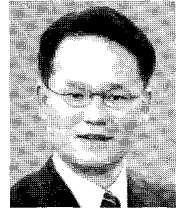


폴리머 섬유보강 아스팔트 콘크리트 혼합물의 피로 특성



유 평 준 | 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 선임연구원

1. 개요

국내에서 광범위하게 적용되는 미국 AASHTO 아스팔트 콘크리트 포장 단면설계 방법의 기준 축하중 수준(18kips=8.2톤) 및 타이어 공기압(약 530 kPa)은 현재 도로를 운행하는 트럭 교통량 및 축하중을 감안할 때 과소평가되어 있는 게 사실이다. 따라서 아스팔트 포장 시공 이후 빈번하게 발생하는 조기파손 문제는 상기한 설계기준과 밀접한 관련이 있을 것이다. 이와 같은 문제점 해결을 위해서는 새로운 설계입력변수(한국형 포장설계법의 축하중 스펙트럼 등)를 현실화한 새로운 포장설계법을 적용하여 단면두께를 조정하거나, 포장설계법에서 설계가 능한 재료범위를 특수한 경우까지 확대할 수도 있다. 많은 포장공학자들이 특수한 경우로서 아스팔트 혼합물의 물리특성, 즉, 강도, 강성 또는 피로 저항성등을 획기적으로 증대시킨 새로운 혼합물의 개발이나 새로운 파괴 매커니즘 정립을 위해 노력하고 있다.

이와 같은 점에서 열가소성(thermoplastic) 폴리머 섬유 복합 아스팔트 혼합물은 기존 가열 아스팔트 포장 혼합물을 3차원적으로 보강하여 기존 혼합물의 피로특성을 획기적으로 증대시키는 특징이 있

다. 인공적으로 고온·고압에서 합성·사출한 단사형 합성 폴리머 섬유(폴리프로필렌(Polypropylene)+폴리에틸렌테레프탈레이트(Polyethylene terephthalate))를 아스팔트 혼합물에 적절한 비율로 혼입한다. 아스팔트 바인더의 개질은 새로운 것이 아니며, 매우 다양한 석유 화학 물질을 혼입하여 바인더의 점도특성 개선을 시도하여 왔다. 대표적인 예로서 EVA(Ethylene Vinyl Acetate)를 바인더에 혼입하여 고온에서의 점도증가(brittleness: 강성 증대)와 저온에서의 점도감소(flexibility: 강성감소) 유도 및 펄리로서 sulphur 혼입으로 혼합물의 강성을 증대시킨 예가 있다. 비교적 최근의 예로서 SBS(Styrene Butadiene Styrene) 및 SBR(Styrene Butadiene Rubber)를 고온에서 아스팔트 바인더에 혼입·용융시켜 점도특성을 개선시키므로 소성변형 저항성 등에 효과적인 혼합물을 이용한 예도 있다. 이와같은 석유계 열가소성 수지를 이용한 아스팔트 바인더 자체의 개질은 일반아스팔트에 비해 제품 제조단가가 비싸고(약 2.0~3배), 개질된 아스팔트 바인더의 저장 보관상 어려움, 혼합물 생산·포설시 일반아스팔트 생산·포설 보다 약 10~15% 고온 유지 등의 문제점이 있다.

아스팔트 혼합물의 직접 보강 예로서 미국 및 캐

나다 등지에서 Geo composite membrane, Geotextile, Geogrid, Wire mesh 등을 아스팔트 혼합물층 바닥에 설치하는 예가 있다. 이 경우 아스팔트 혼합물층의 소성변형 및 반사균열 저항성이 개선된 예가 보고되기는 하지만, 골재분리 또는 탈리 및 포트 홀 등의 문제점을 개선하는 데는 한계가 있는 것으로 지적되며, 사용비용 및 시공상 까다로움과 mesh 설치시 시공상 주의를 요구하는 단점이 있다. 또한 최근 연구에 의하면 교통하중에 의한 아스팔트 층 바닥에서 발생하는 최대 인장 변형률보다 표면으로부터 약 2~3cm 아래 층 내부에서 발생하는 수직 전단 변형률이 층 온도에 따라 차이는 있지만 약 1.5~2배 정도 크게 분석된 예가 있다. 따라서 아스팔트 층의 소성변형이 혼합물의 전단흐름에 기인하는 것이 대부분인 점을 감안할 때 Grid 또는 Membrane 등으로 아스팔트 층 바닥보강은 그 실효성에 의문이 있을 수 있으며, 또한 Grid 또는 Membrane 보강재를 상기한 최대 수직 전단 변형률 발생 위치에 시공하는 것은 매우 어렵다.

상기한 문제점등을 해결하기 위한 방법론으로써 아스팔트 혼합물에 첨가재로써 적절한 크기와 양의 폴리머 섬유(Fiber Strands)를 혼입함으로써 아스팔트 혼합물 자체의 물성을 전체적으로 개선하는 것이다. 폴리머 섬유는 아스팔트 혼합물내에서 골고루 분포됨으로써 전단, 인장강도, 인성(Toughness) 또는 변형에너지(Strain Energy)등의 증대효과를 기대할 수 있다.

2. 관련연구현황

미국의 Texas A&M 대학의 연구결과에 따르면, 가열 아스팔트 혼합물에 PET(Polyethylene terephthalate) 섬유를 혼입하여 실내에서 수행한 빔 피로시험 결과 아스팔트 혼합물의 피로 및 균열 저항성이 크게 개선되었음을 보고했다. 이에 따라 폴리머 섬유 혼입 아스팔트 혼합물을 도로 기층에 시공했을 경우 도로포장의 공용성능이 크게 개선된

것으로 보고되었다. 이외에 카본 파이버 섬유 또는 폴리에스테르 섬유 등을 합성한 연구결과(Bueno et al., Lee et al, Clevon, Jahromi and Khodai)에 의하면 삼축전단강도, 마찰안정도 및 파괴에너지(fracture energy)에 대한 물성 개선효과 및 저온에서의 인장강도 개선 및 소성변형 저항성 개선효과 등을 제시하였다. 2007년 Wu et al.의 연구는 소량의 폴리에스테르 및 셀룰로스 파이버(약 0.3%의 중량비)를 이용한 합성 아스팔트 혼합물의 동탄성계수가 일반 혼합물에 비해 유의할 정도로 큰 결과를 제시하였다.

최근 연구로서 아스팔트 혼합물의 피로 저항성능 및 인성(Toughness) 증대로 조기 균열 및 소성변형 저감을 목표로 합성섬유를 이용한 개질방법이 소개되고 있다. 미국의 아리조나 대학 연구진에 의해 수행한 폴리프로필렌 섬유와 아라미드 섬유를 동시에 아스팔트 혼합물에 혼입한 섬유 보강 아스팔트 혼합물의 공용성능 연구 결과에서 온도균열, 피로균열 및 소성변형 등에 대한 저항성능이 크게 개선됨을 보고하였으며, 기타 연구에서와는 달리 균열억제 성능 평가를 위해 시편에 노치크랙(Notch Crack)을 설치하여 크랙 주변에 저장되는 변형에너지(Strain Energy)가 새로운 크랙 진전에 필요한 에너지와 같은 때 균열이 진전되는 점에 착안하여, 변위를 제어 시험 조건(0.005, 0.01, 0.015, 0.02mm/min)에 각기 해당하는 관측하중 및 균열길이 변화를 각 변형률 별로 측정하여, 각 변형률동안 관측되는 관측하중에 대한 변위(Actuator LVDT)의 면적을 Potential Energy로 환산 후 각 변형율에 해당하는 Potential Energy에 대한 관측시간 동안 균열 길이의 곡선의 선형회귀선의 기울기를 포텐셜에너지율(Potential Strain Energy Rate) 인 J 값으로 균열 진전에 대한 저항성능으로 평가한 결과, 섬유보강한 혼합물이 무보강 혼합물보다 균열저항성능이 큰 것으로 분석한 결과를 제시하였다.

영국의 경우 폴리머 섬유의 사용은 표층 표면처리용으로 두께가 0.2mm 이하의 매우 가는 25mm 길이

의 Polyester 섬유가닥을 아스팔트 바인더에 혼입하여 사용한 예가 있다. 섬유혼입에 따른 표층부에서의 강력한 인장강도 발현으로 표층부의 균열억제 효과가 있고, 특히 파손이 심한 기존 도로포장 보수용으로서 비용대 효율이 큰 것으로 보고된 바가 있다.

3. Fiber Reinforced Asphalt(FRA) 기술 특성

FRA는 상기한 기존 아스콘 포장의 문제점을 해결하기 위한 것으로서, 저비용의 합성 폴리머(PP+PET) 섬유(Composited Fiber Strand)를 일반 역청재에 혼입하여 발현되는 골재간 맞물림 응력 증대, 골재간 브리지 효과(Bridging Effect), 및 아스팔트 바인더의 인성(Toughness) 증대 효과로 아스팔트 콘크리트 포장의 소성변형, 피로균열, 및 포트 홀 파손 문제 등에 대응하는 것과 함께 시공편리성 및 경제성 등을 확보하는데 그 목적이 있다. 또한, 신설 아스콘 포장의 내구성능 증대 효과뿐만 아니라, 불연속면이 형성되어있는 콘크리트 포장 도로에 일반 아스팔트(침입도 등급 60~80 또는 경질 침입도 등급 30) 덧씌우기는 보수의 경우, 반복적인 교통하중이 덧씌운 층하부의 불연속면에 작용했을 경우 발생 가능한 반사균열 억제에도 효과를 발휘할 수 있다. 이 경우에는 마모층(3cm)의 시공을 필요로 한다.

상기 목적을 달성하기 위한 열가소성(Thermoplastic) PP+PET 합성 폴리머 섬유 보강 가열 아스팔트 혼합물은 용융점이 서로 다른 PP (Polypropylene 레진:약 160~170℃)와 PET (Polyethylene Terephthalate 레진:약 250~260℃)의 합성으로 생산된 그림 1과 같은 형상 및 규격의 섬유를 일반 역청재에 혼입하여 생산한 도로 포장용 혼합물이 상기한 구조적 성능 발휘를 주요 특징으로 한다.

역청재의 경우 플랜트에서 아스팔트 콘크리트 혼합물 생산시 온도(약 180~190℃)에서 기타 혼입재

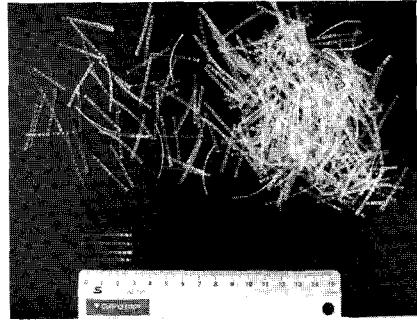
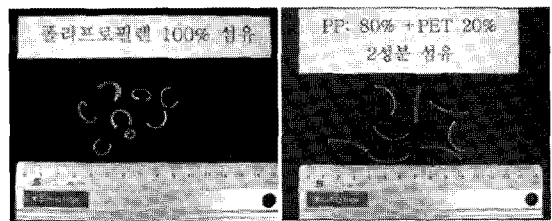


그림 1. PP+PET 합성 폴리머 섬유 형상 및 규격

료를 투입하므로 상기 온도대역에서 역청재 분자와의 분자결합과 혼합물 내에서 최대의 분산성 확보가 가능해야하며, 고온에서 섬유의 형상을 적절히 유지해야한다. 따라서 PP+PET 합성 폴리머 섬유는 역청재와 용융점이 근사한 합성 섬유 표면의 PP성분 레진이 아스팔트 역청재와 분자결합을 유도하며, 용융점이 높은 PET 레진은 섬유자체의 강도 유지와 적은 비빔 시 분산성 확보 역할을 담당하는 특징이 있다. 그림 2와 같이 고온에서(180~190℃)에서 30분간 노출시켰을 경우 100% PP성분의 폴리머 섬유는 섬유 볼링 현상으로 혼합물 비빔시 형상유지가 안되나 PP+PET 합성 폴리머섬유의 경우 형상이 유지되어 혼합물내에서 결합력 증대와 골재맞물림 응력증대 및 혼합물 인성증대효과를 기대할 수 있다.



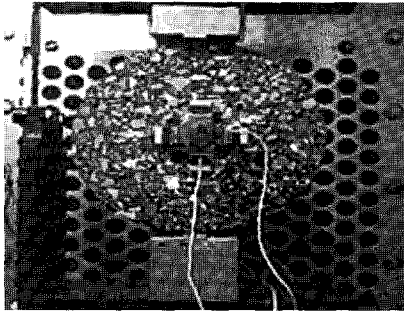
(a) PP 섬유 볼링 (b) PP+PET 합성 섬유 무볼링

그림 2. 폴리머 섬유의 열변형 특성

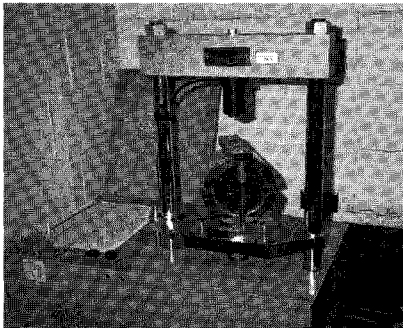
3. FRA 혼합물의 물리적 특징

PP+PET 합성 폴리머 보강 아스팔트 콘크리트

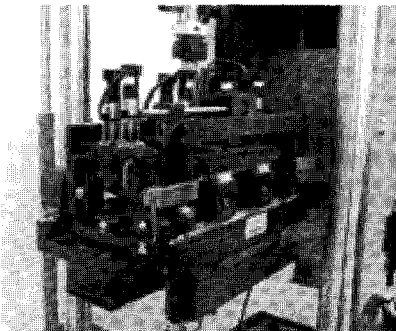
혼합물의 물리적 특성을 설명하기 위하여 실험실내에서 상기 혼합물 시편을 제작하여, 탄성계수 특성과 변형특성을 분석하기 위한 간접인장강도(Indirect Tensile Strength) 시험, 크리프(Creep) 시험 및 4점휨 빔 시험(Four Points Bending Beam Test) 등을 시행하였다. 제작 시편의 형상 및 시험 조건은 그림 3과 같다.



(a) 간접인장강도



(b) 마샬 안정도 시험



(c) 피로시험

그림 3. 폴리머 섬유 보강 아스팔트 혼합물 실내 시험

탄성계수 특성의 경우 시편에 50mm/min의 변형 시편을 가하여 최종 파괴시까지의 응력과 변형 값으로 인성값(Toughness Index)를 구하였다. PP+PET 합성 폴리머 보강 아스팔트 콘크리트 혼합물은 PP+PET 합성 폴리머 섬유량을 혼합물 시편 중량의 0.1%, 0.2%, 0.3%로 조정하여 시험한 결과, 혼합물 중량의 약 0.1%(1~2gram)의 소량을 첨가하였는데도 불구하고, 인성의 경우 일반 혼합물에 비해 약 15%의 증대 효과를 발휘하였다.

최대 인성을 나타낸 PP+PET 합성 폴리머 섬유 0.1% 보강 아스팔트 콘크리트 혼합물의 동적 피로 파괴 특성을 알아보기 위해 그림 3(a)의 동일한 간접인장시험조건에 일정한 하중을 동적하중 1Hz(1초당 1회 하중을 가함)로 시험한 결과, PP+PET 합성 폴리머 섬유 합성 시편의 경우 약 200회 하중 횟수 이후 파괴에 도달했으나, 일반 혼합물의 경우 약 1/2인 약 100회에서 파괴되었다(그림 4). 이는 PP+PET 합성 폴리머 섬유 시편 혼합물의 인성 증대로 동일한 조건에서 파괴에 이르는 시간이 일반 혼합물보다 약 2배 정도 지속되는 것으로 나타났다.

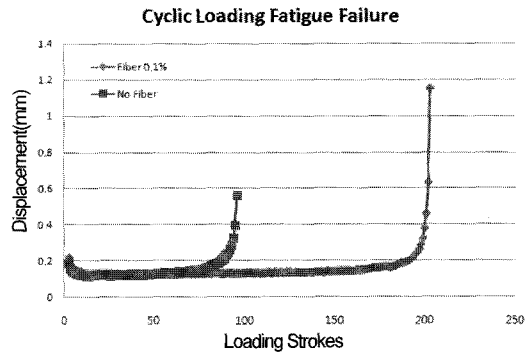


그림 4. PP+PET 합성 폴리머 섬유 보강 아스팔트 혼합물 피로 특성

그림 5에서는 PP+PET 합성 폴리머 섬유 혼합물 시편의 크리프(Creep) 변형특성을 알아보기 위하여 미국 AASHTO TP 9-CREEP 시험 조건인 1000초-Creep 시험을 실시하여 20°C에서의 변형특성을 도시하였다. 본 시험에서는 Creep 특성을 우리나라

의 일반 밀입도 아스팔트 혼합물(D1 W&K 20℃), 미국 SMART Road(SMART ROAD PG70-22 25℃)에서 시험된 결과와 본 발명인 PP+PET 합성 폴리머 섬유 혼합물 시편(T1 W&K 20℃)과의 상대 비교를 수행했다. 시험결과 고비용의 용융 폴리머 분말로 개질된 아스팔트로 보강된 미국 SMART Road 시편이 하중시간에 따른 변형정도가 가장 적으나, 본 발명의 PP+PET 합성 폴리머 섬유 혼합물은 일반 밀입도에 비해서는 현저한 Creep 변형 감소를 보이는 것으로 분석되었다.

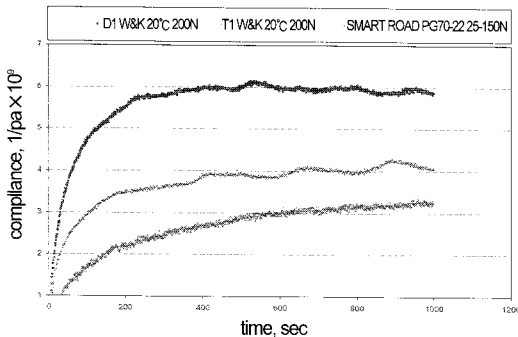
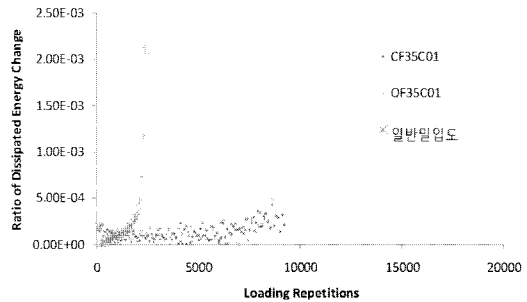
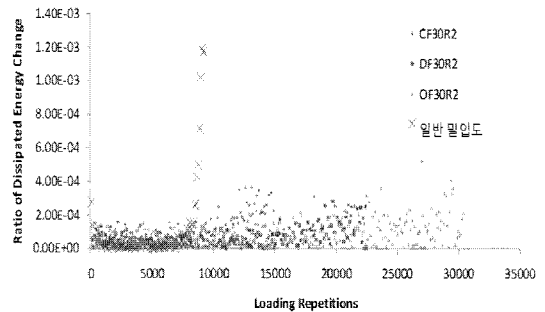


그림 5. PP+PET 합성 폴리머 섬유 보강 아스팔트 혼합물 크리프 변형 특성

일반 혼합물과 섬유보강 혼합물의 분산에너지 변화 특성을 그림 6(a)와 6(b)에 나타내었다. 그림 6(a)는 변형제어 시험에서 1,500 μE 이 시편에 하중주기 동안 발생하도록 시험조건을 조정하고, 시편이 물리적인 파괴에 도달할때까지의 모든 하중주기에 대해 분산에너지 변화비를 100cycle 단위로 나타내었다. 이 경우 일반혼합물의 경우 혼합물의 피로특성이 3가지 단계, 즉, 초기단계, 중기 안정화 단계, 말기 누적파괴 단계로 구분됨을 알 수 있으며, 일반 밀입도 혼합물(최적아스팔트 함량 5.1%)의 경우 2,000cycle 하중주기 근처에서 이미 파괴에 도달했으나, 섬유보강 혼합물의 경우 약 5배에 달하는 10,000cycle까지도 아직 현저한 피로파괴 양상은 보이지 않음을 알 수 있다. 또한 그림 6(b)의 경우 변형률 제어를 1,000 μE 로 변경하여 시험한 결과로서 일반 밀입도 혼합물은 7,000cycle 정도에서 피로



(a) 변형률 1,500 μE 제어



(b) 변형률 1,000 μE 제어

그림 6. 일반 밀입도 및 섬유 보강 혼합물의 분산에너지비 변화

파괴에 도달했으나, 섬유보강 혼합물의 경우 약 3배 정도의 하중주기 동안에서도 현저한 피로파괴에 도달하지 않음을 알 수 있다. 그림 5에서 동일한 섬유보강혼합물 일지라도 골재 배합특성에 따라 차이가 있지만(C: Coarse gradation, D: Dense gradation, O: Open gradation) 이는 섬유보강 혼합물의 인성(Toughness) 증가로 하중주기동안 섬유의 브리지 효과(Bridging Effect)가 발휘되는 것을 유추할 수 있다.

4. 맺음말

아스팔트 혼합물의 물성 개선, 즉 피로수명 증대 및 내부 전단 변형 저항성능 증대 등을 위해 폴리머 합성섬유의 혼입은 실험실에서 실시한 마찰 안정도, 간접인장강도, 크리프 시험 및 빔-피로시험 결과 일반 혼합물에 비해 FRA 혼합물의 성능개선효과를 검

증하였다. 이후, 일반적인 시험결과를 통한 성능 검증이외에 폴리머 합성혼합물의 역학적 특성 및 파괴 매커니즘 분석을 통해 폴리머 혼합물의 물리특성을 설명할 수 있는 피로 방정식 및 구성 방정식 등을 정의할 필요가 있다. 이를 위해 향후 연구에서는 빔 피로 시험 결과를 이용하여 새로운 형태의 피로수명 예측모델 및 응력-변형률 관계 구성방정식 등을 제시할 예정이다. 이와 같은 구성방정식 및 피로수명 예측 방정식 등은 폴리머 혼합물 포장의 두께설계시 설계수명동안 예측교통하중수준에 따른 포장두께 산정시 이용된다.

폴리머 섬유 복합 포장 혼합물에 대한 시험결과 적은 양의 섬유 혼입에도 아스팔트 혼합물의 물성 개선 효과가 있음을 검증하였으며, 이와 같은 물성 개선 효과는 실제 현장에서 신설포장의 경우 교통개방 이후 발생가능한 아스팔트 포장의 소성변형 및 피로균열 등의 발생을 억제하여 포장 공용수명 증대가 가능하다고 판단한다. 향후, 덧씌우기 포장에서도 기존 포장체에서 시작가능한 반사균열 억제 효과 등을 실제 현장 가속시험 등을 통하여 검증할 필요가 있다.

새로운 혼합물의 기계적 물성평가를 위해 전통적인 Marshall 안정도 시험, 4점 빔 피로시험, 간접 Creep 시험 등을 수행하였다. 이와 같은 시험 등을 통하여 비교 대상혼합물과의 내구성(Durability), 강성특성(Stiffness) 및 크리프 특성 등을 종합적으로 평가하였다. 폴리머 섬유 복합 혼합물은 일반 혼합물에 비해 Mashall 안정도의 경우 약 30% 증대, 피로수명의 경우 약 200% 증대, 크리프 Compliance의 경우 약 50% 감소 등 물성 개선 효과를 확인하였다.

기존 아스팔트 혼합물 생산 방식과 관련한 폴리머 복합 아스팔트 혼합물 생산에 다른 아스팔트 플랜트, 시공 절차, 다짐방법 등의 개선 또는 보완 등이 필요치 않다. 다만 폴리머 섬유 혼입에 따른 작업성(Workability) 개선 및 폴리머 섬유 부착 성능 개선 등을 위해 일반 아스팔트 혼합물 최적 아스팔트 중량 대비 약 5~10% 크게 아스팔트 바인더 양을 조절할 필요가 있다.

이와 같은 일반 혼합물에 대비한 물성시험 및 공용성능 시험 결과로 볼 때, 폴리머 섬유 복합 아스팔트 포장 혼합물의 성능 개선효과로 빈번하게 발생하는 가열 아스팔트 혼합물의 소성변형 및 조기 피로 파괴 등의 문제에 효과적으로 대처함으로써 장수명으로 포장으로서 역할이 가능한 것으로 판단한다.

참고 문헌

1. 김광우, 이상범, 정승호, 이순제, 이기호, (2002) 폐 폴리에틸렌 필름 재활용 아스팔트 콘크리트의 특성 분석. 한국도로학회 논문집, Vol. 4, No. 1, pp161-170
2. Bueno, B.S., Silva, W. R., Lima, D. C., Minete, E. (2003). Engineering Properties of Fiber Reinforced Cold Asphalt Mixes. Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 129, N 10.
3. Lee, S. J., Rust, J. P., Hamuda, H., Kim, Y. R. (2005) Fatigue Cracking Resistance of Fiber-Reinforced Asphalt Concrete. Textile Research Journal, Vol. 75, N. 2, pp 123-128
4. Jahromi, S. G., and Khodai, A. (2008) Carbon Fiber Reinforced Asphalt Concrete, The Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 33, No. 2B, pp. 355-364