

지반 변형률을 고려한 지진응답해석

Earthquake Response Analysis considering the Ground Strain Ratio

이일화* 조성호**
Lee, il-wha Joh, sung-ho

ABSTRACT

The most widely accepted analysis, which evaluates the ground response for the liquefaction analysis and dynamic response analysis of structures, is the linear equivalent analysis such as SHAKE. The concept of the equivalent linear analysis holds true only when the nonlinearity of the ground material is not significant and the large lateral displacement due to the earthquake loading is not expected. Thus, in this study the equivalent linear analysis and the finite element analysis are applied to evaluate the ground response of the real site, and the characteristics of the each algorithm are compared. The equivalent linear analysis was performed by SHAKE91, and the finite element analysis was performed by ABAQUS.

1. 서론

토목구조물의 내진해석에 있어서 중요하게 대두되는 문제 중의 하나는 지진동에 대한 지반응답의 평가이다. 지반응답이란 지진의 진원에서 시작된 지진동이 암반층과 토사층을 통과해서 지표면에 도달된 탄성파의 파동을 말하는 것이며, 다양한 지층을 통과하여 지표면까지 전파되는 탄성파의 전파특성을 모델링하여 지반응답을 구하는 해석을 지반응답해석이라고 한다. 지반응답해석은 설계응답스펙트럼을 결정하기 위한 지표면 진동의 예측, 액상화평가를 위한 동적응력과 변형률의 산정 그리고 지반 또는 토류구조물의 불안정을 초래하는 지진하중의 결정 등에 주로 활용된다. 이렇게 지하심부에서 발생한 지진동이 암반층 및 토사층 등 여러 매질을 거쳐서 지표면에 도달하는 지진동을 해석하는 지반응답해석은 수 십km의 암반층을 통과한다하더라도 최종적으로 통과하게 되는 불과 10여 미터의 토사층이 지표면에서의 지진동의 특성에 지배적으로 영향을 주게 된다. 이러한 지표면 지진동에 대한 토사층의 영향을 정량적으로 평가하고자 하는 지진학자 및 지반공학자들에 의하여 여러 가지 방법이 개발되었으며, 이러한 방법들은 해석에 도입되는 모델링 방법에 따라 선형해석, 등가선형해석, 비선형해석 등으로 분류된다. 최근 국내에서도 토목구조물에 대한 내진해석의 중요성이 인식됨에 따라 액상화해석 구조물에 대한 동적응답해석 등을 위해서 본격적으로 지반응답해석이 수행되고 있는데 가장 보편적으로 활용되는 해석이 SHAKE(Schnabel, et al., 1972)를 사용한 등가선형해석이다. 등가선형해석은 비선형 정도가 크지 않은 지진동의 경우에는 합리적인 해석방법이 될 수 있지만 입력지진동에 의해 지반내에 횡방향으로 큰 변위가 발생할 가능성이 있는 경우 등가선형해석은 합리적인 해석방법이 될 수 없다. 한편 SHAKE와 같이 1차원적으로 지반응답해석을 수행할 때 지표면에서의 지진동응답이 기반암에서부터 수직으로 전파되는 SH파에 의해 지배되지 않는 경우에도 1차원 지반응답해석은 합당한 방법이 될 수 없다. 따라서 본 연구에서는 1차원 등가선형해석과 2차원 유한요소해석에 의한 지반응답해석을 실제 현장에 대해 적용하여 각 해석 결과를 비교 검토함으로써 각 해석의 특징을 살펴보고 이를 바탕으로 보다 합리적인 지반응답해석을 위한 제언을 하였다.

* 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원, 정회원

** 중앙대학교 토목공학과 조교수, 정회원

2. 지진에 대한 지반응답해석

본 논문에서는 철도 통과 예정부지의 지진에 대한 지반응답해석을 수행하였다. 건설교통부의 규정에 의하면, 철도 구조물은 내진 1등급 구조물로서, 1000년 주기의 지진에 대해서도 안전하게 설계되어야 한다. 따라서, 본 과제에서도 1000년 주기의 지진에 대한 철도 통과 예정지역의 지진에 대한 지반응답해석을 수행하였다.

본 논문에서는 지진에 의한 지반응답해석을 위해서 항만 및 어항시설에서 규정한 내진해석지침을 따랐는데, 이는 현재 국내에서 내진설계에 관하여 가장 구체적으로 자세히 규정되어 있고, 기타 일반토목구조물의 내진설계에 기준으로 널리 사용되고 있기 때문이다. 본 과제에서 수행한 지진에 대한 지반응답해석의 절차는 그림 1에 제시된 바와 같이, 내진해석을 위한 인공지진 결정, SHAKE를 이용한 1차원 지반응답해석, 2차원 지반응답해석 (지진동으로 인한 등가선형변형률에 해당되는 지반 동적물성결정), 2차원 동적해석 등의 과정을 따랐다.

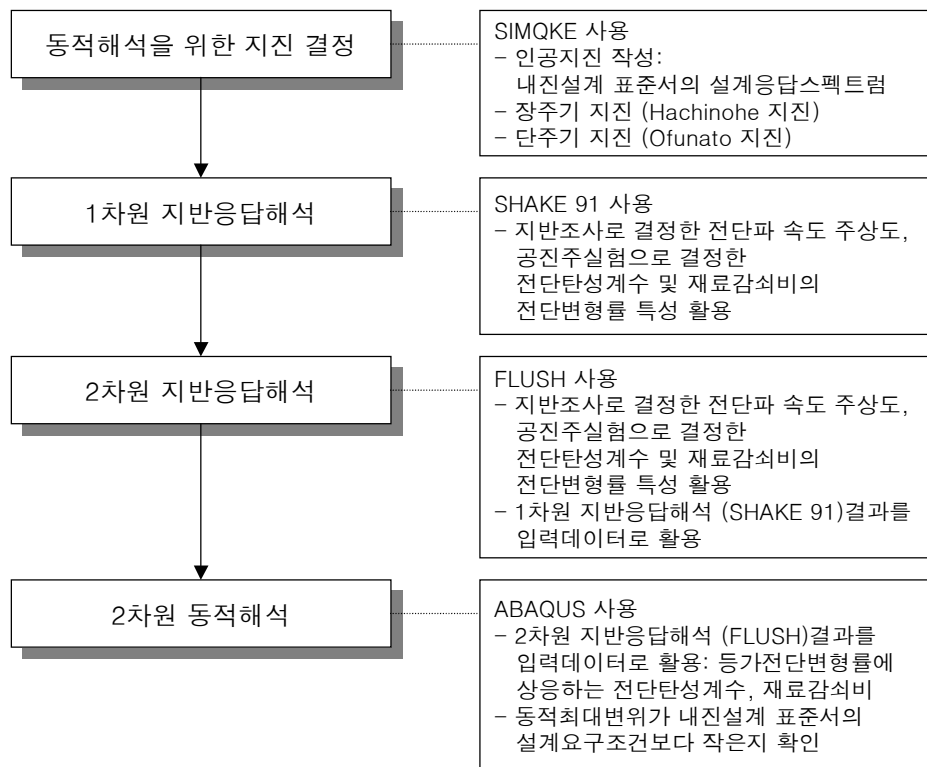


그림 1. 지진에 대한 지반응답해석을 위한 흐름도

3. 지반응답해석에 고려한 입력지진

내진 1등급 구조물이란 1000년 주기의 지진에 대해서도 안전하도록 설계되어야 하며, 1000년 주기의 지진이란 서울지역의 경우 0.11g의 최대지반가속도 (PGA)의 지진에 해당된다. 따라서, 본 과제에서는 서울 지역의 경우 1000년 주기의 지진, 즉 침두 가속도 0.11g의 지진에 대한 지반응답해석을 수행하였다. 정비된 항만 및 어항시설 (1999)에 의하면, 내진설계 대상 항만 구조물은 세 가지 지진에 대해 안전하게 설계되도록 규정하고 있다. 즉, 각 등급에 대한 설계응답스펙트럼을 만족하는 인공지진, 장주기 지진, 단주기 지진 등 세 개의 지진에 대해 안전한 것을 요구하고 있는데, 본 논문에서는 장주기지진과 단주기지진이 고려된 인공지진만 나타내었다. 입력지진의 시간이력은 그림 2에 제시한 바와 같다.

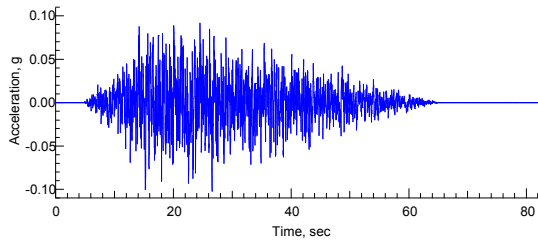


그림 2. 디컨벌루션으로 구한 지반내 기반암 인공지진

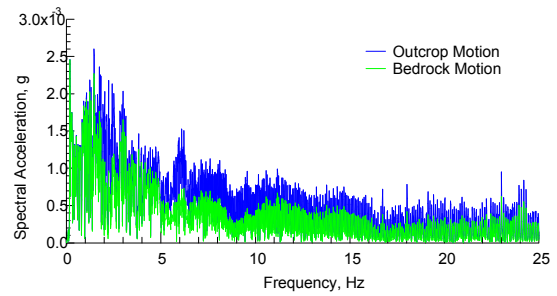


그림 3. 기반암 노두 지진과 지반내 기반암 지진

4. 지진응답해석

4.1 1차원 지반응답해석

지반의 거동을 선형으로 가정하는 1차원 선형 지반응답해석 소프트웨어 중에서 가장 일반적으로 사용하고 있는 것은 SHAKE이다. SHAKE는 비교적 신뢰성 있는 결과를 제시하는 것으로 알려져 있는데 이는 해석이 전체 지반을 감쇠비를 갖는 여러개의 지층으로 모델링하고 있고 무엇보다도 등가선형 해석(equivalent linear analysis)이라는 개념을 도입하고 있기 때문이다. 등가선형해석은 변형률에 따라 비선형적으로 거동하는 지반을 선형해석으로 모사할 수 있도록 하는 해석으로서 복잡한 비선형 거동을 가지는 지반의 물성을 등가의 선형 거동을 하는 물성으로 단순화하여 선형해석을 수행하는 방법이다. 그림 3의 지진은 기반암 노두의 지진을 1차원 지반응답해석(SHAKE91)을 통해 디컨벌루션한 지진으로서 지반내 기반암 지진과 노두지진을 비교한 그림이다.

4.2 2차원 지반응답해석

지진에 대한 지반진동은 지반의 동적물성에 크게 지배된다. 일반적으로 지반의 동적특성은 전단변형률의 크기에 크게 좌우되는데, $10^{-3}\%$ 보다 작은 전단변형률의 경우 지반은 탄성·선형 특성을 보이지만, $10^{-3}\%$ 보다 큰 전단변형률의 경우 현저히 소성·비선형 거동을 보이게 된다. 지반의 동적특성 중 탄성계수는 $10^{-3}\%$ 보다 큰 대전단변형률 구간의 값이 $10^{-3}\%$ 보다 작은 미소전단변형률 구간의 값보다 크게 감소하고, 재료감쇠비는 크게 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서, 내진해석시 고려되는 탄성계수와 재료감쇠비는 지진시 야기되는 전단변형률에 상응하는 값이 사용되어야 한다. 본 과제에서도 지진시 야기되는 전단변형률의 범위 중 등가선형전단변형률에 해당되는 전단탄성계수와 재료감쇠비를 결정하기 위해 FLUSH를 사용하여 2차원 지반응답해석을 수행하여 유효전단파속도를 현장지반 조사로 결정한 현장탄성과 속도와 비교하였다. 유효전단변형률에 상응하는 전단파속도는 현장탄성과 속도 보다 감소된 것을 확인할 수 있었다. 이는 지진동으로 인하여 지반 내에 유발된 전단변형률의 크기가 비선형 영역에 이르렀고 전단탄성계수도 이에 상응하는 수준으로 감소되었기 때문이다.

4.3 유한요소해석에 의한 응답해석

해석 대상부지에 대한 지반응답해석을 상용프로그램인 ABAQUS를 사용하여 수행하였다. 지반응답 해석을 위한 지진동은 항만구조물의 내진설계표준서에 규정된 바와 같이 설계응답스펙트럼에 근거한 인공지진을 사용하였으며, 지반의 물성은 SASW, SPS 검층 등과 같은 현장 탄성과 실험에 의해 전단파 속도를 측정된 후, FLUSH에 의해 지진동의 등가선형변형률에 대한 지반물성치를 추정하여 활용하였다. 그림 4에 인공지진에 대한 지표면에서의 가속도응답해석 결과를 제시하였다. 또한 설계응답스펙트럼으로 생성한 인공지진에 대해서 2%의 감쇠비를 갖는 지반의 응답을 구하여 그림 5에 표시하였다.

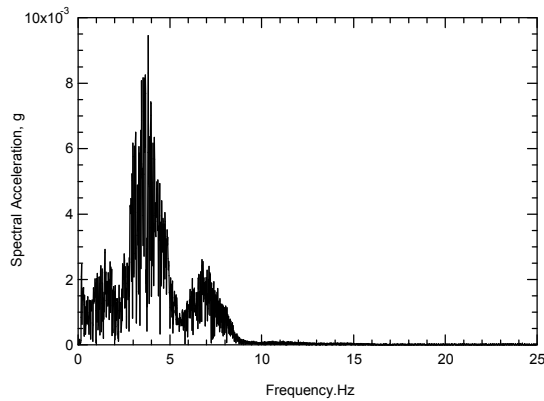


그림 4. 지표면에서의 가속도 스펙트럼

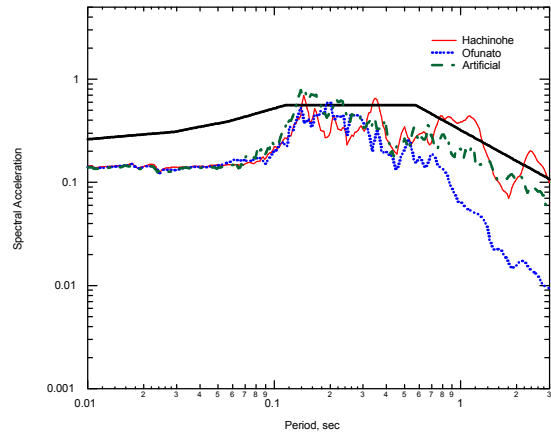


그림 5. 설계지진동에 대한 지표면에서의 응답스펙트럼

5. 결 론

본 논문에서는 1차원 등가선형해석과 2차원 유한요소해석에 의한 지반응답해석을 실제 현장에 대해 적용하여 각 해석결과를 비교 검토하였다. 각 해석법의 차이는 비선형성의 발생으로 인하여 해석에 사용되는 지반의 전단탄성계수가 변화하는 것을 알 수 있었다. 따라서 등가선형해석은 비선형이 고려된 유한요소보다 과소평가하는 경향을 나타낸다고 할 수 있다. 향후 정확한 지진응답해석을 위해서는 지반의 변형률이 고려된 해석이 필요하다고 하겠다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원(1997). 내진설계기준연구(II) 내진설계성능기준과 경제성 평가.
2. 해양연구소(2001), 지진대비 항만구조물 보강기법 및 신형안벽개발 (III), p.255.
3. Kramer, S. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, p.653.
4. Lysmer, J, Takekazu, U., Tsai, C.-F., and Seed, H.B.(1975), FLUSH: A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems, Earthquake Engineering Research Center, Report No.EERC75-30, p.83.
5. Schnabel, P.B., Lysmer, J., and Seed, H.B. (1972),SHAKE: A ComputerProgram for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Center, University of California, Berkeley.

