

경계면 요소를 고려한 지하 철근콘크리트 구조물의 지진해석

Seismic Analysis of Underground RC Structures considering Interface between Structure and Soil

남 상 혁*
Nam, Sang-Hyeok

변 근 주**
Byun, Keun-Joo

송 하 원***
Song, Ha-Won

박 성 민****
Park, Sung-Min

ABSTRACT

The real situation of an underground reinforced concrete(RC) structure with the surrounding soil medium subjected to seismic load is quite difficult to be simulated through an experimental work and, even if it is possible to arrange such an experiment, it will be too expensive. So development of analytical method can be applied usefully to seismic design and seismic retrofit through an analysis of seismic behavior and seismic performance evaluation.

A path-dependent constitutive model for soil that can estimate the response of soil layer is indispensable for dealing with kinematic interaction of RC/soil entire system under seismic loads. And interface model which deals with the dynamic interaction of RC/soil entire system is also necessary.

In this study, finite element analysis program that can consider path-dependent behavior of RC and soil, and interfacial behavior between RC and soil is developed for rational seismic analysis of RC/soil entire system. Using this program, nonlinear behavior of interface between RC and soil is analyzed, and the effect of interfacial behavior to entire system is investigated.

1. 서론

최근 들어 세계 각국의 잦은 지진으로 인해 전 세계적으로 지진에 대한 구조물의 안정성 확보에 대한 관심이 높아지고 있고 국내에서도 많은 관심이 집중되고 있다. 그 동안 철근콘크리트(이하 RC) 구조물의 해석, 설계 및 성능평가에 대해 많은 연구가 진행되어 왔으나, 지반에 둘러싸여 있는 지하 RC 구조물의 경우에는 지진에 대해 비교적 안전한 것으로 인식되어 왔기 때문에 이렇다 할 연구가 없었던 것이 사실이다. 하지만 일본의 고베지진에서 나타난 바와 같이 지하 구조물도 지진에 대해 안전하지 않다는 것이 판명되었고, 그 이후 지하 구조물의 내진에 대한 연구의 필요성이 부각되고 있다.

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

*** 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수

**** 정회원, 연세대학교 토목공학과 석사과정

주위의 지반 매체내에서 지진하중을 받는 지하 RC 구조물의 실제 상황은 실험을 통해 표현하기가 매우 어렵기 때문에 해석적인 방법을 통한 지하 RC 구조물의 지진력에 따른 거동의 분석, 내진성능 평가 등은 신설 지하 RC 구조물의 내진 설계에 유용하게 사용될 수 있을 뿐 만 아니라, 기존 지하 RC 구조물의 내진 보강 등에도 유용하게 사용될 수 있다. 지하 구조물은 지상 구조물과는 달리 지반 내에서 상호작용을 하며 거동을 하기 때문에 지반층의 응답을 예측할 수 있는 지반의 경로의존적 구성모델이 반드시 필요하다. 또한 RC와 지반 사이의 동적 상호작용은 매체의 경계면을 통해 발생하기 때문에 경계구역의 거동이 해석시에 고려되어야 한다. 대부분의 내진 해석 프로그램에서는 이러한 경계면의 거동을 정확히 고려하고 있지 않기 때문에 지하 RC 구조물의 거동을 사실적으로 예측하는 것이 거의 불가능하다. 더욱이 RC와 지반 사이 경계면의 경우 거시적으로 보면 두께가 없지만 경계면의 변형이 정확히 경계면 위에서 발생하는 것이 아니라 경계면에 접해서 발생하기 때문에 두께가 없는 경계면 요소는 변형거동을 사실적으로 표현할 수 없다. 따라서 경로의존적 RC 구성모델, 지반 구성모델과 함께 두께를 갖는 RC와 지반 사이의 경계면 구성모델을 개발하는 것이 절실히 필요한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 지하 RC 구조물과 주변 지반의 상호작용을 고려한 전체 시스템에 대한 합리적인 내진 해석을 위해 RC와 지반의 경로의존적 구성모델을 개발하고, RC와 지반 경계면의 구성모델을 개발한다. 또한 RC와 지반을 하나의 시스템으로 고려하는 해석을 통하여 지하 RC 구조물의 거동을 정확하게 파악하고, 경계면의 거동이 전체 시스템에 미치는 영향에 대하여 알아본다.

2. 재료의 구성모델

2.1 철근콘크리트의 구성모델

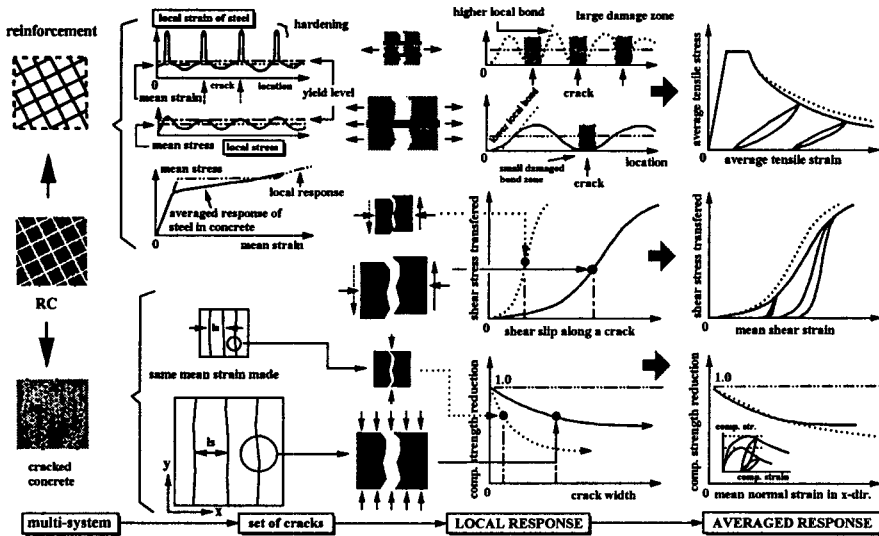


그림 1 철근콘크리트의 구성모델

본 논문에서 사용되는 철근콘크리트 재료모델은 콘크리트와 철근에 대한 평균화된 구성법칙을 조합함으로써 구성되었다. (Okamura and Maekawa, 1991) 철근콘크리트에 있어서 균열간격이나 균열폭은 시험체의 크기나 철근 직경의 크기에 따라 달라지며, 특히 균열간격에 의하여 대표되는 균열분포상태는 크기효과의 주 관심대상이다. 그림 1에 나타난 바와 같이 콘크리트의 단위체적당 전달되는 국부응력은 철근 직경의 크기, 균열형상 등에 따라 달라지게 되는데, 이러한 경우 국부적인 응력전달에 대

한 크기효과는 철근콘크리트의 균열의 집합체 수준에서는 무시될 수 있으며, 만일 평균변형률이 부재의 크기에 관계없이 동일하다면 균열의 간격에 무관하게 구성법칙을 적용할 수 있다. 따라서 그림 1에서 보여주는 것처럼 대표 체적요소에서 정의된 평균화된 응력-변형률 관계를 사용함으로써 균열간격, 균열밀도, 철근의 직경에 대한 크기효과에 무관하게 균열이 존재하는 콘크리트의 압축, 인장, 전단 및 철근의 인장에 대하여 유일성을 만족하는 구성방정식을 얻을 수 있다.

2.2 지반의 구성모델

지진하중을 받는 RC/지반 전체 시스템의 운동학상의 상호관계를 다루기 위해서는 지반의 경로의존적 구성 모델이 반드시 필요하다. 더욱이 구조물에 야기되는 전단력은 지반을 통해 구조물에 전달되는 힘에 의한 것이고, 지반의 비선형 특성은 지하 RC 구조물에 힘을 전달하는 지반가속도의 크기를 좌우하게 된다. 따라서 지반의 비선형 특성을 잘 표현할 수 있는 지반 구성모델의 적용이 매우 중요하다 하겠다. 지반의 구성 모델로서는 반복주기하중과 지진하중을 다룰 수 있는 몇 가지 모델이 있다. 본 연구에서는 지진을 받는 지반층의 비선형 응답을 예측할 수 있는 Ohsaki의 지반 모델을 이용하여 유한요소해석에 적용하였다. 그림 2는 지반 모델의 경로의존적 관계를 나타낸 것이다.

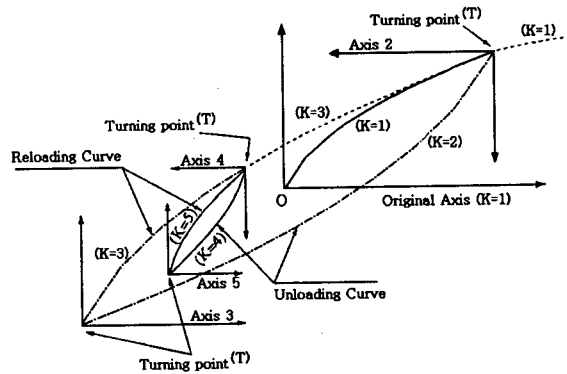


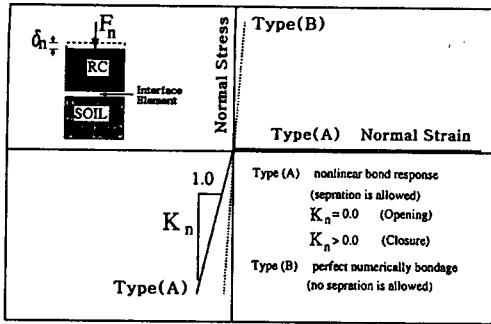
그림 2 지반 모델의 경로의존적 구성 관계

2.3 RC/지반 경계면의 구성모델

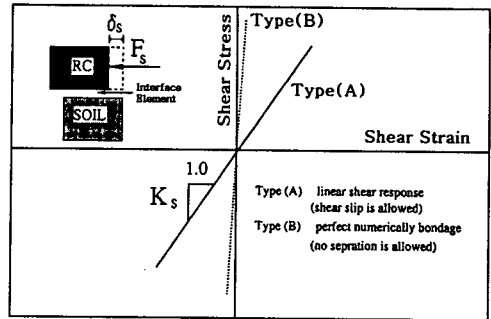
구조물과 지반 사이의 경계구역은 RC/지반 전체 시스템의 상호작용을 다루기 위해 중요하다. 사실상 구조물과 지반은 두 개의 다른 표면을 갖는 다른 재료이다. 구조물은 지반으로부터 토압에 의해 구속압을 받는다. 결과적으로 구조물과 지반의 두 표면은 정상적으로는 정적 하중하에 접촉되어 있다. 이러한 상태에서 대부분의 경우에는 두 표면 사이를 완전 부착으로 가정할 수 있지만 반복 전단하중이나 지진력 등이 고려되면 접촉면상에 인장응력과 구조물의 흔들림이 존재하게 된다. 더욱이 구조물-지반의 상호작용과 관련된 몇몇 연구에서는 지반과 구조물 사이의 접촉면을 완전 부착으로 가정하고 있다. 이러한 가정은 당연히 접촉면위의 인장응력을 유발하게 된다. 따라서 합리적인 경계면 요소의 적용은 구조물-지반 상호작용의 해석에 있어 매우 중요하다 할 수 있다.

2.3.1 선형 탄성 경계면 모델

일반적으로 경계면 요소를 고려하지 않는 경우에는 RC와 지반 사이의 경계를 완전부착으로 가정하게 된다. 이 경우 지반으로부터 구조물로 전달되는 힘의 에너지 소산이 없게 되므로 결과적으로 구조물의 파괴에 대해 더 나쁜 조건이 되게 된다. 선형 탄성 경계면 모델의 경우 그림 3에 나타낸 것과 같이 경계면에 수직인 방향에 대한 거동을 이차선형으로 가정하게 되고, 경계면에 평행한 방향의 거동을 선형으로 가정한다. 따라서 수직응력은 경계면이 분리될 경우에 0이 되어 지반과 구조물 사이에 응력이 전달되지 않는다. 또한 전단응력-전단변형률 관계의 강성 K_s 는 구조물의 표면조건, 마찰각, 초기 토압 등의 변수에 의해 영향을 받게 된다.



(a) Normal response of RC/soil interface



(b) Shear response of RC/soil interface

그림 3 선형 탄성 경계면 모델

2.3.2 두께를 갖는 경계면 모델

구조물과 지반 사이의 경계를 거시적으로 보면 두께가 없다. 따라서 경계면의 거동을 표현하는데 있어서 일반적으로 두께가 없는 경계면 요소를 사용하고 있다. 하지만 두께가 없는 경계면 요소는 많은 단점이 있고, 더욱이 경계면의 미끄러짐이 정확히 경계면 위에서 발생하는 것이 아니라 경계면에 접해서 발생하게 되기 때문에 두께가 없는 경계면 요소는 변형거동을 사실적으로 표현할 수 없다. 따라서 일정한 두께를 갖는 경계면 요소의 적용이 필요하다 할 수 있다. 그림 4는 경계면의 미끄러짐 변형의 세 가지 형태를 나타낸 것이고, 다음과 같다.

- (1) 경계면이 부드러운 경우 미끄러짐은 구조물 표면을 따라 발생한다. (그림 4(a))
- (2) 구조물의 표면이 거친 경우 미끄러짐 표면은 구조물에 인접한 지반에 위치한다. (그림 4(b))
- (3) 많은 미끄러짐 표면으로 구성되는 failure area가 존재한다. (그림 4(c))

그림에서 점선은 변형전의 지반 표면을 나타내는 것이고, 직선은 변형후의 지반 표면을 나타내는 것이다. 이 모든 형태에 있어서, 그림에서 ABCD로 나타낸 구조물 표면에 인접한 좁은 영역에서 큰 미끄러짐 변위가 존재하게 된다. 따라서 두께를 갖는 경계면 요소를 이용하여 구조물에 인접한 좁은 지반 영역과 함께 경계면의 변형 거동을 표현해야 좀 더 사실적으로 접근할 수 있다.

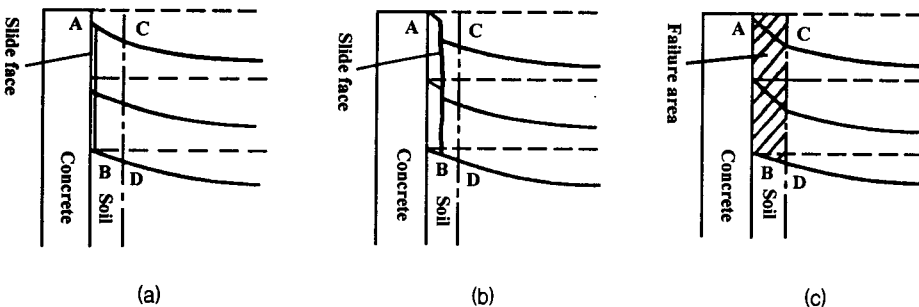


그림 4 경계면 미끄러짐 변형의 형태

3. RC/지반 경계면 거동을 고려한 해석

구조물-지반 전체 시스템의 해석에 있어서 경계면 거동의 영향에 대해 알아보기 위해 서로 다른 경계면 모델을 적용하여 각각 해석을 실시하였다. 그림 5는 해석을 위한 모델링 형상을 나타낸 것이다. 각각의 경계면 모델은 첫째 구조물과 지반 사이를 완전부착으로 가정한 것이고(B1), 둘째 완전부착에 전단변형을 허용한 것이다(B2). 셋째는 경계면에 수직인 방향의 거동을 이차선형으로, 평행한 방향의 거동을 선형으로 가정한 것이고(A1), 넷째는 전단 저항력을 무시하는 효과를 보기 위해 A1에서 전단강성을 0으로 하였다(A2). 해석 결과에 따라 각 경계면 모델간의 차이를 비교하여 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 구조물-지반 전체 시스템의 응답을 보다 사실적으로 구하기 위해서는 적절한 경계면 요소의 적용이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

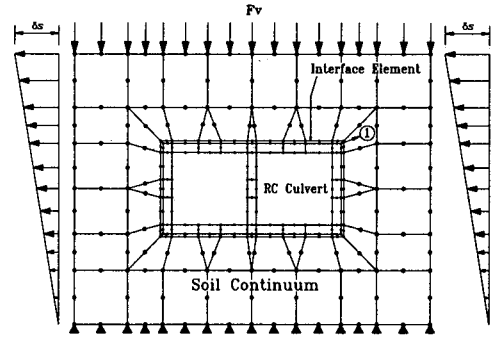


그림 5 해석 모델링 형상

또한 경계면 요소가 두께가 있는 경우의 거동을 알아보기 위해 3Hz의 sine파를 입력가속도로 하여 구조물-지반 전체 시스템의 응답을 분석하였다. 그림 8은 입력가속도의 시간이력을 나타낸 것이고, 그림 9는 주어진 위치에서의 시간에 따른 상대변위를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 경계면을 고려한 경우 상대변위가 크게 나타나는데, 이는 경계면을 고려하지 않는 경우 전체 시스템의 강성을 실제보다 크게 산정하게 되어 응답이 작게 나타나는 것이다. 따라서 두께가 있는 경계면 요소를 적용한 경우 실제 거동에 보다 접근하게 된다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 지하 RC 구조물과 주변 지반의 상호작용을 고려한 전체 시스템에 대한 합리적인 내진 해석을 위해 경계면 요소를 고려하여 해석을 실시하였고, 주로 경계면의 영향에 대해 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 주변 지반을 포함하는 지하 RC 구조 시스템의 해석에서 경계면 요소를 고려하는 것은 구조물과 지반의 사실적인 거동을 표현하기 위해 매우 중요하다.
- (2) 구조물-지반 경계면을 완전 부착으로 가정한 경우 구조물에 대해 더 나쁜 조건으로 작용하게 되므로 반드시 적절한 경계면 요소의 적용이 필요하다.

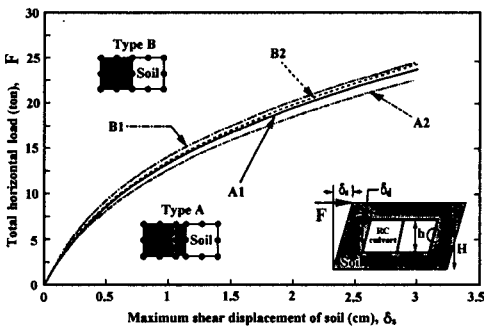


그림 6 하중-변위 관계에 대한 경계면의 영향

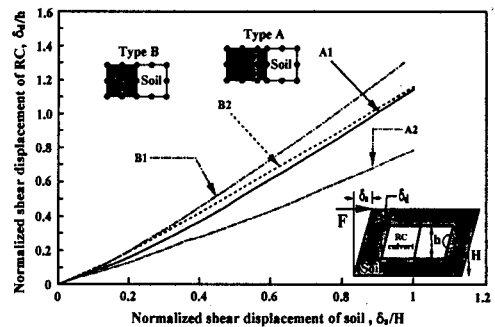


그림 7 전단 변형에 대한 경계면의 영향

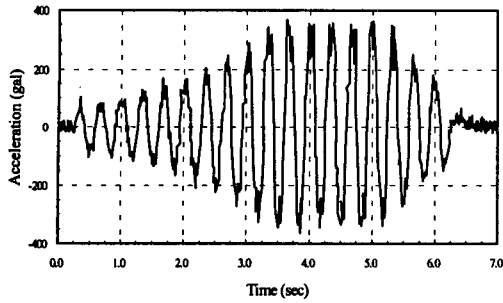


그림 8 입력가속도의 시간이력

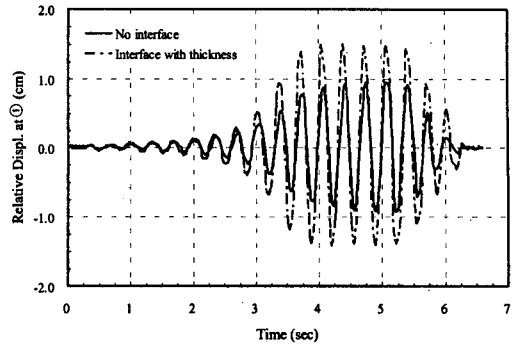


그림 9 시간에 따른 상대변위 (위치 ①)

- (3) 구조물-지반 경계면에 근접해서 발생되는 경계면의 거동은 두께를 갖는 경계면 요소에 의해 나타낼 수 있고, 이는 전체 시스템의 응답을 보다 정확하게 산정할 수 있게 한다.
- (4) 지하 RC 구조물의 해석에 있어서 경계면의 영향 뿐만 아니라 다른 여러 가지의 변수들에 대해서도 보다 많은 진보된 연구가 계속되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Okamura, H. and Maekawa, K., Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete, Gihodo, Tokyo, 1990
2. I. Shahrouz and F. Rezaie, "An Elastoplastic Constitutive Relation for the Soil-Structure Interface under Cyclic Loading", Computers and Geomechanics, Vol. 21, No. 2, 1997, pp. 21~39
3. Yin Zong-Ze, Zhu Hong, and Xu Guo-Hua, "A Study of Deformation in the Interface between Soil and Concrete", Computers and Geomechanics, Vol. 17, 1995, pp. 75~92
4. Ryszard Buczkowski and Michal Kleiber, "Elasto-Plastic Interface Model for 3D-Frictional Orthotropic Contact Problems", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 40, 1997, pp. 599~619
5. Ashraf Adel Shawky, "Nonlinear Static and Dynamic Analysis for Underground Reinforced Concrete", University of Tokyo, Japan, Sept. 1994
6. Xuehui An, "Failure Analysis and Evaluation of Seismic Performance for Reinforced Concrete in Shear", University of Tokyo, Japan, July 1996
7. Xuehui An and Maekawa, K., "Failure Analysis of Underground RC Frame Subjected to Seismic Actions", J. Materials, Conc. Structure, Pavements, JSCE, Vol. 36, No. 571, 1997, pp. 251~267
7. Toki, K., Sato, T. and Miura, M., "Seperation and Sliding Between Soil and Structure During Strong Ground Motion", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 9, 1981, pp. 263~277
8. Nguyen M., Yukio A., Keizo O., and Yasuaki M., "An Idea of Modelling Soil-RC Duct-type Interface under Seismic Loads", 콘크리트 콘크리트工學年次論文集, Vol. 22, NO. 3, 2000
9. 송하원, Maekawa, K., "철근 콘크리트 구조물의 지진응답 해석", 콘크리트학회지(특집 : 콘크리트 구조물의 내진상세 및 보강대책), 제 9권 1호, 1997. 2, pp. 36~43