

연약지반 성토시 전단변형에 의하여 유발된 즉시침하량의 산정

Calculation of Immediate Settlement Caused by Shear Deformation for Embankment on Soft Ground

정하익¹⁾, Ha-Ik Chung, 진현식²⁾, Hyun-Sik Jin, 진규남³⁾, Kyu-Nam Jin, 김달용⁴⁾, Dal-Yong Kim

1) 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Eng. Dept., KICT

2) 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, Civil Eng. Dept., KICT

3) 한국토지공사 토지연구원 주임연구원, Chief Researcher, Korea Land Corporation

4) 한국토지공사 시험 연구실 부장, Director, Korea Land Corporation

SYNOPSIS : The ultimate settlement of soft clay consists of three parts: ① immediate settlement, S_d ; ② Primary consolidation settlement, S_c ; ③ Secondary consolidation settlement, S_s . In general, S_c can be accurately calculated by one-dimensional consolidation and S_s or S_d may be ignored. This paper focuses on a calculation method to estimate the immediate settlement induced by lateral deformation of subgrade, to which shear stress is applied by embankment on soft ground. Immediate settlement and consolidation settlement are discussed by comparing the field measurement of the Yangsan test embankment on treated soft foundation by vertical paper drains.

Key Words : Shear deformation, Soft clay, Consolidation, Immediate settlement.

1. 서론

우리나라는 한정된 국토로 인하여 연약지반을 피하여는 주택단지 및 공공단지를 건설할 수 없는 현실에 있다. 따라서, 최근 남·서해안 고속도로 건설 및 주택·단지 조성을 연약지반상에서 수행되고 있다. 이러한 연약지반상에 구조물 하중이 재하되는 경우 지반은 압밀과 전단에 의해 침하와 측방유동이 발생된다. 측방유동이란 연약지반상에 성토시공시 성토에 의한 편재하중이 하부지반에 작용할 경우, 저항력이 부족하여 성토층 하부 연약지반이 수평방향 압력을 받아 소성유동현상이 발생하는 것을 말한다. 이 측방유동은 성토의 안정과 침하 거동에 큰 영향을 미칠 뿐 아니라 때에 따라서는 지구계 밖에 있는 다른 사람의 토지나 구조물에도 나쁜 영향을 미치기 때문에 그에 대한 대책이 매우 중요하다.

연약지반상에 성토하중이 재하될 경우 연약지반의 침하는 3가지로 구분된다. ① 비배수상태와 전단변형에 의해 유발된 즉시침하(S_d); ② 과잉간극수압의 소산으로 인하여 지반의 체적감소로 유발된 1차 압밀침하(S_c); 그리고 ③ 지반의 크리프 영향으로 인한 2차 압밀침하(S_s). 그러나, 일반적으로 실제 설계상에서는 1차원 압밀침하만을 반영하고 있으며, 2차 압밀침하와 전단변형에 의한 즉시 침하는 고려하지 않고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구는 J. Dai 등(1996)이 제시한 방법을 이용하여 전단변형에 의해 유발된 즉시침하(S_d)를 산정하였다. 그리고 Terzaghi 1차원 압밀이론에 의한 압밀침하(S_c)를 구하여 연구대상지역에서 발생된 전체침하량을 산정하여 보았다. 이렇게 산출된 침하량과 현장 계측침하량을 비교·분석하여 보았다. 해석대상지역은 양산물금 연약지반 시험성토구간으로 연직배수공법이 설치된 연약지반위에 약 8m의 성토가 이루어진 구간으로 하였다.

2. 전단변형에 의해 유발된 즉시침하량의 산정방법

연약지반상에 제방이 축조될 때, 전단응력이 전단강도를 초과하여 소성변형을 일으키게 되는 경우가 있다. 재하 하중이 증가함에 따라, 소성영역은 점차 확대된다. 흙의 체적은 일정하기 때문에, 흙은 수평방향으로 압착하여 이동되고 즉시침하인 추가적인 침하, S_d 가 발생하게 된다. 제방의 성토고가 증가하여 극한 높이에 다다를 때까지 S_d 의 크기는 증가하게 된다. 연약지반상의 제방성토시 하부지반의 전단변형에 의한 측방유동에 의하여 유발되는 즉시침하량의 산정을 위하여 그림 1 및 그림 2와 같은 기하학적인 형상을 생각해 볼 수 있다. 그림 1은 성토제방의 형상 및 유효하중폭을 나타내고, 그림 2는 측방유동에 의한 수평변위 분포도를 나타낸다. 여기에서 전단변형에 의한 침하를 해석하는데 있어서 필요한 매개변수는 다음과 같다.

- 외부하중에 의하여 유발되는 기초지반의 추가 전단응력 ΔP_i ;
- 연약점토층의 두께, Δh_i ;
- 유효 하중폭, B
- 초기탄성계수, E_i

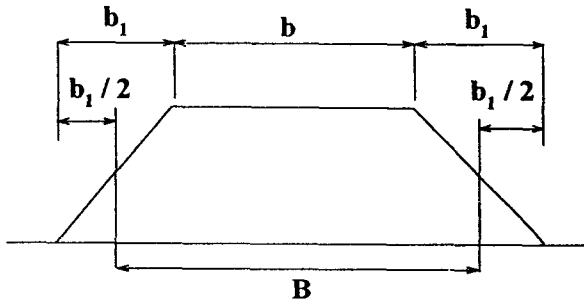


그림 1. 성토제방의 형상 및 유효하중폭

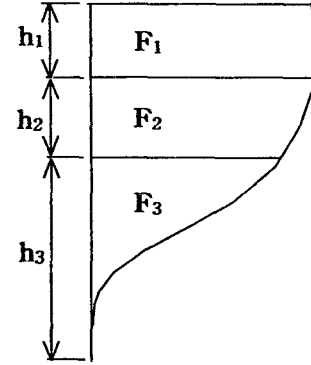


그림 2. 수평변위 분포도

연약한 기초지반상 상재하중의 작용에 의한 수평변위에 의하여 발생되는 흙의 체적은 연약층의 두께 Δh_i , 추가 전단응력 ΔP_i 및 유효 하중폭 B 에 정비례하고, 초기 탄성계수 E_i 에 반비례한다. 그림 2에서 제방의 반 단면에 대한 수평변위 체적을 나타내는 면적을 F ($F=F_1+F_2+F_3$)라고 하면 F 는 다음과 같이 표현된다(Dai 등, 1996; Sekiguchi 등, 1986).

$$F = C_p \cdot S_d \cdot B/2 \quad (1)$$

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha \cdot \Delta P_i \cdot \Delta h_i \cdot B}{2E_i} \quad (2)$$

여기서, C_p : 횡단침하 프로필에 관한 형상계수

α : 다변위계수 (multiple coefficient of displacement)

Δh_i : 토층의 두께(cm), S_d 의 산정시에 박층으로 분할 할 수 있음

ΔP_i : 박층 중앙부에서의 추가 전단응력(MPa)

E_i : 초기 탄성계수(MPa)

따라서 제방중앙부에서 발생하는 추가침하, S_d 는 다음 식으로 산정된다(Dai 등, 1996; Sekiguchi 등, 1986).

$$S_d = \frac{F}{C_p \cdot B/2} = \frac{1}{C_p} \sum_{i=1}^n \frac{\alpha \cdot \Delta P_i \cdot \Delta h_i}{E_i} \quad (3)$$

Dai 등(1996)은 C_p 값을 2/3을 제안 하였고, Sekiguchi 등(1986)은 0.68을 제안하였다. 본 연구에서는 Dai 등이 제안한 값을 사용하였다.

3. 연구대상위치 및 지반조건

연약점토지반상에 축조되는 제방성토에 의한 즉시침하량 및 압밀침하량을 산정하기 위하여 선행제하 공법과 연직배수공법을 병행하여 연약지반단지 개량사업이 진행 중에 있는 경남 양산·물금지구의 시험 시공공간을 선택하였다. 본 연구대상 지역의 제방성토는 연직배수공 타설후 2년에 걸쳐 8.0m까지 단계 적으로 서서히 시행되었다. 그림 3은 본 현장에서의 대표적인 지층구조 및 실내 시험에 의하여 산출된 각종 토질특성을 깊이별로 나타내고 있다. 상부층은 약간 과압밀상태를 보여주고 있으며, 8.0m이후 부터는 정규압밀형태를 보여주고 있다. 점성토층의 두께는 약 30m이며, 그 아래로 모래·자갈층이 존재 하고 있다. 특히 점토층 아래에 있는 자갈·모래층에서 피압이 약 18kPa가 발생하고 있다.

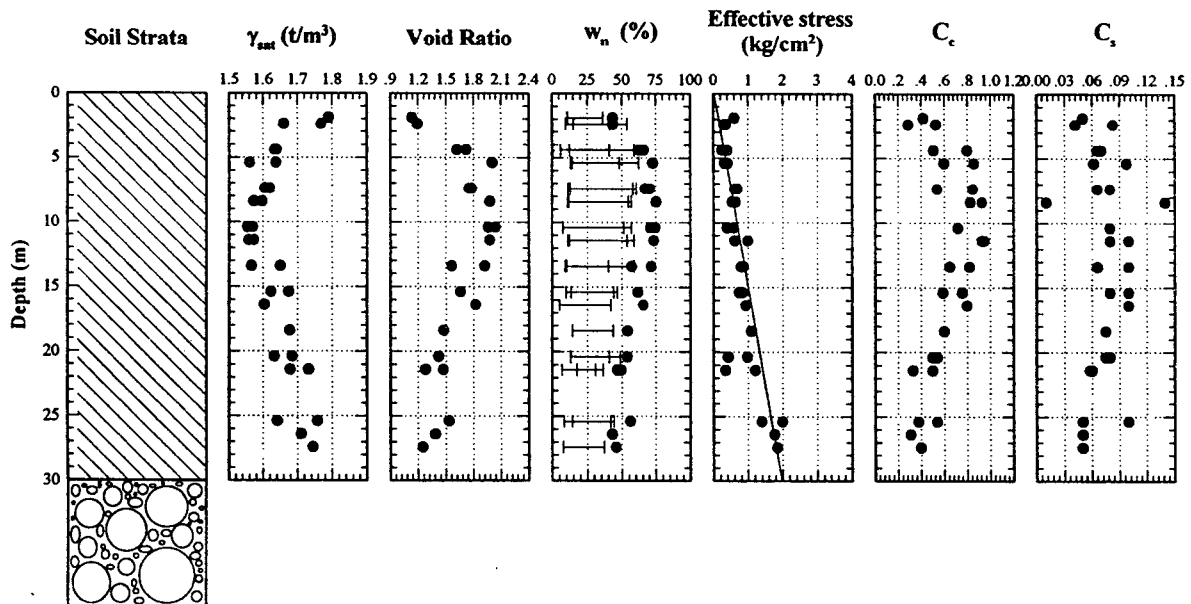


그림 3. 지층구조 및 지반특성

표 1은 그림 3을 참조하여 압밀침하량을 산출하기 위한 토질매개변수를 나타내고 있다. 전체 토층은 토질특성치를 고려하여 4개의 지층으로 분할하였다. 그림 4는 본 연구대상지역의 성토체의 규모와 경사계가 설치된 위치를 나타내고 있다. 초기성토높이는 8.0m이며, 성토체의 단위중량은 1.96t/m³ 이다.

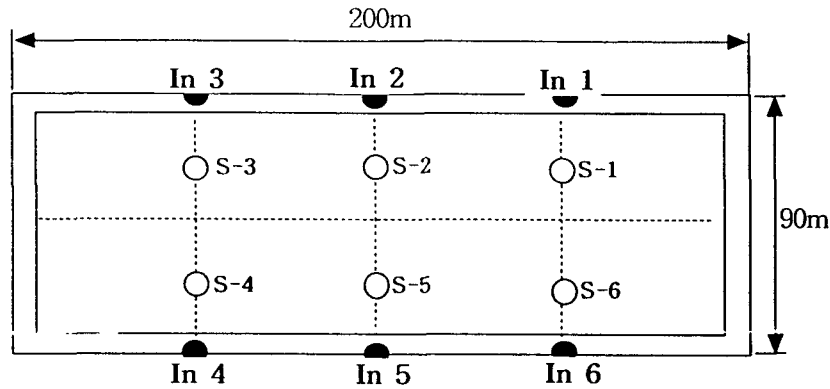


그림 4. 계측위치도

표 1. 지반의 물리적·역학적 특성

토층구분	함수비 (%)	단위중량 (kN/m ³)	간극비	압축지수	팽창지수	비고
0~3	45	17.0	1.196	0.43	0.06	
3~13	70	15.9	1.892	0.83	0.12	
11~21	60	16.8	1.549	0.63	0.09	
21~30	38	17.0	1.353	0.46	0.05	

4. 즉시침하량의 산정 및 분석

그림 5는 본 연구대상현장에서 계측된(98년 12월) 지중 수평변위를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 대부분 최대 수평변위는 약 8.5m부근에서 발생하고 있으며, 30m에서 수평변위는 거의 발생하지 않고 있다. 그림 5에서 수평변위의 면적, 분할층의 두께 및 성토체의 유효폭을 식 (3)에 대입하여, 각 구간에서의 S_d 를 산정 하였다. 이렇게 산정된 S_d 를 표 2에 나타내었다.

또한 Terzaghi 1차원 압밀이론을 이용하여 S_c 를 산출하였다. 본 연구대상지역은 일반적인 연약지반과 다르게 연약점토층 저면에서 피압수가 발생하고 있는 지역이므로, 압밀침하량 산정시 지반조건은 점토층저면에서 피압(18kPa)를 고려하여 각 층의 유효연직응력을 고려하였다. 이와같이 산정된 즉시침하량과 압밀침하량으로부터 이론적인 최종침하량 $S_\infty(S_d + S_c)$ 을 얻을 수 있었다. 현지점(98년 12월)에서 계측침하량과 이론침하량과의 관계를 그림 6에 나타내었다. 여기서, 검정색은 계측침하량을 나타내고 있으며 하얀색은 이론침하량을 나타내고 있다. 그리고 세로축은 침하, 가로축은 측정위치를 나타내고 있다. 그림 6에서 알 수 있듯이 이론값과 계측값은 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 모든 지점에서의 계측값과 이론값 차이는 10% 이내로 나타나고 있다. 본 지역에 있어서 전단변형에 의한 침하량은 압밀침하량에 비하여 2% 내외로 매우 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이로부터 본 지역에서의 실시된 제방성토시공은 매우 안정적으로 수행되었음을 알 수 있다.

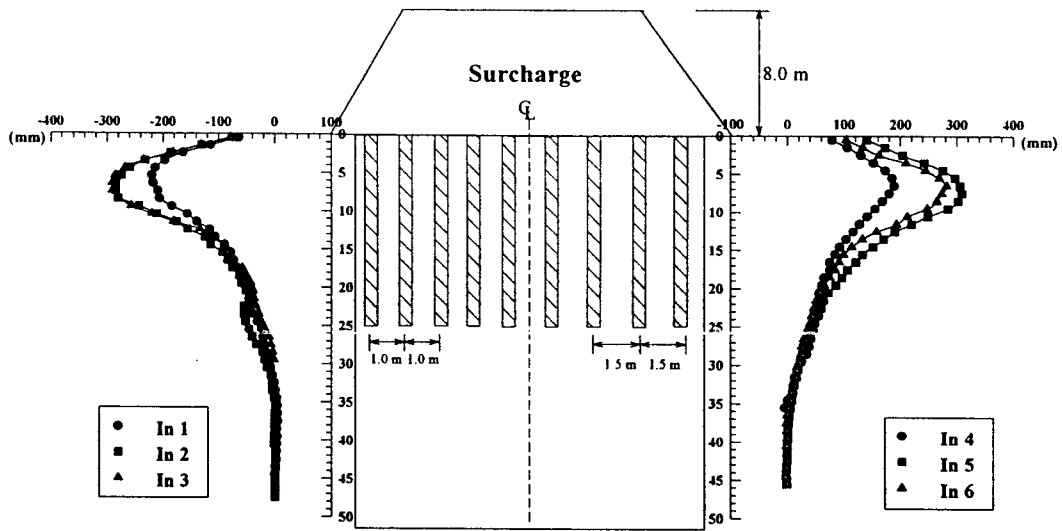


그림 5. 성토체 끝단에서의 지중수평면위

표 2. 즉시침하량 및 전체침하량의 산정

구 간	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6
(1) S_d	6.13	7.74	7.20	5.92	9.13	7.68
(2) S_c	393.61	393.61	393.61	393.61	393.61	393.61
(3) S_∞ (이론)	399.74	401.35	400.81	399.53	402.74	401.29
(4) S_∞ (계측)	406.5	388.0	372.35	379.8	373.6	367.4
(5) $[(3)-(4)]/(4)$, %	1.7	3.4	7.64	5.19	7.8	9.22
(6) S_d/S_c , %	1.56	1.97	1.83	1.5	2.32	1.95

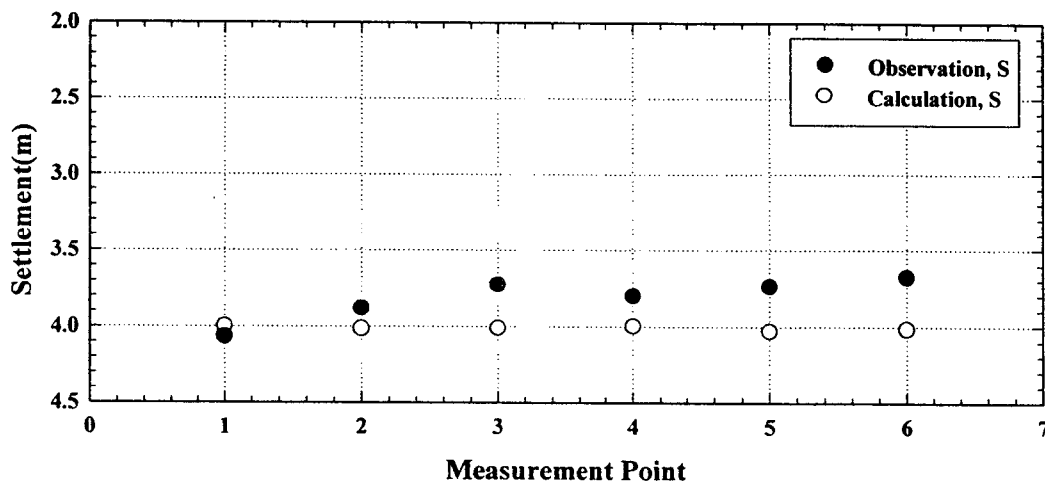


그림 6. 이론 및 계측값과의 비교

5. 결론

전단변형에 의하여 유발된 즉시침하량을 고려하여 최종침하량을 산출하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- (1) Sekiguchi 등(1986), 및 Dai 등(1996)이 제시한 S_d 산정법은 비교적 사용이 간편하였으며, S_d 를 고려한 최종침하량 S_∞ 은 계측값과 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.
- (2) 본 연구대상지역에서의 S_d 는 S_c 에 비하여 아주 작게 나타났음을 알 수 있었다.
- (3) Sekiguchi 등(1986), 및 Dai 등(1996)이 제시한 S_d 산정법의 정확성을 기하기 위하여 국내현장조건에 맞는 C_p 값의 재평가가 요구된다.

6. 참고 문헌

1. 이재훈·홍성영(1995), “지반의 측방유동”, 건설도서.
2. 한국토지공사(1997), “양산물금지구 시험시공연구공사 사전조사 보고서” .
3. Dai J., Zhang C., Yuan W.(1996), “A calculation method of immediate settlement caused by shear deformation”, Second International Conference of Soft Soil Engineering, Vol.2, pp.820~825.
4. 關口秀雄, 柴田徹(1986), “軟弱地盤における側方流動”, 京都大學防災研究所年報, 第29號 B-2, pp. 62~82