

邓肯-张模型参数变化对计算结果的影响

Effects of parameters of Duncan-Chang model on calculated results

何昌荣¹, 杨桂芳²

(1. 四川大学水电学院, 四川 成都 610065; 2. 青岛市市政工程设计院, 山东 青岛 266031)

摘要: 邓肯-张非线性弹性模型共有 8 个参数, 依据试验数据并按比例分别增减每个参数后, 用有限元法计算一座土坝的应力应变等。每个参数的增减变化, 都将引起应力应变的相应变化, 有的成倍变化。本文结果对模型参数测试、计算取值、计算结果的综合判断具有参考价值。

关键词: 模型参数; 位移; 应力比

中图分类号: TU 452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2002)02-0170-05

作者简介: 何昌荣(1953-), 男, 四川自贡人, 1983 年在中国水利水电科学研究院获硕士学位, 现任四川大学教授, 主要从事岩土工程的教学和科研工作。

HE Chang-rong¹, YANG Gui-fang²

(1. College of Hydroelectric, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Institute of Civil Engineering Design, QingDao 266031, China)

Abstract: Duncan-Chang model includes eight parameters. According to tests, data analysis and computation, besides k the other seven parameters vary within limits of 10% ~ 40%, and cause 10~100 percent variety of computed displacements. While the k value may be changed to ten times because of measurement accuracy, the displacements will be also changed within ten to hundred percent. In the example of an earth dam with height of 31 m, the changes of the displacements and stress ratio are computed with each of the parameters increased or decreased 20 to 25 percent from test data. The results can be used as reference for test of model parameters and analysis of computed results.

Key words: model parameters; displacements; stress ratio

1 前言*

邓肯-张模型在国内外广泛使用近 30 年, 大量的试验结果表明, 由于取样制样、试验仪器、试验方法与过程、试验人员操作熟练程度、整理分析资料等诸多因素, 使其 8 个参数变化较大, k 值可成倍甚至成量级相差^[1-3], 用于计算所得结果的差别也较大。邓肯等人曾对该模型的参数作了初步讨论, 对几种不同类型的土给出了参数的范围, 并编制了图表^[4]。这些图表变化范围较大, 不同的取值对计算结果的影响没作进一步讨论。

本文依据文献[5]分别增减 8 个参数, 用有限元法考察对一个均质土坝的位移和应力水平的影响程度。考察某一参数时, 其余 7 个参数不变, 即保持试验取值。

2 计算结果及分析

2.1 E_i 中各参数的影响

邓肯-张 E_i 模型中有 5 个须经试验确定的参数: c , φ , k , n 和 R_f , 即摩尔-库伦准则的黏聚力 c , 内摩擦角 φ , 初始模量 E_i 与固结压力 σ_3 曲线的斜率 n , σ_3 为 100 kPa 时对应的 E_i 值 k , 以及破坏比 R_f 。

研究表明, c , φ 值对变形有很大影响。 c , φ 较低且

偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)不太大时, 就能达到较高应力水平 S 。
 $S = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)_r$, 从而使 E_i 降低, 变形增大。

(1) 黏聚力 c

黏聚力 c 的增减对水平位移 S_h 、垂直位移 S_v 、应力水平 S 的影响见图 1~3 及表 1。

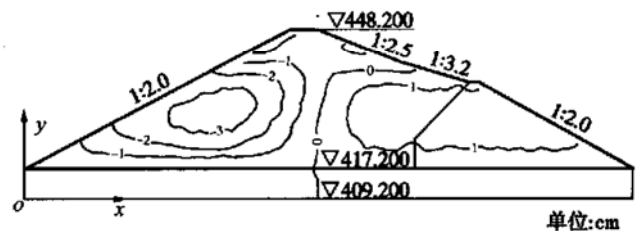


图 1 水平位移等值线图($c = 40$ kPa)

Fig. 1 Contour lines of horizontal displacements

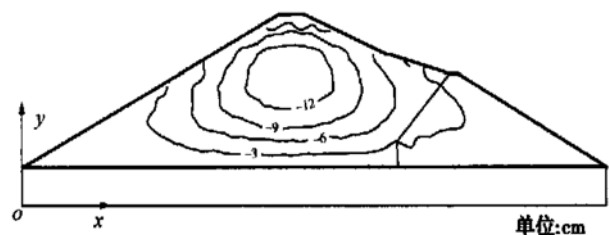


图 2 垂直位移等值线图($c = 40$ kPa)

Fig. 2 Contour lines of vertical displacements

表 1 黏聚力 c 的变化对最大位移及应力水平 S 的影响

Table 1 Effects of variation of cohesion c on maximum displacement & stress level S

c /kPa	c 变化率 / %	S_h /cm	S_h 变化率 / %	S_v /cm	S_v 变化率 / %	S	S 变化率 / %
30	- 25	- 4.67	+ 28.7	- 17.13	+ 17.8	0.940	+ 10.8
36	- 10	- 3.99	+ 10.1	- 15.80	+ 8.7	0.893	+ 5.3
40	0	- 3.63	0	- 14.53	0	0.848	0
44	+ 10	- 3.38	- 6.8	- 13.53	- 6.9	0.865	+ 2.0
48	+ 20	- 3.11	- 14.2	- 12.67	- 12.8	0.846	- 0.2

表 2 内摩擦角 φ 的变化对最大位移及应力水平 S 的影响

Table 2 Effects of Variation of inner friction angle φ on maximum displacement & stress level S

φ / (°)	φ 变化率 / %	S_h /cm	S_h 变化率 / %	S_v /cm	S_v 变化率 / %	S	S 变化率 / %
18.4	- 25	- 6.90	+ 90.3	- 27.91	+ 92.1	0.942	+ 11.1
22.1	- 10	- 4.40	+ 21.3	- 18.26	+ 25.7	0.920	+ 8.5
24.6	0	- 3.63	0	- 14.53	0	0.848	0
27.0	+ 10	- 3.05	- 15.9	- 12.16	- 16.3	0.835	- 1.5
29.5	+ 20	- 2.75	- 24.1	- 10.18	- 29.9	0.871	- 2.7

表 3 n 值的变化对最大位移及应力水平 S 的影响

Table 3 Effects of variation of n on maximum displacement & stress level S

n	n 变化率 / %	S_h /cm	S_h 变化率 / %	S_v /cm	S_v 变化率 / %	S	S 变化率 / %
0.239	- 25	- 3.54	- 2.5	- 14.16	- 2.6	0.866	+ 2.1
0.286	- 10	- 3.62	- 0.3	- 14.02	- 3.5	0.854	+ 0.7
0.318	0	- 3.63	0	- 14.53	0	0.848	0
0.350	+ 10	- 3.64	+ 0.3	- 14.02	- 3.5	0.879	- 3.7
0.382	+ 20	- 3.73	+ 2.8	- 13.92	- 4.2	0.854	- 0.7

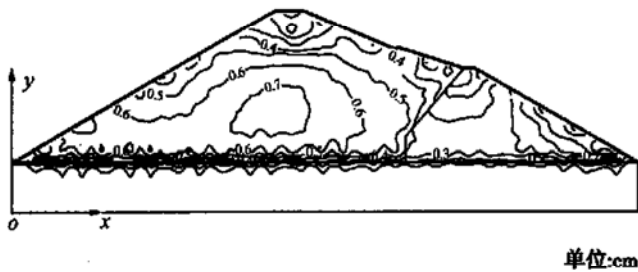


图 3 应力水平 S 等值线图 ($c = 40$ kPa)

Fig. 3 Contour lines of stress level S

由表 1 可见: ①位移随 c 值的增加而减小, 其变化率与 c 变化率大致相当; ②应力水平与 c 值增减成反比, 变化率明显小于 c 值的变化率。

图 1 为 $c = 40$ kPa 的水平位移等值线图, c 增减以后的等值线图趋势大致相同, 数值变化规律见表 1。 $c = 30$ kPa 时, 坝顶及上下游坝脚附近的最大应力水平 $S = 0.94$, 且范围也明显扩大。

(2) 内摩擦角 φ

内摩擦角的影响见表 2 及图 4。

由表 2 可见: φ 值减小 25%, 最大水平位移和垂直位移分别增加 90.3% 和 92.1%; φ 值增加 20%, 分别减小 24.1% 及 29.9%。由图 4 中可见, 高应力水平区仍在坝顶及上下游坝脚附近区域, 这就是工程中常见的坝顶附近开裂及上下游坝脚附近隆起或滑动。

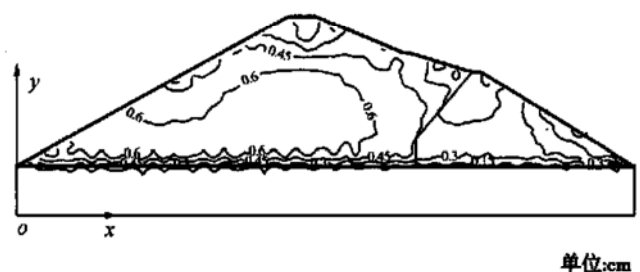


图 4 应力水平 S 等值线图 ($\varphi = 24.6^\circ$)

Fig. 4 Contour lines of stress level S

(3) n 值

初始模量 E_i 与围压力 σ_3 成指数关系, n 为指数, 其影响见表 3。

由表 3 可见, n 值增减对位移和应力水平的影响较小。当 n 增加 20% 时, 最大位移减小 4.2%; 当 n 减小 25% 时, 最大位移增加 2.6%。因此, n 值在整理分析时的局限性要小一些。

(4) 破坏比 R_f

邓肯模型定义破坏比

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (1)$$

式中 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为土的取值抗剪强度; $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 是土的理论极限抗剪强度; 多数取值 $R_f = 0.70 \sim 0.90$, R_f 的影响见表 4 及图 5。

表4 R_f 参数的变化对最大位移及应力水平 S 的影响Table 4 Effects of variation of R_f on maximum displacement & stress level S

R_f	R_f 变化率 / %	S_h / cm	S_h 变化率 / %	S_v / cm	S_v 变化率 / %	S	S 变化率 / %
0.682	-25	-2.56	-29.5	-9.95	-34.3	0.880	+3.8
0.819	-10	-3.12	-14.1	-11.82	-18.7	0.862	+1.7
0.910	0	-3.63	0	-14.53	0	0.848	0
1.000	+10	-4.00	+10.5	-15.46	+6.4	0.869	+2.5

表5 参数 D 的变化对最大位移及应力水平 S 的影响Table 5 Effects of variation of D on maximum displacement & stress level S

D	c 变化率 / %	S_h / cm	S_h 变化率 / %	S_v / cm	S_v 变化率 / %	S	S 变化率 / %
4.69	-25	-3.60	-0.8	-14.39	-0.96	0.861	+1.5
5.63	-10	-3.62	-0.3	-14.54	-0.01	0.849	+0.1
6.25	0	-3.63	0	-14.53	0	0.848	0
6.88	+10	-3.64	+0.3	-13.95	-3.9	0.882	+4.0
7.50	+20	-3.65	+0.6	-13.73	-5.5	0.854	+0.7

表6 参数 F 的变化对最大位移及应力水平 S 的影响Table 6 Effects of variation of F on maximum displacement & stress level S

F	F 变化率 / %	S_h / cm	S_h 变化率 / %	S_v / cm	S_v 变化率 / %	S	S 变化率 / %
0.109	-25	-3.83	+5.7	-14.73	+1.4	0.853	+0.6
0.131	-10	-3.78	+4.1	-14.23	-2.1	0.853	+0.6
0.145	0	-3.63	0	-14.53	0	0.848	0
0.160	+10	-3.56	-2.0	-13.77	-5.2	0.869	+2.5
0.174	+20	-3.52	-2.8	-13.73	-5.5	0.854	-0.7

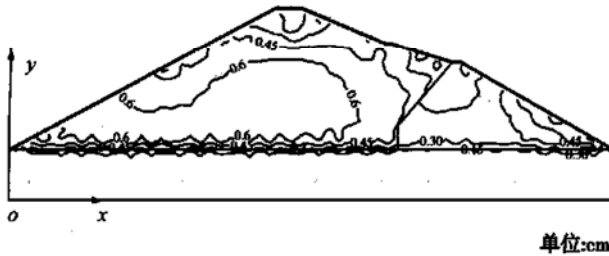
图5 应力水平 S 等值线图 ($R_f = 0.91$)Fig. 5 Contour lines of stress level S

表4中最大水平及垂直位移均随 R_f 的增加而增加。依据 R_f 的意义, R_f 值越大, 计算使用的抗剪强度 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 越接近土的理论极限抗剪强度 ($\sigma_1 - \sigma_3$)_{ult}。土体出现 ($\sigma_1 - \sigma_3$)_f 状态时, 已经产生了相应的较大变形, 濒于破坏了。

尽管表4中不论 R_f 增或减, 应力水平 S 均为增加。实际上, 在类似图5的应力水平等值线图上, 随 R_f 增加, S 值增加, 范围也趋于扩大。较高 S 区域仍出现在坝顶及上下游坝脚附近。

2.2 μ_1 中各参数的影响

切线泊松比 μ_1 涉及 D, F, G 三个参数。

(1) 参数 D

参数 D 的影响见表5。由于对位移和应力水平的改变率较小, 在坝体中分布规律也与其他参数类似, 因

此, 不再示出图形。

由表5可以看出: ①最大水平位移 S_h 随着 D 的增大而增大, 当 D 从基准数减小25%时, S_h 减小0.8%; 当 D 增大20%时, S_h 增加0.6%。②最大垂直位移 S_v 随着 D 的增大而减小, 变化率幅值为 -0.96% ~ -5.5%。③应力水平 S 随着 D 变化出现较小幅度的增减变化, 但是从给出的图形进行分析, S 值及较高 S 区域均有减小。

(2) 参数 F

F 值变化对位移和应力水平的影响也较小。位移随 F 增大而减小, 幅值 +5.7% ~ -5.5%, 见表6。应力水平虽有增减, 但总的趋势是增大。

(3) 参数 G

G 是围压力 σ_3 为 100 kPa 时的初始泊松比 μ_1 , 位移随 G 的增大而减小, 其变化幅度较大。应力水平 S 有增减变化, 但幅度小于 10%, 见表7。

由表7可见: ① G 的基准值减小25%时, 水平位移 S_h 增加53.6%; G 增加20%时, S_h 减小11.3%。② G 减小25%时, 垂直位移 S_v 增加109.0%; G 增加20%时, S_v 减小41.9%。③ G 减小25%时, S 增加9.9%; 增加20%时, S 增加7.9%。

最大位移的位置基本不变, 在距坝底 2/3 处。从上述各参数相比可看出, G 的影响最大, 是该模型的

表 7 参数 G 的变化对最大位移及应力水平 S 的影响

Table 7 Effects of variation of G on maximum displacement & stress level S

G	G 变化率 / %	S_h / cm	S_h 变化率 / %	S_v / cm	S_v 变化率 / %	S	S 变化率 / %
0.225	- 25	- 5.57	+ 53.6	- 30.79	+ 109.0	0.932	+ 9.9
0.270	- 10	- 4.07	+ 12.1	- 18.84	+ 29.7	0.848	0
0.300	0	- 3.63	0	- 14.53	0	0.848	0
0.330	+ 10	- 3.38	- 6.7	- 10.73	- 26.2	0.893	+ 5.4
0.360	+ 20	- 3.22	- 11.3	- 8.45	- 41.9	0.915	+ 7.9

表 8 参数 k 的变化对最大位移及应力水平 S 的影响

Table 8 Effects of variation of k on maximum displacement & stress level S

k	k 变化率 / %	S_h / cm	S_h 变化率 / %	S_v / cm	S_v 变化率 / %	S	S 变化率 / %
200	- 76.0	- 12.7	+ 250.2	- 44.35	+ 205.2	0.926	+ 9.2
466	- 44.1	- 6.20	+ 71.1	- 22.75	+ 56.6	0.917	+ 8.1
833	0	- 3.63	0	- 14.53	0	0.848	0
916	+ 10.0	- 3.38	- 6.8	- 13.45	- 7.4	0.835	- 1.5
999	+ 19.9	- 3.12	- 13.9	- 12.51	- 13.9	0.835	- 1.5

主要控制参数之一。位移随 G 的增大而减小, 且 G 越小, 对位移的影响越大。

2.3 参数 k 的变化与影响

k 为 $\sigma_3 = 100$ kPa 时的初始模量 E_i , 但无量纲。文献[1~ 3]及大量试验资料表明, 由于各种原因, k 值可以相差数倍到几十倍。

常规三轴试验过程中使用百分表量测轴向应变, 试验点绘在普通坐标中求取 k 值。表面上看是 $\epsilon_a \rightarrow 0$ 的纵坐标倒数, 实际上多数情况下仅求取到 $\epsilon_a = 10^{-3}$ 级的相应值^[3], 与原本物理意义相去甚远, 也是众多资料相差较大的原因之一。

本文以算例土坝的土进行了常规法($\epsilon_a \approx 10^{-3}$ 级) 和电测的小应变法($\epsilon_a \approx 10^{-5}$ 级) 求取 k 值, k 值分别为 200 和 833, 计算 k 值对位移和应力水平的影响, 见表 8 及图 6。

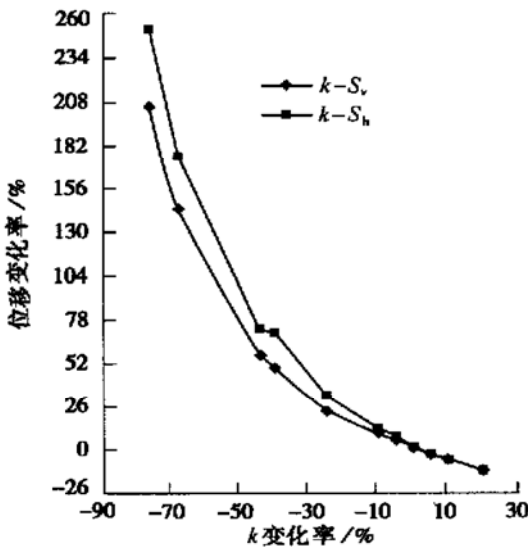


图 6 k 与位移的关系

Fig. 6 Relationships of k vs displacements

由图 6 和表 8 可见:

(1) 位移及应力水平均随 k 值的增减而增减, 当 k 成倍增减时, 也相应成倍增减。

(2) k 从 833 减小至 200, S_h 增加 250.2%, S_v 增加 205.2%, S 增加 9.2%; k 从 833 增至 999 时, S_h 减小 13.9%, S_v 也减小 13.9%, S 减小 1.5%。

应力水平 S 值的大小及范围可以判断土体的稳定程度, 当然不易成倍增减。当较高 S (比如 0.80 或 0.85 以上) 范围较大或连通成片时, 土体容易失稳。

2.4 8 个参数的综合对比

将上述 8 个参数对水平位移和垂直位移的影响绘制成图, 参见图 7 和图 8。

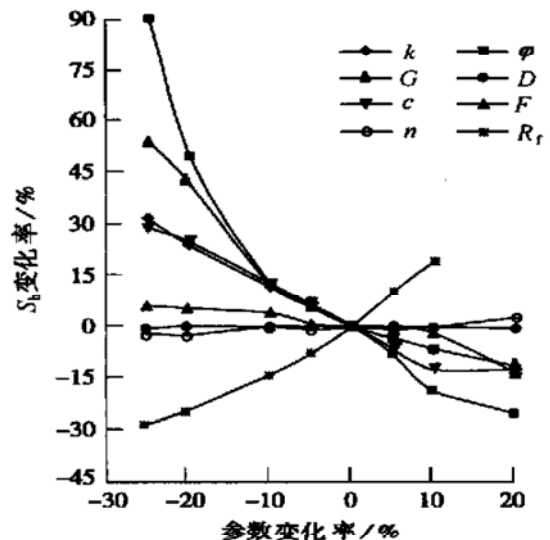


图 7 各参数与水平位移 S_h 关系

Fig. 7 Relationships of the parameters vs horizontal displacements

(1) 图 7 中 R_f 和 n 增减时, S_h 也随之增减; 其余 6 个参数变化, S_h 均成反向增减。 n 增减 - 25% ~ 20% 时, S_h 增减率 5% 以内; R_f 增减 - 25% ~ 20% 时, S_h 增

减变化率 30% 以内;特别是 R_f 增大,即 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 增大,本身就意味着变形增大及相应的应力水平增高。

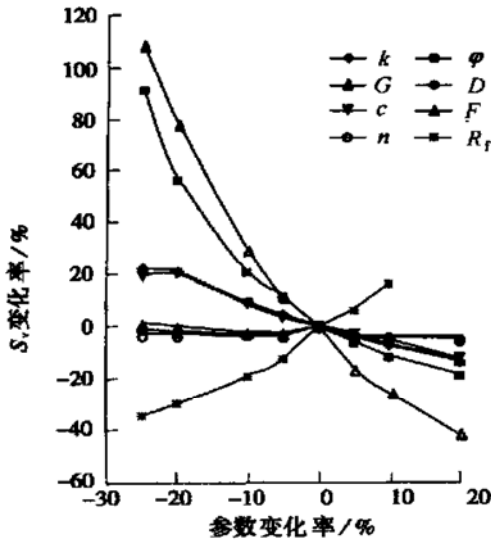


图 8 各参数与竖向位移 S_v 关系

Fig. 8 Relationships of the parameters vs vertical displacements

(2) 图 8 中 S_v 随 R_f 的增减而增减,其余 7 个参数成反向增减。

(3) 相比而言,参数 n , D 和 F 对 S_v 的影响较小,多数变化率在 10%。对位移(也含 S)影响最大的是 φ 和 G 。 φ , G 增减 -25% ~ 20%,最大位移增减可达一倍左右。特别是参数 G , φ 减小时,位移增减曲线斜率较陡,即参数的微小变化,将引起位移的较大变化。这样,对参数试验的精度要求,建议试验参数的折扣范围、计算结果的分析判断、使计算结果与工程实际观测尽可能地吻合等,都提出了更高和更复杂要求。

内摩擦角 φ 经过试验及整理分析时,已经包含有一定的误差,试验人员依据各种情况提出建议值时,相应应有减小折扣,设计计算人员使用时,还要进行折扣。因此, φ 值的变幅可达 10% ~ 40%,计算结果也可能出现上述讨论的情况。

切线泊松比 μ_t 的参数 G ,是围压力 $\sigma_3 = 100$ kPa 时的初始泊松比。对于多数土体而言,变化范围在 0.25 ~ 0.50。实际上,计算使用值与实际相差 10% ~ 30% 是较常见的。

k 值增减引起位移、应力水平的增减趋势虽不及 φ 和 G ,但是,由于 k 值的变幅可达数倍到几十倍,因此也将引起计算结果成倍相差。应该严格按原本物理学意义进行试验和分析资料,也必须改进试验及量测仪器设备,随着机电设备的改进而进步。

3 结 语

邓肯-张模型自 1970 年发表以来,各种本构模型数以百计,都有一定的适用条件应用于复杂的土体,每个模型都带有相应的参数须经试验加以确定。

邓肯-张模型中,8 个参数中除 k 值以外,由于取样制样、试验方法、试验操作熟练程度、试验仪器及量测精度、分析整理方法、建议取值及使用人员的取舍,相差 10% ~ 40% 是经常发生的事情。本文已经证明可引起位移 10% ~ 100% 的变化率。

至于 k 值,邓肯-张模型的原本物理意义是围压力 $\sigma_3 = 100$ kPa 的初始模量 E_i ,但无量纲。 E_i 在模型推导过程中明确定义为 $\epsilon_a \rightarrow 0$ 时的模量,即要求在试验过程中尽可能地量测到微小应变、土体处于弹性状态的模量。大多数土体应变 ϵ_a 从 10^{-6} 增至 10^{-2} 时,模量 E 将减小几十倍^[3]。多数试验由于量测设备精度不够,数据整理方法问题,实际是只取到 $\epsilon_a = 10^{-3}$ 级的 E ,与原定物理力学意义似有一定差距。仅就现行整理分析方法而言,也因经验方法的差异,所得结果经常相差几倍至几十倍,引起计算位移相差一倍左右。多数情况下表现为计算结果远大于实测值,主要是 k 值取值偏小。这些就是各种模型计算结果与实测相差较大的主要原因之一。

要克服上述不利因素,须提高仪器的量测精度,改变整理分析方法,对理论、试验、计算的全面深刻理解,经验的积累才能使这些先进理论和方法符合实际。

本构模型的这些问题,类似于土压力、土坡稳定分析、地基承载力等土力学的普遍问题一样,参数的影响或带来的误差比理论和方法要大得多。

参考文献:

- [1] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [2] 屈智炯. 土的塑性力学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1987.
- [3] 何昌荣. 动模量阻尼的动三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 39-48.
- [4] Duncan J M, Byrne P, Wong K S, et al. Stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stress and movements in soil[R]. San Francisco: University of California Berkeley, 1980.
- [5] 杨桂芳. 静力本构模型试验、参数确定及参数对计算结果的影响分析[D]. 成都: 四川大学, 1999.