

할선탄성계수를 이용한 반복하중 하 지반의 영구변형 해석

Analysis of Permanent Deformation under Repetitive Load Based on Degraded Secant Modulus

안 재 훈¹ Ahn, Jaehun
 오 정 호² Oh, Jeongho
 신 호 성³ Shin, Hosung

Abstract

The analysis of long-term performance of pavement sections under wheel loads is normally conducted in two separated steps. First the resilient behavior of the pavement is calculated assuming the pavement is a layered or discrete elastic medium, and then the permanent deformation is evaluated based on empirical permanent displacement equations. Material properties required in both steps can be obtained from cyclic triaxial tests, in other words, resilient and permanent deformation tests. While this analytical approach is simple and convenient, it does not consider the modulus degradation caused by cyclic loads, and some types of reinforcements such as geosynthetic cannot be modeled in this type of analysis. A model for degraded secant modulus is proposed and suggested to be used for the analysis of permanent behavior of unpaved roadway sections. The parameter for suggested model can be obtained from cyclic triaxial tests, regular practice in pavement engineering. Examples to estimate the model parameters are presented based on both laboratory permanent deformation test and large-scale plate load test.

요 지

일반적으로 도로 포장체 영구변형의 해석은, 먼저 포장체를 층이 진 탄성체로 가정하고 회복탄성계수를 통해 포장체의 회복변형률을 계산하고, 이로부터 다시 실내시험을 통해 얻어진 방정식을 이용하여 영구변형률을 산정하게 된다. 회복탄성계수를 통하여 포장체 내의 응력을 산정할 경우, 포장 내 노상토 상부의 응력은 반복하중으로 인한 노상토의 영구변형 증가를 고려하지 않은 회복탄성계수로부터 결정되므로, 영구변형이 지반 및 포장체에 미치는 영향은 응력 산정 시에 고려되지 않는다. 또한, 토목섬유 등으로 보강된 포장체 등의 거동은 해석에 한계가 있다. 본 논문에서는 기존에 회복탄성계수를 사용하여 포장체의 탄성거동을 계산하는 방식과 달리 하중반복회수의 함수인 할선탄성계수를 사용하여 영구변형을 측정할 수 있도록 새로운 모델을 제안하고, 본 모델 적용과 모델계수 산정의 예를 보인다. 제안된 할선탄성계수를 통한 해석은 비포장 도로 상의 교통으로 인한 영구변형의 예측이나 아스팔트 포장 전 노상토나 기층 상부에 가해지는 공사차량으로 인한 영구변형의 산정에 적용가능 할 것으로 판단한다.

Keywords : Secant modulus, Permanent deformation, Subgrade, Pavement, Numerical analysis

1 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 조교수 (Member, Assistant Prof., School of Civil and Environmental Engrg., Pusan National Univ.)

2 정회원, 국립한국교통대학교 철도시설공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Railroad Facility Engrg., Korea National Univ. of Transportation, Tel. +82-70-8855-1655, Fax. +82-31-462-1531, j-oh@ut.ac.kr, 교신저자)

3 정회원, 울산대학교 건설환경공학부 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Ulsan)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 8월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

기존 국내외의 도로포장 설계법은 포장의 설계에 있어서 설계자가 역학적으로 포장 구조체의 안정성과 거동을 해석하기보다 제안된 공식과 차트들을 이용함으로써 포장 공용성에 필요한 포장의 두께를 산정하는 방식으로 되어있다(Korea Ministry of Construction and Transportation, 1999; AASHTO, 1972). 예를 들어, 아스팔트와 콘크리트 포장을 통틀어 대부분의 국내 고속도로의 설계 시 사용된 미국 ASSHTO 포장설계법의 경우 1950년대 수행한 AASHTO 도로시험의 데이터를 바탕으로 제안되었으며, 본 설계법은 설계자에게 서비스지수(PSI)와 구조지수(SN)를 만족하도록 제안된 수식과 차트 등을 이용하여 포장의 두께를 산정하도록 하고 있다(AASHTO, 1972). 이런 경험적 접근이 지배적인 설계법의 경우, 설계자가 설계하려는 도로 포장체 및 지반 조건이 설계법이 제안될 당시 사용된 조건과 유사할 경우에는 설계에 문제가 없지만, 설계법 제안 시 고려되지 않은 새로운 포장재료 및 구조에 대한 설계에는 적용이 용이하지 않다.

근래에 미국에서 개발한 역학적-경험적 포장설계법의 경우(이후 MEPDG 설계법으로 표기), 역학적인 요소가 보완되어 설계자는 포장체를 층이 진 탄성체로 가정하고 회복탄성계수를 통해 포장체의 회복변형률을 계산하고 이로부터 다시 포장체의 영구변형률을 산정하게 된다(NCHRP, 2004). 하지만 이 경우에도 마찬가지로 여전히 토목섬유로 보강된 포장체 등의 거동은 해석할 수가 없다는 단점이 있다. 또한, 회복탄성계수를 통하여 포장체 내의 응력을 산정할 경우 포장 내 노상토 상부의 응력은 반복하중으로 인한 노상토의 영구변형 증가를 고려하지 않은 회복탄성계수로부터 결정되므로, 영구변형이 지반 및 포장체에 미치는 영향은 응력 산정 시에 고려되지 않는다는 한계가 있다.

본 논문에서는 기존에 회복탄성계수를 사용하여 포장체의 탄성거동을 계산하는 방식과 달리 하중반복회수의 함수인 활선탄성계수를 사용하여 영구변형을 측정할 수 있도록 새로운 모델을 제안하고, 본 모델 적용과 모델계수 산정의 예를 보인다. 포장체 상부의 아스팔트 포장의 경우 회복탄성계수가 아스팔트 파손의 예측에 여전히 중요한 자료이므로, 제안된 활선탄성계수를 통한 해석은 비포장 도로 상의 교통으로 인한 영구변형의 예측이나 아스팔트 포장 전 노상토나 기층 상부에

가해지는 공사차량으로 인한 영구변형의 산정에 적용 가능 할 것으로 판단한다.

2. 기존 포장체의 거동 해석

MEPDG 설계법에 사용되는 프로그램을 포함하여 많은 경우에 포장체의 거동은 먼저 다층탄성이론이나 유한요소해석을 통한 탄성거동의 해석으로 이루어진다(NCHRP, 2004; AMADEUS, 2000; KPRP, 2011). 이에 필요한 회복탄성계수는 많은 연구를 통해 여러 형태의 방정식으로 제안되어 왔으며, MEPDG 설계법에 채용된 회복탄성계수의 식은 다음과 같다.

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (1)$$

이 때, M_r 은 회복탄성계수를, θ 는 부피(bulk)응력을, τ_{oct} 는 팔면(octahedral)전단응력을 나타내며, k_1, k_2, k_3 는 실내 회복탄성계수 시험을 통해 산정할 수 있는 재료의 계수이다.

반면 영구변형률은 역학적 해석이 아닌 경험적 모델로부터 산정되며 미국 MEPDG 설계법에서는 노상토의 영구변형률을 나타내기 위한 모델로서 Tseng and Lytton (1989)의 모델을 변형한 형태를 제안하였다. Tseng and Lytton (1989)의 식은 다음의 형태로 주어진다.

$$\epsilon_p = \epsilon_0 \exp \left[- \left(\frac{\rho}{N} \right)^\beta \right] \quad (2)$$

여기에서 ϵ_p 은 영구변형률을, N 은 하중반복회수를 나타내고, ϵ_0, ρ, β 는 각각 노상토의 물성으로서 실내 영구변형 시험을 통해 산정할 수 있다. 이 외에도 널리 알려진 영구변형률을 산정하기 위한 모델로는 VESYS (Kenis, 1978) 모델을 들 수 있으며 그 식은 다음과 같다.

$$\epsilon_p = \mu N^{-\alpha} \quad (3)$$

본 식의 μ 와 α 값 역시 실내시험을 결과를 회귀분석하여 산정할 수 있는 재료의 계수 값을 나타낸다. 하지만 아스팔트 층의 두께와 강성에 따라 기층이나 노상토에 작용하는 응력은 달라질 수 있음에도 불구하고, 식 (2)와 (3)의 모델의 경우 영구변형률 산정을 위한 실내

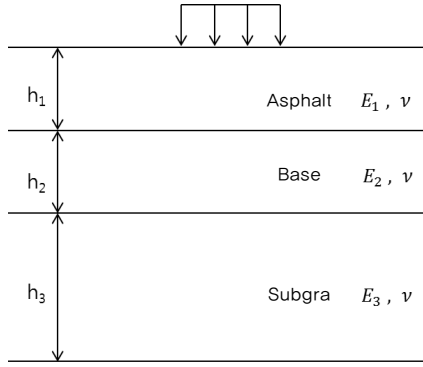


Fig. 1. Layered pavement system

시험 시 적용된 대표응력상태 하나만을 고려할 수 밖에 없다는 단점이 있다.

한편, 아스팔트 혼합재료의 영구변형 역시 도로 포장체의 설계에 중요한 인자로서, MEPDG 설계법 상의 아스팔트 층의 영구변형률의 산정은 다음의 식을 기본으로 한다.

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = aT^bN^c \quad (4)$$

이 때, ϵ_r 은 탄성변형률을, T 는 온도를 나타내며, a , b , c 값은 실내시험 결과의 회귀분석을 통해 얻어진다.

3. 할선탄성계수를 이용한 포장체의 해석

앞서 언급했듯이 기존 포장체의 거동 해석은 정형화된 실내시험 자료를 바탕으로 재료의 물성을 파악하고 이를 이용하여 거동을 해석할 수 있다는 점에서 장점은 있지만, 영구변형의 산정은 경험식으로 이루어지기 때문에 노상토나 기층이 토목섬유 등의 보강재로 보강되었을 경우에, 실내 영구변형시험의 결과로는 보강재의 영향을 산정할 수 없기 때문에, 영구변형의 해석이 용이하지 않다는 단점이 있다. 본 절에서는 기존의 실내시험인 회복탄성계수와 영구변형 산정 시험을 바탕으로, 역학적 해석을 통해 비포장 지반의 영구변형을 산정하기 위한 감쇠 할선탄성계수의 모델을 제안한다. 감쇠 할선탄성계수(Degraded Secant Modulus)라는 용어 및 모델은 해상풍력발전기 기초의 모사를 위해 Achmus et al. (2009)에 의해 제안된 바 있으며, 본 논문에서는 감쇠 할선탄성계수라는 명칭을 사용하되 기존에 제안된 모델보다 더 포장체의 해석에 간편하게 사용될 수 있는

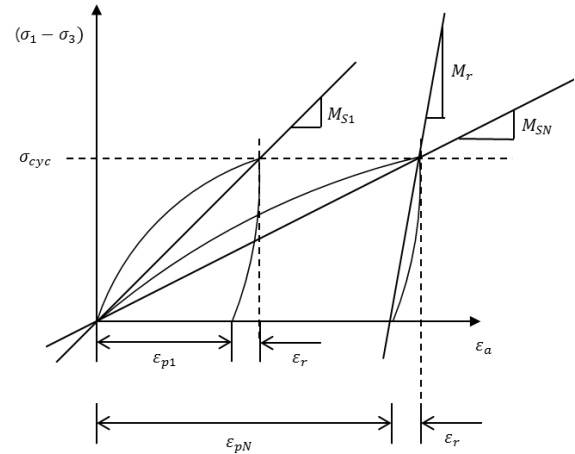


Fig. 2. Concept of degraded secant modulus (after Achmus et al., 2009)

모델을 제안하기로 한다.

교통량에 의한 반복하중 하 지반의 거동은 실내시험으로는 회복탄성계수 시험이나 영구변형 시험으로 산정하며, 이와 같은 시험을 통해 얻어지는 지반재료의 응력-변형률 거동은 Fig. 2와 같이 나타난다. 그림에서 수직축은 반복하중으로 인해 발생하는 응력을, 수평축은 그에 따른 변형률을 나타낸다.

시료에 반복하중 σ_{cyc} 이 처음 재하될 때의 응력-변형률 곡선의 형태가 Fig. 2의 왼쪽 부분에 주어져 있으며, 첫 번째 반복하중의 재하-제하 시 탄성변형률 ϵ_r 과 영구변형률 ϵ_{p1} 역시 같은 곡선에 보인 바와 같다. 이 후 계속 시험이 진행되고 N 번째의 반복하중이 가해질 때의 응력-변형률 관계가 그림의 오른쪽에 주어져 있으며, 이때의 탄성변형률 ϵ_r 과 영구변형률 ϵ_{pN} 역시 그림에 표시되어 있다. 회복탄성계수 측정을 위한 실내시험에서는 하중반복회수가 특정치(일반적으로 200-300번)에 이르면 탄성변형률이, 즉 회복탄성계수가 일정해진다고 가정한다(NCHRP, 2003; LTPP, 1996).

Fig. 2에 보인 바와 같이 본 논문에서는 N 번째 반복하중 시의 할선탄성계수 M_{SN} 을 식 (5)와 같이 정의하며, 영구변형률 ϵ_{pN} 이 하중반복회수 N 의 함수이므로, 할선탄성계수도 하중반복회수의 함수가 된다.

$$M_{SN} = \frac{\sigma_{cyc}}{\epsilon_{pN} + \epsilon_r} \quad (5)$$

반면, 도로 포장체 거동의 해석에 널리 쓰이는 회복탄성계수 M_r 은 다음과 같이 정의된다.

$$M_r = \frac{\sigma_{cyc}}{\epsilon_r} \quad (6)$$

본 논문에서는 입상재료층의 영구변형률을 나타내기 위한 모델로서 하중반복회수와 응력수준을 모두 대변하는 모델을 만들기 위해, 아스팔트 재료의 영구변형률을 나타내는 식 (4)에서 온도에 관한 항을 제거하고 사용하기로 하며, 그 식은 다음과 같다.

$$\frac{\epsilon_{pN}}{\epsilon_r} = aN^c \quad (7)$$

식 (5)와 (6)을 식 (7)에 대입하여 할선탄성계수와 회복탄성계수의 항으로 만들면 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_{cyc}}{M_{SN}} - \frac{\sigma_{cyc}}{M_r} = \frac{\sigma_{cyc}}{M_r} \cdot aN^c \quad (8)$$

식 (8)에 회복탄성계수의 식 (1)을 대입하고 할선탄성계수에 대해 정리하면 다음과 같은 형태가 된다.

$$M_{SN} = \frac{1}{aN^c + 1} k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (9)$$

이와 같이, 기존에 도로 포장체의 거동해석에 사용하는 모델들을 조합하여 할선탄성계수의 식 (9)를 도출할 수 있다. 본 식을 그대로 사용하려면, 다수의 영구변형률 시험을 수행해야 한다. 예를 들어, 회복탄성계수 시험시 식 (1)의 모델계수 k_1 , k_2 , k_3 를 산정하기 위하여 가하는 구속응력과 축차응력의 조합의 조합이 대략 15 경우인 것과(NCHRP, 2003; LTPP, 1996), 모델계수 a 와 c 는 응력이 아닌 하중반복회수에 의존하는 값을 감안하면, 식 (9)에 주어진 k_1 , k_2 , k_3 를 산정하기 위해서도 15번의 정도의 영구변형률 시험을 수행하는 것이 타당하다고 보여진다. 하지만 영구변형률 시험은 시간이 오래 걸리고, 같은 시료로 다수의 영구변형률 시험을 하는 경우는 드물므로, 식 (9)을 단순화 할 필요가 있다고 판단한다.

식 (9)의 단순화를 위해 먼저 탄성변형률의 크기가 영구변형률에 비해 미미하다고 가정하기로 한다. 실제 현장시험에서도 하중반복 회수 한 번 당 발생하는 영구변형률은 탄성변형률에 비해 매우 큰 값을 가지며(Oh et

al., 2010), 하중반복회수가 커져서 영구변형률이 누적될 경우 탄성변형률은 영구변형률에 비해 매우 작은 값이 될 것이다. 본 가정을 식으로 풀이하면 다음과 같다.

$$\epsilon_{pN} + \epsilon_r = \epsilon_{pN} \quad (10)$$

또한 식 (9)에서 팔면전단응력의 항을 삭제하기로 한다. 본 항을 삭제함으로써 비현실적으로 많은 계수들을 사용함으로써 생기는 문제는 피할 수 있지만 반면 부피응력의 항 하나로서 영구변형의 거동을 설명해야 한다는 문제가 생긴다. 본 문제는 영구변형률의 산정에 대해 이미 Puppala et al.(1999)에 의해 검토된 바 있으며, 간략화된 식에서는 구속응력과 축차응력이 독립적으로 영구변형에 영향을 미치지 않는 못하지만 조합된 형태로 변형률에 영향을 미치게 된다. 다시 말해 구속응력의 증감과 축차응력의 증감 모두 부피응력에 영향을 미치므로 간략화된 식에서도 여전히 두 응력의 조합을 고려할 수 있다.

본 가정들을 바탕으로 식 (9)를 단순화 하면 A , B , C 의 세 계수를 가지는 다음의 할선탄성계수 식이 도출된다.

$$M_{SN} = A p_a N^B \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^C \quad (11)$$

본 식은 Puppala et al.(1999)에 의해 제안된 영구변형률의 식 (12)과 매우 유사한 형태를 지니게 된다.

$$\epsilon_p = A' N^{\alpha'} \left(\frac{\theta/3}{p_a} \right)^{\beta'} \quad (12)$$

이 때, 계수 A' , α' , β' 는 영구변형률 시험의 결과를 회귀분석한 결과를 나타낸다. 식 (12)를 비롯하여 기존에 제안된 영구변형률의 경험식들로부터 영구변형률 산정하기 위해서는, 일반적으로 해석대상 지반을 몇 개의 층으로 나누고 먼저 반복하중 하 각 층에 가해지는 평균적인 응력을 계산한다. 이 후, 계산된 응력 및 하중반복 횟수로부터 식 (12)와 같은 경험식을 통하여 영구변형률을 산정하고 이로부터 각 층의 영구변형 및 전체 합산된 영구변형을 산정하게 된다. 하지만 식 (11)와 같은 영구변형을 계산하기 위한 할선탄성계수를 유한요소법에 적용할 경우, 지반 재료의 물성은 각 층별이 아닌

유한요소의 각 적분점마다 변하게 되며, 이에 따라 기존의 경험식을 이용한 계산과정과는 달리 각 지점별로 응력수준, 하중반복회수에 따라 지반의 물성을 갱신하며 영구변형을 산정하게 된다.

4. 실내시험결과를 활용한 모델계수 산정

본 연구에서 제안된, 영구변형의 해석을 위한 할선탄성계수를 이용하여, 반복하중 하 노상토와 기층의 영구변형을 해석하기 위해서는, 각 층 해당 재료의 할선탄성계수 모델계수들을 적절하게 측정하는 것이 매우 중요한 사항이다. 본 모델계수들은 기존의 실내 영구변형률 시험결과로부터 산정할 수 있으며, 본 절에서는 모델계수 산정의 예를 보인다.

Fig. 3과 4에는 미국 텍사스 지역의 강성이 비교적 큰 점토에 대한 영구변형 실내시험결과를 나타낸다(Oh, 2004). 해당 점토에 Table 1에 보인 것처럼 Level 1과

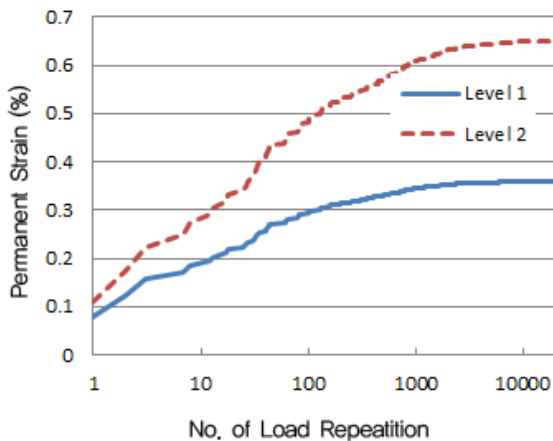


Fig. 3. Permanent displacement of subgrade

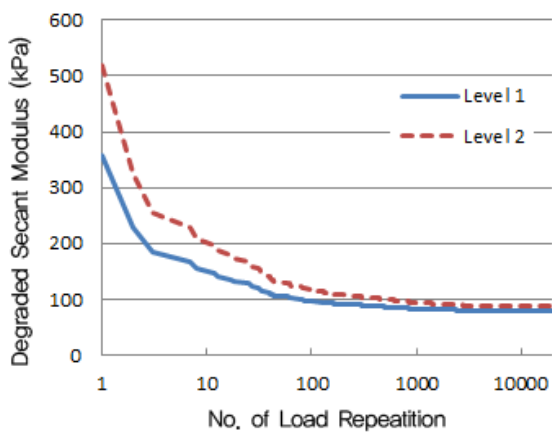


Fig. 4. Degrade secant modulus of subgrade

Table 1. Stresses applied for permanent displacement tests

	Confining stress (kPa)	Deviatoric stress (kPa)
Level 1	28.6	28.6
Level 2	28.6	57.1

Table 2. Model parameters of subgrade material

Model parameter	Value
A	100.2
B	-0.0342
C	0.525

2에 해당하는 구속응력과 축차응력을 가했을 때의 영구변형률 결과 Fig. 3에 할선탄성계수의 결과가 Fig. 4에 주어져 있다. Fig. 4의 할선탄성계수는 실내시험 시 가해진 축차응력을 측정된 영구변형률로 나누어 산정되었다. 본 실내시험에서는 하중 반복회수 20,000번까지 재하 하였다.

한편, 식 (11)에 주어진 할선탄성계수의 모델계수 A, B, C는 다음의 식 (13)과 같이 변환하여 Fig. 4에 산정된 할선탄성계수를 바탕으로 다중선형회귀분석을 통해 산정할 수 있다.

$$\log M_{SV} = \log Ap_a + B \log N + C \log \left(\frac{\theta}{p_a} \right) \quad (13)$$

다중선형회귀분석을 위해서는 스프레드시트 프로그램을 사용하였으며, 이를 통해 산정된 노상토의 할선탄성계수 모델계수가 Table 2에 주어져 있다.

5. 모형시험의 역해석을 통한 모델계수 산정

앞 절에서 설명한 것처럼 제안된 할선탄성계수의 모델계수들은 기존의 영구변형 실내시험의 결과를 통해 손쉽게 산정할 수 있지만, 실제로 다양한 경우의 하중조합 하에 영구변형 시험이 흔히 수행되는 것은 아니다. 따라서 본 절에서는 도로의 거동을 해석하기 위해 수행되는 대형 반복평판재하시험이 수행되었을 때 측정된 변위와 응력으로부터 할선탄성계수의 모델계수를 산정하는 역해석의 예를 보인다. Fig. 5에 대형 반복평판재하시험의 개략도가 나타나 있으며 본 그림에 주어진 모형시험의 형상과 센서의 위치는 Ahn et al.(2009)에 의해 보고된 모형시험을 간략화 한 것이다.

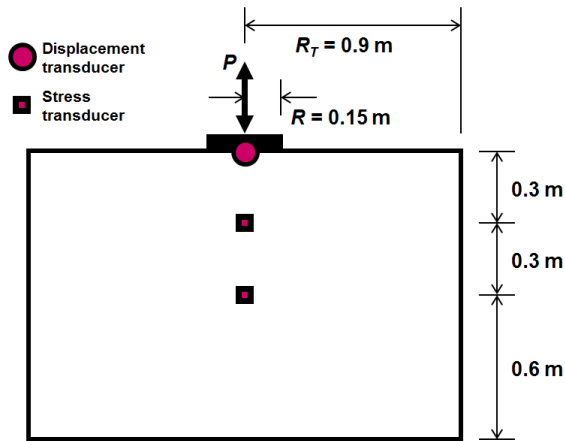


Fig. 5. Schematic of large-scale plate load tests (after Ahn et al., 2009)

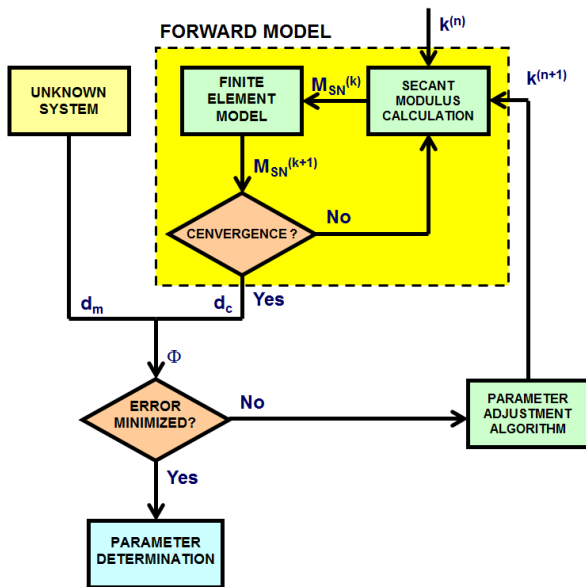


Fig. 6. Inverse analysis of degraded secant modulus (after Ahn et al., 2009)

역해석의 과정을 보이기 위해 먼저 Table 2에 산정된 노상토의 모델계수를 바탕으로 선대칭 유한요소해석을 통하여 Fig. 5에 보인 센서의 위치에서 변위 및 하중을 계산하였다. 본 forward model의 해석은 등가선형해석을 통해 이루어졌으며, 해석의 과정은 Fig. 6에 보인 forward model에 해당하는 부분에 설명되었다. 이와 관련한 활선탄성계수의 반복계산과정 및 수렴기준에 관한 자세한 사항은 Ahn et al.(2009)에 보고된 바와 같다.

이 후, forward model을 통해 계산된 변위와 응력을 계측치라고 가정하고 Fig. 6에 주어진 역해석 과정을 통해 forward model의 입력치로 사용된 활선탄성계수의 모델계수를 역산하였다. 이처럼 측정치 대신에 해석을

Table 3. Results of inverse analysis

Parameter	Baseline	Inversed	Error (%)
A	100.2	100.7	0.5
B	-0.0342	-0.0343	0.3
C	0.525	0.507	3.4

통해 계산된 변위 및 응력을 사용하여 모델계수를 역해석하는 경우에는, 모델계수가 입력치로서 미리 알려져 있기 때문에 역해석으로부터 모델계수가 정확히 산정되었는지 입력치와의 비교로부터 가늠할 수 있다. 모델계수가 본 역해석 과정에서 계수조정(parameter adjustment) 알고리즘은 비선형 최소자승법(least squares) 방법인 Levenberg-Marquardt 방법(Levenberg, 1944; Marquardt, 1963)을 사용하였다.

Forward model로 사용된 선대칭 유한요소모형은 Fortran (Intel, 2011)으로 작성된 Kausel and Roesset (1975)의 모형을 바탕으로 하였으며, 역해석 과정은 MATLAB (Mathworks, 2011)으로 작성하여 사용하였다.

본 과정을 통해 역해석된 활선탄성계수의 모델계수가 Table 3에 주어졌다. 표에 보인대로 모델계수 A, B, C 모두 매우 근소한 오차로 산정된 것을 알 수 있다. 이로부터 역해석을 통해 활선탄성계수의 모델계수를 산정할 수 있다는 것을 알 수 있다. 하지만 이것이 매우 이상적으로 계산된 모형시험으로부터의 변위와 응력을 바탕으로 한 것이므로 실제 계측치의 적용 시에는 모형 시험과정 및 계측치에 존재할 수 있는 불확실성에 대한 공학적인 판단이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 지반의 영구변형을 해석하기 위한 활선탄성계수의 모델을 제안하였다.

제안된 활선탄성계수의 모델계수는 기존에 도로포장 분야에서 수행되는 영구변형 실내시험 결과로부터 회귀분석을 통해 산정할 수 있다. 하지만 제안된 모델의 응력의존성 때문에 몇 가지 하중조합 하에서의 영구변형 시험의 반복수행이 요구된다.

제안된 활선탄성계수는 또한 역해석을 통해 산정될 수 있으며 본 논문에서는 도로포장분야에서 수행되는 대형 반복평판재하시험의 결과로부터 활선탄성계수의 모델계수를 산정하는 과정을 예로 보였다.

제안된 모델을 통한 지반의 거동은 지진공학 혹은 도

로포장 분야에서 지반의 거동을 모사하기 위해 흔히 사용되는 등가선형해석을 통해 산정할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)와 한국연구재단 지역혁신인력양성사업(2011-07-대-04-034)에 의하여 연구되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. AASHTO (1972) *Interim Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
2. Achmus, M., Kuo, Y.-S., and Abdel-Rahman, K. (2009) Behavior of Monopile Foundations under Cyclic Lateral Load. *Computers and Geotechnics*, Vol.36, pp.725-735.
3. Ahn, J., Benjamin, M. C., Robinson, B., Mohammed, A. G., and Roy, H. B. (2009) Inverse Analysis of Plate Load Tests to Assess Subgrade Resilient Modulus. *Journal of the Transportation Research Board*, No.2101, pp.110-117.
4. AMADEUS (2000) *Advanced Models for Analytical Design of European Pavement Structures*. Final report, No. RO-97-SC.2137, European Commission, 2000.
5. Intel (2011) Intel(R) Fortran Compiler 11.1, <http://www.intel.co.kr>
6. Kausel, E. and Roesset, J. M. (1975) Dynamic Stiffness of Circular Foundations. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 101, No.EM6, pp.771-785.
7. Kneis, W. J. (1978) *Predictive Design Procedure, VESYS User's Manual: An Interim Design Method for Flexible Pavement Using the VESYS Structural Subsystem*. Final report, No. FHWA-Rd-77-154, Federal Highway Administration, Department of Transportation, Washington, DC.
8. Korea Ministry of Construction and Transportation (1999) Korea Institute of Construction Technology *Highway Design Handbook*.
9. KPRP (2011) *Korea Pavement Research Program*. Korea Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs.
10. Levenberg, K. A. (1944) Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol.2, pp.164-168.
11. LTPP (1996) *Long-Term Pavement Performance, Protocol P46*, Federal Highway Administration, Virginia.
12. Marquardt, D. W. (1963) An Algorithm for Least-Squares Estimation of Non-linear Parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol.11, No.2, pp.431-441.
13. MathWorks (2011) MATLAB R2011, <http://www.mathworks.co.kr>.
14. NCHRP (2003) *Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design*. NCHRP 01-28A, National Cooperative Highway Research Program.
15. NCHRP (2004) *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. NCHRP 01-37A, National Cooperative Highway Research Program.
16. Oh, J. (2004) *Field monitoring and modeling of pavement response and service life consumption due to overweight truck traffic*, Ph.D. dissertation, Texas A&M University.
17. Oh, J. (2010) Consideration of Moisture Effect on Load Bearing Capacity in Texas Flexible Pavements, *KSCE Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol.14, No.4, pp.493-501.
18. Puppala, A. J., Mohammad, L. N., Members, ASCE, and Allen, A. (1999) Permanent deformation characterization of subgrade soils from RLT test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.11, No.4, pp.274-282.

(접수일자 2012. 2. 29, 심사완료일 2013. 1. 25)