

현장 실험을 통한 LFWD의 보조기층 다짐관리 기초 연구

A Fundamental Study on Establishing the Subbase Compaction Control Criteria of LFWD with In-situ Tests

최준성* · 김종민** · 한진석*** · 김부일****

Choi, Jun Seong · Kim, Jong Min · Han, Jin Seok · Kim, Bu Il

1. 서론

현재 국내에 적용되고 있는 도로포장 설계법은 미국의 AASHTO 설계법과 일본의 TA 설계법을 혼용하여 사용하고 있으며, 포장 재료의 설계입력 물성치는 상대 다짐도와 K_{30} 등의 강도특성 또는 경험적인 물성치를 기준으로 평가하고 있다. 그러나, 경험적인 특성치는 실제 포장체의 거동특성을 구체적이며 실제적으로 평가하기 어려우며, 설계법이 개발되었던 조건과 상이한 조건에서 적용할 경우 신뢰성에 문제가 있다. 이에 경험적 특성치의 한계를 극복하기 위해 '86 AASHTO 설계법에서는 회복탄성계수(Resilient Modulus ; 이하 M_R)를 하부구조 재료의 기본입력 물성치로 적용하였으며, 이후 국내에서도 M_R 값은 포장 설계 및 해석뿐 아니라 포장 평가 및 유지관리 등에도 보편적 개념으로 정착되어 가고 있다. 또한 한국형 도로포장설계법 개발에서도 도로의 설계-시공-유지관리로 이어지는 전 공정 중, 설계 및 유지관리는 회복탄성계수를 이용한 역학적 설계법으로 이루어질 예정이나, 시공에서는 현재까지도 상대 다짐도와 평판재하시험을 이용하여 관리되고 있다. 이는 설계-시공-유지관리의 설계적 관점 불일치라는 역학적 맹점을 갖고 있으며, 이러한 문제를 해결하고자 도로하부 구조의 현장 다짐관리에 다짐 층 탄성계수를 측정할 수 있는 장비 및 다짐관리기법을 위한 연구가 국내외적으로 진행중에 있다.

다짐 층 탄성계수를 측정할 수 있는 장비 및 다짐관리기법이 개발된다 하더라도 도로공사 전체 공정의 다짐 층 탄성계수를 이용한 역학적 다짐관리 일원화를 위해서는 설계시 탄성계수(설계 탄성계수)와 현장 시공 후 측정 탄성계수를 비교할 수 있어야 한다. 그러나, 설계 탄성계수는 현장사용재료를 표준 M_R 시험으로 측정을 하고, 현장 탄성계수는 선택된 시험 장비를 시공현장 다짐 층에 직접적으로 운용하여 측정하는 것으로, 측정 방식 및 원리에 차이가 있다. 이러한 차이로 인해 설계 탄성계수와 현장 탄성계수의 직접적인 비교가 어려우며, 두 탄성계수의 비교를 위해서는 시험상태가 고려된 shift factor 혹은 field factor 가 산정되어야 한다.

본 연구에서는 보조기층의 설계 탄성계수와 현장 탄성계수 비교를 통한 역학적 다짐관리 구현을 위해 다짐 층 탄성계수를 측정할 수 있는 장비를 LFWD로 선정하였으며, 설계 탄성계수는 시험이 복잡하고 변수가 큰 표준 M_R 시험값 대신, 한국형 도로포장설계법에서 제시하고 있는 다짐 재료의 기초물성 값으로부터의 추정식을 이용한 추정 M_R 값으로 산정하였다. 보조기층 다짐 층의 현장 탄성계수를 얻기 위하여 다짐시공 현장에서 LFWD 시험을 실시하였으며, 이와 더불어 현재 다짐관리 기준인 들밀도 시험과 평판재하시험을 실시하여 기존 다짐시험방법과의 상관성을 분석하였다.

* 정회원 · 인덕대학 토목환경설계과 교수 · 공학박사 · 02-950-7565(Email : soilpave@induk.ac.kr)

** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사 · 02-3408-3293(Email : jongmin@sejong.ac.kr)

*** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 · 박사과정 · 02-464-0716(Email : for1000dayshan@nate.com)

**** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원 · 공학박사 · 031-910-0240(Email : bikim@kict.re.kr)

2. LFWD 시험기

국내 보조기층의 탄성계수를 측정할 수 있는 장비 및 다짐 기준 마련 연구를 위하여 보조기층 다짐현장에서 기존 다짐관리 시험법인 들밀도 시험 및 평판재하시험과 탄성계수 측정 장비인 소형충격재하시험(Light Falling Weight Deflectometer ; 이하 LFWD)을 실시하여 현장에서의 상관관계를 비교 분석하였다.

현재 포장 하부구조의 다짐관리 기준인 평판재하시험과 들밀도 시험은, 시험을 수행하는데 있어 많은 인력과 시간이 소요되는 단점이 있다. 이에 시공현장에서 두 시험을 수행한다 하여도 일부 구간에 단편적으로 이루어져 왔으며, 전체 구간의 지지력 데이터를 확인할 수 없는 한계가 있었다. LFWD 시험은 간단한 장비로 구성되어 이동성이 좋으며, 최소 2명에서 수행이 가능하고 실시간으로 시험 데이터를 분석할 수 있어 현장 탄성계수 측정 및 전체 구간의 다짐관리를 가능하게 할 수 있다.

LFWD 시험 장비는 그림 1과 같은 외형을 가지고 있으며, 그림 2와 같은 방법으로 현장에서 시험을 수행하게 된다. LFWD 시험은 자유 낙하시킨 추로 인해 발생하는 충격으로 하중과 처짐을 측정하여 탄성계수를 산출한다.

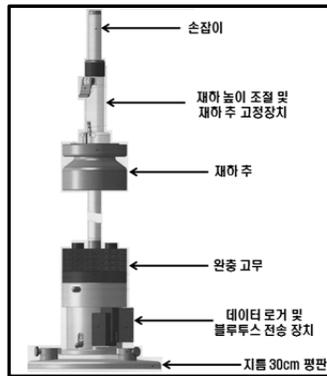


그림 1. LFWD 시험기 외형



그림 2. LFWD 시험 방법

3. 현장시험

보조기층의 탄성계수를 이용한 다짐관리를 위해서는 현장 측정 탄성계수와 비교할 수 있는 기준이 있어야 한다. 이 기준 값은 현장 보조기층 시료를 실내 표준 M_R 시험으로 얻은 설계 M_R 값이어야 하나, 시험이 복잡하고 고도의 숙련도를 요구하여, 시험자의 숙련도에 따라 변수 폭이 큰 단점이 있다. 본 연구에서는 보조기층 현장에서는 LFWD를 이용한 보조기층 현장 탄성계수를 측정하였으며, 실내 표준 M_R 시험을 대신하여, 한국형 도로 설계법에서 제시한 다짐 재료의 기초물성 값으로부터 추정식을 이용한 추정 M_R 값으로 산정하였다.

3.1 현장시험 및 실내시험 실시

보조기층의 탄성계수를 이용한 현장 다짐관리를 위해서는, 여러 현장 시험을 통하여 차량의 운하중을 견딜 수 있는 보조기층의 탄성계수 기준 값을 제시해 주어야 한다. 본 연구에서는 기존의 보조기층의 다짐관리 시험법인 들밀도 시험과 평판재하시험과 탄성계수를 통한 관리기준을 비교분석하고자, 탄성계수 측정은 다짐시공이 완료된 상태에서 실시하였다.

실내 시험은 기본적으로 현장 다짐도를 판별하기 위하여 현장 시료를 이용한 다짐시험을 실시하였으며, 한국형 도로 설계법에서 제시한 M_R 추정식 계산을 위하여 현장 시료의 기초 물성 시험을 하였다. 다짐시험은 보조기층 다짐시험 기준인 E 다짐을 실시하였으며, 기초 물성 시험은 함수비 측정 및 흙 분류를 위한 체 분석 시험을 수행하였다.

3.2 추정 설계 M_R 산정 방법

한국형 도로 설계법에서 제시한 설계 M_R 추정식은, 실내 표준 M_R 시험값과 각각의 시험에 쓰인 재료의 기초 물성값을 정리하여 인공신경망 공식으로 산출된 식이다.(2002 권기철) 인공신경망 공식에서 요구하는 기초 물성값은 보조기층의 경우 다짐시험을 통한 최대건조단위질량과 체분석을 통한 #4번체 통과량 및 균등계수(CU)이다. 이 기초물성값은 실내 시험을 통하여 모두 얻을 수 있었으며, 추정식을 통하여 간편하게 추정 설계 M_R 값을 산정할 수 있었다.

보조기층 현장 시험은 총 9구간에 걸쳐 실시하였으며, 흙 분류에 따라 데이터 범위를 정리하면 표 1과 같다. 여기서 E_{LFWD} 는 LFWD로 측정된 탄성계수를 말하며, E_{FWD} 는 FWD 시험장비로 측정된 탄성계수이다.

표 1. 현장 시험 데이터 정리

	흙 분류	다짐도	E_{LFWD} (Mpa)	K_{30} (MN/m ³)	설계 M_R (Mpa)	E_{FWD} (Mpa)
보조기층	GW	RC > 95%	77~218	-	216.65~571.11	85~212.89
		90%<RC<95%	58~189	276.51~443.68	40.03~468.46	75.33~205.56
		RC<90%	66~205	-	108.26~313.85	90.0~173.22
	GP	RC > 95%	-	-	-	-
		90%<RC<95%	155	312.44	233.88	161.33
		RC<90%	130~158	300.80	119.55~294.59	-
	GW-GP	RC > 95%	89	312.44	227.92	79.22
		90%<RC<95%	97~132	300.80~312.44	210.58~498.64	92.78
		RC<90%	215	300.80	84.98	-
	SW	RC > 95%	77~144	312.44~438.90	235.91~246.96	139.78
		90%<RC<95%	59~170	300.80~343.28	121.65~374.56	104.67~216.33
		RC<90%	60~270	342.26~343.28	168.80~329.63	249.79~280.44
	SP	RC > 95%	148	300.80	330.80	-
		90%<RC<95%	-	-	-	-
		RC<90%	48	342.26	294.12	89.78

현재 보조기층의 다짐관리 기준은 다짐도 95% 이상, 평판재하시험 K_{30} 값은 콘크리트 포장에서는 196MN/m³ 이상, 아스팔트 포장에서는 294MN/m³으로 두 기준 중 하나만 만족하여도 보조기층 다짐관리 기준에 만족한다고 판단하고 있다. 시험결과, 현장 다짐도 95%를 만족하지 못하고 있다 하더라도 K_{30} 값이 모든 지점에서 294MN/m³ 이상임을 알 수 있다.

4. 현장시험을 통한 보조기층의 다짐관리 비교 및 현장전이함수 개발

보조기층의 탄성계수를 이용한 역학적 다짐관리 일원화를 위해서는 설계 탄성계수(설계 M_R)와 현장 시공 후 측정 탄성계수(현장 탄성계수)를 비교할 수 있어야 한다. 그러나, 설계 탄성계수는 현장시료를 표준 M_R 시험기로 측정을 하고, 현장 탄성계수는 LFWD 시험 장비를 시공현장 다짐 층에 직접적으로 운용하여 측정하는 것으로, 측정 방식 및 원리에 차이가 있다. 이러한 차이로 인해 설계 탄성계수와 현장 탄성계수의 직접적인 비교가 불가하며, 두 탄성계수의 비교를 위해서는 시험상태가 고려된 현장전이함수(shift factor 혹은 field factor)가 산정되어야 한다. 이를 위한 기초 연구로서 본 연구에서는 E_{LFWD} 와 추정 설계 M_R 과의 상관관계를 비교 분석하였다.

또한 보조기층의 탄성계수를 이용한 다짐관리 기준이 마련된다 하여도, 실제 현장에서 시험 장비 구비 문제 및 현장 실무자의 기존 다짐관리 기준과 새로운 다짐관리 기준의 개념적 차이에 대한 이해도 결여로 탄성계수를 이용한 다짐관리 기준을 바로 실행하기란 쉽지 않다. 이러한 문제점을 해소하기 위해 기존 다짐관

리 장비를 이용한 현장 탄성계수 측정 방법을 연구하였으며, 이를 위한 기초 연구로 현재 다짐기준인 다짐도 및 K_{30} 과 E_{LFWD} 의 상관관계를 분석하였다.

본 연구는 2년에 걸쳐 수행되고 있으며, 데이터 분석은 1차년 토조 실내 시험 및 현장 시험을 통해 얻은 비교 분석 상관관계 제안식을 안전측 보수적 제안을 위하여 신뢰구간 하한계 90% 상관관계식으로 제안하였으며, 2차년도 현장시험결과를 통하여 제안식을 검증하였다.

4.1 E_{LFWD} 와 다짐도 상관관계

현재 보조기층 다짐관리 기준 중 하나의 현장 다짐도와 현장 E_{LFWD} 상관관계를 분석하였다. 현장 다짐도는 보조기층의 강도 및 강성도 기준인 아닌 품질 기준으로서 보조기층 재료의 역학적 특성 반영에는 부적합하다. 그러나, 기초 물성값이 동일하고 함수비가 동일하다면, 다짐도에 따라 E_{LFWD} 는 정비례 관계를 나타낼 것이며, 이는 많은 현장 데이터 분석을 통하여 보조기층 재료에 따른 E_{LFWD} 기준 값을 제시할 수 있을 것이다. 그림 3의 E_{LFWD} 와 다짐도 상관관계 1차년도 제안식은 기초 물성값이 일정한 GW 시료를 이용한 실내 토조시험 데이터로 산출된 것으로, 다짐도와 E_{LFWD} 의 정비례 관계를 나타내주고 있다. ▲로 표시된 2009년 현장시험 데이터가 신뢰구간 90% 제안식 이상을 모두 만족하고 있음을 검증하였으며, 다짐도 95~100% 범위에서 E_{LFWD} 값이 세로로 분포된 것은 동일 다짐도에서 다짐 재료 종류 및 기초 물성값에 따라 E_{LFWD} 측정값이 서로 차이를 보여주고 있다. 이는 현장에서 측정된 탄성계수가 각 다짐재료의 역학적 특성을 반영한다는 기본 원리를 증명하고 있으며, LFWD 시험 장비를 통해 이를 판단할 수 있음을 알 수 있다.

4.2 E_{LFWD} 와 K_{30} 상관관계

평판재하시험의 K_{30} 은 보조기층에 재하판을 설치하고 연직하중을 단계적으로 가하여 지지력 및 시간과 침하량을 실측하여 분석하는 강도 개념의 시험법이다. 이는 다짐 재료의 역학적 특성을 이용한 시험법으로 미국 및 독일 등에서 LFWD 시험과 같은 탄성계수 측정 장비와 상관관계 비교 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 미국 및 독일의 평판재하시험법은 연직하중의 재하와 소산의 과정을 반복적으로 실시하는 반복 평판재하시험을 수행하지만, 현재 국내 평판재하시험은 연직하중을 단계적으로만 가하는 단순 평판재하시험을 수행하고 있어, 선진 외국 시험 자료들과 직접적인 비교가 불가능하다.

E_{LFWD} 와 K_{30} 의 상관관계는 그림 4와 같으며, E_{LFWD} 와 K_{30} 변화 추이는 서로 비슷함을 알 수 있다. 이는 LFWD와 평판재하시험이 반력에 의한 탄성계수 측정 원리가 유사함을 나타낸다.

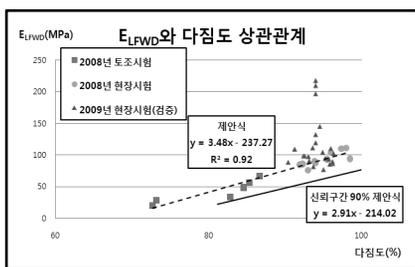


그림 3. E_{LFWD} 와 다짐도 상관관계

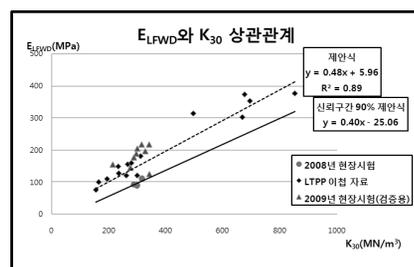


그림 4. E_{LFWD} 와 K_{30} 상관관계

4.3 E_{LFWD} 와 추정 설계 M_R 상관관계

역학적 다짐관리를 위한 설계 탄성계수와 현장 탄성계수의 비교를 위해서는 시험상태가 고려된 현장잔이함수가 필요하며, 이를 위한 기초 연구로서 본 연구에서는 E_{LFWD} 와 추정 설계 M_R 과의 상관관계를 제시하고, 전혀 다른 현장결과로서 검증하였다. 검증결과, 그림 5와 같이, 제안한 신뢰구간 하한계 90% 상관식을 모두 상회하여 안전측 결과를 나타내었다. 그러나, 검증현장 데이터 분포 형태를 보면 동일 E_{LFWD} 범위에서 추정 설계 M_R 범위가 최대 100MPa로 그 변화 폭이 상당히 크며, 다른 상관관계에 비해 데이터 분산이 나타남을 알 수 있다. 이는 설계 M_R 값이 다짐재료에 따른 역학적 특성 고유 값으로서 다양한 다짐 재료로부터 기초 물성에 의한 추정 설계 M_R 식 산

정에 차이가 있기 때문이다. 이와는 달리, 제안한 현장전이함수식은 2008년 현장 시험의 GW 계열 흙을 실내 토조 시험에서도 동일하게 사용하여, 다짐재료 다양성의 한계를 가지기 때문에 사료된다.

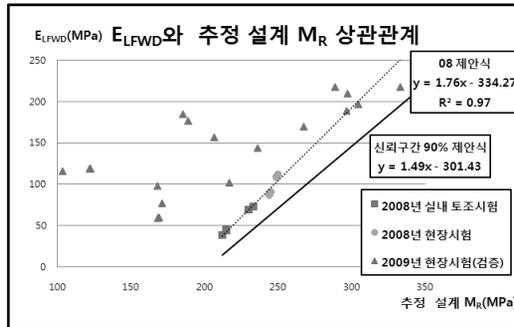


그림 5. 전체 데이터를 이용한 E_{LFWD} 와 추정 설계 M_R 상관관계

따라서, 현장 시험으로 얻은 E_{LFWD} 와 추정 설계 M_R 의 상관관계를 보다 효과적으로 분석하기 위하여 전체 데이터를 흙의 종류에 따라 분별하였으며, 정확한 분별을 위해 다음과 같은 가정 사항을 두었다. 첫째, 표 2의 보조기층 전체 5종류의 흙을 자갈질과 모래질로 나누어 데이터가 가장 많은 GW와 SW 시험 결과 값으로 상관관계를 분석하였다. 둘째, 표준 실내 M_R 시험은 다짐도 95% 이상의 시료를 이용하여 수행하므로, 현장 데이터 중 상대 다짐도 95% 이상 지점의 데이터만 선별하여 상관관계를 분석하였다. 셋째, 보조기층의 탄성계수 범위를 고려하여 최소탄성계수 이상인 60MPa 이상의 데이터만을 선별하여 상관관계 분석하였다. 위 세가지 가정 사항을 기준으로 데이터를 선별하여, 다짐재료 GW, SW의 E_{LFWD} 와 추정 설계 M_R 상관관계를 재분석하여 다짐재료별 현장전이함수를 그림 6, 7과 같이 제시하였다.

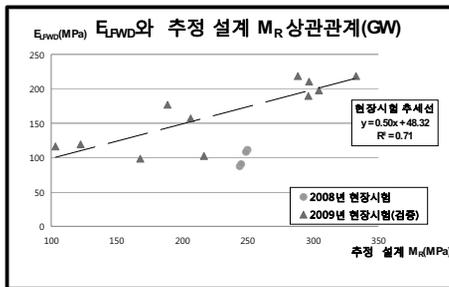


그림 6. GW 계열 데이터를 이용한 E_{LFWD} 와 추정 설계 M_R 상관관계

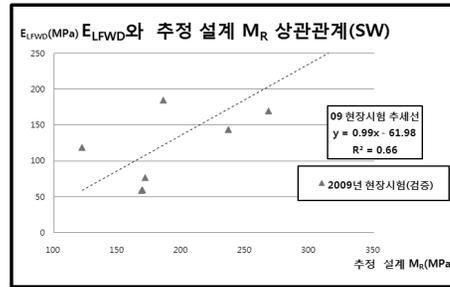


그림 7. SW 계열 데이터를 이용한 E_{LFWD} 와 추정 설계 M_R 상관관계

보조기층 다짐재료 GW와 SW로 현장 시험 데이터를 분류하여 E_{LFWD} 와 추정 설계 M_R 상관관계를 분석한 결과 다짐 재료에 따라 E_{LFWD} 와 추정 설계 M_R 과의 상관관계 경향이 서로 다를 수 있다. GW 계열과 SW 계열의 두 상관관계식에 따르면 GW 계열 흙의 추정 설계 M_R 값이 SW 계열의 흙보다 크며, 이는 GW 계열의 흙이 SW 계열의 흙보다 입자의 크기가 크므로 추정 설계 M_R 값 역치를 갖 것이라는 일반적 원리에 부합하며(2005 박현일), SW 계열의 흙에서는 E_{LFWD} 값이 220MPa 이상 나오지 않으므로 두 계열 흙 간의 추정 설계 M_R 값 역전은 일어나지 않았다. 그러나, 두 흙에 대한 상관관계식을 제안하기에는 시험 데이터가 너무 적고, 두 흙에 대한 데이터 분포도가 추세를 중심으로 분포되어 있어, 제한적임을 알 수 있다. 따라서, 현장에서 사용하기 위한 현장전이함수로서 제안하기 위해서는 보다 많은 시험 데이터를 이용하여 보다



정확한 추세 경향 분석이 필요하다. 또한 동일 계열의 흙이라도 기초 물성값에 따라 추정 설계 M_R 값의 범위가 크므로, 현재 제시되어 있는 추정 설계 M_R 식에 의한 산정값이 보다 일관성있는 결과를 보일 수 있도록 설계 M_R 값 추정 방식에 대한 발전이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구는 현재 경험적 물성치로 평가하고 있는 보조기층 다짐관리 방법을 설계 입력 변수인 회복탄성계수를 이용한 다짐 관리방법으로 전환하는 기초 연구 단계로서, 다짐 재료에 따른 역학적 특성인 설계 M_R 값을 현장에서 직접 측정하여 현재 다짐상태를 평가하고자, 이를 현장 탄성계수 측정 장비인 LFWD와 상관관계를 통해 기존 다짐평가장비의 활용 가능성 및 현장전이함수를 제안하고자 하였다. 국내 9지역의 고속도로 및 국도 보조기층 현장 시험으로부터 보조기층 다짐시공 현장 E_{LFWD} 값과 한국형 도로포장 설계법에서 제안하고 있는 추정 M_R 값 간의 상관관계를 분석하였으며, 현장에서의 E_{LFWD} 값으로부터 보조기층 다짐 재료에 따라 설계 M_R 값을 추정할 수 있는 현장전이함수(shift factor)를 얻을 수 있었다. 그와 더불어 현재 다짐관리 기준인 상대 다짐도 및 K_{30} 값과 E_{LFWD} 값의 상관관계를 제시하였으며, 역학적 다짐관리시 LFWD 시험을 사용하거나 기존 다짐관리 평가 장비인 들밀도 시험 및 평판재하시험을 통하여 보조기층 다짐관리를 할 수 있는 가능성을 제안하였다. 또한 상대 다짐도를 위한 들밀도 시험은 설계탄성계수 추정보다는 보조기층 다짐 재료의 품질 기준에 대한 기준으로서 필요함을 알 수 있었다. 이는 다짐시공 현장에서 기존 다짐관리 기준인 들밀도 시험과 평판재하시험에 익숙한 실무자들에게 새로운 시험법에 대한 충격을 완화해줄 수 있을 것이며, 새로운 시험장비에 대한 적응과 사용이 활발할 때까지의 기술공백을 줄여 줄 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 국책연구과제인 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 일부 결과로 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 국토해양부, 도로공사 표준 시방서, 2009
2. 국토해양부, 한국형 도로포장설계법 개발과 포장성능 개선 방안 연구, C 도로포장 하부구조 다짐관리 지침개발 연구, 2008
3. 박현일 외 2명, 인공신경망 모델에 근거한 노상토 및 보조기층 재료의 탄성계수 추정, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 2005
4. 최준성 외 3명, “노상 및 보조기층의 소형충격재하시험 활용방안 연구”, 한국도로학회논문집, pp85-98, 한국도로학회 2009.6
5. Ravindra Gudishala, 2004, “Development of Resilient Modulus Prediction Models fo Base and Subgrade Pavement Layers from In Situ Devices Test Results”, Louisiana State University.
6. Light Falling Weihgt Deflectometer manual, Dynatest, 2007