

도로포장용 재생콘크리트의 피로저항 특성

Fatigue Resistance Properties of Recycled Pavement Concretes

김광우* · 김성태** · 김대영** · 조문진**

Kim, K. W. · Kim, S. T. · Kim, D. Y. · Cho, M. J.

1. 서 론

국내 콘크리트 포장의 건설 역사는 이미 40년이 넘었고 콘크리트 포장의 가용수명과 그간의 물량을 고려한다면 이미 폐콘크리트의 재활용은 실용화가 이루어져있어야 했다. 하지만 아직 그 실태가 매우 미흡한 실정인데 이는 여러 가지 이유가 있겠지만 기술적인 문제점과 아울러 재생재료에 대한 사회적인 인식과 관련이 있고 아직은 신규 건설물량이 유지보수보다 많은 현실에 기인한다고 보여진다.

특히, 발생량이 급증하고 있는 건설폐기물 중에서도 2000년 현재 약 1,500만 톤인 폐콘크리트 발생량이 2020년에는 약 1억 톤 이상으로 급격히 증가할 것으로 예상된다. 때문에 날로 심각해지는 주거환경, 지역환경 및 지구환경파괴에 대한 대책으로써 부가가치가 높고 수요가 많은 폐콘크리트의 재자원화 기술개발 및 실용화 방안이 절실히 요구되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 폐콘크리트를 재활용하기 위한 기초자료 적립이 필요하다.

일반적으로 폐콘크리트는 파쇄되어 1종부터 3종까지의 재생골재로 생산된다. 그중 1종으로 재생은 상당한 노력과 비용이 들어가며 1종화 과정에서 나오는 많은 몰탈 부분의 미분은 또 다른 산업폐기물이 되는 등 어려움이 따른다. 따라서 많은 경우 재생골재는 2-3종이 생산되며 이들은 배합설계시 조금의 노력을 기울이면 일반 콘크리트와 같은 압축강도를 낼 수 있다. 하지만 재생골재에는 구 콘크리트의 몰탈 부분이 붙어 있고 이것이 장기적인 측면에서 신규 몰탈에 비하여 얼마나 성능이 유지될지는 아직 규명되지 못한 실정이다. 더구나 이 재생콘크리트가 정하중이 아닌 피로하중을 받는 구조물에 사용될 경우 그 성능이 어느 정도인지가 큰 관심의 대상이다. 따라서 본 연구에서는 폐콘크리트 재생골재를 사용하여 제조한 재생콘크리트가 천연골재를 사용한 일반 콘크리트와 비교하여 피로수명이 어떻게 나타나는지를 고찰하였다.

2. 재료 및 실험

2.1 재료

가. 시멘트 및 골재

시멘트는 국내에서 일반적으로 많이 쓰이는 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였다. 본 연구에서는 경상남도 진주시에 위치한 S사의 재생골재 2가지와 신규골재 2가지, 총 4종류의 골재를 사용하였다. 이들은 각각 최대 치수 25mm인 재생골재, 최대 치수 25mm인 신규골재, 재생 잔골재, 신규 잔골재이다.

재생골재의 생산공정은 1차 죠크리셔를 통해 200mm 입자로 파쇄하고, 고압 폭기 발생으로 불순물 부유 및 골재를 고압 세척한 다음 회전틀을 이용해 수조탱크내 부유물을 외부로 송출하고 2차 죠크리셔 과정으로 50mm 입자파쇄를 하고 3차 임팩트 크리셔를 통해 골재의 입형을 개선하여 25mm와 10mm 이하 골재 등의 완제품을 생산하였다. 각 골재에 대한 물리적 성질은 표 1에서 보여준다.

또한 잔골재는 신규 잔골재(강모래)와 재생 잔골재를 50 : 50의 비율로 혼합하여 사용하였다. 그림. 1~3 는 굵은골재와 잔골재의 입도를 보여준다.

* 정희원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수 · 공학박사 · 033-250-6467 (E-mail : kwkim@kangwon.ac.kr)

** 정희원 · 강원대학교 대학원 지역기반공학과 석사과정 · 공학사 · 033-250-7284



표. 1 Physical Properties of Aggregate

Aggregate	SSD Gravity	Specific Gravity	F. M.	Absorption (%)
재생골재 25mm	2.34	2.58	-	7.14
신규골재 25mm	2.66	2.73	-	1.65
재생 잔골재	2.32	2.52	2.88	6.05
신규 잔골재(강모래)	2.52	2.56	2.37	1.11
재생+신규잔골재	2.42	2.54	2.63	3.58

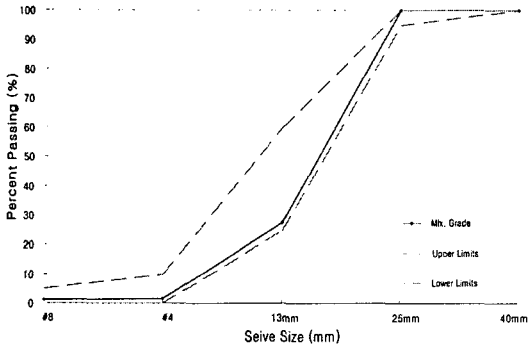


그림. 1 New Coarse Aggregate.

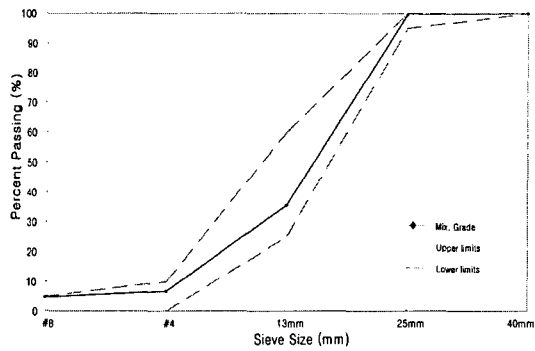


그림. 2 Recycled Coarse Aggregate.

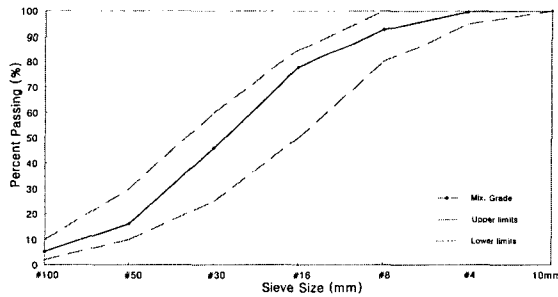


그림. 3 Recycled Fine App. + New Fine App. (50 : 50)

나. 혼화재료

본 연구에 사용한 콘크리트용 혼화제는 암갈색의 나프탈렌계 유동화제(Plasticizer)로 시멘트량에 0.5% 사용하였으며, 특성은 표 2에서 보여준다. 또한 플라이애쉬(Fly ash)는 시멘트량의 15%를 첨가하였으며 그 특성은 표 3과 같다.

표 2. Properties of Plasticizer

Solid Intensity	SO ₄₋₂ Intensity	pH	Cl ⁻ Intensity	Ion	Solubility
> 40%	< 1.8%	8.0	< 200ppm	음이온성	Dissolved in Water

표 3. Properties of Fly ash

SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	lg. Loss	Specific Gravity	Fineness
89.8%	0.3%	0.2%	1.0%	4.5%	2.23	3,200cm ² /g



2.2 실험방법

2.2.1 배합설계

본 연구에서는 w/c를 40, 50, 60%로 변화시키고 전체 굵은골재 량에 대한 재생골재 함량은 0, 25, 50%로 변화시키며 잔골재는 재생잔골재와 신규잔골재를 50 : 50으로 고정시켰다. 재생골재 함량에 따른 w/c별로 빙 공시체를 제작하였다. 배합 설계시 조립률 보정에 있어서는 잔골재율(s/a)의 ±0.5% 만큼, w/c 보정시 잔골재율(s/a)의 ±1%, 부순돌 사용보정에 있어서는 잔골재율(s/a) ±5%, 단위수량에 대하여서는 +9% 만큼 보정하여 배합설계 하였다. 시험비빔을 통한 시방배합 후 15가지 배합설계를 통해 총 45개의 피로시험용 빙 공시체를 제조하였다 (표 4).

표 4. Mixing Design of Recycled Concrete

Series	Max. Size	W/C ratio (%)	s/a (%)	Unit Weight (kg/cm ³)							
				Water (kg)	Cement (kg)	Sand. (kg)	Coarse Agg. (kg)			Additive (g)	
							New	Recycle	sum	Fly ash	Plasticizer
I-A-0-0	25mm	40	42.15	190.75	476.88	655.74	998.24	-	998.24	-	-
I-B-0-0		50	44.15	190.75	381.50	719.20	1000.2	-	1000.2	-	-
I-C-0-0		60	46.15	190.75	317.92	774.33	993.12	-	993.12	-	-
II-A-0-0		40	42.15	190.75	476.88	655.74	719.16	239.87	959.49	-	-
II-A-2-0		40	42.15	190.75	405.34	655.74	719.62	239.87	959.49	71.53	-
II-B-0-0		50	44.15	190.75	381.50	719.20	727.46	242.49	969.95	-	-
II-B-2-0		50	44.15	190.75	324.28	719.20	727.46	242.49	969.95	57.23	-
II-C-0-0		60	46.15	190.75	317.92	774.33	722.44	240.81	963.26	-	-
II-C-2-0		60	46.15	190.75	270.23	774.33	722.44	240.81	963.26	47.69	-
III-A-0-5		40	42.15	190.75	476.88	655.74	464.87	464.87	929.74	-	2.38
III-A-2-0		40	42.15	190.75	405.34	655.74	464.87	464.87	929.74	71.53	-
III-B-0-0		50	44.15	190.75	381.50	719.20	469.94	469.94	939.87	-	-
III-B-2-0		50	44.15	190.75	324.28	719.20	469.94	469.94	939.87	57.23	-
III-C-0-0		60	46.15	190.75	317.92	774.33	466.69	466.69	933.39	-	-
III-C-2-0		60	46.15	190.75	270.23	774.33	466.69	466.69	933.39	47.69	-

- * I, II, III, IV, V : recycled agg. ratio for 0, 25, 50, 75 and 100%, respectively.
- * A, B, C : W/C ratio for 40, 50 and 60%, respectively.
- * 0 : non additive mixture. 2 : representing fly ash. 5 : representing plasticizer

2.2.2 압축강도 및 휨 강도시험

압축강도 및 휨강도 시험은 KS F 2405, KS F 2408에 따라 수행하였다. 시험장비는 최대용량 200ton의 국내 H사의 HD-201 UTM을 사용하였다. 각 휨강도 시험용 공시체는 10×10×45cm로 제작하여 25℃에서 수중양생된 공시체 3개를 무작위로 선정하여 하중재하 부분과 지점 부분의 표면을 연마하고 강도시험을 이용하여 시험 수행하였다.

휨 강도 측정시 지간을 30cm로 하여 4점 휨 시험을 하였다. 하중재하 속도는 0.06±0.04Mpa/sec 이었으며 휨강도 시험 결과로 파괴된 공시체의 대표적인 파괴 양상을 그림. 4에서 보여준다.

2.2.3 피로 시험

피로시험에 있어 물-시멘트비 40, 50, 60%에 대하여 재생골재 0%, 재생25%(신규75%), 재생50%(신규50%)를 사용하였다. 공시체의 규격은 10×10×45cm이고 제작 후 25℃에서 28일간 수중 양생시켰다. 피로시험 공시체에는 $a_0/W=0.3$ 이 되도록 3cm 깊이의 초기균열(notch)을 만들고 10Hz로 물-시멘트비(w/c) 별로 Instron 8502 (그림. 5)를 사용하여 반복하중을 가하였다. 재하 응력 수준은 정적 휨강도의 80%이고 최소하중을 재하 하중의 10%(응력비는 0.1)로 유지하여 각 공시체별로 최대·최소응력, Amplitude, Mean level을 계

산하였다. 피로시험기에 의해 가해지는 재하 하중의 주기와 진폭은 그림. 6과 같다. 또한, 피로하중 재하시 초기 평균하중(f_{mean})까지 도달시간은 O-O'까지 하중이 재하되는 시간이며 실험적으로 결정하여 20초를 적용하였다. 하중재하의 형상은 블록파, 사인파, 삼각파 등이 있으나 본 실험에서는 사인파를 선택하였다.

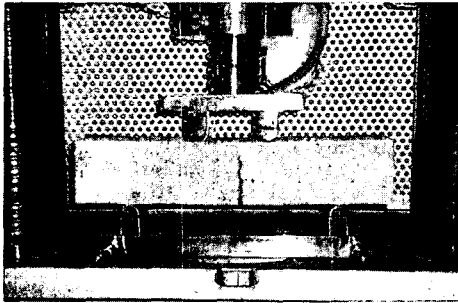


그림. 4 Flexural Test

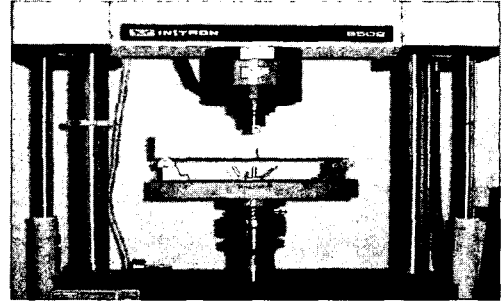


그림. 5 Fatigue Test

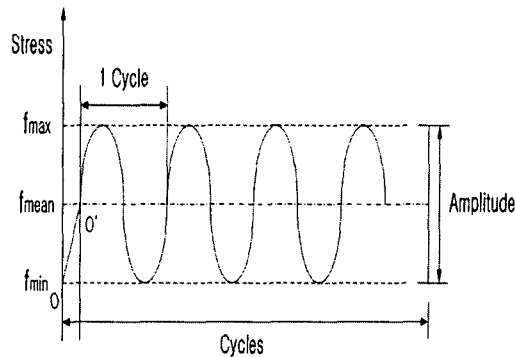


그림. 6 Constant Amplitude Fatigue Test Loading

3. 결과 및 고찰

각 배합에 대한 압축강도 및 휨강도에 대한 결과를 표 5에 나타내었다. 낮은 w/c (40, 50%)에서 플라이 애쉬를 첨가한 경우 목표기준강도보다 높은 압축강도와 휨강도를 보여주었다. 이는 재생골재 사용시 플라이 애쉬를 사용하면 콘크리트에 손상이 없는 강도를 얻을 수 있음을 시사해준다. 또한 압축강도에 대한 휨강도 비율이 신규골재 만으로 만들어진 콘크리트에 비해 2 ~ 3%포인트 정도 높으며 도로포장용 콘크리트 기준인 45kgf/cm²을 대략 만족하였다.

물-시멘트비 40, 50, 60%에 대하여 재생 0%, 재생25%, 재생50%에서의 피로시험 결과는 그림. 7~9와 같다. 콘크리트의 피로 누적 변형 양상을 보면 그림. 7~9에서도 보여지듯이 처음 단계에서는 급속하게 증가하고, 중간단계에서는 느슨하다가 마지막 파괴 단계에서는 갑자기 증가하는 것을 볼 수 있다.

신규 100%의 w/c 40%는 재생25%의 w/c 40%보다 1.4배, 플라이애쉬를 첨가한것에 비해 1.25배 이상 피로저항성이 높은 것으로 나타났다. 그러나 신규골재에 대한 재생비율 25%의 w/c 40%는 신규 100%의 w/c 50%와 비교시 피로누적에 대한 저항성이 비슷하였으며 플라이애쉬를 첨가한 경우 신규골재 w/c 60%보다 4 배이상 피로저항에 높은 결과를 보였다. 신규골재에 대한 재생비율 50%에서 w/c 40%는 플라이애쉬를 첨가한 신규골재 w/c 50%보다 다소 높은 피로저항성을 보여주었으며, 재생골재비율 25%에서의 w/c 40%보다 다소 높은 피로저항성을 보여주었다. 따라서 도로포장용 콘크리트의 사용을 위해서는 재생골재비율 50%까지 낮은 w/c 에 대한 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.



표 5. Compressive and Flexural strength of Concrete

Series	Max. Size	w/c ratio (%)	Compressive strength (f_c : kgf/cm ²)	Flexural strength (f_f : kgf/cm ²)
I-A-0-0	25mm	40	401.9	42.4
I-B-0-0		50	282.1	29.3
I-C-0-0		60	223.2	29.8
II-A-0-0		40	381.6	54.0
II-A-2-0		40	444.4	49.0
II-B-0-0		50	326.3	47.1
II-B-2-0		50	323.6	40.5
II-C-0-0		60	259.4	37.9
II-C-2-0		60	244.6	40.3
III-A-0-5		40	398.7	46.0
III-A-2-0		40	404.7	40.3
III-B-0-0		50	326.5	42.5
III-B-2-0		50	308.7	32.8
III-C-0-0		60	226.8	33.2
III-C-2-0		60	215.7	32.8

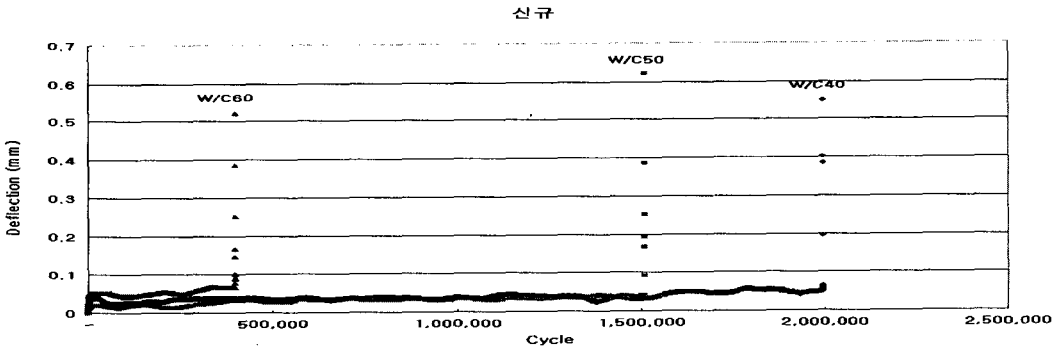


그림. 7 Using New Aggregate

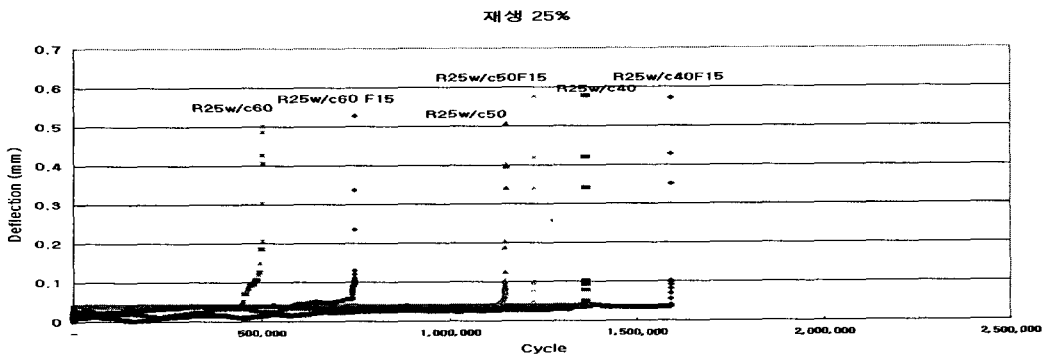


그림. 8 Using 25% Recycled aggregate

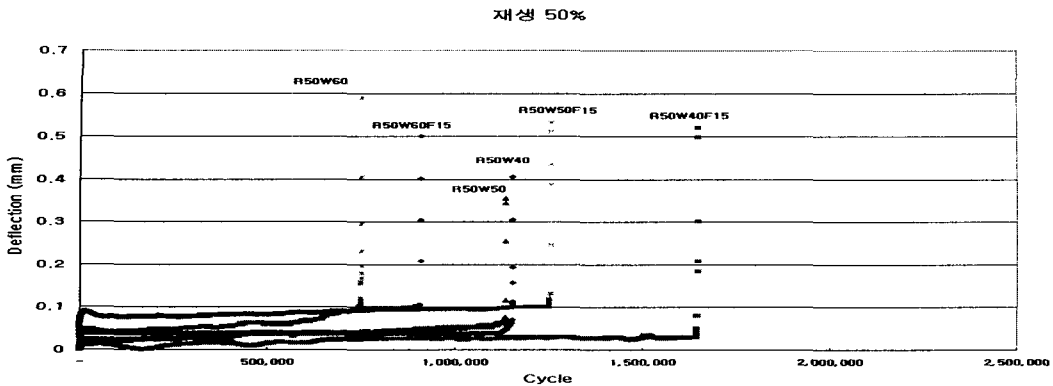


그림.9 Using 50% Recycled Aggregate

4. 결론

- (1) 낮은 w/c(40, 50%)에서 재생골재 비율 25, 50%에 플라이애쉬를 첨가한 배합의 압축강도 및 휨강도가 신규 100%와 비교하여 목표기준강도보다 높은 수준에서 다소 높거나 비슷한 결과를 나타냈다. 이는 재생골재 사용시 플라이애쉬를 사용하면 콘크리트에 손상이 없는 강도를 얻을 수 있음을 말해준다.
- (2) 신규 100%의 w/c 40%는 재생25%의 w/c 40%보다 1.4배, 플라이애쉬를 첨가한것에 비해 1.25배 가량 피로저항성이 높은 것으로 나타났다. 그러나 신규골재에 대한 재생비율 25%에서 w/c 40%는 신규 100%의 w/c 50%와 피로누적에 대한 저항성과 비슷하였으며 플라이애쉬를 첨가한 경우 신규골재 w/c 60%보다 4배이상 피로저항에 높은 결과를 보였다.
- (3) 재생골재 비율 50%에서는 천연골재나, 재생골재 비율 25%보다 피로에 대해서 약한 양상을 보였으나, 물-시멘트비 40%에 플라이애쉬를 첨가한 콘크리트의 경우는 신규골재의 물-시멘트비 50%와 재생골재 비율 25%의 물-시멘트비 40%와 견주어 볼 때, 비슷한 누적피로에 대한 저항성을 가짐을 확인하였다.
- (4) 현재까지 재생콘크리트연구 결과 충분히 실용가능성 있는 것으로 판명되었으며 추후 실용화를 위하여 기존 포장의 상태를 지속적으로 모니터링하고, 배합설계를 수정·보완하는 연구를 수행하여 시공지침서와 표준 품셈이 확립되어야 할 것이다.
- (5) 본 연구결과로 볼 때, 천연골재에 대한 재생골재 비율 50%까지 누적피로하중에 대한 피로저항성 검토결과 양호하였으며 이에 따른 각종 강도시험 및 동결융해, 안전성시험을 병행하여 재생콘크리트의 신규골재에 대한 대체재료로서 근거를 확인할 수 있는 연구가 추후 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 강원대학교 석재복합신소재연구센터의 특별프로그램의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

참고문헌

1. Bauchard, M. (1988), "The Use in Roads of Aggregates made from Demolition Materials," Reuse of Demolition Waste, Proceedings, 2nd International Symposium by RILEM, Kasai, Y. Ed., Chapman and Hall, pp. 719~725.
2. 김진근, 김윤용, (1997), "콘크리트의 피로균열 성장거동에 관한 연구," 콘크리트학회지, 제9권, 제3호, pp. 127~135.
3. 김광우, 김주인, 김기성, (1995), "재생콘크리트의 휨변형과 파괴특성," 한국농공학회 논문집 제 37권 4호.