

R/C 연속보의 아치작용에 대한 연구

Arch Action in Continuous Reinforced Concrete Beams

김준성* 김대중** 김 우***
Kim, Joon-seong Kim, Dae-joong Kim, Woo

ABSTRACT

In this study, 9 reinforced concrete(RC) continuous beams were tested to investigate the arch action. By measuring longitudinal steel strains during the whole loading stages up to failure, the development of arch action is evaluated. Variables included are span length, longitudinal steel ratio and the presence of stirrups. As a result, it was known that measured steel tension in the span is substantially higher than the conventionally calculated values, and it was appeared that near the middle of the shear span the measured values exceeded the calculated values by factors of up to 1.4 or more.

1. 서론

철근콘크리트 보에서 균열 발생 이전의 응력상태는 탄성 보이론(elastic beam theory)으로 쉽게 설명할 수 있으며, 이때 휨응력은 보 깊이에 따라 선형 분포한다. 이러한 보에서의 중립축 및 내부모멘트팔길이는 보의 길이방향에 따라 일정하다. 그러나 휨과 전단이 동시에 작용하고 있는 철근콘크리트 보에 균열이 발생하면 응력분포는 그림 1(a)와 같이 보이론에 의한 분포와는 크게 다르다. 그림 1(a)에서 단면 b-b와 c-c의 압축응력 분포는 비선형이 되며, 압축응력 합력점은 아래로 이동하게 된다. 이러한 현상은 받침점 쪽에 가까울수록 더욱 현저해진다. 즉, 힘을 받는 보에서 내부모멘트팔길이는 주인장철근의 도심에서 압축응력의 합력점까지의 거리로 정의하는데, 그림 1(b)에 나타난 바와 같이 실제 내부모멘트팔길이 j_d 는 지점 쪽에 가까울수록 짧아진다. 깊은 보(deep beam)의 경우 균열이 발생한 후에는 콘크리트 경사압축대와 주인장철근으로 된 인장타이로 구성되는 타이드 아치작용을 한다^{1),3)}. 이러한 현상을 보의 아치작용(arch action) 이라고 한다.

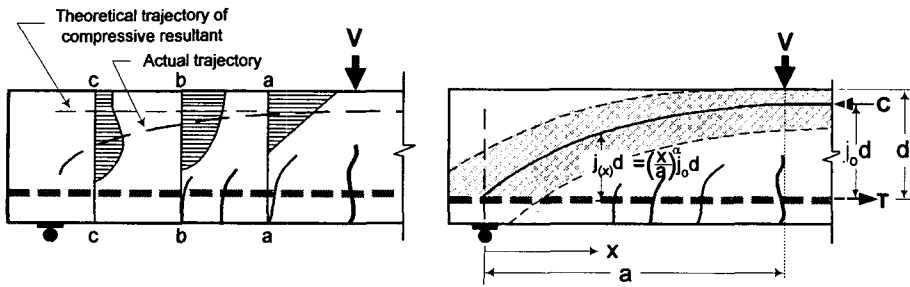
철근콘크리트 보의 아치현상은 오래전부터 알려졌으며^{3),6)}, 최근 Kim, et al.(1998)이 실험적 연구를 통해 철근콘크리트 단순보의 콘크리트 압축력선의 궤적을 정량화한 아치모델을 발표하였다. 이 연구 결과에 의하면, 철근콘크리트 단순보의 전단경간에서 내부모멘트팔길이를 그림 1(b)와 같이 아치형태로 가정하여 다음과 같은 지수함수 형태의 아치모델을 제안하였다.

$$j_{(x)}d = \left(\frac{x}{a}\right)^{\alpha} j_0d \quad (1)$$

* 정회원 · 전남대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

** 정회원 · 남도대학 토목공학과 조교수

*** 정회원 · 전남대학교 공과대학 토목공학과 교수



(a) Compressive Resultant Trajectory (b) Actual Inertia Moment Arm Length
Fig. 1 Arch Action⁴⁾

여기서, 복부철근이 없는 보에 대해 : $\alpha = 1.0(d/a)^{0.6}(\rho)^{-0.1}$

복부철근이 있는 보에 대해 : $\alpha = 0.6(d/a)^{1.4}(\rho)^{-0.2}$

위 식에서 $j(x)d$ 와 j_0d 는 각각 지점에서 x 만큼 떨어진 단면의 실제 내부모멘트팔길이와 선형탄성 이론으로 계산한 값이며, a 는 전단경간이다. d 는 유효깊이이고, ρ 는 주철근비이다.

전단경간에서 아치작용으로 인하여 증가된 실제 주철근인장력 $T(x)$ 는 식(1)을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T(x) = \frac{M(x)}{j(x)d} \quad (2)$$

여기서, $M(x)$ 는 지점에서 x 만큼 떨어진 단면의 작용모멘트이다. 이 때 계산되는 x 지점의 철근인장력 $T(x)$ 는 모멘트팔길이가 $j(x)d$ 로 줄어들기 때문에 보이론으로 계산한 값 T_B 보다 증가한다.

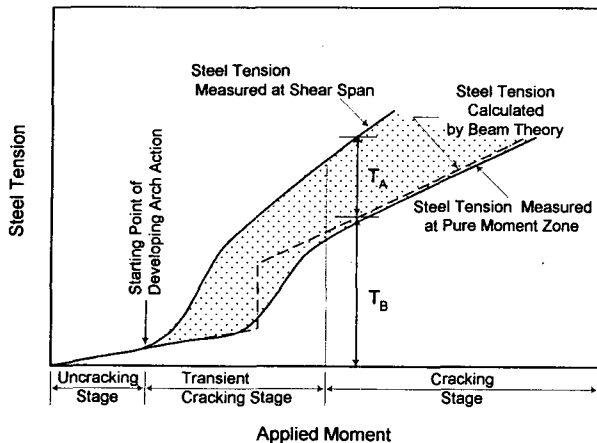


Fig. 2 Steel Tension by Beam Action and Arch Action⁴⁾

인식될 뿐 아직까지 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 이 연구는 철근콘크리트 연속보에서 아치작용으로 인하여 증가된 주철근인장력을 실제 측정하여, 아치작용을 정량적으로 분석하였다.

Kim et al.(1998)의 실험결과에 의하면 철근콘크리트 단순보의 전단경간 중앙에서 실제 철근인장력은 보이론으로 계산한 값보다 20%~100% 정도 더 크게 나타났다. 또한 전단경간내의 실제 철근인장력은 그림 2에 나타난 것과 같이 보작용에 의한 철근인장력 T_B 와 아치작용에 의한 철근인장력 T_A 의 두 성분으로 구분하였으며, 해당 단면에 작용하는 모멘트가 균열모멘트에 도달한 이후에는 T_A/T_B 값은 일정해 지는 것으로 나타났다.

실제로, 대부분의 철근콘크리트 보는 구조적 효율성 때문에 연속보의 형태로 설계된다. 철근콘크리트 연속보에서의 아치현상은 동일조건인 단순보보다 더 현저할 것으로만

2. 실험

철근콘크리트 연속보의 아치현상을 실험을 통해 조사하기 위해 그림 3에 나타난 바와 같은 1단 내민연속보를 제작하였다. 내민보의 양쪽 단부는 0이고 전단력만 존재하게 된다. 따라서 양쪽 단부는 각각 하중점과 반력점으로 이상화하였다. 이때 m-n-o(또는 o-p-q)구간은 집중하중을 받는 단순보와 동일한 전단력 및 모멘트가 발생한다. 이 연속보의 n-o(또는 o-p)구간은 단순보의 전단경간(=

a)에 해당하므로 연속보의 전단경간(= M_{max}/V 으로 간주하였다.

시험체는 전단경간대 유효높이의 비(=), 전단철근의 유무를 주변수로 하여 총 9개를 제작하였으며, 제원 및 재료특성은 그림 3과 표 1에 나타냈다.

시험체는 그림 3(a)와 같이 폭이 10 cm이고, 유효깊이가 40 cm(시리즈 4)와 32cm(시리즈 6 및 8)이며, 피복 두께가 5 cm인 직사각형 단면의 연속보이다. M_{max}/Vd 는 2, 3 및 4로 하여 3단계로 변화시켰으며, 주철근비는 각 시리즈마다 0.7%와 1.3% 또는 0.9%와 1.6%의 두 종류로 하였다. 전단철근이 아치작용에 미치는 영향을 파악하기 위해 3개의 시험체 4WC1, 6WC1 및 8WC1에는 전단철근을 배치하였다. 사용철근은 한 개의 D19 또는 D25를 상·하부에 동일하게 배치하여 복철근보로 제작하였다. 그림 3(a)에 나타난 양쪽 내민보 구간에는 사전파괴를 방지하기 위해 D10 철근으로 만든 폐합스터립을 $d/2$ 간격으로 배치하였다.

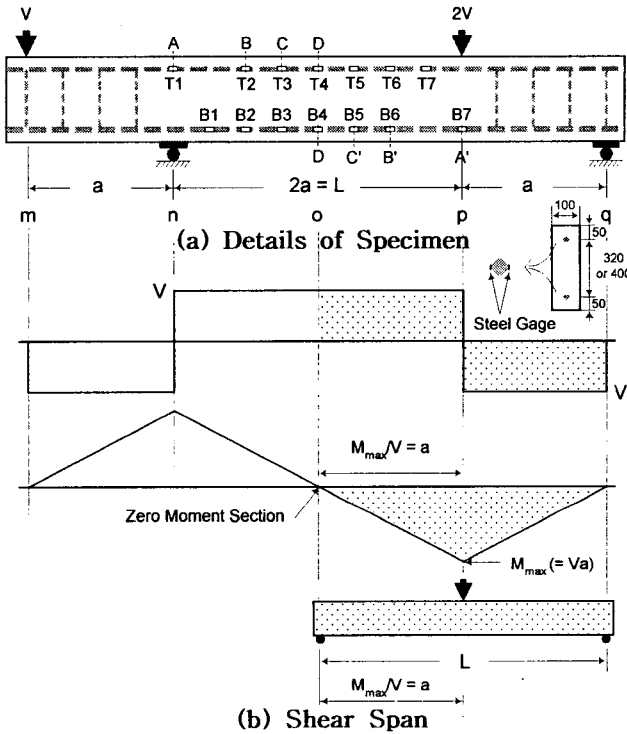


Fig. 3 Details of Specimen and Shear Span

Table 1. Details of Specimens and Material Properties

시 리 즈	시 험 체	폭 b (mm)	유효 깊이 d (mm)	$\frac{M_{max}}{Vd}$	주 철 근				전 단 철 근				콘 크 리 트 압 축 강 도 f_{ck} (MPa)	
					사 용 철 근	공 단 면 적 (mm^2)	항 복 강 도 f_y (MPa)	극 한 강 도 f_u (MPa)	철 근 비 (%)	사 용 유 무	사 용 철 근	공 단 면 적 (mm^2)		항 복 강 도 f_y (MPa)
4	4NC1	100	400	2	D19	286.5	392	579	0.72	×	-	-	-	29
	4NC2				D25	506.7	343	500	1.27	×	-	-	-	
	4WC1				D19	286.5	392	579	0.72	○	D10	71.3	333	
6	6NC1	105	320	3	D19	286.5	392	579	0.85	×	-	-	-	
	6NC2				D25	506.7	343	500	1.51	×	-	-	-	
	6WC1				D19	286.5	392	579	0.85	○	D10	71.3	333	
8	8NC1	100	320	4	D19	286.5	392	579	0.90	×	-	-	-	
	8NC2				D25	506.7	343	500	1.58	×	-	-	-	
	8WC1				D19	286.5	392	579	0.90	○	D10	71.3	333	

전단철근을 갖는 시험체인 4WC1, 6WC1 및 8WC1은 전체지간에 D10 폐합스터럽을 $d/2$ 간격으로 배치하였다.

철근의 변형을 측정위치는 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 단면 A와 A'사이의 내측경간을 8등분한 9개 단면의 14개소이며, 각 측정위치마다 2개의 변형을 게이지를 부착하여 측정해서 그 평균값을 사용하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 일반

전단보강철근이 없는 시험체는 전형적인 전단 파괴를 하였다. 다만, 경간이 긴 8NC1은 주인장철근의 항복에 의한 휨파괴를 하였다. 전단파괴한 시험체의 균열발생 및 파괴에 이르는 과정은 매우 유사하였다. 휨균열 발생 후 하중이 증가함에 따라 전단경간 중앙부근까지 휨균열이 발생되다가 경사전단균열이 발생하여 파괴하였다. $M_{max}/Vd = 2$ 면서 철근비가 0.72%인 4NC1시험체는 경사전단균열 발생 이후 균열이 안정되어 추가하중(reserve strength)이 재하된 후 파괴하였으며, 전단파괴한 그 외의 모든 시험체에서는 경사전단균열 발생과 동시에 순간 파괴하였다.

전단보강철근이 있는 시험체는 일정한 간격으로 휨균열이 발생하다가 하중이 더욱 증가함에 따라 주인장철근이 항복한 후 파괴하는 전형적인 휨파괴를 하였다.

그림 4는 대표적인 시험체(6NC2)의 하중단계별 주철근인장력 분포를 나타낸 그림이다. 최대모멘트 단면(A와 A')에서 측정된 철근인장력은 보이론으로 계산한 값과 거의 동일하다. 그러나 전단경간 중앙단면 B에서는 $0.6P_u$ 일 때 계산값보다 30~40%정도 더 크게 측정되었으며, 극한하중 상태에서는 50~60%정도 크게 나타났다. 6NC2와 같이 전단경간의 각 단면에서 측정값이 계산값보다 크게 나타나는 경향은 모든 시험체에서 동일하게 나타났다.

3.2 경간길이, 주철근비 및 전단철근의 영향

전단경간 구간에서 측정된 철근인장력 T_m 은 그림 2에 나타난 것과 같이 보작용에 의한 철근인장력 T_B 와 아치작용에 의한 철근인장력 T_A 의

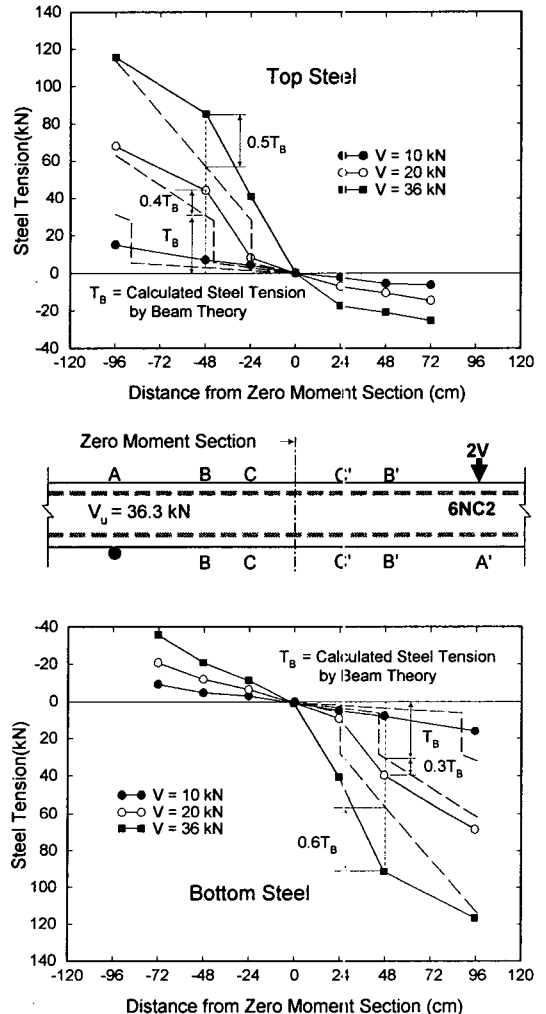


Fig. 4 Distribution of Steel Tension along Reinforcing Bar

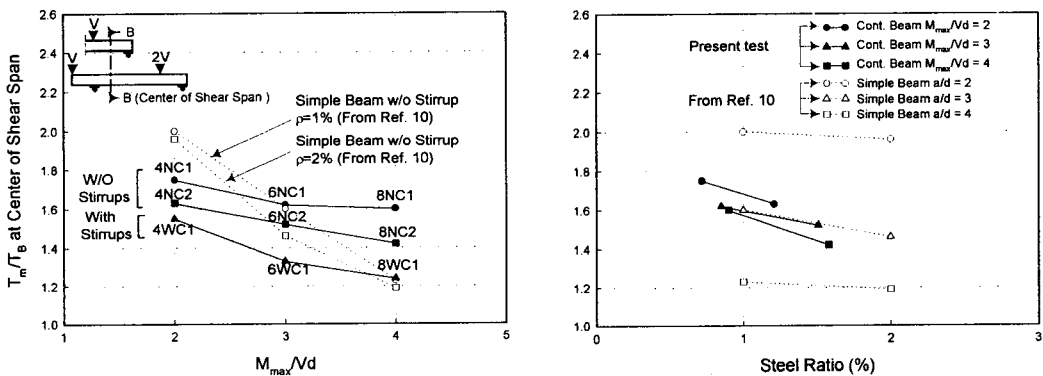
함으로 표현할 수 있다.

$$T_m = T_B + T_A \quad (3)$$

이 관계로부터, 전체 철근인장력 T_m 에 대한 보작용에 의한 T_B 의 비율을 이용하여 경간길이, 주철근비 및 전단철근이 아치작용에 미치는 영향을 분석하였다.

그림 5는 각 변수에 따른 단순보와 연속보의 아치작용을 비교하기 위해 각 시험체 전단경간 중앙에서의 T_m/T_B 를 나타낸 것이다. 이 그림에 표시된 단순보의 T_m/T_B 값은 Kim et al.(1998)의 실험결과이다.

연속보의 전단경간 중앙에서 T_m/T_B 값은 1.40~1.75정도로 나타났다. 특히, M_{max}/Vd 가 2인 전단보강하지 않은 시험체 4NC1은 1.75로 나타났는데, 이것은 실제 철근인장력이 보이론으로 계산한 철근



(a) Arch Action with Variation of M_{max}/Vd (b) Arch Action with Variation of Steel Ratio

Fig. 5 Comparison of Arch Action in Continues Beams with Simple Beams

인장력의 1.75배 정도임을 의미한다. 이러한 차이는 일반적으로 예상되는 값보다 훨씬 큰 것으로서, 철근콘크리트 연속보의 해석 및 설계에 반영되어야 할 것으로 생각된다.

그림 5(a)를 살펴보면 경간길이가 짧아질수록 T_m/T_B 값이 증가하고 있다. 즉, 아치작용이 현저하다는 것을 알 수 있다. 전단경간이 짧은(깊은) 보에서는 콘크리트 압축응력 합력점의 경로가 직선형태 즉, 하중점에서 지점으로 바로 연결된다. 그러므로 전단경간 중앙에서 내부모멘트팔길이 계산 값의 1/2이 되며, 실제철근인장력은 2배가된다. 그런데 상대적으로 긴보에서는 콘크리트 압축응력 합력점은 깊은보에 비하여 보이론으로 계산한 값에 가까워진다. 즉, 긴보의 전단경간 중앙에서 내부모멘트 팔길이는 깊은보에 비하여 크게 나타나며, 실제 철근인장력은 작게 나타난다. 이러한 현상 때문에 그림 5(a)와 같이 경간길이가 짧아질수록 실제 철근인장력이 크게 나타난 것이다.

그림 5(b)는 주철근비에 따른 T_m/T_B 값을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 주철근비가 증가하면 단순보와 연속보 모두 T_m/T_B 값이 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 적은 주철근비를 갖는 보일수록 아치현상이 현저하다는 의미가 된다.

전단철근의 영향을 알아보기 위해 전단보강하지 않은 시험체인 4NC1과 전단보강한 4WC1 시험체의 T_m/T_B 값을 그림 5(a)에서 직접 비교해보면, 스티럽이 배치된 보에서는 아치작용에 의한 주철근인장

력 증가현상이 현저히 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 다른 경간길이를 갖는 보에서도 동일하게 나타난다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 경간길이, 주철근비, 및 전단철근의 보강유무를 주 변수로 하여 직사각형 단면 철근 콘크리트 연속보의 주철근인장력을 측정하여 연속보의 아치작용을 평가하였다. 철근콘크리트 연속보 전단경간의 중앙에서 측정된 실제 철근인장력은 보이론에 의해 계산한 값보다 20%~75%정도 더 크게 나타났다. 특히 전단경간대 유효높이의 비가 2이며 복부철근이 없는 시험체 전단경간중앙에서의 실제 철근인장력은 보이론으로 계산한 철근인장력의 1.75배정도 이었는데, 이는 일반적으로 예상되는 값보다 훨씬 큰 것으로써, 철근콘크리트 연속보의 해석 및 설계에 반영되어야 할 것으로 생각된다. 본 연구에서 수행한 제한된 실험결과와 기존의 단순보 실험결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 철근콘크리트 연속보의 주철근비가 증가할 경우와 전단철근을 보강할 경우 아치작용에 의한 주철근인장력의 증가현상이 감소하는 것으로 나타났으며, 실측한 주철근인장력이 보이론으로 계산한 값보다 더 커지는 아치현상은 경간이 짧아질수록 더욱 현저히 나타났다.
- 2) M_{max}/Vd 가 같은 연속보와 단순보의 아치현상을 비교한 결과 결론 1)에서 살펴본 각 변수에 따른 경향은 단순보와 연속보에서 비슷하게 나타났다. 그런데 전단경간길이가 짧아질수록 아치작용에 의한 주철근인장력이 증가하는 비율이 단순보에 비하여 연속보에서 적게 나타났다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 1999-311-004-3) 지원으로 수행된 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Bresler, B., and MacGregor, J.G. (1967) Review of Concrete Beams Failing in Shear, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 93, No. 1, pp. 343-372.
2. Ferguson, P.M. (1973) *Reinforced Concrete Fundamentals*, 3rd ed., John Wiley and Sons, New York, N. Y.
3. Kani, G.N.J. (1964) The Riddle of Shear Failure and Its Solution, *ACI Journal*, Vol. 61, No. 4, pp. 441-467.
4. Kim, D.J. Kim, W., and White, R.N. (1998) Prediction of Reinforcement Tension Produced by Arch Action in RC Beams, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 6, pp. 611-622.
5. Moody, K.G., Viest, I.M., Elstner, R.C., and Hognestad, E. (1955) Shear Strength of Reinforced Concrete Beams-Part 2, *ACI Journal*, Vol. 51, No. 5, pp. 417-434.
6. Ngo, D., and Scordelis, A.C. (1967) Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams, *ACI Journal*, Vol. 64, No. 3, pp. 152-163.