남악신도시 연약점토의 물리적 특성 및 역학적 특성 연구

Physcial and Mechanical Characteristics of Soft Clay in Nam-Ak New City

김종렬1), Kim, Jong Ryeol, 배성웅2), Bae Sung Wung, 이치열3), Lee, Chi Yeol,

1) 전남대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor. Dept. of Civil Engineering, Chonnam University
2) 전남대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chonnam University
3) 전남대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chonnam University

SYNOPSIS : Soft ground has complex features in mechanic character of ground.
Some problems about the settlement and transformation occur if the ground strength is comparatively weak and the depth is large. Therefore, we should consider physical and mechanical characters for safe, economical design and management.
As the result of the course, we can compare them with those of field then solve the limitations which were came from the complex character of the soft ground.
I have considered the soil's physical character (specific gravity of soil particles, moisture content, grain-size analysis etc) and mechanical character (direct shear test, consolidation, triaxial shear test etc), and then make out a linear interpolation by regression using the two, those and connection of the depth

Key words : physical character , mechanical character , linear interpolation , regression using

1. 서 론

전라남도 도청이 이전될 예정인 전남 무안군 삼향면 남악리 일대에 공단, 공항, 주거단지, 도로 등을 조성하기 위하여 대단위 매립 또는 성토사업이 활발히 추진되고 있다. 그러나 지반조건이 양호한 사업지구의 확보가 어려운 상황이며 국토의 효율적이고 균형적인 발전을 위해 지반이 양호한 지역뿐만 아니라 지반이 연약한 지역까지의 새로운 공간개발이 진행되고 있습니다. 이로 인해 지반특성이 불량하고 개발여건이 열악한 연약지반의 개발이 불가피하며 이에 대한 적극적인 대처방안이 요구되고 있다.

연약지반은 지반의 공학적 성질이 복잡한 특성을 가지고 있으며, 특히 지반의 강도가 작고, 심도가 깊을 때는 침하, 변형 등의 문제가 발생하기 때문에 안정적이고 경제적인 설계 및 관리를 위해서는 물리적 특성값과 역학적 특성값을 심도별 변화를 알아봄으로써 이론 해석을 통해서 얻어진 결과를 실제 현장과 대비하여 기술적 판단을 가미하여 연약지반상에서 복잡하고 다양한 성질 때문에 생기는 제약을 줄일수 있도록 하고자 한다.

흙의 물리적인 특성과 역학적 거동에 대한 강도특성을 다루고 토립자의 비중, 함수비, 입도분석 등 흙의 물성과 직접전단, 압밀, 삼축시험 등 역학시험을 통하여 흙의 역학적 특성과 심도와의 관계를 회귀분석을 통하여 상관관계식을 알아보았다.

2. 실 험

2.1 물성실험

현장에서 채취한 불교란 시료를 가지고 실험실로 반입한 후 점토의 물리적특성을 알아내고, 통일분류법에 의해 흙을 분류하였고, 한국 공업규격(KSF)에 의해 실험을 실시하였다.

2.2 역학실험

역학적 시험은 영국의 GDS사의 삼축압축 시험기를 사용하여 압밀 비배수 전단시험(CU-Test)과 비압밀 비배수시험(UU-Test)을 실시 하였다.

압밀 비배수 전단시험(CU-Test)은 불교란 점성토로 만든 원주형 공시체를 완전 포화시켜서 3축으로 등방압력을 가하여 구속응력이 일정한 상태에서 파괴 과정의 축방향 변형에 따른 전단 저항하중을 측정하였고, 구속응력은 심도에 따라 수직응력과 그 수직응력의 2배, 3배 적용하여 한 시료당 3번의 시험을 실시하였고, 축차응력을 증가시켜 0.5mm/min의 속도로 비배수 전단하였다. 비압밀 비배수시험(UU-Test) 공시체를 포화시켜 3축으로 등방압력을 가하여 구속응력을 달리작용시켜서, 파괴시험을 반복실험 하였다.

압밀시험은 불교란 시료를 압밀 Ring에서 포화시킨후, 수직 정하중을 단계로 가해서 생긴 간극수압을 24시간 동안 상하로 소산시켰다. 시간에 따른 침하량의 측정을 이용한 하중 - 침하량관계도에서 압축계수, 체적 변화 계수, 압축지수, 팽창 지수, 선행압밀응력을, 시간 - 침하량 변화도에서 압밀계수, 투수계수, 2차 압축지수 및 압밀비등을 구해서 기초지반의 압밀 침하량과 시간관계를 추정하였다.

3 물성 시험 결과

3.1 흙의 분류

점성토의 분류특성을 그림1 과 같이 소성도(plasticity chart)상에 나타내볼 때 조사지역에 분포하고 있는 점성토는 액성한계 50%를 기준으로 해서 A선(PI = 0.73(LL-20) 위에 중점적으로 분포하고 있으며 모두 전형적인 점토색깔을 띠고 있고 모든 시료는 깨끗하고 균질하게 분포하고 있었다. 따라서 흙 분류법상 통일 분류법으로 분류하면, 거의 압축성이 크고 투수성이 작은 CH과 압축성이 작은 CL로 분류되고 있다.

거의 CL 과 CH계열의 비가 1 : 3정도로 분포하고 있는 경향을 보이고 있다.

3.2 자연함수비

조사지역에 분포하는 연약층의 자연함수비 분포는 심도에 따라 감소하는 경향을 보이고 있으며, 45.04% ~ 76.77%의 범위로 분포하고 있다. 그림 2 에서 보이는 바와 같이 자연함수비는 동일한 심도에서도 분산이 약간 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

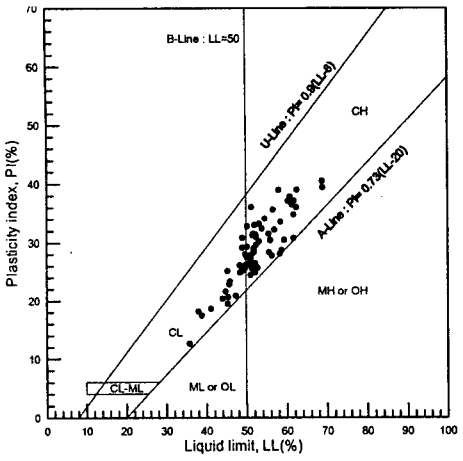

그림 1 소성도에 의한 흙의 통일분류

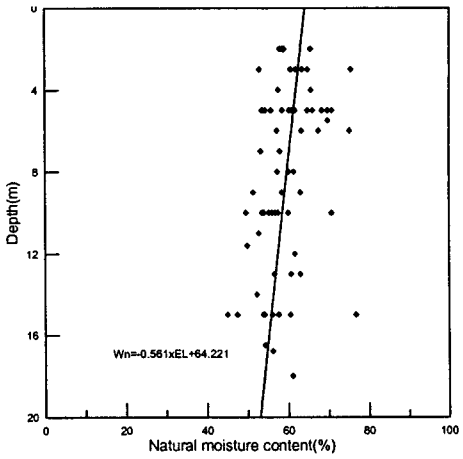

그림 2 자연함수비-심도관계

3.3 아터버그한계 및 연경도(Consistency)

본 조사지역에 분포하는 연약층에 대한 시험결과에서 확인된 아터버그한계는 액성한계(LL)= 38.02 ~ 68.90%, 소성지수(PI)= 18.14 ~ 39.41%으로 액성한계가 자연함수비와 비슷하게 나타나는데, 모래함유량의 다소에 따라 크게 차이를 보인다. 조사지역에서 분포하는 연약층의 액성한계(LL)분포는 44.80 ~ 68.80%의 범위로 분포하고 있다(그림 3 참조). 소성지수(PI)는 21.57 ~ 40.47%의 범위로 분포하고 있다(그림 4 참조).

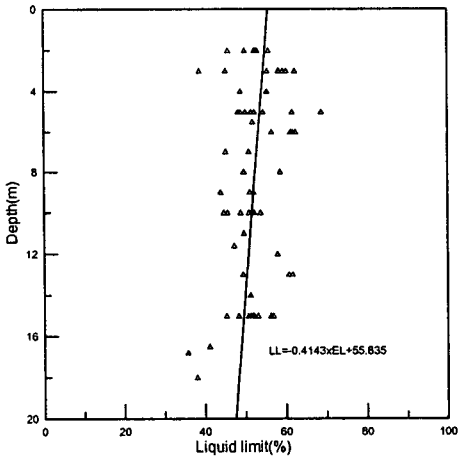

그림 3 액성한계-심도관계

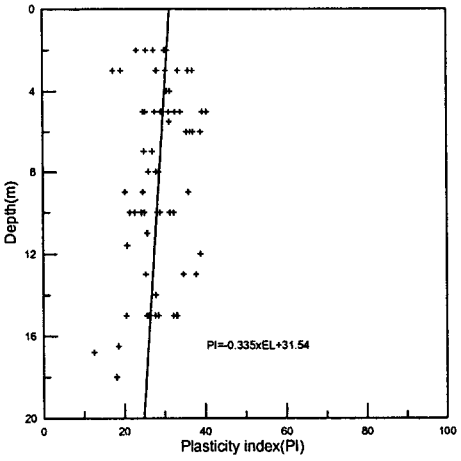

그림 4 소성지수-심도관계

3.4 입도 조성

흙의 입도는 흙을 구성하는 흙입자의 입경분포상태를 전체무게에 대한 백분율로 표시하며 입도시험의 결과는 흙분류에 이용되고 흙의 공학적 성질의 기초적인 판단의 지표가 된다. 조사과정에서 채취된 연약층의 #200번체(75㎛) 통과백분율은 93.14 ~ 100%로 나타났다. #200 통과중량 백분율은 연약층 전 심도에서 거의 98%이상으로 나타나고 있다. 이는 모래의 함유율이 거의 없으며 실트와 점토로 구성된 것으로 판단된다. (그림 5 참조)

표 1 물성 실험 결과

NO	Depth	W	Gs	Atterberg		Grain size distribution					USCS
				LL	PI	NO.4	NO.10	NO.40	NO.200	0.005mm	
NC-1	9.0~9.8	63.12	2.705	52.12	24.81	100	100	100	98.6	40.06	CH
NC-3	5.0~5.8	68.45	2.697	61.65	27.73	100	100	100	100	29.28	CH
NC-4	3.0~3.8	75.54	2.723	59.35	30.43	100	100	100	98	44	CH
NC-5	6.0~6.8	75.24	2.728	61.28	36.43	100	100	100	100	43.2	CH
NC-11	5.5~6.3	69.84	2.69	51.93	31.33	100	100	100	99.45	55	CH
NC-14	10.0~10.8	56.85	2.716	44.8	21.57	100	100	100	100	26.2	CL
NC-14	15.0~15.8	76.77	2.69	56.93	32.17	100	100	100	98.89	74.5	CH
NC-15	10.0~10.8	60.05	2.714	51	24.4	100	100	100	98	35.1	CH
NC-16	4.0~4.8	65.73	2.68	48.98	30.78	100	100	100	99.83	32	CL
NC-18	3.0~3.8	63.4	2.717	62.35	35.98	100	100	100	100	22.7	CH
NC-21	5.0~5.8	66.12	2.699	68.8	40.47	100	100	100	99.8	16.5	CH
NC-21	10.0~10.8	70.78	2.67	53.81	32.36	100	100	100	99.35	38	CH
NC-22	3.0~3.8	64.82	2.685	60.27	37.06	100	100	100	99.5	12.5	CH
NC-23	3.0~3.8	63.51	2.701	58.46	33.51	100	100	100	99.5	22	CH
NC-25	10.0~10.8	54.02	2.67	51.93	28.38	100	100	100	99.21	32.7	CH
NC-26	5.0~5.8	55.81	2.723	50.15	29.25	100	100	100	99.9	18	CH
NC-26	14.0~14.8	52.29	2.67	51.25	27.88	100	100	100	99.02	33	CH
NC-27	6.0~6.8	57.23	2.679	56.58	35.58	100	100	100	100	23	CH
NC-28	10.0~10.8	53.59	2.724	45.72	22.78	100	100	100	100	23	CL
NC-29	5.0~5.8	58.59	2.68	52.38	29.57	100	100	100	98.92	33.5	CL
NC-30	13.0~13.8	56.6	2.68	49.49	25.38	100	100	100	99.93	27	CL
NC-31	10.0~10.8	56.1	2.7	51.65	31.47	100	100	100	99.72	34.6	CH
NC-32	5.0~5.8	54.32	2.68	48.92	29.13	100	100	100	99.64	50	CL
NC-32	15.0~15.8	47.47	2.69	53.15	33.15	100	100	100	99.86	48.5	CH
NC-33	15.0~15.8	53.86	2.69	51.33	25.63	100	100	100	99.44	60	CH
NC-34	10.0~10.8	57.53	2.67	52.27	31.34	100	100	100	99.96	34	CH
NC-35	5.0~5.8	64.83	2.67	54.53	34.05	100	100	100	99.85	25.3	CH
NC-36	5.0~5.8	61.72	2.67	50.19	32.74	100	100	100	98.91	23	CH
NC-36	15.0~15.8	54.17	2.67	48.34	26.07	100	100	100	99.36	21.5	CL
NC-38	5.0~5.8	53.61	2.68	48.36	24.83	100	100	100	99.95	55	CL
NC-40	15.0~15.8	45.06	2.7	50.73	26.45	100	100	100	99.41	47.7	CH
NC-42	10.0~10.8	55.26	2.68	48.93	25.1	100	100	100	99.98	53	CL
NC-42	15.0~15.8	45.04	2.67	52.19	26.39	100	100	100	99.81	60	CH
NC-43	5.0~5.8	60.34	2.67	50.12	27.75	100	100	100	99.95	54	CH
NC-43	15.0~15.8	56.07	2.67	51.8	28.52	100	100	100	98.84	57	CH
NC-44	5.0~5.8	70.87	2.7	51.5	31.2	100	100	100	99.92	62	CH
NC-44	15.0~15.8	57.52	2.69	51.95	32.94	100	100	100	99.69	52.69	CH
BB-13	10.0~10.8	49.61	2.67	51.75	28.96	100	100	100	99.8	44	CH
NC-51	6.0~6.8	67.54	2.66	62.51	38.99	100	100	100	97.48	35	CH
NC-51	13.0~13.8	60.72	2.67	60.79	37.82	100	100	100	98.02	36.9	CH
NC-52	3.0~3.8	60.69	2.65	58.29	28.09	100	100	100	99.71	35	CH
NC-53	2.0~2.8	65.56	2.65	55.91	30.39	100	100	100	99.89	34.9	CH
NC-53	15.0~15.8	60.55	2.69	56.29	27.72	100	100	100	99.88	35.8	CH
NC-55	5.0~5.8	69.82	2.67	68.9	39.41	100	100	100	99.71	34.6	CH
NC-56	2.0~2.8	65.59	2.66	52.75	25.63	100	100	100	99.9	38	CH
NC-57	4.0~4.8	57.63	2.7	55.48	31.48	100	100	100	99.76	39.6	CH
NC-57	9.0~9.8	58.51	2.67	51.22	36	100	100	100	99.61	29	CH
NC-57	12.0~12.8	61.68	2.66	57.99	38.94	100	100	100	99.5	24.1	CH
NC-58	3.0~3.8	60.68	2.67	55.57	28.34	100	100	100	99.96	36	CH
NC-58	18.0~18.8	61.02	2.66	38.02	18.14	100	100	100	99.5	34.9	CL
NC-59	6.0~6.8	63.32	2.67	61.79	37.11	100	100	100	99.89	27.2	CH
NC-59	13.0~13.8	63.02	2.66	61.67	34.74	100	100	100	99.56	32.7	CH
NC-60	3.0~3.8	61.87	2.65	45.3	19.46	100	100	100	99.7	31	CL
NC-60	8.0~8.8	61.39	2.66	58.7	28.7	100	100	100	99.97	38.6	CH
NC-62	8.0~8.8	60.12	2.65	49.82	26.14	100	100	100	99.68	32	CL
NC-62	16.5~17.3	54.26	2.66	41.16	18.6	100	100	100	99.81	31.6	CL
NC-64	2.0~2.8	58.9	2.66	53.13	30.18	100	100	100	99.87	34	CH
NC-64	7.0~7.8	57.98	2.65	51	27.13	100	100	100	99.95	37.5	CH
NC-65	2.0~2.8	58.6	2.65	52.41	30.89	100	100	100	99.67	28.6	CH
NC-65	8.0~8.8	57.36	2.65	49.68	28.01	100	100	100	99.96	30.5	CL
NC-65	15.0~15.8	57.68	2.7	45.42	20.59	100	100	100	99.37	29.9	CL
NC-66	5.0~5.8	60.94	2.66	51.6	25.41	100	100	100	93.14	25.8	CH
NC-66	11.0~11.8	52.75	2.67	49.69	25.85	100	100	100	98.98	23.6	CL
NC-67	2.0~2.8	57.96	2.67	50.02	27.51	100	100	100	99.9	31.9	CH
NC-67	7.0~7.8	53.26	2.67	45.3	25.09	100	100	100	99.81	37.5	CL
NC-67	16.8~17.6	56.15	2.66	35.8	12.61	100	100	100	99.91	31.6	CL
NC-68	3.0~3.8	52.93	2.64	38.85	17.47	100	100	100	99.92	31.4	CL
NC-68	9.0~9.8	51.44	2.67	44.02	20.35	100	100	100	99.9	33.6	CL
NC-69	2.0~2.8	59.02	2.71	45.91	23.31	100	100	100	99.82	32	CL
NC-69	11.6~12.4	49.95	2.71	47.31	20.86	100	100	100	99.79	29.9	CL

3.5 비중(Gs)

시험에서 구한 흙입자의 비중은 흙고체 부분의 단위체적당 평균 무게이고, 흙을 구성하는 흙입자의 개개의 비중은 아니다. 따라서 흙입자의 비중은 흙의 조성광물에 따라 그 값이 다르다. 시험결과 중 비중 G_S=2.67 ~ 2.73(평균 2.691)로 나타났으며, 심도별 변화는 보이지 않았다. (그림 6 참조)

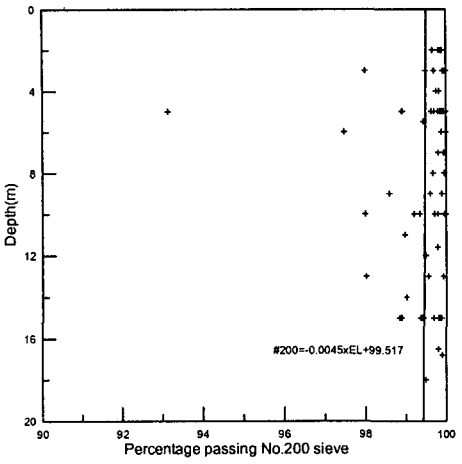

그림 5 #200체 통과량-심도관계

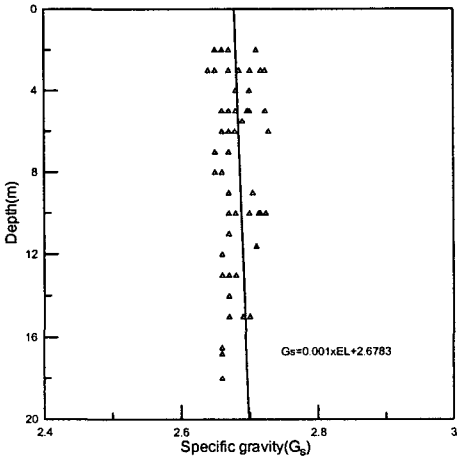

그림 6 비중-심도관계

4. 역학 시험 결과

4.1 삼축압축시험(CU)결과

삼축압축시험(CU)는 원통형 시료를 압축실 내에서 구속응력을 가하여 압밀시킨 후 삼축압축시험(UU)와 같은 조건으로 재하시켜 파괴포락선을 구하고 강도정수 C_{cu}, Φ_{cu}구하는 시험이다. 본 시험의 목적은 압밀에 의한 전단강도의 증가비를 추정하여 시공직후 Φ_u=0 해석에 이용하고 또한 간극수압을 동시에 측정하여 유효응력 강도정수(C_{cu}', Φ_{cu}')를 구하여 유효응력해석에 이용하는 것이다.

모든 시료에 대한 시험결과 전응력으로 구한 점착력은 0.000 ~0.112 kg/㎠, 유효응력으로 구한 점착력은 0.000 ~ 0.089 kg/㎠의 범위에 있으며 전응력으로 구한 내부마찰각은 10.76 ~15.54°, 유효응력으로 구한 내부마찰각은 16.61 ~24.95°의 범위를 나타내고 있다. 하부 연약층에서 채취한 시료에 대한 삼축압축시험 (CU) 결과 점착력은 상부 연약층에서 나타나는 점착력과 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 내부마찰각 또한 상부 연약층과 하부 연약층에서 큰 차이가 없다.

4.2 압밀특성

압밀침하량 산정시 필요한 토질정수는 최종침하량 계산에 필요한 압축지수(C_c)와 체적압축계수(m_v), 침하속도 계산에 필요한 압밀계수(C_v)로 나누어진다.

4.2.1선행압밀하중(P_c)

선행압밀하중(또는 압밀항복응력)은 흙이 과거에 받았던 최대유효 토피하중으로 그 값이 현재의 지중응력 (또는 유효 토피하중)과 일치하는 흙을 정규압밀점토이고, 선행압밀하중이 현재의 지중응력보다 작은 흙을 미압밀점토이며, 지중응력보다 큰 흙을 과압밀점토라 한다.

채취된 불교란시료에 대하여 실시한 표준압밀시험결과를 이용하여 심도별 선행압밀하중의 관계를 그려보면 심도가 깊어짐에 따라 선행압밀하중(P_c)이 약간 감소하는 경향을 보이고 있다.(그림 11)

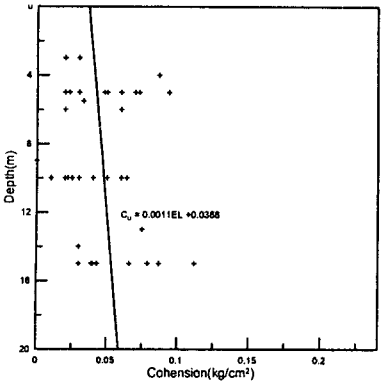

그림 7. 전응력을 이용한 점착력-심도 관계 (CU)

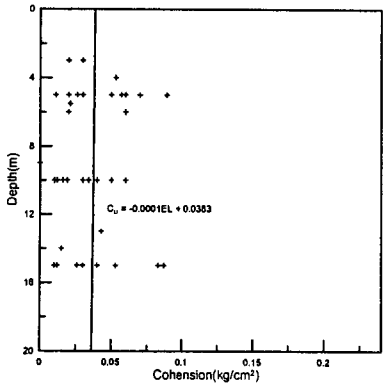

그림 8 유효응력을 이용한 점착력-심도관계 (CU)

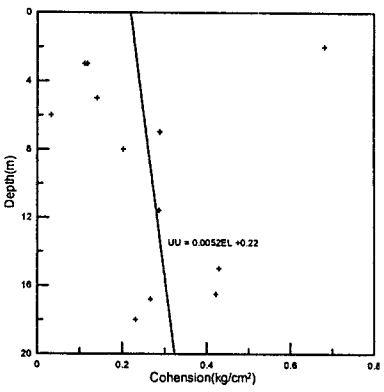

그림 9 전응력을 이용한 점착력-심도관계 (UU)

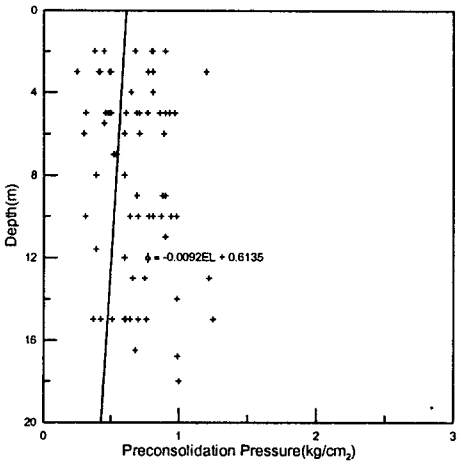

그림 10 전응력을 이용한 내부마찰각-심도 관계 (CU)

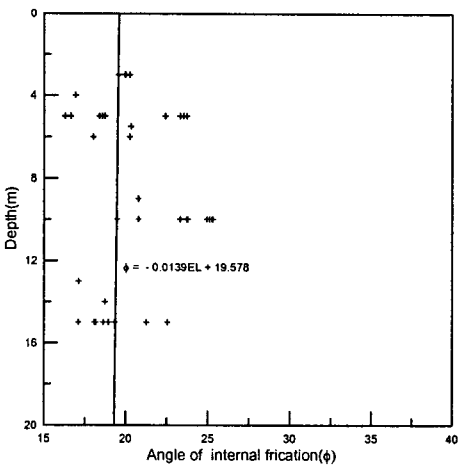

그림 11 유효응력을 이용한 내부마찰각-심도관계 (CU)

4.2.2 압축지수(C_c)

압축지수는 곡선 e-logP의 직선부 기울기를 말하며 소성이 큰 점토일수록 압축지수도 크다. 압축지수는 압밀침하량을 결정하는데 사용되는 요소중의 하나로서 채취된 자연시료에 대한 실험결과 점성토의 압축지수는 0.528 ~ 1.240정도의 범위에 분포하는, 심도증가에 따라 압축지수가 약간 증가하는 경향을 보이고 있다(그림 12 참조)

$$C_c = 0.009(LL-10)$$ 불교란시료

위의 제안식(Terzaghi & Peak, 1967)에 의해 압축지수를 계산하면, LL이 평균 52.81%이므로 C_c는 평균 0.385(불교란)이 값을 갖는다. 본 지구의 압밀시험으로부터 직접 구한 압축지수(0.764)와 액성한계로부터 추정한 압축지수의 값은 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

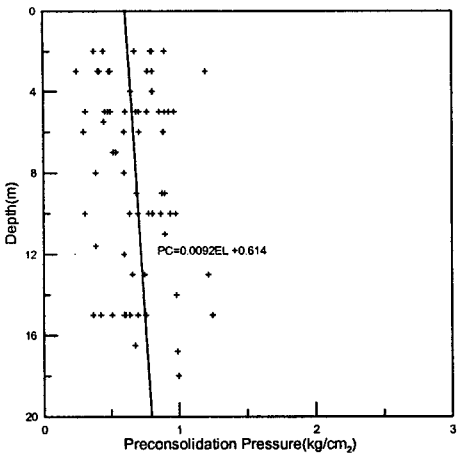

그림 12 선행압밀하중-심도관계

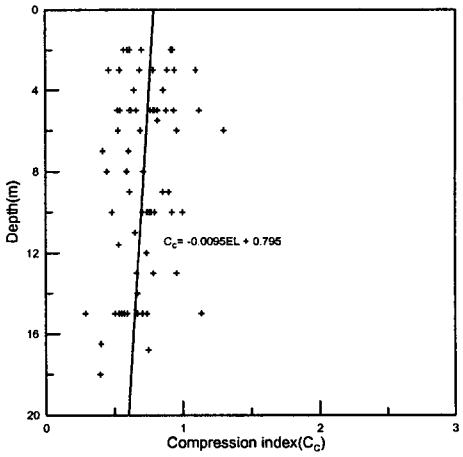

그림 13 압축지수-심도관계

5. 흙의 공학적 특성

5.1 물리적 특성

남악리 일대에서 채취한 시료의 자연함수비가 45.04%~76.77%의 범위에 분포하는 압축성이 큰 실트질 점성토이거나 조개껍질이 섞인 실트질 점토층으로서 통일분류법(USCS)상 압축성이 매우 큰 점토질(CH)이 대부분을 이루는 시료에 대해 물성실험을 실시하였고, 액성한계는 대략 자연함수비보다 약간 작거나 유사하며 #200체 통과량이 95%이상으로서 전형적인 세립토로 볼수 있다.

각 물리적 특성값을 심도에 따라 회귀분석하여 그 상관 관계식을 찾았으며, 이 값은 통계적으로 큰 의미를 지니는 분석값을 보이지는 않으나, 물성의 대체적인 경향을 알아보기 위한 자료로 활용하고자 한다.(표 2 참조)

표 2 토질 특성의 상관관계식

항 목		상 관 관 계 식
물리적 특 성	자연함수비-심도	W_n=-0.561×EL+64.221
	비중-심도	G_S=0.001×EL+2.6783
	액성한계-심도	LL=-0.4143×EL+55.835
	소성지수-심도	PI=-0.335×EL+31.54
	#200통과량-심도	No.200통과량=-0.0045×EL+99.517
비 고		EL : 심 도(m)

5.2 역학적 특성

5.2.1 강도 특성

현장에서는 압밀발생지반의 두께에 비해 면적이 상당히 크기 때문에 압밀은 수평방향의 변위가 없이 연직방향으로만 진행된다고 볼 수 있으나 삼축압축시험에서는 압밀이 등방성이므로 실제보다 더 큰 강도를 가져올 수 있다. 자연상태에 있는 시료를 채취하여 시험실에서 본래의 하중상태가 되도록 재압밀하면, 간극비가 작아지며 강도는 더 증가한다. 또한 일축압축시험 방법은 간단하나 시험상의 특성상 삼축압축시험보다 강도가 작게 평가되며, 특히 실트질을 많이 함유한 점성토에서는 그 경향이 더욱 현저하다. 본 시험에서도 일축압축강도는 삼축압축시험에서 얻은 강도보다 작게 나타났고, 삼축압축시험을 이용한 점착력과 내부마찰각은 심도에 대한 변화에 대해 큰 차이를 나타내지 않고 있다.

5.2.2 압밀 특성

점성토(세립토)지반의 압밀특성은 지반의 침하와 밀접한 관계가 있으며 흙의 강도정수(특히 지지력)에 지대한 영향을 미친다. 본 조사에서 실내시험 결과를 종합해 보면 압밀계수(C_v)가 1.10×10^{-4} ~ 5.70×10^{3} ㎠/sec 범위의 값으로 나타나고 또한 압축지수(C_c)는 0.528 ~1.240의 범위로 나타나고 있으며 토질특성은 연약한 점성토층으로 볼수 있다.

본 실험결과에서 심도와 토질특성간의 관계를 회귀분석하고 그 결과를 상관관계식으로 다음 표 3에 정리하였다. (단, 표 3 참조)

표 3. 토질특성의 상관관계식

항 목		상관관계식
역학적 특 성	유효응력 비배수점착력(CU)-심도	C_U =-0.0001×EL+0.0383
	유효응력 내부마찰각(CU)-심도	Φ = -0.0139×EL+19.578
	전응력 비배수점착력(CU)-심도	C_U = 0.0011×EL+0.0368
	전응력 내부마찰각(CU)-심도	Φ = -0.0092×EL+0.6135
	전응력 비압밀비배수점착력(UU)-심도	C_U = 0.0052×EL+0.22
	선행압밀하중-심도	P_C = 0.0092×EL+0.614
	압축지수-심도	C_C = -0.0095×EL+0.795
비 고		EL : 심도(m)

6.결론

남악신도시의 연약점토의 불교란 시료를 대상으로 물성실험을 한 결과, 압축성이 크고 투수성이 작은 전형적인 세립토로 구성되어 있고, 자연 함수비가 액성한계의 상태에 육박하고 있으며, 심도에 따라 약간 감소하는 경향을 보인다. 액성한계, 소성지수, #200 통과중량 백분율, 비중은 심도에 따라 큰 변화를 보이지 않는다. 대체적으로 물성치가 심도별로 일정하므로 비교적 균질한 세립토 지반이라고 할 수 있겠다.

압밀시험과 삼축압축시험을 통하여 점토의 압밀특성과 심도에 따른 강도특성의 변화를 회귀분석을 통하여 검토한 결과 토질특성은 연약한 점성토층을 이루고 있으며 하부 연약층에서 채취한 시료에 대해 삼축압축시험(CU)을 이용한 심도- 점착력 관계에서는 전응력에서는 심도가 깊어짐에 따라 점토의 점착력이 약간씩 증가하는 것을 보였으며 유효응력은 거의 변화 없이 일정하였다. (UU)실험에서는 심도가 깊어짐에 따라 기울기가 (CU)실험보다 조금 더 급하게 증가하였다. 내부마찰각은 상부 연약층과 하부 연약층에서 큰 차이를 나타내지 않고 있고 조금씩 감소하였다. 표준압밀시험결과를 이용하여 심도별 선행압밀하중의 관계를 그려보면 심도가 증가함에 따라 선행압밀하중(Pc)이 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 채취된 자연시료에 대한 실험결과 사업지구에 분포하고 있는 점성토의 압축지수는 0.528 ~1.240 정도의 범위를 나타내는데, 심도증가에 따라 약간의 감소경향을 보이고 있다.

참고문헌

1. 박병기 등(1995) 연약지반에서의 토질공학, 새론
2. Das, B.M.(1997) Advanced Soil Mechanics & Francis, USA
3. Muni Budhu(1999) Soil Mechanics & Foundations, USA
4. Robert D. Holtz & William D. Kovacs(1981) Geotechnical Engineering, USA
5. 김용필 등 (1997) 지반 공학 시험법 및 응용, 세진사