

수평 분할된 연약 점성토 지반 침하 예측에 관한 연구

A Study on the Prediction of Settlement Horizontally Divided Soft Ground

류 재 하¹⁾ · 김 민 수²⁾ · 김 연 중³⁾ · 정 찬 기[†]

Jaeha Ryu · Minsoo Kim · Yeonjoong Kim · Chankee Jung

Received: June 17th, 2021; Revised: June 24th, 2021; Accepted: July 19th, 2021

ABSTRACT : In the case of construction on soft ground - such as national expressways sponsored by Social Overhead Capital (SOC) - many problems occur due to excessive settlement: therefore, an accurate settlement prediction has a major impact on the selection of improvement methods, project budget and construction period. Most of the settlement prediction methods currently used in projects apply Terzaghi's Theory of One-Dimensional Consolidation which assumes the uniformity of the depth of the soft ground. However, the results of soft ground settlement predictions vary when the target layer is divided into multiple horizontal layers. This study analyzed the change in the consolidation settlement behavior according to the horizontal division of soft ground as well as with different loading height.

Keywords : Consolidation settlement, Horizontal division, Soft ground, Embankment height

요 지 : 연약 점성토 지반에 고속국도 등 대규모 SOC 공사 시 과도한 침하량으로 인하여 많은 문제점들이 발생하고 있어 정확한 침하예측은 개량공법의 선정, 사업비, 사업기간에 많은 영향을 미치게 된다. 현재 설계 시 사용되고 있는 대부분의 침하량 예측기법으로는 연약 점성토 지반의 두께를 단일층으로 하여 1차원 Terzaghi 압밀이론을 적용하고 있다. 그러나 연약 점성토 지반의 침하 예측 시 대상층을 다수의 수평층으로 분할할 경우 침하량에 변화가 발생하고 있다. 본 연구에서는 성토고 변화 조건에서 연약점성토지반 수평분할에 따른 압밀침하거동을 분석하였다.

주요어 : 압밀침하, 수평분할, 연약지반, 성토고

1. 서 론

연약 점성토 지반 위에 도로 등의 다수의 대규모 공사가 추진되고 있으며 이러한 사업 진행 시 연약 점성토 지반으로 인해 공사기간 지연 등의 많은 문제점들이 발생하고 있다.

현재 설계 시 침하량은 토질시험에서 얻어진 압밀 계수 등 지반 특성을 이용하고 Terzaghi 1차원 압밀 이론에 의한 시간-침하량 관계를 예측하고 있으며 현장에서는 실제 계측값을 바탕으로 장래침하를 Asaoka법, Hyperbolic법, Hoshino법 등을 사용하여 침하거동을 분석하고 있다.

그러나 설계 시 예측한 압밀 침하 거동은 해석 방법의 한계 그리고 시공 조건의 가변성 등으로 인하여 실제 거동과 많은 차이를 보이고 있다.

현재까지 예측과 실제 거동의 차이에 대하여 많은 연구가 진행되었으며, 본 연구에서는 설계 단계에서 성토고 변화 조건에서 연약 점성토 지반의 수평분할에 따른 압밀 침

하 거동 변화를 분석하여 향후 설계 시 고려할 만한 해석 방법을 제시하고자 한다.

2. 압밀 침하 거동 분석

성토고 변화 조건에서 연약 점성토 지반의 수평분할에 따른 압밀 침하 거동 변화 해석을 위해 “고속국도 제00호선 00~00간 건설공사(00공구)”의 자료를 활용하였으며 다음과 같은 조건을 적용하였다.

2.1 공사현황

고속국도 00공구의 총 연장은 5.06km이며 순성토 공사로 지층은 매립층, 퇴적층, 풍화토층, 풍화암층 및 기반암층으로 구성되어 있다. 대부분의 구간에서 연약지반이 출현하고 있으며 연약 점성토 지반의 최대 심도는 약 12.0m이다.

1) Korea Expressway Corporation

2) Korea Expressway Corporation

3) Korea Expressway Corporation

† KCC Engineering & Construction Co., Ltd. (Corresponding Author : chankee@kccworld.net)



Fig. 1. Road plan

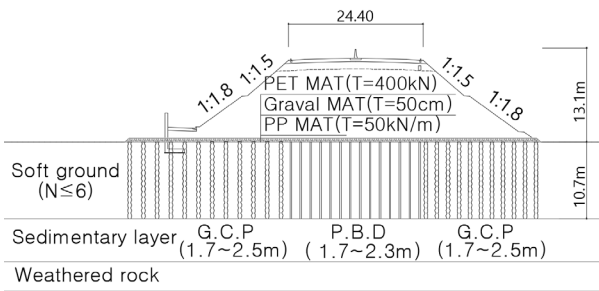


Fig. 2. General section of soft ground improvement

계획된 노선의 연약지반 처리 구간은 총 7개 구간(7 Zones)으로 구분하여 압밀 촉진 공법으로 P.B.D를 적용하였으며, 지반 보강 공법으로 G.C.P 및 PET MAT(400kN/m)를 적용하였다.

교대구간은 측방유동 방지를 위해 고압분사공법을 적용하였다.

대표적인 연약지반 처리 단면 계획은 Fig. 2와 같다.

2.2 검토 단면

성토고 변화 조건에서 연약 점성토 지반의 수평분할에 따른 압밀 침하 거동 변화를 분석하기 위하여 검토 단면은 Fig. 3과 같이 두께D(m)의 점성토층 위에 H(m)의 성토가 이루어지는 것으로 간략화하였다.

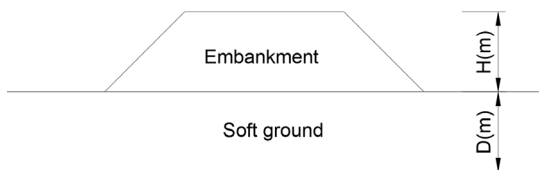


Fig. 3. Section for analysis

2.3 압밀 침하량 산정방법

연약지반 설계 시 상재하중에 의한 최종 압밀 침하량을 산정하는 식은 Terzaghi 1차원 압밀 이론의 압축지수의 정의에 의해 다음과 같이 표현된다(Braja M. das, 2002).

(1) 정규압밀 점성토

$$S = \frac{C_c}{1+e_0} \times H \times \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \quad (1)$$

(2) 과압밀 점성토

$$S = \frac{C_c}{1+e_0} \times H \times \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \quad (2)$$

- $\sigma_0 < \sigma_c < \sigma_0 + \Delta\sigma$

$$S = \frac{C_s H}{1+e_0} \times \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} + \frac{C_c H}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_c} \right) \quad (3)$$

여기서, S : 압밀 침하량(m)

C_c : 압축지수

C_s : 팽창지수

e_0 : 초기간극비

H : 연약 점성토층의 두께(m)

$\Delta\sigma'$: 연직유효응력 증가량
 $= \gamma_t H$ (kPa, 일정한 것으로 가정)

σ'_0 : 연직유효응력(kPa)

σ'_c : 선행압밀응력(kPa)

(3) 2차 압밀 침하

$$S = C_{\alpha} H \log \frac{t_2}{t_1} \quad (4)$$

여기서, S : 2차 압밀 침하량 (m)

C_{α} : 2차 압축지수, t : 시간

2.4 압밀 대상층의 지반특성

연약 점성토층의 지반 특성은 기본 및 실시설계 20공과 시공 중 77공, 총 97공의 시추조사와 물성시험 및 역학시험 결과를 토대로 종합적으로 검토하여 구간별로 산정하였다.

연약지반의 특성을 파악하기 위한 시험은 SPT, 아터버그한

계시험(Atterberg limits), 일축압축시험(Unconfined Compression Test), 압밀 시험(Consolidation test), 삼축 압축 시험(Triaxial Compression Strenght test), 입도분포 시험(Grain Size Distribution test)등을 수행하였다.

전체 구간(Zones of all)에 대한 연약 점성토 지반의 연약 지반 특성은 Table 1과 같다.

기본 및 실시설계 및 시공 중 시행된 시추조사, 물성시험 및 역학시험 결과를 토대로 종합적으로 검토하고 지반정수를 산술 평균하여 구역별로 Table 2와 같이 산정하였으며, 본 연구에서는 “5구간(Zone)”의 지반특성을 활용하였다(연약지반처리계획 검토서, 2021).

Table 1. Geotechnical properties of soft ground (Zones of all)

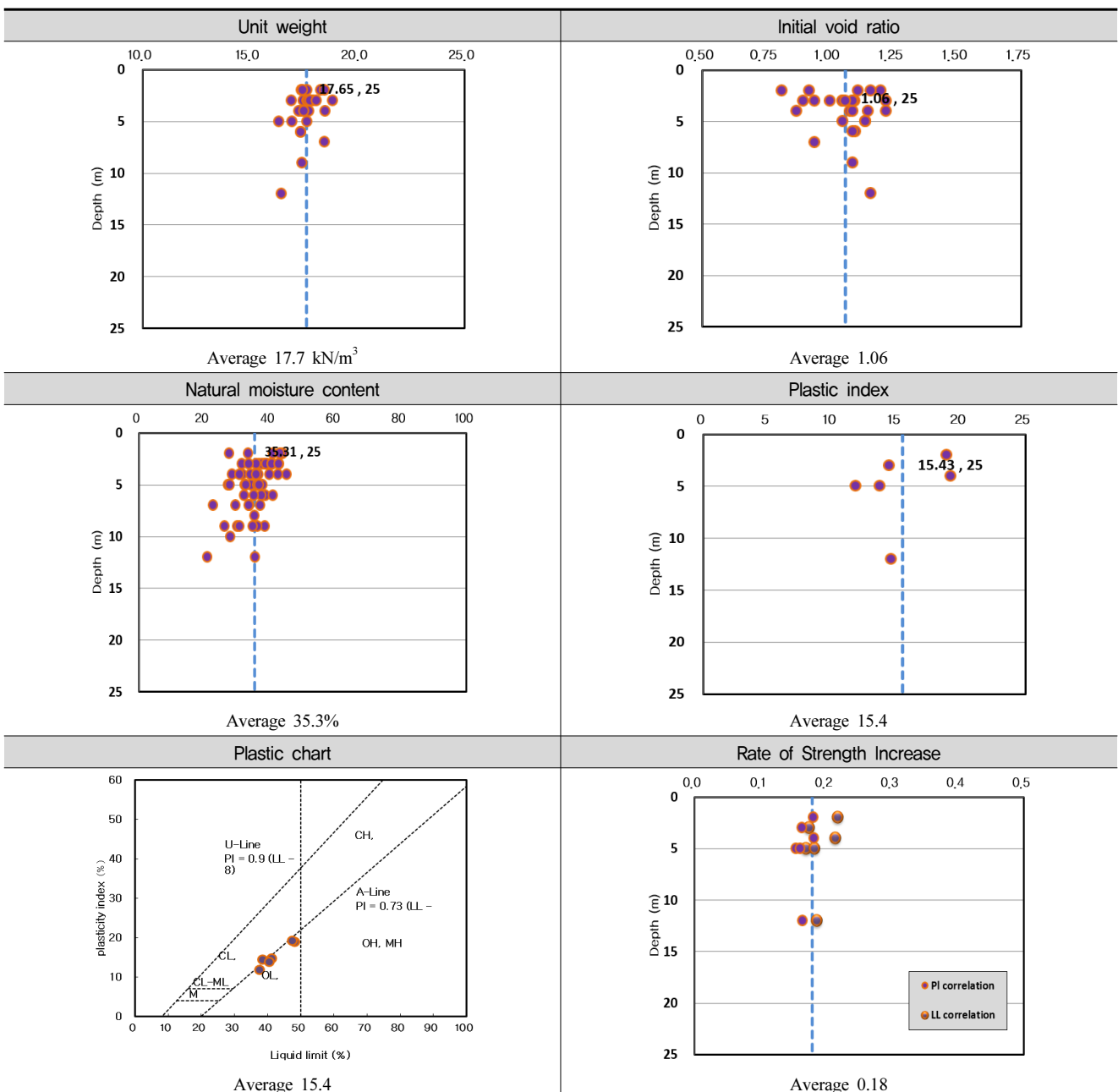


Table 1. Continued

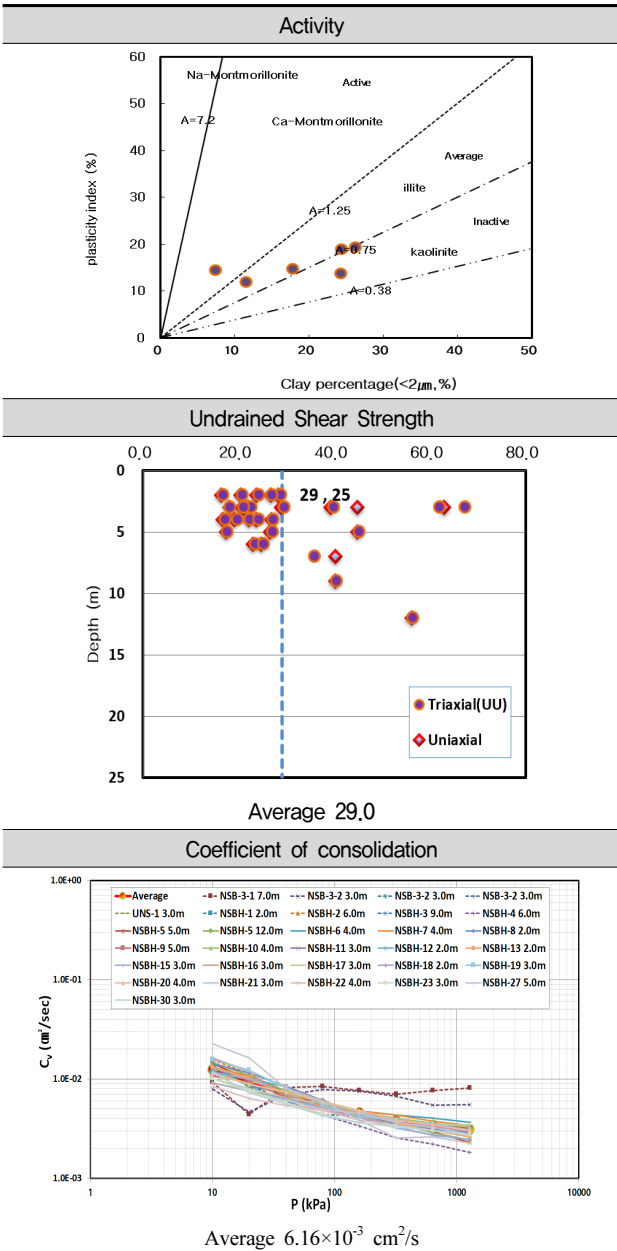


Table 2. Geotechnical properties of soft ground (each Zone)

Properties	Zone						
	1	2	3	4	5	6	7
Unit weight (γ_s , kN/m ³)	17.9	17.4	17.6	18.0	17.6	17.5	17.7
Initial void ratio (e_0)	1.05	1.09	1.03	0.95	1.13	1.12	1.11
Natural moisture contents (W_n , %)	34.93	34.20	33.99	34.48	37.53	36.71	40.72
Liquide limits (LL, %)	42.32	42.32	39.50	42.32	48.30	47.60	42.32
Plastic index (PI, %)	15.43	15.43	13.63	15.43	18.90	19.20	15.43
Coefficient of consolidation ($\times 10^{-3}$ cm ² /s)	6.69	5.47	6.45	6.27	6.00	6.06	6.54
Coefficient of permeability ($\times 10^{-7}$ cm/s)	2.60	3.09	4.52	3.62	5.34	4.04	3.11
Rate of strength increase (α)	0.18	0.18	0.17	0.18	0.20	0.20	0.18
Compression index (C_c')	0.14	0.18	0.19	0.14	0.20	0.16	0.18
Undrained shear strength (S_u , kPa)	27.3	32.7	33.7	19.0	22.7	25.3	19.2

Table 3. Settlements in relation to embankment height and divided soft ground

Layer of division	Item	Thickness of division (m, αD)	Embankment height (βD , m)					
			1.0 (0.1D)	2.0 (0.2D)	5.0 (0.5D)	10.0 (1D)	30.0 (3D)	50.0 (5D)
1	1.00	0.165	0.283	0.511	0.731	1.131	1.329	
2	0.50	0.200	0.328	0.565	0.788	1.189	1.387	
3	0.33	0.215	0.347	0.586	0.809	1.210	1.408	
4	0.25	0.224	0.356	0.596	0.820	1.221	1.419	
5	0.20	0.230	0.363	0.603	0.826	1.228	1.426	
6	0.17	0.233	0.367	0.607	0.831	1.232	1.431	
7	0.14	0.236	0.370	0.611	0.834	1.236	1.434	
8	0.13	0.239	0.372	0.613	0.837	1.238	1.436	
9	0.11	0.240	0.374	0.615	0.838	1.240	1.438	
10	0.10	0.242	0.376	0.616	0.840	1.242	1.440	

2.5 압밀침하량 분석

연약 점성토층의 두께(D)는 10m로 1~10개(0.1~1.0D)의 층으로 균등 분할하였으며, 성토는 1~50m(0.1D~5.0D)까지 적용하였다(Fig. 4 참조).

예측된 발생 침하량은 분할된 압밀 대상층의 두께가 얇아지고 성토 높이가 높아질수록 침하량은 0.165m에서 1.440m로 증가하는 것으로 나타났다(Table 3 참조).

압밀 대상층 분할(αD)에 따른 침하량은 성토고 1.0m(0.1D)의 경우 0.165m에서 0.242m 증가하여 146% 증가하였다.

단일층 대비 성토고(βD)에 따라 108~146% 증가하는 것으로 나타났으며 성토 높이가 높아질수록 그 비율은 줄어드는 것으로 나타났다(Fig. 5 참조).

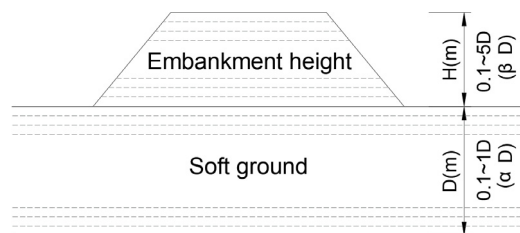


Fig. 4. Embankment height and ground division conditions for settlement analysis

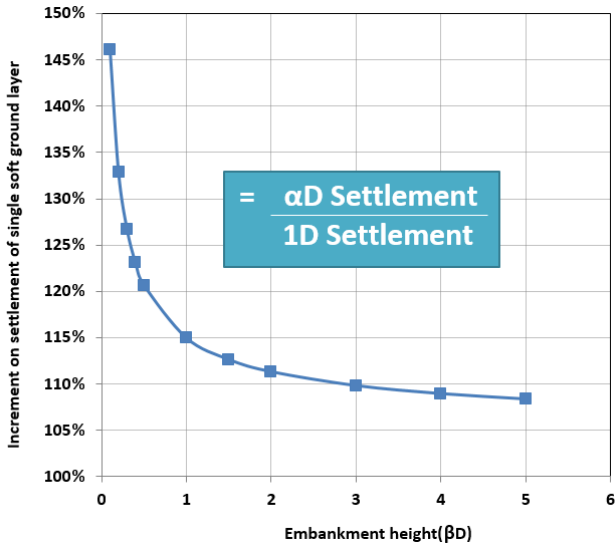


Fig. 5. Increment ratio of settlement related on embankment height and ground division

압밀 대상층 분할에 따른 침하량 변화의 원인은 Eq. (1)에서 층 분할에 따른 수직응력비 ($\log \frac{p'_0 + \Delta p'}{p'_0}$)의 변화에 기인한 것으로 층 분할수가 증가할수록 평균수직응력비의 값이 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 6 참조).

또한, 0.1D~1.0D로 분할된 모든 압밀 대상층의 경우에서 성토 높이가 증가할수록 평균응력비의 증가폭은 완만해지는 경향을 보이고 있다(Fig. 7 참조).

압밀 대상층을 상부(지표면~ GL(-)5.0m), 하부(GL(-)5.0m

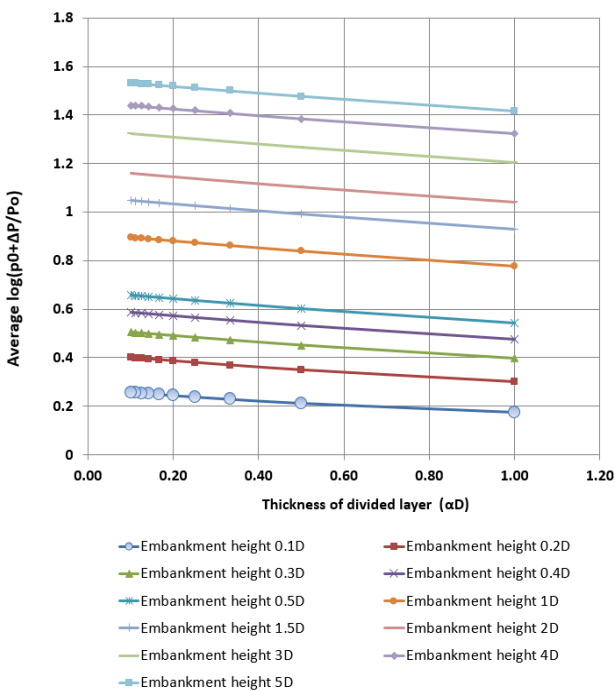


Fig. 6. Average vertical stress in relation to soft ground division and embankment height

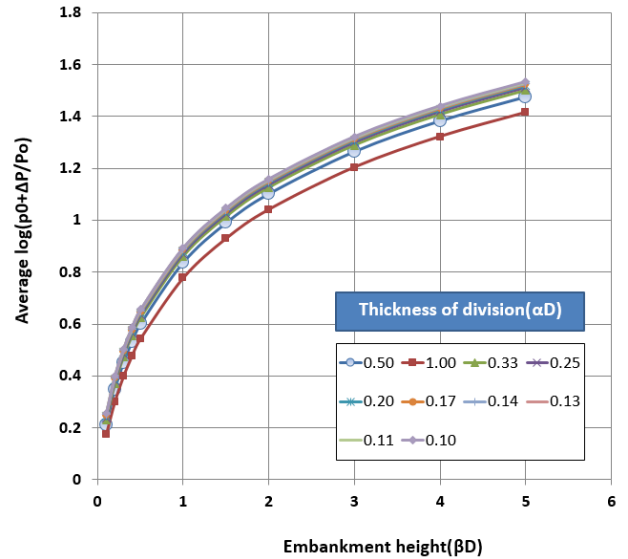


Fig. 7. Vertical stress ratio in relation to embankment height

~ 10.0m)로 구분하여 수직응력비율을 검토한 결과 성토 높이가 0.1D(1.0m)의 경우 상부(지표면~ GL(-)5.0m)에서의 수직 응력비율 압밀 대상층이 분할될수록 71%~75%로 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 8 참조).

또한, 상부층(지표면~ GL(-)5.0m)의 수직응력비율은 성토 높이가 증가할수록 71%에서 58%로 감소하는 경향을 보이고 있다(Fig. 8~11 참조).

따라서, 압밀 대상층의 분할이 증가할수록 대상층 상부에서의 침하량 비율이 상대적으로 높고, 연약층 두께 대비 성토 높이가 증가할수록 상부층(지표면~ GL(-)5.0m)의 상대적 침하량 발생 비율은 낮아지는 것을 의미한다.

1) 성토높이 H=0.1D(1.0m)

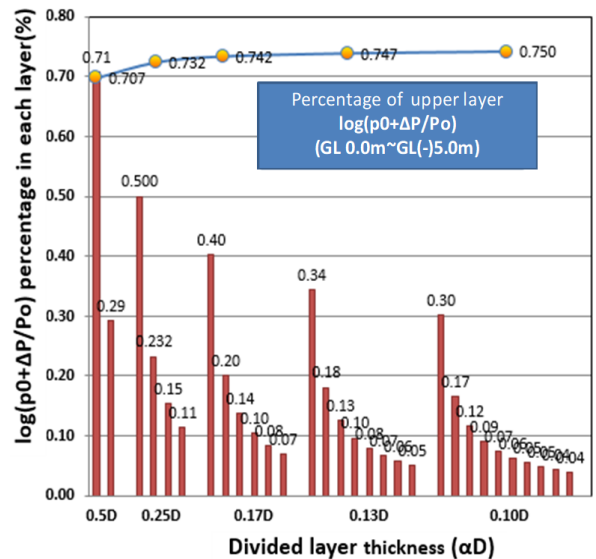


Fig. 8. Vertical stress ratio of upper layer (GL(-)5.0m) (H=0.1D)

2) 성토높이 H=0.5D(5.0m)

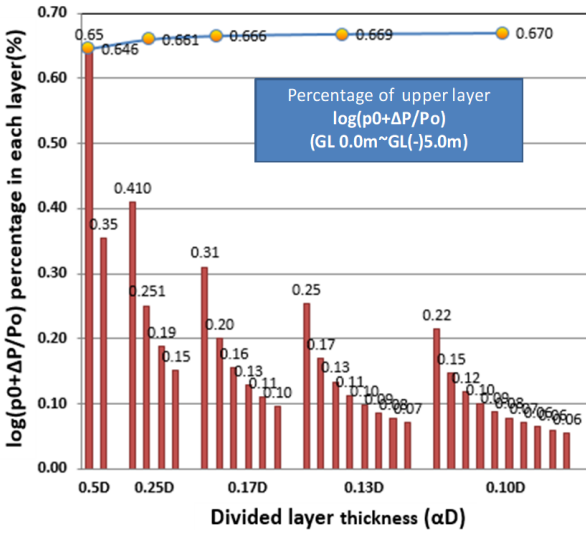


Fig. 9. Vertical stress ratio of upper layer (GL(-)5.0m) (H=0.5D)

3) 성토높이 H=1.0D(10.0m)

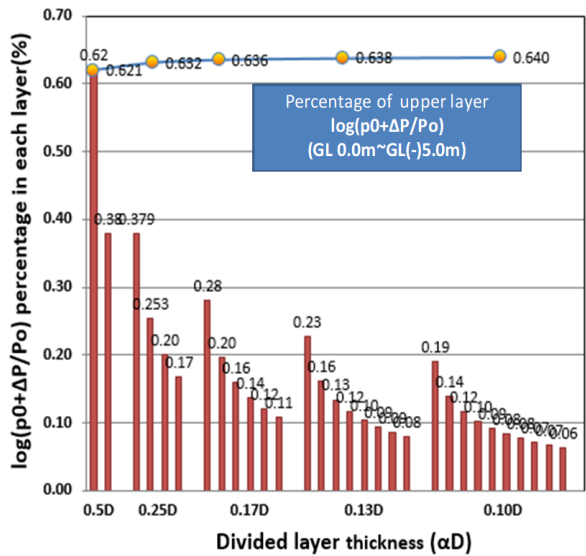


Fig. 10. Vertical stress ratio of upper layer (GL(-)5.0m) (H=1.0D)

4) 성토높이 H=5.0D(50.0m)

성토 높이(0.1D~5.0D)에 따른 압밀 대상층의 분할(0.1~1.0D)에 따른 침하량 증가율은 0.1%~21.0%로 나타났다.

특히, 압밀 대상층 두께 대비 성토고가 낮을수록 압밀 대상층 분할에 따른 침하량의 증가비가 높은 것으로 분석되었다(Table 4 참조).

현재 국내 연약지반 도로의 허용 잔류 침하량에 대한 기준은 10cm로 연약지반 층 분할에 따른 변화량이 10cm 이상일 경우 이에 대한 민감도에 따라 검토 대상층의 분할 여부 및 개수를 검토할 필요가 있다고 판단된다.

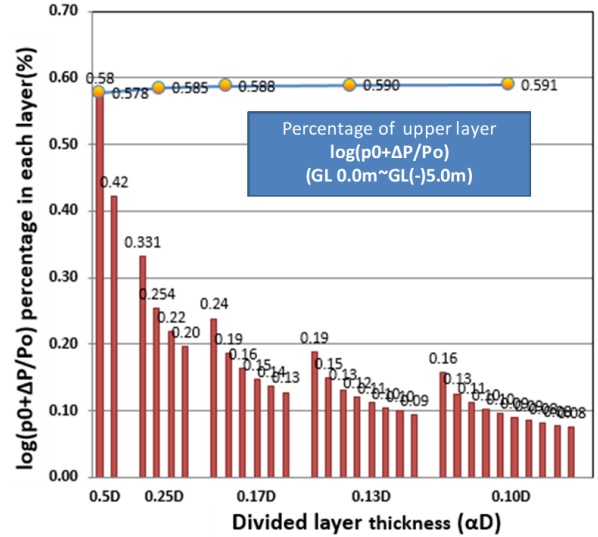


Fig. 11. Vertical stress ratio of upper layer (GL(-)5.0m) (H=5.0D)

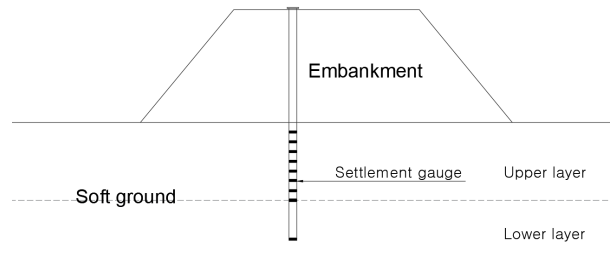


Fig. 12. Concept of settlement gauge installation

Table 4. Rate of settlement change in relation to different Embankment height and division of soft ground

Layer of division	Thickness of division (m, αD)	Embankment height (m)					
		1.0 (0.1D)	2.0 (0.2D)	5.0 (0.5D)	10.0 (1D)	30.0 (3D)	50.0 (5D)
2.0	0.50D	1.210	1.161	1.107	1.078	1.052	1.044
3.0	0.33D	1.077	1.056	1.036	1.027	1.018	1.015
4.0	0.25D	1.040	1.029	1.018	1.013	1.009	1.008
5.0	0.2D	1.025	1.017	1.011	1.008	1.005	1.005
6.0	0.17D	1.017	1.012	1.007	1.005	1.004	1.003
7.0	0.14D	1.012	1.008	1.005	1.004	1.003	1.002
8.0	0.12D	1.009	1.006	1.004	1.003	1.002	1.002
9.0	0.11D	1.007	1.005	1.003	1.002	1.002	1.001
10.0	0.10D	1.006	1.004	1.002	1.002	1.001	1.001
Ratio		<1%	1~3%	3~10%	>10%		

일례로 성토고가 1D(m)의 경우 침하량 변화율을 3% 이하로 제한할 경우 압밀 대상층을 2개 층(αD=0.5)으로 분할할 필요가 있으며, 침하량 변화율을 1% 이하로 제한할 경우 압밀 대상층을 4개(αD=0.25)로 분할할 필요가 있는 것으로 판단된다(Table 4 참조).

한편, 본 연구의 현장 적용성을 확인하기 위해 시공 시 층별 침하계를 연약지반 대상층의 상부층과 하부층으로 구분하고 상부층에 집중 배치할 필요가 있다(Fig. 12 참조).

3. 결 론

성토고 변화 조건에서 Terzaghi 1차원 압밀 이론에 의한 연약 점성토(정규압밀) 지반의 수평분할에 따른 압밀 침하량을 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 분할된 압밀대상층의 두께가 얇아지고 성토높이가 높아질수록 침하량은 단일층 침하량 대비 108~146% 증가하는 것으로 나타났으며, 그 침하량은 연약 점성토 지반 상부층에서 주로 발생하는 것으로 분석되었다. 또한, 층 분할이 증가할수록 침하량은 일정한 값에 수렴하는 것으로 분석되었다.
- (2) 연약층 분할 0.5D의 경우 성토고 0.1D에서 21.0%의 침하량 변화율을 나타내고 성토고 5D에서 4.4%의 침하량 변화율을 나타내는 것으로 분석되어 성토고가 높을수록 연약층 분할에 의한 침하량 변화율은 작은 것으로 나타났다.

- (3) 허용침하량과 관련된 침하량 민감도에 따라 압밀층의 분할의 필요성을 검토할 필요가 있다. 일례로 압밀층 분할에 따른 침하량 변화율을 3% 이하로 제한 시 성토고 0.1D의 경우 5~10개층(0.2D~0.1D)으로, 성토고 1.0D의 경우 4~10개층(0.25D~0.1D)으로 나누어 침하량을 산정할 필요가 있다.
- (4) 향후 압밀 대상층 분할에 따른 침하량 증가율에 대한 제한과 구조물별 허용잔류침하량과의 상관관계를 분석할 필요가 있다.
- (5) 또한, 시공 시 층별침하계 및 지중응력계 등의 계측값과의 비교·검토를 통해 현장에서의 그 적합성을 분석할 필요가 있다.

References

1. 고속국도 제00호선 00~00간 건설공사(00공사) 연약지반처리계획 검토서(2021), 한국도로공사, pp. 2~15.
2. Braja M. Das (2002), Principle of geotechnical engineering, 5th edition, Cole, pp. 281~285.