

지반의 비선형을 고려한 지반-구조물 상호작용계의 지진응답해석 Earthquake Response Analysis of Soil-Structure Interaction Systems considering Nonlinear Soil Behavior

이 중 세* 최 준 성** 임 동 철***
Lee, Jong-Seh Choi, Jun-Seong Lim, Dong-Chul

ABSTRACT

This paper demonstrates how nonlinear soil behavior in a soil-structure interaction system can be realistically incorporated by using a hybrid method in a nonlinear time-domain analysis. The hybrid method employs a general-purpose nonlinear finite element program coupled with a linear SSI program for the unbounded layered soil medium. In order to verify the validity and applicability of the hybrid method, nonlinear earthquake response analyses are carried out for the Hualien free-field problem, in which the ground and underground accelerations were measured during several earthquake events, and for a 2-D subway station. It is found that the nonlinear earthquake responses predicted for the Hualien free-field using the hybrid method compare very well with the observed responses whereas the subway station example gives reasonable results.

1. 서 론

일반적으로 지반에서는 전단변형이 커짐에 따라 지반의 강성은 감소하고 감쇠비는 증가하므로 지반-구조물 상호작용해석에서도 이 같은 영향을 고려하여야 한다. 많은 실험적 연구를 통해 지반의 전단변형도가 10^{-5} 정도 이하에서 지반은 탄성체거동을 하고 그 이상일 때에는 비탄성거동을 나타낸다고 알려져 있다.⁽¹⁾ 지반-구조물 상호작용 해석에서 지반의 비선형성은 두가지로 구분하여 사용되고 있다. 즉, 입력지진하중에 의한 자유장지반에서 일차비선형성과, 지반-구조물의 상호작용에 의한 추가적인 변형에 의한 이차비선형성이다. 원역지반에서는 일차비선형성이 주가 되고 근역지반에서는 일차비선형성과 이차비선형성이 중첩되어 나타난다.⁽²⁾

* 한양대학교 토목·환경공학과 교수

** 한양대학교 토목·환경공학과 박사후과정

*** 한양대학교 토목·환경공학과 석사과정

한편, 대표적인 자유장 해석프로그램인 SHAKE나 지반-구조물상호작용 해석프로그램들은 주파수 영역해법이기에 때문에 시간 및 입력하중에 따라 변하게 되는 지반의 강성과 감쇠비의 변화를 모형화 할 수 없는 문제점이 있다. 그래서 이들 프로그램들은 해석 전과정에서 계산된 유효 전단변형률에 의해 산정된 지반의 강성과 감쇠비가 수렴에 이르도록 하는 등가선형화 기법을 사용하게 되는데 이 방법은 지진의 크기가 크고 연약지반이 깊게 형성된 지반에서는 상당한 오차를 야기 하게 된다. 따라서 이 같은 문제를 해결하기 위해서는 시간영역상에서 직접적으로 재료의 비선형성을 고려할 수 있는 자유장 해석법이나 지반-구조물 상호작용 해석 방법이 필요하게 된다. 본 연구에서는 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램인 KIESSI와 시간영역해석이 가능한 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 연계한 복합법을 사용하여 시간영역에서 지반의 비선형성을 고려한 해석을 수행할 수 있었다. 해석방법의 검증은 위해 대만의 화련지역에서 지표면과 지중에서 측정된 가속도 시간이력을 사용하여 비선형 자유장해석을 수행 하였으며 그 결과를 기존의 해석방법인 SHAKE와 비교하였다. 마지막으로 지하철 구조물에 대해 지반의 비선형성을 고려한 지진응답해석을 수행하여 그 결과를 선형응답해석결과와 비교하였다.

2. 복합법

2.1 주파수 증속 동적강성행렬에 기초한 엄밀해법

원역지반에서 입사하는 지진입력에 대한 구조물 및 근역지반 만의 시간영역에서 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sb}] \\ [M_{bs}] & [M_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}_s\} \\ \{\ddot{u}_b\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sb}] \\ [C_{bs}] & [C_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}_s\} \\ \{\dot{u}_b\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sb}] \\ [K_{bs}] & [K_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s\} \\ \{u_b\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{r_s^{non}(t)\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{p_b(t)\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, 하첨자 s는 구조물과 근역지반, b는 지반의 근역과 원역의 경계면에서 자유도를 나타내고, $\{p_b(t)\}$ 는 반력벡터이며 $\{r_s^{non}(t)\}$ 는 구조물의 비선형성에 의한 추가 복원력벡터이다. 식(1)을 Fourier 변환하여 주파수 영역에서 운동방정식을 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}(\omega)] & [S_{sb}(\omega)] \\ [S_{bs}(\omega)] & [S_{bb}(\omega)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{U}_s(\omega)\} \\ \{\bar{U}_b(\omega)\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{R_s^{non}(\omega)\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{P_b(\omega)\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $[S(\omega)] = [K] + i\omega[C] - \omega^2[M]$ 로서 동적 강성행렬이고, $i = \sqrt{-1}$ 이며 $\bar{U}(\omega)$ 는 주파수 영역해석에 의한 선형응답이다. 그리고 식(2)에서 $\{P_b(\omega)\}$ 는 $\{P_b(\omega)\} = -[\tilde{S}_{bb}(\omega)](\{\bar{U}_b(\omega)\} - \{\bar{U}_b^s(\omega)\})$ 으로 동적상호작용의 영향이 포함된 반력이다. 따라서 식(2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}(\omega)] & [S_{sb}(\omega)] \\ [S_{bs}(\omega)] & [S_{bb}(\omega)] + [\tilde{S}_{bb}(\omega)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{U}_s(\omega)\} \\ \{\bar{U}_b(\omega)\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{R_s^{non}(\omega)\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{P_{eqk}(\omega)\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $\{P_{eqk}(\omega)\} = [\tilde{S}_{bb}(\omega)]\{\bar{U}_b^s(\omega)\}$ 이고, $\{\bar{U}_b(\omega)\}$ 는 그림 1(b)에 나타낸 굴착지반의 응답이며 $[\tilde{S}_{bb}(\omega)]$ 는 경계

면 b에 대한 원역의 영향을 나타내는 임피던스행렬이다. 일반적으로 $[S_{bb}(\omega)]$ 는 주파수종속성이 매우 강하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\tilde{S}_{bb}(\omega)] = [\tilde{K}_{bb}] + i\omega[\tilde{C}_{bb}] + [\tilde{S}_r(\omega)] \quad (4)$$

이제 식(4)를 식(3)에 대입하고 이를 역Fourier 변환하면 아래와 같은 시간영역에서 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sb}] \\ [M_{bs}] & [M_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}_s\} \\ \{\ddot{u}_b\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sb}] \\ [C_{bs}] & [C_{bb}] + [\tilde{C}_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}_s\} \\ \{\dot{u}_b\} \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sb}] \\ [K_{bs}] & [K_{bb}] + [\tilde{K}_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s\} \\ \{u_b\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{r_s^{non}(t)\} \\ \int_0^t [\tilde{S}_r(t-\tau)]\{u_b(\tau)\}d\tau \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{p_{eqk}(t)\} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $[\tilde{S}_r(t)] = \mathcal{F}^{-1}([\tilde{S}_r(\omega)])$, $\{p_{eqk}(t)\} = \mathcal{F}^{-1}(\{P_{eqk}(\omega)\})$ 로서 $\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$ 는 역 Fourier 변환을 나타낸다. 식(5)의 해는 Newmark-법과 같은 직접시간적분법을 사용하여 구할 수 있다.

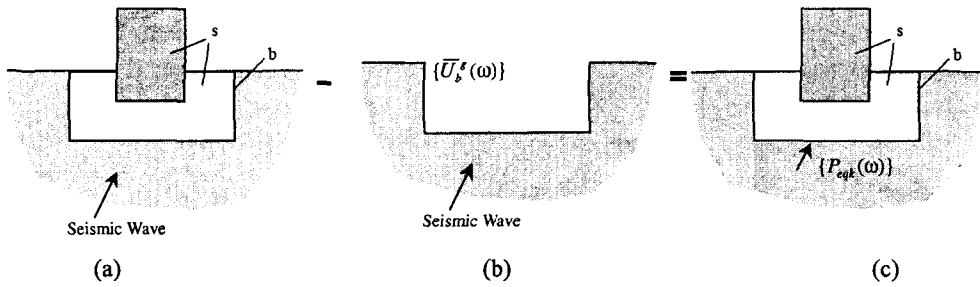


그림 1. 지반-구조물 상호작용계의 지진응답해석문제

2.2 주파수영역해와 범용 유한요소 프로그램을 이용한 복합법

식(1)의 운동방정식에서 첫째 행을 정리하면 다음과 같다.

$$[M_{ss}]\{\ddot{u}_s\} + [C_{ss}]\{\dot{u}_s\} + [K_{ss}]\{u_s\} + \{r_s^{non}(t)\} = -[M_{sb}]\{\ddot{u}_b\} - [C_{sb}]\{\dot{u}_b\} - [K_{sb}]\{u_b\} \quad (6)$$

위의 식(6)은 경계면에서 상호작용이 고려된 응답 $(\{\ddot{u}_b\}, \{\dot{u}_b\}, \{u_b\})$ 을 알고 있으면 식(5)의 복잡한 문제가 경계조건이 시간에 따라 변하는 통상적인 동적해석문제로 치환이 가능함을 의미한다. 식(6) 우변의 상호작용이 고려된 경계응답을 등가선형물성을 사용한 지반-구조물 상호작용 해석프로그램(KIESSI)을 이용하여 구하고, 이를 범용 유한요소 해석프로그램에 비선형해석시의 경계조건으로 입력한다. 이 기법에 포함된 이론적인 근사는 다음과 같다: $\{u_b(t)\} \equiv \mathcal{F}^{-1}(\{\bar{U}_b(\omega)\})$, $\{\dot{u}_b(t)\} \equiv \mathcal{F}^{-1}(\{i\omega\bar{U}_b(\omega)\})$, $\{\ddot{u}_b(t)\} \equiv \mathcal{F}^{-1}(\{-\omega^2\bar{U}_b(\omega)\})$. 이 근사식은 선형문제에 대해서는 정확한 식이 되고 비선형문제에 대해서는 근사적인 식이 된다.

3. 비선형 자유장 응답해석

사용된 지반물성은 화련과제의 상관지반 모형을 사용하였으며, 표 1에서 각 지층별로 구분하여 나타내었다.⁽³⁾ 한편, 해석에 사용된 지진입력가속도는 그림 2에서 보는바와 같이 1995년 5월 1일 화련 시험부지의 지표면상 계측점인 A15점에서 계측된 가속도 시간이력인데 최대지반 가속도의 크기가 0.14g인 중간크기의 지진으로 그 파형은 그림 3과 같다. 시간영역에서 자유장해석을 수행하기 위해 그림 4에서 보인바와 같이 자유장 지반을 가로18m, 세로19m의 크기에 ANSYS 평면변형을 요소인 PLANE82요소 342개를 사용하여 해석모형을 작성하였다. 또한 지반의 재료비선형성을 고려하기 위해 그림 6~7에서 보는 바와 같이 화련자유장 지반의 여러지반영역에 대해서 수행된 주기변형시험(cyclic deformation test)과 비배수 주기강도시험(undrained cyclic strength test) 결과로부터 구해진 변형도에 따른 전단탄성계수와 감쇠비를 사용하였다.⁽⁴⁾ 이 같은 결과를 가지고 ANSYS에서 재료의 비선형성을 고려하기 위해 그림 6~7에서 나타낸 곡선을 그림5에서 보는 바와 같이 응력-변형을 곡선으로 변환하여 나타냈으며 최종적으로 시간영역에서 각 시간단계별로 변형율에 따라 지반의 강성이 고려 될 수 있도록 하였다. 이 같은 과정을 통해 해석모형의 A점에서 가속도 응답스펙트럼과 그 지점에서 실제 계측된 가속도 시간이력의 응답스펙트럼을 비교하였다. 기존의 방법인 SHAKE를 통한 등가선형화 기법을 사용해서 얻어진 결과와도 비교하여 그림 8과 9에서 나타내었다. 그 결과 복합법을 사용한 본 해석값이 계측결과와 잘 일치하는 반면 기존의 SHAKE를 사용하여 등가선형화해석을 수행한 결과와는 상당한 차이를 보여주고 있음을 알 수 있었다. 따라서 본 해석방법의 타당성과 정확성을 검증할 수 있었으며 지반에서 비선형성이 고려된 응답의 경우는 중간 크기의 지진에서도 기존의 등가선형화기법이 상당한 오차를 보이고 있음을 알 수 있었다.

표 1. 수치해석에 사용된 각 지층의 물성

지반영역	전단파 속도(%)	포아송비(ν)	밀도(t/m^3)	재료감쇠비(h)
Sand-1	133	0.38	1.69	0.02
Sand-2	231	0.48	1.93	0.02
Gravel-3	281	0.47	2.42	0.02
Gravel-4	388	0.47	2.42	0.02

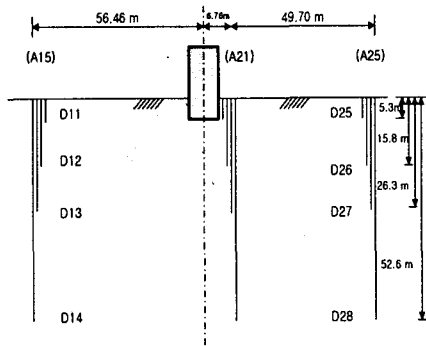


그림 2. 지반계측위치

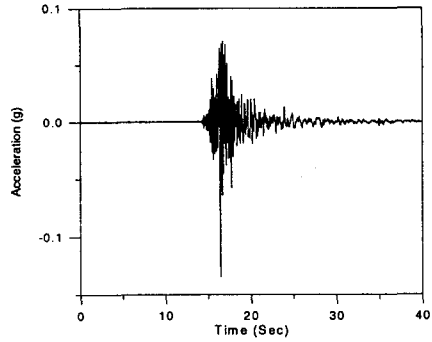


그림 3. 지진입력가속도 시간이력곡선

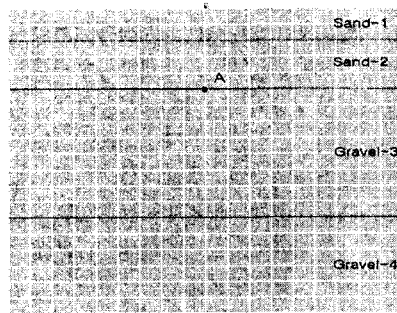


그림 4. 자유장 모델링

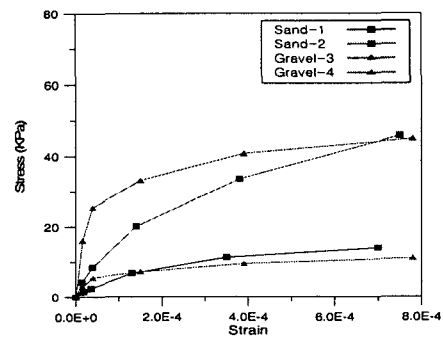


그림 5. 응력-변형을 곡선

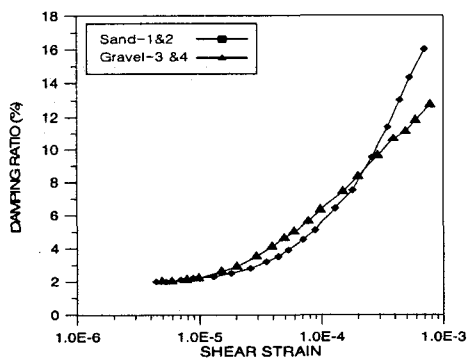


그림 6. 이력감쇠비

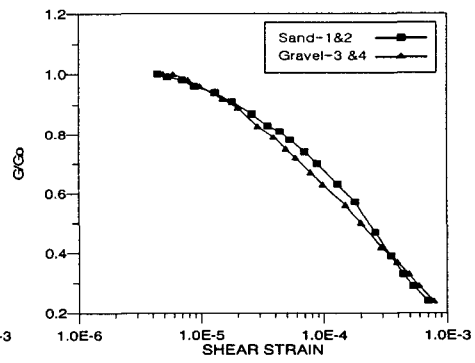


그림 7. 정규화된 전단탄성계수

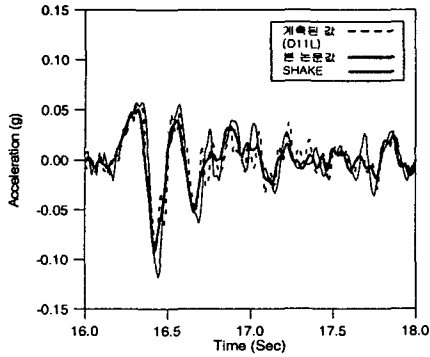


그림 8. 지진입력가속도 시간이력비교

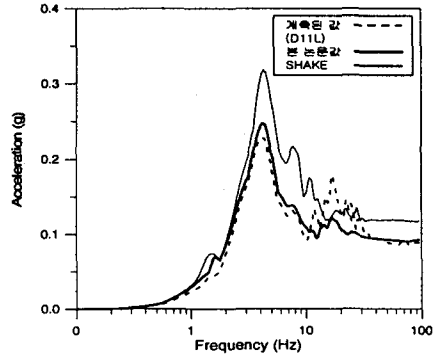


그림 9. 깊이 5.3m에서 응답(D11L)

4. 지반의 비선형성을 고려한 지반-구조물 상호작용해석

시간영역에서 지반의 비선형성을 고려하여 일본 고베의 가미사와 지하철 역을 대상으로 지진응답해석을 수행하였다. 사용된 지진입력가속도는 고베지진시 고베의 지표면에서 계측된 가속도 시간이력으로 그림 10에 나타냈다. 시간영역에서 지반-구조물 상호작용효과를 고려하기 위해 복합법을 사용하였으며 이를 위해 해석모형은 그림 11에서 보인 바와 같이 ANSYS의 8절점 PLANE82와 2절점의 COMBINATION14를 사용하여 나타내었다. 지반의 재료 비선형성을 고려하기 위해 필요한 지반의 동적물성을 고베지하철역에 대해서는 알지 못한 관계로 3장에서 보인 동적지반물성을 동일하게 적용하여 해석하였다. 수치해석에 사용된 구조물과 지반의 물성을 표2에 나타내었으며, 그림 11에서 보인 해석지점에서 지반의 비선형성을 고려한 해석결과와 선형 해석결과와의 가속도 응답스펙트럼을 비교하여 그림 12~15에 나타내었다. 그 결과 지반의 비선형성을 고려한 해석결과가 선형해석결과와 비교하여 응답의 크기면에서 더 작았으며 저주파수에서 보다는 고주파수 성분에서 더 큰 차이를 보여주고 있음을 알 수 있었다. 따라서 이 같은 결과로부터 보다 정확한 지진응답해석을 수행하기 위해서는 반드시 지반의 비선형성을 고려한 해석이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

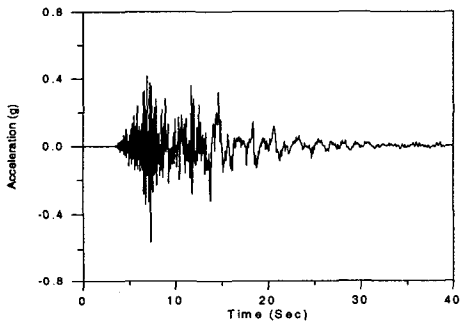


그림 10. 입력지진시간이력 (PGA=0.56g)

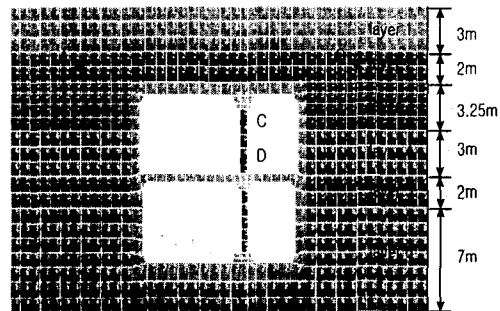


그림 11. ANSYS 해석모델

표 2. 수치해석에 사용된 지반과 콘크리트의 물성

동적지반물성	지반영역	강성계수	이력감쇠비(%)	밀도 (ρ) (t/m^3)	포아송비 (ν)
		선형	선형		
Sand-1	layer 1	219.4	2	1.8	0.45
Sand-2	layer 2	351.0	2	2.0	0.45
Gravel-3	layer 3	381.9	2	2.0	0.45
	layer 4	303.4	2	2.0	0.45
Gravel-4	layer 5	525.5	2	2.0	0.45
	layer 6	691.5	2	2.0	0.45
	layer 7	978.3	2	2.0	0.45
콘크리트 외부프레임		23260	2	2.4	0.2
콘크리트 중간기둥		7000	2	0.672	0.2

주: 지반의 전단파속도의 단위는 %이고, 구조물의 탄성계수는 MPa 임

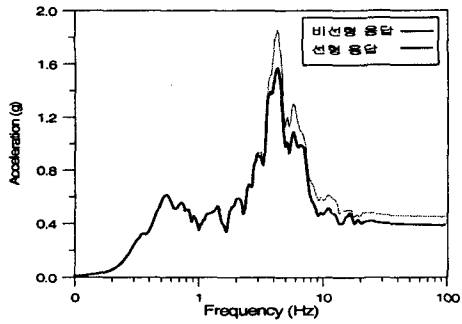


그림 12. 점 A에서 응답비교

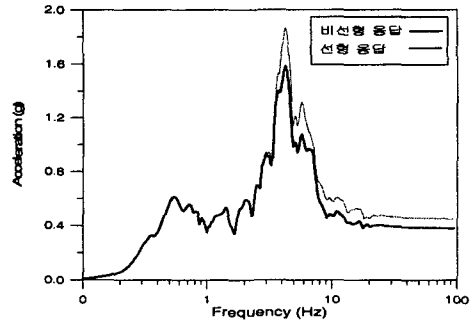


그림 13. 점 B에서 응답비교

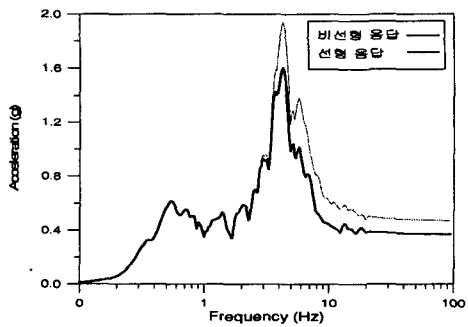


그림 14. 점 C에서 응답비교

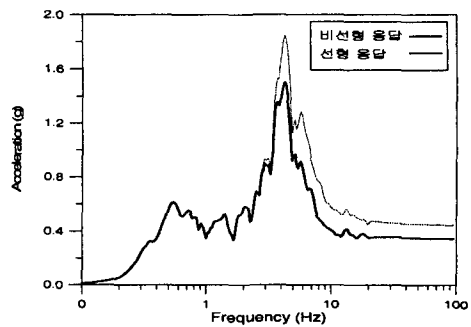


그림 15. 점 D에서 응답비교

5. 결론

본 연구에서는 복합법을 사용하여 시간영역에서 지반의 비선형성을 고려한 지진응답해석을 수행하였다. 해석방법의 검증을 위해 해석결과를 대만 화련부지의 지중에서 계측된 가속도 시간이력과 비교하였으며 그 결과 기존의 등가선형화기법을 사용하는 SHAKE의 해석결과 보다 본 연구의 해석방법이 훨씬 더 실측결과와 가까운 해석결과를 보여주고 있어 본 연구의 정확성과 타당성을 입증할 수 있었다. 마지막으로 본 연구의 해석방법을 2-D 지하철 구조물에 적용하여 시간영역에서 지반의 비선형성을 고려한 해석을 수행하였으며 선형 해석결과와의 차이점을 비교한 결과 반드시 지반의 비선형성을 고려한 지진응답해석이 필요함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Hardin B. O., Drnevich V. P., "Shear modulus and damping of soils: design equations and curves," *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 95, No. SM6, Nov., 1972, pp.667-691.
2. Katayama, Ikuo, *Studies on Fundamental Problems in Seismic Design Analyses of Critical Structures and Facilities*, pp.55-95.
3. 윤정방, 최준성, 김재민, 김문수, "지반-구조물 상호작용계의 강성계수 추정 및 비선형 지진해석," 한국지진공학회논문집, 제1권, 제1호, pp. 41-49.
4. CRIEPI, *The unified model of the ground for FVT-2 analysis, Hualien LSST Meeting*, Taiwan, 1993.
5. An, X. and Maekawa K., "Failure analysis of underground RC frame subjected to seismic actions," *J. Materials, Conc. Strucu Pavements*, JSCE, Vol.36, 1997, pp.251-267
6. Schnabel, N., Lysmer, J., Seed, H.,B., SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC 72-12, Univ. of California, Berkeley, CA, 1972.
7. Senzai, S., Hajime, O., Takashi, M., "A study of the damage of subway structures during the 1995 hanshin-awaji earthquake," *Cement and Concrete Composites*, 19, 1997, pp. 223-239.
8. 김재민, 윤정방, 김두기, "유한요소와 무한요소를 사용한 2차원 선형 지반-구조계의 지진응답해석법," 한국전산구조공학회 논문집, 제13권, 제2호, 2000, pp. 321-244.
9. 최준성, 윤정방, 김재민, 이종세, "지반의 비선형성을 고려한 Hualien 대형지진시험구조물의 지진해석," 대한토목학회논문집, 제20권, 제4-A호, 2000, pp. 643-657.