

주철근비에 따른 고강도 콘크리트 보의 전단강도 특성

The Effect of Longitudinal Steel Ratio
on Shear Strength of Reinforced High Strength Concrete Beams

김진근*
Kim, Jin Keun

박연동**
Park, Yon Dong

ABSTRACT

Eight singly reinforced high strength concrete beams without web reinforcement were tested to investigate their behavior and to determine their ultimate shear capacities. In this study, the main variable was the ratio of longitudinal reinforcement. Test results were compared with strength predicted by using ACI code, Zsutty's equation and Bazant & Kim's equation. As the result, for the beams of low steel ratio, the margin of safety in ACI code may be disappeared. It was shown that Zsutty's equation well predict the trend of the test data.

1. 서론

근래에 들어, 각종 특수, 대형 구조물의 출현으로 인하여 건설 재료의 고강도화에 대한 요구가 크게 증가되고 있다. 고강도 콘크리트는 1960년대부터 개발 및 실용화되기 시작하였는데, 고유동화제(superplasticizer) 등의 우수한 혼화제 개발과 더불어 그 실용성이 크게 증가하였으며, 실제로 많은 구조물들이 고강도 콘크리트를 사용하여 성공적으로 시공되었다. 또한, 고강도 콘크리트의 실용화 강도 수준도 점점 더 증가하여, 최근에는 1000 kg/cm² 이상의 강도를 가진 콘크리트가 고층 건물(1)과 프리스트레스트 콘크리트 부재에 사용되고 있다.

그러나, 고강도 콘크리트 재료 개발에 대해서는 많은 연구가 수행된 데 비하여 고강도 콘크리트를 사용하여 만들어진 부재에 대한 역학적 특성 연구는 상대적으로 적은 편이다. 현재의 설계 기준식들도 대부분 보통강도 콘크리트를 사용한 실험 결과에 근거하고 있으며, 고강도

콘크리트를 사용함에 따른 변동 요인을 거의 고려해주지 못하고 있다. 또한, 고강도 콘크리트 부재는 보통강도 콘크리트 부재에 비하여 취성이 증가하여 연성 확보에 불리한 영향을 미치므로 구조용 고강도 콘크리트의 사용성과 안전성을 확보하기 위해서는 설계 기준식에 대한 재검토가 이루어져야 하겠다.

철근콘크리트 보의 전단강도는 콘크리트 압축강도(f_c'), 전단스팬비(a/d), 주철근비(ρ) 및 유효깊이(d)의 함수이다. 현재의 전단강도에 대한 ACI 기준식(2)(ACI Building Code 318-89의 11-6)은 압축강도 420 kg/cm² 이하의 보통강도 콘크리트 보에 대한 실험에 근거하고 있으며, 이를 고강도 콘크리트 보에 적용할 경우, 일반적으로 안전율이 감소한다고 보고되고 있다.(3) 또한, ACI 기준식은 전단강도에 대하여 주철근비 및 전단스팬비의 효과를 제대로 고려해주지 못하는 것으로 밝혀지고 있다.(4), (5)

본 연구에서는 고강도 콘크리트 보의 전단강도 특성을 규명하기 위하여, 일차적으로 주철근비가 변화되었을 때의 보 전단강도의 특성 및 파괴양상을 실험을 통하여 분석해 보았다.

* 정희원, KAIST 토목공학과 부교수, 공학박사

** 정희원, KAIST 토목공학과 박사과정

2. 실험

2.1 시험체 개요

주철근비에 따른 전단강도 특성을 파악하기 위하여 주철근비를 4종류로 변화시켜 각 변수에 대하여 2개씩 총 8개의 보 시험체를 제작하였다. 모든 시험체는 스티럽을 보강하지 않은 단철근 보이고, 단면은 폭이 17cm, 높이가 30cm로 설계되었으며, 전단스팬비는 3으로 고정하였다.

시험체의 상세는 표 1 및 그림 1과 같다.

표 1. 시험체 종류 및 전단강도

기 호	유효깊이 (d, cm)	전단스팬비 (a/d)	주철근비 (ρ)	측정전단강도 (kg/cm ²)
B-1-1	27.2	3	0.010	12.5
B-1-2	27.2	3	0.010	12.1
B-2-1	27.0	3	0.018	15.4
B-2-2	27.0	3	0.018	15.6
B-3-1	26.7	3	0.034	17.2
B-3-2	26.7	3	0.034	17.3
B-4-1	25.5	3	0.046	20.8
B-4-2	25.5	3	0.046	22.1

고강도 콘크리트의 작업성을 확보하기 위하여 ASTM C494 Type A 및 F에 해당하는 감수제 및 고유동화제를 병용하였다. 사용된 고강도 콘크리트의 배합비 및 압축강도 실험 결과는 표 2와 같다.

철근은 비교적 고강도인 SD 40 철근을 사용하였다.

표 2. 배합비 및 압축강도

시멘트량 (kg/m ³)	w/c (%)	s/a (%)	감수제 (%)	고유동화제 (%)	슬럼프 (cm)	압축강도 (kg/cm ²)
500	30	34	0.2	1.0	16.8	547

2.3 가력장치 및 재하 방법

가력 프레임에 50톤 용량의 유압잭을 설치하여 가력하였으며, 하중은 25톤 용량의 로드셀을 사용하여 측정하였다.

하중은 그림 1에 나타나 있는 바와 같이 보의 중앙으로부터 각각 d/2만큼 떨어진 지점에서 2점 가력하였다. 가력방식은 하중 조절로 하였으며, 하중 증분은 B-1~B-3 보의 경우, 예상 극한하중의 50% 정도까지는 2톤, 80% 정도까지는 1톤, 그 이후에는 0.5톤으로 하였다. B-4 보의 경우는 각각 3톤, 1.5톤, 0.5톤으로 하였다.

각 하중단계마다 보 중앙부의 처짐, 보 중앙부 및 양단에서의 철근의 변형율이 측정되었으며, 균열 양상을 도시하였다.

2.2 실험 재료

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 일반 강모래를 사용하였고 굵은골재는 최대크기 25mm의 쇄석을 사용하였다.

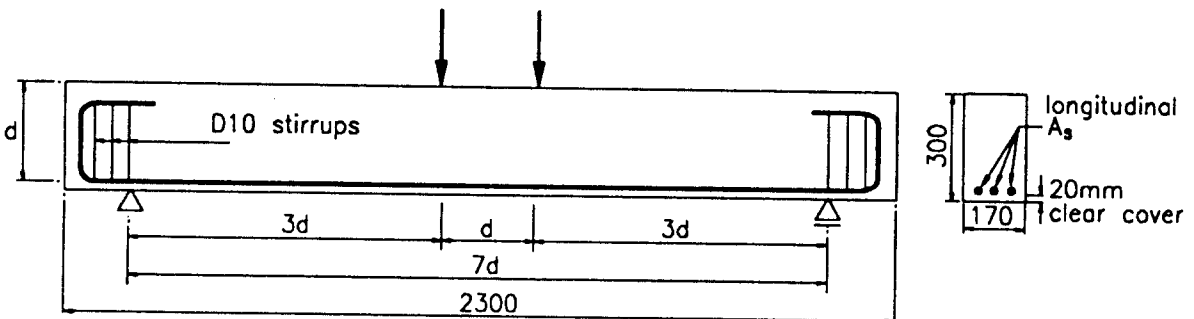


그림 1. 시험체 상세

3. 실험 결과 및 분석

3.1 일반적 파괴 양상

모든 시험체에 대하여 초기 하중단계에서는 순수 휨 구간에서 먼저 휨균열이 발생하였다. 하중이 증가함에 따라 순수 휨 구간에서의 균열이 진전되었으며, 전단스팬 구간에도 휨균열이 발생하기 시작하였다. 계속적인 하중의 증가에도 중앙부의 휨균열의 진전은 크지 않았으나 전단스팬에 발생한 휨 균열의 선단 부분 또는 새로운 위치에서 가력점을 향하여 기울어지는 사인장 균열이 발생하였으며, 이 사인장 균열이 발전하면서 보의 파괴로 이어졌다.

그림 2는 주철근비에 따른 보의 균열 양상을 보여주고 있는데, 주철근비가 감소함에 따라 초기 휨균열이 발생하는 하중이 낮아지고 균열의 진전이 빨라지는 경향을 보여주었다. 그러나 균열 간격이나 극한강도까지의 균열 진전 형태, 파괴면의 형태 등은 모든 시험체에서 유사한 경향을 보여주었다.

그림 3은 주철근비에 따른 고강도 콘크리트 보의 하중-처짐 관계를 도시한 것인데, 그림에 나타나 있는 바와 같이 기울기의 차이는 있으나 모든 보가 휨균열 발생 이후 하중이 거의 선형적으로 증가하다가 극한하중에 도달하면 갑자기 파괴가 발생하는 취성파괴 현상을 보여주었다.

3.2 전단강도

기존의 많은 연구자들이 콘크리트의 전단강도를 정확하게 규명하기 위해 많은 연구를 수행하였으며, (6)-(11) ACI 규준식과 더불어 보의 전단강도를 예측하는 대표적인 모델식으로는 Zsutty 식(6) 및 크기효과(size effect)를 고려한 Bazant & Kim 식(7)이 있다. 각 모델식의 형태는 다음과 같다.

ACI 규준 (11-6)식 ;

$$v_c = 1.9 \sqrt{f'_c} + 2500 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \quad (\text{psi}) \quad (1)$$

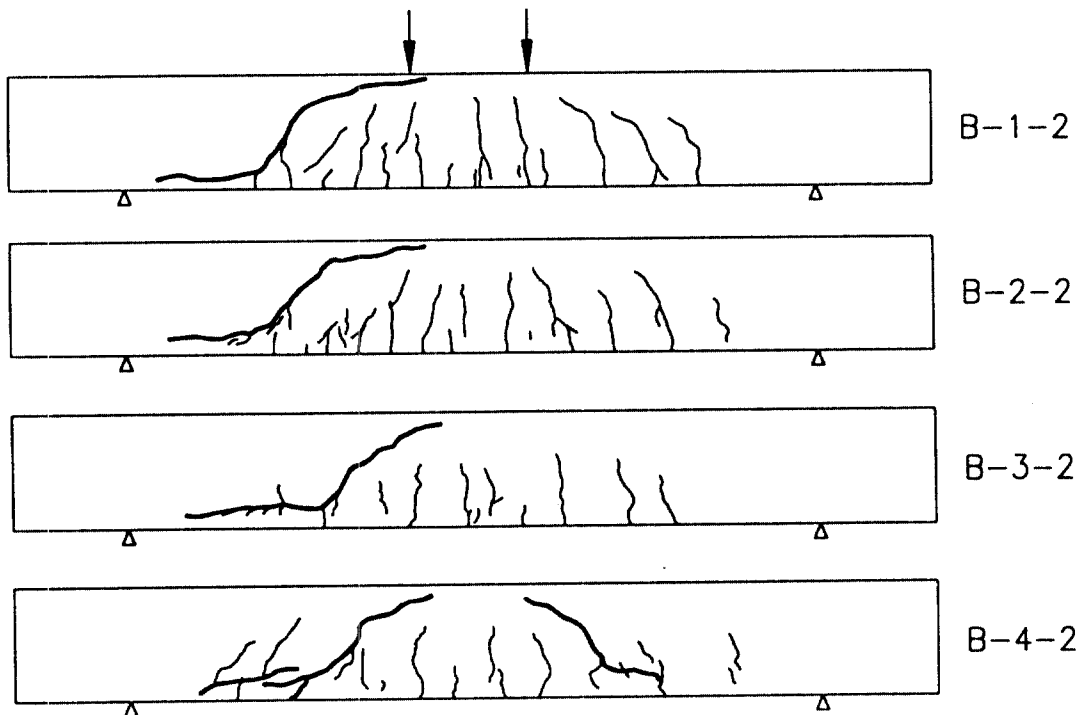


그림 2. 균열 형태 및 파괴 형상

Zsutty 식 ;

$$v_{dt} = 61 \left(f'_c \rho \frac{d}{a} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{psi}) \quad (2)$$

Bazant & Kim 식 ;

$$v_u = \frac{10 \sqrt[3]{\rho}}{\sqrt{1 + d/(25d_a)}} \times \left(\sqrt{f'_c} + 3000 \sqrt{\frac{\rho}{(a/d)^5}} \right) \quad (\text{psi}) \quad (3)$$

여기서, d_a = 최대골재크기

그러나, 위의 식들은 보통강도 콘크리트 보 실험의 결과를 근거로 하여 모델링한 식들이기 때문에 이들을 고강도 콘크리트 보에 적용할 경우에는 적절한 검토가 선행되어야 할 것이다.

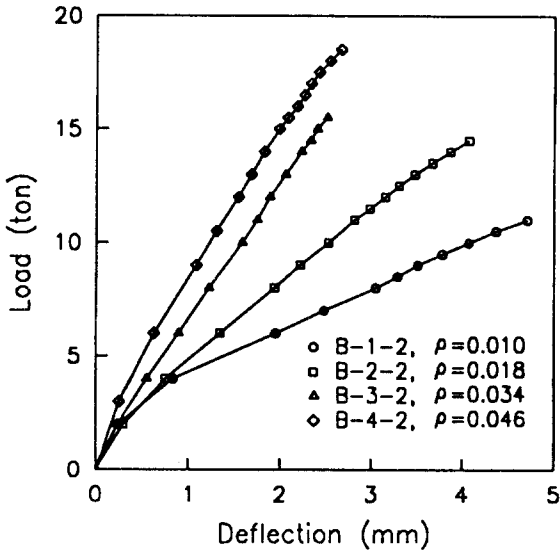


그림 3. 주철근비에 따른 하중-처짐 관계

최근의 고강도 콘크리트 보의 전단강도 특성에 관한 연구에 의하면, (3)-(5), (12)-(15) 일반적으로 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 전단강도는 증가한다. 그러나, ACI 규준식은 전단강도에 대한 콘크리트 압축강도 증가의 효과를 과대 평가해서 콘크리트가 고강도화 되어감에 따

라 (측정값/예측값)으로 계산되는 안전율이 감소하며, (3) 주철근비가 낮을 경우에는 안전율이 아니라고 평가하고 있다. (4) 또한 ACI 규준식은 전단강도에 대한 주철근비 및 전단스팬비의 효과를 과소평가하고 있다고 한다. (4), (5) 고강도 콘크리트 부재는 보통 콘크리트 부재보다 높은 취성율을 보이는데, 최근의 연구 결과에 의하면, 취성계수 $\beta = (f'_c)^2 D / (E_c G_f)$ 로 나타나는 데, 이로부터는 고강도 콘크리트 부재가 보통강도 콘크리트 부재보다 높은 취성율을 보인다는 것을 알 수 있다. 따라서, 고강도 콘크리트 보에서 주철근비가 낮을 때 더욱 취성적이 되며 안전율 확보도 떨어진다. 그러므로 고강도 콘크리트 보의 경우 최소 복부보강근의 양을 늘려주어야 동등한 연성효과를 얻을 수 있다.

그림 4는 극한전단강도 실험 결과를 ACI 규준식, Zsutty 식 및 Bazant & Kim 식과 비교 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 ACI 규준

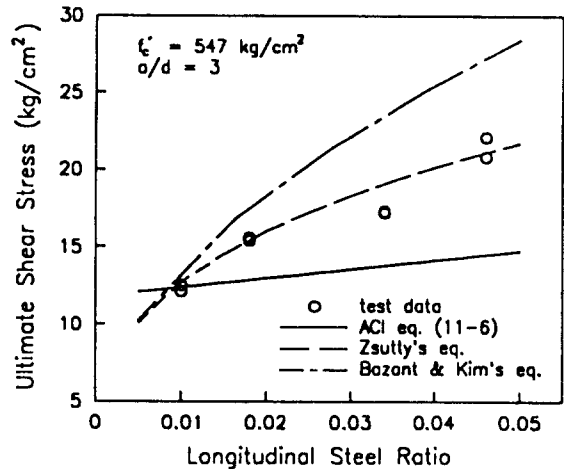


그림 4. 주철근비에 따른 전단강도

식은 주철근비의 증가에 따른 전단강도 증가의 효과를 적절하게 고려해주지 못하고 있어, 주철근비가 높은 경우에는 안전율이 증가하고 있으나 주철근비가 0.01 이하의 경우에는 안전율이 1.0 이하로 떨어지는 경향을 보여주고 있다. 이러한 실험 결과는 고강도 콘크리트의 경우, ACI 규준식이 콘크리트 강도 증가의 효과를 과대 평가하여 전단스팬비가 크고 주철근비가 낮은 경우에는

안전율이 1.0 이하로 떨어진다는 다른 연구자들의 연구결과와 유사한 경향을 보여주고 있다. 본 실험 결과만을 놓고 판단할 때 Bazant & Kim 식은 고강도 콘크리트 보의 경우에 주철근비 증가가 전단강도 증가에 미치는 영향을 과대평가하고 있으며, Zsutty 식은 이효과를 적절하게 평가하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 Zsutty 식은 보 유효깊이 증가에 의한 전단강도에 있어서의 크기효과(size effect)를 고려해주지 않고 있어 이에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다. 실제로 보통 콘크리트(압축강도 267 kg/cm²) 보에 대해서 수행한 Kani⁽⁸⁾의 실험 결과에 의하면, 전단스팬비가 3.0인 경우, 보의 유효깊이가 14cm에서 109cm로 증가함에 따라 전단강도가 41% 감소하였다. 유사한 결과가 고강도 콘크리트 보의 경우에도 나타날 것으로 예상되며, 실제로 대형 고강도 콘크리트 구조부재의 전단강도를 판정하기 위해서는 이에 대한 적절한 고려가 있어야 할 것으로 본다.

4. 결 론

주철근비에 따른 고강도 콘크리트 보의 전단강도 특성을 전단스팬비(a/d) 3에 대하여 실험적으로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 주철근비가 증가함에 따라 초기균열 발생 하중이 증가하고 균열 진전 속도는 늦어졌으나, 균열의 형태 및 진전 상황, 파괴면의 형태는 주철근비에 관계없이 유사한 경향을 보여주었다.
- 2) 주철근비에 관계없이 모든 보에서 급격한 취성파괴 현상을 보여주었다.
- 3) ACI 규준식은 주철근비가 낮은 경우 안전율이 1.0 이하로 떨어져 고강도 콘크리트의 경우에는 규준식에 대한 재검토가 필요할 것으로 판단된다.
- 4) 실험 결과는 Zsutty의 제안식과 그 경향이 가장 잘 일치하고 있으나, 좀 더 확실한 결론을 얻기 위해서는 전단스팬비(a/d), 유효깊이(d) 등의 변화 및 이들 요인들의 상관 관계에 따른 영향도 심도있게 연구되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 1991년도 과학재단 목적기초 연구의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한, 시험체는 (주)대우 창원 경자동차 현장 B/P에서 타설되었으며, 시험체 제작에 많은 협조를 해주신 (주)대우 건설기술연구소 박철립 소장님과 고강도 콘크리트 연구팀에게 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

1. Randall, V.R., Foot, K.B., "High-Strength Concrete for Pacific First Center," Concrete International, Apr., 1989, pp. 14-16.
2. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89)," American Concrete Institute, Detroit, 1989, 353 pp.
3. Mphonde, A.G., Frantz, G.C., "Shear Test of High- and Low-Strength Concrete Beams Without Stirrups," ACI J., Proceedings, Vol. 81, No. 4, 1984, pp. 350-357.
4. Elzanty, A.H., Nilson, A.H., Slate, F.O., "Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Using High-Strength Concrete," ACI J., Proceedings, Vol. 83, No. 2, 1986, pp. 290-296.
5. Ahmad, S.H., Khaloo, A.R., Poveda, A., "Shear Capacity of Reinforced High-Strength Concrete Beams," ACI J., Proceedings, Vol. 83, No. 2, 1986, pp. 297-305.
6. Zsutty, T.C., "Beam Shear Strength Prediction by Analysis of Existing Data," ACI J., Proceedings, Vol. 65, No. 11, 1968, pp. 943-951.
7. Bazant, Z.P., Kim, J.K., "Size Effect in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Beams," ACI J., Proceedings, Vol. 81, No. 5, 1984, pp. 456-467.

8. Kani, G.N., "How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams?," ACI J., Proceedings, Vol. 64, No.3, 1967, pp. 128-141.
9. Rajagopalan, K.S., Ferguson, P.M., "Exploratory Shear Tests Emphasizing Percentage of Longitudinal Steel," ACI J., Proceedings, Vol. 65, No. 8, 1968, pp. 634-638.
10. Placas, A., Regan, P.E., "Shear Failure of Reinforced Concrete Beams," ACI J., Proceedings, Vol. 68, No. 10, 1971, pp. 763-773.
11. Manuel, R.F., Slight, B.W., Suter, G.T., "Deep Beam Behavior Affected by Length and Shear Span Variations," ACI J., Vol. 68, No. 12, 1971, pp. 954-958.
12. Elzanty, A.H., Nilson, A.H., Slate, F.O., "Shear Capacity of Prestressed Concrete Beams Using High-Strength Concrete," ACI J., Proceedings, Vol. 83, No. 3, 1986, pp. 359-368.
13. Ahmad, S.H., Lue, D.M., "Flexure-Shear Interaction of Reinforced High-Strength Concrete Beams," ACI J., Proceedings, Vol. 84, No. 4, 1986, pp. 330-341.
14. Salandra, M.A., Ahmad, S.H., "Shear Capacity of Reinforced Lightweight High-Strength Concrete Beams," ACI J., Proceedings, Vol. 86, No. 6, 1989, pp.697-704.
15. Roller, J.J., Russell, H.G., "Shear Strength of High-Strength Concrete Beams with Web Reinforcement," ACI J., Proceedings, Vol. 87, No. 2, 1990, pp. 191-198.