

현장시험을 통한 노상토의 비선형 탄성계수 평가

Evaluation of Nonlinear Modulus of Subgrade Soils Using Field Tests

권기철* · 이광호** · 박만도*** · 권순민****

Kweon, Gi Chul · Yi, Kwang Ho · Park, Man Do · Kwon, Soon Min

1. 서 론

포장 하부구조의 탄성계수는 포장체의 거동특성을 결정하는 대단히 중요한 기본 물성치로서, 포장 설계단계에서는 실내시험(특히 반복재하식 M_R 시험)에서 결정된 회복탄성계수를 입력변수로 사용하고 있다. 이것은, 노상토가 현장에서 교란된 흙을 다짐에 의하여 시공되므로, 실내시험에 사용되는 시편의 특성이 현장조건과 거의 동일하고, 따라서, 실내시험에서 결정되는 탄성계수가 현장조건에서의 탄성계수와 일치할 것이라는 인식에 근거하고 있는 것이다. 그러나, 최근에는 실내의 회복탄성계수시험에서 결정되는 탄성계수가 현장조건에서의 탄성계수와 일치할 것이라는 인식에 많은 의문이 제기되고 있으며, 현장 및 실내시험을 통한 검증 연구가 보고되고 있다.

실제 현장에서 다짐 노상토의 비선형 탄성계수 평가는 실내시험의 신뢰성 검증 뿐 아니라, 설계에 적용된 입력물성치를 실제 현장에서 만족시키는가를 평가하는 품질관리 측면에서도 중요한 부분이다. 현장 다짐 노상토의 비선형 탄성계수를 평가하는 시험기법으로는, FWD 시험, 현장 크로스홀시험과 실내 공진주시험 결과를 결합하는 방법, 평판재하시험에서 등가 선형탄성계수를 결정하는 방법들이 제안되고 있다. 그러나 아직까지는 실제 현장에서 수행되는 품질관리 목적의 시험기법에는 반영되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 포장 하부구조의 지지력을 평가하는 대표적인 시험기법으로 현업에 매우 널리 사용되고 있는 평판재하시험(PBT; plate bearing load test)과 현장 지반의 비선형 탄성계수결정에 널리 적용되는 공내재하시험(PMT; pressuremeter test)을 적용하여 다짐 노상토의 비선형 탄성계수를 평가하는 기법을 제안하고자 한다. 또한 실제 다짐 노상토 현장에서 PBT, PMT, 그리고 동일한 장소에서 크로스홀시험을 수행하여 제안된 기법의 적용 가능성을 검토하였다.

2. 현장 비선형 탄성계수 평가기법

시공과정의 현장 다짐 노상토의 탄성계수를 평가하는 시험기법으로는, 첫째, 비선형 탄성계수를 직접적으로 결정하는 공내재하시험, 둘째, 등가 선형탄성계수를 결정하는 FWD 또는 평판재하시험, 마지막으로, 현장의 최대탄성계수를 크로스홀시험 또는 표면파기법(SASW)과 같은 동적시험으로 결정하고 실내에서 공진주시험을 통하여 비선형성을 평가하는 방법 등이 제안되고 있다. 현재까지 가장 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있는 방법은 크로스홀시험과 공진주시험을 결합하여 평가하는 기법으로 판단되나, 이러한 기법은 매우 복잡하여 다짐시공 과정의 품질관리에 적용하기에는 많은 문제를 내포하고 있다.

본 연구에서는 지반공학 분야에서 널리 사용되는 공내재하시험의 포장 하부구조에 대한 적용성을 검토하고, 포장 하부구조의 지지력을 평가하는 대표적인 시험기법인 평판재하시험(PBT)의 시험방법을 일부 변경한 시험기법을 통하여 현장 노상토의 비선형 탄성계수결정 기법을 제안하고자 한다.

*정회원 · 동의대학교 토목공학과 · 공학박사 · 051-890-1617 (E-mail : gckweon@dongeui.ac.kr)

**동의대학교 토목공학과 · 석사과정 · 공학사 · 051-890-1968 (E-mail : yi1204@hanmail.net)

***동의대학교 토목공학과 · 석사과정 · 공학사 · 051-890-1968 (E-mail : mando1212@hanmail.net)

****정회원 · 한국도로공사 도로연구소 연구원 02-2230-4851 (E-mail : soonmini@freeway.co.kr)

2.1 평판재하시험(PBT)

평판재하시험은 하부구조의 지지력을 평가를 위하여 현업에 매우 널리 사용되고 있는 시험기법으로 다른 현장시험 기법에 비하여, 하중과 변위를 측정함으로써 매우 역학적인 특성치 결정의 가능성이 높은 시험기법으로 인식되어 왔다. 이러한 평판재하시험 기법의 장점들을 활용하고자, 평판재하시험에서 현장 하부구조의 탄성계수를 결정하고자 하는 다양한 연구(Ping 등, 1995; Ping 등, 1997; Michael, 1988; Fonseca, 2001; Hueckel 등, 2001)가 수행된 바 있다. 그러나, 이러한 연구들은 평판재하시험에서 등가의 선형 탄성계수를 결정하는 기법을 제안하고 있어서, 실제 하부구조 재료의 비선형 특성을 반영하지 못하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 평판재하시험으로부터 비선형 탄성계수를 결정하기 위한 기본적인 기법을 제시하고, 하중과 변위를 Load cell과 LVDT를 사용하여 엄밀히 측정된 개선된 평판재하시험을 수행하여 비선형 탄성계수결정하고, 동일한 장소에서 시험이 수행된 크로스홀시험 결과와 비교 검증을 수행하였다.

평판재하시험(PBT)은 적당한 기구를 통하여 지반에 압력을 가하고, 그 때의 지반의 반응(침하)을 관찰, 측정하는 시험법이다. 먼저 재하판을 지반에 밀착시키기 위하여 약간의 압력을 재하판에 가한 후 지반에 압력을 가하고, 그 때의 침하 특성을 측정하여 그 기울기인 지반반력계수(modulus of subgrade reaction)를 구하는 것이 목적이다. 지반반력계수 결정에서 사용하는 한계 침하량에 대해서는 현재 명확한 정설은 없는 상태이고, 관용적으로 시멘트 콘크리트 포장에 대하여 1.25mm, 아스팔트 포장에서는 2.5mm로 하고 있다.

평판재하시험에서 역재하(unloading)와 재재하(reloading)를 포함하여 시험을 수행하면, 그림 1과 같은 결과를 얻게 된다. 역재하와 재재하 단계를 시험에 포함하는 것은, 초기 재하(initial loading) 단계에서는 하중 재하판과 노상면과의 접촉의 불안정으로 측정 결과의 신뢰성이 떨어지고, 초기 재하단계에서는 탄성변형뿐만 아니라 상당한 소성변형을 포함할 가능성이 커서, 노상을 탄성체로 가정하기 매우 어렵기 때문이다.

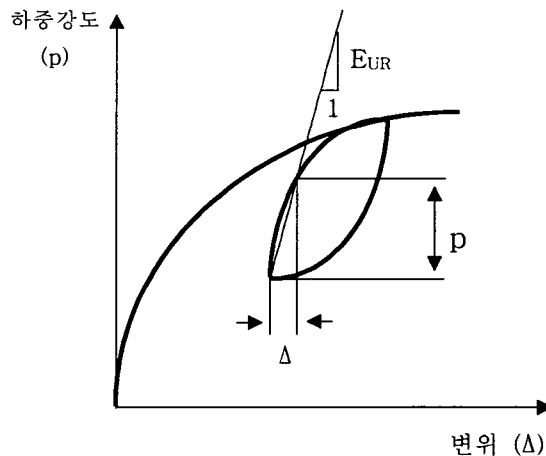


그림 1 평판재하시험에서 일반적으로 획득되는 하중강도-변위 관계

하중 역재하단계 또는 재재하단계에서 지반을 탄성체로 가정한다면, 지반의 탄성계수는 식 (1)과 같이 결정될 수 있다.

$$E = 1.18 \frac{p \cdot a}{\Delta} \quad (1)$$

여기서, E_{UR} = 지반의 탄성계수 (재재하-역재하 관계)

p = 하중강도

a = 재하판 반경

Δ = 침하량



한편, Schmernertermann은 평판재하시험조건에서 지반내의 변형률의 분포는 재하판 직경의 2배 이내에 분포함을 밝히고, 변형영향계수(strain influence factor)를 제안한 바 있다. 이러한 연구 결과를 적용한다면, 식 (1)로 결정되는 탄성계수의 평균적인 변형률 크기는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{avg} = \frac{\Delta}{2B} \tag{2}$$

여기서, ϵ_{avg} = 평균 변형률
 Δ = 침하량
 B = 재하판의 직경

식 (1)과 식 (2)로부터 변형률 크기에 따른 탄성계수를 평판재하시험으로부터 결정할 수 있다. 이러한 방법으로 결정된 비선형 탄성계수는 평판재하시험에서의 응력조건을 고려하지 않은 것이고, 동적인 다른 시험에서 결정된 탄성계수와 비교를 위해서는 초기 재하단계에서의 탄성계수로 전환하여야 한다.

2.2 공내재하시험(PMT)

공내재하시험은 시험공 내에 원통형의 탐침을 관입시켜서 횡방향으로 가한 압력과 그에 따른 변위를 측정하여 비선형 탄성계수를 결정하는 시험장치이다. 그림 2는 노상토에 설치한 공내재하시험기를 나타내고 있으며, 지상에 설치한 가압장치를 통해 탐침에 횡방향으로 압력을 가한 뒤 그에 따른 횡방향 변위를 측정하게 된다. 측정된 결과로부터 수평정지도압, 비배수강도, 전단저항각, 팽창각 등을 결정하는데 광범위하게 적용되었으며, 최근에는 비선형 탄성계수 추정에 많은 연구가 이루어지고 있다(Robertson, 1986; Bellotti, 1989; Jardine, 1986; Muir Wood, 1990).

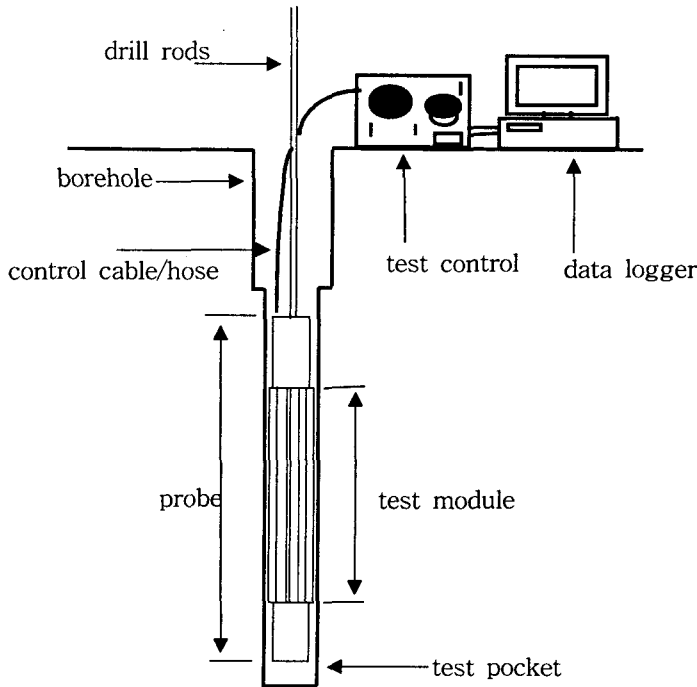


그림 2 공내재하시험기의 개요도

3. 현장시험

3.1 대상현장 및 주요 시험절차

시험은 한국도로공사 시험도로(중부 내륙고속도로, 경기도 이천)의 2개소(#1, 4+300; #2, 7+600)이며, 공내재하시험 및 평판재하시험과 병행하여 크로스홀시험, 함수비 측정, 실내시험을 위한 불교한 시료채취를 함께 실시하였다. 시험위치는 층다짐으로 시공된 노상토 구간(성토 구간)으로 지층이 매우 균질하고, 사질토 성분을 함유한 화강풍화도 지반이다.

사진 1은 평판재하시험기의 설치와 시험 수행중의 전경이며, 재하판은 직경 30cm, 반력하중은 트럭을 사용하였고, 유압잭(Jack)은 용량이 5ton인 것을 사용하였다. 하중측정장치는 보다 엄밀한 측정을 위하여 로드셀을 사용하여 하중을 측정하였고, 스트로크가 50mm 인 2개의 LVDT를 사용하여 수직변위를 측정하였다. 하중은 역재하(unloading)와 재재하(reloading)를 포함하여 시험을 수행하여 초기 재하(initial loading) 단계에서 주로 발생하는 접촉면에서의 오차와 소성변형을 제거하고자 하였다.

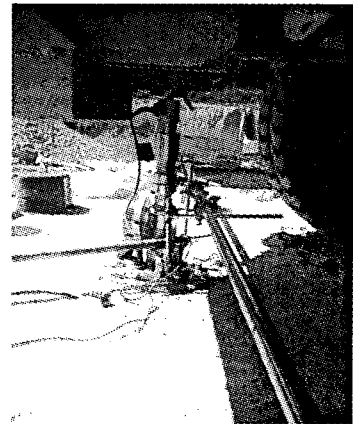
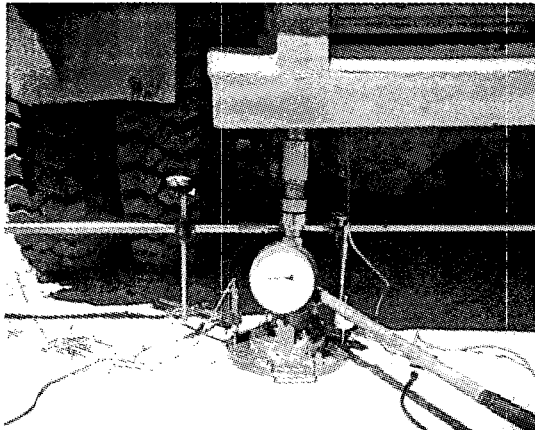


사진 1 평판재하시험 전경

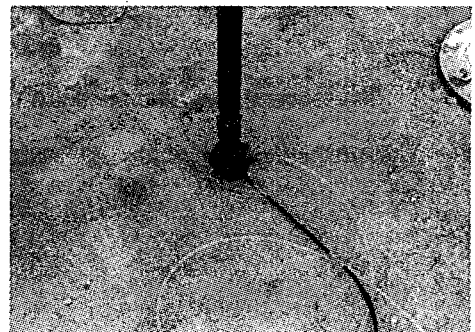


사진 2 공내재하시험 전경

공내재하시험을 수행하기 위해서는 노상토의 교란이 최대로 억제된 시추공이 필요하다. 본 연구에서는 공내재하시험의 탐침과 직경과 거의 유사한 얇은 알루미늄관을 이용하여 시추공을 형성하였다. 우선, 알루미늄



관을 향타하여 일정 깊이까지 관입한 후, 알루미늄관 내부의 흙을 핸드오거를 이용하여 제거하는 작업을 연속적으로 반복하여 노상토의 교란을 최소화하였다. 노상토의 두께인 1.0m 깊이까지 시추공을 형성한 후, 유압잭을 이용하여 알루미늄관을 제거하여 매끈하게 형성된 나공 상태의 시추공을 얻을 수 있었다. 시추공이 형성되면 탐침을 시험 깊이까지 넣은 후, 공기압을 사용하여 재하-역재하가 포함된 공내재하시험을 수행하였다(사진 2 참조). 본 시험에서는 적용한 최대 압력은 5kg/cm² 이고, 압력측정장치(pressure gauge)와 LVDT를 사용하여 공동응력과 공동변형률을 측정하였다.

4.2 시험 결과

평판재하시험에서 얻은 역재하-재재하를 포함한 하중강도-침하량 결과의 일례를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에 나타낸 평판재하시험에서 획득된 하중강도-침하량의 곡선으로부터 변형률 크기에 따른 탄성계수를 3절에서 기술한 방법으로 결정하였다. 3절에서 결정된 Young 계수를 전단탄성계수로 전환하기 위하여 노상의 포아송비를 0.3으로 가정하였다.

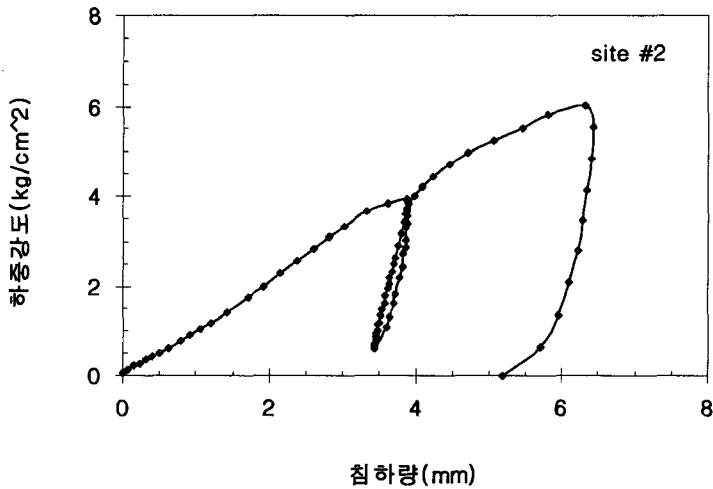


그림 3 평판재하시험에서 얻은 하중강도-침하량 결과 일례

평판재하시험에서 결정된 탄성계수는, 시험과정의 하중 증가로 인하여 탄성계수가 결정되는 지반의 응력 상태(특히, 평균주응력)가 본 연구에서 비교하고자 하는 크로스홀 시험에서의 조건과 상이하다. 따라서 응력 상태 차이에 따른 보정을 위하여 식 (3)을 적용하였다.

$$G_{CH} = G_{PBT} \left(\frac{I_{CH}}{I_{PBT}} \right)^{0.5} \tag{3}$$

여기서, G_{CH} = 크로스홀 시험이 이루어지는 응력상태에서 전단탄성계수

G_{PBT} = PBT 시험에서 결정되는 전단탄성계수

I_{CH} = 크로스홀 시험이 수행되는 응력조건 (평균주응력)

I_{PBT} = 평판재하시험이 수행되는 응력조건 (평균주응력)

평판재하시험에서와 같이 원형등분포 하중이 작용하는 경우 평판재하시험에서 응력범위의 대표적인 깊이

인 재하판 직경(B) 위치에서의 평균적인 응력은 재하된 하중강도의 25%로 평가하여 적용하였다. 한편, 본 연구에서 비교대상으로 하는 크로스홀시험이 수행되는 응력조건(I_{CH})은 평판재하시험의 대표적 깊이인 평판직경(B)에 해당하는 0.3m 깊이에서의 값을 적용하였다. 또한, 비교 대상의 최대전단탄성계수는 평판재하시험의 영향 범위인 재하판 직경(B)까지의 평균 최대전단탄성계수를 크로스홀시험에서 얻은 깊이에 따른 최대전단탄성계수로부터 결정하였다. 이와 같은 방법으로, 크로스홀시험에서 결정된 평균적인 최대전단탄성계수(G_{max})와 평판재하시험에서 결정된 변형률 크기에 따른 탄성계수를 비교하면 그림 4와 같다.

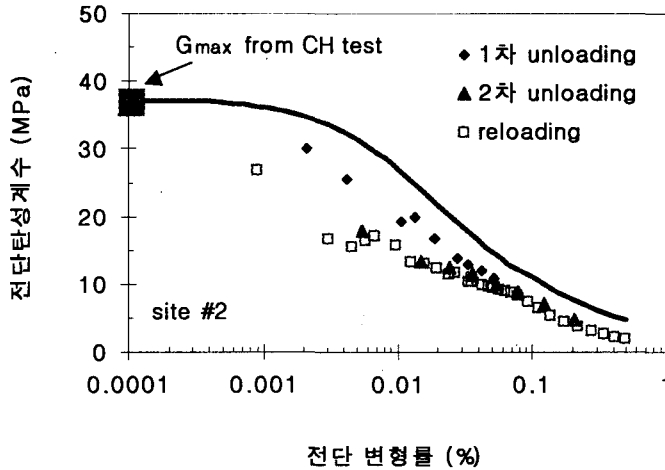


그림 4 평판재하시험에서 결정된 비선형 탄성계수와 크로스홀시험에서 결정된 최대탄성계수의 비교

그림 4에서 실선으로 나타낸 변형률 크기에 따른 탄성계수의 변화곡선은, 크로스홀시험에서 결정된 최대전단탄성계수와 사질토 지반에 대하여 가장 보편적으로 사용되는 정규화탄성계수 감소곡선(Seed-Idriss, 1970)을 결합하여 나타낸 것이다. 평판재하시험에서 결정된 비선형 탄성계수의 경향은 크로스홀시험 결과에 비교적 잘 부합되나, 대체적으로 크로스홀시험 결과보다 작게 평가되는 것으로 나타나고 있다. 이는 지반의 응력상태 차이에 따른 구속압 보정 과정의 오차가 주요한 원인으로 판단된다.

동일한 현장에서 수행된 공내재하시험에서 얻은 공동응력-공동변형률의 일례를 그림 5에 나타내었다. 시험은 평판재하시험과 같이 역재하-재재하 단계를 포함하여 수행하였다. 그림 5에서 보면, 초기재하단계에서는 공동과 탐침의 이격으로 인하여 접촉과정까지 상당한 탐침의 공동변형이 발생하고, 또한 접촉이 이루어진 후에도 많은 공동변형이 발생하는데 이는 시추공 설치과정에서 발생하는 노상토의 교란효과 때문이다.

앞에서 서술하여 듯이 초기재하단계에서는 시추과정의 교란효과를 효과적으로 제거하기 힘들어 재재하 및 역재하 단계에서의 공동응력-공동변형률 결과로부터, Bellotti(1989)가 제안한 기법을 적용하여, 변형률 크기에 따른 탄성계수를 결정하였다. 재재하-역재하단계의 구속응력 차이를 고려하여 각 단계에서의 탄성계수를 식 (4)를 이용하여 보정하였다. Bellotti(1989)가 제안한 방법으로, 그림 5에 나타내었던 공동응력-공동변형률의 관계로부터, 변형률 크기에 따른 탄성계수를 결정한 후, 크로스홀시험에서 결정된 최대탄성계수와 함께 나타내면 그림 6과 같다.

$$G_{ur}^c = G_{ur} (\sigma_{mo}/\sigma_{av})^n \quad (4.3)$$

여기서, G_{ur}^c = 현장 응력상태를 보정한 역재하-재재하 단계의 전단탄성계수

G_{ur} = 역재하-재재하 단계의 전단탄성계수

σ_{mo} = 평균 유효 구속압

$n = 0.5$ 적용

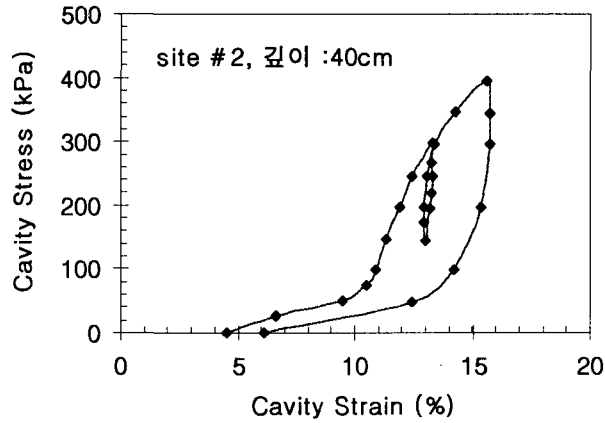


그림 5 공내재하시험에서 결정된 공동응력-공동변형률 일례

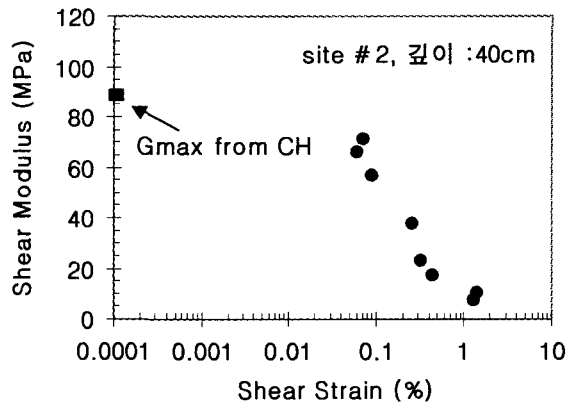


그림 6 공내재하시험에서 결정된 비선형 탄성계수

그림 6에 나타내었듯이 공내재하시험에서 결정되는 비선형 탄성계수가, 크로스홀 시험과 공내재하시험의 변형률 크기를 고려한다면, 크로스홀시험에 비하여 큰 탄성계수가 평가되고 있다. 이러한 차이는 제작된 공내재하시험기의 검증의 신뢰도, 해석기법의 오류 등에서 기인된 것으로 생각된다. 그러나, 노상토가 경험하는 변형률 범위에서는 각 하중단계마다 안정적인 결과가 획득되므로, 향후 현장 노상토의 탄성계수 평가기법으로서의 적용 가능성이 충분한 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 LVDT와 로드셀을 적용하여 하중강도와 변위량을 엄밀하게 측정한 평판재하시험과 현장 지반의 비선형 탄성계수결정에 널리 적용되는 공내재하시험으로부터 노상토의 비선형 탄성계수의 결정 가능성을 검토하였다. 평판재하시험과 공내재하시험 모두 노상토의 현장 비선형 탄성계수를 직접적으로 측정하는 시험기법으로서의 개발 가능성을 확인하였다. 그러나, 결정되는 값의 신뢰성 확보를 위해서는 보다 엄밀한 해석기법의 개발과 검증에 관한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 특히, 결정된 비선형 탄성계수를 크로스홀 시험 결과와 비교하는 과정에서 응력조건에 따른 차이를 얼마나 합리적으로 보정할 수 있는지가 매우 중요하였다.



향후에는, 하중을 연속적으로 재하/역재하/재재하 하고, 재재하-역재하를 보다 많이 포함하는 시험절차의 개선과, 동일한 현장에서 채취된 시편에 대해 실내시험에서 결정되는 비선형 탄성계수와 비교검토를 계획하고 있다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 연구비 지원으로 수행된 '동결심도를 고려한 포장 하부구조 개선방안 연구' 결과의 일부로 감사를 표합니다.

참고문헌

1. 권기철, 김동수 (2000), "다양한 실내시험을 이용한 지반의 탄성계수 평가," 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp. 345-352.
2. 박재영, (1996), "공내재하시험을 이용한 지반의 미소변형 전단탄성계수 측정," 한국과학기술원, 석사학위논문, pp. 16-25.
3. 한국공업규격 KS F2310, (2000), "도로의 평판재하시험 방법"
4. 5. Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Robertson, P. K. and Peterson, R. W. (1989), "Interpretation of Moduli from Self-Boring Pressuremeter Tests in Sand," *Geotechnique* 39, No. 2, pp. 269-292.
5. Hueckel T., Cassiani G., Tao F., Pellegrino A. and Fioravante V., (2001), "Aging of Oil/Gas-Bearing Sediments, Their Compressibility, and Subsidence", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* vol. 127 No. 11
6. Ping W. V. and Ling G., (1997), "Field Verification of Laboratory Resilient Modulus Measurements on Subgrade Soils", *Transportation Research Record* No. 1577
7. Ping W. V. and Ling G., and Harold G., (1995), "Evaluation of Pavement Layer Moduli Using Field Plate Bearing Load Test," *Transportation Research Record* No. 1501, 1995 Annual Meeting, Washington. D.C., pp. 39-49.
8. Myers M. L., (1998), "Prediction of Working-Load Displacements Under Plate-Loading Tests from Seismic Stiffness Measurements", The University of Texas at Austin.