

연약지반에서의 침하량과 실제 - 조사, 해석, 시공 및 계측

Discussion: Prediction and Measurement of Settlement in Soft Ground - Investigation, Analysis, Construction and Monitoring

정성교¹⁾, Sung-Gyo Chung

¹⁾ 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engrg., Dong-A University

SYNOPSIS : As a state-of-the-art paper related to consolidation settlement, the 31th Terzaghi lecture was briefly described. Case histories that are compared between predicted and measured settlements in the Nakdong River deltaic plane were introduced to show the true picture of our technology. Structures and other features of clays in this country were needed to understand, which are closely related to sample disturbance and also consolidation properties. In order to improve the settlement-related technology, some problems that we have faced and their alternatives were considered.

Keywords : soft ground, settlement, sampling, analysis, monitoring, case histories

1. 서론

우리나라의 남서해안은 비교적 점토층이 두껍게 분포하고 있다. 이 해안선을 따라 1980년대 초부터 항만, 공업 및 주거단지 조성을 위한 개발이 시작되어 현재까지 한창 진행 중에 있다. 대표적인 개발사업으로는 남동공단, 대불공단, 남악신도시, 광양만의 항만 및 단지, 그리고 부산지역의 신항 및 각종 단지개발사업 등이 있다. 이러한 개발을 통하여 침하량과 압밀소요시간이 크게 과소평가 되었다고 알려지고 있으나, 이에 대한 문헌이 거의 존재하지 않고 있는 실정이다. 특히 녹산공단의 경우에는 입주시기가 지연되어서 사회문제로까지 비화되었음에도 불구하고 구체적인 기록이 전해지지 않고 있다.

세계 도처에서도 지반개량공사 중에 압밀침하량을 과소평가하여서 문제가 되었던 사례가 가끔 있었다. 이러한 경우에 연구회 등을 통하여 그 원인의 규명과 개선을 위한 집중적인 연구가 뒤따랐다. 그러나 우리의 경우는 예측침하량의 2~3배까지 과대침하가 발생하는 등으로 아주 심각하였지만, 여전히 그러한 노력이 거의 이루어지지 않았다고 할 수 있다.

따라서 본 주제를론에서는 우리의 문제점의 나열과 개선을 위한 제언을 하고자 한다. 이를 위하여 예측 및 실측 침하량의 비교, 점토의 고유특성, 지반조사법, 침하량 계산법, 최종침하량 추정법 등에 대하여 기술한다.

2. 침하량 예측의 오차 및 개선안

연약지반에서 성토로 인하여 발생하는 침하량을 정확히 예측하기란 대단히 어려운 과제이다. 침하량의 예측치와 실측치 사이의 불일치는 피할 수 없는 사실로서 인정되고 있지만, 그 정도에 대해서는 논란이 뒤따를 수 밖에 없다.

예측과 실측 사이의 불일치가 발생하였던 사례에 대하여 수많은 보고되었지만, 이들의 발생요인에 대하여 잘 정리된 결과는 Olson(1998) 교수에 의하여 주어진 31차 Terzaghi lecture에서 볼 수 있다. 이 강의는 우리의 문제를 해결하기 위하여 좋은 참고 자료로 될 수 있으므로, 여기에서 간단히 요약하고자 한다.

(1) 침하해석

침하해석을 위하여 보편적으로 사용되고 있는 표준방법(Terzaghi and Frohlich, 1936)은 수계산(hand calculation)으로도 실제 침하량에 근접하게 예측할 수 있지만, 침하 소요시간에 대해서는 아주 엉뚱한 결과를 준다고 알려져 있다(Duncan, 1993). 근래에 보편적으로 사용되고 있는 유한차분법(FDM)과 유한요소법(FEM)은 실제거동에 거의 근접하게 예측할 수 있다고 보고되고 있다.

(2) 일반적인 설계문제

기술자의 능력에 관계되는 문제이다. 신뢰성 있는 컴퓨터 프로그램을 사용하여 침하예측을 하더라도 적합한 흙모델을 선택하였는가 또는 실험결과를 이용하여 입력정수를 옳게 결정하였는가에 따라 결과는 크게 좌우될 수 있다.

(3) 설계의 정확성에 미치는 영향요소

- **지층구조:** 해당구역 내에서 제한된 지반조사 때문에 실제 지층구조를 충분히 재현하지 못하여 결과되는 오차이다. 이 요인에 의한 오차는 침하해석의 차이로부터 결과되는 오차보다 클 수 있다.
- **시공과정의 불확실성:** 설계와는 상이한 시공속도 및 공사과정을 들 수 있다. 특히, 일반적으로 계층기가 1단 성토 후에 매설되며, 배수효능을 저해하도록 시공이 이루어 진다.
- **연직배수공에 의한 압밀:** 실내실험에서 압밀셀 주변의 마찰과 교란으로 과소평가된 압밀계수를 산정한다. 그리고 현장에서 연직배수공을 관입할 때 발생하는 교란영역을 정확히 알 수 없다.
- **교란:** 실내실험을 위한 시료채취 시의 교란으로 인하여 압밀정수가 크게 과소평가되며, 또한 연직배수공의 관입과 장비이동에 의한 연약지반 상부의 교란이 압밀침하에 영향을 미친다.
- **시료보관:** 시료를 오래 보관할 경우에 흙의 특성이 바뀌며, 특히 선단 부근에서 영향을 많이 받는다.
- **압밀계수의 변화:** Terzaghi이론에 의하면 압밀계수는 압밀 중에 일정하다. 그러나 압밀침하량에 따라 압밀계수는 변하므로 투수계수를 측정하여 비교해 보아야 한다.
- **비선형 응력-변위 거동:** Terzaghi이론과는 다르게 응력-변위 거동은 비선형으로 나타난다.
- **대변형:** Terzaghi 이론과 다르게 특정 흙에서는 대변형이 발생한다.
- **다방향 압밀:** 제방 중심에 비하여 모서리에서는 응력전달 및 배수방향이 다르게 되므로 수치해석이 필요하다.
- **무시된 배수영역:** 지반조사에서 찾지 못한 얇은 모래층이 설계에서 무시됨에 따라 압밀시간이 다르게 결과된다.
- **침하에 따른 응력 재분배:** 설계에서와는 달리, 제방에서의 침하형태와 같이 제방이 사발모양으로 침하할 때 응력 및 간극수압이 재분포하게 된다.
- **이차압축의 영향:** 일반적인 설계법과는 다르게, 이차압축은 1차압밀 중에 발생하며 하중재하속도 등에 따라 달라지며, 또한 언제까지 지속될 것인지에 대하여 불확실하다.

(4) 많은 계측자료의 취급

- **실내실험 자료의 축소:** 수많은 실험결과를 단순화.
- **이차압축 영향을 고려한 실내실험결과와 보정:** 이차압축을 제외하여 간극비 및 압밀계수를 결정한다.
- **사례연구로부터의 교훈:** 단지 한가지의 방법으로 계산된 침하예측이 타당한지를 판단하기 위하여 여러 사례에 의한 예측 및 측정결과와 상호 비교하여 결정한다.

(5) 설계절차의 추천

- 예비조사: 자료수집
- 구조물 조사 및 시공계획 수립(시간과 함께)
- 1차 지반조사의 실시
- 부지 내의 불리한 조건에 대하여 간단한 해석을 실시
- 분석이 더 요구되는 지역에 대하여 상세지반조사, 고급 실내실험 및 해석
- 시료교란 및 이차압축 영향을 배제한 압축 및 투수계수 곡선을 재구성
- 전문프로그램 또는 유한요소해석의 수행
- 계측실시 - 침하계, 간극수압계 및 경사계.

3. 침하예측에 대한 우리의 현주소

국내에서 실시된 연약지반 공사에 대하여 설계와 계측 침하량을 직접 비교하여 보고되었던 사례는 극히 희귀한 편이다. 표 1은 낙동강 하구지역에서 1990년대에 각종 목적으로 실시된 5개 현장의 연약지반 개량공사에서 얻어진 설계 및 계측 침하량을 비교하여 보여주고 있다. 표 2는 압밀침하 소요시간을 비교하고 있다. 이 현장들은 모두 PBD에 의하여 점토층에 완전 및 부분 관입되었다 (Chung, 1999).

이들 표에서 보면, 모래층에서는 침하량을 최소 2배로부터 최대 7배까지 과소평가하였으며, 점성토에서는 1.2~2.5배까지 과소평가 또는 1.2~2.3배까지 과대평가하기도 하였다. 그러나 압밀소요시간은 1.2~6배까지 과소평가하였다.

최근에 완성된 부산신항의 북컨테이너 터미널에서의 시험성토 결과에 의하면(Kim, 2004), 침하량은 설계와 근접하게 예측되었다고 보고되고 있다. 한편, 북컨테이너 배후단지의 시험성토에서는 실측치가 계측치를 훨씬 초과하고 있다(Beak et al, 2005). 이 결과들은 전 현장을 대상으로 종합적인 분석이 이루어지지 않은 상태이어서 1999년도의 실정(Chung, 1999)에 비하여 약 10여 년이 지난 현시점에서는 얼마나 기술이 진보되었는지를 정확히 언급하기 어렵다.

표 1. 낙동강 하구지역의 연약지반 개량공사에서 설계와 실측 침하량의 비교 (Chung, 1999)

Layer	Area	Thickness (m)	Fill height(m)	Designed (cm)	Measured (cm)
Sandy layer	A	7.1 (2.5~16.2)	5.5 (4.3~10.5)	19.0	30.0
	B	12.6 (9.0~12.0)	3.6(2.9~4.6)	7.9	48.5
	C	10.3 (8.5~12.2)	6.5(5.0~10.0) 5.9(5.0~8.7)	13.1	24.0
	D	19.1 (18.1~21.0)	8.0	15.1	100.3
	E	5.8 (1.4~12.6)	5.0	15.6	32.2
Clayey layer	A	36.8 (1.4~54.9)	5.5 (4.3~10.5)	112.0	188.3
	B	26.2 (21.0~33.5)	3.6(2.9~4.6)	71.8	182.1
	C	19.5 (15.2~21.2)	6.5(5.0~10.0) 5.9(5.0~8.7)	102.9	119.0
	D	21.0 (17.0~25.5)	8.0	280.0	120.0
	E	15.0 (4.5~20.5)	5.0	184.5	155.3

표 2. 낙동강 하구지역의 연약지반 개량공사에서 설계와 실측 침하시간의 비교 (단위: 월) (Chung, 1999)

Location	Designed	Measured	Remarks
A	10	60	
B	8	31	
C	9	20	
D	9	37	
E	12	14	

4. 침하예측의 기술 향상을 위한 착안사항

4.1 점토구조에 대한 이해

침하량을 제대로 예측하기 위해서는 점토의 고유특성에 대한 올바른 이해가 요구된다. 부산점토의 경우는 일본의 층적점토와 유사하게 5,000~10,000년 정도의 연대를 지니고 있다 (그림 1). 그러나 퇴적 당시 주로 해수심의 영향 때문에 그림 2에서 보여주는 부산 신항의 경우를 보면, 상부점토는 거의 동일한 환경 하에서 퇴적되었지만, 하부점토의 경우는 위치에 따라 심하게 변화하고 있다.

특이한 사항은 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이, 상부점토는 구조가 잘 발달된 구조점토(structured clay)인 반면에, 하부점토는 비구조 점토(non-structured clay)라는 것이다. 상부점토인 구조점토에서는 압밀하중에 따라 큰 간극(large pores; inter-pores)이 먼저 붕괴된 이후에 intra-pores가 축소하게 된다고 보고하고 있다(Ninjav et al, 2007). 기존의 연구(Delage and Lefebvre, 1984)에서도 시료가 완전히 교란되어도 intra-pores는 크기가 바뀌지 않는다고 역시 보고되었다. 점토구조가 잘 발달된 점토일수록 압밀 중 항복응력에 이르기까지 변위량은 작게 되며 항복 이후에 큰 침하를 보이게 되지만, 비구조점토에서는 완만한 압축곡선을 나타내게 된다.

한편, 남약신도시가 개발되고 있는 곳에서의 점토 퇴적물은 그림 5에서 보는 바와 같이, 퇴적환경에 따라 지표 가까이에서 큰 과압밀비(OCR)를 나타낸다. 이러한 요인은 이온교환에 의하여 점토구조가 아주 고결되었기 때문이라고 보고하고 있다(Won and Chang, 2007).

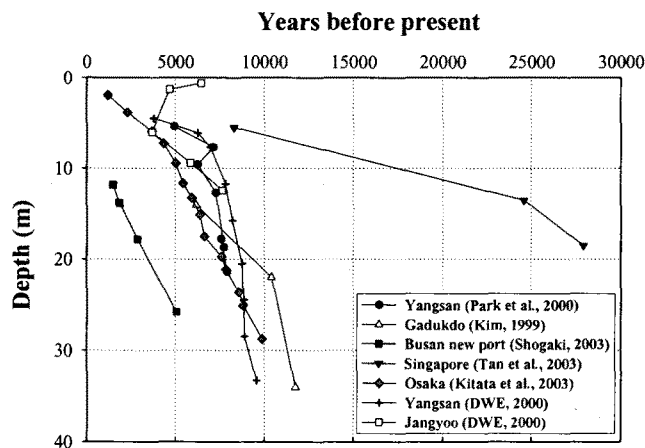


그림 1. 부산점토와 다른 나라의 점토에 대한 퇴적연대에 대한 비교 (Chung et al, 2005b)

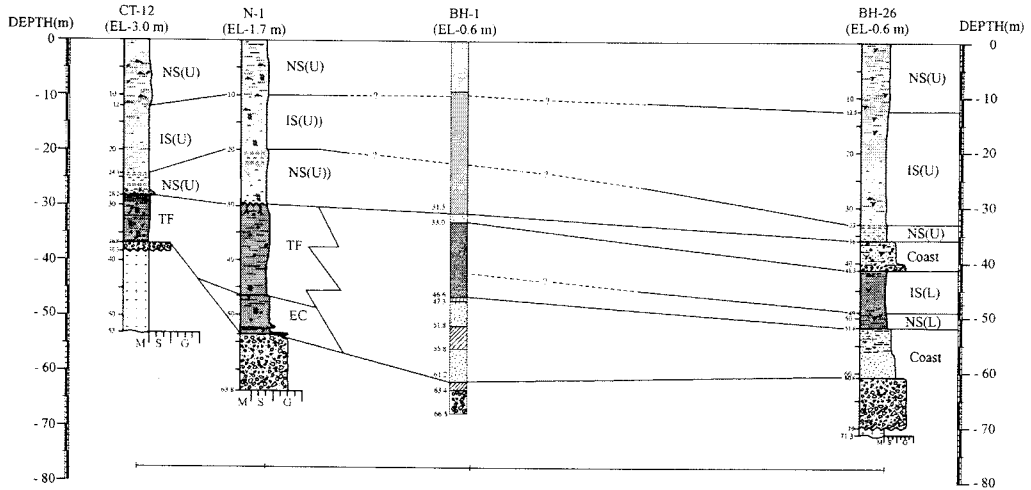
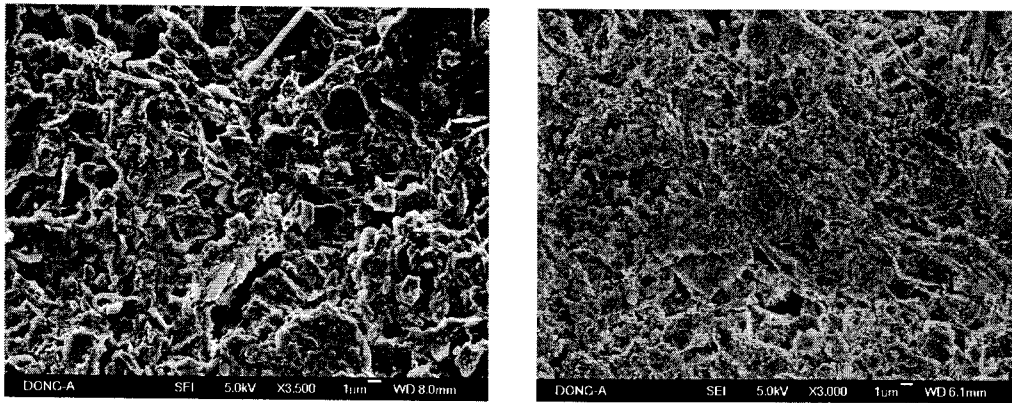


그림 2. 부산신항 점토의 퇴적환경 변화 (Chung et al, 2005b)



(a) 24m depth (Upper clay)

(b) 38m depth (lower clay)

그림 3. 부산점토의 점토구조(Ninjarav et al, 2007)

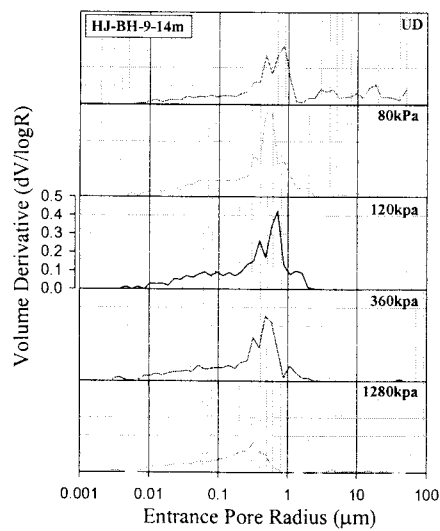


그림 4. 부산점토에 대하여 압밀하중에 따른 간극수압의 변화 (Ninjarav et al, 2007)

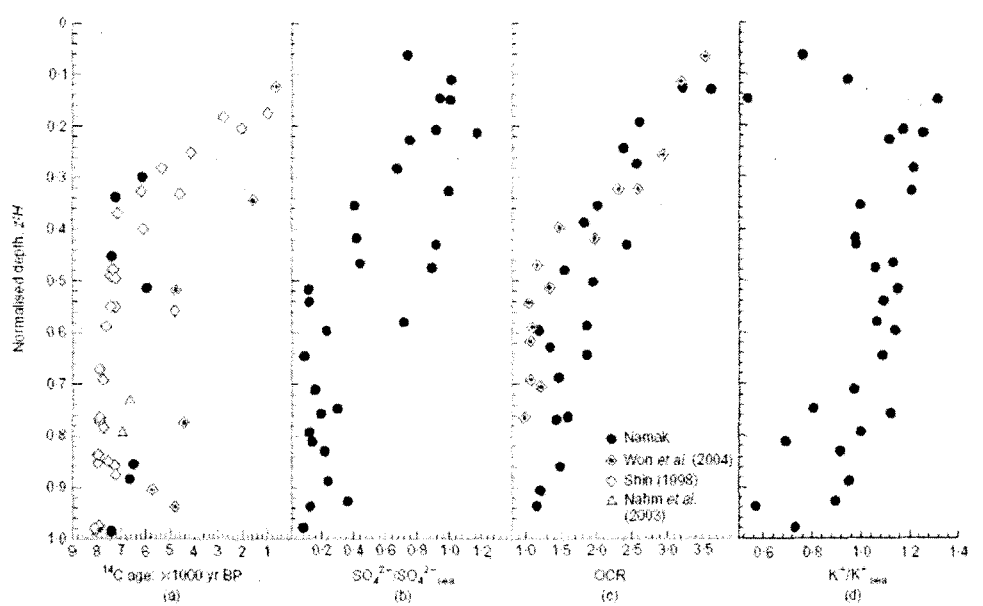


그림 5. 남악점토의 주상도: (a) radiocarbon dating; (b) normalized sulphate ions; (c) overconsolidation ratio; (d) normalized potassium ions (Won and Chang, 2007).

4.2 지반조사

4.2.1 조사계획

Olson(1998)이 언급하였던 바와 같이, 공사지역의 전반에 걸쳐 지층구조를 잘 이해할수 있도록 그림 6에서와 같이 전기탐사법(Giao et al, 2003) 및 필요에 따라 조밀한 시추조사가 요구된다(정성교, 2004a; 2004b).

불교란 시료채취가 한 공에서 2~3개씩 이루어지는 우리의 약속을 속히 탈출하여야 할 것이다. 그림 2에서 언급하였던 바와 같이, 퇴적토는 퇴적환경에 따라 깊이 별로 크게 변하기 때문에 가급적 연속적으로 시료채취가 수행되어야 한다.

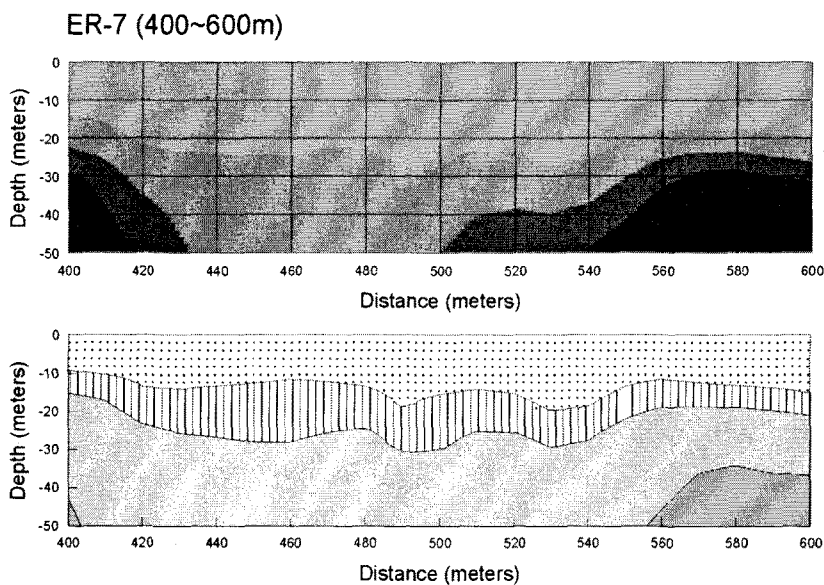
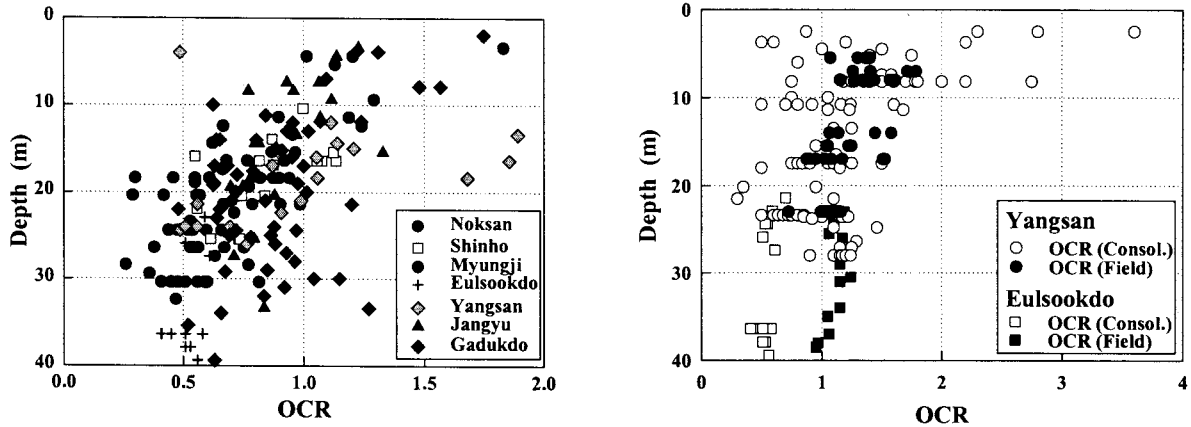


그림 6. 전기탐사에 의한 지층구조

4.2.2 불교란 시료채취

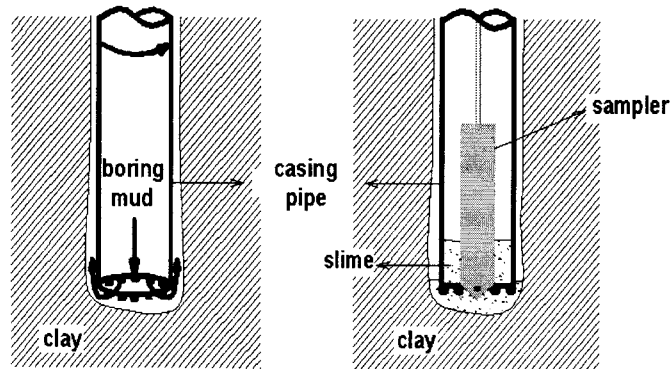
점토 시료의 교란은 항복응력과 압축지수의 감소에 이어서 침하량의 과소평가로 이어지게 된다. 남해안의 점토, 특히 부산점토는 Burland(1990)의 분류에 의하면 아주 고결되었다고 보고되고 있다 (Chung et al, 2002). 그러나 불교란 시료채취된 부산점토를 이용하여 압밀시험을 실시하여 얻어진 항복강도는 아주 낮아서 미압밀점토로 분류되고 있다. 그림 7은 그 대표적인 예이다. 그 원인으로서는 세 가지 요인을 생각할 수 있다. 1) 불량한 시료채취기술; 2) 튜브의 질; 3) 실내 실험방법.



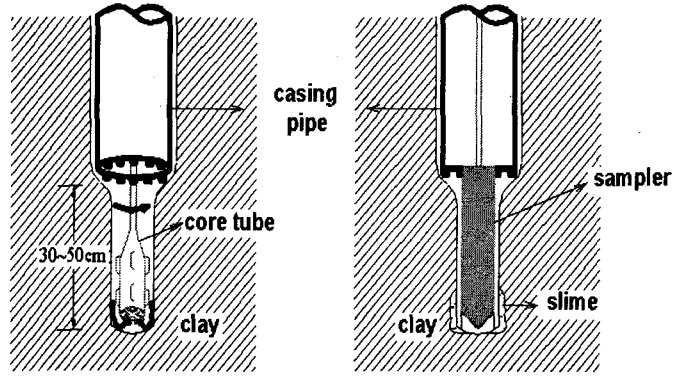
(a) 실내실험 (b) 현장실험
 그림 7. 부산점토의 과압밀비(Chung et al, 2002)

시료채취기술에 대해서는 필자가 국내외에서 여러차례에 걸쳐 우리의 문제점(Chung et al, 2004)과 개선안을 그림 8에서와 같이 발표했었다(Chung et al, 2003; 2005a). 즉, 케이싱 작업 시에 과대한 수압으로 교란된 흙을 제거한 후에 시료채취를 하자는 개념이다. 그러나 개선된 방법으로 할 경우에는 조사 원가가 크게 상승함에 따라 여전히 악습이 고쳐지지 않고 있다.

비록 개선된 불교란 시료채취기술을 적용하였지만, 시료의 질은 크게 향상되지 못하고 있다는 사실, 그리고 그 원인이 시료튜브에 있다는 것을 확인하였다. 즉, 시료튜브가 표 3에서 보여주는 KS규격(KSF2317)을 만족하지 못하고 있다는 것이다. 또 다른 중요한 문제는 우리 튜브의 선단처리에 문제가 있다. 즉, 튜브 선단의 두께 및 각도이다(그림9). 예로서 구조점토인 Bothkennar clay에 대해 둔한 선단을 지닌 튜브를 사용했을 때, 시료교란이 크고 항복응력 및 전단강도가 크게 감소하는 결과를 낳았다 (Tanaka, 2000). 특히 남해안의 상부점토는 구조점토이므로 튜브의 선단처리에 대하여 특별한 관심이 요구된다.



(a) 기존의 방법



(b) 개선안

그림 8. 불교란 시료채취기술(Chung et al, 2003)

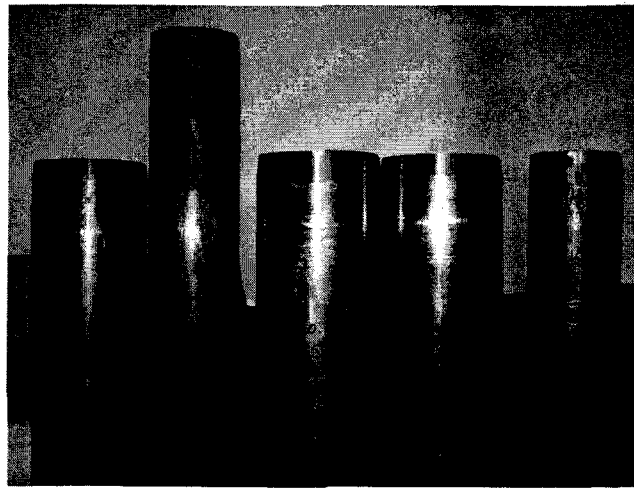


그림 9. 시료튜브의 불균등성

표 3. 채취관의 허용오차(KSF2317)

외 경(mm)	50.8	76.2	127
외 경(mm)	+0.18	+0.25	+0.38
내 경(mm)	-0.18	-0.25	-0.38
두께(mm)	±0.18	±0.25	±0.38
동심도(mm)	0.38	0.51	0.76
직선도(mm)	2.5/m	2.5/m	2.5/m

시료교란은 침하량은 물론 침하속도의 예측에 대해서도 민감하게 작용할 것이다. 그리고 투수계수는 퇴적환경에 따라 크게 변화한다(정성교 등, 2006). 우리의 현실은 시료교란을 고려하여 간단히 $C_h \approx C_v$ 와 같이 가정하고 있다. 이러한 부정확성이 표 2에서와 같이 압밀속도를 크게 과소평가하였을 것으로 사료된다. 다양한 현장실험에 의한 결과와 비교하여 적절히 투수계수 또는 압밀계수를 결정하고 또한 실측결과와 비교하여 어떤 방법이 우리의 지반에 적합한지에 대한 규명이 필요하다.

마지막으로 국내에서 주로 사용하고 있는 표준압밀시험법은 시료교란을 유발할 수 있는 방법이라고 필자는 생각하고 논문을 준비 중에 있다. 적절한 시기에 대하여 언급하기로 한다.

4.2.3 침하량 계산법

국내에서는 Olson(1998)이 추천하는 유한요소법이 설계에 거의 적용되고 있지 않는다. 이와는 별도로, 수계산 또는 거의 유사한 방법으로 압밀침하량 및 소요시간을 계산할 때, 간단히 다음의 두 경우를 생각해 보기로 한다.

먼저 1차원 압밀조건의 경우에 지층구분의 층수가 압밀침하량에 미치는 영향이다. 그림 10에서는 식 (1)과 같은 Terzaghi 1차원 압밀이론에 의하여 지층두께(H)가 각각 10m, 20m 및 30m이며, 과재응력 ($\Delta\sigma$)가 각각 10, 20 및 30t/m²일 경우에 계산된 최종압밀침하량(S_c)을 나타내고 있다(박세호, 2004). 이 그림에서 보면, 점토두께와 과재하중에 무관하게 약 30층으로 구분하여야만 이들에 의한 영향을 받지 않고 합리적인 침하량을 산정할 수 있게 된다.

$$S_c = CR \cdot H \cdot \frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma}{\sigma'_{vo}} \quad (1)$$

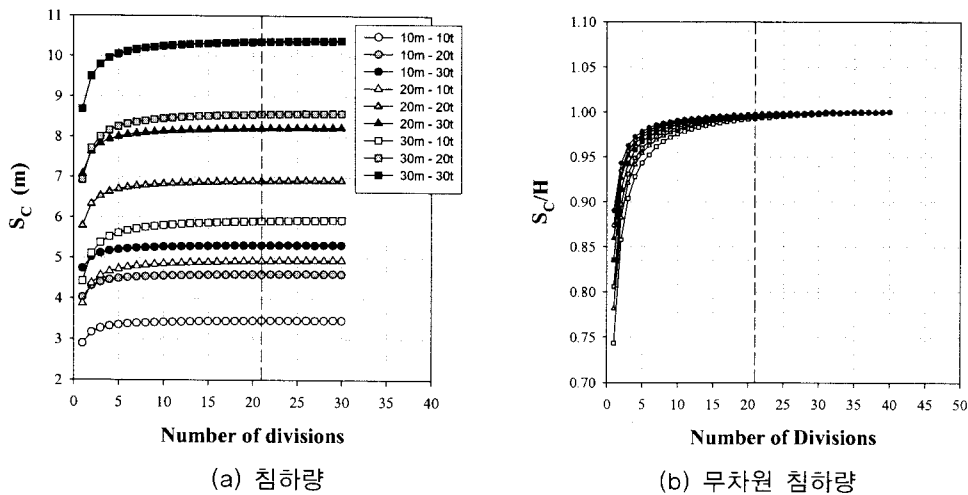


그림 10. 압밀침하량에 대한 지층구분의 영향(박세호, 2004)

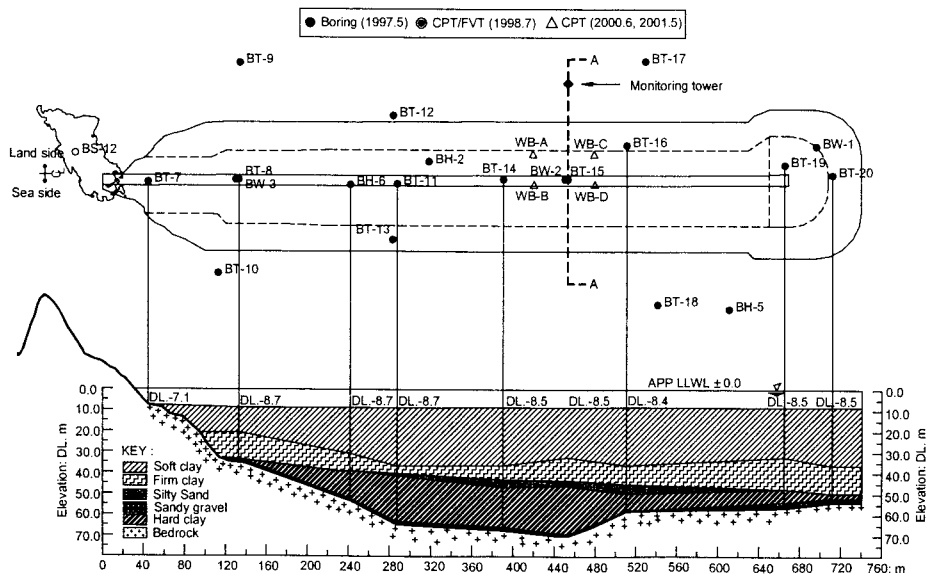


그림 10. 부산신항 서방파제에 대한 지층구조(Chung et al, 2006)

다른 한 요인은 점토층 내에 부분별로 분포하고 있는 얇은 모래층 또는 기반암의 투수특성에 대한 영향이다. 국내에서는 이러한 문제를 아주 가볍게 취급하는 경향이 있다. 하나의 대표적인 예를 그림 11에서 볼수 있다. 이 그림에서 보여지는 예는 부산신항 서방파제로서 상·하부의 점토층 사이에 부분적으로 얇은 모래층이 끼여 있다. 홍콩 신공항의 예에서와 같이, 아주 넓은 면적에 걸쳐 성토를 수행할 경우에는 모래층의 부분 협재가 압밀에 기여하지 못하겠지만(Plant et al, 1998), 그림 11의 경우에는 배수층으로서의 역할이 충분할 것이다. 그림 12에서는 평균압밀도 30%에 따른 강도증가와 사면의 안전율을 보여주고 있다.

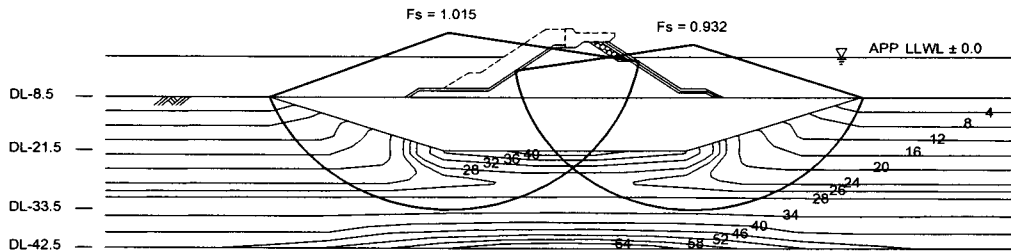


그림 11. 압밀에 의한 강도증가 예(Chung et al, 2006)

연약지반에서 예측과 실측 침하량이 상이하게 되는 결정적인 요인은 비배수 전단변형이라 생각된다. 그림 12에서는 성토 재하에 따라 증가된 지반응력이 항복응력(P점)을 초과하게 될 경우에 비배수 전단변형(P→A점)이 발생하는 예를 보여주고 있다. 이때는 연직 및 수평변위가 거의 유사한 크기로 크게 발생하게 된다. Leroueil et al(1990)은 제방 사면의 안전율이 약 1.5를 초과했을 때, 비배수 전단변형이 거의 무시되어서 예측 침하량이 실측치에 거의 가깝게 된다고 보고하고 있다. 그러나 국내의 기준들이 거의 모두 사면 안전율을 최대 1.3을 채택하고 있으므로, 이에 대한 논의가 필요하다.

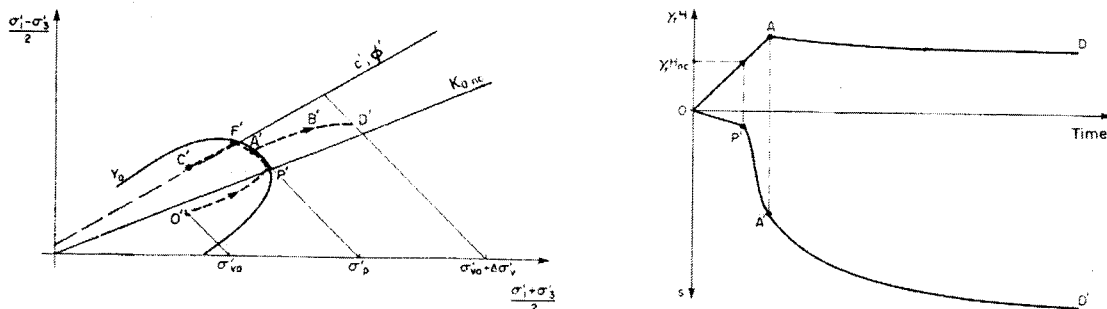


그림 12. 항복응력의 초과 및 전단변형의 발생 (Leroueil et al, 1990)

4.2.4 시공속도에 따른 영향

설계 시에는 제체의 안전을 고려하여 시공(성토) 속도를 결정한다. 그러나 현장여건에 따라 성토를 위한 공사기간이 짧아질 수 있다. 이때는 공사기간의 단축에 따른 재검토가 수반되어야 하지만, 그렇지 못한 경우가 허다한 실정이다.

4.2.5 현장계측

(1) 현장계측기 및 매설방법

현장계측이 정확하지 않을 때 예측의 정도는 평가할 수 없다. 국내의 실측 침하량은 거의 대부분 지표침하계에 의존하고 있으며, 1차원 조건에서는 경사계도 매설되지 않는 실정이다. 국내에서 계측기가 개발되면서부터 수많은 현장에서 매설되는 계측기의 질이 제대로 검증되지 않은 상태로 사용되고 있으며, 매설방법도 올바르게 이루어지지 못하여 계측결과와 신뢰도에 크게 문제가 되고 있으며, 그의 무용론까지 제기되고 있는 현실이다. 그리고 여러 기술이 고급화됨에도 불구하고 계측기술의 진보는 거의 찾아볼 수 없다. 따라서 홍콩 신공항(Plant et al, 1998)에서 이루어진 계측기 및 기술을 배워서 우리의 계측기술의 진보를 가져와야 할 것이다.

(2) 최종침하량의 예측

실측치의 최종침하량은 현장에서 100% 압밀도를 기대하기 어려우므로 각종 예측기법에 의하여 결정된다. 그림 13(a)는 \sqrt{s} 법(정성교 등, 1998)을 포함하여 국내에서 자주 사용되고 있는 예측기법을 이용하여 최종침하량은 구하는 예를 보여주고 있다. 대부분의 기법이 침하량과 시간 곡선에서 직선 기울기에 근거하여 예측하지만, 개인 오차에 따라 결과는 크게 좌우된다. 비록 컴퓨터를 이용할 경우도 그 결과는 크게 호전되지 않는 것이 일반적이다. 따라서 정성교 등(1999) 및 Leroueil et al(1990)이 제안한 바와 같이, 실측곡선에 근접하는 유추곡선을 구하고 그 결과를 이용하여 침하량을 구하는 것이 합리적이다.

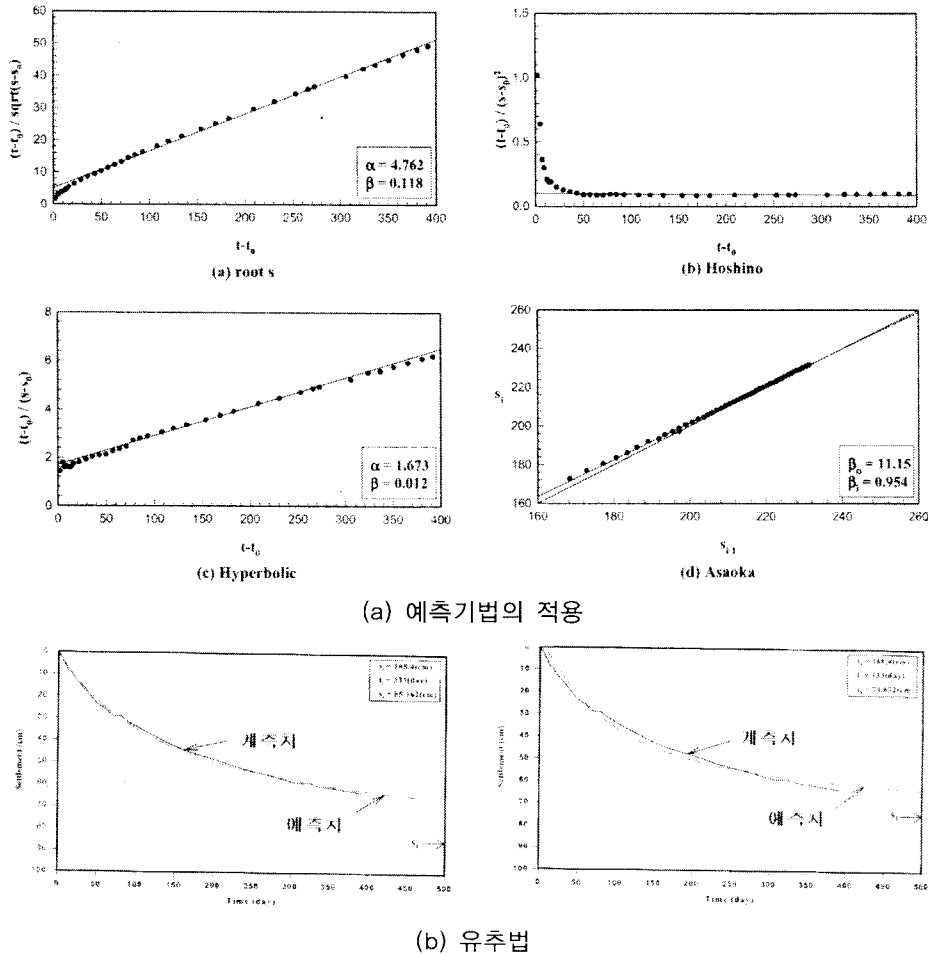


그림 13. 예측기법과 유추법(정성교 등,1999)

5. 결론

연약지반에서의 침하예측 및 실측을 정립하기 위하여 먼저 31차 Terzaghi Lecture를 간단히 요약하였다. 그리고 우리의 예측 및 실측에 대한 현주소를 살펴보았다. 국내기술을 향상하기 위하여 점토의 구조특성을 살펴보았으며, 침하예측 및 실측 기술을 향상하기 위하여 문제점과 개선방법을 분석한 결과는 아래와 같다.

- (1) 국내 대심도 연약지반은 상·하 점토로 구분되며, 상부와 하부점토는 구조점토와 비구조점토로 구성되어 있다. 특히 구조점토인 경우는 시료교란에 민감하므로 취급에 주의가 요구된다.
- (2) 연약지반에서 침하를 제대로 예측하기 위해서 먼저 적절한 방법과 수량의 지반조사가 계획되어야 하며, 연속 불교란 시료채취가 바람직하다. 불교란 시료를 위하여 샘플튜브가 KS규격을 만족하여야 하며, 개선된 시추방법으로 시료채취하도록 추천되었다. 표준압밀시험법의 사용을 자제하도록 역시

권장하였다.

- (3) 침하예측을 위하여 약 30층으로 지층을 구분하여 압밀해석을 수행하며, 사면 안전율이 1.5이상 되도록 추천되었다. 그리고 점토층 사이에 끼인 얇은 모래층은 물론 기반암에 대해서도 배수능력을 고려하여 해석하여야 한다. 압밀해석은 가급적 유한 요소법을 적용하도록 권장하였다.
- (4) 시공속도가 설계와 다를 경우에 재설계 되어야 한다.
- (5) 현장계측기술에 대한 국내기술의 향상이 크게 강조되었다. 한편, 실측치에 근거하여 최종침하량을 예측할 때 유추법에 의하여 계산하도록 추천되었다.

참고문헌

1. 박세호(2004). *대심도연약점토지반의 압밀침하량 산정법에 대한 재고찰*. 동아대학교 산업대학원 토목공학과, 공학석사 학위논문.
2. 정성교, 최관희, 최호광, 조기영 (1998). 압밀해석을 위한 \sqrt{s} -예측기법. *한국지반공학회지*, 14 권, 2 호, pp. 41-53.
3. 정성교, 백승훈, 김규중, 이대명 (1999). 낙동강 삼각주에서 선행하중에 따른 침하예측 및 현장계측. *한국지반공학회 논문집*, 15 권, 5 호, pp. 99-110.
4. 정성교 (2004a). 연약지반조사법, 현장실무자를 위한 연약지반의 조사법 및 토질정수 결정법을 위한 단기강좌, 동아대학교 건설기술연구소. 낙동강 하구유역 연약지반 연구회(ATC-7) 주최, 동아대학교 산학협력관 대회의실, February 26-27.
5. 정성교 (2004b). 연약지반 조사 및 토질정수 결정법. 2004 년도 GS-ATRA 정기세미나, 토목 및 환경기술자를 위한 특별세미나, 토목섬유 응용기술 연구회 (GS-ATRA) & 한국지반공학회 토목섬유기술위원회, 2004. 10. 11, 동서대학교.
6. 정성교, 장우영, E. Nimjarav, 김성렬 (2006). 실내실험에 의한 부산점토의 투수특성 분석. *한국지반공학회 논문집*, 22(11): 133-142
7. KSF 2317(1991): *얇은 관에 의한 흙의 시료채취 방법*, KS규정집, 한국공업표준협회.
8. Beak, S.R., K.W. Park, C.Y. Yune, S.H. Chun, and C.K. Chung (2005). *Current Geotechnical Issues of Thick Clay Deposit, 2005 Joint Symposium of ISSMGE ATC7 & KGS TC*, 21-22 September, Busan: 411-413
9. Burland, J.G. (1990). on compressibility and shear strength of natural clays, *Geotechnique*, 40(3): 329-378.
10. Chung S.G. (1990). Engineering Properties and Consolidation Characteristics of Kimhae Estuarine Clayey Soil, *Thick Deltaic Deposits, ATC-7 Workshop, Special Publication at the 11th ARC on SMGE*, Seoul: 93-108
11. Chung S.G., P.H. Giao, G.J. Kim and S. Leroueil (2002). Geotechnical characteristics of Pusan Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5): 1050-1060.
12. Chung, S.G., S.H. Beck, C.K. Ryu, and S.W. Kim (2003). Keynote Lecture: Geotechnical characterization of Pusan clays. *Korea-Japan Joint Workshop on Characterization of Thick Clay Deposits, Reclamation and Port Construction*, ATC-7, April 8-10, Busan: 3-44.
13. Chung S.G., J.M. Kwag. P.H. Giao, S.H. Back, and K.N. Prasad (2004). A study on soil disturbance of Pusan Clays with reference to drilling, sampling and extruding. *Geotechnique*, 54(1): 61-65.
14. Chung, S.G. (2005a). Keynote Lecture : Sampling techniques and their effects in characterizing of Pusan clay. *Proceedings of International Conf of Civil and Environmental Engineering, ICCEE-2005*, Higashi-Hiroshima, Japan, Oct 26-27, Japan: 29-59.
15. Chung, S.G., C.K. Ryu, K.Y. Jo, and D.Y. Huh(2005b). Geological and geotechnical characteristics of marine clays at the Busan New port. *Marine Georesources and Geotechnology*, Vol. 23, No. 3: 235-251.
16. Chung, S.G., S.K. Kim, Y.J. Kang, J.C. Im, and K. Nagendra Prasad (2006). Failure of a breakwater founded on a thick normally consolidated clay. *Geotechnique*, 56(6): 393-409.
17. Delage, P. and G. Lefebvre (1984). Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation. *Canadian Geotechnical J.*, 21(1): 21-35.

18. Duncan, J.M. (1993). Limitation of conventional analysis of consolidation settlement. *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, 119(9): 1333-1359.
19. Giao, P.H., S.G. Chung, D.Y. Kim and H. Tanaka (2003). Electric imaging for geotechnical investigation of Pusan clay deposits. *Journal of Applied Geophysics*, 52(4), March, Elsevier: 157-175.
20. Kim, S.R., K.H. Koh, and C.M. Park (2004). Keynote Paper: Experience from the performance of ground improvement in thick marine clay deposit. *Proceedings of the International Symposium on Engineering Practice and Performance of Soft Deposit, IS-Osaka 2004*, 2-4 June: 607-621.
21. Leroueil, S., J.P. Magnan, and F. Tavenas (1990). *Embankments on soft clays*. Translated by D.M. Wood, UK: Ellis Horwood.
22. Ninjarav, E., S.G. Chung, W.Y. Jang, and C.K. Ryu (2007). Pore size distribution of Pusan Clay Measured by Mercury Intrusion Porosimetry. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 11(3), May 2007: 133-139.
23. Olson, R.E. (1998). 31th Terzaghi lecture: Settlement of embankments on soft clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 124(4): 278-296.
24. Plant, G.W., C.S. Covil, and R.A. Hughes (1998). *Site preparation for the new Hong Kong International Airport*. Thomas Telford, UK.
25. Tanaka, H. (2000). Sample quality of cohesive soils: Lesson from three sites, Ariake, Bothkennar and Drammen, *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, 40(4): 57-74.
26. Won, J.Y. and P.W. Chang (2007). The causes of apparent overconsolidation in the Namak marine deposit, Korea. *Geotechnique*, 57(4): 355-369.