



실내 및 현장실험을 통한 DCPT의 노상토 다짐관리기준 정립에 관한 기초연구

Fundamental Study on Establishing the Subgrade Compaction Control Criteria of DCPT with Laboratory Test and In-situ Tests

최 준 성*

Choi, Jun Seong

Abstract

In this study, in-situ testing method, Dynamic Cone Penetration Test(DCPT) was presented to establish a new compaction control criteria with using mechanical property like elastic modulus instead of unit weight for field compaction control. Soil chamber tests and in-situ tests were carried out to confirm DCPT tests can predict the designed elastic modulus after field compaction, and correlation analysis among the DCPT, CBR and resilient modulus of subgrade were performed. Also, DCPT test spacing criteria in the construction site was proposed from the literature review. In the result of laboratory tests, Livneh's equation was the best in correlation between PR of DCPT and CBR, George and Pradesh's equation was the best in the predicted resilient modulus. In the resilient modulus using FWD, Gudishala's equation estimates little larger than predicted resilient modulus and Chen's equation estimates little smaller. And KICT's equation estimates the modulus smaller than predicted resilient modulus. But using the results of laboratory resilient modulus tests considering the deviatoric and confining stress from the moving vehicle, the KICT's equation was the best. In the results of In-situ DCPT tests, the variation of PR can occur according to size distribution of penetrate points. So DCPT test spacing was proposed to reduce the difference of PR. Also it was shows that average PR was different according to subgrade materials although the subgrade was satisfied the degree of compaction. Especially large sized materials show smaller PR, and it is also found that field water contents have influence a lot of degree of compaction but a little on the average PR of the DCPT tests.

Keywords : *dynamic cone penetration test(DCPT), PR, soil chamber tests and in-situ tests, CBR, resilient modulus of subgrad*

요 지

본 연구에서는 시공시 현장다짐관리에 있어 단위중량을 이용하는 기존의 방법 대신 탄성계수와 같은 역학적 특성을 이용하는 새로운 다짐관리기준 정립을 위한 현장시험방법을 제시하고자 한다. 이를 위하여 시험법이 간편하며, 활용성이 증가하고 있는 동적콘관입시험인 DCPT 측정시험이 노상토의 다짐품질관리의 적용이 가능한지를 검토하였다. DCPT 시험방법이 현장에서 다짐후 설계탄성계수를 추정할 수 있는지를 확인하기 위하여 실내토조시험, 현장시험을 실시하였고, 노상층의

* 정희원 · 인덕대학 건설환경설계과 교수 · 공학박사



DCPT, CBR, 회복탄성계수간의 상관관계를 분석하였다. 또한, 문헌조사 분석을 통하여 DCPT 시험간격을 제시하였다. 실내시험결과를 분석한 결과, DCPT 관입치(PR) 값과 CBR값 간의 상관관계식에서는 Livneh 식이 가장 부합됨을 알 수 있었고, DCPT 시험을 통한 PR값을 국내의 탄성계수 추정식을 평가한 결과, 예측 M_R 탄성계수 값과 부합하는 제안식으로는 George와 Pradesh의 식이 있었으며, FWD를 이용한 M_R 제안식을 비교한 결과, Gudishala의 제안식은 예측 M_R 값보다 다소 크게 산정되며, Chen의 제안식의 경우 다소 작은 값을 보이고, 건설기술연구원의 제안식은 예측 M_R 값에 과소 평가함을 알 수 있었다. 그러나 실제 차량이 유발하는 주행속도에 따른 축차응력과 구속응력으로부터 실내 M_R 시험결과를 비교분석한 결과, 건기원 제안식이 가장 적합함을 알 수 있었다. DCPT 현장시험결과를 분석한 결과, 관입지점의 입도분포에 따라 PR 값에 오차가 생길 수 있음을 알 수 있었고, 오차를 감소하기 위한 DCPT 시험간격에 대한 추천값을 제시하였다. 현장시험결과를 분석한 결과 현장 다짐도를 만족하는 노상이라 하여도 노상 재료에 따라 평균 PR 값이 다르게 나타났으며, 특히 입경이 큰 재료일수록 평균 PR 값이 작음을 알 수 있었고, 현장함수비의 경우 다짐도에 미치는 영향은 상당히 크나, DCPT 시험에 있어서 현장함수비 변화는 평균 PR 값에 미치는 영향이 미미함을 알 수 있었다.

핵심용어: 동적콘관입시험, 관입치, 토조시험, 현장시험, CBR, 회복탄성계수

1. 서론

지속적인 도로건설기술의 발전에 의한 포장설계 및 유지관리의 합리화 일환으로 역학적 특성인 지반 및 포장재료의 강성 개념에 기초한 역학적인 포장설계방법이 도입되고 있으나, 국내에서는 도로공사의 시공관리에 있어 경험적인 방법에 기초한 평판재하시험 및 들밀도시험을 사용하고 있다. 그 결과, 역학적 포장 해석, 포장단면 설계, 토공 및 포장하부시공 및 유지관리단계에서 각각 다른 기준을 적용하고 있어 합리적인 관리기법이 필요한 현실이다.

현재 도로의 설계와 유지관리는 탄성계수와 같은 흙의 역학적 특성을 이용하여 수행하는 반면 시공시에는 현장에서의 단위중량을 측정하여 이를 실내다짐시험으로부터 구한 최대 건조단위중량과 비교하는 방법으로 시공관리를 하고 있다. 이러한 설계, 시공관리, 그리고 유지관리 간의 개념적 차이는 전체 건설공정의 일관성을 떨어뜨리고 있으며 기술자의 경험적 판단에 크게 의지하는 불합리한 면을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 시공시 현장다짐관리에 있어 단위중량을 이용하는 기존의 방법 대신 탄성계수와 같은 역학적 특성을 이용하는 새로운 다짐관리기준 정립을 위한 현장시험방법을 제시하고자 한다. 본 연구를 통하여 도로포장 설계에서 요구하는 역학적

수의 기준값과 시공현장에서 DCPT 시험법으로 측정한 역학정수 값의 직접비교가 가능하게 되어, 보다 신속하고 합리적인 노상토의 다짐관리가 가능하게 될 것이다.

2. 다짐기준 정립을 위한 연구흐름 방법 제안

도로포장 설계시 노상토의 탄성계수에 의한 도로설계가 실제현장에서 구현되도록, 현장에서 다짐작업시 설계탄성계수 값을 새로운 탄성계수 측정시험을 통해 평가할 수 있어야 한다. 이를 위하여 탄성계수 측정시험의 적용성 및 시험절차법과 분석과정, 그리고 시험빈도를 결정하고자 기존 현장에서 사용되고 있는 현장 다짐도에 의한 포장 하부구조 시공관리와는 완전히 새로운 개념의 노상다짐 기준정립이 필요하다.

현재 개발중에 있는 한국형 도로설계법에서는 공사현장의 하부구조 재료로부터 실험된 기본물성으로부터 설계탄성계수를 추정할 수 있는 경험적 방법을 제시하고 있다. 따라서 실제 도로현장에서 다짐 후 탄성계수 측정시험으로부터 설계탄성계수가 나오는 지 확인하여 다짐관리가 되어야 한다. 현장에서 탄성계수를 추정할 수 있는 측정방법은 측정변위로부터



역산한 탄성계수 측정시험, 측정 콘지수로부터 상관관계식에 의한 탄성계수 측정, 측정도달시간에 의한 파속도를 탄성이론에 의해 탄성계수 측정, 실내시험 CBR치를 통한 상관관계 정립에 의한 탄성계수 추정 이 있다. 본 연구에서는 이러한 측정시험방법중 시험법이 간편하며, 활용성이 증가하고 있는 DCPT 측정 시험이 노상토의 다짐품질관리의 적용이 가능한지를 검토하였다.

따라서 본 연구에서는 탄성계수를 이용한 노상토 다짐관리기준을 정립하기 위해 DCPT 측정용 장비 활용방안 검토, 실내토조시험 실시, 현장시험 실시, 노상층의 DCPT, CBR, 회복탄성계수 관계를 분석하고, 문헌조사 분석을 통하여 DCPT 시험빈도/간격을 제시하고자 한다. 다음 그림 1은 본 연구결과를 활용하기 위한 연구개념 흐름도이다. 이러한 연구개념 흐름도의 실행을 위해 다음과 같은 연구를 진행하였다.

- (1) 기존 실험측정치 - 탄성계수 추정식 조사
- (2) 탄성계수 추정방법 고찰 및 정립
- (3) 탄성계수측정용 장비조사 및 활용방안 수립
- (4) 각 탄성계수측정 실험방법 정리
- (5) 시험을 통한 시험측정치와 탄성계수 추정식 확인 및 비교

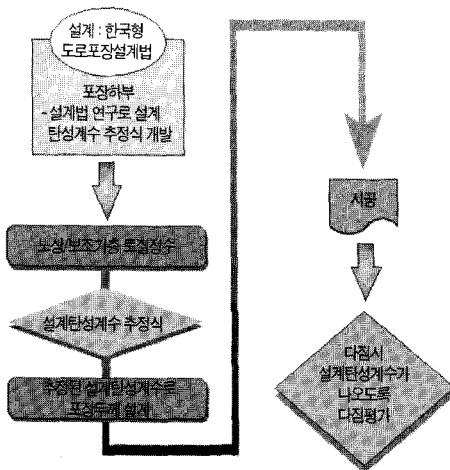


그림 1. 연구개념도

3. 다짐 품질관리의 DCPT 적용

동적 콘 관입 시험 (DCPT:Dynamic Cone Penetrometer Test)은 도로포장과 노상의 지지력을 측정하기 위해 1950년대에 처음 고안된 것으로, 일정 무게의 자유낙하에 의한 힘이 Cone Tip을 타고 실험 지표면을 뚫고 들어가는 능력을 측정하여 지지력을 계측할 수 있게 한 장비이다. DCPT의 발달은 점성토의 특성을 보다 쉽고 빠르게 계측할 필요성에 의해 이루어졌다. 미국에 DCPT 방법 적용은 1980년대 후반에서야 알려졌지만, 최근엔 몇몇 주의 DOT에서 DCPT의 유용한 몇가지 이유들로 DCPT 방법을 활성화시키고 있다.

DCPT는 많은 평가방법들과 융통성을 발휘할 수 있어 DCPT의 PR(penetration rate 이하 PR로 표기, PR=mm/blow) 값은 CBR, 동적탄성계수, E 값과 비교 산정할 수 있다. 또한, 다른 어떤 실험방법보다 간단한 측정방법을 보여주어 최근에는 많은 실험 데이터 값의 축적과 다양한 경험 값들이 축적되어 있으며 ASTM D6951에서도 도로포장 적용에 DCPT의 사용을 새로운 표준실험방법으로 사용하고 있다 (ASTM, 2003). 국내에서도 류명찬 등이 앞서 말한 장점들을 바탕으로 DCPT의 도로적용을 위한 많은 노력을 하고 있다.

3.1 장비의 외형

DCPT는 그림 2에서 보는 바와 같이 크게 상부부분과 하부부분, 그리고 눈금자 이렇게 세 부분으로 나눌 수 있다. 상부부분은 DCPT를 수직으로 유지시켜주기 위해 잡는 핸들과 헤머의 최고점을 지정해주는 상부 모루, 그리고 상부 모루에서부터 자유낙하하는 8kg의 헤머, 이 헤머의 자유낙하 운동을 이끄는 지름 15.8mm, 길이 575mm의 상부 로드, 헤머의 자유낙하 운동을 충격에너지로 바뀌게 하는 하부 모루 이렇게 5부분으로 이루어져 있다. 하부부분은 하부 모루에서 전해져 오는 충격량을 콘까지 보내주는 지



름 15.8mm, 길이 1,000mm의 하부 로드와 그 밑에 DCPT를 관입하는 Cone 이렇게 두 부분으로 나누어져 있으며, 콘의 지름은 20mm이고 선단은 60도의 원추형으로 되어 있다.

눈금자는 하부 로드 1,000mm보다 긴 막대 형태로 되어 있으며, 1mm 단위로 눈금을 그려 놓고 하부 로드 옆에 조립하여 하부 로드의 바늘로 콘이 관입한 깊이만큼의 눈금을 표시해 준다. 이 모든 부분은 철로 구조된 해머를 제외하고는 높은 강도를 견뎌내고 녹에 따른 부식을 막기 위하여 모두 스테인레스로 만들어졌다. 그림 3은 DCPT시험 후 콘을 회수하기 위한 사출잭을 나타낸 것이다. DCPT 시험시 매 충격 횟수마다 눈금을 표 1과 같은 양식의 기록지에 기록하며, 각 충격횟수 당 관입량의 차이를 확인하고 전체 충격횟수와 총관입량으로 PR 값을 찾는다.

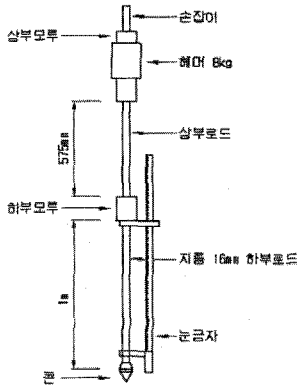


그림 2. DCPT 장비의 외형

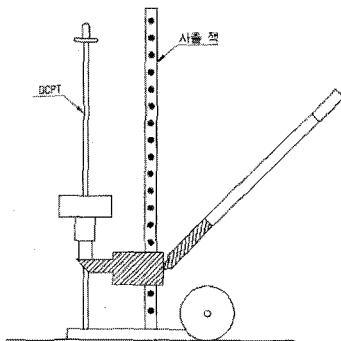


그림 3. 사출 잭(extraction jack) 사용법

표 1. DCPT 시험 기록지

DCPT 시험 기록 일자			
시험날짜	2007년 월 일	시험장소	
흙 분류		요구강도	(mm/blow)
시험자		평가	상 중 하
DCPT 시험 기록			
0			
1			
2			
=			
00			
PR값 (mm/blow)			

3.2 DCPT PR값과 CBR값 및 탄성계수와의 상관관계 조사분석

본 연구는 공진주 시험을 통한 설계탄성계수와 다짐 시공현장에서의 DCPT 시험을 통한 탄성계수(이하 M_R : resilient modulus)를 비교하여 탄성개념의 다짐기준을 정립하는 것이 최종목표이나, 연구 초기 단계로서 현재 노상다짐 기준(도로공사 표준시방서)으로 사용하고 있는 강성개념의 CBR 값과 탄성개념의 탄성계수 값을 추정하는 국내의 상관관계식을 비교분석하였다.

DCPT시험의 Penetration Rate와 CBR 사이의 관계를 이미 많은 실험을 통하여 제시되어 있으며, 그에 따른 상관관계식들 중 가장 널리 알려진 식들은 다음과 같다.

- Kley (1975):

$$\text{Log CBR} = 2.62 - 1.27 \log PR \quad (1)$$
- Smith and Pratt (1983):

$$\text{Log CBR} = 2.56 - 1.15 \log PR \quad (2)$$
- Harison (1984, 1986):

$$\text{Log CBR} = 2.55 - 1.14 \log PR \quad (3)$$
- Livneh (1987, 1991):

$$\text{Log CBR} = 2.20 - 0.71 (\log PR)^{1.5} \quad (4)$$



- Army Corps of Engineers :
 $CBR = 292 / PR^{1.12}$ (5)

이 중 Army Corps of Engineers의 계산식은 후에 Waterways Experiment Station(WES)의 실험에 의해 CBR 값은 포화된 점토에서 실험을 하는 경우 위의 식에 부합하지 못하고 CBR 값이 10% 줄어듦을 알게 되었다. 또한 Webster et al. (1992)에 의해 토양이 CH인 경우 CBR 값이 10% 줄어든다고 보고되고 있다. 수정된 제안식은 다음 식 (6)과 같다. 위 식들을 CBR 값과 DCPT 투과율 그래프로 나타내면 다음 그림 4와 같다.

- $CBR = 1/(0.017019 \times PR)^2$ if $CBR < 10\%$ (6-1)
- $CBR = 1/(0.00281 \times PR)$ (CH) (6-2)

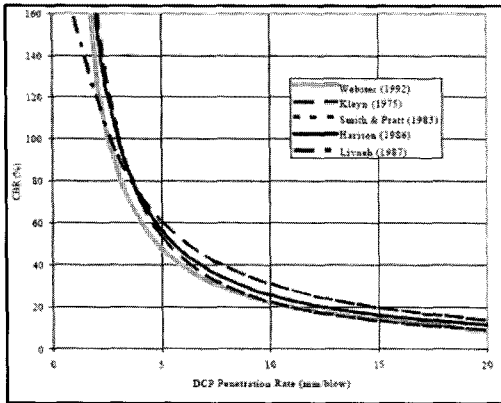


그림 4. CBR 값과 DCPT PR과의 관계

강성 개념의 CBR 값과 탄성 개념의 회복탄성계수 값 간의 상관관계식은 Heukelom and Klomp(1962)의 식 (7)과 같다.

$$CBR \times 10 = M_R(MPa) \quad (7)$$

DCPT PR 값과 M_R 값 간의 대표적인 상관관계식은 2000년 Mississippi DOT에서 제시한 George 식 (8)과 2005년 Minnesota DOT에서 제시한

Chen 식 (9), 2006년 건기원에서 제시한 식 (10) 등이 있다.

$$M_R(MPa) = 235.3(PR)^{-0.475} \quad (8)$$

$$M_R(MPa) = 338(PR)^{-0.39} \quad (9)$$

$$M_R(MPa) = 993.10\left(\frac{1}{PR}\right) + 33.95 \quad (10)$$

현재 “도로공사 표준시방서”의 노상다짐기준에 따르면 노상의 CBR 값은 10 이상을 제시하고 있다. 이는 식 (7)을 통해 M_R 값이 100MPa 이상 되어야 함을 의미하며, 이 값을 식 (8)에 대입하면 PR값은 20mm/blow 이하, 식 (9)에 대입하면 PR값은 30mm/blow 이하, 식 (10)에 대입하면 PR값은 15.2mm/blow임을 알 수 있다.

4. 실내 및 현장시험

본 연구에서는 DCPT 시험방법의 노상토 다짐 관리기준 정립을 위해 한국형 도로포장설계법에서 제시하고 있는 설계탄성계수 추정을 위한 기초물성시험을 실시하였고, 토조 크기에 관하여 토조 설계를 실시 한 후 다짐도에 따른 DCPT의 실내시험을 실시하였다. 또한 실제 도로현장에서 다짐 후 DCPT 측정시험으로부터 설계탄성계수가 나오는지 확인하고자 현장다짐도에 따른 현장시험을 실시하였다.

4.1 기초물성시험을 통한 설계탄성계수 추정

토조내 DCPT 시험에 앞서 현장시험 장소인 우정-장안 구간 시료의 기초물성시험을 실시하였고 이를 토대로 설계탄성계수를 추정하였다.



4.1.1 기초물성시험

(가) 체분석

우정-장안 구간 시료를 체분류를 통해 통일분류법으로 분류한 결과 표 2와 같이 SP로 분류되었다.

표 2. 우정-장안 시료 체분류(총 2812g)

체 번호	통과량 (g)	잔존량 (g)	잔존율 (%)	잔존누적 (%)
No 4	2,114	668	23.76	100.00
No 10	1,602	542	13.27	76.24
No 20	1,054	548	19.49	56.97
No 40	718	336	11.95	37.48
No 60	446	272	9.67	25.53
No 100	252	194	6.90	15.86
No 140	210	42	1.49	8.96
No 200	136	74	2.63	7.47
체 바닥		136	4.84	4.84
누 계		2812	100	
200번 체 통과량		4.84 %		
균등 계수 (Cu)		9.62		
곡률 계수 (Cc)		0.726		

(나) 다짐시험

다짐시험은 시료를 사용하지 않는 비반복법으로 5층 55회 D다짐하였으며 그림 5와 같이 최대건조단위중량 (γ_{dmax}) = 1.948t/m³과 최적함수비(OMC) = 11.1%를 얻었다.

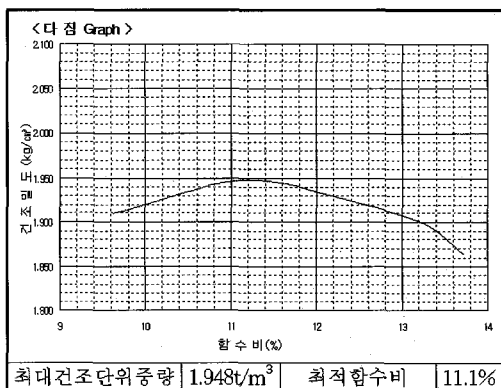


그림 5. 우정-장안 구간 다짐 그래프

(다) CBR 시험

기존 연구에서 제안된 CBR값과 DCPT PR 값의 상관관계식의 적용성을 검토하고자 실시하였으며 결과는 표 3과 같다.

$$\bullet CBR = \frac{\text{하중강도}}{\text{표준하중강도}} \times 100(\%) \quad (11)$$

• 우정 - 장안 구간 노상토 CBR값 = 16

표 3. 우정 - 장안 구간 CBR 시험

공시체(단위 : g)											
다짐 횟수	몰드 번호	시료+몰드(g)	몰드(g)	시료(g)	공시체 체적(cm ³)	γ_r (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)				
55회	1	10,328	5,435	4,893	2,208	2.126	1.949				
25회	2	10,072	5,570	4,502	2,208	2.039	1.863				
10회	3	9,083	4,870	4,213	2,208	1.908	1.726				
관입시험 피스톤 단면적 19.625cm ²											
관입량 (mm)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	5.0	7.5	10.0	수정 2.5	
하중	55회	118.3	184.3	264.8	341.0	421.0	495.0	546.7	695.1	845.6	421.0
읽음 (kg)	25회	35.1	74.1	122.1	174.5	220.9	270.0	308.7	399.1	479.1	220.9
	10회	24.6	44.6	74.6	119.2	145.2	175.0	196.2	258.3	318.1	145.2
CBR 표준하중 1370kg											
		55회	25회	10회	수정 CBR						
CBR%		30	16	11	16						

4.1.2 설계탄성계수 추정

한국형 도로포장설계법에서 제시된 식 (12)의 경험적 상관모형식을 이용하여 현장시험구간인 우정-장안간 설계탄성계수를 추정하였다. 노상의 설계탄성계수를 시공현장에서 구현하기 위하여 먼저 설계수준을 결정한 후, 탄성계수식에 대해 각 계수를 실험 또는 추정식에 의해 산정하여야 한다. 설계수준 2, 3에서의 설계탄성계수는 각 지점에서의 체적응력과 각 노상재료의 기초물성 값으로 결정된다. 표 4는 한국형 도로설계법에 제시되어 있는 설계입력 변수 결정응력 단계이며, 표 5와 표 6은 식 (12)의 경험적 모델의 인자를 결정하기 위하여 제시되어 있다.



$$E = \frac{1}{2}(E_{\max} - E_{\min}) \times (E_n + 1) + E_{\min} \quad (12)$$

여기서,

E = 탄성계수 (Mpa)

E_{\max}, E_{\min} = 상관모형 탄성계수 범위 <표 5>

E_n = 표준화된 탄성계수

표 4. 설계입력변수 응력

노 상 토		
구속응력 (kPa)	축차응력 (kPa)	체적응력 (kPa)
0	14	14
	28	28
	51	51
	55	55
	69	69
10	14	44
	28	58
	51	81
	55	85
	69	99
21	14	77
	28	91
	51	114
	55	118
	69	132
41	14	137
	28	151
	51	174
	55	178
	69	192

표 5. 상관모형의 탄성계수 범위 값

구 분	E_{\min}	E_{\max}
노 상 토	39.0	276.0

다음 표 6은 우정-장안간 기초물성 시험결과를 이용하여 설계입력변수 경험모형 예측식을 통한 탄성계수와 실제 M_R 시험의 시험결과로부터의 탄성계수를 산정한 것이다. 우정-장안 구간 시료에 대한 노상

표 6. 우정-장안 구간 탄성계수 M_R 시험 및 예측모형을 통한 추정 설계탄성계수

경험모형	INPUT	시료다짐시험결과			
OMC(%)	11.1	최적함수비(%)	11.1		
$\gamma_{d\max}$ (kN/m ³)	1.948	최대건조단위중량 (t/m ³)	1.948		
C_u	9.62				
#200 pass (%)	4.84	탄성계수(MPa)			
단계	구속응력 (kPa)	축차응력 (kPa)	체적응력 (kPa)	M_R 시험 결과	경험모형
1	0	14	14	124	181.6889209
2	0	28	28	97	158.6076532
3	0	51	51	76	126.7576585
4	0	55	55	72	122.2164623
5	0	69	69	67	108.673581
6	10	14	44	143	196.718891
7	10	28	58	110	172.4416184
8	10	51	81	83	137.6588703
9	10	55	85	80	132.5685744
10	10	69	99	73	117.1872905
11	21	14	77	158	214.8686221
12	21	28	91	127	189.4383047
13	21	51	114	96	151.4839652
14	21	55	118	90	145.762812
15	21	69	132	81	128.2033497
16	41	14	137	161	252.680789
17	41	28	151	130	225.5691075
18	41	51	174	103	182.2068802
19	41	55	178	99	175.3068551
20	41	69	192	84	153.4635081

토의 탄성계수 비교를 통하여 경험모형과 실제시험 결과와는 차이가 있음을 알 수 있다. 인자결정 시 데이터의 한계성을 지닌 경험모형 모델인자의 적용확대를 위한 더 많은 시험 D/B가 필요하다고 판단되며, 본 연구에서는 한국형 도로포장설계법의 도로단면설계시 현장의 물성특성치로부터 설계탄성계수를 산정하여 설계한 후, 현장에서 다짐평가시 설계탄성계수가 구현되는지 알아보기 위하여 경험모형의 추정된 설계탄성계수 값을 DCPT-탄성계수 적용모델을 위한 비교인자로서 사용하고자 한다.



4.2 실내 토조시험을 통한 기존 제안식 평가

본 연구에서는 국내 현장에 맞는 탄성계수의 측정식 제안을 위한 토조시험을 실시하였고, 우정-장안 구간 시료의 기초물성시험과 DCPT 토조시험을 수행하였으며, 시험결과를 기존연구에서 제안된 CBR 값과 DCPT PR 값의 상관관계식의 적용성을 검토하였다.

4.2.1 토조시험

DCPT의 토조시험을 수행하기 위한 토조제작에 있어 가장 먼저 결정되어야 할 사항은 경계조건을 고려한 토조의 크기이다. 현장 DCPT 시험상황은 시험대상 지반을 반무한체로 가정할 수 있으며 이를 실내에서 재현하기 위해서는 경계조건에 영향을 받지 않는 토조의 형상과 크기를 결정해야 한다.

(가) 토조제작

Ayer, M. E.(1990)에 따르면, DCPT 토조시험시 토조의 크기는 DCPT 시험결과 값에 영향을 주며, 지름 304.8mm 이상의 크기를 만족시켜야 한다. 이를 토대로 그림 6과 같이 내경 900mm, 높이 650mm, 두께 5mm의 원통형 토조를 제작 후 시험을 실시하였다.

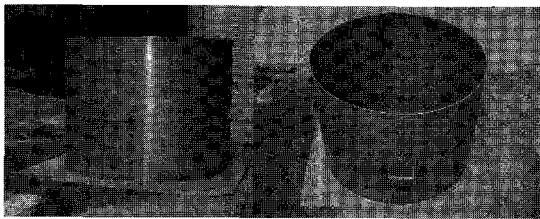


그림 6. 토조의 외형

(나) 시료 준비

충분한 양의 우정-장안 구간 노상토를 19mm 체로 친 후 다짐시험을 통한 최대건조단위중량 값을 토조의 부피에 맞춰 식 (13), (14)로 계산되어진 필요한 만큼의 시료를 준비하였다.

$$V = \frac{1}{4} \times \pi \times 0.9^2 \times 0.5 = 0.32m^3 \quad (13)$$

$$W = V \times \gamma_{dmax} = 0.32 \times 1.950 = 0.624t \quad (14)$$

위 시료량을 자동래머를 이용하여 토조내 5층 다짐을 실시하였다. 다져진 시료를 들밀도시험을 통하여 다짐도를 표 7과 같이 얻었으며, 토조내 DCPT시험을 하였다. 표 8은 문헌조사된 흙종류에 따른 한계 DCPT PR 값을 나타낸 것이다.

표 7. 들밀도 시험을 통한 다짐도측정

	토조 시료 1	토조 시료 2	토조 시료 3
토조 내 시료 $\gamma_{dmax}(t/m^3)$	1.853	1.856	1.858
우정-장안 시료 $\gamma_{dmax}(t/m^3)$	1.948		
상대 다짐 (%)	95.1	95.3	95.4

표 8. 한계 DCPT PR (burnham, 1997)

Material Type	Limiting PR(mm/blow)
Silty/Clay subgrade	< 25
Select Granular Subgrade	< 7
Class 3 Special gradation granular base materials	< 5

4.2.2 DCPT PR값 분석

우정-장안간의 동일 시료를 다짐도만 달리한 후 표 9와 같이 세 번에 나누어 DCPT 시험을 실시하였으며 그림 7에서와 같이 DCPT 시험결과 값을 얻었다. 그림 7에서 보면 몇 개의 점을 빼고는 각 타격 횟수 별 관입량이 25mm를 넘지 않고 각 토조의 PR 값 역시 20mm/blow 이하로 세 토조의 평균 PR 값이 18.7mm/blow인 것을 볼 수 있다. 이는 표 8의 "silty/clay subgrade"에 해당하는 것으로, 본 연구 시료의 경우 체분류를 통한 노상토의 통일분류가 SP로서, 국내실정에 맞는 좀 더 세부적인 분류가 필요



함을 보여준다. 또한 표 7의 들밀도 시험으로 확인된 바와 같이 DCPT 토조시험을 통해서도 요구 다짐도를 얻었음을 알 수 있다.

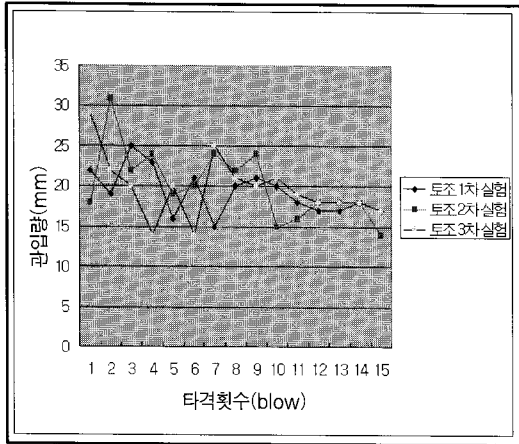


그림 7. 타격 횟수별 DCPT 관입량

표 9. 타격 횟수별 DCPT 관입량

토조 1차 실험			토조 2차 실험			토조 3차 실험		
타격횟수	측정값	관입량	타격횟수	측정값	관입량	타격횟수	측정값	관입량
0	1092	0	0	1092	0	0	1092	0
1	1070	22	1	1074	18	1	1063	29
2	1051	19	2	1043	31	2	1041	22
3	1026	25	3	1021	22	3	1021	20
4	1003	23	4	997	24	4	1007	14
5	987	16	5	978	19	5	987	20
6	966	21	6	958	20	6	973	14
7	951	15	7	934	24	7	948	25
8	931	20	8	912	22	8	927	21
9	910	21	9	888	24	9	907	20
10	890	20	10	873	15	10	886	21
11	872	18	11	857	16	11	867	19
12	855	17	12	839	18	12	849	18
13	838	17	13	821	18	13	831	18
14	820	18	14	803	18	14	813	18
15	803	17	15	787	14	15	796	17
PR(mm/blow) = 19.3			PR(mm/blow) = 19			PR(mm/blow) = 17.8		

4.2.3 실험 결과를 통한 CBR 및 탄성계수 추정제한식의 적용성 검토

DCPT 토조시험결과를 자료로 기존 제안식의 적용성을 확인하였다. 각 제안식에 우정-장안간 실내시험 결과인 CBR 값 16과 평균 PR 값 18.7(mm/blow)를 대입하면 다음과 같다.

• Kley (1975)

$$\text{Log } CBR = 2.62 - 1.27 \log PR \Rightarrow 2.62 - 1.27 \times 1.27 = 1.01 \Rightarrow CBR = 10$$

• Smith and Pratt (1983)

$$\text{Log } CBR = 2.56 - 1.15 \log PR \Rightarrow 2.56 - 1.15 \times 1.27 = 1.09 \Rightarrow CBR = 12$$

• Harison (1984, 1986)

$$\text{Log } CBR = 2.55 - 1.14 \log PR \Rightarrow 2.55 - 1.14 \times 1.27 = 1.10 \Rightarrow CBR = 13$$

• Livneh (1987, 1991)

$$\text{Log } CBR = 2.20 - 0.71 \Rightarrow (\log PR)^{1.5} \Rightarrow 2.20 - 0.71 \times 1.27^{1.5} = 1.18 \Rightarrow CBR = 15$$

기존 제안식 적용성을 살펴본 결과 DCPT 실내토조시험으로 얻은 평균 PR값과 CBR값 16간에 가장 부합하는 식은 Livneh 식임을 알 수 있었다.

또한 우정-장안 구간의 노상토의 기초물성 값을 이용한 경험모형을 통하여 추정된 설계탄성계수와 국내 노상토 재료기준인 조립토 다짐에 대한 DCPT PR 값 범위로 부터 구한 실내시험 탄성계수 값을 비교분석하였다. 표 6에서와 같이 표 9에서 얻은 결과인 조립질 노상토 다짐에 대한 PR값 범위 $\leq 20\text{mm/blow}$, 우정-장안 PR값 = 18.7mm/blow, 우정-장안 M_R 값 = 109.31~258.05MPa로부터 조사된 국내의 탄성계수 추정식의 검증결과는 다음과 같다.

• Hasan (1996)

$$\begin{aligned} M_r(\text{psi}) &= 7013.065 - 2040.873 \ln(PR) - 7013.065 \\ &\quad - 2040.783 \ln(18.71 \div 25.4) \\ &\Rightarrow 7637.99(\text{psi}) \\ &\Rightarrow 52.66(\text{MPa}) \end{aligned}$$



• Chen (1999)

$$M_r(MPa) = 338(PR)^{-0.39} = 338(18.7)^{-0.39} \Rightarrow 107.87(MPa)$$

• George (2000)

$$M_r(MPa) = 235.3(PR)^{-0.475} = 235.3(18.7)^{-0.475} \Rightarrow 125.96(MPa)$$

• Pandey (2003)

$$M_r(MPa) = 357.87(PR)^{-0.6445} = 357.87(18.7)^{-0.6445} \Rightarrow 54.20(MPa)$$

• Pradesh(2004)

$$M_r(MPa) = 415.4(PR)^{-0.25} = 415.4(18.7)^{-0.25} \Rightarrow 199.76(MPa)$$

• Gudishala (2004)

$$M_{FWD} = 2191/PR = 2191/18.7 = 313MPa$$

• 건설기술연구원 제안식(2006)

$$M_{FWD}(MPa) = 993.10\left(\frac{1}{PR}\right) + 33.95 = 87.06MPa$$

위의 제안식에서 얻은 탄성계수 예측값을 비교 분석해 보면, George의 식과 Pradesh의 식 이외에는 탄성계수 예측값 범위내에서 벗어남을 알 수 있다. 하지만, 두 제안식을 통해 얻은 탄성계수 값이 73.8MPa라는 큰 차이를 보이므로 보다 안전하고 효율적인 다짐 설계법을 정립하기 위해서는 보다 많은 실내/현장 시험을 통하여 많은 데이터를 축적, 분석하여 국내 현장에 맞는 다짐 관리기준이 필요하다 고 판단된다. FWD를 이용한 M_R 값과 DCPT PR 값을 이용한 M_R 값의 비교 제안식을 비교한 결과, Gudishala의 제안식이 예측 M_R 값 보다 다소 크게 산정되며, Chen의 제안식 역시 매우 근접한 값을 보이고, 건설기술연구원의 제안식은 예측 M_R 값에 20% 정도 과소평가되어 있음을 알 수 있었다.

또한 본 연구에서는 실제 차량이 유발하는 축차응력과 구속응력을 결정하고자 도로포장하부구조가 콘크리트포장보다는 아스팔트포장의 경우 하중분담 역할이 큼을 고려하여 기존 문헌조사를 통해 표 10과

같이 국내 아스팔트 포장단면을 고려한 단면모델 구성으로부터 설계차량을 기준으로 주행속도에 따른 응력범위 산정을 표 11과 같이 정리하였고, 설계 차량으로부터의 발생범위가 구속응력 23.99~31.74kPa, 축차응력 32.09~51.05kPa 임을 알 수 있었다.

따라서 표 6에서 구속응력 21kPa의 경우로 축차응력 51kPa을 살펴보면 실내 M_R 시험의 경우 탄성계수 96MPa, 경험모형 151MPa이 산정되므로, 문헌조사된 식들 중 건설기술연구원(2006)식이 적합함을 알 수 있었다.

표 10. 국내 아스팔트 포장단면을 고려한 단면모델 구성

	표층	표층	기층	보조기층	노상	참고사항
두께(cm)	하	5	15	30	-	*암반층 : 8m (가정)
	중	10	25	40	-	
	상	20	35	60	-	
탄성계수 (kg/cm ²)	하	하중주파수 및 온도에 따른 탄성계수		K-e 모델을 이용한 비선형 탄성계수		
	중					
	상					
포아송비	0.3	0.3	0.35	0.4		
단위중량(kg/cm ³)	0.00235	0.00235	0.0023	0.00191		
온도(℃)	시험도로 표면온도 : 52.5℃(2004.7.22), -4.5℃(2004.1.3)					
Speed(Km/h)	10, 30, 60, 100					

표 11. 속도에 따른 비구속층의 응력범위(kPa)

응력종류	층	차량주행속도			
		10km/h	30km/h	60km/h	100km/h
수직응력 범위	보조기층	43.96~228.84	26.64~90.09	19.54~48.89	16.49~37.59
	노상	43.50~51.05	35.52~40.31	32.84~37.56	32.09~36.81
구속압 범위	보조기층	21.01~88.44	14.06~31.52	10.12~19.92	8.56~16.40
	노상	28.04~31.74	25.21~28.87	24.26~27.92	27.65~23.99

4.3 현장시험

DCPT 현장시험을 위하여 4곳의 도로건설 현장을 수배하여 현장 DCPT 시험을 수행하였다.



4.3.1 현장시험

시공현장에서 노상 다짐에 따른 DCPT 시험을 위하여 시험빈도를 800m³에서 2회 이상 실시하기로 하였으며(도로공사 표준시방서 참조), 이는 도로 폭 20m를 기준으로 할 때, 20m 간격으로 DCPT 현장 시험을 하였음을 의미한다.

매 DCPT 현장 시험 지점마다 들밀도 시험을 병행 하였으며, 시험이 끝난 후에는 각 지점에서의 시료를 채취하여 그림 8~그림 11과 같이 흙 분류 및 다짐 시험을 통한 각 지점의 다짐도를 산출하였다.

흙분류		GC	
최적함수비	13.5%	현장다짐도	96%
현장함수비	13%	평균 PR값	6.51(mm/blow)

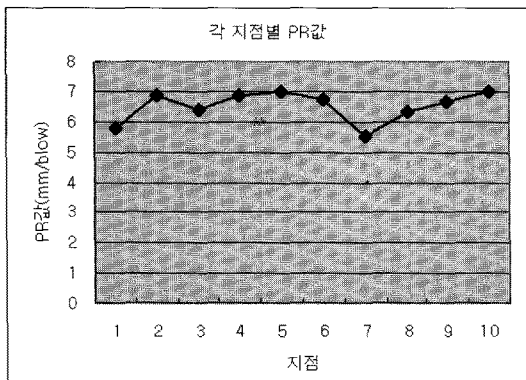


그림 8. 현장 1의 시험결과

흙분류		GP	
최적함수비	12.5%	현장다짐도	95.1%
현장함수비	16%	평균 PR값	6.83(mm/blow)

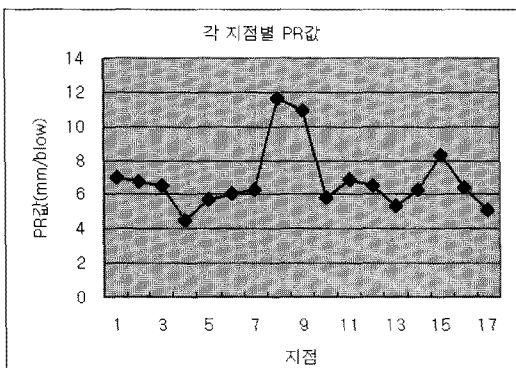


그림 9. 현장 2의 시험결과

흙분류		SP	
최적함수비	11.5%	현장다짐도	95.6%
현장함수비	9.75%	평균 PR값	8.07(mm/blow)

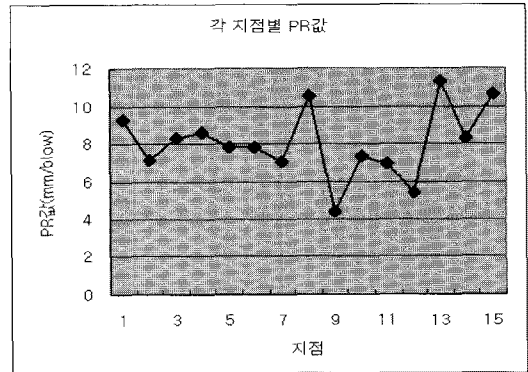


그림 10. 현장 3의 시험결과

흙분류		SM	
최적함수비	14.5%	현장다짐도	91.3%
현장함수비	15.74%	평균 PR값	28.58(mm/blow)

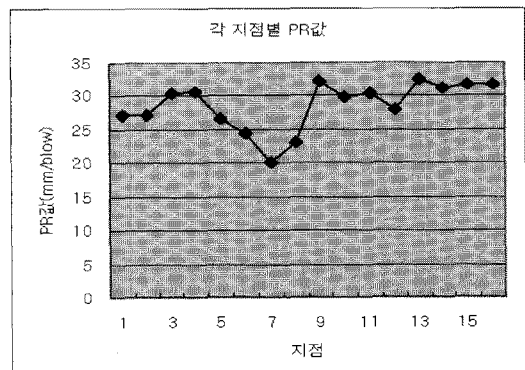


그림 11. 현장 4의 시험결과

4.3.2 DCPT 시험결과 분석

1) 현장 입도분포에 따른 분석

각 구간의 지점별 PR 값을 보았을 때, “현장 4”의 그래프가 다른 세 구간의 그래프보다 대체적으로 평이함을 보이고 있다. 이는 다른 구간의 노상들보다 “현장 4” 노상의 입도분포가 지점별로 별다른 차이 없이 고르다는 것을 의미한다. 또한, 다른 세 구간의 그래프에서 최소 PR 값과 최대 PR 값이 2배 이상



차이가 나는 것은 DCPT 관입지점부에 다른 입상재료를보다 크기가 큰 재료가 상재하여 있음을 나타낸다. 이는 DCPT 시험이 같은 재료로 성토한 노상에 같은 방식과 강도로 다짐을 하였다 하여도 관입지점의 입도분포에 따라 PR 값에 오차가 생길 수 있다는 단점을 보여준다. 이는 곧 DCPT 현장시험은 현장에서 시험빈도가 잦고, 시험간격이 좁을수록 결과값의 신뢰도가 높음을 알 수 있다.

2) 흙 분류에 따른 분석

현장 다짐도 95% 이상을 만족한 “현장 1”, “현장 2”, “현장 3” 세 구간은 흙 분류 및 평균 PR값을 보면, “현장 1”과 “현장 2”가 자갈질 조립토로서 평균 PR값이 6.51mm/blow, 6.83mm/blow로 비슷하며 “현장 3”은 모래질 조립토로서 평균 PR값이 8.07mm/blow로 위 두 구간과 차이를 보이고 있다. 이는 현장 다짐도를 만족하는 노상이라 하여도 노상 재료에 따라 평균 PR 값이 다르다는 것을 의미하며, 특히 입경이 큰 재료일수록 평균 PR 값이 작음을 알 수 있다. 이는 노상재료에 따라 다짐도를 만족하는 PR 값을 달리 정해 주어야 한다는 것을 의미한다.

3) 현장 함수비 및 다짐도에 따른 분석

본 연구의 현장시험결과를 분석한 결과, 표 12의 “도로공사 표준시방서 다짐기준”에 근거하여 “현장 2”는 다짐도 95% 이상을 만족하였으나, 시험직전에 내린 소나기로 인해 현장함수비가 시방서 다짐기준인 최적 함수비 $\pm 2\%$ 범위보다 높게 나타났다. “현장 4”의 현장함수비는 노상 다짐기준에 맞으나 다짐강도가 다짐도 95% 이상에 못 미침을 보인다. 그러

표 12. 도로공사 표준시방서 다짐기준

구 분	노 상	비 고
다짐도(%)	95% 이상	KS F 2311 KS F 2312 ASSHTO. T 224-86
시공시의 함수비(%)	최적함수비 $\pm 2\%$	KS F 2306 KS F 2312

나 “현장 2”는 “현장 1”과 비교할 때 같은 흙 분류 상태에서 비슷한 평균 PR 값을 보이고 있으나, “현장 4”는 다른 세 현장들에 비해 3배 가까이 평균 PR 값의 차이를 보이고 있다. 이는 DCPT 시험에 있어서 현장함수비 변화는 평균 PR값에 미치는 영향이 미미하나, 이외는 반대로 다짐도가 PR값에 미치는 영향이 상당히 크다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

현재 도로설계 및 유지관리는 탄성계수와 같은 흙의 역학적 특성을 이용하여 수행하는 반면 시공시에는 현장에서의 들밀도시험, 평판재하시험 등으로 품질관리를 하고 있어 설계, 시공관리 및 유지관리간의 개념적 차이가 나타나고 있다. 이는 전체 건설공정의 일관성을 떨어뜨리고, 다짐기준 자체가 경험적 측면으로 제시되어 불합리한 면이 있다. 이에 본 연구에서는, 시공현장 다짐관리에 노상의 단위중량을 이용하는 기존방법 대신 노상의 탄성계수를 측정하는 역학적 방식으로 다짐관리방법을 바꾸고자 하는 것이며, 도로포장 설계시 도로설계법에 의한 도로설계가 실제 현장에서 구현되도록 기존현장에서 사용되고 있는 노상토의 현장다짐도에 의한 시공과는 전혀 다른 새로운 개념의 다짐관리를 제시하고자 신속하고 간단하게 측정할 수 있는 DCPT 시험법을 연구하였다.

본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

- ① 탄성계수를 이용한 노상 다짐관리기준 정립을 위한 연구흐름 및 방법론을 제시하였고, 노상토의 설계탄성계수를 현장에서 구현할 수 있도록 현장에서 다짐후 설계탄성계수와 비교하기 위하여 현장탄성계수를 추정하기 위한 DCPT 시험방법의 적용성을 검토하였다.
- ② 실내토조 시험결과, DCPT PR 값과 CBR 값간의 상관관계식에서는 Livneh 식이 가장 부합됨을 알 수 있었다.
- ③ 실내토조에서의 DCPT 시험을 통한 PR값을 국



내외 탄성계수 추정식을 평가한 결과, 예측 M_R 탄성계수 값과 부합하는 제안식으로는 George와 Pradesh의 식이 있었으며, FWD를 이용한 M_R 제안식을 비교한 결과, Gudishala의 제안식은 예측 M_R 값보다 다소 크게 산정되며, Chen의 제안식의 경우 다소 작은 값을 보이고, 건설기술연구원의 제안식은 예측 M_R 값에 20% 정도 과소 평가함을 알 수 있었다.

- ④ 우정-장안간 시료에 대한 노상토의 기초물성시험 결과와 실제 설계수준 1단계에서 실시되는 M_R 시험의 시험결과로부터의 탄성계수 비교를 통하여 경험모형과 실제시험결과와는 차이가 있음을 알 수 있었으며, 이는 경험모형 인자 결정시 데이터의 한계성을 지닌 것으로 판단되며, 경험모형 모델인자의 적용확대를 위한 더 많은 시험 D/B가 필요함을 알 수 있었다.
- ⑤ 실제 차량이 유발하는 주행속도에 따른 축차응력과 구속응력으로부터 실내 M_R 시험결과를 비교 분석한 결과, 실내 M_R 시험결과와 DCPT 시험결과와의 상관관계식으로 전기원식이 적합함을 알 수 있었다.
- ⑥ DCPT 현장시험결과를 분석한 결과, 관입지점의 입도분포에 따라 PR 값에 오차가 생길 수 있음을 알 수 있었다. 이는 곧 DCPT 현장시험은 현장에서 시험빈도가 낮고, 시험 간격이 좁을수록 결과값의 신뢰도가 높음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 DCPT 시험간격에 대한 추천값을 제시하였다.
- ⑦ 현장다짐도를 만족하는 노상이라 하여도 노상재료에 따라 평균 PR 값이 다르게 나타났으며, 특히 입경이 큰 재료일수록 평균 PR 값이 작음을 알 수 있었다. 이는 노상재료에 따라 다짐도를 만족하는 PR 값을 달리 정해 주어야 한다는 것을 의미한다.
- ⑧ 본 연구의 현장시험결과를 분석한 결과, DCPT로 평가할 현장에서의 다짐후 현장함수비 변화는 평균 PR 값에 미치는 영향이 미미함을 알 수 있다.

본 연구를 통하여 실제 도로설계시 사용된 노상토의 탄성계수를 현장에서 구현할 수 있도록 제시된 시험방법 및 절차에 의하여 시공관리자가 가능할 것으로 사료되며, 기존 시공자들에게 과거 다짐관리를 시행시 기존의 다짐도에 의한 다짐관리를 역학적 개념의 다짐관리를 할 수 있도록 하여 역학적-경험적 도로설계법의 시행과정에 완충역할을 기대한다. 그러나 검토된 시험결과 값을 통한 추정탄성계수간에 상당한 차이를 보임에 따라 보다 많은 실내/현장 시험을 통한 데이터 축적과 비교·검토가 필요하며, 추후 DCPT 현장시험을 통한 탄성계수 값과 노상 현장 시료를 이용한 회복탄성계수시험으로 얻은 설계탄성계수 값의 분석을 통해 국내 현장여건에 맞는 토질 종류에 따라 일반적인 DCPT PR - 탄성계수 추정식을 마련하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 국책연구과제인 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능개선방안 연구”의 일부결과로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

건설교통부, 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구, 2002.10~2005.10

건설교통부, 도로공사 표준 시방서, 2003. 10

류명찬, 포장 동적관입시험기에 의한 보조기층 및 노상 지지력 측정, 한국도로포장공학회논문집, 2003. 3

최준성 외 4명, 역학적 시험에 의한 다짐방법의 적합성 평가를 위한 기초 연구, 2003. 10

최준성의 4명, 역학적 시험에 의한 다짐방법의 적합성 평가를 위한 기초연구, 한국도로포장공학회논문집, 2003. 10

최준성의 2명, 소형 다짐장비를 이용한 최소폭 굴착노면의 다짐기준 연구, 한국도로학회 제 2회 봄학술대회 논문집, 2005. 3



- American Society of Testing Materials (2003). *Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications*. ASTM D6951-03, ASTM International, West Conshohocken, PA
- Ayerx, M.E. (1990). Rapid Shear Strength of In Situ Granular Material Utilizing the Dynamic Cone Penetrometer. *University of Illinois at Urbana-Champaign, Ph. D. thesis*.
- Burnham, T. R. (1997). Application of Dynamic Cone Penetrometer to Minnesota Department of Transportation Pavement Assessment Procedures. *Report No. MN/RC-97/19*, Minnesota Department of Transportation, St. Paul, MN
- Burnham, 1997, *Limiting DCP Penetration Rates by MNDOT*
- Chen, D. H., Wang, J-N, and Bilyeu, J. (2001). "Application of Dynamic Cone Penetrometer in Evaluation of Base and Subgrade Layers." *TRR* 1764
- Harison, J. R. (1987). "Correlation Between California Bearing Ratio and Dynamic Cone Penetrometer Strength Measurement of Soils." *Proc. Instn. of Civ. Engrs., London, Part2*, pp. 83-87
- Jayawickrama, P. W., Amarasiri, A. L., and Regino, P. E. (2000). "Use of Dynamic Cone Penetrometer to Control Compaction of Granular Fill." *TRR* 1736
- Livneh, M. and Ishai, I. (1988). "The Relationship Between In Situ CBR Test and the Various Penetration Tests." *Proc. First Int. Conf. on Penetration Testing, Orlando, FL*, pp. 445-452
- Nazzal, M. D. (2003). Field Evaluation of In-Situ Test Technology for QC/QA During Construction of Pavement Layers and Embankments. *MSThesis, Department of Civil and Environmental Engineering*, Louisiana State University
- Siekmeier et al.(1999), *Report, Minnesota Department of Transportation*

접 수 일: 2008. 5. 29
심 사 일: 2008. 6. 2
심사완료일: 2008. 9. 23