文章编号:1672-3031(2017)05-0360-06

砾质土心墙料蠕变对坝体应力变形的影响

徐 晗,程展林,左永振,潘家军
(长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室,湖北 武汉 430010)

摘要:针对砾质土蠕变特性的研究成果较少,原因在于砾质土含有大量渗透性较低的细粒,大试样固结排水效果差,难以获得较好的蠕变试验成果。采用在砾质土大型三轴试样中钻孔灌砂以加速试样的排水固结的方法,进行了某高土质心墙堆石坝砾质土心墙料的蠕变试验,获得了砾质土心墙料的蠕变模型及参数,建立了高心墙坝的三维有限元模型,采用非线性有限元研究了砾质土心墙料蠕变特性对坝体应力变形的影响。研究成果表明:九参数幂级数蠕变模型能较好地描述砾质土的蠕变特性;上、下游坝壳的蠕变对心墙自身变形的影响较小,需要在坝体应力变形计算中考虑心墙料蠕变的影响;当心墙料的蠕变速率快于周围堆石体时,蠕变效应会进一步增加心墙拱效应,反之,蠕变效应会减小心墙拱效应。

关键词:砾质土心墙料;九参数幂级数蠕变模型;钻孔灌砂;心墙的蠕变速率
中图分类号:TV641.1 **文献标识码**:A **doi**:10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.05.005

1 研究背景

随着西部大开发战略的进行,土石坝的建设规模越来越大,坝高逐步向300 m级发展,国内学者开始重视高土石坝的蠕变对坝体应力变形的影响[1-3]。目前,国内外针对堆石料等排水性能较好材料的蠕变特性的研究较多[4-10],提出了较多的针对粗粒土的蠕变模型。而对砾质土蠕变特性的研究甚少[11],原因在于砾质土含有大量渗透性较低的细粒,大试样固结排水效果差,排水不充分会导致瞬间变形偏小,试验中蠕变变形不真实。

长江科学院提出在砾质土心墙料大型三轴试验中采用钻孔灌砂以加速试样的排水固结[12],取得了较好的试验效果。在此基础上进行了某砾质土心墙料的蠕变试验,获得了砾质土心墙料的蠕变模型及参数,编制了相应的蠕变子程序,建立了高心墙坝的三维有限元模型,采用非线性有限元研究了砾质土心墙料蠕变对坝体应力变形的影响。

2 砾质土心墙料的蠕变试验

砾质土心墙料控制干密度为2.20 g/cm^3,试验级配是以砾质土心墙料平均级配经缩尺后的级配,如下表1所示,三轴试样为Φ300×600 mm,试验中对试样进行试样内部成孔并灌注标准砂,以加速试样的排水固结。5个钻孔直径均为6 mm,砂芯的面积置换率占0.2%,三轴试验表明,砂芯的设置对土试样的强度及变形特性基本无影响[12]。

表1 砾质土心墙料试验级配

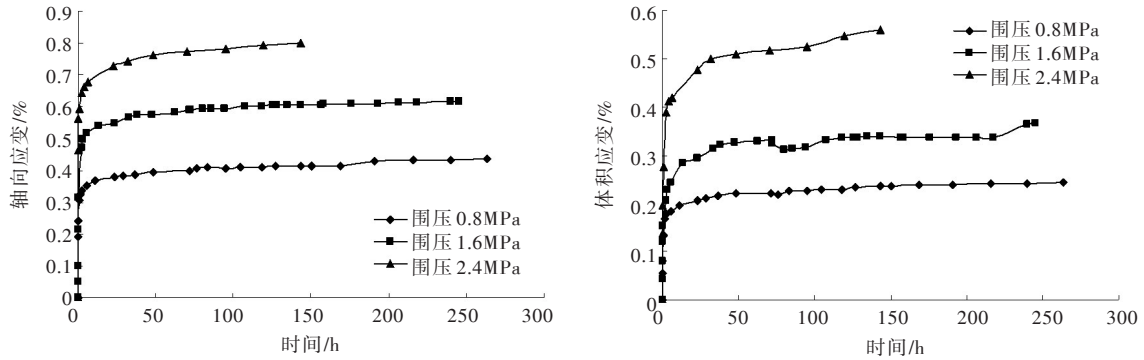
粒径/mm	60~40	40~20	20~10	10~5	<5	合计
百分含量/%	13.93	13.61	12.34	12.34	47.78	100

根据高坝的坝高等实际设计资料,设置0.8 MPa、1.6 MPa、2.4 MPa三种围压,对每一种围压,分别施加0.2、0.4、0.6、0.8四种偏应力水平,研究在不同偏应力水平及不同围压条件下,砾石土心墙料的蠕变特性。各级应力水平下的竖向荷载是根据常规三轴试验确定的强度指标及相应的围压计

收稿日期:2016-03-03
基金项目:国家自然科学基金项目(51309029);长江科学院院所基金(CKSF2016272/YT,CKSF2015036/YT)
作者简介:徐晗(1978-),男,湖北公安人,博士,高级工程师,主要从事岩土工程数值分析研究。E-mail:mechanics007@aliyun.com

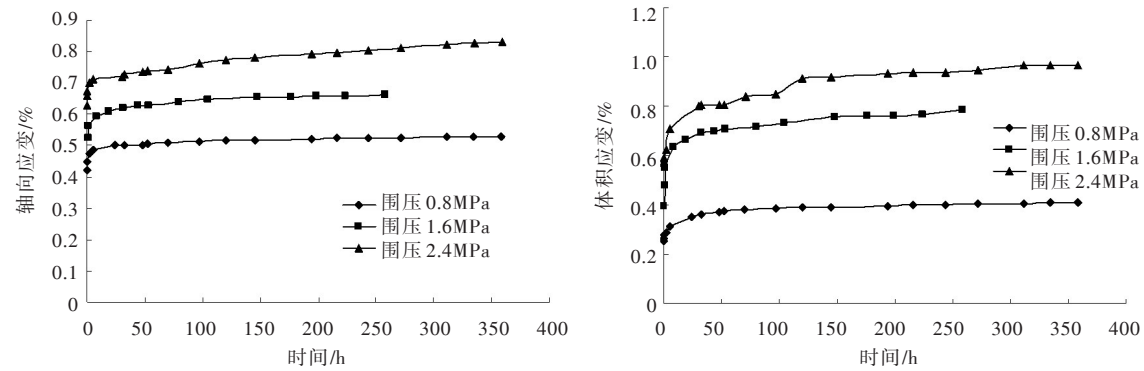
算，变形稳定以每24 h的轴向变形量不大于0.02 mm为控制标准，当变形趋于稳定后施加下一级荷载。

其应力水平0.2、0.4、0.6和0.8时轴向应变和体积应变与时间的关系曲线见图1—4所示，可知砾石土心墙料的蠕变过程是逐渐趋于停止的衰减曲线，前期的瞬时变形较大，后期逐渐趋于稳定。



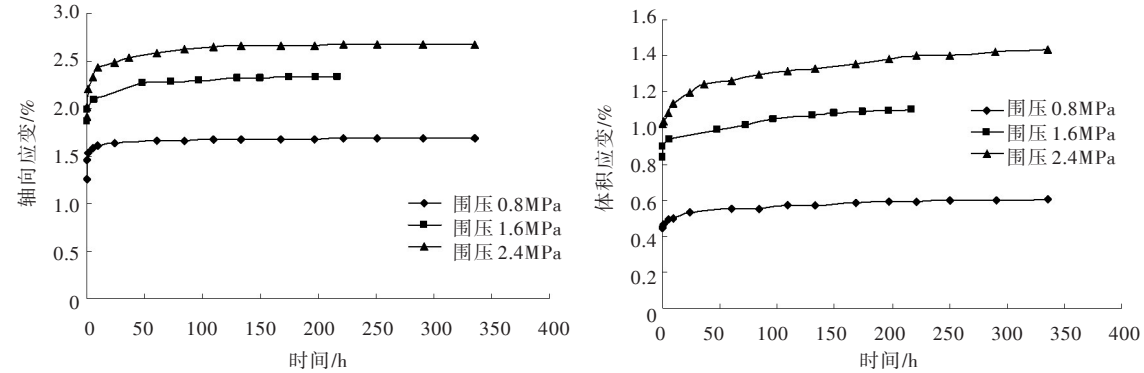
（a）轴向应变与时间关系　　（b）体积应变与时间关系

图1　应力水平0.2时蠕变试验曲线



（a）轴向应变与时间关系　　（b）体积应变与时间关系

图2　应力水平0.4时蠕变试验曲线



（a）轴向应变与时间关系　　（b）体积应变与时间关系

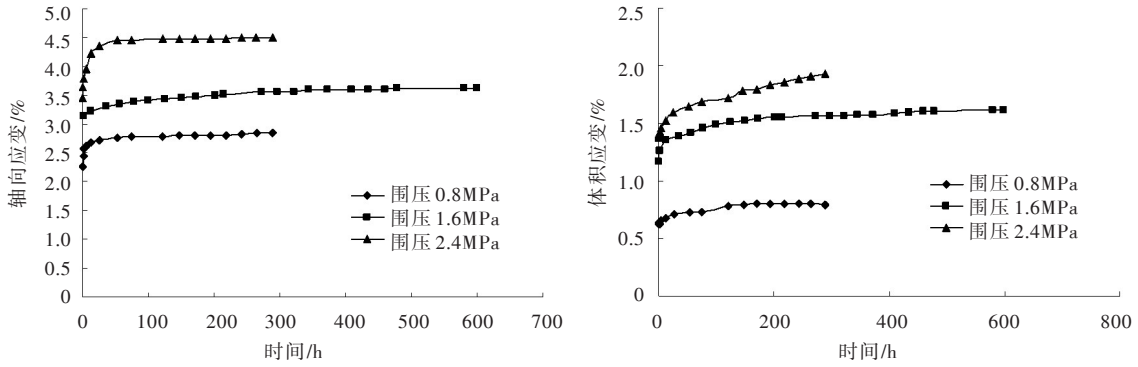
图3　应力水平0.6时蠕变试验曲线

3　粗粒土的九参数幂级数蠕变模型

九参数幂级数蠕变模型由长江科学院提出，根据试验结果认为粗粒土的轴向蠕变和体积蠕变均可用幂函数表达[7]：

$$\varepsilon_a(t)=\varepsilon_{af}\left(1-t^{-\lambda_a}\right) \tag{1}$$

$$\varepsilon_v(t)=\varepsilon_{vf}\left(1-t^{-\lambda_v}\right) \tag{2}$$



（a）轴向应变与时间关系　　（b）体积应变与时间关系

图4　应力水平0.8时蠕变试验曲线

式中：ε_{af}和ε_{vf}分别为某个应力状态下最终轴向蠕变量和最终体积蠕变量，$\varepsilon_a(t)$和$\varepsilon_v(t)$分别为0～t时段内累计的轴向和体积蠕变量，λ_a和λ_v分别为累计轴向和体积蠕变相关的时间幂指数。

最终轴向蠕变量ε_{af}与围压σ_3应及力水平S_L有如下关系：

$$\varepsilon_{af}=\frac{cS_L}{1-dS_L}\sigma_3 \tag{3}$$

式中：c和d为无量纲参数。

λ_a与应力水平S_L基本无关，且λ_a与围压σ_3的关系可以用如下幂函数表示：

$$\lambda_a=\eta\sigma_3^{-m} \tag{4}$$

式中：η和m为无量纲参数。

ε_{vf}与围压σ_3和应力水平S_L可用线性函数拟合：

$$\varepsilon_{vf}=c_\alpha S_L^{d_\alpha}+c_\beta S_L^{d_\beta}\sigma_3 \tag{5}$$

式中：c_α、d_α、c_β和d_β为无量纲参数。

λ_v与应力状态关系不明显，可以假定为常数：

$$\lambda_v=\text{const} \tag{6}$$

开展了上、下游堆石料、砾质土心墙料的室内蠕变试验，对试验数据进行分析后表明，长江科学院粗粒土九参数幂级数蠕变模型能较好地描述砾质土心墙料的蠕变特性。各坝料试验所获所得的九参数幂函数蠕变本构模型参数见下表2所示，在公式中时间单位以小时计，应力单位以MPa计。值得说明的是，堆石料的缩尺方法有一定的尺寸效应，会影响堆石料的蠕变变形，总体上说，大尺寸试样的变形量大于小尺寸试样的变形量，因而会导致数值计算沉降值会小于实际工程实测值[6]。

表2　坝料九参数幂函数蠕变本构模型参数

材料	c	d	η	m	c_α	d_α	c_β	d_β	λ_v
下游堆石料	1.232	0.684	0.084	0.152	0.662	1.961	0.725	0.511	0.083
上游堆石料	1.897	0.324	0.084	0.056	0.841	1.336	1.256	0.578	0.074
砾质土心墙料	1.224	0.214	0.081	0.061	0.044	0.351	0.932	0.771	0.077

4　蠕变对坝体变形的影响

建立某高土质心墙堆石坝三维有限元模型，将分析结果分别按照完建期与蓄水期整理。采用三维有限元软件Marc计算，得到的考虑蠕变与不考虑蠕变的坝体极值结果比较见表3所示。

表3　考虑蠕变与不考虑蠕变结果比较

项目		完建期/m		蓄水期/m	
		无蠕变	蠕变	无蠕变	蠕变
水平位	向上游	−0.41	−0.40	−0.30	−0.22
	向下游	0.67	0.67	1.11	1.25
竖向位移		−3.13	−3.42	−3.06	−3.49

以图5中最大断面心墙内部4个不同高程的节点为例，图6监控点位移蠕变过程曲线表示心墙内部4个不同高程位置的节点的水平位移、沉降蠕变过程。心墙底部监控节点1经历的蠕变时间最长，在逐步的加载过程中产生了明显的蠕变，并且蠕变逐渐趋于稳定；心墙顶部监控节点4经历的蠕变时间最短，但也逐步趋向于稳定值。对比四个不同位置高程的监控节点水平位移与沉降蠕变曲线可知，其计算得到的蠕变曲线与试验曲线规律基本一致。

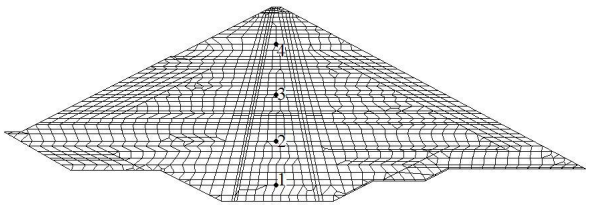
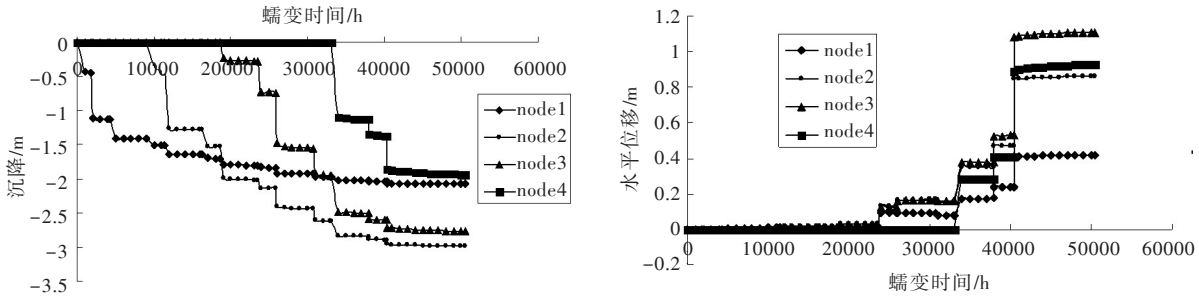


图5　心墙不同高程监控点位置示意



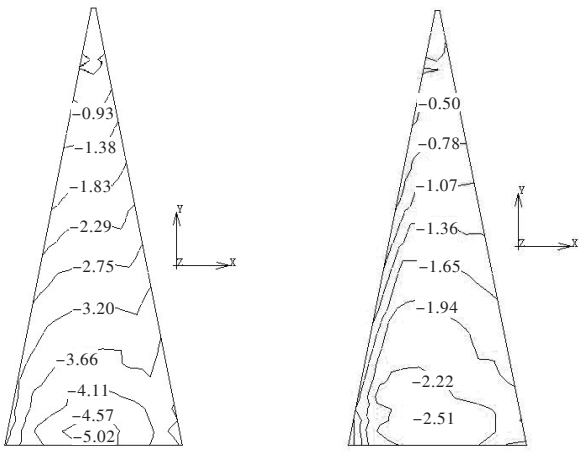
（a）沉降　　（b）水平位移

图6　监控点位移蠕变过程

当考虑坝体蠕变后，蓄水期坝体最大沉降为3.49 m，比不考虑蠕变的坝体的最大沉降增大约43 cm左右；考虑蠕变效应蓄水期坝体最大顺河向位移为1.23 m，比不考虑蠕变的坝体最大顺河向位移增大约12 cm，表明蠕变效应主要引起坝体下沉，对水平位移的影响较小。

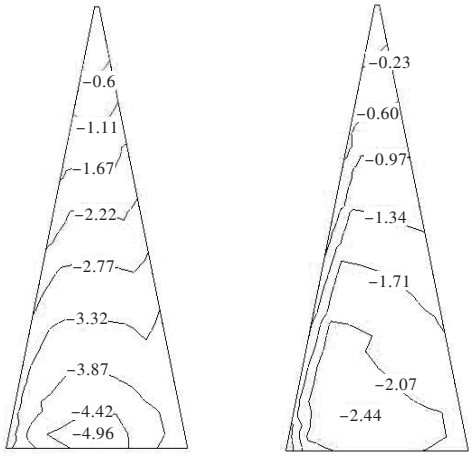
5　蠕变对坝体应力的影响

应力符号以受压为负。图7—8分别为不考虑蠕变与考虑蠕变蓄水期心墙最大断面主应力等值线图，可知两者规律基本接近，只是数值有差异。考虑蠕变后，心墙的最大主应力极值由-5.02 MPa下降到-4.96 MPa，心墙的最小主应力极值由-2.51 MPa下降到-2.44 MPa，究其原因在于心墙较软，其



（a）最大主应力　　（b）最小主应力

图7　不考虑蠕变蓄水期心墙最大断面主应力等值线/MPa



（a）最大主应力　　（b）最小主应力

图8　考虑蠕变蓄水期心墙最大断面主应力等值线/MPa

蠕变的速率要明显快于周围堆石体，进一步加剧了心墙的拱效应，不利于心墙的受力，因此，应采取措施减小心墙的蠕变率。

为了研究心墙料蠕变与否对坝体应力变形的影响，分别计算对比了考虑所有坝料的蠕变特性与仅考虑上、下游堆石体的蠕变两种工况，其计算结果如下表4所示。

表4　考虑心墙蠕变与不考虑心墙蠕变结果比较

项目		完建期/m		蓄水期/m	
		无心墙蠕变	心墙蠕变	无心墙蠕变	心墙蠕变
水平位移	向上游	−0.37	−0.40	−0.24	−.22
	向下游	0.70	0.67	1.35	1.25
竖向位移		−3.24	−3.42	−3.22	−3.49

由表4可知，如果不考虑心墙料的蠕变而仅考虑堆石体的蠕变，蓄水期坝体变形最大值为−3.22 m，与完全不考虑蠕变最大沉降−3.06 m相比，仅增加了16 cm的蠕变量，而考虑了心墙料蠕变后增加了43 cm的蠕变量，说明上、下游坝壳的蠕变对心墙自身变形的影响较小，蠕变计算中应该考虑砾质土心墙料蠕变的影响。

6　结论

（1）上、下游坝壳的蠕变对心墙自身变形的影响较小，需要在坝体应力变形计算中考虑心墙料蠕变的影响，因而有必要进行砾质土心墙料的蠕变试验，试验结果表明九参数幂级数蠕变模型能较好地描述砾质土的蠕变特性；（2）蠕变效应主要引起坝体下沉，对坝体水平位移的影响不大，考虑了坝体的蠕变后，坝体的变形会更真实地反映实际坝体的运行状况；（3）如果砾质土心墙料的蠕变速率快于周围堆石体，则心墙的大、小主应力与不考虑蠕变相比有所减小，蠕变效应会进一步增加心墙拱效应，对心墙水力劈裂不利；反之，蠕变效应会减小心墙拱效应，有利于抑制心墙水力劈裂。

参　考　文　献：

[1] 程展林，潘家军．水布垭面板堆石坝应力变形监测资料分析[J]．岩土工程学报，2012，34(12)：2299−2306．

[2] ATHANASIU C，SIMONSEN A S，SOEREIDE O K，et al．Elastic and creep settlements of rock fills[C]//Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering．2005，Vols 1−5：1837−1843．

[3] ZIMMERER M M，SCHANZ T，LINS Y，et al．Numerical analysis of water reservoir dam−Prediction of long term performance of Versetal dam[C]//Proceedings of the International Symposium on Dams and Reservoirs under Changing Challenges−79 Annual Meeting of ICOLD．2011：321−330．

[4] 李海芳，张茵琪，金伟，等．堆石料蠕变特性试验研究[J]．水力发电学报，2013，32(1)：213−217．

[5] 梁军，刘汉龙．面板坝堆石料的蠕变试验研究[J]．岩土工程学报，2002，24(2)：257−259．

[6] 花俊杰，周伟，常晓林，等．堆石体应力变形的尺寸效应研究[J]．岩石力学与工程学报，2010，29(2)：328−335．

[7] 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．

[8] 朱晟，王永明，徐骞．粗粒筑坝材料的增量蠕变模型研究[J]．岩土力学，2011，32(1)：3201−3207．

[9] 王勇，殷宗泽．一个用于面板坝蠕变分析的堆石蠕变模型[J]．岩土力学，2000，21(3)：227−230．

[10] 李国英，赵魁芝，米占宽．堆石体蠕变对混凝土面板坝应力变形特性的影响[J]．岩土力学，2005，26(S)：117−120．

[11] 王观琪，余挺，李永红，等．300m级高土石心墙坝蠕变特性研究[J]．岩土工程学报，2014，36(1)：140−145．

[12] 徐晗，黄斌，饶锡保，等．三轴试样钻孔灌砂固结排水效果试验研究[J]．岩土力学，2009，30(11)：3242−3248．

（下转第370页）

An alternate concreting technology of lining canal without contraction joint

LU Wenhong[1], ZHANG Caishi[2], CHEN Huatang[1], JIANG Hongyan[2]
(1. *China Irrigation and Drainage Development Center, Beijing* 100054, *China*;
2. *Shuangpai Reservoir Administration of Hunan, Yongzhou* 425100, *China*)

Abstract: Traditional lining canals poured-in-place concreting normally set up expansion joints and water seal to prevent concrete crack, but the water seal is easily damaged due to structure aging and weeds growing. The failure of water seals causes great seepage loss of canals. In order to overcome these shortcomings, a new concreting technology of lining canal without contraction joint is proposed. Based on practices over the past twenty years, the main construction procedures, operating principles and technical requirement are summarized such as: foundation surface treatment, casting intervals, pouring, vibrating and plastering of concrete. The application scope of this technology is also introduced. The results of practical application indicate that this technology can provide convenient and fast construction, reduce the construction period and expenditure, effectively control project quality, increase service life and enhance the waterproof effect.

Keywords: concrete lining canal; alternate bay concreting; contraction joint

（责任编辑：李福田）

（上接第 364 页）

Influence of gravel soil core wall's creep characteristics on the stress and deformation of dam

XU Han, CHENG Zhanlin, ZUO Yongzhen, PAN Jiajun
(*Changjiang River Scientific Research Institute*
Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, *China*)

Abstract: At present, there are limited findings on creep characteristics of gravel soil. A major reason is that the gravel soil contains a large number of fine particles with low permeability. Correspondingly, the consolidation and drainage effect of large sample is weak, which indicates non-reliable creep test results. In this paper, the creep test of a gravel soil used for a high earth core wall rockfill dam is carried out by using the drilling hole and filling sand method in the large gravel soil triaxial specimen to accelerate its drainage and consolidation effect. A creep model and related parameters of the gravel soil are acquired. A three-dimensional finite element model of high earth core wall rockfill dam is established. The influence of the creep characteristics of gravel soil core wall on the stress and deformation of the dam is studied utilizing a nonlinear finite element method. The results show that the creep model with nine parameters and power series has a better performance on describing the creep behavior of the gravel soil. The creep of the upper and lower dam shells has little effect on the deformation of the core wall. The creep effect of the core wall needs to be calculated in the stress and deformation of the dam. When the creep rate of the core wall is faster than that of the surrounding rockfill, the creep effect will further increase the core wall's arching effect. On the contrary, the creep effect will reduce the core wall's arching effect.

Keywords: gravel soil core wall; the creep model with nine parameters and power series; drilling hole and filling sand method; the creep rate of the core wall

（责任编辑：杨　虹）