모래 함유량이 점토의 액소성한계 및 전단강도에 미치는 영향

Effect of Sand Contents on Plastic and Liquid Limits and Shear Strength of Clays

박 성 식¹ Park, Sung-Sik

농 쥘 쥘² Nong, Zhenzhen

Abstract

For soil improvement, sand mats or sand compaction piles are often constructed on soft marine clays. In such cases, some amounts of sand and clay are inevitably mixed. Sand or gravel often exists in the weathered soils near the slope surface. This research investigates the effect of mixing sand content on consistency limits and shear strength of clays. Firstly, sand was mixed with kaolinite or bentonite at 0, 9, 17, 23, 29, 33, 50% and then liquid and plastic limits were measured. Both plastic and liquid limits decreased as a sand content increased. The water content of clay-sand mixtures with different sand content increased by 10% or 20% step by step and then their undrained shear strength was measured using a portable vane shear device called Torvane. For all cases, undrained shear strength of clay-sand mixtures decreased rapidly until reaching a certain value. Their state changed from undrained to drained state gradually as the sand content increased, which caused their undrained shear strength to decrease. On the other hand, a series of direct shear tests were also conducted on such clay-sand mixtures to investigate the effect of sand content on cohesion and angle of internal friction. It was found from clay-sand mixtures that their cohesion decreased but angle of internal friction increased as the sand content increased.

요 지

해안지역의 연약지반을 개량하기 위하여 연약지반 위에 모래를 포설하거나 모래다짐말뚝을 시공할 경우 점토와 모래가 서로 섞이는 경우가 많으며, 풍화된 사면의 표층에도 모래나 자갈 섞인 세립토가 많이 존재한다. 본 연구에서는 이와 같은 혼합토에 포함된 모래 함유량의 증가에 따른 점토의 액소성한계 및 전단강도 변화에 대해 연구하였다. 먼저 카올리나이트와 벤토나이트에 모래 함유량을 0, 9, 17, 23, 29, 33, 또는 50%까지 증가시키면서 액소성한계시험을 실시하였으며, 모래 함유량이 증가함에 따라 액소성한계는 감소하는 경향을 보였다. 다양한 모래 함유량을 가진 카올리나이트와 벤토나이트에 함수비를 10% 또는 20%씩 단계적으로 증가시키면서 토베인시험기를 이용하여 비배수전단강도를 측정하였다. 동일한 모래 함유량을 가진 공시체의 경우 특정 함수비에서 비배수전단강도가 급격히 감소하였으며, 공시체 내 모래 함유량이 증가할수록 배수가 발생하면서 비배수전단강도는 감소하였다. 한편 동일한 조건의 혼합토에 대한 직접전단시험을 실시하여 모래 함유량의 증가에 따른 점토-모래 혼합토의 점착력 및 내부마찰각을 측정하였다. 점토 내 모래 함유량이 증가함에 따라 점착력은 감소하였으며, 내부마찰각은 증가하는 경향을 보였다.

Keywords : Sand, Clay, Liquid limit, Plastic limit, Shear strength

1 정회원, 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 토목공학전공 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., Tel: +82-53-950-7544, Fax: +82-53-950-6564, sungpark@knu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 비회원, 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 토목공학전공 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

연약지반 개량 시 상부에 모래층을 포설하거나 모래 다짐말뚝을 시공할 경우 점토에 모래가 관입되거나 섞이면서 혼합층이 형성된다(Tan et al., 1994). 또는 모래의 투수성을 낮추기 위해 인위적으로 점토를 모래에 소량 혼합하기도 한다(Dafalla, 2013). 풍화된 사면의 표층에도 세립토(점토와 실트)와 조립토(모래나 자갈)가 서로 섞여 있는 경우가 많다. 이러한 점토와 모래 혼합토에서 점토 또는 모래 함유량이 흙의 액소성한계에 미치는 영향에 대한 연구는 1960년대부터 수행되어 왔다(Seed et al., 1964a, 1964b; Sivapulliah and Sridharan, 1985). Seed et al.(1964b)에 의하면 무기질 점토 함유량이 10% 또는 유기질 점토 함유량이 20% 이상인 경우 액성한계와 점토 함유량의 관계는 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 점토 함유량이 20-30% 이상인 혼합토에서 대부분의 연구자들(Dumbleton & West, 1966; Nagaraj et al., 1987; Tan et al., 1994)은 점토 함유량이 증가함에 따라 액성한계가 선형적으로 증가하는 경향을 관찰하였다. 한편 Sivapulliah and Sridharan(1985)은 다양한 점토 함유량을 가진 흙에 대한 연구에서 액성한계와 점토 함유량의 비선형적인 관계를 보였다. Bera(2011)는 모래 함유량이 점토의 공학적 특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 세 종류의 점토에 모래 함유량을 3%에서 21%까지 증가시키면서 액소성 및 수축한계, 다짐시험, CBR시험 등을 수행하였으며, 기존 연구 결과처럼 모래 함유량이 증가함에 따라 점토의 종류에 관계없이 공시체의 액소성한계 및 수축한계가 모두 감소하였다.

몇몇 국외 연구자들은 모래 함유량에 따른 점토의 마찰각 및 점착력과 같은 전단강도 변화를 연구하였다. Tan et al.(1994)에 의하면 점토 종류에 따라 모래 함유량이 40% 이상인 경우보다 40% 이하인 경우에 함수비가 감소함에 따라 전단강도가 선형적으로 증가하는 경향이 더욱 뚜렷하게 나타났다. Dafalla(2013)는 점토 함유량과 함수비 변화에 따른 직접전단시험의 신뢰성을 연구하기 위해 모래에 점토 함유량을 0, 5, 10, 15, 100%까지 혼합하여 각 공시체에 함수비를 변화시키면서 직접전단시험을 실시하였다. 그 결과 점토 함유량이 증가함에 따라 점착력이 증가하였으며, 함수비가 증가함에 따라 내부마찰각과 점착력이 모두 감소하는 결과를 얻었다. Holt and Ellis(1961)의 자갈질 점토에 대한 연구 결과에 의하면 자갈 함유량이 35-50%로 증가할 경우 내

부마찰각과 점착력이 자갈 입자의 영향을 받는 것으로 나타났다. 한편 Kim et al.(2007, 2012), Yamamuro and Lade(1998), Yamamuro and Covert(2001) 등은 모래에 포함된 소성 또는 비소성 세립분이 정적 및 동적 전단강도에 미치는 영향에 대한 다양한 연구를 수행하였다.

하지만 점토에 모래와 같은 사질토가 소량으로 혼합된 흙의 공학적 특성에 대한 국내외 연구사례는 아직 부족한 실정이다. 특히 최근 토석류가 자주 발생하는 상황에서 국내 사면에 존재하는 점토와 사질토 혼합토에 강우로 인한 함수비 증가가 흙의 액소성한계 및 전단강도에 어떤 영향을 미치는지에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 점토에 낙동강모래를 0, 9, 17, 23, 29, 33, 50%까지 혼합하여 모래가 점토의 액소성한계 및 전단 거동에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 특히 새롭게 제안된 흐름한계(Flow Limit, FL) 개념을 포함하여 모래 함유량이 혼합토의 액소성한계에 미치는 영향에 대해서 분석하였다.

2. 모래질 점토의 액소성한계시험

일반적으로 산사태나 토석류가 발생할 가능성이 높은 흙은 상부에 풍화되거나 붕괴된 토사로 국내의 경우 그 두께가 보통 1-2m 정도이며, Fig. 1과 같이 크고 작은 모래나 자갈이 섞여 있다. 이와 같이 사질토가 혼재한 점토질 흙은 함수비 증가에 따라 연경도(consistency)가 달라지면서 토사의 유동이 시작되고 우면산 산사태(Fig. 1)와 같이 대형 토사 붕괴가 발생하기도 한다. 이와 같이 표층에 강도가 약한 사질토가 일부 포함된 점토가 분포할 경우, 강우 등으로 인한 함수비 증가에 따른 토사의 연경도 및 강도 변화를 미리 예측한다면 향후 발생

Fig. 1. Debris flow occurrence in Seoul (KGS Report, 2012)

할 수 있는 산사태나 토석류의 예경보 자료로 활용할 수 있다.

2.1 실험 재료 및 방법

본 연구에서는 통일분류법 상 CL로 분류되며 점토광물 중 가장 안정된 구조를 가진 카올리나이트(kaolinite)와 3층 구조로 가장 약한 결합력을 가지며 통일분류법 상 CH로 분류되는 벤토나이트(bentonite)를 사용하여 점토에 포함된 모래 함유량이 흙의 액소성한계에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 본 연구에 사용한 카올리나이트와 벤토나이트의 비중은 각각 2.47과 2.24이다. 모래는 낙동강모래를 사용하였으며, 낙동강모래는 실리

카가 78% 이상인 실리카질 모래로 약간 모난 형태를 하고 있다(Park and Choi, 2013).

카올리나이트 또는 벤토나이트에 낙동강모래를 0, 9, 17, 23, 29, 33, 또는 50% 혼합하여 재성한 다음 액소성한계시험을 실시하였다. 액성한계는 정적인 방법인 Fall cone방법을 사용하였으며, 영국기준을 이용하였다. 접시의 높이는 40mm, 직경은 55mm이며, 두부의 각은 30°, 중량이 80g인 콘을 사용하였다. 소성한계는 KS F2304 규정에 따라 3회 실시하여 평균값을 구하였다.

2.2 실험 결과

실험 결과는 Table 1과 같으며, Fig. 2는 카올리나이트

Table 1. Effect of sand content on various indexes of clays

Soil	Sand content, SC (%)	Liquid limit, LL (%)	Flow Limit, FL (%)	Plastic limit, PL (%)	Plasticity index, PI (%)	New PI (%)
Kaolinite	0	70	114	40	30	74
	9	66	109	39	27	70
	17	60	108	36	24	72
	23	57	104	33	24	71
	29	52	97	30	22	67
	33	49	97	27	22	70
	50	41	66	23	18	43
Bentonite	0	214	248	90	124	158
	9	219	235	105	114	130
	17	200	228	105	95	123
	23	185	213	101	84	112
	29	169	205	82	87	123
	33	160	202	68	92	134
	50	101	132	46	55	86

Fig. 2. Effect of sand content on FL, LL and PL

Fig. 3. Effect of sand content on New PI and PI

트와 벤토나이트에 포함된 모래 함유량에 따른 액성한계(Liquid limit, LL), 소성한계(Plastic limit, PL) 그리고 흐름한계(Flow Limit, FL)의 변화를 비교하고 있다. 여기서 흐름한계는 비배수전단강도가 0이 되는 흙의 함수비를 나타낸다(Park and Nong, 2013). 점토의 종류에 관계없이 모래 함유량이 증가함에 따라 액성한계, 소성한계 그리고 흐름한계 모두 감소하는 경향을 보였다. Fig. 2(a)의 카올리나이트의 경우 대부분의 지수(index)가 선형적으로 감소하는 경향을 보이지만, Fig. 2(b)의 벤토나이트는 다소 비선형적으로 감소하는 경향을 보였다. Fig. 3은 두 종류의 점토에서 모래 함유량의 증가에 따른 소성지수(Plasticity Index, PI)와 새로운 소성지수(New PI=FL-PL)를 비교하고 있다. Fig. 3과 같이 모래 함유량이 증가할 경우 소성지수와 새로운 소성지수는 감소하였으나, 카올리나이트의 경우에는 모래 함유량 33%까지는 크게 감소하지 않았다. 본 연구 결과는 기존 Bera(2011)를 비롯한 여러 연구자들의 결과와 유사하게 모래와 같은 사질토의 증가에 따라 흐름한계를 비롯하여 액소성한계가 감소하는 경향을 보였다.

3. 함수비 증가에 따른 모래질 점토의 비배수전단강도

3.1 점토의 비배수전단강도시험 결과

본 연구에서는 측정이 간편하고 사용이 용이한 토베인(Torvane)으로 비배수전단강도를 측정하였다. 토베인

은 베인시험기구의 수정형으로 검증된 스프링을 이용하여 비배수전단강도를 즉시 측정할 수 있다. 연약한 점토부터 딱딱한 점토까지 비배수전단강도를 모두 측정할 수 있다. 다양한 강도를 가진 점토를 위해 큰 날개(0-0.2kg/cm²), 일반 날개(0-1kg/cm²), 작은 날개(0-2.5kg/cm²)와 같은 세 종류의 베인 크기가 있으며, 점토가 연약할수록 사용하는 베인의 날개가 크다. 본 연구에서는 높은 함수비를 가진 재성형 시료를 사용하였기 때문에 큰 날개를 사용하였다. 토베인을 이용한 점토의 비배수전단강도 측정방법은 표시점과 눈금판을 '0'으로 맞춘 다음 일정한 수직압력으로 토베인을 흙 속에 삽입한 다음 흙이 전단파괴될 때까지 회전시키면 비배수전단강도가 다이얼 게이지 눈금으로 표시된다.

카올리나이트와 벤토나이트 공시체에 함수비를 증가시키면서 토베인으로 측정한 비배수전단강도 결과를 Table 2와 Fig. 4에 비교하였다. 카올리나이트의 경우에는 함수비를 40%부터 100%까지 10%씩 증가시키면서 측정하였으며, 비배수전단강도는 28kPa에서 1.8kPa까지 감소하였다. 벤토나이트의 경우에는 함수비를 80%부터 220%까지 20%씩 증가시키면서 측정하였으며, 비배수전단강도는 22kPa에서 1.5kPa까지 감소하였다. 점토의 종류에 관계없이 함수비가 증가함에 따라 비배수전단강도는 급격히 감소하다가 특정 함수비 이후에는 완만하게 감소하는 경향을 보였다. 예를 들면, 카올리나이트의 경우에는 함수비가 50%에서 60%로 변할 때 비배수전단강도가 24kPa에서 9.8kPa로 59% 감소하였으며, 벤토나이트의 경우에는 함수비가 140%에서 160%

Table 2. Comparison of undrained shear strength (C_u) with water content increase

Soil	Water content (%)	C_u (kPa)
Kaolinite	40	28
	50	24
	60	9.8
	70	5.4
	80	3.4
	90	2.8
	100	1.8
Bentonite	80	22
	100	19
	120	17
	140	14
	160	6.2
	180	3.6
	200	2.4
	220	1.5

Fig. 4. Undrained shear strength with water content increase

로 변할 때 비배수전단강도가 14kPa에서 6.2kPa로 56% 감소하였다. 이러한 현상은 포화된 점토의 내부 구조가 특정 함수비에서 급작스럽게 붕괴되면서 발생한 것으로 판단된다.

3.2 모래질 점토의 비배수전단강도시험 결과

본 연구에서는 먼저 카올리나이트에 모래를 0, 9, 17, 23, 29, 33, 또는 50% 혼합한 다음, 각각의 공시체에 함수비를 30%에서 100%까지 증가시키면서 토베인을 이

Table 3. Results of undrained shear strength on Kaolinite and sand mixtures

Water content	Sand content (%)						
	0	9	17	23	29	33	50
30	—	—	—	30	36	40	19
40	28	30	34	24	20	18	3
50	24	18	17	8.0	6.0	5.0	1.6
60	9.8	6.4	6.0	4.2	3.4	3.0	0.8
70	5.4	4.0	3.6	3.4	2.4	2.0	—
80	3.4	2.8	2.6	2.2	2.0	1.6	—
90	2.8	2.0	2.0	1.4	1.2	1.0	—
100	1.8	1.6	1.2	—	—	—	—

Fig. 5. Undrained shear strength of Kaolinite with water content

용하여 비배수전단강도를 측정하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다. Fig. 5는 모래 함유량이 다른 각각의 공시체에 대한 함수비 증가에 따른 비배수전단강도 변화를 나타내고 있다. 3.1절의 결과와 유사하게 함수비 증가에 따라 비배수전단강도는 bilinear의 형태로 감소하였다. 특히 어떤 함수비에서 비배수전단강도가 급격히 감소하다가 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보였으며, Park and Nong(2013)에 의하면 이런 특정 함수비를 흐름함수비(Flow Water content, FW)라 정의하였다. 흐름함수비를 구하는 방법은 함수비가 증가함에 따라 비배수전단강도가 급격히 감소하는 구간인 1차 항복구간의 연장선을 그은 다음 비배수전단강도가 서서히 감소하는 2차 항복구간의 연장선과 만나는 점에 대응하는 함수비를 흐름함수비라 하였다. Fig. 5에 X로 흐름함수비를 표시하였으며, 모래 함유량이 증가할수록 Table 4와 같이 흐름함수비는 점점 감소하였다. Fig. 6은 카올리나이트 공시체에서 모래 함유량과 흐름함수비의 상관관계를 나타내고 있으며, 모래 함유량이 증가함에 따라 흐름함수비가 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 순수 점토의 경우 전단 시 비배수 거동을 보이지만, 모래 함유량이 증가하면서 흙의 점착력 감소와 배수가 발생하기 시작하면서 비배수전단강도가 감소한 것으로 판단된다.

Table 3의 결과를 이용하여 함수비가 동일한 경우 모

Table 4. Results of Flow Water content on sandy clays

Clays	Sand content (%)						
	0	9	17	23	29	33	50
Kaolinite	67	62	61	54	51	50	40
Bentonite	189	176	172	145	140	139	89

Fig. 6. Flow water content of Kaolinite with sand content

래 함유량이 비배수전단강도에 미치는 영향을 Fig. 7에 비교하였다. 함수비가 50% 이상인 경우에는 모래 함유량이 증가함에 따라 비배수전단강도가 점점 감소하는 경향을 보이지만, 함수비가 이보다 낮은 경우에는 모래 함유량 증가에 따라 강도가 약간 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 모래가 소량으로 포함된 공시체의 함수비가 30%와 40%인 경우에는 불포화 상태로 흙 입자 사이에 부의 간극수압(suction pressure)이 발생하며, 이로 인한 겉보기 점착력 증가로 상대적으로 높은 강도를 보인 것으로 판단된다.

카올리나이트와 유사하게 모래 함유량이 다른 여러 بنت로나이트 공시체에 함수비를 60%에서 220%까지 증가시키면서 비배수전단강도를 측정하였으며, 그 결과는 Table 5와 같다. Fig. 8은 모래 함유량이 다른 공시체에서 함수비 증가에 따른 비배수전단강도를 비교하고 있다. 그 결과 카올리나이트와 유사한 경향을 보이며, 흐름함수비는 Fig. 8에 X로 표시하였다. Fig. 9는 بنت로나이트 공시체에서 모래 함유량의 증가에 따른 흐름함수비의 변화를 나타내고 있으며, 모래 함유량이 증가함에 따라 흐름함수비가 카올리나이트와 유사하게 선형적으로 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 10은 모래 함유량의 증가에 따른 بنت로나이트의 비배수전단강도를 비교하고 있다. 함수비가 160% 이상일 경우에는 모래 함유량에 관계없이 5kPa 정도의 낮은 비배수전단강도를 보였다. 하지만 함수비가 60-140%

Fig. 7. Undrained shear strength of Kaolinite with sand content

Table 5. Results of undrained shear strength on Bentonite and sand mixtures

Water content	Sand content (%)						
	0	9	17	23	29	33	50
60	—	—	—	19	23	26	29
80	22	30	36	17	20	24	12
100	19	21	27	15	17	18	3.2
120	17	19	23	8.8	7.4	7.0	1.2
140	14	17	14	5.4	4.4	3.6	—
160	6.2	5.0	4.4	4.0	3.2	2.2	—
180	3.6	3.2	2.6	2.8	1.2	0.8	—
200	2.4	2.0	1.4	0.8	0.6	0.4	—
220	1.5	1.2	0.8	—	—	—	—

Fig. 8. Undrained shear strength of Bentonite with water content

Fig. 9. Flow water content of Bentonite with sand content

Fig. 10. Undrained shear strength of Bentonite with sand content

로 상대적으로 낮은 경우에는 모래 함유량의 증가에 따라 비배수전단강도가 최대 36kPa까지 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 카올리나이트와 유사하게 모래 함유량이 증가함에 따라 공시체에서 부분적으로 배수가 발생하여 비배수전단강도가 감소한 것으로 판단된다.

4. 모래질 점토의 전단강도시험 및 결과

모래 함유량에 따른 점토의 점착력과 내부마찰각의 변화를 분석하기 위하여 카올리나이트 또는 벤토나이트에 모래를 0, 9, 17, 23, 29, 33, 또는 50% 혼합한 다음

0.1mm/min의 속도로 직접전단시험을 실시하였다. 또한 모래질 점토의 함수비가 전단강도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 낮은 함수비와 높은 함수비의 두 조건을 실험하였다. 점토와 모래 그리고 정해진 양의 증류수를 잘 혼합한 다음 전단박스에 넣고 정해진 수직하중에 도달할 때까지 느린 속도로 하중을 증가시켰다. 하중 증가로 인

한 배수가 충분히 발생할 수 있도록 기다린 다음 더 이상 배수가 발생하지 않을 경우 전단시험을 실시하였다.

4.1 카올리나이트에 대한 실험 결과

Table 6은 낮은 함수비(30% 또는 40%) 또는 높은 함

Table 6. Results of direct shear tests on Kaolinite and sand mixtures

Soil	Sand content (%)	Water content (%)	Normal stress (kPa)	Direct shear test results		
				Max. Shear stress (kPa)	Cohesion (kPa)	Angle of Internal friction (°)
Kaolinite	0	40	50	51	26.9	25.5
			100	74		
			200	122		
		70	50	36	15	25.8
			100	68		
			200	110		
	9	40	50	45	22	23.8
			100	65		
			200	111		
		70	50	31	11.6	24.4
			100	61		
			200	101		
	17	40	50	58	39	23
			100	87		
			200	123		
		70	50	47	26	24.7
			100	74		
			200	117		
	23	30	50	49	29.9	29.2
			100	81		
			200	134		
		60	50	24	0.7	26.9
			100	54		
			200	101		
	29	30	50	42	15.9	28.4
			100	72		
			200	123		
		60	50	32	5.5	24.7
			100	46		
			200	99		
	33	30	50	61	32	29
			100	86		
			200	144		
		60	50	51	24	25.8
			100	69		
			200	122		
	50	30	50	40	14.5	26.0
			100	62		
			200	113		
		60	50	32	2.25	28.3
			100	52		
			200	111		

수비(60% 또는 70%)를 가진 모래 섞인 카올리나이트 공시체에 대한 직접전단시험 결과이다. 전단과정 중에 전단응력 증가로 일부 공시체의 상부에서 약간의 배수가 발생하였다. 전단시험 결과 내부마찰각은 23-29.2°, 점착력은 0.7-39kPa 사이로 변화가 다소 크게 나타났다. Fig. 11은 모래 함유량의 증가에 따른 점착력과 내부마찰각의 변화를 비교하고 있다. 모래 함유량의 증가에 따라 점착력은 크게 변하지 않지만 전반적으로 감소하는 경향을 보이며, 함수비가 낮은 공시체가 상대적으로 높은 점착력을 보였다. 함수비가 낮은 경우에 공시체 일부가 불포화 상태로 있기 때문으로 판단된다. 모래 함유량이 증가함에 따라 내부마찰각은 6° 범위에서 전반적으로 증가하는 경향을 보이며, 함수비에 따른 뚜렷한 차이는 나타나지 않았다. 이것은 모래 함유량이 50%까지 증가하여도 여전히 모래 입자는 점토에 의해 둘러싸여 있는 상태로 모래 입자가 서로 연결되어 있지 않아 그 영

향이 미미한 것으로 판단된다.

Fig. 12는 높은 함수비를 가진 모래 함유량이 29%인 카올리나이트의 직접전단시험 모습을 보여주고 있다. 전단시험 전의 공시체는 Fig. 12(a)와 같이 상당히 느슨한 상태이지만, 수직응력을 가한 후 공시체가 압축되면서 Fig. 12(b)와 같이 공시체 상하부에서 배수가 발생하였다. 낮은 함수비를 가진 공시체의 경우에는 수직응력 증가에 따라 압축은 되지만 배수는 크게 발생하지 않았다.

4.2 벤토나이트에 대한 실험 결과

Table 7은 낮은 함수비(80% 또는 100%) 또는 높은 함수비(160% 또는 180%)를 가진 모래 섞인 벤토나이트 공시체에 대한 직접전단시험 결과이다. 점착력은 카올리나이트와 유사하게 2.1-30.5kPa 사이이지만, 내부마

Fig. 11. Influence of sand content on cohesion and friction angle of Kaolinite and sand mixtures

Fig. 12. Photos of direct shear test on Kaolinite and sand mixtures

찰각은 3.1-8.7° 정도로 상대적으로 낮았다. Fig. 13은 벤토나이트 공시체에서 모래 함유량의 증가에 따른 점착력과 내부마찰각의 변화를 비교하고 있다. 모래 함유량이 증가함에 따라 함수비가 낮은 경우에는 점착력이 전

반적으로 감소하는 경향을 보이지만, 함수비가 높은 경우에는 점착력이 약간 증가하는 경향을 보였다. 카올리나이트와 유사하게 모래 함유량이 증가함에 따라 내부마찰각은 6° 범위에서 증가하는 경향을 보였다.

Table 7. Results of direct shear tests on Bentonite and sand mixtures

Soil	Sand content (%)	Water content (%)	Normal stress (kPa)	Direct shear test results		
				Max. Shear stress (kPa)	Cohesion (kPa)	Angle of Internal friction (°)
Bentonite	0	100	50	32	30.5	3.1
			100	38		
			200	41		
		180	50	21	18.2	4
			100	26		
			200	32		
	9	100	50	30	27.1	3.9
			100	35		
			200	41		
		180	50	7	2.1	4.7
			100	9		
			200	19		
	17	100	50	15	7.9	6.5
			100	17		
			200	32		
		180	50	9	2.7	8.4
			100	19		
			200	32		
	23	80	50	23	15	7.4
			100	26		
			200	42		
		160	50	8	2.4	6.4
			100	14		
			200	25		
	29	80	50	16	11.2	8.4
			100	30		
			200	39		
		160	50	28	22.1	8.7
			100	40		
			200	52		
	33	80	50	23	13.4	8.6
			100	26		
			200	45		
		160	50	27	26	5.3
			100	38		
			200	44		
	50	80	50	16	10.45	7.5
			100	25		
			200	37		
		160	50	13	7.5	6.8
			100	20		
			200	31		

Dafalla(2013)에 의하면 모래질 점토의 점착력과 내부마찰각은 모래 입자의 모양, 간극비 등 여러 요소의 영향을 받지만 주로 점토광물에 따라 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 가장 안정된 구조를 가진 카올리나이트와 3층 구조로 가장 약한 결합력을 가진 벤토나이트와 같이 서로 다른 두 종류의 점토에서 구한 점착력은 각각 0.7-39kPa와 2.1-30.5kPa로 유사하게 나타났지만, 내부마찰각은 각각 23-29.2°와 3.1-8.7°로 뚜렷한 차이를 보였다. 즉, 본 연구의 경우 점토광물의 차이가 흙의 전단강도 중 점착력보다는 마찰각에 더 큰 영향을 미친 것으로 판단되며, 일부는 사용한 모래와 간극비와 같은 실험조건도 영향을 미친 것으로 판단된다.

Fig. 14는 카올리나이트와 같이 높은 함수비를 가진 모래 함유량이 29%인 벤토나이트 공시체의 성형 모습과 직접전단시험에서 수직응력을 가한 후의 모습이다. 물을 잘 흡수하는 벤토나이트의 입자 구조로 인하여 카올리나이트의 경우보다는 배수량이 상대적으로 적게 발생하였다.

5. 결 론

연약지반 개량공사 현장이나 풍화가 진행된 사면 등을 비롯한 대부분의 현장 토사에는 크고 작은 모래와 점토가 섞여 존재하는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서

Fig. 13. Influence of sand content on cohesion and friction angle of Bentonite and sand mixtures

(a) Specimen before testing

(b) Specimen after applying normal stress

Fig. 14. Photos of direct shear test on Bentonite and sand mixtures

는 대표적인 점토광물인 카올리나이트와 벤토나이트에 모래 함유량을 0, 9, 17, 23, 29, 33, 또는 50%까지 증가시키면서 재성형한 공시체에 대한 액소성한계와 비배수전단강도를 측정하였다. 한편 점토에 모래 함유량을 증가시키면서 직접전단시험을 실시하여 점토-모래 공시체의 내부마찰각과 점착력의 변화를 측정하였다. 본 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 점토 종류에 관계없이 모래 함유량이 증가함에 따라 재성형된 공시체의 액소성한계 및 소성한계가 모두 감소하는 경향을 보였다.
- (2) 점토 종류에 관계없이 함수비가 증가함에 따라 재성형된 공시체의 비배수전단강도는 급격히 감소하다가 특정 함수비에서 완만하게 감소하는 경향을 보였다. 이 특정 함수비를 흐름함수비(Flow Water content)라 하며, 모래 함유량의 증가에 따라 흐름함수비는 점점 감소하는 경향을 보였다. 예를 들면, 카올리나이트와 벤토나이트의 모래 함유량이 0%에서 50%로 증가할 경우, 흐름함수비는 각각 67%에서 40%로, 189%에서 89%로 감소하였다.
- (3) 함수비가 낮은 경우를 제외하면 재성형된 점토 내 모래 함유량이 증가함에 따라 비배수전단강도는 전반적으로 감소하는 경향을 보였으며, 이는 완전한 비배수 상태가 아닌 공시체 내에서 부분적으로 배수가 발생하였기 때문으로 판단된다.
- (4) 모래를 카올리나이트 및 벤토나이트에 섞어 재성형한 혼합토에 대한 직접전단시험으로부터 구한 점착력은 각각 0.7-39 kPa와 2.1-30.5kPa로 서로 유사하게 나타났지만, 내부마찰각은 각각 23-29.2°와 3.1-8.7°로 서로 뚜렷한 차이를 보였다. 따라서 본 연구에서 사용한 점토광물의 차이는 흙의 전단강도 중 점착력보다는 마찰각에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단-공공복지안전연구사업의 지원을 받아 수행되었으며(No. 2012M3A2A1050982) 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Bera, K. A. (2011), "Effect of Sand Content on Engineering Properties of Fine-Grained Soil Mixed with Sand", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.16, pp.1275-1286.
2. Dafalla, M. A. (2013), "Effect of Clay and Moisture Content on Direct Shear Tests for Clay-Sand Mixtures", *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol.2013, pp.1-8.
3. Dumbleton, M. J. and West, G. (1966), "The influence of the coarse fraction on the plastic properties of clay soils", Report 36. Road Research Laboratory, Crowthorne.
4. Holtz, W. G. and Ellis, W. (1961), "Triaxial shear characteristics of clayey gravel soils", *Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng. Paris*, Vol.1, pp.143-149.
5. Kim, U.-G., Ahn, T.-B., Hyodo, M., and Beak, W.-J. (2007), "Effects of fine content on the monotonic shear behavior of sand-clay mixtures", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.4, pp.91-100.
6. Kim, U.-G., Kim, D.-W., Lee, J.-Y., and Kim, J.-H. (2012), "Evaluation of cyclic shear strength characteristics of sands containing fines", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.7, pp.31-40.
7. Korean Geotechnical Society (2012), Final report on Landslides at Umyeonsan, KGS, KGS11-250.
8. Nagaraj, T. S., Murthy, B. R. S., and Bindumadhava (1987), "Liquid Limit determination further simplified", *Geotech. Test. J.*, Vol.12, No.4, pp.302-307.
9. Park, S.-S. and Choi, S.-G. (2013), "A study on sand cementation and its early-strength using blast furnace slag and alkaline activators", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.4, pp.45-56.
10. Park, S.-S. and Nong, Zhenzhen (2013), "A proposal of flow limit for soils at zero undrained shear strength", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.11, pp.73-84.
11. Seed, H. B., Woodward, R. J., Jr., and Lundgren, R. (1964a), "Clay Mineralogical Aspects of the Atterberg Limits", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol.90, No.SM4, pp.107-131.
12. Seed, H. B., Woodward, R. J., Jr., and Lundgren, R. (1964b), "Fundamental aspects of the Atterberg limits", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol.9, No.SM6, pp.75-105.
13. Sivapulliah, P. V. and Sridharan, A. (1985), "Liquid Limit of Soil Mixtures", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.8, No.3, pp.111-116.
14. Tan, T. S., Goh, T. C., Karunaratne, G. P., and Lee, S. L. (1994), "Shear strength of very soft clay-sand mixtures", *Geotech. Test. J.*, Vol.17, No.1, pp.27-34.
15. Yamamuro, J.A. and Lade, P.V. (1998), "Steady State Concepts and Static Liquefaction of Silty Sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.124, No.9, pp.868-877.
16. 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*, Vol.127, No.4, pp.314-324.

Received : December 4th, 2013

Revised : December 28th, 2013

Accepted : January 6th, 2014