

철도궤도형 구조물에서의 응력과 변위*

김성득 · 김우식
토목환경공학부

<요 약>

철도궤도시스템을 단순화시킨 지반위에 놓인 궤도형 구조물을 Talbot 이론 및 연속탄성 지지 모델, 2차원 Plane Strain 모델, 3차원 유한요소 입체모델 그리고 탄소성 지반위의 궤도형구조물을 기발표된 현장 실측치와 비교하여 탄성 및 탄소성 지반위에 놓인 궤도형 구조물의 해석치를 비교 검토하였다. 지반을 탄성으로 본 경우와 실상에 가까운 탄소성으로 본 경우의 수치해석 결과 하중 작용점 아래에서의 깊이에 따른 수직 처짐량이 표면에서 표면아래 50cm까지는 그 처짐량이 1.83배~1.92배로 컸음을 알 수 있었고, 탄소성 지반위에 놓인 보에 대한 모델실험 결과와 수치해석의 결과가 거의 일치함을 확인하였다.

Stress and Deformations in Railway Track-Type Structures

Sung-Duk Kim · Woo-Sik Kim

Department of Civil & Environmental Engineering

<Abstract>

The study compared a Track-Type Structures on soil to make simplification Railway Track System with a Talbot theory, 2-dimensional plane strain finitemodel and 3-dimensional solid model, then compared a Track-Type Structures resting on the elasto-plastic soil medium with a result of elastic and elasto-plastic analysis and field test. A result of elasto-plastic analysis was confirmed larger displacement about 1.83~1.92 times than a result of elastic analysis, this study confirmed to correspond result of

* 이 논문은 1999학년도 울산대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음

model test about a beam on the elasto-plastic soil medium with result of numerical analysis

1. 서 언

철도궤도는 달리는 열차가 운행하는 두 평행선의 기다란 레일(Rail)을 말하며, 레일은 그 아래 침목(Tie), 기층(Ballast), 보조기층(Subballast), 지반(Subgrade)과 같이 다양한 재료로 구성되어 있어서 철도궤도시스템(Railway Track System)이란 표현을 쓰고 있다. 철도궤도의 해석은 레일 밑의 지반을 실제로 가까운 탄소성체로 본 3차원의 입체적 해석을 하기에는 여러 가지 어려움이 있어서 종전까지는 철도궤도를 탄성 지반위의 보(Beam)로 보고 해석한 Talbot 연구가 주로 사용되었다. 본 연구에서는 2차원 Plane Strain 해석에 의한 궤도형 구조물의 해석결과와 Plane Strain 탄소성 해석이 가능한 기 개발된 컴퓨터 프로그램 FLAC에 대해 탄성 해석치와 비교 분석하여 고찰하고, 프로그램 FLAC을 탄소성 해석하여 기 발표된 탄소성해석 결과치 및 현장실험 결과와 비교 고찰해 보고자 한다. 프로그램 FLAC의 효용성이 밝혀지면 2개의 레일이 지나는 궤도형 구조물 대신에 탄소성 지반위의 길다란 보에 대한 해석 결과와 실제 실험실에서 제작한 모형 실험의 결과와 비교 고찰하고, 그 유사성이 확인되면 다시 탄소성 지반위에 놓인 궤도형 구조물에 대해서 다양한 수치실험을 수행하여 철도궤도시스템의 보다 실상에 가까운 해석법을 찾고 나아가서 철도 궤도해석의 기술 증진에 이바지하고자 한다.

2. 탄성지반 위에 놓인 궤도형 구조물의 해석

2.1 궤도형 구조물의 유한요소모델

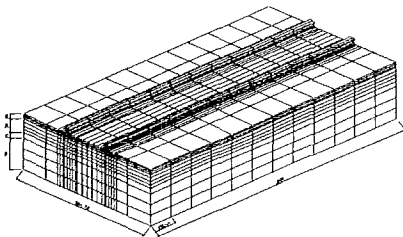


그림 2-1 3차원 유한요소모델

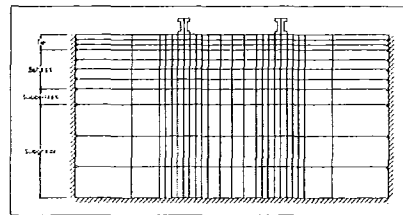


그림 2-2 Plane Strain
유한요소분할도

철도궤도시스템을 모델화한 그림 2-1과 같은 3차원의 유한요소모델을 빠른 처리능력과 발전된 전·후처리(pre·post processor) 그래픽 기능을 용이하게 수행할 수 있는 범용 해석 프로그램인 SAP 90을 이용하여 해석하였다. 3차원 유한요소 해석의 많은 요소분할로 인한 비 효율성을 극복하고 3차원 모델에서의 지반의 변형 및 응력이 Plane Strain 횡단해석시의 그 것과 일치하는지의 여부를 알아보기 위해 그림 2-2와 같은 2차원 Plane Strain 유한

요소 모델에 대해 수치 해석을 하였다. 폭 3m, 길이 12m의 궤도형 구조물에서 지반의 최대 수직 변위값이 폭의 약 2배 되는 길이방향 6m이상의 등분포하중이 작용했을 때 전구간에 등분포 하중이 작용했을 때의 변위값에 근접하였으며, 폭의 약 3배 되는 길이방향 9m이상의 등분포하중이 작용했을 때 그 변위값이 일치함을 알 수 있으며 그러한 하중 조건 하에서는 3차원 입체해석 대신에 2차원 Plane Strain으로 궤도형 구조물의 지반의 변위 및 응력을 구할수 있을 것이다.

2.3 현장 실측치와의 비교

3차원 유한요소 해석과 Plane Strain 해석 결과를 현장실험의 결과와 비교하기 위해서 Kansas Test Track에서의 실측결과를 인용하기로 하였다. Kansas Test Track은 미국 Kansas주의 Aikman과 Chelsea사이에 위치하고 있으며 Santa Fe Railway Company(ATSF) Line과 연결되어 있다. 이곳에는 9개의 각각 다른 목적의 시험장비가 설치된 Test Track 이 있다. 3차원 유한요소 해석결과와 Plane Strain 횡단해석 결과는 각각 최대변위 0.40cm, 0.36cm의 차짐으로 근소한 차이를 보이고 있으나 Kansas Test Track의 실측치와는 상당한 차이를 보이고 있었으며 이는 지반을 탄성으로 보고 해석한 등의 이유에서이다.

3. 탄소성 지반위에 놓인 구조물의 해석

3.1 궤도형 구조물의 탄소성 해석 모델과 비교분석

탄성 지반위의 궤도형 구조물의 3차원 유한요소 모델에 일반적인 plane strain 해석을 실시할 경우 오차가 거의 무시할 정도로 작게 나타났으므로 앞으로 행할 탄소성 지반위의 궤도해석은 plane strain 평면해석으로 하고자 한다.

탄소성 지반위의 놓인 궤도형 구조물의 유한요소해석을 위하여 본 연구에서는 기 개발된 SAP90, FLAC 두가지의 프로그램을 이용하여 수치해석하기로 한다.

3.1.1 해석모델

3차원 철도궤도 시스템과 가장 유사한 3차원 유한요소 모델은 Plane Strain 2차원 모델로 나타내 해석할 수 있음을 앞에서 밝혔다. 그림 3-1와 같이 SAP90 해석을 위한 요소 분할도를 FLAC 해석에 용이하게 그림 3-2과 같은 요소 분할도로 나타내고 그 해석 모델에 대해 FLAC 프로그램을 이용하여 여러 가지 수치해석을 하고자 한다. 즉, 탄성해석에 의한 SAP90과 FLAC의 결과를 비교하고, FLAC을 이용한 탄성해석과 탄소성해석의 결과도 비교하고, 나아가 FLAC의 소성해석과 현장 실측치와도 비교 고찰하고자 한다.

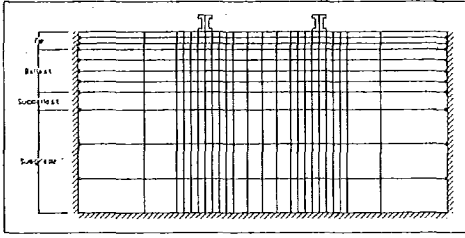


그림 3-1 SAP90해석 요소 분할도

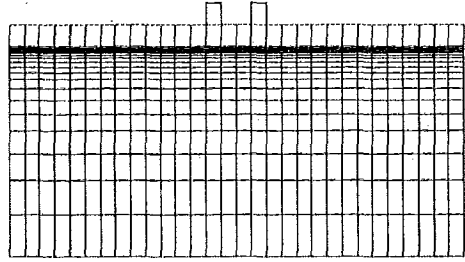


그림 3-2 FLAC해석 요소 분할도

3.1.2 탄성해석에 의한 SAP90과 FLAC의 결과 비교

탄성계수와 포아송비 등 여러 가지 계수값을 가진 탄성 및 탄소성 지반위의 케도형 구조물에 148톤의 수직 집중하중이 작용했을 때 FLAC를 이용한 2차원 탄성영역 수치해석과 기탄성해석인 SAP90을 사용한 Plane Strain 해석에 대한 지반의 하중점 아래에서의 깊이에 따른 수직 처짐량과의 관계가 그림 3-3에 나타나 있다. 그림에서 하중 작용점 아래에서의 수직 처짐량은 표면에서는 SAP90 해석시 1.02cm 이고 FLAC 해석시 1.18cm로 그 오차가 0.16cm로 8% 범위내에 근사하였다. 표면에서 깊이 70cm 정도까지는 그 처짐값의 차이가 0.021cm ~ 0.16cm 범위로 근사하였으며 그 이하에서는 거의 일치하여서 탄성 지반위의 케도형 구조물 해석을 탄소성 해석이 가능한 FLAC을 이용한 탄성해석으로 대체할 수 있을 것이다.

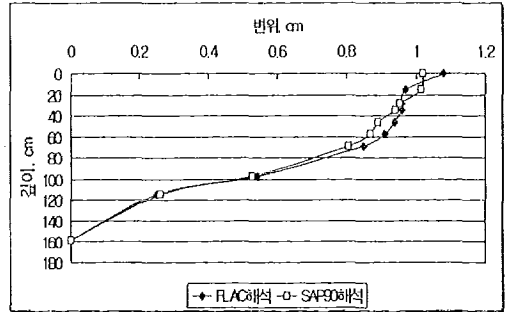


그림 3-3 SAP90/FLAC 탄성해석 비교

3.1.3 FLAC을 이용한 탄성 및 탄소성 해석 비교

지반위에 놓인 케도형 구조물에 대해서 지반을 탄성으로 본 경우와 실상에 가까운 탄소성으로 본 경우의 수치해석을 FLAC을 이용해 해석한 결과 FLAC도 탄성해석이 가능하므로 소성요소를 고려하지 않고 탄성해석한 값과 탄소성해석으로 실제 해석한 하중 작용점 아래에서의 깊이에 따른 수직 처짐량을 그림 3-4에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 지반을 탄소성 지반으로 보고 해석할 경우 탄성으로 보았을 때보다 표면에서 표면아래 50cm까지는 그 처짐량이 1.83배 ~ 1.92배로 컸음을 알 수 있으며 이는 지반을 탄성으로 본 해석이 실제보다 적은 값으로 나타남을 확인할 수 있었다. 즉, 탄성해석보다 탄소성해석에서 소성

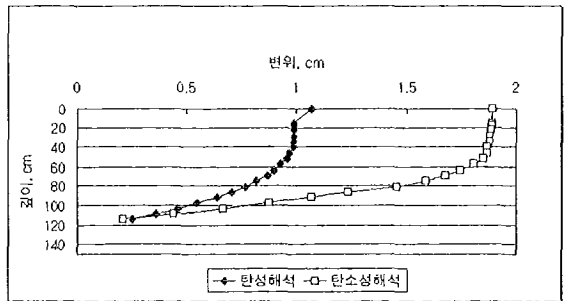


그림 3-4 FLAC을 이용한 탄성 및 탄소성해석 수직 처짐

변위가 이루어지고 난 후에는 상당량의 소성 처짐이 발생한다는 사실을 알 수가 있었다.

3.1.4 현장 실측치 등과의 종합 비교

지반상의 궤도 또는 궤도형 구조물을 Kansas Test의 실측치와 SAP90에 의한 3-D 유한요소 탄성해석결과 그리고 FLAC을 이용한 탄소성 해석결과를 하중이 작용하는 점에서 한쪽 표면에서 따른 수직 처짐값이 그림 3-5에 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 3-D 유한요소 탄성해석, Plane Strain 해석, Kansas Test Track의 실측치는 실측치 하중값에 대한 하중점에서 100cm 떨어진 표면에서의 최대 수직변위가 각각

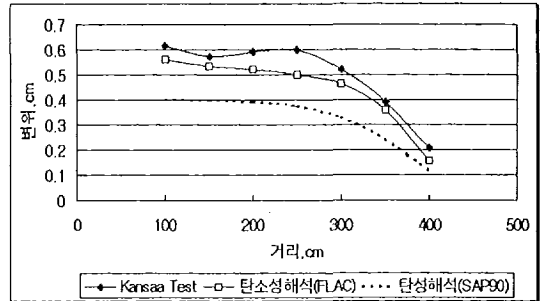


그림 3-5 여러 해석방법에 따른 수직처짐

0.40cm, 0.561cm, 0.616cm로 Kansas Test Track의 실측치의 결과와 탄소성해석의 결과 수직 변위 차이가 0.102cm~0.035cm(8.9%~16%)로 근사함을 알 수 있었다. 이에 앞으로 탄소성 지반위의 궤도형 구조물을 비롯한 여러 형상의 구조물 해석에 대해서 FLAC을 이용한 탄소성해석이 유용함을 확인하였다. 탄성해석 결과가 실측치와 차이가 나는 것은 현장 실측치에서 생기는 기층과 침목의 불안정적인 안착과 Rail Base와 Tie Plate간의 유격에 기인되는 문제점을 상당량 소성영역에서 감안되어졌다고 판단되었고, 앞으로의 실험과 수치해석에 밑바탕이 되는 비교로 사용되어지리라 본다.

3.2 모델실험

길이 900mm, 넓이 200mm, 높이 400mm의 특수 제작된 측면에서 처짐등을 관찰할 수 있는 MESH를 그린 토조를 제작하였다. 여기서 토사의 교란을 방지할 수 있는 자연낙하법으로 지반 부분을 채우고 그위에 실험의 편의상 궤도형 구조물 대신에 보를 놓고 하중을 재하하여 하중 작용점에서의 수직 처짐량을 실험으로 측정한 값이 서로 밀도(1.5kg/cm³, 1.7kg/cm³)가 다른 2가지의 경우에 대해서 그림 3-6에 나타나 있는 바와 같이 그림상으로는 별 차이가 나지 않는다. 한편, 앞에서 수행한 모델 실험 자료에 대해서도 다른 두가지 밀도에 따른 지반 깊이에 따른 응력이 그림 3-7에 나타나 있다.

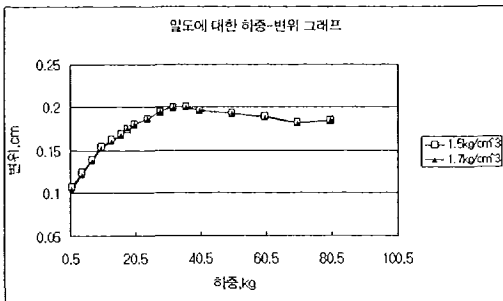


그림 3-6 밀도에 따른 하중-변위

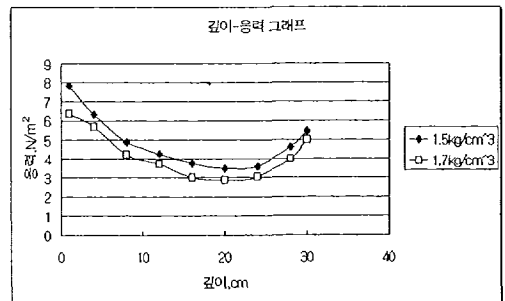


그림 3-7 밀도에 따른 깊이-응력

그림 3-6 및 3-7에서 수치해석 상에서의 최대 처짐값은 밀도에 변화에 크게 차이를 보이지 않지만 실제 모형실험에서는 밀도에 따른 조금의 차이를 나타낸다. 탄소성 지반위에 놓인 보에 대한 모형실험 결과와 그 실험모델에 대한 FLAC에 의한 수치해석의 결과를 비교하기 위해 그림 3-8와 같이 한 그림에 나타내어 보았다. 수치해석과 모형실험의 결과 하중 증가에 따른 수직처짐의 오차가 가장 크게 나타나는 값이 0.0301cm로 극히 작은 값을 나타내므로

다음에 행할 다양한 탄소성 지반위에 궤도형 구조물을 프로그램(FLAC)을 이용하여 사용할 수 있음을 뒷받침 할 수 있다고 본다. 실험모델에서 지반 물성치를 다양하게 변화시킨 결과와 스트레인게이지를 이용했다고 한 응력등의 결과와 수치해석 결과와의 비교는 차후에 보충하기로 한다.

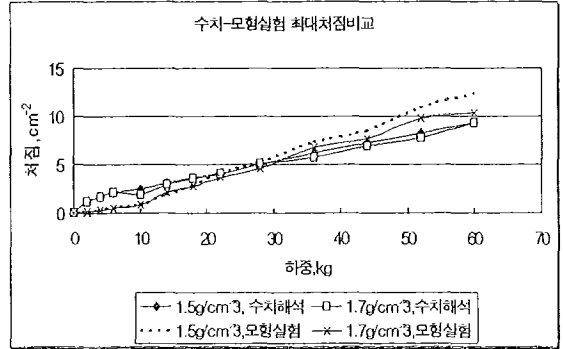


그림 3-8 수치해석-모형실험 비교

4. 궤도형 구조물의 각종 수치해석

4.1 단층 지반의 수치해석

철도궤도시스템을 구성하는 지반은 기층-보조기층-지반과 같이 서로 다르게 구성되어 있다. 본 장에서는 지반이 같은 재료로 된 단층구조와 여러개로 나뉘어진 다층구조로 나누어 수치해석에 적용하고자 한다. 이때 궤도형 구조물의 다층 탄소성 지반 해석에 사용된 지반 특성상의 탄성계수, 프아송 비등의 다양한 계수값이 사용되어 졌다.

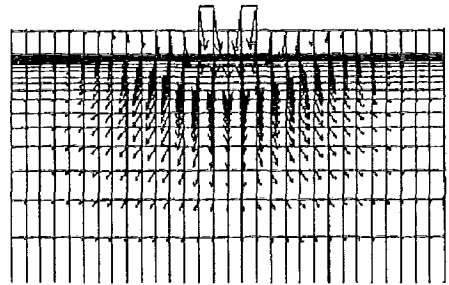


그림 4-1 지반의 변형된 모습

그림 4-1은 단층 지반에 궤도형 구조물에 하중이 작용했을 때 지반의 일반적인 변형을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 각각의 지반 위치와 상태에서 소성변위가 각각 다르게 일어나는 것을 볼 수가 있다.

그림 4-2의 그래프는 하중을 5000~20000kg까지 증가하면서 일정한 비율로 깊이로 따른 변위가 나타나는 것을 볼 수 있었고, 그림 4-3의 그래프는 밀도를 점차적으로 증가시켜 결과를 얻은 것인데, 밀도의 변화는 결과에 크게 영향을 나타내지 못함을 알 수 있었다.

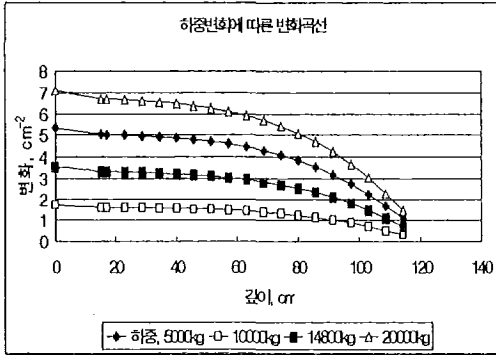


그림 4-2 하중변화에 따른 곡선

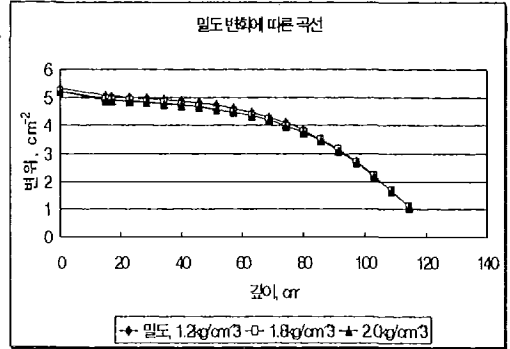


그림 4-3 밀도변화에 따른 곡선

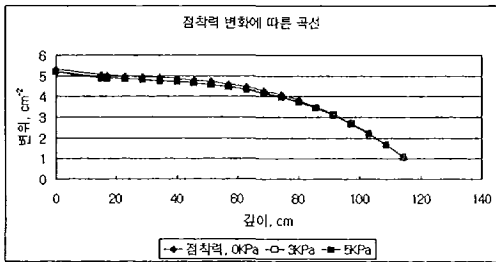


그림 4-4 점착력 변화에 따른 곡선

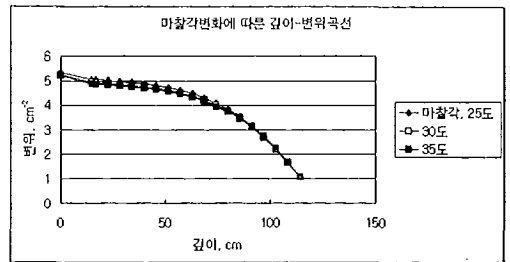


그림 4-5 마찰각 변화에 따른 곡선

그림 4-4와 그림 4-5은 앞에서 언급한 것과 같이 침목 밑의 기층-보조기층-지반이 동일한 성질인 단층으로 가정하고 마찰각과 점착력의 값을 변화시켜 주면서 지반의 변형을 유추해 보았다. 마찰각과 점착력 역시 밀도와 마찬가지로 그렇게 큰 변화는 없었다.

4.2 다층 지반의 수치해석

앞에서와 같이 기층-보조기층-지반이 단일 층이 아닌 서로 다양한 재료로 구성되어 있는 철도궤도시스템을 단순화시켜 수치해석하였고 실제 구조물과 지반상태를 적용하여 보다 현실성에 근접한 해석을 하고자 하였다.

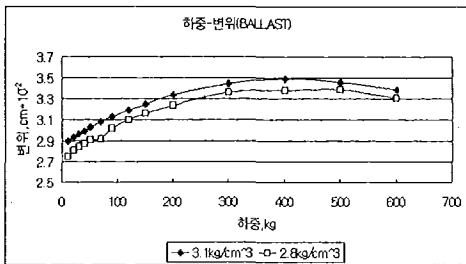


그림 4-6 ballast의 하중-변위 그래프

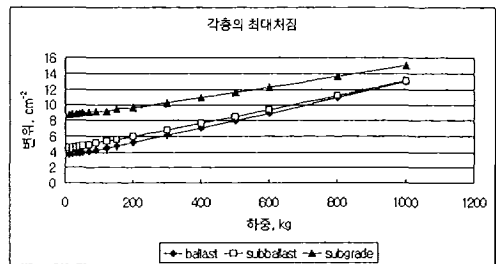


그림 4-7 각층의 최대변위

그림 4-6의 그래프는 기층 부근에 소성변형을 일으키는 지점을 찾아 하중증가에 따른

변위 곡선을 밀도가 서로 다른 두 개의 곡선을 찾아보았고, 그림 4-7은 앞의 단층 지반에서와 같이 기층-보조기층-지반의 위치에서의 최대처짐을 도식화해 보았다.

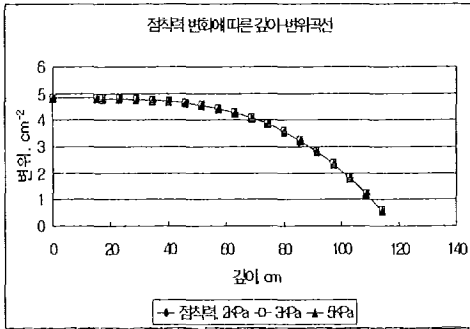


그림 4-8 점착력 변화에 따른
깊이-변위곡선

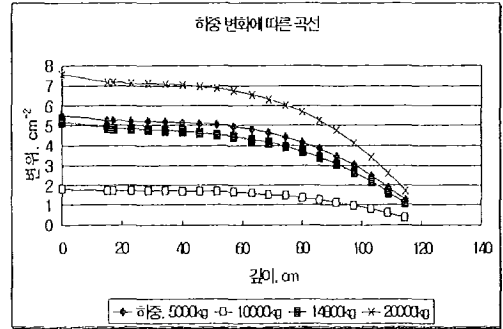


그림 4-9 하중변화에 따른
깊이-변위곡선

그림 4-8은 점착력을 변화시켜서 다층지반의 깊이에 따른 변위곡선을 알아 보았고 그림 4-9은 하중을 일정하게 증가시켜 주면서 다층지반의 변형을 알아보았다. 하중증가는 대수적으로 변위와 정비례하는 것을 볼 수가 있었다.

4.3 비교 고찰

본 장에서 실시한 궤도형 구조물의 각종 수치해석에서 철도궤도시스템을 단지 궤도와 지반만으로 단순화시켜 궤도형 구조물에 작용하는 하중과 지반 계수 변화에 따른 궤도 및 지반의 변형과 거동을 2차원 Plane Strain 모델로 FLAC를 이용하여 해석하였다.

본 해석에서는 단층해석과 다층해석으로 크게 2가지로 나누어 탄소성 해석하여 비교하였는데, 각각의 결과치를 비교해 보면 먼저 하중변화에 따른 변위-깊이 관계곡선은 별다른 큰 차이점을 보이지 않은 것은 지반의 거동은 주어지는 하중도 중요하지만 지반의 물리적 특성에 지배적인 것을 확인할 수 있었고, 마찬가지로, 점착력, 밀도 등의 지반의 물리적 계수값의 변화에 따른 상대적으로 단층과 다층해석에서 각각의 특성을 보여주었다. 또한 3장 그림 3-9에서 나타나 있는 현장 실측치인 Kansas Test Track과의 종합 비교를 통하여 탄소성 지반위에 놓인 궤도형 구조물의 해석에서 탄성해석보다 현장 실측치에 가까운 결과를 보여줌으로써 본 장의 다양한 수치해석에 따른 결과를 몇 부칠수 있다고 본다.

5. 결 론

철도궤도시스템을 단순화시킨 지반위에 놓인 궤도형 구조물을 Talbot 이론 및 연속탄성 지지 모델, 2차원 Plane Strain 모델, 3차원 유한요소 입체모델 그리고 탄소성 지반위의 궤도형구조물과 기발표된 현장 실측치와 비교하여 탄성 및 탄소성 지반위에 놓인 궤도형 구조물의 해석치를 비교 검토해 보고 다음 사항을 알 수 있었다.

1) 기존에 알려진 철도궤도시스템을 단순화시킨 탄성 지반위에 놓인 궤도형 구조물을

3차원 유한요소 입체모델을 2차원 Plane Strain 모델로 간략하게 해석할 수 있다는 것을 알았다.

2) 지반위에 놓인 궤도형 구조물에 대해서 지반을 탄성으로 본 경우와 실상에 가까운 탄소성으로 본 경우의 수치해석을 FLAC을 이용해 해석한 결과 하중 작용점 아래에서의 깊이에 따른 수직 처짐량이 표면에서 표면아래 50cm까지는 그 처짐량이 1.83배~1.92배로 컸음을 알 수 있으며 이는 지반을 탄성으로 본 해석이 실제보다 적은 값으로 나타남을 확인할 수 있었다. 즉, 탄성해석보다 탄소성해석에서 소성 변위가 이루어지고 난 후에는 상당량의 소성 처짐이 발생한다는 사실을 알 수가 있었다.

3) 지반상의 궤도 또는 궤도형 구조물을 Kansas Test의 실측치와 SAP90에 의한 3-D 유한요소 탄성해석결과 그리고 FLAC을 이용한 탄소성 해석결과 하중이 작용하는 점에서 한쪽 면으로 수직 처짐값이 하중점에서 100cm 떨어진 표면에서의 최대 수직 변위가 실측치의 결과와 탄소성해석의 결과 수직 변위 차이가 근사함을 알 수 있었다.

4) 탄소성 지반위에 놓인 보에 대한 모델실험 결과와 그 실험모델에 대한 FLAC에 의한 수치해석의 결과가 거의 일치함을 확인하였다.

5) 지반 물성치를 다양하게 변화시킨 결과와 수치해석 결과와의 비교와 탄소성 지반을 기층-보조기층-지반의 다양한 재료로 보고 토성 재료를 다양하게 변화시킨 모델에 대한 수치해석 결과를 비교 검토할 수 있었다.

참고문헌

- 1) 이종득, 철도공학, 노해출판사, pp. 81~146, 1989
- 2) 김성득, 장승필, "탄소성 지반위에 놓인 원형평판의 유한요소 해석", 대한토목학회 논문집, 제7권 4호, pp.91~102, 1987
- 3) 김성득, 박원규, "탄성 지반위에 놓인 궤도형 구조물의 유한요소 해석", 울산대학교 공학연구논문집, 제30권 1호, pp. 431~445, 1999 한국지반공학회 '98학술발표논문집, pp.145~150,1998
- 4) 김성득, 김우식, "탄성 지반위에 놓인 궤도형 구조물의 해석", 대한토목학회 '99학술발표 논문집, 제4권, pp. 270~300, 1999
- 5) 박영호, "지반-궤도차량의 상호작용에 관한 연구", 서울대학교 공학박사학위논문, 1996
- 6) E. Hinton and D.R.J. Owen, Finite Element Programming", Academic Press, 1977
- 7) Edward L. Wilson, "SAP90 Manual", University of California, Bakeley, 1992
- 8) Itasca Consulting Group, "FLAC User's Manual", 1993
- 9) A. P. S Selvadurai, Elastic Analysis of Soil-Foundation Interaction, Elsevier S. P., Co., 1979
- 10) Raymond, G. P. & Lake, R. W. & Boon, C. J., "Stresses and Deformation in Railway Track", CIGGT NO. 76-11, Queen's University, 1976
- 11) 황정규, 지반공학의 기초이론, 구미서관, pp. 215~221, 1994
- 12) C. S. Desai Elementary Finite Element Method, Prentice Hall, pp.372~381, 1979
- 13) S. P. Timoshenko and J.M. GERE, Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, pp.

319~347, 1961

- 14) 강양원, “탄성지반상의 보 이론에 따른 Rail의 동적특성에 관한 연구”, 연세대학교 석사학위 논문, 1988
- 15) 최창근, 유한요소해석, 집문당, pp. 509~538, 1992