

칼라 아스팔트 혼합물의 저온균열에 의한 파손사례

Field Experience of Low Temperature Thermal Cracking for Color Asphalt Pavement

이석홍* · 김완상** · 이병건*** · 지원우**** · 최준호*****

Lee, Suckhong · Kim, Wansang · Lee, Byunggun · Ji, Wangoo · Choi, Joonho

1. 서론

00지역에 2001년 4월경에 시공한 칼라 아스팔트 혼합물 포장에 날씨가 추워지기 시작한 가을부터 겨울동안 집중적으로 균열이 발생하여 이에 대한 원인조사를 실시하였다.

균열은 00지역 주변도로 전체에 걸쳐 발생 하였으며, 종방향 조인트부 균열과 등간격의 횡방향 균열이 일정한 패턴으로 발생하였다. 동일한 시기에 일반 아스팔트 혼합물로 포장공사를 실시한 주변의 주차장은 양호한 상태를 유지하고 있으며, 동일한 표층 입도로 배합설계 된 주변도로의 칼라 아스팔트 혼합물 표층 부분만 균열이 발생하였다. 균열원인에 대한 자세한 조사는 현장에서 채취한 표층 및 기층 시료, 그리고 현장 시공 당시 남겨져 다져지지 않은 칼라 아스팔트 혼합물에 대한 역학적 시험 그리고 칼라 아스팔트 혼합물의 생산에 사용된 투명 바인더에 대한 유변학적인 시험 등을 통하여 종합적인 분석이 이루어졌다.

2. 국내 아스팔트 도로포장의 현황 및 균열특성

2.1 아스팔트 도로포장의 현실과 국내현황

그동안 국내에서는 아스팔트 도로포장의 소성변형을 줄이기 위한 방법으로 주로 개질아스팔트의 사용과 외국의 선진 아스팔트 포장공법을 도입하였다. 이러한 맥락에서 보면 1987년부터 5년 동안 미국의 연방도로청에서 약 2000억원 정도의 연구비를 투자하여 수행한 SHRP(Strategic Highway Research Program)의 연구결과가 우리나라에도 상당한 영향을 주었으며, 특히 최근에 국내에서 생산되는 몇몇 개질아스팔트는 이러한 SHRP의 연구결과 성과물인 미국의 SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements) 규격에 의하여 생산되고 있다.

수퍼페이브의 연구결과는 아스팔트 바인더의 새로운 등급체계를 개발하였고, 골재의 편장석함유량의 감소와 angularity의 확보를 강조하였으며, 입도는 밀입도 포장보다 굵은 골재가 많이 포함된 거친 입도를 요구하였고, SMA(Stone Matrix Asphalt)포장에서 강조되는 것과 같은 골재의 맞물림(aggregate interlocking)을 강조하여 전단에 저항하도록 추천하고 있다. 이러한 결과의 영향으로 몇 년 전부터 건설교통부 및 지방 국토관리청에서 관할하는 국도의 표층은 굵은골재 최대치수 19mm의 밀입도(일명 #67)로 설계하고 있으며, 아스팔트 등급도

*정회원 · 현대건설기술연구소 팀장/책임연구원 · 031-280-7451 · 2000hyundai@hanmail.net

**정회원 · 현대건설기술연구소 주임연구원 · 031-280-7058 · kimws@hdec.co.kr

***정회원 · 한석기술연구소 선임연구원 · 052-259-3782 · bklee@hansuk.co.kr

****정회원 · 삼성건설기술연구소 차장 · 031-289-6670 · wgji@samsung.com

*****정회원 · 삼성건설기술연구소 과장 · 031-289-6650 · gosancha99@samsung.com



AP-5로 변경하였다. 한국도로공사는 SMA포장공법을 도입하여 고속도로의 덧씌우기 및 교면포장에도 사용하고 있다. 그러나 무엇보다 중요한 것은 아스팔트 혼합물의 대부분을 차지하는 골재와 아스팔트의 품질이 보증되고, 이들이 올바르게 배합설계 및 생산되어 정해진 절차와 기준에 의하여 현장으로 운반, 포설, 다짐되어야 한다.

2.2 Three Major distresses in Asphalt Pavement

수퍼페이브에 의하면 아스팔트 포장의 파손형태를 3가지로 구분하였다. 이를 3 Major distresses라고 표현하며, 소성변형, 피로균열, 저온균열이 그것이다. 아스팔트 혼합물의 공용 특성을 저해하는 요인으로 교통 개방 이후 공용 초기에 혼합물의 유동에 의한 소성변형과, 공용 후기에 혼합물의 노화 또는 교통하중에 의한 균열 및 골재박리 현상 등을 들 수 있다. 아스팔트 포장에 외부의 교통 하중이 가해지면, 기본적으로 포장의 표층 표면에는 압축 응력이 발생하고 표층의 하부에는 수평의 인장 응력이 발생한다. 이에 따라 아스팔트 포장에는 소성변형과 균열 등의 파손 현상이 나타나게 된다. 사실상 아스팔트 표층하부에 발생하는 인장응력이 피로균열을 지배하고, 노상층의 상부에 작용하는 최대 압축강도가 소성변형을 지배한다는 이론이 전통적인 아스팔트 포장의 모델개념이다.

(1) 소성변형

소성변형은 현재 국내 아스팔트 포장에 가장 심각한 파손형상이다. 아스팔트 포장의 소성변형(Rutting, Permanent Deformation)은 주로 차량의 반복 하중에 의해 차륜 통과부를 중심으로 점진적으로 발생하며, 차륜 통과부의 중심은 패이고 가장자리는 융기하는 모양으로 나타나는 파손 형태이다. 비슷한 원인의 하자의 종류로는 발생형태에 따라서 shoving 또는 정차로 주변에 주로 발생하는 corrugation 등이 있다. Dawley(1990)는 이러한 소성변형을 다음과 같이 3가지의 형태로 구분하였다.

- 표면 소성변형 : 교통과 온도에 의해 골재 입자의 아스팔트 손실에 의한 패임 형태
- 구조적 소성변형 : 교통 하중에 의해 표층뿐만 아니라 기층, 보조 기층, 노상에서 발생
- 불안정 소성변형 : 아스팔트 포장층의 혼합물이 측방향으로 유동하면서 발생하는 패임 형태

이를 다시 SHRP(1993)의 연구 결과에 따라 원인별로 구분하면, 첫 번째는 연약한 노상층에 반복 교통 하중으로 침하 현상이 발생하는 것으로, 아스팔트 혼합물의 재료적인 문제보다는 포장의 구조적인 문제에 의해 나타난다. 두 번째는 연약한 아스팔트 혼합물에 의해 표층에서 주로 발생하는 것으로, 아스팔트 혼합물의 재료적인 문제로 나타난다.

(2) 피로균열

아스팔트 포장에 발생하는 피로균열(Fatigue Cracking)은 아스팔트 포장체의 구조적 지지력의 약화에 의한 문제로 발생되는데, 반복 교통하중에 의해 표층의 하부로부터 발생된 균열이 상부로 진전되어 발생하는 균열로서, 대부분이 거북등균열로 진행되는 것으로 알려져 있다. 이러한 피로균열은 발생 초기에는 포장 표면에 종방향으로 발생하다가 시간이 지남에 따라 포장 전체로 확대되어 균열이 진행되는 것이 일반적이다. 피로균열은 주로 상온에서 발생한다고 알려져 있으며, 이를 방지하기 위해서는 포장체의 하부에서 차량하중에 의해 발생하는 인장변형에 저항할 수 있도록 하기 위하여 두께 증가를 통한 포장체의 구조적 용량을 늘리는 방법 또는 아스팔트양을 충분히 사용하는 방법이 사용될 수 있으나 이는 정확한 배합설계기술의 뒷받침이 반드시 필요한 부분이다. 또한 상온에서 높은 스티프니스를 갖는 아스팔트를 선정하여 차량하중에 의해 유도되는 포장체 하부의 인장변형에 저항하도록 하는 것도 중요한 요소이다.



(3) 저온균열

아스팔트 포장에 발생하는 저온균열(Low Temperature Thermal Cracking)은 교통하중과는 상관없이 외부 환경요인에 의해 발생하는 대표적인 포장 파손 형태로서 포장의 횡방향으로 발생하며, 균열은 종방향으로 6 m~30 m의 일정한 간격을 두고 발생하는 것이 특징이다. 그러나 바인더의 스티프니스가 높은 경우에는 균열발생 간격이 이 보다 좁아질 수 있다. 저온균열은 주로 겨울철에 발생한다. 주·야간 기온의 변화에 따라 포장층의 상부에서는 온도 변화에 따라 인장과 압축이 반복되는 현상이 포장층 하부에 비해 훨씬 활발히 진행된다. 저온균열은 이러한 포장층 내의 온도 분포의 불균형 현상이 반복되면서 포장층의 상부로부터 균열이 발생하여 포장층의 하부로 진전되는 균열로 정의되고 있으며, 온도 균열이라 부르기도 한다.

3. 아스팔트의 유변학적(Rheology) 물성측정 방법

3.1 Dynamic Shear Rheometer (DSR) 시험

아스팔트 바인더의 거동은 하중재하 시간과 온도에 좌우되기 때문에 아스팔트 바인더에 대한 이상적인 시험은 이들 두 요소를 모두 포함해야 하며, 이러한 시험을 수행할 수 있는 장비가 레오미터이다. 본 조사에서는 이러한 레오미터의 일종인 Rheometrics사의 ARES 장비를 사용하였다. 이 장비는 그림 1에 나타난 바와 같이, 상온 및 고온의 온도 범위 (약 0°C에서 60°C사이)에서는 Parrel Plate (PP) 모드, 저온의 온도 범위 (약 0°C에서 -50°C사이)에서는 Torsion Rectangular (TR) 모드로 아스팔트의 온도에 따른 스티프니스 거동을 측정할 수 있도록 되어 있다. 그러나 본 시험에서는 5°C, 25°C, 40°C 그리고 60°C에서 PP mode로 수행하였다.

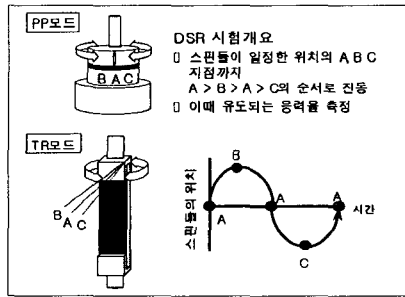


그림 1. DSR 시험방법

DSR의 Parrel Plate나 Torsion Rectangular 시험 모드를 통하여 가해지는 하중은 전단하중이기 때문에 이 시험을 통해 계산되어지는 탄성계수는 전단응력에 대한 탄성계수로서 '전단탄성계수'로 정의되며, 일반적으로 탄성체의 경우는 그 기호를 G로 사용한다. 아스팔트와 같은 점탄성 물체에서는 응력과 변형률 이외에 위상각이 추가로 고려되어 전단탄성계수가 정의되는 데, 이를 복소전단탄성계수(complex shear modulus)라고 하며, 그 기호로 G^* 를 사용하고 있다. G^* 은 총 전단응력 ($\tau_{max}-\tau_{min}$)에 대한 총 전단 변형률($v_{max}-v_{min}$)의 비로써 정의된다. 이러한 G^* 은 물체의 점성을 대표하는 요소와 탄성을 대표하는 요소로 구성되는데, 전자를 저장탄성계수(Storage Modulus) 하여 G' 로 표기하고 후자를 손실탄성계수(Loss Modulus)라 하여 G'' 으로 부르고 있다.



4. 아스팔트 혼합물의 역학적 특성시험

4.1 간접인장강도실험

간접인장강도(Indirect Tensile Strength Test) 시험은 1953년에 Akazawa에 의해 시멘트 콘크리트의 인장 강도를 측정하기 위한 시험법으로 처음 소개되었고, Messina와 Breen이 아스팔트 혼합물의 시험에 적용하였다. 이 후 1965년에 Hadley 등에 의하여 시험 방법이 정립되었다. 간접인장시험은 수직한 직경 면을 따라 평행하게 작용하는 정적 압축 하중을 원통형 공시체에 작용시킴으로서 수행되며, 아스팔트 혼합물을 특성화 하는데 있어 유용한 두 가지의 특성을 제공한다. 첫 번째 특성은 인장강도인데 이것은 아스팔트 혼합물의 균열 발생 가능성을 평가하는 데 사용되고 두 번째 특성은 파괴 시의 인장 변형률인데, 이것은 균열 발생 가능성의 시점을 예측하는데 유용하게 사용된다. 즉, 파괴에 앞서 높은 변형률에 견딜 수 있는 혼합물은 그렇지 못한 혼합물보다 균열에 대한 저항성이 더 크다는 것을 의미한다.

(1) 간접인장강도실험 환경

각 온도변화에 따른 간접인장강도실험을 수행하기 위하여 $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 온도조절이 가능하며, 일정 온도로 장시간 유지할 수 있는 특징을 가지고 있는 mechanical chamber를 사용하였다. 실험시료는 8시간 이상 일정 실험온도로 pre-setting하였으며, 실험 전·후에 온도차가 발생하지 않게 하기 위하여 실험온도에 적합한 경우에만 수행하였다. ASTM D 4123에 규정된 절차에 따라 재하하중은 50.8 mm/분(2 inch/분)으로 제어하였다.

4.2 회복탄성계수실험

교통하중에 의한 반복적인 하중 조건 하에서 아스팔트 도로포장체의 탄성 거동 특성을 파악하기 위해 회복탄성계수(Resilient Modulus, Mr)를 측정한다. 이는 온도별로 다양하게 변화하는 아스팔트 혼합물의 거동 특성을 판단하는데 적용할 수 있다. 즉 아스팔트 혼합물이 고온에서 회복탄성계수가 상대적으로 크거나 높은 증가율을 보였다면, 이 혼합물은 포장의 소성 변형에 대한 저항성이 크다는 것을 의미한다. 또한 저온에서 상온에 이르는 온도 변화에 따른 회복탄성계수의 변동 폭이(온도변화에 따른 회복탄성계수 값의 변화) 상대적으로 작다면, 이런 혼합물은 온도 균열의 발생 원인중 하나인 감온성(Temperature Susceptibility)의 영향을 작게 받는다는 것을 의미한다.

(1) 회복탄성계수실험 환경

환경조건은 간접인장강도실험 환경과 동일하며, 재하하중은 간접인장강도의 5-20 %의 하중으로 가하는데, 본 실험에서는 각 실험시료에 초기하중 200 N을 재하 하였으며 최대하중은 각 온도별 측정된 간접인장강도의 15 %의 값을 재하였다. 상온 및 저온에서의 아스팔트 혼합물의 특성을 측정하기 위하여 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서의 온도영역에서 회복탄성계수를 측정하였다. 시험에 사용된 하중 형태는 Haversine 하중을 사용하였으며, 이때 하중 재하는 0.1초의 재하 기간과 0.9초의 휴지기간을 1사이클로 하여 100회 동안 일정하게 반복하였고 실험결과는 마지막 5회의 평균값을 사용한 것으로 모든 데이터는 컴퓨터에 자동 입력 및 분석된 것이다.

4.3 마찰안정도시험

마찰시험법은 아스팔트 혼합물의 경험적인 물성을 측정하는 것으로, 목적은 표준 실험실 다짐도로 다져진 아스팔트 혼합물의 강도를 측정하기 위한 것이다. 시험의 개략적인 방법은 2개의 반원형 재하 헤드를 통하여 직경 101.6 mm, 높이 63.5 mm인 원통형 공시체에 분당 50.8 mm(2 inch/분)의 속도로 압축 하중을 공시체가 파괴될 때까지 가하면서 이루어지며, 공시체는 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 수조에 30분 동안 수침 된 후에 상온에서 파괴된다. 이는 여름철 포장체의 대략적인 최고 포장 온도를 나타내는 것으로 아스팔트 혼합물에 대한 가장 열악한 온도 조건을 모사하기 위함이다.



5. 아스팔트혼합물의 측정결과

5.1 간접인장강도실험 결과

간접인장강도 실험은 각 온도별(저온:5 ℃, 상온:25 ℃, 고온:40 ℃)로 측정하였다. 파괴 시 변위량은 재하 하중이 최대치에 이르는 시점 즉, 아스팔트혼합물 시료가 파괴에 이르기까지의 변위량이고, Toughness(간접인장강도 시험 중에 발생한 강도-변형량 곡선이 포함하는 면적으로 정의됨) 또한 아스팔트혼합물의 파괴시 까지의 값을 나타낸다. 그림 2는 실험실에서 현장배합을 기준으로 제작된 시료의 실험결과를 그래프로 나타낸 것이다.

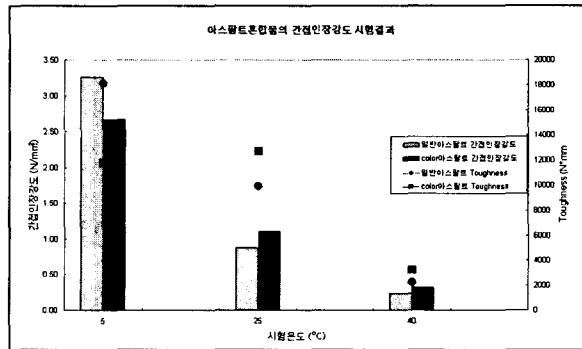


그림 2. 각 온도별 간접인장강도 시험결과

상온(25 ℃)과 고온(40 ℃)에서의 간접인장강도는, 일반아스팔트 혼합물에 비하여 칼라 아스팔트혼합물이 25 %와 37.5 % 증가하였고, 변형에 저항하는 에너지의 총합을 의미하는 터프니스에서도 각각 28%와 45% 증가하는 경향을 보였다. 그러나 반대로 저온(5 ℃)에서는 간접인장 강도와 터프니스에서 각각 일반 아스팔트 혼합물이 칼라 아스팔트 혼합물에 비하여 23 %와 54 % 증가되는 값을 보였다. 이는 상온과 고온에서는 칼라 아스팔트혼합물이 단단하여 일반적으로 인장강도나 터프니스에서 큰 값을 보이지만, 저온부에서는 stress-strain 거동이 급격하게 떨어지는 것을 설명하고 있다.

5.2 회복탄성계수실험 결과

회복탄성계수 실험은 각 온도별(저온:5 ℃, 상온:25 ℃, 고온:40 ℃)로 한 시료에 대하여 두 번의 실험(시료의 방향성을 고려하여 90도 회전)을 실시하여 평균값을 사용하였다. 일반아스팔트 혼합물과 칼라 아스팔트 혼합물을 각각 2개씩 사용했으며 그 시험결과는 다음의 그림 3에 정리하였다.

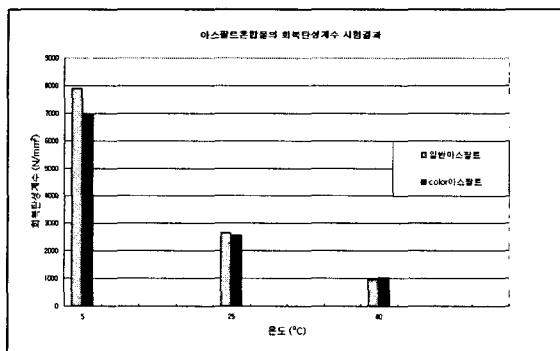


그림 3. 각 온도별 회복 탄성계수 시험결과



앞 장의 간접인장강도 시험 결과와 비슷하게 시공 현장에서 생산된 loose mix를 사용하여 제작한 공시체의 회복탄성계수가 시험실에서 제작한 일반 아스팔트 혼합물이나, 칼라 아스팔트 혼합물 보다 훨씬 큰 값을 나타내고 있다.

5.3 마찰 안정도시험 결과

시험실에서 제작된 일반 및 칼라 아스팔트 혼합물의 마찰 안정도는 그림 4 에서와 같이 각각 1107 kg 와 1106 kg 로 비슷한 값을 보였으나, 현장에서 시공당시 만들어진 시료의 안정도 값은 3479 kg 이었다. 시험실에서 제작된 두 가지 시료의 안정도 값은 우연하게도 거의 동일한 값을 보여주고 있으나, 현장에서 시공에 사용되었던 시료는 거의 3배를 넘는 값을 기록하고 있다.

그림 4는 마찰 안정도와 흐름값을 그래프로 나타낸 것이다.

6. 아스팔트 바인더 시험결과

G^* 값은 전단에 의한 외부하중에 저항하는 에너지의 척도이다. 결국 탄성과 점성의 합으로 이루어진, 이 값이 크다는 것은 외부의 하중에 저항하는 에너지가 많다는 것이다. 위의 그림을 보면 25 °C 의 frequency 범위에서 거의 일치된 값을 보이고 있으며, 5 °C에서는 일반 아스팔트바인더의 G^* 값이 칼라 아스팔트의 바인더 값보다 훨씬 큰 것을 볼 수 있다. 40 °C와 60 °C에서는 일반아스팔트 바인더의 G^* 값이 칼라 아스팔트 바인더에 비하여 각각 4.4배 그리고2.4배 크게 나타나고 있다.

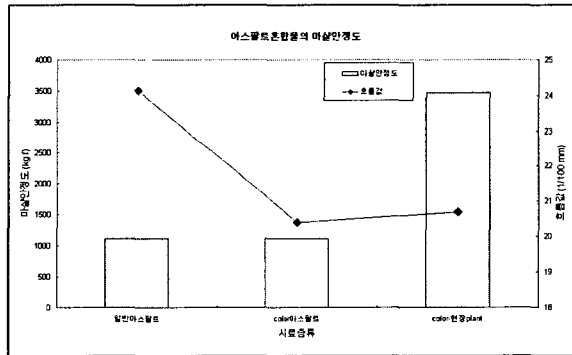


그림 4. 마찰 안정도와 흐름값

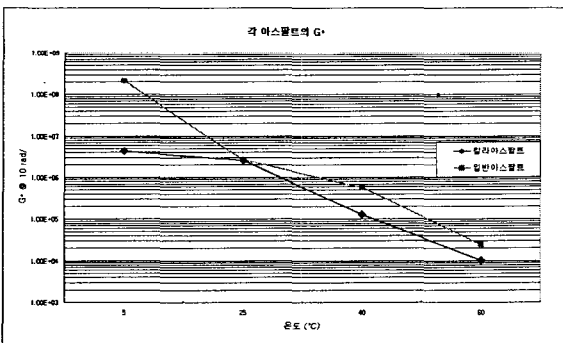


그림 5. Frequency 10 rad/s 에서의 G^* 값

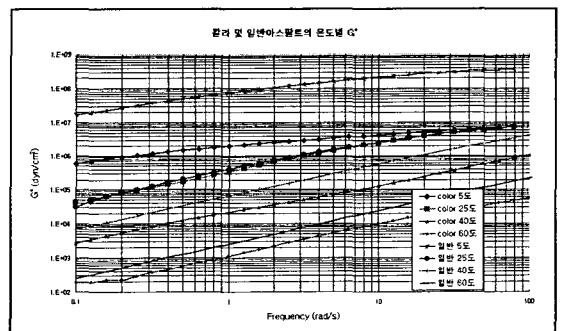


그림 6. 아스팔트 바인더의 온도별 G^* 값



7. 결론

- 간접인장강도실험 및 회복탄성계수실험 결과 일반아스팔트 혼합물에 비하여 칼라 아스팔트 혼합물이 저온에서 균열에 취약한 것으로 판명되었고 특히 현장에서 사용되었던 시료가 훨씬 취성이 큰 것으로 나타났다.
- 시험실에서 제작된 일반 및 칼라 아스팔트 혼합물의 마찰 안정도는 비슷한 값을 보였으나 현장 시공에 사용되었던 시료는 시험실 제작 아스팔트 혼합물보다 거의 3배를 넘는 값을 기록하고 있다.
- 아스팔트 바인더 시험결과인 DSR 시험결과를 보면, 저온부(5 ℃)에서의 일반 아스팔트 바인더의 G^* 값은 칼라아스팔트 바인더의 50배 정도나 된다. 이는 칼라 아스팔트 혼합물에 사용된 투명 바인더의 저온특성에 문제가 있다는 의미이며, 도로포장이 초가을부터 균열이 진행되었다는 것과 많은 관계가 있다고 사료된다.
- 각 시험에 의한 결론을 종합하면, 칼라아스팔트 혼합물에 사용된 투명 바인더의 저온에서의 특성이 일반 아스팔트 바인더에 비하여 너무 취성이 강하다는 것을 알 수 있고, 이것이 00지역 주변도로에 발생한 균열의 가장 큰 원인이라고 사료된다.
- 일반적으로 칼라아스팔트 혼합물은 일반아스팔트 혼합물의 가격에 7배 정도로 아주 고가이다. 결국 이런 고가의 아스팔트 혼합물의 생산과 시공에 사용되는 투명바인더는 반드시 온도변화에 대한 저항성을 확인해야 한다.

참 고 문 헌

1. 아스팔트 포장 연구회, 아스팔트 포장공학 원론, 1999
2. 대한토목학회논문집 19권 2호, 1999.
3. 한국포장공학회, 00 경기장 칼라아스콘 하자분석 및 보수보강방법 검토 연구, 2002. 12
4. Asphalt Institute, Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing (SP-1), 1996
5. Asphalt Institute, Superpave Mix Design (SP-2), 1996
6. Asphalt Institute, The Asphalt Handbook (MS-4), 1989