

# 반복식 평판재하시험을 통한 노상토의 비선형 탄성계수 평가

## Evaluation of Nonlinear Modulus of Subgrade Soils Using Repetitive Static Plate Bearing Load Test (PBT)

서원석\* · 김동수\*\* · 권기철\*\*\* · 노한성\*\*\*\*

Seo, Won Seok · Kim, Dong Soo · Kweon, Gi Chul · Roh, Han Sung

### 1. 서 론

역학적 포장설계법에서는 포장하부구조 재료(노상, 보조기층 및 선택층 재료)의 대표적 특성치가 강성도(stiffness, 탄성계수)로 평가되고 있다. 포장 하부구조의 역학적 특성을 획득하는 방법으로는 실내시험으로부터 하부구조 재료의 회복탄성계수( $M_R$ )를 구하여 설계 및 포장구조해석에 적용할 수 있고, 현장에서는 유지관리 단계에서 사용되는 비파괴시험장비 FWD(Falling Weight Deflectometer)를 이용하여 하부구조의 탄성계수를 평가할 수 있다. 그러나 시공단계에서 현장의 다짐관리기준이 경험적인 방법에 기초한 것으로 역학적 특성이 고려되지 않아 설계단계에서의 역학적 특성을 효율적으로 확인하기는 어렵다. 따라서, 이의 개선을 위해서는 시공단계 현장평가기법의 개선이 필수적으로 요구된다.

기존의 관용적으로 고속도로 현장에서 적용중인 현장다짐관리기법인 모래치환법에 의한 현장다짐 밀도 관리기준과 평판재하시험법의 지지력계수에 의한 관리기준은 설계단계의 역학적 특성치와는 상관성이 매우 미약한 방법이므로 체계적인 설계, 시공 및 유지관리의 합리성을 제고하기 위해서는 설계 및 해석에 사용하는 역학적 물성값인 탄성계수 등과 현장다짐 관리 특성 값인 지반지지력의 상관성을 보다 높일 수 있는 관리방안의 도입이 필요하다. 그러나 현장에서 시공단계에서 하부구조의 비선형 변형특성을 획득하기에는 효과적이고 합리적인 시험법이 설정되지 못한 실정이다.

평판재하시험(PBT; plate bearing load test)은 하부구조의 지지력 평가를 위하여 현업에 매우 널리 사용되고 있는 시험기법으로 다른 현장시험 기법에 비하여, 하중과 변위를 측정함으로써 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 지반반력계수로부터 등가의 선형 탄성계수를 결정하는 기법을 제안하고 있어서 실제 하부구조 재료의 비선형 특징을 반영하지 못하고 있다. 또한, 지반반력계수는 현장의 특정한 조건에서 결정된 값으로 탄성계수에 대한 여러 영향요소를 고려하지 못하고 있다.

본 연구에서는 평판재하시험을 이용하여 설계조건에서 고려되는 포장하부구조의 비선형 탄성계수 결정방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 기존의 평판재하시험을 개선하여 제하(unloading)와 재제하(reloading)를 포함한 반복평판재하시험을 실제 현장에서 수행하였으며, 크로스홀을 동시에 수행하여 제안된 기법의 적용 가능성을 검토하였다.

\*정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 · 공학석사 · 042-869-3659 (E-mail : hemlock@kaist.ac.kr)  
\*\*정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 · 공학박사 · 042-869-3619 (E-mail : dskim@kaist.ac.kr)  
\*\*\*정회원 · 동의대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 · 051-890-1617 (E-mail : gckweon@hyomin.dongui.ac.kr)  
\*\*\*\*정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원 · 공학박사 · 031-371-3344 (E-mail : hsroh@freeway.co.kr)

## 2. 현장 비선형 탄성계수 평가기법

### 2.1 평판재하시험을 이용한 비선형탄성계수 산정방법

본 연구에서는 평판재하시험으로부터 비선형 탄성계수를 결정하기 위하여 제하(unloading)와 재재하(reloading)를 포함한 시험을 수행하고, 하중과 변위를 Load cell과 LVDT를 사용하여 엄밀히 측정된 개선된 평판재하시험을 수행하여 비선형 탄성계수를 결정하였다.

평판재하시험에서 제하와 재재하를 포함하여 시험을 수행하면, 그림 1과 같은 결과를 얻게 된다. 역재하와 재재하 단계를 시험에 포함하는 것은, 초기 재하(initial loading) 단계에서는 하중재하판과 노상면과의 접촉의 불안정으로 측정 결과의 신뢰성이 떨어지고, 초기 제하 단계에서는 탄성변형뿐만 아니라 상당한 소성변형을 포함할 가능성이 커서, 노상을 탄성체로 가정하기 매우 어렵기 때문이다.

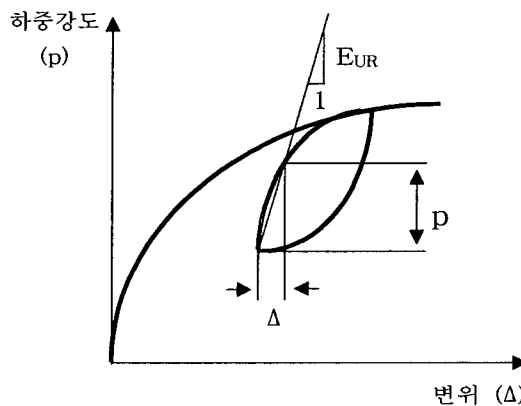


그림 1 평판재하시험에서 일반적으로 획득되는 하중강도-변위 관계

일반적으로 균질한 탄성지반에 놓인 기초의 즉시 침하량을 산정하는 식은 Timoshenko에 의하면 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$\delta = pB \frac{(1-\mu^2)}{E} I \quad (1)$$

- 여기서,  $\delta$  = 기초의 탄성 침하량  
 $p$  = 하중강도  
 $B$  = 기초폭 또는 직경  
 $E$  = 지반의 탄성계수 (Young's modulus)  
 $\mu$  = 지반의 포아송 비 (0.25-0.5)  
 $I$  = 기초의 모양과 강성의 영향을 나타내는 계수

평판재하시험의 경우  $I=1$  이고, 하중 역제하단계 또는 재재하단계에서 지반을 탄성체로 가정한다면, 지반의 탄성계수는 식 (2)와 같이 결정될 수 있다.



$$E_{UR} = 2a(1-\mu^2)\frac{p}{\delta} = 2a(1-\mu^2) \cdot k \tag{2}$$

여기서,  $E_{UR}$  = 지반의 탄성계수 (재하하-역재하 관계)  
 $p$  = 하중강도  
 $a$  = 재하판 반경  
 $\delta$  = 침하량  
 $k$  = 지반반력계수

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 (2)로 결정되는 탄성계수의 평균적인 변형률 크기는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{avg} = \frac{\delta}{2B} \tag{3}$$

여기서,  $\epsilon_{avg}$  = 평균 변형률  
 $\delta$  = 침하량  
 $B$  = 재하판의 직경

식 (2)와 식 (3)으로부터 변형률 크기에 따른 탄성계수를 평판재하시험으로부터 결정할 수 있다. 본 연구에서는 평판재하시험으로부터 얻은 지반반력계수로 탄성계수를 추정하고 이를 크로스홀 시험으로부터 구한 탄성계수와 비교하였다. 그러나 식 (2)를 이용하여 결정된 탄성계수는 시험과정에서 하중 증가로 인한 탄성계수가 결정되는 지반의 응력 상태(특히, 평균주응력)에 영향을 받으므로 본 연구에서 비교하고자 하는 크로스홀 시험에서의 응력상태 차이에 따른 보정이 필요하다. 이를 위하여 다음과 같은 식을 고려할 수 있다.

$$G_{CH} = G_{PBT} \left( \frac{I_{CH}}{I_{PBT}} \right)^{0.5} \tag{4}$$

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 원형등분포하중이 작용하는 경우 평판재하시험에서 응력범위의 대표적인 깊이인 재하판 직경(B) 위치에서의 평균적인 응력은 재하된 하중강도의 25%로 평가하여 적용하였다. 한편, 본 연구에서 비교대상으로 하는 크로스홀 시험이 수행되는 응력조건은 평판재하시험의 대표적 깊이인 평판직경(B)에 해당하는 깊이에서의 값을 적용하였다. 또한, 비교 대상의 최대전단탄성계수는 평판재하시험의 영향범위인 재하판 직경까지의 크로스홀 시험에서 얻은 깊이에 따른 평균 최대전단탄성계수로부터 결정하였다.

## 2.2 크로스홀시험을 이용한 비선형탄성계수 산정방법

크로스홀 시험은 지반에 두 개 이상의 시추공을 뚫어 한쪽은 발진자(source)로, 나머지 시추공은 감지기(receiver)로 구성하여, 발진자에서 유발되는 진동이 지반을 통과하여 감지장치까지 도달되는 파의 전파속도를

깊이별로 측정하여, 깊이별 지반의 최대탄성계수를 측정하는 시험기법이다. 따라서 포장 구조체에서도 지반에서와 마찬가지로 적용할 수 있다. 본 시험은 발진자와 감지기를 시추공내에 설치하여야 하므로, 포장체의 시공과정 또는 시공 후에 두 개의 시추공을 설치하여 그림 2와 같이 기계적으로 타격하는 방법으로 탄성파를 발생시킨다.

두 개의 감지기측 시추공에 발진자와 같은 깊이로 고정된 진동감지장치(3방향 진동감지기)를 설치하여 발진자에서 발생된 탄성파를 측정한다. 발진자와 감지기에서의 신호를 동시에 신호획득장치(signal analyzer)로 측정하면 시추공과 시추공 사이의 파의 도달시간을 측정할 수 있고, 시추공 사이의 거리와 측정된 전단파 도달시간으로부터 전단파속도( $V_s$ )를 결정한다. 이때 저변형을 전단탄성계수를 전단파속도와 현장지반의 질량 밀도로부터 식 (5)를 사용하여 결정한다.

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (5)$$

여기서,  $G_{\max}$  = 저변형을 전단탄성계수  
 $\rho$  = 흙의 질량밀도  
 $V_s$  = 전단파속도

현장에서 크로스홀 시험으로부터 얻는 탄성계수는 일반적으로 저변형율( $< 10^{-3}\%$ )에서의 최대탄성계수를 나타낸다. 그러나, 실제 포장구조체가 경험하는 변형율은 중간변형율 영역( $10^{-3} \sim 10^{-1} \%$ )에 속하므로 크로스홀 시험결과를 직접적으로 이용하기에는 한계가 있다. 따라서, 변형율 크기에 따른 탄성계수 차이를 합리적으로 보정하기 위하여 저변형율에서 중간변형율 크기를 포함하는 범위에서 변형율 크기에 따른 노상토의 정규화탄성계수 감소곡선과의 결합을 통하여 현장에서의 변형율에 따른 탄성계수를 평가할 수 있다.

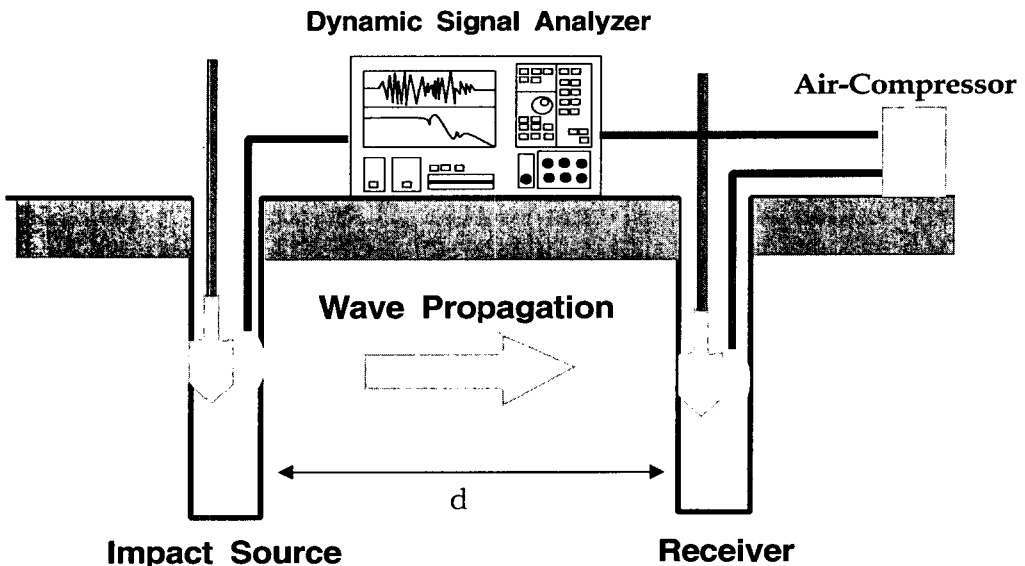


그림 2 크로스홀 시험 개념도



### 3. 현장시험

#### 3.1 대상현장 및 시험방법

본 연구에서는 현장시험으로 익산-장수 고속도로 제 2공구 노체의 성토구간에서 반복식평판재하시험과 병행하여 크로스홀시험, 함수비 측정을 실시하였다. 시험위치는 각 층이 30cm인 4층다짐으로 시공된 노체 구간으로 사질토성분을 함유한 화강풍화토지반이며 다수의 자갈을 포함한 지반이다.

사진 1은 평판재하기의 설치와 시험 수행중의 전경이며, 재하판은 직경 30cm, 75cm의 두 종류를, 반력하중은 진동다짐롤러를 사용하였고, 유압잭(Jack)은 용량이 10ton인 것을 사용하였다. 하중측정장치는 보다 엄밀한 측정을 위하여 로드셀을 사용하였고, 스트로크가 25mm인 3개의 LVDT를 사용하여 수직변위를 측정하였다. 하중은 역재하(unloading)와 재재하(reloading)를 각각 2단계로 시험을 수행하여 초기재하 단계에서 발생하는 접촉면에서의 오차와 소성변형을 제거하고자 하였다.



사진 1 평판재하시험 전경

크로스홀 시험은 지표면으로부터 깊이 23cm부터 73cm 까지 10cm 간격으로 시험을 수행하였다. 또한 시험이 수행된 위치에서 수동식 오거로 시료를 채취하여 함수비를 측정하였다. 크로스홀 시험으로부터 각 깊이에서의 진단파속도를 산정하고 각 깊이에서의 밀도를  $2t/m^3$ 으로 가정하여 최대전단탄성계수를 산정하였다. 크로스홀 시험으로부터는 미소변형을 영역의 최대전단탄성계수만을 산정하기 때문에, 전체변형을 영역(1%~0.0001%)에서의 탄성계수를 산정하기 위하여 사질토 지반에 대하여 가장 보편적으로 사용되는 정규화탄성계수 감소곡선(Seed-Idriss, 1970)과 자갈질 지반의 정규화탄성계수 감소곡선(Seed-Idriss, 1984)을 사용하였다.

#### 3.2 시험 결과

평판재하시험에서 얻은 역재하-재재하를 포함한 하중강도-침하량 결과의 일례를 그림 3에 나타내었다. 또한 그림 3의 결과로부터 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 각 하중단계별 축변형율에 따른 영계수를 그림 4에 나타내었다. 이때 포아송비는 0.3으로 가정하였다. 평판재하시험 결과에서 알 수 있듯이 초기재하값(1st load)은 평판과 지반과의 단부오차 및 소성변형 등의 이유 때문에 변형율에 따른 탄성계수의 경향 및 값이 차이나는 반면에 역재하(1st unload, 2nd unload) 및 재재하(1st reload, 2nd reload)로부터 구한 탄성계수는 변형율에 따른 일반적인 경향을 나타냄을 알 수 있다. 한편, 역재하 단계에서 결정되는 탄성계수가 재재하 단계에서 결정되는 탄성계수보다 크게 나타나는 이유는 역재하 단계의 평균주응력(구속응력)이 재재하 단계의 평균주응력보다 크기 때문이다.

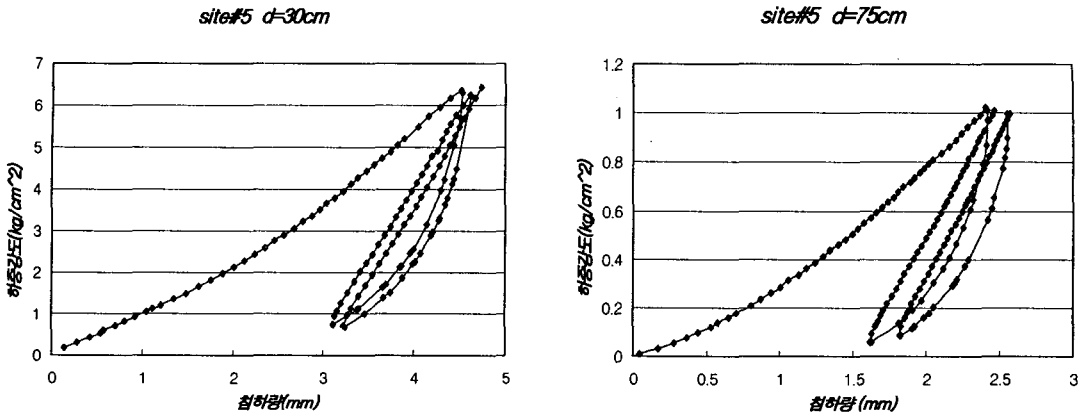


그림 3 평판재하시험에서 얻은 하중강도-침하량 결과 일례

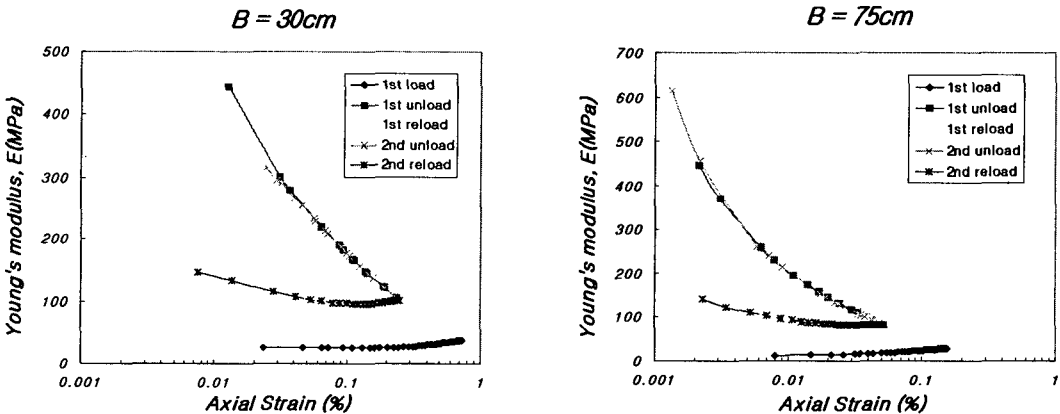


그림 4 평판재하시험으로부터 구한 하중단계별 변형율에 따른 탄성계수

그림 4에 나타난 축변형율에 따른 탄성계수를 지반의 포아송비를 0.3으로 가정하여 전단변형율과 전단 탄성계수로 변환하여 식 (4)와 같이 크로스홀 시험이 수행되는 평균주응력으로 보정한 후, 크로스홀 시험결과와 비교하였다. 평균주응력으로 보정시에 다짐 노상토의 경우 일반적으로 수평토압계수, K값이 0.5~1.0으로 가정할 수 있으므로 K=0.5, K=1.0 두 경우에 대해 보정하여 비교한 결과 큰 차이는 나타나지 않았다. 크로스홀 시험으로부터 구하는 전단탄성계수는 저변형율의 최대전단탄성계수이므로 전체변형율 크기에 따른 탄성계수를 구하기 위하여 전체변형율에서의 정규화전단탄성계수 감소곡선을 이용하였다. 현장의 노체에 사용된 흙은 암버럭이 포함된 풍화토이므로 정규화탄성계수 감소곡선은 가장 보편적으로 사용되는 사질토지반 (Seed-Idriss, 1970)과 자갈질지반(Seed-Idriss, 1984)에 대한 정규화탄성계수 감소곡선을 결합하였다. 이와 같은 결과를 그림 5에 나타내었다.

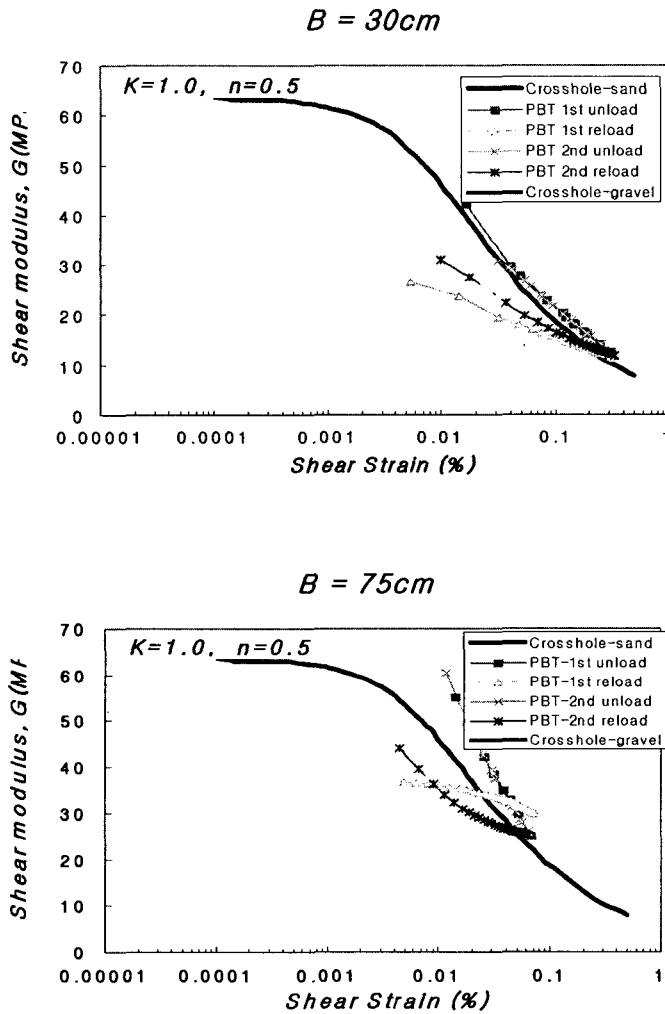


그림 5 평판재하시험의 비선형탄성계수와 크로스홀시험결과와의 비교

그림 5에 나타난 평판재하시험으로부터 구한 비선형탄성계수와 크로스홀 시험으로부터 산정한 비선형탄성계수를 비교해보면 재재하단계(1st reload, 2nd reload)에서 구한 비선형 탄성계수의 경향은 크로스홀 시험 결과와 비슷한 경향을 나타내고 있고, 탄성계수도 사질토 지반과 자갈질 지반 사이에 위치하여 비교적 신뢰성이 있음을 알 수 있다. 다소 차이를 나타내는 이유는 평판재하시험으로부터 탄성계수 및 변형을 산정식에서의 가정과 지반의 응력상태 차이에 따른 구속압 보정과정의 오차가 주요한 원인으로 판단된다. 향후에는 식 (2) 및 식 (3)으로 결정한 탄성계수 및 평균변형율의 엄밀한 검토 연구 및 식 (4)에 나타난 응력상태 보정식의 검토 연구가 요구된다.

이상과 같은 평판재하시험으로부터 얻은 비선형탄성계수와 크로스홀 시험으로부터 얻은 비선형 탄성계수를 반복식 MR 시험이 수행되는 변형률 범위에서의 영계수로 정리하여 표 1에 나타내었다. 전체적으로 첫 번째 재재하단계(1st reload)보다는 두 번째 재재하단계(2nd reload)가 보다 크로스홀 결과에 근접하고 있음을 알 수 있다. 한편, 재재하 직경에 따라서는 직경이 30cm의 경우보다 직경이 75cm의 경우가 탄성계수가



약간 크게 산정되었다. 향후 현장시험에서는 반복하중의 영향을 보다 심도있게 살펴보기 위하여 재재하단계 횡수를 3~5회로 증가시켜 시험을 수행함이 필요하다.

표 1 평판재하시험으로부터 구한 탄성계수와 크로스홀 시험결과 비교

축변형율 (%)	$E_{\text{crosshole}}$ (MPa)		$E_{30}$ (B=30cm) (MPa)		$E_{75}$ (B=75cm) (MPa)		$E_{30} / E_{75}$	
	sand	Gravel	1 <sup>st</sup> reload	2 <sup>nd</sup> reload	1 <sup>st</sup> reload	2 <sup>nd</sup> reload	1 <sup>st</sup> reload	2 <sup>nd</sup> reload
0.01	113	91	69	77	93	85	0.74	0.91
0.05	61	51	44	49	78	65	0.56	0.75
0.1	45	34	37	40	-	-		

#### 4. 결론

본 연구에서는 노체 다짐시 일반적인 평판재하시험을 개선하여 하중과 변위를 보다 엄밀히 측정한 반복 재하식 평판재하시험을 통해 변형율에 따른 비선형 탄성계수를 산정하였다. 이와 같은 결과를 크로스홀 시험과 정규화탄성계수 감소곡선으로부터 구한 전체변형율에서의 비선형탄성계수와 비교한 결과 비교적 신뢰할 수 있는 값을 산정함을 알 수 있었다. 따라서, 지지력계수로부터 현장에서의 탄성계수를 산정시, 평균변형율과 구속압을 고려하고 단부오차와 소성변형이 최소화된 상태에서의 지지력계수를 산정하면 이로부터 탄성계수의 추정이 가능함을 확인할 수 있었다. 한편, 첫 번째 재하에서 결정하는 탄성계수는 재재하단계에서 결정하는 값과 큰 차이를 나타내었고, 재하판 크기에 따른 탄성계수의 차이는 재재하가 반복될수록 보다 일치하는 경향을 나타내었다. 향후, 재재하-역재하 단계를 보다 많이 포함하는 시험절차와 평판재하시험 결과로부터 탄성계수 및 변형율을 보다 엄밀히 산정하는 방법의 검토 및 응력상태 보정의 검토가 요구된다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 연구비 지원으로 수행된 '한국형 포장설계법 개발과 포장 성능 개선방안 연구' 결과의 일부로 감사를 표합니다.

#### 참고문헌

1. 권기철, 이광호, 박만도, 권순민, (2002), "현장시험을 통한 노상토의 비선형 탄성계수 평가" 한국도로포장공학회 2002 학술발표논문집, pp. 255-262.
2. 김동수, 서원석, 권기철, 김형배, (2002), "크로스홀 및 공진주 시험을 이용한 노상토의 현장 탄성계수 평가", 한국도로포장공학회 2002 학술발표논문집, pp. 248-254.
3. Myers M. L.,(1998), "Prediction of Working-Load Displacements under Plate-Loading Tests from Seismic Stiffness Measurement", The University of Texas at Austin.
4. Ping W. V. and Ling G (1997), "Field Verification of Laboratory Resilient Modulus Measurements on Subgrade Soils", Transportation Research Record No. 1557, pp. 53-61, 1997.
5. 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, pp. 39-49.