

# 연약지반 침하관리에 있어서 잔류 침하량에 대한 올바른 이해

김상규\*

연약 지반 상에 단지 조성을 할 때에는 단지 계획고를 정하고 이 계획고보다 더 높게 성토를 하여 원지반의 압밀을 촉진시킨다. 이것을 프리로딩(preloading) 공법이라고 하며, PBD와 같은 연직 배수재를 연약 지반에 삽입하면 압밀이 훨씬 더 촉진된다.

여기서는 계획고까지의 성토 하중과 공용 하중(포장, 교통하중 및 과재하중)을 포함하여 영구하중(permanent load,  $P_p$ )이라고 부르기로 한다. 압밀을 촉진시키기 위해 영구하중에 추가해서 가해주는 성토하중이 일시 재하중(surcharge,  $P_s$ )이다.

프리로딩(preloading)공법을 설계할 때에는 먼저 연약지반의 지반 정수(soil parameter)를 가지고 영구하중으로 인해 발생하는 시간 별 침하량을 계산하여 그림 1과 같이 침하곡선을 그려야 한다. 2차 압밀계수를 사용하면 2차 압밀까지 포함한 침하 곡선이 얻어질 수 있다. 여기서 설계자는 2차 압밀 침하량 발생을 30년( $t_{30}$ )까지로 할 것인지 50년( $t_{50}$ )으로 할 것인지 정해야 한다. 그러면 영구하중으로 인한

목표 침하량(그림 1에서  $\Delta H_f + \Delta H_{sc} + \Delta H_{sec}$ )이 결정된다. 그런데 이 침하량에 이르기까지는 너무나 오랜 시간이 소요됨으로 미리 하중을 추가로 가하면 공기가 훨씬 단축될 수 있다. 프리로딩의 설계는 이 목표 침하량에 차질 없이 도달하게끔 일시 재하중의 크기( $P_s$ )와 이의 제거 시기( $t_{SR}$ )를 결정하는 일이다. 이 하중의 제거 이후 목표 침하량까지 발생하는 침하량을 잔류 침하량(residual settlement,  $\Delta H_{res}$ )이라고 하며, 이 값을 얼마만치 허용할 것인가 하는 것이 허용 잔류 침하량(allowable residual

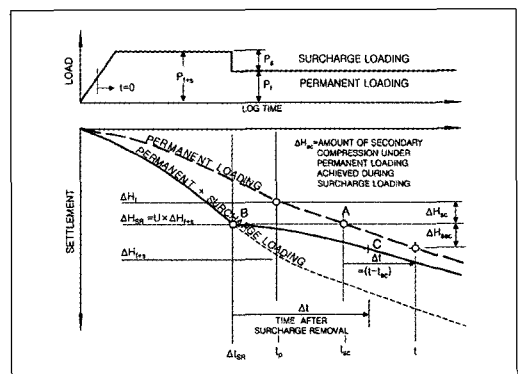


그림 1. 프리로딩 공법의 원리 (Johnson, 1968)

\* 동국대학교 명예교수(skkimgeo@kornet.net)

settlement)이다.

만일 실제 시공이 이 이론 곡선을 그대로 따른다면, 먼저 30년 또는 50년까지 발생하는 침하량 ( $t_{30}$  또는  $t_{50}$ )을 추정하고 잔류 침하량  $\Delta H_{ssc}$ 의 허용치를 결정하면 (예컨대 허용 침하량 = 30cm) 그림 1에서 A점이 결정될 수 있다. 이 점에서 수평방향으로 그은 선이 <영구하중+일시 재하중>의 침하곡선과 마주치는 B점에 대응하는  $t_{cr}$ 를 정하면 이것이 요구되는 일시 재하중 제거시기가 된다. 그러면 이것을 제거한 후의 실제침하는 BC로 표시한 실선을 따라 발생하며, B점에서 허용 침하량과 동일하게 점 (C점)을 찍어서 목표 침하량까지 이르는 시간  $\Delta t$ 를 알게 된다. 재하중 제거 후에는 침하는 실선을 따라 발생하므로, 실제로 목표 침하량까지 도달되는 시간은 영구하중에 대한 목표 침하량 도달 시간보다 짧다 (그림 1 참조). 다시 말하면,  $\Delta H_{cr} = \Delta H_r + \Delta H_{sc}$  이 되는 시점 (B점)에서 일시 재하중을 제거한다면 안전측의 침하관리가 된다.

그런데 실제 시공은 이론과 일치해서 진행되지 않는다. 실제 침하 거동은 압밀 이론과 꼭 일치하지 않을뿐더러 위치에 따라 지반의 특성이 조금씩 변하기 때문이다. 그러나 <영구 하중+일시 재하중>의 실제 침하 거동은 침하 계측기를 사용하여 거의 정확하게 추적할 수 있으므로 이의 측정 결과를 근거로 하여 침하관리를 하지 않을 수 없다. 계측이 어느 정도 진행된 단계에서는 계측 결과를 역산하여 압밀 정수 (압축비, 압축지수, 압밀계수)를 정하고 영구하중에 대한 압밀 곡선을 그릴 수 있다. 2차 압밀계수를 사용하여 2차 압밀곡선도 연결시킬 수 있다. 이렇게 수정된 곡선은 계측 결과를 이용하였으므로 실제와 가장 가깝다. 그러면, 이 침하 곡선들을 근거로 하여 위에 적은 방법대로 일시 재하중 제거 시기를 결정할

수 있다. 이것을 여기서는 편의상 “A” 방법이라고 부르기로 한다.

단지 조성을 하는데 있어서 현재 우리나라에서 관행적으로 행해지고 있는 잔류 침하량에 대한 계측관리 방법은 다음과 같다. 먼저 허용 잔류침하량을 10cm 또는 30cm로 정한다. 다음에는 계측한 결과를 가지고 쌍곡선 법, 아사오까 법과 같은 경험적 방법으로 최종 침하량을 추정하여 현 시점까지 측정된 침하량과의 차이를 잔류 침하량으로 정한다 (실제로는 이 값은 영구하중의 잔류 침하량이 아니다). 이 차이를 지속적으로 추적하면서 허용 잔류 침하량 이내가 되면 일시 재하중을 제거한다. 따라서 이 방법에 있어서는 최종 침하량을 기준하기 때문에 어느 경험식을 사용하여 이 값을 추정하는가 하는데 많은 관심을 가진다. 경험식에 따라 차이가 나기 때문이다. 여기서는 영구 하중으로 발생하는 2차 압밀 침하량에 대해서는 전혀 고려하지 않는다. 설명의 편의상 이것을 “B” 방법이라고 하기로 한다.

여기서 “B” 방법에 대한 문제점을 생각해 보기로 한다. 먼저, 잔류 침하량을 <영구하중+일시 재하중>에 의한 최종 침하량 ( $\Delta H_{fs}$ )을 기준하는 것은 영구 하중에 의한 잔류 침하량과는 무슨 관련이 있느냐 하는 것이다. 프리로오딩 공법은 <영구하중+일시 재하중>에 의해 1차 압밀침하량을 많이 발생시켜서 영구 하중에 의한 2차 압밀 침하량을 상당부분 소거시키는데 목적이 있다. 따라서 양자를 상관시켜 침하관리를 해야 하는데 이 방법은 그렇지 않은 것 같다.

지금 다음과 같은 예를 하나 들어보기로 하자 (그림 2 참조). 허용 잔류 침하량을 30cm로 정하고 공기에 맞게 압밀을 촉진시키기 위하여 일시 재하중을  $10t/m^2$  ( $P_{s1}=10t/m^2$ )과  $20t/m^2$  ( $P_{s2}=20t/m^2$ )의 두 가지 안을 마련했다고 가정한다. 이 두 가지 안에 대

## 연약지반 침하관리에 있어서 잔류 침하량에 대한 올바른 이해

한 각각의 침하곡선은 이 그림의 아래 부분에 나와 있다. 이 그림에서 일시 재하중이 클수록 1차 압밀 침하 곡선은 더 가파르게 그려진다는 것을 유의하면서 이에 대응하는 일시 재하중 제거시기를 “B” 방법으로 한다면, 각각 B점 ( $t_{SR1}$ ) 과 C점 ( $t_{SR2}$ )으로 정해진다. 그런데 이 그림을 자세히 보면, 더 큰 일시 재하중  $P_{S2}$ 의 하중 제거시기가 더 늦어진다는 것을 알 수 있을 것이다 (즉  $t_{SR1} > t_{SR2}$ ). 다시 말하면, “B” 방법으로 침하 관리를 하게 된다면 일시 재하중이 더 큰 경우 더 늦게까지 재하해야 하고, 반대로 일시 재하중이 더 작은 경우에는 더 일찍 재하중을 제거할 수 있다는 결론에 도달된다. 허용 침하량이 동일하다면 일시 재하중이 클수록 제거 시기는 빨라져야 하는데 이것은 분명히 논리상 모순이다. “B” 방법에서는 <영구하중+일시 재하중>의 최종 침하량을 기준하여 허용 잔류 침하량을 관리하기 때문에 이런 모순이 생기게 되는 것이다. 그런데 실제로는 두 경우에 대한 잔류 침하량을 감소시키는 효과는 B점과 C점의 침하량의 차이로 나타난다.

이 예에서 “A” 방법으로 침하 관리를 한다면,  $P_{S1} = 10t/m^2$ 에 대해서는 B점에서,  $P_{S2} = 20t/m^2$ 에 대해서

는 D점에서 각각 이들에 대응하는 시간을 일시 재하중 제거 시기로 정하면 된다. 따라서 일시 재하중을 크게 할수록 재하중 제거 시기는 빨라진다는 것이 명백해진다. 이들 제거 시점은 “B” 방법에 따라 정한 재하중 제거 시기  $t_{SR1}$  및  $t_{SR2}$ 와 개념상 엄청나게 다르다는 사실을 알 수 있을 것이다.

또 하나의 예는 주어진 공기 내에 허용 잔류 침하량을 달성시킬 수가 없어서 공기 중간에 일시 재하중을 추가하는 경우이다. “B” 방법으로 잔류 침하량을 예측한 결과 40cm가 되었다고 가정한다. 허용치 30cm가 되기 위해서는 추가 하중이 요구되어  $10t/m^2$ 를 추가하기로 하고 이에 대한 침하곡선이 그림 3과 같이 그려졌다. 이 침하 곡선을 보고 알 수 있는 바와 같이 “B” 방법으로 침하 관리를 한다면 A점과 B점의 차이가 30cm로 줄어 들지 않고 오히려 40cm보다 더 커진다. 추가하중으로 인한 최종 침하량의 증가가 본래의 재하중 제거 시기의 침하량의 증가보다 상대적으로 더 커지기 때문이다.

이것을 “A” 방법으로 관리한다면 논리가 명확하다. 영구하중의 침하 곡선에서 잔류침하량  $\Delta H_{SC}$ 가 허용치 30cm를 초과한다고 판명되면  $t_{30}$ 점에서 위

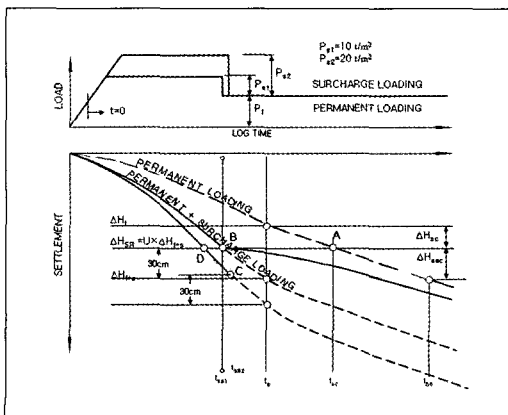


그림 2. 두 가지 다른 일시 재하중에 대한 침하 관리의 차이

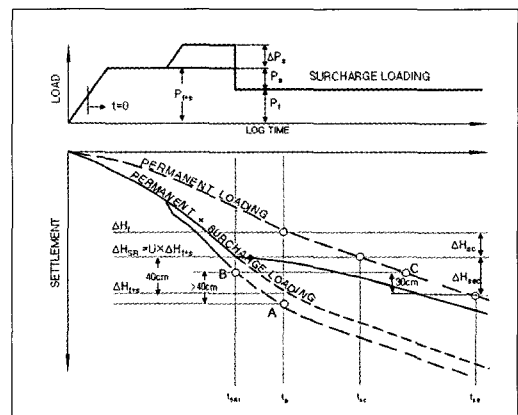


그림 3. 일시 재하중을 추가할 때의 침하관리

로 30cm되는 점 C를 찍고 수평선을 그어 B점을 정한다. 그러면 B점에 대응하는 침하가 발생되도록 추가 재하중을 결정하면 된다.

“A” 방법을 적용하는데 있어서는 2차 압밀계수 ( $C_{\alpha}$ )를 실험실에서 결정하거나 간접적인 방법으로라도 결정되어야 한다. 예컨대, 부산 신항의 2차 압밀계수는  $0.03C_c$ 라고 알려져 있으므로 (Kim et al., 2004), 이것을 공식에 대입하여 2차 압밀 침하량을 구하면,

$$S_s = C_{\alpha} H_p \Delta \log t = 0.03 \times 0.8 \times 30 \times \log 30 = 1.06m$$

가 된다. 여기서  $C_c = 0.8$ ,  $H_p = 30m$ ,  $t = 30$ 년으로 가정하였다. 이와 같은 계산을 근거로 하여 이 중 얼마만치 일시 재하중으로 압밀시킬 것인지 면밀히 검토되어야 한다. 위의 계산에서 허용침하량을 30cm로 정한다면 70cm 이상을 일시 재하중으로 침하시켜야 한다는 결론을 얻는다.

10여년 전에 매립이 완료된 녹산 단지의 경우 지금까지 침하가 발생되고 있어서 관심 기술자들은 장차 발생될 장기 침하를 우려하고 있다. 아직까지 낙

동강 하구 점토에 대해서는 이 부분에 대한 연구 업적은 대단히 미약하다. 간사이 공항의 경우에도 실제로는 계산보다 훨씬 더 크게 침하가 계속된다고 보고되고 있다 (Akai and Tanaka, 1999). 그림 4를 보면 계산상으로 2030년도에 예측되는 침하량이 이미 2000년도 이전에 발생했다는 사실을 알 수 있다. 이러한 국내의 경험을 바탕으로 앞으로 낙동강 하구에서의 매립단지 조성에 있어서는, 장기적인 침하를 고려하여 단지 조성에 대한 설계와 침하 관리를 합리적으로 하는 것이 중요하다.

여기서 우리 기술자들이 고민해야 할 부분은 영구하중의 침하량을 얼마나 실제와 맞게 예측할 수 있는냐 하는 것이다. 지금까지의 논의는 Terzaghi 이론을 근거로 설명하였지만, 특히 낙동강 하구처럼 대심도 연약지반에서는 “Hypothesis B”의 이론을 바탕으로 목표 침하량을 예측하는 것이 실제와 더 가깝다 (김, 2004, Yin, 2003).

연약지반 단지 조성에 대해 지금까지 논의한 것을 한마디로 요약하면, 영구하중에 의한 목표 침하량을 먼저 결정하고 이 값에서 허용침하량을 뺀 침하량에 도달될 수 있게끔 잔류침하량을 관리하면 된다. “B” 방법에서 말하는 잔류침하량은 일시 재하중의 크기는 물론 경험식의 적용에 따라 변화한다는 것을 알아야 한다. 2차 압밀 침하량을 전혀 고려하지 않고, <영구하중+일시 재하중>으로 발생한 침하량만으로 침하관리를 하는 “B” 방법은 더 이상 적용해서는 안 된다는 것을 여기서 강조하고 이 글을 맺는다.

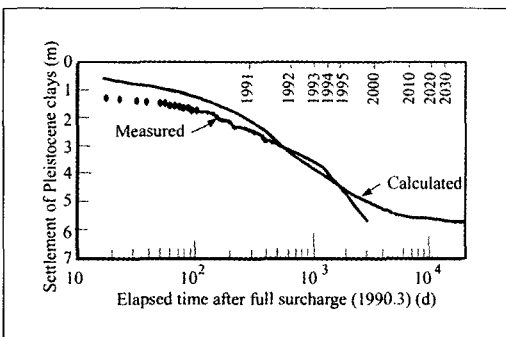


그림 4. 간사이 공항 N 2-1에서 측정한 실제 침하량과 계산치와의 비교 (Akai and Tanaka, 1999)

### 참고 문헌

1. 김윤태, 권용규, 박영목 (2004). 배수제가 설치된 연약지

## 연약지반 침하관리에 있어서 잔류 침하량에 대한 올바른 이해

- 반의 2차 압축을 고려한 축대층 비선형 압밀해석, 연약지반상의 지반공학적 문제와 시공사례, ATC-7 Symposium: 57-67.
2. Akai, K and Tanaka, Y. (1999). Settlement behavior of offshore airport KIA, Proc., 12th European Conf., on SMGE, Amsterdam, 2: 1041-1046.
3. Johnson, S. J. (1968). Preconsolidation for improving foundation soils, Placement and Improvement of Soils to Support Structures, ASCE: 53-89.
4. Kim, S. R., Koh, K. H., and Park, C. M. (2004). Experience from the performance of ground improvement in thick marine clay deposit, Engineering Practice and Performance of Soft Deposits, Osaka 2004: 607-621.
5. Yin, J. H. (2003). A simplified method for calculation of settlements of soils with creep based on Hypothesis B, Proc., Asian Regional Conference on SMGE, Vol. 1:681-684.

### 회비 납부 안내 (지로 및 온라인)

학회 사무국에서는 연중 수시로 학회비를 수납하고 있사오니, 회원여러분의 적극적인 협조를 부탁드립니다. 문의 사항이 있으면 사무국으로 연락하여 주시기 바랍니다.

#### • 은행 무통장(타행) 입금

국민은행 계좌번호 : 534637-95-100979 예금주 : 한국지반공학회

#### • 지로용지 납부

2003년 5월 20일부로 금융결제원에 승인을 받아 한국지반공학회 회비도 지로용지 납부를 할 수 있게 되었습니다.

#### • 지로용지 기입시 유의점

- 지로 장표상의 금액과 납부자 관련정보(회원번호, 성명, 납입금 종류 등)는 흑색볼펜으로 글씨체는 정자로 표기해 주시기 바랍니다.
- 납부금액란에는 정확한 위치에 정자로 아라비아 숫자만 기입합니다.  
납부금액 앞뒤에 특정기호(W, -, \* 등)를 표시 할 수 없습니다.)

※ 지로용지를 못 받으신 분은 지반공학회 사무국(02-3474-4428/양윤희)으로 전화주세요