

아스팔트바인더의 새로운 저온등급 제안

A New Low-Temperature Grading Proposal for Asphalt Binders

허정도* · 노성열** · 최한길***

Huh, Jung Do · Roh, Sung Yul · Choi, Han Kil

1. 서론

이 온도 영역은 통상 30℃에서 -45℃까지를 말하는 데, 피로균열, 충격균열, 반사균열, 저온균열 등의 각종 균열이 발생하는 온도영역을 일컫는다. 일본의 경우 배수성포장용 개질아스팔트 규정으로서 -20℃의 굴곡강도와 굴곡에너지를 시험하여 그 물성으로 이 온도영역의 기준을 정하고 있으며(Nakanishi et al(2002)), 미국의 경우 BBR시험을 통하여 크립강도와 기울기 m값을 구하고 이 값을 이용하고 시간-온도 중첩원리를 적용하여 저온등급을 제정하고 있다. 본 연구에서는 미국의 크립물성 보다는 재료의 파괴에너지가 각종 균열과 직접적인 관련이 있다는 연구결과에 따라서, 일본과 마찬가지로 굴곡강도시험을 채택하고 굴곡에너지를 산정하여 이 값으로 저온등급을 제정하려 시도하지만 일본과는 전혀 다른 저온규정을 제시한다.

2. 연구내용

2.1 굴곡시험

굴곡강도 시험장비는 압축시험기에 굴곡시험 장치를 부착하여 사용한다. <그림 1>은 굴곡시험 장비를, <그림 2>는 시험시편이 장착된 형상을 보여준다. 굴곡시험의 지간거리는 일본의 경우 8cm인 반면에, 본 연구에서는 6cm로 한다. 시험시편의 규격은 일본의 저온시험과 동일하게 폭(2cm)x높이(2cm)x길이(12cm)이다. 시험온도는 일본과는 달리 -25, -20, -15, -10 및 -5℃의 다섯 온도에서 시험한다. 시험챔버의 온도를 시험온도로 맞춘 후 5시간 이상을 허용하여 시편이 균일 시험온도가 되도록 조절한다. 준비된 시편을 굴곡시험기의 두 지지대 위에 올려놓고 지지대의 중앙 점에 10mm/분의 속도로 시편의 횡축으로 압축하중을 가하여 중앙 부분의 굴곡을 유도한다. 시험결과로서 굴곡하중이 굴곡변위에 따라 변화하는 값이 측정된다. 굴곡하중과 굴곡변위와의 관계는 대부분 다음 관계식을 만족한다.

$$F = ay^b \quad (1)$$

$$F = \text{굴곡하중(kgf)} \quad y = \text{굴곡변위(cm)}$$

굴곡강도는 중앙점 하중에 의한 굴곡강도 식(崔 癸軾(2000))⁸으로 구한다.

$$R = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (2)$$

$$R = \text{굴곡강도(kgf/cm}^2\text{)}, \quad P = \text{최대굴곡 하중(kgf)}$$

$$L = \text{지간거리(cm)}, \quad b = \text{시편의 평균 폭(cm)}$$

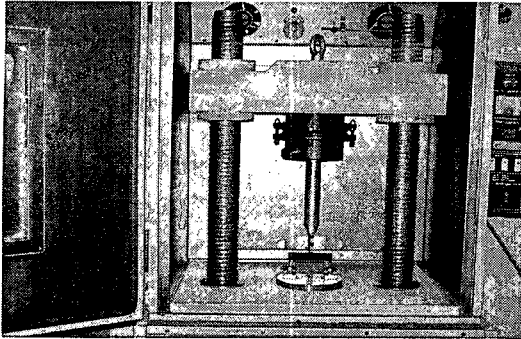
$$h = \text{시편의 평균 높이(cm)}$$

굴곡에너지(W)는 식 (1)을 이용하여 구한다.

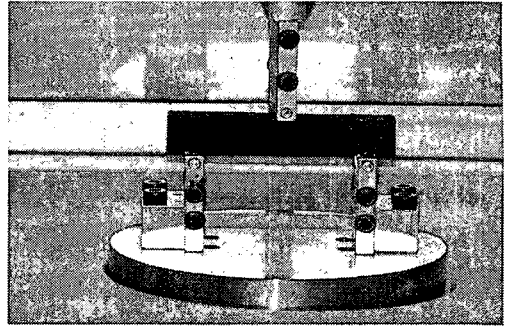
* 정회원 · 인천대학교 ITS 연구센터 수석연구원 · 공학박사 (032)573-6631 (E-mail: jung_huh@hotmail.com)

** 정회원 · 건설교통부 도로정책과 사무관 · 공학석사 (02)504-9160 (E-mail: syroh@moct.go.kr)

*** 정회원 · (주)동일기술 부사장 · 공학박사 (02)3400-5508 (E-mail: oneway1950@hanmail.net)



<그림 1> 굴곡시험 장비와 장착된 시편.



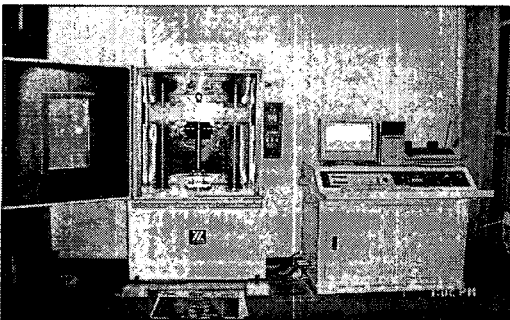
<그림 2> 굴곡강도 시편의 장착 모습.

$$W = \int_0^{\gamma_m} F \cdot d\gamma = \frac{a}{b+1} \gamma_m^{b+1} \quad (3)$$

γ_m 는 굴곡파괴가 있을 경우에는 파괴점에서의 변위, 혹은 파괴되지 않고 계속 굴곡될 경우에는 지간영향으로 하중변화가 오는 시점 바로 전의 변위로 정의된다. 위에서 제시한 시편규격과 지간거리에서는 지간영향으로 하중변화가 오기전의 변위는 통상 5mm 전후의 값으로 나타났다. 5mm를 넘어도 파괴되지 않으면 이 시편은 해당 시험온도에서 파괴가 일어나지 않는다고 정의된다.

2.2 굴곡시험용 장비와 시편제작 몰드

저온 굴곡시험을 수행하기 위해서는 압축시험기, 굴곡시험시편을 지지하는 시편 지지대, 재하봉, 로드셀, 변위측정센서(LVDT), 각 센서에서의 값을 측정값으로 변환할 수 있는 프로그램과 컴퓨터, 프린터 그리고 측정부위를 둘러싸며 온도를 조절할 수 있는 환경챔버 등으로 구성되며, <그림 3>에 실물사진을 보여주고 있다. 더욱 자세한 그림은 위 <그림 1>과 <그림 2>에 나타나 있다.



<그림 3> 환경챔버 내에 설치된 굴곡 시험장비와 제어 컴퓨터에 대한 사진.

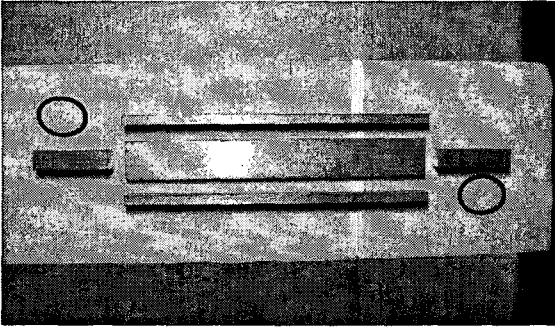
시편지지대는 스텐레스 스틸 혹은 도금을 하여 부식되지 않아야 하며, 지지대 간의 거리는 $6 \pm 0.1\text{cm}$ 라야 한다. 재하봉은 아스팔트시편의 중앙에 하중을 재하할 수 있는 장치로서 500kgf 정도의 하중에 전혀 변화가 없어야 한다.

환경챔버는 시험온도를 -45°C 에서 40°C 까지 변할 수 있어야 하고, 순환펌프로 내부공기를 순환시켜서 항상 균일한 온도를 유지할 수 있으며, 온도변화가 세팅한 온도의 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내여야 한다.

시험시편 몰드는 보통 알루미늄 몰드를 사용한다. 시편몰드의 내부치수는 길이 $12 \pm 0.01\text{cm}$, 폭 $2 \pm 0.01\text{cm}$, 높이 $2 \pm 0.01\text{cm}$ 가 되어야 한다. 시편몰드의 그림은 <그림 4>와 <그림 5>에 나타내었다.

2.3 시편제작과 굴곡시험

<그림 4>의 각 부품을 조립하기 전에 두 측면의 내부 표면과 저판에 젤리를 바르고 여기에 아세테이트 필름을 올려서 붙인다. 이렇게 조립된 시편몰드(<그림 5>)에 충분히 용융된 시료를 한쪽 끝에서부터 천천히 흘려 넣는 데 이 때 기포가 생기지 않도록 주의한다. 용융체는 위가 약간 불룩하도록 채워 넣어서 냉각되어도 시편의 윗면이 일정한 평면을 유지하도록 해야한다. 시료의 윗면이 고르지 않다면 실온에서 45-60분 방치하여 냉각시킨 후, 가열한 스페큘라를 사용하여 시료의 윗부분을 균일한 면이 되도록 다듬는다 (통상 체적수축이나 표면장력으로 인하여 시편에 따라 몰드 중앙의 시편부위에 약간의 함몰이 생긴다).



<그림 4> 굴곡시험 몰드부품을 해체한 모양.



<그림 5> 굴곡시험 몰드부품을 조립한 모양.

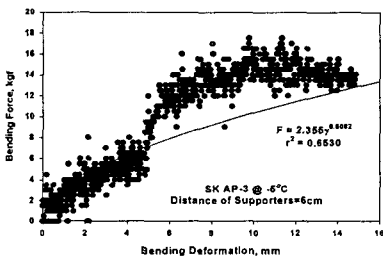
이렇게 제작된 시험시편은 상온에서 1시간 가량 냉각시킨 후, 몰드와 함께 $0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 의 냉장고에 1시간 이상 넣어둔다. 냉장고에서 꺼내어 몰드와 아세테이트 필름을 해체하고 시편을 얻는다. 이렇게 얻어진 시편은 시험하고자 하는 온도와 균일하게 하기 위하여 시험온도를 맞춘 환경챔버 내에 5시간 이상 유지시킨다.

측정준비가 완료된 시편은 <그림 2>와 같이 지지대 위에 올려놓고 영점을 맞춘 후에 재하봉이 10mm/분의 속도로 양쪽 지지대의 중앙점 시편에 압축하중을 가하도록 하면 굴곡시험이 수행된다. 이 때 굴곡변위와 굴곡하중 데이터가 변위센서와 로드셀에 의해 측정되고 수치로 변환되어 컴퓨터에 저장된다.

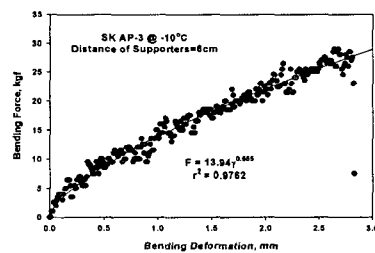
이상의 시험을 $-25, -20, -15, -10, -5, 0^\circ\text{C}$ 에서 각각 수행하여 시편이 굴곡시험에 의해 파괴되는 온도를 찾아낸다.

2.4 굴곡시험 데이터 분석

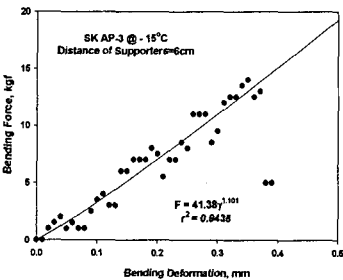
위에서 설명한 방법대로 대표적인 개질아스팔트에 대한 시편을 만들어 굴곡시험을 수행하였다. SK의 AP-3에 대한 시험 데이터는 온도별로 <그림 6>에서 <그림 10>에 표시되어 있다.



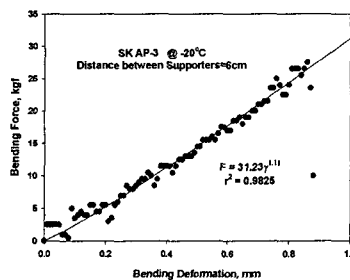
<그림 6> -5°C 굴곡시험.



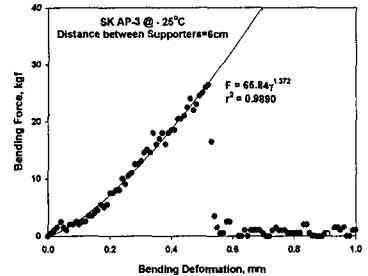
<그림 7> -10°C 굴곡시험.



<그림 8> -15°C 굴곡시험.



<그림 9> -20°C 굴곡시험.



<그림 10> -25°C 굴곡시험.

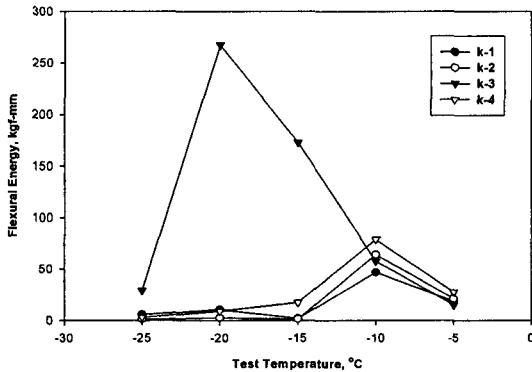


-5°C에서의 굴곡시험 데이터를 나타내는 <그림 6>은 변위가 5mm부근에서 굴곡강도의 변화가 일어남을 볼 수 있으나, 파괴점은 보이지 않는다. 따라서 SK AP-3은 -5°C에서 파괴되지 않는다 하겠다. 이 경우 굴곡강도의 변화가 일어나기 바로 직전의 강도와 변위를 최대값으로 정하고 이 값을 <표 1>에 나타낸다. 반면에 -5°C보다 더 낮은 온도의 굴곡시험 데이터를 표현한 <그림 7>에서 <그림 10>까지는 굴곡에 의한 파괴점이 명확히 드러나 있다. 그러므로 SK AP-3의 파괴점은 -5°C와 -10°C 사이에 존재함을 알 수 있고, 여기서는 -7°C로 정한다. 그리고 각 온도에서의 파괴점 최대하중과 최대변위를 각 그림의 데이터로부터 구할 수 있으며 이들도 <표 1>에 나타내었다. <표 1>에는 변위 γ 함수로서의 하중 F에 대한 회귀분석결과(식 (1))와 이를 이용한 굴곡에너지(식 (3)으로 계산) 값, 파괴하중과 파괴변위, 파괴온도가 국내의 개질이나 비개질 아스팔트 시료에 대하여 수록되어 있다.

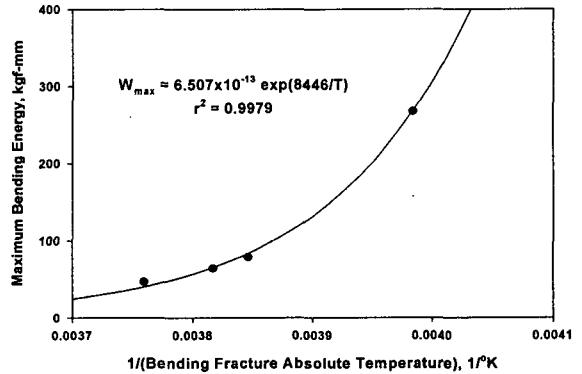
공통적인 현상으로서 굴곡파괴는 변위가 5mm에 도달하기 이전에 발생하며, 파괴되지 않을 경우는 5mm 전후에서 굴곡하중의 변화가 일어난다. 그리고 온도가 낮아수록 굴곡하중을 나타내는 식 (1)의 지수값 b가 커지는 경향이 보이며, 이 값이 크면 재료자체가 매우 딱딱해져 쉽게 파괴될 수 있음을 의미한다. 그리고 굴곡파괴온도는 재료자체의 파괴에너지와 직접적인 관계가 있는 것으로 보이며, 파괴온도에서 최대굴곡파괴에너지에 도달한다. 그 예를 <표 1>에서 회색부분으로 나타내었다. <표 1>을 참조하면 파괴에너지는 재료가 파괴되기 이전 온도나 혹은 파괴 후의 온도에 나타나는 것으로 표현되어 있지만, 엄밀히 말해서, 두 온도간 격(5°C)의 어딘가에서 일어난다고 하는 것이 더욱 정확하다. 이 온도가 파괴에 가까우면 파괴온도쪽에 파괴 이전의 온도에 가까우면 파괴 전의 온도 값이 최대값인 것처럼 <표 1>에 나타나 있다.

<표 1> 각종 아스팔트바인더에 대한 굴곡시험 데이터의 분석.

아스팔트 바인더	측정온도(°C)	식(1) a	식(1) b	r ²	파괴변위(mm)	파괴하중(kgf)	파괴 에너지(kgf.mm)	파괴 가부	저온등급-파괴온도(°C)
k-1	-5	2.36	0.6082	0.6530	4.85	6.0	18.55	부	-7
	-10	13.94	0.6650	0.9762	2.81	27.5	46.77	가	
	-15	41.38	1.1010	0.9435	0.35	14.0	2.17	가	
	-20	31.23	1.1100	0.9825	0.86	27.5	10.77	가	
	-25	65.84	1.3720	0.9890	0.52	26.5	5.89	가	
k-2	-5	2.98	0.4440	0.4663	5.00	6.5	21.06	부	-12
	-10	7.31	0.5775	0.9517	5.29	18.5	64.19	부	
	-15	13.31	0.8672	0.8806	0.43	6.0	1.47	가	
	-20	27.72	1.0360	0.9652	0.46	12.0	2.80	가	
	-25	36.72	1.5270	0.9290	0.38	7.5	1.26	가	
k-3	-5	1.11	0.9341	0.6012	5.40	7.0	15.03	부	-22
	-10	6.43	0.6684	0.9840	5.06	18.5	57.63	부	
	-15	19.84	0.6330	0.9941	5.08	54.5	172.70	부	
	-20	25.08	0.8076	0.9891	5.14	89.0	267.50	부	
	-25	22.57	1.3650	0.9953	1.60	41.5	29.00	가	
k-4	-5	3.49	0.6250	0.8334	4.80	9.0	27.45	부	-13
	-10	9.06	0.6707	0.9742	4.96	26.5	78.75	부	
	-15	18.81	0.6766	0.8900	1.30	22.0	17.42	가	
	-20	44.98	0.8908	0.9916	0.61	29.0	9.34	가	
	-25	78.45	1.1120	0.9806	0.31	21.0	3.13	가	
k-5	-5	14.89	0.7818	0.9346	0.59	9.0	3.26	가	-2
	-20	50.90	1.1500	0.9489	0.28	11.5	1.53	가	
	-25	13.243	0.6860	0.9359	0.71	10.0	4.40	가	
k-6	-10	14.27	0.7651	0.7825	0.56	12.0	2.91	가	-7
	-15	40.00	0.9499	0.9129	0.47	19.5	4.71	가	
	-20	40.47	0.9489	0.9954	1.12	44.0	25.90	가	
	-25	51.28	1.5700	0.9865	0.66	27.0	6.86	가	



<그림 11> 온도에 따른 굴곡에너지의 변화.



<그림 12> 파괴온도와 에너지와의 상관관계.

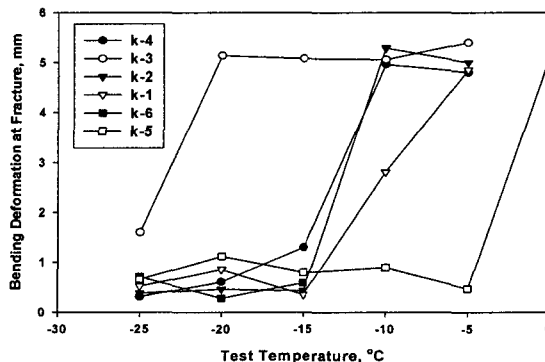
위 <표 1>에서 그늘진 부분은 최대에너지를 제공하는 측정온도이며, <그림 11>에 최대굴곡에너지가 나타나 있다. 이 최대 굴곡에너지는 <그림 12>에 표현된 바와 같이 파괴온도와 관련성이 있다. 이 의미는 저

온등급기준으로 파괴온도를 사용하던지 아니면 최대 굴곡에너지를 사용할 수 있다는 의미이며, 서로 상관관계를 가지고 있다. 즉, 최대굴곡에너지를 알면 아래 식 (4)에 삽입하여 파괴온도를 계산할 수 있다.

$$W_{max} = 6.507 \times 10^{-13} \exp\left(\frac{8446}{T}\right) ; r^2 = 0.9979 \quad (4)$$

이 파괴온도가 특정재료의 저온특성을 대표하기에 충분함으로 본 연구에서 처음으로 저온등급 기준으로 정한다. 이 파괴온도(혹은 최대굴곡에너지)는 재료의 최대파괴변위와 파괴강도에 의해 결정되며, 최대파괴변위는 탄성이 큰 재료일수록 커지고, 파괴강도는 강성이 큰 재료일수록 증가한다. 이 두 물성값이 크면 클수록 큰 최대굴곡파괴에너지를 얻게 되며 더욱 낮은 등급온도가 되는 데, 이러한 재료는 탄성과 내구성(toughness)이 우수한 바인더라 하겠다.

굴곡파괴온도는 파괴변위가 높은 값(5mm 전 후의 값)에서 낮은 값으로 변화할 때의 온도로도 결정할 수도 있다. 아래 <그림 13>은 변위와 온도와의 관계를 보여주는 데, 변위가 5mm 근방에서 그 보다 작은 값으로 떨어지는 지점의 온도가 굴곡파괴 온도임을 시사한다.



<그림 13> 변위와 온도와의 상관관계.



본 연구가 주장하는 것은 굴곡파괴가 일어나는 온도 자체가 아스팔트바인더의 저온성능을 대변하며, 피로 균열을 포함한 각종 균열에 대한 저항성의 정도를 나타낸다는 점이다. 일본에서는 배수성 아스팔트바인더에 대한 등급으로서 -20°C 의 굴곡에너지와 굴곡강도의 상한 값을 규정하고 이 범위 안에 들어야 특정 바인더규정을 만족한다고 인정하지만, <표 1>에서 볼 수 있듯이 굴곡강도와 굴곡에너지 값은 특정바인더가 어느 온도에서 굴곡파괴가 시작되느냐에 따라 -20°C 의 값에 상당한 변화가 올 수 있으므로, 일률적으로 모든 아스팔트바인더에 대하여 -20°C 의 굴곡에너지와 굴곡강도 값으로 등급을 제정하는 것은 부적절하다고 고찰된다. 따라서 본 연구에서는 굴곡파괴가 일어나는 온도가 특정바인더의 굴곡파괴특성을 나타내기에 적절하며, 이 온도가 저온등급을 대변한다고 주장한다.

또한 미국의 저온등급은 BBR시험을 하여 크립물성을 구하여 이 값에 근거하여 등급을 제정함으로 파괴 에너지와는 직접적인 연관성이 없으며, 이로 인해 저온에서의 균열저항성을 나타내는 저온등급을 대변하기에는 효능성에 의심의 여지가 있다. 앞으로 이에 대한 조사가 필요하다.

2.5 저온(굴곡파괴)등급의 시행방안

각 아스팔트바인더에 대한 새로운 저온등급을 위에서 서술한대로 제정하여 아래와 같이 각 기능별로 분류하여 사용할 수 있을 것이다. 아래 분류기준은 본 연구의 제안에 불과하며 언제든지 수정가능하다.

- 기온이 -20°C 이상인 일반 아스팔트 표층용의 저온등급 : (-10°C) 이상
- 중차량이 빈번한 포장표층용의 저온등급 : (-15°C)-(-10°C)
- 시멘트교량 표층용의 저온등급 : (-15°C)-(-10°C)
- 강상판 교량 표층용의 저온등급 : (-20°C)-(-15°C)
- 기온이 -20°C 이하인 한냉지용 아스팔트표층용의 저온등급: (-20°C) 이하

3. 결론

아스팔트바인더의 새로운 저온등급을 굴곡시험을 통하여 제안하였다. 이 등급은 최대굴곡파괴에너지에 해당하는 파괴온도로서 대변되며, 이 등급은 일본의 굴곡기준이나 미국의 크립물성에 의한 저온등급보다 균열 저항성을 나타내는 데 더욱 합리적이라고 평가된다.

감사의 글

본 연구는 건설기반기술혁신 (산학연 공동연구 개발) 사업과 한국형포장설계법 개발 연구사업의 재정적 지원을 받아 이루어진 것으로 본 연구를 가능하게 한 건설교통부와 건설교통기술평가원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Nakanishi H, Kawanaka T, Ziqing L, Baocun H(2002), "Study on Improvement in Durability and Function of Porous Asphalt Pavement", 4th Intern. Conf. on Road & Airfield Pavement Technology, Kunming, China, Proceedings Vol. II, pp. 965-973.