

## R/C 골조구조물 내진보강을 위한 슬라이딩 벽식감쇠기의 개발 및 비선형 동적해석모델

### Development and Nonlinear Dynamic Model of Sliding Wall Damper To Retrofit of R/C Frame Structures

조창근\*      박문호\*\*      장준호\*\*\*      김기욱\*      정인규\*\*\*\*  
Chang-Geun Cho      Moon-Ho Park      Chun-Ho Chang      Ki-Wook Kim      In-Kyu Chung

#### ABSTRACT

In order to retrofit R/C frame structures, a newly proposed Teflon sliding wall damper, consisted of Teflon slider and R/C shear wall, is evaluated by the dynamic analysis model of inelastic frame structures. From analysis results, it is shown that the damper reduces the time-history responses, the maximum story drifts, and the damage of R/C member. By control of damper pressures, especially, the damper can be easily applicable not only to capacity design according to required responses and member damages but also to active damper with actively controlling devices.

#### 1. 서    론

지진하중을 받는 철근콘크리트(R/C) 골조구조물에 대한 응답제어 및 보강법으로서, 여러 종류의 감쇠장치가 개발되어 왔다. 기존의 감쇠장치는 일반적으로 브레이스 부재 형태로서 보-기둥 접합부 또는 보 중앙에서 감쇠기와 연결되도록 고안되었다<sup>1)2)</sup> (Chang과 Soong등, 1995; 조창근 등, 2001). 이러한 브레이스형 감쇠장치는 시공 상 강골조구조물에 적용하기에는 용이하지만 R/C 골조구조물에 적용하기에는 시공 및 구조적으로 여러 단점을 갖고 있다. 기존의 브레이스형 감쇠기를 R/C 골조구조물에 적용할 경우, R/C 구조부재의 접합부에 대한 연결부 문제, 강진의 발생 시 감쇠기와 R/C 보-기둥 접합부 간 연결부의 응력집중에 의한 파손문제로 R/C 구조 부재의 손상을 유발하는 단점이 있다.

본 연구에서 제안하는 전단벽식 마찰 감쇠기는 다음과 같은 특징을 갖고 있다. 첫째, R/C 골조구조물의 내진 보강에 적용할 경우 강진으로 인한 R/C 부재 접합부와 감쇠기 연결부 파손을 최대한 억제할 수 있는 형태로 기존 구조물에 감쇠기를 배치하도록 되어있다. 둘째, 감쇠기 자체가 전단벽과 더불어 상부 수직하중에 저항하고 있으므로, 상부 하중으로 인한 구조물의 P- $\Delta$ 효과를 격감시켜준다. 셋째, 지진하중의 규모와 구조

\* 정회원 · 경북대학교 방재연구소 연구원/강사  
\*\* 정회원 · 경북대학교 토목공학과 교수  
\*\*\* 정회원 · 계명대학교 토목공학과 교수  
\*\*\*\* 정회원 · 경북대학교 토목공학과 박사과정

물의 내진성능설계에 필요로 하는 요구 응답량에 따라서 제어압력을 조절함으로써 감쇠기의 수동제어능력을 정할 수 있다. 이는 제어압력을 능동적으로 조절 가능하도록 할 경우, 능동형 감쇠장치로서도 적용 가능하다.

본 연구에서는 제안된 감쇠기에 대한 수치모델을 통한 동적거동특성을 규명하고, 무엇보다도, 본 감쇠장치의 특징인 제어압력의 조절을 통하여 지진하중에 따른 구조물의 요구성능에 따른 감쇠능력 및 응답특성을 비교·검토함으로써, 제안된 감쇠기의 우수성을 검증하고자 한다.

## 2. 개발된 테프론슬라이딩 벽식감쇠기

제안하는 테프론슬라이딩 벽식감쇠기는 그림 1과 같다. R/C 전단벽의 상부에 요철형 강재가 부착되어 있다. 강재의 요철면 사이에 테프론 슬라이더가 부착되어 있으며, 테프론 슬라이더의 점성마찰에 의해 지진하중에 대한 감쇠기로서의 거동을 나타낸다. 본 감쇠기는 감쇠력의 크기를 테프론 슬라이더에 작용하는 수직의 제어압력을 통해 조절할 수 있으며, 테프론 슬라이더의 재원에 따라서 감쇠기 변위를 설정할 수 있도록 하였다. 상층부 상재하중인 수직력에 대해서는 감쇠장치가 수직변형을 억제할 수 있도록 하면서 수평방향에 대한 미끄럼현상을 유발하도록 요철형 강재 하면에 롤러베어링을 설치하였다. 감쇠장치의 상하부 면이 각각 상하층의 보 부재의 상하면에 연결되도록 그림 1과 같이 R/C 골조구조물에 적용하도록 하여, 감쇠기 연결부의 응력집중에 의한 R/C 부재의 파손을 최대한 방지하도록 구성하였다.

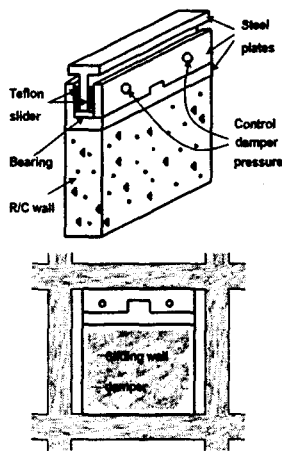


그림 1 제안된 테프론슬라이딩 벽식감쇠기

## 3. 슬라이딩 벽식감쇠기의 모델링

테프론쉬트의 마찰거동특성에 관한 실험연구가 Mohka 등(1990)에 의해 이루어졌다. 본 실험을 통하여, 미끄럼속도, 미끄럼가속도, 테프론에 작용하는 압력, 및 테프론의 형태에 따른 테프론 슬라이더의 마찰거동특성에 미치는 영향에 관하여 검토하였다. 그 결과, 미끄럼속도와 베어링에 작용하는 압력은 테프론 슬라이더의

마찰력에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 마찰력은 미끄럼속도가 증가함에 따라 점차적으로 증가하여 일정한 미끄럼속도를 넘어서는 더 이상 증가하지 않고 일정한 마찰력의 크기를 발휘하였다. 한편 작용하는 압력이 증가함에 따라서 미끄럼속도에 크게 의존하면서 마찰력의 크기는 감소하였다.

이상의 실험에 기초하여, 본 연구에서는, 미끄럼속도  $\dot{U}$  에 의해 테프론 슬라이더의 미끄럼마찰계수를 제안한 Mohka 등(1990)의 식으로부터<sup>3),4)</sup>, 테프론 슬라이더에 작용하는 감쇠기의 마찰력  $f_D$  는, 식 (1)과 같이 간략히 나타낼 수 있다.

$$f_D = [f_{\max} - Df \exp(-a|\dot{U}|)] N \operatorname{sgn}(\dot{U}) \quad (1)$$

여기서,  $f_{\max}$  는 미끄럼속도가 큰 경우에서의 최대마찰계수,  $Df$  는  $f_{\max}$  과 미끄럼속도가 매우 작은 경우에서의 마찰값과의 차이,  $a$  는 테프론 슬라이더에 작용하는 압력과 경계면 조건에 따른 상수,  $N$  은 테프론 슬라이더에 작용하는 압축력을 나타낸다.

한편, 감쇠기의 R/C 전단벽 부분은 지진하중이 작용할 경우 테프론 슬라이더가 대부분의 횡방향 변위를 감당하게 되므로, 감쇠기의 제어압력을 지나치게 크게 두지 않는 한 전단벽의 횡방향 변위 부담은 매우 작아 탄성거동 하에 있게 된다. 따라서, 본 해석모델에서는 R/C 전단벽 부분이 콘크리트 균열을 발생하지 않는 탄성거동을 하도록 제어압력을 고려하여, 해석모델에서도 선형탄성거동을 하는 것으로 가정하였다.

#### 4. 감쇠기가 보강된 R/C 골조구조물의 동적모델

제안된 감쇠장치를 R/C 구조물에 적용하기 위하여, 감쇠기가 보강된 R/C 부재의 이력 및 비탄성 부재모델을 고려한 R/C 평면골조구조물의 동적모델을 제시하였다.

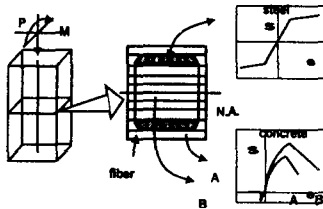
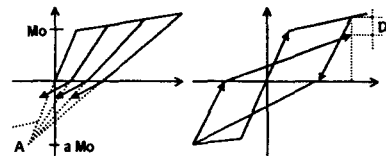


그림 2 R/C 부재의 총상화 단면해석



(a) 강성저하 (b) 강도저하

그림 3 R/C 부재의 강성 및 강도 저하

철근의 응력-변형을 관계는 철근의 항복이후 강성을 고려하여 이원선형으로 이상화하였으며, 콘크리트의 응력-변형을 관계는, 콘크리트가 일축압축강도에 도달하는 압축상승부분은 Hognestad(1951)의 식을 사용하였으며<sup>5)</sup>, 그 이후 극한 응력점까지의 압축하강부분은 선형적으로 감소하는 것으로 가정하였다. 전단철근으로 인한 콘크리트 구속효과는 Kent와 Park(1971)의 제안 식에 따른 응력-변형을 관계를 적용하였다<sup>6)</sup>. 인장축

콘크리트는 응력-변형률 관계가 선형관계이며, 균열 발생 후에는 응력을 부담하지 못하도록 가정하였다. 이상의 구성관계로부터, 축력 및 휨의 조합하중을 받는 직사각형 R/C 보 및 기둥단면에 대한 모멘트-곡률 관계를, 그림 2와 같이, 층상화 모델을 이용하여 산정 하였다<sup>7)</sup>(Mander, 1984). 한편, Ichinose 등(1994)에 의하면<sup>8)</sup>, 일반적인 R/C 부재의 경우, 균열 발생 전후의 강성의 차이가 철근항복이후의 전체 강성변화에 비해 매우 작은 것으로 나타나, 본 모델에서는 철근의 항복 이전 강성을 균열강성으로 대체하여 모멘트-곡률관계가 이원선형이 되도록 단순화하였다.

반복하중을 받는 부재의 강성은 콘크리트의 균열과 철근 및 콘크리트의 미끄럼현상 등으로 강성이 저하된다. 이와 같은 강성저하현상을 고려하기 위하여, 그림 3 (a)와 같이, Kunnath 등(1990)이 삼원선형곡선에 기초하여 제안한 이론을 이원선형으로 단순화하여<sup>9)</sup>, 이전의 이력단계가 탄성한계를 초과했을 경우, 균열강성도의 기울기를 갖는 외삽선이  $\alpha M_y$  의 크기를 갖는 가상점 A에 놓이도록 하여, 제하곡선이 x-축에 도달하기까지 이점을 지향하도록 가정하였다.

반복하중 하에서 R/C 부재의 거동에서 나타나는 또 다른 특징은, 임의 임계상태에서의 하중주기동안에 부재의 강도가 저하되어 더 이상의 동일한 크기의 하중을 부담할 수 없게 된다. 동일한 변형단계에서 동일한 크기의 하중을 부담할 수 없게 되며, 반복횟수의 증가에 따라서 강도저하는 더욱 현저하게 나타난다. 실험에 의하면, 임계점은 콘크리트가 최대 변형률에 도달할 때의 곡률값과 관련이 있으며, 강도의 저하는 임계곡률이 초과한 양에 비례하는 것으로 나타났다. 이러한 거동을 묘사하기 위하여, 그림 3 (b) 와 같이, 본 연구에서는 Roufaiel 등(1987)이 제안한 이력곡선의 선상에 가상의 점을 두고 실제의 제하단계에서의 최대하중 지점을 대체하도록 하여<sup>10)</sup>, 강도저하현상을 나타내도록 하였다.

R/C 보 및 기둥 부재의 비탄성 접선 강성을 계산하기 위하여, 부재 모멘트가 인장철근의 항복 모멘트에 도달하여 비탄성 거동이 진전됨에 따라서 부재 양단부의 비탄성 영역이 부재의 내측으로 소성화 되어가는 현상을 고려하도록 하였다. 이를 위하여 Roufaiel 등(1987)이 제시한 일원성분 비탄성 모델을 수정한 분포 비탄성모델을 본 부재모델에 적용하였다. 부재의 좌우측 절점  $i, j$  의  $x_i$  및  $x_j$  길이를 갖는 비탄성 영역에서는 철근항복 후의 비탄성 평균강성을 가지고, 내측부에서는 단면의 초기탄성강성을 갖는다. 따라서 부재의 비탄성 접선 강성행렬의 산정에서 강성계수값들은 소성현지 발생영역에서의 소성현지 분포길이에 의존한다. 축강성계수는 선형 탄성으로서 일정하다고 가정할 경우, 비탄성 휨강성과 함께 R/C 평면골조 부재의 비탄성 접선 강성행렬을 유도할 수 있다.

철근콘크리트 보 및 기둥부재의 비선형 복원력 특성과 부가적인 전단벽식 감쇠기를 함께 고려한 경우, 비선형 증분형 운동방정식을 정식화할 수 있다. 비선형 동적 운동방정식을 갖는 평면골조구조물의 동적해석을 위하여, Maison(1992)의 지진하중을 받는 골조구조물의 비선형 동적해석 프로그램인 PC-ANSR 프로그램에<sup>11)</sup> 본 감쇠기 요소와 R/C 부재요소의 모델을 작성하여, 동적해석 프로그램을 작성하였다.

## 5. 감쇠기가 보강된 R/C 구조물의 적용 예

본 장에서는, 해석 예를 통하여 제안된 감쇠기의 지진하중에 대한 응답제어능력을 검토하고, 제어압력의 조절에 따른 R/C 구조물의 응답 및 부재 손상 등에 주목하여, 제안된 감쇠기의 제어압력에 따른 구조물의 동적거동특성에 미치는 현상에 관하여 평가하였다.

본 연구에서 고려한 적용 대상 구조물은 그림 4 와 같이 10층 3경간 R/C 평면골조구조물로서, Cecen (1979)의 실험을 통해서 거동이 규명된 구조물이다<sup>12)</sup>. 각 층의 바닥에는 바닥 당 4450 N의 무게가 작용하고 있으며, 경간이 30.5 cm, 층 높이가 22.9 cm 로서 일정하고, R/C 보 및 기둥 부재들의 단면형상은 그림 8과 같으며, 감쇠기는 전 층에 걸쳐 중앙경간에 배치되어 있다. 콘크리트의 경우, 1축압축강도는 30.0 MPa, 이에 대응하는 압축변형률은 0.003 이고, 철근의 경우, 항복응력은 482.3 MPa, 극한응력은 499.5 MPa, 탄성계수는 199.8 GPa 이다. 기둥 부재의 전단철근은 철근지름이 1.59 mm, 간격 8.9 mm 이고, 보 부재의 전단철근은 철근지름이 1.59 mm, 간격 7.62 mm 로 배치되어 있다. 인장 및 압축철근의 경우 대칭단면이 되도록 동일하게 인장 및 압축 철근량을 사용하고 있다. 인장 및 압축 철근의 단면적은 기둥의 경우 31.6, 26.5, 18.7, 및 8.4  $mm^2$  의 네 종류가, 보의 경우 8.4 및 5.9  $mm^2$  로서 두 종류가 사용되었다.

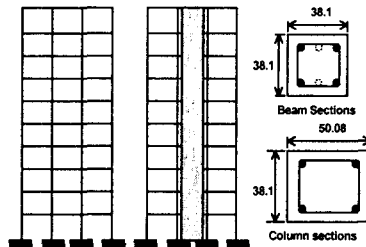


그림 4 10층 경간 R/C 골조구조물의 예

대상 구조물에 작용하는 지진하중은, El Centro 1940 NS 파형의 지진가속도로서, 최대지진가속도  $a_{max}$  값이 0.84g 인 경우로 스케일 된 지진가속도를 사용하여, 10초간의 지속시간을 고려하였다. 전체 구조부재들에 대한 감쇠비는 부재의 탄성 및 비탄성 거동에 관계없이 3 %로 일정하게 가정하였다. 벽식 마찰감쇠기의 재료와 테프론 슬라이더의 재료값은 앞 예와 동일한 값으로 적용하였다. 테프론 슬라이더에 도입되는 감쇠기의 제어압력의 크기  $F_n$  을 달리하여 해석 예를 구성하여 응답제어 및 거동특성을 비교하도록 하였다. 감쇠기가 없는 경우, 그리고 감쇠기가 전 층에 걸쳐 배치된 경우에서,  $F_n = 0.45, 0.93, \text{ 및 } 1.48 \text{ MPa}$  인 네 경우의 해석 예를 수행하였다.

10초 동안의 지속시간에 대하여 비선형 동적해석을 수행한 결과, 각 경우의 구조물에 대한 감쇠기의 R/C 전단벽 부분 콘크리트가 모두 균열에 미치지 않아, 전단벽 요소를 선형탄성으로 가정한 조건은 충분히 타당하였다. 감쇠기가 없는 기존 구조물과 각 감쇠기에 도입되는 제어압력의 크기에 따른 최상층부의 시간이력-변위 관계를 그림 5 에 나타내었다. 본 해석에서, 감쇠기가 없는 기존 R/C 골조구조물에서 최상층부 최대 수평변위가 5.7 cm 가량으로서, Cecen(1979)의 실험에서의 최대 수평변위인 약 5.3 cm 과 근접한 결과를 보여, 본 연구에서 제시된 R/C 골조해석모델의 결과가 실험과 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 제어압력이 증가함에 따라 최상층부의 최대 수평변위량은 각각, 3.6 cm, 1.6 cm, 및 0.7 cm 으로서 감쇠기가 없는 경우의 최대 변위 5.7 cm 보다 크게 감소한 것으로 나타났다.

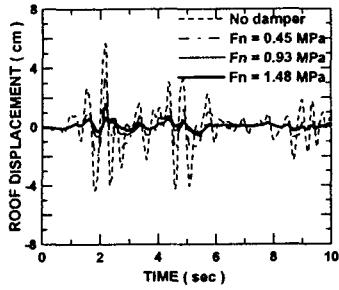


그림 5 시간이력-변위 응답의 비교

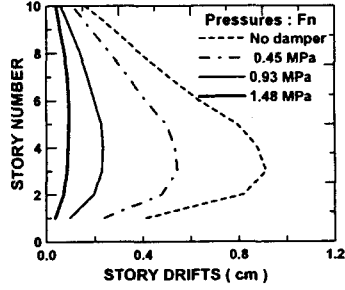


그림 6 최대 층간변위 비교

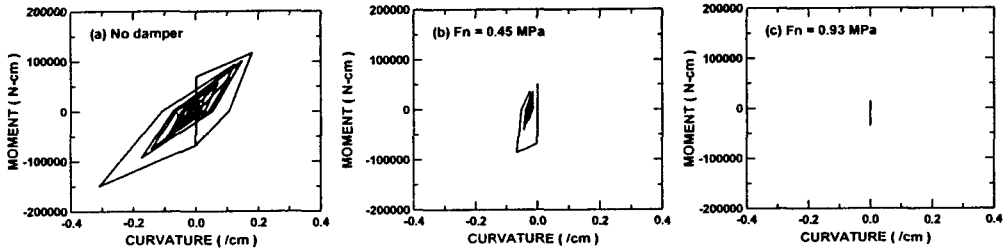


그림 7 1층 R/C 기둥의 모멘트-곡률 거동관계

그림 6은 기존구조물과 각 감쇠기 배치에 따른 최대 층간변위를 나타내고 있다.  $F_n$  값이 0.45, 0.98, 및 1.48 MPa 로 증가함에 따라서, 최대 층간변위량은 각각, 0.54, 0.23, 및 0.09 cm 으로 감소하였으며, 세 경우 모두 감쇠기가 없는 기존구조물의 최대 층간변위 0.91 cm 보다 작게 나타났다. 감쇠기의 제어압력을 증가시킬 수록 최대 변위 및 층간변위를 억제하는데 보다 효과적으로 나타났다. 하지만 감쇠기의 제어압력을 지나치게 증가시킬 경우 최소철근량을 사용한 감쇠기 R/C 전단벽 부분의 콘크리트 균열 및 철근의 항복이 일어나게 되어 감쇠기의 파손을 피할 수 없게 된다.

그림 7은 감쇠기가 없는 경우와 감쇠기가 보강된 경우의 1층 기둥 부재에 대한 모멘트-곡률 이력거동관계를 나타내고 있다. 감쇠기가 없는 경우 최대 곡률량은 0.3/cm 이상을 상회하였으며,  $F_n$  값이 0.45 MPa 인 경우는 약 0.07/cm,  $F_n$  값이 0.93 이상에서는 모멘트-곡률 관계가 선형거동을 하는 것으로 나타났다.

그림 8에서는, 1층 감쇠기의 마찰력-변위 이력관계를 나타내었다. 감쇠기에 작용하는 제어압력  $F_n$  이 증가함에 따라 감쇠기의 마찰력이 증대되고 상대적으로 감쇠기의 변위는 감소하는 것을 알 수 있다.

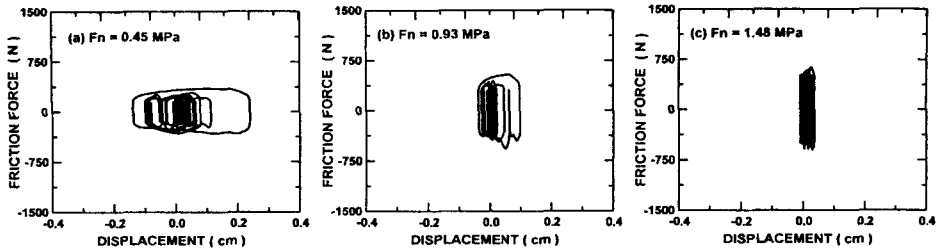


그림 8 1층 감쇠기의 마찰력-변위 거동관계

그림 9 는 감쇠기가 없는 경우와 감쇠기가 배치된 경우의 제어압력의 크기에 따른 R/C 보 및 기둥 부재의 인장철근 항복으로 인한 소성흔지 발생 분포를 나타낸 것이다. 감쇠기가 없는 기존 구조물에 비해 제안된 감쇠기 도입으로 인한 소성흔지 발생이 크게 감소됨을 확인할 수 있었다. 감쇠기의 제어압력을 증가시킬수록 철근항복위치는 감소하여,  $F_n$  값이 0.93 MPa 인 경우 기둥의 손상이 없었으며, 1.48 MPa 인 경우 일부의 보 부재에서만 철근 항복이 발생하였다.

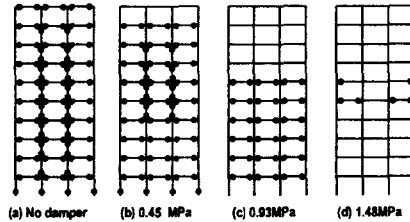


그림 9 인장철근의 항복 위치

## 6. 결 론

본 연구에서 제안된 테프론슬라이딩 벽식감쇠기를 R/C 골조구조물에 적용하여, 감쇠기가 보강되지 않은 경우와 보강된 경우와의 비교·분석을 통해, 제안된 감쇠기의 지진응답제어 및 구조부재에 대한 손상억제에서의 우수성을 확인할 수 있었으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 제안된 벽식마찰감쇠기는, 강진의 발생시 쉽게 야기되는 R/C 부재와 감쇠기 간 연결부의 응력집중으로 인한 파손을 최대한 억제할 수 있도록 고안되었다. 더불어 수직력에 대해서는 감쇠기가 P- $\Delta$  효과를 줄여주는 효과를 기대할 수 있으며, 기존 구조물에 쉽게 보강하여 적용할 수 있도록 고안되었다.
- 2) 해석모델을 통하여, 감쇠기가 보강되지 않은 경우와 감쇠기로 보강된 구조물을 비교했을 때, 제안된 감쇠기를 대상구조물에 적용한 경우, 최상층부의 변위이력-변위 관계 및 층간변위 억제에서 우수한 제어효과를 나타내었으며, 이로 인하여, 저층 기둥 부재의 철근항복과 같은 구조 부재의 손상을 최대한 억제시켜 주었다.
- 3) 감쇠기에 도입되는 제어압력이 조절 가능함으로서 지진규모 및 구조물의 성능설계에 요구되는 기준에 따

라서 제어압력을 설정할 수 있다. 이는 감쇠기의 제어압력을 능동적으로 조절 가능하도록 할 경우 제안된 감쇠기를 능동형 내진설계에 적용할 수 있을 것이다.

## 참고 문헌

1. Chang, K. C., Soong, T. T., Oh, S. T., and Lai, M. L., Seismic Behavior of Steel Frame with Added Viscoelastic Dampers, *J. Structural Engineering, ASCE*, Vol. 121, No. 10, pp. 1418-1426, 1995.
2. 조창근, 박문호, 곽진순, 물리·역학적 특성을 고려한 점탄성 감쇠기 모델에 의한 강뼈대구조물의 지진 응답개선. 한국전산구조공학회 논문집, 제14권 제2호, pp. 225-236, 2001.
3. Mohka, A., Constantinou, M.C., and Reinhorn, A.M., "Teflon Bearing in Base Isolation, Part I : Testing," *J. Structural Engineering, ASCE*, Vol. 116, No. 2, pp. 438-454, 1990.
4. Mohka, A., Constantinou, M.C., and Reinhorn, A.M., "Teflon Bearing in Base Isolation, Part II : Modeling," *J. Structural Engineering, ASCE*, Vol. 116, No. 2, pp. 455-474, 1990.
5. Hognestad, E., "A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members," Univ. of Illinois Eng. Experimental Station, Bulletin Series No. 399, pp. 128, 1951.
6. Kent, D. C. and Park, R., "Flexural members with confined concrete," *J. of Struct. Div., ASCE*, Vol. 97, ST7, pp. 1969-1990, 1971.
7. Mander, J. B., "Seismic design of bridge piers," Ph.D. Dissertation. Dept. of Civil Eng., Univ. of Canterbury, New Zealand, 1984.
8. Ichinose, T. and Takiguchi, K., "Experimental Verification of Beam Models of RC," *J. of Struct. Eng., ASCE*, Vol. 120, No. 8, pp. 2261-2280, 1994.
9. Kunnath, S. K., Reinhorn, A. M., and Park, Y. J., "Analytical Modeling of Inelastic Seismic Response of R/C Structures," *J. of Struct. Eng., ASCE*, Vol. 116, pp. 996-1017, 1990.
10. Roufaiel, M. S. and Meyer, C., "Analytical Modeling of Hysteretic Behavior of R/C Frames," *J. of Struct. Eng., ASCE*, Vol. 113, pp. 429-444, 1987.
11. Maison, B. F., "PC-ANSR : Micro Computer Program for NISEE." University of California, Berkeley, 1992.
12. Cecen, H., "Response of Ten Story Reinforced Concrete Model Frames to Simulated Earthquake," Ph. D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, 1979.