다웰바 설치를 통한 콘크리트 포장 횡방향 균열의 하중전달율 보강

The Load Transfer Restoration of the Cracks on the Jointed Concrete Pavement with Dowel Bar Retrofit

이재훈* · 권오선** · 박준영*** · 김형배****

Lee, Jae Hoon · Kwon, Oh Sun · Park, Jun Young · Kim, Hyung Bae

1. 서 론

줄눈 콘크리트 포장은 온도와 습도 변화로 인한 균열발생을 예방하기 위해 시공과정에서 '인위적인 균열'인 줄눈을 설치한다. 줄눈은 불연속면이기 때문에 교통하중의 분산이 이루어지지 않는다. 따라서, 이를 보완하기 위해서 줄눈에는 인접 슬래브로 하중을 분산시켜주는 역할을 하는 하중전달장치(일반적으로 다웰바)를 설치한다. 줄눈과 마찬가지로 불연속면이기 때문에 하중전달장치를 통한 보강이 필요한 부분이 있는데 바로 슬래브를 횡으로 관통하는 균열이다. 줄눈 콘크리트 포장에 발생하는 균열의 원인은 늦은 줄눈절삭, 콘크리트 강도저하, 반복적인 교통하중의 재하, 하부층의 손상 등 매우 다양하다. 슬래브에 균열이 발생하면 균열주위에 발생하는 스폴링, 단차뿐만 아니라 교통하중 분산능력도 떨어져 2차, 3차 균열이 이어서 발생한다.

국내의 경우, 슬래브에 횡방향 균열이 발생하면 개통 전의 경우 해당 슬래브를 제거하고 인력으로 슬래브를 다시 시공한다. 그러나, 슬래브의 재시공은 과다한 비용이 소요될 뿐만 아니라 인력시공으로 인해 인접한 기계시공 슬래브와 비교할 때 품질이 떨어지는 슬래브를 형성하여 장기 공용시 문제 구간으로 발전하는 경우가 많다. 공용중인 슬래브에서 횡방향 균열이 발생하면 대부분 절삭 후 아스팔트 콘크리트나 고가의 조강재료를 이용해 덧씌우기를 시행한다. 그러나 이러한 덧씌우기 구간은 반사균열과 같은 조기 파손이 발생하거나 기존의 콘크리트 슬래브의 접합부에서 단차, 균열 등 다양한 파손이 발생한다.

DBR(Dowel Bar Retrofit)공법은 대표적인 콘크리트 포장 보수 공법 중 하나로 줄눈 및 균열부에 하중전달율을 복원/보강하기 위해 다웰바를 재설치하는 공법이다. 이미 국외에서는 70년대부터 연구 및 현장적용이 시작되었다. 그러나, 국내에서는 시공된 사례가 거의 없는 공법이기도 하다. DBR공법은 조강 재료를 사용할 경우 1일 이내에 시공을 완료할 수 있어 교통차단으로 인한 피해를 최소화할 수 있으며, 기존 포장체의 일부분에만 시공하기 때문에 매우 효과적이고 경제적인 보수방법이다. 본 연구에서는 줄눈 콘크리트 포장에 발생한 횡방향 관통균열의 보수대안으로 DBR공법을 현장적용하여 하중전달율 복원효과를 평가해 보았다.

2. DBR(Dowel Bar Retrofit)공법 적용

미국에서 DBR공법을 활발히 적용중인 캘리포니아 주는 콘크리트 포장의 90%가 무다웰바(undowel) 줄눈 콘크리트 포장이다. 1960~70년대, 처음으로 콘크리트 포장을 시공할 당시 캘리포니아 주는 다웰바를 줄눈부에 정확히 시공하는 장비와 기술력이 부족하여 다웰바를 시공하지 못했다. 이런 이유로 공용중인 대부분의 콘크리트 포장에서 장기 공용으로 인한 단차가 심하게 발생해 평탄성이 불량해져 이에 대한 유지보수가 절실히 필요하였다. 1979년에 하중전달율 복원과 단차 예방을 위해 DBR공법에 대한 연구가 진행되었으며 그

* 정회원·한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원·공학석사·031-371-3475(E-mail:ranian74@ex.co.kr)
** 정회원·한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원·공학석사·031-371-3478(E-mail:pooh2461@ex.co.kr)-발표자
*** 정회원·한국도로공사 도로교통연구원 연구원·공학석사· 031-371-3477(E-mail:parkjevel@hotmail.com)
**** 정회원·한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원·공학박사·031-371-3437(E-mail:kimhyun3@ex.co.kr)

후로 지속적으로 관련연구가 진행되었다. 2003년에는 가속시험기를 이용하여 DBR공법이 시공된 줄눈과 균열의 공용성에 대한 검증연구를 진행하였는데 그 결과, DBR공법을 적용한 구간은 약 11,000,000ESALs 하중재하 후에도 균열이나 파손이 발생하지 않고 90% 이상의 높은 하중전달율을 유지하는 것으로 보고되고 있다. 이러한 결과를 토대로 DBR공법을 무다웰바 콘크리트 포장의 하중전달율 복원 공법으로 적용 중에 있다[2].

1990년대 이전까지 워싱톤주에서는 콘크리트 포장의 건설시 줄눈에 다웰바를 설치하지 않았다. 그 결과 장기 공용된 대부분의 콘크리트 포장에서 단차가 심각하게 발생했다. 이러한 단차는 평탄성 불량으로 이어져 이를 보수할 수 있는 경제적인 공법에 대한 연구가 진행되었다. 1992년 처음으로 DBR공법을 현장에 시험시공하였고 표면의 평탄성을 회복을 위해 다이아몬드 그라인딩을 함께 적용하였다[3]. DBR공법은 다웰바의 시공상태가 양호할 때 좋은 성능을 보였다. 또한 생애주기비용 분석을 통해 설계수명에 대한 평가를 수행하였다. 유지보수가 필요한 무다웰바 콘크리트포장 구간 중에서 다량의 균열과 스폴링이 발생한 구간을 제외하고 약 450km 이상 구간에 DBR공법을 적용하였다. DBR공법을 적용한 콘크리트 줄눈은 하중전달력이 회복되어 평탄성이 향상되었고 추적조사 결과, 콘크리트 포장의 줄눈부 수명이 10년 이상 연장되었다.

위스콘신주의 경우 1970년대 이전에 시공된 줄눈 콘크리트 포장은 줄눈에 다웰바가 시공되었다. 하지만 1970년대 이후, 줄눈의 골재 맞물림만으로도 하중전달이 충분이 이루어진다고 생각해 시공과정에서 다웰바 설치를 생략하였다. 그 결과, 콘크리트 포장에는 조기에 단차가 발생했고 1980년대에 줄눈 콘크리트 포장에 다시 다웰바를 시공하기 시작했다. 무다웰바로 건설된 줄눈 콘크리트 포장은 단차나 평탄성 회복을 위해 다이아몬드 그라인딩이나 아스팔트 덧씌우기로 보수를 했으나 보수구간에서 다시 단차 등의 파손이 반복되었다. 다른 기관의 사례를 참고하여 1999년 DBR공법에 대한 평가연구가 진행되었다. STH(State Trunk Highway)13, 21, USH(U.S. Highway)45, 18, 151 등의 여러 지역에서 DBR공법에 대한 시험시공과 추적조사를 진행하였으며 그 결과, 평탄성은 평균 1.15, 하중전달율은 40% 이상이 향상되는 것으로 나타났다[4].

그밖에 미네소타주에서는 DBR공법의 우수성을 검증하기 위해 포장 가속시험과 현장시험을 수행하였으며. 노스다코타주는 DBR공법의 채움재료에 대한 연구를 진행하였다[5]. 이와 같이, DBR공법은 텍사스, 캘리포니아, 뉴저지 등을 포함한 미국 대부분의 주에서 수십 년에 걸쳐 콘크리트 포장의 줄눈과 균열의 하중전달율 회복과 단차 예방을 위한 유지보수공법으로 적용해 오고 있다.

3. 사전조사

DBR공법의 현장적용은 현재 확장공사가 진행중인 ○○고속도로 □□터널에서 진행됐다. 이 구간은 총 연장이 654m인 터널포장 구간으로 편도 2차로 구성되어 있으며 1994년 시공을 완료한 후 16년 동안 공용한 구간이다.

사전조사는 표 1과 같이 기능적 상태, 구조적 상태, 내구적 상태로 나누어 진행하였다. 대상구간의 슬래브는 1, 2차로 각각 109개이며, 표면손상을 제외한 모든 항목은 대상 구간 중 선별적으로 진행되었다.

표 1. □□터널 사전조사 내용

구 분	조사항목	조사 장비 및 방법
구조적 상태	동적지지력	구조진단조사장비(HWD)
	하중전달율	
기능적 상태	미끄럼 마찰저항(SN)	미끄럼조사장비(PFT)
내구적 상태	표면손상	육안조사
	콘크리트 강도	코아 채취

3.1 구조적 상태조사

구조적 상태조사로 HWD장비를 이용한 슬래브 하부의 동적지지력 평가와 줄눈 및 균열에서의 하중전달율 측정이 진행됐다. 동적지지력 산정은 93 AASHTO 포장설계지침에서 제시한 AREA법을 이용하여 포장하부의 지지력역산방법을 사용하였다. 하중전달율 평가는 HWD 장비를 이용하여 하중-처짐량 자료를 Teller가

제안한 공식을 이용해 산출하였다. 동적지지력은 무작위로 선출한 18개 슬래브에서 진행하였으며, 하중전달율은 줄눈 6개소, 균열 9개소에서 시험을 수행하였다. 표 2는 구조적 상태조사 결과를 정리한 것으로 줄눈부에서는 평균 94.2% 하중전달율은 보이고 동적지지력도 평균 3,300pci로 전반적으로 매우 건전한 상태를 유지하고 있었다. 반면, 균열부에서는 하중전달율이 평균 79.1%로 다소 떨어지고 있으며 일부 균열에서는 50% 이하의 하중전달율이 조사되어 균열부의 구조적 성능 보강이 필요한 것으로 나타났다.

그림 1. 구조적 상태조사

표 2. 구조적 상태조사 결과

구분	하중전달률(%)		동적지지력 (pci)
	줄눈	균열	
평균	94.2	79.1	3,300
최소	89.0	43.1	1,923

3.2 기능적 상태조사

기능적 상태조사는 포장 노면의 미끄럼 마찰저항에 대한 조사를 실시하였다. 미끄럼 마찰저항 조사는 ASTM E274 시험규정에 맞추어 제작된 견인차량 미끄럼 마찰저항 측정장비를 이용하였다. 시속 65km/h로 주행하면서 1차로는 2회에 걸쳐 9회, 2차로는 3회에 걸쳐 14회 조사를 수행하였다. 그 결과, 평균 미끄럼 마찰저항값은 1차로의 경우 41.1, 2차로의 경우 38.4로 조사되었다. 이러한 결과는 종단선형이 양호한 일반구간의 미끄럼 마찰저항값 관리기준인 35보다는 큰 것이지만, 사고위험이 높은 터널구간이라는 특수성과 장기 공용으로 인한 향후 미끄럼 마찰저항성능 감소를 감안할 때, 다이아몬드 그라인딩과 같은 기능성 회복을 위한 보수공법이 필요한 것으로 나타났다.

3.3 내구적 상태조사

슬래브의 내구성 평가를 위해 육안으로 실시한 파손조사는 전구간에 걸쳐 수행하였다. 코어시편은 파손조사 결과를 토대로 미세균열부, 관통균열부, 정상부를 구분하여 총 6개소에서 수집하였다. 채취된 코어시편은 하부를 절삭하여 압축강도 시험을 실시하였으며, 시편의 상부를 이용해서는 페놀프탈레인 용액을 이용한 중성화 시험과 균열깊이를 조사하였다.

파손조사결과 1차로에 관통균열이 10개, 2차로에 29개가 나타나 장기간 공용에 따른 높은 관통균열 발생율을 보이고 있었다. 또한, 슬래브를 관통하지는 않았어도 전단면에 걸쳐 발생해 향후 관통균열로 발전할 가능성이 높은 부분균열이 각각 3개, 7개로 나타나 균열부에 대한 보수방안 수립이 필요한 것으로 나타났다.

표 3. 포장파손 육안조사결과

조사항목	터널부 1차로		터널부 2차로	
	포장결함(개소)	결함발생률(%)	포장결함(개소)	결함발생률(%)
부분균열*)	3	2.8	7	6.4
관통균열	10	9.2	29	26.6
스폴링	16	14.5	14	12.7

*)부분균열 - 슬래브 내에 횡방향 관통균열을 제외한 큰 균열

※ 결함발생률 - 관통균열은 슬래브단위, 스폴링 및 줄눈벌어짐은 줄눈단위로 산출

그림 2. 터널포장에 발생한 파손(좌측부터 : 횡방향 관통균열, 미세균열, 스폴링)

현장에서 채취한 코어시편을 이용한 압축강도 시험결과 모두 35MPa이 넘는 높은 강도를 보였으며, 이를 토대로 휨강도로 추정해보면 모든 시편이 15MPa를 넘는 높은 휨강도를 보이는 것으로 나타났다. 표면에 나타난 미세균열의 균열깊이는 5mm 내외로 구조적 공용성에는 영향을 주지 않는 장기간 공용에 따른 건조수축균열로 판단되었으며, 중성화 또한 거의 발생하지 않은 것으로 나타났다.

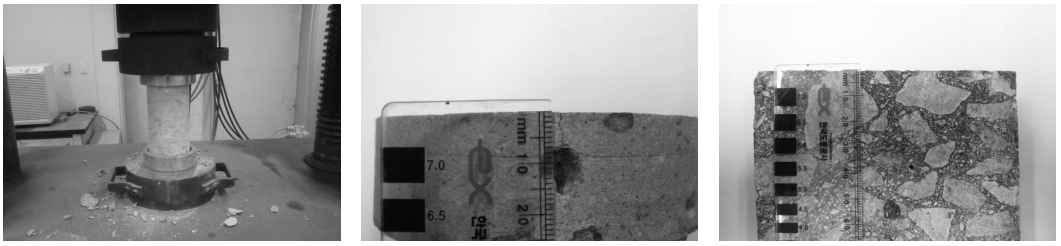

그림 3. 코어시편을 이용한 구조적 상태조사(좌측부터 : 압축강도시험, 균열깊이조사, 중성화시험)

3.4 사전조사결과

사전조사결과 □□터널의 콘크리트 포장은 포장지지력과 줄눈부의 하중전달률이 높아 내구적으로 안정적인 것으로 나타났다. 또한, 콘크리트의 강도 및 중성화 상태는 매우 양호한 것으로 나타났다. 반면, 장기간 공용에 따른 표면의 미세균열이 다수 존재하고 균열부에서 하중전달률 저하가 나타나고 있었다. 장기간의 공용에도 불구하고 전반적인 포장상태가 양호하고 균열부의 구조적 성능 회복만 필요한 것으로 나타나 DBR공법의 적용에 적합한 것으로 판단하였다.

4. DBR공법 시공

국내에는 DBR공법에 대한 설계 및 시공은 기준이 수립되어 있지 않기 때문에 이와 관련된 대부분의 기준은 미국 콘크리트 포장 협회(ACPA, American Concrete Pavement Association)에서 제시한 'Specification Guideline for Dowel Bar Retrofit'을 참고하여 작성하였다.[1]

4.1 DBR 설계

다웰바가 시공되는 슬롯의 제원 및 배치 위치는 그림 4와 같다. 슬롯의 깊이는 콘크리트 포장의 두께와 설치되는 다웰바 하부에 채움재가 밀실하게 충진될 수 있도록 채움재의 골재 크기를 감안하여 설계하였다. 슬롯의 폭 또한 이와 같은 점을 고려하여 다웰바 직경의 2배 정도 크기로 설계하였다. 슬롯은 차량의 윤하중이 통과하는 휠패스에 설치하며 중차량의 교통량을 고려하여 2개 또는 3개로 결정한다. □□터널구간은 중차량 교통량이 큰 곳으로 휠패스에 각각 3개씩 배치하는 것으로 설계하였다.

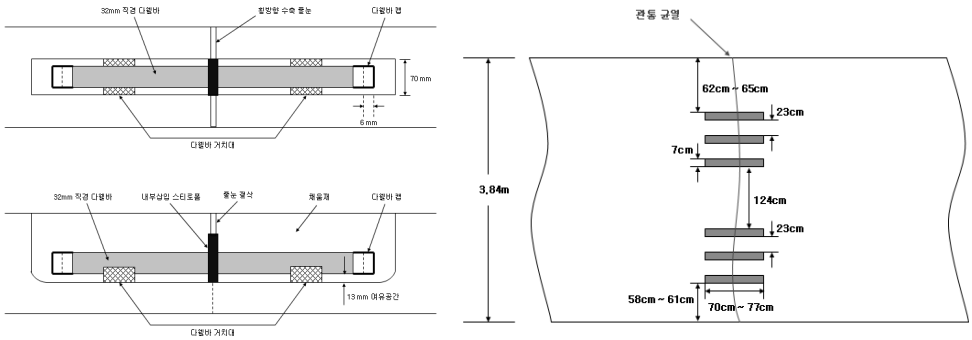

그림 4. DBR공법 시공 설계도

4.2 시공재료

다웰바는 일반적으로 사용하는 에폭시계 도료로 방청된 직경 32mm, 길이 500mm의 SR300 원형봉강을 사용하였다. 다웰바의 자유로운 거동을 위해 양 끝단에 비금속, 비유기 재질의 다웰바 캡을 설치하였다. 채움재 유실 방지를 위해서 슬롯 내부 균열은 콘크리트 포장용 줄눈재를 이용해 충진했다. 슬롯의 채움재는 유지보수 구간의 경우 3시간 압축강도가 21MPa 이상 확보되어야 하며, 팽창률이 0.1% 내인 무수축 재료를 사용해야 한다. 본 시공현장에서는 라텍스 개질 콘크리트를 사용했다. 슬롯과 다웰바 사이를 밀실하게 채우기 위하여 채움재의 골재최대입경은 10mm로 정했다.

4.3 시공

슬롯의 절삭에는 일반적으로 슬롯의 폭만큼 간격을 둔 이중날 절삭기를 사용한다. 그러나, 국내에서는 DBR공법의 시공사례가 거의 없기 때문에 이중날 절삭기를 사용하지 못하고 다른 방법으로 슬롯을 시공했다. 그림 5와 같이 핸드 그라인더를 이용해 노면에 슬롯의 위치를 표시한 후, 코어 채취기와 소형 파쇄기를 번갈아 사용하면서 슬롯을 시공하였다. 슬롯 시공이 끝난 후 고압수를 이용해 슬롯 내부의 잔유물 및 손상된 부유물을 청소하였다. 이 후 슬롯 내부에 다웰바를 거치하고 현장에서 채움재를 배합한 후 포설하였다.

그림 5. 슬롯 시공(좌측부터 : 슬롯 위치 절삭, 슬롯 내부 파쇄, 고압 물청소)

그림 6. 다웰바 설치(좌측부터 : 다웰바 거치, 채움재 포설, 시공 완료 모습)

4.4 추적조사

DBR공법의 시공이 완료된 후 횡방향 균열에서 하중전달율을 측정하였다. 그 결과, DBR공법을 적용한 횡방향 관통균열의 평균 하중전달율은 92.5%로 크게 향상되었다. 표 4는 기 조사된 횡방향 관통균열부에서 DBR공법 시공전·후의 하중전달율 변화를 정리한 것이다. DBR공법의 적용 후 하중전달율은 1.3%~41.9%까지 다양하게 증가한 것으로 나타났다. 특히, 사전조사시 하중전달율이 43.1%였던 균열 8번의 경우 DBR공법의 적용 후, 85.0%까지 크게 올라갔다. DBR공법으로 인한 하중전달율 증가효과는 하중전달율이 작은 균열일수록 큰 것으로 나타났다.

표 4. DBR공법의 시공 전·후 하중전달율 변화

구분	균열1	균열2	균열3	균열4	균열5	균열6	균열7	균열8	균열9	평균
시공 전	87.7%	88.6%	83.7%	87.0%	83.5%	82.8%	87.1%	43.1%	67.8%	79.1%
시공 후	89.0%	-※	96.3%	96.1%	-	-	93.3%	85.0%	83.9%	90.6%
증 감	△1.3%	-	△12.6%	△9.1%	-	-	△6.2%	△41.9%	△16.1%	△14.5%

※ 현장은 공사구간으로 9개 중 3개 균열에서는 현장여건상 추적조사를 실시하지 못함

5. 결 론

DBR공법은 콘크리트 포장에서 구조적 능력을 회복시켜주는 경제적인 유지보수공법으로 국외에서는 지난 수십 년간 폭넓게 사용되어 왔다. 그러나, 국내에서는 적용사례가 거의 없으며 이에 대한 효과분석도 이루어지지 않은 상황이다. 본 연구에서는 DBR공법의 효과분석을 위해 국외의 시공사례를 토대로 □□터널에 대한 사전조사, 현장적용, 추적조사를 실시하였다. 그 결과, 장기간 공용한 후에도 기존 콘크리트 포장의 품질이 좋다면 슬래브에 발생한 횡방향 균열에 DBR공법을 적용하여 하중전달율은 크게 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다. DBR공법의 적용으로 최대 41.9%의 하중전달율 증가효과가 있었으며, DBR공법을 적용한 균열에서는 평균 92.5%의 우수한 하중전달율을 나타내고 있다.

또한, 본 연구에서는 DBR공법의 효과를 구조적 측면인 하중전달율로 제한적인 항목에 대해서만 평가했다. DBR공법의 또 다른 중요한 항목으로는 슬롯 내부의 채움재의 공용성이 있다. 이 부분은 시험시공 구간의 장기적인 추적조사를 통해 차후 검증되어야할 사안이다. 또한, DBR공법의 국내적용이 초기 단계인 관계로 시공에 있어서 장비구성과 슬롯 내부의 다웰바 배치에서 기술적으로 부족한 부분이 있었다. 이러한 시공에 관한 문제는 향후 DBR공법의 보급 확산에 따라 개선될 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. ACPA, Specification Guideline for Dowel Bar Retrofit, 2002
2. John T. Harvey, Lorina Popescu, Abdikarim Ali, “Performance of Dowel Bar Retrofitted Concrete Pavement Under HVS Loading”, Transportation Research Board, 2003.
3. WSDOT, “Dowel Bar Retrofit”, Materials Laboratory Technotes, 2007.
4. Irene K. Battaglia, Barry Paye, “Dowel Bar Retrofit Performance in Wisconsin”, WI-02-10, 2010.
5. Linda M. Pierce, Stephen T. Muench, Joe P. Mahoney, “Long-Term Performance of Dowel Bar Retrofit in Wasington State”, TRB 2010 Annual Meeting, 2009.
6. Curt Dunn, Byron Fuchs, “Evaluation of Dowel Bar Retrofit Using Minnesota Specified 3U18 Patch Mix”, North Dakota Department of Transportation, MR 97-04, 2003.