

압력수준과 세립분함유량에 따른 모래의 압축특성

Influences of Confining Pressure and Fines Content on Compressibility Characteristics of Sand

김 옥 기¹ Kim, Uk-Gie
장 리² Zhuang, Li
김 주 현³ Kim, Ju-Hyun

Abstract

In order to investigate mechanics of mixtures composed of sand and non-plastic silt, various specimens, with sand dominating the soil structure, and with varying fines content, fines content varying were produced. Isotropic consolidation tests were performed using high pressure triaxial test apparatus within high pressure levels where sand grain crushing happened. Experimental results showed that compressive curve of sand after yielding contracts to the NCL due to breakage of sand grains. Moreover, with the increase of fines content, coarse grains are surrounded by fines to form cushion effect, which made the breakage of coarse grains become difficult. Therefore, the maximum inclination of compressive curve became flatter and yield stress increased.

요 지

본 논문에서는 혼합토의 역학적 특성을 해명하기 위한 기초연구로 모래와 비소성 실트로 구성된 혼합토를 대상으로 모래가 골격구조의 주체를 이루는 범위 안에서 다양한 세립분함유율로 조성된 공시체를 제작하였다. 모래입자의 파쇄가 발생하는 고압영역의 등방압축실험을 수행하기 위하여 고압삼축시험기를 이용하여 혼합토의 압축특성 및 파쇄에 대한 영향을 조사했다. 시험 결과, 모래의 압축특성은 입자파쇄가 발생함에 따라 항복에 도달한 뒤에는 1개의 NCL에 수렴하는 경향을 나타낸다. 한편, 혼합토의 압축특성은 세립분함유율이 증가함에 따라 조립자가 세립분에 의해 둘러싸여 쿠션작용에 의해, 조립자가 파쇄를 일으키기 어려워지므로 압축곡선의 최대경사가 완만해지고 항복응력 또한 증가함을 알 수 있다.

Keywords : High pressure triaxial test, Sand-fines mixture, Fines content, Compression index, Crushing strength

1. 서 론

지반의 침하나 안정성 평가 등에 대한 검토를 수행할

때, 대상 지반을 적절한 토질상수로 설정 할 필요가 있지만, 대부분의 경우 지반을 구성하고 있는 토립자의 입도분포를 토대로 대상지반을 간이적으로 모래 또는 점

1 정희원, 한국건설기술연구원 박사후 연구원 (Post-doctoral Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, KITC)

2 정희원, 고려대학교 연구교수 (Research Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.)

3 정희원, 도화엔지니어링 철도부 차장 (Vice general manager, railroad department, Dowha Engineering, Tel: +82-2-6323-4960, Fax: +82-2-501-4534, soil1004@dohwa.co.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 3월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

토지반으로 대분류하여 그 대응이 이루어지고 있다. 그러나 실제 자연지반에 존재하는 사질토지반의 대부분은 여러 종류의 세립분을 포함하고 있으므로 모래나 점토로 명확히 분류하는 것이 곤란한 경우가 있으며, 이러한 흙은 모래와 점토의 중간적인 성질을 나타내기 때문에 Intermediate soil 또는 Transitional soil, 일본에서는 중간토(이하 혼합토)로 분류되어 이에 대한 대응이 이루어지고 있다(Geo-Tech Note 2; Intermediate Soil, 1992). 모래와 세립분의 가장 큰 차이는 토립자의 입경에 기초를 두고 있으며, 입경에 기인하여 투수성이나 압축성이 크게 달라진다. 점토는 모래와 비교하여 압축성이 크기 때문에 침하량 또한 커지고 투수성이 낮아 침하가 장기간에 걸쳐 발생하며, 모래의 경우 밀도의 차이가 거동에 큰 영향을 미친다.

이러한 혼합토 지반에서 발생할 수 있는 문제에 대해 간단히 예를 들면, 건설공사의 시공속도와 대상 지반의 투수성에 관한 문제에서 모래지반은 일반적으로 배수상태로 간주하는 반면, 점토지반은 단기간의 시공에 대하여 비배수상태로 고려되어 시공 후, 압밀에 의한 변형이 천천히 발생한다는 전제조건으로 접근하고 있다. 그러나 혼합토 지반에서는 시공속도와 지반의 투수성의 관계가 상대적으로 상이하기 때문에 부분배수를 고려해야 하므로 단순히 모래 또는 점토지반으로 구분하는 것은 부적절하다. 또한, 설계정수를 결정하는 방법에서도 모래지반에서는 통상적으로 표준관입시험을 이용한 원위치시험으로 설계정수가 결정되고, 점토지반에서는 불교란시료를 채취하여 실내시험을 수행하여 설계정수를 구하는 경우가 많지만, 혼합토에서는 이와 같은 방법으로 단순히 적용할 수 없는 경우가 있다(Tanaka et al., 2001, Kim et al., 2010).

본 논문에서는 혼합토의 역학특성을 해명하기 위한 기초연구로 모래와 실트로 구성된 혼합토를 대상으로 모래가 골격구조의 주체를 이루는 범위 안에서 다양한 세립분함유율로 조성된 공시체를 제작하였다. 그리고, 모래입자의 파쇄가 발생하는 고압영역의 등방압축시험을 수행함으로써 세립분을 포함한 모래의 압축·파쇄특성을 검토하였다.

2. 문헌연구

혼합토의 압밀 및 압축특성에 관한 대부분의 기존 연구에서는 소성이 높은 자연점토 및 상업용 점성토에 모

래를 혼합하여 점토를 기준으로 모래함유율에 따른 일축압축강도특성과 소성계수를 압밀/압축특성과 연관지어 그 관련성을 나타낸 연구가 주를 이루고 있다(Nakase, A. and Kamei, T., 1983, 1988; Tsuchida, T., 1993, Ochiai, H. and Ohmine, K., 1993). 이에 반하여 비소성 세립분을 함유한 혼합토에 대해서는 그 역학적 특성은 아직 명확히 밝혀지지 않아 그 취급에 각별히 주의해야 할 필요가 있다.

혼합토에 관한 연구에서 가장 중요시 되고 있는 것 중 하나는 모래의 성질과 세립분의 성질이 전환되는 전환 세립분함유율(Threshold fines content, 이하 F_{cth})을 구하는 것이라 할 수 있다. 전환 세립분함유율(F_{cth})에 대해 간단히 설명하면, 혼합토는 각기 다른 성질을 가진 두가지 재료가 혼합되어 있으므로 그 구조의 주체가 조립토인 경우와 세립토인 경우로 나누어 파악하는 것이 가능하다. 예를 들면, 순수한 모래를 대상으로 세립분함유율을 증가시킬 경우, 최초 모래만으로 구성된 골격구조의 간극에 세립분이 채워져 간극비는 변화(증·감)하게 되며, 이때, 강도 및 거동특성은 주로 모래만으로 구성된 간극비에 지배된다. 한편, 세립분함유율이 어느 일정 함유율(F_{cth}) 이상이 되면 모래의 성질을 점차 잃어버리고 세립토 고유의 매트릭스가 구성되어 조립토의 접촉면이 이격됨에 따라 모래입자가 세립분 안에 산재하는 상태가 된다. 이때, 혼합토의 강도 주체는 세립토 자체가 가지고 있는 성질에 지배된다. 여기서, 조립토구조에서 세립토구조로 바뀌는 일정 함유율을 전환 세립분함유율(F_{cth})이라 정의한다. 이와 같은 전환 세립분함유율은 대상이 되는 세립분의 종류(소성, 비소성)와 조립분의 입경에 큰 영향을 받으며, 실내시험을 통한 기존 연구에서 활성을 가진 세립분인 경우 $F_c=20\%$ 내외, 비소성 실트인 경우 $F_c=30\sim40\%$ 의 범위에서 전환 세립분함유율을 나타내는 것을 알 수 있다(Thevanayagam et al., 2002, Hyodo et al., 2010; Yamamuro et al., 2001; Ni et al., 2004). 이러한, 전환 세립분함유율을 기준으로 세립분함유율이 적은 모래측 골격구조를 파악하기 위해서 Mitchell, 1977과 Kenny, 1977가 최초 제안한 골격간극비(Granular void ratio)를 시작으로 실트골격간극비(Silt granular void ratio), 등가골격간극비(Equivalent granular void ratio) 등이 제안되어 혼합토의 평가에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근 모래의 압축성에 관한 연구결과에서는 모래도 점토와 동일하게 한계상태이론을 적용할 수 있다는 이

론이 발표된 바 있다(Nocilla, A. et al., 2006). Figure 1에 모래와 혼합토의 서로 다른 압축곡선 개념도를 각각 나타냈다.

Figure 1에 나타낸 바와 같이 모래는 압력이 낮은 영역에서 초기밀도에 대한 영향을 대단히 받기 쉬우며, 압력이 점차 증가하여 입자파쇄가 발생하는 영역의 압력에서 항복하기 시작하여, 높은 압력하에서는 초기밀도가 서로 다른 느슨한 모래와 조밀한 모래가 최종적으로 1개의 단일 정규압축곡선(Normal Compression Line; NCL)으로 수렴하게 된다. Figure (a)에는 모래의 압축곡선과 동일하게 세립분이 함유된 혼합토의 NCL도 높은 압력하에서 단일곡선으로 수렴한다는 개념의 압축곡선을 나타내었고, Figure (b)에는 혼합토의 경우 초기밀도

영향이 모래입자의 파쇄가 생길 만큼의 고압영역까지 이르러도 사라지지 않고 하나의 NCL로 수렴되지 않는다는 서로 상이한 연구결과를 나타냈다(Martins et al., 2001, Nocilla et al., 2006).

이에 본 연구에서는 기존 연구의 문헌을 토대로 모래가 골격구조를 이루고 있는 전환 세립분함유율에 이르기 전까지의 혼합시료를 실험범위로 설정하여, 모래에 소성을 나타내지 않는 비소성 실트 함유율을 증가시켜 다짐 및 공중낙하법으로 공시체를 제작했다. 이와 같이 제작된 공시체에 대하여 파쇄를 일으킬 수 있는 고압 삼축압축시험기로 등방압력조건에서 압축시험을 수행하여 혼합토의 압축특성 및 파쇄에 대한 영향을 고찰했다.

3. 시료 및 시험방법

3.1 시료의 물리적 성질

실험에는 조립토로 상업용 Mikawa(三河) Silica($F_c=0\%$)를 사용했으며, 입경이 서로 다른 V5호, R5.5호, V6호, V3호를 이상적인 입도분포로 조성하기 위하여 건조중량비로 각각 1 : 2 : 2 : 5의 비율로 혼합하여 공시체를 제작하였다. 이와 같이 입도 조정한 혼합 Silica의 최대간극비 및 최소간극비는 각각 $e_{max}=0.850$, e_{min}

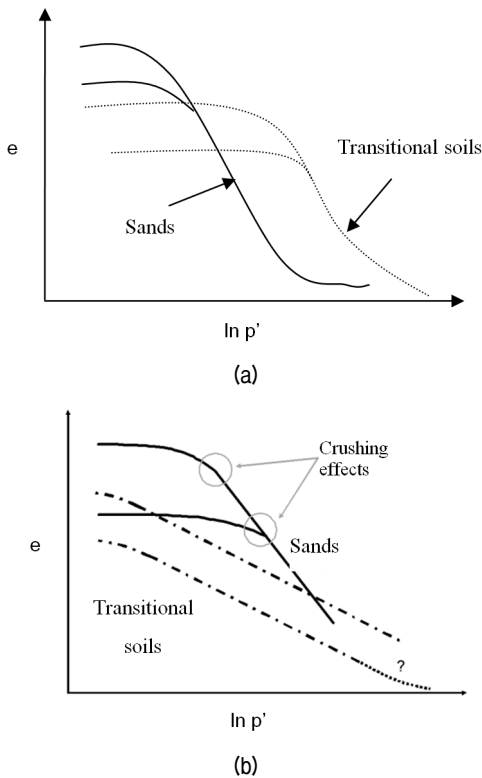


Fig. 1. Schematic illustration of the compression of sands and 'transitional' soils (Nocilla et al., 2006)

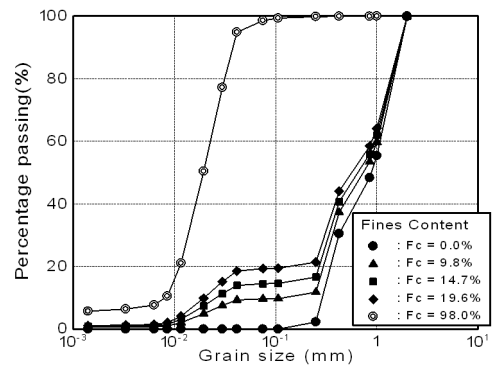


Fig. 2. Grain size distribution curves of samples

Table 1. Physical properties of test materials

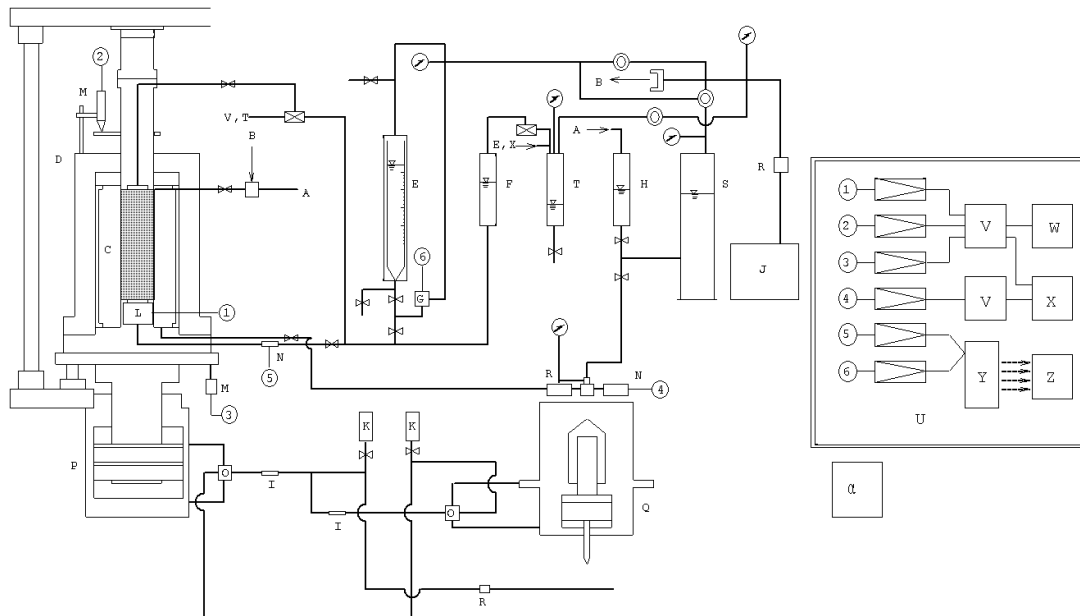
Mixture rate by weight, (%)	Fines content, F_c (%)	Clay content, (%)	Gravity, G_s	Plasticity index, PI	Mean size, D_{50} (mm)	Coefficient of curvature, C_u
100	98.0	6.0	2.665	NP	0.019	2.85
20	19.6	1.2	2.655	NP	0.592	45.86
15	14.7	0.9	2.654	NP	0.679	36.93
10	9.8	0.6	2.653	NP	0.757	9.13
0	0.0	0.0	2.652	NP	0.885	3.70

=0.524이다. 또한, 세립토로는 돗토리현(鳥取縣) 서부지진 발생시 다케우치(竹内) 공업단지에서 실제 액상화에 의해 분사된 Tottori silt($F_c=98\%$, $PF=NP$)를 사용했다. 이들의 세립토와 조립토를 건조 중량비로 각각 혼합하여, Figure 2의 입도분포 곡선에 나타낸 바와 같이 다양한 세립분함유율로 구성된 혼합 시료를 제작했다.

시험에 이용한 시료 및 혼합토의 물성을 Table 1에 나타냈다. Table 1에서 Tottori silt는 자연상태에서 2%의 모래를 포함하고 있으며 돗토리 실트함유율보다 실제 세립분함유율은 0.98배로, 컨시스턴시(Consistency) 시험을 수행한 결과 돗토리 실트를 함유한 모든 시료는 비소성을 나타내는 것을 확인했다.

3.2 실험장비 및 공시체 제작방법

시험에 사용된 장비는 MARUI(주)에서 주문 제작한 고압 삼축압축 시험기로 Figure 3(a), (b)에 배관 및 개념도와 시험기의 전경을 나타냈다. 본 시험기의 특징으로는 구속압을 50MPa까지 재하할 수 있는 유압 서브식 고압시험기로, 고압에 견딜 수 있도록 셀이나 파이프 등은 모두 스테인레스로 제작되어 있고, 재하하는 유압펌프에 의해 전달되는 압력을 측정하 및 측정재하에 이용한다. 고압력 조건에서도 멤브레인의 파손없이 실험이 가능하도록 두께 2mm의 고압용 멤브레인을 가는 철사로 고정시켜 수행하였다(Figure 3c). 본 실험장비에서 이용



C: Specimen, D: Triaxial cell, E: Double burette, F: De-aired water tank, G: Differential pressure gauge, H: Cell water container, I: Shutoff valve, J: Compressor, K: Actuator, L: Load cell, M: Dial gauge, N: Pore pressure gauge, O: Servo valve, P: Vacuum tank, Q: Cell pressure apparatus, R: Filter, S: Cell pressure tank, T: Vacuum tank, U: Measuring box, V: Sub amplifier, W: Static transmitter, X: Dynamic transmitter, Y: Output jack, Z: Safety power, α : Computer

(a) High pressure triaxial compression testing system



(b) Panoramic view of test apparatus



(c) 2 mm thickness of membrane for specimens

Fig. 3. High pressure triaxial compression test apparatus

Table 2. Measuring accuracies

Measure	Type	Model	Upper limit
Axial load cell	Strain gauge	TCLP-30B	300kN
Confining pressure cell	Strain gauge	TD-100	50MPa
Pore water pressure cell	Strain gauge	TD-100	1MPa
Axial displacement cell	Strain gauge	CDP-50	5cm

된 각 측정장치의 제원을 Table 2에 나타냈다.

실내실험에서 공시체를 제작할 경우, 일반적으로 공중 낙하법, 수중 낙하법, 수중 퇴적법, 슬러리 퇴적법, 다짐법 등이 이용되고 있다. 혼합토를 대상으로 한 공시체 제작시, 세립분의 특성상 공중낙하법과 수중낙하법을 이용할 경우, 낙하 시 시료의 중량차로 인해 모래와 세립분이 분리되어 균등하게 세립분이 분포된 공시체를 제작하는 것이 불가능하다. 또한, 수중 퇴적법과 슬러리 퇴적법은 상정한 공시체의 밀도를 조정하는 것이 곤란하다. 이러한 이유로, 본 시험에서는 재료분리가 일어나지 않고 세립분이 균등하게 혼합하여 collapse 현상이 발생하지 않도록 습윤다짐법을 이용하였다(Naeini and Baziar, 2004).

혼합토의 가장 느슨한 상태와 조밀한 상태의 모래 골격 구조를 갖는 공시체를 조성하기 위하여 철제 램머를 이용하여 습윤 다짐하였다. 몰드 안에 시료를 5층으로 나누어 투입하고, 각각 한 층씩 과소다짐법(under-compaction)을 적용하여 균등한 밀도로 분포되는 소정의 다짐횟수를 시행착오법을 이용해 산정하여 적용하였다.

다짐에너지 E_c 는 식 (1)에 의해 계산하였다. 여기서, W_R 은 램머의 중량(N), H 는 낙하높이(m), N_L 은 다짐 층수(=n), N_B 는 한 층의 다짐횟수, V 는 다짐몰드의 체적(m^3)을 나타낸다. 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 3에 각 공시체에 적용한 다짐에너지와 다짐횟수 및 낙하높이를 나타냈다. 공시체 제작시 이용한 다짐에너지는 $E_c=22kJ/m^3$ 와 $E_c=504kJ/m^3$ 의 2종류의 다짐에너지를 설정하였으며, 최소 다짐에너지 $E_c=22kJ/m^3$ 의 경우 램머의 낙하높이를 5cm로 설정하였고, $E_c=504kJ/m^3$ 의 경우는 18.4cm로 설정하여 에너지를 조정하였다. 습윤상태($w=11\%$)에 있는 모래 시료에 가장 낮은 에너지로 다짐한 결과, 조립자의 표면장력에 의해 입도조성한 Silica sand의 기전상태에서 측정된 최대간극비 이상의 아주 느슨한 공시체를 제작하는 것이 가능하였다. 최대 다짐에너지 $504kJ/m^3$ 로 적용한 공시체는 $1008kJ/m^3$ 의 다짐에너지를 적용시켜도 간극비의 변화는 일어나지 않았고 일정한 결과를 얻었다. 따라서, 실험에서 이용한 램머로 다짐에너지 $504kJ/m^3$ 를 적용한 것 이상의 높은 밀도의 공시체를 제작하는 것은 불가능하며, 이 때의 간극비를 실험에서 이용한 간극비의 최소값으로 규정하였다. 2종류의 다짐에너지를 이용한 공시체의 압밀 전 초기 상대밀도는 각각 -20%, 35%이다.

다짐공시체 제작 시 모든 시료의 함수비는 11%로 통일시켰다. 함수비 11%는 다짐을 효과적으로 제어하기 위한 것이다. 세립분이 함유되고 다짐에너지가 적용된 공시체의 특성상, 이산화탄소를 공시체내에 주입시키고 혼합토의 포화를 위해 통수를 용이하게 할 수 있는 적절한 함수비이다(Naeini and Baziar, 2004).

한편, 등방 압축시험에서 고압삼축시험기의 구조상 pedestal에서 직접 공시체를 제작할 수 없어서 공시체를 소정의 몰드에서 제작한 후, 동결시킨 상태에서 pedestal에 착상시키기 때문에 동결과정에서 시료 안의 함수가 팽창하여 $504kJ/m^3$ 로 제작한 공시체의 상대밀도가 35%로 조밀한 조건을 만족하지 못하였다. 이를 보완하기 위해 $F_c=0.0\%$ 의 순수모래 시료를 대상으로 공중낙하법을 이용해서 상대밀도 $D_r=65\%$ 공시체를 별도로 추가 제작했다. 이것은 최대밀도시험(JIS A 1224:2000)을 기준

Table 3. Parameters for preparation of specimens using compaction method

E_c (kJ/m ³)	Number of drops for each layer					Dropping height, (m)	Weight of rammer, (N)
	1 st layer	2 nd layer	3 rd layer	4 th layer	5 th layer		
22	5	10	15	25	30	0.050	1.16
504	60	80	100	120	140	0.184	1.16

으로 건조시료를 깔때기 안에 넣은 후, 몰드 안쪽의 하단부에서 모래의 최상부와 깔때기의 밑부분이 이격되지 않도록 연속적으로 몰드 안에 실험시료를 넣고 나무망치로 몰드 측벽을 타격해서 소정의 밀도를 충족시키는 방법이다.

3.3 실험 조건

본 실험에서는 고압 삼축압축시험기를 이용하여 등방구속압을 단계적으로 재하/제하하여 실험을 수행했다. 재하방법으로는 목표로 하는 압밀 압력까지 단계에 맞추어 축압 및 축차 응력을 순차적으로 상승시키고, 목표로 한 압밀 압력에 도달한 후에는 1분간의 체적변화가 0.01cc($\varepsilon_v=0.005\%$)이하가 될 때까지 배수량을 측정 한 후, 다음 재하 단계로 진행하는 작업을 반복했다. 최종적으로 압밀압력 36MPa까지 재하 한 후, 제하과정을 수행했다. 제하과정도 재하와 동일하게 등방응력상태를 유지한 상태에서 축압 및 축력을 감소시키고, 목표로 하는 압력까지 감소시킨 후 체적변화가 기준치 이하가 될 때까지 측정하였다. 이렇게 측정된 시료는 시험기에서

해체 후, 파쇄 정도를 조사하기 위해 건조시킨 다음 체가름 시험을 수행하여 입도분포를 확인했다.

4. 등방 삼축압축시험의 결과와 고찰

4.1 모래 및 혼합토의 압축특성

Figure 4에 세립분함유율이 다른 시료에 대한 등방압축곡선을 각각 나타냈다. Figure 4(a)에 표기되어 있는 세립분함유율 0%에 대한 결과 중, 범례 $D_r=65\%$ 와 공중낙하법을 이용해서 추가적으로 제작한 조밀한 모래의 공시체를 나타낸다. $D_r=65\%$ 과 $E_c=504\text{kJ/m}^3$ 에 의해 제작된 공시체는 평균 유효주응력이 10MPa 부근에서 항복응력을 나타낸 후, 20MPa에 도달하여 1개의 압축곡선으로 수렴하는 결과를 나타낸다. 반면, $E_c=22\text{kJ/m}^3$ 로 제작한 느슨한 공시체의 압밀곡선은 수렴된 다른 2개 ($D_r=65\%$, $E_c=504\text{kJ/m}^3$)의 압축곡선과 일치하지 않아, 단일 정규압축곡선(NCL)의 수렴까지는 도달하지 못했다. 본 실험에 Host sand로 이용한 Silica sand는 X선 회절시험 결과, 석영이 96% 조성되어 있으며, D_{50} 에 상응

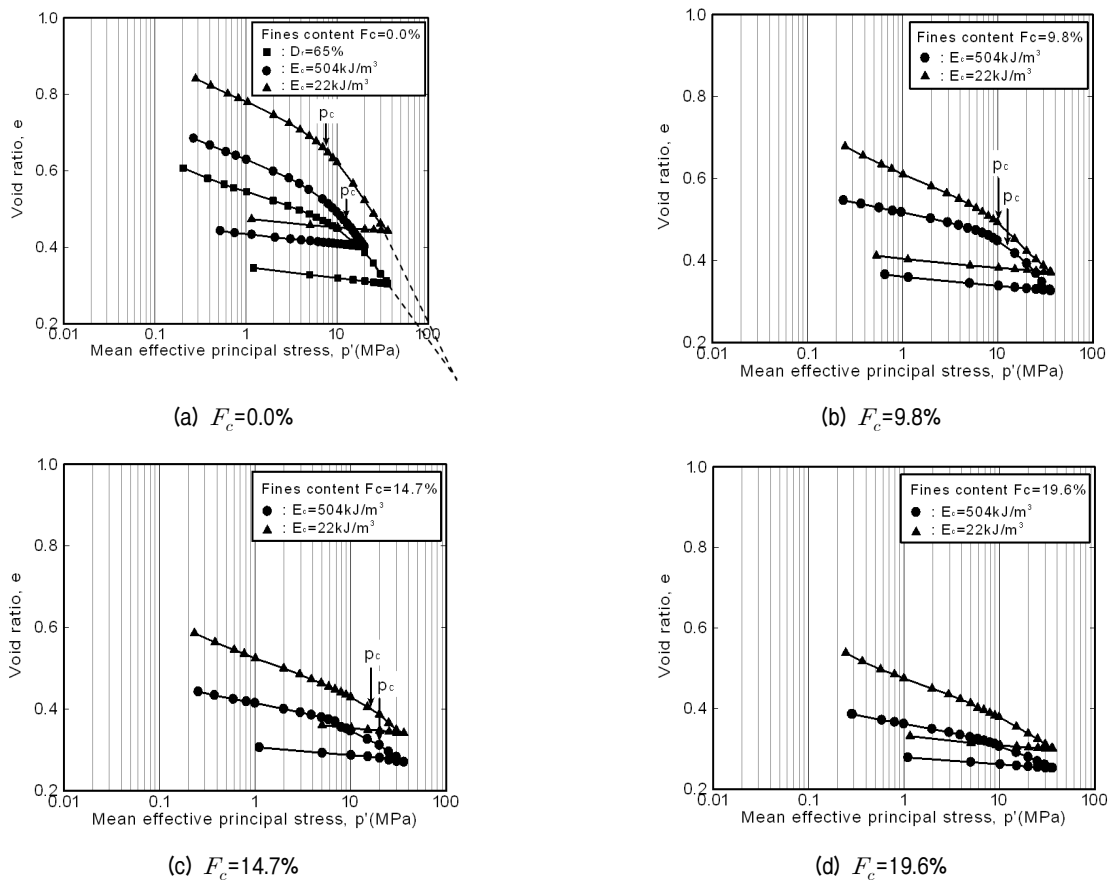


Fig. 4. Consolidation curves

하는 입자의 평균 제1파쇄강도 시험 결과에서 건조상태와 습윤상태의 단입자 강도는 각각 43.89, 39.86MPa의 높은 강도를 나타내었다. 이렇게 silica sand는 파쇄가 그다지 발생하지 않는 시료로 판명되므로(Ham and Kim, 2008), 본 시험에서 적용한 고압영역내에서 완전한 입자파쇄의 경향은 일어나지 않았다. 그러나, 수렴된 2개의 조밀한 공시체의 압축곡선과 느슨한 공시체의 압축곡선의 경사를 비교하면 느슨한 공시체의 기울기가 높으므로, 더 높은 압력을 가할 수 있는 조건이라면 조밀한 공시체의 압축곡선과 일치할 것으로 고려된다. 또한, 본 연구의 목적은 혼합토의 압축곡선 특성에 그 중점을 두고 있으므로, Figure 4(a)그림에는 부가적으로 고압영역에서의 거동을 예측한 압축곡선을 파선으로 덧붙여 표기했다.

Figure 4(b), (c), (d)는 각각 세립분함유율 9.8%, 14.7%, 19.6%의 시료를 대상으로 $E_c=22, 504\text{kJ/m}^3$ 로 제작한 공시체의 압축곡선이며, 모든 압축시험 결과의 압밀항복응력은 압축지수 C_c 선을 이용한 Mikasa(三笠)법을 이용하여 항복응력 p_c 를 구하여 표기하였다. 실험결과에서 동일한 세립분함유율에 대한 항복응력의 경향으로는 조밀한 공시체가 느슨한 공시체보다 높은 응력에서 항복응력을 나타내며, 세립분함유율이 높으면 높을수록 항복응력은 높아지는 경향을 나타낸다. 또한, 세립분이 함유된 시료에 대한 압축곡선은 항복응력 p_c 이상의 압력조건에서 서로 수렴하지 않고 평행하게 진행되는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이를 통해, 그림 (a)의 Silica sand도 파쇄성이 작은 재료이며 세립분을 이용한 실트도 파쇄성이 일어나지 않고 단기간내에 압축되는 세립분이므로, 조립자간의 접촉면이 세립분에 의한 쿠션작용으로 인해 실험 조건의 압력하에서는 거의 평행

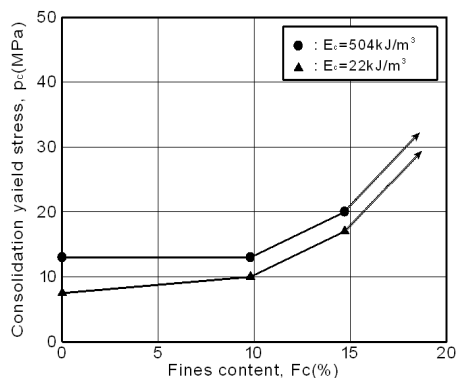


Fig. 5. Relationship between consolidation yield stress and fines content

한 압축곡선을 나타내는 것을 고려된다.

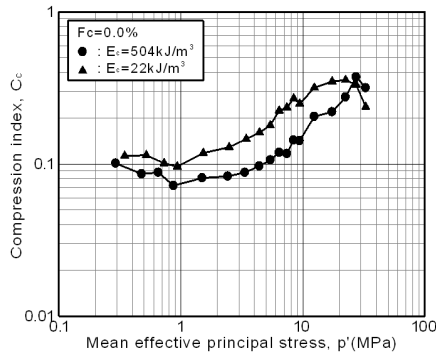
Figure 5에는 Figure 4에서 Mikasa(三笠)법으로 계산한 압밀항복응력, p_c 와 세립분함유율, F_c 의 관계를 나타냈다. 그림에 나타난 바와 같이 세립분함유율이 증가함에 따라 압밀항복응력은 상승하는 경향을 나타내고 있으며, 동일한 세립분함유율에서 느슨한 쪽이 조밀한 공시체보다 낮은 항복응력을 나타낸다. 또한, 세립분함유율 10%이상에서는 일정한 항복응력의 차를 두고 평행하게 증가함을 알 수 있다. 그림에서 세립분함유율이 19.6%인 경우에는 실험을 통한 압축곡선의 결과에서 명료한 직선부분이 나타나지 않아 정확한 압밀항복응력을 산정할 수 없었기 때문에 예측되는 항복응력의 상한값을 표기하여 파선으로 나타냈다.

Figure 6에는 아래의 식 (2)를 이용하여 $e - \log \sigma'$ 곡선의 접선경사인 압축지수 C_c' 와 평균유효응력과 관계를 세립분함유율 기준으로 나타냈다.

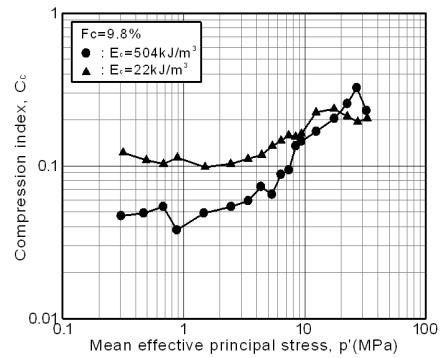
$$C_c' = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'} \quad (2)$$

그림의 모든 시료에서 초기간극비가 큰 공시체(다짐에너지= 22kJ/m^3)가 초기간극비가 작은 공시체(다짐에너지= 504kJ/m^3)보다 낮은 압력 영역에서 높은 압축지수를 나타내며, 압력이 높아질수록 그 차는 감소하는 것을 알 수 있다.

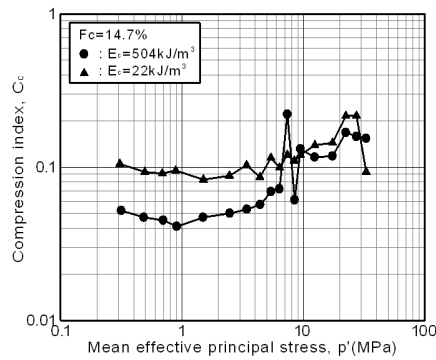
Figure 6의 결과를 동일한 다짐에너지($22, 504\text{kJ/m}^3$)로 구분하여 압축지수와 평균유효응력의 관계로 정리한 결과를 Figure 7에 나타냈다. Figure 7(a)에서 낮은 다짐에너지 22kJ/m^3 로 제작한 공시체는 낮은 응력하에서 세립분함유율에 영향을 받지 않고 거의 동일한 압축지수를 나타내나, 고압으로 진행됨에 따라 낮은 세립분함유율에서 높은 압축지수를 나타내는 것을 알 수 있다. 또한, Figure 7(b)의 높은 다짐에너지로 제작한 공시체에서는 $F_c=0\%$ 에서 $F_c=9.8\%$ 로 변하면 압축지수가 크게 감소하는 경향을 보이며, 세립분함유율의 증가에 따른 압축지수는 큰 차이를 나타내지 않고 거의 동일한 값을 나타냈다. 이는 조립자만으로 구성된 조밀한 공시체의 작은 간극안에 세립분이 조금 함유되는 것만으로도 모래가 골격구조를 쉽게 잃어버리기 때문이고, 세립분이 증가하여도 실트도 모래와 동일하게 입적이 작은 입상체이므로 세립분이 증가하여도 압축지수의 차이는 크게 발생하지 않은 것으로 고려된다.



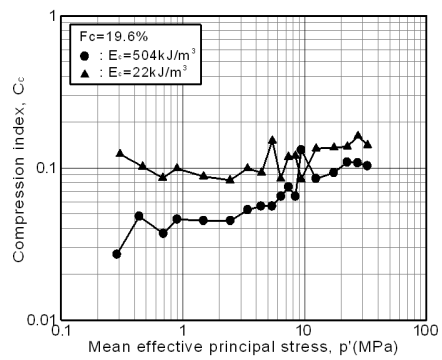
(a) $F_c=0.0\%$



(b) $F_c=9.8\%$

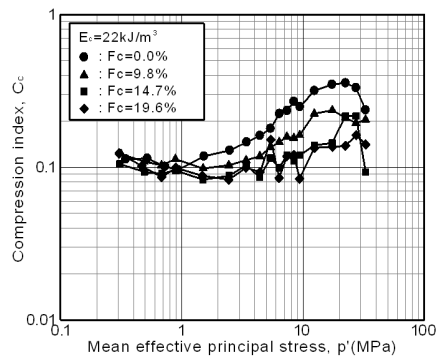


(c) $F_c=14.7\%$

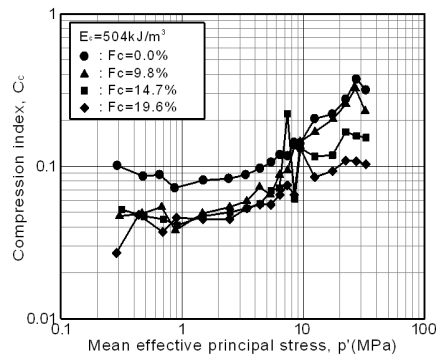


(d) $F_c=19.6\%$

Fig. 6. Relationship between compressibility index and mean effective principal stress (at constant fines content)



(a) 22kJ/m^3



(b) 504kJ/m^3

Fig. 7. Relationship between compressibility index and mean effective principal stress (at constant compaction energy)

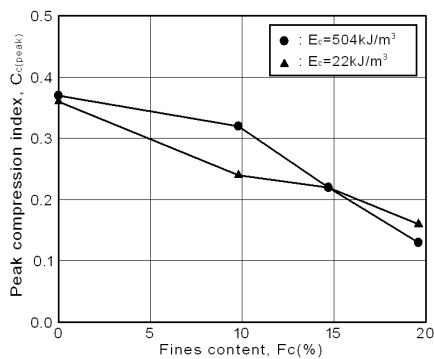


Fig. 8. Relationship between the maximum compressibility index and fines content

각 재하단계에 대한 압축곡선의 기울기 중 최대치 C_c ($C_{c(\text{peak})}$)와 세립분함유율의 관계를 Figure 8에 나타냈다. 그림에서 $C_{c(\text{peak})}$ 의 크기는 서로 다른 다짐에너지를 적용한 초기밀도의 영향을 거의 받지 않으며, 세립분함유율의 증가에 따라 최대압축지수는 감소하는 경향을 나타내고 있다.

4.2 모래 및 혼합토의 파쇄특성

대상시료의 압축시험 전/후에 대한 입자파쇄 발생정

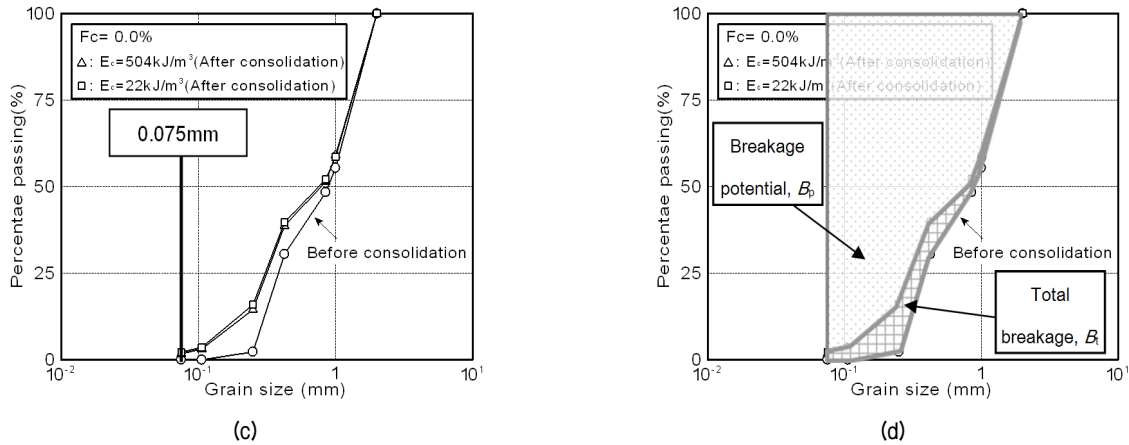


Fig. 9. Grain size distribution curves before and after consolidation

도를 고찰하기 위해, 시험이 종료된 후에 체가름 시험을 실시하여 각각의 시료에 대한 입도분포곡선을 산출했다. Figure 9(a), (b)에는 대표적으로 세립분함유율 0% 시료에 대한 압축시험 전/후의 입경가적곡선의 변화를 각각 나타냈다. 입자파쇄의 정도를 나타내는 지표로는 Hardin, (1985)이 제안한 파쇄량을 나타내는 파라미터 B_r 을 이용했다. B_r 은 Relative breakage라고 불리우며, 아래의 식 (3)에 의해 구할 수 있다.

$$B_r = \frac{B_t}{B_p} \quad (3)$$

식 (3)에서 B_p 는 the breakage potential을 의미하고 입도분포곡선에서 입경 0.075mm에 해당하는 지점에서 종축으로 연장한 직선의 오른쪽부분(0.075mm이상)과 시험 전의 입경분포곡선으로 구성된 폐합면의 면적이다. 한편, B_t 는 total breakage라고 하며, 입경 0.075mm의 종축 연장선과 시험 전의 입도분포곡선에서 시험 종료 후 왼쪽으로 이동한 입도분포곡선과의 사이에 위치한 폐합으로 이루어진 부분의 면적이다.

위와 같은 방식으로 산출한 Relative breakage와 세립분함유율의 관계를 Figure 10에 나타냈다. Figure 10에서 세립분의 증가에 따른 입자파쇄율은 급격히 감소경향을 나타내며, 순수한 Silica sand에서는 조밀한 공시체에서 많은 파쇄가 발생되나 세립분함유율이 증가함에 따라 느슨한 공시체 보다 낮은 파쇄율을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 Figure 7(b)에 나타낸 압축지수와 세립분함유율의 관계와 유사하게 조밀한 시료에서 세립분이 조금이라도 함유되는 것에 의해 큰 차이로 파쇄량이

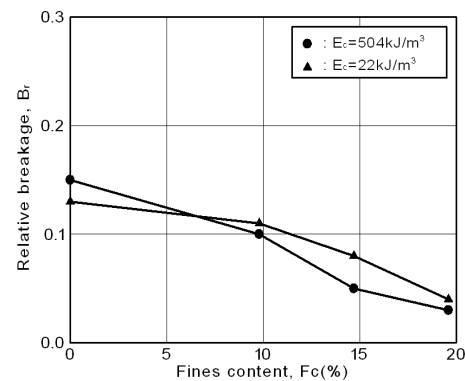


Fig. 10. Relationship between the relative breakage rate and fines content

줄어드는 경향을 나타내며, 조밀한 모래 간극에 세립분이 함유되어 조립자간의 접촉을 막아 완충재 역할을 함으로써 입자파쇄가 감소된 것이라 고려된다.

본 실험에서는 단입자 강도가 비교적 강한 Silica sand를 이용하여 혼합토의 압축곡선이 1개의 단일 NCL에 수렴 또는 평행하게 거동하는 현상이나 결론을 단정하기에는 무리가 있었지만, 시험조건의 압력하에서는 거의 평행하게 거동하는 양상을 나타냈으며, 세립분함유율의 증가에 따른 압축지수의 저하 및 항복응력이 증가함을 알 수 있었다. 또한, 이러한 고압영역에서도 혼합토는 초기의 조립자만의 밀도에 대한 영향을 받고 있으며, 보다 높은 응력을 가할 수 있는 Oedometer compression나 일차원 압축시험이 가능하다면 좀 더 명확한 결론을 도출할 수 있을 것이라 생각된다. 또한, 이러한 혼합토의 거동을 명확하게 하기 위해서 동일한 시료에 대한 고압 조건에서의 전단시험을 수행해야 할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 혼합토의 압축특성을 파악하기 위해 모래와 실트를 함유한 시료를 대상으로 공시체를 제작하여 고압삼축압축시험기를 이용한 등방압축시험을 수행했다. 실험에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 모래의 압축특성은 구속압이 증가해 항복할 때까지는 초기밀도가 대단히 큰 영향력을 미치고 있지만, 입자파쇄가 일어나는 것을 시작으로 항복에 달한 뒤에는 1개의 NCL에 수렴하는 경향을 나타낸다. 또, 밀도가 느슨한 공시체가 조밀한 공시체보다 항복응력이 작음을 알 수 있었다.
- (2) 혼합토의 압축특성은 세립분의 증가함에 따라 조립자가 미립자에 의해 둘러싸여 쿠션작용에 의해, 조립자의 파쇄가 일어나기 어려우므로 압축곡선의 최대경사가 완만해지며 항복응력도 커지는 것을 알 수 있다.
- (3) 압축지수 C_c 와 평균유효응력과의 관계는 낮은 압력조건에서 느슨한 공시체가 높은 압축지수를 나타내며, 압력이 증가할수록 그 차는 감소한다. 또한, 느슨한 공시체는 낮은 압력하에서 세립분함유율에 영향을 받지 않으나, 고압으로 진행됨에 따라 세립분함유율이 낮을수록 높은 압축지수를 나타냈다. 반면, 조밀한 공시체에서는 세립분의 유무에 따라 압축지수가 크게 감소하는 것을 알 수 있다.
- (4) 세립분함유율의 증가에 따라 최대압축지수는 감소하는 일의적인 경향을 나타내며, 상대파쇄율을 조사한 결과, 세립분함유율이 증가할수록 파쇄율은 감소하며 조밀한 공시체에서 더 낮은 파쇄율의 감소를 확인할 수 있었다.

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. Ham, T. and Kim, U. (2008), "Influence of Water on Compression Characteristic for Decomposed Granite Soils", *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.24, No.10, pp.1-9.

3. Hardin, B. O. (1985), "Crushing of Soil Particles", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.111, No.10, pp.1177-1192.
4. Hyodo, M., Kim, U., 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.
5. Japanese Geotechnical Society (1992), "Intermediate Soil, Sand or Clay", *Geo-Tech Note 2*, pp.1-6.
6. Kenny, T. C. (1977), "Residual Strengths of Mineral Mixture", *Proceedings of the 9th International Conference Soil Mechanics*, Tokyo1, pp.155-160.
7. Kim, J., Beak, W., Ishikura, R., and Matsuda, H. (2010), "Undrained Shear Strength Characteristics of Intermediate Soils and Their Application to Rapid Banking Embankment Method", *Proceedings of the 9th National Symposium on Ground Improvement, The Society of Material Science*, pp.299-304.
8. Martins, F. B., Bressani, L. A., Coop, M. R., and Bica, A. V. D. (2001), "Some Aspects of the Compressibility Behaviour of a Clayey Sand", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.38, pp.1177-1186.
9. Mitchell, J. K. (1977), "Fundamentals of Soil Behaviour", 2nd edn, John Wiley Interscience NewYork, pp.172-189.
10. 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.
11. Nakase, A. and Kamei, T. (1983), "Undrained Shear Strength Anisotropy of Normally Consolidated Cohesive Soils", *Soils and Foundations*, Vol.23, No.1, pp.91-101.
12. Nakase, A. and Kamei, T. (1988), "Undrained Shear Strength of Remoulded Marine Clay", *Soils and Foundations*, Vol.28, No.1, pp.29-40.
13. Ni, Q., Tan, T. S., Dasari, G. R., and Hight, D. W. (2004), "Contribution of Fines to the Compressive Strength of Mixed Soils", *Géotechnique*, Vol.54, No.9, pp.561-569.
14. Nocilla, A., Coop, M. R., and Colleselli, F. (2006), "The Mechanics of an Italian silt: an example of 'transitional' behaviour", *Géotechnique*, Vol.56, No.4, pp.261-271.
15. Ochiai, H. and Ohmine, K. (1993), "Compression and Strength Properties of Sand-Clay Mixed Soils", *Tsuchi-to-Kiso*, Vol.41, No.7, pp.11-16.
16. Tanaka, H., Tanaka, M., and Shiwakoti, D. R. (2001), "Characteristics of soils with low plasticity: Intermediate soil from Ishinomaki, Japan and lean clay from Drammen, Norway", *Soils and Foundations*, Vol.41, No.1, pp.83-96.
17. 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.
18. Tsuchida, T. (1993), "Consolidation, Compression and Permeability Properties of Intermediate Soil and Mixture Soil", *Tsuchi-to-Kiso*, Vol.41, No.7, pp.5-10.
19. Yamamuro, J. A. and Covert, K. M. (2001), "Monotonic and Cyclic Liquefaction of Very Loose Sands with High Silt Content", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE*, Vol.127, No.4, pp.314-324.

(접수일자 2012. 7. 10, 심사완료일 2012. 8. 2)