

## 정규압밀점토의 강성도와 전단강도의 상관관계

### Relationship Between Stiffness And Shear Strength of Normally Consolidated Clays

박치원<sup>1)</sup>, Chi-won Park, 박동선<sup>2)</sup>, Dong-Sun Park, 목영진<sup>3)</sup>, Young-Jin Mok

1) 경희대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyunghee Univ

2) 한국토지공사, Korea Land Corporation.

3) 경희대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyunghee Univ.

**SYNOPSIS :** Strength evaluation of soft soils is a formidable task because of difficulties in sampling, specimen preparation and setting in triaxial cells. In undrained triaxial testing, sampling disturbance, verticality of specimen and bedding effect give a great influence on shear strength measurements. In the other hand, shear wave measurements of specimens are less influenced by these factors. In this research, the bender elements were attached top cap and base pedestal of triaxial cell and shear wave velocities were measured. To initiate a methodology to evaluate shear strength indirectly by measuring shear wave velocity, a relationship between shear strength and shear wave velocity was developed with kaolinite specimens consolidated in the laboratory. Undrained shear strength turns out to increase linearly with shear wave velocity. Stress-strain curves can also be predicted with a hyperbolic model and shear wave measurements.

**Key words :** Kaolinite, Undrained shear strength, Bender element, Shear wave velocity, Hyperbolic model

## 1. 서 론

급격한 경제발전은 그에 따른 각종 산업과 공공 복리시설을 수용하고 지원하는 단지, 도로, 항만, 공항 등 사회간접시설의 건설을 절대적으로 필요로 한다. 이러한 사회간접시설의 건설에 있어서 가장 기본적이고 중요한 문제는 입지선택이라고 할 수 있으며, 이와 같은 사회간접시설의 입지는 사회적, 경제적, 지리적, 환경적 상황을 고려하여 결정된다. 근래에는 국토의 효율적 개발과 용지부족현상 그리고, 대상구조물의 기능적 특성 때문에 지반 공학적으로 열악한 특성을 갖는 연약점성토 지반이 부지로 선정되는 경우가 매우 빈번하게 일어나고 있으며, 대부분 해안지역에 위치하는 이러한 부지들의 지반상태는 매우 낮은 강도와 높은 압축성을 가지고 있다. 이러한 연약한 지반의 강도는 표준관입시험의 N값이나 베인시험을 통해 측정되지만 표준관입시험의 N값은 시험자, 시험장비 등의 차이에 따라 결과의 차이를

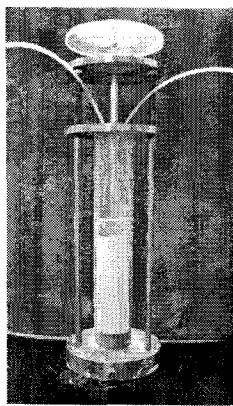
보일수 있으며, 베인시험은 전단파괴의 메카니즘이 실제와는 다른 문제점을 내포하고 있다. 반면 삼축압축시험은 단부오차나 교란 등의 영향을 배제하기위해 매우 정밀하고 숙련된 기술이 필요하다. 따라서 측정이 간편하고 반복 시험 시 결과의 편차가 극히 적은 전단파 계측을 통하여 전단강도를 추정하고자 한다. 본 연구에서는 전단파 계측을 하기 위해 삼축압축시험기에 벤더 엘리멘트를 부착하였고, 정규 압밀된 연약지반을 모사하기 위해 함수비 100%로 혼합한 카올리나이트를 압밀장치를 이용해 3개월 동안 정규압밀 시켰다. 정규 압밀된 카올리나이트를 삼축압축시험을 통해 비배수 전단강도를 구하였으며, 삼축압축시험장치에 부착된 벤더 엘리멘트를 이용하여 전단파속도를 측정하였다. 카올리나이트의 응력-변형률 관계를 Hyperbolic 모델로 나타내었으며, 전단강도로 대변되는 Hyperbolic 모델상수와 전단파속도의 상관관계를 맺었다.

## 2. 시료 및 시험방법

### 2.1 시험시료

본 연구에서는 연약지반을 모사하기 위해 그림 1과 같이 카올리나이트 약 300g에 물 300g으로 교반을 하여 함수비 100%정도로 혼합한 카올리나이트를 지름이 5cm 높이가 30cm인 원통형 플라스틱통에 채우고 3개월간 3개 1종(set)씩 총 3set를 상재하중을 달리하여 압밀을 시켰다. 압밀시간이 충분하지 못하여 압밀이 진행 중인 상태이었고 압밀을 완료시키기 위해 삼축압축시험기에 약 15시간 상재하중을 고려한 등방압밀을 시켰다. 정규압밀시 사용한 상재하중은 10kg, 11.4kg, 15kg을 주었으며 압밀하중을 단위면적으로 나누어 50kPa, 55kPa, 84kPa 등방구속압을 주었다. 각 상재하중에 따라 시료는 3개로 제작 하였다. 각 시료별 시료번호와 상재하중정리는 표1과 같다. 압밀된 시료는 벤더 엘리멘트를 이용하여 전단파 속도를 측정하였으며, 삼축압축장비를 이용하여 비배수 전단강도를 측정하였다.

표 1. 시험에 사용된 시료번호와 상재하중



시료 number	상재하중	등방구속압
50-A		
50-B	10kg	50kPa
50-C		
55-A		
55-B	11.4kg	55kPa
55-C		
84-A		
84-B	15kg	84kPa
84-C		

그림 1. 정규압밀 공시체 제작 장치

본 연구에서는 현장지반에서 채취된 불교란 시료를 모사하기 위하여 연구목적으로 일반적으로 사용되는 카올리나이트를 사용하였으며, 카올리나이트의 물성시험을 시행하였다. 기본 물성은 표 2에 제시한 바와 같다.

표 2. 사용된 카올리나이트 기본 물성

비중	소성한계	액성한계	소성지수	200번째 통과율	통일분류법
2.61	26.87	56.86	30	97.0%	CH-

## 2.2 시험방법

압밀을 모사하기 위해 그림 1과 같은 원형 플라스틱에 상재하중을 주고 압밀을 시켰으며 압밀시간은 3개월간 압밀을 시켰다. 사용한 상재하중은 압밀시험에 사용하는 추를 이용하여 압밀을 시켰다. 카올리나이트 공시체의 직경은 5cm 높이는 10cm 크기로 절단 후, 압밀전 압밀후 재압밀후 3단계의 전단파 속도를 측정하였으며 전단파 속도 측정 후 비배수 전단강도를 삼축압축시험에 의해 구하였다. 그림 2는 본 시험에서 사용된 삼축압축장치이며, 그림 3은 전단파 계측장치의 모식도이다.

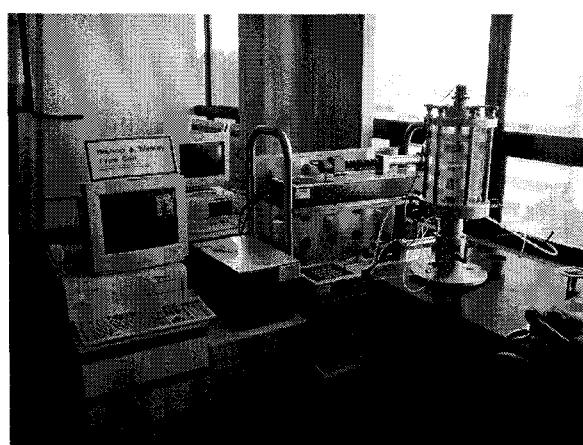


그림 2. 시험에 사용된 삼축압축장치

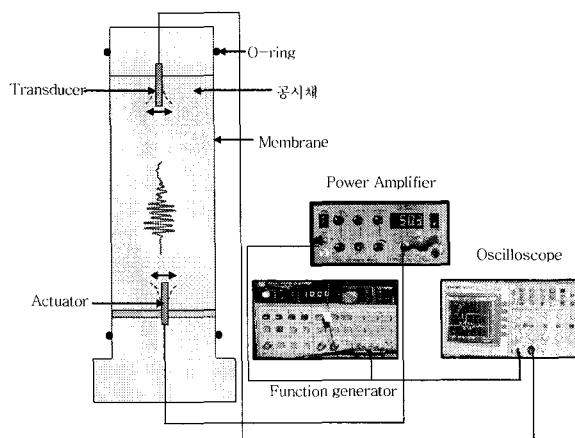


그림 3. 전단파 계측장치 모식도

## 2.3 삼축압축시험

본 실험에서 사용한 삼축압축시험기는 GDS Instrument LTD(U.K)에 의해 개발되어 현대 건설 기술연구소에 있는 장비를 사용하였으며, 이 연구에서는 단기안정해석에 필요한 설계강도정수

를 획득하기 위해 비압밀-비배수 삼축압축시험(UU-test)을 수행하였다. 일반적으로 균질한 정규압밀 점토의 유효상재하중(effective overburden stress)에 대한 비배수전단강도( $c_u$ )의 비( $c/p$ )는 일정하다. 그리고 이 비는 소성지수에 따라 달라진다(Bjerrum, 1954). 본 실험의 결과 구속압이 50kPa, 55kPa, 84kPa에서 카울리나이트 비배수전단강도 결과는 12kPa ~ 19kPa 정도로 평가 되었다. 그럼 4, 5, 6은 각 구속압에서의 모아원이다. 그럼 7은 전단강도와 구속압과의 관계를 나타내는 그래프이다. 구속압이 상승함에 따라 전단강도도 상승함을 알 수 있다. 시료 50-C는 편심을 받아 실제 전단강도보다 작게 나왔으며, 시료 84-B는 멤브레인 사이로 물이 침투해 전단강도가 극히 작게 측정되었다.

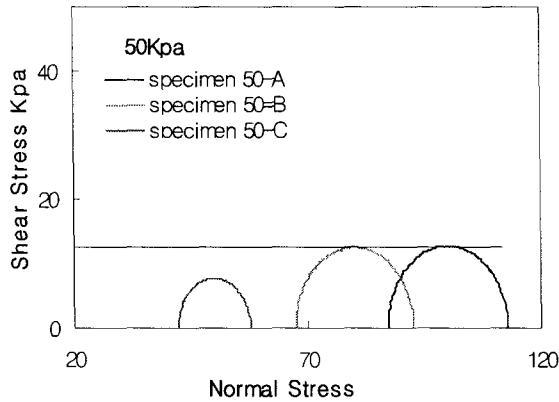


그림 4. 등방구속압 50kPa에서 모아원

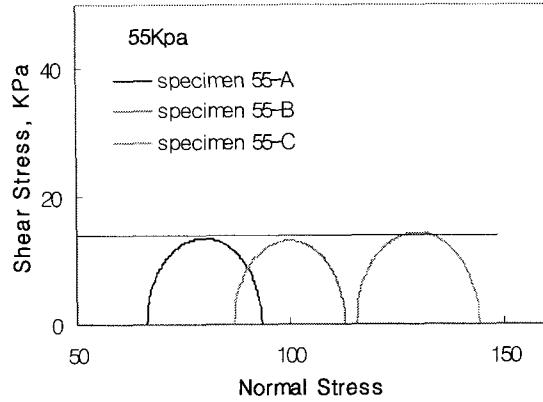


그림 5. 등방구속압 55kPa에서 모아원

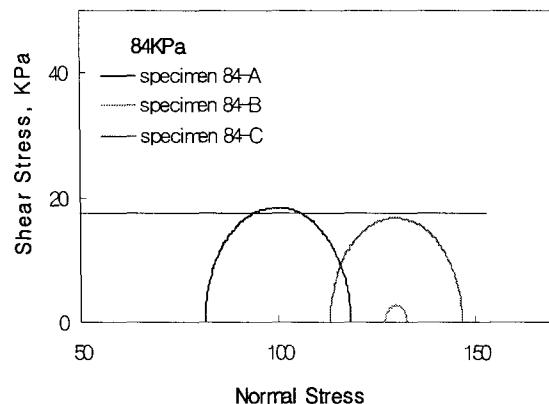


그림 6. 등방구속압 84kPa에서 모아원

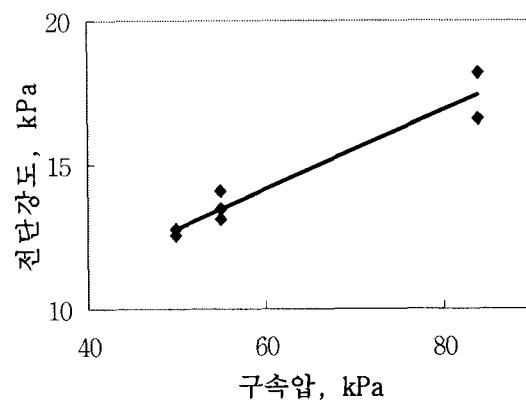


그림 7. 등방구속압과 전단강도 관계

## 2.4 전단파계측

그림 9은 벤더 엘리멘트를 부착한 삼축 압축장비의 base pedestal과 top cap의 사진이고, 그림 10은 실제 시료를 거취한 후 압밀 전 전단파 신호를 잡는 전경이다. 그림 11은 55KPa 등방구속압 재압밀 후 전단파 신호를 제시하였다.

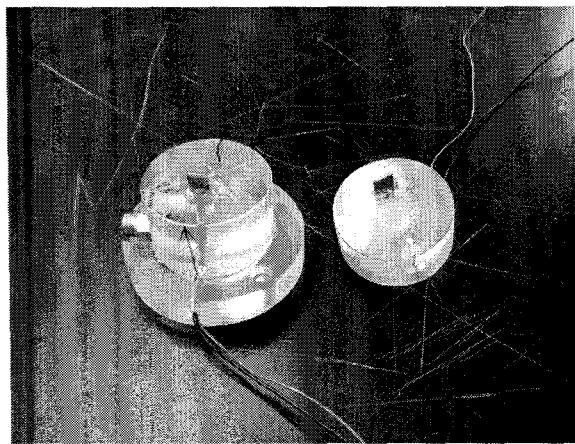


그림 9. 벤더 엘리멘트를 부착한 base pedestal과 top cap

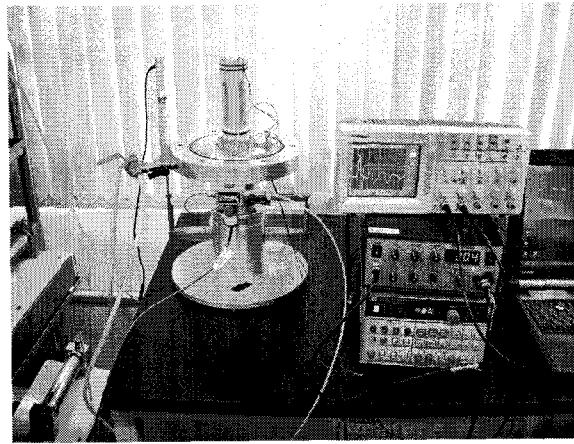


그림 10. 벤더 엘리멘트 측정시스템의 전경

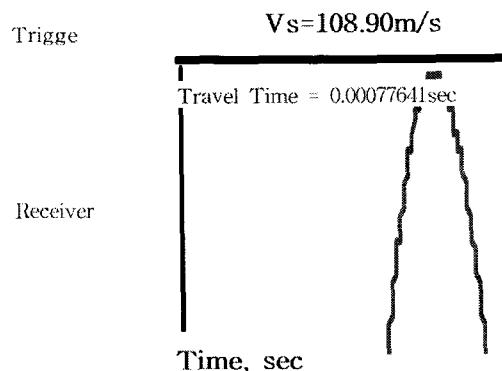


그림 11. 55KPa 등방구속압 재압밀후 전단파 신호

여기서 전단파 도달 시점은 화살표로 표시되어 있고 도달시간은 약 0.776msec.이고 통과 거리는 공시체의 거리에서 벤더엘리멘트의 물인 길이와 압밀에 의한 길이 축소량을 감안하여 계산하면 84mm 내외가 되어 전단파속도는 통과거리(약 84mm)를 도달시간(약 0.776msec)로 나누면 약 108.9m/sec. 가 얻어진다.

### 3. 시험결과 및 분석

#### 3.1 전단강도와 전단파 속도

표 3에서 알 수 있듯이 카울리나이트의 전단파속도는 등방압밀 후 급격히 빨라짐을 알 수 있고, 이는 압밀이 진행 중이라는 것을 알 수 있다. 또한 표 3은 전단파 속도가 들어남에 따라 전단응력이 들어남을 볼 수 있다. 이는 전단파 속도와 전단강도는 매우 긴밀한 관계를 가지는 것을 알 수 있다.

표 3. 카올리나이트 전단파속도와 전단강도

동방구속압	압밀전 전단파속도 (m/sec)	압밀후 전단파속도 (m/sec)	전단강도 (kPa)
50kPa	22.62	94.73	12.70
55kPa	31.25	108.36	13.79
84kPa	41.68	118.71	17.4

그림 12를 보면 카올리나이트의 전단강도와 비배수전단강도의 일반적인 상관관계를 알 수 있다. 전단파 속도가 늘어남에 따라 전단강도가 일차식으로 늘어나는 경향을 보이고 있다. 84kPa 두번째 시료를 통해 신뢰도가 떨어지지만 전단파속도와 비배수전단강도의 관계를 폭넓은 범위에서 얻을 수 있었다.

추후 전단파속도 측정만으로 연약한 점도의 전단강도의 예측이 가능할 것으로 사료된다.

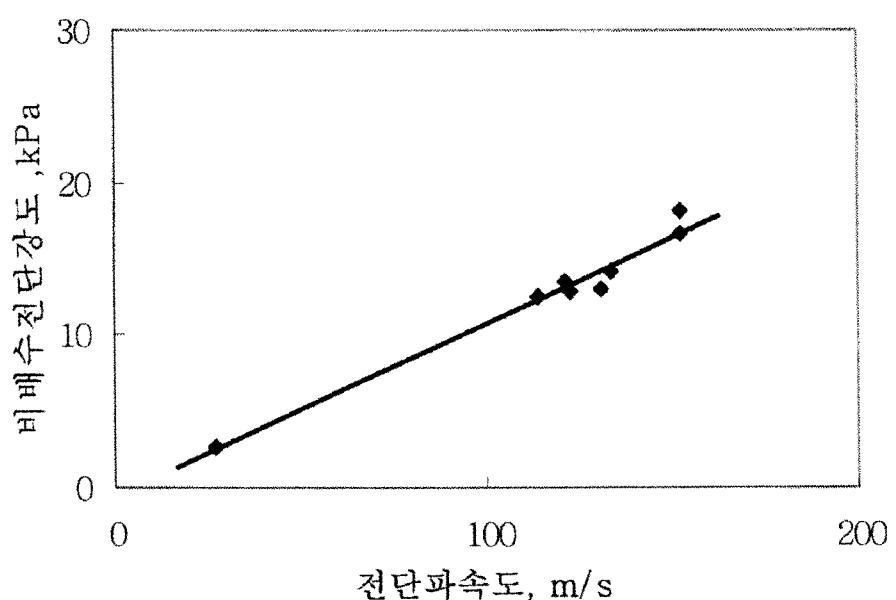


그림 12. 전단강도와 전단파속도 관계

## 3.2 Hyperbolic model

### 3.2.1 정규압밀 카올리나이트의 Hyperbolic Model

정규압밀 점토의 응력-변형률관계를 상수  $a$ ,  $b$ 를 이용하여 Hyperbolic Model로 표현 할 수 있다. 정 규압밀된 일반적인 응력-변형률관계는 그림 5.9와 같이 최대전단변형계수  $G_{\max}$ 와 최대 전단응력값  $\tau_{\max}$ 을 갖는다. 그림13에서 상수  $a$ 값과  $b$ 값은 어떤 지반의 전단강도를 결정해주는 중요한 값이다. 이 값들을 구하는 방법을 1963년 Kondner가 식 3과 같이 제시하였다.

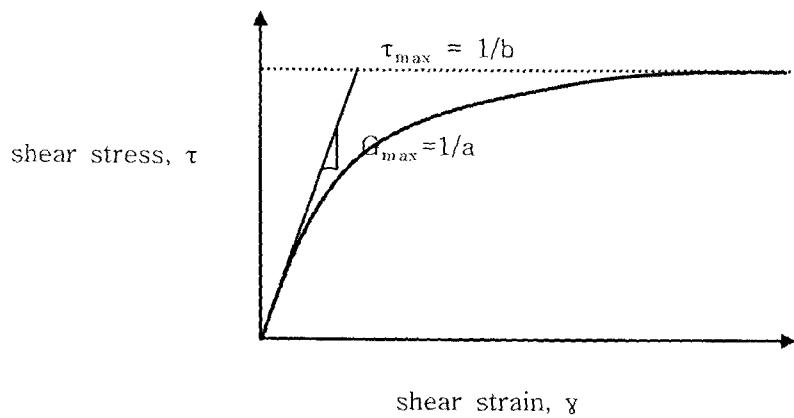


그림 13. 정규압밀점토의 응력-변형률 곡선

삼축압축시험을 통해 구해진 축차응력( $\sigma$ ), 축변형률( $\epsilon$ )의 관계를 식 1과 식 2를 통해 전단변형률( $\gamma$ )과 전단응력( $\tau$ )의 관계로 나타낼 수 있다. 이때 포아송비( $\nu$ )는 비배수 상태에서 volume 변화가 없기 때문에 0.5를 사용하여야 한다. 식 3에 따라  $a$ 값과  $b$ 값의 상관관계를 맺으면 그림 14와 같고 그림 15, 그림 16, 그림 17은 카올리나이트의 각 구속압에 따른  $a$ 값과,  $b$ 값의 상관관계 그래프들이다.

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (1)$$

$$\gamma = \epsilon \times (1 + \nu) \quad (2)$$

$$\tau = \frac{\gamma}{\frac{1}{G_{\max}} + \frac{\gamma}{\tau_{\max}}} = \frac{\gamma}{a + b\gamma} \quad (3)$$

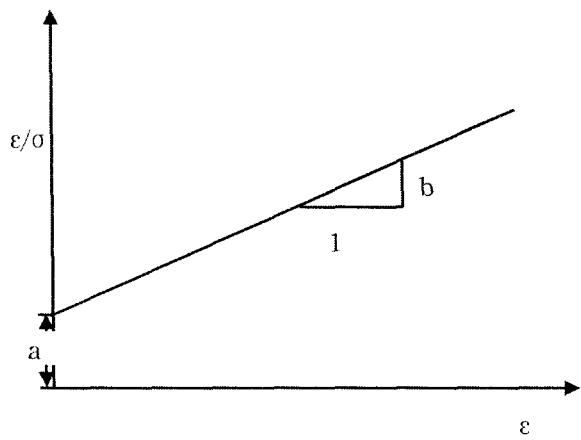


그림 14. 상수 a, b의 상관관계도

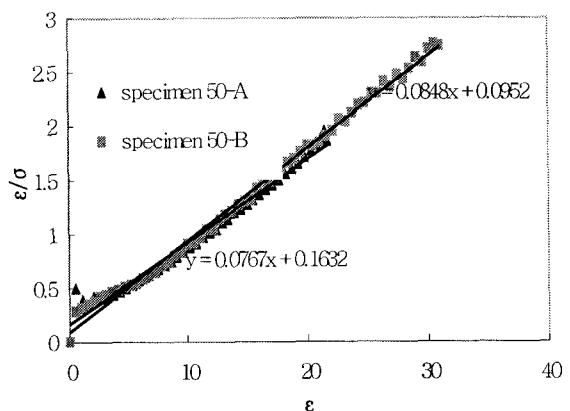


그림 15. 50kPa 상수 a, b의 상관관계도

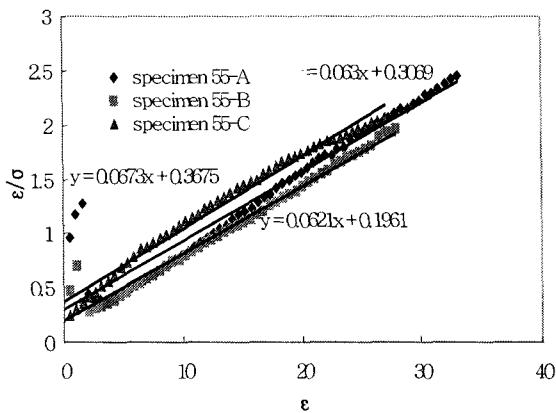


그림 16. 55kPa 상수 a, b의 상관관계도

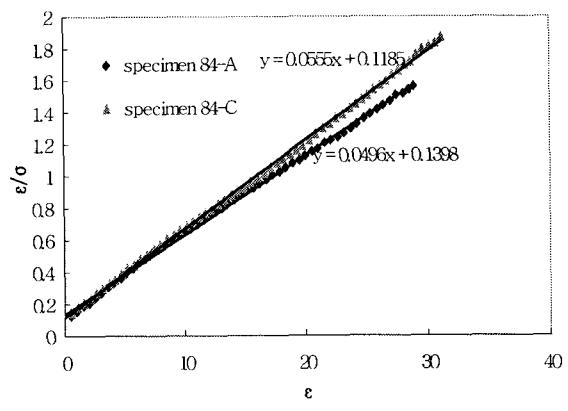


그림 17. 84Pa 상수 a, b의 상관관계도

그림 15, 그림 16, 그림 17에서 구한 상수 a, b값을 이용하여 각 구속압별 응력-변형률 그래프를 재구성하면 그림 18, 그림 19, 그림 20과 같다.

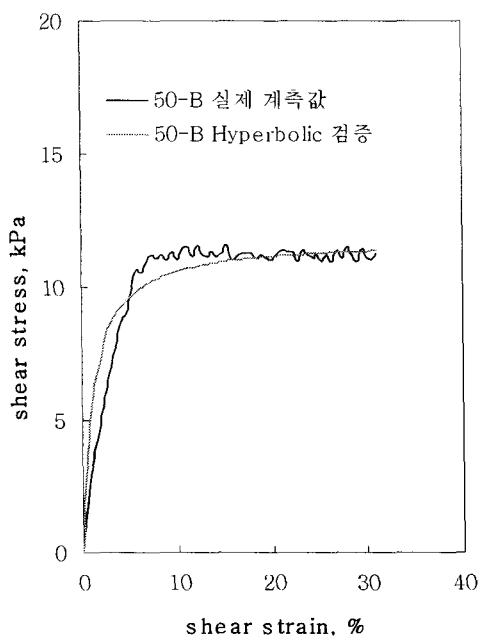


그림 18. 50kPa Hyperbolic 모델

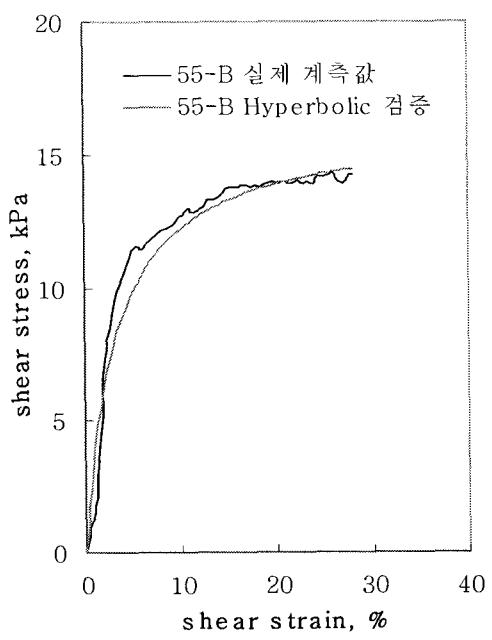


그림 19. 55kPa Hyperbolic 모델

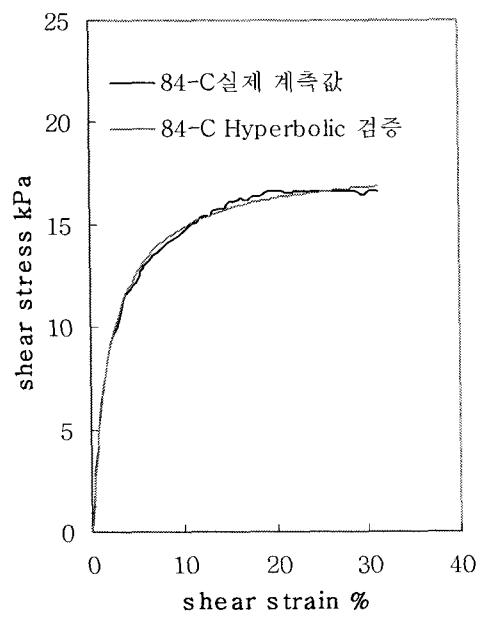


그림 20. 84kPa Hyperbolic 모델

그림 19 55kPa과 그림 20 84kPa에서는 어느 정도 일치하는 경향을 보였으나 50Pa에서는 압밀 후

삼축압축시험 초기에 top cap과 로드셀이 잘 밀착되지 않는 베딩 에러(bedding error)로 인해 다소 일치하지 않음을 볼 수 있다.

위와 같은 검증단계를 거친 후 전단파속도와 상수 a, b와의 상관관계를 구하면 그림 21과 그림 22와 같이 나타난다.

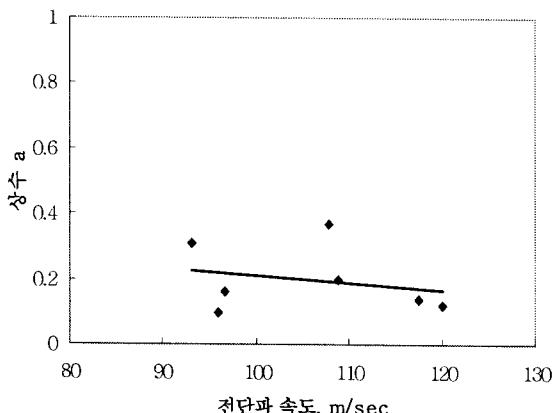


그림 21. 상수 a와 전단파 속도와 관계

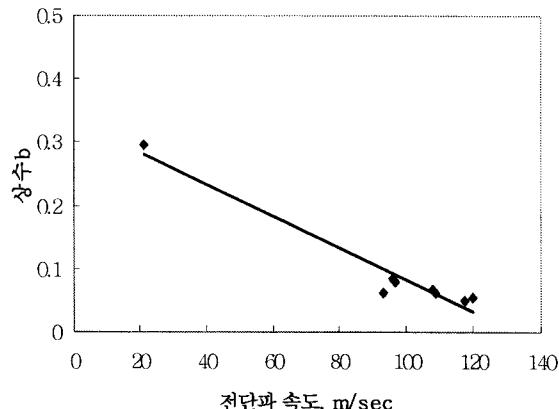


그림 22. 상수 b와 전단파 속도와 관계

그림 21을 보면 상수 a와 전단파 속도와의 관계가 다소 산발적인 경향을 볼 수 있는데, 본 연구의 결과 초기 탄성계수가 0.1에서 0.4로 평가되었다. 초기 압밀에 의한 베딩에러를 제거하고 공시체와 로드셀이 밀착된다면 좀 더 정확한 상수 a값을 구할 것이라 사료된다.

그리고 그림 22를 보면 상수b와 전단파속도와의 상관관계를 그래프로 도식하였다. 전단강도가 전단파속도와 비례하므로 비교적 잘 맞는다고 할 수 있겠다. 추후 연약지반의 전단파속도를 현장실험이나 실내 실험으로 구한다면 전단강도를 구할 수 있고 응력-변형률 그래프를 구할 것으로 예상된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 벤더 엘리멘트를 이용하여 연약한 점토지반의 강성 측정을 시도하였으며 삼축압축장비를 이용하여 배수전단강도를 측정하였다. 벤더 엘리멘트를 삼축압축장비의 top cap과, base pedestal에 부착하여 연약한 해상점토와 카올리나이트의 전단파속도를 측정하였으며, 삼축압축장비를 이용하여 비배수전단강도의 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 벤더 엘리멘트의 전단파속도 측정으로 연약한 점토지반의 비배수전단강도를 예측할 수 있었다.
- (2) 벤더 엘리멘트로 공시체의 강성을 측정하여 현장의 강성과 비교하여 압밀상태를 평가할 수 있었다.
- (3) 카올리나이트의 경우 상재하중에 따라 압밀되어 그 강성이 증가하였으며, 탄성파의 속도 또한 상재하중에 따라 증가하여 강성의 증가와 밀접한 관계가 있음을 보였다. 벤더 엘리멘트로 만든 발진기와 수진기가 연약한 지반조건에서 매우 탁월한 전단파 계측 성능을 보여 앞으로 연약지반에 사용할 우수한 탄성파 시험 장비가 될 것으로 예상된다.

- (4) 정규 압밀된 카울리나이트의 응력변형률 관계는 Hyperbolic Model로 잘 모사되어 강성도 측정만으로 변형특성을 예측할 수 있다.
- (5) 벤더 엘리멘트를 이용한 연약한 점토지반의 평가는 매우 우수한 것으로 평가되었다. 그러나 카울리나이트의 압밀시간이 짧아 압밀진행이 완료되지 못하였으며 다양한 상재하중으로 폭넓은 범위에서 일반화를 시키지 못하였다. 추후 폭넓은 범위에서 장기간 압밀을 시킨 후 추가적인 시험이 연구되어야 할 것이다

## 참 고 문 헌

1. 목영진, 정재우, 장인성 (2005) 벤더 엘리멘트를 이용한 토목재료의 강성 측정에 대한 적용성 연구, 한국지반공학회 봄 학술 발표회.
2. 유재영, 김기일, 손은화 (2002) 압전 세라믹스, 한국과학기술정보연구원.
3. 한국지반공학회, 연약지반(지반공학시리즈6), 구미서관
4. 한국지반공학회, 진동 및 내진 설계(지반공학시리즈8), 구미서관
5. 정재우, 벤더 엘리멘트를 이용한 토목재료의 강성측정에 대한 적용성 연구, 경희대학교, 석사학위논문 (2005. 02)
6. 김창엽, 연약점성토지반 침하량의 합리적 평가를 위한 실험적 연구, 서울대학교, 석사학위논문 (1998. 02)
7. 김완수, 연약지반 성토 시 침하기법의 비교연구, 경희대학교, 석사학위논문 (2000. 02)
8. 홍창수, 아산만 해상점토의 응력변형률 거동에 관한연구, 연세대학교, 석사학위논문 (1995. 02)
9. 박동진, 응력이력이 반복하중을 받는 점성토의 비배수전단강도에 미치는 영향, 인하대학교, 석사학위논문 (1997. 08)
10. 정진훈, 지반의 동적물성치 측정을 위한 인홀시험법에 대한 연구, 경희대학교, 석사학위논문 (2003. 02)
11. Arulnathan, R., Boulanger, R., and Reimer,M.F (1998) Analysis of Bender Element Test, *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, vol.21, No.2, pp.42-53.
12. Bjerrum, L. (1954) Geotechnical Properties of Norwegian Marine Clays, *Geotechnique*, Vol.4, pp.49-69.
13. Dyvik, R. and Madshus, C. (1985) Laboratory Measurement of  $G_{max}$  using Bender Elements, *Proceedings ASCE Annual Convention, Advances in the Art of Testing Soil Under Cyclic Conditions*, Detroit, Michigan.
14. E. C. Drrumm (1990) Estimation of Subgrade Resilient Modulus From Standard Tests
15. Gautschi, G. (Gustav) (2002) *Piezoelectric sensorics*, Berlin ; New York : Springer.
16. G.M.Brignoli, Marino Gotti and Kenneth H. Stokoe, II (1996) Measurement of Shear Waves in Laboratory Specimens by Means of Piezoelectric Transducers, *Geotechnical Testing Journal*, vol. 19, No. 4, pp.384-397.

17. Hardin, B. O. and Black, W. L. (1968) Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay, *Journal of soil mechanics and foundations devision, ASCE*, Vol.94, No.SM2, pp.353-369.
18. J.C. Santamarina, in collaboration with K.A. Klein and M.A. Fam, (2001) *Soils and waves*, Chichester ; New York : J. Wiley Sons.
19. Kondner, R. L, Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.89, No. SMI Proc. paper3429, Feb. 1963, pp115-143.
20. M. L. Ling and P. D. Greeding (2001) A novel bender/extender element for soil testing, *Geotechnique*, vol. 51, No. 8, pp. 713-717.
20. Uchino, Kenji (1997) *Piezoelectric actuators and ultrasonic motors*, Boston, MA : Kluwer Academic Publishers.
21. Vives, Antonio A. (2004) *Piezoelectric transducers and applications*, Berlin ; New York : Springer-Verlag.
21. Viggiani G. & J.H. Atkinson (1995) Interpretation of bender element tests, *Geotechnique*, vol.45, No.1, pp. 149-154.
22. Vincenzo Fioravante and Roberto Capoferri (2001) On the use of multi-direcional piezoelectric transducers in triaxial testing, *Geotechnical Testing Journal*, vol. 24, No. 3, pp.243-255.