

국내 실정에 적합한 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄성계수식 제안

A Proposal of Elastic Modulus Equation for High-Strength and Ultra-High-Strength Concrete

장일영* 송재호* 박훈규** 윤영수***
Jang, Il Young Song, Jae Ho Park, Hoon Gyu Yoon, Young Soo

Abstract

The aim of this study is to suggest the new elastic modulus equation that suits to a domestic situation to coincide the improved mechanical properties of high-strength concrete and ultra-high-strength concrete. For this purpose, this study collected the laboratory data more than 400 connected with the modulus of elasticity that performed in this country and also analyzed it statistically. The compressive strength of investigated concrete ranged from 400 to 1,400kg/cm².

As a result, a practical and useful elastic modulus equation is proposed, it can be considered as most suitable equation in domestic situation.

1. 서 론

최근의 국내 실험 결과에 의하면 콘크리트의 강도가 고강도화 될수록 탄성계수 값이 외국의 경우에 비해 비교적 작은값을 나타내고 있다^(1,2). 실제로 현재 국내의 철근콘크리트 구조물의 설계 및 해석시에 적용하고 있는 미국 ACI 318-89⁽³⁾ 및 ACI 363⁽⁴⁾의 탄성계수식과 일본 AIJ⁽⁵⁾의 규준식이 400kg/cm²이상의 고강도 콘크리트에 대해서는 실측치 보다 과대 평가됨이 국내외에서 수행된 다수의 연구결과^{(1), (6)~(8)}에서 지적되고 있다.

따라서 본 연구에서는 고강도 및 초고강도 콘크리트에 대해 수행된 국내의 탄성계수 실측치를 근거로 하여 고강도 및 초고강도 콘크리트 설계기준 정립에 있어서 기초적 자료가 될 수 있는 국내 실정에

* 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 석사과정

*** 정회원, 삼성물산(주) 건설 기술연구소 선임연구원

적합한 탄성계수 추정식을 제안하고자 한다.

2. 국내 실험데이터 조사방법

본 연구에서는 국내실정에 적합한 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄성계수 추정식을 제안하기 위하여 1979~1996년 사이의 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집^{(9)~(17)}, 콘크리트학회지^{(18)~(20)}, 대한토목학회 학술발표회 논문집⁽²¹⁾, 대한건축학회 학술발표 논문집⁽²²⁾, 대한건축학회 논문집^(8,23) 등의 학술지와 국내 대학의 연구 논문^{(24)~(26)}으로부터 공시체 크기 $\phi 10 \times 20\text{cm}$, 재령 28일, 수중양생한 보통중량의 고강도 콘크리트 및 초고강도 콘크리트 배합비, 압축강도와 ASTM C469⁽²⁷⁾ 규정에 따른 활선탄성계수(Secant Modulus of Elasticity) 및 단위중량에 관한 실험 데이터 440개를 수집하였다.

3. 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄성계수식 제안

3.1 단위중량의 평가

콘크리트의 단위중량은 전체용적의 60~80%를 차지하는 골재의 영향을 주로 받으며, 특히 고강도 콘크리트의 단위중량은 같은 재료를 사용하는 일반 콘크리트에 비해 단위수량이 감소함에 따라 상대적으로 약간 증가하는 경향이 있다. 따라서 고강도 콘크리트의 경우는 구조설계용 단위중량을 검토할 필요가 있다.

기존의 콘크리트구조물 설계에 적용되는 콘크리트의 단위중량은 통상 $2.3 \sim 2.4\text{t/m}^3$ 정도이다. 그러나 국내에서 실험된 자료를 이용하여 그림 1에서와 같이 압축강도와 단위중량과의 관계를 도시하여 보면 다소 분산성은 있으나 고강도 및 초고강도 콘크리트의 단위중량은 대체로 $2.25\text{t/m}^3 \sim 2.55\text{t/m}^3$ 의 범위내에 분포하고 있는 것으로 나타났다.

그림 1로부터 콘크리트의 건조단위중량과 콘크리트의 압축강도와의 관계를 회귀분석(상관계수 0.6)하여 식(1)를 도출하였으며, 압축강도가 증가함에 따라 단위중량도 완만히 증가하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 압축강도 $400 \sim 1,400\text{kg/cm}^2$ 범위의 콘크리트 구조물 설계시 적용될 단위중량은 $2.37 \sim 2.47\text{t/m}^3$ 정도로 분석될 수 있다. 실제로 기존의 실험들^(1,19)에 의하면, 고강도 콘크리트의 단위중량은 일반적으로 물-시멘트 비와 고성능 감수제 첨가량에 관계없이 표준 수중양생의 경

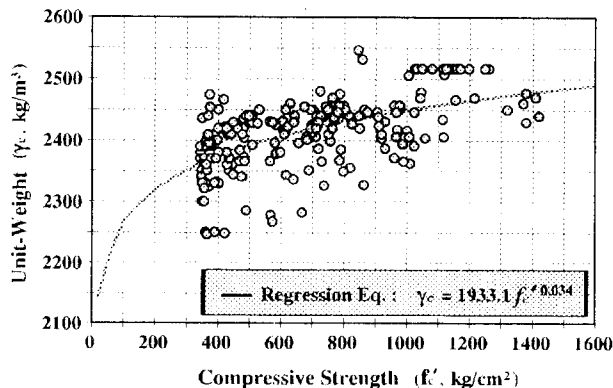


그림 1 콘크리트 단위중량과 압축강도와의 관계

우 2.40~2.45t/m³, 대기양생의 경우 2.39~2.41t/m³의 값을 나타내고 있는 것으로 보고되고 있다.

또한 콘크리트 배합시의 단위용적중량으로부터 경화된 콘크리트의 단위중량을 평가하기 위하여, 수집된 재령 28일 수중양생의 보통중량 콘크리트에 대한 데이터로부터 배합 단위용적중량과 경화후 건조 단위중량의 관계에 대해 다음의 그림 2 및 식(2)와 같은 선형관계(상관계수 0.78)를 도출하였다.

$$\gamma_c = 1933.1 f_c^{0.034} \dots\dots\dots (1)$$

γ_c : 콘크리트의 건조단위중량 (kg/m³)

f_c : 콘크리트의 압축강도 (kg/cm²)

$$\gamma_h = 600 + (0.76 \times \gamma_f) \dots\dots\dots (2)$$

γ_h : 경화후(압축강도 측정시) 콘크리트의 단위중량 (kg/m³)

γ_f : 콘크리트 배합 단위용적중량 (kg/m³)

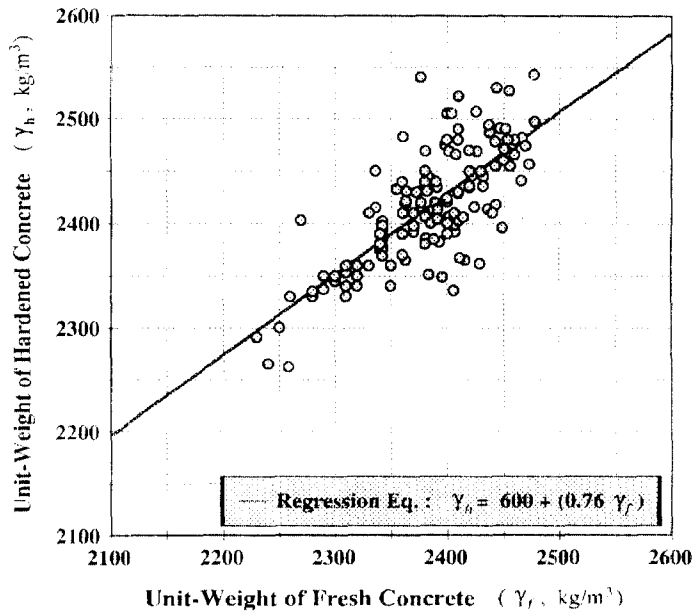


그림 2 콘크리트의 배합시 단위중량과 경화후 단위중량과의 관계

3.2 국내실정에 적합한 탄성계수식의 제안

콘크리트의 탄성계수는 각 구성재료의 탄성특성과 체적비, 굵은골재와 시멘트 페이스트 사이의 부착강도, 혼화재료의 사용량, 양생방법 및 습윤상태, 재하속도 등의 많은 변수들에 의해 영향을 받으므로 콘크리트의 탄성적 특성을 명확하게 규명하여 하나의 식으로 수식화하는 것은 매우 어렵다^(7,8). 그러나 일반적으로 실용적 측면에서 측정이 용이한 단위중량과 압축강도만의 함수로써 다음과 같이 간략하게 정의되어지고 있다^(3,4).

$$E_c = a((f_c' + b)^c + d) \cdot \gamma_c^n \dots\dots\dots (3)$$

E_c : 탄성계수 추정치

f_c', γ_c : 콘크리트 압축강도 및 단위중량 측정값

a, b, c, d, e 회귀상수

따라서 본 연구에서도 수집한 고강도 및 초고강도 콘크리트의 압축강도, 탄성계수 및 콘크리트 단위 중량에 대한 데이터를 식(3)의 형태로써 다중 회귀분석을 수행하였다.

여기서, 콘크리트의 단위중량은 수집한 데이터의 평균치인 2.4t/m³에 대한 비로써 무차원화 하였다.

그림 3은 콘크리트의 단위중량에 따른 탄성계수와 압축강도와의 관계를 도시한 것으로서 회귀분석 결과로 식(4)의 탄성계수 추정식을 도출하였다(상관계수=0.806).

또한 단위중량 2.3t/m³, 2.4t/m³, 2.5t/m³에 대한 회귀분석 곡선을 그림중에 나타냈으며, 이것은 단위중량의 증가에 따라서 탄성계수도 증가하는 경향을 보여주고 있다.

$$E_c = (10,000 \cdot \sqrt{f'_c} + 73,000 \cdot \left(\frac{\gamma_c}{2.40}\right)^{1.5}) \dots \dots \dots (4)$$

여기서, E_c : 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄성계수 (kg/cm²)

f'_c : 재령 28일의 콘크리트 압축강도 (300~1,400kg/cm², ϕ 10×20cm)

γ_c : 콘크리트의 단위중량 (2.25~2.55t/m³)

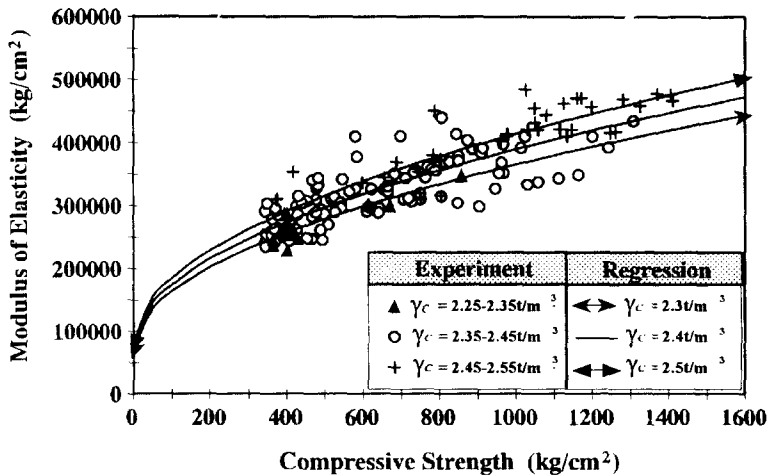


그림 3 콘크리트 단위중량에 따른 압축강도와 탄성계수의 관계

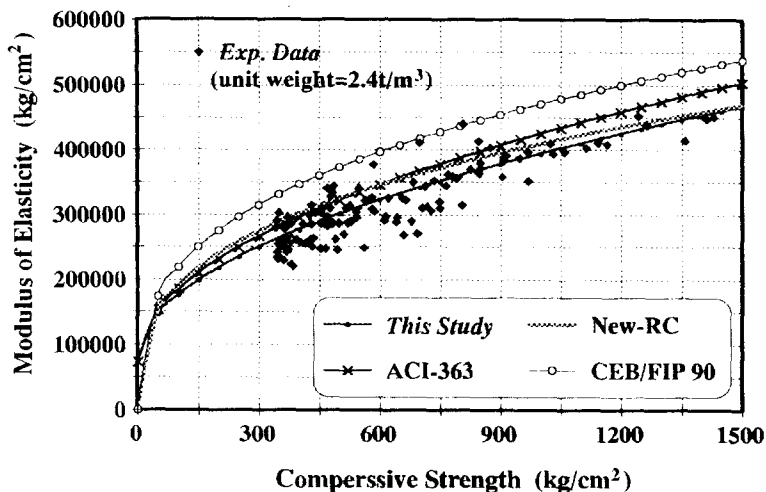


그림 4 탄성계수 추정에 관한 기존의 규정식과 제안식의 비교 ($\gamma_c = 2.40\text{t/m}^3$)

그림 4에서는 본 연구의 제안식(식(4))과 ACI 363식⁽⁴⁾, New-RC식⁽²⁸⁾ 및 CEB-FIP식⁽²⁹⁾의 비교를 나타낸 것으로써, 기존의 탄성계수 표준식들에 비해 국내의 실험값을 근거로한 본 제안식의 값이 다소 작게 나타나는 경향을 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고강도 및 초고강도 콘크리트에 대해 수행된 국내의 탄성계수 실측치를 근거로 하여 고강도 및 초고강도 콘크리트 설계기준 정립에 있어서 기초적 자료가 될 수 있는 국내 실정에 적합한 탄성계수 추정식 제안을 목적으로 활선탄성계수(Secant Modulus of Elasticity) 및 단위중량에 관한 실험 데이터 440개를 수집하였으며, 통계적 수법을 이용하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 건조단위중량과 압축강도와의 관계식(식(1))과 배합시 단위중량과 경화후 건조단위중량과의 관계식(식(2))을 제안하였다. 그 결과, 압축강도가 증가함에 따라 단위중량도 완만히 증가하는 경향이 있으며, 압축강도 400~1,400kg/cm² 범위의 콘크리트 구조물 설계시 적용될 단위중량은 2.37~2.47t/m³ 정도로 분석되어졌다.
- (2) 단위중량과 압축강도를 변수로하는 탄성계수식(식(4))을 새로이 제안하였다. 이식은 기존식들에 비해 작은 탄성계수값을 나타내며, 다수의 국내 실측치에 근거한 것이므로 국내실정에 적합할 것으로 사료된다.

● 참고문헌 ●

1. 이장화, 유영찬, 민병렬, 김광환, "고강도 콘크리트의 실용화를 위한 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제3권2호, 1991. 11., pp. 140-145.
2. 대우엔지니어링 기술연구소, 고강도 콘크리트의 경제적 배합비 결정 및 실용화에 관한 연구, DWERI-CE-10, 1988. 4.
3. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89)", ACI, Detroit, 1989.
4. ACI Committee 363, "State-of-Art Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-84)", ACI, Detroit, 1984.
5. 日本建築學會, 鐵筋 構造計算規準・同解説, 丸善, 1991.
6. Martinez, S., Nilson, A. H., and Slate, F. O., "Spirally-Reinforced High-Strength Concrete Columns", Department Report No.82-10, Structural Engineering Department, Cornell Univ. Ithaca, New York, 1982., pp. 255.
7. 野口貴文, 高強度コンクリートの基礎的力學特性に関する研究, 1995. 3.
8. 김무환 외 3인, "고강도 콘크리트의 개발과 공학적 특성에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 논문집, 제5권2호 통권22호, 1989. 4., pp. 153-163.
9. 권영호, 안재현, 박칠립, "高強度 콘크리트의 配合方法과 運搬特性에 關한 實驗的 研究", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제4권1호, 1992. 5., pp. 7-12.

10. 남상일, 김무한, “高強度 콘크리트의 工學的 特性에 미치는 單位시멘트量的 影響에 關한 實驗的 研究”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제4권1호, 1992. 5., pp. 41-46.
11. 김진근, 박찬규, “주철근비에 따른 고강도 콘크리트 보의 휨거동”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제6권1호, 1994. 5., pp. 71-76.
12. 오병환 외 3인, “고강도 콘크리트의 역학적 특성 및 현장타설 실험 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제6권2호, 1994. 11., pp. 83-86.
13. 윤영수 외 6인, “고강도 콘크리트의 내부온도이력과 경화콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제6권2호, 1994. 11., pp. 127-132.
14. 소현창 외 3인, “1,200kg/cm² 초고강도 콘크리트에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제6권2호, 1994. 11., pp. 133-136.
15. 김무한 외 5인, “골재의 종류에 따른 고강도 콘크리트의 시공 특성에 관한 기초적 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제8권1호, 1996. 5., pp. 12-23.
16. 문한영, 김진철, “실리카흙 혼입 고강도 콘크리트의 기초물성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제3권2호, 1991. 11., pp. 21-25.
17. 김진근, 박찬규, 박연동, “고강도 콘크리트의 재료역학적 특성 연구 -변형도율과 인장강도를 중심으로-”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제4권2호, 1992. 11., pp. 111-118.
18. 배수호 외 3인, “고성능 감수제를 사용한 콘크리트의 품질 특성에 관한 연구”, 콘크리트학회지, 제6권6호, 1994. 12., pp. 135-142.
19. 장일영, 이호범, 변근주, “초고강도 콘크리트의 재료특성 및 휨 거동에 관한 실험적 연구”, 콘크리트학회지, 제4권2호, 1992. 6., pp. 111-118.
20. 오병환, 이성로, “고강도 콘크리트의 통계적 특성을 이용한 품질관리”, 콘크리트학지, 제3권1호, 1991. 3., pp. 33-41.
21. 오병환, “고강도 콘크리트의 효율적인 품질관리 기법”, 대한토목학회지, 제42권4호, 1994. 8., pp. 17-27.
22. 이성준, 정현수, 김덕재, “고강도 콘크리트의 특성이 극한강도설계시 부재단면에 미치는 효과에 관한 연구”, 대한건축학회 학술발표논문집, 제6권2호, 1986. 10., pp. 403-406.
23. 김무한, 윤석천, “고성능 감수제를 사용한 콘크리트의 시공성향상에 및 강도특성에 관한 기초적 연구”, 대한건축학회 논문집, 제4권5호, 통권19호, 1988. 10., pp. 323-333.
24. 安泰松, 高強度 콘크리트의 基礎的 性質에 關한 研究, 漢陽大學校 土木工學科 碩士論文, 1979. 7.
25. 宋基賢, 플라이애쉬를 混入한 高強度 콘크리트의 施工性 및 工學的 特性에 關한 實驗的 研究, 忠南大學校 建築工學科 碩士論文, 1992. 10.
26. 엄주환, 고유동성 콘크리트를 이용한 보부재의 충전 상황별 휨거동 연구, 금오공과대학교 토목공학과 석사논문, 1995. 11.
27. ASTM Designation C 469 : Method of Test for Static Young's Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio in Compression of Cylindrical Concrete Specimens.
28. (財)國土開發技術センター : New RC研究開發概要報告集, 1988.
29. CEB-FIP, Bulletin D'Information No.197, High-Strength Concrete State of Art Report, Aug. 1990.