

급속한 성토시 비선형 해석을 통한 연약지반의 안전성 검토

Investigation of the rapid embankment stability on the soft ground using nonlinear analysis

도기훈* 김무일** 이준식***
Do, Ki Hoon Kim, Moo Il Lee, Jun Seok

ABSTRACT

In this paper, nonlinear elasto-plastic analysis was performed to investigate the stability of the rapid embankment under undrained condition. The commercial code ABAQUS/Standard was used in the study. Resonant Column test (RC test) results and Ramberg-Osgood model were utilized to simulate the nonlinear behavior of soft clay. Ramberg-Osgood model was tested whether it simulates the nonlinear behavior of the soil properly in first. Then the analysis result was compared with the previous research results. It was found that the Ramberg-Osgood model matched well with the soil behavior of soft clay in the rapid embankment under undrained condition..

1. 서론

일반적으로 연약지반 상에 급속한 성토를 할 경우 성토직후 초기 거동은 비배수 거동을 하는 것으로 가정할 수 있고, 지속된 성토하중으로 인하여 연약지반은 대변형을 경험하게 된다. 연약지반의 대변형 영역에서의 거동을 예측하기 위하여는 지반 물성치에 대한 시험을 수행한 후 비선형 해석을 수행해야 한다. 그러나 비선형 해석의 경우 고려해야 할 입력 물성치가 많을 뿐만 아니라, 물성치를 얻기 위한 현장 및 실험방법도 까다로운 것이 현실이다.

본 연구에서는 최근 내진설계의 도입으로 실내 공진주시험 결과가 빈번히 수행되고 있는 점을 착안하여, 공진주시험 결과를 비선형 해석에 적용할 수 있는 방법에 대하여 연구를 수행하였다. 공진주시험의 경우 지반의 대변형 영역까지 변형률에 따른 전단탄성계수를 얻어낼 수 있고 시험 비용이 저렴하다. 특히 강진시 발생하는 대변형 영역에서도 해석결과와 실제 측정결과에서 큰 차이가 나타나지 않아 미국의 설계기준에도 반영되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 연약지반 위에 급속한 성토시 비배수 조건이 성립할 경우 공진주시험 결과를 이용한 비선형 해석의 적용성에 관하여 검토하였다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정, 정회원

E-mail :dkhmh@naver.com

TEL : (02)3457-2446 FAX : (02)3457-2469

** 서울산업대학교 토목공학과 교수, 정회원

*** 한국철도기술연구원 궤도·토목연구본부 책임연구원, 정회원

2. 공진주시험 및 Ramberg-Osgood Model

2.1 공진주시험의 개요

공진주시험은 원통형의 시편에 진동수를 바꿔가면서 비틀자극(torsional excitation)을 가하여 그림 1에 나타난 바와 같이 1차 모드의 공진주파수(f_r)와 진동의 크기(A_r)를 구한 후, 실험기의 특성 및 시편의 크기와 무게를 이용하여 전단파속도(V_s), 전단탄성계수(G) 및 전단변형률(γ)을 구하는 동적인 시험방법이다. 탄성파전달이론(elastic wave propagation theory)에 의한 공진주시험의 지배방정식은 식(1)과 같다.

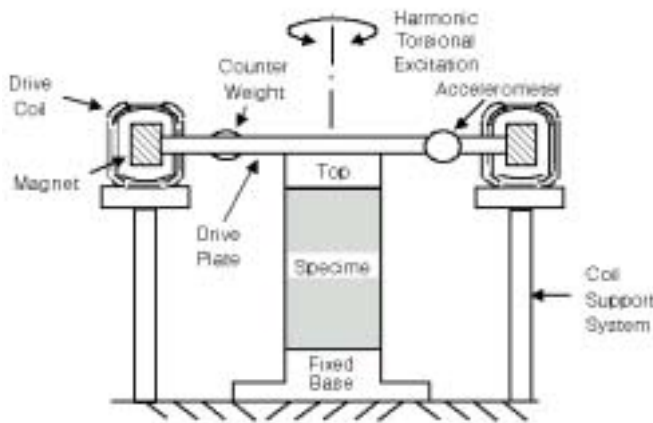
$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega l}{V_s} \cdot \tan\left(\frac{\omega l}{V_s}\right) \quad (1)$$

여기서, I = 공시체의 질량관성 모멘트, I_0 = 진동시스템의 질량관성 모멘트
 ω = 공시체-진동시스템의 고유 진동수, l = 공시체의 길이
 V_s = 전단파속도

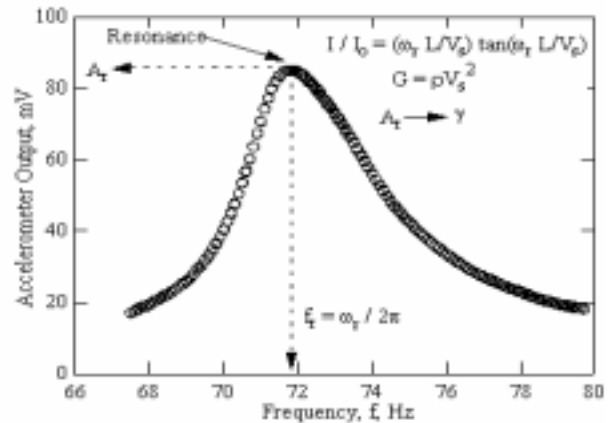
식(1)에 의해 전단파속도(V_s)가 구해지면 전단탄성계수(G)를 식(2)로 구한다.

$$G = \rho V_s^2 \quad (2)$$

여기서, ρ = 질량밀도



(a) 고정단-자유단 방식 공진주시험기 개요도



(b) 공진주시험의 전형적인 결과

그림 1 공진주시험 개요

2.2 Ramberg-Osgood Model

일반적으로 지반의 전단탄성계수는 변형률에 따라 감소하는 특성을 보인다는 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서 신뢰성 있는 비선형 해석을 위하여 하중에 의한 재하, 역재하, 재재하시 발생하는 응력이력 관계를 정확히 모사하는 것은 매우 중요하다. 변형률에 따른 지반의 비선형 응력이력 거동을 나타내는 모델에는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 Ramberg-Osgood 모델을 이용하였다.

Ramberg-Osgood 응력-변형률 관계식은 실내시험 결과에서 얻어진 지반의 비선형성을 가장 효율적으로 나타낼 수 있는 것으로 알려져 있고, 특히 변형률의 증가에 따른 지반의 거동특성을 잘 모사할 수

있다. 변형률에 따른 지반의 전단탄성계수 감소곡선을 얻을 수 있는 지반조사 방법은 공진주시험 (Resonant Column Test, RC test)이 대표적이고, 이 시험에서 얻어진 변형률에 따른 전단탄성계수 감소곡선, 즉 G/G_{max} 곡선의 경우 Ramberg-Osgood 모델을 이용하여 데이터를 정리하는 것이 일반적이다. Ramberg-Osgood 모델의 가장 큰 장점은 모델을 구현하기 위한 매개변수가 R과 C 등 두 개의 매개변수를 이용하여 비선형 응력관계를 도출해 낼 수 있는 것이다. 또한, R과 C는 공진주시험을 실시하여 비교적 쉽게 얻을 수 있고 공진주시험의 경우 다른 시험보다 경제적으로 실시할 수 있다. 또한 공진주시험의 경우 국내의 기술수준이 세계적인 수준으로 평가되고 있어 해석결과에 대한 신뢰성을 높일 수 있다는 장점이 있다. 식(3)에는 Ramberg-Osgood 모델의 Backbone curve를 나타내었다.

$$\gamma = \left(\frac{\tau}{G_{max}} \right) + d \left[\frac{\tau}{G_{max}} \right]^R \quad (3)$$

여기서, R과 C는 모델 매개변수

일반적으로 지반의 비선형 거동을 평가하기 위하여 많이 이용되는 모델중에 Hyperbolic 모델이 있다. 그림 2에는 Ramberg-Osgood 모델을 이용하여 공진주시험에서 얻어진 결과를 Curve fitting한 것이며, 이를 비선형 해석에 많이 이용하고 있는 Hyperbolic 모델과 비교하였다. 두 모델을 비교하여 보면 저변형률 영역에서 큰 차이가 발생하지 않으나 변형률이 증가함에 따라서 Hyperbolic 모델이 실내시험 결과와 많은 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 Ramberg-Osgood 모델의 경우 공진주시험 결과와 잘 일치하고 있으나, Hyperbolic 모델의 경우 실내 시험 결과와 일치하지 않는 부분이 발생하고 있다. 본 연구에서는 지반의 비선형 거동을 상대적으로 우수하게 평가하고 있고 있는 Ramberg-Osgood 모델을 적용하여 비선형 유한요소 해석을 수행하여 비배수 조건에서 대변형 해석을 수행하였다.

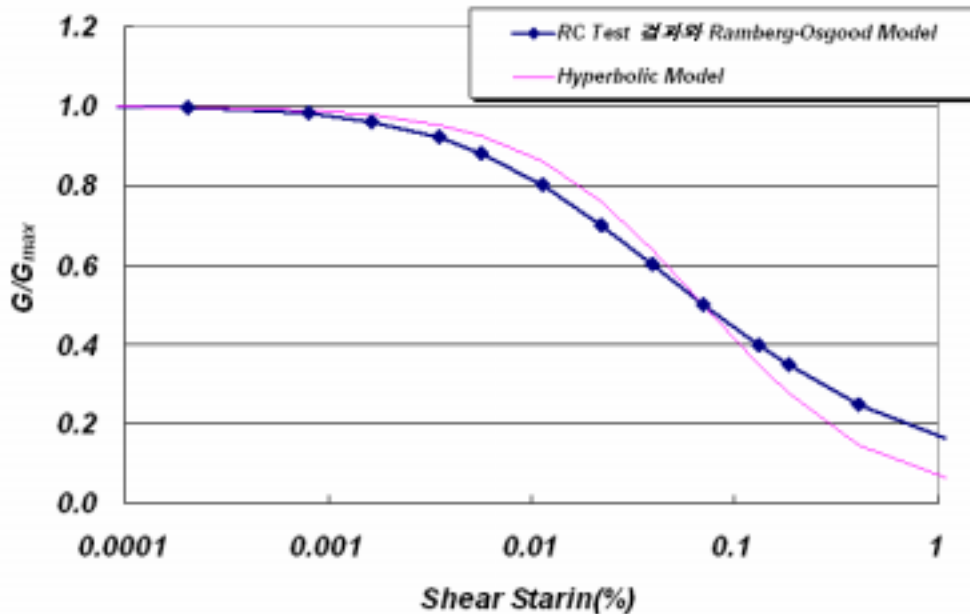


그림 2 전형적인 공진주시험 결과와 Ramberg-Osgood 모델을 이용한 curve fitting 및 Hyperbolic 모델을 이용한 예측과의 비교

3. 예제해석

3.1 해석 대상지반

해석 대상지반은 말레이시아 Muar 평원의 연약지반 시험성토사레이다 (MHA 1989, 오세봉 1999). 성토체의 제원은 폭 40m, 길이 60m 로서 성토시 0.2m씩 주당 약 0.4m 속도로 급속하게 다짐 시공을 하였다. 그림 3은 해석 대상지반의 제원 및 유한요소 망을 나타내며, 평면변형도 조건하의 4절점 요소 (CPE4)로 요소망을 설정하였다. 연약지반 요소는 초기응력이 없이 생성된다. 성토층은 층별로 생성하고 물체력(body force)가하였다(오세봉, 김욱 2002).

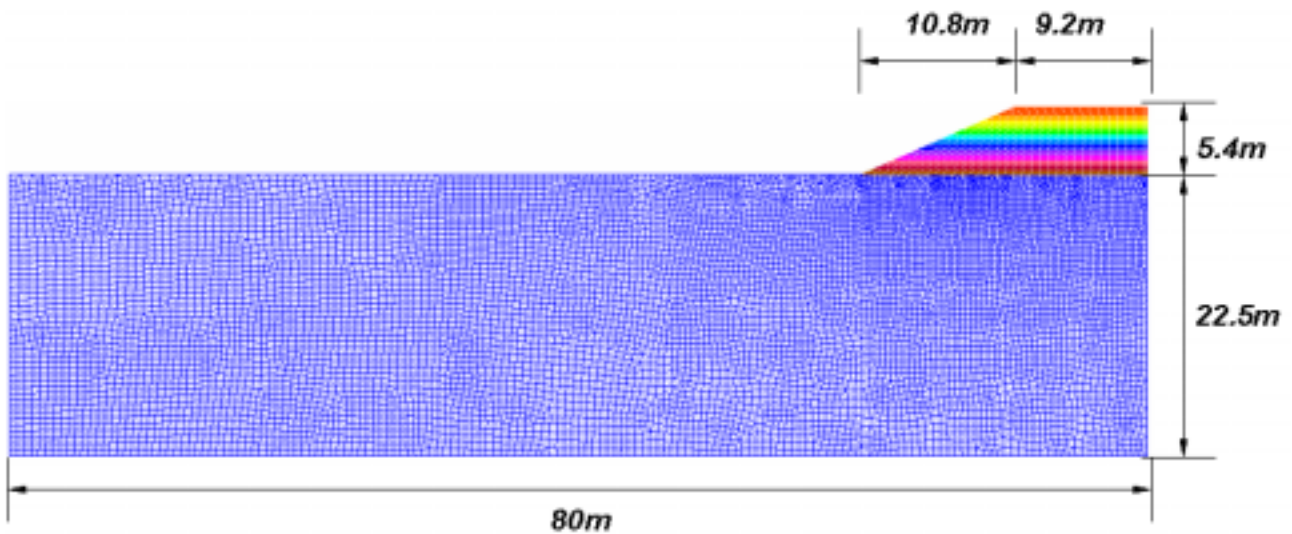


그림 3 해석 대상지반의 제원 및 유한요소 망

3.2 Ramberg-Osgood Model의 검증

본 연구에서는 연약지반 위에 계속 성토하는 과정이므로 하부 연약지반의 경우 지속적인 하중재하 과정만 경험하게 된다. 따라서, 본 연구의 해석결과에서는 지속적인 하중 증가에 의한 변형률 증가 또는 변위 증가 과정만 나타나기 때문에 비선형 해석결과에 대한 확인이 어렵다. 따라서, 본 해석에 이용된 Ramberg-Osgood 모델이 비선형 거동을 제대로 모사할 수 있는지 알아볼 필요가 있어 간단한 해석 모델을 이용하여 검증을 실시하였다.

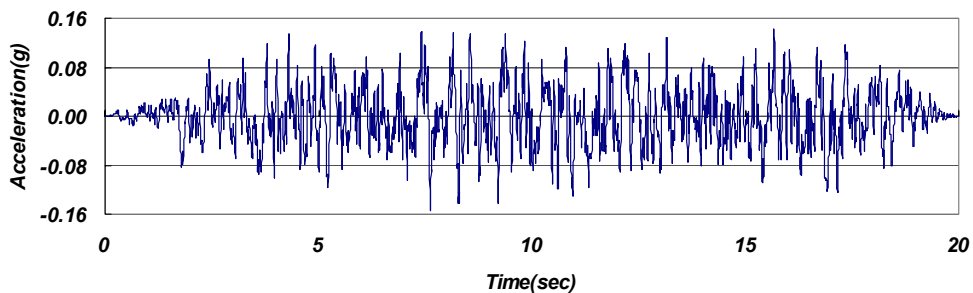
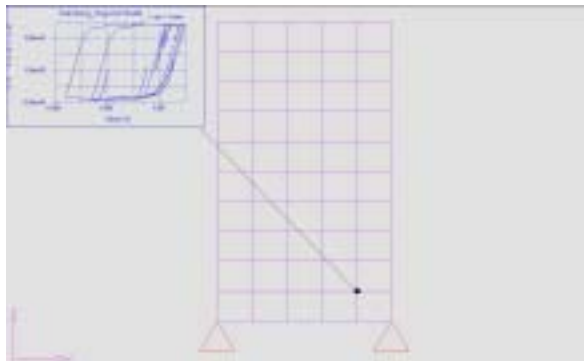


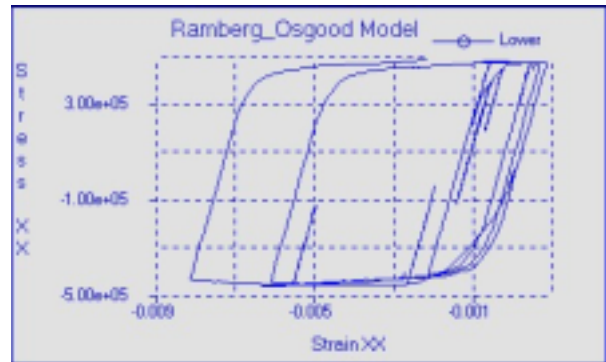
그림 3 검증에 이용된 인공지진파

본 연구에서는 효율적인 비선형 거동을 모사하기 위하여 그림 3의 인공지진파를 적용하여 실제로 유한요소가 비선형 거동을 하는지 확인하였다. 이를 위하여 ABAQUS/Standard를 이용한 비선형해석의

신뢰성을 확인하기 위하여 간단한 모델을 이용하여 시간이력 비선형 응력-변형률 시간이력곡선(Time history of nonlinear stress-strain relationship)을 검토하였다. 본 검증모델에 사용된 물성값은 앞절의 예제중에서 하부의 연약지반 물성을 입력하였다. 예제 해석의 모델과 모델 하부에서 응력-변형률 시간이력곡선은 그림 4에 나타내었다. 그림 4-(b)에 나타난 바와 같이 인공지진파를 적용하여 시간에 따른 유한요소의 응력-변형률 곡선을 그려본 결과, 본 해석에서 사용한 Ramberg-Osgood 모델은 지반의 비선형 거동을 효율적으로 모사할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 이러한 검증절차를 수행한 후 연약지반 상에 급속히 성토될 경우 비배수 조건에서의 비선형 해석을 수행하였다.



(a) 검증을 위한 예제해석 모델



(b) 시간에 따른 응력-변형률 곡선

그림 4 ABAQUS/Standard를 이용한 Ramberg-Osgood 모델 검증

3.3 해석결과

그림 5에는 기존의 연구결과인 1989년 MHA가 수행한 결과, 2002년 오세봉과 김욱이 수행한 연구결과 그리고 본 연구의 결과를 비교하였다. 비교 결과 본 연구의 결과와 오세봉과 김욱이 수행한 결과 및 Mises 기준에 의한 결과의 경우 성토고가 높지 않은 미소변형 영역에서는 비슷한 결과를 보이다가, 성토고가 3m 이상에서는 각각의 해석결과 마다 차이를 보이고 있다. 오세봉 김욱의 결과의 경우 성토고가 높아질수록 대변형 경향이 강하게 나타나고 있다.

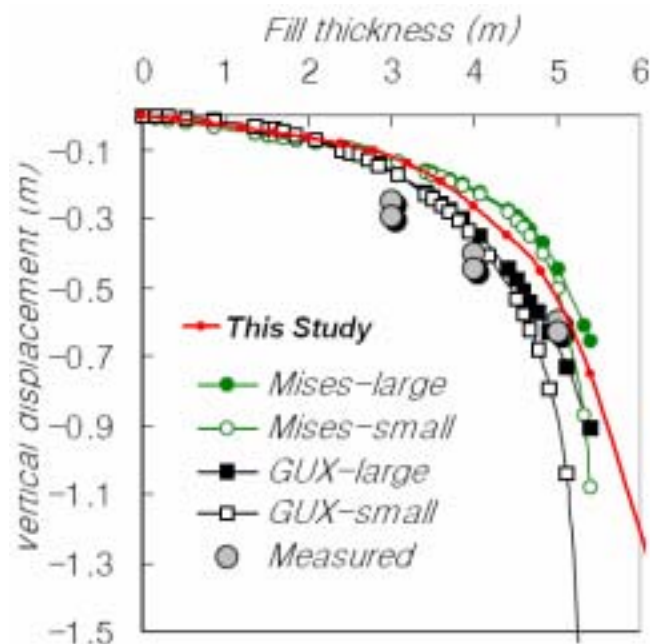


그림 5 본 연구의 해석결과와 기존 연구결과와의 비교

본 연구에서 수행한 Ramberg-Osgood model과 오세봉과 김욱이 수행한 결과는 모두 비선형 탄소성 해석(Nonlinear elasto-plastic analysis)이다. 본 연구에서는 대변형에 따른 파괴규준을 적용하지 않았으나, 오세봉과 김욱의 연구에서는 대변형에 따른 파괴규준과 ABAQUS에서 제공되는 User Subroutine 인 UMAT을 적용한 결과이다. ABAQUS에서 UMAT을 이용할 경우 해석 대상에 따라 개별적인 User Subroutine을 적용해야 하는 단점이 있고, 지배방정식을 새로 구성해야 하는 어려움이 있다. 반면, 본 연구의 Ramberg-Osgood model의 경우 공진주시험 결과만 있다면 모든 경우에 대하여 별도의 User Subroutine을 구성할 필요가 없이 신속하게 해석을 수행할 수 있다. 따라서, 비선형 해석을 위해 필요한 시간과 노력을 고려하면 본 연구에서 이용된 Ramberg-Osgood model의 경우 상대적으로 경쟁력이 있는 것으로 판단된다. 반면, 오세봉과 김욱의 연구 결과의 경우 연약지반상에 급속하고 높은 성토가 필요할 경우 상대적으로 정밀한 해석을 수행할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

일반적으로 지반의 비선형 물성치를 얻기는 매우 힘들다. 그러나, 실내 공진주시험의 경우 비교적 신뢰성 있는 지반의 변형률 증가에 따른 전단탄성계수 감소곡선을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 공진주시험 결과를 Ramberg-Osgood model에 적용하여 급속히 성토된 연약지반의 대변형 특성에 대하여 살펴 보았다. 예비해석 결과 Ramberg-Osgood model은 신뢰성 있는 비선형 거동을 보여 주었고, 기존 문헌에 나타나 있는 예제해석과 비교 결과 비배수 상태에서의 연약지반 대변형 특성을 비교적 신뢰성 있게 나타낼 수 있었다. 따라서, 시험 수행법이 쉽고 비용도 저렴한 공진주시험 결과를 이용한 비배수 상태에서의 급속한 성토시 신속하게 연약지반의 안정성 검토가 가능한 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. 오세봉, 김욱, 2002, ABAQUS를 이용한 연약지반 성토문제에 대한 대변형해석, 대한토목학회 2002년 학술발표회, pp. 154~157
2. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. (2001) ABAQUS/Standard User's Manual, version 6.5
3. MHA, Malaysian Highway Authority(1989), Proceedings of the International Symposium on Trial Embankments on Malaysian Marine clays, Kuala Lumpur, Vol.1