

재생골재를 사용한 고강도 철근콘크리트 보의 전단성능에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Shear Performance of High-strength Concrete Beams Made with Recycled Aggregate

박 우 철* 이 경 희* 박 완 신** 윤 현 도*** 정 수 영***
Park, Woo Chul Lee, Kyoung Hee Park, Wan Shin Yun, Hyun Do Chung, Soo Young

ABSTRACT

The use of recycled-aggregate concrete is increasing faster than the development of appropriate design recommendations. In addition, recycled-aggregate and higher compressive strengths are two of the most desired characteristics to improve the use of concrete as a construction material. The paper reports limited experimental data on the shear capacity of high-strength recycled aggregate concrete beams. Ten beams were tested to determine their diagonal cracking and ultimate shear capacities. The variable in the test program were concrete strength (300, 500 and 700kgf/cm²), and shear span/depth ratio ($a/d = 2.0, 3.0$ and 4.0). Test results indicate that the ACI Building code prediction of Eq. (11-3) and (11-5) for high-strength recycled aggregate concretes are unconservative for all beams (with concrete strength 300, 500 and 700kgf/cm², a/d ratios 2.0, 3.0 and 4.0). But Zsutty Equation for high-strength recycled aggregate concretes is conservative for all beams. The results of the experimental investigation on the cracking patterns for beams show that the angle that the critical inclined crack makes with the horizontal axis decreases with increasing a/d .

1. 서 론

건축폐기물의 재활용은 환경보전 측면에서 폐기물의 자연방치 및 무단폐기, 단순매립 등의 직접적인 환경오염을 예방하고 한정된 골재자원을 절약할 수 있다는 점에서도 그 필요성이 중요시되고 있다. 특히 골재의 경우 천연골재의 주를 이루는 하천골재의 비중은 1998년의 54.2%에서 현재 20%정도 저하되고 있으며, 쇄석골재는 동기간 동안 26.5%에서 50%로 개발이 활발해지고 있지만, 골재 수요량의 증가에 의해 쇄석골재의 가채 매장량은 한계를 보이고 있으며 운송거리 제약 등으로 인한 지역적 수급 불균형이 나타날 가능성도 제기된다. 이에 반하여 폐콘크리트를 파쇄하여 얻은 재생골재의 경우는 노후된 건축물의 재건축 및 도심지 재개발등을 위해 해체 등으로 증가추세에 있는 폐콘크리트덩이를 고려할 때 새로운 재활용자원으로 활용가능성에 대한 연구는 시급한 과제이다. 이전까지 폐콘크리트를 파쇄하여 생산한 재생골재가 구조부재로 사용되지 못하는 이유는 구조재료로서 적절하지 못한 것이

* 정회원, 충남대 건축공학과, 석사과정

** 정회원, 충남대 건축공학과, 박사과정

*** 정회원, 충남대 건축공학과, 교수

**** 정회원, 충남대 건축공학과, 부교수

아니라 그 성능평가에 대한 자료가 부족하기 때문이다.

이에 본 연구에서는 실구조물을 파쇄하여 생산한 재생골재를 사용한 철근콘크리트 보에서 전단경간비 및 콘크리트 압축강도에 따른 전단성능특성을 규명하고자 한다. 또한 본 연구의 결과를 근거로 현행 천연골재 콘크리트 보에 대한 표준식의 재생골재 콘크리트 보의 적용가능성 여부를 평가하고 아울러 재생골재 콘크리트를 구조재료로써 적용시 필요한 기초적인 자료를 제시하고자 한다

2. 실험

2.1 사용재료

본 연구에서 사용된 재생골재 콘크리트는 설계기준강도 300, 500, 700kgf/cm²으로써 강도별 배합조건은 표 1과 같다. 재생골재는 국내 I사가 생산한 골재이며 시멘트는 국내 S사가 생산한 보통 포틀랜드 시멘트를 이용하였다. 또한 현장에 적용 가능한 슬럼프 값 18±2cm를 얻기 위해 고성능 감수제(SP제)를 사용하였다. 시험체에 사용된 콘크리트의 강도특성을 파악하기 위하여 ϕ10×20cm의 공시체를 제작하여 KS F 2405의 규정에 따라 압축강도 시험을 실시하였으며 측정결과를 그림 1에 나타내었다. 주근은 재질 SD 40(KSD 3504)의 HD19를 사용하였으며 재료시험 결과는 그림 2와 같다.

표 1 콘크리트의 배합조건

골재의종류	W/C(%)	S/a	절대용적(ℓ/m ³)				단위중량(kg/m ³)			
			C	BFS	S	G	C	BFS	S	G
재생골재	45	0.48	116	0	340	368	367	0	874	877
재생골재	35	0.52	111	50	340	314	350	150	870	832
재생골재	26	0.5	112	97	307	307	353	289	786	814

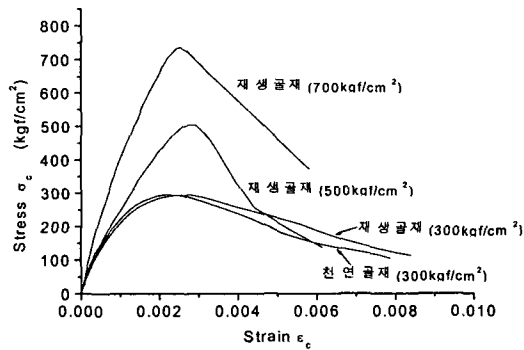


그림 1. 콘크리트의 응력-변형률 관계

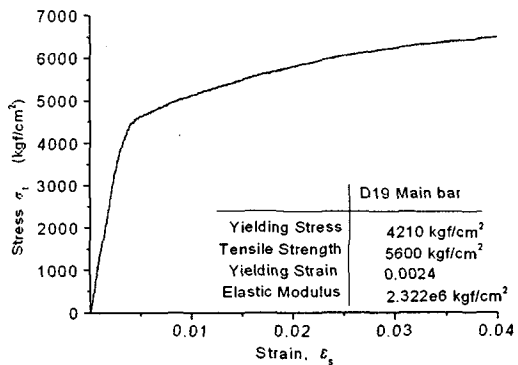


그림 2. 철근의 응력-변형률 관계

2.2 시험체 제작 및 재하방법

본 연구의 변수는 압축강도 ($f_{ck}=300, 500, 700\text{kgf/cm}^2$)와 전단경간비($a/d=2.0, 3.0, 4.0$)이며, 시험체의 단면은 17cm×30cm, 시험체 길이는 전단경간비에 따라 162cm, 216cm, 270cm로써 총 10개의 시험체를 제작하였다. 시험체는 재생골재로 사용한 고강도 철근콘크리트 보의 전단성능을 평가할 수 있도록 부재가 인위적으로 휨파괴 전에 전단파괴 될 수 있도록 설계하였다. 시험체의 양단끝은 스테럽을 조밀하게 배근하여 실험시 충분한 강성을 갖도록 하였으며, 시험체 조립 완료 후 변형계이저를 시험체의 선택된 위치에 부착하였다. 시험체의 세부적 내용은 표 2 및 그림 3에 나타내었다.

표 2 시험체 일람표

시험체명	압축강도 $f_{ck}(kgf/cm^2)$	전단경간비 (a/d)	단면(cm)		인장철근비 $\rho_w(\%)$	골재의 종류	Span(cm)
			폭(b)	흙(d)			
N3-2.0	300	2.0	17	27	1.11	천연골재	162
R3-2.0	300	2.0	17	27	1.11	재생골재	162
R3-3.0	300	3.0	17	27	1.11	재생골재	216
R3-4.0	300	4.0	17	27	1.11	재생골재	270
HR5-2.0	500	2.0	17	27	1.87	재생골재	162
HR5-3.0	500	3.0	17	27	1.87	재생골재	216
HR5-4.0	500	4.0	17	27	1.87	재생골재	270
HR7-2.0	700	2.0	17	27	1.87	재생골재	162
HR7-3.0	700	3.0	17	27	1.87	재생골재	216
HR7-4.0	700	4.0	17	27	1.87	재생골재	270

HR5-2.0 : H(high-strength), R(recycled aggregate), N(Natural aggregate), 3, 5, 7(compressive strength of concrete), 2.0, 3.0, 4.0(shear span/depth ratio)

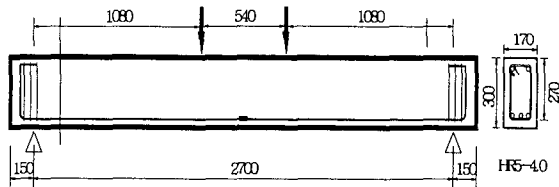


그림 3 시험체 상세도

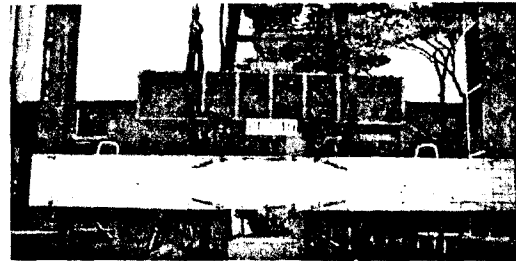


그림 4. 실험전경사진

본 연구에서 하중의 재하는 시험체의 전단내력을 평가하기 위하여 그림 4와 같이 구조용 반력프레임에 100tonf 용량의 유압잭으로 가력하였으며, 하중은 50tonf용량의 Load cell을 사용하여 하중을 측정하였다. 하중재하는 실험체의 예상 종국 파괴하중의 60%까지는 하중조절 방식(Load Control), 그리고 이후부터는 변위조절방식(Displacement)에 의해 가력하였다. 시험체의 처짐, 곡률 및 전단부위의 변형을 측정하기 위하여 시험체 하부에 변위 측정기(Strain Type Displacement Transducer, SDT)를 설치하였다.

3 실험결과

3.1 하중-변위관계

시험체의 전반적인 균열진전 과정을 살펴보면 가력 이후 모멘트가 일정한 구간인 중앙부 2점가력점 사이에서 초기 휨균열이 발생한 후 중앙부 가력점으로부터 받침부 쪽으로 균열이 점차 진전되다가 사인장균열이 발생하면서 급격히 파괴되는 취성특성 보였다. 시험체의 하중-변위관계 곡선을 그림 5(a)~(c)에 나타내었다. 설계기준강도 300kgf/cm²인 천연골재를 사용한 N3-2.0 시험체와 재생골재를 사용한 동일강도의 R3-2.0 시험체를 비교하여 보면 초기 휨균열, 강성 및 사인장균열 후 보유 전단내력 후 파괴까지의 유사한 거동 특성을 보이고 있다. 또한 전단경간비가 감소할수록 사인장균열 발생시 강도와 최대강도가 증가되는 특성을 보였으며 이는 받침부와 가력점 사이에 형성된 압축대(Strut)에 의한 아치거동에 따른 것으로 판단된다. 콘크리트 압축강도 500 및 700kgf/cm²인 고강도 영역의 경우에

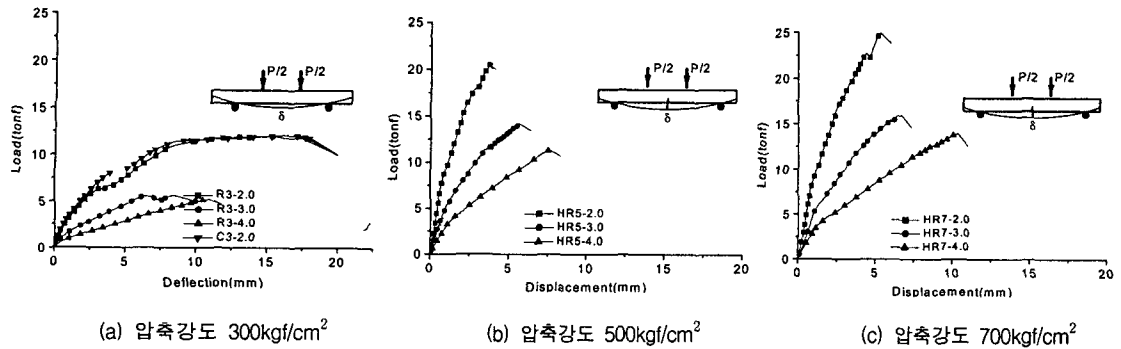


그림 5. 하중-변위관계곡선

도 유사한 거동을 보였다. 또한 전단경간비가 4.0인 R3-4.0, HR5-4.0, HR7-4.0 시험체는 초기 휨균열에 의한 강성저하가 현저히 나타난 반면 전단경간비가 감소할수록 이러한 경향은 크게 나타나지 않았다. 콘크리트 강도에 따른 시험체의 거동특성을 비교하여 보면 전단경간비 2.0이며 압축강도 300kgf/cm²인 R3-2.0 시험체는 사인장균열 이후 파괴시까지 큰 변형능력을 보이고 있으나 HR5-2.0 및 HR7-2.0 시험체의 경우 사인장균열 이후 보다 급격한 취성적인 특성을 보였다.

3.2 파괴양상

모든 보에서 하중의 증가에 따라 압축축으로 사균열의 진전 양상은 전단경간비에 따라 다르게 나타났다. 전단경간비가 2.0인 시험체에서는 사인장균열이 발생된 후에도 어느 정도 균열의 진전 후에 파괴되는 양상을 보이고 전단경간비가 4.0인 시험체에서는 사인장균열이 발생한 후 급격히 파괴되는 취성파괴 양상을 나타내었다. 전단경간비에 따른 균열각도를 관찰한 결과 전단경간비가 증가될수록 사인장균열과 시험체의 수평면이 이루는 각도가 감소하는 것을 알 수 있었다. 기준이 되는 천연골재를 사용한 철근콘크리트 보(N3-2.0)와 재생골재를 사용한 철근콘크리트 보(R3-2.0)와의 사인장균열을 비교하였을 때 그 각도는 유사한 경향을 보였다. 각 시험체별 최종파괴양상과 사인장균열의 각도를 그림 6과 표 3에 나타내었다.

표 3. 시험체 균열각도

시험체명	압축강도 f_{ck} (kgf/cm ²)	전단경간비(a/d)	균열각도
R3-2.0	310	2.0	40°
R3-3.0	310	3.0	38°
R3-4.0	310	4.0	30°
N3-2.0	358	2.0	39°
HR5-2.0	490	2.0	37°
HR5-3.0	490	3.0	30°
HR5-4.0	490	4.0	25°
HR7-2.0	710	2.0	32°
HR7-3.0	710	3.0	26°
HR7-4.0	710	4.0	30°

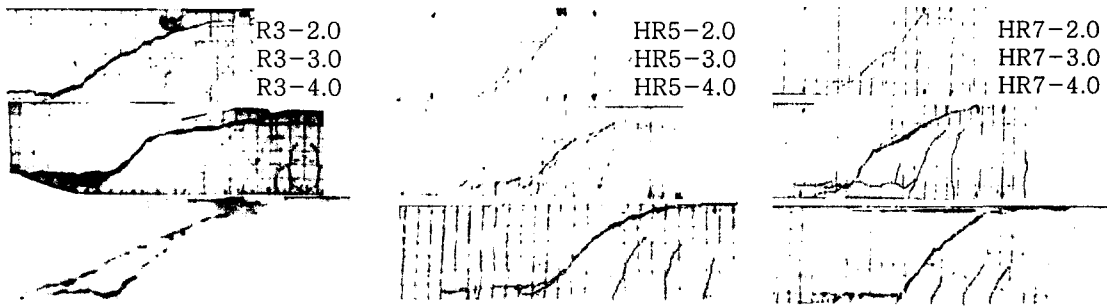


그림 6. 시험체 파괴사진

3.3 현행 기준식의 적용가능성 검토

각 변수별 사균열강도를 실험값과 계산값을 비교하여 표 3에 나타내었다. 전단경간비에 따른 실험값과 계산값을 비교하여 그림 7에 나타내었다. 현행기준식과 실험결과에 의한 사인장균열강도를 비교하여보면 ACI 318-99 (11-3)식은 전단경간비 2.0에 의해 과소평가되고 있고 전단경간비 4.0에서는 과대평가되고 있으나 콘크리트의 압축강도가 증가될수록 실험값이 기준식에 근접함을 알 수 있다. ACI 318-99 (11-5)식에서도 유사하게 평가되고 있다. Zsutty식은 압축강도 300 및 500kgf/cm²에서 실험값보다 과대평가되고 있으며 700kgf/cm²에서는 전단경간비 3.0이하는 실험값과 거의 일치하지만 4.0에서는 과대 평가를 알 수 있었다. 콘크리트의 압축강도가 증가될수록 Zsutty식과 거의 일치함을 알 수 있었다. 일본기준식(AIJ)에서는 모든 조건에서 실험값이 기준식을 상회하는 것으로 나타났다. 유럽기준식(CEB-FIP)에서도 콘크리트의 압축강도 300kgf/cm²에서는 전단경간비 2.0을 제외하고는 기준식이 과대 평가되는 것으로 나타났지만, 콘크리트의 압축강도가 증가될수록 안전측인 것으로 나타났다.

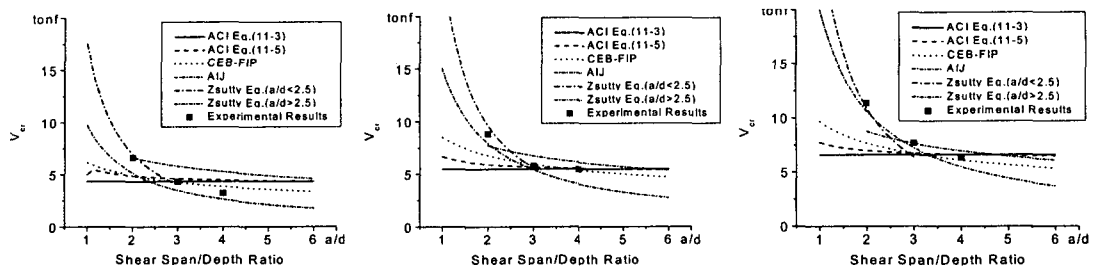
표 4. 실험결과

시험체명	압축강도 (kgf/cm ²)	ρ _w (%)	Exp	ACI ¶	ACI †	Zsutty §	AIJ ◇	CEB-FIP ♀	Exp/	Exp/	Exp/	Exp/	Exp/	
			(tonf)	(11-3) (tonf)	(11-5) (tonf)	(tonf)	(tonf)	(tonf)	(tonf)	(tonf)	ACI	ACI	Zsutty	AIJ
			V _{cr}	V _{cr}	V _{cr}	V _{cr}	V _{cr}	V _{cr}	V _{cr}	V _{cr}	V _{cr}	V _{cr}	V _{cr}	V _{cr}
R3-2.0	310	1.11	6.65	4.28	4.79	6.87	5.03	4.83	1.55	1.39	0.97	1.32	1.38	
R3-3.0	310	1.11	4.35	4.28	4.54	4.79	3.42	4.22	1.02	0.96	0.91	1.27	1.03	
R3-4.0	310	1.11	3.24	4.28	4.42	4.36	2.59	3.83	0.76	0.73	0.74	1.25	0.85	
N3-2.0	358	1.11	6.9	4.60	5.1	7.2	5.52	5.06	1.5	1.35	0.96	1.25	1.36	
5HR-2.0	490	1.87	8.87	5.39	5.84	9.55	7.77	6.71	1.65	1.52	0.93	1.14	1.32	
5HR-3.0	490	1.87	5.78	5.39	5.58	6.67	5.28	5.86	1.07	1.04	0.87	1.09	0.97	
5HR-4.0	490	1.87	5.46	5.39	5.46	6.06	4.00	5.32	1.01	1.0	0.90	1.37	1.03	
7HR-2.0	710	1.87	11.39	6.48	6.87	10.8	10.33	7.59	1.76	1.66	1.05	1.10	1.50	
7HR-3.0	710	1.87	7.68	6.48	6.62	7.55	7.01	6.63	1.19	1.16	1.02	1.09	1.16	
7HR-4.0	710	1.87	6.35	6.48	6.49	6.86	5.31	6.02	0.98	0.98	0.93	1.19	1.54	

¶ ACI 318-99 Code Eq.11-3 ($ACI V_{cr} = 0.53 \sqrt{f_{ck}} b_w d$ (kgf)) † ACI 318-99 Code Eq.11-5 ($ACI V_{cr} = \left\{ 0.5 \sqrt{f_{ck}} + 176 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right\} b$ (kgf))

♀ CEB-FIP Code 1990 ($CEB-FIP V_{cr} = 0.15 (3d/a_v)^{1/3} \xi (100 \rho f_{ck})^{1/3} b_w d$ (Pa))

◇ AIJ Code ($AIJ V_{cr} (= Q_w) = \left\{ \frac{0.053 p_i^{0.23} (F_c + 180)}{M/Qd + 0.12} \right\} b$ (kgf)) § Zsutty Equation ($Zsutty V_{cr} = 10.02 (f_{ck} \rho_w \frac{d}{a})^{1/3} b_w d$ (kgf))



콘크리트 압축강도 300kgf/cm²

콘크리트 압축강도 500kgf/cm²

콘크리트 압축강도 700kgf/cm²

그림 7. 실험값과 현행규준식에 의한 계산값의 비교

4. 결론

본 연구에서는 압축강도(f_{ck}), 전단경간비(a/d)를 주요변수로 10개의 실험체를 계획하여 재생골재를 이용한 고강도 철근콘크리트 보의 전단성능을 규명하고, 기존의 규준식과 비교하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 보통골재를 사용한 고강도 철근콘크리트보와 마찬가지로 재생골재를 사용한 고강도 철근콘크리트 보의 시험체는 초기 휨균열이 발생한 후, 하중이 증가됨에 따라 지점과 가력점 사이에 사인장균열 폭이 증가되며 갑작스럽게 파괴되는 취성파괴 양상을 보였다.
- 2) 전단내력은 강도가 증가할수록, 전단경간비가 작을수록 증가하는 것으로 나타났다.
- 3) 시험체는 사인장균열 이후 어느 정도의 보유전단내력을 보이다가 최대하중 이후 급격하게 전단내력이 감소하였다. 전단경간비가 작을수록 보유전단내력이 큰 것으로 전단경간비가 증가할수록 보유전단내력이 감소하는 것으로 나타났다.
- 4) 실구조물을 파쇄하여 생산한 재생골재로 100% 대체한 콘크리트 압축강도 500 및 700kgf/cm² 급 고강도 재생골재 콘크리트의 전단강도 평가시 천연골재 콘크리트를 사용한 보의 현행전단설계 규준식에 적용 가능한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Shideler, J.J. "Lightweight-Aggregate Concrete for structural use". pp. 299-328
2. S. Mindess, J. F. Young, "Concrete", Prentice Hall, New Jersey, 1981, pp. 581-599
3. Ravindrarakah, R.S. and Tam, T.C. "Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate" Magazine of Concrete Research, 37, NO. 130. 1985
4. Hansen, T.C. "Recycling of Demolished Concrete and Masonry", Report of Technical Committee
5. Wang C.K. and salmon C.G. "Reinforced Concrete Design", Harper Collins, 1992
6. Reiji TANAKA, Norio HATOYAMA, "A Study on RC Structures used the Recycled Aggregate Concrete" 日本建築學會論文集 1999
7. ACI 318-95 Code, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", ACI, Detroit, 1995
8. Zsutty, T.C. "Beam Shear Strength Prediction By Analysis of Existing Data", ACI journal, V.65 Nov. 1968, pp942-951
9. Park, R. and Paulay, T. "Reinforced Concrete Structures", John Wiley & Sons, New York, 1981