

순환골재를 활용한 포장용 시멘트콘크리트의 최적배합 도출을 위한 기초 연구

Fundamental Study on Optimum Mixing Proportion of Cement Concrete Pavement using Recycled Aggregate

김승원 Kim, Sueng Won
김용재 Kim, Yong Jae
이장용 Lee, Jang Yong
이학용 Lee, Hak Yong
박철우 Park, Cheol Woo

정회원 · 강원대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : inncoms@naver.com)
정회원 · 강원대학교 건설시스템공학과 연구교수 (E-mail : kimseungwok@naver.com)
정회원 · 강원대학교 토목건설공학과 석사과정 (E-mail : inncomsymbo@naver.com)
강원대학교 건설시스템공학과 교수 (E-mail : leehy58@kangwon.ac.kr)
정회원 · 강원대학교 건설시스템공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : tigerpark@kangwon.ac.kr)

ABSTRACT

OBJECTIVES : This study is to develop the optimum mixing proportions for cement concrete pavement with using recycled aggregates.

METHODS : The mixture varied recycled coarse aggregates content from 50 % to 100 % to replace the natural coarse aggregates by weight. Tests for fundamental properties as a cement concrete pavement were conducted before and after hardening of the concrete.

RESULTS : It was found that the variation in the amount of the recycled aggregate affected the compressive and flexural strength development, as well as the chloride ion penetration resistance. As the amount of the recycled aggregate content increased the compressive and flexural strength and the resistance to chloride ion penetration decreased. However, the resistance to freeze-thaw reaction was affected significantly. In addition, the gradation of the aggregate became worse and hence so did the coarseness factor as the recycled aggregate amount increased.

CONCLUSIONS : The fundamental properties of the concrete with recycled aggregate does not seem to be appropriate when the recycled aggregate quality is not guaranteed up to a some level and its replacement ratio is over 50%. The optimized gradation of the aggregates should also be sought when the recycled aggregate is used for the cement concrete pavement materials.

Keywords

cement concrete pavement, recycled aggregate, optimized aggregate gradation, optimum coarseness factor

Corresponding Author : Cheolwoo Park, Professor
Department of Civil Engineering, Kangwon National University,
346 Choongang-ro, Samcheok-si, Gangwon-do, 24341, Korea
Tel : +82.33.570.6518 Fax : +82.33.570.6517
E-mail : tigerpark@kangwon.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Oct. 26, 2016 Revised Dec. 01, 2016 Accepted Dec. 01, 2016

1. 서론

1.1. 연구배경 및 목적

20세기 후반부터 나타나기 시작한 지구 온난화 현상으로 전 세계적으로 기상이변이 빈번히 발생하고 있는 가운데, 환경보존에 대한 인식이 갈수록 증대됨에 따라 환경보존 및 천연자원의 보존에 대한 중요성이 심각하게 대두되고 있으며, 환경 규제 역시 강화되고 있는 실

정이다(Do-Heun Lee et al., 2007).

우리나라는 지난 수십 년 동안 경제발전과 더불어 건설산업 역시 급격한 변화를 이루어왔다. 이와 같은 건설산업의 성장의 이면에는 다양한 문제점을 동반하고 있다. 주거환경 개선을 위한 재건축, 재개발 등의 건설공사 증가는 건설폐기물 발생량 증가에 따른 건설폐기물 처리장의 부족과 활발한 건설공사에 따른 천연골재의

부족이 사회적 문제를 야기시키고 있다(Ministry of Environment, 2011).

건설분야에서의 골재는 콘크리트 및 아스팔트 생산에 많은 부분을 차지할 뿐만 아니라, 성토 및 복토 등 매우 광범위하게 사용되고 있는 필수적인 건설재료이다. 하지만 외국에 비해 국토면적이 상대적으로 작은 우리나라는 골재채취가 가능한 지역이 한정되어 있어 그 양 또한 제한적이라 할 수 있다. 우리나라에서는 『골재채취법』 제5조(골재수급기본계획)에 의거하여 국토교통부장관은 5년마다 골재수급기본계획을 수립하고 시행하고 있다. 2008년 제4차 골재수급기본계획의 골재 부존량 조사 결과에 따르면, 국내 골재 부존량은 총 263억 m^3 이며 이 중 개발 가능량은 약 155억 m^3 수준으로 추정되었다(MOLTMA, 2008). 이는 연평균 약 1.1억 m^3 의 골재가 건설시장에서 소비될 것으로 전망하여 140여 년간 사용가능한 규모이다. 하지만 2014년 제5차 골재수급기본계획의 골재 부존량 검토 결과에 따르면, 2014년 이후 개발 가능한 골재 부존량은 146억 m^3 으로 추산되었으며, 매년 허가 및 신고 채취로 공급되는 골재량이 약 2억 m^3 수준임을 고려할 경우 향후 70여 년간 사용할 수 있는 규모이다(MOLIT, 2014). 또한 2008년의 조사결과에 비하여 2014년의 조사결과에서 약 0.9억 m^3 이 증가한 골재 소비량의 추산치를 나타내었다. 이러한 경향으로 보았을 때, 천연골재의 고갈 시기는 향후 70년 이내로 앞당겨질 수 있다.

정부에서는 향후 발생가능한 골재수급난을 예방하고, 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 건설공사 수행과정에서 발생한 건설폐기물을 친환경적으로 적정처리하고, 재활용을 촉진하여 국가자원의 효율적인 이용은 물론 국민경제의 발전과 공공복리에 기여하기 위하여 2003년 『건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률(이하 “건폐법”)』이 제정된 바 있다. 또한 건폐법 제8조에서 환경부장관은 건설폐기물의 재활용을 위한 기본계획을 수립토록 규정함에 따라, 2012년 환경부에서는 “제2차 건설폐기물 재활용 기본계획”을 마련하였다. 이 기본계획에 따르면 2004년 건설폐기물 발생량은 총 발생 폐기물의 48.9%를 차지하고 있으며, 2006년 이후 계속적으로 50% 이상을 상회하는 수준의 건설폐기물이 발생하는 것으로 보고하고 있다. 또한 2009년에 발생한 건설폐기물은 전체 발생 폐기물의 51.2%를 차지하며, 매년 증가하는 추세를 보이고 있다. Fig. 1은 2004년부터 2009년까지의 폐기물 발생량 변화추이를 나타내고 있다.

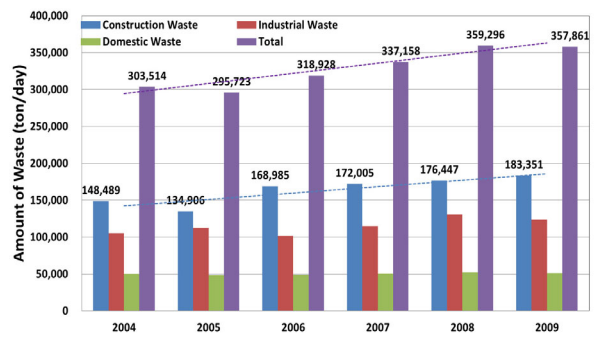


Fig. 1 Change in Amount of Waste

나날이 발생량이 증가하는 건설폐기물을 통해 생산할 수 있는 순환골재를 활용하는 방법이 천연골재의 고갈 시기를 늦출 수 있으며, 정부에서도 이를 인지하고 국토부와 환경부에서 2010년 6월 순환골재 의무사용을 공동 고시하여 순환골재의 활용을 적극적으로 권장하고 있다. 순환골재를 재활용함으로써 천연골재 고갈을 지연시키는 적합한 대체자원으로 인식되고 있는 실정이다(Bae, Jong-Min and Kim, Young-Su, 2010).

국내·외적으로 많은 연구가 진행되었음에도 불구하고 순환골재가 천연골재의 동등한 용도로 사용되지 못하는 이유는 구조적 콘크리트에 사용할 수 있는 순환골재의 품질관리가 미흡하며, 건설분야에서 콘크리트의 품질확보가 상당히 중요한 부분이나, 국내의 순환골재 개발 기술이 아직까지는 천연골재를 대체할만한 수준에 이르지 못하기 때문이다. 이러한 순환골재의 의무사용은 도로 보조기층이나 뒷채움재로 활용하는 것이 대부분이며, 순환골재의 적용 구조물 및 사용량 역시 제한적이라 할 수 있다(Bae, Jong-Min and Kim, Young-Su, 2010). 또한 철근 부착강도 실험을 통하여 순환골재의 치환율이 증가함에 따라 부착강도는 감소하는 경향을 나타내었으며(Kim Hyun-Ho et al., 2005), 순환골재를 사용한 콘크리트는 일반콘크리트에 비해 블리딩이 증가하고 슬럼프가 감소하는 현상을 나타내었으며, 이는 높은 흡수율에 기인한 것으로 추정하고 있다고 보고하고 있다(Choi, Jin Sung et al., 1993).

이와 같이 순환골재를 천연골재의 대체골재로 활용하여 도로포장과 같이 구조적 역할을 할 수 있는 콘크리트 구조물에 적용하여야 한다. 이를 위해서 우선적으로 순환골재의 품질관리가 철저히 이루어져야 한다. 이러한 순환골재를 활용하여 포장용 콘크리트에 적용함으로써 포장용 콘크리트의 실험적 연구를 바탕으로 순환골재가 천연골재를 대체할 수 있는 가장 적합한 대체자원이라는 것을 규명하여 순환골재의 고부가가치 재활용 골재

로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 순환골재를 활용한 포장용 콘크리트의 개발을 위한 실험적 연구의 일환으로, 순환골재의 치환에 따른 경화 전·후의 역학적 특성 및 내구 특성을 분석하고자 한다. 또한 고강도 및 고내구성을 확보할 수 있는 최적배합 도출을 위해 골재의 최적입도(Optimized Aggregate Gradation, OAG)를 분석하고자 한다.

2. 사용재료 및 배합

2.1. 사용재료

2.1.1. 시멘트

본 연구에서는 국내 S사에서 생산하는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다. Table 1과 Table 2는 사용시멘트의 물리적, 화학적 특성을 나타내고 있다.

Table 1. Physical Properties of Cement

Specific gravity	Fineness (cm ² /g)	Stability (%)	Setting time (min.)		Compressive strength(MPa)		
			Initial setting time	Final setting time	3 days	7 days	28 days
3.15	3,400	0.1	230	410	23	31	40

Table 2. Chemical Compositions of Cement

SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Ig-loss (%)
21.95	2.81	60.12	3.32	2.11	6.59	2.58

2.1.2. 골재

본 연구에서는 강원도 삼척 인근의 골재원에서 채취한 굵은골재 최대치수 25mm 및 잔골재를 사용하였으며, 물리적 특성은 Table 3 및 Table 4와 같다.

Table 3. Physical Properties of Coarse Aggregate

Dmax	Specific gravity	Absorption(%)	Fineness modulus
25mm	2.78	0.45	6.8

Table 4. Physical Properties of Fine Aggregate

Specific gravity	Absorption(%)	Fineness modulus
2.66	0.55	2.67

또한 본 연구에서 사용한 순환골재는 발생된 건설폐기물을 재활용하여 생산한 순환굵은골재 25mm 및 순환잔골재를 사용하였다. 사용 순환골재는 특수 개발된

기계장비의 세척과정을 통하여 이물질을 제거하였다. 사용 순환골재의 물리적 특성은 Table 5 및 Table 6과 같다.

Table 5. Physical Properties of Recycled Coarse Aggregate

Dmax	Specific gravity	Absorption (%)	Fineness modulus	Percentage of abrasion(%)
25mm	2.44	4.99	7.10	34.94

Table 6. Physical Properties of Recycled Fine Aggregate

Specific gravity	Absorption(%)	Fineness modulus
2.43	5.89	3.38

2.1.3. 공기연행제

본 연구에는 D사에서 생산하는 공기연행제를 사용하였다. 주성분은 VINSOL계로 콘크리트 도로 및 활주로, 동해를 쉽게 받는 구조물, 입도가 불량한 골재 사용시, 레미콘 및 일반 건설현장에서 사용되는 공기연행제를 사용하였다(Choi, Woo Hyeon et al., 2012).

공기연행제의 특성으로는 콘크리트의 내구성 증진과 단위수량 감소 및 워커빌리티 증대, 재료분리 및 건조수축 감소의 효과를 발휘하는 것으로 알려져 있다(Choi, Woo Hyeon et al., 2012).

2.1.4. 고성능 AE 감수제

본 연구에서는 D사에서 생산하는 폴리카르본산계 고성능 AE 감수제를 사용하였으며, 순환골재 사용으로 인하여 콘크리트의 건조수축에 의한 균열, slump loss 등과 같은 문제점이 발생할 수 있어 그에 맞는 고성능 AE 감수제를 사용하였다.

2.2. 실험배합

본 연구에서는 순환골재를 혼입하지 않은 Plain 변수를 포함하여 순환골재를 50%에서 100%까지 10%씩 증가시켜 중량 치환한 변수에 대하여 배합을 수행하였다. 또한 본 연구에서 사용한 배합표는 한국도로공사에서 제시하는 시멘트 콘크리트 설계기준 배합비 개정(안)에 따라 배합설계를 진행하였다.

또한 도로공사 표준시방서(2015)에 의거하여 목표 슬럼프 10~60mm 이하, 목표 공기량은 5.5±1.5%로 설정하였다. Table 7은 본 연구에 사용된 배합을 나타내고 있다.

Table 7. Mix Proportion

Variables	W/C	S/a(%)	Unit weight(kg/m ³)							
			W	C	N.F.A. ¹⁾	R.F.A. ¹⁾	N.C.A. ¹⁾	R.C.A. ¹⁾	AEA ²⁾	HRWR ²⁾
R0(Plain)	0.43	36	150.0	350.0	602.64	-	1075.77	-	0.07	1.05
R50					301.32	301.32	537.89	537.89		
R60					241.06	361.58	430.31	645.46		
R70					180.79	421.85	322.73	753.04		
R80					120.53	482.11	215.15	860.62		
R90					60.26	542.38	107.58	968.19		
R100					-	602.64	-	1075.77		

1) N.F.A. : Natural Fine Aggregate, R.F.A. : Recycled Fine Aggregate, N.C.A. : Natural Coarse Aggregate, R.C.A. : Recycled Coarse Aggregate
 2) AEA : Air Entraining Agent, HRWR : High Range Water-Reducing Admixtures

3. 실험방법 및 내용

3.1. 경화 전 콘크리트 특성

본 연구에서는 경화 전 콘크리트 특성으로 슬럼프, 공기량 및 단위용적질량 실험을 수행하였다. 슬럼프의 경우, 각 변수별 배합에 대하여 경화 전 콘크리트 특성으로 워커빌리티 측정을 위하여 KS F 2402의 콘크리트의 슬럼프 시험 방법에 의거하여 수행하였다. 도로포장 시공 시 성형성을 유지하기 위하여 슬럼프는 10~60mm 이하로 규정하고 있다.

또한 공기량의 경우, 도로공사 표준시방서(2015)에서 제시하고 있는 목표 공기량 $5.5 \pm 1.5\%$ 를 만족하기 위하여 KS F 2421에 따라 각 변수별 공기량을 측정하였다.

단위용적질량의 경우, KS F 2409의 실험방법에 의거하여 각 변수별 단위용적질량을 측정하였다.

3.2. 경화 후 콘크리트 특성

3.2.1. 압축강도

본 연구에서는 각 변수별 압축강도 측정을 위하여 KS F 2403에 의거하여 $\varnothing 100 \times 200$ mm의 실린더 시험체를 제작하였다. 제작된 시험체는 재령 7일 및 28일에 KS F 2405에 따라 변수별 각각 3개씩 압축강도를 측정하였다. 또한 상대습도 50% 및 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 를 유지하는 항온항습실 내에서 습윤양생을 실시하였다.

3.2.2. 쪼갬인장강도

쪼갬인장강도는 KS F 2423에 의거하여 수행하였으며, 압축강도 실험과 마찬가지로 재령 7일 및 28일에 각 변수별 3개씩 쪼갬인장강도를 측정하였다. 사용된 시험체는 압축강도 시험체와 동일하게 KS F 2403에 의거하여 제작된 실린더 시험체를 활용하였다.

3.2.3. 휨강도

본 연구에서는 도로포장의 성능 점검 기준 중 하나인 휨강도를 측정하였다. 휨강도 시험체는 KS F 2403에 의거하여 $100 \times 100 \times 400$ mm의 각주형 시험체를 활용하였으며, KS F 2408에 따라 4점 재하 시험방법을 통하여 재령 7일 및 28일에 휨강도를 측정하였다. 고속도로 공사 전문시방서(2012)에서는 포장 콘크리트의 휨강도 기준을 재령 28일에 4.5MPa 이상으로 설정하고 있다.

3.2.4. 동결융해 저항성

순환골재를 활용한 콘크리트의 동결융해 저항성 실험은 실내 실험으로 급속 반복 동결 및 융해를 통하여 콘크리트의 내동해성을 평가하였다. 각주형 시험체를 각 변수별 2개씩 제작하여 14일간 양생을 진행하였으며, KS F 2456의 Type B 기준 급속 동결 후 수중 융해 시험 방법에 따라 동결융해에 대한 저항성을 분석하였다. 또한 KS F 2337에 따라 매 30Cycle마다 300Cycle까지 동탄성계수를 측정하여 상대동탄성계수를 측정하였다.

3.2.5. 염소이온침투 저항성(ASTM C 1202)

본 연구에서는 순환골재를 활용한 시멘트콘크리트의 염소이온 침투에 대한 저항성을 평가하였다. 콘크리트 염소이온침투 저항성 시험은 ASTM C 1202 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration에 의거하여 실시하였으며, 각 배합변수별 $\varnothing 100 \times 200$ mm 시험용 공시체를 제작하여 재령 28일에 실험을 진행하였다. 실린더 공시체를 콘크리트 시료절단기를 이용하여 두께 50 ± 3 mm로 절단하고, 수분 증발을 억제하기 위하여 절단된 시편 테두리에 콘크리트 보호용 도막제를 코팅하

였다. 도막제 코팅 후, 확산셀을 구성하여 실험을 실시하였다. 시험 시 전원은 60V의 직류를 $\pm 0.1V$ 로 안정적으로 공급할 수 있어야 하며, 전류는 저항체를 회로에 연결하여 전압을 측정할 수 있다. 확산셀에 들어가는 전해질 용액은 (-)전극에 3.0%의 NaCl 용액과 (+)전극에 0.3mol의 NaOH 용액이다. (-), (+) 확산셀에 용액을 채우고, 30분마다 저항에 걸리는 전압을 6시간 동안 측정하여 기록하며 이 때 전압은 0.1mV까지 측정 가능해야 한다. Table 8은 염소이온침투 저항성 평가기준을 나타내고 있다.

Table 8. Chloride Ion Penetrability Based on Charge Passed

Type	Charge passed (coulombs)	Chloride ion penetrability
I	> 4,000	High
II	2,000~4,000	Moderate
III	1,000~2,000	Low
IV	100~1,000	Very low
V	<100	Negligible

3.3. 최적골재입도 (Optimized Aggregate Gradation)

최근 최적골재입도 개념을 활용하여 콘크리트의 경제적 배합설계 연구 및 도입이 증가하는 추세이다. 최적골재입도 분석을 통하여 단위결합재량과 AE제의 감소 및 초기 비용의 감소, 단위수량의 감소로 인한 수축에 의해 발생하는 균열 저감 효과의 장점을 가질 수 있으며, 시공성 및 내구성 증진효과를 증진시킬 수 있다. 최적골재입도의 적정성을 평가하는 방법으로는 Workability-Coarseness Factor Chart, Percentage Combined Aggregate Retained Chart 및 0.45 Power Chart의 3가지 방법이 대표적이다. 본 연구에서는 순환골재 치환 콘크리트의 굵은골재와 잔골재의 합성입도를 Workability-Coarseness Factor Chart를 통하여 검토하고, 이에 따른 최적입도를 분석하고자 한다(Jeon Sung Il et al., 2012).

4. 실험결과 및 분석

4.1. 경화 전 콘크리트 특성

4.1.1. 워커빌리티

Fig. 2는 각 변수별 배합설계에 대한 슬럼프 실험결과를 비교하고 있다. 순환골재를 치환한 도로포장용 콘크리트의 슬럼프 실험결과, 모든 변수에서 도로공사 표

준시방서(2015)에서 제시하는 슬럼프 10~60mm를 모두 만족하는 것으로 분석되었다. 순환골재 치환에 따라 순환골재의 부착모르타르가 배합수를 흡수하여 슬럼프로스가 발생할 것으로 예상하였으나, Plain 변수를 비롯하여 순환골재 치환에 따른 슬럼프 차이는 미미한 수준으로 분석되었다. 이는 고성능 AE 감수제의 사용으로 슬럼프로스에 대한 영향이 적은 것을 알 수 있었다.

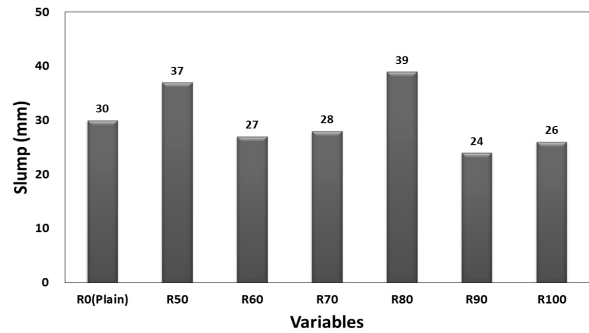


Fig. 2 Test Results of Slump

4.1.2. 공기량

Fig. 3은 각 변수별 배합설계에 대한 공기량 실험결과를 비교하고 있다. 공기량 실험결과, Plain 변수를 포함한 모든 변수에서 6% 전후의 공기량을 확보함과 동시에 목표 공기량인 $5.5 \pm 1.5\%$ 를 모두 만족하는 것으로 분석되었다. 이는 공기연행제 및 고성능 AE 감수제 사용으로 인하여 순환골재 치환에 따른 공기량의 차이는 없는 것을 알 수 있었다.

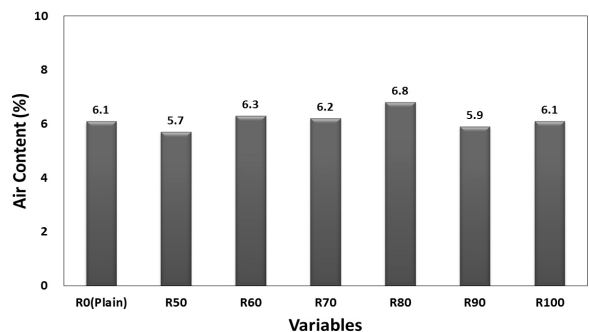


Fig. 3 Test Results of Air Content

4.1.3. 단위용적질량

Fig. 4는 각 변수별 배합설계에 대한 단위용적질량 실험결과를 비교하고 있다. 단위용적질량 실험결과, 모든 변수에서 $2,200\text{kg}/\text{m}^3$ 전후의 값을 나타내었으며, 이는 일반적으로 알고 있는 무근콘크리트의 단위용적질량인 $2,300\text{kg}/\text{m}^3$ 과 비슷한 수준의 단위용적질량 값을 나타내었다.

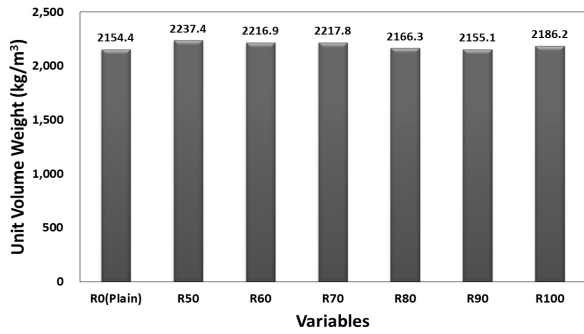


Fig. 4 Test Results of Unit Volume Weight

4.2. 경화 후 콘크리트 특성

4.2.1. 압축강도

Fig. 5는 각 변수별 배합설계에 대한 압축강도 실험 결과를 비교하고 있다. 압축강도 실험결과, 순환골재를 치환하지 않은 Plain 변수의 재령 7일 압축강도는 22.1MPa, 재령 28일 압축강도는 32.8MPa 수준으로 높은 압축강도 값을 나타내었다. 또한 순환골재 치환율 증가에 따른 압축강도는 재령에 관계없이 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 순환골재 표면의 부착모르타르가 영향을 미친 것으로 사료되며, 부착모르타르로 인하여 골재와 모르타르 사이의 계면특성이 저하되기 때문으로 판단된다.

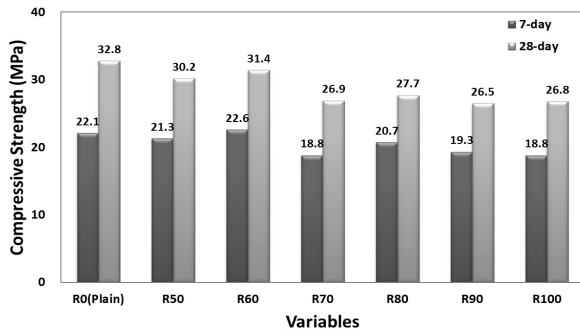


Fig. 5 Test Results of Compressive Strength

4.2.2. 쪼갬인장강도

Fig. 6은 각 변수별 배합설계에 대한 쪼갬인장강도 실험결과를 비교하고 있다. 쪼갬인장강도 실험결과, 순환골재를 치환하지 않은 Plain 변수의 재령 7일 쪼갬인장강도는 2.0MPa, 재령 28일 쪼갬인장강도는 3.2MPa 수준으로 분석되었다. 쪼갬인장강도 결과 역시 압축강도와 마찬가지로 순환골재의 치환율이 증가할수록 강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 순환골재의 치환율이 증가할수록 재령 차이에 따른 쪼갬인장강도의 차이는 크지 않은 것을 알 수 있었다. 이는 콘크리트 배합에 있어

천연골재에 비하여 이물질 제거 순환골재가 상대적으로 많은 비중을 차지하여 모르타르와 순환골재 계면에서의 역학적 성능 저하에 기인한 것으로 판단된다.

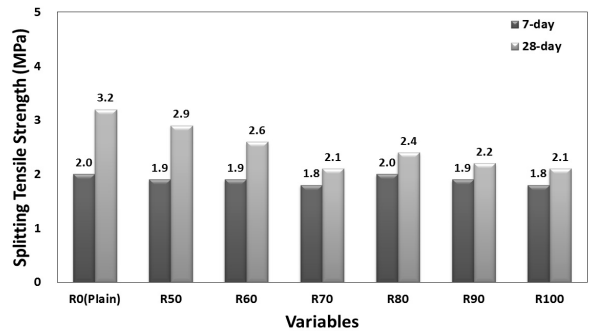


Fig. 6 Test Results of Splitting Tensile Strength

4.2.3. 휨강도

Fig. 7은 각 변수별 배합설계에 대한 휨강도 실험결과를 비교하고 있다. 휨강도 실험결과, 순환골재를 치환하지 않은 Plain 변수의 재령 7일 휨강도는 3.9MPa, 재령 28일 휨강도는 4.8MPa 수준으로 분석되었다. 또한 재령 7일에서 순환골재 치환에 따른 휨강도의 차이는 미미한 수준으로 분석되었으며, 재령 28일에서의 휨강도는 순환골재의 치환율이 증가할수록 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 순환골재 치환 50% 및 60% 변수에서는 고속도로공사 전문시방서(2012)에서 제시하는 재령 28일에 휨강도 4.5MPa를 만족하는 것으로 분석되었다.

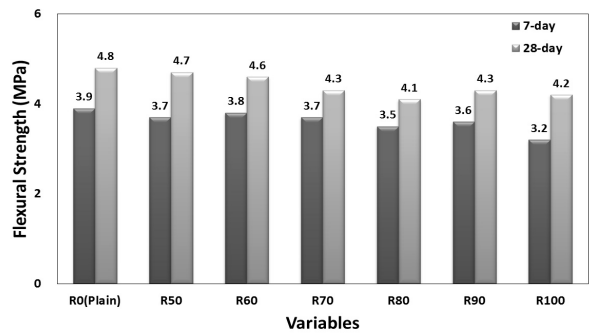


Fig. 7 Test Results of Flexural Strength

4.2.4. 동결융해 저항성

Fig. 8은 각 변수별 배합설계에 대한 동결융해 저항성 실험결과를 비교하고 있다. 동결융해 저항성 실험결과, 순환골재를 치환하지 않은 Plain 변수를 포함한 모든 변수에서 300Cycle에 상대동탄성계수가 90% 이상을 상회하는 수준으로 분석되었다. 이는 공기량 실험결과에서 나타난 바와 같이 공기연행제 및 고성능 AE 감

수제의 사용으로 인하여 콘크리트 내의 연행공기의 충분한 확보를 통하여 동결융해에 의한 저항성이 증대된 것으로 판단된다.

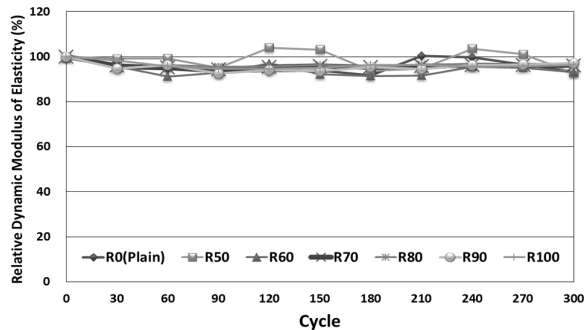


Fig. 8 Test Results of Freeze-Thaw Resistance

4.2.5. 염소이온침투 저항성

Fig. 9는 각 변수별 염소이온침투 저항성을 비교하고 있다. 염소이온침투 저항성 실험결과, Plain 변수가 2,570 쿨롱의 가장 낮은 통과전하량 값을 나타내었다. 순환골재 치환 50%에서 80%를 치환한 변수에서는 2,000 쿨롱 이상, 4,000 쿨롱 이하의 통과전하량 값을 나타내어 ASTM C 1202에서 제시하고 있는 염소이온 침투성이 “보통”으로 분석되었다. 하지만 순환골재를 60% 초과하여 치환한 변수인 R70 및 R80 변수에서 3,000 이상의 다소 높은 통과전하량 값을 나타낸 것을 알 수 있었다. 또한 순환골재 치환을 90% 이상 치환한 R90 및 R100 변수의 경우, 4,000 쿨롱 이상의 통과전하량 값을 나타내어 염소이온 침투성이 “높은”으로 분석되었다.

염소이온침투 저항성 실험결과를 바탕으로 순환골재 치환율이 증가함에 따라 염소이온 침투에 대한 저항성은 감소하는 경향을 나타내었으며, 이는 순환골재 치환율 증가에 따른 압축강도 감소와도 관련이 있는 것으로 판단된다. 또한 순환골재의 치환이 콘크리트 내구성에 부정적인 영향을 미치는 것으로 사료되며, 콘크리트

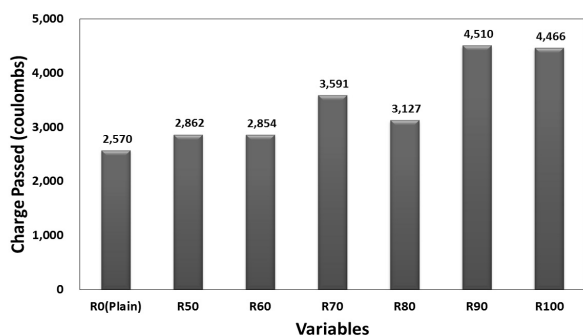


Fig. 9 Test Results of Chloride Ion Penetration Resistance

의 내구성을 보다 긍정적으로 도출하기 위해서는 다양한 배합설계와 그에 따른 추가적인 내구성 실험이 동반되어야 한다고 판단된다.

4.3. 골재최적입도

Fig. 10은 각 변수별 사용한 골재의 Coarseness Factor Chart를 비교하고 있다. Coarseness Factor Chart는 총 5가지 구역으로 구분되며 R0(Plain) 변수의 경우, Zone II 구역에 위치하는 것을 알 수 있었다. 반면 순환골재 치환율이 증가함에 따라 Chart Box에 포인트가 좌측으로 이동하는 경향을 나타내었다. 이는 순환골재 치환율이 증가함에 따라 최적입도에서 점점 멀어진다고 판단할 수 있다. 또한 순환골재 치환율 증가와 함께 골재의 거칠기 정도가 Rocky한 형태로 변화하는 것을 알 수 있었다. 이는 실제 실험에 사용한 순환골재의 입도가 고르지 않으며, 굵은입자가 많은 형태의 골재를 사용한 것에 기인한 것으로 판단된다. 앞선 실내 실험결과와 비교할 경우, 점점 더 골재의 입도가 Gap Graded로 편중된 변수의 경우가 부정적인 결과를 도출한 것을 알 수 있었다.

이와 같은 결과를 바탕으로 Coarseness Factor Chart 분석을 통하여 사용 골재의 입도분포를 조절하여 보다 양질의 콘크리트를 생산할 수 있는 기반으로 활용 가능할 것으로 판단된다. 또한 Coarseness Factor Chart뿐만 아니라 최적골재입도의 적정성을 평가할 수 있는 Percent Combined Aggregate Retained Chart 및 0.45 Power Chart를 활용하여 보다 경제적인 콘크리트 배합설계를 도출할 수 있는 것으로 기대한다.

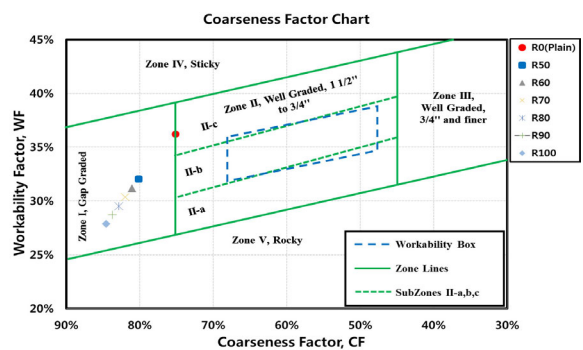


Fig. 10 Coarseness Factor Chart for Combined Aggregate

5. 결론

본 연구에서는 순환골재를 활용한 포장용 콘크리트 개발의 일환으로 순환골재 치환 포장용 콘크리트의 최

적배합 도출을 위한 실험적 연구를 수행하였다. 이에 따른 결론은 다음과 같다.

1. 경화 전 특성 실험결과, 순환골재 치환율 변화에 따른 슬럼프 및 공기량은 도로공사 표준시방서에서 제시하는 목표치는 모두 만족하는 것을 알 수 있었다.
2. 압축강도 실험결과, Plain 변수를 비롯한 순환골재 치환율 50% 및 60% 변수에서는 30MPa를 상회하는 수준의 우수한 압축강도 값을 나타내었으며, 이는 조깅인장강도 실험결과에서도 순환골재 치환율 60%까지의 인장강도 값이 우수한 것을 알 수 있었다.
3. 휨강도 실험결과, 순환골재 치환율 60%까지 도로포장용 시멘트콘크리트 기준인 재령 28일에 4.5MPa를 만족하는 것을 알 수 있었다. 순환골재를 70% 이상 치환한 변수에서는 순환골재 사용이 증가함에 따라 강도감소의 폭이 크게 나타났으며, 이는 압축강도 및 인장강도 결과에서도 비슷한 경향의 수준으로 나타난 것을 알 수 있었다.
4. 이와 같이 순환골재 치환율 증가에 따른 강도의 감소 요인은 양질의 순환골재가 아닌 부착 모르타르를 제거하지 않은 저품질의 순환골재의 사용으로 인하여 시멘트 모르타르와 골재 계면에서의 부착력 저하가 크게 작용한 것으로 판단된다.
5. 내구성 실험결과, 동결융해 저항성의 경우 모든 변수에서 90%를 상회하는 수준의 우수한 결과를 나타내었다. 이는 혼화제의 사용으로 인하여 고르게 형성된 연행공기와 적정 수준의 공기량 확보가 동결융해 저항성을 증진시킨 것을 알 수 있었다.
6. 순환골재 치환율에 따른 염소이온침투 저항성의 경우, 치환율이 증가함에 따라 염소이온침투 저항성이 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 저품질의 순환골재 사용으로 인하여 골재 자체의 비중이 낮고, 흡수율이 높은 것이 가장 큰 원인으로 판단된다.
7. 저품질의 순환골재 사용에 따른 경제성 콘크리트 배합설계를 위하여 골재최적입도를 분석한 결과, 순환골재 치환이 골재최적입도 형성에 적합하지 않은 것을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 굵은골재 및 잔골재의 혼합 비율을 도출하여 콘크리트 배합설계에 적용함이 바람직할 것으로 판단된다.
8. 도로포장을 포함한 구조용 콘크리트에 순환골재의 저변 확대를 위해서는 추가적인 역학적, 내구실험을 통하여 천연골재를 대체할 수 있는 순환골재의 경제

적 사용량의 검토가 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

This study was supported by 2016 Research Grant from Kangwon National University(No. 620160077) and was supported by a grant (15RDRP-B066780-03) from Regional Development Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea.

REFERENCES

- Bae, Jong-Min and Kim, Young-Su (2010), "A Study on the Chloride Diffusivity of Recycled Aggregate Concrete", Journal of the Korea Institute of Building Construction, Vol. 10, No. 1, pp. 147-153.
- Bang, Jin Woo, Kim, Keon Yeol, Lee, Jang Yong, Kim, Seung Won and Park, Cheol Woo (2015), "Freeze-Thaw Resistance Properties of Paving Concrete Containing Variable Quantity of Debrid Removal Recycled Aggregates", Proceedings of 2015 Fall Conference of Korean Recycled Construction Resource Institute, pp. 112-113.
- Choi, Jin Sung, Yoon, Byoung Soo, Lim, Jung Soo, Kim, Jin Man, Nam, Sang Ill and Kim, Moo Han (1993), "An Experimental Study on the Replacement Proportion of Recycled Aggregate Effecting on the Engineering", Proceedings of 1993 Spring Conference of Korea Concrete Institute, Vol. 5, No. 1, pp. 16-21.
- Choi, Woo Hyeon, Park, Cheol Woo, Jung Won Kyong, and Kim, Ki-Heon (2012), "Fundamental Properties of Limestone Powder Added Cement Environment-friendly Concrete for Concrete Pavement," , International Journal of Highway Engineering, Vol 14, No. 4, pp. 37-49.
- Do-Heun Lee, Hyo-Jin Kim, Myoung-Hoon Jun and Jong-Suk Jung (2007), "The State of the Art Report on Technical Development of Recycled Aggregates for Concrete", Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol. 19, No. 2, pp. 34-41.
- Jangyong Lee, Keonyeol Kim, Suman Uprety, Seungwon Kim and Cheolwoo Park (2015), "Flexural Strength of Pavement Concrete using Pure Recycled Aggregate", Proceedings of 17th Conference of Korean Society of Road Engineering, pp. 65.
- Jangyong Lee, Seungwon Kim and Cheolwoo Park (2016), "Chloride Ions Penetration Resistance of Pavement Concrete with Recycled Aggregate", Proceedings of 18th Conference of Korean Society of Road Engineering, pp. 20.
- Jeon Sung Il, Son Hyeon Jang, An Ji Hwan and Kwan Soo Ahn (2012), "Study of Optimized Aggregate Gradation in Concrete Mixtures", Proceedings of 2012 Spring Conference of Korea Concrete Institute, Vol. 24, No. 1, pp. 53-54.
- Kim, Namho and Yang, Seung Cheol (2012), "Evaluation of Impurity Content Criteria of Recycled Aggregate for Lean Concrete Base", International Journal of Highway Engineering, Vol 14, No. 3, pp. 69-76.

- Kim, Hyun-Ho, Yang, Keun-Hyrok, Kang, Kyung-In, Jung, Sang-Jin and Chung, Heon-Soo (2005), "An Experimental Study on the Relationship Between Physical Property of Recycled Aggregates and an Amount of Mortar Attached to the Original Aggregate", Proceedings of 2005 Spring Conference of Korea Concrete Institute, Vol. 17, No. 1, pp. 141-144.
- Kim, Seong-Kwon, Hong, Young-Ho, Park, Jeong-Wook and Yun, Kyong-Ku (2012), "Optimized Concrete Mixture for Airport Pavement considered Optimized Aggregate Gradation", Proceedings of 2012 Fall Conference of Korea Concrete Institute, Vol. 24, No. 2, pp. 811-812.
- Kim, Seung Won, Lee, Jang Yong, Kim, Yong Jae and Park, Cheol Woo (2016), "Service Life Prediction of Concrete using Pure Recycled Aggregate", Proceedings of 2016 Spring Conference of Korea Concrete Institute, Vol. 28, No. 1, pp. 357-358.
- Korea Expressway Corporation (2012), "Expressway Construction Guide Specification (고속도로공사 전문시방서)".
- Ministry of Environmental (ME, 2011), "The Second Study of Basic Plan for Construction Waste Recycle (제2차 건설폐기물 재활용 기본계획 수립을 위한 연구)".
- Ministry of Land, Infrastructure and Transportation (MOLIT, 2014), "The 5th Basic Plan of Aggregate Demand and Supply (제5차 골재수급기본계획)".
- Ministry of Land, Infrastructure and Transportation (MOLIT, 2015), "Road Construction Standard Specification (도로공사표준시방서)".
- Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (MOLTMA, 2008), "The 4th Basic Plan of Aggregate Demand and Supply (제4차 골재수급기본계획)".
- Sea-Hyun Lee and Jong-Woo Shim (2010), "Enactment Provision of Recycled Aggregate Concrete", Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol. 22, No. 1, pp. 33-35.
- Sim, Jongsung, Park, Cheolwoo, Park, Sung Jae and Kim, Yong Jae (2006), "Characterization of Compressive Strength and Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete with Respect to Replacement Ratios", Journal of the Korean Society of Civil Engineering, Vol. 26, No. 1, pp. 213-218.
- Pedro Nel Quiroga and David W. Fowler (2004), "GUIDELINES FOR PROPORTIONING OPTIMIZED CONCRETE MIXTURES WITH HIGH MICROFINES", INTERNATIONAL CENTER FOR AGGREGATE RESEARCH(The University of Texas at Austin).