

낙동강 삼각주 범람원에서 부산점토의 수리학적 특성

Hydraulic Characteristics of Busan Clay in the Floodplain of the Nakdong River Delta

정 성 교¹ Chung, Seong-Gyo

이 남 기² Lee, Nam-Ki

이 정 만³ Lee Jeong-Man

민 세 찬³ Min, Se-Chan

홍 양 표³ Hong, Yang-Pyo

Abstract

To predict the settlement rate of a ground area that incorporates vertical drains, it is desirable to conduct various kinds of advanced field and laboratory tests for hydraulic properties. However, it is urgently needed to appropriately evaluate the hydraulic properties using the results of conventional soil tests which are extensively used for local practice. To achieve this purpose, a number of CPT dissipation test, laboratory permeability and consolidation tests were performed at five sites in the floodplain of the Nakdong River delta, and the test data were comprehensively analyzed. As a result, it is found that the coefficients of horizontal consolidation ($c_{h,NC}$) and permeability ($k_{h,OC}$) of the clay agreed well with those of the CPT-based methods proposed by Baligh and Levadoux (1986). The values of $c_{h,NC}$ and $k_{h,OC}$ were in the range of 0.4~3.0 cm²/sec and 0.40~2.50 cm²/sec, each of which slightly increases or decreases with depth, respectively. It was also inferred that these trends seem to reflect the depositional environments of the clay.

요 지

연직배수공이 매설되는 점토지반에서 압밀속도를 예측하기 위해서는 다양한 종류의 고급 실내 및 현장토질실험을 수행하여 합리적으로 수리학적 특성치를 결정하는 것이 바람직하다. 그러나 실무에서와 같이 보편적인 토질시험을 수행할 경우에 수리학적 특성을 합리적으로 규명하는 것이 우선 필요하다. 이를 위하여 낙동강 하구의 범람원 지역에 속하는 5개 지점을 선정하여 수많은 CPT 소산시험, 보편적인 실내 투수 및 압밀실험을 실시하였으며, 그들을 이용하여 종합적으로 분석하였다. 그 결과, 이 점토의 수평방향 압밀계수($c_{h,NC}$) 및 투수계수($k_{h,OC}$)는 Baligh & Levadoux (1986)의 제안법을 적용한 CPT소산시험결과가 가장 적합한 것으로 나타났다. 여기서 $c_{h,NC}$ 와 $k_{h,OC}$ 는 각각 0.4~3.0 cm²/sec 및 $(1\sim3)\times 10^{-9}$ m/sec 범위에 있으며, 두 값은 깊이에 따라 약간씩 증가 및 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 점토의 퇴적환경을 잘 반영하는 것으로 해석되었다.

Keywords : Clay, Consolidation, Dissipation test, Laboratory test, Permeability

1. 서 론

연약지반 상에 성토를 실시할 때 침하량과 압밀시간

을 실측값과 근사하게 예측하는 기술은 공학적 측면은 물론 사회적인 측면에서도 대단히 중요하다. 국내에서 경험하였던 대표적인 예로서, 낙동강 하구지역의 각종

1 동아대학교 토목공학과 교수 (Prof, Dept. of Civil Engrg., Dong-A Univ., sgchung@dau.ac.kr, 교신저자)

2 부산도시공사 개발팀 과장 (Manager, Development Project Team, Busan Metropolitan Corporation)

3 동아대학교 대학원 토목공학과 (Postgraduate Students, Dept. of Civil Engrg., Dong-A Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

성토공사에서 예측되었던 침하량과 압밀시간은 각각 2~4배 및 3~10배까지 과소평가되기도 하였다(Chung 1999). 근래에 들어서 침하량을 예측하는 기술은 상당히 개선되었지만, 침하시간의 예측에 대해서는 여전히 문제를 안고 있다고 할 수 있다. 따라서 국내 실정을 감안하여 신뢰 있게 침하시간을 예측할 수 있는 기술을 단계적으로 개선할 필요가 있다.

대심도 연약지반에서와 같이 연직배수공(PVD)을 매설하는 경우에는 얇은 점토층의 경우와는 달리 침하시간을 예측하기가 아주 복잡하다. 즉, 연직배수공이 매설된 지반에 적용하기 위한 각종 이론 해들은 수평 및 연직배수를 고려할 수 있는 수많은 매개변수를 포함하고 있다. 비록 실무에 쉽게 적용할 수 있는 간편법(Lee and Chung 2010)이 제안되어 연직배수의 영향을 무시할 수 있다고 하더라도, 여전히 수평 투수계수(k_h), 수평압밀계수(c_h), 배수저항(q_w) 등과 같은 주된 영향인자를 포함하고 있다. 이 중에서 배수저항은 단지 실험적 방법만으로 결정할 수 없는 어려운 매개변수이므로, 별도로 논의되는 것이 바람직하다(Chai and Miura 1999; Lee and Chung 2010; Chung and Lee 2010b).

해외의 경우를 보면, 싱가포르 해성점토(Chu et al. 2002)와 캐나다 동부점토(Tavenas et al. 1986; Leroueil and Hight 2002)에 대한 수리학적 특성, 즉 투수계수 또는 압밀계수를 평가하기 위하여 다양한 현장 및 실내시험법이 적용되고 있다. 이에 비하여 부산점토에 대한 기존의 연구는 보편적인 실험법에 의존하는 정도로 대단히 빈약한 편이다(Chung et al. 2003; 정성교 등 2006b; 등). 그리고, 상기와 같은 해외의 예에서 볼 수 있는 바와 같이 아무리 정교한 토질실험을 수행한다고 하더라도 적용된 방법에 따라 실험값이 제각기 다르게 산출되기도 하며, 또한 소수의 깊이에서 실시되는 실험만으로는 불균질하며 비등방성인 지반상태를 대표하기에는 역시 무리가 따를 것이다. 이와는 별도로, 또 다른 흥미로운 사실은 이론적인 시간-침하 곡선이 실제거동과 다른 경향으로 나타난다는 것이다(Chung et al. 2009). 상기와 같은 여러 가지 이유 때문에, 가급적 다양한 실험법들을 적용하여 매개변수를 결정하여야 하며, 실제 공사 시에 역해석을 통하여 그 값을 재분석하는 것이 절대적으로 필요하다(Leroueil et al. 1988; Chung et al. 2009).

본 논문에서는 압밀시간 예측에 필요하며 기초적이며 실무적인 연구로서, 국내에서 보편적으로 사용하고 있는 각종 토질시험법을 적용하여 부산점토의 수리학적

특성을 규명하기로 하였다. 이를 위하여, 낙동강 하구의 범람원 지역에서 5개 지점을 선정하여 현장토질실험과 정교하게 채취된 자연시료를 이용하여 각종 투수 및 압밀실험을 실시하였다. 이와 같은 실험결과를 종합적으로 분석하여 점토의 수리학적 특성을 합리적으로 결정하였다.

2. 지반조건

2.1 대상현장

조사위치는 부산광역시 강서구 소재로서, 그림 1에서 볼 수 있는 DIS-1~DIS-5로 표기된 5개 지점이다. 이곳은 자연지리학적 분류에 의하면, 낙동강 삼각주의 중앙부의 서쪽에 위치하고 있는 범람원 지대(Floodplain)에 속한다. 여기서 SB-14는 퇴적환경을 분석하기 위하여 사용되었던 시추공 이다.

2.2 지층구조 및 퇴적환경

5개 조사공에서 얻어진 시추조사 결과는 그림 2에서와 같이 나타내었다. 여기서 보면, 지층조건, 지하수위 및 자연시료 채취위치, SPT N값, 퇴적환경 등을 나타내고 있다. 여기에서 나타낸 퇴적환경은 Chung et al. (2010b)에 의하여 분류된 결과를 사용하였다. 즉, 하부로부터 하부조간대(TF: tidal flat), 내만(IS: inner shelf) 및 상부조간대(TF)로 대부분 구성되어 있지만, DIS-1의 하부에서는 얇은 해성(SM: shallow marine) 환경이 나타난다. Chung

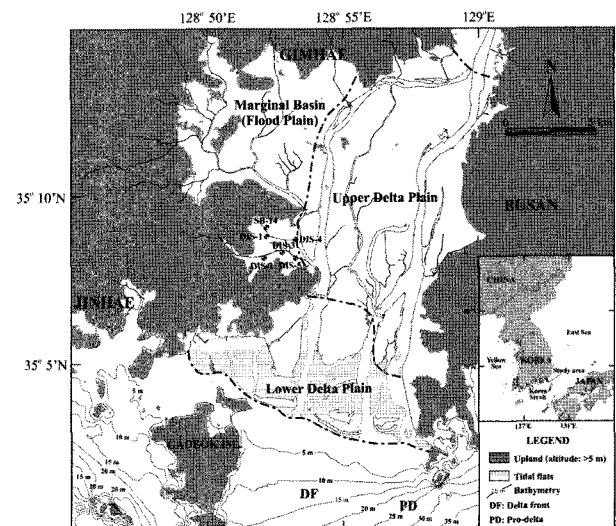


그림 1. 조사위치(류춘길 등, 2005)

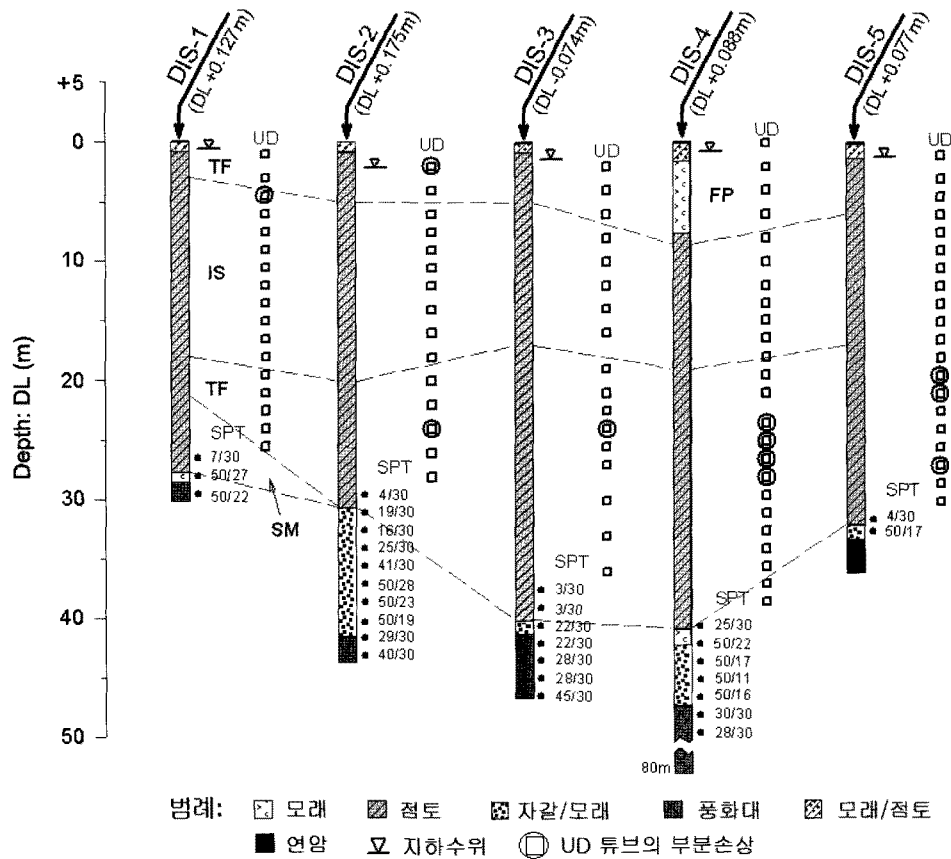


그림 2. 조사공 별의 시추 주상도(TF - 조건대, IS - 내대륙봉 환경)

et al.(2002b, 2002c, 2003, 2006a)에 따르면, TF 및 IS층은 상부 부산점토(Upper Busan clay)에 속하며, SM은 하부점토(Lower clay)로 분류된다. 그리고 각 조사공에서 자연시료 채취 중에 패각(조개껍질) 때문에 샘플튜브(스테인레스강)의 선단이 부분적으로 손상되었던 심도를 표시하고 있다. 샘플튜브가 조금이라도 찌그러진 경우는 낙동강의 지류에 인접한 DIS-4 및 DIS-5의 하부 조건대(TF) 층에서 다수 발생하였으므로, 이 층에는 패각이 다량 함유되어 있음을 지시한다. 또한 이 주상도에서 보면, 퇴적환경대 별의 두께, 점토층의 두께, 모래층의 분포 및 풍화대의 출현심도가 조사공의 위치에 따라 상당한 차이를 나타내고 있다.

지하수위는 조사기간 동안에 수시로 측정된 결과로부터 안정수위를 그림 2에서와 같이 표기하였다. 전체적으로 지하수위는 지표면 아래 1~3m 깊이에 위치하였다.

2.3 점토층의 지수특성

대표적으로 DIS-3 지점에서 점토층에 대한 기본적인 토질특성을 그림 3과 같이 나타내었다. 여기서 볼 수 있

는 특성들이 다른 조사공에서도 유사하게 관찰되었다. 즉, 점성토에서 점토함량은 위치 및 깊이에 따라 약 40~70% 사이에서 변화한다. 이 결과는 낙동강 하구지역의 다른 지역(명지, 신호, 화전지역)에서 관찰된 값보다 다소 크게 나왔다. 단위중량은 자연함수비와 유사하게 퇴적환경, 즉 깊이에 따라 뚜렷한 변화를 보여주고 있다. 특히 정규압밀점토에 대해서 이 두 값의 변화경향은 좋은 상관성을 가진다는 것이 일반적이다. 비중은 2.69~2.72 사이에 분포하며, 지층(퇴적환경)에 따라 약간의 차이를 나타내고 있으나 대략 동일한 공급원을 가졌다고 할 수 있다. 소성지수(I_p)는 20~50% 사이에서 분포하며, 개략적으로 20~30m 깊이를 기준으로 분류된 내대륙봉 환경(IS)에서 크게, 조건대(TF) 환경에서 작게 나타난다. 액성지수(I_L)는 점토구조를 나타내는 지표로 될 수 있으며, $I_L > 1$ 일 경우에는 예민점토(sensitive clay)로 분류된다. 본 현장에서는 내대륙봉 환경(IS)에서 $I_L > 1$, 조건대(TF) 환경에서 $I_L \leq 1$ 으로 나타나는 경향을 보여준다. 상기의 결과는 기존의 연구결과와도 유사하다(Chung et al. 2002a, 2002b; Chung and Giao 2001).

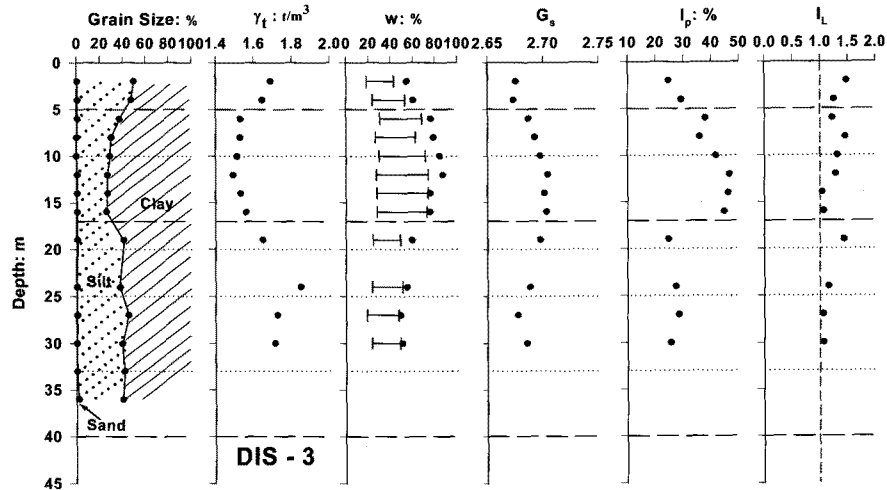


그림 3. 대표적인 지수특성(DIS-3)

3. 실험종류 및 방법

3.1 현장실험

3.1.1 자연시료채취

자연시료 채취를 위하여 DIS-4에서는 지표로부터 상부 모래층(약 6m)까지만 케이싱을 삽입하고 그 아래의 깊이에서는 혼탁액(Bentonite slurry)을 공내에 주입하면서 굴진하였다. 그러나 그 외의 다른 조사공들에서는 전 깊이에 걸쳐 Casing과 청수(맑은 물)를 사용하였다. 이때 사용된 케이싱의 외경이 115mm, 내경 98~101mm 이었다.

국내의 자연시료 채취법에 대한 KS기준(KS F 2317)은 여러 관점에서 미비한 것으로 연구되었다(Chung et al. 2002d, 2003, 2005; Chung 2005). 따라서 상기에서 언급하였던 바와 같이 케이싱을 삽입 중에 과도한 수압이 작용하여 채취심도에 있는 흩이 교란될 수 있다는 단점을 보완하기 위한 연구결과(Chung et al. 2002d, 2004; 광정민 등 2003)에 근거하였다. 즉, 케이싱 선단 아래로 Core tube(bit)를 사용하여 약 50cm 깊이까지 약 $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 이하의 수압(펌프에 부착된 압력계)을 유지시키며, 깊이를 확인하면서 조심스럽게 추가 굴진하였다. 이때, 회전속도는 60rpm 이하이며, 관입속도는 1.7cm/min 이하를 적용하였다. 또한, 작용 수압을 줄이기 위하여 일본에서 주로 사용되는 형식의 Sedimentary tube를 국내에서 처음으로 제작하여 적용하였다.

샘플러는 ‘유압식 고정 피스톤 샘플러(Oil-operated fixed piston sampler)’를 사용하였다(Chung and Kweon

2010). 일반적으로 압입식(mechanical type) 샘플러는 우수한 시료품질을 확보할 수 있는 장점이 있지만, 작업이 불편하며 고가의 채취비가 요구되는 단점이 있다. 반면에, 수압식(hydraulic type) 샘플러는 작업이 용이하고 저렴한 경비가 요구되지만, 시료품질이 다소 떨어진다는 단점이 있다(Clayton et al. 2002). 여기서 사용된 ‘유압식 샘플러’는 위의 두 샘플러의 장점들을 모두 포함하도록 고안되었다. 즉, 유압식 샘플러는 우수한 품질을 확보할 수 있는 동시에 작업이 용이하며 저렴한 채취비용으로 가능하다. 또한, 샘플튜브(시료채취관)가 전진하는 동안에 샘플러가 케이싱의 중간에 고정시키며, 샘플튜브의 전진속도를 크고 일정하게 유지할 수 있다는 추가적인 장점이 있다.

샘플튜브의 기하학적인 특성이 시료품질에 크게 영향을 미친다는 연구(Tanaka 1999; Clayton et al. 1998; Hight 2000)에 주목할 필요가 있었다. 국내 기준(KS F 2317)에서는 샘플튜브에 대한 품질기준이 최근 연구결과를 반영하지 못하고 있다. 따라서 본 과업에서는 국내에서 사용하는 황동(Brass)관 대신에 Stainless steel을 사용하였으며, 국제적인 기준을 만족하도록 제작하여 사용하였다. 즉, 샘플튜브의 내경과 두께는 각각 73.1mm와 1.5mm이며, 길이는 1000mm이고 선단의 두께 및 각도는 각각 0.25mm와 6° 이다.

3.1.2 CPT 소산시험

피에조콘 관입시험(CPT)은 모래지반과 점토층을 연속적으로 관입할 수 있는 대용량(20톤) CPT관입장비(Geomil사)가 사용되었다. 이것은 국내에서 보편적으로

사용되는 방법으로 시추장비를 이용하여 콘을 관입하는 방식과는 근본적으로 다르다. 사용된 콘(Cone; C-15)은 Geomil사에서 제작된 것으로 콘의 면적은 15cm², 선단이 60°를 이루며 어깨에서 간극수압을 측정(u_2)할 수 있도록 만들어져 있다. 이 콘은 정기적(년 1회)으로 Geomil사에서 보정을 거치고 있으므로 비교적 신뢰 있는 결과를 준다.

콘(cone)의 관입속도는 국제지반공학회(ISSMGE)에서 추천하는 20mm/s로 수행하였다(Lunne et al. 1997). 콘의 관입 중에 콘의 경사(허용경사각 25°)가 최대 6°를 넘지 않도록 주의하였으며, 측정된 경사도에 따라 콘의 깊이를 다시 보정하여 실험결과를 정리하였다.

소산시험을 위하여 콘은 글리세린 내에서 충분히 포화시킨 후에 사용하였다. 현장에서 지하수위 위의 지반을 관통하는 동안에 콘이 불포화될 수도 있으므로, 상부 모래층 내에서 예비적으로 소산시험을 실시하여 완전 포화가 되도록 유도하였다. 또한 소산시험은 소정의 깊이에서 압밀도가 70~80%에 도달하도록 지연실험을 실시하였다.

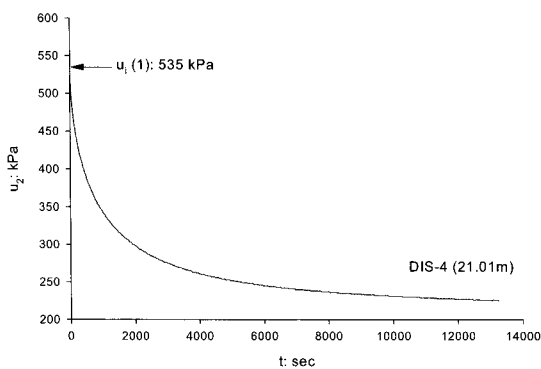
3.2 실내실험

3.2.1 시료

채취된 자연시료는 길이가 약 85cm에 이른다. 자연시료는 정교하게 제작된 시료추출기를 사용하여 연직방향으로 추출하였으며, 약 10cm 크기로 절단하였다. 절단된 시료는 바로 시험에 사용하였거나, 또는 랩(thin plastic film)과 파라핀을 3점으로 감아서 항온항습조에 보관하였다(Chung et al. 2002c).

3.2.2 실내 투수시험

점성토에 대하여 자연시료 상태에서의 연직 및 수평



(a) 읽은 값

투수계수를 측정하는 시험을 실시하였다. 이 실험법에 대한 상세한 기술은 정성교 등(2006b)에서 볼 수 있으므로 여기서는 간단히 설명한다. 먼저 채취된 시료를 이용하여 두 방향으로 각각 절단하여 시편(2×6cm)을 제작하였다. 채취된 시료는 시료채취 중에 시료팽창이 발생하였을 것이라는 사실을 감안하여, 압밀링 내에서 5kPa의 압력을 가하여 안정된 침하에 도달될 때 투수시험을 실시하였다. 투수시험을 위하여 뷰렛(내경 5mm)과 압밀링의 하단부를 서로 연결하여 상향침투가 되도록 유도하였으며, 시험 중 증발을 막기 위하여 뷰렛의 상단부에서 기름을 약간 떨어뜨리고 고무풍선으로 덮었다. 이때 적용된 초기수두는 100mm이며, 뷰렛 내에서 강하되는 수위를 수시로 측정하였다. 이 결과를 도시하여 강하되는 수위와 경과시간 관계가 일정해지는 부분을 이용하여 투수계수의 계산에 적용하였다.

3.2.3 압밀시험

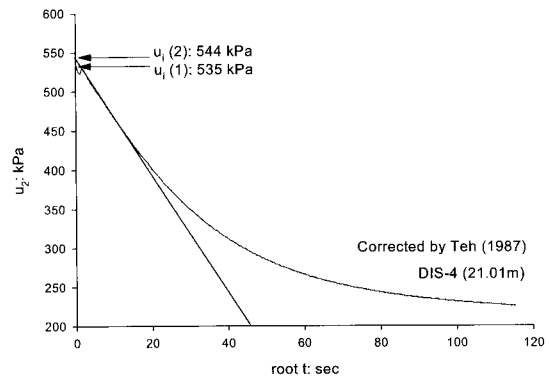
압밀시험은 두 가지의 시험법이 사용되었다. 즉, 국내에서 적용되고 있는 표준압밀시험법(I_L)과 일정변형률(CRS) 압밀시험법이다. 두 시험을 위하여 사용된 시편은 직경 6cm, 높이 2cm 이었다. CRS 압밀시험은 GDS사에서 제작된 Rowe cell을 사용하였으며, 적용된 재하속도는 0.02%/min 이었다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 CPT 소산실험 결과

4.1.1 초기 및 최종 값의 결정

소산시험 결과를 이용하여 각종 수리학적 특성을 분



(b) $u_2: \sqrt{t}$ 그래프에서 직선의 초기값

그림 4. 초기 간극수압의 결정법(DIS-4 21.0m의 예)

석할 때 간극수압의 초기 및 최종 값을 결정하여야 한다. 그림 4에서는 초기 간극수압(u_i)의 결정법을 보여주고 있다. 즉, Teh (1987)가 제안한 \sqrt{t} 법에 의하면, 실측값(u)을 \sqrt{t} 에 대하여 도시하여 '초기 직선부분'을 연결하여 ' $\sqrt{t}=0$ '에 해당하는 점을 초기값으로 결정한다. 그러나, 좀 더 보수적인 값은 최대값(peak; 일반적으로 초기 읽은 값)을 초기값으로 간주하는 방법이다. 여기서 는 전자의 방법($u_i(2)$)을 따랐다.

일반적으로 100% 소산된 잔류상태의 수압(u_{ult} 또는 u_0)은 '쌍곡선(Hyperbolic)법'에 의하여 결정하고 있다. 이때 쌍곡선 함수로 유추된 곡선의 초기 부분은 실측값과 잘 일치하지 않는 경우가 허다하므로, 가급적 실측값(u)의 뒷부분과 일치하는 조건 하에서 쌍곡선 함수의 매개정수를 결정하였다. 그래서 식 (1)은 압밀도를 나타내는 식이며, 압밀도(U) 50%에 해당하는 시간 t_{50} 은 ($u_i - u_{ult}$)/2에 해당하는 값으로 결정할 수 있다.

$$U = \frac{u - u_0}{u_i - u_0} \quad (1)$$

4.1.2 신뢰성 분석

위와 같이 간접적인 방법으로 분석된 잔류상태의 수압(u_{ult} 또는 u_0)을 이용하여 점토층 내에 존재하는 피압의 가능성 및 그의 크기를 분석하기도 한다. 그림 5(a)에서는 잔류상태의 수압(u_{ult} 또는 u_0)을 깊이에 따라 분석하여 나타내었다. 이를 위하여, 먼저 시추조사 과정에

서 장기간 측정된 지하수위와 모래층(상·하부)에서 실시된 CPT 소산시험 결과를 이용하여 정수압 분포를 얻었다. 그 다음으로, 분석된 잔류상태의 수압(u_{ult} 또는 u_0)을 깊이에 따라 도시하여 나타내었다.

그림 5(b)에서 보면, U=100%에서 과잉간극수압 ($u_0 - u_s$)가 점토층에서 (-)20~40kPa 범위 내에서 마치 존재하는 것으로 분석된다. 그러나 이 결과는 측정된 간극수압 및 적용된 쌍곡선 분석법의 신뢰성 등에 따라 달라질 수 있다. 즉, 모래층에 근접한 점토층 내에서 ± 20 kPa 정도의 과잉간극수압이 존재하며, 점토층 내에서 ($u_0 - u_s$)의 분포가 불규칙하게 나타나기도 한다. 여기서 u_s 는 지하수위를 기준으로 계산한 정수압이다. 이러한 원인은 측정값의 신뢰성 보다는 분석방법에 따른 영향으로 생각된다. 예로서, 쌍곡선 함수에 의하여 예측되는 u_{ult} 는 측정시간이 짧을수록 과소평가되는 경향이 있다. 또한 위에서 기술되었던 초기값도 결과에 영향을 미치게 된다. 이와 같은 이유들을 고려할 때, 점토층 내에 피압이 작용하고 있다고 주장하기에는 어려움이 있다. 따라서 보다 정확한 값을 얻기 위해서는 지반 속에 직접 피에조미터를 매설하여 장기간 측정하는 방법을 추천할 수 있다(동아대학교 건설기술연구소 2006).

4.1.3 압밀계수 평가

CPT 소산시험 결과를 이용하여 수평압밀계수를 구하는 방법들 중에서 국내에서 널리 인용되는 것들을 표

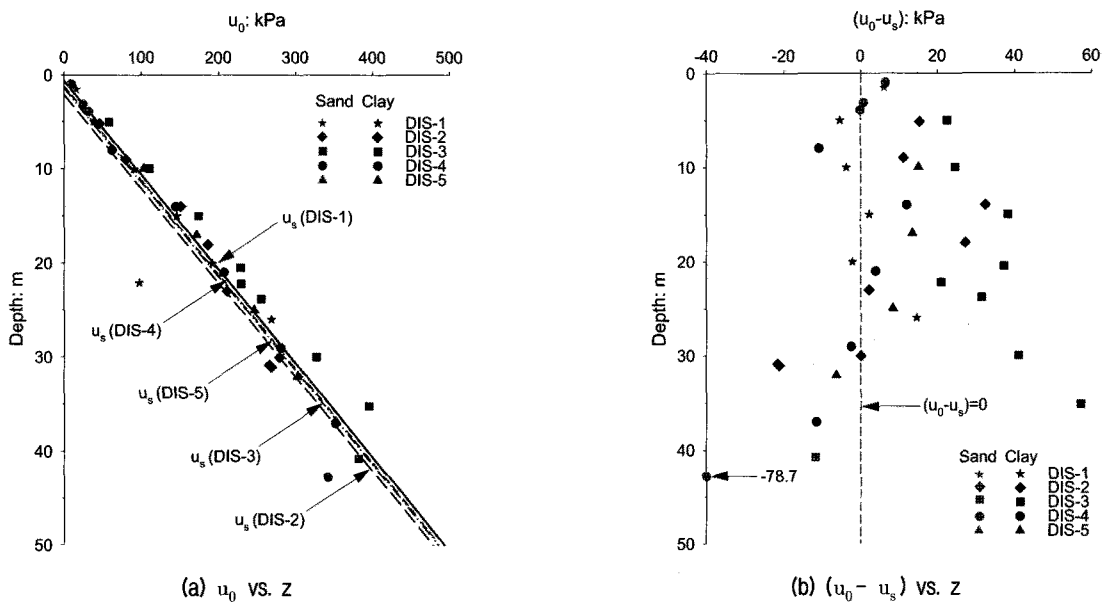


그림 5. 분석된 피압의 깊이별 분포

1에서와 같이 열거하였다. 여기서 T 및 T*=시간계수; r=콘의 반경; I_R=S_u/G=강성지수, G=전단탄성계수, ν=Poisson ratio (0.25 적용); k_h=수평투수계수; Teh법에서 m=√t 곡선의 기울기(그림 4(b)를 참조), M= 1.15.

일반적으로 계산된 압밀계수는 t₅₀(표 2에서는 't'로 표기)에 크게 좌우되므로, U₅₀에 해당하는 시간 t₅₀을 그림 6에서와 같이 도시하여 비교하였다. 이 그림에서 보면 모래층에서의 결과를 제외하면 t₅₀은 대략 1200~2000sec 사이에 분포하며, 20m 아래에서는 약간 감소하는 경향으로 나타난다. 이러한 분포는 그림 5에서 보여 주었던 (u₀-u_s)의 불규칙성과 신뢰성에 대한 의심에도 불구하고 정성적인 측면에서 대체로 납득할만한 결과라 할 수 있다. 즉, 상기의 방법으로 결정된 u_i 및 (u₀-u_s)는 두 값의 평균치에 해당하는 t₅₀에 크게 영향을 미치지 않았다고 할 수 있다.

Baligh & Levadoux (1986)는 표 3에서와 같은 방법으로 분석된 결과를 과압밀 영역(overconsolidated range), 즉 과재하중이 작용하여 압밀을 겪은 상태가 아닌 자연 상태의 조건에 대한 결과(c_{h,OC})라고 하였다. 성토공사에 따라 과재하중이 작용하여 압밀을 받은 상태, 즉 정

규압밀 상태(Normally consolidated range)에 대해서는 식 (2)를 적용하여 보정하여야 한다.

$$c_{h,NC} = c_{h,OC} \cdot \frac{RR}{CR} \quad (2)$$

여기서 CR과 RR은 정규압밀 및 재압축 상태에 대한 압축비 이다.

상기의 방법으로 분석된 c_{h,OC} 및 c_{h,NC}는 대표적으로 DIS-2에 대하여 그림 7에서와 같이 나타내어 비교하였다. 여기서 CR과 RR은 압밀실험 결과를 이용하였다. 또한, 강성지수 I_R을 결정하기 위하여 다음과 같이 적용하였다: s_u = 0.22σ_{v0} (Chung et al. 2006, 2010b), G = [2(1+ν)/E_s], E_s = [M(1+ν)(1-2ν)/(1-ν)], ν = 0.25, M = 8.25(q_t - σ_{v0}) (Lunne et al. 1997). 그림 7에서 보면 적용 공식으로부터 얻어진 수평압밀계수는 넓은 범위 내에서 분포하지만, Baligh & Levadoux(1986), Torstensson (1975), Teh & Houlsby(1991), Teh(1987) 또는 Randolph & Wroth(1979) 순서로 크게 나타났다. 여기서 Randolph & Wroth(1979)의 값을 계산하기 위하여 실내투수실험 결과가 사용되었다. 또한 최대 및 최소값의 차이도 대략

표 1. 압밀계수를 위한 계산공식

제안자	계산공식
Torstensson(1975)-cylindrical	$c_h = r^2 T/t$
Baligh & Levadoux(1986)	$c_h = r^2 T/t$
Teh & Houlsby(1991)	$c_h = T^* r^2 \sqrt{I_R} / t$
Teh(1987)	$c_h = (m/M) \cdot r^2 \sqrt{I_R}$
Randolph & Wroth(1979)	$c_h = (k_h / \gamma_w) G^*$, $G^* = (2G(1-\nu)) / (1-2\nu)$

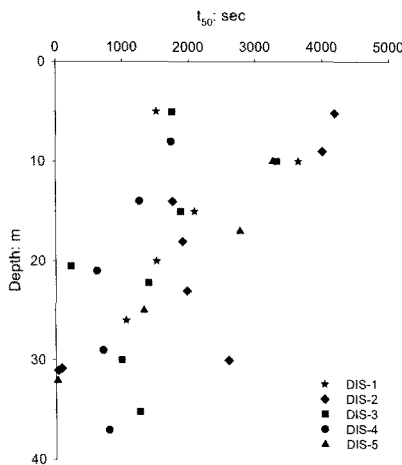


그림 6. 각 조사공에서 산출된 t₅₀

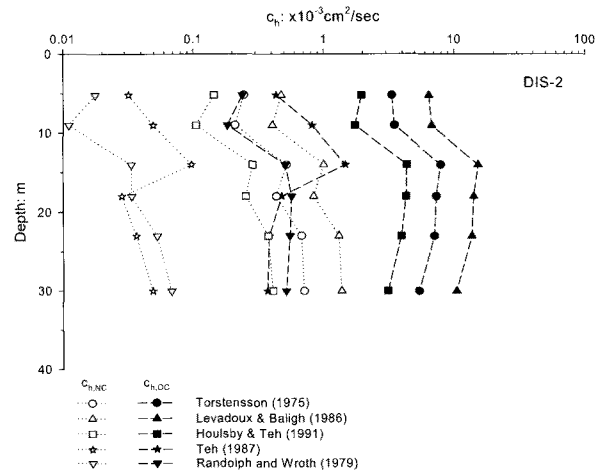


그림 7. 미보정 및 보정 수평압밀계수(DIS-2)

10배 이상에 이르지만, 각 지점별의 $c_{h,NC}$ 와 $c_{h,OC}$ 도 약 10배 이상의 차이(RR/CR)를 나타내고 있다. 따라서 어느 방법을 적용하느냐를 결정하는 것도 어려운 과제이다.

4.1.4 수평 투수계수

Baligh & Levadoux(1980)은 수평 투수계수를 산정하는 계산식을 식 (3)과 같이 제안하고 있다.

$$k_h = \frac{\gamma_w}{2.3 \cdot \sigma'_{v0}} RR \cdot c_h \quad (3)$$

여기서 $RR =$ 과압밀 영역에서의 압축비 $[= C_r / (1 + e_0)]$; $C_r =$ 재압축곡선의 기울기이다. 압축비 RR 은 일반적으로 $(0.5 \sim 2) \times 10^{-2}$ 의 범위이다(Lunne et al. 1997).

그림 8에서는 식 (3)을 사용하여 얻어진 수평투수계수로서 대표적으로 DIS-4에 대하여 보여주고 있다. Randolph & Wroth(1979) 법은 투수계수를 직접 입력하므로 이 그림에서는 배제하였다. 여기서 보면 투수계수

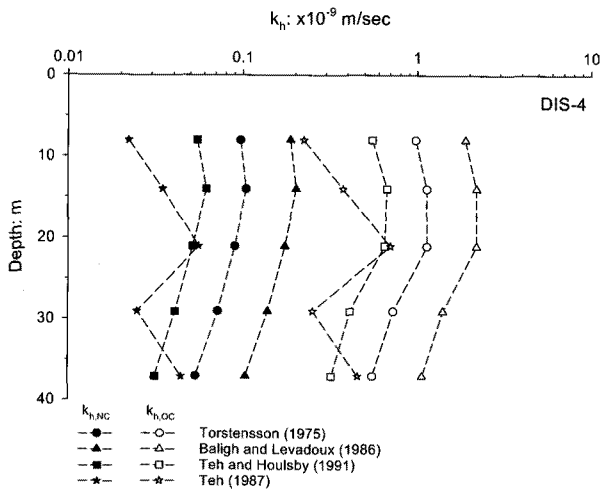


그림 8. 소산시험에 의한 수평투수계수(DIS-4)

는 위치에 따라 차이를 보이지만, t_{50} (그림 6)에서 볼 수 있었던 바와 같이 깊이에 따라 약간씩 감소하는 경향을 나타내고 있다. 식 (3)에서 c_h 를 위하여 상기에서 얻어진 $c_{h,OC}$ 와 $c_{h,NC}$ 를 각각 적용한 결과, 자연상태(OC)의 수평투수계수는 대략 $(0.5 \sim 2) \times 10^{-9}$ m/sec이지만, 정규압밀상태(NC)에 대해서는 $(0.3 \sim 2) \times 10^{-10}$ m/sec으로 감소하였다.

4.2 실내 투수 및 압밀실험 결과

4.2.1 압밀계수

표준압밀시험(I_L) 결과를 이용하여 \sqrt{t} 법과 $\log t$ 법으로부터 얻어진 압밀계수를 대표적으로 DIS-1에 대하여 그림 9에서와 같이 나타내었다. 이 그림에서 초기 유효연직응력은 화살표로서 표현하였다. 또한 CRS시험으로부터 얻어진 압밀계수는 Wissa et al.(1971)에 의한 비선형해(Non-linear solution)를 이용하여 구하였으며, 그림 10과 같이 나타내었다. 두 그림에서 보여주는 전반적인 경향은 압밀계수가 과압밀영역(OC)에서는 크게 나타나다가 정규압밀영역(NC)에서는 급격하게 작아진다. 그러나 표준압밀시험에서 $\log t$ 법으로 구한 압밀계수는 \sqrt{t} 법의 것에 비하여 완만하게 감소하는 경향을 보인다.

설계정수를 구하기 위한 목적으로 그림 11에서와 같이 NC영역에서 얻어진 압밀계수($c_v(NC)$)를 깊이에 따라 모두 나타내었다. 이 그림에서 보면 $c_v(NC)$ 는 대략 17m까지 0.3×10^{-3} cm²/sec로 일정하며, 28m까지 최대 1.2×10^{-3} cm²/sec로 증가한 후, 다시 약간씩 감소하는 경향을 보인다. 그리고 CRS 및 I_L 시험결과에 의한 NC영역에서의 압밀계수는 거의 차이를 보이지 않는다. 압밀계수는 시간에 반비례한다는 사실을 고려할 때, 그림 6

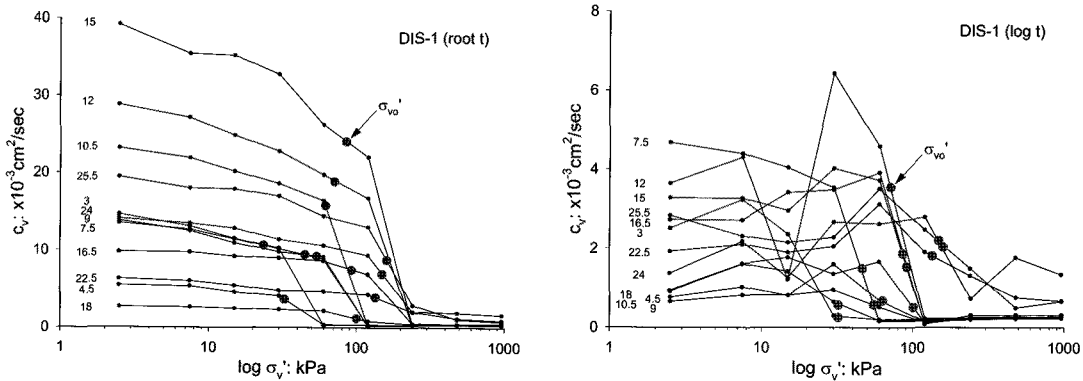


그림 9. 표준압밀시험에 의한 압밀계수: DIS-1

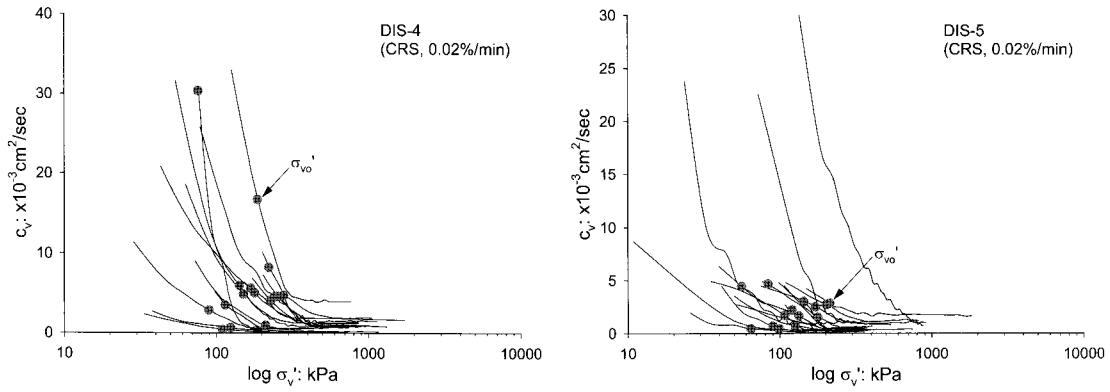


그림 10. CRS시험에 의한 압밀계수: DIS-4 및 DIS-5

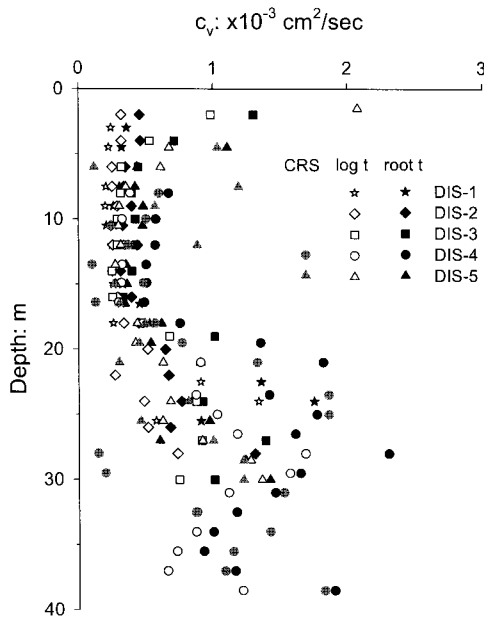


그림 11. 정규압밀영역에 대한 압밀계수의 깊이에 따른 분포

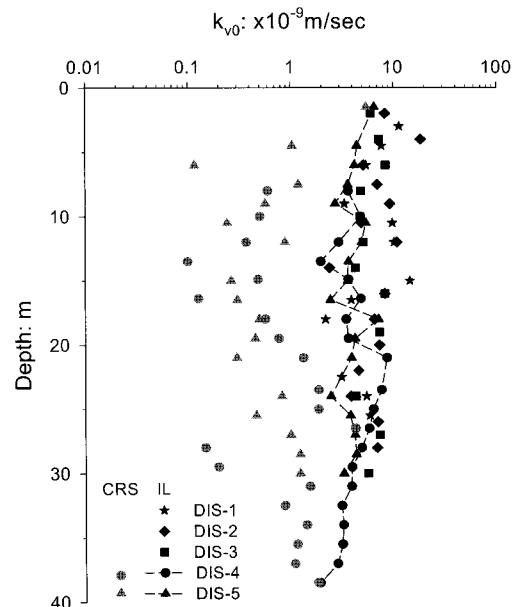


그림 12. I_L 및 CRS 압밀실험 결과를 이용하여 계산된 초기 투수계수 (k_{v0})

에서 보여주었던 t_{50} 과 그림 11에 나타낸 c_v 는 서로 상관성을 나타낸다고 할 수 있다.

4.2.2 투수계수

표준압밀실험에서 $\sigma_{v0}' = 5\text{kPa}$ 에 해당하는 압밀자료를 \sqrt{t} 방법으로 분석 및 계산하여 얻은 투수계수를 초기 투수계수(k_{v0})라고 정의하여 그림 12와 같이 나타내었다. 그러나 CRS압밀실험의 초기값은 표준압밀 실험결과에 비하여 10배 정도로 작았으며, 비교적 불규칙하게 얻어졌다. 표준압밀실험(I_L) 결과를 이용하여 계산한 연직 투수계수 k_{v0} 는 대부분 $(2 \sim 10) \times 10^{-9} \text{m/sec}$ 로 깊이에 따라 대체로 일정하게 분포한다.

4.2.3 실내 투수시험 결과

자연상태 조건에 대하여 실내 투수시험을 실시하여 얻어진 투수특성을 그림 13에서와 같이 나타내었다. 그림 13(a)를 보면, 2공(DIS-4와 5)에 대해 실시된 연직 투수계수(k_{v0})는 모래 또는 패각의 영향으로 임의 깊이에서 최대 $3 \times 10^{-9} \text{m/sec}$ 까지 산출되기도 하지만, 전반적으로 깊이에 거의 무관하게 $(1 \sim 1.5) \times 10^{-9} \text{m/sec}$ 범위 내에 분포한다. 수평 투수계수(k_{h0})는 연직 투수계수와 마찬가지로 모래 또는 패각의 영향으로 최대 $7 \times 10^{-9} \text{m/sec}$ 까지 산출되며, 대체로 $(2.5 \sim 4.0) \times 10^{-9} \text{m/sec}$ 범위 내에 분포한다. 이러한 결과는 부산점토(부산산방향 및 화전지구)에서 얻어진 기존의 결과와도 비교적 일치한다(정성교 등 2006b). 그러나, 본 실험값은 그림 12에서 보여주는 k_{v0} 에 비하여 약간 작다.

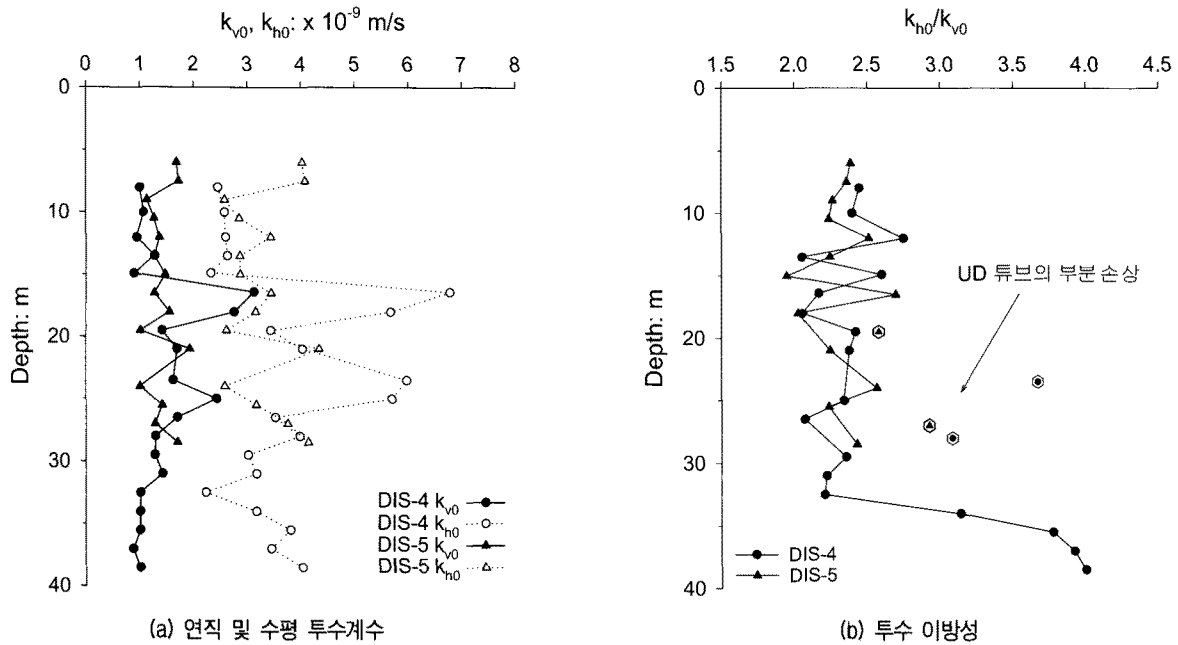


그림 13. 실내실험에 의한 두 방향의 투수계수 및 투수 이방성

그림 13(b)에서 보여주는 투수 이방성(k_{h0}/k_{v0})은 2.0~3.7 사이에 분포한다. 이 값은 정성고 등(2006b)에 의한 $k_{h0}/k_{v0}=2\sim7$ 와 잘 일치한다. 또한, 이 그림 내에서는 패각의 영향으로 샘플튜브가 부분적으로 손상된 위치를 표시하고 있는데, 이 깊이에서는 k_{v0} 에 비하여 k_{h0} 가 크게 나타나고 있다. 이러한 영향을 제외하면, k_{h0}/k_{v0} 은 대략 2.4로 깊이에 따라 일정하다. 그러나 주로 조간대(TF) 내에 포함된 패각층은 성토공사에 의한 압밀시간에 크게 영향을 미칠 수 있다는 것을 지적하고 있다.

5. 토의

5.1 압밀계수

연직배수공(PVD)이 매설되는 대심도 점토지반에서는 수평방향의 투수계수 및 압밀계수가 연직방향의 계수들에 비하여 압밀시간에 결정적으로 영향을 미치므로(Lee & Chung 2010), 여기서는 먼저 수평압밀계수를 중심으로 토의한다. 전술한 바와 같이, 이 계수는 Rowe cell을 이용한 수평압밀시험법과 CPT 소산시험법에 의하여 주로 산출하고 있다. 그러나 이 결과는 시료교란도, 시험방법 및 지반상태에 따라 큰 폭의 차이를 나타내므로 신뢰 있는 값을 결정하기가 쉽지 않다. 한편, 국내에서는 대부분 CPT 소산시험만을 사용하고 있지만, 그림 7에서 보았던 바와 같이 적용 방법에 따라 계산된

결과들의 범위는 10배를 초과하고 있다. 따라서 본 연구에서는 기초적인 연구의 일환으로, 부산점토에 적합한 계산법(소산시험에 근거한 공식)을 합리적으로 결정하기 위하여 보편적으로 사용되고 있는 표준압밀시험과 CRS압밀시험법에 의한 연직방향의 압밀계수를 비교 및 분석하였다.

실내 압밀시험결과를 보면, 압밀계수는 재압축(OC) 영역에서는 아주 크게 얻어지나 정규압밀(NC) 영역에서는 갑자기 작아지며 일정하게 나타났었다(그림 9와 10). 특히 CRS시험결과에서는 다른 점토에 대한 시험결과와 마찬가지로 하중의 초기상태에 압밀계수가 아주 크게 나타나는 단점이 있다. 비록 Dobak(2008)은 이러한 단점을 개선하기 위하여 보정법을 제안하였지만, 이 방법은 보편적으로 적용되지는 않고 있다. 따라서, 압밀계수가 정규압밀 영역에서 일정해진다는 사실에 근거하여 현장 및 실내 실험결과를 비교하는 것이 합당할 것으로 사료된다.

그림 14에서는 CPT 소산시험결과를 각종 방법에 적용하여 계산된 수평압밀계수($c_{h,OC}$)를 정규압밀영역(NC)에 대하여 환산한 값인 $c_{h,NC}$ 와 실내 실험에 의한 값들을 비교하였다. 즉, 표준압밀시험에서 \sqrt{t} 및 $\log t$ 법으로 얻어진 NC영역에서의 연직 압밀계수(c_v) 및 CRS압밀시험으로부터 얻어진 값을 함께 나타내었다. 여기서 보면, CPT 소산시험에 근거한 각종 계산결과($c_{h,NC}$)의 최대 및 최소값의 범위는 대략 10배를 나타내고 있으며,

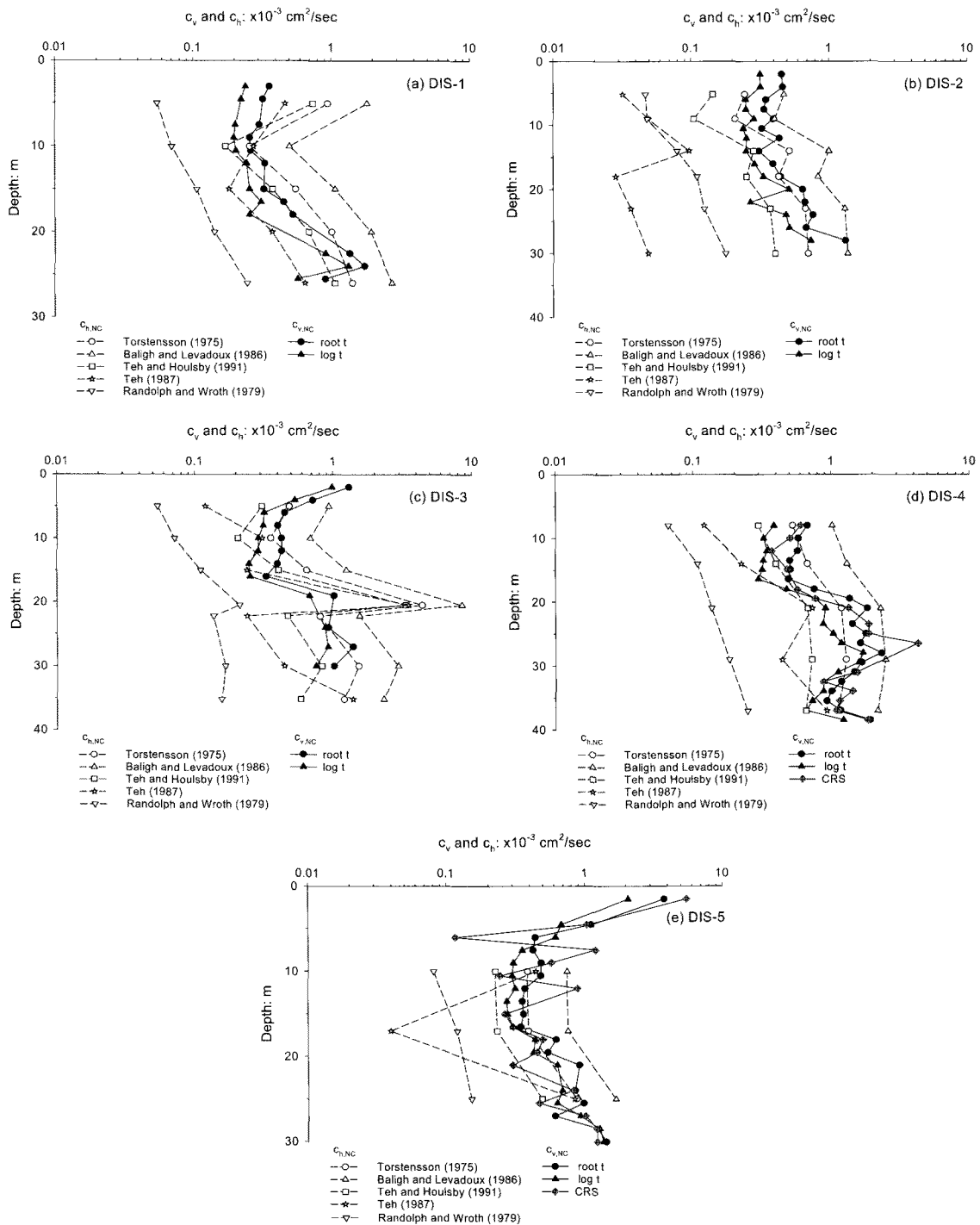


그림 14. 연직 및 수평 압밀계수

실내실험 결과는 그들의 범위 내에서 분포하고 있다. 여기에서 Randolph & Wroth(1978)의 결과는 실내실험으로 얻어진 투수계수를 직접 입력하여 계산한 것으로 다른 방법들에 비하여 아주 작게 얻어졌다.

따라서 c_h 값을 합리적으로 결정하기 위하여, 지반이 균질하고 등방인 조건에 대하여 성립하는 식 (4)를 적용할 수 있다.

$$c_h / c_v = k_{h0} / k_{v0} \quad (4)$$

즉, CPT 소산시험에 적용된 4가지 방법으로 얻어진 결과들 중에서 식 (4)의 조건에 가장 근접한 결과를 찾을 수 있다. 실내 투수실험 결과에 의하면 $k_{h0} / k_{v0} \approx 2.4$ 이었으므로, 이 조건에 가장 가깝게 근접하는 결과는 Baligh & Levadoux(1986)법에 의한 것이었다.

결과적으로, Baligh & Levadoux(1986)의 값들을 모두

도시하면 그림 15에서와 같다. 여기서 보면, 그 값은 $0.40 \sim 2.50 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 범위 내에서 분포하며, 환경대(지층)에 따라 변화하고 있다. 이와 같이 결정된 값이 일정한 경향으로 좁은 범위 내에서 분포하고 있으므로, 본 조사 현장을 대표할 수 있는 평균값(파선)을 그림에서와 같이 추천할 수 있다.

그럼에도 불구하고, 이렇게 결정된 수평압밀계수는 여러 가정에 근거하여 근사적으로 결정된 것이므로, 향후 정교한 방법들을 적용하여 보다 합리적으로 결정되어야 할 것이다. 즉, 정교한 실내 및 현장 시험방법들과 실제 공사 중에 역해석법(Chung et al. 2009; Magnan et al. 1983)을 적용하여야 할 필요가 있다.

5.1 투수계수

점토지반에서 압밀시간에 영향을 미치는 중요한 요소 중의 하나는 수평방향의 투수계수이다. 이 계수 역

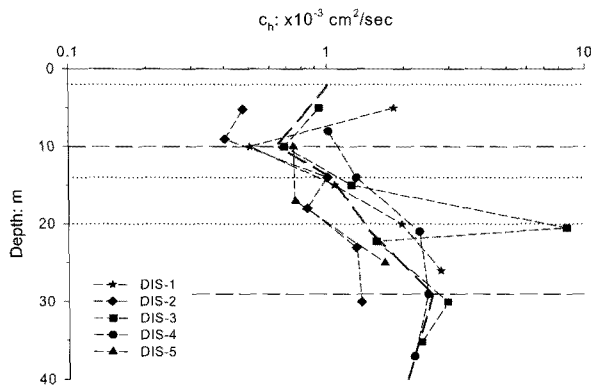
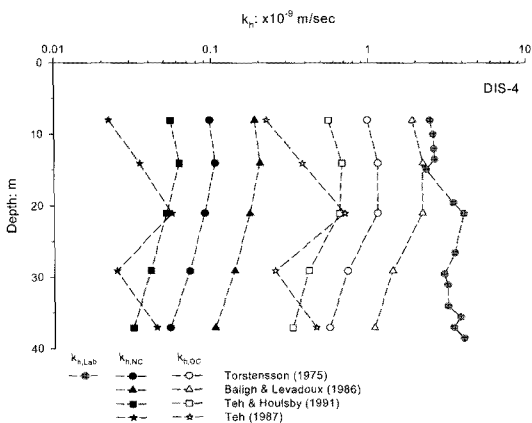
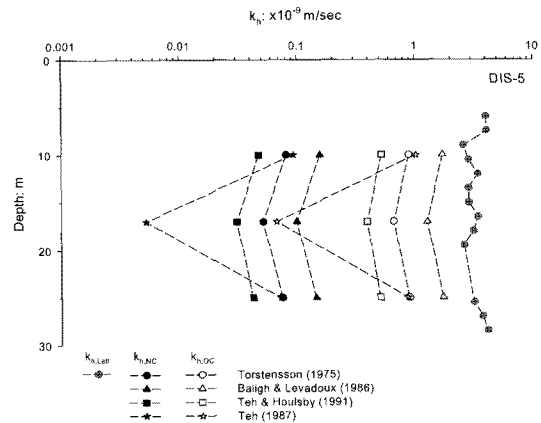


그림 15. 수평 압밀계수의 평균값



(a) DIS-4



(b) DIS-5

그림 16. 실내 투수시험과 CPT소산시험에 의한 수평투수계수의 비교

시 시험방법 및 지반상태에 따라 큰 폭의 차이를 나타내므로 신뢰 있는 값을 결정하기가 쉽지 않다. 그러나 이 목적을 위하여 국내에서는 대부분 CPT 소산시험에 의존하고 있지만, 그림 8에서와 같이 적용 방법에 따라 계산결과들의 범위는 압밀계수와 같이 최대 10배를 초과하고 있다. 따라서, 기초적인 연구의 일환으로, 부산점토에 적합한 계산법(소산시험에 근거한 공식)을 합리적으로 결정하기 위하여 보편적인 실내 수평투수시험을 실시하였다. 그러나 이러한 실내 시험법은 시료를 연직 방향으로 절단 한 후 압밀 또는 투수시험을 실시하므로 그 결과의 신뢰성에 대해서는 논란이 되고 있는 것도 사실이다. 그렇지만, 여기서는 압밀하중에 의하여 점토 구조가 붕괴되기 전의 초기 투수계수를 평가하기 위한 것이므로, 그 결과는 적용 가능하리라 사료된다.

그림 16에서는 소산시험결과를 각종 방법에 적용하여 계산된 수평투수계수와 실내 투수시험으로 얻어진 값들을 비교하고 있다. 여기서 보면, DIS-4와 DIS-5에서 실시된 실내투수시험 결과는 식 (3)에 $c_{h,OC}$ 를 적용한 것보다 $c_{h,OC}$ 를 적용한 결과와 더 가깝다. 그리고 그 중에서 Baligh & Levadoux(1986)에 의한 결과가 가장 유사하다.

모든 조사공에 대하여 상기의 결과를 적용할 수 있는지를 분석하기 위하여, 식 (3)에 Baligh & Levadoux(1986) 법으로 얻어진 $c_{h,OC}$ 와 $c_{h,OC}$ 를 적용한 결과와 병행하여 실내투수시험결과를 그림 17과 같이 도시하였다. 여기서 보면 각 지점에서 CPT소산시험으로부터 얻어진 $k_{h,OC}$ 는 거의 비슷하게 나타나고 있다. 그러나 소산시험에 의한 투수계수($k_{h,OC}$)는 $(1 \sim 3) \times 10^{-9} \text{ m/sec}$ 범위 내에서 깊

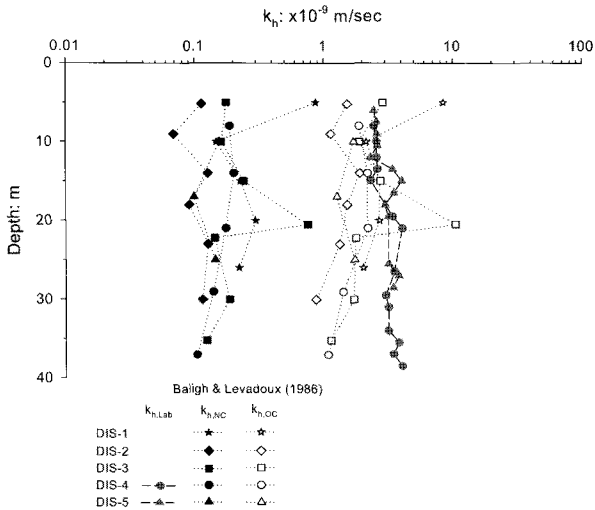


그림 17. 수평 투수계수의 결정

이에 따라 약간씩 감소하는 반면에, 실내 투수시험 결과는 $k_{h,lab} \approx 3 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$ 로서 전 깊이에 걸쳐 거의 일정하게 나타나고 있다. 본 점토의 간극비(또는 함수비)가 깊이에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있으며(Chung et al. 2010), 또한 e-logk 곡선이 일정한 경향을 보여주고 있으므로(정성교 등 2006) 실내 투수시험 결과($k_{h,lab}$) 보다는 CPT 소산시험에 의한 결과가 더 합리적인 값이라 판단된다.

그럼에도 불구하고, 보다 나은 평가를 위해서는 자가식 투수시험법과 같은 정교한 현장시험법들이 동원되어야 한다는 것을 간과해서는 안될 것이다. 또한 성토공사 중 과재하중에 의한 지반응력의 증가($\Delta\sigma$)는 지표면으로부터 가까운 지층에서는 유효연직응력(σ_{v0}')에 비하여 수배에 이르며, 깊이가 깊어질수록 그 비율은 작아진다.

6. 결론

낙동강 하구의 범람원 지역에 분포하는 부산점토에 대한 수리학적 특성을 규명하기 위하여 국내에서 때때로 사용되는 간편한 종류의 실내실험 및 CPT소산실험 결과를 이용하여 분석하였다. 이 결과로부터 얻어진 결론은 아래와 같다.

(1) CPT소산시험에 근거하여 수평 압밀계수를 분석한 결과, 적용 방법에 따라 최대 및 최소값의 차이는 10배를 초과하였다. 지반이 균질하고 등방성을 갖는다고 가정하여 $c_u/c_v = k_{h0}/k_{v0} (=2.4)$ 를 적용한 결과,

여러 방법 중에서 Baligh & Levadoux(1986)법에 의한 계산결과가 가장 근접하였다. 이를 위하여 c_v 는 표준압밀실험 결과에서 일정하게 나타나는 정규압밀영역의 값을 사용하였으며, k_{h0}/k_{v0} 는 실내 투수시험결과를 이용하였다. 이에 따르면, 5개 조사공에서 정규영역(NC)에 해당하는 압밀계수($c_{h,NC}$)는 $0.4 \sim 3.0 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 사이에서 깊이에 따라 약간씩 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 점토의 퇴적환경에 따른 영향을 잘 반영한다고 할 수 있다. 반면에 과압밀 영역(OC)에 해당하는 압밀계수($c_{h,OC}$)는 $c_{h,NC}$ 에 비하여 약 10배보다 큰 값이다.

(2) 채취된 시료를 두 방향으로 잘라 만든 시편에 대하여 실내 투수실험을 실시하여 얻어진 연직 및 수평 투수계수는 깊이에 따라 거의 일정하게 각각 $(1 \sim 1.5) \times 10^{-9} \text{ m/sec}$ 및 $(2.5 \sim 4.0) \times 10^{-9} \text{ m/sec}$ 로 나타나므로, 투수 이방성은 약 2.4이었다. 표준압밀실험으로부터 얻어진 연직투수계수($\sigma_{v0}' = 5 \text{ kPa}$ 에서)는 $(2 \sim 10) \times 10^{-9} \text{ m/sec}$ 로서 전자에 비하여 약간 크게 얻어졌다.

소산시험 결과에 $c_{h,OC}$ 를 대입하여 얻어진 수평 투수계수는 최대 및 최소값의 차이가 약 10배로 나타났다. 여러 방법 중에서 Baligh & Levadoux(1986)법으로 구한 값이 실내 투수실험결과와 가장 근접하였다. 5개 조사공의 결과를 조합하면, 이 값은 $(1 \sim 3) \times 10^{-9} \text{ m/sec}$ 범위 내에서 깊이에 따라 약간씩 감소하였다.

(3) 상기에서는 CPT 소산시험에 의하여 압밀 및 투수계수를 합리적으로 산출할 수 있음을 보였다. 그러나 피압의 존재여부를 분석하였던 과정에서 나타났던 바와 같이, 자료의 분석과정에서 여러 가지 가정과 불확실성을 포함하고 있다. 따라서 수리학적 특성을 보다 합리적으로 결정하기 위해서는 정교한 현장 및 실내실험들을 향후에 실시하여야 함은 물론, 역해석을 수행하여 적용결과의 타당성을 입증할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실 사업의 지원을 받아 수행된 연구(No. ROA-2008-000-20076-0)임을 밝히며, 또한 본 연구를 위하여 협조하여 주신 부산도시공사 및 (주)도화종합기술공사의 관계자들에게 감사한다.

참 고 문 헌

1. 락정민, 정성교, 백승훈, 이영남, 조기영 (2003), 부산점토에 대한 시료채취기술에 따른 시료교란과 시험방법에 따른 압밀정수의 비교. *한국지반공학회 논문집*, 한국지반공학회, 19(4), 8월: 43-53.
2. 동아대학교 건설기술연구소 (2006), *명지·신호지역 학술연구용역 정밀지반조사 최종보고서*.
3. 류춘길, 강소라, 정성교 (2005), 낙동강 삼각주 서부지역의 제4기 후기 고환경 변화. *한국지구과학회지*, 제26권, 5호, 6월: 443-458.
4. 정성교, 장우영, E. Ninjarav, 류춘길 (2006a), 낙동강 하구지역 부산점토의 퇴적환경에 따른 압축특성. *한국지반공학회 논문집*, 22(12): 57-65.
5. 정성교, 장우영, E. Ninjarav, 김성렬 (2006b), 실내실험에 의한 부산점토의 투수특성 분석. *한국지반공학회 논문집*, 22(11): 133-142.
6. Baligh, M.M. and Levadoux, J.N. (1980), *Pore pressure dissipation after cone penetration*. MIT, Department of Civil Engineering, Cambridge, Mass., Report R80-11.
7. Baligh, M.M. and Levadoux, J.N. (1986), Consolidation after undrained piezocone penetration. II: interpretation. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 7, 727-745.
8. Chai, J.C. and Miura, N. (1999), Investigation of factors affecting vertical drain behavior. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.125, No.3, 216-226.
9. Chu, J., Bo, M.W., Chang, M.F. and Choa, V. (2002), Consolidation and permeability properties of Singapore Marine clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.128, No.9, 724-732.
10. Chung, S.G. (1999), 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 (2001), Examination of Pusan clays at a reference testing site. *Lowland Technology International*, IALT, Vol.3, No.2, pp.1-14.
12. Chung, S.G., P.H. Giao, T.S. Nagaraj, and J.M. Kwag (2002a), Characterization of estuarine marine clays for coastal reclamation in Pusan, Korea. *Marine Georesources and Geotechnology*, 20(4): 237-254.
13. Chung, S.G., P.H. Giao, G.J. Kim and S. Leroueil (2002b), Geotechnical characteristics of Pusan clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5): 1050-1060.
14. Chung, S.G., P.H. Giao and H. Tanaka (2002c), Geotechnical characteristics and engineering problems of Pusan clays. *International Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, Vol.1, Dec. 2-4, Singapore, Balkema: 505-541.
15. Chung S.G., P.H. Giao, J.M. Kwag and H. Tanaka (2002d), Comparative study on Korean and Japanese samplers in investigation of Pusan soft clays. *Intl. Workshop on Foundation Design Codes and Soil Investigation in view of International Harmonization and Performance Based Design*, IWS Kamakura 2002: 183-189.
16. 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.
17. 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.
18. Chung, S.G., C.K. Ryu, K.Y. Jo, and D.Y. Huh (2005), Geological and geotechnical characteristics of marine clays at the Busan new port. *Marine Georesources and Geotechnology*, Vol. 23, No. 3: 235-251. July-August.
19. Chung, S.G. (2005), Keynote Lecture: Sampling techniques and their effects in characterizing of Pusan clay. *Proceedings, Current Geotechnical Issues of Thick Clay Deposits, Joint Symposium of ISSMGE ATC7 and KGS TC*, Sept 21-22, Busan, 3-36; also *Proceedings of International Conf on Civil and Environmental Engineering, ICCEE-2005*, Higashi-Hiroshima, Japan, Oct 26-27, Japan, 29-59.
20. Chung, S.G., Kim, S.K., Kang, Y.J., Im, J.C., and Prasad, K.N. (2006), Failure of a breakwater founded on a thick normally consolidated clay. *Geotechnique*, 56(6): 393-409.
21. Chung, S.G., N.K. Lee, and S.R. Kim (2009), Hyperbolic method for prediction of prefabricated vertical drains performance. *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 135, No. 10, 1519-1528.
22. Chung, S.G. and Lee, N.K. (2010), Smear effect and well resistance of PVD-installed ground based on hyperbolic method. *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 136(4): 640-642.
23. Chung, S.G., Chung, J.G., Jang, W.Y. and Lee, J.M. (2010a), Correlations between CPT and FVT results for Busan Clay. *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol. 28, No. 1, 49-63.
24. Chung, S.G., Ryu, C.K., Min, S.C., Lee, J.M., and Hong, Y.P. (2010b), Geotechnical properties and depositional environment of Busan clay in the floodplain of the Nakdong River delta. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Springer. (in review)
25. Chung, S.G. and Kwon, H.J. (2010), Oil-operated fixed piston sampler and its applicability. *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. (in review)
26. Clayton, C.R.I., A. Siddique and R.J. Hopper (1998), Effects of sampler design on tube sampling disturbance - Numerical and analytical investigations. *Geotechnique*, 48(6): 847-867.
27. Clayton, C.R.I., M. C. Matthews and N. E. Simons (2002), Site investigation. Blackie.
28. Dobak, P. (2008), Evaluation of consolidation parameters in CL tests: theoretical and practical aspects. *Geological Quarterly*, 52(4): 397-410.
29. Hight, D.W. (2000), Sampling effects in soft clay: An update. *4th Intl. Geotechnical Engineering Conference*, Cairo, Egypt, 24-27 January: 1- 41.
30. Lee, N.K. and Chung, S.G. (2010), Reevaluation of the factors influencing the consolidation of ground by incorporating prefabricated vertical drains. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 14(2): 155-164.
31. Leroueil, S. and Hight, D.W. (2002), Behaviour and properties of natural soils and soft rocks. *International Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, Vol. 1, Dec. 2-4, Singapore, Balkema: 29-254.
32. Leroueil, S., Diene, M., Tavenas, F., Kabbaj, M., and La Rochelle, P. (1988), Direct determination of the permeability of clay under embankment. *ASCE, J. Of GED*, 114(6): 645-657.
33. Lunne, T., Robertson, P.K. and Powell, J.J.M. (1997), *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Blackie Academic & Professional, 1st edition, 312p.

34. Magnan, J.P., Pilot, G. and Queyroi, D. (1983), Back analysis of soil consolidation around vertical drains. *8th ECSMFE*, Vol. 2, Helsinki, Balkema, 653-658.
35. Randolph, M.F. and Wroth, C.P. (1979), An analytical solution for the consolidation around a driven pile. *Proceedings of the International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geotechnics*, 3(3): 217-229.
36. Tanaka, H. and M. Tanaka (1999), Key factors governing sample quality. *Proc. Intl. Symp. On Characterization of Soft Marine Clays*, Yokosuka, Edited by Tsuchida & Nakase, Balkema: 52-82.
37. Tavenas, F., Tremblay, M., Larouche, G. and Leroueil, S. (1986), In Situ measurement of permeability in soft clays. *ASCE Specialty Conf. In Situ 86*, Blacksburg, VA, pp. 1034-1048.
38. Teh, C.I. (1987). *An analytical study of the cone penetration test*. PhD thesis, Oxford University.
39. Teh, C.I. and Houlsby, G.I. (1991), An analytical study of the cone penetration test in clay. *Geotechnique*, 41(1), 17-34.
40. Torstensson, B.A. (1975), Pore pressure sounding instrument. *Proc. ASCE Special Conf., In Situ Measurement of Soil Properties*, Raleigh, 2: 48-54.
41. Wissa, A.E.Z., Christian, J.T., Davis, E.H., and Heiberg, S. (1971), Consolidation at constant rate of strain. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 97(SM10): 1393-1413.

(접수일자 2010. 7. 6, 심사완료일 2010. 10. 20)