

섬유보강 가열 아스팔트 혼합물의 피로수명 특성

Fatigue Characteristics of Bi-component Fiber Strands Reinforced Hot-Mix Asphalt

유평준* · 최지영** · 엄병식***

Yoo, Pyeong Jun · Choi, Ji Young · Ohm, Byung Sik

1. 서 론

연성 포장체의 조기파손 억제 및 공용수명 증대를 위해서는 가열아스팔트 혼합물의 소성변형 또는 피로 저항 물성을 획기적으로 개선할 필요성이 있다. 가열아스팔트 혼합물의 구조적 안정성 개선을 위해 다양한 보강방법이 적용되고 있으며, 대표적인 예로서 폴리머, 탄소섬유, 또는 유리섬유 등으로 성형된 지오그리드(Geogrod), 지오컴포짓(Geocomposite), 지오멤브레인(Geomembrane)층을 아스팔트 혼합물 층 바닥에 시공하여 소성변형 저항 또는 피로수명 증대를 유도하는 방법을 들 수 있다. 위와 같은 방법을 통해 일정부분의 연성포장의 공용성능 개선효과가 있는 것으로 보고되고는 있으나, 보강 층의 설치위치가 연성 포장체 층바닥에 설치 됨으로써 연성 포장체 내부에서 발생하는 임계변형 즉, 인장변형 또는 전단변형 등에 효과적으로 대응되기가 어렵고, 보강 층의 편평 시공에 따른 주의 및 고비용 또한 상기와 같은 보강 방법의 단점으로 들 수 있다. 이와 같은 보강 방법의 단점을 효과적으로 극복하고, 연성포장 층바닥 보강 이외에 연성포장 층 내부에서 다차원적으로 혼합물 인성(Toughness)을 개선하기 위해서 본 연구에서는 2성분 폴리머 단섬유(Single strand) 보강방법(FRA: Fiber Reinforced Asphalt)을 개발 적용하였다. 본 연구에서 개발한 폴리머 섬유 및 보강방법은 기존의 가열아스팔트 혼합물의 실내 또는 현장 배합절차의 변경이나 섬유 살포를 위한 추가설비 또한 필요치 않으며, 4점 휨 시험 시편 중량의 약 0.1-0.3%에 달하는 적은 양의 폴리머 섬유 첨가로 가열 아스팔트 혼합물의 피로수명이 일반 혼합물 대비 약 2-3배의 증대 효과를 나타내었다. 또한, 본 연구에서는 폴리머 섬유 보강 아스팔트 혼합물의 정량적 피로수명 평가를 위한 분산에너지 변화를 분석하였다.

2. 단섬유 보강 아스팔트 콘크리트

본 연구는 가열 아스팔트 혼합물 도로 포장(이하, 아스콘 포장)의 소성변형 저감 및 피로수명 증대를 위한 합성 폴리머 섬유 보강 아스팔트 혼합물 (Fiber Reinforced Asphalt-concrete: FRA) 개발에 관한 것이다. 가열 아스팔트 혼합물은 아스콘 포장의 표층, 중간층, 및 기층 등에 일반적으로 시공된다. 일반 아스콘 포장의 조성은 아스팔트 바인더, 골재(굵은 골재 및 잔골재), 및 채움재 등으로 이루어진다. 아스콘 포장의 인장 강도 발현은 대부분 아스팔트 바인더의 점착력에 의하며, 전단강도는 혼합물 속의 골재 간의 결합력에 의한다.

일반 아스콘 포장의 파손은 반복적 교통하중 및 환경하중 등으로 수반되는 응력이 반복적으로 혼합물의 인장 또는 전단 강도 등을 초과할 경우 발생한다. 아스콘 포장의 강도 증진을 위한 방법으로 아스팔트 바인더의 점착강도 또는 골재 간 결합력 증진을 위해서 석유계 폴리머 혼입 액상 개질 아스팔트(Polymer Modified Asphalt: PMA) 및 셀룰로스 파이버가 혼입된 골재 입도 조정 혼합물(Stone Mastic Asphalt: SMA) 등을 많이 사용하고 있으나, 과도한 혼합물 생산비용 증대 및 품질관리 등의 어려움이 있다.

본 연구는 아스팔트 바인더의 골재와의 부착강도 및 골재 간 맞물림 효과를 동시에 개선하는 저비용 고

* 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 선임연구원 · 공학박사(E-Mail: pjyoo@kict.re.kr)

** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구원(E-Mail: legion@kict.re.kr)

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구원(E-Mail: bseom@kict.re.kr)

효율의 섬유 형태 폴리머 보강 아스팔트 혼합물에 관한 것이며 저비용의 PP 레진(폴리프로필렌: Polypropylene)과 PET(폴리 에틸렌 테레프탈레이트: Polyethylene terephthalate) 레진을 적정비율로 혼합하여, 개발된 합성 폴리머 섬유(PP+PET Composite)는 고온에서 아스팔트 바인더와의 중합으로 혼합물 인성(Toughness) 및 골재 간 맞물림 효과 증진으로 외부 및 환경 하중 등에 의한 아스콘 포장의 소성변형 및 피로 파손을 최소화 할 수 있다.

2.1 FRA 혼합물의 체적 특성

아스팔트 혼합물의 아스팔트 바인더는 전체 혼합물의 중량비로 약 5-6% 정도를 차지한다. 아스팔트 바인더의 주요한 역할은 일반적인 밀입도 혼합물의 경우 방수 및 혼합물간 부착 기능인 반면에, 대부분이 골재로 구성되는 아스팔트 혼합물의 내구성능 또는 전단저항 성능은 골재 간 결합력(Interlocking Force)에 크게 의존한다. 콘크리트를 이용한 시설물의 경우, 콘크리트의 역학적 특성을 향상시킬 목적으로 고가의 탄소섬유, 강섬유, 아라미드섬유, 또는 유리섬유 등을 이용하거나 비교적 저가의 폴리머인 나일론, 폴리에틸렌, 폴리에스테르, 폴리비닐알콜 섬유 등이 이용되기도 한다. 국내 콘크리트 포장의 경우에는 일반 섬유보강 콘크리트 구조물과는 달리 고분자 화합물을 이용한 고내구성 콘크리트 도로 포장 재료를 개발하여 시공한 예는 없다. 아스콘 포장의 경우, 상기한 폴리머 섬유 처리 콘크리트 구조물이 갖는 장점을 최대한 도로 포장에 반영하여, 아스콘 포장의 조기 파손을 최소화 하고 공용수명 증대가 가능한 새로운 폴리머 섬유 혼입 가열 아스팔트 혼합물의 제조 및 시공 방법을 개발할 필요성에 본 연구의 의의가 있다.

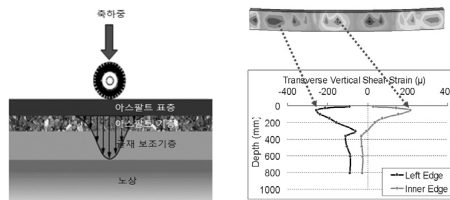


그림 1. 포장체 응력분포 및 표층 내부의 전단 변형 분포

그림 1은 외부 교통하중 작용에 따른 종래 포장체 단면내부에 분포하는 응력집중분석결과를 보여준다. 반복적 외부하중으로 인해 포장체 상부층 내 특정 부분(일반적으로 최상층 바닥 또는 표면으로부터 3-5cm 아래 지점)에 과도한 응력집중으로 상기한 포장파손이 급속하게 그 지점으로부터 진전되어 심각한 파손으로 외부에 드러나게 된다. 이와같은 조기파손 문제점을 해소하기 위하여 역청재(아스팔트 바인더)에 석유계(SBS 또는 SBR) 폴리머 입자를 용융시켜, 역청재의 점도가 증대된 고분자 개질 아스팔트 포장을 이용하여 소성변형 등의 문제를 일정 부분 해소하기도 하지만, 과도한 비용 증대, 품질관리의 어려움, 혼합물 온도 증가에 따른 에너지 비용 증대 및 저온에서 재료의 취성증대로 인한 균열 가능성 증대 등의 문제로 사용상 어려움이 있다. 다른 예로서는 격자 형태로 짜여진 토목섬유를 표층바닥 또는 하부층별 중간에 시공하여 하부로부터 진전될 수 있는 균열 제어 및 상부 층에서의 소성변형 문제 등을 해결하기 위한 수단으로 이용되고 있지만, 과도한 비용 증대 및 그림 1에서와 같이 표층 내부에서 가장 큰 집중응력 또는 전단변형이 발생하는 부분에 상기 재료의 시공 어려움 등의 문제점이 있다.

2.2 가열아스팔트 혼합물용 단섬유 특성

본 연구는 앞서 언급한 기존 아스콘 포장의 문제점을 해결하기 위한 것으로서, 저비용의 2성분 폴리머(PP+PET) 합성섬유(Bicomponent Fiber Strand)를 일반 역청재에 혼입하여 발현되는 골재간 맞물림 응력 증대, 골재간 브리지 효과(Bridging Effect), 및 아스팔트 바인더의 인성(Toughness) 증대 효과로 아스콘 포장의 소성변형, 피로균열 및 포트 홀 파손등의 문제를 해결하는 것과 함께 시공편이성 및 경제성 등을 확보하는 데 의의가 있다. 상기 목표를 달성하기 위한 열가소성(Thermoplastic) PP+PET 합성 폴리머 섬유 보강 가열 아스팔트 혼합물은 용융점이 서로 다른 PP(Polypropylene) 레진: 약 160-170 °C) 와 PET(Polyethylene terephthalate) 레진: 약 250-260°C)의 합성으로 생산된 그림 2와 같은 형상 및 규격의 섬유로 일반 역청재에

혼입하여 생산한 도로 포장용 혼합물이 상기한 구조적 성능 발휘를 주요 특징으로 한다.

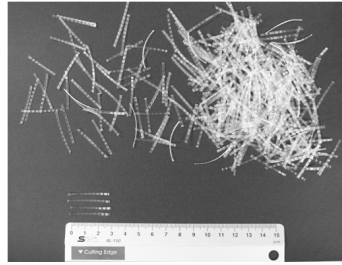


그림 2. PP+PET 합성 폴리머 섬유 실제 형상 및 규격

역청재의 경우 플랜트에서 아스팔트 콘크리트 혼합물 생산시 온도(약 180-190℃)에서 기타 혼입재료를 투입하므로 상기 온도대역에서 역청재 분자와의 분자결합과 혼합물 내에서 최대분산을 동시에 확보 가능해야 한다. 따라서 본 연구에서의 PP+PET 합성 폴리머 섬유는 역청재와 용융점이 근사한 합성섬유 표면의 PP 성분 레진이 아스팔트 역청재와 분자결합을 유도하며, 용융점이 높은 PET 레진은 섬유자체의 강도 유지와 젖은비빔 시 분산성 확보 특징이 있다. PP+PET 합성 폴리머 섬유는 아스팔트 혼합물의 인성, 소요인장강도 및 골재 맞물림 효과(Bridging Effect) 등을 증진시킴으로써, 아스콘 포장 표층 안정성 증진, 기층의 소성변형, 피로균열 및 포트 홀 등을 억제하고, 특히 가열 아스팔트 혼합물 기층의 피로거동에 대한 저항성 및 내구성을 증진 시키는 장점이 있다.

용융점이 서로 다른 PP+PET 합성섬유는 가열 아스팔트 혼합물의 일반적인 생산온도 범위인 180-190 ℃에서 최대의 섬유 분산 유도과 동 혼합 온도 내에서 PP 성분의 일부 용융으로 아스팔트 바인더와의 분자결합을 유도함으로써 최대의 부착강도 발현 유도를 특징으로 한다.

2.3 합성 폴리머 보강 아스팔트 콘크리트 혼합물의 물리적 특징

PP+PET 합성 폴리머 보강 아스팔트 콘크리트 혼합물의 물리적 특징을 객관적으로 설명하기 위하여 실험실내에서 혼합물 시편을 제작하여, 탄성계수 및 변형특성을 분석하기 위한 간접인장강도(Indirect Tensile Strength) 시험 및 크리프(Creep) 시험을 시행하였다.

탄성계수 특성의 경우 시편에 50mm/min의 변형을 시편에 가하여 최종 파괴시까지의 응력과 변형 값으로 인성값(Toughness Index)를 구하여 그림 3에 간략화하여 도시하였다.

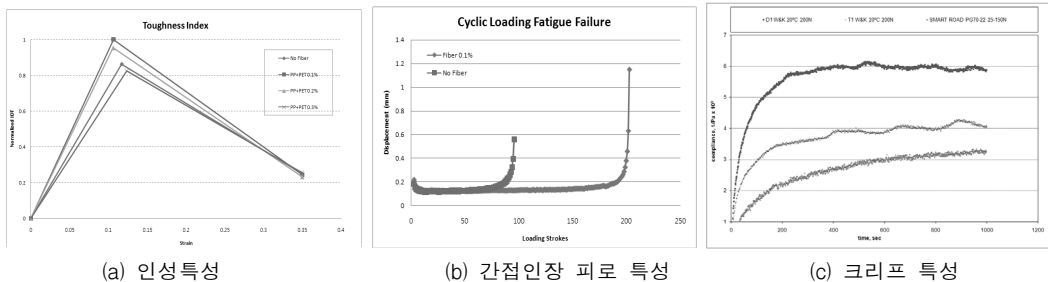


그림 3. PP+PET 합성 폴리머 섬유 보강 아스팔트 혼합물 물리 특성

그림 3a에서 PP+PET 합성 폴리머 보강 아스팔트 콘크리트 혼합은 PP+PET 합성 폴리머 섬유량을 혼합물 시편중량의 0.1%, 0.2%, 0.3% 로 조정하여 시험한 결과, 혼합물 중량의 약 0.1% (1-2 gram)의 소량을 첨가하였는데도 불구하고, 인성의 경우 일반 혼합물에 비해 약 15%의 증대 효과를 발휘 하였다.

최대 인성을 나타낸 PP+PET 합성 폴리머 섬유 0.1% 보강 아스팔트 콘크리트 혼합물의 동적 피로파괴 특성을 알아보기 위해 간접인장시험조건에 일정한 하중을 동적하중 1Hz(1초당 1회 하중 가함)로 시험한 결과, 그

림 3b에서 PP+PET 합성 폴리머 섬유 합성 시편의 경우 약 200회 하중 횟수 이후 파괴에 도달했으나, 일반 혼합물의 경우 약 1/2인 약 100회에서 파괴되었다. 이는 PP+PET 합성 폴리머 섬유 시편 혼합물의 인성 증대로 동일한 조건에서 파괴에 이르는 시간이 일반 혼합물 보다 약 2배 정도 증대되는 것으로 나타났다.

그림 3c는 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 크리프 특성을 우리나라의 일반 밀입도 아스팔트 혼합물(D1 W&K 20°C), 미국 SMART Road(SMART ROAD PG70-22 25 °C)에서 시험된 결과와 본 발명인 PP+PET 합성 폴리머 섬유 혼합물 시편(T1 W&K 20°C)과의 상대 비교를 수행했다. 시험결과 고비용의 용융 폴리머 분말(SBS)로 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.

빔 피로시험을 이용한 일반 밀입도와 섬유보강 혼합물의 분산에너지 변화율을 평가하기위해 분산에너지 계산식 1과 분산에너지 비 계산식 2를 이용하였다.

$$\therefore W_i = \text{Dissipated Energy (DE)} = \pi \hat{\epsilon}^2 E''(w) = \pi \hat{\epsilon}^2 |E^*| \sin \delta = \pi \hat{\epsilon}_i \sigma_i \sin \delta_i \quad (1)$$

$$RDEC_a = \frac{DE_a - DE_b}{DE_a \times (b - a)} \quad (2)$$

식 1에서 DE(Dissipated Energy)는 하중 사이클동안의 분산에너지, $E''(w)$ 는 하중사이클 동안 손실되는 모듈러스, σ_i 시편에 발생하는 스트레스, $\hat{\epsilon}_i$ 는 입력한 스트레인 값, δ_i 는 위상각을 의미한다. 식 2는 Ghuzlan and Carpenter (2000)가 제안한 식으로 임의 하중 사이클 간격간 분산에너지 변화(Ratio of dissipated energy change: RDEC)를 계산하기 위한 산술식이다. 그림 4a는 빔 피로시험에서 1000 cycle 마다 응력-변형을 변화를 나타내며, 각 사이클 별 타원안의 면적은 하중주기 동안의 분산에너지를 의미한다. 동일한 입력 변형을 시편에 가하는 동안 누적변형으로 타원의 기울기가 변화됨을 알 수 있다. 그림 4b의 경우 100cycle 마다의 분산에너지를 식 1로 구하고, 식 2로 구한 분산에너지 변화비를 나타낸다. 초기 하중 주기동안 분산에너지 비가 큰 것은 시편의 큰 초기변형에 원인이 있으며, 이후 분산에너지비 변화가 안정화 단계에 있음을 알 수 있고, 계속적인 하중을 가함으로써 누적변형이 임계값에 도달하면서 분산에너지 비가 다시 크게 증가함을 알 수 있다.

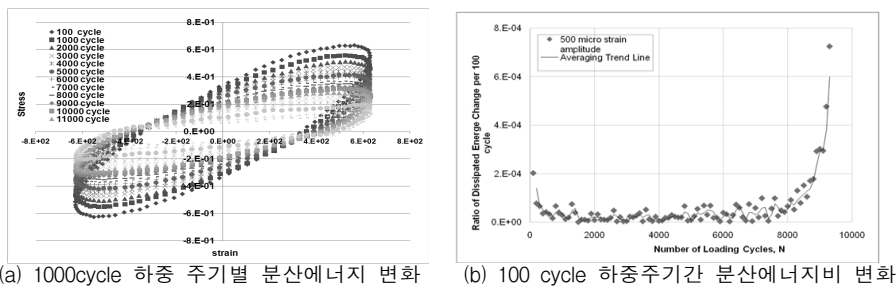


그림 4. 섬유 보강 혼합물의 분산에너지 변화

일반 혼합물과 섬유보강 혼합물의 분산에너지 비 변화 특성을 그림 5a와 5b에 나타내었다. 그림 5a는 변형제어 시험에서 1,500 $\mu\epsilon$ 이 시편에 하중주기동안 발생하도록 시험조건을 조정하고, 시편이 물리적인 파괴에 도달할때까지의 모든 하중주기에 대해 식 2를 이용 분산에너지 변화비를 100 cycle 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 5.4%)의 경우 2,000 cycle 하중주기 근처에서 이미 파괴에 도달했으나, 섬유보강 혼합물의 경우 약 5배에 달하는 10,000 cycle 까지도 아직 현저한 피로파괴 양상은 보이지 않음을 알 수 있다. 또한 그림 5b의 경우 변형을 제어해 1,000 $\mu\epsilon$ 로 변경하여 시험한 결과로서 일반 밀입도 혼합물은 7,000 cycle 정도에서 피로파괴에 도달 했으나, 섬유보강 혼합물의 경우

약 3배 정도의 하중주기동안 에서도 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 발현되는 것을 유추할 수 있다.

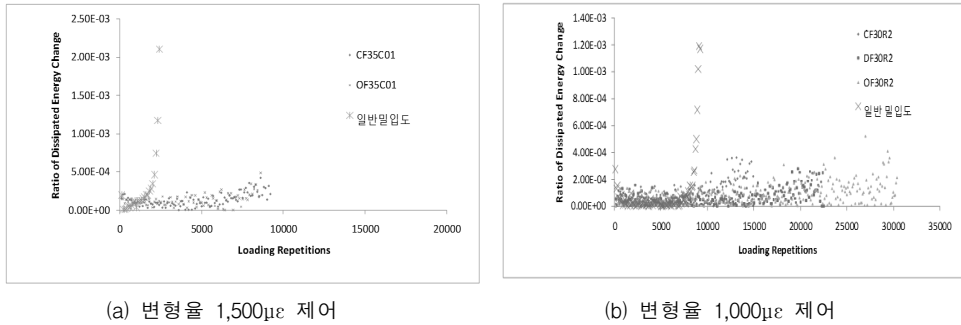


그림 5. 일반 밀입도 및 섬유 보강 혼합물의 분산에너지비 변화

3. 결론

최근 아스팔트 포장 도로 조기파손 및 제한적인 기존 혼합물 배합 설계 등의 문제로 가열 아스팔트 혼합물의 공용성능 및 기계적 물성 등의 획기적 개선을 위한 해결책이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 소량(혼합물 중량 대비 0.1%~0.3%)의 폴리머 합성섬유를 가열 아스팔트 혼합물에 혼입한 새로운 혼합물로 소성변형 및 피로균열 대응 가능성을 평가하였다. 아스팔트 혼합물의 물성 개선, 즉 피로수명 증대 및 내부 전단 변형 저항성능 증대 등을 위해 폴리머 합성섬유의 혼입은 실험실에서 실시한 간접인장강도, 크리프 시험 및 빔-피로시험의 정량적 비교 결과 일반 밀입도 아스팔트 혼합물에 비해 섬유보강 아스팔트 혼합물의 성능개선효과를 검증하였다.

2성분(PP+PET) 폴리머 합성섬유 복합 혼합물은 일반 혼합물에 비해 간접인장강도 시험의 혼합물 인성(Toughness)의 경우 약 15~30% 증대, 피로수명의 경우 약 300~500% 증대, 크리프 컴플라이언스(Creep Compliance) 경우 약 50% 감소 등의 물성 개선 효과를 확인 하였다.

기존 아스팔트 혼합물 생산 방식과 관련한 2성분 폴리머 합성섬유 복합 아스팔트 혼합물 생산은 추가적인 개질 아스팔트 바인더, 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 함량 대비 약 5~10% 크게 아스팔트 바인더 양을 조절할 필요가 있다.

일반 혼합물에 대비한 물성시험 및 공용성능 시험 결과로 볼 때, 2성분 폴리머 합성섬유 복합 아스팔트 포장 혼합물의 탁월한 성능 개선효과로 빈번하게 발생하는 가열 아스팔트 콘크리트 포장의 소성변형 및 조기 피로 파괴 등의 문제에 효과적으로 대처함으로써 장수명 도로 포장으로서 역할이 가능한 것으로 판단한다. 2성분 폴리머 합성섬유 복합 포장 혼합물에 대한 시험결과 적은 양의 섬유 혼입에도 아스팔트 혼합물의 물성 개선 효과가 있음을 검증하였으며, 향후 덧씌우기 포장에서도 기존 포장체에서 반사균열 억제 효과 등을 현장가속시험 등을 통하여 검증할 필요가 있다.

참고 문헌

1. OECD, *Full scale pavement test*, Organization for Economic Cooperation and Development, Road Transport Research, France, 1992
2. COST 333/337, *Development of a bituminous pavement design method for Europe*, BRRC, Belgium, 2000



3. Federal Highway Administration, *2005 status of the Nation's highways, bridges, and transit: conditions and performance*, Report to Congress, Based on 2005 Data, 2006
4. Pyeong Jun, Yoo, *Flexible pavement dynamic response analysis and validation for various tire configurations*, PhD Thesis, University of Illinois at Urbana Champaign, Illinois, USA, 2007
5. SugJoon, Lee, *Long-term performance assessment of asphalt concrete pavement using the third scale model mobile loading simulator and fiber reinforced asphalt concrete*, Phd Thesis, North Carolina State University, North Carolina, USA, 2003
6. Hampton, Francis P., *Cyclic behavior, development and characteristics of a ductile hybrid fiber reinforced polymer for reinforced concrete members Vol 1*, Phd Thesis, Drexel University, Philadelphia, PA, USA, 2004
7. Monismith, C.L., J. Sousa, and J. Lysmer., *Modern pavement design technology including dynamic load conditions* Truck and Bus Meeting and Exposition, pp. 33-52, 1998