

## 폴콘을 이용한 유류 오염 점토지반의 전단강도 예측

송영우<sup>1</sup> · 이한석<sup>1</sup> · 박준범<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한남대학교 건설시스템공학과, <sup>2</sup>서울대학교 건설환경공학부

## Prediction of the Shear Strength of Oil Contaminated Clay using Fall Cone

Youngwoo Song<sup>1</sup> · Hansok Lee<sup>1</sup> · Junboun Park<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University

<sup>3</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

### ABSTRACT

This paper presents the prediction of shear strength of oil contaminated clay using fall cone test used to determine the liquid limit of soil. The penetration depth of fall cone is related to water content of soil. Laboratory vane shear can also be related to water content. To explore the relative correlation between penetration depth of fall cone and laboratory vane shear, both fall cone tests and laboratory vane shear test were carried out with water contents of soil. The developed empirical relationships in this study showed that the shear strength is reduced to 3.9% with 1% increase of oil content. And, the lesser initial water content of contaminated clay, the more shear strength of contaminated clay is affected by oil content.

**Key words :** oil content, shear strength, fall cone test, laboratory vane test

### 1. 서 론

콘을 점성토 위에 올려놓으면 흙의 컨시스턴시에 따라 콘의 자중에 의해 관입깊이가 달라지는 원리를 이용하여 흙의 액성한계를 구하는 시험이 폴콘시험이다. 이 시험에서 콘의 관입깊이와 함수비 사이에는 선형적 관계가 있다 (Wood and Wroth, 1978, Belviso, 1985 등)고 알려져 있다. Zental et al.(2009), Wood and Wroth(1978), Hansbo(1957) 등은 폴콘의 관입깊이와 함수비 사이의 관계를 조사하고, 아울러 실내배인시험으로 구한 전단강도와 함수비 사이의 관계를 구하였다. 두 관계로부터 콘의 관입깊이와 전단강도 사이의 관계를 연관 지은 바 있다. 이는 배인시험보다는 폴콘시험의 간편성과 편이성에 염두를 둔 연구로 생각된다.

본 연구에서는 유류 오염된 점토시료에 대해 폴콘시험을 실시하여 콘 관입깊이와 초기함수비 및 함유비 사이의

관계를 구하고, 같은 시료에 대해 실내배인전단시험을 실시하여 비배수전단강도와 초기함수비 및 함유비 사이의 관계를 구했다. 두 시험 결과로부터 유류오염지반에서 폴콘시험의 관입깊이로부터 실내배인전단시험의 비배수전단강도를 예측하는 식을 유도하였다.

지금까지 유류오염지반의 역학적 강도특성에 대한 연구 (Khamehchiyan et al., 2007, 신은철·이재범, 1997, 조태룡·이영생, 2000)는 특정 오염지반에 대한 지반공학적 특성을 포괄적으로 연구한 자료가 주류를 이루는 한계가 있었다. 더구나 비교적 최근의 연구에 속하는 Khamehchiyan et al.,(2007)의 연구는 오염지반의 초기함수비를 고려하지 않은 등의 제한이 있었다. 본 연구에서는 유류오염지반의 비배수전단강도에 관심을 집중시키고, 여기에 원지반의 초기함수비를 고려하였다. 다양한 점토 오염시료의 획득의 현실적 어려움으로 시험에는 점토배합 시료를 사용하였다.

\*Corresponding author : junbpark@snu.ac.kr

원고접수일 : 2010. 11. 3 심사일 : 2010. 11. 16 게재승인일 : 2010. 11. 24  
질의 및 토의 : 2011. 2. 28 까지

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 재료

점토시료는 Table 1에 표시한 것과 같이 카오리나이트(kaolinite)와 벤토나이트(bentonite)를 일정한 비율로 혼합한 5 종류의 시료를 준비했다. 시료는 점토에 해당하는 200번체 통과분만 사용하였다. 카오리나이트와 벤토나이트를 무게비율로 혼합하고, 시료를 튜브(D = 100 mm, h = 100 mm)에 담은 후 작은 다짐봉을 이용하여 표준다짐에너지( $E_c$ ) 5.63 kg · cm/cm<sup>3</sup>으로 잘 다져주었다. 실제로 기를 유출된 지반의 초기함수비는 현장마다 일정하지 않을 것으로 추정되므로 본 시험에서는 10~30% 범위로 조정하였다.

오염원인 유류는 등유를 사용하였다. 폴콘시험과 실내 베인시험에 사용한 시료의 유류혼합비는 시료건조 중량의 5%~70% 사이를 택하고, 매 시험시 5%씩 증가시켜 실험하였다.

### 2.2. 폴콘시험(Fall cone test)

콘을 점성토 위에 올려 놓으면 흙의 컨시스턴시에 따라 콘의 자중에 의해 관입량이 달라지는 원리를 이용하는 폴콘시험은 1914~1922년 사이 Geotechnical Commission of the Swedish State Railways(GCSSR)에서 제안되었다. 이후 Casagrande 시험법의 단점인 시험장치, 시료 조제 방법, 시험자의 숙련도 등에 의한 함수비 오차를 줄이는 장점이 인정되어, 폴콘시험은 여러 나라에서 액성한계 시험법으로 채택되었다.

폴콘시험 장치는 크게 영국과 스웨덴 기준으로 나눌 수 있고 각 나라 별 기준이 조금씩 다르나 본 연구에서 시험기준으로 한 BS 1377에 따르면, 콘 각 30°, 무게 80 g을 사용하며, 관입시간은 5초이고 측정깊이는 15~20 mm 두 점, 20~25 mm 두 점을 측정한다. 하지만, 본 연구에서는 유류의 함유비에 따라 관입량의 정도를 측정하기 위해, 관입깊이 0~5 mm, 5~10 mm, 10~15 mm, 15~20 mm, 20~25 mm에 해당하는 각 구간별 1점씩 총 5점

Table 1. Clay samples

Clay samples	Kaolinite : Bentonite (%)	LL	PL	PI
S-1	0 : 100	550.3	48.8	501.5
S-2	30 : 70	350.6	45.4	305.2
S-3	50 : 50	275.4	44.1	231.3
S-4	70 : 30	125.6	40.7	84.9
S-5	100 : 0	38.7	15.4	23.2

이상을 측정하였다. 콘의 각, 무게, 관입시간은 BS규정에 따랐다.

### 2.3. 실내베인전단시험(Laboratory vane shear test)

일반적으로 현장베인전단시험은 토파히중영향을 받으므로 깊이와 더불어 강도가 증대한다. 이러한 단점을 보완하고자 실내베인전단시험(Laboratory Vane Shear Test, ASTM D 4648)이 개발되었다. 현장베인전단시험의 방법과 유사하지만 현장에서 베인장비는 최대 길이 150 mm, 폭 75 mm 이고, 표준실내베인은 이보다 작은 길이 12.7 mm, 폭 12.7 mm를 사용한다. 실내베인기구는 특히 전단 강도 20 kN/m<sup>2</sup> 또는 이하를 가지는 부드럽거나 민감한 점토에 적합하다. 또한 실내베인전단시험은 부드러운 시료를 재성형하여 수행할 수 있다(ASTM d 4648).

본 연구에서는 ASTM D-4648 규정을 준용하여 수행하였다. 본 연구에서는 베인의 길이 12.7 mm, 폭 19 mm(시료튜브의 1/2φ)를 사용했다. 시료튜브는 φ38 mm를 사용했다. 또한 점토질에 적합한 4번 스프링(k = 1.47 Nmm per degree)을 이용하여 베인전단시험기의 포인터가 멈출 때까지 측정 후 전단강도( $C_u$ )를 계산하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1. 폴콘실험결과

Fig. 1, 2, 3, 4, 5는 각 시료에 대한 폴콘실험 결과이다. 여기서 오염지반의 초기함수비는 각각 10%, 20%,

Table 2. A, B and coefficients of correlation in equation (1)

Clay sample	Initial water content (%)	A	B	R
S-1	10	-17.8	25.1	0.96
	20	9.4	13.5	0.91
	30	23.3	8.6	0.92
S-2	10	-13.3	22.9	0.94
	20	8.3	13.9	0.90
	30	22.3	8.8	0.91
S-3	10	-9.1	20.2	0.88
	20	9.0	13.7	0.91
	30	21.9	9.2	0.94
S-4	10	-13.0	21.2	0.93
	20	2.8	15.7	0.93
	30	20.1	9.5	0.88
S-5	10	-22.4	24.8	0.92
	20	5.0	16.0	0.94
	30	23.6	9.3	0.95

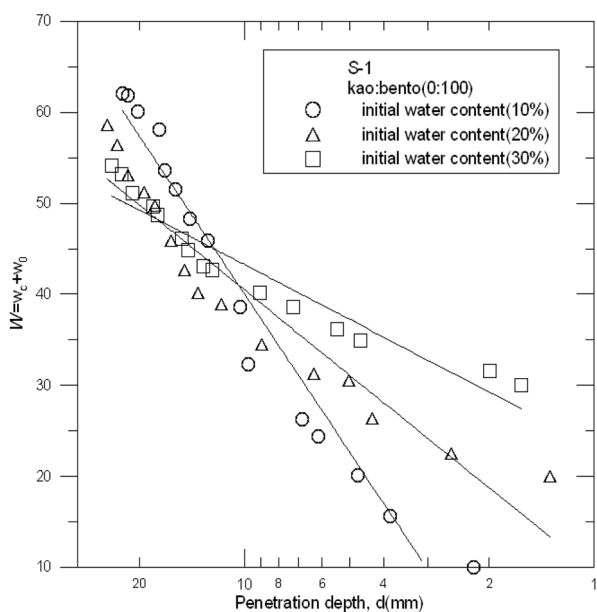


Fig. 1. Relationships between the depth of penetration and the  $W$ , (S-1).

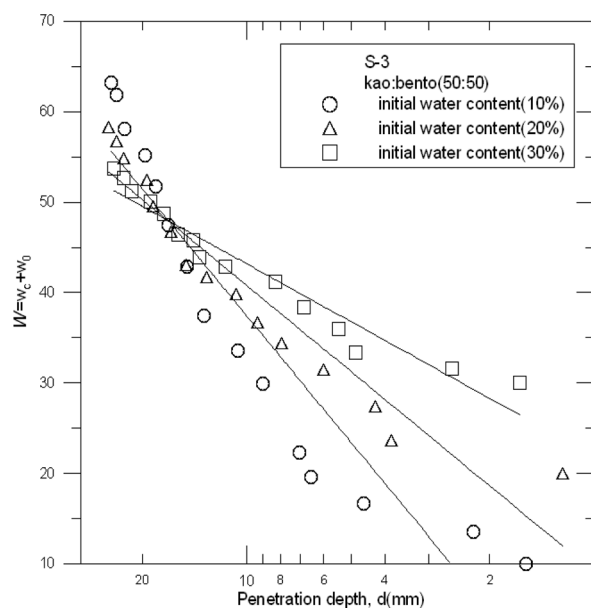


Fig. 3. Relationships between the depth of penetration and the  $W$ , (S-3).

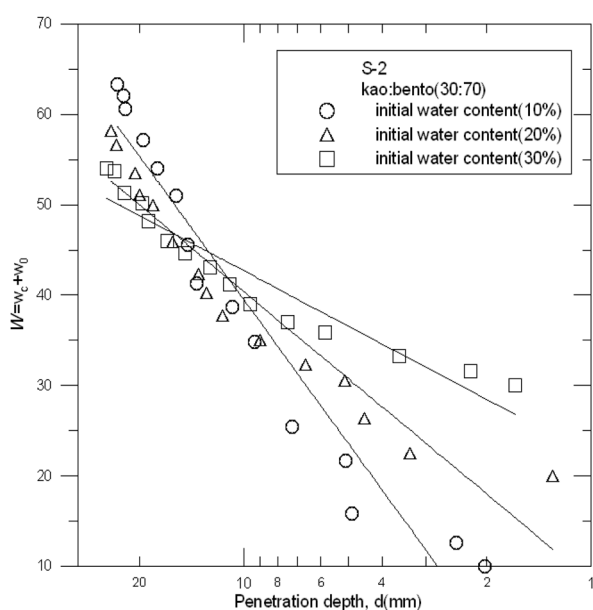


Fig. 2. Relationships between the depth of penetration and the  $W$ , (S-2).

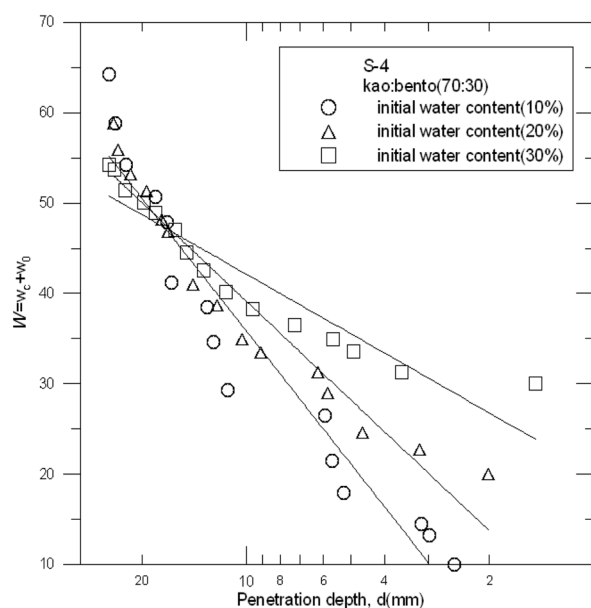


Fig. 4. Relationships between the depth of penetration and the  $W$ , (S-4).

30%이고 함유비는 최대 55%까지 증가시켰다. Fig. 1~5에서 공통적으로 폴콘의 관입깊이와 함수비 사이에는 대수적으로 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다. 또한 유류 오염지반의 초기함수비가 클수록 함유비의 영향은 작아지는 것을 발견할 수 있다. 각 시료별 시험자료를 회귀분석한 결과 식은 다음과 같이 표현할 수 있다. Table 2는 각 시료별 계수값 A, B 그리고 상관계수(coefficient of

correlation), R을 정리한 것이다.

$$W = A + B \cdot \ln(d) \quad (1)$$

여기서,  $W = w_c + w_0$

$w_c$  = 유류오염지반의 초기함수비(%)

$w_0$  = 함유비(%)

$d$  = 폴콘에서의 관입깊이(mm)

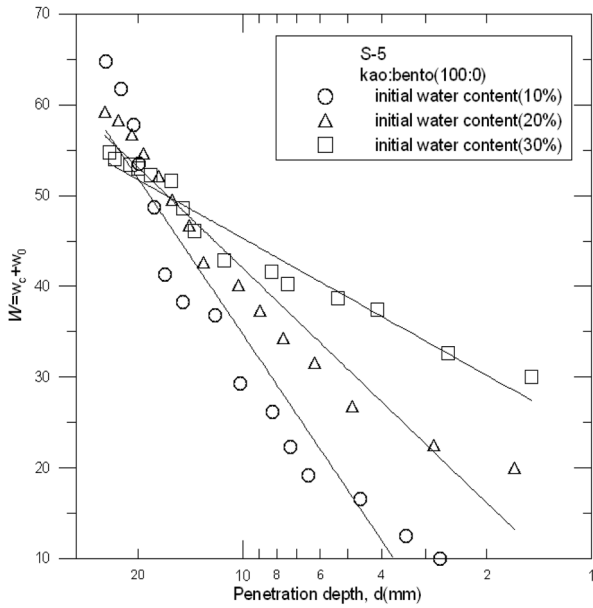


Fig. 5. Relationships between the depth of penetration and the  $W$ , (S-5).

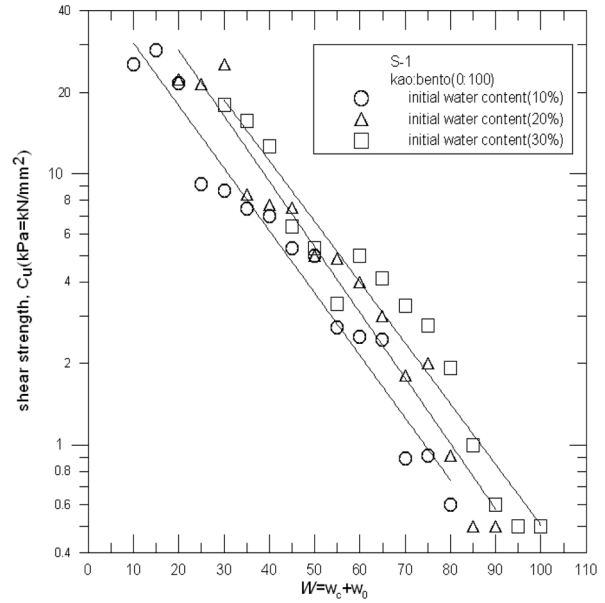


Fig. 7. Relationships between the  $W$  and the undrained shear strength, (S-1).

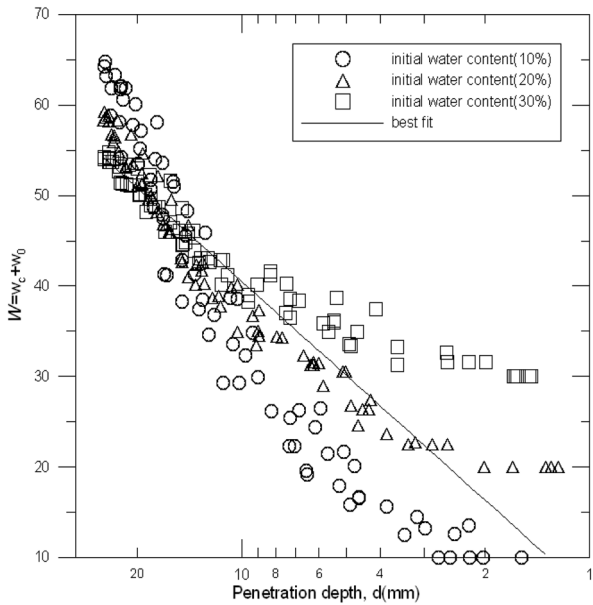


Fig. 6. Relationships between the penetration depth and the  $W$ , (total sample).

Fig. 6은 Fig. 1, 2, 3, 4, 5에 나타난 자료를 종합한 그림이다. 이 그림으로부터 폴콘의 관입깊이( $d$ ) -  $W$ (초기 함수비 + 함수비) 사이의 관계를 구하면 식 (2)와 같다.

$$W = 15 \cdot \ln(d) + 5.93 \quad (2)$$

여기서,  $W = w_c + w_0$

$w_c$  = 유류오염지반의 초기함수비,  $0 < w_c \leq 30\%$

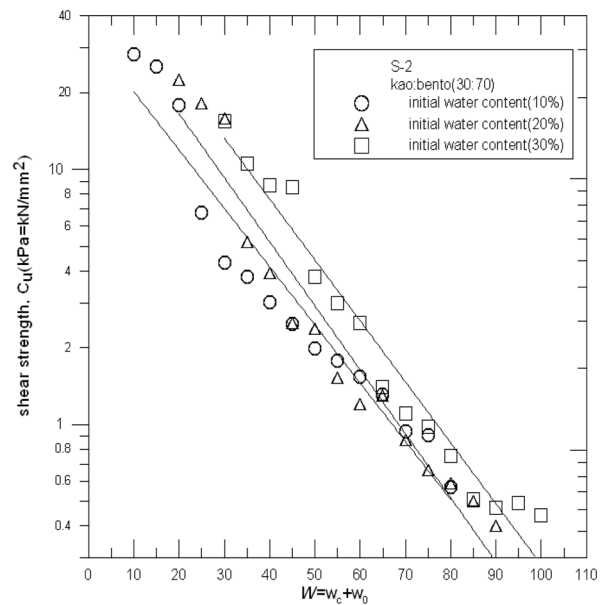


Fig. 8. Relationships between the  $W$  and the undrained shear strength, (S-2).

$w_0$  = 함수비,  $0 < w_0 \leq 55\%$

$d$  = 폴콘에서의 관입깊이(mm),  $0 < d < 30$  mm

### 3.2. 실내베인전단 실험결과

Fig. 7, 8, 9, 10, 11은 폴콘시험에서와 마찬가지로 오염지반의 초기함수비는 각각 10%, 20%, 30%이고 함수비는 최대 70%까지 증가시켰다. Fig. 7~11에서도 공허

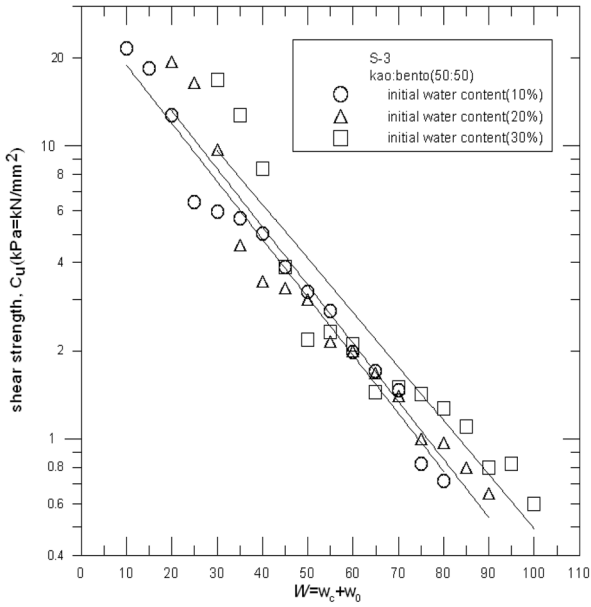


Fig. 9. Relationships between the  $W$  and the undrained shear strength, (S-3).

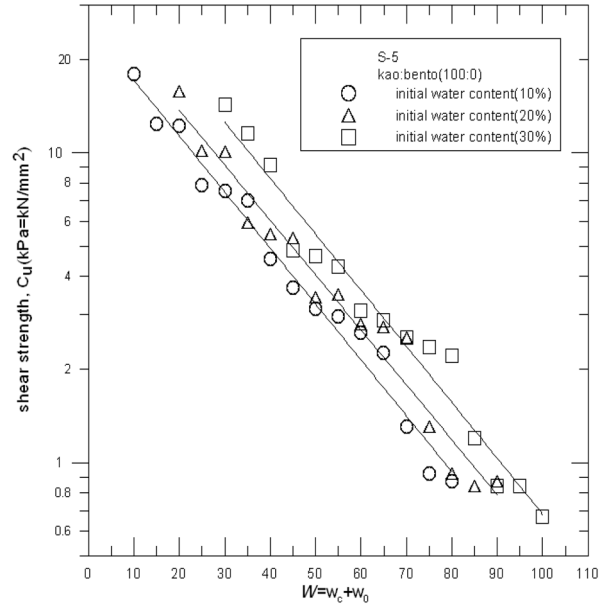


Fig. 11. Relationships between the  $W$  and the undrained shear strength, (S-5).

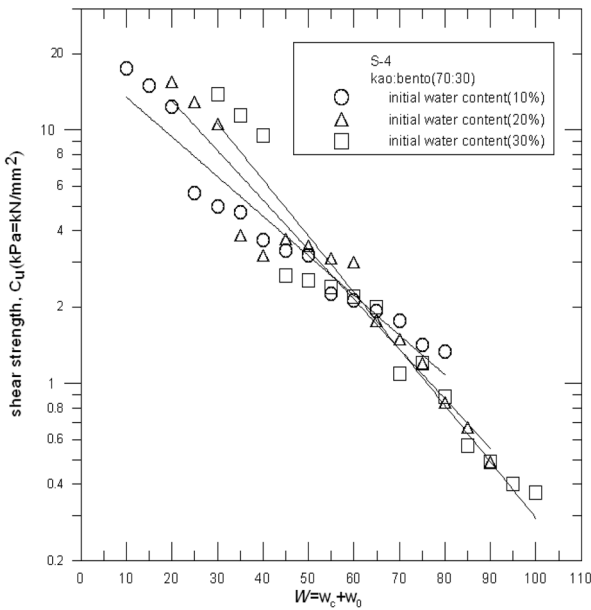


Fig. 10. Relationships between the  $W$  and the undrained shear strength, (S-4).

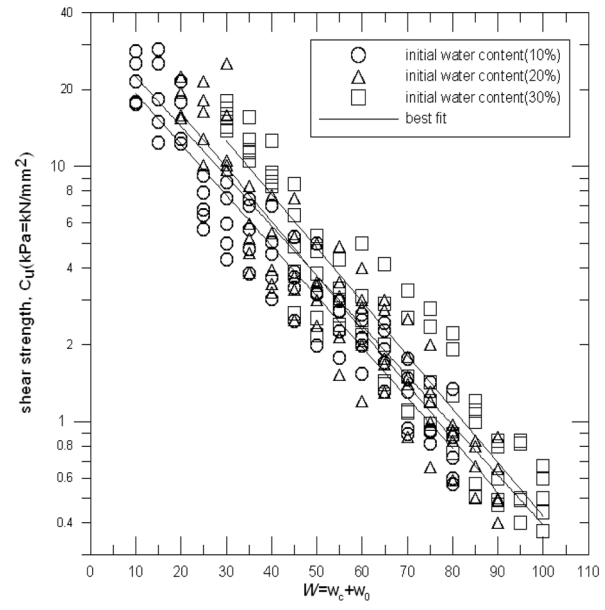


Fig. 12. Relationships between the  $W$  and the undrained shear strength, (total sample).

Fig. 1~5에서처럼 베인전단강도와 함수비 사이에는 대수적으로 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다. 각 시료별 시험자료를 회귀분석한 결과 식은 다음과 같이 표현할 수 있다. Table 3은 각 시료별 계수값 A, B 그리고 상관계수(coefficient of correlation), R을 정리한 것이다.

$$\ln(C_u) = M \cdot W + N \quad (3)$$

여기서,  $W = w_c + w_o$

$w_c$  = 유류오염지반의 초기함수비(%)

$w_o$  = 함유비(%)

$C_u$  = 비배수전단강도(kPa)

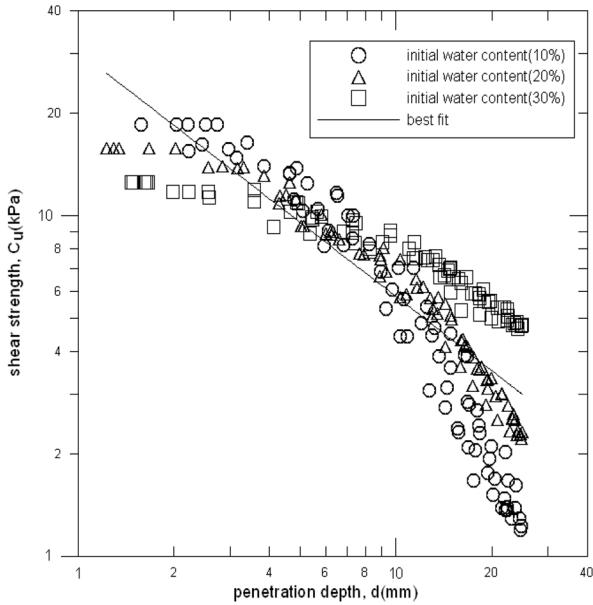


Fig. 13. Relationships between the penetration depth and the undrained shear strength.

Fig. 12는 Fig. 7~11에 나타난 자료를 종합한 그림이다. 이 그림으로부터 전단강도( $C_u$ )와  $W$  사이의 관계를 구하면 식 (4)와 같다.

$$\ln(C_u) = -0.04 \cdot W + 3.50 \quad (4)$$

식 (4)를  $C_u$ 에 대해 정리하면,

$$C_u = e^{(-0.04W + 3.50)} \quad (5)$$

여기서,  $W = w_w + w_c$

$w_c$  = 유류오염지반의 초기함수비,  $0 < w_c \leq 30\%$

$w_o$  = 함유비,  $0 < w_o \leq 70\%$

$C_u$  = 비배수전단강도(kPa)

이 식에 따르면  $W$ 가 1% 증가하면 전단강도는 3.9% 감소하는 것으로 나타났다. 유류함량이 적은 오염지반의 경우는 시간 경과에 따라 강도를 회복한다는 연구도 있으나 이는 추후 연구과제이다.

### 3.3. 폴콘시험의 관입깊이와 실내배인전단시험의 전단강도의 관계

앞 절의 폴콘시험과 실내배인전단시험 결과로부터 폴콘의 관입깊이 및 배인전단강도는 모두  $W$ 와 대수적으로 선형적인 관계가 있음을 알았다. 여기서  $W$ 는 공통의 매개 변수이므로 이를 소거하기 위해 폴콘시험에서 얻은 각 시료별 관입깊이에 대응하는  $W$ 를 각 시료별 식 (3)에 대입

Table 3. A, B and coefficient of correlation in equation (3)

Clay sample	Initial water content (%)	M	N	R
S-1	10	-0.05	3.94	0.96
	20	-0.06	4.47	0.96
	30	-0.05	4.48	0.95
S-2	10	-0.05	3.53	0.93
	20	-0.06	3.96	0.95
	30	-0.06	4.24	0.96
S-3	10	-0.05	3.39	0.97
	20	-0.05	3.49	0.94
	30	-0.04	3.54	0.88
S-4	10	-0.04	2.96	0.94
	20	-0.05	3.47	0.94
	30	-0.05	3.90	0.94
S-5	10	-0.04	3.26	0.98
	20	-0.04	3.43	0.97
	30	-0.04	3.78	0.97

하여 역산으로 전단강도를 구해 그래프로 그리면 Fig. 13과 같다. 이 그림에서 초기함수비가 각각 10%, 20%, 30% 일 때, 전단강도 감소폭은 각각 93%, 85%, 62%로 나타났다. 여기서 초기함수비가 작을 때, 전단강도 감소폭이 두드러진 것을 관찰할 수 있다. 이 결과로부터 점토의 초기함수비가 작을수록 함유비에 큰 영향을 받는 것 같다.

Fig. 13의 자료를 회귀분석한 결과 폴콘의 관입깊이와 배인전단강도 사이의 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ln(C_u) = -0.72 \ln(d) + 3.41 \quad (6)$$

식 (6)을  $C_u$ 에 대해 정리하면,

$$C_u = \frac{30.3}{d^{0.71}} \quad (7)$$

여기서,  $C_u$  = 비배수전단강도(kPa)

$d$  = 폴콘시험에서의 관입깊이(mm)

식 (7)은 유류오염된 점토지반에서 배인시험보다 간편한 폴콘시험 결과만으로 전단강도를 예측할 수 있는 간단한 식이다. 그러나 이 식의 정당성은 추후 많은 자연시료에 대한 시험결과를 통해 검증되어야 할 것으로 생각된다. 아울러 오염된 점토의 시간경과에 따른 강도회복 현상을 고려하는 것 또한 추후 연구과제라 할 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 유류 오염된 점토 혼합물에 대하여 폴콘

시험과 실내배인전단시험을 수행하고, 보다 간편한 시험인 폴콘시험의 관입깊이로부터 유류오염된 점토지반의 비배수전단강도  $C_u$ 를 구하는 다음과 같은 식을 구했다.

$$C_u = \frac{30.3}{d^{0.71}}$$

아울러 오염지반의 초기함수비 및 함유비에 따른 전단강도 감소 식은 다음과 같다.

$$C_u = e^{(-0.04W+3.50)}$$

이 식에 의하면 함유비가 1% 증가할 때, 점토의 비배수전단강도는 약 3.9% 감소하는 것으로 나타났다. 향후 제안된 식을 검증하기 위해서 보다 많은 자연 점토시료에 대한 삼축압축시험 등의 전단강도시험이 필요하다.

## 사 사

본 연구는 2010학년도 한남대학교 교비학술연구조성비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참 고 문 헌

신은철, 신재범, 1997, 원유로 오염된 지반의 역학적 특성, 한국지반공학회, **16**(2), 37-43.  
 조태룡, 이영범, 2000, 산업용 기름으로 오염된 지반의 강도 특성에 관한 연구, 한국지반공학회, **16**(2), 125-134.  
 ASTM D 4648, 1989, Standard test method for laboratory min-

ature vane shear test for saturated fine-grained clayey soil. Annual Book of ASTM Standards, 04.08, 868-873.  
 British standard methods of test for soils for civil engineering puposes. (1975), *British Standard: BS 1377*.  
 Feng, T.W., 2001, Fall-cone penetration and water content relationships of clays, *Geotechnique*, **51**(9), 819-821.  
 Harison, J.A., 1988, Using the BS cone penetrometer for the determination of the plastic limit of soils, *Geotechnique* **38**(3), 433-438.  
 Houlsby, G.T., 1982, Theoretical analysis of the fall cone test, *Geotechnique*, **32**(2), 111-118.  
 Mashalah Khamehchiyan, Amir Hossein Charkhabi, Majid Tajik, 2007, Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils, *Engineering Geology*, **89**, 220-229.  
 Serge Leroueil and Jean-Pierre Le Bihan, 1996, Liquid limits and fall cones, *Can. Geotech. J.* **33**(5), 793-798  
 Wasti, Y., 1987, Liquid and plastic limits as determined from the fall cone and the casagrande methods, *Geotechnical testing journal*, **10**(1), 26-30  
 Wroth, C.P. and Wood, D.M., 1978, The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils, *Canadian geotechnical journal*, **15**(2), 137-145.  
 Wood, D.M., 1985, Some fall-cone tests, *Geotechnique*, **35**(1), 64-68.  
 Zentar, R., Abriak, N.-E., and Dubois, V., 2009, Fall cone test to characterize shear strength of organic sediments, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, **135**(1), 153-157.