

포장가속 시험을 통한 블록포장의 빗물 흐름에 대한 연구

A Study on Rain Flow of Block Pavement Using an Accelerated Pavement Tester

박영석* · 임무광** · 송거름수*** · 김현욱**** · 조윤호*****

Park, Young Seok · Lin, Wuguang · Song, keo reum soo · Kim, Hyun Wook · Cho, Yoon Ho

1. 서 론

블록포장에서의 투, 배수 특성에 관한 본 연구는 과거 수행된 표면 유출수 및 침투수에 대한 적절한 배수 시스템 구축 연구를 토대로 진행되었다. HES(HEART Environment Simulator)를 통해 일반블록 포장 위와 블록과 모래가 시공되지 않은 CTB(Cement Treated Base) 표면에 물을 살수 후 포장 표면 및 기층 바로 아래에서 배수능력 측정을 실시한 것이다. 하지만 과거의 방식으로는 전체 포장구조층에서의 배수능력을 측정할 수 없고 보조기층 이하에 물이 흡수된 정도를 산정할 수 없는 한계가 있었다. 선행연구 결과 및 문제의 고찰을 토대로 도로공사연구원 내에 위치한 포장가속 시험동에서의 연구를 진행하였다. 또한 친환경성을 강조하는 투수성 블록을 채택하였다.

따라서 본고에서는 일반 및 자체투수블록이 사용된 포장에서의 공용횡수 및 강우 모사에 따른 투, 배수 특성에 대한 고찰을 진행하였다. 기본 목적은 향후 투수성 블록포장시스템에서의 침투수에 따른 안정성을 판단 또는 확보를 위해 적절한 배수 설계 방안을 마련하는 것이다. 또한 이 연구는 표면 유출수 저감효과 분석을 통해 강우초기 저류효과를 판정하는 측면에서도 의미가 있다.

이번 연구 수행을 위해 적정 강우량 및 강우강도의 산정, 구역 별 배수단면의 산정, 계측기 설치에 의한 보조기층 내 함수량 계측 등이 이뤄졌다. 또한 유형 배수관 설치로 살수 시 포장 내 발생하는 유출수들을 시간별로 포집, 층별 유출량 산정 및 분석을 실시하였다.

2. 실험 방법 및 재료

과거 HES의 실험결과를 통해 불투수 블록의 표층으로 약 50%의 물이 유출되고 약 20%는 블록하부의 CTB를 통과할 것을 알 수 있었다. 또한 표층 블록없이 투수 CTB만 있는 경우는 살수된 물이 대부분 아래로 통과된 것을 목격하였다(국토해양부, 2010). 이러한 선행 연구 결과와 현장에서 실시된 포장 재료의 투수성 측정 그리고 현장 예비실험을 통해 포장구조체 설계 및 실험 준비를 위한 가능하면서도 최적의 실험조건을 설정하였다. 포장구조체의 설계 및 적용된 재료와 설정된 환경 조건은 다음과 같다.

2.1 실험 방법

(1) 단면 구성

시험시공된 포장구조체는 불/투수블록, 불/투수 CTB 적용 여부에 따라 총 4개의 단면으로 구성된다. 각각

* 비회원 · 중앙대학교 토목공학과 석사과정(E-mail : affordance00@hotmail.com)
** 비회원 · 중앙대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: rarelin@naver.com)
*** 비회원 · 중앙대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: reumsoo@hotmail.com)
**** 정회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 연구교수 · 공학박사(E-mail: hkim29@gmail.com)
***** 정회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 교수 · 공학박사(E-mail: yhcho@cau.ac.kr)

하나의 단면 길이는 6.5m 폭은 1.5m으로 포장구조체의 평면도는 그림 1과 같다. 투수 CTB의 경우 모래층이 CTB로 유출 되는 것을 막기 위해 부직포를 설치하고 배수로 벽면을 타고 아래층으로 물이 흘러내리는 것을 막기 위해 차수 처리를 실시하였다.

블록 포장의 빗물 흐름도를 파악하기 위해 포장체 층별로 집수통로를 설치하였다. CTB의 경우 유출량이 측면으로 배수되기보다 대부분 그 아래로 투과될 것을 예상하여 보조기층 및 노상층의 상부에만 이것을 설치하였다. 반면 불투수 CTB의 경우는 물이 거의 기층을 통과하지 못할 것이기 때문에 모래안정층 아래에도 집수통로를 설치하였다. 또한 유출양상에 따라 유출수가 많은 곳의 유출량을 손쉽게 체크하기 위해 포장 내부에 수조를 설치하였다. 블록표면의 경우는 표층 및 각 층별 배수를 원활하게 하기 위해 1%의 구배를 두었다. 집수통로에 대한 자세한 배치도는 그림 2의 횡 단면도에 예시하였다.

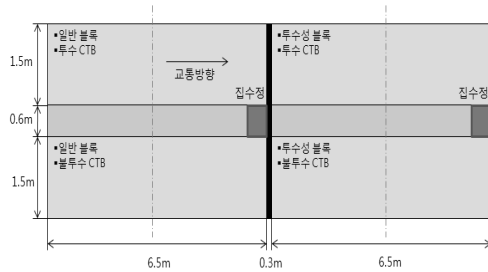


그림 1. 시공 평면도

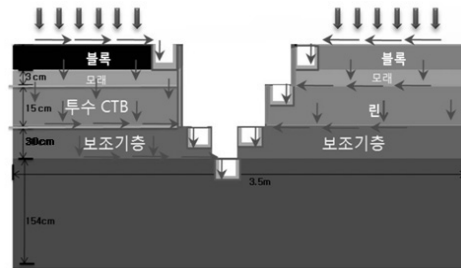


그림 2. 시공 횡 단면도

(2) 환경조건 설정

본 실험에서는 실내 배수로의 협소함과 예비실험을 통한 실험 가능 최대 수량을 고려하여 약 300L에 해당하는 강우량 모사를 계획하였다. 이는 각각의 포장단면의 면적 $1.5 \times 6.5m^2$ 에 높이 30mm 강우가 모사됨을 의미한다. 강우강도의 설정은 다음 그림 3의 강우강도-지속시간-생기빈도의 관계그래프를 활용하였다(이원환, 2009). 이것은 어떤 강도의 강우가 일정 기간동안 내렸을 경우의 확률년수를 생기빈도로 표기한 것이다. 산정된 강우강도는 30년 강우빈도에 해당하는 200mm/hr와 3년 강우빈도에 해당하는 60mm/hr로 설정하였고 이것은 포장면 위에 설정된 강우량을 모두 살포 시 각각 9분, 30분이 소요됨을 의미한다. 한편 이것은 서울시 과거 기록된 최대 강우강도 118mm/hr에 약 2배와 1/2배에 해당되는 수치와도 같다.

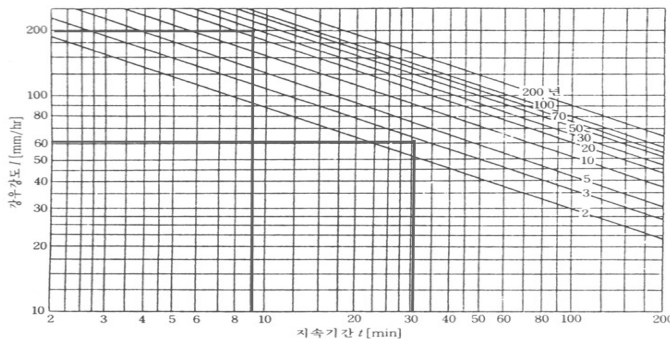


그림 3. 서울 강우강도-지속시간-발생빈도 관계(이영환, 2009)



그림 4. 투, 배수 실험 모습

(3) 실험 준비

살수 속도를 조절할 수 있는 기구를 고안 후 양수기에 연결하여 정해진 강우강도를 모사를 가능하도록 하였다. 또한 각 층별 집수통로를 통해 배수되는 물의 포집을 위해 수중펌프를 설치하였다. 각 단면마다 가장

많은 유출이 발생하는 층의 물은 포장 가운데에 설치된 집수정에서 직접 측정할 수 있도록 하였다.

2.2 실험 재료

적용된 재료의 특징 중 이번 시험에 영향을 줄 수 있는 사항은 다음과 같다. 일반 블록의 경우 블록기층 및 표층이 플라이애쉬 20%로 치환된 재료를 사용하며, 투수 CTB는 플라이애쉬와 혼화제가 치환된 최적 배합의 저수축 투수 CTB 배합이 사용되었다. 투수성 블록의 경우는 시중에 주로 유통되는 다공성의 자체투수 블록을 선정하여 사용하였다.

적용된 블록포장 재료의 투수성능 측정을 위해 공용 초기 KS F 2394에 의한 현장 투수실험을 실시하였다. 투수 CTB의 경우 그 표면의 임의 지점 3곳에 실험을 실시한 결과 $6.0 \times 10^{-2} \text{cm/sec} \sim 8.4 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 정도의 투수계수가 측정되었다. 블록 포설 이후 블록의 종류 마다 각각 3회의 실험을 실시하였으며 그 결과 일반 블록의 투수계수는 $1.55 \times 10^{-2} \text{cm/sec} \sim 9.14 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$, 투수성 블록의 경우는 $1.31 \times 10^{-1} \text{cm/sec} \sim 3.98 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 수준으로 측정되었고 이것은 KS F 4419의 기준인 투수성 블록의 투수계수 $1.0 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 를 만족하였다.

사용된 모래에 대한 입도 분석은 KS F 2502에서 제시한 굵은 골재 및 잔골재의 체가름 시험 방법을 따라 실시하였다. 모래안정층 및 줄눈 모래입도는 각각 ASTM C 33 및 ASTM C 144에서 제시한 입도 기준을 만족하였다.

3. 실험 과정

본 실험에서는 블록 및 CTB의 투수성 재료 사용 유무에 따라 구분된 4개의 단면을 한 번에 한 단면씩 3회를 돌며 총 12회의 투, 배수 측정을 실시하였다. 이것은 한 번의 실험 후 단면에 포화된 물이 빠져나갈 수 있는 시간을 확보하고 포화되지 않은 마른 포장과 이후 2, 3회째 실험에 해당되는 젖은 포장에서의 투, 배수 특성을 비교하기 위한 것이다. 다음의 표 1은 공용횟수에 따른 투, 배수 실험의 실험 실시 현황 및 환경모사 조건을 보여준다.

표 1. 포장가속시험 공용횟수에 따른 실험 실시 현황

모사 된 조건	공용 전	5만회	10만회	
강우량 (L)	300	300	500	300
강우강도 (mm/hr)	200	200	200	60
강우지속시간 (min)	9	9	15	30

주어진 조건에 따른 살수와 동시에 실험이 시작된다. 이후 각 층별 시간에 따른 유출량과 유출 시작시점 및 종료 시점에 대한 기록을 실시하였다. 실험 단면을 옮겨가며 지속적으로 실험을 실시하고, 이전 단면에서 추가적으로 발생된 미소량의 유출수를 추가로 체크한다. 이 모든 과정이 끝나면 해당 단면의 집수통로에 청소를 실시하여 다음 같은 단면에서의 실험에 영향이 없도록 하였다.

4. 실험 결과

이번 실험을 통해 직접적으로 얻을 수 있었던 측정 결과들은 다음과 같다. 먼저 각 단면의 거의 포화된 상태에서 실시되는 마지막 3회째 유출 총합은 거의 일정하게 수렴됨을 알 수 있었다. 자체 투수블록 단면의 경우 다소 변화가 있지만 대부분 별다른 성향 없이 일정한 유출수 총합을 보였다. 일반 블록-블투수CTB의 경우는 3회 살수 시 무려 투입량의 약 96% 이상을 유출했다. 반면 자체 투수 블록-투수CTB의 경우는 살수량의 63% 정도인 190L만을 유출해 나머지 27%는 포장체에 여전히 함유되어 있는 것으로 나타났다.

다음의 그림 5에서는 공용 초기에 실행된 각 단면 당 1회 실험의 공용 횟수에 따른 유출량을 보여준다. 이

그래프는 예상처럼 투수성 재료의 포장 적용 시 유출수의 감소 경향을 보여준다. 이 결과를 다시 그림 6의 젖은 포장에서의 결과와 비교하여 공용횟수가 증가할수록 포장 포화상태에 따른 유출량의 증가함을 확인하였다.

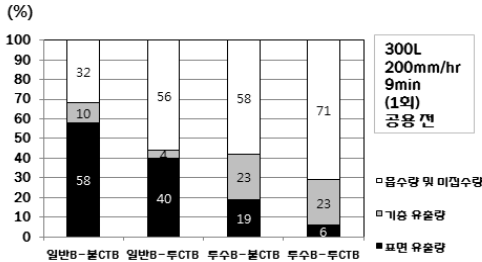


그림 5. 마른 포장에서의 유출량

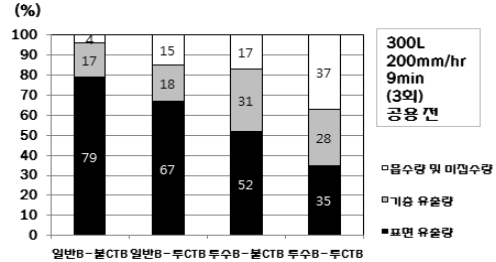


그림 6. 젖은 포장에서의 유출량

그림 7~9를 통해 마른포장에 살수 시 공용횟수에 따라 표면 유출량 및 총 유출량이 증가하는 것을 알 수 있다. 반면 포화된 포장구조체에서의 3회 째 실험 결과는 공용횟수에 따라 총 유출량이 거의 일정 수준으로 나타난다.

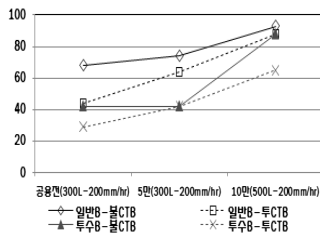


그림 7. 공용 횟수에 따른 표면 유출량 (1회째 살수)

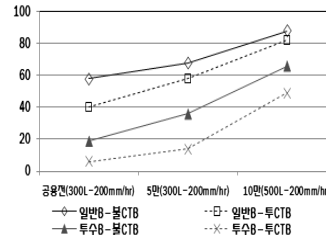


그림 8. 공용 횟수에 따른 총 유출량 (1회째 살수)

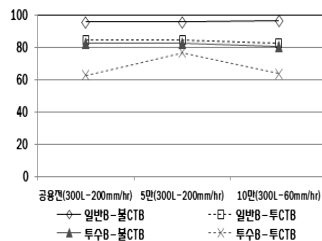


그림 9. 공용횟수에 따른 총 유출량 (3회째 살수)

다음의 그림 10은 단면 종류에 따른 포장체의 흡수율이다. 여기서 블록 포장은 약 30% 정도의 흡수율을 갖는다.

그림 11은 공용전과 공용 5만회가 진행된 이후 실험을 통해 산정된 흡수율 변화 그래프이다. 일반블록은 공용 증가에 따라 흡수율이 감소되는 경향을 갖는 반면 자체 투수블록의 경우는 변동 없이 거의 일정한 경향을 보인다.

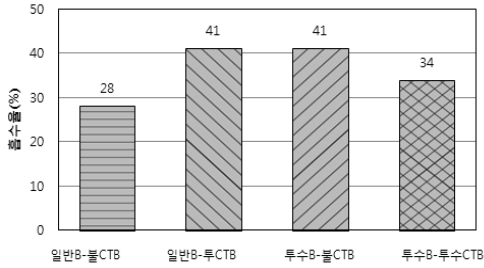


그림 10. 단면 종류에 따른 포장체 흡수율

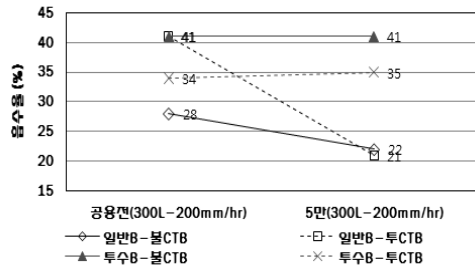


그림 11. 공용횟수에 따른 포장체 흡수율 변화

데이터를 바탕으로 블록포장에 대한 유출계수 분석을 실시하였다. 분석 방법은 합리식(rational method)에 따라 다음의 (식 1)과 같이 산정하였다.

$$Q_p = 0.2778CIA \quad (\text{식 1})$$

- 여기서, Q_p = 침투유량(m^3/s)
- C = 유출계수
- I = 강우강도(mm/hr)
- A = 배수유역면적(km^2).

유출량 및 유출시간 측정데이터를 통해 침투유량(Q_p)은 측정가능하고, 강우강도(I)는 각각의 실험에서 설정되었던 빈도 30년 혹은 3년 경우의, 200mm/hr 또는 60mm/hr으로 정하였다. A 는 배수면적은 설계단면인 $1.5 \times 6.5m^2$ 이다. 투수블록포장으로 바꾸었을 때의 유출계수 변화를 알아보기 위하여 일반블록-블투수CTB와 투수블록-투수CTB층의 실험결과를 비교분석해 보았다. 다음의 그림 12, 13은 이러한 분석의 예로 투수블록, 투수CTB 포장에서 강우강도가 각각 200mm/hr, 60mm/hr일 때의 유출량 분석 그래프이다. 이 결과에서 Borgwardt(1999)가 제시한 0.8~0.2inch 골재로 채운틈새투수블록의 유출계수 0.3~0.5 값과 유사함을 확인할 수 있다. 같은 방식으로 일반블록, 블투수CTB에서도 유출계수를 분석하여 각각의 경우에서의 유출계수 및 총 유출계수 값을 산정해 보았다.

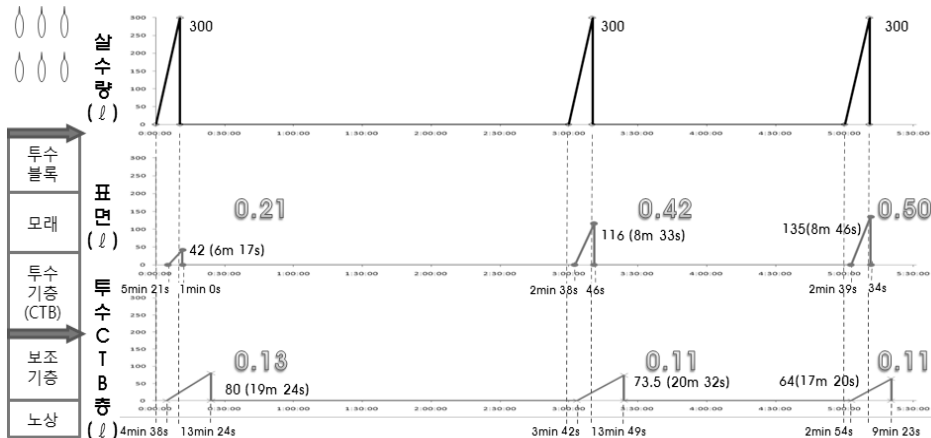


그림 12. 200mm/hr 강우강도에서의 유출량 및 유출계수 변화

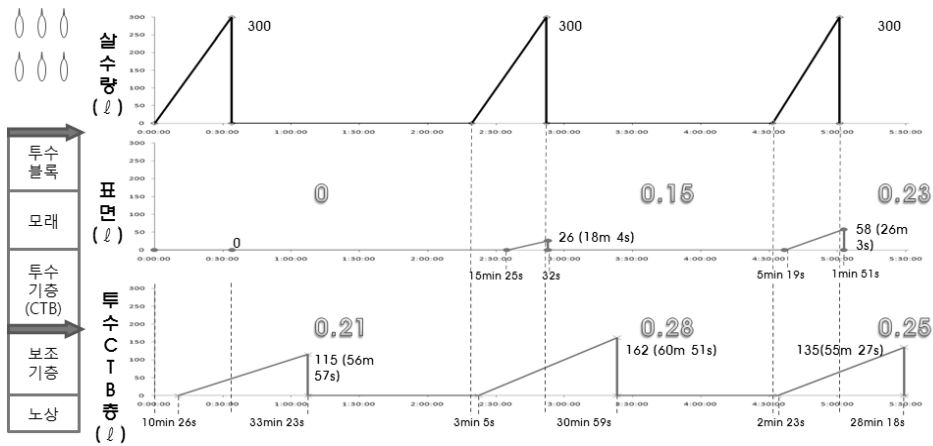


그림 13. 60mm/hr 강우강도에서의 유출량 및 유출계수 변화

다음의 그림 14, 15는 포장종류 및 강우강도 변화에 따른 포장구조체의 각 층별 유출량 및 흡수량을 나타낸다. 단, 수치의 산정에서 강우량을 정확히 2시간 간격으로 3회 모사, 투수블록의 경우 2.6~7%, 투수CTB기층 1~1.6%의 흡수율 그리고 불투수CTB에 흡수되는 양이 0%라는 가정을 두었다.

모든 포장에서는 살수 횟수의 증가에 따라 약 20% 정도의 표면 유출량이 증가하는 것으로 나타났다. 포장에 따른 표면유출량 차이에서는 투수블록 포장의 경우는 불투수블록 포장 보다 25~75% 정도 낮은 표면유출량을 보였다. 강우강도에 따른 표면유출량 변화에서 강우강도가 60mm/hr에서 200mm/hr로 증가함에 따라 불투수블록 포장의 경우 9~39%, 투수블록 포장의 경우 5~45% 정도의 증가된 표면유출량을 나타냈다.

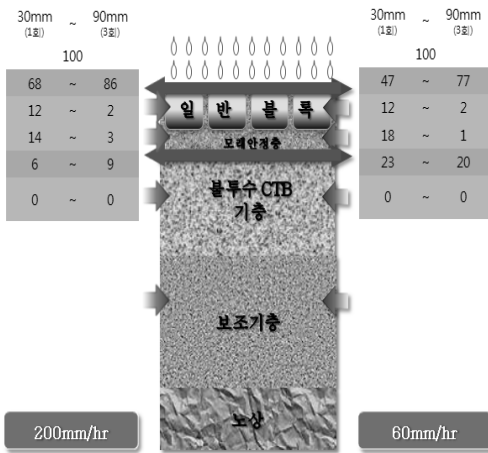


그림 14. 일반블록 포장에서의 강우강도에 따른 유출수준

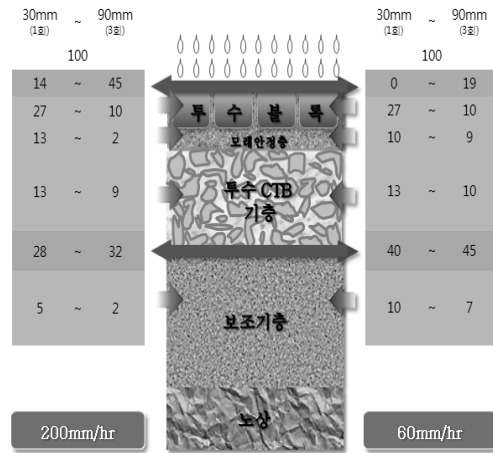


그림 15. 투수블록 포장에서의 강우강도에 따른 유출수준

한편 투수 CTB가 설치된 단면 가운데에서 보조기층 아래로 각각 15, 30cm 깊이에 설치된 TDR(Time Domain Reflectometer)에 의한 함수비 변화를 측정하였다. 마지막 10만회 공용 후 강우모사 실험에서 실험 전-후 함수량 변화를 측정한 결과 그림 16과 같은 측정 결과를 얻었다.

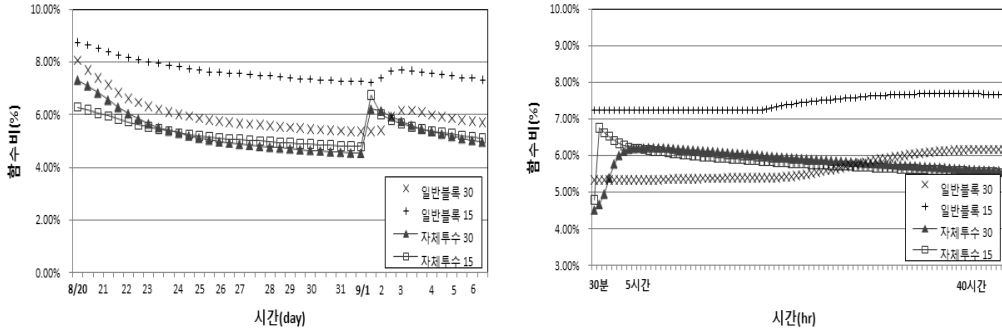


그림 16. TDR을 통해 계측된 실험 전-후 보조기층 내 함수비 변화

이를 통해 함수비의 최고 증가시점은 투수블록 사용 단면의 경우 실험 실시 후 30분~5시간 사이이며, 이것은 일반블록 사용 단면의 경우인 약 40시간과 비교하여 매우 빠른 시간으로 평가되었다. 이렇게 보조기층에 입시 저류된 물은 실험 이후 약 10~15일이 지난 후 정상시의 함수비 상태로 회복 되는 것으로 나타났다.

5. 결론

도로공사 내의 포장가속시험동에 설치된 일반 및 투수성 블록 포장구조체에서 공용횡수 및 시간에 따른 단면 별 유출수 계측 및 결과 분석을 실시하였다. 또한 보조기층에 TDR을 설치하여 함수비 변화 계측을 실시하였다.

블록 포장은 모든 단면에서 약 30~40% 정도의 흡수율을 갖는 것으로 나타났다. 공용횡수 증가에 따라서는 유출량이 증가하는 경향을 보였다. 이것은 공용횡수의 증가로 포장구조체의 내부가 밀실해지며 특히 투수성 블록의 경우는 그 틈으로 줄눈 모래가 침투하면서 블록표면으로부터의 유수 침투를 방해했기 때문으로 사료된다. 투수성블록 포장의 경우 일반블록 포장의 경우보다 25~75% 정도 낮은 표면유출량을 보이며 따라서 더 높은 미끄럼 저항성을 갖는 것으로 나타났다. 또한 투수성블록 포장의 경우 강우강도가 60mm/hr에서 200mm/hr로 증가함에 따라 5~45%, 살수횡수의 증가에 따라 20%의 표면 유출수가 증가하였다. 보조기층에 설치된 TDR을 통해 포장표면으로부터 투수된 물은 보조기층까지 흡수되어 약 2%의 함수비가 증가했고, 약 2주의 시간 후 다시 정상시의 함수비로 회복하는 것으로 나타났다.

다음은 이러한 결과 분석을 통해 내릴 수 있는 결론의 요약이다.

- 블록 포장의 흡수율 특성을 통해 포장구조체의 구조적 안정성 고려 시 맹암거 설치여부 검토가 필요할 것으로 나타났다. 또한 다른 기존 불투수 포장들에 비해 상대적으로 높은 온도저감효과를 기대할 수 있을 것으로 예상되었다.
- 투수성블록 포장과 일반블록 포장의 비교에서는 투수성 블록 포장에서 더 낮은 표면유출량이 나타났다. 따라서 비교적 높은 기능성 측면의 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.
- 표면 유출량 분석을 통해 모사된 강우강도 및 강우량이 적을수록 투수성능 및 미끄럼 저항성 효과 증대를 확인하였다.
- 보조기층 내 함수비 변화 측정 및 결과 분석 내용은 블록포장이 일정기간 동안 저류효과를 갖을 수 있음을 시사한다.

향후 이러한 실험결과를 토대로 추가 분석을 실시하여 투수블록 포장에서의 빗물침투성능과 유출특성을 더욱 명백히 규명하려 한다. 또한 이러한 결과를 통해 투수성블록 포장시스템에서의 효율적인 배수단면 결정안을 고찰하는 연구를 진행할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2010년도부터 서울특별시에서 주관하는 “친환경 투수블록 포장 시험시공 및 개선방안 도출 용역”에 의해 실시된 것으로 한국도로공사 도로연구원의 장비협조를 통해 진행되었으며, 이번 연구가 가능하도록 도와주신 관계자 분들에게 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 국토해양부, “장수명 친환경 포장시스템 개발”, 5차년도 최종보고서, 2010
- [2] 이원환, “수문학”, 제3판 문운당, 2009
- [3] 전성일; 권수안; 김도완, “포장하부구조 함수비 측정을 위한 TDR방식 함수량계의 실내보정실험”, 대한토목학회 정기 학술대회, pp. 1812~1817, 2003
- [4] 한국표준협회, “보차도용 콘크리트 인터로킹 블록”, KS F 4419, 2009
- [5] ASTM C 33, Standard Specification for Concrete Aggregates
- [6] ASTM C 144, Standard Specification for Masonry Mortar
- [7] Borgwardt, S., “Survey and expert opinion on the distribution, performance and possible application of porous and permeable paving systems.”, 1999