도로 및 공항포장 하부층에서의 영구변형 발생에 대한 고찰[1)]

김 인 태 | 정회원 · 명지대학교 교통공학과 교수
박 성 완 | 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 교수

1. 서 론

현재 전 세계적으로 도로 및 공항포장의 설계 및 시공에 있어 많은 관심과 우려는 기존의 하중 크기와는 다른 차량 및 항공기의 출현으로 포장층에 매우 치명적인 손상을 유발할 수 있는 반복하중에 의한 변형인 러팅을 유발하기 쉽기 때문이다. 아스팔트 포장의 러팅은 포장시스템을 이루는 각 층의 영구변형 때문에 발생한다. 대부분의 아스팔트 포장은 쇄석골재 혹은 보조기층을 경제적으로 노상을 보호하기 위해 사용하고 있으므로 이러한 입상재료층에서 주로 많은 영구변형이 발생할 수 있다. 물론 국내의 많은 아스팔트 포장에서는 아직 아스팔트 기층을 적용하는 이유로 상부층인 아스팔트 표층과 기층에서 온도의 영향과 과하중의 영향으로 변형이 많은 것이 사실이다.

한편 일반적인 포장체에서는 교통하중의 크기나 각 포장층의 강도에 따라 전체 러팅의 많은 부분이 하부층에서 발생할 수 있다. 그러나 국내외적으로 이러한 관련재료의 영구변형 저항성 평가를 위한 시험기준은 정립되어 있지 않은 실정이다. 최근 미국에서는 연방항공청(FAA, Federal Aviation Administration)이 주관하여 실규모의 포장시스템과 실제 항공기 하중을 가지고 포장가속시험을 수행하였다. 포장시험소는 뉴저지주 아틀랜틱 시티에 위치하고 있으며 모사시험결과 최대 10cm 까지의 러팅이 포장 표층에서 발견되었다. 여기서 흥미로운 것은 상당부분의 러팅이 입상 기층과 보조기층에서 유발되었음을 다층변위측정계 데이터로 확인할 수 있었다.

본 기사에서는 도로 및 공항포장 하부에서의 영구변형에 영향을 주는 인자들을 중심으로 기술하고 미국 FAA의 NAPTF (National Airport Pavement Test Facility)의 실험결과를 소개하여 아스팔트포장체 하부구조에서 영구변형에 대해 관심을 가질 수 있는 계기를 만들고자 한다.

1) 본 기사는 제1저자의 박사논문(Permanent deformation behavior of airport flexible pavement base and subbase courses)의 일부를 발췌 보완하여 작성한 것임을 밝힙니다.

2. 입상층의 영구변형에 영향을 미치는 요인

입상층의 영구변형에 영향을 미치는 인자는 다양하다. 본 기사에서는 재하하중과 관련된 요인과 그 외의 재료 물성과 관련된 요인으로 구분하여 기술하였다.

2.1 재하하중 관련 주요요인

영구변형에 영향을 주는 재하하중 관련요인에는 응력수준, 응력경로, 응력이력, 재하횟수 등 많은 변수들이 존재하고 있다. 많은 연구자들이 축차응력을 증가시킬 때 영구변형이 증가하고 구속응력을 증가시키면 영구변형 증가율이 감소한다고 보고하고 있다(Morgan 1966; Wood 1982). Pumphrey와 Lentz(1986)는 응력비, 즉 축차응력대 구속응력 비의 영구변형 증가율에 대한 영향에 대해 연구하였다. 그림 1은 응력비가 커질수록 영구변형이 급격히 증가하는 것을 보여주고 있다(Sweere, 1990).

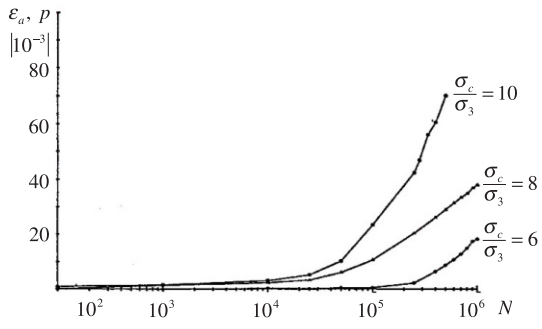


그림 1. 응력비에 따른 영구변형 (Sweere, 1990)

이러한 현상은 초기 영구변형 실험에서도 잘 나타난다. Barksdale(1972)은 편마암을 가지고 한 실험에서 응력비에 따른 영구변형의 증감을 보고하였다(그림 2). 따라서 응력비($\frac{\sigma_1-\sigma_3}{\sigma_3}$)는 입상재료의 영구변형을 조절하는데 매우 중요한 인자라 할 수 있다.

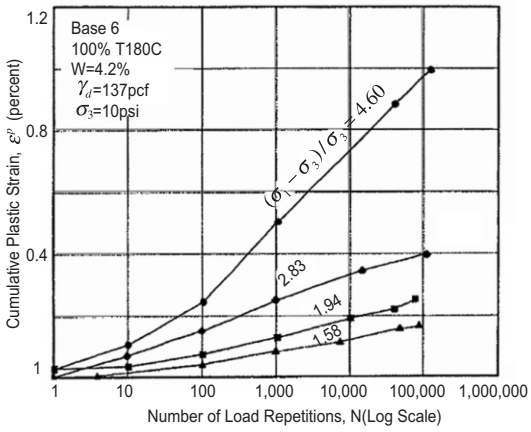


그림 2. 응력비에 따른 영구변형의 증감곡선 (Barksdale, 1972)

Van Niekerk(2002)는 최근 응력비(축차응력/구속응력)뿐만 아니라 일정한 구속상태 하에서의 입상재료의 전단강도와 재하된 축차응력의 비(파괴응력비)가 영구변형에 매우 큰 영향을 미친다고 보고하고 있는데 그림 3과 같다.

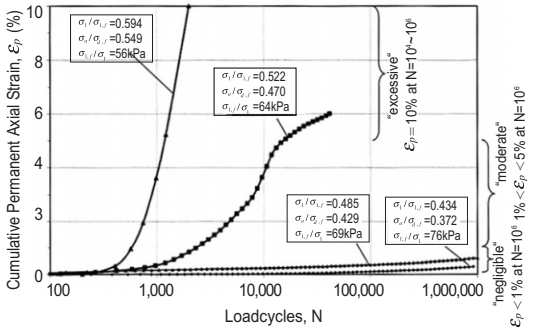


그림 3. 구속압 12kPa에서의 영구변형률 (Van Niekerk, 2002)

물론, 재하 횟수는 영구변형이 발생하는데 영향을 끼치는 가장 중요한 인자 중에 하나이다. 재하 하중이 낮은 경우는 재료의 안정화 현상이 일어나고, 반대로 큰 경우에는 재료가 점차적으로 파괴되는 경향을 보인다(Lekarp and Dawson 1998).

Brown and Hyde(1975)는 재하이력의 영구변형량에 대한 연구를 수행하였다. 재하이력은 입상

재료의 회복탄성계수에는 영향이 거의 없으나 영구변형의 증감에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Monismith(1975)는 서로 다른 크기의 하중을 재하할 때의 순서에 따라 영구변형의 발생량이 큰 차이를 보임을 밝혀냈다. 그림 4는 서로 다른 시험 절차에서 얻어진 결과이다. 첫 번째는 본격적인 재하 전에 낮은 응력 수준으로 컨디셔닝을 한 시편의 결과이고, 두 번째는 컨디셔닝 없이 바로 하중을 재하하였다. 그 결과, 컨디셔닝을 거친 시편의 영구변형 발생량이 현저히 작게 나타남을 볼 수 있다.

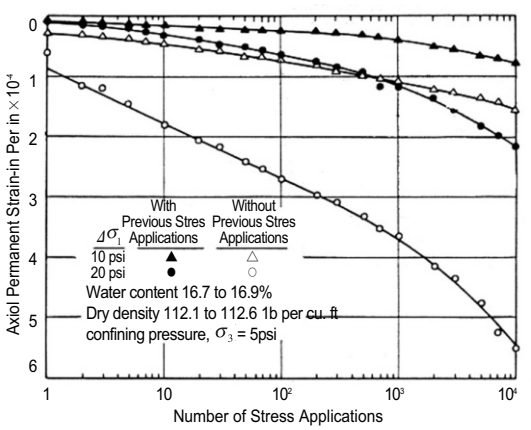
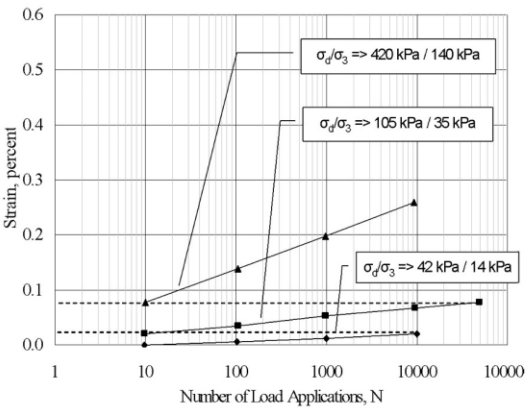


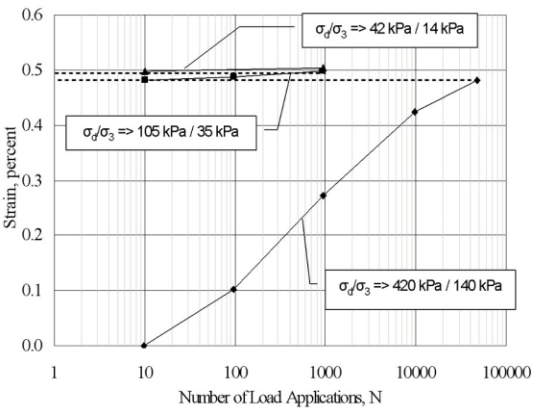
그림 4. 영구변형에 대한 응력이력의 영향
(Monismith et al., 1975)

그림 5는 재하 순서에 따른 영구변형의 발생량의 차이를 명확히 보여준다(김인태, 2005). 따라서, 영구변형에 대한 시험을 수행할 경우는 이러한 응력이력에 대한 보정 혹은 처녀시편으로 시험을 수행하여야 한다.

Lourens(1995)는 영구변형량이 교통하중의 속도 0~20km/hr 범위에서 재하 시간과 재하 주파수에 따라 크게 달라짐을 발견하였다(그림 6). 1997년에는 Corte et al.는 차량의 속도를 40km/hr에서 50km/hr로 재하주파수를 15% 높이자 20%에서 35%의 영구변형 발생량이 줄어듦을 보고하였다. 따라서, 실제 포장시스템에서 발생하는 영구변형을 실내시험이나 APT로 모사하기 위해서는 하중 주파수를 중요하게 고려하여야 한다.



(a) Stress Level from Low to High



(b) Stress Level from Low to Low

그림 5. 영구변형에 대한 응력 이력의 영향

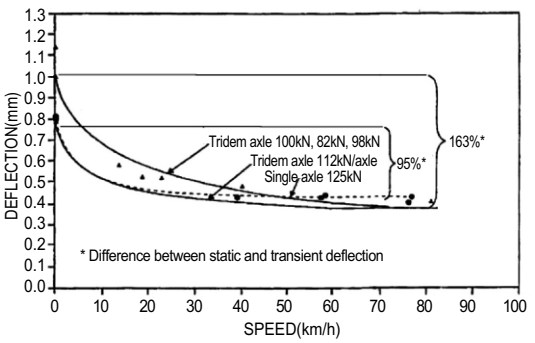


그림 6. 재하속도의 영향 (Lourens, 1995)

2.2 재료 물성관련 부요인

함수비, 포화도, 밀도, 입도, 재료의 파쇄면 등 많은 입상재료의 물성들도 영구변형의 거동에 영향을 미친다. Barksdale(1972)은 다짐도를 AASHTO T-180 기준으로 100%에서 95%로 낮추었을 때 영구변형 발생량이 증가하는 것을 발견하였다. 다짐도는 영구변형 발생량과 반비례관계에 있는 반면에 함수비는 많은 연구자에 의해 보고된 바와 같이 함수비가 증가할수록 발생량이 현저히 증가한다(Barksdale, 1972; Dawson et al, 1996). 이러한 현상은 반복재하로 인한 간극수압이 생기는 것에 그 원인을 두었다. 그러나, Thom and Brown(1987)은 간극수압뿐만 아니라 골재간의 윤활유 효과를 변형률 증가의 원인으로 제시하였다.

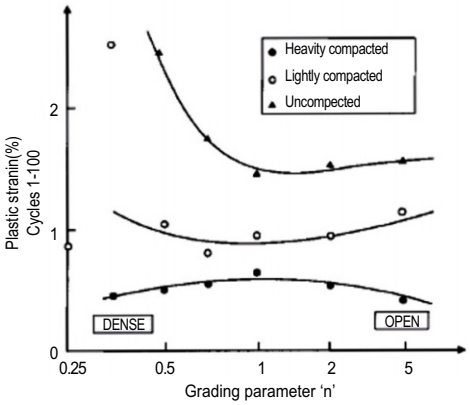


그림 7. 영구변형 발생량에 대한 입도와 다짐의 영향 (Thom and Brown, 1988)

그림 7에서 볼 수 있듯이 시료에 다짐을 가하지 않았을 경우는 개립도의 시편이 밀입도의 시편보다 덜 변형이 생기는 것을 알 수 있다(Thom and Brown, 1988). 반면, 약한 다짐이나 다짐을 과하게 할 경우는 입도나 다짐의 정도에 관계없이 비슷한 영구변형 발생량을 보인다. 그림 7에서의 입도계수(n)는 다음의 Talbot 방정식에서 구할 수 있다.

$$P = 100 \times \frac{d}{D} n$$

여기서, D는 최대 골재 치수이고 d는 체 통과율에 해당하는 골재의 크기이다.

2002년 Van Niekerk의 보고에 따르면 다짐도를 97%에서 103%로 증가시키면 같은 입상재료의 입도에서 축차응력을 50%에서 70%를 증가시킨 결과 비슷한 영구변형 발생량을 얻을 수 있다(그림 8).

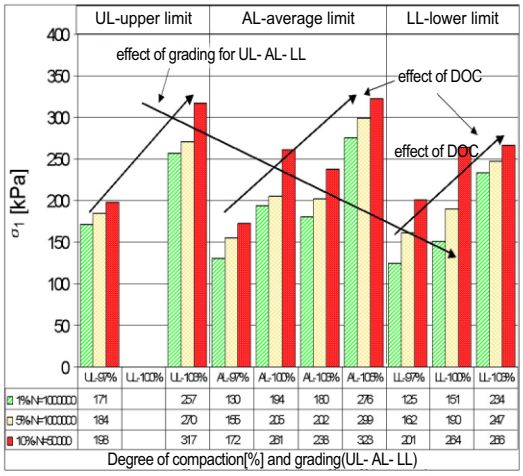


그림 8. 다짐도와 재하하중과의 관계(Van Niekerk, 2002)

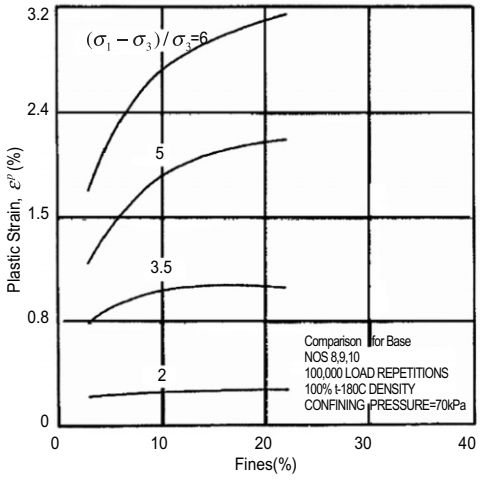


그림 9. 영구변형 발생량에 대한 #200체 통과량과 응력비의 영향 (Barksdale, 1972)

또한 보고에 따르면 #200체 통과량은 영구변형의 발생에 중요한 인자이다(Thom and Brown, 1988). Barksdale(1972)는 #200체 통과량, 즉 세립분이 증가함에 따라 영구변형의 증가가 발생하였다고 보고하였다. 특히, 축차응력이 클 때와 포화도가 크면 그 영향이 더 큼을 알 수 있다(그림 9).

최적 상태보다 조금 낮은 함수비는 영구변형의 발생을 억제할 수 있으나, 함수비가 OMC를 넘게 되면 유효응력이 감소하여 과도한 영구변형이 발생하게 된다(Haynes and Yoder, 1963).

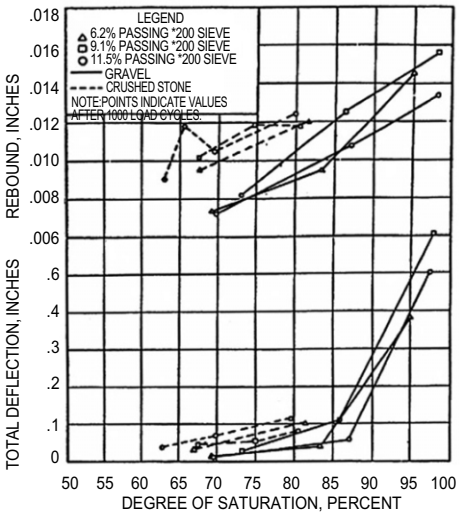


그림 10. 포화도와 영구변형 발생량의 관계 (Haynes and Yoder, 1963)

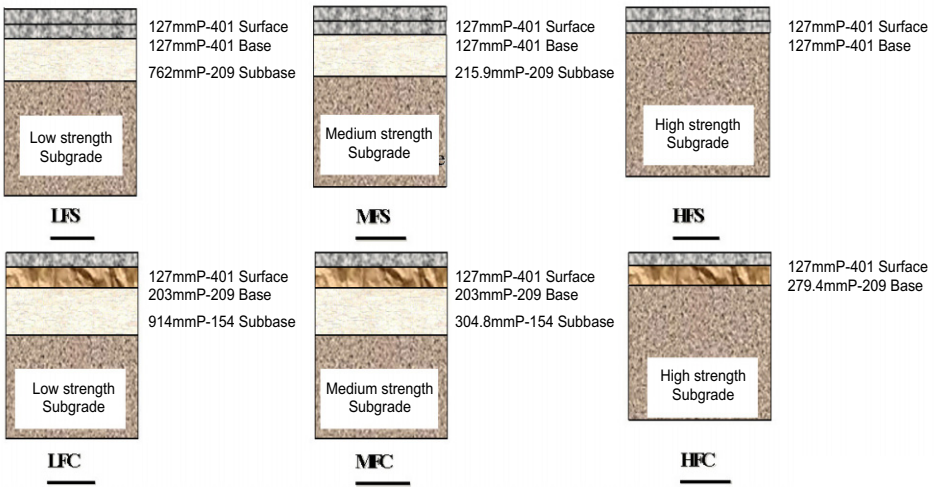
앞에서 살펴본 바와 같이 매우 다양한 입상재료의 물성이 영구변형과 연관이 되어 있다. 따라서 보다 정확한 도로하부층에 대한 영구변형의 발생량을 예측하기 위해서는 이러한 입상재료의 물성 또한 신중히 연구되어야 한다.

3. 미국 FAA 실사 포장 가속시험 소개

미국 뉴저지주의 아틀랜틱시 인근에 National Airport Pavement Test Facility (NAPTF)가 1999년 4월에 공항포장의 평가를 위해 건설되었다. 건설의 주요한 목적은 새로 출현하는 초대형 항공기에 대한 공항포장의 평가를 위함이며 첫 시험은 2001년 7월까지 진행되었다. 기본적으로는 3가지의 노상 타입과, 2가지의 기어 타입을 가지고 시험이 진행되었으며 그 외 다양한 기층과 보조기층의 두께를 가진 시험구간들이 평가되었다.

3.1 시험 개요

NAPTF에 9개의 포장단면이 건설되었다. 노상을 기준으로 CBR이 4(low-strength), 8(medium-strength), 20(high-strength)의 세 가지 기본구간 위에 6개의 아스팔트 포장과 3개의 콘크리트 포장이



〈그림 계속〉

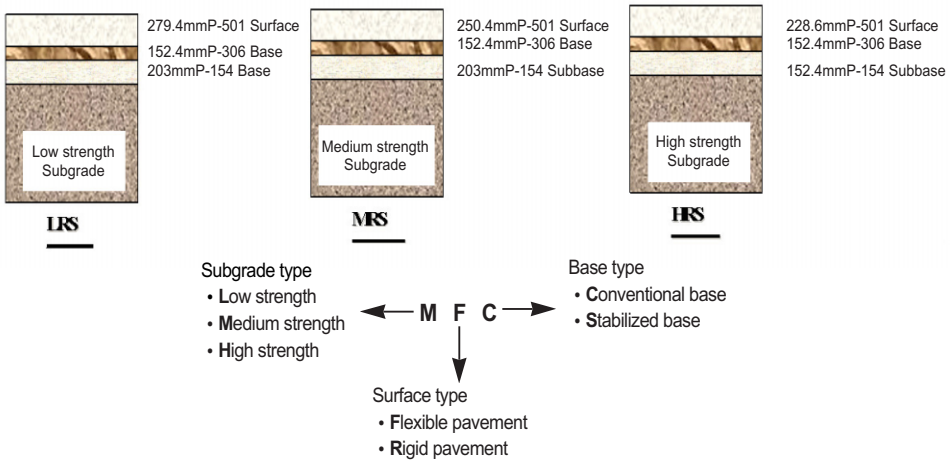


그림 11. NAPTF 시험포장 단면(Garg, 2003)

건설되었다. 그림 11과 같이 기층과 보조기층으로는 미국 공항포장에서 사용되는 입도로 구성된 P201과 P154가 사용되었다.

하중재하는 그림 12와 같이 컴퓨터와 유압으로 조절되었는데 궤도에 의해 움직이는 시험 차량으로 590톤까지 재하가 가능하여 현재 개발 중인 혹은 운영 중인 모든 항공기의 모사가 가능하다.

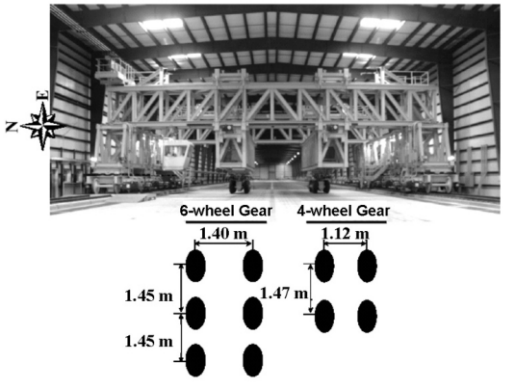


그림 12. 미국 NAPTF의 4-wheel(right) and 6-wheel(left) 하중재하 차량

3.2 시험결과 요약

포장 표면에서 최대 10cm의 러팅이 아스팔트 포장 구간에서 발견되었다. 파괴기준을 25mm로 정하였고 그 기준에 미달할 경우는 20,000회 이상이 재하되었다. 하중은 두 개의 기어타입에 각각 20,430kg 씩 재하되었으며 원더링 폭은 2m로 제한하였다. 각 시험구간의 기층, 보조기층, 및 노상에서 아래와 같은 관측결과들이 보고되었다.

1. LFS구간에서는 영구변형이 주로 기층(P209층)에서 발생하였다(그림 13).

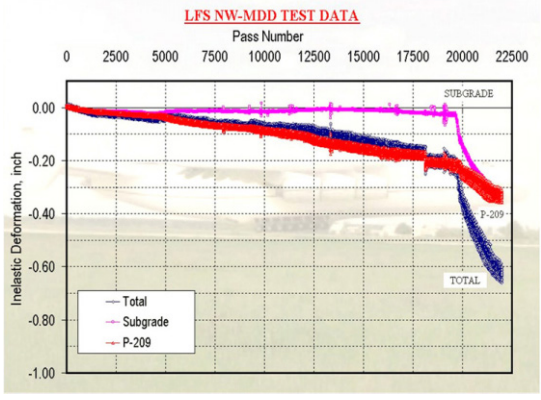


그림 13. LFS구간의 MDD 데이타 (Garg, 2003)

2. LFC구간에서는 영구변형이 주로 보조기층(P154)에서 발생하였으며 기층과 노상에서는 최소한의 영구변형이 발견되었다(그림 14).

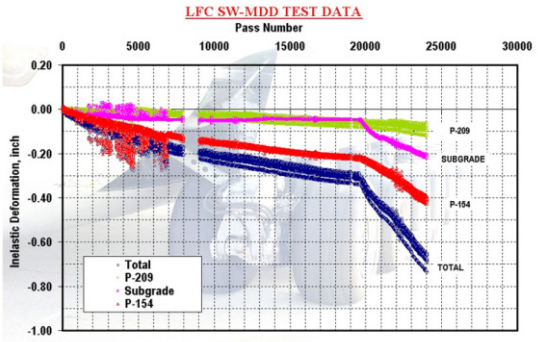


그림 14. LFC구간의 MDD 데이타 (Garg, 2003)

3. MFS구간에서는 노상과 보조기층(P209)에서 주로 발생하였다.

4. MFC구간에서는 영구변형이 주로 보조기층(P154)에서 발생하였다.

이러한 과도한 발생은 포장의 기층과 보조기층의 응력 수준이 매우 높기 때문이며, 반면 이러한 응력 수준을 실내 시험에서는 고려하지 않기 때문에 보다 현실적인 영구변형에 대한 결과를 얻기 힘들다.

4. 요 약

살펴본 바와 같이 도로하부 영구변형에 영향을 주는 인자는 매우 다양하다. 주된 요인들로는 재하하중과 관련이 있는 응력비, 재하횟수, 재하이력, 파괴응력비, 그리고 응력경로 등이 있고 지반적인 요인들로는 재료 함수비, 입도, #200체 통과량, 다짐도 등이 있다. 영구변형의 정확한 예측 및 분석을 위해서는 위의 요인들에 대한 정량화가 필요하다.

또한 도로하부 영구변형에 대한 연구를 수행하기 위해서는 현장에서 하부층이 경험할 수 있는 응력수준을 정확히 아는 것이 매우 중요하다. 그림 15는 ILLI-PAVE(Raad and Figueroa, 1980) 및 GT-PAVE(Tutumluer, 1995) 비선형 2차원 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 NAPTF 시험구간의 MFC 섹션의 각 층별 응력 수준을 분석한 결과이다. 각 층에서의 B777 기어조합으로 인한 수직 압축응력을 살펴보면 기층부(P209)에서 약 881kPa과 보조기층(P154)에서 약 453kPa이 예측되었다.

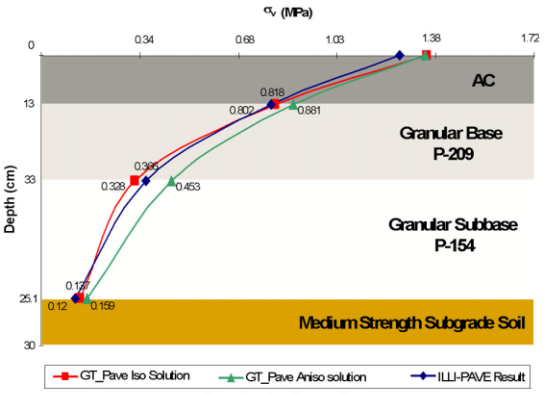


그림 15. MFC구간의 수직 압축응력 (B777 Wheel Load)

또한 그림 16에서 보면 응력비가 최대 10까지 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 바탕으로 볼 때 현재는 영구변형을 위한 시험방법 조차 없는 실정이다. 대부분의 경우 입상재료의 회복탄성계수 시험방법인 AASHTO T307-99를 이용하고 있는데 이 절차는 응력비가 최대 3까지 적용되고 축차응력도 최대 276kPa이므로 위와 같은 공항 포장에는 적합하지 않다. 따라서, 도로 및 공항 아스팔트 포장의 하부층에 대한 영구변형 평가를 위해서는 현재의 각 교통수단에 적합한 시험방법의 개발이 필요한 실정이다.

현재 국내에서 시공되고 있는 획일적인 포장형식 및 설계기술에서 탈피하기 위해서도 다양한 지반조건과 하부구조층에 대한 적절한 변형시험과 검증이 이루어진다면 향후 구조성능, 경제성, 그리고 환경성 등이 고려된 다양한 형식의 도로포장 설계 및 시공이 가능하다고 판단된다.

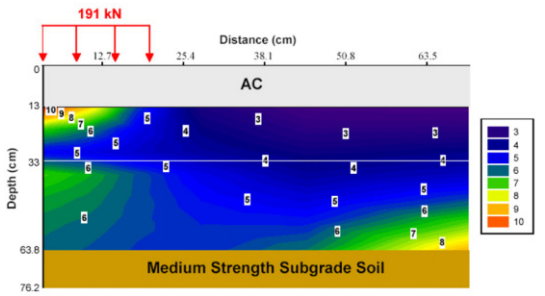


그림 16. MFC구간의 응력비

참고 문헌

1. AASHTO T307-99 (2002). "Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials." Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, 20th Edition, AASHTO, Washington D.C.
2. Barksdale, R. D. (1972). "Laboratory evaluation of rutting in basecourse materials." Proc., 3rd Int. Conf. on Struct. Des. of Asphalt Pavements, pp161~174.
3. Brown, S. F., and Hyde, A. F. L. (1975). "Significance of Cyclic Confining Stress in Repeated-Load Triaxial Testing of Granular Material." Transportation Research Record 537, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp49~58.
4. Dawson, A. R., Thom, N. H., and Paute, J. L. (1996). "Mechanical characteristics of unbound granular materials as a function of condition." Flexible Pavements, Proc., Eur. Symp. Euroflex 1993, A. G. Correia, ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp35~44.
5. Garg, N. (2003). "Permanent deformation behavior of the granular layers tested at the National Airport Pavement Test Facility."Presented at the 82nd Annual Transportation Research Board Meeting, Washington, D.C., January 14.
6. Haynes, JH, and EJ Yoder (1963). "Effects of. repeated loading on gravel and crushed stone base. material used in the AASHTO road test", Highway Research Board Record, 39: 82~86
7. Lekarp, F., and Dawson, A. (1998). "Modeling permanent deformation behavior of unbound granular materials." Constr. and Build. Mat., 12(1), pp9~18.
8. Lourens, J.P. (1995). Towards Improved Understanding of Surfacing, Base, and Tyre Interaction for Low-Cost Pavement Design, South African Department of Transport, Chief Directorate Roads, Report No. RR 93/559, Pretoria, South Africa.
9. Monismith, C. L., Ogawa, N., Freeme, C. R. (1975). "A Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils due to Repeated Loading." Transportation Research Record 537, Washington D.C., TRB, 1~17.
10. Morgan, J. R. (1966). "The Response of Granular Materials to Repeated Loading." Proceedings, Third Conference, Australian Road Research Board, Sydney, pp 1178~1192
11. Pumphrey, Jr., N. D., and Lentz, R. W. (1986). "A Deformation Analysis of Florida Highway Subgrade Sand Subjected to Repeated Load Triaxial Tests." Transportation Research Record 1089, TRB, Washington D. C., pp49~56
12. Raad, L., and Figueroa, J.L., (1980). "Load Response of Transportation Support Systems", Journal of Transportation Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No. TE1, January.
13. Sweere, G. T. H. (1990). "Unbound Granular Bases for Roads." PhD dissertation, University of Delft, Delft, The Netherlands.
14. Thom, N. H., and Brown, S. F. (1987). "Effect of moisture on the structural performance of a crushed-limestone road base." Transp. Res. Rec. 1121, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp50~56.
15. Thom, N. H., and Brown, S. F. (1988). "The effect of grading and density on the mechanical properties of a crushed dolomitic limestone." Proc., 14th ARRB Conf., Part 7, 94~100.
16. Tutumluer, E., (1995). Predicting Behavior of Flexible Pavements with Granular Bases, Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia.
17. Van Niekerk, A. A. (2002). Mechanical Behavior and Performance of Granular Bases and Sub-Bases in Pavements. Ph. D. Thesis, Technische Universiteit Delft, Delft, The Netherlands.
18. Wood, D. M. (1982). "Laboratory Investigations of the Behavior of Soils under Cyclic Loading: A Review." Soil Mechanics-Transient and Cycle Loads, G. N. Pance and O. C. Zienkiewicz, eds., John Wiley and Sons Inc., New York, NY, pp. 513~582