

# 基于大型三轴试验的砂卵石土本构模型比选

李 峰<sup>1</sup>, 程丽娟<sup>2</sup>

(1. 中电建成都建设投资有限公司, 四川 成都 610072;

2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

**摘 要:**砂卵石土地层在成都平原地区分布广泛,但是砂卵石土作为大粒径粗粒土较难使用常规尺寸三轴仪进行试验。本文借助中国电建集团成都院自有的高压大型三轴仪进行数组三轴加载试验,并将应力应变曲线与采用 Midas GTS 进行模拟三轴试验得到的成果(分别采用摩尔库伦、修正摩尔—库伦以及硬化土小应变本构模型)进行对比。结果显示,考虑小应变效应的硬化土模型更适用于模拟砂卵石土的应力应变特征。并且该模型的主要参数可通过三轴试验(加载应力路径和卸载应力路径)和固结试验得到或间接推导,可推广用于砂卵石土为主要地层地区的地下结构设计。

**关键词:**砂卵石土;研究现状;本构模型选取;参数确定;试验结果对比

**中图分类号:**TU521.1;TU317+.1;S146+.1

**文献标识码:** A

**文章编号:**1001-2184(2020)06-0008-03

## Comparison and Selection of Constitutive Models of Sandy Pebble Soil Based on Large Scale Triaxial Test

LI Feng<sup>1</sup>, CHENG Lijuan<sup>2</sup>

(1. PowerChina Chengdu Construction Investment Co., LTD, Chengdu, Sichuan, 610072;

2. PowerChina Chengdu Engineering Co., LTD, Chengdu, Sichuan, 610072)

**Abstract:** Sandy pebble soil layer is widely distributed in Chengdu Plain, but it is difficult to use conventional size triaxial apparatus to test sandy pebble soil as large-size coarse-grained soil. In this paper, array triaxial loading tests are carried out with the help of high-pressure large scale triaxial apparatus owned by Chengdu Engineering Co., LTD. The stress-strain curves are compared with the results of simulated triaxial tests by applying Midas GTS (Mohr Coulomb model, modified Mohr Coulomb model and small strain constitutive model of hardening soil are respectively applied). The results show that the hardening soil model considering small strain effect is more suitable to simulate the stress-strain characteristics of sandy pebble soil, moreover, the main parameters of the model can be obtained or indirectly derived by triaxial test (loading stress path and unloading stress path) and consolidation test, which can be extended to the design of underground structure in the area where sandy pebble soil is the main stratum.

**Key words:** sandy pebble soil; research status; selection of constitutive model; determine of parameters; test results comparison

## 0 引 言

截至目前,国内很多城市都在进行或计划进行以地下轨道交通为代表的大规模地下空间开发。但是此类开发多是各自独立和不成体系的,因此,大型地下空间开发利用技术的研究显得尤为必要。其中工程技术是大型地下空间开发利用技术的重要组成部分,而地下空间工程技术需要解决的首要问题就是地层的力学特性研究。

成都位于岷江冲、洪积扇状平原地貌区域,其

中砂卵石地层分布广泛且埋深浅、厚度大,兼具富含砂土和结合水的特点,对地下结构的设计有着重要影响。因此,需要采用数值模拟、现场试验和理论研究等方法全方位探究成都地区的砂卵石地层力学特性。

### 1 砂卵石土研究现状

砂卵石土属于粗粒土的一种,在力学特性上与细粒土有着不一样的特征,王继庄<sup>[1]</sup>等人基于三轴试验研究了粗粒土的应变特性和弹性模量特征,并指出尺寸效应、试样密度和破碎率是影响结

收稿日期:2020-07-29

果的主要因素。沈珠江<sup>[2]</sup>等人重点关注了砂卵石土的流变特性,通过反馈分析方法、直剪流变试验和单轴压缩流变试验得出了有益的结论。何建平<sup>[3]</sup>等人则通过研究三轴试验的结果,提出含水量、试样密度、粗粒含量同砂卵石强度、力学参数的正相关关系。曹海静<sup>[4]</sup>等人则主要通过数值模拟手段研究了砂卵石基坑的变形特征。

与常规三轴试验不同,地下空间开发时地层多是卸载应力路径,这一特征也会显著影响力学特征<sup>[5,6]</sup>。一个基坑的典型应力路径类似于图1。在卸载应力路径下,其变形模量较加载应力路径会显著增大,从而直接影响变形计算。

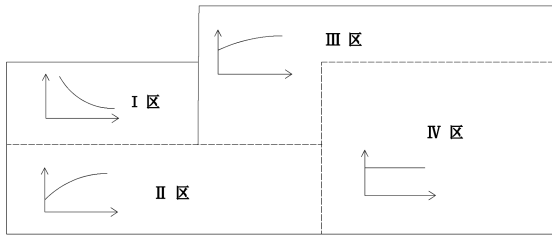


图1 典型应力路径分区

## 2 本构模型选取

为通过数值方法模拟大型地下空间的受力特点并得到准确的结果,首先要选取合适的砂卵石本构模型。目前常见模拟砂卵石土的本构模型主要有摩尔库伦模型,硬化土/修正摩尔库伦模型和硬化土小应变模型<sup>[7]</sup>。

摩尔库伦模型是岩土模拟时的基本模型,具有参数易获取且物理意义明确等优点,但其参数由常规加载应力路径的三轴试验得到,不能反映中主应力的影响,且变形模量为常量。

针对摩尔-库伦模型存在以上不足,提出了修正摩尔-库伦模型(亦即硬化土模型)。该模型为等向硬化弹塑性模型,可以模拟不受剪切破坏或压缩屈服影响的双硬化行为。通过输入卸载/再加载刚度这一参数,可以考虑岩土材料在卸载/再加载应力路径下的变形特性。由于大多数岩土工程本质上都是卸载行为,因而修正摩尔-库伦模型的这一特性可以更准确模拟岩土材料的变形。

岩土材料的变形是岩土工程备受关注的问题,即使是强度指标实际上也隐含了变形控制指标。岩土工程的工程事故也常常是由不当或者过

大变形引发的。已有的研究表明,岩土材料在微小应变阶段就表现出明显非线性特征。硬化土小应变模型是硬化土模型的一种改进,具有硬化土模型相同的特点,同时还考虑了土体在小应变阶段的非线性形变。

本文将基于大型室内三轴试验的成果,与采用以上三种本构模型的模拟三轴试验成果进行对比,从而选取适合砂卵石地层的本构模型。

## 3 本构模型参数的确定

摩尔-库伦模型有四个主要参数:摩擦角 $\Phi$ 、粘聚力 $c$ 、弹性模量 $E$ 及膨胀角。

修正摩尔-库伦模型在此基础上增加了四个主要参数:割线刚度 $E_{50}^{ref}$ ,切线刚度 $E_{oed}^{ref}$ ,卸载弹性模量 $E_{ur}^{ref}$ ,破坏比 $R_f$ 。

硬化土小应变模型则又比修正摩尔-库伦模型增加了两个主要参数:小应变剪切模量 $G_0^{ref}$ ,临界剪切应变。

摩擦角 $\Phi$ 及粘聚力 $C$ 可以直接通过常规三轴试验得到,弹性模量 $E$ 近似采用割线刚度 $E_{50}^{ref}$ ,取对应1/2破坏应变( $>7.5\%$ 时取 $7.5\%$ )时的割线模量,膨胀角取有效内摩擦角减去 $30^\circ$ 。切线刚度 $E_{oed}^{ref}$ 可利用固结仪进行固结压缩试验得到,或者近似取割线刚度 $E_{50}^{ref}$ 。卸载弹性模量 $E_{ur}^{ref}$ 应通过轴向加载-卸载-加载应力路径得到,无试验数据可取 $3\sim 5$ 倍的割线刚度 $E_{50}^{ref}$ 。小应变剪切模量 $G_0^{ref}$ 可近似取邓肯-张双曲线模型参数 $a$ 的倒数, $a$ 可从三轴试验主应变 $\epsilon_1$ 和 $\epsilon_1/(\sigma_1-\sigma_3)$ 的相对关系求得,同时也能



图2 GST80型粗粒土大型高压三轴仪

由此推导出极限偏差应力,从而得到破坏比  $R_f$ 。临界剪切应变取为  $0.010\%$ <sup>[7]</sup>,同土动力学中通常取的大小应变界限保持一致。

#### 4 大型三轴试验与模拟三轴试验结果对比

由以上内容可知,模拟三轴试验中本构模型的参数主要通过三轴试验等室内试验方法得到,

但是砂卵石土由于其颗粒粒径较大,无法采用常规三轴试验仪进行试验。而借助中国电建成都院自有的 GST-80 型高压大三轴及平面应变试验机(图 2)可达到试验目的。试验过程采用计算机自动控制,可按力或位移控制方式完成静力学试验。该大型三轴仪主要技术参数见表 1。

表 1 GST80 三轴仪主要技术参数

试样尺寸	最大轴向荷载 /kN	最大围压 /MPa	最大轴向行程 /mm	轴向变形速率 /mm·min <sup>-1</sup>	体变管容积 /ml	体变分辨率 /ml
300×600	3 000	6.0	300	0.01~6	9 000	10

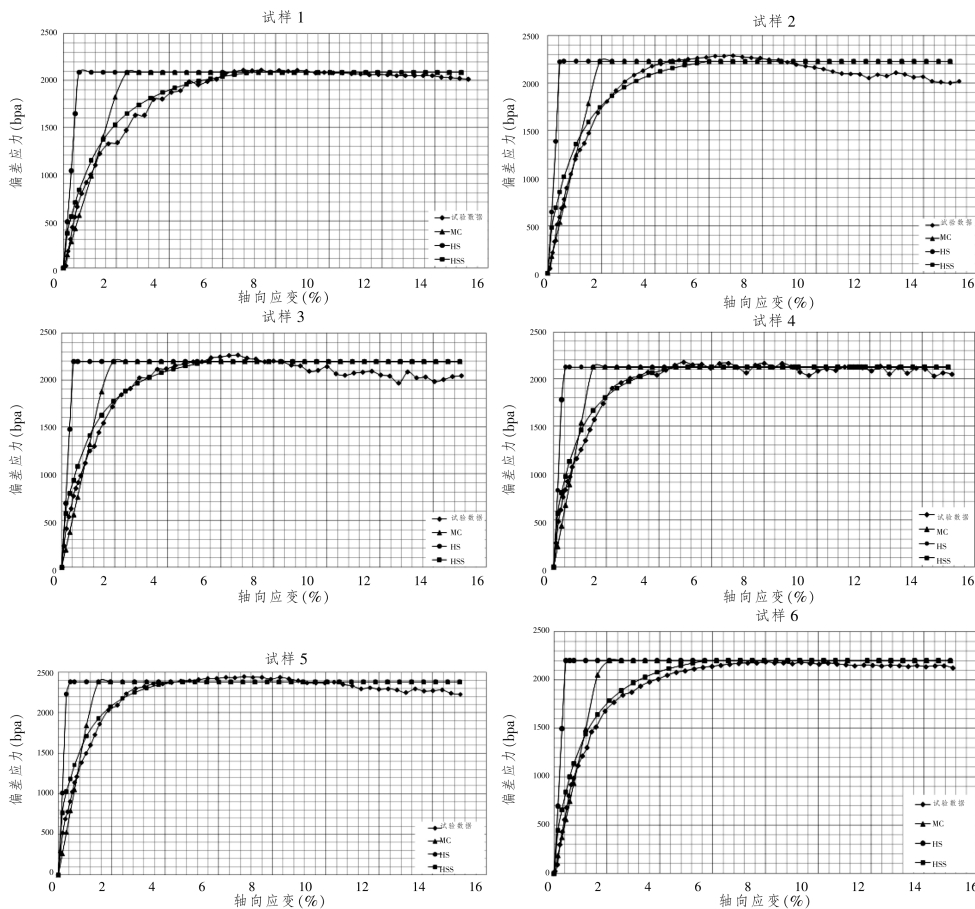


图 3 大型三轴试验与模拟三轴结果对比

针对模拟三轴试验,利用岩土有限元软件 Midas GTS NX 进行。通过分析大型三轴试验结果,发现试样在达到 15% 轴向应变时未发现破坏,参照土工试验方法标准,认为 15% 轴向应变对应的应力为破坏应力。因而模拟三轴试验在围压等于室内试验的前提下,只进行到 15% 轴向应变。

由图 3 可见,在加载初始段(0~1%应变段),摩尔-库伦模型与硬化土小应变模型结果与实际

试验结果更为接近。随着应力应变逐渐增大(1~4%应变段),摩尔-库伦模型结果开始出现较大偏离。而在达到较大应变(>4%)后,三种本构模型的结果已经又趋于一致,并且与实际试验结果非常接近。

由于岩土工程中并不允许较大变形,因而我们更关注较小应变下的应力应变关系。可见在这一区间段,摩尔-库伦模型与修正摩尔-库伦模

(下转第 135 页)

- [4] 李攀光,贺玉彬,等.流域水电智慧调度—大渡河探索与实践[M].北京:科学出版社,2019.
- [5] 罗玮,钟青祥,顾发英.大渡河梯级电站群实时负荷智能调控技术研究[J].中国电机工程学报,2019,39(09):2553—2560.
- [6] 邹建国,芮钧,吴正义.梯级水电站群优化调度控制研究及解决方案[J].电力自动化设备,2007(10):107—111.
- [7] 李蓬路.经济调度控制(EDC)在四川黑水河集控的运用[J].水电厂自动化,2016,37(01):17—18.
- [8] 吴家乐.流域梯级电站集中控制和联合优化调度浅析[J].水电厂自动化,2016,37(03):58—61.
- [9] 尤渺.大渡河流域下游梯级电站发电优化调度研究[D].重庆大学,2008.

- [10] 汤洁.乌江梯级水电站的经济运行研究及应用[D].河海大学,2005.
- [11] 王家华.红水河流域梯级水电站联合发电控制[D].贵州大学,2009.
- [12] 卢立宇,黄炜斌,陶春华,李永利,王金龙.大渡河流域梯级电站经济调度策略研究[J].水力发电,2017,43(03):106—110+131.

#### 作者简介:

李雪梅(1989-),女,四川内江人,工程师,从事梯级水电调度工作;  
钟青祥(1979-),女,四川金堂人,高级工程师,从事梯级水电技术管理工作.  
(责任编辑:吴永红)

(上接第125页)

#### 参考文献:

- [1] 许焕清,马君鹏,王成亮,等. GIS设备典型缺陷的X射线数字成像检测技术[J].电网技术,2017,41(5):1697—1701.
- [2] 闫斌,何喜梅,王志惠,等. X射线数字成像检测系统在GIS设备中的应用[J].高压电器,2010,46(11):89—90.
- [3] 袁文静,董晓,秦国永. X射线实时成像检测技术在动车组上的应用[J].中国科技投资,2018.
- [4] 王坤,李亚宁,杨迎春,等.一种x射线发射器移动调节

装置的制造方法[P].国家知识产权局,2016.06.

- [5] 任立新,陈飞宇,路遥,等.基于X射线数字成像技术的配电设备无损检测[J].农村电气化,2018,第5期:30—32.

#### 作者简介:

王大义(1991-),男,河南邓州人,本科,从事运维工作;  
孙家孝(1996-),男,四川成都人,本科,从事发电运维工作;  
蒋昊巍(1998-),男,四川乐山人,本科,从事发电运维工作;  
李均(1991-),男,四川达州人,本科,从事发电运维工作.

(责任编辑:吴永红)

(上接第10页)

型会先后出现与实际试验结果偏离较大的情况。并且在同样的应力下,这两种模型得到的应变较试验结果偏小,偏于不安全范围。

硬化土小应变模型能较好地模拟砂卵石土体的应力应变特征,从初始段到最终破坏应变段都与实际试验结果有着较大程度的吻合,只是在试样2和试样3大应变状态下出现应变软化现象时有所偏差。

#### 5 结语

成都广泛分布着砂卵石地层,笔者利用大型三轴试验仪进行了数组试验,并将结果与采用三种本构模型得到的模拟三轴数据进行了对比,得出以下结论:

(1)三种本构模型的主要参数都可通过常规室内试验方法获取或推导,有利于工程实际应用的推广。

(2)相较于摩尔—库伦模型和修正摩尔—库伦模型,硬化土小应变模型可以更好的反应土体的应力应变特征,并且前两类模型的结果偏于不安全范围。

(3)硬化土小应变模型的部分参数基于前人的经验,下一步应开展卸载应力路径三轴试验和通过实际工程的监测数据进行反演分析优化模型参数。

#### 参考文献:

- [1] 王继庄.粗粒料的变形特性和缩尺效应[J].岩土工程学报,1994(04):89—95.
- [2] 沈珠江,赵魁芝.堆石坝流变变形的反馈分析[J].水利学报,1998(06):2—7.
- [3] 何建平,彭兴芝,祖焯,等.砂卵石土动、静特性的对比试验研究[J].长江科学院院报,2010(08):40—43.
- [4] 曹海静.成都地铁砂卵石基坑变形监控指标研究[D].中国铁道科学研究院,2015.
- [5] 王海波,徐明,宋二祥.基于硬化土模型的小应变本构模型研究[J].岩土力学,2011(01):39—43.
- [6] 刘熙媛,同澍旺,窦远明,顾杰.模拟基坑开挖过程的试验研究[J].岩土力学,2005(01):97—100.
- [7] T B. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2006.

#### 作者简介:

李峰(1988-),男,重庆人,硕士,工程师,主要从事岩土工程、地下工程等领域的设计与科研工作;  
程丽娟(1984-),女,四川仁寿人,工学博士学位,正高级工程师,主要从事岩土工程、地下工程的科研和设计工作.

(责任编辑:卓政昌)