

## 소형 FWD를 이용한 노상토의 다짐도 추정에 관한 연구

A Study on the Estimation of Relative Compaction  
on the Subgrade using a Portable FWD

강 희 복\*      김 교 준\*\*      강 진 태\*\*\*      김 종 렬\*\*\*\*  
Kang, Hee Bog      Kim, Kyo Jun      Kang, Jin Tae      Kim, Jong Ryeol

### Abstract

This study was intended to estimate of relative compaction on the ground under the load using of portable FWD. The outcome in the wake of the study is highlighted as below. Viewing the variation of dynamic deflection modulus depending on a number of compaction, when a number of compaction increased to 8 (18.3MPa) from 4 (15Mpa), a dynamic deflection modulus increased 27%, and when a number reached to 12 (27.9MPa), it doubled the value indicated in 4. Viewing the relationship between dry density and dynamic deflection modulus in line with the increase in a number of compaction, a number of compaction by the roller reaching to the degree of compaction equivalent to 95% of max dry density was 13, with a dynamic deflection modulus indicating 27MPa ~ 29MPa.

### 요 지

본 연구는 소형FWD를 사용하여 노상토의 다짐도를 추정하였으며 본 연구의 결과는 다음과 같다. 다짐 회수에 따른 동적변형계수의 변화를 보면, 다짐 회수가 4(15MPa)에서 8(18.3MPa)로 증가할 때 동적변형 계수는 27% 증가하였으며, 다짐 회수가 12(27.9MPa)였을 때의 동적변형계수는 다짐 회수 4일 때의 두 배의 값을 나타내었다. 다짐 회수의 증가에 따른 건조단위중량과 동적변형계수와의 관계에서 95% 다짐도에 해당하는 롤러의 다짐 회수는 약 13회이며, 이때의 동적변형계수 분포는 27MPa~29MPa이었다.

**Keywords :** Portable FWD, Dynamic deflection modulus, Static deflection modulus, Estimation CBR

**핵심 용어 :** 소형FWD, 동적변형계수, 정적변형계수, 추정 CBR

\* 정희원, 한영대학 토목환경과 조교수

\*\* 전남대학교 시간강사

\*\*\* 정희원, 전남대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\*\* 정희원, 전남대학교 토목공학과 부교수

E-mail : jrkim@jnu.ac.kr 062-530-1654

•본 논문에 대한 토의를 2007년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2008년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

도로의 합리적인 유지보수의 평가와 포장설계의 주요입력 변수인 동시에 포장 구조체의 구조적 능력을 판단하는 기준이 되는 변형계수를 포함한 포장지반의 물성치를 평가하는 것은 대단히 중요하다.

현재 사용되고 있는 물성치 추정방법에는 평판재하 시험과 CBR시험이 주로 이용되고 있으나 이러한 재하시험방법은 반력으로 대형장비가 필요하고 많은 측정시간과 비용 등의 문제점으로 인해 최근 들어 간단하면서도 일정한 높이에서 규정된 중량을 재하판에 낙하시켜 속도를 측정함으로써 처짐과 동적변형계수를 구하는 방법에 대한 연구가 시도되고 있다. 또한 비파괴 시험으로 스웨덴에서는 Laser Rolling Deflection Meter (Laser RDM)을 활용하여 도로의 처짐을 레이저를 통해 측정하는 방법도 개발되어 있다. 이러한 동적방법으로 물성치 평가를 위한 국내외의 연구를 살펴보면 국내에서는 박태순 등<sup>(9)</sup>에 의해 소형FWD를 활용한 국내 고속도로와 지방도현장의 포장조건이 다른 재료특성에 대한 변형계수 추정을 연구하였다. 또한, 박용부 등<sup>(8)</sup>은 동평판재하시험을 이용한 정적과 동적변형계수의 비교에 대한 연구를 발표하였으며 그 밖의 연구자에 의해 FWD에 대한 연구가 진행되었다.<sup>(2)(3)(10)(11)</sup> 국외의 연구로 각종 휴대용 FWD (Falling Weight Deflectometer)를 개량하여 노상과 노반, 아스팔트층에 대한 물성치 추정과 CBR시험결과와의 비교연구가 수행되었다.<sup>(13)</sup> 지

금까지의 연구는 주로 동적변형계수를 구하는데 주요점을 두었으나 소형 FWD를 노상도의 다짐도 추정에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 노상도의 시공현장을 선정하여 소형 FWD를 이용하여 다짐도를 추정하고자 하였으며 다짐도의 확인을 위해 현장들밀도 시험을 실시하였다.

## 2. 소형 FWD의 원리

### 2.1 소형 FWD의 제원

소형 FWD는 센서(Accelerometer-가속도계)가 부착된 재하판, 하중낙하장비, 전자침하측정장비 및 데이터 출력기로 구분할 수 있다. 센서는 그림과 같이 재하판 위에 내장되어 있고 추가로 가속도계나 속도계를 구입하여 측정할 수 있다. 소형 FWD의 총무게는 15kg, 낙하추의 무게는 10kg, 최대 충격력은 7.07 kN이다. 재하판은 직경 30cm, 처짐 측정범위는 0.1~2.0mm±0.02mm이다. 이상과 같이 소형 FWD는 해석방법에 따라 비선형 거동을 고려해야 하며, 충격하중이 기존 FWD에 비해 훨씬 작아서 실제 포장체가 받는 하중조건과 상이하다는 단점이 있지만 기존 FWD에 비하여 상대적으로 저가이고 경량이며 조작이 간편하여 각 지방자치단체의 도로포장 유지관리에 이용이 용이한 장점이 있다. Fig. 1은 소형 FWD의 개략도이다.

### 2.2 축대칭 하중 작용 시 지표면에서의 처짐

단층구조로 이루어진 잘 다져진 노상 및 노반에 반무한의 원형 등분포하중이 작용할 경우 지반의 응력상태는 Fig. 2와 같다.

이는 탄성론의 축대칭 문제로서 하중에 의한 임계 응력, 변형률, 처짐은 축대칭인 원형면적의 중심아래에서 발생한다.

여기서,  $\tau_{rz} = 0$ ,  $\sigma_r = \sigma_t$  이므로

$\sigma_z, \sigma_r$  은 주응력이다.

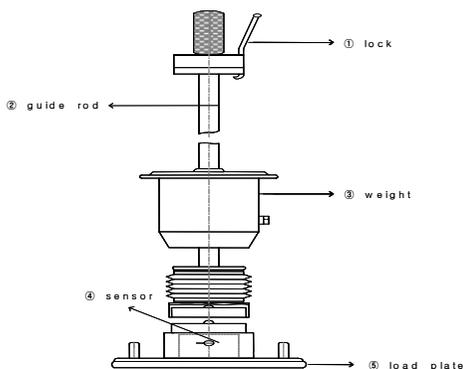


Fig. 1 소형 FWD의 개략도

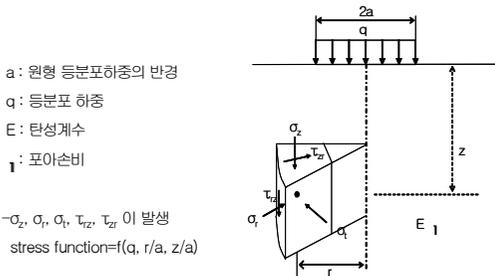


Fig. 2 축대칭 하중을 받는 경우의 응력구성요소

탄성론에 의해 대칭 하중을 받는 대칭축 중심에서의 응력 및 변형률의 관계식으로부터 하중작용중심에서의 연직변형은 식(1)과 같다.

$$w = \frac{(1+\nu)qa}{E} \frac{a}{(a^2+z^2)^{0.5}} + \frac{1-2\nu}{a} [(a^2+z^2)^{0.5} - z] \quad (1)$$

식(1)로부터  $z=0$  일 때 지표면에서의 연직 변형은 다음 식(2)로 구할 수 있다.

$$w_o = \frac{2(1-\nu^2)qa}{E} \quad (2)$$

여기서,  $q$ 는 원형 등분포 하중,  $a$ 는 원형 등분포 하중의 반경,  $\nu$ 는 지반의 포아송비,  $E$ 는 지반의 변형계수이다. 독일의 GDP헨드북에서는 식(2)로부터 동적변형계수를 구하는 식을 다음 식(3)과 같이 제시하였다.

$$w_o = \frac{22.5}{E} \quad (3)$$

### 3. 시험장비 및 시험방법

본 연구에 사용된 소형 FWD는 전철의 Fig. 1에서 소개한 장비를 사용하였다. 시험은 전남 벌교의 P도로 현장 노상 한곳을 선정하여 다짐정도를 판단하기 위해

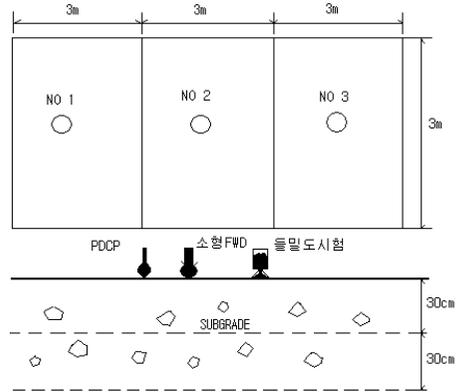


Fig. 3 현장시험 전경도

들밀도시험을 실시하였다. 시험성토현장은 60cm 깊이로 굴착한 후 현장에서 실내다짐시험에 의뢰한 토사를 30cm두께로 그레이더로 정리한 후 진동롤러(10톤)로 4회, 8회, 12회, 20회 다짐을 실시하였다. Fig. 3에서 보인 바와 같이 시험현장구간을 3개 구간으로 나누었으며 진동롤러에 의해 다짐이 끝나면 현장들밀도시험과 소형 FWD시험을 병행 실시하였으며 소형 FWD시험은 정밀도를 높이기 위해 5회 측정된 평균값을 구하였다.

## 4. 결과분석 및 고찰

### 4.1 현장시료의 실내다짐시험 및 기본물성시험 결과

Fig. 4는 KS F 2312의 수정다짐방법 중 D다짐방법에 의해 수행한 다짐곡선을 도시한 것으로 최대건조단위중량은  $1.88\text{g/cm}^3$ 이며 최적함수비는(OMC)는 13.2%이었고 수정CBR은 17.3%였다. 또한 시험성토 현장의 토사를 채취하여 실내다짐시험과 실내CBR시험, 그리고 기본물성시험을 실시하였다. 시험에 사용된 시료의 물리적 특성은 Table 1과 같다. 비중은 2.64이며 액성한계와 소성한계, 소성지수는 NP에 해당된다. 통일분류법상 흙의 분류는 SM에 해당되며 #200체 통과량은 21%이다.

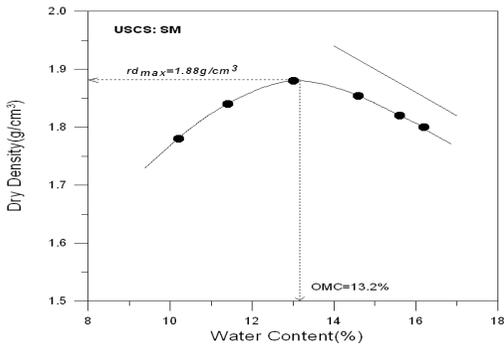


Fig. 4 시료의 다짐곡선

Table 1 본 연구에 사용된 시료의 물리적 성질

현장	비중 (Gs)	액성한 계 (%)	소성한 계 (%)	소성 지수	#200 통과량 (%)	수정 CBR (%)	USCS
별교	2.64	NP	NP	NP	21	17.3	SM

#### 4.2 소형 FWD처짐과 현장들밀도 시험결과

현장에서 만족할 만한 단위중량을 얻으려면 흙의 종류와 함수비 이외에도 여러 요소들을 함께 고려해야 한다. 이러한 요소들에는 다짐장비에 의해 가해지는 압력의 크기, 압력이 가해지는 면적, 다짐층의 두께 등이 있다. 이것은 표면에 가해진 압력이 깊이에 따라 감소하며 결국 깊은 곳에서는 흙이 덜 다져지기 때문이다. 다짐을 받는 동안 흙의 건조단위중량은 롤러의 다짐횟수에 의해 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 롤러의 다짐횟수에 따른 다짐효과를 파악하기 위해 동일한 지점에서 소형 FWD시험과, 현장들밀도시험을 병행 실시하여 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

현장 들밀도 시험은 다짐횟수에 따라 건조단위중량의 변화를 파악하기 위해 다짐이 끝난 후 3개 측점에 대해 시험을 실시하였다. 현장의 기온이 32°로서 무더운 날씨였기 때문에 다짐 작업 후 시간의 경과에 따라서 지표면의 함수비가 감소할 수 있어 함수비 측정은 현장에서 하는 급속함수량 측정 장비를 사용하였으며 확인차원에서 현장에서 시료를 바로 채취하여 무게를 측정 후 24시간 건조시킨 후 함수비를 비교하였다. Table 2의 건조단위중량을 살펴보면 롤러의 다짐 횟수를 4회 진행하였을 때 함수비 측정결과는 약 11%

Table 2 다짐횟수에 따른 건조단위중량, 소형FWD처짐결과(별교현장)

롤러 다짐 횟수	측점	건조 단위중량 (g/cm³)	소형 FWD 처짐(mm)						함수비 (%)
			1회	2회	3회	4회	5회	평균	
4회	NO1	1.60	1.68	1.67	1.47	1.39	1.61	1.56	12.1
	NO2	1.64	1.53	1.54	1.28	1.21	1.49	1.41	10.1
	NO3	1.63	1.66	1.4	1.23	1.4	1.88	1.51	10.9
8회	NO1	1.73	0.95	0.89	1.21	1.24	1.31	1.12	9.7
	NO2	1.68	1.49	1.19	1.40	1.04	1.58	1.34	10.1
	NO3	1.70	0.97	1.28	1.38	1.35	1.31	1.25	9.7
12회	NO1	1.75	0.77	0.80	0.78	0.69	0.84	0.77	9.9
	NO2	1.79	0.71	0.97	0.7	0.72	0.69	0.75	10.1
	NO3	1.82	1.14	0.83	0.88	1.07	0.72	0.92	9.0
20회	NO1	1.85	0.69	0.61	0.72	0.71	0.66	0.67	8.4
	NO2	1.87	0.9	0.69	0.81	0.50	0.72	0.72	9
	NO3	1.84	0.71	0.82	0.69	0.96	0.75	0.78	9.1

였으며 이때의 건조단위중량의 평균은 1.62g/cm³였다. 8회일 때의 함수비는 9.8%이고 건조단위중량은 1.70g/cm³이었으며 12회 일 때의 건조단위중량은 1.78g/cm³을 기록하였다. 20회의 다짐이 완료된 후 함수비는 8.8%였으며 건조단위중량은 1.85g/cm³를 나타내었으며 다짐에너지가 증가하면서 건조단위중량은 증가하였으며 함수비의 감소는 시험 시간의 경과에 따른 건조가 일부 있었을 것으로 판단된다.

#### 4.3 롤러의 다짐횟수에 따른 소형 FWD 처짐 및 동적변형계수 비교 분석

Fig. 5는 다짐횟수에 따른 소형 FWD의 처짐의 변화를 도시한 것이다. 소형 FWD시험결과는 초기 2회의 낙하로 얻어진 처짐 값은 흙의 상태가 약간 팽창되어 있기 때문에 초기 값은 무시하고 5회 반복하여 일정한 값에 접근해 갈 때의 평균값을 연직 처짐으로 사용하였다. 그림에 나타난 바와 같이 롤러 다짐횟수가 4회일 때의 처짐은 약 1.5mm정도를 기록하였으나 다짐횟수가 증가함에 따라 12회까지는 급속도로 처짐의 감소가 나타났고 12회에서 20회까지는 완만한 변화를 보였다. 흙은 다져질 수록 간극속의 공기가 계속 빠져나가 입자간의 간격이 줄게 되고, 건조단위중량과 강도는 증가하며 이에 따라 강성이 커진다. 한편 강성이 클 수록 외부에서 가해지는 진동이나 충격에 대한 반발정도가 커지게 되기 때문에 소형 FWD에 의한 처짐은 줄어들기 마련이다. 따라서 그림에서 롤러 다짐 횟수가 많을 수록 다짐정도가 커지며, 토층의 밀도와

반발력이 증가함을 보여 준다. 과다짐시에는 흙 입자 파쇄로 오히려 강성이 저하되어 반발력이 감소 할 수 있으나 본 연구에서는 그러한 과다짐 현상은 나타나지 않았다. 한편, 과다짐시는 흙 입자 파쇄로 오히려 강성이 저하되어 반발력이 감소함을 나타낸다.<sup>(14)(15)</sup>

Fig. 6은 롤러 다짐횟수에 따른 동적변형계수를 도 시한 것이다. 동적변형계수는 식(3)을 이용하여 구하였 으며 다짐횟수가 4회일 때의 동적변형계수는 15MPa를 나타내었으나 8회로 다짐횟수가 증가되면서 동적변형계수는 18.3MPa로 약 27%정도 증가하였다. 12회로 다짐횟수 증가 시 동적변형계수는 27.9MPa로 다 짐횟수 4회일 때의 동적변형계수보다 약 2배정도로 증가하여 초기 다짐 시 다짐횟수에 따른 다짐도의 증가가 현저하게 나타남을 알 수 있었다. 다짐횟수 20회에서의 동적변형계수는 약 32MPa로 다짐횟수 12회 일 때의 동적변형계수에 비해 10% 증가한 것으로 나타 났다.

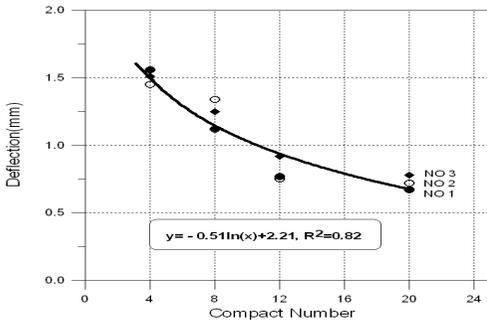


Fig. 5 다짐 횟수에 따른 소형 FWD처짐 비교

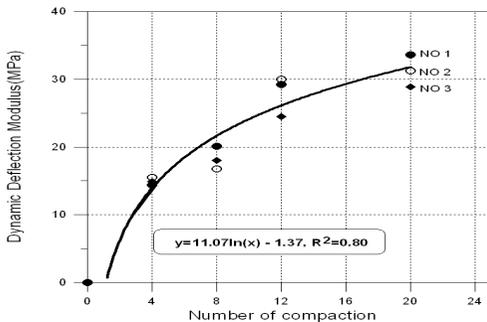


Fig. 6 다짐 횟수에 따른 동적변형계수 비교

#### 4.4 다짐 횟수 증가에 따른 함수비와 건조 단위중량 비교 분석

국내 노상토 재료의 다짐에 대한 주요영향인자로는 건조단위중량, 함수비, 구속응력, 축차응력(변형률크기)인 것으로 밝혀진 바 있다.<sup>(1)</sup> 권기철 등<sup>(5)(7)</sup> Fig. 7은 함수비의 변화에 따른 사질토지반의 건조단위중량 관계를 플로팅 한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같다. 롤러 다짐횟수가 4회일 때 건조단위중량은 평균 1.62g/cm<sup>3</sup> 이고 롤러 8회일 때의 건조단위중량은 1.70g/cm<sup>3</sup>이었다. 이는 다짐도 85%와 90%에 해당하는 값으로 롤러의 다짐횟수가 8회일 때는 충분한 다짐도를 얻지 못했으며 롤러 다짐횟수가 12회일 때는 다짐도 94.5% 롤러 다짐횟수가 20회 일 때는 98%의 값으로 충분한 다짐이 이루어 졌음을 의미한다. 전반적으로 함수비의 증가에 따라 건조단위중량이 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 기존의 많은 연구에서 보고 된 바 와 같이 최적함수비의 건조측으로 형성된 시료가 습윤측으로 형성된 시료에 비해 더 큰 전단변형계수를 보이며 이는 건조측에서 갖게 되는 구조가 습윤측에서 갖게 되는 구조(분산)보다 더 큰 변형계수를 갖는 것을 의미한다.<sup>(4)</sup> 본 연구에서도 건조측에서의 건조단위중량의 증가를 이리한 원인에서 찾아 볼 수 있다. 권기철 등<sup>(7)</sup>의 연구에 의하면 건조단위중량이 증가함에 따라 변형계수가 증가하며 다짐도 90%에서의 변형계수 값에 비하여, 다짐도가 95%일 때는 평균 26%증가하고 다짐도가 100%로 증가하면 평균 56% 증가하는 것으로 보고하였다. 즉 다짐도가 증가할 수

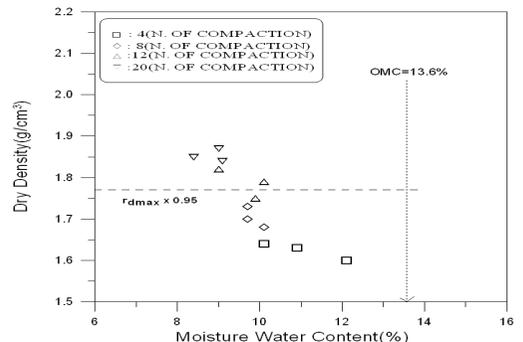


Fig. 7 다짐 횟수 증가에 따른 함수비와 건조단위중량 비교

록 변형계수는 증가한 것으로 나타났다. 전절에서 설명하였듯이 다짐에너지가 증가할수록 변형계수가 증가하였다.

#### 4.5 소형 FWD에 의한 노상토의 다짐도 추정

Fig. 8은 다짐횟수에 따른 건조단위중량과 동적변형계수와의 관계를 비교한 그래프이다.

독일에서는 "ZTVE-StB94"에 의거하여 비동결성 노반에 시공되는 도로등급 SV, I~IV는 동적변형계수가 최소한 60MN/m<sup>2</sup>, V, VI는 50MN/m<sup>2</sup>이 되도록 규정하고 있다. 또한 지반에 따른 다짐도에 따라 동적변형계수의 한계값을 제안하고 있으며 예를 들어 혼합지반과 미세입자 지반의 경우 다짐도 95%이상일 경우 동적변형계수는 10MN/m<sup>2</sup> 이상을 요구하며, 다짐도 97% 이상을 얻고자 할 경우 15MN/m<sup>2</sup>, 100%의 다짐도를 얻고자 할 경우 25MN/m<sup>2</sup>의 동적변형계수를 필요로 한다고 제안하였다.<sup>(8)</sup> 또한 허정도 등<sup>(12)</sup>은 롤러 다짐횟수와 최종다짐밀도를 구하는 식을 제안하기도 하였다.

그림에서 알 수 있듯이 다짐횟수의 증가에 따라 건조단위중량이 증가하고 있다. 롤러 다짐횟수가 4회일 때 건조단위중량은 1.62g/cm<sup>3</sup>으로 다짐도 85%에 해당하며 동적변형계수는 14.9MPa를 나타내었다. 다짐횟수 8회일 경우 건조단위중량은 1.70g/cm<sup>3</sup>이며 동적변형계수는 18.3MPa, 12회의 다짐이 완료되었을 때 건조단위중량은 1.78g/cm<sup>3</sup>, 동적변형계수 27.9MPa를

기록하였다. 최대건조단위중량(1.895g/cm<sup>3</sup>)의 95% 다짐도에서 건조단위중량은 1.80g/cm<sup>3</sup>로서 이에 해당되는 롤러의 다짐횟수는 약 13회 정도로 나타났고 이때의 동적변형계수 분포는 27MPa~29MPa이었다. 이 결과 동적변형계수가 28MPa정도이면 95%정도의 다짐도를 나타낸다고 볼 수 있다.

## 5. 결론

본 연구는 소형 FWD로부터 동적변형계수를 구하여 다짐도를 추정하였고 이를 확인하기 위해 현장밀도 시험을 실시하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 통일분류법상 SM 지반의 노상토인 본 연구현장의 경우 다짐에너지의 증가에 따른 건조단위중량과 동적변형계수와의 관계에서 95%다짐도에 해당하는 롤러의 다짐횟수는 약 13회이며, 이때의 동적변형계수 분포는 27MPa~29MPa이다. 이것은 동적변형계수가 28MPa정도이면 다짐도가 95%라는 것을 의미한다.
- 2) 이상의 연구결과를 당 현장에 국한된 것으로 다짐도의 경우 실제 현장조건별 토사의 특성에 따라 그 범위가 달라질 것으로 판단되는바 많은 토사조건에 따른 연구가 진행된다면 소형 FWD를 이용한 도로 노상토의 다짐도를 평가하는데 시간과 비용 등이 절감되며 실무에의 적용성이 높아 질 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. 건설교통부, "한국형 포장설계법 개발과 포장 성능 개선방안 연구 : 아스팔트 포장 설계법 개발 (하부 구조물성 정량화)", KPRP-G-02.
2. 김수일, 최준성, 이양구, "아스팔트 콘크리트 포장구조체의 물성추정을 위한 FWD시험결과와 최적역산기법 개발", 대한토목학회논문집, Vol. 18, No. 3-1, 1998, pp. 41-52.
3. 김종렬, 강권수, 박달수, 강승구, "소형 FWD의 개량을 통한 아스팔트 포장체의 물성치 추정에 관한 연구", 대한토목학회학술발표회논문집, 2002, pp. 134-137.
4. 김태녕, 정충기, 김명모, "다짐특성이 흙의 동적-지반

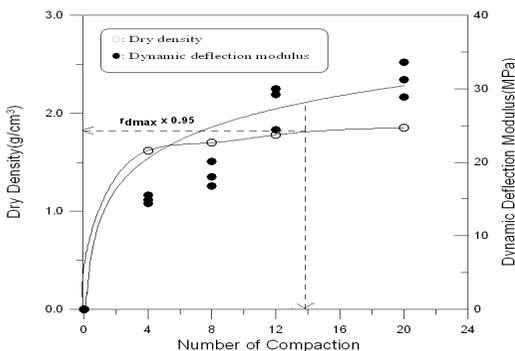


Fig. 8 다짐횟수 증가에 따른 건조단위중량과 동적변형계수 비교

- 공학적 특성에 미치는 영향”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1994, pp. 495-498.
5. 권기철, “국내 노상토의 회복탄성계수에 대한 구성모델”, 대한토목학회 논문집, Vol. 20, No. 3, 2000, pp. 301-310.
  6. 권기철, “국내 도로포장의 동상 특성에 대한 수치해석적 연구”, 한국도로학회 논문집, Vol. 5, No. 2, 2003, pp. 37-47.
  7. 권기철, 오명주, “노상토의 변형특성에 대한 함수비 및 건조단위중량의 영향”, 한국도로학회 논문집 Vol. 8, No. 2, 2006, pp. 87-93.
  8. 박용부, 정형식, “동평판 재하시험을 이용한 정적 및 동적 변형계수 비교”, 한국지반공학학회 논문집, 제19권 제5호, 2003, pp. 335-342.
  9. 박태순, 최준성, 박재균, “회복탄성계수 측정을 위한 Portable FWD의 활용”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2001, pp. 1-4.
  10. 안지환, 양성린, 박희문, 권수안, “현장에서의 동적관입시험을 이용한 노상토의 지지력 평가연구”, 한국도로학회 논문집, 제6권 제3호, 2004, pp. 17-26.
  11. 최준성, 김인수, 김수일, “포장도로 물성추정을 위한 충격하중 변위측정장비의 개발”, 한국도로포장공학회 논문집, Vol. 2, No. 1, 2000, pp. 77-82.
  12. 허정도, 김한용, 남영국, “다짐밀도의 이론적 전개”, 한국도로학회 논문집, 제2권 제1호, 2000, pp. 147-156.
  13. Fleming, P. R., “Small-Scale Dynamic Devices for the Measurement of Elastic Stiffness Modulus on Pavement Foundation”, Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli: Third Volume, ASTM STP 1375, S.D. Tayabji and E.O. Lukanen, Eds., West Conshohocken, PA, 2000.
  14. Forssblad L., “Compaction-meter on vibrating rollers for improved compaction control”, Bulletin of International Conference on Compaction, Paris, International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfield, Minneapolis, 1980, pp. 541-546.
  15. Thurner H. et Sandstron A., “A new device for instant compaction control”, Bulletin of International Conference on Compaction, Paris, 1980, pp. 611-614.
  16. Ugral, A. C. and Fenster, S. K. “Advanced Strength and Applied Elasticity (3rd Edition)” Prentice-Hall PTR, Upper Saddle River, NJ. 172-17, 1995.

급행 (접수일자 : 2007년 8월 2일)