

유한요소법과 기초공학

김 용 석*

1. 서론

유한요소법(Finite Element Method : FEM)이 구조해석 분야에서 혁신적인 선풍을 일으키고 있는 이유는 방법 자체가 이용하기 간편하고 문제 해결에 막강한 위력을 가졌기 때문이다. 이 방법은 50년대 초에 Boundary Element Method(BEM)와 더불어 개발되기 시작했으나 유한요소법의 일반성에 힘입어 70년대에 들어서 BEM보다 먼저 그 화려한 꽃망울을 터트리게 되었다. 유한요소법의 도입과 Computer 산업의 발전으로 그동안 정확한 이론적 해석에만 의존하던 많은 구조해석 문제들이 유한요소법을 이용하여 근사해를 구할 수 있게 되었다. 그러나 유한요소법 S/W에 대한 정확한 이해와 구조에 대한 개념을 정확히 이해하지 못한채 범용 유한요소법 S/W를 이용함으로써 구조분야에 오랜 경험을 가진 사람들 마저도 자신도 모르는 사이에 종종 오류를 범하는 사례를 볼 수 있기 때문에 유한요소법 S/W 이용에 유의해야 한다.

유한요소법의 발전은 그동안 구조해석상 많은 어려움을 겪고 있던 기초공학 분야에도 많은 도움을 주어 요즘 이 분야에서의 유한요소법 이용이 날로 가속화되고 있다. 이런 시점에서 기초공학 분야에 필요한 유한요소법의 기본적인 개념을 소개함으로써 앞으로 유한요소법을 이용하고자 하는 사람들에게 도움이 되었으면 한다.

2. 적용분야

기초공학 분야에서 유한요소법의 적용 사례를 살펴보면 정적해석이 필요한 경우와 동적해석이 필요한 경우로 대별할 수 있는데, 정적해석에서는 주로 기초내부와 기초저면 지반에서의 응력상태, 기초의 유연성, 기초와 지반의 침하 등을 검토하고, 동적해석에서는 기기의 운전이나 지진 발생시 기초의 안전을 위해 기초거동 파악, 지반 안정성 분석 등을 수행한다.

유한요소법을 이용한 기초지반 구조해석은 주로 Mat-기초, 지표포장, 옹벽, Pile Group, 기기 기초, 댐, 터널, 각종 지하 저장시설물 등의 안전성을 검토하기 위해 널리 애용되고 있다. 특히 요즘 원자력 발전소 Containment 빌딩 기초나 대형진동기기 기초 설계를 위해 Structure-Soil Interaction(SSl)을 고려한 유한요소법에 의한 동적해석이 활발히 진행되고 있다.

3. Modelling

기초 구조해석시 기초 지반을 유한요소로 Modelling 하는데 고려해야 할 사항은 2-D(Pseudo 3-D 포함) 또는 3-D Model의 선택, Bottom 및 Lateral Boundary 위치와 종류 선정, 유한요소 크기 결정 등이다.

2-D, Pseudo 3-D, 3-D Model의 선택은 해석 System과 종류에 따라 달라지는데 Plane Strain

* 정희원, 대우엔지니어링, 공학박사

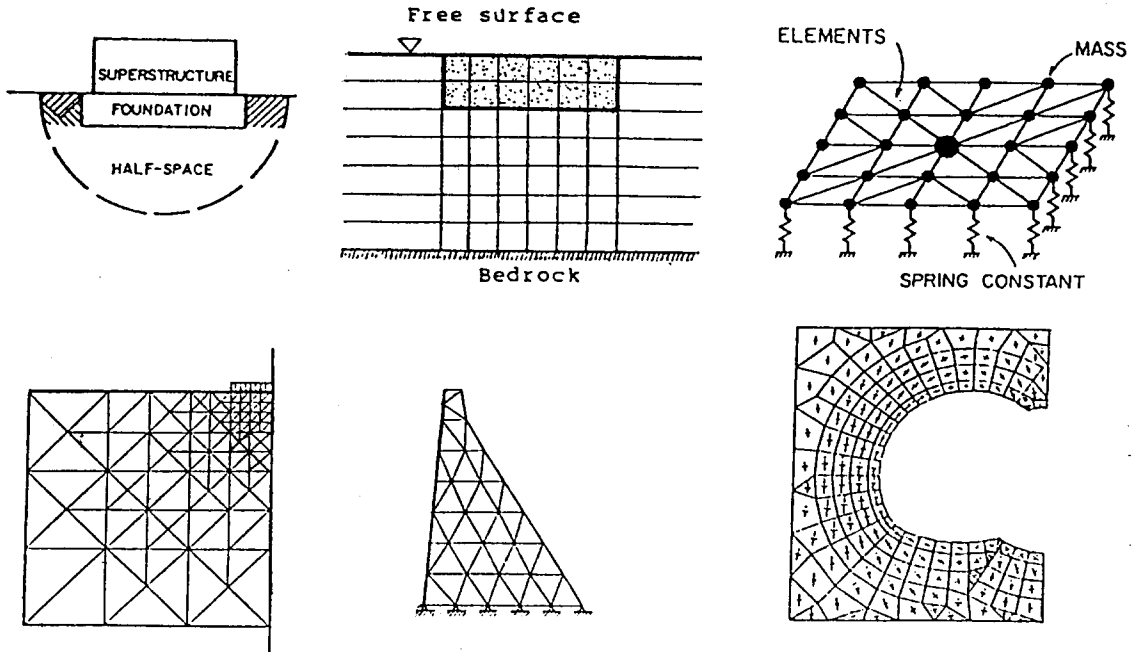


그림 1. FEM Modelling

조건을 갖춘 기초 System에서는 2-D Modelling 이 이용되고, 여타의 경우에는 지반조건이 Half Space라는 점을 고려하여 3-D Modelling이 보편적이다. System의 Geometric 특성이나 해석의 편의상 원통형좌표를 이용한 Pseudo 3-D Modelling 이 이용되기도 한다. 수직방향 해석시는 3-D와 Pseudo 3-D Model에서 똑같은 결과를 얻을 수 있으며 수평방향 해석시도 Soil 층의 유한성과 Soil 내부 Damping을 고려하면 거의 비슷한 결과를 얻을 수 있다.

Pseudo 3-D Modelling시 임의의 형상을 가진 기초는 동일한 면적과 회전모멘트 강성을 가진 원형기초로 가정하는데 기초의 장단변 길이비가 4배 이하인 경우에는 해석 결과에 커다란 차이가 없다.

Bottom Boundary는 수직방향으로 무한한 영역을 대체하기 위해 System 하부에 위치한 경계인데 이상적인 지반의 경우 상당히 먼 거리에 위치하는 것이 타당하지만 실제적으로 지반이 층을 이루고 있고 지층이 깊어짐에 따라 강성이 증가하

기 때문에 통상 지층 강성차가 크게 나는 위치나 기초반경의 4배 정도되는 깊이에 선정한다. Lateral Boundary는 수평방향으로 무한한 영역을 대체하기 위해 System 주위에 위치한 경계로 통상 Viscouse Boundary와 Consistant Boundary를 많이 사용한다. Viscouse Boundary는 주파수에 따라 변하기 때문에 시간 영역에서 사용하고, 기초 가장자리로부터 기초반경의 5-10배 거리에 위치를 선정하는 것이 적합하다. Consistant Boundary는 주파수 영역에서 사용하는데, 선형해석 일때는 기초 가장자리에, 비선형 일때는 기초반경의 10-20배 거리에 그 위치를 선정하는 것이 적합하다.

유한요소법 해석결과에 크게 영향을 미치는 또 다른 인자는 유한요소의 크기인데, 정적해석의 경우 기초 크기의 1/4보다 작고, 동적해석의 경우 관심있는 가장 큰 주파수 파장의 1/6-1/8 정도 크기이면 정확한 결과를 얻을 수 있다. 3-D 해석의 경우, Mesh 크기가 너무 적으면 자유도수가 늘어나 해석의 효율성이 떨어지기 때문에

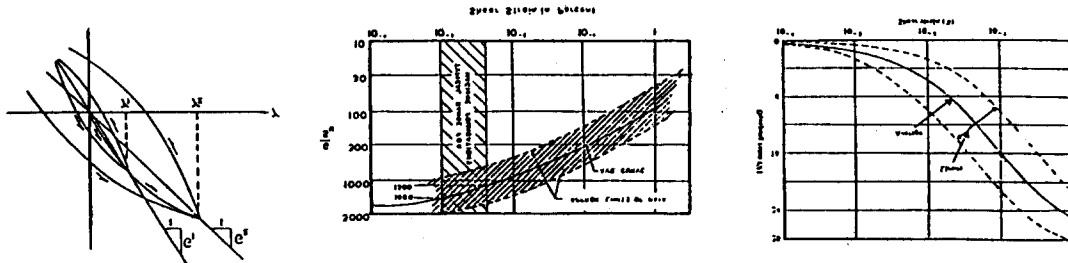


그림 2. 토질계수모델

Boundary 가 기초에서 멀리 떨어져 있는 경우에는 Mesh 크기를 기초에서 멀어짐에 따라 점차 증가하는 것이 일반적인데, Mesh 크기가 너무 커지면 고주파 영역에서의 해석결과가 영향을 받기 때문에 유의해야 한다.

특히, 동적해석시 유한요소 크기는 해석결과의 안정성과 수렴에도 영향을 미치기 때문에 크기 결정에 신중해야 하며 유한요소 크기가 해석 결과에 미치는 영향 평가를 미리 수행하는 것도 중요하다.

4. 토질 계수

유한요소법에 의한 기초지반 구조해석 결과에 영향을 미치는 가장 중요한 것은 토질계수로서 토질계수를 정확하게 결정하기 위해서는 여러가지 현장 및 실내실험을 수행해야 한다. 기초지반의 유한요소법 해석에 필요한 토질계수로는 흙의 밀도, 포아슨비, 전단탄성계수, 감쇠비등을 들 수 있는데, 특히 동적 비탄성해석의 경우 흙의 변형에 따른 전단 탄성계수와 감쇠비의 변화를 알아야 한다.

흙의 밀도와 포아슨비는 기초 구조해석 결과에 크게 영향을 미치지 않는 요소로, 흙의 밀도는 지층의 상태와 지하수위를 고려하여 구해야 하며 포아슨비는 통상 흙의 상태에 따라 0.3-0.5까지 취하지만 보다 정확한 값을 구하기 위해서는 흙의 탄성계수와 전단 탄성계수를 먼저 구하여 계산할 수도 있다. 흙의 전단탄성 계수는 유효구속응력에 따라 영향을 받기 때문에 실내 Resonant Column Test시 이 영향을 고려하여 전단탄성계수를 결정

해야 하며, Cross-Hole 시험을 통하여 전단탄성 계수를 측정할 때는 전단탄성계수 값이 실제 구조물이 세워진 후의 전단탄성계수 보다 다소 크기 때문에 Soil의 변형률을 고려하여 실험식에 따라 수정되어야 한다.

흙의 감쇠비도 Resonant Column Test에서 진동 하중을 가하여 진동 감쇠형태를 측정함으로써 결정할 수 있는데 한 실험식에 의하면 감쇠비와 전단탄성계수 사이에는 $D = D_{max}(1 - G/G_{max})$ 라는 관계가 성립한다.

5. 기초 구조해석

유한요소법에 의한 기초 구조해석은 정적해석과 동적해석으로 대별되는데 동적해석은 또 시간영역 해석과 주파수영역 해석으로 구분된다. 유한요소법에 의한 System 동적구조해석에서 구한 해의 정확성도 중요하지만 해의 안정성 및 수렴여부도 중요하기 때문에 동적해석시 필요한 시간 간격이나 주파수 간격의 결정에 매우 유의해야 한다.

동적해석에서 시간영역 해석은 기초의 시간에 따른 거동이력을 파악할 수 있고 흙의 비선형 특성을 정확히 고려할 수 있는 장점이 있으나 비선형 해석의 경우 작은 시간 간격 선택에 따른 많은 반복계산이 필요한 문제점도 있으며, 주파수 영역해석은 해석시 간편한 장점이 있으나 해석자체의 특성상 비선형 해석이 불가하여 등가선형 해석 방법을 이용하는 번거러움도 있다. 그러나 각종 기기 기초해석의 경우 기기의 운전주파수가 제한되어 있기 때문에 주파수영역 해석을 수행하는 것이 매우 편리하다.

기초지반 구조해석에 유한요소법을 적용할 때 기술적 문제점으로는 많은 유한요소로 인한 Matrix 크기가 커지고 비선형 해석시에는 상당한 반복계산이 필요하다는 것인데 이러한 문제점들은 Substructure Method, Frontal Method 및 Secant Method 등을 활용함으로써 보다 효율적인 해석을 수행할 수 있다.

또한 유한요소법을 이용, 기초지반에 대한 각종 Parameter 연구를 수행하여 기초지반의 Impedance Function을 구함으로서 일반적인 기초에 대한 Winkler Type 해석이 가능하게도 한다.

6. 문제점 및 제언

요즘 유한요소법에 의한 기초지반 구조해석이

보편, 일반화될 정도로 유한요소법 그 자체에 대한 문제점은 거의 없지만 앞서도 지적했듯이 지반 재료의 특성과 반무한공간을 재현하기 위한 경계조건등의 불확실성이 커다란 문제점으로 남아 있다. 특히 매립지와 같이 지반이 불균질, 불균등하여 흙의 특성이 불확실할 때는 System에 대한 해석 결과 자체가 문제시 되는 경우도 있어 흙에 대한 정확하고도 실제적인 계수를 효율적으로 계측할 수 있는 방법, Overburden 하중 증가에 따른 흙의 특성 파악, 흙의 액상화를 고려한 흙의 비선형 거동 파악을 위한 연구가 요구된다.