

장대교량 교면포장 수명연장을 위한 배수층 적용연구

Study to Apply to the Drainage Layer for Extension of the Life on Long Span Bridge Deck Pavements

박희영* · 김명재** · 이현중*** · 전성현****

Park, Hee Young · Kim, Myoung Jae · Lee, Hyun Jong · Jun, Sung Hyun

1. 서 론

교면포장은 방수층을 형성하여 교량상판을 보호하고 통행차량에 대한 평탄성 및 미끄럼 방지기능을 확보하여 사용자들에게 편안하고 안전한 주행성을 제공하는 역할을 담당한다. 1980년대 초반부터 국내에 방수층의 시공이 확대되면서 수분침투에 의한 상판의 부식 및 파손은 크게 줄어들었으나 포장 하부의 불투수층 형성에 의해서 포장체로 침투한 수분이 장기적으로 체류하게 되어 재료분리를 일으키고 포장의 강성을 저하시키며, 포트홀 발생이 크게 증가하게 되었다. 특히, 포트홀의 경우는 여름철 강우이후에 집중적으로 발생하고 있으며, 보수작업을 실시한 이후에도 반복적으로 파손이 발생한다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 침투수의 장기체류 문제는 교면포장의 공용수명을 단축시키고 유지보수 비용을 증가시키기 때문에 신속한 배수효과를 얻을 수 있는 공법의 개발 및 적용이 시급한 실정이다. 현재 국내에는 체류수를 배수시키기 위한 일환으로 포장의 가장자리에 유공관을 매설하여 배수효과를 얻기 위한 공법이 적용되고 있지만 이는 국부적인 배수효과만을 기대할 수 있기 때문에 포장전반에 걸쳐 체류수를 배수시킬 수 있는 공법 개발이 시급한 실정이다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 아스팔트 하층과 방수층 사이에 배수층을 시공함으로써 포장체내 체류수의 원활한 배수효과를 얻을 수 있는 공법의 적용성과 혼합물 개발에 대한 연구를 수행하였다.

2. 교면포장 배수층 적용성 연구의 개요

배수층이란 아스팔트 하층과 방수층 사이에 1.5~2cm두께의 박층으로 다공성 혼합물을 시공함으로써 포장체로 침투한 수분을 신속하게 배수시키는 역할을 하는 포장층으로서, 덴마크에서 교면포장 수명연장을 위한 배수공법의 기본개념으로 1970년도에 처음 제안되었으며, 현재에는 모든 장대교량 교면포장에 적용하고 있다. 배수층의 시공에 의한 체류수 배수공법은 국내에서 포장체내 배수를 위해 적용되고 있는 유공관 매설공법과는 달리 포장체 전면적에 대해서 배수효과를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다.

2.1 체류수의 배수를 위해서 적용되고 있는 국내 공법과 본 연구 공법의 비교

현재 국내에서는 아스팔트 하층에 유공관을 매설하여 포장내로 침투한 수분을 배수시키는 공법을 적용하고 있다. 하지만 서울시 장대교량 교면포장의 2003년도 보수 기록을 보면 포트홀 발생에 대한 보수횟수가 다른 파손유형보다 월등히 많음을 확인 할 수 있으며, 이러한 결과는 유공관 매설에 의한 체류수의 배수효과가 미비하다는 것을 대변하는 것이다. 유공관은 그림 3과 같이 하층의 가장자리에 매설되기 때문에 도로의 중앙부분에 대한 배수효과를 얻을 수 없으며, 포장내에 침투한 수분이 유공관 매설위치 까지 이동하기가 어

* 정희원 · 세종대학교 토목환경공학부 석사과정 · 02-2205-3812(E-mail:heeyoung2000@hanmail.net)
** 정희원 · 세종대학교 토목환경공학부 공학석사 · 02-2205-3812(E-mail:modern95@hotmail.com)
*** 정희원 · 세종대학교 토목환경공학부 부교수 · 공학박사 · 02-3408-3812(E-mail:hiee@sejong.ac.kr)
**** 비희원 · LG건설 도로도시계획팀 과장 · 02-2005-9113(E-mail:yunciv88@hotmail.com)



렵기 때문에 대부분의 수분이 체류수로 남아 있게 되어 포트홀 파손을 유발시키게 된다. 이에 반해 본 연구에서 제안하는 공법은 그림 2와 같이 아스팔트 하층의 전 면적에 걸쳐서 침투수가 이동할 수 있는 다공성 혼합물을 시공함으로써 체류수의 발생을 방지하는 효과를 얻을 수 있다.

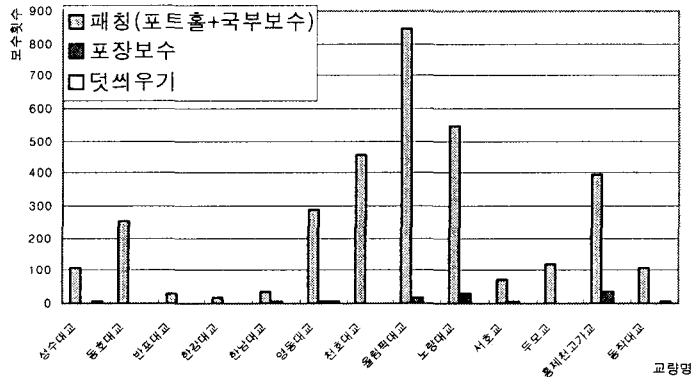


그림 1. 서울시 장대교량 교면포장의 주요파손유형

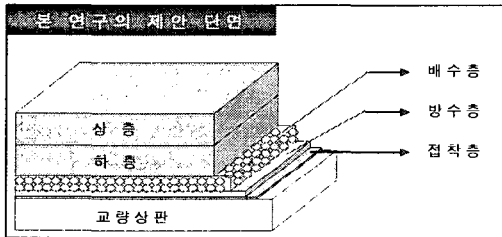


그림 2. 배수층을 적용한 교면포장 단면

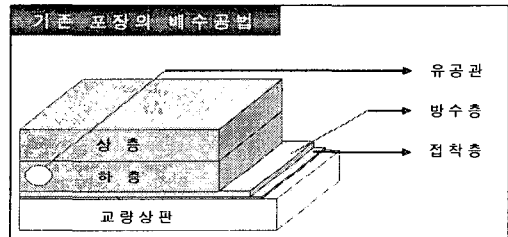


그림 3. 유공관을 적용한 교면포장 단면

2.2 국외 배수 시스템과 국내 적용 시스템의 비교

덴마크에서는 1970년대부터 배수층을 적용한 교면포장을 시공하여왔다. 덴마크의 배수층은 최대입경 8mm의 다공성 혼합물을 두께 1.5~2cm로 시공하여 배수효과를 얻고 있으며, 방수층과 배수층사이의 Drain Way를 통해 체류수를 중앙에 위치한 집수구로 유도하여 배출시키는 방법을 적용하고 있다. 하지만 국내의 교면포장에 구배는 중앙으로부터 가장자리 방향으로 두고 있음으로 본 연구에서는 집수구를 포장의 가장자리에 위치시키고 Drip pipe를 통해 외부로 배출시키는 방법을 선택하였다.

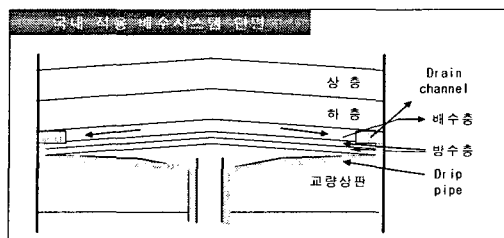
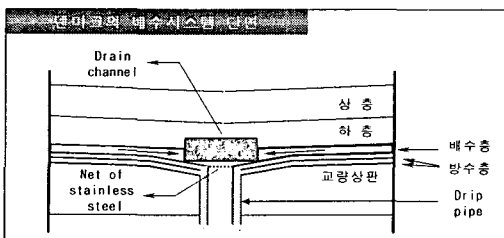


그림 4. 배수 시스템의 횡단면



3. 배수층 적용을 위한 최대입경 10mm 다공성 혼합물 개발

교면포장 배수층을 위한 혼합물은 교통하중에 직접적인 영향을 받지 않으므로, 혼합물의 강도보다는 다공성을 중시하였으며 최대입경 10mm의 골재를 사용하여 최소 20%의 공극율을 유지할 수 있도록 아래와 같은 과정을 거쳐 개발하였다. 혼합물의 강도 확인을 위해 실시한 칸타브로 시험에서 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

3.1 장대교량 교면포장 수명연장을 위한 배수층의 입도 결정

덴마크의 혼합물과 국내 혼합물을 같은 입도로 생산하여 공극율을 비교해 본 결과 상당한 차이가 있었다. 이것은 국내 골재와 덴마크 골재간의 물성차이가 크다는 것을 의미하며, 우리나라에서는 8mm 골재 생산이 용이하지 않으므로 우리나라 실정에 맞는 배수성 혼합물의 입도를 개발해야만 했다.

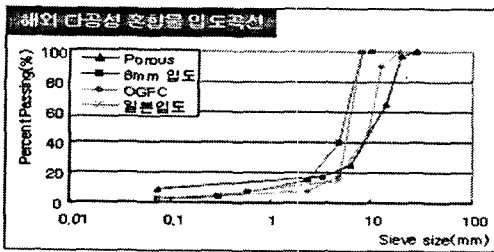


그림 5. 해외 다공성 혼합물 입도곡선의 비교

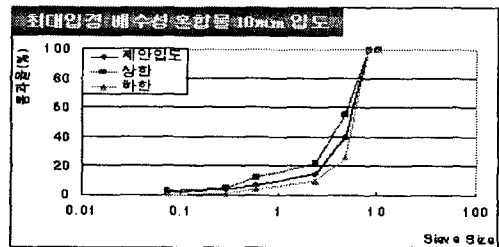


그림 6. 제안입도 및 상,하한입도 곡선

새로운 배수성 혼합물의 상,하한 입도를 결정하기 위해 마샬시편을 제작하여 건설기술연구원에서 사용중인 다공성 혼합물 Gmm, Gmb측정 장비인 Core-lok를 사용하여 공극율을 측정하여, 상한입도는 공극율이 17~18%를 만족하도록 결정하였으며, 하한입도는 국내 배수성 포장에 일반적으로 사용하고 있는 최대입경 13mm 입도를 이동(shift) 시켜 공극율이 20~21%를 만족시키도록 결정하였다.

3.2 다짐 효율에 따른 공극율 확인을 통한 최적 다짐횟수 확인

장수명 교면포장 배수층에 사용될 혼합물은 골재가 작기 때문에 최대입경 13mm 혼합물의 다짐횟수 50회를 실시했을 경우 골재가 깨지면서 공극율 매워 공극율을 감소시키므로 배수성 포장 품질기준에서 요구하는 공극율 20%를 만족하지 못하였다. 그러므로 본 연구에서는 최대입경 10mm에 알맞은 다짐횟수를 다시 정해야 했다.

마샬 다짐횟수에 따른 공극율의 변화를 확인한 결과 표 1과 같이 다짐횟수 약 40회에서 목표 공극율 20%에 만족하는 것으로 나타났다.

Sample ID	Air Voids (%)
20회	22.36
30회	20.60
40회	19.76
50회	19.31
60회	18.45
70회	17.89
80회	15.93

표 1. 다짐횟수에 따른 공극율의 변화량

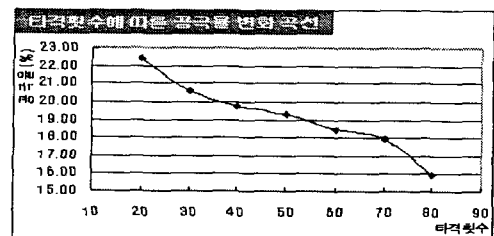


그림 7. 다짐횟수에 따른 공극율 변화곡선



다짐 에너지의 충분여부를 판단하기 위해서 칸타브로 시험을 실시한 결과 손실율이 품질기준에 만족하므로 최적 마찰다짐횟수를 40회로 결정하였다.

3.3 배합설계 실시

FHWA에서 제시한 다공성 혼합물 배합설계방법을 이용하여 배합설계를 실시하였다. FHWA 배합설계방법은 1%에서 7%까지 아스팔트 함량을 갖는 혼합물을 이용하여 드레인 다운 시험으로 얻어진 아스팔트 바인더 손실율과 그와 동일한 혼합물을 이용하여 만든 마찰시편으로 칸타브로 시험을 실시하여 얻어진 손실율을 이용하여 품질기준을 만족면서 아스팔트 함량이 최대가 될 수 있는 지점을 최적 아스팔트 함량으로 결정하는 배합설계법이다. 그림 9에서 보는 바와 같이 최적 아스팔트 함량(OAC)은 5.2%로 결정하였다.

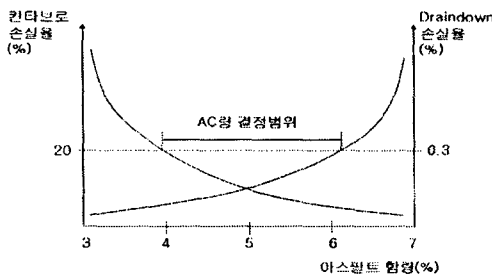


그림 8. FHWA 배수성 포장 배합설계 방법

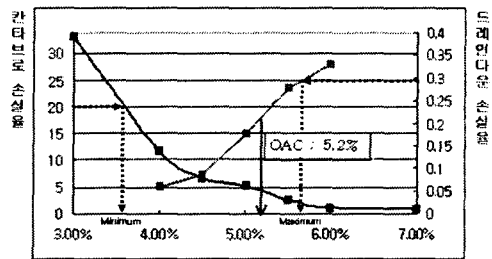


그림 9. 본 연구에서 개발한 혼합물의 OAC

4. 실내시험 실시

새로 개발한 혼합물의 배합설계 및 품질기준에 만족을 하고 있는지를 판단하기 위해서 칸타브로 시험, 동적안정도 시험, 드레인다운 시험, 수분손상시험 등을 실시하였다.

4.1 실내시험 방법

4.1.1 칸타브로 시험(Cantabro Test)

배수성 혼합물의 비산 저항성을 평가하는 시험으로 마찰 다짐을 실시한 공시체를 쇄구슬 없이 로스앤젤레스 마모 감량 시험기에 넣고 300회 회전시킨 공시체의 손실 질량비로 평가한다. 본 연구에서 개발한 혼합물의 칸타브로 손실율은 3.15%로 품질 기준 20%보다 적어 비산 저항성이 뛰어난 것으로 나타났다.

$$\text{손실율}(\%) = \frac{A-B}{A} \times 100$$

여기서 A : 시험 전 공시체의 질량 (g)

B : 시험 후 공시체의 질량 (g)

4.1.2 휠트래킹 시험(Wheel-Tracking Test)

휠트래킹 시험은 고온의 포장 조건하에서 차량하중이 통과함에 따라 발생하는 소성변형을 실내에서 재현하여 평가하는 속성시험으로, 반복주행으로 인한 바퀴패임 깊이의 변화를 측정함으로써 아스팔트 혼합물이 1mm 변형하는데 소요되는 차륜의 통과횟수를 나타내는 동적안정도를 결정한다. 휠트래킹 시험결과는 변형량-시간(재하횟수) 관계곡선에서 변형량이 일정하게 증가하게 되는 45분에서 60분까지의 15분간 주행의 변형



량을 이용하여 변형률(RD, mm/min)로 나타내고, 이 변형률을 이용하여 동적안정도를 구할 수 있다.

$$RD(mm/min) = \frac{d_{60} - d_{45}}{15}$$

$$DS(blow/mm) = \frac{1}{RD} \times 42$$

- 여기서, RD = 시험시작으로부터 45분에서 60분 사이의 15분간에 있어 단위시간 당 변형량
- DS = 시험시작으로부터 45분에서 60분 사이의 15분간에 있어 단위 변형량 당 차륜통과횟수
- d₆₀ = 시험시작으로부터 60분에서의 변형량
- d₄₅ = 시험시작으로부터 45분에서의 변형량

본 연구에서 개발한 혼합물의 동적안정도는 평균 3,342회로 품질 기준인 3,000회보다 높은 값을 나타낸 것으로 보아 소성변형 저항성이 뛰어난 것으로 확인되었다.

4.1.3 드레인다운 시험(Draindown Test)

배수성 혼합물은 아스팔트 바인더가 일반 밀입도 혼합물에 비해 많이 들어가므로 고온에서는 아스팔트 바인더가 많이 흐르는 현상이 발생된다. 아스팔트 바인더의 흐름량을 측정하기 위한 실험이 바로 Draindown 실험이다. 이 실험은 혼합물의 아스팔트 바인더가 잠재적으로 흐를 수 있는가를 측정하여 혼합물을 생산하고 운반 동안 아스팔트 바인더의 손실을 예측하는데 이용된다. 일반적으로 다공성 혼합물에서의 Draindown은 일반 아스팔트의 경우 160℃, 개질 아스팔트의 경우 175℃에서 1시간 거취 후 최대 0.3%가 되지 않도록 규정하고 있다. 본 연구에서 개발한 혼합물의 드레인다운 손실율은 0.208%로 품질 기준 0.3% 이하를 만족하므로 바인더의 흐름으로 인한 저항성이 뛰어난 것으로 확인되었다.

$$\text{손실율}(\%) = \frac{A-B}{A} \times 100$$

- 여기서 A : 시험 전 혼합물의 질량 (g)
- B : 시험 후 혼합물의 질량 (g)

4.1.4 수분손상 시험(Moisture Damage Evaluation Test)

피로균열 및 소성변형과 더불어 혼합물의 수분손상은 아스팔트 포장의 가장 흔한 손상유형 중의 하나이다. 이러한 수분손상의 가장 큰 원인은 아스팔트와 골재의 피막박리에 기인하는 것으로서 이러한 피막박리는 아스팔트 층의 하부에서 먼저 발생되어 상부로 진전된다. 피막박리 현상이 심하게 발생하면 포장이 지지력을 상실하여 과도한 소성변형이 발생되기도 하고 포트홀(pot hole)을 유발시키기도 한다. 현재 배수성 포장 품질 기준에서는 수분손상에 대한 영향을 고려하고 있지 않지만 본 연구에서는 혼합물의 수분 손상에 대한 영향을 고려하여 개발한 혼합물에 대한 수분저항성을 평가하였다.

수분 손상시험은 60℃에서 24시간 수침처리한 시편과 25℃에서 20분간 수침처리한 시편으로 간접 인장강도를 측정하여 건조시편 강도 대비 수침시편의 강도를 TSR로 나타내는데 일반적으로 TSR이 70% 이상되도록 규정하고 있다. 본 연구에서 개발한 혼합물의 TSR은 80.26%로 혼합물의 TSR 품질기준 70%를 만족하는 것으로 보아 수분의 대한 저항성이 뛰어난 것으로 판단된다.

4.2 실내시험 결과

본 연구에서 개발한 혼합물의 실내시험 결과가 표 2와 같이 배수성 포장의 품질기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다.



표 2. 국내 배수성 포장 품질기준 및 본 연구에서 개발한 혼합물의 시험결과

시험항목	배수성 포장 품질기준	본 연구에서 개발한 10mm 혼합물
공극율(%)	20 이상	20 이상
동적안정도 (회/mm)	3,000 이상	3,342
현장투수 성능 (Sec)	10 이내	-
칸타브로 손실율 (%)	20 이하	3.15
Draindown (%)	0.3 이하	0.208
투수계수 (cm/sec)	1×10^{-2} 이상	-
수분손상시험 (TSR, %)	70 이상	80.26
※ 일반 혼합물의 경우		

5. 토공부 현장 시험시공 실시

장수명 교면포장 배수층 적용을 위한 혼합물에 대한 최적 택코팅량 결정, 박층 시공여부 판단, 최적 다짐 횟수 결정, 현장 투수성능 확인과 같은 사항을 목적으로 현장 적용성을 확인하기 위하여 토공부 현장 시험시공을 실시하였다.

5.1 현장 적용 가능성 확인

장수명 교면포장 배수층은 최대입경 10mm의 혼합물로 구성되는데 국내에서 아직까지 최대입경 10mm의 배수성포장을 시공한 적이 없으므로 실내에서 개발한 혼합물이 현장에서도 적용이 가능한지를 판단해야 했다. 본 연구에서 개발한 배수층에 사용될 혼합물은 플랜트에서 생산이 가능하였으므로 현장에서 적용할 수 있는 것으로 확인되었다.

5.2 현장 다짐도를 통한 최적 다짐횟수 결정

현장다짐도를 통한 최적 다짐횟수를 결정하기 위해 5개의 section에서는 다짐 적용 횟수를 2~5회까지 다르게 하여 시공을 실시하였다. 현장다짐도는 실내밀도에 대한 현장밀도의 비를 나타내며 현장밀도는 실내밀도의 95% 이상 되도록 규정하고 있다. 표 3에서 보는 바와 같이 다짐 3회 이상 실시하였을 때 현장다짐도가 규정인 실내밀도의 95% 이상이 되므로 개발한 혼합물의 최적 다짐횟수는 3~5회 정도임을 확인할 수 있었다.

ID	마샬 다짐 40회 기준 (%)
다짐 2회	93.64
다짐 3회	95.22
다짐 4회	96.23
다짐 5회	96.77

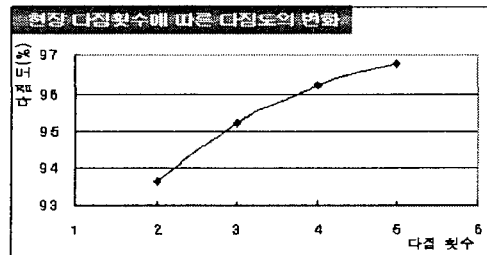


표 3. 현장다짐횟수에 따른 다짐도의 변화 그림 10. 현장 다짐횟수에 따른다짐도 변화 그래프

5.3 투수계수 측정시험을 통한 최적 택코팅량 결정

택코팅을 많이 실시하였을 경우 택코팅제가 포장의 공극을 매워 공극율을 감소시킬 수 있으므로 적절한 택코팅량을 결정하기 위해 한 Section에는 15 l/a을, 다른 Section에는 30 l/a의 택코팅을 실시하여 변수위 투수계수 시험을 통해 투수성능을 비교하여 개발한 혼합물에 대한 최적 택코팅량을 결정하였다. 그 결과 15



ℓ/a의 텍코팅을 실시한 section의 투수계수가 4.96×10^{-2} cm/sec로 30 ℓ/a의 텍코팅을 실시한 section의 투수계수인 4.56×10^{-2} cm/sec보다 조금 큰 것으로 나타났지만 모두 규정인 1×10^{-2} cm/sec에 만족하는 것으로 보아 현장 혼합물의 투수능이 뛰어난 것을 알 수 있었으며, 일반적으로 실시하는 텍코팅량 30 ℓ/a를 실시해도 공극 막힘 현상은 발생하지 않는 것으로 판단되므로 적정 텍코팅량으로 30 ℓ/a를 결정하였다.

5.4 박층 시공 가능성 확인

2개의 section에서 2cm와 3cm로 포설하여 혼합물에 대한 박층 시공 여부를 판단한 결과 충분히 박층 시공이 가능한 것으로 확인되었다. 만약 노면의 평탄성만 지속적으로 유지된다면 1.5cm의 초박층 배수성 포장도 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

5.5 현장 투수성능 확인

토공부 현장 시험시공이 완료된 후에 살수차를 이용하여 살수하여 혼합물의 현장 투수성능을 확인하였다. 그 결과 침투된 물은 그림 11(우)에서 보는 바와 같이 횡단 및 종단 구배를 통해 포장층 외곽으로 즉시 배출되는 것을 확인 할 수 있었다.

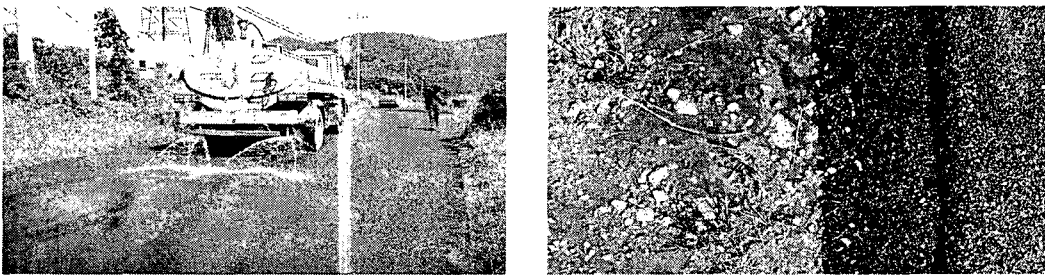


그림 11. 현장 투수성능 확인을 위한 살수 실시(좌) 및 침투수의 배출(우)

5.6 현장 혼합물에 대한 실내시험 실시

현장 혼합물이 배수성 혼합물의 기준을 만족하는지를 확인하기 위하여 쉘트래킹 시험, 수분손상 시험, 투수계수 시험, 칸타브로 시험, Draindown 시험 등을 실시하였다. 현장혼합물에 대한 실내 시험결과는 표 4와 같이 모든 시험항목에서 품질기준을 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

표 4. 현장 혼합물에 대한 시험결과

시험항목	배수성 혼합물의 품질기준	현장 혼합물에 대한 실내시험 결과
공극율(%)	20 이상	20 이상
동적안정도 (회/mm)	3,000 이상	4346
현장투수 성능 (Sec)	10 이내	-
칸타브로 손실율 (%)	20 이하	8.22
Draindown (%)	0.3 이하	0.19
투수계수 (cm/sec)	1×10^{-2} 이상	4.96×10^{-2} (15 ℓ/a) 4.56×10^{-2} (30 ℓ/a)
수분손상시험 (TSR, %)	70 이상	76.03
※ 일반 혼합물의 경우		



6. 결 론

장대교량 교면포장 수명연장을 위한 배수층은 포장층과 방수층 사이에 박층으로 위치하고 있어 최대입경이 작아야하므로 최대입경 10mm 골재를 사용하여 혼합물을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 혼합물의 상한 입도는 공극율이 17~18%를 만족하도록 결정하였고, 하한입도는 국내 배수성 포장에 일반적으로 사용하고 있는 최대입경 13mm 입도를 이동(shift) 시켜 공극율이 20~21%를 만족하도록 결정하였다. 최적 아스팔트 함량(OAC)을 결정하기 위해 드레인다운 손실율과 칸타트로 손실율로 아스팔트 함량을 결정하는 FHWA 배합설계를 실시하여 OAC 5.2%를 결정하였다.

본 연구에서 개발한 혼합물의 물성평가를 위하여 휠트래킹 시험과 수분손상시험을 실시한 결과 기준에 모두 만족하는 것으로 나타났으므로 개발한 혼합물의 현장적용 가능성 확인과 현장 다짐도를 통한 최적 다짐횟수 결정, 최적 텍코팅량 결정, 박층 시공 가능 여부 확인, 현장 투수성능, 품질기준 만족여부를 확인하기 위하여 토공부 시험시공을 실시하였다. 그 결과 모든 항목에서 만족하는 결과를 얻을 수 있었으므로 본 연구에서 개발한 혼합물은 고내구성 교면포장을 위한 배수층으로 적용 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 교면포장의 설계와 시공 일본 도로국.
2. 독일 교면포장 설계 시방서 Germany Road Institute.
3. 서울시 교통량 통계자료
4. 서울시 도로관리 사업소 유지보수 일지 (2003년도 보수일지).
5. 한국건설기술연구원 "국도 BMS 보고서"
6. Department of Civil Engineering, University of Bristol (1985). "Durability and stiffness of mastic asphalt on steel bridge deck plates loaded in flexure" TRL Report CR5, *Transport Research Laboratory*, Crowthorne, U.K.
7. Macdonald, M. D., (1996). "Waterproofing concrete bridge deck: Material and Methods" TRL Report CR636, *Transport Research Laboratory*, Crowthorne, U.K.
8. Price, A. R (1990). "Laboratory Tests on Waterproofing Systems for Concrete Bridge Decks" TRL Report 248, *Transport Research Laboratory*, Crowthorne, U.K.
9. Price, A. R (1991). "Waterproofing of concrete bridge decks: Site practice and failures" TRL Report RR317, *Transport Research Laboratory*, Crowthorne, U.K.
10. Stevenson, A., Evans, W. (1992). "The adhesion of bridge deck waterproofing materials" TRL Report CR325, *Transport Research Laboratory*, Crowthorne, U.K.
11. Vibeke Wegan, (2000). "Surfacing of Concrete Bridge" Danish Road Institute Report 106
12. Ylva Edwards and Pereric Westergren (2001). "Polymer modified waterproofing and pavement system ofr the High Coast Bridge in Sweden" Swedish National Road and Transport Research Institute. VTI rapport 430A