

# 反復荷重下에서의 超高強度 輕量콘크리트의 延性

DUCTILITY OF HIGH-STRENGTH LIGHTWEIGHT CONCRETE MEMBERS  
UNDER REVERSED CYCLIC LOADING

○ 신 성 우 \*, 이 광 수 \*\*, Ghosh, S. K. \*\*\*  
Shin, Sung Woo Lee, Kwang Soo

## ABSTRACT

This experimental investigation was aimed at gathering information on the flexural properties, including ductility, of high-strength lightweight concrete members (concrete with a dry unit weight of approximately  $1.85t/m^3$  and with compressive strength approaching  $630kg/cm^2$  at 56days) under reversed cyclic loading.

Two sets of six specimens each were manufactured using lightweight aggregate concrete having compressive strength of  $350kg/cm^2$  at 28days and  $630kg/cm^2$  at 56days. The test variables were the concrete strength, the amount of longitudinal reinforcement, and the spacing of ties. The test results, including hysteretic load-deflection curves, for the specimens representing columns under zero axial load are reported in this paper.

## 序 論

경량콘크리트는 현장타설과 프리캐스트 콘크리트 용으로 실질적일 뿐만 아니라, 초고층 (Ultra - high rise) 콘크리트 건물의 성공적인 설계와 구축에 있어서 매우 중요한 경제적인 요인이다. 미국에서는 지난 50여년 동안에 걸쳐서 경량콘크리트를 고가도로에 사용하여 왔으며 프리캐스트와 프리스트레스에서 인건비 절감 등의 실제적인 이점을 보이고 있다.

프리캐스트와 프리스트레스 부재에서 경량콘크리트의 사용은 콘크리트의 creep과 shrinkage 때문에 망설여져 왔다. 그 문제에 대한 하나의 가능한 해결책은 단위 응력도 (unit stress) 당 creep의 양을 감소시키는 고강도 경량콘크리트의 사용이다. 이외에도 가벼운 중량과 보다 높은 휨강성을 갖는 그리고 전단 강도가 중요한 해안가 구조물과 장도판 교량에서의 적용 가능성이 있다. 비록 압축강도가  $700kg/cm^2$ 를 초과하는 경량콘크리트가 P. C. A. 실험실에서 성공적으로 생산되었으나, 불행하게도 압축강도  $420kg/cm^2$  혹은 그 이상의 고강도 경량콘크리트의 연성에 관한 정보가 극히 부족한 실정이다.

이렇게 부족한 정보때문에 ACI Building Code(1)는 지진지역에서 사용되는 경량콘크리트의 강도를  $280kg/cm^2$  이하로 제한하고 있다. 이 Code는 "만일 경량조골재 콘크리트로 만들어진 구조부재가 동일한 강도를 갖는 보통중량 조골재 콘크리트로 만들어진 비중간 부재와 동일하거나 혹은 초과하는 강도와 인성 (toughness)을 갖는다는 실험적 근거가 예증된다면, 보다 높은 설계강도를 갖는 경량조골재 콘크리트를 사용할 수 있다."고 언급하고 있다. 이 실험적 고찰은 위와 같은 중요한 Code의 제한을 제거하는데 그 시작이 될 수 있을 것이다.

본 논문은 미국 PCA, Material Service 그리고 한양대학교와의 국제공동연구에 의해 수행되었음을 알려드립니다.

\* 정희원, 한양대 건축공학과, 조교수  
\*\* 한양대 대학원 건축공학과, 박사과정  
\*\*\* Director, Potland Cement Association, IL.

## 試驗體

모든 시험체들은 단면이  $112.5mm \times 225mm$ 와 그리고 길이가  $3m$ 이다. (Fig. 1) 각각 28일 압축강도  $350kg/cm^2$  (A set)과 그리고 56일 압축강도  $630kg/cm^2$  (B set)를 사용하여 각 A, B set당 6개씩 12개의 시험체를 제작하였다. 각 Set에 대하여 두개의 시험체는 4D10, 다른 두개의 시험체는 4 D13 그리고 나머지 두개의 시험체에는 4 D19의 철근들을 사용하였다. 동일한 압축강도와 동일한 주근을 갖는 두 시험체의 차이는 피철근(D6)의 간격으로서  $75mm$ 와  $150mm$ 로 되어 있다.

비록 시험체는 기둥과 같이 보강되었더라도, 현장 조건하에서 수평으로 타설되었으며, 또한 현장조건하에서 양생되었다. 시험체가 순수 휨을 받는 위치에 2점가력하에 실험을 진행하였다. 시험체의 주근비는 ACI Code에서 제안한 평형철근비 이하로 되어 있다.

각 시험체는 A3D1과 같이 두개의 문자와 두개의 숫자로 표시되며, 첫번째 문자인 A 혹은 B는 각각 28일과 56일에서의 콘크리트 압축강도  $350kg/cm^2$ 과  $630kg/cm^2$ 을 나타내고 있다. 첫번째 숫자 3, 4 혹은 6은 각각 주근의 크기 No. 3, No. 4 또는 No. 6 (10, 13 또는 19mm의 지름)을 나타내고 있으며, 두번째 일정한 문자 D는 단순히 첫째와 둘째 숫자를 분리하는 것이다. 마지막으로 두번째 숫자 1 또는 2는 보강근 (confinement reinforcement)의 간격이 각각  $150mm$  또는  $75mm$ 임을 표시하고 있다. 각 시리즈의 모든 시험체들은 동시에 타설되었으며, 시험체의 특성은 Table 1에 나타나 있다.

Mixes는 원하는 강도범위와 소성특성 (workability, finishbility, 등)을 갖도록 설계되었으며, 미국 시멘트 소재 Material Service Corporation에 의해서 설계되었다.

## 實驗 計劃

### 시험기기

부재는 최대하중용량 110ton을 갖는 INSTRON closed-loop servo-controlled testing machine에서 실험하였다.

각 시험체의 단순지지와 하중작용 2점을 위하여 4개의 동일한 철골 grips를 특별히 고안하였다. 이들 Grips는 수직방향으로의 움직임을 방지하는 반면에 하중작용점과 그리고 각 보단부에서의 수평변위와 회전을 할 수 있다. (Fig. 2)

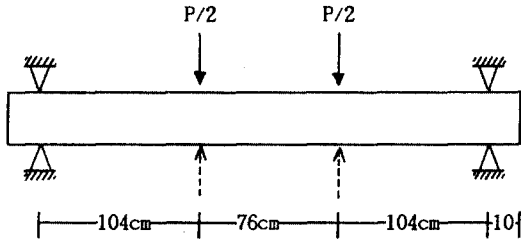
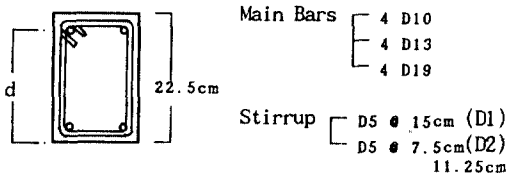


Fig. 1 The Beam Specimen



Details of Beam Section

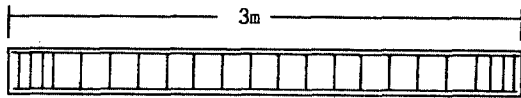


Fig. 2 Distribution of Longitudinal and Confinement Reinforcement

### 변위측정

부재의 처짐을 측정하기 위하여 부재의 중심아래에 최대변위 75mm와 0.025mm의 정확도를 갖는 다이얼 게이지를 설치하였다.

### 변형률 측정

주근 4개에서의 변형률은 이들의 인장항복을 조사하기 위하여 전기저항 스트레인게이지에 의한 측정을 하였다. 콘크리트의 상·하부면에 대한 압축변형률은 전기 wire type strain gage W240으로 처짐을 측정하였으며 이 gage는 스패중앙에 부착하였다. 상·하부면에서 25mm 떨어진 스패 중앙부분에서 시험체의 한쪽면에 대한 변형률은 길이 150mm와 0.0025mm의 정밀도를 갖는 Mechanical strain gage를 사용하여 측정하였다.

### 實驗

모든 실험은 INSTRON 실험기계를 사용하였다. 재하는 한쪽 단부에서 이중작용을 하는 serve-controlled actuator로서 이루어졌으며 보의 전체 폭을 cover할 수 있는 특별제작한 Grips로 연결된 철근 보를 통하여 가력하였다. 이 철근 보를 Fig. 2와 같이 중앙단면에 대하여 대칭으로 위치하였다.

### 재하이력

시험체에 적용된 반복하중은 Fig. 3에 나타나 있는 변위조절로서 하였다. 먼저 계산된 항복처짐의 1/2를 재하하였으며, 그리고 같은 방향으로 3번 반복을 하였다. 다음의 3회 반복하중에 대하여는 항복처짐과 동일한 처짐까지 변위를 증가하였다. 그후에 작용한 처짐의 증가는 항복처짐만큼 증가를 하였다. 실험은 사용기계의 61mm에 도달한 후 종료되었으며, 각 시험체에 작용한 cycle의 수는 A3D1의 경우 30회를 제외하고는 24회를 실행하였다.

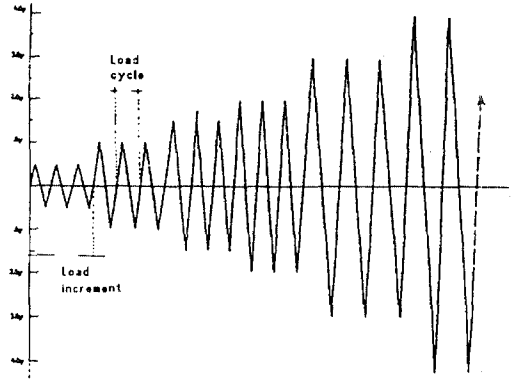


Fig. 3 Loading History

### 荷重-처짐 履歴舉動

실험진행 동안에 12개 시험체들 중 A6D1과 B4D2는 시험기계의 잘못된 기능으로 사고적으로 파괴되었다. 따라서 10개의 시험체에서만 유용한 Dta를 얻을 수 있었다.

A시리즈 4개 시험체에 대한 하중-처짐 이력곡선이 Fig. 4에 나타나 있다. B시리즈의 4개 시험체에 대한 하중-처짐 이력곡선은 Fig. 5에 나타나 있다.

Fig. 4와 5에서 명확하게 나타나는 가장 주목할 만한 특징은 고강도 시험체 B6D1과 B6D2의 이력곡선과 대조되는 시험체 A6D2 시험체의 거동이 뚜렷하게 민칭현상을 보이고 있는 것이다. 이것은 A6D2 시험체의 거동이 전단에 의해 지배되었기 때문인 것이다. 사실상 이 시험체는 전단스팬 1에서 파괴되었다. A 시리즈 시험체들은 2가력점사이 762mm의 거리에서 실험되었다. 이것은 전단스팬을 상대적으로 짧게 하였다. (1.04m). 또한 상대적으로 많은 양의 주근(4개의 No. 6-19mm), 350kg/cm<sup>2</sup>의 보통강도 콘크리트, 그리고 경량골재 콘크리트의 본래 낮은 전단용력(보통중량 콘크리트에 비교해서)은 A6D2 시험체에 대한 전단강도 대 휨강도를 다른 시험체들보다 낮게 만들었으며, 상대적으로 낮은 5.37의 전단스팬-유효깊이 비로 이루어진 이것은 이력곡선의 민칭과 최종 전단파괴를 야기하였다. 이 실험의 경험후에, 두점사이의 거리는 610mm로 감소되었다. 이것은 가장 많이 보강된 시험체들(B6D1, B6D2)의 전단스팬-유효깊이의 비를 5.76으로 증가시켰다. B6D1과 B6D2 시험체에 사용된 현저하게 높게 증가된 콘크리트 강도는 그들 시험체들이 전단에 의해 지배되는 거동을 피하겠끔 하였으며, 민칭현상도 제거되었다.

동일한 양의 보강을 갖는 보에 있어서 철근이 항복하기전의 시험체 강성은 고강도 콘크리트에 대하여

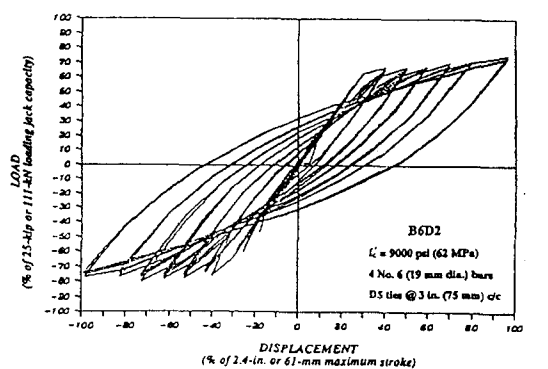
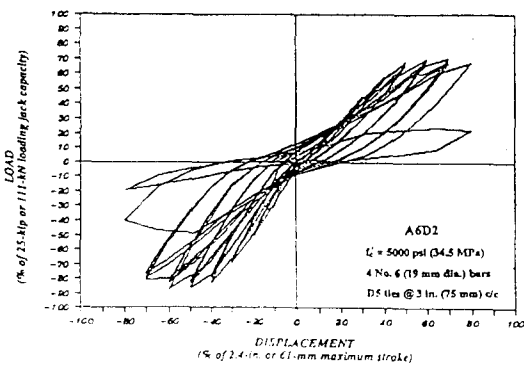
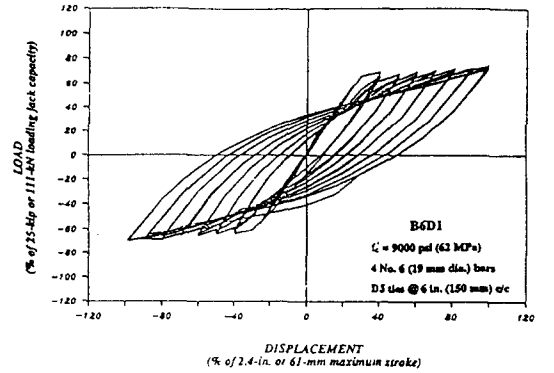
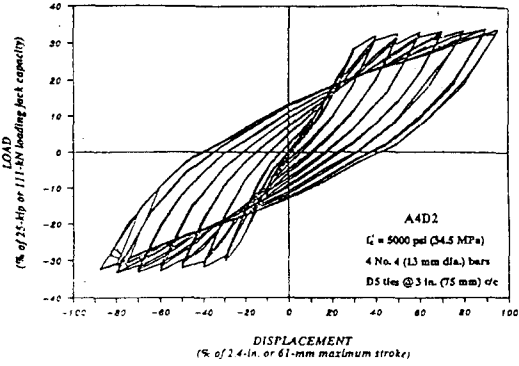
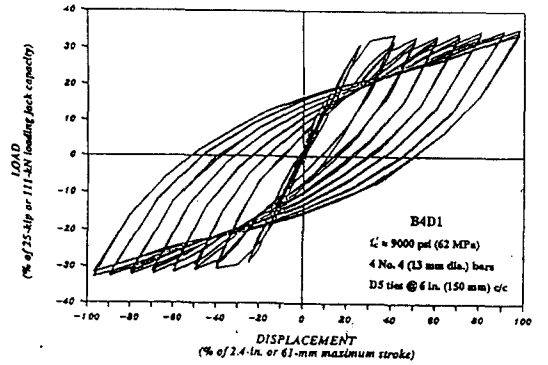
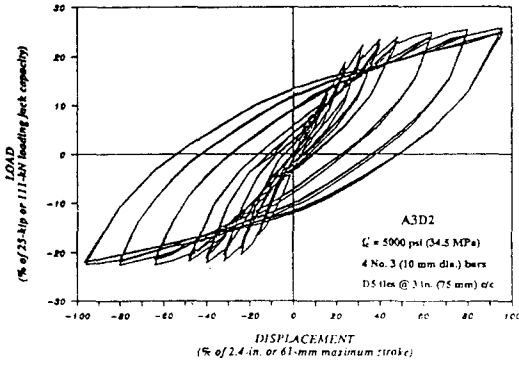
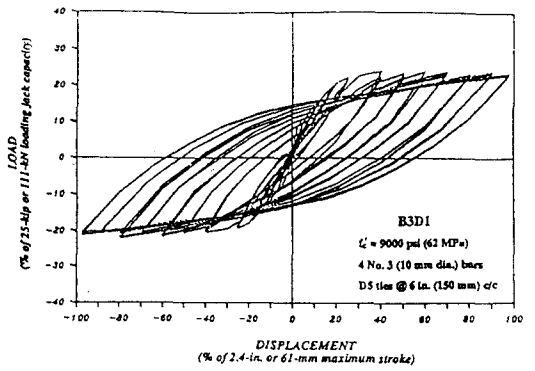
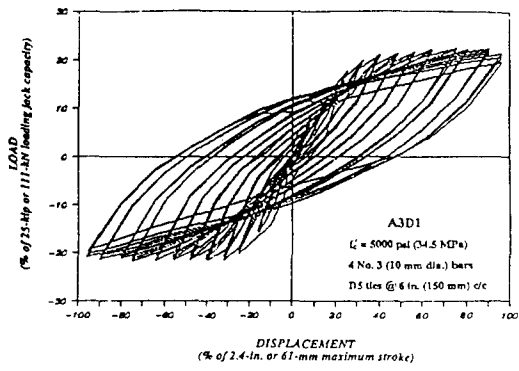


Fig. 4 Load-Deflection Curves

Fig. 5 Load-Deflection Curves

높게 나타났다. 항복후에 콘크리트 강도의 차이에 대한 하중-처짐loop의 형태는 다른 것이 없었다.

압축강도 350, 770, 그리고 1050kg/cm<sup>2</sup>를 갖는 보통중량 콘크리트에 대한 기존 연구에서(2)(3), 동일한 처짐에서 cycle의 반복에 따라 철근의 작은 양과 고강도 콘크리트로 된 보의 하중수행능력에서 현저한 강도저하가 있다는 것을 알 수 있었다. 이 현상은 지금 실험 시리즈에서 연구되고 있는 콘크리트 강도 범위내에서 조사된 것은 아니다. A3D1 시험체가 큰 처짐에서 반복되는 cycle에 따라 하중수행능력의 현저한 감소(저하)를 보여주었던 유일한 시험체였다.

연구되고 있는 범위내에서 구속근(confinement reinforcement) 간격은 띠철근 간격(tie spacing) 75mm를 갖는 A3D2시험체에서는 A3D1시험체에서 큰 폭의 하중반복시 하중부담능력이 저하되는 것을 제외하고는 이러한 현상이 발생하지 않았다는 것 이외에는 보의 이력거동에 주목할만한 영향은 없었다.

### 反復荷重下에서의 휨 延性

#### 철근 콘크리트부재의 연성

부재의 연성은 "처짐"으로서 보통 표현되어지며, ACI Committee 363에서는 다음과 같은 처짐연성계수를 정의하였다 :

$$\mu_{cu} = \Delta_{cu} / \Delta_y \text{ ----- (1)}$$

여기에서  $\Delta_{cu}$ 는 파괴시의 부재처짐이며,  $\Delta_y$ 는 인장철근 항복에서의 부재의 처짐이다.

부재나 구조물이 파괴한다는 것은 이들이 수행할 수 있는 최대하중을 더 이상 지지할 수 없을 때가 적어도 임의의 파괴정의일 수 있다. 참고문헌 5, 6에서와 같이 본 연구에서는 부재연성을 우선 다음과 같이 정의하였다. :

$$\beta \mu_o = \Delta_o / \Delta_y \text{ ----- (2)}$$

여기에서  $\Delta_o$ 는 부재에서 최대하중에 대응하는 부재의 처짐이다.

다음의 연성에 관한 두번째 정의가 또한 참고문헌 5, 6에서 고려되고 있다. :

$$\mu_f = \Delta_f / \Delta_y \text{ ----- (3)}$$

여기에서  $\Delta_f$ 는 하중처짐 곡선의 하향부분을 따라 최대하중의 80%에 해당하는 "최종"처짐이다. 연성의 개념이 하중수행능력에 있어서 실질적인 감소가 없이 비탄성변형에 저항하는 능력과 관계가 있기 때문에 Eq. (3)에서 주어진 연성의 정의는 논리적이고 실질적인 것으로 생각된다.

이 부분에 관찰로써 시험체의 대략 반 정도가 시험기기의 최대 stroke한계 61mm에 어느방향에 도달할때라도 최대하중 수용능력의 20%이상을 잃은 시험체는 없었다. 따라서, 각 시험체에 대하여 Eq. (3)의  $\mu_f$ 는 stroke한계에 가까워지는 상·하방향에 있어서 최대 변위를  $\Delta_f$ 로 계산하였다. 그러나 시험기기의 stroke에 대한 한계가 61mm이기 때문에 모든 값이 보다 더 높았을 것이라고 고려하는 것은 중요하다. 다른 관련성있는 자료(정보)와 함께 하중의 상·하방향에서 시험체에 대한  $\mu_o$ 의 계산된 값이 Table 1에 나타나 있다. 그리고  $\mu_f$ 에 해당하는 값들이 Table 2에 나타나 있다.

Table 1 — Ductility Index  $\mu_f$  for test specimen

Specimen	p/ps	$\Delta_y$ /Max. Stroke %		Load at Max. Stroke Loading Jack Capacity**		$\Delta_u$ /Max. Stroke %		Ductility Index $\mu = \Delta_u/\Delta_y$	
				Load at Max. Stroke Max. Load %					
		up	down	up	down	up	down	up	down
A3D1	0.190	25	22	21.5 (95.1)	20.8 (95.4)	96.1	96.0	3.84	4.36
A3D2	0.194	24	21	25.8 (100.0)	22.6 (100.0)	96.0	96.0	4.00	4.57
A4D1	0.316	25	25	33.3 (99.7)	31.7 (95.5)	96.0	90.2	3.84	3.61
A4D2	0.316	30	30	33.9 (99.1)	32.3 (96.7)	96.0	87.5	3.20	2.92
A6D2	0.510	50	40	66.6 (95.1)	80.6 (92.4)	80.3	70.0	1.61	1.75
B3D1	0.097	10	20	23.5 (97.1)	21.2 (95.9)	98.2	97.6	9.82	4.88
B3D2	0.097	20	21	29.7 (100.0)	15.5 (100.0)	96.0	95.5	4.80	4.55
B4D1	0.172	23	22	35.3 (100.0)	33.0 (100.0)	98.1	96.6	4.27	4.39
B6D1	0.341	26	25	74.5 (100.0)	70.0 (100.0)	99.3	98.3	3.82	3.93
B6D2	0.341	26	39	74.0 (100.0)	77.2 (97.1)	96.2	98.7	3.70	2.53

\*Max. stroke = 2.4 in. (61 mm)

\*\*Loading jack capacity = 25 kips (111 kN)

Table 2 — Ductility Index  $\mu_o$  for test specimen

Specimen	p/ps	$\Delta_y$ /Max. Stroke %		Max. Load Loading Jack Capacity**		$\Delta_u$ /Max. Stroke %		Ductility Index $\mu_o = \Delta_o/\Delta_y$	
				up	down				
		up	down	up	down	up	down	up	down
A3D1	0.190	25	22	22.6	21.8	75.5	74.8	3.20	3.40
A3D2	0.194	24	21	25.8	22.6	96.0	96.0	4.00	4.57
A4D1	0.316	25	25	33.4	33.2	90.0	89.0	3.60	3.56
A4D2	0.316	30	30	34.2	33.4	90.0	79.9	3.00	2.66
A6D2	0.510	50	40	70.0	87.2	70.0	60.0	1.40	1.50
B3D1	0.097	10	20	24.2	22.1	40.2	79.5	4.02	3.98
B3D2	0.097	20	21	29.7	15.5	96.0	95.5	4.80	4.55
B4D1	0.172	23	22	35.3	33.0	98.1	96.6	4.27	4.39
B6D1	0.341	26	25	74.5	70.0	99.3	98.3	3.82	3.93
B6D2	0.341	26	39	74.9	79.5	96.2	72.8	3.70	1.87

\*Max. stroke = 2.4 in. (61 mm)

\*\*Loading jack capacity = 25 kips (111 kN)

#### 주근양의 효과

$\rho_l/\rho_b$ 의 비가 연성지표의 크기에 가장 절대적인 영향을 미치는 요인임이 판명되었다. 복근으로 배근된 단면에서 압축철근이 종국단계에서 항복을 하지 않기 때문에 (연단 압축 콘크리트가 0.3%의 변형율을 얻는 것으로 정의됨)  $\rho_b$ 는 다음과 같은 방정식에 의해서 주어진다. (참조 Ref. 1 Commentary):

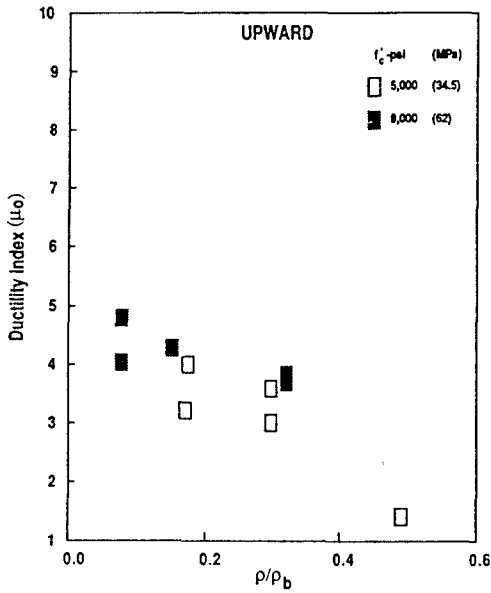


Fig. 6(a) Ductility Index  $\mu_0$  vs.  $\rho/\rho_b$   
— Upward —

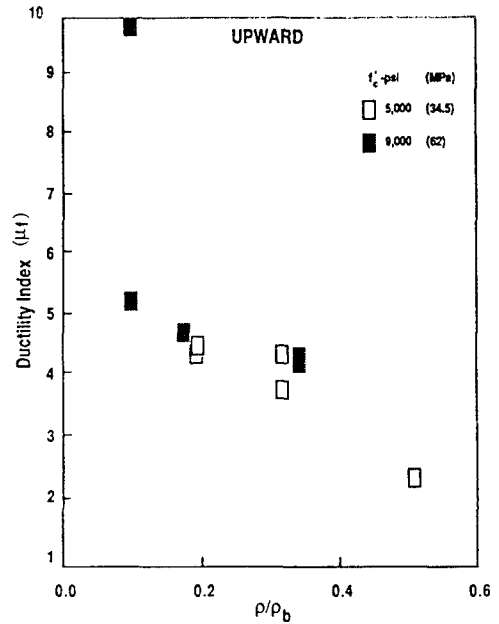


Fig. 7(a) Ductility Index  $\mu_f$  vs.  $\rho/\rho_b$   
— Upward —

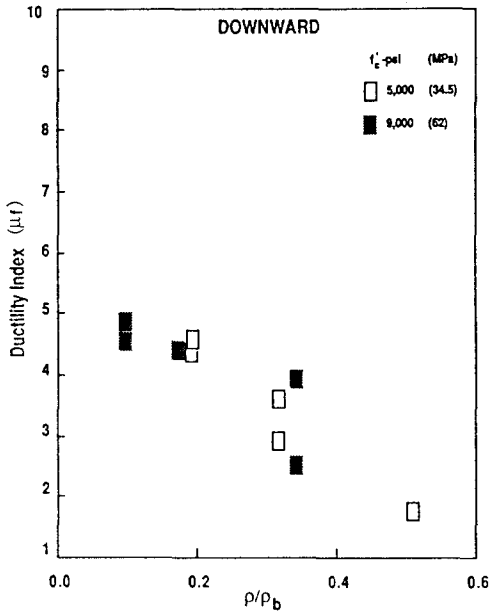


Fig. 6(b) Ductility Index  $\mu_f$  vs.  $\rho/\rho_b$   
— Downward —

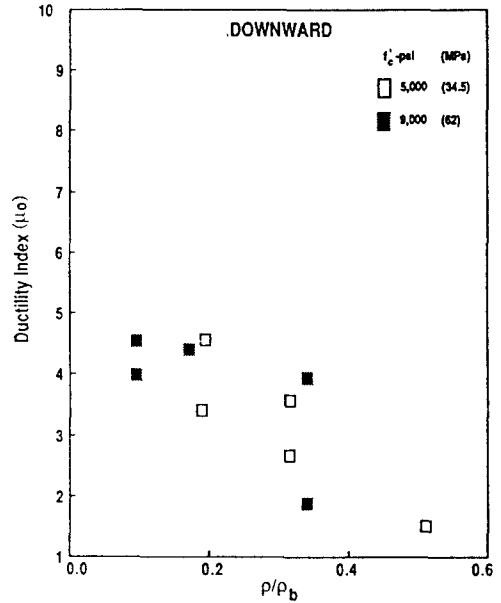


Fig. 7(b) Ductility Index  $\mu_0$  vs.  $\rho/\rho_b$   
— Downward —

$$\rho_b = \rho_b + \rho' (f'_{sb}/f_y) \text{ ----- (4)}$$

여기서

$$\rho_b = k_1 k_2 (f'_{c}/f_y) [E_s \epsilon_u / (E_s \epsilon_u + f_y)] \text{ (5)}$$

이것은 단근으로 배근된 단면에 해당하는 평형철근비이며, 그리고 여기서

$$f'_{sb} = E_s \epsilon_u - (d' / d) [E_s \epsilon_u + f_y] \leq f_y \text{ (6)}$$

이것은 평형파괴에서 압축철근 응력도이다.

$\mu_0$ 에 대한  $\rho/\rho_b$  그리고  $\mu_f$ 에 대한  $\rho/\rho_b$ 의 그림이 Fig. 6과 7에 각각 그려져 있다. 아물튼 전단 파괴된 A6D2 시험체를 제외하고 모든 시험체들은  $\mu_0$ 로 나타낸 시험체보다  $\mu_f$ 로 대표되고 있는 시험체가 보다 실제적임을 보여주고 있다.

Fig. 7에서 값을 얻을 수 있는 가장 큰 값이 아니라 측정될 수 있는 가장 큰 값이라는 것을 다시한번 주목할 필요가 있다.

## 콘크리트 강도의 효과

Fig. 6과 7은 동일한 주근양에 대하여 연성은 콘크리트강도가 증가함에 따라 증가함을 보여주고 있다.

## 구속근 간격의 효과

연구범위내에서 구속근(confinement reinforcement)은 부재연성에 대하여 주목할 만한 효과를 보이지 않아 기대하고 있던 경향과 같은 결과를 보여주었는데 이는 다음과 같이 설명될 수 있다.

기둥에서 tie나 spiral형태의 횡보강근은 다음과 같은 4가지의 서로 다른 기능을 갖고 있다.

- (a) 콘크리트를 타설하는 동안에 주근을 고정시키는 것
- (b) 전단 보강으로써의 역할
- (c) 압축철근의 좌굴지연 그리고,
- (d) 콘크리트 구속의 역할

첫번째 기능은 본 논의에서 실질적으로 관련된 것이 아니다. A602를 제외한 모든 시험체들이 휨에 지배적인 거동을 보였기 때문에 두번째 기능 또한 실질적인 것이 아니다. 세번째 기능에 대하여서 하중수행 능력에 있어서 최대하중의 도달뿐 아니라 감소는 어느 시험체에 있어서 압축 철근의 좌굴에 의해서 지배되는 것이 아니다. (압축철근의 좌굴을 야기시킬 수 있을 만큼 보를 변형시키는 것을 가능한 것이 아니다.) 마지막으로 실험이 축압과 병행된 것이 아니라 휨 아래서 수행하였기 때문에 콘크리트 압축영역은 단면에 대하여 상대적으로 작은부분(중립축 깊이는 상당히 얕았다)이었다. 그래서 콘크리트의 구속, 혹은 보다 정확하게 띠근 간격이 150에서 75mm로 감소하는 구속에 있어서의 변화는 중앙집중압축 하중하에서의 그것만큼 중요하지 않은 것으로 보여진다.

## 보통중량 콘크리트와 비교

반복하중을 받는 보통중량 콘크리트를 사용한 보가 참고문헌 2, 3에 보고되고 있다. 보통중량 콘크리트 보는 동일한 주근과 그리고 비슷한 콘크리트 강도를 갖고 있는 경량 콘크리트보다 높은  $\mu_f$ 값을 보여주고 있다. 그러나 앞에 언급된 것은 경량 콘크리트의 경우 보다 적은 비탄성 변형능력을 반드시 의미하는 것은 아니다.  $\Delta_f$ 의 값은 보통중량콘크리트 보 뿐만 아니라 경량콘크리트의 경우에 있어서 최대 stroke 한계 61mm와 동일하거나 거의 비슷한 값이었다. 그러나 경량콘크리트의 낮은 탄성계수때문에 보의 항복시 중립축 깊이는 보통 보통중량콘크리트 보에 해당하는 것 보다 크다. 이것은 경량보에서 항복곡률과 항복처짐  $\Delta_y$ 를 보다 크게 만든다. 따라서  $\mu_f = \Delta_f / \Delta_y$ 는 보다 작은것이 입증되었다. 실험기기와 한계 stroke에 도달했을 때 실험한 모든 보는 최대하중수행능력의 80%보다 실질적으로 크다는 것이 다시 한번 강조되어야 한다. 따라서 모든 경우에서 실제 값은 Table 2에 보고된 값보다 큰 것이다.

## 結 論

전단파괴된 하나의 시험체를 제외하고는 고강도 경량콘크리트 시험체 뿐만 아니라 보통강도 경량 콘크리트시험체들은 실험기기의 한계stroke에 도달할 때까지의 안정된 이력 거동을 나타내었다. 휨에 지배되

는 거동은 최대가능 휨강도에 해당하는 전단을 초과하는 설계전단 강도를 제공함으로써 확신될 수 있었다. 반복하중을 받는 본 고찰의 경량 콘크리트보와 기존의 고찰에서의 보통중량 콘크리트에 부과될 수 있었던 최대변위는 실험기기의 최대 stroke에 의해 한계가 있었기에 연성지수  $\mu_f$ 의 완전히 잠재적인 값은 측정될 수 없었다. 항복처짐이 경량콘크리트보에 비해 높았기 때문에 경량콘크리트보의 연성지수는 보통중량콘크리트보의 연성지수보다 낮은 값을 보였다.

그러나 만일 전단에 지배된 경량 콘크리트보를 이 과정에서 제외하였다면 부과될 수 있는 최대처짐에서 최대하중 수행능력의 하락이라는 견지에서는 비슷한 강도와 동일한 주근을 갖는 경량 콘크리트보의 연성지수는 보통중량 콘크리트의 연성지수보다 큰 차이가 없는 값을 보였다.

## 感謝의 글

본 연구의 시험체는 Material Service Corporation 이 콘크리트를 제공하였으며, Reinforced Concrete Research Council에서 부분적 재정지원을 하여 주었음을 감사히 생각합니다. 그리고 본 연구를 위하여 한.미 공동연구를 추진하여준 PCA의 Dr. S.K.Ghosh에게도 심심한 사의를 표합니다. 마지막으로 국내측 경비를 지원하여준 한국과학재단 ( 목적기초 : 1989~1992)에 깊은 감사를 드립니다.

## 參考文獻

1. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Concrete(ACI 318-89) and Commentary(ACI 318R-89), American Concrete Institute, Detroit MI, 1989.
2. Kamara, M.E., "Flexural Behavior Including Ductility of Ultra-High Strength Concrete Members Subjected to Reversed Cyclic Loading", Ph. D. Thesis, University of Illinois at Chicago, Chicago, IL, 1988, 258 pp.
3. Shin, S.W., Kamara, M., and Ghosh, S.K., "Flexural Ductility, Strength Prediction, and Hysteretic Behavior of Ultra-High Strength Concrete Members", Special Publication SP 121, A. C. I., Detroit MI, 1990, pp. 239-264.
4. ACI Committee 363, "State-of-the-Art Report on High Strength Concrete", (ACI 363R-84), American Concrete Institute, Detroit, MI, 48pp
5. Shin, S.W., "Flexural Behavior Including Ductility of Ultra-High Strength Concrete Members", Ph.D. Thesis, University of Illinois at Chicago Chicago, IL, 9186, 232 pp.
6. Shin, S.W., Ghosh, S.K., and Moreno, J., "Flexural Ductility of Ultra-High Strength Concrete members", ACI Journal, Proceedings Vol. 86, No. 4, July-August 1989, pp. 393-400.