

# 나선근에 의한 횡보강 응력 계산을 위한 횡보강 유효 계수의 산정법

## Estimation of Confinement Effectiveness Factor for Confining Stress by Spiral

김진근\* 박찬규\*\*  
Kim, Jin-Keun Park, Chan-Kyu

### ABSTRACT

In order to predict the behavior of column confined with spirals, the accurate estimation of confining stress by spiral is very important. Thus a number of models have been proposed for calculating the confining stress by spiral. However, in these equations, it was not considered the effects of the difference of mechanical characteristics related to the application of high strength concrete and spiral in structures.

In this study, a model equation for calculation of the confining stress by spiral was proposed based on the test results investigated here. The proposed equation included the effects of concrete strength, spacing and yield strength of spirals.

### 1. 서론

다른 콘크리트 부재와 마찬가지로 기존의 기둥 설계나 거동을 예측하기 위해 제안된 식들은 대부분 압축강도 41MPa 이하의 콘크리트와 항복강도 414MPa 이하의 철근을 사용한 부재의 실험 결과 및 이론에 기초하고 있다. 그러나 최근에 41MPa 이상의 압축강도 수준을 갖는 콘크리트가 건설 산업에서 많이 사용되고 있으며, 부분적으로 압축강도 수준이 120MPa 정도되는 콘크리트가 빌딩 구조물에 성공적으로 사용되고 있다. 이러한 고강도 콘크리트는 재료 역학적 특성 및 구조 역학적 특성 그리고 콘크리트 제조시 배합 설계와 사용 재료에서 기존의 보통강도 콘크리트(압축강도 41MPa 이하)와는 다르다.<sup>1)</sup> 그러므로 기둥 설계나 거동의 해석을 위해서는 이와 같은

점을 고려해야 하며, 기존의 식들이 고강도 콘크리트 부재에서도 타당한지에 대한 검토를 해볼 필요가 있다. 또한 고강도 콘크리트와 고강도 철근을 사용한 부재의 역학적 특성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 기둥에서도 고강도 나선근을 사용했을 경우 콘크리트의 횡보강 효과에 대한 연구가 이루어지고 있지만 아직까지 미미한 실정이다. 특히 나선근에 의한 횡보강 응력 계산식은 기존의 보통강도 콘크리트와 저강도 나선근을 사용한 경우의 실험 결과를 바탕으로 한 계산식을 고강도에도 단순히 적용하는 경우가 대부분이어서, 새로운 제안식이 필요한 실정이다.

이 연구에서는 나선근으로 횡보강된 콘크리트의 거동 예측시 가장 중요한 요소가 되는 횡보강 응력 계산에 대하여 연구하고자 한다. 이 때 선택된 주요 변수는 나선근의 항복강도 및 간격, 콘크리트의 압축강도 등이며, 이러한 변수에 대하여 실험을 수행하여 모델식을 유도하고자 한다.

\* 한국과학기술원 토목공학과 교수

\*\* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

## 2. 나선근에 의한 횡보강 응력의 계산식

$$f_1 = \frac{2A_{sp}f_y}{d_s} \quad (3)$$

### 2.1 이상화된 횡보강 응력

횡보강된 콘크리트의 강도나 그 점에서의 축방향 변형도 등은 최대 응력 이전의 응력 경로에 관계없이 최대 응력 상태에서 횡보강 응력 크기의 함수로 예측이 가능하다고 알려져 있으며, 이를 식으로 나타내면 식 (1)과 식 (2)와 같다.

$$f_{oc} = f_o + f(f_1) \quad (1)$$

$$\epsilon_{oc} = \epsilon_o + g(f_1) \quad (2)$$

여기서,  $f_{oc}$ ,  $\epsilon_{oc}$  및  $f_1$ 은 각각 횡보강된 콘크리트의 압축강도와 그 점에서의 축방향 변형도 및 횡보강 응력이며,  $f_o$ ,  $\epsilon_o$ 은 각각 횡보강되지 않은 콘크리트의 압축강도와 그 점에서의 축방향 변형도이다. 식 (2)에서의 횡보강 응력은 횡보강된 콘크리트의 최대 응력에서의 나선근에 발생하는 인장력을 횡보강된 콘크리트의 표면에 균일하게 분포시키는 방법을 사용하여 계산할 수 있으며, 다음과 같은 가정하에 횡보강 응력 계산식을 유도할 수 있다.

횡보강된 콘크리트가 압축하중을 받을 경우 최대 응력 이전에 나선근이 항복하고, 나선근의 간격이 균일한 횡보강 응력을 유발시킬 수 있을 정도로 충분히 좁다면 그림 1에 나타낸 바와 같은 이상적인 횡보강 응력이 발생한다. 그림 1에서 나선근의 인장 응력 방향으로 평형 방정식을 풀어서 횡보강 응력( $f_1$ )을 구하면 식 (3)에 나타낸 바와 같다.

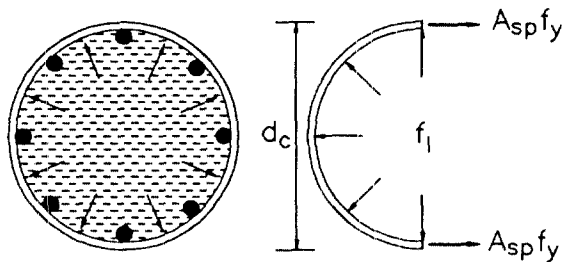


그림 1 나선근에 의한 횡보강 응력

여기서,  $A_{sp}$ 는 나선근의 단면적이며,  $f_y$ 는 나선근의 항복강도,  $s$ 는 나선근의 간격,  $d_c$ 는 나선근의 외경(횡보강된 콘크리트 단면적의 지름)이다. 그리고 식 (3)에서 주의할 점은 나선근으로 사용된 횡보강근의 응력-변형도 관계는 탄성-완전소성의 형태로 모델링되어 있다는 점이다.

### 2.2 횡보강 유효 계수

횡보강 유효 계수의 정의는 나선근에 의한 횡보강 응력 계산시 나선근의 간격에 따른 기하학적 형상 효과를 고려해 주기 위한 것이다. 횡보강된 콘크리트의 최대 응력 이전에 나선근이 항복한다는 가정하에서 유도된 식 (3)이 횡보강 응력을 과대 평가하고 있다는 실험 결과에 기초하여 Iyengar 등<sup>2)</sup>은 횡보강 유효 계수( $k_e$ )를 제안하여 이를 보정해주었으며, 이 때의 횡보강 응력 계산식은 아래 식 (4)에 나타낸 바와 같다.

$$f_1 = \frac{2A_{sp}f_y}{d_s} \times k_e \quad (4)$$

그리고 기존에 각 연구자들이 제안한 횡보강 유효 계수를 분류하면 표 1과 같다.

표 1 각 연구자에 따른 횡보강 유효 계수

연구자	횡보강 유효 계수
Iyengar 등 <sup>2)</sup>	$1 - \frac{s}{d_c}$
Martinez 등 <sup>3)</sup>	$\frac{f_s}{f_y} \left(1 - \frac{s}{d_c}\right)$
Ahmad와 Shah <sup>4)</sup>	$1 - \sqrt{\frac{s}{1.25d_c}}$
김진근 등 <sup>5)</sup>	$1 - \sqrt{\frac{s}{d_c}}$
Mander 등 <sup>6)</sup> : 축방향 철근이 없는 경우	$\frac{d_c}{d_s} \left(1 - \frac{s}{2d_s}\right)^2$

여기서,  $s$ 는 나선근의 간격,  $d_c$ 는 나선근의 외경,  $f_s$ 는 나선근에 발생하는 실제 응력,  $f_y$ 는 나선근의 항복강도,  $d_s$ 는 나선근의 중심

간 거리,  $s'$ 는 나선근의 순간격이다.

이 연구에서는 다음과 같이 횡보강 유효 계수를 정의하였다. 나선근이 항복한다는 가정하에 도입된 횡보강 유효 계수는 나선근의 응력에 관계된 부분과 나선근의 간격에 관계된 부분으로 나눌 수 있다. 전자는 나선근이 항복하지 않았을 경우에 해당되는 것이고, 후자는 나선근이 항복한 이후에 해당되는 것이다. 이것을 식으로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$k_e = k_1 \cdot k_2 \quad (5)$$

여기서,  $k_1$ 은 나선근의 응력에 대한 것,  $k_2$ 는 나선근의 간격에 대한 것이다. 위에서 제시된 기존의 횡보강 유효 계수는 2가지 종류를 동시에 고려한 것으로 판단되나, 이 계수가 구체적으로 어떤 영향인자의 함수인지에 대해서는 연구가 이루어지지 않았다. 그러므로  $k_1$ ,  $k_2$ 에 대한 명확한 규명이 필요하다고 판단된다.

### 3. 나선근에 의한 횡보강 효과 실험

#### 3.1 실험

콘크리트 제조를 위하여 제 1종 포틀랜드 시멘트, 잔골재는 강모래를 사용하였으며, 굵은골재는 최대 골재크기 10mm의 화강암 쉐석을 사용하였다. 그리고 고강도 콘크리트 배합에서는 실리카흄을 사용하였다. 콘크리트의 배합은 표 2와 같다.

표 2 콘크리트 배합표

배합 번호	시멘트	물	잔골재	굵은 골재	단위(kg/m <sup>3</sup> )	
					실리카 흄	고성능 감수제
NC	320	230.4	752	919.3	-	-
MC	480	163	682	1023.0	-	1
HC	495	165	613.3	1044.3	55	2

나선근은 항복강도에 따라 두가지 종류를 선택하였는데 각각의 항복강도는 450(지름 4.8mm), 1375MPa(지름 5.0mm)이다. 항복강도가 450MPa인 나선근의 탄성계수는 182955MPa, 1375MPa인 경우는 탄성계수는

193754MPa이다. 나선근의 항복강도는 영구 연신율 0.2%에서 결정하였다.

모든 시험체는  $\phi 100 \times 400$ mm의 원주형으로 각각의 변수에 대하여 2개씩 제작되었다. 나선근은 바깥지름이 100mm, 각각의 간격에 맞게 스프링 제조 회사에서 제작하였으며, 콘크리트 타설전 몰드안에 배치를 하였다. 모든 시험체에 대하여 진동기를 사용하여 다짐을 실시하였으며, 타설후 24시간만에 탈형하여 시험시까지 수중양생을 실시하였다. 나선근의 변형도는 시험체의 중앙부근에 스트레인 게이지를 양면에 부착하여 측정하였다. 그리고 시험체에 콤프레소메타를 부착한 다음, 양면에 LVDT를 설치하여 축방향 변위를 측정하였다.

#### 3.2 실험결과 및 고찰

실험결과를 표 3에 나타낸 바와 같으며, 각각의 시험체 응력-변형도 곡선에서 최대 응력( $f_{oc}$ )과 그 점에서의 축방향 변형도( $\epsilon_{oc}$ ) 및 나선근의 응력( $f_s$ )이 제시되어 있다.

##### 3.2.1 최대 응력에서의 나선근 변형도

그림 2는 나선근의 간격과 최대 응력에서 나선근의 변형도를 나타낸 것이다. 동일한 나선근 간격하에서 최대 응력에서 나선근의 변형도는 콘크리트의 압축강도에 따라 크게 영향을 받음을 알 수 있는데 이것은 콘크리트의 부피 팽창과 관계가 있기 때문이다. 그리고 나선근의 간격이 작아질수록 이 값은 콘크리트의 압축강도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 나선근의 간격이 커질수록 콘크리트의 압축강도와 나선근의 항복강도에 관계없이 최대 응력에서의 나선근의 변형도는 0으로 접근을 하며, 이 때의 나선근의 간격은 시험체의 직경보다 조금 큰 것을 알 수 있다. 그리고 나선근의 간격이 120mm(시험체 직경의 1.2 배)인 NC120-L의 경우, 나선근 응력이 매우 작은 값을 보이고 있어서 실제로 나선근에 의하여 횡보강이 이루어지지 않음을 알 수 있다. 이러한 현상을 역으로 설명하면, 나선근에 의한 횡보강 응력 계산시 나

표 3 실험결과

specimen	$f_c', f_o, \epsilon_o$	$f_y$ (MPa)	s(mm)	$f_{oc}$ (MPa)	$f_{oc}-f_o$ (MPa)	$\epsilon_{oc}$	$f_s$ (MPa)
NC120-L	$f_c'$ ( $\Phi 100 \times 200$ mm)	451	120	25.02	0.00	0.002081	11.2
NC60-L	=27.20MPa	451	60	27.23	2.21	0.004090	128.1
NC40-L	$f_o$ ( $\Phi 100 \times 400$ mm)	451	40	32.58	7.56	0.01015	365.1
NC30-L	=25.02MPa	451	30	42.28	17.26	0.01534	435.1
NC20-L	$\epsilon_o$ (for $f_o$ )	451	20	54.44	29.42	0.02455	456.5
NC40-H	=0.001965	1375	40	37.19	12.17	0.01901	522.5
MC60-L	$f_c'$ ( $\Phi 100 \times 200$ mm)	451	60	62.42	2.92	0.003012	162.8
MC40-L	=62.40MPa	451	40	68.03	8.53	0.003646	176.7
MC30-L	$f_o$ ( $\Phi 100 \times 400$ mm)	451	30	76.37	16.87	0.005286	310.0
MC20-L	=59.50MPa	451	20	87.88	28.38	0.006491	392.7
MC80-H	$\epsilon_o$ (for $f_o$ )	1375	80	60.50	1.00	0.002653	85.1
MC40-H	=0.002466	1375	40	70.53	11.03	0.004341	261.2
HC60-L	$f_c'$ ( $\Phi 100 \times 200$ mm)	451	60	78.56	0.56	0.002878	98.6
HC40-L	=81.20MPa	451	40	83.40	5.40	0.003151	126.3
HC20-L	$f_o$ ( $\Phi 100 \times 400$ mm)	451	20	103.40	25.40	0.005000	348.8
HC50-H	=78.00MPa	1375	50	82.85	4.56	0.003091	113.5
HC40-H	$\epsilon_o$ (for $f_o$ )	1375	40	88.62	10.62	0.003681	210.2
HC25-H	=0.002588	1375	25	103.28	25.28	0.006676	521.6

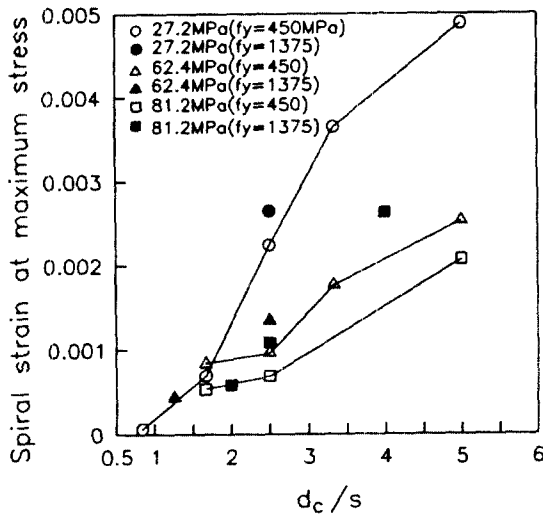


그림 2 나선근 간격에 따른 최대  
응력에서의 나선근 변형도

선근의 항복강도를 사용하는 경우에는 횡보강 유효 계수의 도입이 반드시 필요함을 의미하며, 이 때의 횡보강 유효 계수는 나선근의 실제 인장 응력과 밀접한 관계가 있으므로 나선근의 응력의 함수로 이 계수를 정의할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 나선근에 의한 횡보강 응력의 계산

앞에서도 언급한 바와 같이 나선근의 간격이 시험체의 직경에 비하여 상대적으로 큰 경우 나선근은 항복하지 않는데, 이는 횡보강 유효 계수의 도입이 반드시 필요함을 의미한다. 그리고 그림 2에서 동일한 콘크리트 압축강도와 나선근 항복강도 하에서 나선근의 간격과 최대 응력에서의 나선근 변형도는 대체적으로 선형적인 관계로 모델링할 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 실험결과에 기초하여 이 연구에서는 다음과 같은 방법으로 횡보강 응력을 계산하였다.

시험체의 직경(횡보강된 콘크리트 단면적의 지름)이  $d_c$ , 나선근의 지름이  $d_{sp}$ , 나선근의 항복강도가  $f_y$ 이며, 나선근의 탄성계수가  $E_s$ 인 경우를 살펴 볼 때, 나선근에 의한 횡보강이 이루어지지 않는 나선근의 간격을  $\alpha d_c$ 라면, 기존의 실험결과에서  $\alpha$ 는 다음과 같은 값을 가지는 것으로 나타났다<sup>2,4)</sup>.

$$\alpha \approx 1.0 \sim 1.25 \quad (6)$$

표 3에서 NC120-L은 나선근의 횡보강 효과가 거의 나타나지 않음을 알 수 있는

데, 이것을 바탕으로 이 연구에서는  $\alpha$  값을 1.2로 산정하였다. 그리고 주어진 횡보강되지 않은 콘크리트 압축강도  $f_o$ 에 대하여 나선근의 간격을  $s_1, s_2, s_3$  및  $s_4 (s_1 > s_2 > s_3 > s_4)$ 로 변화시키면, 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 나선근의 응력-변형도 관계를 선형 탄성-완전 소성의 형태로 가정한 경우에 나선근이 항복하는  $s_3$ 가 존재한다. 그리고 압축강도를  $f_{o1}, f_{o2}$  및  $f_{o3} (f_{o1} < f_{o2} < f_{o3})$ 로 변화시키면, 각각의 압축강도에 대하여 나선근이 항복하는 간격이  $s_{y1}, s_{y2}$  및  $s_{y3} (s_{y1} > s_{y2} > s_{y3})$ 로 변화할 것이며, 이는 콘크리트의 부피팽창에 기인한다. 위에서 언급한 바와 같이 최대 응력에서의 나선근의 변형도와 간격의 관계를 선형적으로 가정하는 경우, 나선근의 간격과 항복강도와의 관계를 그림 3(b)와 같이 나타낼 수 있다.

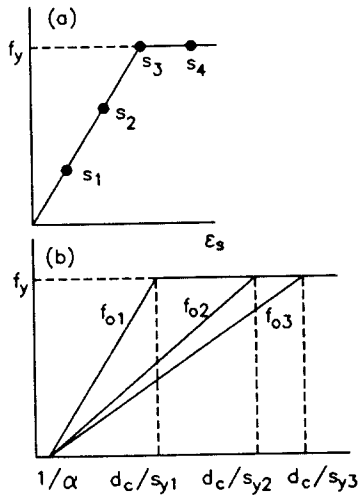


그림 3 간격에 따른 나선근 응력의 변화

위의 이론은 나선근의 응력-변형도 곡선이 탄성-완전 소성인 경우에 성립되므로, 이 연구에서 사용된 나선근을 항복강도  $f_y$ 와 탄성계수  $E_s$ 를 갖는 탄성-완전 소성으로 모델링하였다. 그리고 항복강도 450MPa와 1375MPa인 나선근에 대하여  $s_y$ 를  $f_o$ 와  $d_c$ 의 함수로서 나타내면 식 (7) 및 식 (8)과 같으며, 모델식과 실험결과와의 관계는 그림 4에 나타난 바와 같다.

$f_y = 450 \text{ MPa}$ 에 대하여,

$$s_y = \frac{d_c}{0.057f_o + 1.36} \quad (7)$$

$f_y = 1375 \text{ MPa}$ 에 대하여,

$$s_y = \frac{d_c}{0.095f_o + 3.16} \quad (8)$$

여기서,  $d_c$ 는 나선근의 외경,  $f_o$ 는 무근 공시체의 압축강도이다.

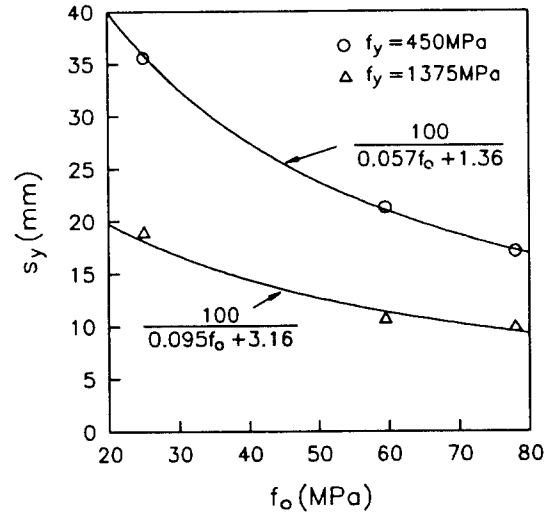


그림 4 콘크리트의 압축강도에 따른 나선근 항복점에서의 간격

앞에서도 언급한 바와 같이 나선근 응력의 함수인  $k_1$ 은 나선근이 항복하기 이전에 도입이 되는데, 그림 3(b)에서 콘크리트의 압축강도 수준에 따른 직선의 초기 기울기이다. 이 때 나선근의 간격 효과가 동시에 고려되었으므로  $k_2$ 는 1로 볼 수 있다. 그리고 그림 4에 나타난 바와 같이 나선근이 항복할 때의 간격은 시험체의 직경에 비하여 상당히 작음을 알 수 있으며, 나선근이 항복한 이후 나선근의 간격이 횡보강 응력의 유효율에 미치는 영향은 매우 작으므로  $k_2$ 는 1.0으로 보았다. 그러므로 최종적인 횡보강 응력은 아래 식 (9)과 식(10)으로 계산할 수 있다.

$s \geq s_y$  인 경우,

$$f_t = \frac{2A_{sp}f_y}{d_s} \left( \frac{1.2s_y}{1.2d_c - s_y} \right) \left( \frac{d_c}{s} - \frac{1}{1.2} \right) \quad (9)$$

$s \leq s_y$  인 경우

$$f_t = \frac{2A_{sp}f_y}{d_s} \quad (10)$$

여기서,  $s_y$ 는 임의의 압축강도  $f_o$ 에 대하여 나선근이 항복할 때의 간격이며, 식 (7)과 식 (8)에 정의된 바와 같와 같다.

### 5. 모델식을 이용한 횡보강된 콘크리트의 강도 증가 예측식

위에서 제시된 나선근에 의한 횡보강 응력 계산식을 사용하여 횡보강된 콘크리트의 강도 예측식을 제안하였다. 표 3의 실험치와 이 연구에서 사용한 시험체의 크기와 유사하고 나선근의 변형도가 보고된 Martinez 등의 실험결과와 강관을 이용하여 콘크리트의 횡보강 효과에 대한 실험을 수행한 Xiao 등<sup>7)</sup>의 실험치를 바탕으로 회귀분석을 하여 식 (11)에 나타낸 바와 같은 모델식을 유도하였다. 여기서 횡보강 응력 ( $f_t$ )은 식 (9)와 식 (10)으로서 계산한 값이다.

$$f_{oc} = f_o + 3.52f_t \quad (11)$$

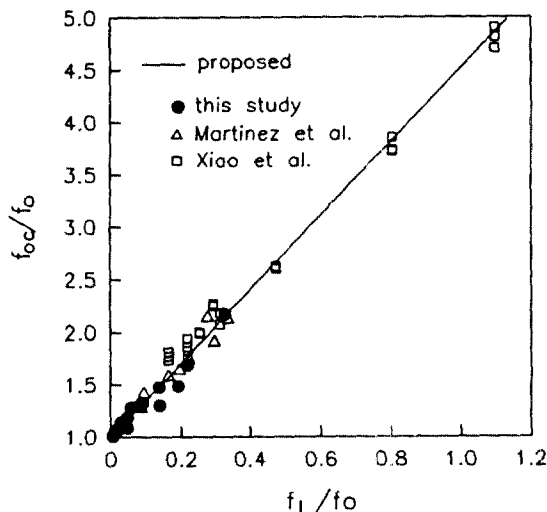


그림 5 횡보강된 콘크리트의 강도 증가

### 6. 결론

나선근의 실제 응력을 고려하여 횡보강 응력을 계산할 수 있는 모델식을 유도하였으며, 이 때 횡보강 응력은 나선근의 항복강도 및 간격, 콘크리트의 압축강도, 그리고 공시체의 직경에 의하여 계산할 수 있다.

### 참고 문헌

- 1) ACI Committee 363, "State-of-the Art Report on High-Strength Concrete," (ACI363R-84), American Concrete Institute, Detroit, 1984, 48 pp.
- 2) Iyengar, K.T.S.R., Desayi, P., and Reddy, K.N., "Stress-Strain Characteristics of Concrete Confined in Steel Binders," Magazine of Concrete Research, Vol. 22, No. 72, 1970, 173-184.
- 3) Martinez, S., Nilson, A.H., and Slate, F.O., "Spirally-reinforced High-strength Concrete Columns," Report No. 82-10, Dept. of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, N.Y., 255 pp.
- 4) Ahmad, S.H., and Shah, S.P., "Stress-Strain Curves of Concrete Confined by Spiral Reinforcement," ACI Journal, Vol. 79, No. 6, Nov.-Dec. 1982, pp. 484-490.
- 5) Kim, J.K., and Lee, T.G., "Failure Behavior of Reinforced Concrete Frames by Combined Layered and Nonlayered Method," Computer and Structure Journal, Vol. 48, No. 5, 1993, pp. 819-825.
- 6) Mander, J.B., Priestly, M.J.N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 1804-1826.
- 7) Xiao, Y., Tommii, M., and Sakino, K., "Triaxial Compressive Behavior of Confined Concrete," Concrete Research and Technology, Japan Concrete Institute, Vol. 2, No. 1, 1991, pp. 1-14.