

복잡한 지층 형상을 고려한 지반-구조물 상호작용 해석

박 장 호

아주대학교 공과대학 환경건설교통공학부
(2006. 1. 24. 접수 / 2006. 3. 30. 채택)

Analysis of Soil-Structure Interaction Considering Complicated Soil Profile

Jang Ho Park

Division of Environmental, Civil and Transportation Engineering, Ajou University
(Received January 24, 2006 / Accepted March 30, 2006)

Abstract : When a structure is constructed at the site composed of soil, the behavior of a structure is much affected by the characteristics of soil. Therefore, the effect of soil-structure interaction is an important consideration in the design of a structure at the site composed of soil. Precise analysis of soil-structure interaction requires a proper description of soil profile. However, most of approaches are nearly unpractical for soil exhibiting material discontinuity and complex geometry since those cannot consider precisely complicated soil profiles. To overcome these difficulties, an improved integration method is adopted and enables to integrate easily over an element with material discontinuity. As a result the mesh can be generated rapidly and highly structured, leading to regular and precise stiffness matrix. The influence of soil profile on the response is examined by the presented method. It is seen that the presented method can be easily used on soil-structure interaction problems with complicated soil profile and produce reliable results regardless of material discontinuities.

Key Words : soil-structure interaction, improved integration method, complicated soil profile

1. 서 론

건설산업의 발전과 건설 수요의 증가로 인한 대형 구조물의 건설이 증가함에 따라 암반지역이 아닌 연약지반을 포함한 지반에 구조물이 건설되는 경우가 증가하고 있다. 연약지반을 포함한 지반에 구조물이 건설되는 경우 구조물 주변 지반의 유연성으로 인하여 지반과 구조물 사이에 상호작용이 발생하게 된다. 이러한 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction)은 구조물이 대형화되고 지반을 구성하는 지층이 연약할수록 안전한 구조물의 설계를 위하여 반드시 고려되어야 한다.

지반의 영향을 고려하기 위한 지반-구조물 상호작용에 대한 많은 연구가 현재까지 이루어졌고 또한 이루어지고 있다¹⁻³⁾. 이러한 연구들은 대부분 지반을 한 가지 매질이나 또는 다층의 수평 층으로

이루어진 단순한 형태로 가정하고 있다. 그러나 모든 지반을 이러한 단순 지층으로 묘사할 수 없으며, 복잡한 지층 형상을 가지는 지반을 단순 지층으로 묘사하는 방법으로 해석을 수행할 경우 결과에 대한 높은 신뢰성을 기대하기 어렵다. 한편 유한요소법을 이용하면 어느 정도의 복잡한 지층을 갖는 지반을 묘사할 수 있으나, 지층의 복잡한 정도가 심해질 경우에는 그 형상을 따라 요소를 만들고 각 요소마다 하나의 물성을 대응시켜야 하므로 요소의 생성에 많은 시간이 소요되게 된다. 또한 요소의 모양이 정다각형을 크게 벗어나 심하게 왜곡될 수 있으며, 이로 인하여 얻어지는 강성행렬은 역행렬의 계산이 어려운 나쁜 성질(ill-conditioned)을 갖는 행렬이 될 가능성도 높아진다. 이러한 현상은 해석방법과 관계없이 수치해석상의 오차를 크게 하므로 더욱 부정확한 결과를 야기하게 된다⁴⁾. 따라서 복잡한 지층의 형상을 보다 쉽고 정확하게 묘사할 수 있는 새로운 지반-구

조물 상호작용 해석방법이 요구된다.

본 논문에서는 불연속을 가지는 함수에 대한 수치적분을 보다 정확히 수행할 수 있는 기법을 유한 요소에 도입함으로써 지반을 정렬된 유한요소로 보다 빠르고 편리하게 구성하고, 이로부터 보다 정밀한 지반-구조물 상호작용 해석결과를 얻을 수 있는 방법을 제시하였다. 제시한 해석방법을 이용하여 복잡한 지층의 형상을 고려한 지반과 구조물의 운동을 시간영역에서 구하고, 해석 결과로부터 구조물과 지층의 형상 등이 지반-구조물 상호작용에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 복잡한 지층 형상을 고려한 지반-구조물 상호작용 해석법

2.1. 불연속을 포함하는 요소의 수치적분

불연속을 가지는 함수에 대한 수치적분을 보다 정확히 수행할 수 있는 기법은 다음과 같다^{5,6)}. Fig. 1에서 δ 의 위치에서 함수의 불연속이 발생할 때 불연속 함수 $F(\zeta)$ 는 다음 식과 같이 연속함수 $C(\zeta)$ 와 unit step 함수 $|D(\delta)|H(\zeta-\delta)$ 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$F(\zeta) = C(\zeta) + |D(\delta)|H(\zeta-\delta) \quad (1)$$

여기서 $D(\delta) = F(\delta) - C(\delta)$ 이고, ζ 는 요소에서의 국부 좌표계를 의미한다.

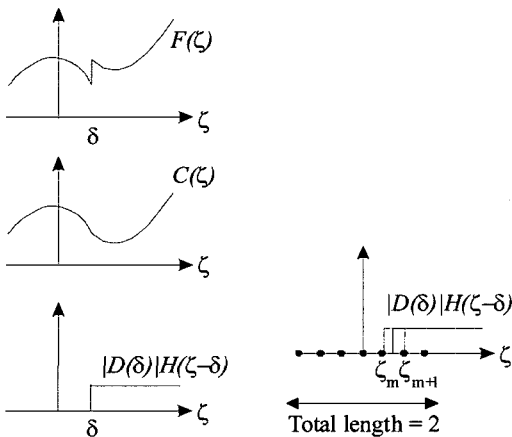


Fig. 1. Integration of discontinuous function.

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

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

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.

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

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

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

Error

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

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_i 와 $\zeta_i - \zeta_{i+1}$ 의 최대값은 각각 $1.93N^{-0.795}$, $2.6N^{-1.02}$ 으로 오차의 범위는 다음의 식으로 표현될 수 있다^{5,6)}.

Error Bound

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

식 (6)에서 알 수 있는 바와 같이 수치적분에서 가우스 적분점의 개수를 증가시키면 적분 오차는 줄어들게 되므로, 적절한 개수의 가우스 적분점을 사용하면 만족할만한 결과를 얻을 수 있다. 이와 같은 수치적분방법은 3차원 유한요소의 질량과 강성행렬 계산에도 적용이 가능하다. 따라서 이러한 수치적분방법을 요소 내에 하나의 불연속이 존재하는 3차원 요소에 적용하고 기존에 사용하는 것보다 많은 적절한 개수의 가우스 적분점을 사용하면 3차원 유한요소의 질량과 강성행렬을 정확하게 구할 수 있다. 이때 불연속을 포함하는 3차원 요소에서 발생하는 오차 범위는 가우스 적분점의 개수에 따라 정해지며, 이를 정리하면 Table 1과 같다^{5,6}.

2.2. 지반-구조물 상호작용 해석법

일반적으로 지반을 구성하는 지층이 연약하면 구조물을 지지하는 지반과 구조물 사이에 상호작용이 발생하게 되어 단단한 지반에서와는 다른 거동을 보이게 된다. 따라서 연약지반을 포함한 지반에서는 지반-구조물 상호작용의 영향이 반드시 고려되어야 하며, 지층의 형상이 복잡한 경우에는 지층의 형상을 정확히 고려할 수 있는 방법이 필요하다. 지반-구조물 상호작용 해석방법은 지반을 해석에 포함하는 방식에 따라 직접법과 부분구조법으로 나눌 수 있다⁷. 본 논문에서는 단순하고 정확도가 높기 때문에 많이 이용되고 있는 직접법^{8,9}을 채택하였다. 또한 앞서 제시한 불연속을 포함하는 요소를 도입함으로써 Fig. 2와 같이 지반을 정렬된 요소로 분할함과 동시에 복잡한 지층의 형상은 함수 또는 위치정보로 표현하여 복잡한 지층의 형상을 정확하고 편리하게 고려하였다. 이로 인하여 복잡한 지층을 갖는 지반에 대한 요소의 생성에 수반되는 문제점들을 해결함과 동시에 효율성을 높일 수 있다.

Table 1. Error bounds of the improved integration method

No. of Gauss Points	Error bound $\left(\frac{[5.07N^{-1.82}]^3}{8} \right)$
3×3×3	0.040
5×5×5	0.0025
7×7×7	0.00040

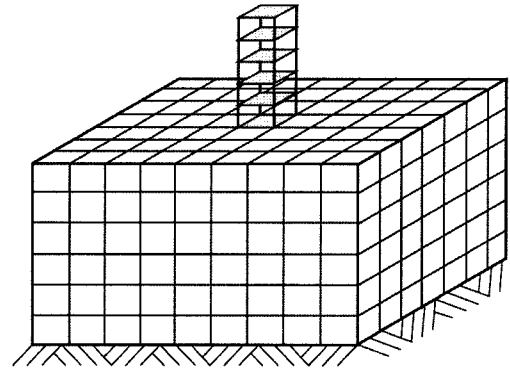


Fig. 2. Model for soil-structure interaction analysis.

지반의 경계조건 역시 해석 결과에 직접적인 영향을 미치는 중요한 인자이다. 본 논문에서는 지반의 경계조건에 Lysmer 경계를 적용하여 경계의 절점에 점성 감쇠장치를 부착하였다. 각각의 경계에는 전단파 에너지를 흡수하는 감쇠장치와 압축파 에너지를 흡수하는 감쇠장치를 부착하였으며, 감쇠장치의 값은 다음의 식들에 의하여 구하여진다¹⁰.

$$c_t = A\rho v_s \quad (7)$$

$$c_n = A\rho v_p \quad (8)$$

여기서 ρ 는 지반의 밀도, v_s , v_p 는 각각 전단파와 압축파의 속도, A 는 유효단면적을 나타낸다.

3. 복잡한 지층 형상을 고려한 지반-구조물 상호작용 해석

본 논문에서 제안한 방법을 사용하여 복잡한 지층을 가지는 지반에서의 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하였다. 이를 통하여 지층 형상과 특성이 지반-구조물 상호작용에 미치는 영향을 조사하였다.

3.1. 구조물과 지층의 성질

본 논문에서는 다양한 형태의 지반에 놓인 7층 구조물에 대하여 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하였다. 지반과 구조물은 Fig. 2와 같은 형태로 모델링하였다. 구조물의 물성은 Table 2와 같고, 표에서 B1은 지하층을 나타내며 지표면 아래에 위치한다. 구조물의 감쇠값으로 0.03을 사용하였다.

Table 2. Properties of structure model

Floor	Level(m)	Stiffness(kN/m)	Mass(kg)
7	22.5	-	1050000
6	19	7820000	1050000
5	15.5	8540000	1150000
4	12	9020000	1150000
3	8.5	9890000	1150000
2	4.5	10200000	1150000
1	0	7280000	1390000
B1	-3.5	∞	1750000

지층의 형상과 지층의 물성이 지반과 구조물의 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수평 층상(지층 케이스 mm)과 Fig. 3의 네가지 형태의 지층 형상(지층 케이스 mm, mp, pm, pp) 등 다섯가지 형태의 지층 형상에 대하여 지층의 물성을 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 이산화된 지반 영역의 크기는 100m×100m×40m이며, 20×12×8 = 1920개의 직사각형 고체요소를 사용하였다. 수치적분시 사용된 적분점의 개수는 요소 내에 불연속이 존재하는 경우에는 7×7×7=343개의 적분점을 사용하고 그렇지 않은 경우에는 3×3×3=27개의 적분점을 사용함으로써 계산량의 증가를 최소화하고 전체 계산의 정도를 높였다. 해석에 사용된 지반의 물성은 두가지로 Table 3에 나타낸 것과 같다.

입력가속도로 도로교 설계기준의 설계가속도 응답스펙트럼으로부터 최대가속도는 0.2g, 시간간격은 0.01초를 갖는 인공지진 가속도 시간이력을 생성하고(Fig. 5), 하부경계에서 입력하였다.

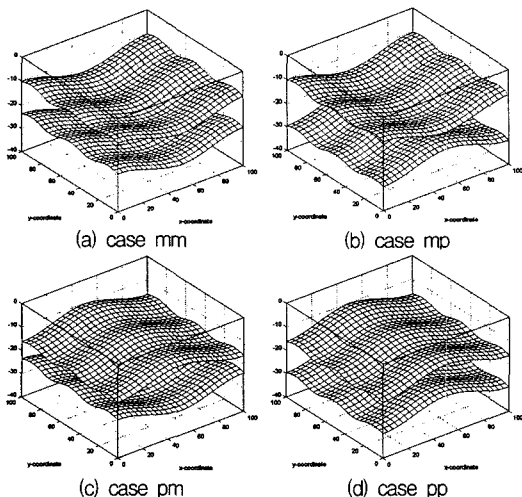


Fig. 3. Four types of soil profiles.

Table 3. Properties of soil layers

Type	Layer	S-wave velocity (m/s)	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio	Damping ratio
I	Top (0-13.33m)	600	1900	0.35	0.10
	Middle (13.33-26.67m)	900	2000	0.30	0.04
	Bottom (26.67-40.00m)	1200	2100	0.25	0.02
II	Top (0-13.33m)	400	1800	0.35	0.10
	Middle (13.33-26.67m)	800	1900	0.30	0.04
	Bottom (26.67-40.00m)	1000	2000	0.25	0.02

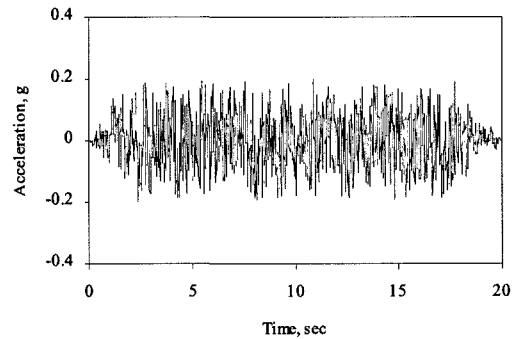


Fig. 4. Acceleration time history of input motion.

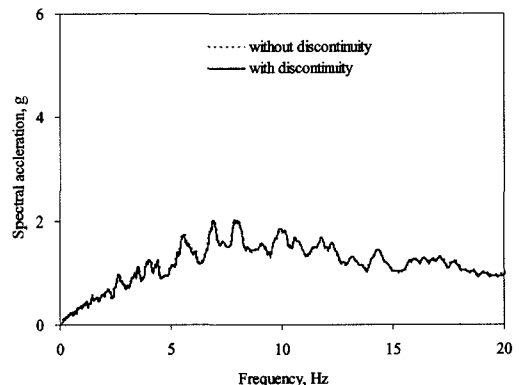


Fig. 5. Comparison of response spectra at the ground surface for free field motion.

3.2. 지반-구조물 상호작용 해석결과

본 논문에서 제시한 해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 수평 층상 모델에 대하여 요소에 불연속을 포함하는 경우와 요소에 불연속을 포함하지 않는 경우의 자유장해석 결과를 비교하였다. 불연속

을 포함하는 경우는 요소의 높이를 조절하여 요소 내에 경계층이 위치하도록 하였다. Fig. 5는 type II 지반에서 두 방법에 의한 자유장 해석으로부터 얻은 지표면에서의 응답스펙트럼으로 두 결과가 잘 일치하고 있다.

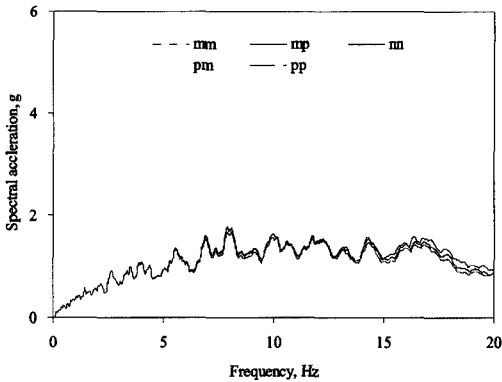
본 논문에서 제시한 방법을 이용하여 다섯가지 지반 형상에 대하여 자유장 해석 및 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하였다. Fig. 6은 구조물이 없는 경우의 지표면에서의 응답 스펙트럼을 나타내고 있다. 상대적으로 단단한 지반 type I에서는 지반 type II에 비하여 지층의 형상에 따른 응답의 변화가 작게 나오고 있다. 또한 지반의 특성에 따라 차이를 보이는 주파수 구간도 달리 나타나고 있다. 시간이력 역시 동일한 경향을 나타내며, 지반 type II에서 발생한 최대가속도를 Table 4에 정리하였다. 이러한 결과는 지층의 형상과 지반의 물성이 지반의 응답에 영향을 미치며, 정확한 해석을 위해서는 지반의 정확한 묘사가 중요함을 보여준다.

Table 4. Comparison of maximum accelerations at the ground surface without a structure for soil type II

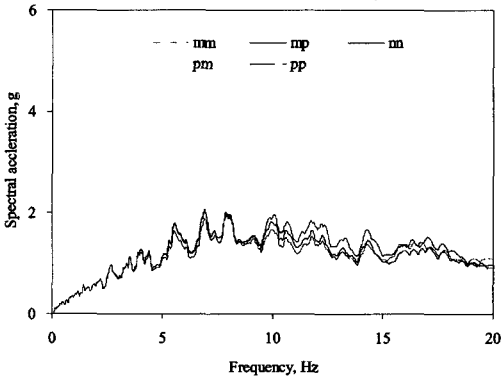
Case	mm	mp	nn	pm	pp
Max. acc.(g)	0.422	0.417	0.366	0.385	0.372

지층의 형상과 지층의 물성이 지반-구조물 상호작용에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 Fig. 2와 같이 구조물이 있는 경우에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 7은 구조물과 접한 지표면에서의 응답 스펙트럼을 비교한 것이고, Fig. 8은 구조물 상단에서의 응답 스펙트럼을 비교한 것이다. 시간이력의 결과는 짧은 시간간격으로 그 차이가 잘 보이지 않는 반면 응답스펙트럼에서는 그 차이가 명확히 보여 응답스펙트럼 결과만을 도시하였다.

Fig. 7에서 볼 수 있듯이 구조물과 접한 지표면에서 응답 스펙트럼의 최대값은 지반 type I에서는 8.03 Hz에서 발생하며, 지반 type II에서는 7.92Hz에서 발생하고 있다. 또한 응답의 증폭 형태도 다르게 나타나고 있다. 이는 구조물과 지반의 상호작용에 의하

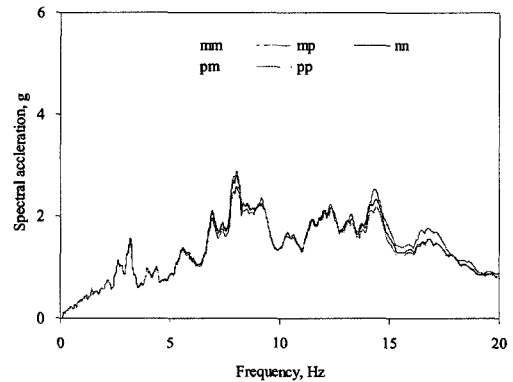


(a) Spectral acceleration for soil type I

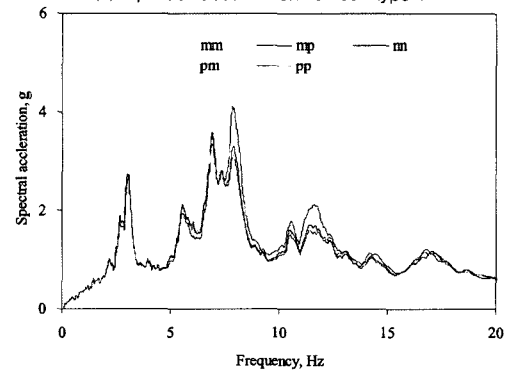


(b) Spectral acceleration for soil type II

Fig. 6. Comparison of response spectra at the ground surface without a structure for different soil types.



(a) Spectral acceleration for soil type I



(b) Spectral acceleration for soil type II

Fig. 7. Comparison of response spectra at the ground surface with a structure for different soil types.

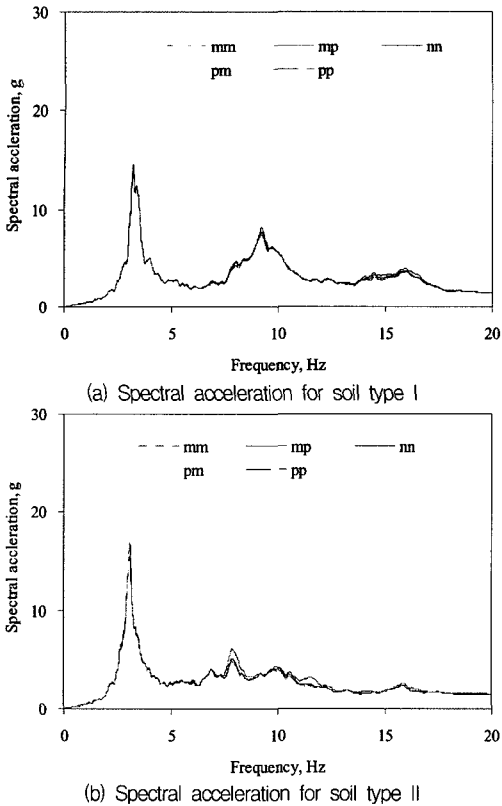


Fig. 8. Comparison of response spectra at the top of the structure for different soil types.

여 주요 모드의 주파수가 변함을 의미하며, 그 때의 최대값 역시 Table 5와 같이 변하고 있다. 지반 물성치의 영향을 살펴보면 자유장 해석에서와 같이 구조물이 있는 경우에도 상대적으로 단단한 지반 type I에서는 지반 type II에 비하여 지층의 형상에 따른 응답의 변화가 작게 나오고 있다. 그리고 지반 type I에서는 케이스 mm이 최대값을 보이는 반면, 지반 type II에서는 케이스 pp가 최대값을 가지며 최소값에 비하여 31% 큰 값을 보이고 있다. 이러한 결과는 지층의 형상과 지반의 물성이 지반-구조물 상호작용에 영향을 미치며, 정확한 지반-구조물 상호작용 해석을 위해서는 지반의 정확한 묘사가 중요함을 보여준다.

Table 5. Comparison of spectral accelerations at the ground surface with a structure

Soil Type \ Case	mm	mp	nn	pm	pp
Type I at 8.03Hz	2.88	2.86	2.80	2.64	2.60
Type II at 7.92Hz	3.11	3.12	3.28	4.07	4.08

Table 6. Comparison of spectral accelerations at the top of the structure for soil type II

Frequency \ Case	mm	mp	nn	pm	pp
3.09Hz	15.46	15.44	15.73	16.99	16.95
7.92Hz	4.80	4.82	5.07	6.03	6.03

Fig. 8은 구조물 상단에서의 응답 스펙트럼으로 구조물과 접한 지표면에서의 응답에 비하여 그 차이가 작게 나타나고 있다. 이는 구조물의 응답을 지배하는 1차 모드가 3Hz 부근의 주파수 영역에 존재하는데 반하여 지층의 형상에 따른 지반의 응답 변화는 7Hz 이상의 주파수 구간에서 발생함으로써 주파수 구간이 달라 나타나는 결과이다. Table 6은 지반 type II에서 지층의 형상에 따른 지반의 응답 변화가 작은 구간과 응답 변화가 큰 구간에서의 구조물 주파수 응답의 크기를 비교한 것이다. 3.09Hz에서는 케이스 pp가 최대값을 가지며 지층의 형상에 따른 응답의 차이가 최대 10% 정도인 반면에 7.92Hz에서는 케이스 pp가 최대값을 가지며 응답의 차이가 최대 26%로 훨씬 크게 나타나고 있다. 이러한 결과들을 정리하여 보면 지반이 단단하지 않은 경우 지층의 형상이 지반-구조물 상호작용에 더 큰 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있으며, 본 논문에서 제시한 해석방법을 이용하면 이러한 문제를 보다 편리하고 정확히 고려할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

지반이 단단하지 않은 경우 지반과 구조물의 응답은 지반-구조물 상호작용의 영향을 받으며, 지반의 물성이나 지층의 형상에 따라 차이가 발생하게 된다. 따라서 지반-구조물 상호작용의 엄밀한 해석을 위해서는 지반을 구성하는 지층에 대한 적절한 모델링이 필요하다. 그러나 지층의 변화가 심한 지반에서는 기존의 해석방법을 이용할 경우 지층의 적절한 묘사나 정확한 지반-구조물 상호작용 해석이 매우 어렵다.

본 논문에서는 불연속을 포함하는 요소를 사용하여 지반을 정렬된 요소망으로 만들고 복잡하게 변화하는 지층의 경계면을 적절한 함수로 표현하여 고려하는 방법을 사용함으로써 3차원 지반-구조물 상호작용 해석을 보다 편리하고 정확한 수행하였다. 제시된 방법은 정렬된 요소를 사용함으로써 지반의 형상이 복잡하더라도 나쁜 성질(ill-conditioned)을 갖는 행렬이 발생되지 않으며, 지층의 형상을 함수로 표

현함으로써 다양한 지층에 대한 해석을 보다 쉽고 정확하게 수행할 수 있다.

해석결과에서는 지반을 구성하는 지층의 형상과 지층의 물성이 지반 및 구조물의 응답에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 지층의 형상이 응답에 미치는 영향은 지반이 단단하지 않은 경우 더 크게 나타났다. 본 논문에서 다룬 예에서는 지반의 특성과 주파수 구간에 따라 지표면에서의 가속도 응답 스펙트럼이 최대 31%, 구조물 상단에서의 가속도 응답 스펙트럼이 최대 26%의 차이를 보이고 있다. 이러한 결과는 안전한 구조물의 설계를 위해서는 지층의 특성을 적절히 반영하여야 하며, 이에 대한 세심한 고려가 필요함을 보여준다. 결과들을 종합하여 보면 본 논문에서 제시한 해석기법은 지층의 형상 변화가 심한 지형에서의 엄밀한 해석을 보다 쉽게 할 수 있으며, 지반-구조물 상호작용의 영향을 파악하는데 매우 유용함을 알 수 있다.

감사의 글 : 이 논문은 2005년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2005-003-D00382).

참고문헌

- 1) Luco, J. E., Linear soil-structure interaction, Lawrence Livermore National Lab, UCRL-15272, 1980.
- 2) Wang, S., "Coupled boundary and finite elements for dynamic structure-foundation-soil interaction", Computational Structures, Vol. 44, pp. 807~812, 1992.
- 3) Wolf, J. P., Dynamic soil-structure-interaction, Prentice-Hall Inc, 1985.
- 4) Cook, R. D., Malkus, D. S., and Plesha, M. E., Concepts and application of finite element method, John Wiley & Sons Inc, 1989.
- 5) Zohdi, T. I., and Wriggers, P., "Computational micro-macro material testing", Archives of Computational Methods in Engineering, Vol. 8, pp. 132~228, 2001.
- 6) 박장호, 박재균, "불규칙한 다층 물성을 가지는 지반의 지진 응답 해석", 한국지진공학회 논문집, 제9권, 제6호, pp. 67~73, 2005.
- 7) Wolf, J. P., Soil-structure interaction analysis in time domain, Prentice-Hall Inc, 1988.
- 8) Hayashi, Y., Tamura, K., Mora, M., and Takahashi, I., "Simulation analysis of buildings damaged in the 1995 Kobe, Japan, earthquake considering soil-structure interaction", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 28, pp. 371~391, 1999.
- 9) Zhang, Y., Yang, Z., Bielak, J., Contel, J. P., and Elgamal, A., "Treatment of seismic input and boundary conditions in nonlinear seismic analysis of a bridge ground system," 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, 2003.
- 10) Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L., "Finite dynamic model for infinite media," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 95, pp. 859~877, 1969.