

초고강도 콘크리트의 재료특성 및 휨 거동에 관한 실험적 연구

장 일영* 이 호범*
Jang, Il Young Lee, Ho Beom

ABSTRACT

The object of this study is to investigate material characteristics and flexural behavior of high strength concrete. Principal causes of variations of high compressive strength include the strength-producing capabilities of cement and silica hume. Compressive strength of 1200 kgf/cm² is introduced for identifying the effect of the variation of the size of porosity and alternative method of measurement, Acoustic Emission method, is applied to examine the phenomenon of concrete failure. The main test variables in the beam element are tensile steel ratios, presence of shear reinforcement, and change of steel shape. The estimation of stress block in the flexural test of this element tends to support the present theory and may suggest a desirable shape of the stress block.

1. 서론

최근에 있어서 콘크리트 재료의 신소재 개발 및 시공기술 등의 향상에 힘입어 콘크리트의 초고강도화가 급속히 진행되고 있다. 초고강도 콘크리트의 개발 및 실용화는 건축구조물의 초고층화, 교량의 장대교화, 프리캐스트 제품의 품질개선 및 프리스트레스 콘크리트 구조물의 사용성 증가 등을 가능하게 하고있다. 이는 앞으로 고강도 콘크리트의 수요가 급증할 것을 예상되게 하고 있으며¹⁾ 실제로 선진외국의 경우 RC 구조물에 압축강도 900kgf/cm² 이상의 고강도 콘크리트를 적용하고 있으며 현재 RC 구조물에 적용된 콘크리트 압축강도는 최대 1330kgf/cm²까지 이르고 있으나 국내의 경우는 400kgf/cm² 정도가 사용되었을 뿐이다. 앞으로는 국내에서도 초고강도 콘크리트의 사용이 많아질 것이 예상되며 특히 프리캐스트 제품 및 프리스트레스 콘크리트 구조물 등에서 빠른 발전이 있으리라 생각된다.

본 연구는 콘크리트 압축강도 1200kgf/cm²을 대상으로 하여 압축강도시험, 휨강도시험, 할열인장강도

시험, Acoustic Emission(AE) 실험 및 세공(공극)실험을 실시하여 재료적 특성을 파악하였으며, RC 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 혼화제로 실리카흄(SiO₂: 90.3%)을 사용하였으며 고성능 감수제는 마이티150을 사용하였다. 표 1에 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 원주형 공시체를, 휨강도는 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 40\text{cm}$ 의 각주형 공시체를 사용하였다. 강도시험 재하는 200ton 만

* 삼성종합건설 기술연구소 선임연구원

표 1 초고강도 콘크리트(A) 및 보통 콘크리트(B)의 배합비

종류	최대골재(mm)	슬럼프범위(cm)	공기량범위(%)	W/C(%)	잔골재율(%)	W/C+Si(%)	Si/C(%)	단위량(kgf/m ³)					
								W	C	S	G	My150	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	175	383	689	1222	0.96	0.0

표 2 공시체 제원

공시체 번호	인장주철근		압축주철근		휨구간보강근		평철근비 ρ_b	형 ρ_1 ρ_b (%)	철 표 형 상	근 면 상
	사 실 용 근	철 근 비 ρ_1	사 실 용 근	철 근 비 ρ_c	사 실 용 근	간 격 (cm) ρ_w				
1	3D22	1.66	2D6	0.09				13.31	12.5	이형
2	3D19	1.23	2D6	0.09				13.31	9.2	이형
3	3D16	0.85	2D6	0.09				13.31	6.4	이형
4	3D13	0.54	2D6	0.09				13.31	4.1	이형
5	3D19	1.23	2D6	0.09	D10	9	0.79	13.31	9.2	이형
6	3Φ22	1.66	2D6	0.09				13.31	12.5	원형
7	3D22	1.66	2D6	0.09				13.31	12.5	반이형
8	3D16	0.85	3D16	0.85				14.57	5.8	이형

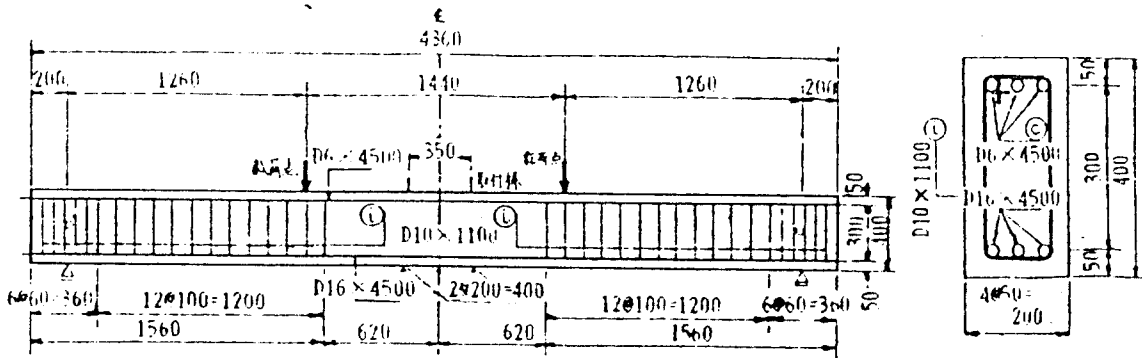


그림 1 RC 보부재의 형상 크기 및 배근도

능시험기를 사용하였으며, 하중, 종횡방향 변형을 및 AE 이벤트수를 Dynamic Strain Indicator와 Data Recorder를 이용하여 동시에 측정하였다. 또한 압축강도 측정용 공시체를 파괴시킨후 수은 압입방법(포로시미터 측정기)을 이용하여 콘크리트 내부의 세공(공극)특성에 대하여 검토하였다.

RC 보 부재 공시체의 형상크기 및 배근의 일례를 그림 1에 나타내며 공시체 제원 및 변동인자를 표 2에 나타낸다. 보 공시체는 단면높이 40cm(유효높이 35cm), 폭 20cm, Span 396cm(전단 span 126cm, 휨 span 144cm, 전단 span비 3.6)으로 공시체 수는 8개이다. Span 중앙단면과 중앙으로 부터 20cm 위치에

Nocth를 설치하여 부재가 좌우대칭으로 변형하도록 하였으며 전단구간에는 스텐드를 충분히 배근하여 전단파괴가 일어나지 않도록 하였다. 변동인자는 표 2에 나타낸 것과 같이 인장철근비, 휨 구간내의 전단보강근의 유무 및 축방향철근의 표면형상(원형 철근, 반이형철근 및 이형철근)으로하였다.

휨 재하는 100ton 유압 잭을 이용한 하중 제어방식으로서 2점재하를 실시하였다. 하중측정은 로드셀을 이용하였으며 변위계를 중앙점, 재하점 및 그 사이의 5개소에 설치하여 변위분포를 측정하였다. 콘크리트 표면(압축부 및 인장부에 35개소) 및 인장 철근(중앙점을 중심으로 22개소)에는 스트레인게이

지를 붙여서 변형율을 측정하였으며 부재중앙점의 압축면에는 다이알게이지를 설치하여 종국상태까지의 압축변형율을 측정하였다. 전 측정점은 U-CAM과 PC를 이용하여 5초 간격으로 동시에 기록하였다.

3. 강도 실험결과 및 분석

3.1 기본 강도의 특성

초고강도 콘크리트의 압축강도는 $1000\text{kgf/cm}^2 - 1300\text{kgf/cm}^2$ 범위에 있으며 보통강도 콘크리트는 300kgf/cm^2 전후이다. 그 시험결과를 표 3에 나타낸다. 압축강도시험으로부터 구한 종방향 변형율은 콘크리트 파괴시 극한 변형율²⁾과 매우 잘 일치하고 있다. 이는 초고강도 콘크리트가 갖는 공극의 조밀성 및 재료의 배합정도가 전체 종방향 변형율에는 큰 영향이 없음을 보여준다. 그러나 횡방향 변형율 0.0011 - 0.0017로부터 계산된 포아슨 비 0.26 - 0.43은 ACI에서 제안한 최대강도 $560\text{kgf/cm}^2 - 812\text{kgf/cm}^2$ 에서의 0.2 - 0.28³⁾ 보다 최고 2배의 크기를 갖는다. 초기탄성계수 E_c 는 $4.1 \times 10^5\text{kgf/cm}^2 - 5.2 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$ 의 범위로 보통 콘크리트 보다 약 2배값을 나타내며 초고강도 콘크리트 보다 탄성적으로 취성적파괴를 한다. 이는 ACI에서 제시되는 압축강도 $210\text{kgf/cm}^2 - 840\text{kgf/cm}^2$ 범위에서의 탄성계수식³⁾보다 20% 정도 크게 나타난다.

휨강도 및 활열인장강도 시험결과는 표 4와 같다. 초고강도 콘크리트의 휨강도 및 활열인장강도는 압축강도 증가율만큼의 강도증진은 기대할 수가 없지만 일반적인 보통 콘크리트의 휨강도 및 활열인장강도보다는 크므로 구조적 성능에 미치는 영향은 클 것이 예상된다.

3.2 AE 특성

그림 2에 종방향 변형율에 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 AE 이벤트 수의 증가는 거의 미세하지만 최대 강도 부근에서 급격히 AE 이벤트 수가 증가하였다.

이 것은 초고강도 콘크리트가 보통강도 콘크리트에 비해 조직이 치밀하기 때문이며 최대응력점 가까이 까지도 건전한 상태를 유지한다고 생각되어진다. 즉 미세균열 발생 및 골재와 모르타르 등의 박리현상이 최대응력 부근에서나 발생하는 것을 의미하며 입자의 하중에 의한 파괴에너지가 보통 콘크리트에서 보다도 더 빠르게 소산되어 매우 취성적이다.

3.3 세공(공극) 특성

콘크리트 압축강도와 전세공량과의 관계를 그림 3에 나타낸다. 여기서 전세공량은 세공직경 $300\mu\text{m} - 0.003\mu\text{m}$ 범위의 세공을 합산한 용적을 말한다. 초고강도 콘크리트의 경우 세공 직경은 $40 \text{ \AA} - 400 \text{ \AA}$ 범위에 분산되어 있지만 보통 콘크리트 경우는 큰 직경이 1000 \AA 까지 달하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 전 세공량이 감소할 수록 압축강도는 증가하고 있다. 이것은 콘크리트 중의 전 세공량에 의해 압축강도가 결정되는 세공 이론⁴⁾을 따르고 있다. 선형분석에 따라 식(1)을 제시하며 이 식은 전 세공량과 압축강도와의 관계를 나타내고 있다.

$$f_c = -13667 Gg + 1552.3 \quad \text{—————(1)}$$

Gg : 전 세공량 (cc/g)

그림 4는 누적 세공 용적 곡선과 세공직경을 비교한 것으로 초고강도 콘크리트는 보통 콘크리트에 비하여 전 세공 용적이 1/3 정도로 매우 적으며 강도가 높을수록 작은 세공들이 많이 분포되어 있음을 알 수 있다. 이것은 미립자인 실리카 흙 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 것이 많이 분포되어 있으면 강도가 낮아짐을 알 수 있다.

4. 휨거동 실험결과 및 분석

4.1 파괴형태 및 균열 발생상황

표 5에 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 압축파괴현상을 보였다. 부재 중앙으로부터 균열이 발생 초기 하중단계에서 1차균열 안정상태가 되며 하중이 더 커지면서 2차균열이 발생하였

표 3 압축강도 시험결과

공시체	최대응력 kgf/cm ²	종변형률 $\epsilon_y \times 10^{-6}$	횡변형률 $\epsilon_x \times 10^{-6}$	포아슨비 ν	탄성계수 10 ⁵ kgf/cm ²	AE이벤트 수
C11-1	1146	3475	1110	0.319	4.21	6294
C11-2	1133	3900	1652	0.423	4.10	800
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	5.15	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
CG2	270	1800	480	0.267	2.86	9500

C1:No.2,3,4,5 공시체

C2:No.1,6,7,8 공시체

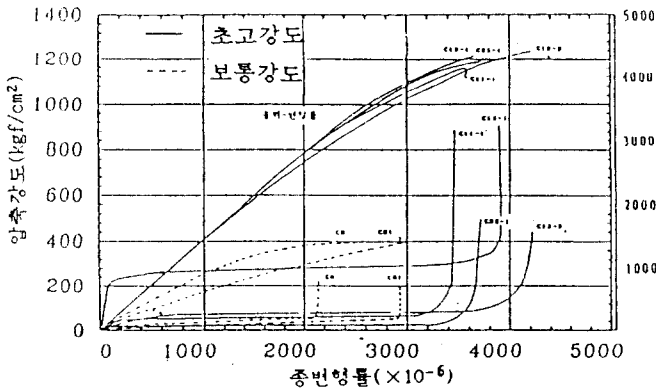


그림 2 종방향 변형률에 대한 압축강도와 AE 이벤트 수의 관계

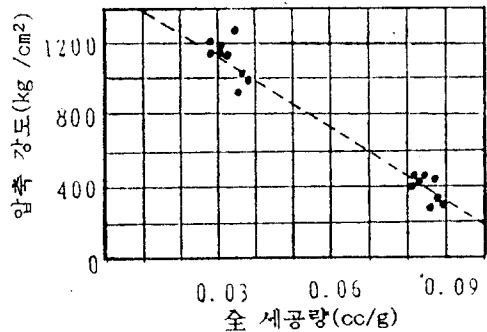


그림 3 압축강도와 전세공량과의 관계

표 4 휨강도 및 할얼인장강도 시험결과

종류	No	휨강도(f_r') (kgf/cm ²)	할얼인장강도(f_t') (kgf/cm ²)	f_r' / f_c'	f_t' / f_c'
초고강도	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
보통	1		28.7		1/10.5
	2		29.6		1/10.1

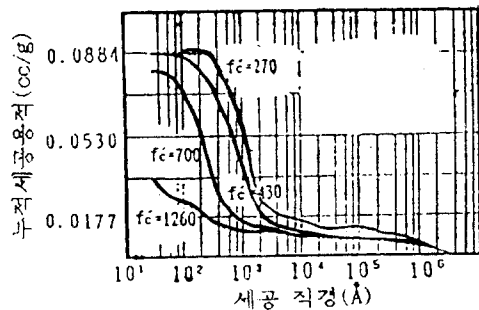


그림 4 누적세공용적과 세공직경과의 관계

다. 부재항복후 내력이 증가하면서 균열의 상부 끝 부분이 분기하는 현상이 발생하였으며 하부단에서도 2차균열이 1차균열에 결합되는 현상이 보였다. 이것은 보통강도 콘크리트 부재의 휨거동과 비슷한 경향이지만 균열 길이는 하단부부터 중립축까지 약 36 - 37cm정도로 콘크리트 압축강도가 높을 수록 상당히 짧은 압축력으로 단면의 평형조건을 만족시키고 있다. 이는 고강도 콘크리트로서 건널 수 있는 단면이 매우 효율적임을 보여주고 있다. 인장철근비가 비교적 작은 No.4공시체는 파괴없이 인성적 대변형 거동을 하였으며 도중에 재하를 중단시켰다. 균열간격이 크고 2차균열은 발생하지 않았으며 따라서 균열분산성이 나빠 균열폭도 상당히 커져 사용성의 문제가 예상되었다. 그러나 과소 철근비가 갖는 안정성 문제에서 인성(Ductility)의 효과를 볼 수가 있으며 상대적으로 취성파괴를 하는 다른 공시체들과 잘 비교된다. 원형철근을 인장철근으로 사용한 No.6공시체는 전단구간 인장철근이 Slip되어 대변형이 생기는 정착파괴를 나타냈다. 균열간격은 비교적 크며 2차균열은 발생하지 않았다. 반이형철근(휨구간 부분의 이형철근 Rib를 한 개 걸러 제거함으로써 Rib간격은 이형철근의 2배임)을 인장철근으로 사용한 No.7공시체는 같은 조건하에서 이형철근을 사용한 No.1공시체와 비교해 특별한 거동은 보이지 않았다.

균열분산성이 나빠 균열폭도 상당히 커져 사용성의 문제가 예상되었다. 그러나 과소 철근비가 갖는 안정성 문제에서 인성(Ductility)의 효과를 볼 수가 있으며 상대적으로 취성파괴를 하는 다른 공시체들과 잘 비교된다. 원형철근을 인장철근으로 사용한 No.6공시체는 전단구간 인장철근이 Slip되어 대변형이 생기는 정착파괴를 나타냈다. 균열간격은 비교적 크며 2차균열은 발생하지 않았다. 반이형철근(휨구간 부분의 이형철근 Rib를 한 개 걸러 제거함으로써 Rib간격은 이형철근의 2배임)을 인장철근으로 사용한 No.7공시체는 같은 조건하에서 이형철근을 사용한 No.1공시체와 비교해 특별한 거동은 보이지 않았다.

4.2 하중-변위 관계

그림 5에 전공시체의 하중-변위 관계를 나타낸다. 초고강도 콘크리트를 사용한 본 실험의 경우 전반적인 경향은 일반적으로 알려져 있는 보통강도 콘크리트 휨 거동의 하중-변위 관계특성과 비슷한 경향을 보였다. 인장철근비가 클 수록 휨 내력은 증가하지

만 최대내력 도달 직후 급격한 압축파괴가 발생하여 인성(Ductility)은 감소하였다. 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 인성비(종국상태 변위 / 부재항복 변위)도 11.1정도로 같지만 원형철근을 사용한 공시체는 항복점이 명확치 않고 최대내력 도달 후에도 변위는 증가하여 인성비는 14.3정도를 나타내었다. 휨 구간에 스테럽을 보강한 공시체(No.5)가 같은 조건하에서 스테럽을 배근하지 않은 공시체(No.2)보다 최대내력 및 인성이 증가하였다. 이것은 최대내력 도달 직후의 급격한 압축파괴를 스테럽이 존재함으로써 압축부 콘크리트를 구속하는데에 그 원인이 있다고 보여진다. 압축철근을 배근한 공시체(No.8)가 같은 조건하에서 압축철근을 배근하지 않은 공시체(No.3)보다 최대내력은 크지만 인성은 작게 나타났다. 이 원인은 종국상태 가까이부터 압축철근 위치(하단면부터 35cm높이에 배근)보다도 중립축 위치가 상승하여 압축철근이 인장철근의 역할을 하게 되어 인장철근비가 높아졌기 때문으로 사료된다.

4.3 단면 응력분포 및 중립축 이동

그림 6에 단면 변형률분포의 일례를 나타낸다. 각 하중단계의 변형률분포는 대략적인 직선분포를 나타내며 하중 증가에 따른 중립축상승 효과를 잘 나타내고 있다. 종국상태에 도달 할 때의 중립축은 하단면 부터 36 - 37 cm정도이며 전절에서 기술한 급격한 압축파괴의 직접적인 원인으로 사료된다. Hognestad의 응력블록 이론에 의한 종국내력 계산치(표 2)와 본 실험치(표 5)와를 비교하면 계산치는 실험치보다 약 10 - 20%정도 작은 값을 나타낸다. 따라서 초고강도 콘크리트를 사용하는 경우에는 새로운 응력블록 이론이 제안되어야 한다. 본 실험의 경우 변형률 분포에 따른 응력분포형상이 파괴 직전에 대체로 삼각형 분포를 이루고 있어 기존의 이론⁵⁾과 같은 경향을 나타내고 있으나 종국상태에서 대해서는 더 많은 연구가 있어야 할 것으로 사료된다.

5. 결론

1) 초고강도 콘크리트는 보통 콘크리트에 비해 보다 최고 2배까지 탄성적이고 급격한 취성파괴를 유

표 5 휨거동 실험결과

시편 번호	초기 균열			철근 항복시			최대 내력시			중국 상태시			균열 간격		파괴 형태	ACI 최대 내력
	하중 (ton)	변위 (mm)	압축연 변형율	하중 (ton)	변위 (mm)	압축연 변형율	하중 (ton)	변위 (mm)	압축연 변형율	하중 (ton)	변위 (mm)	압축연 변형율	최대 (mm)	평균 (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

($\epsilon_y \times 10^{-6}$)

($\epsilon_y \times 10^{-6}$)

($\epsilon_y \times 10^{-6}$)

발하며 압축강도 증가율만큼의 탄성계수, 할열인장 강도 및 휨인장강도의 증가를 기대할 수 없다. 2) AE의 발생거동은 재하하중에대한 초기 및 중국 파괴 상태를 잘 규명하고 있으며 기대되는 항복 또는 극한 변형율의 추정과 함께 고강도 콘크리트의 취성적 성향을 다른 차원에서 입증하였다. 3) 콘크리트중의 전세공량의 감소와 압축강도의 증가는 선형적 비례의 관계가 있으며 고강도로 갈 수록 작은 세공의 분포율이 크게된다. 4) 초고강도 콘크리트구형 보 부재 경우 중국상태의 압축영역이 상당히 작아 단면 효율성이 매우 높으나 이에따른 압축철근의 인장철근화로 인성의 감소가 있어 안정성에서는 불리하게 작용하므로 설계시 경제적 내력 산정에 유의하여야 한다. 5) 초고강도 콘크리트의 휨거동에서 압축부의 응력분포형상은 재고되어야 한다.

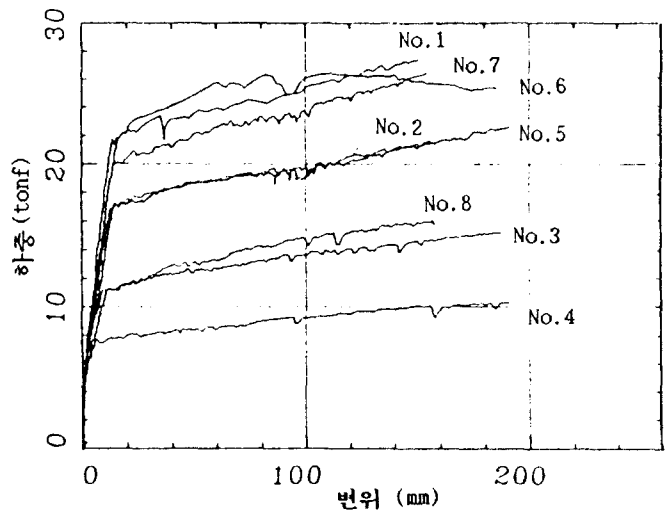


그림 5 하중-변위 관계

참고 문헌

- 1) ACI-363, State of the Art Report on High-Strength Concrete, Journal of ACI, Vol.81, No.4, July-Aug., 1984
- 2) C.K. Wang and C.G. Salmon, Reinforced Concrete Design, pp.11, New York, 1979
- 3) ACI Manual of Concrete Practice, Part2-1991, 363R-21, pp.1029, 1991
- 4) 小柳, 콘크리트의 고강도화とその限界, 콘크리트工学, Vol.14, No.3, pp.3-11, March, 1976
- 5) 신성우, "고강도 콘크리트 부재의 응력분포에 관한 검토", 콘크리트 학회지, 제2권 2호, pp. 93-99, 1990.6

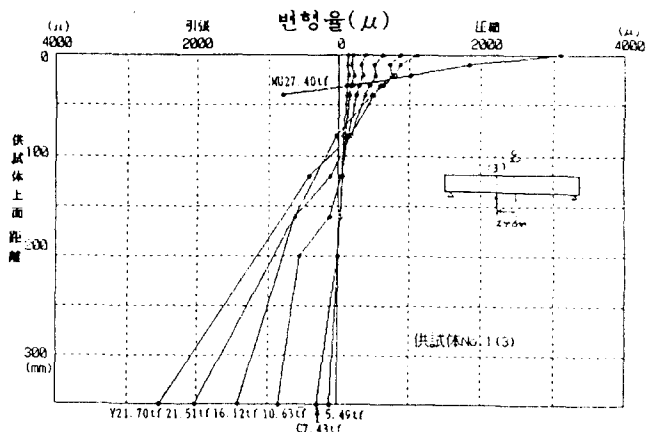


그림 6 단면 변형율 분포