

삼축압축시험과 전단파 계측을 이용한 정규압밀 점성토의 강성도와 전단강도의 상관관계

Relationship between Stiffness and Shear Strength of Normally Consolidated Clay using Triaxial Compression Tests and Shear Wave Measurements

오상훈¹⁾, Sang-Hoon Oh, 김학성¹⁾, Hak-Sung Kim, 김은정¹⁾, Eun-Jung Kim, 박인범¹⁾, In-Beom Park, 목영진²⁾, Young-Jin Mok

¹⁾ 경희대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyung-Hee University

²⁾ 경희대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyung-Hee University

SYNOPSIS : Thanks to a new in-situ seismic probe, using bender elements and penetration scheme, a simple linear relationship between undrained shear strength(C_u) and shear wave velocity(V_s) was obtained. This priceless relationship is worthy to be illuminated further in ideal laboratory environment. To avoid sampling disturbance effect, special consolidation cylinders were used to make normally consolidated specimens from kaolinite suspension. The undrained shear strengths of the specimens were measured using unconsolidated undrained triaxial compression tests. Also shear wave velocity measurements were performed prior to shearing the same specimens, using the bender elements installed in the base pedestal and the top cap of the triaxial compression cell. The C_u - V_s relationship is fairly linear and supports the linear trend of clayey silt obtained using field testing. Also the classic density-shear modulus relationship for soft clay proposed by Hardin and Black(1969) was once more verified hereby.

Key words : Shear Modulus, Undrained Shear Strength, Bender Elements

1. 서 론

연약지반의 정밀한 강성도 측정과 전단강도 및 밀도와 같은 타 인자(parameter)와의 상관관계를 맺기 위한 많은 노력이 있었다. 최근에 벤더엘리먼트(bender element)를 이용한 관입형 현장탄성과 시험장비가 개발되었고(정재우 외, 2008), 이를 이용한 정규압밀 점성토의 전단파속도와 비배수 전단강도 및 밀도의 상관관계를 구하였다(박동선, 2008 ; 오상훈 외, 2008). 앞의 연구에서 전단강도와 전단파속도와 일차적인 상관관계가 도출되어, 이 값진 관계를 이상적인 실험실 환경에서 확인할 가치가 있어 이 연구를 시작하였다. 늘상 시달리는 시료교란의 영향을 피하기 위하여 특별히 제작한 압밀 실린더를 사용하여 부유 상태의 카올리나이트(kaolinite)로부터 정규압밀 공시체를 제작하였다. 이 공시체의 비배수 전단강도를 비배수 비압밀 삼축압축시험을 통해 측정하였다. 또한 삼축압축셀(triaxial cell)의 상부 캡(cap)과 공시체 받침(pedestal)에 벤더엘리먼트를 부착하여 전단파괴 전에 같은 공시체의 전단파속도(shear wave velocity)를 측정하였다. 다음 절에서 이 연구의 배경을 더 상세히 언급하였다.

2. 연구 배경

정규압밀 점성토의 전단변형특성(전단응력(τ)과 전단변형도(γ)의 관계)은 그림 1과 같이, 쌍곡선 모델(hyperbolic model)로 표현되고 있다(Kondner, 1963; Hardin & Drenevlch, 1972). 이와 같이 전단강도(C_u 또는 τ_{max} : 참고문헌에 충실하고자 기호 병용)와 강성도(G_{max} : 미소변형 전단변형계수)는 밀접한 관계에 있고, 압밀이 진행되어 단단해 질수록 두 계수 모두 증가하고 있다. 미소변형 전단변형계수(G_{max})는 지반의 전단파속도(V_s)와 직접적인 관계에 있으며, 전단파속도는 현장 및 실내 탄성파시험으로 구할 수 있다. 즉, 정규압밀점성토의 전단강도와 전단파속도는 서로 밀접한 상관관계에 있다. 또한 콘 저항치(q_c)처럼 현장에서 측정된 전단강도를 대변할 수 있는 인자와 전단변형계수의 상관관계는 여러 학자들에 의해 밝혀졌다(Mayne & Rix, 1993 ; Tanaka & Nishida, 1994 ; Simonini & Cola, 2000). 이와 같이 전단강도와 강성도(전단변형계수나 전단파속도)는 근접한 관계가 있음이 명확하다. 이에 근거하여 전단강도와 전단파속도와의 상관관계를 밝히 고저 한다.

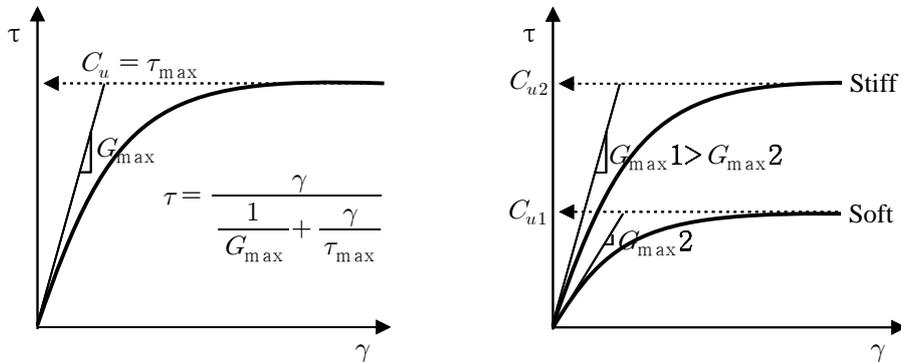


그림 1. 정규압밀점성토의 전단응력-전단변형도

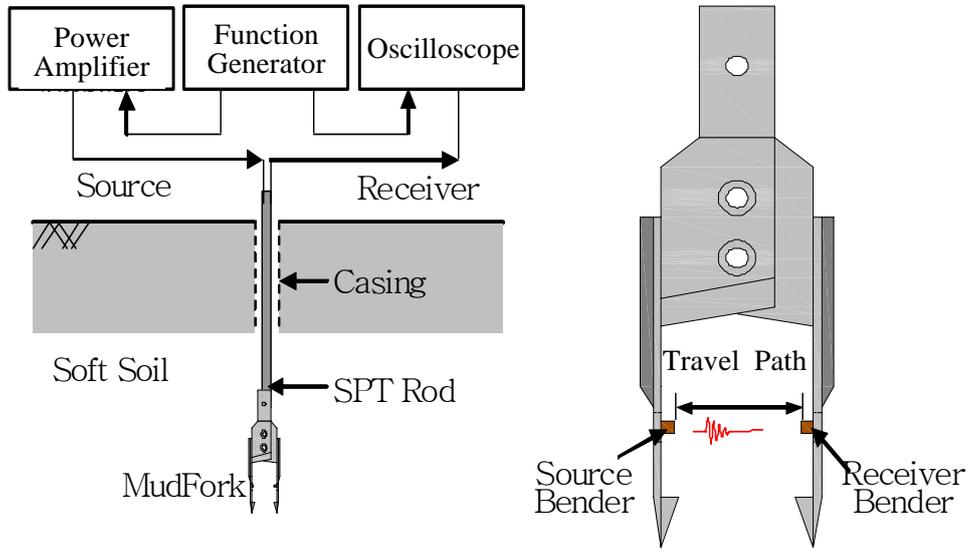
그림 2는 벤더엘리먼트를 이용하여 새로 개발된 관입형 탄성과 계측장비이다(정재우 외, 2008). 이 탄성과 프로브(probe, MudFork로 명명됨)는 두 개의 블레이드(blade)로 이루어진 포크(fork) 형태로, 한 블레이드에 발진자 엘리먼트를, 다른 블레이드에는 감지기 엘리먼트를 장착되었다. 이 프로브를 일반 보링기의 SPT(standard penetrarion test)의 룯드(rod)로 관입하며 매 측정 깊이에서 전단파속도를 계측하였다. 인천의 한 점토질 실트지반에서, 이와 같은 현장 전단파속도 계측과 함께 콘 관입시험 결과, 삼축압축시험을 통한 전단강도를 측정하여, 식 (1)과 같이 비배수 전단강도와 전단파속도의 선형적 상관관계를 도출하였다(오상훈 외, 2008). 이와 같이 간편한 상관관계를 실험실에서 정규압밀로 생성한 카울리나이트 공시체로 선형적 상관관계를 확인하고자 한다.

$$C_u = 0.38 V_s - 6.65 \quad (1)$$

3. 공시체 성형

압밀 실린더는 지름 50mm의 아크릴 관으로 만들었다. 압밀을 촉진하기 위해 배수용 다공판(porous stone)을 공시체 받침과 상부 캡 이외에 실린더 몸통 부분에 고리(ring) 형태의 다공판 2개를 더 설치하여 배수 거리를 단축하였다(그림 3). 카울리나이트 혼탁액은 각각 카울리나이트 300g과 물 300g을 혼합하여 사용하였다. 카울리나이트의 비중은 2.7, 소성지수는 30이었다. 카울리나이트 혼탁액을 실린더에 넣고, 단계적으로 무게추를 증가하여 6개월간 압밀하였다. 4조의 공시체를 6.7kg, 12.3kg, 18.0kg,

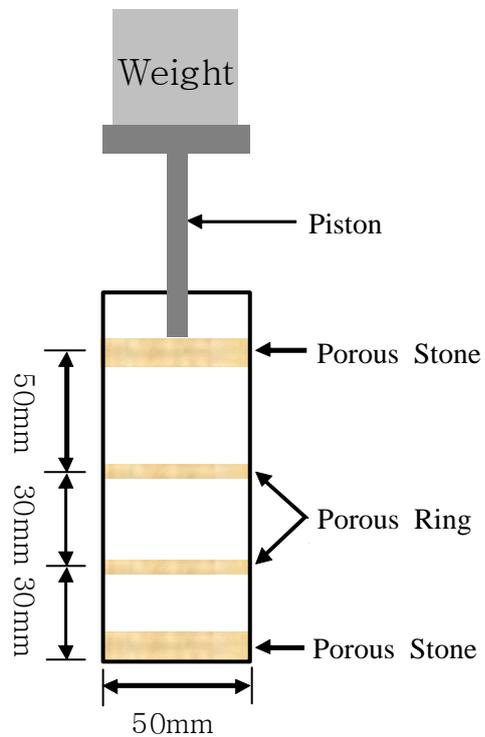
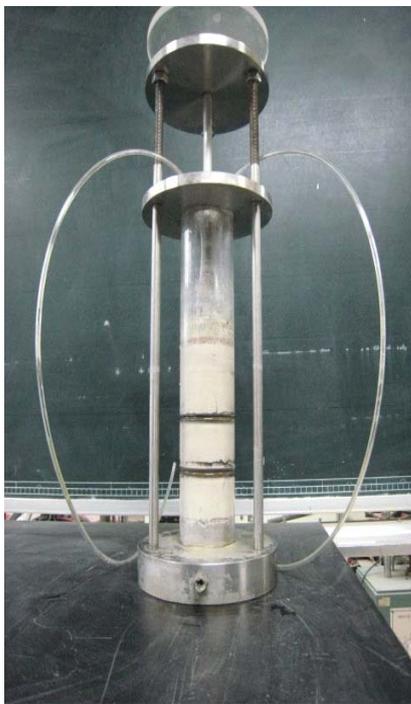
29.2kg의 최종 압밀하중으로 성형하였다. 6.7kg으로 압밀한 공시체는 2개이며, 나머지는 3조는 4개의 공시체를 성형하여 총 14개의 공시체를 준비하였다.



(a) 시험 구성

(b) MudFork

그림 2. 현장에서 MudFork를 이용한 탄성파시험



(a) 압밀 실린더 사진

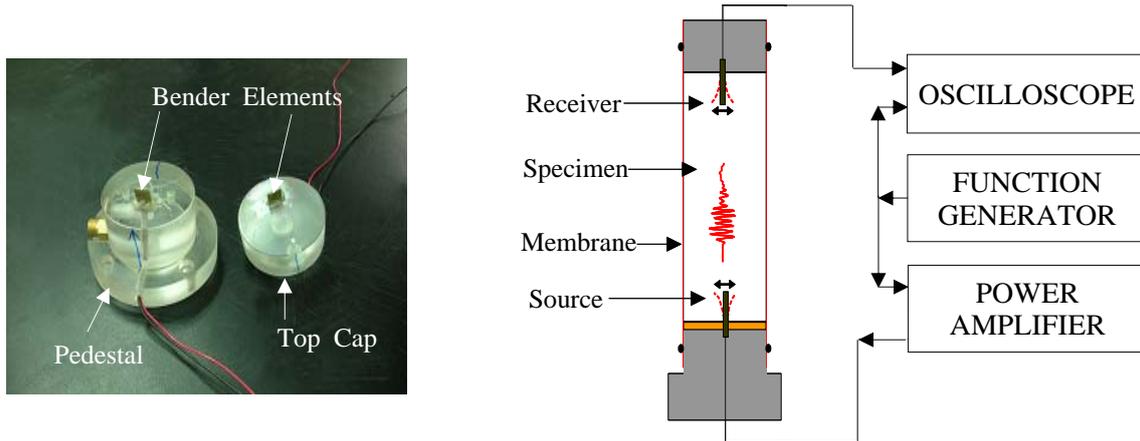
(b) 압밀 실린더 도식도

그림 3. 카올리나이트 공시체 압밀 성형 실린더

4. 실내시험

4.1 시험계획

삼축압축시험기로 비배수 비압밀 전단파괴시험을 하면서 각 과정마다 전단파속도를 측정하였다. 전단파속도를 측정하기 위해 상부 캡과 공시체 받침에 그림 4(a)와 같이 벤더엘리먼트를 설치하였다. 상부 캡에 부착한 벤더엘리먼트는 탄성과 시험에서 감지기로 이용하였고, 공시체 받침에 부착한 벤더엘리먼트는 발진자로 이용하였다. 그림 4(b)는 전단파속도를 계측하기 위한 모식도이다.



(a) 벤더엘리먼트

(b) 전단파속도 계측장비

그림 4. 벤더엘리먼트를 부착한 장치와 전단파속도 계측 장치

각 공시체를 삼축압축셀에 거취한 다음 24시간 동안 압밀 실린더의 무게추에 상응하는 등방구속압으로 압밀하였다. 압밀시 전단파속도 측정은 그림 5와 같이 시간마다 측정을 하였다. 압밀이 진행됨에 따라 전단파속도는 증가하고 20시간 이 후에는 거의 최대치에 수렴하고 있다. 이는 등방구속압이 공시체 형시 무게추의 인한 구속압보다 커서 정규압밀 상태를 유지하는 것을 의미한다. 압밀종료후 배수밸브를 잠그고 최종 등방구속압을 가하였다. 전단파속도 계측은 공시체 거취 후, 압밀종료 후, 최종 구속압을 가한 후, 응력이 바뀔 때 마다 3회 측정하였다. 각 공시체의 응력이력은 표 1과 같다.

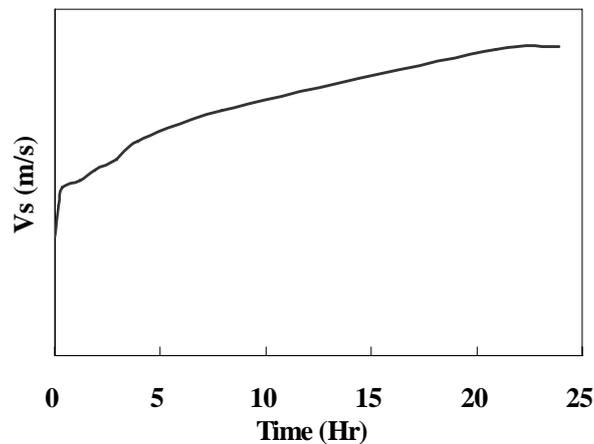


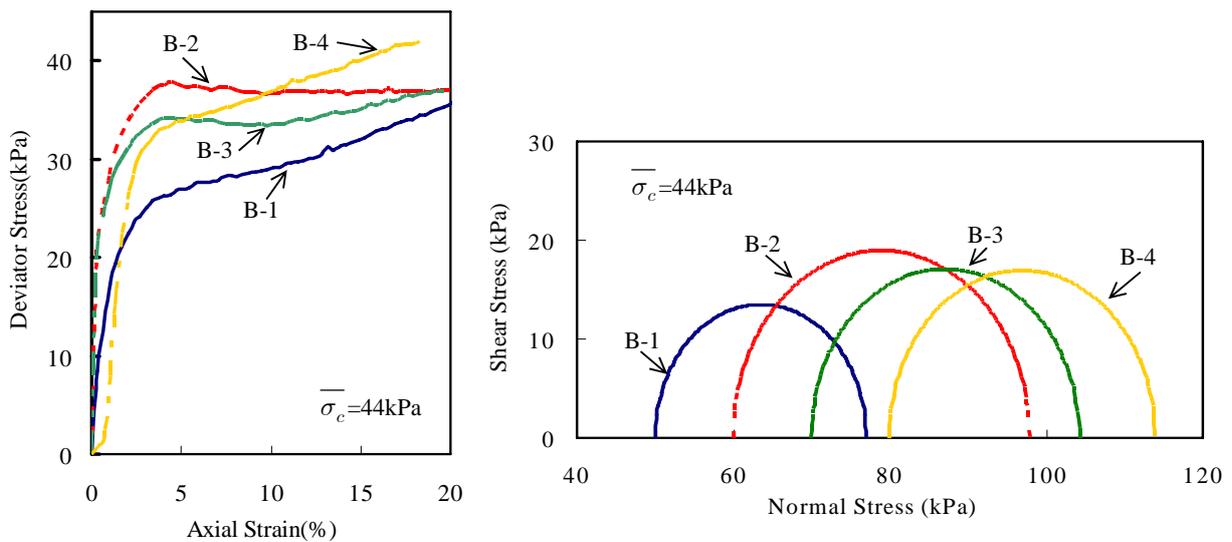
그림 5. 압밀시 전단파속도의 증가

표 1. 각 공시체의 응력이력

Specimen	Weight (kg)	Consolidation Pressure(kPa)	Confining Pressure (kPa)
A-1	6.7	24	30
A-2			40
B-1	12.3	44	50
B-2			60
B-3			70
B-4			80
C-1	18.0	64	70
C-2			80
C-3			90
C-4			100
D-1	29.2	104	110
D-2			120
D-3			130
D-4			140

4.2 시험결과

그림 6은 B조의 4개의 공시체의 축차응력-변형률곡선과 모어원(Mohr circles)이다. 같은 조건에서 공시체를 성형하였어도 전단강도에서 약간의 차이가 있다. 그림 7은 대표적인 전단파 실험이다. 압밀종료 후 비배수 상태로 구속압을 증가하였어도 전단파속도가 변화가 없는 사실은, 공시체가 100% 포화되어 등방구속압을 증가시켜도 유효응력의 변화가 없음을 실증하고 있다. 공시체 A-2, B-4, C-3, C-4를 제외한 다른 모든 공시체는 이와 유사한 거동을 보여주고 있다. 공시체 A-2는 멤브레인 흠집으로 물이 침투하여, 전단강도 및 전단파속도가 낮게 측정되었다. 공시체 B-4는 설명할 수 없는 이유로 전단파속도가 등방구속압 증가 후 전단파속도가 증가하였다. 공시체 C-3, C-4 또한 불합리한 전단파속도가 측정되었다. 이상과 같이 비정상적인 시험결과는 분석에서 제외하였다. 14개 공시체의 시험결과는 표 2와 같이 정리하였다. 비배수 전단강도와 전단파속도 모두 압밀구속압에 따라 선형으로 증가하고 있다.



a) 축차응력-변형률 곡선

b) 모어원

그림6. 공시체 B set의 축차응력-변형률 곡선과 모어원

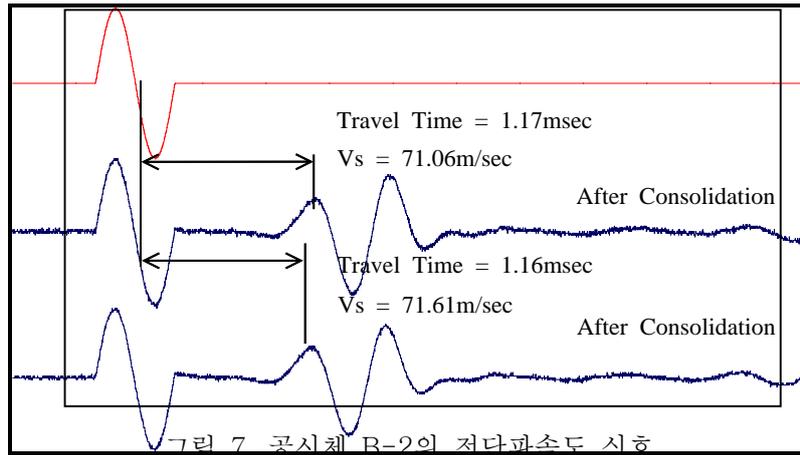


그림 7. 공시체 B-2의 전단파속도 신호

표 2. 전단강도와 전단파속도

No.	Undrained Strength C_u (kPa)	S-Wave Velocity, m/sec			Remarks
		Before Consolidation	After Consolidation	After Confining	
A-1	9	17	69	69	
A-2	3*	22	20*	20*	Leaking
B-1	15	26	63	67	
B-2	19	30	71	72	
B-3	17	24	64	66	
B-4	18	30	61*	96*	Inexplicable Vs increment
C-1	25	41	135	134	
C-2	31	45	113	113	
C-3	20	46	32*	24*	Unreasonable Vs
C-4	16	52	59*	69*	Unreasonable Vs
D-1	36	47	134	131	
D-2	39	54	137	134	
D-3	38	50	103	102	
D-4	50	40	144	146	

5. 전단파속도와 상관관계

그림 8은 각 공시체의 압밀 후 측정된 전단파속도와 전단강도를 함께 도시하였다. 전단강도와 전단파속도의 상관관계는 선형으로, 실트질 점토에서 제안한 선형적 상관관계(박동선, 2007 ; 오상훈 외, 2008)를 입증하고 있다. 실트질 점토의 소성지수는 2~7%정도이고 카올리나이트의 소성은 약 30%정도이다. 두 선형관계는 소성지수에 그리 민감하지 않은 것으로 나타나고 있다. 이러한 소성지수에 둔감한 상관관계의 가설은 다양한 소성지수의 점성토를 추가로 더 시험하여 검증되어야 한다.

전단탄성계수는 측정된 전단파속도로부터 계산하여, Hardin & Black(1969)이 제안한 전단탄성계수와 간극비의 경험식(식 2)을 이용하여 간극비를 유추할 수 있다.

$$G_{\max} = 1230OCR^k \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} \sqrt{\sigma_0} \quad (2)$$

여기서 G_{\max} 는 전단탄성계수이며 단위는 psi이고, σ_0 는 유효응력이며 단위는 psi이다. OCR은 과압밀비이며, e 는 간극비이다. k 는 소성지수에 관련된 계수이다. 그림 9에 공시체로부터 실측한 간극비와 경험식으로부터 측정된 간극비를 함께 나타내었다. 이 경험적인 상관관계는 이 시험결과에서 다시 한 번 검증되었다.

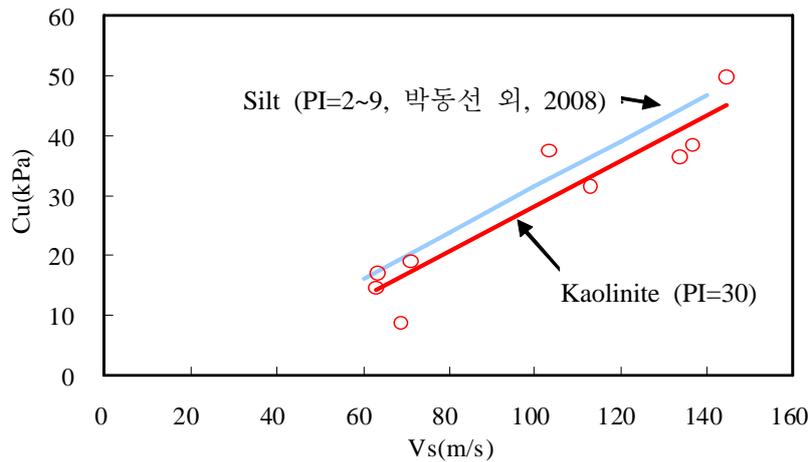


그림 8. 전단강도와 전단파속도의 상관관계

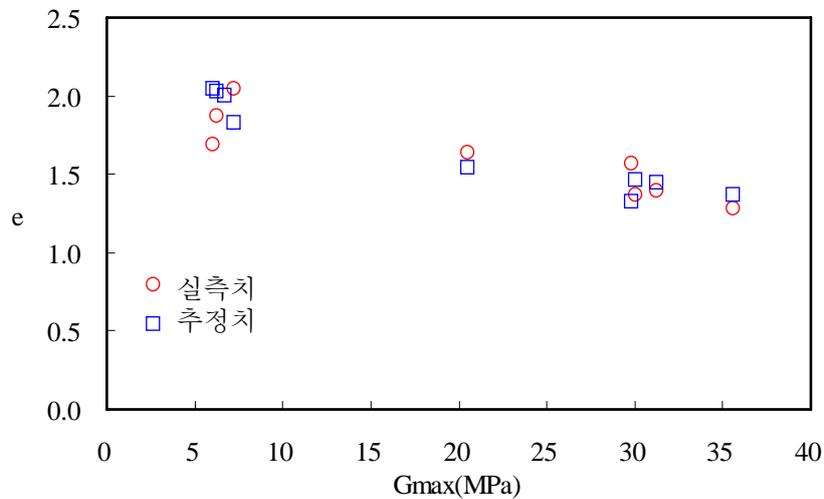


그림 9. 간극비와 전단탄성계수의 상관관계

6. 결 론

최근에 벤더 엘리먼트(bender element)를 이용한 관입형 현장탄성파 시험장비가 개발되었고(정재우 외, 2008), 이를 이용한 정규압밀 점성토의 전단파속도와 비배수 전단강도 및 밀도의 상관관계를 구하였다(박동선, 2008 ; 오상훈 외, 2008). 앞의 연구에서 전단강도와 전단파속도와의 일차적인 상관관계가 도출되어, 이 값진 관계를 이상적인 실험실 환경에서 확인할 가치가 있어 이 연구를 시작하였다.

벤더엘리먼트를 이용한 관입형 탄성과 프르브 개발로, 비배수 전단강도와 전단파속도의 선형적 상관관계가 도출되었다. 이 값진 상관관계는 이상적인 실험실 환경에서 검증할 가치가 있다. 공시체의 교란을 피하기 위하여 특별히 제작된 압밀 실린더를 사용하여 카올리나이트 혼탁액으로 부더 정규압밀 공시체를 성형하였다. 전단파괴 직전에 벤더엘리먼트를 공시체 받침과 상부 캡에 설치하여 전단파속도를 측정하였다. 전단강도와 전단파속도의 상관관계는 현장의 실트질 점토에서 얻은 상관관계와 같이 선형적으로 나타나, 기존에 연구된 선형관계가 입증되었다. 또한 Hardin & Black(1969)이 제안한 점토의 밀도와 전단탄성계수의 상관관계가 다시 한 번 그 유용성이 검증되었다.

감사의 글

본 연구는 일부 건설교통부 건설핵심기술연구개발 사업의 연구비지원(C105B1000008-06B010000612)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 박동선 (2008), *실트질 세립토의 비배수강도와 전단탄성계수의 상관관계*, 박사학위 논문, 경희대학교.
2. 오상훈, 박동선, 정재우, 박철수, 목영진 (2008), "실트의 비배수 전단강도 및 밀도와 전단파속도와의 상관관계", *한국지반공학회 논문집*, 제 24권, 5호, pp.1~9.
3. 정재우, 오상훈, 김학성, 목영진(2008), "연약지반 강성측정을 위한 벤더엘리먼트 프르브", *대한토목학회 논문집*, 제 28권 2c호. pp.125-131.
4. Hardin, B.O. and Black, W.L. (1969), "Closure to Vibration Modulus of Normally Consolidated Clays". *J. Soil Mech. Found Div.*, ASCE, Vol 95, No. SM6, pp.1531-1537.
5. Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. (1972), "Shear Modulus and Damping in Soils : Design Equations and Curves", *J. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, Vol. 98, No. SM7, pp.667-692.
6. Jung, J. W., Kim, H. S., Park, C. S. and Mok, Y. J. (2008a), "Development of Penetration-type Bender Element Probe for Stiffness Measurements of Soft Soils". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE(submitted).
7. Kondner, R. L. (1963), "Hyperbolic Stress-Strain Response : Cohesive Soils". *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 89, No. SMI, pp.115-143.
8. Mayne, P. W. and Rix, G. J. (1993), "Relationships for clay", *Geotech. Testing J.*, Vol. 16, No. 1, pp.54-60.
9. Simonini, P. and Cola, S. (2000), "Use of piezocone to predict maximum stiffness of Venetian soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 4, pp.378-382.
10. Tanaka, H., Tanaka, M., Iguchi, H. and Nishida, K. (1994), "Shear modulus of soft clay measured by various kinds of tests", *Proc., Int. Symp. On Pre-Failure Deformation of Geomaterials*. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, Vol. 1, pp.235-240.