

탄소성 경계면 요소를 고려한 철근콘크리트 지하 구조물의 해석

Analysis of Underground RC Structures considering Elastoplastic Interface Element

남 상 혁* 송 하 원** 변 근 주***
Nam, Sang Hyeok Song, Ha Won Byun, Keun Joo

ABSTRACT

Even though structural performance evaluation techniques for reinforced concrete structures have been improved, there are still many problems in the evaluation of structural performance for underground structures which interacts with surrounding soils. Since experimental evaluation of underground RC structures considering the interaction with the surrounding soil medium is quite difficult to be simulated, the evaluation for underground RC structures using an analytical method can be applied very usefully. For underground structures interacted with surrounding soils, it is important to consider path-dependent RC constitutive model, soil constitutive model, and interface model between structure and soil, simultaneously. In this paper, an elastoplastic interface model which consider thickness was proposed and importance of interface model is discussed. The effects of stiffness of structures to entire underground RC system are investigated through numerical experiment for underground RC structure for different reinforcement ratios and thickness of interfaces.

1. 서론

지하 철근콘크리트(이하 RC) 구조물은 대부분이 사회 기반시설이며 대형 구조물이기 때문에 그 중요성과 경제적인 문제를 고려한다면 지반을 포함하는 지하 구조 시스템의 거동을 정확하게 분석하는 것은 매우 중요하다. 하지만 주위의 지반 매체내에서 거동을 하는 지하 RC 구조물의 실제 상황은 실험을 통해 표현하기가 매우 어렵기 때문에 해석적인 방법을 통한 지하 RC 구조물의 거동 분석은 매우 유용하게 사용될 수 있다. 지하 구조물은 지상 구조물과는 달리 지반과 상호작용을 하며 거동을 하기 때문에 지반내에서 하중을 받는 RC/지반 전체 시스템의 운동학상의 상호관계를 다루기 위해서는 지반층의 응답을 예측할 수 있는 지반의 경로의존적 구성모델이 반드시 필요하다. 또한 RC와 지반 사이의 상호작용은 매체의 경계면을 통해 발생하기 때문에 경계구역의 거동이 해석시에 반드시 고려되어야 한다. 만일 RC와 지반 사이의 경계면 거동을 고려하지 않는다면 전체 시스템의 강성을 크게 산

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정
** 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수
*** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

정하게 되어 응답이 작게 나타나기 때문에 적절한 경계면 모델의 적용이 매우 중요하다 하겠다. 따라서 본 논문에서는 보다 정확한 경계면 거동을 표현하기 위해 두께를 갖는 탄소성 경계면 모델을 개발하여 해석에 적용하였다. 이에 따라 지하 RC 박스 구조물에 대한 해석을 실시하여 경계면 거동의 영향을 분석하였고, 또한 구조물의 강성이 전체 시스템의 거동에 미치는 영향에 대해 알아보기 위해 RC 구조물에 배근된 철근비를 다르게 하여 그 거동의 차이를 분석하였다.

2. 철근콘크리트 및 지반의 구성모델

2.1 철근콘크리트의 구성모델

본 연구에서 사용되는 철근콘크리트 재료모델은 콘크리트와 철근에 대한 평균화된 구성법칙을 조합함으로써 구성되었다.^{1, 2)}

콘크리트의 단위체적당 전달되는 국부응력은 철근의 직경, 균열형상 등에 따라 달라지게 되는데, 이러한 경우 국부적인 응력전달에 대한 크기효과는 철근콘크리트의 균열의 집합체 수준에서는 무시될 수 있으며, 만일 평균변형률이 부재의 크기에 관계없이 동일하다면 균열의 간격에 무관하게 구성법칙을 적용할 수 있다. 따라서 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. 또한 단조하중에 대한 콘크리트내의 철근모델은 탄성부분과 항복 후의 경화부분을 갖는 이차선형(bilinear)의 평균응력과 평균변형률의 형태로 주어지며, 항복후의 모델은 항복점에서 일정한 변형률 경화율을 갖는 것으로 모델링 되었다. 반복하중을 받는 경우에는 제하와 재하에 의한 내부의 곡선을 Kato모델과 코사인곡선에 의하여 표현되는 응력분포의 가정을 적용하였다.³⁾

2.2 지반의 구성모델

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 할 수 있다. 본 논문에서는 지반층의 비선형 응답을 예측할 수 있는 Ohsaki의 지반 모델을 이용하여 유한요소 해석에 적용하였다.⁴⁾

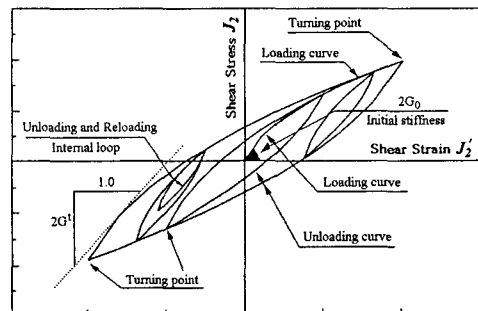


그림 1 지반의 반복 전단 모델

2.3 탄소성 경계면 구성모델

경계면의 거동은 그림 2(a)에 나타난 것과 같이 수직응력(σ_n)과 전단응력(τ)를 받는 전단변형을 기본적으로 포함한다. 많은 경계면에서 볼 수 있는 지배적인 변형 형태는 그림 2(b)에 나타난 것과 같이 단순 전단변형을 상태이다. 여기서, u 와 v 는 local x, y축에서의 변형이고, u_r 과 v_r 은 각각 상대 전단변위와 수직변위를 나타낸다. 본 연구에서는 두께를 갖는 경계면 요소에 대해 그림 2(c)에 나타난

것과 같이 폭 B와 두께 t를 갖는 8절점 사각형요소로 표현하였고, 구조물-지반 경계면의 거동을 보다 사실적으로 나타내기 위해 소성론의 관점에서 구성관계를 제안하였다.^{5, 6)}

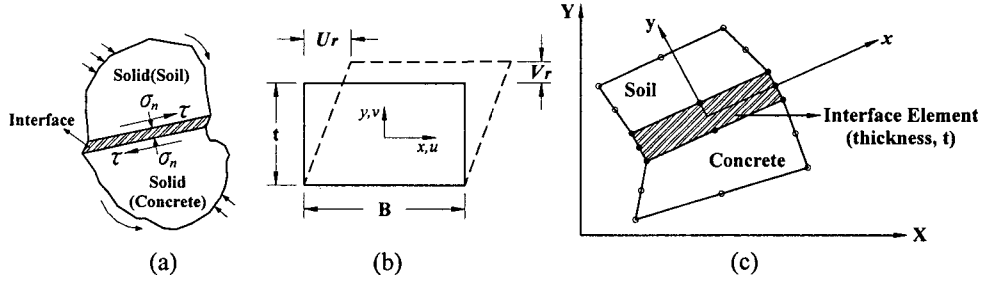


그림 2 두께를 갖는 경계면 모델의 형태

초기항복이 발생한 후 경계구역의 거동은 부분적으로 탄성과 소성 상태가 공존하게 된다. 응력이 증가하는 동안 변형률의 변화는 식 (1)과 같이 탄성과 소성 성분의 합으로 가정되어 질 수 있다.

$$d\varepsilon_{ij} = (d\varepsilon_{ij})_e + (d\varepsilon_{ij})_p \quad (1)$$

탄성 변형률 증분과 소성 변형률 증분을 다시 나타내면 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{d\sigma_{ij}'}{2\mu} + \frac{(1-2\nu)}{E} \delta_{ij} d\sigma_{kk} + d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2)$$

식 (2)를 매트릭스 형태로 정리하면 식 (3)과 같이 되고, 이에 따라 식 (4)와 같은 경계면의 탄소성 응력-변형률 관계를 얻을 수 있다.

$$d\varepsilon = [D]^{-1} d\sigma + d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma} \quad (3)$$

$$d\sigma = D_{ep} d\varepsilon \quad (4)$$

여기서, $D_{ep} = D - \frac{d_D d_D^T}{A + d^T a}$, $d_D = D a$

$$a^T = \frac{\partial F}{\partial \sigma} = \left[\frac{\partial F}{\partial \sigma_x}, \frac{\partial F}{\partial \sigma_y}, \frac{\partial F}{\partial \tau_{xy}} \right], \quad A = -\frac{1}{d\lambda} \frac{\partial F}{\partial x} dx, \quad a: \text{흐름벡터}$$

항복기준은 소성 변형이 시작될 때의 응력단계를 결정하게 되므로 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트나 지반에 적용 가능한 Mohr-Coulomb 항복기준을 적용하였다. 이에 대한 세부과정은 소성이론을 참고하기로 한다.⁷⁾

3. 지하 철근콘크리트 구조물의 해석

3.1 대상구조물 및 해석 조건

구조물과 지반 사이의 경계면을 포함하는 RC/지반 전체 시스템에 대한 해석 결과를 검증하고 또한 경계면 거동의 영향에 대해 알아보기 위해 서로 다른 경계면 모델을 적용하여 각 모델에 따른 거동을 분석하였다. 적용된 경계면 모델은 선형탄성 경계면 모델과 탄소성 경계면 모델이다. 그림 3은 Shawky(1994)에 의해 실시된 RC/지반 시스템의 실험 장치를 나타낸 것으로, 실험 결과를 본 연구의 검증 자료로 이용하였다. 또한 높은 전단변형 하에서의 구조물의 강성에 대한 영향을 알아보기 위해

RC 구조물은 철근비가 다른 두 종류의 경우로 나누어 해석을 실시하였다. Case A는 철근비를 0.4%로 하였고 Case B는 0.88%로 하였으며, Case B의 경우 구조물의 강성을 높이기 위해 Box의 모서리 부분에 45°의 헌치를 설치하였다. 해석시 각 요소는 8절점 quadrilateral 요소를 사용하였으며 두께가 있는 탄소성 경계면 요소의 경우도 같은 요소를 사용하였다. 해석에 사용된 재료물성 및 하중 조건 등은 실험시의 조건과 같게 하였으며 표 1에 나타내었다

표 1 RC 및 지반의 재료 물성치

RC		지반	
Strength of Concrete	240 kgf/cm ²	Soil Type	Sandy Soil
Unit Weight	0.0024 kg/cm ³	Unit Weight	0.0018 kg/cm ³
Poisson's Ratio	0.18	Poisson's Ratio	0.45
Young's Modulus of Steel	2.04 × 10 ⁹ kgf/cm ²	Young's Modulus	1160 kgf/cm ²
		Initial Shear Stiffness	400 kgf/cm ²
Yield Stress of Steel	3500 kgf/cm ²	Shear Velocity	150 m/sec
ρ_s (%)	Case A	N-Value	5
	Case B		

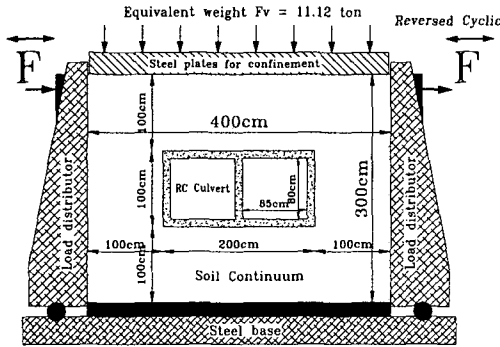


그림 3 RC/지반 시스템 실험장치 (Shawky, 1994)

3.2 반복주기하중에 대한 하중-변위 관계

반복주기하중에 대한 지반 최대 전단변위의 해석 결과를 실험 결과와 함께 그림 4(Case A) 및 그림 5(Case B)에 나타내었다. 해석 결과는 두 경우 모두 RC/지반 시스템의 하중-변위 관계를 잘 예측하고 있다. RC/지반 시스템의 해석에 있어 경계면의 영향을 무시하게 되면 전체 시스템의 강성이 크게 산정되어 응답이 작게 나타나기 때문에 반드시 경계면 거동을 고려해야 한다. 해석결과에서 나타난 바와 같이 선형탄성 경계면 모델의 경우 제하(unloading)와 재재하(reloading)의 경로에서 다소 오차가 발생하고 있고 잔류변형이 작게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 하지만 탄소성 경계면 모델을 적용한 경우에는 제하

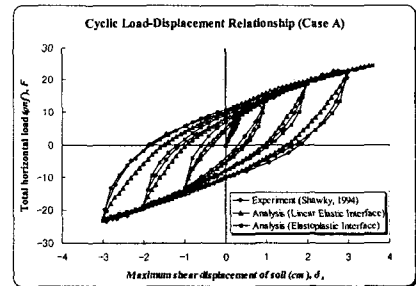


그림 4 반복하중에 대한 지반 최대 변위 (Case A)

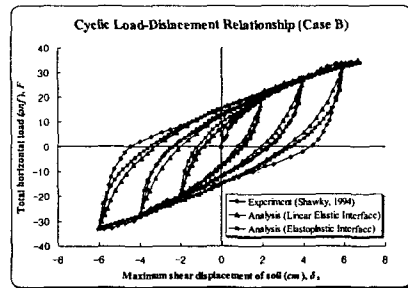


그림 5 반복하중에 대한 지반 최대 변위 (Case B)

(loading) 경로 뿐 만 아니라 제하 및 재재하의 경로까지 잘 표현하고 있어 선형탄성 경계면 모델에 비해 RC/지반 경계면의 거동 특성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 탄소성 경계면 모델은 RC/지반 전체 시스템의 응답을 보다 사실적으로 구현하기에 적절하다 할 수 있다.

3.3 경계면 두께의 영향

지하 구조물의 해석시 구조물/지반 경계면 거동의 영향에 대해 알아보기 위해 구조물과 지반 사이를 완전부착으로 가정

한 경우와 본 연구에서 제안된 두께를 갖는 탄소성 경계면 모델을 적용한 경우를 비교하였고, 경계면의 두께를 다르게 하여 두께에 따른 거동의 차이에 대해 알아보았다. 그림 6과 그림 7은 총 수평하중에 대한 최대 지반변위를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 것과 같이 완전부착인 경우 전체 시스템의 강성이 크게 산정되어 응답이 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 경계면의 두께를 다르게 하여 해석한 결과 경계면의 두께가 지반 변위에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다. 경계면의 두께에 따른 거동을 보면 Case A, B 모두 두께 변화에 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 경계면의 두께가 얇아질수록 지반 변위에 대한 구조물의 상대변위가 커지는 경향을 나타냈지만 큰 차이는 나타나지 않았다. 두께가 있는 경계면 요소를 적용하는데 있어 경계면의 두께를 결정하는 것은 매우 중요하다. 기존의 연구에서는 두께의 결정을 실험에 의존하고 있는 실정이고 경계면의 상태에 따라 거동이 달라지기 때문에 절대적인 값을 산정하기는 쉽지 않다. 하지만 본 연구에서 제안된 탄소성 경계면 모델의 경우 전체 시스템의 거동이 경계면 두께에 크게 영향을 받지 않기 때문에 일정 두께 이하의 경계면 요소를 적용한다면 RC/지반 경계면의 거동을 잘 표현할 수 있을 것으로 판단된다.

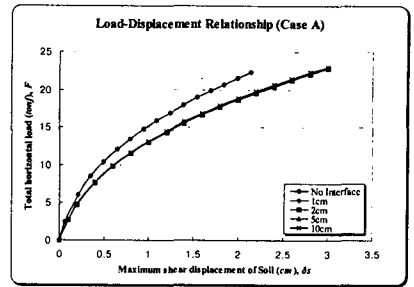


그림 6 하중-최대 지반변위 관계에서의 경계면 거동의 영향 (Case A)
 경계면 두께가 얇아질수록 지반 변위에 대한 구조물의 상대변위가 커지는 경향을 나타냈지만 큰 차이는 나타나지 않았다. 두께가 있는 경계면 요소를 적용하는데 있어 경계면의 두께를 결정하는 것은 매우 중요하다. 기존의 연구에서는 두께의 결정을 실험에 의존하고 있는 실정이고 경계면의 상태에 따라 거동이 달라지기 때문에 절대적인 값을 산정하기는 쉽지 않다. 하지만 본 연구에서 제안된 탄소성 경계면 모델의 경우 전체 시스템의 거동이 경계면 두께에 크게 영향을 받지 않기 때문에 일정 두께 이하의 경계면 요소를 적용한다면 RC/지반 경계면의 거동을 잘 표현할 수 있을 것으로 판단된다.

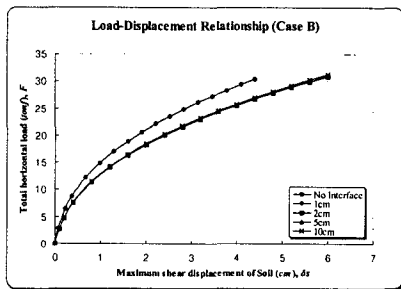


그림 7 하중-최대 지반변위 관계에서의 경계면 거동의 영향 (Case B)

3.4 철근비의 영향

RC/지반 전체 시스템의 거동에 있어 구조물의 강성이 미치는 영향에 대해 알아보기 위해 RC 구조물의 철근비를 다르게 하여 여러 경우의 해석을 실시하였다. 경계면 요소(탄소성 경계면 요소)나 지반 강성 등의 다른 변수들은 동일하게 하였고 모든 경우에 대해 Case A와 Case B로 나누어 해석하였다. 그림 8과 9는 RC 구조물의 상대변위에 대한 철근비의 영향을 나타낸 것이다. 구조물의 응답은 구조물 자체의 강성과 연관되기 때문에 철근비의 영향은 RC의 상대변위에 현저하게 나타난다.

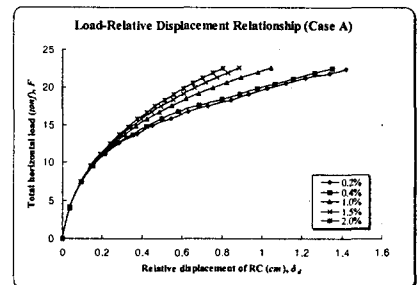


그림 8 RC 구조물의 변위에 대한 철근비의 영향 (Case A)

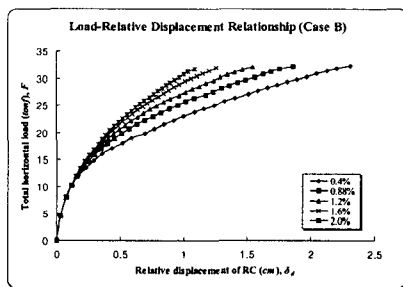


그림 9 RC 구조물의 변위에 대한 철근비의 영향 (Case B)

Case A와 B의 경우 모두 철근비를 증가시키면 RC의 변형이 줄어드는 것을 볼 수 있고, 매우 작은 철근비를 사용한 경우 변형이 급격하게 증가하게 되는 것을 알 수 있다. 하지만 지반 최대 변위는 지반과 콘크리트의 강성에 의해 주로 좌우되고 철근비의 영향은 거의 없다는 것을 알 수 있었다. 따라서 지하 RC 구조물의 경우 철근비의 변화가 RC 구조물의 변형거동에 직접적으로 영향을 미치지 않지만 지반의 변형에는 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 지하 RC 구조물과 주변 지반의 상호작용을 고려한 전체 시스템에 대한 합리적인 해석을 위해 탄소성 경계면 요소를 제안하여 해석에 고려하였고, 경계면의 거동과 RC 구조물의 강성이 전체 시스템에 미치는 영향에 대해 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 주변지반을 포함하는 지하 RC 구조 시스템의 해석에서 RC/지반 경계면을 완전부착으로 가정하게 되면 구조물에 대해 더 불리한 조건으로 작용하게 되므로 정확한 성능평가를 위해 경계면 요소의 적용이 반드시 필요하다.
- (2) RC/지반 사이의 경계면 거동을 보다 정확히 표현하기 위해 두께를 갖는 탄소성 경계면 요소를 제안하여 해석에 적용하였고 그 타당성을 확인하였다.
- (3) 경계면의 두께에 따른 거동을 분석한 결과 제안된 경계면 모델은 경계면 요소의 두께에 크게 영향을 받지 않고 지하 RC 구조 시스템의 거동을 잘 표현할 수 있다는 것을 알 수 있었고, 제하 경로 뿐 만 아니라 제하 및 재제하 경로까지도 잘 나타내고 있음을 알 수 있었다.
- (4) 지반으로부터 유발되는 힘은 구조물의 강도에 따라 비례적으로 증가하기 때문에 철근비의 변화가 구조물의 안전에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다. 하지만 철근비는 구조물의 손상과 균열조건에 영향을 미치므로 구조물의 기능 및 사용성을 고려하여 철근비를 결정해야 한다.

참 고 문 헌

1. Okamura, H. and Maekawa, K (1990) *Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete*, Gihodo, Tokyo
2. Song H.-W., Shim S.-H., Byun K.-J. and Maekawa K. (2001) "Failure Analysis of RC Shell Structure using Layered Shell Element with Pressure Node", *J. of Str. Eng.*, ASCE, Accepted
3. Kato, B. (1979), "Mechanical Properties of Steel under Load Cycles Idealizing Seismic Action", *CEB Bulletin D'Information*, 131, pp. 7~27.
4. Shawky A. A. (1994) *Nonlinear Static and Dynamic Analysis for Underground Reinforced Concrete*, Ph.D. dissertation, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
5. Yin Z. Z., Zhu H., and Xu G. H. (1995) "A Study of Deformation in the Interface between Soil and Concrete", *Computers and Geomechanics*, Vol. 17, pp. 75~92.
6. Samtani N. C., Desai C. S. and Vulliet L. (1966), "An Interface Model to Describe Viscoplastic Behavior", *Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech.*, Vol. 20, pp. 231~252.
7. Owen D. R. J. and Hinton E. (1980) *Finite Elements in Plasticity : Theory and Practice*, Pineridge Press Limited, U.K.
8. An X. (1996) *Failure Analysis and Evaluation of Seismic Performance for Reinforced Concrete in Shear*, Ph.D. dissertation, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
9. An X. and Maekawa, K.(1997) "Failure Analysis of Underground RC Frame Subjected to Seismic Actions", *J. Materials, Conc. Structure, Pavements*, JSCE, Vol. 36, No. 571, pp. 251~267.
10. 송하원, Maekawa, K., "철근 콘크리트 구조물의 지진응답 해석", *한국콘크리트학회지(특집 : 콘크리트 구조물의 내진상세 및 보강대책)*, 제 9권 1호, 1997. 2, pp. 36~43
11. 남상혁, 변근주, 송하원, 박성민 (2000) 경계면 요소를 고려한 지하 철근콘크리트 구조물의 지진해석, *2000년도 가을 학술발표회 논문집 (I)*, 한국콘크리트학회, pp. 87~92.