

점토혼합모래의 반복전단특성에 대한 세립분 함유율의 영향

Effect of Fines Content on the Cyclic Shear Characteristics of Sand-clay Mixtures

김 옥 기¹ Kim, Uk-Gie

안 태 봉² Ahn, Tae-Bong

효도 마사유키³ Hyodo, Masayuki

Abstract

In this study, cyclic shear characteristics of sand-clay mixtures were analyzed. In order to perform cyclic triaxial tests on sand clay mixtures, natural clays with activity and silica sand were mixed variously to reproduce soils with wide range of grain size compositions. Test specimens with various fines contents were prepared by the moisture compaction and pre-consolidation methods, while paying attention to the void ratio expressed in terms of the sand structure and clay structures, and undrained cyclic shear tests were performed. In the test results, cyclic shear strength decreased with increasing of sand granular void ratio below 20% of fine contents. When the granular void ratio of the test specimen exceeded the maximum void ratio of the silica sand, the clay matrix dominated the soil structure, and soil structures were not influenced by compaction energy. It was observed that, the matrix structure of the coarse particles has great effect on the undrained cyclic shear strength characteristics for sand-clay mixtures, and therefore, it is more appropriate to pay more attention to the density of the sand structure, rather than to the fines content.

요 지

본 연구에서는 모래에서 점토에 이르는 넓은 범위의 혼합시료를 재성형하기 위하여 세립분으로 활성을 가지고 있는 자연점토와 조립분으로 규사를 혼합하여 실험에 이용하였다. 공시체는 세립분함유율이 낮은 범위 즉, 모래입자가 골격구조를 형성하고 있는 범위에 대해서는 다양한 간극비를 조성하기 위해 습윤 다짐방법을 이용하였으며, 활성을 나타내는 범위에 대해서는 정규압밀점토의 일정한 간극비를 조성하기 위해 예압밀방법을 이용하여 다양한 세립분 함유율을 갖는 공시체를 제작하여 비배수 반복 전단실험을 수행하였다. 실험결과, 세립분함유율 20%미만의 시료에서 동일한 세립분함유율의 공시체에 대해 모래 골격간극비가 증가함에 따라 반복 전단강도는 감소하였으며 더욱이, 실험 시료의 골격간극비가 규사의 최대간극비 이상의 범위에서는 흙의 구조가 다짐에너지의 영향을 거의 받지 않고 강도발현의 주체가 점토 매트릭스에 지배되는 것을 알 수 있다. 모래점토 혼합토를 대상으로한 비배수 반복 전단실험에서 세립분 함유율이 20%미만의 낮은 영역에서 조립자의 구조는 반복 전단강도 특성에 큰 영향을 미치며 더욱이, 세립분 함유율보다 모래구조의 밀도에 유의하는 것이 더욱 적합한 것을 알 수 있다.

Keywords : Cyclic shear strength, Fines content, Granular void ratio, Monotonic shear strength, Sand-clay mixture

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

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

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

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

실제 자연지반을 대상으로 설계를 수행 할 경우 간이적으로 사질토로 분류된 지반의 대부분은 세립분을 함유하고 있으며, 이러한 지반은 모래 또는 점토로 명확히 분류되지 않고 중간적인 성질을 가지고 있는 중간토로 분류되는 경우가 많이 존재한다. 이러한 중간토에 관하여 일본에서는 倉田進, 藤下利夫(1960)에 의해 모래와 점토의 경계에 대한 연구결과, 0.05mm이하의 토립자 함유량을 기준으로 하여, 20%이하를 사질토 영역, 40% 이상을 점토영역, 20~40%를 모래와 점토의 중간영역으로 구분하고 있으며, 이 결과는 현재 일본의 항만시설기준(일본항만협회, 1989)에 적용되어 설계에 반영되고 있다. 또한, 최근 현행되고 있는 도로나 철도등에 지침서에는 전단특성을 대상으로 한 액상화판정에서 세립분 함유율 35%이하, 점토 함유율 10~15%이하, 소성지수 15%이하의 범위를 중간토의 기준으로 적용(岡二三生 et al., 2002)하고 있으며 또, 압축/압밀특성을 대상으로 한 경우 점토 함유율 20~50%, 소성지수 NP~30%의 범위를 중간토의 판정지표(日本地盤工学会編, 1992)로 제안하고 있다.

이러한, 세립분을 함유한 모래의 액상화에 관한 기존의 연구로서, Fei(1991)는 1976년 중국의 Tangshan지진의 현장조사에서 실트질 흙의 액상화저항은 세립분의 증가에 의해 증가한다고 하였으며, Chang et al.(1982), Dezfulian(1982)는 실내실험을 통하여 실트나 소성이 낮은 세립분 함유율이 증가할수록 사질토의 액상화강도는 증가한다고 보고하였다. Ishihara and Koseki (1989), Yasuda et al.(1994)는 세립분이나 점토의 명확한 상관관계없이 소성지수가 증가하면 액상화 저항강도도 증가한다고 하였다. 반면, Tronsco and Verdugo(1985)는 광산의 모래를 이용하여 실험한 결과 세립분이 증가할수록 액상화강도는 감소하는 경향이 있다고 하였고, 황대진 등(1993)은 Tyoura sand와 실트를 혼합한 시료를 대상으로 액상화 및 정적 삼축실험을 통하여 실트분의 증가에 의해 액상화 강도는 감소하며, 이는 세립분의 증가에 의해 입자간의 다일레이턴시 저항력의 감소에 원인이 있다고 보고 하였다. Tronsco and Verdugo(1985), Vaid(1994)등은 일정한 간극비나 일정한 건조중량으로 공시체를 제작하여, 실트 함유율이 증가하면 액상화 강도는 감소한다고 보고하였다. Koester(1994)와 Law and Ling(1992)등은 일정한 간극비로 시료를 제작한 액상화

강도는 세립분 함유량이 증가함에 따라 초기에 감소하지만, 어느 일정량의 세립분 함유율을 기준으로 다시 증가한다고 보고 하였다.

이와 같이, 기존 혼합토에 관한 연구에서는 세립분 함유율의 증가에 따라 액상화강도가 증가 또는 감소한다는 상반된 견해가 대두되어 통일적인 해석이 곤란한 상태에 있으며, 최근 이러한 액상화 강도의 증감은 세립분 활성의 유/무에 기인하여 다양한 해석이 이루어지고 있다. 그러나, 이러한 혼합토를 대상으로 한 연구결과에서 모래가 골격구조를 이루고 있는 영역에서는 다양한 모래의 초기구조가 존재하므로 단순히 세립분의 함유량만으로 일관적인 경향을 평가하는 것은 한계가 있다고 판단된다. 지금까지 연구된 많은 액상화에 관한 연구에서 공시체 제작 방법은 연구자에 의해 각기 다르며, 거동을 지배하는 모래의 골격구조에 대한 연구는 그다지 행하여 지지 않았다.

본 연구에서는 활성을 가지고 있는 자연점토와 모래를 혼합하여 습윤다짐법과 예압밀법을 이용하여 모래가 골격구조를 가지고 있는 상태부터 세립분이 매트릭스를 구성하는 상태에 이르기까지 세립분 함유율의 변화에 따른 일련의 비배수 반복전단시험을 수행하였다. 특히, 실험결과를 이용하여, 세립분 함유율이 낮은 점토 혼합모래의 영역에 대하여 모래골격과 세립분 함유율에 착안하여 점토혼합모래의 반복전단특성을 평가하였다.

2. 시료 및 시험방법

2.1. 시료의 물리적 성질

본 실험에서는 입도조정된 Micawa 규사와 일본 Yamaguchiken Iwakuni항에서 채취한 해성점토인 Iwakuni clay를 다양한 비율로 혼합하여 넓은 범위의 세립분 함유율을 갖는 공시체를 제작하였다. 먼저, Micawa 규사를 체가름하여 균등한 입도를 갖는 V5호, R5.5호, V6호, V3호로 각각 분류하였으며, 이상적인 입도분포를 조성하기 위하여 건조중량비로 각각 1 : 2 : 2 : 5의 비율로 혼합하였다. 이와 같이 입도조정된 규사의 최대간극비 및 최소간극비는 각각 $e_{max}=0.850$, $e_{min}=0.524$ 이다. 한편, Iwakuni clay는 조립분과 조개껍질 등의 이물질을 제거하기 위하여 0.425mm체로 체가름하였으며, 입도조정 후의 입도조성은 세립분 98.0%, 점토분 38.8%이며 소성지수 47.5%의 중소성점토로 분류된다.

Fig. 1은 실험에 이용한 시료에 대한 입도 분포곡선으로 그림에 나타난 바와 같이 입도조정된 규사와 Iwakuni clay를 건조중량비로 100 : 0, 90 : 10, 85 : 15, 83 : 17, 80 : 20, 70 : 30, 50 : 50, 0 : 100의 8종류로 혼합하여 사질토에서 점성토에 이르는 다양한 공시체를 제작, 실험에 이용하였다.

실험에 이용한 시료의 세립분 함유율에 따른 물리적 성질을 Table 1에 나타내었다. 표에 나타난 바와 같이, 세립분 함유율 F_c 가 19.6%이상의 혼합토에서는 활성을 가지고 있지만 $F_c=19.6\%$ 미만에서는 비소성인것을 알 수 있으며, Iwakuni clay는 자체적으로 약 2%의 모래를 함유하므로, Iwakuni clay 함유율 100%시료의 세립분 함유율은 98%가 된다. 따라서 실험에 이용한 모든 공시체의 세립분 함유율은 Iwakuni clay 함유율보다 낮게 조성되어 있다.

2.2. 공시체 제작방법 및 실험조건

실험에 이용한 공시체 제작은 먼저, Iwakuni clay 함유율 20%이상의 시료에 대해서 액성한계의 약 2배에 해당하는 함수비로 교반 후 슬러리 상태의 시료를 예압

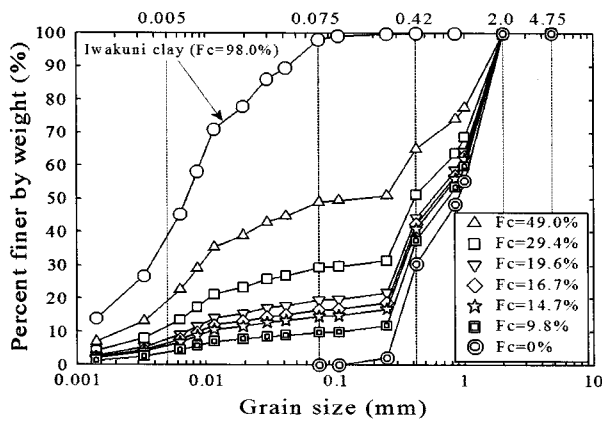


Fig. 1. Grain size distribution curves of samples used

Table 1. Physical properties of the samples used

Iwakuni Clay Content (%)	Fines Content (%)	Clay Content (%)	Specific Gravity G_s	Plasticity Index I_p	Mean Diameter D_{50} (mm)	Uniformity Coefficient U_c
100	98.0	38.8	2.610	47.5	0.007	-
50	49.0	19.4	2.631	31.4	0.140	-
30	29.4	11.6	2.644	28.65	0.415	165.85
20	19.6	7.8	2.644	14.62	0.55	125.71
17	16.7	6.6	2.645	NP	0.61	105.68
15	14.7	5.8	2.646	NP	0.64	83.64
10	9.8	3.9	2.648	NP	0.71	11.25
0	0.0	0.0	2.652	NP	0.88	3.79

밀셀에 넣고 정규압밀상태의 조건을 재현하기 위해 연직압력 50kPa로 재하하여 예압밀시킨 후 직경 5cm, 높이 10cm의 치수로 성형하였다. 한편, 점토함유율 20%미만의 시료에 대해서는 다양한 상대밀도와 모래 골격 구조를 갖는 공시체를 조성하기 위하여 철제램머를 이용한 습윤 다짐공시체 제작법을 이용하였으며, 몰드안에 시료를 5층으로 나누어 투입하고, 한층씩 램머를 이용하여 과소다짐법(under-compaction)으로 소정의 에너지를 가하여 성형하였다.

다짐에너지 E_c 는 식(1)에 의해 계산하였으며 여기서, W_R 은 램머의 중량(kN), H는 낙하높이(m), N_L 은 다짐 층수(=n), N_B 는 한층의 다짐횟수, V는 다짐몰드의 체적(m³)을 나타내며 다양한 밀도를 갖는 공시체를 제작하기 위하여 각각의 시료에 대하여 다짐횟수와 낙하높이를 변화시킴으로써 다짐에너지를 조정하였다(Adachi et al., 2000).

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

Table 2에 공시체에 제작시, 적용한 다짐횟수와 낙하높이 및 다짐에너지를 나타냈다. Table 2에서 나타난 바와 같이, 22KJ/m³부터 504KJ/m³까지 5종류의 다짐에너지를 설정하였으며, 최소 다짐에너지 $E_c=22KJ/m^3$ 의 경우 램머의 낙하높이를 5cm로 설정하였고, 그 이외의 경우는 18.4cm로 설정하여 에너지를 조정하였다. 약간의 습윤상태에 있는 모래 시료에 대해 가장 낮은 에너지로 다짐한 결과, 조립자의 표면장력에 의해 입도조성한 규사의 기진상태에서 측정된 최대간극비를 넘는 아주 느슨한 공시체를 제작하는것이 가능하였다. 5종류의 다짐에너지를 이용한 공시체의 압밀전 초기 상대밀도는 각각 -25%, 15%, 40%, 60%, 70%이다.

다짐공시체 제작시 시료의 함수비는 11%로 통일하

Table 2. Tamping method for preparation of specimens

E_c (kJ/m ³)	Number of dropping per a layer					Height dropping weight(m)	Weight of rammer (kN)
	1 st layer	2 nd layer	3 rd layer	4 th layer	5 th layer		
504	60	80	100	120	140	0.184	0.00116
324	40	50	65	75	85	0.184	0.00116
113	14	19	23	25	29	0.184	0.00116
51	4	7	10	13	16	0.184	0.00116
22	5	10	15	25	30	0.05	0.00116

였으며, 이것은 다짐을 효과적으로 행하기 위한 것과 실험에 사용한 Iwakuni clay의 고유한 성질을 변화시키지 않게 하기 위해 설정하였다. 또한, 세립분이 함유되고 다짐에너지가 적용된 공시체의 특성상, 이산화탄소를 공시체내에 주입시키고 혼합토의 포화를 위한 통수과정에서 세립분이 함유되고 다짐에너지가 적용된 본 실험공시체의 특성에 적절한 함수비로 생각된다(Nacini, S.A.,2004).

2.3. 점토혼합모래의 골격구조

점토혼합모래의 특성은 각기 성질이 다른 두가지 시료가 혼합되어 있으므로, 그 구조의 주체가 조립토인 경우와 세립토인 경우로 나누어서 파악하는 것이 가능하다. 세립분 함유율이 낮아 모래의 조립분이 형성하는 골격이 전체구조의 주체가 되는 경우는 어느 정도의 세립분이 함유되어도 골격을 형성하는 모래입자의 간극사이에 세립토가 존재하는 상태이므로 모래골격의 간극비는 영향을 받지 않는다. 이 경우 혼합토의 강도주체는 모래골격의 간극비에 지배된다고 생각할 수 있다. 한편, 세립분 함유율이 어느 일정량 이상이 되면 조립토의 접촉면이 이격되어 세립토만의 매트릭스가 구성되고, 모래입자가 그 안에 산재하는 상태가 되며, 이때 혼합토의 강도주체는 세립토가 가지고 있는 성질에 지배된다. 따라서, 점토혼합모래의 강도특성은 단순히 세립분 함유율만이 아닌 조립토의 골격구조가 큰 영향을 미치고 있다고 고려되므로 적절한 평가를 행하기 위해서는 골격을 구성하는 조립토만의 밀도에 착안할 필요성이 있다고 판단된다(김육기, 2007).

따라서, 본 연구에서는 조립토 접촉면의 입자마찰에 의한 골격구조가 강도특성에 주된 영향을 미치고 있다는 전제로 세립토가 혼합된 공시체의 전체 질량보다도, 세립분을 토립자가 아닌 간극으로 간주하여 세립분의 영향을 무시한 모래골격간극비(Granular void ratio)의

개념에 착안하였다. 조립자만으로 형성된 골격의 상태를 표현하는 식 (2) (Mitchell 1976., Kenny 1977)를 이용하여 조립자만으로 형성된 골격구조의 상태를 파악하고자 하였다.

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

여기서, e_s : 골격간극비,

V_v : 간극의 체적,

V_{sc} : 세립분의 체적,

V_{ss} : 조립분의 체적을 각각 나타낸다.

Fig. 2(a), (b)에는 공시체의 압밀전과 100kPa의 구속압으로 압밀시킨 후의 골격간극비와 세립분 함유율의 관계를 각각 나타내었다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 $F_c=0\sim 16.7\%$ 의 시료에 대해서는 단계적인 다짐에너지 $E_c=22, 51, 113, 324, 504, 1008\text{kJ/m}^3$ 를 가하여 공시체를 제작 하였으며, 식 (3)에 나타난 골격간극비 개념을 이용한 골격상대밀도를 이용하여 초기 골격상대밀도를 $D_{rs}=25, 15, 40, 60\%$ 로 조정하여 두가지 조건으로 공시체를 제작하였다.

$$D_{rs} = \frac{e_{\max,HS} - e_s}{e_{\max,HS} - e_{\min,HS}} \quad (3)$$

여기서, $e_{\max,HS}$ 와 $e_{\min,HS}$: Host sand 규사의 최대, 최소 간극비, e_s : 골격간극비를 각각 나타낸다.

다짐에너지 적용에서 최대 다짐에너지가 504kJ/m^3 이상으로 표기되어 있는 것은 504kJ/m^3 이상의 다짐에너지를 적용시켜도 골격간극비의 변화는 일어나지 않고 일정하게 나타났다. 따라서, 실험에서 이용한 램머로 이 이상의 높은 밀도의 공시체를 제작하는 것은 불가능하며, 이때의 골격간극비를 실험에서 이용한 골격간극비의 최소값으로 하였다. Fig. 2(b)에서 다짐에너지를 적용시킨 공시체는 세립분 함유율의 증가에 따라 골격간

극비는 증가하여 규사의 최대 간극비에 근접하는 경향이 나타나며, 골격간극비는 16.7%부근에서 한점으로 수렴되어 이 이상의 세립분 함유율에 대해서는 예압밀법의 적용에 의해 골격간극비가 일정하게 증가되었다. 이러한 일련의 세립분 함유율의 변화를 통해 공시체의 골격구조에 착안하면 $F_c=0\%$ 일때, 모래입자만으로 골격이 형성되어진 구조가 세립분 함유율의 증가에 따라 모래의 간극안에 세립토가 증가하여 모래입자의 맞물림을 감소시켜 골격구조의 강도를 잃게 하는 것으로 생각할 수 있다. 공시체의 골격간극비가 규사의 최대 간극비 $e_{max}=0.85$ 이상이 되었을때 모래의 간극에 세립분이 완전히 충전된 상태에 있는 것으로 고려할 수 있다. 이와 같은 결과에 의해, 규사의 최대간극비를 기준으로 $e_{max}=0.85$ 이하의 공시체는 모래입자가 골격을 형성하여 구조의 주체를 이루고 있고, $e_{max}=0.85$ 이상의 골격간극비를 갖는 공시체는 구조의 주체가 점토 매트릭스에 의해 지배하고 있다고 생각할 수 있다.

또, 다짐에너지 22KJ/m^3 의 공시체는 압밀전 표면장력에 의한 토립자의 느슨한 접촉으로 인해 부유해 있는 것과 같은 상태로써 규사의 최대간극비를 넘는 가장 느슨한 골격간극비를 나타내며, 구속압에 의한 압밀후에는 입자의 접촉비율이 증가하여 골격간극비가 감소하고

규사의 최대간극비($D_r=0\%$)에 근접하고 있다.

Fig. 3(a), (b)는 $F_c=0\sim 30\%$ 의 범위에서 제작한 공시체에 대한 압밀후의 간극비와 세립분 함유율의 관계를 나타내었다. Fig. 3(a)에서 다짐에너지가 비교적 낮은 $E_c=22, 51\text{KJ/m}^3$ 를 적용한 경우 상대밀도 30%이하의 느슨한 모래에 세립분 함유율이 증가함에 따라 밀도 자체가 증가하여 간극비가 선형적으로 감소하는 경향이 나타났으나, $113\sim 504\text{KJ/m}^3$ 의 공시체에서는 세립분 함유율 10~15%에서 가장 작은 값을 나타내며, 세립분이 증가할수록 간극비가 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 다짐 에너지가 높은 상대밀도 50%이상의 비교적 조밀한 모래에 간극이 큰 점토세립분이 함유되어 $F_c=15\%$ 이상이 되면 모래의 함유량이 감소하므로 오히려 간극비가 증가하기 시작되는 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 3(b)의 골격 상대밀도를 통일시킨 공시체는 세립분 함유율의 증가에 따라 간극비가 직선적으로 감소하고 있는 경향을 나타내었다. Fig. 3(a)의 간극비와 세립분 함유율의 관계에서도 $F_c=16.7\%$ 부근에서 공시체의 간극비는 한점에 수렴되어 Fig. 2와 유사한 경향을 보였으나 세립분 함유율에 대한 간극의 일정한 관계를 나타내기에는 무리가 있었다. 이와 같은 결과를 근거로 혼합토에 대해 세립분을 간극으로 간주한 골격 간극비 개념을 이용한 접근이 타당성이 있는 것을 알 수 있다.

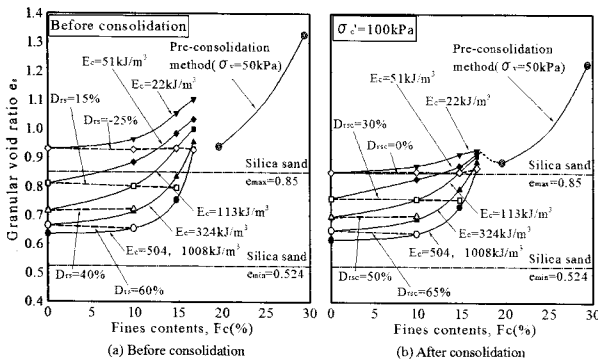


Fig. 2. Relationship between granular void ratio e_s and fines contents F_c for samples before and after consolidation

2.4. 실험방법

본 실험에 사용한 시험기는 일본 Kyusyu MARUTO 사의 전/공 서보식 반복 삼축시험기로 하중진폭일정의 0.001~0.5Hz 주파수로 재하가능한 공압제어식 반복 삼축시험장치를 이용하여 재하주파수 0.02Hz, 유효구속압 100kPa의 구속압일정 조건으로 비배수 반복전단시험을 수행하였다. 순수한 모래를 대상으로 한 반복 전단 삼축에 있어서 재하주파수는 액상화강도에 커다란 영향을 미치지 않지만(安田, 曾我., 1984) 점성토의 경우 반복 전단강도는 재하주파수의 상승에 따라 강도가 높게 평가되는 것으로 알려져 있다(山本, 兵動., 1999). 점성토의 반복 전단강도 특징인 재하속도의 의존성을 고려하기 위해 재하주파수를 0.02Hz로 적용하였다. 이러한 근거로 모래구조에서 점토성분의 매트릭스까지 세립분 함유율을 증가시킨 시료를 이용한 본 연구에서 점토혼합모래의 반복전단특성에 대하여 균일한 평가를 하기 위해 재하주파수를 0.02Hz로 설정하였다.

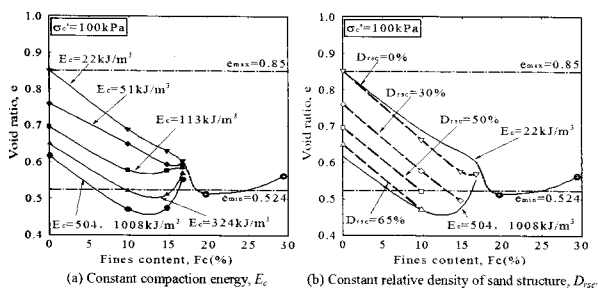


Fig. 3. Relation between void ratio and fines content at constant compaction energies and granular relative densities

3. 실험결과와 고찰

3.1. 비배수반복전단강도 특성

다짐 및 예압밀법으로 제작한 점토혼합모래 공시체에 구속압 $\sigma_c' = 100 \text{ kPa}$ 을 가한후 재하주파수 0.02Hz의 반복축하중으로 비배수 반복 삼축압축시험을 수행하였다. 대표적으로 다짐에너지 $E_c = 22, 504 \text{ kJ/m}^3$ 로 성형한 공시체에 대한 축변형률과 축차응력 및 유효응력의 관계를 Fig. 4(a), (b)에 각각 나타내었다. Fig. 4에서 다짐에너지가 낮은 22 kJ/m^3 의 공시체의 밀도는 가장 느슨한 상태에 있으며 특히, 세립분을 함유하지 않은 $F_c = 0\%$ 에서 유효응력이 0에 근접할수록 축변형이 순간적으로 급격히 발달하여 파괴에 이르는 유동거동을 나타내고 있다. $F_c = 9.8\%$ 와 14.7% 는 서로 유사한 거동을 나타내고 있으며, 초기 유효응력 감소량도 세립분 함유율에 그다지 영향을 받지 않고 동일한 거동을 나타내고 있다. 반면, 다짐에너지가 높은 504 kJ/m^3 에서는 세립분 함유율의 증가에 따라 축변형률의 폭이 증가하며, 반복횟수의 증가와 함께 축변형이 서서히 발달하여 최종적으로 완전히 액상화에 이르고 있지만, 액상화에 따른 급속한 축변형률의 발달은 나타나지 않았다.

Fig. 5는 골격상대밀도를 $D_{rsc} = 0\%$ 로 일정하게 적용한 공시체의 축변형률과 축차응력 및 유효응력의 관계를

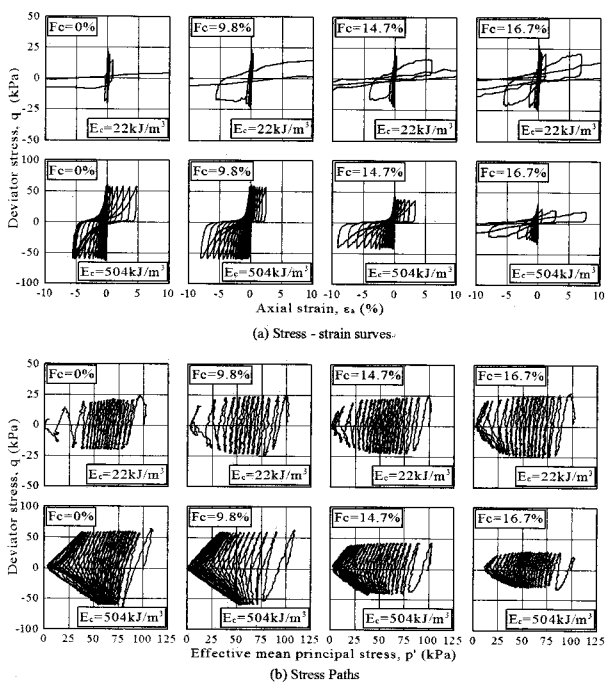


Fig. 4. Stress-strain relations and stress paths for $E_c = 22$ and 504 kJ/m^3 specimens

나타낸다. Fig 5에서는 F_c 가 증가할수록 액상화에 이르는 반복횟수가 증가하고 있으며, 이와 같은 경향은 골격상대밀도를 일정하게 적용시킨 모든 공시체에서 동일한 결과가 나타났다.

Fig. 6(a), (b)는 다짐에너지 $E_c = 22, 504 \text{ kJ/m}^3$ 를 적용한 공시체와 압밀후 골격상대밀도가 0, 65%로 일정한 공시체에 대한 반복전단응력비($\sigma_d/2\sigma_c'$)와 양진폭 축변형률 $\epsilon_{DA} = 5\%$ 발생에 필요한 반복횟수(N)의 관계를 각각 나타냈다. Fig. 6(a)에서 다짐에너지가 높은 504 kJ/m^3 에서는 세립분 함유율의 증가에 따라 반복전단강도가 큰 폭으로 감소하며 특히, $F_c = 14.7\%$ 에서는 $F_c = 0, 9.8\%$ 와 비교하여 액상화강도가 현저히 감소하였다. 반면, 에너지가 낮은 22 kJ/m^3 에서는, 세립분 함유율의 증가와 더불어 반복 전단강도가 약간 증가하는 경향이 나타났다. Fig. 6(b)에서 골격상대밀도를 0%로 일정하게 적용한 경우, 반복전단강도는 세립분 함유율의 증가와 함께 증가하는 경향이 나타났다. 특히, $F_c = 0\%$ 와 9.8% 이상의 강도차이는 크게 나타나며 세립분을 함유한 경우와 함유하지 않은 것과의 강도차는 뚜렷이 나타났다. 또한, 골격상대밀도를 65%로 통일시킨것에 대해서는 세립분의 증가로 반복강도가 급격히 증가하고 있으므로, 골격간 극비가 동일한 경우 모래골격의 간극안에 존재하는 세

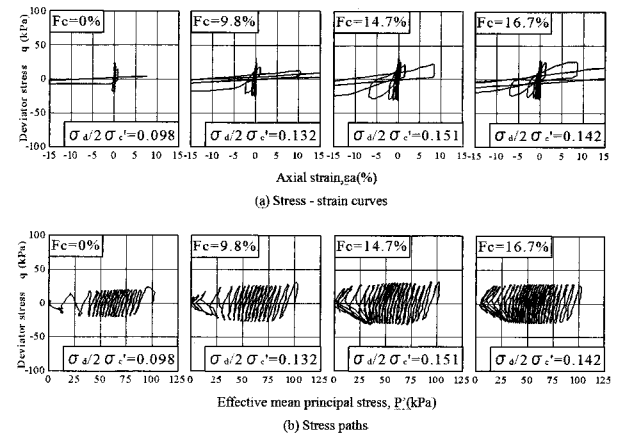


Fig. 5. Stress-strain relations and stress paths for specimens constant relative density of sand structure, $D_{rsc} = 0\%$

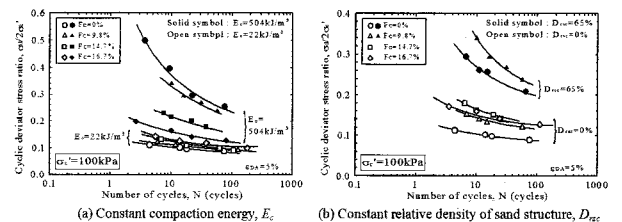


Fig. 6. Cyclic shear strength curves

립분이 반복전단강도에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 반복 전단응력비($\sigma_d/2\sigma_c'$)와 반복횟수(N)의 관계에서 반복횟수 20회 일때의 반복 전단응력비를 반복 전단강도비 $R_L(N=20)$ 로 나타내어, 세립분 함유율과 골격간극비가 반복 전단강도에 미치는 영향을 검토하였다.

Fig. 7(a)에서 에너지가 높은 공시체일수록 세립분 함유율의 증가와 함께 액상화강도가 급격히 감소하는 경향이 나타났다. 이것은 조밀한 모래골격을 갖는 구조일수록 간극비가 작아 세립분의 증가에 의해 골격구조가 무너지기 쉬운것으로 판단된다. 한편, 에너지가 낮은 공시체에서는 큰 차이를 보이지 않지만 약간의 강도상승을 나타내고 있다. 이것은 느슨한 골격상태에서 세립분의 증가로 인한 공시체 자체의 밀도 증가에 의한 것으로 고려된다. Fig. 7(b)에서 골격상태밀도가 일정한 공시체는 모든 경우에서 세립분 함유율의 증가에 따라 반복 전단강도가 증가하고 있다. 이것은, 일정한 골격상태밀도를 유지하기 위해 세립분이 증가함에 따라 골격을 이루는 모래의 양도 함께 증가하므로 골격이 무너지지 않는 상태에서 간극중에 세립분이 충전되어 공시체 전체의 밀도가 증가되었기 때문이라고 판단된다. 이는 동일한 조건의 점토혼합모래 시료에 대한 비배수 및 배수 삼축 압축실험 결과와도 유사한 경향의 결과가 나타난다(김육기, 2007).

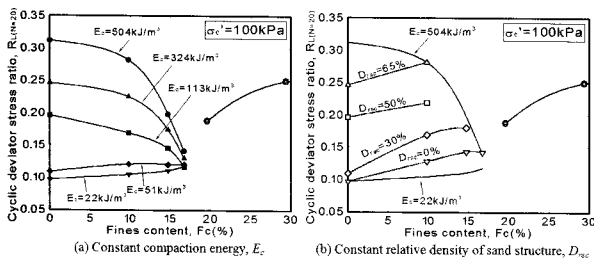


Fig. 7. Relationship between $R_L(N=20)$ and F_c for compaction energy and granular void

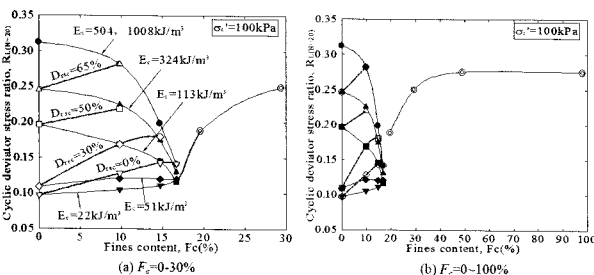


Fig. 8. Relation between cyclic shear strength ratio and fines content

Fig. 8(a)에는 Fig. 7의 $F_c=0\sim 30\%$ 까지의 다짐에너지 방법에 대한 총괄적인 결과와 (b)에는 $F_c=0\sim 100\%$ 범위의 모든 반복전단시험결과에 대해 반복 전단응력비와 세립분함유율의 관계를 나타냈다. Fig. 8(b)에서 $F_c=19.6\%$ 이상의 공시체에서는 세립분 함유율의 증가에 따라 반복전단강도가 일정하게 유지되는 양상을 나타내며, 이는 $F_c=19.6\%$ 이상의 공시체는 세립분이 매트릭스를 형성하여 세립분구조의 영향을 받으며, 특히 $F_c=30\%$ 이상에서는 모래입자의 영향은 없어지고 점토의 고유 강도를 나타내고 있는것을 알 수 있다.

3.2. 골격구조와 반복전단강도의 관계

Fig. 9에는 모래의 다양한 밀도를 나타내는 세립분 함유율 20%이하의 시료에 대하여 반복전단강도비 $R_L(N=20)$ 와 골격간극비(e_s)의 관계를 나타내었으며, Fig. 9(a)에는 세립분 함유율에 대한 영향, Fig. 9(b)에는 다짐에너지에 대한 영향을 각각 나타냈다. Fig. 9에서 규사의 최대 골격간극비 $e_{max}=0.85$ 를 점선으로 표기하였다. 모래가 강도 발현의 주체가 되는 $F_c=19.6\%$ 이하의 반복 전단강도는 골격간극비에 크게 의존하고 있으며, 골격간극비의 증가에 따른 강도의 저하가 현저하게 나타났다. 골격간극비가 작은 경우에는 세립분함유율에 의한 강도의 차이가 작게 나타나며, 골격간극비 0.75 부근에서는 세립분이 골격의 간극을 충전시켜 공시체의 밀도가 높아지므로 세립분함유율의 증가에 따른 강도의 증가가 크게 되었다. 골격간극비가 규사의 최대간극비를 넘는 $e_{max}=0.85$ 이후에는 구조의 주체가 세립분의 매트릭스에 지배되기 때문에 반복전단강도의 차이는 거의 나타나지 않았다. 또한, 예압밀법으로 제작한 $F_c=19.6\%$ 는 다짐공시체의 강도보다 높은 반복전단강도를 나타내고 있다. 이는 규사의 최대간극비를 넘은 부분에서 모래가 골격을 잃기 시작하여 세립분이 구조의 주체를 이루고 있고, 공시체 제작방법의 영향이라 고려된다. 예압

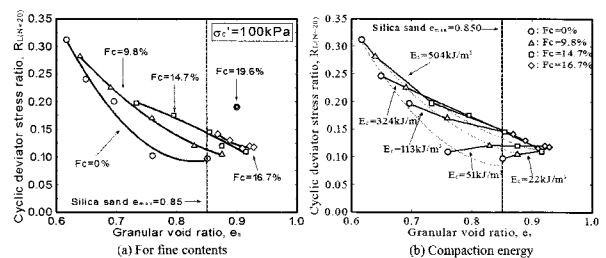


Fig. 9. Relationship between $R_L(N=20)$ and e_s for samples

밀 공시체의 경우 장기적인 압밀하중의 적용에 의해 다짐방법을 적용한 공시체보다 더 조밀한 점토구조를 가지고 있고, 상대적으로 다짐공시체의 간극안에 존재하는 세립토는 미압밀상태가 되어, 느슨한 모래구조가 지배적으로 된다고 고려된다. 이러한 이유로 세립토가 구조의 주체가 되는 영역에서는 세립토의 압밀정도의 시간의존성이 반복전단강도에 큰 영향을 미치고 있다고 판단된다. Fig. 9(b)에서는 골격간극비가 작을수록 다짐에너지에 따른 액상화강도의 큰차를 나타내고 있으며, 골격간극비가 증가 할수록 강도의 차는 점차 감소하여 모래의 최대 간극비 $e_{max}=0.85$ 이상에서는 다짐에너지에 의한 영향을 거의 받지 않고 조립토가 점토중에 부유하고 있는 상태에 도달하여 점토자체의 강도에 영향을 받는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 점토혼합모래에 대하여 모래의 골격구조와 세립분 함유율이 액상화 강도에 미치는 영향과 특성을 파악하기 위해 활성을 가지고 있는 자연점토와 모래를 혼합하여 모래만으로 이루어진 입상구조부터 세립분이 매트릭스를 구성하는 상태에 이르는 다양한 공시체를 제작하였으며, 세립분의 영향을 고려할 수 있는 골격간극비(Granular void ratio)개념을 이용하여 반복전단 삼축압축실험을 수행하였으며 실험에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 점토혼합모래의 비배수 반복전단강도는 모래가 골격을 형성하고 있는 $F_c=0\sim 20\%$ 의 영역에서는 모래의 골격구조가 강도발현의 주체가 되며, $F_c=20\%$ 이상에서는 점토분의 매트릭스구조가 강도발현의 주체가 되어 점토자체의 강도에 의해 지배된다. 또, $F_c=30\%$ 이상에서 반복 전단강도는 일정하게 나타나 점토와 동일한 강도를 나타낸다.
- (2) $F_c=0\sim 16.7\%$ 에 대한 반복전단강도는 높은 다짐에너지를 적용한 공시체의 경우, $F_c=0\%$ 의 조밀한 모래 상태에서는 세립분 함유율의 증가에 따라 모래의 골격구조가 느슨하게 이격되어 강도는 급격히 감소하며, 낮은 다짐에너지의 경우는 공시체밀도의 증가에 의해 약간의 강도증가를 나타낸다. 골격상대밀도를 일정하게 통일시킨 공시체는 세립분 함유율의 증가에 따라 조립토도 같은 비율로 증가하여, 조립토의

골격이 유지된 상태에서 간극에 세립토가 충전되어 공시체의 밀도증가에 의해 강도가 증가하였다.

- (3) 전단강도는 골격간극비에 크게 의존하며, $F_c=0\sim 16.7\%$ 영역에서 강도는 감소하고 규사의 최대간극비 이상에서는 골격간극비가 증가할수록 세립분 함유율에 따른 강도의 차는 점차 감소하며, 다짐에너지에 의한 영향 또한 받지 않고 강도가 한점에 수렴되었다. 한편, $F_c=20\%$ 에서는 예압밀법에 의한 점토의 시간의존성에 의해 동일한 골격간극비에서 강도의 차이가 나타나는 것을 알 수 있다.
- (4) 점토혼합모래에서 세립분 함유율이 낮은 영역에서는 동일한 세립분 함유율에 대하여 다양한 골격간극비를 가지며 이에 따른, 반복전단강도는 조립자가 형성하는 골격에 크게 영향을 받아 세립분 함유율보다는 모래구조의 밀도에 착안해야 하며, 세립분 함유율이 높은 영역에서는 점토자체의 강도를 나타내지만, 재성형 공시체의 제작방법 및 세립토의 압밀 상태에 대한 영향을 받는다. 이와같은 사항을 기본으로 향후 점토-모래 혼합토에 대한 연구를 진행하는 것이 바람직하다고 생각된다.

참고 문헌

1. 김옥기, 안태봉, 효도 마사유키, 백원진., (2007). “점토와 모래의 혼합토의 정적 전단거동에 대한 세립분 함유율의 영향”, 한국 지반공학회 논문집 제23권, 4호, pp.91-100.
2. 황대진, 야나기사와, 칸노., (1993). “실트를 함유한 모래의 전단 특성에 대하여”, 일본 토목학회 논문집, No. 468/III-22, pp.25-33.
3. 倉田進, 藤下利夫., (1960). “砂と粘土の工学的性質に関する研究”, 運輸省港湾技術研究所報告, 第11卷, 第9号, pp.389-424.
4. 安田, 曾我., (1984). “液状化特性に与える振動数等の影響”, 第19回土質工学研究発表会, pp.549-550.
5. 日本港湾協会., (1989). “港湾施設の技術上の基準”, 同解説(上), pp.173-174.
6. 山本, 兵動., (1999). “粘性土の繰返しせん断強度・塑性指数關係に及ぼす載荷周波数の影響”, 第34回地盤工学研究発表会, Vol. 1., pp.1059-1060, 1999.
7. 地盤工学会編., (1992). “ジオテクノート2中間土-砂か粘土か-”, (財)日本地盤工学会.
8. 岡二三生, 角南進, 山本陽一., (2002) “液状化メカニズム・予測法と設計法4.液状化判定法(その1)”, 土と基礎, vol.50, No.8, pp. 51-52.
9. 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, pp.24-27 (in Japanese).
10. Chang, N.Y., Yeh, S.T., and Kaufman, L.P., (1982). “Liquefaction Potential Of Clean And Silty Sands” proceedings of the 3rd International Earthquake Microzonation Conference, Seattle, USA,

Vol.2, pp.1017-1032.

11. Dezfulian, H., (1982). "Effects of Silt Content on Dynamic Properties of Sandy Soils" Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, USA, pp.63-70.
12. Fei, H.C., (1991). "The Characteristics of Liquefaction Of Silt Silt" Soil Dynamics and Earthquake Engineering V, Computational Mechanics Publications, Southhampton, pp.293-302.
13. Ishihara, K., and Koseki., (1989). "Discussion On the Cyclic Shear Strength Of Fines Containing Sands" Earthquakes Geotechnical Engineering, Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering , Rio De Janiero, Brazil, pp.101-106.
14. Kenny, T. C., (1977). Residual strengths of mineral mixtures. Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech., Tokyo 1. 155-160.
15. Koester, J.P., (1994). "The Influence Of Fine Type And Content On Cyclic Strength" Ground Failures Under Seismic Conditions, Geotechnical Special Publication No.44, ASCE, pp.17-33.
16. Law, K.T. and Ling, Y.H., (1992). "Liquefaction Of Granular Soils With Non-Cohesive and Cohesive Fines" Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam, pp.1491-1496.
17. Mitchell, J. K., (1976). Fundamentals of soil behaviour, New York; Wiley., pp.174.
18. Naeini, S. A., (2004). "Effect of fines content on steady-state strength of mixed and layered samples of a sand" Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24, pp.181-187.
19. Tronco, J.H., and Verdugo, R., (1985). "Silt Content And Dynamic Behavior Of Tailing Sands" Proceedings. Twelfth International Conference on Soil Mech and Found. Eng., San Francisco, USA, pp.1311-1314.
20. Vaid, V.P., (1994). "Liquefaction Of Silty Soils" Ground Failures Under Seismic Conditions, Geotechnical Specila Publication No. 44, ASCE, pp.1-16.
21. Yasuda, S., Wakamatsu, K., Nagase, H., (1994). "Liquefaction Of Artificially Filled Silty Sands" Ground Failures Under Seismic Conditions, Geotechnical Special Publication No.44, ASCE, pp. 91-104.

(접수일자 2007. 6. 14, 심사완료일 2008. 1. 8)