

신뢰성이론을 이용한 철근 콘크리트 부재의 전단변형 해석에 관한 평가

The estimation for Shear Deformation Analysis of Reinforced Concrete Members using Reliability Theory

최광진* 장일영** 송재호***
Choi, Kwang Jin* , Jang Il Young** , Song Jae Ho***

ABSTRACT

The object of this thesis is an analytical study on shear deformation of reinforced concrete members using monte carlo method. Using the established experimental data that has been presented in various documents the stress-strain relationships curves of reinforced concrete ($300\text{kgf/cm}^2 \sim 400\text{kgf/cm}^2$) models are proposed. Finally, the theoretical values calculated using the analytical method developed in this study have been investigated in comparison with the experimental ones which were carried out earlier in order to prove its validity. From the results it has been shown that theoretical values agree quite well with experimental ones, and it could be pointed out that the presented analytical method is widely acceptable for the practical analysis of shear displacement of reinforced concrete members.

1. 서론

1.1 연구의 목적 및 배경

본 연구의 목적은 신뢰성이론을 이용하여 철근콘크리트 부재의 전단변형을 해석하여 변위를 평가하는데 그 목적을 두고 있다. 여기서 기존의 전단변형 해석방법은 철근콘크리트 부재의 휨모멘트-곡률관계에 의한 변위산정법은 전단력을 무시하므로써 비교적 정확한 변위해석이 가능하지만, 전단력 작용이 큰경우에도 휨모멘트의 작용에 의한 휨변위와 전단력의 작용에 의한 변위를 개별적으로 산정하므로써 양자를 합하여 변위를 구하는 것이 가능하다면 이러한 산정방법이 실용가능하다고 생각되어진다. 여기서는 철근콘크리트 부재를 대상으로 하여 휨모멘트와 전단력의 작용에 의해 발생하는 변위를 구할때에는 변형율의 적합조건식, 힘의 평형조건식 및 모멘트 평형조건식을 이용하므로써 전체변위를 산정하였다. 그러나 본 해석방법은 실험데이터를 가지고 표준화된 난수를 이용한 신뢰성 이론인 몬테카를로 해석방법을 통하여 컴퓨터를 이용한 구조체의 내력을 평가하는데 있다. 최종적으로 본 해석방법을 기존해석방법의 결과와 실험치로 해석방법의 타당성을 평가하는데 있다.

* 정회원 (주) 동우기술단 부설 연구소 연구원, 공학석사

** 정회원 금오공과대학교 토목공학과 교수, 공학박사

***정회원 금오공과대학교 토목공학과 교수, 공학박사

2. 재료의 모델화

2.1 본 연구에 적용된 보통강도 콘크리트의 응력-변형을 곡선

1) 300kgf/cm²~400kgf/cm²의 보통강도 콘크리트의 경우

영역 AB ($E_m < EPUPK$)

$$F_m = 45.08E_m^{0.65}$$

$$F_m = 8.03(2.00 \times 10^{-4} FCP + 3.21 \times 10^{-10} + 0.8 \times 10^{-4} EPUPK^{0.21})^{0.65} \quad (1)$$

영역 BC ($EPUPK \leq EP2C$) (비구속일 경우)

$$F_m = 1.53 \times 10^4 E_m^{-2.01} \quad (2)$$

영역 BC ($EPUPK \leq E_m \leq EP2C$) (구속일 경우)

$$F_m = FCP [1 - Z(E_m - EPUPK)] \quad (3)$$

여기서, EP2C, FCP5U : 최대변형율의 20%, 50%변형율, EP5UC : 최대응력의 50%응력

$$Z = (FCP / (FCP - FCP5U)) / (EP5UC + EP50H - EPUPK)$$

$$EP50H = [((EP2C - EPUPK)(FCP - FCP5U) - (EP5UC - EPUPK)) / (FCP - FCP2C)]$$

비구속된 콘크리트에 대해서는

$$EP5UC - EP2C \text{ and } FCP5U = FCP2C$$

영역 CD ($EP2C \leq E_c \leq EPUT$)

$$F_m = FCP2C \quad (4)$$

여기서, EPUT : 콘크리트의 극한 변형율

2.2 본 연구에 적용된 철근의 응력-변형을 곡선

철근의 응력-변형을 곡선모델은 기존의 많은 연구자들에 의해 실험으로 구한 것에 근사적으로 표현할 수 있는 그림 2에 있는 복합곡선모델(complex curve model)을 사용하였다.

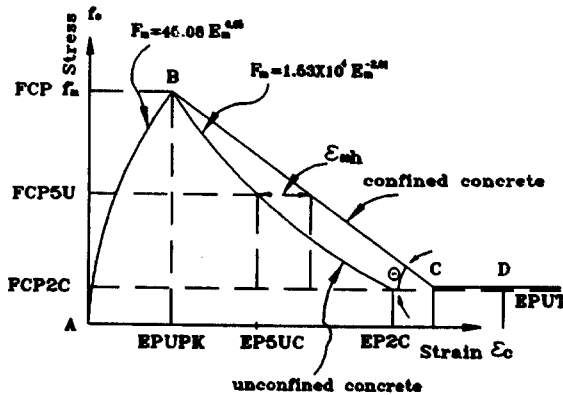


그림 1. 보통강도 콘크리트(300kgf/cm²~400kgf/cm²)의 응력-변형을 곡선

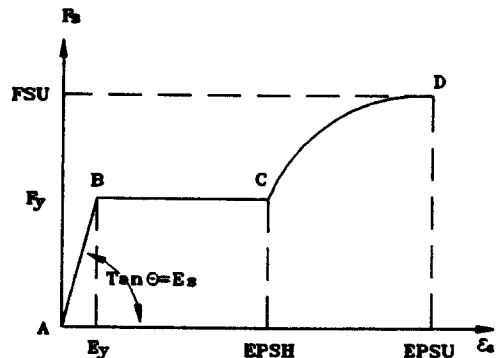


그림 2. 철근의 응력-변형을 곡선모델(복합곡선모델)

3. 전단변형의 해석모델

3.1 부재의 모델화

기둥부재의 경우 사인장균열발생시의 응력상태는 그림3.와 같다. 부재에 작용하는 외력(外力)에 저항하는 내력(內力)으로는 전단보강철근의 인장력 Q_w , 인장주철근의 타우웬 작용전단력 Q_{t1} , 압축측의 콘크리트에 있어서의 분담전단력 Q_c 가 있다. 콘크리트 변형율은 상부절편과 하부절편의 경계점 변형율을 ϵ_c , 압축면에서의 변형율을 ϵ_{cc} 이고 인장주철근에서의 변형율을 ϵ_{st1} , 사인장 균열면에서의 변형율을 ϵ_{st2} 가 있다. 콘크리트 압축면에서의 길이는 사인장 균열 전단위치에 있어서의 상부절편단면의 길이 X_0 , 하부절편단면의 중립축길이 X_{o2} , 전단보강근이 유효하게 작용하는 범위를 d_e 로 한다.

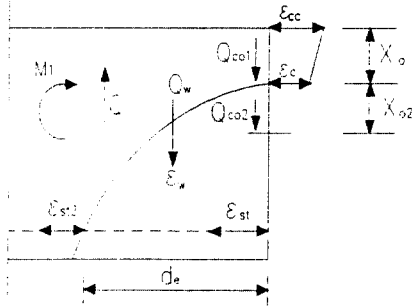


그림 3. 전단파괴의 응력상태

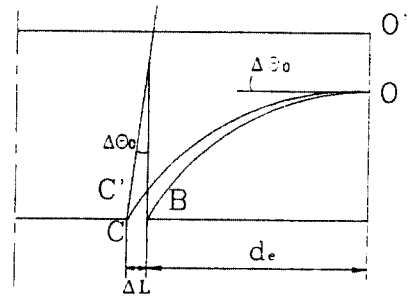


그림 4. 상부절편에서 일어나는 회전변위

상부절편에서의 구간 d_e 의 범위내에서는 부가회전각 $\Delta\theta_0$ 및 회전각에 의한 인장철근에서 발생하는 변형량 ΔL 은 다음식으로 나타낸다.

$$\Delta\theta_0 = \int_0^{d_e} \phi_m dx = \int_0^{d_e} \frac{(\phi_t + \phi_c)}{2} dx = \frac{\phi_t + (\epsilon_{cc} - \epsilon_c)/X_0}{2} \times d_e \quad (5)$$

$$\Delta L = \Delta\theta_0 (d - X_0) \quad (6)$$

3.2 변형율 분포의 가정

그림5.에서 보면 전단보강근의 변형율 ϵ_w 와 분담전단력 Q_w 는 다음과 같이 근사치로서 가정한다.

$$\epsilon_w = 0.5(\epsilon_{st2} - \epsilon_{st20}) \quad (7)$$

$$Q_w = 0.5 \frac{(\sigma_{st2} - \sigma_{st20})}{\sigma_{wy}} \times Q_{wy} \quad (8)$$

인장주철근의 변형율은 d_e 구간에서는 2차식으로 가정한다.

$$\epsilon_s = (\epsilon_{st} - \epsilon_{st2}) \left(\frac{x}{d_e} \right)^2 + \epsilon_{st2} \quad (9)$$

또한 회전각에 의하여 인장주철근 위치에서 발생하는 변형량 ΔL 은 인장주철근 변형율의 함수로서 다음과 같이 나타낸다.

$$\Delta L = \int_0^{d_e} \epsilon_s dx = \frac{(\epsilon_{st} + 2\epsilon_{st2}) \times d_e}{3} \quad (10)$$

3.3 다우웰작용 전단력

전단보강근이 있는 부재의 다우웰작용 전단력은 부재의 파괴시에는 사인장균열 위치에서의 인장철근의 변형률값에 비례한다. 따라서 다우웰작용 전단력 Q_D 는 Q_w 에 비례한다고 가정하여 다음과 같이 나타낸다.

$$Q_D = \frac{Q_w}{Q_{wy}} \times Q_{D0} \quad (11)$$

Q_{D0} 는 다우웰작용 전단력의 최대값이며 본 연구에서는 廣澤의 실험식을 이용한다.

3.4 각절편의 평형조건식 및 전단력 계산

상부절편에서의 변형을, 힘의 평형조건식과 모멘트의 평형조건식은 부재축에 대하여 모멘트가 평형을 이룬다고 생각하면 (축력을 무시함) 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_2 = Q \times a - (Q_D \times d_c + 0.5 \times Q_w \times d_c) \quad (12)$$

$$\Delta M_2 = \int_{X_c}^X \sigma_c \times b \times y \times dy \quad (13)$$

하부절편 변형률의 적합조건식, 힘의 평형 조건식과 모멘트의 평형조건식은 인장주철근 위치에 대한 모멘트, 힘의 평형을 생각하면 다음과 같다.

$$M_1 = X_{s2} \times C_{c1} + \Delta M_1 \quad (14)$$

$$\Delta M_1 = \frac{b}{\phi_{cl}} \times \int_0^{\epsilon_c} f(\epsilon) \epsilon d\epsilon = \frac{b}{\phi_{cl}} \times G(\epsilon_c) \quad (15)$$

$$M_1 = \frac{0.5(\sigma_{s2} - \sigma_{s20})}{\sigma_{wy}} (0.5Q_{wy} + Q_{D0}) \times d_c \quad (16)$$

상부절편 및 하부절편의 모멘트와 작용 외력과의 평형조건식은 하부절편의 응력에 의한 모멘트 M_1 과 상부절편의 응력에 의한 모멘트 M_2 의 합을 작용외력에 의한 작용모멘트 $M = S \times a$ 와 같다고 하면 작용 외력 Q 를 구할 수 있다.

$$S = \frac{(M_1 + M_2)}{a} \quad (17)$$

4. 해석방법

4.1 몬테카를로 시뮬레이션을 도입하기위한 불확실한 변수의 선택

모든 콘크리트 구조물들은 불확실한 변수를 포함하고 있다. 그래서 다음과 같은 변수를 선정하였다.

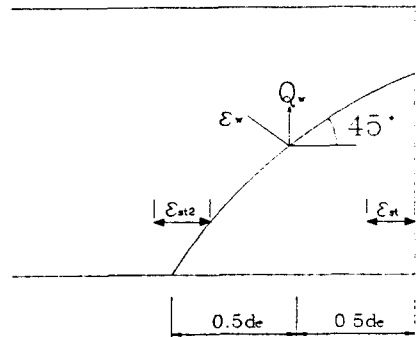


그림 5. 전단철근에 대한 전단력(Q_w) 변화의 위치

- (1) 철근의 항복강도
- (2) 콘크리트 구조물들의 최대압축강도
- (3) 철근의 탄성계수
- (4) 최대 압축강도에서의 압축변형을
- (5) 콘크리트 구조물의 파괴시의 극한변형을
- (6) 전단보강철근의 인장력
- (7) 인장주철근의 다우웰작용전단력
- (8) 압축측 콘크리트의 변형을(상부절편 및 하부절편의 경계값의 변정을, 압축연 변형을)
- (9) 인장주철근에서의 변형을
- (10) 상부절편의 길이
- (11) 사인장 균열 선단위치에서 하부절편단면의 중립축 길이

불확실한 변수를 응답방정식의 해석적인 정확성을 보완하기위하여 신뢰성 지수를 도입하였다.

- (12) 전단력 용량계산에 포함되는 신뢰성 지수
- (13) 항복변위계산에 포함되는 신뢰성 지수
- (14) 극한변위계산에 포함되는 신뢰성 지수

4.2 몬테카를로 시뮬레이션 해석방법

수치 계산면에서는 수계산을 하는 구조물의 응답에 대한 불확실한 변수 (uncertainties variables)를 양적으로 나타내는 방법으로 테일러 급수확장(taylor series's expansion)을 이용하여 외력에 의한 응답불확실한 변수와 구조물에 내포되어 있는 불확실한 구조적인 변수들사이의 선형적인 관계(linear relationships)를 정식화한 선형통계학적인 방법(linear statistical method)을 이용하였는데, 이 방법을 표준화된 난수를 이용, 컴퓨터 시뮬레이션방법을 선택하여 구조물에 내포되어 구조적인 변수와 응답 불확실한 변수를 이용하여 구조물들의 내력을 평가하였다. 또한 식(5)에서(17)에 대한 식에서 불확실한 변수를 각식에서 대해서 편미분하여 표준화된 난수를 도입, 이용하여 Taylor's series에서의 편미분을 간략화하여 일반화 시켜 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하면 그 과정은 그림 6.와 같다.

5. 결론

5.1 해석결과

본 해석방법을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존의 해석방법, 실험에의한 데이터와 컴퓨터를 이용한 본해석방법인 몬테카를로 시뮬레이션방법과의 결과치를 비교하면 오차는 개략적으로 내력을 평가하는데에는 별 문제가 없을 것으로 사료된다.
- 2) 사인장균열모델에 의한 평가방법은 사인장 균열 발생 전후를 평가하는데 거의 정확한 해석치를 보여주고 있다.

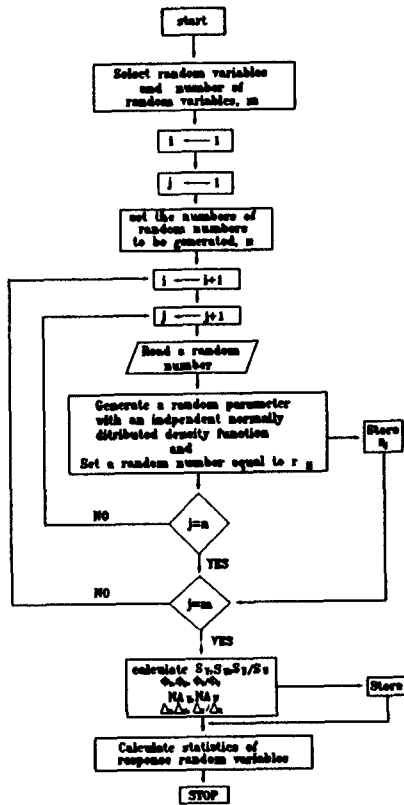


그림 6. 몬테카를로 시뮬레이션 해석 순서도

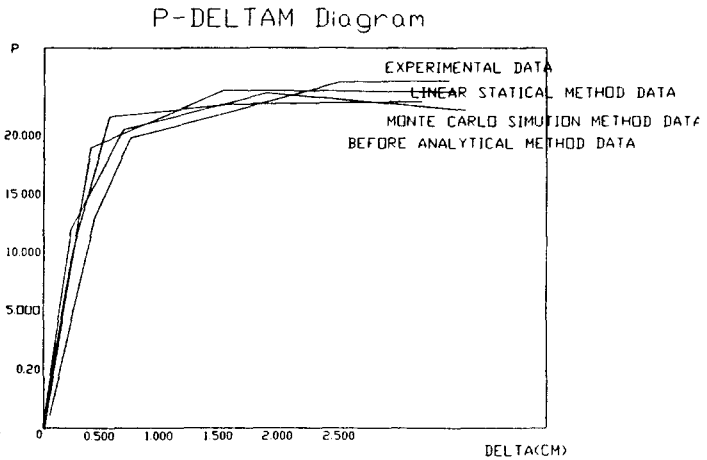


그림 7 보통강도콘크리트의 전단변형에 의한 하중-변위관계

참고문헌

1. ACI 381-83 Building Code Requirement for Reinforced Concrete, Portland Cement Association
2. Hognestad, E., Hanson, N.N., and Mchenry, d., "Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design", Journal of the American Concrete Institute, Vol.52, December 1955, PP455-479; also PCA Development Department Bulletin d6.
3. Hognestad, E., "Confirmation of Inelastic Stress Distribution in Concrete" Journal of Structure Division Proceeding of the American Society of Civil Engineers, Vol.83, Proc 1189, March 1957; also PCA Development Department Bulletin d15.
4. Wang, C.K., and Salmon, C.G., "Reinforced Concrete Design", Third Edition, Happer & Row Publishers, New York, n.y. 1979, Chap.1.2, and 3.
5. Choi, Kwang Jin, "An Analytical Study of Flexural Deformation for High Strength Concrete Structures using Reliability Theory", Korean Concrete Institute, 1996.5.
6. Hong, Won Kee, "Development of Analytical Models for Reinforced Concrete Masonry Flexural Walls", PH.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of California, Los Angeles 1989.
7. Hart, G.C., "Uncertainty Analysis Loads, and Safety in Structural Engineering", Prectice-Hall, Inc., New Jersey 1988.