

연약지반 압밀 침하량 예측 이론 적용의 허와 실

Truth and Untruth of Consolidation Settlement Prediction Theory Applied to Soft Clay

이승래, Seung Rae Lee

KAIST 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, KAIST

1. 서론

연약지반 압밀 침하량 예측 이론과 관련된 연구는 1920년대부터 Terzaghi에 의해 처음 시작된 이래로 매우 오랫동안 활발히 수행되어 왔다. 당시에는 이론적인 해를 구하기 위한 컴퓨터 수치해석이 아직 발달되지 못한 연유로 실제와는 다소 거리가 있는 가정들과 매우 이상적인 초기 조건 및 경계조건들을 바탕으로 이론적인 해를 구할 수밖에 없었다. 이후 매우 눈부실만한 수치해석 방법의 발달로 보다 현실적인 상황을 이론적으로 고려하기 시작하여 현재는 연약지반 압밀 침하량을 예측하기 위한 많은 해석적 방법이 이용되고 있다.

그럼에도 불구하고 실제 현장에서 유발되는 압밀 침하량과 이의 시간적인 변화량 예측은 아직까지 다소 실망적인 결과를 초래하고 있는 실정이다. 이로 인해 최근에는 거의 모든 연약지반과 관련된 공사에서 예측 등을 통해 이러한 이론적인 예측방법의 단점을 보완하고자 하는 노력이 병행되고 있다. 심지어는 이론적인 토대를 거의 무시한 채 단순히 계측된 자료만을 가지고 모든 결과를 판단하기에 이르렀다. 하지만 얻어진 계측 결과들이 특히 이론적으로 예측된 결과와 상이한 경우 이를 면밀히 분석하고 검토하지 않은 채 단순한 결론에 도달하는 경우에는 그 결과에 대한 타당성을 잃어버릴 수 있을 뿐 아니라 다른 현장의 경우 적용할 수 없는 매우 피상적인 결과만을 얻고 끝나는, 그럼으로 인해 때론 기본적인 이론적 결과마저 뒤흔들어 놓는 결과를 초래할 수 있다.

이에 본 토론에서는 이러한 추세에 대한 위험성을 간과할 수 없어 다시금 이론적인 배경에 충실하고자 하였다. 그리고 이를 바탕으로 어떠한 요인으로 인해 이론적으로 예측한 결과와 다른 현장 실측 결과가 나타날 수 있는지를 몇 가지 살펴봄으로써 단순한 결과 도출에 그치지 않고 지반공학자가 반드시 갖추어야 할 결과에 대한 분석력 향상에 다소나마 도움을 주고자 하는 것이 본 토론의 목적이다.

2. 최종 압밀 침하량

실제 현장에서 빈번히 유발될 수 있는 2차원 또는 3차원적인 응력 변화에 의해 유발되는 침하량 예측은 단순한 체적변화만을 고려하는 1차원적인 압밀 침하량 예측에 비해 전단 거동 또한 포함하므로 훨씬 복잡한 문제로 대두된다. 따라서 실제의 이러한 조건을 단순히 1차원적인 상황으로 가정하여 주어진 현장 연약지반의 압밀 침하량을 예측하는 경우, 이는 실제와 다른 침하량이 예측되는 결과를 초래하는 요인 중의 하나이다. 그럼에도 불구하고 본 토론에서는 이에 대한 논의보다 1차원적인 압밀 침하량을 예측하는 경우에도 현장 상황의 경우 많은 불확실성을 포함할 수 있으므로 이에 한정하여 논의하고자 한다. 따라서 두께 H 를 갖는 연약지반 층에 $\Delta\sigma$ 의 응력 변화가 모든 연약지반 층 내에 일정하게 변화하는 경우에 대한 경우로 한정한다.

이 때 유발되는 최종 압밀 침하량은 식 (1) 또는 식 (2)에 의해 산정될 수 있다.

$$S_f = \Delta H = \frac{\Delta e}{1+e} H \quad (1)$$

$$S_f = m_v H \Delta \sigma \quad (2)$$

과압밀 점토의 경우에는 비교적 m_v 의 값이 일정하다고 가정할 수 있으므로 대상 과압밀 점토지반의 m_v 값만 대표성을 가지고 잘 추정된다면 식 (2)를 이용하여 최종 압밀 침하량을 합리적으로 예측하는 것이 가능하다. 이때 과압밀 점토지반의 층 두께 H 와 응력변화 $\Delta \sigma$ 는 비교적 용이하게 예측이 가능하다.

반면 정규압밀 연약지반의 경우 m_v 는 응력 수준에 따라 비선형적으로 변하므로 이때에는 식 (1)을 이용하여 다음의 Δe 를 추정하여 적용함으로써 최종 압밀 침하량 예측이 이루어질 수 있다.

$$\Delta e = C_c \text{ or } C_r \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma'_0} \right) \quad (3)$$

이때에는 선형적으로 가정된 압축계수(또는 재압축계수)의 합리적인 추정 외에도 압밀 과정에서 계속적으로 변화하는 공극비와 층 두께를 어떻게 고려하여 적용할 것인지와 현장 지반의 대표할 수 있는 초기 유효응력을 어떻게 적용할 것인가 또한 최종 압밀 침하량 예측에 영향을 미치게 된다.

이 이외에도 연약 점토지반의 경우 2차 또는 매우 유기질이 많은 경우 3차 압밀 특성을 가지게 되므로 이 또한 고려할 필요가 있다. 3차 압밀 특성은 차치하고라도 최종 2차 압밀 침하량의 경우에는 실제로는 1차 압밀 과정에서도 복합적으로 유발되지만 종종 1차 압밀과는 독립적으로 유발된다고 가정하여 산정하는 것이 통상적이다.

$$S_s = C_\alpha \log \left(\frac{t_0 + \Delta t}{t_0} \right) \quad (4)$$

이때 t_0 는 통상적으로 1차 압밀이 완료되는 시점을 기준으로 한다. 하지만 실제로는 2차 압밀이 1차 압밀과 동시에 유발되므로 이를 고려하여 t_0 를 기준시간(통상적으로 1)을 적용하여 산정하기도 한다.

이와 같이 비교적 간단하게 구해지는 1차 압밀 침하량 또는 2차 압밀 침하량의 경우에도 실제 관련된 지반 변수들의 적용에 따라 예측 결과가 달라질 수 있으므로 이를 명확히 기술하는 것이 필요하고 더욱이 예측된 침하량이 실제 관측된 침하량과 다른 경우에는 이들 요인들 중 무엇이 잘못되어 그러한 결과가 도출되었는지를 명확히 분석함으로써 차후 보다 나은 예측 결과를 얻는데 필요한 경험을 축적하는 것이 매우 중요하다. 즉 관련된 지반 변수들이 주변 조건의 변화에 따라 변하는 경우 이를 합리적으로 고려하는 것이 필요하다.

3. 시간에 따른 압밀 침하량

시간에 따른 압밀 침하량 예측은 최종 압밀 침하량 예측보다 훨씬 복잡하고 어려운 문제를 야기한다. 이에 대한 최초의 연구는 Terzaghi에 의해 시작되었고 이에 대한 해는 현재도 특히 배수재가 설치되지 않은 연약지반의 경우에는 빈번히 적용되고 있다. 하지만 얻어진 해는 가정된 사항과 적용된 초기 조건 및 경계 조건에 따라 영향을 받으므로 적용하는 해에 적용된 가정 사항과 초기 조건 및 경계 조건이 달라지는 경우에는 이의 적용성이 떨어진다. 따라서 Terzaghi 압밀 이론식에서 고려된 가정 사항과는 다른 조건을 가진 지반에 적용하고는 단순히 예측된 거동이 관측된 거동과 다르다는 이유만으로 그 적용성을 과소평가하는 것은 바람직하지 못하다.

배수재가 설치된 연약지반의 시간에 따른 압밀 침하량 예측 시 적용되는 Hansbo 등이 제안한 식 또한 기본적으로는 Terzaghi에 의해 가정된 사항들을 바탕으로 유도되었으므로 변형이 많이 유발되어 관련된 지반 변수들이 지속적으로 변화하는 경우와 초기 조건 및 경계 조건이 다른 경우에는 그 적용성이 떨어질 수밖에 없다.

특히 실제 현장에서 관측된 결과에 의하면 초기에 유발되는 시간에 따른 압밀 침하량의 형상은 일반적으로 적용되는 압밀 침하량 산정 이론식으로부터 예측되는 형상과 매우 다른 형상을 지닌다. 이는 실제 현장에서의 시간에 따라 작용되는 응력변화를 이론식들이 고려하지 못하기 때문이며 이는 Taylor에 의해 처음 개념적으로 제안된 방법으로 비교적 용이하게 보정된 침하 형상을 얻는 것이 가능하다.

이러한 초기의 이론과는 다소 다른 압밀 특성 과정을 지나면 대부분 정규압밀 연약 점토지반에서 유발되는 이론적인 형상과 유사한 형상을 실제 관측 결과들이 나타내는 경우가 대부분이다. 하지만 때로는 이론적으로 예상되는 쌍곡선 형상이나 반 대수 관계와는 전혀 다른 형상을 나타내는 경우도 있다. 따라서 이러한 경우에는 초기에 관측된 결과를 이용하여 다른 곡선 맞춤식을 적용한 후 그 이후의 침하량을 예측하는 많은 곡선식들을 제안하여 왔다. 그러나 이론적으로 나타나는 곡선 형태와는 다른 형상이 나타나는 이유를 분석하지 않은 채 단순히 잘 맞는 다른 곡선 맞춤식을 제안하여 적용하는 것이 때론 매우 그릇된 결과를 초래할 수도 있으므로 반드시 그러한 차이는 이유에 대한 면밀한 검토와 분석이 병행될 필요가 있다.

뿐만 아니라 배수재가 설치되는 경우에는 배수재 설치로 인한 교란영역을 정확히 고려하기 힘든 조건이 내재되어 있고 배수재의 통수능 효과 또한 압밀 거동 특성에 영향을 주므로 실제 관측된 침하량 분석 시에 대한 고려 또한 필요하다. 그 외에도 원형을 가지지 않는 PVD의 경우에는 이론적으로 고려하는 배수재의 반경을 어떻게 적용할 것인가에 대한 합리적인 근거 또한 필요하다.

그리고 이러한 제안된 예측 방법들은 2차 압밀량을 고려하지 못하므로 실제 이를 고려하기 위해서는 다른 이론의 적용이 필요하다. 2차 압밀은 이론적으로 1차 압밀과 동시에 진행되므로 이들 침하량을 동시에 고려하는 방법을 적용하는 것이 이론적으로는 더 합리적이다. 따라서 이를 동시에 고려하기 위해 rheological 모델 등의 적용에 대한 연구가 비교적 활발히 진행되기도 하였다. 하지만 문제는 이러한 모델에 사용되는 2차 압밀과 관련된 모델 변수들이 실제 물리적인 의미를 상실하는 경우가 대부분이고 또 이들이 대부분 상수 값으로 결정될 수 없을 뿐 아니라 실험적으로 구하기도 매우 어려운 경우가 많아 최근에는 이들 모델의 적용성이 다소 떨어지고 있다.

따라서 대부분의 경우 1차 압밀과 2차 압밀을 독립적으로 고려하여 예상되는 압밀 침하량을 산정하는 방법이 선호되어 사용되고 있다. 그러나 산정은 독립적으로 하더라도 시간에 따른 침하량 계산 시 시간 단계마다 2차 압밀량 또한 고려하여 산정하는 것이 더 실제에 접근된 시간에 따른 침하량 예측이 가능해진다.

4. 결론

연약지반의 압밀 침하량 산정 문제는 오래 전부터 연약지반을 연구하는 연구자들에게는 해결하고 싶은 숙원 중의 하나이다. 그럼에도 불구하고 아직까지 그 해결방법은 손에 잡힐 듯이 다가와 있지 못하다. 아니 더욱 멀어지는 느낌마저 든다. 하지만 이론적인 배경이 든든한 상황에서 실제 관측되는 현상들을 어느 정도 명확히 분석할 수 있을 때만이 그 해결책이 가능하다고 믿는다. 아무리 어려운 예측 문제이지만 그렇다고 이론을 무시한 채 현상만을 가지고 접근하고자 할 때 그 해결은 점점 멀어져 갈 수 밖에 없다. 그러므로 우리 지반공학자들은 책임감을 가지고 가능한 모든 노력을 기울여 왜 이론적인 예측과는 다른 현상들이 나타나는가를 면밀히 분석하여야만 한다. 이것이 다른 공학자들이 하지 못하는 것을 할 수 있는 진정한 지반공학자들의 책임이고 그로 인해 지반공학자들의 위상이 높여질 것이다.