

콘크리트포장의 성능평가 및 보수공법 결정

유 태 석* · 김 준 범**

1. 머리말

국내 고속도로 콘크리트포장의 사용연수가 증가함에 따라 그 성능이 저하되어 파손이 증가하고, 파손이 생기지 않은 지역 또한 잠재적인 파손의 가능성은 높아지고 있다. 이러한 구간들은 지속적인 상태평가를 통해 파손상태를 평가하고 필요한 경우 적절한 보수 및 보강을 수행하여야 한다.

콘크리트포장의 상태평가는 포장표면상태에 대한 평가와 하부상태에 대한 평가로 나누어질 수 있는데 균열, 패칭 및 종단 평탄성 등을 사용하여 표면상태를 평가하고, 처짐량 등을 사용하여 하부에 대한 평가를 수행하는 것이 일반적인 방법이다. 평가결과를 통해 포장의 보수가 이루어지므로 올바른 포장상태 데이터 취득과 데이터를 이용한 합리적인 평가를 수행하여야 하며 평가결과를 바탕으로한 보수우선순위와 보수공법 선택논리의 수립은 핵심적인 사항이라고 할 수 있다.

포장상태 데이터의 취득은 수동방식과 자동방식으로 나누어지는데, 수동방식은 현장의 상태를 눈으로 직접 확인한 결과를 사용하므로 경험 있는 기술자가 수행하는 경우 적절한 판단을 수행할 수 있으나 주관적이고 많은 시간이 소요되는

한계를 가지고 있고 결정적으로 포장하부에 대하여는 코아채취 등의 파괴시험이 불가피하다. 따라서 장비사용을 통한 자동화의 수립이 필수적인데 노면촬영기, 평탄성 측정기, 비파괴 처짐시험기와 지반탐사레이더 등이 개발되어 사용되고 있다.

포장조사를 통해 얻어진 데이터는 포장의 평가에 사용되는데 포장표면에 대한 조사를 통해 얻어진 균열, 패칭 및 평탄성 등은 보수우선순위의 결정을 위한 지수를 구하는데 사용되고 포장하부에 대한 조사를 통해 얻어진 자료는 잠재적인 결함을 찾아내어 포장파손 이전에 보수여부를 판단하는데 사용하게 된다. 본 고에서는 포장의 표면 및 하부에 대한 조사방법을 기술하고 조사결과를 통한 평가방법, 고속도로 콘크리트포장에 대하여 현재 검토되고 있는 보수우선순위 및 보수공법 결정 방법을 소개하고자 한다.

2. 비파괴시험을 통한 포장물성의 평가

하부결함이 무시할 정도라고 가정할 수 있는 콘크리트포장에 대한 성능평가는 정밀역해석법과 Best Fit법이 주로 사용된다. 이 방법은 무한 넓

* 정회원 · 한국도로공사 도로연구소 연구원

** 정회원 · 한국도로공사 도로연구소 연구원

이의 판에 대한 Westergaard의 공식을 기초로 유도되었으며 슬래브의 중앙에 비파괴 시험장비인 Falling Weight Deflectometer를 통해 처짐을 측정하고 7개의 처짐 센서에 나타난 처짐을 기초로 포장하부의 동적지지력과 탄성계수를 평가하고 덧씌우기 두께를 판단하는데 사용하는 방법이다.

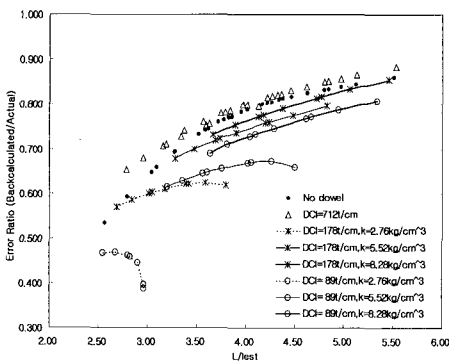
그러나 실제 현장에 적용하는 경우 슬래브의 형상과 다우웰 바에 의한 영향이 존재하므로 위의 방법으로 구해진 결과와는 다른 양상을 나타내고 그림 1과 같이 표현된다. 그림 1의 (a)는 정밀역해석 방법으로 구해진 결과와 포장해석 프로그램인 ILLI-SLAB을 사용한 결과의 비를 통해 상대오차의 경향을 구한 것이다. 그림에서 가로축은 슬래브의 크기를 상대강성반경으로 나눈 값으로 그 값이 작아질수록 슬래브의 크기가 작아져 유한판의 거동을 보이며 오차가 커지고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 다우웰 바가 존재하는 줄눈의 영향을 고려하는 경우 지지력 수준별로 다른 경향을 보이는 매우 복잡한 거동을 보이게 된다.

탄성계수의 평가결과는 지지력의 영향을 받으므로 위의 도표에서 존재하는 오차가 그대로 탄성계수로 옮겨가게 되는데 그림 1의 (b)와 같이

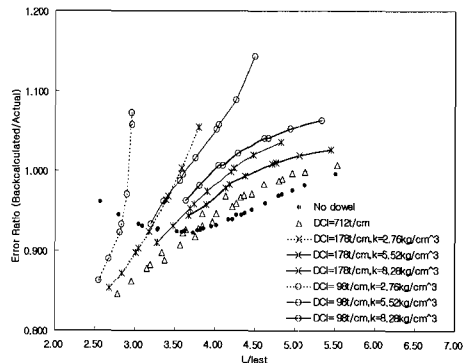
발산하는 경향이 나타난다. 그림 1과 같은 오차는 이러한 영향을 고려한 평가기법의 개발을 통한 진전을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 1과 같은 경향은 콘크리트포장에 환경에 의한 영향이 없는 경우를 가정하고 구해진 결과이다. 현장의 온도 및 습도와 같은 환경에 의한 영향이 존재하면 슬래브에는 자체변형으로 인한 지지조건의 변화로 매시간 지지력이 달라지게 된다. 지지력의 변화는 탄성계수의 역산 결과에 영향을 미쳐, 마치 콘크리트의 탄성계수가 시간에 따라 달라지는 듯한 효과를 일으키게 되는데 이러한 영향을 최소화하기 위해서는 온도 및 습도에 의한 자체변형이 최소가 되는 시점을 찾거나 계측을 통해 자체변형이 없는 상태로 보정하는 과정이 필요하다.

마지막으로 현재의 비파괴시험은 동적하중에 의한 처짐을 측정하고 있으므로 위에서 제시한 정적인 역산절차와는 다른 결과를 제시한다는 점이다. 위에서 제시한 2가지의 정적역산값이 동적역산 값과 같아지기 위해서는 하중이력과 7개의 처짐센서에서 계측된 처짐의 이력이 동시에 최대값이 되어야 하지만 실제로는 각각의 처짐과 하중사이에는 시간의 차이가 존재하게 된다. 이러한



(a) 지지력에 대한 상대오차비



(b) 탄성계수에 대한 상대오차비

그림 1. 슬래브형상 및 다우웰 바에 따른 지지력 및 탄성계수의 상대오차비

영향으로 평판재하시험으로 구해진 지지력은 정적인 역산으로 구해진 값에 비해 약 0.5배 정도의 값을 가지게 되는데 현재는 단순히 정적 역산으로 구한 값의 1/2을 사용하고 있는 실정이다. 최근에는 슬래브의 크기, 두께 및 시간이력 등을 고려한 DYNABACK-R 등 실제와 더욱 가까운 평가방법이 개발되고 있다.

3. 비파괴시험을 통한 하부결함이 발생한 포장의 성능평가

콘크리트포장의 하부에 결함이 발생하는 경우 상부 콘크리트 슬래브에 영향을 미치게 되는데 주로 슬래브의 처짐으로 인한 평탄성 불량과 심한 경우 슬래브의 균열로 나타나게 된다. 포장하부의 결함정후를 보이는 이러한 구간들에 대하여는 적절한 평가를 통해 보강을 실시하여 더 이상의 파손진전이 일어나지 않도록 하는 것이 중요하다. 이러한 구간에 대한 성능평가는 포장구조진단기(Falling Weight Deflectometer)를 통해 모서리 처짐을 분석하는 방법과 지반탐사레이더(Ground Penetrating Radar)를 사용하여 지반의 상태를 분석하는 방법이 있다.

처짐시험을 통한 분석방법에는 변환하중에 의한 모서리 처짐 분석법(Variable Load Corner Deflection Analysis)과 공동규모 추정절차에 따른 방법(Void Size Estimation Procedures)이 있다. 변환하중에 의한 모서리 처짐 분석법은 일반적으로 3단계 하중의 증가에 따른 처짐의 경향으로 이루어지는 그림 2에서의 직선이 처짐축에 발생시키는 절편으로 공동의 여부를 판단하는 방법이다. 이것은 콘크리트포장 하부에 공동이 발생하는 경우 하부의 지지구조가 하중의 크기에 따라 달라지기 때문에 원점을 통과하는 선형의 경향을 가지지 않음을 이용하는 방법이다. 공동의 유무는 절편의 크기 2~3mils를 경계로 이보다 작은 경우

공동이 없는 것으로 판단하고 이보다 큰 경우 공동의 존재가 큰 것으로 판단한다.

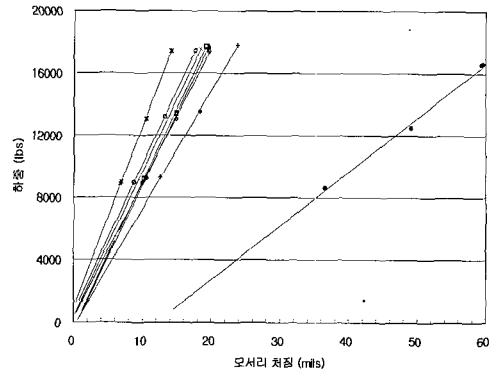


그림 2. 변환하중에 의한 모서리처짐 분석결과

다음으로 공동규모 추정절차 방법은 공동이 존재할 것으로 예상되는 구간과 전·후의 건전한 구간의 모서리 처짐을 정규화하고 공동여부를 추정하는 방법이다. 이 기법은 서로 다른 콘크리트 탄성계수를 가진 측정구간에 다른 크기의 FWD를 사용하여 얻은 모서리 처짐을 한가지의 탄성계수와 FWD하중에 대하여 정규화 시킨 후에 공동의 규모에 따른 처짐량을 포장해석을 통해 추정해 나가는 방법을 사용한다.

이 방법에서는 얻어진 데이터 가운데 공동이

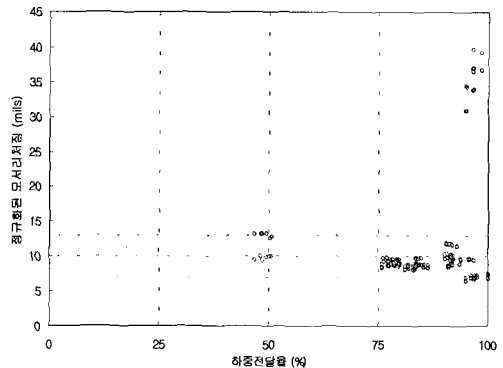


그림 3. 공동규모 추정절차에 의한 방법

없는 것으로 추정되는 부분을 zero void band를 통해 구분하고 그 이상이면 공동으로 추정한다. Zero void band는 공동이 없는 경우의 평균 처짐 값이 15%의 분산을 가지고 있는 것으로 가정하고 하한 값은 전체 데이터의 5%가 분포하는 처짐 값으로 가정하여 구한다. Zero void band를 초과하는 처짐을 가지는 지점에 대하여는 포장해석을 통해 공동을 가정하고 얻어진 처짐 값을 통해 규모를 추정하게 되는데 매우 많은 가정이 수반되는 관계로 zero void band까지를 도시하는 수준을 유지하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 게다가 그림에서와 같이 동질성구간에 대한 처짐과 하중전달의 상태를 한눈에 파악할 수 있으므로 공동 및 포장보수의 우선순위를 판단하는 데 유용하게 사용할 수 있을 것으로 사료되며 변환하중에 의한 모서리 처짐 평가방법과 병행해서 사용하여 공동의 유무를 합리적으로 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

지반탐사레이다(GPR)는 송신기로 불리우는 안테나로 부터 방출된 전자기파가 지반에 매입된 대상물에 반사되어 수신기로 불리우는 또 다른 안테나에 감지되는 원리로 작동된다. 전자기파의 펄스에너지는 전기적 성질이 바뀌는 경계면에서 에너지 가운데 일부가 반사되고 나머지는 통과한다. 전자기파가 표층, 기층 및 보조기층으로 이루어진 포장의 하부에 적용되는 경우 각각의 경계면에서 반사를 일으키고 그림 4와 같은 형태로 나타난다.

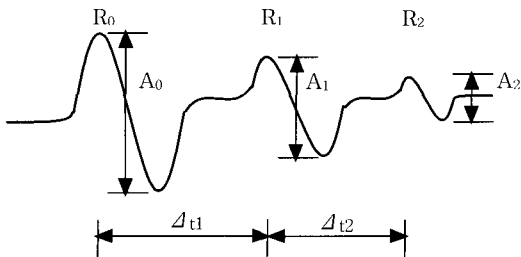


그림 4. 전형적인 포장단면에 대한 레이더 파형

여기에서,

A_0 = 표면 반사파 크기 (R_0) (volts)

A_1 = 표층과 기층 경계에서의 반사파 크기 (R_1)

A_2 = 기층과 노상 경계에서의 반사파 크기 (R_2)

Δt_1 = 전자기파가 표층을 통과 후 반사소요 시간

Δt_2 = 전자기파가 기층을 통과 후 반사소요 시간

일반적으로 공동은 콘크리트포장 슬래브의 아래 부분에 발생하며 이러한 부분에 레이더 탐사를 실시하는 경우 콘크리트 슬래브와 기층 사이의 매질로서 인식된다. 따라서 콘크리트 슬래브-공동 사이의 경계면과 공동-기층 사이의 경계면에서 반사파가 발생하며 두 가지 신호가 결합되어 건전한 지역과는 다른 신호가 수신된다. 이러한 신호가 연속적으로 결합되어 측정지역의 연속적인 지반하부 상태를 볼 수가 있는데 아래 그림과 같이 나타난다.

지반탐사 레이더를 사용하는 경우 포장하부에 결합이 발생하는 구간의 신호는 건전한 구간과 차이가 나는 점을 이용하여 결합부를 추정하게 된다. 그러나 이 방법을 고속도로의 콘크리트포장에 적용하기 위해서는 슬래브와 기층의 두께를 감당할 정도로 투과성이 좋은 안테나를 사용하여야 하는데 이러한 경우 분해능력이 떨어져 소규모의 공동에 대한 정확한 정보를 얻기 힘들고 정량적인 결과를 제시하지는 못해 포장하부에 대규

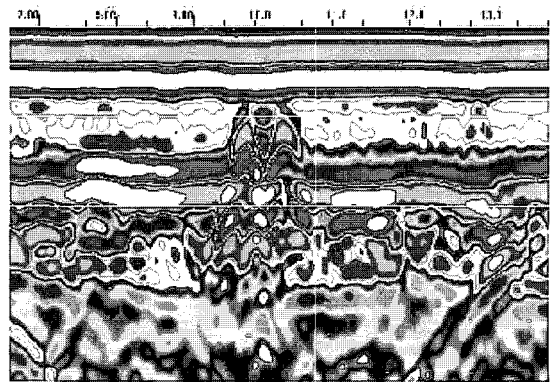


그림 5. 지반하부에 결합이 발생한 경우의 GPR 측정결과

모 결함이 발생한 경우 그 위치를 찾아내는데 효과적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 포장의 성능평가를 통한 보수공법 결정

위에서 제시한 성능평가방법은 포장의 하부에 대하여 수행되는 것이지만 실제로 콘크리트 포장에 대한 보수여부의 판단은 포장의 표면에 나타난 파손상태를 기준으로 평가하는 경우가 대부분이다. 포장의 표면에 대한 성능평가 방법과 이를 통한 보수여부의 결정은 나라마다 다른 기준을 통해 결정하고 있고 미국의 경우 주마다 다른 평가체계를 가지고 있다. 따라서 본 절에서는 현재 우리나라의 고속도로 콘크리트포장에 대해서 현재 도입예정인 방법을 기준으로 기술하고자 한다.

고속도로 포장의 보수공법은 그림 6과 같은 절차를 사용하여 결정된다. 그림에서와 같이 이러한 결정을 위해서는 포장상태 및 교통량 조사자료 등에 대한 방대한 양의 데이터가 필요하고 이를

통해 유도된 HPCI와 같은 포장상태지수를 통해 보수우선순위를 결정하게 된다.

현재 사용되고 있는 HPCI(Highway Pavement Condition Index)는 무근콘크리트포장을 대상으로 도로이용자 및 유지보수자의 관점을 고려하여 결정된 평가지수이다. HPCI의 개발을 위해 고속도로현장의 기술자, 유지보수 담당자, 도로전문가로 구성된 평가집단이 전국의 콘크리트포장중 34곳을 대상으로 승차감조사 및 육안조사를 실시하였고 이들 결과를 바탕으로 SHRP LTPP Pavement Distress Identification Manual의 기준에 따른 현장 상세조사를 중회귀분석을 실시하였다. 최종적으로 도출된 포장상태 평가모델은 다음과 같으며 아래의 공식은 회귀분석을 통해 얻은 평가모델 대안 가운데 민감도분석을 통해 결정된 것이다.

$$\begin{aligned}
 HPCI = & 7.35 - 4.65 \text{Log}(1 + IRI) \\
 & - 1.06 \text{Log}(10 + \frac{10}{B} C) \\
 & - 0.32 \text{Log}(10 + \frac{10}{B} P)
 \end{aligned}$$

위의 공식에서 IRI는 포장의 종단 평탄성을, C는 100m당 Bm의 폭을 가지는 차선에 발생한 균열의 길이를, P는 100m당 Bm의 폭을 가지는 차선에 수행된 패칭의 면적을 나타낸다.

포장상태의 분석은 개별포장이 나타내는 파손성상을 포장상태 평가지수로서 정량화하며, 향후 전개될 포장상태의 진전 양상을 포장파손 예측모델에 의한 예측값을 적용함으로써 미래 시점의 포장상태를 예측하게 된다. 또한 이 예측값을 토대로 분석 단위 년별 포장상태 평가, 보수 대상구간 선정, 보수예산 추이에측, 보수공법 추천 등을 수행한다. 그림 7은 HPCI와 교통량을 기준으로 보수우선순위를 결정하는 화면을 보여주고 있다.

포장조사의 결과를 토대로 보수공법이 결정되며 여기에는 포장의 기능적 측면, 포장의 안정성

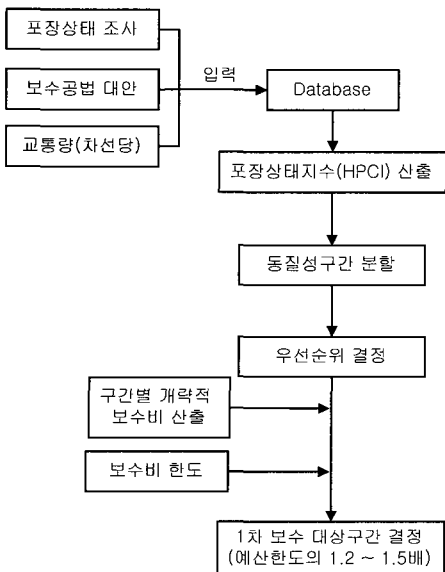


그림 6. 고속도로 포장관리시스템의 보수우선순위 결정 절차

측면, 포장의 구조적 측면이 고려될 수 있다. 포장의 기능성에는 포장상태 평가지수, 종단 평탄성, 균열 및 패칭 등이 있고 포장의 안정성 측면에는 미끄럼저항계수가 있으며 포장의 구조적 안정성에는 포장의 탄성계수와 하중전달지수 등이 있다.

전통적으로 포장의 상태에 따른 보수공법의 결정은 기술자가 현장의 상태를 눈으로 확인하고 보수공법을 결정해왔으나 관리연장의 증가 및 공법결정에의 주관성 개입의 문제로 장비를 사용한 조사결과를 근거로 보수공법을 결정하기 위한 노력이 계속되고 있다. 현재는 장비를 사용해서 얻은 종단 평탄성 및 균열조사 결과를 통해 정한 보수공법과 도로기술자가 현장조사 후 결정한 보수공법을 연관시키는 일이 진행되고 있는데 이는 지속적인 현장조사를 통한 보정이 필요한 실정이다. 그림 8은 이러한 논리를 근거로 보수공법을 결정하는 예를 보인 것으로 보수공법의 결정은 균열과 종단평탄성의 조사결과를 토대로 보수가 필요없는 경우, 부분보수를 수행하여야 하는 경우와 덧씌우기를 수행하여야 하는 경우로 나누어진 다.

3가지의 보수공법을 구분하기 위해서는 그림 8에서 균열과 종단평탄성에 대하여 decision value라고 일컬어지는 값을 정해야 하는데 이것은 현

장데이터의 지속적인 분석과 보정 과정을 통해 정해질 수 있다.

포장에 보수를 수행할지 여부와 어떤 보수공법을 적용할지 결정하기 위해서는 위에서 언급한 기본적인 사항 이외에 종합적인 판단절차가 필요하다. 예를 들어 물리적인 상태만에 의하여 보수 우선순위를 결정하지 않고 임의의 포장구간에 취해지는 보수에 따른 편익 및 보수비용에 의한 비용대 편익비에 의한 보수우선순위 및 보수대안 선정이 그것이다. 이러한 조건까지를 고려한 수준의 포장관리를 수행하기 위해서는 포장파손예측 모델의 수립과 수명주기비용 산정을 위한 절차가 필요하며 지속적인 연구가 실시되고 있다.

5. 맺음말

국내 고속도로 콘크리트포장의 수명이 늘어남에 따라 파손으로 인한 보수비용의 급속한 증가가 예상되고 있다. 따라서 정해진 보수예산에서 가장 시급한 곳을 선정하여 최선의 효과를 얻을 수 있는 보수를 수행하기 위한 절차가 필요하게 되었고, 오랜 기간동안 포장관리체계(PMS)를 정착시키기 위한 노력이 계속되어 왔다.

본 기사에서는 콘크리트포장의 성능평가 방법을 포장하부와 표면에 대한 것으로 구분하여 설명하였다. 포장하부에 대한 평가는 우리나라의 경

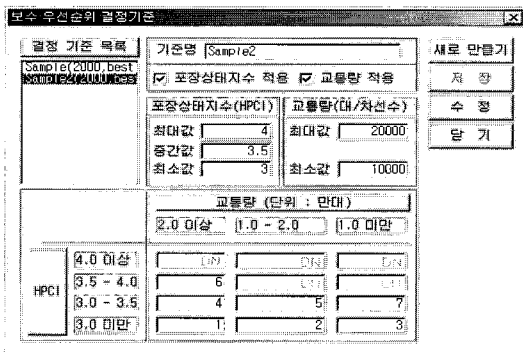


그림 7. 보수우선순위 결정도표

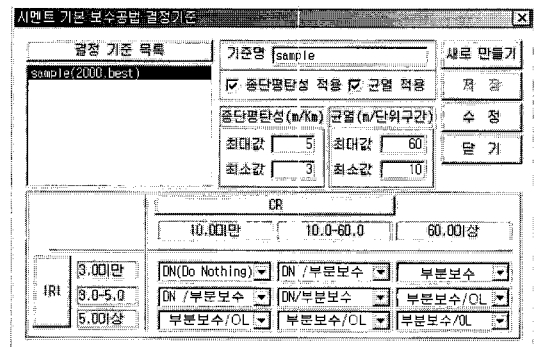


그림 8. 콘크리트 포장의 보수공법 결정도표

우 FWD와 GPR을 통해 수행되며 하부의 공동판독, 물성추정을 통한 덧씌우기 두께의 산정에 사용된다. 그러나 포장의 보수보강은 포장의 표면상태에 따른 사용성에 중점을 두고 수행되며 균열, 종단 평탄성 및 패칭 등의 상태를 종합적으로 고려하여 HPCI와 같은 지수를 도출한 후에 보수우선순위와 보수공법을 결정하게 된다.

효과적인 포장관리를 수행하기 위해서는 앞서 언급한 바와 같이 정확하고 신속한 현장조사, 합리적인 현장조사결과의 판독 및 평가방법 수립과 평가결과를 기초로한 보수공법 도출을 위한 논리의 수립이 필수적이다. 이 가운데 정확하고 신속한 현장조사는 포장조사 장비의 건전성과 매우 밀접한 관계를 가지며 올바른 판단을 위한 가장 기초적이고도 중요한 일이라고 할 수 있다. 다음으로 구해진 조사결과를 기초로 한 평가기법의 수립과 보수공법 도출을 위한 논리의 수립은 이론적인 접근뿐만 아니라 현장에서 발생한 실제의 현상을 설명할 수 있도록 지속적인 보정이 이루어져야 하며 포장조사자료에 대한 끊임없는 분석과 이를 이용한 보정을 통해 이루어질 수 있다. 현재 이를 위한 지속적인 장비개발, 평가기법수립

과 현장조사를 통한 공용성 평가가 이루어지고 있으며 더욱 합리적인 포장성능의 평가를 통한 보수공법을 도출이 가능해질 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

1. 김재영, 엄주용, 유태석, "시멘트 콘크리트포장의 유지보수체제(PMS)에 대한 연구(Ⅲ)," 도로연 95-23-14, 도로연구소, 1995.
2. 이광호, 엄주용, 김준범, 정철기, 서영찬, "포장데이터베이스 구축 및 활용방안 연구," 도로연 00-17, 도로연구소, 2000.
3. 이병철, 엄주용, 임승욱, "시멘트 콘크리트포장의 유지보수체제(PMS)에 대한 연구(Ⅱ)," 도로연 94-15-10, 도로연구소, 1994.
4. 유태석, 한승환, 서진원, 우정원, "비파괴시험을 통한 콘크리트 포장 하부 평가기법 개발," 도로연 00-23, 도로연구소, 2000.
5. Karim Chatti and Tae Kuk Kim, "A Simple Dynamic Backcalculation Procedure for FWD Testing of Rigid Pavements," TRB 80th Annual Meeting, TRB, 2001
6. K. T. Hall and M. I. Darter, T. E. Hoerner, and L. Khazanovich, "LTPP Data Analysis-Phase I: Validation of Guidelines for k-Value Selection and Concrete Pavement Performance Prediction," Technical Report FHWA-ED-96-198, FHWA, U.S. 1997.
7. L. Khazanovich, Shiraz D. Tayabji and M. I. Darter, "Backcalculation of Layer Parameters for LTPP Test Sections, Volume I : Slab on Elastic Solid and Slab on Dense-Liquid Foundation Analysis of Rigid Pavements," Technical Report FHWA-RD-00-086, FHWA, U.S. 2001.

회비 납입 안내

우리 학회의 정관에 의하여 3월부터 새로운 회계연도가 시작됩니다. 지난 해에 입회한 정회원 및 특별회원은 연회비를 납부하여 주시기 바랍니다.

학회 정관(제9조)에 의하여 연회비를 1년 이상 납부하지 않은 회원은 회원자격이 정지되어 학회지의 발송을 중지합니다.

§ 납부할 곳 : 하나은행 224-910004-51504 한국도로포장공학회

(가입회원명으로 입금 요망)

- 학회 사무국 -