弹塑性耦合条件下沥青混凝土的应力－应变关系

朱　晟

（河海大学水电工程学院，江苏 南京 210098）

摘　要：三轴试验的结果表明：应用于水利工程的沥青混凝土由于自身的孔隙率小，侧向作用效应十分明显，体积变形较小且主要表现为剪胀特性。目前已有的非线性和弹塑性模型难以正确地反映复杂应力状态下的这种力学行为。文中考虑沥青混凝土不遵守关联流动法则和Drucker公设，其弹性系数伴随塑性变形过程而改变，建议了一个在弹塑性耦合基础上的双屈服面弹塑性模型，与室内三轴试验结果吻合良好。

关键词：沥青混凝土；流动法则；弹塑性耦合；本构模型

作者简介：朱　晟(1965－)，男，教授，主要从事土石坝等水工岩土方面的研究。

0 引　　言

沥青混凝土具有良好的防渗性能($k \leqslant 10^{-7}$ cm/s)和适应变形能力，在水利工程中特别是土石坝的防渗结构得到广泛的应用[1-2]。目前对于交通用途的道路沥青，已经有过充分的研究。对水工沥青混凝土力学特性的研究却较少，特别对碾压密实的沥青混凝土在复杂的高应力状态下的应力变形、强度特性了解不充分。

已有的研究资料表明[3-9]：复杂的高应力状态下，沥青混凝土的本构模型大多采用非线性弹性模型，由于沥青混凝土自身的孔隙率小，侧向作用效应十分明显，体积变形较小且主要表现为剪胀特性，使得非线性弹性模型无法正确地模拟这种侧向作用效应。A.Le.Coroller[8]根据沥青和矿物骨料的变形特点，分别建立沥青和矿物骨料的弹塑性模型，然后进行叠加计算，做为一种尝试，尚未得到实测资料的验证。

随着三峡茅坪溪、冶勒等高土石坝的不断修建，水工沥青混凝土理论研究已经滞后于实践的发展，深入了解沥青混凝土的力学特性，开发能够更合理地反应复杂的高应力状态下沥青混凝土的应力－应变关系本构模型，十分紧迫。对于正确把握大坝的工作机理，确保大坝的运行安全，至关重要。

1 沥青混凝土应力－应变关系模型

1.1 沥青混凝土的强度

沥青混凝土是由矿物骨料、沥青胶结料和孔隙所共同组成的具有空间网状结构的多相分散体系。目前，沥青混凝土主要有表面理论和胶体理论两种强度理论[10]，表面理论侧重于矿质集料间骨架的作用；而胶体理论则认为：由于沥青的粘聚作用，沥青混凝土是一种胶结体，侧重于沥青胶浆的性能。对水工沥青混凝土而言，由于沥青用量和矿粉用量较少，其强度形成更强调粗集料的骨架作用，强度理论主要采用表面理论。就力学性能，与其它均质材料和水硬性胶结材料相比，沥青混凝土的结构比较松散，并具有明显的颗粒性，粘聚着沥青的矿物骨料颗粒自身强度远大于沥青的粘结强度，认为沥青混凝土仍然是一种散粒体材料，同时材料的破坏形式更接近剪切破坏，仍可利用Mohr-Coulomb理论求解。从宏观上看，它与粘性土性质相似，只不过这些粘聚着沥青的骨料颗粒间胶结作用比较明显，粘聚力较大，粘性更强。因此，可利用土体的本构模型或者修正有关土体本构模型来研究沥青混凝土的应力变形特性。

1.2 沥青混凝土的应力-应变模型

用传统的增量塑性理论建立岩土材料的本构模型时，大多利用关联流动法则和Drucker公设[11-12]。实际上，岩土和某些复合材料在破坏前大多为强化材料，往往不遵守关联流动法则和Drucker公设[13-15]，伴随着塑性变形的发展，其弹性系数同时降低。采用不相关联流动法则建立的本构模型[16-17]，推导出的不对称弹塑性矩阵容易引起计算上的困难。殷有泉、曲圣年[14]利用Ilyushin公设，在应变空间内推导了广义正交法则，由于需要在应变空间内建立本构模型，难以推广。

与岩土类材料类似，认为沥青混凝土在塑性变形过程中，弹性系数随着塑性变形的发展而变化，如图1（a）所示，当$\sigma_A < \sigma_B$时，B点回弹曲线BB'的斜率小于A点回弹曲线AA'的斜率，即外荷作用下，弹性系数和应力状态是耦合的。

对于一个应力增量$d\sigma$的屈服过程，应变增量$d\varepsilon$由可恢复部分$d\varepsilon^e$和不可恢复部分共同组成，见图1（a）所示。

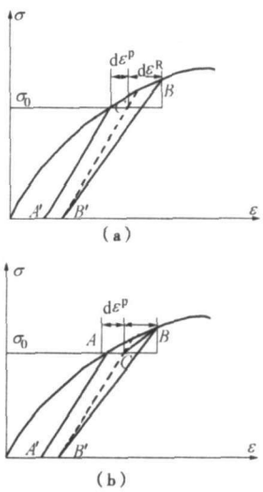


图1 弹塑性耦合的沥青混凝土应力－应变关系

其中不可恢复应变增量由塑性应变增量$d\varepsilon^p$和弹塑性耦合产生

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的应变增量 $d\varepsilon^C$ 两部分组成，即

$$d\varepsilon = d\varepsilon^P + d\varepsilon^C + d\varepsilon^e \tag{1}$$

弹塑性耦合产生的应变增量 $d\varepsilon^C$，是因材料屈服导致弹性系数的变化引起的，即

$$d\varepsilon^C = dC \cdot \sigma \tag{2}$$

$$dC = \frac{\partial C}{\partial H_\alpha} dH_\alpha \quad , \tag{3}$$

式中，H_α（$\alpha = 1,2,3,\cdots$）为硬化参数，表示由于塑性变形引起材料微观结构变化的参量，与塑性变形历史有关，可以是塑性应变、塑性功或代表热力学状态的内变量。

考虑到弹塑性耦合产生的不可恢复的应变增量 $d\varepsilon^C$ 的机理目前尚不明确，本文将图 1(b)中应力路径 $B \to B'$ 简化为 $B \to C \to B'$，其中 CB' 为 AA' 的平行线。则在应力增量 $d\sigma$ 的屈服过程中，沿 $B \to C$ 应力路径中产生的应变增量 $d\varepsilon^R$ 为可恢复的。而沿 $A \to B$ 应力路径加载，产生的塑性应变增量 $d\varepsilon^P$ 变为 AC 线段的长度。在材料屈服后的某个应力增量 $d\sigma$ 的作用下，应变增量 $d\varepsilon$ 可表示为

$$d\varepsilon = d\varepsilon^P + d\varepsilon^R \quad , \tag{4}$$

式中，$d\varepsilon^R = d\varepsilon^C + d\varepsilon^e$，相当于假定弹塑性耦合产生的应变增量 $d\varepsilon^C$ 是可恢复的。已有研究成果证明[18-19]，部分塑性变形是可以恢复的，具有可逆性。

式（4）即为考虑弹塑性耦合条件下的增量弹塑性本构关系。下面分别讨论增量变形各分量的具体计算。

(1) 塑性应变增量 $d\varepsilon^p$

在应力增量 $d\sigma$ 的屈服过程中产生的塑性应变增量 $d\varepsilon^P$ 遵守关联流动法则和 Drucker 公设，利用现有的弹塑性模型计算。

考虑到沥青混凝土具有较强的剪胀特性，本文利用椭圆－抛物双屈服面模型[12]，屈服面方程为，

$$p + \frac{q^2}{M_1^2 (p + p_r)} = \frac{h\varepsilon_v^p}{1 - t\varepsilon_v^p} p_a \quad , \tag{5}$$

$$\frac{\alpha q}{G} \sqrt{\frac{q}{M_2 (p + p_r) - q}} = \varepsilon_s^p \quad 。 \tag{6}$$

式中，p、q 为广义正应力和广义剪应力；ε_v^p、ε_s^p 为塑性体应变和等效塑性剪应变；G 为弹性剪切模量；α、h、t、M_1、M_2 分别为模型的试验参数；$p_r = C \cdot \cot\varphi$；$p_a$ 为大气压。

各屈服面的屈服轨迹见图 2 所示。

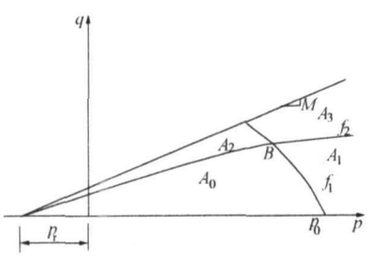


图 2 椭圆抛物双屈服面模型的屈服轨迹

(2) 可恢复的应变增量 $d\varepsilon^R$

利用弹性理论进行计算，满足广义虎克定律，可写为

$$d\varepsilon^R = C \cdot d\sigma \quad , \tag{7}$$

式中，C 为弹性柔度矩阵，为应力状态的函数，也可写为 $C(\sigma)$。

考虑到邓肯双曲线模型能较好地反映材料的非线性弹性特性，采用邓肯模型计算弹性系数 E_t，即

$$E_t = Kp_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^n \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cdot \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi}\right]^2 \quad , \tag{8}$$

式中，C、φ 分别为粘聚力和内摩擦角，K、n、R_f 为试验参数。

2　模型的试验检验

试验结合三峡水利枢纽茅坪溪防护土石坝工程进行。心墙沥青混凝土的沥青含量 6.5%，试验温度 16.4℃，试件直径×高度为 100 mm ×200 mm，采用静压法成型，成型时沥青混合料的温度控制在 140 ± 3℃，在恒压 10 MPa 下稳定 3 min，静压的试件同试模一起放入冷水中冷却脱模。试验采用英国产 GDS Trtech 50 非饱和土三轴试验装置，加载速率设定为 0.001 mm/s，即 0.06 mm/min。

2.1　沥青混凝土的强度

图 3 为沥青混凝土试件的三轴试验成果，利用 Mohr-Coulomb 理论求解粘聚力 c 和内摩擦角 φ。由图可见：各组破坏应力园的外包线并不是直线，随着围压的增大，沥青混凝土的强度有所降低，呈现明显的非线性特性。采用对数关系拟合，即

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \cdot \lg(\sigma_3 / pa) \quad , \tag{9}$$

得，$\varphi_0 = 51.8°$，$\Delta\varphi = 18.3°$。

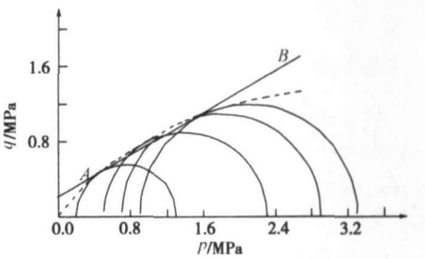


图 3 三轴试验沥青混凝土的破坏强度包线

2.2　沥青混凝土的应力应变关系曲线

为模拟试件加载过程分级加荷，对各级荷载用文中建议模型对应的弹塑性矩阵计算相应的应变增量，采用优化方法与试验结果对比分析后求得模型参数。

图 4 为克拉玛依沥青混凝土心墙试样在围压分别为 0.9、0.5、0.2 MPa 对应的三轴试验量测结果与利用本文推导模型的计算结果比较图。图中细实线为未考虑强度非线性的计算曲线（曲线 2），粗实线为考虑强度非线性的计算曲线（曲线 1），其中考虑强度非线性特性的模型各参数见表 1。由图可见，强度特性对沥青混凝土的应力－应变曲线影响较小，而对轴向应变与体积应变关系则有显著的影响，采用非线性强度更能体现其力学特性。本文建议模型对试验结果拟合较好，真实地反映了复杂应力条件下沥青混凝土的应力－应变特性。

表 1 模型计算参数

K	n	R_f	α	M_1	M_2	h	t
215	0.13	0.58	0.11	2.48	2.60	635	4.53

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

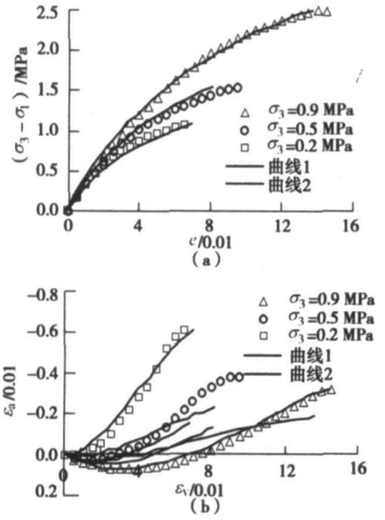


图 4 三轴试验量测与模型计算结果比较

3 结 论

(1) 沥青混凝土材料不遵守关联流动法则和 Drucker 公设，传统的增量塑性理论难以正确反映其应力应变关系，本文建议的考虑弹塑性耦合特性的弹塑性应力－应变关系模型，合理地体现了沥青混凝土的应力－应变规律，为了解复杂应力状态下沥青混凝土的力学特性，提供了依据。

(2) 沥青混凝土强度呈现较强的非线性特性，对其应力应变关系有明显的影响。

参考文献：

[1] HOEG K. An evaluation of asphalt concrete cores for embankment dams[J]. Water Power and Dam Construction, 1992(7): 32－34.

[2] 朱 晟, 闻世强. 当代沥青混凝土心墙坝的进展[J]. 人民长江, 2004,(9): 9－11.

[3] 郭葭窗. 沥青混凝土三轴试验及应力一应变特性[J]. 水利水电技术, 1981(9): 58－64.

[4] 凤家骥, 葛毅雄, 等. 沥青混凝土应力应变关系试验研究[J]. 水利学报, 1987(11): 56－62.

[5] 王为标, 孙振天, 等. 沥青混凝土及应力－应变特性研究[J]. 水利学报, 1996(5): 1－8.

[6] 朱 晟, 曹广晶, 张超然, 等. 茅坪溪土石坝安全复核验算[J]. 水利学报, 2004(11): 124－128.

[7] WANG W B, HOEG K. Effects of compaction method on the properties of asphalt concrete for hydraulic structure[J]. Hydropower and Dams, 2002, 6: 63－71.

[8] COROLLER A Le. Approach to bituminous concrete core behavior by FEM computation[C]// Commission Internationale Des Grands Barrages, Q.61, R.54. SAN Francisco, 1988: 997－1027.

[9] KRISHNAN J Murali. Triaxial testing and stress relaxation of asphalt concrete[J]. Mechanics of Materials, 2004, 36: 849－864.

[10] 张登良. 沥青路面[M]. 北京:人民交通出版社, 1998.

[11] ROSCOE K H, BURLAND J B. On the generalized stress-strain behaviour of 'wet' clay [C]// Engineering Plasticity. Cambridge University Press, 1968: 535－608.

[12] 殷宗泽. 一个土体的双屈服面应力－应变模型[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(4): 64－71.

[13] 郑颖人. 岩土塑性力学的新进展—广义塑性力学[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 1－10.

[14] 殷有泉, 曲圣年. 弹塑性耦合与广义正交法则[J]. 力学学报, 1982, (1): 63－70.

[15] 刘元雪. 岩土本构理论的几个基本问题研究[J]. 岩土工程学报, 2001,23(1):45－48.

[16] POOROOSHASB H B. Description of flow of sand using State parameters [J]. Computers and Geotechnics, 1989, 7(8):195－218.

[17] LADE P V, KIM M K. Single hardening constitutive model for frictional materials[J]. Computer and Geotechnics, 1988(6): 1－47.

[18] 李广信, 郭瑞平. 土的卸荷体缩与可恢复剪胀[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2):158－161.

[19] 张建民. 砂土的可逆性和不可逆性剪胀规律[J] 岩土工程学报, 2000, 22(1): 12－17.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net