

부산·경남지역 연약지반의 토질 특성

박 성 재
부산대학교 명예교수

1. 서론

일반적으로 부산·경남지역의 연약지반을 논할 때에는 낙동강 하구 유역의 퇴적층 즉, 델타지역을 일컫는 경우가 많으며 부산의 용지난에 대한 대책 방안으로 많은 개발이 이루어지고 있다. 특히 연약지반의 심도가 아주 깊기 때문에 현장의 설계 및 시공에 많은 문제점이 노출되었고 이에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다. 그 예로, 60년대 중반부터 시작된 차의 연구(1966)를 예로 들 수 있다. 그는 90년대에 들어서면서부터 이 지역 연약지반에 관한 본격적인 체계를 수립해오고 있는데 특히, 지반정보시스템 개발의 필요성을 역설하고 그 토대가 된 연구들(박 등, 1994; Park 등, 1997)은 앞으로의 지반공학의 새로운 연구방향을 제시한 것이라 할 수 있다.

델타 지역은 양산천 합류점으로부터 하구에 이르는 평야로 약곡이 매적(埋積)되는 형태로 만들어진 하구 삼각주(estuarine delta)이다. 이 삼각주가 만들어진 만(灣)은 양산단층과 관계를 갖는 구조곡으로 보여져서 동측의 곡벽은 대략 직선상으로 되어 단층에 혹은 단층성애의 지형적 특징을 가지고 있다.

그림 1은 1917년에 편집된 낙동강 삼각주 지역의 오래된 지형도이다. A지역은 대저일동을 주축으로 동쪽에 삼낙동, 서쪽에 식만동, 죽림리를 포함하는 지역으로 밭농사 및 주택지로 이용되고 있는 자연제방과 논농사가 영위되고 있는 후배저지로 구성되어 있다. 그림 2는 본 삼각주평야의 현재 상태 미지형을 분류한 것이다. 이 평야에는 충적층에 의하여 둘러싸여 있는 기반암의 노출지(칠집산, 덕도동 죽도 등)가 충적평야 중에 섬처럼 보이는 구릉지는 1477년에 편집된 우리나라 고지리 문헌인 동국여지승람(東國輿地勝覽)의 기록과 그 부도에 섬으로 되어 있고 이 주변 및 조만강 하류부는 해역으로 되어 있었던 것으로 나타나 있다. 이것은 김해 삼각주가 이전의 만이 우리나라 남·서해안에서 흔히 볼 수 있는 접재하는 섬을 갖고 있었다는 것을 말해준다. 본 삼각주 평야의 주부를 형성하는 내만삼각주(상부, 하부)는 외해의 영향을 거의 받지 않은 내만에서 하천의 분류와 하중도의 형성을 반복하면서 하천과 평행되는 충적평야가 형성되었다는 것을 알 수 있다(박, 1998).

본 연구는 기존의 조사자료 및 논문 등을 면밀히 검토해 낙동강 하구 퇴적층의 토질특성을 재조명하는데 그 목적이 있다.

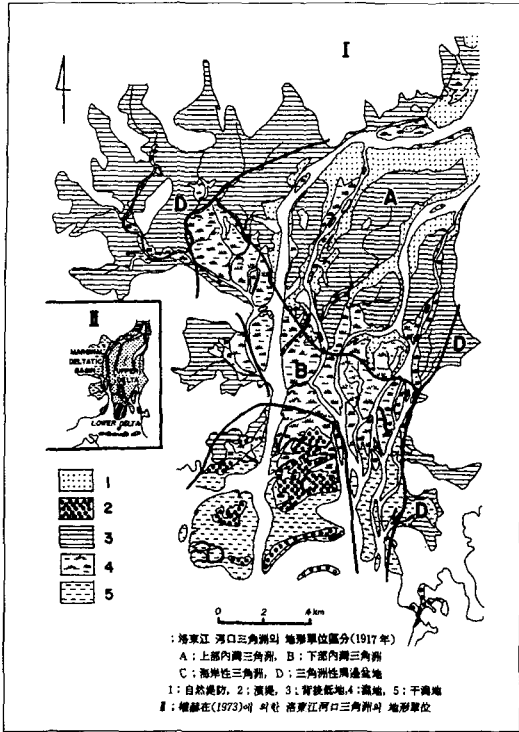


그림 1. 낙동강 하구삼각주의 지형단위구분(1917)

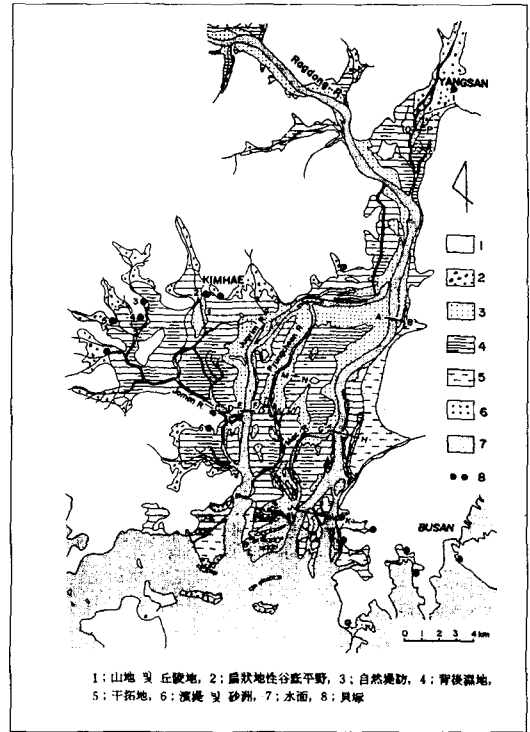


그림 2. 낙동강 하구삼각주평야의 지형분류도

2. 낙동강 하구 토질특성의 개요

2.1 퇴적특성

낙동강 하구는 대조차 1.3m, 소조차 0.1m에 지나지 않지만, 하상구배가 완만하기 때문에(하상구배 0.01%), 대조때의 조수의 영향은 삼랑진까지 미쳐서 홍수때 수위변화에 많은 영향을 끼쳤다(조, 1987). 이와 같이 낙동강의 하구삼각주는 수류의 작용과 조수의 영향을 받아 해수면의 상승과 더불어

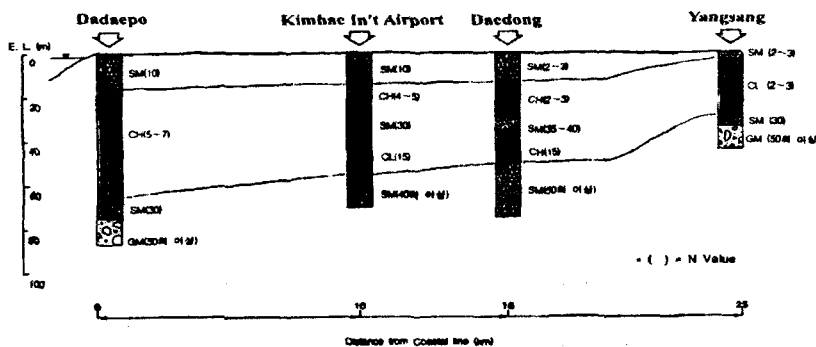


그림 3. 낙동강 하구의 남북을 연하는 지층단면(백, 1998)

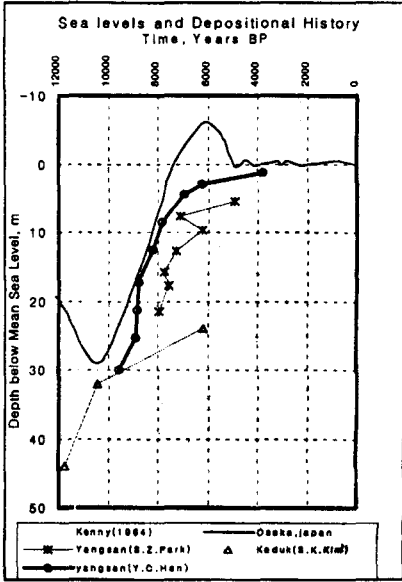


그림 4. 해수면 변동과 퇴적연대의 비교(한, 2001)

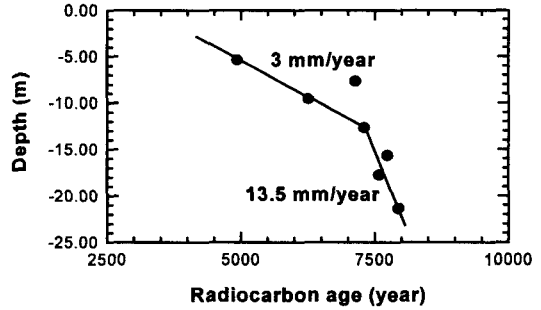


그림 5. 양산지층의 퇴적속도 분석(정경환 등, 2001)

어 오랜 지질연대에 걸쳐 발달되어 왔다.

그림 3은 양산으로부터 대대포 앞바다까지 남북을 따른 하구 삼각주의 퇴적층 단면을 보인 것이다. 퇴적층의 깊이는 하구로 갈수록 깊어지는 경향을 보인다.

퇴적연대는 양산의 경우 그림 4에서 보듯이 평균 해수면 아래 약 2~30m가 지금으로부터 약 4000 yr ~ 9800 yr 전에 형성되었음을 알 수 있다(Park 등, 2000). Park과 Han의 연구는 같은 양산지역이지만 약 1000 yr의 차이가 있는데, 이는 조사지역의 차이인 것으로 판단된다.

그림 5는 양산지층의 퇴적 속도를 나타낸 것이다. 12~13m 이하의 지층에서는 13.5mm/year의 속도로 무척 빠르게 진행되었음을 알 수 있다.

2.2 토질특성

이 지역은 오랜 시간동안 낙동강 상류에서 운반되어 퇴적된 많은 양의 세립토로 이루어져 있으며 층적층의 두께가 두껍고 강도는 낮으며 높은 압축성을 보인다. 점토층은 정규압밀 상태이며 퇴적층의 두께는 지표면에서 약 25m ~ 75m 내에 분포하고 있는데 이는 상·하류를 비교해서 별 다른 차이가 없다. 그림 6에 표기된 위치에서 채취된 시료들에 대한 낙동강 하구 점토의 토질특성은 표 1과 같다.

권 등(1996), 김 등(1997), 조 등(1996)은 이 지역에 대해 수행된 많은 압밀시험 결과를 바탕으로, 낙동강 하구 점토의 OCR이 1보다 작은 미압밀점토라고 결론지었다. 한편, 김(1999)은 이 지역의 OCR이 현장시험에서는 정규압밀점토로 평가되기는 하지만 퇴적연대가 세계의 다른 연약점토에 비해 빠르기 때문에 미압밀로 간주하고 설계하는 것이 예상치 못했던 과대 침하량에 대비할 수 있는

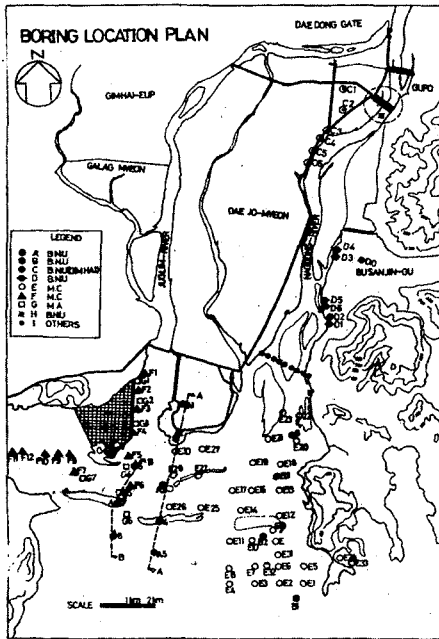


그림 6. 시추 위치도(박, 1966)

표 1. 낙동강 하구지역의 토질특성

항목	범위	
분류	CH, CL	
자연 함수비(W_n)	33 ~ 65(%)	
초기 간극비(e_0)	0.8 ~ 1.8	
비중	2.63	
액성한계(W_L)	37 ~ 70(%)	
소성한계(W_p)	15 ~ 43(%)	
압축지수(C_c)	실트질 림	실트질 점토
	0.3	0.65

방법이라고 제안하였다. 그러나 저자는 녹산(한국지반공학회, 1997)과 양산(한국지반공학회, 1998)에 대한 연구 보고서를 통해서 현실적으로 미압밀 점토에 대한 설계는 불가능할 뿐만 아니라 실제로도 이 지역의 점토는 정규압밀점토라고 밝힌 바 있다. 또한, 정 등(1999)과 정 등(2000)도 표준관입시험, 피에조콘시험, 현장배인시험, 팽창계시험(DMT) 등과 같은 현장시험을 통해서 이 지역의 OCR이 각각 0.95~1.2, 1~1.2인 정규압밀점토라고 재평가하였다.



그림 7. 낙동강 하구 연약지반(A:가덕도, B:울속도, C:명지, D:녹산, E:김해국제공항, F: 장유, G:김해 내외, H:양산물금)

정 등(2001)은 그림 7에 표시된 지역들에 관한 연구에서 압축지수와 초기간극비, 액성한계 사이에는 그림 8, 그림 9와 같은 상관관계가 성립함을 보였다.

그림 10은 일축압축시험 결과를 $(q_u/\sigma_{v0}')/\epsilon_f$ 와 ϵ_f 를 축으로 하여 다시 도시화한 것이다. 대부분의 낙동강 하구 점토들의 전단강도 특성은 상한계선인 U - Line(Upper Line)과 하한계선인 L - Line(Lower Line) 사이에 분포하며 이 범위는 다시 M-Line(Middle Line)에 의해 크게 두 영역으로 구분된다는 것을 알 수 있다(오, 2003).

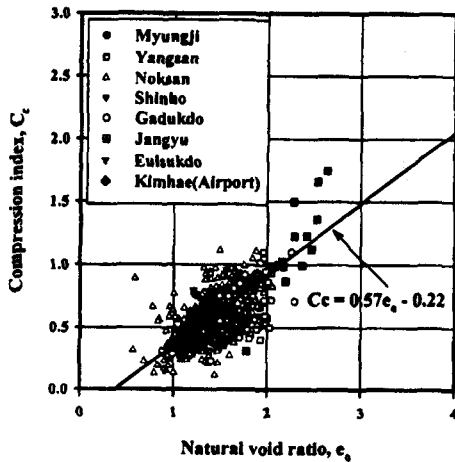


그림 8. C_c 와 e_0 의 상관관계

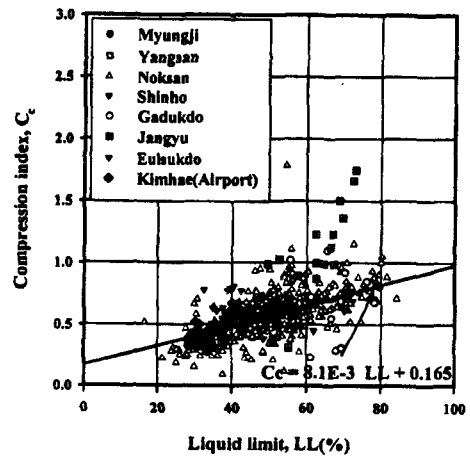


그림 9. C_c 와 W_L 의 상관관계

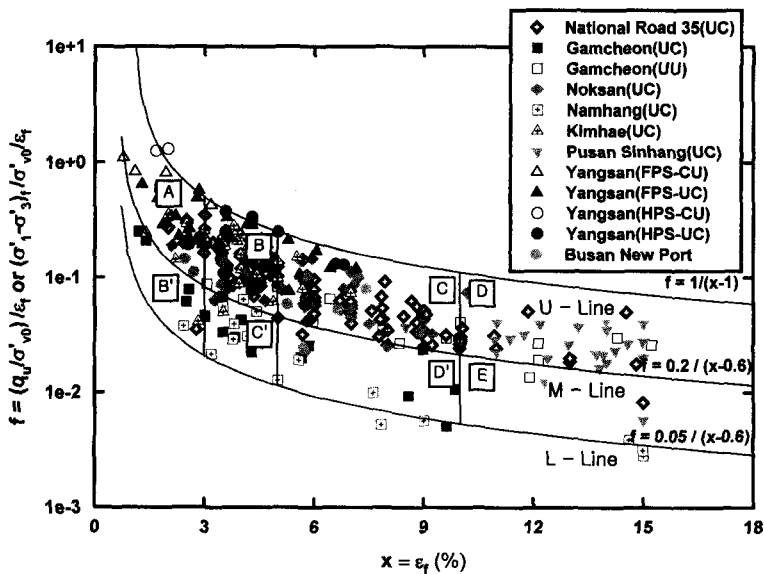


그림 10. $(q_u/\sigma_{v0}')/\epsilon_f - \epsilon_f$ 관계

$$(q_u/\sigma'_{v0})/\epsilon_f = 1/(\epsilon_f - 1) \quad (\text{U - Line}) \quad (1)$$

$$(q_u/\sigma'_{v0})/\epsilon_f = 0.2/(\epsilon_f - 0.6) \quad (\text{M - Line}) \quad (2)$$

$$(q_u/\sigma'_{v0})/\epsilon_f = 0.05/(\epsilon_f - 0.6) \quad (\text{L - Line}) \quad (3)$$

3. 지역별 토질 특성

3.1 양산 · 물금지역

연구 대상지역에 실시한 지반조사 결과, 지표면으로부터 약 1.8m와 4.2m는 성토층 및 모래질 점토가 형성되어 있으며 그 아래로 점토층이 존재한다. 단위중량은 2.71 ~ 2.73 g/cm³의 범위를 보였는데, 이러한 값은 전형적인 일본의 해성 점토보다 조금 더 큰 값이다. 자연함수비와 액성한계는 거의 같은 값을 나타냈으며, 소성지수는 심도에 관계없이 20%를 조금 상회하는 값으로 거의 일정했다(그

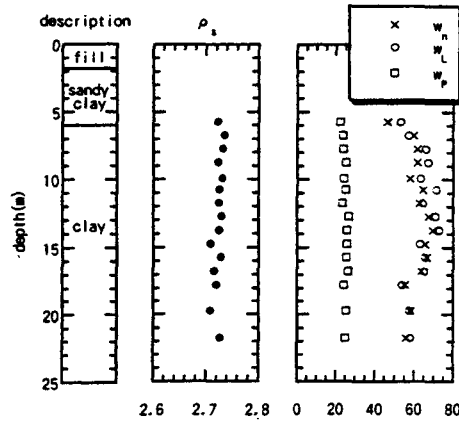


그림 11. 심도별 토질특성 (단위중량 및 연경도)

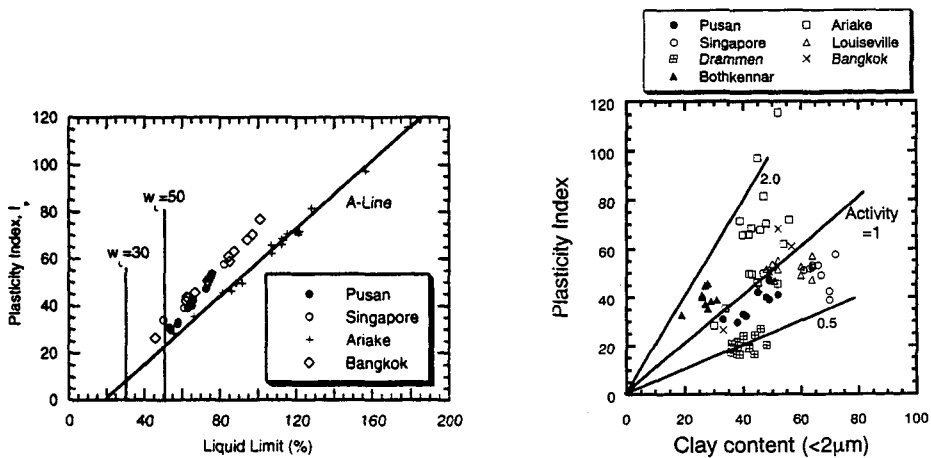


그림 12. 소성도(左) 및 활성도(右)

림 11).

아터버그 한계는 그림 12와 같이 소성도 상의 모든 데이터들이 A선 위에 분포하고, 활성도는 0.8 ~ 0.9 정도로 거의 일정한 값을 보이며, 일본의 전형적인 해성 점토와 비교했을 때에는 상당히 작은 값이다. 이와 같이 밀도와 활성도가 깊이에 대해 거의 일정한 값을 보이는 것은 이 지역의 광물이 유사하다는 것을 나타낸다.

압밀시험(CRS & IL시험)에 의한 p_c 값은 그림 13과 같다. p_c 값은 5 ~ 12m까지는 약 100kPa로 일정하지만, 12m 이하에서는 깊이에 따라 증가하는데 그 크기는 p_0' 보다 다소 크게 나타난다. OCR 은 15m 정도까지는 1보다 큰 값을 보이지만, 그 하부는 거의 1에 수렴하고 있다. 15m 이하의 낮은 OCR 값은 일본의 Ariake 지역이나 영국의 Bothkennar 지역 OCR과 비교하면 상당히 낮은 값이지만, OCR 값은 IL보다 CRS 시험에서 더 크게 평가되었는데 이것은 CRS의 변형률이 IL보다 훨씬 크기 때문이라고 생각된다.

그림 14는 심도별 전단강도를 나타낸 것이다. 일축압축시험에 의한 결과는 교란에 의해 특별한 경향을 보이지 않지만, 삼축압축시험에 의한 강도는 증가하는 경향을 보인다. 그림 14의 $c_{u(1)}$ 는 일축압축시험 결과를 Shogaki의 강도보정법을 이용하여 보정한 비배수 전단강도로서 삼축압축시험 결과와 유사한 경향을 보인다는 것을 알 수 있다(박 등, 2002).

김 등(2000)은 양산과 가덕도에서 채취된 불교란 시료를 이용하여 표준압밀시험과 일정변형률 압밀시험을 수행하여 투수계수지수(C_k , $e - \log k$ 의 기울기)를 이용한 간극비와 투수계수 관계를 규명한 바 있다. C_k 는 간극비의 변화에 따른 투수계수의 감소정도를 나타내는 것으로서, 압밀되는 동안 간극비가 일정하다고 가정한 Terzaghi의 압밀 가정을 보완할 수 있다. 결과에 따르면, 두 시료는 그림 15와 같이 $C_k = 0.5e_0$ 의 경험식을 잘 충족시키는 것으로 조사되었다.

특히, 이 지역은 지하에 평균 2m의 수두를 가진 피압수의 존재가 확인되어 드레인 설계 당시 드레

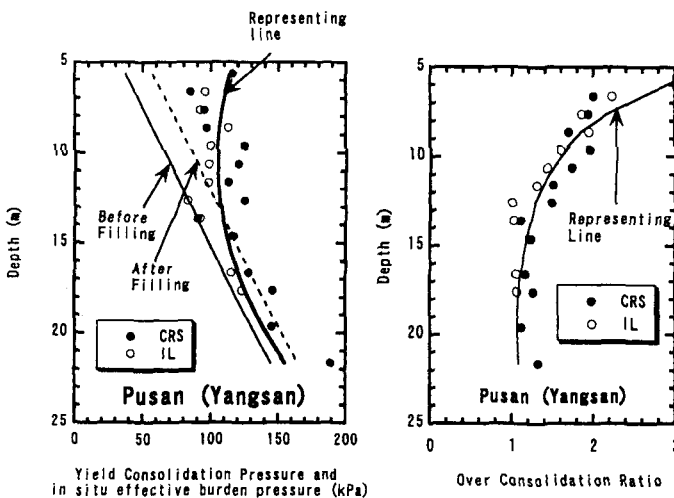


그림 13. CRS 및 IL시험 결과(左:선형 압밀하중, 右:OCR)

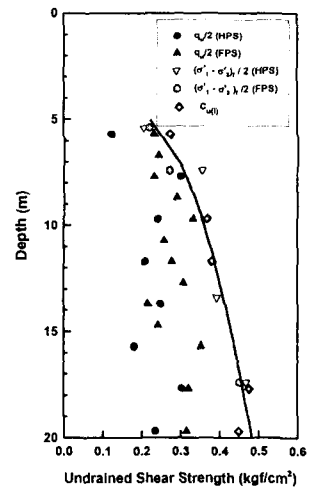


그림 14. 심도별 전단강도

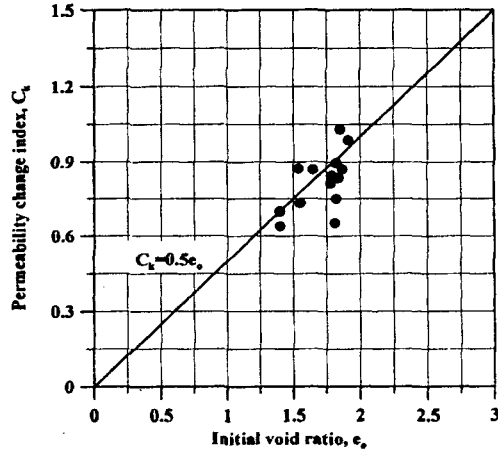


그림 15. 투수계수와 초기간극비와의 관계(김, 2000)

인을 피압수까지 관통시켜야하는지에 대한 논란이 많았던 지역이다. 보고서(한국지반공학회, 1998)에 의하면 이 지역은 불투수층 하부에 상대적으로 투수성이 큰 모래/자갈층이 분포하고 주변 구릉 및 산지 등으로부터 유입수(지하수)의 공급으로 인해 상류부의 위치수두가 하류에서 압력수두로 전이되어 하류부에서 피압수가 발생한 것임을 알 수 있다. 저자는 보고서를 통해서, 유한요소 해석시 과잉간극수압의 변화를 시뮬레이션하여 드레인이 피압층을 관통한 경우가 관통하지 않은 경우보다 과잉간극수압 소산이 빨라 피압층에 의한 지반의 압밀 저해효과는 크지 않을 것으로 판단하였다. 또한, 대상지역의 매립고가 5m로서 2m의 수두를 가지는 피압수의 영향은 미미할 것이라는 결론을 내린 바 있다.

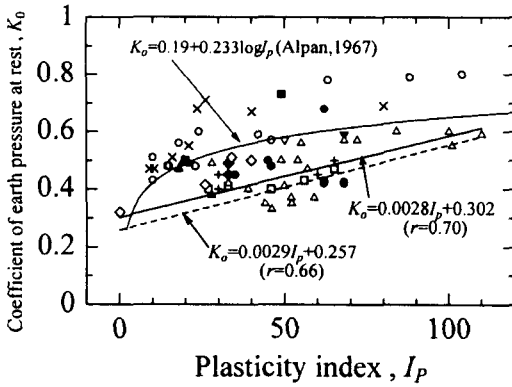
3.2 김해(내외)

본 지역은 주삼각주의 서쪽에 위치하며 최근에 육지화된 곳이다. 주삼각주는 낙동강의 직접적인 영향을 받아서 빨리 퇴적되었고, 자연제방도 발달되어 있다. 그러나, 주변부는 주류로부터 멀리 떨어져 있기 때문에 중류부의 배후습지와 같이 본류가 범람할 때 퇴적되어 형성되었기 때문에 주삼각주 지역보다 늦게까지 바다로 남아있었다.

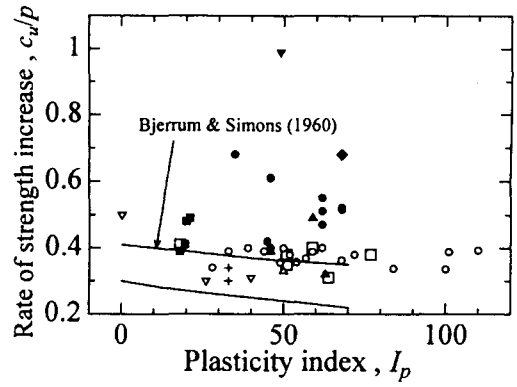
표 2는 김해장유지구를 포함한 X-선 회절분석결과를 나타낸 것이다. 공통적으로 Illite가 가장 많이 함유되어 있음을 알 수 있는데, 양산지역에 대한 조사(정경환 등, 2001)에서도 유사한 결과를 보였다.

표 2. X-선 회절분석 결과

Site	Illite	Kaolinite	Chlorite	Smectite	비고
김해/장유지구	49.49~51.24	21.33~22.75	19.34~21.42	6.24~8.08	한영철(2001)
낙동강	45.8~56.1	16~24.7	17.9~24.6	3.7~10.0	최진용, 김석윤 (1998)
낙동강하구	47.5~55.9	18.9~20.2	23.5~29.6	1.8~6.6	
녹산국가산업단지	33~65	15~36	7~31	0.3~19	이선갑(2003)



(a) 소성지수에 따른 K_0



(b) 소성지수에 따른 강도 증가율

그림 16. 소성지수에 따른 K_0 (左)와 강도증가율(右)

Shogaki 등(2001)은 김해지역의 점토를 다른 나라의 점토와 비교하여 다음과 같은 특성이 있음을 밝힌 바 있다. 먼저, 강도증가율은 0.3에서 0.5의 범위를 나타내고 K_0 는 소성지수(I_p)가 증가할수록 증가하는 경향을 보인다. 하지만, 그림 16((a):◇로 표기, (b):▽로 표기)에서 보듯이 지역차이나 흙의 종류와는 무관한 것으로 나타났다.

3.3 녹산국가산업단지

이 지역은 녹산국가공단을 조성하기 위한 건설공사가 시행되었던 지역으로서 지층은 상부로부터 최대 70여m까지 쇄설성의 미고결 퇴적물이 분포하며 평균적으로 볼 때 상부(지표면~15m), 중부(15~39m), 하부(39m 이하)로 구분된다. 퇴적물 중 점토의 구성비가 대단히 높아 전형적인 연약지반으로 분류된다. 상·하부 지층 경계는 공학적 특성에서 아주 명확하게 나타나는데, 입도 분포는 상부 15m 구간은 사질토에 해당되며, 17~37m 구간은 점토가 우세한 실트질 점토, 39m 이하의 지층은 점토의 함량이 감소하는 반면 실트가 증가하는 실트질 점토에 해당된다. 그림 17은 녹산지역의 토질특성을 나타낸 것이다.

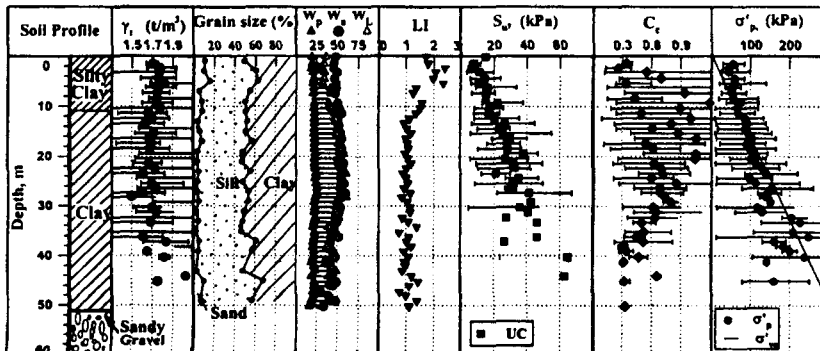


그림 17. 녹산지역의 토질특성(정성교 등, 2001)

이 지역은 산업단지 조성을 위한 설계 단계에서, 연약지반 처리 경험 부족, 공사기간의 촉박성, 예산 등의 문제로 침하량 예측이 잘못되어 많은 설계 변경을 해야했고 또한 토취장 확보, 민원문제 등으로 인한 공사 기간 연장, 공사비 증액이 불가피 했던 곳이다.

4. 결론

낙동강 하구지역 점성토에 대한 토질특성을 조사하여 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

1. 낙동강 하구 연약지반의 변천과정, 토질특성, 퇴적특성을 살펴보았다.
2. 이 지역의 압밀 특성이 실내압밀시험에 의해 미압밀이라는 의견이 제시된 바 있지만, 현장조사를 통해서 정규압밀점토임을 알 수 있었다.
3. 일축압축시험 결과를 $(q_u/\sigma'_{v0})/\epsilon_f$ 와 ϵ_f 를 축으로 하여 다시 플롯팅해 본 결과, 대부분의 낙동강 하구 점토들의 전단강도 특성은 상한계선인 U - Line(Upper Line)과 하한계선인 L - Line(Lower Line) 사이에 분포하는 것으로 조사되었다.
4. 김해지역 점토는 강도증가율은 0.3에서 0.5의 범위를 나타내고 K_0 는 소성지수(I_p)가 증가할수록 증가하는 경향을 보인다. 하지만, 지역차이나 흙의 종류와는 무관하다.
5. 양산과 가덕도 점토는 $C_k=0.5e_0$ 의 경험식을 잘 만족한다.
6. 낙동강 하구 점토에 대한 X-선 회절분석결과, 공통적으로 Illite가 가장 많이 함유되어 있음을 알 수 있었다.

낙동강 하구 점토는 그 심도가 우리나라에서 가장 깊고 토질 특성도 다양하여 조사·설계 그리고 시공이 적절하지 못하면 많은 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 관련 기술자나 학자들이 서로의 연구를 공유·검토하여 많은 자료가 축적된다면 앞으로의 우리나라 연약지반 처리 기술에 많은 발전이 있을 것이다.

참고문헌

1. 권기호, 배종건, 고광진, 정성교 (1996), “낙동강 하류지역의 충적점토에 대한 토질역학적 특성”, 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), pp. 395-398.
2. 김상규 (1999), “낙동강 하구 지반 매립시 발생된 과다 압밀침하”, KGC '98 Derdging and Reclamation Conference 논문발표집, pp. 35-48.
3. 김상규, 고성일 (1997), “낙동강 하구 및 인접해안 충적층의 미압밀 특성”, 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, pp. 3-18.
4. 조기영, 이남기, 정진교, 정성교 (1996), “낙동강 하류지역의 미완속압밀점토에 대한 토질특성 및 압밀 침하예측”,

- 대한토목학회 학술 발표회 논문집(III), pp. 543-546.
5. 김동휘, 임형덕, 김진원, 이우진 (2000), “실내시험을 통한 김해점토의 투수특성 평가”, 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp. 647-654.
 6. 동아지질 (2000), 김해 내외지구지반조사 보고서.
 7. 박성재 (1998), “낙동강 하구 연약지반 개량의 트러블 원인과 그 대책”, KGC '98 Derdging and Reclamation Conference 논문발표집, pp. 30-86.
 8. 박성재 (1966), “釜山市 埠頭地域 埋立地の 變遷과 土質特性에 대하여”, 부산대학교 석사학위 논문.
 9. 박성재, 오원택, 정경환, 여주태 (2002), “흡수력시험에 의한 양산지역 점성토의 교란특성과 원위치 강도 추정에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제22권, 제6-C호, pp. 595-603.
 10. 박성재, 정경환, 이성국, 최숙희 (1994), “지반정보시스템 개발의 필요성 고찰”, 대한토목학회 학술발표회 논문집 (II), pp. 495-498.
 11. 오원택 (2003), “시료의 교란도 평가에 의한 점토지반의 원위치 강도 추정”, 부산대학교 박사학위 논문.
 12. 이선갑, 김성욱, 황진연, 정성교 (2003), “부산점토의 특성 : 녹산지역점토 퇴적물의 광물조성과 토질”, 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp. 741-746.
 13. 정경환, 박성재, 박재환, 김찬홍, 오원택, S. Suwa & M. Fukuda, H. Tanaka, O. Mishima and M. Tanaka (2001), “양산지역의 한일 공동조사 결과”, ISSMGE ATC-7 Symposium 논문집, pp. 165-186.
 14. 정성교, 박정민, 김규중, 백승훈 (2001), “부산점토의 지반공학적 특성에 관한 고찰”, ISSMGE ATC-7 Symposium 논문집, pp. 27-41.
 15. 정성교, 김규중, 이대명, 조기영 (1999), “낙동강 삼각주 점토에 대한 과압밀비의 평가”, 한국지반공학회논문집, 제5권, 제4호, pp. 85-97.
 16. 정성욱, 김찬홍, 박성재, 정경환 (2000), “원위치시험을 이용한 점성토지반에서의 OCR평가”, 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp. 419-422.
 17. 조화룡 (1987), “한국의 총적평야”, 교학연구사.
 18. 한국지반공학회 (1997), 녹산국가공단 조성공사 장래지반침하 추정 및 대책 검토서에 대한 검토 연구 보고서.
 19. 한국지반공학회 (1998), 양산-물금지구 연약지반 관련 학술연구 용역 보고서.
 20. 한국토지공사 (1997), 양산물금지구 시험시공연구공사 사전조사 보고서.
 21. 한영철 (2001), “낙동강 유역의 연약점성토 퇴적 특성에 대한 고찰”, ISSMGE ATC-7 Symposium 논문집, pp. 45-54.
 22. S. Z. Park, D. H. Jung, G. H. Jeong, K. J. Lee (1997), “Evaluation of the Stability of Embankment on Soft Ground by Field Monitoring and Development of the EMMS”, Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering Hamburg, Vol. 1, pp. 723-726.
 23. S. Z. Park, G. H. Geong, J. H. Park, F. E. Bautista, S. Suwa, M. Fukuda, H. Tanaka, O. Mishima & M. Tanaka (2000), “The Mysterious Formation of Nakdong River Estuary Soft Soil”, ISGK2000, Kochi, Japan, pp. 41-48.
 24. T. Shogaki, S. Yano, Gyeon-Hwan Jeong, S. Suwa (2001), “Undrained strength properties of United Kingdom, Korea and Japanese clay deposit”, 대한토목학회 지반공학 관련 초청 강연회 강연집, pp. 30-35.