



## 순환 굵은골재의 혼입률에 따른 콘크리트와 이형철근의 부착 거동

장용현<sup>1)</sup> · 최기선<sup>2)</sup> · 유영찬<sup>2)</sup> · 김공환<sup>2)</sup> · 윤현도<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>충남대학교 건축공학과 <sup>2)</sup>한국건설기술연구원 건축구조·자원연구실

## Effect of Recycled Coarse Aggregate (RCA) Replacement Level on the Bond Behaviour between RCA Concrete and Deformed Rebars

Yong-Heon Jang,<sup>1)</sup> Ki-Sun Choi,<sup>2)</sup> Young-Chan You,<sup>2)</sup> Keung-Hwan Kim,<sup>2)</sup> and Hyun-Do Yun<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

<sup>2)</sup>Building Structure & Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

**ABSTRACT** In this study, mixed recycled coarse aggregate (RCA) was produced by mixing RCA from waste concrete in order to evaluate a new method of RCA production. Bond strength between reinforcing bars and RCA concrete was qualitatively evaluated as a part of continuous studies to establish design code of reinforced concrete structural members using recycled aggregate. For practical application, specimens were manufactured with the ready mix RCA concrete. Parameters investigated include: concrete compressive strength (i.e 21, 27 and 40 MPa), replacement levels (i.e 0, 30, 60 and 100%), bar position (i.e vertical and horizontal) and bar location (75 and 225 mm). For the pull-out test, each specimen was in the form of a cube, with each side of 150 mm in length and a deformed bar, 16 mm in diameter, was embedded in the center of each specimen. From the test results, the most of HT type specimen with compressive strength of 21 and 27 MPa showed lower bond strength than the ones provided in CEB-FIP and considered in reinforcement location factor ( $\alpha = 1.3$ ). It was reasoned that bonded area of top bar specimen was reduced at the soffit of reinforcement because of bleed water of fresh concrete. Therefore the reinforcement location factor in current KCI design code should be reviewed and modified.

**Keywords :** recycled coarse aggregate (RCA), replacement level, bond strength, pull-out

### 1. 서 론

건설 산업은 환경 단체와 시민들의 자연환경 보존에 대한 인식 및 요구 증가에 따라 천연 골재 확보에 어려움을 겪고 있으며 이러한 현실에 반해 골재 수요량은 지속적으로 증가하고 있는 실정이다. 또한 재건축 재개발 사업의 증가로 많은 양의 건설폐기물이 발생하고 있다. 합리적인 골재 공급 및 환경 보존은 건설 산업이 넘어서야 하는 가장 큰 문제 중 하나로 이를 해결할 수 있는 대안은 지속 가능한 발전과 자원 순환형 사회를 만들어 가는 것이며 미래 건설 산업의 궁극적 모델이라 할 수 있다. 따라서 순환골재 활용에 대한 필요성은 지속적으로 증대될 것으로 예상되고 있으며 현재 정부는 제도적 뒷받침<sup>1)</sup>을 통하여 순환골재의 생산 및 사용을 적극 유도하고 있다. 현행 순환골재 품질 기준<sup>2)</sup>에서는 콘크리트용 순환골재에 대하여 규정하고 있지만 기존 연구의 대부분이 재

료 성능 실험에 근간하고 있기 때문에 구조 성능에 대한 검토 및 이에 근거로 한 구조설계기준은 미흡한 실정이다. 또한 국내 순환골재 생산수준이 최근 몇 년간 지속적인 설비투자에 의해 콘크리트용의 고품질 순환골재의 생산이 가능해진데 반하여 기존 연구의 대부분이 저품질 재생골재를 대상으로 한 연구이며 이로 인한 부정적 인식이 순환 골재의 활용을 저해하고 있는 측면이 있다. 한편 저품질의 재생골재가 성토 및 기초용 등에 주로 사용됨으로써 자원의 재활용에 대한 효율성을 저하시킬 수 있다. 따라서 고품질의 순환골재와 재생골재를 적절히 혼합하여 현행 순환골재의 품질기준을 충족하는 골재를 사용함으로써 재자원화에 따른 2차 폐기물을 최소화하는 것이 절실히 요구된다. 또한 순환골재 콘크리트의 신뢰성 확보를 위하여 현행 순환골재 품질기준에서 제한하는 콘크리트 강도 범위를 40 MPa 내외로 확대하여 순환골재 콘크리트 성능에 대한 다양한 연구와 이를 근거로 한 기준정비가 요구된다. 또한 선행 연구<sup>3-5)</sup>에 따르면 수평철근 하부의 콘크리트 타설 깊이가 200 mm 이상일 경우, 상부 철근 효과(top bar effect)에 의해 소모 부착강도를 발휘하지 못하는 경우가 발생하는 것으로 보고되고 있다. 이는

\*Corresponding author E-mail: wiseroad@cnu.ac.kr

Received September 16, 2009, Revised October 14, 2009,

Accepted November 1, 2009

©2010 by Korea Concrete Institute

철근과 콘크리트의 충분한 부착 성능 확보를 통한 복합 재료로서의 효율적인 거동에 장애가 될 수 있다. 따라서 순환골재를 사용한 구조물의 신뢰성 있는 설계 방법을 제시하기 위해서는 순환골재 콘크리트의 재료 특성 및 구조 부재 성능에 관한 연구와 더불어 이형철근과 순환골재 콘크리트의 부착 성능에 대한 평가가 절실히 요구된다.

이에 이 연구에서는 순환 굽은골재 콘크리트의 구조 기준 정립을 위한 연구의 일환으로 고품질 순환골재와 재생골재를 혼합하여 현행 순환골재의 품질기준 하한치를 만족하는 순환 굽은골재를 사용한 콘크리트와 이형철근의 부착 성능을 평가하고자 한다. 이를 위하여 콘크리트 강도, 치환율, 철근의 배근 방향 위치를 변수로 직접 인발(pull-out) 실험을 계획하였고 이 실험 결과를 바탕으로 ACI, CEB-FIP 기준식 및 기존 연구 결과와 비교·분석함으로써 순환 굽은골재 콘크리트의 부착 설계를 위한 현행 기준식의 적용 가능성을 검토하고자 한다.

## 2. RCA 콘크리트와 이형철근의 부착 시험

### 2.1 실험 계획

보통강도 범위에서의 순환 굽은골재 콘크리트와 이형철근의 부착 성능 평가에 관한 선행 연구 결과에 의하면 수직 및 수평 배치된 하부 철근의 부착강도는 현행 규준에서 요구하는 값을 만족시키는 것으로 나타났으나, 수평 배치된 상부 철근의 경우 부착강도의 저하가 현저히 나타난 것으로 보고되고 있다.<sup>4)</sup> 압축강도에 따른 이러한 역할을 평가하기 위하여 이 연구에서는 선행 연구에서와 같은 보통강도의 순환 굽은골재 콘크리트와 더불어 저강도 및 고강도 순환 굽은골재 콘크리트의 부착 성능을 평가하기 위하여 시험체에 사용된 콘크리트 압축강도를 21, 27 및 40 MPa로 계획하였다.

### 2.2 실험체 계획

이 연구에서는 Table 1에 나타난 바와 같이 순환 굽은골재 치환율(0, 30, 60, 100%) 및 철근 배근방향/위치에 따른 부착거동 특성을 평가하기 위하여 Fig. 1에 나타난 바와 같이 KS F 2441,<sup>6)</sup> ASTM C234<sup>7)</sup>와 CSA S806-02<sup>8)</sup> 규격을 참고하여 2가지 형태의 시험체를 계획하였다. 수직 시험체(철근을 수직으로 배치 하고 철근과 수평방향으로 콘크리트 타설, 이하 수직 시험체)는 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 150 × 150 × 150 mm 강제 몰드에 콘크리트를 75 mm 높이로 2번에 나누어 타설하였다. 상단근 효과의 영향을 고려하기 위하여 제작한 수평 시험체는 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 150 × 150 mm 평면에 높이 300 mm로 제작하였으며, 하부로부터 75 mm와 225 mm 위치에 철근을 수평으로 배치하고 콘크리트를 100 mm 높이로 3번에 나누어 타설하였다. 모든 시험체의 콘크리트는 타설 후 각 층에 대하여 다짐봉으로 25회 다짐을 실

Table 1 Summaries and numbers of specimens

$f_{ck}$ (MPa)	Type	RCA replacement level (%)			
		0	30	60	100
21	V	3	3	3	3
27	HT	3	3	3	3
40	HB	3	3	3	3

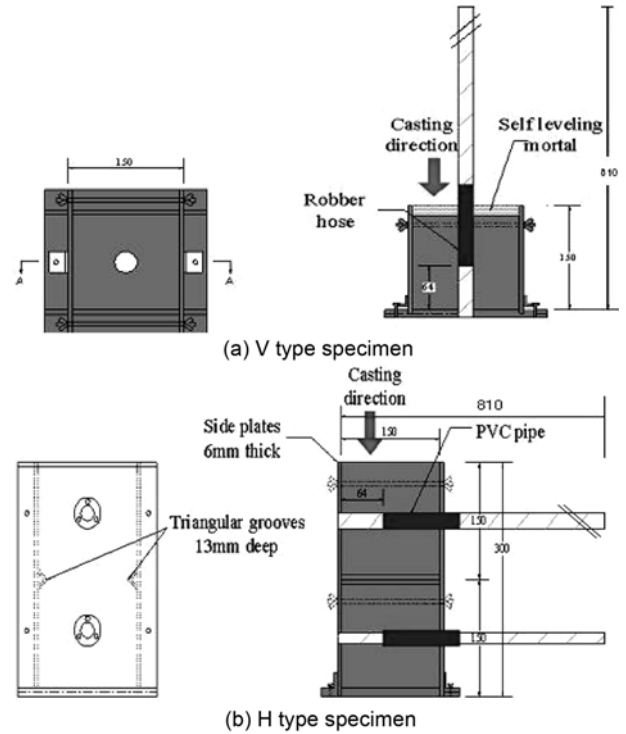


Fig. 1 Details of specimen (unit: mm)

시하였다. 시험체에 매립된 철근의 총 길이는 810 mm이며, 하중 재하 시 지점에서 압축력에 의한 구속력을 방지하고 뽀뽀파괴가 발생되도록 하기 위하여 D16 철근 공칭직경의 4배인 64 mm가 콘크리트와 부착되도록 하였으며 이외의 구간에서는 철근과 콘크리트가 부착되지 않도록 철근에 고무호스를 사용하여 분리하였다. 2단 수평 시험체 강제몰드에는 150 mm 위치에 V형 홈을 성형하여 수직 부착 시험체와 동일한 크기로 분리될 수 있도록 하였으며, 모든 시험체는 콘크리트 타설 3일 후 강제몰드를 해체하고 20 ± 2°C 항온수조에서 28일간 수중양생 후 실험시까지 대기양생 하였다.

### 2.3 사용 재료

이 연구에서는 순환골재 품질 기준에서 콘크리트용 순환 굽은골재의 품질 기준 하한치인 흡수율 3.0%, 절건밀도 2.5 g/cm<sup>3</sup>를 만족하는 골재를 생산하기 위하여 Table 2에 나타난 바와 같이 순환 굽은골재와 재생 굽은골재를 2.5 : 1.0의 비율로 혼합하여 사용하였다. 또한 현재까지 순환골재 콘크리트 특성에 관한 연구는 대부분 소규모 실험실 배합 및 비빔을 통하여 이루어졌으며, 이러한 소규모 실험실에서 얻어진 결과를 실제 현장에 적용할 경

**Table 2** Physical properties of aggregates

Type of aggregate	Maximum size (mm)	Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	Water absorption (%)	Unit weight (kg/l)
Natural coarse aggregate	25	2.69	0.57	1.55
*Mixed recycled coarse aggregate	25	2.49	3.00	1.51
Recycled coarse aggregate	25	2.59	1.59	1.61
Waste concrete	25	2.28	6.28	1.30

\*Mixed = recycled (2.5): waste concrete (1.0)

우 비빔방법 및 계량오차 등으로 인하여 다른 결과를 보일 수 있다. 따라서 이 연구에서는 순환 굵은골재 콘크리트의 실용화를 전제로 하여 레미콘 배합으로 콘크리트를 제조하였고 콘크리트 설계기준강도는 21, 27, 및 40 MPa로 계획하였다. 콘크리트의 배합조건은 Table 3에 나타난 바와 같고, 콘크리트의 강도 특성은 Table 4와 같다. 이 연구에서 사용된 철근은 직경 16 mm 이형철근을 사용하였으며, 철근의 기계적 특성은 Table 5에 나타난 바와 같다. Fig. 2는 이 연구에 사용된 골재의 입형을 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 순환 및 재생 굵은골재의 입형은 천연 부순자갈에 비하여 둥근 형상을 갖고 순환 및 재생골재의 표면에 시멘트 페이스트가 부착되어 천연골재에 비하여 흡수율이 높게 나타났다.

**2.4 실험 방법**

부착강도를 평가하기 위한 인발시험은 CSA S806-02<sup>8)</sup>

**Table 3** Mix proportions of concrete

f <sub>ck</sub> (MPa)	RCA replacement ratio (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )						
				W	C	S	G1	G2	G2*	AD
21	0	51.0	47.8	177	347	827	937	0	0	2.43
	30						656	189	76	
	60						375	378	151	
	100						0	630	252	
27	0	45.7	46.0	176	385	782	954	0	0	2.70
	30						668	192	77	
	60						382	385	154	
	100						0	641	257	
40	0	33.0	41.6	163	494	695	987	0	0	4.94
	30						691	199	80	
	60						395	398	159	
	100						0	664	265	

AD = admixture (water reducing agents)

G1 : natural, G2 : circuit, G2\* : recycled

**Table 4** Compressive test result

f <sub>ck</sub> (MPa)	RCA replacement ratio (%)	f <sub>cu</sub> (MPa)	E <sub>c</sub> (GPa)	f <sub>ct</sub> (MPa)
21	0	27.50	20.15	1.81
	30	22.82	17.60	1.94
	60	26.92	18.70	2.11
	100	24.97	19.39	1.89
27	0	26.93	20.17	2.49
	30	30.07	20.56	2.67
	60	27.94	18.97	2.11
	100	26.93	19.59	1.81
40	0	41.85	24.46	2.45
	30	37.09	21.57	2.38
	60	38.43	22.00	2.55
	100	39.64	22.67	2.32

**Table 5** Mechanical properties of deformed bar

Ribbed bar	f <sub>y</sub> (MPa)	f <sub>u</sub> (MPa)	ε <sub>s</sub> (×10 <sup>-6</sup> )	E <sub>c</sub> (GPa)
D16	454.7	736.7	2534.6	182.3



**Fig. 2** Shapes of aggregates

에 따라 실시하였다. 하중은 1,000 kN 용량의 만능시험기를 이용하여 가력 하였으며 가력 속도는 변위제어로서 1.2 mm/min의 속도로 가력 하였다. Fig. 3과 같이 슬립은 시험체 상부 자유단에 돌출되어 있는 철근에 1개의 변위계(LVDT)를 설치하여 콘크리트와 철근의 상대변위를 측정하였으며 재하시 시험체의 편심을 방지하고자 콘크리트 블록하부에 원형 구좌를 제작하여 설치하였다.

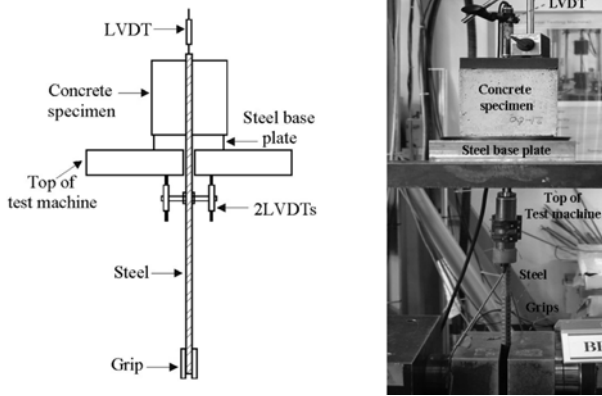


Fig. 3 Test setup

### 3. 부착 실험 결과 및 분석

#### 3.1 부착응력-슬립 관계

Fig. 4는 철근에 도입된 하중을 철근과 콘크리트의 부착면적으로 나누어 산정된 부착응력과 철근 자유단 슬립량의 관계를 콘크리트 설계압축강도, 철근 배근방향/위치 및 순환 굽은골재 치환율에 따라 비교하여 나타낸 부착응력-슬립 관계 곡선이다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 40 MPa 시험체와 21 및 27 MPa HT형 시험체를 제외한

나머지 시험체는 Tassios<sup>9)</sup>가 제안한 철근의 인발에 의한 전형적인 부착거동 특성을 보이고 있다. 즉, 철근의 부착응력 관계 곡선은 화학적인 점착력만 작용하는 1단계 이후 일정한 기울기로 증가하다가 기계적 부착력과 콘크리트와 철근의 맞물림 작용이 발생하는 2단계 및 3단계에서 슬립이 발생하게 되어 완만한 기울기로 증가하게 되고 이후 최대 부착응력에 도달하는 4단계를 지나면서 철근의 뺨힘 현상이 발생하는 양상을 보이고 있다.

한편 Fig. 4 및 Table 6에 나타난 바와 같이 수직(V형) 시험체의 경우 압축강도가 증가할수록 높은 부착강도를 나타내고 있으며, 동일한 강도를 갖는 시험체의 경우 천연골재만을 사용한 시험체에 비해 순환 굽은골재 혼입에 따라 부착강도는 약 2~19% 저하 되었으나 대체로 순환 굽은골재 치환율 증가에는 큰 영향 없이 유사한 부착거동 특성을 나타내 치환율에 대한 상관관계는 크지 않은 것으로 나타났다. 수평 하부철근(HB형) 시험체의 경우 순환 굽은골재 혼입에 따라 약 ±20% 정도의 강도 차이를 나타냈으나 순환 굽은골재 치환율 60% 이하의 경우 대체로 천연골재만을 사용한 시험체와 유사한 부착강도를 나타내 치환율에 따른 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 수평 상부철근(HT형) 시험체의 경우 순환 굽은골재 치환율 30% 이하에서는 천연골재만을 사용한 시험체와 유사한 부착강도를 나타냈고 순환 굽은골재 치환율 60%

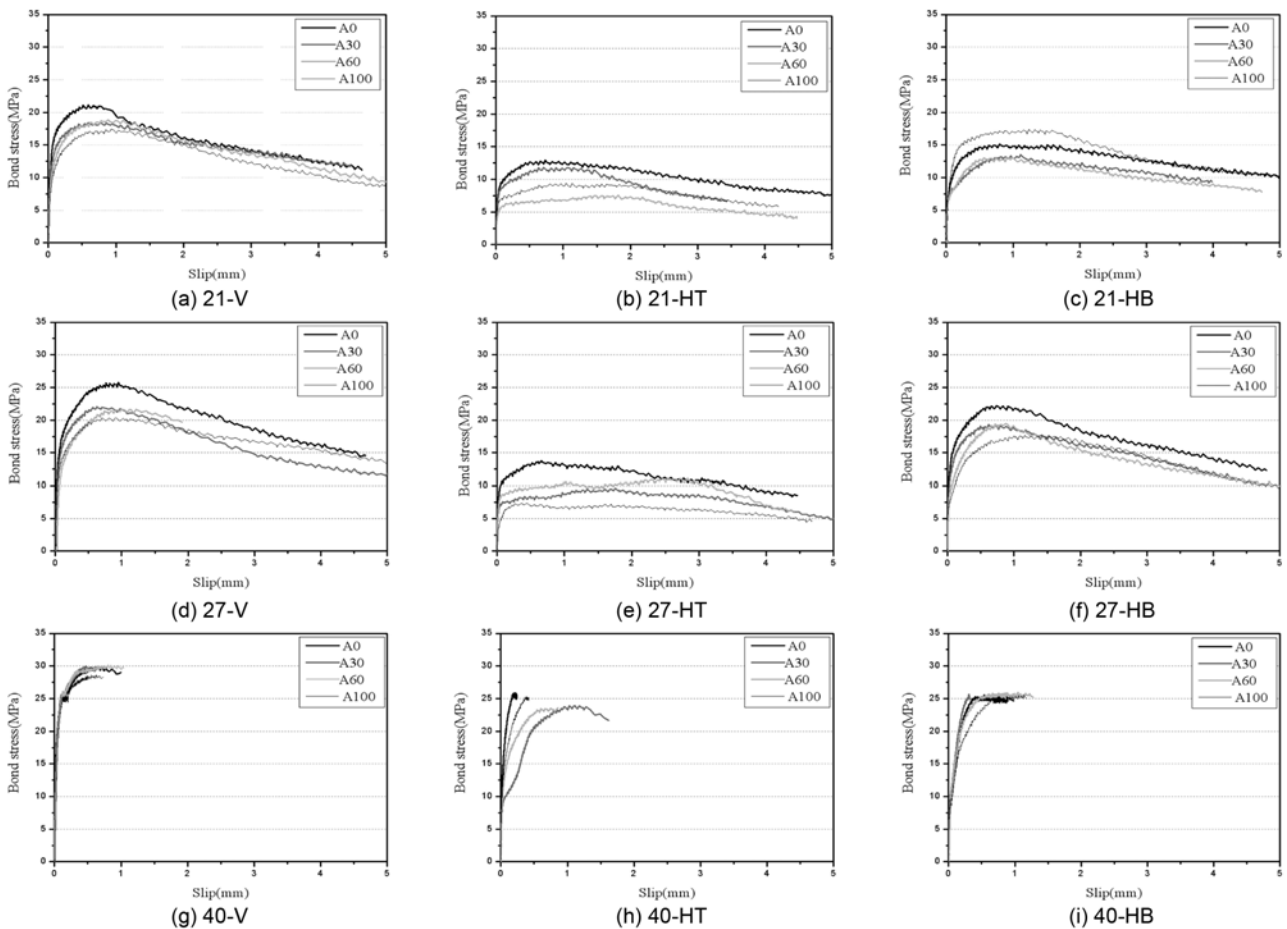


Fig. 4 Average bond stress versus slip relationship

**Table 6** Summaries of test results

Specimen	$\tau_{max}(1)$	$\tau_{CEB}(2)$	$\tau_{ACI}(3)$	(1)/(2)	(1)/(3)	Specimen	$\tau_{max}(1)$	$\tau_{CEB}(2)$	$\tau_{ACI}(3)$	(1)/(2)	(1)/(3)
21-0V1	20.63	10.49	6.63	1.97	3.11	21-30V1	16.90	9.55	6.04	1.77	2.80
21-0V2	21.12	10.49	6.63	2.01	3.19	21-30V2	16.51	9.55	6.04	1.73	2.73
21-0V3	22.26	10.49	6.63	2.12	3.36	21-30V3	18.40	9.55	6.04	1.93	3.05
21-0V-avg	21.34	21-0V-s	0.68	-	-	21-30V-avg	17.27	21-30V-s	0.81	-	-
21-0HB1	13.88	10.49	6.63	1.32	2.09	21-30HB1	15.21	9.55	6.04	1.59	2.52
21-0HB2	15.13	10.49	6.63	1.44	2.28	21-30HB2	13.54	9.55	6.04	1.42	2.24
21-0HB3	14.42	10.49	6.63	1.37	2.17	21-30HB3	12.22	9.55	6.04	1.28	2.02
21-0HB-avg	14.48	21-0HB-s	0.51	-	-	21-30HB-avg	13.66	21-30HB-s	1.22	-	-
21-0HT1	7.79	10.49	6.63	0.74	1.17	21-30HT1	12.56	9.55	6.04	1.31	2.08
21-0HT2	12.93	10.49	6.63	1.23	1.95	21-30HT2	11.83	9.55	6.04	1.24	1.96
21-0HT3	14.13	10.49	6.63	1.35	2.13	21-30HT3	12.55	9.55	6.04	1.31	2.08
21-0HT-avg	11.62	21-0HT-s	2.75	-	-	21-30HT-avg	12.31	21-30HT-s	0.34	-	-
21-60V1	18.84	10.38	6.56	1.82	2.87	21-100V1	20.01	9.99	6.32	2.00	3.17
21-60V2	19.49	10.38	6.56	1.88	2.97	21-100V2	18.64	9.99	6.32	1.87	2.95
21-60V3	22.81	10.38	6.56	2.20	3.48	21-100V3	17.45	9.99	6.32	1.75	2.76
21-60V-avg	20.38	21-60V-s	1.74	-	-	21-100V-avg	18.70	21-100V-s	1.05	-	-
21-60HB1	13.70	10.38	6.56	1.32	2.09	21-100HB1	18.88	9.99	6.32	1.89	2.99
21-60HB2	14.18	10.38	6.56	1.37	2.16	21-100HB2	17.37	9.99	6.32	1.74	2.75
21-60HB3	13.10	10.38	6.56	1.26	2.00	21-100HB3	18.33	9.99	6.32	1.83	2.90
21-60HB-avg	13.66	21-60HB-s	0.44	-	-	21-100HB-avg	18.19	21-100HB-s	0.62	-	-
21-60HT1	7.57	10.38	6.56	0.73	1.15	21-100HT1	9.45	9.99	6.32	0.95	1.50
21-60HT2	5.80	10.38	6.56	0.56	0.88	21-100HT2	11.06	9.99	6.32	1.11	1.75
21-60HT3	8.91	10.38	6.56	0.86	1.36	21-100HT3	9.95	9.99	6.32	1.00	1.57
21-60HT-avg	7.43	21-60HT-s	1.27	-	-	21-100HT-avg	10.15	21-100HT-s	0.67	-	-
27-0V1	24.96	10.38	6.56	2.40	3.79	27-30V1	22.05	10.97	6.93	2.01	3.18
27-0V2	25.77	10.38	6.56	2.48	3.93	27-30V2	21.83	10.97	6.93	1.99	3.15
27-0V-avg	25.32	27-0V-s	0.46	-	-	27-30V-avg	21.94	27-30V-s	0.11	-	-
27-0HB1	19.83	10.38	6.56	1.91	3.02	27-30HB1	19.32	10.97	6.93	1.76	2.79
27-0HB2	22.17	10.38	6.56	2.14	3.38	27-30HB2	14.95	10.97	6.93	1.36	2.16
27-0HB3	23.39	10.38	6.56	2.16	3.41	27-30HB3	17.27	10.97	6.93	1.57	2.49
27-0HB-avg	21.46	27-0HT-s	1.16	-	-	27-30HB-avg	17.18	27-30HB-s	1.79	-	-
27-0HT1	13.76	10.38	6.56	1.33	2.10	27-30HT1	15.25	10.97	6.93	1.39	2.20
27-0HT2	15.09	10.38	6.56	1.45	2.30	27-30HT2	8.61	10.97	6.93	0.79	1.24
27-0HT3	10.08	10.38	6.56	0.97	1.54	27-30HT3	9.60	10.97	6.93	0.88	1.38
27-0HT-avg	12.98	27-0HT-s	2.12	-	-	27-30HT-avg	11.15	27-30HT-s	2.92	-	-
27-60V1	21.66	10.57	6.68	2.05	3.24	27-100V1	20.37	10.38	6.56	1.96	3.10
27-60V2	21.43	10.57	6.68	2.03	3.21	27-100V2	21.38	10.38	6.56	2.06	3.26
27-60V-avg	21.55	27-60V-s	0.12	-	-	27-100V-avg	20.88	27-100V-s	0.50	-	-
27-60HB1	19.38	10.57	6.68	1.83	2.90	27-100HB1	17.64	10.38	6.56	1.70	2.69
27-60HB2	19.47	10.57	6.68	1.84	2.91	27-100HB2	16.18	10.38	6.56	1.56	2.47
27-60HB3	20.45	10.57	6.68	1.93	3.06	27-100HB3	18.47	10.38	6.56	1.78	2.81
27-60HB-avg	19.77	27-60HB-s	0.48	-	-	27-100HB-avg	17.43	27-100V-s	0.95	-	-
27-60HT1	11.13	10.57	6.68	1.05	1.67	27-100HT1	10.65	10.38	6.56	1.03	1.62
27-60HT2	6.58	10.57	6.68	0.62	0.98	27-100HT2	9.31	10.38	6.56	0.90	1.42
27-60HT3	11.61	10.57	6.68	1.10	1.74	27-100HT3	7.36	10.38	6.56	0.71	1.12
27-60HT-avg	9.77	27-60HT-s	2.27	-	-	27-100HT-avg	9.11	27-100HT-s	1.35	-	-
40-0V1	29.02	12.94	8.18	2.24	3.55	40-30V1	29.86	12.18	7.70	2.45	3.88
40-0V2	29.82	12.94	8.18	2.30	3.65	40-30V2	29.98	12.18	7.70	2.46	3.89
40-0V-avg	29.42	40-0V-s	0.40	-	-	40-30V-avg	29.92	40-30V-s	0.06	-	-
40-0HB1	28.13	12.94	8.18	2.17	3.44	40-30HB1	29.01	12.18	7.70	2.38	3.77
40-0HB2	25.55	12.94	8.18	1.97	3.12	40-30HB2	28.46	12.18	7.70	2.34	3.70
40-0HB3	26.53	12.94	8.18	2.05	3.24	40-30HB3	25.62	12.18	7.70	2.10	3.33
40-0HB-avg	26.74	40-0HB-s	1.06	-	-	40-30HB-avg	27.70	40-30HB-s	1.49	-	-
40-0HT1	27.41	12.94	8.18	2.12	3.35	40-30HT1	23.92	12.18	7.70	1.96	3.11
40-0HT2	22.01	12.94	8.18	1.70	2.69	40-30HT2	17.75	12.18	7.70	1.46	2.31
40-0HT-avg	24.71	40-0HT-s	2.70	-	-	40-30HT-avg	20.84	40-30HT-s	3.09	-	-
40-60V1	27.36	12.40	7.84	2.21	3.49	40-100V1	28.67	12.59	7.96	2.28	3.60
40-60V2	30.18	12.40	7.84	2.43	3.85	40-100V2	29.00	12.59	7.96	2.30	3.64
40-60V-avg	28.77	40-60V-s	1.41	-	-	40-100V-avg	28.84	40-100V-s	0.16	-	-
40-60HB1	25.96	12.40	7.84	2.09	3.31	40-100HB1	28.86	12.59	7.96	2.29	3.63
40-60HB2	26.17	12.40	7.84	2.11	3.34	40-100HB2	27.40	12.59	7.96	2.18	3.44
40-60HB3	25.90	12.40	7.84	2.09	3.30	40-100HB3	25.55	12.59	7.96	2.03	3.21
40-60HB-avg	26.01	40-60HB-s	0.12	-	-	40-100HB-avg	27.27	40-100HB-s	1.35	-	-
40-60HT1	23.58	12.40	7.84	1.90	3.01	40-100HT1	28.75	12.59	7.96	2.28	3.61
40-60HT2	23.53	12.40	7.84	1.90	3.00	40-100HT2	19.61	12.59	7.96	1.56	2.46
40-60HT3	-	-	-	-	-	40-100HT3	25.81	12.59	7.96	2.05	3.24
40-60HT-avg	23.56	40-60HT-s	0.02	-	-	40-100HT-avg	24.72	40-100HT-s	3.81	-	-

\*avg = average s = standard deviation

이상의 시험체에서는 약 12~35% 부착강도 저하를 나타냈으나 이는 타설 높이에 따른 영향으로 판단되며 치환율에 따른 영향은 크지 않은 것으로 사료된다. 한편 Fig. 4 (b) 및 (e)에 나타난 바와 같이 콘크리트 압축강도 21 MPa의 수평(21-H형)시험체 중 상부철근 시험체인 21-HT형 시험체는 21-V형 시험체에 비해 약 32~60%, 하부철근 시험체인 21-HB형에 비하여 약 7~46% 낮은 부착강도를 나타내었고, 27-H형 시험체 중 상부철근 시험체인 27-HT형 시험체는 27-V형 시험체에 비해 약 46~64%, 27-HB형 시험체에 비해 약 38~55% 낮은 부착강도를 나타내었다. 또한 21 및 27-HT형 시험체의 경우 초기의 화학적 접착력 상실 이후 부착강도 증가 없이 리브와 콘크리트의 슬립만 증가하여 원형철근에서 일반적으로 나타나는 부착거동 특성<sup>9)</sup>을 보였고 시험 종료 후 잔류마찰강도가 V형 시험체에 비하여 낮은 값을 나타냈다. 이는 HT형 시험체의 상부철근 하부에 블리딩 및 골재침하 등에 기인한 것으로 사료된다. 한편 설계압축강도 40 MPa 시험체의 경우 전술한 압축강도 21 및 27 MPa 시험체와 다르게 철근의 배근방향/위치 및 순환 굽은골재 치환율에 관계없이 대체로 적은 슬립량의 쪼갬 파괴에 의해 최대하중이 결정되었고 상부철근 시험체의 경우 부착강도 저하가 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 이 연구에서 제작된 시험체가 CEB-FIP에서 제안하고 있는 콘크리트 피복(cover) 5d<sub>b</sub>에 비하여 다소 적은 4d<sub>b</sub>로 고강도영역에 대한 충분한 구속효과를 발휘하지 못하였기 때문인 것으로 판단되며 상부철근 시험체의 경우 단위수량 감소로 블리딩(bleeding)이 감소되고, 콘크리트의 점성 증가로 공극 및 골재 침하가 감소하므로 상부철근의 부착강도 저하가 크지 않은 것으로 사료된다.

### 3.2 순환골재 종류에 따른 영향

Fig. 5 (b)는 흡수율 2.99% 및 절건밀도 2.49 g/cm<sup>3</sup>인 단일한 종류의 순환 굽은골재를 사용한 기존 연구 결과와 재생골재를 혼입·생산한 순환 굽은골재를 사용한 이 연구 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 비교 대상은 설계압축강도 27 MPa의 V형 및 H형 시험체로 하였고 철근과 콘크리트 사이의 부착응력을 압축강도의 제곱근으로 무차원화한 값과 순환 굽은골재 치환율을 비교하여 나타내었다. 단일한 종류의 순환 굽은골재를 사용한 기존 연구의

경우 V형 및 H형 시험체 모두 순환 굽은골재 혼입률 증가에 관계없이 유사한 부착강도 특성을 나타냈으며 재생골재를 혼입·생산한 순환 굽은골재를 사용한 이 연구 시험체의 경우 순환 굽은골재 혼입률이 증가함에 따라 부착응력이 다소 감소하는 경향을 보였고 기존 연구 시험체에 비해 타설 방향에 관계없이 대부분의 시험체에서 다소 낮은 부착강도를 나타내었으나 순환 굽은골재 치환율 60% 이하일 경우 기존 연구 결과 값과 큰 차이는 나타나지 않아 재생골재 사용에 따른 성능 저하는 크지 않은 것으로 판단된다. 재생골재를 혼입·생산한 순환골재의 경우에는 혼입된 순환 굽은골재 중 일부 상대적으로 흡수율이 높은 재생골재에 의한 골재-시멘트 페이스트 사이의 부착력 저하와 기포 등의 영향으로 철근과 콘크리트 사이의 부착력 저하가 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.3 철근 위치에 따른 부착 거동 특성

철근 위치에 따른 보정계수 1.3은 콘크리트구조설계기준(KCI-07)<sup>10)</sup>에서 규정하고 있으며 상부철근의 위치에 따른 블리딩 영향을 반영한 보정계수로 다음 내용과 같다.

$\alpha$  = 철근의 위치계수

- (가) 상부철근(정착 길이 또는 겹침이음부 아래 300 mm를 초과되지 않는 콘크리트를 친 수평철근)-----1.3
- (나)기타 철근 -----1.0

Fig. 6은 HT형 시험체의 파괴 후 단면을 나타낸 것이며 Fig. 7은 압축 강도별 각 H형 시험체 상부철근의 부착강도를 기준으로 하여 하부 철근의 부착강도 증가율을 순환 굽은골재 치환율에 따라 각각 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 순환 굽은골재 치환율 30% 이내에서는 다수의 시험체가 철근의 위치계수 1.3을 만족하는 것으로 나타났으나 치환율 60% 이상인 경우에는 대부분의 시험체가 기준 값을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 HT형 시험체의 경우 원형에 가까운 입형을 가진 순환 굽은골재 혼입률이 증가할수록 경화 전 골재 침하량의 증가, 재료 분리가 발생하였으며 미미한 맞물림 작용과 더불어 블리딩 등에 의한 부착 면적 감소에 따른 것으로 판단된다. 반면 HB형 시험체의 경우 치밀한 굽은골재 분포의 영향으로 철근과 콘크리트의 맞물림 작용에 의해 부

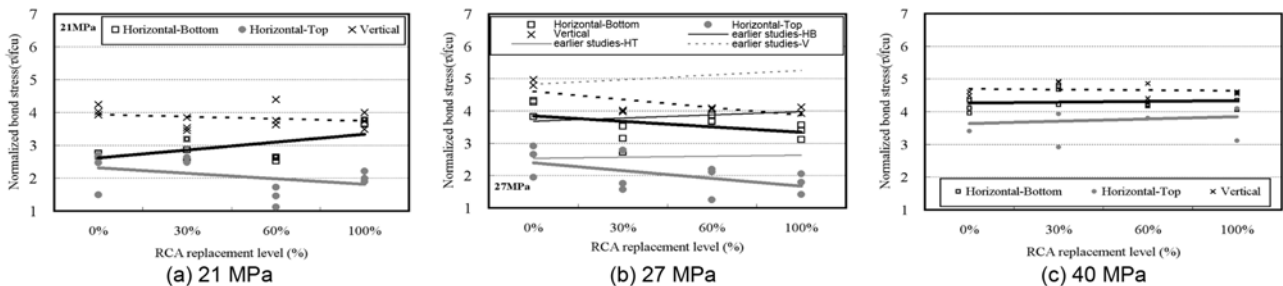
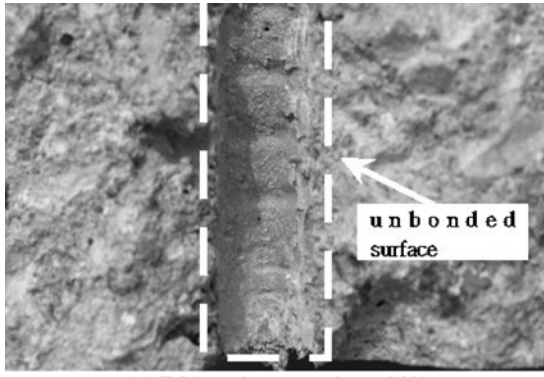
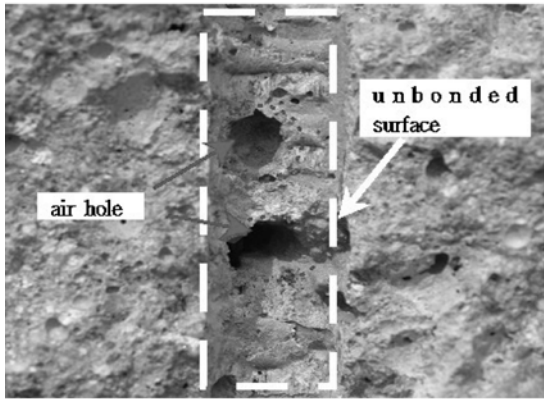


Fig. 5 Effect of RCA replacement level on the bond stress

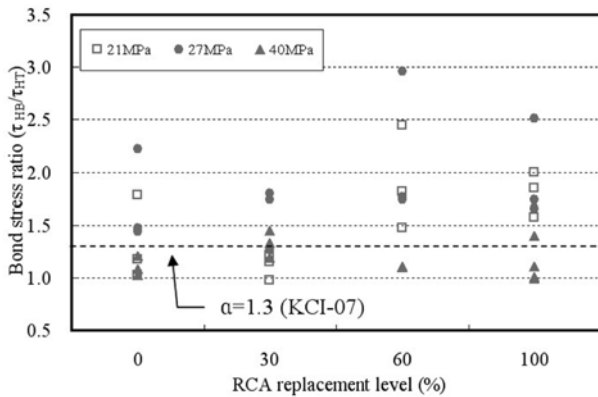


(a) RCA replacement level-60%



(b) RCA replacement level-100%

**Fig. 6** Cross-section of the top reinforcement of the HT specimen after failure

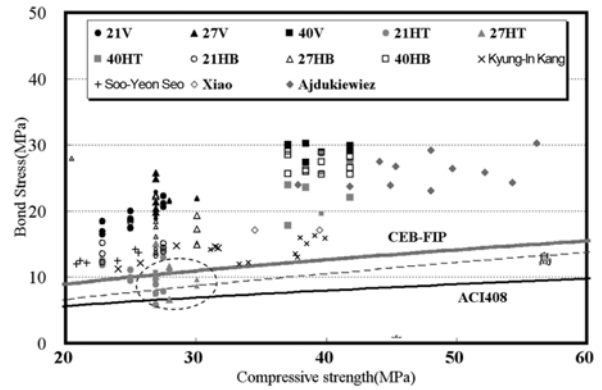


**Fig. 7** Bond stress ratio versus RCA replacement level

착강도가 높게 나타난 것으로 판단되며 콘크리트의 압축강도가 증가됨에 따라 상하부의 부착강도 차이는 다소 감소되는 경향을 보였다. H형 시험체중 보통강도 범위의 상부철근 시험체(높이 225 mm)에서도 부착강도의 저하가 발생하는 것으로 나타났으며 이는 현행 기준에서 정하고 있는 상부철근 높이인 300 mm 이하이며 이와 같은 결과를 근거로 볼 때 현재 기준에서 제안하는 철근 위치 보정계수 1.3에 대한 재검토가 요구된다.

#### 4. 기준식 및 제안식과의 비교

이 연구에서는 순환 굽은골재 콘크리트 부재의 구조설



**Fig. 8** Comparison between test results and calculated results

계기준 작성을 위한 기초 자료를 확보하고자 이 연구의 실험 결과 및 최희복,<sup>11)</sup> 윤승조,<sup>12)</sup> Xiao,<sup>13)</sup> Ajdukiewicz<sup>14)</sup> 등 기존의 연구자에 의해 실시된 실험 결과를 상호 비교하여 압축강도에 따른 부착강도를 Fig. 8에 나타내었다. Table 6 및 Fig. 8은 실험 결과를 각 시험체별로 비교하기 위하여 각 시험체별 부착응력과 압축강도에 따른 기준식 및 제안식에 의해 계산된 값을 비교하여 나타내었으며 기존 연구자들이 수행한 연구 결과의 경우 수직 배근에 의한 시험체의 인발실험에 국한되어 수행되긴 했지만 기준식 및 제안식을 대체로 만족하는 것으로 나타났다. 이 연구의 V형 시험체의 경우 순환 굽은골재 치환율에 관계없이 CEB-FIP, ACI 기준값 및 제안식을 모두 만족하는 것으로 나타났으며 콘크리트 압축강도 증가에 따라 부착강도도 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 H형 시험체 중 HB형 시험체 역시 기준값 및 제안식을 상회하고 있으며 콘크리트 압축강도 증가에 따라 부착강도도 증가하는 경향을 나타내고 있다. 반면 압축강도 21 및 27 MPa인 HT형 시험체에서는 CEB-FIP 및 ACI에서 정하고 있는 기준 값을 만족하지 못하고 있어 이형철근과 콘크리트 사이에 충분한 부착력을 확보하지 못하고 있는 것으로 평가되었으며 이는 상대적으로 미미한 이형철근과 콘크리트의 맞물림 작용과 더불어 블리딩 및 레이턴스에 의한 부착 면적 감소에 기인한 것으로 사료된다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 재생골재를 혼입한 순환 굽은골재 시험체의 부착강도도 일부 HT형 시험체를 제외하고는 대체로 CEB-FIP 및 ACI 408 기준식에 의한 계산 값을 상회하는 것으로 나타났다.

#### 5. 결 론

- 1) V형 시험체의 경우 압축강도가 증가할수록 높은 부착강도를 나타내고 있으며, 동일한 압축강도를 갖는 시험체의 경우 순환 굽은골재 혼입에 따라 부착강도 저하가 다소 나타났으나 순환 굽은골재 치환율 증가에는 큰 영향 없이 유사한 부착거동 특성을 나타내 치환율에 대한 상관관계는 크지 않은 것으로 나타났다. 수평 하부철근(HB형) 시험체의 경우 순환 굽은골재 혼입에 따라 약 ±20% 정도의 강도

차이를 나타냈으나 순환 굽은골재 치환율 60% 이하의 경우 대체로 천연골재만을 사용한 시험체와 유사한 부착강도를 나타내 치환율에 따른 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 수평 상부철근(HT형) 시험체의 경우 순환 굽은골재 치환율 30% 이하에서는 천연골재만을 사용한 시험체와 유사한 부착강도를 나타냈고 순환 굽은골재 치환율 60% 이상의 시험체에서는 약 12~35% 부착강도 저하를 나타냈으나 이는 타설 높이에 따른 영향으로 판단되며 치환율에 따른 영향은 크지 않은 것으로 사료된다.

- 2) 재생골재를 혼입·생산한 순환 굽은골재를 사용한 이 연구 대상 시험체의 경우 기존 순환 굽은골재만을 사용한 시험체에 비하여 모든 시험체에서 다소 낮은 부착강도를 나타내었으나 순환 굽은골재 치환율 60% 이하일 경우 기존 연구 결과 값과 큰 차이는 나타내지 않았으며 일부 HT형 시험체를 제외하고는 대부분 CEB-FIP 및 ACI 408 기준식에 의한 계산 값을 상회하는 것으로 나타나 재생골재 사용에 따른 성능저하는 크지 않은 것으로 판단된다.
- 3) 순환골재 품질기준에서 정하는 최대 압축강도 27 MPa 이내의 시험체의 경우 현행 기준에서 정하는 상부철근의 높이인 300 mm 이하(높이 225 mm)에서 철근 위치 보정계수  $\alpha=1.3$  이상의 부착응력의 저하가 발생했다. 이에 따라 현행 KCI-07에서 정하는 철근의 위치 계수에 대한 추가적인 연구를 통해 보정 계수의 재검토와 신뢰성 확보가 필요할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 연구는 국토해양부가 출원하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2005 건설핵심기술연구개발사업 05건설핵심D07 “건설폐기물 재활용 기술 개발”의 지원 비로 수행된 연구의 일부이고, 이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 2단계 BK21 사업의 지원비를 받았으며 이에 감사드립니다.

1. 건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률, 2003.
2. 국토해양부, “순환골재 품질기준,” 국토해양부, 2005.
3. 진수만, 윤현도, 최기선, 유영찬, 김공환, “순환골재 콘크리트와 이형철근의 부착특성,” 콘크리트학회 논문집, 20권, 2호, 2008, pp. 165~173.
4. 이민정, 윤현도, 김선우, 최기선, 유영찬, 김공환, “철근의 위치에 따른 이형철근과 순환굽은골재 콘크리트의 부착성능,” 대한건축학회 논문집(구조계), 24권, 8호, 2008, pp. 29~39.
5. Esfahani, M. R., Lachemi, M., and Kianoush, M. R., “Top-bar Effect of Steel Bars in Self-consolidating Concrete (SCC),” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, Issue 2, 2008, pp. 52~60.
6. KS F 2441, “철근의 부착에 의한 콘크리트 비교 시험 방법,” 지식경제부 기술표준원, 2005.
7. ASTM C234, “Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel,” American Society for Testing and Material.
8. CSA S806-2, “Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced,” Canadian Standards Association.
9. Tassios, T. P., “Properties of Bond between Concrete and Steel under Load Cycles Idealizing Seismic Actions,” *Proc. AICAP-CEB Symposium*, Rome, CEB Bulletin No. 131, 1979, pp. 67~122.
10. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2007, 523 pp.
11. 최희복, 강경인, “순환골재콘크리트와 이형철근 사이의 부착성능,” 대한건축학회 논문집(구조계), 24권, 3호, 2008, pp. 95~102.
12. 윤승조, 서수연, 이우진, 강성덕, 윤두희, 김태호, 민석환, “순환 굽은골재 치환율에 따른 콘크리트의 부착성능 평가에 관한 실험 연구,” 대한건축학회 학술발표대회논문집, 26권, 1호, 2008, pp. 529~532.
13. Xiao, J. and Falkner, H., “Bond Behavior between Recycled Aggregate Concrete and Steel Rebars,” *Construction and Building Materials*, Vol. 21, Issue 2, 2007, pp. 395~401.
14. Ajdukiewicz, A. and Kliszczewicz, A., “Influence of Recycled Aggregate on Mechanical Properties of HS/HPC,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 24, Issue 2, 2002, pp. 269~279.

**요약** 순환골재 콘크리트와 철근의 부착 거동 규명은 철근콘크리트 구조물에 순환골재를 적용하기 위해서 매우 중요한 요소이다. 이에 따라 이 연구에서는 콘크리트와 철근 상호간의 부착 거동을 평가하기 압축인발 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 변수는 설계압축강도(21, 27, 40 MPa), 순환 굽은골재 치환율(0, 30, 60, 100%) 및 철근의 배근방향 및 위치(상단근, 하단근)로 하였다. 이 연구를 통하여 얻어진 실험 결과를 종합해 보면, V형 시험체의 경우 순환골재 치환율에 관계없이 상호 유사한 값을 나타내고 있으며 H형 시험체의 경우는 철근의 배근 위치에 영향을 받는 것으로 나타났다. 일부 HT형 시험체를 제외하고는 대부분 CEB-FIP 및 ACI 408 기준식에 의한 계산 값을 상회하는 것으로 나타나 재생골재 사용에 따른 성능 저하는 크지 않은 것으로 판단된다. HT형 시험체의 경우 순환골재 치환율 증가에 따라 골재 침하 현상이 크게 발생되며 불리딩 및 레이턴스에 의한 부착면적의 감소로 최대 부착응력이 다른 시험체에 비하여 낮게 나타났다. 전술한 바에 의하면 현행 기준에서 정하는 상부철근의 높이인 300 mm 이하(높이 225 mm)에서도 부착강도의 저하가 발생하며 이에 따라 현재 기준에서 제안하는 철근 위치 보정계수 1.3의 값의 수정과 신뢰성 확보가 필요할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 순환 굽은골재, 치환율, 부착강도, 범함