

# 점토와 모래의 혼합토의 정적 전단거동에 대한 세립분 함유율의 영향

## Effects of Fine Content on the Monotonic Shear Behavior of Sand-Clay Mixtures

김 옥 기<sup>1</sup> Kim, Uk-Gie      안 태 봉<sup>2</sup> Ahn, Tae-Bong  
효도 마사유키<sup>3</sup> Hyodo, Masayuki      백 원 진<sup>4</sup> Beak, Won-Jin

### Abstract

In most design codes, soils are classified as either sand or clay, and appropriate design equations are used to represent their behavior. For example, the behavior of sandy soils is expressed in terms of the relative density, whereas consistency limits are often used for clays. However, sand-clay mixtures, which are typically referred to as intermediate soils, cannot be easily categorized as either sand or clay and therefore a unified interpretation of how the soil will behave at the transition point, i.e., from sandy behavior when fines are low to clay behavior for high fines content, is necessary. In this study, active natural clays are mixed with sand, and the fines content varied in order to produce different structures, ranging from one state where only sand particles form the soil structure to another where the matrix of fines make-up the structure. While paying attention to the granular void ratio in order to clarify the shear properties of sand-clay mixtures with increasing fines content monotonic, shear tests were performed on isotropically, and anisotropically consolidated specimens. From the test results, it was observed that the monotonic shear strength of sand-clay mixtures is dependent on the granular void ratio.

### 요 지

대부분의 지반설계에 있어서 지반은 모래나 점토로 구분하며 각 지반의 거동에 따른 적절한 설계가 이루어지고 있다. 예를 들면, 사질토의 거동은 상대밀도로 나타내며, 점토의 거동은 연경도 등을 이용하여 나타낸다. 그러나 모래-점토 혼합토는 전형적으로 중간토로 구분되며 간단히 모래나 점토로 구분되지 않으므로 세립분 함유율이 낮은 사질토부터 세립분 함유율이 높은 점토에 대한 전이영역에서의 흙의 거동에 대하여 합리적인 해석이 필요하다. 본 연구에서는 활성을 가지고 있는 자연점토와 모래를 혼합하여 모래만으로 구성된 구조부터 세립분만의 구조에 이르기 까지 다양한 세립분 함유율을 갖는 공시체를 제작하였다. 모래-점토 혼합토에 대한 세립분 함유율의 증가에 따른 전단특성을 명확하게 하기 위해 골격간극비에 착안하여 등방 및 이방압밀상태에서 전단실험을 수행하였다. 실험결과에서 모래-점토 혼합토의 정적전단강도는 골격간극비에 크게 의존하는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Fines content, Granular void ratio, Initial shear condition, Monotonic shear strength, Sand-clay mixture

1 야마구치대학교 공학부 사회건설공학과 (Dept. of Civil Eng., Yamaguchi Univ.)

2 정희원, 우송대학교 철도건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Woosong Univ., tbahn@wsu.ac.kr, 교신저자)

3 야마구치대학교 공학부 사회건설공학과 교수 (Prof., Dept. of Civil Eng., Yamaguchi Univ.)

4 야마구치대학교 공학부 사회건설공학과 조수 (Research Associate, Dept. of Civil Eng., Yamaguchi Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 10월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

실제 지반을 대상으로 하는 실무에 있어서는 순수한 모래에서 점토에 이르는 다양하고 폭 넓은 범위의 흙을 다루지 않으면 안 되지만, 대부분의 경우 간이적인 방법으로 대상지반을 모래 또는 점토로 구분한 해석이 행하여지고 있다. 모래와 같은 입상재료는 입자들의 접촉에 의한 마찰에 의해 강도가 발휘되고 있으나, 점토의 경우는 입자의 접촉에 의한 강도발휘보다 이중층을 통한 전기력이 힘의 주체가 된다. 이와 같이, 모래와 점토에서는 흙입자간에 미치는 힘의 상태가 각기 다르기 때문에, 모래에서는 입자형상이나 상대밀도, 점토에서는 활성도와 연경도 등이 각각 강도의 지표가 된다.

그러나 실제지반에는 중간토로 분류되는 세립분을 함유한 점토혼합토가 존재하며 일본에서는 倉田進과 藤下利夫(1960)에 의해 모래와 점토를 혼합하여 조성한 일련의 역학실험에 의해 모래와 점토의 경계를 연구한 결과, 0.05mm이하의 토립자 함유량을 기준으로 하여, 20%이하를 사질토 영역, 40%이상을 점토영역, 20~40%를 모래와 점토의 중간영역으로 구분하고 있다. 이 결과는 현재 일본의 항만시설기준(일본항만협회, 1989)에 채용되어 설계에 반영되고 있다.

이러한 중간토를 대상으로 한 기존 연구로는 Skempton (1985), Bjerrum(1954), Larsson(1980) 등에 의해 비배수 삼축압축실험이 수행되었으며, 실험결과 유사한 종류의 중간토의 비배수 전단강도는 소성지수의 감소에 따라 점차 감소하는 것이 실험적으로 밝혀졌지만, 그 결과에 대한 명확한 관계는 해명되지 않았으며 오차 또한 심하게 나타났다. 이것은 같은 소성지수를 가진 시료라도 중간토의 종류에 따라 비배수 전단강도가 다르게 나타나며, 이러한 차이는 세립분에 의한 활성의 유·무와 세립분에서 점토와 실트의 구성비에 기인하는 것으로 최근 다양한 해석이 진행되어지고 있으나, 기존에 행하여졌던 연구에서는 연구자들마다 각기 공시체 제작방법이 다르며, 점토혼합토의 강도와 거동을 지배하는 모래의 다양한 초기구조와 골격에 대한 거론은 그다지 행하여지지 않았다.

본 연구에서는 활성을 가지고 있는 자연점토와 모래를 혼합하여 모래만으로 이루어진 입상구조부터 세립분이 매트릭스를 구성하는 상태에 이르는 넓은 범위의 다양한 세립분 함유율을 갖는 공시체를 제작하였으며, 혼합토의 전단특성을 명확하게 하기 위해 골격간극비

(Mitchell, 1976 Kenny, 1977)에 착안하여 등방압밀 및 이방압밀조건을 재현한 초기 전단응력조건에 대하여 배수 및 비배수 정적 삼축압축실험을 수행하였다.

## 2. 시료 및 시험방법

### 2.1 시료의 물리적 성질

본 연구에 이용한 조립분은 Micawa규사를 체가름하여 이상적인 입도분포로 조성하기 위하여 건조중량비 1 : 2 : 2 : 5의 비율로 각각 혼합하였다. 이와 같이 입도 조정된 규사의 최대간극비 및 최소간극비는 각각  $e_{max}=0.850$ ,  $e_{min}=0.524$ 이다. 세립분은 일본 Yamaguchi현 Iwakuni항에서 채취한 해성점토로서 0.425mm체로 체가름하여 조개껍질 등의 이물질질을 제거하였으며, 입도 조정후의 입도조성은 세립분 98.0%, 점토분 38.8%이며 소성지수 47.5의 중소성점토로 분류된다.

Fig. 1에서 나타낸바와 같이 입도 조정된 규사와 Iwakuni 점토를 건조중량비로 100 : 0, 90 : 10, 85 : 15, 83 : 17, 80 : 20, 70 : 30, 50 : 50, 0 : 100의 8종류로 혼합하여 사질토에서 점성토에 이르는 넓은 범위의 다양한 공시체를 제작, 실험에 이용하였다.

Table 1에는 실험에 이용한 시료의 세립분 함유율에 따른 물리적 성질을 나타내었다. Table 1에서 알 수 있는 바와 같이 세립분 함유율  $F_c$ 가 19.6%이상의 혼합토에서는 활성을 나타내고 있지만 16.7%이하에서는 비소성인것을 알 수 있으며, Iwakuni 점토는 자체적으로 약 2%의 모래를 함유하고 있으므로 각 실험에 이용한 공시체의 세립분 함유율은 Iwakuni 점토 함유율보다 낮게 조성되어 있다.

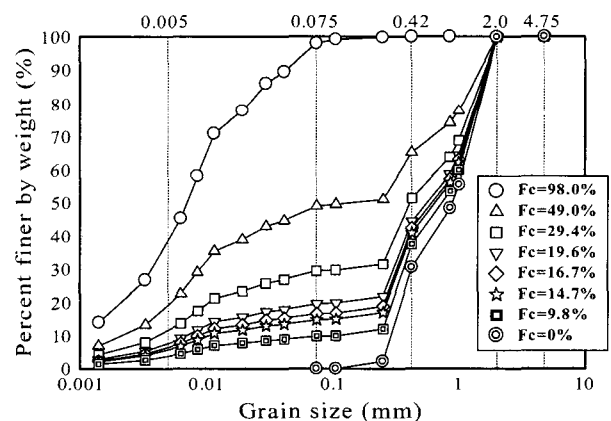


Fig. 1. Grain size distribution curves of sand-clay mixtures

Table 1. Physical properties of test materials

Iwakuni. Clay Ratio (%)	Fines content (%)	Clay content (%)	Specific gravity	D <sub>50</sub> (mm)	Cu	LL (%)	PI (%)
100	98.0	38.8	2.610	0.007	-	77.34	47.54
50	49.0	19.4	2.631	0.140	-	58.24	31.41
30	29.4	11.6	2.644	0.415	165.85	47.31	28.65
20	19.6	7.8	2.644	0.55	125.71	35.33	14.62
17	16.7	6.6	2.645	0.61	105.68	-	NP
15	14.7	5.8	2.646	0.64	83.64	-	NP
10	9.8	3.9	2.648	0.71	11.25	-	NP
0	0.0	0.0	2.652	0.88	3.79	-	NP

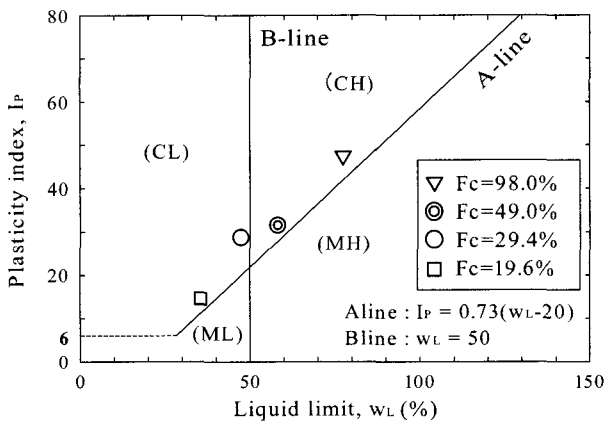


Fig. 2. Plasticity chart on pre-consolidation samples

Fig. 2는 본 실험에 이용한 시료중 소성을 가지고 있는 시료를 대상으로 하여 소성도를 이용하여 분류한 결과이다. Fig. 2에서 세립분 함유율  $F_c=98.0, 49.0\%$ 는 압축성이 큰 점토로 구분되면 또, 모래가 많은 영역에 있는  $F_c=19.6, 29.4\%$ 는 중간 압축성인 점토로 구분된다. 따라서 소성도표에서 중간토의 영역(A-line 상위)에 있는  $F_c=19.6, 29.4\%$ 는  $F_c=98.0, 49.0\%$ 와 같은 점성토로 구분하여도 무리가 없음을 알 수 있다.

## 2.2 공시체 제작방법 및 실험조건

실험에 이용한 공시체 제작은 Iwakuni 점토 함유율 20%이상의 시료에 대해서는 액성한계의 약 2배에 해당하는 함수비로 교반후 슬러리 상태의 시료를 예압밀셀에 넣고 연직압력 50kPa을 재하하여 예압밀시킨 후 직경 5cm, 높이 10cm의 크기로 성형하였다. 한편, 점토 함유율 17%이하의 시료에 대해서는 다양한 상대밀도와 골격간극비를 갖는 시료를 조성하기 위하여 램머를 이용한 습윤 다짐공시체 제작법을 이용하였다. 다짐시료의 초기 함수비는 점토 고유의 성질이 변하지 않으며,

포화를 용이하게 하기 위해 탄산가스를 통과시킬 수 있는 최소의 함수비인 초기함수비 11%로 섞은 후, 몰드에 5층으로 나누어 투입하였으며, 한층씩 철재램머를 이용하여 소정의 에너지로 다짐하여 제작했다.

다짐에너지  $E_c$ 는 식 (1)에 의해 계산하였으며 여기서,  $W_R$ 은 램머의 중량(=0.00116kN),  $H$ 는 낙하높이(m),  $N_L$ 은 다짐 층수(=5),  $N_B$ 는 한 층의 다짐횟수,  $V$ 는 다짐몰드의 체적을 나타내며 각각의 공시체에 대하여 다짐횟수와 낙하높이를 변화시킴으로써 다짐에너지를 조정하였다(Adachi et al., 2000).

$$E_c = \frac{W_R \cdot H \cdot N_L \cdot N_B}{V} \quad (1)$$

본 연구에서는 조립토의 입자마찰에 의한 골격구조가 강도특성에 주된 영향을 미치고 있다는 전제로 세립토가 혼합된 공시체 전체의 질량보다도 세립토의 영향을 무시한 조립토만의 밀도에 착안하는 것이 적절하다고 판단하여, 공시체의 세립토를 간극으로 간주한 모래골격간극비(Granular void ratio)의 개념에 착안하여 조립토만으로 형성된 골격의 상태를 표현하는 식 (2)를 이용하였다(Mitchell, 1976; Kenny, 1977).

$$e_g = \frac{V_v + V_{sc}}{V_{ss}} \quad (2)$$

여기서,  $e_g$  : 골격간극비(Granular void ratio),  $V_v$  : 간극의 체적,  $V_{sc}$  : 세립분의 체적,  $V_{ss}$  : 조립분의 체적을 각각 나타낸다.

Fig. 3 (a), (b)에는 세립분 함유율에 따른 모래골격간극비  $e_g$ 와 다짐에너지  $E_c$ 를 균일하게 적용시킨 공시체의 압밀 전·후의 관계를 나타내었다. 세립분 함유율  $F_c=0, 9.8, 14.7, 16.7\%$ 의 시료에 대해서는 단계적인 다짐

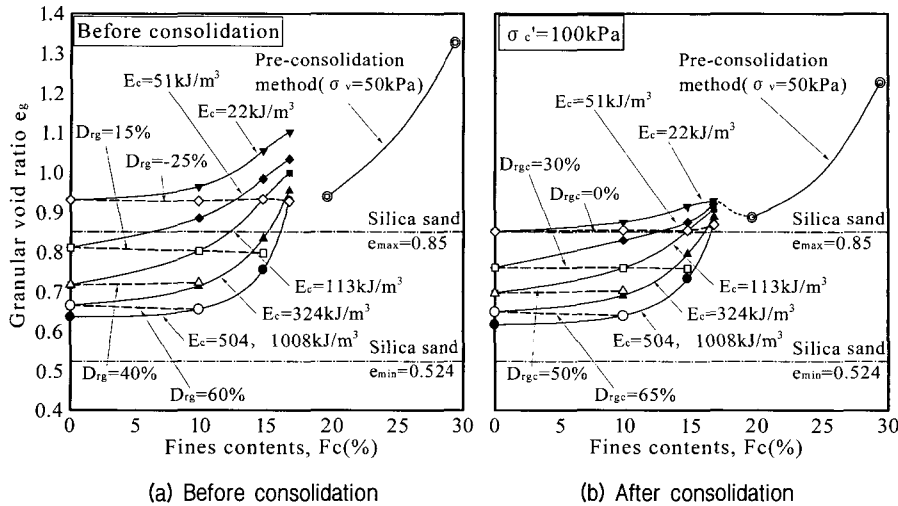


Fig. 3. Relationship between granular void ratio and fine contents

에너지  $E_c=22, 51, 113, 324, 504, 1008\text{kJ/m}^3$ 을 가하여 공시체를 제작하였으며, 골격간극비 개념을 이용한 골격상대밀도를 이용하여  $D_{rg}=25, 15, 40, 60\%$ 로 조정하여 두가지 조건으로 공시체를 제작하였다. Fig. 3에 나타낸바와 같이  $F_c=0\sim 6.7\%$ 에서는 다짐에너지 및 조립토만을 고려한 일정한 골격상대밀도를 갖는 공시체 제작이 가능하였으며,  $F_c=19.6\%$ 이상의 시료에서는 50kPa의 예압밀 응력에 의한 예압밀공시체의 골격간극비를 얻었다. 이때, 다짐에너지  $E_c=504, 1008\text{kJ/m}^3$ 을 적용한 경우에서 골격간극비가 더 이상 작아지지 않고 동일한 골격간극비가 얻어졌다. 이것은 실험에 사용한 램머로 다짐가능한 최소의 골격간극비임을 알 수 있다.

Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 압밀전의 공시체는 규사의 최대간극비  $e_{max}=0.85$ 이상으로 상당히 느슨한 구조를 가지고 있으나, 구속압 100kPa로 압밀 완료 후에는 최대간극비 부근으로 감소하고 있다. 즉, 초기 공시체 성형상태에서는 세립분과 모래입자가 느슨한 접촉으로 부유해 있는 것과 같은 상태에 있지만, 구속압의 적용에 의해 모래입자의 접촉비율이 증가하여  $e_{max}=0.85$ 에 근접하여 골격을 형성하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 세립분 함유율에서  $e_g=0.85$ 이하에서는 구속압 적용 후에 모래입자에 의해 골격을 형성하고 있지만, 세립분 함유율의 증가에 따라  $e_g=0.85$ 이상에서는 세립분에 의한 매트릭스가 형성되어 있는 것을 확인 할 수 있으며, 이를 근거로 세립분을 간극으로 간주한 골격간극비를 이용한 접근이 타당성이 있는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 위와 같은 조건의 시료들에 대해서 등방압밀 조건으로 배수 및 비배수 삼축압축시험을 수행

하였으며, 이방 압밀조건을 재현하기 위하여 초기 전단 응력비  $\sigma_2/\sigma'_c=0.2, 0.4$ 의 조건으로 축압일정하에서 유효구속압 100kPa, 축 변형속도 0.1%/min로 실험하였다.

### 3. 등방압밀조건하의 정적전단특성

#### 3.1 비배수 정적 전단실험 결과

비배수 정적전단 실험에서 얻은 축차응력-축변형률 및 유효응력경로의 결과를 Fig. 4~6에 나타내었다. Fig. 4는 다짐에너지  $22\text{kJ/m}^3$ 을 균일하게 적용한 공시체에 대한 실험결과를 나타낸 것으로 세립분이 함유되지 않은  $F_c=0\%$ 의 느슨한 모래의 전단특성에서 세립분의 증가에 따라 같은 경향의 연화거동을 나타내며, 세립분 함유율의 증가에 따른 침투강도의 증가를 볼 수 있다. 유효응력의 경로에서는 모든 경우 수축거동을 나타내며 유효응력이 거의 0에 이르는 정적액상화가 일어남을 알 수 있다.

또한, Fig. 5는 높은 다짐에너지  $E_c=504\text{kJ/m}^3$ 을 적용한 경우로서  $F_c=0, 9.8\%$ 의 경우는 축변형률의 증가에 따라 축차응력이 최대값을 나타낸 후 연화거동을 나타내고 있지만,  $F_c=14.7\%$ 에 있어서는 축차응력이 점증적으로 증가하는 경화거동을 나타내며, 세립분이 더욱 증가한  $F_c=16.7\%$ 에서는 다시 연화거동을 나타낸다. 결과적으로 다짐 에너지가 낮을때와는 반대로 세립분 함유율의 증가에 따라 강도가 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 이는, 조립토만으로 구성된 입상구조에서 세립분 함유율의 증가에 의해 세립분이 조립분사이에 충전되

어 혼합역할을 함으로써 모래의 골격구조가 파괴하기 쉬운 경향을 나타내기 때문에 사료된다.

Fig. 6은 모래골격상대밀도  $D_{rgc}=0\%(e_g=0.85)$ 에 균일하게 적용시킨 경우이며, 모든 경우에 있어서 전단 중

수축거동을 나타내고 있다. 또, 세립분의 증가에 따라 Fig. 4와 같은 경향의 강도 상승을 볼 수 있으며, 이와 같은 실험결과는 골격상대밀도를 일정하게 유지시킨 30, 50, 65%의 경우에서도 동일한 경향을 나타냈다.

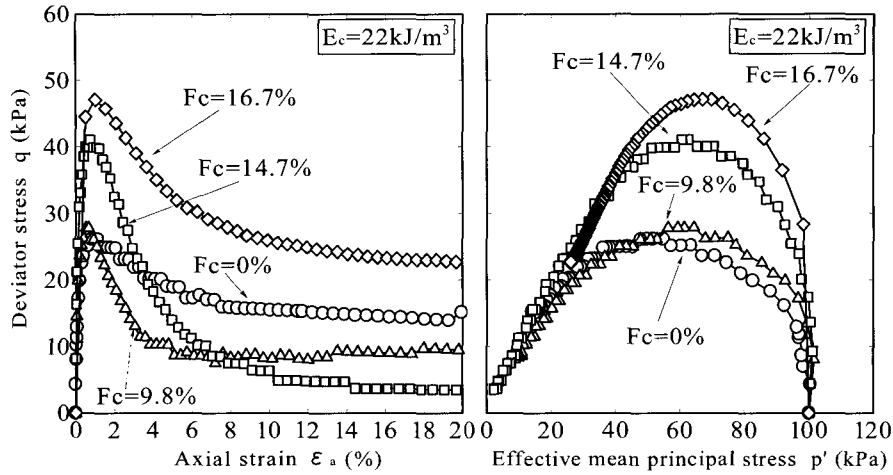


Fig. 4. Relationships between deviator stress and axial strain and effective stress path on  $E_c=22KJ/m^3$

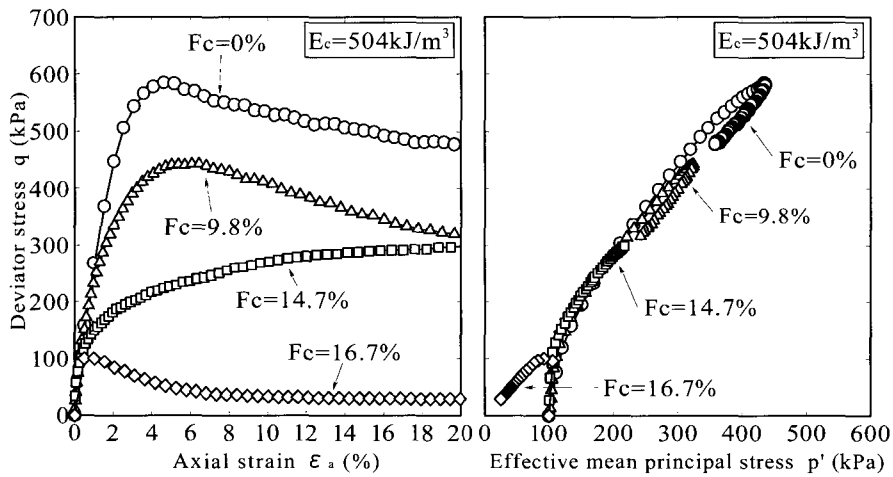


Fig. 5. Relationship between deviator stress and axial strain and effective stress path on  $E_c=504KJ/m^3$

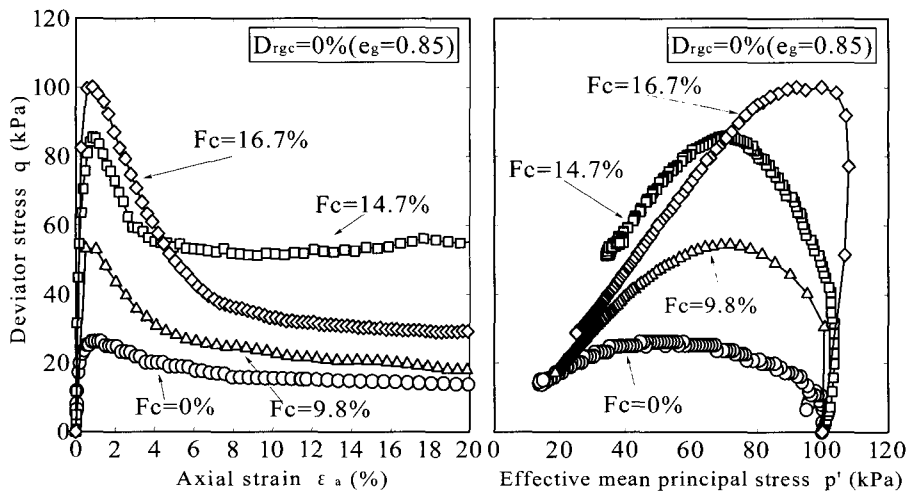


Fig. 6. Relationship between deviator stress and axial strain and effective stress path for  $D_{rgc}=0\%$

Fig. 7에는 비배수 전단시험의 모든 시험결과에 대하여 최대축차응력비와 세립분 함유율의 관계를 나타내었다. 우선,  $F_c=0\sim 16.7\%$ 사이의 골격상대밀도( $D_{rgc}$ )를 균일화시킨 공시체에서는, 모든 경우에서 세립분 함유율이 증가함과 더불어 최대축차응력 또한 증가하고 있다. 이것은 골격상대밀도를 일정하게 유지하기 위해 세립분의 증가와 더불어 조립분도 일정비로 증가되므로 공시체 전체 밀도의 증가에 의한 것으로 사료된다.

또한,  $F_c=0\sim 16.7\%$ 에서 다짐에너지를 균일하게 적용한 경우에서 다짐에너지가 높은 조밀한 상태에서는 세립분 함유율의 증가에 따라 최대축차응력은 큰 폭으로 감소하고 다짐에너지가 낮은 느슨한 상태에서 최대축차응력은 증가한다. 이것은 각각 다음과 같이 생각할 수 있다. 다짐에너지가 높은 조밀한 상태의 공시체에 있어서는 이미 모래만으로 구성된 조밀한 골격구조에 세립분이 증가함에 따라 세립분이 조립자사이에 충만되어

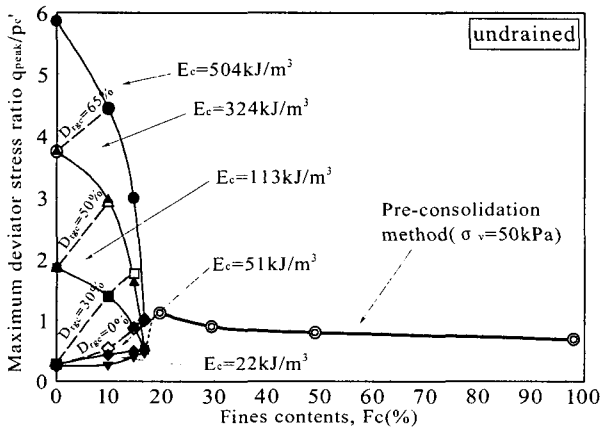


Fig. 7. Relationships between peak deviator stress ratio and fines contents (undrained condition)

유효역할을 함으로써 모래가 골격구조를 상실하여 강도가 감소하는 것으로 생각할 수 있다. 또한, 다짐에너지가 낮은 느슨한 상태에서는 느슨한 모래 골격안에 세립분의 증가에 의해 상대적으로 공시체 밀도가 증가함에 따라 강도의 증가가 나타난 것으로 판단된다.  $F_c=20\%$ 이상의 예압밀 시료에서는  $F_c=29.4\%$ 이상에서 최대축차응력은 거의 일정한 값을 나타내고 있으며, 이는 세립자가 조립자사이에 충만됨에 따라 조립자의 접촉점이 떨어져 세립분이 강도의 주체를 이루어 조립토의 영향을 전혀 받지 않는 세립분으로 구성된 매트릭스 구조가 형성되었음을 알 수 있다.

### 3.2 배수 정적전단시험결과

비배수시험과 같은 조건으로 제작된 공시체에 대하여 전단과정중 체적변형의 특성을 조사하기 위해 배수 정적전단시험을 수행하였으며, Fig. 8에 다짐에너지가 낮은  $22\text{kJ/m}^3$ 과 에너지가 높은  $504\text{kJ/m}^3$ 에 대한 축차응력과 축변형률 및 체적변형률의 관계를 나타내었다.

Fig. 8(a)에서, 다짐에너지가 낮은 상태에서는 세립분 함유율의 증가에 따라 최대축차응력은 작은 폭으로 증가를 보이며, 모든 경우에서 경화거동을 나타내며, 전단중 체적변형은 수축거동이 일어나는 것을 알 수 있다. 반면, 다짐에너지가 높은 상태일때는 세립분 함유율의 증가에 따라 최대축차응력이 큰 폭으로 감소하고  $F_c=16.7\%$ 일때 최대값은 나타나지 않고 낮은에너지의 경우와 동일한 경화거동을 나타내며 체적은 팽창한다.

Fig. 8(b)의 일정한 골격상대밀도를 갖는 경우는 최대 축차응력이  $F_c=9.8\%$ 까지 크게 증가한 후  $F_c=14.7\%$ 에서

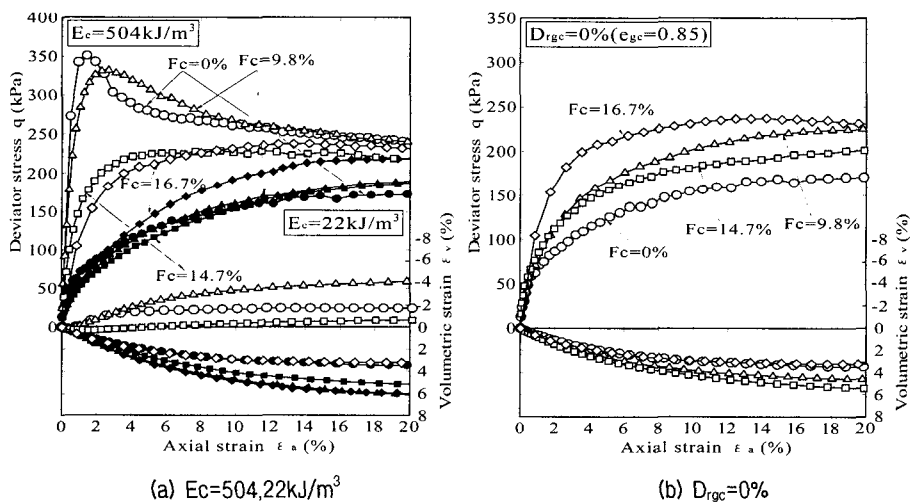


Fig. 8. Relationships between deviator stress-axial strain and volume strain (drained condition)

작은 감소를 보이며 다시,  $F_c=16.7\%$ 일때 상승하고 있다. 또, 다짐에너지가 느슨한 경우와 동일하게 전단중 경화 거동을 나타냈다. 이와 같은 경향은 모든 배수 전단시험 결과에서 관측되었으며, 느슨한 골격구조에서 세립분의 증가로 인하여 세립분과 조립분이 함께 결속되어 강도가 증가하며, 세립분의 증가에 의한 영향으로  $F_c=14.7\%$ 에서 조립구조의 균형이 무너진것으로 고려된다.

Fig. 9에는 배수삼축실험에 대한 최대축차응력비와 세립분 함유율의 관계를 나타내었다. Fig. 9에 나타난 바와 같이, 다짐에너지가 높은  $E_c=504\text{kJ/m}^3$ 과  $E_c=113\text{kJ/m}^3$ 의 경우에는 세립분 함유율이 증가함에 따라 강도가 감소하고 있으며, 골격상대밀도를 일정하게 유지시킨  $D_{rsc}=50, 65\%$ 상태에서는 세립분의 증가에 따른 강도의 증가를 나타낸다. 골격상대밀도 0% 및 다짐에너지  $E_c=113\text{kJ/m}^3$ 이하에서는  $F_c=9.8\%$ 에서의 최대축차응력은 상승하고  $F_c=14.7\%$ 에서는 골격이 무너져 축차응력이 감소하는 경향을 볼 수 있다. 또한,  $F_c=16.7\%$ 가 되면 강도차는 거의 보이지 않고 일정하게 한 점에 집중되어 예압밀시료의 강도에 근접함을 알 수 있다.

이와 같은 결과로부터, 다짐에너지가 높은 공시체에서는 조밀한 모래 골격이 형성되어 있는 상태에서 세립분의 증가에 따라 강도의 감소를 나타내며, 골격상대밀도가 높은 상태에서는 세립분과 조립분이 일정비로 함께 증가함에 따라 공시체내의 밀도가 상대적으로 높게 되어 강도의 증가를 나타냄을 알 수 있다. 또한, 골격상대밀도와 다짐에너지가 낮은 상태에서는 체적변형이 일정하여 골격이 유지되고 있는 상태에서 골격사이에 어느 정도의 세립분의 증가로 일정강도는 증가하지만, 어느 한계이상 이 되면 골격을 잃고 오히려, 강도는 감소

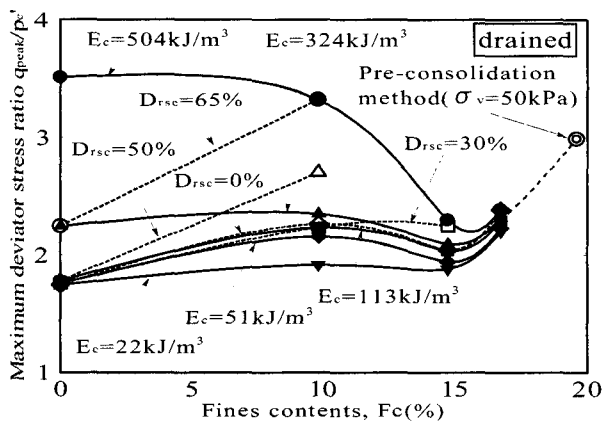


Fig. 9. Relationships between peak deviator stress ratio and fines contents (drained condition)

하며 세립분이 더욱 증가하면 점토성분의 매트릭스가 형성되어 예압밀시료의 강도에 근접하여 강도가 증가한 결과를 나타냈다.

#### 4. 초기전단응력을 받는 점토 혼합토의 비배수 전단특성

하천제방이나 성토지반과 같이 초기전단응력을 받고 있는 현장상태의 점토혼합토의 조건을 재현하기 위하여 초기전단응력비  $\sigma_s/2\sigma'_c=0.2, 0.4$ 의 이방압밀상태를 적용한 점토혼합토의 비배수 정적 전단시험을 수행하였다.

Fig. 10에는 초기전단 응력조건에 있어서  $\sigma_s/2\sigma'_c=0.4$ 의 결과에서 다짐에너지  $E_c=51, 504\text{kJ/m}^3$ 로 균일하게 적용한 경우에 대하여 축차응력-축변형률 및 유효응력의 관계를 나타내었다. Fig. 10(a)에 나타난 바와 같이 에너지가 낮은  $E_c=51\text{kJ/m}^3$  경우에는 세립분 함유율의 증가에 따라 축차응력은 증가를 나타낸다. Fig. 10(b)의 에너지가 높은  $E_c=504\text{kJ/m}^3$  경우에는 (a)의 경우와 반대로 세립분의 증가에 따라 강도는 큰 폭으로 감소하고 있으며 축차응력의 최대치를 나타낸 후 연화거동을 나타내고 있다.

세립분 함유율  $F_c=9.8\%$ 일때 초기전단응력비  $\sigma_s/2\sigma'_c=0.0, 0.2, 0.4$ 에 대한 다짐에너지  $E_c=51, 504\text{kJ/m}^3$ 의 경우, 축차응력과 축변형률 및 유효응력경로를 Fig. 11(a), (b)에 나타내었다. Fig. 11에 나타낸바와 같이, 다짐에너지에 관계없이 초기전단응력비의 증가와 더불어 최대 축차응력은 증가하였으며 Fig. 11(a) 다짐에너지가 낮은 경우의 유효응력경로에 있어서 초기전단응력비가 크면 클수록 전단 직후에 파괴선에 도달하였으며, 모든 유효응력경로는 파괴선을 따라 유효응력이 0부근까지 도달하여 정적액상화가 일어난다.

이와 같은 초기전단응력의 적용에 의한 파괴선에 도달하는 현상은 점토와 모래에 대해 모든 경우에서 유사하게 나타났다(Hyodo et al., 1994a, 1994b).

다짐에너지가 큰 Fig. 11(b)에서는 초기전단응력비의 증가에 따라 최대축차응력이 증가하며 모든 경로에서 같은 양상의 연화거동을 보이고 있다.

Fig. 12는 초기전단 조건하에서 최대축차응력비와 세립분 함유율의 관계를 나타내었다. Fig. 12에서 초기전단응력조건을 받는 모든 경우에서 강도의 증가를 보이며, 특히 세립분 함유율이 낮은 경우에서 초기전단에 대

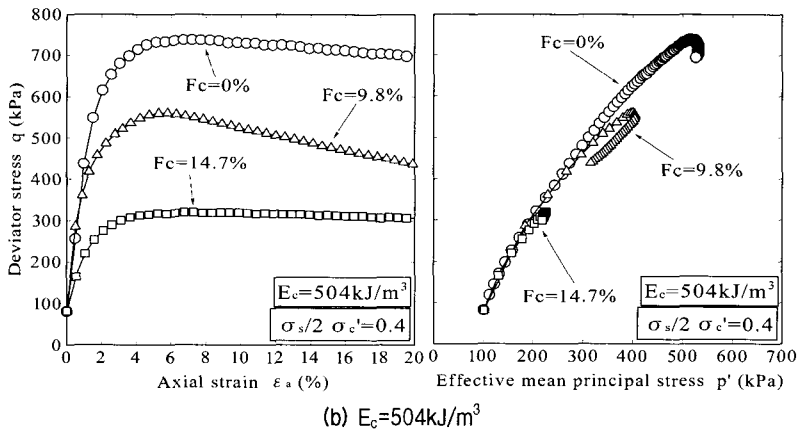
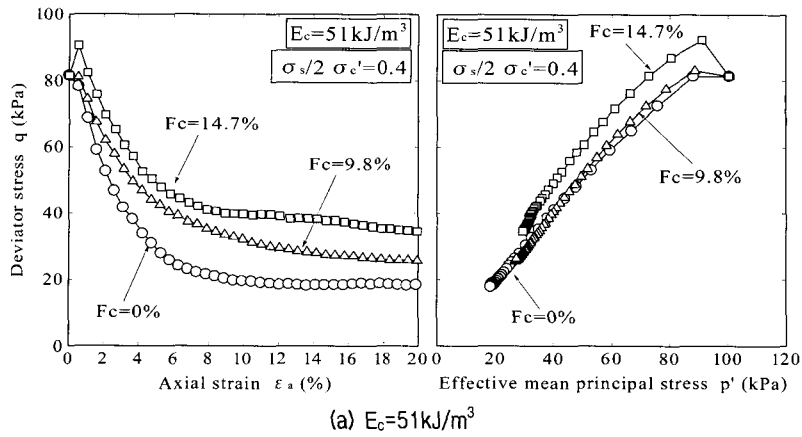


Fig. 10. Relationships between deviator stress and axial strain and the effective stress paths on  $E_c=51\text{KJ/m}^3$   $E_c=504\text{KJ/m}^3$  (initial shear stress  $\sigma_s/2\sigma_c' = 0.4$ )

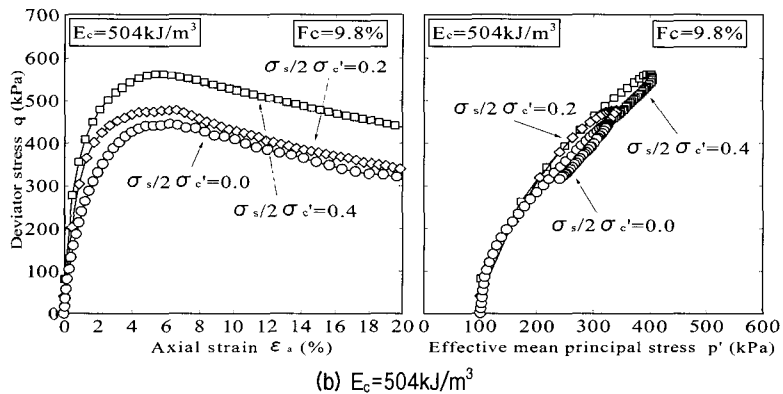
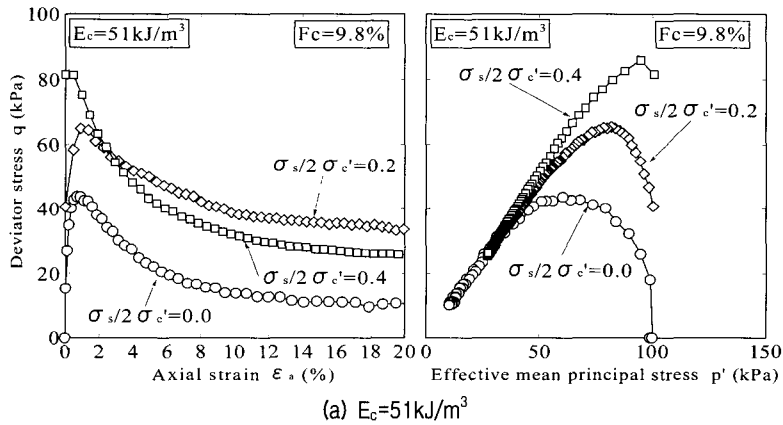


Fig. 11. Relationships between deviator stress and axial strain and the effective stress paths under initial shear stress ( $F_c=9.8\%$ )



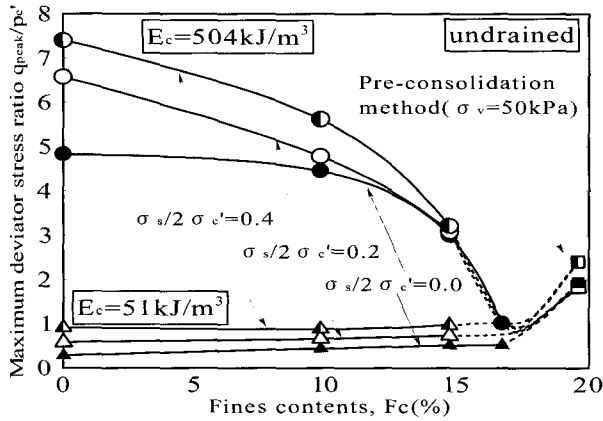


Fig. 12. Relationships between peak deviator stress ratio and fines contents under initial shear stress condition

하여 크게 영향을 받고 있는 것을 알 수 있다. 세립분 함유율의 증가에 대한 영향에 대해서는, 에너지가 낮은 상태에서 축차응력은 작은 쪽으로 증가하며 이것은 비배수 실험의 결과와 동일하게 느슨한 조립분의 골격구조에 세립분만이 증가하면서 밀도자체의 증가에 의해 강도가 증가한 것으로 생각되며, 에너지가 높은 상태에서는 조밀한 골격상태에 세립분이 충만됨에 따라 축차응력이 감소하여  $F_c=14.7\%$ 가 되면 초기전단의 영향은 없지 않으며, 더욱이  $F_c=16.7\%$ 가 될때 강도는 한 점에 집중하는 것을 알 수 있었다.  $F_c=19.6\%$ 의 예압밀 시료에서는 강도가 증가하여 세립분의 매트릭스를 형성하고 있기 때문에 모래의 영향을 거의 받지 않고 있는 것을 알 수 있다.

### 5. 골격구조와 전단강도의 관계

점토혼합토의 정적 삼축압축실험의 결과로부터 전단 강도는 골격구조에 큰 영향을 받으며, 세립분 함유율은

골격구조의 형성과 파괴에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 13(a), (b)에는 비배수조건에서의 실험결과에 대하여 최대축차응력비와 전술한 식 (2)에 의해 계산한 골격간극비의 관계를 나타내었다. Fig. 13(a)에서 나타낸 바와 같이 동일한 골격간극비일 때에는 세립분 함유율의 증가로 인해 전단강도는 증가하며 또, 골격간극비의 증가와 더불어 강도가 감소함을 알 수 있다. 특히,  $e_g=0.75$ 부근에서 세립분 함유율에 따른 큰 강도변화가 나타났다. 또한, 최대간극비  $e_{max}=0.85$ 이상에서는 세립분에 의한 매트릭스의 형성으로 강도 증가가 작은 쪽으로 증가했다.

Fig. 13(b)는 각각의 공시체에 적용한 다짐에너지에 대한 결과로서 Fig. 13에서 알 수 있는 바와 같이 골격간극비가 작을수록 다짐에너지에 따른 강도의 큰 차를 나타내고 있으나 골격간극비가 증가할수록 그 차이는 점차 감소하여  $e_{max}=0.85$ 이상에서는 에너지에 의한 영향을 거의 받지 않고 조립토가 점토중에 부유하고 있는 상태에 도달하여 점토자체의 강도에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

### 6. 결론

본 연구에서는 점토 또는 모래로 구분되지 않는 혼합토에 대하여 세립분 함유율에 대한 영향과 그에 따른 역학적 특성을 파악하기 위하여 활성을 가지고 있는 자연점토와 모래를 혼합하여 모래만으로 이루어진 입상구조부터 세립분이 매트릭스를 구성하는 상태에 이르는 넓은 범위의 공시체를 제작하였으며, 세립분의 영향을 고려할 수 있는 골격간극비를 이용하여 등방압밀 및

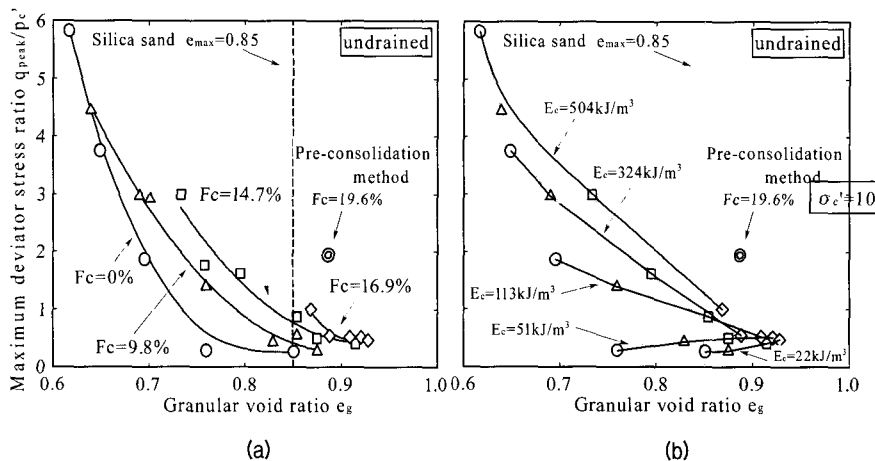


Fig. 13. Strength relationship between undrained monotonic shear tests and granular void ratio

초기 전단응력조건을 재현한 이방압밀조건에 대하여 배수 및 비배수 정적 삼축압축실험을 수행하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 시험 공시체 제작은 혼합토의 활성의 유/무에 따라  $F_c=0\sim 16.7\%$ 에는 다짐방법,  $F_c=19.6\%$  이상에서는 예압밀방법에 의해 다양한 공시체를 제작하였으며 특히, 다짐에너지에 의해  $F_c=0\sim 19.6\%$ 사이에서 다짐공시체 밀도의 상한을 결정하는 것이 가능하였다. 또한, 세립분 함유율  $F_c=19.6\%$  이상이 되면 일정 구속압 하에서 혼합토층의 골격간극비는 일정하게 유지됨을 알았다.
- (2) 배수 및 비배수 삼축압축 실험결과에서 큰 다짐에너지에 의해 조밀한 상태로 골격구조가 형성된 공시체는 세립분의 함유로 인해 조립자 사이에 세립분이 충전되어 윤택역할을 함으로써 강도가 큰 폭으로 감소하며, 낮은 다짐에너지에 의해 골격을 이루고 있는 경우에는 느슨한 골격사이로 세립분 자체만의 증가로 전체적인 밀도의 증가로 인해 적은 강도의 상승을 나타냈다. 이러한 골격의 상태에 따른 강도의 상이한 증감은 세립분 함유율 16.7% 부근에서 한점에 수렴하는 경향을 보이며, 그 이후에는 세립분이 주된 구조를 이루어 세립분의 강도특성에 의존함을 알 수 있었다.
- (3) 이방압밀 조건을 재현한 초기 전단응력에서의 강도 특성은 높은 초기 전단 응력을 받을수록 더 높은 강도를 나타내며, 세립분 함유율이 낮은( $F_c=0\sim 14.7\%$ ) 범위에서 큰 영향을 받는다. 또한, 세립분이 증가함에 따라  $F_c=14.7\%$  이상에서는 초기 전단응력에 의한 영향을 받지 않으며 동일한 강도를 나타내는 것을 알 수 있었다.
- (4) 점토혼합모래의 정적전단강도는 조립자의 골격간극비에 크게 의존하고 있으며 동일한 골격간극비일

때에는 세립분 함유율의 증가로 인해 강도가 증가하며 골격간극비의 증가와 더불어 강도는 감소함을 알 수 있다. 또한, 골격간극비가 작을수록 다짐에너지에 따른 강도는 큰 차이를 나타내고 있으나 골격간극비가 증가함에 따라 그 차이는 점차 감소하여 최대간극비  $e_{max}=0.85$  이상에서는 에너지에 의한 영향을 거의 받지 않고 세립분에 의한 구조가 형성되어 조립토가 점토층에 부유하고 있는 상태로 점토자체의 강도에 크게 의존하고 있는 것으로 나타났다. 본 연구는 Micawa 규사와 Iwakuni 점토에 대한 실험결과로 일반적인 흙에 대한 결과는 아니다.

## 참 고 문 헌

1. 日本港灣協會 (1989), 港灣施設の技術上の基準, 同解説(上), pp.173-174.
2. 倉田進, 藤下利夫(1960), 砂と粘土の工學的性質に関する研究, 運輸省港灣技術研究所 報告, 第 11卷, 第 9号, pp.389-424.
3. Adachi, M., Yasuhara, K. and Shimabukuro, A. (2000), "Influences of sample preparation method on the behavior of non-plastic silts in undrained monotonic and cyclic triaxial tests," Tsuchi-to-Kiso, Vol.48, No.11, 24-27 (in Japanese).
4. Bjerrum, L. (1954), FGeotechnical properties of Norwegian marine clays Geotechnique, Vol.4, No4, pp.49-69.
5. Hyodo, M., Tanimizu, H., Yasufuku, N. And Murata, H. (1994), "Undrained cyclic and monotonic triaxial behaviour of saturated loose sand", *Soils and Foundations*, Vol.34, No.1, 19-32.
6. Hyodo, M., Yamamoto, Y. and Sugiyama, M. (1994), "Undrained cyclic shear behavior of normally consolidated clay subjected to initial static shear stress", *Soils and foundations*, Vol.34, No.4, 1-11.
7. Kenny, T. C. (1977), Residual strengths of mineral mixtures. Proc. 9<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech., Tokyo 1. 155-160.
8. Larsson, R. (1980), Undrained shear strength in stability calculation of embankments and foundations on soft clays, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.17, No.4, pp.591-602.
9. Mitchell, J. K. (1976), *Fundamentals of soil behaviour*, New York; Wiley.
10. Skempton, A.W. (1985), Residual strength of clay in landslides, folded strata and the laboratory, *Geotechnique*, Vol.35, No.1, pp.3-18.

(접수일자 2006. 12. 7, 심사완료일 2007. 3. 6)