

다단계 FWD 하중을 이용한 블록포장의 비선형 거동 분석

An Analysis on the Nonlinear Behavior of Block Pavements using Multi-Load Level Falling Weight Deflectometer Testing

박 희 문 Park, Hee Mun
김 연 태 Kim, Yeon Tae
이 수 형 Lee, Su Hyung

정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 연구위원 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : hpark@kict.re.kr)
정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 신진연구원 (E-mail : kyt@kict.re.kr)
정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 수석연구원 · 공학박사 (E-mail : shlee1@kict.re.kr)

ABSTRACT

OBJECTIVES : The objective of this study is to analyze the nonlinear behavior of block pavements using multi-load level falling weight deflectometer (FWD) deflections.

METHODS : Recently, block pavements are employed not only in sidewalks, but also in roadways. For the application of block pavements in roadways, the structural capacities of subbase and subgrade are important factors that support the carry traffic load. Multi-load level FWD testing was conducted on block pavements to analyze their nonlinear behavior. The deflection ratio due to the increase in load was analyzed to estimate the nonlinearity of block pavements. Finite element method with nonlinear soil model was applied to simulate the actual nonlinear behavior of the block pavement under different levels of load.

RESULTS : The results of the FWD testing show that the center deflections in block pavements are approximately ten times greater than that in asphalt pavements. The deflection ratios of the block pavement due to the increase in the load range from 1.2 to 1.5, indicating that the deflection increased by 20~50%. The material coefficients of the nonlinear soil model were determined by comparing the measured deflections with the predicted deflections using the finite element method.

CONCLUSIONS : In this study, the nonlinear behavior of block pavements was reviewed using multi-load level FWD testing. The deflection ratio proposed in this study can estimate the nonlinearity of block pavements. The use of nonlinear soil model in subbase and subgrade increases the accuracy of predicting deflections in finite element method.

Keywords

Block Pavement, Falling Weight Deflectometer, ILLIPAVE, Finite Element Method

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 Aug. 02, 2016 Revised Nov. 30, 2016 Accepted Nov. 30, 2016

1. 서론

최근 블록포장은 보도부에서 저속 이면도로의 차도부로 확장하여 적용되고 있는 추세이다. 국외에서는 블록포장의 차도부 설치에 필요한 블록포장 시스템 설계 기준을 제정하여 차도부 적용에 따른 포장파손을 최소화

하고 있다. 블록포장은 차량이 통과하기 때문에 블록자체의 강도도 중요하지만 블록하부의 보조기층 및 노상층의 지지력 확보 또한 매우 중요하다. 현재 포장구조체의 상태를 평가하는 비파괴시험장치로 FWD(Falling Weight Deflectometer)가 널리 이용되고 있다. 이는 포장의 구조적 지지력 및 적정성을 측정하는 장비로서

하중을 자유 낙하시켜 그 때의 충격하중에 의한 포장체의 처짐량을 측정하는 장비이다. FWD에 의한 충격하중 방식은 실제 교통 하중과 유사하고 이동성이 우수하여 현재까지 개발된 포장 지지력 측정 장비 중 가장 우수한 장비로 평가 받고 있다(Ullidtz et al. 1995). 본 연구에서는 블록포장과 차도부 포장의 FWD 처짐값의 특성을 분석하여 블록포장의 구조적 지지력을 평가하였다. 그림 1은 본 연구에 사용된 한국건설기술연구원서 보유하고 있는 KUAB FWD장비를 나타내고 있다. 또한 FWD 하중을 다단계로 재하하여 블록포장에서 발생하는 비선형성을 FWD 처짐비를 산정하여 비교하였다. 블록포장의 비선형성을 모사하기 위하여 비선형 토질 모델을 접목한 유한요소해석을 수행하여 모델의 계수값을 산정하였다. 유한요소해석으로 산정된 표면처짐은 실제 현장에서 측정된 FWD 처짐값과 상대비교를 수행하여 정확도를 검증하였다.



Fig. 1 Falling Weight Deflectometer (FWD)

2. 블록포장의 FWD 처짐곡선 특성

블록포장의 구조적 지지력을 평가하기 위하여 산업단지 공원부지 내에 위치한 블록포장 2개 구간에서 FWD 시험을 수행하였다. 블록포장 구간별 총 10개 지점에 대하여 25, 40, 70kN 하중을 재하하여 하중재하 중심으로부터 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1500mm에 위치한 지오폰을 이용하여 표면에서의 처짐값을 측정하였다. 또한 블록포장과와의 상대적 비교를 위하여 본 구간과 인접한 차도부에서도 동일한 지점에서 본 시험을 수행하였다. 블록포장에서 블록의 두께는 60mm이며 300mm 보조기층 상부에 설치하였다. 차도부는 아스팔트 포장으로 아스팔트층은 200mm, 보조기층은 300mm로 시공되어 있다. Fig. 2와 3은 블록포장과 차도구간에서 측정된 FWD 처짐곡선을 나타내고 있다. 블록포장의 중심처짐값은 차도구간에 대비하여 하중크

기와 상관없이 약 10배 이상 크게 나타나고 있다. 블록포장의 경우에는 하중중심에서부터 600mm 이상부터는 표면처짐이 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 하중재하에 따른 포장층 내부의 응력이 600mm 이내에 집중되어 보조기층과 노상에서 응력이 높아지게 된다. 이러한 현상은 주로 표층의 두께가 얇거나 표층재료의 강성이 낮거나 보조기층 및 노상의 지지력이 낮은 경우에 주로 발생한다. 특히 블록포장의 경우에는 블록의 크기가 작고 블록간의 연결이 되지 않으며, 하중 전달 및 분산이 되지 않아 하중이 직접적으로 보조기층에 전달되기 때문에 이러한 현상이 발생하는 것으로 판단된다. 하중크기가 증가하게 되면 블록포장의 경우 포장층 하부에서 응력값이 증가하게 되며 이에 따라 보조기층 및 노상층의 재료는 응력에 따라 강성이 변화하는 비선형 거동을 하게 된다.

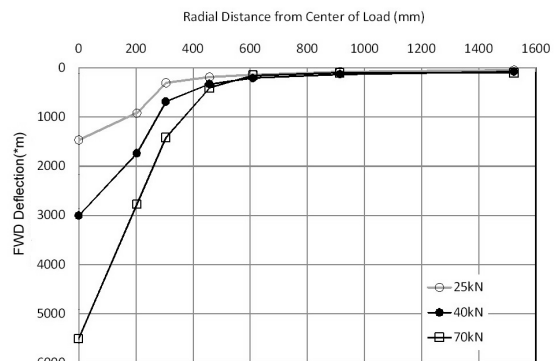


Fig. 2 Deflection Basin Measured from Block Pavement with Different Load Levels

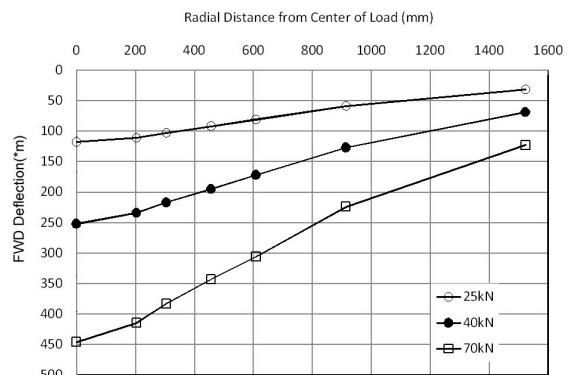


Fig. 3 Deflection Basin Measured from Asphalt Pavement with Different Load Levels

3. 블록포장의 비선형 거동 분석

블록포장 하부층의 응력증가에 따른 포장층의 비선형 거동을 분석하기 위하여 다단계 하중 FWD 처짐값을

분석하였다. 다단계 하중으로 측정된 FWD 중심 표면 처짐값(D_0)은 하중크기(P)로 나누어 Eq.(1) 같이 정규화하였다. 다음으로 도로포장체의 비선형 정도를 결정하기 위하여 70kN 하중에서 정규화된 처짐값을 25kN 하중의 정규화 처짐값으로 나누어 다음 Eq. (2)와 같이 FWD 처짐비(Deflection Ratio)를 계산하였다.

$$Normalized D_0 = D_0/P \quad (1)$$

$$Deflection Ratio = \frac{Normalized D_0(40 \text{ or } 70kN)}{Normalized D_0(25kN)} \quad (2)$$

Fig. 4는 산업단지 시험구간 지점별 블록포장 2개소 및 차도부 구간의 FWD 처짐비를 나타내고 있다. 여기서 처짐비 1은 하중크기에 따라 포장체의 처짐값이 선형적으로 증가하는 거동을 의미하며, 처짐비가 1 이상인 경우는 하중크기 증가보다 포장체의 처짐이 더 많이 발생하는 비선형 거동을 의미한다. 보도부 블록포장의 경우, 차량의 통과가 불가하기 때문에 표면에서 재하되는 하중이 매우 작을 것이나 블록포장을 차도부에 적용할 경우에는 하중이 급격히 증가하게 되며 이에 따라 포

Table 1. Average Value, Standard Deviation, and Coefficient of Variation of Deflection Ratio

Type	Deflection ratio		
	Average value	SD ¹	COV ² (%)
Block pavement 1	1.34	0.10	7.10
Block pavement 2	1.35	0.06	4.09
Road pavement	1.11	0.01	0.74

1) SD: Standard Deviation

2) COV: Coefficient of Variation

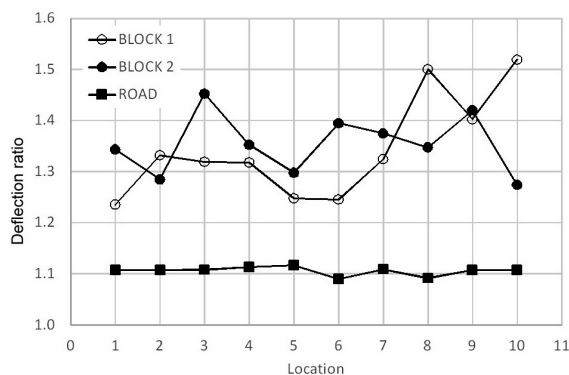


Fig. 4 Deflection Ratio Measured from Different Pavement Type

장의 처짐도 과도하게 발생할 것이다. 본 연구에서 제한한 FWD 처짐비를 통하여 블록포장의 거동을 명확하게 분석하여 향후 블록포장 설계 기준의 기초 자료로 사용이 가능할 것이다.

블록포장의 경우 FWD 처짐비 범위는 1.2~1.5, 평균 1.35이며, 차도부 포장의 경우에는 평균 처짐비가 1.1이다. 즉, 블록포장의 경우 재하하중의 크기가 증가함에 따라 재하하중 대비 약 20~50% 높은 처짐값이 발생하고 있으며 지점별 FWD 처짐비 편차도 높은 편이다. 반면 차도부 포장은 비선형 거동이 약 10% 정도이며, 처짐비 편차도 낮은 것을 알 수 있다. 블록포장의 변동계수는 블록포장별로 각 4와 7%이며 차도부의 변동계수는 0.7%이다. 일반적으로 포장하부층의 거동은 보조기층 및 노상층의 재료, 다짐도, 함수비 등의 영향을 많이 받고 있다. 블록포장과 차도부 포장에 수습된 보조기층 및 노상층 재료가 동일한 것으로 가정하면 시공 시 블록포장 하부층의 다짐도가 차도부 대비 전반적으로 낮으며 시공품질의 균질성도 낮은 것을 알 수 있다.

4. 블록포장의 유한요소해석

본 연구에서는 다단계 하중재하에 따른 블록포장의 거동을 분석하기 위하여 ILLIPAVE 유한요소 프로그램을 활용하여 블록포장체에 대한 유한요소 해석을 수행하였다.

ILLIPAVE 프로그램은 포장 하부 지반 재료의 비선형 거동을 반영할 수 있도록 구성되어 있다(Hick et al, 1970, Thompson and Robnett 1979). Fig. 5와 같이 하나의 유효중을 축대칭으로 적용하여 비선형 경계값을 유한요소로 해석한다. 일반적으로 입자로 구성된 자갈층

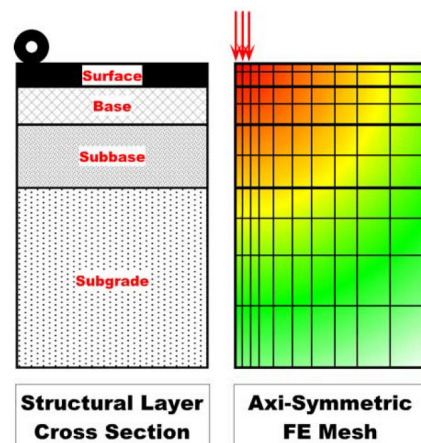


Fig. 5 Example Sketch of Axisymmetric FE Mesh (ILLIPAVE Manual, 2003)

이나 모래 지반의 응력의존성(Stress-Dependent)을 확인하기 위해 Mohr-Coulomb 의 '파괴기준'을 포함한 이론을 반영하였다(Thompson et al., 1998, Yoder and Witczak 1975).

앞서 언급한 재료에 가해지는 주응력의 합(θ)이 증가할수록 회복탄성계수(M_R)는 증가하는데 이를 Stress hardening(Fig. 6)이라 하며, 축차응력이 증가함에 따라 회복탄성계수가 감소하는 것을 Stress-Softening(Fig. 7)이라고 한다. 이러한 현상을 모사하기 위하여 ILLIPAVE에서는 높은 축차응력과 삼축압축 상태에서 가해지는 상태에서 토질의 거동을 경험적인 함수를 반영하여 Eq. (3)과 같이 수정된 함수를 사용하였다(Uzan, 1985).

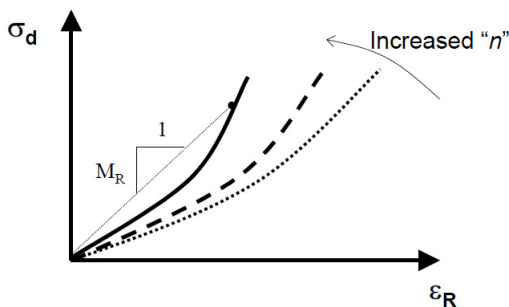


Fig. 6 Stress-Hardening Models (ILLIPAVE Manual, 2003)

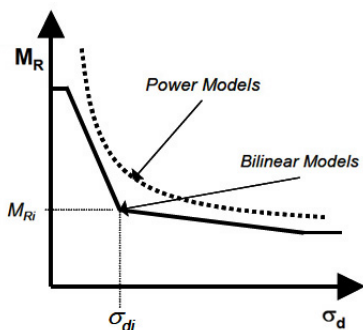


Fig. 7 Stress-Softening Models (ILLIPAVE Manual, 2003)

$$M_R = k_1(\theta)^{k_2}(\tau_{oct})^{k_3} \quad (3)$$

여기서, θ 는 주응력의 합, τ_{oct} 는 축차응력, k_1, k_2, k_3 는 모델상수를 의미한다.

블록포장의 단면 구성은 본 구간에 시공된 단면 구성과 유사하도록 블록, 보조기층, 노상층으로 구성하였다. 블록재료는 선형탄성거동을 한다고 가정하였으며, 보조기층과 노상재료는 비선형 거동을 분석하기 위하여

Universal Soil 모델을 유한요소해석에 적용하였다(Yau and Von Quintus, 2002). 본 모델에 따르면 보조기층과 노상층 재료의 탄성계수는 응력수준(주응력과 축차응력)에 의하여 결정된다.

본 구간의 블록 단면두께는 60mm이며, 보조기층의 두께는 200mm이고, 블록은 상호 연결되어 있는 연속체로 가정하였다. 블록의 탄성계수는 1,000MPa로 가정하였으며, 보조기층과 노상층은 동일 재료로 가정하여 동일한 모델 상수값을 사용하기로 하였다. 교통하중 접지면은 원형으로 가정하였으며 각각의 하중이 152.4mm 반지름의 원형 접지면에 적용하도록 하였다.

블록포장에서 하중크기 증가에 따른 포장체의 비선형 거동을 분석하기 위하여 토질 비선형 모델의 k3값의 변화에 따른 처짐비의 변화를 검토하였다. Fig. 8은 k3값 변화에 따른 처짐비 변화를 40kN과 70kN에 대하여 나타내고 있다. 여기서 k1값은 42MPa, k2값은 0.1로 고정하고 k3값만 변화시켜 유한요소해석을 수행하였다. 그림에서 보는 바와 같이 k3값이 증가함에 따라 처짐비는 선형으로 감소하고 있으며, 40kN 하중보다 70kN 하중에서 처짐비가 크게 나타나고 있다. 주어진 조건에서 k3가 -0.7일 경우, FWD 처짐비는 1.25~1.3 범위이며 이러한 수치는 Table 1에서 제시한 현장 평균 처짐비의 범위와 유사하였다.

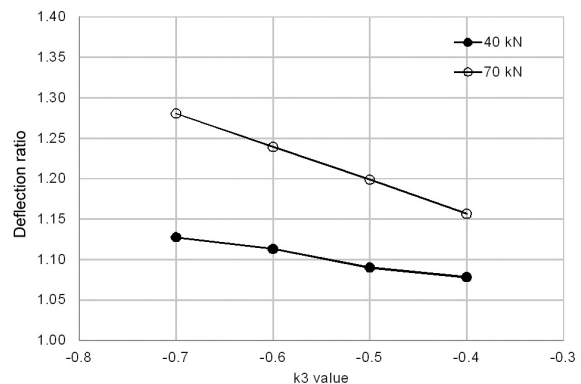


Fig. 8 Effect of K3 Value on the Deflection Ratio ($k_1=42\text{MPa}$, $k_2=0.1$)

Fig. 9는 k2값이 0.1, k3값이 -0.7일 경우, k1값의 변화에 따른 FWD 처짐비의 변화를 나타내고 있다. k1이 증가함에 따라 FWD 처짐비가 증가하는 추세이나 k3의 변화보다는 작은 것을 알 수 있다. 여기서 k1이 12,000일 경우, FWD 처짐비는 1.35로서 현장에서 측정한 평균값과 동일한 것을 알 수 있다.

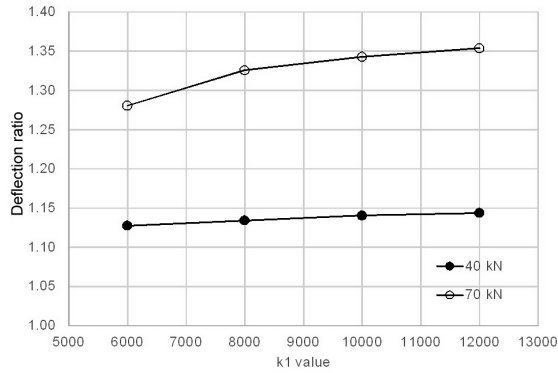


Fig. 9 Effect of k1 Value on the Deflection Ratio (k2=0.1, k2=-0.7)

비선형 토질 모델의 상수를 결정한 후에 유한요소해석을 수행하여 블록포장의 표면에서 발생하는 처짐값을 계산하였다. Fig. 10~12는 현장에서 측정된 블록포장의 처짐값을 최대, 최소값으로 분류하여 센서 위치별 처짐값의 범위를 나타내고 있다. 현장 측정결과와 유한요소 해석결과를 비교한 결과, 하중크기와 상관없이 계산된 처짐값이 500mm까지의 측정된 현장 계측값의 범위 내에 있음을 알 수 있다. 500mm 이상에 위치한 센서에

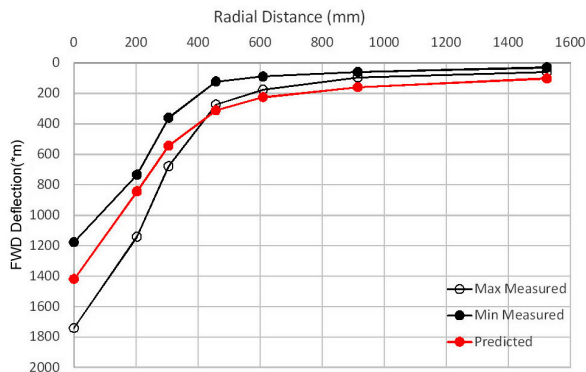


Fig. 10 Comparison of Measured and Predicted Deflections with 25kN of Load Level

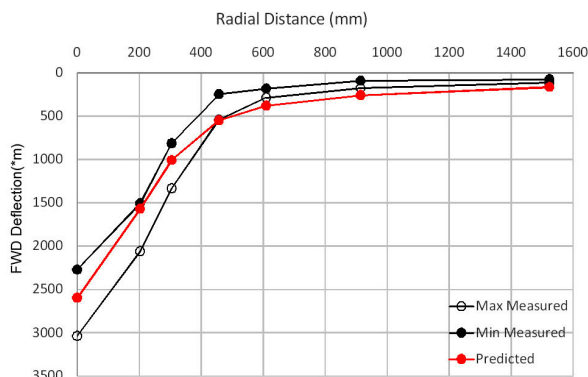


Fig. 11 Comparison of Measured and Predicted Deflections with 40kN of Load Level

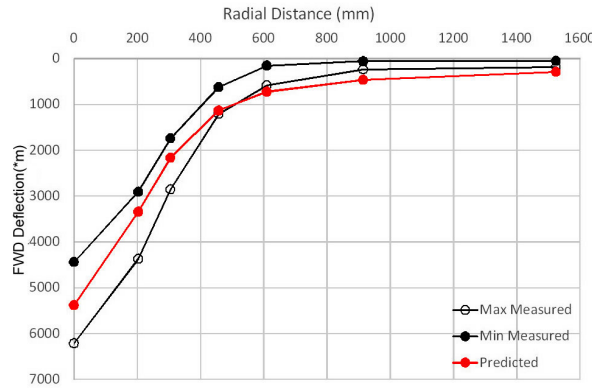


Fig. 12 Comparison of Measured and Predicted Deflections with 70kN of Load Level

서 측정된 처짐값은 유한요소해석 처짐값보다 작은 것을 알 수 있다. 이는 블록포장의 블록간의 단절에 의한 응력의 분포가 낮아서 발생하는 현상으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 블록포장의 구조적 지지력 평가를 위해 블록포장 2개 구간과 상대비교를 위한 인접 차도부 1개 구간에 대해 FWD 시험을 수행하였다. 또한, 블록포장의 비선형 거동 분석을 통해 FWD 처짐비를 계산하였으며, 유한요소해석을 통해 데이터를 검증하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 블록포장의 FWD 처짐곡선 특성을 살펴보면 하중재하 지점이 멀어질수록 처짐값의 차이가 줄어드는 경향을 보이고, 하중재하에 따른 포장층 내부의 응력이 600mm 이내에 집중되어 있는 것으로 나타났다.
2. 블록포장과의 비교를 위해 수행한 차도부의 결과값과 비교했을 때, 약 10배 이상의 처짐이 블록포장에서 발생하는 것으로 나타났으며, 차도부와 달리 블록포장은 비선형 거동을 보이는 것을 확인하였다.
3. 포장체에 재하된 하중크기와 처짐값 간의 비를 나타내는 처짐비를 통하여 포장 형식별 처짐비의 편차와 변동계수를 파악하였다. 블록포장의 경우 차도부 대비 처짐비는 약 0.2정도 높게 나왔으며, 편차와 변동계수는 다짐도와 지반 안정도가 낮아 약 5배~10배 정도 차이가 나는 것으로 파악되었다.
4. 다단계 하중재하에 따른 블록포장의 거동을 분석하기 위해 ILLIPAVE를 활용하여 유한요소해석을 수행하였으며, 비선형 거동을 분석하기 위해 Universal Soil Model을 적용하였다. 처짐비가 현장 측정 값과

동일할 때의 계수 값을 구해 이 때의 조건으로 구한 유한요소해석 결과와 비교한 결과, 하중 재하 범위 500mm 까지는 계층값의 범위내에 있는 것으로 확인되었다.

감사의 글

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

REFERENCES

- Franco G. R., Emeritus M. T. ILLIPAVE User's Manual, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2003.
- Hicks, R. G. Factors Influencing the Resilient Properties of Granular Materials. Ph. D. Dissertation, Univ of California, Berkeley. 1970.
- Thompson, M. R. and Robnett, Q. L. Resilient Properties of Subgrade Soils. Transportation Engineering Journal. ASCE. Vol. 105, No. TE1. 1979.
- Thompson, M. R., Tutumluer, E., Bejarano, M.. Granular Material and Soil Moduli - Review of the Literature. COE Report No. 1, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, 1998.
- Ullidtz, Coetzee, N. F. Analytical Procedures in Nondestructive Testing Pavement Evaluation, Transportation Research Record 1482, pp. 61-78. 1995.
- Uzan, J. Characterization of granular materials. Transp. Res. Rec. 1022, Transportation Research Board, Washington, D. C., 52-59. 1985.
- Yau, Amber, and Harold L. Von Quintus, Study of LTPP Laboratory Resilient Modulus Test Data and Response Characteristics, Report No. FHWA-RD-02-051, Federal Highway Administration, U.S.Department of Transportation, Washington,D.C., 2002.
- Yoder, E. and Witczak, M. Principles of Pavement Design, John Wiley & Sons, 1975.