

고강도 콘크리트의 재료역학적 특성 연구

—변형도율과 인장강도를 중심으로—

The Mechanical Properties of High-Strength Concrete

—The Effect of Strain Rate and the Tensile Strength—

김진근*, 박찬규**, 박연동***
Kim, Jin-Keun, Park, Chan-Kyu, Park, Yon-Dong

ABSTRACT

The mechanical behaviors related to the strain rate effect and the tensile strength of high-strength concrete were investigated in this study. For this purpose, concrete cylinder specimens with 4 different compressive strengths from 232kgf/cm² to 1113kgf/cm² were tested and analysed on the mechanical properties(stress-strain relationship, compressive strength, modulus of elasticity, strain at peak compressive stress). From this experimental and analytical study, it seems that the current prediction model(ACI) for modulus of rupture need to be refined. Therefore, more refined equations for evaluating tensile strength of concrete are proposed.

1. 서론

철근콘크리트 구조물에 사용되는 모든 재료는 가해지는 재하율(loading rate) 또는 변형도율(strain rate)에 영향을 받는다.(1) 특히 콘크리트는 변형도율에 따라 강도, 강성 및 연성이 크게 달라지므로 이에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 1917년에서 1989년 사이에 콘크리트의 하중에 대한 거동을 연구하기 위하여 사용된 변형도율의 범위는 10⁻⁸/sec~10²/sec로 매우 폭넓게 분포되어 있다. 그러나 대부분의 실험이 약 600 kgf/cm² 이하의 압축강도에 대하여 수행되었으며, 이 이상의 강도수준에 대한 실험의 실적은 미미한 형편이다. 외국의 경우 압축강도 700kgf/cm² 정도의 고강도 콘크리트 사용이 실용화되어 있고, 부분적으로 1400kgf/cm²의 초고강도 콘크리트가 사용되고 있는 것으로 보아(2) 고강도 및 초고강도 콘크리트에 대한 정적 거동 및 동적거동에 대한 보다 많은 실험과 연구가 이

루어 져야 할 것이다. 인장강도를 예측하는 모델 식도 일정한 압축강도의 범위(840kgf/cm²이하)에서 유도된 것으로 전 압축강도수준에 대한 재료역학적 모델식이 제시되어야 할 것이다.

본 연구의 목적은 콘크리트의 역학적 특성 중에서 가장 기본적이면서도 중요한 요소인 변형도율에 따른 응력-변형도 관계 및 기타 역학적 특성과 인장강도에 대하여 가능한 높은 압축강도 범위까지 실험을 수행하고 각각에 대한 성질을 추정하는 데에 있다.

2. 실험

2.1 실험계획

각 강도수준에 대한 역학적 특성의 경향을 알아보기 위하여 콘크리트의 압축강도를 저강도, 중간강도, 고강도, 초고강도로 4등분한 232, 465, 904, 1113 kgf/cm²에 대하여 주어진 변형도율에 따라 실험을 수행하였다. 변형도율은 2×10⁻³/sec, 2×10⁻⁴/sec, 2×10⁻⁵/sec(정하중 변형도율), 5×10⁻⁶/sec와 같다. 그리고 각 압축강도수준에 대하여 콘크리트의 활렬인장강도와 휨인장강도를 측정하였다.

* 한국과학기술원 토목공학과 부교수
** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
*** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

2.2 실험재료 및 배합설계

본 연구에 사용된 시멘트는 S사 제품의 제 1종 포틀랜드 시멘트이다. 잔골재는 금강에서 구입한 강모래이며 비중은 2.54, 흡수율은 1.87, 조립율은 6.08이다. 굵은 골재는 전라남도 곡성에서 구입한 최대크기 13mm 쇄석이며, 비중은 2.65, 흡수율은 1.97, 조립율은 2.89이다. 고강도 및 초고강도 콘크리트 배합에서는 작업성을 확보하기 위해서 naphthalene계 고성능 감수제인 Super-20을 사용하였다. 실리카흙은 (주)S산업에서 구입한 Elkem Microsilica(분말 제품)를 사용하였다.

콘크리트의 배합표는 표 1과 같다. 콘크리트의 응력-변형도 실험은 저강도에서 공시체 기호 LS, 인장강도 실험은 LS-1에 따라 배합설계를 하였다. 나머지 강도수준에서는 두 경우 모두 같은 배합설계에 따랐다.

표 1. 콘크리트 배합표

공시체 기 호	단 위 중 량 (kg/m ³)					고성능 감수제 (%)	슬럼프 (cm)
	시멘트	실리카흙	물	잔골재	굵은골재		
LS	320.0	-	240.0	735.5	1198.3	-	21.8
LS-1	320.0	-	217.6	761.7	930.7	-	6.1
MS	480.0	-	168.0	677.3	1015.7	3.0	17.2
HS	442.0	78.0	156.0	632.7	1032.3	2.0	8.1
UHS	487.5	162.5	123.5	533.0	1082.0	5.0	8.4

(저강도:LS 중간강도:MS 고강도:HS 초고강도:UHS)

2.3 비빔방법

믹서는 공칭용량 80 리터(liter)의 강제식 믹서를 사용하였으며, 비빔은 다음과 같은 순서와 방법에 따라 행하였다. 먼저 재료를 굵은 골재, 잔골재, (시멘트+실리카흙)의 순서로 투입하여 1분간 건비빔하여 시멘트와 골재를 잘 섞이게 한 다음 물과 고성능 감수제를 동시에 투입한 후 3분간 비벼 콘크리트 공시체를 제작하였다. 골재는 표면건조포화상태(SSD)의 골재를 사용하였으며, 굵은 골재는 실험 전에 물로 씻어 불순물을 제거하였다.

2.4 공시체 제작 및 실험방법

콘크리트의 할렬인장강도 및 응력-변형도 관계의 실험에 사용된 모든 공시체는 $\phi 10 \times 20$ cm 물드를 사용하여 붓다짐 방법으로 제작하였다. 휨강도 실험용 공시체는 $15 \times 15 \times 53$ cm의 물드를 사용하여 제작하였다. 슬럼프 실험은 타설과 동시에 KS F 2402에 따라 수행하였다. 공시체는 제작 후 즉시 비닐로 덮어 수분의 증발을 방지하였으며, 24시간만에 탈형하여 시험시까지 23 ± 1 °C에서 습윤양생을 실시하였다.

모든 실험은 재령 28일을 전후하여 수행하였으며, 이때 실험에 사용된 기기는 250톤 용량의 Instron사의 Closed-loop Servo-Hydraulic Dynamic Materials Testing System이다. 공시체면의 이물질(시멘트풀, 유황 혼합물)에 의한 실험시의 오차를 방지하기 위하여 클램핑 시스템을 사용하지 않고, 공시체 절삭기를 사용하여 공시체면을 명확하게 연마한 후 실험을 수행하였다.

콘크리트의 응력-변형도 실험에서 주어진 변형도율을 얻기 위하여 COD(crack opening displacement) gage를 사용하였다. COD gage를 사용하기 위하여 공시체 주변에 콤프레소미터를 부착하여 실험을 수행하였다. 콘크리트의 초기탄성계수(E_i)는 응력-변형도 곡선에서 최대응력의 40% 위치에서 선정하였다.

할렬인장강도 실험은 KS F 2423, 휨인장강도 실험은 KS F 2408에 따라 각각 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험결과

각 강도수준에서 변형도율에 따른 최대응력, 최대응력에서의 변형도(ϵ_p) 및 초기탄성계수(E_i)는 표 2에 수록되어 있다. 각 강도 수준에 대해서 변형도율에 대한 응력-변형도 곡선과 정하중 변형도율에서 제안식과 실험결과가 그림 1에서 그림 4에 나타나 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 저강도와 중간강도에서는 응력-변형도 곡선에서 하강곡선을 안정적으로 얻은 반면, 고강도와 초고강도에서는 콘크리트의 폭발적인 파괴에 의해 하강부분의 곡선을 얻을 수가 없었다. 실제적으로 고강도의 응력-변형도 곡선에서 하강부분

표 2. 변형도율에 대한 실험 요약

강도수준	변형도율 (λ sec) (공시체수)	최대응력 (kgf/cm ²) 평균	$\epsilon_p \times 10^{-6}$ 평균	E_i (kgf/cm ²) 평균	단위중량 (ton/m ³)
저강도	2×10^{-3} (2)	272 [1.17]	1827 [0.87]	292864 [1.32]	2.240
	2×10^{-4} (3)	272 [1.17]	2009 [0.95]	238575 [1.07]	2.293
	2×10^{-5} (3)	232 [1.00]	2111 [1.00]	222661 [1.00]	2.297
	5×10^{-6} (2)	233 [1.00]	2002 [0.95]	221350 [0.99]	2.293
중간강도	2×10^{-3} (2)	547 [1.18]	2714 [0.89]	341386 [1.38]	2.378
	2×10^{-4} (2)	527 [1.13]	2776 [0.91]	289757 [1.17]	2.375
	2×10^{-5} (4)	465 [1.00]	3045 [1.00]	247375 [1.00]	2.369
	5×10^{-6} (2)	453 [0.97]	2914 [0.96]	247844 [1.00]	2.385
고강도	2×10^{-3} (3)	1030 [1.14]	3734 [1.05]	333876 [1.12]	2.389
	2×10^{-4} (3)	947 [1.05]	3278 [0.92]	327463 [1.10]	2.394
	2×10^{-5} (4)	904 [1.00]	3569 [1.00]	298644 [1.00]	2.402
	5×10^{-6} (2)	847 [0.94]	3400 [0.95]	304459 [1.02]	2.398
초고강도	2×10^{-3} (4)	1242 [1.12]	3418 [0.94]	392268 [1.14]	2.435
	2×10^{-4} (4)	1164 [1.05]	3620 [0.99]	349166 [1.02]	2.414
	2×10^{-5} (5)	1113 [1.00]	3622 [1.00]	343007 [1.00]	2.413
	5×10^{-6} (2)	1058 [0.95]	3541 [0.98]	337552 [0.98]	2.404

을 얻기란 상당히 어렵다. 이유로 콘크리트는 고강도화가 될수록 취성적인 성질을 가지기 때문이며, 콘크리트 공시체와 기계사이의 상호작용도 중요한 원인이 된다.

콘크리트의 인장강도에 대한 실험 결과가 표 3에 나타나 있다. 각각의 인장강도에 대한 모델식과의 관계 곡선이 그림 5와 그림 6에 나타나 있다.

3.2 제안식

각 강도수준에서 정하중 변형도율에 대한 응력-변형도 관계식은 기존의 식중 전 압축강도 범위에서 콘크리트의 성질을 잘 반영하는 것으로 판단되는 다음 식⁽³⁾을 사용하여 실험 결과와 비교하였다.

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

$$\text{하강부분; } \sigma_c = f_o \cdot \exp \left[-B(\epsilon_c - \epsilon_o)^C \right] \quad (2)$$

여기서,

$$f_o = f'_c + 4.2 f_{cl}$$

$$\epsilon_o = 1.33 \times 10^{-4} \cdot \sqrt[3]{f'_c}$$

$$A = \frac{E_c \epsilon_o}{f_o}$$

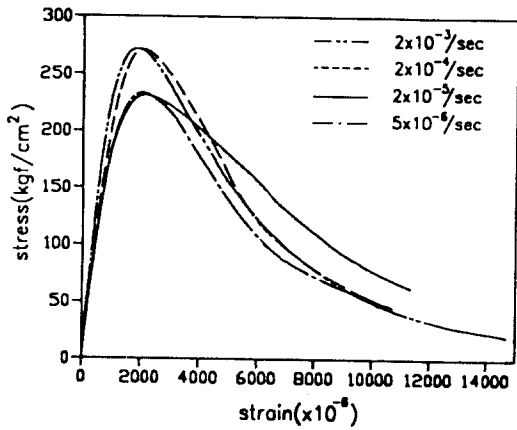
$$E_c = 40000 \sqrt{f'_c} + 1 \times 10^6$$

$$B = \left(260 + \frac{14400}{f'_c} \right) \exp \left(-30 \frac{f_{cl}}{f'_c} \right)$$

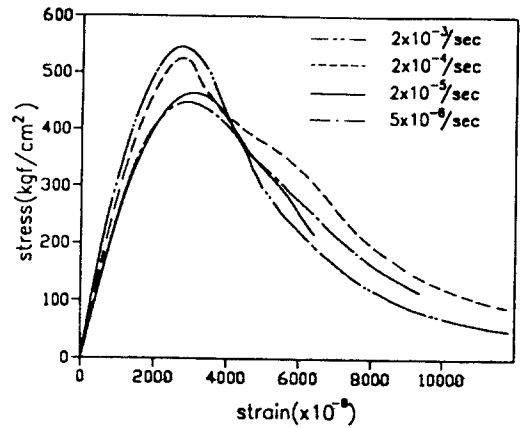
$$C = 1.2 - 0.00004 f'_c$$

unit : psi

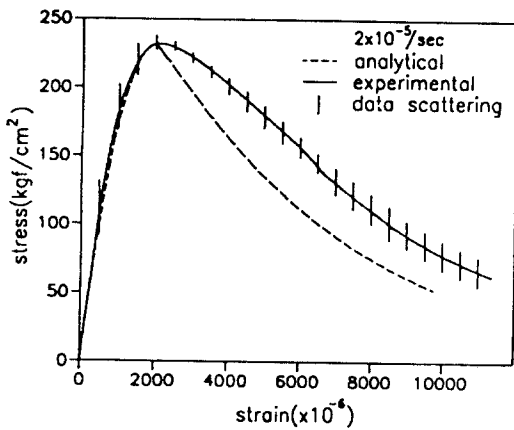
위의 식에서 횡보강효과가 없다면 f_{cl} 의 값은 0이다.



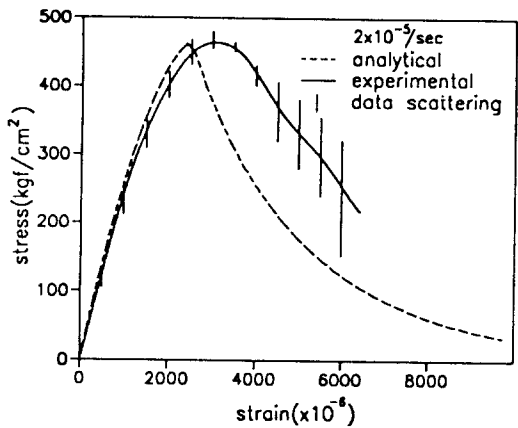
(a) 변형도율에 따른 곡선



(a) 변형도율에 따른 곡선



(b) 정하중변형도율에 대한 곡선



(b) 정하중변형도율에 대한 곡선

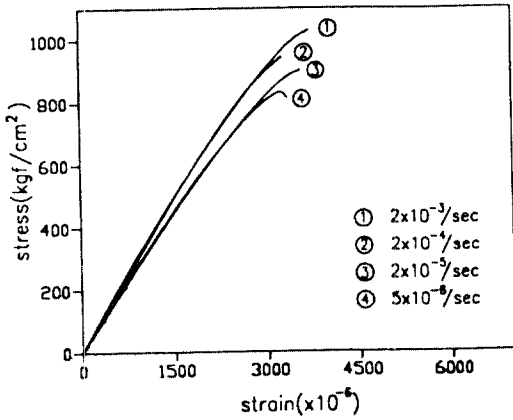
그림 1. 저강도 콘크리트의 응력-변형도 곡선

그림 2. 중간강도 콘크리트의 응력-변형도 곡선

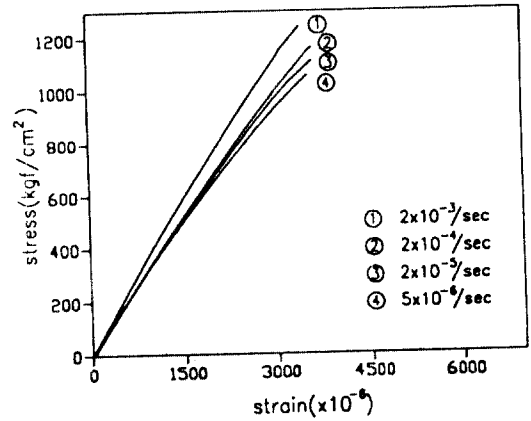
표 3. 콘크리트의 인장강도 시험 결과

압축강도(f_c') kgf/cm ²	합렬인장강도(f_t) kgf/cm ² (평균)	휨인장강도(f_r) kgf/cm ² (평균)	f_t/f_r	f_t/f_c'	f_r/f_c'
268	34.3	40.4	0.85	0.13	0.15
465	46.1	60.4	0.76	0.10	0.13
904	65.2	91.0	0.72	0.07	0.10
1113	72.1	105.0	0.69	0.06	0.09

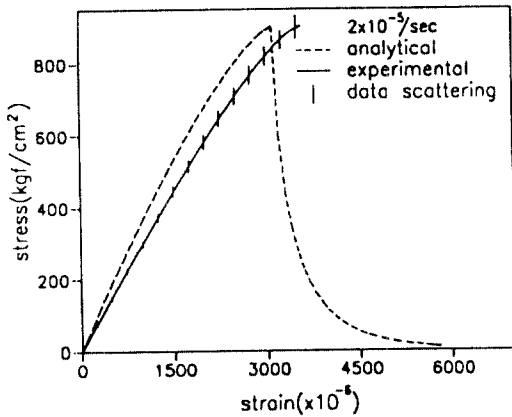
(각 평균값은 공시체 3개에 대한 것임)



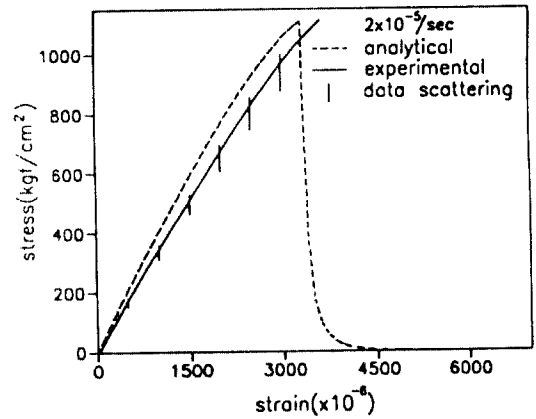
(a) 변형도율에 따른 곡선



(a) 변형도율에 따른 곡선



(b) 정하중변형도율에 대한 곡선



(b) 정하중변형도율에 대한 곡선

그림 3. 고강도 콘크리트의 응력-변형도 곡선

그림 4. 초고강도 콘크리트의 응력-변형도 곡선

콘크리트의 인장강도를 결정하는 대부분의 모델식들이 압축강도의 함수로 되어 있으며 기본적인 형태는 다음과 같다.

$$f_t = K [f'_c]^R \quad (3)$$

지금까지 제안되었던 모델식에 있어서 R의 범위는 0.5~0.735의 범위를 가진다. (4)

본 연구에서 콘크리트의 인장강도를 예측하는 모델식은 실험결과와 국내(5)-(10) 및 국외(11)-(17)의 데이터를 사용하여 결정하였다. 골재의 크기 및 종류, 양생조건, 혼화재의 첨가유무에 관계없이 재령 28일의 실험데이터를 사용하였으며, 그림 5와 그림 6에서 알 수 있듯이 초

고강도 영역(1000kgf/cm² 이상)에 해당하는 실험데이터 갯수는 매우 적다.

표 4. 인장강도 모델식의 요약

인장강도	계수	ACI(18)	Oluokun(4)	제안식
할렬 인장강도	R	0.5	0.69	0.5
	K	1.962	0.61	1.91
휨 인장강도	R	0.5	—	3/4
	K	3.103	—	0.6

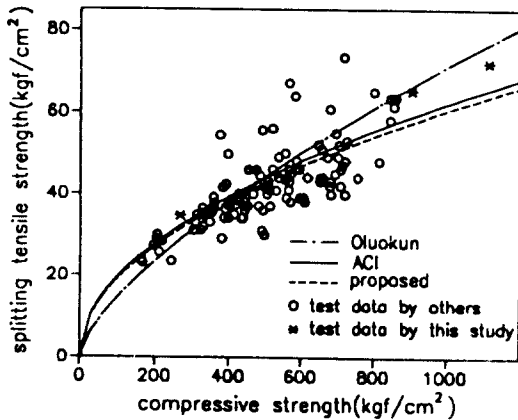


그림 5. 압축강도와 활렬인장강도의 관계

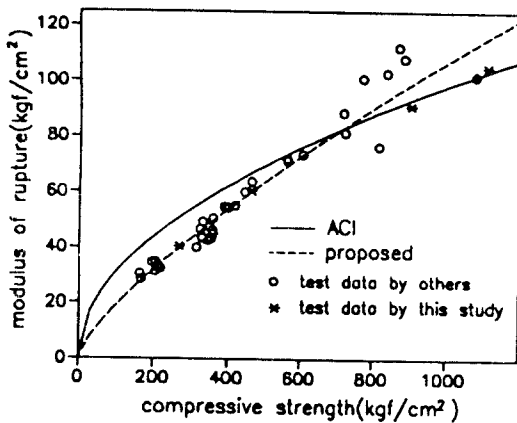


그림 6. 압축강도와 휨인장강도의 관계

3.3 고찰

서로 다른 변형도율을 받는 콘크리트의 거동에서 주요 관심사는 (1) 최대압축응력, 초기탄성계수 및 응력-변형도 곡선에서 하강부분의 기울기, (2) 변형도율에 따른 최대응력에서 변형도의 변화 등이다. (19)

3.3.1 변형도율에 따른 재료 상수의 변화

정하중변형도율(2×10^{-5} /sec)의 재료상수를 1.0으로 했을 때 각 변형도율에 따른 재료상수의 상대적인 변화량이 표 2에 나타나 있다. 여기에서 변형도율이 증가함에 따라 최대응력과 초기탄성계수의 상대적 증가율은 강도가 증가하면서 작아짐을 알 수 있다. 이것은 강도가 높아질수록 변형도율에 대한 민감도가 떨어지는 것을 의미한

다.

각 강도수준에서 변형도율이 증가함에 따라 최대응력과 초기탄성계수는 증가하는 반면, 최대응력에서의 변형도는 대체적으로 감소하는 경향이 있다. 예외적으로 정하중변형도율과 이보다 낮은 저변형도율(5×10^{-6} /sec)에 대한 관계에서는 일반적인 경향과 다르게 나타났다. 이유로는 두 변형도율 사이의 차이가 다른 두 변형도율(2×10^{-3} /sec, 2×10^{-4} /sec)과 비교할 때 작기 때문인 것으로 판단되며, 5×10^{-6} /sec의 변형도율을 정적하중변형도율로 분류하는 경우도 있다. (1)

3.3.2 강도수준에 따른 재료상수의 변화

압축강도가 증가함에 따라 초기탄성계수와 최대응력에서의 변형도는 증가하는 것으로 나타났다. 최대응력에서의 변형도는 압축강도가 증가할수록 그 증가폭이 줄어드는 것으로 나타났고, 실제적으로 사용되는 응력-변형도 관계에서도 이와 같은 관계를 모델링한 것이 있다. 제안식에서 최대응력에서의 변형도는 최대응력의 1/3승에 비례하는 것으로 식을 유도하였으며(제안식 참조), 이것은 압축강도가 증가함에 따라 최대응력에서의 변형도의 증가량은 감소하도록 되어 있다.

3.3.3 응력-변형도 곡선에서의 하강부분 기울기

각 강도 수준에 있어서 변형도율에 따른 응력-변형도 곡선에서 하강부분에 대한 기울기는 변형도율에 따라서 유의할 만한 차이를 보이지 않았다. 다만 상승 부분은 변형도율이 증가함에 따라 기울기가 커지는 경향을 나타내었다.

응력-변형도 곡선의 하강부분에서 실험곡선은 제안식의 곡선보다 높게 나타났다. 최대응력에서의 변형도율은 저강도 콘크리트에서는 잘 맞으나 나머지 강도수준에서는 실험결과가 제안값보다 크게 나타났다.

3.3.4 압축강도와 인장강도의 관계

본 실험에서 활렬인장강도 값은 다른 실험결과에 비하여 약간 크게, 휨인장강도는 거의 비슷하게 나타났다. 콘크리트의 인장강도실험 결과에서 휨인장강도는 활렬인장강도보다 큰 값을 가지

는 것으로 나타났다. 또한 압축강도가 증가함에 따라 압축 강도와 할렬인장강도와의 비 및 휨인장강도와 할렬인장강도와의 비가 감소하는 것으로 나타났다. 실험결과와 비교해 볼 때 ACI 식은 재령 28일에서 할렬인장강도를 잘 예측하는 것으로 나타났다. 압축강도의 지수는 할렬인장강도에서 0.5가 타당하며 휨인장강도에서는 0.75가 잘 맞는 것으로 나타났다. Oluokun이 제안한 식은 압축강도 800kgf/cm^2 이상에서 본 연구의 실험결과와 어느 정도 일치하는 경향을 나타냈다.

4. 결론

본 연구에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 변형도율이 증가함에 따라 고강도 콘크리트는 저강도 콘크리트에 비하여 초기탄성계수와 최대응력의 증가율이 작은 것으로 나타났다. 이것은 고강도 콘크리트가 저강도 콘크리트에 비하여 변형도율에 대한 민감도가 떨어지는 것으로 해석할 수 있다.
- 2) 각 강도 수준에서 변형도율이 증가함에 따라 초기탄성계수와 최대응력은 증가하지만 최대응력에서의 변형도는 감소하는 것으로 나타났다.
- 3) 강도가 증가함에 따라 초기탄성계수와 최대응력에서의 변형도는 증가함을 보이며, 압축강도가 증가함에 따라 증가율은 감소하는 것으로 나타났다.
- 4) 28일 재령 콘크리트의 인장강도 계산식에 있어서 할렬인장강도는 압축강도의 0.5승에 비례하는 것으로 나타났다. 그러나 휨인장강도는 압축강도의 0.75승에 비례하는 것으로 나타나 ACI식에 대한 재검토가 필요한 것으로 사료된다.
- 5) 콘크리트의 인장강도를 예측하는 대부분의 식이 압축강도 840kgf/cm^2 이하의 실험결과에서 유도된 것으로 초고강도에 대한 많은 실험이 수행되어 이를 식에 반영해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 1991년도 과학재단 목적기초 연구의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Bischoff, P.H., Perry, S.H., "Compressive Behavior of Concrete at High Strain Rates," *Materials and Structures*, Vol. 24, No. 144, 1991, pp. 425-450.
2. "고강도 콘크리트 재료 및 활용기술의 개발," 한국과학기술원 토목공학과, 과학기술처 첨단과제 제 1차년도 보고서, 1991.
3. 김진근, 이태규, 서용표, "형보강 효과를 고려한 콘크리트의 응력-변형도 관계," 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, Vol. 2, No. 1, 1990, pp. 116-121.
4. Oluokun, F.A., "Prediction of Concrete Tensile Strength from Its Compressive Strength: Evaluation of Existing Relations of Normal Weight Concrete," *ACI Materials J.*, Vol. 88, No. 3, 1991, pp. 302-307.
5. 남상일, 김무한, "고강도 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 단위시멘트량의 영향에 관한 실험적 연구," 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제 4권, 1호, 1992, pp. 41-46.
6. 문한영, 김진철, "실리카흙 혼합 고강도 콘크리트의 기초 물성에 관한 연구," 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제 3권, 2호, 1991, pp. 21-25.
7. 권영진, 김무한, "실리카흙을 혼입한 고강도 콘크리트의 시공성 및 공학적 특성에 관한 연구," 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, Vol. 2, No. 1, 1990, pp. 29-34.
8. 김무한, 남재현, "콘크리트 강도에 미치는 조골재의 종류 및 크기의 영향에 관한 실험적 연구," *ACI 한국분회 학술발표회 논문개요집*, 1987, pp. 171-192.
9. 오병환, 엄주용, "실리카흙을 사용한 고강도

- 콘크리트의 역학적 특성과 최적배합연구," 콘크리트학회지, 제 1권, 1호, 1989, pp. 75-86.
10. 이광수, 오정근, 신성우, 최문식, "고강도 콘크리트 보-기둥 접합부의 역학적 거동에 관한 연구-구부림 철근을 중심으로," 콘크리트학회지, Vol. 3, No. 2, 1991, pp. 123-132.
 11. Walker, S., Bloem, D.L., "Effects of Aggregate Size on Properties of Concrete," ACI J., Vol. 57, No. 3, 1960, pp. 283-298.
 12. Aitcin, P. C., Laplante, P. and Bedard, C., "Development and Experimental Use of a 90 MPa(13000psi) Field Concrete," ACI SP-87, 1985, pp. 51-70.
 13. Swamy, R. N., "High-Strength Concrete - Material Properties and Structural Behavior," ACI SP-87, 1985, pp. 119-146.
 14. Johnston, C. D., "Durability of High Early Strength Silica Fume Concrete Subjected to Accelerated and Normal Curing," ACI SP-132, Vol. 2, 1992, pp. 1167-1187.
 15. Kashima, S., Furuya, N. and Yamaoka, R., "High-Strength Concrete for Wall Foundation Using Ternary Blended Cement with Intermixture of Blast-Furnace Slag and Fly Ash," ACI SP-132, Vol. 2, 1992, pp. 1451-1469.
 16. Carette, G. G., Malhotra, V. M., "Long-Term Strength Development of Silica Fume Concrete," ACI SP-132, Vol. 2, 1992, pp. 1017-1044.
 17. Berke, N. S., Dallaire, M. P. and Hicks, M. C., "Plastic, Mechanical, Corrosion, and Chemical Resistance Properties of Silica Fume(Microsilica) Concretes," ACI SP-132, Vol. 2, 1992, pp. 1125-1149.
 18. ACI Committee 363, "state-of-the-Art Report on High Strength Concrete," ACI J., Vol. 81, No. 4, 1984, pp.364-411.
 19. Soroushian, P., Choi, K. B. and Alhamad, A., "Dynamic Constitutive Behavior of Concrete," ACI J., Vol. 83, No. 2, 1986, pp. 251-259.