

소성지수에 따른 점성토의 압밀특성에 관한 연구

A study on the Consolidation Characteristic of Cohesive Soil by Plastic Index

김 찬 기¹ Kim, Chan-Kee

조 원 범² Cho, Won-Beom

이 승 련³ Lee, Seung-Lun

최 우 정⁴ Choi, Woo-Jung

Abstract

The standard consolidation tests using the incremental loading technique test (IL) were performed on remolded normal consolidation and undisturbed clay samples to find out the effects of plastic index and loading period on consolidation in this study. The remolded samples used were prepared by mixing Gunsan-Samangum clay with bentonite so that they may have plasticity indexes of 15, 30, 45, and 60%, respectively. The undisturbed clay samples were collected from Incheon, Kwangyang, and Uolsan. The samples were tested at the condition of 4 different loading periods (1, 2, 4, and 8 days). Settlement, coefficient of consolidation, compression index, secondary compression index, and pore water pressure characteristics were investigated from the plastic index and loading period aspects, and the compression index, coefficient of consolidation, and secondary compression index were formulated in terms of the plastic index and loading. To verify the applicability of proposed equations, the settlements obtained from Terzaghi's theory, modified Cam-Clay model (elasto-plastic model), and the Sekiguchi model (elasto-viscoplastic mode) were compared with the test results. The comparison indicates that the Sekiguchi model incorporating the secondary consolidation characteristic well predicts the results.

요 지

본 연구는 군산 새만금지역의 점성토를 소성지수 15%, 30%, 45%, 60%가 되도록 벤토나이트를 첨가한 인공의 시료를 이용하여 하중재하기간을 1일, 2일, 4일, 8일 등으로 달리한 표준압밀시험을 실시하였다. 그리고 인천, 광양, 울산지역의 불교란 시료에 대한 압밀시험도 같이 수행하여 소성지수와 압밀하중재하기간이 2차 압밀에 어떤 영향이 있는지를 밝혔다. 그리고 각 소성지수에 따른 하중과 침하특성, 압밀계수특성, 압축지수 및 2차 압축지수특성, 간극수 압특성을 밝히고 압축지수, 압밀계수, 2차 압축지수 등을 소성지수, 하중에 관하여 정식화하였다. 또한 정식화한 식을 이용한 1차 및 2차 압밀침하량 예측결과와 탄소성 구성모델인 수정 Cam-Clay모델과 탄·점소성 모델인 Sekiguchi모델을 이용한 예측결과를 모형시험 결과와 같이 비교하였다. 그 결과, 2차 압밀특성을 고려한 Sekiguchi모델이 매우 정도 높게 결과를 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

Keywords : Consolidation characteristic, Incremental loading, Plastic index, Secondary compression index

1 정회원, 대전대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Daejin Univ., cckim@daejin.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 대전대학교 대학원 박사과정 (Member, Graduate Student Dept. of Civil Engrg., Daejin Univ.)

3 정회원, 서정엔지니어링(주) 대표이사 토질 및 기초기술사 (Member, Sujung Engrg., Co. Ltd.)

4 정회원, 원광대학교 대학원 박사과정 (Member, Graduate Student Dept. of Civil Engrg., Daejin Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

연약지반위에 구조물을 설치하거나 도로, 비행장 등을 시공하는 경우에 성토하중으로 인한 전단변형, 시간의존적 압밀침하 등 많은 지반공학적 문제점이 대두된다. 그 중 압밀침하는 오랜 기간 동안 발생하므로 공학적인 문제뿐만 아니라 경제적인 문제까지 크게 발생시키고 있다. 이러한 압밀침하의 정도 높은 예측을 위해 많은 이론이 제안되었고 상용되고 있다.

현재 널리 적용되고 있는 Terzaghi 압밀이론은 성토시 지반을 완전 비배수상태로 가정하여 성토하중과 동일한 과잉간극수압이 발생하며 성토 후 시간경과에 따라 과잉간극수압 소산과정과 동시에 침하가 발생하는 것으로 간주하고 있다. 하지만 실제 현장을 살펴보면 과잉간극수압이 완전히 소산한 후에도 2차압밀이 발생하고 있으나 2차 압밀에 의한 침하량은 종종 간과되었다. Terzaghi의 1차원 압밀이론과 Biot(1941), 吉國(1972)의 다차원 압밀이론 그리고 Schiffman 등(1964)의 불균질지반에 대한 1차원 압밀이론은 모두 탄성압밀이론으로 그 성격은 동일하게 평가되고 있으며 흙을 탄성체로 가정한 압밀해석에서는 표준압밀시험이나 현장에서 관측된 2차 압밀을 평가할 수 없다.

한편 Murayama와 Shibata(1958)는 점성토의 시간의존성 거동 특성에 관한 연구를 발표하였고 Otha 등(1975)은 토체의 비등방성을 고려할 수 있는 모델을 제안하였으며 Sekiguchi와 Otha(1977)는 2차 압밀특성, 다일러턴시특성 및 시간의존성을 고려한 탄점소성 구성모델을 제안하였다.

Terzaghi의 압밀이론이 발표된 이후 2차 압밀에 관한 연구가 활발히 수행되고 있으나 그 평가방법은 아직 명확하게 확립되어 있지 않은 실정이며 실무에서는 Terzaghi의 1차원 압밀이론에 기초하여 표준압밀시험 결과를 이용한 침하시간 및 침하량의 예측으로 구성된다. 1차원 압밀해석과 그 토질정수는 먼저 정수가 얻어진 압밀시험의 거동을 충분히 설명할 필요가 있다고 생각한다. 연약지반에서의 압밀침하계산에 이용되는 정수와 소성지수 및 물리특성과의 상관관계에 대해서는 많은 연구가 진행되어져 왔으나(Yasuhara 등, 1983) 현장에 적용하기 위한 소성지수와 압밀특성과의 실험적 연구는 아직 미비한 실정이다. 본 연구는 군산 새만금지역의 점성토를 사용하여 소성지수를 15%, 30%, 45%, 60% 4종류로 변화시켜 재 성형·재 압밀시료를 제작한다. 1일, 2일, 4

일, 8일 등으로 하중재하기간을 달리하여 압밀시험을 실시한 결과를 이용하여 소성지수와 압밀하중재하기간이 2차 압밀에 어떤 영향이 있는지를 밝히고, 각 소성지수에 따른 하중과 침하특성, 압밀계수특성, 압축지수 및 2차 압축지수특성, 간극수압특성을 밝히고자 한다. 아울러 압축지수, 압밀계수, 2차 압축지수와 소성지수, 하중에 관한 정형화된 식을 제안하며 이식을 이용하여 침하량을 예측하여 유용성을 검증하고자 한다. 또한 적합성을 검증하기 위하여 2차 압밀을 고려한 Terzaghi 1차원 압밀식과 탄소성 구성모델인 수정 Cam-Clay 모델과 2차 압밀특성을 고려한 탄·점소성 모델인 Sekiguchi 모델을 이용하여 수치해석을 실시한다.

2. 우리나라 연약지반 특성

우리나라 서해안과 남해안 및 내륙 일부지역을 중심으로 연약점성토의 물리적, 역학적 특성을 문헌 및 각종 시험자료를 토대로 조사한 바 액성한계가 30~70%에 해당하고 통일분류법상 CL, CH, MH를 나타내며 자연함수비는 100% 이내로서 액성한계와 비슷한 수준이다. 연약지반의 물리적 특성은 함수비, 비중, 단위중량, 입도 및 Atterberg 한계 등으로 이들 특성으로부터 흙의 물리적인 특성 그 자체뿐만 아니라 지질학적인 기원이나 압밀특성 및 전단강도 등의 역학적인 특성을 추정하는데도 활용 가능하다.

그림 1과 그림 2는 심도별 함수비와 액성한계 분포를 나타낸 그림이다. 서남해안에 대한 연약지반의 물리적 특성을 정리하면 함수비는 액성한계와 같거나 약간 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 서해안은 조수간만의 차가 크고 점성토가 해양성 퇴적물로 세립의 실트입자가 많이 포함되어 있기 때문에 서해안에 비해 남해안으로 갈수록 함수비는 증가하는 경향을 보이고 있다.

그림 3은 서남해안의 심도별 과압밀비를 나타낸 그림이고, 그림 4는 심도별 압축지수의 분포를 나타낸 그림이다. 깊이가 증가할수록 과압밀비 값이 감소하는 경향을 보이며 남해안지역은 미압밀점토인 것으로 추정되는 지역도 있지만 서해안은 대부분 정규압밀상태인 것으로 판단된다. 그리고 서해안은 남해안에 비해 과압밀층의 두께가 두꺼운 것으로 나타났으며 서해안 지역의 압축지수는 비교적 작은 값을 나타내고 남해안으로 갈수록 증가하는 경향을 보이고 있다.

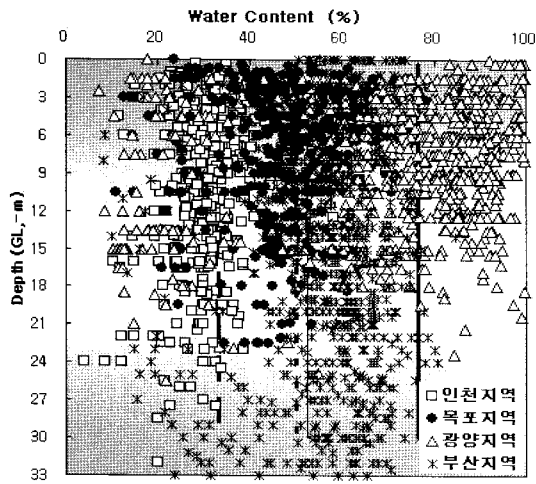


그림 1. 심도별 자연 함수비의 분포

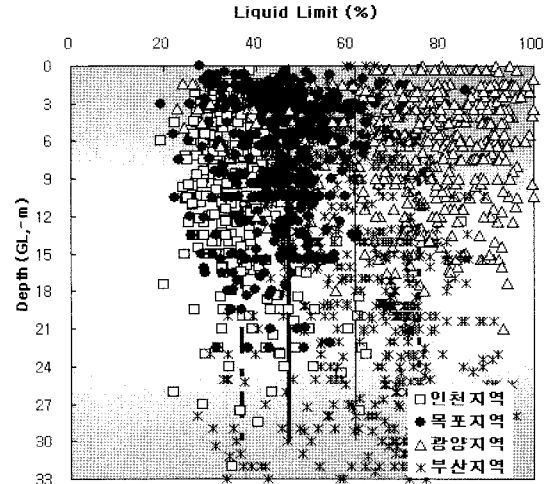


그림 2. 심도별 액성한계의 분포

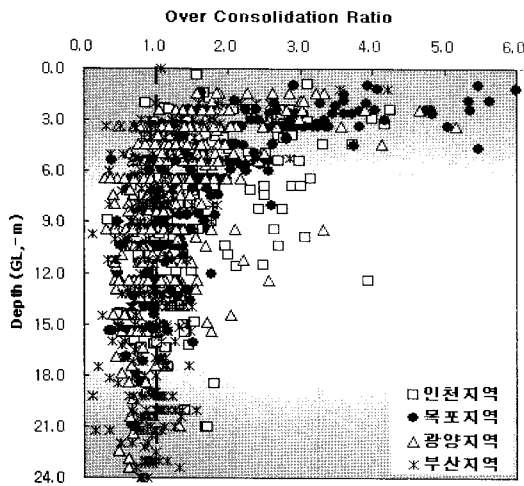


그림 3. 심도별 과압밀비의 분포

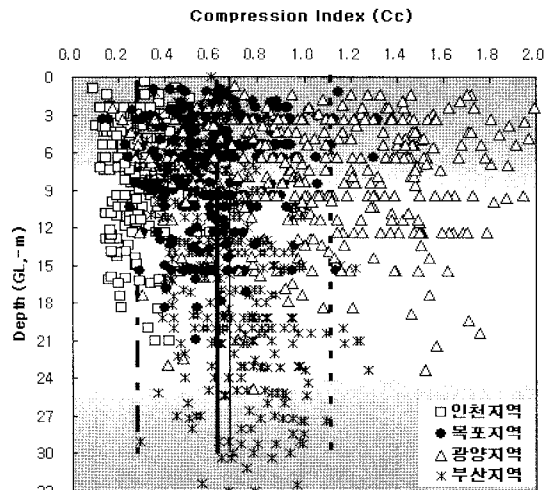


그림 4. 심도별 압축지수의 분포

3. 시험

3.1 시험 시료

본 연구는 소성지수의 변화 및 압밀재하기간의 차이에 따른 압밀특성의 변화를 파악하기 위해 점토시료에 벤토나이트를 첨가하여 소성지수를 15%, 30%, 45%, 60%로 달리한 시료를 제작하여 압밀시험을 수행하였으며, 점토시료는 군산지역으로 구분한 새만금지역에서 채취한 실트질 점토를 사용하였다. 본 연구에 사용한 점성토시료의 물리적 특성을 표 1에 나타내었다.

표 1. 새만금 점성토의 물리적 특성

함수비 (W_n (%))	비중 (G_s)	액성한계 (LL (%))	소성지수 (PI)	#200체 통과량 (%)
28.7	2.69	30.1	10.3	89.8

3.2 시험방법

시료제작방법은 새만금지역에서 채취한 원지반 상태의 점성토시료를 실험실로 운반하여 물과 함께 슬러리 상태가 되도록 교반한다. 이와 같이 준비된 슬러리 상태의 시료에 조개껍질 등의 이물질을 제거하기 위하여 40번체(0.42mm)를 이용하여 체가름을 하였다. 여기에 소정의 소성지수를 갖도록 일정 중량비의 벤토나이트를 혼합하여 슬러리 상태를 만들었으며 벤토나이트 혼합 후의 슬러리 상태의 함수비는 액성한계의 3배 이상의 값을 나타내도록 하였다. 슬러리 상태의 시료는 그

림 5에 나타난 시료교반 및 진공 탈기 장치를 이용하여 5~6시간정도 시료 내부의 공기를 제거한다.

슬러리 상태에서 교반 및 탈기가 종료된 점토시료를 공기가 들어가지 않도록 탈기장치로부터 호스 등을 이용하여 몰드의 바닥 면부터 골고루 채워지도록 주의를 기울여서 그림 6에 나타난 압밀 시료 성형 토조에 넣고 하중을 가하여 재성형 점토시료를 제작하였다. 이때 부주의로 공기가 들어가면 시료 내부에 공동이 생길 수 있다. 압밀 토조에 시료를 채운 후 하루 동안 액성한계의 약 2배 정도의 함수비를 갖도록 자중압밀 시킨 후 벨로프레임을 조립한다. 압밀장치는 표준 압밀시험기와 유사한 구조로 상·하부에 다공판을 설치하여 양면배수가 가능하도록 하였다. 압밀장치 조립 후 압력장치와 연결을 하여 시료의 유효구속압으로 부터 시작하여 하중 증분 비($\Delta p/p$)를 1로 하여 0.4kgf/cm^2 으로 선행압밀하중까지 압밀을 실시한다. 이 때 최종하중단계에서는 압밀기간 중 침하량을 측정하여 3t법으로 1차 압밀 종료시간을 결정한다(일본 지반공학회, 토질시험법, 1990). 이와 같이 소성지수를 4종류로 변화시켜 재 성형·재 압밀한 시료를 이용하여 압밀시험을 실시한다.

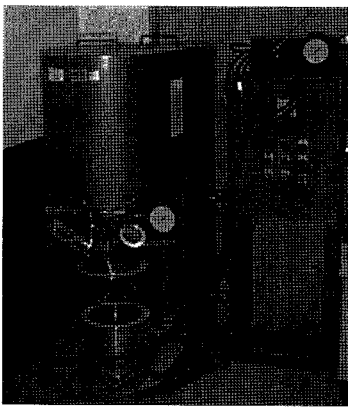


그림 5. 시료교반 및 진공탈기장치



그림 6. 시료 성형 토조 및 대형압밀장치

4. 시험결과 및 고찰

4.1 압축지수 특성

압밀현상을 설명하기 위한 토질정수를 간단한 물리적 특성만을 이용하여 구할 수 있는 식을 제안하고자 기본적으로 소성지수를 15%, 30%, 45%, 60%로 각각 달리한 이상화 된 시료에 대한 압밀시험 결과와 현장에서 채취한 광양($PI=14.3\%$, 38.2% , 43.9%), 인천($PI=15.4\%$, 18.8%), 울산($PI=9.4\%$, 15.2% , 17.2%)지역의 불교란시료를 이용하여 각각의 토질정수의 특성을 고찰하였다.

그림 7은 압축지수와 소성지수의 관계를 나타낸 것으로 그림에 나타난 바와 같이 소성지수가 증가함에 따라 압축지수가 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있어 압축지수와 소성지수의 관계를 선형회귀분석으로 정식화한 결과 식 (1)과 같으며 이때 상관 계수는 0.92로 매우 양호한 선형성을 보이고 있다. 또한 현재 널리 쓰이고 있는 Skempton이 제안한 액성한계로부터 압축지수를 구하는 식과 비교한 결과 압축지수 값이 비교적 일치 하는 것을 확인 할 수 있었다.

$$C_c = 0.2983 + 0.0025 \cdot PI \quad (1)$$

그림 8은 소성지수가 15%와 45%인 경우 하중단계 3.2kg/cm^2 에서 1일, 2일, 4일, 8일로 각각 하중 재하기간을 달리하여 압밀한 결과를 시간과 침하량과의 관계로 나타낸 그림이다. 그림에서 1차 압밀 종료시간인 t_{100} 과 2차 압축지수가 하중 재하기간에 따라 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 하중재하기간이 길어지면 1차 압밀 종료시간이 지연되고 2차 압축지수가 작아져 2차 압밀 침하량 산정 시 작게 예측이 될 수 있음을 알 수 있다.

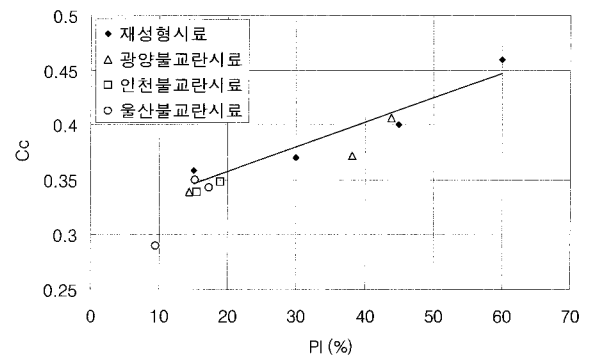


그림 7. 소성지수와 압축지수관계 곡선

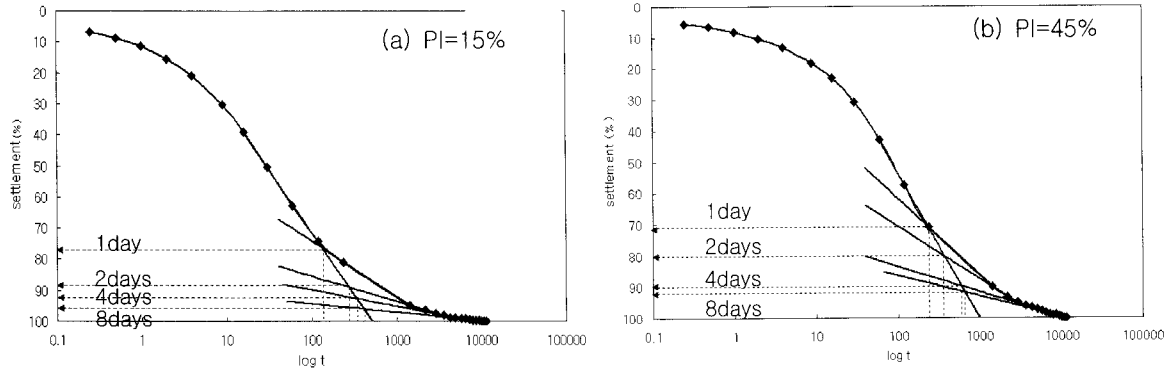


그림 8. 재하기간과 t_{100} 의 관계

4.2 2차 압축지수 특성

그림 9는 각각의 하중단계에서 2차 압축지수와 소성 지수와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 선형적인 관계가 있음을 확인할 수 있어 2차 압축지수를 소성지수와 하중의 관계로 정식화하기 위해 다중 회귀분석을 수행하였다. 그 결과 모든 자료를 이용하여 정식화 한 경우는 식 (2)와 같으며 상관계수가 0.61로 신뢰성이 다소 불확실하다. 그러나 초기하중 0.1 Kgf/cm^2

와 0.2 Kgf/cm^2 을 제외한 정규압밀영역만의 값을 이용하여 정식화하면 식 (3)과 같으며 상관계수가 0.84로 실용상 유용할 것으로 생각된다.

$$C_a = 0.0570 + 0.0036PI - 0.007P \quad (R = 0.61) \quad (2)$$

$$C_a = 0.1134 + 0.0035PI - 0.013P \quad (R = 0.84) \quad (3)$$

그림 10은 재하기간에 따른 2차 압축지수의 변화를 나타낸 그림으로 각 하중단계의 재하기간이 1일인 경우보다 8일인 경우의 2차 압축지수의 변화가 약 3-5배 정도 작게 나타나고 있다. 이는 하중재하기간이 길어지면 1차 압밀 종료시간이 지연되고 2차 압축지수가 작아지기 때문이다. 그리고 하중재하기간이 긴 경우 2차 압축지수는 작아지고 이는 곧 침하량 계산 시 압밀 침하량이 과소평가 되는 것을 의미한다. 그리고 소성지수가 큰 경우가 작은 경우에 비해 2차 압축지수가 약간 크게 나타나는 경향이 있다. 선행압밀하중 전의 2차 압축지수의 변화는 하중이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이나 선행압밀하중 이후의 하중에서는 하중이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다.

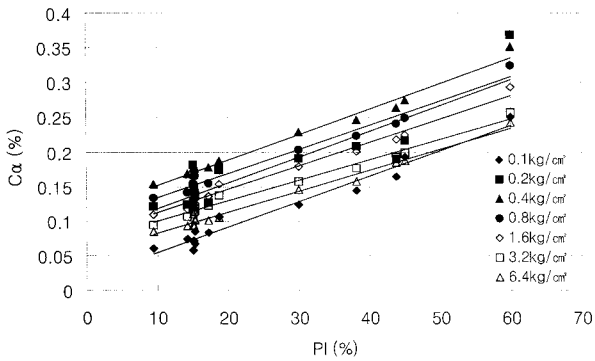


그림 9. 하중변화에 따른 2차 압축지수와 소성지수의 관계

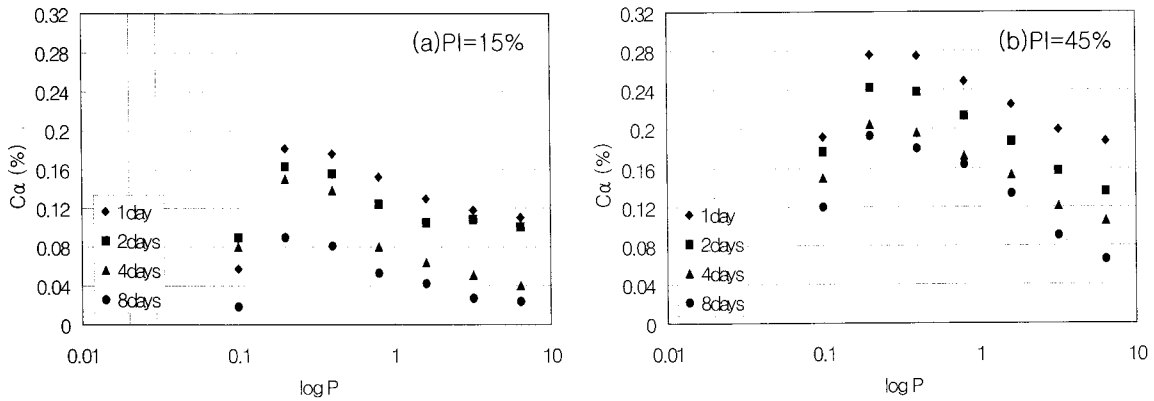


그림 10. 재하기간에 따른 2차 압축지수의 변화

그림 11은 각각의 하중단계에서 압밀재하기간이 1일과 8일에 대한 소성지수변화에 따른 2차 압축지수와 하중과의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난바와 같이 소성지수가 증가함에 따라 두 경우 모두 2차 압축지수가 증가하는 경향을 보이고 있다. 그리고 선행압밀하중 전인 과압밀 영역에서의 2차 압축지수는 하중이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이거나 선행압밀하중 이후의 하중에서는 반대의 경향을 보이고 있다.

그림 12는 하중재하기간을 달리하여 얻은 2차 압축지수를 이용하여 각각의 하중재하기간별 침하량을 예측하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난바와 같이 Terzaghi에 의한 탄성이론식에 의한 예측치는 간극수의 배출에 의한 1차 압밀과정은 잘 일치하는 경향을 보이고 있으나 2차 압밀과정을 설명하지 못하고 있다. 그리고 하중재하기간을 각기 달리하여 얻은 2차 압축지수를 이용하여 얻은 압밀침하량은 하중재하기간이 1일인 경우의 2차 압축지수를 이용하여 구한 압밀침하량이 시험결과와 가장 일치하는 것을 알 수 있으며 이는 寺田邦雄(2000)의 연구 결과와도 일치하고 있다. 또한 소성지수가 변화하여도 같은 경향을 보이고 있음을 확인 할 수 있었다.

4.3 간극수압 특성

압밀 이론에서 1차 압밀의 종료는 과잉간극수압이 모두 소산된 시점으로 정의한다. 통상의 1차 압밀 종료시간의 결정방법은 \sqrt{t} 법과 $\log t$ 법이 가장 많이 이용되고 있다. 2차 압축지수는 침하량 산정에 중요한 변수임에도 불구하고 결정방법이 명확히 정의 되지 않아 단계별 하중재하기간을 8일로 하는 경우도 종종 있어 2차 압축지수 결정에 재하기간이 어떠한 영향이 있는지 검증하고 간극수압이 완전히 소산되는 시간을 알아보기 위해 압밀 중 간극수압을 측정하였다. 그림 13은 시간에 따른 침하량 곡선과 간극수압비의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 과잉간극수압은 가해진 하중의 80~85%가 발생한 것을 볼 수 있다. 이는 시료에 존재하는 가스가 시료와 링의 벽면 마찰을 유발하여 재하중의 80~85%의 과잉간극수압이 발생한다고 보고한 Crawford (1964)의 실내압밀시험의 결과와도 유사한 경향을 보이고 있다. 그리고 소성지수가 작은 경우가 큰 경우보다 최고점에 도달하는 시간이 더 지연되는 것을 볼 수 있다. 이는 소성지수가 작을수록 투수계수가 작아지며 이로 인

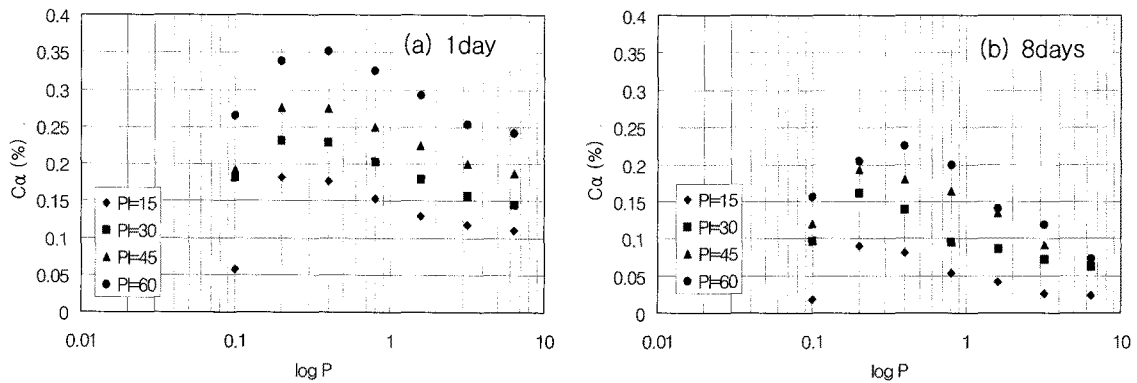


그림 11. 소성지수에 따른 2차 압축지수 관계

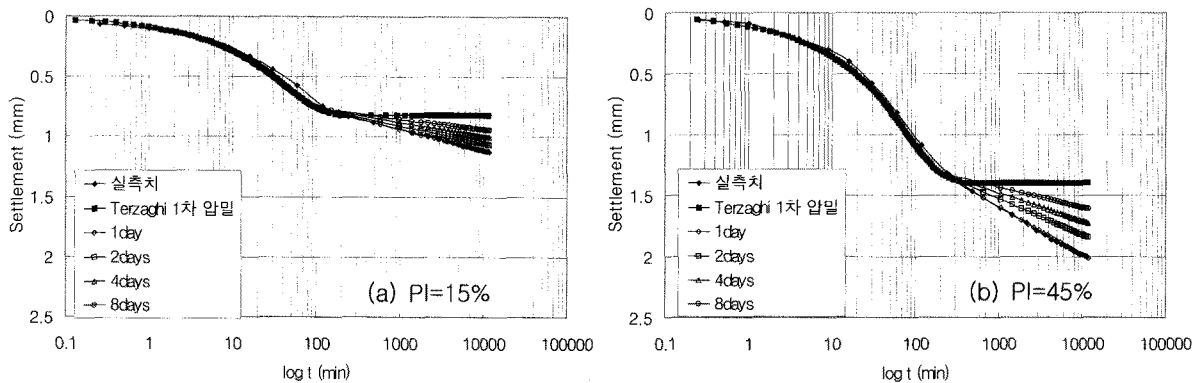


그림 12. 하중 재하기간에 따른 시간-침하량 예측

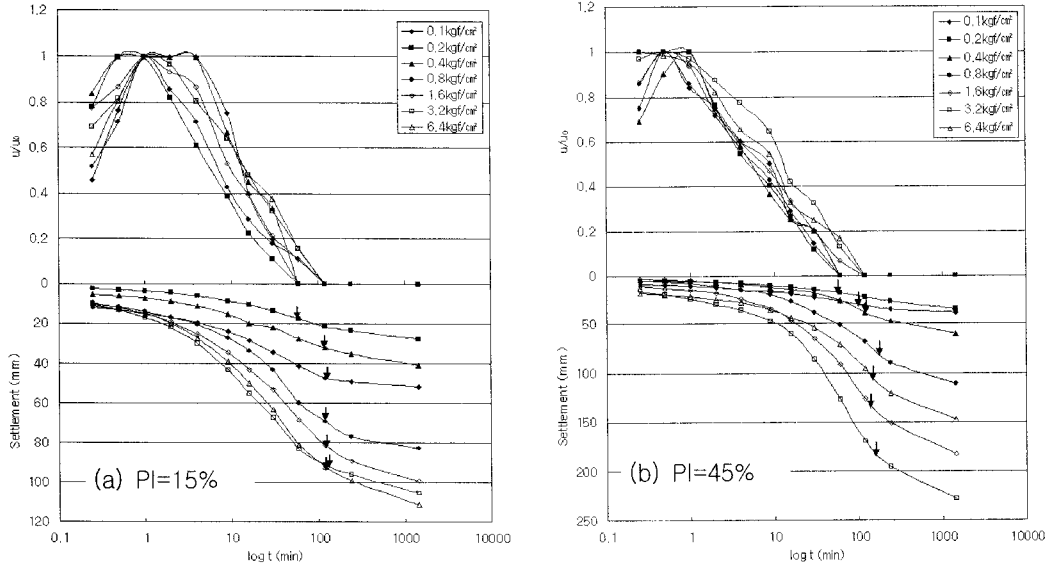


그림 13. 간극수압 비 및 침하량 관계

해 시료에서 빠져나가는 간극수압이 최고점까지 도달하는데 걸리는 시간이 늦어지는 것을 알 수 있다.

또한 과잉간극수압이 모두 소산되는 시간과 침하량-시간곡선을 이용해서 구한 1차 압밀 종료시간을 살펴보면 화살표로 표시한 1차 압밀 종료시점과 과잉간극수압이 완전히 소산된 시점이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 그리고 앞에서 언급한바와 같이 하중재하기간이 길수록 2차 압축지수는 작게 나타나므로 이를 이용하여 최종 침하량을 예측한다면 실제 침하량보다 작게 예측될 것이다. 그러므로 2차 압축지수를 산정할 경우 하중재하기간 1일의 압밀시험을 통해 2차 압축지수를 얻는 것이 가장 합리적이다.

4.4 C_a/C_c 의 관계

C_a/C_c 개념은 특정지반의 일정한 C_a/C_c 와 $e-\log P$ 곡선의 이차압밀 거동을 정의한 것으로 이는 압밀시험으로부터 이차압밀량 산정과 데이터 해석에 유용한 역할을 한다. Mesri와 Godlewski(1977)는 C_a 와 C_c 사이의 관계에 대한 연구를 통하여 1차 압밀과 2차 압밀은 동일한 메커니즘에 기인한다고 결론지었다. 따라서 C_a/C_c 의 개념을 제안하였으며 특정한 흙에 대하여 시간, 유효응력, 간극비에 관계없이 일정하다고 결론지었다. 그림 14는 소성지수의 변화에 따른 C_a/C_c 의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 소성지수의 변화 또한 일정한 기울기를 갖는 것을 알 수 있는데 이는 일정 하중에 대해서는 소성지수가 변한다 하더라도 C_a/C_c 는

일정하다는 것을 볼 수 있다.

그림 15는 본 연구에서 수행한 여러 경우의 압축지수와 이차압축지수의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 선형의 관계를 보이고 있어 선형회귀분

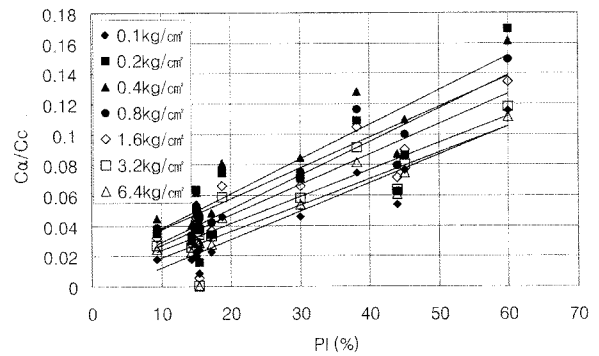


그림 14. 소성지수와 C_a/C_c 의 관계

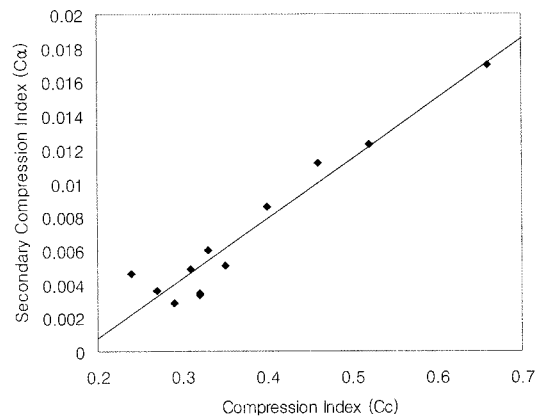


그림 15. C_c 에 따른 C_a 의 관계

석을 수행한 결과 C_u/C_c 는 0.0356로 나타났다. 남해안 해성점토에 대한 C_u/C_c 는 0.0397이라고 김(1999) 등에 의해 보고된 바와도 유사한 값을 나타내며 Mesri와 Castro(1987)가 제안한 비유기질 점토에 대한 C_u/C_c 값 0.040 ± 0.01 과도 유사한 결과를 나타낸다.

4.5 압밀계수 특성

그림 16은 각각의 하중단계에서의 압밀계수와 소성지수와의 관계를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 다소 선형적인 관계가 있음을 확인할 수 있어 압밀계수를 소성지수와 하중의 관계로 정식화하기 위해 다중회귀분석을 수행하였다. 그 결과 모든 자료를 이용하여 정식화 한 경우는 식 (4)와 같으며 상관계수는 0.68로서 다소 큰 오차를 갖는다. 그러나 과압밀 영역인 초기 하중 0.1kg/cm^2 과 0.2kg/cm^2 을 제외하고 정식화하면 식 (5)와 같으며 0.80의 상관계수를 가지므로 실용적으로 유용할 것으로 생각된다.

$$C_v = 0.0157 - 0.0001PI - 0.001P \quad (R = 0.68) \quad (4)$$

$$C_v = 0.0135 - 0.0001PI - 0.001P \quad (R = 0.80) \quad (5)$$

그림 17은 각각의 단계별 하중 재하기간을 1일, 2일, 4일, 8일로 각각 달리하여 재하기간의 변화에 따라 압밀계수의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난바와 같이 각각의 소성지수에서 각 단계하중의 재하기간이 1일인 경우의 압밀계수가 8일인 경우의 압밀계수보다 약 5배 정도 큰 경향을 보이고 있다.

또한 일반적으로 압밀계수를 결정하기 위해서 $\log t$ 법(Casagrande 방법)과 \sqrt{t} 법(Taylor 방법)의 도해법이 사용된다. 그러나 이들 방법은 시간-간극비 곡선이 도해법으로 추정하기 힘든 모양을 나타낼 경우에는 적용시키기 어렵다. Taylor 방법은 시간-간극비 곡선에서 도시

되는 선이 매우 작은 각으로부터 결정됨에 따른 오차, Casagrande 방법은 \log 축척으로 인해 생기는 오차 등을 가지게 된다. 두 종류의 도해법에 의한 결과를 비교해 보면 Casagrande의 방법이 Taylor의 방법에 비해 과대평가 되는 것을 알 수 있다. 그림 18은 Casagrande 방법에 의한 c_v 가 Taylor 방법에 의한 c_v 보다 작게 예측되는 것을 나타내는데 이는 Olson(1986)의 연구 결과와도 일치한다.

Casagrande의 방법과 Taylor의 방법으로 구한 압밀계

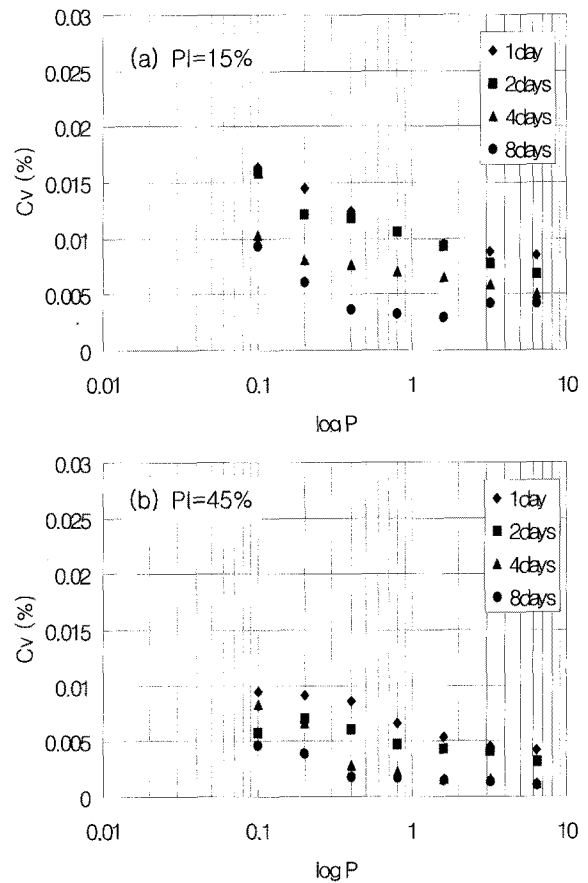


그림 17. 재하기간에 따른 압밀계수의 변화

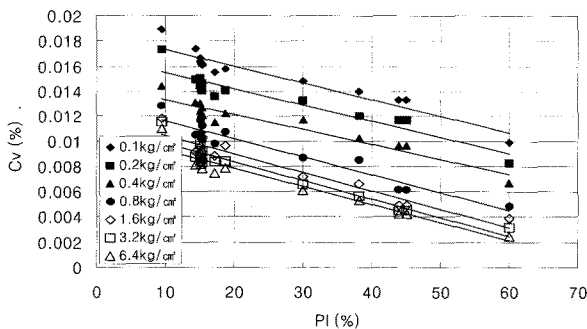


그림 16. 하중변화에 따른 압밀계수와 소성지수의 관계

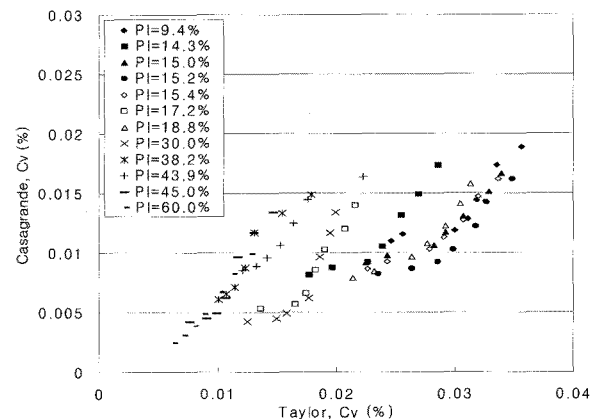


그림 18. Casagrande 방법과 Taylor 방법의 비교

수가 어느 정도의 차이가 있는지를 밝히고 이를 하나의 통일된 식으로 정식화하여 시험방법에 의한 압밀계수의 차를 없애고자 Casagrande의 방법을 이용한 $c_v(\log t)$ 을 소성지수와 Taylor 방법을 이용한 $c_v(\sqrt{t})$ 의 관계식으로 식 (6)과 같이 정식화하였다. 이 식의 상관계수는 0.94로 매우 양호한 상관성을 보이고 있다.

$$c_v(\log t) = 0.06904 + 0.000042PI - 0.79024c_v(\sqrt{t}) \quad (6)$$

(R = 0.94)

4.6 침하 예측

탄성압밀이론에 의한 압밀침하량의 계산은 연약 점성토층에 압밀하중이 재하 되었을 때 가장 간편하게 압밀침하량을 예측하는 방법이지만 2차 압밀 특성을 설명

할 수 없는 한계성을 갖고 있다. 그러므로 Terzaghi에 의한 1차 압밀침하 식에 2차 압밀 침하를 포함한 식 (7)을 이용하여 모형지반의 압밀침하를 예측하고 박 등(1985)에 의해 개발된 탄소성 구성모델인 Cam-clay모델과 크리프 특성을 포함한 탄·점소성 구성모델인 Sekiguchi모델을 이용한 유한요소 프로그램을 이용하여 수치해석을 실시하여 각각의 해석방법의 실용성을 검토하였다.

$$S = \frac{C_c}{1+e_0} \times H \times \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} + \frac{C_\alpha}{1+e_0} \times H \times \log \frac{t_p + \Delta t}{t_p} \quad (7)$$

수치해석에 사용된 각각의 토질정수들은 앞서 시행된 재성형 시료 및 불교란 시료의 표준압밀시험과 삼축 압축시험을 통하여 실험실에서 구한 정수들을 사용하

표 2. 수치해석에 사용된 토질정수

소성지수	15%	45%
λ	0.1826	0.2217
κ	0.0139	0.0219
M	0.73	0.66
C_α	0.0065	0.0169
$\sigma'_v(P_c)$	0.50	0.50
e_0	0.997	0.988
λ_k (투수계수)	8.79E-08	4.16E-07

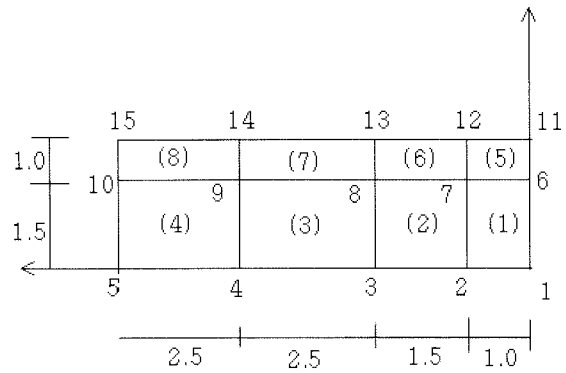


그림 19. 유한요소 망

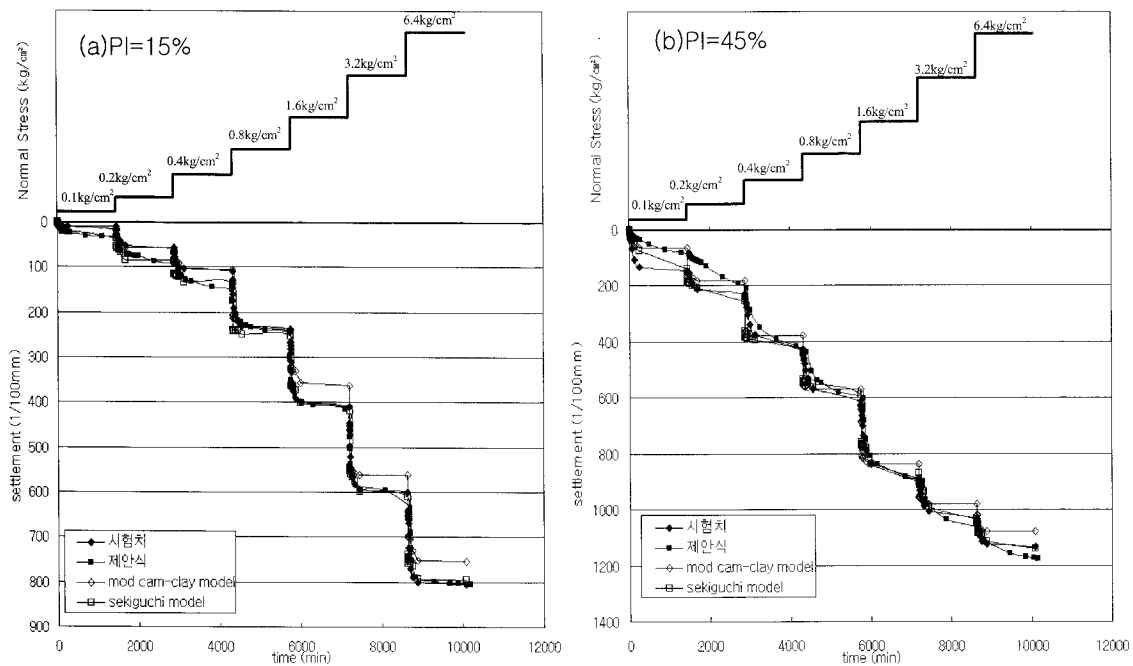


그림 20. 하중재하에 따른 시간-침하량 관계

였으며 각 소성지수별 수치해석에서 사용한 토질정수를 표 2에 나타내었다. 또한 수치해석을 위한 모형시험은 직경 150mm, 높이 50mm인 압밀시험기를 이용하여 압밀시험을 수행하였으며 이를 수치해석하기 위해 그림 19와 같이 시료를 4등분하여 축대칭조건의 유한요소망으로 해석하였다.

그림 20은 탄·점소성 모델인 Sekiguchi 모델, 탄·소성 모델인 수정 Cam-clay 모델 그리고 본 연구에서 제안한 제안식을 사용하여 수치해석한 결과를 압밀시험 결과와 비교하여 나타내었다.

그림에 나타난바와 같이 수정 Cam-clay 모델을 이용한 결과는 Sekiguchi 모델을 이용하여 해석한 결과와 달리 2차 압밀인 크리프의 영향을 고려하지 않으므로 곡선의 개형이 직선의 형태로 나타나고 있으며 최종침하량 역시 시험치와 다소 상이한 경향을 보이고 있다. 그리고 제안식의 침하량 예측은 과압밀 영역에서는 다소 시험치와 차이를 보이나 정규압밀 영역에서는 매우 유사한 선형을 보이고 최종침하량은 매우 잘 일치하는 것으로 보인다. 또한 크리프의 영향을 고려한 탄·점소성 모델인 Sekiguchi 모델은 모든 경우 시험치와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그러므로 본 연구에서 제안한 제안식은 설계 초기인 기본설계 시 개략적인 침하량을 산정할 때 매우 유용할 것으로 사료되며 정도 높은 압밀침하량을 얻을 때는 탄·점소성 모델인 Sekiguchi 모델을 이용함이 바람직할 것이다.

5. 결론

본 연구는 소성지수를 달리한 재성형 시료와 인천, 광양, 울산지역의 불교란 시료에 대한 표준압밀시험을 수행하여 소성지수와 압밀하중재하기간이 2차 압밀에 어떤 영향이 있는지를 밝히고, 각 소성지수에 따른 하중과 침하특성, 압밀계수특성, 압축지수 및 2차 압축지수특성, 간극수압특성을 밝히고자 하였다.

그리고 압축지수, 압밀계수, 2차 압축지수 등을 소성지수와 하중의 관계식으로 한 제안식의 유용성을 검증하고자 탄소성 구성모델인 수정 Cam-Clay 모델과 탄·점소성모델인 Sekiguchi 모델을 이용하여 수치해석한 결과와 비교하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압밀계수와 2차 압축지수를 소성지수와 선행하중이후의 하중관계로 정식화한 결과 $C_v = 0.0135 - 0.0001PI$

$- 0.001P$ 와 $C_\alpha = 0.1134 + 0.0035PI - 0.013P$ 를 얻었다.

- (2) 압축지수는 소성지수가 증가함에 따라 선형적으로 증가하며 이 관계를 정식화하면 $C_c = 0.2983 + 0.0025 \cdot PI$ 이고, 일정 하중에 대해서는 소성지수가 변한다 하더라도 C_u/C_c 는 0.0356으로 일정하다.
- (3) 과잉간극수압은 가해진 하중의 80~85%가 발생한 것을 볼 수 있으며 소성지수가 작은 경우가 큰 경우보다 최고점에 도달하는 시간이 더 지연되는 것을 볼 수 있다.
- (4) 하중 재하시간을 달리 재하 한 경우 과잉간극수압의 완전 소산 시간과 1차 압밀 종료 시간은 하중 재하 시간이 1일인 경우가 가장 잘 일치한다. 그러므로 2차 압축지수는 재하기간 1일에서 얻은 값을 사용하는 것이 가장 합리적이다.
- (5) 압밀계수 결정시 $\log t$ 법은 \sqrt{t} 법 보다 과대평가되는 것을 알 수 있으며, 이 식을 정식화하면 $c_v(\log t) = 0.06904 + 0.000042PI - 0.79024c_v(\sqrt{t})$ 이다.
- (6) 정식화한 식을 이용한 Terzaghi의 1차원 압밀식의 유용성을 비교 검증하기 위하여 수정 Cam-Clay 모델과 Sekiguchi 모델을 이용하여 모형시험 결과를 예측한 결과 Sekiguchi 모델과 함께 매우 정도 높게 예측하고 있음을 확인 할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 건설교통부 건설핵심기술 연구개발사업 친환경·지능형 도로설계 기술개발 연구단('05~'10)의 친환경·지능형 도로설계 및 평가시스템 개발(제 1세부 과제) 연구결과와 일부입니다.

참고 문헌

1. 김규선, 임형덕, 이우진 (1999), "실내압밀시험에 의한 남해안 해성점토의 C_u/C_c ", *한국지반공학회지*, 제15권, 제6호, pp.87-96.
2. 박병기, 정진섭, 강병선 (1985), "북한연약지반의 변형해석에 관한 수치해석", *대한토목학회지*, 제1권, 제2호, pp.27-39.
3. 吉國 洋 (1972), "三次元圧密の基理論", *土木學會論文集*, 第201号, pp.89.
4. 寺田邦雄 (2000), "二次圧密を考慮した圧密沈下計算方法の提案(2)", 第35回地盤工学回研究発表会, 発表論文集, pp.729-730.
5. 日本地盤工学会 (1990), *土質試験の方法と解説*, pp.289-308.
6. Biot, M. A. (1941), "General Theory of Three-dimensional Consolidation", *Journal Appl. Phys.*, pp.12-155.
7. Crawford, C. B. (1964), "Interpretation of the Consolidation Test", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*,

Vol.90. No.SM5, pp.87-102.

8. Mesri, G. and Codlewski, P. M. (1977), "Time and stress compressibility interrelationship", *Journal of Geotech. Eng. Div.*, ASCE 103, No.GT5, pp.417-430.
9. Mesri, G. and Castro, A. (1987), "The Concept and During Secondary Compression", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 113, No.GT3, pp.230-247.
10. Murayama, S. and T. Shibata (1958), "Rheological Properties of Clays", *Proc. 5th Int. Conf. Soil mech.*, pp.1-269.
11. Ohta, H., S. Yoshitani and S. Hata (1975), "Anisotropic Stress-Strain relationship of Clay and its Application to Finite Element Analysis", *Soil and Foundations*, Vol.15, No.4, pp.61-78.
12. Schiffman, R. L. and Gibson. R. E. (1964), "Consolidation of Non-homogeneous Clay Layers", *Proc. ASCE*. 90-SM. 5-1.
13. Sekiguchi, H., and Ohta, H.C. (1977), "Induced Anisotropy and Time Dependency in Clay", *Proc. Speciality Session 9, 9th ICSMFE*, Tokyo, pp.229-238.
14. Yasuhara, K., Yamanouchi, T. and Ue, S. (1983), "Secondary Compression of Clay in Consolidation and Undrained Shear Tests", *Proc. Int. Symp. Recent Development in Lab. & Field Tests and Analysis of Geotechnical Problems*, pp.361-374.
15. Olson, R. E. (1986), "State of the Art: Consolidation Testing", *Proceeding of Consolidation of soils: Testing and Evaluation*, ASTM STP 892, pp.7-70.

(접수일자 2008. 4. 30, 심사완료일 2008. 7. 23)