

탄소성 경계면 요소를 고려한  
지하 철근콘크리트 박스의 내진 해석  
Seismic Analysis of Underground RC Box  
considering Elastoplastic Interface Element

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

ABSTRACT

Since experimental evaluation of underground RC structures considering interaction with surrounding soil medium is quite difficult to be simulated, the evaluation for the 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 of interface is proposed and applied for the analysis considering the interaction. Failure mechanism of underground RC box of two story and two box subway station under seismic action is obtained and the effects of ductility of intermediate column to entire underground RC system are investigated through analysis.

1. 서론

지진은 우리가 경험하는 자연재해 중에서 가장 극적인 지각변동과 인명 및 재산 피해를 가져오는 무서운 현상으로서, 그 역사는 인류의 역사와 함께 기록되어 왔다. 이와 같은 지진은 지진 다발 지역인 지진대에서 주로 발생하고 있으나, 그 규모나 빈도의 차이는 있지만 지구 표면 어디에서나 발생할 수 있다는 것이 지진학자들의 일반적인 견해이다. 최근 들어 세계 각국의 잦은 지진으로 인해 전 세계적으로 지진에 대한 구조물의 안정성 확보에 대한 관심이 높아지고 있고 국내에서도 많은 관심이 집중되고 있다.

지진하중을 받는 철근콘크리트(이하 RC) 구조물의 해석, 설계 및 성능평가 등에 대해서는 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 지하 구조물도 지진에 대해 더 이상 안전하지 않다는 것이 판명되었고, 그에 따라 지하 구조물의 내진에 대한 연구의 필요성이 부각되고 있다. 하지만 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 필

\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

요하다. 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 강성이 크게 산정되어 응답이 작게 나타나게 된다. 따라서 적절한 경계면 모델의 적용이 매우 중요하다 하겠다.

RC와 지반 사이 경계면의 경우 거시적으로 보면 두께가 없지만 경계면의 변형은 정확히 경계면 위에서 발생하는 것이 아니라 경계면에 근접한 지반층에서 발생하기 때문에 두께가 없는 경계면 요소를 사용하는 경우 경계면의 실제 거동을 표현할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 좀 더 정확한 경계면 거동을 표현하기 위해 두께를 갖는 탄소성 경계면 모델을 개발하여 해석에 적용하였으며, 지진하중을 받는 지하 RC 박스 정거장 구조물에 대한 해석을 실시하여 그 거동의 특성을 분석하였다. 또한 철근비가 다른 경우에 대한 해석을 실시하여 지진하중에 대한 지하 RC 구조물의 파괴 기구를 파악하고 철근비의 변화에 따른 구조물의 거동 변화를 분석하였다.

## 2. 철근콘크리트 및 지반의 구성모델

### 2.1 철근콘크리트의 구성모델

본 연구에서 사용되는 철근콘크리트 재료모델은 콘크리트와 철근에 대한 평균화된 구성법칙을 조합함으로써 구성되었다(Okamura and Maekawa; 1991, Song et. al, 2002).

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 이중선형(bilinear)의 평균응력과 평균변형률의 형태로 모델링 되었다. 반복하중을 받는 경우에는 제하와 재하에 의한 내부의 곡선을 Kato모델(1979)과 코사인곡선에 의하여 표현되는 응력분포의 가정을 적용하였다.

### 2.2 지반의 구성모델

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 모델(Ohsaki, 1982)을 이용하여 유한요소해석에 적용하였다.

## 3. 탄소성 경계면 모델

지중 RC 구조물이 지반으로부터 토압에 의한 구속압을 받아 정적하중하에 구조물과 지반의 두 표면이 정상적으로 접촉되어 있는 대부분의 경우 두 표면 사이를 완전 부착으로 가정할 수 있으나, 반복 전단하중이나 지진하중 등이 작용하는 경우 접촉면상에 인장응력과 구조물의 흔들림이 발생하게 되어 불완전 부착이 된다. 더욱이 RC/지반 경계면의 경우 미끄러짐이 정확히 경계면 위에서 발생하는 것이 아니라 경계면에 근접한 지반층에서 발생하게 되기 때문에 두께가 없는 경계면 요소는 변형거동을 사실적으로 표현할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 두께를 갖는 경계면 모델에 대해 폭 B와 두께 t를 갖는 8절점 사각형요소로 표현하였고, 구조물-지반 경계면의 거동을 보다 사실적으로 나타내기 위해 탄소성 구성식을 제안하여 해석에 적용하였다. 그림 1은 두께를 갖는 경계면 모델의 기본 형태를 나타낸 것이다.

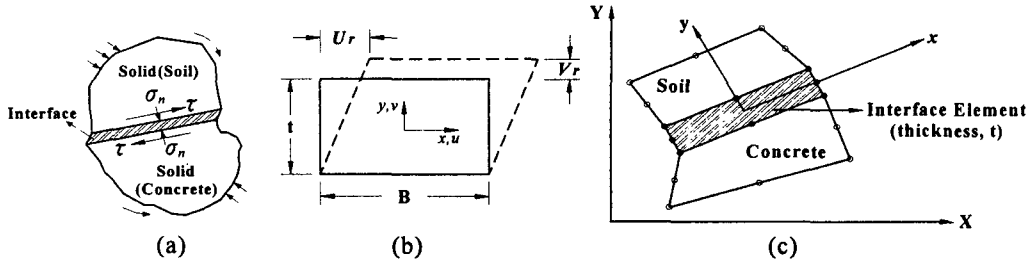


그림 1. 두께를 갖는 경계면 모델의 형태

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

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

식(1)에서 탄성 변형률 증분은 식(2)와 같이 나타낼 수 있고, 소성 변형률 증분은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(d\varepsilon_{ij})_e = \frac{dS_{ij}}{2\mu} + \frac{(1-2\nu)}{E} \delta_{ij} d\sigma_{kk} \quad (2)$$

$$(d\varepsilon_{ij})_p = d\lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3)$$

여기서,  $Q$ 는 소성포텐셜,  $d\lambda$ 는 소성 계수의 향으로 정의되는 직교상수이다.

식(3)은 항복 후의 소성흐름을 지배하기 때문에 흐름법칙으로 정의된다. 소성포텐셜  $Q$ 는  $J_2 (= \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij})$ 와  $J_3 (= \frac{1}{3} S_{ij} S_{jk} S_{ki})$ 의 함수로서  $Q \equiv f$ 가 되면 연관흐름법칙(associate flow rule)으로 나타낼 수 있다.

$$(d\varepsilon_{ij})_p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4)$$

이에 따라 탄소성 변형에 대한 응력-변형률 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{dS_{ij}}{2\mu} + \frac{(1-2\nu)}{E} \delta_{ij} d\sigma_{kk} + d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (5)$$

이러한 관계를 행렬 형태로 나타내기 위해 항복함수를 식(6)과 같이 정의한다.

$$f(\sigma) = k(x) \quad (6)$$

여기서,  $\sigma$ 는 응력벡터이고  $x$ 는 항복면의 팽창을 좌우하는 경화변수이다.

컨시스턴시 조건은 식(7)과 같으며, 이를 다시 쓰면 식(8)과 같다.

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma} d\sigma + \frac{\partial f}{\partial x} dx = 0 \quad (7)$$

$$\mathbf{a}^T \mathbf{D} d\varepsilon^e + \frac{\partial f}{\partial x} dx = 0 \quad (8)$$

여기서,  $\mathbf{a}$ 는 흐름벡터를 나타내며  $\mathbf{a} = \frac{\partial f}{\partial \sigma}$ ,  $\mathbf{a}^T = \left[ \frac{\partial f}{\partial \sigma_x}, \frac{\partial f}{\partial \sigma_y}, \frac{\partial f}{\partial \tau_{xy}} \right]$ 이다.

식(8)은 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{a}^T \mathbf{D} (d\varepsilon - d\varepsilon^p) + \frac{\partial f}{\partial x} dx = 0 \quad (9)$$

식(9)에 식(4)를 도입하여  $d\lambda$ 에 관하여 정리하면,

$$d\lambda = \frac{1}{H + \mathbf{d}_D^T \mathbf{a}} \mathbf{d}_D^T d\boldsymbol{\varepsilon}, \quad \mathbf{d}_D = D \mathbf{a} \quad (10)$$

따라서 식(10)을 다음 식(11)에 대입하면 식(12)와 같은 응력-변형률 관계가 주어진다.

$$d\boldsymbol{\sigma} = D (d\boldsymbol{\varepsilon} - d\boldsymbol{\varepsilon}^p) = D (d\boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{a} d\lambda) \quad (11)$$

$$d\boldsymbol{\sigma} = \left[ D - \frac{1}{H + \mathbf{d}_D^T \mathbf{a}} D \mathbf{a} \mathbf{d}_D^T \right] d\boldsymbol{\varepsilon} = \left[ D - \frac{1}{H + \mathbf{d}_D^T \mathbf{a}} \mathbf{d}_D \mathbf{d}_D^T \right] d\boldsymbol{\varepsilon} \quad (12)$$

즉, 경계면의 탄소성 응력-변형률 관계를 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\boldsymbol{\sigma} = D_{ep} d\boldsymbol{\varepsilon} = \left[ D - \frac{\mathbf{d}_D \mathbf{d}_D^T}{H + \mathbf{d}_D^T \mathbf{a}} \right] d\boldsymbol{\varepsilon} \quad (13)$$

항복기준은 소성 변형이 시작될 때의 응력단계를 결정하게 되므로 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트나 지반에 적용 가능한 Mohr-Coulomb 항복기준을 적용하였고 항복함수는 식(14)와 같이 나타낼 수 있다(Owen and Hinton, 1980).

$$f(\boldsymbol{\sigma}) = \frac{1}{3} J_1 \sin \phi + \sqrt{J_2} \left( \cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \phi \right) \quad (14)$$

#### 4. 지하 RC 박스의 내진 해석

##### 4.1 대상 구조물

본 연구에서 사용된 대상 구조물은 그림 2에 나타낸 것처럼 지하철 정거장 구조의 대표적인 형태이다. 외폭 16.68m, 높이 13.25m의 RC 구조물이 폭 12.68m, 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.

그림 2에 나타난 것처럼 RC와 지반의 사이에는 탄소성 경계면 요소로 모델링을 하였고, 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 모델링 하였다. 또한 지반 양쪽 끝의 경계조건은 자유장 효과를 고려하여 중복된 경계조건으로 고려하였다. 그림 3은 지반의 종단면도를 나타낸 것이고, 표 1은 각 지반층의 재료 특성치를 나타낸 것이다.

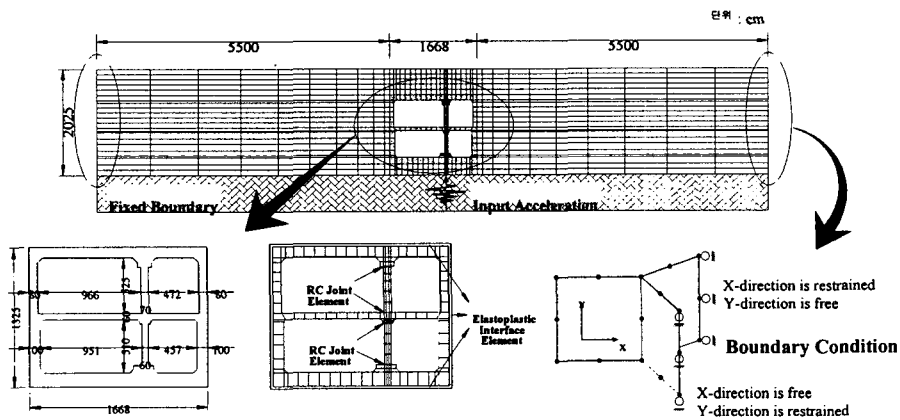


그림 2. 대상 구조물의 형태 및 경계조건

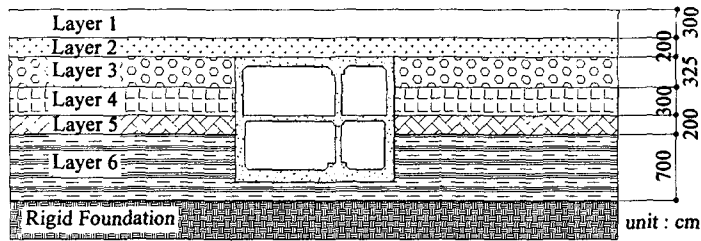


그림 3. 지반층의 단면도

표 1. 지반층의 재료 특성치

	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
Vs (m/s)	205.0	246.0	256.6	228.7	301.0	345.3
Gs (kgf/cm <sup>2</sup> )	757.1	1212	1318	1047	1823	2386
Es (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

#### 4.2 입력 지진가속도

본 연구에서 사용된 지진파는 고베지진시 기록된 지진 가속도를 적용하였다. RC/지반 전체 시스템의 동적 응답을 표현하기 위해 수평방향과 수직방향의 지진가속도를 모두 고려하였다. 그러나 지진가속도는 기초 암반에서의 값이 아니라 지표면에서 측정된 기록이기 때문에 실제의 입력 지진파보다 다소 증폭된 값일 수 있지만 심한 지진이 발생한 경우의 구조물의 거동을 분석하기 위해 그대로 사용하였다. 그림 4는 수평방향과 수직방향의 지진가속도를 나타낸 것으로 각각 818gal과 332gal의 최대가속도를 갖고, 시간 간격은 0.02초이다.

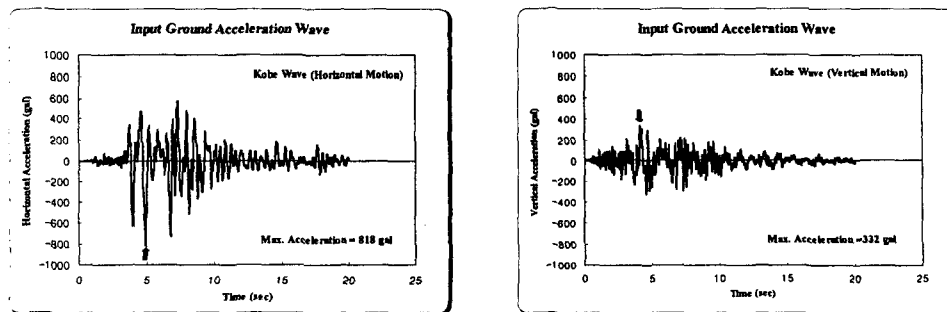


그림 4. 수평 및 수직방향 지진 가속도

#### 4.3 지진하중에 대한 해석 결과

지진하중에 대한 지하 RC 구조물의 파괴 기구를 파악하고 철근비의 변화에 따른 전체 정거장 RC 구조물의 거동 변화를 분석하기 위해 기둥 부분의 철근비를 다르게 하여 해석을 실시하였다. 표 2에 나타낸 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.

표 2. Case별 중간 기둥의 철근비

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

4.3.1 RC 구조물의 비탄성 거동

지하 RC 구조물의 응답과 RC/지반 사이의 상호작용을 논의하기 위해 전단력으로 인해 유발되는 RC의 손상과 변형의 전단모드에 대해 분석하였다.

RC 면내 응력의 2차 불변량의 평균과 같은 평균 전단응력( $J_s$ )은 평균 전단강도를 나타낸다. 따라서 식(15)와 같이 평균 전단강도에 대상 단면의 면적을 곱하게 되면 모든 요소에서의 평균 전단력을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 J_{2s} &= \sqrt{\frac{1}{3} ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_1 \sigma_2)} \dots \dots (\text{local}) \\
 J_s &= \int_{\text{element}} J_{2s}(x, y) dx dy / A \dots \dots (\text{global}) \\
 V &= J_s \times A_c, \quad A_c = \text{RC의 대상 단면적}
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

1차 변형을 불변량( $I_1'$ )은 균열발생과 면내 요소의 면적 변화 및 균열 발생과 밀접한 관계가 있다. 평균 변형을 불변량( $I'$ )으로 표시되는 RC 평균 변형률은 모든 RC 요소에 대한  $I_1'$ 의 평균값이다. 이 값은 RC가 탄성 전단 거동을 할 경우 잔류변형이 존재하지 않으면 하중 제거 후에 0이 된다. 따라서 평균 변형률  $I'$ 는 비탄성 거동시 철근콘크리트의 손상의 정도를 표현하게 되고 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

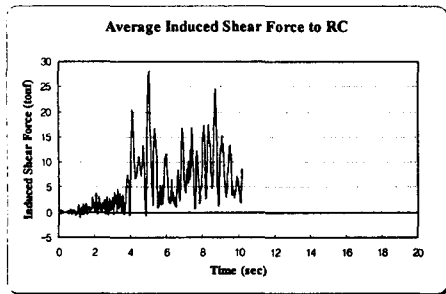
$$I = \sum_{\text{all elements}} I_1(x, y) dx \cdot dy / A, \quad I_1 = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}
 \tag{16}$$

여기서,  $\epsilon_1$ 과  $\epsilon_2$ 는 주변형률을 나타내며,  $A$ 는 RC 요소의 전체 면적을 나타낸다.

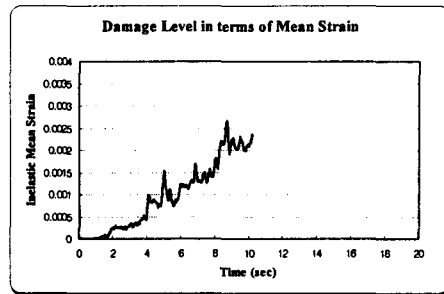
위의 관계에 따라 각 경우에 대해 RC에 유발되는 전단력과 평균 변형률 항에서의 손상 단계를 그림 5 ~ 그림 7에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 Case A는 10.22초에 파괴가 발생하였고 Case B는 17.04초에 파괴가 발생하였지만 Case C는 파괴가 발생하지 않았다. 이것은 기둥의 철근비를 변화시킴으로 인해 구조물의 전단 저항력과 연성이 증가하게 되기 때문이다. 이로 인해 구조물에 유발되는 손상 단계도 줄어들게 됨을 알 수 있다.

4.3.2 지하 RC 박스의 파괴 기구

그림 8은 각 경우에 대한 RC 박스 구조물의 변형 형상 및 시스템 파괴 여부를 보여준다. Case A의 경우 상층 기둥에 변형이 집중적으로 발생하게 되고 결과적으로 상층 기둥에서 전단파괴가 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 휨파괴가 야기된다. 또한 주철근량의 감소로 인해 연성이 증가된 Case C의 경우에는 파괴가 발생하지 않게 되고 변형이 집중되는 현상도 발생하지 않게 된다.

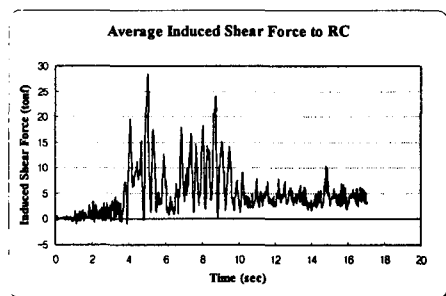


(a) 구조물에 유발되는 평균 전단력

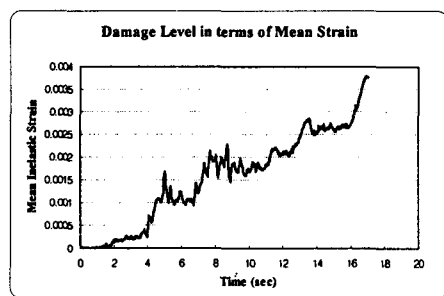


(b) 구조물에 유발되는 손상 정도

그림 5. Case A의 해석 결과

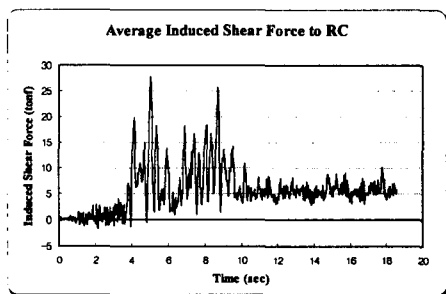


(a) 구조물에 유발되는 평균 전단력

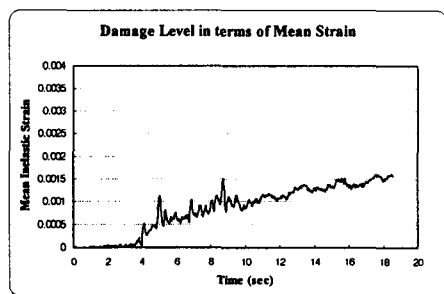


(b) 구조물에 유발되는 손상 정도

그림 6. Case B의 해석 결과

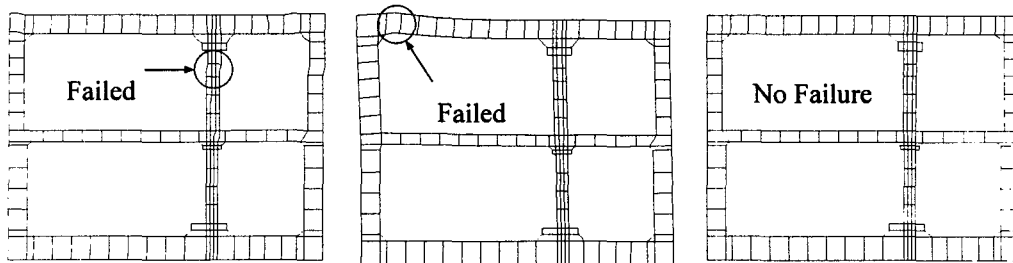


(a) 구조물에 유발되는 평균 전단력



(b) 구조물에 유발되는 손상 정도

그림 7. Case C의 해석 결과



(a) Case A의 변형 형상

(b) Case B의 변형 형상

(c) Case C의 변형 형상

그림 8. 철근비 변화에 따른 변형 형상

## 5. 결론

본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) RC/지반 사이의 경계면 거동을 정확히 표현하기 위해 두께를 갖는 탄소성 경계면 요소를 제안하여 해석에 적용한 결과 지하 RC 구조 시스템의 지반 내에서의 동적 거동을 잘 표현할 수 있었다.
- (2) 주철근량과 횡철근량을 합리적으로 산정하여 철근 배근에 적용함으로써 구조물의 전단 저항력과 연성, 이에 따른 구조물에 유발되는 손상을 조절할 수 있었다.
- (3) 철근비의 변화에 따른 구조물의 거동을 분석한 결과 구조물의 전단 저항성과 연성이 구조물의 내진 성능에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 따라서 내진설계시 지하 RC 구조 전체 시스템을 고려한 합리적인 해석을 통해 적절한 설계가 가능함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. 송하원, Maekawa, K., 철근 콘크리트 구조물의 지진응답 해석, *한국콘크리트학회지*, 제 9권 1호, 1997. 2, pp. 36~43
2. 남상혁, 변근주, 송하원, 박성민 (2000) 경계면 요소를 고려한 지하 철근콘크리트 구조물의 지진 해석, *2000년도 가을 학술발표회 논문집 (I)*, 한국콘크리트학회, pp. 87~92.
3. An, X. (1996) *Failure Analysis and Evaluation of Seismic Performance for Reinforced Concrete in Shear*, Ph.D. dissertation, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
4. Chen W. and Saleeb A. (1994) *Constitutive Equations for Engineering Materials*, Elsevier Science, Netherlands
5. Kato, B. (1979) Mechanical Properties of Steel under Load Cycles Idealizing Seismic Action, *CEB Bulletin D'Information*, 131, pp. 7-27.
6. Nguyen, M., Yukio, A., Keizo, O., and Yasuaki, M. (2000) An Idea of Modelling Soil-RC Duct-type Interface under Seismic Loads", *Proc. of JCI*, Vol. 22, No. 3
7. Ohsaki, Y. (1982) *Dynamic Nonlinear Model and One-Dimensional Nonlinear Response of Soil Deposits*, (Research Report 82-02), Dept. of Architecture, University of Tokyo
8. Okamura, H., and Maekawa, K. (1991) *Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete*, Gihodo, Tokyo
9. Owen, D. R. J., and Hinton, E. (1980) *Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice*, Pineridge Press Limited, U.K.
10. Shawky, A. A. (1994) *Nonlinear Static and Dynamic Analysis for Underground Reinforced Concrete*, Ph.D. dissertation, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
11. Song H.-W., Shim S.-H., Byun K.-J. and Maekawa K. (2002) Failure Analysis of RC Shell Structure using Layered Shell Element with Pressure Node, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, May, 2002.
12. 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.