

신뢰성 이론을 이용한 고강도콘크리트 구조물의 축력-모멘트관계에 있어서의 해석방법에 대한 평가

The Estimation of Analytical Method for Axial Force-Moment Relationships of High-Strength Concrete Structures using Reliability Theory

최광진* 장일영** 송재호*** 홍원기****
Choi, Kwang Jin Jang, Il Young Song, Jae Ho Hong, Won Kee

ABSTRACT

The main object of the study is that axial force-moment relationships for high strength concrete structures using reliability theory(Linear statistical method, Monte Carlo Simulation) including probability conception. And mean stress factors and centroid factors proposed to high strength concrete structures using reliability theory(Linear statistical method, Monte Carlo Simulation). Finally, The established experimental data for axial force-moment relationships are compared to the analytical data(data for Linear statistical method and Monte Carlo Simulation) for axial force-moment relationships in this analytical method.

1. 서론

현대사회에서는 인구의 증가와 지가의 상승으로 토목, 건축구조물들은 고강도화, 경량화됨으로써 고강도 콘크리트의 수요가 급격히 늘고 있다. 또한 시멘트의 강도와 시공기술의 발달, 고성능 감수제 및 혼화제의 개발등으로 점차적으로 수요 범위가 증가추세에 있고, 1980년대에 와서 미국, 일본, 캐나다등에서는 압축강도 1000kgf/cm^2 의 고강도 콘크리트의 개발로 고층건물, 교량 등에 고강도콘크리트, 초고강도 콘크리트의 시공성이나 현장성에 대한 연구가 많이 시행 되고 있다.

-
- * 정회원 (주)동우기술단 부설 연구소 연구원, 공학석사
 - ** 정회원 국립금오공과대학교 토목공학과 교수,공학박사
 - *** 국립금오공과대학교 토목공학과 교수, 공학박사
 - **** 정회원 (주) 삼성중공업 건설부문 품질팀장, 토목구조기술사

그러나 현재 대개 사용되고 있는 이론들은 보통 강도 콘크리트를 사용하여 실험한 결과에 근거로 강도의 변화를 주어서 사용하였기 때문에 고강도 콘크리트에 대한 적용성은 불합리한 점을 많이 내포하고 있다.

2. 연구배경과 목적

철근 콘크리트의 기둥에 대한 연구는 1931년 ACI 318 분과위원회에서 564개의 기둥부재에 대한 실험결과를 발표하면서 본격적으로 시작되었다. 그 후에 1951년에 Hognestad가 축하중과 휨모멘트(하중)를 받는 기둥에 대한 연구를 발표하면서 이에 대한 연구가 고조되었다. 1960년대 중반기에 들어오면서 기둥의 단부조건, 부재사이의 상호작용, 기둥이 구조물 전체거동에 미치는 영향에 관한 연구가 시작되었으며, 1964년 Wood는 전체구조물의 거동과 부재거동사이의 관계를 명확히 규명하여 부재를 설계해야 하는 것을 지적하였다. 그래서 본 연구의 목적은 확률적인 개념이 포함되어 있는 신뢰성이론(선형통계학적 방법)을 이용하여 고강도콘크리트 구조물에 대한 하중-모멘트 관계(load-moment relationships), 평균응력계수(mean stress factor, α)와 도심계수(centroid factor, γ)를 본 해석방법으로 산정하여, 산정된 값으로 고강도콘크리트의 강도별로 평균응력계수와 도심계수를 제안하고 또한 두 해석방법과 실험치를 통하여 본 해석방법에 대한 타당성을 평가하는데 있다.

3. 응력-변형을 곡선의 모델과 응력불러

3.1 철근의 응력-변형을 곡선모델

철근의 응력-변형을 곡선모델은 기존의 많은연구자들에 의해 실험으로 구한 것에 근사적으로 표현할 수 있는 그림 3.1에 있는 복합곡선모델(complex curve model)을 사용하였다.

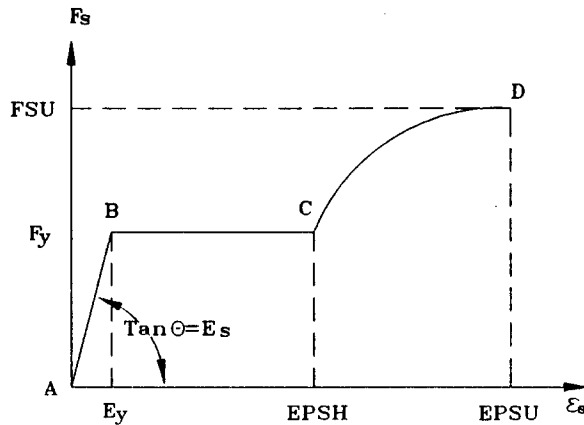


그림 3.1 철근의 응력-변형을 곡선모델(복합곡선모델)

3.2 콘크리트의 응력-변형을 곡선모델

국내,외적으로 압축강도가 500kg/cm² 인 실험되어있는 공시체(φ10×20cm) 50개의 실험데이터를 수집하여 대수회귀분석과 각 불확실한 변수사이의 상호관계를 이용한 다중회귀분석을 이용하여 고강도콘크리트의 근사적인 상승곡선과 하강곡선을 그림 3.2에서와 같이 모델화 하였다.

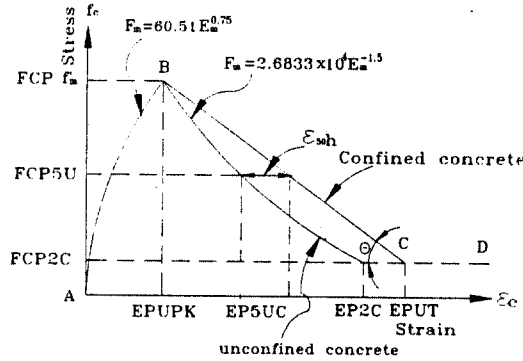


그림 3.2 콘크리트의 응력-변형을 곡선모델

400kg/cm² ~500kg/cm² 의 고강도 콘크리트의 경우

영역 AB ($E_m < EPUPK$)

$$F_m = 60.51 E_m^{0.75}$$

$$F_m = 11.24(2.00 \times 10^{-6} FCP + 6.31 \times 10^{-10} + 0.8 \times 10^{-8} EPUPK^{0.64})^{0.75} \quad (1)$$

영역 BC ($EPUPK < EP2C$)(비구속일 경우)

$$F_m = 2.68 \times 10^4 E_m^{-1.50} \quad (2)$$

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

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

비구속된 콘크리트에 대해서는

$$EP5UC = FCP2C$$

영역 CD ($EP2C \leq E_c \leq EP2C$)

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

3.3 응력블럭

응력블럭은 대한 연구는 콘크리트가 발명되면서 시작되었다고 하여도 과언은 아니다. 처음에는 1899년 포물선(parabola distribution)응력분포의 이론이 정립되었고, 1904년 등가블럭응력분포(rectangular distribution)의 이론이 정립되었고 현재 보통강도콘크리트에서는 등가블럭응력분포가 완전히 이론으로 정립이 되어있다. 또한 고강도 콘크리트에 대한 연구는 ACI 363 고강도 분과위원회에서 각종 응력블럭을 통하여 고강도콘크리트에서는 보통강도콘크리트에서 정립된 이론을 바탕으로 한 등가블럭분포를 사용하는 것이 약간의 문제점으로 나타나 사다리꼴 응력블럭을 사용하는 것을 고려할 필요가 있다고 밝히고 있다. 그러나 고강도콘크리트에 대한 응력 분포는 기존의

kent-park 곡선에서 강도를 변화시켜 사용한 것이 현실이다. 최근에는 많은 연구자들에 의해서 실험과 해석적인 방법을 통하여 정립이 되어가고 있다. 기존에 정립된 등가응력블럭분포에 대한 힘-모멘트 평형방정식은 식(6), 식(7)과 같고, 사다리꼴응력분포에 대한 힘-모멘트 평형방정식은 식(8), 식(9)에 나타나고 있다. 또한 평균응력계수와 도심계수는 식(10),(11)에서와 같다.

4. 해석방법

4.1 두 해석방법에 도입하기위한 불확실한 변수의 선택

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

- (1) 철근의 항복강도
- (2) 콘크리트 구조물들의 최대압축강도
- (3) 철근의 탄성계수
- (4) 최대 압축강도에서의 압축변형을
- (5) 콘크리트 구조물의 파괴시의 극한변형을
- (6) 소성현지길이

불확실한 변수를 응답방정식의 해석적인 정확성을 보완하기위하여 신뢰성 지수를 도입하였다.

- (7) 모멘트 용량계산에 포함되는 신뢰성 지수
- (8) 항복변위계산에 포함되는 신뢰성 지수
- (9) 극한변위계산에 포함되는 신뢰성 지수

4.2 선형통계학적인 방법

수치적인 면에서는 수계산을 하는 구조물의 응답에 대한 불확실한 변수 (uncertainties variables) 을 양적으로 나타내는 방법으로 taylor series's expansion을 응답불확실한 변수와 불확실한 구조적인 변수들사이의 선형적인 관계(linear relationships)를 정식화한 선형통계학적인 방법(linear statistical method)을 이용하였고, 구조물의 응답 불확실한 변수를 이용하여 구조물들의 내력을 평가하여 하중-모멘트 관계를 산정한다. 일반적으로 taylor series's expansion을 표현함은 식(5)와 같다.

$$f(r_1, r_2, \dots, r_m) = f(\bar{r}_1, \bar{r}_2, \dots, \bar{r}_m) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial f(\bar{r}_1, \bar{r}_2, \dots, \bar{r}_m)}{\partial r_j} (r_j - \bar{r}_j) + 0^+ \quad (5)$$

고강도콘크리트 평형방정식을 유도하기 위하여 실제적인 응력분포곡선을 이상화한 사다리꼴응력분포과 등가블럭응력분포 를 고강도콘크리트의 압축 및 인장철근을 콘크리트 단면에서의 힘과 모멘트의 평형방정식 식(6)~식(9)을 불확실한 변수로 편미분 하면 각 항에 대한 축력-모멘트를 산정한다.

4.3 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 의

한 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 평가하여 최종적으로 축력-모멘트 관계를 산정한다. 고강도콘크리트 평형방정식($400\text{kg/cm}^2 \sim 500\text{kg/cm}^2$)을 유도하기 위하여 실제적인 응력분포곡선을 이상화한 사다리꼴응력분포와 등가응력분포를 고강도콘크리트의 압축 및 인장철근을 콘크리트 단면에서의 힘과 모멘트의 평형방정식을 구성하면 다음식과 같다.

$$P = (1 + \beta)/2 \times \alpha f_c b k d + \sum f_s (A_{s_i} + A_{s_i}') \quad (6)$$

$$M = (1 + \beta)/2 \times \alpha f_c' b k d (l_w/2 - \gamma y) + \sum (f_{s_i} A_{s_i} + A_{s_i}') (l_w/2 - d_i) - P' e \quad (7)$$

$$P = \alpha f_c b k d + \sum f_s (A_{s_i} + A_{s_i}') \quad (8)$$

$$M = \alpha f_c' b k d (l_w - \gamma k d) + \sum (f_{s_i} A_{s_i} + A_{s_i}') (l_w/2 - d_i) - P' e \quad (9)$$

평균응력계수와 도심계수는 식(10),(11)에서와 같다.

$$\alpha = \frac{\int_0^{\epsilon_m} F_m d\epsilon_m}{F_m \epsilon_m} \quad (10)$$

$$\gamma = 1 - \frac{\int_0^{\epsilon_m} F_m d\epsilon_m}{F_m \epsilon_m} \quad (11)$$

된다. 위의 식을 이용하여 표준화된 난수를 도입, 이용하여 taylor's series에서의 편미분을 간략화한 선형통계학적인 방법과 이것을 일반화 시켜 컴퓨터시뮬레이션을 이용한 그 과정은 그림 4.1과 같다.

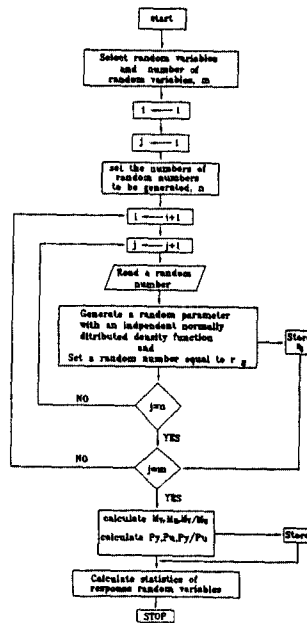


그림 4.1 해석방법의 관한 해석 순서도

5. 결론

5.1 해석결과

본 해석방법으로 고강도콘크리트 구조물에 대한 다음과 같은 축력-모멘트 관계가 산정되었다.

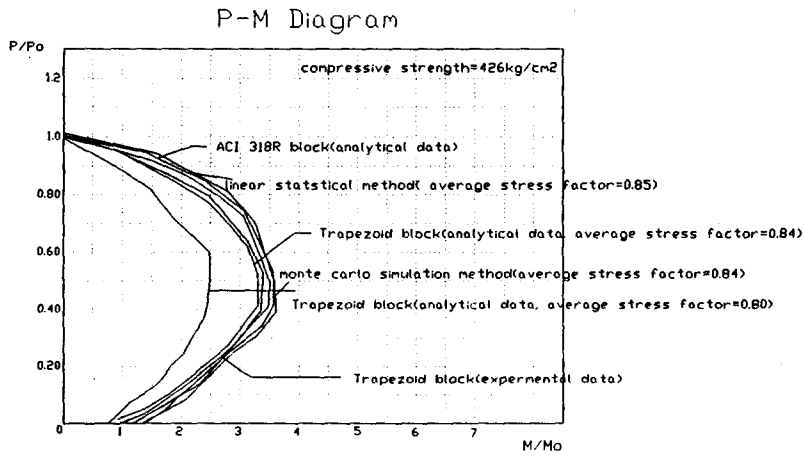


그림 5.1 해석방법별 고강도콘크리트의 평균응력계수에 대한 축력-모멘트 관계

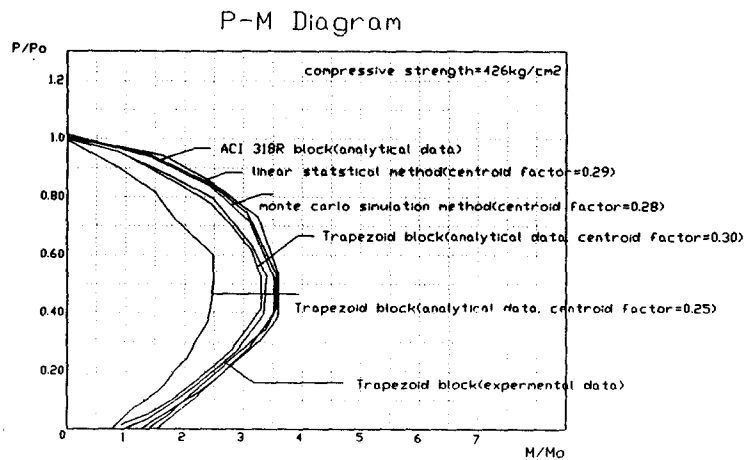


그림 5.2 해석방법별 고강도콘크리트의 도심계수에 대한 축력-모멘트 관계

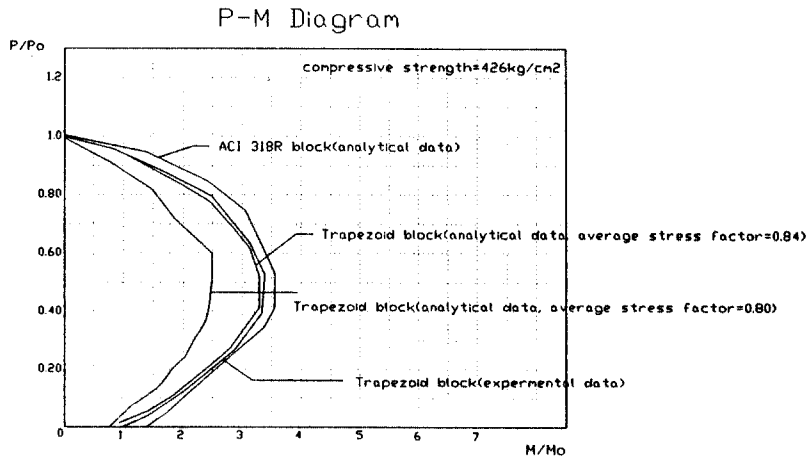


그림 5.3 응력불러벌 고강도콘크리트의 평균응력계수에 대한 축력-모멘트 관계

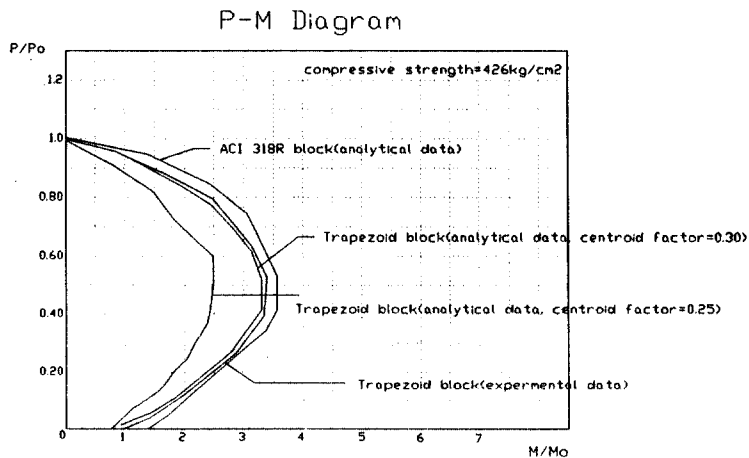


그림 5.4 응력불러벌 고강도콘크리트의 도심계수에 대한 축력-모멘트 관계

본 해석방법을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 해석방법은 ACI 363 committe (미국고강도 콘크리트 분과위원회)에서 실험한 데이터와 비교하여 보면 평균응력계수(α)은 띠철근에서 0.80~0.85 나선철근에서 0.75~0.80 일때가 실험 데이터가 본해석방법과 일치하는 것으로 나타났다.
- 2) 본 저자가 이전의 논문에서와 같이 고강도콘크리트에서는 사다리꼴 응력불러를 적용하는 것이 타당하다고 나타났다.

- 3) 고강도콘크리트 각 강도별로 평균응력계수와 도심계수를 제안하면 다음과 같은 표 6.1와 같다.
- 4) 고강도콘크리트 해석방법별 평균응력계수와 도심계수를 제안하면 다음과 같은 표 6.2와 같다.
- 5) 본 해석방법과 컴퓨터를 이용한 몬테카를로 시뮬레이션방법과의 오차는 0.01%~0.07%라는 결과로 나타나기 때문에 본 방법을 쓰는 것은 고강도 콘크리트 구조물의 내력평가에는 별 문제가 되지 않을 것으로 사료된다.

표 6.1 강도별로 평균응력계수 및 도심계수

강도(kg/cm ²)	평균응력계수(α)	도심계수(γ)
300~400kg/cm ²	0.83	0.35
400~500kg/cm ²	0.84	0.30
500~700kg/cm ²	0.86	0.25

표 6.2 해석방법별 평균응력계수 및 도심계수

강도(kg/cm ²)	평균응력계수(α)	도심계수(γ)
300~400kg/cm ²	0.83(0.82)	0.35(0.33)
400~500kg/cm ²	0.84(0.83)	0.30(0.29)
500~700kg/cm ²	0.86(0.85)	0.25(0.26)

강도별로 검토한 결과 강도가 클수록 평균응력계수는 증가하나 도심계수는 감소하고 있다.

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", Pretice-Hall, Inc., New Jersey 1988.
8. P.T. Wang, S.P. Shah and A.E. Naaman, "High Strength Concrete in Ultimate Strength Design", Proc. ASCE, J. Struct. Div., Vol. 104 No.11, 1978, PP 1761-1773.
9. ACI-363, "State of the Art Report on High Strength Concrete", Journal of ACI, Vol.81, No.4, PP. 1009-1056, July-Aug 1984.
10. Park, P. and Paulay, "Reinforced Concrete Structures", Pretice-Hill, New York, 1975.