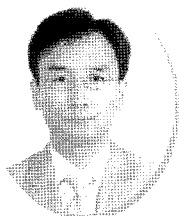
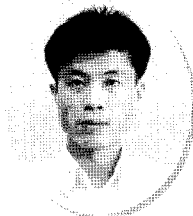


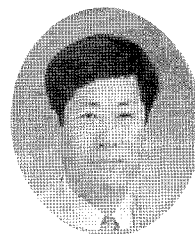
서부산지역 연약지반의 공학적 특성



최충락
(주)평화엔지니어링 이사



이병용
(주)평화엔지니어링 과장



이춘석
(주)수성엔지니어링 부사장

1. 서론

국가경제의 성장과 더불어 각종 용지의 수요가 증가되면서 지반조건이 양호한 지역에서의 사업지구 확보가 점점 어려워지고 있는 실정이다. 이에 따라 지반조건이 불량한 지역에서의 사업이 늘어나고 지반의 공학적 특성을 잘못 판단하여 공사를 실패하는 사례가 늘어나면서 학계, 업계 및 여러 연구기관에서 연약지반에 대한 공학적 특성을 정확히 분석하려는 노력과 더불어 연약지반처리기술에 많은 연구가 진행되어 오고 있다.

특히, 낙동강하구 델타퇴적토지반은 국내에서 알려진 가장 깊은 퇴적토층의 심도를 가지고 있어 압밀침하량이 크고 압밀소요시간이 오래걸리는 특징을 가지고 있는 지역으로 최근에 낙동강하구 델타퇴적토지반에서 시행되고 있는 각종 개발사업(녹산국가 산업단지, 신호공업단지, 명지주거단지, 양산·물금지구 택지조성 사업지구)에서 나타났듯이 예상침하량보다 2배이상의 침하량이 발생한

경우, 퇴적토층의 하부층이 미압밀로 판단하는 경우등 여러 가지 지반공학적 측면에서 문제점을 내포하고 있다.

서부산지역(낙동강하구)에서 시행된 지반조사자료를 이용하여 서부산지역 연약지반의 물리·역학적 특성을 파악하고자 하였다.

2. 대상지역 및 분석방법

서부산지역(낙동강하구)의 델타 퇴적토 지반에서 최근 시행된 약 25만평 규모의 유통단지 조성사업의 지반조사 시 채취된 약 250여개의 불교란시료(Undisturbed Sample)에 대한 토질시험 자료를 이용하여 서부산지역의 공학적 특성을 밝히고자 토질분류, 심도, 교란정도에 따라 정리·분석하였다.

2.1 대상지역

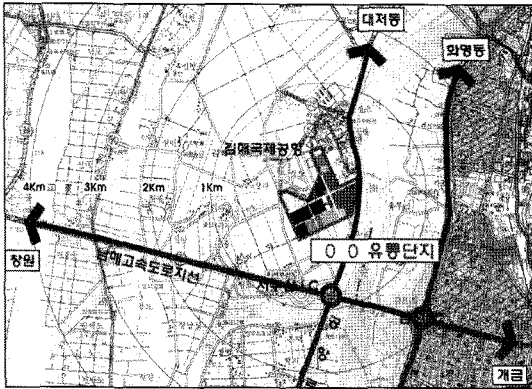


그림 2.1 연구대상지역 위치도

행정구역상 “부산광역시 강서구 대저2동” 일원으로 김해국제공항인근에 위치하고 있으며, 시추조사 49공, 자연시료채취 252개 및 실내시험을 실시하였으며, 상세한 위치는 그림 2.1에서 보는바와 같다.

2.2 분석방법

채취된 불교란시료를 이용하여 서부산지역의 공학적 특성을 분석하기 위하여 아래와 같은 방법으로 수행하였다.

- 공학적 특성을 살펴보기 위해 실내시험결과를 통일분류법(USCS)에 따라 정리·분석하였다.
- 심도에 따른 변화를 살펴보기 위하여 물리, 압밀, 역학적특성에 대한 심도별 값의 변화를 분석하였다.

표 3.1. 물리특성의 분포범위

구분	범위	95%신뢰구간	평균값	표준편차
점토함유율 (%)	53.5~97.1	89.12~91.13	90.1	7.045
비중 (Gs)	2.64~2.73	2.69~2.70	2.70	0.017
함수비 (w _n %)	28.70~61.40	44.58~46.16	45.27	5.589
액성한계 (LL%)	31.20~69.20	49.68~52.35	50.86	9.415
소성지수 (PI%)	3.80~41.50	24.75~26.99	25.71	7.910
액성지수 (LI)	0.33~1.77	0.80~0.87	0.84	0.223
활성도 (A)	0.47~2.53	1.22~1.31	1.25	0.313
간극비 (e)	0.84~1.68	1.22~1.26	1.24	0.153
단위중량 (kN/m ³)	16.27~18.90	17.46~17.59	17.52	0.044

3. 연약지반의 공학적 특성

3.1 물리특성

흙의 물리적 특성은 #200체 통과율 (점토함유량), 비중 (Gs), 함수비(w_n), 간극비(e), 포화도(S), 아터버그 한계, 소성도, 활성도(A)등이 있으며, 물리적 특성은 흙을 분류하는데 간접적으로 사용되고 유효상재압을 결정하는데 필요한 흙의 단위중량을 계산할 뿐 만 아니라 역학적 특성을 파악하는데도 도움이 된다.

본 절에서는 서부산지역 연약점성토에 대하여 실내시험결과를 토대로 물리적 특성 및 심도별 특성 변화에 대하여 살펴보았다.

표 3.1은 본 지역에 분포하는 연약지반의 물리적 특성에 대한 값이다.

3.1.1 입도분포

그림 3.1은 깊이에 따른 #200번체(75µm이하) 통과량으로 점토함유량을 나타낸 것이다. 그림 3.1에서 보는 바와 같이 #200번체(75µm이하) 통과한 입자함유율은 85~95%의 분포를 보이고 있으며, 비중은 그림 3.2에서 보는 바와 같이 비중은 2.66~2.73 범위의 분포로 나타났다.

기술기사1

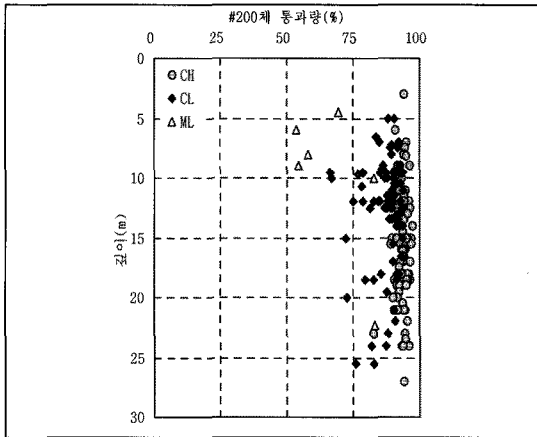


그림 3.1 심도별 #200체 통과율

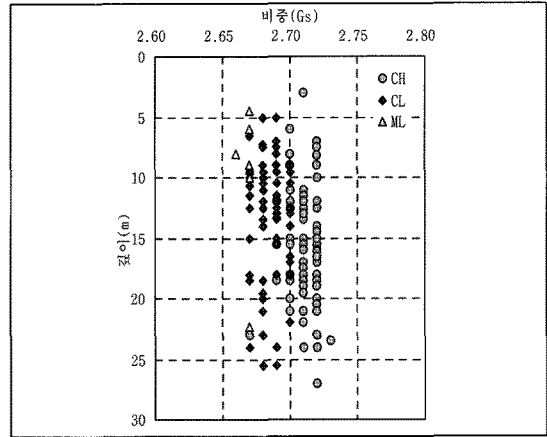


그림 3.2 심도별 비중분포

3.1.2 흙의 분류

세립토를 분류하는데 있어서 소성도를 이용하면 매우 편리하다. 소성도는 종축에는 소성지수를 횡축에는 액성한계를 도시하며, 그림 3.3은 Casagrande(1947)가 제안한 소성도에 시험결과를 Plot한 것으로 대부분 무기질 점토(CH, CL)로 나타났으며 일부구간에서는 압축성이 작은 실트(ML)가 분포하고 있다.

활성도의 분포범위는 0.47~2.53의 범위를 보이며 평균값 1.25로 나타났다.

3.1.3 아터버그 한계 (Atterberg Limits)

깊이에 따른 액성한계(LL)에 대한 분포범위는

31.2%~69.2%로 평균 50.86% 정도로 나타나며, 소성한계(PL)에 대한 분포범위는 21.0%~29.4%로 평균 25.15% 정도로 나타났다.

소성지수(PI)에 대한 분포범위는 3.8%~41.5%로 평균

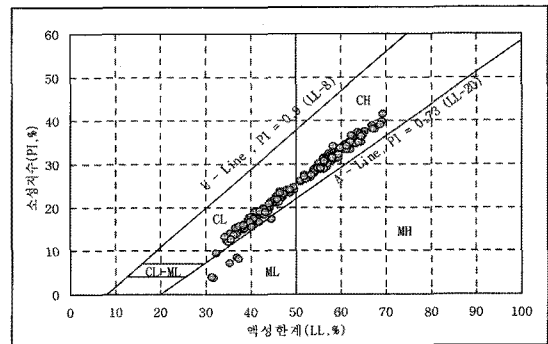


그림 3.3 소성도 (Plasticity Chart)

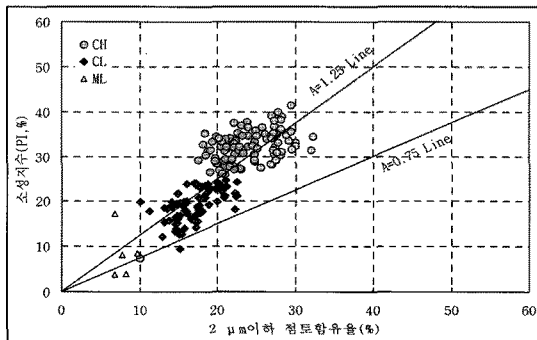


그림 3.4 활성도 (Activity)

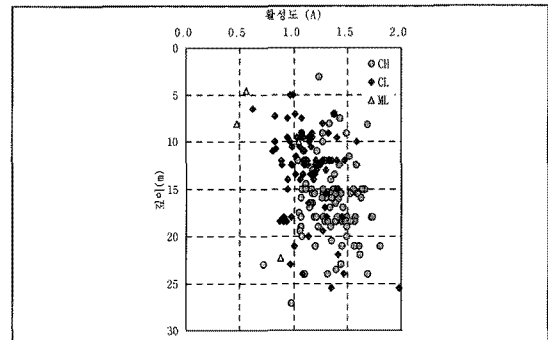


그림 3.5 심도별 활성도 분포

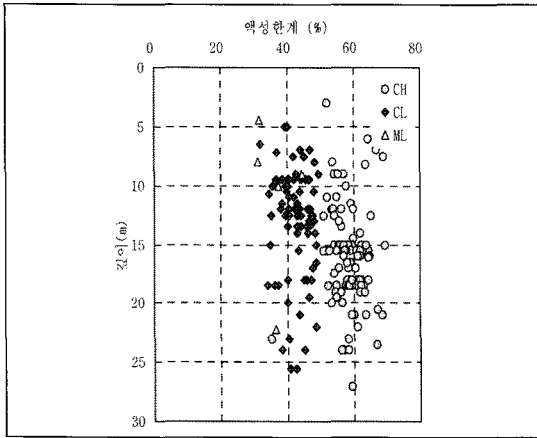


그림 3.6 심도별 액성한계 분포

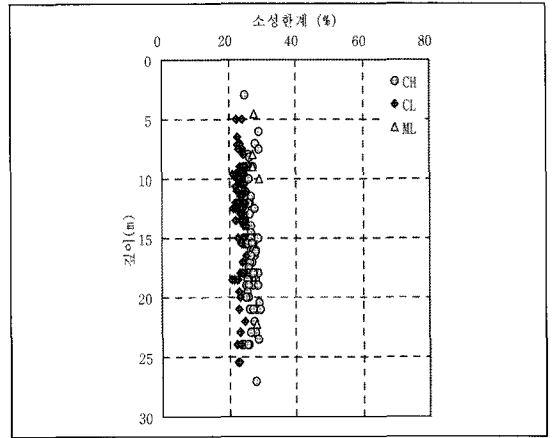


그림 3.7 심도별 소성한계 분포

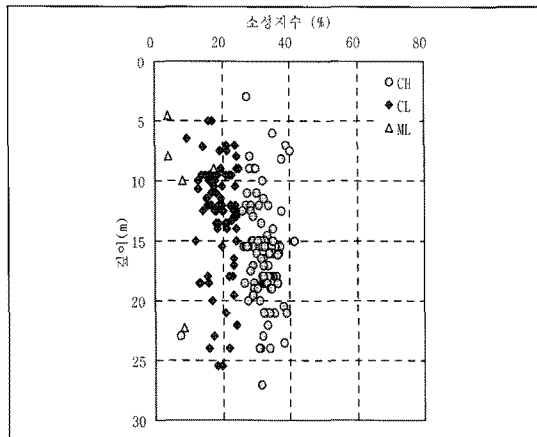


그림 3.8 심도별 소성지수 분포

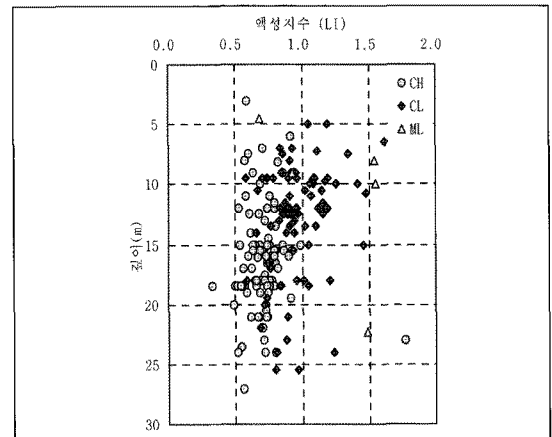


그림 3.9 심도별 액성지수 분포

25.75% 정도로 나타나며, 액성지수(LI)에 대한 깊이에 따른 분포범위는 0.33~1.77로 평균 0.84 정도로 나타났다.

3.1.4 함수비, 간극비, 단위중량

함수비(w_n)에 대한 분포범위는 30.3%~61.4%로 평균 45.37% 정도로 나타나며, 심도증가에 따른 저소성점토(CL)인 경우는 40%내외의 값으로 심도에 따라 거의 일정한 경향을 보이며, 고소성점토(CH)는 40%~60%의 범위 안에서 분포하는 경향을 나타냈다.

간극비(e)는 0.84~1.68로 넓은 분포의 범위를 보이며

평균 1.24로 나타나며, 깊이에 따른 간극비(e)의 분포형상은 함수비와 거의 유사하다.

단위중량(γ)은 15.88~18.55 kN/m³의 범위를 보이며 평균값 17.17 kN/m³으로 나타났으며, 깊이에 따라 일정한 경향을 보이지 않고 있으며 전반적으로 분산폭이 크게 나타났다.

3.2 압밀특성

흙의 압밀특성은 압축지수(c_c), 선형압밀하중(P_c), 과압밀비(OCR), 압밀계수(c_v) 등이 있으며, 압밀특성은 지반의

기술기사1

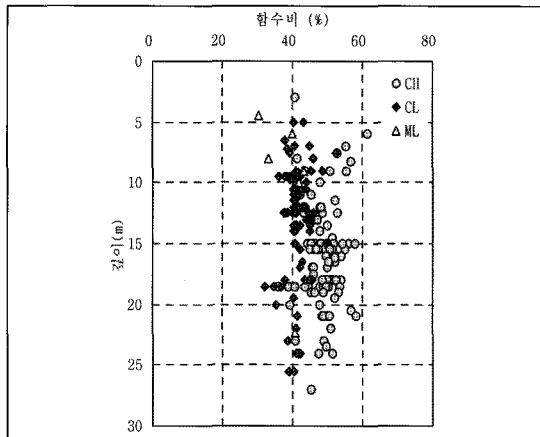


그림 3.10 심도별 함수비 분포

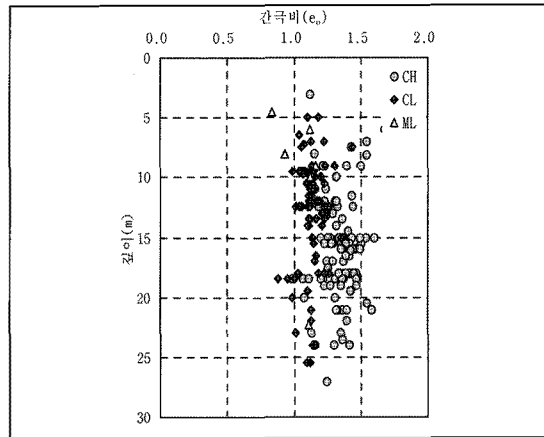


그림 3.11 심도별 간극비 분포

침하량 및 침하시간을 계산할 뿐 아니라, 유효상재압을 구하여 선행압밀하중과의 관계로부터 과압밀비(OCR)를 산정하여 흙의 응력이력을 파악하는데도 도움이 된다.

본 절에서는 실내시험결과를 토대로 압밀 특성 변화 및 연약점성토층의 전구간에 대하여 자연시료를 채취하여 심도별 압밀 특성 변화에 대하여 살펴보았다.

3.2.1 압축지수, 수정압축지수 (Compression Index, Modified Compression Index)

압축지수(c_c)에 대한 분포범위는 0.22~0.91의 범위로 비교적 넓은 분포를 보이며 평균 0.53정도로 나타나며, 심도증가에 따른 압축지수(c_c)의 경향은 심도 10m까지

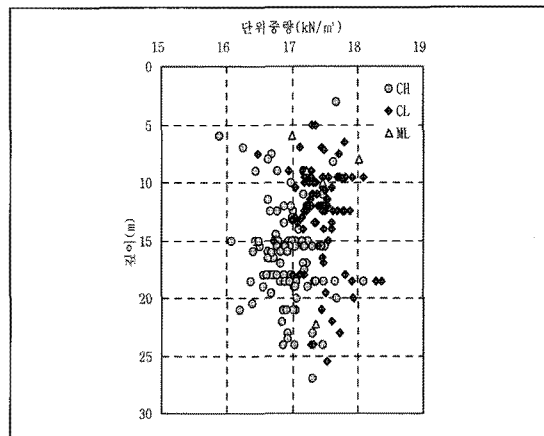


그림 3.12 심도별 단위중량 분포

거의 일정하며 10m하부부터 증가하는 양상을 보이는 경

표 3.2. 압밀특성의 분포범위

구분	범위	95%신뢰구간	평균값	표준편차
압축지수 (c_c)	0.223~0.910	0.508~0.545	0.527	0.131
수정압축지수 (c_c)	0.310~0.911	0.610~0.649	0.629	0.138
선행압밀하중(kN/m^2)	43.0~195.0	103.1~111.3	107.2	29.0
과압밀비 (OCR)	0.40~1.93	0.858~0.929	0.89	0.247
압밀계수 (c_v)				
(log법, t_{50} , cm/sec)	$4.72 \times 10^{-4} \sim 5.89 \times 10^{-3}$	$2.43 \times 10^{-3} \sim 2.75 \times 10^{-3}$	2.59×10^{-3}	1.15×10^{-3}
(√t법, t_{50} , cm/sec)	$3.01 \times 10^{-3} \sim 1.44 \times 10^{-2}$	$9.31 \times 10^{-3} \sim 9.93 \times 10^{-3}$	9.63×10^{-3}	2.18×10^{-3}

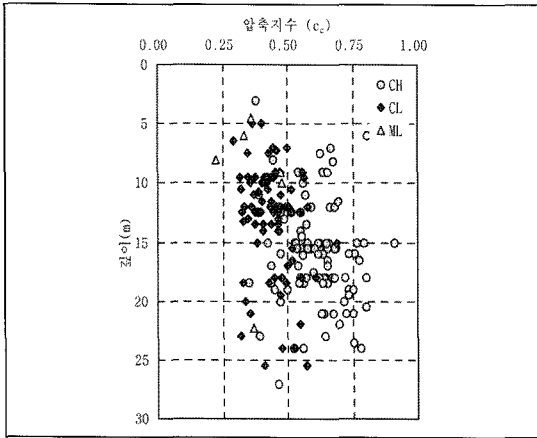


그림 3.13 심도별 압축지수 분포

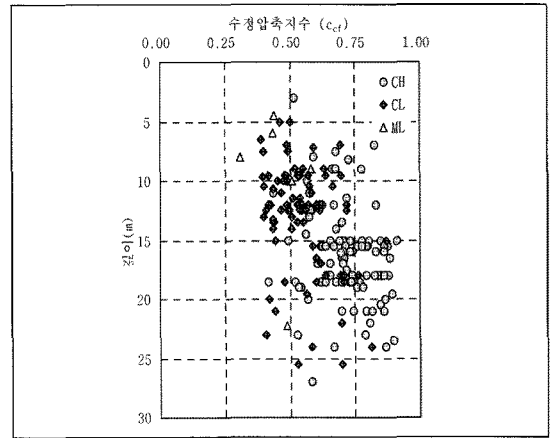


그림 3.14 심도별 수정압축지수 분포

향을 나타낸다. 깊이에 따른 수정압축지수(e_{cr})에 대한 분포범위는 0.16~0.91의 범위로 평균 0.63 정도로 나타났다.

1.93(평균:0.89)범위로 나타났다.

3.2.2 선행압밀하중 (Preconsolidation Pressure, P_c)

그림 3.15과 그림 3.16은 실내시험에서 구한 선행압밀하중(P_c)을 심도 및 유효상재하중과의 관계를 도식화한 것이다. 그림 3.16은 유효상재하중과 선행압밀하중과의 관계를 도식화 한 것으로 회귀 분석 결과 $OCR=0.40\sim$

3.2.3 과압밀비 (OverConsolidation Ratio, OCR)

심도에 따른 과압밀비는 그림 3.17과 같으며 상부에서는 $OCR > 1.0$ 으로 약간과압밀점토의 양상을 보이거나 하부로 갈수록 OCR이 점차 감소하지만 전체적으로 정규압밀상태의 양상을 나타낸다.

심도가 증가함에 따라 OCR이 일부 1.0보다 작아 과소압밀상태(압밀진행중)으로 보이거나 Clemence & Finbarr

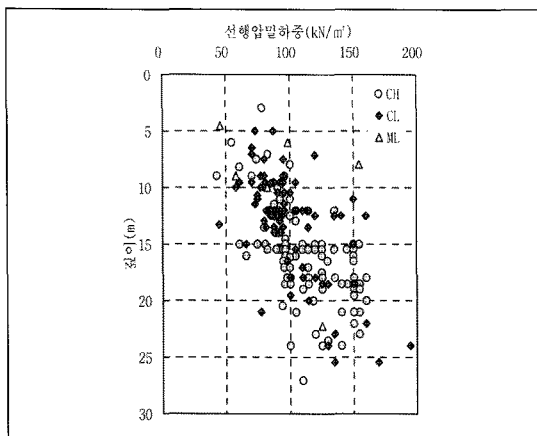


그림 3.15 심도별 선행압밀하중

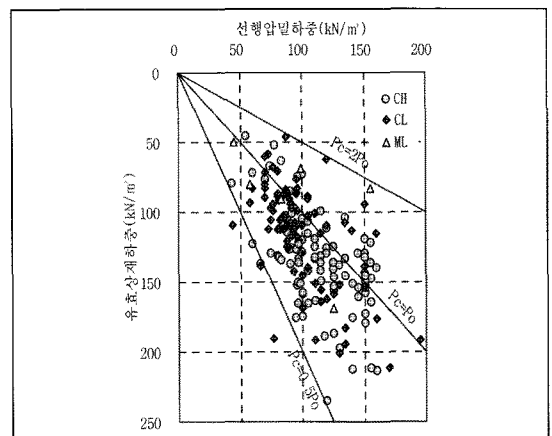


그림 3.16 유효상재하중-선행압밀하중

기술기사 1

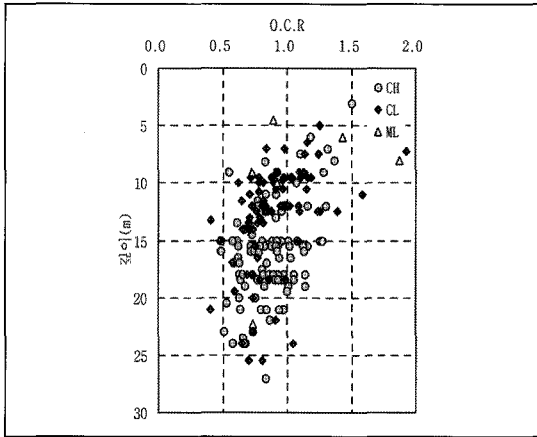


그림 3.17 심도별 과압밀비

등에 의하면 OCR이 0.8~1.5 까지는 정규압밀 점토로 간주할 수 있다고 하였고 표준압밀시험으로부터 구한 압밀 곡선에서 Casagrande가 제안하는 방법으로 선행압밀하중을 결정하면 인위적인 오차와 값이 과소평가되는 경향이 있으므로 실무적 관점에서 과소압밀(Under Consolidation) 효과를 무시하여도 큰 무리가 없을 것으로 판단되며, 본 연구대상지역에서 실시된 물리적 특성값인 액성지수(LI)값의 95% 신뢰구간에 대한 분포범위는 0.80~0.87로 나타나 Simons & Menzies(1977)이 제안한 액성지수(LI)에 의한 압밀상태를 판단할 때 정규압밀상태로 판단된다.

3.2.4 압밀계수

(Coefficient of Consolidation, c_v)

압밀계수 (Coefficient of consolidation)는 압축지수 (c_c)와 함께 압밀 특성을 좌우하는 중요한 요소의 하나로 서 본 연구대상지역에서는 Casagrande가 제안한 $\log t$ 법 (1940), Taylor가 제안한 \sqrt{t} 법 (1942)등에 의해 압밀계수를 산정하였으며 그 결과는 그림 3.18 압밀계수 ($\log t$ 법, t_{60}) 과 그림 3.19 압밀계수 (\sqrt{t} 법, t_{60})와 같다.

압밀계수(c_v)값은 작용하중에 일반적으로 다르게 적용하나, $\log t$ 법(t_{60})에 의한 경우는 $4.72 \times 10^{-4} \sim 5.89 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$, \sqrt{t} 법(t_{60})에 의한 경우는 $3.01 \times 10^{-3} \sim 1.44 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 의 범위로 분포하고 있으며, 해석방법에 따른 압밀계수 (c_v)값은 Casagrande(1940)가 제안한 $\log t$ 법(t_{60})이 Taylor(1942)가 제안한 \sqrt{t} 법(t_{60})보다 작게 산정되었다.

3.3 강도특성

연약지반에 대한 강도특성은 공학적인 관점에서 크게 2 가지 측면에서 주관심 대상이 된다. 그중 하나는 파괴와 관련된 지반강도 문제로서 심도변화에 따른 강도분포와 외부조건에 의한 지반강도의 변화, 상태의 추이에 대한 것이다.

본 절에서는 서부산지역 연약점성토에 대하여 실내시

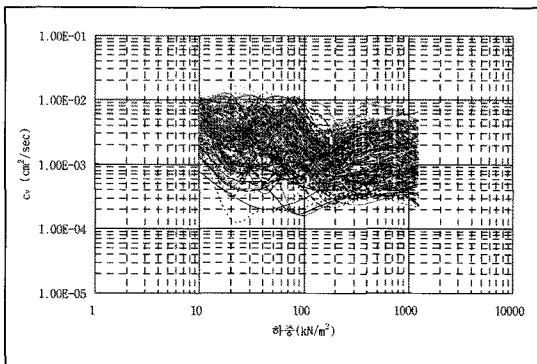


그림 3.18 압밀계수 ($\log t$ 법, t_{60})

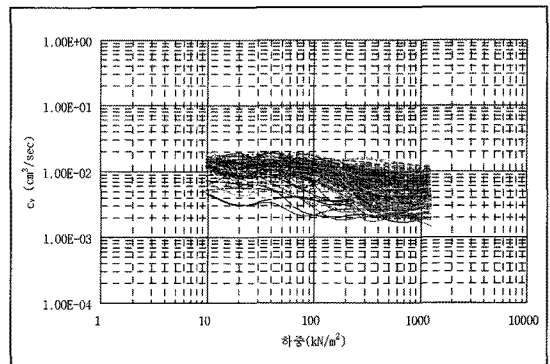


그림 3.19 압밀계수 (\sqrt{t} 법, t_{60})

표 3.3. 강도특성의 분포범위

구분	범위	95%신뢰구간	평균값	표준편차
비배수강도(kN/m^2)				
일축압축($c_v=q_u/2$)	5.61~59.85	27.28~30.39	28.84	10.98
삼축압축($C_{uv}, p_u=0$)	5.95~63.25	28.63~31.80	30.21	11.21
강도증가율(c_u/p_u)				
Skempton	0.155~0.264	0.204~0.211	0.208	0.027
Hansbo	0.180~0.311	0.235~0.245	0.240	0.036

험결과를 토대로 강도 특성 및 심도별 강도 변화에 대하여 살펴보았다.

3.3.1 비배수전단강도

일축압축시험에 의한 비배수전단강도 ($c_v=q_u/2$)에 대한 분포범위는 5.61~59.85 kN/m^2 , 평균 28.90 kN/m^2 로 나타나며, 삼축압축시험(UU-test)에 비배수전단강도에 대한 분포범위는 5.95~63.25 kN/m^2 , 평균 30.21 kN/m^2 로 나타났다.

일축압축시험에 구한 비배수전단강도와 삼축압축시험에 구한 비배수전단강도 모두 심도가 증가할수록 강도가 증가하는 경향을 보였다.

3.3.2 강도증가율

일축압축시험 및 삼축압축시험에서 얻은 비배수전단강도를 유효상재하중으로 나눈 강도증가율(을 나타낸 것으로 심도가 깊어질수록 강도증가율이 감소한 것을 볼 수 있었다.

강도증가율(c_u/\bar{P}_u)은 0.04~0.45의 범위로 평균 0.25를 나타내고 있으며, Bjerrum (1973)등에 의하면 강도증가율은 소성지수와 비례하여 증가하는 경향을 보인다고 연구한 바 있으며, 그림 3.24는 본 연구지역에서 채취된 점성토의 강도증가율을 나타낸 것으로 소성지수값이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타냈다.

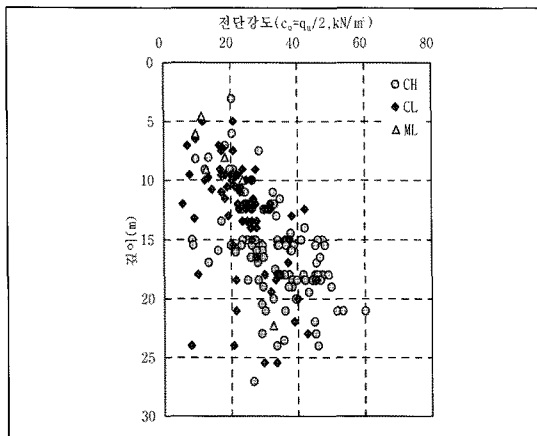


그림 3.20 심도별 전단강도 (일축압축시험)

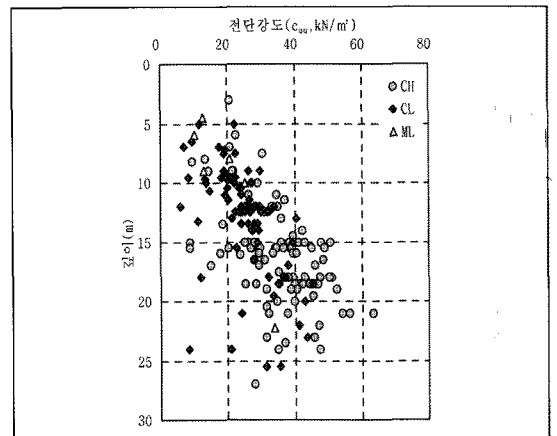


그림 3.21 심도별 전단강도 (삼축압축시험)

기술기사 1

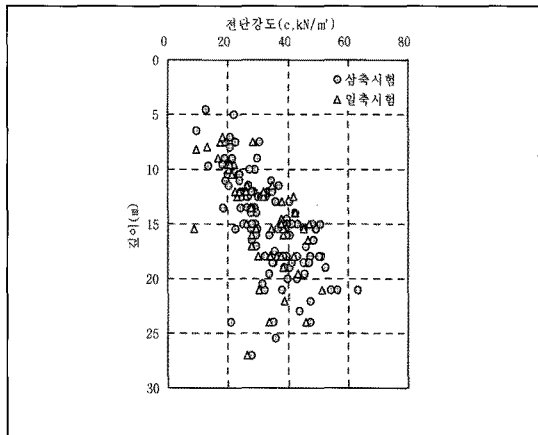


그림 3.22 심도별 전단강도 (교란효과고려시)

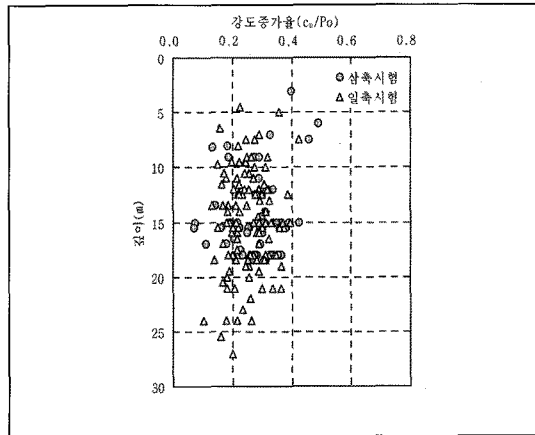


그림 3.23 심도별 강도증가율

4. 결론

낙동강 하구 델타퇴적토지반인 서부산 지역에서 시행된 지반조사 자료를 이용하여 물리·역학적 특성을 분석하였다.

- 1) 서부산지역 연약지반은 활성도 1.22~1.31(평균:1.24) 구간에 분포하는 Illite를 주 광물성분으로 #200번체(75 μ m이하) 통과량 90% 이상의 세립토를 함유하고 통일분류법 CH, CL로 분류되었다.
- 2) 비중(G_s)은 2.69~2.70, 자연함수비(w_n)는 44.58%~46.16%, 액성한계(LL)는 49.68%~52.35%, 단위중량은 17.46kN/m³~17.59kN/m³으로 분포하며 액·소성상태 및 지반의 압밀상태를 판단할 수 있는 액성지수(LI)는 0.80~0.87로 나타났다.
- 3) 압밀(침하)특성을 반영하는 압축지수(c_v)는 0.508~0.545, 선형압밀하중(P_c)은 103.1kN/m²~111.3kN/

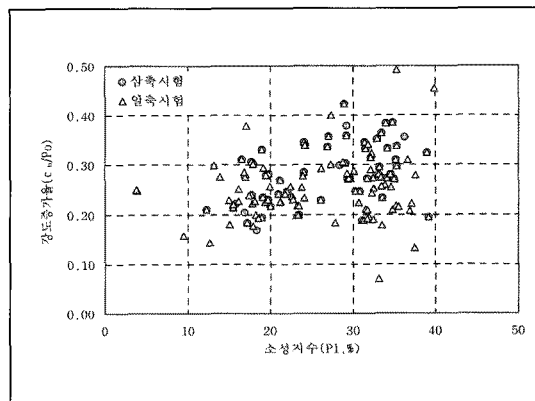


그림 3.24 강도증가율-소성지수

m²으로 분포하고, 압밀소요기간과 관련지어지는 압밀계수(c_v)는 log t법(t_{90})에 의한 경우는 $2.43 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec} \sim 2.75 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$, \sqrt{t} 법(t_{90})에 의한 경우는 $9.31 \times 10^{-3} \sim 9.93 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{sec}$ 의 범위로 나타났다.

- 4) 비배수전단강도는 심도가 증가할수록 증가하는 경향을 보였으며, 5.61 kN/m²~ 63.25 kN/m²의 범위로 분포하고 있다.