5 탄성과 탐사 콘관입시험(SCPT)

탄성과 탐사 콘관입시험(seismic cone penetration test, SCPT)은 피에조콘의 상단에 진동을 감지할 수 있는 수신기(receiver)를 설치하여 콘관입시험 도중 지표면의 발진자(source)로부터 발생된 탄성파를 지중에서 평가하는 시험이다. 이 시험은 콘관입시험과 다운홀 시험을 접목한 시험 방법으로 콘관입시험과 함께 지반의 전단파 속도 및 압축

파 속도를 동시에 얻기 위해 널리 이용되고 있다. SCPT는 다운홀 시험에 비해 시추공을 별도로 만들지 않아도 되는 장점이 있으며, 수신기와 주변 지반이 완전히 접촉된 상태에서 시험이 수행되기 때문에 보다 정확한 전단파 및 압축파를 측정할 수 있는 장점을 지니고 있다(조성민 등, 2004). 본 연구에서는 한국도로공사의 궤도 탐재형 트럭시스템(GPMS)을 이용하여 콘의 관입과 함께 2m 심도 간격으로 SCPT를 수행하였으며, 다운홀 시험과 동일한 방법을 이용하여 최대 전단탄성계수를 평가하였다. SCPT의 측정 심도 간격(2m)이 DH의 간격(1.5m)보다 큰 관계로 본 연구에서는 DH로부터 구한 최대 전단탄성계수가 실제 지반의 전단탄성계수에 보다 가까운 값이라고 간주하였다.

3.6 공진주시험(RC)

공진주시험(resonant column test, RC)은 지반의 동적 특성치를 평가하기 위해 수행되는 시험방법으로서 전단 변형률의 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비 등을 평가하기 위해 널리 사용되는 실내 시험 방법이다. 본 연구에서는 Stokoe식 공진주 시험기를 이용하였고, 현장 상태에 맞추어 현장에서 채취된 시료를 성형하고, 구속 압을 가한 후 시험을 수행하였다.

4. 시험 결과 및 분석

4.1 대상 지반 분류 및 특성

앞서 언급한 바와 같이 콘관입시험 중 얻은 선단 저항력, 주면 마찰력, 간극수압 측정치를 이용하여 각

표 1. CPT를 이용한 지반 분류 기준

분류번호	지반분류(Robertson 등, 1986)		본 연구 분류
1	예민비가 큰 세립질 흙	Sensitive fine grained	-
2	유기질토	Organic material	-
3	점토	Clay	점토(clay)
4	실트질 점토 또는 점토	Silty clay to clay	점토(clay)
5	점토질 실트 또는 실트질 점토	Clayey silt to silty clay	점토(clay)
6	모래질 실트 또는 점토질 실트	Sandy silt to clayey silt	실트(silt)
7	실트질 모래 또는 모래질 실트	Silty sand to sandy silt	실트(silt)
8	모래 또는 실트질 모래	Sand to silty sand	모래(sand)
9	모래	Sand	모래(sand)
10	자갈질 모래 또는 모래	Gravelly sand to sand	모래(sand)
11	높은 강도의 세립질 흙	Very stiff fine grained	-
12	모래 또는 점토질 모래	Sand to clayey sand	-

시험 위치에 대해 지층을 분류하였다. 지반 분류는 Robertson 등(1986)이 제시한 분류 도표를 이용하여 수행하였다. 그림 4에서는 심도 30m까지의 콘관입시험 결과로부터 계산한 마찰률(friction ratio, R_f)와 간극수압 계수(pore pressure parameter, B_q)의 관계를 Robertson의 도표에 도시한 결과를 보여준다. 그림 4에서 표시한 분류 기준은 표 1에 정리하였다. 그림 4에서 마찰률과 간

극수압계수는 다음과 같이 정의된다.

$$R_f = f_s/q_c, \quad B_q = (u_2 - u_0)/(q_t - \sigma_{v0}) \quad (4)$$

여기서 f_s 는 주변 마찰력, q_c 는 선단 저항력, u_2 는 측정된 간극수압, u_0 는 측정 심도에 해당하는 정수압, σ_{v0} 는 측정 심도에 해당하는 연직 응력, 그리고 q_t 는 보정된 선단 저항력으로 $q_t = q_c + (1-a)u_2$ 이며 a 는 피에조콘의

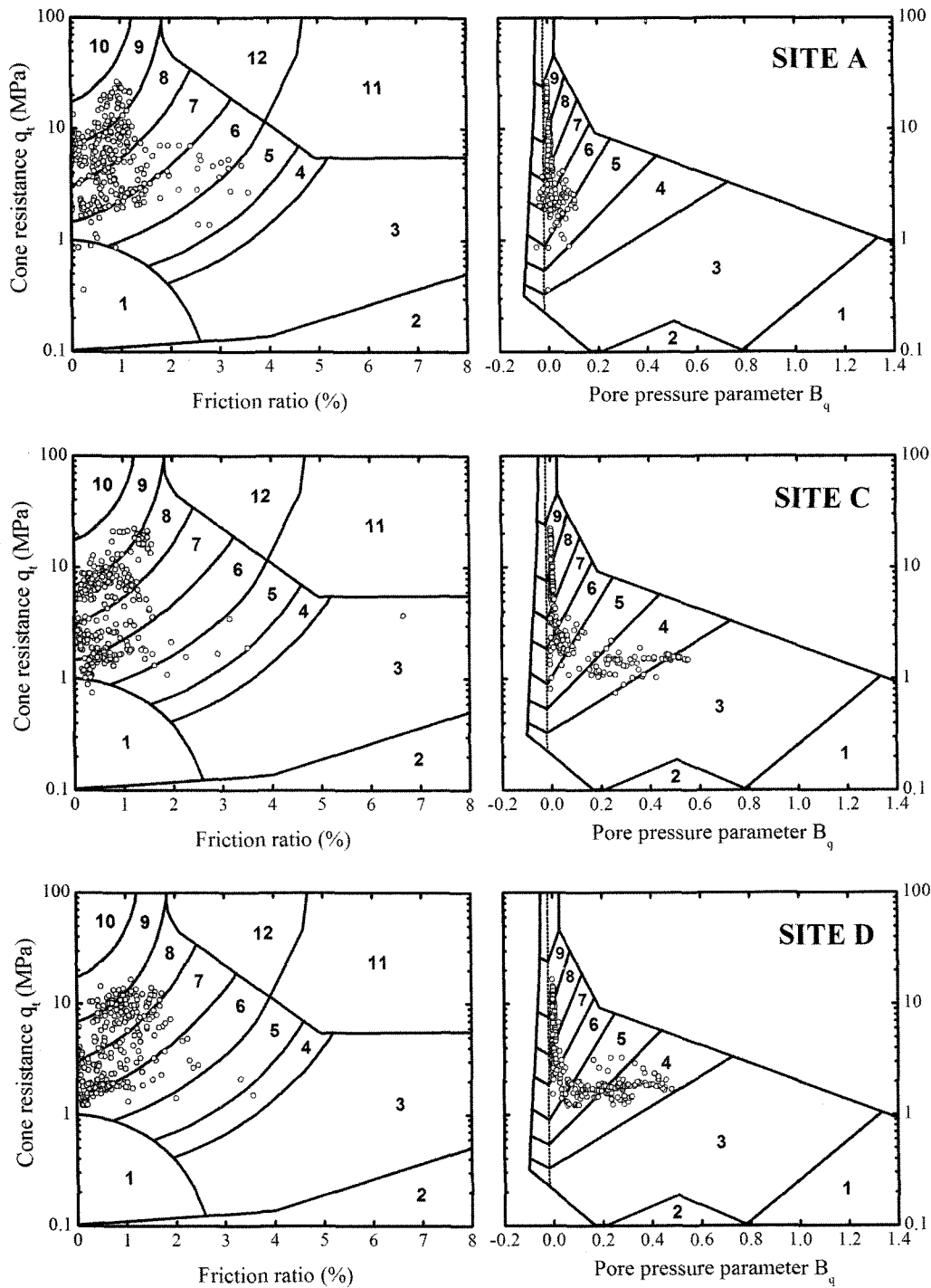


그림 4. CPT 결과를 이용한 지반 분류(Robertson 등(1986)의 분류 도표, 표 1 참조)

다공석 필터 설치에 따른 부등 단면적 비(본 연구에서 $a=0.8$)이다.

그림 4에서 보인 바와 같이, 마찰률을 기준으로 분류할 경우 대부분의 흙이 실트질 모래(분류 기준 7) 또는 모래(분류 기준 8)로 분류되며 각 시험 위치에 따른 차이가 크지 않다. 하지만 간극수압계수를 기준으로 분류

할 경우 시험 위치에 따른 지층 분류의 분포가 마찰률을 기준으로 한 경우보다 분명히 나타난다. 즉 Site A의 경우 간극수압계수를 기준으로 분류할 때 실트질 모래(분류 기준 6)가 좀 더 많이 나타나며, Site C와 D의 경우 점토질 실트(즉 분류 기준 4와 5)가 더 많이 나타난다. 이와 같이 분류 기준(즉 마찰률 또는 간극수압계수)에

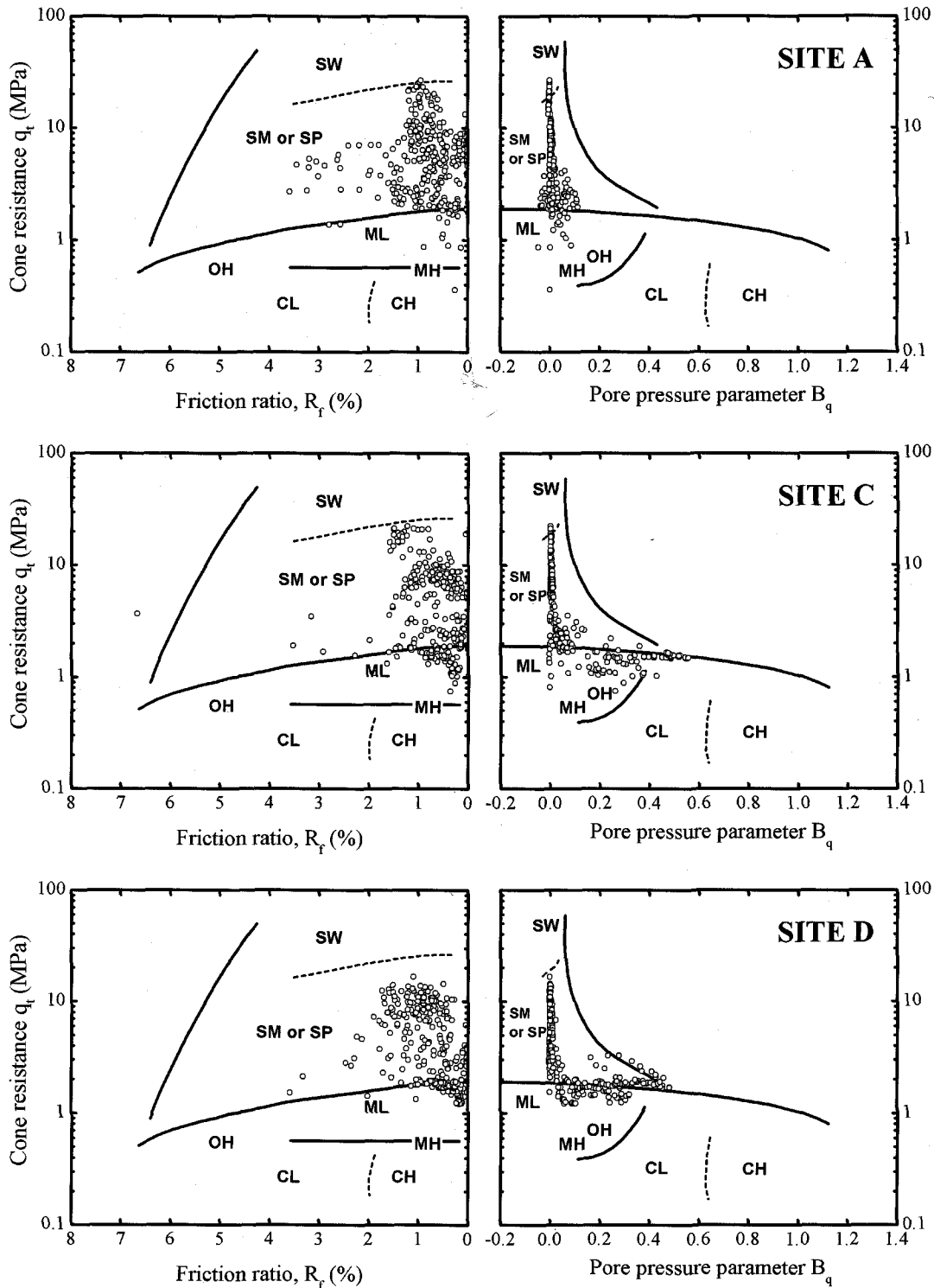


그림 5. CPT 결과를 이용한 지반 분류(이선재(1997)의 분류 도표)

따라 차이가 나타나는 것은 주면 마찰력이 매우 작을 것으로 측정되기 때문에 마찰률의 신뢰도가 간극수압 계수에 비해 다소 결여되기 때문이다(이선재 1997; 동부건설 1998). 따라서 본 연구에서는 Robertson 등(1986)의 도표를 이용하여 간극수압계수를 기준으로 각 지층을 분류하였다. 또한 해석상의 편의를 위해 Robertson 등(1986)의 도표에서 3, 4와 5로 분류되는 지층은 점토(clay)로, 6과 7로 분류되는 지층은 실트(silt)로, 8, 9와 10으로 분류되는 지층은 모래(sand)로 분류하였다(표 1 참조).

Robertson 등(1986)의 도표로 지층을 분류할 경우 분류 체계가 일반적으로 사용되는 통일분류기준과 상이하므로 해석 상의 문제가 발생할 수 있다. 이선재(1997)는 국내 여러 지역에 대해 실시한 콘관입시험 결과를 실내시험 결과와 비교한 후 통일분류법에 따라 분류된 도표를 제시한 바 있다. 그림 5는 콘관입시험 결과를 이선재의 분류 도표 상에 도시한 결과를 보여준다. 이선재의 분류 기준을 따를 경우 대부분의 흙이 SM 또는 SP로 분류되며, Site C와 D의 경우 ML에 좀더 많이 분포하고 있다. 따라서 본 연구에서 다루는 지반이 대체로 실트질 모래로 이루어져 있음을 알 수 있다.

그림 6에서는 각 위치에서 심도에 따른 콘관입시험 결과, 표준콘관입시험 결과, Robertson 등(1986)의 분류 도표를 이용한 분류 결과 및 대략적인 지층 구성을 도시하였다. 그림 6에서 보인 바와 같이 대상 부지는 심도 15m 까지 대개 모래로 이루어져 있으며, 심도 15m 하부에서는 일반적인 서해안 지역 특성과 같이 모래, 실트 및 점

토층이 복잡하게 교차하고 있다.

4.2 최대 전단탄성계수 분포

그림 7에서는 각종 현장 시험 및 공진주시험으로부터 구한 최대 전단탄성계수(G_{max})를 각 시험 위치 별로 심도에 따라 도시하였다. CPT 및 SCPT의 시험 결과는 기준 시험으로 설정한 DH 시험 결과의 심도 간격에 맞추어 0.5m 간격으로 구하였으며 나머지 결과들은 시험 심도에 맞추어 도시하였다. Site C와 D의 경우 현장 상황에 의해 심도 26m까지 DH 시험을 실시할 수 있었으며, 비교를 위해 다른 시험 결과도 DH 시험 심도에 맞추어 제시하였다.

그림 7을 살펴보면, 비록 제한된 수량이지만 SBPT 및 RC의 최대 전단탄성계수와 DH 시험으로 구한 값이 매우 유사하며, 이는 DH 시험을 이용하여 실제 지반의 최대 전단탄성계수 값을 적절히 측정할 수 있음을 간접적으로 보여준다. 측정 원리가 같은 SCPT와 DH 시험 결과는 이론 상 같은 심도에서 동일한 값이어야 하지만, 앞서 언급한 바와 같이 DH 시험의 경우 시추 선굴착 효과, 두 시험의 시험 심도 및 시험 간격의 차이 때문에 시험 결과 간에 약간의 차이를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서는 좀 더 조밀한 심도 간격으로 수행한 DH 시험의 최대 전단탄성계수를 시험 방법 간 측정 결과 비교 시 기준값으로 정하였다. 비교를 위해 각 시험에서 구한 최대 전단탄성계수(G_{max})를 DH 시험으로 구한 값(G_{max} (DH))으로 나누고 이 값을 통계 분석에 이용하였다. 그

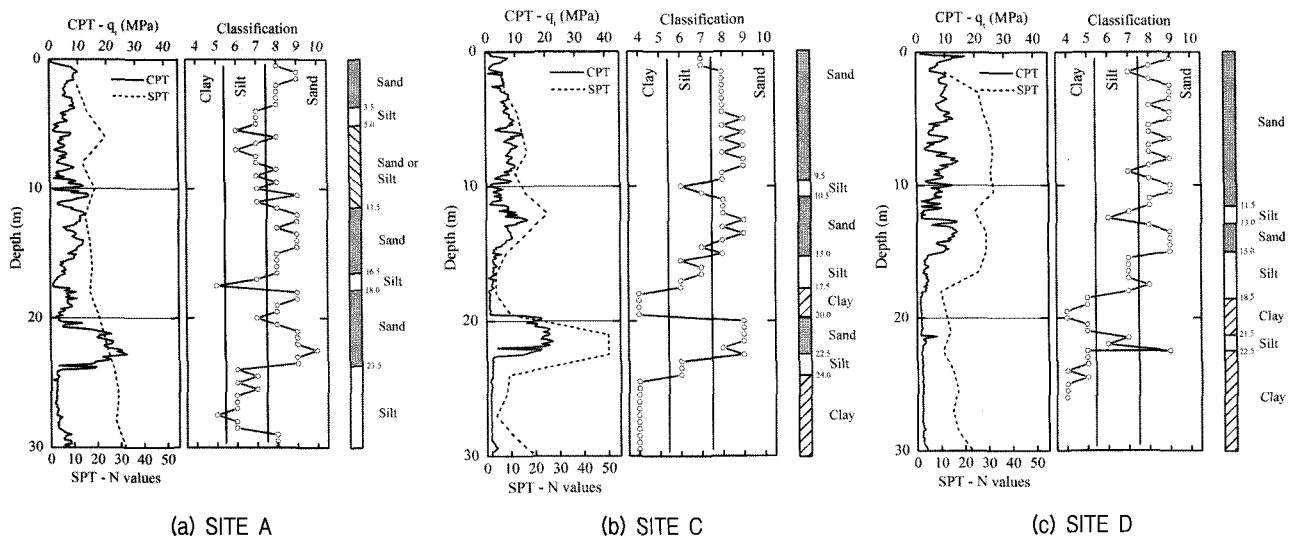


그림 6. 각 시험 위치에서 심도에 따른 지층 분류

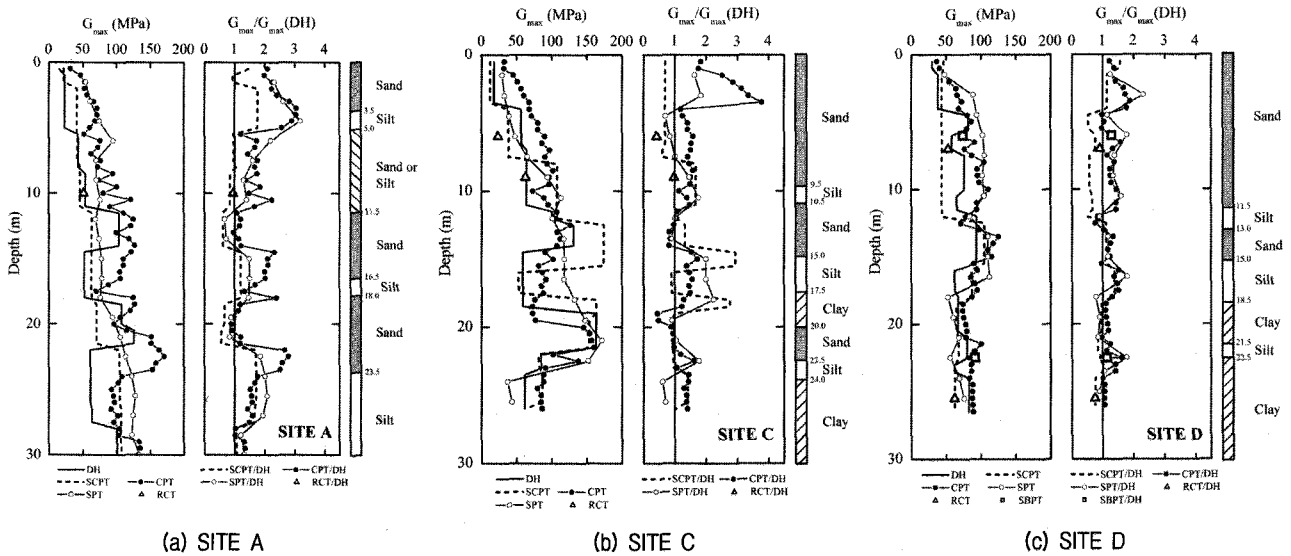


그림 7. 각 시험 위치에서 최대 전단탄성계수 비교

림 7에서는 각 시험 방법의 $G_{max}/G_{max}(DH)$ 변화를 심도에 따라 도시하였다.

4.3 시험 방법에 따른 결과 비교

각 시험 방법에 대한 $G_{max}/G_{max}(DH)$ 의 빈도수(frequency of occurrence)와 확률 밀도(probability density)를 그림 8에 도시하였다. 또한 표 2에 각 시험 방법에 대한 $G_{max}/G_{max}(DH)$ 의 기술통계량을 정리하였다. $G_{max}/G_{max}(DH)$ 의 분포는 로그노말 분포(lognormal distribution)를 따른다고 가정하였으며, 로그노말 분포의 확률 밀도함수는 다음과 같다.

$$f_X(x) = \frac{1}{x\lambda\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right)^2\right] \quad (5)$$

여기서 확률변수 χ 는 $G_{max}/G_{max}(DH)$ 의 값이며, λ 와 ξ 는 로그노말 분포의 평균과 표준편차이다. 로그노말 분포의 계수 λ 와 ξ 는 식 (6)을 이용하여 정규분포에 대한 평균(μ)과 표준편차(σ)로 환산할 수 있다(Ang and Tang, 1975)

$$\mu = \exp(\lambda + \xi^2/2), \quad \sigma = \mu[\exp(\lambda^2) - 1] \quad (6)$$

그림 8과 표 2에서는 전체 대상 지반에 대한 통계 분석 결과와 함께 모래(sand) 및 실트(silt)와 점토(clay)로 구분하여 처리한 분석 결과를 도시하였다. 점토의 경우 해석 자료의 개수가 충분하지 않아 실트에 포함시켜 자료를 처리하였다. SCPT의 경우 예상할 수 있는 바와 같이 $G_{max}/G_{max}(DH)$ 의 평균이 1.0에 가까운 값이며, 표준편차도 다른 시험에 비해 상대적으로 매우 작은 값이다.

표 2. 각 시험방법에 대한 $G_{max}/G_{max}(DH)$ 의 기술통계량

		전체			모래			실트 및 점토		
		SCPT/DH	CPT/DH	SPT/DH	SCPT/DH	CPT/DH	SPT/DH	SCPT/DH	CPT/DH	SPT/DH
로그 노말 분포	평균(λ)	0.02	0.35	0.28	-0.06	0.41	0.28	0.13	0.27	0.29
	표준편차(ξ)	0.40	0.34	0.40	0.40	0.35	0.39	0.38	0.31	0.43
	왜도 ¹⁾	-0.34	1.18	-0.82	-0.80	-0.37	-0.65	0.23	3.71	-1.00
	첨도 ²⁾	0.36	0.24	0.07	0.35	0.55	0.07	0.52	-0.62	0.05
환산 정규 분포	평균(μ)	1.11	1.50	1.44	1.02	1.60	1.42	1.23	1.38	1.46
	표준편차(σ)	0.01	0.12	0.12	0.02	0.15	0.11	0.05	0.09	0.13
	분산계수 ³⁾	1%	8%	8%	2%	9%	8%	4%	7%	9%

1) 왜도(skewness) : 자료분포의 비대칭도를 측정하는 수치이며, 평균이 중앙값보다 크면 양의 값, 작으면 음의 값이다.
 2) 첨도(kurtosis) : 자료분포의 뾰족함을 측정하는 수치이며, 정규분포의 첨도는 3이다. 정규분포보다 뾰족하면 양의 값, 편평하면 음의 값을 가진다.
 3) 분산계수(coefficient of variation) : 표준편차를 평균으로 나눈 수치이며, 자료의 분산도를 무차원화하여 상호 비교할 때 사용한다.

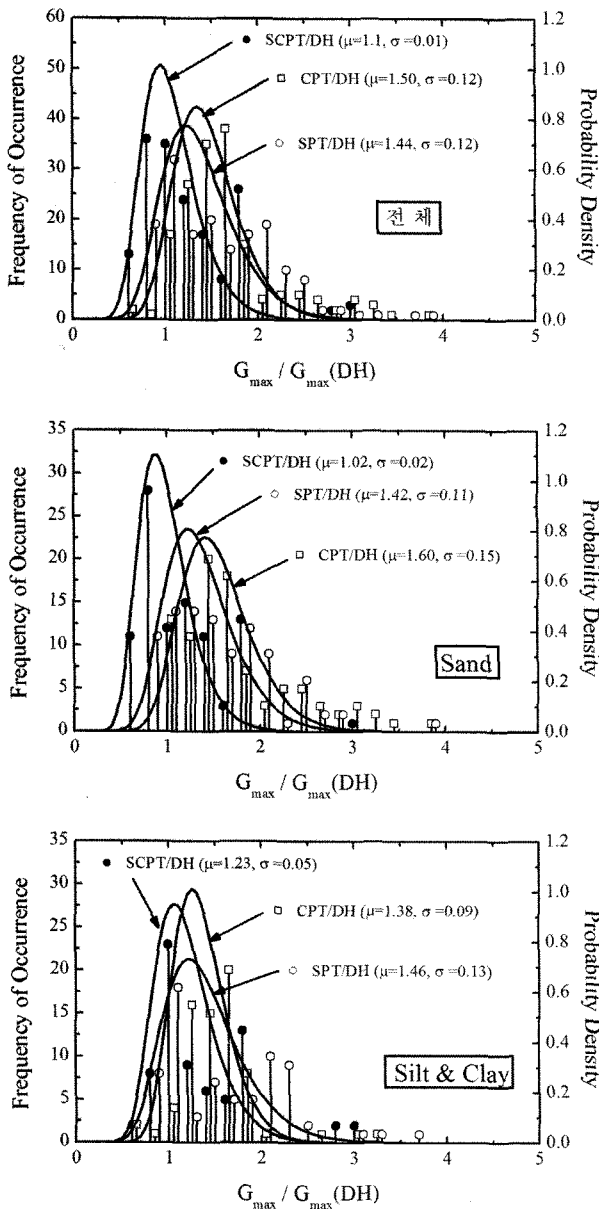


그림 8. G_{max}/G_{max} (DH)의 분포

단 실트 및 점토에 대한 결과에서는 평균값이 1.23으로 DH 시험결과와 차이를 보였는데, 이는 그림 7(b)에서 확인할 수 있듯이 Site C의 심도 15m와 18m 근처의 실트와 점토층에서 SCPT의 결과가 DH 시험에 비해 조밀하게 측정되지 않은 것이 통계자료에 영향을 주었기 때문이다. 이러한 측정 심도 차이에 따른 영향을 배제한다면 SCPT와 DH은 동일한 결과를 제시한다고 판단할 수 있다.

SPT의 경우 G_{max}/G_{max} (DH)의 평균값이 약 1.44이고, 지반 종류에 따라 큰 차이를 보이지 않았으며, 표준편차는 SCPT보다 큰 값을 갖는 것으로 나타나 상대적으로 SPT로 구한 G_{max} 의 신뢰도가 떨어짐을 알 수 있다.

CPT의 경우에도 G_{max}/G_{max} (DH)의 평균이 1.50으로 SPT와 마찬가지로 최대전단탄성계수를 과대평가하며, 표준편차 역시 SPT와 유사한 점으로 판단할 때 그 신뢰성이 떨어지는 것으로 판단된다. 더욱이 CPT의 경우 지반 종류에 따라서도 값의 크기와 신뢰도 모두 분명한 차이를 보이고 있다. 즉 실트 및 점토층에 대한 전단탄성계수는 비교적 작은 분산도를 보이지만, 모래층의 경우 SPT보다 큰 분산도를 보인다. 이는 그림 7에서 보인 바와 같이 특히 SITE C의 0~5m 심도에서 CPT로 구한 최대 전단탄성계수가 DH의 측정치와 상당히 큰 차이를 보였기 때문이다.

SPT와 CPT의 통계분석 결과를 종합해 볼 때, 두 시험 방법에서 모두 최대 전단탄성계수를 전반적으로 크게 평가하고 있다. 또한 CPT의 경우 모래층과 실트 및 점토층의 평가 값들이 크게 차이가 나므로 구분할 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 통계자료를 토대로 SPT와 CPT에 대한 식 (1)과 (2)를 수정하여 보다 나은 전단탄성계수 평가가 가능하도록 하였다. 앞서 분석한 통계자료를 토대로 대한 SPT와 CPT의 최대 전단탄성계수 추정식을 제안하면 아래의 식과 같다. 또한 추정식의 오차 수준을 제시하기 위해 추정식으로 구한 값과 실측치 간의 오차를 각 심도에서 구한 후 평균을 취하여 식과 함께 제시하였다.

모래, 실트 및 점토층에 대한 추정식(SPT) :

$$G_{max} = 2.984\rho V^{0.80} \quad (7)$$

실측치와의 오차 : $\pm 33\%$

모래층에 대한 추정식(CPT) :

$$G_{max} = 1.021(q_c)^{0.25}(\sigma'_{10})^{0.375} \quad (8)$$

실측치와의 오차 : $\pm 31\%$

실트 및 점토층에 대한 추정식(CPT) :

$$G_{max} = 1.184(q_c)^{0.25}(\sigma'_{10})^{0.375} \quad (9)$$

실측치와의 오차 : $\pm 17\%$

그림 9에서는 제안된 추정식의 타당성을 검토하기 위해 제안식과 DH 시험으로 구한 최대 전단탄성계수를 심도에 따라 비교하였고, 제안식이 충분한 신뢰성을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 대부분의 지반조사에서 최대 전단탄성계수의 측정을 위해 DH 시험이나 SCPT 등의 시험을 수행하기는 어렵다. 그러나 서해안 지역의 실트질 모래에 대한 최대 전단탄성계수는 일반적으로 수

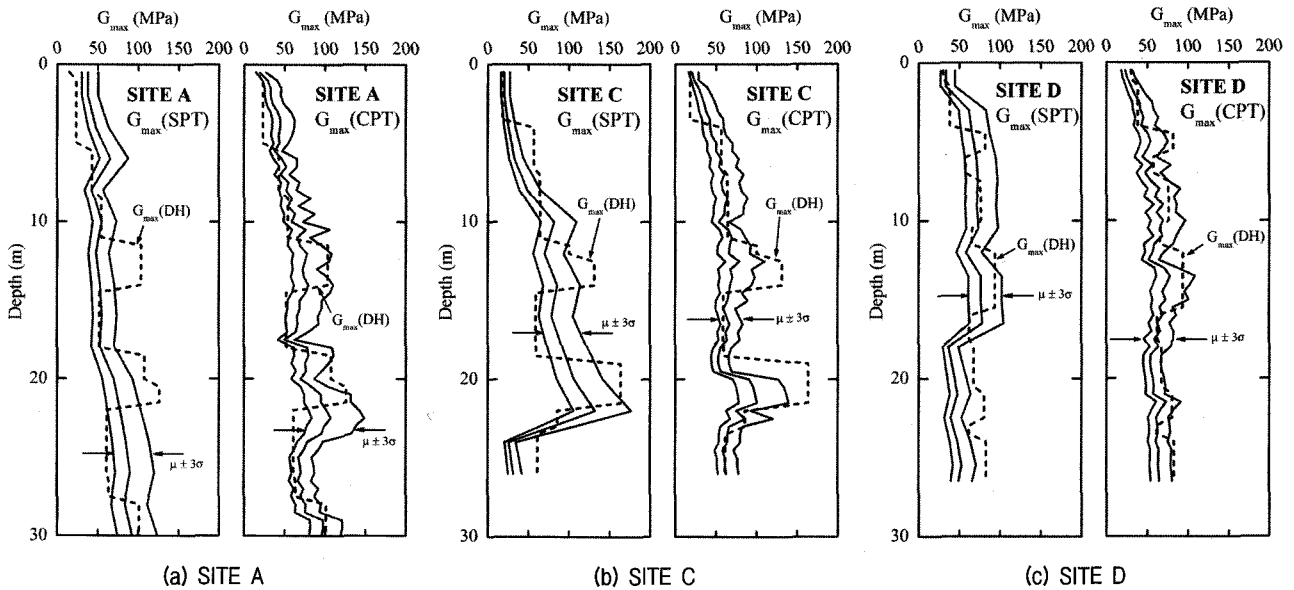


그림 9. 제안식으로 예측한 최대 전단탄성계수

행되는 SPT 또는 CPT 시험의 결과와 본 연구의 제안식을 이용하여 충분한 신뢰도를 가지고 손쉽게 평가할 수 있다고 판단된다.

Campanella 등(2004)에 의하면 콘관입시험에서 얻어지는 결과로부터 상관관계를 이용할 때는 대상이 되는 지반 고유의 상관관계를 해당 시험들을 시행, 비교하여 결정하고, 이를 이용하는 것이 가장 바람직하다고 제안하고 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 상관관계들은 서해안 송도지역의 실트질 모래지반에 가장 적합하다고 판단되지만, 이외에도 유사한 형성 과정을 거쳐 조성된 여타 서해안 여러 지역의 실트질 모래지반의 경우에도 상당한 신뢰도를 가지고 적용할 수 있을 것으로 예상된다.

5. 결론

본 연구에서는 서해안 송도 지역의 실트질 모래에 대한 최대 전단탄성계수를 평가하기 위해 5 종류의 현장 시험(표준관입시험, 콘관입시험, 자가굴착식 공내재하 시험, 다운홀 시험, 탄성과 탐사 콘관입시험)과 공진주 시험을 실시하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 대상 부지의 세 위치에 대해 수행한 각종 현장 시험 및 공진주 시험으로부터 최대 전단탄성계수의 분포를 심도에 따라 구하였다. 공진주 시험 및 공내재하 시험으로부터 구한 최대 전단탄성계수는 다운홀 시험의 결과와 매우 유사하였으며, 이는 현장 최대 전

단탄성계수 평가에 공진주 시험 및 공내재하시험의 적용 가능성을 보여준다.

- (2) 다운홀 시험과 탄성과 탐사 콘관입시험으로부터 구한 최대 전단탄성계수를 비교한 결과, 특정 심도에서 매우 유사한 최대 전단탄성계수를 얻을 수 있었다.
- (3) 기존의 경험식(식 (1) 참조)을 이용하여 표준관입시험으로부터 구한 최대 전단탄성계수를 다운홀 시험과 비교한 결과, 지층의 종류에 관계없이 최대 전단탄성계수를 40% 이상 크게 평가할 뿐만 아니라 신뢰도 역시 낮게 나타남을 알 수 있었다. 콘관입시험으로부터 구한 최대 전단탄성계수 역시 기존의 탄성계수에 대한 경험식(식 (2) 참조)을 이용하여 구할 경우, 최대 전단탄성계수를 50% 이상 과대 평가하며 낮은 신뢰도가 나타났다. 더욱이 CPT의 결과는 지반의 종류에 따라 상이한 값과 신뢰도를 갖는 것으로 나타났다.
- (4) 서해안 송도 지역의 실트질 모래지반에 대한 통계 분석자료를 토대로 표준관입시험 및 콘관입시험 결과로부터 최대 전단탄성계수를 평가할 수 있는 추정식을 기존의 경험식을 토대로 수정하여 제안하였으며, 제안된 추정식의 오차는 시험 종류 및 지층 종류 별로 17~33%의 범위에 있었다. 제안식으로 구한 전단탄성계수를 다운홀의 결과와 다시 비교하였고 이로부터 제안한 경험식의 타당성을 검증하였다. 또한 여기서 결정된 상관관계는 유사한 형성 과정을 거친 서해안 지역의 실트질 모래에도 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

비록 본 연구에서는 제한된 수량 및 위치에 대한 시험 결과를 이용하였지만, 표준관입시험과 콘관입시험에 대해 제안된 경험식은 향후 서해안 지역, 특히 인천 근해 지역에서 토목구조물 설계 시 최대 전단탄성계수의 평가에 유용하게 쓰일 수 있을 것이라고 판단된다. 하지만 보다 광범위한 지역에 본 연구 내용을 적용하기 위해서는 향후 지속적인 실험과 자료 수집이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국가스공사와 한국지반공학회의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사의 말씀을 드립니다.

참고 문헌

1. 동부건설 기술연구소 (1998), “피에조콘 관입시험 활성화를 위한 동부건설㈜-서울대학교 공과대학 산학합동연구”, pp.82-91.
2. 선창국 (2004), *한반도 내륙지역의 지진공학적 지반 정보화 시스템 구축 및 지반 증폭 특성 평가*, 서울대학교 박사학위 논문, pp.149-171.
3. 이선재 (1997), *피에조콘을 이용한 국내 지반의 공학적 특성 연구*, 서울대학교 박사학위 논문, pp.17-45.
4. 조성민, 정경자, 김홍중, 정종홍, 선창국 (2004), “탄성파콘관입시험을 활용한 지반의 전단파 전달속도 산정”, *대한토목학회 정기 학술대회 논문집*, pp.1428-1433.
5. Ang, A. A-S. and Tang, W.H. (1975), *Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume I Basic Principles*, John Wiley & Sons, New York.
6. Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Robertson, P.K. and Peterson, R.W. (1989), “Interpretation of moduli from self boring pressuremeter in sand”, *Geotechnique*, Vol.39, No.2, pp.269-292.
7. Campanella, R.G. and Howie, J.A. (2004), “Practical applications of the cone penetration test”, Geotechnical Research Group of the University of British Columbia, pp.31-40.
8. Imai, T. and Tonouchi, K. (1982), “Correlation of N value with S-wave velocity and shear modulus”, Proc., 2nd Eur. Symp. on Penetration Testing, Vol.1, pp.67-72.
9. Mayne, P.W. and Rix, J.G. (1993), “Gmax-qc relationships for clays”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.16, No.11, pp.54-60.
10. Rix, G.J and Stokoe, K.H. (1992), “Correlation of initial tangent modulus and cone resistance”, Proc., International Symp. Calibration Chamber Testing, Posdam, New York, Elsevier, pp.351-362.
11. Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D. and Gerig, J. (1986), “Use of piezometer cone data”, Proc., ASCE Specialty Conference In Situ'86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Blackburg, ASCE, pp.1263-80.

(접수일자 2005. 5. 26, 심사완료일 2005. 10. 28)