

콘크리트 슬래브와 보조기층 사이의 마찰특성 조사

Investigation of Friction Characteristics between Concrete Slab and Subbase Layers

임진선* · 박문길** · 남영국*** · 정진훈****

Lim, Jin Sun · Park, Moon Gil · Nam, Young Kug · Jeong, Jin Hoon

Abstract

In this study, a series of push-off tests for lean concrete, aggregate, asphalt subbases mainly used in Korea were performed to investigate the friction characteristics between the slab and subbase layers. Use of separation membrane and wet condition of subbase were other parameters in the tests. Horizontal displacements of the slabs and friction coefficients were measured at 1st loading, stable condition (2nd and 3rd loadings), and wet condition (4th loading) by applying 40mm/hour horizontal loadings. Larger maximum friction coefficients were measured in order of the lean concrete, asphalt, aggregate, and subbases using the separation membrane at 1st loading, and in order of the asphalt, aggregate, lean concrete, and subbases using the separation membrane at stable and wet conditions. The friction coefficients of the aggregate and asphalt subbases which did not use the separation membrane decreased by the wet condition while the subbases using the separation membrane were not affected. Additional push-off tests for effects of slab thickness and temperature sensitivity of asphalt will be performed. And, effects of the friction characteristics between the slab and subbase layers on behavior and performance of concrete pavements will be investigated by structural analyses using the test results.

Keywords : concrete pavement, slab, subbase, friction coefficient, separation membrane

요 지

본 연구에서는 슬래브와 보조기층 간의 마찰 특성을 조사하기 위하여 국내 콘크리트 포장에 주로 사용되는 린 콘크리트, 쇄석, 아스팔트 보조기층에 대하여 마찰력 실험을 실시하였다. 이 외에도 분리막 사용 여부와 보조기층의 습윤 상태를 실험 변수로 사용하였다. 슬래브에 40mm/hour의 속도로 수평하중을 가한 1차 하중 재하 시와 안정화 상태(2차 및 3차) 및 습윤 상태(4차)에서의 슬래브의 수평변위와 마찰계수를 측정하였다. 1차 하중재하 시 린 콘크리트, 아스팔트, 쇄석, 그리고 분리막을 사용한 보조기층 순으로 최대 마찰계수가 컸으며, 안정화 상태에서는 아스팔트, 쇄석, 린 콘크리트 그리고 분리막을 사용한 보조기층 순으로 크게 측정되었다. 분리막을 사용한 보조기층은 습윤 상태에 의한 영향이 거의 없었으나 분리막을 사용하지 않은 쇄석 및 아스팔트 보조기층은 습윤 상태로 인하여 마찰계수가 감소하였다. 향후 슬래브의 두께와 아스팔트의 온도 민감성이 미치는 영향에 대한 추가 마찰력 실험이 수행될 것이다. 그리고, 실험 결과를 이용한 구조해석을 통하여 슬래브와 보조기층 간의 마찰특성이 콘크리트 포장의 거동 및 공용성에 미치는 영향을 조사할 계획이다.

핵심용어 : 콘크리트 포장, 슬래브, 보조기층, 마찰계수, 분리막

1. 서 론

콘크리트 포장 슬래브는 그림 1과 같이 온도 및 습도의 영향을 받아 체적이 변화하며 거동을 하는데, 이때 슬래브와 보조기층 사이에는 부착(Adhesion), 전단마찰(Shear Friction), 맞물림(Interlocking) 등의 이유로 마찰저항이 발생한다. 슬래브와 보조기층 사이의 마찰저항은 건조수축 뿐만 아니라 수화열의 발생과 소멸 및 대기온도의 상승과 하강으로 인한 콘크리트 슬래브의 거동을 구속하여 응력을 발생시키는데, 이

때 발생된 콘크리트 슬래브의 인장응력이 인장강도를 넘어설 때 균열 등의 파손이 발생되어 장기적으로 도로포장의 공용성을 저하시킨다(박문길, 2009; Wesevich 등, 1987). 미국과 유럽의 줄눈 콘크리트 포장에는 모래, 쇄석, 아스팔트, 시멘트 안정처리 등의 다양한 재료의 보조기층이 사용되고 있으며, 보조기층 종류에 따른 마찰저항 특성에 관한 여러 연구결과가 설계기준과 시공지침 등에 반영되고 있다(Rasmussen 등, 2001). 반면 국내의 경우 1990년대 초반 이전에 시공된 줄눈 콘크리트 포장에 아스팔트 보조기층과

*인하대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : coreplay@hanmail.net)

**인하대학교 토목공학과 석사 (E-mail : pmg1979@gmail.com)

***참여회원 · (주)한맥기술 기술연구원 원장 · 공학박사 (E-mail : yknam@incheon.ac.kr)

****정회원 · 교신저자 · 인하대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 (E-mail : jhj@inha.ac.kr)

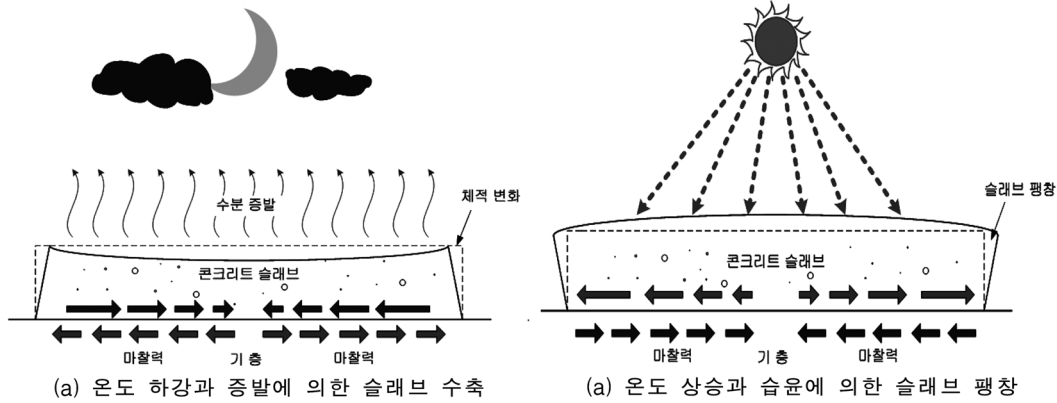


그림 1. 콘크리트 슬래브와 보조기층 간 마찰력 발생 개념도

쇄석 보조기층이 사용되었고, 그 후에는 획일적으로 린 콘크리트 보조기층 위에 분리막(Polyethylene sheet)을 덮는 방식으로 시공하고 있으나, 사용되는 보조기층 재료의 종류가 제한적임에도 불구하고 보조기층 종류에 따른 마찰저항 특성에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다(박문길, 2009).

슬래브와 보조기층 간의 마찰저항 특성은 환경하중에 의한 콘크리트 포장의 거동을 파악하는데 필요한 자료로서 줄눈 간격, 줄눈재, 타이바 등의 설계에 필요한 입력변수로 활용될 수 있다(Suh 등, 2002). 따라서 본 연구에서는 기존 연구자들이 제안한 실험방법인 Push-off test를 실시하여 국내에서 주로 사용되는 5가지 보조기층 종류에 대해 슬래브와 보조기층 간의 마찰저항 특성을 정량화하고 보조기층 위에 사용되는 분리막의 효용성을 분석하고자 한다.

2. 마찰력 이론

마찰력이란 물체가 다른 물체의 표면에 접하여 움직이려고 하거나 움직이고 있을 때 접촉면을 따라 작용하는 저항력을 의미하며, 접촉면에 평행하게, 운동방향과 반대 방향으로 작용한다. 마찰력은 접촉 면적과 거의 관계가 없고 접촉하는 물질의 종류와 관계가 있다. 고전 물리학에서 Leonardo da Vinch-Amontons의 법칙에 따르면 마찰특성은 어떠한 물체의 자중과 마찰력 사이의 선형적인 관계인 마찰계수로서 식 (1)과 같이 표현한다. 이 관계는 접촉면 사이에 부착력이 존재하지 않고, 물체가 미끄러질 때까지 변형을 하지 않는다는 가정을 내포하고 있다.

$$\mu = F/N = \text{constant} \quad (1)$$

여기서, μ =마찰계수, F =마찰력, 그리고 N =물체의 자중

슬래브와 보조기층 간의 마찰력은 크게 부착과 전단의 두 가지 성분으로 구성된다. 전단성분은 미끄러지는 면에서의 입자 간의 마찰과 맞물림에 의한 현상이며, 부착성분은 주로 전기 화학적인 특성을 갖고 있다(Lee, 2000; Wesevich 등, 1987). 이러한 마찰특성을 설명하기에 적합한 모델은 Coulomb의 Two-Term External Friction Model로 식 (2)와 같다(Kragelsky 등, 1977).

$$\mu = F/N = A/N+B \quad (2)$$

여기서, A = 접촉면에서의 부착특성에 관한 계수, B = 접촉면에서의 마찰 및 맞물림 특성에 관한 계수

Coulomb 모델에 의해 계산되는 마찰계수 μ 는 식 (1)과 같은 상수가 아니다. 그림 2와 같이 슬래브와 보조기층 사이의 마찰계수는 접촉면에서 부착력을 잃고 전단 파괴되는 시점인 Preliminary Displacement에서의 마찰계수인 μ_{\max} 까지 증가되며, 전단 파괴 후 미끄러질 때에는 일정한 마찰계수 μ_{sliding} 을 나타낸다(Lee, 2000; Kragelsky 등, 1977). 보조기층 재료가 높은 강성을 지닐수록 Preliminary Displacement와 μ_{\max} 를 연결하는 직선의 기울기가 가파르게 변화한다. 또한 동일한 보조기층 재료를 사용한 경우에도 파괴 후 접촉면이 거칠수록 μ_{\max} 및 Preliminary Displacement가 커지게 된다(Lee, 2000).

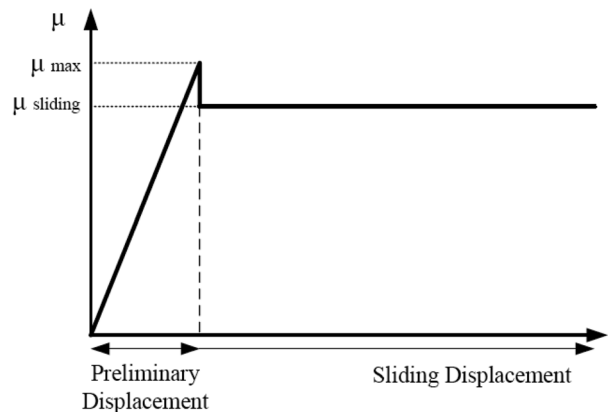


그림 2. Coulomb의 마찰특성 개념도

3. 기존 연구결과

슬래브와 보조기층 간의 마찰저항 특성을 관찰하기 위해 많은 연구자들이 Push-off Test를 실시하였다. 콘크리트 포장 기술의 발전과 더불어 여러 가지 보조기층 종류에 대한 실험이 다양하게 수행되었는데, 1920대 중반부터 1960년대 초반까지는 주로 강성이 낮은 보조기층 재료에 대한 실험이 수행되었고, 1980년대에 들어서 안정처리 보조기층과 같은 강성이 높은 재료에 대한 실험이 수행되었다(Chia 등, 1986; Wesevich 등, 1987).

Teller 등(1930), Friberg(1954), 그리고 Timms(1963)는

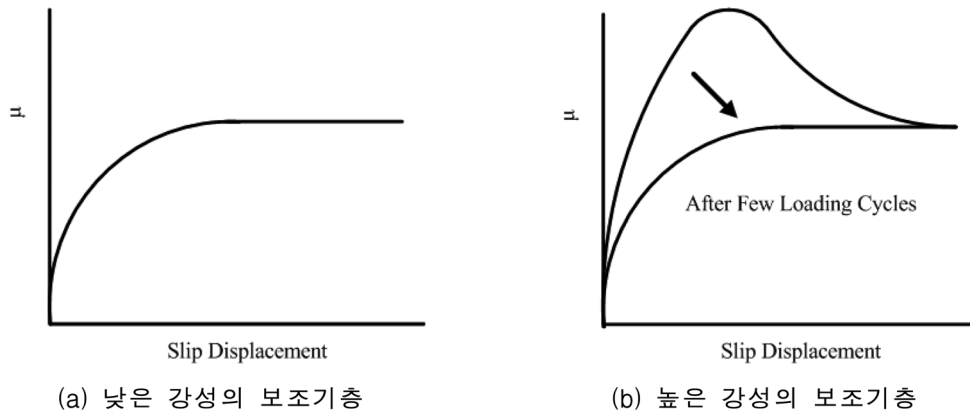


그림 3. 보조기층 강성에 따른 마찰저항 특성 (Lee, 2000)

여러 번의 하중 재하를 통해 첫 번째 하중 재하 시의 마찰저항과 반복하여 하중을 재하하여 안정화된 후의 마찰저항을 비교하였다. 그 결과 그림 3(a)와 같이 낮은 강성을 지니는 보조기층 재료는 첫 번째 하중 재하 시와 안정화된 후의 마찰저항 특성이 비슷하였으나, 높은 강성을 지니는 재료는 그림 3(b)와 같이 초기 하중 재하 시에는 높은 마찰저항을 나타냈으나, 여러 번의 하중 재하 후에는 안정화되어 일정하게 낮은 마찰저항 특성을 나타냈다.

Goldbeck(1924), Teller 등(1930), 그리고 Timms(1963)는 강성이 낮은 보조기층 재료에 대하여 슬래브와 보조기층 사이의 습윤 상태에 따른 실험을 수행하여 마찰저항 특성의 변화를 조사하였다. Goldbeck(1924)는 습윤 상태에서 Preliminary Displacement가 50%에서 70%까지 감소하고, μ_{max} 는 10%에서 30%까지 감소한다고 보고하였다. Timms(1963)도 비슷한 경향의 결과를 얻었으나 Goldbeck(1924)의 결과처럼 감소가 크지는 않다고 보고하였다.

Teller 등(1930), Timms(1963), 그리고 Wesevich 등(1987)은 슬래브의 두께를 변화시키며, 즉 슬래브의 자중을 변화시키며 실내 및 현장에서 실험을 실시하였다. 그 결과 노상토 및 안정처리 기층에서는 Coulomb이 제안한 Two-Term External Friction Model과 같이 슬래브의 두께가 두꺼울수록 마찰계수가 명확하게 줄었지만, 노상에서는 영향이 매우 작은 것으로 나타났다. 또한 국내에서 Suh 등(2002)도 이와 유사한 결과를 얻은 것으로 보고하였다.

Scott(1963)은 실내에서 다양한 보조기층 재료에 대하여 마찰저항 실험을 실시했으며, 특히 아스팔트 바인더가 포함된 보조기층 재료는 강성이 온도에 따라 매우 민감하다고 보고하였다. 또한 Lee 등(1981)도 점탄성 재료의 보조기층은 온도에 따른 영향이 매우 크며 낮은 온도에서 점탄성 보조기층의 마찰강성이 매우 커진다고 보고하였다.

Wesevich 등(1987)은 아스팔트 안정처리 보조기층, 시멘트

안정처리 보조기층, 석회 처리 보조기층, 미처리 노상 보조기층에 대하여 현장에서 실험을 실시하였고 슬래브와 보조기층 사이의 파괴면을 관찰하였다. 그 결과 강성이 약한 보조기층에서는 그림 4(a)와 같이 슬래브 하부 면을 따라 파괴가 발생했지만, 강성이 높은 아스팔트 안정처리 보조기층은 그림 4(b)와 같이 보조기층 내부에서 전단 파괴가 발생했으며, 시멘트 안정처리 기층의 경우 허용된 하중 수준 내에서는 파괴가 발생하지 않았다.

위와 같이 여러 연구자들이 보조기층의 종류, 하중재하 횟수, 습윤 건조 상태, 슬래브 두께에 대하여 Push-off Test를 수행하여 몇 가지 의미 있는 결과를 제시하였지만, 국내 콘크리트포장에 많이 사용된 린 콘크리트 보조기층에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 또한, 국내에서 사용되는 아스팔트 보조기층 재료의 물성은 해외에서 사용되는 재료와 차이가 있기 때문에 외국의 연구결과를 국내 콘크리트포장의 해석 및 설계에 그대로 반영하는 것은 적합하지 않다고 판단된다. 이 밖에도 분리막의 사용여부에 관한 연구는 외국에서도 거의 시도된 적이 없으므로 국내에서 주로 사용되고 있는 린 콘크리트, 아스팔트, 쇄석 보조기층과 슬래브 간의 마찰특성을 분리막의 사용여부에 따라 조사하는 작업은 매우 중요하다고 판단되었다.

4. 현장실험

린 콘크리트, 쇄석, 아스팔트 보조기층에 대하여 슬래브와 보조기층 간의 마찰저항 특성을 살펴보기 위해 Push-off Test를 실시하였다. 현장실험은 2008년 4월 15일부터 19일까지 충남 당진군에 위치한 부지에서 총연장 14m의 실험구간에 그림 5와 같이 분리막이 설치된 린 콘크리트 보조기층(두께 50mm), 분리막이 없는 린 콘크리트 보조기층(두께 50mm), 분리막이 설치된 쇄석 보조기층(두께 100mm), 분리

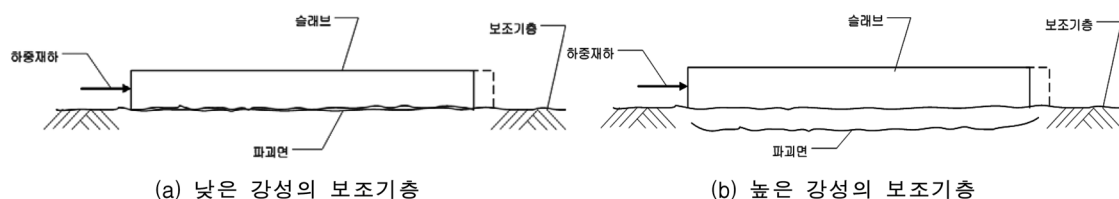


그림 4. 보조기층 강성에 따른 슬래브-보조기층의 파괴면 (Wesevich 등, 1987)

막이 없는 쇠석 보조기층(두께 100mm), 그리고 분리막이 없는 아스팔트 보조기층(두께 50mm)의 총 5가지 보조기층 형식에 대하여 실험을 실시하였다.

콘크리트 슬래브의 수평 거동을 모사하기 위해 40mm/

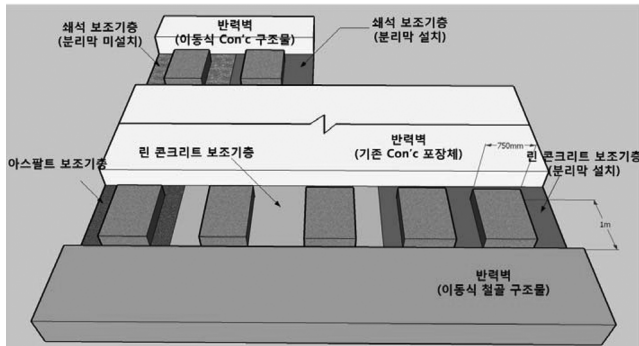


그림 5. 현장실험 전경

hour의 속도로 하중을 재하 할 수 있는 유압재과 감속기를 그림 6과 같이 설치하였다. 최대 정지마찰력 이상의 수평하중을 콘크리트 슬래브에 가하기 위하여 고정식 반력벽을 설치하였으며, 강성이 높은 보조기층 실험 시에는 불도저로 받쳐서 반력벽을 완전히 고정시켰다. 로드셀과 맞닿는 콘크리트 슬래브 전면에는 1.3mm 두께의 철판을 전체 면적에 걸쳐 부착하여 수평하중이 골고루 분포할 수 있도록 하였다. 가이드 프레임은 현장 실험에 사용될 콘크리트 슬래브의 크기가 0.75m×1.0m×0.2m (가로×세로×높이)인 것을 고려하여 1.8m×1.8m(가로×세로)의 크기로 제작하였으며, 예기치 못한 충격에도 움직이지 않도록 총 중량 100kg의 강재로 제작하였다. 수평하중에 의한 콘크리트 슬래브의 수평변위를 측정하고 편심 때문에 발생하는 부등변위를 보정하기 위하여 4개의 LVDT를 전후 및 좌우로 가이드 프레임에 설치하였다.

현장실험에 사용된 콘크리트 슬래브는 고속도로공사 전문시방서(2006)의 콘크리트 포장 배합기준을 참조하여 표 1과 같이 배합설계 되었으며, 린 콘크리트 보조기층은 4.0m×1.0m(가로×세로)의 크기로서 고속도로공사 전문시방서(2006)의 콘크리트 포장 배합기준을 참조하여 표 2와 같이 배합설계 되었다. 슬래브 콘크리트의 28일 압축강도는 32.2MPa였고, 28일 휨강도는 설계기준 4.5MPa를 만족하는 4.8MPa였다. 린 콘크리트의 7일 압축강도는 설계기준 압축강도인 4.9MPa를 만족하는 10.1MPa였다. 또한 아스팔트 보조기층은 도로공사표준시방서 배합기준과 Suh 등(2002)의 기존 실험을 참고하여 표 3과 같이 배합하여 시공되었으며,

표 1. 콘크리트 슬래브 배합표

슬럼프 (mm)	공기량 (%)	W/C (%)	S/A (%)	단위량(kg/m ³)				
				W	C	잔골재	굵은골재	혼화제*
40~60	4~6	45.1	38.1	147	326	692	1,122	0.963 0.30

* 혼화제는 고성능 AE 감수제 사용

표 2. 린 콘크리트 보조기층 배합표

구분	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	W/C (%)	S/A (%)	단위량(kg/m ³)				
					W	C	잔골재	굵은골재	혼화제*
빈배합	-	1~2	79.1	32.4	125	158	695	1,449	-

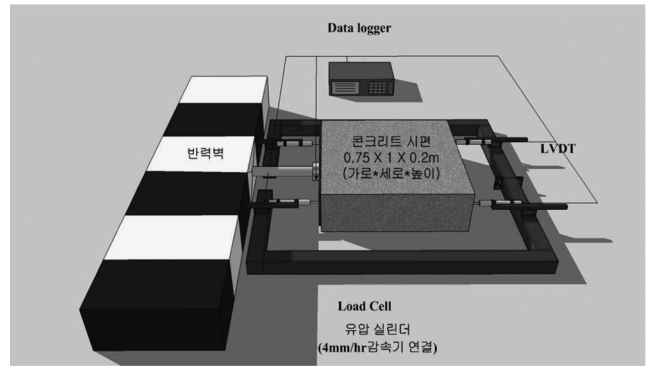


그림 6. 마찰저항 실험 상세도

표 3. 아스팔트 보조기층 배합표

공칭입경	체 통과중량 백분율(%)	
12.5mm(1/2inch)	100	95-100
4.75mm(No. 4)	58.3	55-90
2.37mm(No. 5)	42.5	35-50
600 μ m(No. 30)	23.1	18-30
300 μ m(No. 50)	15.6	10-21
150 μ m(No. 100)	10.3	6-16
75 μ m(No. 200)	6	4-8
아스팔트 함량 %	5.8	
공기량 %	4.2	
흐름값(0.1mm)	32	

쇄석 보조기층은 KS F 2312 E 다짐법에 따라 최대 건조 밀도 95% 이상, 최적 함수비의 $\pm 2\%$ 이내가 되도록 충분히 다져 표 4와 같은 기준을 만족하도록 시공되었다.

5. 현장실험 결과

보조기층 위에 설치된 슬래브가 미끄러질 때까지 수평하중을 가하는 방법으로 보조기층 별로 4번씩 수평하중과 슬래브 수평변위를 측정하고 그 결과를 분석하였다. 보조기층 종류에 따라 측정되고 분석된 실험 결과는 다음과 같다.

5.1 분리막을 사용하지 않은 린 콘크리트 보조기층

분리막을 사용하지 않은 린 콘크리트 보조기층의 경우 1차 하중 재하 시 강성이 매우 큰 린 콘크리트 보조기층과 콘크리트 슬래브가 부착되어 하중 재하 장치의 재하 범위인

표 4. 쇄석 보조기층 입도기준

	공칭 입경에 대한 체 통과중량 백분율(%)								
	100	75	50	40	20	5	2	0.4	0.08
SB-2			100	80~100	55~100	30~70	20~55	5~30	0~8

90kN의 하중에도 접촉면에서의 파괴가 발생하지 않아 슬래브가 미끄러지지 않았다. 따라서 중장비로 슬래브를 밀어 린 콘크리트 보조기층으로부터 콘크리트 슬래브를 강제로 분리한 후 실험을 계속할 수 있었다. 린 콘크리트가 매우 높은 강성을 지녔음에도 불구하고 슬래브의 파괴면을 확인해 본 결과 슬래브의 면을 따라서 파괴되었는데, 이는 접촉면에서의 부착력 보다 슬래브 및 린 콘크리트 보조기층 내부의 재료 간의 결합력이 더 강하였기 때문으로 판단되었다. 슬래브를 사이에 두고 마주보는 반력벽을 번갈아 사용하면서 실시한 2차와 3차 실험 결과, 강제로 분리된 슬래브와 보조기층 사이의 최대 마찰계수는 그림 7과 같이 각각 0.67과 0.64로 측정되었다. 4차 실험에서 측정된 습윤 상태에서의 최대 마찰계수는 0.64로서 건조 상태와 비교 시 거의 유사한 값을 나타냈다.

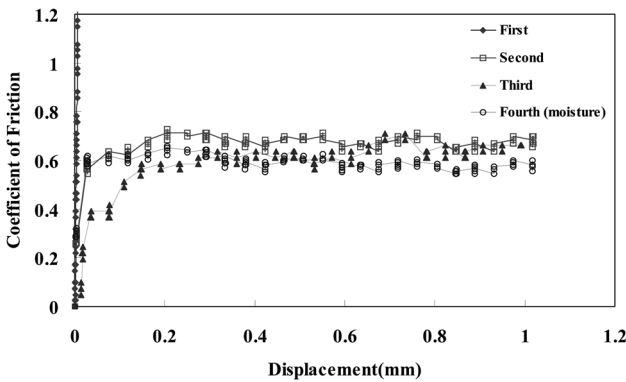


그림 7. 분리막을 사용하지 않은 린 콘크리트 보조기층 마찰실험 결과

5.2 분리막을 사용한 린 콘크리트 보조기층

분리막을 사용한 린 콘크리트 보조기층에서 1차 하중 재하 시의 최대 마찰계수는 그림 8에서 보듯이 0.91이었고 이때의 수평변위는 0.05mm였다. 2차 및 3차 실험에서는 최대 마찰계수가 각각 0.38과 0.41로 1차 실험에서보다 낮게 나타났다. 분리막이 존재함에도 불구하고 린 콘크리트 보조기층과 슬래브 사이가 어느 정도 맞물려 있기 때문에 1차 실험에서는 최대 마찰계수가 크게 나타났지만 분리된 후에는 최대 마찰계수가 낮아졌고 동일한 실험을 반복하여도 거의 동일한 마찰계수를 나타내는 것으로 조사되었다. 최대 마찰계수가 발생할 때까지 발생한 변위는 1차 하중 재하시보다 상당히 큰 것으로 나타났다. 습윤 상태를 재현한 4차 실험에서는 2차 및 3차 실험의 결과에 비해 약간 낮은 수준의 마찰계수를 보였으며 최대 마찰계수는 0.35로 나타났다. Goldbeck(1924)이 흙과 모래 등의 낮은 강성을 갖는 보조기층 재료에 대해 마찰저항 실험을 실시하여 얻은 결과와 달리 분리막이 깔린 린 콘크리트 보조기층은 습윤 및 건조 상태에 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단되었다. 분리막을

사용하지 않은 경우와 비교하였을 때 최대 마찰계수는 크게 줄어들고 이때의 수평변위는 크게 증가하는 것으로 나타나 분리막의 효과가 큰 것으로 판단되었다.

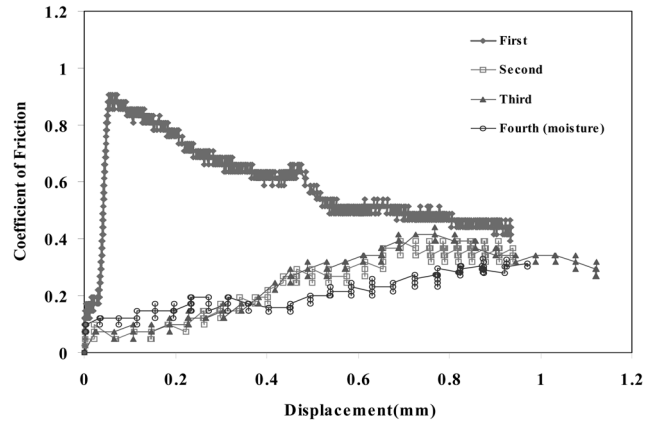


그림 8. 분리막을 사용한 린 콘크리트 보조기층 마찰실험 결과

5.3 분리막을 사용하지 않은 쇄석 보조기층

분리막을 사용하지 않은 쇄석 보조기층에서의 1차 하중 재하 시 최대 마찰계수는 그림 9와 같이 3.35로서 매우 컸으며, 이때의 수평변위는 0.23mm로 측정되었다. 2차 및 3차 하중 재하 시의 최대 마찰계수는 모두 2.57로 동일하게 측정되었으며, 강제로 분리된 린 콘크리트 보조기층보다 높은 마찰계수를 나타낸 이유는 콘크리트 슬래브의 하부와 쇄석 보조기층 표면의 골재가 서로 맞물려 있었기 때문으로 판단되었다. 최대 마찰계수가 발생할 때의 수평변위도 상대적으로 컸는데 이는 슬래브가 미끄러지기 전까지 슬래브와 맞닿아 있는 골재가 함께 밀렸기 때문으로 추정되었다. 습윤 상태에서의 최대 마찰계수는 1.69로서 건조 상태에서 낮아졌는데 이는 콘크리트 슬래브와 쇄석기층 사이에 침투한 수분이 골재 간의 결합력 내지는 다짐도를 떨어뜨렸기 때문으로 판단되었다.

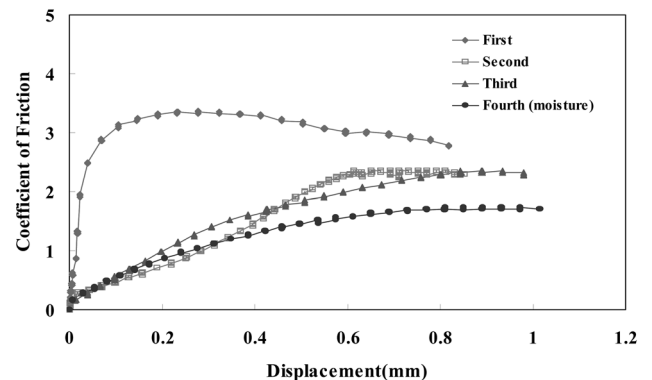


그림 9. 분리막을 사용하지 않은 쇄석 보조기층 마찰실험 결과

5.4 분리막을 사용한 쇄석 보조기층

분리막을 사용한 쇄석 보조기층에 대하여 1차 하중 재하

시 최대 마찰계수는 그림 10과 같이 0.76이었으며 이때의 수평변위는 0.11mm로 측정되었다. 2차와 3차 실험에서 측정된 최대 마찰계수는 각각 평균 0.44, 0.42로서 1차 하중 재하 시 측정된 최대 마찰계수의 거의 절반 수준으로 감소된 것을 확인 할 수 있었다. 분리막을 사용하지 않은 경우보다 최대 마찰계수는 감소하여 린 콘크리트 보조기층의 경우와 동일한 경향을 나타내었으나 최대 마찰계수 발생 시의 수평변위는 감소하여 린 콘크리트 보조기층의 경우와 반대의 경향을 나타내었다. 그 원인에 관해서는 보다 면밀한 조사와 분석이 필요한 것으로 판단되었다. 습윤 상태에서 측정된 최대 마찰계수는 0.41로서 건조 상태에서보다는 약간 감소하였다.

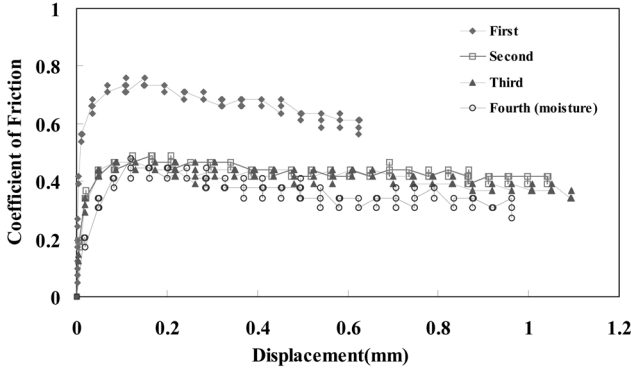


그림 10. 분리막을 사용한 쇄석 보조기층 마찰실험 결과

5.5 분리막을 사용하지 않은 아스팔트 보조기층

아스팔트 보조기층에서 1차 하중 재하 시의 최대 마찰계수는 그림 11에서 보듯이 5.23이었으며 이때의 수평변위도 0.44mm로서 모두 매우 크게 측정되었다. 2차 실험에서는 측정 장치의 오류로 인하여 최대 마찰계수에 도달하기 전에 측정이 중단되었지만 3차 실험과 결과가 유사하여 3차 실험 결과만을 사용하여도 무관할 것으로 판단되었다. 2차와 3차 실험에서 측정된 최대 마찰계수는 1차 하중 재하 시보다 약간 작았으나 이때의 수평변위는 훨씬 큰 것으로 측정되었다. 아스팔트 보조기층은 린 콘크리트 보조기층과는 달리 1차 하중 재하 후에도 콘크리트 슬래브와 완전히 분리되지 않고 아스팔트 보조기층 내부에서 불규칙한 파괴면이 생성되면서 일부는 콘크리트 슬래브와 부착되어 육안으로 보기에는 수평하중에 의하여 슬래브가 밀리면서 슬래브 부근의 아스팔트가 찢어지는 것처럼 관찰되었다. 2차 및 3차 하중 재하 시 측정된 결과는 1차 실험에서의 경향과 크게 차이가 나지는 않았으며 단지, 슬래브가 미끄러질 때의 수평변위에서만

차이를 구별할 수 있었다. 습윤 상태에서 아스팔트 보조기층의 최대 마찰계수는 3.76으로 측정되어 다른 보조기층과는 달리 습윤 및 건조 상태에 비교적 큰 영향을 받는 것으로 판단되었다.

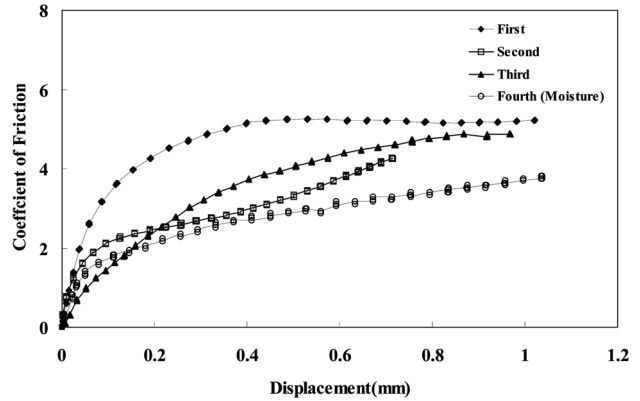


그림 11. 분리막을 사용하지 않은 아스팔트 보조기층 마찰실험 결과

5.6 실험 결과의 비교

표 5와 그림 12는 1차 하중 재하, 안정화 상태, 그리고 습윤 상태에서의 최대 마찰계수와 최대 마찰계수시의 수평변위를 비교한 것으로 여기서 안정화 상태란 1차 하중 재하로 슬래브와 보조기층이 분리된 이후 수 차례의 하중이 가해져 마찰저항 거동이 유사해진 상태를 말하며, 본 연구에서는 2회 하중재하 시부터 안정화 상태라고 가정하였다. 1차 하중 재하 시의 최대 마찰계수는 분리막을 사용하지 않은 린 콘크리트, 아스팔트, 분리막을 사용하지 않은 쇄석, 분리막을 사용한 린 콘크리트, 그리고 분리막을 사용한 쇄석 보조기층 순으로 큰 것으로 나타났고, 안정화 상태에서는 아스팔트, 분리막을 사용하지 않은 쇄석, 분리막을 사용하지 않은 린 콘크리트, 분리막을 사용한 쇄석, 그리고 분리막을 사용한 린 콘크리트 보조기층의 순으로 큰 것으로 조사되었다. 분리막을 사용한 경우 안정화 상태에서의 최대 마찰계수는 1차 하중 재하 시의 40%에서 50%까지 크게 감소한 반면, 분리막을 사용하지 않은 경우에는 10%에서 30%의 감소효과만 발생하였다. 아스팔트 보조기층과 분리막이 설치되지 않은 쇄석 보조기층과 같이 건조 상태에서의 최대 마찰계수가 컸던 보조기층에서 슬래브와 보조기층 사이가 습윤 상태가 되었을 때의 최대 마찰계수 감소효과가 컸으나 건조 상태에서 최대 마찰계수가 작았던 다른 보조기층에서는 감소효과가 작은 것으로 나타났다.

표 5. 보조기층 별 최대 마찰계수 및 수평변위

보조기층 종류	1차 하중 재하		안정화 상태		습윤 상태	
	최대마찰계수 (μ_{max})	μ_{max} 일때 수평변위 (mm)	최대마찰계수 (μ_{max})	μ_{max} 일때 수평변위 (mm)	최대마찰계수 (μ_{max})	μ_{max} 일때 수평변위 (mm)
린 콘크리트(분리막 미사용)	-	-	0.68	0.20	0.64	0.21
린 콘크리트(분리막 사용)	0.91	0.05	0.41	0.72	0.35	0.88
쇄석(분리막 미사용)	3.35	0.23	2.57	0.71	1.69	0.92
쇄석(분리막 사용)	0.76	0.11	0.42	0.12	0.41	0.12
아스팔트	5.23	0.44	5.05	0.88	3.76	1.07

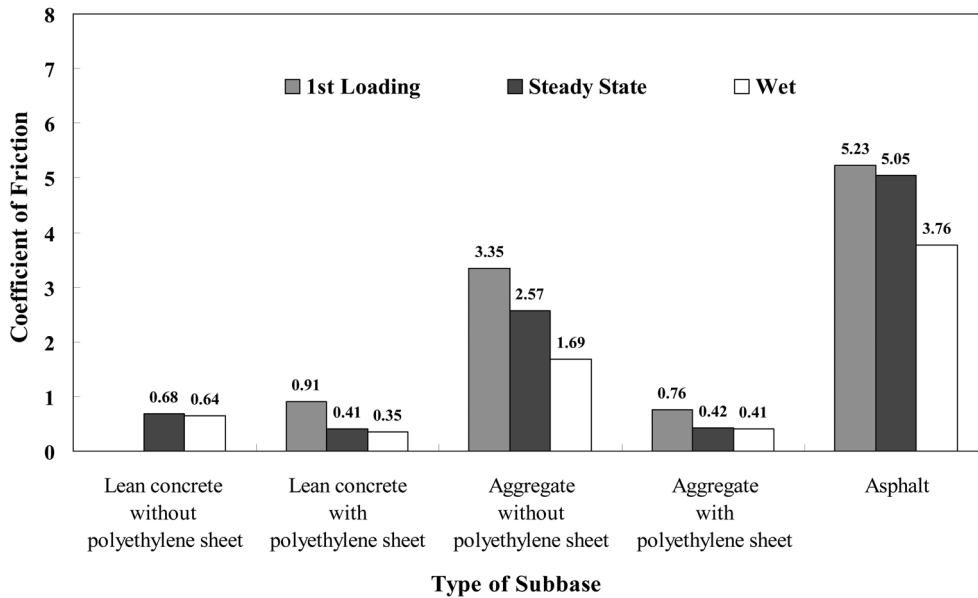


그림 12. 보조기층 별 마찰실험 결과 비교

6. 실험 결과의 적절성 검토

현장실험 결과의 적절성을 검토하기 위해 본 연구에서 수행된 실험 결과를 그림 13과 같이 Wesevich 등(1987)의 실험 결과와 비교하였다. Wesevich 등은 Texas주 Houston에서 10월에 100mm와 200mm 두께의 슬래브를 대상으로 노상, 석회 안정처리 보조기층, 아스팔트 안정처리 보조기층, 시멘트 안정처리 보조기층, 그리고 아스팔트 보조기층에서 1차 하중만을 재하하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 현장실험은 200mm 두께의 슬래브에 대한 실험이므로 200mm 두께의 슬래브에 대한 1차 하중 재하 결과를 비교하였다.

분리막을 사용하지 않은 린 콘크리트 보조기층의 경우 큰 수평하중에도 불구하고 슬래브와 보조기층 사이가 분리되지

않아 그림 13과 같이 최대 마찰계수를 측정할 수 없었는데 이는 Wesevich 등의 실험 중 린 콘크리트와 물성이 비슷한 시멘트 안정처리 보조기층에서의 결과와 동일했다. 현장에서 측정된 아스팔트 보조기층의 최대 마찰계수는 Wesevich 등의 실험 결과와 유사한 결과를 나타냈으나, Wesevich 등의 실험이 본 연구의 현장실험보다 낮은 기온에서 수행되었으므로 최대 마찰계수에 이르기 전의 변위에 따른 마찰계수 변화율은 더 큰 경향을 나타냈다. 쇄석 보조기층의 최대 마찰계수는 Wesevich 등의 아스팔트 안정처리 보조기층 및 석회 안정처리 보조기층의 최대 마찰계수와 유사하거나 다소 컸으며 변위에 따른 마찰계수의 변화율도 안정처리 보조기층보다는 큰 경향을 나타냈다. 분리막을 사용한 린 콘크리트 보조기층 및 분리막을 사용한 쇄석 보조기층의 최대 마찰계

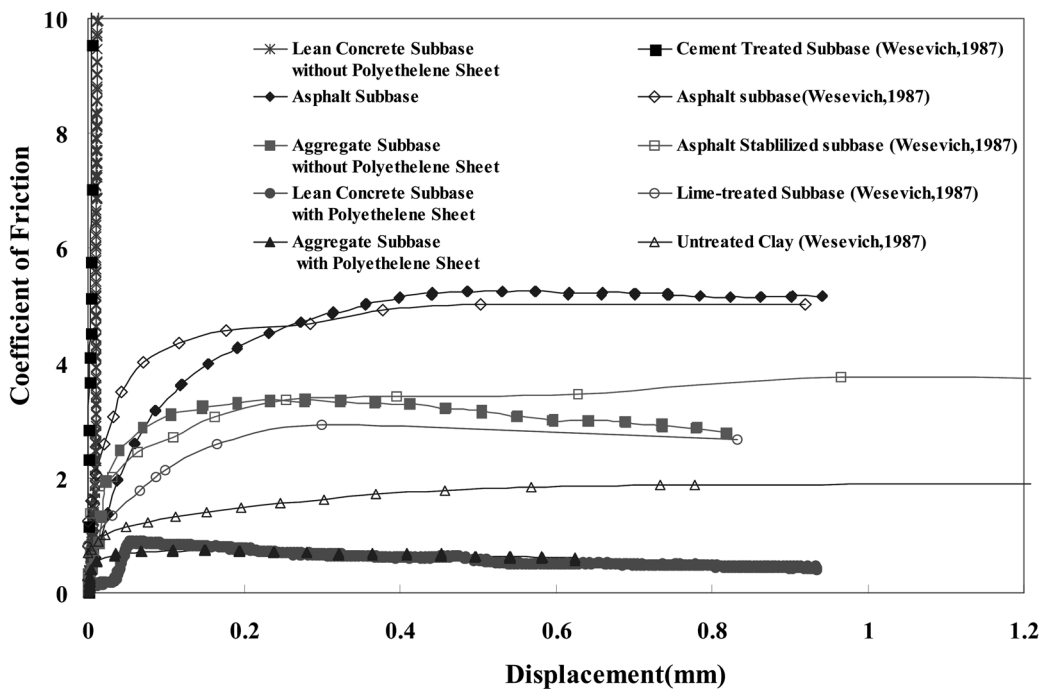


그림 13. 1차 하중재하 시의 실험결과와 Wesevich 등(1987)의 실험결과 비교

수는 Wesevich 등의 실험 결과 중 가장 낮은 최대 마찰계수를 보였던 노상보다 약 70% 가량 작았다. 재료 및 기상 등의 실험조건에 다소 차이가 있었음에도 불구하고 본 연구에서 수행된 현장실험 결과는 기존 연구 결과와 비교할 때 합리적인 경향을 나타내어 실험 결과의 적절성을 충분히 검증하였다고 판단되었다.

7. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 슬래브와 보조기층 간의 마찰저항 특성을 조사하기 위해 국내 콘크리트 포장에 주로 적용되는 린 콘크리트, 쇠석, 아스팔트 보조기층에 대하여 분리막 사용 여부 및 습윤 상태에 따른 마찰력 실험(Push-off test)을 실시하였다. 이를 통하여 1차 하중 재하 시와 안정화 상태 시 및 습윤 상태에서의 각 보조기층 별 최대 마찰계수와 수평변위를 측정하였고 이를 비교 분석하였다. 본 연구를 통하여 도출된 주요한 결론은 다음과 같다.

1. 분리막이 설치되지 않은 경우 1차 하중 재하 시 콘크리트 슬래브와 린 콘크리트 보조기층이 부착되어 매우 큰 마찰저항을 나타냈으며, 중장비로 강제 분리 후 관찰한 결과 파괴면은 슬래브의 면을 따라 발생되었다. 이는 슬래브와 린 콘크리트 보조기층 간의 부착강도가 린 콘크리트의 인장강도 보다 작았기 때문으로 판단된다.
2. 강제 분리된 린 콘크리트 보조기층과 분리막을 사용한 린 콘크리트 보조기층은 2차 하중재하 시부터 유사한 값의 비교적 작은 마찰계수가 측정되었다. 분리막을 사용한 쇠석 보조기층의 경우에도 린 콘크리트 보조기층과 유사한 작은 마찰계수를 나타냈다.
3. 분리막을 사용하지 않은 쇠석기층에서는 슬래브 하부에 부착된 골재가 슬래브의 미끄러짐을 방해하여 분리막을 사용하였을 때 보다 훨씬 큰 마찰계수를 나타냈다.
4. 슬래브와 아스팔트 보조기층 간의 부착강도가 아스팔트의 인장강도 보다 커서 보조기층 내부에 파괴면이 불규칙하게 형성되었으며, 다른 보조기층보다 높은 강성으로 인하여 비교적 큰 마찰계수가 측정되었다.
5. 1차 하중재하 결과 린 콘크리트 > 아스팔트 > 쇠석 > 분리막 사용 보조기층 순으로 최대 마찰계수가 크게 측정되었으며, 2차 및 3차 실험에서는 아스팔트 > 쇠석 > 강제 분리된 린 콘크리트 > 분리막 사용 보조기층 순으로 크게 측정되었다.
6. 강제 분리된 린 콘크리트 보조기층 및 분리막을 사용한 보조기층에서는 습윤 및 건조 상태가 슬래브와 보조기층 간의 마찰계수에 미치는 영향이 비교적 작았으나 분리막을 사용하지 않은 쇠석 보조기층과 아스팔트 보조기층에서는 그 영향이 큰 것으로 조사되었다.
7. 1차 하중재하에 대한 현장실험을 기존 연구자의 실험과 비교한 결과 린 콘크리트 보조기층과 시멘트안정처리기층이 매우 유사한 경향을 보였으며, 아스팔트 보조기층의 경우 최대마찰계수는 유사한 결과를 얻었으나 실험현장의 기온차로 인하여 변위에 대한 마찰계수 변화율은 차이를 나타냈다. 쇠석 보조기층의 경우에는 아스팔트 안정처리 기층 및 석회 안정처리 기층과 유사한 경향을 보였다. 분리

막을 사용한 보조기층의 경우 노상위에서 실험한 결과보다도 매우 낮은 마찰계수를 보였고, 이를 통해 분리막을 사용하면 슬래브와 보조기층 간의 마찰저항을 줄이는 효과가 매우 탁월함을 알 수 있었다.

콘크리트 슬래브의 두께에 따른 추가적인 실험이 필요하며 온도에 민감하게 물성이 변화하는 아스팔트 보조기층에 대해서도 온도에 따른 마찰특성을 조사할 필요가 있는 것으로 판단된다. 본 연구에서 획득된 실험 결과를 바탕으로 비선형 구조해석을 실시하여 슬래브와 보조기층 사이의 마찰저항에 따른 콘크리트 포장의 거동을 조사할 예정이다.

감사의 글

본 논문의 내용은 한국건설교통기술평가원의 구조적 성능을 고려한 시멘트 콘크리트포장의 기능 개선 시공화 연구(06 건설핵C20)를 통하여 도출된 결과의 일부로서 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 박문길(2009) 콘크리트 포장의 슬래브-기층 종류별 마찰력 연구, 석사학위논문, 인하대학교.
- 한국도로공사(2005) 고속도로공사 전문시방서, 8-4, pp. 15-27.
- Chia, W. S., McCullough, B. F., and Burns, N. H. (1986) *Field Evaluation of Subbase Friction Characteristics*, Research Report 401-5, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin.
- Friberg, B. F. (1954) Friction resistance under concrete pavements and restraint stresses in long reinforced slabs, *HRB Proc.*, Vol. 33, pp. 167-184.
- Goldbeck, A. T. (1924) Friction tests of concrete on various sub-bases, *Public Roads* Vol. 5, No. 5, pp. 19-21.
- Kragelsky, I. V., Dobychin, M. N., and Kombatov, V. S. (1977) *Friction and wear : Calculation method*, Pregamon Press.
- Lee, S. W. (2000). Characteristics of friction between concrete slab and base, *KSCCE*, Vol. 4, No. 4, pp. 265-275.
- Lee, L. H. and Ludema, K. C. (1981) *Friction and Wear of Polymers*, Tribology Series 6, Elsevier.
- Rasmussen, R. O. and Rozycki, D. K. (2001) Characterization and modeling of axial slab-support restraint, *Transportation Research Record*, No. 1779, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 26-32.
- Suh, Y. C., Lee, S. W. and Kang, M. S. (2002). Evaluation of sub-base friction for typical korean concrete pavement, *Transportation Research Record* No.1809, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 66-73.
- Scott, J. P. (1963) Tests on materials for use in sliding layers under concrete road slabs, *Civil Engineering*, Vol. 56, No. 663, pp. 1297-1301, pp. 1466-1468, pp. 1603-1605.
- Teller, L. W. and Sutherland, E. C. (1930) The structural design of concrete pavements, *Public Roads*, Vol. 10, No. 12, pp. 213-230.
- Timms, A. G. (1963) Evaluating subgrade friction-reducing mediums for rigid pavements, *Highway Research Record*, No. 60, Highway Research Board, Washington D.C., pp. 28-38.
- Wesevich, J. W., McCullough, B. K., and Burns, N. H. (1987) *Stabilized sub-base friction study for concrete pavements*, Research Report 459-1, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, April.

(접수일: 2009.9.9/심사일: 2009.10.14/심사완료일: 2009.11.10)