

旁压试验反演邓肯-张模型参数方法研究

Study on back-analysis method of constitutive parameters for Duncan-Chang model based on in-situ pressuremeter tests

刘小生¹, 汪小刚¹, 马怀发², 侯淑媛¹

(1. 中国水利水电科学研究院 北京 100044; 2. 北京工业大学, 北京 100044)

摘要: 研究了联合室内模拟试验和现场旁压仪试验综合确定邓肯-张 $E-B$ 模型有关参数的方法。内容包括: ①采用邓肯-张 $E-B$ 模型和有限元方法, 对旁压试验机理进行数值模拟; ②研制采用阻尼最小二乘法非线性优化理论, 依据实测旁压曲线, 进行土体本构模型参数反演的方法和计算机程序; ③在对模型各参数敏感性分析基础上, 以室内试验结果为初值, 对某工程地基覆盖层现场旁压试验实测曲线进行 $E-B$ 模型参数的反演分析。为实际工程的计算分析提供了更为可靠依据。

关键词: 旁压试验; 本构模型; 有限元方法; 非线性优化; 反分析

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)05-0601-06

作者简介: 刘小生(1962-), 男, 中国水利水电科学研究院岩土工程研究所, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程, 土力学、土动力学及土石坝与地基抗震理论和试验研究。

LIU Xiaosheng¹, WANG Xiaogang¹, MA Huai-fa², HOU Shuyuan¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research 100044, Beijing 100044, China; 2. Beijing Poly-technical University, Beijing, China)

Abstract: This paper attempts to develop a method to back-analyze the constitutive parameters for Duncan-Chang $E-B$ model, based on in-situ pressuremeter tests. The main work includes: ①the working mechanics of pressuremeter test is numerically simulated with finite element method, in which Duncan-Chang $E-B$ model is applied; ②a practical back-analysis method and computing program of constitutive parameters for Duncan-Chang $E-B$ model are developed, based on the non-linear optimization theory with damping least squares; ③some measured pressuremeter curves are back-analyzed with the method to determinate Duncan-Chang $E-B$ model parameters for the foundation soil of some practical project, based on sensitivity analysis of parameters and laboratory tests, and the calculated results are proved practically significant.

Key words: pressuremeter test; constitutive model; finite element method; non-linear optimization; back-analysis

0 概述*

土石坝及覆盖层地基系统的应力变形数值分析结果是否可靠, 关键在于选择的土体本构模型及模型参数是否能反映土体实际的工程力学特性。在计算模式方面, 目前大多采用以邓肯-张双曲线为代表的非线性弹性模式。在模型参数确定方面, 则采用现场取散装样运至实验室内重新制样进行试验的办法确定。

已有研究结果表明, 室内重塑样试验与原状土及现场原位试验所确定的土体工程力学特性参数有很大差别, 其原因是由于土体的原位结构性的影响。尤其是对深厚覆盖层土体, 由于成层年代长, 应力应变历史复杂, 其原位结构性的影响更为显著。同时, 由于深度大、土颗粒粒径大, 原状取样难度极大。因此, 采用现场原位试验确定土体工程力学特性, 特别是现场确定计算模型参数的方法研究日益得到重视。

旁压试验是一种利用钻孔在覆盖层一定深度部位进行的原位载荷试验, 试验成果为旁压荷载与旁压位移的关系曲线。一般采用弹性或理想弹塑性解析理论来对旁压试验机理进行解释, 以确定诸如旁压模量、侧

压力系数、地基极限承载力等参数, 并依据经验评价地基的允许承载力及沉降变形^[1]。由于不能考虑土体的非线性、弹塑性及剪胀性, 这些理论不能很好地模拟旁压试验机理, 亦不能清楚地解释所测参数的物理意义, 试验成果很难应用于数值计算。本文综合室内模拟试验结果, 引进邓肯-张 $E-B$ 模型, 采用有限元数值分析方法模拟旁压试验过程和变形机理。在此基础上, 依据实测旁压试验曲线, 建立目标函数, 对模型参数进行优化, 使实测旁压曲线与计算旁压曲线之间的差别最小, 反分析确定本构模型参数。

1 旁压试验的有限元数值模拟

1.1 邓肯 $E-B$ 模型

土体本构模式采用邓肯-张 $E-B$ 模型, 并将其推广到三维情况, 即用广义剪应力 q 代替三轴试验中的主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 。用平均主应力 p 代替三轴试验中的最小主应力 σ_3 , 用三维问题的摩尔库仑准则的 q_f 代替二维的摩尔库仑强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$, 则切线模量

E_t 、体积模量 B_t 及回弹模量 E_{ur} 分别为

$$E_t = k \cdot p_a \left| \frac{p}{p_a} \right|^n \left| 1 - R_f \cdot \frac{q}{q_f} \right|^2, \quad (1)$$

$$B_t = k_b \cdot p_a \left| \frac{p}{p_a} \right|^m, \quad (2)$$

$$E_{ur} = k_{ur} \cdot p_a \left| \frac{p}{p_a} \right|^n, \quad (3)$$

式中

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2]^{1/2}, \quad (4)$$

$$p = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad (5)$$

$$q_f = \frac{3C \cos \varphi + 3p \sin \varphi}{\sqrt{3} \cos \theta_0 + \sin \theta_0 \cdot \sin \varphi}. \quad (6)$$

式(6)中 θ_0 为 Lode 应力角, 可按式计算

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left| -\frac{1}{\sqrt{3}} \mu_0 \right|, \quad (7)$$

$$\mu_0 = 1 - 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (8)$$

在该模式中, 为确定弹性模量 E 、体积模量 B 及回弹模量 E_{ur} , 需要通过试验确定 k 、 n 、 k_b 、 m 、 k_{ur} 、 R_f 、 c 、 φ (或 φ_0 、 $\Delta \varphi$) 8 个参数。

1.2 有限元网格和单元刚度矩阵

由于试验是轴对称的, 所以采用的单元是一些轴对称的整圆环, 它们的横截面 (与 rz 面相交的截面) 取为矩形。各个单元之间系用圆环形的铰互相连接, 而每一个铰与 rz 面的交点就是结点。这样各单元将在 rz 面上形成矩形网格, 就象平面问题中各矩形单元在 xy 面上形成的网格一样 (见图 1)。

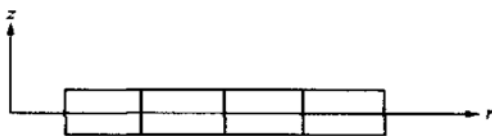


图 1 有限元网格划分示意图

Fig. 1 Sketch of FEM grid

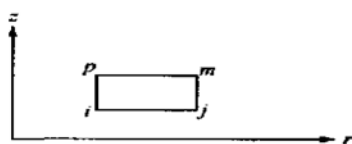


图 2 环状单元的矩形截面

Fig. 2 Rectangle section sketch of ring element

在矩形单元上 (见图 2), 仿照平面问题, 取线性位移模式, 由于旁压测试是横向荷载试验, 所以周围土体只有径向位移, 垂直位移为 0。

有单元刚度矩阵

$$[k] = 2\pi \iint_B [D]^T [B] r dr dz = [[k_1][k_2][k_3][k_4]],$$

$$[k_1] = \frac{2\pi E \mu (1 - \mu)}{(1 - 2\mu)} \cdot$$

$$\left| \begin{aligned} & \frac{b}{a^2} \left| -a^2 + (1 - \mu)(a + r_i)^2 \ln \frac{r_i + a}{r_i} \right| + \frac{(1 - 2\mu)a}{2b} \left(r_i + \frac{1}{4}a \right) \\ & - \frac{br_i}{a^2} (1 - \mu)(a + r_i) \ln \frac{r_i + a}{r_i} + \frac{(1 - 2\mu)a}{4b} \left(r_i + \frac{1}{2}a \right) \\ & - \frac{br_i}{2a^2} (1 - \mu)(a + r_i) \ln \frac{r_i + a}{r_i} - \frac{(1 - 2\mu)a}{4b} \left(r_i + \frac{1}{2}a \right) \\ & \frac{b}{2a^2} \left| -a^2 + (1 - \mu)(a + r_i)^2 \ln \frac{r_i + a}{r_i} \right| - \frac{(1 - 2\mu)a}{2b} \left(r_i + \frac{1}{4}a \right) \end{aligned} \right|,$$

$$[k_2] = \frac{2\pi E \mu (1 - \mu)}{(1 - 2\mu)} \cdot$$

$$\left| \begin{aligned} & -\frac{br_i}{a^2} (1 - \mu)(a + r_i) \ln \frac{r_i + a}{r_i} + \frac{(1 - 2\mu)a}{4b} \left(r_i + \frac{1}{2}a \right) \\ & - \frac{b}{a^2} \left(a^2 + (1 - \mu)r_i^2 \ln \frac{r_i + a}{r_i} \right) + \frac{(1 - 2\mu)a}{2b} \left(r_i + \frac{3}{4}a \right) \\ & \frac{b}{2a^2} \left(a^2 + (1 - \mu)r_i^2 \ln \frac{r_i + a}{r_i} \right) - \frac{(1 - 2\mu)a}{2b} \left(r_i + \frac{3}{4}a \right) \\ & - \frac{br_i}{2a^2} (1 - \mu)(a + r_i) \ln \frac{r_i + a}{r_i} - \frac{(1 - 2\mu)a}{4b} \left(r_i + \frac{1}{2}a \right) \end{aligned} \right|,$$

$$[k_3] = \frac{2\pi E \mu (1 - \mu)}{(1 - 2\mu)} \cdot$$

$$\left| \begin{aligned} & -\frac{br_i}{2a^2} (1 - \mu)(a + r_i) \ln \frac{r_i + a}{r_i} - \frac{(1 - 2\mu)a}{4b} \left(r_i + \frac{1}{2}a \right) \\ & \frac{b}{2a^2} \left(a^2 + (1 - \mu)r_i^2 \ln \frac{r_i + a}{r_i} \right) - \frac{(1 - 2\mu)a}{2b} \left(r_i + \frac{3}{4}a \right) \\ & \frac{b}{a^2} \left(a^2 + (1 - \mu)r_i^2 \ln \frac{r_i + a}{r_i} \right) + \frac{(1 - 2\mu)a}{2b} \left(r_i + \frac{3}{4}a \right) \\ & - \frac{br_i}{a^2} (1 - \mu)(a + r_i) \ln \frac{r_i + a}{r_i} + \frac{(1 - 2\mu)a}{4b} \left(r_i + \frac{1}{2}a \right) \end{aligned} \right|,$$

$$[k_4] = \frac{2\pi E \mu (1 - \mu)}{(1 - 2\mu)} \cdot$$

$$\left| \begin{aligned} & \frac{b}{2a^2} \left| -a^2 + (1 - \mu)(a + r_i)^2 \ln \frac{r_i + a}{r_i} \right| - \frac{(1 - 2\mu)a}{2b} \left(r_i + \frac{1}{4}a \right) \\ & - \frac{br_i}{2a^2} (1 - \mu)(a + r_i) \ln \frac{r_i + a}{r_i} - \frac{(1 - 2\mu)a}{4b} \left(r_i + \frac{1}{2}a \right) \\ & - \frac{br_i}{a^2} (1 - \mu)(a + r_i) \ln \frac{r_i + a}{r_i} + \frac{(1 - 2\mu)a}{4b} \left(r_i + \frac{1}{2}a \right) \\ & \frac{b}{a^2} \left| -a^2 + (1 - \mu)(a + r_i)^2 \ln \frac{r_i + a}{r_i} \right| + \frac{(1 - 2\mu)a}{2b} \left(r_i + \frac{1}{4}a \right) \end{aligned} \right|,$$

1.3 整体刚度矩阵

由单元刚度矩阵的计算公式可以看出, 距中心对称轴距离相等的单元的单元刚度矩阵相等。

土体取单位高度进行计算, 将单位高度土体等分

成两层,再将两层在半径方向划分成若干宽度不等的矩形单元,单元的宽度由内向外逐渐变大。结点单元划分和编号如图3。

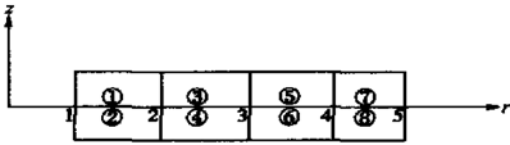


图3 结点单元划分和编号示意图

Fig. 3 Sketch for partitioning and numbering of element

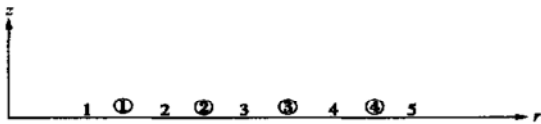


图4 杆单元示意图

Fig. 4 Sketch of bar element

距中心对称轴距离相等的两矩形单元可以聚集为一杆单位。图4为整个体系聚集后的杆单元。可以得出整个体系聚集后的整体刚度矩阵为

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{11}^{(1)} & k_{12}^{(1)} & & & \\ k_{21}^{(1)} & k_{22}^{(1)} + k_{11}^{(2)} & k_{12}^{(2)} & & \\ & k_{21}^{(2)} & k_{22}^{(2)} + k_{11}^{(3)} & k_{12}^{(3)} & \\ & & & \dots & \\ & & & k_{21}^{(n-1)} + k_{11}^{(n)} & k_{12}^{(n)} \\ & & & k_{21}^{(n)} & k_{22}^{(n)} \end{bmatrix}.$$

1.4 有限元方程

$$[K]\{\delta\} = \{P\}, \quad (9)$$

式中 K 为刚度矩阵; δ 为结点位移; P 为结点载荷列阵。

荷载列阵按在非弹性体边界上受有均匀分布的体力 p 进行计算。有限元计算采用增量法,对于每级压力增量 ΔP_i 。用上次荷载作用下的应力、应变状态确定参数,计算下一级压力增量下的应力、位移、应变增量,并与上次压力下的应力、位移、应变叠加,然后用新的应力与应变状态确定计算参数,依次类推。计算中 σ_0 不能为拉应力,如果出现 σ_0 小于 0,则取 $\sigma_0 = 0$ 。

经算例验证,由旁压试验线弹性理论孔壁位移解析求得各级压力作用下的位移值与由有限元程序求解得到的各级压力作用下的位移值基本一致,说明了本文所编制的有限元计算位移程序是可行的。

2 非线性优化方法

为了依据现场实测的旁压试验曲线来反演土体本构模型参数,目标函数可取为

$$\omega(x) = \sum_{i=1}^n [f_i(x) - u_i]^2, \quad (10)$$

式中 x 是为需要反演的土体参数向量; $f_i(x)$ 为土体在第 i 个观测点的计算位移值; u_i 为土体在第 i 个观测点的实测位移值; n 为由现场获取的位移量测值的总个数。进行优化反演分析,就是求解上述目标函数,寻找一组适当的 (x^*) ,使相应的目标函数值为最小。由于目标函数为测量位移与计算位移的泛函,位移 $f_i(x)$ 是土体参数向量 x 的非线性函数,且材料参数隐式地包含在有限元方程中,在反分析过程中必须求解有限元方程,属于非线性优化问题。本文应用直接法求解。

利用 Taylor 级数,可将第 $k+1$ 次迭代时的误差函数用第 k 次迭代已知值表示成

$$\omega(x^{k+1}) = \omega(x^k) + \left(\frac{\partial \omega}{\partial x}\right)^k dx^k + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}\right)^k (dx^k)^2, \quad (11)$$

式中 x 为待反演的土体参数。

令 $\omega(x^{k+1}) \rightarrow \min$, 即由 $\frac{\partial \omega}{\partial (dx^k)} = 0$ 则得到

$$\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}\right)^k dx^k = - \left(\frac{\partial \omega}{\partial x}\right)^k. \quad (12)$$

利用式(10)可得到

$$\frac{\partial \omega}{\partial x} = \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x}\right)^T (f(x) - u), \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x}\right)^T \frac{\partial f(x)}{\partial x}. \quad (14)$$

其中,在推导式(14)时,用到了 $\frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} = 0$,这是因为求解 $f(x)$ 的有限元方程是用一阶 Taylor 近似式。

将式(13)、(14)代入(12)式中,得到求解 dx^k 的第 $k+1$ 次迭代方程为

$$\left(\frac{\partial f(x)}{\partial x}\right)^T_k \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x}\right)_k dx^k = \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x}\right)^T_k (u - f(x)), \quad (15)$$

式中

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix}_{n \times 1}, \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix}_{m \times 1},$$

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_m} \\ \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_m} \end{bmatrix}_{n \times m}, \quad (n \geq m).$$

以 $f(x)$ 代替 δ 对有限元方程(9)两边进行 x 求导, 则有

$$\left(\frac{\partial f(x)}{\partial x}\right)_k = -K^{-1}\left(\frac{\partial K}{\partial x}f(x)\right)_k, \quad (16)$$

$$\text{式中 } K = [K]_{n \times n}, \quad \frac{\partial K}{\partial x}f(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial K}{\partial x_1}f(x) \\ \frac{\partial K}{\partial x_2}f(x) \\ \vdots \\ \frac{\partial K}{\partial x_m}f(x) \end{bmatrix} =$$

$$\left[\frac{\partial K}{\partial x_i}f(x)\right]_{n \times m}.$$

实际计算时, 采用如下计算步骤: ①选择初值 $x = x^0$; ②由有限元方程式(9)求得位移 $f(x)$; ③根据式(16)计算 $\left(\frac{\partial f(x)}{\partial x}\right)$; ④由式(15)计算 dx^k ; ⑤计算: $f(x)^{k+1} = f(x)^k + df(x)^k, x^{k+1} = x^k + dx^k$.

判别计算是否收敛:

$$\frac{\|x^{k+1} - x^k\|}{\|x^{k+1}\|} \leq \varepsilon_1, \quad \frac{\|f(x)^{k+1} - f(x)^k\|}{\|f(x)^k\|} \leq \varepsilon_2,$$

若收敛, 计算结束, 否则转步骤(1)。

由于函数 $f_i(x)$ 的非线性性质, 有时会出现相关性, 从而导致矩阵 $\frac{\partial f(x)}{\partial x}$ 退化或呈病态, 此时 $\left(\frac{\partial f(x)}{\partial x}\right)^T \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x}\right)$ 的病态性更为严重, 无法利用式(15)计算出 dx_k , 因此在编制程序中, 引进了阻尼因子的办法以改善矩阵条件, 采用了阻尼最小二乘法求解^[2]。

经算例计算验证, 对选取的模型参数, 由各级压力作用下的孔壁位移计算位移作为实测位移值, 进行模型参数反演, 反演结果与选取的参数值非常吻合, 说明了本文所编制的反演程序是可行的。

3 旁压仪试验的反演分析

由于需要确定的参数较多, 如果对所有的模型参数均作为未知数进行反演, 可能会出现多值问题, 必须对反演参数进行选取。因此, 首先进行了模型各参数对旁压变形影响的敏感性分析, 确定敏感性参数。在此基础上, 根据室内模拟试验的特点, 选定反演参数。最

后, 以室内模拟试验结果作为反演初试参数, 进行反演分析。

3.1 室内试验结果

通过对坝基中粗砂及坝基砂砾石的饱和固结排水静力三轴剪切试验^[3], 可得到邓肯-张模型参数, 其结果见表1。

3.2 参数敏感性分析

所谓敏感性分析, 是将某一参数变化而其它参数不变, 用有限单元法计算这个参数每次变化后的孔壁位移的结果, 并观察参数变化对变形的影响程度大小, 然后来确定参数的敏感程度。这里选择邓肯 $E-B$ 模型的 k 、 n 、 R_f 、 k_b 、 m 及 φ_0 共6个参数进行了敏感性分析。以坝基砂砾石及坝基中粗砂的饱和固结排水静力三轴剪切试验得到的邓肯-张模型参数作为标准值(即变化率为0), 通过变化某一参数, 用有限单元法计算得到每次参数变化后的位移变化。

3.3 反演分析方法

参数敏感性分析结果表明, 影响旁压变形的参数主要为 k , 而 n 、 R_f 、 k_b 、 m 及 φ_0 对位移的影响很小。而且摩尔强度指标 $\Delta\varphi$ 、 φ_0 (或 c 、 φ) 是土力学中的常用参数, R_f 、 $\Delta\varphi$ 、 φ_0 (或 c 、 φ) 可以通过现场大型直剪测试直接现场确定。此外, 大量试验表明^[4], 对于目前采用模拟级配的室内大型三轴静力剪切试验所得的 R_f 、 $\Delta\varphi$ 、 φ_0 (或 c 、 φ) 值试验结果和原级配材料所得结果基本一致, 且 R_f 、 $\Delta\varphi$ 、 φ_0 (或 c 、 φ) 受现场原位结构性影响较小。因此, 反演时参数 R_f 、 $\Delta\varphi$ 、 φ_0 (或 c 、 φ) 及 m 可直接采用大型静力三轴试验结果。参数 k 、 n 及 k_b 则以大型静力三轴试验结果作为反演初始值, 通过有限元非线性优化反分析程序分析确定。

3.4 反演结果

对某工程覆盖层地基现场旁压仪试验结果^[5], 根据室内试验结果, 给定 R_f 及 $\Delta\varphi$ 、 φ_0 的值(坝基中粗砂 $m = 0.033$, $R_f = 0.75$, $\Delta\varphi = 3.2^\circ$, $\varphi_0 = 46.5^\circ$; 坝基砂卵石 $m = 0.180$, $R_f = 0.84$, $\Delta\varphi = 7.2^\circ$, $\varphi_0 = 48.5^\circ$), 以大型静力三轴试验结果确定的 k 、 n 及 k_b 参数值作为反演时的初始值, 进行了反演计算。反演分析结果如表2所示。

表1 坝基中粗砂及砂砾石室内三轴试验结果

Table 1 Laboratory test results for middle-sized sands and gravels of dam foundation

试样	干密度 / ρ_d ($g \cdot cm^{-3}$)	相对密度 D_r	φ_0 /($^\circ$)	$\Delta\varphi$ /($^\circ$)	K	n	K_b	m	R_f
坝基中粗砂	1.84	0.85	46.5	3.2	656.5	0.33	405	0.03	0.75
坝基砂卵石	2.11	0.85	48.5	7.2	500	0.44	240	0.18	0.84

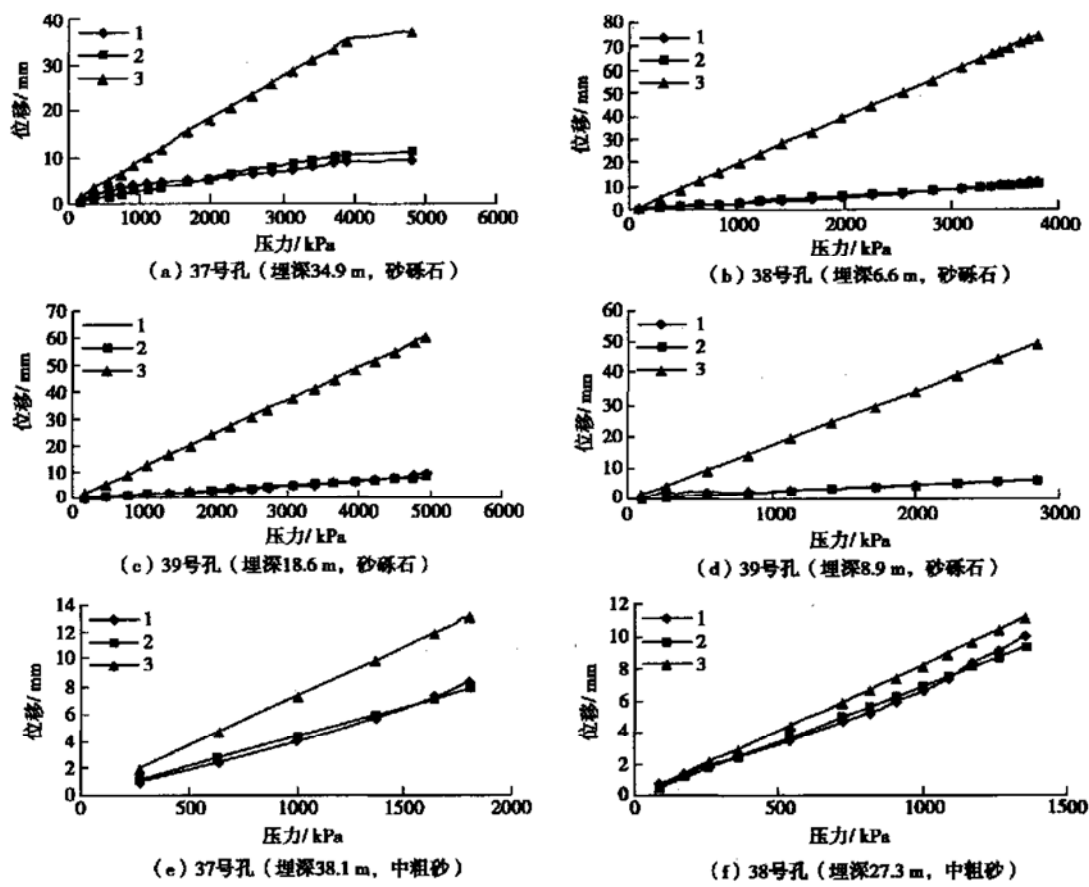


图 5 各个测点位移曲线比较图

Fig. 5 Comparison of displacement for various mensuring points

3.5 实测位移值与计算结果比较

由反演得到的土体模型参数, 对各测试点分别进行了有限元计算, 得到不同压力下的计算位移值, 如图 5。为了比较, 图中还同时给出了各点在不同压力下的旁压位移试验结果。可见实测位移值与计算结果基本一致。

表 2 $E-B$ 模型参数反演值

Table 2 Back- calculated results of parameters for $E-B$ model				
深度 /m	土体参数			
	孔号	k	n	k_b
34.9(砂砾石)	37号	1785	0.340	327
6.6(砂砾石)	38号	2602	0.363	370
18.6(砂砾石)	39号	2768	0.338	365
8.9(砂砾石)	39号	2759	0.360	338
砂砾石均值		2479	0.350	350
38.1(中粗砂)	37号	1128	0.350	426
27.3(中粗砂)	38号	898	0.310	384
中粗砂均值		1013	0.330	405

为了反映土体原位结构性等的影响, 在图 5 中给出了分别按室内试验和优化反分析所得两套参数计算的旁压曲线的比较。图中曲线 1, 2, 3 分别表示: 1 为实测旁压曲线; 2 为反演参数计算的旁压曲线; 3 为室内试验参数计算的旁压曲线。可见, 室内试验参数

计算曲线与实测曲线相差较大, 按室内试验所得参数计算所得到的位移值远小于考虑了原位特性影响的优化方法所得参数计算的位移值。表明覆盖层地基土体原位结构性的影响显著。因此, 考虑结构性的影响有重要工程意义。进行在室内试验结果的基础上的反演分析结果较单纯室内试验所得结果更能反映实际情况。

4 结 语

本文研究了联合室内模拟试验和现场旁压仪试验, 综合确定土的土体本构关系有关参数的方法, 为研究深厚覆盖层粗粒料工程特性开辟了新的途径。主要取得以下成果和结论:

- (1) 采用有限元数值计算分析技术, 对旁压试验原理进行了数值模拟, 计算中采用目前广泛应用的邓肯- 张 $E-B$ 模型。
- (2) 在模型各参数对变形的敏感性分析基础上, 研制了依据实测旁压曲线, 采用阻尼最小二乘法非线性优化理论, 反分析土体本构模型参数的方法和计算机程序。
- (3) 在室内试验结果的基础上, 采用开发的旁压试

验有限元反分析方法和程序,对某工程地基覆盖层现场旁压试验实测曲线进行了邓肯-张 $E-B$ 模型参数的有限元反演分析。

(4) 进行了实测旁压曲线、室内试验参数计算旁压曲线及反演参数计算旁压曲线三者比较分析,发现室内试验参数计算曲线与实测曲线相差较大,表明覆盖层地基土体原位结构性的影响显著。因此,考虑结构性的影响有重要工程意义。进行在室内试验结果的基础上的反演分析结果较单纯室内试验所得结果更能反映实际情况。

参考文献:

- [1] 孟高头. 土体原位测试机理方法及其工程应用[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [2] 李庆扬. 非线性方程组的数值解法[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [3] 中国水利水电科学研究院. 新疆察汗乌苏水电站筑坝材料试验报告[R]. 2002, 3.
- [4] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程第三分册(SD128-87)及说明书[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989.
- [5] 中国水利水电科学研究院. 新疆察汗乌苏水电站工程覆盖层地基现场旁压仪试验研究报告[R]. 2003, 2.

《岩土工程学报》广告业务简介

《岩土工程学报》创办于 1979 年,是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。国内外公开发行。

本刊为我国中文核心期刊,并在同类期刊中排列首位。本刊为中国科协、江苏省和我国水利系统优秀期刊,多次获中国科协和国家自然科学基金委的择优经费资助。本刊的读者面广,读者群稳定,多年来,发行量均位于同类期刊的前列。

本刊开展广告业务旨在及时传递国内外的新产品、新技术信息,扩大优质产品和先进技术在国内外影响,促进科技进步,加速科技成果向生产力的转化。

《岩土工程学报》刊登广告注意事项:

(1) 刊登广告前需签订协议。客户应提供营业执照副本复印件;广告中如含有产品鉴定或检验结论,入围或获奖情况以及单位通过质量体系认证等内容时,客户需提供相应结论报告

或证书的复印件。

(2) 客户应于广告刊登前 45 天将广告稿递交本刊广告部。
E-mail: ge@njhri.edu.cn。

(3) 本刊广告部有权根据广告法及新闻出版有关文件规定,对客户的广告内容进行必要的修改。本刊广告部在规定的时间内未收到客户的广告费或广告稿时,有权将客户所订广告版面转让给其他客户。

(4) 广告一经刊出,即向刊登广告的客户赠送当期杂志 5 册。

(5) 《岩土工程学报》广告发布业务联系方式。通讯方式: 210024,南京市虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部;电话: 025-85829556, 85829553; 传真: 025-85829555; 联系人: 胡海霞; E-mail: ge@njhri.edu.cn。

(本刊编辑部)