

철근콘크리트의 비선형 거동과 모델링

Nonlinear Behavior and Modeling for Reinforced Concrete



김진근*

1. 서론

철근콘크리트 구조물의 완전한 거동을 예측하거나 정확한 해석 및 설계를 위하여, 또한 기존 구조물의 내구성 파악을 위하여 재료의 성질을 정확하게 규명하는 것은 가장 기본적이면서도 중요한 과제이다. 그러나 철근콘크리트 구조물에서 철근은 균질한 재료로 볼 수 있지만 콘크리트는 비균질한 재료이므로 철근과 콘크리트가 합성재료로서 일체로 거동할 경우 그 양상은 매우 복잡하게 된다. 이는 철근과 콘크리트의 탄성계수 및 극한 변형도가 서로 다르고, 특히 콘크리트는 철근과는 달리 압축강도에 비해 인장강도가 매우 작아 사용하중 범위 내에서도 인장부에서 균열이 발생하게 되어 재료의 강성이 저하되고, 균열에 의해 재료가 방향성을 가지게 되기 때문이다. 또 철근과 콘크리트 사이의 부착 파괴에 의한 비선형성도 매우 불확실한 성질을 갖고 있기 때문이다.

따라서, 구조물의 비선형 거동을 파악하기 위해

서는 철근콘크리트 재료에 대한 보다 정확한 이해와 모델의 선택 또는 개발이 필요하게 된다.

2. 1축응력 상태의 콘크리트

실제 철근콘크리트 구조물은 여러방향에서 동시에 하중이 가해지며 한 방향에서만 가해지는 경우는 극히 드물다. 그러나 콘크리트 재료의 상대적 평가와 실험의 간편성 등의 이유로 1축응력 상태의 거동은 매우 중요하게 다루어지고 있다. 또한 다축응력 상태의 실제 문제를 다룰 때에도 1축응력 상태로 단순하게 가정하여 사용하기 때문에 대부분의 실제 해석에 있어서는 1축응력 상태의 응력-변형도 관계는 중요한 재료특성이 된다.

2.1 1축압축

콘크리트는 1축압축을 받으면 횡방향으로의 인장변형을 일으키게 되므로 미세균열 및 주균열이 하중방향과 나란히 발생하여 응력이 증가함에 따라 포아송비(poisson's ratio)가 증가하게 된다.

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수, 공박

횡보강(confinement)이 되어 있을 경우에는 횡방향의 인장변형을 막아주어 균열의 진전을 억제하기 때문에 강도 및 연성(ductility)이 증진되는 효과를 가져오게 된다.

콘크리트의 압축력에 의한 파괴도 결국에는 횡방향의 인장변형에 의한 것이다. 단조하중을 받는 콘크리트의 응력-변형도 곡선은 그림 1에서와 같이 작용응력이 압축강도의 약 30%에 이를 때까지는 거의 선형을 유지하나 그 후 응력이 증가하면 부착면에서의 미세균열이 서서히 확대되고 응력-변형도 곡선은 점차적으로 비선형성을 보이게 된다. 이때 응력이 더욱 증가되고 약 70~80%에 이르면 굵은 골재와 모르타르 사이의 부착균열이 더욱 증가하여 모르타르 내에서도 균열이 발생하여 비선형성은 더욱 커진다. 이와 같은 미세균열은 비선형성이 커짐에 따라 균열들의 연결에 의해 주균열로 진전되어 비선형성은 더욱 커지고 압축강도 이후에서는 변형연화(strain-softening)현상을 보이며 압축파괴된다. 한편 고강도 콘크리트에서는 보통강도콘크리트에 비해 비선형성이 작게 나타나는데 이는 굵은골재와 모르타르의 부착력이 상대적으로 높고 파괴진행속도가 빨라 균열이 집중되고 골재내부에서도 균열이 진행되기 때문이다.

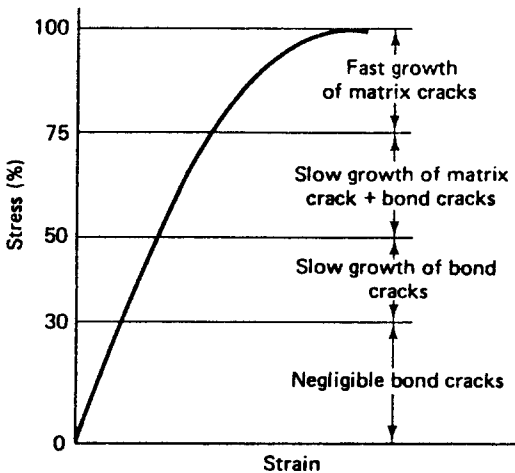


그림 1. 1축압축 콘크리트의 응력-변형도 곡선

이와같은 응력-변형도 곡선의 모델은 많은 연구자들에 의하여 다양한 형태의 식으로 제안되어 있으며, 그 중 Hognestad⁽¹⁾와 Fafitis 등⁽²⁾에 의한 식을 예로 들면 다음과 같으며, Hognestad식은 장기변형까지도 고려하여 모델링한 식이고, Fafitis 식은 1축압축에 있어서 일반적인 실험실의 실험치에 의한 식이다.

1) Hognestad의 제안식⁽¹⁾

$$\text{상승부분} : \sigma_c = 0.85f_o \left[2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\text{하강부분} : \sigma_c = 0.85f_o \left[1 - 0.15 \frac{\epsilon_c - \epsilon_o}{\epsilon_u - \epsilon_o} \right] \quad (2)$$

여기서, f_o , ϵ_o 는 콘크리트의 압축강도와 그때의 변형도이고, ϵ_u 는 콘크리트의 최대변형도이다.

2) Fafitis등의 제안식⁽²⁾

$$\text{상승부분} : \sigma_c = f_o \left[1 - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \right)^A \right] \quad (3)$$

$$\text{하강부분} : \sigma_c = f_o \exp \left[-k(\epsilon_c - \epsilon_o)^{1.15} \right] \quad (4)$$

여기서, A, k는 압축강도 및 횡보강 효과에 따른 변수이다.

2.2 1축인장

콘크리트는 최대 인장응력에 도달하면 균열이 발생하여 더 이상의 응력을 부담할 수가 없게 된다. 그러나 철근콘크리트에서는 콘크리트와 철근의 부착으로 인하여 철근의 응력이 콘크리트로 전달되어 균열 발생 후에도 콘크리트가 어느 정도의 인장응력을 받게 되는 인장강성 증진효과(tension-stiffening effect)가 발생된다. 이러한 효과를 고려하기 위하여는 그림 2와 같이 콘크리트의 최대 인장응력 후에 강성을 추가하는 방법^(3, 4, 5)과 그림 3과 같이 철근의 강성을 증진시켜 주는 방법⁽⁶⁾이 있다.

3.1 소성(perfectly-plastic)모델

재료는 항복점(yield point)을 가지면서 완전 탄-소성 거동을 하는 것으로 가정하여 사용하는 모델로서, 철골 구조에서는 적합한 방법이지만 콘크리트 구조에서는 적합하다고 볼 수 없다.

3.2 변형경화(strain-hardening)모델

앞절의 소성 모델을 콘크리트에 적합하게 수정한 방법으로 그림 5와 같이 초기에 탄성한계곡면과 파괴곡면을 선택하고, 하중상태가 탄성한계곡면 내에 있을 경우에는 탄성상태로 해석한다. 그리고 하중이 증가하여 이 한계곡면을 넘어설 경우 현재의 하중면(loading surface)을 새로운 한계면으로 취하여 이 면까지 감소된 강성으로 탄성거동을 하는 것으로 하여 소성변위(irrecoverable deformation)는 발생하지 않는다고 생각한다. 이러한 하중면은 파괴곡면에 이를 때까지 계속 확장 진행된다.

하중면은 Chen⁽¹⁰⁾에 의한 식(5)와 Buyukozturk⁽¹¹⁾에 의한 식(6)이 사용된다.

$$\frac{J_2 + \frac{\beta}{3}I_1 - \frac{1}{12}I_1^2}{1 - \frac{\alpha}{3}I_1} = \tau^2 \quad (5)$$

$$3J_2 + \tau I_1 + \frac{1}{5}I_1^2 = \frac{1}{9}\tau^2 \quad (6)$$

여기서, I_1 은 응력에 의한 invariant이고, J_2 는 편차응력(deviatoric stress)에 의한 invariant이며, α 와 β 는 콘크리트 강도에 의하여 결정되는 재료상수이다. 위의 식들에서 $\tau = \tau_0$ 이면 탄성한계곡면이 되고, $\tau = \tau_u$ 이면 파괴곡면이 된다.

4. 3축응력 상태의 콘크리트

댐이나 텐돈 갤러리 등의 대형 매스 콘크리트 구조와 같이 모든 방향으로의 상대변위를 무시할 수 없는 경우에는 3축응력 상태의 응력이 작용된다고 볼 수 있다. 그림 6에서 보는 바와 같이 3축 방향으로 같은 크기의 응력이 작용하는 상태의 콘크리트 응력-변형도 관계는 1축 및 2축압축에 비하여 현저하게 다른 거동양상을 보이고 있다. 그리고 하중제거시에는 초기하중(initial loading) 상태의 기울기와 거의 비슷한 값을 가진다.

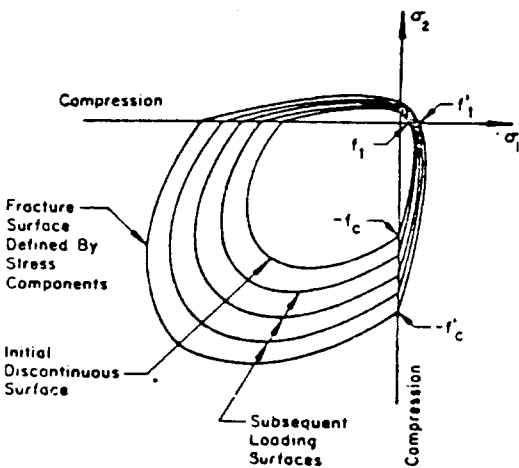


그림 5. 2축응력을 받는 콘크리트의 하중면

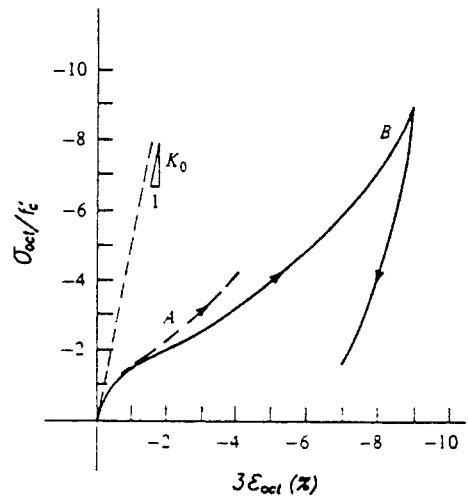


그림 6. 3축응력을 받는 콘크리트의 응력-변형도 곡선

이와 같은 3축응력 상태의 거동 해석을 위하여 소성파괴(plastic fracture)의 개념을 이용한 많은 모델식들^(12, 13)이 제안되어 있으며, 특히 반복응력에 대하여서는 endochronic 모델⁽¹⁴⁾등을 사용하여 해석하기도 한다. 또 microplane model⁽¹⁵⁾등에 의해 최근에 해석이 시도되기도 하고 있다.

5. 콘크리트의 시간 의존성(time-dependency)

콘크리트는 비균질적인 재료 특성을 가질 뿐만 아니라 수경성 재료이기 때문에 시간에 따라 재료의 성질이 변화하게 된다. 따라서 콘크리트의 장기 비선형 요인들을 고려하여 그 거동을 예측하여야 하나, 적용에 있어서 재료특성의 불명확성, 복잡성 등으로 인하여 사용성 및 안전성의 여부를 진단하기란 매우 어려운 문제이다.

콘크리트 구조물의 장기 비선형 거동의 중요 요인으로는 크리프(creep)와 건조수축(shrinkage)을 들 수 있으며, 이러한 요인들에 의하여 구조물은 균열이 발생하여 내구성, 수밀성, 수기성 등에 유해한 결과를 초래할 수도 있다. 크리프와 건조수축에 의한 장기거동을 예측하기 위하여 각국의 규준에서 각기 모델식을 제시하고 있으며, 이 중 미국의 ACI모델⁽¹⁶⁾, 유럽의 CEB-FIP모델⁽¹⁷⁾, 그리고 BP-KX모델⁽¹⁸⁾이 가장 대표적으로 사용되고 있다.

6. 철 근

철근은 모든 경우에 대하여 길이방향의 일축으로만 응력이 작용하는 것으로 생각하며, 구조형태 및 하중 조건에 따라 부착-슬립 효과(bond-slip relation)를 고려하여 주어야 한다.

6.1 응력-변형도 관계

철근은 완전 탄-소성 곡선으로 가정하는 것이

가장 일반적인 방법이며, 필요에 따라 변형경화 현상을 포함시키기도 한다. 또한 반복하중이 작용할 경우에는 Bauschinger 효과가 발생하므로 Kent⁽¹⁹⁾에 의한 식(7) 혹은 Singh등⁽²⁰⁾에 의한 식(8)등과 같이 이를 고려한 모델식을 사용하여야 한다(그림 7 참조).

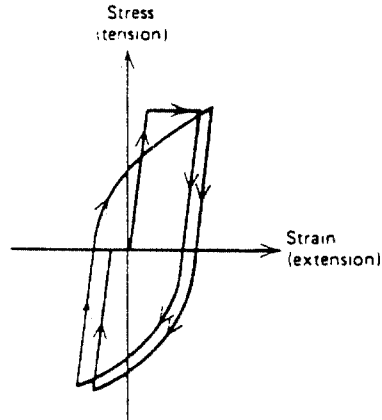


그림 7. 반복하중을 받는 철근의 응력-변형도 곡선

$$\epsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} \left(1 + \left| \frac{\sigma_s}{\sigma_{ch}} \right|^{\gamma-1} \right) \quad (7)$$

$$\sigma_s = f_y \left[1 - \exp\left(-\frac{2.05\epsilon_s}{\epsilon_{sh}}\right) + 0.129 \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{sh}} \right] \quad (8)$$

여기서, γ 는 반복횟수에 따른 변수이고, σ_{ch} 는 철근 변형도에 따른 변수이다.

6.2 부착-슬립효과

부착응력은 철근콘크리트 구조물에서 균열이 발생한 후에 콘크리트와 철근의 응력재분배에 따른 변형도 변화에 기인하고 두 재료의 부착면을 따라 작용하는 전단응력으로 표현되며, 인장 균열 면에서 이러한 응력의 변화로 인하여 슬립이 발생된다(그림 8 참조).

이와 같은 부착-슬립 효과는 부착면에서의 응력분포가 매우 불규칙하고 복잡하기 때문에 이론

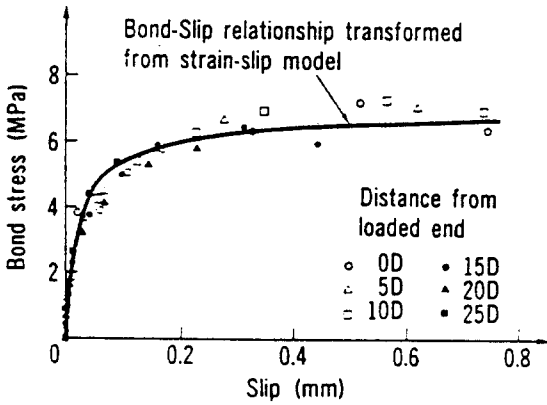


그림 8. 부착-슬립 곡선

적으로 그 관계를 규명하여 내기란 매우 어려운 일이며, 식(9)의 Shima의 제안식⁽²¹⁾이나 식(10)의 Houde의 제안식⁽²²⁾과 같이 실험치로부터의 수치 해석을 통하여 경험적으로 모델화하는 것이 이제까지의 일반적인 방법이며, 최근에 이를 이론적으로 유도하려는 노력이 진행되고 있다.

$$\tau = 0.73f'_c \ln(1 + 5000 s/d)^3 / (1 + \epsilon_s \times 10^5) \quad (9)$$

$$\tau = 1.95 \times 10^6 s - 2.35 \times 10^9 s^2 + 1.39 \times 10^{12} s^3 - 0.33 \times 10^{15} s^4 \quad (10)$$

여기서, τ 는 부착응력, s 는 슬립양, d 는 철근직경, ϵ_s 는 철근의 변형도이다.

7. 모멘트-곡률 관계

휨을 받는 부재의 특성은 단면의 모멘트-곡률 관계로 나타내어지며, 이러한 모멘트-곡률 관계는 구조물의 거동 특성을 결정하는 중요한 요인이 된다. 현재까지의 모멘트-곡률 곡선을 구하는 일반적인 방법은 다음과 같은 세가지 방법이 있다.

- 휨강성을 모델화하여 구하는 방법
- 인장강성 증진효과를 포함한 콘크리트 또는 철근의 응력-변형도 곡선을 사용하여 구하는 방법

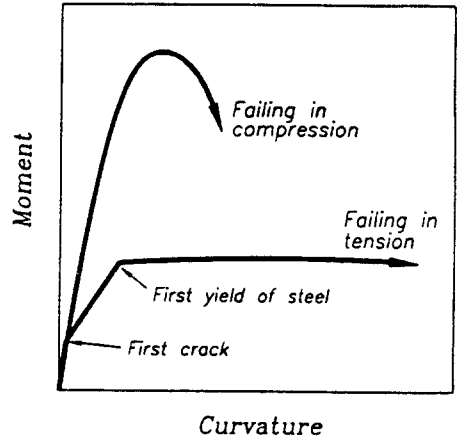


그림 9. 모멘트-곡률 곡선

○ 철근과 콘크리트의 부착-슬립 효과를 고려하여 구하는 방법

모멘트-곡률 곡선의 형태는 그림 9에서와 같이 두가지의 대표적인 형태로 구분된다. 과소철근 단면일 경우 인장부위의 균열발생으로 인하여 초기 강성의 저하가 발생되며 그 후 철근의 항복과 함께 부재에는 큰 연성이 발현된다. 한편 과다철근 단면일 경우와 축력이 상당히 작용하는 경우에는 철근의 항복보다 압축부의 콘크리트 파쇄가 선행되기 때문에 급격한 파괴의 진행과 함께 연성은 거의 나타나지 않는다.

8. 결 론

이상에서 간략하게나마 철근콘크리트의 비선형 거동에 대한 분석과 모델식들에 대하여 설명하였다. 이 밖에도 철근콘크리트의 비선형성에 영향을 미치는 요인들은 무수히 많으며, 아직도 정량적으로 나타낼 수 없는 현상들도 많이 있다.

철근콘크리트의 비선형 해석을 위하여서는 무엇보다도 먼저 재료의 비선형성이 비교적 정확하게 고려된 모델들을 사용하는 것이 가장 중요한 일이다. 그렇다고 재료의 모든 비선형성을 고려하는 것은 사용성의 측면에서 그다지 좋은 방법은

아니며, 구조물의 형상, 하중조건 등에 따라 중요하다고 판단되는 요인들에 대하여는 정확한 비선형 모델을 그리고 크게 영향을 미치지 않는 요인들에 대하여서는 선형으로 가정하거나 또는 무시하는 것이 유한요소 해석을 수행함에 있어서의 효율적인 방법이라 할 수 있겠다.

철근콘크리트의 유한요소 해석을 위하여서는 유한요소의 적용방법에 대한 개발도 중요하지만 그보다 먼저 사용되는 재료의 실제 거동을 보다 더 정확하게 이해하고, 그 바탕 위에서 더욱 더 실제와 근접한 비선형 모델을 사용 또는 개발하는 것이 우선적으로 요구된다 하겠다.

참 고 문 헌

- 1) Hognestad, E., "A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members," Bulletin Series No. 399, Univ. of Illinois, 1951, pp.129
- 2) Fafitis, A. and Shah, S.P., "Predictions of Ultimate Behavior of Confined Columns Subjected to Large Deformations," J. ACI, Vol. 82, No. 4, 1985, pp.423-433.
- 3) Scanlon, A. and Murray, D.W., "Time Dependent Reinforced Concrete Slab Deflections," J. Struct. Div., ASCE, Vol. 100, No. 9, 1974, pp.1911-1924.
- 4) Lin, C.S. and Scordelis, A.C., "Nonlinear Analysis of RC Shells of General Forms," J. Struct. Div., ASCE, Vol. 111, No. 3, 1975, pp. 523-538.
- 5) Gilbert, R.I. and Warner, R.F., "Tension Stiffening in Reinforced Concrete Slab," J. Struct. Div., ASCE, Vol. 104, No.12, 1978, pp.1885-1900.
- 6) Mueller, G., Numerical Problems in Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete," UC-SESM Report No. 77-5, Univ. of California, Berkeley, 1977.
- 7) Darwin, D. and Pecknold, D.A., "Analysis of RC Shear Panel Under Cyclic Loading," J. Struct. Div., ASCE, Vol. 102, No. 2, 1976, pp. 355-359.
- 8) Karsan, I.D. and Jirsa, J.O., "Behavior of Concrete Under Compressive Loadings," J. Struct. Div., ASCE, Vol. 95, No.12, 1969, pp. 2543-2563.
- 9) Otter, D.E. and Naaman, A.E., "Model for Response of Concrete to Random Compressive Loads," J. Struct. Engrg., ASCE, Vol. 115, No 11, 1989, pp.2794-2809.
- 10) Chen, A.C.T. and Chen, W.F., "Constitutive Relations for Concrete," J. Engrg. Mech., ASCE, Vol. 101, No. EM4, 1975, pp.465-481.
- 11) Buyukozturk, O., "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Structures," Computers and Structures, Vol. 7, 1977, pp.149-156.
- 12) Bazant, Z.P., "Work Inequalities for Plastic - Fracturing Materials," Vol. 16, 1980.
- 13) Ottosen, N.S., "A Failure Criterion for Concrete," J. Engrg. Mech., ASCE, Vol. 103, No. EM4, 1977, pp.527-535.
- 14) Bazant, Z.P. and Bhat, P., "Endochronic Theory of Inequality and Failure of Concrete," J. Engrg. Mech., ASCE, Vol. 102, 1976, pp.701-722.
- 15) Prat, P., "Micromechanics Modeling and Fracture Mechanics of Concrete and Geomaterials," Ph. D. Dissertation, Northwestern Univ., August 1987, 184pp.
- 16) ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures," American Concrete Institute, Detroit, 1971.
- 17) CEB-FIP, "Model Code for Concrete Structures," Comite Euro-International du Beton, Paris, Vol.2, 1978.
- 18) Bazant, Z.P. and Kim, J.K., "Consequences of Diffusion Theory for Shrinkage of Concrete," Materials and Constructions, RILEM, Vol. 24, pp.323-326.
- 19) Kent, D.C., "Inelastic Behavior of Reinforced

- Concrete with Cyclic Loading,” Ph. D. Dissertation, Univ. of Canterbury, New Zealand, 1969.
- 20) Singh, A., Gerstle, K.H. and Tulin, L.G., “The Behavior of Reinforcing Steel Under Reversed Loading,” Materials Research and Standards, Vol. 5, No. 1, 1965, pp.1-12.
- 21) Shima, H. and Chou, L. L., “Bond-Slip-Strain Relationship of Deformed Bars embedded in Massive Concrete,” Proc. of JSCE, Vol. 378, 1987, pp.165-174.
- 22) Houde, J., “Study of Force-Displacement Relationships for the Finite Element Analysis of Reinforced Concrete,” Report No. 73-2, Mcgill Univ., Montreal, 1973.

전문서적 보급 안내

“최신콘크리트공학”

〈한국콘크리트학회 編 · 4×6배판, 총 684쪽〉

● 본 학회는 콘크리트 관련기술의 가장 기본이 되는 콘크리트 재료의 제반특성을 집대성한 전문서적 「최신콘크리트공학」을 출간하고 여러분에게 보급하고 있습니다.

- 주요내용 :
- | | |
|---------------------|----------------------|
| (1) 콘크리트 정의 및 발달사 | (12) 콘크리트의 시험 |
| (2) 시멘트 | (13) 품질관리 |
| (3) 콘크리트 골재 | (14) 내구성 |
| (4) 배합수 | (15) 콘크리트의 균열 및 파괴역학 |
| (5) 혼화재료 | (16) 특수콘크리트 |
| (6) 배합설계 | (16.1) 고강도 콘크리트 |
| (7) 굳지 않은 콘크리트의 성질 | (16.2) 경량 콘크리트 |
| (8) 혼합, 운반 및 타설 | (16.3) 섬유보강 콘크리트 |
| (9) 양생 | (16.4) 콘크리트-폴리머 복합체 |
| (10) 굳은 콘크리트의 강도 특성 | (16.5) 중량콘크리트 |
| (11) 콘크리트의 역학적 특성 | |

● 구입방법 : 본 서적이 필요하신 분은 학회사무국에서 구입하시기 바라며 직접 오시기 어려운 분은 밑에 기재된 은행계좌로 송금하시면 우송해 드립니다.(송금자명 필히 기재요망)

● 보급가격 : 15,000원(회원은 10% 할인해 드립니다), 우편발송시 우송료 1,500원 별도 부담해야 함.

● 은행계좌 : 한일은행(096-132587-01-501)(예금주 : 최신콘크리트공학)

● 문의처 : 한국콘크리트학회 사무국

주 소 : 서울시 강남구 청담동 134-20(삼익빌딩 419호)

전 화 : 546-5384, 543-1916, 545-0199