

# 고강도콘크리트 구조부재의 변위해석시스템 개발연구

## The Development of Displacement Analysis System in High Strength Concrete Members

장 일 영\*  
Jang, Il-Young

요 약

고강도콘크리트(압축강도 400~700kgf/cm<sup>2</sup>)를 이용한 구조물의 강도성능과 휨변형을 정확히 구하는 해석방법을 제안하는 것이 본 연구의 목적으로서, 재료특성을 모델화하기 위하여 회귀분석을 이용한 고강도콘크리트의 응력-변형률관계와 사다리꼴 응력모델을 검토하여 그 적용성을 확인하였다. 내력과 변형의 해석방법으로서는 단면을 요소분할하여 재료의 응력-변형률관계를 이용한 모멘트-곡률관계의 해석을 이용하였다. 여기서 본 연구는 재료특성의 불확정 변수와 해석시의 반복계산에 의한 오차를 최소화하기 위하여 확률적 개념을 이용한 몬테카를로 시뮬레이션의 방법을 도입하여 내력 및 변위성능을 합리적으로 평가하였다.

Abstract

The object of this study is to propose a rational method of resistance strength and flexural deformation for structures using high strength concrete(400~700kgf/cm<sup>2</sup>).

The material property(stress-strain relationship) is to be modelize using regression analysis of experimental result. And the applicability of trapezoidal stress model is to be verified. An analytical method is used by the moment-curvature relationship which is based on stress-strain relationships of material for discreted element of section.

The evaluation method of moment-curvature of high strength concrete structures is also proposed by using the Monte Carlo Simulation based on a probabilistic concept that could minimize an error due to iterated calculations and random variable of material properties.

1. 서 론

최근 구조물의 초고층화, 대형화 그리고 특수화 경향과 더불어 고강도콘크리트를 이용한 구조물 해석과 설계법 등에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>(1,2)</sup>. 탁월한 구조적 장점 때문에 고강도콘크리트의 사용은 필연적 추세이지만, 취성파괴에

대한 구조적 안정성 확보가 중요한 과제로 대두되고 있다. 특히 압축강도의 사용범위가 넓어진 콘크리트의 응력-변형률관계곡선 모델화, 종국강도의 산정에 이용되는 응력블럭모델의 적용성, 그리고 강도의 평가만이 아닌 하중-변형관계로서 표현되는 연성 확보 등의 문제를 명확히 규명할 필요가 있다.

\* 금오공과대학교 토목공학과 조교수

이 논문에 대한 토론을 1995년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1996년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

본 연구에서는 최근 가장 많이 사용하고 있으며 앞으로도 빈번한 사용이 예상되는 압축강도 400kgf/cm<sup>2</sup>부터 700kgf/cm<sup>2</sup>까지의 범위에 있는 고강도콘크리트를 이용한 경우, 그 구조물의 종국 강도와 휨변형특성을 비교적 정확히 구할 수 있는 해석방법의 제안을 목적으로 하고 있다. 우선 고강도콘크리트의 재료특성을 모델화하기 위하여 저자의 실험결과<sup>(3)</sup>와 실험조건이 유사한 기존의 응력-변형률관계들을 대상으로, 회귀분석을 행하여 새로운 고강도콘크리트의 응력-변형률관계를 모델화하였다. 또한 이 관계로부터 사다리꼴형의 응력모델을 검토하여 적용성을 확인하였다. 강도와 변형의 해석에 있어서는, 단면을 요소분할하여 재료의 응력-변형률관계와 평형방정식을 이용한 모멘트-곡률관계의 해석방법을 기본으로 하였다. 여기서 본 연구에서는 재료특성의 불확실성과 모멘트-곡률해석방법의 오차 등의 불확실성을 충분히 고려하기 위하여 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation) 모의기법을 도입하였다. 즉 난수를 발생시켜서 재료특성의 불확정 변수와 해석시의 반복계산등에 의한 오차를 최소화하기 위하여 확률적 개념을 이용한 해석방법의 제안이 본 연구의 특징이다.

2. 재료특성의 모델화

2.1 고강도콘크리트의 모델화

고강도콘크리트(압축강도 400kgf/cm<sup>2</sup>~700kgf/cm<sup>2</sup>)의 재료특성을 모델화하기 위하여 참고문헌(3)의 실험결과(Φ10×20cm의 원형공시체 600개의 압축강도시험으로써 배합비는 주로 물시멘트비와 잔골재율을 증감하여 결정되었다)와 실험조건이 유사한 기존 연구<sup>(4)</sup>들의 응력-변형률관계를 대상으로, 회귀분석을 이용하여 새로운 고강도콘크리트의 응력-변형률관계를 모델화하였다.

그림 1에 나타낸 바와 같이 400kgf/cm<sup>2</sup>, 500kgf/cm<sup>2</sup>, 600kgf/cm<sup>2</sup> 및 700kgf/cm<sup>2</sup>의 각 강도에 대하여 상승 및 하강곡선식을 모델화하였다. 즉 최근 일반적으로 많이 사용되고 있는 설계 기준강도에 대한 표준화의 의미를 갖는다. 하강곡

선은 횡보강근등에 의해 강하게 구속될 경우(참고 문헌(5)의 횡보강근비에 의해 구배가 변화하는 Park모델과 동일하여, 그림 1에 점선부분은 강도 700kgf/cm<sup>2</sup>경우의 예이다)와 비구속일 경우의 두 가지 형태로 모델화하였다.

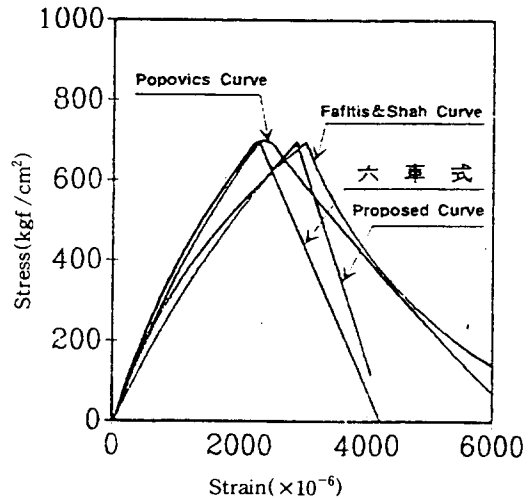


그림 1 각 강도별의 응력-변형률관계 모델

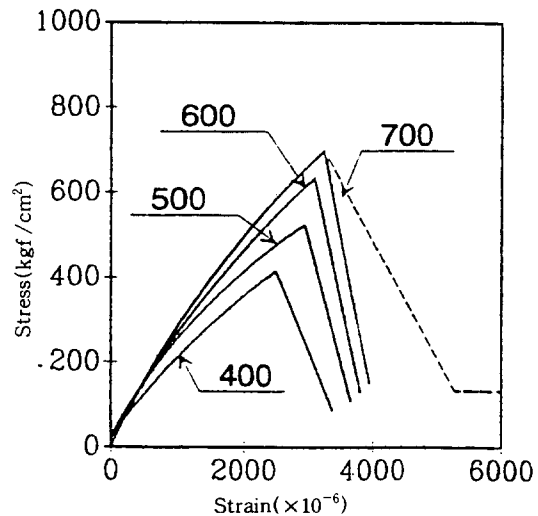


그림 2 고강도콘크리트의 응력-변형률 모델 비교

상승곡선의 기울기는 최대강도가 증가함에 따

라 급해지며, 최대강도시의 변형율은 약간씩 증가하고 있다. 하강곡선에서는 비구속조건의 경우, 최대강도가 클수록 기울기가 급하게 떨어지는 경향이 있으며, 구속조건일 경우는 완만히 떨어지는 직선형태로 나타나고 있다. 즉 고강도콘크리트를 사용할 경우에는 최대압축강도 이후의 급격한 취성 파괴가 우려되므로 보강근의 역할이 더욱 중요시될 것으로 사료된다.

각 강도별의 고강도콘크리트의 모델구성식을 표 1에 나타낸다.

표 1 고강도콘크리트의 응력-변형률관계 구성식

Compressive Strength	Ascent Curve	Descent Curve
400kgf/cm <sup>2</sup>	$f'_c = 7.21 \times 10^4 \cdot \epsilon_c^{0.85}$	$f'_c = 706 - 16.4 \times 10^4 \cdot \epsilon_c$
500kgf/cm <sup>2</sup>	$f'_c = 3.51 \times 10^4 \cdot \epsilon_c^{0.71}$	$f'_c = 1355 - 35.8 \times 10^4 \cdot \epsilon_c$
600kgf/cm <sup>2</sup>	$f'_c = 7.19 \times 10^4 \cdot \epsilon_c^{0.81}$	$f'_c = 1623 - 41.4 \times 10^4 \cdot \epsilon_c$
700kgf/cm <sup>2</sup>	$f'_c = 10.2 \times 10^4 \cdot \epsilon_c^{0.85}$	$f'_c = 2353 - 61.1 \times 10^4 \cdot \epsilon_c$

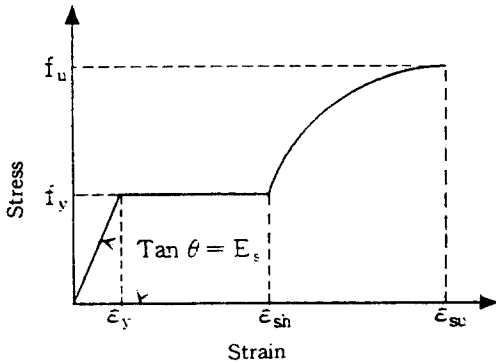


그림 3 철근특성의 응력-변형률관계

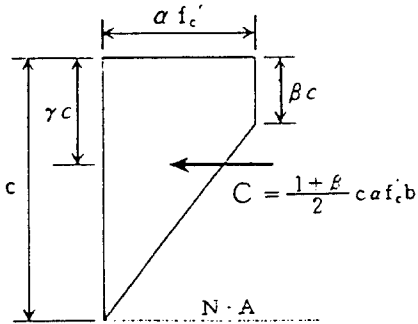


그림 4 사다리꼴 응력 모델

그림 2는 설계기준강도 700kgf/cm<sup>2</sup>의 경우를 예로 들어 여러 제안식과 비교한 것이다. 본 연구에서 제안한 모델과 기존의 모델들<sup>(6,7,8)</sup>과 비교하면 최대압축강도와 이 때의 변형율은 다른 모델과 비교하여 큰 차이를 나타내고 있지만, 하강곡선의 경사는 가장 급경사를 이루고 있다. 즉 기존 모델들 보다도 취성적 성향을 가장 강조한 모델로 사료된다.

이것은 콘크리트 강도가 높아지면 최대압축강도 이후에 대한 하강곡선의 실험적측정에 한계가 있고, 극한변형율까지의 측정은 측정장치와 실험방법에 좌우되므로 일반성이 없으므로 고강도콘크리트의 취성적 파괴특성을 강조하여 안전측의 설계를 하기 위함이다.

### 2.2 철근의 모델화

그림 3에 나타낸 것처럼 직선과 곡선이 혼합되어 있는 복합모델을 이용하였으며, 철근의 변형률 경화효과는 Park의 곡선식<sup>(5)</sup>을 이용하였다.

### 3. 고강도콘크리트의 응력분포모델

2장에서 제안한 고강도콘크리트의 응력-변형률관계 구성식을 근거로 응력분포 모델을 검토하였다. 고강도콘크리트에 많이 사용되고 있는 모델로는 대한토목학회규준<sup>(9)</sup> 및 ACI 318 code<sup>(10)</sup>의 직사각형 응력블럭이 있으며, 또한 ACI 363<sup>(11)</sup>에서 제안하고 있는 사다리꼴 응력 모델(그림 4 참조 여기서  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 응력분포계수를 나타낸다)과 탄성계수를 직접적으로 이용한 삼각형응력모델<sup>(11)</sup>도 일반적으로 알려져 있다. 이러한 모델 중에서 어느 것을 선택하여도 종국강도의 결과치에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 알려지고 있다<sup>(11,11)</sup>. 그러나 직사각형 응력블럭 모델은 보통강도콘크리트를 대상으로한 모델로서 콘크리트가 고강도화 되면 실제의 응력분포를 나타내기에는 무리가 따른다. 이에 대해서 삼각형응력모델은 고강도콘크리트의 경우 탄성계수는 증가하여 상승곡선은 선형화되며, 하강곡선의 구배는 급하게 떨어지므로 본 연구에서 제안한 응력-변형률 관계와의 양호한

적합성이 예상된다. 그러나 본 연구의 강도범위에 대해서 적용시키면 중립축의 계산치가 매우 작아져 비현실적인 값이 되는 단점이 있다.

따라서 이모델은 초고강도콘크리트의 경우에 적용 가능한 것으로 생각되어진다.

본 연구에서는 삼각형응력모델과 직사각형응력모델과의 중간형태인 사다리꼴응력모델을 사용하였다. 그 이유는 종국강도 계산시, 평형철근비 이하의 경우에는 어떤모델을 사용해도 고강도콘크리트구조에 적용가능하지만, 평형철근비 이상의 보 및 축력과 휨모멘트가 동시에 작용하는 부재에 대해서는 응력분포형태에 따라 계산결과가 틀려진다는 사실<sup>(1)</sup> 때문이다.

즉 고강도콘크리트를 이용하는 경우 응력분포는 응력-변형을 관계와의 적합성을 충분히 고려하여 결정해야만 한다.

#### 4. 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 휨모멘트-곡률관계의 해석

##### 4.1 기존의 휨모멘트-곡률관계

본 연구에서는 강도와 변형의 해석에 있어서 기존의 휨모멘트(M)-곡률( $\phi$ )관계의 해석법을 기본으로 이용하였다. 즉 단면을 요소분할하여 각 요소에 대한 콘크리트와 철근의 변형율과 각 재료의 응력-변형률관계, 그리고 축력(N) 및 모멘트(M)의 평형조건식을 이용하여 해석을 하였다.

기존의 휨모멘트-곡률관계의 축력 및 모멘트의 평형방정식을 식(1)과 (2)에 나타냈으며, 계산 순서는 그림 5의 순서도와 같다.

$$N = \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \cdot b \cdot \Delta Z + \sum_{j=1}^m \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \quad (1)$$

$$M = \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \cdot Z_{ci} \cdot b \cdot \Delta Z + \sum_{j=1}^m \sigma_{sj} \cdot Z_{sj} \cdot A_{sj} - N \cdot Z_n \quad (2)$$

여기서,

N : 축력,    b : 단위폭

$\Delta Z$  : 단면분할시의 요소 두께

$\sigma_{ci}$  : 단면분할시의 i번째 요소의 콘크리트응력

M : 모멘트,     $A_{sj}$  : j요소의 철근 단면적

$Z_{ci}$  : 압축면부터 i요소의 중심까지 거리  
 $Z_{sj}$  : 철근요소의 압축면으로 부터의 거리  
 $Z_n$  : 단면높이의 1/2

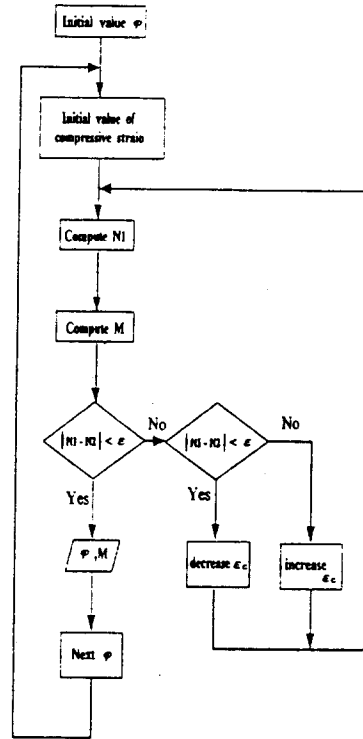


그림 5 기존의 휨모멘트-곡률관계 해석 순서도

##### 4.2 몬테카를로 시뮬레이션의 도입

압축강도의 사용범위가 넓어진 고강도콘크리트를 구조재료로서 사용할 경우에 열거할 수 있는 문제는, 특히 재료특성의 모델화가 아직 명확하게 정립되어 있지 않음으로써 초래되는 그 재료특성의 분산성과 취성적 성향 등에 의한 불확실성의 평가 방법에 있다. 또한 예상강도와 변위의 정확한 계산이 선결문제로서 남는다. 본 연구에서는 고강도콘크리트의 재료 불확실성 및 모멘트-곡률해석방법 오차 등의 불확실성을 충실히 고려하기 위하여 몬테카를로 시뮬레이션 모의기법을 해석시스템에 도입하였다. 즉 난수를 발생시켜서 재료특성의 불확정 변수와 해석시의 반복계산 등으로 인한 오차를 최소화하는 확률적 개념을 기존의

모멘트-곡률관계에 응용하여 새로운 해석방법을 제안하였다.

본 연구에서 이용한 불확정변수와 해석방법을 설명하면 이하와 같다.

(1) 재료특성의 불확정변수

- ① 콘크리트의 최대압축강도
- ② 콘크리트의 최대압축강도시의 변형을
- ③ 콘크리트의 극한변형을
- ④ 철근의 항복강도
- ⑤ 철근의 탄성계수
- ⑥ 철근의 경화 발생시 변형을

(2) 휨모멘트-곡률관계 해석의 불확정변수

- ⑦ 축력 및 모멘트 평형방정식의 허용한계에 대한 신뢰지수
- ⑧ 항복시의 곡률에 대한 신뢰지수
- ⑨ 최대모멘트시의 곡률에 대한 신뢰지수

재료특성의 불확실성을 고려하기 위하여 ①-⑥의 불확정변수에 대한 확률밀도함수가 되는 일반난수를 발생시킨다. 이 분포를 임의의 확률분포함수로 변환하여 심프슨 복합공식을 이용해서 정규형 확률분포값을 구하였다. 이렇게 구하여진 정규형 확률분포값(U)과 불확정변수의 평균치( $\bar{x}$ )와 표준오차( $\sigma_x$ )를 이용해서 추정값(x)이라한다(식(3)). 또한 휨모멘트-곡률관계 해석의 불확실성을 고려하기 때문에 일반난수분포로 부터 임의의 확률분포함수로 변환하여 이절선형으로 간략화하였다. 그리고 ⑦-⑨의 불확정변수로 부터 구한 한계치(a, b)와 확률분포함수( $P_i$ )를 이용하므로써 추정값(x)을 구하였다(식(4)). 최종적으로는 이것들의 추정값을 평균함으로써 확정값으로 하였다.

$$X = \bar{X} + U \cdot \sigma_x \quad (3)$$

$$X = a + \frac{(b-a)(P_i-0)}{(1-0)} \quad (4)$$

몬테카를로 시뮬레이션 방법의 순서도는 그림 6에 나타낸다.

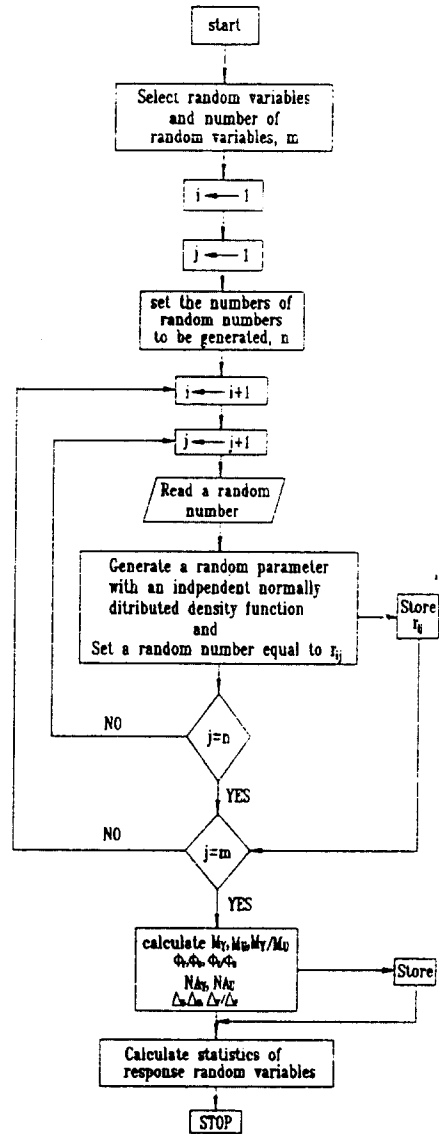


그림 6 몬테카를로 시뮬레이션 방법의 순서도

4.3 해석방법의 응용예

본 연구의 해석방법은 휨기둥을 하는 보부재 및 기둥부재를 대상으로 할 경우 휨모멘트-곡률관계와 하중-변위관계 등을 비교적 정확하게 산정할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 부재의 소성힌지등을 고려하면 좀 더 간단히 내진벽등의 응답감소계수(Response Reduction Factor)를 비교적 정확하게 구할 수 있으리라 사료된다.

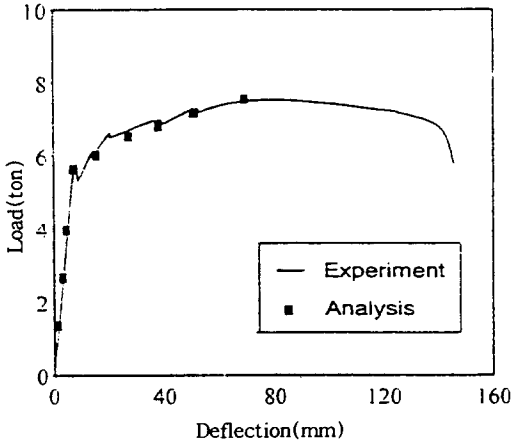


그림 7. 단조재하시의 하중-변위관계

응용 예로는 압축강도  $700\text{kgf/cm}^2$ 의 고강도콘크리트를 이용한 기둥부재(축력이 없으므로 캔틸레버보와 동일한 형태임)의 휨강도와 변위량을 구하여 실험값<sup>12)</sup>과 비교해 보았다. 실험공시체의 치수로서는 전단스팬비는 3.5이고 단면의 크기는  $12.5 \times 25\text{cm}$ , 유효높이 22cm와 부재깊이 77cm(부재전장 87cm)가 된다. 휨거동을 유도하기 위하여 축력은 가하지 않았으며 D13(SD40)을 4개 배근하여 주철근비를 1.6%로 하였다. 또한 휨파괴 이전에 전단파괴가 일어나지 않게 하기 위해서 전단보강근을 ACI 규준치 만큼 충분히 배근하였다. 실험의 변동인자로서는 단조재하와 일방향 반복

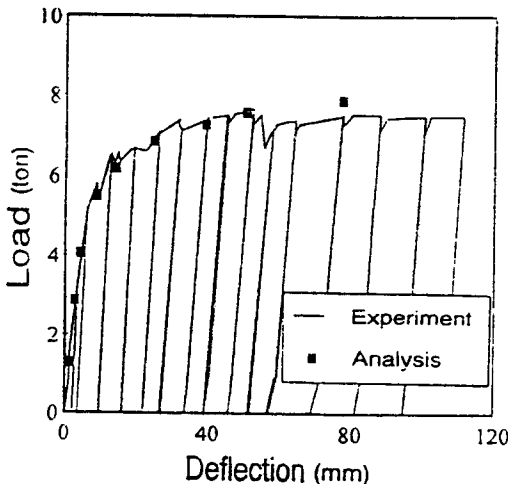


그림 8. 일방향 반복재하시의 하중-변위관계

재하를 하였다. 그림 7 및 그림 8에는 이 실험결과에 대한 해석값을 비교하였으며, 매우 정확한 해석결과를 얻었음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 최근 일반적으로 많이 사용되거나 사용될 것이 예상되는 콘크리트의 설계기준강도에 대해서  $400\text{kgf/cm}^2$ ,  $500\text{kgf/cm}^2$ ,  $600\text{kgf/cm}^2$ ,  $700\text{kgf/cm}^2$ 의 각 강도에 대해서 응력-변형을 관계를 모델화하여, 기존의 모델들과 비교 검토하였다. 또한 응력분포모델로서 사다리꼴응력모델을 이용하여 종국강도를 정확하게 평가하였다.

(2) 종국강도와 변형의 해석에 있어서는 재료의 응력-변형률관계를 이용한 모멘트-곡률관계의 해석을 근거로 하였고, 본 연구에서는 재료특성의 불확실성 및 모멘트-곡률의 해석방법 오차 등의 불확실성을 충실히 평가할 수 있는 몬테카를로 시뮬레이션의 방법을 도입하여 좋은 결과를 얻었다. 즉 이 해석방법은 휨모멘트-곡률관계와 하중-변위관계 등을 정확히 산정할 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모 과제 연구비에 의하여 연구되었으므로 감사의 뜻을 전합니다.

또한 본 논문의 일부결과는 건설기술연구개발사업의 “국내실정에 맞는 고강도콘크리트의 개발 및 실용화연구”에서 도움을 받았으므로 감사의 뜻을 전합니다.

### 참 고 문 헌

1. ACI-363, “State of the Art Report on High-Strength Concrete”, *ACI 363R 92*, American Concrete Institute, Oetroit 1992.
2. 日本建築學會, “高強度コンクリートの技術の現狀”, 1991.

3. 삼성건설(주) 중앙시험실, "고강도콘크리트의 최적배합비에 관한 연구", 기술보고서, 1992.
4. 岡本 申, 柳下文夫, "高強度コンクリートの應力-ひずみ特性", JCI Vol.14, No.3, 1976.4.
5. Kent, D. C. and Park, T. "Flexural Members with Confined Concrete," *Proceeding ASCE*, Vol.197, No.ST", July, 1971, pp.1969-1991.
6. Fafitis, A. and Shah, S. P., "Lateral Reinforcement for High Strength Concrete Column", *ACI 363 SP-87 High Strength Concrete Symposium* 1985, pp.213-232.
7. Popovics, S., "A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of Concrete", *Cement and Concrete Research* Vol.3, No.4, 1973, pp.583-599.
8. 六車 熙長井榮治, "コンクリートの 壓壊ひずみに關する研究", セメント技術情報, Vol.30, 1976, pp.362-365.
9. 大韓土木學會, "콘크리트標準示方書, 1989.
10. ACI 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary(ACI 318M-89/ACI 318R-89)". *American Concrete Institute*, Detroit, 1989, pp.108-109.
11. Shin, S. W., et al, "Flexural Ductility, Strength Prediction and Hysteretic Behavior of Ultra-High Strength Concrete", *Second International Symposium*, 1990, pp.239-264.
12. 삼성건설(주)기술연구소, "고강도콘크리트현장 프로젝트 및 초고강도콘크리트 시공기술개발", 기술보고서, 92017, 1992.12.

(접수일자 : 1995. 3. 4)