

철근콘크리트 보에서의 아취작용에 대한 연구

Arch Action in Reinforced Concrete Beams

김 우*
Kim, Woo

◦ 김 대 중**
Kim, Dae Joong

ABSTRACT

Four reinforced concrete beams without shear reinforcement were tested statically up to failure to investigate the arch action in reinforced concrete beams. Major variable was the shear span to depth ratio varied from 2 to 4.

Due to the reduction of internal moment arm length by the development of arch action, the measured steel tension was higher than the calculated steel tension.

1. 서론

콘크리트는 다른 재료에 비해 비균질성의 재료이며, 압축강도에 비해 인장강도가 현저히 낮은 재료이기 때문에 사용하중이 작용할 때 이미 균열이 발생되고, 철근과 콘크리트의 합성작용에 기인한 복잡성 때문에 고도의 정밀한 구조역학 및 재료역학을 적용하여 설계하는데 많은 한계성을 지니고 있다.

철근콘크리트 구조물의 가장 기본적인 구성 요소로서 보를 들 수 있다. 보는 일반적으로 휨과 전단에 저항하는 부재이다. 보통 보의 지간이 상대적으로 길 때는 휨에 의해 주로 지배되며, 이때 고전적인 보 이론(*beam theory*)에 의해 해석 및 설계된다. 반면에 보의 지간이 상대적으로 짧을 때는 휨보다는 전단에 의해 지배되며, 이 때의 거동은 훨씬 복잡하게 된다. 탄성균질로 된 보에서의 응력상태 또는 거동을 다룰 때, 고전적 보이론과 전단이론을 적용하면 실제와 같게 접근할 수 있다. 철근콘크리트 보에서도 균열발생전의 상태는 위와 같은 고전이론을 적용하여 접근할 수 있다. 그러나 균열이 발생하고 난 후의 응력상태는 위와 같은 고전이론으로 접근하는

데는 큰 한계를 갖고 있다. 즉, 보에 균열이 발생하고 난 후의 응력분포는 고전이론에 의한 것과는 크게 상이하다.

그림 1은 철근콘크리트 보의 균열발생전과 균열발생후의 응력상태를 유한요소법에 의해 해석한 결과를 나타낸 것이다¹⁾. 이 그림에서 알 수 있듯이, 균열발생전의 휨응력상태는 고전적인 보이론에 의해 계산한 값과 거의 일치하고 있다. 그러나 보의 일부 구간에 균열이 발생하고 난 후의 응력분포는 고전이론에 의한 것과는 크게 상이하다. 특히 그림 1(b)의 단면 a-a는 균열이 없는 구간임에도 불구하고 (단면 b-b와 c-c의 응력상태는 균열단면임으로 응력상태가 변화하리라고 간주하더라도), 응력상태는 고전이론을 적용하여 구할 수가 없는 결과이다. 이것은 이미 잘 알려진 "아취작용"에 의한 것이다. 즉, 철근콘크리트 보에 휨균열이 발생하면 보의 전체적 거동양상은 타이드 아취작용에 의해 지배되게 된다. 이러한 현상은 특히 지간이 짧은 보에서는 매우 현저하게 나타나게 된다.

위와 같은 "아취작용"에 의해 그림 1(b)에 나타낸 바와 같이 실제 내부모멘트팔길이 z_c 는 고전이론에 의해 계산된 내부모멘트팔길이 z_0 보다 작게 되어, 실제 철근의 응력은 환산균열단면에 고전이론을 적용하여 계산한 값보다 크게 된다. 그러나 이와 같은 철근콘크리트보

* 정회원, 전남대학교 토목공학과 부교수

** 정회원, 전남대학교 토목공학과 박사과정

에서의 “타이드 아취작용”에 대한 정량적 또는 중요성 정도는 아직까지 잘 인지되지 않은 실정이며, 설계에도 아직 반영되지 않고 있는 실정이다. 즉, 현재까지 철근콘크리트 보의 철근응력 및 이음, 부착에 대한 설계의 근본이 환산균열단면에 고전적인 보이론을 적용하여 산정하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 아취작용에 의한 콘크리트 압축력선의 궤적(thrust trajectory)을 실험으로 측정하여, 철근콘크리트 보에서 아취작용의 현저함을 보임으로써 가장 기본적인 구조부재인 보의 거동을 좀 더 정확하게 규명하고자 하였다.

2. 실험

2.1 시험체

아취작용에 의한 콘크리트 압축력선의 궤적(thrust trajectory)을 실험을 통해 측정, 연구하기 위해 전단지간대유효높이의 비(a/d)를 주 변수로 하여 총 4개의 시험체를 제작하여 실험하였다. 시험체는 전단지간대유효높이의 비

(a/d)가 2, 2.5, 3 및 4로 하여 그림 2와 같은 제원을 갖는 직사각형 단면의 단순보로서 철근비는 D19 1개를 사용하여 1.146% 였다. 각 보의 명칭은 첫문자는 a/d , 두번째 문자는 하중재하형태인 2점재하를 나타내도록 P로 표시 부여하였다.

시험체 제작을 위해 전단지간내에는 4등분한 간격으로, 순수휨구간내에는 중앙점에 strain gage를 철근에 부착한 후, 부착부위를 두께 1.5mm, 길이 4cm의 플라스틱 파이프로 피복하여 콘크리트 타설 이전에 주철근을 준비 하였다. strain gage 부착위치를 플라스틱 파이프로 피복한 이유는 strain gage 부착위치 근처에서 휨균열이 발생되도록 유도하고, 정확한 철근의 변형을 측정을 위해 콘크리트의 부착응력이 발생되지 않도록 하기 위함 이었다.

2.2 재료 및 실험

시험체 제작때 사용된 콘크리트의 슬럼프는 8cm, 압축강도는 223 kg/cm^2 , 인장강도는 18

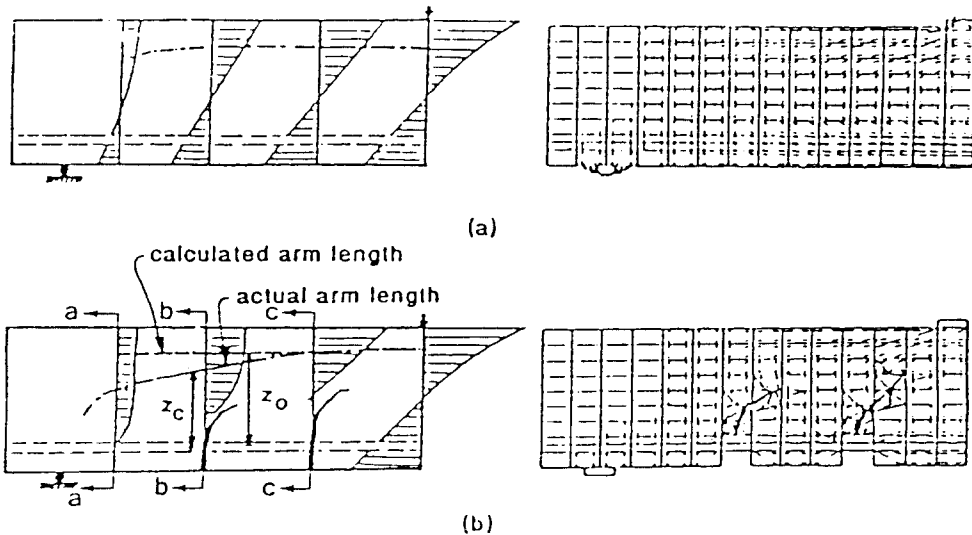


Fig. 1 Reduction of internal moment arm length due to development of arch action by flexural cracking: (a) before flexural cracking; (b) after flexural cracking.

Note that the figures on the right side are a result of finite-element analysis, which shows principal stress trajectories expressed by vector lines.

kg/cm^2 이었다. 본 실험에 사용된 D19 철근의 항복강도는 $3848 kg/cm^2$, 극한인장강도는 $5614 kg/cm^2$ 이었다.

하중재하는 대칭2점하중으로 oil jack을 사용하여 가력하였다. 자료수집은 하중재하시각 sensor에서 출력되는 신호를 자동자료처리 시스템에 의해 자동판독 및 기록되게끔 하였고, 균열의 발생 및 진전과정은 하중의 증가에 따라 추적해서 보 위에 기록하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 균열형상 및 파괴거동

전단지간대유효높이의 비(a/d)가 2, 2.5 및 3인 보는 전단파괴하였고, a/d가 4인 보는 휨파괴하였다. 파괴강도와 균열형상은 표 1과 그림 3에 나타냈다.

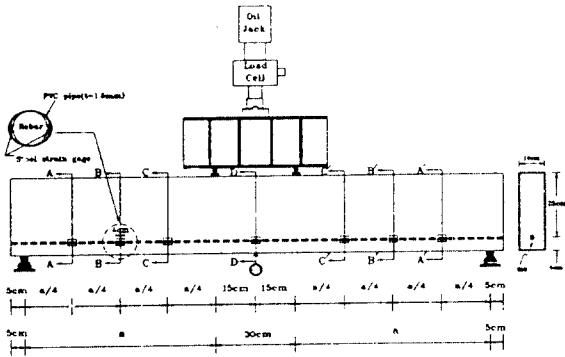


Fig. 2 Specimen Detail

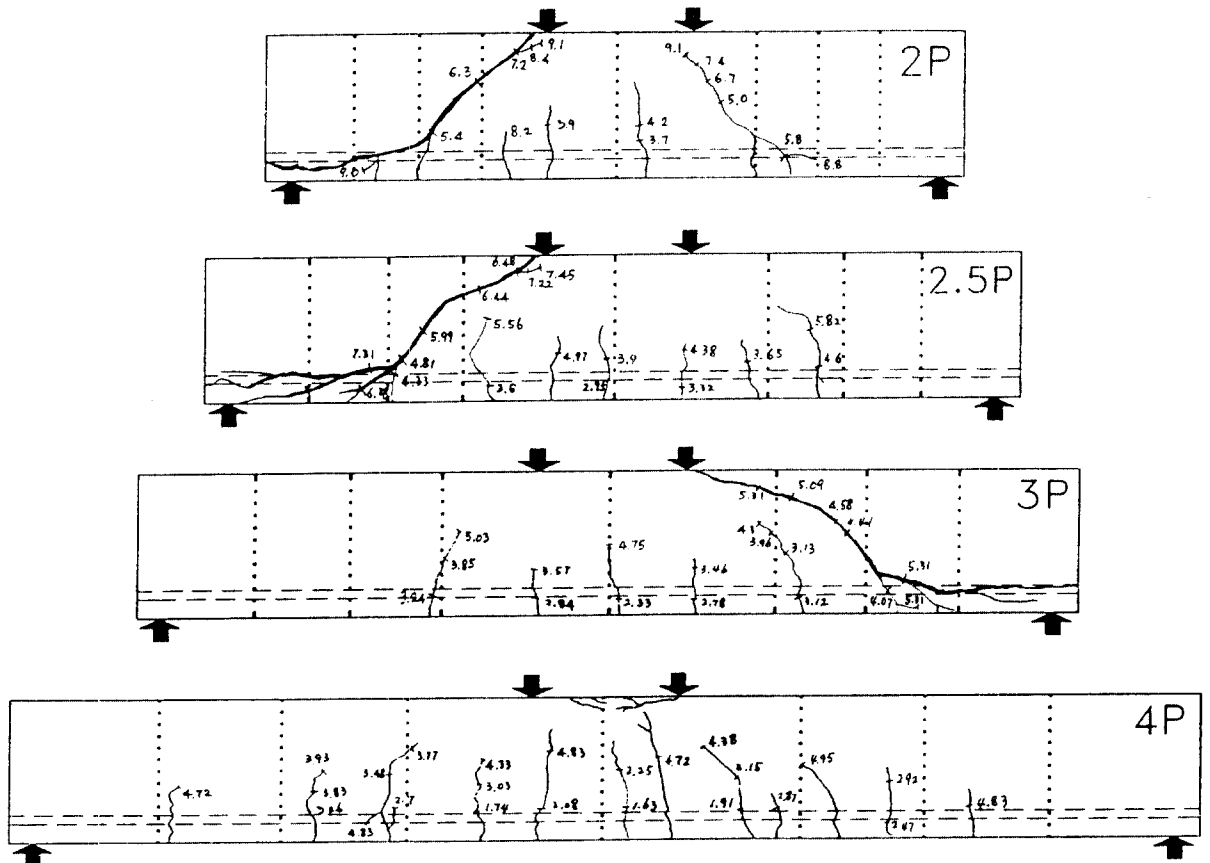


Fig. 3 Crack Configuration

전단파괴한 모든 보에서의 균열발생과 진전은 유사하였다. 하중을 증가시키기에 따라, 먼저 보의 순수휨구간에서 휨균열이 발생하였다. 하중이 더욱 증가함에 따라 보의 전단지간의 중앙부 근처에까지 휨균열이 발생하다가, 어떤 하중에서 급작스럽게 전단균열이 발생하였다. 이 전단균열은 하중이 더욱 증가함에 따라 윗 끝은 하중재하점쪽으로, 아래 끝은 지지점쪽으로 진전되어 파괴에 이르렀다.

Table 1 Summary of Test Results

Specimens	a/d	Shear Cracking Load (kg)	Ultimate Load (kg)	Remarks
2P	2	5000	9220	Shear Failure
2.5P	2.5	4810	7500	Shear Failure
3P	3	4410	5310	Shear Failure
4P	4	-	5060	Flexural Failure

3.2 주인장철근의 인장력

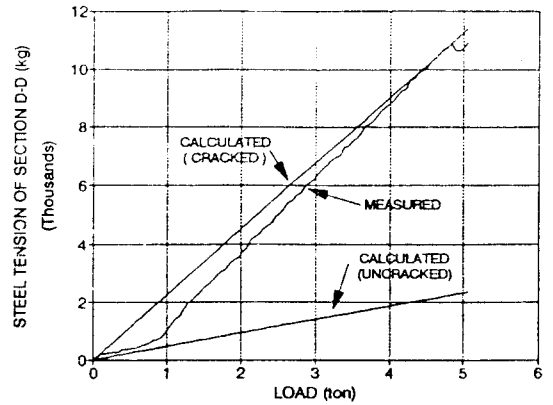
하중증가에 따른 철근인장력 변화양상은 측정단면의 위치(전단지간, 순수휨구간)와 균열 발생여부에 따라 크게 세가지 형태였다.

순수휨구간내에서 측정된 철근인장력은 그림 4(a)에 보인 바와 같이 초기하중단계, 즉 휨균열 발생전의 상태에서는 고전적인 보이론 (beam theory)에 의해 계산한 값과 일치하고, 휨균열이 발생한 후에는 하중이 증가함에 따라 환산균열단면에 고전적인 보이론을 적용하여 산정한 값에 접근 일치하였다.

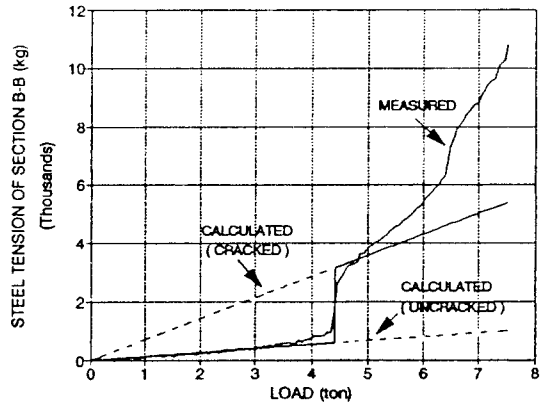
전단지간내 균열단면에서의 철근인장력은 그림 4(b)와 같이 휨균열 발생전의 하중단계에서는 고전적인 보이론에 의해 계산한 값과 일치하다가 하중이 증가하여 휨균열이 발생함과 동시에 급작스럽게 증가한 후 더욱 하중이 증가함에 따라 환산균열단면에 보이론을 적용하여 산정한 철근인장력보다 훨씬 크게 나타

났다.

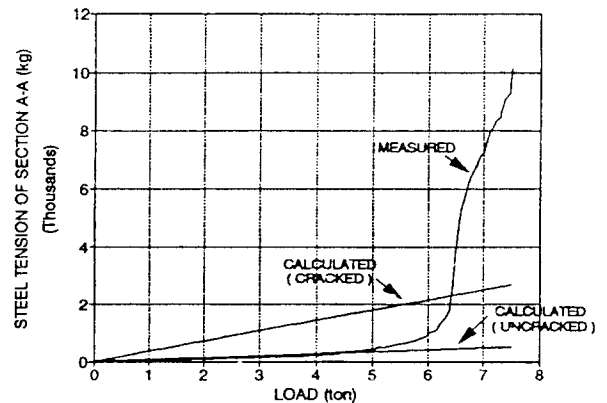
그림 4(c)는 지점쪽에 가까와서 휨균열이 발생하지 않은 단면이나 전단지간내 휨균열근처



(a) steel tension in pure flexural region



(b) steel tension at crack section of shear span



(c) steel tension at uncrack section of shear span

Fig. 4 Steel Tension

의 비균열단면에서의 철근인장력 변화양상이다. 비균열단면임에도 불구하고 보에 다른 지역에서 균열이 발생하고 난 후인 최종하중단계에서는 측정된 철근인장력이 환산균열단면에 보이론을 적용하여 계산한 값보다 크게 나타났다.

이와 같이 전단지간내에서 측정된 철근인장력 변화양상은 순수휨구간내에서와는 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 보에 균열이 발생하고 난 후의 하중단계에서 순수휨구간내의 철근인장력은 계산한 값과 거의 일치하지만 전단지간내의 철근인장력은 계산치보다 훨씬 크게 나타났다.

실험결과로부터 균열의 진전상황과 하중단계에 따라 전단지간내 A, B 및 C 단면의 철근인장력의 상대적 변화추이를 살펴보면 철근

콘크리트 보에서의 타이드 아취현상은 현저하게 나타났다. 그림 5에 전단지간대유효높이의 비가 2.5인 보의 하중단계별 철근길이방향에 따른 철근인장력을 나타냈다. 보 전체에 걸쳐 균열이 발생하지 않은 하중단계($P=2000\text{kg}$)에서는 기초적인 보이론에 의해 예측할 수 있는 바와 같이 철근의 길이방향에 따라 철근인장력은 선형이다. 그러나 하중이 증가하여 몇개의 휨균열이 발생하는 단계($P=4000\text{kg}$, $P=6000\text{kg}$)에서는 휨균열이 발생된 단면에서 철근인장력은 고전적인 보이론에 의해 계산한 철근인장력보다 크게 되어 곡선분포한다. 이와 같은 현상은 아취작용으로 인한 내부모멘트팔길이(internal moment arm length)의 감소 때문에 철근인장력이 증가되었기 때문이다. 특히, 수평균열이 발생되어 파괴되기 직전의 최종하중단계($P=7000\text{kg}$, $P=7500\text{kg}$)에서는 철근의 길이방향에 상관없이 철근인장력은 거의 동일한 값을 나타냈다. 이것은 철근콘크리트 보가 콘크리트로 된 arch rib과 철근으로 된 tie로 구성되어 타이드 아취작용을 하기 때문이다. 즉 철근은 인장재료시험하는 것과 비슷하게 되어 tie에 해당하는 구간의 철근인장력이 동일하게 된 것이다.

3.3 철근콘크리트 보의 아취작용

휨균열이 발생하기 전의 철근콘크리트 보의 철근의 길이방향에 따른 인장력은 복합단면을 갖는 보의 기초적인 이론으로 적절히 예측할 수 있지만 휨균열이 생긴 후에는 철근의 인장력 분포는 복잡하게 된다.

본 연구의 실험결과로부터 살펴본 바와 같이, 균열이 발생한 이후 순수휨구간에서는 계산한 철근인장력은 실험측정치와 비슷하지만 전단지간내의 철근인장력은 계산되어진 철근의 인장력 이상의 값이었다. 그 이유는 그림 1을 보면 휨균열이 진전함에 따라 압축응력분포의 형태가 균등하게 되고 중립축 위치는 아래로 이동하게 되는 아취작용에 기인된 것이다. 그러므로 내부모멘트팔길이는 줄어들고,

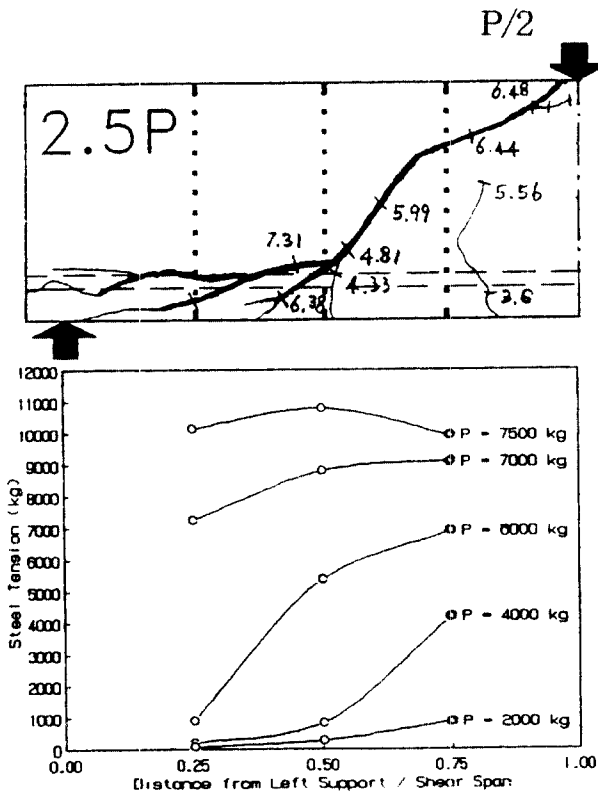


Fig. 5 Variation of Steel Tension along the Span

측정된 철근인장력은 계산치보다 더 커지는 것이다. 따라서 철근콘크리트 보에서의 “아취 거동”은 식 (1)과 같은 확대계수 m_a 를 사용하여 정량적으로 표현할 수 있다.

$$m_a = \frac{T_m}{T_o} \quad (1)$$

where T_m : measured steel tension

T_o : calculated steel tension

경사전단균열은 보통 전단지간 중앙위치에서 발생하므로, 전단지간 중앙에서의 하중증가에 따른 확대계수 m_a 의 변화를 그림 6에 나타냈다. 전단지간 중앙위치에서 측정된 철근인장력이 고전적인 보이론을 적용하여 계산된 철근인장력보다 a/d 가 2인 보의 경우 비균열 하중단계에서는 4배정도, 균열 하중단계에서는 2배정도까지 크게 나타났으며, a/d 가 2.5인 보의 경우 비균열 하중단계에서는 1.5배정도, 균열 하중단계에서는 2배정도까지 크게 나타났다. 이것은 지간이 짧은 철근콘크리트 보에서 아취작용의 현저함을 의미하며, 특히 지간이 상대적으로 짧을수록 아취작용은 현저함을 의미한다.

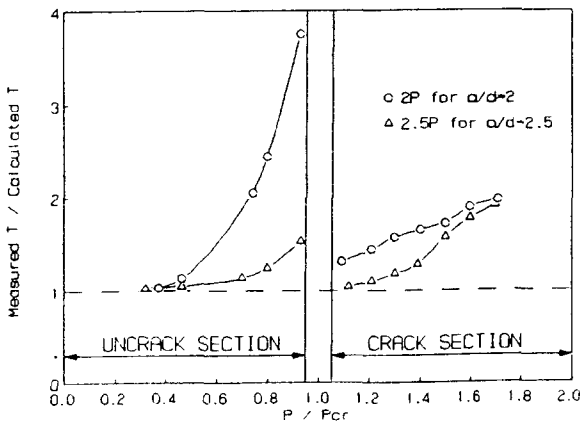


Fig. 6 Magnification of Steel Tension

4. 결론

본 연구를 통하여 도출된 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 순수휨구간내의 철근인장력은 고전적인 보이론을 적용하여 산정한 철근인장력과 거의 일치하지만 전단지간내의 철근인장력은 보의 “아취작용”때문에 계산값보다 훨씬 크게 나타났다.

2) 전단파괴한 시험체의 경우 수평균열이 발생되어 파괴되기 직전인 최종하중단계에서 철근콘크리트보는 타이드 아취작용을 하여 철근의 길이방향에 상관없이 철근인장력은 거의 동일한 값을 나타냈다.

3) 전단지간 중앙위치에서 측정된 철근인장력이 고전적인 보이론을 적용하여 계산된 철근인장력보다 a/d 가 2인 보의 경우 비균열 하중단계에서는 4배정도, 균열 하중단계에서는 2배정도까지 크게 나타났으며, a/d 가 2.5인 보의 경우 비균열 하중단계에서는 1.5배정도, 균열 하중단계에서는 2배정도까지 크게 나타났다.

참고문헌

1. Kim, W., and White, R.N., “Initiation of Shear Cracking in Reinforced Concrete Beams with no Web Reinforcement,” ACI Structural Journal, Vol.88 No.3, May-June 1991, pp.301-308.

2. Bresler, B., and MacGregor, J.G., “Review of Concrete Beams Failing in Shear,” Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.93, No.ST1, Feb. 1967, pp.343-372.

3. Kani, G.N.J., “The Riddle of Shear Failure and Its Solution,” ACI Journal, Vol.61, No.4, Apr. 1964, pp.441-467.