

土体非线性模型的分段切线模量研究

王晓妮, 卢廷浩, 王 伟

(河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要 结合大量实验数据, 基于原邓肯非线性模型, 建立了土体达到抗剪强度之前分段切线模量的非线性模型, 其轴向应变 ϵ_a 与轴向压应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的比 $\epsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_a$ 曲线包括向上弯折和向下弯折 2 种, 均由两折线组成. 硬化型曲线一般可用向下弯折的折线进行拟合, 而软化型且剪胀比较明显的应力-应变关系用向上弯折的折线进行拟合. 试验结果表明, 该模型较原邓肯非线性模型能更好地模拟土的应力、应变发展情况, 与实际更加吻合.

关键词 非线性模型; 分段切线模量; 三轴试验; 初始弹性模量

中图分类号 :TU443 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2006)02-0204-04

岩土工程分析计算结果是否可靠并符合实际, 与计算所选用的土体本构模型及其计算参数是否贴近实际密切相关. 由于双曲线型的邓肯非线性模型简便直观, 并能较好地反映土体的非线性性态, 且参数易通过试验直接获得, 因而最为常用. 但是该模型采用单一双曲线描述, 可能会与实际情况有较大的差异^[1-3], 这是因为试验得到的应力-应变曲线有时难以用一条双曲线较好地模拟, 而 $\epsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_a$ 也并非成一条直线. 本文通过分析大量原状土室内试验的结果, 针对硬化土和软化土两种类型, 提出分段整理邓肯非线性模型切线模量的方法. 该方法既与试验结果较为符合, 又保持了模型的简单性^[4-5].

1 原邓肯非线性切线模量^[1]

在室内试验的基础上, Kondner 等假定土体的轴向压应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与轴向应变 ϵ_a 符合双曲线关系, 故变量 $\epsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ϵ_a 呈直线关系(图 1), 可表示为

$$\frac{\epsilon_a}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\epsilon_a \quad (1)$$

式中: a ——初始切线模量 E_i 的倒数; b ——理论双曲线渐进值的倒数. 对式(1)求导, 邓肯等推得土体的切线弹性模量为

$$E_t = \frac{1}{a} [1 - b(\sigma_1 - \sigma_3)]^2 \quad (2)$$

式(1)(2)即为原邓肯非线性模型. 由于其形式简单, 目前得到了较为广泛的应用.

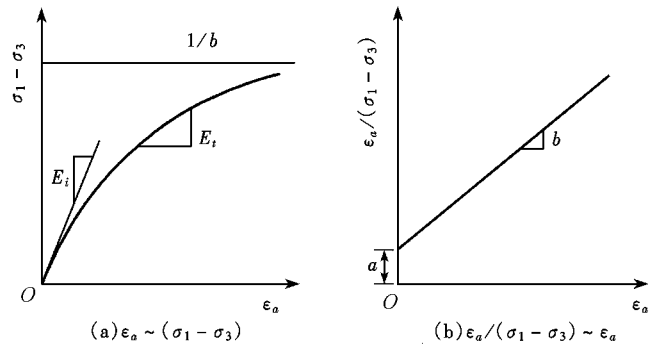


图 1 土的应力-应变关系

Fig. 1 Stress-strain curve of soil

2 三轴试验数据

实际工程中, 原邓肯非线性模型计算的初始变形偏大, 与实际有较大出入. 大量三轴试验说明 $\epsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_a$ 不是简单的直线关系, 一般呈 2 段折线, 即应力-应变曲线可用两条双曲线描述.

由于工程中土体的剪应力一般达不到其抗剪强度, 因此本文仅对土体达到抗剪强度之前的应力-应变关系进行模型拟合和讨论. 本文列举 25 组试验数据中典型的几组进行说明. 图 2 是不同围压下土样 1、土样 2、土样 3 应力-应变曲线所拟合的 $\epsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_a$ 关系曲线.

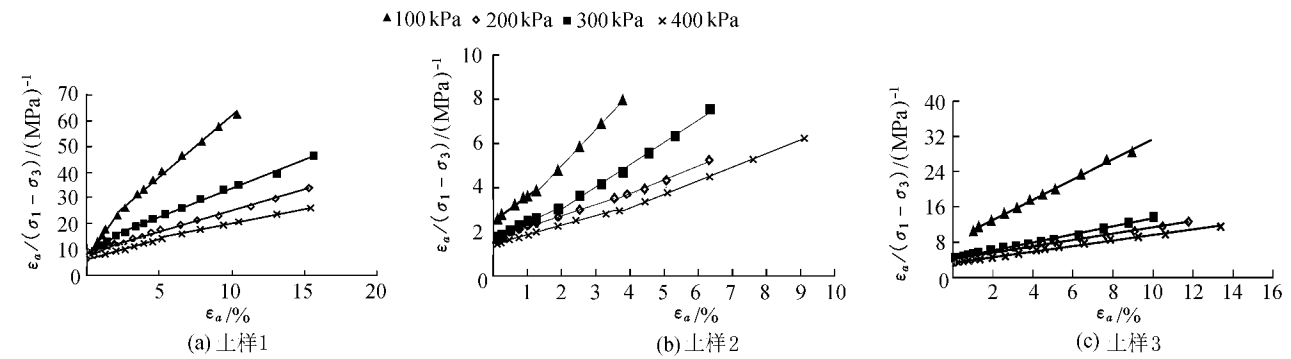


图 2 土样 $\varepsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 曲线
Fig.2 $\varepsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3)$ versus ε_a for soil specimens

3 分段切线模量^[6-8]

3.1 模型的提出

由图 2 可见,只有图 2(c)中土样 3 的 $\varepsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 曲线呈单一直线型.图 2(a)中土样 1 的 $\varepsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 曲线向下弯折,由 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 曲线知该土样属于硬化土;图 2(b)中土样 2 的 $\varepsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 曲线向上弯折,由 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 曲线知该土样属于软化土,并不是如式 (1) 所示的简单直线,因此有必要在式 (1) 的基础上对曲线采用分段模拟的方法进行修正.需要说明的是,图 2(b)描述的虽然仅是土体应变软化型曲线的硬化段,但与纯硬化型土的应力-应变曲线有明显的不同,这是因为软化型土的结构性较强,并在达到峰值强度前一般伴随有剪胀现象.

拟合呈两折线型的试验数据,则 $\varepsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 两段折线的转折点记为 $(\varepsilon_i/(\varepsilon/(\sigma_1 - \sigma_3)))_i$,见图 3. 式 (1) 可修正为

$$\begin{cases} \frac{\varepsilon_a}{\sigma_1 - \sigma_3} = a_1 + b_1 \varepsilon_a & \varepsilon_a \leq \varepsilon_i \\ \frac{\varepsilon_a}{\sigma_1 - \sigma_3} = a_2 + b_2 \varepsilon_a & \varepsilon_a > \varepsilon_i \end{cases} \quad (3)$$

由式 (2) (3),按原邓肯非线性模型的思路,土体的应力-应变曲线两段的切线模量分别为

$$\begin{cases} E_t = \frac{1}{a_1} [1 - b_1 (\sigma_1 - \sigma_3)]^2 & (\sigma_1 - \sigma_3) \leq (\sigma_1 - \sigma_3)_i \\ E_t = \frac{1}{a_2} [1 - b_2 (\sigma_1 - \sigma_3)]^2 & (\sigma_1 - \sigma_3) > (\sigma_1 - \sigma_3)_i \end{cases} \quad (4)$$

式中 a_1, b_1, a_2, b_2 的物理意义与原邓肯模型中相应的 a, b 意义相同,推求方法也相同.当 $a_1 = a_2$ 且 $b_1 = b_2$ 时,式 (4) 便与式 (2) 相同,修正模型仍然是原邓肯非线性模型.

3.2 分段切线模量转折点确定

3.2.1 硬化型土转折点

修正模型的关键在于确定转折点的位置.对于硬化型土,研究发现虽然转折点应变 ε_i 与破坏时轴向应变 ε_f 的绝对值随土样物理性质的差异变化很大,但两者的比值 $\varepsilon_i/\varepsilon_f$ 变化不大,基本区间为 0.2~0.3,见表 1.

3.2.2 软化型土转折点

对于应变软化型土,若剪胀比较明显,通过比较图 2(b)中土样 2 的 $\varepsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 曲线和图 4 中的 $\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$

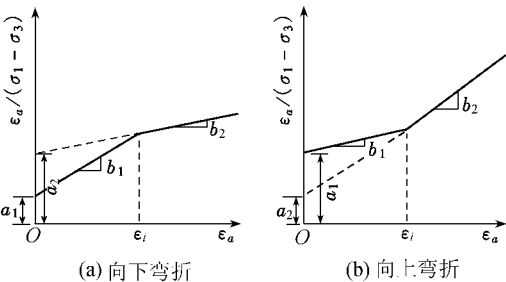


图 3 模型的修正
Fig.3 Modified model

表 1 硬化型土的比值 $\varepsilon_i/\varepsilon_f$

围压/		$\varepsilon_i/\varepsilon_f$				
kPa		土样 1	土样 4	土样 5	土样 6	土样 7
100		0.20	0.21	0.33	0.21	
200		0.13	0.23	0.33	0.22	0.33
300		0.12	0.21	0.30	0.16	0.33
400		0.34	0.13	0.25	0.13	0.34

关系曲线,发现 $\varepsilon_a(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 曲线的转折点对应的 ε_i 与 $\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ 曲线的峰值点对应的轴向应变基本一致,因此可以通过 $\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ 曲线确定 $\varepsilon_a(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 曲线的转折点坐标.

3.3 修正模型与原邓肯模型比较

由式(4)得:切线弹性模量随初始弹性模量及轴向应力差渐进值的增加而增加.原邓肯模型得到的参数 a, b 与修正模型得到的参数相比,对于硬化型土,有 $a_1 < a, b_1 > b, a < a_2, b > b_2$;对于软化型土,有 $a_1 > a, b_1 < b, a > a_2, b < b_2$.

分别在转折点前、后各取一轴向压应力,根据式(2)(4)计算所得的土样 1 和土样 2 的切线模量 E_t 列于表 2、表 3.

分析表 2、表 3 可得 (a)对于土样 1 和土样 2,由本文模型得出的前段切线模量均大于由原邓肯模型得出的前段切线模量,也将改变原单一曲线的邓肯模型计算的土体初始变形偏大的失实现象 (b)本文模型得出的土样 1 后段切线模量与原邓肯模型得出的后段切线模量差别不大 (c)本文模型得出的土样 2 的后段切线模量明显小于原邓肯模型得出的切线模量 (d)硬化型土(图 3a)土样 1 和软化型土(图 3b)土样 2 对切线模量的影响均较大.

表 2 两种模型计算的土样 1 切线模量
Table 2 Tangent modulus of soil specimen 1
calculated by two models kPa

σ_3	$\sigma_1 - \sigma_3$	修正模型			原邓肯模型		
		1/a	1/b	E_t	1/a	1/b	E_t
100	20	157	120	109	95	189	76
	150	68	213	6	95	189	4
200	20	146	236	122	104	416	94
	250	88	451	17	104	416	17
300	20	145	382	130	123	592	114
	300	111	623	30	123	592	30
400	20	160	657	150	147	764	139
	450	117	873	27	147	764	25

表 3 两种模型计算的土样 2 切线模量
Table 3 Tangent modulus of soil specimen 2
calculated by two models kPa

σ_3	$\sigma_1 - \sigma_3$	修正模型			原邓肯模型		
		1/a	1/b	E_t	1/a	1/b	E_t
100	150	404	887	279	447	686	273
	450	576	612	40	447	686	53
200	300	586	1389	360	657	1116	352
	800	980	994	37	657	1116	53
300	500	579	1965	322	579	1923	317
	1150	808	1520	48	579	1923	94
400	700	672	2404	337	745	1976	311
	1400	1527	1637	32	745	1976	63

为验证本文模型的通用性,结合土样 1、土样 2 的试验数据将本文模型与原邓肯模型进行对比,结果见图 5.由图 5 可见,本文模型与原邓肯模型相比能够更好地模拟土体的应力-应变关系,与试验数据更加吻合.

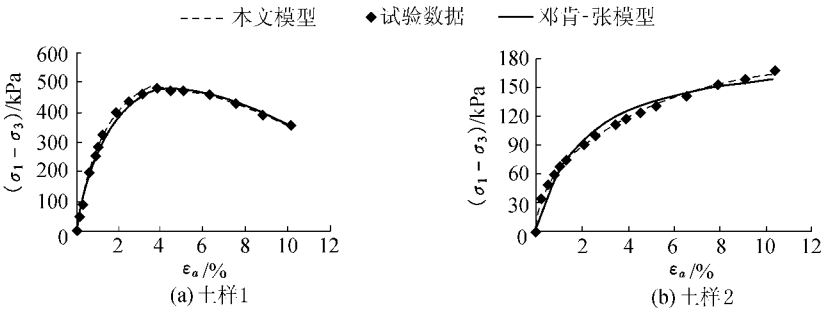


图 5 实测与模型计算曲线对比
Fig.5 Measured and calculated results of soil specimens

4 结 论

本文结合大量的试验数据,提出了一种基于土体分段切线模量的非线性模型,其 $\varepsilon_a(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 曲线包括向上弯折和向下弯折 2 种,均由两折线组成.硬化型曲线一般可用向下弯折的折线进行拟合,曲线的转

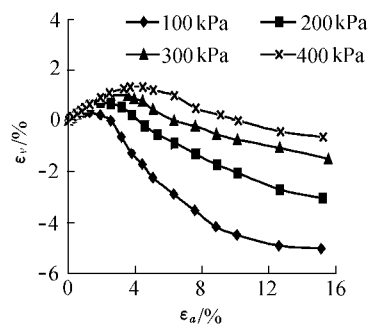


图 4 土样 2 的 $\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ 曲线
Fig.4 ε_v versus ε_a for soil specimen 2

折点在 $(0.2 \sim 0.3)\epsilon_f$ 附近,而软化型且剪胀比较明显的应力-应变关系用向上弯折的折线进行拟合,转折点对于 $\epsilon_v \sim \epsilon_a$ 曲线的峰值点.由于试验数据有限,目前只能给出转折点的大概位置,不能用某一具体公式对其进行描述,这也是今后研究的一个方面.

本文模型与原始单一曲线的原邓肯非线性模型相比能够更好地反映土体在不同阶段的应力-应变关系,与实际数据吻合得更好.

参考文献：

[1] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996 55-56.
[2] 朱珍德,张爱军,徐卫亚. 隧洞围岩拉压不同模量弹性理论的解析解[J]. 河海大学学报:自然科学版,2003,31(1):45-48.
[3] 赖勇,宋雄伟,施建勇. 土体小应变下的非线性特征试验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2005,33(3):93-97.
[4] 罗刚,张建民. 邓肯-张模型和沈珠江双屈服面模型的改进[J]. 岩土力学,2004(6):887-890.
[5] 胡应德,叶枫,陈志坚. 土体邓肯-张非线性弹性模型参数反演分析[J]. 土木工程学报,2004,37(2):54-57.
[6] 王立钟,赵志远,李玲玲. 考虑土体结构性的修正邓肯-张模型[J]. 水利学报,2004(1):83-89.
[7] 何昌荣,杨桂芳. 邓肯-张模型参数变化对计算结果的影响[J]. 岩土工程学报,2002,24(2):170-174.
[8] 尹蓉蓉,朱合华. 邓肯-张模型参数敏感性分析[J]. 华东船舶工业学院学报,2003,17(1):20-23.

Segmented tangent modulus of nonlinear soil model

WANG Xiao-ni , LU Ting-hao , WANG Wei

(Geotechnical Research Institute of Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :A segmented tangent modulus model was developed based on a great deal of triaxial compression test data and Duncan 's nonlinear model of soil. According to the model ,there were two kinds of $\epsilon_a \sim (\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_b$ curves of soil before failure ,i.e. upward bending curve and downward bending curve ,and each kind of curves was divided into two parts according to their turning points. The curve for hardening soil was fitted with downward bending lines ,while the stress-strain curve for softening soil with characteristic of dilatation was fitted with upward bending lines. Experimental result shows that the present model is better than Duncan 's nonlinear model in simulation of stress-strain curves of soil ,and the simulated result is in good agreement with test data.

Key words :nonlinear model ;segmented tangent modulus ;triaxial test ;initial elastic modulus