

# 철근콘크리트 지하철 정거장 구조물의 내진 성능 해석

## Seismic Performance Analysis of RC Subway Station Structures

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

### ABSTRACT

In this paper, an averaged constitutive model of concrete and reinforcing bars for RC structure and path-dependent Ohsaki's model for soil are applied, and an elasto-plastic interface model having thickness is proposed for seismic analysis of underground RC subway station structure. A finite element analysis technique is developed by applying aforementioned constitutive equations and verified through seismic analysis of underground RC subway station. Then, failure mechanisms of the RC subway station structure under seismic action are numerically derived. Then, failure modes and damage levels of the station are also analytically evaluated for the cases of several designs of the underground RC station.

### 1. 서    론

그 동안 철근콘크리트(이하 RC) 구조물의 설계 및 시공 기술에 관한 많은 연구가 있었고, 동시에 LNG 탱크나 원자력 발전소와 같은 큰 규모의 RC 구조물들이 많이 건설되었다. 비록 RC 구조물의 설계 및 시공 기술이 상당히 발전되었다 할지라도 아직도 해결해야 할 많은 문제가 남아 있는데, 특히 지하에 건설되어 주변 지반과 상호작용을 하는 지하 RC 구조물의 경우에는 더욱 그렇다.

지하 구조물은 지상 구조물과는 달리 지반과 상호작용을 하며 거동을 하기 때문에 지반 내에서 하중을 받는 RC 구조물의 거동을 정확하게 해석하기 위해서는 지반층의 거동을 예측할 수 있는 지반의 경로의존적 구성모델이 반드시 필요하다. 또한 RC 구조물과 지반 사이의 상호작용은 매체의 경계면을 통해 전달되기 때문에 RC 구조물의 거동을 보다 정확하게 해석하기 위해서는 경계구역의 거동이 해석시에 반드시 고려되어야 한다. RC와 지반 사이의 경계면 거동을 표현하는데 있어서 거시적으로 두께가 없는 경계면 요소를 사용하고 있지만 경계면의 변형은 정확히 경계면에서 발생하는 것이 아니라 경계면에 근접하여 RC 구조물을 둘러싸고 있는 지반층에서 발생하기 때문에 두께가 없는 경계면 요소를 사용하는 경우 경계면의 실제 거동을 표현할 수 없다<sup>1)</sup>.

본 연구에서는 경로의존적 RC 및 지반의 구성모델에 좀 더 정확한 경계면 거동을 표현하기 위해 두께를 갖는 탄소성 경계면 모델을 제안하여 유한요소 내진 해석 프로그램을 개발하였고 이를 이용해 지진하중을 받는 RC 지하철 정거장 구조물에 대해 RC 구조물과 지반을 하나의 시스템으로 고려한 내진 해석을 수행하였다. 또한 대상 RC 구조물에서 사용 철근량이 다른 경우에 따른 해석을 실시하여 지진하중에 대한 지하 RC 정거장 구조물의 파괴 기구를 파악하였고 철근비의 영향에 따른 균열 형상 및 파괴 모드의 변화와 구조물의 손상 정도에 대해 분석하였다.

\* 정회원, 연세대학교 산업기술연구소 객원연구원, 공학박사

\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수, 공학박사

## 2. 재료 구성 모델

### 2.1 철근콘크리트 구성 모델

본 연구에서 사용되는 철근콘크리트 재료모델은 콘크리트와 철근에 대한 평균화된 구성법칙을 조합함으로써 구성되었다. 이 구성 모델에서는 대표 체적요소에서 정의된 평균화된 응력-변형률 관계를 사용함으로써 균열간격, 균열밀도 등의 크기에 무관하게 균열이 존재하는 콘크리트의 압축, 인장, 전단 및 철근의 인장에 대하여 유일성을 만족하는 구성방정식을 얻을 수 있다. 콘크리트내의 철근모델은 변형률경화 거동을 고려하여 이중선형의 평균응력과 평균변형률의 형태로 모델링 되었다<sup>2)</sup>.

### 2.2 지반 구성 모델

RC/지반 전체 시스템의 거동을 정확하게 나타내기 위해서는 지반의 경로의존적 구성 모델이 반드시 필요하다. 더욱이 구조물에 유발되는 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 연구에서는 반복주기하중을 받는 지반층의 비선형 응답을 예측할 수 있는 Ohsaki의 지반 모델을 이용하여 유한요소해석에 적용하였다<sup>3)</sup>.

### 2.3 탄소성 경계면 구성 모델

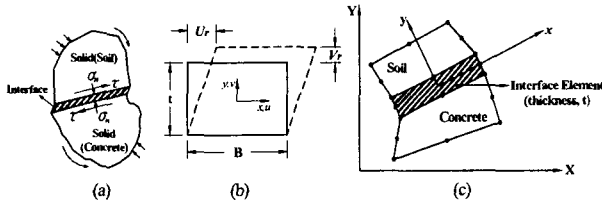


Fig. 1 Elasto-plastic interface model with thickness

부분적으로 탄성과 소성 상태가 공존하게 된다. 응력이 증가하는 동안 변형률의 변화는 식(1)와 같이 탄성과 소성성분의 합으로 가정되어 질 수 있다.

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

식(1)로부터 탄소성 변형에 대한 응력-변형률 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

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

식(2)를 행렬형태로 정리하면 식(3)과 같이 되고, 경계면의 탄소성 응력-변형률 관계를 얻을 수 있다.

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

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

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

$$a^T = \frac{\partial f}{\partial \sigma} = \left[ \frac{\partial f}{\partial \sigma_x}, \frac{\partial f}{\partial \sigma_y}, \frac{\partial f}{\partial \tau_{xy}} \right], \quad H : \text{Hardening function}, \quad a : \text{flow vector}$$

### 3. 지하철 정거장 구조물의 내진 성능 해석

#### 3.1 대상 구조물

본 연구에서 사용된 대상 구조물은 Fig. 2에 나타난 것처럼 지하철 정거장 구조의 대표적인 형태이다. 외폭 16.68m, 높이 13.25m의 RC 구조물이 폭 126.68m, 높이 20.25m의 지반 내에 위치하고 있다. 구조물의 각 층마다 5m 간격의 중간 기둥이 위치하고 있고, 위층은 0.7m×1.4m, 아래층은 0.6m×1.5m의 단면을 갖는다.

Fig. 2에 나타난 것처럼 RC와 지반의 사이에는 탄소성 경계면 요소로 모델링하였고, 기둥의 상하단 끝에는 기둥과 슬래브 사이에 불연속적인 변형이 발생하는 것을 방지하기 위해 RC joint 요소를 두었다. RC와 지반 그리고 경계면 요소는 8절점 quadrilateral 요소를 사용하였으며 RC joint 요소는 두께가 없는 6절점 요소로 모델링하였다. 또한 지반 양쪽 끝의 경계조건은 자유장 효과를 고려하여 중복 경계조건으로 고려하였다. Fig. 3은 지반의 종단면도를 나타낸 것이고, Table 1은 각 지반층의 재료 특성치를 나타낸 것이다.

#### 3.2 입력 지진가속도

본 연구에서 사용된 지진파는 고베 지진시 기록된 지진 가속도를 적용하였다. RC-지반 전체 시스템의 동적 응답을 표현하기 위해 수평방향과 수직방향의 지진가속도를 모두 고려하였다. 사용된 지진가속도는 수평방향 818gal, 수직방향 332gal의 최대가속도를 갖는 단주기파이다<sup>6)</sup>.

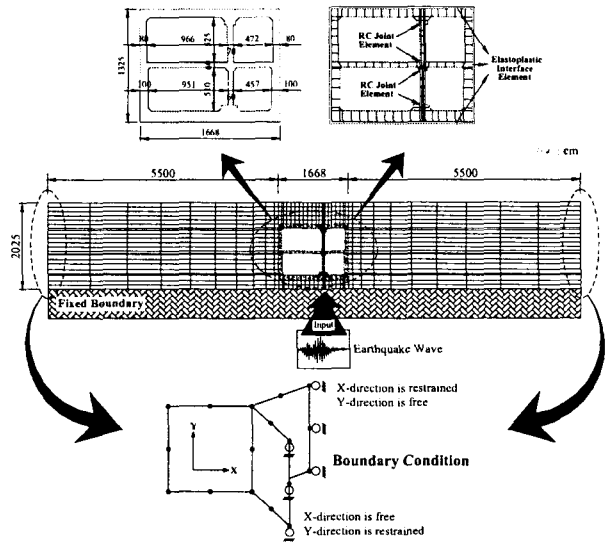


Fig. 2 Finite element mesh and boundary conditions of RC-soil system

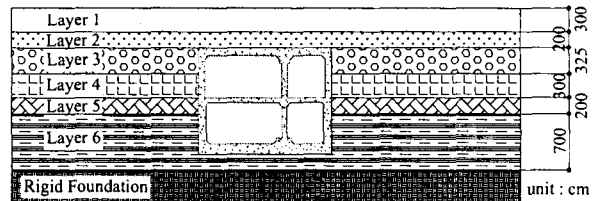


Fig. 3 Profile of surrounding soil

Table 1 Characteristic variation of surrounding soils

	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5	Layer 6
Layer thickness (m)	3.0	2.0	3.25	3.0	2.0	7.0
SPT-N	10	18	20	15	30	42
$V_s$ (m/s)	205.0	246.0	256.6	228.7	301.0	345.3
$G_s$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	757.1	1212	1318	1047	1823	2386
$E_s$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	2196	3514	3822	3037	5288	6921
Weight density (t/m <sup>3</sup> )	1.8	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Soil type	clay	sand	clay	sand	clay	clay

### 3.3 지진하중에 대한 내진 거동 분석

지진하중에 대한 지하 RC 구조물의 파괴 기구를 파악하고 철근비의 변화에 따른 전체 RC 정거장 구조물의 거동 변화를 분석하기 위해 중간 기둥 부분의 철근비를 다르게 하여 해석을 실시하였다. Table 2에 나타난 바와 같이 중간 기둥의 종방향 철근비 5.1%, 횡방향 철근비 0.15%인 Case A와 기둥의 횡철근량을 늘린 경우(Case B), 횡철근량은 늘리고 주철근량은 줄인 경우(Case C)에 대한 해석을 실시하여 각 경우의 거동 특성을 비교 분석하였다.

Table 2 Reinforcement ratio of intermediate column

Reinforcement Ratio	Case A	Case B	Case C
Longitudinal Reinforcement	5.1%	5.1%	3.67%
Web Reinforcement	0.15%	0.76%	0.76%

#### 3.3.1 RC 구조물의 비탄성 거동

지진에 의한 전체 RC 구조물의 손상정도를 나타내기 위해서는 시간영역에서의 비탄성 해석 결과가 필요하다. 따라서 각 경우에 대해 시간영역에서 RC에 유발되는 평균 전단력을 Fig. 4에 나타내었고, 시간영역에서의 RC 구조물의 비탄성 변형률을 Fig. 5에 나타내었다. 이 값은 RC 구조물의 손상 정도와 동적 하중이 작용한 후에 잔류변형이 어느 정도인지를 정성적으로 표현한다. 그림에서 나타난 바와 같이 Case A는 10.22초에 파괴가 발생하였고 Case B는 17.04초에 파괴가 발생하였지만 Case C는 파괴가 발생하지 않았다. 이것은 중간 기둥의 철근비를 변화시킴으로 인해 구조물의 전단 저항력과 연성이 증가하게 되고 이로 인해 구조물에 유발되는 손상 정도가 줄어들게 되어 파괴가 발생하지 않게 됨을 알 수 있다.

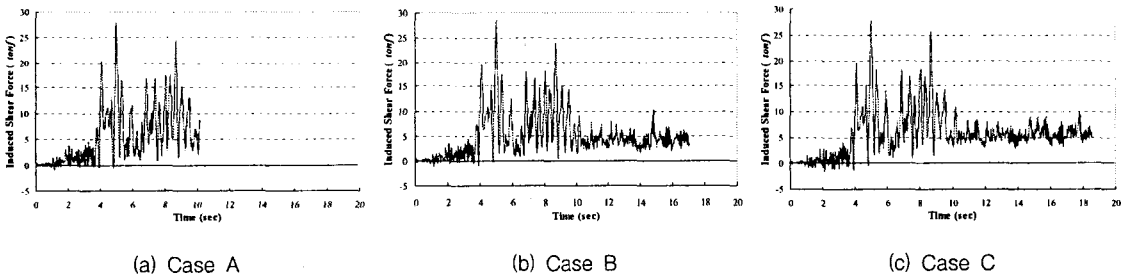


Fig. 4 Induced shear force to RC of RC-soil system in time domain

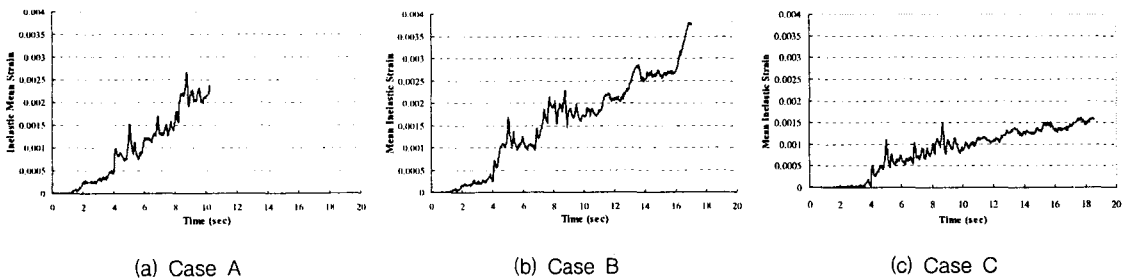


Fig. 5 Damage level in the RC of RC-soil system in time domain

### 3.3.2 RC 구조물의 균열 형태

1995년 일본의 고베 지진에서 나타난 지하 RC 박스 구조물의 전형적인 손상 형태는 중간 기둥의 파괴였다. Fig. 6은 고베 지진시에 발생한 Kamisawa 역의 중간 기둥의 실제 파괴 형상을 나타낸 것이다. Fig. 6에 나타난 것과 같이 상층의 중간 기둥에서 전단 균열에 의한 치명적인 손상이 나타났다. 그러나 하층 기둥에서는 파괴에 이를 정도의 큰 손상은 나타나지 않았고 전단 균열도 크게 발생되지 않은 것을 볼 수 있다. 따라서 이 RC 구조물의 전형적인 파괴 형태는 상층 기둥에 집중된 전단 균열과 손상으로 인한 중간 기둥의 파괴라 할 수 있다.

본 연구에서는 지하 RC 정거장 구조물이 파괴에 도달하게 될 때의 파괴 위치와 파괴 모드를 분석하기 위해 Case A와 Case B의 파괴시의 균열 형상을 나타내었다.

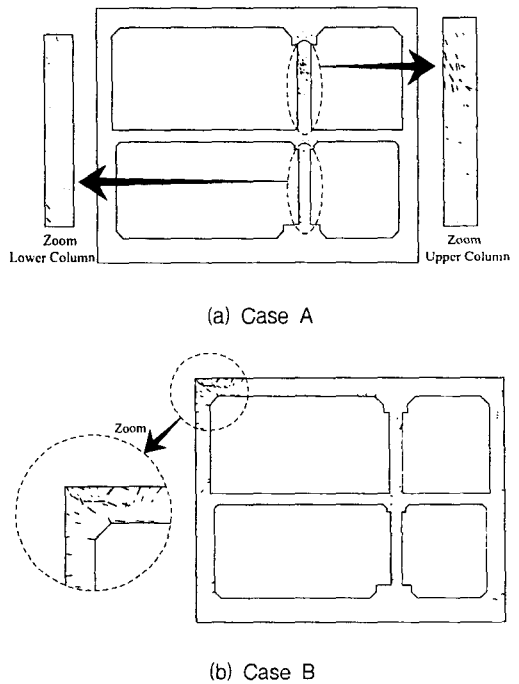
Fig. 7에 나타난 바와 같이 Case A의 경우에는 상층 기둥에 큰 균열이 집중되고 하층 기둥과 다른 부분에는 균열이 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 또한 상층 기둥에 나타나는 큰 전단 균열에 의해 기둥에서 전단 파괴가 발생하게 되는 것을 예측할 수 있다. 이는 Fig. 6에 나타난 Kamisawa 역에서의 파괴 형태와 동일한 것으로 실제 지진시의 지하 RC 구조물의 파괴 형태를 잘 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 횡철근량이 증가된 Case B의 경우에는 상부 슬래브에 균열이 집중되고 있고 기둥에는 큰 균열이 나타나지 않아 구조물의 치명적인 파괴로 나타나는 기둥의 전단 파괴는 발생되지 않고 상부 슬래브의 휨파괴로 유도됨을 알 수 있다.

### 3.3.3 RC 구조물의 파괴 모드

Fig. 8은 사용 철근량을 달리한 RC 박스 구조물의 지진하중에 대한 변형 형상 및 시스템 파괴 여부를 나타낸 것이다. Case A의 경우 상층 기둥에 변형이 집중적으로 발생하게 되고 결과적으로 상층 기둥에서 전단 파괴가 발생하게 되는 것을 볼 수 있다. 횡철근량의 증가로 인해 전단 저항력이 높아진 Case B의 경우에는 기둥에서는 변형이 크게 발생되지 않아 치명적인 전단파괴는 나타나지 않으나 상부 슬래브의 휨파괴로 유도되는 것을 알 수 있다. 또한 주철근량의 감소로 인해 연성이 증가된 Case C의 경우에는 파괴가 발생하지 않고 변형이 집중되는 현상도 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 이와 같은 해석 결과에 따라 철근비의 변화에 의해 구조물의 전단저항성과 연성을 조절할 수 있다는 것을 알 수 있고, 이러한 구조물의 전단저항성과 연성이 구조물의 내진 성능에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.



(a) Upper level (b) Lower level  
Fig. 6 Damage observation in Kamisawa station<sup>6)</sup>



(a) Case A (b) Case B  
Fig. 7 Crack pattern of the structure at the failure

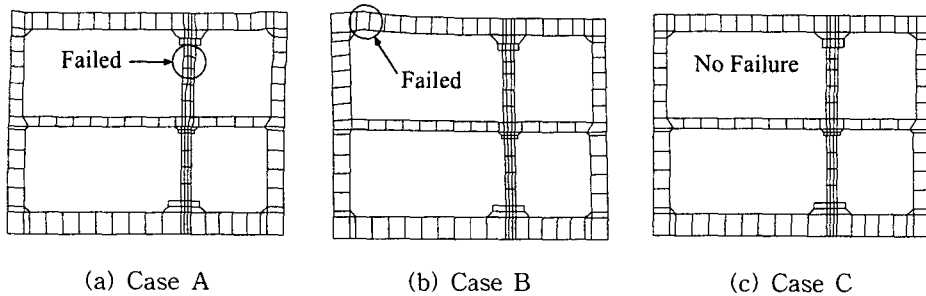


Fig. 8 Deformation profile of RC at failure

#### 4. 결 론

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 주변 지반을 포함하는 지하 RC 정거장 구조물의 해석에서 지반의 영향 및 구조물과 지반 사이 경계면의 영향을 고려하기 위해 두께를 갖는 탄소성 경계면 모델을 이용한 지하 RC 구조물의 해석 기법을 개발하였다.
- 2) 지진하중에 대한 지하 RC 구조물의 파괴거동을 분석한 결과 선행 해석에 따른 철근 배근을 통해 구조물의 전단 저항력과 연성, 이에 따른 구조물에 유발되는 손상을 조절할 수 있었고, 해석결과를 이용하여 구조물의 변형 형상, 균열 분포 및 파괴모드 등이 유리하도록 설계하여 지하에 위치하는 RC 지하철 정거장의 치명적인 파괴를 피할 수 있다는 것을 확인하였다.
- 3) 지반에 둘러 싸여 있는 지하 RC 구조물의 경우 지반의 영향이 고려된 구조물의 전단 저항성과 연성이 구조물의 내진 성능에 큰 영향을 미치며 내진설계시 지하 RC 구조 전체 시스템을 고려한 해석을 통해 보다 합리적인 설계가 가능하다.

#### 참고문헌

1. 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.
2. Okamura H. and Maekawa K. (1991), *Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete*, Gihodo-Shuppan, Tokyo, Japan.
3. Ohsaki, Y. (1982), "Dynamic Nonlinear Model and One-Dimensional Nonlinear Response of Soil Deposits", *Research Report 82-02*, Dept. of Architecture, University of Tokyo.
4. 남상혁, 송하원, 변근주 (2002), "탄소성 경계면 요소를 고려한 지하 철근콘크리트 박스의 구조성능 평가", *대한토목학회 논문집*, 제 22권, 제 2-A호, pp. 423~436.
5. 남상혁 (2002), *탄소성 경계면 모델을 이용한 지하 철근콘크리트 구조물의 내진 해석*, 박사학위 논문, 연세대학교.
6. An X. (1996) *Failure Analysis and Evaluation of Seismic Performance for Reinforced Concrete in Shear*, Ph.D. Dissertation, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
7. Shawky A. A. (1994), *Nonlinear Static and Dynamic Analysis for Underground Reinforced Concrete*, Ph.D. Dissertation, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
8. 남상혁, 송하원, 변근주 (2001), "탄소성 경계면 요소를 고려한 철근콘크리트 지하 구조물의 해석", *2001년도 가을 학술발표회 논문집*, 한국콘크리트학회, pp. 471~476.
9. 남상혁, 송하원, 변근주 (2002), "탄소성 경계면 요소를 고려한 지하 철근콘크리트 박스의 내진 해석", *2002년도 춘계 학술발표회 논문집*, 한국지진공학회, Vol. 6, No.1, pp. 109~116.