

# 고탄성 응력흡수 중간층 혼합물의 전단 저항 특성 연구

## A Study on Shear Resistance Properties of High-elastic Stress Absorbing Interlayer Asphalt Mixture

박태순\* · 이요섭\*\*

Park, Tae Soon · Lee, Yo Seop

### 1. 서 론

기존 노후 콘크리트 포장에 아스팔트 덧씌우기를 적용할 경우 일반적으로 발생하는 문제점은 반사균열이다. 반사균열(Reflection Cracking)이란 아스팔트 또는 콘크리트 포장층 위에 아스팔트 혼합물로 덧씌우기를 하였을 때 기존 포장층의 균열 또는 줄눈의 형상이 그대로 반사되어 덧씌우기층으로 진전되므로써 표면에 균열이 나타나는 것을 말한다. 이러한 반사균열은 아스팔트 포장에 표면수의 침투 경로가 되어 도로 포장의 연속성을 파괴하므로 단면전체에 대한 강도 및 공용성을 저하시키는 요인이 되고 있어 이를 억제하기 위한 연구가 진행되어 오고 있다. 본 연구에서는 노후 콘크리트 포장의 아스팔트 덧씌우기 시공 후 발생하는 반사균열을 억제하기 위한 포장공법 개발의 일환으로 아스팔트 덧씌우기 층 하부에 고탄성 응력흡수 아스팔트 중간층 혼합물을 설치하여 반사균열을 억제하는 효과를 규명하고자 하였다. 사용된 재료는 AP-5, SBS PMA, CRM 아스팔트 및 개발된 고탄성 아스팔트를 사용하였다. 또한 빔 피로시험을 통하여 고탄성 중간층 혼합물 기준에 적합한 고탄성 아스팔트 바인더를 선정하여 중간층 혼합물을 제작하였고 반사균열 저항특성을 규명하기 위한 반사균열 진전 모사시험(Fracture Mode II Test)을 수행하였다.

### 2. 고탄성 응력흡수 중간층의 이론적 배경 및 원리

덧씌우기 전 응력흡수 중간층을 설치할 경우 기대되는 효과와 성능은 다음과 같다. 하부층에서 발생한 균열은 상부로 진전되고 응력흡수 중간층에서는 얇은 판상의 수평균열이 발생할 만큼의 모멘트와 전단응력이 발생한다. 이러한 단계 이후에는 하부층의 균열은 중간층에 도달하게 되고 판상균열이 발생하게 된다. 판상균열이 상부층의 하부에서 변형이 발생할 정도가 되어 파괴점에 도달하면 상부층의 균열이 발생되면서 결국에는 완전 파괴에 이르게 된다. 그림 1 은 이와 같은 원리에 대한 모식도이다.

이러한 응력흡수 중간층의 거동특성은 아래와 같은 효과가 기대된다.

- ① 전단저항 : 하층 및 상층간의 결합력과 중간층 자체의 전단저항이 너무 낮을 경우, 조기에 판상균열이 발생하여 상층의 조기균열이 발생하게 된다.
- ② 중간층의 강성 : 중간층의 강성이 너무 낮을 경우 상층의 하부에서 큰 변형이 발생하여 이 층으로부터 조기 균열이 발생하게 된다.
- ③ 중간층의 파약력(toughness) : 중간층의 파약력이 너무 낮을 경우 오히려 중간층을 통하여 균열이 진전되어 균열 발생 저지 효과가 없거나 제한적인 효과만을 얻게 된다.

\* 정희원 · 서울산업대학교 토목공학과 교수 · 02-970-6506(tpark@snut.ac.kr)

\*\* 정희원 · 서울산업대학교 토목공학과 대학원 · 02-970-6946(lys1229@empal.com)

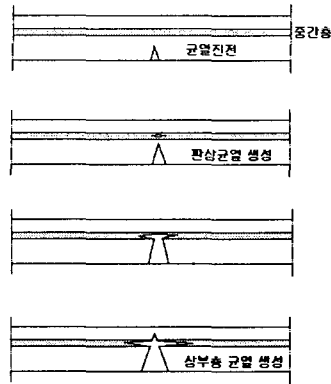


그림 1. 응력흡수 중간층의 거동 및 균열 전전 형태

### 3. 고탄성 응력흡수 중간층의 재료특성

고탄성 응력흡수 중간층 혼합물은 샌드 아스팔트로부터 아이디어를 얻은 새로운 아스팔트 덧씌우기용 중간층 혼합물로서 SBS 고분자 개질 아스팔트를 주재료 하고 최대골재 크기를 9mm로 하여 콘크리트나 아스팔트 포장으로부터 반사균열을 억제하기 위해 고안된 고탄성, 불투수성의 가열 혼합 중간층이다. 고탄성 응력흡수 중간층(이하 '고탄성 중간층'으로 표기)용 아스팔트 바인더는 국내 기술로 제작된 특수바인더로 S사에서 개발된 아스팔트 바인더가 사용되었다. 개발된 아스팔트 바인더는 성능이 이미 입증된 국외의 제품과의 비교시험을 통해 국외의 고탄성 중간층용 바인더 규격에 대한 PG등급, 저장안정성, 탄성회복률 등에서 동등한 성능을 나타내었다. 혼합물 제작을 위해 사용된 고탄성 중간층 혼합물의 입도는 표 1 과 같다. 표 2 는 고탄성 중간층 혼합물의 설계기준을 나타낸 것이다.

표 1. 고탄성 중간층 혼합물의 입도

| 체크기              | 통과율 %    |
|------------------|----------|
| 9.5 mm           | 100      |
| No. 4 (4.75 mm)  | 80 - 100 |
| No. 8 (2.36 mm)  | 60 - 85  |
| No. 16 (1.18 mm) | 40 - 70  |
| No. 30 (600 μm)  | 25 - 55  |
| No. 50 (300 μm)  | 15 - 35  |
| No. 100 (150 μm) | 8 - 20   |
| No. 200 (75 μm)  | 6 - 14   |

표 2. 고탄성 중간층용 혼합물에 대한 시험 기준

| 시험항목  | 기준                                     |
|---|--|
| • 공극률 (Va), %   | 0.5 - 2.5                              |
| • 골재간극률 (VMA)   | 16.0 이상                                |
| • 빔 안정도 (AASHTO T-246, 60°C),<br>선회다짐 50회 (몰드, 100mm) | 18.0 이상                                |
| • Flexural Beam Fatigue Test<br>(AASHTO TP-8)         | 2개 건본의 평균치에 대한<br>최소 100,000 cycles 이상 |



고탄성 중간층 혼합물은 하부에 위치한 콘크리트 포장의 수평 및 수직방향의 상대변위를 흡수하여 상부 덧씌우기층으로 전달되는 상대 변위량을 줄여주는 목적으로 사용되며 통상적으로 약 25mm(±5mm)의 두께로 설치된다.

#### 4. 빔 피로시험(Flexural Beam Fatigue Test)

빔 피로시험에 의한 아스팔트 혼합물의 성능평가는 혼합물 자체의 피로수명 뿐만 아니라 반사균열에 대한 저항성 판단의 척도가 되는 시험으로 자리잡고 있다. 실내 빔 피로시험에서 산출된 피로수명값이 현장에 대한 결과와는 다르므로 보통 빔 피로시험은 다양한 혼합물을 비교하거나 상대적인 공용성의 우열을 가리는데 사용 목적이 있다. 따라서, 본 시험은 개발된 2종류(NY 바인더, PY 바인더)의 고탄성 중간층용 아스팔트 바인더를 빔 피로시험용 시편으로 제작하여 AASHTO TP-8에서 규정하고 있는 100,000cycles 이상의 피로수명 만족 여부를 판단하고 반사균열 진전 모사시험에 사용될 고탄성 중간층용 아스팔트 바인더를 선정하기 위하여 수행하였다. 그림 2 는 빔 피로시험 장면을 나타내었으며, 그림 3 에서는 빔 피로시험에 사용된 시험혼합물의 종류 및 시험 결과를 나타내고 있다.

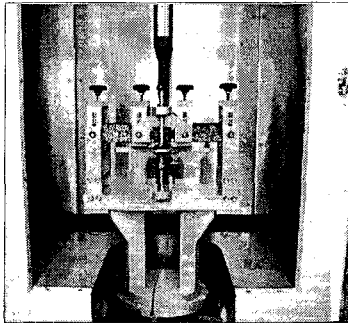


그림 2. 빔 피로시험 장면

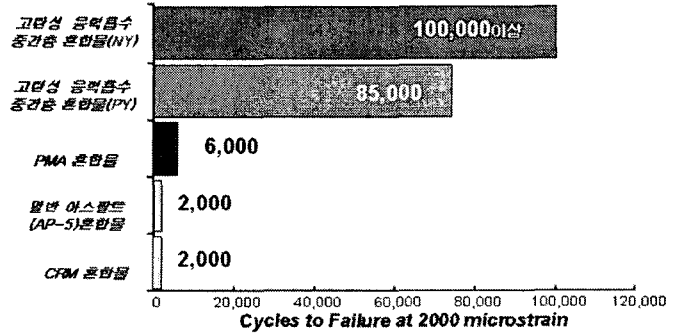


그림 3. 사용된 시험혼합물 종류 및 시험결과

개발된 고탄성 중간층 혼합물의 경우 NY 및 PY 바인더 시험혼합물에서 모두 뛰어난 피로수명 저항성을 보였으나 고탄성 중간층용 혼합물의 시방서 규정인 100,000cycles에 만족하는 혼합물은 NY 바인더 시험혼합물로 반사균열 진전 모사시험에 적용된 고탄성 중간층 혼합물은 NY 바인더 시험혼합물만을 사용하였다.

#### 5. 반사균열 진전 모사시험

본 연구의 목적인 고탄성 응력흡수 중간층 혼합물의 반사균열 저항특성을 규명하기 위한 반사균열 진전 모사시험을 수행하였다. 반사균열 진전 모사시험(Fracture Mode II)은 도로포장의 수직변형을 모사한 전단과 피균열과 수평변형을 모사한 휨 피로균열을 시험혼합물에 적용하기 위해 수행한 시험으로 직경 20cm인 바퀴(wheel)가 20cm 거리를 왕복하는 휠 트래킹(Wheel Tracking)시험기를 이용하였으며, 100kg의 윤회중이 적용된 휠(wheel)을 시험공시체 상면에 재하하여 0.5Hz의 속도로 왕복하는 시험을 수행하였다. 시험공시체는 매 500cycle 마다 수직균열과 수평변위를 측정하였으며, 육안으로 관찰이 가능한 각각의 수직균열의 합이 공시체의 전체 높이에 도달할 때까지 시험을 수행하였다. 이 때까지 바퀴의 왕복 회수(cycles)를 파괴수명(Failure Life)으로 기록하였다. 반사균열 모사시험에 사용된 시험혼합물의 종류 및 특징을 표 3에 나타내었다.



표 3. 아스팔트 혼합물 시험혼합물의 종류

| 중간층이 설치되지 않은 시험공시체<br>(A)*  | 중간층이 설치된 시험공시체<br>(IA, NA, NP, NC)*   |
|---|---|
| <p>① 덧씌우기층<br/>- 일반아스팔트(AP-5) 혼합물 7.5cm</p> <p>② 콘크리트 슬래브 4cm</p> | <p>① 덧씌우기층<br/>- 일반아스팔트(AP-5) 혼합물 5cm<br/>- PMA 혼합물 5cm<br/>- CRM 아스팔트 혼합물 5cm</p> <p>② 중간층<br/>- 일반 아스팔트 2.5cm<br/>- NY 바인더 혼합물 2.5cm<br/>(고탄성 중간층용 혼합물)</p> <p>③ 콘크리트 슬래브 4cm</p> |

\* 약자 읽는 방법

A : 중간층이 설치되지 않은 혼합물로 AP-5가 덧씌우기층 바인더로 사용된 혼합물

IA : 중간층이 설치된 혼합물로 AP-5가 중간층 바인더로 사용되고 AP-5가 덧씌우기층 바인더로 사용된 혼합물

NA : 중간층이 설치된 혼합물로 NY 아스팔트가 중간층 바인더로 사용되고 AP-5가 덧씌우기층 바인더로 사용된 혼합물

NC : 중간층이 설치된 혼합물로 NY 아스팔트가 중간층 바인더로 사용되고 CRM이 덧씌우기층 바인더로 사용된 혼합물

NP : 중간층이 설치된 혼합물로 NY 아스팔트가 중간층 바인더로 사용되고 PMA가 덧씌우기층 바인더로 사용된 혼합물

## 6. 결과 및 고찰

### 6.1 중간층 설치 유·무에 따른 반사균열 저항 특성 비교

각 시험공시체에 대하여 3번의 반사균열 진전 모사시험(Fracture Mode II)을 수행한 후 평균값을 산출하였다. 덧씌우기 표층 혼합물의 재료는 일반 아스팔트(AP-5)로 기준 하였으며 중간층 설치 유·무에 따른 반사균열 저항 특성 결과를 표 4 에 나타내었다. 중간층이 설치되지 않은 시험은 시공현장에서 일반적으로 적용되고 있는 덧씌우기 공법을 모사한 시험이다.

표 4. 중간층 설치 유·무에 따른 반사균열 저항 특성

| 항목      |        | 진단파괴수명<br>(cycle) | 수직균열 진전비<br>(micron/cycle) | 수평변위<br>(mm) | 동적안정도<br>(cycle/mm) |
|---------|--------|-------------------|----------------------------|--------------|---------------------|
| 중간층 미설치 | A      | 6,500             | 10.7                       | 3.54         | 1,797               |
|         | 중간층 설치 | IA                | 8,500                      | 8.2          | 3.05                |
|         | NA     | 25,000            | 2.6                        | 3.80         | 7,856               |

덧씌우기 표층의 두께가 7.5cm로 중간층이 설치되지 않은 A 시험공시체는 전단 파괴모드시험을 통해 전단파괴수명이 6,500cycles로 나타났다. 이에 반해 중간층이 설치된 시험에서는 일반 아스팔트 중간층이 설치된 IA 시험공시체가 8,500cycles를 나타내었고 개발된 고탄성 용력흡수 중간층이 설치된 NY 시험공시체는 25,000cycles를 나타내어 각각 중간층이 설치되지 않은 A 시험공시체 보다 1.3배, 3.8배 진단파괴수명이 증가하는 결과를 나타내었다.

시험공시체가 파괴될 때의 유효중 왕복횟수(cycle)와 수평변위량(mm)의 관계를 이용하여 산정한 동적안



정도(DS : Dynamic Stability)는 고탄성 응력흡수 중간층이 설치된 NA 시험공시체가 7,856cycles/mm의 결과를 나타냈으며 일반 아스팔트 중간층이 설치된 IA 시험공시체는 3,060cycles/mm를 나타내어 중간층이 설치되지 않은 A 시험공시체(1,797cycles/mm) 보다 각각 4.4배, 1.7배 증가된 결과를 나타내었다.

수직균열 진전비 또한 중간층이 설치된 경우에서 증가하는 결과를 나타내었으며, 그 결과로는 NY 시험공시체와 IA 시험공시체가 중간층이 설치되지 않은 A 시험공시체 보다 각각 4.1배, 1.3배 증가하는 결과를 나타내어 중간층이 설치되므로써 반사균열의 진전을 억제할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 그림 4 와 그림 5 에서는 각 경우에 대한 전단파괴수명과 동적안정도를 비교하여 나타내었다.

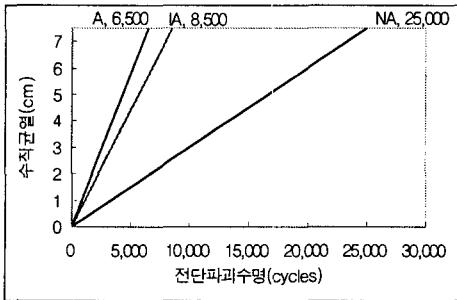


그림 4. 전단파괴수명 비교

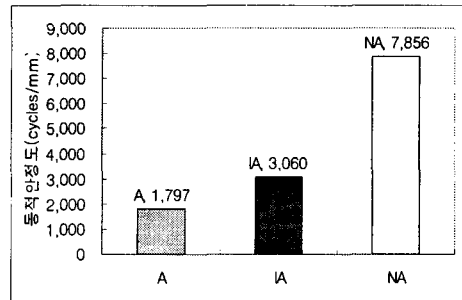


그림 5. 동적안정도 비교

결과적으로 고탄성 중간층의 설치는 중간층이 설치되지 않거나 일반 아스팔트 중간층이 설치된 경우보다 반사균열의 진전을 보다 효과적으로 지연시킬 수 있는 것으로 사료된다.

### 6.2 고탄성 중간층이 설치된 시험혼합물의 표층 재료별 저항 특성 비교

중간층 설치 유·무에 따른 반사균열 저항성 비교를 통해 고탄성 중간층의 설치가 반사균열 억제에 효과가 있음을 입증하였다. 따라서, 본 항에서는 고탄성 중간층을 설치하고 덧씌우기 표층의 재료를 다르게 하여 각 재료별 반사균열 저항 특성을 비교 검토하였다. 각각의 덧씌우기 표층 재료는 AP-5(NA), CRM(NC), PMA(NP)가 사용되었으며, 전단파괴모드 시험 결과에 따른 반사균열 저항 특성을 표 5 에 나타내었다.

표 5. 고탄성 중간층이 설치된 시험혼합물의 표층 재료별 저항성 비교

| 혼합물      | 항목 | 전단파괴수명 (cycle) | 수직균열 진전비 (micron/cycle) | 수평변위 (mm) | 동적안정도 (cycle/mm) |
|----------|----|----------------|-------------------------|-----------|------------------|
| NA 시험공시체 |    | 25,000         | 2.6                     | 3.80      | 7,856            |
| NC 시험공시체 |    | 20,000         | 3.5                     | 3.15      | 6,564            |
| NP 시험공시체 |    | 128,000        | 0.48                    | 2.26      | 72,597           |

시험 결과를 통해 NP 시험공시체(고탄성 중간층 + PMA 덧씌우기 표층)가 가장 우수한 반사균열 저항성을 나타내었다. PMA 덧씌우기 표층 혼합물과 고탄성 중간층이 설치된 NP 시험공시체는 전단파괴수명에서 NA 시험공시체(고탄성 중간층 + AP-5 덧씌우기 표층)보다 5.1배, NC 시험공시체(고탄성 중간층 + CRM 덧씌우기 표층) 보다 6.4배 증가된 전단파괴수명을 나타내었다.

동적안정도는 NP 시험공시체가 72,597cycles/mm로 NA 시험공시체(7,856cycles/mm)의 9.2배, NC 시험공시체(5,594cycles/mm)의 13배 증가된 결과를 나타내었다. 수직균열 진전비에서도 NP 시험공시체가 NA 및 NC 시험공시체에 비하여 각각 5.4배, 7.3배로 우수한 반사균열 저항성을 보였다.

전단파괴수명과 동적안정도에 대한 비교 그래프를 그림 6 과 그림 7 에 나타내었다.

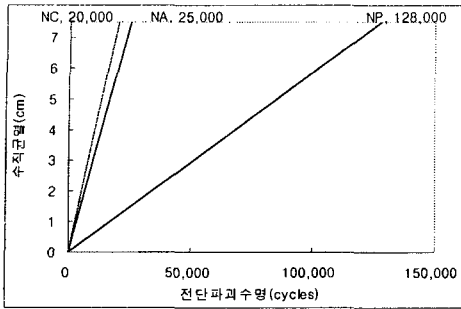


그림 6. 혼합물별 전단파괴수명 비교

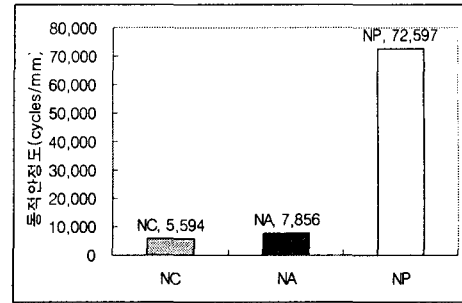


그림 7. 혼합물별 동적안정도 비교

본 연구에서는 포장층 재료별 저항특성 비교뿐만 아니라 아스팔트 덧씌우기층의 하부를 구성하는 콘크리트 포장층을 모사한 시멘트 콘크리트 블록(콘크리트 슬래브)의 간격(이하 '줄눈 간격'으로 표기)을 변화시킨 후 각 줄눈 간격에 따른 저항 특성도 비교하여 보았다. 줄눈 간격은 1.0cm, 0.5cm, 0.25cm로 하였으며, 전단 파괴수명에 대한 결과는 표 6 에서 처럼 줄눈 간격이 줄어들수록 파괴수명은 연장되는 것으로 나타났다.

표 6. 줄눈 간격 변화에 따른 반사균열 저항성 비교

| 혼합물/줄눈간격 |       | 항목 | 전단파괴수명<br>(cycle) | 수직균열 진전비<br>(micron/cycle) | 수평변위<br>(mm) | 동적안정도<br>(cycle/mm) |
|----------|-------|----|-------------------|----------------------------|--------------|---------------------|
| A        | 10mm  |    | 4,833             | 15.3                       | 3.60         | 1,403               |
|          | 5mm   |    | 6,500             | 10.7                       | 3.54         | 1,797               |
|          | 2.5mm |    | 6,750             | 10.6                       | 3.33         | 2,337               |

## 7. 결론

- 본 연구를 통해 고탄성 중간층의 설치는 반사균열을 제어하는데 뚜렷한 효과가 있는 것으로 규명하였으며, 고탄성 중간층을 설치하고 상부 덧씌우기 혼합물에 적절한 재료를 사용하여 덧씌우기를 시행 할 경우 반사균열 억제에 뛰어난 효과가 있을 것으로 사료된다.
- 줄눈 간격 변화에 따른 반사균열 저항 특성은 일반적으로 줄눈 간격이 줄어들수록 저항성이 향상된 것으로 나타났다. 따라서, 덧씌우기전 포장 균열에 대한 전처리를 함으로써 유지보수 후 도로공용수명의 연장에 따른 시공비용의 절감효과도 고려할 수 있을 것으로 판단한다.

## 참고문헌

- 박태순, 이요섭, 서경원, 고석범, 아스팔트 덧씌우기 포장의 반사균열 지연을 위한 응력흡수 중간층 혼합물의 전단 저항 특성, 한국도로학회 논문집, 2004년 학술발표회, pp.235-238.
- 한국도로공사 도로연구소, 포장균열 및 노면 반사균열 억제방안 연구(I, II, III, IV), 도로연, 1997~2000
- Joseph, P. E., *Low Temperature Reflection Cracking Through Asphalt Overlays*, Ph. D. Dissertation. University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 1987
- Molenaar, A. A. A., Heerkens, J. C. P., Verhoeven, J. H. M., *Effects of Stress Absorbing Membrane Interlayers*, AAPT Vol.53, pp.453-481, 1986
- Rigo, J. M., *General Introduction Main Construction of the 1989 Conference on Reflective Cracking in Pavements and Future Prospects*, Proceedings of the 2nd International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements, pp.3-20, 1993