

부산 점토의 퇴적 특성, 피압의 영향 및 지반 개량에서 얻은 경험 Depositional Characteristics of Busan Clay, Effects of Artesian Pressure, and Experiences from Ground Improvement

김상규¹⁾, Sang-Kyu Kim

¹⁾ 동국대학교 명예교수, Professor emeritus, Dongguk University

SYNOPSIS : The depositional characteristics of Busan clay are initially described in this paper. The deposits of the Nakdong River estuary are composed of some different layers, which have been affected by marine transgression and regression. The upper clay layer is thick and soft. The lower clay layer and some depth of the upper clay layer have been leached by artesian pressure existing in an aquifer below. The clay shows unique physical and engineering characteristics due to leaching. Several large-scale reclamation projects have been performed in this delta area. The preloading method using long vertical drains has been applied for soft ground improvement. Experiences obtained from ground improvement are mentioned in connection with the depositional characteristics of the clay layers.

Keywords : clay, ground improvement, preloading, vertical drain, artesian pressure

1. 서론

낙동강은 하구에 이르러 삼각주가 발달하였다. 이 삼각주는 낙동강의 한 지류인 양산천과의 합류 지점 일대로부터 해안 쪽으로 넓게 발달된 약 200km²의 넓은 충적 평야를 포함하고 있다. 이 지역이 특히 공학 쪽의 주목을 받게 된 것은 1980년대 후반 이후 중요한 주거 및 산업 기반 시설의 단지로서 개발되어왔기 때문이다. 이 지역에는 국제 관문인 김해 비행장이 그 중앙에 자리하고 있고, 북쪽으로는 양산 주거 단지, 서쪽으로는 김해 장유 주거 및 물류 유통 단지, 남쪽으로는 녹산 산업 단지를 비롯한 공업 단지가 이미 들어섰다. 현재는 해안을 따라 부산 신항이 건설되고 있고, 한편 서 낙동강 서쪽 유역을 따라 화전 산업단지가 개발되고 있다. (그림 1.1. 참조). 또한 신항의 물류를 전담하는 철도도 건설되고 있다.

이와 같은 대규모의 개발 사업을 수행하는 동안 방과제의 붕괴, 교량 기초의 변위, 도로 제방의 활동, 과대한 지반 침하 등 몇 가지 실패를 겪었고, 이로부터 많은 교훈을 얻으면서 기술력도 크게 향상되었다. 그러나 아직도 더 해결하지 않으면 안 되는 과제가 있는 것으로 보인다.

하구 삼각주는 몇 개의 퇴적층으로 이루어져 있지만 지반 기술자의 큰 관심을 끄는 것은 연약한 점토층이다. 여기서는 특히 점토층에 대한 퇴적 및 공학적 특성을 설명하고 이와 관련하여 주거 및 산업

단지 조성에 있어서 지금까지 겪은 지반개량 상의 몇 가지 경험을 기술하고자 한다.

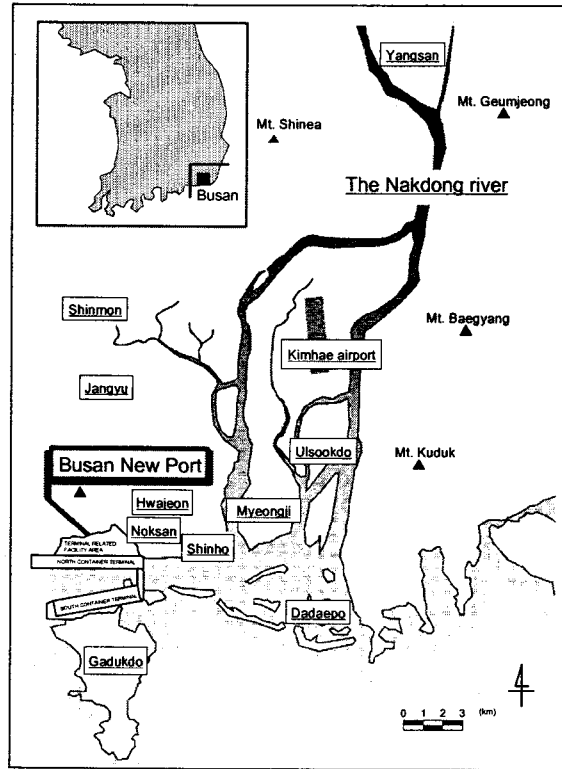


그림 1.1 낙동강 하구와 개발 지역

2. 델타 지역의 퇴적 특성

2.1 퇴적층의 구성

이 델타 지역은 낙동강 주류와 평행하게 위치한 양산 단층이 과거에 활발한 지각변동을 받아 우횡변위 (right-lateral slip)로 형성된 협곡으로 알려져 있다 (조, 1987). 이 협곡에 퇴적된 최초의 물질이 자갈이라는 사실은 이 하상의 경사가 급하였다는 것을 말해준다. Park et al. (1988)은 팔레오세의 낙동강 해안 (Paleo-coastline)이 수 십만년 동안 규슈 남쪽까지 연장되었고 급한 하상 경사로 말미암아 하천 작용에 의한 깊은 침식곡 (erosion valley)이 형성된 것으로 추정하고 있다.

그림 2.1 은 시추 조사 위치를 중심으로 낙동강 하구 연안으로부터 상류를 따라 퇴적된 각 지층의 깊이와 퇴적 층서를 개략적으로 보인 것이다. 이 지층 단면은 낙동강 하구의 전체적인 퇴적 환경을 이해하는데 도움을 줄 것이다. 퇴적층의 두께는 낙동강 하구에서는 약 80m 까지 이르지만 주류를 따라 감해로 올라가면서 다소 얇아지고 양산에서는 50m 정도로 감소된다.

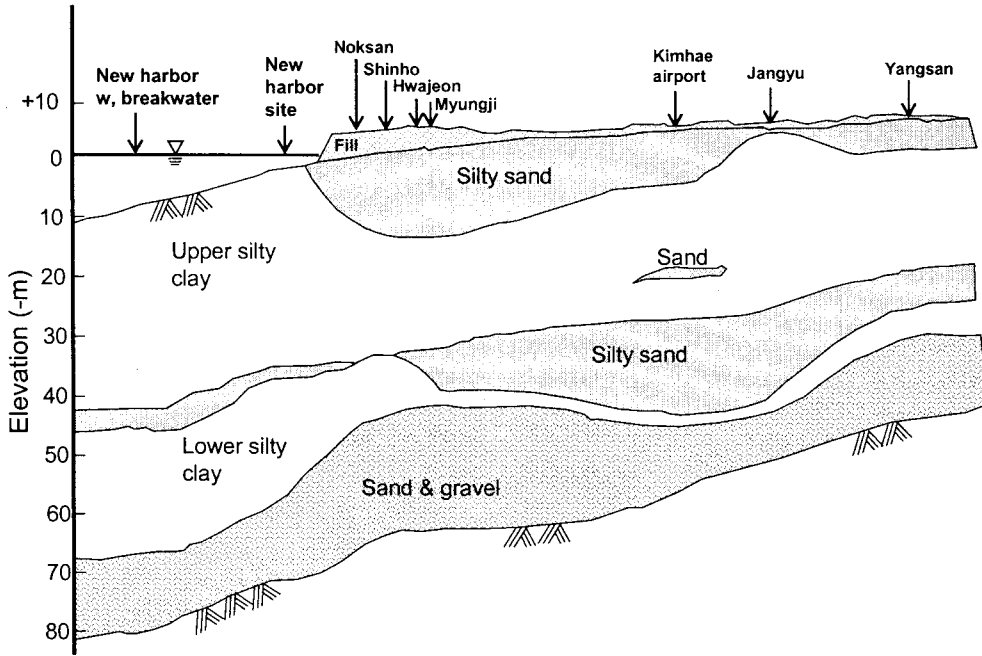


그림 2.1 낙동강 하구 지층 단면의 개략도

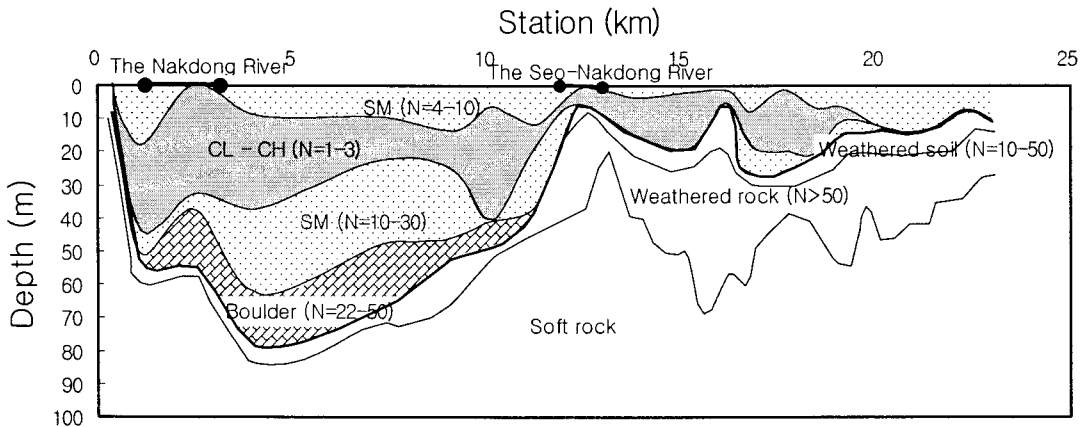


그림 2.2 사상에서 김해로 가로지르는 지층 단면 (동일기술공사, 2003)

한편, 낙동강을 가로질러 사상에서 서쪽으로 김해까지 횡단하는 단면을 보면 (그림 2.2; 동일기술공사, 2003), 동쪽의 낙동강 주류에서의 퇴적층의 깊이가 최대 70m 나 되지만 서쪽으로 갈수록 약간의 기복을 보이면서 감소하는 경향을 보인다. 특히 낙동강과 서 낙동강 사이에는 퇴적 이전에 소쿠리 모양의 큰 분지가 형성되었고, 여기에 자갈층이 먼저 두껍게 퇴적된 것을 알 수 있다. 이것은 대하천이 있었던 흔적으로 추정할 수 있다. 서 낙동강을 지나 서쪽 (김해 쪽)으로는 자갈층은 없지만, 연약 층을 포함한 퇴적층이 비교적 두껍다. 이 분지에는 하천의 우수 작용과 뒤따른 해침 (marine transgression) 또는 해퇴 (marine regression)로 말미암아 (그림 2.3 참조) 여러 종류의 물질이 퇴적되었다. 퇴적층서는 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 하부 모래 및 자갈층

주로 화강암, 유문암 (rhyolites), 안산암으로 구성된 기반암 위에 먼저 자갈층이 두껍게 퇴적되었다. 이 층의 퇴적은 하류 작용에 의해 이루어졌다. 하부 모래층은 해진의 영향을 받아 수면 경사가 훨씬 완만하게 된 후 형성된 퇴적물이다.

(2) 하부 점토층

하부 모래층 위에 퇴적된 하부 점토층은 지표면 아래 65-45m 깊이부터 퇴적되기 시작하였다. 해안을 따라 퇴적된 이 지층의 두께는 10-20m 나 된다. 그러나 김해와 양산에서는 이 두께가 현저히 얇아진다. 중간 모래층이 아주 얇거나 존재하지 않는 경우에는 (예, 녹산과 신호 일부) 상, 하부 전체 점토층의 두께가 40-50m 나 된다. 그러나 공학적 특성은 그 위의 상부 점토층과 현저한 차이를 나타낸다.

(3) 중간 모래층

중간 모래층이 퇴적된 표고와 두께는 위치마다 달라서 일률적으로 언급하기가 대단히 어렵다. 그러나 일반적인 경향을 보면, 내륙 쪽에서는 낙동강의 주류를 따라 약 45m 의 깊이부터 퇴적이 시작되었고 그 두께도 매우 두껍다. 반면, 연안 부근에서는 이 두께가 얇아서 신항 배후단지 시험 부지에서는 그 두께가 약 3m 또는 그 이하에 지나지 않는다. 녹산과 신호에서는 중간 모래 층이 나타나지 않는다. 내륙 쪽에서 이 모래 층의 두께가 두꺼운 것은 하류의 영향을 많이 받았기 때문이다. 이 모래 층은 해안 퇴적물 (coastal deposit), 또는 해변 퇴적물로 분류될 수 있다.

(4) 상부 점토층

상부 점토층은 신항 방파제 (가덕도)에서 해변 아래 42m, 명지와 신호에서는 30-45m 깊이부터 퇴적이 시작되었다. 그러나 장유와 양산에서는 이 보다 훨씬 얇은 약 25m 깊이부터 퇴적되었다. 이 점토층의 두께는 20-35m 나 되며 상류로 갈수록 얇아진다. 하부 점토층을 제외하더라도 이 층의 퇴적 두께는 동남 아시아의 점토 (최대 두께 25m)나 오오사까와 고오배 점토의 두께 (20m-25m)에 비해 더 두껍다 (그림 2.3 참조). 이것은 낙동강 상류로부터 뜬 짐 (suspended load)의 공급이 충분하고 퇴적 속도가 비교적 빨랐기 때문으로 생각된다.

(5) 상부 모래 층 (지표층)

지표면을 덮고 있는 것은 모래 층, 실트 또는 점토가 많이 섞인 모래층이며, 이 두께는 위치 별로 크게 변화한다. 울산도에서 이 모래 층의 최대 두께는 18m 나 되며, 명지 신호, 녹산, 화전 단지에서도 평균 10m 를 넘는다. 이 곳의 모래층은 주로 파랑의 작용을 받아 낙동강의 주류와 직각으로 발달된 사주 (sand bar)의 형성 과정과 밀접히 관련된 것으로 보인다.

한편, 상부 내만 삼각주에 분포하는 내륙의 모래층은 유수에 의한 자연 제방 (natural levee)으로 형성되었다 (조, 1987). 하천의 범람 (flood plain)으로 배후 습지나 유수지에 퇴적된 표층은 모래와 더불어 점토, 실트와 같은 가는 입자가 많이 포함되어 있다. 이러한 표층은 장유와 같은 삼각주성 주변분지에 많이 분포한다. 이 위치에서는 표면층이 모래질 점토 또는 실트질 점토층으로 분류되며 그 아래 상부 점토층과 구별이 힘들 때도 있다. 따라서 이것을 일률적으로 상부 모래층으로 부르는데 다소 무리가 있는 것은 사실이다. 바다 쪽의 신항과 방파제 부지에서는 상부 모래 층이 존재하지 않는다.

2.2 퇴적 연대와 퇴적 속도

점토층의 퇴적 연대는 radio-carbon dating 으로 판별할 수 있다. 상부 점토층에 대해서는 양산, 신항 등 몇 곳에 대해 백 (1999), Park et al. (2000), 한 (2001), Kitada et al.(2003)에 의해 조사되었는데, 공통적으로 BP (before present) 10,000 년 이후에 퇴적된 것이 확인되었다. (김과 김, 2006 참조).

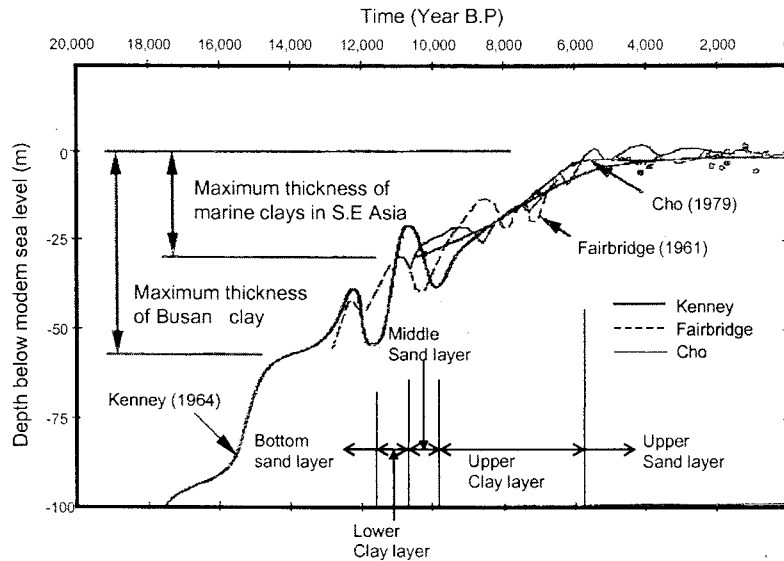


그림 2.3 해면 상승과 퇴적층과의 관계

상부 모래층은 5,000-6,000 년 이전 해수면이 거의 정체된 후 지금까지 오랜 연대에 걸쳐 퇴적된 것이다. 따라서 이 퇴적층은 하류의 양향이 지배적인 것으로 보인다.

중간 모래 층은 해퇴 시에 퇴적된 것이다. 이 모래 층의 퇴적 연대는 그림 2.3 의 Kenny (1964)와 Fairbridge (1961)의 해수위 변동 곡선을 참고하여 BP 10,000 년 - 11,000 년으로 추정할 수 있을 것 같다. 하부 점토층의 퇴적연대는 BP 11,000 년 - 12,000 년으로 추정하였다. 이와 같은 추정을 근거로 하면 하부 점토층의 퇴적 연대는 상부 점토 층과 1,000 년 정도의 차이 밖에 없으나 중간에 있는 모래층이 배수층의 역할을 함으로서 공학적 성질의 차이가 뚜렷이 나타나는 것으로 보인다.

델타 점토는 뜬 짐 (suspended load)의 활발한 유입 때문에 일반적으로 퇴적 속도가 빠르다, 하구 점토의 퇴적 속도는 여러 연구자에 의해 조사되었는데, 특히 BP 10,000 년 - 7,000 년에서는 1cm/year 를 훨씬 넘는다 (김과 김, 2006).

2.2 점토층의 퇴적 특성과 퇴적 이후의 환경의 변화

2.2.1 점토 층 퇴적 시의 특성

점토층의 퇴적 당시의 환경은 점토층이 함유하고 있는 유공충 화석군집 (foraminiferal fauna) 또는 규조 화석 군집 (diatom flora)과 같은 고생물학적 연구를 통해 밝힐 수 있다. 생물에 따라 해양의 모든 환경에서 서식하는 것도 있고, 정상적인 염도를 유지하는 해수에서만 서식하는 미생물도 있기 때문이다. 예컨대, 유공충 (foraminifera), 패각편 (shell fragment), 편형충 (ostracods), 황철광 (pyrite), 난노 화석 (nanno fossil), 해수성 규조류 (marine diatom) 등은 해수의 환경에서만 존재한다. 이러한 연구는 양산 점토에 대해서는 한일 합동 연구로 정경환 등 (2001)에 의해, 부산 신항 점토에 대해서는 Kitada

et al (2003) 등에 의해 수행되었다. 녹산, 장유, 부산 신항 등 다른 지역에 대해서도 류 (2003)가 미화석 분석을 많이 수행하였다.

표 2.1 은 양산점토에 대해 화석 군집의 깊이 별 분포에 대한 연구 결과를 예로 보인 것이다. 이 연구에 의하면, GL (-)16.45m 아래의 점토 층에서는 해성 미화석이 없고 운모와 식물 편익의 염기성 물질이 많이 나타난다. 따라서 이 깊이 아래 퇴적물은 기수성 퇴적물 (brackish-water deposit)로 판단하고 있다. GL (-)7.42m ~ GL (-)16.45m의 중간 퇴적층은 유공충, 패각편, 편형충 등 해성 미화석이 연속하여 나오고 있어서 이 지층의 퇴적 당시에는 해양의 퇴적 환경이었다고 말할 수 있다. 그 위 EL (-)7.42m 이상의 지층은 해성 미화석이 나타나지 않는다.

부산 신항의 점토 층에 대해서 미화석 조사를 수행한 결과를 보면 (Kitada et al., 2003), GL (-)30m 아래에서는 해성 미화석이 없고, GL (-)8m ~ GL (-)30m까지는 해성 미화석이 존재한다. 한편, GL (-)8m 이상에서는 해성 미화석이 없다. 이와 같은 미화석 조사로부터 상부와 하부 점토 층은 모두 해진 시에 퇴적되었지만, 처음에는 기수 (brackish water)의 환경에서, 그 다음에는 해수에서, 다시 기수의 환경변화를 거치면서 퇴적되었다는 것을 알 수 있다.

류 (2003), 허 (2003), Chung et al. (2003)은 전체 군집 (T)에 대한 해중에서 서식하는 프랑크톤 (P)의 비율 (P/T)을 기준하여 퇴적 환경의 변화를 조사하였다 (그림 3.3, 3.4 참조). 이 조사에서도 동일한 결론이 도출되었는데, 지질학적으로는 처음의 퇴적물을 연안의 환경 (near-shore)에서, 그 다음의 퇴적물을 내 대륙붕 (inner shelf)의 환경에서 퇴적되었다고 말한다 (그림 3.3 참조).

표 2.1 양산지역 퇴적층에 대한 미화석 분석 결과 (정 등, 2001)

Depth GL (-) (m)	foraminifera	shell fragment	ostracods	sea urchin	volcanic grass	mica	plant fragment	pyrite	nannofossil	marine diatoms	non-marine diatoms	species of diatoms
2.186 t	-	-	-	-	++	+++++	+	-	-	-	-	Coc. Cym.
2.186 b	-	-	-	-	++	+++++	++++	-	-	-	-	Coc. Cym.
3.836 t	-	-	-	-	++	+++++	+	-	+++	+	-	Nrv. Coc. Cym.
5.836 t	-	-	-	+	++	+++++	+	-	+	+	+++	Nrv. Cym. Them.
5.836 b	-	-	-	-	-	+++++	+++	-	+++	+	+++	Nrv. Cym. Them.
7.836 t	++	+++	++	+	+	+++++	+	-	++++	+	++	Nrv. Dip.
7.836 m	++	+++	++	-	-	+++++	+++	-	++++	+	++	Nrv. Dip.
7.836 b	++	+++	++	+	+	+++++	+++++	-	++++	+	+	Dip.
9.836 t	+	++	++	-	-	+++++	+	-	++	-	-	
10.600	-	+++	+	+	-	+++++	++++	-	+++	-	-	
11.836 t	+	+++	+	+	+	+++++	+++	-	++++	+	+	Coc. Acc. Cym.
13.836 t	++++	++++	++	++	+	+++	+	-	++++	+	-	Coc.
13.836 b	++++	++++	+++	++	+	++++	++	-	++++	+	-	Coc.
15.836 t	+++	++++	++++	++++	-	+++	++	-	++++	+	-	Them.
15.836 b	++++	++++	+++	++	-	+++	++++	-	++++	+	-	Them.
17.836 t	++++	++++	+++	++	-	++++	+	-	++++	+++	+	Them. Coc. Cym.
17.836 b	++++	++++	+++	++	+	++++	++++	-	++++	+++	+	Them. Coc. Cym.
19.836 t	+++++	++++	+++	+++	-	+++	+	+++	++++	+	-	Coc. Them.
20.600	+++++	++++	+++	+++	-	+++	++++	-	++++	+	-	
20.600 m	++++	+++	++	++	-	+++	-	+	++++	+	-	
20.600 b	++	+++	++	++	-	+++	+++	-	++++	+	-	
21.836 t	++++	++++	+++	++	-	++++	++	-	++++	++++	-	Coc. Them.
21.836 b	++++	++++	+++	+++	-	+++	++	-	++++	++++	-	Coc. Them.
23.836 t	++++	++++	+++	++	-	++++	+++	-	++++	+++	+	Them. Coc. Mid.
23.836 b	++++	++++	+++	++	-	++++	++++	-	++++	+++	++	Them. Coc. Mid.
25.836 t	+++	++++	++	+	-	+++	++	-	++++	+++	++	Them. Coc. Mid.
27.836 t	+++	++++	++	+	-	+++	++	-	++++	+++	++	Coc. Frg.
28.090 t	+	++++	-	-	++	+++	+	+	+++	++	++	Coc. Frg.
28.600 t	+	++++	+	+	-	++++	++++	-	+++	-	-	
30.090 t	-	-	-	-	+++	+++	-	-	-	-	-	
31.090 t	-	-	-	-	+	++++	+	-	-	-	-	
34.090 t	-	-	-	-	+	+++	+	-	-	-	-	
33.600 t	-	-	-	-	-	++++	+	-	-	-	-	
19.41~19.42	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	
19.37~19.58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
21.10~21.11	-	-	-	-	++	+	++	-	-	-	-	
21.41~21.42	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	
21.67~21.68	-	-	-	-	+	+	++	-	-	-	-	

t: top of the core, m: middle of the core, b: bottom of the core

Ref. (1) foraminifera (2) shell fragment (3) ostracods (4) sea urchin (5) volcanic grass (6) mica (7) plant fragment (8) pyrite (9) nanno fossil (10) marine diatoms (11) nonmarine diatoms
 - 없음, + 아주 드뭄, ++ 드뭄, +++ 보통, ++++ 풍부, +++++ 아주 풍부

연안의 환경에서 퇴적된 점토는 담수의 영향을 많이 받았기 때문에 염도가 비교적 낮아서 해안 점토 (coastal clay) 또는 lagoon clay 의 특성을 지니고 있다. 그러나 내 대륙붕에서 퇴적된 점토는 충분한 심도를 가진 해양의 환경에서 퇴적되었기 때문에 해성점토 (marine clay)의 특성을 보인다. 따라서 낙동강 하구 점토는 이러한 특성을 함께 지니고 있으므로 델타 점토 (deltaic clay) 또는 하구 점토 (estuarine clay)라고 명명하는 것이 옳을 것이다.

2.2.2 퇴적 환경이 지수적 성질에 끼친 영향

이와 같은 퇴적 환경의 변화는 점토의 함량, 함수비, 간극비 등에 크게 영향을 끼친다. 그림 2.4 는 양산 점토층에 대한 자료 (Lim et al., 2003)인데, 하구 점토의 특징을 잘 나타내는 그림이다. 정규 압밀 상태에 있는 해성 점토층과는 달리 중간 깊이에서 자연 함수비, 액성한계, 간극비가 더 크고 그 상부와 하부는 반대로 더 작다. 전체 단위 중량은 중간 깊이에서 더 작다.

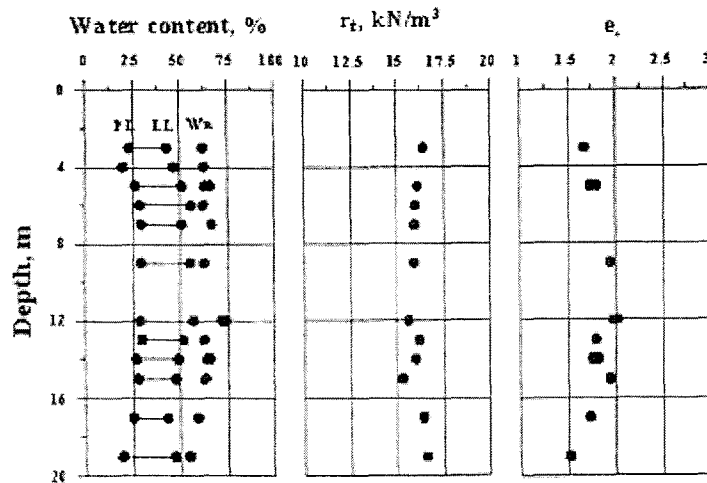


그림 2.4 양산점토에 대한 깊이 별 함수비와 간극비의 변화 (Lim et al., 2003)

Suwa (2002)는 신히 부지에 대해 깊이의 증가에 따른 점토의 함량, 함수비와 간극비의 변화를 조사하였다. 이 조사에서도 상부 점토층의 중간 깊이에서 점토 함량, 자연함수비, 간극비 등이 그 위와 아래보다 더 크다는 것을 보였다. 이것은 내 대륙붕의 환경에서 퇴적되었기 때문이다.

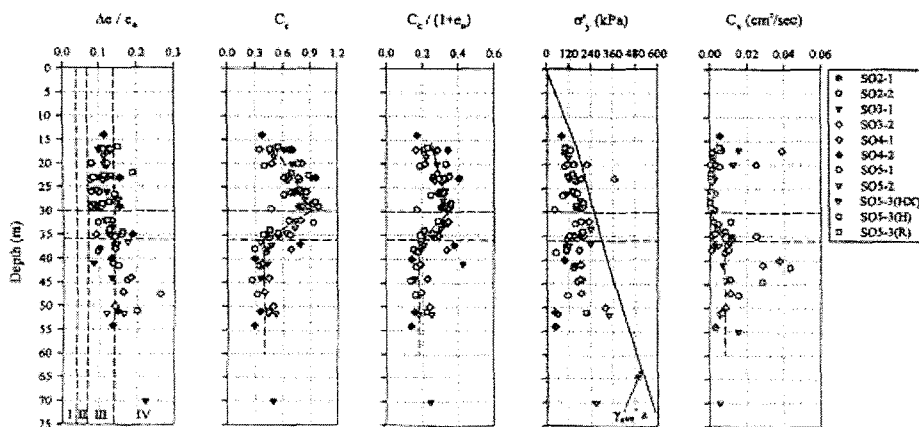


그림 2.5 신히 지역의 압밀 시험 결과 (동아대 건설연구소, 2006)

점토층이 퇴적되면서 자중 압밀을 받아 아래로 내려갈수록 간극비의 감소가 예상되는데도 불구하고 오히려 증가한 것은 콜로이드 이론으로 충분히 설명될 수 있다 (Pusch, 1973). 기수의 환경에서 퇴적되었을 때보다도 해수의 환경에서는 점토 입자가 면모 구조를 하기 때문이다.

이 영향은 압축 지수와 압축비의 심도 별 변화에도 나타난다. 그림 2.5 는 신호 지역에 대한 압밀 시험 결과인데, 15m 깊이까지는 모래층이고 그 아래부터 상부 점토층과 하부 점토층이 놓인다. 압축 지수와 압축비의 깊이 별 변화를 보면, 약 30m 깊이에서 최대 값을 보이고 있고 그 위 또는 아래로 갈수록 조금씩 감소한다는 것을 주목할 수 있을 것이다. 이것은 최대치를 중심으로 상하 일부 점토층은 내 대륙붕 (해양)의 환경에서 퇴적되었다는 것을 의미하며, 전술한 설명과 일치한다.

그림 2.6 은 부산 신항에 대한 깊이 별 압축비의 변화를 나타낸 것이다 (허, 2003). 이 그림에서 IS (inner shelf)는 내 대륙붕의 환경에서 퇴적되었다는 것을 의미하며, 압축비는 공통적으로 0.3 정도이다. 침하량을 계산할 때 참고로 이용할 수 있을 것이다.

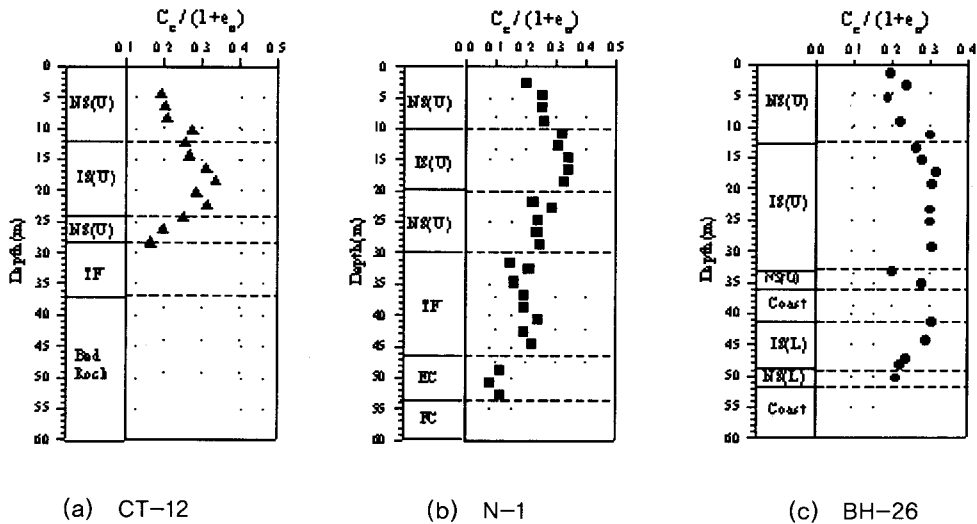
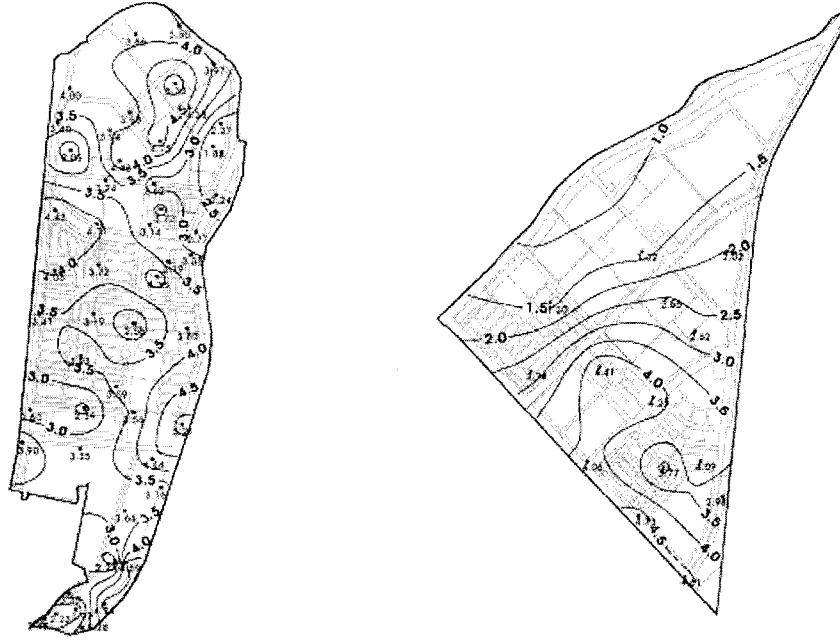


그림 2.6. 부산 신항에서 조사한 압축비의 깊이 별 변화 (허, 2003)

3. 피압 (artesian pressure)과 그 영향

3.1 피압의 크기와 분포

양산의 시험 시공 부지에서 피압 (artesian pressure)의 존재가 확인된 후 (한국토지공사, 1997), 한과 유 (1999)는 양산 주거 단지 전반에 걸쳐 피압의 분포를 조사하였다. 그림 3.1 에 보인 바와 같이 A 지구에서는 피압 수두가 최대 El. 4.5m 까지 올라오며, 지하수위의 위치 (El. 0-0.8m) 보다 최대 4m 가량 높은 것으로 확인 되었다. 또 피압 수두는 지표면의 표고보다도 2-3m 더 높다. 양산천의 서쪽에 위치한 B 지역의 경우, 북서쪽은 피압이 거의 없으나, 남동측은 지표면 위로 1.4m 높이의 피압이 존재하였다. 이 곳에서 피압이 측정된 이후 델타 지역 내의 피압의 존재 가능성에 대해 큰 관심을 갖게 되었다.



(a) A 지구

(b) B 지구

그림 3.1 양산지역의 피압수 분포 (한과 유, 1999)

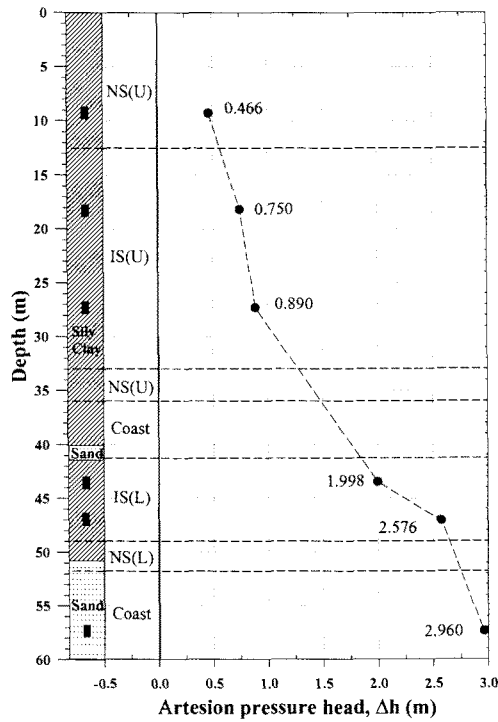


그림 3.2 부산 신항 BH-26에서의 피압 (허, 2003)

그림 3.2 는 부산 신항 북쪽의 한 위치 (BH-26)에서 깊이 별 피압의 변화를 측정된 기록이다 (허 2003). 대수층으로 간주되는 GL -58m 의 깊이에서의 피압은 $2.96t/m^2$ 로 측정되었고 지표면으로 올라갈수록 그 값은 대략 직선적으로 감소하였다. 부산 신항 민자 부두가 위치하는 곳에서도 55m 의 깊이에서 $0.73t/m^2$ 의 피압의 존재가 확인되었다 (백, 2005). 현재까지의 조사 결과로서는 양산과

더불어 여기에서의 피압이 델타 지역 내에서는 가장 큰 값으로 나타났다.

표 3.1 은 현재까지 조사된 피압 수두 측정의 기록이다. 이 표를 보면 양산과 부산 신항을 제외하고는 그 값은 1m 내외에 지나지 않는다. 그러나 델타 지역 거의 전역에 걸쳐서 피압수가 존재한다는데 주목할 필요가 있다. 피압수가 존재하는 대수층의 심도는 지표면 아래 상당한 깊이에 있는 하부 모래층이라고 생각되나 조정 경기장 부지에서는 중간 모래층에서도 이것이 발견되었다 (대우 엔지니어링, 1998). 델타 지역 내에 피압이 존재하는 이유는 주변을 둘러싸고 있는 주변 야산의 높은 지하수위의 영향뿐만 아니라 상류와의 수두 차로 인한 지하수의 대수층 (aquifer)으로의 공급과 해수의 삼투 (permeation) 때문이라고 생각된다.

표 3.1 델타 지역 내 피압 수두의 분포

Location	Elevation measured below GL(m)	Max. measured artesian pressure head (m)	References
Yangsan	33.0	3.02	Daewoo(1998)
	30.5	3.52	
	37.8	4.04	
Busan New Port	57	2.96	Huh (2003)
	Kadukdo	40.3	
Boat race site	26.5	1.35	Pusan Harbor(1998)
	34.5	1.58	
Shinho	34	1.11	Daewoo Eng.(1998)
			Chung et al.(2003a)

3.2 피압에 의한 염분과 양 이온의 용탈

피압수는 해양 환경 또는 기수 환경에서 퇴적된 점토의 염분을 용탈시키고 화학적 풍화 작용을 일으켜 양이온을 방출한다. 일단 이온이 방출되면, 점토 입자의 이중층 (diffused double layer)에서 교환 가능한 이온이 되어 이온 성분의 변화를 가져온다. 한 예로 K/Na 의 비율을 조사하면 화학적 풍화가 일어난 정도를 알 수 있다. 한편, 해성 점토층으로 CO₂ 를 포함하는 빗물이 침투되면 pH 값의 감소를 가져오고 이로 인해 pH 값이 낮아지면 점토 광물은 풍화를 시작한다 (Brenner et al., 1981).

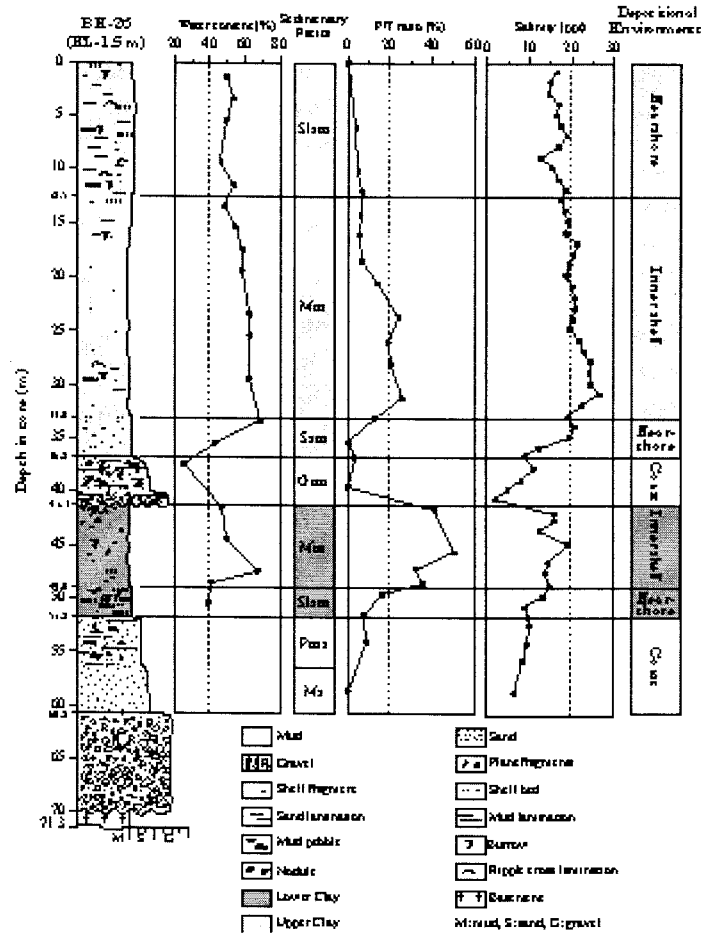


그림 3.3 부산 신항 BH-26 보오링 위치에 대한 깊이 별 염분 농도의 변화 (허, 2003)

그림 3.3 은 높은 피압수가 발견되었던 부산 신항의 BH-26 에 대한 지층 단면, 깊이 별 함수비의 변화, P/T 및 염도의 변화를 보여준다. P/T 값의 깊이 별 변화를 보면, 상부 점토층 및 하부 점토층의 중간 깊이는 해양의 환경에서 퇴적된 점토라는 것을 알 수 있다. 이것은 위에서 논의한 결과와 일치한다.

그러나 염도의 분포를 보면 약 30m 의 깊이로부터 위로 갈수록 염도가 조금씩 감소한다 (최대치 27g/l). 이것은 주로 퇴적 시 담수의 영향을 받았기 때문으로 보인다. 그러나 하부 점토의 염도는 상부 점토에 비해 현저히 감소되었다는 것이 명확하다. 이것은 피압수에 의해 염분이 용탈되었기 때문이다. 전술한 바와 같이 이 위치에서는 약 3m 의 피압 수두가 발견되었다는 것을 유의할 필요가 있다.

그림 3.4 는 부산 신항의 다른 위치 (N-1)에 대한 깊이 별 염분의 변화를 보이는 흥미 있는 자료이다 (허, 2003). 이 그림을 보면, 상부 점토층의 최대 염도 25g/l 에 비해 하부 점토층의 염도는 5-10g/l 에 지나지 않으며, 25m 의 깊이부터 상부 점토층의 일부와 하부 점토층에서 염분 용탈이 있었음을 다시 확인할 수 있다. 또 이 위치에서 하부 점토층의 pH 값은 8.0 이하이며 상부 점토층에 비해 더 낮은 것으로 조사되었다. CO₂ 를 포함하는 담수가 침투되면 pH 값의 감소를 가져온다는 것은 이미 언급하였다. 그러나 이 위치에서는 피압이 존재하는지 조사되지는 않았다.

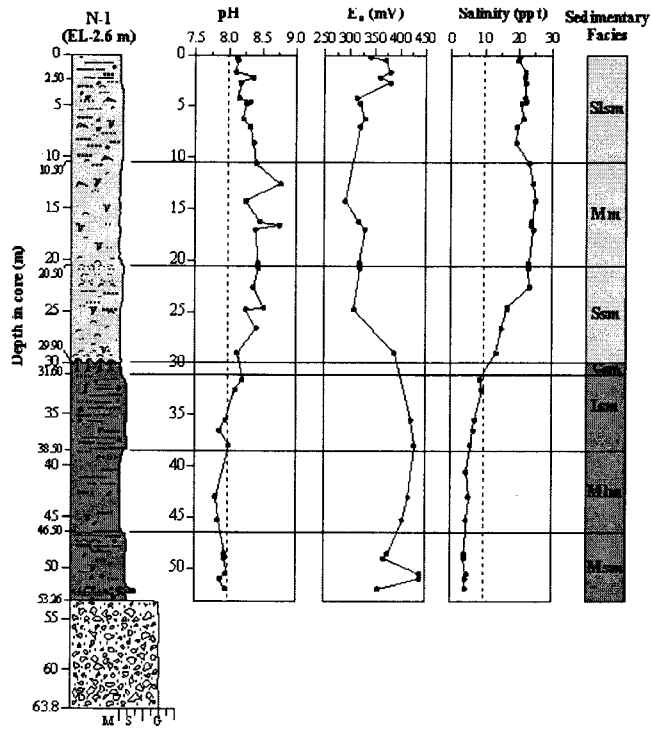


그림 3.4 부산 신항 N-1 위치에 대한 지화학적 분석 (허, 2003)

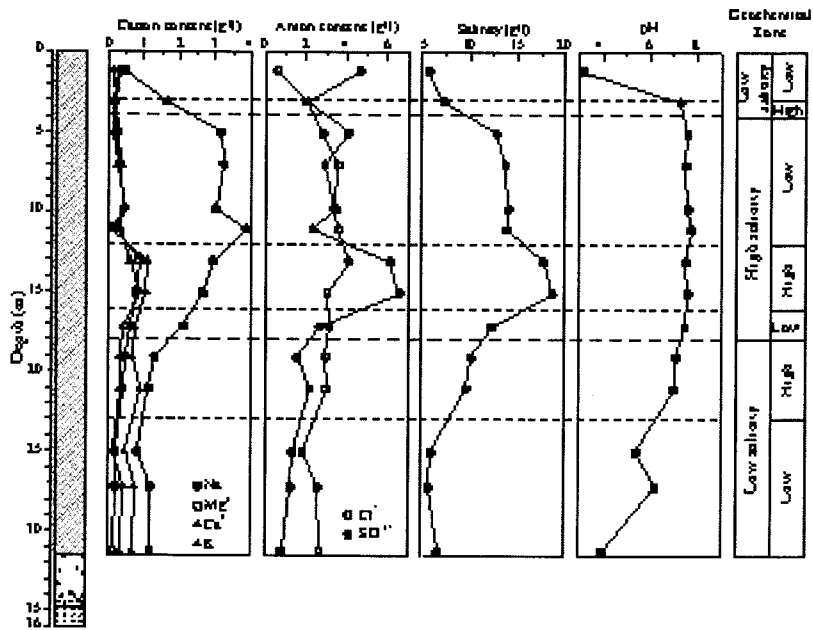


그림 3.5 장유 지역에 대한 지화학적 분석 결과 (류, 2003, 정, 2003)

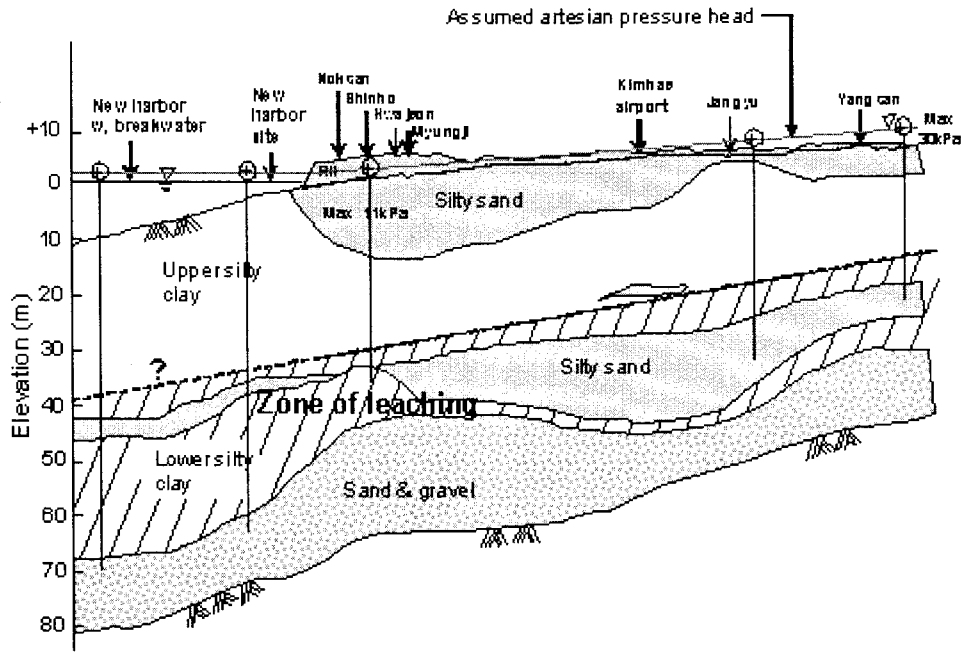


그림 3.6 피압 수두와 염분 용탈의 깊이

해성 점토가 퇴적될 당시에는 주로 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^+ 등의 이온을 함유하고 있고, 특히 Na^+ 이 풍부하다 (Brenner et al., 1981). 장유 지역에 대한 지화학 (geochemistry) 조사에 의하면 (류, 2003, 그림 3.5 참조), 5-16m 의 깊이에서 Na^+ 이온과 SO_4^{2-} 이온이 가장 많으며 염도는 가장 높다. 그러나 그 아래쪽으로는 이 이온들과 염도가 현저히 낮아진다. 이와 같은 이온의 갑작스런 감소는 피압수에 의한 염분 용탈 (leaching)에 기인된 것으로 판단된다.

위에서 논의한 바와 같이 점토층에 대한 퇴적 시의 환경과 그 후에 발생한 염도의 감소, 이온 농도의 감소 등을 고려하면, 상부 점토층의 어느 깊이 아래까지 피압수에 의한 용탈작용 (leaching)이 있었든 것으로 판단된다. 그림 3.6 은 이와 같은 지화학적 조사로부터 용탈 작용이 발생한 지층 깊이를 추정한 그림이다.

3.3 피압이 공학적 성질에 끼친 영향

3.3.1 액성지수와 염분 용탈과의 관계

액성지수의 값은 퇴적 당시의 환경과 그 이후의 변화를 잘 암시한다. 퇴적과정에 있는 점토는 지표면에서 높은 함수비를 가짐으로 액성지수는 1 보다 더 크다. 예민한 점토도 액성지수가 1 을 초과한다. 정규압밀 점토는 0.5 로부터 1.0 이상까지 넓게 변화하지만, 퇴적 후 추가로 하중을 받았거나 건조 작용 (desiccation)을 받았다면 액성지수는 1 보다 더 작아진다. 런던 점토처럼 과압밀비가 크면 0 까지 내려 갈 수 있다.

이와 같은 정규 압밀 점토의 거동과는 달리, 델타지역 내의 대부분의 점토는 전 깊이에 걸쳐서 액성지수가 1 보다 크거나 거의 동일하다 (그림 3.7 참조). 액성지수가 1 보다 큰 이유는 두 가지를 생각할 수 있다. 첫째, 수층에서 퇴적되어 지표면을 이루는 퇴적층은 함수비가 높아서 거의 액체상태에

가깝다고 할 수 있으므로 이런 경우에는 액성지수가 1 보다 크다. 둘째, 해수에 퇴적된 점토층의 염분이 용탈되었다면 자연함수비가 액성한계를 초과한다. 염분이 용탈되면 함수비는 거의 변화가 없지만 액성한계가 감소하기 때문이다.

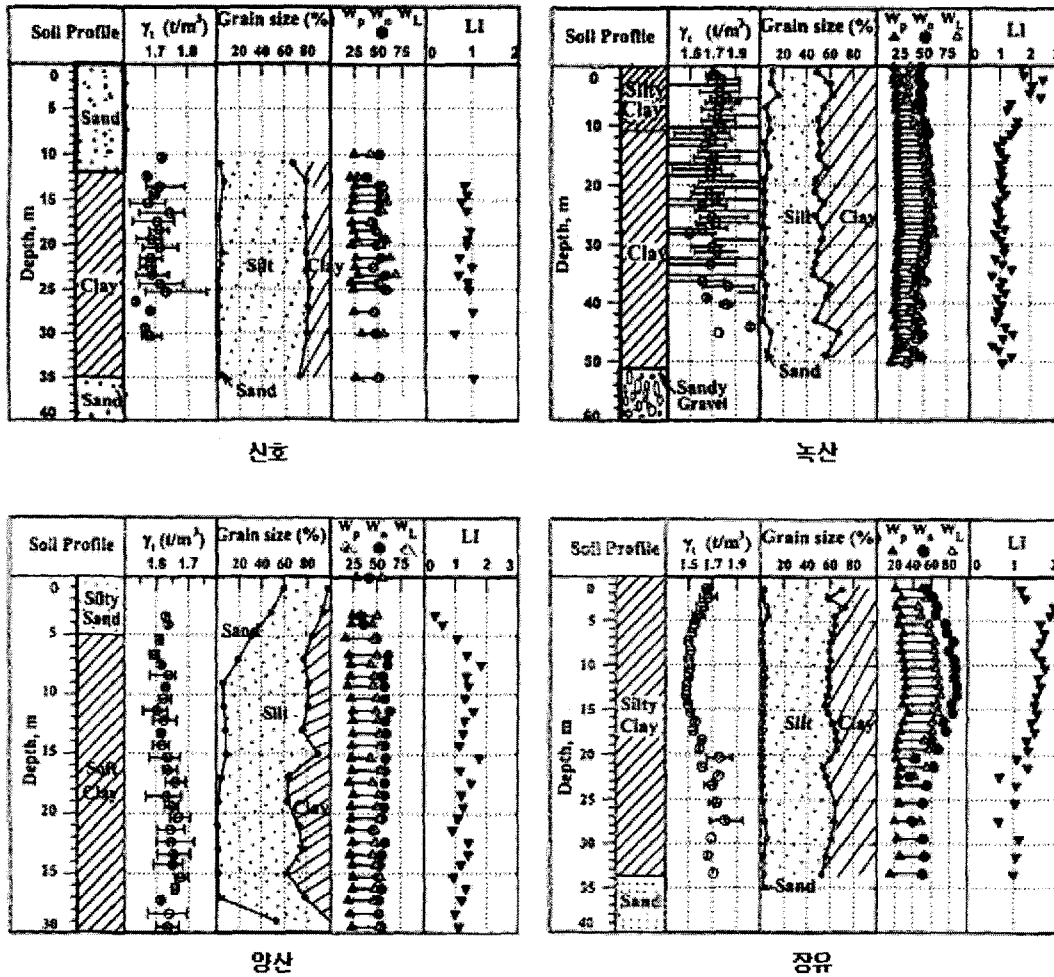


그림 3.7 여러 지역에 대한 깊이에 따른 액성지수의 변화 (정 등, 2001)

그림 3.8 은 Sridhharan (2006)이 일본의 Isahaya 시료에 대하여 시험한 결과인데, (a) Na^+ 이온과 액성한계, (b) 염분 농도와 액성한계와의 관계를 잘 설명해준다 (Sridhharan, 2006). Na^+ 이온이 감소하면 액성한계가 감소하고 또 염분 농도가 감소하면 액성한계도 따라서 감소한다는 것을 잘 보여주고 있다. 이미 Bjerum (1967)은 노르웨이 점토에 대한 실험에서 염분 용탈로 인해 액성한계가 48%에서 37%로 감소한 예를 보고하고 있다.

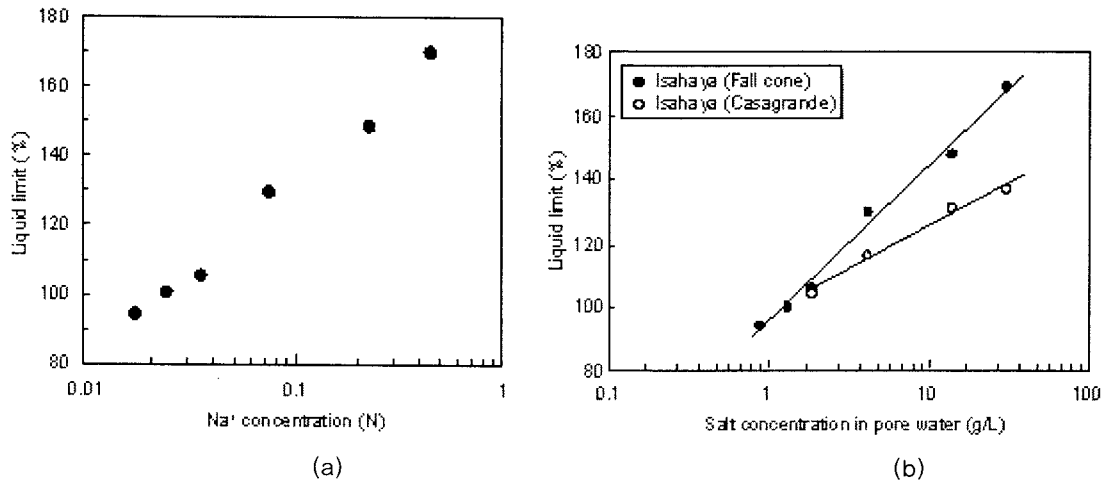


그림 3.8 (a) Isahaya 시료에 대해 시험한 Na⁺이온과 액성한계와의 관계 (b) 염분의 농도 액성한계와의 관계 (Sridharan, 2006)

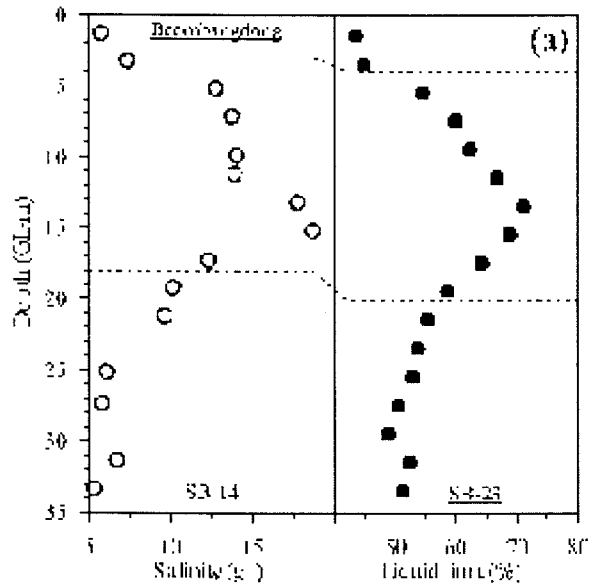


그림 3.9 현장 시험에서 얻은 염도와 액성한계와의 관계 (류, 2003)

낙동강 하구 점토에 대해서는 류 (2003)에 의해 현장에서 채취한 시료에 대해 염도와 액성한계와의 관계를 규명하였다 (그림 3.9). 이 그림을 보면, 깊이 15m 부근에서 염분이 가장 많고 (약 23g/l), 바로 이 깊이에서 액성한계도 가장 높다 (약 70%)는 것을 알 수 있다. 이 깊이 아래로는 염분이 5g/l 까지 감소하였는데 염분의 감소에 따라 액성한계도 50%까지 감소하였다. 이 조사는 염분 용탈이 있으면 실제로 액성지수를 증가시키고 또 다음에 설명하는 활성도를 감소시키게 된다는 충분한 설명이 될 수 있을 것이다.

3.3.2 활성도에 끼친 영향

장유와 신호지역에 대하여 깊이 별로 활성도를 조사한 결과를 그림 3.10에 제시하였다(Chung et al., 2003). 활성도는 심도에 따라 큰 차이를 보이는데, 중간 깊이에서 가장 크고 그 위와 아래는 작다는

것을 알 수 있다. 즉, 장유에서는 19m 아래에서, 신호에서는 30m 아래에서 활성도가 그 위에 비해 많이 떨어졌다. 또 장유에서는 4m 깊이 위로, 신호에서는 21m 깊이 위로 활성도가 더 떨어졌다. Tanaka et al. (2001)의 조사에 의하면, 장유에서는 19m 아래에서 활성도가 가장 낮고, 신호에서는 30m 아래에서 가장 낮았다. 이와 같은 활성도도 염분의 용탈과 관련이 있다.

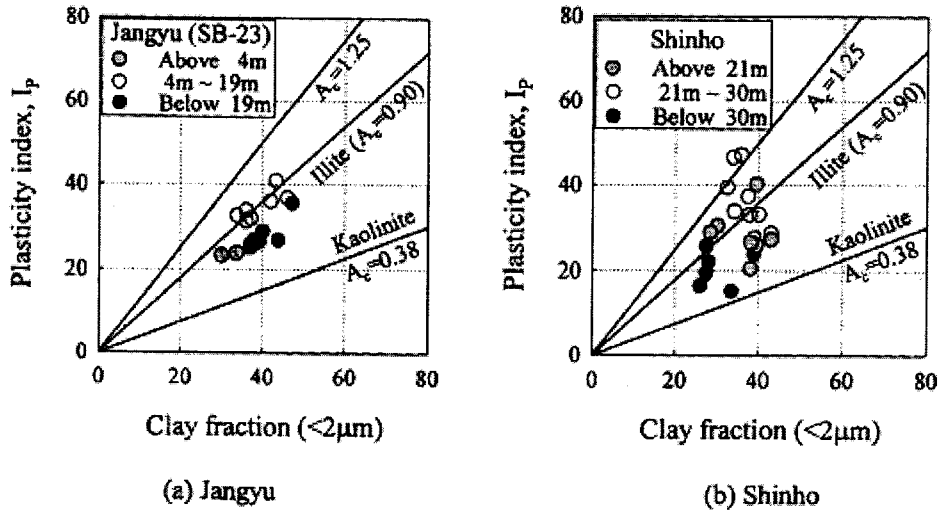


그림 3.10 장유 (a)와 신호 (b)지역에 대해 조사한 깊이 별 활성도(Chung et al., 2003)

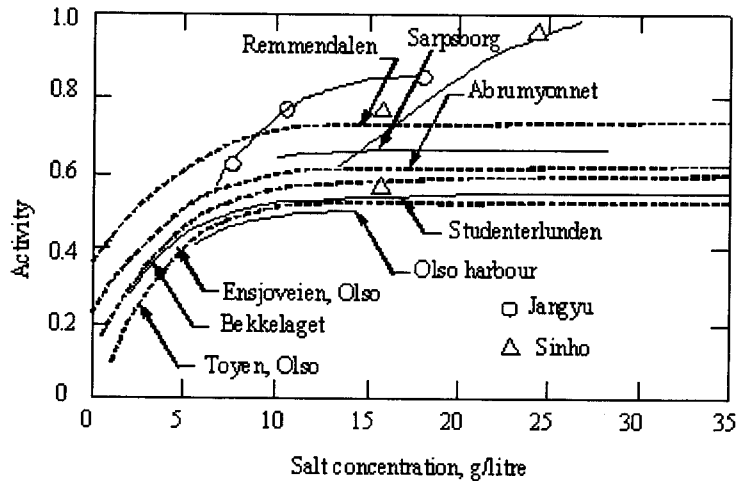


그림 3.11 노르웨이 점토에 대한 염분 용탈이 활성도에 끼친 영향 (Bjerrum, 1954)

노르웨이 점토에 대해 염분 용탈이 활성도에 끼치는 영향에 대해서는 Bjerrum (1954)에 의해 연구되었다. 그림 3.11 을 참조하면, 염분이 10g/l 까지 감소되어도 활성도는 거의 감소되지 않는다. 그러나 10g/l 이하가 되면 활성도가 떨어지기 시작하고 5g/l 이하가 되면 이 값이 현저하게 감소된다는 사실을 실험으로 보이고 있다.

그림 3.10 의 결과를 이 그림에 겹쳐보면 낙동강 하구 점토는 염도가 10g/l 까지 떨어지기 훨씬 이전부터 활성도가 감소한다는 사실을 알 수 있다. 이미 3.9 에서 보여준 바와 같이 하구 점토는 10g/l 보다 훨씬 더 많은 염도에서도 액성한계가 감소한다는 것을 알게 되었으므로 이러한 결과는 충분히 예견될 수 있다. 염분 용탈이 있으면 이미 설명한 바와 같이 액성한계가 감소하고 따라서 소성지수가

감소하기 때문에 활성도도 감소된다.

3.3.3 예민비

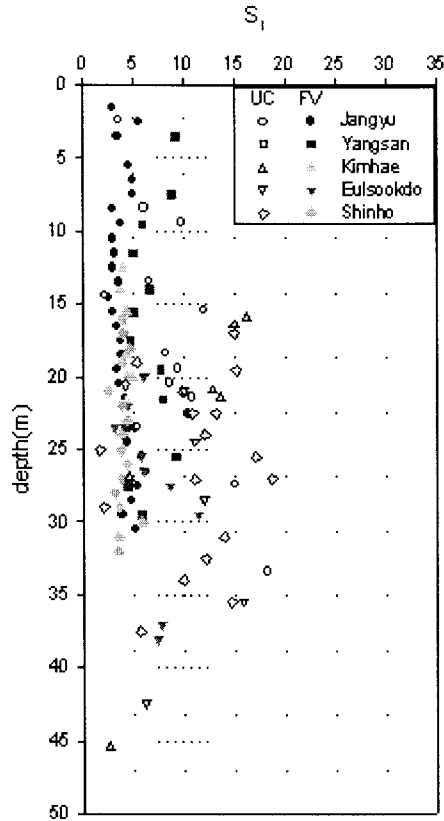


그림 3.12 낙동강 하구 점토의 예민비 (백, 2002)

그림 3.12 는 델타 여러 지역에 대하여 측정된 예민비를 보여준다 (백, 2002). 예민비는 현장 배인 시험 (FV)과 일축압축시험 (UC)으로 측정되었다. 배인 시험으로 측정된 값은 3-10 의 범위에 있다. 그러나 후자로 측정된 시험치는 이보다 훨씬 높으며, $S_t=5-18$ 까지 그 값의 변화가 심하다. 이 변화는 시료 교란 때문인 것으로 보인다. 시료가 교란되면 예민비는 과소평가된다는 것을 유의할 필요가 있다. 이 그림을 보면, 시험 방법에 따라 큰 차이가 나타난다는 것을 알 수 있다. 현장 배인시험은 흙을 교란시킬 때 주위의 구속으로 인해 충분히 교란되지 않기 때문에 이 시험에 의한 측정치는 실제보다 작은 값을 얻게 된다. 예민비 측정의 표준 방법은 실내 배인시험으로 알려져 있으므로 UC 에 의한 측정치가 실제와 더 가까울 것이다. 이 그림에서 한 가지 유의할 것은 15m 깊이 아래부터 예민비가 갑자기 증가한다는 사실이다. 이것은 이 깊이 아래는 염분이 용탈되었기 때문이다

표 3.1 은 예민비의 분류표이다 (Brenner et al., 1981). 연구자에 따라 분류상 차이가 있지만, 낙동강 하구 점토는 염분이 용탈된 깊이에 대해서는 예민한 점토 (sensitive clay) 내지 극히 예민한 점토 (very sensitive clay)로 분류해도 좋을 것 같다.

표 3.1 예민비의 분류 (Brenner et al., 1981)

Skempton & Northy (1952)	Rosenqvist (1963)	Soderblom (1969)
1.0: Insensitive clays	1.0: Insensitive clays	<20: Normal clays
1-2: Clays of low sensitivity	1-2: Slightly sensitive clays	20-50: Semi-quick clay
2-4: Clays of med. sensitivity	2-4: Medium sensitive clays	>50: Quick clays
4-8: Sensitivity clays	4-8: Very sensitive clays	
8-16: Extra-sensitivity clays	8-16: Slightly quick clays	
>16: Quick clays	16-32: Medium quick clays	
	32-64: Very quick clays	
	>64: Extra quick clays	

3.3.4 비배수 전단강도에 끼친 영향

그림 3.13 은 델타 내 여러 지역에 대해 심도의 증가에 따른 콘 관입치 (q_c)의 변화를 보여준다 (백, 2002). 장유와 양산에서는 각각 17-20m 와 21-23m 의 깊이에서, 신호 지역에서는 30-35m 의 깊이에서 강도 증가가 나타나지 않거나 감소한다. 이 그림을 보면 하구의 상부 점토 전체에 걸쳐서 이러한 경향이 공통적으로 나타난다는 것을 알 수 있다. 실내 전단시험이나 현장 베인 시험 결과에서도 이러한 경향은 동일하다 (Lim, et al. 2003; Chung et al., 2003). 강도 증가가 없거나 감소하는 깊이는 공통적으로 중간 모래층에 가까운 상부 점토층 내에 있다. 또 이 깊이는 간극비가 감소하기 시작하는 깊이와 대략 일치하였다.

그림 3.14 는 염분 용탈이 전단강도에 끼친 영향을 잘 나타내고 있다. 장유의 경우에는 10g/l 아래로 떨어졌을 때 갑작스런 강도 감소가 발생하였다. 신호의 경우에는 15g/l 로 염도가 떨어질 때 강도 감소가 발생하였다. 여기에는 더 이상 제시하지 않았지만 다른 자료에서도 이러한 경향을 찾아 볼 수 있었다. 이 두 그림으로 미루어 보면 염도가 10-15g/l 로 떨어지기 시작하면 전단강도가 갑자기 감소한다는 것을 알 수 있다. 그러나 강도 감소 이후의 강도 증가비는 염분 용탈이 발생하지 않았든 상부 점토와 거의 동일한 것으로 보인다. 이 부분에 대해서는 실험을 통해 염도의 감소와 전단강도와의 관계를 더 자세히 규명할 필요가 있을 것 같다.

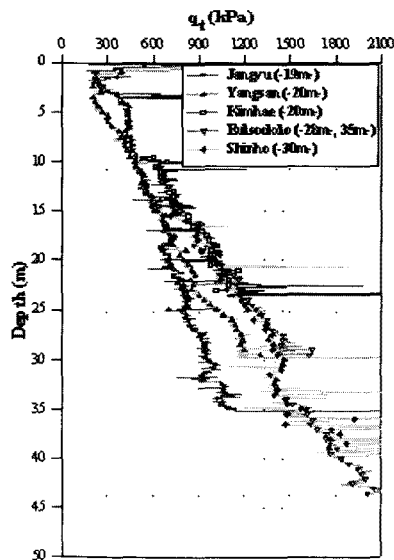


그림 3.13 델타 내 여러 지역에서 측정된 깊이 별 콘 관입치의 변화 (백, 2002)

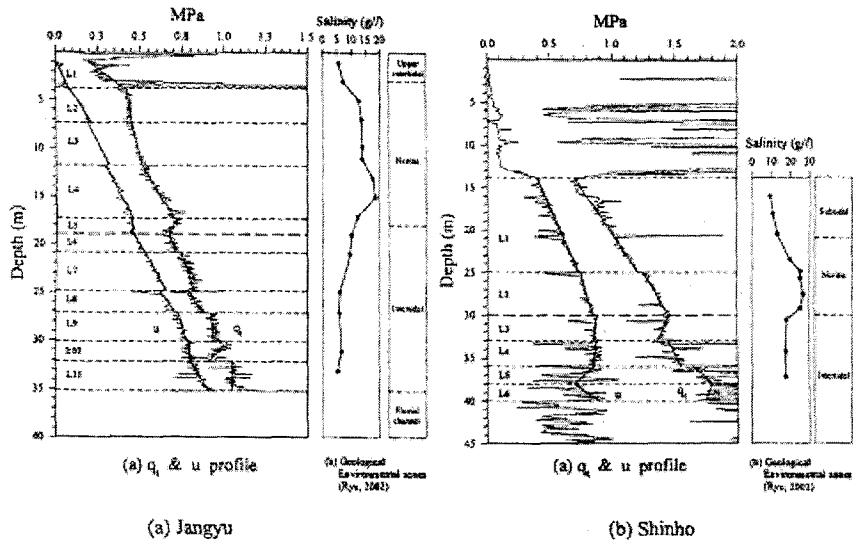


그림 3.14 염분 용탈과 강도 감소와의 관계 (Chung et al.)

그림 3.15 는 노르웨이의 Drammen 점토에 대해 염분 용탈이 전단강도에 어떤 영향을 끼치는가를 잘 보여주는 그림이다 (Bjerrum, 1967). 이 점토는 하구 점토와 마찬가지로 점토 광물의 주성분은 illite 이다. 그림 3.15(a)를 보면, 피압을 받으면 유효 토피하중이 감소하고 담수의 침투로 염분이 용탈되면 간극비와 비배수 강도가 감소한다. 그 후에는 약간의 하중 증가로도 간극비가 크게 감소한다. 이 그림에서는 퇴적시의 강도 증가비 S_u/s_{v0} 는 0.20 으로부터 0.12 까지 감소하였다는 것을 보여주고 있다. 이것을 위에서 설명한 낙동강 하구 점토의 전단 특성의 거동과 관련시켜 보면, 전단강도의 갑작스런 감소에 대한 설명이 될 수 있을 것이다.

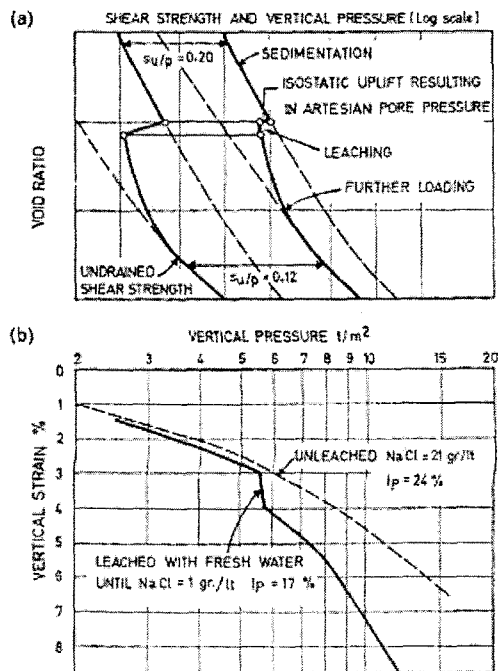


그림 3.15 노르웨이 Drammen 점토에 대한 염분 용탈이 비배수 전단강도와 압축성에 끼친 영향 (a) 일반 원리 (b) 압축성 (Bejerrum, 1967)

3.3.5 변형 특성에 끼친 영향

그림 3.16 은 양산 점토에 대하여 여러 가지 시험 방법으로 시험한 깊이의 증가에 따른 과압밀비의 측정치를 보여준다 (Lim et al., 2003). 실내 시험 결과 (CRS)에 의하면, 약 10m 의 깊이까지는 과압밀비는 1 을 넘는다. 그러나 그 이하의 깊이에서는 과압밀비는 1 보다 낮다. 이 그림에서 현장 시험으로 결정한 과압밀비는 Marchetti (1980), Lunne et al. (1997) 등이 제안한 경험식을 이용하여 산정한 것이다. 양산 점토는 경험식에 따라 전체적으로 또는 부분적으로 OCR 값이 1 보다 크기도 하고 작아지기도 한다. 그러나 여기서 주목할 것은 OCR 값이 깊이가 증가할수록 공통적으로 감소하는 경향을 보인다는 사실이다.

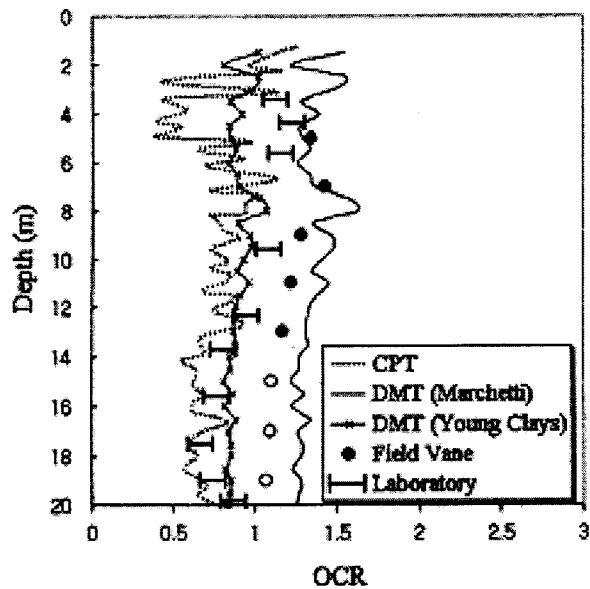


그림 3.16 양산 점토에 대한 과압밀비의 측정 (Lim et al., 2003)

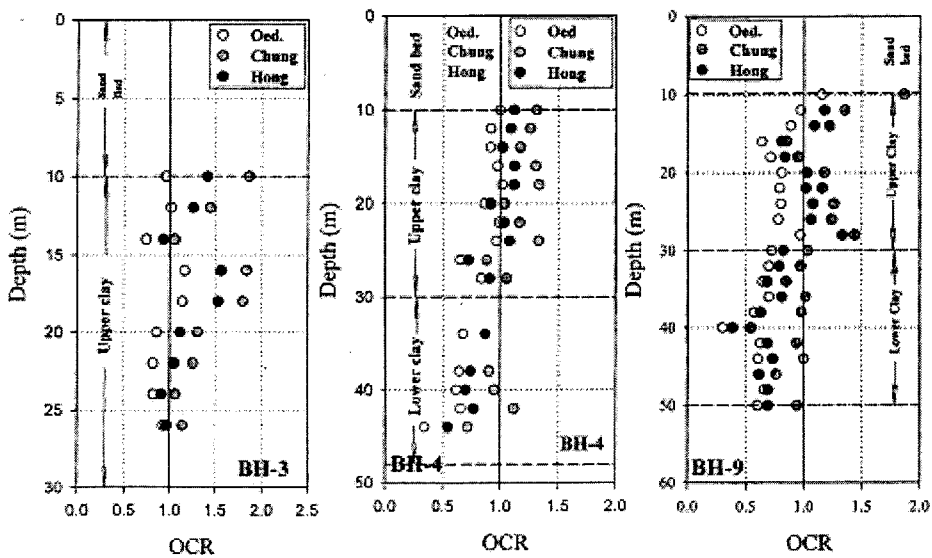


그림 3.17 화전 지구 여러 시추 위치에 대한 깊이의 증가에 따른 OCR 의 변화 (Rao, 2004)

그림 3.17 은 화전지구에 대해 깊이 별 OCR 를 보여주는 그림이다. 대략 깊이 30m 부근에서는 OCR>1 이나, 이 깊이 아래는 갑작스런 감소를 보이면서 OCR=0.5 또는 그 이하까지 떨어졌다. 이 자료는 시료 교란을 보정하기 위해 Schmertmann 등과 같은 수정방법을 적용하였지만, 하구 점토가 이와 같이 미압밀 특성을 보인다는 것은 오래 전부터 논란되어 왔다 (김, 1999; 김과 고, 1997; 조 등, 1996). 물론, 이런 결과가 나타난 것은 시료 교란에 의한 원인도 있을 것이다. 그러나 지금까지의 설명으로서는 피압으로 인해 유효 토피하중이 감소된 것이 주된 원인이라고 해도 좋을 것이다.

4. 하구 점토지반의 지반개량에서 얻은 경험

4.1 예측 침하량과 실제 침하량

연약지반에서 발생하는 침하량과 침하시간을 계산하는 이론은 이미 오래 전에 Terzaghi 에 의해 개발되었지만, 실제와 맞게 예측하는 일은 토질 기술자의 오랜 과제가 되어왔다. 예측에 사용되는 토질 정수는 시료 교란과 시험 방법에 의존할 뿐만 아니라, 실제 지반은 점소성 거동 (viscous behavior)을 하고 있기 때문이다.

선형하중 공법으로 단지 조성을 할 때에는 지표면 위로 고성토가 요구된다. 하구의 내륙 쪽의 지표면은 지하수위 면이 0-3m 에 있으나, 바다 쪽의 신항만 북항 부지의 지표면은 해면 아래 0.5-2.5m 아래에 있기 때문이다. 하구 연약 지반에서 최초로 양산, 명지, 신호, 녹산과 같은 대규모 단지를 조성할 때에는 예측한 침하량은 실제보다 1/2-1/3 정도 까지 작게 예측한 경험도 있다 (김, 2004). 그 이유는 주로 시료 교란에 의한 압축 지수의 과소 평가에 기인되었다. 그러나 최근에 와서 시료 채취 기술의 향상과 더불어 더 정교한 시험과 해석으로 이 차이는 현저히 감소되었다.

표 4.1 압축 지수 및 압축비에 대한 시험 치와 역 해석 결과의 비교

구분	시험		역해석 1*	역해석 2**	
	Cc	Cc/(1+e0)	Cc/(1+e0)	Cc	Cc/(1+e0)
부산신항 (A-1)	0.5-1.0	0.28 (평균)	0.32	1.369	0.49**
북산신항 (M-4)		0.28 (평균)	0.33	1.307	0.47**
녹산	0.5-1.0	0.27(평균)			
명지	0.6	0.24(평균)			
양산	0.28-0.54	0.29(평균)			0.45***
을숙도	0.54	0.21(평균)			

* 역해석 1: 김상규 (2007)

** 역해석 2: 김운태 (2007)

*** 역해석 자료: Giao et al. (2000)

표 4.1 은 현재까지 여러 단지 조성에서 적용한 압축지수와 압축비를 보여준다. 녹산, 양산 등 단지에서 계산에 사용된 압축비는 0.21-0.27 이었지만, 현재 축조 중인 부산 신항 배후 단지에서는

0.28 이다. 부산 신항에 대해서는 선행하중을 가한 후 약 2 년이 지난 시점에서 상부 점토 층에 대해 역해석을 해보았다. 역해석 1 은 재래식의 방법으로 손 계산하여 구한 것인데 (김상규, 2007), 선행하중을 가한 후 2 년 이상 경과한 계측 침하량 자료에서 압축비를 역산하였다. 역해석 2 는 유전자 알고리즘을 적용하여 수치 해석으로 구한 결과이다 (김운태, 2007). 부산 신항에 대한 결과를 보면, 시험치 시험에서 얻은 압축비 0.28 (평균 $C_c = 0.75 (0.5-1.0)$)에 비해 역해석 1 의 결과는 0.32-0.33 으로써 이보다 더 크다. 좋은 품질의 시료와 시험으로 시험치를 얻었다 하더라도 실측 침하량은 약 20% 가까이 더 크다는 것을 알 수 있다. 역해석 2 의 결과는 시험치보다 훨씬 더 크다.

실험실에서 얻은 C_c 값으로 예측한 침하량은 실제보다 과소 평가된다는 사실은 이미 많은 연구자에 의해 밝혀졌다 (예; Bjerrum, 1972; Leroueil, 1996). 시험실에서 EOP (end of consolidation) 방법으로 단시간 내에 얻어지는 C_c 값은 2 차 압밀의 영향이 배제되지만, 현장에서는 설사 압밀 촉진 공법을 사용한다 하더라도 6 개월 내지 1 년 이상의 기간에 걸쳐 침하됨으로 2 차 압밀의 영향 (Bjerrum, 1972) 또는 점소성 거동 (viscous behavior, Leroueil, 1996)이 포함되기 때문이다. 그림 4.4 를 참조하면, 시험실에서 하중 증가 기간을 24 시간 기준하여 결정한 C_c 값으로 계산한 침하량은 처녀 압밀곡선의 AC 를 따라가지만, 현장에서 1 년간에 걸쳐 침하가 발생하였다면, 점선 AD 를 따라 침하가 발생한다. 따라서, 현장에서는 CD 만치 더 크게 침하가 발생한다.

표 4.2 는 현재까지 단지를 조성한 부지에 대하여 성토고와 실측 침하량과의 관계를 보인 것이다. 이 표를 보면, 연약 층 두께가 20m 내외인 경우(명지)에는 성토고의 25-30%가 침하하고 30m 를 넘는 경우에는 대략 45% 정도 침하한다는 것을 알 수 있다. 이것은 예비설계 시 참고할 수 있는 대단히 유용한 자료라고 생각된다.

표 4.2 성토고에 따른 침하량 발생의 통계

위치	연약층 평균 두께(m), T	평균 성토고(m), H	실측 평균 침하량(cm), S	S/H (%)
명지(1)	19.5	5.4	1.71	31.6
명지(2)	19.5	5.9	1.48	25.1
신호	38.2	4.8	2.1	45.7
녹산	36.8	5.5	2.51	43.8
양산	26.7	8.0	3.9	48.7
부산신항	35	13.5	5.85	43.3

4.2 피압수가 압밀 침하에 끼치는 영향

앞 장에서 하구 델타 지역 곳곳에서 피압수의 존재가 확인되었다는 것을 언급하였다. 여기서는 단지 조성에 있어서 피압수가 압밀 침하에 어떤 영향을 끼치게 될 것인가를 논의해보고자 한다.

대수층 내에 있는 피압수는 훌륭한 수자원이다. 단지 조성 후 가정 용수 또는 상업 및 공업 용수로 이를 이용하려고 한다면 풍부한 수량을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 얕은 깊이에서 채취가 가능함으로 경제적이다. 그러나 수요 과잉으로 피압 수두가 감소한다면 지하 수위의 감소 이상으로 심각한 지반

침강 (land subsidence)을 유발한다. 행정적인 측면에서 이에 대한 대비가 미리 요구된다.

피압이 존재하는 지반에서 연직 배수재를 사용하여 선행하중 공법으로 연약 지반의 압밀을 촉진시키고자 할 때에도 이 배수재가 어떤 영향을 끼치는가 살펴 볼 필요가 있다. 그림 4.1 (a)는 대수층에 피압이 존재하는 경우 지하 수위에 추가해서 발생하는 깊이 별 피압의 분포를 보여준다. 만일 배수재를 대수층까지 삽입했다면, 피압수는 배수재를 통해 지속적으로 배수될 것이고 피압수의 공급이 계속되는 한, 원 지하 수위는 곧 $\Delta h = u_{ar}/\gamma_w$ 만치 상승할 것이다 (그림 4.1 (b)). 여기서 u_{ar} 는 피압 (artesian pressure)의 크기이다. 지표면 또는 여성토의 높이가 이 높이보다 충분히 높지 않다면 지표면이 범람될 수도 있다. 배수재의 선단이 대수층 위에 있는 경우에도 (그림 4.1 (c)) 앞서 설명한 바와 같은 결과를 가져온다. 그러나 이 경우에는 지하 수위의 상승이 전자의 경우보다 낮다. 만일 배수재 선단과 대수층 사이의 두께가 불투수층의 역할을 충분히 한다면 수위 상승은 거의 없을 수도 있다.

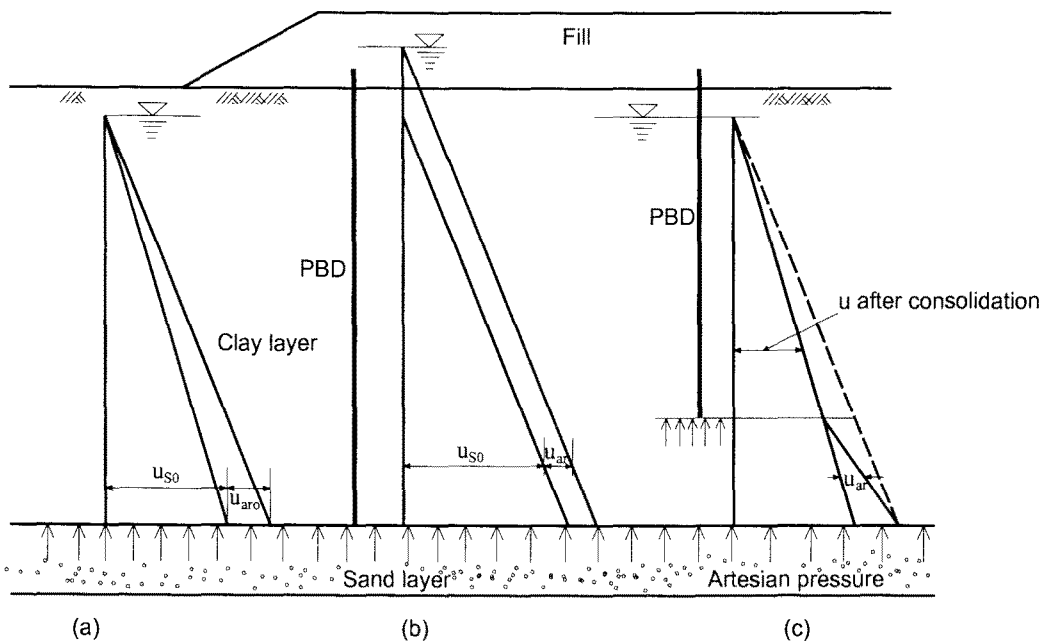


그림 4.1 배수재의 깊이에 따른 피압의 분포 (a) 배수재가 없는 경우 (b) 배수재가 대수층까지 관통된 경우 (c) 배수재 선단이 대수층 위에 놓이는 경우

이와 같은 분석 결과는 배수재의 선단은 대수층 위에 위치시키는 것이 중요하다는 것을 말해준다. 그러나 이 경우에는 점토층의 하부가 미개량 층으로 남게 됨으로 전체 점토층의 압밀이 지연된다는 것을 유의해야 한다. 부산 신항의 경우에는 배수재의 길이가 최대 50m 나 되지만, 다행히도 하부 모래층까지 도달되지 않았으며 피압의 존재 여부도 확인되지 않았다.

4.3 선행하중 공법 설계 시 영구 침하량과 잔류 침하량

선행하중 공법 (preloading)의 설계에 대해서는 Johnson (1970)의 논문이 거의 고전이라고 할 수 있으며, 그림 4.2 는 이의 설계 방법을 잘 설명해주고 있다. 하구 연약지반에 대해 선행하중 공법을

적용하여 여러 곳에서 단지 조성을 수행하였지만, 이 방법을 따라 설계하는 경우는 극히 드문 것 같다. 이에 대해서는 이미 김 (2006)이 이에 대한 올바른 이해를 촉구한 바 있다.

선행하중 공법은 연약 지반 상에 영구 하중 (permanent load, P)에 추가해서 여성토 (또는 일시 재하중, surcharge, P_s)를 가함으로써 2 차 압밀침하량을 상당부분 감소시키는데 목적이 있다. 그림 4.2 를 참조하면, 여성토를 함께 가한 후 여성토 제거 시기 t_{SR} 에서 이것을 제거한다면 영구하중의 2 차 압밀침하량 중 A 점까지 발생하는 2 차 압밀침하량이 ρ_{sc} 만치 제거되었으므로 (앞으로 발생하는 잔류 침하량은 ρ_{sec} 만 남는다. 따라서 선행 하중 공법을 설계할 때에는 영구하중 (permanent load)에 의해 발생하는 1 차 압밀침하량과 2 차 압밀 침하량을 먼저 계산해서 이 값을 기준하여 여성토의 크기와 이의 제거 시기를 결정해야 한다.

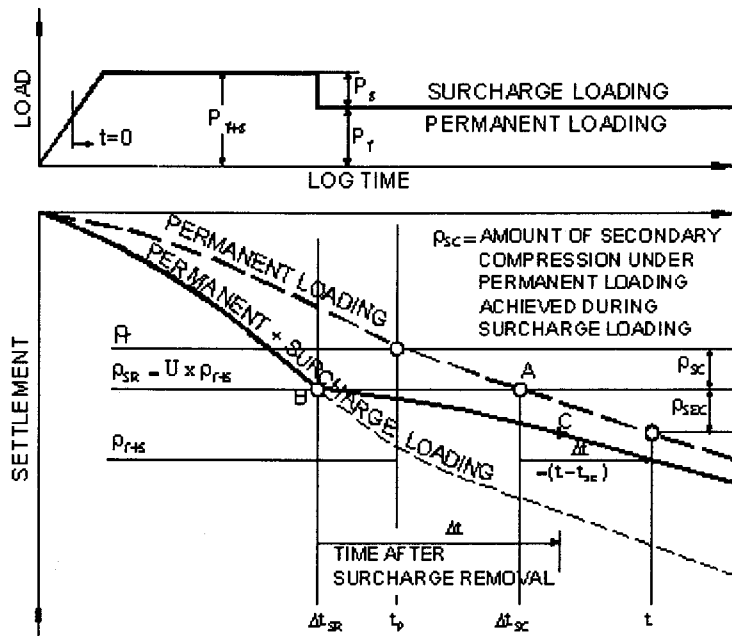


그림 4.2 선행하중 공법 설계의 원리 (Johnson, 1968)

영구하중이란 계획 지반고까지 매립할 때의 하중과 공용하중 (교통하중 등)을 포함하며, 이 하중으로 발생하는 압밀 침하량은 재래식의 방법으로 쉽게 계산할 수 있다. 예컨대, 50 년까지의 2 차 침하량을 추정했다면 이것을 보탠 값이 선행하중 공법에서 미리 침하를 유발시키려는 목표 침하량이 된다. 그런데 이 목표치에 도달할 때까지는 여성토의 재하 시간이 상당히 길어짐으로 허용침하량을 고려하여 그 이전에 여성토를 제거할 수 있게끔 설계되어야 한다. 다시 말하면, 선행하중 공법의 설계는 <목표 침하량-허용침하량>에 차질 없이 도달하게끔 여성토의 크기 (P_s)와 이의 제거 시기 (t_{SR})를 결정하는 일이다. 여성토 제거 이후 목표 침하량까지 발생하는 침하량을 잔류 침하량 (residual settlement, r_{sec})이라고 하며, 이 값을 얼마만치 허용할 것인가 하는 것이 허용 잔류 침하량(allowable residual settlement)이다. 잔류 침하량을 <영구하중+여성토>의 1 차 압밀 침하량으로 기준하여 설계나 침하관리를 하는 경우가 있는데, 이것은 선행하중 공법의 원리를 잘못 이해하고 있기 때문이다 (김, 2006).

4.4 부산 신항 시험 부지에서 얻은 경험

신항 배후단지 시험 시공은 다음과 같은 몇 가지 특징이 있다. 첫째, 단지 부근에 인접한 해로를 준설하여 단지 조성을 위한 매립 재료로 이용하였다. 둘째, 연약한 준설토층 위에 장비를 통행시키기 위해 대나무 매트를 사용하였다. 셋째, 지반 개량을 위한 배수재의 길이가 최대 50m 나 되지만, 그래도 미 개량 층이 남아 있다. 이와 같은 새로운 시도에 대한 개량 지반의 거동을 잘 이해하기 위해서는 더 연구해야 할 과제가 많이 남아 있다. 이에 대한 보고서는 거의 완성단계에 있지만, 여기서는 시험 시공에서 얻은 자료를 가지고 내가 분석하고 경험한 결과를 여기에 기술하고자 한다.

4.4.1 지층 별 침하량의 특징

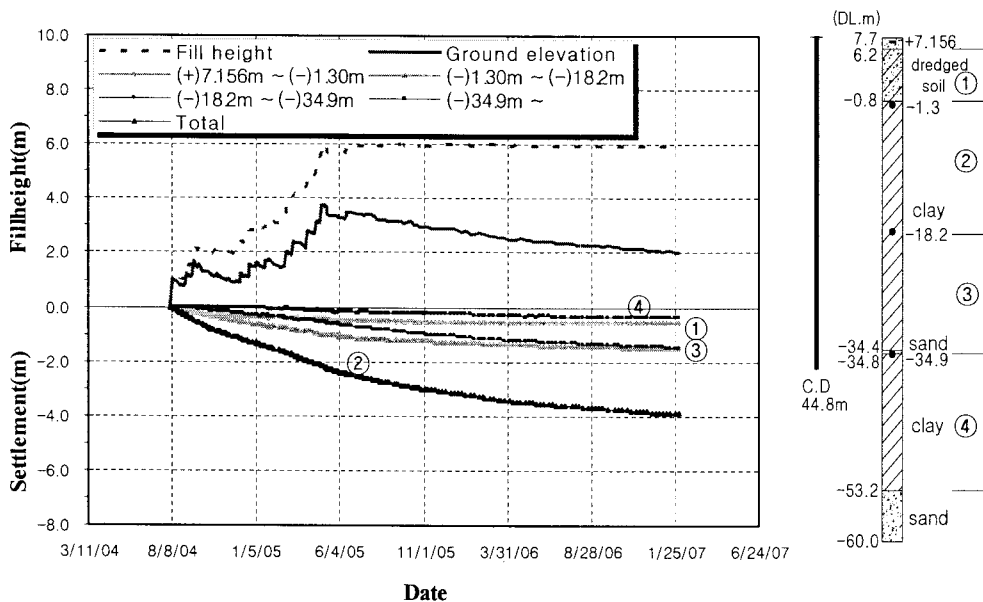


그림 4.3 부산 신항 배후 단지 (M-4) 침하계측의 한 예 (백, 2007)

지표면이 지하수위 아래 또는 가까이 있을 때 성토 하중으로 인해 침하가 발생하면 이 하중이 시간의 경과에 따라 감소한다. 그림 4.3 은 신항 배후단지 시험 성토에 대한 대표적인 자료인데 (M-4), 처음에 7.2m 높이로 해면 위에 준설토로 성토를 했고 그 다음에는 다시 6.2m 높이의 성토 (사질토)를 했다. 전체 성토고는 13.5m 나 되지만 성토의 시작과 더불어 침하가 발생하였으므로 계획된 성토고에는 이르지 못한다. 이런 경우에는 침하와 더불어 성토 하중이 부력을 받은 값만치 감소된다. 따라서 선행 하중은 시간과 더불어 감소하므로, 침하 곡선은 일정한 하중과는 달리 점감하중 (gradually decreasing load)에 의해 얻어진다는 것을 유의할 필요가 있다.

층별 침하계를 이용하여 지층이 변화하는 곳에서 계측이 이루어졌다. 이 그림은 1.6m 의 간격으로 CD (cellular drain)을 심어 약 1 년 반에 걸쳐 지반 개량한 결과이다. 상부 점토층은 배수재에 의해 지반이 개량되었지만, 배수재가 삽입되지 않은 하부 점토층은 침하 속도가 그 위와 다를 것이다.

전체적으로 보면, 44-50m 나 되는 긴 배수재를 사용했음에도 불구하고 전체 점토층이 두꺼워 하부 점토층은 미처리 층으로 남아 있다. 이 미처리 층의 두께는 10-25m 나 되나 상부 점토 층의 두께보다

훨씬 작으며, 또 압축지수가 상부점토 층에 비해 작으므로 (평균 $C_c=0.3$) 침하량은 그렇게 크지는 않다. 그러나 배수재에 의한 압밀이 촉진 되지 않음으로써 주어진 시간에 대한 압밀도가 상대적으로 낮아서 장기적인 침하의 문제가 있을 수 있다.

실제의 측정 기록을 보면, 그림 4.3 의 M-4 의 경우에는 다행히도 최종 조사 시점 (07/1/26)에서 하부 점토층의 압밀도는 85%나 되며 (정, 2007), 침하량은 상부 점토 층의 13% 정도에 지나지 않는다. 그러나 다른 위치 (M-2, M-5)에서는 잔류 침하량이 30cm 가까이 되고 압밀도가 50% 정도에 지나지 않았다.

4.4.2 침하 관리를 통한 여성토 제거 시기의 결정

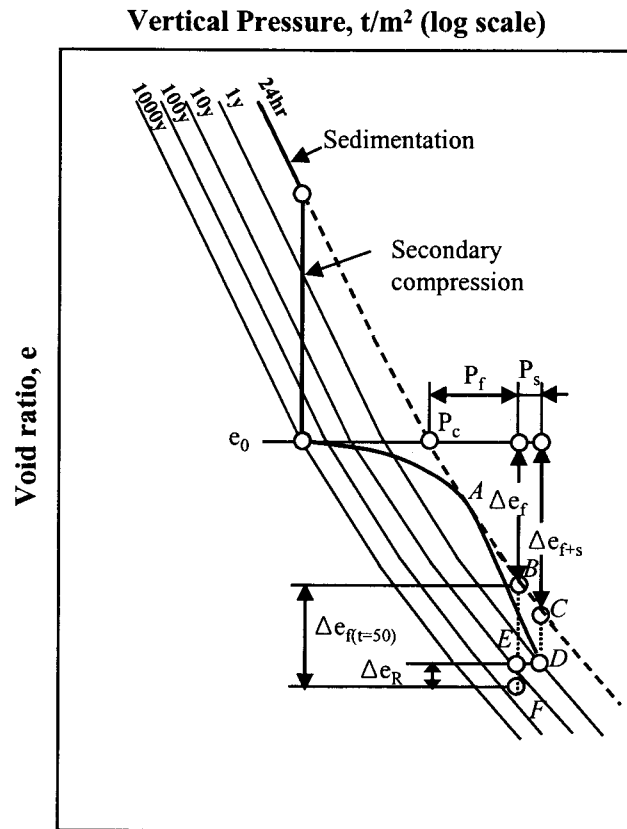


그림 4.4 여성토 제거 시기의 관리 방법

실제로 성토를 하면서 침하량을 추적해보면 설계 시의 침하곡선과 일치하는 경우가 드물다. 그 이유는 이미 설명한 바와 같이 2 차 압밀이 병행하여 발생하기 때문이다. 그림 4.4 를 참조하면 그 이유를 명백하게 이해할 수 있을 것이다.

본래 이 그림은 Bjerrum (1967)이 즉시 압밀 (instant compression)과 지연 압밀 (delayed compression)의 개념을 설명하기 위해 마련된 것이다. 설계 시 압밀시험 자료를 가지고 침하량을 산정했다면, $\langle P_f + P_s \rangle$ 에 의한 1 차 압밀 침하량은 처녀 압밀 곡선의 AC 를 따라 침하할 것이다. 그러나 현장에서는 2 차 압밀을 수반함으로써 점선 AD 를 따라 침하가 일어난다 (여기서는 재하기간을 1 년으로 가정하였음). 계측 결과를 가지고 Asaoka 법 또는 쌍곡선 법과 같은 경험 공식을 사용하여 지속적으로

침하량을 추정해나가면 이 침하량은 실제와 가장 가깝게 예측할 수 있다. D 점까지의 침하량은 여성토 P_s 를 제거 할 때까지의 침하량이므로 $\langle P_f + P_s \rangle$ 에 의한 최종침하량에다 여성토 제거시점에서의 압밀도를 곱하여 구할 수 있다.

연구하중 (공시하중 포함)만에 의한 1 차 압밀침하량은 B 점까지의 침하량이 될 것이다. 이 값은 설계 시에는 시험에서 얻은 압축지수 또는 압축비를 써서 구하였지만, 측정 자료를 가지고 역해석으로 압축비를 구하면 실제와 맞게 수정할 수 있다. 만일 2 차 압밀침하의 발생을 50 년간으로 정한다면, 그 침하량은 BF 가 되며 영구하중에 의한 1 차 압밀 침하량과 이 값을 합친 것이 선행압밀하중에 의해 도달시키고자 하는 목표 침하량이다. 이 그림에서는 선행 압밀하중 $\langle P_f + P_s \rangle$ 에 의해 영구하중에 대한 2 차 압밀 침하량이 BE 만치 감소되었으므로 목표 침하량까지 도달하기 위해서는 아직도 EF 만치 남아 있다. 이것이 잔류 침하량 이다. 시공자는 이 값이 허용치 (부산 신항에서는 30cm)를 초과하지 않도록 침하관리를 해야 한다 (김, 2006 참조). 잔류 침하량이 허용치 이내가 되게끔 선행하중 $\langle P_f + P_s \rangle$ 에 의한 요구되는 압밀도는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\rho_f + \rho_{sec} = \bar{U}_{req} \rho_{f+s} + \rho_{allo} \quad (4.1)$$

$$\bar{U}_{req} = (\rho_f + \rho_{sec} - \rho_{allo}) / \rho_{f+s} \quad (4.2)$$

여기서

\bar{U}_{req} : $\langle P_f + P_s \rangle$ 에 의한 요구되는 압밀도

ρ_{sec} : 2 차 압밀침하량

ρ_{allo} : 허용 잔류침하량

ρ_f : 영구하중 (P_f)에 의한 1 차 압밀침하량

ρ_{f+s} : \langle 영구하중+여성토 \rangle 에 의한 1 차 압밀 침하량

만일 준설토층이 있다면, 이 경우에 요구되는 압밀도는

$$\bar{U}_{req} = (\rho_f + \rho_{sec} - \rho_{allo}) / (\rho_{f+s} - \rho_{reci}) \quad (4.3)$$

여기서

ρ_{reci} : 준설토층의 최종침하량

침하관리를 하면서 $\langle P_f + P_s \rangle$ 에 의한 압밀도가 얼마인지는 계속적으로 추적할 수 있다. 선행하중 공법에 대한 시공관리의 요점은, 설계 시에 결정된 여성토 제거 시기 t_{SR} 에 도달할 때 식 (4.2) 또는 (4.3)으로 계산한 압밀도가 만족되는지 확인하고, 필요하다면 여성토 제거 시기를 연장하거나 추가 성토를 할 수 있다.

4.4.3 배수재의 길이가 압밀도에 미친 영향

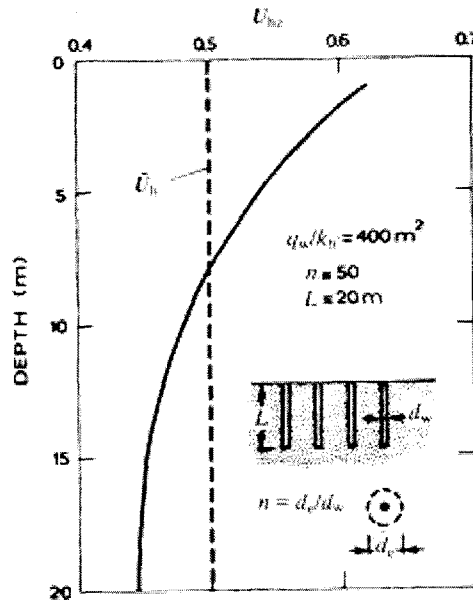


그림 4.5 깊이에 따른 웰 저항 변화의 한 예 (Lancellotta et al., 1981)

부산 신항의 지반 개량 공사에서는 최대 50m 길이의 배수재가 삽입되었다. 이와 같은 긴 배수재의 사용은 세계적으로 드문 일이지만, 장비의 발전으로 이것을 삽입하는데 있어서는 문제는 없었던 것 같다. 그러나 배수재가 길어질수록 이에 수반되는 문제점은 있을 수 있다. 이에 대한 국내의 연구 사례는 아직 없으므로 외국의 문헌을 인용하여 논의하기로 한다.

Lancellotta et al. (1981)의 연구에 의하면, 배수재의 길이가 길면 깊은 심도에서의 압밀도는 그 위에 비해 감소 된다. 그림 4.5 는 PBD 길이 20m 에 대한 시험 결과인데, PBD 의 상단에서는 어느 시점에서의 수평방향의 압밀도가 60% 이상까지 이르나 아래로 갈수록 낮아져서 하단에서는 45%까지 떨어진다. 부산 신항에서 사용된 배수재 길이는 40-50m 나 되는데, 이 시험 결과로 미루어 보면 배수재가 길수록 압밀 효과는 떨어진다는 것은 분명하다. 주된 이유는 다음에 설명하는 구속응력의 영향을 받기 때문이다.

4.4.4 배수재의 품질과 구속압력의 영향

PBD 는 외국뿐만 아니라 국산 제품도 많이 생산되고 있다. 그림 4.6 은 외국의 여러 제품에 대해 통수 능력과 구속압력에 따른 통수 능력의 변화를 시험한 결과이다 (Kamon and Ito, 1984). 제품에 따라 초기 통수능력이 100m³/year 부터 200m³/year 까지 크게 차이가 난다는 것을 알 수 있다. 또 모든 제품은 구속 압력이 커질수록 통수능력은 저하한다. 부산 신항의 경우, 50m 길이의 하단에서는 대략 250kN/m²의 구속압력을 받는다 (성토고를 13.5m 로 가정하였음). 따라서 배수재의 길이가 길수록 통수 능력이 감소되므로 앞서 설명한 바와 같이 결과적으로 압밀도가 저하하게 된다.

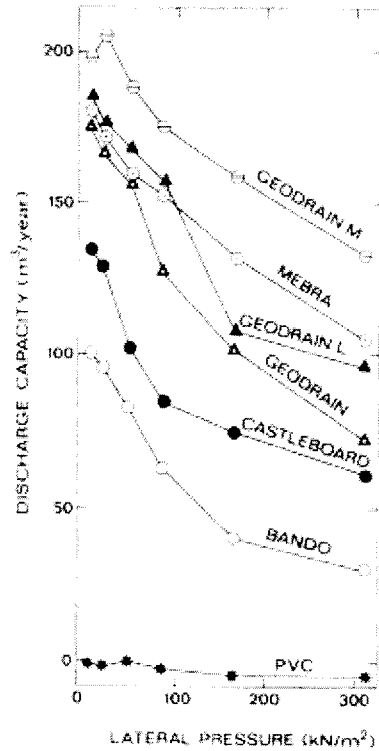


그림 4.6 배수재의 종류에 따른 통수 능력의 비교 (Kamon and Ito, 1984)

4.4.5 대나무 매트와 스미어 존과의 관련

PBD 를 삽입할 때 시료 교란은 주로 멘드렐의 형상에 기인된다. 예민한 점토 지반은 그렇지 않은 지반에 비해 시료 교란이 클 것이다. 특히, 신행 배후 부지는 준설토를 사용하여 약 7m 두께로 매립하였기 때문에 연약한 지표면 위에 PBD 타설 장비의 통행이 문제가 되었다. 이를 해결하기 위해 대나무 매트와 geotextile 을 깔 다음, 그 위를 약 1m 두께의 모래를 포설하였다. 이러한 공법을 적용함으로써 장비의 통행은 가능하였으나, 멘드렐 삽입 또는 인발 시 대나무 매트의 파손에 따른 시료 교란의 우려가 예상되었다. 이에 대한 조사는 되지 않았지만, 만일 파손된 대나무 조각이 이 멘드렐과 함께 따라 내려갔다면 원 지반 전체를 교란시킬 수도 있을 것이다.

그림 4.7 은 스미어 존 (smear zone)의 직경 (d_s)이 시간 계수 ($T_{90(smear)}$)에 어떤 영향을 끼치게 되는가를 일목요연하게 보여주는 그림이다. 이 그림을 보면 스미어 존의 영역 (d_s/d_w)이 클수록, 시간계수가 증가함으로 압밀 시간이 현저히 길어진다는 것을 제시하고 있다.

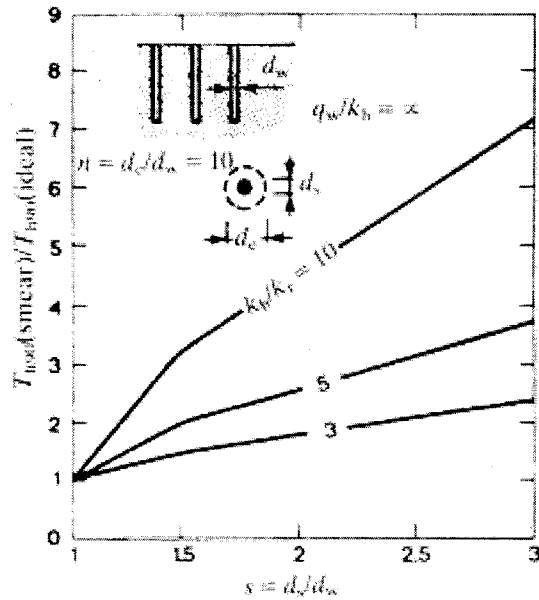


그림 4.7 압밀 속도에 관한 교란의 영향 (Lancellotta et al., 1981)

부산 신히 시험 부지에 대한 지반 개량 결과를 보면, PBD 간격 1.3m 의 압밀도가 1.5m 에 비해 더 낮았다. PBD 간격이 1.0m 이하가 되면 지반 교란으로 말미암아 간격 감소의 효과가 없다는 것은 잘 알려진 사실이지만, 1.3m 의 간격에서 시료 교란의 영향이 현저하게 나타나는 것은 극히 드문 일이다.

이와 같이 압밀도가 이론적인 해석보다 지연되는 이유는 지금까지 설명한 바와 같이 배수재 품질의 영향, 배수재 길이의 영향, 스미어 존의 영향 등으로 생각할 수 있다. 그러나 이러한 관제들은 앞으로 더 연구되어야 할 것이다.

5. 단지 조성 이후의 문제

이와 같이 조성된 단지에는 여러 종류의 건물을 수용하게 된다. 건물의 중량과 크기에 따라 기초 형식이 결정될 것이다. 기본적으로 기초는 지지력에 충분히 안전할 뿐만 아니라 침하량이 허용할 수 있는 범위 내에 있도록 설계되어야 한다. 그런데 하구의 연약 지반에서는 구조물의 기초 형식이 침하에 의해 지배된다는 것을 유념해 둘 필요가 있다.

5.1 기초 형식이 다른 경우의 부등침하

조성된 단지 상에는 여러 가지 다른 종류의 구조물이 축조될 것이다. 이 구조물은 하중의 크기에 따라 기초 형식을 달리하게 된다. 만일 단지지 말뚝에 의해 구조물이 지지된다면 전면기초에 비해 상대적으로 침하를 무시할 수 있다. 그러나 처리되지 않은 지반은 교통 하중이나 비교적 가벼운 하중을 받아도 침하가 발생한다. 그러면 말뚝으로 지지된 구조물과 단차가 생긴다. 하구의 단지에서 축조된 구조물에서 이와 같은 부등침하의 예는 무수히 많다.

그림 5.1 은 양산의 모 아파트에서 발생한 부등침하의 예이다. 말뚝에 지지된 건물에 인접한 도로는 침하가 생겨 건물과 현저한 단차가 생겼다. 한편, 도로에 인접한 지하 주차장은 원 지반을 굴착하여 축조하였으므로 완전한 floating foundation 으로 기능하여 침하가 전혀 발생하지 않았다. 따라서 건물과 주차장 사이의 도로가 가라앉아 군데 군데 균열이 발생하였다. 또 건물에 접하여 높이 1m 가량 성토하여 만들어진 화단은 계속된 침하로 건물 벽에 그 흔적이 명확히 나타나 있었다.

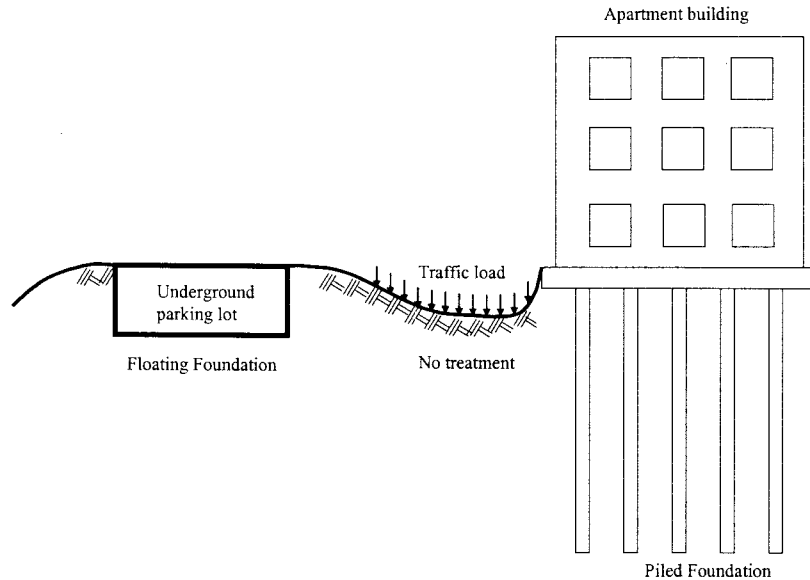


그림 5.1 양산 주거단지에서 건물, 도로, 주차장간에 단차가 발생한 한 예

이와 같은 부등침하를 방지하려면, 단지 구성을 한 후에는 건물 기초 설계에 대한 가이드라인을 제시하고 이를 철저히 이행하도록 행정적으로 강제할 필요가 있을 것이다. 특히 대단지 내에는 주거 및 상업용 건물, 공장, 창고, 상하 수도관, 전기선 등 다양한 구조물을 수용해야 함으로 미리 단차 발생에 대한 철저한 대비가 없다면 추후에 관리 비용이 너무 과다해진다는 것을 지적해 두고 싶다.

5.2 장기적인 침하

5.2.1 2 차 압밀침하

하구 점토 층은 그 두께가 두껍기 때문에 2 차 침하량이 과다하게 산출된다. 시험 결과에 의하면 부산 점토의 1 차와 2 차 압축지수의 비 C_{a2}/C_{a1} 는 조사자에 따라 차이가 있어서 그 값은 0.033-0.045 (평균 0.039)로 보고되고 있다 (표 5.1 참조). 이것을 가지고 30-50m 두께에 대한 50 년간 발생하는 2 차 압밀 침하량을 계산하면 대략 50-80cm 가 된다. 이 침하는 장기간에 전체 단지에 걸쳐 발생하지만, 단지 계획고의 선정 등을 위해 미리 대비해 둘 필요는 있을 것이다. 이미 논의한 바와 같이 선행하중에 의해 전체 지반이 과압밀 상태가 되었다면, 2 차 압밀침하량은 상당량 감소된다는 사실도 알아 둘 필요가 있다.

표 5.1 여러 조사자가 시험한 C_a/C_c 의 값

위치	Ca/Cc	조사자
양산	0.040-0.045	Lim et al. (2003)
부산 신항(1)	0.033-0.035	Kim & Chi (2003)
부산 신항 (2)	0.036	김윤태 (2007)
부산 신항, 화정	0.043	정성교 등(2006)

5.2.2 지반 침강

하부 모래층 또는 중간 점토층에 존재하는 피압수는 훌륭한 수자원이지만 단지 조성 후 이를 이용한다면 지반 침강 (land subsidence)의 문제가 생긴다. 이 문제는 행정적인 엄격한 규제로 그 방지가 가능하다. 지반 침강의 심각성에 대해서는 우리나라와 이웃하는 상해 (Shen et al., 2006) 또는 방콕 (Prinya et al., 1989)에서 발생한 선례를 참고할 필요가 있다. 이 두 도시는 피압수가 존재한다는 보고는 없다. 그러나 피압수가 존재하는 경우에는 이것을 수자원으로 이용함으로써 피압 수두가 감소한다면 지반 침강이 더 촉진된다는 사실을 명심해두어야 한다.

5.2.3 염분 용탈에 의한 장기 침하

3장에서 염분 용탈 작용이 점성토의 공학적 성질에 끼친 영향을 논하였지만, 이 작용이 지속적으로 발생한다고 가정할 때 장기적으로 어떤 영향을 끼치게 되는지 미리 생각해 둘 필요가 있을 것 같다. 지금까지 장기적인 침하는 구조물의 존속 수명 동안 발생하는 (예컨대 50년) 2차 압밀 침하량이 주 연구대상이었다. 그러나 이미 2장에서 퇴적 환경으로 인한 간극비의 특성 (그림 2.4 참조)에 대해 언급하였지만, 점토층의 간극비가 어느 깊이에서 감소되는 현상은 염분 용탈이 그 원인이 될 수도 있다.

염분 용탈로 인해 간극비가 감소되는 실험은 최초로 노르웨이 점토에 대해 행해졌다 (Bjerrum, 1967: 그림 3.15 (b) 참조). 그 후 Kazi and Moum (1972)은 염분 용탈에 의한 간극비의 변화와 2차 압밀에 의한 간극비의 감소를 비교하기 위해 대단히 흥미 있는 실험을 수행하였다 (그림 5.2). 26g/l의 염분을 가진 한 시료는 토피 하중까지 압밀 시험기에서 압밀시킨 상태에서 동일한 염도의 물로 용탈시키면서 2차 압밀 침하량을 측정하였고, 동일한 조건의 다른 시료는 탈기된 증류수로 1.6g/l가 될 때까지 76일간 염분을 용탈시켰다. 그 결과를 보면, 전자에 대한 2차 압밀침하량은 전체 두께의 1.5%로 측정되었으나, 후자의 염분 용탈에 의한 침하량은 4.5%이었다. 후자에서 2차 압밀침하량 1.5%를 감한다면, 3%가 염분 용탈로 인한 침하량이 된다. 이 실험 결과는 하구 점토에 대한 것은 아니지만, 염분 용탈만으로도 침하가 발생할 수 있다는 사실을 시사해준다. 그림 3.3과 3.4를 참조하면 부산 신항에서는 하부 점토층의 염도가 5-15g/l까지 낮아졌으므로 이로 인한 침하의 영향도 충분히 상상할 수 있다.

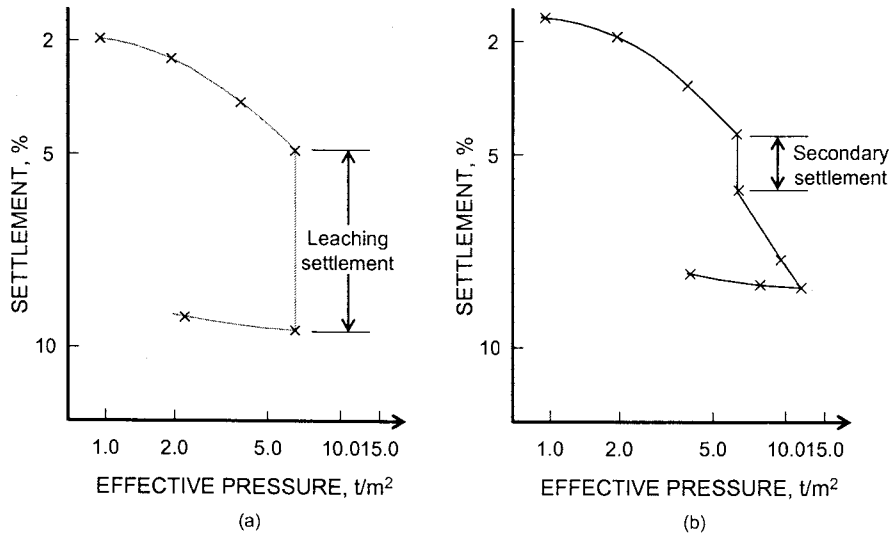


그림 5.2 노르웨이 Drammen 점토에 대한 염분 용탈과 2 차압밀에 의한 침하량의 비교 (a) 염분 용탈에 의한 침하 (b) 2 차압밀에 의한 침하 (Kazi and Moum, 1972)

6. 결론 및 요약

이 논문의 전반부는 현재까지 낙동강 하구 퇴적층에 대해 수행되었던 토질 조사보고서, 시험 기록, 연구보고서, 연구 논문 등을 섭렵하고 분석한 결과를 정리한 것이다. 그 다음, 대심도 연약지반 상에 대규모 단지를 조성하면서 특히 지반개량을 통해 얻어진 경험을 기술하였다. 이 내용은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- (1) 낙동강 하구 분지의 퇴적층의 두께는 50-80m 가 된다. 이 퇴적층에는 퇴적 연대가 다른 상부 점토층과 하부점토층이 퇴적되었고, 침하의 대부분은 두꺼운 상부 점토층에서 발생한다.
- (2) 대부분의 델타지역에 걸쳐 피압 (artesian pressure)이 존재한다. 피압 수두는 최대 4m 나 되며, 이로 인해 상부 점토층의 아랫부분까지 염분 용탈작용 (leaching)이 발생하였다. 염분 용탈이 발생한 깊이의 점토층은 액성지수가 1 과 같거나 이 보다 크며 활성도가 낮고, 예민비가 높으며 강도가 떨어지고, 과압밀비가 1 보다 낮다.
- (3) 단지 조성 시, 연약지반에 성토를 하면 침하량이 크게 발생한다. 통계적인 침하량의 실측 자료에 의하면, 점토 층 깊이가 20m 이내일 때에는 성토고의 20-25%, 그 이상이 되면 성토고의 45%까지도 침하가 발생한다.
- (4) 신항 배후단지 시험성토를 수행하면서 몇 가지 중요한 경험을 하게 되었다. 이 시험 시공에서는 50m 까지의 긴 연직 배수재의 사용, 약 7m 의 두께의 준설토를 성토재로 이용, 공사 차량의 통행을 위한 대나무 매트 사용 등 특이한 조건으로 지반 개량이 수행되었다. 이에 대한 분석 결과는 다음과 같다.

1) 배수재 간격 1.5m 에 비해 1.3m 에 대한 압밀도 증가가 나타나지 않는다. 40m 가 넘는 배수재의 최소 간격은 1.5m 가 적당한 것으로 보인다.

- 2) 준설토의 침하량은 위치에 따라 큰 차이가 있다. 준설토 투기를 철저히 관리하지 않은 결과로 보인다.
 - 3) 대나무 매트 사용으로 공사 차량의 진입은 거의 성공적이었지만, 배수재 타입 장비에 의한 매트의 파손으로 스미어 존의 영역이 확산된 것 같다.
 - 4) 긴 배수재를 상용했음에도 불구하고 10-25m 이상의 미처리 층이 존재한다. 그러나 이 층의 침하량은 상부 점토층의 10% 정도이다.
- (5) 피압을 받고 있는 지반에서는 PBD 선단이 대수층 위에 놓이게 하는 것이 바람직하다. 피압을 받고 있는 대수층까지 도달되면 지하수위를 상승시킨다. 또 상승된 지하수위가 지표면 위까지 올라오면 전체 지표면을 범람시킬 수 있다.
- (6) 단지 조성 후에는 단지에 세워지는 구조물의 기초 형식에 따라 침하량이 달라짐으로 침하량의 상이에 따른 부등침하의 우려가 있다.

감사의 말

이 논문에서 인용된 대부분의 자료는 2000 년도부터 지금까지 매년 개최된 ATC-7 의 심포지움 발표 논문과 세미나 등에서 인용되었다. 발표자 여러분께 심심한 사의를 표한다. 이 논문의 그림은 김운태 박사의 도움을 받았다.

참고문헌

- 김상규 (1999). 김해 점토의 공학적 특성과 기초 설계와의 관련, *Proc., Sang-Kyu Kim Symposium on Geotechnical Engineering, Seoul, Korea: 205-230*
- 김상규 (2004). 낙동강 하구 연약지반과 관련된 우리의 기술적 현실 및 발전 방향, 단기 강좌, ATC-7, 동아대학교 건설기술연구소: 1.1-1.19.
- 김상규 (2006). 잔류 침하량의 올바른 이해, 한국지반공학회지, 22 권 10 호: 17-21.
- 김상규, 고성일 (1997). 낙동강 하구 및 인접해안 층적층의 미압밀 특성, 한국지반공학회 학술발표회 논문집: 3-18.
- 김상규, 김운태 (2006). 낙동강 하구 델타 퇴적토의 특성과 기초 설계와의 관련, *ATC-7 Workshop, 낙동강 하구 연약지반에서의 중, 저층 빌딩의 최적 기초형식, ATC-7: 19-101.*
- 김운태 (2007). 미발표 자료
- 대우엔지니어링 (1998). 양산 물금지구 택지 개발 사업 피압수 세부조사 보고서.
- 도화종합기술공사 (1998). 신호 지방산업단지 조성공사 연약지반 분석 보고서.
- 동아대 건설기술연구소 (2006). 명지 신호지구 정밀 지반 조사 중간보고서.
- 동일기술공사 (2003). 부산-김해간 경량전철 말뚝기초 공법 선정 자문자료.
- 류준길 (2003). 낙동강 하구 일원에 분포하는 홀로세 해성 점토질 퇴적층의 토목지질학적 특성, 이학박사 학위 논문, 부산대학교.
- 백경중 (1998). 낙동강 하구 및 인접 해안의 퇴적 환경이 해성 퇴적층의 공학적 특성에 미치는 영향,

- 박사학위 논문, 동국대학교.
- 백승훈 (2002). 현장 시험에 의한 부산 점토의 토질특성 분석, 공학박사 학위 논문, 동아대학교.
- 백승훈 (2005). 부산 신항 민자부두 피조미터 조사 보고서, 삼성물산.
- 백승훈 (2007). 미발표 자료.
- 침하안전관리 용역단 (2006). 계측 자료
- 조기영, 이남기, 정진교, 정성교 (1996). 낙동강 하구 및 인접해안 충적층의 미압밀 특성, 대한토목학회 학술발표회 논문집 (III): 543-546.
- 조화룡. 1987. 한국의 충적평야, 교학연구사.
- 정경환, 신민식, 김동해, 이준석, 김두호, 김창시 (2004). 낙동강 하구지역의 연약지반상 성토에 따른 현장 계측관리 사례연구, Proc., ATC-7 Symposium, 연약지반 상의 지반공학적인 문제와 시공 사례: 69-81.
- 정성교, 김규중, 이대명, 조기영 (1999). 낙동강 삼각주의 연약점토에 대한 과압밀비 평가, 한국지반공학회 논문집 15 권 4 호: 85-97.
- 정성교, 광정민, 김규중, 백승훈 (2001). 부산점토의 지반공학적인 특성에 관한 고찰, Proc., ATC-7 Symposium, 국내 퇴적층의 토질 특성 및 지반개량 대책: 27-41.
- 정충기 (2007). 미발표 자료
- 침하안전관리 용역단 (2006). 침하계측자료, 유신 설계공단.
- 한국토지공사 (1997). 연약지반의 처리공법과 침하계측에 관한 연구, 양산 물금 시험시공.
- 한영철 (2001). 낙동강 유역의 연약점성토 퇴적 특성에 대한 고찰, Proc. ATC-7 Symposium, 국내 퇴적층의 토질 특성 및 지반개량 대책: 45-53.
- 한영철, 유갑용 (1999). 양산 물금지구 피압수 특성에 관한 연구 '99 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회.
- 허대영 (2003). 부산 신항지역에서의 부산 점토에 대한 토질 특성 연구, 공학박사 학위 논문, 동아대학교.
- Bejerrum, L. (1954). Geotechnical properties of Norwegian marine clays, *Geotechnique*, 4: 49-69.
- Bjerrum, L. (1967). Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings, *Geotechnique*, 17: 81-118.
- Brenner, R. P., Chilingarian, G. V. , and Roberson, JR. J. O. (1981). Engineering geology on soft clay, *Soft Clay Engineering* edited by Brand E. W. and R. P. Brenner, Elsevier Scientific Publishing Co.: 159-238.
- Chung, S. G., Back, S. H., Ryu, C. K. and Kim, S. W. (2003). Geotechnical characterization of Pusan clays, *Prec., Korea-Japan Joint Workshop on Characterization of Thick Clay Deposits: Reclamation and Port Construction*, ATC-7, Busan, Korea: 3-44.
- Fairbridge, R. W. (1961). Eustatic changes in sea level, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol.4: 99-186.
- Giao, P. H., Chung, S. G., and Yoon, D. D. (2000). Settlement analysis of Yangsan soft clay, 델타 퇴적토에 관한 Workshop 논문집, ATC-7: 18-37.
- Johnson, S. J. (1968). Precompression for improving foundation soils, *Proceedings, ASCE*, , Vol. 96, No. SM1: 111-144.
- Kamon, M. and Ito, Y. (1984). Function of band-shaped prefabrication plastic board drain, *Proc., 9th Japanese National Conference on SMFE*, Tokyo.
- Kazi, A. and Moum, J. (1972). Effect of leaching on the fabric of normally consolidated marine clays: 137-152.

- Kenney, T. C. (1964). Sea level movements and the geologic histories of the post glacial marine soils at Boston, Nicolet, Ottawa, and Oslo, *Geotechnique*, Vol. 14: 203.
- Kitada, N., Suwa, S., Saito, R., Iwaki, Shogaki, T., Nochigawa, Y., Jeoung, G. H., and Park, S. Z. (2003). Geological investigation of Pusan alluvial plain, *Proc. of Korea-Japan Joint Workshop, Characterization of Thick Clay Deposits: Reclamation and Port Construction*, ATC-7: 129-135.
- Kim, S. K. (1999). Large consolidation settlement occurred during reclamation works in the Nakdong river mouth, *Proc., '99 Dredging and Geo-environmental Conference*, Seoul, Korea, pp. 35-48.
- Kim, S. K. and Kim, Y. T. (2003). Optimization on unusual thick clay deposits, *Proc., 12th Asian Regional Conference of SMGE*, Singapore: 1415-1422.
- Lancellotta, R., Maniscalco, R., Battaglio, M. (1981). Preconsolidazione dei terreni consivi mediante precalico e dreni, in: *Atti Istituto Scienza delle Costruzioni*, Politecnico di Torino, 505, Turin.
- Leroueil, S. (1996). Compressibility of clays: fundamental and practical aspects. *J. of Geotech. Engineering., ASCE*, 122 (7): 534-543.
- Lim, H. D, Lee, C. H., and Lee W. J. (2003). Geotechnical Characteristics of Yangsan Clay, *Proc. Korea-Japan Joint Workshop: Characterization of Thick Clay Deposit, Reclamation and Port Construction*, ATC-7: 59-70.
- Lunne, T., Robertson, P. K., and Powel J. J. M. (1997). *Cone penetration testing in geotechnical practice*, Blacki Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall.
- Marchetti, S. (1980). In-situ test by flat dilatometer, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 106: 299-321.
- Park, S. Z., Jeoung, G. H., Park, J. H., Bausista, F. E., Suwa, S., Tanaka, F., Mishima, O., and Tanaka, M. (2000). The Mysterious formation of Nakdong River estuary soft soil, *Seminar on New Strategy Geo-techniques, Ground Improvement and International Codes, ISK 2000*, Koich, Japan: 41-48.
- Park, Y. A., Kim, B. K., and Zhao, S. (1998). Sea level fluctuation in the Yellow Sea basin, *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 29, No. 12: 42-49.
- Prinya, N., Yong, R. N., Thingchai, C., Somkid, B. (1989). Land subsidence in Bangkok during 1978-1988, *Workshop on Land Subsidence*, Bangkok.
- Pusch, R. (1973). Pysico-chemical processes which affect soil structure and vice versa. *Proc. Int. Symp. Soil Structure*, Gothenberg, Appendix: 27-35.
- Rao, K. G (2004). *Comprehensive experimental investigation for geotechnical characteristics of Pusan clay in the west coast of the Nakdong River estuary*, Ph D. dissertation, Dong-A University.
- Rosenqvist, I. Th. (1953). Considerations on the sensitivity of Norwegian quick-clays, *Geotechnique*, 3: 195-200.
- Shen, S. L., Xu, Y. S., Cai, Z. Y., Hayashi, S. (2006). 3D-analysis on land subsidence in Shanghai due to withdrawal of groundwater, *Proc., International Symposium on Lowland Technology*, Saga, Japan: 247-252.
- Sridharan, A. (2006). Engineering behavior of marine clays: some fundamental aspects, Special lecture, *Proc., 2006 ISLT*, Saga, Japan.
- Suwa, S. (2002). Lecture note, *Japan -Korea Seminar on Nakdong Delta in Busan and Osaka Bay*.
- Tanaka, H., Mishima, O., Tanaka, M., Park, S. Z., Jeoung, G. H., and Locat J. (2001). Characterization of Yangsan Clay, Pusan, Korea, *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, Vol. 41, No. 2: 89-104.