

고강도 철근 콘크리트 보의 휨 설계 및 연성능력

Flexural Design and Ductile Capacity of Reinforced High Strength Concrete Beams



신성우*

Shin, Sung-Woo



유석형**

Yoo, Suk-Hyung



안종문***

An, Jong-Moon



이광수****

Lee, Kwang-Soo

요 약

동일한 인장철근배근상대($\rho/\rho_b = \text{constant}$)에서 휨을 받는 고강도 철근 콘크리트 보는 보통강도의 철근 콘크리트보에 비해 더욱 취성적인 거동을 하게 된다. 본 실험결과 연성적인 파괴를 유도하기 위하여 콘크리트의 강도가 830kg/cm^2 이상일 경우 철근비를 $0.6\rho_b$ 이하로 배근하여야 할 것으로 나타났다. 또한 콘크리트 강도가 830kg/cm^2 이상일 경우 사각형응력 블록을 사용한 ACI 휨강도식의 안전율이 감소하였으며, 삼각형에 가까운 압축응력 분포를 나타내었다. 이는 콘크리트 강도가 증가할수록 응력-변형을 곡선이 거의 선형적으로 증가하는 재료적 성질에 기인하는 것으로 사료된다.

Abstract

The reinforced high-strength-concrete beam subjected to flexure moment behaves more brittle than the moderate-strength-concrete beam reinforced with equal reinforcement

* 정희원, 한양대학교 건축공학과 교수, 공박
** 대한주택공사 부설 주택연구소 연구원
*** 정희원, 한양대학교 대학원
**** 정희원, 여주전문대 건축공학과 조교수, 공박

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 2월 27일까지 학회로 보내 주시면 1997년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

ratio(ρ/ρ_b). Test results show that when the concrete strength exceeds 830kg/cm^2 , the maximum reinforcement ratio should be less than $0.6\rho_b$ for ductile behavior (ρ_b = balanced steel ratio).

The ratio of flexural strength between experimental results and analytical results with rectangular stress block decrease as the compressive strength of concrete increase. The shape of the compressive stress block distributed triangularly, because the ascending part of the stress-strain curve shows fairly linear response up to maximum stress in contrast to the nonlinear behavior of the medium and low strength specimens.

Keywords : equal reinforcement ratio (ρ/ρ_b), high-strength-concrete, ductile behavior flexural strength, compressive stress block

1. 서 론

고강도 콘크리트는 압축부재로 사용될 때 콘크리트의 장점을 더욱 극대화하여 안전하고 경제적인 재료로 사용될 수 있으나, 단점으로는 콘크리트 강도가 높을 수록 그의 재료 역학적 특성이 달라질 뿐 아니라 더욱 취성적인 재료가 되어 이에 대한 보완 조치가 없으면 부재의 연성이 확보되지 않아 휨부재로 사용시에는 안전성이 저하되므로, 이러한 구조 역학적 거동에 대한 연구가 고강도 콘크리트를 사용하기 전에 규명되어야 할 필요가 있다.

순수 휨을 받는 철근 콘크리트 보의 파괴양상은 배근된 철근량에 따라서 다르게 나타난다. 인장 철근이 저보강되었을 경우($\rho < \rho_b$)에는 (여기서 ρ = 인장 철근비, ρ_b = 평형철근비) 콘크리트의 압축연단이 파괴변형도에 도달하기 전에 인장축 철근이 항복하게 되는데 철근은 콘크리트보다 훨씬 큰 변형도까지 견딜 수 있으므로 이 보는 콘크리트의 상당한 균열 또는 보의 큰 처짐이 발생한 후 파괴되는 연성파괴(ductile failure)가 발생하며, 반면에 과보강되었을 경우($\rho > \rho_b$)에는 콘크리트의 압축연단부가 파괴변형도에 도달하여도 인장철근은 항복하지 않은 상태이기 때문에 압축부 콘크리트의 파괴에 의한 보의 갑작스런 파괴양상인 취성파괴(brittle failure)로 연결된다. 따라서 부재의 취성 파괴를 방지하고 연성파괴로 유도하기 위하여 과다한 인장철근의 사용을 제한할 필요가 있어 "극한강

도설계법에 의한 철근콘크리트 구조설계규준"¹⁾에는 최대인장철근량을 평형철근비(ρ_b)의 75% 이하로 배근하도록 규정하고 있다. 그러나 이 규정은 콘크리트 압축강도가 560kg/cm^2 정도까지에 대한 것이어서 그 이상의 고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보에 대해서도 적절한 지에 대한 검증이 필요하다.

또한 휨을 받는 콘크리트 보의 경우에 단면에 발생하는 압축응력 분포는 콘크리트 공시체 실험을 통한 응력-변형률 곡선의 모양과 비슷한 포물선 응력 분포를 나타내는데 현재 ACI와 국내규준에서는 이를 사각형 모양으로 단순화시켜 휨강도를 계산하고 있다(Fig.1 참조).^{2,3,6)} 그러나 고강도 콘크리트에서는 일반강도와는 달리 응력-변형률 곡선이 최대응력까지 거의 선형적인 모양을 갖게 된다.³⁾ 따라서 고강도 콘크리트 보에서 사각형 응력 분포를 가정한 휨강도 계산이 타당한가를 확인할 필요가 있다.²⁾

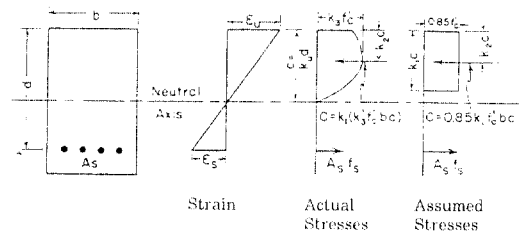


Fig. 1 Distribution of rectangular stress block

본 연구에서는 이상과 같이 고강도 콘크리트보에서 휨연성을 확보하기 위한 최대인장철근비에 대한 검토와 압축응력 분포에 대한 실험 연구를 통해 고강도 콘크리트 보의 휨거동을 규명하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험체 계획

철근콘크리트 부재의 휨연성 거동에 영향을 미치는 요소로서는 콘크리트의 압축강도, 인장 철근비 및 전단 보강근의 양 등이 있으나, 본 연구에서는 이중 가장 큰 영향을 미치는 인장 철근비를 주요 변수로 선정하였다. 보 단면은 항상 힘의 평형방정식이 성립한다. 따라서 순수히 콘크리트의 강도증가에 따르는 휨 연성거동 및 압축응력분포를 관찰하기 위해서는 콘크리트 압축강도의 증가에 따르는 휨강도의 압축력의 증가 만큼의 인장력을 증가시켜 동일한 보강상태를 유지하여야 하므로 철근량은 각기 콘크리트의 압축강도의 증가에 따르는 부재의 압축력의 증가 만큼의 인장력을 증가시킬 수 있도록 철근량을 조절하여야 한다. 따라서 인장철근은 콘크리트 강도와 철근의 항복강도를 포함한 평형철근비에 대해서 동일한 비율을 갖도록 평형비(ρ/ρ_b)의 개념으로 변수를 선정하였으며 각기 지보강, 평형, 및 과보강시의 휨거동을 관찰할 수 있도록 $\rho = 0.6\rho_b, 0.9\rho_b, 1.0\rho_b, 1.2\rho_b$, 그리고 $1.4\rho_b$ 로 계획하였다. ACI 휨강도 계산시 응력블럭 계수 β_1 의 한계치인 0.65에 해당하는 560kg/cm^2 이상의 고강도 콘크리트 보의 응력분포 관찰을 위해서 동일한 평형비(ρ/ρ_b)에 대하여 콘크리트 압축강도를 200, 520, 830kg/cm^2 으로 하여 총 15개의 실험체를 계획하였으며, 실험체 단면은 $50\text{cm} \times 26\text{cm}$ 길이는 420cm 로 전 실험체를 동일하게 계획하였다.

실험체는 순수 휨응력 발생 구간을 유도하기 위하여 2점 가력을 하였으며, 이 구간에서는 압축철근과 전단보강근을 배근하지 않고 인장철근만 배근하였다. 또한 양지점에서 가력점까지의 구간 ($a/d=6.8$)에서 실험체의 전단파괴를 방지하고 균열을 억제하기 위하여 전단보강근으로 충분히 보강하였다. 이상과 같이 계획된 실험체 상세가 Table

Table 1 Details of specimen

실험체명	f'_c (kg/cm^2)	ρ_b	인장철근배근	ρ	ρ/ρ_b
NBH1	200	0.021	10-D13	0.0124	0.624
NBH2			9-D16	0.0177	0.885
NBH3			4-D16+4-D19	0.0195	0.975
NBH4			8-D19	0.0230	1.150
NBH5			9-D19	0.0258	1.290
MBH1	520	0.044	14-D16	0.0306	0.697
MBH2			2-D13+8-D22	0.0383	0.870
MBH3			10-D22	0.0441	1
MBH4			8-D25+2-D13	0.0498	1.130
MBH5			10-D25	0.0588	1.340
HBH1	830	0.069	8-D25	0.0410	0.592
HBH2			4-D19+8-D25	0.0604	0.873
HBH3			5-D22+8-D25	0.0694	1
HBH4			6-D19+10-D25	0.0787	1.137
HBH5			16-D25	0.0940	1.360

MBH2

M : 콘크리트 강도(Normal, Middle, High)

B : Beam

H : 최대 철근비

2 : 철근비($\rho = 1: 0.6\rho_b, 2: 0.9\rho_b, 3: 1.0\rho_b,$

4: $1.2\rho_b, 5: 1.4\rho_b$)

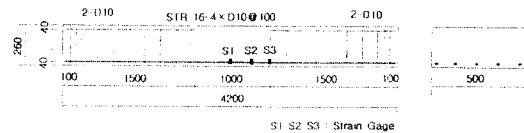


Fig. 2 Details of specimen

1과 Fig. 2에 나타나 있다.

2.2 재료의 성질

콘크리트에 사용된 시멘트는 국내용 1종 포틀랜드 시멘트, 실리카흄은 S사 제품으로 품질규격 Grade-60, 유동화제는 나프탈렌계인 G사의 Super-20을 사용하였으며, 조골재는 최대치수 19mm의 쇄석, 그리고 세골재는 강사를 사용하였다. $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 공시체를 제작하여 KS F 2405에 따라 200ton U.T.M.으로 압축강도 시험을 하였으며, 그 결과가 Fig. 3에 나타나 있다. 인장철근은 D10, D13, D16, D19, D22, 그리고 D25를 사용하였으며, 전단보강근으로는 D10을 사용하였다.

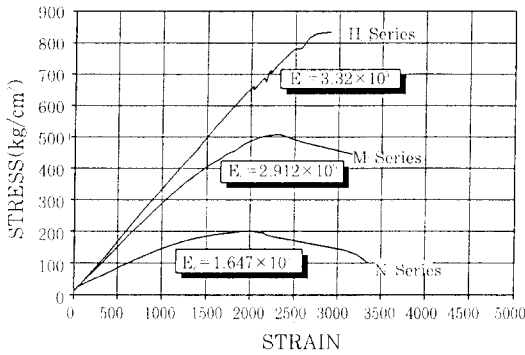


Fig. 3 Stress-strain curve of concrete

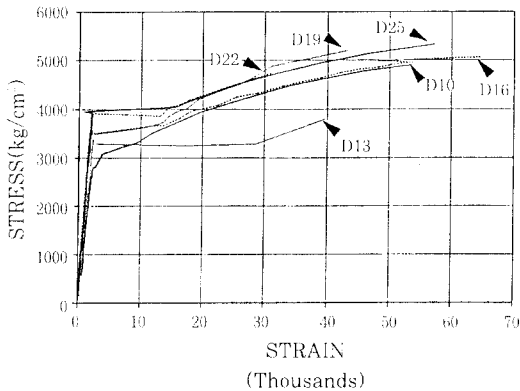


Fig. 4 Stress-strain curve of reinforcement

KS B 0801규정에 의해 철근의 인장 시험편을 제작하였고, KS B 0802의 급속재료 인장시험방법에 따라 시험을 실시하였다. 인장시험결과는 Fig. 4에 나타나 있다.

2.3 실험 진행

실험체의 설치는 Fig. 5와 같이 양단을 단순지지하고 2점 가력하였다. 처짐의 측정을 위하여 실험체 중앙에서부터 50cm간격으로 3개의 전기 다이얼 게이지를 설치하였고, 철근의 변형율을 측정하기 위하여 Fig. 2와 같은 위치에 스트레인 게이지를 설치하였으며 콘크리트의 변형율을 측정하기 위하여 Fig. 5와 같이 상단부에서부터 2cm간격으로 콘크리트 게이지를 부착하였다. 하중의 가력은 예상 최종과최하중의 1/3까지는 하중을 일정하게 증가시키는 하중조절방식(load control)으로 그 이후부터

는 실험체 중앙부에 설치된 다이얼 게이지의 처짐을 관찰하면서 변위조절방식(deflection control)에 의해 가력하였다. 실험에 사용된 기기는 300ton 오일 잭, Computing Data Logger(TDS 601), 그리고 100ton 로드셀 등이 사용되었다.

3. 실험결과

3.1 하중 처짐곡선

실험결과 Fig. 6 (a), (b), (c)에 나타나 있듯이 적보강시($\rho=0.6\rho_b, 0.9\rho_b$)에는 최대하중 이후 완만한 하강곡선을 보였으나 평형($\rho=\rho_b$) 및 과보강시($\rho=1.2\rho_b, 1.4\rho_b$)에는 급격한 하강곡선을 보여주었으며, 동일한 평형비(ρ/ρ_b)인 경우에는 콘크리트 강도가 높을 수록 최대하중시 큰 처짐을 유지하였고, 강성도 높게 나타났다.

각 지점으로부터 가력점까지 전단응력 발생구간 내에서는 다소 미세한 휨균열이 발생하였으나 전단에 의한 균열은 발생하지 않았으며, 일반적으로 순수 휨응력 발생구간에서 보의 하단으로부터 수직으로 상승하는 휨균열이 뚜렷이 발생하였고 상부에서는 콘크리트의 압괴가 발생하였다. 평균적으로 휨강도는 동일한 철근비에서 콘크리트의 강도가 200kg/cm^2 에서 520kg/cm^2 로 증가할 때 $15.7\text{t}\cdot\text{m}$, 그리고 520kg/cm^2 에서 830kg/cm^2 로 증가할 때 $6\text{t}\cdot\text{m}$ 증가하였다. 또한 동일한 콘크리트강도에서는 적보강($\rho=0.6\rho_b, 0.9\rho_b$)에서 평형철근비($\rho=\rho_b$)까지는 $8.1\text{t}\cdot\text{m}$ 증가하였으나 평형철근비(ρ

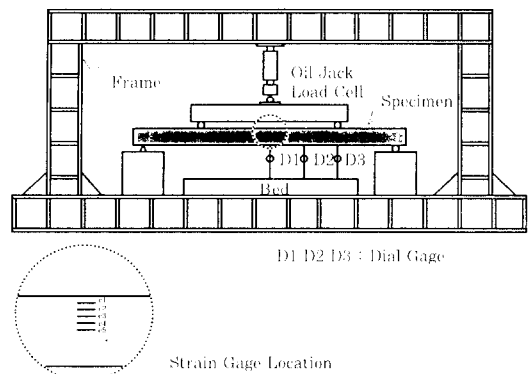


Fig. 5 Test set up

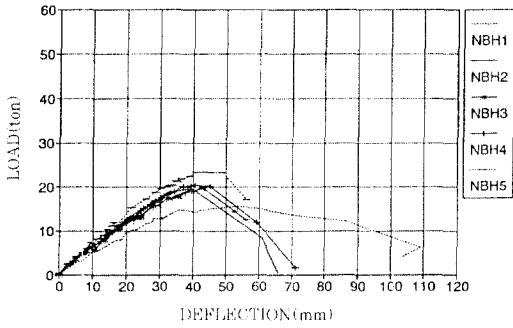


Fig. 5(a) Load-deflection curve of N-series

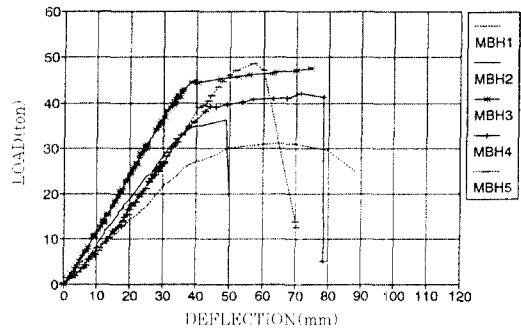


Fig. 6(b) Load-deflection curve of M-series

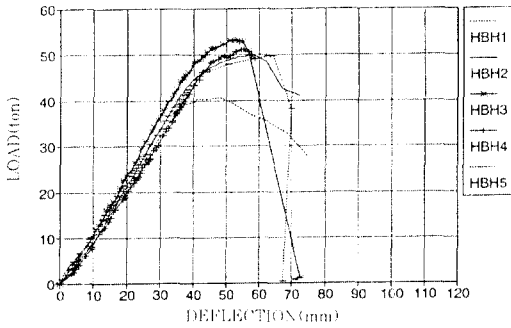


Fig. 6(c) Load-deflection curve of H-series

$= \rho_n$)에서 과보강($\rho = 1.2\rho_n, 1.4\rho_n$)까지 휨강도의 증가는 거의 없었다(0.04t · m 증가).

3.2 압축응력분포

각 하중 단계별로 콘크리트 변형율을 측정하였으며 콘크리트의 박리와 최종파괴시 콘크리트 압괴로 인한 상부 콘크리트 게이지의 망실로 인하여 다소 취득이 곤란한 data들이 있었으나 'Plane sections remain plane'의 법칙을 적용하여 압축축 최상단부터 중립축까지의 변형율을 측정하였다. 이성과 같이 얻은 변형율 값을 이용하여 최대 하중의 50%이하의 하중상태에서는 탄성범칙을 적용하여 콘크리트 응력($\sigma = E_c \epsilon_c$)을 구하였고, 이후부터는 재료시험 결과에 따른 응력-변형율 곡선을 이용하여 응력을 구하였으며 각 실험 단계별 압축변형율 및 응력 분포 상태는 Fig. 7에 나타나 있다.

최종파괴상태의 변형율은 대부분 $\epsilon_{0.2}$ 보다 작았으며 철근비가 증가할 수록 중립축이 다소 하향하였

Table 2 Test results for ductility index

실험체명	f_c (kg/cm ²)	ρ/ρ_n	Δ_1	Δ_2	Δ_3	μ_s	μ_d
NBH1	200	0.624	19.73	53.51	82.84	2.71	4.2
NBH2		0.885	20.55	39.89	53.2	1.94	2.59
NBH3		0.975	22.73	42.58	50	1.87	2.2
NBH4		1.15	20.9	40.4	51	1.93	2.4
NBH5		1.29	21.6	43.13	55	2	2.55
MBH1	520	0.697	25.23	62.94	88.06	2.49	3.49
MBH2		0.87	20.12	44.57	49	2.22	2.44
MBH3		1	33.22	74.33	74.33*	2.24	2.24*
MBH4		1.13	39.31	71.37	78.51**	1.82	2**
MBH5		1.34	40.63	57.02	64	1.4	1.58
HBH1	830	0.592	20.2	48.29	68.42	2.39	3.39
HBH2		0.873	30.46	58.87	72.63	1.9	2.36
HBH3		1	33.42	51.24	58.5	1.53	1.75
HBH4		1.137	38.49	55.26	55.26*	1.44	1.44*
HBH5		1.36	34.24	53.26	68	1.56	1.99

* : 하중의 감소 없이 최대하중 상태에서 붕괴

** : 최대하중의 20% 감소 이전에 붕괴

다. 520kg/cm² 실험체보다는 830kg/cm² 실험체가 더욱 급한 기울기를 갖는 응력분포를 나타내었는데 이는 고강도일 수록 '최대응력시까지 응력 변형율 곡선이 거의 선형적으로 증가한다'는 콘크리트 압축강도 시험결과와 잘 일치하고 있다.

4. 실험결과 분석 및 기존식과의 비교

4.1 휨연성 거동

부재의 연성은 '처짐'으로 보통 표현되어지며, 연성을 평가하는데 있어서는 부재의 인장철근 함량

시의 처짐을 기준으로 하여 최대하중시의 처짐 (Δ_0)과 최종상태의 최종처짐, 그리고 최대하중 이후 하향곡선에서 최대하중의 80%에 해당하는 부재의 처짐(Δ_f)을 고려하여 그 부재의 연성을 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\mu_0 = \Delta_0 / \Delta_y \quad (1)$$

$$\mu_f = \Delta_f / \Delta_y \quad (2)$$

여기서 $\mu_0 = \Delta_0$ 에 의한 연성지표

$\mu_f = \Delta_f$ 에 의한 연성지표

$\Delta_y =$ 보 중앙부 인장철근 항복시의 처짐

$\Delta_0 =$ 최대하중시의 처짐

$\Delta_f =$ 최대하중이후 최대하중의 80%에서의 처짐

본 연구에서는 최대하중 이후에도 부재의 하중 부담능력이 20%저하되는 시점에서의 처짐을 기준으로한 연성계수 (μ_f)를 채택하여 실험결과를 분석하였다.

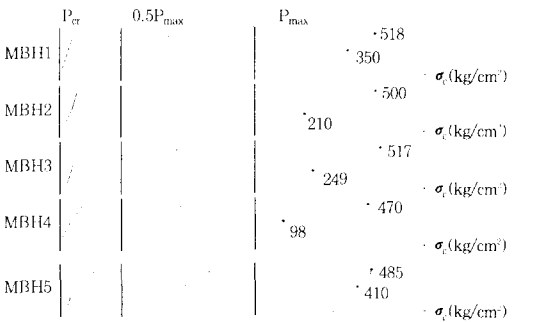


Fig. 7(a) Stress distribution for loading stages(M-series)

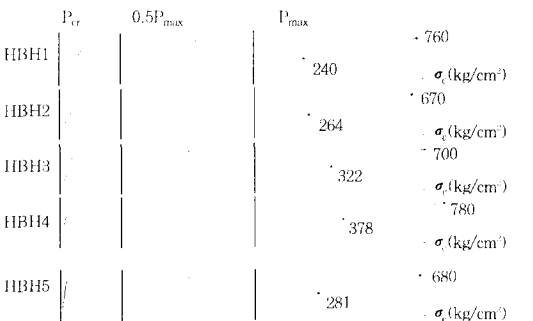


Fig. 7(b) Stress distribution for loading stages(H-series)

4.1.1 철근비의 영향

철근 콘크리트 보의 연성에 가장 큰 영향을 미치는 요소인 철근비에 따른 연성지수 그래프는 Fig. 8에 나타나 있듯이 철근비가 $0.6\rho_b$ 에서 평형철근비까지는 철근비가 증가할 수록 연성이 감소하지만 과보강 상태에서는 연성지수의 변화가 거의 없어 과보강되었을 때 인장철근비는 부재의 연성에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 모든 실험체는 Blume⁸⁾, Furlong⁹⁾ 그리고 Mc Gregor¹⁰⁾ 등에 의해 일반적으로 제안된 최소 연성지수 4보다는 다소 적은 연성지수를 나타내는데, 참고로 Shin S.W., 와 Ghosh¹¹⁾의 기존 실험과 비교하여 보면 동일한 철근비에 대하여 연성지수가 평균적으로 4정도로 본 실험결과가 더 적은 것을 알 수 있으며 Leslie 그리고 Noel Everard 등의 실험결과와는 크게 차이가 나지 않고 있다. 이는 압축철근과 전단 보강근의 처짐에 대한 영향 때문으로 처짐측정 위치인 부재 중앙에 전단보강근 및 압축철근이 주위의 콘크리트에 대하여 보강 작용(confinement)을 하여 비보강

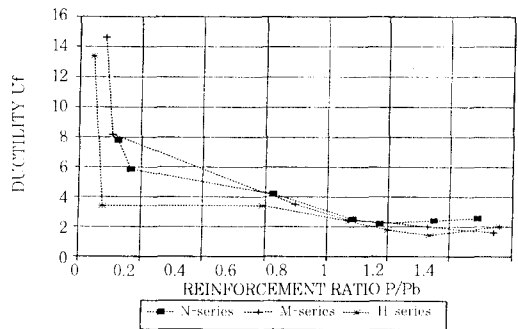


Fig. 8 Ductility index with different reinforcement ratio

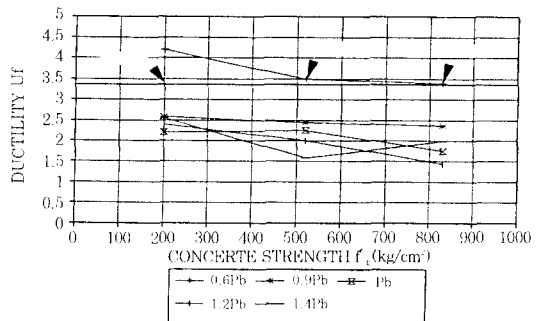


Fig. 9 Ductility index with different concrete compressive strength

된 콘크리트보다 더 큰 변형율에서 파괴되어 결과적으로 부재의 휨강도와 연성을 증가 시킨 것으로 사료된다.

4.1.2 콘크리트 압축강도의 영향

콘크리트 압축강도에 따른 각 부재의 연성을 비교하면 다음과 같다. 실험결과 콘크리트 강도가 높을 수록 동일한 철근비(ρ/ρ_b)일때 연성을 작아져 고강도 콘크리트 부재의 취성적인 성질을 보여주고 있다.

Fig. 9에서 철근비를 참조하여 연성을 수정하여 볼 때 MBH1의 실험체의 경우 철근비가 $0.697\rho_b$ 이므로 $0.6\rho_b$ 일 경우 그래프가 다소 상향할 것이며, NBH2 실험체의 경우 철근비가 $0.885\rho_b$ 이므로 MBH2 및 HBH2와 동일한 철근비 $0.87\rho_b$ 로 된다면 연성지수가 다소 증가할 것이다. 따라서 저보강된 실험체의 경우 강도증가에 따라 연성지수가 거의 직선적으로 감소하는 일관된 양상을 보여주어 저보강 실험체의 최종파괴시 부재의 기동이 철근비에 의하여 크게 영향을 받는 것을 볼 수 있으나 그 이상으로 보강된 실험체의 경우는 강도변화에 따라서 연성지수가 다소 불규칙하게 나타나 최종파괴시 콘크리트 강도와 철근비의 복합적인 요소에 의해 영향을 받는 것으로 보인다. 최대 철근비 규준 ($0.75\rho_b$)을 검토하기 위하여 보강강도(200kg/cm^2) 실험체의 연성지수, μ 를 직선보강하면 철근비 $0.75\rho_b$ 로 보강된 경우 3.4의 연성이 확보됨을 표 2와 그림 9를 통하여 예측할 수 있다. 또한 MBH1 실험체가 $0.697\rho_b$ 로 보강되어 3.49의 연성을 보이며 HBH1 실험체는 $0.592\rho_b$ 로 보강되어 3.39의 연성을 나타내고 있다. 따라서 현재의 최대철근비 규준 $0.75\rho_b$ 는 고강도 콘크리트에서도 이와 동일한 연성을 확보하기 위하여 압축강도 520kg/cm^2 에서는 $0.7\rho_b$ 이하로 압축강도 830kg/cm^2 에선 $0.6\rho_b$ 이하로 보강되어야 함을 알 수 있다.

4.2 휨강도 계산 및 비교분석

실험값과 사각형 응력분포를 이용한 국내규준식 및 본 연구에서 직접 압축응력을 측정하여 계산한 식을 Table 3과 같이 비교하였으며 실험결과에 따

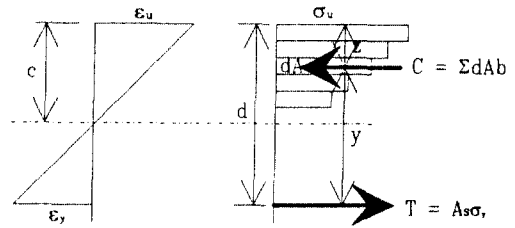


Fig. 10 Stress and strain at ultimate stage

른 휨강도는 다음과 같은 방법으로 계산하였다.

1) 변형율(strain) : 콘크리트 게이지에서 최대 하중시의 부재단면 위치마다의 콘크리트 변형율을 구한다.

2) 응력(stress) : 각 콘크리트 강도의 최대 응력의 50%이하는 후크의 법칙($\sigma_c = E_c \epsilon_c$)에 따라 그 이상은 Fig. 3에 나타난 콘크리트 응력-변형율 곡선을 이용하여 응력을 구한다

3) y_c : 실험을 통하여 구한 응력값을 충분할 한 후 y_c 를 구한다.

$$y_c = \frac{\Sigma dA \cdot y}{A} \quad (3)$$

여기서 y : 인장력 중심에서 임의층까지의 거리

dA : 임의층의 면적

A : 응력분포의 전면적

y_c : 인장중심에서 압축응력 분포의 도심까지 거리

$$z = (d - y_c) \quad (4)$$

4) M_n :

$$M_n = A_s \sigma_s (d - z) \quad (5)$$

(저보강, 평형일 때 $\sigma_s = \sigma_y$)

위의 식들을 이용한 휨 강도값을 비교하여 보면 콘크리트 강도가 520kg/cm^2 에서 830kg/cm^2 으로 증가할 때 z 값이 감소하여 저항 모멘트의 팔길이가 증가함을 알 수 있다. 이는 콘크리트 압축강도가 560kg/cm^2 이상 상승할 때 β_1 은 0.65로 한정하였

Table 3 Comparison of test results and code equation

실험체명	M _{cr}		M _n		EXP/ACI		EXP/CAL		P _{cr}	P _{max}	
	CAL	EXP	ACI	CAL	EXP						
NBH1	1.59	2.41	7.69	/	11.78	1.53	AVE. 1.37	/	3.21	15.7	
NBH2	1.59	2.99	10.12		14.7	1.45			3.98	19.6	
NBH3	1.59	2.82	11.12		14.86	1.34			3.76	19.81	
NBH4	1.59	3.47	12.51		15.35	1.23			4.62	20.47	
NBH5	1.59	2.32	13.51		17.51	1.3			3.09	23.35	
MBH1	3.98	3.65	17.1	17.6	23.4	1.37	AVE. 1.39	1.33 AVE. 1.34	4.87	31.2	
MBH2	3.98	5.03	19.2	19.08	30.89	1.42			1.43	6.7	36.3
MBH3	3.98	5.48	21.4	23.4	35.28	1.44			1.32	7.3	47.48
MBH4	3.98	5.06	22.7	25.3	31.68	1.39			1.25	6.75	42.17
MBH5	3.98	2.66	25.3	25.4	34.62	1.37			1.36	3.54	48.6
HBH1	5.06	6.23	27.7	26.5	30.45	1.1	AVE. 1.168	1.13 AVE. 1.165	8.3	40.6	
HBH2	5.06	2.03	29.1	28.9	37.61	1.29			1.3	2.7	50.14
HBH3	5.06	3.83	32.7	32.8	39.86	1.22			1.2	5.1	53.13
HBH4	5.06	2.03	35.8	36.7	38.03	1.06			1.03	2.7	51.14
HBH5	5.06	5.06	40.4	44.8	37.28	*			*	6.75	49.7

* 실험치보다 계산치가 높게 나타난 경우

어도 증립축 자체가 상승하므로 압축응력의 중심점이 상승하게 됨을 보여준다. 국내규준식과 본 연구의 계산식을 실험값과 비교하여 보면 실험값에 대한 국내규준식을 이용한 계산치의 비가 압축강도 520과 830kg/cm²에서 각각 1.39와 1.168을 나타내고 있으며 실험값에 대한 직접 계산값의 비가 압축강도 520, 830kg/cm² 실험체에서 각각 1.36과 1.165를 나타내고 있어서 직접측정에 의한 계산값이 실험값에 더욱 근접한 결과치를 보여주고 있다. 또한 강도별로 비교하여 보면 압축강도 520kg/cm²에서 1.39와 1.36을 그리고 압축강도 830kg/cm²에선 1.168과 1.165를 나타내어 콘크리트 강도가 클수록 ACI 규준식은 안전율이 감소 됨을 볼 수 있으나 직접측정에 의한 계산식은 콘크리트 강도가 증가할 수록 실험값에 가깝게 계산됨을 볼 수 있다.

5. 결 론

1. 철근 콘크리트 휨부재의 안전을 위한 최소연성지수 3이상을 만족시키기 위하여 압축강도 520kg/cm² 이상에선 철근비를 0.7ρ_b 이하로, 그리고 압축강도 830kg/cm² 이상에선 0.6ρ_b 이하로 낮추어야 할 것으로 판단된다.

2. 실험치에 대한 국내규준식과 계산식의 비가

압축강도 520kg/cm²에선 각각 1.39와 1.36을 압축강도 830kg/cm²에선 1.168과 1.165를 나타내고 있어 콘크리트 강도가 클 수록 휨계산식의 안전율이 더욱 고려되어야 할 것으로 판단된다.

3. 콘크리트의 압축강도가 높을 수록 응력-변형을 곡선이 거의 선형적인 증가를 하므로 부재단면상의 압축응력 분포는 거의 삼각형에 가까운 선형적인 분포를 하였다.

4. 동일한 평형비(ρ/ρ_b)에서 콘크리트의 강도가 높을 수록 부재의 연성능력이 떨어져 부재는 취성적인 거동을 한다.

참 고 문 헌

1. "국한강도 설계법에 의한 철근 콘크리트 구조 설계규준 및 해설", 대한 건축학회, 1994
2. Mattock, Kritz; Ladislav B., Hognestad, Einvind. "Rectangular Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design," Journal of the ACI., V.32, No.8, pp. 875-928, Feb. 1961.
3. Leslie, K.E., Rajagopalan, K.S., Everard, N.J., "Flexural Behavior of HSC Beams," ACI Journal Proceeding, V.73, No.8, Sep. 1976, pp. 517-521.

4. Wang, P.T., Shah, Naaman, A.E., "High Strength Concrete in Ultimate Strength Design," Proceedings of ASCE, V.104, No.ST11, Nov. 1978, pp. 1761-1773.
5. Jensen, V.P., "The Plasticity Ratio of Concrete and It's Effect on the Ultimate Strength of Beams," ACI Journal, Proceedings V.39, No.6, June 1943, pp. 565-582.
6. Hognestad, E., "A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Member," Bulletin No. 399, University of Illinois Engineering Experiment Station, Nov. 1951, 128 p.
7. 신성우, "고강도 콘크리트 부재의 응력블럭에 관한검토", 콘크리트 학회지 제2권 2호 1990. pp. 93-99
8. Blume, J.A.; Newmark, N.M., and Corning, L.H., "Design of Multy-Story Reinforced Concrete Buildings for Earthquake Motions," PCA, 1961.
9. Furlong, Richard W., "Design of Concrete Frames by Assigned Limit Moment," ACI Journal, Proceedings V.67, No.4, Apr. 1970, pp. 341-353
10. J.G.Mc Gregor, "Ductility of Structural Elements" Handbook of Concrete Engineering, 1st Ed., Van Nostrand Reinhold.
11. Sung-woo Shin, Satyendra K.Ghosh, and Jaime Moreno, "Flexural Ductility of Ultra-High-Strength Concrete Members," ACI Journal, July-August, 1989, pp. 394-400.
(접수일자 : 1996. 4. 15)