

순환 굵은 골재 흡수율에 따른 RC 보의 부착성능에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Bond Performance of RC Beams According to Absorption of Recycled Coarse Aggregates

김 상 우¹⁾
Kim, Sang Woo

이 현 아²⁾
Lee, Hyun Ah

정 창 교³⁾
Jung, Chang Kyo

김 길 희^{4)*}
Kim, Kil Hee

Abstract

This study evaluates the bond behavior of reinforced concrete (RC) beams using recycled coarse aggregates. A total of four specimens were cast and tested. The test parameter was the type of coarse aggregates, that is, natural and recycled coarse aggregates, and the absorption ratio of recycled coarse aggregate. The recycled coarse aggregates with absorption ratios of 3% and 6% were used in this test. The specimens were simply supported and were subjected to a concentrated load. A test method proposed by Ichinose was adopted to estimate effectively the bond properties of specimens. From the experimental results, it was found that there was no difference of bond characteristics according to the absorption ratio of recycled coarse aggregates.

Keywords : Recycled aggregate, Bond, Absorption, RC beams, Bond-slip relationship

1. 서론

최근 국내의 강자갈이나 모래를 비롯한 천연골재자원은 이미 고갈상태에 이르러 건설현장의 골재는 대부분 석산에서 생산된 부순골재로 대체되고 있는 실정이다. 그렇지만 골재를 채취하는 과정에서 발생하는 환경문제로 인하여 부순골재 생산에 큰 영향을 미칠 것으로 보인다(이도현, 2004; 김무한, 1998).

골재의 수요량은 Fig. 1(건설교통부, 2005a)에 나타낸 바와 같이 매년 1.5% 내외로 꾸준히 증가하는 추세를 보이고 있다. 그러나 2020년에는 천연골재의 부존량과 개발 가능량이 55억³ 정도가 될 것으로 예상되어 천연골재 수급의 한계점에 도달할 것으로 보인다.

최근 국내에서는 노후된 건축물의 재건축과 낙후된 도심지의 재개발 사업이 꾸준히 증가하고 있으며 이러한 추세는 앞으로도 계속 이어질 것으로 예상되고 있다. 재건축과 재개발 사업이 증가함에 따라 건설폐기물, 특히 폐콘크리트의 발생량 또한 급격하게 증가하고 있다. 따라서 이들 건설폐기물의 효율적인 재활용이 어느 때 보다도 절실하게 요구되고 있다.

고갈되어 가는 천연골재를 대체하면서도 건설폐기물인

폐콘크리트를 재활용하기 위하여 순환골재에 관한 연구가 진행되고 있다. 이러한 사회적 흐름에 따라 정부의 관련부처에서도 ‘건설폐기물 재활용 촉진에 관한 법률(환경부, 2009)’과 ‘순환골재 용도별 품질기준(국토해양부, 2008)’을 제정하였다. 그러나 순환골재에 대한 부정적인 인식과 관련기준의 미비 등으로 대부분의 순환골재는 성토용 및 도로 노반재 등의 한정된 용도로만 재활용하고 있는 실정이다(건설교통부, 2005b; 최민수, 2003). 이에 본 연구에서는 순환골재의 적극적인 활용을 위한 기초연구로, 순환골재를 사용한 콘크리트와 철근 사이의 부착특성을 규명하여 폐콘크리트에서 발생한 순환 굵은 골재의 철근콘크리트 구조 부재에 대한 적용 가능성을 검토하고자 하였다.

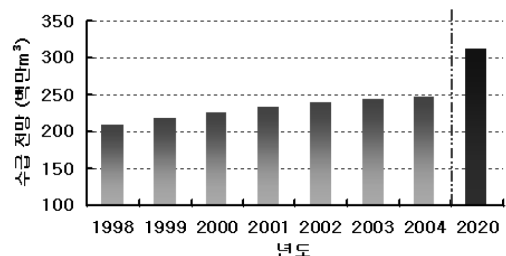


Fig. 1 Supply and demand of aggregate

1) 공주대 건축공학과 연구교수

2) (주)미래 ISE

3) 공주대 대학원 석사과정

4) 공주대 건축공학과 부교수

* Corresponding author : kimkh@kongju.ac.kr 041-521-9330

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2010년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Mix design of concrete

Specimens	Mix strength (MPa)	W/B	S/a	Unit weight (kg/m ³)							Density of coarse aggregate	
				W	C	F/A	S/P	S	G			A.D
									Natural	Recycled		
B-N	24	49.7	47.6	168	220	51	68	842	934	-	1.86	2.62
B-A3		49.7	47.5	168	220	51	68	842	-	913	1.86	2.54
B-A6		47.8	47.3	172	234	54	72	825	-	749	1.98	2.11

2. 실험 계획

2.1 재료

순환골재의 품질기준인 2006년 개정 전의 KS F 2573 콘크리트용 순환골재(한국표준협회, 2006)에서는 흡수율의 차이로 순환골재의 적용 범위에 대한 등급을 규정하였다. 등급의 범위는 1종, 2종, 3종으로 나누었으며 3% 이하의 흡수율을 가진 1종 순환골재만을 구조용 콘크리트로 사용할 수 있도록 규정하였다. 그러나 2006년 개정 이후에는 콘크리트용 순환골재의 규격을 흡수율 3.0% 이하로 규정하되 골재의 종류 및 용도에 대한 구분은 삭제하였다(한국표준협회, 2007). 따라서 본 연구에서는 천연골재 및 순환골재의 사용 유무와 순환 골재의 흡수율 차이에 따른 주철근과의 부착 특성을 알아보기 위하여 천연 골재 및 흡수율 3%와 6%의 순환 골재를 실험변수로 하여 Table 1과 같이 콘크리트를 배합하였다.

천연 골재는 일반적으로 레미콘 배합 시에 사용되는 25mm 쇄석을 이용하였다. 순환 골재는 흡수율 차이에 따른 부착성능의 차이를 알아보기 위하여 현재의 KS F 2573의 품질을 만족하는 흡수율 3%와 품질기준을 만족시키지 않는 흡수율 6%로 계획하였다. 잔 골재는 아산만에서 생산되는 강모래를 이용하였으며, 굵은 골재 이외에는 동일한 재료를 사용하여 설계기준강도 24MPa, 슬럼프 180mm로 콘크리트를 배합설계 하였으며 콘크리트의 실제 물리적 성질은 Table 2와 같다.

본 연구에서는 순환골재의 적극적인 활용을 위하여 순환골재 치환율을 100%로 하였다. 콘크리트의 압축강도를 평가하기 위하여 $\phi 100 \times 200$ mm 실린더형 공시체를 제작하였으며 재료 실험결과는 Table 2에 나타내었다.

본 실험에서는 주철근으로 D16과 D19를 사용하였으며 전단보강근으로 D10을 사용하였다. 철근의 인장강도 시험결과 항복강도는 D10, D16, D19 철근에 대하여 각각 560 MPa, 490 MPa, 680 MPa로 측정되었다. 각 철근의 물리적 특성은 Table 3에 나타난 바와 같다.

2.2 실험체

본 연구에서는 순환골재의 흡수율에 따른 부착성능을

Table 2 Physical properties of concrete

Specimens	Slump (mm)	Air (%)	f_{ck} (MPa)
B-N	170	5.0	22.3
B-A3	200	6.2	15.6
B-A6	150	6.0	20.9

Table 3 Physical properties of reinforcement

Steels	Area (mm ²)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
D10	71.3	560	623
D16	198.6	490	660
D19	286.7	680	730

Table 4 Properties of test specimens

Specimens	f_{ck} (MPa)	Coarse aggregate	Longitudinal steel bar	Shear steel bar
B-N	22.3	Natural	4-D19 $f_y=680$ MPa	D10@50mm $f_{wy}=560$ MPa
B-A3	15.6	Recycled (3%)		
B-A6	20.9	Recycled (6%)		

검토하기 위하여 실험체 일람표를 나타낸 Table 4에서 보는 바와 같이 총 4체의 실험체를 제작하였다. 실험체명은 부착을 뜻하는 B, 천연골재를 뜻하는 N, 그리고 순환골재 흡수율에 따라 A3(흡수율 3%)와 A6(흡수율 6%)으로 계획하였다.

실험체의 배근상세는 Fig. 2(前田匡樹, 1994)에 나타내었다. 실험체의 단면은 400×250mm, 전체길이는 2,200mm로 계획하였다. 실험구간은 Fig. 2에서와 같이 실험체 단부에 위치한 두 개의 균열 유도 홈 사이의 250mm 구간이며, 실험구간의 단면은 A-A' 단면과 같다. 실험구간에는 순수한 부착응력만 작용할 수 있도록 유도하기 위하여 B-B' 단면과 같이 피복콘크리트에서 주철근까지 균열 유도 홈을 설치하여 휨균열을 유도하였다. 실험구간은 실험체의 각 단부 상하부 4곳으로 한 실험체에서 총 4번의 실험이 가능하도록 계획하였다.

실험구간에서 부착에 저항하는 주철근으로 D19 철근을 4대씩 배근하였으며, 부착파괴 이전에 휨파괴 하는 것을 방지하기 위하여 보조철근으로 D16 철근을 4대 보강하였다. 또한 전단파괴를 방지하기 위하여 D10 철근을

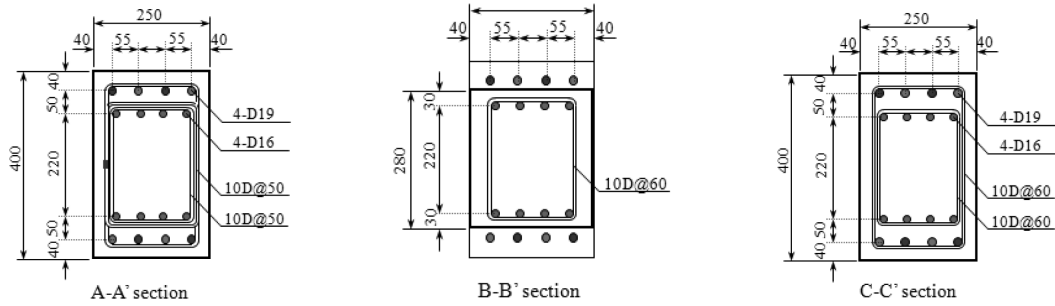


Fig. 2 Details of specimens (unit: mm)

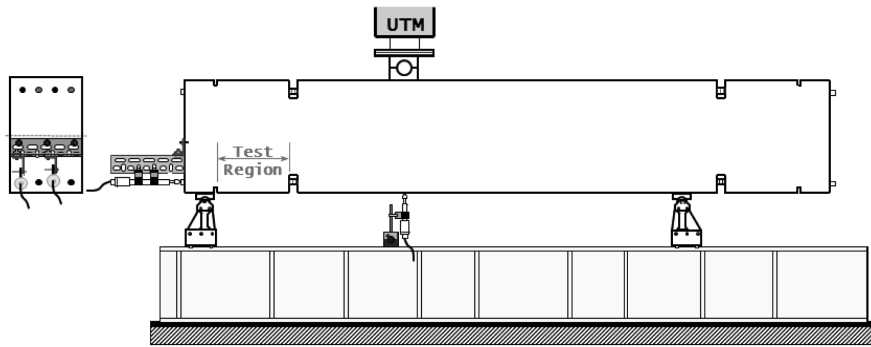
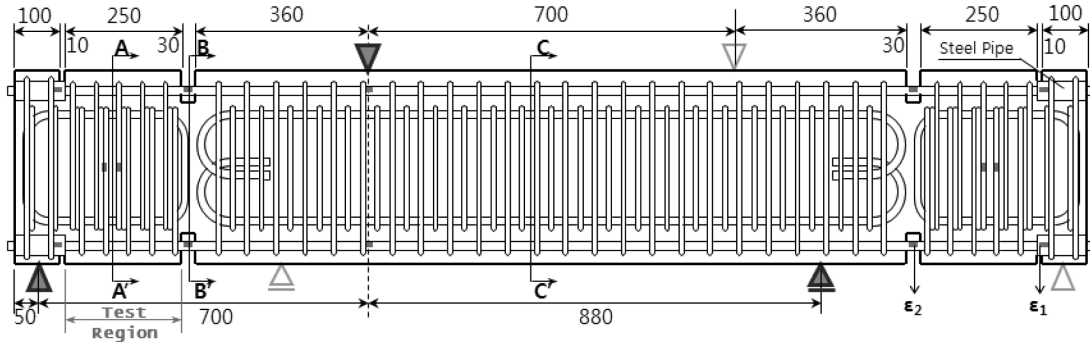


Fig. 3 Test setup of specimen

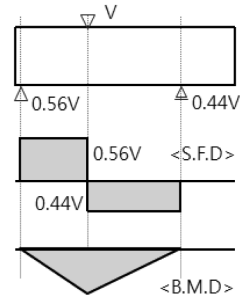


Fig. 4 SFD and BMD

50mm 간격으로 배근하였다.

실험체의 단부는 지지 반력에 의하여 철근이 구속되지 않도록 강관을 이용하여 철근과 콘크리트 사이의 부착을 절연하였다. 실험구간에서 작용하는 부착응력을 측정하기 위하여 균열 유도 홈과 부착절연구간의 주철근에 와이어 스트레인 게이지를 각각 부착하였다. 또한 전단파괴 유무를 확인하기 위하여 전단보강근에 스트레인 게이지를 부착하였다(곽성근, 김길희, 2007).

2.3 실험방법

본 연구에서 수행한 부착실험 방법은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 실제 부재의 응력상태를 재현하면서 부착응력-미끄러짐 관계를 간편히 계측할 수 있는 Ichinose(前田 匡樹 등, 1991)가 제안한 단순보형 실험방법을 이용하였다. 실험체의 처짐을 측정하기 위하여 가력지점 아래에 2

개의 LVDT를 설치하였다. 또한 가력에 따른 부착응력-미끄러짐 관계를 계측하기 위하여 Fig. 3과 같이 실험체 단부 내·외측 주철근 위치에 LVDT를 설치하였다. Fig. 4는 실험체에 작용하는 단면력도를 나타낸다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 하중-처짐 관계

Table 5는 부착실험에서 관찰된 1, 2차 실험결과와 평균값을 나타내고 있다. 실험체는 각각 4번의 가력이 가능하도록 설계되었으나 실험 결과 분석에는 우수한 계측결과를 나타낸 1차 및 2차 실험결과만을 사용하였다. Table 5에서 P_{max} 는 최대하중을 의미하며 V_{max} 는 실험구간에 작용한 최대전단력으로 각각의 값은 2회 실험의 평균값으로 하였다. 또한 하중-처짐 관계를 나타낸 Fig. 5에서 1,

2차 실험결과는 각각 (1)과 (2)로 구분하여 나타내었다. 실험결과 모든 실험체는 부착 파괴하였으며 각 실험체의 내력은 Table 5와 Fig. 5에서와 같이 콘크리트 압축 강도에 비례하였다. 전연골재를 사용한 B-N 실험체가 가장 높은 내력을 나타내었으며, 그 다음으로 B-A6, B-A3 실험체의 순서를 나타내었다. 이는 앞서 기술한 콘크

Table 5 Experimental results of test specimens

Specimens	f_{ck} (MPa)	P_{max} (kN)	V_{max} (kN)	Failure mode
B-N	22.3	403	225	Bond failure
B-A3	15.6	259	144	
B-A6	20.9	315	175	

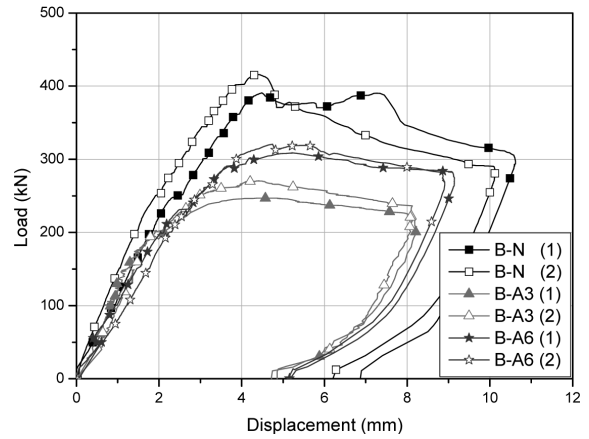
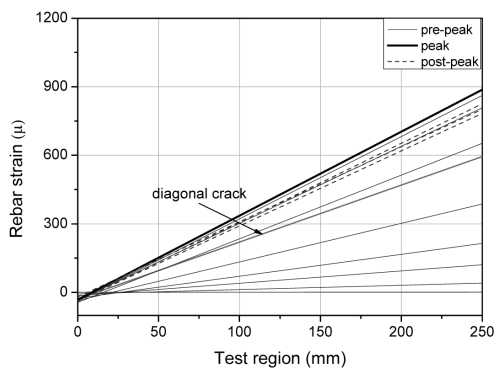
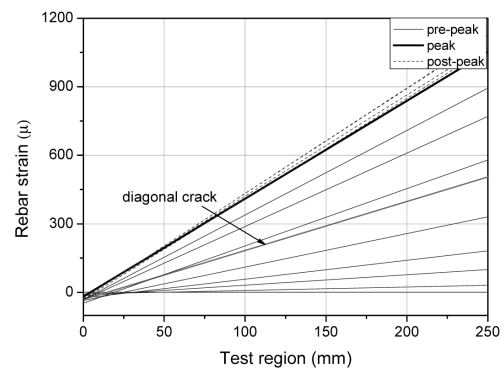


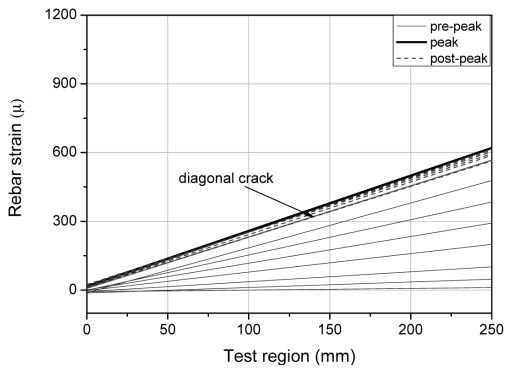
Fig. 5 Load versus displacement relationships



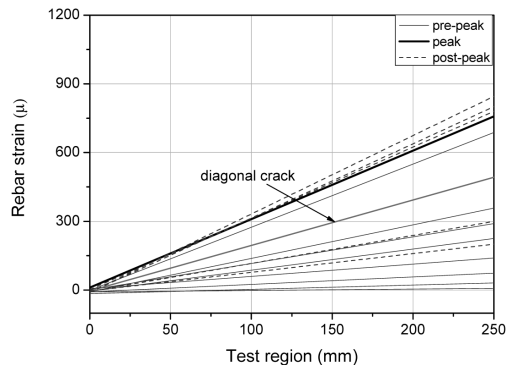
(a) B-N (inside)



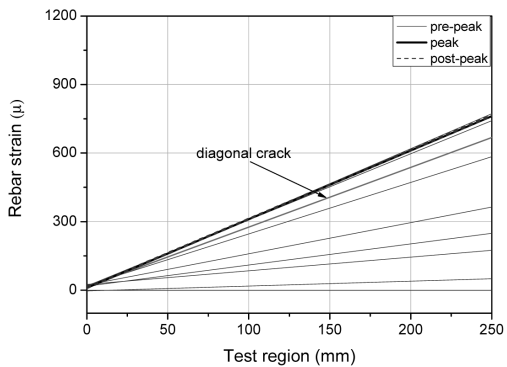
(b) B-N (outside)



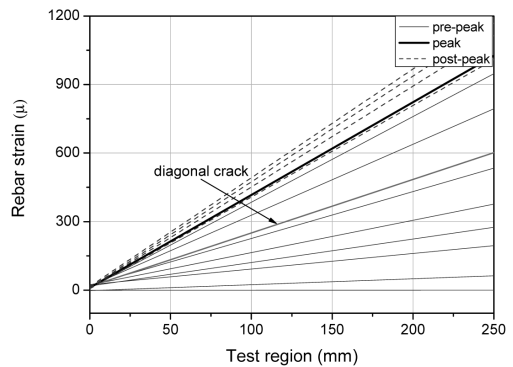
(c) B-A3 (inside)



(d) B-A3 (outside)



(e) B-A6 (inside)



(f) B-A6 (outside)

Fig. 6. Strain distributions of longitudinal reinforcement

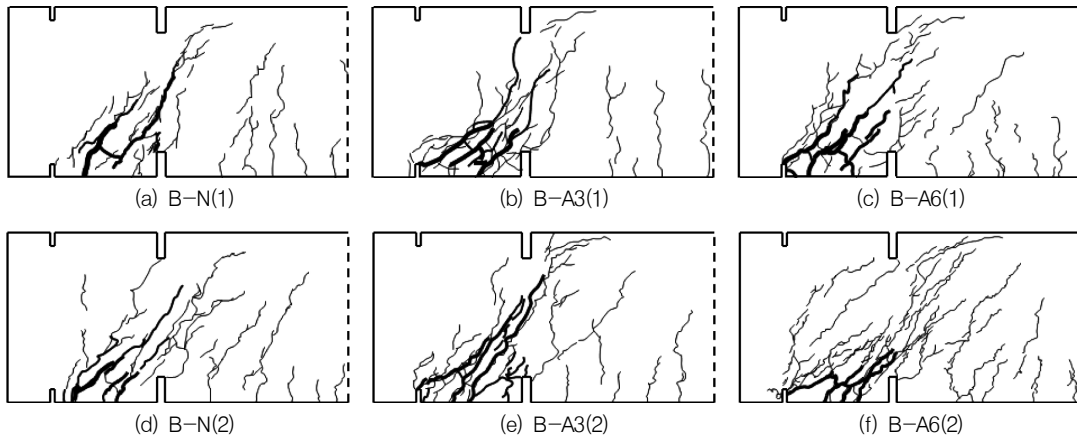


Fig 7. Crack patterns of specimens

리트의 강도 차이에 의한 것이며, 천연골재와 순환골재의 흡수율 차이에 의한 거동의 차이는 확인할 수 없었다.

3.2 철근변형률

Fig. 6은 Fig. 2의 실험체 상세에 표시된 두 곳의 균열 유도 홈에 위치한 내측 및 외측 주철근에 부착한 스트레인 게이지의 값을 이용하여 1차 실험에서 얻은 실험 구간의 변형률 분포를 각각 나타낸 것이다. 굵은 실선은 최대 내력일 때의 변형률을 나타내며, 실선은 최대 내력 이전까지의 변형률, 점선은 최대 내력 이후의 변형률, 일점쇄선은 경사균열이 발생하였을 때의 변형률을 나타낸다.

실험구간의 변형률 분포를 나타낸 Fig. 6은 응력의 분포를 의미하며 그 기울기는 실험구간에 작용하는 부착응력의 크기를 나타낸다. 하중이 증가함에 따라 변형률 구배가 상승하는 것으로 나타나 실험영역의 부착응력 또한 점점 증가하는 것을 그림으로부터 확인할 수 있다.

경사균열이 발생한 이후 최대응력에 도달할 때까지 변형률 구배는 점진적으로 증가하지만, 최대 내력 이후에는 기울기의 변화가 미약하거나 작아져 부착 열화가 일어났음을 알 수 있다. 이러한 경향은 내측 주철근과 외측 주철근에서 모두 확인할 수 있었다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 내측 주철근의 경우 최대내력 이후 변형률 구배가 감소하는 데에 비하여 외측 주철근의 경우에는 최대 내력 이후에도 변형률 구배가 약간 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 실험구간의 부착열화가 내측 주철근으로부터 시작되어 외측 주철근으로 전이되었기 때문으로 판단된다.

3.3 균열 상황

각 실험체의 파괴 후 균열양상을 나타낸 Fig. 7로부터 모든 실험체가 부착균열이 실험구간의 주철근을 따라 크

게 발생하면서 최종 파괴되었음을 확인할 수 있다. 모든 실험체는 최대모멘트 발생 지점인 가력점 하부에서 휨균열이 최초로 발생한 후 실험구간의 경계면에 설치한 균열 유도 홈으로 진전되었다. 이후 휨균열은 경사균열로 발전하였으며, 동시에 주철근을 따라 부착균열도 발생하였다. 하중이 증가하면서 실험 구간의 부착균열도 증가하였으며, 최종적으로 주철근의 급격한 미끄러짐이 발생하면서 부착파괴 하였다.

Fig. 7로부터 천연골재를 사용한 B-N 실험체가 순환골재를 사용한 B-A3 및 B-A6 실험체보다 부착균열의 수는 다소 작았으나 발생한 부착균열의 형상에서는 서로 유사함을 알 수 있다. 또한 순환골재의 흡수율이 차이가 나는 경우에도 균열발생의 경향은 서로 유사하였다.

3.4 철근의 부착응력과 미끄러짐

Fig. 8은 실험구간에 매립된 내측 및 외측 주철근의 부착응력-미끄러짐 관계를 나타낸다. 여기서 부착응력은 Fig. 9에서 보듯이 균열 유도 홈에 부착한 변형률로부터 평균부착응력의 개념을 적용하여 식(1)과 같이 구할 수 있으며, 주철근의 미끄러짐 양은 실험체 단부에 설치한 LVDT 값과 실험구간 철근자체의 늘어난 길이를 이용하여 식(2)와 같이 구할 수 있다.

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

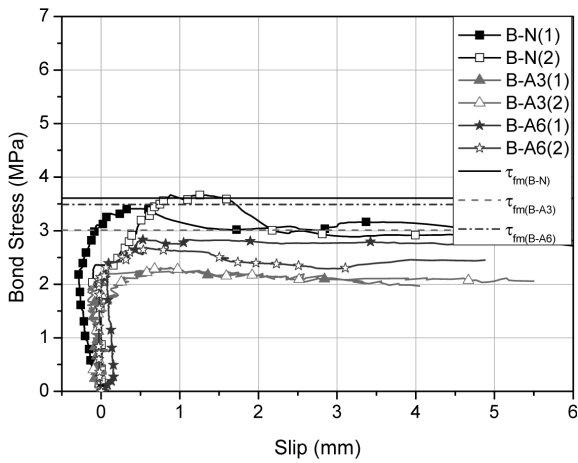
$$slip = LVDT - \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{2} \cdot l \quad (2)$$

여기서 ϵ_1 은 인장단부의 주철근 변형률, ϵ_2 는 인장단부에서 250mm 위치의 주철근 변형률, E_s 는 철근의 탄성계수, A_{st} 는 주철근의 면적, $\Sigma\psi$ 는 주철근의 공칭둘레의 합, l 은 실험구간의 길이로 250mm이다.

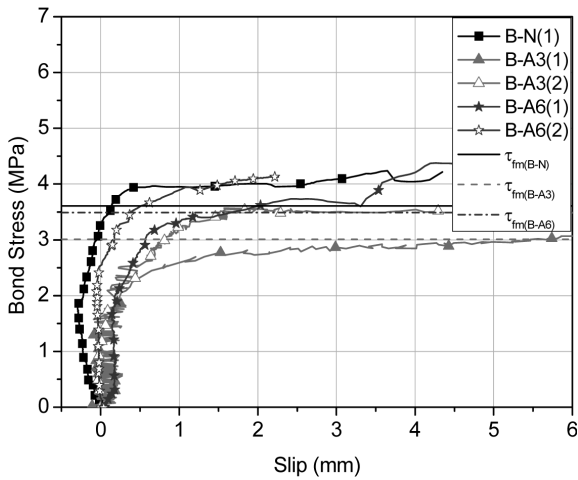
Table 6 Comparison of analytical and experimental results

Specimens	f_{ct} (MPa)	τ_{exp} (MPa)		$\tau_{exp,in}/\tau_{exp,out}$	τ_{fm} (MPa)	τ_{exp}/τ_{fm}	
		in	out			in	out
B-N	22.3	3.54	4.24	0.83	3.61	0.98	1.17
B-A3	15.6	2.28	3.16	0.72	3.01	0.76	1.05
B-A6	20.9	2.76	4.16	0.66	3.49	0.79	1.19

Note : τ_{fm} is bond strength predicted by Fujii-Morita equation



(a) Inside longitudinal reinforcement



(b) Outside longitudinal reinforcement

Fig. 8. Bond stress versus slip relationships

실험결과와 해석결과를 비교하기 위하여 Fujii-Morita 식(榮藤井와 田司郎森, 1982)을 사용하여 실험체의 부착응력을 계산하였다. 부록에 Fujii-Morita 식을 기술하였으며 그 결과는 Fig. 8과 Table 6에 나타내었다. 여기서 Table 6의 실험결과는 1, 2차 실험의 평균값이다. Fujii-Morita 식에 의한 각 실험체의 부착응력 τ_{fm} 은 B-N의 경우에 3.61 MPa, B-A3와 B-A6은 각각 3.01 MPa과 3.49 MPa로 계산되어 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 부착강도 역시 증가하였다.

내·외측 주철근의 실험결과 및 해석결과를 나타낸

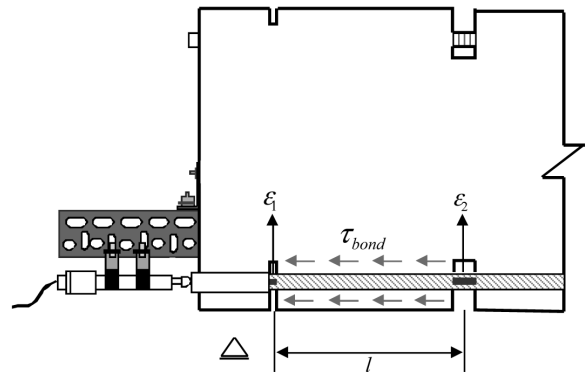


Fig. 9 Measuring method of slip

Table 6에 나타낸 바와 같이 내측 주철근의 부착강도는 외측 주철근에 비하여 천연골재를 사용한 실험체에서는 약 20%, 순환골재를 사용한 실험체에서는 약 30%~35% 정도 낮게 나타났다. 이것은 내측 주철근의 경우 횡보강근에 의한 구속이 외측 주철근보다 작을 뿐만 아니라 링 텐션(ring tension) (Fujii, 1998) 영역이 겹치기 때문에 판단된다(김길희, 2005). 따라서 부착열화는 내측 주철근에서 먼저 발생하여 순차적으로 외측 주철근으로 진전하였을 것으로 판단된다.

실험에서 계측된 내·외측 주철근의 부착강도 τ_{exp} 와 Fujii-Morita 식으로 구한 τ_{fm} 을 비교하면, 외측 주철근의 경우 천연골재를 사용한 B-N 실험체의 부착강도는 해석결과를 1.17배 상회하고 있다. 그리고 흡수율 3%와 6%인 순환골재를 사용한 B-A3와 B-A6 실험체 또한 해석결과에 비하여 각각 1.05배와 1.19배 높은 부착강도를 보였다.

내측 주철근의 경우 천연골재를 사용한 B-N 실험체는 해석결과와 거의 유사한 반면, 순환골재를 사용한 실험체는 약 25% 해석결과보다 낮은 것을 Table 6으로부터 확인할 수 있다. 이것은 다음과 같은 두 가지 요인에 의한 것으로 판단된다. (1) 순환골재의 마모에 의한 둥근 입형 때문에 골재와 시멘트 페이스트 사이의 부착력이 다소 낮아졌을 뿐만 아니라, (2) 마쇄 및 파쇄 과정을 거치면서 골재와 시멘트 페이스트 사이에 미세한 균열이 발생하였기 때문으로(柳啓 등, 1995) 골재와 시멘트 페이스트 사이의 이러한 부착저하는 부착할렬균열이 발생하기 쉬운 내측 주철근에서 더욱 두드러진 것으로 생각된다.

4. 결론

참고문헌

이 연구에서는 순환골재의 RC 구조 부재 적용을 위하여 순환골재 흡수율에 따른 부착 특성을 실험적으로 평가하였으며, 실험결과 다음의 사실을 확인할 수 있었다.

1) 본 실험결과 순환골재의 흡수율에 따른 부착성능의 차이는 발견되지 않았으며, 천연골재와 순환골재를 사용한 실험체의 균열양상 또한 서로 유사함을 확인할 수 있었다.

2) 부착파괴는 내측 주철근에서 시작하여 외측 주철근으로 진전하였으며, 외측 주철근의 부착강도는 골재 종류에 관계없이 내측 주철근의 부착강도 보다 높은 성능을 보였다. 여기서 내측 주철근의 부착열화가 외측 주철근보다 선행한 것은 횡보강근의 구속이 외측 주철근에서보다 더 작았을 뿐만 아니라 링텐션 영역이 내측 주철근에서 겹치기 때문으로 판단된다.

3) 천연골재를 사용한 실험체의 경우에는 내측 주철근의 부착강도가 Fujii-Morita 식에 의한 해석결과와 유사하였던 반면, 순환골재를 사용한 실험체의 경우에는 실험결과가 해석결과보다 약 20% 낮게 나타났다. 이는 마모에 의한 골재의 등근형상과 골재와 모르타르 사이의 미세균열에 의한 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력 양성사업 및 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업으로 수행된 연구(2009-0093825)의 결과이며 이에 감사드립니다.

1. 건설교통부·한국건설교통기술평가원, “구조용 재생골재 및 재생골재콘크리트 구조물의 장기 안정성에 관한 연구”, 2005a, pp. 42-47.
2. 건설교통부·한국건설교통기술평가원, “대체골재를 사용한 콘크리트의 고품질화 기술 개발”, 2005b, pp. 27-41.
3. 광성근, 김길희, “고강도 횡 보강근을 적용한 RC 보의 부착강도 증진을 위한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집 구조계, 제 23권 8호, 2007, pp. 35-42.
4. 국토해양부, 순환골재 품질기준, 2008.
5. 김길희, 철근콘크리트 구조, 구미서관, 2005, pp. 88-107.
6. 김무한, “건설폐기물 및 재생골재 콘크리트”, 한국콘크리트 학회지 제10권 6호, 1998, pp. 52-60.
7. 이도현, “국내 재생(순환)골재의 생산 및 활용 현황”, 재생(순환)골재 및 재생(순환)골재 콘크리트 정책·기술 세미나 논문집, 한국콘크리트 학회, 2004, pp. 30-38.
8. 최민수, “골재 자원의 수급안정을 위한 정책 방안 세미나”, 한국건설산업연구원, 2003, pp. 2-10.
9. 한국표준협회, KS F 2573, 콘크리트용 순환골재, 2006.
10. 한국표준협회, KS F 2526, 콘크리트용 골재, 2007.
11. 환경부, 건설 폐기물 재활용 촉진에 관한 법률, 2009.
12. 柳啓, 中川宗男, 吳祥根, “재생조골재에 부착된 미세분말이 재생 콘크리트의 성질에 미치는 영향”, 대한건축학회 추계학술 논문집 제15권 2호, 1995, pp. 673-676.
13. 前田匡樹, 小谷俊介, 青山博之, “RC部材の付着割裂強度に關する實驗的研究”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 13, No. 2, 1991, pp. 145-150.
14. 前田匡樹, “鐵筋 콘크리트部材の付着割裂破壞に關する研究”, 1994, pp. 3-1~3-88.
15. 柴藤井, 田司郎森, “異形鉄筋の付着割裂強度に關する研究”, 日本建築學會論文報告輯, No. 319, 1982, pp. 47-55.
16. Fujii, S., “Splitting Bond Failure in Reinforced Concrete Members”, Concrete Journal of Japan, Vol. 36, No. 2, Feb. 1998, pp. 10-15.

(접수일자 : 2009년 11월 16일)
(심사완료일자 : 2010년 2월 4일)

요 지

본 연구에서는 순환 굵은 골재를 사용한 철근콘크리트 (RC) 보의 부착거동을 평가하였다. 총 4개 실험체를 제작하였으며, 실험변수는 굵은 골재의 종류(천연 및 순환골재)와 순환골재의 흡수율로 하였다. 본 실험에서는 흡수율이 3%와 6%인 순환 굵은 골재를 사용하였으며, 실험체는 단순지지 형태로 집중하중을 받도록 계획하였다. 실험체의 부착특성을 효과적으로 평가하기 위하여 Ichinose가 제안한 실험방법을 채택하였다. 본 실험결과, 순환 굵은 골재의 흡수율에 따른 부착 특성의 차이는 발견되지 않았다.

핵심 용어 : 순환골재, 부착응력, 흡수율, RC 보, 부착-슬립 관계

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 부착강도를 뜻하며 다음 식과 같다.

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

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

여기서 b_i 는 부착할렬 패턴에 따라 결정되는 상수로 다음 식중 최소 값으로 산정한다.

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

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

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.