

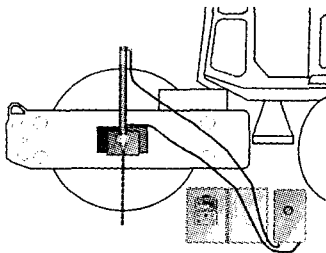
# 콘관입시험기를 이용한 도로 노상토의 다짐관리 시스템 개발

## Development of Compaction Investigation System for Road Subgrade with Portable Cone Penetrometer

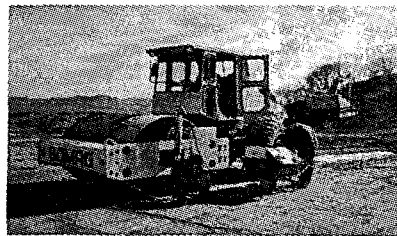
임유진\* , 이현승\*\* , 박영호\*\*\* , 이기홍\*\*\*\*

### 1. 서 론

국내 도로공사 현장에서 노상토 및 구조물 뒷채움부의 다짐관리는 일반적으로 평판재하시험 (PBT) 또는 현장들밀도시험에 의해 이루어지고 있다. 평판재하시험은 반력의 확보를 위해 중차량 장비의 반입이 반드시 필요하고 시험절차가 번거로우며 시험자의 숙련도에 의해 결과가 좌우되는 단점이 있다. 한편 국내에서는 다져진 한 층의 두께를 20cm~30cm 정도로 규정하고 있으나 대부분 잘 지켜지지 못한 형편이고, 평판재하시험의 경우 상대적으로 작은 재하판(직경 30cm)을 사용함으로써 재하시험시 표층의 잘 다져진 곳에 대한 지지력 계수를 획득하여 불량한 다짐결과를 초래한다. 이에 착안하여 응력도달 범위가 작은 재하시험을 지양하고, 노상의 지지력이 상부 포장층의 소성변형에 크게 영향을 끼치는 것에 주목하여, 노상의 전단강도를 해석하여 지반의 다짐도를 추정할 수 있는 콘관입시험기와 구동시스템을 개발하였다(그림 1).



(a)



(b)

그림 1. 다짐관리용 콘관입시험기: (a) 콘의 차량탑재 개략도, (b) 현장시험 모습

\*정회원, 배재대학교 토목환경공학과 조교수, 공학박사, 042-520-5402 (E-mail: yujin@mail.pcu.ac.kr)

\*\*배재대학교 토목환경공학과 석사과정, 042-520-5855 (E-mail: truemant9@hanmail.net)

\*\*\*한국도로공사 도로연구소 책임연구원, 공학박사, 02-2230-4651 (E-mail: 1026@freeway.co.kr)

\*\*\*\*(주)BBM 코리아, 대표이사, 02-6300-4686



본 관입시험기는 미 육군공병단의 휴대형 콘 관입시험기에서 기본 모델을 차용하였으나 콘의 각도와 길이를 달리하여 다양한 시험이 가능하도록 하였으며 노상 전단탄성계수(G)에 대한 선택 기능을 추가하였다. 아울러 데이터의 입출입과 시스템의 구동이 하나의 프로그램에서 이루어지도록 하여 현장 다짐시 즉석에서 다짐도와 전단강도를 확인할 수 있도록 하였다.

## 2. 콘관입시험기의 작동 원리

### 2.1 Rohani-Baladi(1981)의 콘관입 모델

일반적으로 콘의 저항치( $q_c$ )는 지반의 건조단위중량( $\gamma_d$ ), 상대밀도( $D_r$ ), CBR 등과 관련성이 있는 것으로 알려져 있다. 즉, 콘 관입저항치는 건조단위중량에 비례하며 다짐작용 등 과압밀 효과에 의해 그 값이 크게 증가한다. Schmertman(1977)은 현장CBR과 콘관입저항치와의 상관성을 다음 식으로 제안한 바 있다(단위 tsf):

$$CBR = \frac{q_c}{3} \quad (1)$$

Rohani-Baladi(1981)는 임의 관입력으로 콘을 지중에 관입시키면 콘의 원추대 주변흙이 관입력에 의해 전단됨에 착안하여 관입모델을 제안하였으며 콘원추면상에 작용하는 수직응력( $\sigma_n$ )이 구형공동의 확장(그림 2.)에 필요한 내부압력과 같다고 가정하여 콘지수식을 흙의 전단강도 항으로 표시하였다. 콘지수(CI)는 콘관입력을 콘단면적으로 나눈 것이며 지반의 강도정수 및 강성(stiffness)과 직접 연관된다. 구형공동팽창모델과 구형공동주위의 응력평형식에 Mohr-Coulomb 파괴규준식과 경계조건 및 흙의 응력-변형률 조건식을 적용하고 풀면 식(2)와 같은 콘지수와 전단강도정수(C,  $\phi$ ) 및 전단탄성계수(G)사이의 상관식을 설정할 수 있다:

$$CI = \left( \frac{2 \tan \alpha (1 + \sin \phi) G^m}{\left(\frac{D}{2}\right)^2 \gamma \tan^3 \phi} \right) \left[ \frac{3(\tan \alpha + \tan \phi)}{3 - \sin \phi} \right] \Omega - C \cot \phi \quad (2)$$

$$\text{여기서, } \Omega = \frac{[C + \gamma(Z+L)\tan \phi]^{3-m} [C + \gamma(Z+L)\tan \phi + (2-m)\gamma L \tan \phi] (C + \gamma Z \tan \phi)^{2-m}}{(2-m)(3-m)}$$

및  $m = 4 \sin \phi / 3(1 + \sin \phi)$ 으로 정의된다. 한편 전단탄성계수(G)는 Hardin 과 Drnevich(1972)에 의해 모난 모래지반에 대해 식 (3)과 같이 제안된 바 있다:

$$G = 1230 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} (OCR)^K \sigma'_o{}^{0.5} \quad (3)$$

다져진 표토는 과압밀상태이고 과압밀비(OCR)은 1.0에 가깝고 평균유효주응력( $\sigma'_o$ )은 표토에서 1

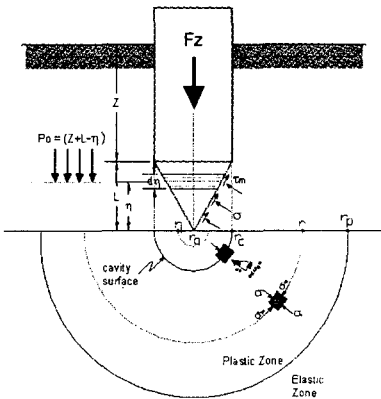


그림 2. Rohani-Baladi(1981)의 구형공동팽창 콘관입 모델

(psi) 정도 되므로 위의 계산식의 단순형 또는 CI연관식을 프로그램에서 선택할 수 있도록 하였다.

### 2.2 콘장비의 구성 및 작동

개발된 콘관입시험기는 유압펌프, 유압실린더, 컨트롤박스, 브라켓, 그리고 콘으로 구성된다. 콘은 로드와 하중계를 통하여 유압 실린더에 연결되고 최대 관입깊이는 60cm이며 실린더 옆에 장착된 LVDT로 측정된다. 장비를 운용하기 위한 지반조사용 차량은 별도로 필요 없으며 현장 다짐장비에 그림 1 및 그림 3과 같이 브라켓을 이용해 견착하여 사용한다. 일반적으로 관입속도는 2cm/sec를 유지하며 1~3cm/sec 사이에서 변경이 가능하다. 하중계와 변위계에서 측정된 아날로그 신호는 컨트롤박스의 Load indicator에 수치로 표시되며 동시

에 노트북컴퓨터로 전송된다. 컨트롤 박스의 내부에는 A/D 컨버터 모듈과 다시 RS-232C 통신을 이용한 통신모듈이 각 1개씩 설치되었다. 따라서 관입깊이에 따른 콘관입저항값 변화를 추적할 수 있다. 사용 가능한 콘은 모두 9종이며 표준 WES콘 1개(D=20.32mm, 정점각(2α)=30°)와 지름과 정점각(2α)이 다른 나머지 8개의 콘이 있다.

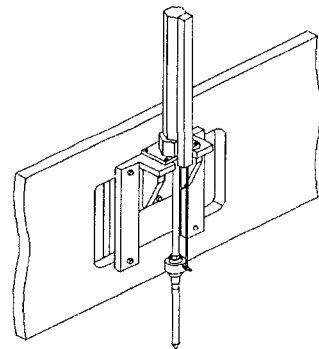


그림 3. 브라켓으로 다짐장비에 견착된 콘시험기

### 3. 데이터의 획득 및 해석

전관입깊이에 걸쳐 획득된 콘지수 변화는 다소 불규칙한 경향을 보인다. 이론상 이들은 깊이에 비례하여 단조증가하여야 하므로 두 측정점 사이의 기울기를 구하여 음(negative)의 값이 나오면 그 지점의 데이터는 무시하고 인접한 두 점의 평균점을 연결하여 단조증가하도록 연결하였다. 또한 강도정수를 구하는데 사용되는 콘지수는 1)7cm 및 15cm 깊이에서 획득된 값을 사용(Rohani-Baladi, 1981)하거나 2) 전깊이에 걸친 평균 콘지수값(CI<sub>avg</sub>) 또는 3) 임의 두 깊이에서 선택할 수 있다. 한 지역에서 여러 번의 콘관입시험을 실시함으로써 다수의 콘관입지수 변화그래프를 얻게된다. 이에 따라 평균콘지수(CI<sub>mean</sub>) 및 평균변동계수(COV<sub>avg</sub>)를 구하여 그 지반의 대표 CI값과 표 2.에 의한 신뢰정도를 평가할 수 있다.



표 1. 측정콘지수의 분포상태

평균변동계수	콘지수 신뢰정도
10(%) 이하	아주 양호
10(%) ~ 15(%)	양호
15(%) ~ 20(%)	보통
20(%) 이상	불량

#### 4. 현장적용 및 데이터 해석

##### 4.1 현장적용

제작된 콘관입시험기의 적용성을 검토하기 위하여 고속도로 성토부의 노상다짐이 이루어지는 곳에 관입시험을 실시하였다. 현장 반입된 노상토재료의 토질특성은 표 2와 같다. 타 다짐장비와의 비교평가를 위해 평판재하시험, 현장들밀도시험 및 RI시험을 실시하였다. 노상 다짐시 다짐정도 차이에 의한 지반반력계수( $k_{30}$ )와 전단강도정수 및 건조다짐중량의 상관성을 조사하기 위하여 해당 노상을 각각 10회 ~ 50회까지 다짐차량의 주행횟수를 달리하여 다지고 평판재하시험을 실시하였다(표 3).

표 2. 현장 노상재료의 토질특성

비 중	2.7
액성 한계	21
소성 지수	N.P
USCS 분류기호	SP
$V_{d-max}$	1.944 ( $t/m^3$ )
최적함수비( $w$ , %)	11

표 3. 평판재하시험에 의한 지반반력계수( $k_{30}$ )

차량반복횟수	지반반력계수( $k_{30}$ ) ( $kg/cm^3$ )
10	4.9
20	6.8
30	7.3
40	9.65
50	13.05

다짐 및 견착차량은 진동다짐롤러(BOMAG)를 이용하였으며 층다짐 실시 후 콘관입장비를 장착하여 일정 간격으로 이동하며 시험하였다. 그림 4. ~ 그림 7.은 현장에서 획득한 콘관입 데이터를 이용하여 지반의 전단강도 정수를 추정하는 절차를 일부 도시한 것이다.

콘저항치와 과압밀된 모래지반의 탄성계수와 상관성은 Lunne와 Christoffersen(1985)에 의해 아래와 같이 제안된 바 있다:

$$E=5 q_c \text{ for } q_c=50MN/m^2 \quad (4)$$

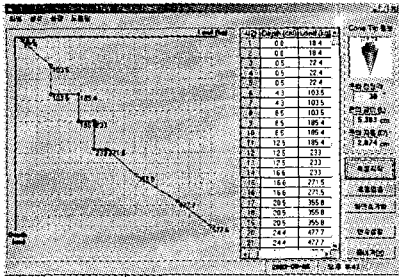


그림 4. 콘지수 획득 데이터의 표시

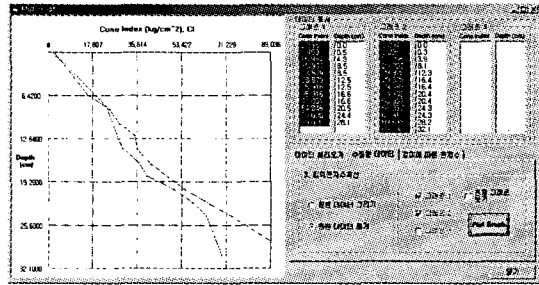


그림 5. 데이터의 단조증가 수정

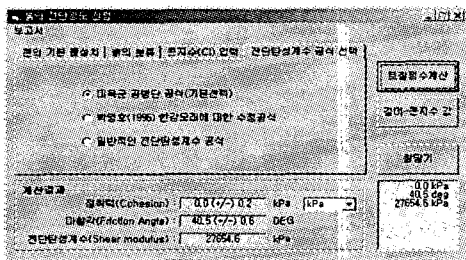


그림 6. 전단강도정수 및 전단탄성계수의 계산

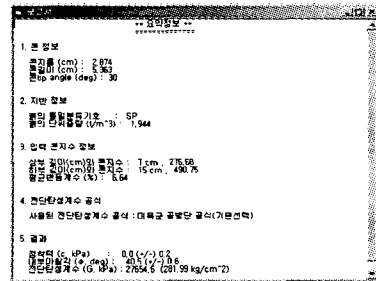


그림 7. 계산결과의 요약 출력

탄성계수(E)와 전단탄성계수(G)와의 상관식( $E=2G(1+\nu)$ )을 이용하면 콘지수로부터 지반의 탄성계수를 계산할 수 있다. 다짐횟수를 달리하여 구한 대표 지반반력계수( $k_{30}$ ), 전단탄성계수(G) 및 탄성계수(E)의 상관식을 표 4. 및 그림 8.과 같이 정리할 수 있었다. 프로그램으로 계산해 낸 전단강도 정수 중 내부마찰각은 표 5.와 같으며 삼축시험 결과와 유사하게 나타났다. 반면 점착력은 매우 큰 오차를 보였으며 이는 실 지반의 모관현상에 의한 겉보기 점착력을 제대로 반영하지 못한 결과로 보이며 이를 보정하기 위해서 관입속도의 재검토가 필요할 것으로 판단된다.

표 4. 다짐횟수 차이별 계산된 물성치의 비교

물성치 \ 회수	10	20	30	40	50
$k_{30B}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	147	204	219	289.5	391.5
G (kg/cm <sup>2</sup> )	351.4	476.1	490.9	559.6	628.8
$E_{\nu=0.5}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	1054.1	1428.5	1472.8	1678.8	1886.3
$E_{\nu=0.3}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	913.6	1238	1276.4	1455	1634.8

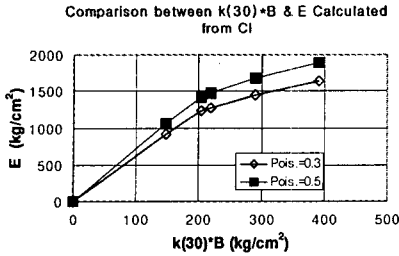


그림 8 평판재하시험에 의한  $k_{30} \cdot B$ 와 CI에서 구한 E값의 상관관계도

표 5. 계산된 내부마찰각의 비교

내부마찰각 ( $\phi^{\circ}$ )		
콘시험해석	삼축시험	전단시험
44.8 ± 1.3	43.8	47.2

### 5. 결 언

현장 다짐차량에 간단히 견착하여 도로 노상토의 다짐도를 파악할 수 있는 콘관입시험기와 구동 시스템을 개발하였다. 콘지수의 대표치를 측정하고 이를 이용해 전단강도정수를 파악할 수 있었다. 아울러 전단탄성계수(G)를 도출해냄으로써 지반의 강성을 파악하여 상대 다짐정도를 알 수 있었다. 본장비의 운용시스템을 완성하기 위해서는 다양한 노상층의 토질특성을 데이터베이스화하고 콘지수(CI)와 지반반력계수( $k_{30}$ ) 및 전단탄성계수에 대한 연관성을 밝힐 필요가 있다.

### 참고문헌

1. Rohani, B. and Baladi, G.Y.(1981) "Correlation of Mobility Cone Index with Fundamental Engineering Properties of Soil", Technical Report SL-81-4, US Army Engineer Waterway Experiment Station, Vicksburg, MS, USA
2. Hardin, B.O. and Drnevich, V. P. (1972) "Shear Modulus and Damping in SOILS: Design Equations and Curves", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.98, No. SM7, 667-691
3. Vesic, A.S.(1972). "Expansion of Cavities in Infinite Soil Masses", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 98, No. SM3