



노후 줄눈 콘크리트 포장 보수를 위한 얇은 연속 철근 콘크리트 덧씌우기 포장의 초기거동 평가

Early Age Behavior of Thin Bonded Continuously Reinforced Concrete Overlay on Aged Jointed Plain Concrete Pavement

류 성 우* 남 정 희** 김 기 현*** 조 윤 호****
 Ryu, Sung Woo Nam, Jung Hee Kim, Ki-Heun Cho, Yoon-Ho

Abstract

Thin bonded continuously reinforced concrete overlay(CRCO) was constructed on the existing jointed plain concrete pavement(JPCP) surface at Seo-Hae-Ahn express highway in South Korea in order to evaluate its applicability and performance. Two sections of road were considered for this evaluation. In the first section, the concrete overlay was placed and cut down to the existing layer to form transverse joints while CRCO was constructed on top of the existing layer in the second section. Early strength concrete(Type III) was utilized for both overlay sections. The depth of milling and the thickness of overlaid layer were 5 cm and 10 cm, respectively. Several vibrating wire gauges(VWG) were installed to evaluate the performance of CRCO with respect to curling, delamination, and crack propagation. As a result of the strength test, it was found that strength of the material reaches the design criteria within 1- 3 days. Analysis with vibrating wire gauge(VWG) showed CRCO effectively restricts joint movement. High adhesive strength also was observed from the material regardless of length of aging. Meanwhile, transverse cracks were observed on the middle of the section where JPCP overlay was applied whereas arbitrarily cracks in transverse direction were observed on the section where CRCP was applied.

Keywords : maintenance and rehabilitation, thin bonded concrete overlay, jointed concrete overlay(JCO), continuously reinforced concrete overlay(CRCO), early age behavior

요 지

본 연구에서는 노후 콘크리트 포장의 효율적 유지보수를 위하여 국내 최초 적용된 Thin Bonded Continuously Reinforced Concrete Overlay (CRCO) 공법의 초기 공용성이 평가되었다. 서해안 고속도로의 표층 파손 구간에 Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP) 덧씌우기와 CRCO 공법을 이용한 보수가 진행되었다. JPCP 덧씌우기 공법이 적용된 구간에서는 인접 슬래브가 완전히 분리되도록 덧씌워진 층의 줄눈을 완전히 커팅하였으며, CRCO 공법이 적용된 구간에서는 0.5% 종방향 철근과 위치 고정용 횡방향 철근을 설치한 후 그 위에 덧씌우기를 수행하였다. 두 구간 모두에서 3종 시멘트가 이용되었다. 현장 강도 시험 결과, 1~3일 내에 교통개방이 가능한 강도가 발현된 것이 확인되었으며, vibrating wire gauge (VWG) 데이터 분석 결과, CRCO 공법이 기존 포장의 줄눈 거동을 억제하는 것으로 나타났다. 부착강도 시험결과, 재령에 상관없이 높은 부착강도가 확인되었다. 한편, JPCP 덧씌우기 공법이 적용된 구간에서는 중앙부에서, CRCO 공법이 적용된 구간에서는 CRCP 포장과 같은 무작위 횡방향 균열이 관찰되었으며, CRCO 공법의 균열폭 거동이 JCP 보다 50% 정도 낮은 것으로 나타났다.

핵심용어: 유지보수, CRC 덧씌우기 포장, JCP 덧씌우기 포장, CRC 덧씌우기, 초기 거동

* 정회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 박사과정(E-mail: htsw@naver.com)
 ** 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원(E-mail: archnam@kict.re.kr)
 *** 정회원 · (주) 삼우 IMC 대표이사(E-mail: kiheun@samwonimc.com)
 **** 정회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 정교수(E-mail: yhcho@cau.ac.kr)



1. 서론

다양한 아스팔트 및 콘크리트 덧씌우기 공법이 노후 콘크리트 포장수명을 연장하기 위한 유지보수 방안으로 개발되었으나, 기존 콘크리트 포장면의 파손 부 및 줄눈부로부터 덧씌우기 층으로 전파되는 반사 균열에 의하여 공용 수명이 저하되는 문제가 해결되지 못하고 있다. 이러한 문제를 극복하고자 최근 국외에서는 새로운 형태 및 재료에 대한 연구가 진행 중이지만, 이를 국내에 활용하기 위해서는 교통 조건, 재료 조건, 포장 형태가 다른 국내 도로환경이 이들 덧씌우기 공법에 고려되어야 할 것이다. 본 논문에서는 국내 도로 환경을 고려한 Continuously Reinforced Concrete Pavement(CRCP) 개념의 얇은 덧씌우기 포장에 관한 연구를 진행하였으며, 그 초기 공용성에 대한 결과를 비교 분석하였다.

2. 콘크리트 덧씌우기 공법 및 사례 조사

콘크리트 덧씌우기는 노후된 콘크리트 포장의 구조적·기능적으로 보강하기 위하여 사용하기 시작하였으며, 다양한 관련 공법들이 개발되어 현장에 적용되고 있다. 콘크리트 덧씌우기 포장은 다음과 같이 경계면 처리 방식 및 덧씌우기 콘크리트 종류로 분류될 수 있다.

경계면 처리방식에 의한 덧씌우기는 접착식(BCO, Bonded Concrete Overlay), 비접착식(UBCO, Unbonded Concrete Overlay), 부분 접착식(PBCO, Partially Bonded Concrete Overlay) 콘크리트 덧씌우기 공법으로 나뉜다. 접착식 공법은 덧씌우기 포장을 기존 포장층에 완전히 접착시키는 것으로 층간 부착을 증대시키기 위해 기존 포장을 절삭하여 일정한 거칠기를 확보한 후 신·구 포장의 줄눈부를 일치시켜 덧씌우기하는 순으로 진행된다. 비접착식 공법은 기존 포장 결함부가 덧씌우기층의 거동에 영향을 주지 않도록 두 층을 완전히 분리시키는

공법으로 신·구 포장의 줄눈부를 일치시킬 필요는 없다. 부분 접착식은 기존 포장위에 아무런 표면처리 없이 덧씌우기를 하는 공법으로 시공이 간단하지만 기존 포장의 결함이 덧씌우기 층으로 진전되는 문제점이 있다(Ref. 2,3).

덧씌우기 콘크리트 종류에 의한 덧씌우기는 무근 콘크리트, 철근보강 콘크리트, 연속철근 콘크리트, 섬유보강 콘크리트 덧씌우기로 나뉜다. 무근 콘크리트는 가장 널리 사용되는 것으로 경계면 조건에 따른 3가지 공법 모두에 적용이 가능하다. 철근보강 콘크리트는 슬래브 하부에 철근 매쉬를 설치하여 덧씌우기층을 보강하는 공법으로 신·구 줄눈부를 일치시키는 것이 일반적이다. 연속철근 콘크리트는 일반 CRCP와 유사한 개념으로 덧씌우기층에 철근을 삽입하여 덧씌우기층을 보강하는 공법이다. 일반적으로 철근량은 약 0.6%이며, 종방향 철근은 덧씌우기층의 아래 부분이나 중간 부분에 위치한다. 섬유보강 콘크리트는 덧씌우기 재료에 철강섬유나 폴리프로필렌 섬유들을 첨가하여 보강하는 공법이다(Ref. 2,3).

국내 콘크리트 포장은 공용성이 심각하게 저하된 구간이 많지 않아 전체 덧씌우기 보다는 파손된 슬래브의 줄눈부 보수, 균열보수 등 국부적인 유지보수가 대부분이었다. 국내에서는 2건의 보수가 콘크리트 덧씌우기 공법으로 진행된 바 있다. 첫째 사례는 1996년 한국도로공사에서 88 고속도로 약 290m 구간에서 조강재료를 이용하여 시행한 접착식 및 비접착식 콘크리트 덧씌우기로, 접착식의 경우 6, 10cm, 비접착식의 경우 25cm 두께로 시공되었다. 접착식 구간은 시공 후 1년이 경과 시점에서 전단면 보수 구간에서 약간의 접착력 손실 외에 전반적으로 포장 상태가 양호한 것으로 나타났으며, 5년 이상 경과된 후에도 유사한 상태가 보고된 바 있다(Ref. 2,3). 두 번째는 시공 후 20년 이상 공용되어 많은 결함이 발생한 1999년 공군기지 활주소에 적용된 사례로서, 활주로의 충분한 수명을 확보하기 위하여 FAA 기준에 따라 2cm 아스팔트 분리층을 설치한 후 약 36cm

두께의 비접착식 콘크리트 덧씌우기를 보수공법으로 적용하였다(Ref. 4).

미국에서는 1913년부터 1960년대 사이에 노후된 콘크리트 포장의 보수를 위하여 덧씌우기 공법이 활발하게 연구되었다. 예를 들어, 오하이오(Warsaw Street), 미주리(Savannah)주에서는 Mesh-Reinforced Concrete 덧씌우기 공법을 이용한 보수를 수행하여 콘크리트 포장의 총 수명을 약 40년 이상까지 연장시킨 바 있으며(Ref. 5,6), New York(Rocher)에서는 버스 정류장에 일반 콘크리트 덧씌우기를 하여 파손 및 부착에 심각한 문제없이 11년 이상 더 이용한 바 있다(Ref. 5,6). 또한 N.Y. Route 27에서는 20년 된 포장에 Mesh-Reinforced Concrete 를 적용하여 공용성을 연장시켰다는 결과가 보고되었다(Ref. 5,6).

한편, 1970년대에는 Steel Fiber Reinforced Concrete(SFRC)가 덧씌우기 재료로 주로 사용되었는데, 아이오아 주(Green County)에서는 이 재료를 이용한 덧씌우기 공법을 적용하여 포장의 수명을 10~15년 이상 연장하였다(Ref. 6,7). 다른 프로젝트(I-80 구간)에서도 이 재료를 이용한 덧씌우기 공법을 통해 공용성을 증진 시켰다(Ref. 6,8).

1980년대에는 기존 포장과 덧씌우기 포장과의 부착에 관한 연구 및 재료를 개선하는 연구가 활발하게 진행되었다. 루이지아나 주(U.S 61)에서는 줄눈부에서 기존 포장층과 덧씌우기 층의 부착 문제를 확인하였으며, 줄눈부의 응력 감소를 위해 기존 슬래브에 인위적으로 줄눈을 시공하였다(Ref. 6,9). 텍사스 주(South Loop IH-610)에서는 다양한 재료 이용 및 경계면 처리를 통하여, 층간 부착이 공용성에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인하였으며, 기존 포장 파손부를 보강하면 덧씌우기 층에 구조적인 문제가 발생하지 않는 것을 알 수 있었다(Ref. 6,10,11). 아이오와 주(Route 141)에서는 43년 된 JPCP 포장을 Shot Blasting 과 Bonding Agent 처리한 후 10cm BCO 공법을 적용한 결과 층간 부착에 큰 문제가 없음을 확인하였다(Ref. 6,12). 다른 프로젝트

(U.S. 71 North of Storm Lake)에서는 층간 부착 증진을 위한 시멘트 그라우트 처리를 하였으나 표층의 면처리가 어렵다는 것을 확인하였다(Ref. 6,13). 텍사스 주(North Loop IH-610)에서는 Welded Wire Fabric과 SFRC를 적용하여 약 5.1Km를 시공하였으나 층간 부착에 큰 문제가 발생하였고 많은 균열이 조사되었다. 사우스 다코타 주에서는 1985년에 공용 35년이 지나 포장 상태(PSR: 2.47, CRS: Poor)가 나쁜 20cm JPCP 포장(Undowel, 4.5m Joint Spacing)을 유지보수하여 만족할 만한 공용성을 확보하였다(Ref. 6,14). 켈리포니아 주에서는 1964년에 20cm JPCP 포장(Undowel, Random Joint Spacing)이 시공된 IH-80을 1981년에 7.5cm의 TBCO(JCP) 공법을 적용하여 보수하였으나 공용후 상당 구간에서 문제가 발생하여 아스팔트 재덧씌우기를 하였다(Ref. 6,15).

1990년대에는 덧씌우기 포장에 대한 다양한 연구가 이뤄졌다. 버지니아 주에서는 노후 JPCP 포장에 대해 48시간 내로 교통개방을 하기 위해 Fast Track TBCO 공법을 시공하였다. 6년 후의 추적 조사 결과, 포장의 공용성이 양호하였으며, 경계면의 문제는 줄눈부에서 약 0.5m 내에 발생하는 것으로 확인되었다(Ref. 6,16). 일리노이 주에서는 I-80(1965년 시공, CRCP 20cm), I-88(1975년 시공, CRCP 20cm)도로에서 각각 JPCP 10cm, 7.5cm 무근 콘크리트 덧씌우기를 하였다. 전체적으로 덧씌우기 보수 3년 후 일부 구간에서 균열이 발생하였으나 공용성은 좋은 것으로 나타났다(Ref. 6,17). 1983년에 미시시피 주에서 일부 연구한 CRCP 위에 Continuously Reinforced Concrete Overlay를 적용했던 사례를 기초로 최근 텍사스에서는 CRCO 적용성 연구를 진행 중에 있다. 이 연구에서는 40년 공용된 구간(Loop 610)의 CRCP 포장위에 CRCO를 시공한 결과, 층간 부착면의 문제는 전단력이 아니라 수직 인장력에 의해 발생하며, 적절한 표면 처리가 부착강도를 증진시키는 방법이라는 것을 확인하였다(Ref. 18).

3. 현장 시험시공

본 논문에서도 중차량들이 많이 지나는 노후 고속도로의 유지보수를 위해 적용될 수 있는 CRCP 형태의 덧씌우기 공법 연구에 초점을 맞췄다. 시험시공 현장은 서해안 고속도로 매송 IC와 비봉 IC 사이의 매송 휴게소 예정 부지(상행)로서, 기존 포장 단면은 린콘크리트 15cm에 표층 콘크리트 30cm이며 슬래브의 폭은 3.8m, 길이는 6.0m이다. 포장 상태 조사 결과, 심한 균열이나 파손은 발생하지 않았으나 표면에 머리카락 균열(Crazing)이 발생한 상태였는데, 이는 교통 하중에 의한 것이 아니라 시공 초기의 품질 관리 미흡으로 판단된다. 그림 1은 시험시공 구간의 상태를 나타낸 것으로 머리카락 균열이 발생한 것을 확인할 수 있다.

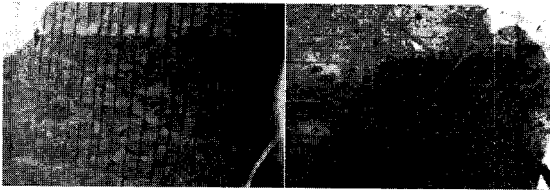


그림 1. 시험시공 구간의 포장 상태 (좌: 표면 머리카락 균열, 우: 아스팔트 패칭)

3.1 디맥 게이지(Demac Gauge)를 이용한 변위 측정

현장 시험시공을 수행하기에 앞서 기존 JCP의 줄눈폭 움직임이 덧씌우기에 어떠한 영향을 주는지를 확인하기 위하여, 각 줄눈(약 34개)의 변위를 디맥 게이지를 이용하여 측정하였다. 변위 측정은 2008년 2월 18일 정오를 기준(0시)으로 오후 1(1시)시부터 19일 오후 3시(27시)까지 실시하였는데, 그림 2는 디맥 계측 결과를 나타낸 것이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 대기 중 온도가 낮아지고 높아짐에 따라서 줄눈 벌어짐이 커지고 작아지는 것을 알 수 있다. 특히 7번 줄눈(7번 슬래브와 8번 슬래브 사이의 줄눈)에서 가장 큰 거동을 보였으며, 가장 작은 줄눈 거동

은 9번 줄눈에서 발생하였다. 이를 근거로 줄눈부 움직임을 확인하기 위한 계측기 매립 위치(2번, 7번, 9번 줄눈)를 결정하였다.

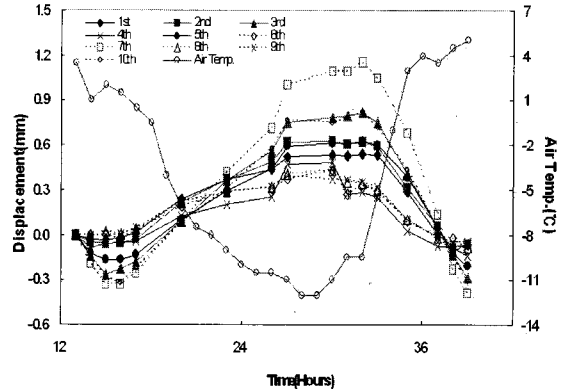


그림 2. 디맥 게이지 측정

3.2 시험시공

시험시공은 CRCO공법과 기존 CRCO공법으로 시공하였다. 전자는 기존 포장을 5cm 밀링하여 파손 부위를 제거하고 그 위에 철근을 설치한 후 10cm 덧씌우는 형태로, 철근량은 10cm 덧씌우기 포장 단면에 대해 0.5% 넣는 것으로 계획하였다. 후자는 밀링한 후에 10cm 덧씌우기를 하고, 줄눈부를 일치시켜 덧씌우기 두께보다 깊게 약 12cm 줄눈 커팅을 하는 형태이다. 그림 3은 두가지 공법이 적용된 시험시공 단면을 나타내고 있다.

CRCO의 경우 슬래브 수가 많을수록 양 끝단의 경계 조건에 의한 영향을 배제할 수 있겠지만 시공비용 및 기타 현장 여건으로 인하여 8개 슬래브만을 적

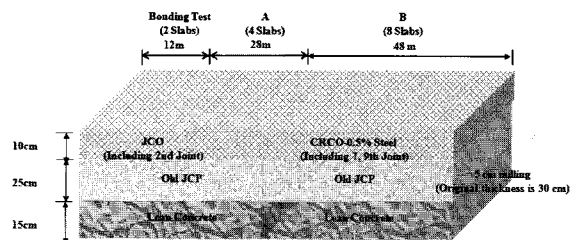


그림 3. 시험시공 단면 계획

용대상으로 하였다. JCO 구간은 6개 슬래브에 시공하였으며 이 중 2개 슬래브에서는 층간 부착 강도를 평가하였다.

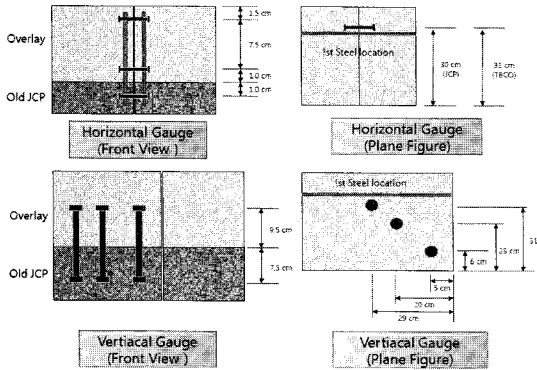


그림 4. 계측기 매립 상세도

미세 균열이나 파손을 제거하고 신·구 콘크리트 포장의 부착 강도를 증진시키기 위하여 기존 노후포장을 5cm 밀링하였다. 밀링 깊이는 12 지점에서 3곳씩 측정된 결과, 평균 4.4cm, 표준편차 0.3cm였다. 밀링 후 에어제트로 노면에 남아있는 불순물을 제거한 후, 앞서 디벡 계측을 통하여 선정된 줄눈부(2번, 7번, 9번 줄눈)의 깊이별 거동 측정을 위하여 Vibrating Wire Gauge(VWG)를 그림 4의 상단에 나타나 있는 깊이와 위치로 매설하였다. 또한 신·구 콘크리트 포장의 경계면 거동을 측정하기 위하여 JCO와 CRCO구간의 줄눈 거동이 큰 줄눈부(2번, 7번 줄눈)에 그림 4의 하단에 나타난 위치와 형태로 VWG를 매설하였다. 온도 및 건조수축에 따른 변형률을 측정하기 위하여 무응력 장치와 VWG를 CRCO구간의 줄눈 거동이 큰 줄눈부에 매설하였다.

종방향 및 횡방향 철근으로는 공칭 지름이 19mm인 이형 철근이 사용되었으며, 종방향 철근의 양은 앞서 설명한 바와 같이 덧씌우기 포장 두께의 0.5% 간격은 1@29cm+13@23cm + 1@29cm로 설치하였다. 철근의 이음은 50cm 겹치게 하였으며, 이음부가 일직선 상으로 있을 경우 구조적 취약부가 되어 파손이 발생할 수 있다고 판단하여 사선 형태로 조립하였다. 횡방향 철근은 종방향 철근의 위치를 고정하

기 위하여 약 1m 간격으로 설치하였다.

시험시공에 사용되는 배합은 실내 실험과 현장 배치 플랜트에서 강도, 슬럼프 및 슬럼프 로스 시험 등을 통해 표 1과 같은 슬럼프 페이퍼를 사용할 수 있는 최종배합을 결정하였다. 현장 시험시공은 슬럼프 페이퍼 유도선 설치→타설→계측기 매립→공시체 제작→횡방향 타이닝→양생제 살포 순으로 진행되었다. 기존 JCP 덧씌우기 공법 구간에는 일정 강도가 발현된 후 기존 줄눈 위치에 줄눈 절삭 및 채움재를 설치하였다.

표 1. 현장 시험시공 재료의 배합

물/시멘트 (%)	잔 골재율 (%)	단위 재료량(Kg/m ³)			혼화재료(%)		
		물	시멘트 (Type3)	잔 골재	굵은골재 (19mm)	고성능 감수제	촉진제
30	45	160	412	766	969	1.5	2

4. 초기 거동 평가

본 공법의 비교 평가를 위하여 슬럼프, 강도 및 세팅 시간 측정, 부착 강도 시험, FWD 분석, VWG 결과 분석, 균열 조사 등을 실시하였다.

4.1 강도 및 세팅 타임 측정

압축강도 공시체는 마지막 차량의 재료(슬럼프 16cm)를 이용하여 현장에서 제작하였다. 샌드 베드를 만들어 실제 포장체 온도변화를 고려한 초기 강도를 측정하였으며, 그 결과는 표 2와 같다. 시공 후 초기에는 강도가 충분히 발현되지 않았으나 3일 강도는 교통 개방이 가능한 기준강도(압축강도 300kg/cm² 이상)를 상회하였다. 초기 강도가 예비시험보다 낮게 나온 것은 타설 후 강우가 내렸으며 대기 온도가 낮아서 수화반응이 빠르게 일어나지 않은 것으로 판단된다. 재료의 초결과 종결을 측정하기 위하여 KS F 2436에 제시된 “관입 저항침에 의한 콘크리트의



응결 시간 시험방법”에 준하여 실험을 진행하였으며, 표 3에 나타난 바와 같이. 콘크리트 혼합물이 만들어진 후 약 3시간 정도에 초결이, 약 4~5시간 사이에 종결이 발생하였다. 초결과 종결 사이에 계측기와 포장 재료는 부착하여 일체 거동을 하는 것으로 고려될 수 있다(Ref. 19).

표 2. 압축강도 측정 결과

재령	12시간	20시간	24시간	3일	7일
강도(Kg/cm ²)	35.33	114.6	144.73	581.47	619.67

표 3. 응결시간 측정 결과

구 분	슬럼프 6cm		슬럼프 11cm	
	초결	종결	초결	종결
응결 종류				
응결 시간	170 분	247 분	177 분	286 분

4.2 부착 강도

신·구 콘크리트 포장의 경계면의 부착 강도를 측정하기 위하여 KS F 2386 “도로포장체 부착면의 인장 접착 시험방법”에 따라 실험을 실시하였다(Ref. 20). 슬래브의 코너에서 중앙부 방향으로 20cm 마다 100cm 위치까지 2개씩 코어를 뚫어 실험하였으며, 전체적으로 층간 부착 상태는 양호하였다. 재령과 슬래브에서의 위치(슬래브 코너로부터의 거리)를 실험 변수로 설정하여 실험한 결과, 표 4에 나타난 바와

표 4. 부착강도 측정 결과

(괄호 밖: 작용하중, 괄호 안: 작용하중/면적)

	3 days		7 days		14 days	
	Kg(Kg/cm ²)		Kg(Kg/cm ²)		Kg(Kg/cm ²)	
20cm	1661 (21.2)	785 (10.0)	845 (10.8)	760 (9.7)	/	
40cm	1615 (20.6)	800 (10.2)	1053 (13.4)	1250 (15.9)	905 (11.5)	
60cm	1113 (14.2)	790 (10.1)	505 (6.4)	1055 (13.4)	835 (10.6)	
80cm	950 (12.1)	770 (9.8)	605 (7.7)	/		/
100cm	1225 (15.6)	995 (12.7)	/	1070 (13.6)	820 (10.4)	

같이 3, 7, 14일에 따른 부착 강도에 큰 차이가 없었다. 이는 사용된 시멘트가 유지보수용 조강 재료이기 때문이며, 시공 후 초기 단계이기 때문에 부착면의 분리 현상 또한 발생하지 않은 것으로 판단된다.

4.3 계측기 결과 분석

4.3.1 해석 프로세스

시간에 따른 콘크리트 초기 변형은 크게 응력하중에 의해 발생하는 변형과 환경 하중에 의해 발생하는 변형으로 구분된다. 외부하중을 통해 발생하는 변형은 탄성변형과 크리프변형이 있으며, 환경하중에 의하여 발생하는 변형은 온도변형과 건조수축이 대표적인 예이다. 아래의 식 (1)은 위의 변형률이 중첩될 수 있음을 수식으로 나타내고 있다(Ref. 21).

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_i^T &= \Delta \epsilon_i^\sigma + \Delta \epsilon_i^0 \\ &= \Delta \epsilon_i^e + \Delta \epsilon_i^c + \Delta \epsilon_i^{th} + \Delta \epsilon_i^{sh} \end{aligned} \quad \text{식 (1)}$$

여기서,

$\Delta \epsilon_i^T$: 전체 변형률

$\Delta \epsilon_i^\sigma$: 응력 종속 변형률(stress-dependent strain: SIS)(탄성, 크리프 변형률)

$\Delta \epsilon_i^0$: 응력 비종속 변형률(stress-independent strain: SDS)(온도, 습도, 건조수축 변형률)

$\Delta \epsilon_i^e$: 탄성변형률 / $\Delta \epsilon_i^c$: 크리프변형률 / $\Delta \epsilon_i^{th}$: 온도변형률 / $\Delta \epsilon_i^{sh}$: 건조수축변형률

위의 식(1)에서 환경하중만 재하되는 경우에는 $\Delta \epsilon_i^\sigma$ 는 “0”이 되며, 크리프에 의한 변형률이 매우 작아 무시할 수 있을 정도라고 가정되면 식 (1)은 아래 식 (2)와 같이 단순화될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_i^{sh} &= \Delta \epsilon_i^0 - \Delta \epsilon_i^{th} \\ &= \Delta \epsilon_i^T \text{ of Stress } \in \text{ dependent device} \\ &\quad - (\Delta T \times COTE) \end{aligned} \quad \text{식 (2)}$$

여기서,

$\Delta \epsilon_i^{tot}$: 온도변형률을 제외한 나머지 변형률(건조

수축변형률, 습도 변형률)

$\Delta \epsilon_i^T$: 환경하중에 의한 변형률 / $\Delta \epsilon_i^T$ 온도변형률
COTE: 열팽창계수

식(2)에서 건조수축과 온도에 의한 변형률을 분리하기 위하여, 본 연구에서는 그림 5에 나타난 바와 같이 TxDOT에서 사용한 원형 실린더에 작은 구멍이 뚫린 Non-Stress Device를 이용하였다. 이 장비는 콘크리트와 측면의 마찰을 최소화하여 자유롭게 움직일 수가 있어 온도 변화에 따라 콘크리트가 자유롭게 수축 및 팽창할 수가 있다. 또한 작은 구멍을 통해서 습기가 이동할 수 있도록 하여 실제 포장체내의 상태를 모사할 수가 있는 특징이 있다. 이 장치를 이용하여 온도와 변형률과의 평균 기울기 그래프를 통해 콘크리트 COTE(Coefficient of Thermal Temperature)를 결정하였다. COTE와 아래의 식을 이용하여 SIS에서 온도변형률을 분리하고 건조수축 변형률을 계산하여 거동을 분석하였다. 그러나 초기에 변형률 데이터와 온도를 측정 한 결과는 재료의 일반적인 거동과 정대반대인 것으로 나타났는데, 이는 계측기와 재료의 열팽창계수가 달라 발생하기 때

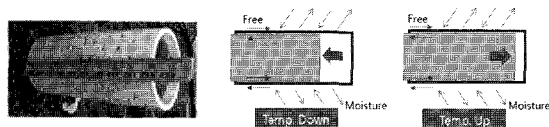


그림 5. 원형 실린더 형태의 무응력 측정 장치 개념도

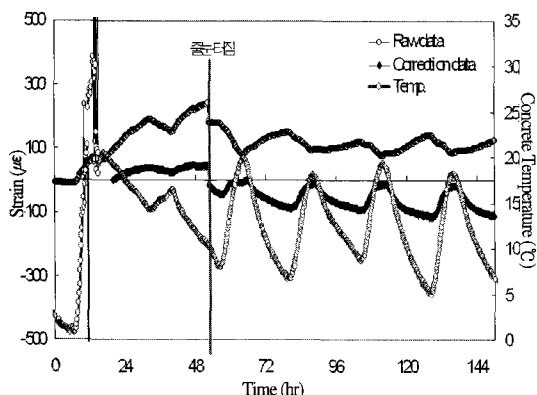


그림 6. 계측기 열팽창계수에 의한 변형률 보정 전후 결과

문이다. 따라서 콘크리트 변형률 계측기의 보정계수 (Compensation Coefficient)를 이용하여 초기 변형률에서 계측기의 온도 변형률을 제거하였으며, 식 (3)이 보정에 사용되었다(Ref. 22).

Total Strain(Load+Temp.)

$$= (L2 - L1) + \Delta T \times \text{WG COTE} \quad \text{식 (3)}$$

여기서,

Total Strain(Load+Temp.) = Strain Variation induced by The Load & Temp.

L2 = Final Reading / L1=Initial Reading

Delta T=Variation of temp./VWG COTE
= $11.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

시험 시공한 구간의 실제 온도와 건조수축을 측정하기 위한 원형 실린더 내의 VWG 데이터 분석결과, 그림 6과 같이 초기에 VWG의 열팽창 계수에 의한 변형률을 보정하기 전의 거동(Raw data)은 온도 변화(Temp. data)와 반대로 거동하는 것을 알 수 있다. 하지만 온도 보정을 한 후의 거동(Correction data)은 온도와 같은 패턴으로 변화하는 것을 알 수 있다.

4.3.2 열팽창계수 및 건조수축 변화

온도 변화에 의한 변형률과 건조수축에 의한 변형률을 구분하기 위하여 원형 실린더 내의 VWG 데이터를 분석하였다. 본 논문에서는 온도 변형률을 분리하기 위하여 일일 온도 변화에 따른 변형률을 플로팅하여 그 기울기를 열팽창계수로 정의하였다. 건조수축 변형률은 그림 7과 같이 매일 온도 싸이클에 의해 발생하는 변형률 변화 중에서 온도가 서로 동일한 시간대의 변형률 변화로 정의하였다.

초기 열팽창계수는 두 가지 방법으로 산정하였다. 첫 번째 방법은 하루의 온도 변형률과 온도 변화를 플로팅하여 추세선을 결정하고 그 기울기를 초기 열팽창계수로 정의하는 것이고, 둘째는 앞서 플로팅한 데이터의 온도변화가 최대, 최소일 때의 변형률 데이

터를 얻어 그 기울기로 정의하는 방법으로 그림 8에 그 결과가 나타나 있다. 그림 8에 나타난 바와 같이, 강도가 발현하면서 열팽창계수가 점점 증가하였으며 계산 방법에 따른 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 그림 8(a)의 그림과 같이 시공 후 약 43일 후의 데이터를 분석한 결과, 안정화된 열팽창계수는 약 $7.142 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다.

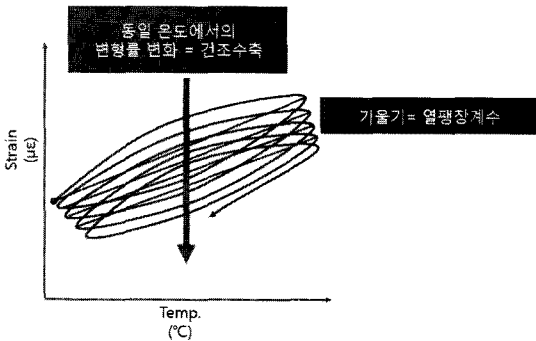
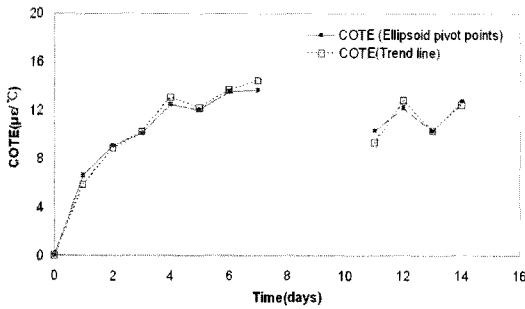
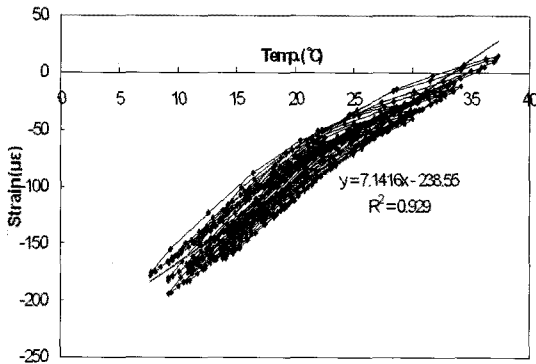


그림 7. 건조수축 변형을 및 열팽창계수 산정



(a)



(b)

그림 8. 초기 열팽창계수 변화 및 시공 후 43일 후의 열팽창계수

그림 9는 시간에 따른 건조수축 변화를 분석한 결과를 나타내고 있다. 그림 9에서 나타난 바와 같이, 건조 수축량은 대기 중의 습도 변화에 따라 24시간 내에서도 변화하는 것을 알 수 있으며, 건조 수축이 가장 많이 발생하는 시간대는 오후 7~8시 사이였으며, 반면 다시 건조수축을 회복하여 최소가 되는 것은 오전 11~12 사이인 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 낮 동안에는 상대습도가 낮아 건조수축이 많이 발생하며 저녁이 되면 상대습도가 높아져서 다시 회복될 것이라는 예측과 다른 결과를 나타냈다. 11일 이후는 건조수축이 일부 회복되는 것은 비가 내려 대기 중의 상대습도가 높아졌기 때문으로 판단된다.

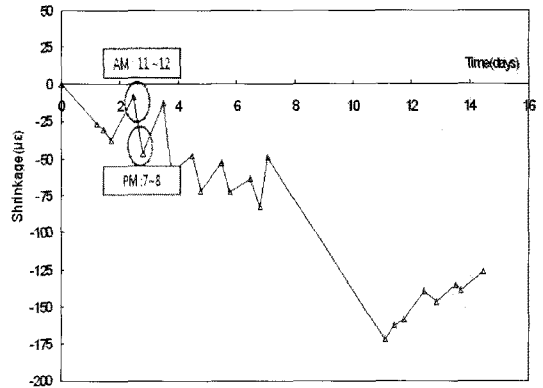


그림 9. 건조수축 변형을 변화

4.3.3 수평 거동 평가

본 연구에서는 기존 콘크리트 포장의 줄눈부의 거동으로 인한 반사균열을 예상하여 시공시 CRCO구간에 균열유도장치를 삽입하지 않았다. 그러나 예상과 달리 줄눈 움직임이 적은 기존 줄눈에서 약 45cm 이격된 곳에 균열이 발생하였다. 따라서 데이터 분석에는 기존 JCO와 CRCO구간의 줄눈부 거동이 큰 곳에 매설한 VWG 데이터를 이용하였다.

그림 10은 표층에서 약 1.5cm 깊이의, 그림 11은 표층에서 약 11cm 깊이의 시공 초기 및 43일 후의 상부 변형률을 나타내고 있다. 상부의 초기 거동을 살펴보면 시공초기 슬래브의 온도가 약 20°C 였으며,

온도 하강 및 상승을 반복하였다. 앞서 디벡 게이지를 이용하여 줄눈거동을 측정하였을 경우, CRCO 전의 줄눈부의 거동이 기존 JCO 전의 줄눈부 거동보다 2배 이상 더 크게 움직이는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 덧씌우기 후 CRCO의 줄눈부 거동이 기존 JCO에 비하여 절반 수준으로 낮아졌다.

시공 후 약 43일 지난 후의 상하부 변형률을 나타내는 그림 10과 그림 11의 우측 그림에 나타난 바와 같이, 시공 초기 슬래브 온도인 20℃ 기준으로 높은 온도에서는 변화 폭이 작아졌으며 두 공법간의 기울기도 거의 유사한 것을 알 수 있다. 그러나 20℃ 이하에서는 시공 초기의 거동 패턴과 동일한 것을 알 수 있는데, 이는 온도가 높은 여름철에는 균열부가

닫히기 때문에 큰 차이를 보이지 않다가 겨울철이 되어 균열부가 열리면 CRCO의 철근이 균열폭이 늘어나는 것을 억제하기 때문으로 판단된다. 그림 11과 같이 기존 노후 슬래브에 매립한 데이터를 확인한 결과, 시공 초기에는 변화폭은 상대적으로 작지만 상부의 온도에 따른 변형률 변화와 동일하게 거동하였으며, 줄눈부 억제 효과도 JCO에 비해 약 60% 이상 큰 것으로 나타났다. 하지만 43일이 지난 후에 기존 포장의 줄눈부 거동은 두 공법간에 큰 차이가 없이 거의 유사하였다. 전체적으로, 겨울철 CRCO공법은 온도 변화폭이 큰 상부의 줄눈부 거동을 억제하는 것으로 판단된다.

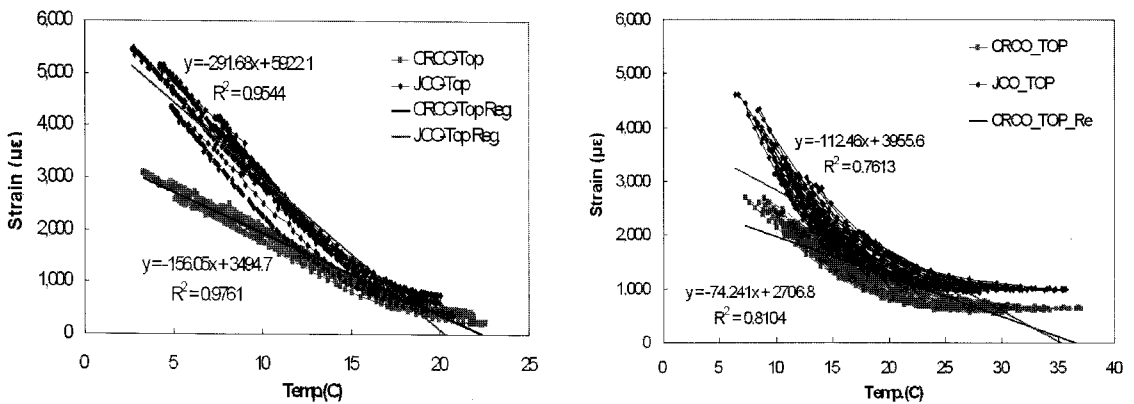


그림 10. 상부 변형률 데이터 비교(좌: 시공초기, 우: 시공후 43일 부근)

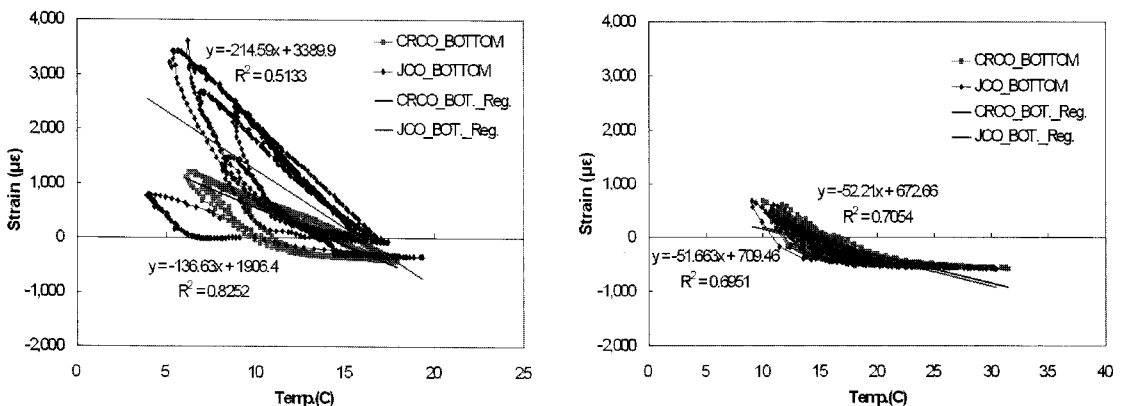


그림 11. 하부 변형률 데이터 비교(좌: 시공초기, 우: 시공후 43일 부근)

4.3.4 수직 거동 평가

컬링 및 와핑에 의한 신·구 경계면에서의 부착에 따른 거동을 평가하기 위하여 그림 4의 하단부와 같이 매설한 계측기들 중 가장 코너에 있는 것들은 페이퍼의 바이브레이터에 의해 손상되었다. 따라서, 약 20cm와 30cm에 수직으로 매립된 계측기를 이용하여 덧씌우기층의 수직방향 거동을 평가하였는데, 그림 12에 나타난 바와 같이 두 구간 모두 경계면이 분리된 거동을 보이지 않은 것으로 나타났으며, 온도에 따른 변화율 또한 위치 및 공법과 무관하게 거의 유사하였다. 하지만 향후 지속적인 모니터링을 통해 층간 부착이 문제가 될 경우, 이에 대해 평가하여 종방향 철근 설치에 따른 효과의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

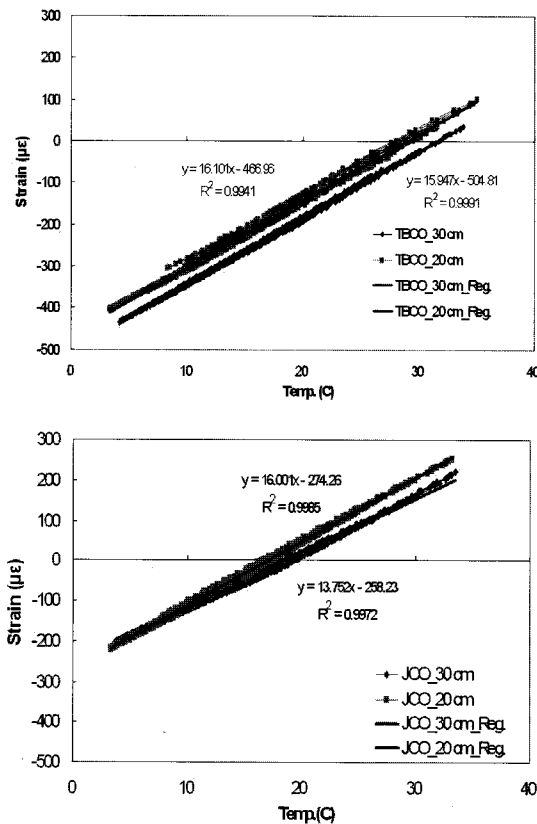


그림 12. 시공 초기 CRCO 및 JCO 구간의 온도 및 위치에 따른 수직 변형률

4.4 균열조사

균열조사는 시공 후 18시간과 43일이 지난 후에 2회에 걸쳐 실시하였다. 18시간 후에 조사된 균열은 그 방향이 불규칙적이었으며, 이는 양생재가 골고루 뿌려지지 않아 발생한 건조수축균열로 판단되었다. 43일이 지난 후에 발생한 균열을 조사한 결과, CRCP에서 발생하는 횡방향 임의 균열과 같은 형태의 균열이 발생하였다. CRCO구간의 횡방향 균열 간격은 많은 경우에 1.0m~1.5m 사이였으며, 일부 2m이상(구간 끝단부), 1m미만(초기 균열 많은 곳)인 경우도 소수 조사되었다. JCO구간의 경우, 응력이 집중되는 슬래브의 중앙부에서 횡방향 균열이 발생되었다. 전 구간에 걸쳐 슬래브에서 발생한 균열은 그림 13에서 나타난 바와 같이 대체적으로 현장에서 측정된 슬럼프 값이 낮은 재료에서 초기에 상당수가 발생하였다. 43일후 균열 양상을 살펴보면, CRCO 구간의 양 끝단부는 응력이 해방되어 총 균열 발생량이 중앙부 보다 더 적은 것을 알 수 있었다.

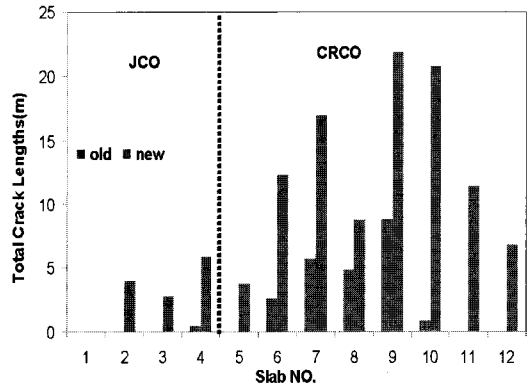


그림 13. 슬래브별 균열발생 길이

5. 결론

국내의 문헌 조사를 통해 국내에 적용 가능한 얇은 콘크리트 덧씌우기 공법에 대한 연구 및 시험 시공을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.



- 국내의 문헌 조사결과, 국내 적용사례는 극히 드물었으며 미국의 경우 오랜 시간동안 관련 연구를 지속적으로 진행하여 왔다. 전반적으로 기존 포장의 파손부 처리가 중요하며 Bonding Agent는 접착 상태에 대해 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 종방향 이형 철근을 설치하여 덧씌우기하는 공법은 최근의 연구동향으로 나타났으며 본 연구에서도 이 공법을 도입하였다.
- 서해안 고속국도의 노후 콘크리트에 기존 JCP 덧씌우기와 종방향 철근이 들어간 CRCO 공법을 시공하였다. 초기 강도 측정 결과, 1~3일 정도에 교통개방이 가능할 정도의 강도를 발현하였으며, 콘크리트 응결 시간 측정결과, 초결은 재료 혼합 후 약 3시간 무렵에, 종결은 4~5시간 후에 발생하였다.
- VWG 계측기와 SDS 측정용 원형 실린더를 매립하여 초기 거동을 분석하였다. 초기 열팽창계수는 일정하지 않고 증가 추세였으며 43일 후 약 $7.142 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 정도 되었다. 건조수축 변화를 확인할 수 있었으며 하루에도 주기를 갖고 변화하는 것을 알 수 있었다.
- 공법간의 수평 거동을 분석하였으며, 덧씌우기 전 약 3배 정도 움직이는 줄눈부가 덧씌우기 후 기존 JCP 덧씌우기 공법의 변형률 변화폭의 약 50% 수준으로 나타났다. 수직 거동 분석 결과 두 층은 분리되지 않았으며 위치에 상관없이 유사한 경향을 나타냈다.
- 균열 조사 결과, 기존 JCP 덧씌우기 구간에서는 응력이 집중되는 중앙부에, 종방향 철근이 들어간 CRCO 공법은 CRCP와 같이 1~1.5m 간격의 횡방향 균열이 발생하였다.

향후 이에 대한 추적 조사를 수행하고, 미흡한 점을 보완하는 추가 연구를 진행하여 CRCO 공법이 국내 노후 콘크리트 포장의 유지보수 공법으로 자리잡을 수 있도록 노력할 것이다.

참고 문헌

1. 강릉대학교, “노후 콘크리트 포장의 원위치 파쇄 기층화 공법 개발”, 2차년도 보고서, 2005
2. 한국도로공사 도로연구소, “콘크리트 덧씌우기에 의한 포장보강방안 연구(3)”, 1997
3. 김진춘, 권순민, “특집:콘크리트포장의 덧씌우기 및 재포장] 비행장 포장에서의 콘크리트 덧씌우기 (Overlay)”, 도로포장공학회지 제3권 제2호 20~27 pp. 2001. 6
4. 유승권, 최진욱, “특집:콘크리트포장의 덧씌우기 및 재포장] 비행장 포장에서의 콘크리트 덧씌우기 (Overlay)”, 도로포장공학회지 제3권 제2호 3~10 pp., 2001. 6
5. Felt, Earl J., “Resurfacing and Patching Concrete Pavements with Bonded Concrete,” *HRB Proceedings*, Vol. 35, Washington D. C., 1956
6. Delatte, N. J. and Laird, J. T. II, “Performance of Bonded Concrete Overlays” 1998, *TRB*
7. Marks, V.J., “A Fifteen Year Performance Summary of Fibrous PC Concrete Overlay Research in Greene County, Iowa”, *Fifteen Year Report for Iowa Highway Research Board, Research Project HR-165*, Iowa Department of Transportation, August 1989.
8. Reiner, E. J. “Concrete Overlays Challenge Asphalt,” *Civil Engineering*, pp. 54-57, 1987.
9. Temple, W. H., and Cumbaa, S. L., “Thin Bonded PCC Resurfacing”, *Louisiana Department of Transportation and Development, Report No. FHQA/LA-85/181*, July 1985.
10. Kailasanathan, K., McCullough, B.F., and Fowler, D.W., “A Study of the Effects of Interface Condition on Thin Bonded PCC Overlays,” *Research Report 357-1, Center for Transportation Research*, The University of Texas at Austin, December 1984.
11. Bagate, M., McCullough, B. F., Fowler, D. W., and Muthu, M., “An Experimental Thin-



- Bonded Concrete Overlay Pavement,” *Research Report 357-2F, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, November 1985.*
12. Marks, V. J., “Thin Bonded Portland Cement Concrete Overlay,” *Final Report for Iowa Department of Transportation Project HR-521, Federal Highway Project DTFH71-83-3502-IA-11, November 1990.*
 13. Reiner, E. J. “Concrete Overlays Challenge Asphalt”, *Civil Engineering*, pp 54-57. 1987.
 14. Delatte, N. J., Gräter, S. F., Treviño-Frias, M., Fowler, D. W., McCullough, B. F., “Partial Construction Report of a Bonded Concrete Overlay on IH-10, El Paso and Guide for Expedited Bonded Concrete Overlay Design and Construction”, *Report 2911-5F, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, December 1996.*
 15. Neal, B. F., “California’s Thin Bonded PCC Overlay,” *Report No. FHWA/CA/TL-83-04, Sacramento, California, June 1983.*
 16. VTRC 97-R9RB(Virginia Transportation Research Council), “*Evaluation of a Thin-Bonded Portland Cement Concrete Pavement Overlay,*” <http://pratt.vtrc.virginia.edu/briefs/97-r9rb/thin.htm>
 17. IDOT, “*Thinbonded concrete overlay with fast tack concrete*”, Final report for Iowa DOT project HR-531, 1990
 18. German Claros, Moon Won, “Project Summary, O-4893:performance of old concrete under thin overlays”, *TxDOT*
 19. KS F 2436, “관입 저항침에 의한 콘크리트의 응결 시간 시험방법”
 20. KS F 2386, “도로포장체 부착면의 인장접착 시험 방법”
 21. Jeong-Hee Nam, “Measurement and Analysis of Early-Age Concrete Strains and Stresses in continuously Reinforced Concrete Pavement Under Environmental Loading”, *Center for Transportation Research The University of Texas at Austin, 2006*
 22. 조윤희, “일일우일신-16-변형을 측정 결과의 해석 방법에 대하여”, 2006

접 수 일: 2009. 2. 4
심 사 일: 2009. 2. 6
심사완료일: 2009. 5. 6