

고강도 횡보강근을 사용한 철근콘크리트 보의 부착 거동 평가

Evaluation of Bond Behavior of Reinforced Concrete Beams with High-Strength Transverse Reinforcement

김 상 우¹⁾ 김 영 식²⁾ 백 승 철³⁾ 김 길 희^{4)*}
Kim, Sang Woo Kim, Young Sik Baek, Seung Cheol Kim, Kil Hee

Abstract

This paper investigates the bond behavior of reinforced concrete beams having high-strength transverse reinforcement. A total of four reinforced concrete beams were tested in this study to estimate the bond capacity of the proposed U-shape reinforcement. The proposed U-shape reinforcement not only has a simple structure to install, but also can increase the bond capacity of reinforced concrete beams by controlling bond cracks.

This study follow the test method proposed by Ichinose to obtain the bond stress and the bond slip of the specimens. The main test parameters were the yield strength, ratio, and reinforcing types of transverse reinforcements. It was found that the proposed U-shape reinforcement was able to effectively improve the bond performance of reinforced concrete beams with high-strength transverse reinforcement.

Keywords : Bond behavior, Transverse reinforcement, U-shape reinforcement, Bond failure, RC beams

1. 서 론

건축구조물은 현대 사회의 다양한 요구에 부합하여 고층화, 장스팬화, 특수화 되고 있다. 이러한 건축구조물의 실현을 위한 고성능 건축 재료 및 구조시스템 연구와 개발이 필연적으로 요구된다.

건축 재료의 고강도화에 대한 연구는 최근 30년간 콘크리트를 중심으로 비약적으로 발전하였다. 이러한 발전에 힘입어 철근콘크리트(RC) 부재는 더 높은 하중에 저항할 수 있을 뿐만 아니라 부재의 자중과 치수 또한 크게 줄일 수 있게 되었다.

고층 RC 구조물을 시공할 때 철근의 밀실한 배근으로 인한 어려움은 항상 지적되어 왔다. 특히 내진설계와 같이 배근 간격이 좁거나 고강도 콘크리트를 적용하여 높은 하중을 철근이 함께 부담하여야 하는 경우 설계와 시공적인 측면에서 어려움이 크게 증가한다. 이러한 점에서 철근의 고강도화는 높은 하중을 전달하면서도 배근 간격을

넓힐 수 있으므로 매우 효과적이다. 그러나 고강도 철근에 대한 연구는 고강도 콘크리트에 비하여 매우 미약한 실정이다.

고강도 철근의 구조부재 적용에 대한 견해는 나라별로 다른 양상을 나타내고 있다. 미국의 경우에는 주철근의 고강도화에 초점을 맞춰 연구를 진행하고 있다. 반면에 일본의 경우에는 내진 설계시 전단보강근량이 증가함에 따라 발생하는 과밀 배근 및 시공성 저하 등을 방지하기 위하여 전단보강근의 고강도화에 초점을 맞춰 연구를 진행하고 있다(日本国土開発技術センター, 1988-1992). 그러나 국내의 경우에는 원자재가격 급등 등의 사회적 문제로 인하여 고강도 강재에 대한 필요성이 증대되어 최근 연구가 진행되고 있으나 아직 활발하지는 못한 실정이다(최임준 등, 2009).

일반적으로 RC 부재의 전단내력은 전단보강근의 양(ρ_w)과 항복강도(f_{wy})에 지배적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 전단보강근으로 고강도 철근을 사용하

1) 정회원, 공주대학교 건축공학과, 연구교수
2) 정회원, 공주대학교 건축공학과, 박사과정
3) 정회원, 고려열연(주)
4) 정회원, 공주대학교 건축공학과, 부교수

* Corresponding author : kimkh@kongju.ac.kr 041-521-9335

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Properties of specimens and test results

Specimen	Concrete (MPa)	Shear reinforcement			Longitudinal reinforcement (4D-22)	U-shaped reinforcement	Peak load (kN)	Failure mode
		f_{wy} (MPa)	ρ_w (%)	$\rho_w f_{wy}$ (MPa)				
SP1	$f_{ck}=23$	400	1.14	4.56	$f_y=400$ (MPa)	-	390	Bond failure
SP2	$f_{ck}=35$	796	1.14	9.08		-	326	Bond failure
SP3		400	2.28	9.12		-	579	Bond failure
SP4		796	1.14	9.08		$f_{wy}=400$ (MPa)	499	Bond failure

면 그 양을 줄이는 것이 가능하다고 예상되지만 철근의 부착내력은 일반적으로 횡보강근의 양에는 영향을 받지만 항복강도에는 둔감한 것으로 알려져 있다(Kim & Sato, 2005). 따라서 횡 보강근의 배근상황에 따라 전단파괴보다 주철근의 부착응력의 저하에 따른 부착파괴가 선행할 가능성이 예상된다.

이러한 부착파괴를 방지하는 방법으로 내측 주철근을 구속할 수 있는 보조근(sub-tie)을 두는 경우가 일반적이지만 시공능률이 저하되는 단점이 있다. 이러한 것에 대한 기존의 선행연구에서는 시공성이 우수하면서도 고강도 횡보강근을 사용하였을 때 발생할 수 있는 부착파괴를 효과적으로 방지할 수 있는 U자형 비폐쇄형 보강근을 제안하였다(곽성근 등, 2007). 이에 본 연구에서는 RC 보의 부착실험을 수행하여 고강도 횡보강근 및 U자형 비폐쇄형 보강근의 부착 특성을 검토하였다.

2. 실험계획

2.1 사용 재료

Table 1은 실험체에 사용된 재료의 상세를 나타낸다. 실험체 제작에 사용된 콘크리트는 압축강도가 23MPa과 35MPa로 두 가지 종류가 사용되었으며, 주철근으로는 항복강도가 400MPa인 D19와 D16 철근을 사용하였다.

전단보강근으로는 D10 철근이 사용되었으며, 항복강도는 일반강도인 400MPa과 고강도인 796MPa이 사용되었다. 실험체의 부착성능을 향상시키기 위하여 사용된 U자형 보강근은 항복강도가 400MPa이고 직경이 10mm인 이형 철근으로 폭 80mm, 길이 90mm가 되도록 계획하였다.

2.2 실험체

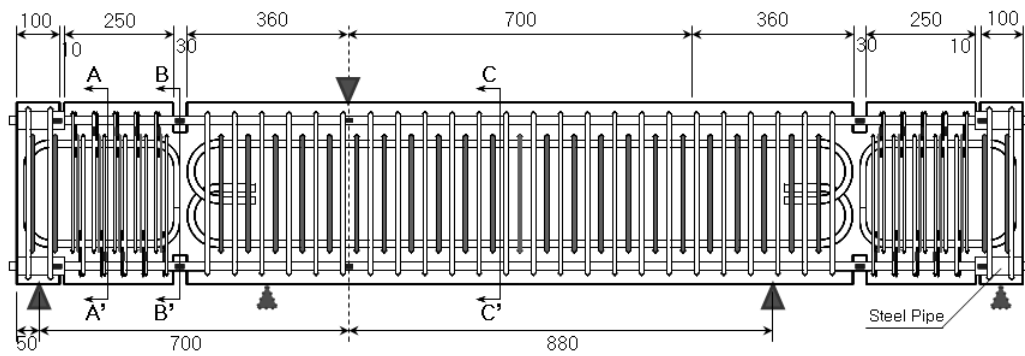
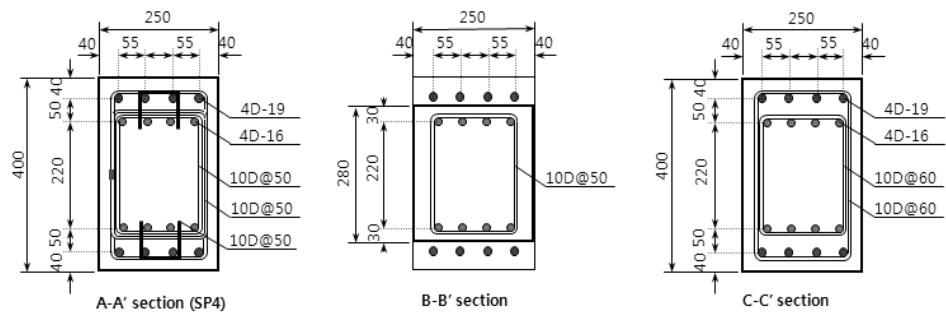
본 연구에서는 횡보강근의 항복강도와 배근형태에 따

라 총 4개의 실험체를 계획하였으며, 그 상세는 Table 1과 같다. SP1 실험체는 Table 1과 Fig. 1에서 보는 바와 같이 400MPa의 D10 철근으로 외측 주철근만을 횡보강하였다. SP2 실험체는 SP1 실험체와 전단보강근비 ($\rho_w = 1.14\%$)는 동일하지만 전단보강근의 항복강도 (f_{wy})가 SP1 실험체에서 보다 약 2배인 796MPa이 되도록 계획하였다.

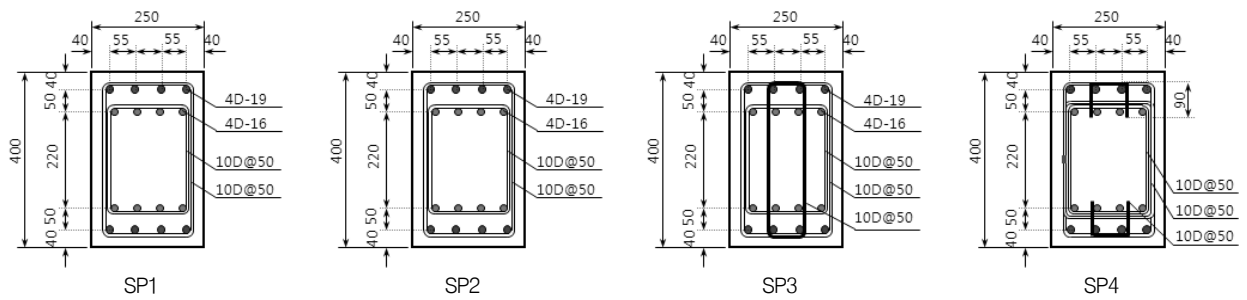
SP3 실험체는 SP1 실험체에서 내측 주철근을 보조근으로 보강하도록 계획하여 SP2 실험체와 동일한 전단보강량($\rho_w f_{wy} = 9.0 MPa$)을 가지도록 하였다. 반면, SP4 실험체는 SP2 실험체와 동일하게 고강도 횡보강근을 가지되 내측 주철근을 제안된 U자형 비폐쇄형 보강근으로 부착에 대해서만 보강하도록 계획하였다.

모든 실험체는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 250mm 폭과 400mm 높이, 그리고 양 단부에 250mm 길이의 실험구간을 가진다. 실험체의 주철근은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 휨파괴를 방지하기 위하여 SD40 강도의 D19 철근과 D16 철근 4대씩을 각각 1단과 2단에 배근하였다. 또한 전단파괴를 방지하기 위하여 D10 철근을 실험구간에서는 50mm 간격, 실험 외 구간에서는 60mm 간격으로 전단보강 하였다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 실험영역에 균열 유도 홈을 설치하여 이 구간에서의 부착파괴를 유도하였으며 균열 유도 홈에 와이어 스트레인 게이지(WSG)를 설치하여 실험구간에서의 부착응력을 직접 측정할 수 있도록 계획하였다. 특히, 주철근의 구속정도에 따른 내·외측 주철근의 응력상태를 확인하기 위하여 Fig. 1(b)에서와 같이 내·외측 주철근에 모두 와이어 스트레인 게이지를 부착하였다. 실험체의 양단부에는 지지반력에 의한 영향을 받지 않도록 강관을 이용하고 부착은 절연하여 실험구간의 단부에서 부착력이 최초로 발휘되도록 하였다.



(a) Dimensions and reinforcement details



(b) Cross sections of specimens (A-A')

Fig. 1 Details of test specimens

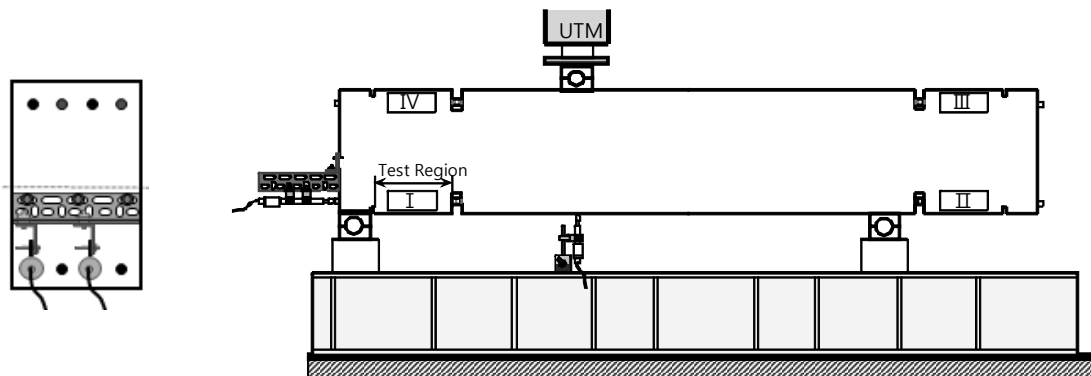


Fig. 2 Test setup

2.3 실험방법

이 연구에서는 고강도 횡보강근 및 U자형 비폐쇄형 보강근이 주철근의 부착 성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 2와 같이 Ichinose(前田 匡樹, 1994)가 제안한 단순보형 부착실험을 수행하였다. 이 실험법은 실험구간 내에 휨 균열이 발생하도록 균열 유도 홈이 있고 실험구간 밖의 철근이 콘크리트에 매립되지 않도록 계획되었기 때문에 실험구간 내에서의 철근과 콘크리트 사이에 발생하는 부착력을 평가할 수 있다.

내·외측 주철근의 미끄러짐 양은 Fig. 2와 같이 실험체 양단에 돌출된 주철근에 LVDT를 각각 설치하여 측정하였다. 가력지점 하부에는 2개의 LVDT를 설치하여 이들 평균값으로 부재의 처짐을 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 실험결과

실험결과 모든 실험체는 실험구간에서의 부착할렬 균열에 의한 부착과괴를 나타내었다. 실험에서 측정된 각 실험체의 전단력-처짐 관계는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 SP1과 전단보강근비는 같지만 전단보강근의 항복강도가 2배 높은 SP2 실험체는 콘크리트 압축강도의 영향을 고려할 경우, 전단보강근의 항복강도 증가에 따른 내력증가는 확인할 수 없었다.

SP2 실험체와 전단보강근의 양($\rho_w f_{wy}$)은 같지만 항복강도(f_{wy})를 반으로 줄이는 대신 보강근비를 2배 높게 하여 내·외측 주철근을 모두 구속한 SP3 실험체는 SP2 실험체보다 약 2배 높은 내력을 발휘하였다. 또한 SP2 실험체에서 내측 주철근을 선행연구에서 제안한 비폐쇄형 U자형 보강근으로 구속한 SP4 실험체는 SP2 실험체

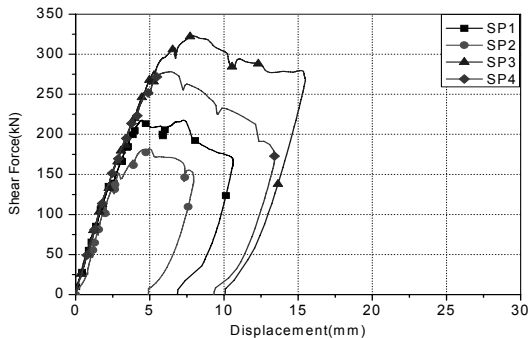
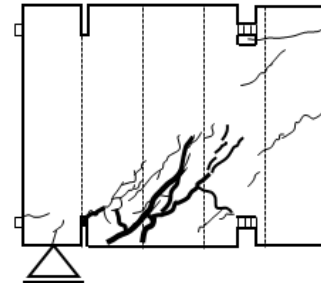


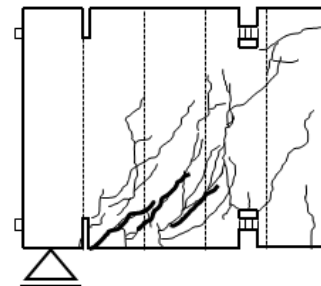
Fig. 3 Shear force versus displacement relationships

에 비하여 약 1.5배 높은 내력을 나타내었다.

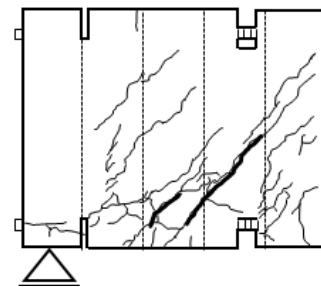
Fig. 4는 실험구간 내에서 각 실험체에 발생한 균열 상황을 나타낸다. 모든 실험체에서 가력지점 하부에서 휨 균열이 발생한 후 실험구간 내에 설치한 균열 유도 홈에 휨 균열이 발생하였다. 하중이 증가함에 따라 실험구간 내에 있는 주철근을 따라 부착균열이 발생한 후 부착할렬 파괴에 의하여 최대내력에 이르렀다.



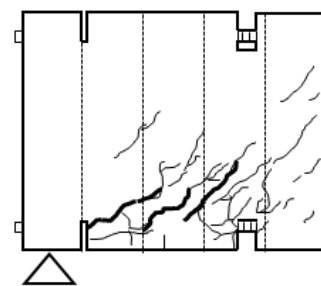
(a) SP1



(b) SP2



(c) SP3



(d) SP4

Fig. 4. Crack patterns of specimens

3.2 주철근 및 전단보강근의 변형률 분포

실험에서 측정한 각 실험체별 주철근과 전단보강근의 변형률 분포는 Fig. 5~8에 나타내었다. 변형률 분포도는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 실험구간의 균열 유도 홈 위치의 주철근에 부착한 스트레인 게이지 값을 이용하여 나타내었다. 각 그림에서 굵은 실선은 최대하중시 구간별 변형률을 나타내며 가는 실선과 점선은 최대하중 이전과 이후의 변형률을 각각 나타내고 있다. Fig. 5의 내·외측 주철근의 변형률 분포에서 선의 기울기는 실험구간에서의 응력차이를 의미하며 이는 곧 실험구간의 부착응력의 크

기를 뜻한다. 그림에서 최대하중 이후에 기울기가 감소하는 것으로부터 실험체가 부착열화에 의하여 파괴된 것을 알 수 있다. 외측 주철근만을 전단보강근으로 구속한 SP1과 SP2 실험체의 경우 외측 주철근의 변형률 구배에 비하여 내측 주철근의 변형률 구배가 낮게 나타났다. 이에 비하여 내측 주철근을 폐쇄형과 U자형 비폐쇄형 보강근으로 구속한 SP3와 SP4 실험체의 경우 내·외측 주철근의 변형률 구배는 서로 큰 차이를 나타내지 않았다. 이러한 실험결과로부터 폐쇄형과 비폐쇄형 보강근에 관계없이 내측 주철근을 구속함으로써 주철근의 부착력 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

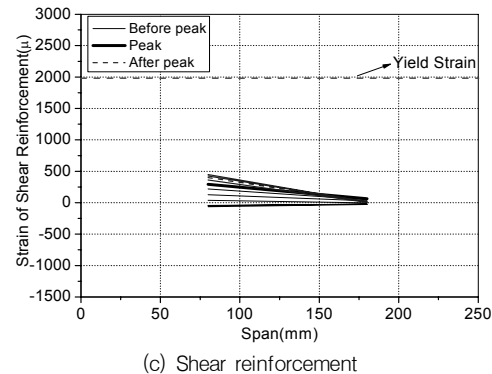
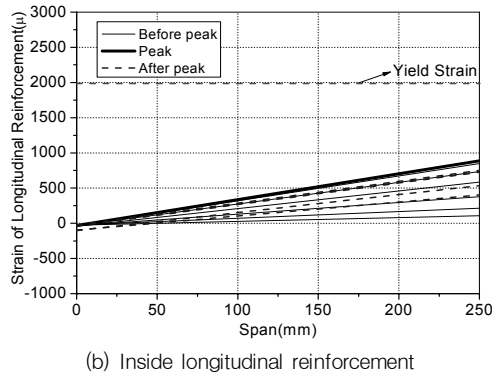
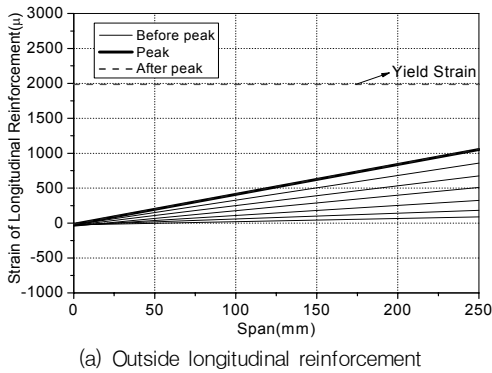


Fig. 5 Strain distributions of SP1

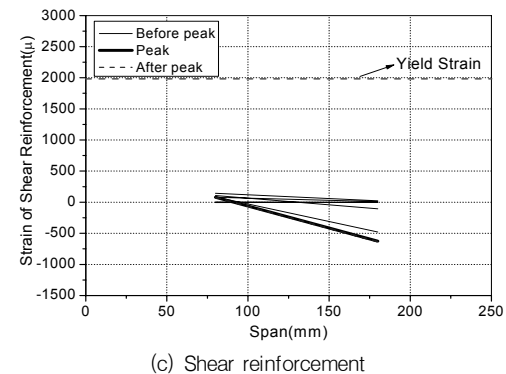
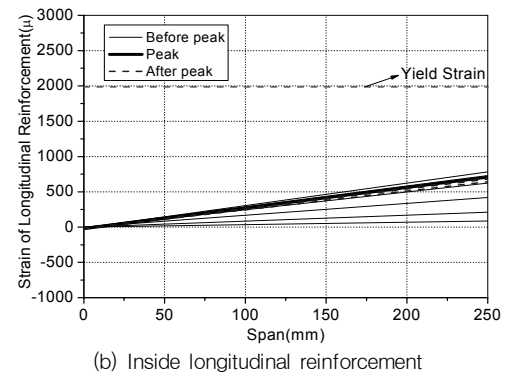
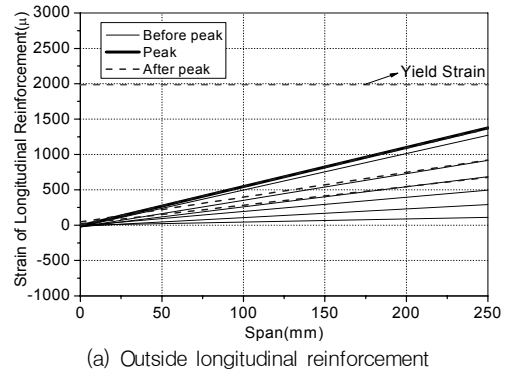
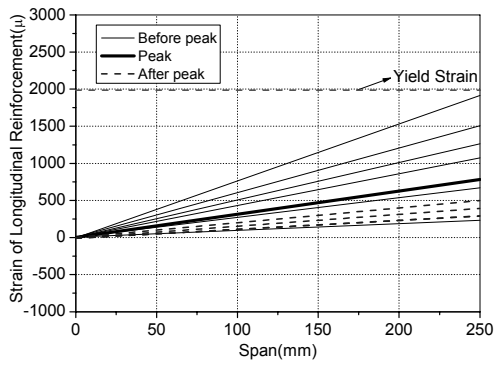
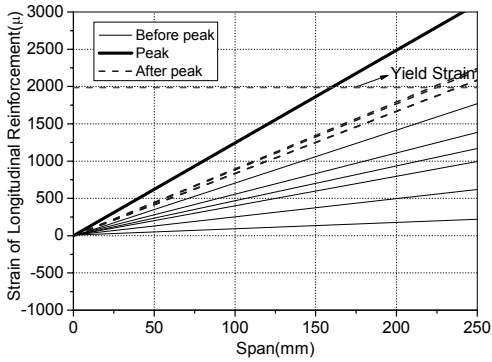


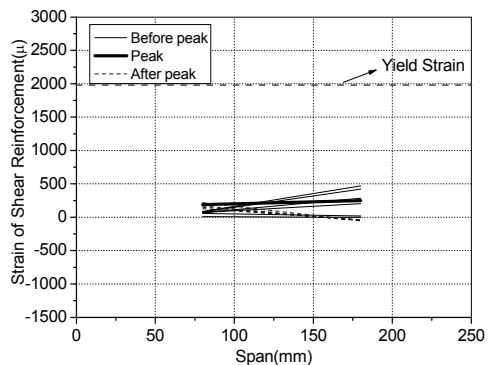
Fig. 6 Strain distributions of SP2



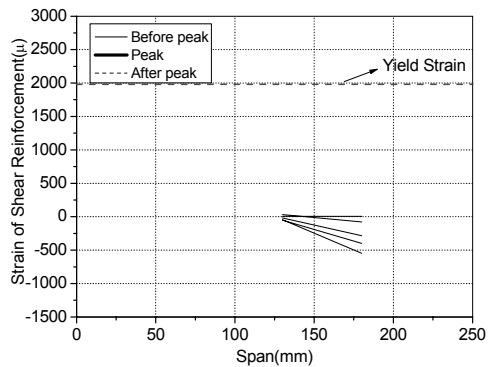
(a) Outside longitudinal reinforcement



(b) Inside longitudinal reinforcement

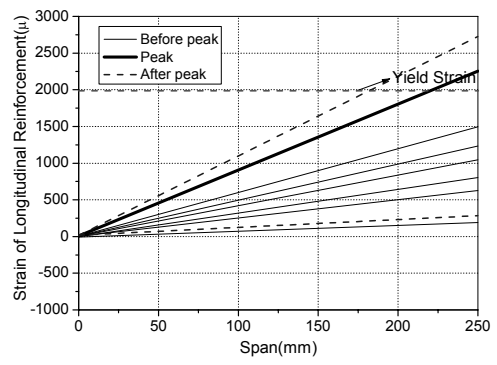


(c) Outside shear reinforcement

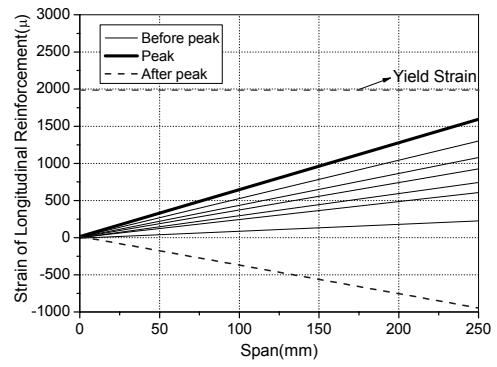


(d) Inside shear reinforcement

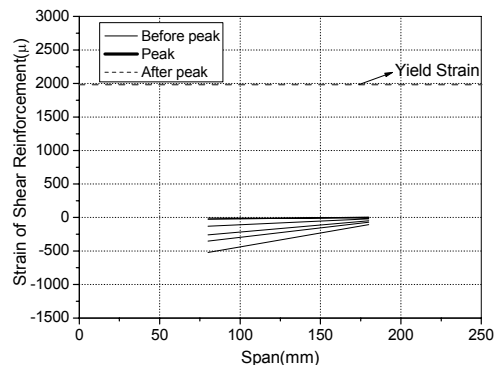
Fig. 7 Strain distributions of SP3



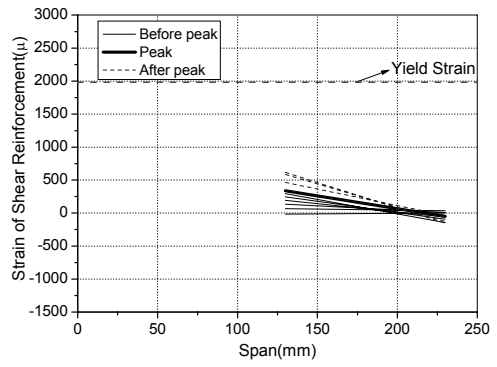
(a) Outside longitudinal reinforcement



(b) Inside longitudinal reinforcement



(c) Shear reinforcement



(d) U-shape reinforcement

Fig. 8 Strain distributions of SP4

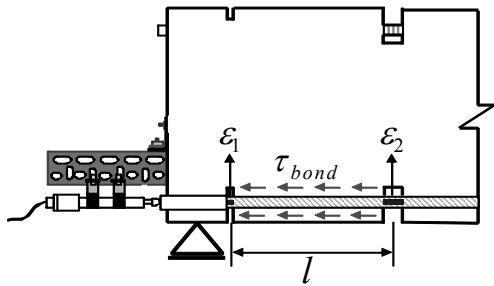


Fig. 9 Measuring method of slip

또한, Fig. 5~8로부터 모든 실험체의 전단보강근 변형률이 항복 변형률보다 크게 낮아 전단파괴 이전에 부착과괴 하였음을 할 수 있다.

3.3 부착응력-미끄러짐 관계

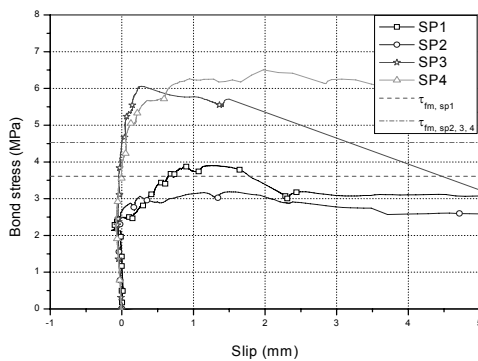
실험구간에서의 부착응력은 평균 부착응력 개념을 이용하여 다음과 같이 구하였다.

$$\tau_{bond} = \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1) \cdot E_s \cdot A_{st}}{\Sigma\psi \cdot l} \quad (1)$$

여기서 ϵ_1 과 ϵ_2 는 Fig. 9에 나타난 바와 같이 두 개의 균열 유도함에 각각 부착된 게이지로부터 측정한 변형률, E_s 는 철근의 탄성계수(MPa), $\Sigma\psi$ 는 철근 공칭둘레의 합, l 은 실험구간의 길이(250mm)를 나타낸다.

주철근의 미끄러짐 양은 Fig. 9와 같이 인장철근 단부에 설치한 LVDT와 주철근에 부착한 스트레인 게이지로부터 측정된 값을 이용하여 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$slip = LVDT - \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{2} \cdot l \quad (2)$$



(a) Inside longitudinal reinforcement

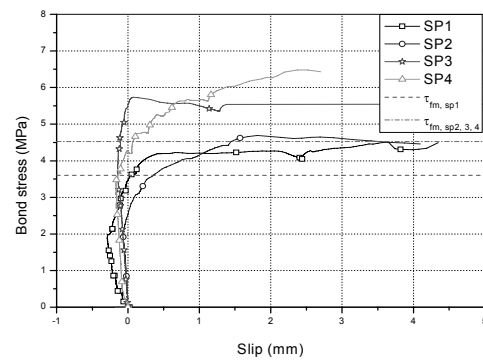
Fig. 10은 실험결과와 해석결과에 의한 부착응력-미끄러짐 관계를 나타낸다. 여기서 실험결과는 식(1)과 식(2)로부터 구하였으며 해석결과는 Fujii-Morita(Fujii & Morita, 1981)의 제안한 식을 이용하였다. 외측 주철근만 구속한 SP1과 SP2 실험체의 경우 Fig. 10에서 보는 바와 같이 내측 주철근의 부착강도가 외측 주철근보다 낮았으며, 이는 링텐션(岡田 清 外, 1987)(ring-tension)작용으로 인하여 내측 주철근이 외측 주철근보다 부착열화가 더 쉽게 발생하는 구조를 가지기 때문으로 판단된다.

내·외측 주철근을 모두 구속한 SP3와 SP4 실험체는 내측 주철근을 구속하는 폐쇄형 및 비폐쇄 U자형 보강근이 내측 주철근의 부착열화를 억제하여 부착강도를 증진시켰음을 Fig. 10으로부터 확인할 수 있다. 최대 내력에 도달한 후에는 주철근의 미끄러짐 양이 급격히 증대되었다. 특히 비폐쇄형 U자 보강근을 사용한 SP4 실험체는 기존 폐쇄형 보강근을 사용한 SP3 실험체와 유사한 부착성능을 보였을 뿐만 아니라, 외측 주철근만 구속한 SP2 실험체보다 내측 주철근의 부착강도가 약 2배 정도 높게 나타났다. 따라서 제안된 비폐쇄형 U자 보강근을 고강도 횡보강근을 사용한 철근콘크리트 보에 적용할 경우 부착성능을 효과적으로 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

주철근의 구속 방법에 따른 부착특성을 평가하기 위한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 철근콘크리트 보의 부착성능은 횡보강근의 비와 구속 정도에는 민감하지만 횡보강근의 항복강도에는 둔감함을 확인하였다.
- 2) 내외측 주철근을 보강근으로 모두 구속한 경우 외측 주철근만 구속한 경우보다 높은 부착성능을 보였다.



(b) Outside longitudinal reinforcement

Fig. 10 Bond stress versus slip relationships

이는 링텐션 작용으로 부착에 취약한 구조를 가진 내측 주철근에서 외부로 전진되는 균열을 내측 보강근이 억제하였기 때문에 판단된다.

- 3) 제안된 비폐쇄형 U자 보강근으로 보의 내측 주철근을 구속하였을 경우 내측 주철근의 부착강도가 약 2배 증진되었으며 기존 폐쇄형 보강근의 부착성능과 유사하였다. 따라서 제안된 비폐쇄형 U자 보강근은 기존의 폐쇄형 보강근보다 간편하면서도 비교적 효과적으로 철근콘크리트 보의 부착성능을 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(KRF2010-0008689) 및 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업으로 수행된 연구임(2010-0028289).

참고문헌

1. 광성근, 김길희, "고강도 횡 보강근을 적용한 RC보의 부착 강도 증진을 위한 실험적 연구", 대한건축학회 논문집(구조계) 제 23권 제 8호, 2007년 8월, pp.35~42.
2. 최임준, 박종욱, 황현복, 이정윤, "고강도 전단보강 철근을 사용한 철근콘크리트 보의 거동평가", 한국콘크리트학회 2009년도 봄 학술발표회 논문집 제 21권 제 1호, 2009년, pp.3~4.
3. 前田 匡樹, "鉄筋コンクリート部材の附着剝離破壊に関する研究", 修士学位論文, 東京大学, 1994, pp.3-1~3-23.
4. 岡田 清 外, 콘크리트工学ハンドブック, 朝倉書店, 1987, pp.407~418.
5. (財) 日本国土開発技術センター, New RC 究開発概要報告書, 1988~1992.
6. Fujii, S. and Morita, S., "Effect of Transverse Reinforcement on Splitting Bond Strength," Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol.3, 1981, pp.237~244.
7. Kim, K.-H. and Sato, Y., "Bond-strengthening Hooks for

RC Members with High Strength spirals," Journal of KCI, Vol. 17 No. 5, Oct., 2005, pp.835~842.

부 록

Fujii-Morita가 제안한 부착강도 식은 다음과 같다.

$$\tau_{fm} = \tau_{co} + \tau_{st}$$

여기서 τ_{co} 와 τ_{st} 는 각각 콘크리트와 횡보강근의 부착 강도를 뜻하며 다음 식과 같다.

$$\tau_{co} = (0.096 b_i + 0.134) \sqrt{f_{ck}}$$

$$\tau_{st} = 7.8 \frac{k \cdot A_{st}}{s \cdot N \cdot d_b} \sqrt{f_{ck}} \leq 0.27 \sqrt{f_{ck}}$$

여기서 b_i 는 부착할릴 패턴에 따라 결정되는 상수로 다음 식으로 구할 수 있다.

$$b_i = \min(b_{si}, b_{ci})$$

$$b_{si} = \frac{b}{N \cdot d_b} - 1 \quad (\text{for side split})$$

$$b_{ci} = \sqrt{2} \left(1 + \frac{C_s + C_b}{d_b} \right) - 1 \quad (\text{for coner split})$$

여기서 b 는 단면의 폭, N 은 주근의 개수, s 는 횡보강근의 간격, d_b 는 주근의 지름, C_s 는 측면 피복 두께, C_b 는 저면 피복 두께, A_{st} 는 1쌍의 횡보강근 단면적, f_{ck} 는 콘크리트 압축강도, k 는 $b_i = b_{si}$ 인 경우 1.0이고 $b_i = b_{ci}$ 인 경우 $\sqrt{2}$ 이다.

(접수일자 : 2010년 2월 23일)
(심사완료일자 : 2010년 5월 24일)

요 지

이 논문에서는 고강도 횡보강근을 가진 철근콘크리트 보의 부착 거동을 연구하였다. 제안된 비폐쇄형 U자 보강근의 부착 성능을 평가하기 위하여 총 4개의 철근콘크리트 보를 실험하였다. 제안된 비폐쇄형 U자 보강근은 쉽게 설치할 수 있는 구조를 가졌을 뿐만 아니라 부착 균열을 억제함으로써 철근콘크리트 보의 부착 성능을 증가시킬 수 있다.

이 연구에서는 실험체의 부착 응력과 미끄러짐을 구하기 위하여 Ichinose가 제안한 실험방법을 따랐다. 주요 실험변수는 횡보강근의 항복강도와 보강근비 및 구속의 형태로 하였다. 실험결과, 제안된 비폐쇄형 U자 보강근은 고강도 횡보강근을 사용한 철근콘크리트 보의 부착 성능을 효과적으로 향상시켰음을 확인할 수 있었다.

핵심 용어 : 부착 거동, 횡보강근, U자 보강근, 부착과괴, RC 보