

DOI: 10.11779/CJGE2022S2034

# 深层粉质黏土旁压试验及参数反分析

杨玉生<sup>1, 2</sup>, 刘小生<sup>1, 2</sup>, 彭文明<sup>3</sup>, 赵剑明<sup>1, 2</sup>, 朱凯斌<sup>1, 2</sup>, 朱斌<sup>1, 2</sup>

(1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室(中国水利水电科学研究院), 北京 100048; 2. 水利部水工程抗震与应急支持工程技术研究中心, 北京 100048; 3. 中国电建成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072))

**摘要:** 深厚覆盖层土体具有显著的原位结构效应, 如何考虑原位结构效应确定其本构模型参数, 关系安全评价结果的可靠性。对覆盖层深部粉质黏土开展了原位旁压测试, 测得了其荷载-位移曲线, 确定了相应深度处初始压力、承载力特征值和旁压模量等力学指标特征值。联合原位旁压试验和室内三轴试验结果, 采用基于和声算法的PBP3反分析程序, 确定了覆盖层深部粉质黏土的本构模型参数。分别采用反分析参数和室内试验参数模拟了旁压试验过程, 与实测荷载位移曲线进行了对比, 论证了反分析参数的合理性。

**关键词:** 深层粉质黏土; 原位结构效应; 旁压试验; 参数反分析

中图分类号: TU413 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S2-0155-05

作者简介: 杨玉生(1980—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程方面的科研咨询工作。E-mail: yangysh@iwhr.com.

## Pressuremeter tests and parameter back analysis of deep silty clay

YANG Yu-sheng<sup>1, 2</sup>, LIU Xiao-sheng<sup>1, 2</sup>, PENG Wen-ming, ZHAO Jian-ming<sup>1, 2</sup>, ZHU Kai-bin<sup>1, 2</sup>, ZHU Bin<sup>1, 2</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin IWHR, Beijing 100048, China; 2. The Ministry of Water Conservancy and Water Engineering Seismic Emergency Support Engineering Technology Research Center, Beijing 100048, China;  
3. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** The deep overburden layer has significant in-situ structural effects, and how to determine the constitutive model parameters by considering the in-situ structure effects is related to the reliability of safety assessment results. The in situ pressuremeter tests are carried out on the silty clay in deep overburden layer, and the load-displacement curves are measured, and the characteristic values of mechanical indexes such as bearing capacity characteristic value and pressuremeter modulus at corresponding depths are determined. Combined with the results of the in-situ pressuremeter tests and laboratory triaxial test, the constitutive model parameters of silty clay in deep overburden are determined by using the PBP3 back analysis program based on the harmony algorithm. The process of the pressuremeter tests is simulated by using the back analysis parameters and laboratory test parameters respectively, and the rationality of the back analysis parameters is demonstrated by comparing with the measured load-displacement curves.

**Key words:** deep silty clay; in-situ structural effect; pressuremeter test; parameter back analysis

## 0 引言

伴随着中国西北和西南地区水电资源的开发, 将越来越多地遇到覆盖层上建坝的问题。而土石坝及地基覆盖层数值计算及评价结果是否可靠, 主要取决于计算所采用的计算模式能否正确反映土体的应力应变关系(包括剪胀或剪缩等特性)及强度特性(包括强度硬化和软化特性)等规律特征, 以及确定的模型参数是否反映原位土体的实际情况<sup>[1-2]</sup>。目前人们已经认识到, 要建立考虑所有影响因素、适合所有土类及所有工程问题的统一模型是不现实的, 而只能针对不同的土类及不同的工程问题, 考虑主要影响因素, 采用简单、实用的土体本构模型。同时, 更重要的是对选

定的土体本构模型, 合理地确定计算所需的本构模型参数<sup>[3-6]</sup>。在计算模式方面, 国内外应用最广的是以邓肯-张双曲线模型为代表的非线性弹性模式, 已积累了丰富的使用经验。

传统的确定覆盖层和土石坝筑坝材料力学特性参数的方法, 主要包括室内试验和现场试验, 但已有研究<sup>[7-13]</sup>表明, 深厚覆盖层土体具有显著的原位结构效应, 单纯的室内试验或现场试验难以满足考虑原位结构效应确定土体本构模型参数的要求。在工程实践中, 依据监测资料采用反分析技术确定土体的本构模型参

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0404905); 国家自然科学基金项目(51679264, 51209234)

收稿日期: 2022-12-06

数也是一种方法，但依据监测资料的反分析来不及指导当前工程设计，而更有意义的是在设计阶段能够准确确定覆盖层地基土体的本构模型参数，这是目前研究中较少涉及的一个问题。

本文结合某拟建于深厚覆盖层上的大型土质心墙坝工程，进行深部粉质黏土现场旁压试验，测得其荷载-位移曲线，将测得的荷载-位移信息代替工程建设中监测信息，作为反分析的位移输入真值，基于和声算法反分析确定深部粉质黏土的本构模型参数；通过基于室内试验参数和反分析参数的计算值与实测值的对比，验证了反分析结果的合理性。

## 1 深层粉质黏土旁压试验

某高土石坝拟建于深厚覆盖层上，其上部为厚度12~20 m的砂卵砾石层（④层），其下为两层含砾中粗砂层，厚度分别为37~54 m（③-3层）和150~170 m（③-1层），其间夹有厚度为20 m左右的粉质黏土层（③-2层）。现场进行了3个钻孔的原位旁压试验，限于篇幅，本文仅对钻孔404进行介绍。其测试深度分别为64.5 m和67.2 m，对应上覆有效应力分别为750 kPa和776 kPa，旁压荷载位移曲线如图1所示。由图1可知，旁压试验曲线形态完整，明显分为3个阶段，说明钻孔质量和旁压试验质量较好。随荷载增加，初始阶段（I段）径向位移迅速增大，实际上是钻孔卸荷后施加旁压荷载后的压密阶段；似弹性阶段（II段）径向位移随压力增大而近似线性增大；塑性变形阶段（III段）径向位移随压力增大而迅速增大。旁压试验结果汇总见表1。

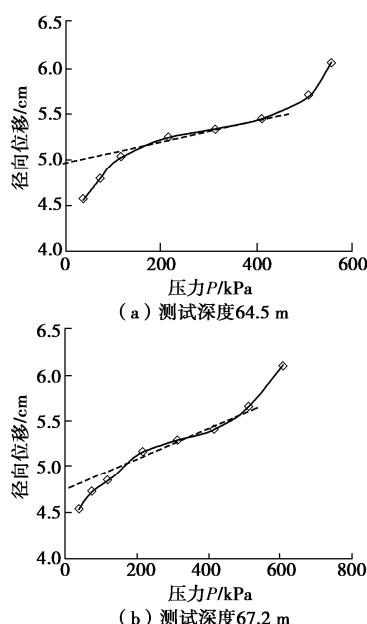


图1 ③-2 层粉质黏土层旁压荷载-位移关系曲线

Fig. 1 Load-displacement curves of silty clay layer ③-2 by pressuremeter tests

表1 钻孔404旁压试验成果汇总表

Table 1 Summary of pressuremeter tests of borehole 404

编号	土层 描述	试验 深度 <i>H/m</i>	上覆 有效 压力 <i>P<sub>f/kPa</sub></i>	临塑 压力 <i>P<sub>L/kPa</sub></i>	极限 特征值 <i>F<sub>ak/kPa</sub></i>	承载力 <i>E<sub>m/MPa</sub></i>	旁压模 量
							<i>P<sub>f/kPa</sub></i>
③-2	粉质 黏土	64.5	750	420	600	310	4.65
③-2	粉质 黏土	67.2	776	410	730	280	3.94

## 2 覆盖层深部土体参数反分析及验证

### 2.1 反分析流程

反分析采用自主研发的PBP3程序，流程图见图2所示。该程序采用和声算法进行初值范围内的参数优化，具有良好的全局寻优能力。其中，参数初值范围采用室内试验结合工程类比确定。

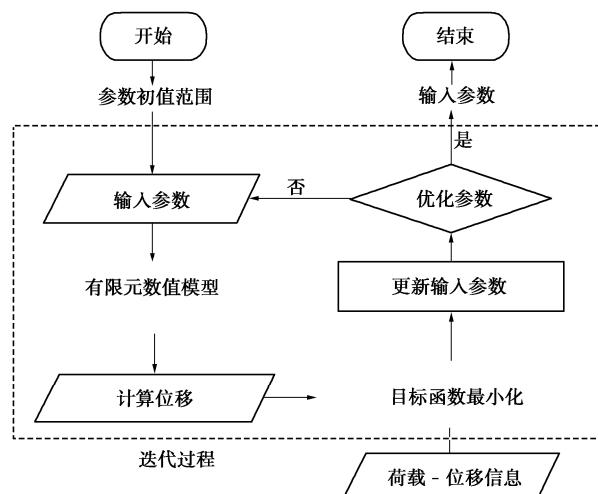


图2 反分析流程图

Fig. 2 Flow chart of back analysis

旁压试验有限元模拟通过单元刚度聚集的方法来实现<sup>[14-15]</sup>，该模拟方法能够极大地提高有限元程序效率，尤其是能够极大地提高需要反复调用正演程序的反分析程序效率。

基于旁压试验的位移反分析过程就是寻找与位移实测值相比误差最小的位移计算值所对应的邓肯-张模型参数的过程。为便于分析，以位移计算值与实测值的误差平方和最小作为确定反分析参数值的依据，即当反分析中得到的参数所对应的计算值与旁压试验中实测的位移值最接近时，该参数即为反分析值。

目标函数见公式(1)：

$$\min(F(\nu)) = \sum_{i=1}^m [u_i(\nu) - u_i^*]^2 ,$$

$$v_{\min} \leq v_i \leq v_{\max}, \quad (1)$$

式中  $v$  为待反分析的本构模型参数;  $m$  为用于反分析的荷载级数;  $u_i(v)$  为反分析获得参数对应的第  $i$  级荷载下的计算位移值;  $u_i^*$  为第  $i$  级荷载下的实测位移值。

## 2.2 待反分析参数的选择

在位移反分析理论研究和实际应用中, 反分析参数的选择十分重要。过多的反分析参数可能会带来反分析结果不唯一、反分析工作量过大和反分析精度降低三个方面的问题<sup>[16-17]</sup>。因此, 在应用反分析技术进行模型参数反分析时, 应合理地确定待反分析参数。需要从设计意图出发, 抓住问题的主要矛盾, 尽可能地消减反分析参数的个数; 尽量选择位移反应量较大的参数作为反分析对象, 涉及到位移对参数的敏感程度。

邓肯-张  $E-B$  模型包含了  $k$ ,  $n$ ,  $k_b$ ,  $m$ ,  $R_f$ ,  $\Delta\varphi$ ,  $\varphi_0$  (或  $c$ ,  $\varphi$ ) 共 7 个参数。敏感性分析表明, 位移对  $k$  和  $k_b$  的敏感性较强, 对  $n$ ,  $m$  的敏感性较弱<sup>[18]</sup>。强度指标  $\Delta\varphi$ ,  $\varphi_0$  (或  $c$ ,  $\varphi$ ) 是土力学中的常用参数,  $R_f$ ,  $\Delta\varphi$ ,  $\varphi_0$  (或  $c$ ,  $\varphi$ ) 可以通过现场大型直剪测试直接确定。此外, 大量试验表明, 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  $R_f$ ,  $\varphi$ ,  $\Delta\varphi$  (或  $c$ ,  $\varphi$ ) 试验结果和原级配材料所得结果基本一致, 且  $R_f$ ,  $\varphi$ ,  $\Delta\varphi$  (或  $c$ ,  $\varphi$ ) 受现场原位结构性影响较小。因此, 在进行反分析时, 可直接采用大型静力三轴试验结果给定参数  $\varphi$ ,  $\Delta\varphi$  (或  $c$ ,  $\varphi$ ) 及  $R_f$  的值, 虽然变形对  $n$  和  $m$  两个参数的敏感性较低, 但考虑到  $n$ ,  $m$  的确定与  $k$  和  $k_b$  的确定实际上是同一个过程。因此, 将参数  $k$ ,  $n$  及  $k_b$ ,  $m$  选定为待反分析的参数。

## 2.3 室内三轴试验结果

表 2 给出了深层粉质黏土室内大型三轴试验获得的邓肯-张模型参数。试验结果显示该黏土层性质较差, 与相应埋深土体性质的一般认识规律不符。

表 2 邓肯-张模型参数室内试验值

Table 2 Parameters of Duncan-Chang model obtained from laboratory tests

土样名	土层类 称	干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	$\varphi_d$	$c_d$	$k$	$n$	$k_b$	$m$	$R_f$
③-2	粉质 黏土	1.51	30.4	34.1	184	0.36	118	0.25	0.76
		1.47	29.8	30.6	175	0.34	109	0.23	0.74

## 2.4 参数反分析结果及验证

在室内试验结果的整理上, 相同控制条件下, 获取的试验参数差异可能是成倍的, 依据试验结果结合工程类比, 设定初值范围下限为试验值的 1/4, 上限

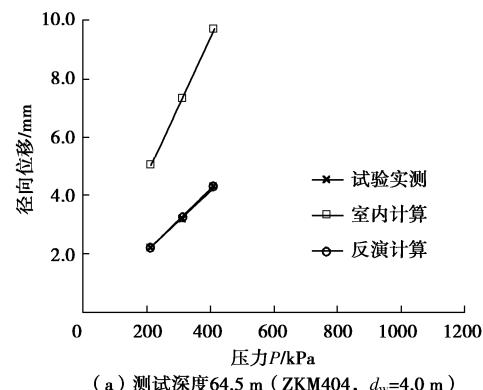
为试验值的 4 倍。将旁压荷载 - 位移信息作为输入真值, 采用 PBP3 程序基于和声算法通过反分析确定粉质黏土的变形参数, 结果见表 3。

表 3 基于旁压试验的反分析邓肯-张模型参数值

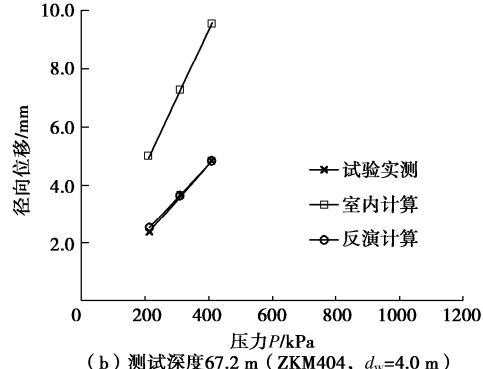
Table 3 Parameter back analysis values of Duncan-Chang model based on pressuremeter tests

编号	土层 类型	试验深 度 $H/m$	上覆压力 $/kPa$	$k$	$n$	$k_b$	$m$
③-2	粉质 黏土	64.5	750	421	0.348	385	0.463
③-2	粉质 黏土	67.2	776	366	0.354	306	0.467

由表 2 和表 3 可知, 粉质黏土  $k$  值和  $k_b$  的平均值分别约为试验值的 200% 和 300%,  $n$  和  $m$  分别为试验值的 100% 和 190%。依据室内试验参数值和反分析参数值, 对各测试点分别进行旁压试验有限元分析模拟, 得到不同压力下的相应计算位移值, 并与实测位移值对比, 如图 3 所示。



(a) 测试深度 64.5 m (ZKM404,  $d_w=4.0$  m)



(b) 测试深度 67.2 m (ZKM404,  $d_w=4.0$  m)

图 3 粉质黏土层计算荷载 - 位移曲线与实测值对比

Fig. 3 Comparison between calculated load-displacement curves and measured values of silty clay layer

由图 3 可知, 采用反分析参数的计算旁压曲线与实测旁压试验曲线一致性很好, 而采用室内试验参数的计算曲线与实测旁压曲线相去甚远, 室内试验参数计算径向位移显著大于实测位移。表明覆盖层地基土体的原位结构性、原位级配及原位密度等因素的影响

显著, 考虑这些因素的影响有重要意义。

### 3 结语

本文开展了深层粉质黏土原位旁压试验, 确定了其荷载-位移曲线。在室内三轴试验和工程类比确定反演参数初值范围基础上, 采用全局寻优能力强的和声算法, 反分析确定了深层粉质黏土的本构模型参数并进行了合理性验证。

研究表明, 基于反分析参数的计算荷载-位移曲线与实测荷载-位移曲线似弹性阶段吻合很好, 而室内试验参数计算荷载-位移曲线与实测值差异很大。说明覆盖层原位土体具有显著的原位结构效应, 考虑原位结构效应确定覆盖层地基的工程力学参数, 对覆盖层上高土石坝工程安全评价有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 蒋彭年. 土的本构关系[M]. 北京: 科学出版社, 1982. (JIANG Peng-nian. Constitutive Relation of Soil[M]. Beijing: Science Press, 1982. (in Chinese))
- [2] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983. (HUANG Wen-xi. Engineering Properties of Soil[M]. Beijing: Water Conservancy and Hydropower Press, 1983. (in Chinese))
- [3] NAYLOR D J. Stress-Strain Laws for Soil, Development in Soil Mechanics[R]. Edited by Scott C R, 1975.
- [4] 曾以宁, 屈智炯, 刘开明, 等. 土的非线性  $K-G$  模型的试验研究[J]. 成都科技大学学报, 1985, 17(4): 143–149. (ZENG Yi-ning, QU Zhi-jiong, LIU Kai-ming, et al. An experimental study of nonlinear  $K-G$  model for soils[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1985, 17(4): 143–149. (in Chinese))
- [5] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989. (XIE Ding-yi. Soil Dynamics[M]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 1989. (in Chinese))
- [6] 顾淦臣. 土石坝地震工程[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989. (GU Gan-chen. Earth Dam Earthquake Engineering[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1989. (in Chinese))
- [7] 刘小生, 汪闻韶, 赵冬. 饱和原状砂土的静、动力强度特性试验研究[J]. 水力学报, 1991, 22(11): 41–46. (LIU Xiao-sheng, WANG Wen-shao, ZHAO Dong. Experimental study on static and dynamic strength characteristics of saturated sandy soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 22(11): 41–46. (in Chinese))
- [8] 刘小生, 赵冬, 汪闻韶. 原状结构性对饱和砂土动力变形特性影响试验研究[J]. 水力学报, 1993, 24(2): 32–42. (LIU Xiao-sheng, ZHAO Dong, WANG Wen-shao. Experimental study on dynamic deformation characteristics of saturated sand with shape structure[J]. Effects of in situ fabric on the dynamic deformation behavior of saturated sand[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 24(2): 32–42. (in Chinese))
- [9] 刘小生, 汪闻韶, 常亚屏. 饱和原状砂动力特性研究[R]. 国家自然科学基金重大项目“岩土与水工建筑物相互作用”研究成果汇编, 1992. (LIU Xiao-sheng, WANG Wen-shao, CHANG Ya-ping. Study on Dynamic Characteristics of Saturated Undisturbed Sand[R]. Compilation of the Research Achievements on the Interaction Between Rock and Soil and Hydraulic Structures in Major Projects of the National Natural Science Foundation of China, 1992. (in Chinese))
- [10] 刘启旺, 杨玉生, 刘小生, 等. 考虑原位结构效应确定深厚覆盖层土体的动力变形特性参数[J]. 水力学报, 2015, 46(9): 1047–1054. (LIU Qi-wang, YANG Yu-sheng, LIU Xiao-sheng, et al. Test of dynamic deformation parameters of deep alluvial soils considering in-situ structural effects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9): 1047–1054. (in Chinese))
- [11] 杨玉生, 刘小生, 赵剑明, 等. 考虑原位结构效应确定深厚覆盖层土体的动强度参数[J]. 水力学报, 2017, 48(4): 446–456. (YANG Yu-sheng, LIU Xiao-sheng, ZHAO Jian-ming, et al. Determination of liquefaction resistance of deep alluvial soils considering in-situ structure effects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(4): 446–456. (in Chinese))
- [12] 杨玉生, 刘小生, 汪小刚, 等. 覆盖层地基和筑坝土石料本构模型参数反分析研究进展[C]// 第六届中国水利水电岩土力学与工程学术研讨会, 2016: 94–102. (YANG Yu-sheng, LIU Xiao-sheng, WANG Xiao-gang, et al. Research progress on back analysis of constitutive model parameters of alluvial foundation and rockfill materials[C]// The 6th China Water Conservancy and Hydropower Geotechnical Mechanics and Engineering Symposium, 2016: 94–102. (in Chinese))
- [13] 杨玉生, 刘小生, 赵剑明, 等. 基于计算结果和监测资料的坝基覆盖层沉降对比分析[C]// 土石坝工程—面板与沥青混凝土防渗技术交流会, 2015: 129–135. (YANG Yu-sheng, LIU Xiao-sheng, ZHAO Jian-ming, et al. Comparative analysis of dam foundation settlement based on

- calculation results and monitoring data[C]// Proceeding for Earth Dam Engineering: Anti-seepage Technology in Face Slab and Asphalt Concrete, 2015: 129 - 135. (in Chinese))
- [14] 刘小生, 汪小风, 马怀发, 等. 旁压试验反演邓肯-张模型参数方法研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 601 - 606. (LIU Xiao-sheng, WANG Xiao-gang, MA Huai-fa, et al. Study on back-analysis method of constitutive parameters for Duncan-Chang model based on in-situ pressuremeter tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 601 - 606. (in Chinese))
- [15] 马怀发, 孔俐丽, 侯淑媛, 等. 基于旁压试验反分析土体本构参数的有限元方法[J]. 水利水电技术, 2005, 36(6): 58 - 60, 64. (MA Huai-fa, KONG Li-li, HOU Shu-yuan, et al. FEM for inverse analysis on soil constitutive parameters based on pressuremeter test[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(6): 58 - 60, 64. (in Chinese))
- [16] 杨志法, 王思敬, 冯紫良, 等. 岩土工程反分析原理及应用[M]. 北京: 地震出版社, 2002. (YANG Zhi-fa, WANG Si-jing, FENG Zi-liang, et al. Principle and Application of Back Analysis in Geotechnical Engineering[M]. Beijing: Seismological Press, 2002. (in Chinese))
- [17] 吕爱钟, 蒋斌松. 岩石力学反问题[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998. (LÜ Ai-zhong, JIANG Bin-song. Inverse Problem of Rock Mechanics[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1998. (in Chinese))
- [18] 杨玉生, 刘小生, 赵剑明, 等. 邓肯 E-B 模型参数敏感性分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2013, 11(2): 81 - 86. (YANG Yu-sheng, LIU Xiao-sheng, ZHAO Jian-ming, et al. Parameter sensitivity analysis of Duncan E-B model[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013, 11(2): 81 - 86. (in Chinese))

(编校: 明经平)