

아스팔트순환골재를 이용한 투수성 콘크리트의 역학적 특성

The Mechanical Properties of Porous Concrete using Recycled Asphalt Aggregate

이 동 욱¹ Lee, Dong-Wook 윤 중 만^{2*} Yun, Jung-Mann
김 남 식³ Kim, Nam-Sik 강 영 민⁴ Kang, Young-Min

ABSTRACT

In this study, it is analyzed that mechanical properties and required strength of porous concrete according to the mixing ratio of cement, fine aggregate, and water/cement ratio in order to evaluate mechanical properties of porous concrete using recycled asphalt aggregate. Recycled asphalt aggregates of 13 mm were used without modification of aggregate grading to extend porous concrete application. The water/concrete ratio was poor mix and the range of compressive strength was 18.2 to 19.5 MPa. The average value of permeability showed 8.0E-02 cm/sec.

요 지

본 연구에서는 아스팔트순환골재를 이용한 투수성 콘크리트의 역학적 특성을 알아보기 위하여 투수성 콘크리트의 단위시멘트량, 잔골재 비율, 물시멘트(w/c)비의 혼합을 변화에 따른 역학적 특성과 구조체로서 요구되는 소요강도에 대하여 분석하고자 하였다. 순환골재의 사용성을 높이기 위하여 입도조정 없이 13mm 아스팔트순환골재를 사용하였으며, 물시멘트비는 빈배합이 되도록 결정하였다. 분석결과 압축강도는 18.2~19.5Mpa를 보였으며 투수계수는 평균적으로 8.0E-02cm/sec 값을 나타내었다.

Keywords : Recycled asphalt aggregate, Porous concrete, Compressive strength, Coefficient of permeability

1. 서 론

본 연구의 목적은 최근 건설폐기물의 급증하는 추세에서 폐아스팔트는 단순 재생아스팔트 생산에만 의존해왔던 것을 투수성 콘크리트로 재활용함으로써 환경문제 감소 및 순환골재 재활용범위의 극대화를 이루고 아스팔트순환골재를 이용한 투수성 콘크리트의 기술개발에 있다.

최근 건설폐기물의 발생량은 늘어나는 추이에 있으며 2006년도 건설폐기물 총발생량은 61,679천톤/년으로, 전년도 49,241천톤/년에 비해 약 25.3% 증가하였다. 건설폐

기물 총발생량이 증가함에 따라 건설폐기물 중 큰 구성비를 차지하고 있는 폐콘크리트 발생량의 경우 40,258천톤/년으로, 전년도 28,655천톤/년에 비해 40.5%증가하였다. 특히, 폐아스팔트콘크리트의 경우 7,911천톤/년으로, 전년도 5,615천톤/년에 비해 40.9% 증가 하였으며 매년 40% 이상 증가되고 있는 실정이다(환경부, 2007).

본 연구에서는 이러한 아스팔트순환골재를 재활용하고 친환경적이며 집중호우에 강한 도로건설 필요에 따라 투수성 포장기술 개발이 요구되는 시점에서 아스팔트순환골재를 이용한 투수성콘크리트에 관한 내용을 서술한다.

1 비회원, 제주대학교 토목공학과(해양과환경연구소) 조교수 (Nonmember, Assistant Professor, Dept. of Civil Eng., Jeju National Univ.)

2* 정회원, 안산공과대학 건설정보시스템과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Construction Information System, Ansan College of Technology, E-mail: jmyun@act.ac.kr)

3 비회원, 제주대학교 토목공학과 박사과정 (Nonmember, Doctorate Course, Dept. of Civil Engineering, Jeju National Univ.)

4 비회원, (주)SM기술단 (Nonmember, Assistant Manager, SM Technology Company)

2. 실험의 개요

2.1 공시체 제작

아스팔트순환골재를 이용한 투수성 콘크리트의 일축압축강도 및 투수성실험을 위한 공시체를 제작하였다. 이를 위하여 시멘트와 아스팔트순환골재를 교반기에 함께 넣은 상태에서 건비빔을 행한 후 두 재료가 잘 섞이도록 충분히 교반되었을 때 배합수를 투입한 후 3분간 재차 교반하였다. 이때 생성된 혼합물을 내경(d) 100mm, 높이(h) 200mm 인 원통형 압축강도 실험용 공시체에 시료를 3번에 나누어 각층마다 25회씩 다짐하여 각 재령별(7, 14, 28일)로 공시체를 3개씩 제작하였다. 제작된 공시체는 공기 중에서 수분이 증발되지 않도록 밀봉한 상태에서 48시간이 경과한 후에 탈형하여 소정의 기간 동안 20±2℃에서 습윤양생을 하였다(유승경, 2007).

2.2 실험 장치 및 방법

압축강도 실험은 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 실험 방법)의 실험방법에 따라 제작된 공시체를 습윤양생하여 만능재료시험기로 압축강도를 측정 하였다. 3개의 공시체 평균값을 실험결과로 채택할 하였으며 압축강도 산정식은 식 (1)과 같다.

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

여기서, f_c : 압축강도(MPa)

P : 최대하중(N)

A : 공시체의 단면적(mm²)

표 1. 배합비 설계치 (단위: kg)

단위 골재량(A)	c/a	시멘트 (C)	w/c	물(W)
1337	0.16	214	0.30	64
	0.18	241	0.31	75
	0.20	267	0.32	86
	0.22	294	0.33	97
	0.24	321	0.34	109
	0.26	348	0.35	122
	0.28	374	0.36	135
	0.30	401	0.37	148
	0.32	428	0.38	163
	0.34	468	0.39	183

한편, 정수위투수실험은 상류 측의 수위를 일정하게 유지하고 일정 두께의 시료를 통과하는 침투수량에 의하여 투수계수를 측정하는 실험방법으로 일반적으로 투수성이 작은 흙에 대해서는 침투수량이 작기 때문에 부정확하게 되어 비교적 투수성이 큰 흙에 사용되어진다(이용남, 2008). 본 연구에서는 실내정수위투수실험법을 사용하였고 정수위투수실험 장치는 그림 1과 같은 구조로 되어 있으며, $\Phi 15 \times 10\text{cm}$ 의 투수콘크리트 공시체를 이와 같이 제작한 투수실험기를 이용하여 실험하였으며 투수계수는 Darcy의 법칙(Braja, 2006)에 의해 식 (2)를 이용하여 투수계수를 산정하였다.

$$k = \frac{QL}{Ah(t_2 - t_1)} \quad (2)$$

k : 투수계수(cm/sec)

L : 시료의 높이(cm)

A : 시료의 단면적(cm²)

h : 수두(cm)

Q : ($t_2 - t_1$) 시간내에 월류한 수량(cm³)

또한, 현장투수실험은 현장여건상 변수위투수실험을 행할 것이고 변수위투수실험은 다져진 점토와 같이 투수성이 작은 시료에 대하여 행한다. 그림 2는 현장변수위투수 실험기의 모식도이고 투수계수의 산정은 식 (3)을 이용하여 구한다. 실험방법은 유점토나 실리콘을 시험기 저면에 미리 부착시켜 노면과 접촉면에서의 누수를 방지한 다음 측정이 이루어진다(이용남, 2008).

$$k = 2.3 \frac{aL}{AT} \cdot \log\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (3)$$

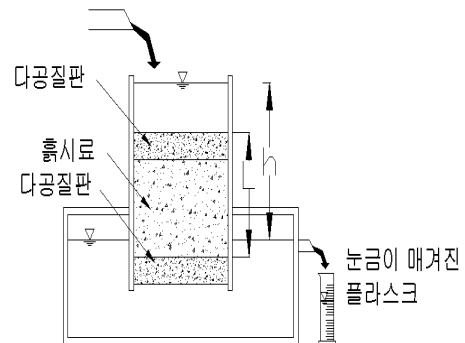


그림 1. 정수위투수실험 장치

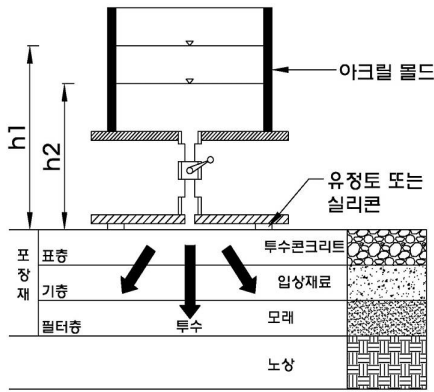


그림 2. 현장 변수위투수시험기의 모식도

- k : 투수계수(cm/sec)
- a : 몰드의 단면적(cm^2)
- L : 투수콘크리트의 두께(cm)
- A : 시료의 단면적(cm^2)
- h_1 : 측정개시수위(cm)
- h_2 : 측정종료수위(cm)
- T : 시험동안측정된 시간(sec)

3. 실험결과

3.1 배합인자별 특성

3.1.1 물시멘트비와 단위시멘트량에 따른 압축강도

아스팔트순환골재를 이용한 투수성 콘크리트의 단위시멘트량과 w/c에 따른 재령별 압축강도를 그림 3과 같이 나타내었다. 단위시멘트량이 증가할수록 투수성 콘크리트의 압축강도는 비례적으로 증가하는 경향을 나타냈으며 단위시멘트량이 20kg/m^3 씩 증가함에 따라 압축강도는 2.6~3.8%정도 상승되었다. 이는 고품분인 시멘트량의 증가로 인한 공극률 감소와 단위체적중량 상승에 따른 것으로 사료된다. 또한 보통콘크리트의 특성 중 압축강도는 w/c가 낮을수록 증가되는 것으로 알려져 있다. 하지만 투수성 콘크리트의 경우는 슬럼프가 거의 없는 빈배합의 형태로 w/c에 따른 압축강도의 특성이 일정한 경향을 나타내기가 매우 어렵다.

3.1.2 공극률에 따른 압축강도

아스팔트순환골재를 이용한 투수성 콘크리트의 공극률에 따른 압축강도를 그림 4와 같이 나타내었다. 일반적으로 잔골재의 비율이 높을수록 단위체적 내의 공기량은 감

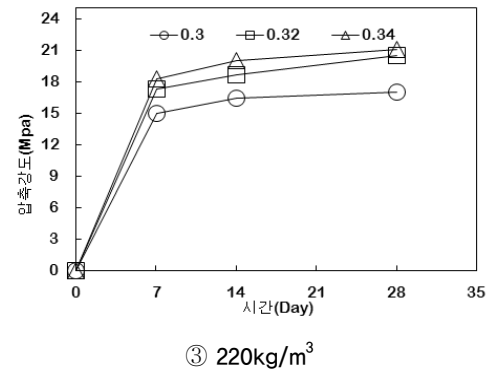
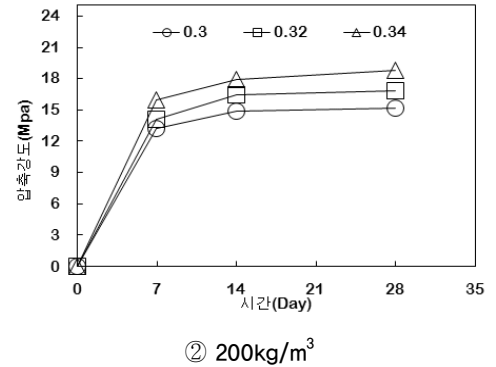
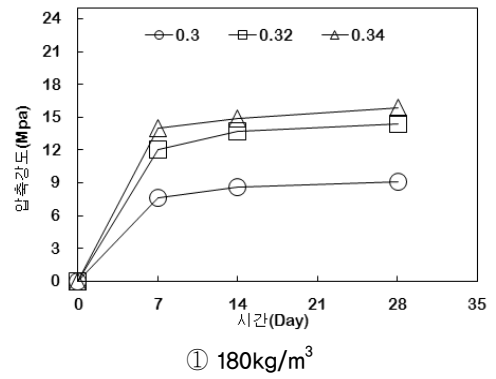


그림 3. w/c와 단위시멘트량에 따른 압축강도

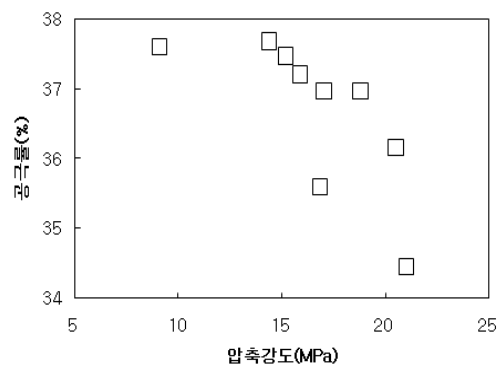


그림 4. 공극률에 따른 압축강도

소되고 고품분이 많아짐에 따라 빈 공간을 채움으로써 단위체적중량이 증가하기 때문에 압축강도의 상승을 예상할

수 있다. 하지만 투수성 콘크리트에서는 잔골재를 제외한 빈배합으로 불규칙한 연속공극을 필요로 함에 따라 투수성 콘크리트의 압축강도는 공극률이 0.48~1.88% 증가할 경우 압축강도는 0.52~1.96MPa정도 감소하는 것으로 나타났다으며 37%이상 공극률의 증가는 곤란하다는 것을 알 수 있다.

3.1.3 공극률과 투수계수

아스팔트순환골재를 이용한 투수성 콘크리트의 공극률에 따른 투수계수를 그림 5와 같이 나타내었다. 공극률이 0.48~1.88% 증가할 경우 투수계수 0.1E-01cm/sec정도의 투수성능이 향상되는 경향을 보였다.

3.2 배합설계

3.2.1 투수계수에 따른 압축강도

그림 6과 같이 투수성 콘크리트의 압축강도는 투수계수에 따라 변화하며 서로 상관관계를 이룬다. 이들의 관계는 식 (4)와 같이 나타내었다.

$$f_{28} = -46.19k + 21.71 \quad (4)$$

$$R^2 = 0.878$$

여기서, f_{28} : 28일 압축강도(MPa)

k : 투수계수(cm/sec)

단위골재량을 기준으로 시멘트비율이 증가함에 따라 w/c를 변화시켰을 때의 압축강도와 투수계수를 실내실험을 통하여 측정하였으며, 이들의 상관관계로부터 소요 28일 압축강도(또는 설계기준강도)에 따른 투수계수를 식 (4)로부터 구할 수 있다.

3.2.2 시멘트골재비와 투수계수의 상관관계

그림 7과 같이 투수성 콘크리트의 투수계수는 단위골재량의 c/a에 따라 변화하며 서로 상관관계를 이룬다. 이들의 관계는 식 (5)와 같이 나타내었다.

$$k = 1.146(c/a) + 0.403 \quad (5)$$

$$R^2 = 0.998$$

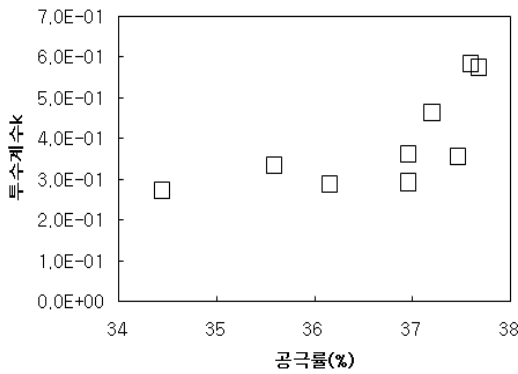


그림 5. 공극률에 따른 압축강도

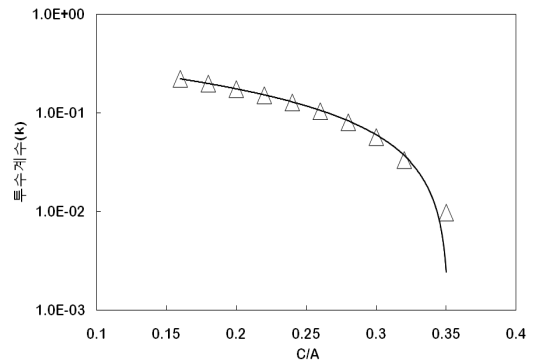


그림 7. c/a와 투수계수의 상관관계

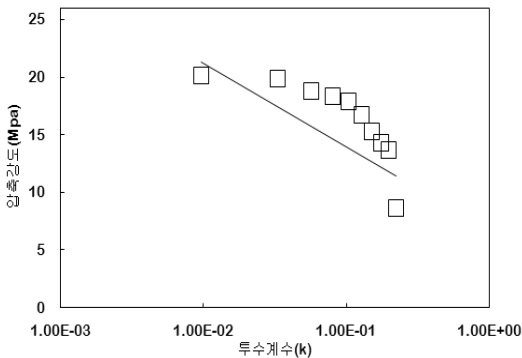


그림 6. 투수계수에 따른 압축강도

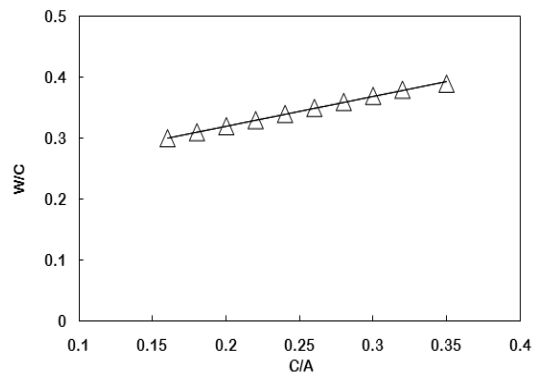


그림 8. w/c와 c/a의 상관관계

여기서, c/a : 시멘트골재비

투수계수가 정해지면 식 (5)로부터 필요한 c/a 를 구할 수 있다.

3.2.3 w/c 와 c/a 와 상관관계

단위골재량을 기준으로 c/a 가 증가함에 따라 w/c 를 변화시켜 플로우 값이 거의 발생하지 않도록 하여 최소한의 유동성만을 확보하였다. 그림 8과 같이 c/a 와 w/c 는 서로 상관관계를 이루며 시멘트골재비가 정해지면 식 (6)으로부터 w/c 를 구할 수 있다.

$$w/c = 0.558(c/a) + 0.209 \quad (6)$$

$$R^2 = 0.990$$

여기서, w/c : 물시멘트비(%)
 c/a : 시멘트골재비

3.2.4 배합설계 과정

소요 28일 압축강도가 $f_{28} = 18\text{MPa}$, 투수계수 $k = 1.0\text{E-}02\text{cm/sec}$ 이상인 아스팔트순환골재를 이용한 투수성 콘크리트를 제작하려 한다. 배합설계의 경계조건으로 시멘트는 보통 포트랜드시멘트, 골재는 페아스팔트를 분쇄한 후 13mm이하의 아스팔트순환골재를 사용한다. 배합설계 결과는 표 2에 나타내었다. 단, 단위골재량은 단위체적내 최대골재량 1337kg/m^3 을 단위골재량으로 선정하였다.

- (1) 소요 28일 압축강도(또는 설계기준강도)가 정해지면 c/a 와 압축강도의 상관관계로부터 식 (4)에 대입하여 필요한 투수계수 $k = 8.0\text{E-}02\text{cm/sec}$ 를 구할 수 있다.
- (2) 투수계수 $k = 8.0\text{E-}02\text{cm/sec}$ 을 식 (5)에 대입하여 필요한 시멘트골재비 $c/a = 0.28$ 을 구할 수 있다.
- (3) 그림 8과 같이 c/a 와 w/c 는 서로 상관관계를 이루며 시멘트골재비 $c/a = 0.28$ 을 식 (6)에 대입하여 물시멘트비 $w/c = 36\%$ 를 구할 수 있다.

3.2.5 배합설계기준에 따른 압축강도실험 결과

앞서 설계된 배합조건을 기준으로 소요 28일 압축강도가 $f_{28} = 18\text{MPa}$, 투수계수 $k = 8.0\text{E-}02\text{cm/sec}$ 인 아스팔트순환골재를 이용한 투수성 콘크리트를 제작하였다. 그림 9와 같이 총5회의 압축강도실험결과 28일 압축강도가

표 2. 배합설계 결과

w/c(%)	c/a	단위중량(kg/m ³)		
		시멘트량 (C)	물량 (W)	골재량 (A)
36	0.28	374	134	1337

표 3. 현장 변수위투수 실험결과

No.	A	B
투수계수 (cm/sec)	7.1E-02	7.1E-02

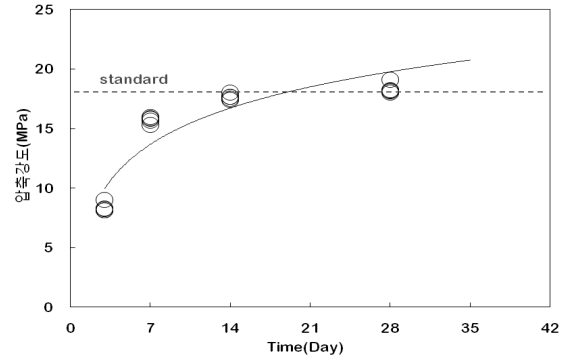


그림 9. 배합설계기준에 따른 압축강도실험 결과

18.2~19.5MPa로 설계강도 이상의 압축강도를 발현하였으며 투수계수는 $k = 7.3\text{E-}02\text{cm/sec}$ 로 설계 기준보다 7.0 E-03cm/sec 정도의 오차를 보였다.

3.2.6 현장투수실험

실험결과는 표 3과 같으며, 현장변수위투수실험은 실내 실험을 통하여 얻어진 소요 28일 압축강도의 설계배합비를 기준으로 현장시공하여 투수계수를 측정하였다. 현장 투수실험결과 A, B두지역의 투수계수가 7.1E-02cm/sec로 측정되었으며 실내 정수위투수실험 결과와 비교 하였을 때 2.0E-03cm/sec정도의 오차를 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 투수성 콘크리트의 압축강도 및 투수성능에 대한 기초적 특성을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 단위시멘트량이 증가할수록 투수성 콘크리트의 압축강도는 비례적으로 증가하는 경향을 나타냈으며 단위시멘트량이 20kg/m³씩 증가함에 따라 압축강도는

2.6~3.8%정도 상승하는 경향을 보였다.

- (2) 투수성 콘크리트의 압축강도는 공극률이 0.48~1.88% 증가할 경우 압축강도는 0.52~1.96MPa정도 감소하는 것으로 나타났으며 37%이상 공극률의 증가는 곤란하다는 것을 알 수 있다.
- (3) 공극률이 증가함에 따라 투수성 콘크리트의 투수능력이 향상되는 경향을 보였다.
- (4) 일반적으로 투수성 콘크리트의 압축강도는 18MPa 이상을 기준으로 하며, 13mm 아스팔트순환골재를 이용한 투수성 콘크리트의 압축강도는 18.2~19.5MPa로 투수성 콘크리트의 구조체로서 사용에 무리가 없음을 확인하였다.
- (5) 투수성 콘크리트의 투수성을 분석한 결과 실내 정수위투수시험 결과 투수계수가 8.0E-02cm/sec로 나타났으며 현장 변수위투수시험에서는 투수계수가 7.3E-02cm/sec으로 일반적인 투수성 콘크리트의 수명한계선 기준인 1.0E-02cm/sec을 상회하는 것으로 분석되

었으며, 투수성확보에 무리가 없을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 제주지역환경기술개발센터의 지원에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이용남 (2008), *투수콘크리트의 공극막힘현상에 의한 투수성 검토*, 석사학위논문, 제주대학교, pp.48-62.
2. 유승경 (2007), “순환골재를 이용한 투수성 콘크리트의 역학특성”, *한국토목섬유학회논문집*, 제6권, 제2호, pp.17-20.
3. 환경부 (2007), *2006년도 건설폐기물 재활용통계조사 보고서*, 환경부 보고서, pp.1-239.
4. Braja M. Das (2006), *Principles of Geotechnical Engineering*, 구미서관, 서울.

(논문접수일 2011. 3. 3, 심사완료일 2011. 3. 23)