

# 철근 콘크리트 중공슬래브 교량의 균열 거동

## Cracking Behavior Of Reinforced Concrete Voids Slab Bridge

김 인 배<sup>\*</sup>      손 혁 수<sup>\*\*</sup>      이 재 훈<sup>\*\*\*</sup>  
Kim, In Bae      Son, Hyeok Soo      Lee, Jae Hoon

### ABSTRACT

In this study, the tests were performed on a series of reinforced concrete strip specimens to investigate a cracking behavior of reinforced concrete voided slab bridge. Also, the mid-span deflections, the crack widths and failure mode of reinforced concrete strip specimens were studied. It was found that serviceability of cracking and deflection at reinforced concrete voided slab bridge which were constructed and designed under verifying serviceability as design criteria are lower than common reinforced concrete member. On the basis of the experimental results, it is more reasonable to evaluate crack occurring  $f_r = 2.0\sqrt{f_{ck}}$  rather than modulus of rupture of concrete,  $f_r = 0.8\sqrt{f_{ck}}$

### 1. 서 론

기 시공된 철근콘크리트 중공슬래브교에서 가장 심각한 문제점으로 지적되고 있는 사항은 균열에 관한 문제이다. 일반적인 철근콘크리트 구조물에 있어서도 균열거동은 많은 변수들의 영향을 받고 있는데, 중공슬래브교는 중공관이 콘크리트 내부에 배치되어 일반적인 철근콘크리트 구조물의 균열거동에 비하여 더욱 복잡한 거동을 보인다. 그러나 중공슬래브교의 설계 시에는, 단순히 콘크리트 단면 내부에 원형의 공간이 있는 단면으로만 취급하고 일반적인 철근콘크리트 부재에 대한 단면해석이론과 설계방법을 그대로 적용함으로써, 중공관에 의한 역학적 영향을 무시하고 있다. 따라서 중공슬래브교에 대한 기존의 설계방법에 대한 검증은 위하여 실험을 통한 중공슬래브교의 거동을 파악하는 것이 매우 중요하다.

### 2. 실험계획 및 방법

#### 2.1 실험계획

중공슬래브교의 거동은 중공비, 중공관의 배치간격(중공관 중심간 거리), 중공관의 중심과 수직인 상부와 하부의 슬래브 두께, 철근 배근 등 많은 변수에 영향을 받을 것으로 예상할 수 있다. 중공슬래브 판 부재 실험에서도 이와 같이 매우 많은 변수들이 복합적으로 나타나게 될 것으로 예상되는데, 이와

\* 정희원, 영남대학교 토목공학과 석사과정

\*\* 정희원, 영남대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정희원, 영남대학교 토목공학과 부교수

같은 많은 변수에 대한 판 부재 실험은 실험적 연구에 있어서 매우 비효율적이다. 따라서 각 변수의 영향을 파악하기 위해서는 단위부재 실험을 수행하는 것이 효율적이다.

단위부재 거동실험은 중공슬래브 판을 횡방향과 종방향으로 나누어 횡방향 단위부재 시험체와 종방향 단위부재 시험체에 대하여 실험을 수행하였다. 횡방향 단위부재 시험체에 대한 실험을 통하여 중공슬래브의 종방향 거동을 파악하고 콘크리트 수축과 중공관의 구속작용에 따른 균열거동과 중공관의 간격에 따른 변형거동과 복부 진단철근의 배근방법에 따른 변형거동을 분석한다. 종방향 단위부재 시험체에 대한 실험에서는 중공슬래브교의 횡방향 거동과 콘크리트 수축과 중공관에 의한 구속력에 따른 균열거동과 주철근의 배근방법에 따른 거동을 분석한다.

중공슬래브교의 균열원인 분석을 위한 실험은 다음의 4가지 형상의 시험체로 구분하여 시험체를 제작하였으며, 각 시험체는 표 1에 요약하여 나타내었다.

표 1. 중공슬래브 시험체의 구분

구 분	일련 번호	시 편 명	종방향 철근	중 공 관		비 고
				직 경 (mm)	중 공 비 (%)	
Series-A	1	VA-750-1	6-D16	750	75	횡 방 향
	2	VA-750-2				
	3	VA-650-1				
	4	VA-650-2				
	5	VA-550-1				
	6	VA-550-2				
Series-B	7	VB-750-U1	6-D16	400	66.7	단 위 부 재
	8	VB-750-U2				
	9	VB-750-X1				
	10	VB-750-X2				
	11	VB-375-U1				
	12	VB-375-U2				
	13	VB-375-X1				
	14	VB-375-X2				
Series-C	15	VC-0-1	6-D16	NONE	0	종 방 향
	16	VC-0-2				
	17	VC-625-S1				
	18	VC-625-S2				
	19	VC-750-S1				
	20	VC-750-S2				
	21	VC-750-R1	10-D16	300	75	단 위 부 재
	22	VC-750-R2				
	23	VC-625-DA1				
	24	VC-625-DA2				
25	VC-625-DB1	10-D16	300	62.5	부 재	
26	VC-625-DB2					
Series-R	27	R-1	건조수축 변형률 계측용 무근콘크리트 시험체			
	28	R-2				

## 2.2 실험방법

전 시험체의 중공관의 구속에 의한 콘크리트 수축변형률의 변화를 측정하기 위하여 단위부재 시험체(Series-A, Series-B, Series-C) 및 무근 시험체(Series-R)에 Demec게이지 용 측정점(Demec Point)을 부착하여 콘크리트 수축변형률을 측정하였고, 각 시험체의 중앙 하단부에 변위계(LVDT)를 이용하여 처짐을 측정하였다. 그리고, 시험체 중앙부분의 곡률은 변위계를 압축측, 인장측에 각각 2개를 설치하여 측정하여 구하였다.

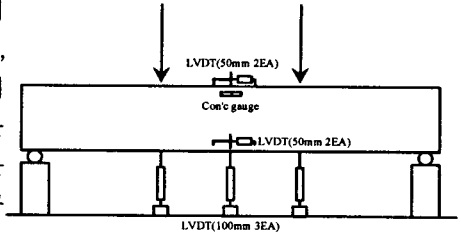


그림 1. 시험체의 센서 부착 위치

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 중공관에 의한 구속작용

그림 2는 무근콘크리트 시험체 Series-R과 중공비를 변수로 제작된 횡방향 단위부재 시험체 Series-A, Series-B, Series-C의 콘크리트 수축변형률을 비교하여 나타낸 것으로서 무근콘크리트 시험체보다 중공시험체의 수축이 작게 발생하여 중공관에 의한 구속작용이 콘크리트 수축변형률에 영향을 미치고 있음을 나타내고 있다.

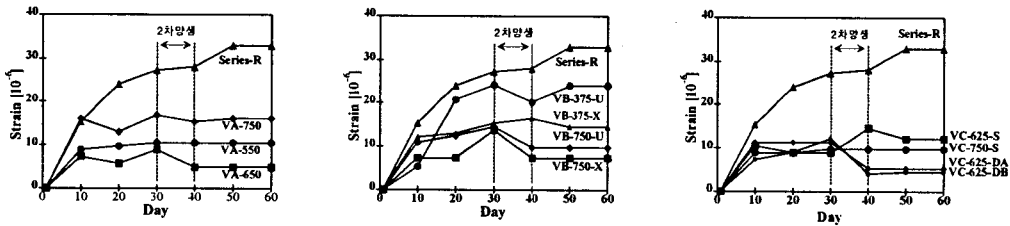


그림 2. 각 Series별 콘크리트 수축 변형률

표 2. 휨균열 강도 비교

시험체명	시험체 $f_r$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	시험체 $\alpha$ 값 $f_r = \alpha \sqrt{f_{cu}}$	공시체 $f_r$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	$\frac{f_r(\text{시험체})}{f_r(\text{공시체})}$ [%]
VC-0-1	27.0	1.70	33.1	81.7
VC-0-2	29.3	1.83	33.1	88.4
VC-625-S1	16.6	1.03	33.1	50.0
VC-625-S2	16.6	1.04	33.1	49.3
VC-750-S1	13.0	0.82	33.1	39.4
VC-750-S2	16.6	1.04	33.1	50.2
VC-625-DA1	23.9	1.50	33.1	72.3
VC-625-DA2	23.4	1.50	33.1	70.7
VC-625-DB1	17.7	1.11	33.1	53.4
VC-625-DB2	20.6	1.29	33.1	52.3

$$f_{ru} = 2.0 \sqrt{f_{cu}} = 32.0 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\alpha \text{ 값 평균} = 1.29$$

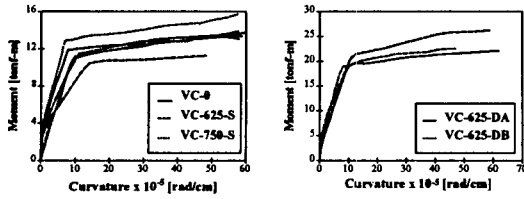


그림 3. 모멘트-곡률 관계

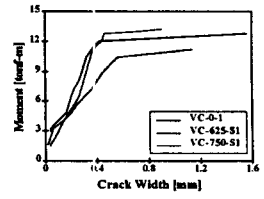


그림 4. 균열폭 비교

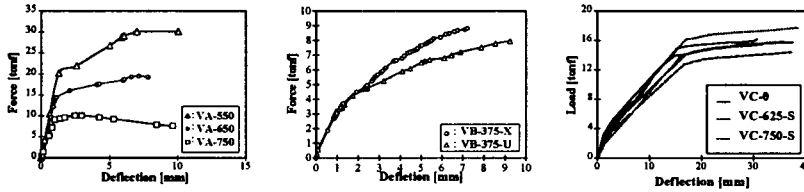


그림 5. 하중-처짐 관계

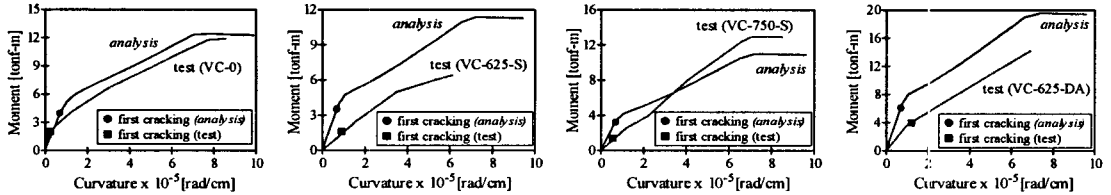
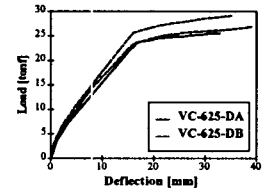


그림 6. 모멘트-곡률 곡선의 비교(해석치, 실험치)

### 3.2 균열 강도

무근 휨 공시체의 재료시험을 통하여 얻은 평균 균열강도는  $33.1 \text{ kgf/cm}^2$ 으로서 설계기준이 제시하고 있는  $f_{ru} = 2.0\sqrt{f_{cu}}$ 의 휨균열강도 식으로 구한  $32.0 \text{ kgf/cm}^2$ 과 유사한 값을 나타내었다. 그리고, Series-C 시험체를 통하여 얻은 균열응력은 무근 휨 공시체보다 낮은 균열강도를 나타내었다. 이는 중공관이 배치되어 있는 시험체에서 콘크리트 수축변형에 대해 중공관 및 철근에 의한 구속력이 작용하여 무근 휨 공시체보다 낮은 응력에서 균열이 발생한다는 것을 의미한다.

표 2는 무근 휨 공시체의 휨균열강도와 중공슬래브 시험체의 휨균열응력을 비교하여 나타낸 것이다.

### 3.3 모멘트-곡률 관계

그림 3은 종방향 단위부재 시험체인 Series-C의 모멘트-곡률 곡선 계측결과를 나타낸 것이다. 그림에서 단면의 외부 크기가 동일한 VC-0, VC-750-S, VC-625-S, VC-625-DA, VC-625-DB 시험체의 모멘트-곡률 곡선은 중공관의 유·무 및 중공비에 따라 휨강도 및 강성의 차이가 나타났으나 일관된 경향은 발견되지 않았다.

### 3.4 모멘트-곡률 해석

중공슬래브 시험체의 실험결과에 의한 모멘트-곡률 관계를 해석치와 비교하기 위하여 재료비선형을 고려한 모멘트-곡률 해석을 수행하였고 그림 6에 시험체의 실험결과와 해석결과에 의한 모멘트-곡률 관계와 초기강성 및 초기 휨균열발생시의 모멘트를 비교하여 나타내었다. VC-0 시험체의 그림은 중공관이 들어있지 않은 중실단면 시험체의 거동을 비교한 것으로서 초기강성의 경우 해석치가 실험치

에 비해 작게 평가되었으며, 초기균열 발생시의 모멘트는 해석치의 경우 실험치 보다 다소 높은 하중 단계에서 균열이 발생한 것으로 분석되었다. VC-625-S, VC-750-S, VC-635-DA 시험체의 그림은 중공관 단면 시험체의 거동을 비교한 것으로서 초기강성의 경우 중실단면의 비교치와는 달리 해석치가 실험치에 비해 크게 평가되었으나, 해석에서 중공관에 의한 콘크리트의 인장강도 감소를 고려하지 않았으므로 초기균열 발생시의 모멘트는 실험치보다 해석치가 더욱 높은 하중단계에서 균열이 발생하는 것으로 분석되었다. 이러한 경향은 중공슬래브 시험체의 경우에 중공관에 의해 콘크리트 건조수축의 영향으로 인한 인장력이 작용되어 하중의 재하가 있기 전에 이미 미세한 균열이 발생하였거나, 균열이 발생하지 않았더라도 낮은 하중에서도 미리 발생한 콘크리트의 인장응력 만큼의 낮은 하중에서 균열이 발생한 것으로 판단되며, 초기강성 또한 해석치보다 작은 경향을 나타내는 것으로 판단된다.

### 3.4 균열폭

재하실험시 측정된 균열폭을 각 시험체별로 비교하여 그림 4에 나타내었다. 균열폭의 측정은 하중을 재하하는 동안 시험체의 측면, 하단부를 면밀히 관찰하면서 초기 균열이 발생하는 시점부터 0.5tonf씩 하중을 증가시키면서 균열폭을 측정하였다. 그림 4에서 중공단면의 경우 중실단면에 비하여 낮은 하중에서 초기균열이 발생하였으며 하중증가에 따른 균열폭의 증가 역시 중공단면의 경우가 중실단면의 경우 보다 증가되었으며 특히 중공비가 0.625인 VC-625 시험체는 이러한 경향이 크게 나타났다.

### 3.5 하중-처짐 관계

그림 5는 횡방향 단위부재인 Series-A 시험체의 중공관의 크기에 따른 하중-처짐 관계를 비교하여 나타낸 것이다. 모든 시험체의 초기강성은 유사한 경향을 나타내었으나, 파괴시의 하중은 큰 차이를 나타내고 있다. 즉, 동일한 외부 단면의 크기에 대해서 중공비(중공관의 직경과 단면 크기와의 비율)가 클수록 휨강도가 감소하는 경향을 나타내었다. Series-B의 경우, 그림에서 나타내고 있듯이 복부 전단철근의 형상에 따라 전반적인 하중-처짐 곡선의 차이는 크지 않으나, U형상의 전단철근 보다는 X형상의 전단철근을 사용한 시험체의 파괴시 강도와 강성이 다소 크게 나타나 있다. 즉, 실제 중공슬래브 교의 시공시 복부 전단철근으로 X형상의 전단철근을 사용하는 것이 강도측면에서는 효율적일 것으로 판단된다. Series-C의 경우, 중공관의 유무 및 중공관의 크기에 따른 특별한 경향을 보이지 않았다. 이는 비록 중공관에 의해 콘크리트의 면적이 작은 시험체라고 할지라도 중공관 자체의 휨에 저항하는 능력이 크게 작용하였을 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

- (1) 무근콘크리트 시험체와 중공슬래브 단위부재 시험체에 대하여 수축변형을 계측한 결과, 중공슬래브 시험체의 수축변형은 무근콘크리트 시험체의 수축변형보다 작았다. 따라서, 중공관에 의한 구속작용이 매우 크게 작용한다고 판단된다.
- (2) 중공 시험체의 휨균열응력 및 균열모멘트 실험결과는 설계기준의 41~75% 수준을 보임으로서, 중공관의 구속작용에 의한 인장응력이 콘크리트의 균열강도를 감소시키는 것으로 판단된다.
- (3) 중공 시험체의 휨균열응력 실험결과를 설계기준이 제시하는 휨균열강도 식( $f_r = 2.0\sqrt{f_{ck}}$ )과 같이 콘크리트 압축강도의 제곱근으로 표시했을 때, 계수는 0.82~1.50의 범위로서 평균 1.29의 값을 나타내었다. 따라서 중공슬래브교에 대하여는 휨균열강도 식으로  $f_r = 0.8\sqrt{f_{ck}}$ 을 사용하여 균열발생 여부를 판정하는 것이 합리적이라고 판단된다.

- (4) 종방향 단위부재의 균열폭 실험결과와 해석결과를 분석한 결과, 균열환산단면 2차모멘트를 이용한 단성해석으로 철근의 응력을 계산하고 균열폭 계산식을 적용하여 균열폭을 계산하는 일반적인 해석 방법을 중공슬래브에 적용하여도 큰 무리는 없을 것으로 판단된다. 다만 이러한 경우라도 일반적인 철근콘크리트교와 같은 균열의 사용성 수준을 보유하지는 못할 것으로 판단된다.
- (5) 종방향 단위부재 시험체의 실험결과, 중공비에 따라 휨강도의 차이가 나타났으나 일관된 경향은 발견되지 않았다. 즉, 중공비가 0.625인 시험체는 중실단면의 시험체보다 휨강도가 작게 나타났으나, 중공비가 0.75인 시험체는 중실단면의 시험체보다 휨강도가 오히려 크게 나타났다. 일반적으로는 중공이 있는 단면의 휨강도가 중실단면의 휨강도보다 작을 것으로 예측할 수 있으나, 중공비가 0.75인 시험체는 콘크리트의 실제 면적이 작음에도 불구하고 중공관 자체의 단면 2차 모멘트가 크기 때문에 중공관에 의한 휨모멘트 저항능력이 증가하였기 때문이라고 판단된다.
- (6) 휨강도의 관점에서는 종방향 인장철근을 중공관 사이의 중실단면에 배근한 경우가 유리하지만, 균열의 관점에서는 종방향 인장철근은 균등하게 배근하는 것이 유리한 것으로 판단된다.
- (7) 중공관의 이격거리에 대한 실험결과, 초기거동은 이격거리에 관계없이 유사하였으나 극한상태에서는 이격거리가 큰 경우 강성이 다소 증가하였다.
- (8) 동일한 중공비와 이격거리를 가진 경우, 복부 전단철근의 형상으로 U형상의 전단철근이 배근된 시험체보다 X형상의 전단철근이 배근된 시험체가 중공슬래브 횡방향으로의 파괴강도 및 극한하중에서의 강성이 다소 크게 평가되었으나, 사용하중 수준에서는 거의 동등한 강성을 나타내었다. 중공슬래브교의 극한상태는 종방향으로 주로 발생하며 횡방향으로는 극한상태에 도달하지 않는 것이 일반적이므로 X형상의 전단철근이 U형상의 전단철근보다 더 바람직하다고는 할 수 없을 것이다. 따라서 전단철근의 형상은 시공성을 고려하여 선택하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부와 건설기술연구원의 지원으로 수행되었기에 관계기관에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 대한콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준, 건설교통부, 1999.
2. 도로교 표준시방서-설계편, 건설교통부, 1996
3. G. Elliott, L. A. Clark, & R. M. Symmons, Test of quarter-scale reinforced concrete voided slab bridge, Cement and Concrete Association, Technical Report 527, 1979
4. R. Park and T. Paulay, Reinforced Concrete Structures, John Wiley and Sons, New York, 1976.
5. E. C. Hambly, Bridge Deck Behaviour, E & FN SPON, 1991
6. Bakht, B., Jaeger, L. G., and Cheung, M. S., Cellular and Voided Slab Bridges, ASCE Journal of Structural Engineering, 107(9), 1981
7. 건조수축에 의한 철근콘크리트 보의 곡률 및 처짐 Curvature and Deflection of Reinforced Concrete Beams due to Shrinkage 콘크리트학회지 1998, 12 v.10, n. 6, pp. 261-268
8. 이동현, 반복하중을 받는 철근콘크리트 보의 사용성에 관한 실험적 연구, 1999