

试论岩石力学与土力学统一共核理论模型

王瑞彩 阮怀宁

(河海大学岩土所,江苏 南京 210098)

摘要:从几个方面讨论岩石力学与土力学统一共核的理论模型。弹塑性分析所采用的 Mohr-Coulomb 准则和 Drucker-Prager 准则以及考虑所有应力分量的统一强度理论虽然各有缺点,但都能较好的表征岩土介质的某些特性。粘弹性模型中的广义 Kelvin 模型和粘弹塑性模型中的西原模型较全面地反映出工程中的岩土特性。连续介质力学模型已成功地描述了土体和某些岩体的力学属性。通过对本构模型和强度理论、流变模型、连续介质和不连续介质力学模型的讨论,阐述了岩石力学与土力学是一个统一的理论体系的观点。

关键词:本构模型 强度理论 流变模型 连续介质 不连续介质 力学模型

中图分类号: TU45 TU43

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2002)07-0014-04

岩石力学是研究岩体的性质和工程设计中与岩体有关的设计所需要的专门方法^[1],以岩体为研究对象。土力学是一门研究土体渗流、压缩和强度三个主要课题的学科,以土体为研究对象^[2]。

天然的地质材料可分为岩石和土,两者都由矿物颗粒和碎片集合物构成。岩石与土的区分仅在于颗粒间胶结的强弱。岩石的矿物颗粒间具有很强的连接,一般较坚硬,是连续的块体;土是岩石风化后的产物,由许多岩石碎块、矿物颗粒和黏土矿物堆积而成,颗粒之间联结很微弱,称为散体。

既然土是岩石风化后的产物,有时就会遇到难以区分的情况。如某些风化强烈的岩石、岩性特别软弱或胶结很差的沉积岩,它们既可称为岩石,又可视作土。在有些情况下,岩石力学和土力学的研究领域之间并没有明确的界限。

岩石力学和土力学自开创以来,逐渐形成了自己完整的理论体系,并在工程实践中发挥了重大作用。它们并不是独立的,而是一个统一的体系。本文拟从岩石和土的本构模型和强度理论、流变模型、连续和不连续介质力学模型几方面阐述岩石力学与土力学的异同及统一问题。

1 本构模型和强度理论

岩土的本构模型描述岩土材料在外力作用下表现出来的行为性状,建立应力、应变、温度等之间的定量关系。最早的均质、各向同性或横观各向同性模

型曾被广泛用于描述岩土力学特征,峰值强度前的线弹性应力应变关系被应用描述介质变形性质。考虑岩土应力应变曲线的非线性特征时,通常将 Duncan 非线性弹性模型^[3]应用于数值分析。土体弹塑性模型则多用著名的剑桥模型^[4]。当岩土材料进入塑性屈服阶段时,目前广泛采用 Mohr-Coulomb 准则和 Drucker-Prager 准则。弹塑性分析采用的 Mohr-Coulomb 准则一般形式为^[5]

$$f^*(I_1, I'_2, \theta_\sigma, c, \varphi) = 0 \quad (1)$$

式中: I_1 为应力不变量; I'_2 为偏应力不变量; θ_σ 为应力角; c 为凝聚力; φ 为内摩擦角。

在主应力空间,式(1)表示以静水应力轴为中心轴,具有不规则六角形截面的角锥体表面。该准则较好地表征了岩土介质在压缩条件下的某些弹塑性特征,得到了广泛的应用。Mohr-Coulomb 准则的缺点是没有考虑中主应力的影响^[6],另外,屈服面存在的“角隅”现象给数值计算带来了困难。但 Mohr-Coulomb 准则还是有很大的适用性,陶纪南^[7]指出 Mohr-Coulomb 准则及其各种变换形式均属抗剪强度准则,它们用于描述剪切破坏是很适用的。李小春等^[8]指出 Mohr 准则用于软弱的岩石或中等坚硬岩石在不太高的围压范围时有较好的准确性。

为解决 Mohr-Coulomb 准则存在的问题,人们在 Mises 准则中加上一个静水应力因子,形成了著名的 Drucker-Prager 准则。该准则不仅考虑到 3 个主应力对破坏的影响,并且消除了屈服面存在的“角隅”。

Drucker-Prager 准则可表述为^[5]

$$\alpha I_1 + \sqrt{J'_2} - k_f = 0 \quad (2)$$

式中: α 为参数; I_1 为应力不变量; J'_2 为偏应力不变量; k_f 为破坏参数。

在主应力空间, 式(2)表示以静水应力轴为中心轴的圆锥体。它克服了 Mohr-Coulomb 准则的上述缺点, 但在破坏状态下给出了较大的体积膨胀, 这与某些岩土介质的试验结果不符。

俞茂宏从正交八面单元体的 3 个主应力出发, 提出了双剪强度理论和适用于岩土体的广义双剪强度理论^[9], 并得到了统一强度理论^[10]。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b} (b\sigma_2 + \sigma_3) &= \sigma_t \quad (\text{当 } \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \text{ 时}) \\ \frac{1}{1+b} (\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 &= \sigma_t \quad (\text{当 } \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \text{ 时}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: α 为材料的拉压强度比; b 为中间应力系数; σ_t 为拉伸强度。

在主应力空间, 式(3)表示以静水应力轴为中心轴, 具有不等边十二边形截面的锥体表面。该理论考虑到所有应力分量及它们对材料破坏的不同影响, 能够适用于拉压强度不等并与静水应力有关的岩土材料。统一强度理论覆盖了极限面的所有区域, 具有独特的优点, 但在塑性应变分析中, 也存在角点奇异性问题, 俞茂宏等^[11]采用一种矢量平均的统一处理方法解决了角点奇异性问题。关于统一强度理论仍需进行相应的工程验证。

2 流变模型

岩土流变学研究岩石的应力、温度和变形与时间的关系。当温度变化很小时, 可以不考虑温度的影响^[12]。在长期的研究工作中, 各国学者提出了许多适合岩土材料的流变模型。从形式上看, 这些模型大体上可分为 3 类: 经验公式、组合模型和积分形式的模型^[13]。经验公式是根据不同试验条件及不同岩石的种类求得的数学表达式, 对于特定的岩土材料可以很好地拟合, 但较难于推广。组合模型又称为微分模型、元件模型, 它既是物理模型又是数学模型, 由材料的基本力学元件——Hooke 弹性体、St. Venant 塑性体、Newton 粘滞壶组成。积分模型仅仅是数学模型, 是根据实际材料的流变方程和数学上的处理方便而建立起来的流变方程的典型数学形式^[12]。下面仅就组合模型讨论流变模型问题。

常见的组合模型有粘弹性和粘弹塑性模型。粘弹性模型有 Maxwell 模型、Kelvin 模型、Burgers 模型、广义 Kelvin 模型等^[12, 13, 14], Maxwell 模型、Kelvin 模型、Burgers 模型等均是广义 Kelvin 模型的特例^[14]。

广义 Kelvin 模型具有瞬时弹性变形、弹性后效、松弛的特点, 且蠕变过程不是无限变形的, 松弛过程也不是应力松弛为零的, 这些特点较全面地反映出工程中的岩土特性, 应用较多。常见的粘弹塑性模型有 Bingham 模型、西原模型和广义西原模型等^[12, 13, 14]。西原模型在低应力时是粘弹性状态, 与广义 Kelvin 模型相同, 在高应力时是粘塑性状态, 相似于 Burgers 模型, 且可以反映岩土材料何时屈服, 因此应用于描述岩土介质的粘弹塑性状态是一个比较符合实际的模型^[15]。

赵维炳采用广义 Kelvin 模型模拟了饱和土体轴对称固结理论解^[16], 推导出了自由应变条件下考虑井边涂抹作用、等垂直应变条件下考虑涂抹和井阻作用的饱和粘弹性土体轴对称固结理论解; 导出了饱水土体一维固结问题的普遍理论解^[17], 并结合上海某小型锅炉房的饱水黏土地基进行计算, 计算结果与实测资料吻合。

陈卫忠等^[18]采用广义 Kelvin 模型对三峡船闸高边坡在施工开挖过程中的节理裂隙损伤耦合效应及时效特征进行非线性有限元分析, 证明了所建流变模型的合理性。肖洪天等^[19]采用广义 Kelvin 模型建立了用于裂纹流变扩展计算的细观力学模型, 通过有限元分析计算, 发现给定位移加载条件下计算结果与试验结果吻合较好。

詹美礼等^[20, 21]采用西原模型模拟黏性土的粘弹塑性变形, 借助于殷宗泽的双屈服面模型^[22]对上海软黏土流变特性进行了试验研究和有限元分析计算, 计算结果和实测结果的接近论证了所采用的流变模型的合理性。

朱维申等^[23]采用西原模型对三峡船闸高边坡的稳定性进行模拟边坡开挖过程的损伤流变分析, 计算结果和实测结果比较接近。贾强^[24]采用西原模型建立了岩体损伤流变的基本理论, 找到了小浪底水利枢纽工程的导流洞在开挖过程中出现大范围坍塌现象的主要原因。西原模型在文献[25, 26]中也取得了比较满意的结果。

3 连续介质与不连续介质力学模型

土体是由颗粒堆积而成的具有孔隙的非连续介质, 受力后土颗粒及其接触点处会出现很大的应力集中, 但我们所研究的土体在通常应力下的变形只取决于颗粒的相对挤紧, 而土颗粒本身的变形可忽略不计。当基础尺寸远大于单个颗粒尺寸时, 我们只需了解整个受力平面上的平均应力, 而不需研究单个颗粒的受力状态, 所以在通常应力下将一般颗粒的土体视为连续体是可以的。目前已经成功地利用

连续介质力学的原理描述了土体的应力变形规律.

岩体也是一种非连续介质,岩体中存在节理、断层等各种不连续面.学者们曾提出岩体连续性的“尺度相对性准则”,即岩体的连续性取决于岩体内不连续面尺度与所研究的整个岩体尺度之比 R ,若比值 R 远小于1,则岩体可视为连续介质,否则视为不连续介质^[27].岩体变形的连续与否还与其所处的应力状态有关,孙广忠称之为围压效应^[28].他指出很多试验表明碎裂岩体在围压很高时,结构面的力学效应将完全消失.Müller^[29]提出当 $\eta = \sigma_1/\sigma_3 = 1$ 时节理没有多大的作用,可将岩体看作连续介质来处理;当 $\eta \gg 1$ 即 σ_1 远大于 σ_3 时,岩体中的裂隙影响很大,岩体应看作不连续介质.一般地, $\eta = 4 \sim 5$ 为连续介质和非连续介质的分界线.综上所述,选择岩体的力学介质类型的合理标准可表述为:若岩体受到较强的围限作用以致不出现较大的主应力差,岩体内不连续面尺度与所研究的整个岩体尺度之比 R 远小于1,且其基本单元(物理力学性质方面能代表介质特征的最小单元)足够小,以致允许对其进行试验或通过其他方式确定其力学性质,则岩体可视为等效连续体^[30],否则应视为不连续体.

4 结 论

a. 岩土材料本构关系总体具有非线性特性.非线性弹性模型可考虑岩土材料弹性阶段的非线性特征,但不能解决弹塑性问题;Mohr-Coulomb 准则适用于描述岩土剪切破坏,但忽略了中主应力作用;Drucker-Prager 准则考虑中主应力的作用及静水压力的影响,但在破坏状态下给出了较大体积膨胀,考虑到所有应力分量以及它们对材料破坏的不同影响的广义双剪强度理论及其角隅模型,展示了较好的应用前景,但仍需相应的试验与工程验证.

b. 岩土材料具有流变特性.在众多的流变模型中,广义 Kelvin 模型具有的瞬时弹性变形、弹性后效、松弛等特点较全面地反映出工程中的岩土特性;西原模型在低应力时为粘弹性状态,在高应力时为粘塑性状态,且可以反映岩土材料何时屈服.这两种模型均既适用于岩石又适用于土.

c. 连续与不连续介质力学模型是岩土的两类力学模型,对于土体一般采用连续介质力学模型,对于岩体则要根据具体工程中岩体的结构形式、受力状况和受力过程,根据文中所建议的选用标准,选用合理的连续或不连续力学模型.

参考文献:

[1] Goodman R E. 岩石力学原理及其应用[M]. 王鸿儒, 王宏

硕译. 北京: 水利电力出版社, 1990. 1~2.

[2] 钱家欢. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1995. 2~5.

[3] Duncan J M, Chang C Y. Non-line analysis of stresses and strain in soil[J]. ASCE SMFD, 1970, 96(SM5): 1629~1653.

[4] Roscoe K H, Burland J B. On the generalized stress-strain behaviour of wet clays[A]. In: Heyman, Leclie ed. Engineering Plasticity[C]. Cambridge Univer Press, 1968. 536~609.

[5] 蒋彭年. 土的本构关系[M]. 北京: 科学出版社, 1982. 102~109.

[6] Harkness R M. An essay on 'Mohr-Coulomb' [A]. In: Parry R H G eds. Stress-Strain of Soil[C]. Oxford: Foulis & Co., 1972. 212~219.

[7] 陶纪南. 莫尔库仑准则的应用范围及临界应力状态探讨[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(5): 76~83.

[8] 李小春, 许东俊. 中间主应力对岩石强度的影响程度和规律[J]. 岩土力学, 1991, 12(1): 9~16.

[9] 俞茂宏, 何丽南, 宋凌宇. 双剪应力强度理论及其推广[J]. 中国科学 A 辑, 1985, 28(12): 1113~1120.

[10] 俞茂宏. 岩土类材料的统一强度理论及其应用[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 1~10.

[11] 俞茂宏, 詹月稳, 李建春. 统一强度理论角点奇异性的统一处理[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 849~852.

[12] 于学馥. 现代工程岩土力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 172~210.

[13] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990. 177~188.

[14] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. 237~250.

[15] 孙钧, 汪炳鉴. 地下结构有限元解析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1986. 114~121.

[16] 赵维炳. 广义 Voigt 模型模拟的饱和土体轴对称固结理论[J]. 河海大学学报, 1988, 16(5): 47~56.

[17] 赵维炳. 广义 Voigt 模型模拟的饱水土体一维固结理论及其应用[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(5): 78~85.

[18] 陈卫忠, 朱维申. 节理岩体开挖卸荷过程中断裂损伤耦合效应的流变分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(增): 909~912.

[19] 肖洪天, 周维垣, 杨若琼. 岩石裂纹流变扩展的微观机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 623~626.

[20] 詹美礼. 软土流变试验及隧道有限元分析[D]. 南京: 河海大学, 1991.

[21] 詹美礼, 钱家欢, 陈绪禄. 软土流变特性试验及流变模型[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 54~62.

[22] 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(1): 64~71.

[23] 朱维申, 邱祥波, 李术才, 等. 损伤流变模型在三峡船闸高边坡稳定分析的初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 431~436.

[24] 贾强. 地下工程开挖过程的流变损伤研究[D]. 南京: 河

海大学,1991.

[25] 夏熙伦,徐平,丁秀丽. 岩石流变特性及高边坡稳定性流变分析[J]. 岩石力学与工程学报,1996,15(4):312~322.

[26] 章根德,何鲜,朱维耀. 岩石介质流变学[M]. 北京:科学出版社,1999.330~348.

[27] Stagg K G,Zienkiewicz O C. Rock mechanics in engineering practice[M]. London:Allen & Unwin Ltd.,1969.237~272.

[28] 孙广忠. 岩体力学基础[M]. 北京:科学出版社,1983.57~59.

[29] L. Müller. Technical parameters of rock and rock masses[A]. In: L. Müller eds. Rock Mechanics[C]. Rotterdam: A. A. Balkema,1974.15~27.

[30] 薛守义. 论连续介质概念与岩体的连续介质模型[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(2):230~232.

(收稿日期 2002-04-30 编辑:傅伟群)

(上接第2页)作降雨径流预报(分为南宁、五塘、邕宁、长塘、那楼、露圩、峦城、新福、西津9块单元面积).对该流域内每块单元面积分别进行产流、汇流计算,计算出各单元面积的出流过程,将各单元面积的出流过程线性叠加,即为南宁—西津区间流域汇入西津的流量 $Q_{西2}$.

h. 西津洪水.将南宁以上流域汇入西津的流量 $Q_{西1}$ 与南宁—西津区间流域汇入西津的流量 $Q_{西2}$ 线性叠加,即为西津总的流量 $Q_{西}$.由于西津水库没有入库站,没有 $H \sim Q$ 关系,故西津流量未作校正.

5 预报成果及误差分析

5.1 预报成果

南宁、西津预报成果精度统计见表5和表6;实测、预报洪水过程见图3,图3中雨量为南宁—西津区间的流域平均雨量.

表5 2001年7月1~31日洪水洪量预报成果

站名	实测径流 /10 ⁸ m ³	预报径流 /10 ⁸ m ³	绝对误差 /10 ⁸ m ³	相对误差 /%	确定性 系数
南宁	174.4373	191.5587	-17.1214	9.8	0.9315
西津	213.3382	212.3857	0.9525	-0.45	0.9543

表6 2001年7月1~31日洪水洪峰流量预报成果

站名	洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)		相对误差 /%	峰现时间	
	预报值	实测值		预报值	实测值
下颜	7390	6670	10.8	6日14时	6日20时
崇左	8210	8890	-7.6	5日11时	5日8时
南宁	15080	13400	12.5	6日8时	6日10时
西津	14300	13900	2.9	8日11时	8日8时

5.2 误差分析

因遭受3号强台风袭击,7月2日军山中继站天线被风刮弯后曾中断信息接收48h,该期间有关测站的雨量、水位采用人工观测资料,其余时间均采用遥测系统资料.从表5和表6可见,预报结果令人满意.但南宁站水量绝对误差为 $-17.1214 \times 10^8 \text{ m}^3$,洪峰滞时最大误差为+6h(下颜站),最小为2h(南宁站).笔者认为误差的主要原因是西津以上流域面积大,部分流域面积在境外,南宁以上流域大部分地区为崇山峻岭,遥测雨量站点少,河道洪水演算在南宁以上流域洪水预报中起着极其重要的作用,尤其

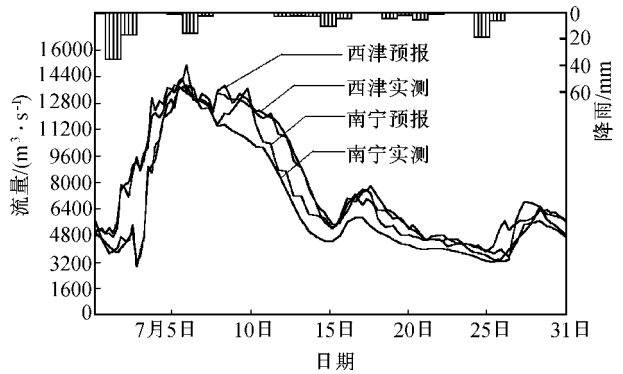


图3 南宁、西津7月1~31日实测与预报流量过程线

是下颜、崇左、南宁汇流计算正确与否对南宁洪水预报及预见期起着关键的作用,南宁—西津区间流域遥测雨量站点布设相对较密,是掌握下游洪水变化及预见期的主要区域,该区域的产、汇流计算正确与否对西津洪水预报精度及预见期有着十分重要的影响.解决的途径是:对左、右江的汇流及洪水遭遇问题,下颜—南宁、崇左—南宁区间及南宁—西津区间流域的产流问题作进一步深入的分析研究.

6 结 语

用开发的郁江洪水预报系统对2001年7月由第3和第4号台风在郁江流域造成的暴雨洪水进行了连续预报,预报结果令人满意,说明系统采用的预报模型合理,技术路线正确.系统及相应的预报方法对该流域洪水产生和形成规律研究、灾害性洪水预报、防汛抗洪工作十分有益.

本研究得到西津水电厂资助,西津电厂杨捷辉、凌坚、庞宗孟同志提供了有关资料,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

[1] 陈树娥,潘心华,王伶俐. 广西郁江2001年暴雨洪水分析[J]. 水文,2002(1):54~57.

[2] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型和陕北模型[M]. 北京:水利电力出版社,1984.

(收稿日期 2002-05-09 编辑:熊水斌)