

## 삼축압축시험을 통한 복합지반의 전단강도에 관한 연구

### A Study on Shear Strength of Composite Ground with Triaxial Test

신 회 범<sup>1)</sup>, Hi-Bum Shin, 이 상 익<sup>2)</sup>, Sang-Ik Lee, 박 용 원<sup>3)</sup>, Yong-Won Park, 김 병 일<sup>4)</sup>, Byoung-Il Kim

<sup>1)</sup> 명지대학교 토목공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil Eng., Myongji University

<sup>2)</sup> 명지대학교 토목공학과 박사과정, Ph. D candidate, Dept. of Civil Eng., Myongji University

<sup>3)</sup> 명지대학교 SOC 공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Myongji University

<sup>4)</sup> 명지대학교 SOC 공학부 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Myongji University

**SYNOPSIS** : This study performs a series of Triaxial Compression Test for clay-sand composite specimens changing area replacement ratio. Purpose of the test is to conform the propriety of weighted average method in estimating shear strength of the composite ground. The test results show that measured values of shear strength of composite specimens are larger by 20~30% than those from estimation using the current weighted average method. It is thought that the differences are from pseudo-overconsolidation behavior of composite specimens.

**Key Words** : Composite Specimen, Compositied Ground, Shear Strength, Triaxial Test

## 1. 서론

복합지반이란 광범위하게는 두 종류 이상의 지층이 함께 공존하는 지반의 상태라 할 수 있다. 이는 자연적으로 형성된 '자연적 복합지반'과 인위적으로 형성한 '인공적 복합지반'으로 대별될 수 있다. 전자는 대부분의 경우가 지층혼합형태의 규모가 크고 배치가 횡방향으로 이루어져 있으며 오랜 시간 퇴적에 의한 지층 형태로 존재할 수 있는데, 다층지반이나 점토층 중간에 샌드심(sand seam)이 존재하는 형태가 이러한 자연적인 복합지반의 한 종류라 할 수 있다. 이 지반은 광범위하게 분포하며 공학적으로 안정성이나 사용성 등으로 인해 발생하는 문제에 대해 그 해결 방안이 제시되어 있는 반면에 인위적으로 조성된 복합지반은 이러한 문제(안정성과 사용성)의 해결을 위한 신뢰성 있는 이론들과 해결방안들이 아직은 일반화되어 있지 않다고 할 수 있다. 인위적으로 조성한 복합지반 즉, '인공적 복합지반'의 대표적인 예로는 모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile)과 쇠석기둥(Stone Column)등으로 개량된 지반을 들 수 있으며, 이 이외에도 심층혼합공법(Deep Mixing Method)에 의해 개량된 지반도 이에 포함시킬 수 있을 것이다. 현재 우리 나라에서는 복합지반으로의 개량을 위해 SCP공법이 가장 많이 사용되고 있으며 그 규모 또한 점차적으로 증가하는 추세이다. 그러나 이들 인위적인 복합지반 조성공법들은 여러가지 역학적 특성들이 규명되어 있지 않은 실정이므로 대부분의 경우에 공법을 적용함에 있어 경험적인 공식들과 시공사례 등에 의존하여 시공되고 있는 형편이다. 이와 같은 현실은 개량공법이 적용된 복합지반의 안정성을 평가함에 있어서 전단강도나 지지력 등을 해결하는데 많은 문제점을 야기시킨다. 따라서 이 연구에서는 이러한 불확실성의 해결을 위한 시작으로 실내삼축시험을 통해서 모래의 치환율과 구속압의 변화에 따른 복합지반의 전단강도 특성을 공학적인 측면에서 규명하여 기존의 경험적인 가중평균법과 비교하였다.

## 2. SCP 복합지반

### 2.1 SCP 복합지반의 응력분담

모래다짐말뚝이 연약한 점성토층에 조성된 복합지반위에 하중이 재하된 경우, 점성토와 말뚝으로 지반에 형성된 모래는 강성이 다르기 때문에 각각의 재료가 분담하는 응력이 다르며, 이는 강성이 큰 모래말뚝 쪽으로 응력이 집중되는 원인이 된다(村山, 1962). 이 때문에 점성토에 걸리는 응력은 대폭 감소하게 되고, 지지력증대, 침하감소 등의 효과가 나타나게 된다. 복합지반은 그림 1과 같이 복합지반위의 평균응력  $\sigma$ 가 재하되어 지반반력으로 말뚝에  $\sigma_s$ , 점성토에  $\sigma_c$ 의 응력이 발생하고, 각각의 면적  $A_s$ ,  $A_c$ 의 범위 내에서 응력이 일정하다고 가정하면 다음 식이 얻어진다.

$$\sigma A = \sigma_s A_s + \sigma_c A_c \quad (2.1)$$

응력분담비 ( $m = \sigma_s / \sigma_c$ )를 이용하여 이 식을 변형하면,

$$\sigma A = m \sigma_c A_s + \sigma_c A_c = \sigma_c (m A_s + A_c) \quad (2.2)$$

로부터,

$$\frac{\sigma_c}{\sigma} = \frac{A}{m A_s + A_c} = \frac{1}{(m-1)a_s + 1} = \mu_c \quad (2.3)$$

$$\frac{\sigma_s}{\sigma} = \frac{m A}{m A_s + A_c} = \frac{m}{(m-1)a_s + 1} = \mu_s \quad (2.4)$$

여기서,

$$a_s = \frac{A_s}{A} \quad (\text{치환율}) \quad (2.5)$$

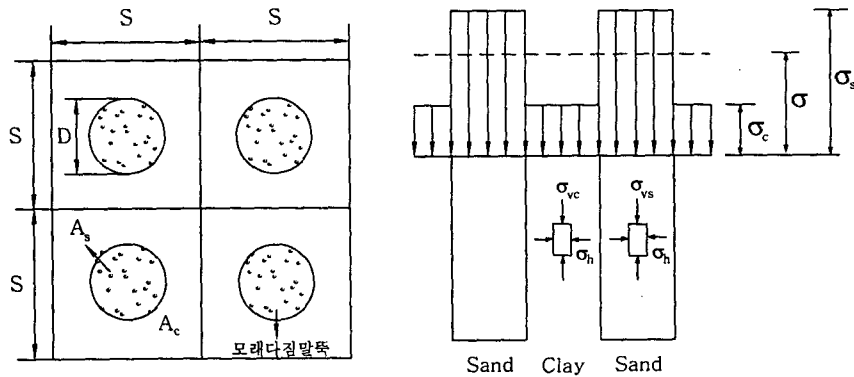


그림 1. 복합지반의 기본 개념

여기서,  $\mu_c$ 와  $\mu_s$ 는 상재압에 의해 각각 점토층과 모래 말뚝에 발생하는 응력의 비이다.

따라서,

$$\mu_s \cdot a_s + \mu_c(1 - a_s) = 1 \quad (2.6)$$

식 (2.4)~식 (2.6)은 복합지반에 대한 기본적인 식이 된다(神田; 寺師, 1990).

## 2.2 복합지반 전단강도

현재 복합지반 전단강도 결정에 사용되고 있는 가중평균에 의한 강도산정식은 각각의 전단강도를 가중 평균하여 사용하는 방법으로서, 모래와 점토에 발생하는 응력(응력분담비)에 대한 고려, 압밀 진행에 따라 발생하는 점토의 전단강도 증가에 대한 고려 여부에 따라 몇 가지 공식이 제안되어 있다. 복합지반의 전단강도 가중평균은 다음과 같이 계산된다(日本土質工學會, 1988).

$$\bar{\tau} = (1 - a_s) \cdot (c_u + \Delta c) + (\gamma_s' \cdot z + \mu_s \cdot \sigma) \cdot a_s \cdot \tan \phi_s \cdot \cos^2 \theta \quad (2.7)$$

$$\Delta c = (c' / p') \cdot \mu_c \cdot \sigma \cdot U$$

여기서,  $a_s$  : 치환율

$\Delta c$  : 점착력 증가량

$\gamma_s'$  : 모래의 유효단위중량

$\theta$  : 파괴면의 경사각

$U$  : 압밀도

$\phi_s'$  : 모래의 내부 마찰각

## 3. 시험 및 결과 분석

### 3.1 복합시료 형성을 위한 점토와 모래의 특성

복합지반 모형공시체를 구성하고 있는 점토와 모래의 특성은 표 1과 같고, 그림 2는 시험에 사용된 모래의 입도분포곡선으로 SP로 분류된다.

표 1. 점토와 모래의 특성

점토				모래			
Specific gravity, $G_s$	Liquid limit, $w_l(\%)$	Plastic limit, $w_p(\%)$	Plasticity Index, $PI(\%)$	Coefficient of Consolidation, $c_v(\text{cm}^2/\text{sec})$	Specific gravity, $G_s$	Permeability Coefficient, $k(\text{cm}/\text{sec})$	Shear strength parameter, $\phi^\circ (D_r=70\%)$
2.68	37.50	20.0	17.5	$0.44 \times 10^{-3}$	2.65	$3.3 \times 10^{-3}$	37°

Note : 모래의 전단저항각은 상대밀도 70%로 했을 때의 측정값임.

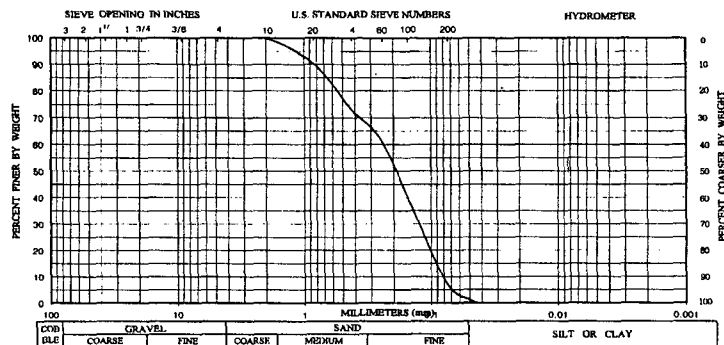


그림 2. 모래의 입도분포곡선

### 3.2 복합지반의 삼축압축시험

#### 3.2.1 공시체 제작

이 연구에서는 GDS 자동화 삼축압축시험기를 이용하였으며, 서해안 지역의 해성점토를 25kPa의 구속압(압밀압)으로 예압밀 시켜서 적정 자립도를 확보한 후에 샘플러를 이용하여 D=5cm, H=10cm의 시료 성형기로 사진 1과 같이 점토 공시체를 성형하였다. 이 공시체에 복합지반 공시체를 형성하기 위해서 치환율에 따라 1.94( $a_s=15\%$ ), 2.5( $a_s=25\%$ ), 3.16( $a_s=40\%$ ), 3.78( $a_s=57\%$ )cm 직경의 케이싱을 이용하여 그림 2, 그림 3과 같이 모래기둥을 점토 공시체안에 조성하였다. 여기서, 모래기둥의 상대밀도( $D_r$ )는 70%이다. 삼축압축시험의 압밀시 구속압은 50, 100, 150kPa로 하였고, 사진 4와 같이 조성된 복합지반 공시체는 모래기둥이 충분히 포화될 때까지 물을 공급해주었으며, 소형 시료추출기로 교란되지 않게 케이싱 안쪽의 복합지반 공시체를 밀어내어서 삼축실안에 안치하였다.



사진 1. 시료 성형 케이싱



사진 2. 케이싱 조립

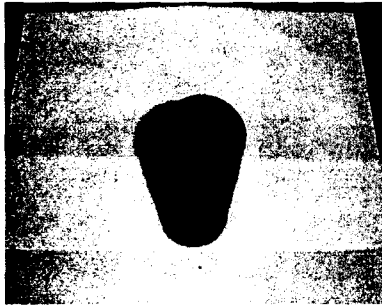


사진 3. 점토 구성

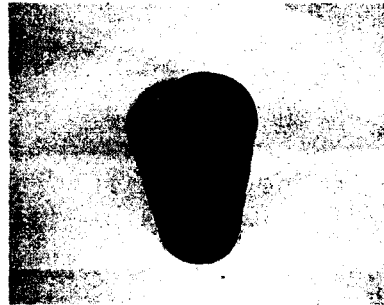
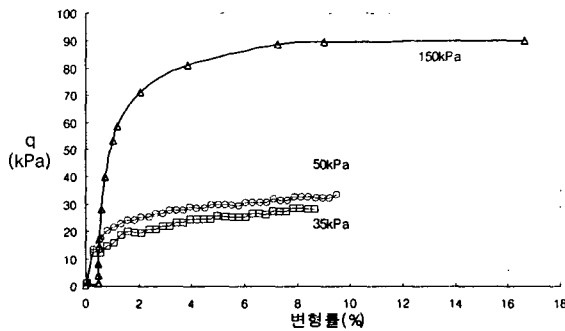
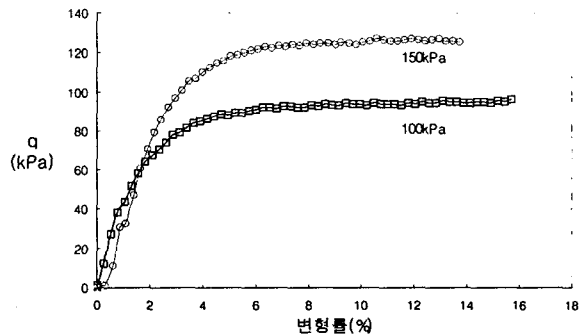


사진 4. 복합지반 모형 샘플

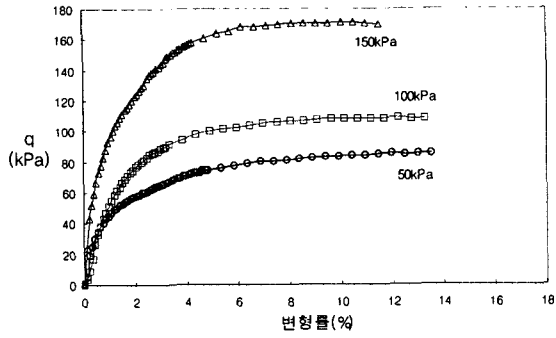
#### 3.2.2 시험결과



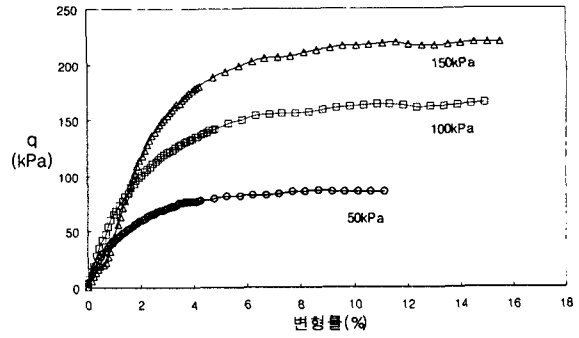
1) 치환율 15%일 때



2) 치환율 25%일 때

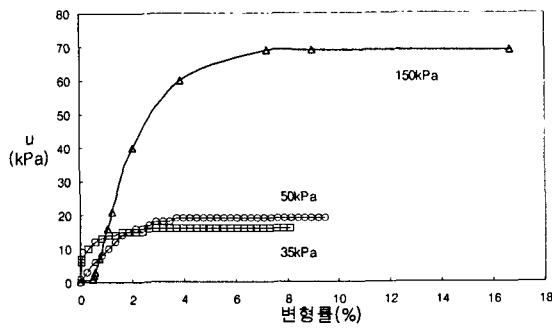


3) 치환율 40%일 때

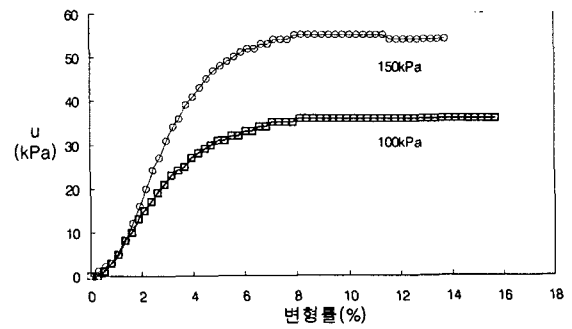


4) 치환율 57%일 때

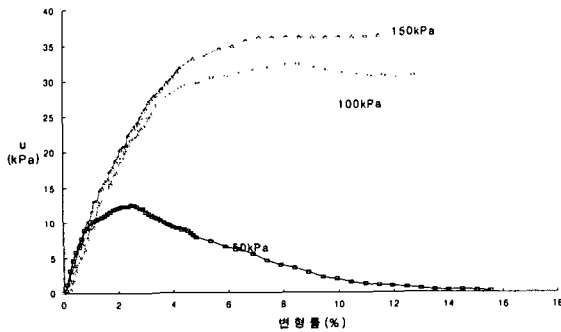
그림 3. 전단시 변형경향



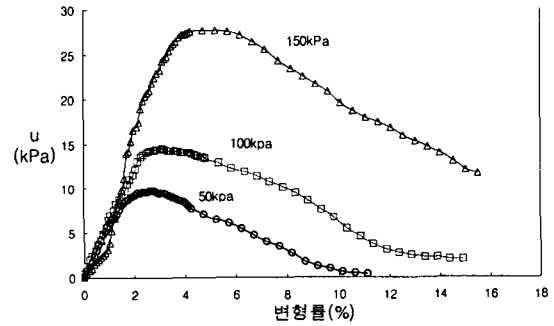
1) 치환율 15%일 때



2) 치환율 25%일 때

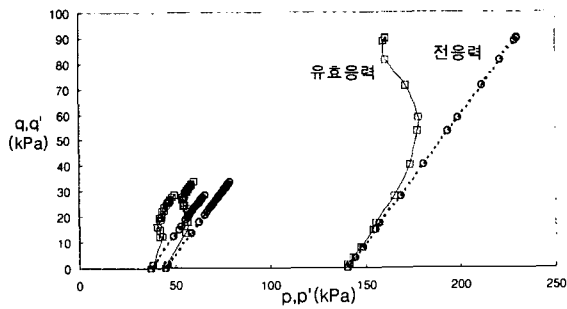


3) 치환율 40%일 때

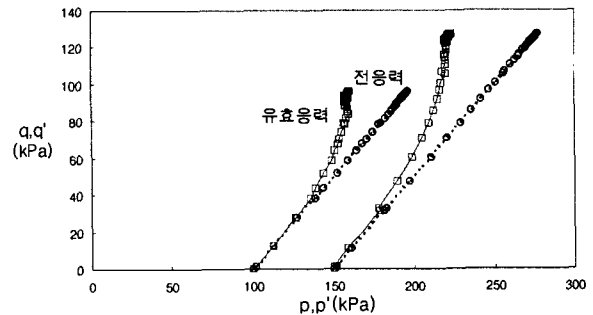


4) 치환율 57%일 때

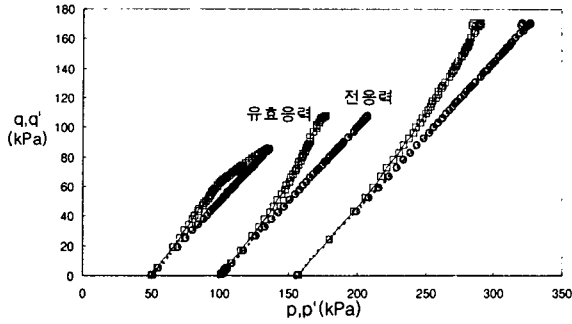
그림 4. 전단시 발생하는 과잉간극수압의 변화



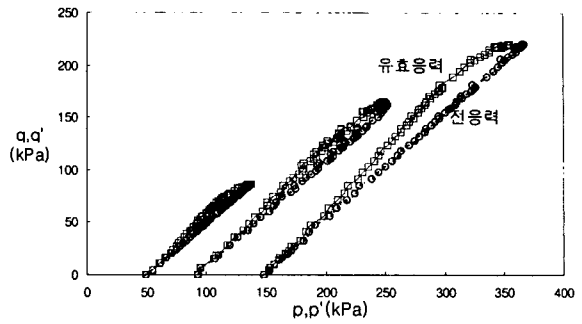
1) 치환율 15%일 때



2) 치환율 25%일 때



3) 치환율 40%일 때



4) 치환율 57%일 때

그림 5. 복합지반의 응력경로

이 연구에서 전단속도는 시간당 5%이하의 속도로 전단시켰으며, 전단중 간극수압의 변화를 보기 위하여 CU-Test를 실시하여 간극수압의 변화양상도 관찰하였다. 그림 3~그림 5에 시험결과를 수록하였다.

### 3.3 결과 분석

그림 4에서 치환율 40%의 간극수압의 변화를 보면 구속압의 차이에 따른 독특한 변화양상을 나타내고 있으며, 그림 3에서 볼 수 있듯이 구속응력이 클수록 파괴점의 변형률이 커짐을 알 수 있다. 또한 응력-변형률 관계에서는 일반적인 정규압밀점토시료와 유사한 거동 양상을 보여주고 있는 반면에 그림 4의 복합시료의 간극수압-변형률 관계는 일반적인 점토시료와 다른 양상을 보임을 알 수 있었다. 모래의 치환율이 커질수록 변형이 진행되면서 간극수압이 감소하는 양상을 보이며 구속응력이 작을수록 그 경향이 커진다. 이는 치환율이 높은 시료에서는 전단중에 모래에서 발생하는 부(負)의 간극수압이 점토의 정(正)의 간극수압을 상쇄하는 효과를 나타낸 것이다. 그러면서도 응력-변형률 곡선은 첨두점을 보이지 않는 정규압밀점토의 곡선형태를 나타낸다는 것이 특징적이라 할 수 있다. 이러한 간극수압의 발생형태는 그림 5의 유효응력경로에서도 치환율이 높은 복합시료에서 마치 과압밀점토시료와 같은 응력 경로를 보이고 있다. 그림 6에 치환율별 파괴포락선을 수록하였다. 그리고 표 2에서는 삼축압축시험을 통해서 얻어낸 복합지반의 전단강도를 가중평균식에 의해 산정되는 전단강도와 비교하였다.

가중평균법에 의한 복합지반 전단강도식의 개념은 다음과 같다.

$$\bar{\tau} = (1 - a_s) \bar{\tau}_c + a_s \bar{\tau}_s \quad (2.8)$$

이 연구에서 순점토와 순모래에서의 구속압이 100kPa 일 때 전단강도는 각각 다음과 같다.

- 점토( $\bar{\tau}_c$ ) : 53.171 kPa,
- 모래의 내부마찰각( $\phi$ ) : 37°

표 2. 전단강도 비교( $\sigma_3 = 100\text{kPa}$  일때 전단저항력)

$a_s(\%)$ 모래의 치환율	$\phi'_n (^\circ)$ 복합지반의 내부마찰각	$c'_n$ 복합지반의 점착절편	$\tau_{sc}$ (calculated) 복합지반의 산정치		$\tau_{sc}$ (measured) 복합지반의 시험치	
			$(1 - a_s)\bar{\tau}_c$	$a_s\bar{\tau}_s$	$Cu$	$\sigma \tan \phi'_s$
15	33.8	0.3938	45.20	11.30	0.40	66.91
			56.50		67.30	
25	30.11	16.5	39.88	18.84	16.5	57.98
			58.72		74.48	
40	33.25	13.51	31.90	30.14	13.51	65.56
			62.04		79.07	
57	40.02	0.199	30.31	32.40	0.199	83.99
			62.71		84.19	

Note : 구속압  $\sigma_3 = 100\text{kPa}$  일때의 전단강도를 비교한다.

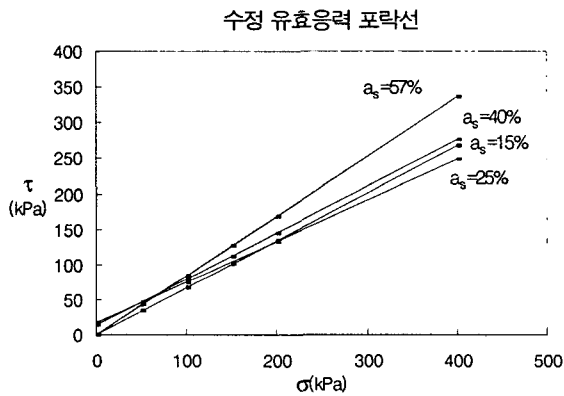


그림 6. 치환율별 파괴 포락선

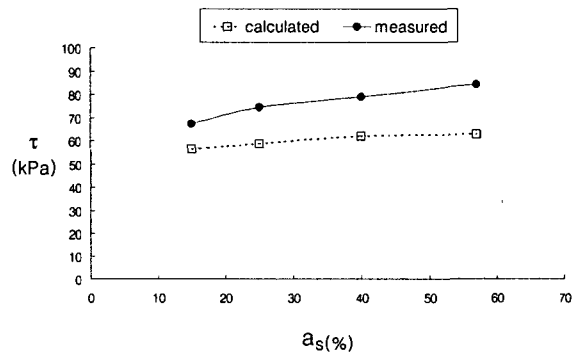


그림 7. 계산치와 실험치의 비교

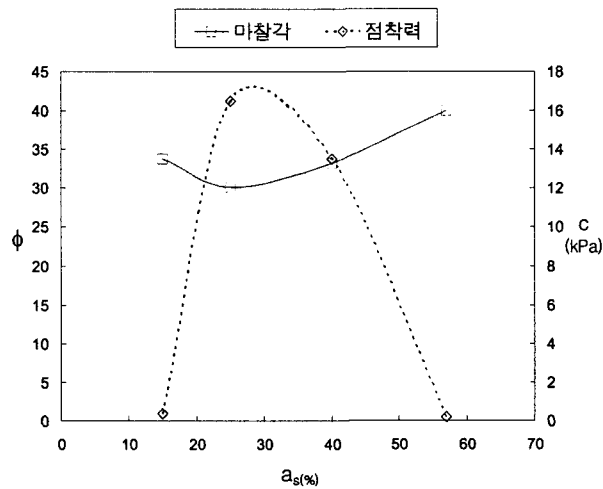


그림 8. 치환율과 강도정수와의 관계

## 4. 결론

복합지반을 이용하여 연약지반을 개량할 때 일반적으로 평균전단강도법(가중평균법)을 이용하여 지반의 안정성을 평가해 왔던 기존의 설계법이 표 2에서 볼 수 있듯이 안전측에서 평가되어 왔다는 결과를 얻을 수 있었다. 이 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 치환율에 따른 응력경로와 간극수압의 변화를 살펴보면 치환된 모래의 양이 증가할수록 치환율 40% 이상에서 점토가 과압밀 되어가는 과정과 유사한 거동을 보이기 시작한다. 이와 같은 이유로 40%이하(저치환율)는 점토지반의 점착력이 지반의 강도를 규정하는데에 주요요소로 작용한다고 할 수 있겠다. 이와는 반대로 40%이상(고치환율)에서는 모래의 내부마찰각에 의한 영향이 지반의 전단강도를 지배하는 중요한 요소가 된다는 것을 알 수 있었다.
- 2) 이 연구에서 주목할 부분은 채움재인 모래의 역할이라고 할 수 있다. 복합지반을 형성하는 모래 말뚝은 점토에서 발생하는 정(正)의 간극수압을 부(負)의 간극수압으로 상쇄시키고 있다고 해석할 수 있다. 이 때문에 모래말뚝이 형성된 복합지반에서는 과압밀점토와 흡사한 간극수압의 변화 양상을 보이게 되고, 이 간극수압 발생 거동이 복합지반 강도변화에 있어서 과압밀지반의 효과를 나타낸다.
- 3) 전단강도를 산정하는데 그동안 사용되어 왔던 가중평균법은 강도가 20%~30%정도의 안전측으로 해석됨을 알 수 있어서 경제적인 설계를 위해서 복합지반 전단강도에 관한 추가적인 연구가 필요하다.
- 4) 현장에서는 SCP 복합지반이 부분배수상태로 전단되므로 차후에는 이러한 조건을 고려한 실험연구를 수행할 계획이다.

## 참고문헌

1. 村山朔郎(1962), “粘性土に對するパイ프로コンポーザー工法の考察“, 建設機械化, 日本建設機械化協會, Vol.150, pp. 10~15
2. 日本土質工學會(1988), “軟弱地盤對策工法, 調査設計から施工まで“, pp. 127~128
3. 神田勝己, 寺師昌師(1990), “粘性土地盤を對象とするSCP工法の實用設計法(感度分板と實態調査), 港滿枝研資料, No.669.