

# 철근콘크리트보의 전단균열강도에 대한 콘크리트강도의 영향

## Effect of Concrete Strength on Shear Cracking Strength in Reinforced Concrete Beams

김 우 \*  
고 광 일 \*\*  
김 대 중 \*\*\*

### Abstract

The effect of concrete strength on shear cracking strength in reinforced concrete beams is investigated analytically. The quantitative response of reinforced concrete beam-end-part with varying concrete stiffness, which is a function of concrete compressive strength, is examined utilizing a finite element method. The result indicates that the severer shear stress localization/concentration takes place in the beam having higher concrete strength. Thus the increase ratio of shear cracking strength with respect to concrete compressive strength decreases as the concrete strength becomes higher.

### 1. 서 론

근래에 철근콘크리트 구조물 건설에 고강도 콘크리트 사용이 급속히 증가하는 추세이다. 이러한 고강도 콘크리트를 사용함에 따라 아직까지 해결되지 않은 문제들이 많이 있는데, 그 중 하나가 보의 전단에 관한 것이다. 현재 사용되고 있는 시방서의 전단강도  $V_u$ 는 콘크리트의 전단지지력  $V_c$ 와 전단철근의 전단지지력  $V_s$ 의 합으로 되어있다. 이 중에서 콘크리트강도가 변화함에 따라 달라지는 것은  $V_c$ 이다. 기존의 시방서에서의 콘크리트의 전단지지력  $V_c$ 는 전단균열강도에 근거하고 있다. 그런데 ACI Code나 우리나라 콘크리트시방서에서의 콘크리트 전단강도  $V_c$ 는 콘크리트강도가 비교적 낮은  $150 \text{ kg/cm}^2$ 에서 약  $350 \text{ kg/cm}^2$ 의 철근콘크리트보를 실험하여 얻은 자료를 기준으로 추출된 것이다. 그러나 최근에 이보다 높은 강도의 고강도 콘크리트가 특수구조물등의 건설에 사용되어지고 있을 뿐만 아니라, 향후 더욱 일반화될 추세이다. 따라서 현재 시방서의  $V_c$ 에 관한 규정이 타당한가를 검토해야할 단계에 와 있다고 하겠다.

더우기 최근에 고강도 철근콘크리트보의 실험결과(그림 1)에 의하면 콘크리트강도가 증가할수록 시방서에 의한 예측  $V_c$ 의 안전율이 감소하여 1 이하가 된다고 보고되었다(1).

지금까지 콘크리트의 압축강도  $f'_c$ 와 콘크리트보의 전단지지력  $V_c$ 와의 상관관계에 대하여 많은 논란이 되어오고 있다. 현재 사용되고 있는 시방서에서는 철근콘크리트보의 공칭전단지지력  $V_c$ 는  $(f'_c)^{0.5}$ 에 비례한다고 규정하고 있다. 이것은 기초탄성역학에 근거하여, 보에

서의 조합응력에 의한 주인장응력이 콘크리트의 한계인장응력  $f'_t$ 에 도달하면 전단균열이 발생한다는 논리에 입각한 것으로서, 콘크리트의 인장강도  $f'_t$ 는 압축강도  $f'_c$ 의 1/2승에 비례하고 있다는 사실에 바탕을 두고있는 것이다. 그러나 여러학자들은 많은 실험결과에 근거하거나 또는 이들 결과들을 통계적으로 분석하여서 콘크리트의 전단지지력  $V_c$ 는  $(f'_c)^{0.33}$ 에 비례한다는 사실이 더 정확하다고 주장하고 있고, 또 이렇게 받아 들여지고 있는 추세라고 할 수 있다(3, 4).

이와 관련하여 본 저자들은 위의 문제에 대한 좀 더 명확한 현상을 파악하기 위해 콘크리트보의 전단강도  $V_c$ 와 콘크리트의 인장강도  $f'_t$ (여기서 인장강도는 할열강도로 측정함)와 관계를 실험을 통하여 그림 2와 같은 결과를 얻은 바 있다(2). 일반적으로 기초역학에 의해 콘크리트보에서의 전단균열은 조합응력에

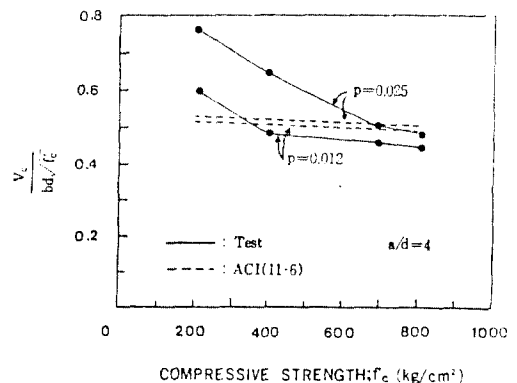


Fig. 1 Effects of Concrete Compressive Strength on the Shear Strength

\* 전남대학교 토목공학과 조교수  
\*\* 여수수산대학 해양토목공학과 조교수  
\*\*\* 전남대학교 토목공학과 석사과정

의한 사인장응력이 한계인장강도  $f_t$ 에 도달하면 발생한다고 인식되고 있다. 따라서 이 개념에 의하면  $V_c$ 는  $f_t$ 에 정비례 관계가 성립되어야 할 것이며, 그림 2에서의  $v_c/f_t$ 는 상수로 표시되어야 할 것이다. 그러나 그림 2에서 보인 것처럼  $v_c/f_t$ 는  $f_t$ 가 증가함에 따라 현저하게 감소하고 있다.

따라서 본 연구에서는 위와 같은 현상에 대한 근본적인 원인을 밝히고,  $V_c$ 에 대한  $f_t$ 의 영향을 정확히 규명하고자 한 것이다.

## 2. 전단균열 메카니즘

지금까지 휨모멘트와 전단력이 동시에 작용하고 있는 철근콘크리트보의 전단파괴거동을 파악하기 위해 전세계적으로 무수히 많은 실험을 하였다. 이러한에도 불구하고 지금까지 보의 전단파괴메카니즘이 명쾌하게 규명되어져 있지 않다. 위와 같이 많은 실험에서 공통적으로 관찰된 전단균열의 발생과정은 다음과 같다. 즉, 보에 작용하는 수직하중이 증가함에 따라 보의 중앙부부터 휨균열이 발생하여 점차 전단시간 중앙부위까지 휨균열이 확대된다. 그후 어떤 하중단계에서 전단시간의 맨 바깥쪽 휨균열 옆과 주철근의 바로 위에서 전단균열이 갑자기 발생한다. 위와 같은 관찰내용을 근거로 본 연구에서는 휨균열이 전단시간 중앙부 근처까지 발생한 후의 전단균열 발생 직전의 상태(그림 3(a))일때의 전단균열 발생예정지역(critical zone; 임계지역)의 응력상태를 개념적으로 규명하여 보았다.

하중을 받아 몇개의 휨균열이 생긴 철근콘크리트보를 그림 3(a)와 같이 고려하면 주철근의 인장력  $T$ 와 그림 3(b)의 단부요소  $pp'mn'$ 의 평균조건으로부터 주철근과 평행하고 근접한 면

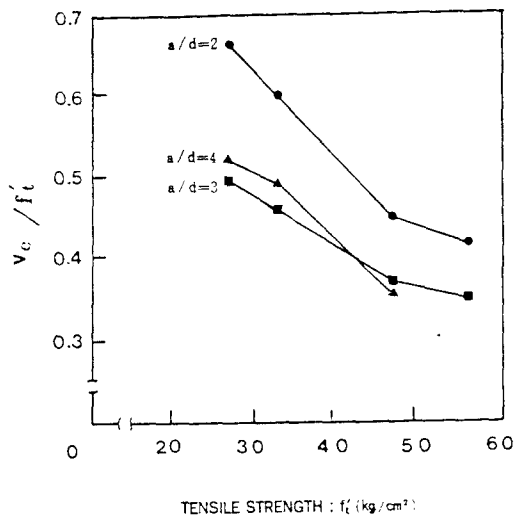


Fig. 2 Shear Cracking Strength Plotted against Tensile Strength

$pp'$ 의 평균전단응력  $v$ 는 다음과 같다.

$$v = \frac{T}{b a_c} \quad (1)$$

그러나 식 (1)에 의한 전단응력은 철근과 콘크리트의 상이한 재료의 합성작용때문에 전단응력  $v$ 의 정확한 해석은 어렵다.

### 2-1 부착응력분포에 의한 효과

주철근의 인장력  $T$ 는 부착력에 의하여 콘크리트에 전달되고  $pp'$ 면의 전단응력은 보의 길이방향과 폭방향에 따라 변하나, 본 연구에서는 보의 폭에 대해서 일정하다고 가정하고 보의 길이방향에 따른 전단응력의 분포만 고려한다. 전단면  $pp'$ 가 주인장철근에 근접하면, 전단응력은 부착응력으로 인하여 발생하므로 이 전단면의 전단응력분포는 부착응력분포와 거의 동일하게 되어 그림 3(c)와 같은 형태가 될 것이다. 또한, 콘크리트에서의 전단응력은 철근과 콘크리트 사이의 부착력에 의해 기인한 것이기 때문에 보의 길이방향의 분포형태는 그림 3(d)와 같은 형태가 될 것이다.

위와 같은 이유로 임계지역(그림 3(a))에서의 전단응력의 집중화가 일어난다. 바로 이것이 실험에서 관찰된 전단균열발생점과 일치하고 있다. 여기서 중요한 것은 휨균열이 발생하기 전에는 철근의 길이방향에 따른 부착응력은 선형분포를 이루고 있으나, 휨균열  $n \cdot p'$ 가

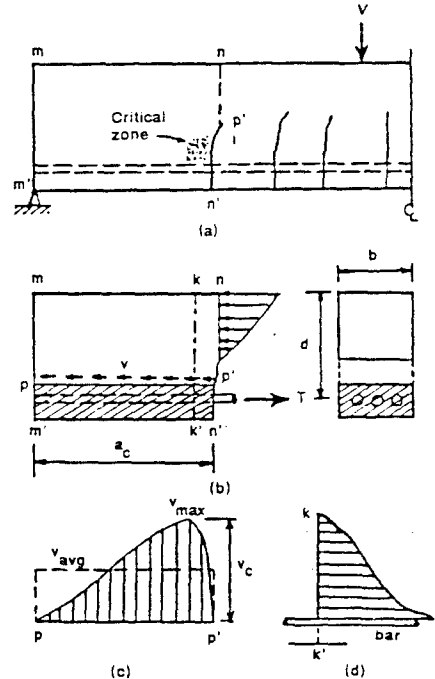


Fig. 3 Shear Stress in Reinforced Concrete Beam

발생하면 부착응력의 본포는 급격하게 변화하여 임계지역에서의 전단응력 집중현상이 일어나고 있다는 사실이다.

전단균열이 발생하는 임계지역에서의 전단응력  $v_c$ 는 그림 3(c)의 최대전단응력  $v_{max}$ 와 일치한다고 볼 수 있다. 따라서 확대계수  $m_b$ 를  $v_{max}/v_{avg}$ 로 정의 한다면, 임계지역에서의 전단응력  $v_c$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v_c = m_b \frac{T}{b a_c} \quad (2)$$

### 2-2 아취작용에 의한 효과

휨균열이 발생하기 전의 철근콘크리트보의 철근길이에 따른 인장력은 합성단면을 갖는 보의 기초적인 이론으로 계산할 수 있지만 휨균열이 생긴 후에는 철근의 인장력본포는 복잡하게 된다.

일반적으로 내부모멘트 팔길이 (arm length)는 철근비  $p$ 의 함수로 되어 있는데, 순수휨구간에서는 관례적인 방법으로 계산한 인장력  $T$ 는 실험 측정치와 비슷하다. 그러나 전단구간에서의 팔길이는 계산치보다 더 작아지는 경향이 있다. 그림 4는 휨균열이 발생함에 따라 콘크리트 압축응력분포의 형태가 등분포화 되어지고, 중립축의 위치는 아래로 이동하고 있는 것을 보이고 있다. 이것은 이미 알려진 아취작용 때문이다. 따라서 압축응력의 합력점과 철근중심간의 거리로 정의된 모멘트팔길이는 작아진다. 이러한 이유에서  $M/z_o$ 로 계산되는 철근의 인장력  $T$ 는 증가하게 된다. 따라서 전단구간에서 실제 철근의 인장력  $T$ 는 계산치보다 더 크게 된다. Arch작용으로 인한 팔길이  $z$ 의 감소때문에 철근의 인장력  $T$ 가 증가하는 것은 계수  $m_a (=z_o/z_c)$ 를 사용하여 생각할 수 있다. 여기서  $z_c$ 는 실제 팔길이이고,  $z_o$ 는

관례적인 이론으로 계산한 값이다. 그러면 실제의 인장력  $T$ 는  $m_a T_o$ 로 나타낼 수 있다. 여기서  $T_o$ 는 관례적인 이론으로 구한 철근의 인장력이다. 따라서 식 (2)는

$$v_c = m_a m_b \frac{T_o}{b a_c} \quad (3)$$

집중하중이 작용하고 있는 단순보에서, 지점에서  $a_c$ 만큼 떨어진 단면의 휨모멘트는  $V \cdot a_c$ 로 나타낼 수 있다. 이 단면에서 관례적인 이론으로 계산된 철근의 인장력  $T_o$ 는 다음과 같다.

$$T_o = \frac{V a_c}{z_o} \quad (4)$$

여기서  $V$ 는 전단구간에 작용하는 전단력이다. 식 (4)를 식 (3)에 대입하면 임계지역에서의 전단응력은 다음과 같다.

$$v_c = m_a m_b \frac{V}{b z_o} \quad (5)$$

윗 식은  $m_a$ 와  $m_b$ 의 효과에 의해서 임계지역에서의 전단응력이 상당히 확대되고 있는 것을 보여주고 있다. 전단에 파괴되는 구형 콘크리트 보에서의 확대계수의 곱인  $m_a m_b$ 의 값은 3 이상이 될 것이다.

### 2-3 전단균열강도

식 (5)의 전단응력  $v_c$ 가 콘크리트의 한계인장강도  $f_t$ 에 도달하면 임계지역에서 전단균열이 발생한다고 할 수 있다. 따라서 이때의 전단력  $V$ 가 전단균열강도  $V_c$ 일 것이다. 즉, 식 (5)의  $v_c$ 를  $f_t$ 로 치환하여 정리하면, 보의 전단균열강도  $V_c$ 는 다음과 같이 된다.

$$V_c = \frac{1}{m_a m_b} (f_t b z_o) \quad (6)$$

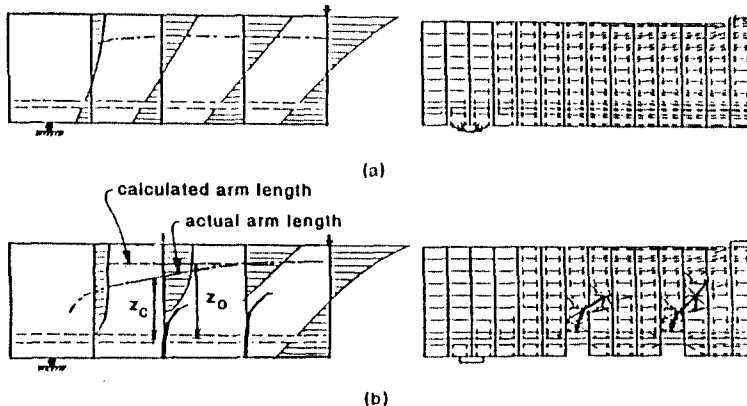


Fig. 4 Reduction of internal moment arm length due to development of arch action

- (a) before flexural cracking
- (b) after flexural cracking

### 3. 콘크리트 압축강도의 영향

앞에서 기술한 전단균열 메카니즘에 의하면, 철근과 인접 콘크리트 사이의 부착(bond)응력의 집중현상(concentration)은 전단균열의 주된 원인이 되고 있다. 그런데 지금까지 부착응력에 대하여 알려진 바에 의하면 고강도 콘크리트일수록 최대부착응력 값이 커지며, 또한 부착응력의 최대점이 하중재하쪽에 근접한다고 알려져 있다. 이것은 탄성론에 근거한다면 탄성계수  $E_c$ 가 서로 다른 두 물질이 합성되어져 있을 때 두 물질의 경계면에서의 전단응력은 두 물질의 상대적인 탄성계수비에 따라 달라진다는 사실과 일치한다. 따라서 본 연구에서는 위와 같은 사실과, 콘크리트의 탄성계수  $E_c$ 는 압축강도  $f'_c$ 의 함수( $E_c = 15000\sqrt{f'_c}$ )라는 사실에 착안하여 콘크리트 압축강도의 변화에 따른  $E_c$ 를 변화시킴으로써 결과되는 전단응력의 본포상태를 유한요소해석에 의해 조사하여 보았다.

#### 3-1 해석 Model

해석 Model용 보는 참고문헌 2에서 실제 실험을 한  $a/d$ 가 3인 보를 선택하였다. 그림 5(a)에 단철근 구형보의 치수를 나타냈다. 철근콘크리트보의 거동을 유한요소로 해석하기는 너무 많은 어려움이 있다. 그래서 본 연구의 목적은 어떤 정밀한 수량을 구하기 위한 것보다는, 합성부재인 철근콘크리트보에서의 탄성계수비의 변화에 따라 보에서의 전단응력의 분포가 어떻게 달라지는가에 대한 개략적인 경향을 연구하기 위한 것이다. 따라서 그림 5(b)와 같이 보의 휨균열에서 지점사이의 부분의 중립축 아래 부분을 분리시킨 보의 단부만을 그림 5(c)와 같이 해석 모델화시켰다.

철근콘크리트보의 거동을 2차원 탄성 평면응력(plane stress) 상태로 나타낼 수 있다는 가정과 철근과 콘크리트 사이는 완전부착상태로 해석하였다. 즉 철근은 폭을 따라 균일하게 본포된 하나의 층으로 이상화시켰으며, 이에 따른 철근의 탄성계수  $E_s$ 를 수정하여 사용했다. 주변수인 콘크리트 탄성계수  $E_c$ 는  $15000\sqrt{f'_c}$ 에 의해 계산하여 사용하였다. 따라서  $f'_c$ 가 200에서  $1000 \text{ kg/cm}^2$ 까지  $100 \text{ kg/cm}^2$ 씩 증가하는데 따른  $E_c$ 는  $2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 에서  $4.7 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 까지 변화시켜 사용하였다. 230개의 4각형 요소(Q4)를 사용하였으며, 작용하중은 철근의 인장력으로서  $1000 \text{ kg}$ 을 모든 경우 동일하게 작용시켰다. 계산에는 Super-Sap 프로그램을 사용하였다.

#### 3-2 결과분석

해석모델의 모든 성질을 일정하게 하고 다만 콘크리트의 탄성계수  $E_c$ 만을 변화시킨 후 단면 a-a (그림 5(c))상의 전단응력의 분포상태를 조사하였다. 그림 6은 콘크리트강도가  $200 \text{ kg/cm}^2$ ,  $600 \text{ kg/cm}^2$ ,  $1000 \text{ kg/cm}^2$ 일때의 단면 a-a 상의 전단응력 본포상태를 나타낸 것이다.

전체적인 본포형태는 철근의 인발부착실험에 의해 구한 본포형태와 대략적으로 일치한다. 즉, 최대전단응력점이 하중작용점 근처에 있으며 콘크리트강도가 클수록 최대전단응력( $V_{max}$ ) 값이 증가하는 경향이 뚜렷히 나타났다. 더우기 평균전단응력과 최대전단응력의 비( $V_{max}/V_{avg}$ )가 2 이상이었다. 이것은 이미 발표된 논문들의 실험결과와 비슷하게 나타나고 있다.

콘크리트의 탄성계수  $E_c$ 의 변화에 따른 단면 a-a상의 전단응력의 본포를 좀 더 조직적으로 파악하기 위해  $V_{max}$  대  $V_{avg}$ 의 비인 확대계수  $m_b$ 를 그림 7에 나타냈다.  $m_b$ 는  $f'_c$ 에 따라 현저하게 변화하고 있음을 알 수 있다.  $f'_c$ 가  $800 \text{ kg/cm}^2$  일때는  $200 \text{ kg/cm}^2$  일때 보다  $m_b$ 가 약 35% 증가되었다.  $f'_c$ 에 따른  $m_b$ 를 회귀분석에 의해 수식화하면 그림 7에서 나타냈듯이, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_b = \frac{V_{max}}{V_{avg}} = (f'_c)^{0.18} \quad (7)$$

식 (6)에서 콘크리트의 인장강도  $f'_c$ 를 기존의 사고대로  $(f'_c)^{0.5}$ 의 함수로 보고, 확대계수  $m_a$ 는  $f'_c$ 와는 상관이 없는 함수로 간주할 수 있을 것이다. 위와 같은 가정하에서 식 (6)의  $m_b$ 를 식 (7)의  $(f'_c)^{0.18}$ 로 치환하면, 철근콘크리트 보에서의 전단강도  $V_c$ 와 사용한 콘크리트의 압축강도와 관계는,

$$V_c \propto (f'_c)^{0.32} \quad (8)$$

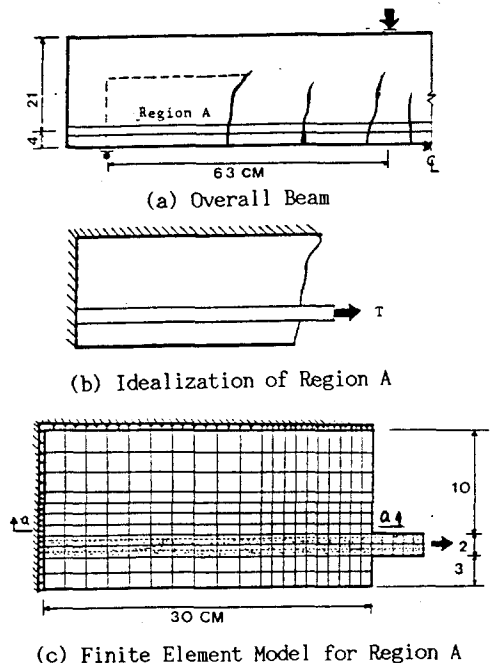


Fig. 5 Analytical Model to Study on Mechanism of Bond-induced Shear Stress

로 나타낼 수가 있다. 놀랍게도 식 (8)은 참  
고문헌 3과 4에서 주장하는 내용 ( $V_c \propto$   
 $(f'_c)^{0.33}$ )과 거의 일치하고 있다.

결론적으로 그림 2에서 보인 것처럼, 전단강  
도  $v_c$ 가 콘크리트의 인장강도에 비례하지 않  
고, 고강도일수록 전단강도의 증가율이 둔화되  
어지는 주된 이유는 부착응력의 극부화 또는  
집중화(localization/concentration)가 심화되  
기 때문이라고 할 수 있을 것이다.

그러나 본 해석에서는 탄성과 완전부착으로  
이상화시켰기 때문에, 실제 보에서의 소성 또  
는 미세균열에 의한 응력집중점에서의 응력이  
완현상을 고려하지 못한 문제점들을 포함하고  
있고, 또 단면  $k-k'$ (그림 2(d))상의 전단응력  
분포를 보면 깊이방향에 따라 심하게 변화하기  
때문에, 식 (7)에서의  $f'_c$ 에 대한 승수값 0.18  
은 다소간의 차이가 있을 것이다. 그러나 이  
러한 경향만은 확실하다고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

철근콘크리트보에서 전단강도(전단균열강도)  
 $V_c$ 가 콘크리트의 인장강도에 비례하지 않는 주  
된 이유는, 콘크리트 압축강도에 따른 탄성계  
수가 변화하기 때문에 철근과 콘크리트 사이의  
부착응력의 분포가 변화하기 때문이다. 즉,  
고강도 콘크리트보일수록 전단응력의 극부화  
또는 집중화(localization or concentration  
of shear stress)가 심화되기 때문에  $f'_c$ 의 증  
가에 따른  $V_c$ 의 증가율이 둔화되어진다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Elzanaty, A.H., Nilson, A.H., and  
Slate, F.O., "Shear Capacity of Reinforced  
Concrete Beams Using High-Strength  
Concrete," ACI Journal, Proceedings V.83,  
No.2, Mar-Apr. 1986, pp.290-296.
- (2) 고광일, 김 우, "고강도 철근콘크리트보의  
전단강도에 관한 연구," 대한토목학회 논문집,  
제9권 제4호, 1989년 12월, pp.63-71.
- (3) 신성우, 이광수, 권영호, 오정근, "전단보  
강이 없는 고강도 철근콘크리트보의 전단역학  
적 거동에 관한 연구," 한국콘크리트학회지,  
제1권 1호, 1989년 9월, pp.67-74.
- (4) Zsutty, T.C., "Beam Shear Strength  
Predicted By Analysis of Existing Data,"  
ACI Journal Proceedings V.65, 1968,  
pp.943-947(Discussions May 1969, pp.432).

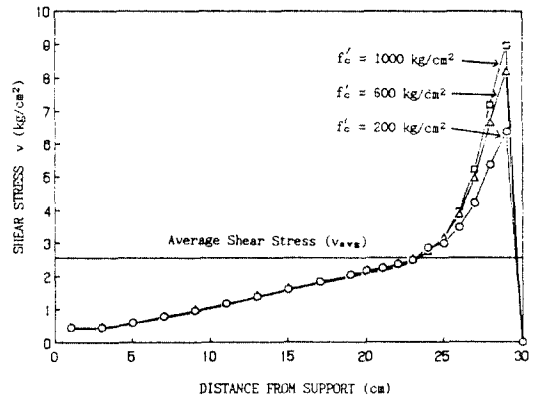


Fig. 6 Shear Stress Distribution

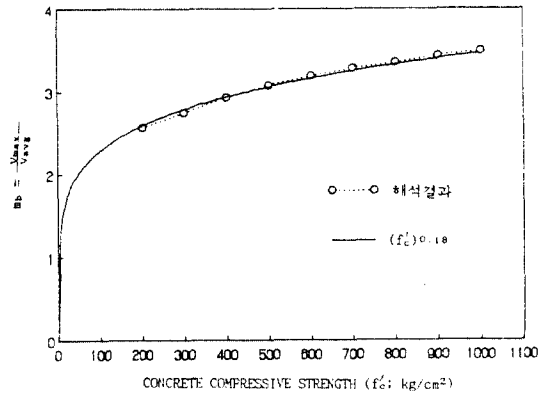


Fig. 7 Variation of Magnification Factor  
 $m_b$  against Concrete Compressive  
Strength