

철근콘크리트 보의 강판 휨보강 설계식에 관한 연구

A Study on the Design Formula about Strengthening in Flexure
with Steel Plate in Reinforced Concrete Beams.

김 종 옥* 장 화 균** 원 영 술*** 주 경 재****
Kim, Jong-Ok Jang, Hwa-Kyun Won, Young-Sul Joo, Kyung-Jai

Abstract

When RC beams are strengthening in flexure with steel plate, they have initial strain due to dead load. Strain of steel used in strengthening member is zero. The effect of strengthening in flexure at member changes in accordance with the quantity of initial strain. But in most cases, quantity of reinforcement is determined without regard to the difference of initial strain when there are calculated the strengthening in flexure at beams. Such method is possible to suggest inadequate quantity of reinforcement. Thus, the object of the study is to suggest practical design equation and reinforcement proposal using comparison and analysis reinforcement efficiency about flexural strength in case with regard and without regard to the initial strain when RC beams are strengthening in flexure with steel plate.

keywords : initial strain, reinforcement efficiency

1. 서 론

콘크리트 구조물은 시공 또는 사용중의 과다하중 등과 같은 여러 가지 요인에 의하여 손상을 입거나 노후화 되며 이러한 상태들이 구조물의 안전상 치명적인 결함이 아닌 한, 그 결함을 적절히 보수·보강하여 손상된 구조체의 구조내력을 복구시킨 후 유지관리한다면 건축물의 성능을 향상시킬 수 있을 것이다.

이러한 관점에서 기존 구조체의 보수·보강을 필요로 하는 경우가 증가하고 있으며, 이에 따라 보강재료, 시공방법에 대한 연구와 더불어 보강설계에 관한 기법이 필연적으로 요구되고 있다. 현재 연구되고 실행되어지는 보수·보강 방법 중 가장 많이 사용되어지고 있는 방법은 균열부위를 에폭시 등의 합성수지로 보수한 후 필요내력에 도달하도록 계산된 강판을 접착하는 방법이라 할 수 있으며, 실제 구조물에 이러한

* 건국대학교 건축과 박사과정 수료

** 동원대학교 건축과 조교수, 공학박사

*** 한울구조 대표이사, 공학박사

**** 건국대학교 건축과 명예교수, 공학박사

● 본 논문에 대한 토의를 2000년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2001년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

보수·보강공법을 적용하기 위한 보강설계를 할 경우 대상 부재에는 고정하중 등에 의한 초기변형률이 작용되고 있는 상태이며, 보강설계시 이미 초기변형률이 발생된 부재와 변형률이 없는 새로이 접착된 보강재의 변형률의 차이에 의한 보강부재의 구조적인 거동을 해석하여 부재 설계시 고려하여야한다. 그러나 현재의 보강설계법은 대부분 보강대상 부재의 초기변형률을 무시하고 보강대상 부재와 보강재가 일체로 작용하는 것으로 가정하여 설계하고 있으며, 이러한 설계방법은 보강 설계시 보강량의 산정에 있어 적절하지 못한 설계량을 제시할 우려가 있다.

따라서 본 연구는 보강을 필요로 하는 부재중 휨내력이 부족한 철근콘크리트 보 부재를 대상으로 휨보강시 초기변형률을 고려하지 않는 경우의 보강부재와 초기변형률을 고려한 경우의 보강부재의 보강효율을 비교·분석하여 실용적인 보강계산식 및 보강안을 제시하는데 목적이 있다.

2. 보강 설계식

2.1 설계를 위한 가정조건

- 1) 변형 전에 부재축에 수직한 평면은 변형 후에도 부재축에 수직하다.
- 2) 철근에 생기는 변형률은 같은 위치의 콘크리트에 생기는 변형률과 같다.
- 3) 철근과 콘크리트 응력은 철근과 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 이용하여 계산할 수 있다.
- 4) 콘크리트의 인장강도는 무시한다.
- 5) 콘크리트는 압축변형률이 0.003에 도달했을 때 파괴된다.
- 6) 압축측 콘크리트의 응력분포는 계산의 편의를 위하여 같은 면적의 등가직사각형 응력블럭으로 대체한다. 응력의 크기는 $0.85 f_{ck}$ 로 고정하고 압축연단으로 부터의 거리 a 를 $a = \beta_1 \cdot c$ 로 한다.

① $f_{ck} \leq 280 \text{ kgf/cm}^2$ 의 경우

$$\beta_1 = 0.85$$

② $f_{ck} > 280 \text{ kgf/cm}^2$ 의 경우

$$\beta_1 = 0.85 - 0.007 \frac{f_{ck} - 280}{10} \geq 0.65$$

2.2 초기변형률을 고려하지 않는 경우의 보강 설계식

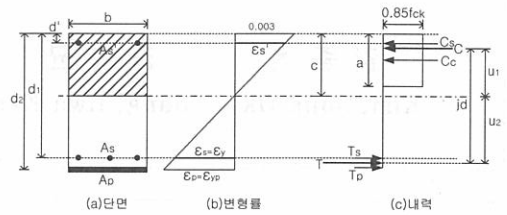


Fig. 1 초기변형률을 고려하지 않는 경우의 보강후 복근직사각형보의 변형률 및 응력

1) 인장력

$$T_s = A_s \cdot \epsilon_s \cdot E_s = A_s \cdot f_y$$

$$T_p = A_p \cdot \epsilon_{yp} \cdot E_s = A_p \cdot f_{yp}$$

$$\therefore T = T_s + T_p$$

2) 압축력

① 압축철근이 항복 할 경우

- 중립축 거리 계산

$$a = \frac{(A_s - A'_s)f_y + A_p \cdot f_{yp}}{0.85f_{ck} \cdot b}$$

$$c = \frac{a}{\beta_1}$$

$$C_s = A'_s \cdot f_y$$

$$C_c = 0.85 f_{ck} a b$$

$$\therefore C = C_s + C_c$$

② 압축철근이 항복하지 않을 경우

- 중립축 거리 계산

$$a = \frac{(A_s f_y + A_p f_{yp} - 6000 A'_s) + \sqrt{(A_s f_y + A_p f_{yp} - 6000 A'_s)^2 + 4(0.85 f_{ck} b)(6000 \beta_1 d' A'_s)}}{2 \times (0.85 f_{ck} b)}$$

$$c = \frac{a}{\beta_1}$$

$$C_s = A'_s \cdot f'_s = A'_s \times E_s \times \epsilon_c \times \frac{c - d'}{c}$$

$$C_c = 0.85 f_{ck} a b$$

$$\therefore C = C_c + C_s$$

3) 응력 중심 거리

$$u_1 = \frac{C_s (c - d') + C_c \left(c - \frac{a}{2} \right)}{C}$$

$$u_2 = \frac{T_s (d_1 - c) + T_p (d_2 - c)}{T}$$

$$\therefore jd = u_1 + u_2$$

4) 모멘트 강도

$$M_n = T jd$$

$$\phi M_n = \phi T jd$$

f_{yp} : 보강강판의 항복강도

ϵ_{yp} : 보강강판의 항복강도시 변형률($\frac{f_{yp}}{E_s}$)

2.3 초기변형률을 고려한 경우의 보강설계식

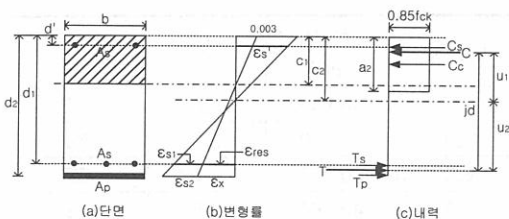


Fig. 2 초기변형률을 고려한 경우의 보강 후 복근직사각형보의 변형률 및 응력

보강재 접착시 인장 철근에는 고정하중 등에 의한 초기변형률이 ϵ_{res} 만큼 작용하는 상태이며, 새로이 정착된 보강재는 변형률이 0인 상태이므로 보강부재의 내력 계산시 보강재의 변형률은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 ϵ_x 만큼 감소된 ϵ_{s2} 의 값으로 계산하여야 하며, 삼각형 닻음비를 이용하여 ϵ_{s2} 와 ϵ_s 를 구하면 다음과 같다.

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_s \frac{d_2 - c_2}{d_1 - c_2} - \epsilon_{res} \frac{d_2 - c_1}{d_1 - c_1} \quad (1)$$

$$\epsilon_s = (\epsilon_{s2} + \epsilon_{res} \frac{d_2 - c_1}{d_1 - c_1}) \cdot \left(\frac{d_1 - c_2}{d_2 - c_2} \right) \quad (2)$$

균형보이론을 적용하여 ϵ_{s2} 와 ϵ_s 를 계산하기 위한 보강전·후의 중립축거리 c_1 과 c_2 를 구하면 다음과 같다.

$$c_1 = \frac{6000}{(6000 + f_y)} \times d_1 \quad (3)$$

$$c_2 = \frac{6000}{(6000 + f_{y1})} \times d_3 \quad (4)$$

보강후 인장철근과 보강재와의 합력을 f_{y1} , 압축측 연단에서 합력의 응력 중심까지의 거리를 d_3 라 하면 (단 $f_y > f_{yp}$)

$$d_3 = \frac{(6000 + f_y) \times d_1 + (6000 + f_{yp}) \times d_2}{(2 \times 6000 + f_y + f_{yp})} \quad (5)$$

$$f_{y1} = \frac{(f_y - f_{yp})(d_2 - d_3)}{d_2 - d_1} + f_{yp} \quad (6)$$

인장철근과 보강재에 항복이 발생한 후에도 변형률은 전단면에 걸쳐 선형분포를 유지하나 응력의 크기는 항복강도를 초과하지 못하므로 모멘트 강도 계

산에 사용되는 응력은 각 부재의 항복강도를 기준으로 구하며 보강설계식은 초기변형률의 크기에 따라 다음의 3가지 경우로 구분한다.

1) 인장철근과 보강강판이 동시에 항복할 경우

$$\epsilon_{res} = \epsilon_{bres}$$

2) 인장철근보다 보강강판이 먼저 항복할 경우

$$\epsilon_{res} < \epsilon_{bres}$$

3) 인장철근이 보강강판보다 먼저 항복할 경우

$$\epsilon_{res} > \epsilon_{bres}$$

위 3가지 경우의 기준이 되는 "1) 인장철근과 보강강판이 동시에 항복할 경우"의 변형률 값은 다음과 같으며, 이 경우는 초기변형률을 고려하지 않고 보강효율을 계산하는 경우와 같게된다.

$$\epsilon_{bres} = (\epsilon_y \frac{d_2 - c_2}{d_1 - c_2} - \epsilon_{yp}) \cdot (\frac{d_1 - c_1}{d_2 - c_1}) \quad (7)$$

2), 3)의 경우 보강후 ϕM_n 은 초기변형률을 고려하지 않은 경우의 보강설계식에 철근과 보강강판의 응력을 Table 1.의 각 경우별 응력값으로 변경하여 산정한다.

Table 1 보강설계식의 경우별 적용응력

조건 응력	동시항복 ($\epsilon_{res} = \epsilon_{bres}$)	보강강판항복 ($\epsilon_{res} < \epsilon_{bres}$)	인장철근항복 ($\epsilon_{res} > \epsilon_{bres}$)
철근의 응력	f_y	f_s	f_y
강판의 응력	f_{yp}	f_{yp}	f_{sp}

f_s : 사용하중 작용시 계산된 인장철근의 응력(= $\epsilon_s \cdot E_s$)

f_{sp} : 사용하중 작용시 계산된 보강강판의 응력(= $\epsilon_e \cdot E_s$)

2.4 보강시 취성파괴 검토식

인장철근과 보강강판이 동시에 항복강도에 도달하는 경우의 검토식은 다음과 같으며, 그 외의 경우는

Table 1과 같이 철근과 보강강판의 응력을 변경하여 검토한다.

1) 중립축 거리

$$c_b = \frac{6000}{6000 + f_{y1}} d_3$$

2) 응력

$$C_b = 0.85 f_{ck} \cdot a_b \cdot b + f'_s \cdot A'_s$$

$$T_b = f_y \cdot A_s + A_{pb} \cdot f_{yp}$$

3) 최대 보강 강판비

$$A_{pb} = \frac{C_b - f_y \cdot A_s}{f_{yp}}$$

$$\rho_{pmax} = 0.75 \cdot \rho_{pb} = 0.75 \cdot \frac{A_{pb}}{bd_3}$$

3. 보강 효율성 검토

3.1 해석 모델의 선정

초기변형률을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우의 휨보강 효과의 비교·분석을 위하여 Table 2의 조건으로 철근콘크리트 보 부재의 해석모델을 선정하여 검토한다.

단 $f_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$, SD40, SS400, 복근비

Table 2 해석모델의 종류

모델명	$b \times D$ (cm)	$\frac{D}{b}$	유효층 (cm)
A15	30×45	1.5	37
A20	30×60	2.0	52
A25	30×75	2.5	67
B15	40×60	1.5	52
B20	40×80	2.0	72
B25	30×100	2.5	92

는 0.5로 일정하게 제한하였으며, 인장철근비는2단 배근시 보폭의 최대 배근량을 고려 0.2%~1.0%의 범위로 하였고 보강강판비는 보강시 취성파괴가 발생하지 않는 0.2~1.0% 범위로 정하여, 인장철근과 보강강판의 전체양이 균형철근비 이하가 되도록 하였다.

보강후 ϕM_n 을 계산하기 위한 초기변형률은 철근의 항복강도 도달시의 변형률 $\epsilon_y (= f_y / E_s)$ 를 기준으로 하며, 비교를 위하여 ϵ_y 의 20%~80% 범위 내에서 20%씩 증가시켜 해석하였다.

3.2 보강량의 변화에 따른 보강효율

유도된 보강설계식으로 계산된 각 경우별 보강후의 ϕM_n 을 보강전의 ϕM_n 과 비교한 보강효율(=

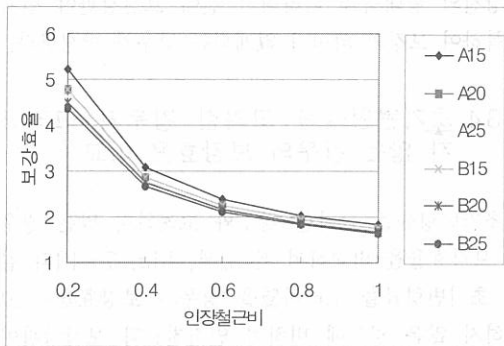


Fig. 3 보강강판비 1%경우의 각 모델별 최대 보강효율

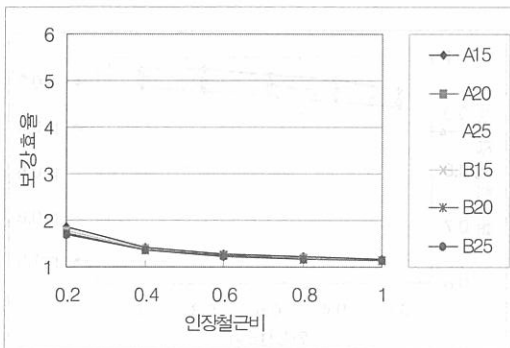


Fig. 4 보강강판비 0.2% 경우의 각 모델별 최대 보강효율

보강후 ϕM_n) 을 구하여 검토한 결과 보강효율은

Fig. 3~4와 같이 초기변형률의 크기와 부재크기의 변화에 관계없이 인장철근비가 적고 보강강판비가 높을수록 크게 나타났으며, 인장철근비와 보강강판비가 동일한 조건에서의 보강효율은 D / b 가 커질수록 감소된다.

3.3 초기변형률의 변화에 따른 보강효율

인장철근과 보강강판이 동시에 항복하게되는 초기 변형률(ϵ_{bres})은 Table 3과 같이 D / b 가 커질수록 감소되었다.

Table 3 부재별 ϵ_{bres} 의 평균값

모델명	A15	A20	A25	B15	B20	B25
ϵ_{bres} (%)	75	65	60	66	60	55

Fig. 5~6과 같이 초기변형률의 변화에 따른 보강효율을 비교하여 본 결과, 해석모델 모두 인장철근보다 보강강판이 먼저 항복하는 범위($\epsilon_{res} < \epsilon_{bres}$)에서는 초기변형률이 커질수록 보강효율이 증가하였으며, 인장철근이 보강강판보다 먼저 항복하는 범위($\epsilon_{res} > \epsilon_{bres}$)에서는 초기변형률이 커질수록 보강효율은 감소하였다.

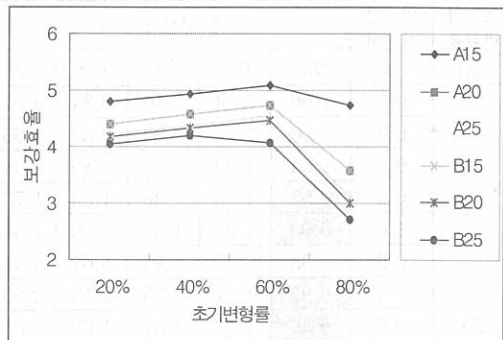


Fig. 5 초기변형률의 변화에 따른 각 모델별 최대 보강효율 비교

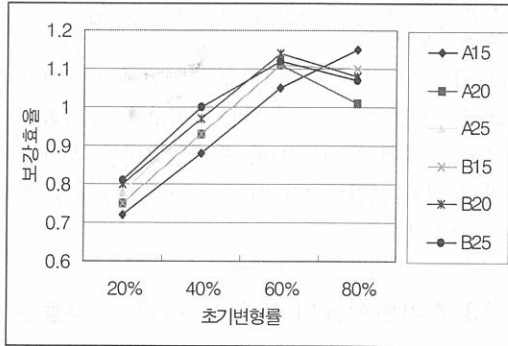


Fig. 6 초기변형률의 변화에 따른 각 모델별 최소 보강효율 비교

Table 4 A15의 보강효율

초기 변형률 (%)	인장 철근비 (%)	보강 강판비 (%)				
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
40	0.2	1.58	2.45	3.30	4.13	4.94
	0.4	1.14	1.57	1.99	2.41	2.81
	0.6	1.00	1.28	1.56	1.83	2.11
	0.8	0.93	1.14	1.35	1.56	1.77
	1.0	0.88	1.06	1.23	1.39	1.56
.20	0.2	1.41	2.28	3.14	3.97	4.79
	0.4	0.97	1.41	1.83	2.25	2.66
	0.6	0.82	1.12	1.40	1.68	1.95
	0.8	0.76	0.98	1.19	1.40	1.61
	1.0	0.72	0.89	1.06	1.23	1.40

■ 보강강판 초기 항복 범위

Table 5 A20의 보강효율

초기 변형률 (%)	인장 철근비 (%)	보강 강판비 (%)				
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
40	0.2	1.56	2.34	3.10	3.84	4.57
	0.4	1.16	1.55	1.92	2.30	2.66
	0.6	1.04	1.29	1.55	1.80	2.04
	0.8	0.97	1.16	1.36	1.54	1.73
	1.0	0.93	1.09	1.24	1.39	1.54
20	0.2	1.38	2.16	2.93	3.67	4.41
	0.4	0.99	1.37	1.75	2.13	2.50
	0.6	0.86	1.12	1.37	1.63	1.88
	0.8	0.79	0.99	1.18	1.37	1.56
	1.0	0.75	0.91	1.07	1.22	1.37

■ 보강강판 초기 항복 범위

Table 6 A25의 보강효율

초기 변형률 (%)	인장 철근비 (%)	보강 강판비 (%)				
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
40	0.2	1.56	2.28	3.00	3.70	4.38
	0.4	1.18	1.55	1.90	2.26	2.60
	0.6	1.06	1.30	1.54	1.78	2.01
	0.8	1.00	1.18	1.36	1.54	1.70
	1.0	0.97	1.11	1.25	1.39	1.52
20	0.2	1.37	2.10	2.82	3.53	4.22
	0.4	1.00	1.37	1.73	2.08	2.43
	0.6	0.88	1.12	1.37	1.61	1.84
	0.8	0.82	1.00	1.18	1.36	1.54
	1.0	0.78	0.93	1.08	1.22	1.35

■ 보강강판 초기 항복 범위

인장철근보다 보강강판이 먼저 항복강도에 도달하게 되는 경우, 초기변형률의 크기와 보강강판량에 따라 Table 4~6에 표시된 바와 같이 해석모델 모두 보강전의 휨내력을 나타내기 전에 보강강판이 먼저 항복하여 보강의 의미가 없게되는 경우가 발생한다.

3.4 초기변형률을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 보강효율 비교

초기변형률을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 보강효율을 비교하여 본 결과, Fig. 7~14와 같이 초기변형률을 고려하였을 경우의 보강효율이 고려하지 않은 경우에 비하여 인장철근과 보강강판이 동시에 항복하는 경우를 제외하고는 감소됨을 알 수 있었다.

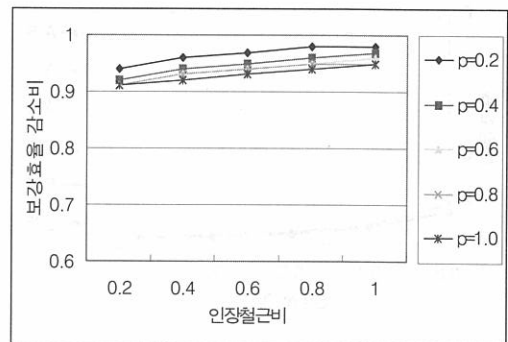


Fig. 7 A15의 초기변형률 80% 고려 경우의 보강효율 감소비

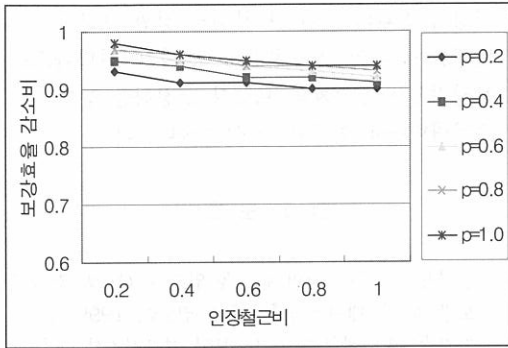


Fig. 8 A15의 초기변형률 60% 고려 경우의 보강효율 감소비

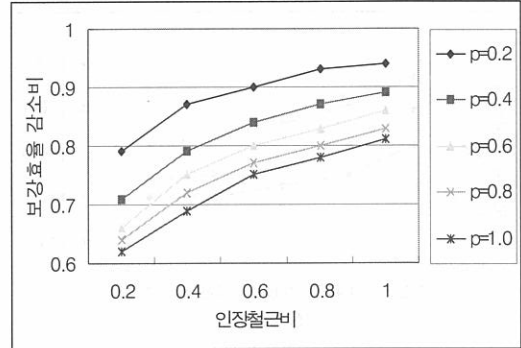


Fig. 11 B25의 초기변형률 80% 고려 경우의 보강효율 감소비

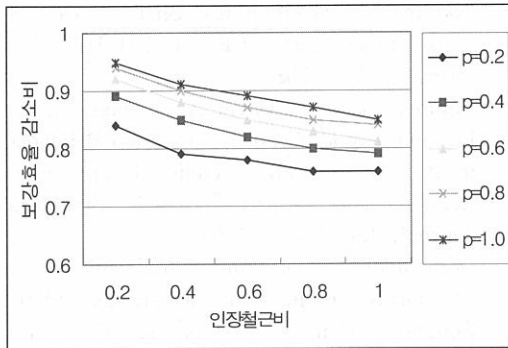


Fig. 9 A15의 초기변형률 40% 고려 경우의 보강효율 감소비

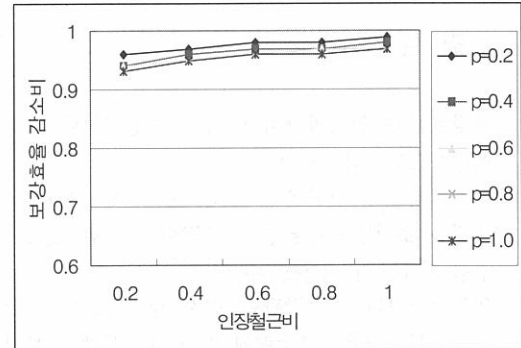


Fig. 12 B25의 초기변형률 60% 고려 경우의 보강효율 감소비

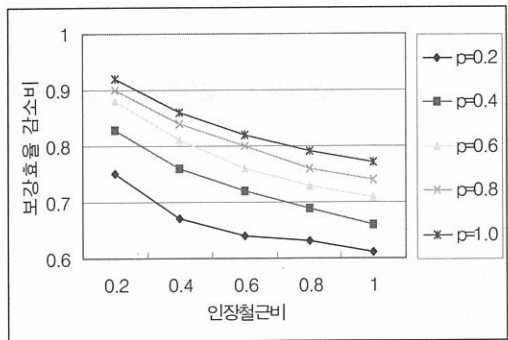


Fig. 10 A15의 초기변형률 20% 고려 경우의 보강효율 감소비

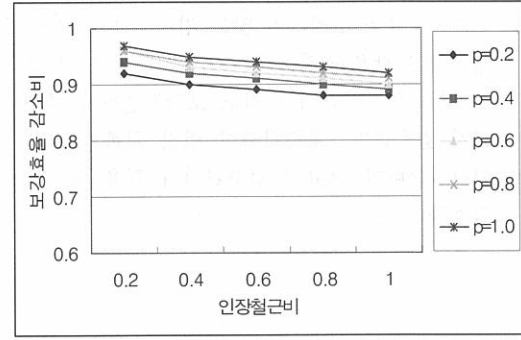


Fig. 13 B25의 초기변형률 40% 고려 경우의 보강효율 감소비

초기변형률을 고려한 경우의 보강효율 감소비(= $\frac{\text{초기변형률을고려한경우의 } \phi M_n}{\text{초기변형률을고려하지않은경우의 } \phi M_n}$)는 인장철근이 보강강판보다 먼저 항복하는 범위($\epsilon_{res} < \epsilon_{bres}$)에서는 인장철근비가 적고 보강강판비가 클수록 크.

게 감소하며, 보강강판이 먼저 항복하는 범위($\epsilon_{res} < \epsilon_{bres}$)에서는 인장철근비가 크고 보강강판비가 적을수록 크게 감소한다.

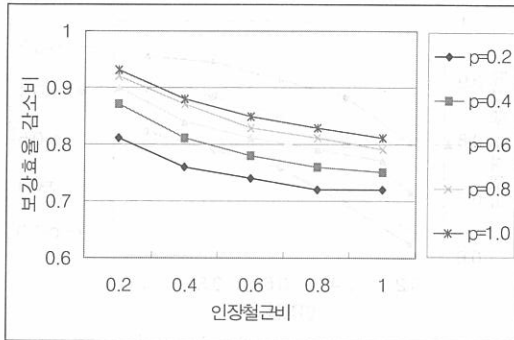


Fig. 14 B25의 초기변형률 20% 고려 경우의 보강효율 감소비

4. 결론

- 1) 보강효과는 인장철근비가 적고 보강강판비가 높을수록 크게 나타난다.
- 2) 초기변형률을 고려하지 않고 보강량을 산정하는 방법은 초기변형률 ϵ_{res} 가 식(7)에서 구한 ϵ_{bres} 와 같을 경우에만 적용할 수 있다.
- 3) 인장철근보다 보강강판이 먼저 항복강도에 도달하게 되는 경우, 보강량에 따라 대상부재가 보강전의 내력을 나타내기 전에 보강강판이 먼저 항복하여 보강의 의미가 없게되는 경우가 발생한다.
- 4) 초기변형률을 고려하지 않은 경우에 대한 고려한 경우의 보강효율 감소비는 인장철근이 먼저 항복할 경우 인장철근비가 적고 보강강판비가 클수록 크게 감소하며, 보강강판이 먼저 항복할 경우는 인장철근비가 크고 보강강판비가 적을수록 크게 감소한다.

- 5) 이상의 결과와 같이 보 부재의 강판 보강시 초기 변형률에 따라 보강효율의 변화가 나타나므로, 보강량은 대상부재의 보강시 고정하중 등에 따른 초기변형률에 의하여 산정되어야 한다.

참고 문헌

1. 김성용외4, "구조적인 손상을 입은 R.C보의 강판 휨 보강 효과", 대한건축학회지 19권2호, 1999.10
2. 하기주외4, "철근콘크리트 보의 보수보강에 따른 구조성능 평가", 대한건축학회지 13권4호, 1997.4
3. Scordelis, Alexander C. and Lin, C.S., "Nonlinear Analysis of R.C Shells of General Form", Proceeding ASCE vol. 101 DT3 Mar. 1975. pp. 523~538
4. Philip A. Ritchie, David A. Thomas, Le-Wu Lu, and Guy M. Connelly, "External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforcement Plastics", ACI Structural Journal, July-August 1991.
5. Deric John Oehlers and John Paul Moran, "Premature Failure of Externally Plated Reinforced Concrete Beams", ASCE vol 116 No. 4 April 1990. pp. 987~993

(접수일자 : 2000년 6월 15일)