

RC 보의 강도증진에 따른 최소전단철근 기준의 적합성 평가에 관한 연구

Assessment of Code Requirements on Minimum Shear
Reinforcement in High-Strength RC Beams

○ 윤영수* 원종필* 장일영**
Yoon, Y. S. Won, J. P. Jang, I. Y.

Abstract

This paper presents the assessment of the minimum shear reinforcement requirements in normal, medium and high-strength reinforced concrete beams. Twelve shear tests were conducted on full-scale beam specimens having design concrete compressive strengths of 35, 70 and 100 MPa. Different amounts of minimum shear reinforcement were investigated, including the amounts required by Korean Concrete Standard (KCI88), JCI86, ACI89 (revised 1992) and CSA94 standard. The performance of the different amounts of shear reinforcement are discussed in terms of the shear capacity, the ductility and the crack control at service load levels. An assessment of code provisions for minimum shear reinforcement, and the prediction and comparison of the ultimate shear capacity are also presented.

1. 서론

철근콘크리트 보의 전단파괴에 대한 연구는 수십년에 걸친 연구자들의 노력에도 불구하고 아직까지 명확하게 규명하지 못하고 있는 어려운 문제중의 하나이며, 전단거동은 휨거동에 비해서 여러가지 변수들에 의해 더욱 복잡하고 이론적으로 규명하기 곤란한 인자를 포함하고 있다.^(1,2)

구조물이 파괴될 경우 반드시 방지되어야 하는 것은 전단에 의한 취성파괴로써, 이는 철근콘크리트 부재의 강도를 휨능력 이하로 감소시킬 뿐만 아니라 부재의 연성을 현저히 감소시키게 된다.

고강도 콘크리트가 더 높은 인장강도를 갖

음으로 해서 이에 따른 더높은 하중에서 전단균열이 예상되고 따라서 더 많은 양의 최소전단철근의 보강이 요구되며, 또한 고강도 콘크리트의 경우 골재를 가르는 균열면이 형성되어 사균열 이후의 보유전단내력이 보통강도 콘크리트에 비해 감소하는 것으로 알려져 있지만 현재의 국내의 시방서는 이점을 고려하고 있지않고, 반면에 실제 고강도 콘크리트의 시공은 진행되고 있는 실정에 있다.

따라서 본 연구에서는 국내의 콘크리트 시방서인 KCI 88⁽³⁾ 및 일본의 JCI 86⁽⁴⁾의 기준을 고찰하고, 또한 콘크리트 보의 고강도화를 고려할수 있도록 근래에 개정된 미국의 ACI 89⁽⁵⁾ 및 캐나다의 CSA 94⁽⁶⁾의 최소전단철근의 기준에 대하여 실물크기의 실험을 통하여 고강도 콘크리트 보의 전단내력과 거동을 분석하여 향후의 안정된 설계를 위한 자료를 제공하고자 한다.

* 삼성물산 건설부문 기술연구소

** 금오공과대학교 토목공학과 조교수

2. 최소전단철근에 관한 각 기준

철근콘크리트 보의 최소전단 철근량에 대한 기준은

- ACI 83, CSA 84 및 KCI 88의 경우

$$A_v = \frac{0.35}{f_y} (b_w s) \quad (1)$$

- JCI 86 (1991년 개정)의 경우

$$A_v = 0.0015 (b_w s) \quad (2)$$

- CSA 94의 경우는 콘크리트의 압축강도의 함수로 표시하며

$$A_v = \frac{0.06 \sqrt{f'_c}}{f_y} (b_w s) \quad (3)$$

- ACI 89 (1992년 개정)의 경우는 다음의 두 방법중 한가지를 선택할 수 있다.

$$A = \frac{0.35}{f_y} (b_w s)$$

여기서, 전단저항강도 $V_c = 0.167 \sqrt{f'_c} b_w d$ 로 구할수 있으며, $V_c \geq 0.167 \sqrt{69} b_w d$ 를 만족해야 한다.

또는, $f'_c = 69$ MPa를 기준으로

$$A = \frac{0.35}{f_y} (b_w s) \quad (f'_c \leq 69 \text{ MPa의 경우})$$

$$A = \frac{f'_c}{35} \cdot \frac{0.35}{f_y} (b_w s) \leq \frac{1.05}{f_y} (b_w s) \quad (f'_c > 69 \text{ MPa의 경우}) \quad (4)$$

로 구분해서 사용하며, 이때는 $V_c = 0.167 \sqrt{f'_c} (b_w d)$ 를 사용한다.

위의 각 기준을 도식화한 것이 Fig. 1에 나타나 있으며,

여기서,

A_v : 최소연직전단철근(stirrup)량

b_w : 복부폭

s : 전단철근의 배치간격

d : 보의 유효높이

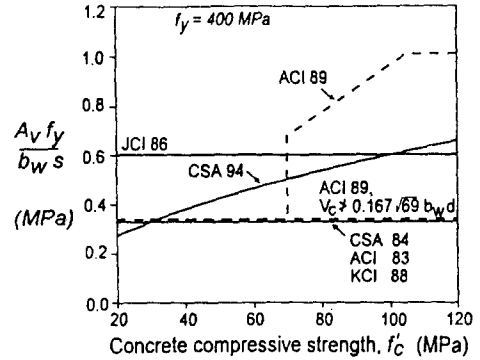


Fig. 1 Code requirements on minimum shear reinforcement

3. 실험

3.1 시험체 계획

전단 흐름의 메카니즘이 주로 보작용에 의해서 전달되는 보는 통상 전단지간비가 2.5 이상인 일반보의 경우가 대부분이므로, 본 실험에서는 Fig. 2에서 보는 것처럼 전단지간비가 3.2인 보를 택하였고, 시험체 설치 및 측정 장치도 Fig. 2에 나타나 있다.

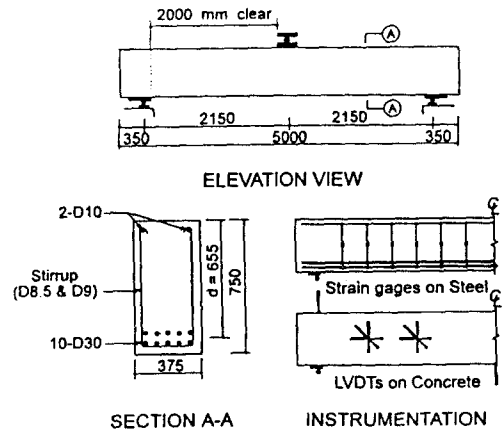


Fig. 2 Details of beam specimens and instrumentation

본 시험은 콘크리트 강도별로 보통강도 콘크리트 시험체는 N-씨리즈, 고강도 콘크리트 시험체는 M-씨리즈, 초고강도 콘크리트 시험체는 H-씨리즈로 구분하였으며, 각 시험체별 특성은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Details of beam specimen

| Specimen | f_c (MPa) | Shear reinforcement | | |
|--------------------------------------|----------------|---|------------------------------|--|
| | | Stirrup size and spacing (mm) | A_v/A_{sb} (MPa) | Comments |
| N-Series N-0 N-1 N-2 N-3 | 36 | - 8.0 mm dia @ 325 9.5 mm dia @ 465 9.5 mm dia @ 325 | 0.00 0.35 0.35 0.50 | no stirrups min A_v , $s=d/2$ min A_v , $s=0.7d$ > min A_v , $s=d/2$ |
| M-Series M-0 M-1 | 67 | - 8.0 mm dia @ 325 | 0.00 0.35 | no stirrups KCI 88, ACI 83, ACI 89, CSA 84 |
| M-2 M-3 | | 9.5 mm dia @ 325 9.5 mm dia @ 230 | 0.50 0.70 | min A_v , $s=d/2$ CSA 94 min A_v , $s=d/2$ ACI 89 min A_v , $s<d/2$ |
| H-Series H-0 H-1 | 87 | - 8.0 mm dia @ 325 | 0.00 0.35 | no stirrups KCI 88, ACI 83, ACI 89 |
| H-2 H-3 | | 9.5 mm dia @ 270 9.5 mm dia @ 160 | 0.80 1.00 | CSA 84 min A_v , $s=d/2$ JCI 86, CSA 94 min A_v , $s<d/2$ ACI 89 min A_v , $s<d/2$ |

* Lower amount of minimum A_v provided when $\sqrt{f'_c} \leq \sqrt{69}$ MPa in design

† Upper amount of minimum A_v provided when $\sqrt{f'_c} > \sqrt{69}$ MPa in design

Note : f_y for all stirrups is 430 MPa.

3.2 콘크리트 및 철근의 특성

콘크리트의 압축강도 실험결과에서 보통강도 N-씨리지는 36 MPa, 고강도 M-씨리지는 67 MPa, 초고강도 H-씨리지는 87 MPa의 평균압축강도를 보였다.

각 시험체의 인장철근으로 D30을 2열로 총 10개씩 배근하여 철근비 0.028을 갖도록 하였으며, 전단철근으로는 단순하면서도 가장 보편적인 U자형의 스티럽을 선택하였고, 정확한 전단철근량을 산정하기 위하여 D8, D9.5의 두종류의 단면을 택하였으며, 스티럽의 앵커를 위해 보 상부에 2개의 D10을 배치하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 전단거동

Fig. 3의 압축강도 36 MPa를 갖는 보통강도 콘크리트 보의 경우, 실험체 N-1은 전단균열 발생 이후에 전단스티럽의 변형경화가 시작되기 이전에도 적절한 전단내력을 보유하고 있음을 보여준다. Table 2에서 보는 것처럼, 스티럽 항복시 전단력, V_y 와 전단균열 발생시

의 전단력, V_{cr} 의 비가 시험체 N-2는 1.23으로 훨씬 작은 V_{cr} 을 보였고, 또한 다른 시험체와는 상이한 형태의 전단 파괴를 보였다. 이 시험체는 Fig. 4에서 보는 것처럼 보 들레에 하중작용시 비틀림을 유발하였음을 보여주는 나선형태의 균열이 발생하였음을 알 수 있다. 이 시험체는 낮은 V_{cr} 때문에 V_y/V_{cr} 가 1.62이다. 실험체 N-3는 규준에서 요구하는 최소전단철근 보강량 이상으로 보강되어 ($A_v = 0.50 b_w s/f_y$) 다소 과보수적인 결과를 나타내고 있다.

Table 2. Shear at cracking and stirrup yield and crack widths at "service" load

| Specimen | V_x (kN) | V_y (kN) | V_u/V_y | V_u permitted by ACI (kN) | $V_{service}$ | W_{max} at $V_{service}$ (mm) |
|----------|---------------|---------------|-----------|--------------------------------------|---------------|---------------------------------------|
| N-0 | 245 | - | - | 123* | 74 | - |
| N-1 | 260 | 320 | 1.23 | 332 | 199 | - |
| N-2 | 200 | 325 | 1.62 | 332 | 199 | - |
| N-3 | 254 | 349 | 1.37 | 369 | 221 | - |
| M-0 | 269 | - | - | 166* | 101 | - |
| M-1 | 269 | 316 | 1.09 | 422 | 253 | - |
| M-2 | 269 | 383 | 1.32 | 459 | 275 | - |
| M-3 | 289 | 463 | 1.60 | 508 | 305 | 0.15 |
| H-0 | 311 | - | - | 171* | 103 | - |
| H-1 | 311 | 334 | 1.07 | 428 | 257 | - |
| H-2 | 311 | 480 | 1.54 | 489 | 293 | - |
| H-3 | 334 | 518 | 1.54 | 628 | 377 | 0.25 |

* Nominal resistance for member without stirrups equals 0.5 V_u .

압축강도 67 MPa를 갖는 4개의 고강도 콘크리트 시험체의 전단력과 주인장 변형률과의 관계를 보면, 시험체 M-1은 콘크리트 압축강도가 67 MPa로써 엄밀하게는 69 MPa 보다 작기때문에 KCI88, 1983 ACI 규준과 1984 CSA 표준, 또한 1989 ACI 규준에 따라 최소전단철근을 보강한것으로, 이 시험체는 연성거동을 보이고 전단균열 발생 이후 다소의 전단내력을 보유하고 있지만, 만일 스티럽이 그림에서와 같은 상당한 정도의 변형경화를 나타내지 않았다면 보유전단내력이 감소될 수도 있었음을 시사하고 있다.

1994 CSA 표준에 따라 최소전단철근을 보강한 시험체인 M-2는 연성 거동을 나타내었고, V_y/V_{cr} 의 비가 1.32를 나타내었다. 1989 ACI 규준에 따라 최소전단철근을 보강한 시

험체인 M-3의 경우는 원래 M-씨리즈의 콘크리트 시험체의 설계기준강도로 70 MPa를 정하였었지만 압축강도 시험결과 67 MPa가 나왔으므로 이 시험체의 전단철근 보강은 콘크리트의 압축강도가 기준치가 되는 69 MPa보다 크다고 가정하여 보강된 것이므로 V_y/V_{cr} 값이 다소 과보수적인 1.60을 나타내고 있음을 알 수 있다.

87 MPa의 압축강도를 갖는 4개의 초고강도 콘크리트의 시험체의 전단거동의 경우, 시험체 H-1은 최초의 전단균열을 발생시키는 전단력, V_{cr} 보다 7% 상향된 값에서 전단스터럽이 항복하는 것을 보여주고 있다.

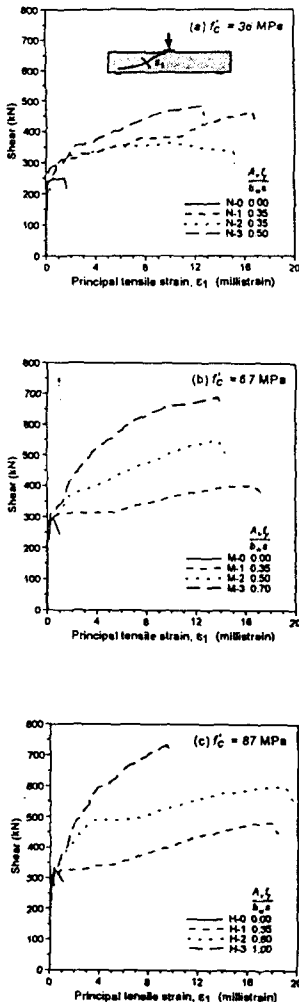


Fig. 3 Shear force versus principal tensile strain responses

1994 CSA 표준과 1989 ACI 규준에 상응하는 전단보강을 한 시험체인 H-2 와 H-3은 전단균열 발생 후, 두 실험체 모두 V_y/V_{cr} 의 비율이 1.54로써 상당한 전단내력을 보유하고 있음을 알 수 있다.

4.2 사용하중하의 전단균열

고강도 콘크리트는 균열 표면이 매끄러우며, 골재 상호간의 부착력을 격감시켜 콘크리트의 전단저항 능력이 떨어지게 된다. 골재 상호간의 부착력이 격감되기 때문에, 보다 큰 다우웰 힘은 종방향 인장철근에 발생하게 된다. 이러한 큰 다우웰 힘은 고강도 콘크리트에서 국부적으로 집중되는 큰 부착응력과 함께 전단 균열이 종방향 인장철근을 가로지르는 지점에서 상당한 부착-활렬응력을 발생시키게 된다. 이러한 합성된 효과는 Fig. 4에 시험체 M-1처럼 종방향 인장철근의 활렬균열로 인한 취성적인 거동을 나타내는 것을 알 수 있으며, 또한 바로 취성적인 전단 파괴를 유도할 수 있다.



Fig. 4 Observed crack patterns in specimens after failure

각 규준에 준하여 전단보강을 한 9개 시험체의 극한전단력과 최대 전단균열폭과의 관계가 Fig. 5에 나타나 있다.

4.3 극한전단력의 추정

수정 압축장이론⁽⁷⁾(Modified Compression Field Theory, MCFT)에 기반을 둔 컴퓨터 프로그램 "RESPONSE"와 1989 ACI 규준을 사용하여 12개 모든 시험체의 극한전단력을 예측한 추정치가 Table 3에 나타나 있다.

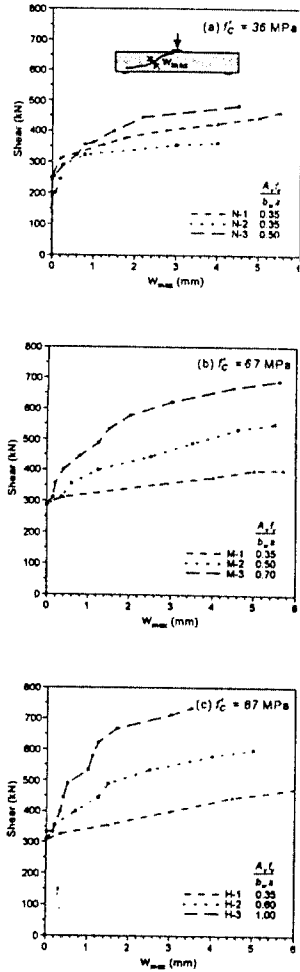


Fig. 5 Shear force versus maximum shear crack width

Table 3. Comparison of predicted and measured shear capacities for specimens

| Specimen | V _{test} (kN) | V _{MCFE} (kN) | V _{test} /V _{MCFE} | V _{ACI} (kN) | V _{test} /V _{ACI} |
|----------|------------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| N-0 | 249 | 253 | 0.98 | 246 | 1.01 |
| N-1 | 457 | 391 | 1.17 | 332 | 1.36 |
| N-2 | 363 | 368 | 0.99 | 332 | 1.09 |
| N-3 | 483 | 420 | 1.15 | 369 | 1.31 |
| M-0 | 296 | 305 | 0.97 | 336 | 0.88 |
| M-1 | 405 | 437 | 0.93 | 422 | 0.96 |
| M-2 | 562 | 455 | 1.21 | 459 | 1.20 |
| M-3 | 689 | 538 | 1.28 | 508 | 1.36 |
| H-0 | 327 | 331 | 0.99 | 342 | 0.96 |
| H-1 | 483 | 475 | 1.02 | 426 | 1.13 |
| H-2 | 596 | 539 | 1.11 | 489 | 1.22 |
| H-3 | 721 | 729 | 0.99 | 626 | 1.15 |

4.4 각 규준에 대한 평가

Fig. 6은 국내의 콘크리트시방서, 즉 콘크리트 강도와는 관계없이 $A_v f_y / b_w s$ 가 0.35 MPa인 최소전단철근 보강을 한 시험체의 결과를 나타내고 있다. 이 시험체들의 결과는 콘크리트의 강도가 상당히 다양함에도 불구하고, 놀랍게도 비슷한 결과를 보였다. 이 시험체들은 고강도 콘크리트의 잇점을 이용하지 못하였으며, 전단균열 발생 이후의 적절한 전단강도를 보유하기 위해서 전단스터럽의 변형경화에 의존하고 있음을 알 수 있다.

1994 CSA 표준에 따른 최소전단 보강량을 갖는 시험체들은 콘크리트 강도가 증가함에 따라 극한전단력도 더불어 증가하는 결과를 얻었고, 전단스터럽의 변형경화에 의존할 필요도 없이 전단균열 발생이후의 적절한 전단내력을 보유하였다.

최소전단철근 보강에 관한 1989 ACI의 두 단계의 레벨 규준에 따른 시험체의 전단거동을 보면, 이 두 단계중 윗 단계의 레벨로 전단철근이 보강된 경우는 전단균열 발생 이후 상당한 보유전단내력을 가짐을 알 수 있으며, 아랫 단계의 레벨로 전단철근이 보강된 경우, 즉 $A_v f_y / b_w s$ 가 0.35 MPa 인 경우는 단지 전단스터럽의 변형경화가 상당부분 진행된 이후에야 적절한 전단내력을 보유할 수 있었다.

Fig. 7은 시험체의 전단능력에 최소전단철근 보강이 미치는 영향을 결정하기 위한 다른 접근 방법을 보여주고 있다.

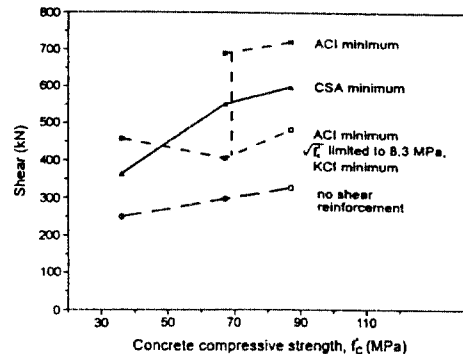


Fig. 7 Ultimate shear capacities of specimens

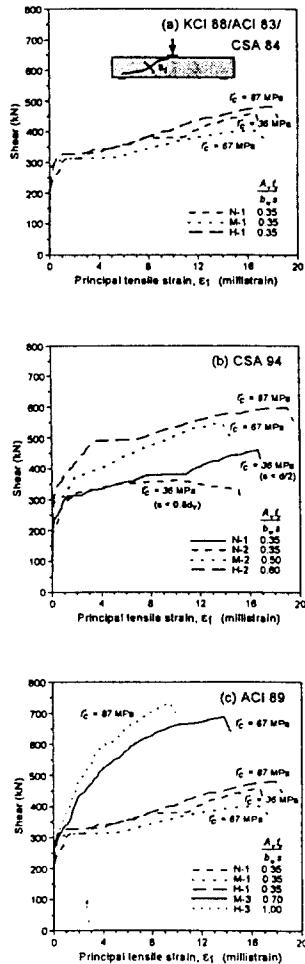


Fig. 6 Influence of minimum shear reinforcement

5. 결론

(1) 고강도 및 초고강도 콘크리트 보의 경우 콘크리트 강도와 무관하게 일정한 값의 최소 전단철근량을 규정한 국내의 콘크리트 표준시방서의 경우에는 낮은 보유전단내력등 전단의 유리한 거동을 기대할 수 없으므로 콘크리트 압축강도의 증가에 따라 최소 전단철근량도 더불어 증가해야 됨을 알 수 있다.

(2) 1994 CSA 시방서는 최소전단철근에 관한 규정식에 콘크리트 압축강도의 평방근을 포함함으로써 콘크리트의 고강도화로 인해 요구되어지는 최소전단철근 보강량을 점진적으로 증가하도록 하고 있으며, 전단균열 발생이후에

도 적절한 전단보유내력을 갖추고 있음을 나타낸다.

(3) 콘크리트의 압축강도가 69 MPa까지는 1989 ACI 기준식은 콘크리트의 압축강도의 영향을 고려하고 있지 않지만, 69 MPa 이상일 경우는 69 MPa를 초과하는 강도를 고려하느냐의 여부에 따라 두가지 방법을 규정하고 있다. 69 MPa를 초과하는 강도를 고려하는 경우에는 상당히 많은 양의 전단철근이 보강되도록 규정되어 있어 전단균열 이후의 보유전단내력이 크게 증가하지만 과보수적 설계가 될 수 있으며, 만일 69 MPa이하로 제한한다면 전단균열 이후의 부족한 보유전단내력으로 인해 적합하지 않을수도 있음을 알 수 있다.

(4) 콘크리트 압축강도의 증가를 고려하여 적절하게 최소전단철근을 보강한 경우는 취성적인 전단-부착 파괴를 야기할 수 있는 활렬균열을 제어하는데 유리함을 알 수 있다.

참고 문헌

1. 윤영수, "철근콘크리트 보의 고강도화에 따른 전단거동에 관한 연구", 한국콘크리트학회지, Vol. 6, No. 6, 1994, 12, pp. 190-198.
2. 윤영수, "고성능 RC보의 최소전단철근기준 평가에 관한 실험적 연구", 대한토목학회지, 제 15권, 제 4호, 1995. 11, pp.1511-1519.
3. 콘크리트 표준시방서, 건설부, 1988, 12, pp.147.
4. 일본콘크리트 표준시방서, 1986 (1991년 개정).
5. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318M-89/ACI 318R-89)", American Concrete Institute, Detroit, 1989, 353pp.
6. Canadian Standard Association, "Design of Concrete Structures", CSA A23.3-94, Rexdale, Ontario, 1994, 199pp.
7. Collins, M.P. and Mitchell, D., "Prestressed Concrete Structures", Prentice Hall, 1991, 766pp.