

# 抽水蓄能电站过渡过程计算影响因素分析

郑应霞,胡雄峰,邱绍平

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 310014)

**摘要:**过渡过程计算是调节保证设计的一种计算手段,也是调节保证设计的基础。以国内某抽水蓄能电站可行性研究阶段的过渡过程计算过程为例,通过利用 Hysim 软件,计算分析了电站吸出高度、转轮模型特性、尾水洞洞径的大小、机组转动惯量以及导叶关闭规律等因素对过渡过程计算结果的影响。分析结果表明,电站吸出高度和转轮模型特性对过渡过程计算结果影响更为显著;由于电站的吸出高度和枢纽布置方案在可研阶段基本上已经确定,而不同厂家研发的机组所具有的特性又各不相同,因此,在实施机组招标时,应重视机组特性对过渡过程计算的影响,以满足调节保证设计的要求。

**关键词:**过渡过程;吸出高度;转轮模型特性;转动惯量;导叶关闭规律;抽水蓄能电站

中图法分类号:TV734

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.16.018

## 1 项目概述

水电站的调节保证设计关系到电站工作人员、设备以及建筑物的安全,因此在各个设计阶段都必须引起高度的重视<sup>[1]</sup>。同时,根据水利水电规划总院颁布的《水电站输水发电系统调节保证设计专题报告编制暂行规定(试行)》(以下简称“暂行规定”)中的规定,电站可行性研究阶段(以下简称“可研阶段”)审定的调节保证设计成果是作为以后电站设计、机组招标以及电站验收的基本依据,不得随意更改<sup>[2]</sup>。因此,可研阶段的调节保证设计对整个电站的设计尤为重要。

在调节保证设计过程中,最为重要的是过渡过程的计算。而过渡过程计算又受到计算软件、输水系统的布置、尾水洞洞径大小、电站吸出高度、转轮模型特性、机组转动惯量以及导叶关闭规律等因素的影响。本文以国内某抽水蓄能电站可研阶段成果为例,利用复杂系统的水力过渡过程仿真计算软件 Hysim 为计算平台,分析了吸出高度、转轮模型特性、尾水洞洞径的大小、机组转动惯量以及导叶关闭规律对过渡过程计算结果的影响。

## 2 计算实例概述

在可研阶段,国内某抽水蓄能电站 J 的主要参数为:总装机容量为 1 200 MW,安装有 4 台单机容量为 300 MW 的可逆式水轮发电机组;上库正常蓄水位为 593 m,死水位为 569 m;下库正常蓄水位为 255 m,死水位为 225 m;水泵水轮机毛水头/扬程范围为 314 ~ 368 m,额定水头为 330 m,额定转速为 333.3 r/min,吸出高度为 -65 m;机组转动惯量(不含水泵水轮机)为 9 000 t·m<sup>2</sup>。

枢纽建筑物主要由上水库、下水库、输水系统、地下厂房及开关站等组成,地下厂房采用尾部布置方案。输水系统采用两洞四机的布置方式,分为 2 个独立的一洞两机水力单元;在每个水力单元输水系统的引水隧洞末端布置阻抗式调压室,输水系统总长约为 3 277.8 ~ 3 292.9 m,其中引水系统全长约为 2 830.7 ~ 2 845.8 m,尾水系统全长约 447.1 m。

## 3 过渡过程计算控制值

在该电站确定的调节保证设计参数中,计算控制

值如下。

- (1) 机组蜗壳进口最大压力值不大于568.6 m；
- (2) 机组最大转速上升率  $\beta_{\max} \geq 45\%$  (导叶正常关闭)；
- (3) 尾水管最小内水压力:在设计工况下  $H_{w\min} \geq 14$  m,在校核工况下  $H_{w\min} \geq 7$  m；
- (4) 输水系统沿线洞顶最小内水压力  $H_{amin} \geq 2$  m。

4 机组特性对过渡过程计算的影响

4.1 吸出高度的影响分析

在可研阶段,将该电站的吸出高度确定为 -65 m,对应的下库死水位为 225 m,水泵水轮机的安装高程确定为160.0 m,对应最小扬程时的下库水位为 255 m,水泵水轮机最大埋深约为 -95 m。不同吸出高度  $H_s$  时的相继甩负荷尾水管最小压力值列于表 1。从表 1 中可以看出,吸出高度对尾水进口最小压力的影响较大,绝对吸出高度越大对尾水管进口最小压力越有利;但是绝对吸出高度的增加会加大电站的开挖量,进而也会增加投资,同时,也会对进厂交通洞等附属洞室的布置带来很大的影响。

表 1 不同 $H_s$ 时相继甩负荷尾水管进口最小压力 m		
吸出高度	最小压力	计算修正后值
-60	8.17	-9.89
-63	10.17	-7.99
-65	13.17	-3.89
-67	15.17	-1.89

注:上库正常蓄水位 593 m,下库死水位 225 m,2 台机组正常运行,1 台机组突甩全负荷,在最不利时刻另 1 台机组突甩全负荷,导叶正常关闭。

4.2 机组转轮模型的影响分析

在可研阶段,机组制造厂商尚未开展针对该电站的水力模型开发工作,因此不具备有针对性的过渡过程计算所必须的水泵水轮机模型特性曲线。在该阶段,借鉴了相近水头段水泵水轮机模型特性曲线来开展过渡过程计算工作<sup>[3]</sup>。

国内外部分与抽水蓄能电站 J 水头相近 (300 ~ 400 m 水头范围) 的抽水蓄能电站及其主要参数列于表 2。

表 2 部分相近水头段抽水蓄能电站主要参数						
项目	水轮机水头/ m	水泵扬程/ m	水轮机额定 功率/ MW	额定转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	水泵最低 扬程时转速/ ( $m \cdot m^3 \cdot s^{-1}$ )	吸出 高度/ m
电站 J	364.5 ~ 330.0 ~ 303.9	374.5 ~ 318.2	305.2	333.3	43.5	-65
电站 A	329.4 ~ 308.0 ~ 288.0	334.1 ~ 296.5	306.0	333.3	45.9	-64
电站 B	331.5 ~ 295.0 ~ 268.2	337.6 ~ 276.2	306.0	300.0	45.2	-50
电站 C	341.8 ~ 305.0 ~ 282.8	350.1 ~ 294.96	255.0	333.3	42.0	-48
电站 D	397.5 ~ 360.0 ~ 328.0	408.5 ~ 346.5	260.0	428.6	45.1	-82

从表 2 可以看出,A、B、C、D 4 座抽水蓄能电站的比转速水平与电站 J 相当。电站 J 在上述各电站特性曲线上的运行范围见图 1~4。从图 1~4 可以看出,电站 J 运行范围在电站 D 特性曲线上较优,该特性曲线的“S”特性相对较为平缓;“S”区离低水头工况下运行范围相对较远,机组的低水头并网稳定性相对较优。根据在电站 A、电站 B 和电站 C 的特性曲线上所反映出来的电站 J 的运行范围,可以看出,其处于低水头段,运行范围和“S”特性区域比较接近,可能会对机组低水头运行并网等带来困难。但是考虑到 A 电站的水头和容量范围以及转速与本工程最为接近,因此,最终选择了电站 A 和电站 D 这 2 座电站的水泵水轮机转轮特性曲线。作为过渡过程计算分析用的代表性曲线,并将其用于对水泵水轮机转轮特性曲线的改变对输水系统及发电机组有关设计参数的影响展开比较分析。

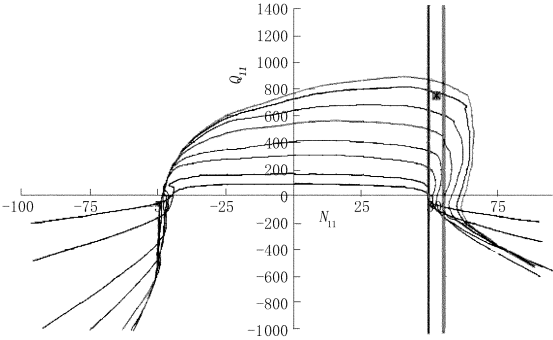


图 1 电站 J 在电站 A 特性曲线上的运行范围

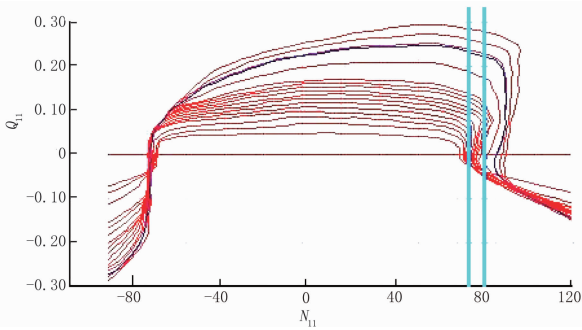


图 2 电站 J 在电站 B 特性曲线上的运行范围

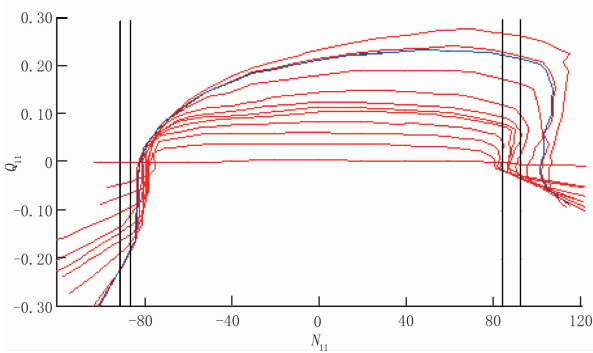


图 3 电站 J 在电站 C 特性曲线上的运行范围

针对蜗壳进口最大压力、尾水管进口最小压力的

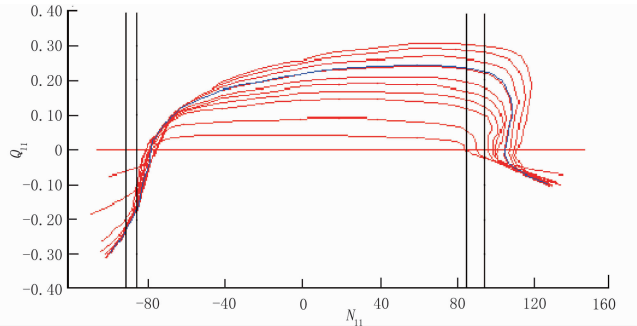


图 4 电站 J 在电站 D 特性曲线上的运行范围

控制性工况进行了相关计算和分析,不同转轮特性的计算成果见表 3。

特性曲线	蜗壳进口	尾水管进口最小压力/m		转速上升(正常 关闭导叶)/%
	最大压力/m	设计工况	校核工况	
电站 A 转轮	602.55	14.68	-9.47	40.55
电站 D 转轮	567.08	26.10	17.25	39.18

由表 3 可知,采用电站 A 的机组特性曲线计算时,在相同的输水系统布置下,蜗壳进口最大压力、尾水管进口最小内水压力等均不能满足计算控制值的要求。蜗壳进口压力值超标不多,适当加大压力钢管及机组过流部件的设计压力即可以解决,但是尾水管进口最小压力值和计算控制值的差距比较大。

从电站 D 的机组四象限特性曲线上可以看出,电站 J 的运行范围相对电站 A 的曲线较优;“S”特性相对较为平缓,“S”区离低水头工况下的运行范围相对较远,机组的低水头并网稳定性相对较优<sup>[4]</sup>。但是采用电站 D 的转轮特性曲线计算得到的结果皆能满足设计要求,而且还留有一定的裕度。

通过上述计算分析可以看出,不同转轮的特性曲线对过渡过程计算结果的影响比较显著。因此,在工程前期设计时,选择合理的特性曲线非常重要。

### 4.3 尾水洞洞径大小的影响分析

在上述计算成果中,采用的电站 A 特性曲线尾水管进口的最小压力与计算控制值的差距比较大,一般来说,通过优化尾水洞洞径或降低机组的安装高程可以改善尾水管的最小压力偏低的问题。如果通过降低机组安装高程来改善尾水管的最小压力值,那么从 4.1 节的计算成果来看,机组的安装高程需要降低很多,而且绝对吸出高度需要增加很大。因此,作者在此主要是研究尾水洞洞径的大小对尾水管进口最小压力的影响。为此,对尾水主洞由 8.2 m 加大至 10.2 m,同时将尾水支管由 5.9 m 加大至 6.7 m 的输水系统布置方案进行了过渡过程计算,计算成果见表 4 和图 5。

根据表 4 和图 5 可知,尾水隧洞洞径加大以后,对尾水管进口的最小压力有一定的改善,但其改善幅度

比较小。

表 4 尾水系统直径敏感性计算结果			m
电站 A 转轮特性曲线(校核工况)		尾水管进口	
尾水支管直径	主洞直径	最小压力	
5.9	8.2	-9.47	
6.1	8.7	-5.95	
6.3	9.2	-2.77	
6.5	9.7	0.23	
6.7	10.2	2.80	

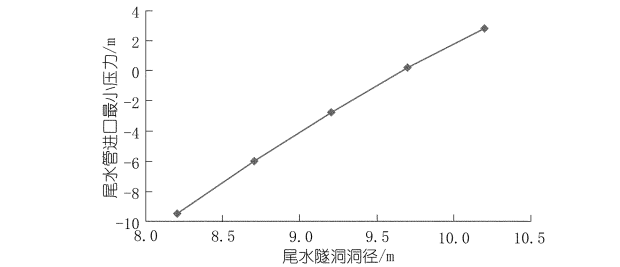


图 5 尾水管进口最小压力随尾水系统洞径变化过程线

### 4.4 导叶关闭规律的影响分析

对于抽水蓄能水电站来说,由于机组的“截流特性”,致使机组最大转速上升率通常比较容易满足控制要求,而导叶关闭规律对蜗壳进口最大压力、尾水管进口最小压力的影响比较大。因此,针对蜗壳进口最大压力、尾水管进口最小压力的代表性工况进行了相关计算和分析,计算成果见表 5;机组导叶关闭规律对相关计算结果影响的过程线见图 6 及图 7。

关闭规律/ s	JHT5 蜗壳进口 最大压力/m	尾水管进口最小压力/m	
		SJT1	JHT3
14	575.99	25.19	17.55
16	567.08	26.10	17.25
18	558.88	26.95	17.73

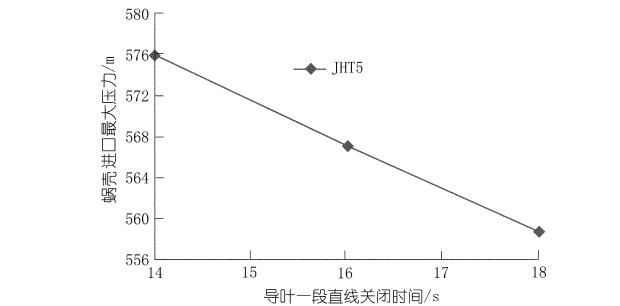


图 6 蜗壳进口最大压力随导叶关闭规律变化过程线

从上述计算结果可以看出,蜗壳进口最大压力随着导叶关闭时间的延长而减小。关闭时间取 16 s 时,蜗壳进口的最大压力接近计算控制值,尾水管进口最小压力亦满足设计要求,而且随着导叶关闭时间的延长而增大。对于可逆式机组而言,随着关机时间的延长,虽然在一定程度上能够使水击压力降低,但是可能

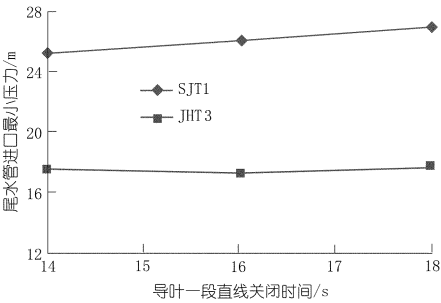


图 7 尾水管进口最小压力随导叶关闭规律变化过程线

会导致可逆式机组在高转速区域的停留时间加长,如果运行工况较长时间地滞留在不稳定的倒“S”区,那么就会诱发剧烈的压力脉动。因此,机组导叶关闭的时间不宜取太大。

4.5 机组转动惯量影响分析

通常情况下,机组  $GD^2$  增大,对于过渡过程计算结果是有利的。对于常规水电机组而言,如果关机规律不变,流量变化主要源于导叶开度的变化,转速变化对其影响很小,因此机组  $GD^2$  增大主要是体现在转速最大上升值的减小,对压力控制值影响不大。但是对于抽水蓄能电站,由于可逆式机组的转轮全特性曲线倒 S 区的影响,导致机组的转速发生变化,而这可能是引起流量、压力变化的重要因素。机组  $GD^2$  增大,虽然能使转速最大上升值减小,但是转速上升、下降的过程均减缓,致使机组在关闭过程中较长时间地滞留在高转速区(倒 S 区),因此增大机组  $GD^2$  的取值,然而这样并不一定能很好地改善蜗壳、尾水管内的压力控制值(改善效果甚微)<sup>[5]</sup>。

为了比较分析机组  $GD^2$  值的改变对过渡过程计算结果的影响,分别对机组  $GD^2$  取  $8\,500, 9\,000\text{ t}\cdot\text{m}^2$  和  $9\,500\text{ t}\cdot\text{m}^2$  为基准进行转动惯量的影响分析,计算采用 16 s 一段直线关闭规律,计算结果见表 6。转动惯量对相关计算结果影响的过程线见图 8,9 和图 10。

表 6 机组  $GD^2$  敏感性分析计算结果

机组转动惯量 $GD^2/(\text{t}\cdot\text{m}^2)$	JHT5 蜗壳进口最大压力/m	尾水管进口最小压力/m		SJT2 机组最大转速上升率(导叶正常关闭的机组)/%
		SJT1	JHT3	
8 500	569.38	25.06	14.82	40.06
9 000	567.08	26.10	17.25	39.16
9 500	565.07	27.59	18.74	38.31

上述计算结果表明,当机组  $GD^2$  从  $8\,500\text{ t}\cdot\text{m}^2$  变化至  $9\,500\text{ t}\cdot\text{m}^2$  时,蜗壳进口最大压力及机组转速上升率均会随之降低,但降低的幅度均比较小。说明加大  $GD^2$  对降低蜗壳进口压力效果仍不明显;尾水管的最小压力随之会略有提高,但幅度也比较小。对于电站 J 来说,  $GD^2$  值的增大对蜗壳最大压力、转速上升

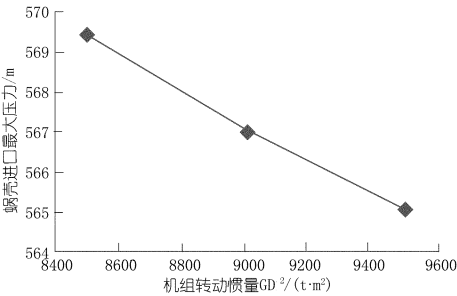


图 8 蜗壳进口最大压力随机组转动惯量变化过程线

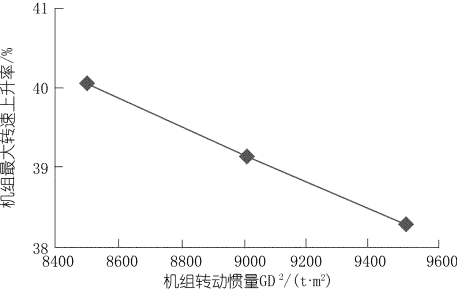


图 9 机组最大转速上升率随机组转动惯量变化过程线

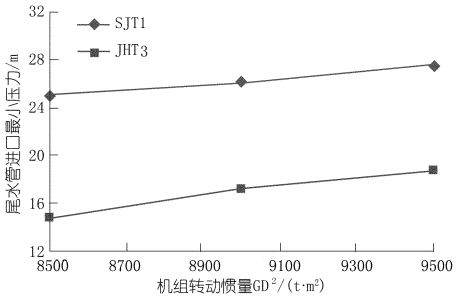


图 10 尾水管进口最小压力随机组转动惯量变化过程线率和尾水最小压力的改善影响不大,另外,随着机组  $GD^2$  值的增大,相应地,机组造价也会加大。

5 结 语

从上述分析来看,各种因素均对过渡过程的计算成果有影响,但是对机组的安装高程以及转轮特性的影响更为明显。机组的安装高程和输水系统的布置在可研阶段基本上都已经确定,而机组的转轮特性、转动惯量以及导叶的关闭规律等,需要在机组招标完成后才能确定。可研阶段借鉴的类似水电站的特性曲线与实际的特性曲线有偏差,因此计算结果也就存在误差,而在前期设计中,对于这种误差,只能通过在对计算结果进行修正时考虑一定的计算误差修正量来作为设计余量。

在以往的主机厂开发、设计过程中,往往是在对转轮水力研发完成后再进行过渡过程计算,通过优化导叶关闭规律、机组转动惯量等手段来达到满足调节保证值的目的,然而这些优化的效果却并不一定很明显。因此结合《暂行规定》中的相关要求,在转轮水力开发

的过程中同步进行调节保证设计,通过优化水泵水轮机的特性来优化过渡过程计算才是最有效的手段。因此,在主机招标时,就应当对机组特性对过渡过程计算的影响予以足够的重视,选择各方面指标优秀的水泵水轮机,以满足调节保证设计的要求。

参考文献:

[1] 武赛波,朱丽辉.水电站调节保证计算问题探讨[J].云南水力发电,2012,(4):78-79.

[2] 李修树,高瑜,董笑波.浅析水电站调节保证设计[J].水力发电,2014,(4):58-60.  
[3] 刘君,段宏江,刘国峰,等.如何做好输水发电系统的调节保证设计[J].西北水电,2013,(6):56-62.  
[4] 陈顺义,李成军,周杰,等.水泵水轮机稳定性预判和对策[J].水力发电,2011,(12):50-54.  
[5] 杨建东,高志芹.机组转动惯量  $GD^2$  的取值及对水电站过渡过程的影响[J].水电能源科学,2005,(4):47-50.

(编辑:赵秋云)

Study on factors affecting transient process calculation of pumped storage power station

ZHENG Yingxia, HU Xiongfeng, QIU Shaoping

(PowerChina Huadong Engineering Corporation limited, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Transient process calculation is the basis of regulation guarantee design. Taking the transient process calculation in feasibility study of a domestic pumped storage power station as an example, the effects on the transient process calculation results exerted by the following factors are calculated and analyzed through Hysim: draft head, runner model characteristics, diameter of tailrace tunnel, generator – unit’s moment of inertia and closure law of guide vanes. It is founded that the draft head and runner model characteristics have more significant impact on the transient process calculation results. As the draft head and the station layout can be basically determined in feasibility study while the characteristics of the generator – unit developed by different manufacturers are variable, so concern should be attached to the characteristics of the generator – unit in its bid invitation so as to meet the demand of regulation guarantee design.

**Key words:** transient process; draft head; runner model characteristics; moment of inertia; closure law of guide vanes; pumped storage power station

(上接第 52 页)

[10] Sonmez H, Gokceoglu C, Medley E, et al. Estimating the uniaxial compressive strength of a volcanic bimrock [J]. Int Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006,43:554-561.  
[11] Yue Z Q, Chen S, Tham LG. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing [J]. Computers and geotechnics 2003, (30):375-397.  
[12] Coli N, Berry P, Boldni D, et al. The contribution of geostatistics to the characterization of some bimrock properties [J]. Engineering geology, 2012,137-138: 53-63.

[13] Pan Y W, Hsieh M H, Liao M H. Mechanical properties of virtual block – in – matrix colluvium [C] // Proceedings of ARMA 2008, 42nd U. S. Rock Mechanics Symposium. San Francisco, USA, 2008.  
[14] Lindquist E. The strength and deformation properties of mélange [D]. Berkeley:Department of Civil Engineering, University of California.

(编辑:郑毅)

Research on soil – rock mixture stochastic model based on meso – structural statistical characteristics

ZHANG Shu<sup>1</sup>,TANG Huiming<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Three Gorges Research Center for Geo – hazard of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Aiming at the colluvial – deluvial soil – rock mixture mass from a typical debris landslide in Three Gorges Reservoir Area, we conduct two – dimensional image process to the picture of outcrop of the mixture, so its meso – structural characteristics are obtained. Then the maximum likelihood estimation is utilized to fit the probability density curve, and then Kolmogorov – Smirnov method is adopted to conduct hypothesis testing. The stochastic model is generated based on the obtained statistical characterizations. The results indicate that for the block, the long axis dimension and ratio of long axis to short axis follow the log – normal distribution, while the dip angle of long axis follows normal distribution, and its distributed coordinates follows uniform distribution. Besides, there is linear correlation between the rock proportion in soil – rock mixture and the parameters of mean value and variance of the block long axis dimension. The generated stochastic model includes the small block that was usually ignored, so it could reflect meso – structure of soil – rock mixture accurately and by finite element software, the physical and mechanical characteristics could be analyzed further.

**Key words:** soil – rock mixture; stochastic model; meso – structure; probability density distribution