복잡한 지반 형상을 고려한 비선형 지반-구조물 상호작용 해석

박 장 호
아주대학교 공과대학 환경건설교통공학부
(2010. 10. 26. 접수 / 2011. 1. 20. 채택)

Nonlinear Soil-Structure Interaction Analysis Considering Complicated Soil Profile

Jang Ho Park
Division of Environmental Civil and Transportation Engineering, Ajou University
(Received October 26, 2010 / Accepted January 20, 2011)

Abstract : This paper presents a nonlinear soil-structure interaction analysis approach, which can consider precisely characteristics of structures, complicated soil profiles and nonlinear characteristics of soil. Although many methods have been developed to deal with the soil-structure interaction effects in past years, most of them are nearly unpractical since it is difficult to model complicated characteristics of structure and soil precisely. The presented approach overcomes the difficulties by adopting an unaligned mesh generation approach and multi-linear model. The applicability of the proposed approach is validated and the effects of complicated characteristics of structure and soil on soil-structure interaction are investigated through the numerical example by the proposed nonlinear soil-structure interaction analysis approach.
Key Words : nonlinear soil-structure interaction, unaligned mesh generation approach, multi-linear model, complicated soil profiles, nonlinear characteristics of soil

1. 서 론

현대사회의 발전과 더불어 도시화가 진행되고 있으며, 이에 따라 한정된 도시의 공간을 보다 효율적으로 사용하기 위하여 구조물들은 점차 대형화, 복합화되고 있다. 또한 지역의 랜드마크적인 대형화, 복합화된 구조물의 건설 역시 증가하고 있다. 반면 이러한 대형화, 복합화된 구조물들이 건설되어지는 지반은 암반지역과 같이 지반 조건이 양호한 곳이 적어지고 있으며, 연약지반을 포함하는 등 지반 조건은 점차 열악해지고 있는 실정이다. 이러한 대형화, 복합화된 구조물 특성 및 중요도 그리고 구조물이 건설되어지는 지반의 특성을 고려하면 구조물의 설계시에는 지진 하중에 대하여 구조물과 지반의 상호작용이 적절하고 충분하게 고려되어야 할 것이다.

지반-구조물 상호작용을 고려하기 위한 다양한 해석방법들이 지난 30여 년간 개발되어 왔다[1-3]. 새로운 모델링 기법과 다양한 해석방법들이 제시되어 왔으며, 새로운 수치해석기법들의 도입과 더불어 전산기의 발전으로 해석의 정확도와 해석시간의 단축이 이루어져 왔다. 그러나 대부분의 해석기법들이 모델링의 어려움과 해석시간의 단축을 위하여 다양한 가정들을 도입하고 있다. 실제로 많은 경우 지반 매질의 분포나 지반과 기초의 경계 등 복잡한 공간적 형상은 단순화되어 모델링되고 있으며, 지반 매질의 비선형성은 등가 선형으로 고려되고 있는 실정이다. 이러한 지반 매질의 분포 및 비선형성, 지반과 기초의 경계처리 등에서의 단순화는 지반-구조물 상호작용 해석에서 결과에 상당한 영향을 미친다는 연구 결과가 제시되고 있다[4,5]. 따라서 지진에 대한 정확한 구조물 거동의 예측을 위해서는 구조물의 특성, 지반과 기초의 경계, 지반 매질의 분포 및 비선형 특성 등을 종합적으로 모델링하여 해석을 수행할 수 있는 해석방법이 요구하다.

본 논문에서는 기존의 연구들에서 종합적으로 고려되지 못하였던 구조물의 특성, 기초와 지반의 경계, 지반 매질의 분포 및 비선형 특성 등을 종합적

jangho@ajou.ac.kr

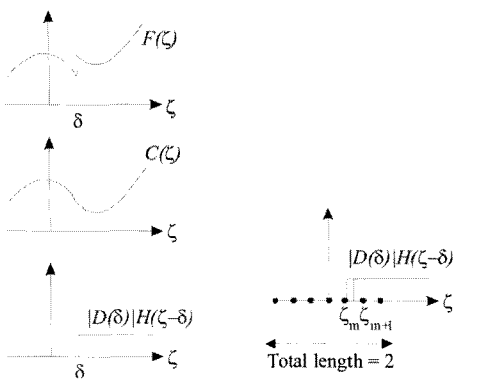
으로 고려할 수 있는 지반-구조물 상호작용 해석법을 제시하였다. 제시한 비선형 지반-구조물 상호작용 해석기법을 이용하여 지반-구조물 시스템에 대한 선형 및 비선형 동적 해석을 수행하고, 이를 통하여 복잡한 지층 형상을 고려하고 구조물의 특성 및 지반 매질의 비선형 특성이 지반-구조물 상호작용에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 복잡한 지반 형상을 고려한 비선형 지반-구조물 상호작용 해석

본 논문에서는 불연속면을 포함하는 요소의 강성행렬과 질량행렬을 보다 정확히 계산할 수 있는 Unaligned mesh generation 기법을 이용한 유한요소를 사용함으로써 복잡한 경계조건을 갖는 지반-구조물 시스템을 보다 빠르고 편리하게 모델링하고, Multi-linear model을 이용하여 지반 매질의 비선형성을 고려함으로써 구조물 특성, 지반 매질의 분포 및 비선형 특성, 기초와 지반의 복잡한 경계 등을 종합적으로 고려할 수 있는 비선형 지반-구조물 상호작용 해석기법을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 해석기법은 정렬된 요소를 사용하기 때문에 나쁜 성질을 갖는 행렬이 발생되지 않으며, 불연속면을 포함할 수 있는 요소를 사용함으로써 모델링이 간편하고, Multi-linear model을 이용함으로써 비선형 지반-구조물 상호작용 해석을 정밀하게 수행할 수 있다.

2.1. Unaligned mesh generation 기법

복잡한 지반 매질의 분포 및 기초와 지반 경계의 정확하고 편리한 모델링을 위하여 Unaligned mesh generation 기법을 적용하였다. Unaligned mesh generation 기법의 기본개념은 다음과 같다[4,6].



(a) Separation of a discontinuous function (b) Integration of a step function

Fig. 1. Integration of a discontinuous function.

Fig. 1에서 δ의 위치에서 함수의 불연속이 발생할 때 불연속함수 $F(\zeta)$는 다음 식과 같이 연속함수 $C(\zeta)$와 unit step 함수 $|D(\delta)|H(\zeta-\delta)$의 합으로 나타낼 수 있다.

$$F(\zeta) = C(\zeta) + |D(\delta)|H(\zeta-\delta) \tag{1}$$

여기서 $D(\delta) = F(\delta) - C(\delta)$이고, ζ는 요소에서의 국부좌표계를 의미한다.

불연속 실수함수 $F(\zeta)$를 주어진 영역에 대하여 적분하면 다음과 같다.

$$\int_{-1}^{1} F(\zeta)\, d\zeta = \int_{-1}^{1} [C(\zeta) + |D(\delta)|H(\zeta-\delta)]]\, d\zeta \tag{2}$$

식 (2)에서 연속함수 $C(\zeta)$와 step 함수 $|D(\delta)|H(\zeta-\delta)$를 각각 가우스 적분법(Gauss quadrature rule)을 사용하여 적분을 수행하면 다음과 같이 된다.

$$\int_{-1}^{1} C(\zeta)\, d\zeta \approx \sum_{i=1}^{N} C(\zeta_i) w_i \tag{3}$$

$$\int_{-1}^{1} |D(\delta)|H(\zeta-\delta) d\zeta \approx \sum_{i=1}^{N} |D(\delta)|H(\zeta_i-\delta) w_i \approx |D(\delta)| \sum_{i=1}^{m} 0 \cdot w_i + |D(\delta)| \sum_{i=m+1}^{N} 1 \cdot w_i \tag{4}$$

여기서 N은 가우스 적분점(Gauss quadrature point)의 개수이고, w_i는 가우스 적분 가중치(Gauss quadrature weight)를, ζ_i는 가우스 적분점의 위치를 나타낸다. 가우스 적분법에 의하여 연속함수의 적분이 정확하게 이루어졌다면 불연속함수의 적분에서 발생하는 오차는 다음 식과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \left| \int_{-1}^{1} F(\zeta) d\zeta - \sum_{i=1}^{N} (C(\zeta_i) + |D(\delta)|H(\zeta_i-\delta)) w_i \right| \\ &= |D(\delta)| \left| (1-\delta) - \sum_{i=m+1}^{N} w_i \right| \\ &\le |D(\delta)| \left| \sum_{i=m}^{N} w_i - \sum_{i=m+1}^{N} w_i \right| \\ &\le |D(\delta)| \cdot \max|w_i| \cdot \max|\zeta_i - \zeta_{i+1}| \end{aligned} \tag{5}$$

따라서 가우스 적분법에 의한 불연속함수의 적분 오차 범위는 가장 큰 가우스 적분 가중치인 $|w_i|_{\max}$와 인접한 두 가우스 적분점 사이의 최대거리 $|\zeta_i - \zeta_{i+1}|_{\max}$에 의하여 결정된다. 실수값 w_i와 $\zeta_i - \zeta_{i+1}$의 최대값은 각각 $1.93N^{-0.795}$, $2.6N^{-10.2}$으로

오차의 범위는 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$\text{Error Bound} \le \max|w_i| \cdot \max|\zeta_i - \zeta_{i+1}| \approx 5.07N^{-1.82} \quad (6)$$

식 (6)에서 알 수 있는 바와 같이 수치적분에서 가우스 적분점의 개수를 증가시키면 적분 오차는 줄어들게 되므로, 적절한 개수의 가우스 적분점을 사용하면 불연속함수에 대하여 만족할만한 수치적분 결과를 얻을 수 있다.

이와 같은 불연속함수에 대한 수치적분방법은 3차원 유한요소의 질량행렬과 강성행렬 계산에도 적용이 가능하다. 따라서 이러한 수치적분방법을 유한요소의 요소행렬의 계산에 적용하면 요소 내에 불연속이 존재하더라도 기존에 사용하는 것보다 많은 개수의 가우스 적분점을 사용함으로써 불연속면을 포함하는 3차원 요소의 질량과 강성행렬을 정확하게 구할 수 있다.

2.2. Multilinear model

일반적으로 지반 매질의 동적 거동 특성은 전단변형률의 크기에 크게 좌우된다. 전단변형률이 10^{-3}보다 작은 경우 지반 매질의 동적 특성은 탄성-선형의 특성을 보이지만, 전단변형률이 10^{-3}보다 큰 경우 지반 매질의 동적 특성은 소성-비선형 특성을 나타낸다. 지반 매질의 동적 특성 중 전단탄성계수는 전단변형률이 10^{-3}보다 큰 경우에 전단변형률이 증가함에 따라 전단탄성계수가 급격하게 감소하게 된다. 또한 지반 매질의 감쇠비는 전단변형률이 10^{-3}보다 큰 경우에는 전단변형률이 증가함에 따라 크게 증가하는 경향을 보인다. 따라서 정밀한 지반-구조물 상호작용의 해석을 위해서는 이러한 비선형 특성을 갖는 지반 매질의 전단탄성계수와 감쇠비가 적절하게 해석에 반영되어야 한다.

비선형 문제에 사용되고 있는 수치해석기법으로 뉴튼-랩슨법(Newton-Raphson Method), 수정 뉴튼-랩슨법(Modified Newton-Raphson Method), 원주기법(Arc-length Method), Bi-linear 모델, Multi-linear 모델 등을 들 수 있다[7]. 뉴튼-랩슨법은 주어진 구간을 여러개의 증분 구간으로 분할하고, 각 증분 구간에 대하여 평형조건을 만족할 때까지 반복 계산을 수행한다. 수정 뉴튼-랩슨법은 부구간이 새로 시작될 때마다 접선계수를 갱신함으로써 비선형성이 크지 않은 경우 해석시간을 어느 정도 줄일 수 있다. Bi-linear 모델은 탄성계수와 접선계수 및 항복응력을 필요로 한다. 이 모델은 변형률이 작고 교번 하중이 적용되는 문제에서 사용될 수 있으며, Multi-linear 모델은 Bi-linear 모델의 개념을 확장한 다선형 응력-변형률 관계를 사용한다.

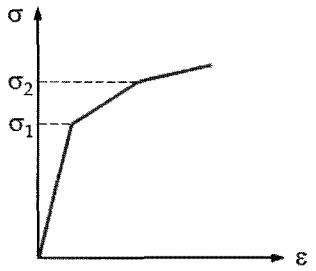


Fig. 2. Multi-linear model.

본 논문에서는 해석의 효율성과 지반 매질의 비선형성을 고려하여 Multi-linear 모델을 사용하여 지반 매질의 비선형성을 고려하였다. 뉴튼-랩슨법의 경우 해석시간이 과다하며, Bi-linear 모델의 경우 지반 매질의 비선형 특성을 표현하기 적절하지 않은 반면 Multi-linear 모델의 경우 뉴튼-랩슨법과 Bi-linear 모델의 단점을 극복할 수 있는 장점이 있다.

2.3. 지반-구조물 상호작용 해석법

지반-구조물 상호작용 해석방법은 지반을 해석에 포함하는 방식에 따라 직접법과 부분구조법으로 나눌 수 있다[8]. 본 논문에서는 지반-구조물 상호작용 해석에 단순하고 정확도가 높기 때문에 많이 이용되고 있는 직접법을 사용하였다. Fig. 3과 같은 지반-구조물 시스템을 직접법을 적용한 유한요소로 모델링하면 지반운동을 받는 지반-구조물 시스템의 운동은 다음과 같은 이산화된 운동방정식으로 표현될 수 있다[4].

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = [M]\ddot{u}_{bs} + f \quad (7)$$

여기서 M, C, K는 각각 구조물과 지반의 질량, 감쇠 및 강성행렬을 나타내며, u는 절점의 변위를, $\ddot{u}_{bs}$는 기반암에서의 지반 가속도를 의미한다. 또한, f는 경계면에 작용하는 하중을 의미한다.

지반의 경계조건 역시 해석 결과에 직접적인 영향을 미치는 중요한 인자이다. 본 논문에서는 지반의 경계조건으로 Lysmer 경계를 적용하여 경계의 절점에 점성 감쇠장치를 부착였다[9]. 각각의 경계에는 전단파 에너지를 흡수하는 감쇠장치와 압축파 에너지를 흡수하는 감쇠장치가 부착되며, 감쇠장치 값은 다음의 식들에 의하여 구하여진다.

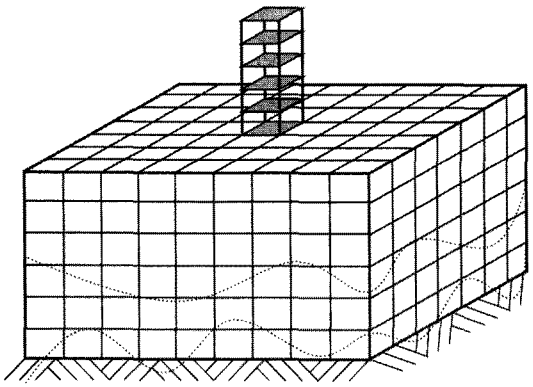


Fig. 3. Soil-structure interaction analysis model.

$$c_t = A\rho v_s \tag{8}$$

$$c_n = A\rho v_p \tag{9}$$

여기서 ρ는 지반의 밀도, v_s, v_p는 각각 전단파와 압축파의 속도, A는 유효단면적을 나타낸다.

3. 복잡한 지층 형상을 고려한 비선형 지반-구조물 상호작용 해석

본 논문에서 제시한 비선형 지반-구조물 상호작용 해석기법을 이용하여 지반-구조물 시스템에 대한 선형 및 비선형 동적 해석을 수행하고, 이를 통하여 복잡한 지층 형상을 고려하고 구조물의 특성 및 지반 매질의 비선형 특성이 지반-구조물 상호작용에 미치는 영향을 살펴보았다.

3.1. 구조물과 지반의 모델링

해석에 사용된 구조물의 물성은 Table 1과 같고, 구조물의 감쇠비로는 0.03을 사용하였다.

지층의 형상은 Fig. 4와 같고, 지층의 경계면은 식 (10), (11)과 같은 수식으로 정의하였다. 실제로

Table 1. Properties of structure model

Floor	Level (m)	Stiffness (kN/m)	Mass (kg)
7	22.5	-	2100000
6	19	7820000	2100000
5	15.5	8540000	2300000
4	12	9020000	2300000
3	8.5	9890000	2300000
2	4.5	10200000	2300000
1	0	7280000	2780000
B1	-3.5	∞	3500000

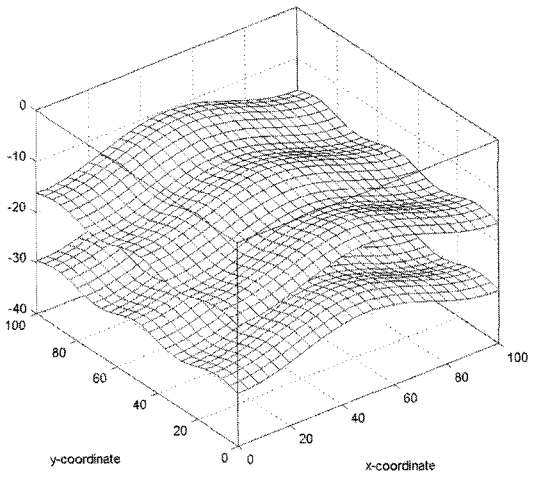


Fig. 4. Soil profile.

지층의 형상은 주어진 식과 같이 이루어져 있지 않으나, 수평층상이 아닌 층상을 표현하기 위하여 주어진 식으로 가정하였다. 또한 지반의 물성 및 지반의 변형률에 따른 전단강성과 감쇠는 Table 2 및 Fig. 5와 같다.

$$z = 3\cos\frac{\pi x}{50} + \frac{1}{2}\sin\frac{\pi y}{20} - 13.333 \tag{10}$$

$$z = 3\cos\frac{\pi x}{50} + \frac{1}{2}\sin\frac{\pi y}{20} - 26.667 \tag{11}$$

Table 2. Properties of soil model

Layer	Density (kg/m^3)	Shear Modulus (G_o)	Poisson's ratio	damping ratio (ξ_o)
Top (0-13.33 m)	1800	113000000	0.35	0.10
Middle (13.33-26.67 m)	1900	475000000	0.30	0.04
Bottom (26.67-40.00 m)	2000	1070000000	0.25	0.02

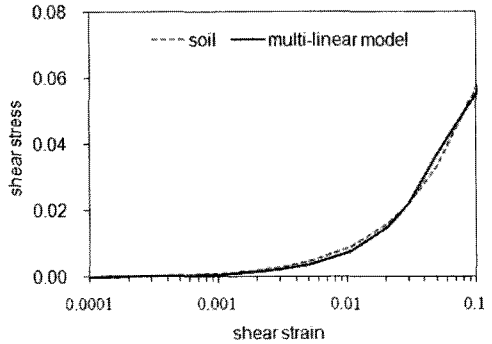


Fig. 5. Nonlinear properties of soil.

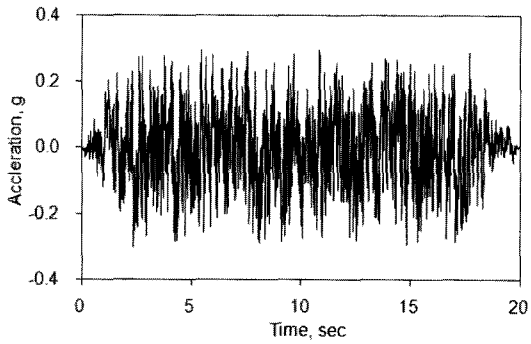


Fig. 6. Input ground motion at the bed rock.

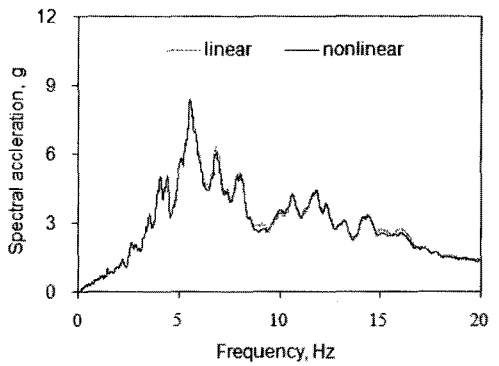


Fig. 7. Spectral acceleration at the ground surface for model without structure.

구조물과 지반의 모델링은 Fig. 3과 같이 하였으며, 이산화된 지반 영역의 크기는 100 m×100 m×40 m이고, 24×12×10=2880개의 직사각형 고체요소를 사용하였다. 수치적분시 사용된 적분점의 개수는 요소 내에 불연속이 존재하는 경우에는 11×11×11=1331개의 적분점을 사용하였고 그렇지 않은 경우에는 3×3×3=27개의 적분점을 사용함으로써 계산의 정도를 높임과 동시에 전체 계산량의 증가를 최소화하였다.

입력가속도로 도로교 설계기준의 설계응답스펙트럼을 사용하고 최대가속도는 0.3 g, 시간간격은 0.01초를 갖는 인공지진 가속도 시간이력을 Fig. 6과 같이 생성하고[10], 하부경계에서 입력하였다.

3.2. 지반-구조물 상호작용 해석 결과

본 논문에서 제시한 비선형 지반-구조물 상호작용 해석기법을 이용하여 비선형 자유장 해석 및 비선형 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하고 그 결과를 선형 자유장 해석 및 선형 지반-구조물 상호작용 해석 결과와 비교하였다. 시간이력의 결과는 짧은 시간간격으로 그 차이가 잘 보이지 않는 반면 응답스펙트럼에서는 응답의 차이가 좀 더 명확히 보여 해석 결과에 대한 응답스펙트럼을 도시하였다.

Fig. 7은 구조물이 없는 경우의 지표면에서의 응답스펙트럼을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 선형 해석의 결과와 비선형 해석의 결과가 큰 차이를 보이지 않고 있다. Fig. 7의 응답스펙트럼에서 최대치를 보이는 5.5 Hz 근처에서 spectral acceleration은 선형 해석의 경우 8.40 g으로, 비선형 해석의 경우 8.41 g으로 나타났다. 시간이력에서는 지표면에서 가속도의 최대치가 각각 선형 해석의 경우 1.02 g이고, 비선형 해석의 경우 1.04 g이었다. 이러한 선형 및 비선형 해석 결과에서의 작은 차이는 지반 매질의 전단변형률이 작았기 때문인 것으로 보인다. 실제로 지표면에서의 전단변형률의 최대값은 선형 해석의 경우 2.292×10^{-4}이고, 비선형 해석의 경우 2.314×10^{-4}으로 나타나 큰 전단변형이 발생하지 않고 있음을 보여주며, 그 차이도 매우 작았다.

구조물이 있는 경우 구조물의 영향으로 구조물이 없는 경우에 비하여 지반 매질의 전단변형이 커지고 선형 및 비선형 해석 결과의 차이도 크게 나타났다. Fig. 8은 구조물과 접한 지표면에서의 선형 및 비선형 해석 결과의 응답스펙트럼을 비교한 것이고, Fig. 9는 구조물 상단에서의 선형 및 비선형 해석 결과의 응답스펙트럼을 비교한 것이다. 구조물과 접한 지표면에서의 응답스펙트럼이 최대치를 보이는 4.4 Hz 근처에서 spectral acceleration이 선형 해석의 경우 10.15 g으로, 비선형 해석의 경우 10.95 g으로 나타났다(Fig. 8). 구조물 상단에서의 응답스펙트럼이 최대치를 보이는 1.8 Hz 근처에서 spectral acceleration은 선형 해석의 경우 12.55 g으로, 비선형 해석의 경우 10.48 g으로 나타났으며, 4.4 Hz 근처에서 spectral acceleration은 선형 해석의 경우 11.01 g으로, 비선형 해석의 경우 11.83 g으로 나타났다(Fig. 9). 구조물 1차 모드의 진동수인 1.8 Hz 근처에서는 선형 해석의 결과가 크게 나온 반면에 지반의 응답변화가 큰 진동수 구간에서는 비선형 해석의 결과가 크게 나타났다. 그리고 구조물의 응답이 지표면에서의 응답에 비하여 크게 증폭되었다. 이러한 결과는 지층의 형상 및 지반 매질의 비선형 특성이 구조물과 연계되어 복잡한 거동을 나타내는 것을 보여준다.

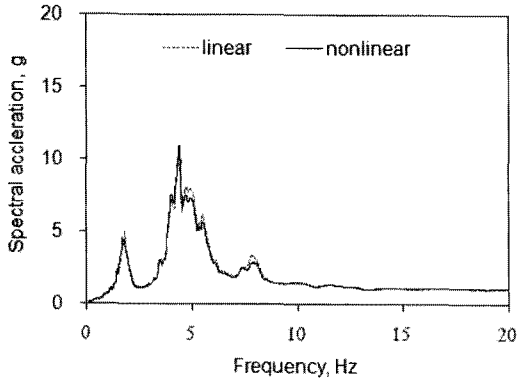


Fig. 8. Spectral acceleration at the ground surface for model with structure.

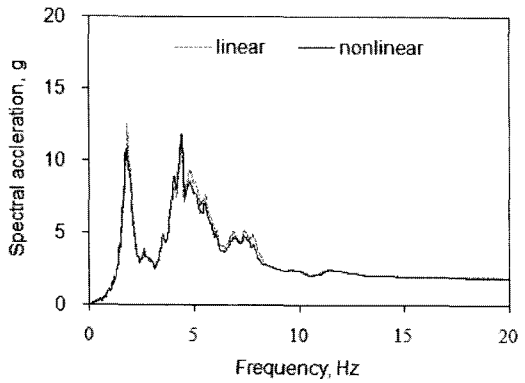


Fig. 9. Spectral acceleration at the top of structure for model with structure.

시간이력해석 결과에서 지표면에서의 가속도 최대치는 각각 선형 해석의 경우 1.00 g이고, 비선형 해석의 경우 0.98 g으로 나타났다. 또한 지표면에서 전단변형률의 최대값은 선형 해석의 경우 1.620×10^{-3}이고, 비선형 해석의 경우 1.674×10^{-3}으로 나타나 구조물이 없는 경우에 비하여 큰 전단변형이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 그 차이도 자유장 해석의 경우보다 크게 나타났다. 구조물 상단에서의 가속도 최대치는 각각 선형 해석의 경우 2.05 g이고, 비선형 해석의 경우 1.82 g로 나타났다. Fig. 10과 Fig. 11은 비선형 지반-구조물 상호작용 해석에서 각각 지표면과 구조물 상단에서의 가속도 시간이력을 나타낸 것이다.

해석 결과를 종합하여 보면 예제의 경우 구조물의 응답을 지배하는 구조물 1차 모드의 진동수와 지반의 응답변화가 큰 진동수 구간이 상이한 경우임에도 불구하고 구조물에 의하여 지반 매질의 전단변형률이 커지고 이에 따라 선형 해석과 비선형 해석결과의 차이도 커졌다. 또한 지반 매질의 비선형 특성이 구조물과 연계되어 복잡한 거동을 보였으며, 정밀한 지반-구조물 상호작용 해석을 위해서는 정확한 지반의 모델링과 함께 지반 매질의 비선형 특성이 고려되어야 함을 확인하였다.

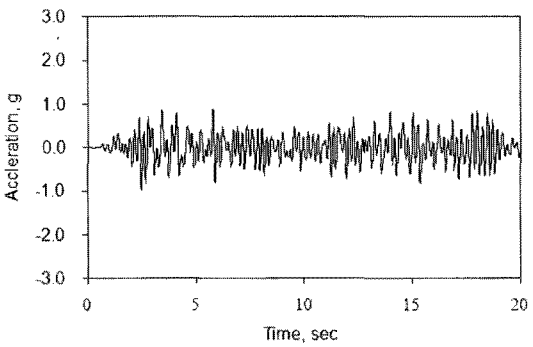


Fig. 10. Acceleration time history at the ground surface for model with structure.

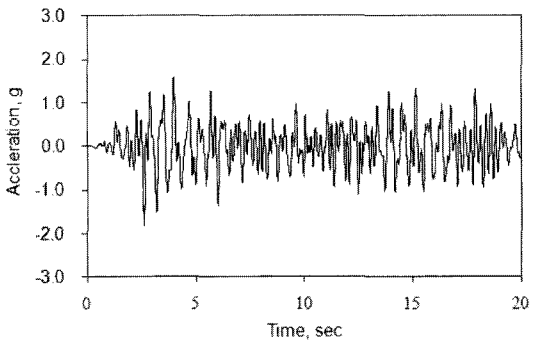


Fig. 11. Acceleration time history at the top of structure for model with structure.

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 연구들에서 종합적으로 고려되지 못하였던 구조물의 특성, 지반과 기초의 경계, 지반 매질의 분포 및 비선형 특성 등을 종합적으로 고려할 수 있는 비선형 지반-구조물 상호작용 해석법을 제시하였다. 제시한 해석기법은 정렬된 요소를 사용하기 때문에 나쁜 성질을 갖는 행렬이 발생되지 않으며, 불연속면을 포함할 수 있는 요소를 사용함으로써 모델링이 간편하고, Multi-linear model을 이용함으로써 비선형 지반-구조물 상호작용 해석을 정밀하게 수행할 수 있다.

제시한 해석법을 이용한 비선형 지반-구조물 상호작용 해석을 통하여 복잡한 지층 형상을 고려하고 구조물의 특성 및 지반 매질의 비선형 특성이 지반-구조물 상호작용에 미치는 영향을 살펴보았다.

자유장 해석의 경우 큰 전단변형이 발생하지 않아 선형 해석과 비선형 해석에서의 동적 응답의 차이가 작게 나타났다. 지표면에서 선형 해석과 비선형 해석 결과의 차이는 spectral acceleration에서 0.12%, 최대가속도에서 1.96%, 최대전단변형률에서 0.95%를 보였다. 반면 구조물이 있는 경우 전단변형률이 구조물이 없는 경우에 비하여 크게 증가하였으며, 이에 따라 선형 해석과 비선형 해석에서의 동적 응답의 차이도 크게 나타났다. 지표면에서 선형 해석과 비선형 해석에서의 동적 응답의 차이는 spectral acceleration에서 7.88%, 최대가속도에서 2.00%, 최대전단변형률에서 3.33%의 차이를 보였으며, 구조물의 상단에서는 spectral acceleration과 최대가속도가 각각 16.49%, 11.22%의 차이를 나타내었다. 이러한 결과는 구조물에 의하여 지반-구조물 상호작용에서 비선형성의 영향이 커지게 됨을 의미하며, 본 논문의 예와 달리 구조물의 응답을 지배하는 구조물 1차 모드의 진동수와 지반의 응답변화가 큰 진동수 구간이 유사한 경우에는 선형 해석과 비선형 해석 결과의 차이는 더 크게 될 것이다.

지반조건이 양호하지 못한 지역에 건설되는 대형 구조물의 경우 구조물의 안전한 설계를 위해서는 구조물의 특성, 지반과 기초의 경계, 지반 매질의 분포 및 비선형 특성 등을 종합적으로 고려할 수 있는 지반-구조물 상호작용 해석기법이 필요하며, 제시한 해석기법은 이러한 조건을 충족시킬 수 있을 것이다. 그리고 해석 결과로부터 지반 매질의 비선형 특성이 구조물 특성 및 지층의 형상 등과 연계되어 지반-구조물 시스템에 상당한 영향을 미치며, 정밀한 지반-구조물 상호작용 해석을 위해서는 정확한 지반의 모델링와 함께 지반 매질의 비선형 특성이 고려되어야함을 다시 확인하였다.

참고문헌

1) Park, S. and Antin, N., "A discontinuous Galerkin method for seismic soil-structure interaction analysis in the time domain", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 33, pp. 285~293, 2004.
2) Zerfa, Z. and Loret, B., "A viscous boundary for transient analyses of saturated porous media", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 33, pp. 89~110, 2004.
3) Wang, G., Chen, L., and Song, C., "Finite-infinite element for dynamic analysis of axisymmetrically saturated composite foundations", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 67, pp. 916~932, 2006.
4) 박장호, "구조물과 복잡한 지층 특성을 고려한 지반-구조물 시스템의 동적 해석", 한국안전학회지, 제22권, 제5호, pp. 50~56, 2007.
5) Cole, R.T. and Rollins, K.M., "Passive earth pressure mobilization during cycling loading", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, pp. 1154~1164, 2006.
6) Zohdi, T. I., and Wriggers, P., "Computational micro-macro material testing", Archives of Computational Methods in Engineering, Vol. 8, pp. 132~228, 2001.
7) Bathe, K., Finite element procedures, Prentice- Hall Inc, 1996.
8) Wolf, J. P., Dynamic soil structure interaction, Prentice- Hall Inc, 1985.
9) Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L., "Finite dynamic model for infinite media", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 95, pp. 859~877, 1969.
10) 한국도로교통협회, 도로교 설계기준, pp. 490~493, 2005.