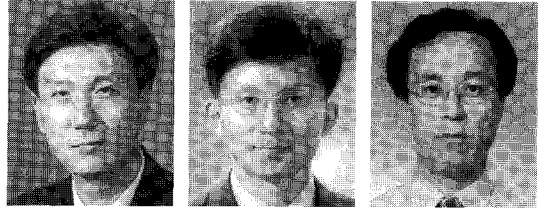


포장 하부구조 다짐시공 기법 및 관리기준



박 성 완 | 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 조교수
임 유 진 | 정회원 · 배재대학교 건설환경 · 철도공학과 부교수
박 건 수 | 정회원 · 대림산업 토목사업본부 부장

1. 개요

도로 포장 하부구조는 통상 보조기층과 선택층, 그리고 노상과 노체로 크게 구성된다. 각 층들은 다짐의 공정을 통하여 지지력을 확보하고 침하에 대한 내구성을 갖게 되므로 다짐 시방의 규정과 이 규정에 따른 엄밀한 시공은 상부포장의 성능과 내구성을 확보하는데 있어 매우 중요하다고 볼 수 있다.

현재 국내에서는 포장설계 방법에 있어 변화가 요구되고 있어 그에 따른 제반 다짐 관련연구의 필요성이 대두되고 있는 실정이다. 이에 본 기사에서는 기존의 발간된 자료 중 “한국형 포장설계법 개발과 포장 성능 개선 연구”(건설교통부 2003)와 그 외 관련 자료를 토대로 국내의 포장 하부구조 다짐시공 및 관리기준에 대하여 간략히 논의하고자 한다.

2. 하부층 다짐시공

자반에 대한 다짐은 매우 효과적이고 경제적인 시공법으로 댐, 제방, 도로 등의 건설에서 가장 주된 공정중 하나이다. 다짐은 많은 지반의 공학적 특성

들이 개선될 수 있음을 보여주는데 아래와 같다.

- 흙의 간극을 축소하여 투수성을 저하시켜 물의 침입에 의한 지반의 연화, 팽창을 적게 하여 흙을 안정되게 함
- 성토의 비탈면 안정, 교통하중 지지 및 지반구조물에 필요한 전단강도, 지지력 증가 등 강도특성을 강화함
- 지반의 상대밀도, 흙의 구조 등이 전반적으로 균질화 함
- 도로성토와 같은 완성 후의 노면에 악영향을 주는 성토자체의 압축침하를 저감하게 함
- 온도 변화에 의한 지반내 간극수의 부피변화로 인한 동상 등의 부피변화를 억제함

다짐에 영향을 주는 요인들은 크게 재료적, 기계적, 그리고 시공 3가지로 나눌 수 있으며 서로 상호 의존적이다. 3가지 요소들에 포함된 여러 요인들을 살펴보면 아래와 같다(Brandl 2001).

- 재료적 측면
 - 흙의 종류
 - 입도
 - 입자의 형상

- 함수비
- 세립분
- 다짐되는 층의 강성
- 다짐층의 두께
- 다짐되는 층 아래의 흙의 강성 및 지반조건
- 층간 경계면의 성질

■ 롤러의 기계적 측면

- 동적인 힘의 방향
- 진동 빈도
- 드럼 폭
- 드럼의 직경
- 롤러 무게
- 드럼의 기하구조 및 모양
- 자주 기동여부

■ 시공적 측면

- 롤러의 패스 회수
- 롤러의 속도 및 방향 등

실내다짐시험은 현장에서 사용하는 재료와 동일한 재료를 사용하여 현장 다짐의 최적 조건을 파악하는데 그 목적이 있다. 따라서 기준이 되는 다짐에너지를 사용하여 최적의 되는 조건 즉, 최대 건조다짐밀도(γ_{d-max})에 해당하는 최적 함수비(ω_{opt})를 파악하는 것이 선결 조건이다. 도로지반의 다짐시공에 가장 큰 영향을 미치는 것은 다짐의 에너지와 함수비로 볼 수 있다. 이때 다짐 에너지는 현장 시공 시 다짐 차량에 의해 주어지며 현장의 최적 다짐조건을 결정하기 위하여 동일한 시료에 대한 실내 다짐시험이 요구된다. 다짐차량은 주로 진동하중, 충격하중 또는 진동하중에 의해 다짐 에너지를 공급하며 다짐 에너지의 적절한 선택은 해당 흙 재료의 입도와 분류특성 등을 고려하여 결정한다. 특히, 세립분이 많은 재료는 압축 즉, 전압다짐의 효과가 크고 반면 조립분의 재료는 진동다짐의 효과가 큰 것으로 알려져 있다.

전압식에 속하는 다짐차량으로는 1) 머캐덤 롤러, 2) 탠덤롤러, 3) 탬핑롤러, 4) 타이어롤러 등이 있

으며 진동식 다짐차량으로는 1) 진동 롤러, 2) 소일 콤팩터, 3) 진동 콤팩터 등을 들 수 있다. 그림 1은 진동 롤러에 의한 다짐기계이다.

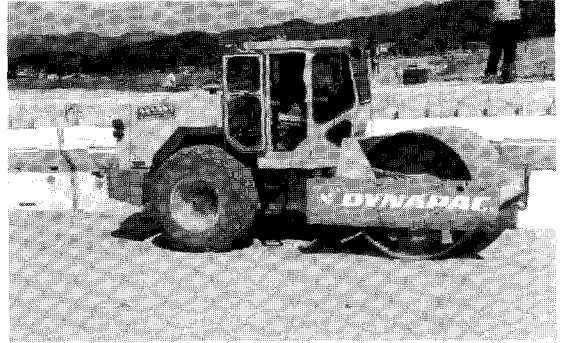


그림 1. 진동 롤러 다짐기(건설교통부 2003)

그림 2에서 대형 수직 진동식 롤러는 지반재료의 골재를 파쇄하는 등 부정적인 요인을 제공하는 것으로 알려져 최근에는 롤러의 수직 자중과 수평전단력을 동시에 활용한 진동 롤러의 사용이 유럽을 중심으로 확대되고 있다. 따라서 다짐 시 발생할 수 있는

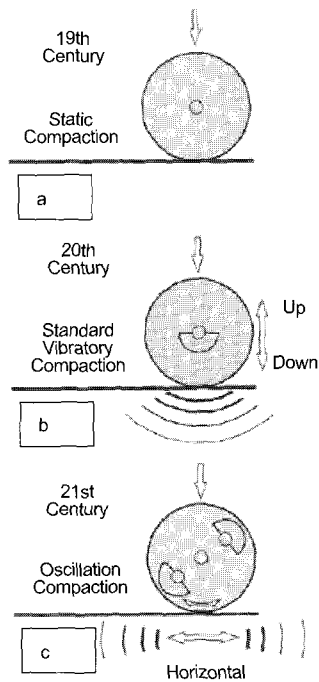


그림 2. 다짐 롤러 시스템의 종류(Kearney 2006)

골재분리와 같은 현상을 방지하고 균일한 입도와 조건으로 향상된 소요 다짐을 이룰 수 있다.

한편 국내에서 노체 및 노상의 다짐 관리기준은 표 1과 같으며 주로 현장밀도를 확인하거나 30cm 평판을 활용한 재하시험(PBT)으로 획득한 지지력 계수를 산정하여 검토하고 있다.

표 1. 다짐시험의 판정기준

| 구 분 | | 노 체 | | 노 상 | |
|-------------------|-------------|-------------------------------------|-------|---------|-------|
| | | 암성도 | 일반성도 | | |
| 1층 다짐완료 후의 두께(cm) | | 60 | 30 | 20 | |
| 다 짐 도 (%) | | - | 90 이상 | 95 이상 | |
| 다 짐 방 법 | | - | A, B | C, D, E | |
| 평판 재하 | 아스팔트 포 장 | 침하량(cm) | 0.125 | 0.25 | 0.25 |
| | | 지지력 계수 (K ₃₀ : kg/cm) | 20 | 15 | 20 |
| | 콘크리트 포 장 | 침하량 (cm) | 0.125 | 0.125 | 0.125 |
| | | 지지력 계수 (K ₃₀ : kg/cm) | 20 | 10 | 15 |

그러나 평판재하시험은 반력 확보를 위하여 중차량의 반입이 반드시 필요하고 시험시간이 길고 절차가 번거로와 시험자의 숙련도가 중요하다는 단점이 있다. 또한 다짐 두께는 통상 20cm에서 30cm 정도로 규정하고 있으나 현장 실무자들의 경험에 따라 좌우되는 경우가 많다. 특히, 평판재하시험은 시험시 표층에 국한하여 지지력 계수를 추정하게 되어 실제 다짐도보다 과다 평가가 될 가능성이 많다. 이러한 평판의 크기와 재하 반복회수에 따른 지지력의 차이로 인한 문제점들이 존재하고 있어 추후 도로하부에서 획득되는 지지력 계수값의 획득 및 다짐관리 규정의 수정이 필요한 실정이다.

표 2. 재하판 크기 및 하중 단계별 지지력 계수
(건설교통부 2003)

| 구 분 | K ₃₀ (MN/m ³) | | | K ₇₅ (MN/m ³) | | | K ₃₀ /K ₇₅ | | |
|-----|--------------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|
| | 1 st load | 1 st reload | 2 nd reload | 1 st load | 1 st reload | 2 nd reload | 1 st load | 1 st reload | 2 nd reload |
| K | 180.4 | 343.5 | 349.0 | 53.7 | 108.0 | 111.6 | 3.36 | 3.18 | 3.12 |

한편 보조기층의 경우 다짐완료된 노상면에 포설하는 것을 원칙으로 하되 노상면이 연약하거나 동결 상태에 있는 경우는 피해서 포설하도록 규정하고 있다. 이때 부적합한 노상면은 면 고르기, 재다짐 및 치환 등을 통해서 시방규정에 맞도록 하여야 한다. 보조기층의 다짐요건은 흙의 다짐시험방법(KS-F2312)에 준하여 시험토록 하고 있는데 획득한 최대건조밀도(γ_{d-max})의 95%이상으로 다져야 하며 한층 두께가 20cm를 넘지 않도록 규정하고 있다. 그러나 이러한 층두께의 제한은 최근 다짐시공 장비의 발전에 비하면 적정하지 못한 측면도 있어 보다 합리적이고 경제성을 고려한 층두께 규정의 재고가 필요한 실정이다.

3. 현장 다짐도 관리

현장에서는 넓은 면적에 대하여 균일한 최적함수비를 가진 다짐의 관리가 매우 중요한데 현재까지는 주로 좁은 범위에서 이루어지는 밀도 및 지지력에 기초한 현장다짐도 관리가 이루어지고 있다. 주요 방법은 아래와 같다.

- 모래치환법,
- 평판재하시험,
- Proof rolling, 그리고
- CBR 방법 등

따라서 최근 검토가 되고 있거나 외국에서 활용 중인 방법들을 소개하면 다음과 같다.

■ 진동 롤러의 진동거동에 의한 다짐도 평가
진동 롤러는 강재 차륜의 내부에 회전하는 편심축을 가지고 원심력에 의해 주기적인 진동력을 발생시켜 자중과 진동력의 작용에 의해 효율적인 다짐이 가능하다. 이를 활용하면 실시간으로 다짐과 동시에 관리하는 것이 가능해져 합리적인 시공관리가 가능한 장점이 있다. 또한 지반다짐에 따른 진동 롤러의

진동거동 변화나 진동축의 진동거동을 활용하여 다짐평가를 수행할 수 있으며 주로 fill dam, 성토, 택지조성, 매설관의 backfill 등 각종의 공사에 활용되고 있다. 그러나 진동 롤러마다 지반강성과 진동거동과의 관계를 사전에 파악해야 하는 단점이 있다.

■ GPS를 이용한 다짐 평가

위치측량시스템인 GPS를 활용하여 실시간 진동 롤러에 부착한 GPS와 지반반력 센서에 의하여 전압 시공중 관리를 행하는 기법으로 대규모 공사나 암성토 등에 활용되고 있다.

■ 중추낙하법을 이용한 다짐 평가

중추를 낙하시켜 지반에 충돌할 때 발생하는 진동 특성으로부터 지반의 다짐도를 평가하는 방법으로 신속하고 간편하며 비용이 저렴하다는 장점이 있다. 반면 적용지반의 한계가 있으며 추의 종류에 따라 적용 깊이가 차이가 나는 등의 단점이 있다.

■ 지오게이지(Geogauge) 이용한 다짐 평가

그림 3과 같이 지오게이지는 지반의 표면에서 직접적으로 변형에 대한 지반강성을 구하는 장치이다. 측정은 지반의 포아송비를 가정하고 기지의 접촉면에 대한 변형 저항값인 지반의 탄성계수를 추정할

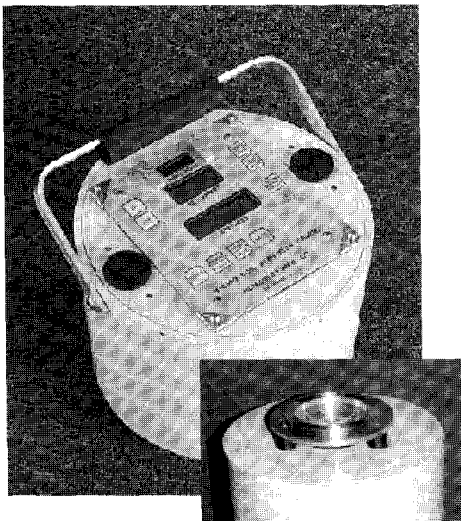


그림 3. 지오게이지 전경(건설교통부 2003)

수 있으며 함수량의 측정이 병행되면 건조밀도 또한 산정할 수 있다. Geogage는 254mm 원형으로 높이 279mm 중량 9.98kg으로 휴대가 가능하며 FWD와 DCP의 기능을 대체 할 수 있는 장점도 있다.

■ 공내재하시험(PMT)를 활용한 다짐 평가

공내재하시험은 프로브를 대상 지반내 천공된 구멍에 거치하고 이를 횡방향으로 팽창시켜 주변지반에 가압 후 토체의 압력에 대한 변형특성을 실시간으로 측정하여 탄성계수를 획득한다(임유진 2000). 그림 4는 시험 모식도이다.

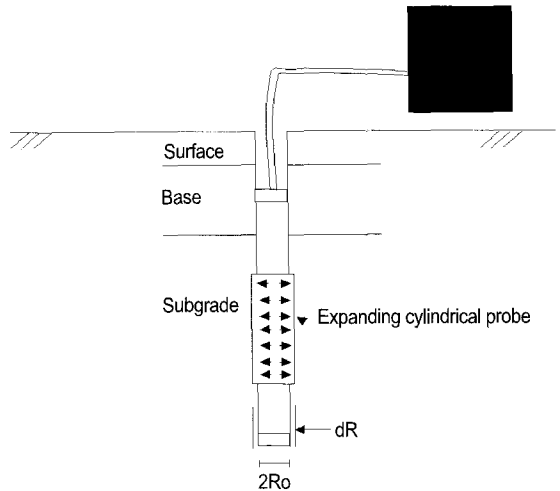


그림 4. PMT시험의 모식도(임유진 2000)

■ 이외에 기존의 방사선 동위원소를 이용한 RI 방법이 있으나 국내에서는 원자력법 규제로 사용이 매우 제한적이다.

살펴본 바와 같이 현재 다짐된 도로하부 및 지반의 밀도에 기초한 현장 관리가 완공직후 평가를 위한 접근에서 장기 포장공용성 및 보수설계가 가능한 탄성계수 방식으로 전환하고 있음을 알 수 있다. 실용성에 대한 부분만 보완된다면 생애주기(life cycle)를 고려한 현장 다짐관리에 다양한 평가 방법이 도입될 수 있을 것이다.

4. 다짐 두께 및 평가

다짐의 정도는 지반의 전단강도와 강성에 많은 영향을 미친다. 다짐장비가 중량화하고 장비의 다짐 에너지 효율이 증가함에 따라 층다짐 두께 조정의 필요성이 확대되고 있다. 따라서 층다짐의 두께가 현 기준에 비해 증가되어야 한다면 전체 층다짐 두께에 대해 효율적으로 다짐도를 평가할 수 있는 방법이 필요하다.

지반을 층별로 다짐하면 초기 지중응력과 더불어 수직응력의 발생이 변하게 되며 이에 수평응력도 발생하는데 그림 5와 같다. 다만 연직응력이 제거되어도 잔류 수평응력이 존재하게 된다. 따라서 아래의 그림에서와 같이 다짐 층수가 증가하면 잔류응력은 지반의 수평응력과 같아지거나 작아져 다짐의 영향이 거의 없어진다.

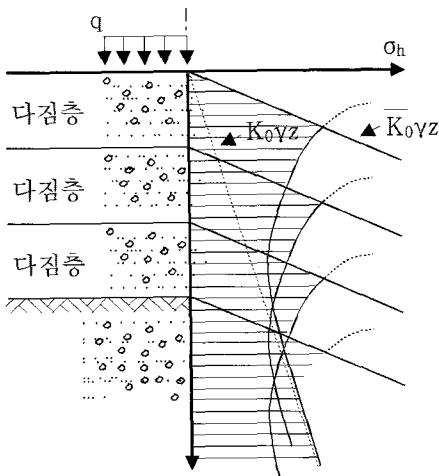


그림 5. 다짐에 의한 층별 지중응력의 변화(노한성 2001)

최근 미국에서의 연구에 의하면 종전의 15cm에서 20cm의 현행 기준을 25cm에서 40cm까지 상향 조정할 수 있다는 결과가 있다(Allen 1998). 만일 동일한 다짐도를 유지하며 다짐층 두께를 증가시킬 수 있다면 상당부분 공사기간 및 경제적인 측면의 이익이 예상된다.

또한 소요 다짐도와 층별 강성을 얻기 위해서는 하부재료의 혼합, 운반, 포설, 다짐 공정에 함수비의 조절이 균등해야 한다. 이를 위해서는 보다 역학적인 측면에서 강성도 혹은 탄성계수를 통한 평가가 반영되어야 다짐 두께의 기준이 유연해지리라 판단된다. 그림 6과 7에서와 같이 중부내륙 고속도로 시험도로 노상의 시료에 대한 시험결과 최적함수비에서 최대건조밀도를 가지고 있어도 회복탄성계수는 건조축보다 작음을 알 수 있다. 또한 습윤축보다는 건조축의 변화폭이 크므로 현장 다짐시 균등하지 않은 함수비는 균일하지 못한 강성을 제공하고 이에 따른 포장하부의 지지력 및 포장시스템의 공용성에 영향이 미침을 추측할 수 있다. 따라서 현행 밀도 위주의 설계 및 시공관리에서 역학적인 포장설계와 시공으로 전환된다면 탄성계수에 근거한 다짐관리로 일관성 있는 평가가 필요함을 알 수 있다.

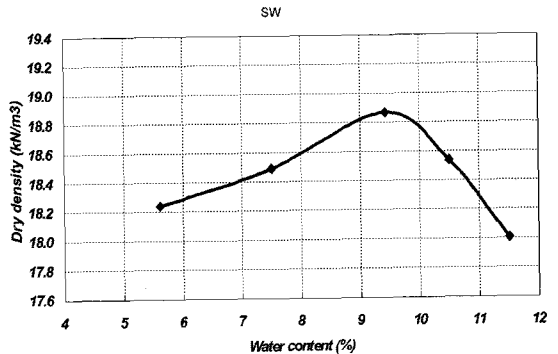


그림 6. 시험도로 노상의 함수비-건조밀도 관계도(이치현 2006)

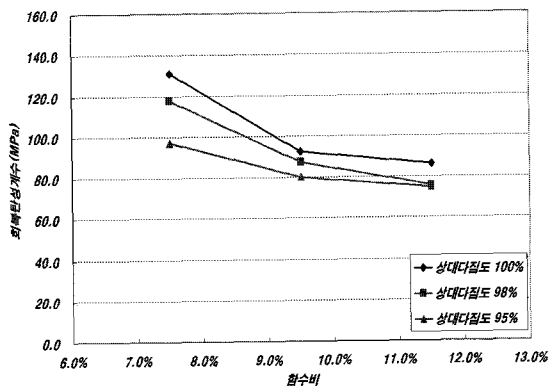


그림 7. 시험도로 노상의 함수비-회복탄성계수 관계(이치현 2006)

5. 결론

앞서 살펴본 바와 같이 도로 하부구조에 대한 다짐 시공 및 평가에 대하여 향후 개발되고 있는 역학적인 포장설계 적용과 병행하여 변화가 요구되고 있다. 도로 및 공항 포장의 하부구조는 구조적 요소로서의 역할이 매우 중요하여 설계자와 관련 엔지니어들의 재고가 필요하다. 우선적으로 검토하고 시작해야 할 일은 과연 현행 다짐층의 두께나 다짐에 대한 평가방법이 적절한지 여부와 전체 포장시스템의 공용성에 얼마만큼의 영향을 미치는가를 알아보는 것이다. 특히 다짐시공 건설기계에 대한 최신 기술의 현장 적용성 검토를 통하여 시공성 및 경제성의 재고가 필요하다. 이를 통하면 하부구조에서 대체 재료의 재활용도 가능하다고 판단된다.

마지막으로 이제는 확실적인 다짐의 시공 및 평가에서 벗어나 역학적 설계에서 시공 관리가 연속해서 이루어지는 보다 일관성 있고 효율적인 방식의 다짐 관리가 이루어져야 하겠다.

참고문헌

1. 건설교통부, 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구, 연구보고서 KPRP-E-03, 2003

2. 노한성, 최영철, 충격완화재 적용성 평가 연구, 연구보고서, 한국도로공사, 2001
3. 임유진, 박성완, "공내 재하시험기(PMT)를 이용한 포장체의 탄성계수 결정", 한국도로학회 학술발표회 논문집, pp15-20, 2000
4. 이치현, 계절적 함수비를 고려한 화강 풍화 노상토의 회복변형거동 연구, 석사학위 논문, 단국대학교, 2006
5. Allen, J., Bueno, J., Kalinski, M., Myers, M., and Stokoe, K., "Increased Single-Lift Thicknesses for Unbound Aggregate Base Courses", Research Report 501-5F, International Center for Aggregate Research, Texas, US, 1998
6. Brandl, H., "Compaction of Soil and Other Granular Material-Interactions", Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Earth Structures, A.A. Balkema Publishers, 2001
7. Kearney, E., "Oscillatory Compaction of Hot-Mix Asphalt", Transportation Research Circular, No. E-C105, Transportation Research Board, pp49-53, 2006