

연약지반의 침하특성을 고려한 샌드매트의 실용적 설계를 위한 고찰

Practical Design of the Sandmat Considering Consolidation Settlement Properties

이 봉 직¹⁾ · 권 영 철²⁾ · 이 종 규[†]

Lee, Bongjik · Kwon, Youngcheul · Lee, Jongkyu

ABSTRACT : The practical design method on sandmat uses a drain length, rate of consolidation settlement and permeability of sand as a major design factors. And, on the basis of this design process, it has been installed beneath the embankment with same thickness. However, the possibility the underestimation on the thickness of sandmat and the delayed drain have been pointed out by several authors caused by a differential settlement at the center and the end of embankment. In this study, therefore, the effect of the differential settlement on the thickness of sandmat and delayed drain through the numerical analysis of embankment was analyzed. As a result, a substantial sandmat thickness becomes small and the possibility of the delayed drain can be certified because of the development of differential settlement at the center and ends of embankment. As a countermeasure to overcome this problem, the applicability of the mound type sandmat was also investigated by the numerical method. It can be concluded that it maintains the designated substantial sandmat thickness throughout consolidation process, and is useful method to maintain the drain capacity. Especially, the mound type sandmat is effective method for a construction site where can cause a differential settlement such as embankment. Furthermore, it has to be designed on the basis of the accurate prediction of consolidation settlement as well as rate of consolidation settlement, drain length and permeability of sand.

Keywords : Horizontal drain, Mound type sandmat, Delayed drain

요 지 : 현재 실무에서 사용되고 있는 샌드매트의 설계법에서는 주로 수평배수층의 배수거리, 침하속도, 투수성 등을 설계 인자로 사용하고 있으며, 현장 시공 시에는 성토체 하부에 동일한 두께로 시공하고 있다. 그러나 하부 연약지반의 변형에 따라 성토 중앙부와 양단에서 부등침하가 발생하게 되어 샌드매트 두께산정에 있어 과소평가될 가능성과 배수지연을 유발할 우려가 있음이 지적되어왔다. 본 연구에서는 연약지반의 변형으로 인해 생기는 부등침하의 발생이 배수지연 및 샌드매트의 두께산정에 어떠한 영향을 미칠 수 있는지 여부를 수치해석을 통해 분석하였다. 해석 결과 부등침하로 인하여 실질 유로두께의 감소를 확인할 수 있었으며, 새로운 위치수두의 차가 발생하여 배수지연 현상을 유발할 가능성이 있음이 확인되었다. 이에 대한 대응책으로 본 연구에서는 사전에 부등침하를 예측하여 성토 중앙부의 샌드매트 두께를 증가시킨 마운드형 샌드매트의 적용성에 대하여 검토하였으며, 압밀의 진행에 따라 변형이 크게 발생하여도 소정의 실질 유로두께를 유지하고 있음을 확인하였다. 특히, 마운드형 샌드매트는 연약지반 성토와 같이 변형의 분포가 위치에 따라 다른 경우의 건설공사에 매우 유효하리라 판단하며, 경제적이고 합리적인 수평배수재로서 적용이 가능할 것으로 판단되었다. 또한, 마운드형 샌드매트의 설계를 위해서는 성토단계별로 압밀속도, 배수거리나 투수성뿐만 아니라 연약지반의 침하특성을 정확하게 예측하는 것이 필수적이라고 사료된다.

주요어 : 수평배수재, 마운드형 샌드매트, 배수지연

1. 서 론

연약지반 처리공법 중 가장 빈번히 사용되는 공법은 프리로딩공법과 연직배수공법을 들 수 있다. 프리로딩 공법과 연직배수공법을 적용하는데 있어서는 반드시 수평배수재를 설치하게 되는데 이 수평배수재의 주요한 역할은 압밀의 진행에 따라 배수되는 간극수를 횡방향으로 배수시키거나 성토내의 지하수위를 저하시키는 배수층의 역할 및 연약지반에서의 건설공사를 원활하게 수행할 수 있도록

록 하는 주행성의 확보이다.

시간 의존적 거동인 연약지반의 압밀에서 수평배수재가 제 기능을 발휘하지 못할 경우, 압밀에 의해 배출된 간극수가 외부로 원활하게 배출되지 못하여 결과적으로는 압밀의 지연을 발생시키게 된다. 이처럼 수평배수재의 성능 유지는 연약지반 개량에 있어서 중요한 영향인자이지만 이에 대한 연구는 연직배수 등 압밀축진공법에 비해 상대적으로 부족한 것이 현실이다.

지금까지 수평배수재에 관한 연구는 연직배수재와 수평배

1) 정희원, 충주대학교 토목공학부 부교수

2) 정희원, 충주대학교 토목공학부 연구교수

† 정희원, (주)진산이엔지 지반부 이사(E-mail : jklee@empal.com)

수재를 동시에 고려하여 압밀해석을 실시하는 방법(Yoshikuni, 1974)이 제안된 바 있으며, 김현택(2001; 2002) 등은 수평배수층의 소요 통수능에 관한 연구를 실시하였다. 또한, 장연수(2003) 등은 수평배수재의 불포화 특성에 관한 영향 인자를 분석하였으며, 이송(2000) 등은 수평배수를 고려한 비선형 해석 방법을 제안하였다.

수평배수재로는 샌드매트가 가장 널리 사용되고 있으며, 실무 수준에서의 샌드매트의 설계에는 배수거리, 침하속도, 투수성 등이 고려되고 있다. 하지만 연약지반에서 성토를 시공하는 경우에는 성토 중앙부와 성토양단에 있어서 침하량의 차이가 발생하게 되며, 성토체 하부에 설치되는 샌드매트 역시 성토체와 동일하게 성토 중앙부의 침하량이 커지는 것이 일반적이다. 따라서 압밀침하가 진행됨에 따라 성토체 외부로 간극수를 배출하는 성토의 양단과 연약지반에서 배수되어오는 성토 중앙부에서는 침하량의 차이에 의한 위치수두의 차이가 발생하게 된다. 이 때문에 샌드매트의 배수 성능의 저하를 유발하게 되며 결국에는 압밀을 지연시키게 된다. 결국, 원활한 배수를 위해서는 단계 성토의 진행과 더불어 발생하는 압밀 침하거동을 분석하여 간극수가 샌드매트로 유입되어 오는 지점과 이를 배출시키는 지점의 침하량의 차이가 연약지반에 시공하는 성토의 압밀침하거동에 미치는 영향을 반영할 필요가 있다.

이와 같은 문제인식을 바탕으로 각종 설계에서는 시공 개선사항으로 성토 중앙부에 시공되는 샌드매트의 두께를 증가시키는 마운드형 샌드매트를 도입하는 사례가 증가하고 있으며, 특히 김형주(2006) 등은 압밀침하를 고려하여 샌드매트의 간극수압거동에 관한 실험적 연구 결과를 제시하였다.

이에 본 연구에서는 기존의 샌드매트 설계방법을 고찰하였으며, 연약지반이 분포하는 지반에 대한 수치해석을 통하여 성토체의 침하량을 평가하고, 수평배수재의 침하량 차이로 인한 배수특성의 변화를 평가하였다. 이를 바탕으로 연약지반의 침하특성을 고려하지 않고 수평배수재의 두께를 산정할 경우 발생할 수 있는 배수지연 가능성에 대해 논의하였으며, 이에 대한 대안으로 성토 중앙부에 추가 성토를 하여 마운드형으로 샌드매트를 설치할 경우에 대하여 침하 및 배수특성을 평가하였다.

2. 샌드매트 통수능 평가

샌드매트의 통수능을 평가하기 위하여 Yoshikuni(1974)는 수평배수재와 연직배수재를 동시에 고려할 수 있는 압밀해석방법을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F(n) + 0.8L}\right) \quad (1)$$

$$\text{여기서, } F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2},$$

$$L = \frac{32}{\pi^2} \left[\frac{k_h}{k_v} \left(\frac{H_s}{d_w}\right)^2 + \frac{H_s k_h}{n^2 TK} \left(\frac{L_d}{d_w}\right)^2 \right]$$

여기서, n : 간격비, T_h : 수평방향시간계수, t : 압밀소요 시간, c_h : 흙의 수평압밀계수, d_e : 영향원의 직경, H_s : 점토층 두께, T : 수평배수층 두께, k_v : 연직배수재 투수계수, K : 수평배수재 투수계수, L_d : 배수저항계수이다. 샌드매트 두께 산정에 있어, 국내에서 설계에 주로 적용되는 기준은 한국도로공사(1997; 1998) 설계기준이다. 이에 따르면 성토재하기간 동안 평균동수구배가 수평배수층 내 자유 수면을 갖는 조건, 즉 위치수두만 갖고 압력수두가 발생되지 않은 조건은 식 (2) 및 (3)과 같으며, 식에 나타난 각 인자에 대한 설명은 그림 1과 같다(한국도로공사, 1998).

$$Q = L \cdot S = k \cdot i \cdot A = \frac{k \cdot \Delta H_m \cdot H}{L} \quad (2)$$

$$\Delta H_m = \frac{L^2 \cdot S}{2 \cdot K \cdot H} \quad (3)$$

여기서, ΔH_m : 샌드매트 내의 압력수두(cm), L : 수평배수층의 배수거리(cm), S : 성토재하시의 평균 침하속도(cm/day), K : 모래의 투수계수(cm/day), H : 샌드매트두께(cm)이다. 설계 시에는 식 (3)에서 $\Delta H_m < H$ 라는 조건을 만족하는 범위에서 샌드매트 두께를 결정하고 있다. 그러나 이 경우에는 성토 중앙부의 압밀침하량만을 고려하게 되므로 성토 사면부와 중앙부의 침하 차이에 따른 동수구배의 변화 혹은 위치수두의 변화를 충분히 반영할 수 없다는 지적도 있다(김형주 등, 2006). 물론 압밀침하 초기에는 식 (1)에 의해 샌드매트 두께를 산정하여도 배수가 가능하나, 압밀이 진행됨에 따라 샌드매트가 성토체와 같이 침하할 경우에는 샌드

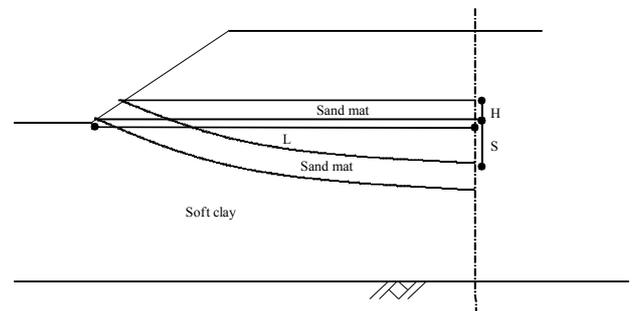


그림 1. 샌드매트의 배수효과

매트의 위치수두가 변화하게 되며 압밀침하량의 차이에 따라 배수효과가 저감될 수 있고 또한 수평배수층 내 자유 수면을 갖는 조건을 만족할 수 없는 상황이 될 수 있다.

3. 수치해석을 통한 침하해석

본 연구에서는 연약지반이 분포하는 신설 국도현장을 상정하여 침하해석을 실시하였으며, 본 구간에 적용된 공법은 PVD 공법으로 방치기간은 6개월, 2단계의 단계성토로 계획하였다. 해석단면 및 주요 제원은 그림 2와 같다.

압밀침하해석은 수정 Cam-clay 모델을 이용하였으며, 해석에 사용된 주요지반정수를 요약하면 표 1과 같다. 해석시 경계조건은 해석체 양단은 롤러조건, 하단부는 고정조건으로 모델링하였으며, 연직배수재는 등가투수계수 개념을 적용하였다. 또한 수평배수재 포설방법을 수평 및 포물선 형태로 모델링 하였으며, 연약지층 두께를 5, 10, 15, 20m로 변경시켜가며 해석을 실시하였다.

해석은 샌드매트 설치 방법을 수평 및 포물선 형태로 모델링 하였으며, 연약지층 두께를 5, 10, 15, 20m로 변경해 가면서 해석을 실시하였다. 해석은 초기하중 설정, 1단계 성토 후 압밀, 2단계 성토 후 압밀 순으로 해석을 실시하였으며, 각각의 경우의 침하량과 수평배수재의 배수특성을 평가하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 침하를 고려하지 않을 경우 수평배수재의 두께 평가

침하를 고려하지 않을 경우 샌드매트의 두께는 식 (3)을

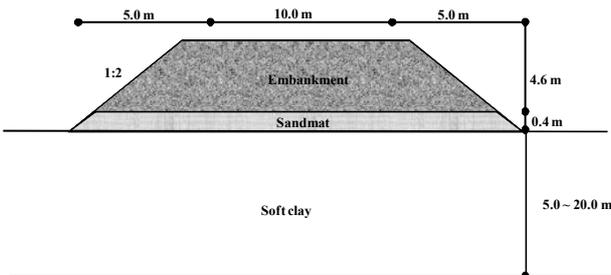


그림 2. 해석단면 및 주요 제원

표 1. 해석에 적용된 주요 지반정수

성토체	γ_t (tf/m^3)	C (tf/m^2)	ϕ ($^\circ$)	E (tf/m^2)	ν
	1.90	1.5	25	3,000	0.30
점토층	λ^*	κ^*	C_{CU}^*	ϕ'_{cu}	μ_{ur}
	0.068	0.017	0	31	0.15

이용하여 평가하였으며, 샌드매트의 두께는 주로 침하속도와 배수거리에 의해 결정되며, 샌드매트 내의 압력수두보다 샌드매트의 두께가 클 경우 수평배수가 이루어진다. 이하에서는 침하를 고려하지 않은 경우에 있어서 샌드매트의 두께 산정에 큰 영향을 미치는 배수거리와 침하속도의 측면에서 분석을 실시하였다.

먼저, 그림 3은 침하속도가 동일한 조건에서 배수 길이를 변화시켰을 경우의 해석 결과를 나타내고 있다. 그림에서 T_{min} AREA는 이미 언급한 바와 같이 수평배수가 일어날 조건, 즉 압력수두보다 두께가 커지는 영역을 나타내고 있으며, 각 압력수두에서 유지해야할 최소의 샌드매트 두께를 만족시키는 영역을 표현하고 있다. 그림 3을 통해 배수 길이가 15m, 20m, 30m인 경우에 확보해야할 샌드매트의 최소 두께는 각각 40cm, 50cm, 80cm 정도임을 알 수 있으며, 배수성능을 확보할 수 있는 샌드매트의 최소두께와 배수 길이 사이에는 어느 정도의 비례관계가 인정될 수 있음을 알 수 있었다.

그림 4는 그림 3과 반대로 배수 길이를 동일하게 고정하고

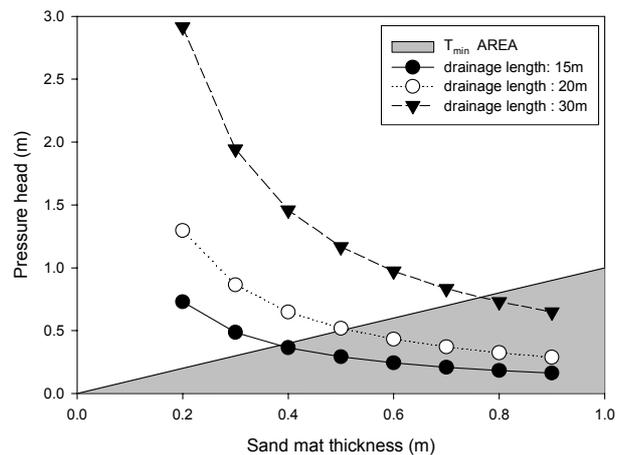


그림 3. 배수 길이에 따른 샌드매트 두께

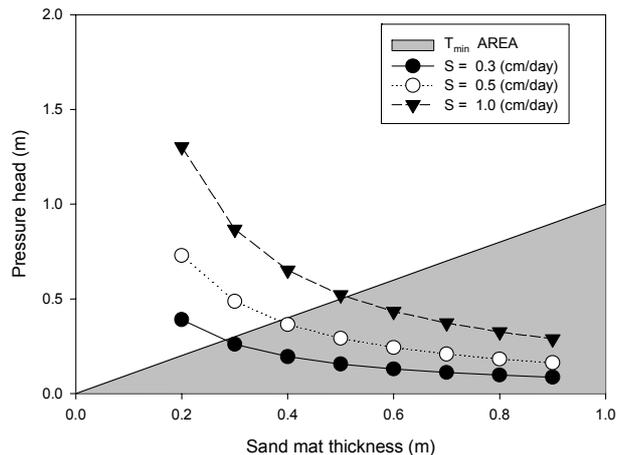


그림 4. 침하속도에 따른 샌드매트 두께

상태에서 침하속도를 변화시키며 해석한 결과를 나타내고 있으며, 침하속도가 0.3cm/day일 경우 30cm 두께면 배수가 가능하지만, 침하속도가 1.0cm/day로 증가할 경우 샌드매트의 최소 두께는 60cm 이상 확보해야 하는 것으로 나타났다.

상기 그림에서 볼 수 있듯이 기존에 설계에 반영되고 있는 샌드매트는 침하에 따른 성토 중앙부와 양단부의 침하량 차이를 반영하지 못하고 있다. 즉, 샌드매트의 평균적인 두께만을 설계인자로 사용하고 있으므로, 샌드매트의 위치에 따른 부등침하가 발생 할 경우 샌드매트로 간극수가 유입되는 유입점과 샌드매트 밖으로 유출되는 지점에 위치수두가 변화하기 때문에 침하가 진행될수록 배수가 불량해질 가능성은 높다고 판단된다.

따라서 원활한 배수를 위해서는 성토단계에 따른 압밀 침하 거동분석을 통하여 샌드매트 내의 간극수 유입지점과 유출지점의 침하량 차이를 고려하여야 한다. 특히, 침하가 상당히 진행된 단계에서는 압밀 침하 차이가 커지기 때문에 압밀로 인해 샌드매트로 유입되는 간극수를 성토 외부로 배출하기 위해서는 샌드매트의 두께를 증가시키거나 혹은 압밀침하에 대응하는 단면으로 샌드매트를 계획하는 것이 바람직하다고 판단된다.

4.2 침하량을 고려한 샌드매트의 두께 평가

4.2.1 연약층 심도에 따른 침하량 평가

침하에 따른 샌드매트의 두께를 산정하기 위하여 유한 요소해석을 통해 침하량을 평가하였으며, 주요 침하 기준 위치는 그림 5와 같다.

그림 5에서 샌드매트 중앙부의 침하량은 ΔT_c 샌드매트 끝단의 침하량은 ΔT_e 로 나타냈으며, 침하각은 θ 로 표현하였다. 샌드매트에 대한 침하 해석결과를 요약하면 표 2와 같다.

해석결과 침하량은 성토체 하부에서 가장 크며, 성토체 끝단으로 갈수록 감소하는 경향을 보였으며, 연약층심도가

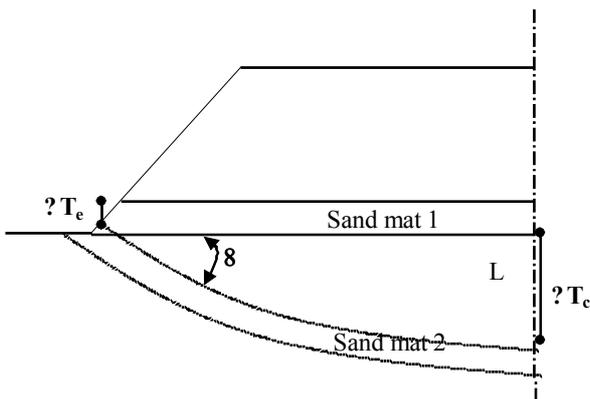


그림 5. 해석에서의 침하 기준 위치

깊을수록 침하량은 커지는 것으로 분석되었다. 또한 샌드매트 상부보다는 샌드매트 하부의 침하량이 다소 큰 것으로 나타났으나 그 차이는 미소한 것으로 나타났다. 성토위 치별 침하량을 나타내면 그림 6부터 그림 9와 같다.

해석결과, 연약층심도가 깊을수록 최종침하량은 커지며, 성토체 중앙부와 성토체 끝단의 침하량 차이를 나타내는

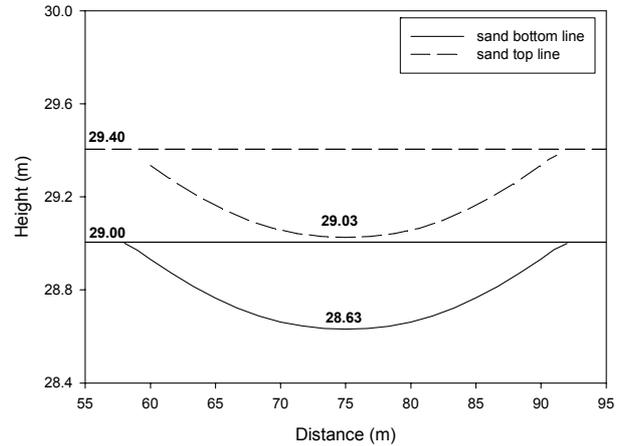


그림 6. 성토위치에 따른 최종침하량(H_s : 5.0m)

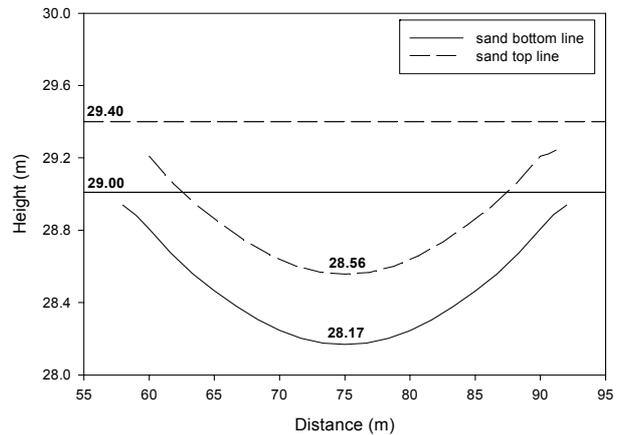


그림 7. 성토위치에 따른 최종침하량(H_s : 10.0m)

표 2. 샌드매트의 침하해석결과

1단계 성토			
H_s (m)	ΔT_c (cm)	ΔT_e (cm)	θ
5	26.3	0.5	0.017
10	61.7	4.5	0.038
15	81.4	9.8	0.048
20	90.1	14.3	0.050
2단계 성토			
H_s (m)	ΔT_c (cm)	ΔT_e (cm)	θ
5	37.0	0.9	0.025
10	84.0	6.0	0.052
15	109.0	13.0	0.064
20	122.0	19.0	0.069

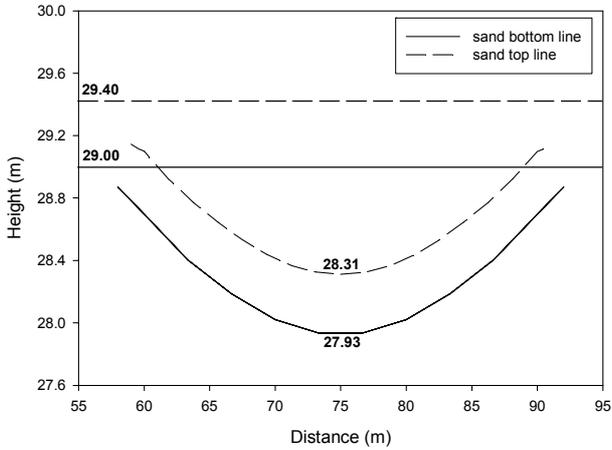


그림 8. 성토위치에 따른 최종침하량(H_s : 15.0m)

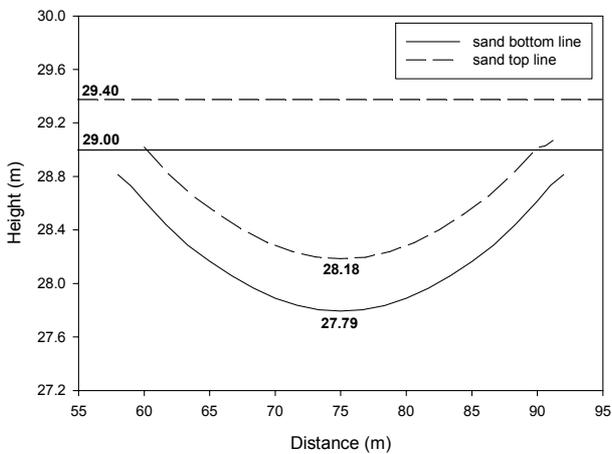


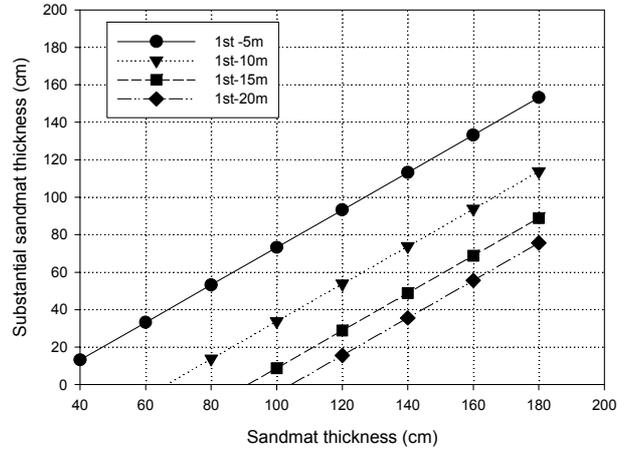
그림 9. 성토위치에 따른 최종침하량(H_s : 20.0m)

침하각 역시 증가하므로 샌드매트의 통수능에 미치는 영향 역시 연약층심도가 깊을수록 클 것으로 예상된다.

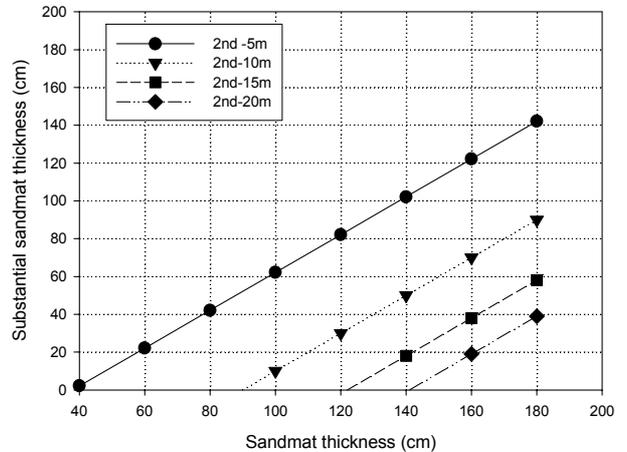
4.2.2 침하량을 고려한 샌드매트 두께 평가

성토체의 침하가 진행됨에 따라 성토체 하부에 있는 샌드매트 역시 침하하며, 이에 따라 샌드매트를 수평으로 설치하였다 하더라도, 침하가 진행됨에 따라 포물선 형태로 변화하게 된다. 침하는 성토체 중앙부가 비교적 크고 성토체 끝단으로 갈수록 감소하기 때문에 성토체 중앙부에서 발생하는 압밀 유출수는 침하차이에 의해 발생하는 위치수두의 차이에 의해 성토 끝단으로 유출되지 못하여 결국 배수지연의 원인으로 작용할 수 있다.

따라서 침하가 발생된 후 실제 유로를 형성하게 되는 샌드매트의 두께는 줄어들 수밖에 없으며, 본 연구에서는 샌드매트의 끝단 높이와 중앙부 높이의 차를 실질 유로두께로 산정하였다. 그림 10은 연약층심도 및 각 성토단계에서 침하량 계산 결과를 반영하여 실질 유로두께를 산정한 결과를 나타낸 것이다. 최종 침하량을 기준으로 놓고 볼 때 침하량



(a) 1단계 성토 후



(b) 2단계 성토 후

그림 10. 연약층 심도에 따른 샌드매트의 실질 유로두께

이 비교적 작게 발생하는 구간의 경우, 성토높이 5m인 경우 초기 설치된 샌드매트두께 60cm를 설치하였다 하더라도 침하 후 실질유로두께는 20~30cm에 지나지 않게 되어 상당한 압밀지연이 발생할 가능성이 있으며, 성토높이가 10m인 경우에는 배수가 불가능한 것으로 분석되었다. 더욱이, 연약층의 심도가 20m로 깊은 경우에는 성토 중앙부와 양단의 압밀침하의 차이가 100cm 이상 발생됨에 따라 자연 유하로 흐를 수 있는 실질 유로두께를 확보하기 위해서는 최소 140cm 이상의 샌드매트 단면이 확보되어야 하는 것으로 나타났다.

침하량을 고려하지 않고 수평배수층 두께를 산정할 경우에는 대체적으로 50cm 전후이면 배수흐름에 문제가 없다고 판정되었으나, 압밀침하를 고려할 경우에는 압밀이 진행되어 침하가 크게 발생하는 경우에는 성토 중앙부와 양단의 침하 차이도 커지게 되어 배수흐름에 문제가 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 반면에 1단계 성토 후의 침하량만을 기준으로 놓고 판단하면 과다하게 두께가 산정될 수 있기 때문에 단계성토시 중간단계에서 발생한 침하량을 이용한 것과 비교하여 적용하여야 할 것으로 판단된다.

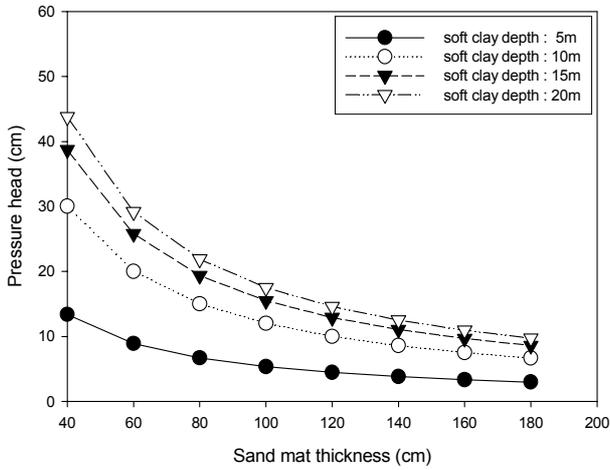


그림 11. 연약층 심도에 따른 압력수두

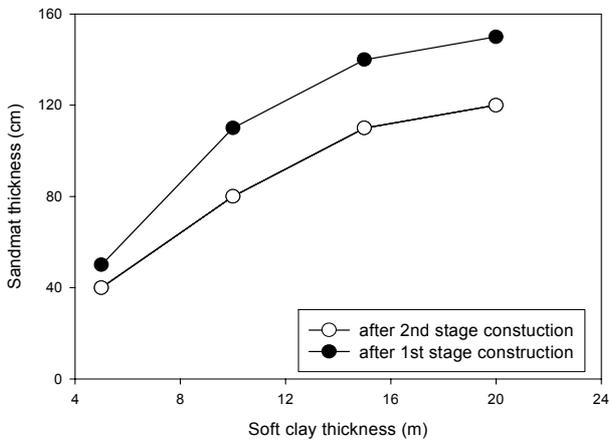


그림 12. 연약층 심도에 따른 샌드매트 두께

그림 11은 연약층심도에 따른 압력수두의 변화를 나타낸 것으로, 연약층심도가 클수록 압력수두는 증가하며, 이는 침하속도에 따른 영향인 것으로 분석된다. 샌드매트 내에서 자유 수면이 형성되기 위해서는 그림 10의 샌드매트 실질 유로두께보다 샌드매트내의 압력수두가 작아야 하는 조건을 충족시켜야 한다.

그림 12는 침하량을 고려할 때의 연약층심도와 성토단계에 따라 샌드매트 내에 자유 수면이 형성되기 위한 샌드매트의 최소 두께를 구한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 침하량을 고려하였을 경우 최소 40cm에서 최대 140cm 까지 샌드매트 두께를 확보하여야 하는 것으로 분석되었다. 동일한 조건에서 침하량을 고려하지 않을 경우 산정된 샌드매트두께는 40cm~60cm인 것과 비교하여 볼 때 샌드매트 두께 부족으로 인한 배수지연이 발생 할 수 있는 것으로 나타났다.

4.3 마운드형 샌드매트의 특성 평가

지금까지의 해석 결과에 기초하여 판단하면, 샌드매트의 두께를 동일한 단면으로 시공하는 것보다는 성토 중앙부에

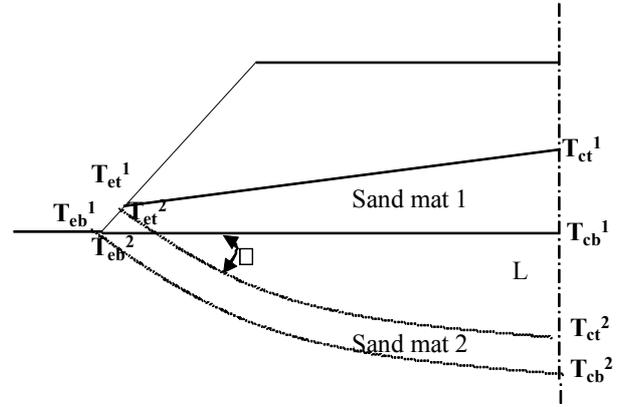


그림 13. 마운드형 샌드매트의 침하 기준 위치

표 3. 마운드형 샌드매트의 침하해석결과

샌드매트 중앙부 해석결과					
H_c (m)	샌드매트 두께(cm)	T_{ct}^1	T_{cb}^1	T_{ct}^2	T_{cb}^2
5.0	50	29.5	29	29.1	28.6
10.0	110	30.1	29	29.3	28.1
15.0	140	30.4	29	29.3	27.9
20.0	160	30.6	29	29.4	27.7
샌드매트 끝단부 해석결과					
H_c (m)	샌드매트 두께(cm)	T_{et}^1	T_{eb}^1	T_{et}^2	T_{eb}^2
5.0	40	29.4	29	29.4	29.0
10.0	40	29.4	29	29.3	28.9
15.0	40	29.4	29	29.3	28.9
20.0	40	29.4	29	29.2	28.8

서 발생하게 될 큰 압밀침하에 대비하여 샌드매트도 성토 중앙부로 갈수록 두께를 증가시키는 이른바 ‘마운드형’ 샌드매트가 실무적으로 배수성능을 유지시키기 위한 대안으로 제시될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 압밀 침하의 발생에 따른 마운드형 샌드매트의 효과를 평가하기 위하여 유한요소해석을 실시하였으며 이에 기초하여 침하량을 평가하여 마운드형 샌드매트의 성능을 평가하고자 하였다. 수치해석에서 사용한 침하 기준 위치는 그림 13과 같다.

그림 13에서 샌드매트 최소두께는 40cm를 유지하였으며, 수평으로 설치된 수평매트의 해석결과를 이용하여 최종침하량에 대한 침하각을 이용하여 샌드매트의 중앙부 두께를 산정하였다. 그림에서 샌드매트의 초기설치위치는 성토중앙부 위치(T_{ct}^1 , T_{cb}^1)와 성토 끝단 위치(T_{et}^1 , T_{eb}^1)이지만 침하가 발생된 후 샌드매트의 위치는 성토체의 침하와 함께 변화하여 침하 후 성토중앙부 위치(T_{ct}^2 , T_{cb}^2)와 침하 후 성토 끝단 위치(T_{et}^2 , T_{eb}^2)로 변화되는 것을 나타낸 것이다. 마운드형 샌드매트에 대한 침하 해석결과를 요약하면 표 3과 같다.

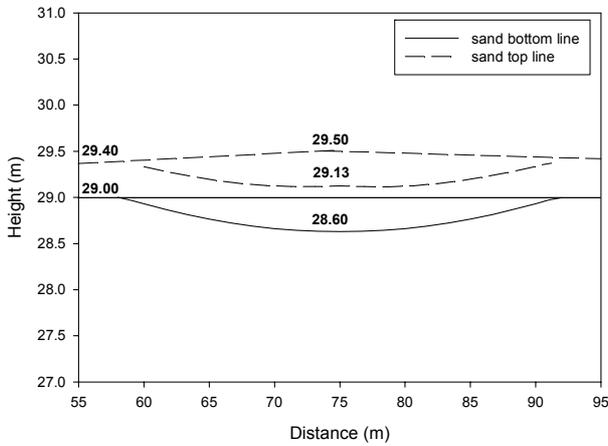


그림 14. 마운드형 샌드매트 최종침하량(H_s : 5.0m)

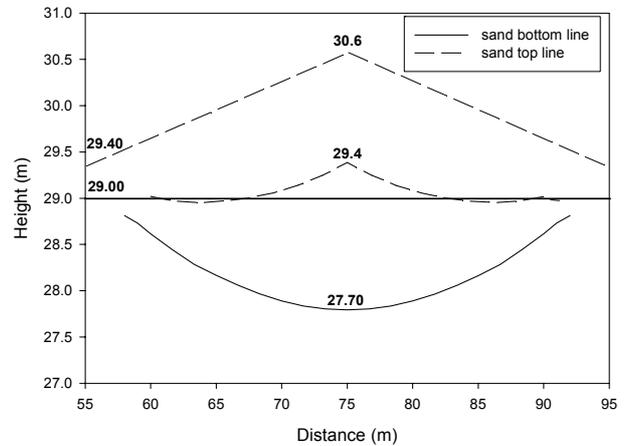


그림 17. 마운드형 샌드매트 최종침하량(H_s : 20.0m)

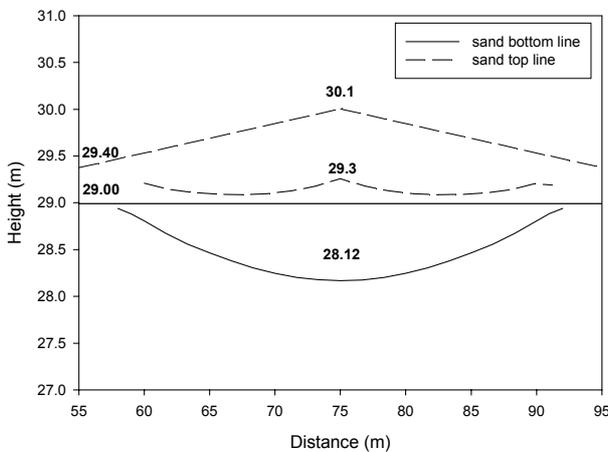


그림 15. 마운드형 샌드매트 최종침하량(H_s : 10.0m)

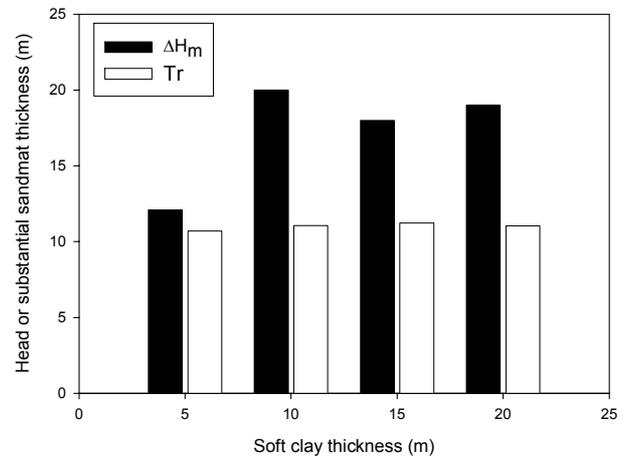


그림 18. 샌드매트의 배수성 평가

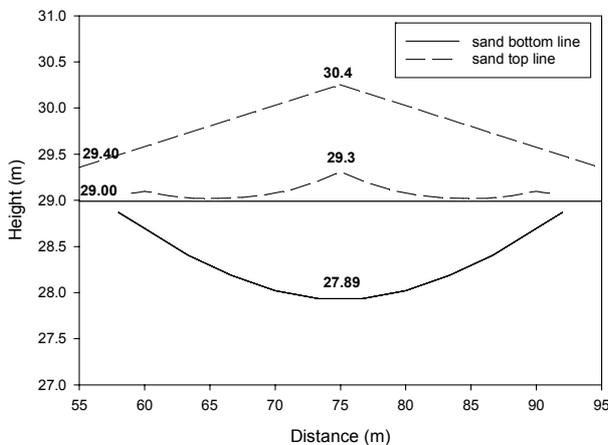


그림 16. 마운드형 샌드매트 최종침하량(H_s : 15.0m)

그림 14에서 그림 17은 연약층 두께에 따른 해석결과를 나타낸 것으로 침하가 진행됨에 따라 포물선 형태로 변화하게 되지만, 사전에 성토체 중앙부의 두께를 증가시켜 설치하였기 때문에 샌드매트 상부는 비교적 선형을 이루게 되는 것을 알 수 있다. 즉, 샌드매트 하단층의 침하량은 수

평으로 설치된 경우와 유사하지만 샌드매트 상단부의 경우 두께를 증가시켰으므로 수평배수층 내에 자유 수면이 형성될 수 있음을 나타내고 있다.

그림 18은 마운드형으로 샌드매트를 설치할 경우의 압력수두(ΔH_m)와 샌드매트 실질 유로두께(T_r)를 나타낸 것으로, 모든 경우에서 압력수두가 샌드매트의 실질 유로두께보다 큰 것으로 나타나 샌드매트의 배수성능 유지가 가능함을 보이고 있다. 침하를 고려하여 샌드매트의 두께를 증가시킨 경우에는 당연히 공사비가 증가하게 된다. 따라서 사전에 충분한 검토를 통해 침하량의 분포를 예측하고 이를 통해 마운드형으로 샌드매트를 설치한다면 공사비의 증가를 최대한 억제하고 동시에 합리적인 샌드매트의 설계가 가능할 것으로 판단된다.

마지막으로 향후 연직배수재와 샌드매트를 동시에 고려한 해석을 통하여 침하단차에 따른 샌드매트의 배수특성을 평가하기 위한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 샌드매트 설계방법을 고찰하고, 연약지반 위에 시공된 성토를 대상으로 한 수치해석을 통하여 성토체의 침하량 및 샌드매트의 배수특성을 평가하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 현재 실무에서 사용되고 있는 샌드매트 설계법은 주로 수평배수층의 배수거리, 침하속도, 투수계수 등의 인자를 사용하고 있으나, 이 방법은 샌드매트의 변형에 대한 영향인자가 부재하여 성토 양단과 중앙부의 침하량의 차이에 의해 발생하는 배수지연을 방지할 수 없는 구조를 갖고 있어, 샌드매트의 두께가 과소평가될 가능성이 있음을 알 수 있었다.
- (2) 성토 중앙부와 양단의 부등침하는 연약지층의 깊이가 깊어질수록 커지게 되며, 이 부등침하를 고려하여 실질 유로두께를 산정해 본 결과 초기에 설치된 샌드매트에 비해 배수에 기여할 수 있는 유로 두께는 크게 감소함을 알 수 있었다. 또한, 새로운 위치수두의 차가 발생할 것으로 예측되어 원활한 배수를 위해서는 더 많은 압력수두의 발생이 요구되므로 결과적으로는 배수지연현상을 유발할 가능성이 있음을 확인하였다.
- (3) 본 연구에서는 사전에 성토 중앙부와 양단의 부등침하를 예측하여 성토 중앙부의 샌드매트 두께를 증가시킨 마운드형 샌드매트의 적용성에 대하여 검토하였으며 압밀의 진행에 따라 변형이 크게 발생하여도 소정의 실질 유로두께를 유지하고 있음을 확인하였다. 따라서 마운드형 샌드매트는 연약지반 성토와 같이 변형의 분포가 위치에 따라 다른 경우의 건설공사에 매우 유효하리라 판단하며 경제적이고 합리적인 샌드매트로서 적용할 수 있을 것으로 판단한다.
- (4) 마운드형 샌드매트의 설계를 위해서는 성토단계별로

압밀속도, 배수거리, 연약지반의 침하특성을 고려하여야 하며, 최종침하량을 기준으로 샌드매트 두께를 산정할 경우 과다하게 두께가 산정될 수 있기 때문에, 단계성토시 중간단계에서 발생한 침하량을 이용한 결과와 비교하며 적용하여야 할 것으로 판단된다.

- (5) 향후 연직배수재와 수평배수재를 동시에 고려한 해석을 통하여 침하단계에 따른 배수지체 특성을 평가하기 위한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 1차년도 충주대학교 대학구조개혁지원사업비의 지원을 받아 수행한 연구로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김현택, 김상규, 공길용(2001), 연약지반위에 성토시 수평배수층의 소요통수능, *한국지반공학회논문집*, 제17권 제5호, pp. 83~96.
2. 김현택, 김상규, 공길용(2002), 연직배수공법에서 수평배수층의 소요통수능, *한국지반공학회논문집*, 제18권 제1호, pp. 59~70.
3. 김형주, 이민선, 백필순, 전해선(2006), 점토지반 샌드매트의 간극수압 거동, *한국지반공학회논문집*, 제22권 제8호, pp. 55~62.
4. 이송, 채영수, 황규호, 전제성(2000), 수평배수를 고려한 압밀 해석, *한국지반공학회논문집*, 제16권 제6호, pp. 105~115.
5. 장연수, 박정순, 박정용(2003), 수평배수재의 불포화 통수 특성 연구, *한국지반공학회논문집*, 제19권 제2호, pp. 15~25.
6. 한국도로공사(1997), 연약지반 수평배수재 연구, pp. 1~94.
7. 한국도로공사(1998), 도로설계실무편람, pp. 586.
8. Yoshikuni, H. and Nakanodo, H.(1974), Consolidation of soils by vertical Drain Wells with Finite Permeability, *Soils and Foundations*, Vol. 14, No. 2, pp. 35~46.

(접수일: 2007. 6. 25 심사일: 2007. 7. 20 심사완료일: 2007. 9. 14)