



포장동적관입시험기(PDCP)에 의한 보조기층 및 노상 지지력 측정

Estimation of Bearing Capacity of Subbase and Subgrade Using Pavement Dynamic Cone Penetrometer

류 명 찬*

Roo, Myung-Chan

Abstract

This paper presents a theoretical approach for estimation of CBR-value of subbase course and subgrade using a portable pavement dynamic cone penetrometer[PDCP]. The PDCP used in this paper was based on a design from South Africa and extensive studies by Kleyn(1982) and more recently by Liveneh and Ishai(1987) and Chua(1988). To date, California Bearing Ratio[CBR] value was studied mainly for application of pavement structural design. This study was initiated to develop a method of obtaining the in situ CBR-values of subbase and subgrade for the structural evaluation of pavements in the swift and inexpensive manner. PDCP tests were implemented at 20 different kinds of soil samples in the lab and test results were analysed by a theoretical approach introduced. The procedure presented provides acceptable and promising results.

Key words : pavement dynamic cone penetrometer, CBR, elastic modulus

요 지

본 연구는 도로를 설계, 건설, 유지관리하는 도로기술자들이 실제 도로의 건설과 유지관리가 이루어지고 있는 현장에서, 도로를 구성하고 있는 기층, 보조기층, 선택층, 노상, 노체 등의 현장강도성분을 PDCP(Pavement Dynamic Cone Penetrometer)라는 조각이 용이하고 실험결과 해석이 간단하면서 신뢰성 있는 기구를 사용하여 현장에서의 측정이 가능하도록 하고자 수행이 되었다.

이와 같은 목적을 수행하기 위하여 먼저 현장에서 조립 및 이동이 용이하도록 포장관입시험기(PDCP)를 제작하였으며, 동일한 시료에 CBR시험 및 PDCP관입시험을 시행하기 위하여 기존의 직경 15cm CBR 몰드를 여러개 연결하여 높이를 키운 특수 CBR 몰드도 동시에 제작하였다. 실험실에서 다양한 시료에 대하여 다짐시험을 실시하여 최적 함수비 및 최대 건조밀도를 구한 후, 각각 B다짐 및 D다짐으로 다져 PDCP 관입시험 및 CBR시험을 실시하였다. 이와 같은 시험 결과 스무 개의 CBR값과 관입지수와의 상관관계식을 구할 수 있었다.

또한 해석적인 방법으로 PDCP시험의 결과치인 관입지수로부터 탄성계수를 산정하는 방법을 소개하였다. 현단계에서는 다양한 토질분류에 대한 관입지수와 탄성계수 산정식이 제시되어 있지 않아 정확한 탄성계수값을 구하는 데에는 어려움이 있지만, 추후 보다 다양한 토질분류에 대한 관입지수와 탄성계수 산정식을 얻는 노력이 시행된다면 보다 정확한 탄성계수값 및 회복탄성계수(M_R)값도 구할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 동적포장관입시험기, CBR, 탄성계수

* 정회원 · 명지전문대학 토목과 부교수

1. 서론

도로를 건설하고 유지관리하는 도로포장기술자들은 항상 도로가 설계수명 동안 이용차량들이 안전하고 쾌적하게 도로를 주행할 수 있도록 적절한 서비스 수준을 유지하는데 주안점을 두고 있다. 이러한 도로 포장체의 적절한 서비스 수준유지의 관건은 이용교통량을 지탱하는 도로포장체 구성 각 층이 적절한 강도를 유지하도록 설계, 시공, 관리하는데 있다. 포장체강도는 현재 주로 CBR(California Bearing Ratio)치를 사용하여 관리되고 있는바, 현장에서 시료를 채취하여 실험실에서 실시하는 실내CBR시험 및 현장CBR시험에 의하여 결정된다.

도로포장층의 현장강도를 직접 평가하는 것은 항상 도로관련기술자 모두가 바라는 바이지만 현단계에서는 어려움이 많아 대다수 포장엔지니어 들은 실내CBR과 같은 간접적인 방법에 의존해 왔는데, 이는 사실 토질시료에 대한 관입강도시험에 불과한 것이다. 결국 CBR과 상호연관성을 갖는 현장강도시험이 시행되고 있지 않기 때문에 도로건설공사와 같은 광활한 지역에서의 성토작업시 지지력 균일여부 및 다짐장비의 효율성 확인이 곤란한 상태이므로 포장 구조설계 및 토공작업에 있어 포장층의 현장강도 특성을 직접 평가하는 것이 필요한 실정이다.

도로포장체 각층의 구조적 능력을 평가하기 위해 여러 가지 다른 방법, 파괴 및 비파괴 방법, 즉 평판재하시험, CBR시험, 벤첼만뱀 시험, FWD, Dynaflect 등을 현재 사용하고 있으나 각 방법에 따라 결과치가 상이한 경우가 많으며, 각각의 시험방법에 따라 결과의 호환성을 기대하기가 어렵다. 현재 포장층 평가방법중 비파괴시험방법이 역산에 의해 포장 각 층의 탄성계수를 비교적 신속하고 용이하게 얻을 수 있다는 장점으로 점차 사용이 확산되고 있으나, 아직 결과에 대한 신뢰도가 떨어지고 있는 실정이다.

본 연구에서 제안된 포장동적관입시험기(PDCP: Pavement Dynamic Cone Penetrometer, 이하

PDCP로 표기·그림 1 참조)를 사용하여 현장에서 직접 시료를 채취하지 않고 관입깊이에 따른 포장층(일반적으로 기층 이하)의 강도성분측정이 가능하다. PDCP를 현장에 이와 같은 목적으로 적용하기 위하여는 다양한 도로포장용 성토재료에 대한 실내 CBR과 γ_{dmax} (최대건조밀도)를 결정한 다음, 현장에서의 PDCP시험으로부터 구한 관입지수와의 상호관계를 분석하여 노상과 포장층의 현장강도를 직접 평가할 수 있는 방법을 도출함이 요구된다.

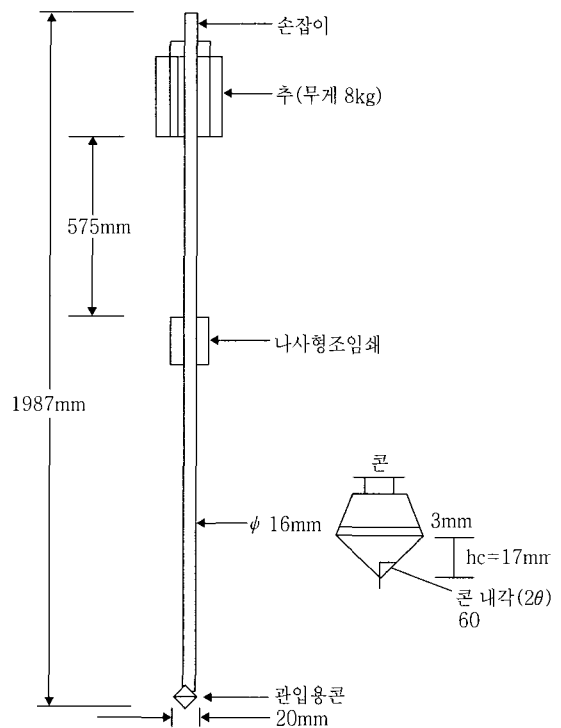


그림 1. 포장동적관입시험기(PDCP)

2. PDCP 관련 기술사항

2.1 PDCP의 소개

본 연구에 사용된 포장동적관입시험기(PDCP)는

남아프리카공화국에서 처음 제작된 것에 근간을 두고 있으며, Kley et al.(1982)에 의해 광범위하게 연구되었고, 최근에는 Harison(1986), Livneh와 Ishai(1987), Chua(1988)에 의해 정립되어 왔다.

남아프리카에서 최초로 개발된 PDCP는 기본적으로 직경 16mm의 강봉과 해머(무게 8kg) 및 콘(직경 20mm, 내각 60°)으로 구성되어 있고, 슬라이딩 해머의 자유낙하(낙하고 575mm)에 의해 충격이 가해질 때, 지중에 관입된 깊이(mm), 관입지수(mm/blow) - 해머 1회 타격당 관입 깊이 - 를 기록하며, 장비의 총 무게는 약 12kg이다. 지중으로 관입되는 아래 부분 강봉에는 5mm 마다 눈금이 새겨져 있으며, 해머를 제외한 부분은 녹 발생 방지를 위하여 스테인리스 스틸로 제작되었다. 본 연구에서는 아래 부분 강봉에는 관입 깊이 읽음을 용이하게 하기 위하여 별도의 관입 깊이 읽음장치를 부착하여 제작되었다. 이러한 포장동적관입시험은 포장층의 노면으로부터 깊이에 따른 구조적 특성을 연속적, 경제적인 방법으로 평가하기 위하여 고안된 신속하고 간단한 현장조사 기법이다.

또한, 이 시험은 분리형 원통 샘플러(split spoon sampler)가 PDCP의 강봉 선단에 부착된 내각 60°의 콘으로 대체되어 있다는 점에서 표준관입시험(standard penetration test: SPT)의 변형이라 할 수 있다. 시험방법은 일반적으로 해머의 5회 자유낙하에 따른 관입심도가 기록되고, 그 결과는 단위 타격횟수에 따른 관입심도(관입지수)로써 판독된다.

점토질 흙에 있어 이 시험의 문제점은 강봉을 따라 점착력이 증가하는 경향이 있어 토질층을 명확히 구분할 수 없다는 것이다. 그러나, 심도가 다소 얇은 경우에는 문제가 없다.

그림 2는 고속도로 건설현장에서의 PDCP 시험 전경을 보여주고 있다. 아울러, PDCP는 포장 각층의 개략적인 심도를 평가하는데도 유용하다. PDCP는 원래 아스팔트 포장 구성층(기층, 보조기층, 노상)의 강도성분을 결정하기 위해 사용되었고, 통상 어떤 지점에서의 포장 시험시는 아스팔트 표층 원형

코아(core)를 제거한 후, PDCP를 기층상부에서 소요포장층 또는 노상 아래로 관입시킨다. 포장체 각층의 물성은 PDCP의 관입심도에 따라서 연속적으로 측정되고 기록된다. 아스팔트층의 특성은 실험실에서 회복탄성계수시험 등과 같은 보다 더 정확한 물리적 시험에 의해 주로 평가된다.

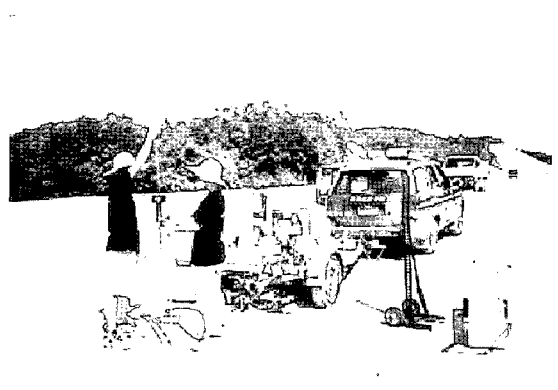


그림 2. 고속도로 건설 현장에서의 PDCP 관입시험 전경

2.2 PDCP의 해석원리

2.2.1 이론적 해법

본 연구에서 PDCP의 포장층 관입과정은 Yankelevsky와 Adin(1980)이 제안한 모델인 피관입층을 여러개의 토질 디스크(soil disc)로 나누어, 이 soil disc층을 PDCP가 관입해 들어가는 것으로 해석한다.

PDCP가 해머의 타격에 의해 soil disc를 관입해 들어가면 구멍(hole)이 생기는데, 그 순간 반경은 동일 높이에서 PDCP 선단 콘의 반경과 동일하다. 이때 콘과 soil disc의 접촉은 soil disc 내부 경계선상에 압축응력이 작용할 때까지 유지되며 압축이 사라질 때 분리되고, soil disc의 내부경계반경은 소성변형으로 인해 콘의 반경보다 크게 된다. 그림 3과 같이 PDCP 관입시 선단이 가느다란 콘 표면과 접촉하

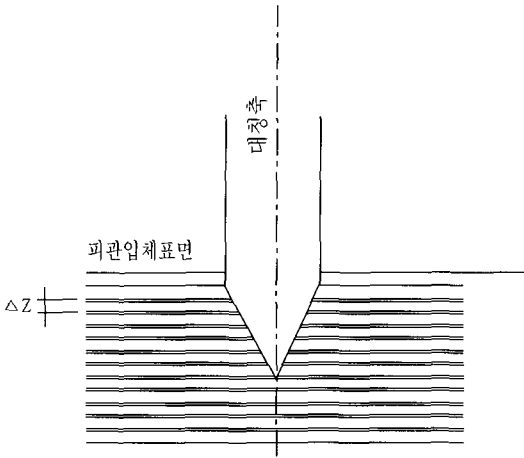


그림 3. 토질디스크로 이상화된 피관입체

는 토질입자는 연직성분 보다 복사성분(radial components)의 변위가 훨씬 더 크다고 가정하여 연직성분의 변위는 무시하고, soil disc의 변위는 복사방향(radial direction)만 고려된다. PDCP의 대칭축은 유한차분(finite differences)으로 구분되고, 토층(soil medium)은 대칭축에 수직인 면에 의해 disc로 분리된다. 그래서 연속체(여기서는 토층)는 공통된 회전대칭축을 가진 일련의 soil disc로 구성되며 각각의 soil disc는 복사방향에 있어 무한하고, 콘의 높이와 같은 일정한 두께 ΔZ 를 가지고 있다. 또한 모든 soil disc에 있어 각 토질입자의 변위는 오직 복사방향이다. 즉, 디스크의 반응은 1차원 문제로 해석된다. soil disc의 내부경계와 접하고 있는 콘(cone)의 국부표면에 있어서 변위, 속도 및 감속도의 순간복사성분(radial components)은 disc의 내부경계값과 같다고 보며 이러한 disc 특성을 기초로 하여 soil disc 내부경계선상에서 콘(cone)에 의해 가해진 압력을 계산할 수 있다.

한편, Yankelevsky와 Adin(1980)은 토질관입분석을 단순화시키는 방법을 규명하면서 토층에 충격을 주는 PDCP에 대하여 다음과 같이 단순 가정을 두었다.

① PDCP 선단 콘(cone)의 충격은 토층에 수직으

로 가해지고, 항상 그 상태로 존재한다.

② 콘과 토층 사이의 열전달과 확산은 무시한다.

③ 콘은 강체이다. 즉, 토질변형만이 고려된다.

④ 높은 국부체적변화가 관입을 지배하는 주된 메카니즘이라고 가정하므로 오직, 소성변형만이 고려된다.

⑤ PDCP의 선단은 가느다랗다. 즉, PDCP 선단 콘의 길이와 직경의 비는 크다

⑥ 흙과 콘 선단(nose) 표면 사이의 마찰은 무시할 수 있을 정도이다

⑦ PDCP의 선단, 또는 그 일부분만이 토층(soil target)과 접촉한다

그림 4는 소성충격면 배면에 있어서 soil disc의 한 단면을 보여주고 있다.

Yankelevsky와 Adin(1980)은 또한 1차원 모델을 만들어서 분석을 단순화하였으며, 그 합성식을 사용하여 탄성계수뿐만 아니라 구속변형률(locking strain)을 계산하였다. 제시된 해법은 알려진 특성의 토층으로부터 PDCP 선단 콘의 평균 감속도와 관입 심도를 예측하는 것이다. Mohr-Coulomb의 파괴기준이 적용되었고, 체적압축율은 구속체 모델(locking material model)에 의해 이상화되었으며,

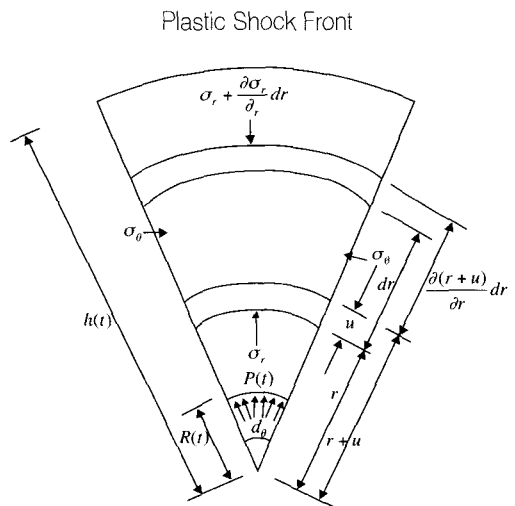


그림 4. 특정 디스크의 한 섹터

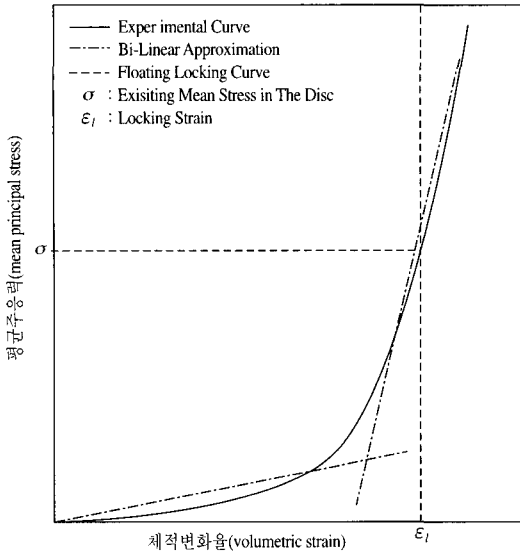


그림 5. 피관입체의 hydrostatic 모델

이 모델은 그림 5와 같이 구속 체적변형률로써 정의된다. soil disc의 두께는 콘 선단 높이로 가정하며 콘의 선단은 토질과 접하는 PDCP의 유일한 부분이 된다.

주된 관심사항은 콘의 움직임에 있으므로 콘의 내부경계 움직임을 통해 전형적인 soil disc 반응을 표현하는 것이 바람직하며 그 움직임은 콘과 disc에 있어서 같다. 결국 disc 운동방정식의 유도는 이러한 접근방식에 근간을 두고 있다.

2.2.2 동적 특성 계산

Yankelevsky와 Adin(1980)은 복사응력 σ 과 접선응력 σ_θ 의 평균인 평균주응력(average mean stress)에 대해 다음과 같이 표현하였다.

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{2} \cdot \tau_0 [(\bar{\epsilon}_l - 1) \cdot \log_e \bar{\epsilon}_l - \bar{\epsilon}_l + \frac{1}{3}] + \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot R^2 \cdot \left[\frac{7}{3} - \log_e \bar{\epsilon}_l \right] + \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot R \cdot \ddot{R} \cdot (1 - \log_e \bar{\epsilon}_l) \quad (1)$$

여기에서 τ_0 는 파괴시 주응력차이고, $\bar{\epsilon}_l$ 은 평균 체적구속변형률(mean volumetric locking strain)이

며, ρ_0 는 초기질량밀도(initial mass density), R 은 복사변위, \dot{R} 는 속도, \ddot{R} 는 soil disc 내부경계에서의 가속도이다.

PDCP의 콘 관입시 충격파(shock wave) 전면의 위치는 그 순간반경 h 로서 정의된다.

$$h = \frac{R}{\epsilon_l'} \quad (2)$$

ϵ_l' 은 체적구속변형률(volumetric locking strain)이며 소성 충격파이면에서의 복사응력은 다음과 같다.

$$\sigma_h = \rho_0 \cdot \dot{R}^2 \quad (3)$$

복사변위(R), 속도(\dot{R})와 가속도(\ddot{R})는 콘 선단에서의 수직성분으로부터 결정되는데, 복사변위는 다음과 같다.

$$R = \frac{h_c}{2} \cdot \tan(\theta) \quad (4)$$

여기에서 h_c 는 콘의 높이이며, θ 는 콘의 반각이다.

평균 복사속도

$$\dot{R} = \frac{W_w \cdot \sqrt{(2g \cdot h_w)}}{W_w + W_r} \cdot \tan(\theta) \quad (5)$$

여기서 h_w 는 낙하거리로서 575mm, W_w 는 햄머의 무게로 8kg, W_r 은 봉의 무게로 3.1kg 정도이며, g 는 중력가속도이다.

복사가속도는 콘 선단에서의 감속으로부터 계산된 하향력으로 구해진다.

$$\ddot{R} = \frac{g \cdot h_w \cdot W_w^2}{(W_w + W_r)^2 \cdot D} \cdot \tan(\theta) \quad (6)$$

여기서 D 는 관입지수이다.

Disc의 내부경계에서 복사응력은 다음과 같이 근사적으로 표현할 수 있으며,

$$p = \frac{h_w \cdot W_w^2}{(W_w + W_r) \cdot D \cdot hc^2 \cdot \tan^2(\theta)} \quad (7)$$

소성토질 디스크 전체내의 평균주응력(average mean stress)은 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{\sigma} = \frac{p + \sigma_h}{2} - \frac{\tau_0}{2}, \quad \sigma_h = \rho_0 \cdot \dot{R}^2 \quad (8)$$

τ_0 나 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 로 나타내는 파괴시 주응력차는 다음과 같다.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (9)$$

여기에서, σ_1 과 σ_3 는 최대 및 최소주응력이고, c 는 점착력이며 ϕ 는 내부마찰각이다.

다양한 토질종류에 있어 파괴시 주응력차의 대표적인 값은 Duncan et al.(1980)의 삼축시험 데이터로부터 얻었다. 표 1은 방정식 (1)에 사용될 대표적인 τ_0 중앙값을 요약해 놓은 것이다. 아스팔트 콘크리트에서 τ_0 값은 Carpenter(1986)에 의해 보고된 일축압축시험결과가 적용되었다. 이 값은 낮은 축의 값으로 표면처리를 한 얇은 층에 적용하기 적절한 수치이다.

표 1. 토질 분류에 따른 대표적인 τ_0 중간 값

구 분	파괴시 주응력 차 (kg/cm ²)	비 고
자갈 / 쇄석	21.1	
사 질 토	10.55	
실 트 질 흙	5.3	
점토	낮은 소성	3.5
	높은 소성	1.8
아스팔트 콘크리트	56.2	

2.2.3 탄성계수 산정

평균체적구속변형률(mean volumetric locking

strain)은 방정식 (1)의 ϵ_i 값을 조절하여 시행착오법(trial and error method)에 의하여 방정식 (8)의 평균복사응력 값을 얻음으로서 구할 수 있다.

Yankelevsky와 Adin(1980)은 어떤 알려진 토질 특성 즉, 토질에서의 관입심도를 예측하기 위해 평균 응력-체적변형을 곡선을 사용한 해법을 제시하였다.

하지만 그들의 보고서에서뿐만 아니라 Yarrington(1978)의 논문에서 제시된 실험 데이터(수직응력 vs 수직변형률)를 통해 토질에서 흔히 사용되는 쌍곡선의 응력-변형을 곡선상에 적용시킴으로써 특정응력 및 변형률에서 유일점들을 나타내는 일단의 곡선을 도출할 수 있는데, 그 방정식은 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{\epsilon_i}{\frac{1}{E_i} - \frac{1}{a \cdot E_i^b}} \cdot \epsilon_i \quad (10)$$

여기서 ϵ_i 은 선형변형률로서 약 $\epsilon_i/3$ 이며, E_i 는 초기 접선계수이고, a 와 b 는 상수로서 일반적으로 흙에 대해서는 a 와 b 의 값이 각각 35.7, 0.7이 적용된다.(Yarrington, 1978)

선형변형률 ϵ_i 은 방정식(10)에 적용되어 초기 접선탄성계수를 구하는데 방정식(8)에서 결정된 것과 같은 평균주응력 값을 얻기 위하여 시행착오법에 의해 선형변형률을 대입함으로서 초기탄성계수 E_i 를 구할 수 있다.

그림 6과 7은 표 1에 나타난 재료들의 탄성계수와 관입지수의 상관관계를 보여주고 있으며, 괄호 속의 숫자는 파괴시의 주응력 차이이다. 여기에 나타난 재료들은 높은 소성의 점토, 낮은 소성의 점토, 실트질 흙, 모래질 흙, 자갈 혹은 쇄석, 아스팔트 콘크리트와 같이 상당히 광범위한 분류를 보이고 있다. 각각의 분류 대해서 한가지 대표 값만이 주어져 있는 상태이다. 보다 세분화된 도로구성재료에 대한 이와 같은 탄성계수와 관입지수의 상관관계를 얻기 위해서는, 광범위한 여러 재료에 대한 실험 데이터를 수집/분석함이 필요하며 경우에 따라서는 특정 재료에 대한 직접적인 실험이 필요하다.

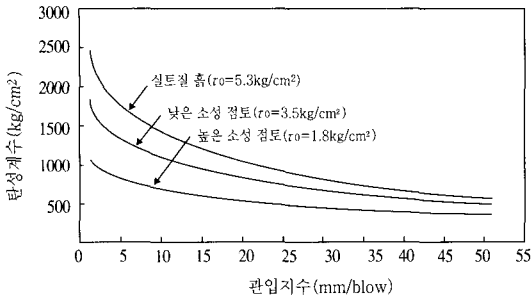


그림 6. 세립질 흙의 관입지수와 탄성계수의 상관관계

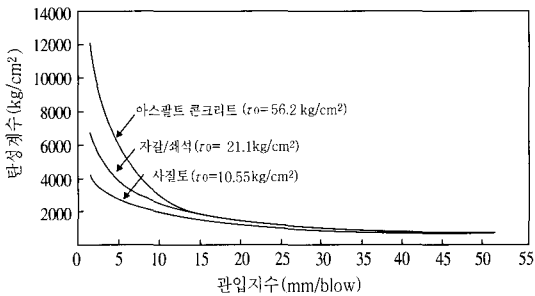


그림 7. 조립질 흙의 관입지수와 탄성계수의 상관관계

3. 기본 토질시험

본 실험에서 적용된 기본적인 토질시험은 입도(체가름)시험, 액성한계 및 소성한계시험, 다짐시험이다. 먼저 기본적인 흙시료를 만들기 위하여 점토와 모래를 서로 다른 비율로 섞어 A, B, C, D 네가지의 흙시료를 만들었으며, 혼합비율은 표 2와 같다. 이와 같이 만들어진 네가지 시료와 표준사에 대하여 기본적인 토질시험을 실시하였으며, 결과는 표 3 및 표 4와 같다. 통일분류법에서는 균등계수가 4 또는 6보다 크고, 곡률계수가 1~3의 범위에 있을 때 입도분포가 좋다고 분류가 되는데, 이 기준으로 보았을 때 흙 D가 이 기준에서 벗어나 비교적 균일한 입도분포를 이루고 있다는 것을 알 수 있다. 흙 D로 갈수록 균등계수가 줄어드는 경향을 보이므로 혼합에 사용된 모래가 균일입도의 모래가 사용된 것을 알 수 있

다. 애터버그한계(Atterberg Limits)는 모래 혼합량이 큰 흙 D로 갈수록 액성한계, 소성한계, 소성지수의 값이 감소함을 알 수 있다. 특히 흙 C, D의 경우는 소성한계를 가지지 않는 N.P.(Non-Plastic)흙이다. 다짐시험의 결과 최적함수비는 흙 A에서 흙 C까지는 감소하다가 흙 D에서는 증가하는 결과를 나타내었고, 최대 건조단위중량 값의 경우에도 같은 경향을 보이고 있다. 점성이 없고 깨끗한 모래인 표준사의 경우는 다짐을 하는 동안 충분히 배수가 잘 되는 조건이므로 초기 함수비의 조절이 의미가 없고 일정

표 2. 흙 시료 혼합비율

구 분	점 토(%)	모 래(%)	비 고
A	80	20	
B	60	40	
C	40	60	
D	20	80	

표 3. 체가름 및 애터버그한계 실험결과

구 분	A	B	C	D
최대입경(mm)	2.0	2.0	2.0	2.0
D ₁₀ (mm)	0.081	0.12	0.14	0.27
D ₃₀ (mm)	0.19	0.29	0.35	0.46
D ₆₀ (mm)	0.48	0.58	0.62	0.62
균등계수(C _u)	5.93	4.83	4.43	2.30
곡률계수(C _c)	0.93	1.21	1.41	1.26
액성한계 (%)	26.5	22.0	17.0	5.0
소성한계 (%)	17.1	16.4	-	-
소성지수 (%)	9.4	5.6	N.P.	N.P.

표 4. 다짐 시험결과

구 분	A	B	C	D	표준사
최적함수비 (%)	10.4	10.0	8.4	10.8	9.5
최대건조단위중량(g/cm³)	2.15	2.16	2.19	1.94	1.65

한 값의 최대 건조단위중량 값을 얻을 수 있었다.

4. 실내 PDPC 시험

실험실에서 PDPC관입지수와 실내CBR값과의 상관관계를 도출하기 위한 실내 PDPC시험을 실시하였다. 흙시료에 대하여 동일한 조건 - 다짐에너지, 함수비, 흙의 구조(soil structure) - 하에서 PDPC 시험과 실내 CBR실험을 실시하여 각각의 실험 결과치인 관입지수와 CBR값을 얻기 위하여 일반 CBR 실험 몰드 보다 높이가 여섯 배까지 더 높은 시료를 다질 수 있는 특수 CBR몰드를 제작하였다 (그림 8 참조). 본 실험에서는 여섯 개의 몰드 중 세 개만을 사용하였다. 지름15cm, 높이 17.5cm의 몰드 세 개를 소정의 다짐에너지로 다진 후 상부 두 개의 몰드에는 PDPC를 사용하여 관입시험을 실시하고, 관입시험을 실시한 상부 두 개의 몰드를 들어 낸 후 맨 아래에 있던 몰드를 사용하여 CBR시험을 실시하는 것이다. 이와 같은 과정의 실험을 통하여 위에서 서술한 바와 같이 동일 다짐조건에 있는 동일 흙에서의 PDPC시험과 CBR실험 결과치를 얻을 수가 있다. 이렇게 하여 얻어진 관입지수와 CBR치와의 상관관계는 상당히 신뢰성이 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대가 된다.

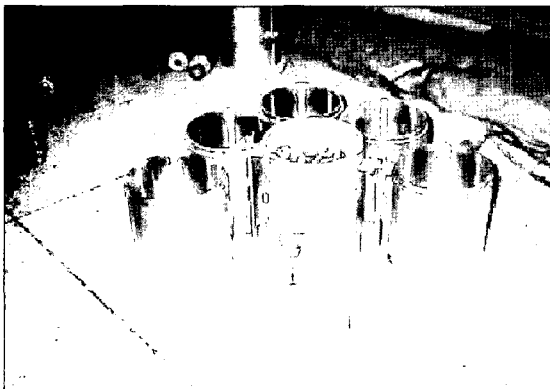


그림 8. 본 실험을 위하여 제작된 특수 CBR몰드

4.1 실험방법

본 실험은 첫 번째 맨 하단의 몰드에 추후 CBR시험을 실시하기 위하여 두께 5cm의 스페이서 디스크를 넣고 표준 다짐방법 중 B방법, 수정 다짐방법 중 D방법, 두 가지 다짐 에너지로 다진 후 칼라를 제거하고 다음 몰드를 연결하여 동일한 다짐방법으로 다져 몰드를 삼단까지 다진다. 세번째 몰드까지 다진 후 PDPC관입시험을 두 번째 몰드 하단까지 - 안전 측면에서 관입깊이 30cm까지 - 실시한다. (그림 9 참조) PDPC관입시험기를 빼낸 후 위의 두 몰드를 하단부 몰드 내의 흙시료가 영향을 받지 않도록 조심스럽게 제거한 후 제일 하단부 몰드를 들어내어 스페이서 디스크를 제거하고 CBR시험기에 거치한 후 실내CBR시험을 실시한다.



그림 9. 특수 CBR 몰드 내 PDPC 관입 장면

4.2 실험결과

동일한 흙시료에 대하여 PDPC관입시험과 실내 CBR시험을 실시한 결과 얻은 각각의 실험 결과치인 관입지수(PI)와 CBR값은 아래 표 5와 같다. 표 5의 왼쪽 구분 칸의 기호는 첫 번째 글자는 흙시료의 종류를 나타내며, 두 번째 글자는 영어 대문자 B와 D 두 가지인데 각각 다짐방법 B와 D를 의미한다. 흙 종류 기호 중 '현장'은 중부내륙 고속도로에 건설 중

표 5. 실내 PDCP시험 및 CBR시험 결과

구 분	CBR(%)	PI(mm/blow)	함수비(%)	비 고
현장B	18.51	3.89	9.22	
현장D	30	2.42	7.53	
AB	5.4	14.45	14.73	
AD	12.33	6.31	12.1	
BB	8.27	9.36	-	
BD	11.61	6.31	9.03	
CB	14.48	4.59	-	
CD	18.86	3.96	7.84	
DB	12.33	6.54	20.11	
DD	15.43	5.0	8.99	
EB	13.67	5.16	7.90	
ED	28.57	2.4	5.43	
FB	12.34	6.48	1.59	
FD	18.44	3.72	2.20	
GB	16.29	5.24	7.69	
GD	15.92	4.49	5.95	
HB	7.92	8.25	6.65	
HD	5.07	19.29	5.91	
IB	7.81	10.93	6.95	
ID	10.93	5.93	5.10	

표 6. 실험에 사용된 흙시료의 혼합 구성

구 분	혼 합 내 용	비 고
E	굵은쇄석(강자갈 포함) 20Kg + 마사토 15Kg	
F	잔쇄석 11Kg + 흙D 19Kg	
G	강자갈 15Kg + 흙C 20Kg	
H	강자갈 20Kg + 흙B 10Kg	
I	강자갈 10Kg + 모래 25Kg	

인 시험도로 건설현장의 노상을 구성하고 있는 마사토를 가리킨다. 시험도로 현장의 노상은 대부분 마사

토로 구성이 되어 있어 노상토의 조건은 양호하다고 할 수 있다. 그 외에 기호 E에서 I까지의 흙의 구성은 표 6과 같다. 흙 E~I까지는 본 실험결과 얻고자 하는 관입지수와 CBR값과의 상관관계의 통계적인 신뢰도를 높이기 위해 상관관계 샘플의 수를 20개로 하기 위해 만들어진 흙 시료들이다.

4.3 실험결과 분석

실내 PDCP실험 결과 얻은 관입지수와 실내 CBR 값은 그림 10과 같다. 실험결과를 회귀분석한 결과 그림 10에 곡선으로 표시된 것과 같은 결과를 얻었으며, 실내CBR 값과 관입지수와의 상관관계식은 다음과 같다.

$$\log CRB = 1.79 - 0.88 \log PI \quad (R^2=0.97)$$

$$\text{혹은, } CRB = 61.66/PI^{0.88}$$

여기에서 PI는 관입지수로서 단위는 mm/blow이다.

본 실험에서 얻은 결과와 기존의 연구결과를 비교한 결과는 그림 11과 같다. 그림 11에서 나타난 것과 같이 본 연구결과 제안한 CBR값과 관입지수와의 상관관계식이 관입지수에 대하여 기존에 제안된 세 제안식보다 낮은 값을 보여주고 있다. 그러나 본 연구에서 사용된 PDCP는 상기의 기존 세 제안식을 도출하는데 사용된 것과 동일한 - 같은 해머 무게와 낙하 거리 적용 - 것이므로 PDCP에 의한 원인은 없을 것으로 판단된다. 단지 문제가 CBR값을 구하는 과정상의 상이점을 생각해 볼 수 있다. Harison은 점토, 모래, 자갈 등의 시료의 수침 및 비수침 조건하에서 PDCP 관입시험을 표준 CBR몰드에서 수행하였고, Livneh와 Ishai는 실험실과 현장에서 얻은 데이터로부터 상관식을 도출하였다. Livneh와 Ishai의 실내시험에서는 입도가 세립인 토질시료를 수침과 비수침 조건하에서 실험하였고, 다짐된 입상토는 다양한 구속축압을 가해줄 수 있는 연성몰드(flexible mold)를 사용하여 몇가지 구속축압을 사용하여 실



험하였다. 미국 미네소타주 교통국(DOT)에서 적용하고 있는 CBR과 관입지수 관계식은 1992년 미 육군 공병단 U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station에서 제안한 식을 받아들여 사용하고 있다. 그러나 본 연구에서 제시하고 있는 식은 이미 발표된 세 식보다는 낮은 값의 CBR치를 주고 있으나 이 식은 KS 방법에 따른 CBR실험결과와 관입지수와의 상관관계식이므로 국내실정에 적합한 식으로 판단이 되며, 또한 국내 현장 - 중부내륙고속도로 1공구 시험주로 건설현장 - 에서의 PDCP시험결과 노상면 및 선택층에서 관입지수 2 mm/blow의 값을 얻은 경우도 있는바, 이 경우에 기존의 세 식을 적용하는 경우에는 CBR값이 90에서 100을 상회하므로 합당치 못하다고 할 수 있다. 따라서 국내 조건에서는 제시된 상관식이 합당한 것으로 판단된다.

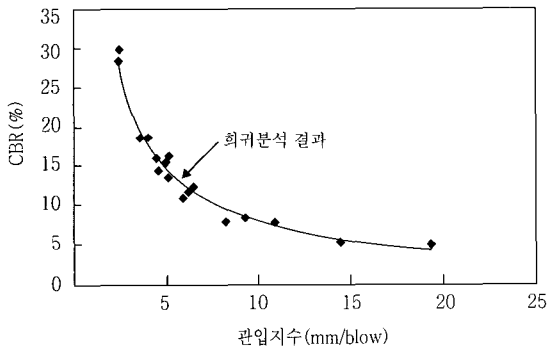


그림 10. 실내 PDCP 실험결과 (관입지수와 CBR값 상관관계)

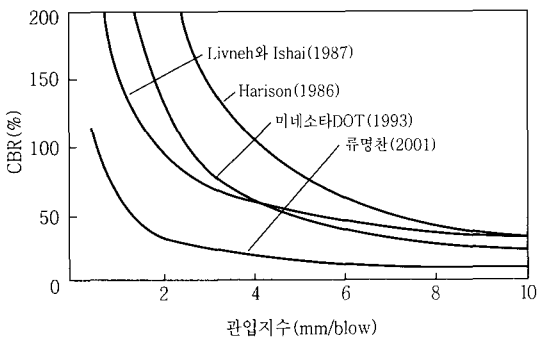


그림 11. CBR과 관입지수 상관관계 비교

5. 결론

본 연구는 도로를 설계, 건설, 유지관리하는 도로 기술자들이 실제 도로의 건설과 유지관리가 이루어지고 있는 현장에서, 도로를 구성하고 있는 기층, 보조기층, 선택층, 노상, 노체 등의 현장 강도 성분을 PDCP(Pavement Dynamic Cone Penetrometer)라는 조작이 용이하고 실험 결과 해석이 간단하면서 신뢰성 있는 기구를 사용하여 현장에서의 측정이 가능하도록 하고자 수행이 되었다.

이와 같은 목적을 수행하기 위하여 먼저 현장에서 조립 및 이동이 용이하도록 포장관입시험기(PDCP)를 제작하였으며, 동일한 시료에 CBR시험 및 PDCP관입시험을 시행하기 위하여 기존의 직경 15cm CBR 몰드를 여러 개 연결하여 높이를 키운 특수 CBR 몰드도 동시에 제작하였다. 실험실에서 다양한 시료에 대하여 다짐시험을 실시하여 최적 함수비 및 최대 건조 밀도를 구한 후, 각각 B다짐 및 D다짐으로 다져 PDCP 관입시험 및 CBR시험을 실시하였다. 이와 같은 시험 결과 스무 개의 CBR값과 관입지수와의 상관관계를 구할 수 있었으며 그 식은 다음과 같다.

$$\log CRB = 1.79 - 0.88 \log PI \quad (R^2 = 0.97)$$

$$\text{혹은, } CRB = 61.66 / PI^{0.88}$$

여기에서 PI 는 관입지수로서 단위는 mm/blow이다.

또한 해석적인 방법으로 PDCP시험의 결과치인 관입지수로부터 탄성계수를 산정하는 방법을 소개하였다. 현 단계에서는 다양한 토질 분류에 대한 관입지수와 탄성계수 산정식이 제시되어 있지 않아 정확한 탄성계수 값을 구하는 데에는 어려움이 있지만, 추후 보다 다양한 토질 분류에 대한 관입지수와 탄성계수 산정식을 얻는 노력이 시행된다면 보다 정확한 값의 탄성계수 값 및 회복 탄성계수(M_R)값도 구할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 연구과제 대외공모에 의하여 이루어진 「포장 동적관입시험기에 의한 시험도로 노상 및 기층 지지력 현장 측정」 연구 결과의 일부입니다.

참고 문헌

1. Chua, K. M., Determination of CBR and Elastic Modulus of Soils Using a Portable Pavement Dynamic Cone Penetrometer, *Proc. Penetration Testing*, Balkema, Rotterdam, 1988, pp. 407~411.
2. David Z. Yankelevsky and Moshe A. Adin. A Simplified Analytical Method for Soil Penetration Analysis, *Int. J. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. Vol. 4, 1980, pp. 233~239.
3. 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.
4. Kleyn E. G., Maree J. H. and Sayage P. F., The Application Of a Portable Dynamic Cone Penetrometer to Determine In Situ Bearing Properties of Road Pavement Layers and Subgrades in South Africa. *Proc., Second European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam, 24-27 May, 1982., pp. 277~282.
5. Livneh, M. and Ishai, I. "Pavement and Material Evaluation by a Dynamic Cone Penetrometer". *Proc., 6th Intl. Conf. on Struct., Design of Asphalt Pavements*. University of Michigan, Ann Arbor, July, 1987., pp. 665~668.
6. Yarrington, P., A Comparison of Calculations with High Velocity Soil Penetration Data, SAND 78-0311, Sandia Labs., Albuquerque, New Mexico, 1978

〈접수 : 2003. 2. 26〉