

성토체 및 모래매트의 강성이 하부지반의 변형과 성토체의 안전에 미치는 영향에 대한 유한요소해석

배우석* · 김종우* · 권영철†

*청주대학교 토목환경공학과 · 충주대학교 토목공학과

(2007. 5. 16. 접수 / 2007. 7. 24. 채택)

Finite Element Analysis for the Effects on the Stiffness of the Embankment and Sandmat on the Deformation Property and the Safety of Road Embankment

Woo-Seok Bae* · Jong-woo Kim* · Young-Cheul Kwon†

*Department of Civil and Environmental Engineering, Chongju University

Department of Civil Engineering, Chungju National University

(Received May 16, 2007 / Accepted July 24, 2007)

Abstract : Effects on the stiffness of the embankment and sandmat on the construction safety of road embankment was investigated in this study by the numerical experiments using FEM. Two points was mainly focused in this study especially. First the deformation characteristics by the change of the stiffness of sand mat and embankment was investigated by the analyzing the consolidation settlement at the center of the embankment and the lateral displacement at the toe of the embankment. And, the effect of the stiffness on the stress distribution characteristics was also investigated in this study. Furthermore, slope stability analysis was carried out to gain the safe factor by change the stiffness of the sandmat and the embankment. The objective of the study is supplying the result of the numerical experiments for the geotechnical engineers who use the FEM for the safety design of the soil structures. As a result, the stiffness of the superstructures greatly affects on the deformation characteristics both in consolidation settlement and lateral displacement. However, it can be aware that it is not dominants to the stress distribution in the aspect that the no changes in the residual excess pore water pressure. Therefore, the decision of the stiffness has to be carried out deliberately considering not only the consolidation the magnitude of the settlement and the lateral displacement, but the slope stability.

Key Words : road embankment, consolidation settlement, lateral displacement. slope stability

1. 서 론

함수비가 높은 점토나 느슨하게 퇴적된 모래 지반을 통과하는 구간에서 도로를 건설하는 경우에는 모래매트와 성토공법을 이용하여 도로를 건설하는 경우가 많다. 이때 성토 하중에 의해 발생하는 압밀침하나 성토 자체의 안전성은 건설안전 확보 측면에서 매우 중요한 데이터이다. 또한, 안정된 지반이라고 할지라도 지반에 구조물이 건설되면 지반의 응력상태가 반드시 바뀌게 되며 변형과 함께 안정 조건에도 영향을 미치게 된다. 따라서 연약지반 위

에 성토를 실시하는 경우에는 반드시 구조물의 건설에 따라 구조물이 어떻게 변형할 것인지에 대한 정확한 예측이 필요하게 되며, 이 결과에 의해 안전한 건설을 위한 대책을 수립하게 된다. 특히, 연약 지반 위에서의 건설 공사에서는 성토 하중에 의해 침하뿐만 아니라 구조물의 횡적 변형도 발생하게 되며 결국 이러한 변형이 주변 지반이나 이곳에 시공되어 있던 지중 구조물 및 성토 자체 혹은 구조물의 안정에 막대한 영향을 미치고 있다.

그러나 연약 지반의 침하와 안정 문제는 대상 지반의 압밀에 의한 체적변형과 파괴를 일으키는 전단 변형 등이 혼재되어 일어나는 현상이며, 따라서 성토의 하중이나 범면의 경사, 시공 방법 등 상부 구

† To whom correspondence should be addressed.
yckhen@cjnu.ac.kr

조물에 의한 영향과 함께 연약 지반의 두께, 역학적 특성 등 하부 지반 특성 등 여러 가지 영향인자에 의해 좌우되기 때문에 높은 정확도를 갖은 해석법의 확립은 매우 어려운 일이다.

특히, 성토의 강성은 하부에 전단되는 응력의 형상 등에 영향을 미치게 되며 성토의 안정에도 직접적인 영향을 미치게 된다. 성토를 비롯해서 지반의 탄성 강성을 결정하는 방법은 여러 가지 다른 방법이 있으며 이러한 방법들을 사용하여 유한요소해석을 수행하게 된다. 먼저 Bjerrum(1963)은 비배수 전단강도(S_u)와 200~500정도의 값을 갖는 α 파라미터를 이용하여 $E_u = \alpha S_u$ 라는 경험식을 발표하였다. Balasubramaniam et al.(1980)는 보정하지 않은 현장 베인강도(S_uFVS)를 이용하여 $E_u = 70 \sim 270 S_uFVS$ 라는 경험식을 발표하였다. 이후에도 여러 가지 형태의 유사연구가 수행되었으며, 특히, 변형의 대상이 되는 연약지반뿐만 아니라 성토 자체나 주변 지반의 강성결정에 있어서도 신중을 기해야 한다는 주장이 제안되어 왔다(Mesri and Choi, 1985; Ohta and Hayashi, 1997; Leroueil et al, 2001). 또한, Nagahara et al.(2004)은 고속도로 건설을 위해 시공된 성토에 대해 20년간의 추적연구를 통해 성토체의 강성이 하부 연약지반의 장기침하에도 영향을 미치고 있음을 지적한 바 있다. Fuji et al.(2000)이 수행한 연구에서는 하부 지반이 모래 지반인 경우로 본 연구와 직접적인 관련은 없으나 성토체나 배수재로서 설치되는 모래 지반의 강성이 성토지반의 동적 안정성에도 밀접한 관련을 보이고 있다는 점을 강조하였다. 사질토의 탄성계수는 연구자에 의해 다양하게 제안되고 있으나 대체적으로는 N치를 이용하여 산정하는 방법이 폭넓게 사용되고 있다. Fig. 1은 그 대표적인 예로 다양한 종류의 흙과 강도(N치)에 대해 Schultze and Menzenbach(1961)가 정리한 연구 결과를 나타내고 있다. 또한 Table 1에서는 일본지반공학회에서 제안한 흙의 종류에 따른 탄성계수의 개략적인 값을 나타내고 있다. 표를 통해 알 수 있듯이 동일한 흙의 종류에서도 탄성계수의 범위는 매우 크게 분포하고 있음을 알 수 있으며 구조물의 중요도에 따라 다짐도가 달라지므로 성토체나 모래매트의 탄성계수를 산정하는 것은 그다지 간단한 일은 아니다.

따라서 본 연구에서는 연약지반 위에서 도로를 건설하기 위해 실시한 성토를 대상으로 성토체와 모래매트의 강성이 성토에 미치는 영향을 수치해석

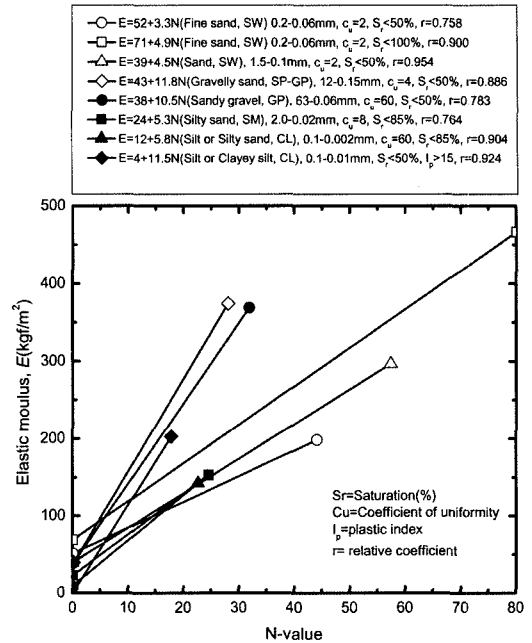


Fig. 1. Relationship of elastic modulus and N value(Schultze and Menzenbach, 1961).

Table 1. Typical values of elastic modulus

Kinds of soil	$E(tf/m^2)$
Dense gravel	10,000~20,000
Dense sand	5,000~8,000
Loose sand	1,000~2,000
Stiff clay	800~1,500
Medium clay	400~800
Soft clay	150~400
Very soft clay	50~300

을 통해 평가해보고자 한다. 또한, 본 연구에서는 두 가지 측면에서 해석을 실시하여 결과를 분석한다. 첫 번째는 성토 및 모래 매트의 강성을 변화시켜 성토에 의한 압밀침하의 영향에 대해 고찰하는 것이며, 두 번째는 이러한 강성의 변화가 사면 안정에 미치는 영향을 검토하는 것이다. 본 연구에서는 이러한 고찰을 기준으로 현재 사용되고 있는 강성 결정의 타당성과 급후 설계 및 안정검토에서의 강성의 결정에 구체적인 연구 결과를 제공하는 것을 목적으로 한다.

2. 해석 조건의 설정

본 해석을 수행하기 위하여 Fig. 2와 같은 도로

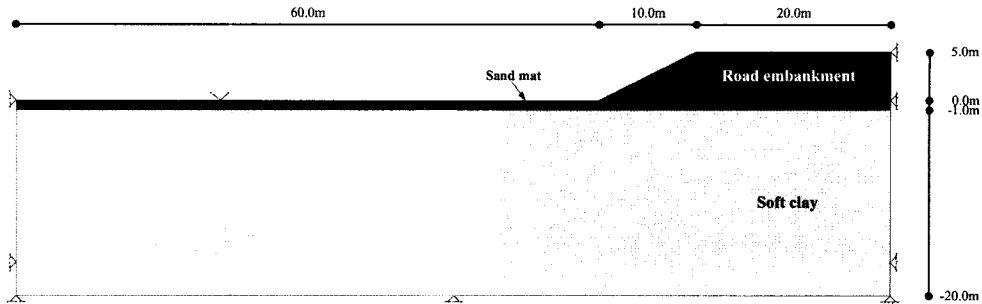


Fig. 2. Geometry and boundary condition in XY section.

성토 공사를 상정하였으며, 높이 5m의 도로성토체와 높이 1m의 모래매트, 그리고 그 하부에 연약한 점토층이 19m 깊이로 분포하고 있는 지반조건으로 해석 모델을 구성하였다. 성토체의 폭은 20m이며 사면은 1:2로 충분한 안전성을 갖는 경사를 갖도록 하였다. 또한 유한요소망의 폭이 해석결과에 영향을 미치지 않도록 성토체 전체폭(30m)의 3배 정도로 충분히 모델링을 수행하였다.

지하수위는 모래매트 상부면과 일치하고 있으며 따라서 모래매트와 연약점토 지반은 모두 포화되어있는 상태를 가정하였다. 배수 조건은 모래매트는 배수를 허용하는 층으로 설정하였으며, 연약지반 밑에는 불투수층의 압반이 존재하는 경우를 설정하여 비배수조건으로 설정하였다. 따라서 본 해석은 상부 단면배수의 경우에 대한 수치해석결과이다. 경계조건으로서는 성토단면의 중앙 1/2단면만을 모델링하였으므로 성토 중앙에서는 횡방향변위가 구속되었으며 연약지반 하층부에서는 횡변위와 연직변위가 모두 구속되는 모델링을 수행하였다. 또한 성토체와 같이 폭에 비해 길이가 긴 구조물에서 일반적으로 사용되는 평면변형률조건(plan strain condition)을 적용하여 모델링하였다.

Table 2는 본 해석에서 사용된 해석 파라미터를 정리한 것이다. 먼저 점토지반은 Mohr-Coulomb model, 사질토인 성토체와 모래매트의 경우에는 Linear elastic model을 이용하여 해석을 실시하였다. 점토지반에서는 지하수면 아래의 매우 연약한 상태에 존재하는 상황을 상정하여 강성이 매우 낮은 상태(500kPa)를 모델링하였으며 투수계수는 1.0E-4m/day로 투수성이 매우 낮아 압밀침하에 상당한 시일이 소요되도록 모델링하였다. 이에 비해 성토체와 모래매트의 경우에는 단위중량이 매우 크고 투수계수 역시 연약지반에 비해 10000배 이상 크기 때문에 압밀과는 관계없는 층으로 모델링하였다.

Table 2. Parameters used in analysis

Parameters	Unit	Clay layer Mohr-Coulomb	Embankment Linear elastic	Sand mat Linear elastic
Dry unit weight	kN/m ³	15	19	19
Saturated unit weight	kN/m ³	18	24	24
Horizontal permeability	m/day	1.0E-4	1.0	1.0
Vertical permeability	m/day	1.0E-4	1.0	1.0
Elastic modulus	kPa	500	Variable	Variable
Poisson's ratio	-	0.333	0.333	0.333
Cohesion	kPa	2	-	-
Friction angle	Deg	24	-	-
Swelling angle	Deg	0	-	-

본 연구에서는 해석 파라미터로서 성토체와 모래매트의 강성을 변화시켜가며 수치해석을 수행하였으므로 성토체와 모래매트의 탄성계수는 변수로 작용시켰다. 성토체와 모래매트의 탄성계수는 500kPa, 1MPa, 5MPa, 10MPa, 20MPa까지 총 5가지의 경우를 상정하였다.

성토는 단계재하가 아니라 즉시 재하되도록 하였으며 성토가 완료된 이후 50년까지의 데이터를 수집하여 분석하였다. 이와 더불어 성토가 완료된 이후에 성토사면의 안전성을 검토하기 위한 사면안정 해석도 추가되었다. 이와 같은 해석 조건을 이용한 수치실험에는 상용 프로그램인 Plaxis 7.2가 사용되었다.

3. 수치실험 결과 및 분석

본 연구에서 수행한 수치실험에서는 성토체와 모래매트의 강성이 주요한 해석 변수이며 크게 두 가지 측면에서 성토체의 건설에 따른 안전조건의 변화에 초점을 맞추어 해석결과를 분석하고자 하였다. 첫 번째는 변형특성에 미치는 이들 강성변화의 영향이며 두 번째는 과잉간극수압의 발생으로 대표되는

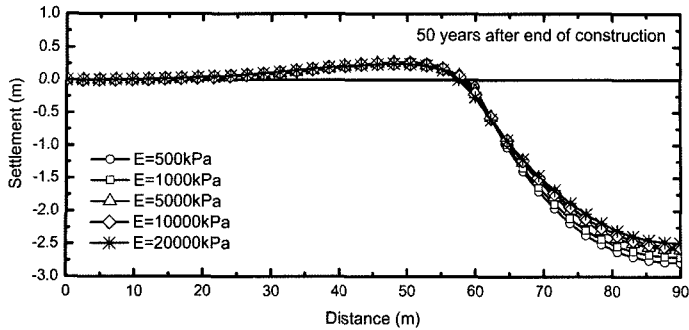


Fig. 3. Variation of surface settlement with elastic modulus of sand-mat.

응력특성변화의 측면이다. 이하에서 모래매트 및 성토체의 강성변화에 대한 분석결과를 정리하였다.

3.1. 모래매트의 강성 변화에 대한 영향

Fig. 3은 모래매트의 강성변화에 따라 발생하는 표층에서의 침하량을 정리한 것이다. 이 데이터는 성토가 완료된 이후에 50년 이후의 시간단계에서 계산된 결과이다. 그림에서 거리 60m에 해당되는 지점이 성토의 끝인 성토 선단이 위치하고 있으며 90m에서 성토의 중앙부가 위치하게 된다. 또한 성토 중앙부에서는 압밀 침하에 의한 수직침하가 두드러지게 나타나고 있으며 성토의측부로는 압밀 침하 및 성토 선단에서의 측방변위에 의해 발생하는 지반 융기가 발생되고 있다. Fig. 3을 통해 알 수 있듯이 모래매트의 강성이 작아질수록 성토 중앙에서의 침하량은 더욱 크게 발생하고 있는 것을 알 수 있었다. 그러나 모래매트의 강성이 5,000kPa 보다 큰 경우에는 모래매트의 강성이 크게 상승하여도 성토 중앙의 침하량의 감소는 그다지 크게 발생하고 있지 않는 것으로 나타났다. 일반적으로 성토부지 내에서 모래매트를 설치하는 경우에는 다짐 관리에 그다지 큰 배려를 하고 있지 않아 대단히 연약한 상태로 존재하게 되며 대체적으로 N치가 1에서 5회를 넘지 않게 된다. 이는 지금까지 제안된 식에 의해 계산하게 되면 대체적으로 탄성계수가 최대 10000kPa정도이거나 최소 700kPa에 해당되는 강성을 갖게 된다. 이러한 결과는 강성의 변화가 성토에 의한 침하량의 산정에 큰 영향을 줄 수 있다는 점을 시사하고 있다. 하지만 성토 선단 외측부에서 발생하고 있는 지반 융기의 경우에는 모래매트의 영향을 그다지 많이 받고 있지는 않는 것으로 계산 결과를 얻을 수 있었다. 이는 성토체 자체의 강성이 8000kPa로 대단히 높은 상태로 모델링을 수행

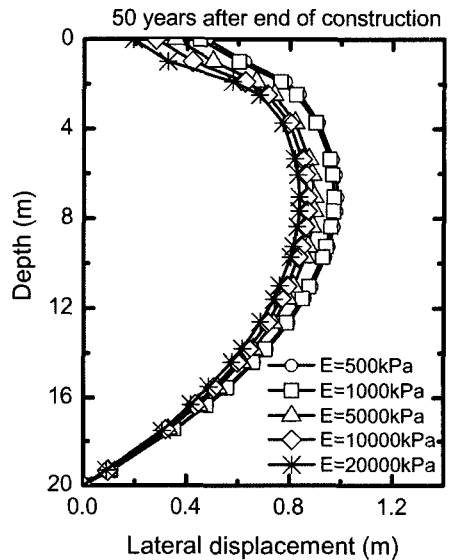


Fig. 4. Lateral displacement at the toe corresponding with elastic modulus of sand-mat.

하였기 때문에 상대적으로 지표면이 고정되는 현상을 일으켰을 것으로 판단된다.

물론 성토체 강성을 저하시켜 모델링하게 되면 더욱 두드러진 변형특성을 얻을 수는 있으나 성토 자체의 안전성이 크게 떨어져 현실성 없는 해석이 될 가능성이 높기 때문에 본 연구에서는 다소간의 지표구속효과가 발생하더라도 성토 강성을 높은 값으로 유지하였다.

연약지반 위에서 실시되는 건설공사의 안정 조건을 판단하는 중요한 지표 중의 하나는 성토 선단에서 발생하는 측방변위이다. 측방변위는 구조물의 기울림 현상, 부등침하에 의한 균열 발생 등으로 상부 구조물이나 흙 구조물 자체의 공용성 저하에 큰 영향을 미치게 된다. Fig. 4에서는 성토체의 강성을 유지한 채로 모래매트의 강성을 변화시켰을 경우

의 측방변위의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 성토체의 강성이 낮아질수록 지표면의 구속효과가 저하됨에 따라 성토 외측으로의 유동에 대한 저항력이 감소되며 결국 측방 변위량이 증가되게 된다. 최대 변위를 기준으로 성토강성이 가장 작은 경우인 500kPa에서 최대인 경우인 20,000kPa로 변화되는 동안 측방 변위량은 약 15% 감소하고 있는 것으로 계산 결과 나타났으며 모래매트의 강성의 선택은 성토 전체의 안정조건이나 상부 구조물의 안정 조건에 미치는 영향이 크다는 사실을 알 수 있었다. 따라서 현재 다양한 경험식을 통해 관습적으로 산정되고 있는 탄성계수 값의 산정에 있어 신중을 기할 필요가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5는 모래의 강성변화에 따라 달라지는 성토 중앙부에서의 압밀 침하량의 변화를 나타내고 있다. 그림을 통해서 모래매트의 강성은 성토 중앙부의 침하량의 변화에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었으며 모래매트의 강성이 클수록 성토 중앙부의 침하량도 크게 감소되고 있음을 알 수 있었다. 특히 모래매트의 강성의 크기가 500kPa에서 1000kPa, 그리고 2000kPa로 강성변화량이 그다지 크지 않은 범위에서 압밀침하량의 감소가 두드러지게 나타났으며 강성 변화량의 폭이 큰 경우에는 침하량의 감소가 제한적임을 알 수 있었다.

이를 종합적으로 분석해보면 일반적으로 성토에 의한 안정관리에서는 성토선단에서 관측된 측방변

위량과 성토 중앙부에서 관측된 압밀 침하량과의 관계를 이용하는 경우가 많다. Fig. 4와 5를 통해 알 수 있듯이 모래매트의 강성은 이 두 값 모두에 영향을 미치고 있었으며 이는 유한요소법을 이용한 시뮬레이션의 지표면에 분포된 모래 매트 강성을 어떻게 산정하느냐에 따라 성토의 안정조건이 달라질 수 있음을 의미하며, 이는 합리적인 평가와 입력데이터의 선택이 매우 중요하다는 것을 시사하고 있다.

한편, 모래매트의 강성이 응력특성의 변화에 미치는 영향을 평가하기 위하여 성토단면의 특성점인 성토의 선단과 성토 중앙부에서 관측된 과잉간극수압의 분포를 비교하였다. 과잉간극수압은 토질역학에서 유효응력을 유추해 볼 수 있는 아주 중요한 데이터이며 특히 압밀과 같이 유효응력의 증가가 현상을 전체적으로 지배하는 경우에는 과잉간극수압의 변화가 시사하는 바가 크다고 할 수 있겠다. Fig. 6과 7에서는 각각 성토선단부와 중앙부에서 계산된 과잉간극수압의 깊이에 따른 분포를 나타내고 있다. 그림과 같이 성토 중앙부에서는 모래매트의 강성의 변화에 따라 과잉간극수압의 분포가 약간 변화하기 하지만 절대량에서 전체 거동을 지배할 정도로 큰 값의 차이를 보인다고 할 수 없을 정도였다. 특히 성토 선단에서는 거의 동일한 분포를 보이고 있어 모래매트의 강성이 응력분포특성에 미치는 영향이 매우 미비할 수 있음을 알 수 있었다.

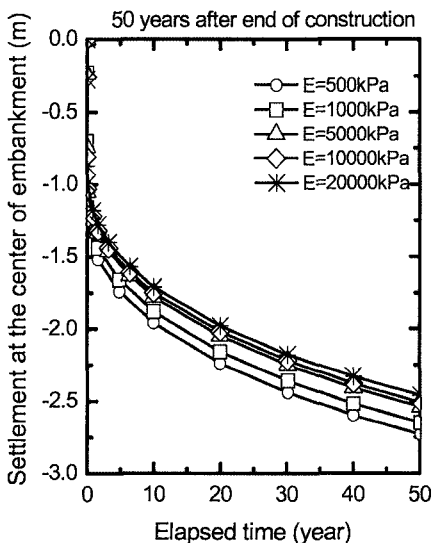


Fig. 5. Settlement at the center corresponding with elastic modulus of sand-mat.

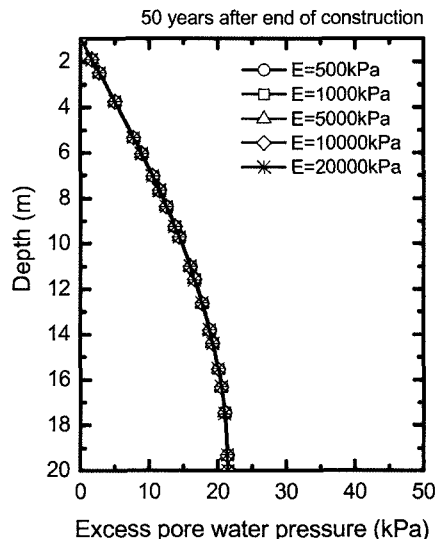


Fig. 6. Excess pore pressure at the toe corresponding with elastic modulus of sand-mat.

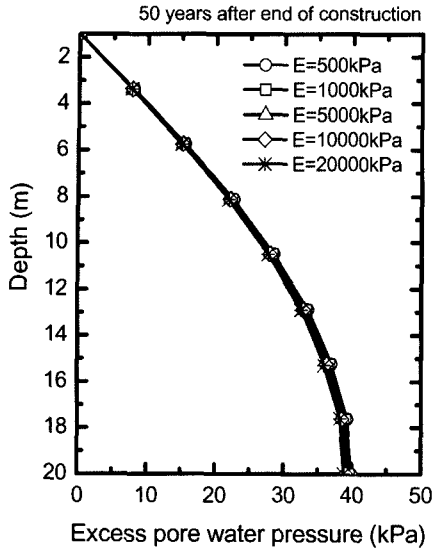


Fig. 7. Excess pore pressure at the center corresponding with elastic modulus of sand-mat.

3.2. 성토체의 강성변화에 대한 영향

Fig. 8은 성토체의 강성을 변화시켰을 때 지표면에서 계산된 수직 변형량의 분포를 나타낸 것이다. 계산 결과를 살펴보면 먼저 강성 저하에 따라 침하량의 크기는 더욱 커지고 있음을 알 수 있었다. 모래매트의 경우에 비해서는 강성의 변화에 따라 값의 변화가 더욱 크게 일어나고 있음을 알 수 있으며 변형량의 절대값에서도 모래매트의 경우에 비해서 더욱 크게 발생되고 있음을 알 수 있다. 특히, 변형 발생 패턴에 있어서는 강성변화에 따라 큰 변화를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 성토체의 강성에 따른 하부지반의 지압분포의 변화에도 영향을 받을 것으로 판단되며 성토의 강성이 낮을수록 성토 선단부에 작용하는 지압이 커지게 되며 중앙부에 가까울수록 지압이 줄어들어 볼록형의 분포를 보이는

것으로 판단된다. 또한 이에 따라 발생하는 침하량도 성토의 강성이 낮은 경우($E=500\text{kPa}$)에는 선단부에 침하량의 분포가 크고 중앙부에서는 약간 줄어드는 분포를 보이고 있었다. 이러한 경향은 특히 성토 강성이 상대적으로 낮은 두 가지 경우에 있어 두드러지게 나타나고 있으며 다른 경우에는 성토의 중앙부로 갈수록 압밀침하량이 커지는 경향을 보이고 있었다. 또한 성토 선단 외측부의 융기 현상도 성토체의 구속효과의 크기가 작아지는 관계로 강성이 작을수록 지반 융기도 작아지는 경향을 갖고 있는 것으로 나타났으며 최대값의 분포도 성토체 쪽으로 쏠리는 현상이 있음을 확인해 볼 수 있었다. 이러한 점을 종합적으로 판단해 볼 때 성토체의 강성은 하부 연약지반의 침하특성을 전체적으로 지배하고 있으며 침하량의 절대값은 물론이고 침하량의 분포에 대해서도 미치는 영향이 큰 것으로 판단할 수 있다.

따라서 지반의 변형에 관련된 유한요소시뮬레이션에서는 성토체의 강성의 선택에 신중을 기할 필요가 있음을 알 수 있으며 특히 성토 강성이 낮게 평가되는 경우에는 후술하게 될 성토사면의 안정성과 더불어 침하의 크기 및 분포를 종합적으로 고려해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 9는 성토 선단에서 계산된 측방변위의 깊이별 분포를 나타내고 있다. 측방변위의 분포 역시 지표면 침하량에서와 같이 성토의 강성에 대한 영향을 받고 있다는 사실을 알 수 있다. 특히, 성토체의 강성이 낮은 경우에는 측방변형량의 값이 크게 증가하고 있으며 본 수치실험에서 상정한 5가지의 경우에서 성토강성이 가장 큰 경우에 비해서 측방변형량은 20%이상 증가하고 있음을 알 수 있었다. 특히 성토선단에서의 측방변형량은 성토강성이 낮은 두 가지 경우에서 급격하게 발생하였다.

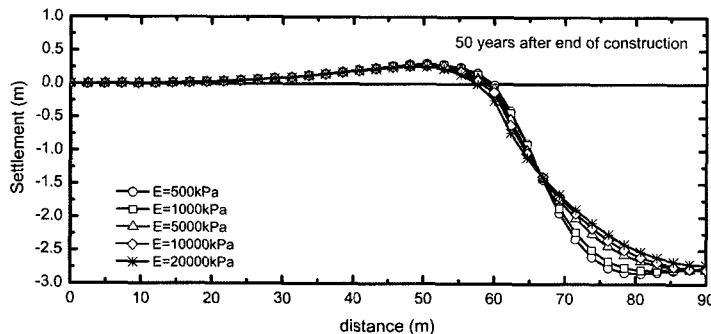


Fig. 8. Variation of vertical displacement of surface corresponding with elastic modulus of sand-mat.

특이할 점은 Fig. 10에서 알 수 있듯이 성토체 중앙부에서의 침하량은 각 경우에 거의 유사한 값을 갖고 있다는 점이다. 이러한 점은 성토의 안정관리가 일반적으로 성토 중앙부의 침하량과 선단부의 측방 변위량의 값의 추이를 이용하여 수행되고 있다는 점에서 특히 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다. 즉, 성토에 의한 침하량의 변화는 없는 상태에서 측방변위량의 변화는 성토체의 강성에 매우 크

게 좌우되므로 성토의 강성이 상대적으로 낮게 설정될 경우에는 불안전측에서 실재가 이루어질 가능성이 많다는 점에 주목해야할 필요가 있을 것으로 판단된다. 따라서 유한요소시물레이션을 이용하여 성토의 안정성을 판단하는 경우에는 본 해석결과에서 얻어진 바와 같이 성토체의 강성 선택을 지나치게 낮게 하는 경우를 피하는 등의 고려가 수행되어야 한다는 점을 알 수 있다.

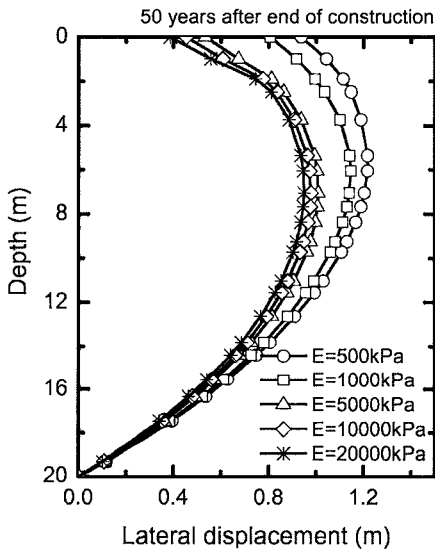


Fig. 9. Variation of lateral displacement at the toe corresponding with elastic modulus of embankment.

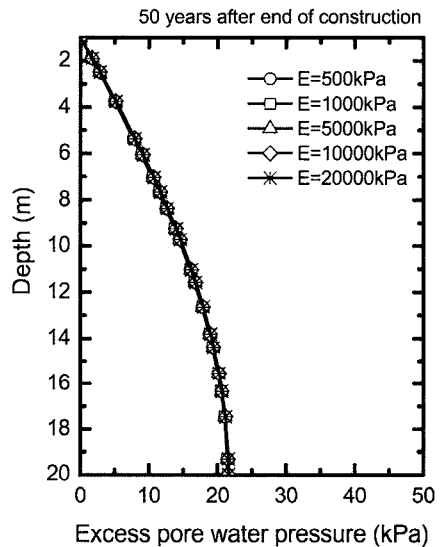


Fig. 11. Settlement at the center corresponding with elastic modulus of embankment.

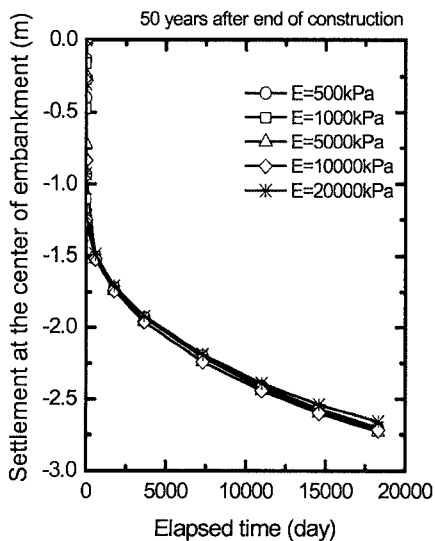


Fig. 10. Excess pore pressure at the center corresponding with elastic modulus of embankment.

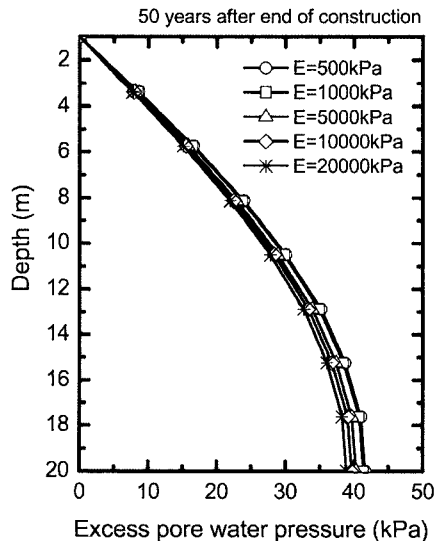


Fig. 12. Excess pore pressure at the toe with corresponding with elastic modulus of embankment.

Fig. 11과 12는 각각 성토체의 강성변화에 따른 성토 선단부와 중앙부에서 계산된 잔류 과잉간극수압의 분포를 나타낸다. 성토체의 강성 변화에 대해 모래매트의 경우와 마찬가지로 성토 중앙부에서는 약간의 변화가 발생하고 있으나 전체 거동을 지배할 정도의 차이가 발생하고 있다고 판단되지는 않는다. 따라서 이 두 가지 결과와 모래매트의 강성의 경우를 종합적으로 판단해보면 상부의 강성변화가 하부 잔류 과잉간극수압의 분포, 즉 연약지반의 응력 상태 변화에 미치는 영향은 매우 미미하거나 거의 영향을 미치지 않을 가능성을 고려해 볼 수 있다.

3.3. 강성변화에 따른 사면 안전율의 변화

성토체와 모래매트의 강성변화가 성토사면 전체의 안전에 미치는 영향을 검토하기 위하여 두 부분의 강성을 변화시켜가면서 안전율을 산정하였다. 여기서는 제한된 경사를 갖는 성토체를 모델링하였으므로 계산된 안전율의 절대값은 큰 의미를 갖고 있지 못하지만 안전율의 변화라는 측면에서 분석을 수행하였다. 먼저 Fig. 13은 변위의 전체증분의 분포를 나타낸 것으로 성토 밑으로 표현되는 원호면이 잠정적인 파괴면으로 작용할 수 있는 면으로 평가할 수 있다.

일단 모래매트의 강성을 변화시킨 경우와 성토체의 강성을 변화시킨 경우 모두 거의 유사한 형태의 파괴를 유추해 볼 수 있으며 Fig. 14에서와 같이 성토 강성이 증가할수록 사면의 안전율이 크게 증가하고 있음을 알 수 있었다. 한편 강성의 증가에 따른 사면의 안전율의 증가는 강성 증분이 커질수록 안전율의 증분은 줄어드는 형태를 보이고 있으며 이는 모래매트의 강성을 조절한 경우와 성토체 자체의 강성을 변화한 경우 모두 동일하게 나타났다.

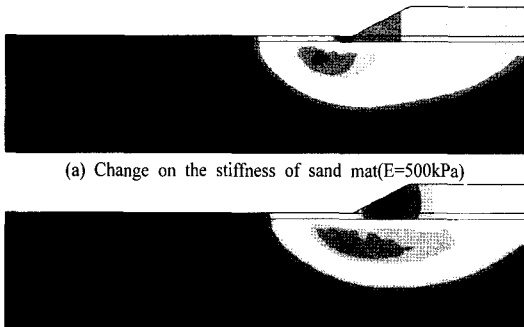


Fig. 13. Distribution of entire increment of displacement.

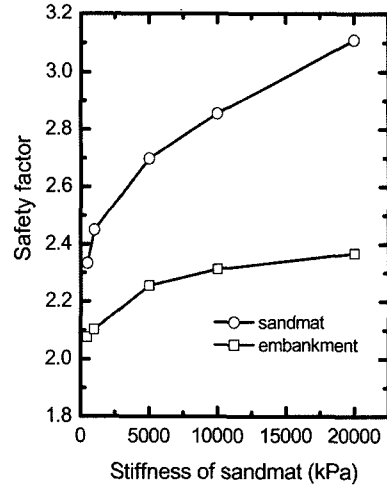


Fig. 14. Variation of safety factor corresponding with elastic modulus.

4. 결론 및 요약

성토체와 모래매트의 강성이 성토체의 변형특성과 응력특성 그리고 성토 사면 자체의 안전에 미치는 영향을 검토하기 위하여 성토 강성을 해석 파라미터로 하여 수치실험을 수행하였으며 각각의 분석주안점을 기준으로 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 모래매트의 강성 변화는 성토 중앙부에서 관측되는 압밀 침하량의 크기 및 성토 선단부에서 발생하는 측방 변위 모두에 영향을 미치고 있었으며 강성이 증가할수록 지표면의 구속효과가 증대되어 변형은 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 유한요소법을 이용한 시물레이션의 지표면에 분포된 모래매트의 강성에 따라 성토의 안정조건이 달라질 수 있음을 의미하며, 이는 해석 시 강성의 적용이 안정에 매우 중요하다는 것을 시사하고 있다. 그러나 과잉간극수압의 잔류량으로 판단해본 응력특성의 변화는 두드러진 점을 발견하지 못해 강성 변화는 변형특성의 변화에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

2) 성토체의 강성이 변화됨에 따라 두드러지게 나타난 점은 성토하부의 압밀 침하 발생 형상과 성토 선단에서의 측방 변형량이었으며, 이러한 점을 종합적으로 판단해 볼 때 성토체의 강성은 하부 연약지반의 침하특성을 전체적으로 지배하고 있으며 침하량의 절대값은 물론이고 침하량의 분포에 대해서도 미치는 영향이 큰 것으로 판단할 수 있다. 따라서 지반의 변형에 관련된 유한요소시물레이션에서는

성토체의 강성을 결정함에 있어 신중을 기할 필요가 있음을 알 수 있으며 특히 성토 강성이 낮게 평가되는 경우에는 성토사면의 안정성과 더불어 침하의 크기 및 분포를 종합적으로 고려해야 할 것으로 판단된다.

3) 성토체의 강성변화로 인해 알 수 있었던 또 하나의 특징은 성토체 중앙부에서의 침하량은 각 경우에 거의 유사한 값을 갖고 있다는 점이다. 이러한 점은 성토의 안정관리가 일반적으로 성토 중앙부의 침하량과 선단부의 측방 변위량의 값의 추이를 이용하여 수행되고 있다는 점에서 특히 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다. 즉, 성토에 의한 침하량의 변화는 없는 상태에서 측방변위량의 변화는 성토체의 강성에 매우 크게 좌우되므로 성토의 강성이 상대적으로 낮게 설정될 경우에는 불안전측에서 설계가 이루어질 가능성이 많다는 점에 주목해야 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4) 성토체와 모래매트의 강성변화에 의한 성토 자체의 안전율을 강성의 증가에 따라 증가를 보이고 있었으며 안전율의 증분은 강성 증분이 커질수록 줄어드는 경향을 보이고 있다.

참고문헌

- 1) Balasubramaniam, A. S., Brenner, R. P., Mallawarachy, R. V. and Kuvijitjaru, S., "Performance of Sand Drains on Bangkok Clays", Sixth Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Vol. 1, pp. 447~468, 1980.
- 2) Bjerrum, L., "Allowable settlements of structures", Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden, Volume 2, pp. 135~137, 1963.
- 3) Fujii, T., Hyodo, M., Kusakabe, S., and Fukuda, K., "On-line seismic response tests on embankments founded on saturated sandy deposits", JSCE, Vol. 652, No. 3-51, pp. 229~243, 2000.
- 4) Japanese Geotechnical Society, "Handbook of soil mechanics", JGS, p. 795, 1982.
- 5) Leroueil, S., Saihi, F., and Demers, D., "Considerations on stability of embankments on clay", Soils and Foundations, Vol. 41, No. 5, pp. 117~127, 2001.
- 6) Mesri, G. and Choi, Y. K., "Settlement analysis of embankments on soft clays", Journal of geotechnical engineering, ASCE, Vol. 111, No. 4, pp. 441~464, 1985.
- 7) Nagahara, H., Fujiyama, T., Ishiguro, T., and Ohta, H., "FEM analysis of high airport embankment with horizontal drains", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 22, pp. 49~62, 2004.
- 8) Ohta, E. and Hayashi, "FEM analysis of highway embankment constructed on the soft clay", Symposium on the back analysis and construction management in recent geotechnical application, JSCE, pp. 123~132, 1997.
- 9) Schultze, E., and Menzenbach, D., "Distribution of stress beneath a rigid foundation", Proceedings of 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 807~816, 1961.