

모래-세립분 혼합토에 대한 반복전단강도특성 평가

Evaluation of Cyclic Shear Strength Characteristics of Sands Containing Fines

김 옥 기¹ Kim, Uk-Gie

김 동 욱² Kim, Dong-Wook

이 준 용² Lee, Joon-Yong

김 주 형³ Kim, Ju-Hyong

Abstract

In most design codes, soils are classified as either sandy or clayey soils, and appropriate design equations for each soil type are used to estimate their soil behaviour. However, sand-fine mixtures, which are typically referred to as intermediate soils, are somewhere at the middle of sandy or clayey soils, and therefore a unified interpretation of soil behaviour is necessary. In this paper, a series of cyclic shear tests were carried out for three different combinations of sand-fine mixtures with various fines content. Silica-sand mixture and fines (Iwakuni natural clay, Tottori silt, kaolinite) were mixed together with various mass ratios, while paying attention to the changes of void ratios expressed in terms of sand structure. The cyclic shear strengths of the mixtures below the threshold fines content were examined with the increasing fines contents. As a result, as the fines contents increased, their cyclic deviator stress ratios decreased for dense samples while it increased for loose samples. Additionally, cyclic deviator stress ratio of the mixtures was estimated using the concept of equivalent granular void ratio.

요 지

토질분류법에서 흙은 크게 사질토와 점성토로 분류되며, 실제 설계에서도 이와 같이 분류된 흙 종류에 따라 다른 예측식을 사용하여 흙의 거동을 평가하고 있다. 그러나, 모래-세립분 혼합토는 전형적으로 중간토(intermediate soil or transitional soil)로 구분되어 모래와 점토의 중간적인 성질을 나타내기 때문에, 이러한 혼합토에 대한 거동특성을 평가할 수 있는 기준이 필요하다. 본 논문에서는 입도분포를 조정하여 특정 모래에 세 가지 종류의 세립분으로 구성된 다양한 세립분함유율을 갖는 시료를 대상으로 일련의 반복 삼축압축시험을 수행하였다. 모래가 골격을 이루는 간극비(골격간극비)를 고려하여, Silica sand와 세립분(Iwakuni natural clay, Tottori silt, kaolinite)을 다양한 건조 중량비로 혼합하여 그 특성을 파악하였으며, 실험결과로 전환 세립분함유율(threshold fines content)을 넘지 않는 혼합토의 반복전단강도를 세립분 함유율 증가에 따라 평가하였다. 그 결과, 반복 전단응력비는 세립분 함유율 증가에 따라 조밀한 시료에서는 감소, 느슨한 시료에서는 증가하는 결과를 나타냈으며, 혼합토의 반복전단응력비를 등가골격간극비의 개념을 이용하여 평가했다.

Keywords : Equivalent granular void ratio, Fines content, Liquefaction resistance, Sand skeleton structure, Sand-fines mixtures

1 정회원, 한국건설기술연구원 박사후 연구원 (Post-Doctoral Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, KICT, Tel: +82-31-910-0747, Fax: +82-31-910-0211, ugkim@kict.re.kr, 교신저자)

2 정회원, 한국건설기술연구원 박사후 연구원 (Post-Doctoral Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, KICT)

3 정회원, 한국건설기술연구원 연구위원 (Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Division, KICT)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

토질분류법은 흙의 세립분함유율 50%를 기준으로 그 이상일 경우 점성토, 그렇지 않을 경우를 사질토로 구분하고 있으며, 실제 설계에서도 점성토와 사질토에 따라 다른 설계공식이 제시되고 있다. 그러나, 사질토로 분류된 지반의 대부분은 세립분을 함유하고 있으며, 실제 자연지반에서도 모래, 실트, 점토 등의 입경과 성질이 서로 다른 토립자가 복잡하게 혼재하고 있어 흙을 간단히 “모래” 또는 “점성토”로 분류하기 어려운 경우가 많다. 특히, 최근 증가하고 있는 해상 풍력발전소나 해상 플랜트 등의 해상 구조물은 그 입지선정이 매우 제한적이며, 지반개량 또한 곤란한 경우가 많으므로 다양한 지반을 대상으로 한 해양하중 등의 평가가 필요하다.

모래, 실트, 점토가 혼합된 흙은 모래와 점토의 중간적인 성질을 나타내기 때문에 Intermediate soil 또는 Transitional soil, 일본에서는 중간토(이하 혼합토)로 구분하고 있으며, 이러한 혼합토의 역학적 특성에 대한 연구가 아직 활발히 이루어지지 않아 이들 흙의 특성을 평가하는데 신중을 기해야 한다(Geo-Tech Note 2; Intermediate Soil, 1992). 이와 같이, 세립분을 함유한 혼합토의 액상화에 관한 기존 연구는 크게 ‘활성이 있는 세립분’과 ‘비소성 세립분’에 관한 연구로 구분가능하며 이에 대한 내용들은 다음에 간단히 나타냈다.

Fei(1991)는 1976년 중국의 Tangshan지진 현장조사에서 실트질 흙의 액상화 저항은 세립분의 증가에 따라 증가한다고 하였으며, Chang 등(1982), Dezfulian(1982)는 실내실험을 통하여 실트나 소성이 낮은 세립분의 함유율이 증가할수록 사질토의 액상화 저항강도는 증가한다고 보고하였다. Ishihara and Koseki(1989), Yasuda 등(1994)은 실트나 점토의 명확한 상관관계 없이 소성지수가 증가하면 액상화 저항강도도 증가한다고 하였다. 반면, Tronsco and Verdugo(1985)는 광산 모래를 이용하여 실험한 결과, 세립분이 증가할수록 액상화 강도는 감소하는 경향이 있다고 하였고, 황대진 등(1993)은 Toyoura sand와 실트를 혼합한 시료를 대상으로 액상화 및 정적 삼축실험을 수행하여 실트가 증가하면 액상화 강도는 감소하며, 이러한 이유는 세립분 증가에 따른 입자간의 다일레이턴시(dilatancy) 저항력 감소에 그 원인이 있다고 보고하였다. Vaid(1994)는 일정한 간극비나 일정한 건조중량으로 공시체를 제작하여, 실트함유율이 증가하면 액상화 강도는 감소한다고 보고하였다. Koester(1994)와

Law and Ling(1992) 등은 일정한 간극비로 시료를 제작한 액상화 강도는 세립분함유량이 증가함에 따라 초기에는 감소하지만, 어느 일정량의 세립분함유율을 기준으로 다시 증가한다고 보고한 바 있다. 또한, Shen(1977), Vaid(1994)는 액상화 강도는 단순히 세립분함유율의 상관관계가 아닌 모래의 골격구조와 크게 관련이 있다고 제안했다. 이와 같이, 혼합토에 관한 기존 연구에서는 세립분함유율의 증가에 따라 액상화 강도가 증가 또는 감소한다는 상반된 견해가 대두되어 통일적인 해석이 어려우며, 최근 이러한 액상화 강도의 증감은 세립분의 활성 유무에 기인하여 다양한 해석이 이루어지고 있다[Belkhatir et al.(2010), Bouferra and Shahrouf(2004), Carraro et al.(2009), Xenaki and Athanasopoulos(2003)]. 그러나, 이러한 혼합토를 대상으로 한 연구결과에서 모래가 골격구조를 이루고 있는 영역에서는 모래의 다양한 초기구조가 존재하므로 단순한 세립분의 함유량만으로 액상화 강도 경향을 일괄적으로 평가하는 것은 한계가 있다고 판단된다. 지금까지 연구된 많은 액상화에 관한 연구에서 공시체 제작방법은 연구자마다 각기 다르며, 거동을 지배하는 모래의 골격구조에 대한 연구는 그다지 수행되지 않았다.

본 연구에서는 넓은 범위의 혼합시료를 실험하기 위하여 Silica sand와 자연점토, 자연실트, 상업용 점토를 각각 혼합하여 3가지의 혼합시료를 실험에 이용하였다. 공시체 제작은 습윤다짐법과 예압밀법을 이용하여 모래가 골격구조를 이루고 있는 상태에서 세립분이 매트릭스를 구성하는 상태에 이르기까지 세립분함유율의 변화에 따른 일련의 비배수 반복전단시험을 수행하였다.

2. 시료 및 시험방법

2.1 시료의 물리적 성질

본 실험에서 사용된 조립토는 입도를 조정된 Micawa Silica sand를 사용했으며, 세립토는 일본 Yamaguchi현 Iwakuni항에서 채취한 해성점토 Iwakuni clay와 Tottori현 서부지진 발생 시, 실제 액상화에 의해 분사된 Tottori silt 그리고, 상업용 점토인 Kaolinite를 각각 다양한 비율로 혼합하여 세 종류의 혼합토로 공시체를 제작하였다. 실험에 이용한 시료의 물리적 성질과 입도분포곡선은 각각 Table 1과 Figure 1에 각각 나타냈다.

이들 시료를 이용하여 세립분함유율을 증가시키며 다양한 공시체를 제작하였다(Table 2). 각각의 세립분(Iwakuni

clay, Tottori silt, Kaolinite)에 대하여, 건조중량비로 Silica sand-Iwakuni clay는 8가지, Silica sand-Tottori silt와 Silica sand-Kaolinite는 각각 7가지와 6가지 시료를 제작했으며 모래에서 순수한 세립토에 이르는 공시체를 제작하여 실험하였다.

모든 시료에 대해 액소성 시험을 수행하여 소성지수를 조사한 결과 Iwakuni clay 혼합토의 경우, 세립분함유율(F_c)가 20% 이상, Kaolinite 혼합토의 경우 30% 이상의 시료에서 활성을 나타내고, 그 미만의 세립분함유율과 Tottori silt 혼합토에서는 모든 시료가 비소성인 것을 알 수 있었다. Iwakuni clay와 Tottori silt는 자체적으로 약 2%의 모래를 함유하므로, 실험에 이용한 공시체의 세립분함유율은 실제 세립분함유율보다 조금 낮게 구성되어 있다.

2.2 공시체 제작방법 및 간극비

실험에 이용한 공시체 제작은 Iwakuni clay함유율 20%, Kaolinite함유율 30% 이상의 시료에 대해서는 활성을 가지고 있으므로, 액성한계의 약 2배에 해당하는 함수비로 교반하고 슬러리 상태의 시료를 예압밀셀에 넣고 정규

압밀상태의 조건을 재현하기 위해 연직압력 50kPa로 재하하여 예압밀시킨 후, 직경 5cm, 높이 10cm의 치수로 성형하였다. 한편, 비소성을 나타내는 Iwakuni clay함유율 20% 미만, Kaolinite함유율 30% 이하, Tottori silt의 모든 시료에 대해서는 다양한 상대밀도와 모래 골격구조를 갖는 공시체를 조성하기 위하여 철재 램머를 이용한 습윤 다짐법을 이용하였으며, 몰드 안에 시료를 5층으로 나누어

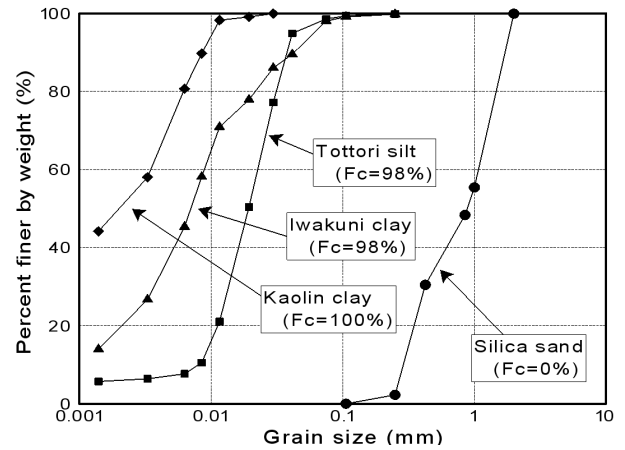


Fig. 1. Grain size distribution curves of samples

Table 1. Physical properties of test materials

Sample	Fines content, F_c (%)	Clay content, C_c (%)	Gravity, G_s	Plasticity index, PI	Mean size, D_{50} (mm)	Coefficient of curvature, C_u
Silica sand	0	0	2.652	NP	0.861	4.04
Iwakuni clay	98	38.8	2.610	47.57	0.006	—
Tottori silt	98	6.0	2.665	NP	0.019	2.85
Kaolinite	100	72.3	2.618	21.80	0.002	—

Table 2. Relation between mixed proportions and fine contents

Silica sand mix. Mixture rate by weight (%)	Iwakuni clay		Tottori silt		Kaolinite	
	Mixture rate by weight (%)	Fines content (%)	Mixture rate by weight (%)	Fines content (%)	Mixture rate by weight (%)	Fines content (%)
100	0	0.0	0	0.0	0	0.0
90	10	9.8	10	9.8	10	10.0
85	15	14.7	15	14.7	15	15.0
83	17	16.7	—	—	—	—
80	20	19.6	20	19.6	20	20.0
70	30	29.4	30	29.4	30	30.0
50	50	49.0	50	49.0	—	—
0	100	98.0	100	98.0	100	100.0

Table 3. Compaction method for preparation of specimens

E_c (kJ/m ³)	Number of dropping per a layer					Height of dropping weight (m)	Weight of rammer (kN)
	1st	2nd	3rd	4th	5th		
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	0.050	0.00116

투입하고, 한층씩 램머를 이용하여 다짐횟수와 낙하높이를 변화시켜 과소다짐법(under compaction)으로 소정의 에너지를 가하여 성형(Adachi 등, 2000)하였다. 공시체 제작에 이용한 다짐조건은 Table 3과 같다.

다짐에너지는 Iwakuni clay혼합토를 기준으로 22kJ/m^3 부터 504kJ/m^3 까지 5가지의 다짐에너지를 설정하였으며, 1008kJ/m^3 이상의 다짐에너지로 다짐해도 504kJ/m^3 로 제작한 상대밀도 70% 이상의 공시체를 제작하는 것은 불가능했으므로, 실험에서 사용한 램머로 다짐 가능한 최대 에너지를 504kJ/m^3 로 설정했다. 다짐공시체 제작 시, 시료의 함수비는 11%로 통일하였으며, 이것은 혼합토의 특성상 재료분리(collapse)가 일어나지 않고 균등하게 혼합시키기 위함이며 또한, 실험에 사용한 소성점토의 고유한 성질을 변화시키지 않고 다짐을 효과적으로 행하기 위해서 설정한 함수비이다(Nacini and Baziar, 2004). 또한, 습윤상태($w=11\%$)에 있는 모래시료에 가장 낮은 에너지로 다짐한 결과, 조립자의 표면장력에 의해 기전상태에서 측정된 Silica sand의 최대간극비를 넘는 아주 느슨한 공시체를 제작하는 것이 가능하였다.

Figure 2에는 반복삼축시험 수행 시, 응력비가 서로 다른 공시체 4개의 평균 간극비와 세립분함유율과의 관계를 각각 나타냈다. Figure 2(a)에 나타난 바와 같이 $F_c=0\text{-}20\%$ 의 영역에 대해 제작한 공시체에 낮은 다짐에너지($E_c=22, 51\text{kJ/m}^3$)를 적용한 경우, 상대밀도 30% 이하의 느슨한 모래에 세립분함유율이 증가함에 따라 밀도 자체가 증가하여 간극비가 선형적으로 감소하는 경향이 나타났으며, 다짐에너지 113- 504kJ/m^3 로 제작한 공시체에서는 세립분함유율이 증가함에 따라 간극비가 감소하여 10-15%에서 가장 작은 값을 나타낸 후, 세립분이 증가할수록 간극비가 오히려 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 상대밀도 50% 이상의 비교적 조밀한 모래의 간극에 세립분이 함유되어 간극비는 감소하며, $F_c=15\%$ 이상이 되면 증가된 세립분에 의해 모래 함유량이 감소하여 오히려 간극비가 증가하기 시작하는 것을 알 수 있다. 또한, 세립분함유율 17%에서는 다짐에너지의 크기에 상관없이 모든 시료가 한 간극비에 수렴되어, 이 지점이 모래의 골격구조에서 세립분의 구조로 전향되는 전환 세립분함유율(threshold fines content)으로 판단할 수 있다. 세립분함유율을 계속 증가시켜 $F_c=20\%$ 이상의 예압밀 시료로 제작한 공시체의 경우, 간극비는 점차 증가하여 점토 고유의 특징을 나타내는 것을 알 수 있다. 이와 같은 간극비와 세립분함유율의 관계는 활성을 가지고 있는 Kolinite(Figure 2(b))에서도 동일한

경향을 나타내고, Kaolinite 함유율 30%에서는 다짐에너지 504kJ/m^3 을 적용한 경우와 예압밀시료에서 유사한 간극비를 얻을 수 있었다.

활성을 가지는 세립분과는 상이하게 실트 혼합토에서는 초기 모래의 최대·최소 간극비에서 세립분 함유율이 증

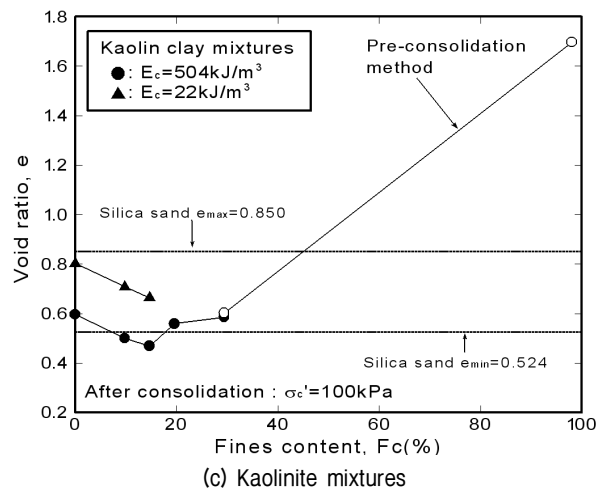
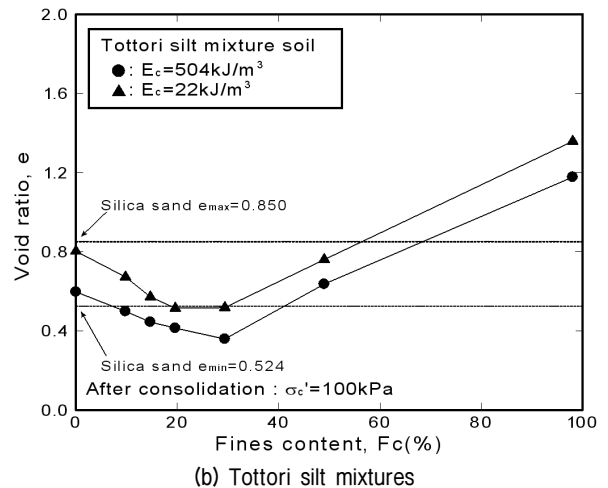
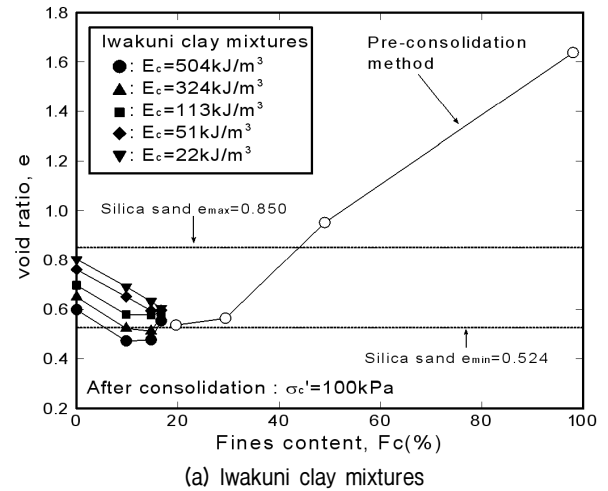


Fig. 2. Relation between void ratio and fines content

가함에 따라 간극비는 초기에 감소하며 ‘전환 세립분함 유율(F_{cth})’을 기준으로 간극비는 증가하는 특징을 나타낸다. 이는 모래의 간극안에 실트가 혼합되어 간극비는 감소하며, 세립분 함유율이 F_{cth} 이상이 되면 오히려 실트 안에 모래가 부유하는 구조로 전향되어 간극비가 증가한 것이며, 실트도 모래와 유사한 활성이 없는 입상체이므로 소성지수를 나타낸 세립분과 같이 간극비가 한 점에 집중되는 현상은 나타나지 않았다.

2.3 실험방법

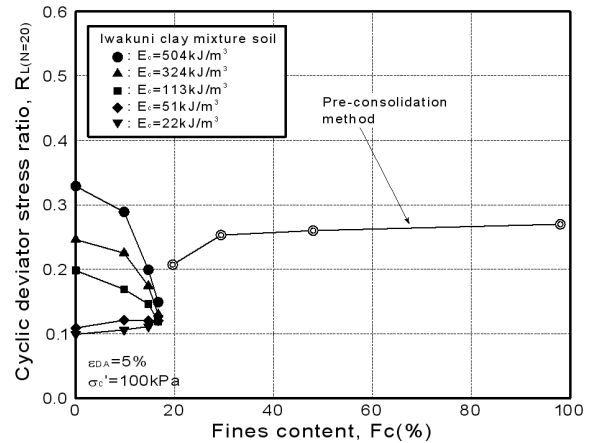
본 실험에 사용한 시험기는 일본 Kyusyu MARUTO사의 전/공 서보식(servo type) 반복 삼축시험기로 일정한 하중진폭으로 0.001-0.5Hz의 주파수로 재하가능한 공압제어식 반복 삼축시험장치이며, 재하주파수 0.02Hz, 유효 구속압 100kPa의 구속압을 일정하게 유지시킨 조건에서 비배수 반복전단시험을 수행하였다. 순수한 모래를 대상으로 한 반복 전단삼축시험에서 재하주파수는 액상화 강도에 커다란 영향을 미치지 않지만(Yasuda and Soga, 1984), 점성토의 반복 전단강도는 재하주파수의 상승에 따라 강도가 높게 평가되는 것으로 알려져 있다(Yamamoto and Hyodo, 1999). 이에 실험에서는 모래구조에서 점토성분의 매트릭스까지 소성지수가 서로 다른 시료에 대해 동일한 재하속도를 적용하여 반복전단강도에 대한 균일한 평가를 수행하고자, 시험기의 특성을 고려하여 장시간 일정한 사인파 하중을 정확하게 제어할 수 있는 재하주파수로 0.02Hz를 설정하였다.

3. 실험결과와 고찰

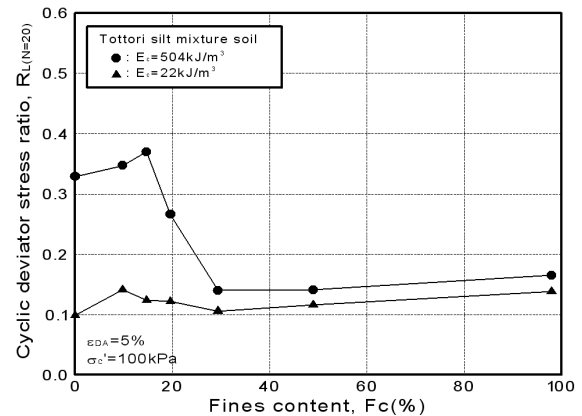
3.1 비배수 반복전단강도 특성

실험 결과로 Figure 3에 반복축차응력비($\sigma_d/2\sigma'_c$)와 양진폭 축변형률(ϵ_{DA})이 5%발생할 때의 반복횟수(N)의 관계를 나타냈다. Seed 등(1983)이 제안한 $\tau_c=0.65\tau_{max}$ 에 대응하는 등가반복횟수에 대하여 지진 magnitude 7.5에 상당하는 등가반복횟수를 20회로 상정하여 반복 전단응력비를 반복 전단강도비 $R_{L(N=20)}$ 로 나타내어, 세립분함유율이 반복전단강도에 미치는 영향을 검토하였다. 여기서, σ_d 는 축차응력, σ'_c 는 유효구속압을 나타낸다. 우선, 세립토가 활성을 나타내는 Iwakuni clay 혼합토와 Kaolinite 혼합토를 나타낸 Fig. (a), (c)에서 다짐에너지가 높은 범위에 속

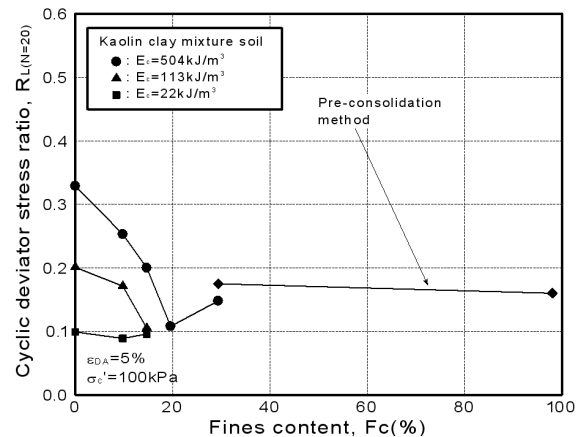
하는 113-504kJ/m³로 제작한 공시체에 대해서는 세립분함유율의 증가에 따라 반복전단강도가 큰 폭으로 감소하는 경향이 나타났다. 이것은 조밀한 모래골격을 갖는 구조일수록 조립토가 이루는 간극비가 작은 상태에서 미량의 세립분함유율에도 불구하고 골격구조가 쉽게 무너지는 것으로 판단된다. 한편, 다짐에너지가 낮은 22-51kJ/m³공시체



(a) Iwakuni clay mixtures



(b) Tottori silt mixtures



(c) Kaolinite mixtures

Fig. 3. Relation between cyclic shear strength ratio and fines content

에서는 큰 차이를 보이지 않지만 약간의 강도 상승을 나타내고 있다. 이것은 느슨한 골격상태에서 세립분의 증가로 인한 공시체 자체의 밀도 증가에 의한 것으로 고려된다.

세립분함유율이 증가하여 어느 정도 이상의 세립분함유율(F_{ch})에 도달하게 되면, 반복전단강도는 다짐에너지의 영향을 받지 않고 일정한 값을 나타내는데, 이는 세립분이 매트릭스를 형성하여 세립분구조의 영향을 받으며, $F_c=30\%$ 이상에서는 모래입자의 영향은 없어지고 점토의 고유강도를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 특히, Kaolinite 혼합토 $F_c=30\%$ 에서 다짐에너지법과 예압밀법으로 유사한 간극비를 나타낸 공시체의 반복 전단강도는 다짐법을 이용한 공시체보다 예압밀 시료의 경우가 높은 반복 축차응력비를 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 Yamamoto and Hyodo(1999)의 압밀시간과 재하속도의 결과에서 제시한 바와 같이 예압밀법으로 제작한 공시체에서 세립토의 매트릭스구조가 발달하여 높은 강도를 나타낸다.

Figure 3(b)의 Tottori silt 혼합토의 결과에서는 높은 다짐에너지로 제작한 공시체의 경우, 활성을 가지고 있는 세립토와는 상이하게 세립분함유율이 낮은 영역에서 액상화강도는 증가하며, $F_c=10\%$ 지점에서 강도가 크게 감소한 후, 그 이상의 세립분함유율에서는 낮은 다짐에너지 공시체와 일정한 강도차이를 두고 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 이는 실트도 크기가 작은 입상체로서 모래와 같이 밀도의 증가에 의해 강도의 증가를 나타낸 후, $F_c=10\%$ 지점에서 모래의 골격구조가 이격되기 시작하여 $F_c=30\%$ 에서는 실트고유의 강도를 나타내고 있다.

이와 같은 결과에서 기존 문헌연구의 세립분 함량에 따라 액상화 강도가 증가 또는 저하된다는 상반된 결과는 모래가 이루는 골격구조를 고려하는 것으로 인해 해명할 수 있다.

3.2 등가골격간극비에 의한 반복전단강도의 평가

혼합토의 특성을 검토할 때는 각기 다른 성질을 가진 두 가지 시료가 혼합되어 있으므로, 그 구조의 주체가 조립토인 경우와 세립토인 경우로 나누어 파악할 수 있다. 세립분함유율이 낮아 모래의 조립토가 형성하는 골격이 전체구조의 주체가 되는 경우는 세립분이 함유되어도 골격을 형성하는 모래입자의 간극사이에 세립토가 존재하는 상태로서 조립토 골격의 배열은 자유롭게 변화되며, 혼합토의 강도 및 거동특성은 주로 모래골격의 간극비에 지배된다. 한편, 세립분함유율이 어느 일정량

(F_{ch}) 이상이 되면 세립토 고유의 매트릭스가 구성되고 조립토의 접촉면이 이격되면서 모래입자가 그 안에 산재하는 상태가 된다. 이때 혼합토의 강도주체는 세립토 자체가 가지고 있는 성질에 지배된다. 이렇게, 혼합토 구조의 강도발현 주체는 세립분함유율에 의해 변화되며, 특히 세립분함유율이 낮은 영역에서는 조립토가 형성하는 골격구조(밀도)가 그 특성에 강하게 영향을 미쳐 세립토의 영향은 보조적으로 기여한다고 생각할 수 있다[Hyodo 등 (2010), Kim 등(2007)]. 이러한 이유로 혼합토의 골격구조 특성을 보다 적절하게 평가하기 위해 Mitchell(1976)과 Kenny(1977)가 제안한 골격간극비의 개념을 이용하여 많은 연구가 수행되어 왔지만, 세립분의 종류에 구분을 두지 않고 세립분의 영향을 완전히 무시하는 가정에 의해 강도가 과소평가되고 골격구조가 이루는 다양한 초기상태를 평가하기에는 충분하지 않다.

본 연구에서는 통상적인 간극비와 골격간극비의 중간적인 개념으로 세립분이 조립분의 강도에 어느 정도는 기여하고 있다는 개념을 도입한 등가 골격간극비(Thevanayagam, 2002)를 통해 세립분이 강도에 미치는 영향을 검토했다. 등가 골격간극비는 Figure 4에 나타낸 혼합토의 삼상도와 같이 설명하는 것이 가능하다. 혼합토의 삼상도는 시료가 완전 포화상태인 경우 간극, 세립토, 조립토 3부분으로 분리하여 고려하는 것이 가능하며, 등가골격간극비 e_{ge} 는 식 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{ge} = \frac{V_v + (1-b)V_{sf}}{V_{ss} + bV_{sf}} = \frac{V_v + (1-b)V_{sf}}{V_s - (1-b)V_{sf}} \quad (1)$$

여기서, b 는 조립토에 대한 세립분의 기여율(contribution factor)이라 정의하며, 식 (1)에 의해 등가 골격간극비가 $b=1$ 일 때는 세립토를 조립토와 동등하게 토립자로 간주

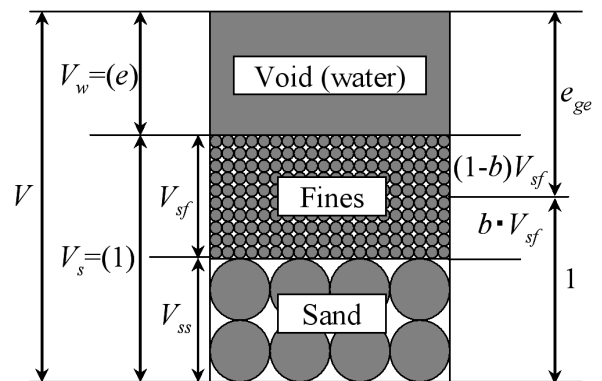


Fig. 4. Phase diagram of intermediate soil

한 통상적인 간극비(e)와 동일한 값이 되며, $b=0$ 일 경우에는 세립분의 존재를 전혀 인정하지 않고 간극으로 간주한 골격간극비(e_g)와 동일한 값이 된다. 이러한 기여율 b 에 대한 이론은 아직 연구자들에 의해 의견이 통일되지 않고 여러 가지 의견이 분분하지만 통상적으로는 0에서 1사이의 값을 가지며, 그 값에 의해 조립토의 강도와 등가로 간주하는 정도를 나타내고 있다.

실험에서 얻은 혼합토의 비배수 반복전단시험의 결과에서 다짐에너지로 제작한 세립분함유율 20% 이하의 영역($F_c < F_{cth}$)에 대해서 반복전단강도와 등가골격간극비의 관계에 대해서 검토하였다. 가장 실험 케이스가 많은 Iwakuni clay 혼합토의 검토를 대표적으로 Figure 5에 나타냈다. 먼저 Figure 5(a)에 등가골격간극비 개념에서 $b=1$ 인 경우, 즉 통상의 간극비와 반복전단강도비의 관계를 나타냈다. 그림에서 간극비가 일정한 조건에서 세립분함유율이 높을수록 강도는 낮아지고, 동일한 세립분함유율에서 다짐에너지에 의한 강도의 변화는 세립분함유율의 증가에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 동일한 세립분함유율에 대해서 간극비가 작을수록 강도가 증가하는 경향이 나타났다. 이와같이 세립분이 존재하는 것에 의해 반복전단강도는 모래만의 거동과 확연히 다르고 일괄적인 경향을 나타내지 않는다.

전술한 바와 같이 세립토의 영향을 완전 무시하고 골격을 이루는 모래만을 토립자로 간주한 골격간극비, 즉 $b=0$ 인 경우는 Figure 5(b)에서 나타낸 바와 같이, 순수한 모래의 강도를 기준으로 오른쪽에 위치하게 되며, 골격간극비의 감소에 따라 강도는 증가하고, 골격간극비가 일정한 경우 세립분함유율의 증가에 따라 강도가 증가한다. 이와 같은 관계에서 세립분이 함유되는 것에 의해 골격간극비는 과소평가되는 경향이 있으며, 강도간의 일의적인 관계를 나타내기에는 무리가 있음을 알 수 있다.

다양한 혼합토 공시체의 반복전단강도와 등가골격간극비의 관계에서 순수한 모래($F_c=0\%$)의 반복전단강도를 기준으로 혼합토에 대한 등가골격간극비의 기여율 b 의 값을 0과 1사이의 범위에서 변화시켜가며 회귀분석한 결과, 가장 좋은 상관성을 나타낸 b 를 기여율의 최적값으로 선정했다. Figure 5(c)에 반복전단강도비와 기여율($b=0.3$)을 적용한 등가골격간극비의 관계를 나타냈다. 전술한 Figure 5(a), (b)와의 비교에서 알 수 있듯이, 세립분함유율 20% 미만의 다양한 세립분함유율로 구성된 혼합토의 반복전단강도 분포를 순수한 모래의 반복전단강도와 간극비의 관계에 일치시키는 좋은 상관관계를 나타냈다.

이와 동일한 과정을 거쳐, 다른 세립분(Tottori silt, Kaolinite)을 함유한 각각의 혼합토에 대해서도 검토를 수행한 결과 Figure 6과 같은 결과를 얻었다. 이는 실험에 조립토로 이용한 Silica sand의 반복전단강도에 대하여 Iwakuni clay 혼합토는 30%, Tottori silt는 43%, Kaolinite는 14%의 백분율로 기여하고 있는 것을 의미한다.

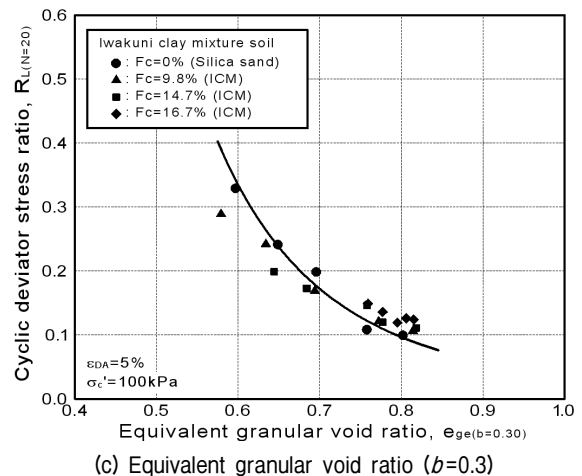
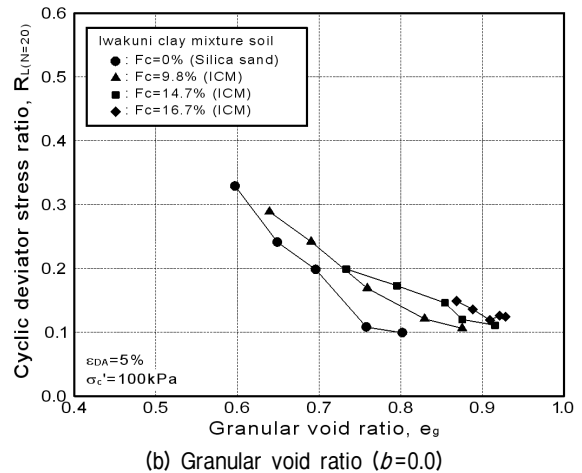
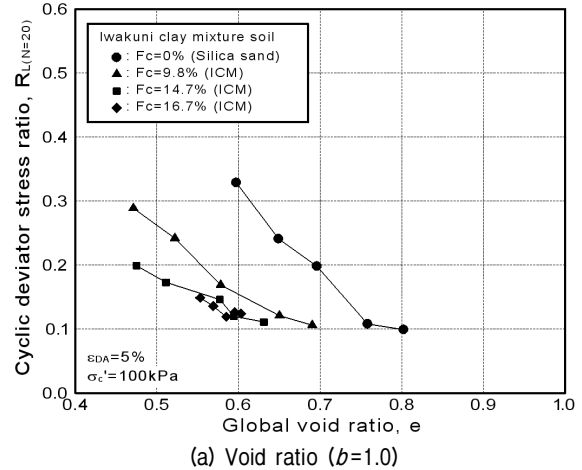


Fig. 5. Relation between cyclic shear strength ratio and equivalent granular void ratio

3.3 등가골격상대밀도에 의한 반복전단강도의 평가

액상화의 강도를 예측할 때, 액상화 강도는 대상지반의 밀도에 가장 큰 영향을 받는다. 그러나, 혼합토의 경우 세립분함유율의 변화에 따라 밀도나 간극비, 모래가 이루는 골격구조의 파악이 곤란하므로 액상화강도의 변화에 대해 일괄적인 해석이 어려운 상황이다. 지금까지의 액상화강도를 평가하기 위한 간이식은 $F_c < 10\%$ 이하의 세립분함유율이 낮은 모래를 주대상으로 하고 있으며, 상대밀도의 정의에 대입되는 간극비의 정의 또한 세립분함유율 5% 이하로 정의되어 혼합토의 밀도를 평가하기에는 무리가 있다. 이에 모래의 상대밀도를 산정하는 식에서 간극비 e 를 등가골격간극비 e_{ge} 로 치환하여 식 (2)와 같은 등가골격상대밀도를 적용하여, 이 식에 의해 혼합토에 대해서도 세립분함유율의 변화를 반영하여 상대밀도를 파악하는 것이 가능하리라 생각된다.

$$D_{rge} = \frac{e_{maxH} - e_{eq}}{e_{maxH} - e_{minH}} \times 100(\%) \quad (2)$$

여기서, e_{maxH} , e_{minH} 는 조립토의 최대/최소 간극비, e_{ge} 는 등가골격간극비이다.

Figure 7에 반복전단강도비와 등가골격상대밀도의 관계를 나타냈다. Figure 6의 결과와 동일하게 반복전단강도비와 등가골격상대밀도의 관계에서도 기여율을 변화시키는 것으로 순수한 모래만의 반복전단강도비와 일의적인 관계를 얻을 수 있었다. 또한, 본 연구에서 수행한 실험결과의 타당성을 비교검토하기 위해 Ishihara(1996)와 현행 일본 도로교량시방서(Matsuo, 2004)에 의한 모래의 액상화 강도의 추정치와 비교한 결과 좋은 상관관계를 나타내고 있으며, 세립토가 골격형성에 기여하는 정도를 적절히 평가함으로써 혼합토에 대해서도 기존의 모래에 대해 연구되어온 밀도와 액상화 강도와의 관계를 추정할 수 있게 되었다. 또한, D_r 또는 D_{rge} 이 25% 이하의 매우 느슨한 상태의 시료에 대해서 기존 추정식에서는 액상화 강도가 0으로 추정되는 문제점이 있었지만, 본 실험결과에서는 상대밀도가 0인 매우 약한 구조에서도 액상화 강도는 최소한 0.1정도가 발현되어 기존식에서는 액상화강도가 과소평가되었을 가능성이 있다고 고려된다.

4. 결론

본 연구에서는 다양한 종류의 혼합토에 대하여 모래의 골격구조와 세립분함유율이 액상화 강도에 미치는 영향과 특성을 파악하기 위해 세 종류의 세립토와 모래를 각각 혼합하여 모래만으로 이루어진 입상구조부터 세립분이 주체를 이루는 다양한 공시체를 제작하여 반복삼축압축시험을 수행하였으며, 혼합토의 반복전단강도를 평가하기 위해 등가골격간극비의 개념을 이용했다. 본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 혼합토의 컨시스턴스 시험과 공시체의 간극비 및 시험 결과로부터 모래의 골격구조에서 세립토의 구조로 전환되는 전환 세립분함유율(threshold fines content)을 파악하였다.
- (2) 혼합토의 비배수 반복전단강도는 모래가 골격을 형성하고 있는 $F_c < F_{cth}$ 의 영역에서는 모래의 골격구조가 강도발현의 주체가 되어 세립분함유율 보다는 모래

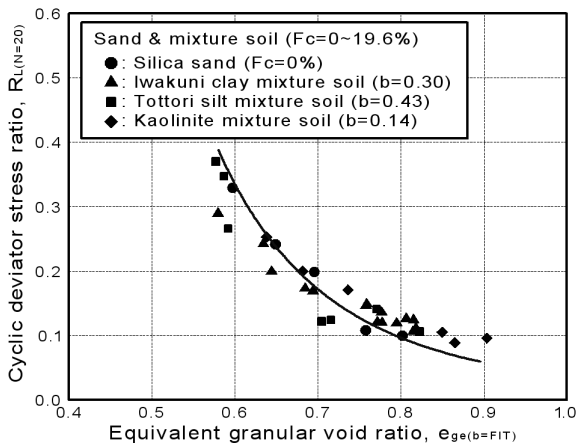


Fig. 6. Relation between cyclic shear strength ratio and equivalent granular void ratio ($b=fit$)

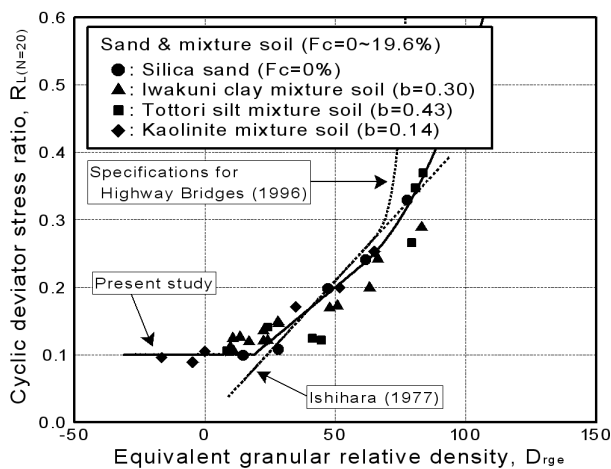


Fig. 7. Relation between cyclic shear strength ratio and equivalent granular relative density

구조의 밀도에 착안해야 하며, $F_c > F_{cth}$ 영역에서는 세립분의 매트릭스구조가 강도발현의 주체가 되어 세립토 주체의 강도에 의해 지배된다.

- (3) 활성을 나타내는 세립분의 경우 $F_c < F_{cth}$ 의 영역에서의 반복전단강도는 $F_c = 0\%$ 의 조밀한 모래상태에서 세립분함유율의 증가에 따라 모래의 골격구조가 느슨하게 이격되어 강도는 급격히 감소하며, 느슨한 공시체의 경우는 공시체밀도의 증가에 의해 약간의 강도증가를 나타낸다. 비소성인 실트의 경우에는 실트도 모래와 유사한 하나의 입상체로 고려되어 소성 세립분의 혼합토와는 다르게 조밀한 시료에서 초기에 강도가 증가한 후, 세립구조로 전환됨에 따라 강도가 급격히 감소하는 특징을 나타낸다.
- (4) 모래가 골격구조를 형성하고 있는 $F_c < F_{cth}$ 의 영역에서는 등가골격간극비의 개념을 도입하여 각각의 세립분이 모래강도에 대한 기여율을 산정했다. 또한, 등가골격상대밀도를 제안하여 혼합토의 액상화 저항강도를 모래의 액상화 저항강도에 일의적으로 나타내는 것이 가능했으며 현행시방서의 액상화 강도의 추정치와 비교한 결과, 좋은 상관관계를 나타냈다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업 10기기술혁신E04 “대구경 대수심 해상기초시스템 기술개발”과제의 지원으로 이루어진 것이며, 연구수행에 도움을 주신 Yamaguchi(山口) Univ. Hyodo, Masayuki 교수님께 감사의 뜻을 전합니다.

참고 문헌

1. 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.
2. Belkhatir, M., Arab, A., and Della, N. (2010), “Liquefaction Resistance of Chlef River Silty”, *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol.7, No.2, pp.119-137.
3. Bouferra, R., and Shahrou, I. (2004), “Influence of Fines on the Resistance to Liquefaction of a Clayey Sand”, *Ground Improvement*, Vol.8, No.1, pp.1-5.
4. Carraro, J. A. H., Prezzi, M. and Salgado, R. (2009), “Shear Strength and Stiffness of Sands Containing Plastic or Nonplastic Fines”, *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, Vol.135, No.9, pp.1167-178.
5. Chang, N. Y., Yeh, S. T., and Kaufman, L. P. (1982), “Liquefaction

Potential of Clean and Silty Sands” *3rd International Earthquake Microzonation Conference*, Seattle, USA, Vol.2, pp.1017-1032.

6. 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.
7. Fei, H. C. (1991), “The Characteristics of Liquefaction of Silt”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Computational Mechanics Publications, South hampton, pp.293-302.
8. Hwang, D. J., Yanagisawa, E., and Sugano, T. (1993), “Shear Characteristics of Silt Containing Sand”, *Journal of Japan Society of Civil Engineers(JSCE)*, No.463/III-38, pp.25-33.
9. Hyodo, M., Kim, U. G., Nakata, Y., and Yoshimoto, N. (2010), “Effect of Fines on Undrained Shear Characteristics of Sand-Clay Mixtures”, *Journal of Japan Society of Civil Engineers (JSCE)*, Vol.66, No.1, pp.215-225.
10. Ishihara, K. (1996), “Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics”, *1st ed.*, Oxford, Claredon Press.
11. Ishihara, K., and Koseki, J. (1989), “Discussion on the Cyclic Shear Strength of Fines-Containing Sands”, *Earthquakes Geotechnical Engineering, Proceeding of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio De Janiero, Brazil, pp.101-106.
12. Japanese Geotechnical Society (1992), “Intermediate Soil, Sand or Clay”, *Geo-Tech Note 2*, pp.1-6.
13. Kenny, T. C. (1977), “Residual Strengths of Mineral Mixture”, *Proceedings of the 9th International Conference Soil Mechanics*, Tokyo1, pp.155-160.
14. Kim, U. G., Ahn, T. B., and Hyodo, M. (2008), “Effect of Fines Content on the Cyclic Shear Characteristics of Sand-clay Mixtures”, *Journal of Korean Geotechnical Society (KGS)*, Vol.24, No.1, pp. 51-59.
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 10th world conference on earthquake engineering*, Rotterdam, pp.1491-1496.
17. Matsuo, O., (2004), “Simplified Procedure for Assessing Liquefaction Potential of Soils in the Specifications for Highway Bridges”, *Journal of Japan Society of Civil Engineers (JSCE) invited paper*, No.757/III-66, pp.1-20.
18. Mitchell, J. K. (1977), “Fundamentals of Soil Behaviour”, *2nd edn*, John Wiley Interscience NewYork, pp.172-189.
19. Naeini, S. A., and Baziar, M. H. (2004), “Effect of Fines Content on Steady-State Strength of Mixed and Layered Samples of a Sand”, *Soil dynamic sand earthquake engineering*, Vol.24, pp.181-187.
20. Seed, H. B., Idriss, I. M., and Arango, I. (1983), “Evaluation of Liquefaction Potential using Field Performance Data”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.109, No.3, pp.458-482.
21. Shen, C. K., Vrymoed, J. L., and Uyeno, C. K. (1977), “The Effects of Fines on Liquefaction of Sands”, *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Vol.2, pp.381-385.
22. Thevanayagam, S., Shenthan, T., Mohan, S. and Liang, J. (2002), “Undrained Fragility of Clean Sands, Silty Sands, and Sandy Silty”, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol.128, No.10, pp.849-859.

23. Tronco, J. H., and Verdugo, R. (1985), "Silt Content and Dynamic Behavior of Tailing Sands", *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, USA, pp.1311-1314.
24. Vaid, V. P. (1994), "Liquefaction of Silty Sands", *Journal of ASCE, Ground failures under seismic conditions*, Geotechnical special publication, No.44, pp.1-16.
25. Xenaki, V. C., and Athanasopoulos, G. A. (2003), "Liquefaction Resistance of Sand-Silt Mixtures: an Experimental Investigation of the Effect of Fines", *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, No.23, pp.183-194.
26. Yamamoto, Y., and Hyodo, M. (1999), "Effect of Shearing Cyclic Frequency on Relationship Between Cyclic Shear strength and plastic index", *Proceedings of the 34th Japanese Geotechnical Society (JGS) Conference*, Vol.1, pp.1059-1060.
27. Yasuda, S., and Soga, K. (1984), "Effect of Shearing Cyclic Frequency on Liquefaction Characteristic", *Proceedings of the 19th Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference*, pp.549-550.
28. Yasuda, S., Wakamatsu, K., and Nagase, H. (1994), "Liquefaction of Artificially Filled Silty Sands" Ground Failures Under Seismic Conditions, *Geotechnical Special Publication Journal of ASCE*, No.44, pp.91-104.

(접수일자 2012. 5. 10, 심사완료일 2012. 7. 6)