

2축 압축을 받는 고강도 콘크리트 및 강섬유보강 고강도 콘크리트의 역학적 거동 특성

임동환 ^{1)*}

¹⁾ 동서대학교 토목공학과

(2005년 5월 2일 원고접수, 2005년 8월 30일 심사완료)

Mechanical Behavior of Plain and Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete under Biaxial Compression

Dong-Hwan Lim ^{1)*}

¹⁾ Dept of Civil Engineering, Dongseo University, Busan, 617-833, Korea

(Received May 2, 2005, Accepted August 30, 2005)

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the mechanical characteristics of plain and steel fiber high strength concrete under uniaxial and biaxial loading condition. A number of plain and steel fiber high strength concrete cubes having 28 days compressive strength of 82.7 MPa(12,000 psi) were made and tested. Four principal compression stress ratios ($\sigma_2/\sigma_1=0.00, 0.50, 0.75$ and 1.00), and four fiber concentrations ($V_f=0.0, 0.5, 1.0$ and 1.5%) were selected as major test variables. From test results, it is shown that confinement stress in minor stress direction has pronounced effect on the strength and deformational behavior. Both of the stiffness and ultimate strength of the plain and fiber high strength concrete increased. The maximum increase of ultimate strength occurred at biaxial stress ratio of $0.5(\sigma_2/\sigma_1=0.5)$ in the plain high strength concrete and the value were recorded 30% over than the strength under uniaxial condition. The failure modes of plain high strength concrete under uniaxial compression were shown as splitting type of failure but steel fiber concrete specimens under biaxial condition showed shear type failure. The values of elastic modulus were also examined higher than that from ACI and CEB expression under biaxial compression condition.

Keywords : high strength concrete, fiber reinforced high-strength concrete, stress-strain relation, failure modes, elastic modulus

1. 서 론

지난 20년간 국내·외에서는 섬유 콘크리트 및 고강도 콘크리트의 재료 특성 및 역학적 특성 등에 대한 많은 실험 및 이론 연구가 집중적으로 수행되어져 왔다. 최근 들어 고강도 콘크리트는 고층 건물, 장대 교량, 해양 구조물 및 해안 구조물 등의 특수 구조물 등에 널리 활용되고 있으며¹⁻⁶⁾, 고강도 콘크리트의 높은 완성도 및 경제적인 장점 때문에 이의 활용이 증대되고 있다. 또한 섬유 콘크리트는 연성·인성의 증대, 인장 및 휨 거동의 개선, 균열제어효과가 탁월하여 많은 구조물에 적용되고 있다. 따라서, 섬유보강 고강도 콘크리트는 고강도 콘크리트와 섬유 콘크리트의 역학적 특성 및 장점을 가지기 때문에 고품질의 구조물 제작에 활용될 수 있다. 최근 들어 1축 및 다축을

력을 받는 고강도 콘크리트에 대한 재료 특성 및 역학적 특성 등에 대한 많은 실험적 및 이론연구가 수행되고 있으며^{5,6,13,15-18)}, 1축 및 3축 응력을 받는 고강도 콘크리트에 대한 응력-변형률 거동 및 모델 등이 많은 연구자들에 의해 제시되었다^{10-12,14-18)}. 또한 최근 보고에 의하면, 고강도 콘크리트에 적절한 형상의 강섬유를 적정량 투입하였을 때, 고강도 콘크리트의 연성 및 강성 등의 역학적 거동에 현저한 효과가 있음이 밝혀지고 있다⁷⁻⁹⁾. 그러나 2축 응력을 받는 고강도 콘크리트에 대한 연구는 그리 많지 않은 실정이며, 또한 압축강도 69 MPa(10,000 psi) 이상의 고강도 콘크리트 및 섬유보강 고강도 콘크리트의 거동 특성에 대한 연구는 매우 미미한 실정이다. 실제 토목, 건축 구조물의 중요한 구조부재가 되는 슬래브, 장 지간 얇은 쉘 구조(long span thin shell structure), 전단벽 및 격납 구조물 등은 기본적으로 2축 응력 상태가 되지만 현행 설계는 1축 하중 상태의 실험 및 해석으로 도출된 재료 특성에 근거하여 수행되고 있고 있다.

따라서 본 연구에서는 1축 및 2축 압축응력을 받는 고강

* Corresponding author

E-mail : limdh@dongseo.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

도 콘크리트 및 섬유보강 고강도 콘크리트의 역학적 거동 및 재료 특성을 규명하고자 한다. 또한 2축 압축을 받는 고강도 콘크리트의 탄성계수 값을 분석하여, 현행 시방기준에서 제시하고 있는 탄성계수식의 적용여부를 고찰하고자 한다. 이를 위하여, 82.7MPa(12,000psi) 28일 압축강도를 발현하는 고강도 콘크리트 및 섬유보강 고강도 콘크리트 큐브 시편을 제작하여 2축 압축 응력비(σ_2/σ_1) 및 섬유 혼입률(V_f)을 주된 실험 변수로 하는 1축 압축 실험 및 2축 압축 실험을 수행하였다. 위 실험을 통하여, 고강도 콘크리트 및 섬유보강 고강도 콘크리트의 극한강도, 응력-변형을 특성, 파괴형상 및 탄성계수 특성 등이 고찰되었다.

2. 고강도 콘크리트의 실험

2.1 콘크리트의 배합

본 실험에서는 82.7MPa(12,000psi)의 28일 압축강도가 발현될 수 있도록 고강도 콘크리트의 배합을 수행하였다. Table 1은 본 실험에서 도출한 고강도 콘크리트 배합비를 나타낸 것으로서, 본 배합에서는 3종 조강시멘트를 사용하였고, 물-시멘트 비는 0.25로 채택하였다. 콘크리트 타설시 적정 유동성을 확보하기 위하여 고성능 감수제를 사용하였으며, 본 배합에서는 시공성을 고려하여 시멘트 중량 대비 2.5%를 사용하였다. 또한 배합설계 시 산정된 시멘트량의 15%의 실리카폼을 투입하였으며, 잔골재율은 37.3%이다. 굵은골재는 최대 골재 치수 10mm인 쇄석을 사용하였으며, 비중은 2.68이다. 또한 잔골재는 강모래를 사용하였고, 조립률은 2.67이며, Table 2는 본 실험에서 사용된 강섬유의 재료 특성을 나타낸 것이다. 강섬유보강 콘크리트 시편 제작에 쓰인 강섬유는 끝이 휘어진(Hooked) 원형단면의 강섬유를 사용하였으며, 섬유의 길이 35mm, 직경 0.5mm, 형상비(aspect ratio) 70인 섬유를 사용하였다. 본 실험에서는 위 강섬유를 부피비 0.5, 1.0 및 1.5%를 투입하였으며, 볼-베어링 현상이 발생하지 않도록 타설을 수행하였다.

2.2 실험 시편의 제작 및 실험 변수

본 실험에서는 고강도 콘크리트 및 82.7MPa의 강도를 가지는 강섬유보강 고강도 콘크리트 시편의 1축 및 2축 압축 상태에서의 재료 특성 및 역학적 특성을 규명하기 위하여, 100mm×100mm×100mm 큐브 시편을 다량 제작하였고, 콘크리트 실린더를 동시에 제작하였다. 모든 시편은 타설 후 24시간 이후에 양생수조에서 수중양생을 수행하였으며, 압축강도 시험 하루 전에 습윤양생 실에 이 동하여 실험을 실시하였다.

Table 1 Concrete mix proportions (unit: kgf/m³)

Cement	Coarse aggregate	Fine aggregate	Water	Silica fume	Super plasticizer
534	1098	653	133	80	13.4

Table 2 Type and properties of fiber

Fiber type	Equivalent diameter d_f (mm)	Length L_f (mm)	Tensile strength f_t	Elasticity modulus (GPa)
Hooked steel	0.50	35	1115	207

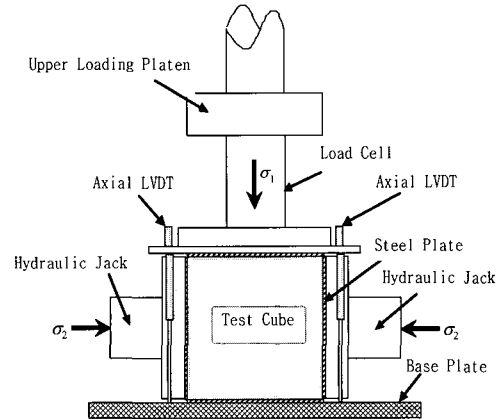


Fig. 1 Test set up

본 실험연구에서는 부응력 방향 및 주응력 방향 압축응력비(σ_2/σ_1) 및 강섬유 혼입률(V_f)을 실험 변수로 채택하였다(Table 3). 본 연구에서는 응력비(σ_2/σ_1)를 0.0, 0.5, 0.75 및 1.0으로 채택하고, 섬유혼입률(V_f)을 부피비(0.0, 0.5, 1.0 and 1.5%)로 채택하여 고강도 콘크리트 및 섬유보강 고강도 콘크리트의 역학적 특성 등을 구명하고자 하였다.

2.3 실험 방법

본 실험에서는 만능압축시험기로 1축 압축실험 및 2축 압축실험을 수행하였다. 실험 방법은 먼저 소정의 1축 압축응력을 큐브 시편에 도입하고, 이것과 동시에 다이얼게이지가 부착된 압축기로 2축 압축응력을 도입하였다. 2축 압축응력 도입은 위에서 설명한 바와 같이 부응력 방향 및 주응력 방향 압축응력비(σ_2/σ_1)를 0.0, 0.5, 0.75 및 1.0으로 채택하여 하중을 도입하였다. Fig. 1은 본 실험 방법을 도시한 것으로서, 각 실험 부재에는 변위계(LVDT), 콘크리트 스트레인게이지 및 다이얼게이지를 부착하여 각 조건의 변형, 변형률 및 변위를 분석하였다. 위의 측정값은 Data Acquisition Software를 통해 처리 분석되었다. Table 3은 본 실험에서 적용된 시편의 종류와 실험 변수 및 실험 방법을 나타낸 것이다. 시편의 기호 표시에서, UPC는 고강도 콘크리트를 나타내고 있으며, UFC는 강섬

Table 3 Test variables and ultimate strength

Test specimen series	Steel fiber contents (V_f)	Compressive strength of cylinders (MPa)	Minor/major stress ratio (σ_2/σ_1)	Ultimate strength of cubes (MPa)	Increase of ultimate strength (%)
UPC-0.0-0.00	0	81.0	0.00	82.3	-
UPC-0.0-0.50	0	80.8	0.50	106.9	29.8
UPC-0.0-0.75	0	80.7	0.75	102.1	24.1
UPC-0.0-1.00	0	81.3	1.00	98.5	19.6
UFC-0.5-0.00	0.5	84.0	0.00	88.1	-
UFC-0.5-0.50	0.5	83.8	0.50	112.8	28.0
UFC-0.5-0.75	0.5	84.2	0.75	109.2	24.0
UFC-0.5-1.00	0.5	82.9	1.00	104.0	18.0
UFC-1.0-0.00	1.0	86.5	0.00	88.5	-
UFC-1.0-0.50	1.0	85.2	0.50	112.4	27.0
UFC-1.0-0.75	1.0	88.0	0.75	109.7	24.0
UFC-1.0-1.00	1.0	87.5	1.00	101.8	15.0
UFC-1.5-0.00	1.5	88.2	0.00	100.8	-
UFC-1.5-0.50	1.5	89.5	0.50	121.0	20.0
UFC-1.5-0.75	1.5	88.7	0.75	118.9	18.5
UFC-1.5-1.00	1.5	88.5	1.00	109.0	9.0

유보강 고강도 콘크리트를 나타내고 있다. 두 번째 표시는 섬유 혼입량이며, 마지막 수치는 부응력 방향 및 주응력 방향 압축응력비(σ_2/σ_1)이다. UPC-0.0-0.00 큐브 시편에 대해서는 주응력 방향으로 1축 압축 하중만을 가했으며, UPC-0.0-0.50 큐브 시편은 소정의 1축 압축 하중(σ_1 방향)을 도입하고, 이와 동시에 1축 압축 하중의 50%에 상응하는 하중을 주응력 방향의 직각방향(부응력 σ_2 방향)으로 하중을 도입하였다. UPC-0.0-0.75, 및 UPC-0.0-1.00 큐브 시편은 위 시편과 동일한 2축 압축 상태의 실험 방법과 동일하며, 다만 주응력 방향의 직각 방향(σ_2 방향)으로 하중을 주응력 방향의 75% 및 100%로 도입하여 2축 상태에서의 역학적 거동 특성을 구명하고자 하였다.

UFC-0.5-* 시리즈 시편은 강섬유를 0.5% 혼입한 섬유보강 고강도 콘크리트를 나타내고 있으며, UFC-1.0-* 및 UFC-1.5-* 시편 시리즈는 강섬유를 각각 1.0%, 1.5%를 혼입한 고강도 섬유보강 고강도 콘크리트 시편이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 극한강도

본 연구에서는 고강도 보통 콘크리트 및 섬유보강 고강도 콘크리트의 1축 압축 및 2축 압축 상태에서의 극한강도 증진 효과를 분석하였으며, 그 결과 2축 압축 상태에서의 압축강도가 크게 증진되는 것으로 나타났다. 또한 섬유 혼입률이 증가함에 따라 압축강도 증진 효과가 크게 나타나며, 강섬유가 1.5% 투입된 경우에는 전혀 없는 경우보다 22% 이상 증진되고 있음을 알 수 있다. Fig. 2 및 Table 3은 2축 응력 상태에서의 극한강도 증진 효과를 보

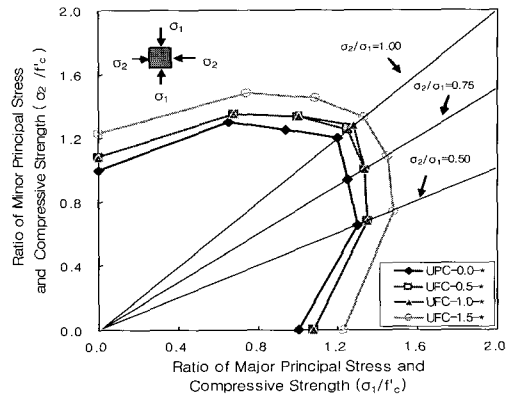


Fig. 2 Increase in ultimate strength for plain and fiber high strength concrete

여주고 있으며, 부응력 방향(σ_2)으로 하중이 가해지면, 이 방향으로의 구속 효과 때문에 주응력 방향으로(σ_1 방향)의 압축강도를 향상시키는 효과를 나타내고 있다.

또한 구속응력의 크기에 비례하여 주응력 방향으로의 1축 압축 강도가 크게 나타나는 것이 아니라, 부응력 방향 및 주응력 방향 압축응력비(σ_2/σ_1)가 0.5일 때 극한강도의 효과가 가장 크게 나타나며, 최대 증진 효과는 1축의 그것과 비교할 때 약 30%의 증진 효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 다른 연구자의 연구 결과와¹⁷⁾ 일치하고 있다. 이와 같은 결과는, 강섬유가 보강된 콘크리트의 경우에도 같이 적용되는 현상으로 나타났으며, 응력비가 0.5인 경우에 하중 증가 비율이 가장 크게 나타나고 있다. 또한 섬유 혼입량은 0.5에서 1.0%에 이를 때 극한하중의 증가폭이 가장 크게 도출되고 있으며, 섬유 혼입량이 1% 이상인 경우에는 그 증가 폭이 다소 적어지는 것으로 나타났다.

3.2 응력-변형률 곡선

고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트 보다 더 높은 하중에 이르기 까지 선형구간이 확대되며 또한 초기 강성이 크게 향상된다. 특히 2축 압축을 받는 고강도 콘크리트의 응력 변형률 관계는 1축의 경우보다 초기강성 및 탄성계수가 크게 나타나며, 비례한도 역시 크게 나타난다. 응력-변형률 곡선의 비선형 구간은 주로 미세균열의 발생에 기인하며, 이러한 미세균열은 골재와 모르타르의 부착 파괴에 의하여 시작되고, 이 균열은 모르타르를 관통하여 콘크리트 파괴를 유도한다. 그러나 2축 압축하의 고강도 콘크리트는 부응력(σ_2) 방향으로의 구속 압축력으로 인하여 이러한 미세균열을 방지하며, 따라서 더 높은 하중 구간에 이르기 까지 선형을 유지하게 된다. 전술한 바와 같이 2축 압축을 받는 콘크리트의 경우에 압축응력비가 0.5인 경우에 극한 강도 증진율이 최대에 이르며, 그 증가율은 30%에 달했으며, 본 실험 결과 초기강성 역시 응력비가

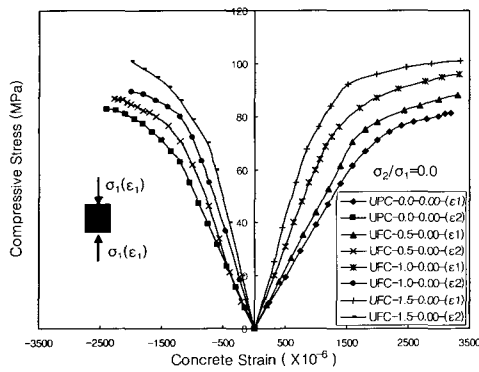


Fig. 3 Stress strain curves for plain and fiber HSC under uniaxial compression

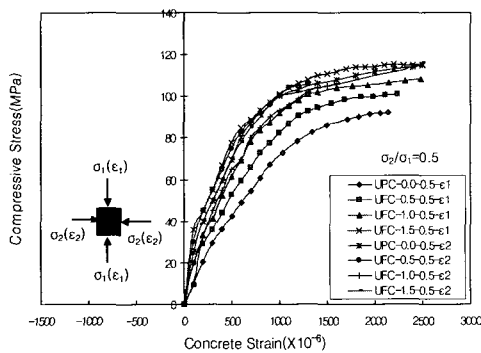


Fig. 4 Stress strain curves for plain and fiber HSC at stress ratio of 0.5

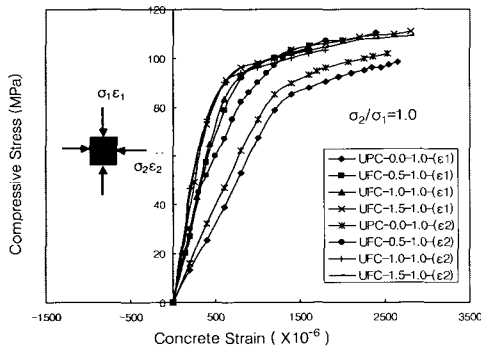
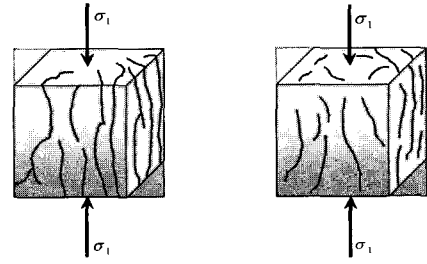


Fig. 5 Stress strain curves for plain and fiber HPC at stress ratio of 1.0

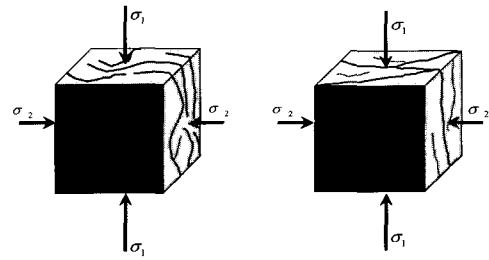
0.5인 경우에 가장 크게 나타나고 있다. 이는 2축 상태에서 응력비(σ_2/σ_1)가 높을수록 그 크기에 비례해서 탄성계수가 증진되는 것은 아니며, 따라서 2축 압축을 받는 부재의 탄성계수 산정 시에는 이러한 점을 충분히 고려하여야 함을 시사하고 있다.

Fig. 3은 고강도 보통 콘크리트, 섬유 혼입률이 0.5, 1.0 및 1.5%인 강섬유보강 고강도 콘크리트의 1축 압축상태의 응력-변형률을 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 섬유혼입률이 증가할수록 극한강도는 증가하는 현상을 파악할 수 있으며, 섬유혼입률이 1%가 될 때 까지는 약 8



(a) Plain HSC under uniaxial compression (b) Fiber HSC under uniaxial compression

Fig. 6 Crack patterns



(a) Plain HSC under biaxial compression (b) Fiber HSC under biaxial compression

Fig. 7 Crack patterns

% 정도의 강도가 증진하다가 섬유혼입률이 1.5% 혼입되었을 때는 극한강도가 약 22% 증진되는 현상을 발견할 수 있다. 또한 섬유가 혼입될수록 연성은 증가하여 연성파괴의 현상이 뚜렷하게 나타나고 있다. 그러나 섬유 혼입률이 1%이상 증진되면 연성의 증가는 거의 없으므로 나타나고 있으며, 이는 섬유혼입률이 1% 이상인 경우에는 부재의 역학적 거동이 크게 개선되지 않는다는 사실을 말하고 있다.

Fig. 4는 고강도 보통 콘크리트, 섬유 혼입률이 0.5, 1.0 및 1.5%인 강섬유보강 고강도 콘크리트의 2축 압축응력비(σ_2/σ_1)가 0.5인 2축 압축상태의 응력 변형률을 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 섬유 혼입률이 증가할수록 극한강도는 106.9MPa에서 121MPa로 계속 증가하고 있으며, 섬유혼입률이 0.5%인 경우 1축 상태의 그것보다 6%, 1.5%인 경우는 20%로 증가하는 사실을 알 수 있으며, 이는 섬유혼입률이 일정수준(1%)이상 증가할수록 2축의 효과는 커진다는 사실을 말하고 있다. Fig 5는 섬유혼입률이 0.5, 1.0 및 1.5%인 강섬유보강 고강도 콘크리트의 2축 압축 응력비(σ_2/σ_1)가 1.0인 2축 압축상태의 응력변형률을 도시한 것이다. 그림에서 보듯이, 2축 압축 응력비(σ_2/σ_1)가 0.5인 경우(Fig. 4)와 거의 유사한 결과를 보이고 있다.

3.3 파괴 형상

3.3.1 1축 압축 상태

본 실험에서는 1축 압축 상태에서의 큐브 시편에 대한

균열 형상 및 파괴 양상을 고찰하였다. 1축 압축을 받는 고강도 보통 콘크리트는 재하 방향과 평행한 균열이 발생하며, 이는 재하 방향에 직각으로 작용하는 쪼갠인장응력으로 균열이 발생하기 때문이다. Fig. 6(a)는 1축 압축 하의 고강도 보통 콘크리트의 파괴 양상을 나타내는 것으로서, 그림에서 알 수 있듯이, 재하 방향과 평행한 두면에서 쪼갠 인장응력으로 인한 균열이 발생하고 있다. Fig. 6(b)는 1축 압축하의 섬유보강 고강도 콘크리트의 파괴 양상을 나타내는 것으로서, 발생 균열이 보통 콘크리트 보다 방향성이 적었으나, 그 균열의 양상은 비슷하다. 이는 전술한 응력-변형률의 곡선에서도 유추할 수 있으며, 강섬유보강 콘크리트와 보통 콘크리트는 응력 변형 특성이 거의 유사하게 나타났으며, 단지 연성의 증가 특성만 좋아지고 있다.

3.3.2 2축 압축 상태

Fig. 7(a)는 2축 압축 하의 고강도 보통 콘크리트의 파괴 양상을 나타내는 것으로서, 그림에서 알 수 있듯이, 재하면에서는 판형파괴(plate type failure)가 일어나고 있음을 알 수 있으며, 재하 방향의 면에서는 쪼갠인장응력으로 인한 균열이 발생하고 있다. Fig. 7(b)는 2축 압축 하의 강섬유보강 고강도 콘크리트의 파괴 양상을 나타내는 것으로서, 보통 콘크리트와는 달리 전단 형태의 파괴가 일어남을 알 수 있다. 전단균열은 섬유 혼입률에 따라 약간의 차이가 발생하였으나, 15°~40° 정도의 각도를 유지하면서 발생하고 있었다.

이것은 혼입된 섬유에 의한 효과 때문인 것으로 판단되며, 섬유는 인장파괴를 구속하여, 전단파괴 형태를 유도하는 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터, 부응력 방향으로 하중이 도입되는 2축 응력 상태가 되면, 강섬유보강 고강도 콘크리트 파괴 형상은 인장파괴의 형태에서 점차 전단 파괴 형상으로 변해 간다는 사실을 알 수 있다.

3.4 고강도 콘크리트의 탄성계수

현재 사용되고 있는 콘크리트 탄성계수식은 콘크리트의 압축강도 및 콘크리트의 표면건조 단위중량으로 정의되고 있으며, 미국 ACI에서는 탄성계수식을 다음과 같이 정의하고 있다.

$$E_c = 57,000 \sqrt{f'_c (\omega_c/145)^{3/2}} \quad (f_c \leq 6,000 \text{psi}) \quad (1)$$

$$E_c = (40,000 \sqrt{f'_c + 1,000,000}) (\omega_c/145)^{3/2} \quad (6,000 \text{psi} \leq f_c \leq 12,000 \text{psi}) \quad (2)$$

여기서, ω_c 는 콘크리트의 단위중량(lb/ft^3), f'_c 는 압축강도(psi) 그리고 E_c 는 콘크리트의 탄성계수(psi) 이다.

또한 CEB-FIP Model Code 에서는, 콘크리트의 압축강도를 알고 있는 경우에 다음의 식을 제안하고 있다.

$$E_c = E_w (f_{cm}/f_{cmo})^{1/3} \quad (3)$$

여기서, E_c 는 콘크리트 탄성계수

$$E_{co} = 2.15 \times 10^4 \text{MPa}, f_{cmo} = 10 \text{MPa} \text{ 이다.}$$

일반적으로 1축 압축 상태에서의 탄성계수는 응력-변형률 곡선으로부터 도출되는 초기접선계수로 결정될 수 있으나, 본 연구와 같은 2축 응력 상태에서는 적용될 수 없다. 2축 응력 상태에서의 주응력 방향변형률(ϵ_1)은 다음과 같이 표현되며, 이때 콘크리트는 등방성 재료라 가정한다.

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \frac{\nu\sigma_2}{E} = (1 - \alpha\nu) \frac{\sigma_1}{E} \quad (4)$$

여기서, $\alpha = \sigma_2/\sigma_1$ 이다.

식 (4)로부터 $d\sigma/d\epsilon$ 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \frac{E}{1 - \alpha\nu} \quad (5)$$

여기서, $d\sigma/d\epsilon$ 는 응력-변형률 곡선에서의 초기탄성계수이며, 이는 실험으로부터 도출된다. 식 (5)로부터, 2축 압축을 받는 고강도 콘크리트의 탄성계수를 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$E = (1 - \alpha\nu) \frac{d\sigma}{d\epsilon} \quad (6)$$

Table 4와 Fig. 8은 본 실험결과 산출된 탄성계수와 ACI 및 CEB 탄성계수식에 근거한 탄성계수를 비교한 것이다. 본 연구에서 나타난 2축 압축응력 하의 고강도 콘크리트 탄성계수치는 식 (6)에 의해 결정되었으며, $d\sigma/d\epsilon$ 는 실험으로 결정된 초기 접선계수 이다.

본 연구 결과, 2축 압축을 받는 고강도 콘크리트의 탄성계수는 압축응력비(σ_2/σ_1)에 따라서 다소 다르게 나타났으며, 이는 초기접선계수($d\sigma/d\epsilon$)의 크기와 2축 압축으로 인한 Poisson 효과가 동시에 고려되었기 때문인 것으로 사료된다. 압축강도 82.7MPa(12,000psi)를 가지는 콘크리트가 1축 압축을 받는 경우, 탄성계수는 ACI 및 CEB Code로부터 규정된 탄성계수 식보다 높게 발현되고 있음이 나타났다. 또한 2축 응력비가 0인 경우와 2축 압축 응력비가 0.50, 및 0.75인 경우, 실험 결과로부터 도출된 탄성계수 값은 ACI, CEB식에서 도출된 탄성계수보다 높게 나타났다. 그러나 2축 압축 응력비가 1.0인 경우(UPC-0.0-1.00), 탄성계수는 현행 시방기준으로부터 도출된 결과와 거의

Table 4 Values of elastic modulus by test, ACI and CEB

Specimen series	Initial tangent modulus, $d\sigma/d\epsilon$ (MPa $\times 10^4$)	Elastic modulus (MPa $\times 10^4$)			Test/ACI	Test/CEB
		Test	ACI	CEB		
UPC-0.0-0.00	3.92	3.92	3.70	3.67	1.059	1.068
	3.94	3.94	3.70	3.67	1.065	1.074
	3.81	3.81	3.70	3.67	1.030	1.037
	4.09	4.09	3.70	3.67	1.105	1.114
	3.98	3.98	3.70	3.67	1.076	1.084
	3.74	3.74	3.70	3.67	1.011	1.019
	3.68	3.68	3.70	3.67	0.995	1.003
	3.76	3.76	3.70	3.67	1.016	1.025
	3.94	3.94	3.70	3.67	1.065	1.074
UPC-0.0-0.50	3.90	3.90	3.70	3.67	1.054	1.063
	5.11	4.65	4.12	4.03	1.129	1.154
	5.19	4.72	4.12	4.03	1.146	1.171
	5.39	4.90	4.12	4.03	1.189	1.216
	5.26	4.79	4.12	4.03	1.163	1.189
	5.22	4.75	4.12	4.03	1.153	1.179
	5.24	4.77	4.12	4.03	1.158	1.184
	5.31	4.83	4.12	4.03	1.172	1.199
	5.27	4.80	4.12	4.03	1.165	1.191
UPC-0.0-0.75	5.21	4.74	4.12	4.03	1.150	1.176
	5.36	4.88	4.12	4.03	1.184	1.211
	5.23	4.52	4.04	3.96	1.119	1.141
	5.26	4.55	4.04	3.96	1.126	1.149
	5.24	4.53	4.04	3.96	1.121	1.141
	5.03	4.35	4.04	3.96	1.077	1.098
	5.26	4.55	4.04	3.96	1.126	1.149
	5.05	4.37	4.04	3.96	1.082	1.104
	5.10	4.41	4.04	3.96	1.092	1.114
UPC-0.0-1.00	5.07	4.39	4.04	3.96	1.087	1.109
	5.17	4.47	4.04	3.96	1.106	1.129
	5.02	4.43	4.04	3.96	1.074	1.096
	4.77	3.91	3.97	3.97	0.985	0.997
	4.80	3.94	3.97	3.97	0.992	1.005
	4.96	4.07	3.97	3.97	1.025	1.038
	4.91	4.03	3.97	3.97	1.015	1.028
	4.62	3.79	3.97	3.97	0.955	0.967
	4.70	3.85	3.97	3.97	0.970	0.982
UPC-0.0-1.00	4.81	3.94	3.97	3.97	0.992	1.005
	4.65	3.81	3.97	3.97	0.960	0.972
	4.70	3.85	3.97	3.97	0.970	0.982
	4.65	3.81	3.97	3.92	0.960	0.972

일치하였다. 이상의 결과로부터 ACI 및 CEB 탄성계수 식은 2축 압축을 받는 고강도 콘크리트에도 적용이 가능한 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 1축 및 2축 압축응력을 받는 고강도 보통 콘크리트 및 강섬유보강 고강도 콘크리트의 역학적 거동 및 재료 특성을 규명하였으며, 다음의 결론이 도출되었다.

1) 부응력 방향으로 도입된 구속응력은 주응력 방향으로의 강도 및 변형거동에 좋은 개선 효과를 보이며, 고강도 콘크리트 및 강섬유보강 고강도 콘크리트의 강성

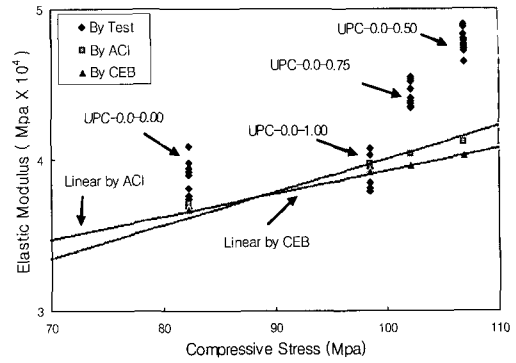


Fig. 8 Comparison of the values of elastic modulus from test and ACI, CEB expression

및 극한강도가 현저히 증대되었다. 또한 섬유가 혼입될수록 연성은 크게 증가하여 연성파괴의 현상이 뚜렷하게 나타나고 있다. 그러나 섬유혼입률이 1% 이상 증진되면 연성의 증가는 거의 없는 것으로 나타나고 있으며, 이는 섬유혼입률이 1% 이상인 경우에는 부재의 연성 거동이 크게 개선되지 않는다는 사실을 말하고 있다.

- 2) 2축 압축하중이 콘크리트에 도입될 때 극한강도는 1축 압축이 작용할 때의 극한강도 보다 증대되었다. 고강도 보통 콘크리트인 경우, 주응력 방향 및 부응력 방향 압축응력비(σ_2/σ_1)가 0.5일 때 극한강도의 효과가 가장 크게 나타났다. 최대 증진 효과는 1축의 그것과 비교할 때 약 30%의 증진 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 강섬유보강 고강도 콘크리트의 경우에도 2축 압축 상태에서의 압축강도가 크게 증진되는 것으로 나타났으며, 섬유혼입률이 증가함에 따라 압축강도 증진 효과가 크게 나타났다.
- 3) 1축 압축을 받는 고강도 보통 콘크리트 및 강섬유보강 콘크리트는 재하 방향과 평행한 쪼갬인장응력으로 인한 균열이 발생하는 것으로 나타났으며, 2축 응력 상태에서는 고강도 보통 콘크리트의 경우 재하면에서는 판형파괴가 일어나고, 재하 방향의 면에서는 쪼갬인장응력으로 인한 균열이 발생하였다. 그러나 섬유가 혼입된 강섬유보강 고강도 콘크리트는 보통 콘크리트와는 달리 전단형태의 파괴가 일어났다. 이는 섬유가 인장파괴를 구속하며, 전단파괴 형태를 유도하기 때문이며, 부응력 방향으로 하중이 도입되는 2축 응력 상태가 되면, 파괴형상은 인장파괴의 형태에서 점차 전단 파괴 형상으로 변해 간다는 사실을 알 수 있다.
- 4) 본 실험 결과로부터 도출된 2축 압축 상태에서의 탄성계수 값은 ACI, CEB식에서 도출된 탄성계수보다 높게 나타났다. 그러나 2축 응력비가 1.0인 경우에 탄성계수는 현행 시방기준으로부터 도출된 결과와 거의 일치하였다. 이상의 결과로부터 ACI 및 CEB 탄성계수 식은 2축 압축을 받는 고강도 콘크리트에도 적용이 가능한 것으로 사료된다.

참고문헌

- Nawy, E. G., *Fundamental of High Strength High Performance Concrete*, Longman, 1996.
- Nawy, E. G., *Reinforced Concrete - A Fundamental Approach 4th Edition*, Prentice Hall, NJ, 2000, 786pp.
- Nawy, E. G., *Concrete Construction Engineering Handbook*, CRC Press, Boca Raton, FL, 1998, 1250pp.
- Randall, V. and Foot, K., "High Strength Concrete for Pacific First Center", *Concrete International*, Vol.11, No.4, Apr. 1989, pp.14~16.
- Hang, A. K. and Sandvik, M., "Mix Design and Strength Data for Concrete Platform in the North Sea, Concrete in Marine Environment, SP-109, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1988, pp.895~906.
- Nilson, A. H., *Design Imprecations of Current Research on High Strength Concrete*, ACI SP-87-7, pp.85~118.
- Chen, R. C., Carrasguillo, S. J., and Flower, D. W., *Behavior of High Strength Concrete under Uniaxial and Biaxial Compression*, ACI SP-87-14, pp.251~273.
- Imran, I. and Pantazopoulou, S. J., "Experimental Study of Plain Concrete Under Triaxial Stress", *ACI Material Journal*, Nov.-Dec. 1996, pp.589~601.
- Traina, L. A. and Mansour, S. A., "Biaxial Strength and Deformational Behavior of Plain and Steel Fiber Concrete", *ACI Material Journal*, Jul.-Aug., 1991, pp.354~362.
- Liu, T., Nilson, A., and Slate, F., "Stress-Strain Response and Fracture of Concrete in Uniaxial and Biaxial Compression", *ACI Journal, Proceedings*, Vol.69, No.5, May, 1972, pp.291~295.
- Tasuji, I., Slate, F., and Nilson, A., "Stress-Strain Response and Fracture of Concrete in Biaxial Compression", *ACI Journal, Proceedings*, Vol.75, No.7, Jul., 1978, pp.306~312.
- Kuper, H., Hilsdorf, H. K., and Rusch, H., "Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses", *ACI Journal, Proceedings*, Vol.66, No.8, Aug., 1969, pp.656~666.
- Liu, T. C. Y., Nilson, A. H., and Slato, F. O., "Biaxial Stress-Strain Relations for Concrete, Proceedings", *J. of ASCE*, Vol.98, ST5, May, 1972, pp.1025~1034.
- Herrin, J. C. *Behavior of High Strength Concrete Model Subjected to Biaxial Compression*, MS-Thesis, University of Texas at Austin, May, 1983.
- Chen, R. L. *Behavior of High Strength Concrete in Biaxial Compression*, PhD Thesis, University of Texas at Austin, Dec., 1984.
- Yin, W., Su, E., Mansour, M., and Hsu, T., "Biaxial Tests of Plain and Fiber Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol.86, No.3, May-Jun., 1991, pp.236~243.
- Hussein, A. and Marzouk, H., "Behavior of High Strength Concrete under Biaxial Stresses", *ACI Materials Journal*, Jan.-Feb., 2000, pp.27~36.
- Addis, B. J. and Alexsander M. G., *A method of proportioning trial mixes for high strength concrete*, in ACI SP-212, High Strength Concrete, 2nd International Symposium, 1990, pp.287~308.
- Fiorate, A. E., "PCA Research on High Strength Concrete", *Concrete International*, Vol.11, No.4, 1989, pp.44~50.

요 약

본 연구는 1축 및 2축 압축응력을 받는 고강도 콘크리트 및 섬유보강 고강도 콘크리트의 역학적 거동 및 재료 특성을 규명함에 목적이 있다. 이를 위하여, 본 연구에서는 82.7MPa(12,000psi) 28일 압축강도를 발현하는 고강도 콘크리트 및 섬유보강 고강도 콘크리트 큐브 시편을 제작하여 2축 압축 응력비($\sigma_2/\sigma_1=0.00, 0.50, 0.75, 1.00$) 및 섬유혼입률($V_f=0.0, 0.5, 1.0, 1.5\%$)을 주된 실험 변수로 하는 실험을 수행하였다. 위 실험 연구를 통하여, 부응력 방향으로 도입된 구속응력은 주응력 방향으로의 강도 및 변형 거동에 좋은 개선 효과를 보이며, 고강도 콘크리트 및 강섬유 보강 고강도 콘크리트의 강성 및 극한강도가 현저히 증대되었음을 알 수 있었다. 또한 주응력 방향 및 부응력 방향 압축응력비(σ_2/σ_1)가 0.5일 때 극한강도의 효과가 가장 크게 나타났으며, 최대 증진 효과는 1축의 그것과 비교할 때 약 30%의 효과가 있는 것으로 나타났다. 1축 압축을 받는 고강도 보통 콘크리트 및 강섬유보강 콘크리트는 재하 방향과 평행한 쪼갬인장응력으로 인한 균열이 발생하는 것으로 나타났으나, 2축 압축을 받는 섬유보강 고강도 콘크리트는 진단 형태의 파괴가 일어났다. 본 실험 결과로부터 도출된 2축 압축 상태에서의 탄성계수 값은 ACI, CEB식에서 도출된 탄성계수보다 높게 나타났으며, 따라서 현재 사용되는 ACI 및 CEB 탄성계수 식은 2축 압축을 받는 고강도 콘크리트에도 적용이 가능한 것으로 사료된다.

핵심용어 : 고강도 콘크리트, 섬유보강 고강도 콘크리트, 응력-변형률 곡선, 파괴 양상, 탄성계수