

4점 휨 피로시험 장비로 측정한 아스팔트 혼합물의 피로 특성에 관한 연구

A Study for Fatigue Characteristics of HMA as Measured using the Four Point Bending Beam Fatigue Tester

최지영*, 박희문**, 엄병식***, 홍재청****

Choi, Ji Young, Park, Hee Mun, Ohm, Byung Sik, Hong, Jae Cheong

1. 서론

아스팔트 혼합물의 피로거동의 특성을 파악하기 위하여 각국의 연구기관에서는 다양한 종류의 피로시험을 개발하여 사용하고 있다. 피로시험에 사용되는 시편의 기하학적 조건 및 하중재하 방식에 따라 피로시험은 크게 일축인장 피로시험, 간접인장 피로시험, 처짐보(bending beam) 피로시험으로 구분할 수 있다. 또한 피로시험은 하중의 재하방식에 따라 응력제어와 변형률제어로 구분이 된다. 본 연구에서는 아직 국내에 많이 보급되지 않은 4점 휨 피로시험 장비를 사용하여 아스팔트 혼합물의 피로특성을 파악하고, 피로모형을 개발하고자 한다.

2. 처짐보 피로시험(Bending Beam Fatigue Test)

이 시험은 보형태의 공시체에 반복하중을 가하여 시험을 수행하는 것으로, 단순 지지된 시편에 1점 또는 2점 하중을 재하한다. 일반적으로 응력과 변형률 계산은 휨이론에 의해 수행되며, 다음과 같은 장단점이 있다.

■ 장점

- 시험법이 널리 잘 알려져 있고 이해가 쉽다.
- 혼합물의 평가와 설계에 사용될 수 있는 기본적인 물성을 측정할 수 있다.
- 응력제어 시험의 결과는 두꺼운 아스팔트 포장의 설계에 사용할 수 있으며, 변형률제어 시험의 결과는 얇은 아스팔트 포장의 설계에 사용할 수 있다.
- 2점 재하시험에서 시편의 파괴는 비교적 균등한 응력범위에서 시작된다.

■ 단점

- 실험실 결과를 현장에서의 포장공용성과 비교·입증하기 위하여 전이계수(Shift factor)가 필요하다.
- 비용과 시간이 많이 들며 특별한 장비를 요구한다.
- 1점 재하방식에서는 비교적 균등한 인장응력 범위에서 시편의 파괴가 시작되는 것이 불가능하다.
- 응력의 상태가 근본적으로 일축이기 때문에 현장의 포장체 내에서 발생하는 응력상태를 재현하기가 불가능하다.
- 인장변형률과 응력을 계산하기 위하여 탄성이론을 사용한다.

* 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원 · 공학석사 · 031-910-0190 (E-mail : legion@kict.re.kr)

** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원 · 공학박사 · 031-910-0323 (E-mail : hpark@kict.re.kr)

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원 · 공학석사 · 031-910-0541 (E-mail : bseom@kict.re.kr)

**** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 국토PMS조사평가팀장 · 031-910-0186 (E-mail : jcheong@kict.re.kr)

2.1 기존의 휨 피로시험

가) 3점 휨 피로시험

3점 휨 피로시험은 영국(J. W. Smith, 1984)과 일본(笹井 幸男, 1999)에서 실시하였으며, 강상판과 아스팔트 혼합물로 이루어진 시편으로 시험하였다.

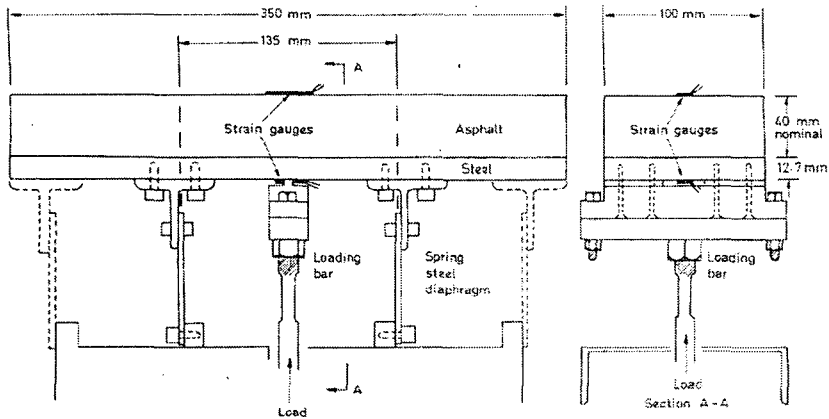


그림 1. 영국의 3점 휨시험 장치

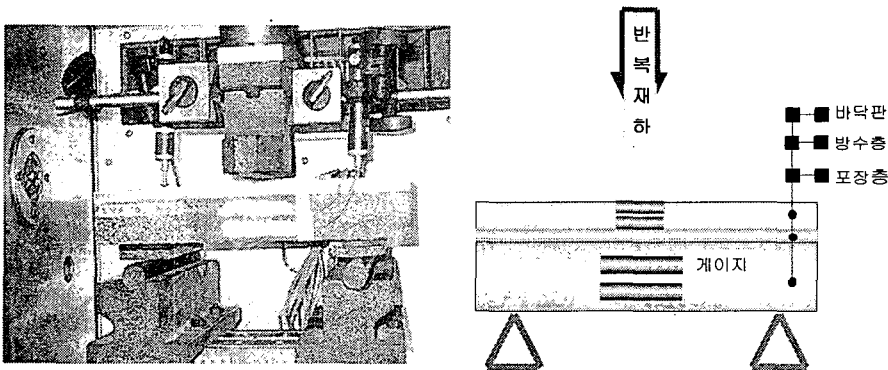


그림 2. 일본의 3점 휨시험 장치

나) 4점 휨 피로시험

4점 휨 피로시험은 미국(Asphalt Institute, 2003)과 네덜란드(Medani T.O., 2002), 남아프리카 공화국(Hartman, 2004)등에서 시행되고 있다.

미국 아스팔트 협회는 장수명포장과 관련된 연구에서 무한피로수명이 될 수 있는 변형률을 찾기 위하여 시험을 실시하였다. 변형률제어방식으로 변형률 레벨을 $800\mu\epsilon$, $400\mu\epsilon$, $200\mu\epsilon$, $100\mu\epsilon$, $70\mu\epsilon$ 으로 시험하였다. 그림 3은 각 변형률 레벨에 따른 시편의 강성감소를 나타내고 있다.

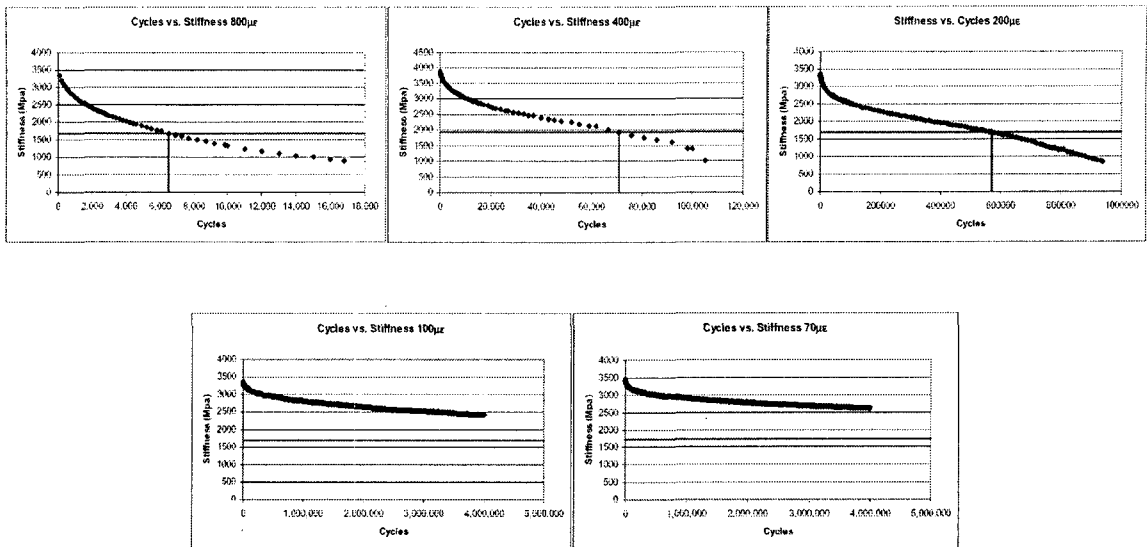


그림 3. 4점 휨 피로 시험결과 (Asphalt Institute, 2003)

3. 4점 처짐보 피로시험 규정

4점 휨 피로시험에 대한 시험 규정은 AASHTO TP8-94 "Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending"로서 아래의 사항들을 규정하고 있다.

이 시험기준의 목적은 빔형태(50mm×63mm×380mm)의 아스팔트 혼합물에 반복하중을 주어 휨파괴가 일어나게 하여 피로수명과 피로에너지를 측정하는 것이다. 그림 4는 시편에 작용하는 힘들을 나타낸 모식도이다. 하중제하는 변형률제어로 5~10Hz의 사인파로 하며, 시편을 지지하는 4점은 회전이 자유로워야 한다. 시험온도는 20±0.5℃에서 수행하며, 2시간동안 시편의 온도를 안정화시킨 후 시험을 수행한다.

시험이 진행되는 동안 재하하중, 빔 중앙의 처짐과 더불어 최대인장응력, 최대인장변형률, 위상각, 강성, 손실에너지, 누적손실에너지가 하중제하 주기마다 계산되어 저장될 수 있어야 한다.

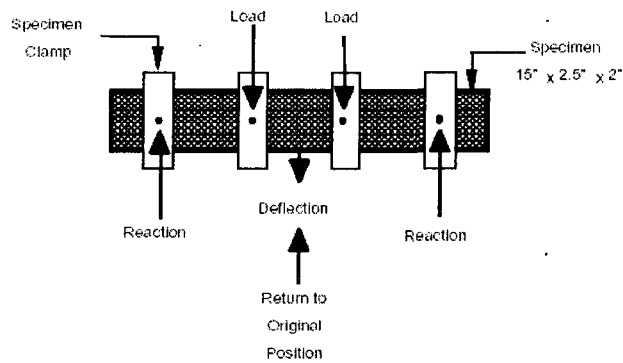


그림 4. 4점 휨 피로시험의 하중제하장치 개략도

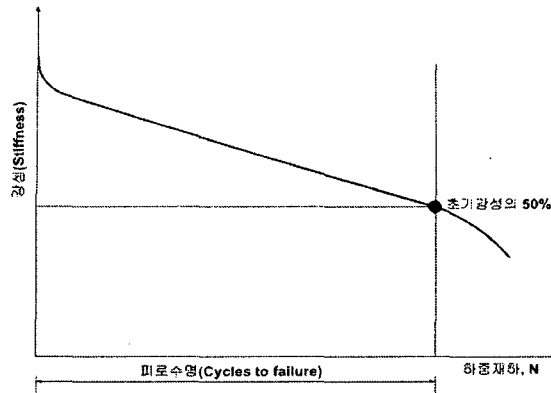


그림 5. 변형률제어 방식에서 파괴의 정의

재하하는 변형률은 $250 \sim 750 \mu\epsilon$ 으로 하며, 초기 50사이클에서 측정된 결과들을 계산하여 초기강성을 계산한다. 시편의 파괴는 혼합물의 강성(Stiffness)이 초기 강성의 50%일 때의 하중재하횟수로 정의한다(그림 5).

3.1 계 산

아래의 식을 이용하여 하중재하 주기마다 값들을 계산한다.

3.1.1 최대인장응력(Maximum Tensile Stress, Pa)

$$\sigma = \frac{PL}{bh^2} \quad (\text{식 1})$$

여기서, P : 재하하중 (N)

L : 바깥쪽 클램프 사이의 거리 (m)

b : 시편의 평균너비 (m)

h : 시편의 평균높이 (m)

3.1.2 최대인장변형률(Maximum Tensile Strain, m/m)

$$\epsilon_t = \frac{12\delta h}{3L^2 - 4a^2} \quad (\text{식 2})$$

여기서, δ : 시편중앙에서의 최대처짐 (m)

a : 안쪽 클램프 사이의 거리 (m)

L : 바깥쪽 클램프 사이의 거리 (m)

3.1.3 휨 강성(Flexural Stiffness, Pa)

$$S = \frac{\sigma_t}{\epsilon_t} \quad (\text{식 3})$$

3.1.4 위상각(Phase Angle, deg)

$$\phi = 360 f s \quad (\text{식 } 4)$$

여기서, f : 하중재하주기 (Hz)

s : P_{\max} 와 δ_{\max} 사이의 시간 (sec)

3.1.5 소산에너지(Dissipated Energy, J/m³)

$$D = \pi \sigma_t \epsilon_t \sin(\phi) \quad (\text{식 } 5)$$

3.1.6 누적 소산에너지(Cumulative Dissipated Energy, J/m³)

$$\sum_{i=1}^n D_i \quad (\text{식 } 6)$$

여기서, D_i : i 번째 하중재하에서의 소산에너지

4. 피로시험

4.1 시험시편제작

본 연구에서 사용한 시편은 19mm 밀입도+AP5 혼합물을 사용하였으며, 최적아스팔트 함량은 5.1%를 사용하였다. AASHTO TP-8에서 제시한 크기의 시편을 제작하기 위하여 300mm×400mm×60mm의 시편을 제작하여 5개로 잘라 시편을 마련하였다. 또한, 시편의 균열을 관찰하기 위하여 수직면에는 흰색 페인트를 칠하였다.

4.2 시험장비

하중재하 및 조절은 기존의 INSTRON장비를 사용하였으며, 4점 휨 피로시험을 위하여 하중 재하장비를 새로 제작하였다. 시험데이터의 수집 및 저장은 National Instruments사의 SCXI 샤시와 LabVIEW 프로그램을 사용하였다. 하중재하 장비는 큰 사이즈의 시편을 시험할 수 있도록 크게 제작되었으며, 시편의 고정을 위하여 4개의 DC모터를 장착하였다.

4점 휨 피로시험을 위하여 그림 6과 같이 시스템을 구성하였다. 시험을 수행하기 위한 변형률계는 INSTRON컨트롤러에 연결된 컴퓨터에서 MAX프로그램을 사용하였고, 시험 중 사이클마다 발생하는 하중, 보의 처짐, 바닥판과 아스팔트 혼합물의 변형률은 National Instruments사의 SCXI샤시를 통하여 수집되도록 하였다. SCXI샤시는 센서의 특성에 맞는 각각의 모듈을 설치하여 시그널 컨디셔닝을 할 수 있는 장비이다. 이렇게 수집된 데이터는 SCXI샤시에 연결된 컴퓨터에서 LabVIEW 프로그램으로 각 센서의 측정값과 강성, 위상각 및 손실에너지가 계산되어 화면에 보여진다. 그림 7은 시험데이터를 수집중인 LabVIEW의 모니터 화면으로서, 각각의 하중주기마다 하중, 시편중심에서의 처짐값을 그래프로 보여주고 있다. 또한, 수집된 데이터를 바탕으로 실시간으로 시편의 강성(Stiffness)과 위상각(Phase angle), 소산에너지(Dissipated energy)를 계산하여 저장할 수 있다(그림 7).

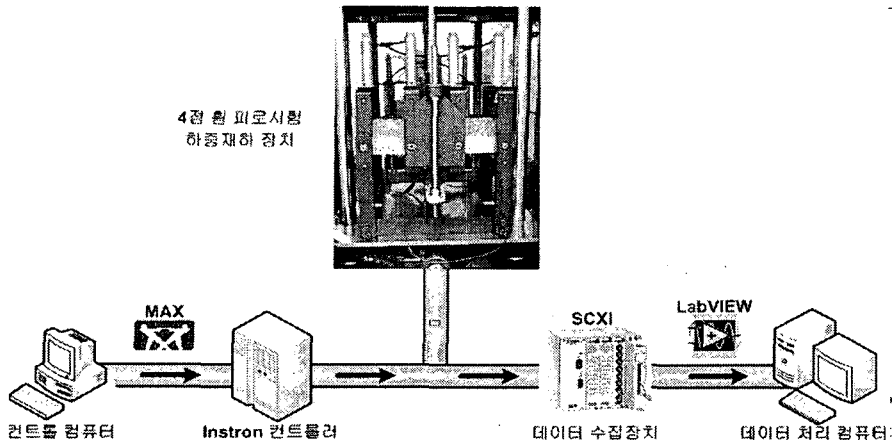


그림 6. 4점 휨 피로시험장비 개념도

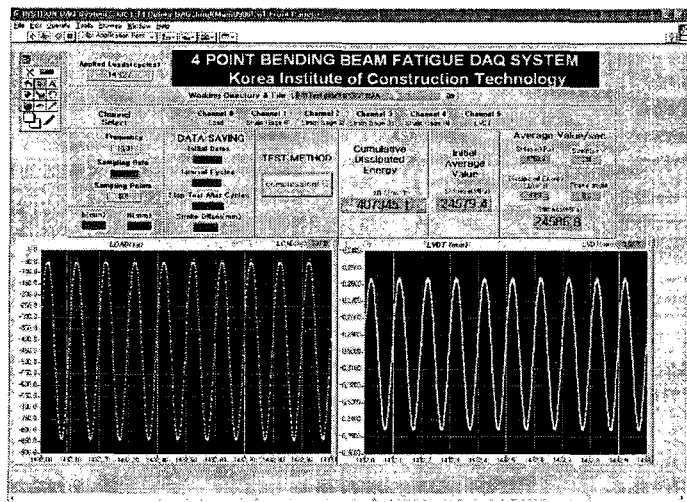


그림 7. 데이터 수집중인 LabVIEW 화면모습

4.3 시험방법

하중재하는 변형률제어 방식으로, 10Hz의 Haversine파로 재하 하였다. 시험온도는 20℃로, 시편은 20℃에서 2시간이상 방치후 시험을 실시하였다. 시험 데이터는 시험초기의 50cycles의 값을 계산하여 초기 강성값(S_{ini})을 구하고, 매 500cycles 마다 데이터를 계산 및 저장하여 초기 강성값 40%가 되면 시험이 끝나도록 하였다.

4.4 시험결과

각 시편에 대하여 변형률제어 방식으로 시험이 이루어 졌다. 재하된 변형률은 240 $\mu\epsilon$, 300 $\mu\epsilon$, 400 $\mu\epsilon$, 410 $\mu\epsilon$, 470 $\mu\epsilon$ 로서, 시편의 크기에 따라 변형률이 조금씩 다르게 나타났다.

그림 8은 240 $\mu\epsilon$, 410 $\mu\epsilon$ 의 시험결과로서 초기 강성의 50%에 도달하였다. 그러나 120 $\mu\epsilon$ 로 재하하였을 경우는 2,000,000회를 재하 하여도 초기강성의 50%에 도달하지 아니하여 시험을 중단하였다. 미국 아스팔트 협회의 시험결과에서는 200 $\mu\epsilon$ 에서는 강성이 초기강성의 50%에 도달하였으며, 무한피로수명이 되는 변형률은 100 $\mu\epsilon$ 이 하였다.(그림 3)

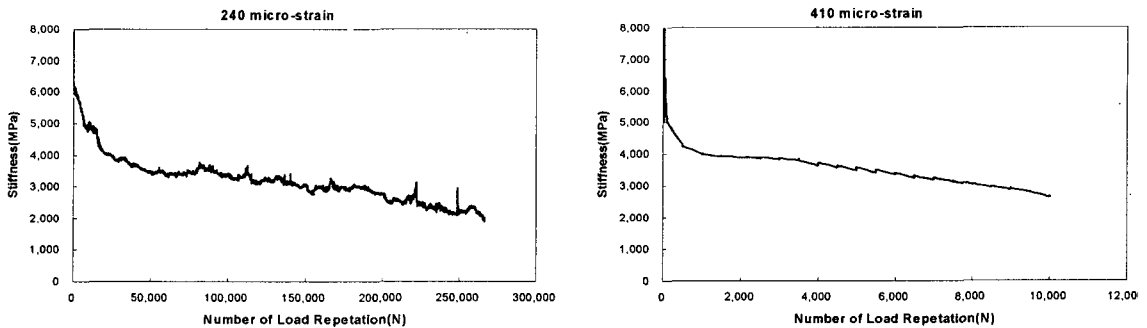


그림 8. 변형률 제하방식의 피로시험 결과

5개의 시편에 대하여 시험한 결과 아래의 식 7과 같이 19mm 밀입도+AP5 혼합물의 피로식을 구할 수 있었다.

$$\epsilon_t = 2595.9 N^{-0.2058} \quad (\text{식 7})$$

여기서, ϵ_t : 인장변형률

N : 하중재하횟수

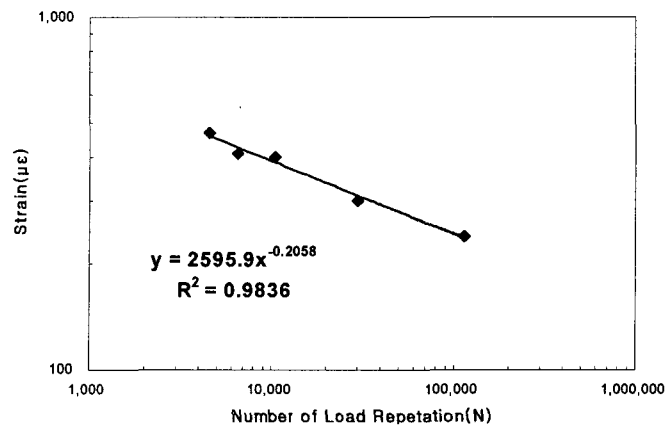


그림 9. 19mm밀입도+AP5 혼합물의 피로모형

5. 결 론

본 연구를 통한 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 4점 휨 피로시험 장비를 이용하여 아스팔트 혼합물의 피로특성을 파악할 수 있었다. 특히 실제 포장과 가장 유사한 방식으로 다짐을 하고, 실제 포장에서와 같은 휨거동이 발생하게 시험하여 실제거동과 가장 유사하게 모사시험을 수행할 수 있다는 장점이 있다.

2. 변형률 120 $\mu\epsilon$ 에 대해서는 초기강성의 50%에 도달하지 않았다. 이는 19mm 밀입도+AP5혼합물의 경우 120

$\mu\epsilon$ 이하의 변형률에 대해서는 피로균열에 대한 저항성이 매우 큰 것을 알 수 있었다.

3. 19mm 밀입도+AP5 혼합물에 대한 피로모형을 개발할 수 있었다.

아스팔트 혼합물의 피로특성을 단기간에 완료하기 위하여 SHRP 보고서에서는 다음과 같은 방법을 제안하고 있다. 4개의 시편에 변형률제어로 10Hz의 서로 다른 변형률을 재하 하여 24시간 안에 피로시험을 마칠 수 있다.

1. 피로수명이 5,000~10,000회가 나오도록 변형률 레벨을 높게하여 시험을 실시한다. 시작 변형률 레벨로 80 0~1,000 $\mu\epsilon$ 이 주로 사용된다. 만약 피로수명이 10,000회를 넘을 경우, 2번째 시편은 변형률 레벨을 높여 시험을 실시하고, 그렇지 않은 경우는 변형률 레벨을 낮추어 시험을 실시한다. 이런 변형률에서의 시험은 대략 2시간이 소요된다.

2. 앞에서의 시험이 서로 다른 변형률 레벨에서 실시되었다면, 변형률과 하중재하횟수의 관계로부터 기울기를 구할 수 있다. 이 기울기를 이용하여, 피로수명이 대략 100,000회가 되도록 변형률 레벨을 정하여 시험을 실시한다. 이 시험은 대략 4시간이 소요된다.

3. 2단계까지의 결과로부터 얻은 변형률과 하중재하횟수와의 관계는, 피로수명이 350,000~500,000회가 되는 변형률 레벨을 더 잘 찾을 수 있게 한다. 이 시험은 13~15시간이 소요되며, 다음날 아침에는 피로시험이 완료되어 있다.

앞으로 다양한 혼합물에 대한 추가시험과, 현장 데이터와의 변환계수와 관련하여 많은 연구가 추가되어야 할 것으로 사료된다.

감사의글

본 연구는 한국건설기술연구원 기관고유사업인 “고내구성 교면포장 기술개발 연구”의 일부 성과물로 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. 박희문, 최지영, 고내구성 교면포장 기술개발 연구, 한국건설기술연구원, 2004
2. 笹井 幸男ほか, "鋼床版SMA舗装の挙動調査", 第23回日本道路協會論文集, 1999, pp276.
3. A. A. Tayebali, J. A. Deacon, and C. L. Monismith, Development and Evaluation of Dynamic Flexural Beam Fatigue Test System, *Transportation Research Board 1545*, Transportation Research Board, National Research Council, Washinton D.C., 1996, pp.89-97.
4. A. M. Hartman, M. D. Gilchrist, Evaluating Four-Point Bend Fatigue of Asphalt Mix Using Image Analysis, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 16, ASCE, Jan./Feb. 2004, pp. 60-68
5. G. M. Rowe, M. G. Vouldin, Improved Techniques to Evaluate the Fatigue Resistance of Asphalt Mixtures, 33rd Annual Meeting of Petersen Asphalt Research Conference, Laramie, WY, July 1996.
6. Institute for Transportation Studies, Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes, University of California at Berkeley, SHRP-A-404, 1994, pp. 89-97.
7. J W Smith, M S G Cullimore, I D Fleet, C E Little "Durability and stiffness of mastic asphalt on steel bridge deck plates loaded in flexure" Department fo Civil Engineering, University of Bristol, Contractor Report CR5, (1984), pp11~13.
8. Kent Newman, Polymer-Modified Asphalt Mixtures for Heavy-Duty Pavements : Fatigue Characteristic as Measured by Flexural Beam Testing, 2004 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Apr. 2004.
9. Medani T. O., Kolstein M. H., Material behaviour of mastic asphalt for orthotropic steel deck bridges, CROW, Wegbouwkundige Werkdagen, Ede, 2002, Nederland.
10. Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending, AASHTO Designation : TP8-94, 1996