

邓肯—张非线性材料模型参数优化计算方法

陈 江¹, 赵云川¹, 李朝政¹, 韦建平²

(1. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院科学研究分院, 云南 昆明 650033 ;

2. 陕西省渭南市公路管理处, 陕西 渭南 714000)

摘要 :以 SL237—1999《土工试验规程》建议的计算方法为依据,以邓肯—张 $E-B$ 模型 K, n 参数的计算为主线,提出了一种邓肯—张非线性材料模型参数优化计算方法。该方法首先得到 5 种拟合方案的参数计算结果,以此为依据确定 K, n 参数的二维矩形区域,然后在该区域内随机搜索与试验结果符合较好的参数点构成有效点集,根据有效点集确定优选参数。该方法综合考虑了 5 种拟合方案的计算结果,得到的优选参数是试验数据的充分体现,与规程建议的方法相比更具代表性。

关键词 :土石料;邓肯—张非线性材料模型;三轴压缩试验;参数优化

中图分类号 :TU411.93

文献标志码 :A

文章编号 :1006-7647(2012)01-0027-03

Parametric optimization method for Duncan-Zhang nonlinear material model // CHEN Jiang¹, ZHAO Yun-chuan¹, LI Chao-zheng¹, WEI Jian-ping² (1. Scientific Research Institute, HydroChina Kunming Engineering Corporation, Kunming 650033, China; 2. Weinan Highway Management Office of Shanxi Province, Weinan 714000, China)

Abstract :Based on the method suggested by the Chinese specification of soil test (SL237—1999), a parametric optimization method for Duncan-Zhang nonlinear material model is proposed by regarding the computation of K and n of Duncan-Zhang $E-B$ model as the main clue. Firstly, the calculated results of K and n of five fitting schemes are obtained. Thus, the 2D rectangle area of K and n is determined. Then the efficient point sets which have good accordance with the test results are randomly searched in this area. Finally, the optimized parameters are determined according to the efficient point sets. The proposed method comprehensively considers the calculated results of five fitting schemes, and the yielded optimized parameters adequately reflect the test data. To this end, this method is more representative than the one suggested by the Chinese specification of soil test (SL237—1999).

Key words :earth-rock material; Duncan-Zhang nonlinear material model; triaxial compression test; parametric optimization

土石坝是建坝历史最悠久的一种坝型,具有坝基适应性强、充分利用当地材料的优势,数量最多。据国际大坝委员会 20 世纪 80 年代统计,在已建的高度超过 15 m 的大坝中,土石坝占了 80% 以上^[1]。我国是世界上建坝数量最多的国家,据 2005 年统计,我国坝高超过 30 m 的大坝中,土石坝占 59%,堆石坝占 8%。近几年,我国一批 300 m 级的高土石坝开始建设,如糯扎渡(261.5 m)、古水(305 m)、两河口(293 m)、双江口(314 m)等。土石料是土石坝的主要筑坝材料,在土石坝的应力应变数值分析中,邓肯—张非线性材料模型是应用最广的土石料本构模型,如岩土工程商用软件 GeoStudio 中含有这种本构模型,ANSYS^[2],ADINA^[3],FLAC^{3D}^[4-5]中均有该模型的二次开发应用。另外,该模型也可作为水泥土^[6]和粉煤灰^[7]的力学本构模型。

邓肯—张非线性材料模型参数主要通过室内三轴压缩试验获得,采用 SL 237—1999《土工试验规

程》^[8]建议的计算方法(以下简称规程方法)得到的模型参数不尽理想,而 DL/T 5355—2006《水电水利工程土工试验规程》^[9]中没有明确初始切线模量 E_i 和主应力差渐近值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 的具体拟合方案。因此,在邓肯—张非线性材料模型参数计算时,往往需要根据经验反复调整拟合方案以获得合理的参数,如文献[10]中的适线法。这种后处理方式效率较低,且调整方法也难以统一。为此,本文提出一种邓肯—张非线性材料模型参数优化计算方法,实现了模型参数的优化。

1 模型参数计算结果的不唯一性

邓肯—张非线性材料模型分为 $E-B$ 模型和 $E-\mu$ 模型两种,本文以 $E-B$ 模型为主线进行分析。

邓肯—张 $E-B$ 模型的具体表述详见相关规程, $E-B$ 模型参数计算结果的不唯一性主要表现在 K, n, K_b, m 这 4 个试验常数,其中 K, n 与切线模量相

关, K_b, m 与体积模量相关。

根据康德纳的建议,在 σ_3 为常量下,三轴试验的应力-应变关系近似为双曲线关系,可表示为

$$\frac{\epsilon_a}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\epsilon_a \tag{1}$$

式中: ϵ_a 为轴向应变, 10^{-6} ; $\sigma_1 - \sigma_3$ 为主应力差, kPa; a, b 分别为初始切线模量 E_i 的倒数和主应力差渐近值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 的倒数, SL237—1999《土工试验规程》^[8]规定:采用应力水平 70% 和 95% 2 点的试验结果求得 a 和 b 值。

根据简布对压缩试验的研究,初始切线模量与固结压力有以下近似关系:

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \tag{2}$$

式中: E_i 为初始切线模量, kPa; σ_3 为围压, kPa; p_a 为大气压力, kPa。

在双对数坐标下, $E_i/p_a \sim \sigma_3/p_a$ 基本呈线性关系,拟合出一条直线,该直线的斜率为 n ,截距为 K 。

同一围压下,一组三轴试验至少会有 30 个以上的记录点,仅采用 2 个试验点进行式 (1) 的线性拟合,显然代表性不够,这也就是采用规程方法得到的参数计算结果不理想的根本原因。为此,在进行式 (1) 拟合时,本文拟定了 5 种拟合方案:①采用规程^[8]建议的方案;②采用全部试验点;③采用剔除软化点后的全部试验点;④采用主应力差破坏值或体积应变最大值 70% ~ 100% 之间的试验点;⑤采用主应力差破坏值或体积应变最大值 70% ~ 95% 之间的试验点。采用上述 5 种拟合方案对某土料的三轴试验结果进行处理,得到的 $E-B$ 模型 K, n, K_b, m 参数对比见图 1 和表 1。

表 1 各方案得到的 $E-B$ 模型参数

方案	K	n	K_b	m
1	225.0	0.43	234.0	0.19
2	192.2	0.45	105.9	0.40
3	174.8	0.48	105.9	0.40
4	297.5	0.35	55.8	0.47
5	237.3	0.41	57.5	0.48

从图 1 和表 1 可以看出:各方案得到的 $E-B$ 模型参数各不相同,有的差别较大,说明 $E-B$ 模型参数的计算结果与式 (1) 的拟合方案密切相关,具有不唯一性。

2 邓肯-张 $E-B$ 模型参数优化计算原理

在规程方法中,切线弹性模量的拟合仅利用 2 个试验点的数据,切线体积模量的拟合仅利用 1 个试验点的数据,其拟合结果的代表性是片面的,不足以代表整条试验曲线。因此,本文提出了参数优化计算方法,该算法首先得到 5 种拟合方案的参数计算结果,下面以 K, n 值为例说明其优化计算步骤:

- a. 将 5 个拟合方案得到的 5 个 K, n 点绘制在二维半对数坐标中,根据这 5 个点确定一个二维矩形区域。
- b. 矩形区域的中心取为这 5 个点的中心,即中心点的 $\lg K, n$ 值分别为这 5 个点 $\lg K, n$ 值的平均值。
- c. 设矩形区域中心点的 $\lg K$ 值与这 5 个点 $\lg K$ 值的极差为 l ,矩形区域中心点的 n 值与这 5 个点 n 值的极差为 w ,则令矩形区域的边长为 $4l$,宽度为 $4w$,由此即确定了该二维矩形区域。
- d. 在该二维矩形区域中随机生成 N 个点 ($N \geq 1000$) 根据每个点所代表的参数 K, n ,由式 (2) 可得各围压下的切线模量,由此可得式 (1) 中各围压下

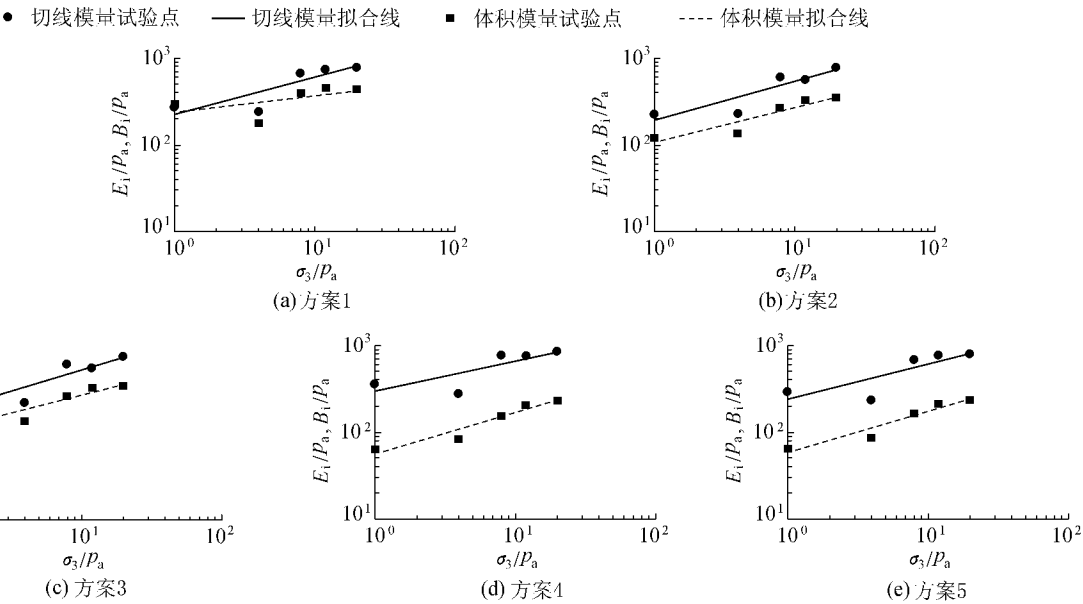


图 1 各方案 $E-B$ 模型参数计算图解

的 a 值,令破坏比 R_f 为 5 种方案得到的破坏比的平均值,由此可得式(1)中各围压下的 b 值。

e. 各国压下的 a, b 确定后,即可得各国压下主应力差与轴向应变的双曲线关系式(1),将该关系式得到的结果与试验结果对比,可得二者的误差。

f. 对随机生成的 N 个点循环计算误差值,令 N 个点的误差最小值为 t_{ol} ,误差值小于 $p(1.1 \leq p \leq 1.5)$ 倍 t_{ol} 的点定义为有效点。

某组三轴试验的 K, n 优化计算结果见图 2,可以看出:有些方案得到的 (K, n) 没有落到有效点集范围内,属于误差较大的点,因此,片面地选取某一方案的计算结果是不合适的。

图 2 中有效点基本集中在一个条带内,将有效点拟合成一条直线,该直线满足如下关系:

- 按方案 1 求得的 (K, n) : (225.02, 0.43)
 - 按方案 2 求得的 (K, n) : (192.18, 0.45)
 - 按方案 3 求得的 (K, n) : (174.79, 0.48)
 - 按方案 4 求得的 (K, n) : (297.50, 0.35)
 - 按方案 5 求得的 (K, n) : (237.26, 0.41)
 - 随机生成的 (K, n) 点集,共 3 000 个点
 - (K, n) 有效点集, K 值范围: [183.19, 294.11]
 - (K, n) 拟合线: $n = 2.49 - 0.86 \lg K$
 - (K, n) 随机点集中的最优点: (237.77, 0.44)
 - (K, n) 中部代表点: (232.12, 0.45)
- 破坏比 $R_f = 0.772$

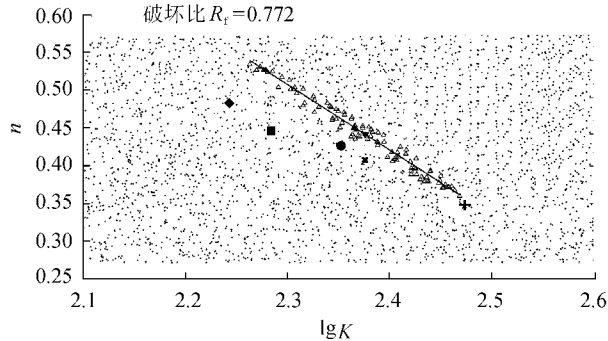


图 2 K, n 优化计算结果

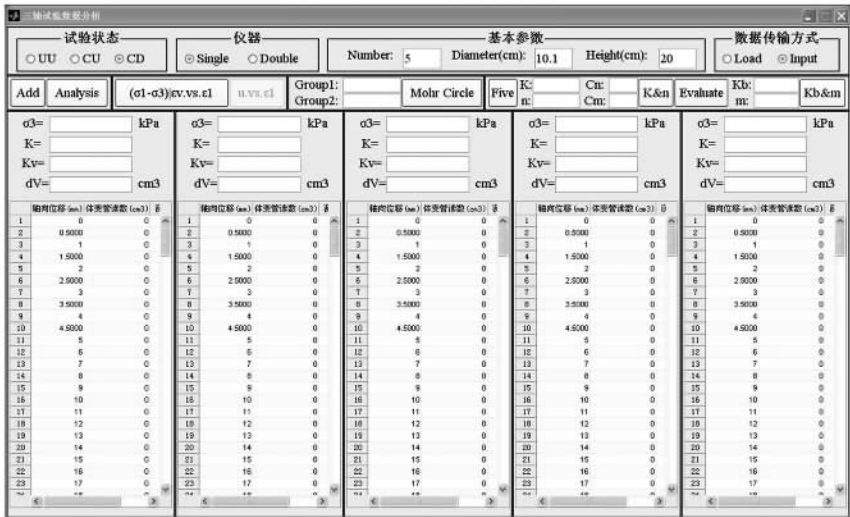


图 4 三轴压缩试验数据后处理操作界面

$$n = A + B \lg K \quad K \in [K_1, K_2] \quad (3)$$

式中: A, B 为拟合系数; K_1, K_2 为条带内有效点集 K 值的下限和上限。

直线的上限点、下限点及中点所代表的 K, n 参数的计算结果与试验结果的对比见图 3。

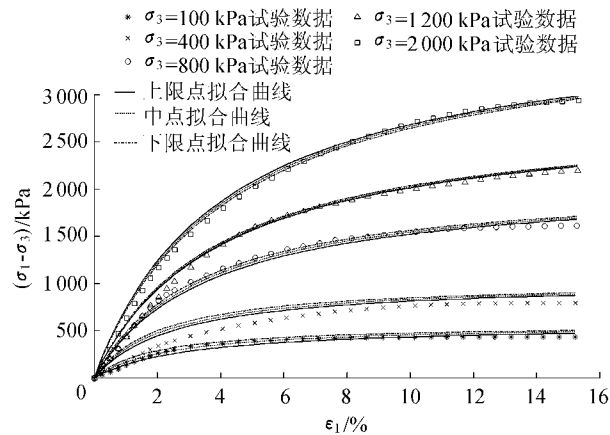


图 3 拟合结果与试验结果对比

由图 3 可以看出,拟合直线的上限点、中点、下限点 3 点的拟合结果与试验结果均符合较好,实际上,该条直线上的所有点所代表的 K, n 参数均可作为优选参数,作为折中考虑,本文建议最终的 K, n 参数取直线的中点。

实际应用中发现:当试验数据较好时,直线中点一般在最优点附近(例如图 2),这也可以作为评价试验数据是否有效的依据之一。

同理,按照上述步骤可确定 K_b, m 的优选参数值。

3 三轴试验数据后处理软件的开发

以邓肯-张非线性材料模型参数优化计算方法为核心,开发了三轴试验数据后处理软件包,操作界面见图 4。该软件可实现 3 种试验状态(UU、CU、CD)

and its impact on water development :a critical survey[J]. American Journal of Economics and Sociology ,1973 ,32(1) : 61-72.

[4] HOWE C W ,SCHURMEIER D R ,SHAW W D. Innovative approaches to water allocation :the potential for water markets [J]. Water Resources Research ,1986 ,22(4) :439-445.

[5] MATHER J. Water resources[M]. New York :John Wiley & Sons ,Inc. ,1984.

[6] WILLIAM G. Water law[M].2nd ed. Michigan : Lewis Publishers ,Inc. ,1988.

[7] KELMAN J ,KELMAN R. Water allocation for economic production in a semi-arid region[J]. Water Resources Development ,2002 , 18(3) :391-407.

[8] TEERINK J R ,MASAHIRO N. 美国日本水权水价水分配 [M]. 刘斌 ,高建恩 ,王仰仁 ,译. 天津 :天津科学技术出版社 ,2000.

[9] ROBERT B , EDWYNA H. Efficiency gains from water markets :empirical analysis of water move in Australia[J]. Agricultural Water Management ,2008 ,95 :391-399.

[10] 陈艳萍 ,吴凤平 ,吴丹. 基于模糊优选和 TOPSIS 法的流域初始水权分配模型[J]. 河海大学学报 :自然科学版 , 2009 ,37(4) :467-471.

[11] 佟金萍 ,王慧敏 ,牛文娟. 流域水权初始分配系统模型

[J]. 系统工程 ,2007 ,25(3) :105-110.

[12] 王治. 关于建立水权与水市场制度的思考[N]. 中国水利报 ,2001-12-25(4).

[13] 曾勇 ,杨志峰 ,刘静玲. 一种区域水资源初始产权配置模型[J]. 资源科学 ,2005 ,27(2) :28-32.

[14] 周念来 ,纪昌明. 区域水权初始配置模型研究[J]. 水电能源科学 ,2007 ,25(3) :6-8.

[15] 董增川. 水资源规划与管理[M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,2008.

[16] 吴丹 ,吴凤平 ,陈艳萍. 面向行业的初始水权配置系统模型构建[J]. 水利水电科技进展 ,2010 ,30(5) :29-32.

[17] 吴凤平 ,葛敏. 基于和谐性判断的交互式水权初始分配方法[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2006 ,34(1) :104-107.

[18] 汪敏 ,王丽铮 ,朱美琪. 一种交互式船型优化方法的探讨及应用[J]. 武汉理工大学学报 :交通科学与工程版 , 2002 ,26(1) :99-102.

[19] 高而坤 ,党连文. 水权制度建设试点经验总结 :大凌河流域初始水权制度建设资料汇编[G]. 北京 :中国水利水电出版社 ,2008.

[20] 吴凤平 ,吴丹 ,陈艳萍. 流域初始水权配置系统方案诊断模型[J]. 系统工程 ,2010 ,28(4) :24-29.

(收稿日期 :2011-04-07 编辑 :高建群)

(上接第 29 页)

下数据自动处理、成果图绘制、邓肯-张非线性材料模型参数计算等功能 ,与以往采用 Excel 进行三轴试验数据后处理相比 ,效率大幅度提高 ,且降低了由于操作失误而造成参数计算错误的可能性。

4 结 语

邓肯-张非线性材料模型是应用最广的土石料本构模型 ,而目前规程关于模型参数的计算方法还不尽完善。土石料种类繁多 ,目前还没有哪种本构模型能够完全适用于任何类型的土石料 ,同理 ,任何一种拟合方案都不可能做到尽善尽美。本文以规程方法为主要依据 ,提出了一种参数优化计算方法 ,该方法将 5 种方案的拟合结果进行综合分析 ,得到的优选参数是试验数据的充分体现 ,与规程方法相比 ,更具代表性。

拟合直线上的点均可作为优选参数 ,建议最终参数取直线的中点。该点一般位于最优点附近 ,这也可以作为评价试验数据是否有效的依据之一。

三轴试验在各种土工试验中周期较长、数据量较大、后处理工作量大 ,将现代计算机技术与常规土工试验相结合 ,开发相应的后处理软件 ,可以大大提高效率和降低错误发生的可能性 ,让工程技术人员

从繁琐的数据后处理中解脱出来 ,有更多的时间和精力进行试验成果的分析 and 总结。

参考文献 :

[1] 汝乃华 ,牛运光. 大坝事故与安全 :土石坝[M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,2001.

[2] 宿辉 ,党承华 ,崔佳佳. 邓肯-张非线性模型研究及其在 ANSYS 中的实现[J]. 中国农村水利水电 ,2010(6) :76-79.

[3] 曹琳 ,赵继伟. ADINA 软件的二次开发[J]. 人民黄河 , 2009 ,31(7) :96-97.

[4] 陈育民 ,刘汉龙. 邓肯-张本构模型在 FLAC^{3D} 中的开发与实现[J]. 岩土力学 ,2007 ,28(10) :2123-2126.

[5] 冷先伦 ,盛谦 ,朱泽奇 ,等. 邓肯-张模型在 FLAC^{3D} 中的实现及工程应用[J]. 建筑科学 ,2009 ,25(1) :100-105.

[6] 王军 ,丁光亚 ,潘林有 ,等. 静三轴试验中水泥土力学特性及本构模型研究[J]. 岩土力学 ,2010 ,31(5) :1407-1412.

[7] 杜学玲 ,张铁成 ,张喜发. 粉煤灰邓肯-张模型参数试验研究[J]. 路基工程 ,2006(3) :79-80.

[8] SL237—1999 土工试验规程[S].

[9] DL/T5355—2006 水电水利工程土工试验规程[S].

[10] 丁磊 ,张林洪 ,代彦芹. 邓肯-张模型参数中 K 与 n 值的计算方法研究[J]. 西北水电 ,2010(1) :19-22.

(收稿日期 :2011-06-20 编辑 :熊水斌)