

평판재하시험을 통한 투수 블록포장의 탄성계수 및 상대강도계수 산정

Elastic Modulus and Layer Coefficient of Permeable Block Pavements Based on Plate Load Tests

최 용 진 ¹	Choi, Yong-Jin	오 정 호 ²	Oh, Jeong-Ho
한 신 인 ³	Han, Shin-In	안 재 훈 ⁴	Ahn, Jaehun
신 현 석 ⁵	Shin, Hyun-Suk		

Abstract

Permeable block pavement systems are widely used to relieve the flood and enhance water circulation. However, domestic design method has not yet been established well. Although AASHTO 93 flexible pavement design method is applied as a structural design method outside the country, there is a lack of information on layer coefficient of the permeable pavement materials, which makes it difficult to apply the design to various materials. Therefore, in this study, a method of calculating the layer coefficient of permeable block pavement materials by plate load test was presented and the layer coefficient of a permeable block pavement in a testbed was evaluated. Overall, calculated layer coefficient of open graded aggregate and permeable block pavement surface layer were similar to those of the conventional values. The presented method may be used to evaluate layer coefficients of permeable block pavements for design.

요 지

도심 홍수 및 물순환 왜곡을 해결하기 위한 대표적 저영향개발기술 중 하나인 투수 블록포장이 포장시설로서 활발하게 적용되고 있다. 하지만 국내의 경우 설계법이 잘 정립되어있지 않고 국외에선 AASHTO 93 연성포장 설계법을 구조설계법으로 적용하고 있긴 하나 투수성 포장재료의 상대강도계수에 대한 정보가 부족하여 다양한 재료에 대한 설계적용이 어렵다는 단점이 있다. 이에 따라 본 연구에선 평판재하시험을 통해 투수 블록포장 재료의 상대강도계수를 산정하는 방법을 제시하고, 투수성 포장 실증현장에서 평판재하시험을 실시하여 이를 산정하였다. 산정된 개립도 골재와 투수 블록포장 표층의 상대강도계수는 전체적으로 기존의 값과 유사한 경향을 나타냈다. 본 연구에서 제시한 방법을 사용하여 향후 설계를 위한 투수 블록포장 재료의 상대강도계수를 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Permeable block pavement, Pavement structural design, Layer coefficient, Plate load test

1 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Pusan National Univ.)
2 정회원, 국립한국교통대학교 철도시설공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Railroad Facility Eng., Korea National Univ. of Transportation)
3 정회원, (주)서영엔지니어링 기술연구소 상무 (Member, Managing Director, R&D Center, Seoyeong Engng. Co. Ltd.)
4 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engng., Pusan National Univ., Tel: +82-51-510-7627, Fax: +82-51-513-9596, jahn@pusan.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)
5 비회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 교수 (Prof., Dept. of Civil and Environmental Engng., Pusan National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 기후변화와 도시화에 따른 침투유출시간의 감소와 불투수면적의 증가는 도시 물순환 체계의 왜곡을 가져오고 있다. 특히 우리나라는 도시화율이 높고 집중호우 발생빈도 또한 높아 이에 대한 적절한 대책이 필요하다. 이러한 문제들을 해결하기 위한 대책으로, 강우유출 발생지에서부터 침투와 저류를 통해 도시화에 따른 수생태계의 피해를 최소화하여 개발 이전의 상태에 최대한 가깝게 만들기 위한 토지이용 계획 및 도시개발 기술인 저영향개발(Low Impact Development, LID)기술이 효과적인 대책으로 떠오르고 있다(Han, 2011).

이와 같은 LID기술 중 하나로, 기존의 포장체 및 하부구조로의 우수침투를 허용하지 않는 전통적인 포장시스템과 다른, 침투를 허용하는 투수성 포장으로 도로포장을 설계 및 시공하는 사례가 세계적으로 늘어나고 있다(Scholz and Grabowiecki, 2007). 특히, 투수성 포장 중의 하나인 투수 블록포장은 유출량감소, 수자원 오염방지효과와 더불어 도시 열섬현상의 저감효과가 있으며(Smith, 2011) 아스팔트, 콘크리트 포장과 비교하였을 때 블록의 인터록킹에 의한 역학적 안정성을 가지고 있고 시공성과 심미적 효과가 우수하다는 특징이 있다(Ministry of Construction & Transportation, 2007).

투수 블록포장의 설계에는 수문학적 설계와 구조적 설계의 요건을 모두 만족시켜야 하며, 이에 따라 미국, 유럽 등의 기술선진국에서는 이미 투수 블록포장의 통합 설계법이 개발되어 활용되고 있다. 하지만, 우리나라의 경우 국외 선진 사례에 비해 통합적 설계법이 잘 정립되어 있지 않다. 통합적 설계법 중 구조적 설계를 위해, 미국 ICPI(Smith, 2011)와 ASCE(American Society of Civil Engineers, 2010) 등에서는 AASHTO 93 설계법(American Association of State Highway, and Transportation Officials, 1993)의 연성포장 설계법을 기반으로 투수 블록포장의 구조설계법을 제시한 사례가 있으나, 여전히 투수성 포장에 대한 설계 입력치에 대한 연구는 국제적으로도 미흡한 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 AASHTO 93 설계법을 바탕으로 기존의 투수 블록포장에 사용되는 각 포장층 재료의 상대강도계수를 문헌조사를 통해 정리하고, 평판재하시험을 통해 국내 시공된 투수 블록포장의 상대강도계수를 구하고 이를 국외의 문헌값과 비교하고자 한다.

2. 구조설계법 및 상대강도계수

2.1 국내외 설계법

국내 투수 블록포장 설계 기준의 대표적인 예로 서울특별시의 “투수블록포장 설계, 시공 및 유지관리 기준 (Ver. 2.0)”을 들 수 있다(Seoul Metropolitan City, 2013). 본 설계기준은 교통량과 노반의 조건을 바탕으로, 표준설계단면을 제시하고 있어 사용이 간단하다는 장점이 있으나, 설계 문헌에 제시되지 않은 다른 종류의 포장층 재료를 사용할 경우, 이를 바탕으로 기술자가 판단하여 설계하기 힘들다는 어려움이 있다.

블록포장은 표층과 기층을 통한 하중 분산과 전달 기제가 연성포장과 유사하다는 특징을 가지며(Swan and Smith, 2009), 이에 따라 국외에서는 블록포장을 연성포장 시스템으로 보고 AASHTO 93의 연성포장 설계법을 ASCE, ICPI 등에서 블록포장의 구조설계법으로 사용하고 있다(Smith, 2011; American Society of Civil Engineers, 2010). 하지만 이들 기준에도 일부 포장재료에 대한 상대강도계수만 제시되어 있고 투수 블록포장에 사용되는 재료의 상대강도계수에 대한 정보는 부족하다. 따라서 투수 블록포장 구조설계를 위해 투수성 포장재료의 상대강도계수 산정이 필요하다.

2.2 상대강도계수

일반적인 투수 블록포장 시스템의 개략도가 Fig. 1에 제시되어 있다. 포장시스템은 표층, 기층, 보조기층, 그

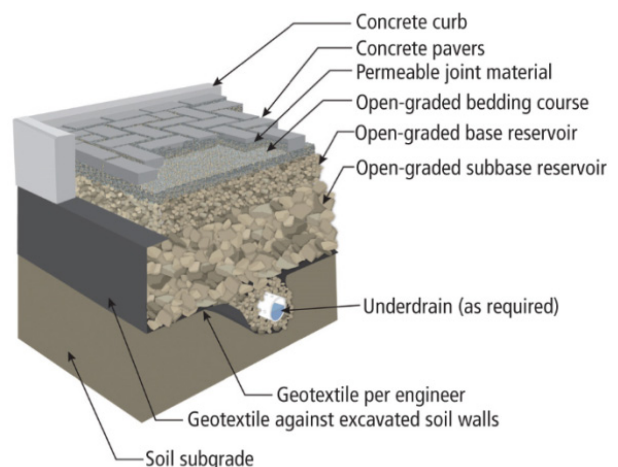


Fig. 1. Typical Cross Section of Permeable Block Pavement (Smith, 2011)

리고 이를 지지하는 하부노반으로 구성되며, AASHTO 설계법에서는 이러한 포장체가 지니는 구조적 성능을 각 층에 사용되는 재료의 물성을 나타내는 값인 상대강도계수를 사용하여 Eq. (1)와 같이 나타내고 있다(American Association of State Highway, and Transportation Officials, 1993).

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 \quad (1)$$

여기서, SN 은 포장체가 가지는 구조적 성능을 나타내는 값인 포장두께지수, a_1, a_2, a_3 는 표층, 기층, 보조기층의 상대강도계수, D_1, D_2, D_3 은 표층, 기층 보조기층의 두께를 나타낸다.

투수 블록포장 설계에서는 표층을 투수 블록, 줄눈채움재, 그리고 받침안정층을 하나의 층으로 보고 등가 물성을 바탕으로 상대강도계수를 사용한다. 기층과 보조기층의 경우, 투수성 포장에 요구되는 적절한 투수성능을 위해 개립도 골재를 사용하고, 이에 따라 설계 시에 개립도 골재의 상대강도계수를 사용하게 된다. Table 1에 기존의 문헌에 나타난 투수성 포장에 사용되는 재료의 상대강도계수를 정리하였다. 표에 보인 문헌의 내용 중, Smith(2011)는 표층을 8 cm 두께의 투수 블록과

ASTM No. 8의 줄눈채움재, 그리고 5 cm 두께의 ASTM No. 8, 9 또는 89를 사용한 받침안정층으로 구성하고, 기층은 ASTM No. 57, 보조기층은 ASTM No. 2의 입도를 가진 골재를 사용하여 구성하여 이에 대한 각각의 상대강도계수를 제안하였다.

3. 상대강도계수 산정

3.1 평판재하시험

상대강도계수 산정을 위한 현장시험을 부산대학교 양산캠퍼스에 소재한 한국 그린인프라·저영향개발 센터(Korea GI & LID Center)에서 수행하였다(Fig. 2). 본 센터에는 수리·수문, 토질 및 포장, 환경 분야의 다양한 LID 실증시설이 시공되어 운영되고 있으며 이에 대한 성능평가가 실시되고 있다. 특히 포장의 경우, 투수블록, 투수성 아스팔트, 투수성 콘크리트 등의 다양한 종류의 투수성 포장 현장모형이 시공되어있고, 이에 대한 수문학적·구조적 성능평가가 시행되고 있다. 본 연구에서는 GI & LID센터에 있는 투수 블록 포장의 현장모형에서 평판재하시험(Plate load test, PLT)을 실시하여, 얻어진 하중과 침하량의 관계로부터 투수성 포장의 기층



Fig. 2. Korea GI & LID Center (Lee et al., 2017)

Table 1. Layer coefficient of permeable block pavement materials

Literature	Material	Layer coefficient
Smith (2011)	Surface layer	0.30
	Open graded aggregate base	0.09
	Open graded aggregate subbase	0.06
Hansen (2008)	Open graded aggregate base	0.10~0.14
Oregon Department of Transportation (2011)	Open graded aggregate base	0.10
	Open graded aggregate subbase	0.08
Bahia et al. (2000)	Open graded aggregate base	0.12
Hein et al. (2013)	Open graded aggregate base	0.06~0.09
Zhou et al. (1992)	Open graded aggregate base	0.08~0.14

및 보조기층에 사용되는 개립도 골재의 상대강도계수와 투수 블록포장 표층의 상대강도계수를 산정하였다.

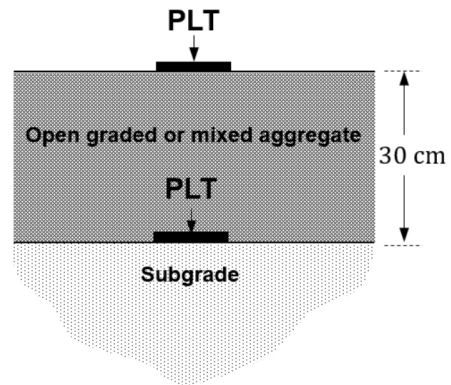
첫 번째 PLT는 가로 4 m, 세로 16 m 규모로 시공된 실증 부지 A(Site A - Aggregate Base Site, Fig. 3), 즉 Fig. 3(b)의 보인 노반 및 골재층을 대상으로 하였으며, 골재는 직경 25 mm 개립도 골재 혹은 직경 40 mm인 혼합 골재가 사용되었다. 두 번째 PLT를 수행한 실증 부지 B(Site B - Permeable Block Pavement Site)는 가로 2.3 m, 세로 11 m 규모로 시공된 투수 블록포장체로(Fig.

4), 표층에서 위치를 옮겨가며 두 차례 PLT를 실시하였다. 단면은 8 cm 두께의 투수 블록과 입경 2 mm의 줄눈 채움재, 3 cm 두께의 직경 4~8 mm 반침안정층, 30 cm 두께의 직경 13, 25 mm 혼합 개립도 골재층, 15 cm 두께의 직경 25 mm 개립도 골재층, 그리고 모래필터층으로 시공되었다. Fig. 3(b)와 Fig. 4(b)는 각 실증 시험체의 단면과 PLT 실시 위치를 나타낸다. 모든 PLT에는 직경 30 cm의 평판을 사용하였다.

Table 2는 각 현장에서 실시된 PLT 결과를 나타낸다.



(a) Overview

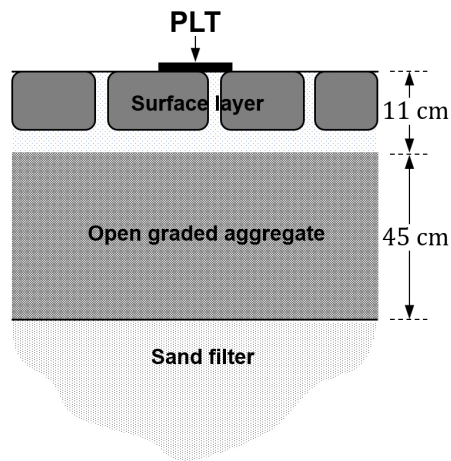


(b) Cross section and test location

Fig. 3. Site A - Aggregate base site



(a) Overview



(b) Cross section and test location

Fig. 4. Site B - Permeable block pavement site

Table 2. Results of plate load tests

Location		Settlement (mm)	Pressure (kN/m ²)
Site A	Surface of subgrade	2.6	177
	Surface of open graded aggregate (D 25 mm) base layer	2.5	260
	Surface of mixed aggregate (D 40 mm) base layer	2.5	435
Site B	Surface of permeable pavement system (Trial 1)	2.5	558
	Surface of permeable pavement system (Trial 2)	2.5	581

KS F2310에 따르면, 연성포장의 하부 구조의 경우 침하량 2.5 mm를 기준으로 지반반력계수를 산정하며(Korean Standards Association, 2015), 이에 따라 2.5 mm에 해당하는 하중강도를 결과로 나타내었다.

3.2 상대강도계수

연성포장에서 포장체가 가지고 있는 구조적 성능을 나타내는 유효포장구조지수(SN_{eff})는 다음의 식을 통해 평가할 수 있다(American Association of State Highway, and Transportation Officials, 1993; Pologruo, 2006).

$$SN_{eff} = 0.0045D^3\sqrt{E_p} \quad (2)$$

여기서, D 는 노반 상부 포장 구조의 두께(in), E_p 는 현장시험으로부터 얻어지는 노반 상부 포장 구조의 복합탄성계수(psi)이다. 본 연구에서는 E_p 를 산정하기 위한 현장시험으로 PLT를 사용하였다. 상대강도계수는 현장시험으로 얻어지는 SN_{eff} (Eq. (2))와 AASHTO 설계식(Eq. (1))으로부터 산정할 수 있다.

먼저, Site A 하부 노반층의 탄성계수는, 하부 노반 상부에서 수행한 PLT 결과를 바탕으로, 다층탄성해석 프로그램인 KENLAYER(Huang, 2004)를 사용하여, 역산하여 산정하였다. 이 후, Site A의 개립도 골재 상부에서 수행한 PLT 결과와 이미 산정한 노반층의 탄성계수를 바탕으로, 다층탄성해석 프로그램을 사용하여 Fig. 3(b) 단면의 골재의 탄성계수를 역산하였다. 이렇게 산정한 노반층과 골재층의 탄성계수의 결과를 Table 3에 제시하였다. 골재의 상대강도계수는 역산된 탄성계수를 Eq. (1)과 Eq. (2)에 적용하여 산정하였으며, 이 역시 Table 3에 제시하였다. 직경 25 mm 개립도 골재의 상대강도계수는 0.08, 직경 40 mm 혼합 골재의 상대강도계수는 0.11로 산정되었으며, 산정된 개립도 골재의 상대강도계수는 기존 문헌에 나타난 개립도 골재의 상대강도계

수(Table 2)과 유사한 수준으로 평가되었다.

투수 블록포장층의 상대강도계수는 Site B의 PLT 결과로부터 산정하였다. 다층탄성해석 프로그램을 사용하여 Fig. 4(b)의 단면을 해석하였으며, 앞서 구한 노반층과 개립도 골재층의 탄성계수를 해당 단면에 사용하여, 투수 블록포장층의 탄성계수를 역산하였다. 이 때, 15 cm 두께의 혼합 개립도 골재층과 30 cm 두께의 단일 개립도 골재층은 하나의 45 cm 개립도 골재층으로 고려하였다. 이 후, Eq. (1)과 Eq. (2)를 바탕으로 투수 블록포장층의 상대강도계수를 산정하였으며, 산정된 투수 블록포장층의 탄성계수와 상대강도계수가 Table 3에 제시되어 있다. 이렇게 산정된 투수 블록포장층의 상대강도계수는 0.26~0.27로 Smith(2011)가 제안한 투수 블록포장 표층의 상대강도계수인 0.30과 근사하지만 다소 작은 값을 보인다.

4. 결론

대표적인 LID기술 중 하나인 투수 블록포장이 그 장점으로 인해 사용이 증가하고 있다. 하지만 국내의 경우 설계법이 잘 정립되지 않았고 국외의 경우도 ICPI, ASCE 등에서 구조설계법으로 AASHTO 93 연성포장 설계법이 사용되고는 있지만 투수성 포장재료의 상대강도계수와 이를 산정하는 방법에 대한 정보가 부족하여 다양한 재료에 대한 설계 적용이 어려운 현실이다.

본 연구에선 이와 같은 한계점을 극복하기 위해 평판재하시험을 통한 투수성 포장재료의 상대강도계수 산정방식을 제시하고 투수성 포장 현장모형에 PLT를 실시하여 상대강도계수를 산정하였다. 그리고 산정결과를 기존의 값들과 비교, 평가하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

- (1) 산정된 개립도 골재의 상대강도계수는 0.08로 기존의 값인 0.06~0.12의 범위 내로 평가되었다. 시험에

Table 3. Elastic modulus and layer coefficient of permeable block pavement materials

Material		E_p (psi)	a_i
Subgrade		2900	-
Aggregate base	Open graded aggregate (D 25 mm)	6090	0.08
	Mixed aggregate (D 40 mm)	14500	0.11
Surface layer	Permeable block pavement surface layer (Trial 1)	16675	0.26
	Permeable block pavement surface layer (Trial 2)	17545	0.27

사용된 골재는 직경 25 mm 개립도 골재로서, 입도가 유사한 ASTM No. 57의 상대강도계수 0.09와 유사한 상대강도계수 값을 보였다.

- (2) 산정된 투수 블록포장 표층의 상대강도계수는 0.26~0.27로, 블록의 강성, 줄눈채움재와 받침안정층에 사용되는 골재의 종류, 받침안정층의 두께에 따라 차이는 있겠지만, 기존의 값인 0.30과 유사하게 평가되었다.
- (3) PLT의 결과로부터 투수 블록포장재료의 상대강도계수를 성공적으로 산정할 수 있었다. 실제 설계 입력치로 제안할 수 있기 위해서는 더 다양한 블록을 바탕으로 한 본 연구결과가 뒷받침 되어야 할 것으로 판단한다.

현재 투수 블록포장의 설계 및 시공을 어렵게 하는 요인으로는, 한국형 투수 골재의 제안 및 물성의 산정 미비, 개립도 골재의 품질관리의 어려움, 구조적 설계법 및 구조·수문 통합적 설계법의 미정립 등을 들 수 있으며, 향후 이에 대한 지속적인 연구가 있어야 할 것으로 판단한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(17CTAP-C132363-01)에 의해 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. American Association of State Highway, and Transportation Officials (1993), *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, 1993, AASHTO, Washington D.C.
2. American Society of Civil Engineers (2010), *Structural Design of Interlocking Concrete Pavement for Municipal Streets and Roadways*, ASCE, Reston, VA.
3. Bahia, H. U., Bosscher, P. J., Christensen, J., and Hu, Y. (2000), *Layer Coefficients for New and Reprocessed Asphaltic Mixes*, No.WI/SPR-04-00.
4. Han, W. S. (2011), "US Low Impact Development Applications and Implications for Urban Rainwater Management Improvements", *Homeland Policy Brief*, Vol.344, pp.1-6.
5. Hansen, K. (2008), *Porous Asphalt Pavements for Stormwater Management*, National Asphalt Pavement Association (NAPA), NAPA, Lanham, MD.
6. Hein, D. K., Strecker, E., Poresky, A., Roseen, R., and Venner, M. (2013), *Permeable Shoulders with Stone Reservoirs*, No.NCHRP 25-25 Task 82, Champaign, IL.
7. Huang, Y. H. (2004), *Pavement Design and Analysis*, Pearson/Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
8. Korean Standards Association (2015), *Standard Test Method for Plate Load Test on Soils for Road*, KS F 2310:2015.
9. Lee, E., Kim, G., Ahn, J., and Shin, H.-S. (2017), "Surface Infiltration Rate of Permeable Block Pavements Depending on the Size of Filling Materials", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.17, No.1, pp.227-233.
10. Ministry of Construction & Transportation (2007), *Development of Eco-friendly 4S Pavement System*, Final Report.
11. Oregon Department of Transportation (2011), *ODOT Pavement Design Guide*.
12. Pologruto, M. (2006), "Study of In Situ Pavement Material Properties Determined from FWD Testing", *Journal of Transportation Engineering*, Vol.132, No.9, pp.742-750.
13. Scholz, M. and Grabowiecki, P. (2007), "Review of Permeable Pavement Systems", *Building and Environment*, Vol.42, No.11, pp.3830-3836.
14. Seoul Metropolitan City (2013), *Design, Construction and Maintenance Standards of Pitcher Block Pavement*, ver.2.0.
15. Smith, D. R. (2011), *Permeable Interlocking Concrete Pavements*, Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI), Herndon, VA.
16. Swan, D. J. and Smith, D. R. (2009), "Development of the Permeable Design Pro Permeable Interlocking Concrete Pavement Design System", *9th. International Conference on Concrete Block Paving, Argentina*, pp.18-21.
17. Zhou, H., Moore, L., Huddleston, J., and Gower, J. (1992), *Free Draining Base Materials Properties*, Final Report, HPR Project No.5283.

Received : October 11th, 2017

Revised : October 31st, 2017

Accepted : November 1st, 2017