Int. J. Highw. Eng. Vol. 19 No. 6 : 37-46 DECEMBER 2017
https://doi.org/10.7855/IJHE.2017.19.6.037

아스팔트 표층과 RCC 기층 계면에서의 부착특성 연구

Bond Characteristics at the Interface between HMA Surface and RCC Base

홍 기	Hong, Ki	강릉원주대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : 7thheaven258@gmail.com)
김영규	Kim, Young Kyu	정회원 · 강릉원주대학교 토목공학과 · 공학박사 (E-mail : kingdom1980@nate.com)
배석일	Bae, Abraham	정회원 · 삼성물산(주) 건설부문 Civil ENG팀 · 공학박사 (E-mail : abebae@naver.com)
이승우	Lee, Seung Woo	정회원 · 강릉원주대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : swl@gwnu.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : A composite pavement utilizes both an asphalt surface and a concrete base. Typically, a concrete base layer provides structural capacity, while an asphalt surface layer provides smoothness and riding quality. This pavement type can be used in conjunction with roller-compacted concrete (RCC) pavement as a base layer due to its fast construction, economic efficiency, and structural performance. However, the service life and functionality of composite pavement may be reduced due to interfacial bond failure. Therefore, adequate interfacial bonding between the asphalt surface and the concrete base is essential to achieving monolithic behavior. The purpose of this study is to investigate the bond characteristics at the interface between asphalt (HMA; hot-mixed asphalt) and the RCC base.

METHODS : This study was performed to determine the optimal type and application rate of tack coat material for RCC-base composite pavement. In addition, the core size effect, temperature condition, and bonding failure shape were analyzed to investigate the bonding characteristics at the interface between the RCC base and HMA surface. To evaluate the bond strength, a pull-off test was performed using different diameters of specimens such as 50 mm and 100 mm. Tack coat materials such as RSC-4 and BD-Coat were applied in amounts of 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, and 1.1 ℓ/m^2 to determine the optimal application rate. In order to evaluate the bond strength characteristics with temperature changes, a pull-off test was carried out at -15, 0, 20, and 40 ℃. In addition, the bond failure shapes were analyzed using an image analysis program after the pull-off tests were completed.

RESULTS : The test results indicated that the optimal application rate of RSC-4 and BD-Coat were 0.8 ℓ/m^2, 0.9 ℓ/m^2, respectively. The core size effect was determined to be negligible because the bond strengths were similar in specimens with diameters of 50 mm and 100 mm. The bond strengths of RSC-4 and BD-Coat were found to decrease significantly when the temperature increased. As a result of the bonding failure shape in low-temperature conditions such as -15, 0, and 20 ℃, it was found that most of the debonding occurred at the interface between the tack coat and RCC surface. On the other hand, the interface between the HMA and tack coat was weaker than that between the tack coat and RCC at a high temperature of 40 ℃.

CONCLUSIONS : This study suggested an optimal application rate of tack coat materials to apply to RCC-base composite pavement. The bond strengths at high temperatures were significantly lower than the required bond (tensile) strength of 0.4 MPa. It was known that the temperature was a critical factor affecting the bond strength at the interface of the RCC-base composite pavement.

Keywords

Composite Pavement, Roller Compacted Concrete(RCC), Bond Characteristics, Hot Mixed Asphalt(HMA), Tack Coat, Pull-off test

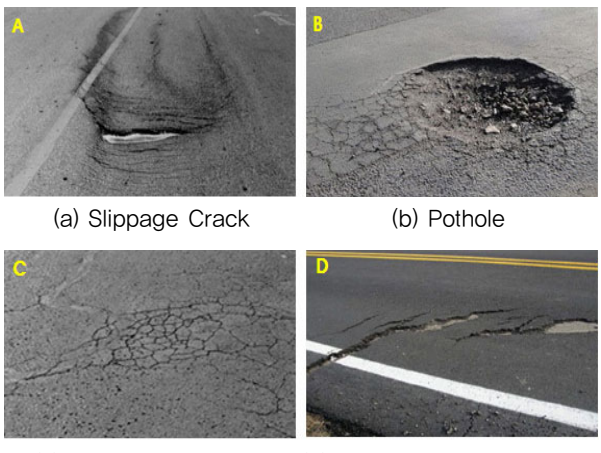
Corresponding Author : Lee, Seung Woo, Professor
Department of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National Univ.,
7, Jukheon-gil, Gangneung city, Gangwon province, 25457, Korea
Tel : +82.33.640.2419 Fax : +82.33.641.1391
E-mail : swl@gwnu.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Sep. 26, 2017 Revised Oct. 08, 2017 Accepted Nov. 22, 2017

1. 서론

국내 고속도로 연장은 약 4000km로 이 중 60% 이상이 콘크리트 포장으로 구성되어 있다. 국토교통부 고속도로 건설계획(2016~2020) 수립 연구에서는 2020년까지 6000km 이상 고속도로 건설이 계획되어 있어 매년 고속도로 콘크리트포장 연장이 증가할 전망이다(MOLIT, 2016). 현재 국내 고속도로 콘크리트 포장은 노후화와 기후환경(폭우 및 폭설 등)의 변화로 포장 파손이 가속되어 개선을 필요로 하는 상황이며 매년 고속도로 파손 포장에 대한 보수 및 보강 비용으로 약 800억원 이상을 소비하여 경제적 손실을 발생시키고 있다(Korea Expressway Corporation, 2015).

복합포장은 단일거동(monolithic behavior)을 하는 다른 특성을 지닌 2개 또는 그 이상의 다층으로 구성된 포장으로 정의되며, 일반적으로 표층의 연성포장(HMA)과 기층의 강성포장(RCC, CTB, PCC, Lean Concrete 등)으로 구성된다(SHRP, 2013). 복합포장은 강성기층의 높은 하중지지력과 더불어 아스팔트 표층의 소음저감, 평탄성, 미끄럼저항성 등을 확보할 수 있는 장점을 가진 포장으로, 높은 구조적 성능을 통해 장기공용성 확보가 가능한 경제적 대안이다(Nunez, 2007). 그러나 이러한 복합포장은 아스팔트와 콘크리트 간의 재료적 이질성으로 인한 계면의 부착파괴로 포장성능을 다하고 있지 못한 실정이다(Al-Qudi et al., 2008; Lee et al., 2011).



(a) Slippage Crack (b) Pothole

(c) Premature Fatigue (d) Surface Layer Delamination

Fig. 1 Pavement Distress due to De-Bonding (Al-Qadi et al., 2008; West et al., 2005)

복합포장 계면에 부착 손실이 발생할 경우, Fig. 1과 같이 slippage crack과 더불어 러팅, 피로균열, top-down crack 등 아스팔트 표층의 조기파손을 야기하여 포장의 공용수명 저하 및 경제적 손실을 발생시킨다. 반면 적절한 부착력을 확보한 경우 상·하부 층의 일체형 거동을 통해 교통 및 환경하중에 의해 발생된 응력과 변형률을 포장 전체에 적절하게 분산시킴으로써 공용성능 확보의 장점을 가진다(West et al., 2006; Al-Qudi et al., 2008; Rahman et al., 2017). 그러므로 복합포장 계면의 부착력 확보는 포장의 구조적/기능적 성능 및 내구성 향상을 통해 장기공용성을 확보하기 위한 중요한 과제이다.

복합포장에 적용되는 아스팔트와 택코트 재료는 역청혼합물을 포함하고 있는 재료로 시간-온도에 의존적인 점탄성 특성을 나타내며 콘크리트는 환경적 조건(온도 등)에 따라 컬링 및 수축·팽창 등이 발생하는 재료적 특성을 가진 재료이다. 복합포장의 역학적 거동은 이러한 각 재료 및 포장계면의 특성에 기반한다. 그러므로 부착 성능을 평가함에 있어 국내의 계절별 기후에 따른 복합포장 내 온도특성을 반영하여 부착성능이 평가되어야 한다. 그러나 국내의 경우 20℃의 표준온도만을 적용한 부착성능 평가를 통해 품질관리가 수행되고 있으며 이와 관련된 연구가 미흡한 실정이다. 또한, 복합포장의 경제적 강성기층으로 본 연구에 적용된 롤러다짐콘크리트(RCC)는 적은 단위수량 및 단위시멘트량을 사용하여 시멘트 페이트의 양이 일반콘크리트 포장에 비해 적으며 포설 후 롤러전압다짐이 적용되기 때문에 불규칙한 거친 표면을 형성한다. 그러므로 이러한 특성을 고려한 적정 택코트 재료 및 살포량 선정이 요구된다. Fig. 2는 RCC와 PCC의 표면 상태에 대한 비교를 보여준다.

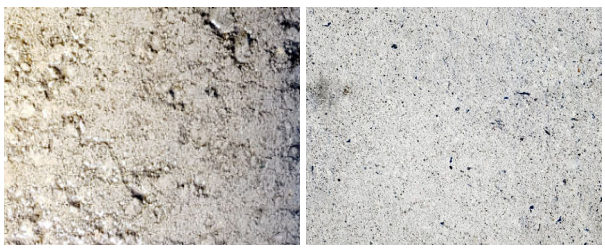


Fig. 2 RCCP (Left) and PCC Surface (Right)

따라서, 본 연구에서는 롤러다짐콘크리트-기층 복합포장에 대한 택코트 재료(RSC-4, BD-Coat)의 적정 살포량을 선정하고 온도조건에 따른 부착특성을 분석하고자 한다. 추가적으로 실험적 연구들에 대한 부착파괴 단면 검토를 통해 인장부착파괴 양상을 정립하고 부착파괴단면의 특성을 분석하고자 하였다.

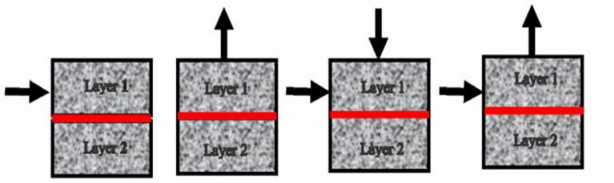
2. 복합포장의 부착특성

2.1. 택코트 재료의 역할 및 특성

콘크리트와 아스팔트 포장 간 계면의 부착력 확보를 위해 사용되는 택코트 재료는 신·구 표면 사이에 부착력 확보를 위해 상대적으로 흡수성이 낮은 표면에 적용되는 역청재료로 정의된다(ASTM D8-02). 택코트 재료는 유화아스팔트, 아스팔트 시멘트, 컷백아스팔트로 분류되며 국내·외에서는 일반적으로 상온에서 시공이 쉽고 균일한 도포로 부착력 확보에 장점을 가진 유화아스팔트(물+아스팔트바인더+유화제 혼합물)가 사용되고 있다. 국내의 경우 빠른 양생시간 확보로 공기단축 등 장점을 가진 rapid setting 계열의 양이온 유화아스팔트(RSC-4 등)가 주로 사용되며 국외에서는 slow setting 계열의 유화아스팔트(SS-1(h), CSS-1(h) 등)가 택코트 재료로 사용되고 있다. 이외에 부착 및 재료 성능 개선을 위해 폴리머 등 개질제를 첨가한 개질유화아스팔트(BD-Coat 등)가 사용되고 있다(Kim et al., 2015).

2.2. 부착파괴 메커니즘

아스팔트 표층과 콘크리트 기층으로 이루어진 복합포장에서 계면의 부착은 아스팔트 포장성능에 상당한 영향을 미치며, 복합포장의 구조적·기능적 성능을 보장하기 위해 부착력 확보를 통한 일체형 거동이 필수적이다. 포장 계면의 부착파괴는 교통하중(수직하중, 수평하중) 및 환경하중(curling, 수축·팽창 등)에 의해 발생하는 인장응력과 전단응력이 포장 계면의 인장 및 전단 부착강도를 초과할 경우, 수직인장부착파괴(mode Ⅰ) 또는 수평전단부착파괴(mode Ⅱ)에 의해 발생하게 된다(Mohammad et al., 2012; Chavez et al., 2008). Rahman et al.(2016)에 따르면 공용 중인 포장에서 다양한 교통하중 및 환경하중의 영향으로 발생할 수 있는 부착파괴 mode는 Fig. 3과 같이 세분화할 수 있으며, pure shear mode(A) 또는 shear-compression modes(C)는 일반적으로 줄눈 등 불연속면이 없는 포장 계면에서 차량의 braking 또는 accelerating에 의한 종·횡 방향 수평하중에 의해 발생되며 pure tension mode(B)는 줄눈콘크리트 포장과 아스팔트 덧씌우기로 이루어진 포장의 계면에서 발생되는 환경하중(curling, wapping)에 의해 야기된다. shear-tension modes(D)는 전단강도가 인장강도에 비해 상대적으로 작은 포장 계면에서 과도한 수평하중으로 발생된 표층의 bulking에 의해 인장응력이 발생할 것이라고 하였으나 이것은 실제 포장에서 거의 발견되지 않았다. 아래의 Fig. 3은 포장계면의 부착파괴 모드를 보여준다.



(a) Pure Shear Mode (b) Pure Tension Mode (c) Shear-Compression Mode (d) Shear Tensile Mode

Fig. 3 Interface Bonding Failure Mode (Rohman et al., 2016)

2.3. 복합포장 부착성능 평가기준 및 계면의 부착응력 조사

현재 국내의 경우 콘크리트 포장에 대한 아스팔트 덧씌우기 공법 적용 시, 택코트의 부착강도 기준은 없는 실정이며, KS F 4932(교면용 도막 방수재의 접착강도) 기준에 준하여 사용하고 있다(Cho, 2013). 그러므로 복합포장의 부착성능 평가를 위해 아스팔트와 콘크리트 계면에서 교통 및 환경하중의 영향으로 부착파괴를 유발하는 부착응력에 대한 검토가 요구된다.

Rith et al.(2017)은 heavy duty area의 RCC-기층 복합포장(HMA/RCCB)에서 발생된 수직 및 수평 교통하중으로 인한 복합포장 계면의 수평전단부착거동을 조사하였다. 연구에는 아스팔트 표층(100mm)을 비롯하여 RCC 기층(400mm) 그리고 노상(3000mm)으로 구성된 FEM model이 사용되었다. 재료는 선형탄성으로 고려되었으며 fully bonded condition의 부착계면이 사용되었다. 연구에 사용된 교통하중은 각 타이어마다 153 kN을 가지는 straddle carrier가 사용되었다. 온도조건(5, 20, 40℃)에 따른 아스팔트 재료물성과 수평하중의 영향이 전단부착응력 해석에 고려되었다. 연구결과, 복합포장(HMA/RCCB) 계면의 수평하중은 수평전단응력과 비례하였으며 그 영향이 상당하였다. 반면 온도변화에 따른 아스팔트 재료의 물성 변화는 계면의 수평전단응력에 눈에 띄는 영향을 미치지 못했다. 연구에서 발생된 최대수평전단응력은 수평하중이 수직하중의 60~80%일 때, 약 0.33~0.35MPa를 보여주었다.

Xu et al.(2009)는 concrete-bridge deck과 asphalt overlay 계면에 적용된 접착층(waterproof layer)의 부착거동을 연구하고자 계면의 수직인장응력 및 수평전단응력에 대한 온도(0, 25, 40℃)에 따른 아스팔트 물성과 아스팔트 덧씌우기 두께의 영향을 유한요소해법을 통해 조사하였다. 부착계면은 fully bonded condition

으로 고려되었으며 포장계면의 마찰 영향을 고려하고자 nonlinear surface-to-surface contact model이 적용되었다. 하중은 약 140kN-single axle dual tire가 적용되었다. 실험결과, 온도 변화에 따른 아스팔트 물성변화가 인장 및 전단응력에 미치는 영향은 작았으며 아스팔트 두께는 포장 계면의 전단응력 및 인장응력에 상당한 영향을 미쳤다. 아스팔트 두께가 두꺼워질수록 전단응력은 최대 66%, 인장응력은 최대 25%감소하여 전단응력이 아스팔트 두께의 영향을 더 많이 받는 것으로 판명되었으며, 16cm 이상에서는 아스팔트 포장 두께 증가에 따른 전단 및 인장응력의 감소가 미미하였다. 해석결과로 얻어진 포장 계면의 최대인장응력은 약 0.1~0.2MPa 수준이었으며 최대전단응력은 약 0.2~0.3MPa를 나타내었다.

Liu et al.(2011)은 아스팔트 표층과 콘크리트 기층으로 구성된 복합포장구조에 대한 전단부착응력을 2D FEM을 통해 연구하였다. 연구에는 60mm 두께의 아스팔트 표층과 240mm의 콘크리트 기층으로 구성된 model이 적용되었으며 98, 138, 169kN-single axle dual tire의 수직하중(P)이 각각 적용되었다. 수평하중($Q_{max} \leq Pf$)은 선행연구를 통해 조사된 pavement attachment coefficient(f)를 이용하여 적용되었다. 연구결과, 수직 및 수평하중의 증가는 복합포장 계면의 수평전단응력을 증가시켰으며 수직하중보다 수평하중이 전단응력에 지배적인 영향을 주었다. 복합포장 계면에서 발생된 최대수평전단응력은 pavement attachment coefficient(f)가 0.7(dry asphalt surface condition 일 때 최대 0.65를 나타냄)일 때 교통하중에 따라 약 0.3~0.5MPa의 범위를 나타내었다.

문헌연구에서 제시된 부착응력은 각각의 해석조건과 연구방법에 따라 다소 차이를 보이고 있으나 전단응력은 포장두께 및 교통하중의 영향에 따라 약 0.2~0.5MPa 범위에 있으며 인장응력은 아스팔트포장 두께 및 온도에 따른 HMA 물성변화에 따라 약 0.1~0.2MPa 범위를 나타내고 있다. 국내의 경우 국토교통부 차량운행제한 규정, 2010에 의거하여 축하중 10t(100kN) 또는 총중량 40t 이상의 차량운행을 제한한다는 점에서 현실적으로 공용중인 고속도로 포장에 교통하중으로 인해 발생 가능한 최대전단응력은 약 0.3MPa로 추정되며 고속도로의 경우 일반적으로 차량의 braking and accelerating의 경우가 많지 않다는 점에서 이보다 크지 않을 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구의 소요부착강도 선정에 있어, 전단부착응력과 인장부착응력은 각각 0.3MPa, 0.2MPa가 적용되었으며 부착파괴에 대해 보다 안전 축을 제공하기 위해 아스팔트 표층 두께가 50mm일 때 발생되는 최댓값을 적용하였다. 또한 NCHRP(2012)에서는 일반적으로 공용중인 포장 계면의 부착파괴는 단조수평하중이 아닌 반복적 교통하중의 영향으로 인한 피로수평하중에 의해 발생되므로 전단피로파괴의 영향을 피하고자 stress ratio(stress/ strength)=0.5 이하를 만족할 것을 추천하였다. 그러므로, 소요전단부착강도에 대해 stress ratio가 0.5 이하를 만족하도록 하였으며 인장부착파괴 또한 온도변화에 따른 반복적 curling에 의해 발생될 것이 예측되므로 소요전단부착강도와 동일한 stress ratio를 적용하여 선정하였다. 계절 변화에 따른 온도조건은 부착응력에 미치는 영향이 미미하므로 소요부착강도를 선정함에 있어 배제되었다. 아래의 Table 1은 본 연구에서 제시된 복합포장 계면에 대한 택코트의 소요부착강도를 보여주며, 본 연구의 실험적 결과들은 아래의 소요부착강도로 평가되었다.

Table 1. Required Bond Strength at Interfacial of Asphalt and Concrete Pavement

Classification	Required bond strength(Mpa)
Shear bond strength	0.6
Tensile bond strength	0.4

포장계면에 발생된 전단부착파괴 또는 인장부착파괴는 교통 및 환경(수분침투 등) 영향에 대한 저항성을 저하시켜 크랙의 증식처럼 포장 전체에 점차적으로 부착손실을 야기할 것으로 예상된다. 그러므로 공용중인 포장의 부착성능은 인장과 전단 모두에 대해 합리적인 평가가 이루어져야 한다(Raab et al., 2004; Rahman et al., 2016). 차량의 stopping and starting이 발생하는 고속도로 혼잡구간이나 톨게이트 구간의 경우 포장계면에 발생되는 전단응력에 의한 전단부착파괴 영향이 지배적이다(West et al., 2005). 그러나 고속도로 일반구간의 경우 차량의 braking and accelerating이 발생하는 경우가 드물기 때문에 전단부착파괴보다 인장부착파괴의 영향이 더 지배적일 것으로 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 고속도로 일반구간에서 발생되는 인장부착파괴의 영향을 고려하고자 pull-off test를 수행하여 그 부착특성과 영향을 평가하였다.

3. 연구방법

3.1. 사용 재료 및 시편제작

3.1.1. 택코트 재료

본 연구에서 사용된 택코트 재료는 현재 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 일반유화아스팔트(RSC-4)와 유연성 및 접착력 향상을 위해 고무계 폴리머 등을 첨가하여 교면용 포장 등에 사용되는 개질유화아스팔트(BD-Coat)이다. 사용된 택코트 재료는 와이어브러쉬 및 에어컴프레셔로 이물질이 제거된 건조한 콘크리트 표면에 붓과 롤러를 이용하여 균일하게 도포되었으며, 약 12시간 동안 양생되었다. 아래의 Table 2은 본 연구에서 사용된 택코트의 재료실험 결과를 보여준다.

Table 2. Property of Tack Coat Material

Property		RSC-4	BD-Coat
Viscosity(Engler, 25℃)		4.3	2
Sieve test(1.18mm, %)		0.1	0.1
Coating test		PASS	PASS
Particle charge test		Cationic (+)	Cationic (+)
Residue weight(%)		52	63
Residue	Penetration (25℃, 1/10mm)	96	67
	Ductility (15℃, cm)	74	100
	Solubility in trichloroethylene(%)	98.9	-
Storage stability(24h)(Weight %)		0	0

3.1.2. 콘크리트

본 실험에서 기층으로 사용된 롤러다짐콘크리트(RCC)는 일반콘크리트 포장에 비해 적은 단위수량 및 단위시멘트량을 사용하는 zero-slump의 된 배합 콘크리트로 수화반응과 롤러다짐에 의한 조밀한 내부 형성으로 골재 맞물림 효과를 증진시켜 우수한 강도발현과 구조적 성능 확보가 가능하며, 또한 신속한 시공속도 및 간소화된 시공절차와 조기교통개방 등의 장점을 가져 복합포장에서 구조적, 경제적 강성기층으로 활용성이 큰 콘크리트이다(PCA, 2010). RCC기층은 300×300×150(mm^3) 몰드에 ASTM C1435에 따른 vibrating hammer 장비를 사용하여 100mm 두께로 제작되었으며, SHRP(2013)에서는 복합포장의 HMA 표층 시공에 대해 콘크리트-기층 양생 7일 이후 또는 휨강도 4.0 MPa 이상을 만족시킬 것을 제시하고 있어 본 실험에 사용된 RCC-기층은 위의 사항을 만족하도록 7일간 양생되었다. 아래의 Table 3과 Table 4는 각각 본 실험에 사용된 RCC기층의 배합표와 물성을 보여준다.

Table 3. Mixture Design of Roller Compacted Concrete

G_{max} (mm)	Vebe time(s)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Content (kg/m^3)				
						W	C	S	G	AE0.1
19	55~60	0	1	39.3%	48	118	300	1010	1049	0.3

Table 4. Material Properties of Roller Compacted Concrete

Classification	Compressive strength (MPa)		Flexural strength (MPa)	
	7day	28day	7day	28day
RCC #1	33.19	41.74	6.01	7.85
RCC #2	30.18	43.01	6.91	8.02
RCC #3	31.56	43.78	6.94	7.56
Avg	31.68	42.37	6.62	7.81

3.1.3. 아스팔트

체가름 시험을 통해 얻어진 입도의 조정을 통해 표층용 아스팔트(WC-1, 13mm)의 합성입도 조건을 만족하였으며, 아스팔트바인더(AP-3)가 OAC 5.5%로 적용되었다. RCC기층 제작과 마찬가지로 표층용 아스팔트가 300×300×150(mm^3) 몰드에 포설되었으며, ASTM C1435에 따른 vibrating hammer 장비를 사용하여 50mm 두께로 제작되었다.

3.2. 실험조건 및 방법

본 연구에서는 일반유화아스팔트(RSC-4)와 개질유화아스팔트(BD-Coat)에 대한 살포량 실험을 통해 적정 사용량을 선정하였으며, 최적살포량에 대한 실험은 20±2℃ 표준조건에서 pull-off test를 통해 수행되었다. 온도에 따른 부착성능평가는 -15±2, 0±2, 20±2, 40±2℃ 4가지 조건에 대해 수행되었으며, 각각의 온도조건을 만족시키기 위해 temperature chamber에서 최소 12시간이상 양생된 후 실험되었다. 아래의 Table 5는 본 실험 조건에 대한 요약을 보여주며 Fig. 4는 공통적으로 적용되는 전체적인 실험 과정을 보여준

Table 5. Summary of Test Condition

Variable	Level
Tack coat type	RSC-4(water content, 48%), BD-Coat(water content, 37%)
Surface condition	Normal RCCP surface
Test method(loading rate)	Pull-off test(0.1 MPa/s)
Tack coat application rate	0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1 L/m^2
Coring size	Ø100mm, Ø50mm
Test temperature	-15±2℃, 0±2℃, 20±2℃, 40±2℃

Production of RCC-Base & Curing 7days

RCC-Base Drying & Cleaning +Tack Coat Apply&24h Curing

Production of HMA-Surface

Coring Test

Temperature Curing (over 12h)

Pull-off Test

Fig. 4 Test Method and Procedure

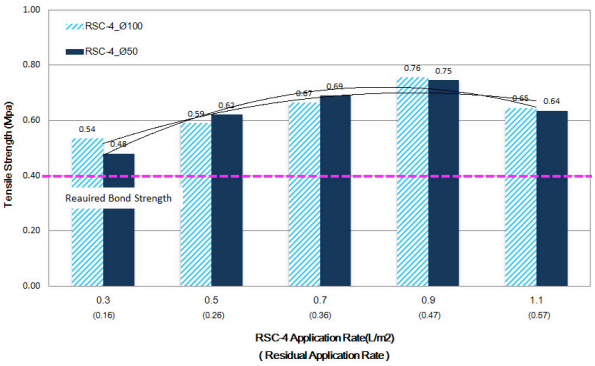


Fig. 5 Test Result of Optimal Application Rate of Tack Coat Material (RSC-4)

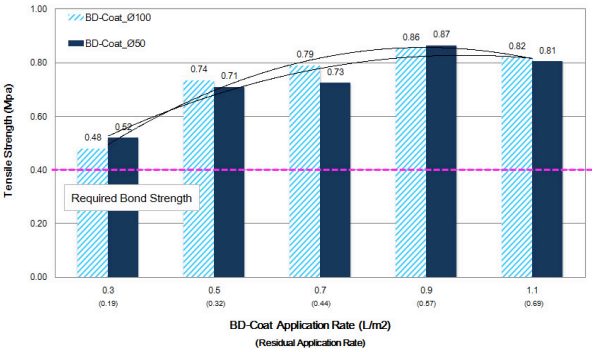


Fig. 6 Test Result of Optimal Application Rate of Tack Coat Material (BD-Coat)

다. tack coat application rate은 택코트에 함유된 수분을 포함하는 양을 의미한다.

4. 실험결과

4.1. 택코트재료의 적정살포량 실험결과

본 최적택코트살포량 실험에서는 BD-Coat와 RSC-4 택코트에 대한 적정사용량선정 연구와 더불어 추가적으로 Ø100mm와 Ø50mm Coring 시편에 대한 coring size effect가 고려되었다. Fig. 5와 Fig. 6은 RSC-4와 BD-Coat에 대한 각각의 실험결과를 보여주며 그래프 x축의 residual application rate(택코트 잔류 살포량)는 택코트에 함유된 수분이 증발하고 남은 양을 나타낸다.

본 실험결과, 일반유화아스팔트의 RSC-4와 개질유화아스팔트의 BD-Coat 모두 사용량이 증가할수록 인장부착강도가 증가하였으며 일정 수준 이상의 사용량에서는 인장부착강도 저하가 발생되었다. RSC-4와 BD-Coat는 각각 약 0.42(0.8) L/m^2, 0.57(0.9) L/m^{2}에서 최적사용량으로 판단되었으며, BD-Coat의 경우 전반적으로 RSC-4보다 더 큰 인장부착성능을 보여주었다. RSC-4와 BD-Coat의 모든 살포량은 본 연구에서 제시된 소요인장부착강도 0.4 MPa을 모두 만족하였다.

Cho.(2013)에 의해 수행된 HMA/PCC 복합포장의 부착특성연구에서 일반유화아스팔트와 개질유화아스팔트의 최적잔류사용량이 각각 약 0.23L/m^{2}와 0.25 L/m^{2}을 나타낸 것과 비교하여 본 연구에서 수행된 HMA/RCC 복합포장의 일반유화아스팔트와 개질유화아스팔트의 사용량은 그보다 약 2배 가량 더 많았다.

이는 RCC의 경우 PCC에 비해 적은 단위수량 및 단위시멘트량 사용으로 시멘트페이스트 양이 매끈한 표면을 형성하기에 부족하며 포설 직후 롤러다짐이 적용되기 때문에 불규칙한 거친 표면형성에 의한 RCC 부착계면의 비표면적 증가에 따른 것으로 판단된다. 택코트의 적정 사용량은 하부 포장층의 표면 상태에 따라 다소 차이가 발생할 수 있으므로 이를 현장에 적용하기 위해서는 하부포장의 표면 상태를 확인하는 것이 요구된다. 또한 부착실험시편의 중앙부에서 실험된 Ø100mm 코어시편과 같은 부착실험시편의 단부 부근에서 시험된 Ø50mm 코어시편에 대한 인장부착강도는 거의 유사한 결과를 나타내어 ±100mm, ±50mm에 대한 coring

size effect는 미미한 것으로 판단되었다.

4.2. 온도에 따른 부착특성 실험결과

본 실험에서 RSC-4와 BD-Coat는 각각 0.42L/m², 0.57L/m²의 최적잔류사용량이 적용되었으며, 각각의 택코트 재료에 대해 -15±2, 0±2, 20±2, 40±2℃ 실험온도 조건의 인장부착강도 특성이 연구되었다. 아래의 Table 6은 각 택코트 재료의 온도에 따른 부착특성을 보여준다.

Table 6. Characteristics of Bond Strength According to Test Temperature Condition

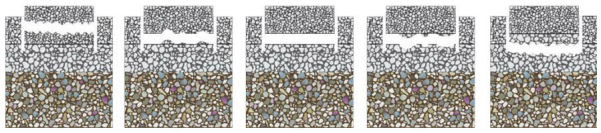
Temp (℃)	RSC-4				BD-Coat			
	1	2	3	Avg (MPa)	1	2	3	Avg (MPa)
-15±2℃	1.53	1.27	1.14	1.31	1.61	2.10	1.80	1.84
0±2℃	0.98	1.02	1.17	1.06	2.03	1.82	1.34	1.73
20±2℃	0.77	0.79	0.76	0.77	0.83	0.83	0.82	0.83
40±2℃	0.05	0.06	0.06	0.06	0.08	0.08	0.07	0.08

본 실험에서 두 택코트 재료 모두 온도가 증가할수록 부착강도가 저하되었으며 40±2℃ 조건을 제외하고 모든 온도조건에서 RSC-4와 BD-Coat는 본 연구의 소요인장부착강도 0.4MPa를 만족하였다. 그러나 40±2℃ 온도조건에서는 RSC-4와 BD-Coat 모두 소요인장부착강도 0.4MPa에 한참 못 미치는 부착강도 성능을 나타내었으며, 또한 여름철 복합포장 계면에서 발생될 것으로 예측되는 최대인장부착응력 0.2MPa에도 미치지 못하였다. 따라서 여름철 국내의 포장 내 온도가 최대 60℃까지 상승한다는 점을 고려하였을 때, 복합포장 계면의 인장부착파괴가 발생될 가능성이 높은 것으로 판단된다. 그러므로 고온조건에서 재료의 점성 및 강성의 변화가 적은 온도저항성을 가진 택코트 재료의 적용은 부착확보에 기여할 것으로 사료된다.

5. 부착파괴단면 검토

5.1. 분석방안

인장부착파괴 양상을 정립하고 부착특성과 부착파괴단면과의 상관관계를 분석하여 부착취약점을 파악하고자 부착파괴단면에 대한 검토가 수행되었다. Fig. 7은 인장부착강도 실험에서 발생할 수 있는 복합포장(HMA/Con´c)에 대한 부착파괴단면을 5가지로 세분화한 모습을 보여준다.



(A) Cohesive Failure of Asphalt Mixture Layer
(B) Interfacial Failure of Asphalt Mixture Layer and Tack Coat Layer
(C) Cohesive Failure in the Tack Coat Layer
(D) Interfacial Failure of Tack Coat and Concrete Layer
(E) Cohesive Failure of Concrete Layer

Fig. 7 Tensile Bonding Failure Case (Alexandra Destrée, 2016)

본 분석에서 부착실험 종료 후 부착파괴 단면을 육안으로 확인하였을 때 A와 E파괴는 발생되지 않았으며 부착계면에 대한 아스팔트 층과 롤러다짐콘크리트 층의 부분적 파괴의 발생 또한 매우 미미함으로 이는 해석에서 제외하였다. 또한 포장계면에 살포되는 택코트의 두께는 3㎜ 이내로 매우 얇기 때문에 일반적으로 C파괴(택코트 내 부착파괴)를 구분함에 있어 제한이 따른다. 따라서 본 해석에서는 B파괴(아스팔트 층과 택코트 계면의 부착파괴, 검은색 계열 또는 유사한 명도를 나타내는 색상), D파괴(택코트와 콘크리트 계면의 부착파괴, 흰색·회색 또는 유사한 명도를 나타내는 색)에 대한 분석을 통해 포장계면의 부착특성과 인장부착파괴단면 사이의 상관관계 분석을 수행하였다. Fig. 8은 본 연구에서 수행된 부착파괴단면(코어 하부)에 대해 보여준다.

Fig. 8 Bonding Failure Surface (Bottom of Core)

부착파괴단면 case에 대한 분류는 HMA-택코트 계면에서 부착파괴가 발생하거나 HMA 근접거리의 택코트에서 부착파괴가 발생할 경우, 부착파괴단면에 남아있는 택코트 재료로 인해 주로 검은색 또는 이와 유사한 명도의 색상을 나타내며 택코트-RCC 계면에서 부착파괴가 발생하거나 RCC 근접거리의 택코트 재료에서 부착파괴가 발생한 경우에는, 택코트 재료 또는 RCC 표

면의 손실로 인해 회색빛깔, 흰색 또는 이와 유사한 명도의 색상의 부착파괴단면을 나타내는 특성을 활용하여 분류되었다. 다만, 부착파괴단면에서 흰색을 띄는 부분의 경우 전체 부착파괴단면에서 차지하는 비율이 크지 않으며 coring test로 인해 발생된 시멘트의 이물질과 영상 촬영 시 발생되는 택코트 재료의 빛 반사 등을 포함하는 것으로 판단되어 해석에서 노이즈로 분류되었다. 부착파괴단면에 대한 구성비(%)는 Eq. (1)과 같이 각 부착파괴 case에 대한 사진의 픽셀수를 전체 부착파괴단면의 총 픽셀 수로 나눠 계산되었으며, 아래의 Fig. 9는 부착파괴단면을 확대한 것으로 부착파괴 단면을 구성하고 있는 각각의 대표적인 색상 case를 보여준다.

$$\text{Composition ratio of bonding failure surface}(\%) = \frac{\text{number of pixel on each case of bonding failure}}{\text{number of total pixel on bonding failure surface}} \times 100 \quad (1)$$

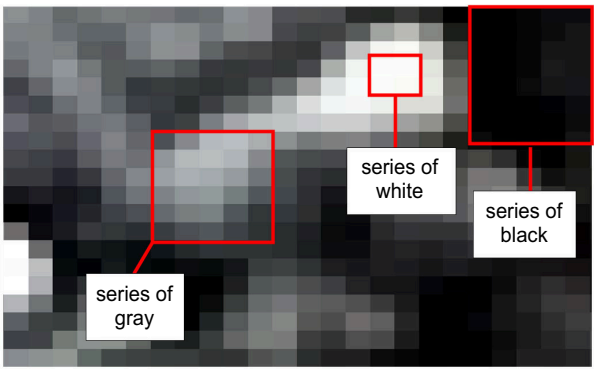


Fig. 9 Zoomed Bonding Failure Surface

부착파괴단면의 분석 방법 및 순서는 아래의 다음과 같다.

1) 인장부착실험 종료 후, 부착파괴면 청소 및 건조
2) 영상기기를 통한 부착파괴면 촬영
3) 촬영된 영상을 영상편집프로그램을 활용하여 분석 가능한 이미지로 편집(모든 촬영영상은 2750×2750Pixel, 해상도(픽셀/인치) : 72DPI로 편집되었음; 1픽셀=0.00123mm2)
4) 영상해석프로그램(ENVI)을 활용하여 색상에 따른 각 복합포장계면의 부착파괴Case 분류 및 구성비 조사
5) 포장계면의 부착특성과 인장부착파괴단면 사이의 상관관계 분석 수행

5.2. 분석결과 및 고찰

5.2.1. 택코트살포량에 따른 부착파괴단면 특성

아래의 Table 7, Table 8은 RSC-4와 BD-Coat 살포량에 따른, HMA-택코트 계면의 부착파괴(HMA/Tack Coat)와 택코트-RCC 계면의 부착파괴(Tack Coat/RCC)가 전체 부착파괴단면에서 차지하는 각각의 비율을 보여준다.

Table 7. Characteristics of Bonding Failures Surface According to Application Rate (RSC-4)

Application rate	Avg. Maximum tensile strength (MPa)	HMA/Tack coat		Tack coat/RCC	
		PIXEL COUNT (EA)	Avg. PERCENT (%)	PIXEL COUNT (EA)	Avg. PERCENT (%)
0.3	0.54	1,658,258	35.15	3,057,524	64.85
0.5	0.59	1,566,630	34.06	3,048,080	65.94
0.7	0.67	1,478,547	32.41	3,081,675	67.59
0.9	0.76	1,451,536	31.60	3,147,033	68.40
1.1	0.65	1,401,367	29.13	3,407,059	70.87

Table 8. Characteristics of Bonding Failures Surface According to Application Rate (BD-Coat)

Application rate	Avg. Maximum tensile strength (MPa)	HMA/Tack coat		Tack coat/RCC	
		PIXEL COUNT (EA)	Avg. PERCENT (%)	PIXEL COUNT (EA)	Avg. PERCENT (%)
0.3	0.48	1,847,667	37.93	3,023,062	62.07
0.5	0.74	1,739,454	34.56	3,293,000	65.44
0.7	0.79	1,886,631	37.26	3,176,295	62.74
0.9	0.86	1,716,659	33.93	3,341,305	66.07
1.1	0.82	1,511,133	29.25	3,654,854	70.75

택코트 살포량에 따른 부착특성 실험에서 택코트-RCC 계면은 전체부착파괴단면의 약 60~70% 비율을 나타내었으며, RSC-4와 BD-Coat는 서로 비슷한 경향을 보였다. RSC-4와 BD-Coat 모두 살포량이 증가할수록 택코트-RCC 계면이 전체부착파괴단면에서 차지하는 비율이 최대 6~9% 증가하였으며 반대로 HMA-택코트 계면의 비율은 감소하는 경향을 보였다. 일반적인 조건에서 RCC-택코트 계면은 HMA-택코트 계면에 비해 상대적으로 부착에 취약한 것으로 판단된다. 그러므로 RCC-택코트 사이의 결합을 증진시키기 위한 노력은 포장 계면의 부착 확보에 보다 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

5.2.2. 온도조건에 따른 부착파괴단면 특성

Table 9, Table 10은 RSC-4와 BD-Coat에 대한 온

도조건에 따른, HMA-택코트 계면의 부착파괴(HMA/Tack)와 택코트-RCC 계면의 부착파괴(Tack Coat/RCC)가 전체 부착파괴단면에서 차지하는 각각의 비율을 보여주며, RSC-4와 BD-Coat는 각각 택코트 잔류 살포량 기준으로 각각 0.42L/m^2, 0.57L/m^{2}가 적용되었다.

Table 9. Characteristics of Bonding Failures Surface According to Temperature Condition (RSC-4)

Temperature	Avg. Maximum tensile strength (MPa)	HMA/Tack coat		Tack coat/RCC	
		PIXEL COUNT (EA)	Avg. PERCENT (%)	PIXEL COUNT (EA)	Avg. PERCENT (%)
-15±2℃	1.31	1,750,690	34.582	3,330,488	65.418
0±2℃	1.06	1,557,394	31.246	3,424,013	68.754
20±2℃	0.77	2,064,914	42.526	2,797,665	57.474
40±2℃	0.06	2,753,580	58.603	1,957,748	41.397

Table 10. Characteristics of Bonding Failures Surface According to Temperature Condition (BD-Coat)

Temperature	Avg. Maximum tensile strength (MPa)	HMA/Tack coat		Tack coat/RCC	
		PIXEL COUNT (EA)	Avg. PERCENT (%)	PIXEL COUNT (EA)	Avg. PERCENT (%)
-15±2℃	1.84	1,444,520	27.332	3,838,686	72.668
0±2℃	1.73	1,779,464	35.059	3,293,356	64.941
20±2℃	0.83	1,973,536	38.734	3,122,403	61.266
40±2℃	0.08	3,010,206	54.223	2,585,455	45.777

RSC-4와 BD-Coat 모두 유사한 경향을 나타내었으며 상온 및 저온조건(-15, 0, 20℃)의 경우 택코트-RCC 계면은 전체부착파괴단면의 약 60~70%를 나타내었다. 반대로 온도가 증가할수록 RCC-택코트 계면이 전체부차파괴단면에서 차지하는 비율은 감소하였으며 HMA-택코트 계면은 증가하는 경향을 나타내었다. 고온조건(40℃)의 경우에는 HMA-택코트 계면이 전체부착파괴 단면에서 차지하는 비율이 약 55~58% 수준을 나타내었으며 이는 택코트-RCC계면보다 약 5~8% 더 많은 수준이었다. 따라서, 고온조건(40℃)의 경우 HMA-택코트 계면이 택코트-RCC 계면에 비해 부착에 취약한 것으로 판단되었으며, 상온 및 저온조건(-15, 0, 20℃)의 경우 택코트-RCC 계면이 상대적으로 부착에 취약한 것으로 판단되었다.

6. 결론

본 연구에서는 롤러다짐콘크리트-기층 복합포장에 대한 부착특성 정립 및 부착강도 확보방안을 제시하기 위해 택코트 재료, 살포량, 온도조건을 비롯하여 부착파괴단면에 대한 검토를 통해 인장부착 특성을 비교·분석하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

1. RSC-4의 경우 잔류택코트 살포량 약 0.42 L/m^{2}에서 0.7MPa 이상의 최대인장부착강도를 나타내었으며 BD-Coat의 경우 잔류택코트 살포량 약 0.57L/m^{2}에서 0.86MPa 이상의 최대인장부착강도를 보였다. 전반적으로 BD-Coat의 경우 RSC-4에 비해 높은 인장부착성능을 나타내었으며, RSC-4와 BD-Coat는 모든 살포량에서 본 연구의 소요인장부착강도 0.4MPa를 만족하였다.
2. RSC-4와 BD-Coat에 대한 ±100mm 코어시편과 ±50mm 코어시편은 비슷한 인장부착성능을 나타내어 core size effect는 미미한 것으로 판단되었다.
3. RSC-4와 BD-Coat 모두 온도가 증가할수록 인장부착강도가 급격히 저하되었으며, 상온 및 저온조건(-15, 0, 20℃)의 RSC-4와 BD-Coat는 본 연구의 소요인장부착강도 0.4MPa를 만족하였으나 고온(40℃)조건에서는 RSC-4(0.06MPa)와 BD-Coat(0.08MPa) 모두 소요인장부착강도에 크게 못 미치는 결과를 보여주어 여름철 복합포장 계면의 인장부착파괴 가능성이 높은 것으로 예측되었다. 따라서 고온조건에서 재료의 점성 및 강성의 변화가 적은 온도저항성을 가진 택코트 재료의 적용은 부착확보에 기여할 것으로 사료되었다.
4. 택코트 살포량에 따른 부착특성 실험에서 택코트-RCC 계면은 전체부착파괴단면의 약 60~70% 비율을 나타내었으며, RSC-4와 BD-Coat는 서로 비슷한 경향을 보였다. RSC-4와 BD-Coat 모두 살포량이 증가할수록 택코트-RCC 계면이 전체부착파괴단면에서 차지하는 비율이 최대 6~9% 증가하였다. 일반조건에서 RCC-택코트 계면은 HMA-택코트 계면에 비해 상대적으로 부착에 취약한 것으로 판단되었다. 그러므로 RCC-택코트 사이의 결합을 증진시키기 위한 노력은 포장 계면의 부착 확보에 보다 큰 영향을 미칠 것으로 판단되었다.
5. 온도에 따른 인장부착강도 실험결과, 상온 및 저온(-15, 0, 20℃) 조건의 경우 택코트-RCC 계면은 전체부착파괴단면의 약 60~70%를 나타내었다. 고온조건인 40℃의 경우 HMA-택코트 계면이 전체부착파괴 단면에서 차지하는 비율은 택코트-RCC계면

보다 약 5~8% 더 많은 약 55~58%를 나타내었다. 따라서, 고온조건(40℃)의 경우 HMA-택코트 계면이 택코트-RCC 계면에 비해 부착에 취약한 것으로 판단되었으며, 상온 및 저온조건(-15, 0, 20℃)의 경우 택코트-RCC 계면이 상대적으로 부착에 취약한 것으로 판단되었다.

향후 연구과제로 롤러전압콘크리트-기층 복합포장(HMA/RCC)에 대한 온도조건에 따른 전단부착강도 시험이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단-이공학 개인기초연구지원사업의 연구비지원(No.2017R1D1A3B03033714)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCES

Al-Qadi, I. L., Carpenter, S. H., Leng, Z., Ozer, H., and Trepanier, J. (2008). *Tack coat optimization for HMA overlays: Laboratory testing*, FHWA-ICT-08-023, Illinois Department of Transportation, Illinois.

ASTM D8-02 (2004). *Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements.*

ASTM C1435 (2008). *Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer*.

Cho, M. J. (2013). "Investigation into bonding characteristics of tack coat materials for asphalt overlay on concrete pavement. " *International Journal of Highway Engineering.* Vol. 15, No. 4, pp.85-94.

Kim, D., & Mun, S. (2015). "A Study for Evaluation of Hot Mixed Asphalt Mixtures with Tack-Coat Regarding High-Frequency Dynamic Resistance Performance and Bonding Property." *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp.35-47.

Korea Expressway Corporation (2015). *Long-term remodeling strategy due to aging of highway concrete pavement* (in Korean).

KS F 4932, (2007). *Waterproofing membrane coating for concrete deck of bridge*, Korean Agency for Technology and Standards.

Lee, S. W., & Son, H. J. (2011). "A study on the factors affecting on the life of bonded concrete overlay pavement using the LTPP data of USA." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*., Vol. 31, No. 2, pp.31-39.

Liu, K., Wang, F., & Wang, X. (2012). *Research on Interlaminar Instability Failure of Asphalt Overlay on Old Cement Pavement*, No. 12-3150, TRB, Washington, D.C.

Medina-Chavez, C.I., Choi, S. and Won, M.C., (2008). Concrete Pavement Overlays and 280 Failure Mechanisms. *Center for Transportation Research*, Report No. FHWA/TX-09/0-4893-2, Center for Transportation Research The University of Texas, Texas.

Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2016). *2016~2020 Study of highway construction plan* (in Korean).

Mohammad et al. (2012). *Optimization of Tack Coat for HMA Placement*, NCHRP Report 712, TRB, Washington, D.C.

Raab, C., Partl, M. N. (2004). "Interlayer Shear Performance :Experience with Different Pavement Structures.", *3th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Vienna, Austria, Vol.1, pp.535-545.

Rahman, A., Ai, C., Xin, C., Gao, X., & Lu, Y. (2017). "State-of-the-art review of interface bond testing devices for pavement layers: toward the standardization procedure." *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 31, No. 2, pp.109-126.

Rao, S. P. (2013). *Composite pavement systems Volum 1: HMA/PCC composite pavements report*, S2-R21-RR-2, TRB, Washington, D.C.

Rith, M., Kim, Y. K., Hong, S. J., & Lee, S. W. (2017). "Effect of horizontal loading on RCC-base composite pavement performance at heavy duty area.", *Construction and Building Materials*, Vol. 131, pp.741-745.

West, R. C., Zhang, J., & Moore, J. (2005). *Evaluation of bond strength between pavement layers*. NCAT report, 05-08, National Center for Asphalt Technology, Alabama.

Xu, Q., Zhou, Q., Medina, C., Chang, G. K., & Rozycki, D. K. (2009). " Experimental and numerical analysis of a waterproofing adhesive layer used on concrete-bridge decks.", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 29, No. 5, pp.525-534.