

# 소형FWD를 이용한 노상토의 동적변형계수와 현장 CBR의 상관 연구

A Study on the Relation between Dynamic Deflection Modulus  
and In-Situ CBR Using a Portable FWD

강 희 복\*      김 교 준\*\*      박 승 균\*\*\*      김 종 렬\*\*\*\*  
Kang, Hee Bog      Kim, Kyo Jun      Park, Sung Kyoon      Kim, Jong Ryeol

## Abstract

The road construction, as part of effort to ease the worsening traffic, has been underway throughout the nation, while the existing road has been increasingly losing its load carrying capacity due to such factors as heavy traffic and weathering. In the case of site, the soil type, plasticity index, and specific gravity were SC, 12.2%, and 2.66, respectively. The maximum dry density, optimum moisture content and modified CBR were 1.895g/cm<sup>3</sup> (Modified Compaction D), 13.6%, and 16.2%, respectively. A correlation of coefficient expressed good interrelationship by 0.90 between the CBR estimated from a dynamic penetration index of dynamic cone penetrometer test and a deformation modulus converted from a dynamic deflection modulus obtained from a portable FWD test.

## 요 지

최근 교통소통의 필수적인 수단으로 많은 도로가 건설 중에 있으며 기 시공된 도로 등은 차량의 통행과 기후 등의 여러 요인에 의해 내하력이 저하되고 있다. 본 연구에 적용된 지반의 흙의 종류와 소성지수 그리고 비중은 각각 SC, 12.2%, 2.66이였으며 최대건조단위중량, 최적함수비, 수정CBR은 각각 1.895 g/cm<sup>3</sup> (수정다짐 D), 13.6%, 16.2%였다. 이러한 지반조건에서 동적콘관입시험의 관입지수로부터 추정된 CBR과 소형 FWD시험의 동적변형계수로부터 환산한 정적변형계수 사이에는 상관관계수가 0.90으로 높은 상관성을 나타내었다.

**Keywords :** Dynamic deflection modulus, Dynamic penetration index, In-situ CBR, Portable FWD

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

\* 정희원, 한영대학 토목환경과 조교수

\*\* 정희원, 전남대학교 시간강사

\*\*\* 정희원, 전남대학교 토목공학과 박사과정, 남양건설(주) 상무이사

\*\*\*\* 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

우리나라의 경우 물류이동 및 교통소통의 대부분을 도로가 담당하고 있으며, 현재까지 지속적으로 도로의 이용이 증가하고 있다. 이러한 차량 통행의 지속적인 증가, 집중호우나 폭설 등의 자연적인 여러 요인에 의해 도로의 내하력이 저하되고 최종적으로는 파괴에 도달하여 주행성, 쾌적성 및 안전성 등의 저하를 가져와 차량의 원활한 통행에 많은 지장을 주고 있다. 따라서 도로의 합리적인 유지보수의 평가와 포장설계의 주요 입력 변수인 동시에 포장 구조체의 구조적 능력을 판단하는 기준이 되는 변형계수를 포함한 포장지반의 물성평가는 대단히 중요하다. 사용빈도가 높은 현장 CBR이나 평판재하시험 방법은 반력으로 대형장비가 필요하고 많은 측정시간이 소요되므로 시험횟수가 제한되며 현장상태에 따라 값의 차이를 보이고 있다. 이러한 문제점으로 인해 최근 들어 간단하면서도 일정한 높이에서 규정된 중량을 재하관에 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.<sup>(4)</sup>

이러한 동적방법으로 물성치 평가를 위한 국내외의 연구를 살펴보면 국내에서는 박태순 등<sup>(5)</sup>에 의해 소형 FWD(Falling Weight Deflectometer)를 활용한 국내 고속도로와 지방도로 현장의 포장조건이 다른 재료특성에 대한 변형계수 추정을 연구하였다. 또한, 박용부 등<sup>(4)</sup>은 동평판재하시험을 이용한 정적과 동적변형계수의 비교에 대한 연구를 발표하였으며 그 밖의 연구자에 의해 FWD에 대한 연구가 진행되었다.<sup>(1)(2)(5)(6)</sup>

국외의 연구로 휴대용 FWD를 개량하여 노상과 노반, 아스팔트층에 대한 물성치 추정에 대한 연구를 진행하였으며 특히 Moshe Livneh<sup>(11)</sup>는 통일분류법상 CH와 SP지반에 대해 동적변형계수로부터 환산한 정적변형계수와 현장CBR과의 상관관계식을 제시하였다. 본 연구에서는 국내 노상토에 대한 상관관계를 알아보기 위해 1개의 시공현장(노상층)을 선정하여 현장실험을 실시하였으며 정적변형계수와 동적콘관입시험으로부터

추정한 현장CBR과의 상관관계식을 도출하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 소형 FWD의 메카니즘

단층구조로 이루어진 잘 다져진 노상 및 노반에 반무한의 원형 등분포하중이 작용할 경우 지반의 응력상태는 Fig. 1과 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.

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

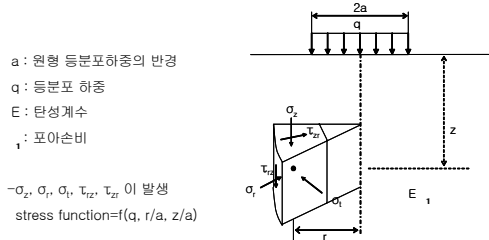


Fig. 1 축대칭 하중을 받는 경우의 응력구성요소

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

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 등분포하중의 반경,  $\nu$ 는 지반의 포아송비,  $E$ 는 지반의 변형계수이다. 독일의 GDP헨드북에서는 식(2)로부터 동적변형계수를 구하는 식을 다음 식(3)과 같이 제시하였다.

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

## 2.2 동적콘관입시험으로부터 CBR 추정

포장설계는 노상의 지지력비 시험인 설계 CBR값을 사용하여 결정한다. 그리고 품질관리는 평판재하시험을 실시하여 그 시공의 품질관리를 판정한다. 그러나 이 두가지 시험은 시간적인 제약이나 현장상태에 따라 값의 차이를 보이고 있고 많은 노력이 들기 때문에 이러한 문제점을 보완하기 위해 동적콘관입시험이나 소형 FWD시험을 시행하려는 연구들이 진행되어 오고 있다. Table 1은 국내외에서 제안한 추정 CBR을 구하는 연구결과를 요약한 것이다.

Table 1 기존에 연구된 동적콘관입지수와 CBR 값의 상관관계<sup>(6)</sup>

연구자	상관식	년도
Livneh	$\log(\text{CBR}) = 2.56 - 1.16 \log(\text{DCP})$	1991
Livneh, Ishai and Livneh	$\log(\text{CBR}) = 2.45 - 1.12 \log(\text{DCP})$	1993
Harison	$\log(\text{CBR}) = 2.55 - 1.14 \log(\text{DCP})$	1987
Smith and Patt	$\log(\text{CBR}) = 2.56 - 1.16 \log(\text{DCP})$	1983
Kleyn	$\log(\text{CBR}) = 2.62 - 1.27 \log(\text{DCP})$	1975
NCDOT	$\log(\text{CBR}) = 2.60 - 1.07 \log(\text{DCP})$	1989
Norwegian Road Research	$\log(\text{CBR}) = 2.44 - 1.07 \log(\text{DCP})$	1995
안지환 등	$\log(\text{CBR}) = 2.50 - 1.01 \log(\text{DCP})$	2004
류명찬	$\log(\text{CBR}) = 1.79 - 0.88 \log(\text{DCP})$	2003

## 3. 시험장비 및 시험방법

동하중에 의한 지반의 지지력 평가를 위한 장비인 소형 FWD는 센서(Accelerometer-가속도계)가 부착된 재하판, 하중낙하 장비, 침하측정 장비로 구분되며 Fig. 2는 소형 FWD의 노상에서의 시험전경이다. 소형 FWD는 자유낙하 시킨 추로 인해 발생하는 충격으로 하중과 처짐을 측정하기 위한 장비로서 장소의 제약을 받지 않고 손으로 이동할 수 있는 장비이다. 이 장비는 3가지의 낙하 추 즉, 10kg, 15kg, 20kg의 3가지 재원이 있으며, 고정 손잡이를 눌러 자유 낙하된 낙하 추를 고무원충기에 등분포에 가까운 하중을 가하여, 하중판을 통해 표면에 가해진 충격력에 의해 하중판 중앙에 위치한 Geopone에 움직임을 측정함으



Fig. 2 노상에서의 소형 FWD 시험전경

로써 컴퓨터에 전송된 Data와 처짐량을 화면상에서 확인하여 Stiffness를 구한다.<sup>(5)</sup>

동적콘관입시험은 류명찬<sup>(3)</sup>이 제작한 콘을 조금 변형하여 제작하였다. 직경은 16mm의 강봉과 해머(무게 8kg) 및 콘(각 60도)으로 구성되어 있고, 해머의 자유낙하고는 575mm로 해머의 자유낙하에 의해 충격이 가해질 때 지중에 관입된 깊이(mm), 관입지수(mm/blow)를 기록하였다. 관입깊이를 측정하기 위해 시험장비의 손잡이 부분을 기준으로 스타프의 읽음값으로 관입지수를 측정하였으며 초기는 매 타격당 관입깊이를 측정하였으나 지표하 30cm 아래 부분은 해머의 5회 자유낙하에 따른 관입심도가 기록되고 그 결과는 단위 타격횟수에 따른 관입심도로서 판독된다.<sup>(3)</sup> 시험은 기 시공된 여수현장을 선정하여 소형FWD 시험과 동적콘관입시험을 실시하였다.

## 4. 결과분석 및 고찰

### 4.1 현장시료의 실내다짐시험 및 기본물성 시험 결과

본 연구에서 실시한 현장 CBR과 동적콘관입지수의 관계를 확인하기 위해 여수국도현장의 기 시공된 도로 기층 현장을 선정하여 시험을 실시하였다. Fig. 3은 KS F 2312의 수정다짐방법 중 D다짐방법에 의해 수행한 다짐곡선을 도시한 것으로 최대건조단위중량은 1.895g/cm<sup>3</sup>이며 최적함수비(OMC)는 13.6% 이고 수정CBR은 16.2%였다. Fig. 4는 현장시료의 입경가

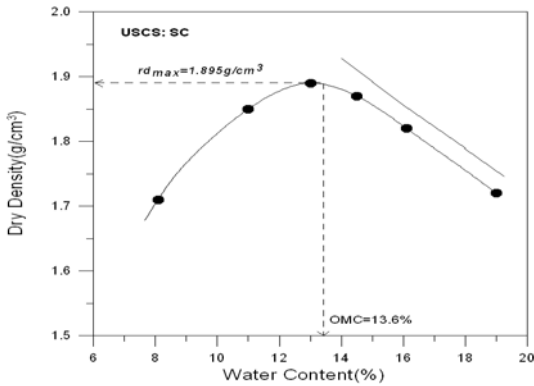


Fig. 3 시료의 다짐곡선

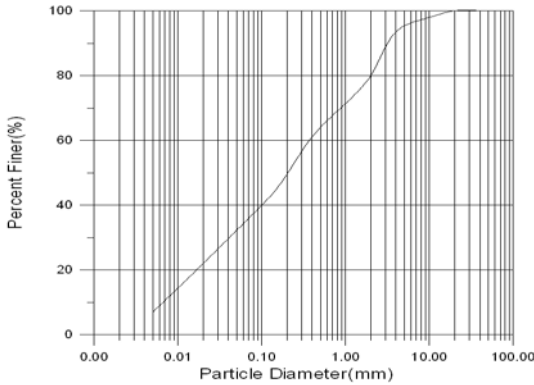


Fig. 4 시료의 입경가적곡선

Table 2 본 연구에 사용된 시료의 물리적 성질

비중 (Gs)	액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성 지수	#200 통과율 (%)	수정 CBR (%)	USCS
2.66	34.3	22.1	12.2	36.7	16.2	SC

적곡선을 나타낸 것이며 시험성도 현장의 토사를 채취하여 실내다짐시험과 실내CBR시험, 그리고 기본물성 시험을 실시한 물리적 특성은 Table 2와 같다. 여수 현장은 비중이 2.66이며 액성한계 34.3%, 소성한계 22.1%, 소성지수 12.2%이며, #200체 통과율은 36.7%이고, 통일분류법상 SC에 해당된다.

#### 4.2 동적콘관입시험 및 소형 FWD, 현장 들밀도 시험결과

Fig. 5는 여수현장의 측정1~측점3 까지 측정 한

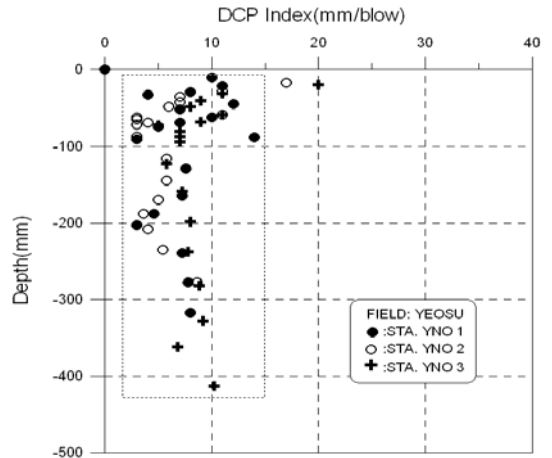


Fig. 5 동적콘관입시험결과(측점 1~측점 3)

이별 동적콘관입지수를 나타낸 것이다. 그림에서 측정 1의 평균 동적콘관입지수는 7.98mm/blow이며 깊이 32cm까지 측정하였으며 깊이별로 일정한 값을 보였다. 측정2의 동적콘관입지수는 5.95mm/blow로서 측정 1보다 다짐이 잘된 결과를 보였으며 측정 3은 8.31mm/blow의 동적콘관입지수를 보였다. 측점은 30~40cm정도 깊이까지 측정하였다. 측정 4는 다짐 상태가 가장 양호한 결과를 보인 지점이며 동적콘관입 지수는 평균 4.77mm로서 약 21cm깊이까지 일정한 값을 보였다. 측정 5와 6은 깊이 약 10cm까지 10mm/blow정도를 보였으나 이후로 동적콘관입지수가 다소 큰 값을 보였으며 평균한 동적콘관입지수는 측정 5의 경우 9.27mm/blow 측정 6의 경우 13.21 mm/blow로서 10개 측정 중 다짐도가 부족한 것으로 나타났다.

측점 7의 동적콘관입지수 평균값은 10.18mm/blow이며 측정 8은 7.74mm/blow를 기록하였다.

또한 측정 9는 10.17mm/blow, 측정 10은 6.86 mm/blow를 기록하였다. (Table 3 참조)

안지환 등<sup>(6)</sup>의 연구에 의하면 현장에서 DCP장비를 통한 노상의 포장지지력을 평가할 경우 현장 CBR 20%이상에 해당하는 동적콘관입지수값이 15mm/blow 이하로 나타날 경우 충분한 지지력을 가지는 것으로 판단해도 좋다는 결론을 참고할 경우 본 연구에서의 동적콘관입지수에 의한 다짐도 평가는 대체적으로 만

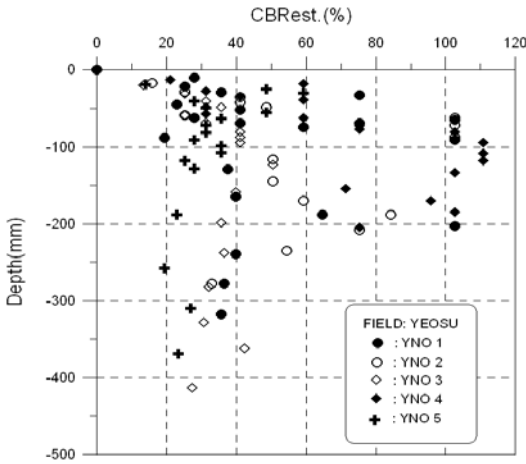


Fig. 6 추정CBR 결과(측점1~측점5)

Table 3 건조단위중량, 소형FWD치점, 동적콘관입시험, 추정 CBR 결과

측점	건 조 단 위 중 량 (g/cm <sup>3</sup> )	소형 FWD 치점(mm)				동적 콘 관 입 시험 (mm/blow)	추정 CBR (%)	함수비 (%)
		1회	2회	3회	평균			
YNO 1	1.87	0.54	0.38	0.49	0.47	7.98	46.4	9.8
YNO 2	1.84	0.50	0.36	0.33	0.39	5.95	48.0	9.7
YNO 3	1.79	0.41	0.47	0.61	0.52	8.31	35.5	8.8
YNO 4	1.86	0.24	0.32	0.34	0.30	4.77	78.9	9.1
YNO 5	1.81	0.57	0.42	0.51	0.50	9.27	31.8	9.0
YNO 6	1.76	0.82	0.79	0.72	0.78	13.21	21.2	9.9
YNO 7	1.78	0.55	0.49	0.58	0.54	10.18	28.9	9.8
YNO 8	1.81	0.37	0.37	0.25	0.33	7.74	38.4	7.4
YNO 9	1.77	0.64	0.51	0.57	0.57	10.17	27.8	9.9
YNO10	1.78	0.43	0.39	0.42	0.41	6.86	43.5	9.7

축할 만하다고 본다. 본 연구에서의 현장 CBR은 직접시험을 하지 않고 동적콘관입시험으로부터 Table 1에서 제안한 기존의 국내외 연구자들이 식을 이용하여 추정하였으며 Fig. 6은 여수현장의 CBR 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 CBRest는 동적콘관입시험으로부터 추정된 CBR을 의미한다. 본 연구에서는 Livneh et al<sup>(8)</sup>, Harison<sup>(7)</sup>, 식과 안지환 등<sup>(6)</sup>, 류명찬<sup>(3)</sup>이 제안한 식을 사용하였다.

Table 3은 각 측정별 건조단위중량, 소형FWD치점, 동적콘관입시험, 추정CBR 결과를 나타낸 것이다.

### 4.3 동적변형계수와 동적콘관입지수, 추정 CBR 비교 분석

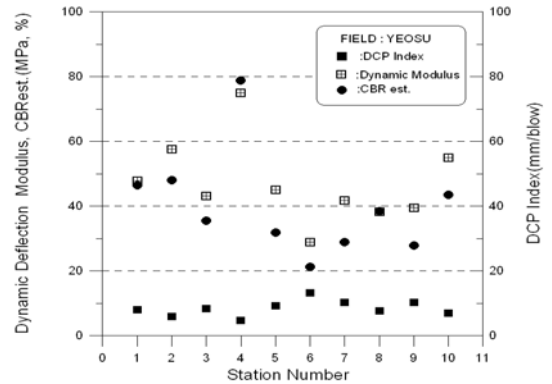


Fig. 7 측정점에 따른 동적변형계수 비교

Fig. 7은 각 측정위치별 소형 FWD 시험의 동적변형계수, 추정CBR, 동적콘관입지수를 알기 쉽게 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 평균관입지수는 8.44mm를 나타내었다. STA. 6번 지점의 동적콘관입지수가 13.21mm로 다른 측정보다 동적콘관입지수가 다소 크게 나타났다. 그림의 좌측 y축은 동적변형계수와 추정CBR을 동시에 나타낸 것으로 동적콘관입지수가 가장 적은 측정 4에서 동적변형계수는 75MPa를 나타내었으며 추정CBR은 78.9%를 기록하였다. 그림에서 알 수 있듯이 동적콘관입지수와 동적변형계수 그리고 추정CBR은 유사한 양상을 보이고 있다.

### 4.4 추정 CBR과 정적변형계수 상관성 분석

독일의 구조설계에서는 노반과 노상에 대해 평판재하시험을 2회 실시하여 정적인 변형계수를 구하여 설계에 이용하고 있으며 식(4)을 이용하여 소형 FWD 시험에서 구한 동적변형계수를 정적변형계수( $E_{v2}$ )값으로 환산하였다.

$$E_{v2} = 600 \ln \frac{300}{300 - E_{v1}} \quad (4)$$

또한 Livneh et al<sup>(10)</sup>은 현장CBR시험과 German Light Drop-Weight(LDW)를 이용하여 동적변형계수를 구한 후 정적변형계수로 환산하여 점토층과 사질토층에 대해 다음과 같은 상관관계식을 제안하였다.

점토층(CH):

$$E_{v2} = 600 \ln \frac{300}{300 - 6.019 CBR^{(1/1.41)}} \quad (5)$$

사질토층(SP):

$$E_{v2} = 600 \ln \frac{300}{300 - 4.0354 CBR^{(1/1.41)}} \quad (6)$$

본 연구에서는 여수현장에 대해 동적콘관입시험에서 구한 동적콘관입지수로부터 추정CBR을 구하고 식(4)의 독일공식<sup>(11)</sup>을 이용하여 소형 FWD시험에서 구한 동적변형계수로부터 정적변형계수를 환산하여 이들 간의 상관관계식을 도출하였다.

현장의 지반은 사질토층(SC)으로 본 연구에서 구한 추정CBR과 정적변형계수와의 상관관계는 식(7)과 같으며 Fig. 8에 나타내었다. ( $R^2=0.90$ )

$$E_{v2} = 600 \ln \frac{300}{300 - 3.419 CBR^{(1/1.41)}} \quad (7)$$

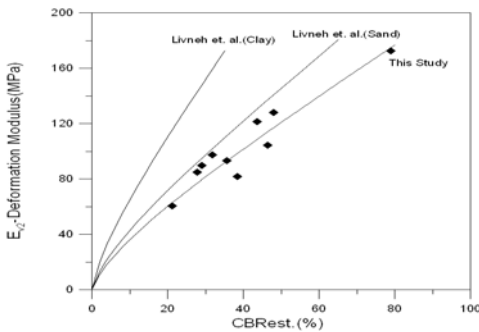


Fig. 8 추정CBR과 정적변형계수와의 상관관계

## 5. 결론

본 연구에서는 국내 1개의 시공현장(노상토)을 선정하여 소형 FWD 시험과 동적콘관입시험으로부터 노상토 지반의 정적변형계수와 현장CBR과의 상관관계식을 도출하였다.

Livneh et al.<sup>(10)</sup>은 통일분류법상 SP지반에 대해 식(6)과 같은 식을 제시하였으나 본 연구에서는 SC에 해당되는 지반에 대해 실험한 결과 추정CBR 과 정적

변형계수 사이에는 다음과 같은 상관관계를 얻을 수 있었다.

$$E_{v2} = 600 \ln \frac{300}{300 - 3.419 CBR^{(1/1.41)}}$$

추후 보다 다양한 토질분류에 대한 연구가 진행된다면 보다 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 보이며 실무에의 적용성이 높아 질 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. 김수일, 최준성, 이양구, "아스팔트 콘크리트 포장구조체의 물성추정을 위한 FWD시험결과의 최적역산기법 개발", 대한토목학회논문집, Vol. 18, No. 3-1, 1998, pp. 41-52.
2. 김종렬, 강권수, 박달수, 강승구, "소형 FWD의 개량을 통한 아스팔트 포장체의 물성치 추정에 관한 연구", 대한토목학회학술발표회논문집, 2002, pp. 134-137.
3. 류명찬, "포장동적관입시험기에 의한 보조기층 및 노상 지지력 측정", 한국도로학회논문집, 제5권 제1호, 2003, pp. 35-45.
4. 박용부, 정형식, "동평판 재하시험을 이용한 정적 및 동적 변형계수 비교", 한국지반공학학회논문집, 제19권 제5호, 2003, pp. 335-342.
5. 박태순, 최준성, 박재균, "회복탄성계수 측정을 위한 Portable FWD의 활용", 대한토목학회학술발표회논문집, 2001, pp. 1-4.
6. 안지환, 양성린, 박희문, 권수안, "현장에서의 동적관입시험을 이용한 노상토의 지지력 평가연구", 한국도로학회논문집, 제6권 제3호, 2004, pp. 17-26.
7. Harison, J.A., "Correlation of CBR and Dynamic Cone Penetrometer Strength Measurement of Soils", Technical Note No.2, Australian Road Research Board, Vol. 4, 1986.
8. Livneh, M., and Ishai, I., "Pavement and Material Evaluation by a Dynamic Cone Penetrometer", Proc., 6th Intl. Conf. on Strut., Design of Asphalt Pavement, University of Michigan, Ann Arbor, 1987, July, pp. 665-668.
9. Livneh, M., "A Single Measurement with the Portable FWD to Estimate the In-Situ Asphalt layers Moduli" Transportation Research Record, No. 1570, TRB. 118-125, 1987.

- 
10. Livneh, M., Livneh, A.N., Elhadad, E. "Determining a Pavement Modulus from Portable FWD Testing", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ (ASTM), Vol. 20, No. 4. 1997, pp. 373-382.
  11. Moshe, L. and Yair, G. "Use of Falling-

Weight Deflectometer and Light Drop Weight for Quality Assessment During Road Formation and Foundation Construction" TRB 80th Annual Meeting, Washington, D. C., 2001.

(접수일자 : 2007년 8월 2일)