

고강도 철근을 활용한 휨 부재의 연성거동에 관한 연구

Flexural Behavior of RC Beams Using High-Strength Reinforcement for Ductility Assessment

권 순 범* / 윤 영 수**

Kwon, Soon-Beom / Yoon, Young-Soo

Abstract

This paper presents the appropriateness for using high strength reinforcement according to the use of high strength concrete. Nine flexural tests were conducted on full-scale beam specimens according to the concrete strength, reinforcement strength and reinforcement ratio as main variable. The structural behavior was analyzed due to the flexural strength, stress-strain curve, deflections at yielding and fracture point, crack appearance and ductility factor. The member with high-strength reinforcements showed large deflection at yielding point and this was analyzed as a main cause to decrease the ductility factor. Structural behavior after yielding point, however, showed similarity to behavior of members with normal strength reinforcements of same stiffness. It was found that in the case of using reinforcements of 5500kgf/cm² strength, the combination with concrete of 800kgf/cm² strength demonstrated the great appropriateness which can increase the flexural capacity without any reduction of maximum reinforcement ratio.

Keywords : high-strength concrete, high strength steel, upper limit of reinforcement ratio, ductility This combination also showed the same ductile behavior with the combination with normal concrete behavior.

요 지

본 논문에서는 콘크리트의 고강도화에 따른 고강도 철근의 사용 가능성과 적절한 철근강도를 연구하고자 콘크리트의 강도, 철근강도, 철근비를 주요 변수로 하여 9개의 보 실험체를 계획하였다. 2점 재하를 실시, 휨강도, 응력 이력곡선, 인장철근 항복시의 처짐량, 파괴시의 처짐량, 균열, 연성지수를 측정하여 변수에 따른 구조적 거동을 분석하였다. 고강도 철근을 적용한 부재는 항복점의 변위가 크게 나타났고, 이러한 특성이 연성지수의 감소를 가져오는 주요 요인으로 밝혀졌다. 그러나 항복이후의 거동은 동일한 강성을 갖는 일반강도철근의 부재와 유사하게 나타났다. 일반적으로 고강도 철근의 적용 시 평형철근비의 감소에 의한 철근비의 증가로 연성거동의 감소효과가 나타나고 있으나, 콘크리트의 강도를 증가시키면 연성의 증대효과를 기대할 수 있고, 본 논문으로부터 철근강도 5500kgf/cm²의 경우 콘크리트 강도는 800kgf/cm²정도가 기존 연성의 손실 없이 휨 강도를 증가시킬 수 있는 적절한 조합으로 기존의 콘크리트와 동일한 연성거동을 기대할 수 있을 것으로 나타났다.

핵심용어 :

* 정회원, 서영기술단 구조1팀

** 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수

1. 서 론

최근 콘크리트 재료의 신소재 개발 및 고강도화와 시공기술 등의 향상에 힘입어 콘크리트의 초고강도화가 급속히 진행되고 있고 이에 따라 압축강도가 600kgf/cm² 정도까지의 고강도 콘크리트에 관해서는 연구가 진행되어 설계시공 지침안이나 전문위원회의 보고서 형태로 역학적 특성에 대해 많이 보고되고 있다.⁽¹⁾

고강도 콘크리트의 개발 및 실용화는 기존 구조물에 비해 자중감소에 의한 교량의 장대화, 다층라아멘의 보나 기둥부재의 단면적 축소에 의한 이용공간의 확대 등을 가능케 하여 실용적인 측면으로 상당히 유용한 전망을 가지고 있다.^{(1),(2)}

그러나, 이러한 고강도 콘크리트의 장점에도 불구하고 철근콘크리트 구조물의 특징인 콘크리트와 그에 상응하는 철근과의 상호 조화가 필요하게 되는데, 일반강도의 철근을 적용한 콘크리트의 고강도화만으로는 철근비의 상승으로 인한 취성적 파괴, 처짐량의 증가, 밀실한 배근 구조를 띠게 되는 등 추가적인 문제점이 발생하게 되어 고강도 철근의 사용이 불가피하게 된다. 이러한 배경속에 최근 통상 사용하는 철근보다 항복강도가 높은 고강도 철근을 이용하려는 움직임이 이루어지고 있고 고강도 콘크리트의 활성화와 더불어 고강도 철근의 사용은 앞으로 더욱 증가할 것으로 예상된다.⁽²⁾

한편, 고강도 철근의 적용시 예상되는 문제점으로는 구조적으로 처짐량으로 설계가 결정되는 부재에서는 배근량의 절감이 제한적으로 적용될 뿐만 아니라, 고강도 철근을 주철근으로 사용한 철근콘크리트 부재의 실험값이 충분히 축적되어 있지 않고, 특히 재료의 고강도화로 인한 부재 전체의 인성이 줄어드는 재료적인 측면에서도 적합하지 않은 경우 등이 있다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 사용되고 있는 일반강도 콘크리트와 고강도 콘크리트, 국내 생산중인 일반강도 철근과 고강도 철근을 사용하여 휨 실험을 실시한 후 그에 따른 역학적 특성과 구조적 성능, 연성, 처짐 등을 검토하여 구조물 시공에 적합한 철근강도와 콘크리트 강도 조합을 도출하는 것을 연구목적으로 하고 있다.

2. 실험

2.1 사용 재료

본 연구에서 사용한 콘크리트는 일반 현장에서 사용하고 있는 배합을 고려하여 실시한 것으로써 콘크리트와 재료실험결과는 Table 1,2와 같다.

콘크리트는 현재 국내 현장에서 일반적으로 널리 사용 중인 배합과 동일하게 설정하여 설계압축강도 250kgf/cm² 과 400kgf/cm²을 사용하였다. 콘크리트 압축강도 시험을 위해 시험체와 같은 조건으로 28일간 양생하였다. 공시체는 강도 측정시에 편심을 방지하기 위해 공시체의 양면을 연마 하였으며 재하시 응력-변형률 곡선을 측정하기 위하여 공시체의 표면에 2개씩의 Strain Gauge를 부착하였고 평균값을 사용하여 강도를 산정하였다.

철근은 현재 국내에서 생산중인 고강도 철근을 사용하였다. 본 연구에서 주로 사용한 철근은 공칭 직경이 16, 19, 22, 25, 29mm인 이형 철근으로 항복강도가 3000kgf/cm², 5500kgf/cm²인 것을 사용하였다. 이러한 철근은 KS B 0801의 규정에 의해 인장시험편을 제작하였고, KS B 0802의 급속재료 인장시험방법에 따라 UTM을 이용하여 시험을 실시하였다.

Table 1 Concrete test results

Concrete strength (kgf/cm ²)	Compressive strength (kgf/cm ²)	Splitting tensile strength (kgf/cm ²)	E _c (×10 ⁹ kgf/cm ²)
250	280	21.1	2.760
400	402	27.6	2.943

Table 2 Mechanical Properties of Reinforcing Bars

Type	f _y (kgf/cm ²)	E _s (×10 ⁶ kgf/cm ²)	ε _y (×10 ⁻⁶)	f _u (kgf/cm ²)
D16	3470	1.793	1.935	4830
	6000	2.056	2.918	7200
D25	3550	2.018	1.759	4620
	5720	2.003	2.856	6810
D19	3670	1.937	1.895	5060
D22	3510	1.872	1.875	4720
D29	3540	2.000	1.77	4820

2.2 실험변수

본 연구에서는 콘크리트의 압축강도, 철근의 인

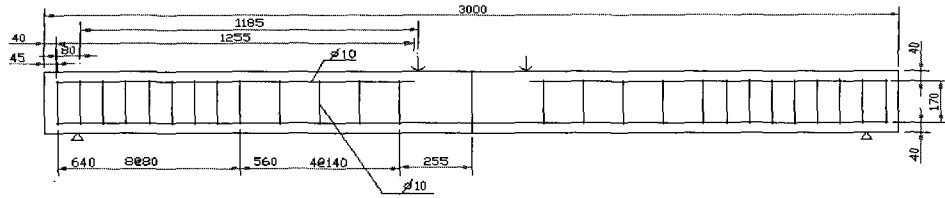


Fig. 1 Reinforcement detail and loading scheme

장강도, 철근비를 변수로 하여 총 9개의 실험체를 제작하였다. 콘크리트의 압축강도는 250kgf/cm², 400 kgf/cm²로 설계하였으며 28일 재령에서 측정된 강도는 280kgf/cm²과 402kgf/cm²이다. 철근은 현재 국내에서 생산중인 3000kgf/cm², 5500kgf/cm²강도의 철근을 사용하였고, 철근비의 감소에 따른 연성지수 증가율의 증가를 고려하여 각각의 강도조합에 따른 철근비를 0.75p_b, 0.45p_b, 0.35p_b로 계획하였다. 실험체의 명명은 콘크리트강도, 철근강도, 철근비의 순으로 이루어졌다. 실험체 분류의 콘크리트강도 및 철근의 강도조합을 한 그룹으로 하였고 각각의 명명 예는 다음과 같다.

EX) H-5-1

콘크리트 강도: M(250kgf/cm²), H(400kgf/cm²)

철근 강도: 5(5500kgf/cm²), 3(3000kgf/cm²)

철근비: 1(0.75p_b), 2(0.45p_b), 3(0.35p_b)

2.3 실험체 제작

부재의 파괴양상은 대표적으로 휨파괴, 횡단파괴, 전단파괴 등으로 나눌 수 있다. 이러한 파괴의 양상은 주로 전단지간/유효높이비 영향을 주로 받게 되는데, 전단지간/유효높이비가 약 6.0보다 큰 경우에는 인장철근이 항복한 이후에 콘크리트의 압축부분이 파괴하는 휨파괴 형태를 나타내게 된다.⁽⁷⁾ 따라서 본 실험에서는 전단지간/유효높이비를 6.2로 설정하여 전형적인 휨파괴를 유도하였다.

부재의 총길이는 3000mm로 제작하였고 단면의 크기는 폭 220mm 높이는 250mm로 제작하였다. 전단철근의 배근은 전단파괴를 방지하기 위하여 다소 과보수적인 지점으로부터 80mm의 간격으로 8개, 그 이후는 140mm의 간격으로 4개를 설치하였다. 순수 휨 구간에 해당하는 중심구간은 압축철근의 영향 배제 및 극한 응력상태에서 인장철근으로

거동하는 것을 방지하기 위하여 단철근 배근이 되도록 설계하였다.

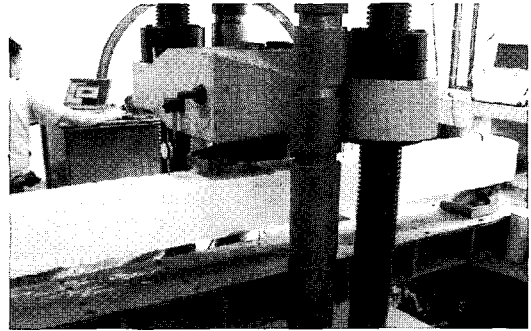


Fig. 2 Test set-up

2.4 실험방법

하중재하는 순수 휨구간을 만들기 위해 2점 재하를 실시하였으며 받침점은 단순받침점으로 구성하였다. 연성거동의 산정을 위한 처짐은 LVDT로 측정하였으며 최대 처짐이 발생하는 보의 중앙부분에 설치하였고, LVDT와 기록계를 연결하여 기록하였다. 철근의 변형률 및 항복여부를 측정하기 위해 최초 공시체 타설시 배근후에 철근면을 일정부분 연마 후 스트레인게이지를 철근면에 부착하였고 전류선을 공시체 밖으로 연결하여 실험시 이 전류선을 U-cam에 연결하여 인장철근의 이력을 측정하여 컴퓨터에 입력하였다. 휨 구역의 중심부에 해당하는 콘크리트의 상부면에는 타설 완료 후 거푸집을 제거한 상태에서 상부면을 연마하고 스트레인게이지를 부착하여 휨 파괴시 콘크리트 응력을 측정할 수 있도록 계획하였다.

주요 측정치로는 최초 인장균열하중, 철근항복하중 및 처짐량, 파괴시의 하중 및 처짐량이며 철근 항복 처짐량과 파괴시의 처짐량으로부터 연성지수를 산출하여 실제 부재에 적용하기 위한 연성거동의 정도를 판단한다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 하중-변위 관계

Fig. 3~Fig. 5는 각 그룹의 하중 변위곡선을 나타내고 있다. 전체적인 파괴양상은 전형적인 휨 파괴로 나타나고 있으며, 일반적인 부재의 하중 변위 관계는 최초 하중 재하부터 초기 인장균열까지 비교적 높은 강성으로 변위가 진전된 후 균열의 발생 이후 균열 단면에 대한 강성의 기울기로 철근항복까지 지속적으로 변위와 힘이 증가하고 있다. 항복 지점의 결정은 최초 항복점을 측정하기 위해 각각의 휨철근에 부착한 스트레인게이지의 측정치로부터 하나의 철근만이 항복을 하여도 부재 전체적인 거동에서는 하중-곡선의 기울기가 변화하면서 항복점의 거동을 보이는 것으로 나타나 스트레인게이지의 측정치를 이용하여 항복지점을 설정하였다.

인장 이후 파괴까지의 거동은 평형철근비 영역에 가까운 부재(0.75 ρ_b)는 미처 일정한 변위가 나타나기 전에 취성적인 파괴를 보였고 낮은 영역의 철근비(0.35 ρ_b)에서는 큰 변위를 나타내어 철근비의 영향을 명확히 나타내고 있다.

전체적인 부재의 최초 균열하중은 2.5ton~3ton 사이로 거의 균일하게 측정되고 있으며, 파괴하중은 예측치와 거의 유사하게 일치하는 것으로 나타났다. 동일한 콘크리트강도와 동일한 철근강도를 가진 공시체 그룹에서는 철근비의 증가에 의한 뚜렷한 파괴하중의 상승을 보여 주고 있다.

3.2 철근비에 따른 부재의 거동

Table 4는 각 변수별 연성지수를 산정하기 위한 주요 측정치를 나타낸다. 연성지수 산정을 위해서는 파괴시의 처짐과 항복시의 처짐을 결정하여야

Table 3 Concrete mix proportions

strength (kgf/cm ²)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	Fine agg. (kg)	Coarse agg.(kg)		Admixture(kg)			Slump (cm)	Air(%)
					19mm	25mm	표준형 감수제	고성능 감수제	유동화제		
250	49	182	371	808		967	1.113	-	-	15	4
400	34	174	512	725	930	-	-	7.168	1.024	15	4.5

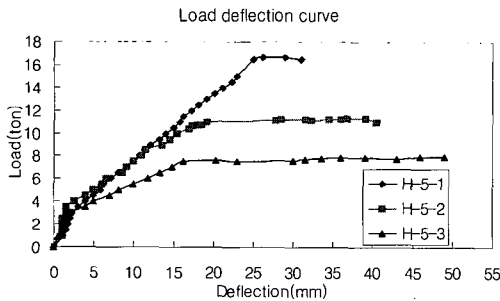


Fig. 3 Load-deflection curve for H-5 series

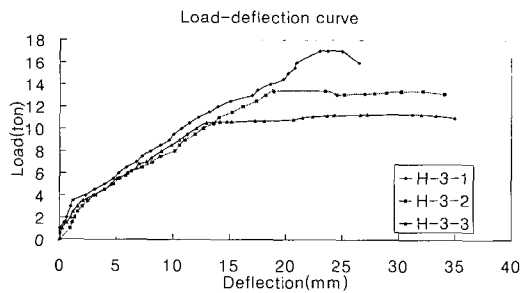


Fig. 4 Load-deflection curve for H-3 series

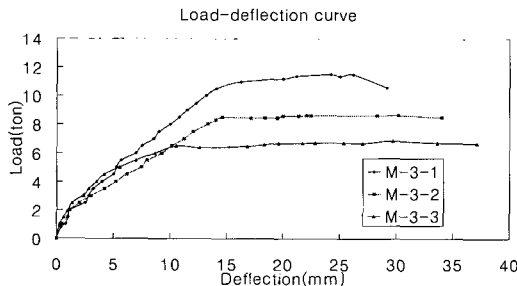


Fig. 5 Load-deflection curve for M-3 series

하는데, 본 연구에서는 인장철근의 스트레인이지를 이용하여 최초 인장철근이 항복에 도달하였을 때를 항복점으로 설정하였고, 휨 강도가 급격히 하강하는 지점을 파괴점으로 설정하여 처짐을 결정하였다. 연성지수는 파괴시의 처짐/항복시의 처짐으로부터 산정하여 이렇게 얻어진 연성지수는 Fig. 6에 나타났다. 연성지수는 기존의 연구와 비교하면 대체적으로 철근비의 영향을 적절하게 반영하고 있는 것으로 판단된다.

Table 4 reinforcement detail

Concrete	Steel	Type	Area	Reinforcement ratio/ ρ_b
250	3000	2D-29	12.848	0.765
		2D-22	7.742	0.461
		2D-19	5.73	0.341
400	3000	2D-25 +2D-22	17.876	0.650
		2D-25 +1D-19	12.848	0.467
		2D-22 +1D-19	10.607	0.386
400	5500	2D-25	10.134	0.750
		3D-16	5.958	0.443
		2D-16	3.972	0.295

일반적으로 구조물의 연성파괴를 유도하기 위한 연성의 정도를 연성지수를 사용하여 분류한다. 철근 콘크리트 구조물의 연성지수는 극히 취성거동 구조물인 경우의 1에서부터 연성거동 구조물 7인 경우로 분류하게 되는데 대체적으로 3~6정도의 연성지수가 요구되고 있으며 극심한 지진지역이 아닌 보통의 구조물의 경우 3정도의 연성이 요구되고 있

다.⁽⁷⁾ 기존의 연구와 본 실험의 결과를 비교하여 볼 때 연성지수의 관점에서는 일반적인 구조물의 경우, 3정도의 연성거동을 보이고 있는 0.35 ρ_b 의 철근비가 적절한 것으로 나타났다. 그러나 이러한 연성지수에 의한 분류는 항복이후 파괴 시까지의 변위가 충분하여 붕괴의 징후를 나타낼 수 있는 부재임에도 불구하고 항복까지의 변위 증가에 기인하여 낮은 연성지수를 나타내는 경우가 발생하게 되어 실제구조물에 연성지수 적용에 적절한 고려가 이루어져야 하겠다.

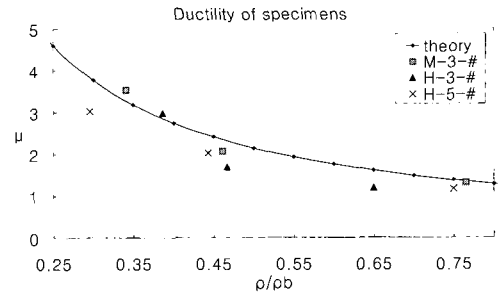


Fig. 6 Reinforcement ratio vs. ductility index curve

3.3 콘크리트 강도변화에 따른 부재의 거동

Fig. 7과 Fig. 8은 H-3-2, M-3-1의 동일한 철근 단면적, 동일한 철근 강도 시험체의 비교를 나타내었다. 콘크리트 강도의 변화로부터 휨 강도가 상승하는 것을 나타내고 있으며, 연성지수 또한 다소 상승하는 것을 확인할 수 있고 기존의 연구와 부합되는 결과를 나타낸다.(8),(9),(10),(11) 휨 부재의 파괴는 최초 인장력과 동일한 콘크리트 응력분포도의 생성으로 평형상태에 도달한 후 항복된 인장철근의 변위가 증가하면서 응력분포도의 면적이 감소

Table 5 Test result of ductility

Specimen	ρ/ρ_b	A_s	Δ_y	Δ_r	$\mu = \Delta_r/\Delta_y$
H-5-1	0.750	10.134	25.0	29.0	1.16
H-5-2	0.443	5.958	19.2	39.0	2.03
H-5-3	0.295	3.972	16.2	49.0	3.02
H-3-1	0.650	17.876	21.0	25.0	1.19
H-3-2	0.467	12.848	18.9	32.2	1.70
H-3-3	0.373	10.607	10.5	31.2	2.97
M-3-1	0.765	12.848	20.0	26.2	1.31
M-3-2	0.461	7.742	14.6	30.2	2.07
M-3-3	0.341	5.730	7.5	21.3	2.84

하게 된다. 응력분포도의 감소는 과도한 응력을 유발하여 인장력에 상응하는 압축력을 받지 못하여 종곡의 파괴에 이르게 된다. 휨 부재에 고강도 콘크리트를 적용하면 위에서 언급한 파괴이후의 응력 불력이 상대적으로 작은 면적으로도 인장력에 상응하는 압축력을 확보할 수 있게 되고 일반강도 콘크리트보다 인장철근의 큰 변형을 유도하게 되어 연성지수의 증가를 가져온 것으로 판단된다.^{(12),(13),(14)}

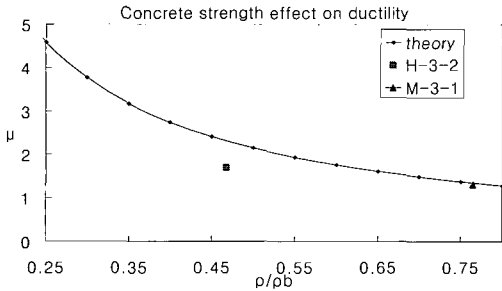


Fig. 7 Concrete strength effect on ductility

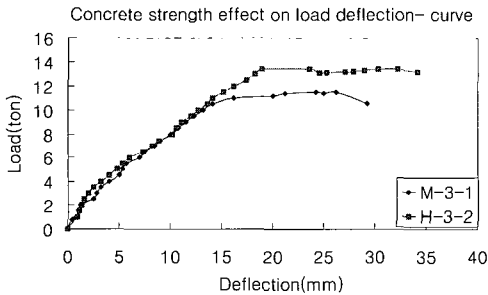


Fig. 8 Concrete strength effect on load deflection- curve

3.4 고강도 철근 치환효과

Fig. 9와 Fig. 10의 그래프는 동일한 콘크리트-동일한 철근면적(H-5-2, H-3-3)을 가진 부재의 상호 비교이다. 위의 그래프는 고강도 철근으로 일반강도 철근을 치환한 대표적인 경우인데 연성지수면에서는 다소 감소하였으나 휨 강도에는 그다지 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 또한 고강도 철근을 사용하였을 경우 상대적으로 항복시의 변위량이 증가하였고 파괴시에도 다소 감소된 처짐을 보이나 항복이후의 거동에서는 두 공시체가 유사한 거동을 보임으로써 이러한 철근의 치환은 항복시까지의 변위에 주요한 영향을 미치며 결국 연성지수

도 항복시까지의 변위량이 증가함으로써 감소한 것으로 판단된다. 따라서 안정적인 부재의 설계를 인장철근의 항복이후의 충분한 변위를 확보하는 것이라는 측면에서는 고강도 철근의 적용이 가능하다고 판단된다.

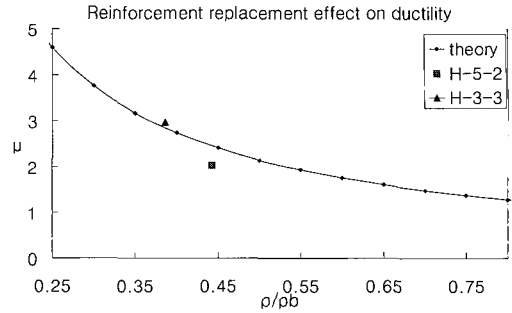


Fig. 9 Reinforcement replacement effect on ductility

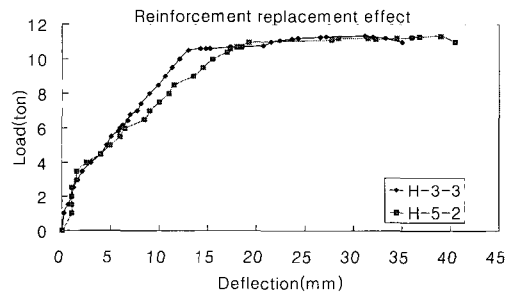


Fig. 10 Reinforcement replacement effect on load- deflection curve

4. 철근 및 콘크리트 강도 효과 고찰

부재의 연성이란 어떠한 부재가 외력을 받았을 때 어느 정도의 변형이 일어난 후에 파괴에 이르는가를 판단하는 부재의 변형성능을 나타내는 용어로서, 부재파괴시 붕괴의 위험성을 인지시키는 데에 기준이 되는 값으로 사용되고 있다. 연성의 주요한 거동은 철근비의 영향으로부터 유도되고 있는데 철근 콘크리트 구조물에 거동변화는 콘크리트의 강도 변화에 따른 응력불력의 변화와 이에 상응하는 인장철근의 거동이 주로 지배하게 된다. 휨 구조물의 연성에 가장 큰 영향을 주는 평형철근비를 산정하는 식은 다음과 같이 유도된다.⁽¹⁵⁾

$$C = 0.85f_{ck}ab \quad (1)$$

$$T = f_y A_s \quad (2)$$

fck < 280일 때

$$a = \frac{5100d}{f_y + 6000} \quad (3)$$

$$\rho_b = \frac{4335f_{ck}}{f_y(f_y + 6000)} \quad (4)$$

fck > 280일 때

$$a = \frac{6000d}{f_y + 6000} \left(0.85 - \frac{0.007(f_{ck} - 280)}{10} \right) \quad (5)$$

$$\rho_b = AB \frac{f_{ck}}{f_y(f_y + 6000)} \quad (6)$$

where A=6276

B=(1-0.00067fck)

평형철근비에 관한 식 (4), (6)에서 콘크리트의 강도를 250kgf/cm²에서 700kgf/cm²로 증가시켰을 경우 평형철근비가 2.14배 증가하는 것으로 나타나 동일한 단면의 경우 p/pb의 값을 감소시켜 연성의 증대를 가져오는 것으로 나타났다. 한편 철근의 강도를 3000kgf/cm²에서 6000kgf/cm²을 증가시켰을 경우 철근비는 0.375배로 감소하는 것으로 나타나 콘크리트의 경우와는 반대로 p/pb의 값을 증가시키는 경향이 있는 것으로 나타났다. 따라서 일반적으로 철근콘크리트 부재에 있어서는 철근의 강도변화가 콘크리트의 강도변화보다 평형철근비를 변화시키는 주요 인자로서 나타나고 있다. 다음의 그래프는 위의 식(4), (6)을 이용하여 콘크리트 강도 250kgf/cm²을 기준으로, 철근강도는 3000kgf/cm²을 기준으로 하여 강도변화에 따른 평형철근비에 대한 변화 효과를 나타낸다.

콘크리트는 250kgf/cm²를 기준으로 하여 900kgf/cm²까지의 강도변화를 고려하였고 철근은 3000kgf/cm²를 기준으로 하여 10,000kgf/cm²까지의 강도변화에 대한 고려를 실시하였다. 기존의 철근 콘크리트 구조물을 기준으로 평형철근비 면적의 감소 없이 휨 강도를 상승시키면서 고강도 철근을 적용하기 위한 콘크리트 강도를 산정하여 보면 그림으로부터 현재 현장에서 주로 사용되고 있는 초고강도 콘크

리트의 강도가 800kgf/cm²인 점을 감안하면 Fig.11로부터 effect ratio는 2.37로써 Fig. 12로부터 적절한 철근비는 effect ratio가 0.416인 5500kgf/cm²의 철근강도가 적절한 것으로 나타나고 있다. 따라서 일반적으로 철근 콘크리트 구조물에 연성거동을 고려한 고강도 철근을 활용하기 위해서는 적절한 고강도 콘크리트가 요구되는 것으로 나타나고 있다.

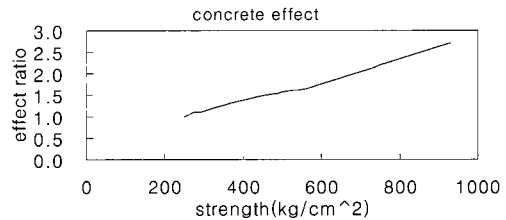


Fig. 11 Concrete strength effect ratio on ductility

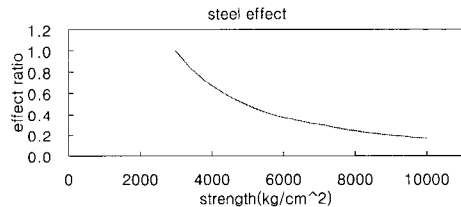


Fig. 12 Reinforcement strength effect ratio on ductility

5. 결 론

고강도 철근을 활용한 휨부재의 연성거동에 관한 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 일반적으로 동일한 콘크리트와 철근강도일 경우 철근비가 상승할수록 취성적인 파괴양상을 띠며 각각의 변수에서 0.35pb일 경우에는 연성지수 3이상의 거동을 할 수 있는 것으로 나타났다.
- 2) 휨 부재에 있어서 하중-변위곡선에 영향을 미치는 가장 주요한 인자는 콘크리트의 강도와 철근의 강도이고 고강도 철근을 사용하였을 경우 항복시의 처짐이 증가되고, 파괴까지의 변위는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 정적 구조물일 경우 또는 사하중이 지배하는 경우 고강도 철근이 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

3) 고강도 철근을 사용하여 휨 부재의 강도를 증가시킬 경우 연성의 감소가 발생하나 고강도 콘크리트와 적절하게 조합하여 사용한다면, 기존 연성의 손실 없이 부재의 휨 강도를 증가시킬 수 있는 것으로 나타났고, 현행 시방서를 적용한 분석결과 일반적인 고강도 콘크리트 800kgf/cm²의 강도에는 5500kgf/cm²의 철근강도가 적합한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) 강석화, “고강도 철근이 배근된 고강도 콘크리트 부재의 휨거동에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회논문, 제 15권 1호, 1995, pp.107-117
- 2) 장일영, 이호범, 변근주, “초고강도콘크리트의 재료특성 및 휨 거동에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회지, 제 4권 2호, 1992, pp.111-118.
- 3) 김진근, 박찬규, “주철근비에 따른 고강도 콘크리트보의 휨 거동”, 1994년도 콘크리트학회 춘계학술강연회, 1994
- 4) Shin, S.W., Ghosh, S.K. and Moreno, J. “Flexural Ductility of Ultra-High Strength Concrete Members”, ACI Structural Journal, Vol.86, No. 4, 1989, pp.394-400
- 5) J. G. MacGregor. “Ductility of Structural Elements” Handbook of Concrete Engineering, 1st Ed., Van Nostrand Reinhold.
- 6) Mohammad S. Al-Haddad, “Curvature Ductility of Reinforced Concrete Beams under Low and High Strain Rates”, ACI/9-10, 1995, pp.526-534
- 7) Park, Robert, and Paulay, Thomas, Reinforced Concrete Structure, John Wiley & Sons, New York, 1975, 769 pp.
- 8) 신성우, 유석형, 안중문, 이광수, “고강도 철근 콘크리트 보의 휨 설계 및 연성능력”, 콘크리트학회논문집 제 8권 6호, 1996, pp.141-149
- 9) 신성우, “고강도 콘크리트 부재의 응력블럭에 관한 검토”, 콘크리트 학회지 제 2권 2호 1990. pp. 93-99
- 10) 박승중, 김용부, “콘크리트 압축강도변화에 따른 철근 콘크리트 보의 휨연성 거동에 관한 실험적 연구”, 콘크리트학회지, 제 11권 3호, 1999, pp.131-140
- 11) R. Park and Dai Ruitong, “Ductility of Reinforced Concrete Beam Sections”, ACI Structural Journal/3-4, 1988, pp.217-225
- 12) Mattock, Kritiz; Ladislav B., Hognestad, Einvind. “Rectangular Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design”, Journal of the ACI., V32, No.8, pp. 875-928, Feb. 1961.
- 13) Leslie, K.E., Rajagopalnan, K.S., and Everard, N.J., “Flexural Behavior of high-Strength Concrete Beams”, ACI Journal, Vol.75, No. 8, 1976 pp. 517-521
- 14) Wang, P.T., Sha, Naaman, A.E., “High Strength Concrete and It’s Effect on the Ultimate Strength of beams”, ACI Journal, proceedings V.39, No.6, June 1943, pp 565-582
- 15) ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, American Concrete Institute, pp.14-9.