

# 초고강도 콘크리트의 재료특성 및 휨 거동에 관한 실험적 연구

## Experimental Study on the Material Characteristics and Flexural Behavior of Ultra High-Strength Concrete

장 일 영\*, 이 호 범\*\*, 변 근 주\*\*\*  
Jang, Il Young Lee, Ho Beom Byun, Keun Joo

### 요 약

본 연구는 실리카흙을 혼화재료로 사용하여  $1200\text{kgf}/\text{cm}^2$  정도의 초고강도 콘크리트를 제조하였으며 이에 대한 재료특성 실험 및 보부재의 휨거동 실험을 실시 비교 분석하였다. 재료특성 실험으로는 기본적인 강도 시험, 파괴 응력 측정, AE 실험 그리고 수분압입법에 의한 세공실험을 실시하였다. 초고강도 콘크리트의 재료특성치는 ACI 363의 고강도 콘크리트 재료특성 결과보다 크게 나타났으며 압축강도와 미세공극량은 선형적으로 비례하였다. 보부재의 휨특성을 파악하기 위해 인장철근비 변화, 전단보강근의 유무 및 철근 표면형상의 변화 등을 실험인자로 하였으며 각각의 현상을 비교분석함으로써 균열 성장에 따른 하중-변위 관계, 중립축 이동에 따른 부재거동 및 응력분포의 변화에 관하여 비교 고찰하였다. 초고강도 콘크리트를 사용한 보부재의 경우 중립축 상승으로 단면의 압축영역은 매우 작아져 급격히 압축파괴되는 경향을 보였으며 응력분포 형태는 삼각형의 분포를 보였다.

### Abstract

The object of this study is to investigate material characteristics and flexural behavior of ultra high-strength concrete of  $1200\text{ kgf}/\text{cm}^2$  obtained by the mix of silica fume. The assessment of compressive strength by using the Acoustic Emission method forms an advanced experimental result for examining the concrete failure. Modulus of rupture and tensile splitting strength are also studied. Experimentally determined values for the modulus of elasticity and strains, etc are observed higher than those predicted by the expression given in ACI 363R. The main variables in the beam test are tensile steel ratios, presence of shear reinforcement, and change of steel bar shape. The section behavior of beam as a function of the location of neutral axis, the load-displacement relationships and the pattern of crack are investigated. A triangle stress block on a section of test beam may be validated by the present

\* 정희원·삼성종합건설 기술연구소 선임연구원  
\*\* 삼성종합건설 기술연구소 선임연구원  
\*\*\* 정희원·연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

본 실험은 前田製管(株)의 도움으로 東北大學 工學部 土木工學科 構造工學研究室에서 실시하였다.

theory and can be suggested as a developed model.

**Keywords :** Ultra high-strength concrete, Material characteristics, Acoustic Emission, Micro porosity, Flexural Behavior, Load-displacement relationship, Triangle stress block

## 1. 서론

최근에 있어서 콘크리트 재료의 신소재 개발 및 시공 기술 등의 향상에 힘입어 콘크리트의 초고강도화가 급속히 진행되고 있다.<sup>(1,2,3,4)</sup> 초고강도 콘크리트의 개발 및 실용화는 건축구조물의 초고층화, 교량의 장대교화, 프리캐스트 제품의 품질개선 및 프리스트레스 콘크리트 구조물의 사용성 증가등을 가능하게 하고 있으며 이는 앞으로 고강도 콘크리트의 수요가 급증할 것을 예상되게 하고 있다. 실제로 미국의 경우 철근콘크리트 구조물에 압축강도 900kgf/cm<sup>2</sup>이상의 초고강도 콘크리트를 적용하고 있으며 현재 철근콘크리트 구조물에 적용된 콘크리트 압축강도는 최대 1330kgf/cm<sup>2</sup>까지 이르고 있다. 일본의 경우는 현장 적용가능한 압축강도가 600kgf/cm<sup>2</sup> 정도에 머물고 있으나 이것은 지진대라는 특수지역성에 따른 것이며 프리캐스트 제품에는 1000kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 초고강도 콘크리트가 쓰여지고 있다. 국내의 경우는 토목공사에 최고 450kgf/cm<sup>2</sup> 정도가 사용되었음을 고려하면 선진외국과 상당한 차이를 나타내고 있다. 이것은 설계자 인식 및 현장 시공경험 부족 그리고 시공기술의 비전문성 등이 원인이 되고 있다. 그러나 강도발현을 위한 초고강도 콘크리트의 제조는 그다지 어렵지 않으며 특히 프리캐스트 제품 및 프리스트레스 콘크리트 구조물 등에서 빠른 발전이 있으리라 생각

된다.

본 연구는 콘크리트 압축강도 1200kgf/cm<sup>2</sup> 정도를 대상으로 하여 압축강도시험, 휨강도시험, 할열인장강도시험, AE(Acoustic Emission) 실험 및 세공(공극) 실험을 실시하여 재료적 특성을 파악하였으며, 철근콘크리트 구형보 부재의 휨 재하 실험을 실시하여 초고강도 콘크리트 구조부재의 휨거동 특성을 파악하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료 및 배합설계

시멘트는 보통포틀랜드 시멘트, 조골재는 최대치수가 15mm인 산지쇄석, 세골재로는 강모래를 사용하였다. 콘크리트의 초고강도화를 위해 혼화재료로 실리카흙(Table 1 참조)을 사용하였으며 고성능 감수제는 마이티150을 사용하였다. Table 2에 본 실험에서 사용한 초고강도 콘크리트 및 보통 콘크리트의 배합표를 나타낸다. 양생은 타설후 증기스팀으로 1일간 양생한 후 약 56일간 자연상태로 방치하였다.

### 2.2 공시체 제원 및 실험방법

압축강도 및 할열인장강도는  $\Phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 의 원주

Table.1 Chemical composition and physical properties of silica fume(%)

SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Diameter( $\mu\text{m}$ )	Specific Surface
90.3	2.33	1.17	1.29	1.99	0.40	1.84	0.52	0.13~0.16	15~20 m <sup>2</sup> /g

Table.2 Mix proportions of concrete

Type	Maximum aggregate (mm)	Slump range (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	W/C+Si (%)	Si/C (%)	Unit weight(kgf/m <sup>3</sup> )					
								W	C	S	G	Mi.150	Si
A	15	12±2	2±1	27.9	44.8	24.3	15.9	130	460	824	1014	16.3	69.9
B	25	8±2	2±1	46.0	40.0	46.0	0.0	75	383	689	1222	0.96	0.0

A: Ultra high strength concrete, B: Lower strength concrete

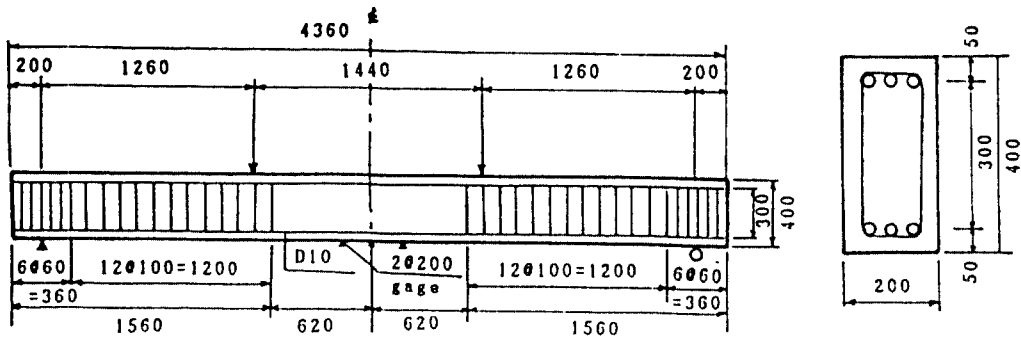


Fig.1 Details of beam specimens

형 공시체를, 휨강도는 10cm×10cm×40cm의 각주형 공시체를 사용하였다. 강도시험 재하는 200ton 만능시험기를 사용하였으며, 하중, 종 횡방향 변형율 및 AE 이벤트수를 Dynamic Strain Indicator 와 Data Recorder를 사용하여 동시에 측정하였다. 또한 압축강도 측정용 공시체를 파괴시킨 후 수은압입방법(자동포로시미터 Auto Pore 9200 V2. 03)을 사용하여 콘크리트 내부의 세공특성(Micro porosity)에 대하여 검토하였다.

철근콘크리트 보 공시체의 형상크기 및 배근의 일례를 Fig. 1에 나타내며 공시체 제원 및 변동인자를 Table 3에 나타낸다. 보 공시체의 제원은 단면높이 40cm(유효높이 35cm), 폭 20cm, 스패ن 396cm(전단스패ن 126cm, 휨스패ن 144cm, 전단-스패너비 3. 6)으로 공시체 수는 8개이다. 스패ن 중앙단면 및 단면 중앙으로 부터 20cm 위치에 노취를 설치하여 부재가 좌우대칭으로 변형하도록 하였으며 전단구간에는 스텔립을 충분히 배근하여 전단파괴가 일어나지 않도록 하였다. 변동인자는 Table 3에 나타난 것과 같이 인장철근비, 휨 구간내의 전단보강근의 유무 및 축방향철근의 표면형상(원형철근, 반이형철근 및 이형철근)으로하였다.

휨 재하는 100톤 유압 잭을 이용한 하중 제어방식으로서 2점재하를 실시하였다. 하중 측정은 로드셀을 이용하였으며 변위계를 중앙점, 재하점 및 그사이의 5개소에 설치하여 변위분포를 측정하였다. 콘크리트 표면(압축부 및 인장부에 35개소) 및 인장철근(중앙점을 중심으로 22개소)에는 스트레인지지를 붙여서 변형율을 측정하였으며 부재 중앙점의 압축면에는 다이알게이지를 설치하여 종국상대까지의 압축변형율을 측정하였다. 전체 측정점은 U-CAM과 PC를 이용하여 5초 간격으로 동시에 기록하였다.

Table.3 Properties of specimens

No. of specimen	Tensile rebar		Compress.rebar		Bal. steel ratio $\rho_b$ (%)	$\rho_1$ $\rho_2$ (%)	Shape of bar
	No.of bar	Ratio $\rho_1$ (%)	No.of bar	Ratio $\rho_2$ (%)			
1	3D22	1.66	2D6	0.09	13.31	12.5	Deformed
2	3D19	1.23	2D6	0.09	13.31	9.2	Deformed
3	3D16	0.85	2D6	0.09	13.31	6.4	Deformed
4	3D13	0.54	2D6	0.09	13.31	4.1	Deformed
5*	3D19	1.23	2D6	0.09	13.31	9.2	Deformed
6	3 $\phi$ 22	1.66	2D6	0.09	13.31	12.5	Round
7	3D22	1.66	2D6	0.09	13.31	12.5	Half Def.
8	3D16	0.85	3D16	0.85	14.57	5.8	Deformed

\* Especially 16 stirrups are reinforced at D10@9 in flexural span

### 3. 강도 실험결과 및 분석

#### 3. 1 압축강도 특성

초고강도 콘크리트의 압축강도는 1000kgf/cm<sup>2</sup>-1300kgf/cm<sup>2</sup> 범위에 있으며 보통강도 콘크리트는 300kgf/cm<sup>2</sup> 전후이다. 이 시험결과를 Table 4에 나타낸다(4장의 휨기동 실험의 압축강도 시험결과). 초고강도 콘크리트의 압축강도시험으로부터 구한 최대강도 도달시의 종방향 변형율 0.0031-0.0042는 보통강도 콘크리트의 종방향 변형율 0.0018-0.0026 보다 상당히 크며 압축강도 증가와 더불어 최대강도시의 종방향 변형율도 증가한다는 경향<sup>(5)</sup>과 일치하고 있다. 포아슨 비도 0. 4 전후로서 Perenchio등<sup>(6)</sup>의 실험결과인 최대강도 560kgf/cm<sup>2</sup>-812kgf/cm<sup>2</sup>에서의 0.2-0.28 과 큰 차이를 보이고 있다. 응력-변형율 관계에서의 초기탄성계수  $E_c$ 는 4.10×10<sup>4</sup>kgf/cm<sup>2</sup>-4.84×10<sup>4</sup>kgf/cm<sup>2</sup>의 범

Table.4 Compressive strength values of the test concrete

Sylinder specimen	Maximum stress kgf/cm <sup>2</sup>	Long. strain $\epsilon_s \times 10^{-6}$	Trans. strain $\epsilon_t \times 10^{-6}$	Poisson ratio $\nu$	Young's modulus 10 <sup>3</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	No. of AE event
C11-1	1146	3475	1110	0.319	4.21	6294
C11-2	1133	3900	1652	0.423	4.10	6100
C11-3	1159	3925	1645	0.419	4.71	1223
C12-1	1261	3853	1652	0.429	4.17	3632
C12-2	1197	3663	1032	0.282	4.57	3410
C12-3	1248	4225	1324	0.313	4.15	2696
C21-1	1050	3288	710	0.216	4.32	2715
C21-2	1025	3400	1134	0.333	4.84	1139
C22-1	1171	3688	1475	0.400	4.71	2984
C22-2	1031	3125	1175	0.376	4.21	7186
C22-3	1048	3450	1120	0.324	4.55	9900
C22-4	1080	3715	1520	0.409	4.44	2900
C22-5	1115	3270	1395	0.427	4.21	5150
C22-6	1125	3605	1365	0.379	4.62	4200
CH	369	1960	635	0.324	2.42	9980
CG1	325	2573	678	0.264	2.68	5505
CG1	270	1800	480	0.267	2.86	9500

C1: No.2, 3, 4, 5 Specimen,

C2: No.1, 6, 7, 8 Specimen

CH, CG: Lower strength concrete

위로서 ACI 363<sup>(1)</sup>에서 제시되는 압축강도 210kgf/cm<sup>2</sup>~840kgf/cm<sup>2</sup> 범위에서의 탄성계수식에 의한 결과 보다 약 20% 정도 크게 나타나고 있다. 이와 같이 초고강도 콘크리트의 압축강도, 횡방향 변형률 및 초기 탄성계수 등은 상당히 크게 나타나 구조 및 재료역학적 거동에 고려되어야 한다.

### 3. 2 휨인장강도 및 활열인장강도 특성

휨인장강도 및 활열인장강도 시험결과를 Table 5에 나타낸다. 압축강도 1200kgf/cm<sup>2</sup> 정도인 초고강도 콘크리트의 휨인장강도( $f_r$ )는 94kgf/cm<sup>2</sup>~ 117kgf/cm<sup>2</sup> 정도이다. Slate등<sup>(3)</sup>의 제안식을 본 실험의 초고강도 콘크리트에 대해 적용하면 실제값보다 과대평가가 되므로 기존의 실험치<sup>(7)</sup>와 본 실험결과 등을 이용하여 식(1)과 같은 압축강도에 따른 휨인장강도 계산식을 제시한다.

$$f_r = 0.07 f_c + 19.3 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (1)$$

여기서,  $100 \text{ kgf/cm}^2 < f_c < 1191 \text{ kgf/cm}^2$

Dewar<sup>(1)</sup>에 의하면 보통강도 콘크리트 경우의 활열

인장강도는 압축강도의 약 10% 정도이나 고강도 콘크리트의 경우는 약 5% 정도가 된다고 했지만 본 실험의 경우는 약 7%~8% 정도의 범위에 있다. 이는 초고강도 콘크리트에서의 관계상수를 재고해야 함을 보여주고 있다.

초고강도 콘크리트의 휨인장강도 및 활열인장강도는 압축강도 증가율만큼의 강도증진은 기대할 수가 없지만 일반적인 보통 콘크리트의 휨인장강도 및 활열인장강도보다는 크므로 구조적 성능에 미치는 영향은 클 것이 예상된다.

Table.5 Modulus of rupture( $f_r$ ) and tensile splitting strength( $f_t$ )

Type	No.	$f_r$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$f_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$f_r/f_c$	$f_t/f_c$
Ultra high-	1	94.1	89.1	1/12.7	1/13.4
	2	101.9	79.6	1/11.7	1/14.6
	3	96.0	85.9	1/12.4	1/13.9
	4	108.2	84.4	1/9.9	1/12.7
	5	117.0	85.0	1/9.1	1/12.6
	6	105.3	79.6	1/10.2	1/13.4
Lower	1		28.7		1/10.5
	2		29.6		1/10.1

### 3. 3 AE 특성

Fig. 2에 종방향 변형률에 대한 압축강도와 AE 이벤트 수 관계에 대한 측정예를 나타낸다. 여기서 AE 이벤트 수는 공시체 내부의 미세균열로 인한 파쇄음을 측정하는 기계적 기준치로서 본 실험의 경우 200kHz~500kHz를 측정범위로 하였다. 보통강도 콘크리트는 저응력 상태에서부터 AE 이벤트 수가 증가하여 최대강도부근에서 AE 이벤트 수는 급격히 증가하였다.

초고강도 콘크리트의 경우는 저응력 상태에서 AE의 이벤트 수 증가는 거의 미세하지만 최대강도 부근에서 급격히 AE 이벤트 수가 증가하였다. 이것은 초고강도 콘크리트가 보통강도 콘크리트에 비해 조직이 치밀하기 때문이며 최대응력점 가까이까지도 건전한 상태를 유지하기 때문이다. 즉 미세균열 발생 및 골재와 모르타르 등의 박리현상이 최대응력 직전에서만 발생하는 것을 의미하며 입자의 하중에 의한 파괴에너지가 보통 콘크리트에서보다도 더 빠르게 소산되어 매우 취성적임을 나타낸다.

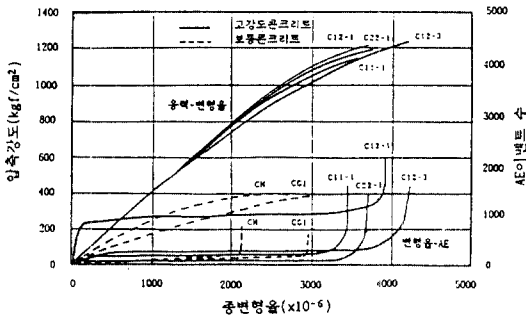


Fig.2 Compressive strength - longitudinal strain - AE event number curve

### 3. 4 세공(공극) 특성

콘크리트 압축강도와 전 세공량과의 관계를 Fig.3에 나타낸다. 여기서 전 세공량은 세공직경 300 $\mu$ m-0.003 $\mu$ m 범위의 세공을 합산한 용적을 말한다. 초고강도 콘크리트의 경우 세공 직경은 40 Å-400 Å 범위에 분산되어 있지만 보통 콘크리트 경우는 직경이 1000 Å까지 달하고 있다. Fig.3에서 알 수 있듯이 전 세공량이 감소할수록 압축강도는 증가하고 있다. 이것은 콘크리트 중의 전 세공량에 의해 압축강도가 결정되는 세공 이론<sup>(4)</sup>을 따르고 있음을 나타내고 있다. 선형분석에 따라 식(2)를 제시하며 이 식은 전 세공량과 압축강도와의 관계를 나타내고 있다.

$$f_c = -13667 G_g + 1552.3 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (2)$$

여기서,  $G_g$ : 전 세공량 (cc/g)

Fig.4와 Fig.5는 각각 누적 세공용적과 세공직경의

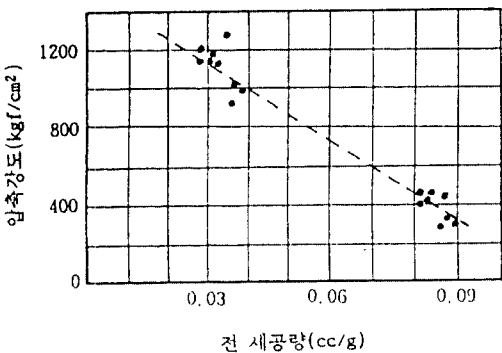


Fig.3 Compressive strength vs total amount of porosity

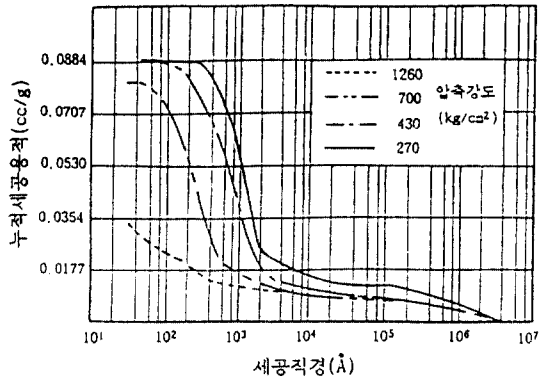


Fig.4 Porosity diameter vs cumulative porosity volume

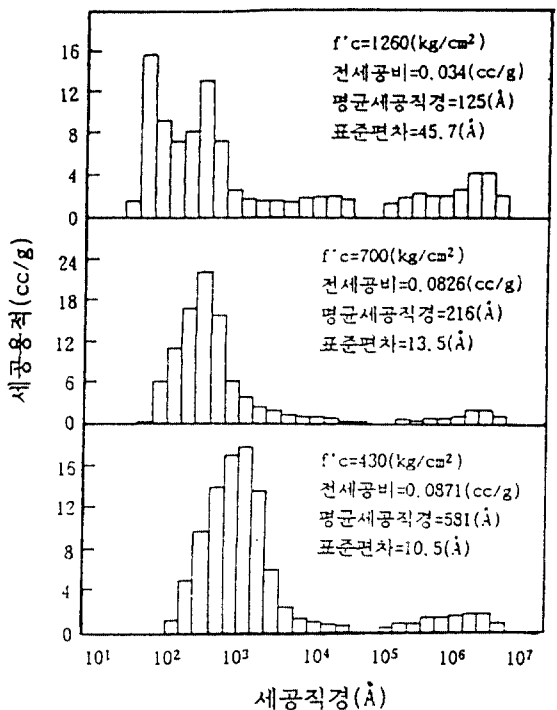


Fig.5 Porosity diameter vs porosity volume

관계 그리고 압축강도별 세공직경과 세공용적 분포와의 관계를 비교한 것이다. 초고강도 콘크리트는 보통 콘크리트에 비하여 전 세공 용적이 1/3 정도로 매우 적으며 강도가 높을수록 작은 세공들이 많이 분포되어 있음을 나타내고 있다. 이것은 미립자인 실리카흄 혼입에 따른 마이크로 필터 효과에 의하여 잘 다져질 수 있는 성질과 포졸란 반응에 의해 경화체 조직이 치밀화될 수 있는 성질 등의 효과로써 설명할 수 있으며 세공 직경이 큰 것

이 많이 분포되어 있으면 강도가 낮아짐을 알 수 있다.

#### 4. 휨거동 실험결과 및 분석

##### 4.1 파괴형태 및 균열 발생상황

Table 6에 휨거동 실험결과를 나타낸다. 인장철근비가 비교적 큰 No. 1, No. 2, No. 3, No. 5, No. 7 및 No. 8공시체는 부재항복후 철근 경화현상에 의해 내력이 증가하지만 종국상태에서는 폭발음을 동반하는 급격한 압축파괴 현상을 보였다. 부재 중앙으로부터 균열이 발생. 초기 하중단계에서 1차균열 안정상태가 되며 하중이 더 커지면서 2차균열이 발생하였다. 부재항복후 내력이 증가하면서 균열의 상부 끝부분이 갈라지는 현상이 발생하였으며 하부단에서도 2차균열이 1차균열에 결합되는 현상이 보였다. 이것은 보통강도 콘크리트 부재의 휨거동과 비슷한 경향이지만 균열 길이는 하단 부부터 중립축까지 약 36-37cm정도로 콘크리트 압축강도가 높을수록 상당히 짧은 압축역으로 단면의 평형 조건을 만족시키고 있다. 이는 고강도 콘크리트로서 견딜 수 있는 단면이 매우 효율적임을 보여주고 있다. 인장철근비가 비교적 작은 No. 4공시체는 연성적인 대변형 거동을 보여 재하를 도중에 중단시켰다. No. 4공시체는 균열간격이 크고 2차균열은 발생하지 않았다. 따라서 균열분산성이 나쁘며 균열폭도 상당히 커져서 사용성의 문제가 예상된다. 그러나 파소철근비가 갖는 안정성 문제에서 연성의 효과를 볼 수가 있으며 상대적으로 취성파괴를 하는 다른 공시체들과 비교된다. 원형철근을 인장철근으로 사용한 No. 6공시체는 전단구간 인장철근이 슬립되어 대변형이 생기는 정착파괴를 나타냈다. 균열간격은

비교적 크며 2차균열은 발생하지 않았다. 반이형철근(휨구간 부분의 이형철근 마디를 한 개 걸러 제거함으로써 Rib간격은 이형철근의 2배임)을 인장철근으로 사용한 No. 7공시체는 같은 조건하에서 이형철근을 사용한 No.1 공시체와 비교해 특별한 거동은 나타나지 않았다.

##### 4.2 하중-변위 관계

Fig. 6, 7, 8은 전 공시체의 하중-변위 관계를 나타낸다. 초고강도 콘크리트를 사용한 본 실험의 경우 전반적인 경향은 일반적으로 알려져 있는 보통강도 콘크리트 휨거동의 하중-변위 관계 특성과 비슷한 경향을 보였다. 즉 인장철근비가 클수록 휨내력은 증가하지만 최대내력 도달 직후 급격한 압축파괴가 발생하여 연성은 감소하였다. Fig. 6에 나타난 것과 같이 인장철근비가 같은 경우에도 철근 표면형상(부착성능)에 따라 내력 및 변형성능은 틀리게 나타났다. 종국내력은 이형철근(No. 1), 반이형철근(No. 7), 원형철근(No. 6)의 순서로 컸으며 파괴까지의 변위량은 작게 나타났다. 이형철근과 반이형철근을 사용한 공시체의 하중-변위 관계 특성은 매우 유사하며 연성비(종국상태 변위/부재항복 변위)도 11.1정도로 같지만 원형철근을 사용한 공시체는 항복점이 명확치 않고 최대내력 도달 후에도 변위는 증가하여 연성비는 14.3정도를 나타내었다. Fig.7에 나타난 것과 같이 휨 구간에 스테럽을 보강한 공시체(No.5)가 같은 조건하에서 스테럽을 배근하지 않은 공시체(No.2)보다 최대내력 및 연성이 증가하였다. 이 것은 최대내력 도달 직후의 급격한 압축파괴를 스테럽으로 압축부 콘크리트를 구속하는데에 그 원인이 있다고 보여진다. Fig. 8에 나타난 것과 같이

Table.6 Flexural behavior of beams

No. of spec.	Initial crack			Yielding of bar			Maximum strength			Ultimate status			Crack spacing		Failure mode	ACI Maximum strength
	Load (ton)	Dis. (mm)	Comp. strain	Load (ton)	Dis. (mm)	Comp. strain	Load (ton)	Dis. (mm)	Comp. strain	Load (ton)	Dis. (mm)	Comp. strain	Max. (mm)	Ave. (mm)		
1	7.4	2.1	224	21.7	13.5	1122	27.4	150	4490	27.4	150	4490	26.0	17.3	급격압괴	24.36
2	8.3	2.8	336	17.0	12.7	729	21.7	158	5810	21.7	158	5810	25.0	17.9	압괴	17.47
3	5.6	1.9	139	11.0	10.6	671	16.1	245	7603	16.1	245	7603	25.0	19.3	급격압괴	13.32
4	5.5	1.7	168	7.8	6.6	476	10.1	-	3873	10.1	365	3788	36.0	27.5	휨파괴	8.87
5	5.8	1.8	168	17.3	14.3	870	23.0	205	4968	23.0	205	4968	20.0	13.9	압괴	17.47
6	5.6	1.5	112	22.4	15.2	1010	25.3	111	2497	25.3	205	2609	34.0	23.1	대변형	24.22
7	6.7	2.0	167	20.2	13.9	1065	26.5	154	3394	26.5	154	3394	25.0	16.5	폭발압괴	24.35
8	6.2	1.8	140	11.2	9.9	504	15.8	158	3114	15.8	158	3029	31.0	19.5	급격압괴	13.96

\* Unit of compressive end strain :  $\epsilon_c \times 10^{-4}$

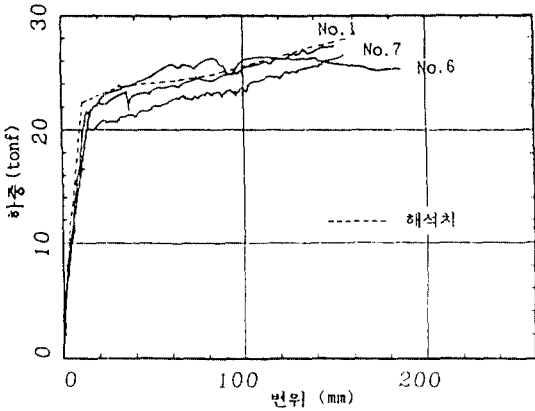


Fig.6 Load-displacement curves for specimen No.1, No.6, No.7.

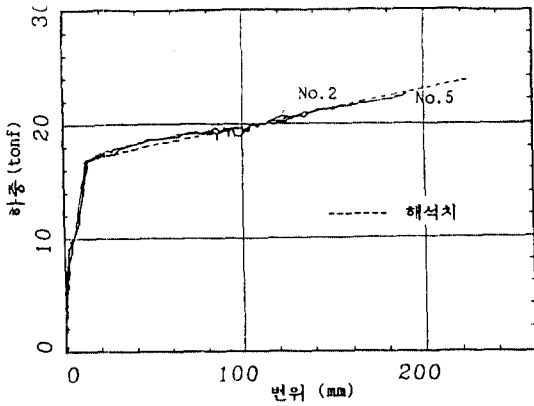


Fig.7 Load-displacement curves for specimen No.2, No.5.

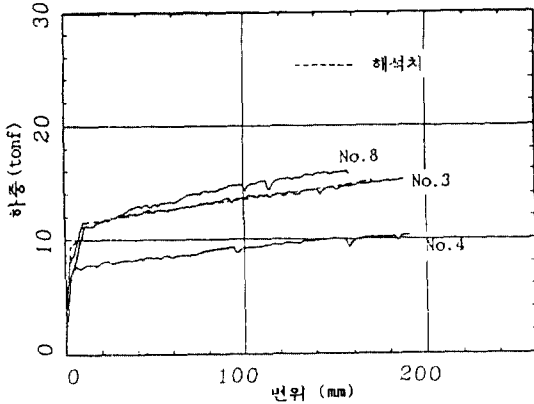


Fig.8 Load-displacement curves for specimen No.3, No.4, No.8.

압축철근을 배근한 공시체(No.8)가 같은 조건하에서 압축 철근을 배근하지 않은 공시체(No.3)보다 최대내력은 크지만 연성은 작게 나타났다. 이 원인은 종국상태 가까이부터 압축철근 위치(하단면부터 35cm높이에 배근)보다도

중립축 위치가 상승하여 압축철근이 인장철근의 역할을 하게 되어 인장철근비가 높아졌기 때문으로 사료된다. Fig.6, 7, 8중에 나타난 해석치는 부착특성을 고려한 휨모멘트-곡률 관계에 의한 하중-변위 해석법<sup>(9)</sup>을 이용하여 계산한 것으로 초고강도 콘크리트를 사용한 본 실험결과와도 상당히 일치하고 있다.

#### 4.3 단면 응력분포 및 중립축 이동

Fig.9에 단면 변형률분포의 실험예를 나타낸다. 각 하중단계의 변형률분포는 대략적인 직선분포를 나타내며 하중 증가에 따른 중립축 상승 효과를 잘 나타내고 있다. 종국상태에 도달 할 때의 중립축은 하단면 부터 36-37cm정도이며 급격한 압축파괴의 직접적인 원인으로 사료된다. Hognestad의 응력블록 이론<sup>(10)</sup>에 의한 ACI의 종국내력 계산치와 본 실험치(Table 6 참조)를 비교하면 계산치는 실험치보다 약10-20%정도 작은 값을 나타낸다. 따라서 초고강도 콘크리트를 사용하는 경우에는 새로운 응력블록 이론이 제안되어야 한다. 본 실험의 경우 변형률 분포에 따른 응력분포 형상이 파괴 직전에 대체로 삼각형 분포를 이루고 있어 기존의 실험 결과 및 이론<sup>(11,12)</sup>과 같은 경향을 나타내고 있으나 종국 상태에서 대해서는 더 많은 연구가 있어야 할 것으로 사료된다.

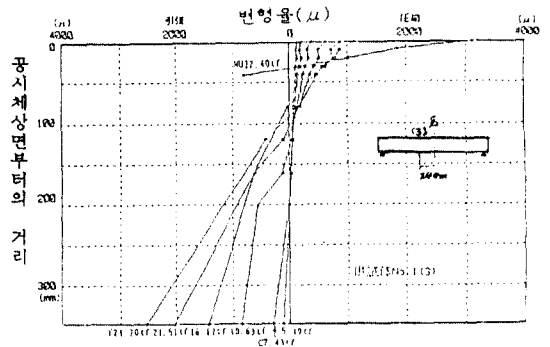


Fig.9 Strain distribution on a cross section of beam

#### 5. 결론

- 1) 초고강도 콘크리트는 보통 콘크리트에 비해 최고 2 배까지 탄성적이고 급격한 취성파괴를 유발한다. 또한 압축강도 증가율만큼의 함열인장강도 및 휨인장강도 등

의 증가는 기대할 수 없으나 ACI 363의 고강도 콘크리트의 재료특성 결과보다 전반적으로 큰 값을 나타냈다. 따라서 약점인 취성적 보완만 따른다면 구조재료로서의 초고강도 콘크리트 사용은 매우 유용하다고 생각된다.

2) AE의 발생거동은 재하하중에 대한 초기및 종국 파괴상태를 잘 규명하고 있으며 기대되는 최대 변형율의 추정과 함께 초고강도 콘크리트의 취성적 성향을 검증하였다.

3) 콘크리트중의 전 세공량의 감소와 압축강도의 증가는 비례 관계가 있으며 고강도화 될 수록 작은 세공의 분포율이 크게 나타나고 있다.

4) 초고강도 콘크리트 구형 보부재의 경우 종국상태의 압축영역이 상당히 작아 단면 효율성이 매우 높으나 이에 따른 압축철근의 인장철근화로 연성의 감소가 있어 안정성에서는 불리하게 작용하므로 설계시 경제적 내력 산정에 유의하여야 한다.

5) 휨 구간의 스테럽 배근은 휨부재의 연성 증가에 매우 효과적이며 인장주철근의 고강도화가 요구된다.

6) 초고강도 콘크리트의 휨거동에서 압축부의 응력 분포형상은 삼각형 분포에 가까워 짐을 실험적으로 증명하였다.

#### 참 고 문 헌

- 1) ACI-363, "State of the Art Report on High-Strength Concrete", Journal of ACI, Vol.81, No.4, July-Aug. 1984, pp.1009-1056
- 2) Russel, H.G., "High-Strength Concrete", Korea Chapter of the ACI, 1990, pp.1-7
- 3) FIP/CEB, "State of the Art Report on High Strength Concrete", Bulletin d'Information No.197, August 1990
- 4) 日本建築學會, "高強度コンクリートの技術の現状", 1991

- 5) Wischers, G., "Applications and Effects of Compressive Loads on Concrete", Beton-technische Berichte 1978, Beton-Verlag GmbH, Dusseldorf, 1979, pp31-56 (in German)
- 6) Perenchio, W.F. and Klieger, P., "Some Physical Properties of High Strength Concrete", Research and Development Bulletin No. RD056. 01T, Portland Cement Association, Skokie, 1978
- 7) 張一泳, 石黑直, "超高強度コンクリートの基礎的特性に関する研究", 東北大學 工學部 土木工學科, 構造工學 研究室 論文, 1991. 3
- 8) 小柳 治, "コンクリートの高強度化とその限界", コンクリート工學, Vol.14, No.3, March 1976, pp. 3-11
- 9) 장일영, "철근콘크리트 부재의 부착특성을 고려한 휨모멘트-곡률 관계에 관한 연구", 콘크리트 학회지, 제3권 4호, 1991. 12, pp.97-106
- 10) Hognestad, E. and McHenry, N.W. et al, "Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design", Journal of ACI, Vol.27, No. 4, Dec. 1955, pp.455-479
- 11) 신성우, "고강도 콘크리트 부재의 응력블록에 관한 검토", 콘크리트 학회지, 제2권 2호, 1990.6, pp.93-99
- 12) Swartz, S.E. and Nikaen, A. et al, "Structural Bending Properties of Higher Strength Concrete", Proceedings of the Symposium on Utilization of High Strength Concrete, Stavanger Norway, June 1987, pp.147-178

(접수일자 : 1992. 2. 27)