

도로함몰 위험도 평가를 위한 실험형 포장가속시험 기초 연구

A Preliminary Study for Assessing the Risk of Road Collapse Using Accelerated Pavement Testing

박 희 문	Park, Hee Mun	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 연구위원 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : hpark@kict.re.kr)
김 연 태	Kim, Yeon Tae	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 신진연구원 (E-mail : kyt@kict.re.kr)
최 지 영	Choi, Ji Young	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 수석연구원 (E-mail : legion@kict.re.kr)
김 기 현	Kim, Ki Hyun	정회원 · 한국건설기술연구원 국가건설기준센터 수석연구원 (E-mail : kihyun@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The objective of this study is to evaluate the effect of size and depth of cavities on the pavement failure using the full-scale accelerated pavement testing.

METHODS : A full-scale testbed was constructed by installing the artificial cavities at a depth of 0.3 m and 0.7 m from the pavement surface for accelerated pavement testing. The cavities were made of ice with a dimension of 0.5 m*0.5 m*0.3 m, and the thickness of asphalt and base layer were 0.2 m and 0.3 m, respectively. The ground penetrating radar and endoscope testing were conducted to determine the shape and location of cavities. The falling weight deflectometer testing was also performed on the cavity and intact sections to estimate the difference of structural capacity between the two sections. A wheel loading of 80 kN was applied on the pavement section with a speed of 10 km/h in accelerated pavement testing. The permanent deformation was measured periodically at a given number of repetitions. The correlation between the depth and size of cavities and pavement failure was investigated using the accelerated pavement testing results.

RESULTS : It is found from FWD testing that the center deflection of cavity section is 10% greater than that of the intact section, indicating the 25% reduction of modulus in subbase layer due to the occurrence of the cavity. The measured permanent deformation of the intact section is approximately 10 mm at 90,000 load repetitions. However, for a cavity section of 0.7 m depth, a permanent deformation of 30 mm was measured at 90,000 load repetitions, which is three times greater than that of the intact section. At cavity section of 0.3 m, the permanent deformation reached up to approximately 90 mm and an elliptical hole occurred at pavement surface after testing.

CONCLUSIONS : This study is aimed at determining the pavement failure mechanism due to the occurrence of cavities under the pavement using accelerated pavement testing. In the future, the accelerated pavement testing will be conducted at a pavement section with different depths and sizes of cavities. Test results will be utilized to establish the criteria of risk in road collapse based on the various conditions.

Keywords

Accelerated Pavement Test, Cavity, Testbed, Permanent Deformation

Corresponding Author : Park, Hee Mun, Research Fellow
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology,
283, Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223,
Korea
Tel : +82.31.910.0323 Fax : +82.31.910.0161
E-mail : hpark@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Sep. 08, 2016 Revised Oct. 04, 2016 Accepted Oct. 04, 2016

1. 서론

최근 도심지에서 빈번하게 발생하는 도로함몰은 도로 이용자의 안전을 위협하고 국민의 불안감을 증대시키고 있는 실정이다. 이에 따라 이러한 도로함몰의 발생 원인과 메커니즘을 규명하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 서울시에서는 다채널 지표투과레이더 (Ground Penetrating Radar, GPR)를 이용하여 도심지 주요도로 구간에 대하여 도로동공 탐사를 수행하고 있다. 탐사 결과, 서울시에서 발생하는 동공의 위치는 아스팔트 포장 하부 또는 보조기층 상부(지표면으로부터 0.2~0.4m 위치)에서 주로 발생하는 것으로 나타났다(서울특별시, 2005).

도로함몰의 발생 시점은 도로동공의 크기 및 위치, 교통량, 토질조건, 환경적 요인에 의하여 결정된다. 도로동공이 많이 발생하는 일본의 경우에는 도로동공의 폭과 동공 토피에 따라 도로함몰 위험도를 평가하고 있으며, 구체적인 기준은 Table 1에 제시하였다. 일본의 도로함몰 위험도 평가 기준은 과학적 분석과 시험에 근거하기 보다는 경험에 의하여 결정된 기준이다. 따라서 도로함몰 위험도 평가에 필요한 정량적 기준 정립이 필요하다.

Table 1. Risk Criteria of Road Collapse in Japan (Seoul, 2005)

Risk rank	Risk criteria	Action plan
A	Less than 0.3m depth or more than 0.3m depth with cavity width more than 1.5m	Urgent repair
B	More than 0.3m depth with cavity width 0.5~1.5m and refer the graph in case of cavity width more than 1.5m	Normal repair (Repair before wet season)
C	More than 0.3m depth with cavity width less than 0.5m and refer graph in case of cavity width more than 0.5m	Regular monitoring

기존의 도로함몰 발생 원인 및 메커니즘 규명 연구는 주로 실내시험 및 수치해석에 집중되어 있다. 실내시험과 수치해석의 주요 목적은 도로함몰 발생 모형의 개발이다. 개발된 도로함몰 발생 모형은 현장조건을 고려한 실험을 통한 검증이 반드시 필요하다. 본 연구의 목적은 실험 포장 가속시험(Accelerated Pavement Tester, APT)을 통하여 도로함몰 발생 모형을 검증하고 도로함몰 위험도를 평가하고자 한다.

본 연구에서는 도로동공 크기와 위치에 따른 도로함몰

발생 시점 및 함몰 시 하중재하 횟수를 평가하기 위하여 실험 포장 가속시험을 수행하였다. 본 연구결과는 동공발생에 따른 도로함몰의 위험도를 평가하여 추후 보수시기와 공법 결정에 주요한 자료로 사용될 것이다.

2. 테스트베드 구축

도로동공과 포장파손의 상관관계를 파악하고 도로함몰 발생 모형을 검증하기 위해 한국건설기술연구원 일산본원에 포장가속시험을 위한 실험형 테스트베드를 구축하였다. 포장가속시험을 위한 테스트베드의 평면도와 단면도는 Fig. 1과 2에 나타나 있다. 테스트베드의 단면은 길이 10m, 폭 3m이며 보조기층의 두께는 50cm, 아스팔트층 두께는 20cm로 구성되어 있다. 본 테스트베드는 2개의 Section으로 구분하였으며 이는 Section별로 다른 깊이에 모의동공을 매설하기 위함이다. 매설한 모의동공의 크기는 50cm×50cm×30cm이며, Section 1에는 지표면으로부터 70cm 하부에, Section 2에는 지표면으로부터 30cm 하부에 각각 매설하였다. 여기서, Section 1은 Table 1에 나타난 바와 같이 일본 도로함몰 위험도 평가 기준 B등급, Section 2는 A등급에 해당한다. Section별로 동공매설 구간은 전구간으로 하중재하에 따른 포장층의 거동을 측정하고 동공 매설구간의 포장 파손량을 상호 비교하기 위해 설치하였다.

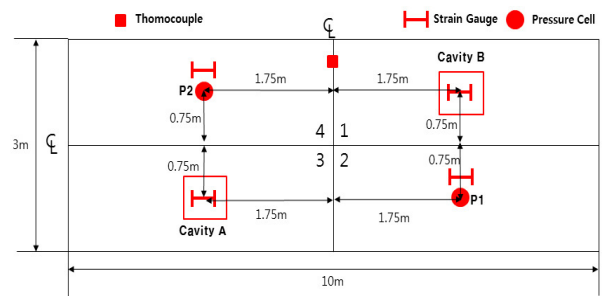


Fig. 1 Plane View of APT Testbed

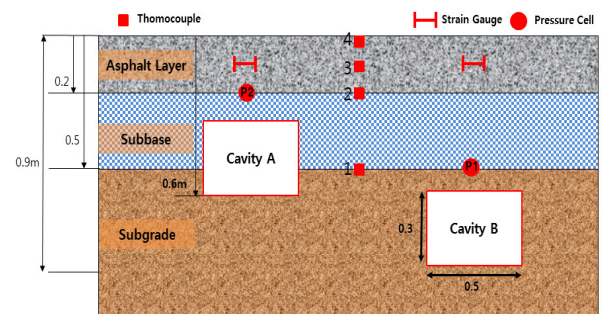


Fig. 2 Sectional View of APT Testbed

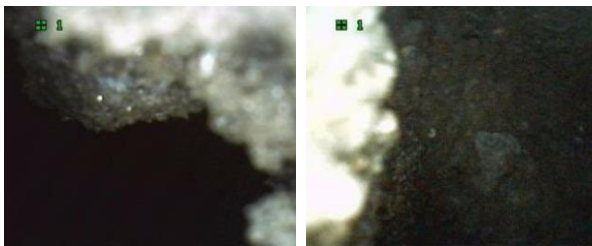
테스트베드 구축 시 동공 생성 유무를 직접 확인하기 위해 내시경을 활용하였으며, 이를 위해 내시경 관을 동공위치에 매립하였다. 또한 포장가속시험 및 FWD (Falling Weight Deflectometer) 재하하중에 따른 도로포장체의 거동을 파악하기 위하여 토압계와 변형률계를 지정된 위치에 매설하였다.

3. 동공생성 평가를 위한 시험

동공 생성 유무 및 위치를 파악하기 위해 다양한 실험을 수행하였다. 직접적인 실험으로는 내시경 삽입을 통한 모의동공 상태를 관찰하였으며, 비파괴 시험으로는 지표투과레이더와 FWD 장비를 사용하여 동공 생성 여부를 확인하였다.

3.1. 내시경 조사

포장층 하부에 동공이 생성되었을 때, 이를 파악하기 위한 방법 중 가장 좋은 방법은 천공을 통한 내시경 조사이다. 그러나 포장가속시험 전 천공을 할 경우 포장체의 내구성에 영향을 미치며 천공 시 물의 침투가 발생할 수 있다. 그러한 이유로 사전에 내시경 삽입을 위한 관을 매설하였으며, 매설관을 통해 내시경을 삽입하여 Fig. 3과 같이 동공이 생성된 것을 직접 관찰할 수 있었다. 그러나 내시경 사용은 조명의 밝기 및 광각렌즈의 왜곡에 의하여 동공의 형상 및 크기를 측정하기에 어려움이 있다.



(a) Upper Side of Cavity (b) Side of Cavity

Fig. 3 Endoscope View in the Cavity

3.2. GPR 시험

국내에서는 육안조사가 어려운 구간의 동공 파악을 위해 비파괴 시험(Non-Destructive Test)을 수행하며, 대표적인 비파괴 시험으로는 전기비저항 탐사와 지표투과레이더 시험이 있다. 본 연구에서는 포장 하부 깊이 0.5m~1.0m 범위에서 가로×세로×높이 50cm의 동공을 찾는데 적합한 중심주파수인 500MHz의 안테나

로 Ground-Coupled 방식의 GPR 시험을 수행하였다 (Kim et al, 2016).

GPR 시험 결과, 동공이 매설되어 있는 위치에서 Fig 4와 같이 도로동공 매설위치에서 뚜렷한 포물선 형상이 나타나는 것으로 파악되었다. 이를 통해 포장가속시험을 수행하기 전 포장하부에 동공이 형성된 것으로 판단하였다.

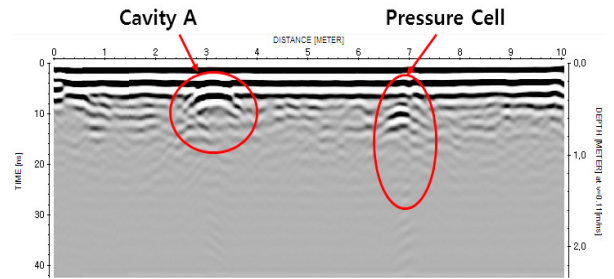


Fig. 4 GPR Test Result (B-Scan)

3.3. FWD 시험

FWD 장비는 포장의 구조적 지지력을 측정하는 장비로서 하중을 자유낙하시켜, 그 때의 충격 하중에 의한 도로 포장체의 처짐량을 측정하는 장비이다(Ulliditz et al, 1995). 본 연구에서는 GPR 측정과 동시에 FWD 시험을 수행하였으며, 포장 하부에 동공이 존재할 때의 유한요소해석 시 재료 물성으로 활용하기 위한 각 층별 탄성계수를 산정하였다.

3.3.1. 동공 유무에 따른 도로포장체 구조적 지지력 평가

본 구간에서는 시험 중 포장 함몰을 우려하여 24kN의 비교적 약한 재하하중을 사용하였으며, 시험 시 대기온도는 약 20℃이다. Fig. 5는 건전구간과 동공구간에서 측정된 센서의 위치별 FWD 처짐값을 나타내었다.

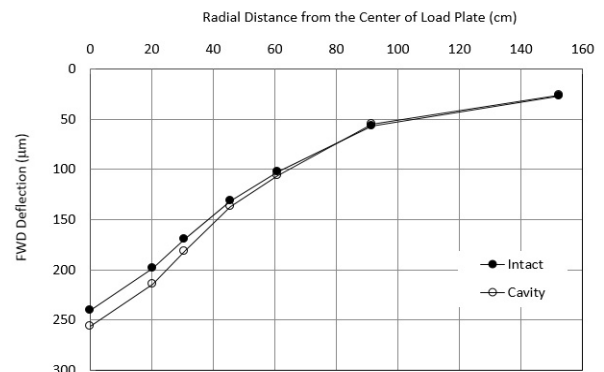


Fig. 5 Comparison of FWD Deflection Basin Obtained from Intact and Cavity Sections

시험결과, 동공구간의 경우 건전구간 대비 중심 처짐값이 약 10% 정도 크게 나타났으며 양구간에서의 D6센서 처짐값은 동일하여 노상층 지지력은 유사한 것으로 판단되었다. 따라서 중심 처짐값의 약 10% 차이는 보조기층에서의 동공유무에 따른 지지력 차이에 의하여 발생한 것으로 판단된다.

동공 및 건전구간의 도로포장체 지지력을 평가하기 위하여 한국건설기술연구원에서 개발한 역산프로그램을 이용하여 포장층별 탄성계수를 Table 2와 같이 산정하였다. 아스팔트층과 노상층의 탄성계수는 양 구간에서 유사한 것으로 나타났으나 동공구간 보조기층의 탄성계수가 건전구간 대비 약 25% 낮은 것으로 파악되었다. 이러한 동공구간 보조기층에서의 탄성계수 저감은 보조기층에 매설된 모의동공에 의한 것으로 사료된다.

Table 2. Results of FWD Backcalculated Modulus in Cavity and Intact Sections

Layer	Cavity section			Intact section		
	Mean (MPa)	SD* (MPa)	COV** (%)	Mean (MPa)	SD (MPa)	COV (%)
Asphalt	2742.9	464.9	16.9	2680.1	549.3	20.5
Subbase	105.1	2.4	2.3	129.0	29.4	22.8
Subgrade	60.0	5.2	8.7	62.5	2.8	4.5

SD* : Standard Deviation

COV** : Coefficient of Variation

4. 포장가속시험 수행

4.1. 포장가속시험장비 소개

포장가속시험은 수개월 내에 포장의 장기 공용성을 검증하는 시험으로서 신재료나 신공법의 포장 적용능력을 평가할 때 주로 사용된다(Kwak et al, 2009). 또한, 본 연구내용과 같이 안전상 실제 도로에서 수행할 수 없

Table 3. Specification of Accelerated Pavement Tester

List	Contents	Note
Dimension	Length 23m, Height 3.3m, Width 3.06m	-
Load capacity	Max 12.5ton (Dual tire)	Possible to use the super single tire
Speed	Max 12km/h	Pavement distress may decrease with increase speed more than maximum
Testing area	Loaded length : 8.3m, Loaded width : 0.84m Effective length(constant load) : 6m	Wandering option

는 파손 예측 관련 실험에도 적합한 시험장비이다. 한국건설기술연구원에서 보유하고 있는 포장가속시험장비 (Heavy Vehicle Simulator, HVS)의 제원은 Table 3과 같다(Dynatest, 2012).

4.2. 응력 및 변형률 테스트

본 논문에서는 포장가속 하중재하에 따른 아스팔트 내부의 변형률과 보조기층 및 노상층 상부의 응력을 주기적으로 측정하였다. 노상층 상부에 위치한 토압계의 데이터 분석결과 Fig. 6과 같이 약 70kPa의 응력이 발생하는 것으로 나타났으며, 아스팔트층 중앙부의 인장변형률은 Fig. 7과 같이 약 4microns로 파악되었다. 본 시험에서 아스팔트층의 인장 변형률 값이 매우 낮은 이유는 변형률계가 아스팔트층 중앙부에 위치하였기 때문에 발생한 것으로 사료된다. 향후 아스팔트층 하부에 변형률계를 매설하여 포장층 하부의 인장응력을 측정할 예정이다.

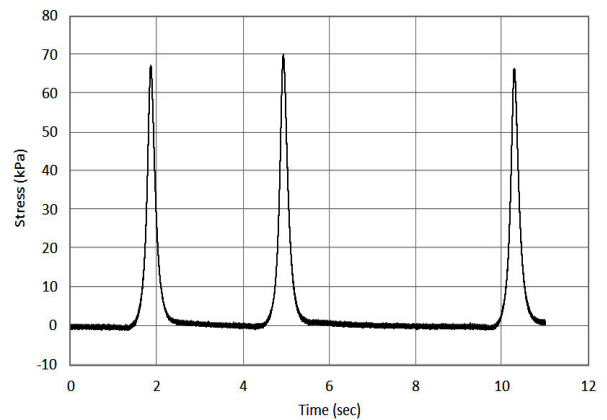


Fig. 6 Change of Compressive Stress Values with Elapsed Time Measured on Top of Subgrade Layer (APT Load Application)

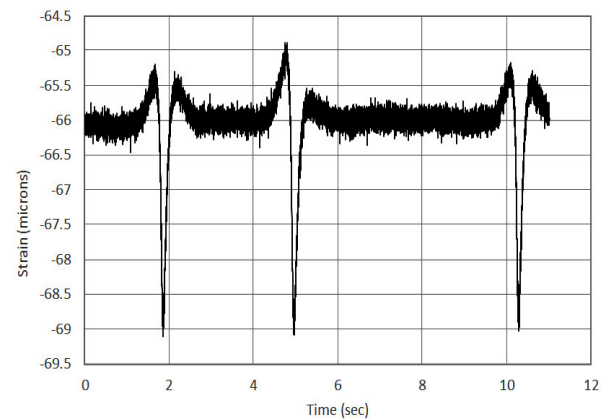


Fig. 7 Change of Tensile Strain Values with Elapsed Time Measured in the Middle of Asphalt Layer (APT Load Application)

4.3. 포장가속시험 결과

본 논문에서는 앞서 소개한 포장가속시험기 운영을 통해 건전구간 및 동공매설구간의 포장상태 및 소성변형량을 비교하였다. 하중은 8ton의 축하중을 가하였으며, 운행속도는 10km/h를 유지하였다. 동공 매설구간 도로함몰 과정을 자세히 관찰하고자 촬영장비를 포장가속시험기 상단과 하단에 각각 설치하여 포장가속시험 운행에 따른 포장단면 변화를 기록하였다. 또한, 운행 횟수별 소성변형량 측정을 통해 처짐값의 추이를 Fig. 8~10에 나타내었다. 건전구간에서는 하중재하횟수 90,000회에서 최대 처짐점에서의 소성변형이 약 10mm 정도 일어났으나 동공 매설 깊이 70mm의 경우 최대 처짐점에서의 소성변형이 약 30mm 정도 일어나 약 3배의 차이가 났다. 동공 매설 깊이 30cm의 경우 Fig. 10과 같이 32,000회에서 포장가속시험기를 운행할 수 없는 정도의 소성변형이 발생하여 장비가동을 중단하였다. 가동 중단 당시 최대처짐은 약 90mm로 동공 매설깊이 70cm에서 동일 운행 횟수에서의 차이는 약 20배 정도로 파악되어 동공위치가 표면에 가까울수록 도로함몰이 빠르게 형성되는 것으로 파악되었다. 또

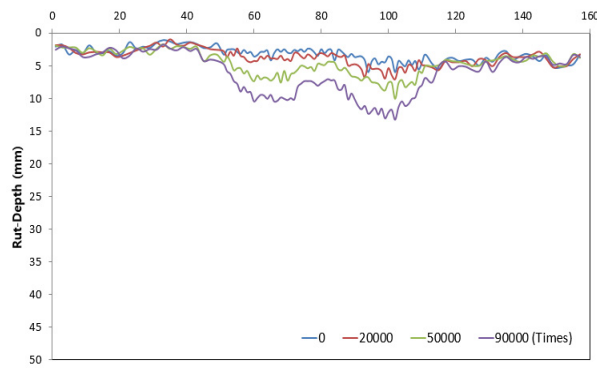


Fig. 8 Change of Rut Depth Profile with Number of Load Applications in Intact Section

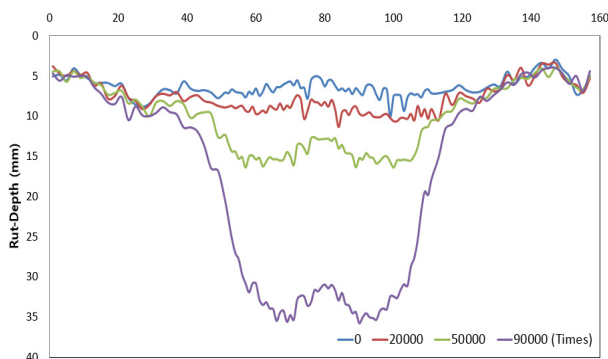


Fig. 9 Change of Rut Depth Profile with Number of Load Applications in Cavity B Section

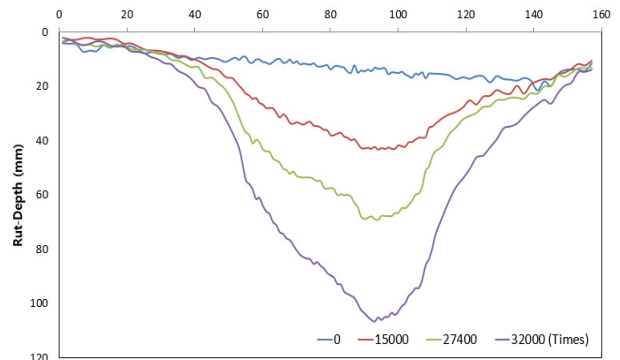


Fig. 10 Change of Rut Depth Profile with Number of Load Applications in Cavity A Section



Fig 11. Pavement Collapse in Cavity A

한, 건전구간의 경우 타이어 모양과 비슷하게 W자 형태로 그래프가 그려지지만 동공구간의 경우 Fig. 10과 같이 U자 형태로 포장층 전체가 침하하는 특징을 보였다. 동공 A의 경우, 실험이 완료된 지 약 1주 후 Fig. 11과 같이 실제로 도로함몰이 발생하였다. 포장의 함몰 정도는 삽입한 얼음의 크기와 유사한 가로×세로×높이 약 50cm 정도로 동공의 크기만큼 함몰되는 것으로 파악되었다.

위 결과를 토대로 구간 별 하중재하횟수에 따른 소성변형량 그래프를 Fig. 12와 같이 정리하였다. 일반적으로 소성변형량이 25mm 이상일 경우 도로포장이 파괴되었다고 가정하는데 이를 기준으로 하여 본 논문에서 수행한 동공매설 구간의 파괴 예상 운행 횟수는 매설 깊이 30cm(동공 A)의 경우 13,000회, 매설깊이 70cm(동공 B)의 경우 80,000회로 약 6배 이상 빨리 파괴가 일어날 것으로 판단되었다.

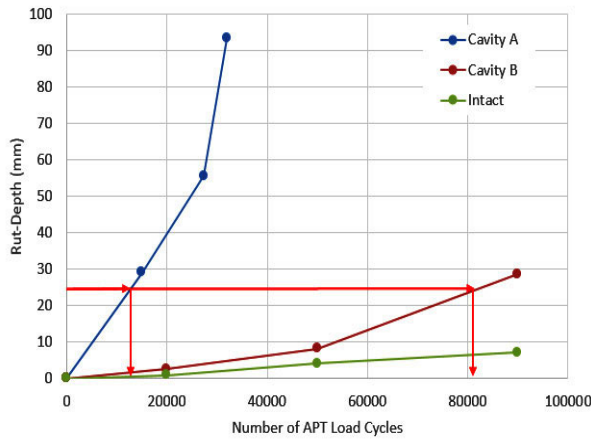


Fig. 12 Rut-Depth Measured from Number of APT Load Cycles in Intact and Cavity Sections

향후 본 연구 결과를 바탕으로 다양한 동공 깊이 및 크기에 대한 실험형 포장가속시험을 수행할 것이다. 이를 통해 얻어진 결과로 동공이 도로파손으로 진행되는 시간을 예측하여, 도로함몰 위험도 평가 기준 정립을 위한 학술적, 실험적 근거를 마련할 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 실험형 포장가속시험을 통해 포장하부 동공유무에 따라 포장체의 변형 및 파괴 메커니즘을 파악하였다. 이는 도로함몰 위험도 평가를 위한 기초 연구이며, 다음 결과를 토대로 향후 테스트베드 구축과 포장가속시험을 수행하기 위한 자료로 활용할 예정이다.

1. 현재 국내에서 도로함몰 위험도 등급 기준 제시를 위해 참고한 일본의 위험도 산정기준을 따라 위험도 등급 A, B에 해당하는 테스트베드를 구축하였다.
2. 내시경 테스트를 통해 동공의 생성유무를 직접 확인하였고, GPR과 FWD 장비를 통해 간접적으로 동공의 생성을 확인하였다.
3. 특히, FWD 테스트를 통해 테스트베드 구축 시 설치한 변형률계와 토압계의 올바른 데이터 획득여부를 확인할 수 있었으며, 변형률계의 매설위치는 포

장층의 아래에 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단하였다.

4. 포장가속시험 결과 동공을 매설하지 않은 건전구간과 동공을 매설한 구간의 소성변형 차이가 확연히 달랐으며, 동공 매설깊이 30cm의 경우가 동공 매설깊이 70cm의 경우보다 약 6배 정도 빨리 파괴가 일어났다.
5. 동공구간의 도로포장체 지지력을 FWD 시험으로 평가한 결과, 동공구간 보조기층의 탄성계수가 건전구간 대비 약 25% 낮은 것으로 파악되었으며, 이러한 저감효과는 보조기층에 매설된 동공에 의한 것으로 판단된다.
6. 향후에 다양한 깊이와 크기의 동공을 테스트베드에 구축한 후 포장가속시험을 수행하여 도로함몰 위험도 평가를 위한 정량적 기준을 정립할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/교통물류연구개발사업의 연구비지원(과제번호 16TLRP-C099510-02)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Dynatest, 2012. CSIR Heavy Vehicle Simulator(HVS) Mark VI Manual.
- Kim, Yeon Tae, Kim, Booil, Kim, Je Won, Park, Hee Mun. 2016. Determining the Optimal Frequency of Ground Penetrating Radar for Detecting Voids in Pavements, International Journal of Highway Engineering, Vol. 18, No. 2. 37-42.
- Kwak, Byoung Seok, Suh, Young Chan, Song, Chul Young, Kim, Ju Won., 2009. Evaluation of the Temperature Drop Effect and the Rutting Resistance of Moisture Retaining-Porous Asphalt Pavement Using Accelerated Pavement Testing, International Journal of Highway Engineering, Vol. 11, No. 3. 97-109.
- Seoul Metropolitan Government, 2005. Manual for Management Policy of Road Collapse.
- Ullidtz, Coetzee, N. F. Analytical Procedures in Nondestructive Testing Pavement Evaluation, Transportation Research Record 1482, pp. 61-78. 1995.