



순환골재 콘크리트와 이형철근의 부착 특성

전수만¹⁾ · 윤현도^{1)*} · 최기선²⁾ · 유영찬²⁾ · 김궁환²⁾

¹⁾충남대학교 건축공학과 ²⁾한국건설기술연구원

The Bond Characteristics of Deformed Bars in Recycled Coarse Aggregates Concrete (RCAC)

Su-Man Jeon¹⁾, Hyun-Do Yun^{1)*}, Ki-Sun Choi²⁾, Young-Chan You²⁾, and Keung-Hwan Kim²⁾

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

²⁾Korea Institute of Construction Technology, Koyang 411-712, Korea

ABSTRACT One of the most important requirements for reinforced concrete constructions is the bond behavior between concrete and reinforcement. For practical application, it is very important to study bond behavior of reinforcing bars in recycled aggregate concrete (RAC). Thirty six pull-out tests were carried out in order to investigate the bond behaviour between recycled coarse aggregate concrete (RCAC) and deformed bars. RCA replacement ratios (i.e., 0%, 30%, 60% and 100%) and positions of deformed bar (i.e., vertical and horizontal position) were considered as variables in this paper. Each specimen was in the form of a cube, with edges of 150 mm in length and for the pull-out tests, a deformed bar, 13 mm in diameter, was embedded in the center of each specimen. Based on the test results, the bond strength between the RCAC and deformed bars were influenced by both RCA replacement ratios and positions of deformed bars. It was found that under the equivalent mix proportion (i.e., the mix proportions are the same, except for different RCA replacement ratios), the bond strength between the RCAC and the ribbed bar has no obvious relation with the RCA replacement ratio, whereas the positions of deformed bars have a significant effect on the bond behavior between the RCAC and deformed bars. Under the condition of same RCA replacement ratio, the specimen of horizontal reinforcement at upper position (HU type) appear considerably low bond stress.

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

1. 서 론

최근 전 세계적으로 환경오염이나 자원고갈이 급속히 진전되고 있는 가운데 21세기의 건설생산업은 타 산업의 생산 활동에 비하여 막대한 자원을 소비할 뿐만 아니라 대량의 폐기물을 발생시키고 있어 지구환경 부하를 증대시키는 주범으로 인식되고 있다. 국내의 경우는 1970~80년대의 경제 성장기에 대규모로 건설된 철근콘크리트 건축물이 노후화됨에 따라 도시 재개발/재건축이 활발하게 진행되고 있으며, 신도시 건설 등의 대형사업과 맞물려 많은 양의 건설폐기물이 발생되고 있다. 더욱이 이러한 건설폐기물의 일부는 불법 매립, 투기 및 소각과 같이 적절치 못하게 처리되는 것으로 보고되고 있어 이로 인한 환경오염의 문제가 날로 심화되고 있는 실정이다. 특히 매년 급증하고 있는 건설폐기물 중에서 폐콘크리트가 양적으로 가장 큰 비중을 차지하고 있으며 또한, 천연자원 고갈 등으로 인하여 천연골재의 수급문

제가 지속적으로 제기되고 있어 새로운 골재원으로서 순환골재의 중요성이 더욱 증가되고 있다. 이에 정부는 「건설폐기물 등의 재활용 촉진에 관한 법률안」¹⁾을 제정하여 천연골재의 대체자원으로 활용 가능한 순환골재 생산 유도 및 일정 규모 이상의 공사에 한하여 순환골재의 사용을 의무화하고 있어, 향후 순환골재 사용에 대한 사회적인 요구는 한층 더 증가할 것으로 예상된다. 따라서 건설 현장에서 순환골재의 적극적인 사용을 유도하기 위해서는 순환골재 콘크리트의 품질 성능, 내구 성능 및 구조 성능에 대한 다양한 연구 자료를 근거로 한 기준 정비가 요구된다.

한편, 천연골재 콘크리트에 비하여 낮은 것으로 평가되는 순환골재 콘크리트의 강도 특성은 철근콘크리트 구조 부재의 전체적인 거동 측면에서 볼 때 그 영향은 상대적으로 적은 것으로 보고되고 있다^{2,3)}. 그러나 순환골재 콘크리트를 사용한 구조 부재가 그 기능을 발휘하기 위해서는 철근과 순환골재 콘크리트가 일체화 되어야 하며, 이를 위해서는 순환골재 콘크리트와 철근표면 사이의 적절한 부착응력이 확보되어야 한다. 따라서 구조 부재에 순환골재 콘크리트를 적극적으로 활용하기 위해서

*Corresponding author E-mail: wiseroad@cnu.ac.kr
Received June 25, 2007, Accepted October 20, 2007
©2008 by Korea Concrete Institute

는 순환골재를 사용한 휨 및 전단 성능에 대한 폭넓은 검증 실험뿐만 아니라 부착 거동에 대한 평가가 요구되고 있다. 그러나 순환골재 콘크리트 부재의 설계기준 작성 및 해석 시 중요한 순환골재 콘크리트 내 철근의 부착 거동에 관한 연구는 전무한 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 순환골재 콘크리트의 구조기준 작성을 위한 연구의 일환으로 레미콘 배합에 의하여 생산된 콘크리트에서 순환골재 치환율이 철근과의 부착 거동에 미치는 영향을 실험적으로 파악함으로써 순환골재 콘크리트의 구조 부재로의 적용 가능성을 검증하고자 하였다. 실험 계획시에는 실제 철근콘크리트 부재에서 철근의 배근 방향과 위치에 따른 영향을 평가하기 위하여 콘크리트와 철근의 부착 거동을 3가지 조건(수직 배근, 수평 상단근, 수평 하단근)에서 평가하도록 계획하였다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 현행 천연골재 콘크리트에 대한 표준식 및 기존 연구와 비교·분석함으로써 순환골재 콘크리트 부재의 구조적 적용 가능성을 검토하고자 한다.

2. 부착강도에 관한 기준 및 제안식 분석

2.1 CEB-FIP code⁴⁾

국내에서는 철근과 콘크리트의 부착 성능에 대한 적합성을 평가할 수 있는 기준식이 아직 마련되어 있지 않아 외국의 관련 규정을 검토하였다. 즉, CEB-FIP code에서는 천연골재를 사용한 콘크리트의 구속응력 및 부착 조건에 따른 최대부착응력을 콘크리트의 압축강도에 대하여 다음과 같이 정의하고 있다.

$$\tau_{max} = 2.5 \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

여기서 콘크리트 피복이 철근직경의 5배 이상이면 구속된 콘크리트라 정의하고 있고 구속된 콘크리트에 대하여 부착조건이 양호한 경우의 최대부착응력은 식 (1) 이상의 값을 보여야 한다고 규정하고 있으며, Fig. 1 및 Table 1과 같이 부착강도 뿐만 아니라 슬립량에 대해서도 규정하고 있다.

2.2 島의 제안식⁵⁾

島는 철근 및 콘크리트 종류, 부착 길이 등을 주요 변수로 철근콘크리트 선형 부재에 대한 인발시험을 실시하

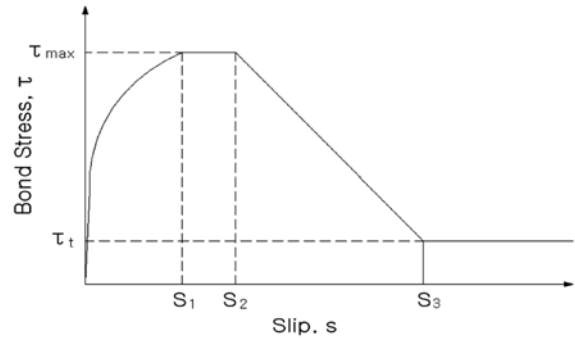


Fig. 1 Analytical bond stress-slip relationship according to CEB-FIP model code 1990⁴⁾

여 다음과 같은 식 (2)를 제안하였다.

$$\tau = 0.9f'_c{}^{2/3}(1 - e^{-40(S/D)^{0.6}}) \quad (2)$$

여기서 τ 는 철근의 부착응력 (MPa)이고 f'_c 는 콘크리트의 압축강도 (MPa)이며, S 및 D는 각각 철근의 부착길이 (mm) 및 직경 (mm)이다.

3. 실험

3.1 실험 계획

본 연구에서는 순환골재의 치환율 및 철근 배근 방향/위치에 따른 부착 거동 특성을 평가하기 위하여 Table 2에 나타난 바와 같이 각 변수별로 3개씩 총 36개의 시험체를 계획 및 제작하였다. 시험체는 순환골재 치환율 (0, 30, 60, 100%) 및 철근 배근 방향 (vertical/ horizontal position)을 변수로 하였으며, 모든 시험체는 KS F 2441, ASTM 234와 CSA S802-02규격을 참고하여 Fig. 2에 나타난 바와 같이 150 × 150 × 150 mm인 콘크리트 입방체로 동일하게 하였고 1개의 철근을 수직으로 입방체의 중심축에 설치하였다. 철근의 부착 길이는 사용된 D13철근 공칭직경의 4배 ($4d_b = 50.8$ mm)로 하였으며, 부착 면이 형성되는 50.8 mm 이외의 부분에는 고무호스를 사용하여 콘크리트와 철근이 비부착 되도록 하였다. 부착시험용 철근의 길이는 콘크리트 입방체에서 그립까지의 길이를 인장 시험의 시험 길이인 $40d_b$ 를 적용하고 그립 (grip) 길이는 152 mm로 하여, 철근의 전체 길이를 810 ($150 + 40d_b + 152$) mm로 하였다. Fig. 3과 같이 부착 시험체를 제작하였으며 콘크리트는 4번에 나누어 같은 두께로 타설 후 각각의 콘크리트 층에 대하여 다짐봉으로 25회 다

Table 1 Bond model parameters in CEB-FIP code

Confining conditions	Bond conditions	S1	S2	S3	α	τ_{max}
Confined concrete	Good*	1	3	Clear rib spacing	0.4	$2.5 \sqrt{f_{ck}}$
	Poor*	1	3	Clear rib spacing	0.4	$1.25 \sqrt{f_{ck}}$

*Good : failure by shearing of concrete between the ribs

Poor : failure by splitting of concrete

Table 2 Parameters of specimens

Type		0	30	60	100
		Replacement ratio of recycled coarse aggregate (%)			
V*	1	A0V1	A30V1	A60V1	A100V1
	2	A0V2	A30V2	A60V2	A100V2
	3	A0V3	A30V3	A60V3	A100V3
HU*	1	A0HU1	A30HU1	A60HU1	A100HU1
	2	A0HU2	A30HU2	A60HU2	A100HU2
	3	A0HU3	A30HU3	A60HU3	A100HU3
HL*	1	A0HL1	A30HL1	A60HL1	A100HL1
	2	A0HL2	A30HL2	A60HL2	A100HL2
	3	A0HL3	A30HL3	A60HL3	A100HL3

*V : Vertical reinforcement

HU : Horizontal reinforcement at upper position

HL : Horizontal reinforcement at lower position

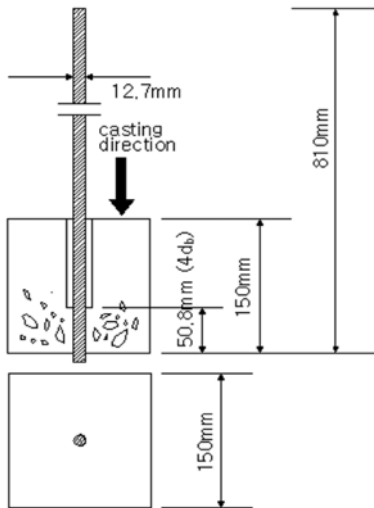


Fig. 2 Details of specimen (unit: mm)

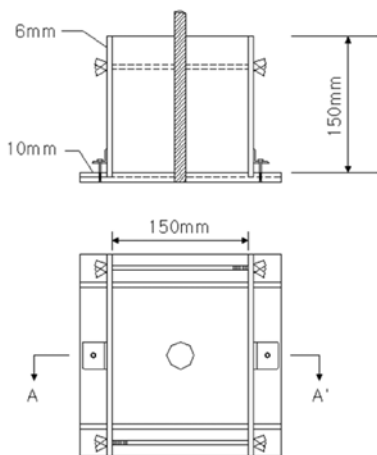


Fig. 3 Details of form (unit: mm)

짐을 실시하였다. 거푸집은 콘크리트 타설 후 24시간 경과 후에 제거하였다.

또한 Fig. 4에 나타난 바와 같이 철근 배근 방향을 변

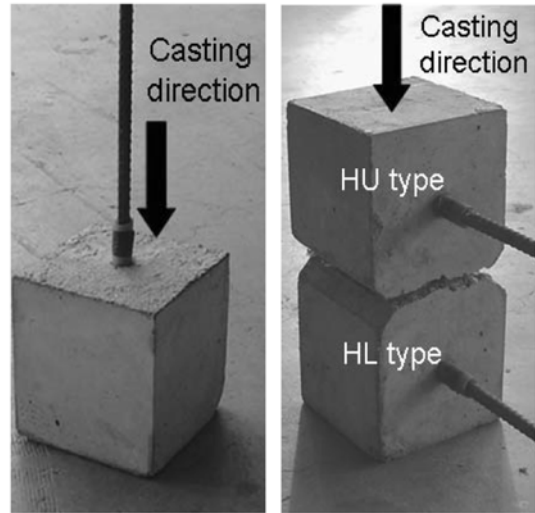


Fig. 4 Casting direction

수로 하여 실제 시공 시 수직철근을 묘사한 V type과 수평철근의 하부 콘크리트에서 굵은골재의 분포 영향 (하부콘크리트 피복두께)을 고려하기 위하여 H type을 각각 제작하였다. H type의 경우 철근 배근 방향을 콘크리트 타설 방향에 수직으로 하여 상·하부 두개의 시험체 (HU, HL)를 동시에 타설 한 후 각각 분리하여 철근의 위치에 따른 영향을 검토하기 위한 실험을 실시하였다.

3.2 실험 방법

부착 시험은 CSA S806-02 기준⁶⁾에 준하여 실시하였다. 하중은 200 kN 용량의 만능재료시험기를 이용하여 변위 제어 (1.26 mm/min)로 가력 하였다. 철근과 콘크리트 사이의 슬립량은 하중점에서 측정되는 하중단 슬립과 철근의 매립 단부에서 측정되는 자유단 슬립으로 구분하여 측정하였다. 철근의 슬립량은 Fig. 5에 나타난 바와 같이 하중단 및 자유단으로부터 3개의 변위측정장치 (linear variable displacement transducer, LVDT)를 이용하여 측정하였다.

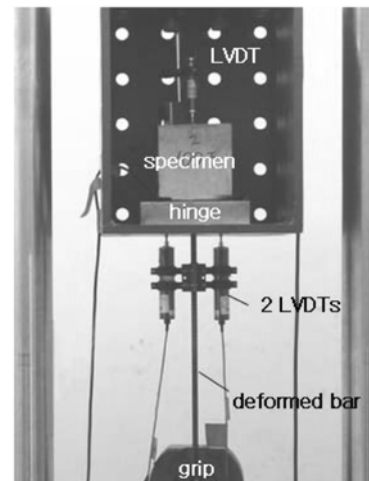


Fig. 5 Test setup

하중단 슬립은 철근을 중심으로 양측에 설치된 2개의 LVDT를 사용하여 측정하였고, 자유단 슬립은 하중단 반대편에서 시험체의 돌출 부분에 1개의 LVDT를 설치하여 각각 측정하였으며, 철근의 인발 실험 시, 매립된 철근에 편심인발하중이 작용되는 것을 방지하기 위하여 인발하중 가력점에 특수하게 제작된 원형 구좌를 설치하였다.

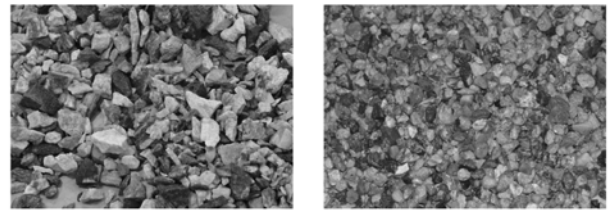
3.3 사용 재료

본 연구에서는 국내 순환골재의 품질 기준에서 구조 부재에 적용 가능한 순환골재 품질 성능의 하한치를 만족하도록 제조된 흡수율 2.99% 및 절건밀도 2.49 g/cm³인 순환골재 (I사)를 제조하여 사용하였다. 현재까지 순환골재 콘크리트 특성에 관한 연구는 대부분 소규모 실험실 배합 및 비빔을 통하여 이루어졌으며, 이러한 소규모 실험실에서 얻어진 결과를 실제 현장에 적용할 경우, 비빔 방법 및 계량오차 등으로 인하여 실험 결과의 오차가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 현장여건을 충분히 반영할 수 있도록 레미콘 배합으로 콘크리트를 제조하였으며 콘크리트의 설계기준강도는 현행 순환골재의 품질기준에서 규정하고 있는 구조용 콘크리트의 적용 한계치인 27 MPa로 계획하였다. 콘크리트 배합에 사용된 골재의 물리적 성질과 골재의 입형 및 형상은 Table 3 및 Fig. 6에 각각 나타내었고, 콘크리트의 배합조건은 Table 4에 나타내었다. 사용된 인장철근은 SD400급의 D13철근을 사용하였으며, KS B 0802에 준하여 실시된 철근의 인장강도 실험 결과는 Table 5에 나타낸 바와 같다. 또한 KS F 2405에 의하여 측정된 압축강도는 Table 6에서 보는 바와 같이 순환골재 치환율에 따라서 설계기준강도보다 8~37% 정도 높은 범위를 보였다.

4. 실험 결과

4.1 Pull-out 실험에 의한 부착메커니즘

Tassios⁷⁾의 연구에 의하면 Pull-out 실험을 통한 콘크리



(a) Natural aggregate

(b) Recycled aggregate

Fig. 6 Types of aggregates

Table 5 Mechanical properties of ribbed bar

Ribbed bar	f_y (MPa)	f_u (MPa)	$\epsilon_s (\times 10^{-6})$	E_c (GPa)
D13	383.14	553.43	2138.25	179.33

Table 6 Strength properties of concrete

RCA replacement ratio (%)	f_{cu} (MPa)	f_{ct} (MPa)	$\epsilon_c (\times 10^{-6})$	E_c (GPa)
0	37.05	3.45	2643.5	25.84
30	33.58	2.54	2830.0	13.47
60	32.35	3.09	3147.5	13.38
100	29.27	2.72	2978.0	12.82

트와 이형철근의 부착거동을 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 4단계로 나누고 있다. 1단계는 철근과 콘크리트의 화학적인 점착력만 작용하며, 2단계에서는 화학적인 점착력을 상실한 이후에 철근리브에 의한 기계적 부착력이 나타나게 된다. 3단계에서는 철근을 둘러싸고 있는 콘크리트와 철근의 맞물림 작용에 의하여 응력이 발생하게 되어 균열이 생기기 시작하고, 4단계에서는 최대부착응력 이후에 구속응력의 저하 및 미끄러짐이 그림에 나타난 바와 같이 철근의 종류 및 파괴 양상에 따라 달리 나타나게 된다. 이형철근에서는 구속 효과에 따라서 파괴 양상이 다르게 나타나며 구속 효과가 좋을수록 철근의 Pull-out 현상에 의한 부착거동을 보이게 된다.

4.2 부착응력-슬립 관계

Fig. 8은 재하 단계별로 철근에 도입된 하중을 철근 부

Table 3 Physical properties of aggregates

Type of aggregate	Maximum size (mm)	Specific gravity (g/cm ³)	Water absorption (%)	Unit weight (kg/l)
Natural	25	2.61	0.64	1.51
Recycled	20	2.49	2.99	1.56

Table 4 Mix proportions of concrete

RCA replacement ratio (%)	f_{ck} (MPa)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				
				W	C	S	G1*	G2*
0	27	43.6	46	132	392	823	960	0
30	27	43.6	46	132	392	823	672	297
60	27	43.6	46	132	392	823	394	533
100	27	43.6	46	132	392	825	0	888

*G1 : Natural aggregate, G2 : Recycled aggregate

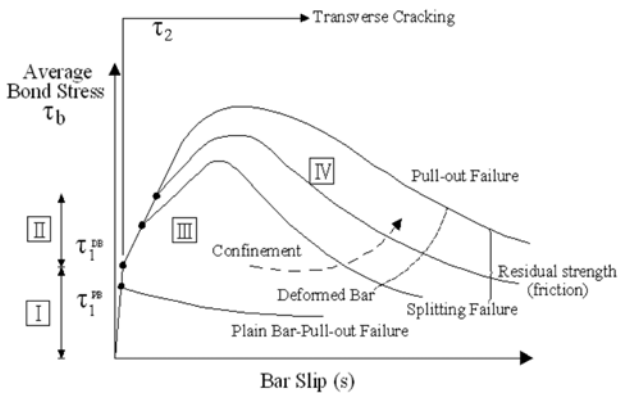


Fig. 7 Local bond stress-slip relationship

착 면적으로 나누어 산정된 부착응력과 철근의 자유단 슬립량의 관계를 철근의 배근 방향/위치 및 순환골은골재 치환율에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 각 시험체의 부착응력 및 슬립량은 동일한 조건의 각 3개 시험체의 평균치로 산정되었다.

모든 시험체에서 철근의 부착응력은 화학적인 점착력만 작용하는 1단계 이후 일정한 기울기로 증가하다가 기계적 부착력과 콘크리트와 철근의 맞물림 작용이 발생하는 2단계 및 3단계에서 슬립이 발생하게 되어 완만한 기울기로 증가하게 된다. 이후 최대부착응력에 도달하는 4단계를 지나면서 철근의 Pull-out 현상이 발생하면서 감소되었다. Fig. 9(a)에 나타난 바와 같이 수직철근을 묘

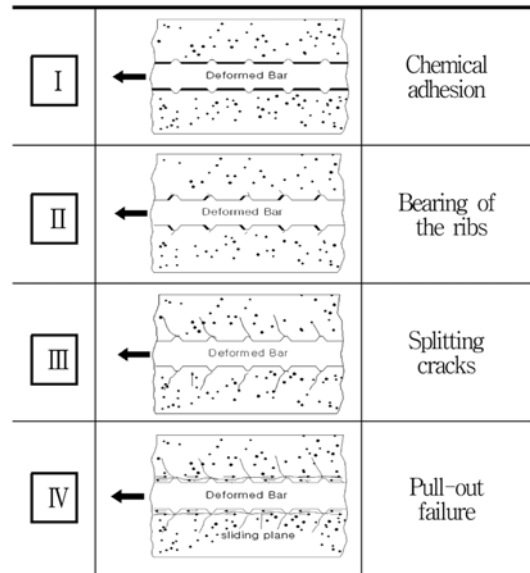


Fig. 8 Mechanism of bonding between deformed bar and concrete

사한 V type 시험체의 경우 순환골은골재 치환율에는 크게 관계없이 유사한 부착응력-슬립량 거동 특성을 보이고 있다. 그러나 철근을 수평으로 배치하고 철근과 수직 방향으로 콘크리트를 타설한 H type 시험체들은 전체적으로 V type 시험체에 비해 비교적 낮은 부착강도를 나타냈으며, 최대부착응력시 슬립량 또한 2배 정도 높게 나타났다. 특히 Fig. 9(b)에 나타난 바와 같이 H type 시

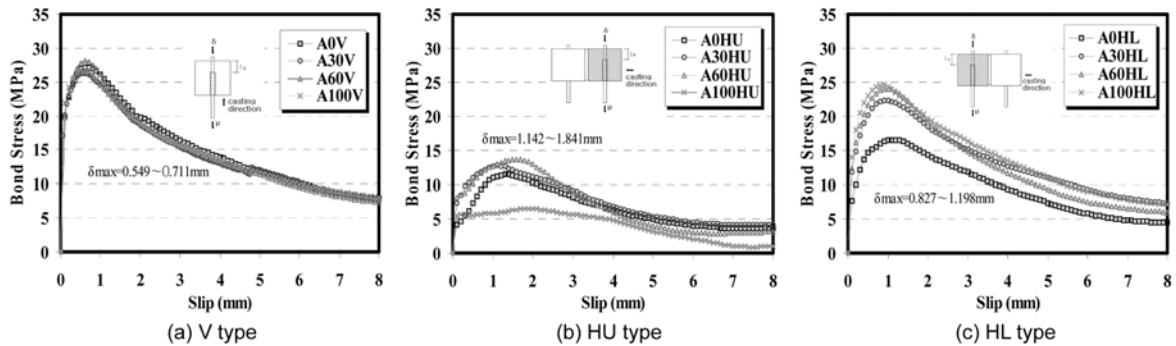


Fig. 9 Average bond stress versus average slip relationship

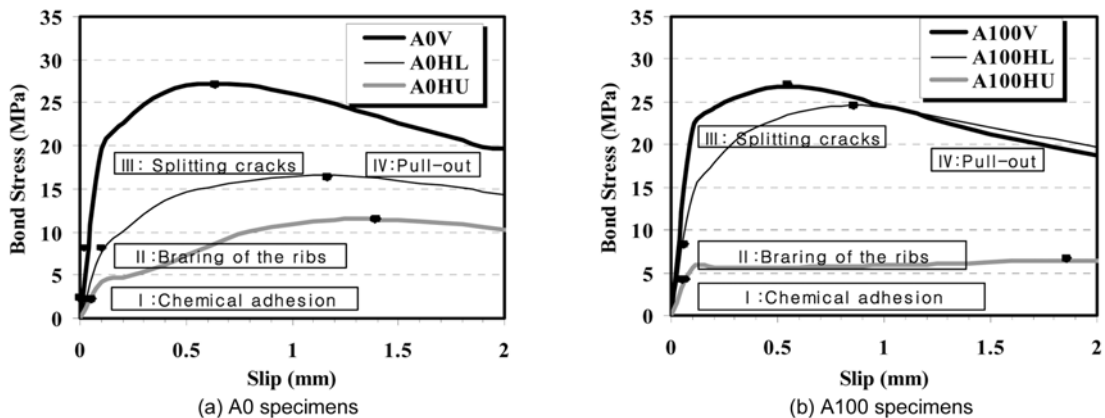


Fig. 10 Pull-out behavior of ribbed bar in RCAC

험체 중 상부철근 시험체인 HU type 시험체가 하부철근 시험체인 HL type에 비하여 낮은 부착응력을 보였으며, 순환굵은골재 치환율이 증가함에 따라 부착강도가 다소 증가하다가 굵은골재를 100% 순환굵은골재로 치환한 A100HU 시험체에서 다른 시험체에서와 상이한 낮은 부착강도를 보였다. 또한 Fig. 9 (c)에서와 같이 HL type 시험체의 경우에는 V type 시험체와 비교한 결과, 순환굵은골재를 사용한 A30HL, A60HL 및 A100HL 시험체가 약 20%의 부착응력 저하를 보인 반면, 천연골재를 사용한 A0HL 시험체에서는 약 40%의 부착응력 저하를 보였으며, 최대부착강도시 변형률은 A100HL 시험체 (슬립량 1 mm 이내)를 제외하고 V type 시험체보다 2배가량 높게 측정된 것으로 파악되었다.

또한 Fig. 10은 전술한 부착 메커니즘에 따라 천연골재만을 사용한 A0시험체와 순환굵은골재만을 사용한 A100시험체를 철근의 배근방향 및 위치에 따라 각 단계별로 나누어 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 철근과 콘크리트의 접촉력만 작용하는 1단계 이후에 수평철근을 묘사한 H type 시험체가 수직철근을 묘사한 V type 시험체에 비하여 더 많은 슬립량의 증가와 낮은 최대부착응력을 보이는 등 상이한 거동을 보이고 있다. 특히 상부철근 시험체인 HU type의 경우 기계적 부착력과

콘크리트와 철근의 맞물림 작용이 발생하는 2단계 및 3 단계에서 부착응력의 증가가 작고, 그에 따른 슬립량이 많이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 철근의 배근 방향 및 위치에 따라서 나타나는 차이로서, 수직철근을 묘사한 V type 시험체는 굵은골재의 고른 분포를 보이는 반면, 수평철근을 묘사한 H type 시험체의 경우에는 전술한 골재침하 현상으로 인해 굵은골재의 편중 현상이 발생됨에 따라 상부철근에서는 콘크리트의 구속 효과가 감소된 것으로 판단된다.

이와 같이 순환굵은골재 치환율에 따른 각 시험체별 최대부착응력과 최대부착응력을 각 시험체별 압축강도의 제곱근으로 무차원화하여 비교한 것을 Fig. 11에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 H type 시험체에서는 철근의 위치 (상부 및 하부)에 따라 최대응력이 큰 차이를 나타내는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트를 타설하고 다짐을 통하여 시험체 제작이 완료된 상태에서도 일정시간이 경과하게 되면 콘크리트 경화 전에 굵은골재의 침하현상이 일어나게 되며, 이로 인해 굵은골재가 하부 시험체로 편중되었기 때문인 것으로 판단된다. 특히 순환굵은골재를 100% 치환한 A100HU 시험체의 경우에는 순환골재의 입형이 거의 원형에 가까움에 따라 공시체 제작시 콘크리트 다짐 및 양생 과정에서 실험체 하부로 골재침하

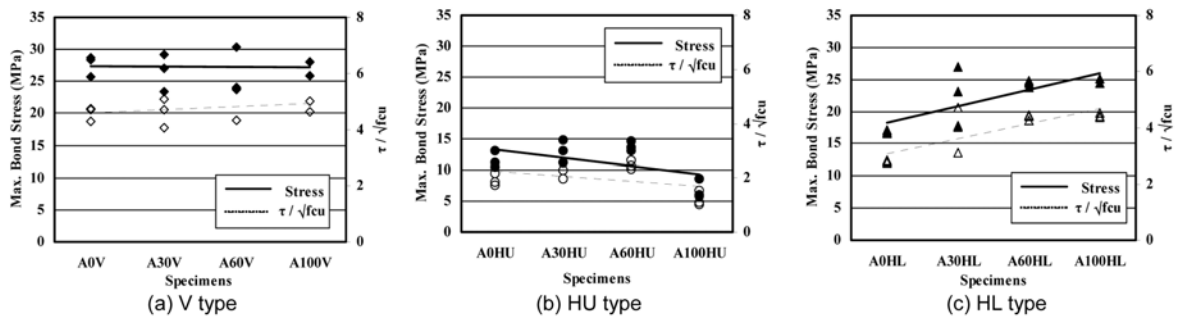


Fig. 11 Comparison for the maximum bond stress

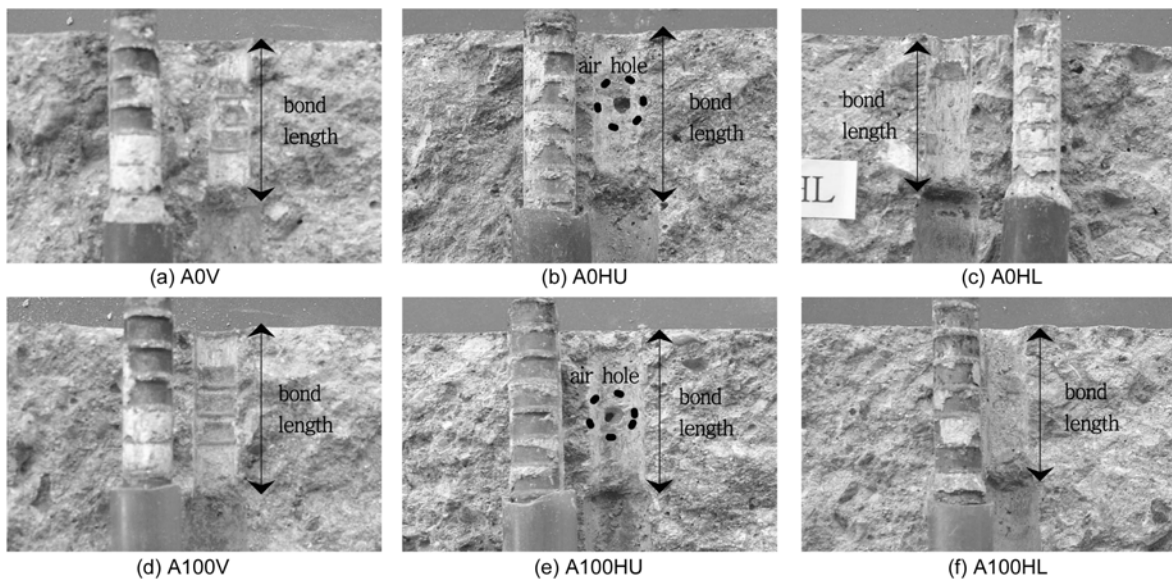


Fig. 12 Failure mode of the specimens

현상이 두드러지게 나타난 것에 기인하는 것으로 판단된다. 이에 비하여 쇄석 천연골재는 입형이 불규칙하고 날카로운 골재의 침하량이 순환골재에 비하여 작게 되었을 것으로 예상된다.

아울러 콘크리트를 타설하고 다짐을 한 후에 블리딩이 발생하고 콘크리트 입방체 내부에 기포가 발생하여 표면으로 상승하게 된다. 이때 H type 시험체의 경우 블리딩 및 이에 따른 레이턴스의 영향으로 V type 시험체에 비하여 상대적으로 철근과 콘크리트의 부착면이 완전하지 못한 것으로 판단된다. 또한 상부철근 시험체인 HU type 경우에는 V type 시험체나 하부철근 시험체에 비하여 콘크리트 입방체 내부의 기포가 상승할 때 상부철근을 통과하지 못하고 철근과의 부착면에 공기구멍을 형성하게 되어 상대적으로 부착면적이 감소하여 현저하게 낮은 부착응력을 나타내는 것으로 판단된다.

Fig. 12는 천연골재만을 사용한 A0 시험체와 순환골은 골재를 100% 치환한 A100 시험체를 철근 배근 방향에 따라 철근과 콘크리트의 부착면을 비교해 보기 위하여 콘크리트 입방체를 반으로 쪼개어 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 H type 중 상부철근 시험체인 HU type의 경우에는 최종 파괴 형태에서 콘크리트와 철근의 부착면에 기포가 발생하여 공기구멍이 생긴 것을 확인할 수 있다.

4.3 실험 결과 및 규준/제안식에 의한 계산 결과 비교

본 연구에서는 순환골재 콘크리트 부재의 구조설계기준 작성을 위한 기초 자료를 확보하고자 본 연구의 실험 결과 및 윤승조⁸⁾, Jianzhuang Xiao⁹⁾, Andrzej Ajdukiewicz¹⁰⁾

등 기존의 연구자에 의해 실시된 실험 결과를 상호 비교하였다. 각 실험자에 의해 실시된 순환골재 콘크리트와 철근과의 부착강도를 콘크리트 압축강도에 대하여 나타내면 Fig. 13과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 다른 연구자들에 의한 연구 결과는 모두 수직철근을 묘사한 V type의 형태로 실험을 실시되었으며, 모두 CEB-FIP 규준식 및 島의 제안식의 값을 상회하는 결과를 보였다. 또한 Table 7 및 Fig. 14는 CEB-FIP 규준식 및 島의 제안식과 본 연구에서 얻어진 결과를 각 시험체별로 비교하기 위하여 시험체별 최대부착응력 (τ_{EX})과 CEB-FIP 규준식 및 島의 제안식에 의해 계산된 값 (τ_{ANA})의 비 (τ_{EX}/τ_{ANA})를 나타낸 것이다.

Fig. 13에 나타난 바와 같이 수직철근을 묘사한 V type 및 수평철근을 묘사한 H type 중 하부철근 시험체인 HL

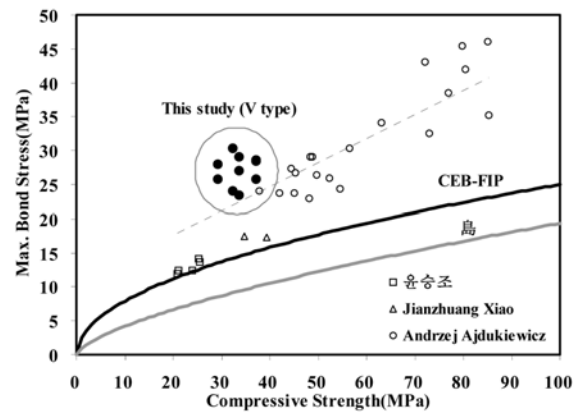


Fig. 13 Influence of concrete compressive strength on bond stress of ribbed bars

Table 7 Test results and comparison with analytical result

Specimen	τ_{max} (1)	δ_{max}	τ_{CEB} (2)	$\tau_{島}$ (3)	(1)/(2)	(1)/(3)	Specimen	τ_{max} (1)	δ_{max}	τ_{CEB} (2)	$\tau_{島}$ (3)	(1)/(2)	(1)/(3)
A0V1	28.69	0.552	15.22	10.00	1.89	2.87	A30V1	23.38	0.535	14.49	9.37	1.61	2.50
A0V2	28.44	0.929	15.22	10.00	1.87	2.84	A30V2	27.06	0.613	14.49	9.37	1.87	2.89
A0V3	25.79	0.573	15.22	10.00	1.69	2.58	A30V3	29.12	0.984	14.49	9.37	2.01	3.11
A0HU1	13.02	1.315	15.22	10.00	0.86	1.30	A30HU1	13.04	0.966	14.49	9.37	0.90	1.39
A0HU2	11.25	1.541	15.22	10.00	0.74	1.12	A30HU2	11.24	1.410	14.49	9.37	0.78	1.20
A0HU3	10.52	1.303	15.22	10.00	0.69	1.05	A30HU3	14.81	1.049	14.49	9.37	1.02	1.58
A0HL1	16.55	1.140	15.22	10.00	1.09	1.65	A30HL1	17.83	1.213	14.49	9.37	1.23	1.90
A0HL2	16.76	1.486	15.22	10.00	1.10	1.68	A30HL2	23.16	0.808	14.49	9.37	1.60	2.47
A0HL3	17.06	0.968	15.22	10.00	1.12	1.71	A30HL3	26.91	0.813	14.49	9.37	1.86	2.87
A60V1	24.09	0.724	14.22	9.14	1.69	2.64	A100V1	25.81	0.560	13.53	8.55	1.91	3.02
A60V2	30.36	0.570	14.22	9.14	2.14	3.32	A100V2	28.01	0.537	13.53	8.55	2.07	3.28
A60V3	30.31	0.609	14.22	9.14	2.13	3.32	A100V3	-	-	-	-	-	-
A60HU1	13.05	1.591	14.22	9.14	0.92	1.43	A100HU1	8.57	1.974	13.53	8.55	0.63	1.00
A60HU2	14.69	1.489	14.22	9.14	1.03	1.61	A100HU2	5.81	1.969	13.53	8.55	0.43	0.68
A60HU3	13.56	1.670	14.22	9.14	0.95	1.48	A100HU3	6.10	1.581	13.53	8.55	0.45	0.71
A60HL1	24.79	0.807	14.22	9.14	1.74	2.71	A100HL1	25.20	0.709	13.53	8.55	1.86	2.95
A60HL2	23.79	0.926	14.22	9.14	1.67	2.60	A100HL2	24.51	0.902	13.53	8.55	1.81	2.87
A60HL3	24.50	1.126	14.22	9.14	1.72	2.68	A100HL3	24.43	0.869	13.53	8.55	1.81	2.86

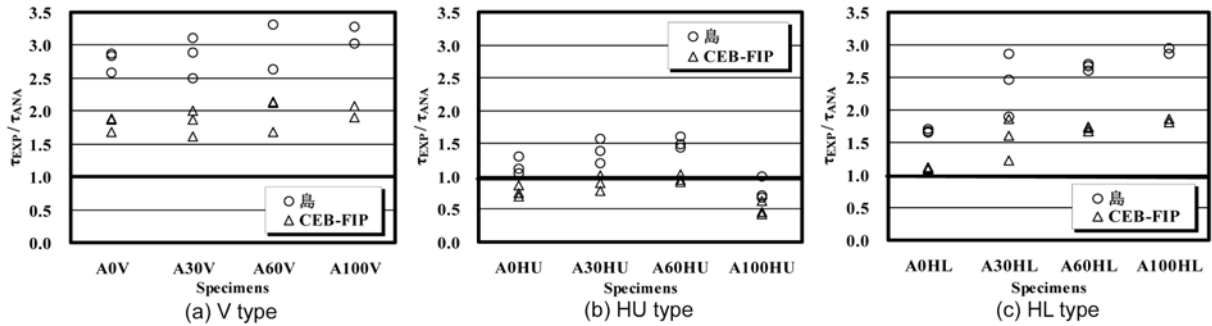


Fig. 14 Comparison with CEB-FIP code of the specimens

type의 경우 CEB-FIP 기준식 및 鳥의 제안식에 의한 계산결과를 상회하는 부착강도를 나타내었다. 또한 HL type에서는 순환굵은골재 치환율이 증가됨에 따라 τ_{EX}/τ_{ANA} 값도 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 수평철근을 묘사한 H type 중 상부철근 시험체인 HU type의 경우에는 순환굵은골재 치환율이 증가됨에 따라 τ_{EX}/τ_{ANA} 비가 점차 높게 나타나고 있으나, 전반적으로 1.0 내외의 값을 보여 상대적으로 다른 조건의 시험체들에 비하여 CEB-FIP 기준식 및 鳥의 제안식에 의한 계산값 보다 낮게 나타나 규준에서 정하는 부착력을 확보하지 못하고 있는 것으로 평가되었다.

본 연구에서의 실험 결과를 종합적으로 분석한 결과, 철근의 부착응력은 순환굵은골재 치환율에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났고, 오히려 굵은골재 입형에 기인한 침하량 차이에 의한 골재편중 현상 및 콘크리트의 블리딩에 의한 기포의 영향에 의하여 철근의 위치(상부 및 하부)에 따른 응력의 차이가 발생하였다. 특히 상부철근을 묘사한 HU type의 경우에 다른 시험체에 비하여 현저한 부착응력의 저하를 나타내었으며 그에 따라 식 (3)과 같은 형태의 기존 규준 및 제안식에 근거하여 이형철근의 부착강도에 철근의 위치에 대한 고려사항을 수정해야 할 필요가 있을 것으로 사료된다.

$$\tau = \alpha \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

전술한 바와 같이 CEB-FIP code에서는 α 를 2.5로 책정하고 있다. 본 연구 범위 내에서는 Fig. 15에 나타난 바와 같이 수직철근인 V type 및 하부철근인 HL type의 경우에는 기존의 규준을 만족하므로 2.5로 적용해도 무방하다. 그러나 상부철근인 HU type의 경우에는 α 를 제한된 시험체 수이기는 하지만 굵은골재의 편중 현상 및 기포의 영향을 고려하여 50% 정도 낮춘 1.2로 표현하였다. 이는 하부철근인 HL type의 가장 작은 실험값의 평균과 α 를 1.2로 고려하였을 때 상부철근인 HU type중 가장 작은 실험값의 평균이 각각의 규준값을 5~10% 이상 상회하고 있으므로 적용 가능할 것으로 판단된다. 본 연구는 강자갈을 사용한 폐 콘크리트로부터 생산된 순환골재를 사용한 콘크리트의 실험 결과에 근간하고 있지만, 향후 보다 많은 실험을 통하여 데이터를 구축할 필요성

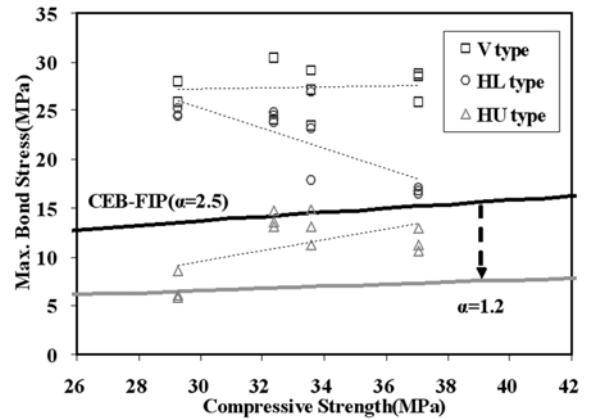


Fig. 15 Influence of concrete compressive strength on bond stress of deformed bars

이 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

- 1) 순환골재를 사용한 콘크리트에서 철근과 콘크리트의 부착응력-슬립 관계는 철근의 배근 방향/위치 및 순환굵은골재의 치환율에 따라서 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, 수직철근 시험체는 순환굵은골재의 치환율에 관계없이 상호 유사한 경향을 나타내고 있으나, 수평철근 시험체 중 상부철근 시험체와 하부철근 시험체는 수직철근 시험체에 비하여 각각 약 58% 및 약 20% 정도 부착응력이 저하된 것으로 나타나 철근의 위치(상·하부)별로 부착응력의 분포에 차이가 있는 것으로 파악되었다.
- 2) 수평철근의 배근 위치에 따른 부착강도의 차이는 순환굵은골재의 침하로 인한 굵은골재의 편중 현상과 철근하부 콘크리트 페이스트의 추가적인 침하 및 상부철근을 통과하지 못한 기포의 영향으로 인하여 콘크리트와 철근의 부착면적이 감소된 것에 기인하는 것으로 판단된다.
- 3) V type 및 HL type의 경우 전반적으로 순환굵은골재 치환율과 무관하게 각 시험체의 부착강도는 CEB-FIP 기준식 및 제안식보다 상회하는 값을 나타내어 적용이 가능할 것으로 판단된다. 반면 수평방향으로 배근된 상부철근(철근 하부에 깊이 225 mm 콘

크리트가 타설됨)인 HU type의 경우 다른 시험조건에 비하여 부착강도가 작은 것으로 나타나 이에 따른 심도 깊은 검토가 필요할 것으로 사료된다.

- 4) 철근과 콘크리트의 부착강도 평가를 위한 기존의 규준식에서 철근의 위치에 따른 기여도를 재검토할 필요성이 있을 것으로 사료된다. 본 연구범위 내에서는 HU type의 경우에는 α 값을 기존의 2.5에서 1.2로 낮추어 적용해야 하며, 보다 다양한 데이터 구축을 통하여 그 적용성을 높여나가야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2005년 건설핵심기술연구개발사업 05건설핵심D07의 제1세제부 “순환골재 콘크리트의 구조기준 설정 연구”의 일부로서, 관계체위께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률, 2003.
2. 한병찬, 윤현도, 정수영, “전단보강되지 않은 고강도 재생골재 콘크리트 보의 전단거동”, 대한건축학회 논문집

(구조계), 18권, 10호, 2002, pp.3~10.

3. 이원석, 윤현도, “순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 전단성능”, 대한건축학회 논문집 (구조계), 23권, 4호, 2007, pp.19~26.
4. Comite Euro-International Du Betom, *CEB-FIP MODEL CODE 1990*, Thomas Telford, 1990, 433pp.
5. 島 弘, 周 札良, 岡材 甫, “マツシフなコンクリートに埋められた異形鐵筋の付着力-すべら關係”, 土木學會論文集, Vol.378, No.6, 1987, pp.165~174.
6. CSA standard, *Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers*, Standard Association, 2002, 177pp.
7. 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.
8. 윤승조, 서수연, 이우진, 강성덕, 윤두희, 김태호, 민석환, “순환골재 치환율에 따른 콘크리트의 부착성능 평가에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회, 춘계학술발표대회 논문집(구조계), 26권, 1호, 2006, pp.529~532.
9. Falkner, Jianzhuang Xiao, H., “Bond Behavior between Recycled Aggregate Concrete and Steel Rebars”, *Construction and Building Materials*, Vol.21, 2007, pp.395~401
10. Ajdukiewicz, Andrzej and Kliszczewicz, Alina, “Influence of Recycled Aggregate on Mechanical Properties of HS/HPC”, *Cement and Concrete Composites*, Vol.24, 2002, pp.269~279.

요 약 철근콘크리트구조물의 거동에서 가장 중요한 요구사항 중의 하나는 철근과 콘크리트 상호간의 합성 거동을 위한 부착 성능의 확보이며, 순환골재 콘크리트를 구조체로 적용하기 위해서는 순환골재와 철근의 부착 거동을 구명하는 것이 매우 중요한 요소로 등장하게 된다. 이러한 분석에 따라 본 연구에서는 순환골재를 사용한 콘크리트와 철근 상호간의 부착거동을 평가하기 위하여 총 36개의 시험체를 제작하여 압축인발 실험을 수행하였다. 연구를 수행함에 있어 실험에 사용된 변수는 0, 30, 60, 100%의 4가지의 순환골재 치환율 및 철근의 배근 방향 및 위치 (상단근, 하단근)로 하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 실험 결과를 종합해 보면, 순환골재를 사용한 콘크리트와 철근간의 부착강도는 실험에 사용된 변수인 철근의 배근방향/위치 및 순환골재 치환율에 따라서 그 영향이 상호 다르게 나타나는 것으로 파악되었다. 즉, 수직배근된 철근의 경우는 순환골재의 치환율에 관계없이 상호 유사한 값을 나타내고 있는 반면, 수평 배근된 시험체의 경우는 순환골재 치환율 및 철근의 배근 위치에 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 순환골재의 치환율 변화에 따라 콘크리트 침하량의 차이가 발생되며 추가적으로 상부철근을 통과하지 못한 기포의 영향으로 인해 부착면적이 감소되었기 때문인 것으로 판단되며, 이로 인하여 HU type 시험체의 최대부착응력이 다른 시험체에 비하여 현저히 작은 것으로 나타났다. 따라서 순환골재 콘크리트를 포함하여 철근과 콘크리트의 부착강도 평가를 위한 기존의 규준식에서 철근의 위치에 따른 기여도를 재검토할 필요성이 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 순환골재, 치환율, 부착강도, 압축인발