

油變性 알키드 樹脂와 硃砂를 使用한 密粒度 透水콘크리트의 强度 및 耐久特性[†]

金仁中* · *洪昌佑**

*(株)지케이, **忠州大學校 土木工學科

Durability and Strength of Dense Grate Permeable Concrete Using Silica sand and Flexible Alkyd Resin[†]

In-Jung Kim* and *Chang-Woo Hong**

*GK Co., Ltd

**Department of Civil Engineering, Chungju National University

요 약

건설 분야의 자원재활용 연구는 폐콘크리트의 순환골재화, 아스팔트의 재활용 등에 광범위하게 진행되어온 반면에, 폐식용유를 원료로 한 도로용 포장공법에 관한 연구는 전무한 실정이다. 한국에서는 연간 20만톤의 폐식용유가 배출되며 이중 약 10만톤이 회수 가능한 것으로 추산된다. 폐식용유를 재활용한다면, 폐기비용을 절감할 수 있음은 물론, 하천의 수질오염도 방지할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 본 연구에서는 폐식용유를 회수하여 알키드 수지를 만들기 위해 에스테르반응을 시켜 제조된 유연성 알키드 수지에 규사를 혼입한 밀입도 투수콘크리트가 비차도용 도로 포장에 적용가능한지에 대한 역학적 특성(강도, 내수성, 화학저항성, 마모저항성, 동결융해저항성, 투수계수)을 평가하였다. 실험결과 휨강도는 도로설계기준 4.5MPa에 1.6배의 결과를 보였으며, 내수성 및 화학저항성, 동결융해저항성은 재령 초기에 강도저하현상이 나타났으나, 재령이 증가함에 따라 큰 변화는 보이지 않았다. 그리고 양생온도는 수지의 유리전이온도 특성에 의해 고온에 비해 저온에서 강도증진현상을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 도로포장용으로 적용시에는 작업성, 강도 및 내구성 측면을 고려해서 유연성 알키드 수지의 혼입률이 규사 중량대비 10~12%가 적절한 것으로 나타났다.

주제어 : 폐식용유, 유연성알키드수지, 규사, 투수콘크리트

ABSTRACT

Researches on resources recycling in the field of construction have made an extensive progress such as recycled aggregate of waste concrete and recycling of asphalt. On the other hand, there are almost never researches on pavement method with used waste frying oil. In South Korea, 0.2 million ton used waste frying oil is discharged every year. It is guessed that about 0.1 million ton used waste frying oil can be collected. If used waste frying oil is recycled, it is expected that disuse cost will be reduced and water pollution of rivers will be prevented. Therefore, the purpose of the study was to evaluate on mechanical features (strength, water resistance, chemical resistance, abrasion resistance, freezing and thawing resistance and permeable coefficient) whether dense graded permeable concrete mixing silica sand with flexible alkyd resin manufactured by making ester reaction with collected used waste frying oil to make alkyd resin could be applied to road pavement for non-roadway. The results of the study were as follows. In flexural strength, it had 1.6 times as much as road design standard 4.5MPa. In water resistance, chemistry resistance and freezing and thawing resistance, they had lack of strength in early age. As age went by, they didn't have

[†] 2010년 8월 24일 접수, 2010년 9월 27일 1차수정
2010년 10월 11일 수리

* E-mail: cwhong@chungju.ac.kr

large changes. And curing temperature had phenomenon of increase in strength at rather low temperature than high temperature by glass transition temperature of resin. Therefore, considering workability, strength and durability when it was applied to road pavement, it was reasonable that the mixing ratio of flexible alkyd resin was 10~15% in comparison with silica sand weight.

Key words : waste frying oil, flexible alkyd resin, silica sand, permeable concrete

1. 서 론

산업의 발달과 더불어 많은 건설재료가 개발되어 왔으며, 최근에 들어서는 친환경 및 자원재활용 재료로의 전환을 시도하고 있다. 또한 지구온난화 문제로 이산화탄소를 절감하는 공법과 재료를 요구하고 있으며, 특히 도로 및 보도 포장재는 더욱더 친환경 재료로서의 신소재 개발에 박차를 가하고 있다.¹⁻⁶⁾ 건설 분야의 자원재활용 연구는 폐콘크리트의 순환골재화, 아스팔트의 재활용 등에 광범위하게 진행되어온 반면에, 폐식용유를 원료로 한 도로포장공법에 관한 연구는 전무한 실정이다. 한국에서는 연간 20만톤의 폐식용유가 배출되며 이중 약 10만톤이 회수 가능한 것으로 추산된다.⁷⁾ 폐식용유는 식용유보다는 점도가 다소 높고 각종 이물질이 섞인 것을 제외하면 식용유와 거의 성상이 비슷하다. 식용유는 어느정도 사용하면 식료품으로서의 기능을 상실하여 폐기되어야 하는데, 보통 일반 가정이나 음식점, 각종 제과류 공장에서 버려지는 폐식용유를 재활용한다면, 폐기비용을 절감할 수 있음은 물론, 하수구로 버려져 이로 인한 환경오염이 악화되는 것을 방지할 수 있을 것으로 기대된다.⁸⁾ 최근에 들어 비차도용 도로포장재는 황토, 숯 등을 이용한 기능성 포장재와 다양한 재료를 이용한 투수형 포장재가 많이 적용되고 있으나, 강도에 관한 시방규정만 있어 내구성 등에 대한 자료와 연구가 부족한게 현실이다.⁹⁾ 또한 불포화 폴리에스테르 수지를 활용한 도로포장재의 경우 강성 및 내구성은 우수하나, 가격이 고가이고, 현장타설 공법에서는 작업성 등의 문제점이 노출되고 있어 적용성이 떨어지는 단점을 갖고 있다. 그리고 우레탄 계열의 폴리머 수지는 고무와의 접착성과 작업성은 우수하나, 골재 등 암석류에는 강성이 저하되고, 내구성에 문제가 발생되고 있다.⁵⁻⁶⁾ 따라서 본 연구에서는 회수한 폐식용유를 에스테르반응을 시켜 제조한 유연성 알키드수지와 규사를 혼합하여 제조한 밀입도 투수콘크리트가 비차도용 도로포장에 적용가능한지에 대한 역학적 특성을 평가하고자 한다. 이를 위해 밀입도 투수콘크리트의 재령별 압축강도, 휨강도 특성을 분석하고, 물에 대한 저항성 및 온도

및 마모 등에 대한 내구성능을 분석하기 위해 내수성, 내온성, 마모저항성, 동결융해저항성, 공극률, 투수계수의 특성을 실험적으로 분석하여 비차도용 도로포장재에 적용가능성을 평가하고자 한다.

2. 실 험

2.1. 사용재료

비인더는 국내 G사의 폐식용유를 회수해서 에스테르반응을 시켜 제조된 열경화성 수지인 유연성 알키드수지 주제와 MDI(Methylene diphenyl diisocyanate) 경화제를 사용하였다. 사용된 수지의 점도는 2,000CPS이며, 비중은 0.95, N.V는 95%, pH는 7로서 작업이 용이하며 유기용제를 사용하지 않는 특징을 갖고 있다. 또한 골재는 충북지역에서 생산된 4호 규사를 사용하였다.

2.2. 배합 및 시험편 제작

시험체는 KS F 2419(폴리에스테르 레진 콘크리트 강도시험용 공시체 제작방법)에 의거해 실내온도 20±1°C 상대습도 60±2%의 조건에서 유연성 알키드 수지를 규사중량의 6%, 8%, 10%, 12%를 혼합하여 강제식 믹서로 배합한 후 몰드에 넣어 15회 2단 분다짐을 통해 시험편을 제작하였다. 압축강도용 시험체는 Ø75×150 mm 원주형 몰드를 사용하였고, 휨강도는 60×60×240 mm 몰드를 사용하였으며, 마모저항성 시험체는 50×50×50 mm 큐빅몰드를 사용하였다. 또한 모든 시험체의 양생은 20±1°C, 상대습도 50%의 항온항습실에서 기건양생을 실시하였다.

2.3. 실험항목

2.3.1 내수성

30일 기건양생 후 수중에 5일, 10일, 15일, 20일, 30일동안 침수후 KS F 2481에 의하여 압축강도 시험을 실시하였으며, 5일, 10일, 20일에 KS F 2482에 의하여 휨강도를 시험을 실시하였다.

2.3.2 내온성

30일 기건양생 후 온도조건 -20°C, 20°C, 60°C의 각각의 조건으로 온도챔버에 24시간 보관 후 KS F 2481, KS F 2482에 의하여 시험체의 강도시험을 실시하였다.

2.3.3 내화학성

30일 기건양생 후 5%황산과 10% 염화칼슘 수용액에 각각 5일 15일, 30일 동안 침수후 KS F 2481에 의하여 압축강도 시험을 실시하였다.

2.3.4 공극률

공극률 시험은 일본 콘크리트공학협회의 에코콘크리트 연구위원회의 『포러스 콘크리트의 공극률 시험방법』중에서 용적법에 준하여 식(1)과 같은 방법으로 공극률을 계산하였다.

$$A(\%) = 1 - \frac{W_2 - W_1}{V_1} \times 100 \quad (1)$$

여기서 A : 콘크리트의 전공극률 및 연속공극률

W₁ : 공시체의 수중중량

W₂ : 24시간 자연방치 후의 기중중량

V₁ : 공시체의 용적

2.3.5 투수계수

투수계수 시험은 일본콘크리트공학협회 『포러스콘크리트의 투수계수 시험방법(안)』에 준하여 Fig. 1과 같은 장치를 사용하여 Darcy의 법칙에 근거하여 다음의 식(2)에 의해 산출하였다.

$$K = \frac{L}{H} \times \frac{Q}{A(T_2 - T_1)} \quad (2)$$

여기서, K : 투수계수(cm/sec)

L : 공시체의 높이(cm)

A : 공시체의 단면적(cm²)

T₁ : 측정개시시간(sec)

T₂ : 측정완료시간(sec)

Q : T₁에서 T₂까지 흐른 유량(cm³)

2.3.6 마모저항성

15일 기건양생후 50×50×50 mm 큐빅시험편을 로스 엔젤레스 마모시험기에 넣고, 철재볼을 사용하지 않고 300번 회전시킨후 마모손실률을 다음 식(3)에 의해서 계산하였다.

$$\text{손실률}(\%) = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (3)$$

여기서 A : 시험전의 시편무게(g)

B : 시험후의 시편무게(g)

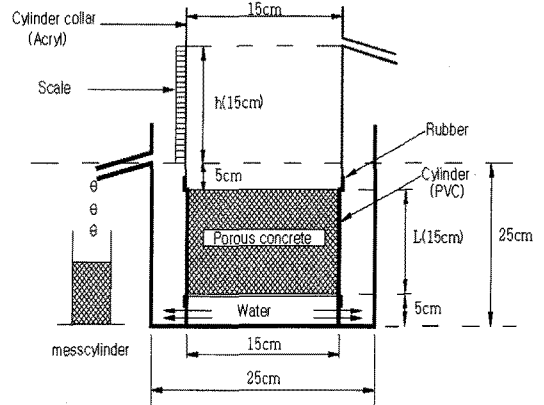


Fig. 1. Test device diagram for permeability coefficient.

2.3.7 동결융해저항성

동결융해 실험은 KS F 2456의 B-type인 공기중 동결, 수중 용해 방법으로 3시간을 한 사이클로 설정하였다. 그리고 50사이클까지 10사이클마다 압축강도를 측정하여 동결융해에 따른 강도 변화 특성을 시험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 강도 및 내수성

바인더 혼입률 및 양생시간에 따른 압축강도 및 휨강도 변화는 Table 1과 같다. 유변성 알키드 수지 바인더를 사용한 밀입도 콘크리트의 양생시간에 따른 압축강도 특성을 분석한 결과 재령 30일인 경우에 비해 재령 90일인 경우가 혼입률이 각각 6, 8, 10, 12%일 때 각각 8.4%, 14.96%, 8.88%, 4.47% 증가하는 것으로 나타났다. 혼입률이 증가함에 따라 압축강도는 전반적으로 증가하는 경향을 보였으며, 바인더 혼입률이 6%, 12%인 경우 강도증진율이 현저히 저하되는 것으로 나타났다. 또한 바인더 혼입률이 증가함에 따라 재령 30일의 휨강도는 증가하는 것으로 나타났다. 압축강도가 바인더 혼입률 변화에 따라 7~10.5MPa를 보였으며, 이에 따른 휨강도가 4.7~7.2MPa로서 압축강도 대비 휨강도가 약 67%로 나타났다. 이와 같은 결과로서 유변성 알키드 바인더를 혼입한 밀입도 투수콘크리트의 강도특성은 압축강도에 비해 휨강도가 매우 높게 나타났으며,

Table 1. Comparison of compressive and flexural strength

Spec.	Binder contents (%)	Compressive strength (MPa)							Flexural strength (MPa)			
		Dry curing (day)		Water curing (day)					Dry curing (day)	Water curing (day)		
		30	90	5	10	15	20	30	30	5(35)	15(40)	20(50)
PB-6	6	6.98	7.58	5.32	5.11	4.94	5.03	5.07	4.69	4.15	4.03	4.01
PB-8	8	7.62	8.96	6.10	5.84	5.57	5.41	5.43	5.41	4.65	4.31	4.21
PB-10	10	9.13	10.02	7.70	7.30	6.96	6.85	7.05	6.47	5.42	5.05	4.90
PB-12	12	10.48	10.97	9.30	8.50	8.22	8.05	8.15	7.16	6.01	5.93	5.71

도로설계기준인 휨강도 4.5MPa의 기준을 바인더 혼입률 6%이상인 경우에서 모두 만족하는 것으로 나타났다. 이는 유연성 알키드 수지가 골재의 부착강도를 증진시키고 콘크리트의 취성적 성질을 개선시킨 것으로 사료된다. 그리고 Fig. 1~2는 침수재령에 따른 압축강도 및 휨강도를 나타낸 것이다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 수중양생 재령 5일에서는 혼입률 6%, 8%, 10%, 12%에서 표준양생 30일 압축강도 대비 각각 23.78%, 19.94%, 15.66%, 11.25% 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 재령

10일에서는 재령 5일 대비 각각 3%, 4.26%, 5.19%, 8.6% 감소하는 경향을 나타냈으며, 5일 이후에는 수중양생 증가에 따른 압축강도 감소폭은 매우 작은 것으로 나타났다. 수중양생이 증가할수록 압축강도는 감소하는 경향을 보이고 있으나, 수중양생 5일에서 압축강도 감소율이 전체 감소율에서 70% 이상인 것으로 나타났다. 그리고 휨강도의 내수성 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 수중양생 5일에서는 바인더 혼입률 6%, 8%, 10%, 12%에서 기건양생 휨강도 대비 11.51%, 14.04%, 16.53%,

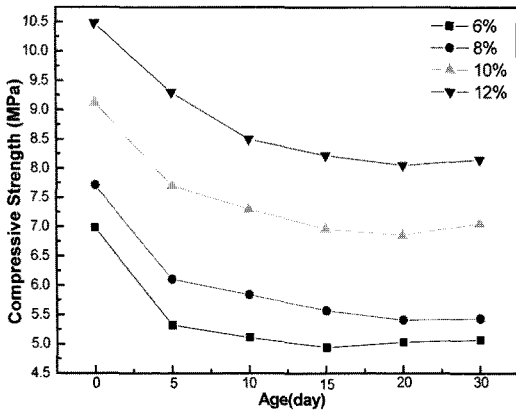


Fig. 1. Compressive strength by water immersion.

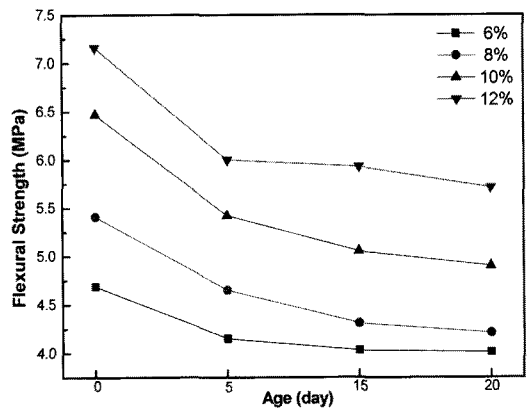


Fig. 2. Flexural strength by water immersion.

Table 2. Compressive and flexural strength by curing temperature

Spec.	Binder contents (%)	Compressive strength (MPa)			Flexural strength (MPa)		
		-20°C	20°C	60°C	-20°C	20°C	60°C
PB-6	6	9.75	6.98	5.35	6.75	4.69	3.25
PB-8	8	11.36	7.71	5.70	7.37	5.41	3.54
PB-10	10	13.07	9.13	6.26	8.38	6.47	4.08
PB-12	12	14.51	10.48	7.21	9.93	7.16	4.46

16.06% 감소하는 경향을 나타내었으며, 수중양생 5일 이후에는 압축강도 특성과 마찬가지로 수중양생 증가에 따른 감소폭은 현저히 줄어드는 것으로 나타났다. 휨강도 또한 수중양생 5일 휨강도가 제일 크게 감소하는 것으로 나타나 압축강도와 유사한 경향을 보였다.

3.2. 내온성

양생 온도조건에 따른 압축강도 및 휨강도 변화특성은 Table 2 및 Fig. 3-4와 같다. 양생조건은 30일간 20±1°C, 상대습도 50%의 항온항습실에서 기건양생을 실시한 후 온도챔버에서 각각 -20°C, 20°C, 60°C로 1일간 양생하였다. Fig. 3과 같이 -20°C에서 양생한 경우가 20°C에서 양생한 경우에 비해 압축강도가 혼입률 별로 약 40% 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 60°C에서 양생한 경우는 20°C에서 양생한 경우에 비해 압축강도가 약 30% 감소하였으며, 온도조건 -20°C의 압축강도와 비교하면 약 50%감소하는 것으로 나타났다.

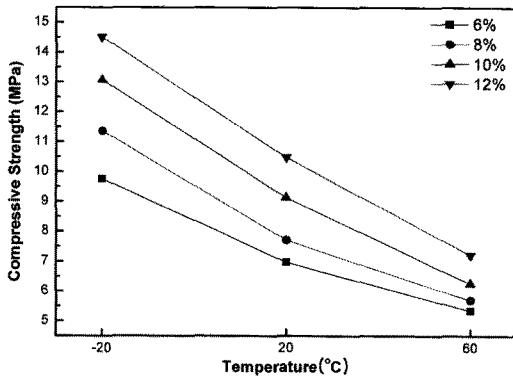


Fig. 3. Compressive strength by curing temperature.

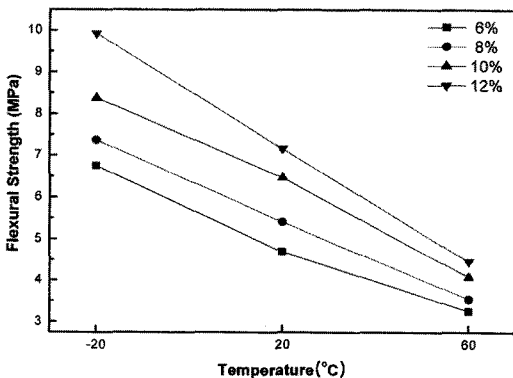


Fig. 4. Flexural strength by curing temperature.

또한 Fig. 4와 같이 휨강도의 경우도 -20°C의 양생조건과 비교하여 양생온도가 증가함에 따라 바이너 혼입률 별로 51.85%, 51.97%, 51.3%, 55.3%로 크게 감소하였다. 이와같이 양생온도에 따른 강도변화는 온도가 상승하면서 골재부분과 레진층이 분리되어 내부에 수축응력이 잔존하게 되어 강도가 감소된 것으로 판단되며, 저온에서 강도가 증가하는 것은 사용된 유연성 알키드수지의 유리전이온도가 낮기 때문으로 판단된다.

3.3. 화학저항성

황산 5%와 염화칼슘 10% 수용액에 침지재령에 따른 압축강도 변화는 Fig. 5-6과 같다. Fig. 5와 같이 황산 5% 수용액에 침지한 압축강도는 기건양생 압축강도에 비해 5일 침지한 압축강도가 바이너 혼입률 별로 약 30% 감소하는 것으로 나타났으며, 침지재령이 증가할수록 압축강도는 감소하였지만 감소폭은 매우 작았다. 그리고 Fig. 6과 같이 염화칼슘 10% 수용액에 침지

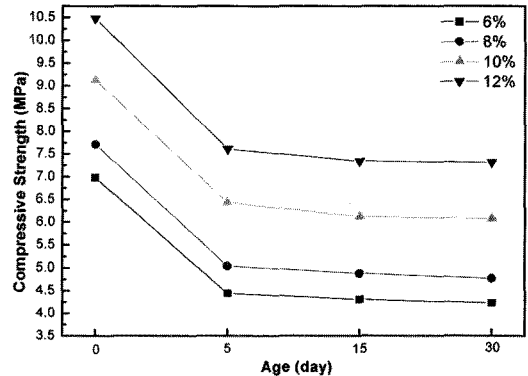


Fig. 5. Compressive strength by 5% sulfuric acid.

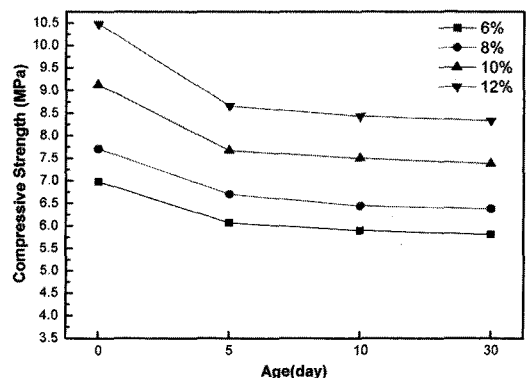


Fig. 6. Compressive strength by 10% calcium chloride.

한 압축강도는 5일 침지한 압축강도가 기건양생 압축강도에 비해 바인더 혼입률 별로 약 15%감소하는 것으로 나타나 황산5% 수용액 침지에 비하여 압축강도의 감소폭은 적은 것으로 나타났다. 그리고 침지재령 5일 이후에는 황산에 침지한 경우와 비슷한 경향을 보였다.

3.4. 마모저항성

Fig. 7은 바인더 혼입률에 따른 마모손실률을 나타낸 것이다. 바인더 혼입률이 증가할수록 마모손실률은 18.71%에서 9.41%, 5.01%, 2.70%로 감소하여, 바인더 혼입률이 증가할수록 충격에 의한 내구성 및 마모저항성은 크게 향상되는 것으로 나타났다.

3.5. 공극률 및 투수계수

Fig. 8은 공극률과 투수계수 시험결과로 공극률은 혼입률이 증가함에 따라 30.32%, 23.21%, 18.47%, 17.85%로 감소하는 것으로 나타났다. 바인더 혼입률이 증가함에 따라 공극률이 감소하는 것은 밀입도 규사의 공극을 바인더가 감싸므로 이로 인해 공극이 감소되는 것으로 판단된다. 그리고 투수계수는 바인더 혼입률이 6%인 경우 0.188 cm/sec를 나타내었으며, 바인더 혼입률이 12%로 증가함에 따라 0.019 cm/sec로 90% 감소하였다. 이와 같이 공극률과 투수계수는 직접적인 상관성을 갖고 있다. 도로포장 설계·시공지침에 의하면 공극률을 12% 이상으로 규정하고 있고, 투수계수를 0.01 cm/sec 이상으로 제한하고 있다. 실험결과 모든 시험편에서 공극률 18~30%를 보여 규정을 만족하고 있으며, 투수계수는 0.019~0.188cm/sec로 투수계수 규정(0.01 cm/sec)도 만족되는 것으로 나타났다.

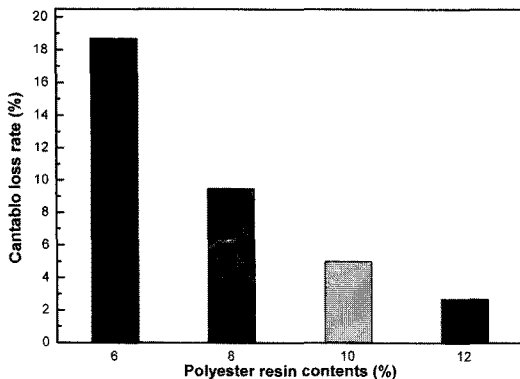


Fig. 7. Wear loss rate by resin additional rate.

3.6. 동결융해 저항성

밀입도 투수콘크리트의 동결융해에 따른 저항성은 Fig. 9와 같이 동결융해 50사이클에 따른 압축강도로 분석하였다. 동결융해 10사이클 후의 압축강도는 기건양생 압축강도에 비하여 약 20% 감소하였다. 또한 동결융해 20사이클 후의 압축강도 변화는 이전 10사이클의 경우와 비교하여 감소폭이 낮아지는 경향을 보였다. 이와같은 결과는 내수성의 결과와 유사한 결과를 보인 것으로 동결융해에 대한 영향보다는 물에 대한 저항성이 낮아 나타난 결과로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 유변성 알키드 수지를 바인더로 사용한 밀입도 투수콘크리트의 강도 및 내구성에 대해서 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유변성 알키드 수지의 혼입률 변화에 있어서 혼입

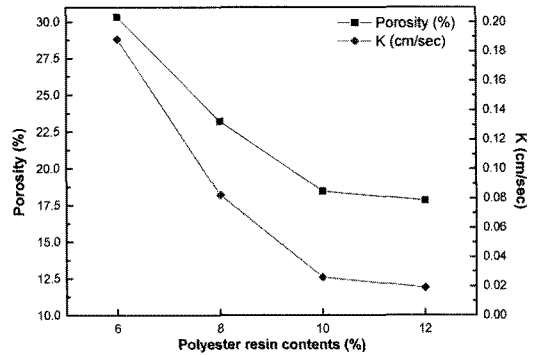


Fig. 8. Porosity and permeability coefficient.

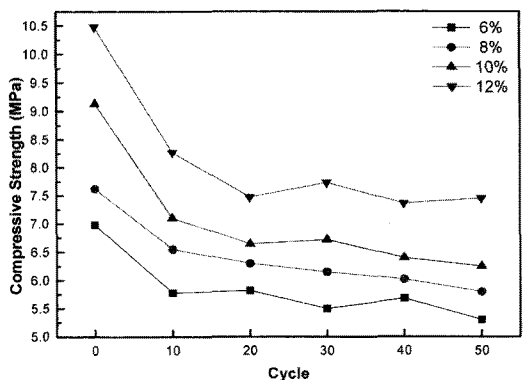


Fig. 9. Compressive strength by freezing-thawing.

를 12%에서 압축강도 및 휨강도가 가장 높은 값을 보였으며, 특히 휨강도는 도로설계기준의 휨강도 4.5MPa에 1.6배의 결과를 얻었다. 그리고 내수성을 분석한 결과 침수재령이 증가할수록 압축강도 및 휨강도가 감소하였으며, 침수재령 5일 이후에는 감소폭이 거의 완만해져 강도 저하 현상은 대부분 침수재령 초기에 발생하는 것으로 나타났다.

2. 양생온도 -20°C와 20°C에서 압축강도를 비교한 결과 -20°C에서 바인더 혼입률 변화에 따라 38~45%정도 증가하였다. 그리고 60°C와 20°C의 경우에서는 60°C의 경우가 23.4~31.4%정도 압축강도가 감소하였다. 또한 휨강도의 경우 -20°C와 20°C에서 휨강도를 비교한 결과 -20°C에서 29.5~43.9%정도 증가하였고, 60°C와 20°C의 경우 60°C에서 30.7~37.7%정도 휨강도가 감소하였다. 이와같은 결과는 유변성 알키드 수지의 유리전이온도가 낮아 저온에서 강성이 증가한 원인에 기인한 것으로 판단된다.

3. 화학저항성을 분석한 결과 내수성의 결과와 유사한 결과를 도출하여, 물에 의한 내수성이 저하되어 나타난 결과로 판단할 수 있었다. 그리고 마모저항성은 유변성 알키드 수지 혼입률이 증가할수록 마모손실률은 18.7%에서 2.7%로 감소하였다.

4. 유변성 알키드 수지 혼입률을 6%에서 12%로 증가함에 따라 공극률은 30.3%에서 17.9%로 감소되었으며, 투수계수는 0.188 cm/sec에서 0.019 cm/sec로 유변성 알키드 수지 혼입률이 증가함에 따라 10배 정도 감소하였다.

5. 동결융해에 따른 저항성을 압축강도 변화로 분석한 결과 동결융해 사이클이 증가함에 따라 압축강도는 감소하였다. 이와같은 결과는 내수성의 결과와 유사한 것으로 유변성 알키드 수지를 사용한 경우 동결융해의 반복에 따른 영향보다는 물에 의한 내수성이 감소한 결

과에 기인한 것으로 판단된다.

6. 유변성 알키드 수지와 규사를 혼입한 밀입도 투수 콘크리트를 도로포장용으로 적용시 수지 혼입률이 12% 이상 일때는 수지 과다로 인한 작업성과 적정공극을 확보하는데 문제점이 도출됨으로 인해 강도 및 내구성 측면에서 바인더의 최적혼입률은 규사 중량대비 10~12%로 판단된다.

참고문헌

1. 문한영, 김성수, 정호섭, 1998: 투수성 콘크리트 포장의 실용화를 위한 실험적 연구, 콘크리트학회 논문집, 10권 3호, pp. 165-173.
2. 김봉찬, 은재기, 김환기, 소양섭, 2000: 현장적용 투수성 콘크리트의 배합조건 결정에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 학술발표회논문집, 12권 1호, pp. 130-135.
3. Zouaghi, A. and et al., 1997: Effect of Aggregate shape and Mixture Proportion on Permeability and Strength of Porous Concrete, Proceedings of JCA, No.51, pp. 882-887.
4. Tamai, M. and et al., 1988: No-fines pervious concrete for paving, Concrete International, pp. 20-27.
5. 연규석, 김동준, 김윤환, 김남길, 주명기, 이윤수, 2002: MMA 개질 폴리머 모르타르의 굳기전 성질, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 14권 2호, pp. 763-768.
6. 노병철, 최규형, 김정훈, 2007: 불포화 폴리에스터수지를 이용한 투수 콘크리트의 투수성 향상에 관한 실험적연구, 한국콘크리트학회 논문집, 19권 2호, pp. 163-169.
7. 김덕근, 이진석, 2005: 폐유지로부터 화학축매에 의한 바이오디젤 생산 연구, 한국신·재생에너지학회 2005년도 춘계학술대회논문집, pp. 487-490.
8. 오영택, 1998: 디젤기관의 대체연료로서 폐식용유의 유용성에 관한 연구, 대한기계학회논문집 B권, 제22권 제4호, pp. 481-488.
9. 홍창우, 2010: 실리카흙을 사용한 투수콘크리트의 강도 및 동결융해저항성, 자원리싸이클링, 제19권 제4호, pp.35-40.



金仁中

- 충주대학교 토목공학과 공학석사
- 현재 (주)지케이 기술연구소 소장

洪昌佑

- 현재 충주대학교 토목공학과 교수
- 당 학회지 제15권 2호 참조