

유한요소해석을 이용한 연직배수재의 타설범위에 따른 개량효과에 관한 연구

A Study on the Effect of Improvement Boundary of Vertical Drain Method by Finite Element Analysis

장용채* · 김주한** · 이진수***

Chang, Y. C. · Kim, J. H. · Lee, J. S.

Abstract

Soft foundation is extensively distributed in coastal areas including our local regions. Embankment load on such soft foundation causes displacement due to lack of base ground supports. Long-term consolidation can result in settlement and destruction of shear failure and structure. Therefore, a variety of vertical drain methods are applied to construction sites to prevent base from breaking and changing for secure construction. This study analyzed the patterns of changes displacement to determine efficient range of improvement since range of vertical drain material determines vertical and horizontal changes based on the width range of under ground improvement. Changes of intensity with distance from embankment edge were also analyzed in the field study of embankment slope.

Keywords : Consolidation, Ground improvement, Sand compaction pile method, Settlement, Soft foundation, Vertical drain

요 지

우리나라의 서·남해안 지역과 내륙의 하천 인근 지역은 상당한 범위에 걸쳐 점성토 지반이 형성되어 있다. 연약지반상의 제체는 지지지반의 지지력 부족으로 인하여 변위를 일으킨다.

장기적인 압밀은 구조체의 침하나 전단파괴를 가져올 수 있다. 따라서, 지반의 파괴와 과다변형을 억제하기 위해서 건설현장에 다양한 연직배수공법을 적용한다.

이 연구는 지반개량의 범위에 기초하여 연직배수재를 연직 및 수평방향으로 변화시켜 효율적인 개량 범위의 형태를 결정하고자 한다. 제체의 가장자리로부터 거리에 따른 강도의 변화는 제체 사면의 현장 값으로부터 해석되어진다.

주요어 : 압밀, 지반개량, 샌드컴팩션파일공법, 침하, 연약지반, 연직배수

* 목포해양대학교 해양시스템공학부 해양토목공학전공, 조교수

** 다산ENC 지반공학부, 사원

*** 동신대학교 토목공학과, 교수

1. 서론

우리 지역을 포함하여 해안을 끼고 있는 많은 지역에는 연약지반이 넓게 분포하고 있다. 이와 같은 연약지반상에 제체하중이 작용할 경우 원지반은 지지력 부족에 의하여 변위를 일으키게 된다. 즉, 장기간 압밀에 의한 침하가 발생하고, 심할 경우 전단파괴를 일으키며, 상부 구조물이 붕괴될 수도 있다. 이에 따라 실제 시공시에는 지반파괴 및 과다 변형을 억제하고, 안정적인 시공을 위해 다양한 종류의 지반개량공법을 적용하고 있다. 국내에서는 지중에 모래 기둥을 형성하여 지반의 압밀을 촉진하는 연직배수공법(vertical drain method)을 가장 많이 사용하고 있다.

본 연구에서는 연직배수공법 중 가장 많이 사용되는 Sand Compaction Pile(이하 SCP) 공법을 적용하였을 때 지반 내에 연직배수재의 타설범위를 성토체 끝단으로부터 제체 내측으로 3열까지 감한 경우와 제체 외측으로 3열까지 증가한 경우에 대해서 유한요소해석을 수행하였다. 이를 통해 지반의 시간에 따른 압밀과 성토하중의 변화에 의한 지반의 침하와 변형거동을 파악해 보고 지반의 개량에 있어 가장 효율적인 개량범위를 결정하고자 하였다.

2. 본론

2.1 해석조건

본 해석에서는 2차원 유한요소해석 프로그램인 Afimex의 압밀해석 tool인 DACSAR를 사용하였으며, DACSAR에 사용한 구성식은 Modified Cam-clay, 세키쿠치-오오타(關口-太田)모델을 사용하였다. Fig. 1에 해석을 실시한 성토체와 지반의 기본조건을 나타내었다. 본 해석에서는 다양한 연직배수공법 중 개량효과가 가장 뛰어난 SCP공법을 중심으로 SCP의 개량범위에 따른 개량 효과만을 단순 분석하기 위하여 지층의 형태를 Fig. 1과 같이 모델링하였다. 해석에 사용된 모델은 원지반(정규압밀점성토)의 깊이를 25m로 하였고, 지반 개량공법은 SCP를 2m 간격

으로 타설하여 적용하였다.

경계조건은 양쪽 끝부분에서는 수평방향은 고정, 수직방향은 변위를 허용하는 연직 로울러로 설정하였고, 바닥 부분은 수평, 수직방향 모두 변위를 허용하지 않는 고정으로 설정하였다.

해석모델의 수위는 지표면으로 설정하였고, 배수조건은 지표면 한쪽 방향으로 배수를 허용하였다.

성토체의 높이는 총 11m로 4단계(1단계:3m, 2단계:4.5m, 3단계:2m, 4단계:1.5m)로 나누어 단계성토하였고, 경사면의 기울기는 1:1.5로 하였다. 성토체의 대칭성을 고려하여 성토체 중심부로부터 해석을 실시하였으며, 성토체 끝단에서 해석모델의 경계면까지 거리를 성토체 폭의 약 3배 정도로 하여 해석시 경계면의 영향을 받지 않도록 고려하였다.

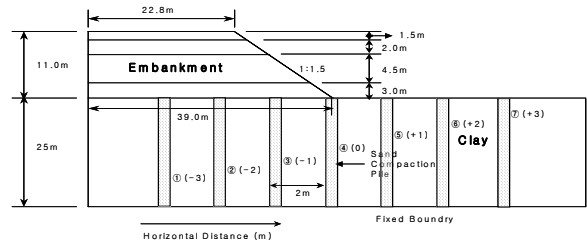


Fig. 1. An outline of analyzed model

각 성토단계에 따른 시공조건은 다음과 같다.

Table 1. The construction condition applied in the analysis

해석단계	해석기간 (일)	누적일수 (일)	성토하중 (t/m ²)
1 초기응력해석	300	300	-
2 SCP시공	180	480	-
3 1단성토	60	540	5.4
4 성토후 방치	90	630	5.4
5 2단성토	90	720	13.5
6 성토후 방치	90	810	13.5
7 3단성토	30	840	17.1
8 성토후 방치	90	930	17.1
9 4단성토	30	960	19.8
10 성토후 방치	90	1050	19.8
11 방치기간	1600	2650	19.8

본 연구에서는 위의 기본해석조건을 바탕으로 하여, SCP의 타설범위를 기준으로 개량범위만을 변화시키면서 -1열~-3열, 0열, +1열~+3열로 표 2와 같이 총 7가지 경우로 해석을 실시하였으며, 각 조건에 의한 해석결과를 비교하기 위해 동일한 위치에서 발생하는 연직변위와 수평변위를 분석하였다.

Table 2. Ground condition applied in the analysis

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7
개량범위 (성토체끝단을 기준으로)	-3열	-2열	-1열	0열	+1열	+2열	+3열

해석조건은 2차원 평면 변형률(plain strain) 조건으로 탄점소성 특성을 고려하여 해석하였으며, 절점은 사각형 4절점 요소를 사용하였고 해석에 사용된 요소수는 856개, 절점수는 937개이다.

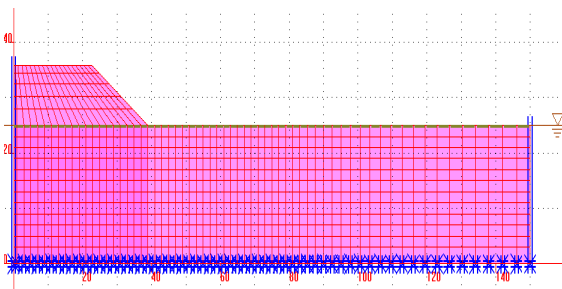


Fig. 2. The mesh drawing of analyzed model

해석에 사용된 토질상수 값은 다음 표 3과 같다.

Table 3. Material property applied in the analysis

① Original ground(visco-elasto plasticity ground)

다이러턴스 계수, D	비가 역비 Λ	한계 응력비 M	유효 포아송비 ν'	정지 토압계수 K_o	원위치의 정지토압계수 K_i	이차 압밀계수 α	초기체적 변형률속도 V_o (1/day)	압축 지수 λ
0.0702	0.63	1.1025	0.3482	0.534	0.534	0.006142	0.0000001	0.325
소성 지수 PI	압축 지수 C	선형압밀 상재압 σ_{vo} (t/m^2)	유효상재압 σ_{vi}' (t/m^2)	선형연직응력에 대한 간극비 e_o	일차압밀에 필요한 시간 t_c (day)	X방향 투수계수 (m/day)	Y방향 투수계수 (m/day)	
30	0.75	19.44	19.44	1.65	1.0e+5	4.23e-6	4.23e-6	

② Improved ground(visco-elasto plasticity ground)

다이러턴스 계수, D	비가 역비 Λ	한계 응력비 M	유효 포아송비 ν'	X방향 투수계수 (m/day)	Y방향 투수계수 (m/day)	선형압밀 상재압 σ_{vo} (t/m^2)	정지 토압계수 K_o
0.021	0.63	1.1025	0.3482	4.667e-1	4.667e-1	19.44	1.0
유효상재압 σ_{vi}' (t/m^2)	원위치의 정지토압계수, K_i	이차 압밀계수 α	초기체적 변형률속도, V_o (1/day)	압축 지수 λ			
19.44	0.534	0.006142	0.0000001	0.0975			

※ SCP개량지반은 D, λ , K_o , 투수계수 이외에는 원지반과 동일한 물성값을 사용한다.

③ Embankment(elasticity ground)

구분	라미의 정수 λ (t/m^2)	라미의 정수 μ (t/m^2)	유효상재압 σ_{vi}' (t/m^2)	원위치 정지 토압계수 K_i
성토체	5652.023	2048.281	1	0.58
구분	X방향 투수계수(m/day)	Y방향 투수계수(m/day)	초기 간극비 e_i	
성토체	0.864	0.864	1	

여기서, 라미의 정수 $\lambda = \nu E / (1 + \nu)(1 - 2\nu)$,
 E :영계수, ν :포아송비, $\mu = G = E / \{2(1 + \nu)\}$

2.2 해석결과

2.2.1 지표면에서의 연직변위

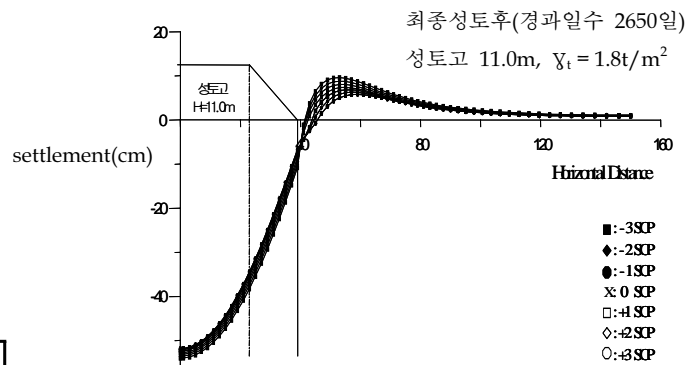


Fig. 3. Settlement profile in the surface

지표면에서의 하중 증가단계에 따른 연직변위를 살펴 본 결과 제체의 중앙부에서는 최대 52cm 정도의 침하가 발생하였으며, 최대용기량은 10cm 정도가 발생하였다.

성토체 끝단까지는 침하의 양상이 개량범위에 따라 일정한 경향을 나타내고 있으나 각 Case의 지표면 연직변위의 양상을 보면 개량범위가 작은 Case 1, 2, 3, 4(-3열, -2열, -1열, 0열)에 있어 성토체 끝단위치~제체 외측 2m 범위 사이에서 침하·융기의 양상이 급격하게 변화함을 알 수 있다.

그러나 Case 5, 6, 7(+1열, +2열, +3열)의 경우는 제체 하부에서의 거동과 같이 제체 외측부에서도 연직변위의 양상이 일정한 경향을 보이고 있다. 이는 제체 하부는 대부분 개량범위에 포함되어 있으나, 융기부분에 있어서는 경우에 따라 개량부분과 미개량부분이 포함되어 있기 때문에 연직배수재의 배수효과에 따른 압밀침하의 발생으로 인해 그 차이가 크게 나타난 것으로 분석된다.

결론적으로 각 Case의 지표면에서의 연직변위 변화의 결과에서는 각 Case별로 침하량, 융기량의 차이 모두 1cm 미만으로 개량범위에 따른 영향을 거의 받지 않고 있다고 할 수 있다.

2.2.2 10m 깊이에서의 연직변위

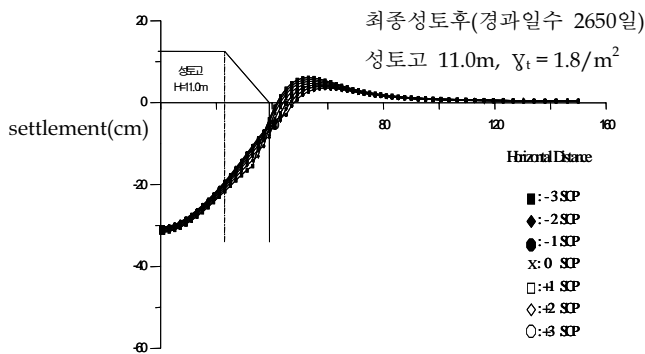


Fig. 4. Settlement profile at 10m depth

10m 깊이에서의 연직변위는 제체 중앙에서의 지표면 침하량(약 52cm 정도)의 약 60% 정도인 약 30cm 정도를 보이고 있으며, 융기량은 최대 6cm로 지표면 융기량의 60% 정도가 발생하였다. 종합적으로 10m 깊이에서는 지표면 연직변위량의 50~60% 정도의 침하, 융기를 보이며, 개량 범위에 따른 침하-융기 거동이 더욱 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있다.

2.2.3 성토체 윗단 위치에서의 수평변위

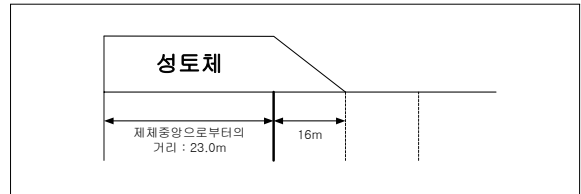


Fig. 5. An outline of upper spot on embankment

① 1단계 성토후(성토고 3m, 경과일수 630일)

1단계 성토후의 수평변위량을 나타내면 다음의 Fig. 5(a)과 같다. 지표면 부근에서는 2cm 미만으로 나타났으며, 수평변위가 가장 크게 발생한 10m 깊이에서도 2.5cm 미만으로 지표면 부근과 큰 차이가 없었다. 1단계 성토후에는 재하하중이 적어 개량범위에 따른 각 Case별 수평변위의 차이가 거의 나타나지 않았다.

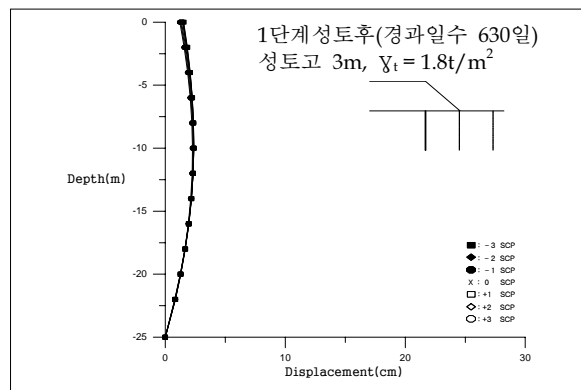


Fig. 5(a). Horizontal displacement profile after 1 step of banking

② 3단계 성토후(성토고 9.5m, 경과일수 930일)

3단계 성토후의 수평변위량은 Fig. 5(b)과 같다. 지표면 부근에서의 수평변위량은 약 7cm 가량 발생하였고, 지표면에서 개량범위에 따른 최대변위량과 최소변위량의 차이는 1cm 정도로 매우 미미하였다. 그리고, 수평변위량이 가장 크게 나타난 10m 깊이에서도 각 Case에 따른 최대 변위량과 최소변위량의 차이가 2cm 정도로 지표면부근의 변위차의 2배를 나타내고 있다. 또한 개량범위에 따른 각 Case의 수평변위량의 차이도 0.5cm 미만으로 매우 작게 나타났다.

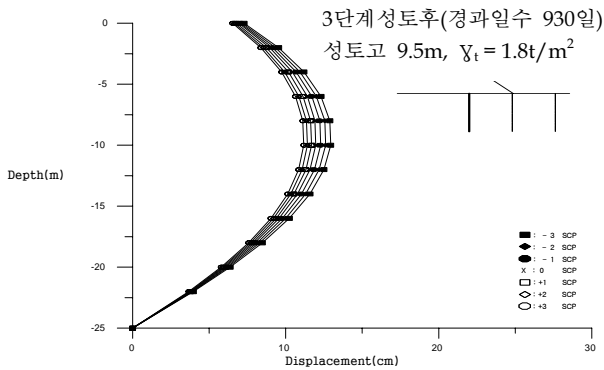


Fig. 5(b). Horizontal displacement profile after 3 step of banking

③ 최종단계 성토후(성토고 11.0m, 경과일수 2,650일)

최종단계 성토후의 결과에서는 지표면 부근의 수평변위량은 약 10cm 가량 발생하였고, 지표면에서의 개량범위에 따른 최대변위량과 최소변위량과의 차이는 1cm 정도로 매우 작게 나타났다. 그러나, 수평변위량이 가장 크게 나타나는 10m 깊이에서는 개량범위에 따라서 최대 3cm 정도로 3단계 성토후와 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 각 Case별 수평변위량의 차이도 3단계 성토후의 결과보다는 증가하였지만 1cm 정도로 미미하게 나타났다. 이는 성토하중의 증가는 물론 방치기간이 장기간에 걸쳐 이루어졌기 때문에 이에 따른 압밀침하량의 변화에 의한 것으로 판단된다.

성토하중의 증가에 따라 각 Case별로 성토체 윗단 위치에서의 수평변위를 검토해 본 결과, 성토체 윗단의 위치는 모든 Case의 개량범위 안에 위치하기 때문에 각 Case별로 수평변위량이 큰 차이 없이 일정한 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다.

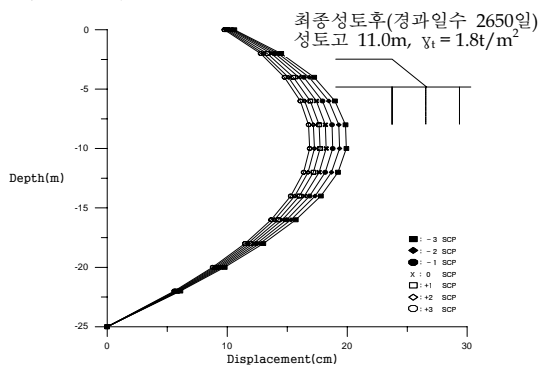


Fig. 5(c). Horizontal displacement profile after final step of banking

2.2.4 성토체 끝단 위치에서의 수평변위

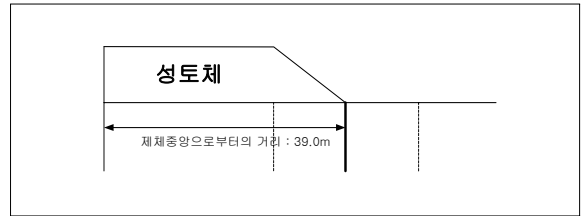


Fig. 6. An outline of edge on embankment

① 1단계 성토후(성토고 3m, 경과일수 630일)

1단계 성토후의 수평변위는 다음 Fig. 6(a)과 같다. Fig. 6(a)에 나타난 성토체 끝단 위치에서 수평변위를 분석하면 그림에 나타난 바와 같이 수평변위는 8m 깊이에서 가장 크게 나타났다. 지표면 부근의 최대수평변위량은 2.5cm 미만으로 나타났으나, 8m 깊이에서는 약 5cm 정도가 발생하였다. 성토체 끝단 위치에서는 성토체 윗단 위치에서의 수평변위 양상과 다른 독특한 경향을 나타내었다. 즉, 성토체 끝단에서 3열, 2열까지 SCP를 타설하지 않은 Case 1(-3열), Case 2(-2열)의 수평변위량이 다른 경우에 비하여 상대적으로 크게 발생한 것을 알 수 있다. 이는 개량 범위 부족에 의한 지반의 횡방향 이동량이 증가한 결과에 기인한 것으로 판단된다.

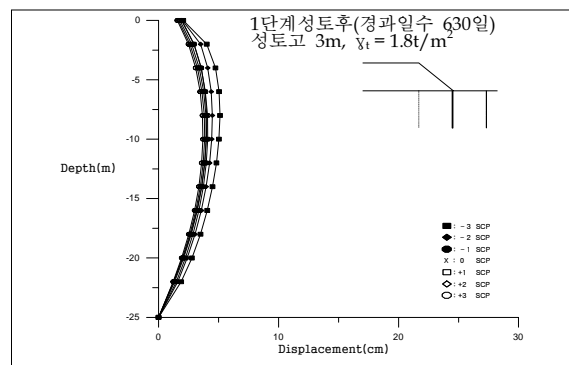


Fig. 6(a). Horizontal displacement profile after 1 step of banking

② 3단계 성토후(성토고 9.5m, 경과일수 930일)

3단계 성토후의 수평변위량은 Fig. 6(b)와 같다. 지표면 부근에서의 수평변위량은 약 8cm 가량 발생하였으나, 8m 깊이에서의 최대변위량은 17cm 정도로 지표면부근

변위량의 약 2배정도 발생하였다. 그리고 개량범위에 따른 변위량의 차이가 1단 성토때보다 더욱 크게 발생하였다. 특히 개량범위를 3열까지 감한 Case 1(-3열)의 경우의 수평변위양상이 다른 경우에 비해 독특한 정도로 큰 차이를 나타내 3열까지 감한 것은 효율적인 지반 개량에 있어 무리가 있을 것으로 판단된다.

또한 Case 3(-1열)의 경우가 Case 4(0열)의 경우보다 수평변위량이 작게 나타나고 있다. 지반의 개량효과를 분석하기 위하여 상기 방법을 시도한 결과, 원지반의 수평방향 이동이 성토체 끝단까지 개량한 경우와 끝단에서 안쪽으로 1열을 제거한 경우에 있어서도 그 값의 차이가 없는 것으로 판단되어 연직배수재의 1열 제거가 가능한 것으로 나타났다.

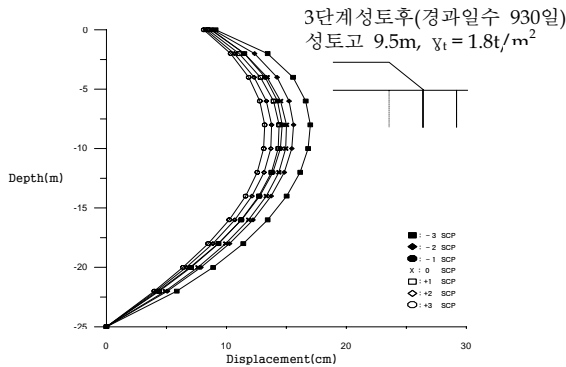


Fig. 6(b). Horizontal displacement profile after 3 step of banking

③ 최종단계 성토후(성토고 11.0m, 경과일수 2,650일)

최종단계 성토후의 결과에서는 지표면 부근의 최대수평 변위량이 13cm 정도 발생하였고, 8m 깊이에서는 최대 약 23cm 정도 발생하였다. 이는 3단계 성토후와 비교하면 6cm 정도 증가한 것으로 나타났으며, 전체적인 변위양상은 유사하였다. 하지만 더욱 두드러진 특징은 3단계에서 발생한 변위의 차이가 최종단계에서는 커지는 경향을 보였다. 또한 Case 3(-1열)의 경우가 Case 5(+1열)의 수평변위량과 비슷하게 나타남을 알 수 있으며, Case 1(-3열)에 있어 수평변위량 값이 여타 경우보다 크게 나타났다. 이는 3단계 성토후의 경향과 비슷한 분포를 나타내고 있으나, 3열까지 지반개량의 범위를 감하는 것은 많은 횡방향 변위를 불러 일으킬 수 있다는 것을 나타내고 있

어 실제 지반개량에 있어서 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

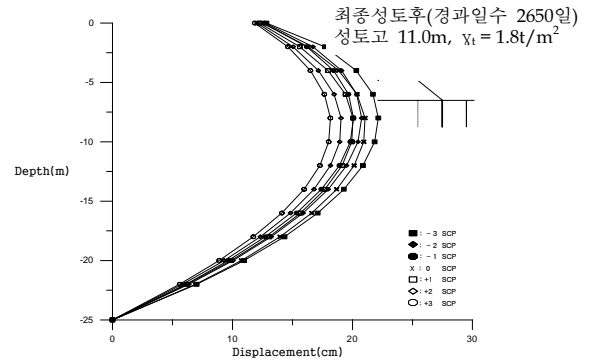


Fig. 6(c). Horizontal displacement profile after final step of banking

이러한 결과하에서, 이와 같은 조건으로 지반개량을 행할 경우 2열까지 감하여 시공하여도 성토체 끝단까지 개량한 경우(Case 4의 경우)와 비슷한 결과를 나타내는 바 실제 지반개량에 있어서 적용 가능성을 보여주고 있다. 그러나 실제 지반개량의 적용에 있어서는 시험시공이나 토조를 이용한 모형 실험등을 통한 많은 연구와 검증이 필요하다. 또 Case 1의 결과를 보면 이전의 하중단계에서보다 변위량의 차이가 더욱 크게 나타나 3열까지 감했을 경우는 수평방향 변위에 큰 영향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

2.2.5 미개량 구간 위치에서의 수평변위

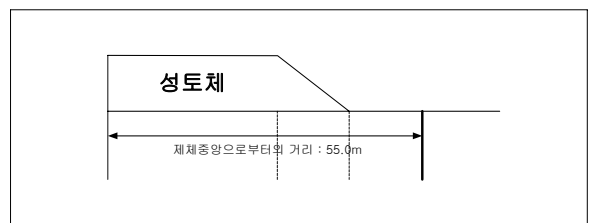


Fig. 7. An outline of unimproved spot

① 1단계 성토후(성토고 3m, 경과일수 630일)

성토고 3m인 1단계 성토후의 수평변위는 Fig. 7(a)와 같다. 지표면 부근의 수평변위량은 약 3cm 정도로 나타났으며, 최대수평변위를 나타내는 10m 깊이에서도 약 4cm 미만으로 지표면 부근과 큰 차이를 나타내지 않았다.

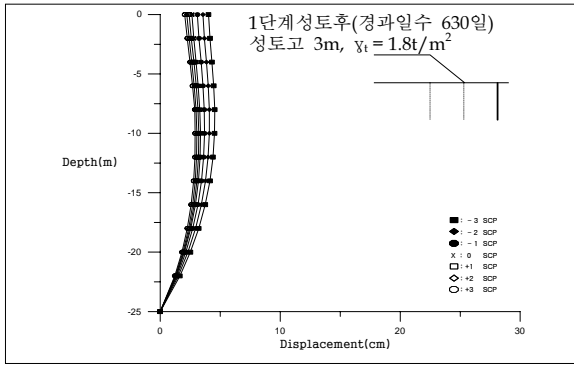


Fig. 7(a). Horizontal displacement profile after 1 step of banking

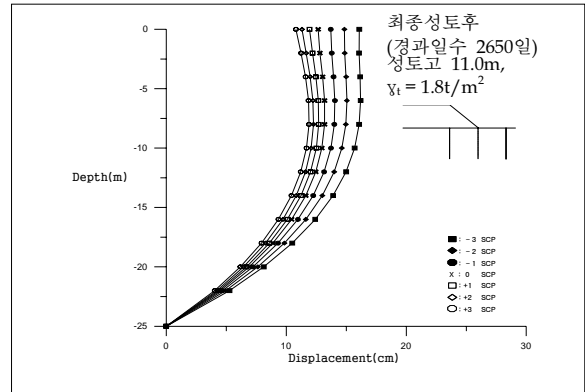


Fig. 7(c). Horizontal displacement profile after final step of banking

② 3단계 성토후(성토고 9.5 m, 경과일수 930일)

3단계 성토후의 수평변위량도 지표면 부근과 최대수평변위가 발생한 8m 깊이까지 큰 변화를 나타내지 않았다. 하지만 지표면에서 지반 개량범위에 따른 수평변위량이 서로 4cm 이상의 큰 차이를 나타내고 있어 지반개량의 범위가 제체의 횡방향 변위에 큰 영향을 끼치는 것을 알 수 있다.

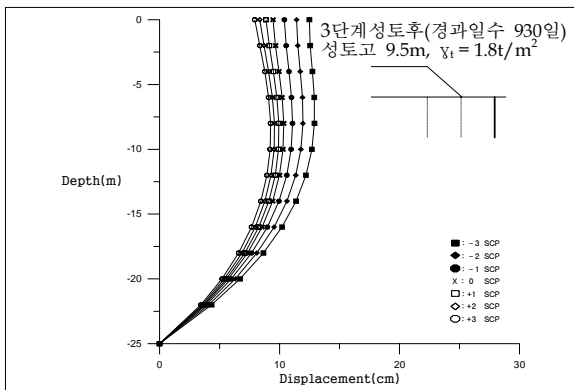


Fig. 7(b). Horizontal displacement profile after 3 step of banking

③ 최종단계 성토후(성토고 11.0m, 경과일수 2,650일)

최종단계 성토후의 결과에서는 각 Case별 수평변위량의 차이가 3단계 성토후보다 증가하여 지표면에서 최대 5cm 정도로 나타났으나, 지표면으로부터 깊이가 깊어질수록 수평변위량의 차가 줄어들어 10m 깊이에서는 개량 범위에 따른 변위량의 차이가 4cm 정도로 나타나고 있다.

미개량 구간의 위치에서 개량범위에 따른 수평변위량의 차이를 분석한 결과, 개량범위가 좁은 경우일수록 수평변위가 크게 나타났다. 특히 성토체 끝단에서 제체 안쪽으로 3열까지 감한 경우의 Case 1, 2, 3(-3열, -2열, -1열) 변위량의 차이가 각각 약 1cm 정도로 성토체 끝단부터 제체 밖으로 3열까지 추가한 Case 5, 6, 7(+1열, +2열, +3열)의 경우 변위량(각각 약 0.5cm 정도)에 비하여 2배 이상 크게 나타났다.

이는 개량범위가 제체 외측으로 넓은 범위까지 영향을 끼친다는 것을 나타내고 있다. 이상의 결과에서 각 Case별 수평변위량의 차이가 1cm 미만으로 매우 미소하므로 앞선 성토체 끝단위치의 결과에서와 같이 Case 3(-1열)의 실제 지반개량에 대한 적용 가능성을 보여주고 있다. 앞의 세 지점에서의 수평변위 변화의 경향은 최대측방변위량이 성토체 끝단지점에서 22cm 정도로 가장 크게 나타나고, 성토체 윗단위에서 20cm 정도, 미개량 구간 위치에서 16cm 정도가 발생하였는데, 각 위치에서의 최대값이 큰 차이를 보이지 않는 결과로 보아 지반 변위에 대한 제체하중의 영향이 성토체로부터 먼 위치까지도 영향을 미치는 것으로 분석된다.

3. 결 론

지반개량에 따른 연직배수재의 개량범위에 대해 수치해석을 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 연약지반의 개량범위에 따른 지표면에서의 연직변위를 분석한 결과, 성토체 끝단으로부터 개량범위를 3열까지 증가시킨 Case 5, 6, 7(+1열, +2열, +3열)은 침하-용기의 거동이 일정한 경향을 보이나, 제체 내측으로 3열까지 감소시킨 Case 1, 2, 3, 4(-3열, -2열, -1열, 0열)의 경우는 성토체 끝단 부근에서 침하-용기가 급작스럽게 반전되었다. 이는 성토체 끝단 부근이 Case 5, 6, 7의 경우엔 모두 개량범위 안에 포함되지만 Case 1, 2, 3, 4의 경우엔 개량범위 안에 포함되지 않기 때문인 것으로 판단된다.
2. 지표면으로부터 10m 깊이에서의 연직변위의 변화를 분석한 결과, 연약지반의 개량범위까지는 일정한 경향을 보이나, 그 이후부터는 침하량의 변화가 급격하게 나타났다. 이는 개량범위의 차이에 따라 발생한 수평변위량의 차이에 의한 것으로 판단된다. 또한 10m 깊이에서는 지표면에서의 연직변위량의 50~60% 정도가 발생됨을 확인할 수 있었다.
3. 성토체 윗단 위치에서의 수평변위를 분석한 결과, 이 위치는 모든 Case의 경우에 있어 개량범위 내에 위치하기 때문에 각 Case별로 수평변위량이 큰 차이 없이 일정한 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. 따라서 이 위치에서는 개량범위가 수평변위에 큰 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.
4. 성토체 끝단 위치에서의 수평변위를 분석한 결과, 여타의 Case에 비하여 Case 1(-3열)의 경우가 큰 변위를 보여, 지반개량 범위의 3열까지의 감소는 효율적인 지반개량에 있어 무리가 따를 것으로 판단된다. 또한 동일한 조건으로 지반개량을 할 경우, 2열까지 감한 Case 2(-2열) 시공하여도 성토체 끝단까지 개량한 Case 4(0열)와 비슷한 결과를 나타내는바 실제 지반개량에 있어서 적용 가능성을 보여주고 있다. 그러나 실제 지반개량의 적용에 있어서는 시험시공이나 토조를 이용한 모형 실험등을 통한 많은 연구와 검증이 선행되어야 한다.
5. 미개량 구간 위치에서의 각 Case별 수평변위의 차이를 분석한 결과, Case 1, 2, 3(-3열, -2열, -1열)의 경우가 Case 5, 6, 7(+1열, +2열, +3열)에 비하여 2배 정도의 수평변위차가 크게 나타났다. 이는 개량범위에 따라 수평변위량의 차이가 증대함을 나타내고 있으며, 변위량의 최대값도 15cm 미만으로 성토체 끝단의 최대 수평변위량 23cm보다 45% 정도 감소하여, 제체하중으로부터 멀어질수록 수평변위량도 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다.

(접수일자 : 2003년 4월 22일)

참 고 문 헌

1. 장용채 외 1인(1996), 교대변위 억제대책에 관한 연구(II), 도로연구소, 도로연 96-46-12
2. 장용채 외 1인(1995), 연약지반에서의 토질공학, 도서출판 새론
3. 장용채 외 1인(1997), 연약지반 대책공 메뉴얼, 한국도로공사, 도로연구소
4. 일본토질공학회(1993), 지반의 측방이동, 토질기초공학라이브러리
5. 일본도로협회(1986), 도로토공 연약지반 대책공 지침
6. 일본토질공학회(1982), 토질공학 핸드북
7. 일본토질공학회, 연약지반 대책공법 -조사 설계에서 시공까지-
8. A.M, Britto, Critical state Soil Mechanics Via Finite Element
9. Braza M, Das. Advanced Soil Mechanics, Mc Graw Hill
10. J.H, Atkinson, The mechanics of soil and foundation, McGraw-Hill
11. Karl Terzaghi, Theoretical Soil Mechanics, Chapman and Hall