신뢰성 이론을 이용한 500kgf/㎠의 고강도콘크리트 구조물에 대한 휨변형의 해석적 연구

An Analytical Study of the Flexural Deformation for High Strength Concrete Structures using Reliability Theory

송재호*, 최광진**, 김민웅***, 홍원기****

Abstract

The object of this thesis is an analytical study on flexural deformation of high strength concrete structures using reliability theory. Using the established experimental data that have been presented in various documents the stress-strain relationship curves of high strength(500kgf/㎠)models are proposed. Based on both methods of logarithm regression analysis and multiple regression analysis adopted in order to establish the relationships between design parameters, response random variables and flexural deformation analyzed using Monte Carlo simulation and Simpson composite formula. Additional random variables are introduced to incorporate both the confidence in the analytical accuracy of engineering mechanics associated with structural response quantities and the uncertainty in the construction quality control. The result is expected to accomodate other important design parameter of high strength concrete design in treating reliability theory that practicing engineers, structural engineering often face.

1. 서 론

기존 연구는 응력-변형율 곡선의 변곡점에서 응력과 변형율을 실험에서 구하기가 불편하고 하강곡선응답과 최고점 변형율을 실험적으로 얻기에는 어렵다.

* 금오공과대학교 토목공학과 교수

** (주)건영 엔지니어링사업본부

***금오공과대학교 대학원 토목공학과 석사과정

****정회원, (주)건영 엔지니어링사업본부 부장

또한 고강도콘크리트의 응력-변형율 곡선식, 응력블럭의 형태와 이에 수반되는 휨거동 해석를 근사적으로 파악하고 있다. 그러나 실험에 의해서만이 파악되고 있기 때문에 데이타 추정방법이 한정되어 있다. 그래서 본 연구에서는 고강도콘크리트(500 kgf/㎠)의 실험 데이타(ϕ10×20cm)를 통계적인 방법으로 회귀분석을 수행하여 응력-변형율 곡선을 모델화하였고 고강도콘크리트에 적합한 응력블럭을 선택하기 위하여 본 연구에서 제안한 고강도콘크리트의 응력

-변형율 곡선식을 초기치를 0으로 하여 극한변형율를 최종치로 적분하여 면적을 산정한 다음 비교, 검토하여 응력블럭을 선택하였다. 또한 이것을 바탕으로 확률적인 개념이 포함되어 있는 몬테카를로 시뮬레이션 해석방법을 이용하여 실제 구조물에 대한 휨모멘트-곡률 관계를 산정하여 하중-변위 관계를 모델화 하였다.

2. 재료의 모델화

2.1 철근의 모델화

철근의 응력-변형율 곡선은 그림1에서 보는 바와 같이 변형율경화 범위를 고려한 철근거동을 가장 근사하게 표현할 수 있는 복합곡선모델을 사용하였다.

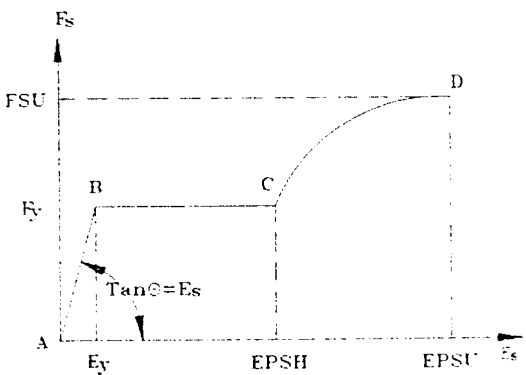

그림 1. 철근의 응력-변형율 곡선

2.2 콘크리트의 모델화

고강도 콘크리트의 응력-변형율 곡선모델은 500kgf/㎠을 중심으로한 기존실험데이타에 근거로 상호간의 대수회귀분석과 다중회귀분석하여 곡선을 모델화 하였다 [1),2)]. 그래서 각 변수 상호간에 통계적인 기법을 적절히 응용하므로써 이들간의 상승과 하강곡선식을 유도하여 이것을 근거로 하여 그림2와 같이 모델화 하였다.

구속조건에서의 하강곡선은 기존의 Kent-Park수정곡선의 구속하강역을 이용하여 영역별로 구분하여 응력-변형율 곡선을 설명하면 다음과 같다 [3),4),5),6)].

영역 AB ($E_m < E_0$)

$$F_m = 60.51\,E_m^{\,0.75} \qquad (1)$$

$$F_m = 11.24(2.00\times10^{-6}\,FCP + 6.31\times10^{-10} + 0.8\times10^{-8}\,EPUPK^{0.64})^{0.75} \qquad (2)$$

영역 BC ($E_0 \le E_{20C}$)(비구속일 경우)

$$F_m = 2.68\times10^{4}\,E_m^{-1.50} \qquad (3)$$

영역 BC ($E_0 \le E_m \le E_{20C}$)(구속일 경우)

$$F_m = F_{cp}[1 - Z(E_m - E_0)] \qquad (4)$$

여기서,

E_{20C}, E_{50C}: 최대변형율의 20%, 50%변형율

F_{cp50} : 최대응력의 50%응력

$$Z = (F_{cp}/(F_{cp-F_{cp50}}))/(E_{50C} + E_{50h} - E_0)$$

$$E_{50h} \fallingdotseq [(E_{20C} - E_0)(F_{cp} - F_{cp50}) - (E_{50C} - E_0)] / (F_{cp} - F_{cp20})]$$

비구속된 콘크리트에 대해서는

$$E_{50C} = E_{20C} \text{ and } F_{cp50} = F_{cp20} \qquad (5)$$

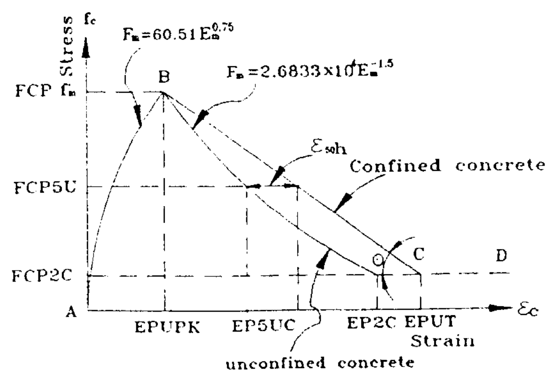

그림 2. 고강도콘크리트의 응력-변형율 곡선

영역 CD $(E_{20C} \leq E_m \leq E_{ut})$

$$F_m = F_{cp20} \tag{6}$$

여기서, E_{ut}: 콘크리트의 극한변형율

3. 고강도콘크리트의 응력블럭 제안

보통 콘크리트구조물의 거동은 탄성거동으로 가정하지만 실제적으로 무제한의 소성흐름으로 거동하기 때문에 소성비에 대한 개념이 포함되어야 하므로 기존에 제안되어 많이 이용하고 있는 등가응력블럭은 재검토가 할 필요가 있다. 따라서 고강도콘크리트에 실제적인 응력분포곡선에 근사적인 응력블럭을 제시되어야 한다. 고강도콘크리트의 응력블럭을 선택하기 위해서는 기존에 제안된 등가직사각형 응력블럭인 경우 압축영역의 면적을 구하고 소성비의 개념이 포함되어 있는 사다리꼴 응력블럭인 경우 압축영역의 면적을 먼저 구한다. 그래서 본 연구에서 제안된 고강도 콘크리트의 응력-변형율 곡선식에서 초기치를 0으로 하여 최대변형율 0.0023까지의 면적과 최대변형율 0.0023에서 극한변형율 0.004까지 적분하여 면적을 산정한 다음 위의 두블럭과 비교검토하여 고강도콘크리트의 응력블럭을 해석한 결과는 사다리꼴 응력블럭에 가까운 것으로 나타나 이 응력블럭을 제안하였다. 또한 고강도콘크리트의 평형 방정식을 유도하기 위한 실제적인 응력분포곡선을 이상화한 사다리꼴 응력분포의 그림3에 표시된 것과 같다 [3),4),6)].

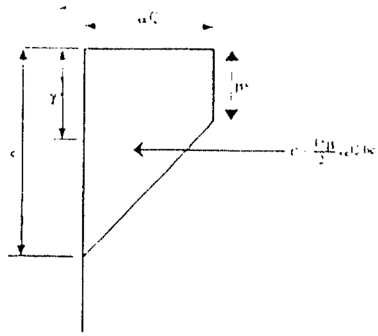

그림 3. 사다리꼴 응력블럭

4. 휨모멘트-곡률관계의 해석방법

4.1 기존의 휨모멘트-곡률관계의 해석방법

기존의 휨모멘트-곡률관계의 해석방법은 단면의 곡률로 부터 힘과 휨모멘트를 구하는식을 도입하였다. 그리고 콘크리트단면과 철근층으로 분할하여 재료의 각 층에서의 응력과 변형율은 층의 중앙에서 평가하고 충전체에서도 동일하게 가정하였다. 또한 단면의 곡률은 변형율의 구배이며 단면의 압축연으로 각 층마다의 변형율을 계산하고 힘과 모멘트 평형방정식에서의 곡률과 압축연의 변형율이 설정되면 변형율분포를 발생시키는 힘과 모멘트를 구할 수있다. 그래서 위의 과정을 초기치와 비교하여 반복수행하므로써 휨모멘트-곡률관계를 산정할 수 있고 이 관계를 기본으로 하여 변위를 구하여 하중-변위관계를 모델화 하였다.

4.2 몬테카를로 해석방법

기존의 해석방법에서는 재료의 각 층에 대한 힘과 모멘트에 대한 것을 직접 계산하여 허용오차까지 반복계산하여 구하였는데 이러한 방법은 각 층에 대한 힘과 모멘트의

평형방정식에서 데이타의 수가 한정되어 있기 때문에 한계가 있다. 그래서 확률개념이 포함되어 있는 몬테카를로 해석방법을 사용하므로써 난수에 의해서 데이타가 무한정 제공이 되고 있기 때문에 기존의 해석방법의 문제점을 해결할 수 있고 해석의 정확성에 기여할 수 있다. 몬테카를로 해석방법은 구조물에서 응답 불확실한 변수와 관련되어 있는 해석적인 신뢰성과 구조물 특성제어에 있어서 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 불확실성의 도입을 구체화하기 위하여 이 방법을 이용하였다. 그래서 본 연구에서 제안한 응력-변형율 곡선과 응력블럭을 이용하여 평형방정식에 쓰여질 평균응력계수(α)와 도심계수(γ)를 산출하기 위하여 모델화한 응력-변형율 곡선아래의 면적과 응력블럭의 압축력을 같다고 하여 평균응력계수를 산정하였다. 또한 응력-변형율 곡선아래의 면적을 원점에 관하여 단면 1차모멘트를 취하므로써 도심계수를 산정할 수있다. 사다리꼴 응력블럭으로부터 힘과 모멘트 평형 방정식을 도출한다. 그리고 몬테카를로 해석방법에서 일단 도입한 불확실한 변수의 정확한 값을 컴퓨터 시뮬레이션하여 얻기위해서 확률밀도함수에서의 난수의 값을 확률분포함수의 표준화된 U값을 도입하여 신뢰성 이론의 하나인 복잡한 비선형 방정식을 포함하고 있는 선형통계학적 방법의 편미분을 간략화 하여 불확실한 변수를 산정한다. 또한 앞에서 계산한 불확실한 변수를 모델화한 철근과 고강도콘크리트 응력-변형율 곡선에서의 변수로 사용되어진다. 그런데 보통의 몬테카를로 시뮬레이션을 하는 방법에는 두가지 방법이 있다.

첫째로 불확실한 변수의 수행하고자 하는 표본수에 대한 확률밀도함수의 난수를 발생시키고 이것을 수행횟수에 동일하게 분할하고 각각 알고 있는 변수에 대한 평균값과 표준편차의 두 식으로 부터 균등한 확률분포함수의 한계치를 결정하여 확률축(세로축)의 한계치를 결정하여 난수를 발생시키고 이것을 수행횟수에 동일하게 분할하고 확률축에 대응하는 목표값축(가로축)의 균등난수를 발생시켜서 U값이 포함된 불확실한 변수의 값을 산정하여 이것을 불확실한 변수로 구성된 모멘트 평형방정식에 대입하여 발생된 난수만큼 수행하여 산정한 모멘트를 평균값을 낸다.

둘째로 확률밀도함수에 대한 난수를 발생시키고 이에 상응하는 확률분포함수로 변환시켜서 표준화된난수를 발생시키고 확률분포함수에서 U값을 도입하여 불확실한 변수에 대한 값을 산정하여 모멘트에 대한 식에 대입하여 모멘트를 계산한다.

그러나 본 연구에서는 확률밀도함수에 대한 난수를 발생시키고 이에 상응하는 확률분포함수로 변환시켜서 표준화된 난수를 발생시킨다. 또한 확률밀도함수에 대한 U값을 도입하여 불확실한 변수를 컴퓨터 시뮬레이션에 의해서 정확한 값을 산정한다. 그리고 고강도콘크리트의 휨모멘트와 곡률의 산정에 사용될 몬테카를로 해석과정은 수행하고자 하는 표본수에 대한 확률밀도함수의 난수를 발생시키고 이것을 수행횟수에 동일하게 분할하고 확률축에 대응하는 목표값축(가로축)의 균등난수를 발생시킨다. 그런데 여기서 확률밀도함수에서 확률분포함수로 변환시키게 되면 실제적인 확률분포함수

의 곡선을 직선으로 간략하게 가정하여 수식화 한다. 또한 내력과 외력에 대한 모멘트 평형방정식에서 각각 산정한 외력과 내력에 의한 모멘트와의 차이에 신뢰성 지수를 곱한 것을 허용오차로 하여 세로축(확률축)에서는 확률분포함수에서 표준화된 난수(U)의 크기에 따라 변화하는 한계치를 이용하고 세로축상의 난수에 대한 가로축(목표값축)의 값을 직선보간법에 의한 식에 의해서 허용오차 만큼 반복계산하여 최종적으로 산정된 값을 극한 모멘트로 하고 연성이 1를 계속 유지하다가 연성이 1에서 1보다 큰 값으로 변화할때의 값 즉 기울기가 변하는 점을 항복모멘트로 산정한다.

그리고 극한상태에서의 곡률산정은 최연단의 변형율이 변화함에 따라서 중립축의 위치를 변화함으로 일반적으로 곡률산정은 변형율 분포에서 최연단의 변형율을 중립축의 위치를 나누므로써 산정한다.

또한 항복상태에서의 곡률산정은 세로축(확률축)에서는 확률분포함수에서 표준화된 난수(U)의 크기에 따라 변화하는 한계치를 이용하여 세로축상의 난수에 대한 가로축(목표값)의 값을 직선보간법에 의해서 연성이 1에서 1보다 큰값으로 변화할때의 값 즉 기울기가 변하는 한계치를 산정한다. 위의 전과정을 몬테카를로 해석횟수 만큼 반복수행한다. 그리고 전체적으로 산정된 값을 수행횟수만큼 나누어 평균값을 취하여 응답 불확실한 변수를 산정한다. 몬테카를로 시뮬레이션 해석과정은 그림 4에 잘나타나 있다. 그 해석과정을 거쳐서 휨모멘트-곡률관계를 산정하여 하중-변위관계를 모델화 하였다 [8),9),10),11)]

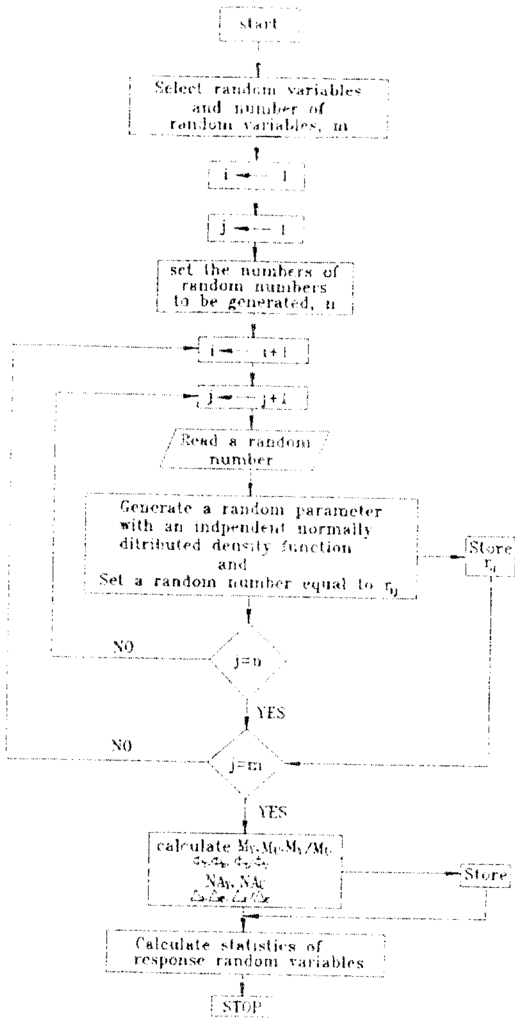

그림 4. 몬테카를로 해석방법의 순서도

고강도 콘크리트의 해석에 사용된 부재는 $17.5cm \times 17.5cm$의 직사각형단면이고 콘크리트의 피복두께가 1.5cm, 높이 (H)가 $300cm$이고 압축강도 $(540 kgf/cm^2)$인 기둥(Column)을 해석대상으로 했고 인장철근비는 0.0037이고 압축철근비는 0으로 하였다.

또한 기둥에 대한 휨모멘트-곡률관계는 그림5에 나타나 있다 [6),7),8)].

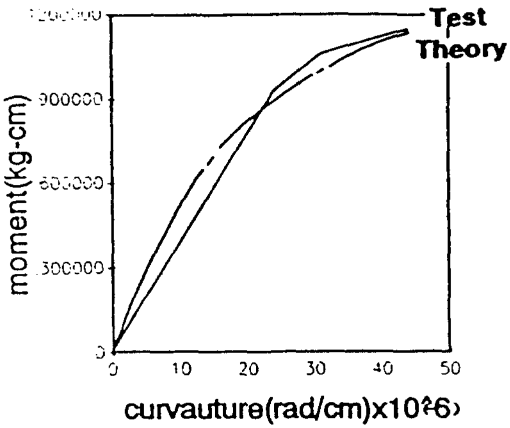

그림 5. 고강도콘크리트의 휨모멘트-곡률관계

또한 기둥에 대한 하중변위 관계는 그림6에 나타나 있다 [6),8)].

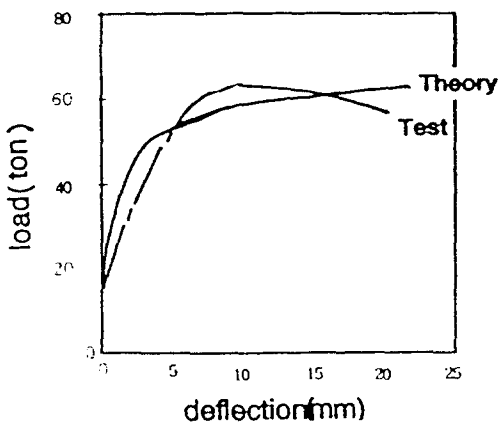

그림 6. 고강도콘크리트의 하중-변위관계

5. 결 론

본 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1)고강도콘크리트의 응력블럭은 사다리꼴 블럭이 적합하다고 나타났다.

(2)고강도콘크리트가 됨에 따라서 중립축의 위치가 상승하기 때문에 응력블럭의 면적이 작아지므로 초기 변형율에서 최대변형율에 이르는 시간이 짧아진다고 나타난다.

(3)몬데카를로 시뮬레이션 해석방법을 사용하므로써 휨거동 해석에 대한 데이타 추정 한계를 벗어날 수 있을 것으로 사료된다.

(4)고강도콘크리트을 사용한 기둥의 해석결과와 실험결과가 비교적 근사한 거동을 하고 있다.

참 고 문 헌

(1) Yoshio Hiramatsu, Kiyoshi Okada, Yukitoshi Oka., Wataru Koyanagi, Yoshiaki Mizuta.", Designing and Constructing a Stiff Testing Machine and the Deformation Characteristics of Various Kinds of Concrete",JCIVol.24, No.260(material), Jan 1975.

(2) ACI-363, "State of the Art Report on High-Strength Concrete", Journal of ACI,Vol.81, No.4, July-Aug.pp.1009-1056 1984.

(3)Building Code Requirements for reinforced Concrete, ACI 318-83, 1983.

(4)Park, P. and Paulay,T.,"Reinforced Concrete Structures",John Wiley and Sons,Inc. New York. 1975.

(5) Hart,G.C.,"Uncertainty Analysis, Loads, and Safety In Structural Engineering" Prantice-Hall, Inc. 1982.

(6) 友澤史紀, 阿部道彦, 桝田佳寛, "高强度 コンクリ-トの開發", JCI Vol. 32 No.10, October 1994.

(7) 삼성 건설 기술 연구소, " 고강도콘크리트현장프로잭트 및 초고강도콘크리트시공 지침서", 기연-92017, 1992. 12.

(8) 최광진, " 신뢰성 이론을 이용한 고강도콘크리트 구조물의 휨변형 해석에 관한 연구", 금오공과대학교 대학원 토목공학과 석사논문, 1995. 2.