



간접인장강도 시험을 통한 아스팔트 포장의 지불규정 인자와 피로균열과의 상관관계 분석

Correlation Analysis Between Pay Adjustment Factors of Asphalt Pavement and Fatigue Cracking using Indirect Tensile Test

이석근*	김성민**	황상민***	이종명****
Rhee, Suk Keun	Kim, Seong-Min	Hwang, Sang Min	Lee, Jong Myung

1. 서론

본 연구는 포장 성능 개선을 위한 지불규정(Pay Adjustment)개발을 위한 기준인자 선정에 관한 기초연구로 수행되었다. 지불규정은 밀도와 평탄성 등과 같은 지불규정 인자의 측정값에 따라 통계적 품질측정 방법인 PWL에 따른 지불계수(Pay Factor)를 이용해 공사비를 차등 지급하기 때문에 지불규정 인자의 편차에 따른 실제 포장의 공용성 변화를 공학적으로 증명해야 할 필요가 있다. 이를 위해 지불규정에 적합한 공용성 모형 선정에 앞서 지불규정인자와 피로균열과의 상관관계를 검증하기 위해 간접인장강도 시험을 진행하였다. 포장 성능에 직접적 영향을 미치는 밀도와 아스팔트 함량, 입도와 현행 준공검사 기준인 두께와 평탄성을 국내 지불규정 기준인자로 선택했으며 이 중 아스팔트 함량, 밀도, 입도를 변수로 설정하였다. 아스팔트포장의 경우 아스팔트함량이 변화에 따라 밀도가 변화하는 등 각 인자가 상호 연관관계를 가진다. 따라서 본 연구에서는 지불규정 인자간의 상호 영향을 최소화하기 위해 총 14종의 시편제작을 제작하였다. 시험시편은 현재 국내에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 밀입도 19mm 아스팔트 혼합물로 바인더는 PG58-22를 사용하였으며, 시험온도는 20℃에 대하여 간접인장 피로시험을 수행하였다.

2. 입도변수 설정을 고려한 배합설계

본 연구에서는 국내에서 가장 많이 이용되는 화강암 종류의 골재를 이용하였다. 선화다짐기를 사용해 시험시편의 공극률을 조정하였으나 배합설계의 경우 본 연구의 결과가 국내 실제 공사에 적용될 것을 고려하여 현재 현장에서 가장 많이 사용하고 있는 마샬배합설계에 따라 진행하였다.

표준입도(#8번체 통과율 40%)에 대해 배합설계를 실시하였고, 입도 변수 조정을 위해 #8번체 통과율 32%, 35%, 50%, 53%에 해당하는 배합설계를 수행하였다. 각 입도별 통과백분율은 <표 1>과 같다.

#8번체 통과율을 기준으로 한 골재 입도별 통과 백분율에 따라 흐름값, 공극률, 포화도, 골재 간극률, 안정도를 각각 측정하여 최적 아스팔트 함량을 <표 2>와 같이 결정하였다.

* 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 교수 · 공학박사 · 031-201-2900 (E-mail:skrhee@khu.ac.kr)
 ** 비회원 · 경희대학교 토목공학과 도로연구실 공학박사 · 031-201-3795 (E-mail:seongmin@khu.ac.kr)
 *** 비회원 · 경희대학교 토목공학과 도로연구실 석사과정 · 031-201-2923 (E-mail:lee0821c@nate.com)
 **** 비회원 · 경희대학교 토목공학과 도로연구실 석사과정 · 031-201-2923 (E-mail:lee0821c@nate.com)



〈표 1〉 골재의 입도별 통과 백분율

체크기mm	40	25	20	13	10	5 (#4)	2.5 (#8)	1.2 (#16)	0.6 (#30)	0.3 (#50)	0.15 (#100)	0.08 (#200)	
#8 통과율	32%	100	100	100	86	75	54	32	30	21	15	8.8	6.2
	35%	100	100	100	86	75	54	35	30	21	15	8.8	6.2
	40% (표준 입도)	100	100	100	86	75	54	39	29	21	15	8.8	6.2
	50%	100	100	100	86	75	54	50	31	21	15	8.8	6.2
	53%	100	100	100	86	75	54	53	31	21	15	8.8	6.2

〈표 2〉 #8번체 기준으로 한 입도별 최적아스팔트함량

#8번체 통과율	32%	35%	40% (표준입도)	50%	53%
최적아스팔트함량(OAC)	4.8%	5.9%	5.1%	6.3%	5.9%

3. 시험 변수 및 시편 제작

3.1 시험변수

지불규정 인자간의 상호 영향을 최소화하기 위해 모든 다양한 시험시편을 제작해 시험을 진행했다. 예를 들어 아스팔트 함량의 경우 공극률을 4%로 구속한 시편과 공극률을 구속하지 않은 시편을 제작해 시험을 진행했으며 〈표 3〉과 같이 각 인자별 시험 변수와 편차를 설정하였다.

〈표 3〉 간접인장강도시험을 위한 인자별 변수 및 편차

지불규정인자	각 인자의 편차	변수개수	비고
아스팔트 함량	3.5% 4.5% 5.5% 6.5%	4	입도 : 표준입도 공극률 구속시편
	4.1%, 4.6%, 5.1%, 5.6%	4	입도 : 표준입도 공극률 불구속시편
밀도 (이론최대밀도비)	98%, 96%, 94%, 92%, 90%	5	입도 : 표준입도 아스팔트함량 : 표준입도의 OAC (5.1%)
입도	#8 통과율 기준 : 32%, 35%, 50%, 53%	4	아스팔트 함량 : 표준입도의 OAC (5.1%), #8 통과율 기준의 OAC 선회다짐 횟수 80회 고정

또한 각 인자별 편차에 따른 피로균열의 상관관계를 보다 정확하게 파악하기 위해 시험변수에 미세한 편차를 설정하였다. 아스팔트 함량의 경우 함량 변화에 따른 피로균열 발생 경향을 보이기 위해 아스팔트 함량변수의 편차를 1%로 하여 총 4종류의 공시체를 제작했으며 공극률을 고정하였다. 또한 공극률을 구속함으로써 발생할 수 있는 과다짐의 영향을 평가하기 위해 표준입도를 사용한 시편도 제작했다.

밀도 변수는 일반적인 마샬다짐도를 사용하지 않고 이론 최대 밀도 비를 사용했다. 하지만 마샬다짐도는 실험실의



마찰시험 값과 현장의 길보기 비중의 비로써 실제 밀도와 관련된 아스팔트 포장의 품질을 대표하기엔 어렵다는 문제점이 존재한다(국토해양부, 2006). 이와 같은 문제점을 극복하기 위해 미국을 비롯한 선진국에서는 포설된 구간에서 채취한 시료를 플랜트에서 생산된 아스팔트 혼합물의 이론 최대 밀도와 비교하여 적정 밀도를 판단하고 있다. 현재 국내의 이론 최대 밀도 비의 기준은 하한한계는 92%로 정의하고 있으며 과 다짐을 방지하기 위해 상한한계를 96%로 정의한다. 따라서 밀도의 편차를 2%로 고정하여 이론 최대 밀도 비 98%, 96%, 94%, 92%, 90%의 변수로 공시체를 제작했다.

입도는 #8 통과율을 기준으로 32%, 35%, 50%, 53% 총 4개의 공시체를 제작하였다. 표준입도곡선의 상한값과 하한값에 해당하는 35%와 50%와 표준입도에 해당하는 40%, 시방한계를 벗어난 32%, 53%에 해당하는 시편을 제작해 시험을 수행하였다.

3.2 시험방법 및 데이터수집

본 연구에서 사용된 시험 장치는 상부재하방식의 INSTRON사의 Servo-Hydraulic closed-loop 시스템이며, 모든 시험은 간접인장 방식에 의해 수행되었다. 변위측정은 RDP Electronic사의 LVDT를 사용하였다. 각 센서에서 발생하는 데이터의 동기화를 위하여 National Instruments사의 데이터 수집카드(16bit), 데이터 수집장비(SCXI새시) 및 모듈, LabVIEW 프로그램을 사용하였다.

3.3 피로시험 데이터 해석

아스팔트 혼합물의 피로수명을 평가하는 가장 일반적인 방법은 혼합물에 대해 피로시험을 수행하여 얻어진 데이터로부터 강성(stiffness)을 계산하고 이를 통해 시편의 강성이 초기 강성의 50% 도달했을 때까지 시편에 가해진 하중재하회수를 피로수명으로 결정하는 방식, 그리고 하중재하회수에 따른 변형률 진폭의 변화를 그래프로 그린 다음 최소 곡률반경이 되는 지점의 하중재하회수를 피로수명으로 결정하는 방식이라 정의하고 있다(SHRP-A-404). 본 연구에서는 시편의 강성이 초기 강성의 50%에 도달할 때까지 적용된 하중재하회수를 피로수명으로 결정하였다.

피로수명을 산정하기 위해서는 시편의 강성을 사용하게 되는데 시편의 강성은 수평 인장 변형률의 진폭을 사용하여 계산하게 된다. 피로시험이 진행되는 동안 일반적으로 인장 변형률은 초기에 큰 폭으로 증가되다가 한참동안은 큰 변화가 없으며 파괴에 도달할 때 다시 큰 폭으로 변화하게 된다.

간접인장 피로시험의 경우 시편에 일정한 크기의 진폭을 가진 압축하중을 반복 재하하는 방식이지만 2축 응력 상태이기 때문에 포아송비에 따라 응력이 변화하게 된다. 시편이 선형 점탄성 범위내에 존재할 경우에는 포아송비가 일정하지만 선형 점탄성 범위를 벗어날 경우에는 시편에 발생하는 손상에 의해 포아송비가 증가하게 된다. 그러나 포아송비를 정확히 실험을 통하여 실측하기는 굉장히 어렵기 때문에 본 연구에서는 포아송비를 0.35로 가정하여 강성을 계산하였다.

4. 실험 결과

4.1 아스팔트 함량과의 관계

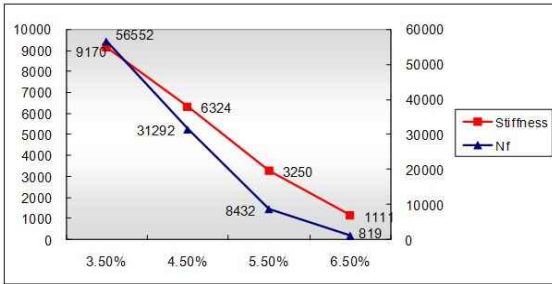
아스팔트 함량 변수는 과다짐에 의한 영향을 구별하기 위해 공극률 구속 시편과 불구속 시편으로 나누어 실험을 진행했다. 실험을 진행한 모든 시편이 혼합물의 강성이 하중재하 회수가 증가함에 따라 감소함을 보였으며 공극률을 구속시킨 아스팔트 함량변수의 경우 <그림 1>과 같이 함량이 증가함에 따라 강성과 피로수명이 줄어들어 기존의 실험결과와 상반된 결과를 나타내었다.

이는 함량 3.5%의 경우 선회 다짐기를 이용한 공시체 제작 시 다른 공시체에 비해 적은 아스팔트 함량으로 인하여 과다짐이 되었기 때문에 강성과 피로수명이 오히려 더 높게 나온 것으로 판단돼 공극률 불구속시편을 제작하여 동일한

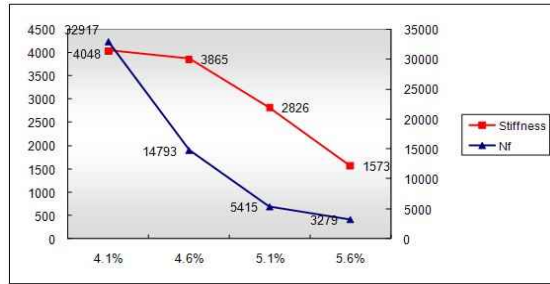


실험을 수행했다. 하지만 <그림 2>와 같이 공극률 구속 시편과 동일한 경향을 보였다.

이는 상온(20℃)에서 실험을 진행해 온도의 변화에 따른 영향을 배제했기 때문으로 보인다. 이와 관련 간접인장시험을 이용한 아스팔트 혼합물의 피로 해석(이현중 외, 1999)에 관한 연구결과 역시 아스팔트 함량에 따른 피로경향이 기존의 아스팔트 함량이 증가할수록 피로수명이 줄어든다는 기존의 실험과 다른 결과를 보였다. 따라서 다양한 하중조건과 온도조건 및 아스팔트 함량변수의 편차 조정 등을 통해 아스팔트 함량과 피로경향과의 연관성에 관한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.



<그림 1> 아스팔트 함량 변수의 피로 경향 비교 (공극률 구속 시편)



<그림 2> 아스팔트 함량 변수의 피로 경향 비교 (공극률 불구속 시편)

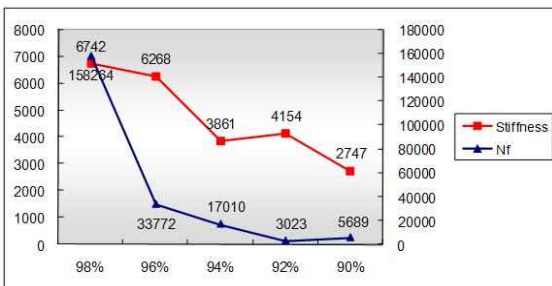
4.2 밀도와와의 관계

밀도변수는 다짐횟수를 조정하여 시편을 제작해 실험을 수행했으며 최초 피로시험을 수행한 밀도 변수의 경우 <그림 3>과 같이 밀도 증가함에 따라 강성과 피로수명이 줄어드는 결과를 나타내었다. 밀도의 경우 밀도가 감소함에 따라 강성과 피로수명이 줄어들어 기존의 실험결과들과 잘 일치하였다. 밀도의 경우에도 98%에서 현저히 높은 피로수명이 보였는데, 이 또한 과다짐으로 인한 영향으로 보인다.

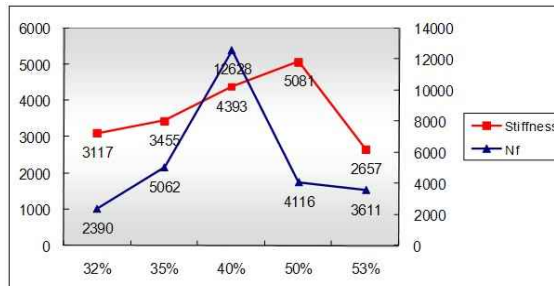
4.3 입도와와의 관계

입도의 경우 #8번체 통과율을 기준으로 표준입도곡선의 상한값과 하한값에 해당하는 35%와 50%와 표준입도에 해당하는 40%, 시방한계를 벗어난 32%, 53%에 해당하는 시편을 제작해 시험을 수행했으며 <그림 4>와 같은 결과를 보였다.

입도의 경우 시파피에 이르기까지의 하중재하 횟수(Nf)가 표준입도곡선의 상한값과 하한값에 해당하는 35%와 50%가 시방한계를 벗어난 32%, 53%에 비하여 강성과 피로수명이 높게 나타났는데, 이를 #8번체 통과율 40%를 기준으로 상한값과 하한값을 초과했을 때 피로에 약해진다는 사실을 알 수 있다.



<그림 3> 밀도 변수의 피로 경향 비교



<그림 4> 입도 변수의 피로 경향 비교



5. 결 론

본 연구에서는 지불규정 인자가 실제 피로균열에 미치는 영향을 검토하였다. 그 결과는 아스팔트 함량, 입도, 밀도에 따라 피로파괴의 경향이 뚜렷이 나타났으며 본 연구에서 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 지불규정인자의 편차에 따라 피로수명은 일정한 경향을 보이며 감소했다.

(1) 아스팔트 함량은 공극률 구속여부와 상관없이 함량이 증가함에 따라 피로수명이 감소함을 보였다.

(2) 밀도의 경우 밀도가 감소함에 따라 강성과 피로수명이 줄어들어 기존의 실험결과들과 잘 일치하였다. 밀도의 경우에도 98%에서 현저히 높은 피로수명이 보였는데, 이 또한 과다짐으로 인한 영향으로 보인다.

(3) 입도의 경우 #8번체 통과율 40%의 피로수명이 가장 높게 나타났고, 표준입도곡선의 상한값과 하한값에 해당하는 35%와 50%가 시방한계를 벗어난 32%, 53%에 비하여 강성과 피로수명이 높게 나타났는데, 이를 통해 상한값과 하한값을 초과했을 때 피로균열에 취약해진다는 사실을 알 수 있다.

2. 피로시험을 수행한 결과, 아스팔트 함량의 경우 함량이 증가함에 따라 강성과 피로수명이 줄어들어 기존의 실험결과와 상반된 결과를 나타내었다.

3. 함량 3.5%의 경우 선회 다짐기를 이용한 공시체 제작 시 다른 공시체에 비해 적은 아스팔트 함량으로 인하여 과다짐이 되었기 때문에 강성과 피로수명이 오히려 더 높게 나온 것으로 보인다.

4. 향 후 다양한 온도와 하중레벨에서 빙피로시험과 함께 추가적인 시험을 수행하여 피로수명 예측모형을 통해 변수에 따른 피로공용성 검증이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 건설교통 R&D 정책·인프라 사업 - 성능중심의 건설기준 표준화과제('06~ '11) 연구 결과의 일부입니다. 본 연구의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Asphalt Research Program Institute of Transportation Studies University of California, Berkeley, (1994), "Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes", Strategic Highway Research Program
2. 이현중, 박현순, 강민균, (2003) "간접인장시험을 이용한 아스팔트 혼합물의 피로해석", 한국 도로학회 학술대회 논문집
3. 이영호, (2004) "삼축압축 반복재하 시험을 통한 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성 연구", 석사학위논문, 경희대학교
4. 한국건설기술연구원, 한국도로공사, (2004) "한국형포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구", 국토해양부
5. 한국건설기술연구원, (2006) "아스팔트포장의 현장 다짐관리 매뉴얼", 국토해양부