



유한요소법을 이용한 철근콘크리트 지하철 정거장 구조물의 내진 해석

남상혁^{1)*} · 송하원¹⁾ · 변근주¹⁾

¹⁾연세대학교 토목공학과

(2002년 8월 28일 원고접수, 2003년 2월 28일 심사완료)

Seismic Analysis of RC Subway Station Structures Using Finite Element Method

Sang-Hyeok Nam^{1)*}, Ha-Won Song¹⁾, and Keun-Joo Byun¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Yonsei University, Seoul 122-749, Korea

(Received August 28, 2002, Accepted February 28, 2003)

ABSTRACT

Even though a lot of advanced researches on analysis, design, and performance evaluation of reinforced concrete (RC) under seismic action have been carried out, there has been only a few study on seismic analysis of underground RC structures surrounding soil medium. Since the underground RC structures interact with surrounding soil medium, a path-dependent soil model which can predict the soil response is necessary for analyzing behavior of the structure inside soil medium. The behavior of interfacial zone between the RC structure and the surrounding medium should be also considered for more accurate seismic analysis of the RC structure.

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 structures. A finite element analysis technique is developed by applying aforementioned constitutive equations and is verified by predicting both static and dynamic behaviors of RC structures. Then, failure mechanisms of underground RC structure under seismic action are numerically derived through seismic analysis of underground RC station structure under different seismic forces. Finally, the changes of failure mode and the damage level of the structures are also analytically derived for different design cases of underground RC structures.

Keywords : *finite element method, seismic analysis, underground RC structure, soil-structure interaction, elasto-plastic interface model*

1. 서 론

지진은 우리가 경험하는 자연재해 중에서 가장 심한 지각변동과 인명 및 재산 피해를 가져오는 무서운 현상으로서, 그 역사는 인류의 역사와 함께 기록되어 왔다. 흔히 지진이 발생하지 않는 것으로 인식되어 있는 한반도에서도 역사적으로 많은 지진 활동이 있었고 앞으로도 지진 발생 가능성을 예상해야 할 것이다. 최근 들어 세계 각국의 잦은 지진으로 인해 전 세계적으로 지진에 대한 구조물의 안전성 확보에 대한 관심이 높아지고 있고 국내에서도 많은 관심이 집중되고 있다. 하지만 아직도 국내의 많은 구조물들이 내진설계가 되어 있지 않아 중간 규모의 지진이 발생하더라도 엄청난 피해가 우려되고 있어 대책 마련이 시급한 실정이다.

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. 또한 산업의 발달과 도시의 팽창으로 도심지 지하철과 고속철도, 도로터널 등과 같은 많은 지하 구조물들의 건설이 활발히 이루어지고 있다. 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 RC 구조물은 대부분이 사회 기반시설이며 대형 구조물이기 때문에 합리적인 설계를 위해 지반을 포함하는 지하 구조 시스템의 거동을 정확하게 규명하는 것은 매우 중요하다. 하지만 주위의 지반 매체 내에서 거동을 하는 지하 RC 구조물의 실제 상황은 실험을 통해 표현하기가 매우 어렵고, 실제 구조물에 대해 그러한 실험을 수행하는 것이 불가능한 경우가 많다. 그렇기 때문에 해석

* Corresponding author

Tel : 02-2123-2806 Fax : 02-364-5300

E-mail : salute@cmme.yonsei.ac.kr

적인 방법을 통한 지하 RC 구조물의 거동 분석은 매우 유용하게 사용될 수 있다.

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 한다³⁾. 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 없다⁴⁾.

본 논문에서는 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 구조물의 파괴 기구를 파악하였고 철근비의 영향에 따른 균열 형상 및 파괴 모드의 변화와 구조물의 손상 정도에 대해 분석하였다. 한편 주변 지반 조건이 다른 경우에 대한 해석을 실시하여 지하 RC 구조물의 거동에 주변 지반이 미치는 영향을 분석하였다.

2. 재료의 구성 모델

2.1 철근콘크리트의 구성 모델

본 연구에서 사용되는 철근콘크리트 재료모델은 콘크리트와 철근에 대한 평균화된 구성법칙을 조합함으로써 구성되었다⁵⁾. 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 철근 모델은 변형률경화 거동을 고려하여 이중선형의 평균응력과 평균변형률의 형태로 모델링 되었다. 반복하중을 받는 경우에는 제하와 재재하에 의한 내부의 곡선을 Kato모델과 코사인곡선에 의하여 표현되는 응력분포의 가정을 적용하였다⁶⁾.

2.2 지반의 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 유한요소해석에 적용하였다⁷⁾. Ohsaki 모델에서는 Fig. 1과 같이 지반의 전단응력과 전단변형률 사이의 비선형 관계를 각각 편차응력 S_{ij} 의 제 2 불변량 $J_2 (= \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij})$ 와 편차변형률 e_{ij} 의 제 2 불변량 $J_2' (= \frac{1}{2} e_{ij} e_{ij})$ 으로 나타내었으며 식 (1)로 나타낸다.

$$\frac{J_2'}{M} = \frac{J_2}{2G_0M} \left(1 + A \left| \frac{J_2}{S_u M} \right|^B \right) \quad (1)$$

여기서,

$$B ; \text{지반종류계수} = \begin{pmatrix} \text{점성토: 1.4} \\ \text{사질토: 1.6} \end{pmatrix}$$

$$M ; \text{이력상수} = \begin{pmatrix} \text{재하: 1.0} \\ \text{제하 및 재재하: 2.0} \end{pmatrix}$$

$$A = \frac{G_0}{100 S_u} - 1$$

S_u ; 극한 전단강도

G_0 ; 초기 전단강성

$$= \frac{\gamma}{9.81} V_s^2 = 1200N^{0.8}$$

여기서, γ ; 지반의 단위중량 (tf/m^3)

N ; 표준관입시험의 N 치

V_s ; 전단파속도 (m/sec)

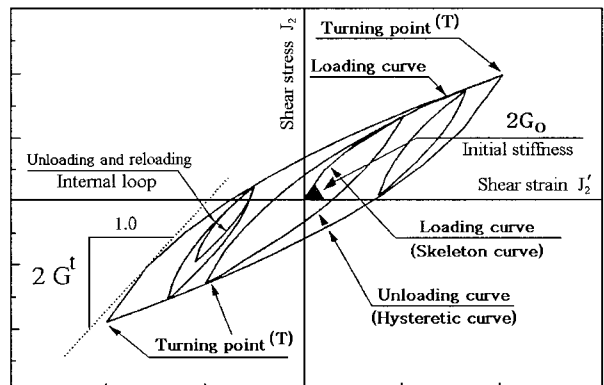


Fig. 1 Cycle shear model for soil

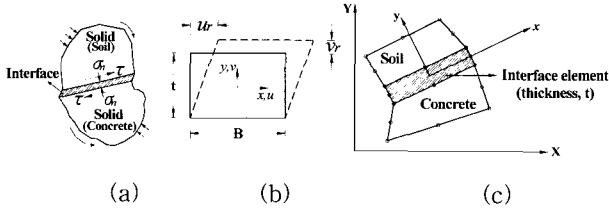


Fig. 2 Elasto-plastic interface model with thickness

2.3 탄소성 경계면 구성 모델

경계면의 거동 모델은 Fig. 2(a)에 나타낸 것과 같이 수직응력(σ_n)과 전단응력(τ)을 받는 전단변형을 기본적으로 포함한다. 많은 경계면에서 볼 수 있는 지배적인 변형 형태는 Fig. 2(b)에 나타낸 것과 같이 단순 전단변형을 상 태이다. 여기서, u 와 v 는 국소좌표 x, y 축에서의 변형 이고, u_r 과 v_r 은 각각 상대 전단변위와 수직변위를 나 타낸다. 본 연구에서는 Fig. 2(c)에 나타낸 것과 같이 두 겹을 갖는 경계면 모델에 대해 폭 B 와 두께 t 를 갖는 8절 점 사각형요소로 표현하였고, 구조물-지반 경계면의 거동 을 보다 사실적으로 나타내기 위해 탄소성 구성식을 제안 하여 해석에 적용하였다^{8,9)}.

초기항복이 발생한 후 경계구역의 거동은 부분적으로 탄성과 소성 상태가 공존하게 된다. 응력이 증가하는 동 안 변형률의 변화는 식(2)와 같이 탄성과 소성성분의 합 으로 가정되어 질 수 있다.

$$d\varepsilon_{ij} = (d\varepsilon_{ij})_e + (d\varepsilon_{ij})_p \quad (2)$$

식(2)에서 탄성 변형률 증분은 식(3)과 같이 나타낼 수 있고, 소성 변형률 증분은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$(d\varepsilon_{ij})_e = \frac{dS_{ij}}{2\mu} + \frac{(1-2\nu)}{E} \delta_{ij} d\sigma_{kk} \quad (3)$$

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

여기서, Q 는 소성포텐셜, $d\lambda$ 는 소성 계수의 향으로 정의되는 직교상수이다. 식(4)는 항복 후의 소성흐름을 지배하기 때문에 흐름법칙으로 정의된다. 소성포텐셜 Q 는 J_2 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.

$$(d\varepsilon_{ij})_p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (5)$$

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

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{dS_{ij}}{2\mu} + \frac{(1-2\nu)}{E} \delta_{ij} d\sigma_{kk} + d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (6)$$

이러한 관계를 행렬 형태로 나타내기 위해 항복함수를 식(7)과 같이 정의한다.

$$f(\sigma) = k(x) \quad (7)$$

여기서, σ 는 응력벡터이고 x 는 항복면의 팽창을 좌우 하는 경화변수이다.

식(7)은 다시 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(\sigma, x) = f(\sigma) - k(x) = 0 \quad (8)$$

컨시스턴시 조건은 식(9)와 같으며, 이를 다시 쓰면 식 (10)과 같다.

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma} d\sigma + \frac{\partial f}{\partial x} dx = 0 \quad (9)$$

$$a^T D d\varepsilon^e + \frac{\partial f}{\partial x} dx = 0 \quad (10)$$

여기서, a 는 흐름벡터를 나타내며 $a = \frac{\partial f}{\partial \sigma}$,

$$a^T = \left[\frac{\partial f}{\partial \sigma_x}, \frac{\partial f}{\partial \sigma_y}, \frac{\partial f}{\partial \tau_{xy}} \right] \text{이다.}$$

식(10)은 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$a^T D (d\varepsilon - d\varepsilon^p) + \frac{\partial f}{\partial x} dx = 0 \quad (11)$$

식(11)에 식(5)를 도입하여 $d\lambda$ 에 관하여 정리하면,

$$d\lambda = \frac{1}{H + d_D^T a} d_D^T d\varepsilon \quad (12)$$

여기서, $d_D = D a$

따라서 식(12)를 다음 식(13)에 대입하면 식(14)와 같은 응력-변형률 관계가 주어진다.

$$d\sigma = D (d\varepsilon - d\varepsilon^p) = D (d\varepsilon - a d\lambda) \quad (13)$$

$$d\sigma = \left[D - \frac{1}{H + d_D^T a} D a d_D^T \right] d\varepsilon \quad (14)$$

$$= \left[D - \frac{1}{H + d_D^T a} d_D d_D^T \right] d\varepsilon$$

즉, 경계면의 탄소성 응력-변형률 관계를 식(15)와 같이 나타낼 수 있다^{10,11)}.

$$d\sigma = D_{ep} d\varepsilon = \left[D - \frac{d_D d_D^T}{H + d_D^T a} \right] d\varepsilon \quad (15)$$

항복기준은 소성 변형이 시작될 때의 응력단계를 결정 하게 되므로 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서 항복함 수는 식(16)과 같은 콘크리트나 지반에 적용 가능한 Mohr-Coulomb 항복기준을 적용하였다^{12,13)}.

$$f(\sigma) = \frac{1}{3} I_1 \sin \phi + \sqrt{J_2} \left(\cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \phi \right) \quad (16)$$

3. 지하철 정거장 구조물의 동적 해석 방법

3.1 직접 시간적분법에 의한 시간영역 동적 해석

동적 운동방정식의 해를 유한요소법을 통해 구하는데

있어서 직접 시간적분법을 이용한다. 지하구조물의 해석에 있어 동적 운동방정식을 이용하여 직접적분법으로 해석하는 방법은 수식을 변화시키지 않고 단계적인 수치적분을 수행함으로써 응답을 구하는 방법이다. 임의의 시간 $t + \Delta t$ 에서의 응답을 구하는 방법은 전체 해석시간에 걸쳐 연속적인 거동을 한번에 구하는 것이 아니라, Δt 간격의 시간 단위에 대한 각각의 응답으로 나누어 구하는 것이다. 이 방법은 이전 시간단계 t 로부터 구한 응답요소 $\{u\}_n, \{\dot{u}\}_n, \{\ddot{u}\}_n$ 를 시간단계 $t + \Delta t$ 에서의 운동방정식에 포함시켜 다음 단계의 응답 $\{u\}_{n+1}$ 을 구하게 된다.

해석시 시간 증분의 크기 Δt 는 각 단계의 간격이 같은 경우 전체 해석 시간을 단계의 수로 나누어 구하고, 시간 증분 Δt 의 크기는 변위응답, 속도 및 가속도 등 해법 과정의 정확성, 안정성 및 계산의 양 등에 직접적인 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 최종 가속도의 값을 이전 시간 단계에서의 다른 응답의 함수로 나타내어 해석하는 Newmark 직접적분법을 이용하여 해석을 수행하였다. 동적 응답을 구하는 점진적인 해석법은 각 해석 단계에서의 최초 시점으로부터 최종 시점까지 적분을 통해 수치적으로 응답을 구하는 방법으로서 속도 및 변위에 대하여 식(17)과 식(18)을 통해 기본 동적 평형방정식을 구성할 수 있다¹¹⁾.

$$\{\dot{u}\}_{n+1} = \{\dot{u}\}_n + (1 - \gamma)\Delta t\{\ddot{u}\}_n + \gamma\Delta t\{\ddot{u}\}_{n+1} \quad (17)$$

$$\{u\}_{n+1} = \{u\}_n + \Delta t\{\dot{u}\}_n + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)\Delta t^2\{\ddot{u}\}_n + \beta\Delta t^2\{\ddot{u}\}_{n+1} \quad (18)$$

3.2 Body force 및 초기조건

구조물과 지반 사이 경계면을 통한 상호작용은 지하 RC 구조물의 응답에 큰 영향을 미친다. 경계구역에서는 구조물과 지반 사이의 미끄러짐(sliding)과 분리(separation) 거동의 두 가지 성분을 갖는다. 이 두 가지 성분은 초기조건에 의해 큰 영향을 받게 되는데 특히 분리거동의 경우에는 더욱 그렇다.

지진파가 시작되면 구조물과 지반의 변형 차이로 인해 RC와 지반 사이의 접촉면에서 인장력이 발생하게 된다. 이러한 인장력에 의해 낮은 변형 단계에서도 RC 표면과 지반 사이에서 분리가 발생하게 된다. 지진파에 의한 동적 하중의 방향이 바뀔 때 지반은 반대의 방향으로 변형이 자유롭게 되고, RC와 지반 사이가 분리되어 발생하는 공간으로 인해 구조물에 큰 힘이 유발된다. 이러한 힘들에 의해 구조물의 응답은 spike점을 갖는 파괴에 도달한

것으로 해석된다. 하지만 실제로는 이 인장력은 초기 토압으로 인한 압축력에 의해 약화될 것이므로 초기에 RC 표면과 지반 사이의 분리는 발생하지 않을 것이다. 따라서 RC와 지반 사이 경계구역의 비현실적인 거동을 피하기 위해 해석시 초기조건으로 body force를 고려하게 되면 보다 실제적인 응답을 얻을 수 있다^{11,14)}.

3.3 자유장 효과

자유장 효과(far field effect)는 지반의 무한영역 동적 해석에서 가장 큰 문제중의 하나이다. 일반적인 경계조건은 전달성 경계(transmitting boundary)를 표현하기가 어렵다. 경계구역은 구조물에 하중이 가해질 때 지반으로 전달되는 변위 또는 응력이 0이 되는 위치로 정해질 수 있다. 하지만 유한거리의 경계조건만으로는 이러한 정확한 결과를 얻기가 어렵기 때문에 지반의 경계에 중복 경계조건을 적용한다.

가상의 경계조건인 중복 경계 개념은 Fig. 3에 나타난 것처럼 서로 반대의 경계조건을 갖는 두 개의 경계로 분할하게 된다. 두 개의 중복된 경계구역은 각각 강성과 중량의 1/2만 갖게 되며 상호 보완적인 경계조건을 갖는다. 경계구역으로 전달된 파는 동시에 두 개의 경계구역으로 들어가게 된다. 가상 경계에 반사된 두 반사파는 같은 진폭을 갖지만 부호가 달라 반대의 위상을 갖게 되므로 반사된 후에 이 두 파는 서로 상쇄되어 구조물에 영향을 미치지 않게 될 것이다. 따라서 지반의 양 끝단에 중복 경계조건을 적용하여 자유장 효과를 고려하였다^{11,14,15)}.

4. 지하철 정거장 구조물의 내진 해석

4.1 대상 구조물

본 연구에서 사용된 대상 구조물로는 Fig. 4에 나타난 것처럼 지하철 정거장 구조의 대표적인 형태를 선택하였다. 외폭 16.68m, 높이 13.25m의 RC 구조물이 폭 126.68m, 높이 20.25m의 지반 내에 위치하고 있다. 구조물

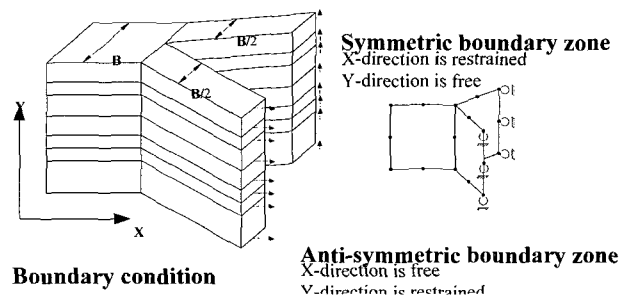


Fig. 3 Mixed mode boundary for representing far field

Table 1 Characteristic values 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_{so} (kgf/cm ²)	757.1	1212	1318	1047	1823	2386
E_{so} (kgf/cm ²)	2196	3514	3822	3037	5288	6921
Weight density (tf/m ³)	1.8	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Soil type	clay	sand	clay	sand	clay	clay

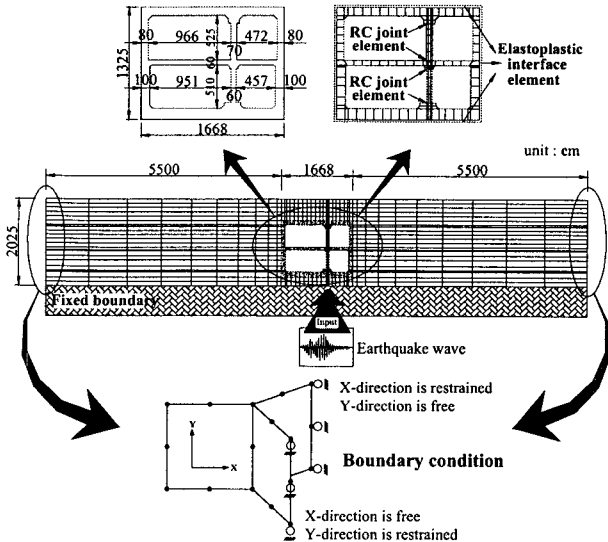


Fig. 4 Finite element mesh and boundary conditions of RC-soil system I

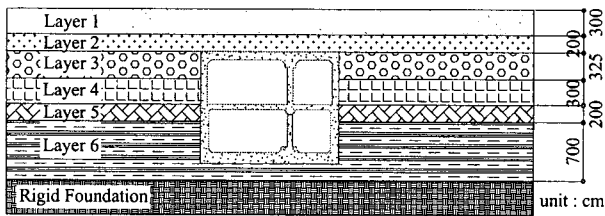


Fig. 5 Profile of surrounding soil

의 각 층마다 5m 간격의 중간 기둥이 위치하고 있고, 위 층은 0.7m×1.4m, 아래층은 0.6m×1.5m의 단면을 갖는다.

Fig. 4에 나타난 것처럼 RC와 지반의 사이에는 탄소성 경계면 요소로 모델링을 하였고, 경계면의 두께는 1cm로 하였다. 두께를 갖는 경계면 모델을 이용한 해석 기법 및 경계면의 두께에 관한 내용은 이전 연구를 참고하는 것으로 하였다^{10,11)}. 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 중복 경계조건으로 고려하였다. Fig. 5는 지반의 종단면도를 나타낸

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%

것이고, Table 1은 각 지반층의 재료 특성치를 나타낸 것이다.

4.2 입력 지진가속도

본 연구에서 사용된 지진파는 고베 지진시 기록된 지진 가속도를 적용하였다. RC-지반 전체 시스템의 동적 응답을 표현하기 위해 수평방향과 수직방향의 지진가속도를 동시에 고려하였다. 그러나 지진가속도는 기초 암반에서의 값이 아니라 지표면에서 측정된 기록이기 때문에 실제의 입력 지진파보다 다소 증폭된 값일 수도 있지만 심한 지진이 발생한 경우의 구조물의 거동을 분석하기 위해 그대로 사용하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 수평방향과 수직방향의 지진가속도를 나타낸 것으로 각각 818gal과 332gal의 최대 가속도를 갖는 단주기파이고, 입력 시간 간격은 0.02초이다.

4.3 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 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.

4.3.1 RC 구조물의 비탄성 거동

지진에 의한 전체 RC 구조물의 손상정도를 나타내기 위해서는 시간영역에서의 비탄성 해석 결과가 필요하다. RC 면내 응력의 2차 불변량의 평균과 같은 평균 전단응력 J_s 는 평균 전단강도를 나타내게 되므로 평균 전단

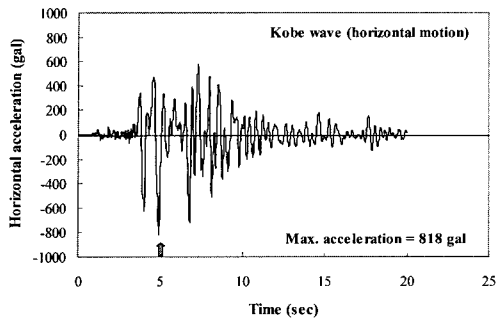


Fig. 6 Horizontal acceleration of earthquake wave

강도에 대상 단면의 면적을 곱하게 되면 모든 RC 요소에서의 평균 전단력을 구할 수 있다. 또한 1차 변형률 불변량 I_1' 은 균열발생과 면내 요소의 면적 변화에 밀접한 관계가 있다. 순수 전단 변형 상태에서는 잔류변형이 존재하지 않게 되고, 탄성 전단 거동의 경우 이 값은 0이 된다. 그러므로 평균 변형률 불변량은 비탄성 변형률 (inelastic strain)로 정의될 수 있고 철근콘크리트의 손상 정도를 나타내게 된다.

이에 따라 각 경우에 대해 전체 RC 구조물에 유발되는 시간영역에서의 평균 전단력을 Fig. 8에 나타내었고, 시간영역에서의 RC 구조물의 비탄성 변형률을 Fig. 9에 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 발생하

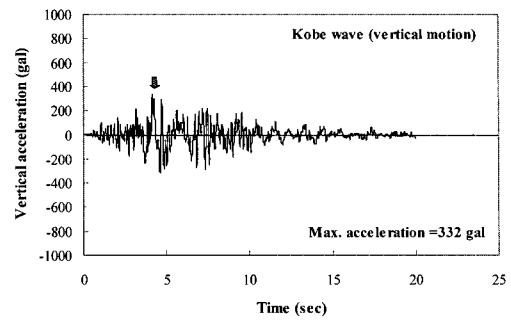


Fig. 7 Vertical acceleration of earthquake wave

였지만 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.

4.3.2 RC 구조물의 균열 형태

RC 정거장 구조물의 전형적인 파괴 형태는 상층 기둥에 집중된 전단 균열과 손상으로 인한 중간 기둥의 파괴라 할 수 있다. 1995년 일본의 고베 지진에서 나타난 지하 RC 박스 구조물의 전형적인 손상 형태도 중간 기둥의 파괴였다. Fig. 10은 고베 지진시에 발생된 Kamisawa역의 중간 기둥의 실제 파괴형상을 나타낸 것으로 상층의 중간 기둥에서 전단 균열에 의한 치명적인 손상이 나타났고 이로 인해 상부 슬래브가 내려앉게 되는 것을 알 수 있다.

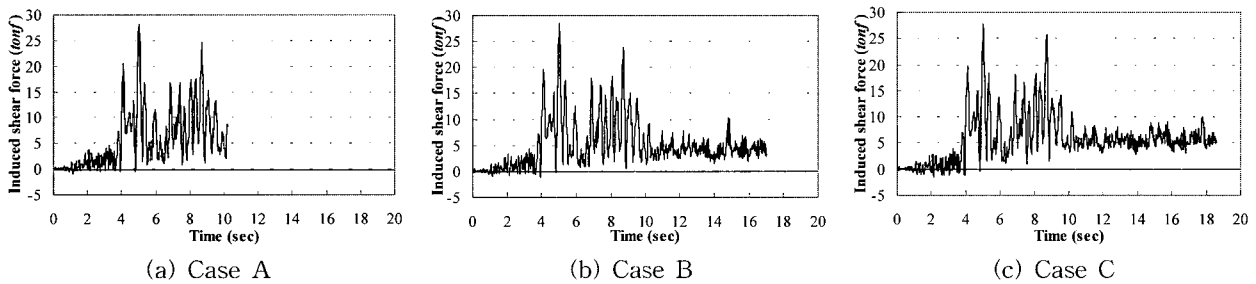


Fig. 8 Induced shear force to RC of RC-soil system I in time domain

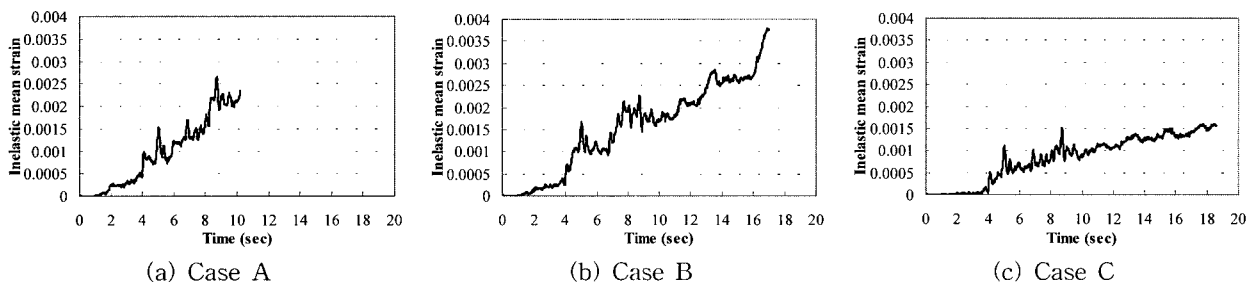


Fig. 9 Damage level in the RC of RC-soil system I in time domain

그러나 하층 기둥에서는 파괴에 이를 정도의 큰 손상은 나타나지 않았고 전단 균열도 크게 발생되지 않은 것을 볼 수 있다¹⁶⁾.

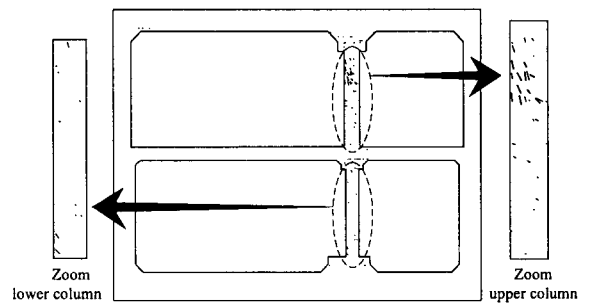
본 연구에서는 지하 RC 정거장 구조물이 파괴에 도달하게 될 때의 파괴 위치와 파괴 모드를 분석하기 위해 Case A와 Case B의 파괴시의 균열 형상을 Fig. 11에 나타내었다. Case A의 경우에는 상층 기둥에 큰 균열이 집중되고 하층 기둥과 다른 부분에는 균열이 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 또한 상층 기둥에 나타나는 큰 전단 균열에 의해 기둥에서 전단 파괴가 발생하게 되는 것을 예측할 수 있다. 이는 Fig. 10에 나타낸 Kamisawa 역에서의 파괴 형태와 동일한 것으로 실제 지진시의 지하 RC 구조물의 파괴 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.

4.3.3 RC 구조물의 파괴 모드

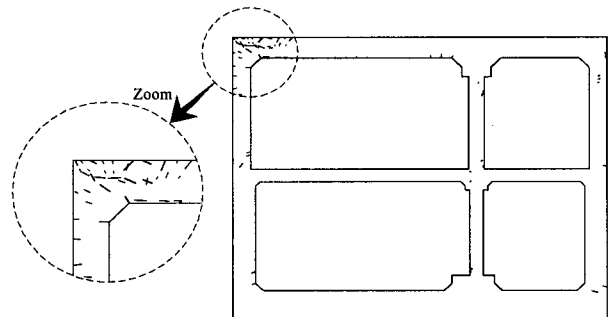
Fig. 12는 사용 철근량을 달리한 RC 박스 구조물의 지진하중에 대한 변형 형상 및 시스템 파괴 여부를 나타

낸 것이다. 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 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) Case A



(b) Case B

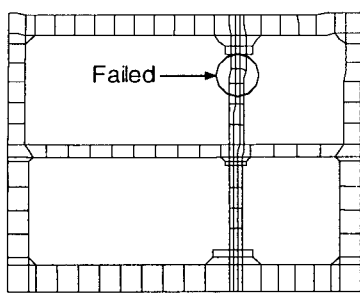


(a) Upper level

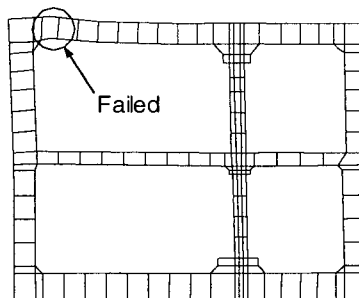
(b) Lower level

Fig. 10 Damage observed in Kamisawa station

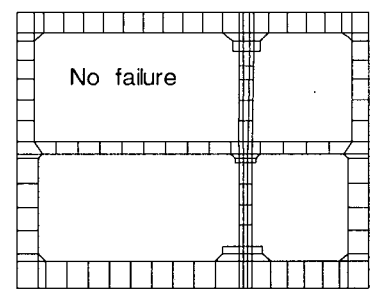
Fig. 11 Crack pattern of the structure at the failure



(a) Case A



(b) Case B



(c) Case C

Fig. 12 Deformation profile of RC at failure

4.3.4 주변 지반 조건에 따른 구조물의 내진 거동

지하 구조물은 지반 내에서 주변 지반과 함께 상호작용을 하며 거동을 하기 때문에 지진시에 주변 지반 조건에 따른 영향이 크게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 지진하중에 대한 주변 지반의 영향을 분석하기 위해 Fig. 13과 Fig. 14에 나타난 것과 같은 형태의 구조물에 대한 해석을 실시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 Fig. 4와 동일한 구조물-지반 시스템에 대해 주변 지반의 높이를 다르게 하여 해석을 실시하였다. Fig. 13은 지반의 높이가 7m이고 구조물의 일부가 지반 내에 있는 경우이다. 또한 Fig. 14는 2m의 지반 위에 구조물이 위치하고 있는 경우로서 지반에 둘러싸여 있지 않은 지상 구조물과 같은 조건을 나타낸다. 입력 지진하중도 고베지진시 기록된 지진가속도를 동일하게 적용하였으며, 다른 조건들도 모두 동일하게 하였다. Table 3은 지반의 재료 특성을 나타낸 것이다.

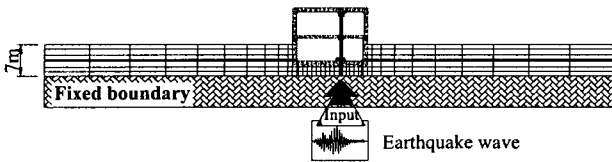


Fig. 13 Finite element mesh of RC-soil system II

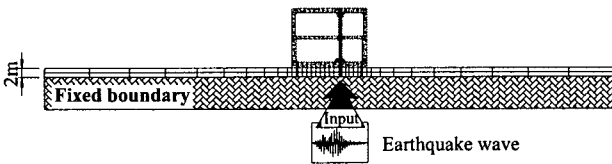


Fig. 14 Finite element mesh of RC-soil system III

Table 3 Characteristic values of surrounding soil

Layer thickness (m)	SPT -N	V_s (m/s)	G_{so} (kgf/cm^2)	E_{so} (kgf/cm^2)	Weight density (t/m^3)	Soil type
7.0, 2.0	42	345.3	2386	6921	2.0	clay

주변 지반 조건이 다른 RC 구조물의 지진하중에 대한 거동을 파악하고 철근비의 변화에 따른 전체 RC 구조물의 거동 변화를 분석하기 위해 중간 기둥 부분의 철근비를 다르게 하여 해석을 실시하였다. 앞 절에서와 마찬가지로 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. Fig. 15는 RC-지반 시스템 I(Fig. 4), II(Fig. 13), III(Fig. 14)에서 각 경우의 손상 정도를 비교한 것이다. Fig. 15(a)에 나타난 바와 같이 구조물이 완전히 지중에 묻혀있는 RC-지반 시스템 I에서는 Case A의 경우 10.22초에서 파괴가 발생하게 되고, Case B의 경우 17.04초에 파괴가 발생하게 된다. 중간 기둥의 전단 저항성과 연성을 증가시킨 Case C의 경우에는 파괴가 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 구조물의 일부분만 지반에 묻혀있는 경우인 RC-지반 시스템 II에서는 Fig. 15(b)에 나타난 바와 같이 중간 부분에서 Case B의 손상 정도가 크게 나타나지만 최종적으로는 손상 정도가 Case A보다 작아지게 되는 것을 알 수 있고 Case A, B, C 모두 파괴가 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 15(c)에 나타난 지상 구조물인 RC-지반 시스템 III에서는 Case B의 손상 정도가 커져서 파괴에 이르게 되는 것을 알 수 있다.

즉, 지반에 둘러싸여 있는 지하 RC 구조물의 경우 지상 구조물과 비교하여 그 거동 형태가 다르게 나타나며 지반의 영향으로 인해 상대적으로 RC 구조물이 안전할 수 있다는 것을 확인 할 수 있었고, 주변 지반의 영향을 고려한 해석을 통하여 RC 구조물의 거동을 정확하게 해석할 수 있다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

지하 RC 구조물과 주변 지반의 상호작용을 고려한 전체 구조 시스템의 합리적인 해석을 위하여 두께를 갖는 탄소성 경계면 모델을 이용한 해석기법을 제안하고, 제안된 해석기법을 이용하여 지진하중을 받는 구조물의 손상, 균열, 파괴모드 등을 분석한 연구의 결과는 다음과 같다.

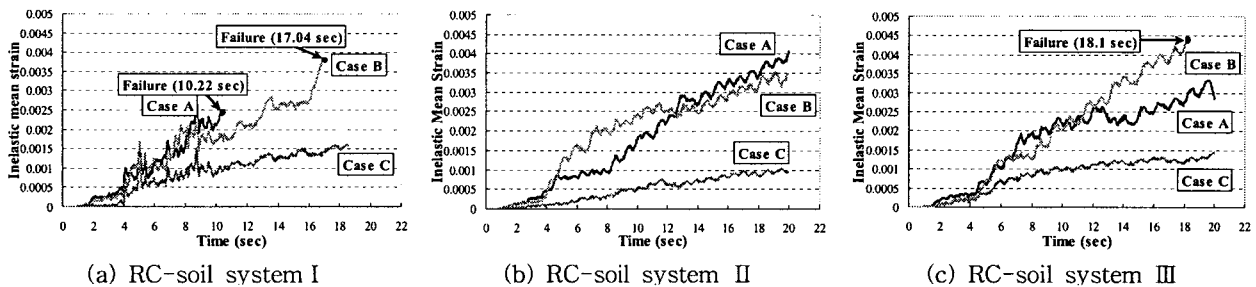


Fig. 15 Damage level in the RC of different RC-soil systems

- 1) 주변 지반을 포함하는 지하 RC 구조 시스템의 해석에서 구조물과 지반 사이 경계면의 영향을 고려하기 위해 두께를 갖는 탄소성 경계면 모델을 이용한 지하 RC 구조물의 해석기법을 개발하였다.
- 2) 지진하중에 대한 지하 RC 구조물의 파괴거동을 분석한 결과 합리적인 철근비의 산정을 통해 구조물의 전단 저항력과 연성, 이에 따른 구조물에 유발되는 손상을 조절할 수 있었고, 구조물의 변형 형상, 균열 분포 및 파괴모드 등을 변화시켜 합리적이면서 안전한 설계를 할 수 있다는 것을 확인하였다.
- 3) 지하 RC 구조물의 해석에 유한요소법은 유용하게 사용되며 지반의 영향을 고려한 해석이 가능하고, 지반에 둘러싸여 있는 지하 RC 구조물의 경우 주변 지반 조건에 따라 RC 구조물의 거동과 파괴 여부가 크게 달라지며 구조물의 전단 저항성과 연성이 RC 구조물의 내진 성능에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 따라서 지중 RC 구조물의 내진설계시 지하구조물-지반 전체 시스템을 고려한 해석을 통해 보다 합리적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 남상혁, 변근주, 송하원, 박성민, "경계면 요소를 고려한 지하 철근콘크리트 구조물의 지진해석", 가을 학술발표회 논문집(I), 한국콘크리트학회, 2000, pp.87~92.
2. 남상혁, 송하원, 변근주, "탄소성 경계면 요소를 고려한 철근콘크리트 지하 구조물의 해석", 가을 학술발표회 논문집, 한국콘크리트학회, 2001, pp.471~476.
3. 남상혁, 송하원, 변근주, "탄소성 경계면 요소를 고려한 지하 철근콘크리트 박스의 내진 해석", 춘계 학술발표회 논문집, 한국지진공학회, Vol. 6, No.1, 2002, pp.109~116.
4. Yin Z. Z., Zhu H., and Xu G. H., "A Study of Deformation in the Interface between Soil and Concrete," *Computers and Geomechanics*, Vol. 17, 1995, pp.75~92.
5. Okamura H. and Maekawa K., *Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete*, Gihodo-Shuppan, Tokyo, Japan, 1991.
6. Kato, B., "Mechanical Properties of Steel under Load Cycles Idealizing Seismic Action," CEB Bulletin D'Information, 131, 1979, pp. 7-27.
7. Ohsaki, Y., "Dynamic Nonlinear Model and One-Dimensional Nonlinear Response of Soil Deposits," Research Report 82-02, Department of Architecture, University of Tokyo, 1982.
8. Samtani N. C., Desai C. S., and Vulliet L., "An Interface Model to Describe Viscoplastic Behavior," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 20, 1996, pp.231~252.
9. Shahrour I. and Rezaie F., "An Elastoplastic Constitutive Relation for the Soil-Structure Interface under Cyclic Loading," *Computers and Geomechanics*, Vol. 21, No. 2, 1997, pp.21~39.
10. 남상혁, 송하원, 변근주, "탄소성 경계면 요소를 고려한 지하 철근콘크리트 박스의 구조성능 평가", 대한토목학회 논문집, 제 22권, 제 2-A호, 2002, pp.423~436.
11. 남상혁, 탄소성 경계면 모델을 이용한 지하 철근콘크리트 구조물의 내진 해석, 박사학위논문, 연세대학교, 2002.
12. Owen D. R. J. and Hinton E., *Finite Elements in Plasticity : Theory and Practice*, Pineridge Press Limited, U.K., 1980.
13. Chen W. and Saleeb A., *Constitutive Equations for Engineering Materials*, Elsevier Science, Netherlands, 1994.
14. Shawky A. A., *Nonlinear Static and Dynamic Analysis for Underground Reinforced Concrete*, Ph.D. Dissertation, University of Tokyo, Tokyo, Japan. 1994.
15. An X., *Failure Analysis and Evaluation of Seismic Performance for Reinforced Concrete in Shear*, Ph.D. Dissertation, University of Tokyo, Tokyo, Japan, 1996.
16. 송하원, Maekawa, K., "철근 콘크리트 구조물의 지진 응답 해석", 한국콘크리트학회지, 제9권 1호, 1997, pp.36~43.

요 약

지진하중을 받는 철근콘크리트(이하 RC) 구조물의 해석, 설계 및 성능 평가 등에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔으나, 지반에 둘러싸여 있는 지하 RC 구조물의 지진 해석에 대해서는 상대적으로 연구가 부족하였다. 지중의 지하 구조물은 지상 구조물과는 달리 지반과 상호작용을 하며 거동을 하기 때문에 지반내에서 하중을 받는 RC 구조물의 거동을 해석하기 위해서는 지진하중 하에서의 지반층의 거동을 예측할 수 있는 지반의 경로의존적 구성모델이 반드시 필요하다. 또한 RC 구조물과 지반 사이의 상호작용은 매체의 경계면을 통해 전달되기 때문에 보다 정확한 RC 구조물의 내진성능을 해석하기 위해서는 경계구역의 거동이 해석시에 반드시 고려되어야 한다.

이에 따라 본 논문에서는 지하 RC 구조물의 내진성능을 해석적으로 예측하기 위해 RC 구조물에 대해서는 철근과 콘크리트의 평균화된 구성모델을 적용하였고, 지반에 대해서는 경로의존적 Ohsaki 모델을 적용하였으며, 두께를 갖는 탄소성 경계면 모델을 제안하였다. 또한 지진하중을 받는 지하 RC 정거장 구조물에 대한 내진 해석을 수행하여 지진시의 지하 RC 구조물의 파괴 기구를 해석적으로 구하였고, RC 구조물에 대한 상대적인 배근 설계에 따른 파괴 모드의 변화와 구조물의 손상 정도의 변화를 해석적으로 구하였다.

핵심용어 : 유한요소법, 내진 해석, 지하 철근콘크리트 구조물, 구조물-지반 상호작용, 탄소성 경계면 모델