

# 철근콘크리트 뼈대 구조물의 정적 비선형 해석에 관한 연구

심종성\* 오조민수\*\*

A Study on the Nonlinear Analysis of R/C Frame Structures  
subjected to Static Loads

Sim, Jongsung\* Cho, Minsoo\*\*

## Abstract

The purpose of this study is to develop the computer software for the nonlinear analysis of R/C frame structure under static loads. For this purpose, strain-rate dependant material model and physical element model considering both flexural and shear deformation are adopted and they are connected with 'TWO-D' which is commercial software for elastic structural analysis. The analytical results using the developed software are compared to the experiment results and they are generally satisfactory.

## 1. 서 언

### 1.1. 연구 배경 및 목적

철근콘크리트(R/C) 뼈대 구조물이 지진이나 충격과 같은 강한 동적반복하중을 받을 경우의 거동예측을 위한 기존 해석기법의 문제점으로는 변형률 속도의 변화가 R/C 구조의 거동에 미치는 영향을 고려하고 있지 않다는 점과 동적반복하중상태에서 R/C 구조의 변위를 휨변위량만이 지배하는 것으로 보고 대부분의 해석모델이 제안되고 있다는 점을 들 수 있다<sup>1)</sup>.

기존 실험결과에 따르면 변형률속도가 정적인 경우는  $10^{-5}/\text{sec}$ 이며<sup>2,3)</sup>, 지진이나 충격하중의 경우에는 각각  $10^{-2}/\text{sec}$  및  $10^{-1}/\text{sec}$  정도인 것으로 알려져 있다. 이러한 큰 차이에도 불구하고 현재까지 지진과 같은 강한 동적 반복하중하에서의 철근콘크리트 구조물의 해석 및 설계는 정적 실험결과에 근거하고 있으므로 실측치와 예측치 간의 오차를 발생시키는 하나의 원인이 되고 있다<sup>3,4)</sup>.

또한 동적반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 변형은 휨, 전단, 그리고 연결부에서의 고정단 회전량으로 구성되며, 특히 지진이나 충격과 같은 강한 동적 반복하중을

받는 경우 전단변형 및 고정단 회전량의 역할은 하중의 반복에 따라 더욱 커지는 것으로 나타나고 있다. 그러나 구조물의 거동을 예측하기 위한 현재까지의 구조해석모델은 이러한 거동특성을 무시하고 오직 휨거동의 특성만을 이상화시킨 형태이므로 지진하중에서의 구조물의 실제거동과 예측치간에는 피할 수 없는 오차를 수반하고 있다<sup>5,6)</sup>.

따라서 본 연구는 동적반복하중을 받는 R/C 구조물의 거동을 예측하기 위해 우선 정적하중하에서의 탄성범위 및 비탄성범위를 포함하는 구조물의 거동을 예측하고자 한다. 이를 위해서는 기존 연구결과인 변형률속도의 변화에 의한 R/C 부재의 거동을 예측해 내는 부재해석모델과 철근콘크리트 부재의 변형이 주로 휨과 전단변위량으로 구성되어 있다는 점을 감안 할 수 있는 부재해석모델을 탄성해석 프로그램인 'TWO-D'<sup>7)</sup>에 하나의 요소로 접목시켜 활용함으로써 강한 정적하중을 받는 경우의 R/C 구조물의 비탄성영역을 포함하는 실제거동에 대한 예측치를 얻을 수 있는 프로그램으로 보완하는 것으로 목적으로 하였다.

### 1.2 연구 방법 및 범위

본 연구에서는 철근콘크리트 부재의 휨과 전단변형을 이상화 시킬 수 있는 physical model을 채택하고, 변형률 속도의 영향을 고려하기 위하여 이미 발표된 철근

\* 한양대학교 토목공학과 조교수

\*\* 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정

및 콘크리트 재료모델을 적용하여 R/C부재의 모멘트-곡률 관계를 예측 할 수 있는 실용설계식을 도입하였다. 도입된 부재해석 모델은 범용 구조해석용 프로그램인 'TWO-D'에 하나의 새로운 형식의 부재 요소로서 활용하였다. 작용하는 정적하중은 적당한 크기로 증가시킴으로써 하중증가에 따른 R/C 뼈대 구조물 내의 각각의 부재거동이 탄성영역 또는 비탄성영역에 속하는가를 판단할 수 있도록 하여 정적증분하중을 받는 R/C 뼈대 구조물의 비탄성 거동을 예측해 낼 수 있는 구조해석용 프로그램으로 완성하였다. 본 연구에서 제안된 R/C 뼈대 구조물을 위한 정적 비선형 해석기법의 신뢰성은 다른 연구자들의 실험을 통하여 얻어진 이력거동의 탄소성 영역에서 얻어낼 수 있는 bilinear skeleton curve 와 비교함으로써 확인 하였다. 실험데이터의 선정은 1층-1경간 R/C 뼈대 구조물에 국한 하였다.

## 2. 해석 기법

### 2.1 변형율속도의 고려

변형율속도의 변화가 구조거동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 일반적으로 사용되고 있는 기법은 layer 모델<sup>8)</sup>이나, 이 기법은 변형율속도를 고려할 수 있는 장점을 가지고 있는 반면, 계산과정의 복잡성 때문에 사용하기에는 부적당한 면을 가지고 있다<sup>1)</sup>. 따라서 이러한 점을 개선하기 위해 참고문헌[9]에서는 ACI 318 Committee 10)에서 제안한 공칭 휨강도를 구하기 위한 기본가정을 근거로 하여 실용계산식이 사용되고 있다. 실용설계식에서는 ACI의 기본가정과 함께 변형율속도의 영향을 고려하기 위해 단면 전체의 변형율속도의 절대치는 극한압축단면의 변형율속도와 같다고 가정함으로써 변형율속도의 변화에 따른 R/C부재의 증가된 휨강도( $M_n'$ )는 다음과 같이 표현된다.

$$M_n' = A_s f_y' (d - d') + 0.85 f_c' a b (a/2 - d) \quad (2.1)$$

여기서,  $f_y'$ 와  $f_c''$ 은 각각 변형율속도의 변화에 따라 변하는 철근의 항복 강도 및 콘크리트의 압축강도이며, 그 값은 참고문헌[9]에서 언급되었듯이 각각 식 (2.2) 및 식 (2.3)과 같다.

$$f_y' = f_y [-4.51 \times 10^{-6} f_y + 1.46 + (-9.20 \times 10^{-7} f_y + 0.0927) \log_{10} \dot{\epsilon}_c] \quad (2.2)$$

$$f_c'' = \begin{cases} f_c' [1.48 + 0.160 \log_{10} \dot{\epsilon}_c + 0.0127 (\log_{10} \dot{\epsilon}_c)^2] & \text{for air dried concrete} \\ f_c' [2.54 + 0.580 \log_{10} \dot{\epsilon}_c + 0.0543 (\log_{10} \dot{\epsilon}_c)^2] & \text{for saturated concrete} \end{cases} \quad (2.3)$$

여기서,  $f_y$  및  $f_c'$ 은 정적하중하에서의 철근의 항복강도 및 콘크리트의 압축강도이며,  $\dot{\epsilon}_c$ 은 변형율속도( $1/\text{sec} \geq 10^{-5}$ )이다.

변형율속도를 고려한 실용설계식 (2.1), (2.2) 및 (2.3)에 의한 해석결과는 다소 복잡한 layer 모델에 의한 해석결과와 비교해볼 때 유사함을 알 수 있었으며<sup>11)</sup>, 따라서 본 연구에서는 상기 언급된 해석기법을 도입하였다. 단, 식 (2.1), (2.2) 및 (2.3)은 U.S.C.S. 단위에 근거하고 있어 본 연구에서 완성된 프로그램에서는 단위변환을 위한 별도의 module이 사용되었다.

### 2.2 적용된 Physical 모델

그림 2.1은 본 연구에서 적용한 철근콘크리트 부재를 이상화 시킨 physical 모델을 나타낸다<sup>12)</sup>. 이 모델에서는 모든 전단 변형과 휨의 탄-소성 변형은 길이가 없는 양단부의 스프링에 집중해서 생긴다고 가정하였고, 실제적으로도 전단과 휨의 양단 변형은 보-기둥 접합부와 근접한 곳에 집중해서 발생한다. 휨과 전단 스프링의 항복은 휨 스프링의 모멘트가 철근콘크리트 단면의 휨 항복 강도에 도달했을 때 동시에 일어난다고 가정하였다.

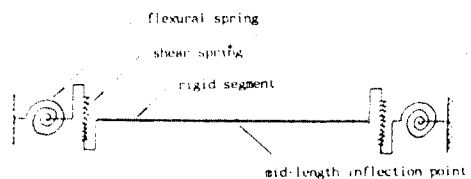


그림 2.1 Physical Model

### 2.3 제안된 비선형해석 기법

본 연구에서는 구조물의 비선형 해석을 수행하기 위하여 탄성해석 프로그램인 'TWO-D'를 활용 하였다. 그러나, 'TWO-D' 프로그램은 비선형 해석기능이나, 동적해석의 기능은 갖추고 있지 않으므로 'TWO-D'를 기본으로 한 정적 비선형 해석을 위해서는, 부재의 항복점, 초기강성, 변형경화강성을 결정하는 QUICK module 및 strain rate의 영향을 고려할 수 있는 DYNA module, 그리

고 비탄성 영역에서의 강성매트릭스를 구성하는 INELSI module 등이 'TWO-D'에 추가되어야 한다. 그림 2.2는 정적 비선형 해석을 수행하기 위하여 본 연구에서 제안한 module들의 'TWO-D'와의 연결상태를 flow chart 형식으로 소개하고 있으며 이중, 본 연구에서 제안한 module별 기능은 다음과 같다.

(1) DYNA module은 비탄성 해석시 이용되는 재료의 성질과 strain rate를 입력하는 module로서, 식 (2.1) ~ (2.3)을 이용하여 변형을 속도때 따른 증가된 휨강도를 계산해 내는 역할을 담당하며, 재료특성 즉, 철근의 탄성계수와 정적하중상태에서의 철근의 항복응력 및 콘크리트의 항복응력 그리고 변형률속도 등의 데이터가 입력된다.

(2) UNIT module

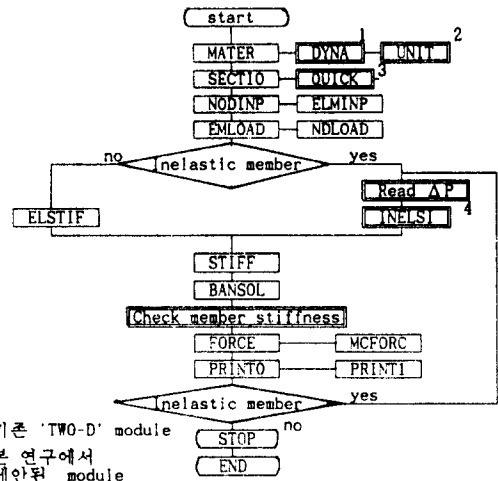
Strain rate의 효과를 고려하기 위한 기법은 콘크리트 및 철근의 변형률-응력선도를 근거로 하고 있으며, 이는 실험결과를 이상화하는 model로써 형성되며, 본 연구에서 사용된 실험결과는 U.S.C.S. 단위를 근거로 하고 있어 본 연구에서 입력되는 data의 단위가 U.S.C.S. 단위인 경우에는 전혀 문제가 되지않으나, metric 단위일 경우 단위변환이 요구된다. UNIT module은 이와같은 문제를 해결하는 module이다.

(3) QUICK module

QUICK module은 단면특성을 고려하기 위한 module로서 토목 구조물에서 흔히 사용되는 rectangular, circular, T-section 또는 I-section R/C 부재에 대한 bilinear skeleton curve를 설정하는 기능을 지닌 SIMPR, SIMPC, SIMPT, SIMPI 등의 subroutine으로 구성된다. 이 module에서는 DYNA module에서 입력된 strain rate에 의한 증가된 휨강도 및 전단강도를 포함하는 부재의 bilinear skeleton curve가 형성되며, 이 결과를 근거로 R/C 뼈대 구조체의 정적 비선형해석이 가능하게 된다.

(4) INELSI module

INELSI module은 비탄성 해석시 사용되는 부재강성을 결정하는 module로서 식 (2.10)의 형태로 구성되며, 이에 대한 유도는 2.4절에서 설명된다.



Legend  
 □ : 기존 'TWO-D' module  
 ■ : 본 연구에서 제안된 module

그림 2.2 탄성해석 프로그램에 추가된 module들

2.4 비선형해석을 위한 부재강성행렬 [Ke] 유도

본 연구에서 채택된 physical model을 사용한 그림 2.3과 같이 표현될 수 있는 일반보에 대하여 부재좌표계의 양(+)의 방향을 그림과 같이 정하고 경계조건이  $u_1 = v_1 = \theta_1 = 0$  인 경우를 생각하면, 보 이론에 따라 변위  $u_2, v_2,$  와  $\theta_2$ 는 하중  $F_{x2}, F_{y2}$  와  $M_2$ 에 대한 유연도 행렬은 식(2.4)와같이 쓸 수 있다.

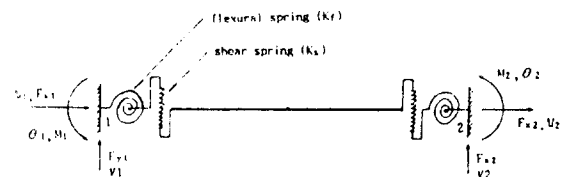


그림 2.3 physical 모델의 자유도

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L}{EA} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{K_T} & \frac{L^2}{2EI} \\ 0 & \frac{L^2}{2EI} & \frac{L}{EI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \\ M_2 \end{bmatrix} = [F_{22}] [F_2] \quad (2.4)$$

여기서,  $K_T$ 란 휨강성( $K_f$ )과 전단강성( $K_s$ )의 합으로서 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{K_T} = \frac{1}{K_f} + \frac{1}{K_s} \quad (2.5)$$

강성행렬 [ $K_{22}$ ]을 구하기 위하여 상기 유연

도행렬  $[F_{22}]$ 를 역변환하면 절점 2의 단위변위에 의한 절점 2의 힘은 식 (2.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[F_2] = [K_{22}] [\delta_2] \quad (2.6)$$

여기서,  $[K_{22}]$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$[K_{22}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{4EI K_T}{(4EI - K_T L^3)} & -\frac{2EIL K_T}{(4EI - K_T L^3)} \\ 0 & -\frac{2EIL K_T}{(4EI - K_T L^3)} & \frac{4E^2 I^2}{L(4EI - K_T L^3)} \end{bmatrix}$$

절점 2의 단위변위에 의한 절점 1의 힘은 힘의 평형조건으로부터 식 (2.7)과 같다.

$$[F_1] = [K_{12}] [\delta_2] \quad (2.7)$$

여기서,  $[K_{12}]$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$[K_{12}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{4EI K_T}{(4EI - K_T L^3)} & \frac{2EIL K_T}{(4EI - K_T L^3)} \\ 0 & -\frac{2EIL K_T}{(4EI - K_T L^3)} & \frac{2EI(K_T L^3 - 4EI)}{L(4EI - K_T L^3)} \end{bmatrix}$$

마찬가지 방법으로 절점 1의 단위변위에 대한 절점 1과 절점 2의 힘은 식(2.8)과 식(2.9)로서 표현될 수 있다.

$$[F_1] = [K_{11}] [\delta_1] \quad (2.8)$$

$$[F_2] = [K_{21}] [\delta_1] \quad (2.9)$$

따라서 부재좌표계의 강성행렬은 식(2.6), (2.7), (2.8), (2.9)을 조합함으로써 식(2.10)과 같이 표현될 수 있다.

$$[K_0] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}$$

즉,

$$[K_0] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{4EI K_T}{\eta} & \frac{2EIL K_T}{\eta} & 0 & -\frac{4EI K_T}{\eta} & \frac{2EIL K_T}{\eta} \\ 0 & \frac{4E^2 I^2}{L\eta} & 0 & 0 & -\frac{2EI K_T}{\eta} & \frac{2EI \nu}{L\eta} \\ \hline -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{4EI K_T}{\eta} & \frac{2EIL K_T}{\eta} & 0 & \frac{4EI K_T}{\eta} & \frac{2EIL K_T}{\eta} \\ 0 & 0 & \frac{4E^2 I^2}{L\eta} & 0 & 0 & \frac{4E^2 I^2}{L\eta} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

sym.

여기서,  $\eta, \nu$ 는  $E, I, K_T, L$ 로 구성되는 함수로서 식 (2.11)과 (2.12)와 같이 표현된다.

$$\eta = (4EI - K_T L^3) \quad (2.11)$$

$$\nu = (K_T L^3 - 4EI) \quad (2.12)$$

식 (2.10)의 부재강성행렬은 전체강성행렬을 구성하기전에 전체좌표계  $[K_G]$ 로 변환되어야 한다. 즉,

$$K_G = A^T K_0 A \quad (2.13)$$

여기서,  $A_T$ 는 변환 행렬 즉,

$$A_T = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\text{여기서, } A = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 3. 수치해석

본 연구에서 완성된 정적 비선형해석 프로그램의 신뢰성을 확인하기 위하여 반복하중을 받는 Ohno<sup>14)</sup>의 1층-1경간 철근콘크리트 구조물의 거동에 대한 실험결과를 채택하여 얻어진 envelope curve와 해석결과를 비교검토 하였다.

시험체 형태는 그림 3.1과 같고 부재별 재료 및 단면특성을 입력하기 위한 입력 data는 표 3.1과 같다. Ohno의 실험에서 적용된 하중은 그림 3.1(a)에 나타난 반복하중이었으나, 본 연구에서는 작용하중에 의한 구조거동이 탄성영역인가 또는 비탄성영역인가를 구분하기 위하여 최대하중의 1/100의 증분하중으로의 변환이 필요하였다. 또한 Ohno의 실험에서는  $10^{-2}/\text{sec}$  정도의 동적 strain rate를 사용한 것으로 간주하였으며, 본 연구에서 제안되었던, strain

rate의 변화에 따른 구조거동을 예측하기 위하여  $10^{-5}/\text{sec}$  및  $10^{-1}/\text{sec}$ 의 strain rate가 적용된 결과를 함께 검토하였다.

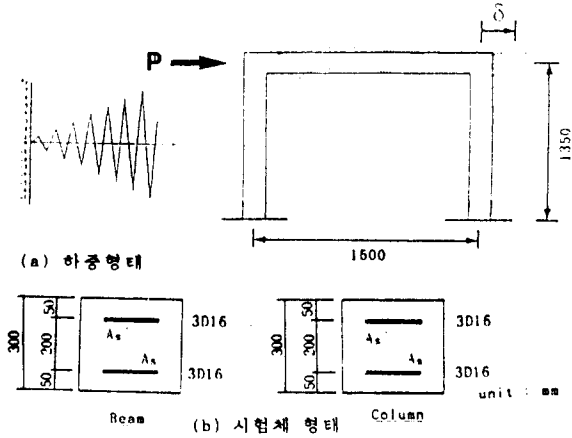


그림 3.1 시험체의 형태와 하중형태

단면형태	retangular (1)	
철근의 탄성계수	2.04E6 kg/cm <sup>2</sup>	
poison's ratio	0.16	
콘크리트 압축강도	260 kg/cm <sup>2</sup>	
철근 항복강도	3535 kg/cm <sup>2</sup>	
conc. curing condition	general condition	
number of steel layers	2	
of No.1 layer	height	5.0
	area	5.958
of No.2 layer	height	25.0
	area	5.958
strain rate	0.01	
vertical conc. cover	at top	4.205
	at bottom	4.205
strain-hardening ratio	flexure	0.02
	shear	0.005

표 3.1 채택된 R/C 구조물의 보 및 기둥의 입력 data

#### 4. 비교 및 고찰

철근콘크리트 구조물의 비탄성변형은 일반적으로 보-기둥 접합부 부근에서 형성되는 소성한지에서 기인하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 비선형 거동을 예측하기 위하여 그림 2.1와 같이 부재의 양단에 휨스프링과 전단스프링을 둔 physical model의 구조부재를 사용하여 정적 하중을 증분하중으로 변환시킨 후 이들을 증가시키면서 정적하중이 증가함에 따라 변화하는 구조체의 탄성영역의 거동과 항복후 강성 변화에 따른 구조체의 비탄성 거동에 대한 예측을 실시하였으며, 해석결

과는 그림 4.1에 나타난 것과 같이 비교적 만족스러웠다.

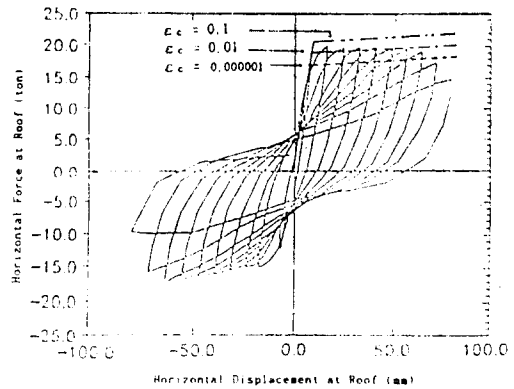


그림 4.1 실험결과 및 정적 비선형해석과의 비교

그림 4.1에서 굵은 점선으로 표시된 선은 본 연구에서 예측한 구조물의 탄-소성 거동을 나타내고 있으며, 실선은 그림 3.1에 도시된 시험체의 반복하중이 작용된 결과인데, 탄성영역 및 비탄성 영역에서 실험 결과에서 구할 수 있는 envelope curve와 근접한 예측결과를 나타내고 있어 본 연구에서 제안한 식(2.10)의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 또한 본 해석 기법의 장점이었던 strain rate의 영향에 대한 해석결과도 그림 4.1에 포함하였는데 참고문헌(14)에서 언급되었듯이 휨강도에 대한 동적 strain rate의 효과는 약 20 % 정도 인것으로 나타나고 있다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 철근콘크리트 부재의 전체 변형이 휨 및 전단 변위량으로 구성되어 있는 점에 착안하여 그 각각의 거동특성을 이상화시킬 수 있는 부재의 physical model을 도입하고 또한 이미 연구결과가 발표된 변형률속도의 변화에 의한 구조물의 거동변화를 고려할 수 있는 실용설계식을 도입하여 탄성해석 프로그램인 'TWO-D'에 하나의 새로운 부재요소로서 접목시킴으로써 정적 하중하에서의 구조물의 탄성거동 및 비탄성 거동을 예측하고자 하였으며, 본 연구에서 사용된 수치해석기법의 신뢰성을 확인하기 위하여 실험적연구결과와 비교 분석되었는데, 그 결과는 만족스러웠다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초 연구 과제 (Grant No. 893-1301-012-1) 지원에 의해 수행되었음을 알리며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. Sim, Jongsung, "Inelastic Response of Reinforced Concrete Elements to Dynamic Loads", Ph. D. Dissertation, Michigan State University, Dept. of Civil and Environmental Engineering, 1987
2. American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Specimens", Designations: C39-86, 1986 Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.02, section 4, : Concrete and Material Aggregates, PP.24~29.
3. Soroushian, P. and Obaseki, K., "Strain Rate-Dependent Interaction Diagrams for Reinforced Concrete Sections", ACI Journal, Vol. 83, No. 1, Jan. - Feb. 1986, PP.108-116
4. Scott, B. D., Park, K. R. and Priestly, M. J. N., "Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates", ACI Journal, Vol.79, No.1, Jan.-Feb. 1982, PP.13-27
5. Ataly, M. B. and Penzien, J., "The Sesimic Behavior of Critical Regions of Reinforced Cocrete Components As Influenced by Moment, Shear and Axial Force", Report No. UCB/EERC-75/12, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkley, Dev. 1975
6. Fenwick, R.C., "Shear Deformations in Seismic Response of Frame Structures", J. of Structural Division, ASCE, Vol. 109, No. ST4, April 1983
7. Hyundai Engr. & Construction Co.Ltd., Computer Center, "TWO-D", 1982.
8. Kaba, S. A. and Mahin, S. A., "Refined Modeling of Reinforced Concrete Columns for Seismic Analysis", Report No. UCB/EERC-84/03, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkley, April 1984
9. 심종성, "변형율속도변화에 대한 철근콘크리트 부재 설계인자의 민감성 연구", 대한토목학회 논문집, 제9권, 제4호, 1989,12, pp.9-13
10. ACI Committee 318, "Building Code Requirement for Reinforced Concrete (ACI-318-89)", American Concrete Institute Detroit 1989
11. 심종성, " 변형율속도를 고려한 철근콘크리트 부재거동을 위한 개선된 해석모델", 대한토목학회 논문집, 제9권, 제2호, 1989, 6, pp.23-29
12. 심종성, "휨 및 전단 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 비선형해석 모델", 콘크리트학회지, 제1권, 제1호, 1989,9, pp.115-124
13. Scribner, C. F. and Wight, J. K, "Delaying Shear Strength Decay in R/C Flexural Member under Large LoReversals", Report No.UMEC 76-R2, Univ. of Michigan, Ann Arbor, 1978.
14. Ohno, T., Fujikake, K., Nishioka, T., "Experimantal Study on Energy Absorption Capacity of Reinforced Concrete Frames", JSCE, Vol. 8, No. 390, 1988, 2., PP. 113-121