

# 친환경 4S(Safe, Silent, aeSthetic, and user Satisfaction guaranteed) 포장시스템 하부구조의 초기 함수비 변화

The Early Water Content Variation of Eco-friendly 4S (Safe, Silent, aeSthetic, and user Satisfaction guaranteed) PavementSystem Foundation

김인태\* · 이명찬\*\* · 조윤호\*\*\*

Kim, In Tai · Lee, Myung Chan · Cho, Yoon Ho

## 1. 서론

국가 경제가 성장하고 국민 개개인의 생활수준이 향상됨에 따라 정온하고 안전한 생활 즉, 삶의 질(Well-Being)에 대한 관심과 욕구는 점점 커지고 있다. 이러한 사회·경제적인 변화는 도로 분야에도 적용되어 기존의 이동성 및 경제성 확보의 관점에서 안전성 및 환경친화성을 강조하는 사용자 편의 중심으로 변화하고 있다. 따라서 구조적으로 안전하면서도 우수한 성능을 지닌 환경친화적인 포장 재료개발의 필요성이 요구되고 있다.

도로 사용자 중심의 안전하고(Safety), 조용하며(Silence), 아름다운(aeSthetic) 포장을 개발하여 이용자에게 만족(Satisfaction)할 수 있는 도로포장(이하, 4S)을 구현하기 위해 투·배수성 포장을 도로 등급에 맞추어 개발하려고 한다. 4S 공법의 특징은 기층으로 신재료인 저수축 투수/불투수 시멘트 안정처리 기층(Cement Treated Base, 이하 CTB)을 적용한다는 점이다. 4S 포장에 기층으로 활용하는 저수축 투수/불투수 CTB는 이전 CTB와 달리 건조수축에 의한 균열 발생을 저감시켜 반사균열을 억제하며 포장의 구조적 능력을 보강할 수 있다는 장점이 있다고 판단된다.

본 논문은 경북 김천에 실시된 4S 현장 시험시공 자료를 바탕으로 기술하였다. 노상에 TDR(Time-Domain Reflection)를 매설하여 자연환경(강우량, 온도 등)에 의한 투·배수성 포장과 일반포장에서의 노상 중량함수비 및 포화율 변화를 비교·검토하였다. 더불어 현장투수시험을 통해 투수성능과 배수형태를 점검하고 FWD(Falling-Weight Deflectometer) 측정을 실시하여 단면별 구조적 지지력을 평가하였다.

## 2. 투·배수성 포장에 대한 기술동향

Hassan M. Salem(2006)은 Rockcap를 기층으로 활용하였을 때 포장 공용성과 노상 함수비 측면에서의 효율성을 평가하였다. 함수비 측정은 TDR(Time-Domain Reflection) 장비를 이용하였다. 결과적으로 Rockcap의 적용은 배수시설은 갖춘 Weiser 지역에서 쇄석기층 단면보다 노상 함수비를 저감시켰다. 배수시설을 갖추지 않은 Moscow 지역은 반대의 경향을 나타냈다. 전체적인 노상 함수비는 배수시설을 적용하지 않은 Moscow에서 높게 나타났다. 또한 FWD(Falling-Weight Deflectometer)측정 결과 두 지역 모두 Rockcap을 적용한 단면이 더 우수하였으며 더욱 놀라운 것은 Moscow지역에서는 노상 함수비가 Rockcap을 적용한 단면이 더욱 높았으나 FWD결과는 노상의 함수비가 더욱 높은 Rockcap단면이 강성이 더욱 높은 것으로 나타났다. (Hassan M. Salem, 2006) 미네소타DOT에서는 기층, 보조기층, 노상에서 함수비 상태가 계절 변화 뿐만 아니라 단순한 강우에 따라라도 변화한다고 하였다. 강우량에 따라 포화율이 100%에 도달하기도 하였으며 무강일수가 지속될 경우 포화율이 하락하였다. (Roberson, 2002) 일본에서는 시험시공을 통한 차도용 투

\* 비회원 · 명지대학교 공과대학 교통공학과 조교수 · 공학박사 · 031-330-6505(E-mail:kit1998@hotmail.com)

\*\* 비회원 · 중앙대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 · 공학박사 · 02-816-0251(E-mail:na-4060@hanmail.net)

\*\*\* 정회원 · 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 부교수 · 공학박사 · 02-816-0251(E-mail:yhcho@cau.ac.kr)



수성 포장에 대한 연구를 실시하였다. 노상 함수비의 경우 강우에 의하여 함수비가 올라가고 잠시 맑은 날씨 또는 구름이 계속되면 거의 일정한 함수비로 떨어지는 모습이 관찰되었다. 지지력 관점에서 강우 이후 FWD 측정 결과 함수비가 증가한 시점에서 FWD의 처짐량이 약간 크게 발생하였으나 처짐량으로부터 구한 노상 탄성계수에는 거의 변화가 없었다. (Endo Katsura, 2002) 이는 증발량에 따라 노상 함수비가 변한다는 것을 보여준 좋은 사례라 하겠다. 일본 국토교통성 중부지방정비국과 아이찌현에서는 '빗물침투형 도로구조의 개발' 연구를 위해 투수포장 시험시공을 실시하였다. 이 연구에서 노상 및 보조기층의 시공단계와 주행시험 후 동적평판시험기로 지지력을 측정한 결과 살수주행 후에도 지지력의 변화가 없었다고 보고되었다. (Nemeto Nobuyuki, 2001) 따라서, 어느 정도의 노상강성의 변화는 전체적인 포장의 거동에 미치는 영향이 미미하다고 판단된다.

### 3. 친환경 4S 투·배수성 포장시스템 현장 시험시공

#### 3.1 포장재료

4S 포장의 특징은 기층으로 CTB를 활용한다는 점이다. 이에 따라 시멘트 안정 처리 기층을 아스팔트 포장 적용 시 문제가 되는 반사균열을 해결하기 위하여 저수축 투수/불투수CTB를 개발하였다. 저수축 불투수 CTB의 경우 상온과 항온항습실의 다른 환경조건에서 양생조건에 따른 건조수축 그리고 혼화재 종류와 양에 따른 수축저감율을 측정하였다. 실내 실험 결과를 바탕으로 현장 실험에 적용하여 시멘트(7%)+플라이 애쉬(25%)+팽창재(10%)를 혼합한 재료배합을 제시할 수 있었다. 투수CTB의 경우 굵은 골재 최대치수 25mm, 단위 시멘트량 7%, 잔골재율 10~15%, 물/시멘트비 45~55%인 배합이 투수계수(10mm/sec), 연속공극률(15%), 압축강도 기준(50kg/cm<sup>2</sup>, 7일 강도)을 모두 만족 하였다. 건조수축 실험 결과 저수축 투수CTB는 일반린보다 약 17%, 저수축 불투수CTB보다 약 8%의 수축 저감효과가 나타났다.(중앙대학교, 2005) 투수AP의 경우 19mm, 13mm, 8mm의 골재를 이용하였으며OAC(Optimum Asphalt Content)의 경우 실내 예비실험을 통해 5%로 결정하였다. Draindown의 방지를 위해 바이어탑 섬유질 첨가하였으며 치환율은 0.9%였다.

#### 3.2. 현장시험시공

친환경 4S 투·배수성 포장시스템을 경부고속도로 영동~김천간 6차로 확장공사 제 5공구 부채도로에 시험 시공하였다. 경북 김천 시험시공 구간은 교통량이 적어 환경하중만을 고려할 수 있다는 점에서 그 의미가 아주 높다고 판단된다. 단면으로는 50mm두께의 투수 아스팔트를 표층으로 활용하고 기층으로 150mm의 저수축 투수CTB를 적용한 경우(이하, 투수AP/투수CTB)와 역시 50mm두께의 투수 아스팔트를 표층으로 이용하고 반면에 기층으로 150mm의 저수축 불투수CTB를 활용하는 단면(이하, 투수AP/불투수CTB), 마지막으로 이를 비교·검토하기 위한 일반아스팔트 단면 총 3 종류를 포설하였다. 계측기는 배수 특성이 다른 세 단면의 노상 증량함수비의 변화를 살펴보기 위해 단면마다 함수비 측정기기를 매설하였으며 온도측정계측기(I-Button)를 이용하여 노상내부온도를 측정하여 동결유무를 확인하고자 하였다. 그림 1은 현장 시험시공 단면도와 계측기 매립 현황을 보여주고 있다.

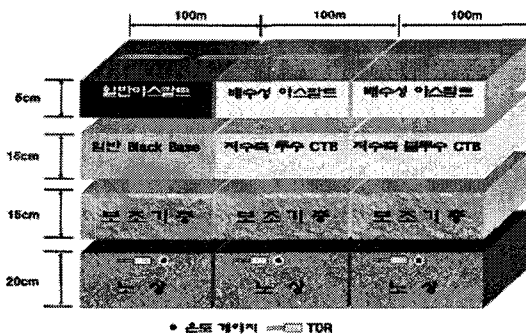


그림 1. 시험시공 단면도 및 계측기 매립현황



### 3.2.1 Time-Domain Reflectometer(TDR) 실내 보정 실험

TDR은 현장 함수비를 측정할 수 있는 비파괴적인 방법 중 하나이다. TDR은 1970년대 후반 이후 흙의 현장 함수비(in-situ moisture content)를 알아냈는데 사용되었으며 최초의 사용분야는 농업분야였다. 현재 FHWA(Federal Highway Administration)에서는 TDR를 Long-Term Pavement Performance(LTPP) Seasonal Monitoring Program(SMP)에서 64 LTPP의 현장 함수비를 측정하는데 사용하는 등 점차적으로 사용이 증대하고 있다.(Y. Jane Jiang, 1998)

TDR은 흙의 현장 함수비를 측정하는데 있어 전자기파(electromagnetic wave)를 이용한다. 전자기파 기법은 물과 흙의 유전율(dielectric constant) 차이를 이용하여 흙의 함수비를 알아내는데 효과적인 방법이다. TDR의 원리는 시작점으로부터 전기적 불연속성을 지닌 물체로까지 전자기파(electromagnetic wave)의 일방향 이동시간(travel time)을 측정하는 것을 기초로 하고 있다. 유전율은 전자기파의 시간과 도파관(waveguide)의 길이로 알 수 있다.(Brian K. Diefenderfer, 2000)

여기서 도파관은 전송로로 사용되는 도체로 만든 속이 빈 도관을 말한다. 흙에서 도파관을 따라 전달되는 전자기파의 전달 속도  $v$ 는 아래의 식(1)과 같다.(Brian K. Diefenderfer, 2000)

$$v = \frac{c}{\sqrt{K_a}} \tag{1}$$

여기에서,  $c$  = 자유 상태( $3.8 \times 10^8$  m/s)에서의 전자기파 속도

$K_a$  = 복합 유전율에서의 실수부

측정된 유효 유전율(apparent dielectric constant)  $K_a$ 은 다음의 식(2)으로 표현할 수 있다.

$$K_a = \left(\frac{ct}{l}\right)^2 \tag{2}$$

여기에서,  $c$  = 자유상태( $3.8 \times 10^8$  m/s)에서의 전자기파의 속도

$t$  = TDR 시스템에 의해 측정되는 전자기파의 일방향 진행 시간(sec)

$l$  = TDR 전달 라인의 길이(m)

본 실험에서 사용한 TDR 은 Campbell사에서 제조한 CS616모델을 사용하였으며 Datalogger로는Campbell Scientific Datalogger CR10X를 이용하였다. 기존 모델은 별도의 인터페이스(Interface)가 필요하고 결과값이 유전율로 나왔으나 CS616 모델은 결과값이 주기로 나오고 Datalogger에서 데이터를 획득할 수 있는 특징이 있다.

TDR보정 실험은 Virginia Tech, 한국건설기술연구원(전성일, 2003) 등에서 실시한 실험을 바탕으로 수정하여 적용하였다. 실험 절차는 첫 번째로 50cm×50cm×30cm 크기의 박스를 플라스틱으로 제작하였다. 이후 각각의 중량함수비(0%, 5%, 10%, 15%)에서 흙과 물을 골고루 혼합하였으며 다짐은 3층으로 실시하였다. TDR은 가운데층에 위치하며 다짐을 실시하기 이전에 적어도 150mm를 이격한다.

TDR측정이 끝난 이후 가운데층으로부터 흙을 취득하여 무게를 재고, 완전건조 시킨 후 중량함수비를 얻기 위해 다시 흙의 무게를 재었다. 이는 KS F 2306에 준하였다. 마지막으로 중량함수비의 주기값(T)의 관계를 3차 방정식으로 회귀분석을 실시하여 보정 방정식을 산출하였다.

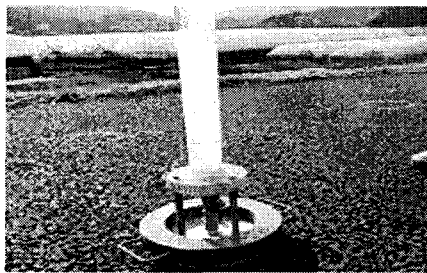
## 3.3 현장실험 결과

### 3.3.1 투수 시험

현장투수특성은 친환경4S 투·배수성 포장시스템의 주요한 친환경적인 기능성 중의 하나이며 이를 통해 우천 시 안전한 미끄럼저항성 확보와 소음 저감의 간접평가가 가능하다. 그러나, 투·배수성 포장은 공용기간이 증가함에 따라 먼지, 미세물질 등에 의하여 공극막힘현상이 발생하며 결과적으로 투수능력 및 소음 감소효과가 떨어지는 단점이 있다. KS F 2394에 준하여 제작한 현장투수시험기를 이용하여 기층 시공 이후 투수CTB의 투수성능을 살펴보았으며 표층 타설 이후 각 단면에서 실험을 실시하였다. 그림 2.a에 나와 있는 현장투수시험의 경우 물 400ml가 15초에 통과할 때 투수계수  $10^{-2}$ cm/sec이다. 즉, 15초 이내로 400ml의 물이 통과할 경우  $10^{-2}$ cm/sec보다 높은 투수계수를 가졌다고 판단할 수 있다. 결과적으로 투수CTB의 경우 평균 5.9(s), 투수AP의 경우 대체로 3~4(s)를 나타내어 양호한 투수성능을 지니고 있음을 알 수 있었다.

또한, 투수AP/불투수CTB 단면, 투수AP/투수CTB 단면 및 일반아스팔트 단면의 단면별 배수형태 및 방향특성을 살펴보았다. 현장 시험시공의 장소가 한방향으로 편구배가 2%임을 감안하여 도로의 측면에서 0.3m 떨어진 지점에 약 6 리터의 물을 투입하였다. 그림 2.b은 투수AP표층/불투수CTB 기층 단면에서 투입된 물의 배수형태 및 방향을 보여주고 있다. 투수AP표층을 통과한 물은 불투수CTB기층을 통과하지 못하고 측면 배수형태로 배수되고 있는 모습을 육안으로 확인할 수 있었다. 같은 실험을 투수AP 표층/투수CTB기층 단면과 일반아스팔트 단면에서도 반복 실시하였다.

투수AP표층/투수CTB기층 단면에서는 그림 2.c에서 보여주듯이 물이 측면으로 배수되지 않고 있다. 이는 기층으로 사용된 투수CTB로 물이 바로 투수된 것을 판단된다. 마지막으로 일반아스팔트 단면은 그림 2.d에서 보여주듯이 물이 내부로 침투하지 못하고 횡단구배를 따라 배수됨을 육안으로 볼 수 있었다.



<a> 현장투수시험기(KSF2394)



<b> 투수AP/불투수CTB



<c> 투수AP/투수CTB



<d> 일반아스팔트포장

그림 2. 현장투수실험 모습 및 배수형태, 방향측정

### 3.3.2 자연환경(강우량, 온도등)에 의한 노상 증량함수비 및 포화율 변화관측

단면별 노상 증량함수비 변화를 살펴보기 위하여 장기간 강우량에 따른 TDR의 변화를 살펴보았다. 강우량의 경우 시험시공 근처 기상청 자료와 현장 사무소 자료를 활용하였으며 노상 내부온도는 온도측정계측기 (I-Bottun)를 이용하여 측정하였다.

그림 3은 2006년 1월 13일에 발생한 누적강우량 7.5mm/hr에 따른 단면별 노상 증량함수비의 변화를 보여



주고 있다. 데이터 분석 결과 강우 시작 이후 투수AP표층/투수CTB기층 단면은 약 4시간 이후 노상 중량함수비가 증가하기 시작했고 투수AP표층/불투수CTB기층 단면과 일반아스팔트 단면은 각각 7시간과 18시간 이후에 노상 중량함수비가 반응을 보이기 시작했다. 이는 앞서 설명한 투수실험을 뒷받침하는 결과와 일맥상통한다 하겠다. 투수 표층과 투수 기층으로 이뤄진 단면은 다른 두 단면에 비해 빠른 투수속도를 보여줬으며 이는 가장 빠른 TDR의 반응으로 나타난 것이다.

그림 4는 약 10개월 동안(2005년 10월~2006년 7월) 자연환경(강우량, 온도 등)에 따른 단면별 노상 포화율의 변화를 나타낸 그래프이다. 시공 직후의 노상 포화율은 투수AP표층/투수CTB 기층 단면, 투수AP표층/불투수CTB기층 단면, 일반아스팔트 단면은 대체로 55~65%를 보였다. 최초의 변화는 보조기층 시공 이후 내린 강우에 의하여 발생하였다. 특이한 점은 일반아스팔트 단면의 포화율이 약 14%가 증가한 것에 비해 다른 단면은 약 27%정도 노상 포화율이 증가하였다. 이는 보조기층 타설 이후 일반아스팔트 단면상부에 유화제를 살포하였는데 유화제가 살포 후 내린 강우의 침투를 저하시킨 것으로 판단된다. 또한, 온도측정 계측기에서 읽혀진 자료를 보면 모든 단면에서 겨울을 지나는 동안 노상 내부온도가 0℃ 이하로 내려가지 않아 동

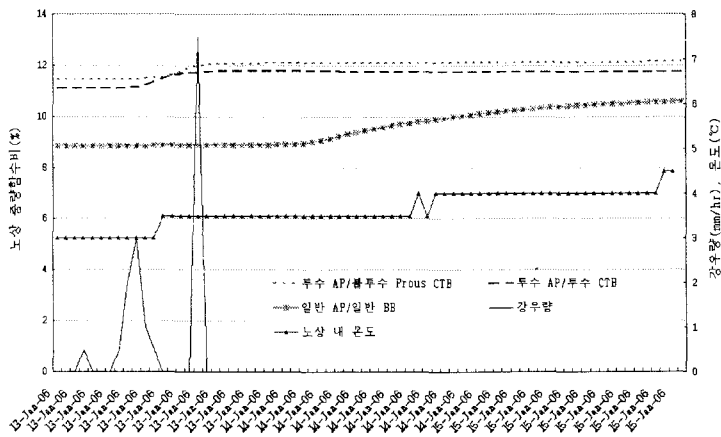


그림 3. 강우량에 따른 단면별 노상 중량함수비 변화 추이

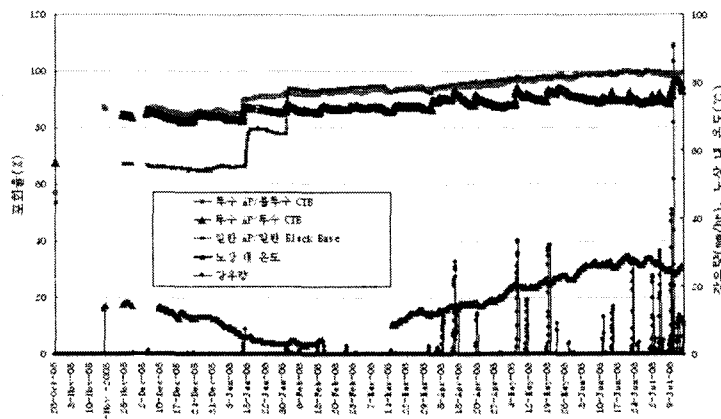


그림 4. 강우량에 따른 노상 포화율 변화

상현상은 발생하지 않았다고 생각된다. 초기에는 적은 강우량에도 큰 폭으로 노상 포화율이 증가하였으나 2006년 3월 이후 겨울철에 비하여 상대적으로 많은 강우량에도 불구하고 투수AP/투수CTB단면을 제외한 나



머지 단면은 증가율이 둔화되고 있다. 이후에는 많은 경우에도 불구하고 노상 포화율이 더 이상 증가하지 않는 모습이 관측되었다. 반면에 투수AP/투수CTB 단면의 경우는 강우량이 발생할 때는 급격히 증가하고 비가 없는 무강우일이 계속되는 경우에는 저하되는 요동(Fluctuation)현상이 발생하고 있다.

이는 투수AP/투수CTB 단면이 다른 단면에 비하여 표층과 기층에 모두 공극을 가지고 있어 대기와의 교류가 활발하여 노상에서의 수분 소산이 활발히 일어나기 때문이라고 판단할 수 있다고 생각된다. 또한, 노상의 온도가 상승할수록 노상 포화율이 저감되는 정도가 점점 커지는 것을 2006년 4월 이후에 살펴볼 수 있었다. 이러한 소산작용을 이용하면 도시 내 불투수층의 증가로 인한 열섬효과 저감에 기여할 수 있을 거라 생각된다.

#### 4. FWD측정을 통한 노상 처짐량과 포화율과의 관계

FWD 실험을 통해 단면별 노상 처짐량과 포화율과의 관계를 살펴보았다. 표 1에서 나타나듯이 겨울철에 실시한 결과를 살펴보면 일반아스팔트 단면 노상의 포화율이 다른 단면에 비하여 더 낮음에도 불구하고 가장 큰 처짐량을 나타내었으며 투수AP/불투수CTB 단면이 가장 적은 처짐량을 보였다. 비록 높은 함수비로 인하여 노상 자체의 강성은 낮을 수 있으나 강성이 높은 기층으로 사용함으로써 더 높은 구조적 안정성을 얻을 수는 있다는 사실을 보여주고 있으며 이는 이전 연구(Hassan M. Salem, Endo Katsura)와 비슷한 결과를 나타내고 있다. 여름철의 경우에도 높은 포화율로 인하여 단면별 노상 처짐량은 증가하였으나 겨울철 데이터와 마찬가지로 일반아스팔트 단면에서 가장 큰 처짐량이 발생하였다.

표 1. 단면별 노상 처짐량과 포화율과의 관계

	겨울철			여름철		
	처짐량 (mils)	타격지점으로부터 1.8m 떨어진 Geophone (mils)	포화율 (%)	처짐량 (mils)	타격지점으로부터 1.8m 떨어진 Geophone (mils)	포화율 (%)
일반아스팔트 단면	7.44	1.45	66.39	25.23	2.33	99.42
투수 AP/ 저수층 투수 CTB 단면	11.92	1.01	85.21	18.79	2.21	93.54
투수 AP/ 저수층 불투수 CTB	7.49	0.81	86.85	12.51	2.00	99.32

#### 5. 결 론

친환경 4S 투·배수성 포장시스템의 현장 시험시공을 통해 여러 시공된 단면 별 강우 처리방식 특성에 따른 투수 형태 및 강우량에 따른 노상 증량함수비 및 포화율의 변화를 살펴보았다. 기존 투·배수성 포장과 달리 4S 포장의 특징은 반사균열을 저감시키고 노상 함수비 증가로 인한 강성 약화를 보상하기 위하여 저수층 투수/불투수CTB를 기층으로 활용했다는 점이다.

시공 이후 투수성능평가에서 투수 AP 표층/투수 CTB기층과 투수 AP 표층/투수 불투수CTB기층 모두 투수계수 기준에 부합하였으며 각 단면별 배수방향도 확인할 수 있었다.

TDR를 이용한 노상 포화율의 관측 결과 투수AP/투수CTB 단면이 표층과 기층의 공극으로 인하여 강우량에 따라 민감하게 반응하고 소산 정도도 다른 단면에 비하여 빠르게 진행됨을 알 수 있었다. 이러한 소산작용을 이용하면 도시 내 불투수층의 증가로 인한 열섬효과 저감에 기여할 수 있다 하겠다. 현재까지의 측정 결과 일반아스팔트 단면과 투수AP/불투수CTB 단면의 경우 포화율100% 도달하였다. 투수AP/불투수CTB 단면과 일반아스팔트 단면에서 최초로 포화율 100%에 도달하기 까지 최초의 강우 이후 약 10개월이 소요되었다. 그러나 투수AP/투수CTB의 경우 포화율이 100%에 이르지 않고 최대 95%까지 증가하였으며 2006년 4월 이후로 강우량에 따라 90~95% 사이를 유지하고 있는 것을 알 수 있었다. 이는 투수 포장의 증발현상이 노상 포화율의 감소로 이어졌음을 알 수 있고 여러 학자들의 연구가 이를 뒷받침 한다. 포화율이 100% 가까이 증가할 수 있는 이유로는 본 부채도로가 고속도로 사면에 위치하며 본선에서 많은 양의 물이 시험시공 현장



에 공급되고 있고 지하수위 또한 표층에서 그리 멀지 않은 곳에 위치하고 있어 이런 현상이 발생하는 것으로 추정된다.

마지막으로 FWD측정을 통해 노상 처짐량과 포화율과의 관계를 살펴본 결과, 높은 포화율로 인하여 노상 자체의 강성은 낮을 수 있으나 강성이 높은 기층으로 사용함으로써 더 높은 구조적 안정성을 얻을 수는 있다는 사실을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 ‘친환경 4S 포장 시스템 개발 연구’ 과제 수행을 통해 이루어진 것으로 본 연구를 가능케 한 지원 기관에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 조운호, **친환경 4S 포장시스템 개발연구 1차년도 보고서**, 중앙대학교, 2005
2. 조운호, **반사균열을 억제한 시멘트 안정처리기층 재료 개발**, 2005
3. 전성일, **포장 하부구조의 함수비측정을 위한 TDR방식 함수량계의 실내보정실험**, 한국건설기술연구원, 2003
3. Endo Katsura, **시험포장에 의한 차도용 투수성 포장의 퍼포먼스**, 2002
4. Nemoto Nobuyuki, **수지 코트형 투수성 아스팔트포장의 차도형 적용**, 2001
5. Y. Jane Jiang, **EVALUATION OF IN-SITU MOISTURE CONTENT AT LTPP SEASONAL MONITORING PROGRAMSITES**, 1998
6. BRIAN K. DIFENDERFER, **LABORATORY CALIBRATION AND FIELD VERIFICATION OF SOIL MOISTURE CONTENT USING TWO TYPES OF TIME-DOMAIN REFLECTOMETRY PROBES**, 2000
7. Hassan M. Salem and Fouad M. Bayomy **Effectiveness of Using Open-Graded Base Layer on the Subgrade Moisture Regime and the Overall Pavement Performance**, Transportation Research Board 2006
8. Ruth Roberson, John Siekmeier **Determining Material Moisture Characteristics for Pavement Drainage and Mechanistic Empirical Design**, Materials & Road Research 2002