

# 반복재하 평판재하시험의 유한요소해석을 이용한 변형계수의 추정기법

## An Evaluation Method of Deformation Moduli using Finite Element Analysis of Cyclic Plate Load Tests

오 세 봉<sup>†</sup> · 서 원 석<sup>1)</sup> · 권 오 균<sup>2)</sup>

Oh, Seboong · Seo, Wonseok · Kwon, Ohkyun

**ABSTRACT** : The problem on cyclic plate load tests was analyzed by finite element method using an anisotropic hardening constitutive model. The constitutive model was coded to user subroutine in ABAQUS. Using the result of the analysis, Young's moduli corresponding to various strain levels were evaluated by a back calculation method and were very similar to those of input. On the basis of the back calculation method plate loading tests were verified. As a result, deformation moduli could be evaluated practically from cyclic plate load tests with respect site conditions.

**Keywords** : Cyclic plate load tests, Anisotropic hardening constitutive model, Finite element method, Deformation moduli, Back calculation method

**요 지** : 본 연구에서는 비등방경화 구성모델을 이용하여 반복재하 평판재하시험에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 이 때 구성모델은 ABAQUS 코드에서 제공하는 사용자 서브루틴에 적용하였다. 평판재하시험의 해석결과를 이용하여 영계수와 변형률을 역계산하였으며 입력된 변형계수와 비교한 결과 적절하게 계산할 수 있는 것으로 판단되었다. 이러한 기법을 토대로 평판재하시험 사례에 대한 적용을 수행하였다. 이로부터 변형률에 따른 변형계수의 변화를 반복재하 평판재하시험 결과로부터 실용적으로 획득하는 것이 가능하였다.

**주요어** : 반복재하 평판시험, 비등방경화 구성모델, 유한요소법, 변형계수, 역계산법

## 1. 서 론

지반공학 문제와 관련된 설계법은 공용하중 하에서의 거동에 초점을 두는 관점으로 옮겨가고 있다. 특히 포장설계 분야에서는 AASHTO 86' 설계법 잠정지침 이후 기존의 경험적 물성치에서 공용하중 하에서의 역학적 물성치인 포장재료의 회복탄성계수(Resilient modulus,  $M_R$ )를 설계 입력치로 설정한 것이 전환점이라고 할 수 있다.

그러나 회복탄성계수와 같이 지반 재료의 변형계수와 관련된 실내시험은 활발히 이루어진 반면에 현장에서 변형계수를 획득하는 기법에는 많은 한계가 있는 것이 현실이다. 즉, 설계시에는 역학적 물성치를 이용하지만 현장에서는 이를 평가할 적합한 방법이 부족하여 설계와 시공관리 사이의 상관성이 미약한 실정이다. 따라서 현장에서도 역학적 변형특성과 직접적인 상관계수의 평가가 중요하며, 특히 공용조건에서 경험하는 0.01%~0.1% 변형률수준에서 나타나는 변형계수를 실용적으로 평가하는 것이 중요하다

(김동수 등, 2005).

평판재하시험은 실무에서 널리 사용되는 현장 재하시험 기법으로 평판의 수직 하중-변위 관계를 획득할 수 있다. 이러한 평판재하시험으로부터 변형계수를 추정하는 연구가 이루어지고 있으며(Ping 등 1995, 김동수 등 2005), 김동수 등에 의하면 반복재하 평판시험을 통하여 축변형률에 따른 변형계수를 도출하여 크로스 홀 및 실내시험 결과와 비교하여 현장에서의 평가 가능성을 확인하였다.

현장시험 만으로는 평판하부의 지중 응력과 변형에 관련된 거동을 분석하기가 어렵다. 또한 재하시험으로부터 변형계수를 추정하는 기법에 대한 검증은 위해서는 해석적인 접근이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 평판재하시험으로부터 현장의 변형계수를 추정하는 방법을 수치 해석적으로 접근하고자 한다.

재하시험중 반복재하시 영구변형이 발생하는 비선형적인 거동을 해석하기 위해서는 비등방 경화 탄소성 모델을 적용할 필요가 있다(오세봉, 2002). 본 연구에서는 비등방

† 비회원, 영남대학교 건설환경공학부 교수(E-mail : sebungoh@yu.ac.kr)

1) 비회원, Univ. of Texas at Austin Dept. of Geotechnical Eng. 박사후과정

2) 정회원, 계명대학교 토목공학과 교수

경화 구성모델을 이용하여 평판재하시험에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 그리고 해석결과를 토대로 입력된 변형계수를 추정하는 기법을 개발하고 현장 시험결과와 비교를 통하여 검증하고자 한다.

## 2. 구성모델 및 해석기법

이승래와 오세봉(1995)은 일반 등방경화규칙(*generalized isotropic hardening rule*)을 제안하여 비등방 경화규칙을 기술하였다. 일반 등방경화규칙은 상동응력  $\xi_{ij}$ 를 응력원점 뿐만 아니라 임의의 응력상태에서 선정하여 재료의 비등방성을 표현할 수 있도록 하였다(그림 1). 그림 1 (a)와 (b)에 나타나는 재하 및 역재하의 과정에서, 항복면은 각각의 재하 과정에 상응하는 상동중심에 대하여 등방적으로 경화한다. 특히 역재하시에는 새롭게  $\xi_{ij}$ 를 생성시킨다. 이러한  $\xi_{ij}$ 에 대하여 항복면들이 등방적으로 경화함으로써 역재하과정에서 유발되는 소성유동을 표현할 수 있다. 이 때 응력-변형률 관계는 그림 1 (c)에 도시하였듯이 상응하는 비선형 관계를 유발한다.

내부변수  $\xi_{ij}$ 는 연속적인 재하과정에서는 변화하지 않지만 응력경로가 항복면( $f=0$ ) 내부로 변화하는 경우에만 변하는 변수로 가정하고 그 조건은 다음과 같이 수식화 할 수 있다.

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} < 0 \quad (1)$$

적용된 모델(GUX)은 전응력 개념에 의거한 구성관계로 지층의 유일한 응력-변형률 관계가 존재한다고 가정하고

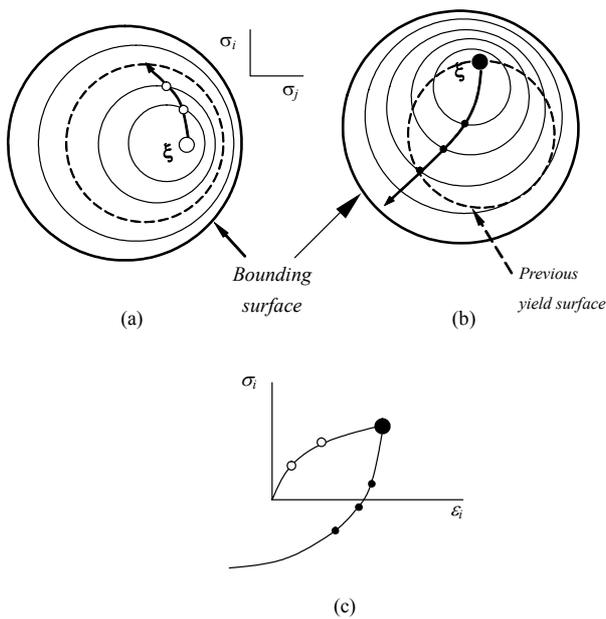


그림 1. 비등방 경화규칙

모델하는 데 적합하다(오세봉 2002). 따라서 지층을 강도에 따라 세분하고 상응하는 계수를 추출하여 해석에 적용할 수 있다. 그리고 그림 1에서 보여지듯이 경계면(*bounding surface*)의 크기와 위치는 일정하다고 가정한다. 경계면과 항복면(그림 2)은 일반적인 응력장에 대하여 다음 식으로 나타난다.

$$F = (\bar{s}_{ij} - b_{ij})(s_{ij} - b_{ij}) - \bar{R}^2 = 0 \quad (2)$$

$$f = (s_{ij} - \beta_{ij})(s_{ij} - \beta_{ij}) - \bar{r}^2 = 0 \quad (3)$$

이 때 축차응력텐서  $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_{kk}\delta_{ij}/3$ 이고  $b_{ij} = a_{ij} - a_{kk}\delta_{ij}/3$ ,  $\beta_{ij} = \alpha_{ij} - \alpha_{kk}\delta_{ij}/3$ 로서 각각 경계면과 항복면 중심응력텐서  $a_{ij}$ ,  $\alpha_{ij}$ 의 축차항이다. 그리고  $\bar{r}$ 은 항복면의 반경이며  $\bar{R}$ 은 경계면의 반경이다. 또한  $\bar{s}_{ij}$ 는  $\sigma_{ij}$ 를  $\xi_{ij}$ 로부터 경계면으로 사상한 응력(*mapping stress*)이다.

등방축삭상태에서 삼축시험이나 비틀전단시험등을 수행하는 경우에는  $\Pi$ 면에서 응력원점으로부터 방사적인 응력 경로를 나타낸다. 이 경우에 식 (2)와 (3)은 다음과 같이 단순화 할 수 있다.

$$F = (\bar{q} - b)^2 - R^2 = 0 \quad (4)$$

$$f = (q - \beta)^2 - r^2 = 0 \quad (5)$$

여기서,  $q = \sqrt{1.5 s_{ij} s_{ij}}$ 로 삼축시험조건에서는  $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 이다. 그리고  $b, \beta$  및  $R, r$ 은 각각  $q$ 축상에 나타나는 경계면과 항복면의 중심 및 크기를 나타낸다.

항복면의 크기가 소성축삭변형률에 의하여 지배된다고 가정하여 경화함수를 다음과 같이 설정하였다.

$$\bar{e}^p = a \frac{(r/R)^b}{(1-r/R)^c} \quad (6a)$$

$$\bar{e}^p = \sqrt{2}/3 \{ (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2 + (\epsilon_{yy} - \epsilon_{zz})^2 + (\epsilon_{zz} - \epsilon_{xx})^2 + 3/2(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \}^{1/2} \quad (6b)$$

여기서, 소성 축삭변형률  $\bar{e}^p = \int d\bar{e}^p$ 이고 적분범위는 하나의 역재하 과정 내에서 규정된다. 계수  $a, b$  및  $c$ 는 경화함수에 사용되는 재료계수들이다.

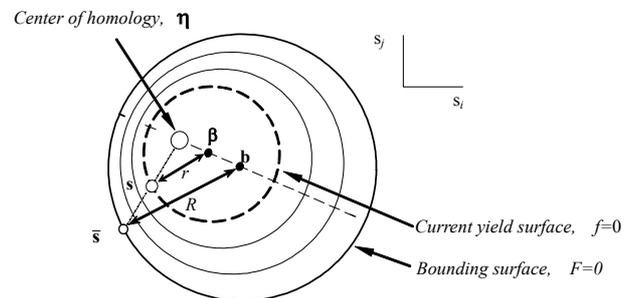


그림 2. 경계면과 항복면

지반재료의 비등방경화 구성모델을 ABAQUS 코드(Hibbitt, Karlsson & Sorensen, 2001)에 구현하기 위해서는 정식화 과정이 필요하다. 이를 위하여 전병곤 등(2002)은 (1) Hughes-Winget(1980) 알고리즘에 의하여 회전된 계에서 Jaumann 응력속도를 이용하여 대변형도 연속체 역학에 합당하도록 구성관계를 기술하였다. 그리고 (2) 해의 정확도를 확보하기 위하여 내재적 응력적분 기법을 정식화하고 (3) 비선형 지배식의 해2차적 수렴도를 확보하기 위하여 일관된 접선 계수를 정식화하였다. 이러한 정식화 과정은 ABAQUS 코드에서 제공하는 사용자 구성관계 서브루틴 UMAT에 합당하도록 이루어졌다. 표 1에서는 ABAQUS에서 제공하는 사용자 서브루틴 UMAT에 구현한 구성관계 코드의 알고리즘을 보여준다.

### 3. 대상 문제의 해석 조건

본 연구에서는 김동수 등(2005)이 수행한 직경 30cm의 강체 평판을 이용한 반복재하시험을 대상으로 하였다. 일반 평판재하시험보다 엄밀한 값을 산정하기 위하여 평판에 작용된 하중은 로드셀을 이용하여 측정하였고, 평판에 발생하는 침하량을 3개의 LVDT로부터 평균값을 구하여 산정하였다. 그림 3에서는 본 연구에 적용된 평판재하시험의 개요도를 나타내었다.

그림 4는 해석 대상지반의 요소망을 나타내며, 축대칭 조건하의 4절점 요소로 요소망을 설정하였다. 지반 요소는 초기응력이 없이 생성된다. 평판은 하중-시간함수를 적용하여 각 층의 하중을 세분하도록 하였다. 그리고 지반 요소는 GUX 모델을 각각 적용하였다.

그리고 대상지층의 시료에 대하여 제안된 모델을 검증하였다. 시험에 적용된 기본물성 시험결과는 표 2에 나타내었다. 대상 지역에서 불교란시료를 채취하여 공진주시험(RC), 비틀전단시험(TS)을 실시하였다.

크로스홀 시험은 평판재하시험이 수행된 인근지역 노상 지표면으로부터 10cm 간격으로 수행하였다. 최대 전단계

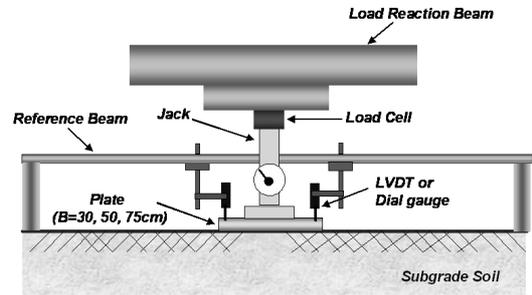


그림 3. 평판재하시험 개요도(김동수 등 2005)

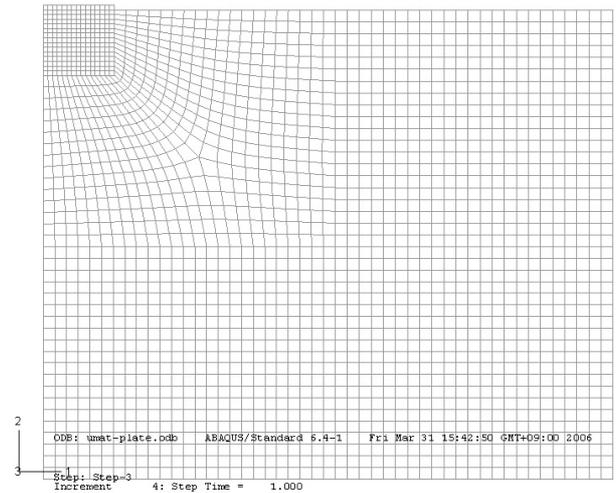


그림 4. 대상지반의 요소망

표 2. 대상지반의 기본 물성

입도시험 결과	D <sub>95</sub> (mm)	7.2
	D <sub>50</sub> (mm)	2.3
	C <sub>c</sub>	1.1
	C <sub>u</sub>	6.4
	#200 통과량 (%)	1.3
	#4 통과량 (%)	84.0
비중		2.67
소성지수 (PI, %)		NP
흙 분류	통일분류	SW
	AASHTO 분류	A-1-a
다짐시험 결과	OMC (%)	10.5
	γ <sub>max</sub> (t/m <sup>3</sup> )	2.03

표 1. UMAT의 알고리즘

과정	설명
1. Read previous stress, strain increment and state variables from previous step.	이전 단계에서 수렴한 응력, 변형률 증분, 상태변수를 입력한다. 응력의 적분은 주어진 변형률 증분에 대하여 이루어진다.
2. Calculate trial stress tensor	입력된 변수로부터 정의할 수 있는 응력텐서의 일부를 시도응력으로 정의한다. 이러한 시도응력텐서를 먼저 계산한다.
3. Check reverse loading, if reverse loaded cases then reset state variables	역재하가 일어난 경우에는 상태변수를 초기화를 해야 한다.
4. Integrate stress by iteration	응력의 적분은 내재적으로 정식화되었으며 반복적으로 해를 구한다.
5. Calculate consistent tangent modulus	적분된 응력을 이용하여 일관된 접선계수를 계산한다.
6. Update state variables	상태변수를 새로이 정의한다.

수  $G_{max}$ 는 평판재하시험 결과와 비교하기 위하여 평판재하시험 영향깊이인 평판직경의 2배에 해당하는 깊이, 0.6m까지의 평균 값 및 최대값, 최소값을 산정하였다. 층상으로 이루어진 지층을 구분하여 상응하는 변형계수를 적용하는 것이 엄밀하다. 하지만 본 연구에서는 평판재하시험이 영향을 끼치는 영역이 깊지 않은 편이므로 대푯값을 선정하였다.

한편, 구속압 41kPa에서의 공진주시험으로부터 구한 정규화전단탄성계수 감소곡선을 이용하였다. 크로스홀 시험으로부터 구한 최대전단계수와 공진주시험으로부터 얻은 정규화전단탄성계수 감소곡선을 적용하여 비선형 전단탄성계수를 산정하였다.

등방압축 조건하에서 수행한 시험결과들을 분석하기 위하여 식 (6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\psi = \bar{\epsilon}^p (1 - q/q_{max})^c = a (q/q_{max})^b \quad (7)$$

따라서 계측된  $\psi$ 와  $q/q_{max}$ 를 대수축에 나타내면 계수 a, b를 결정할 수 있다. 단 계수 c는 가정하여  $\psi$ 와  $q/q_{max}$  관계가 대수축하에서 선형적으로 나타날 수 있도록 하여야 하는 데 경험적으로 0.3-0.4정도의 값을 나타낸다.

비틀전단시험(TS), 공진주시험(RC) 결과에서 나타난 전단변형률로부터 축차변형률  $\bar{\epsilon} = \gamma/\sqrt{3}$ 을 구할 수 있다. 따라서 소성 축차변형률은 최대(초기) 전단계수를 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\bar{\epsilon}^p = \bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}^e, \quad \bar{\epsilon}^e = q/3G_{max} \quad (8)$$

시험 결과는 그림 5와 같이 분석하였으며, 표 3에 도출

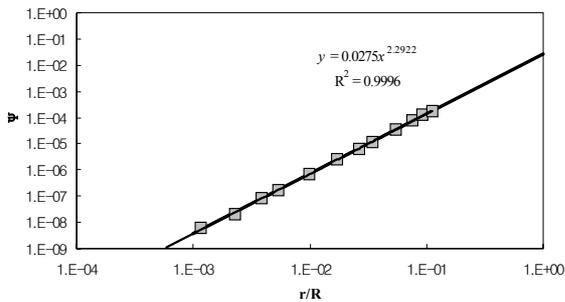


그림 5. 계수 도출과정

표 3. 대상 지층의 재료계수

$G_{max}$ (GPa) <sup>a</sup>	a	b	c	점착력 (kPa)	마찰각 (°)	$\sigma_c$ (kPa)	$q_{max}$ (kPa) <sup>a</sup>	remark
183	0.1601	2.296	0.3	0	35.0	41	866	CH min.
270.7	0.071	2.2697	0.3					CH avg.
390	0.0275	2.2922	0.3					CH max.
460	0.0187	2.2908	0.3					Lab max.

된 모델계수를 정리하였다. 시험결과는 크로스 홀 시험 결과 나타난 최대전단계수의 최소값, 평균, 최대값 183, 271, 390GPa에 대하여 구분하여 분석하였다. 또한 실내시험시 최대 전단계수 460GPa인 경우도 추가하였다.

제안된 모델은 각 지층에 상응하는 최대 변형계수( $E_{max}$ )와 전단강도를 적용하여 실제 응력-변형률 관계를 적합하게 모델할 수 있다. 표 3에 나타난 Mohr-Coulomb 파괴규준 계수( $c'=0$  kPa,  $\phi'=35^\circ$ )로부터 최대 축차응력은 다음과 같은 식을 이용하여 결정할 수 있다.

$$q_{max} = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \phi/2) + 2c \tan(45^\circ + \phi/2) - \sigma_3 \quad (9)$$

그림 6에는 정규화 변형계수( $E/E_{max}$ )에 대한 실험치와 계산치가 비교되어 있다. 제안된 모델의 경우 시험결과를 정확하게 계산하였다. 이로부터 제안된 모델이 미소변형률 조건의 응력-변형률 관계를 모델할 수 있음을 알 수 있다.

이러한 결과로 미루어 볼 때, GUX 모델은 미소변형률 조건에서 나타나는 비선형적인 응력-변형률 관계를 모델할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 평판재하시험의 유한요소해석

그림 7 (a)는 지름 30cm 평판의 하중-변위 관계를 나타낸 것이다. 해석결과는 최대 전단계수가 271, 390, 461 GPa인 경우에 대하여 구분하여 나타낸다. x 축은 침하량을 평판의 지름으로 표준화하여 나타냈다. GUX 모델의 경우에는 반복재하시 변위의 양상이 비선형적 형태를 나타내고 있으며 반복재하가 진행되면서 영구변형이 발생하는 것을 알 수 있다.

평판재하 시험시에는 평판 단부의 정착 오차로 인하여 초기 재하시 변위가 크게 나타나는 경향을 보이는 데, 이는 평판재하시험의 특성상 피할 수 없는 오차이다. 이를 보정하기 위하여 그림 7 (b)와 같이 반복재하 시점으로 하중-

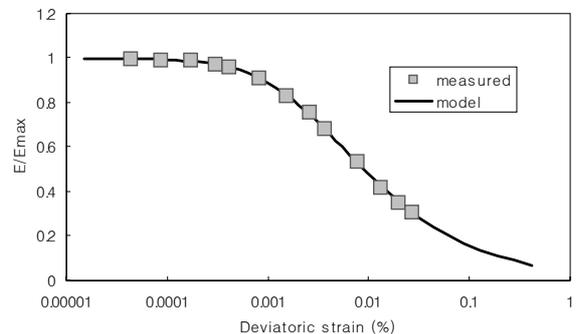
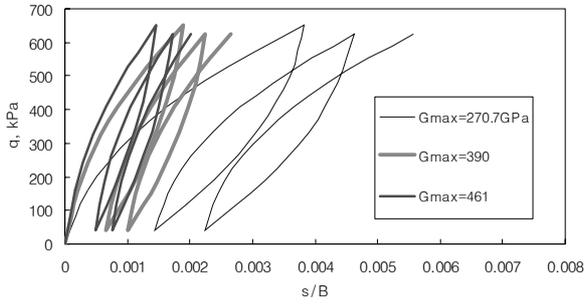
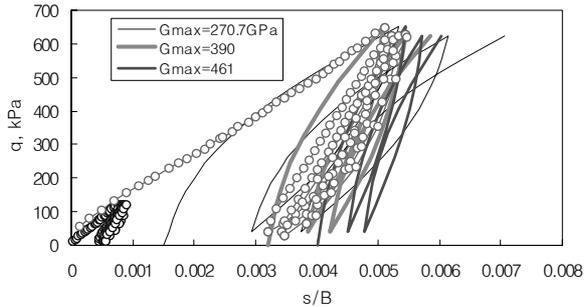


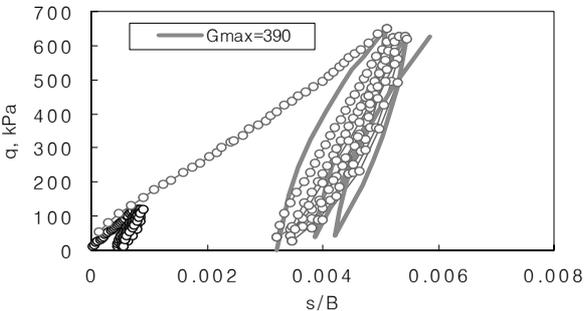
그림 6. 할선계수비  $E/E_{max}$ 에 대한 비교



(a)



(b)

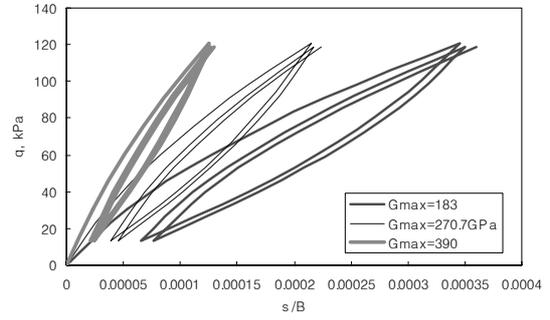


(c)

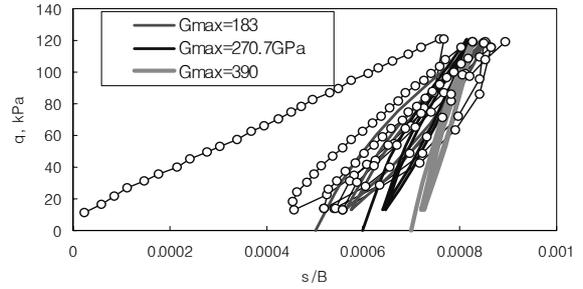
그림 7. 30cm 평판의 하중-변위 관계

변위관계들을 이동하여 일치시켰다. 즉 실험과정에서의 반복재하과정과 해석치를 비교한 것이다. 반복재하시의 관계를 관찰하여 보면 평판 단부의 정착효과가 초기 재하뿐만 아니라 반복재하시에도 영향을 끼치는 것으로 보여진다. 결과적으로 그림 7 (c)에서 보여지듯이 최대 전단계수가 390 GPa인 경우(크로스 홀 시험치중 최대값)에 실제 거동을 잘 계산하는 것으로 판단된다.

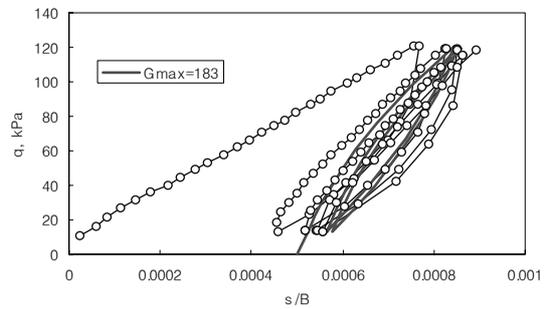
그림 8 (a)에는 지름 76cm 평판의 해석결과를 나타냈다. 해석결과는 최대 전단계수가 183, 271, 390 GPa인 경우에 대하여 구분하여 나타낸다. 평판 단부의 정착 오차를 보정하기 위하여 그림 8 (b)와 같이 반복재하 시점으로 하중-변위관계들을 이동하여 일치시켰다. 결과적으로 그림 8 (c)에서 보여지듯이 최대 전단계수가 183 GPa인 경우(크로스 홀 시험치중 최소값)에 실제 거동을 잘 계산하는 것으로 판단된다.



(a)



(b)



(c)

그림 8. 76cm 평판의 하중-변위 관계

그림 9에서는 최대 전단계수가 390 GPa인 경우 30cm 평판 하부에서 나타나는 체적응력 등고선을 보여주고 있다. 평판의 하부영역에서는 625kPa 하중 재하시 체적응력은 200~500kPa정도 가해지고 있음을 알 수 있다. 이로부터 평판 직하부에는 상당히 큰 체적응력이 집중되고 있음을 알 수 있다. 김동수 등(2005)에 의하면 평판재하시험시 재하과정에서 체적응력이 증가하면 이로 인하여 구속효과가 변화한다. 특히 사질토의 경우에는 변형계수가 체적응력에 의존하게 된다. 변형률이 증가함에도 체적응력이 함께 증가하여 평판재하시험으로부터 구한 변형계수의 감소 효과가 크게 나타나지 않게 될 수 있다. 크로스홀-공진주 시험으로부터 구한 탄성계수 감소곡선과 비교하기 위해서는 이러한 효과를 보정할 필요가 있었다. 본 연구는 해석적인 접근으로 구성관계 내에서 구속압에 따른 최대 전단계수의 변화를 고려하는 것이 바람직하다. 그러나 적용된 구성모델은 이러한 효과를 고려할 수 없었다.

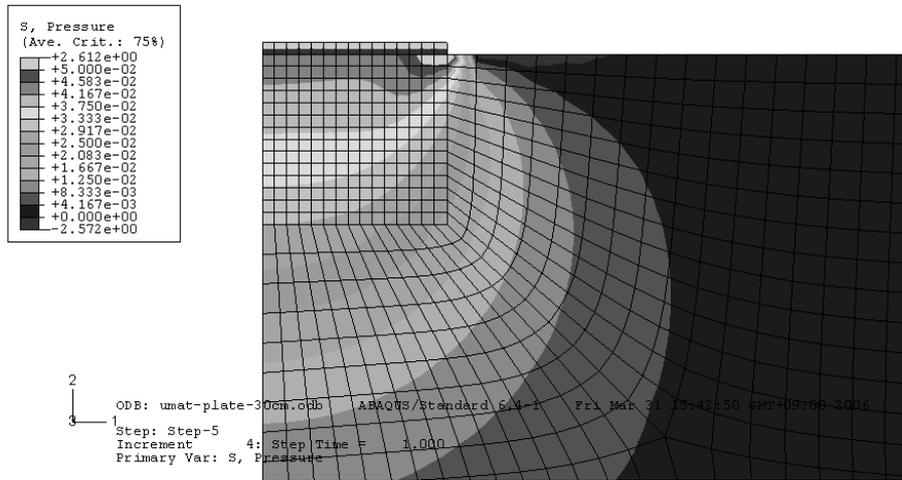


그림 9. 30cm 평판에서의 체적응력 등고선( $10^{-4}$ kPa,  $kN/cm^2$ )

그림 10에는 하중-변위관계의 히스테리시스를 시뮬레이션하였다. 비등방경화 탄소성모델은 그림에서와 같이 하중의 제거 및 재하의 반복재하과정에서 히스테리시스를 모델할 수 있다.

평판재하시험시 하중-변위 관계로부터 탄성론에 의거하여 각 단계별 영계수와 수직변형률을 산정할 수 있다.(김동수 등, 2005)

$$E_s = \frac{\Delta q}{\Delta \delta} B(1 - \nu^2) \quad (10)$$

$$\epsilon_v = \frac{\Delta \delta}{B(1 - \nu^2)} I_z \quad (11)$$

이때,  $I_z$ 는 변형률 영향계수이며 B는 평판의 지름이다.  $\Delta q$ ,  $\Delta \delta$ 는 평판재하시험시 단위면적 당하중 및 수직변위의 변화량을 의미한다. 이러한 변화량은 역재하가 일어난 시점을 기준으로 계산할 수 있다.

비선형적인 거동을 하는 지층의 경우에는 평판하부의 지층에 분포하는 영계수와 수직변형률이 변화하므로 대표값을 선정하는 것이 바람직하다. 따라서 인자  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 이용하여 각각 수직변형률과 탄성계수를 보정하였다.

$$E_s = \beta \frac{\Delta q}{\Delta \delta} B \quad (12)$$

$$\epsilon_v = \alpha \frac{\Delta \delta}{B} \quad (13)$$

그림 7 (a)나 8 (a)에 나타난 해석결과를 이용하여 윗 식들에 나타난 영계수와 변형률을 계산하였다.

- ① 그림 7 (a)나 8 (a)로부터  $\Delta q$ ,  $\Delta \delta$ 를 구한다.
- ② 식 (12) 및 (13)로부터  $E_s$ 와  $\epsilon_v$ 를 구한다.

그림 11에서는 최대전단계수가 271GPa인 경우 해석결

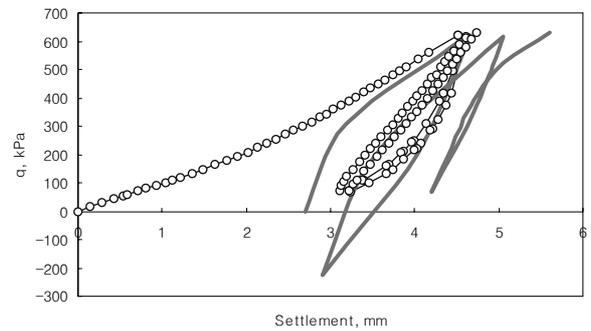


그림 10. 평판재하시험의 하중-변위 히스테리시스

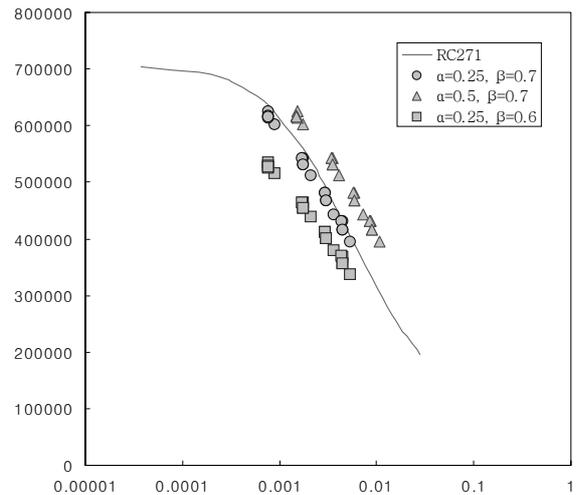


그림 11. 76cm 평판에 대한 영계수의 역해석

과로부터 구한 역해석 결과를 공진주시험을 통하여 구한 영계수 입력치와 비교하였다.  $\beta=0.7$ 일 경우  $\alpha$ 가 증가할수록 변형계수를 과대평가하였고,  $\alpha=0.25$ 일 때  $\beta$ 가 증가할수록 변형계수를 과대평가하는 경향을 나타내고 있다.  $\alpha=0.25$ ,  $\beta=0.7$ 일 경우가 입력된 실선의 영계수를 가장 잘 추정할 수 있었다.

그림 12와 13에서는 대상현장에 대한 평판재하시험 해석 결과로부터 구한 할선 영계수를 보여주고 있다( $\alpha = 0.25$ ,  $\beta = 0.7$ ). 이러한 역해석 결과를 공진주시험을 통하여 구한 영계수 입력치와 비교하였다. 최대전단계수가 183, 271, 390, 461GPa인 경우에 대하여 역해석 결과는 실제 영계수를 전반적으로 유사하게 추정하고 있음을 알 수 있다. 그림 12에는 30cm 평판에 대한 유한요소해석결과는 역해석하여 해석 시 입력된 영계수와 비교하였다. 그림에서 보여지듯이 하중 제거시 결과에 대한 역해석은 입력된 영계수로 매우 정확하게 계산할 수 있었다. 반면에 재하시 결과들은 입력된 변형계수는 다소 과대평가하는 경향이 있다. 그림에도 불구하고, 입력된 변형계수와 역해석 결과가 전반적으로 일치하고 있다.

76cm 평판 해석에 대한 역해석 결과는 그림 13에서 보여지듯이 축변형률이  $10^{-3} \sim 10^{-2}$ % 수준에 놓여있다. 그리고 하중재하시 및 제거시 결과가 모두 입력된 변형계수와 정확하게 일치하고 있다. 30cm 평판재하시험시에는 그림 12에서 보여지듯이 변형률 수준이  $10^{-2}$ % 이상 수준에서 나타

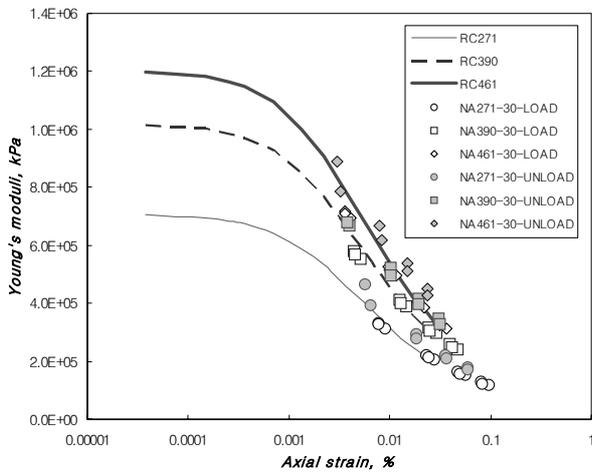


그림 12. 30cm 평판에 대한 영계수

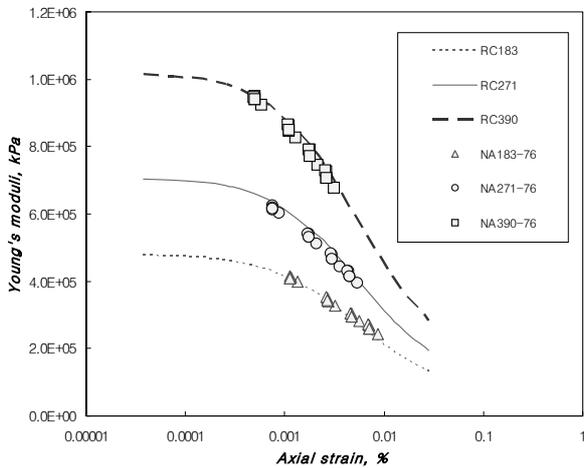


그림 13. 76cm 평판에 대한 영계수

나므로 오차가 다소 발생하고 있음을 알 수 있다. 그림 7이나 8의 결과로부터 반복재하 평판재하시험결과를 획득한 후 식 (12)와 (13)에 의한 분석이 가능하다고 판단된다.

그림 14에는 반복재하시험시 하중결과를 보여주고 있다. 식 (12)와 (13)으로부터 분석하여 변형계수를 계산하였으며 수치해석 결과로부터 산정된  $\alpha = 0.25$ ,  $\beta = 0.7$ 를 적용하였다. 하중 재하시 관계들은 실제 변형계수를 과소평가하였으며, 체적응력에 따른 구속효과의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 현장의 실험결과 중에서 하중제거시(unloading) 자료만을 이용하였다.

그림 15에는 역해석을 수행한 변형계수를 나타내고 있다. 평판의 지름이 30cm인 경우에는 평판재하시험결과 구한 영계수는 최대전단계수가 390GPa인 곡선과 매우 일치하고 있다. 한편 평판지름 76cm인 경우에는 최대전단계수 183~271GPa 사이에 값들이 놓여있다. 두 경우 모두 평판재하시험 결과로부터 구한 변형계수가 현장의 변형계수를 합리적으로 획득하는 것으로 판단된다.

초기재하시 단조증가곡선은 평판 단부의 접촉이 불완전하여 동일한 현장에서도 편차가 발생하기 마련이다. 반면 반복재하시험시에는 여러 사이클의 반복재하시 결과가 중

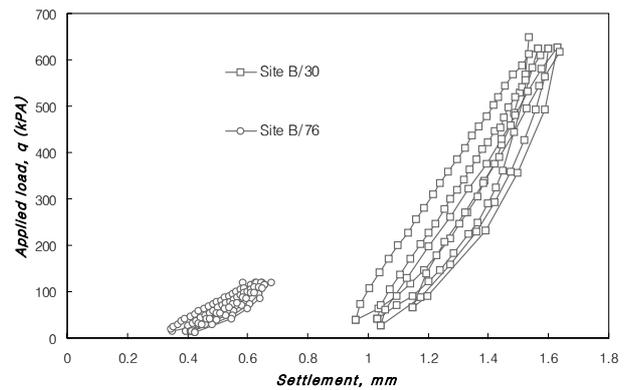


그림 14. 반복재하 평판재하시험시 하중-침하관계

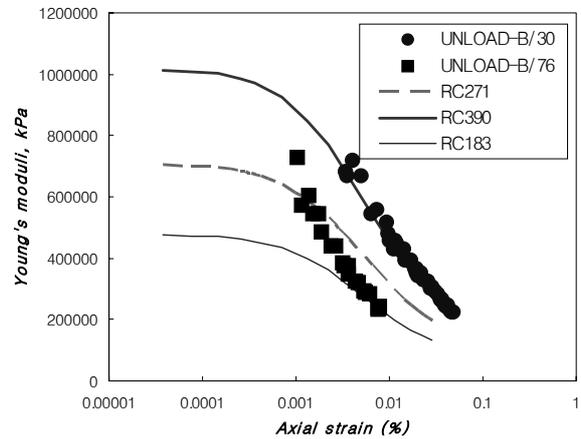


그림 15. 평판재하시험 결과분석

침하여 나타나고 있으며, 시험횟수가 늘어나더라도 반복재하시험 결과는 일관되게 나타날 것으로 판단된다.

이러한 결과로 미루어 볼 때 반복재하 평판시험을 수행한 후 현장의 변형계수를 획득하는 것이 가능하다고 판단된다. 특히 여타 변형계수 시험이 수행하기 곤란한 여건에서 반복재하시험을 수행하는 경우에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 평판재하시험시에는 평판하부의 얇은 깊이 영역의 구성관계에 영향을 받으며, 반복재하시험에는 작은 범위의 변형률 영역에서 나타나는 비선형 변형계수에 반응한다. 이로 인하여 본 연구의 구성모델이 적절하게 실제 평판재하시험 거동을 모델할 수 있었다고 판단된다.

본 연구는 하나의 현장시험 결과를 대상으로 한 결과이므로 제한적인 여건에서 적용이 가능하다. 본 연구진은 이를 보완하기 위하여 다양한 사례를 통한 검증이 현재 진행되고 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 비등방경화 구성모델인 GUX 모델을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 이 때 ABAQUS 코드에서 제공하는 서브루틴 UMAT를 적용하여 평판재하시험을 유한요소해석할 수 있었다. 평판재하시험의 해석결과를 이용하여 영계수와 변형률을 역계산하는 기법을 개발하였다. 그리고 입력된 변형계수와 역해석된 변형계수를 비교한 결과 역계산 기법이 적절한 것으로 판단되었다. 그리고 평판재하시험결과를 역계산시 필요한 식 (12) 및 (13)에서  $\alpha = 0.25$ ,  $\beta = 0.7$ 임을 구하였다.

이러한 기법을 실제 현장시험에 적용한 결과, 현장 평판재하시험으로부터 변형계수를 합리적으로 획득하는 것이 가능하였다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 반복재하 평판시험을 수행한 후 현장의 변형계수를 획득하는 것이 가능하다고 판단된다. 특히 여타 변형계수 시험이 수행하기 곤란한 여건에서 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 본 연구는 다양한 사례를 통한 검증이 필요하며 현재 후속 연구가 진행되고 있다.

## 참 고 문 헌

1. 김동수, 서원석, 권기철(2005), “반복식 평판재하시험을 이용한 노상토의 현장 변형계수 평가”, *한국지반공학회 논문집*, 21권, 6호, pp. 67~790.
2. 오세봉(2002), “비등방경화 구성모델을 이용한 대변형 해석 : I. 정식화”, *한국지반공학회 논문집* 18권 4호, pp. 207~214.
3. 이승래, 오세봉(1995), “일반 등방경화규칙에 의거한 점토의 비등방 탄소성 구성모델”, *한국지반공학회지*, 10권, 3호, pp. 17~32.
4. 전병근, 한성수, 오세봉(2002), “비등방경화 구성모델을 이용한 대변형 해석 : II. 해석”, *한국지반공학회 논문집*, 18권 4호, pp. 215~218.
5. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.(2001) *ABAQUS/Standard User's Manual*, version 6.2.
6. Hughes, T. J. R. and Winget, J.(1980). “Finite Rotation Effects in Numerical Implementation of Rate Constitutive Equations Arising in Large Deformation Analysis,” *Int. J. for Numerical Method in Engineering*, Vol. 15, pp. 1862~1867.
7. Ping, W. V., Ge, L. and Goodwin, H.(1995), “Evaluation of pavement layer moduli using field plate bearing test,” *Transportation Research Records*, No. 1501, 99. pp. 39~49.

(접수일: 2007. 9. 12 심사일: 2007. 9. 28 심사완료일: 2007. 11. 9)