

粗粒筑坝材料的增量流变模型研究

朱 晟^{1,2}, 王永明^{1,2}, 徐 骞^{1,2}

(1. 河海大学 水文水资源与水利水电工程国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 水工结构研究所, 南京 210098)

摘 要: 针对全量型流变模型与加载应力路径无关, 不能考虑施工或蓄水期在变应力作用下土石坝流变遗传特性的问题, 基于继效理论, 结合某工程堆石料的三轴流变试验资料, 提出了适合于土石坝筑坝材料流变特性分析的 7 参数增量流变模型; 利用试验各级增量荷载作用下的最终体积流变量与对应体积应力之间为近似线性关系, 最终剪切流变量与对应的试验广义剪应力之间接近双曲线关系, 整理得到其流变体积模量和剪切模量等模型参数; 验证分析表明, 建议的增量流变模型计算值与试验结果吻合较好, 其可应用于实际土石坝的流变研究。

关 键 词: 土石坝; 粗粒材料; 增量分析; 流变; 本构模型

中图分类号: TV 223

文献标识码: A

Study of incremental rheological model of coarse grained material for embankment

ZHU Sheng^{1,2}, WANG Yong-ming^{1,2}, XU Qian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098; China;

2. Institute of Hydraulic Structures, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Considering that total rheological model is independent of stress path and rheological genetic characteristic of rockfill dam is omitted, a seven-parameter incremental rheological model which is more suitable for the rheological analysis of coarse grained material is achieved based on the theory of hereditary creep. The analysis of normal triaxial rheological test data of some rockfill indicates that: the linear function could be adopted to fit the relationship between ultimate volume rheological deformation and corresponding volume stress, and hyperbola function could be adopted to fit the relationship between ultimate shear rheological deformation and corresponding generalized shear stress; so rheological volume modulus and shear modulus of coarse grained materials could be calculated based on the above-mentioned functions. Finally, a verification analysis is done; it could be concluded that the incremental rheological model approximately agrees with the experimental results; and it can be applied to earth dam projects.

Key words: soil-rock dam; coarse-grained material; increment analysis; rheology; constitutive model

1 引 言

目前, 粗粒筑坝材料的流变特性试验研究一般采用分级加载方式, 流变建模采用全量理论^[1-6], 即流变仅与应力状态有关, 与试验加载应力路径无关, 一种应力状态对应一条与应力全量有关而与应力增量无关的流变曲线。

对于采用分层碾压施工技术修建的土石坝, 填筑过程如图 1(a)所示, 当大坝填筑到 H_1 高程时, m 单元的上覆土柱高度为 h_1 ; 当大坝填筑到 H_2 高程

时, m 单元的上覆土柱高度为 h_2 。对大坝进行流变分析时, 随着大坝填筑高度的增加或水库蓄水位的变化, 坝体计算单元 (例如图中 m 号) 的应力状态也将发生改变; 在这种变应力作用下, 大坝堆石体的流变必然具有继效特性^[7-9]。事实上, 天生桥面板坝由于堆石体沿基本平行于下游坝坡方向分 6 期填筑 (见图 1 (b))。实测资料表明, 在大坝竣工到蓄水前的较短时间内, 3 期面板出现大量裂缝的主要原因, 是由于后期填筑堆石体流变时间相对较短, 流变变形更大造成的。

然而, 以应力全量形式推导的流变模型, 由于与加载应力路径并无关联, 虽能符合特定试验条件下的试验现象, 但在模拟土石坝的增量荷载进行计算时, 这类模型却不能考虑该级增量荷载之前的历史应力作用下已经完成部分流变的影响, 亦即无法考虑堆石体流变的遗传特性, 难以准确计算土石坝的流变性状。

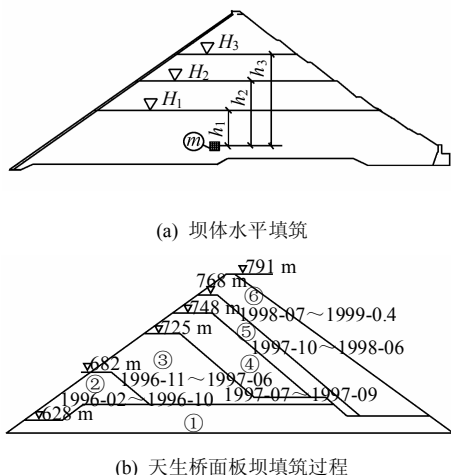


图1 大坝施工仿真流变计算示意图
Fig.1 Calculation sketch map of simulated dam rheological

为此, 必须寻求在考虑应力状态的同时, 又能考虑与应力路径相关联的流变计算模型与方法, 以便能考虑变应力作用下堆石体流变的遗传效应, 正确分析堆石体流变特性对大坝结构性态的影响。

2 复杂应力路径下粗粒料的流变特性

鉴于全量形式的流变模型存在的问题, 现以滞后变形理论为基础, 研究可反映应力路径影响的增量型粗粒筑坝材料的流变模型。先从一维简单状态入手, 进而将其推广到三维复杂受力状态。

2.1 计算公式

已有研究表明^[8], 粗粒料的流变变形近似于指数型衰减规律, 可由 Kelvin 体控制其滞后变形, 其流变方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta}} \right) \quad (1)$$

考虑到岩土体的黏滞系数随时间而改变^[9], 上述流变方程改写为

$$\varepsilon = \varepsilon_f \left(1 - e^{-Ct^\alpha} \right) \quad (2)$$

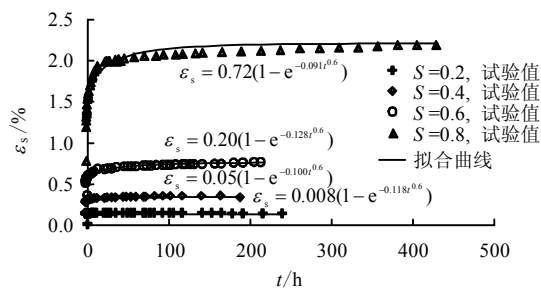
式中: ε_f 为最终流变量; C 、 α 均为试验参数。

2.2 复杂应力状态下流变性质研究

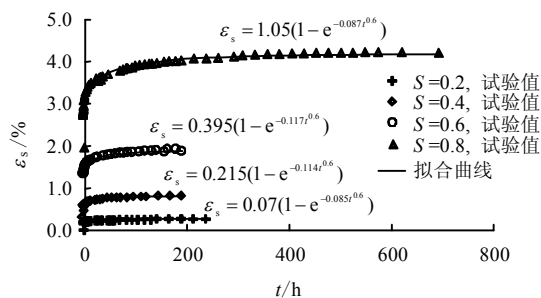
2.2.1 室内三轴流变试验

某坝的筑坝材料为花岗岩堆石料, 试验干密度为 2.08 g/cm^3 , 试样直径×高度为 $300 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$, 试验围压分别为 0.80 、 1.60 、 2.40 MPa 共 3 组。采用应力控制式三轴试验装置, 先加某级试验围压, 然后按应力水平 S 为 0.2 、 0.4 、 0.6 、 0.8 逐级施加竖向荷载增量。在给定各级荷载稳定应力条件下, 记录不同时刻试样变形, 当变形趋于稳定后施加下一级增量荷载。

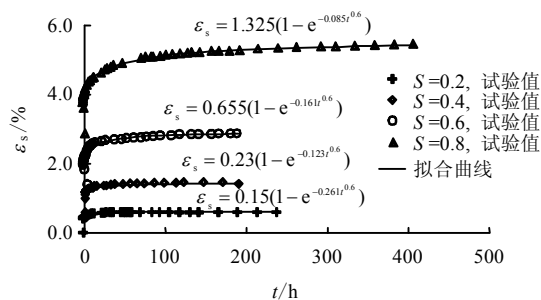
图 2 和图 3 分别给出试样在不同应力状态下的剪切和体积流变随时间变化曲线^[10]。实测变形包括加荷初期的瞬时变形和持续荷载作用下的流变变形。



(a) 围压为 0.80 MPa

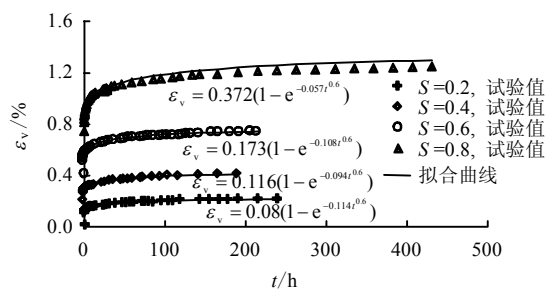


(b) 围压为 1.60 MPa

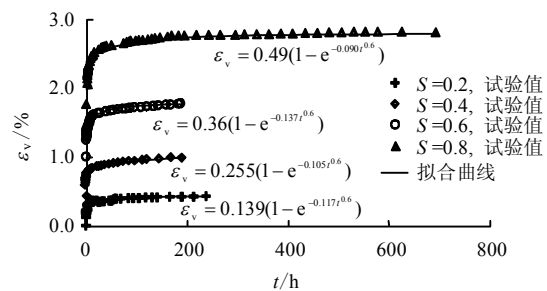


(c) 围压为 2.40 MPa

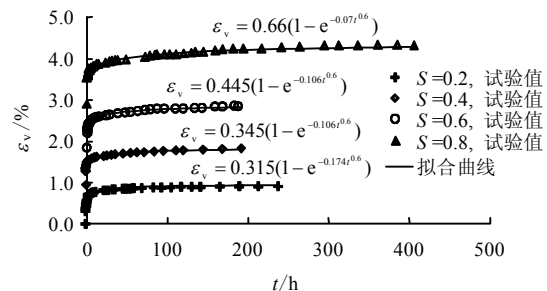
图2 堆石料剪切流变曲线
Fig.2 Shearing rheological curves of rockfill



(a) 围压为 0.80 MPa



(b) 围压为 1.60 MPa



(c) 围压为 2.40 MPa

图 3 堆石料体积流变曲线

Fig.3 Bulk rheological curves of rockfill

假定各级应力条件下堆石料的体积流变和剪切流变规律都符合指数型衰减规律,可根据式(2)用最小二乘法拟合图示各级荷载增量下的流变试验曲线,得到初始流变率 C 值和最终流变量,分别见表 1 和表 2。

表 1 参数 C 值Table 1 The parameters of C

应力水平	围压为 0.80 MPa		围压为 1.60 MPa		围压为 2.40 MPa	
	体积	剪切	体积	剪切	体积	剪切
0.2	0.114	0.118	0.117	0.085	0.174	0.261
0.4	0.094	0.100	0.105	0.114	0.106	0.123
0.6	0.108	0.128	0.137	0.117	0.106	0.161
0.8	0.057	0.091	0.090	0.087	0.070	0.085

由表 1 可以看出,除去最大和最小值,参数 C 值基本在一个较小的范围内波动,拟合的 α 值也在 0.59~0.61 范围,近似当着常数,各拟合曲线的相关系数均大于 0.93。

表 2 各级增量应力下的最终流变量 (单位: %)

Table 2 Final rheological values under different incremental stresses (unit: %)

应力水平	围压为 0.80 MPa		围压为 1.60 MPa		围压为 2.40 MPa	
	体积流变量	剪切流变量	体积流变量	剪切流变量	体积流变量	剪切流变量
0.2	0.080	0.008	0.139	0.070	0.315	0.150
0.4	0.116	0.050	0.255	0.215	0.345	0.230
0.6	0.173	0.200	0.360	0.395	0.445	0.655
0.8	0.372	0.720	0.490	1.050	0.660	1.325

2.2.2 增量型的流变模型

根据继效理论,在变应力作用下土石坝筑坝粗粒料的流变过程,可以看作是前后一系列外力共同作用效应的叠加。设在 ζ_i 时刻作用外加应力 $\Delta\sigma_i$, 则 n 个应力增量步后,所产生的流变量为

$$\varepsilon = \int_0^{\sigma_n} \frac{d\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-C(t-\zeta)^\alpha}\right) \quad (3)$$

式中: $\sigma_n = \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \dots + \Delta\sigma_n$ 。

假定粗粒料的体积流变 ε_v 和剪切流变 ε_s 与一维流变状态完全一致,根据广义虎克定律,则当 $t > \zeta_n$ 时,有

$$\varepsilon_v = \int_0^{\sigma_{vn}} \frac{dp}{3K} \left(1 - e^{-C(t-\zeta)^\alpha}\right) \quad (4)$$

$$\varepsilon_s = \int_0^{\sigma_{sn}} \frac{dq}{3G} \left(1 - e^{-C(t-\zeta)^\alpha}\right) \quad (5)$$

由于粗粒料 Kelvin 体的弹性常数 K 、 G 与应力状态相关,故式(4)、(5)为时间和应力的函数,具有非线性特性。假定粗粒料卸载回复过程与加载过程的流变规律相同,利用 Leaderman 原理^[11],计算 n 级应力增量作用下的累积流变量,当 $t > \zeta_n$ 时为

$$\varepsilon_v(t) = \sum_{i=1}^n \Delta\varepsilon_{vfi} \left(1 - e^{-C(t-\zeta_i)^\alpha}\right) \quad (6)$$

$$\varepsilon_s(t) = \sum_{i=1}^n \Delta\varepsilon_{sfi} \left(1 - e^{-C(t-\zeta_i)^\alpha}\right) \quad (7)$$

式中: $\Delta\varepsilon_{vfi} = \frac{\Delta p_i}{3K_i}$, $\Delta\varepsilon_{sfi} = \frac{\Delta q_i}{3G_i}$, 分别为第 i 级应力增量作用下的最终体积流变量和最终剪切流变量; p 、 q 分别为体积应力和广义剪应力; K_i 、 G_i 为控制滞后变形部分的参数,称为流变体积模量和流变剪切模量,是对应加载应力路径下应力状态的函数。

2.2.3 模型的参数

上述模型参数中, C 、 α 均为试验常数,可直接拟合试验资料得到;尚需确定 K 、 G 等控制滞后

变形部分的参数。

将不同应力状态下体积应力和最终体积流变之间的关系绘于图 4, 可见两者近似为线性关系。假定堆石料的流变体积模量与应力水平无关, 根据弹性理论, 求得切线流变体积模量:

$$K = \frac{\partial p}{\partial \varepsilon_{vf}} = \frac{1}{3} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_{vf}} \quad (8)$$

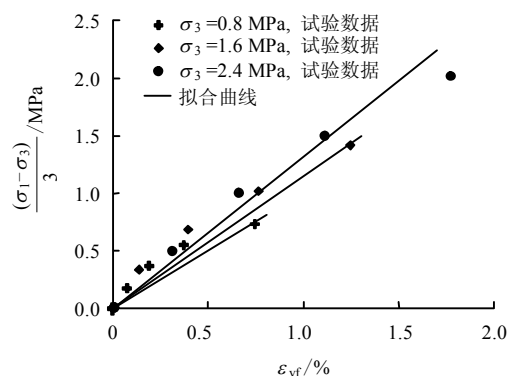


图 4 体积应力增量与最终体积流变的关系
Fig.4 Relationships between bulk stress increment and finally bulk rheological value

认为流变体积模量一般随试验围压的变化而变化, 以下式近似表示:

$$K = k_v p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{n_v} \quad (9)$$

式中: k_v 、 n_v 均为模型参数, 可根据试验结果整理得到。

图 5 为不同应力状态下广义剪应力和最终剪切流变之间的关系, 两者近似为双曲线关系, 可表示为

$$q = \frac{\varepsilon_{sf}}{\frac{1}{3G_i} + \frac{1}{q_{ult}} \varepsilon_{sf}} \quad (10)$$

式中: $3G_i$ 为图中曲线的初始切线斜率; G_i 为初始流变剪切模量; q_{ult} 为图中曲线的渐近线。对式(10)进行微分计算, 得切线流变剪切模量为

$$G = \frac{1}{3} \frac{\partial q}{\partial \varepsilon_s} = G_{i0} (1 - R_{sf} S)^2 \quad (11)$$

G_{i0} 为初始流变剪切模量, 可参照式(12)确定:

$$G_{i0} = k_s p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{n_s} \quad (12)$$

式中: S 为应力水平; p_a 为大气压力; R_{sf} 为破坏

比, 与 k_s 、 n_s 为模型参数, 可根据试验资料整理得到。

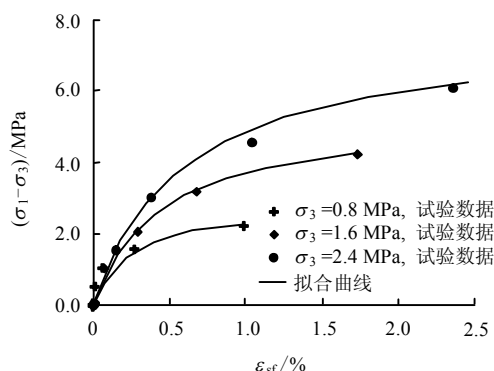


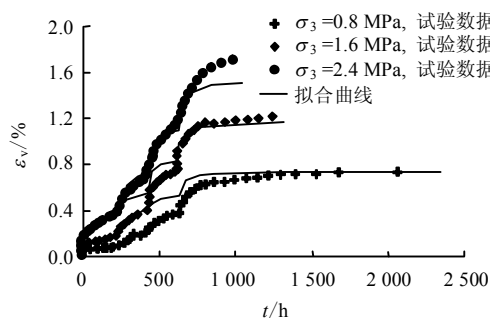
图 5 偏应力与最终广义剪应变的关系
Fig.5 Relationships between shearing strength and finally shearing rheological value

最后, 整理得到的流变模型参数见表 3。

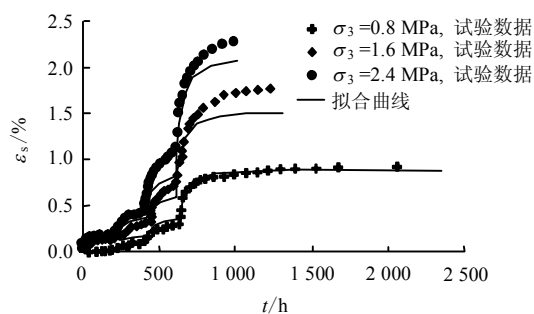
表 3 流变模型参数

k_s	n_s	k_v	n_v	R_{sf}	C	α
2 858	0.126	578	0.26	0.97	0.106	0.60

利用建议模型, 根据表 3 参数进行反算得到计算值, 与试验数据比较见图 6 所示, 两者基本吻合。



(a) 体积流变



(b) 剪切流变

图 6 模型计算值与试验数据比较
Fig.6 Comparison between calculated values and test data

3 模型的试验验证

图 7 示出花岗岩堆石料试样围压为 0.8 MPa 时采用一次性全量加载的流变试验结果。为便于比较, 将 2.2.1 节按应力水平 S 从 0.2→0.4→0.6→0.8 分 4 次逐级施加增量荷载, 测得的流变试验结果也绘于图中。

由图可见, 两种加载方式下试样实测的总变形量是一致的, 其最终体积应变为 2.7%, 最终轴向应变为 1.3%。在围压同为 0.8 MPa 的前提下, 由于两种加载方式对应的常规三轴试验都是沿着 $\Delta q / \Delta p = 3.0$ 的相同应力路径进行, 试样在试验过程中产生的瞬变总量相等, 所以两种不同加载方式试样产生的流变总量必然相等, 亦即试样一次性全量加载方式产生的流变量等于采用增量加载方式对应各级应力状态下的流变量之和。说明具有非线性特性的堆石流变, 仍然符合 Boltzmann 继效理论, 满足叠加原理。

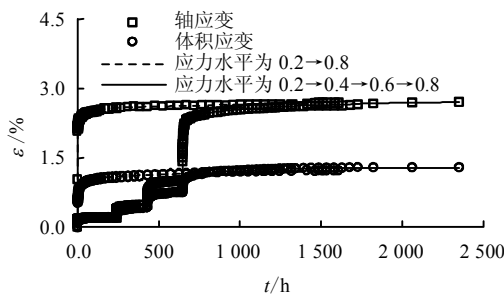


图 7 两种加载方式的流变试验结果
Fig.7 Rheological measured values under two loading paths

假如堆石流变仅仅取决于应力状态, 则当试验的应力水平同为 0.8 时, 两种加载方式下试样产生的流变量相等, 必然导致采用逐级加载方式时, 试样应力水平从 0.2→0.4→0.6 加载过程中产生的流变量等于 0 的错误结论。可见, 对于变应力作用过程而言, 全量流变模型在理论上是不能准确地计算土体流变的。

值得一提的是, 目前研究复杂应力条件下粗粒料的流变问题, 都是在室内应力控制式三轴流变试验基础上进行的。由于试样的流变易于稳定, 一般在前一级荷载作用下流变完成后再施加下一级荷载, 测读新的流变数据。为此, 根据式 (6)、(7), 在第 k 级应力增量作用下试样的累积流变量为

$$\varepsilon_v(t) = \sum_{i=1}^{k-1} \Delta \varepsilon_{vfi} + \Delta \varepsilon_{vfk} \left(1 - e^{-C(t-\zeta_k)^\alpha} \right) \quad (13)$$

$$\varepsilon_s(t) = \sum_{i=1}^{k-1} \Delta \varepsilon_{sfi} + \Delta \varepsilon_{sfk} \left(1 - e^{-C(t-\zeta_k)^\alpha} \right) \quad (14)$$

试样在前 $k-1$ 级历史荷载产生的流变已经完成, 不会影响第 k 级应力增量作用下的流变衰减规律, 为考虑流变遗传效应的特例。

对于常规三轴流变试验, 当采用模拟实际土石坝分层碾压施工的分级加载方式时, 则根据式 (13)、(14) 可知, 第 k 级 ($k > 1$) 试验荷载作用下测得的流变为该级荷载作用下的流变增量。此时, 全量流变模型将该级流变增量, 视为当前应力状态的函数, 通过拟合试验曲线整理模型参数, 显然漏掉了试样在前 $k-1$ 级历史荷载作用下产生的流变, 违背了经典的继效理论。

4 关于流变初始时间 t_0 的确定

对堆石料的流变特性进行研究时, 如何选取合理的流变初始时间 t_0 非常重要。图 8 为双江口与猴子岩两工程筑坝堆石料的典型流变试验结果, 可见与 Mica 坝的试验资料类似^[12], 加载后堆石料不同时刻对应的变形规律不一致, 无论是轴向应变速率还是体积应变速率, 都存在拐点现象。

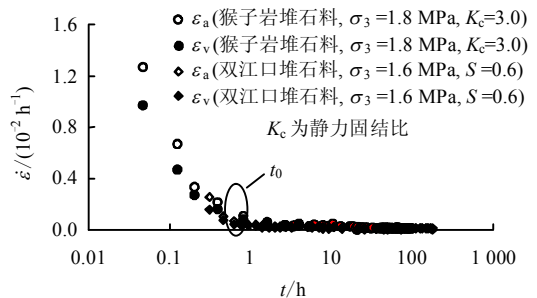


图 8 流变初始时间 t_0
Fig.8 Rheological initial time t_0

依据图中变形速率分布, t_0 取为 0.75 h, 对应起始流变的应变速率约为 0.0012 h^{-1} 。

5 结 论

(1) 全量型流变模型认为流变仅与应力状态有关, 难以反映应力路径或应力历史对堆石流变的影响, 不能考虑变应力作用下堆石流变的遗传效应。

(2) 试验得到各级增量荷载作用下的最终体积流变量与对应体积应力之间为近似线性关系, 而最终剪切流变量与对应的试验广义剪应力之间接近双曲线关系。

(3) 式 (6)、(7)、(9)、(11) 构成复杂应力条件下粗粒料的增量流变模型, 模型参数分别为 R_{sf} 、

C 、 α 、 k_s 、 n_s 、 k_v 、 n_v 共 7 个, 可由室内三轴流变试验结果确定, 或根据大坝原型监测资料反演确定。

参 考 文 献

- [1] BJERRUM L. Engineering geology of normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings[J]. *Geotechnique*, 1967, 17(2): 82—118.
- [2] PARKIN A K. Creep of rockfill[C]//Advances in Rockfill Structure. London: Kluwer Academic Publishers, 1991: 221—237.
- [3] 沈珠江, 左元明. 堆石料的流变特性试验研究[C]//第六届土力学及基础工程学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 1991: 443—446.
- [4] 梁军, 刘汉龙. 面板坝粗粒料的蠕变试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 257—259.
LIANG Jun, LIU Han-long. Creep test for rockfill of CFRD[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(2): 257—259.
- [5] 程展林, 丁红顺. 堆石料蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 473—476.
CHENG Zhan-lin, DING Hong-shun. Creep test for rockfill[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(4): 473—476.
- [6] 李国英, 米占宽, 付华. 混凝土面板堆石坝堆石料流变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1712—1716.
LI Guo-ying, MI Zhan-kuan, FU Hua. Experimental studies of rheological behaviors for rockfills in concrete faced rockfill dam[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(11): 1712—1716.
- [7] 范广勤. 岩土工程流变力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [8] 沈珠江. 土石料的流变模型及其应用[J]. 水利水电科学, 1994, (4): 335—342.
SHEN Zhu-jiang. A creep model of rockfill material and determination of its parameters by back analysis[J]. *Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute*, 1994, (4): 335—342.
- [9] 维亚洛夫 C C. 土力学的流变原理[M]. 杜余培译. 北京: 科学出版社, 1987.
- [10] 长江科学研究院. 双江口堆石坝粗粒料的蠕变试验研究[R]. 武汉: 长江科学研究院, 2008.
- [11] 杨挺青. 黏弹性力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.
- [12] RONALD C HIRSCHFELD, STEVE J POULOS. Embankment-dam engineering Casa Grande volume[M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 1973: 185—191.

《岩土力学》2011 年第 7 期被 EI 收录论文 (50 篇, 收录率 100%) (1)

序号	论文题名	作 者	页 码
1	含水率和颗粒级配对 TJ-1 模拟月壤力学性能影响的试验研究	蒋明镜, 李立青, 刘 芳, 等	1921—1925
2	水平循环荷载下风电机组基础离心模型试验研究	王富强, 荣 冰, 张 嘎, 等	1926—1930
3	复杂应力条件下原状饱和海洋黏土残余变形特性试验研究	刘功勋, 栾茂田, 唐小微, 等	1931—1938
4	高陡边坡滑坡体黄土的强度特性研究	廖红建, 李 涛, 彭建兵	1939—1944
5	含浅层气砂土的赋存特征及其非饱和参数预测	王 勇, 孔令伟, 郭爱国, 等	1945—1950
6	荷载作用下土体气压劈裂效果试验研究	韩文君, 刘松玉, 章定文	1951—1956
7	充气锚杆在砂土中的模型试验研究	曹佳文, 彭振斌, 彭文祥, 等	1957—1962
8	膨润土改性黄土衬里防渗性能室内测试与预测	张虎元, 赵天宇, 吴军荣, 等	1963—1969
9	扩底桩桩端承载机制初探	文松霖	1970—1974
10	桩承式路堤土拱效应的试验和数值研究	费 康, 王军军, 陈 毅	1975—1983
11	软土地区扩孔灌浆预制管桩承载力研究	刘永超, 郑 刚	1984—1990
12	循环荷载下花岗岩细观损伤量化试验研究	倪晓慧, 朱珍德, 李晓娟, 等	1991—1995
13	基于黄土物理化学性质变化的固化土强度影响因素分析	樊恒辉, 高建恩, 吴普特, 等	1996—2000
14	强夯激励下黄土边坡动力响应模型试验研究	龚成明, 程谦恭, 刘争平	2001—2006
15	非饱和压实膨胀土渗透特性的试验研究	崔 颖, 缪林昌	2007—2012
16	节理峰值后归一化位移软化模型	唐志成, 夏才初, 黄继辉, 等	2013—2016
17	颗粒运移对蒋家沟土体渗透性影响的试验研究	王志兵, 汪 稔, 胡明鉴, 等	2017—2024
18	橡胶颗粒改良粉煤灰土的动力特性试验研究	李长雨, 刘寒冰, 魏海斌	2025—2028
19	基于统计损伤的井壁坍塌压力模型	邱 康, 陈 勉, 金 衍	2029—2033
20	桥基岸坡变形破坏机制物理模拟研究	王 华	2034—2038
21	PS 加固对非饱和遗址土的渗透特性影响研究	李最雄, 邵明申, 陈 锐	2039—2044
22	残积土抗剪强度的环剪试验研究	吴 迪, 简文彬, 徐 超	2045—2050
23	高速铁路路基戈壁填土地基系数与变形模量分析	杨有海, 黄大维, 赖国泉, 等	2051—2056
24	大型地下厂房区域地应力场多源信息融合分析方法及工程应用	黄书岭, 张 勇, 丁秀丽, 等	2057—2065
25	横观各向同性岩体中圆形巷道反分析的惟一性	张志增, 李仲奎	2066—2072

(未完, 见第 3496 页)