

文章编号:1671-2579(2009)04-0178-04

# 柔性加载条件下碎石材料变形特征研究

欧阳振华<sup>1</sup>, 李世海<sup>2</sup>, 刘晓宇<sup>2</sup>

(1. 煤炭科学研究总院, 北京市 100013; 2. 中国科学院力学研究所)

**摘 要:** 碎石材料是岩土工程界广泛应用的一种路基和坝基材料, 由于受试验条件的限制, 对碎石材料的变形破坏特性研究较少, 工程中常将其作为弹性材料来考虑。该文利用中国科学院力学研究所研发的具有自主知识产权的柔性加载试验机, 对具有相同粒径分布和含水量的碎石体进行了多次不同围压下的三轴压缩试验。试验结果表明: 碎石材料是一种非弹性材料, 其应力-应变关系曲线可分为3个阶段, 表现出明显的非线性; 碎石材料在外载作用下发生破坏时, 材料内部没有宏观的断裂面出现, 破坏后的碎石体仍然具有一定的承载力; 柔性加载状态下的较大尺寸碎石试样的破坏强度满足莫尔-库仑强度准则。

**关键词:** 碎石材料; 柔性加载; 均匀力边界; 变形特征; 试验研究

## 1 引言

碎石是天然岩石或卵石经机械破碎、筛分而成的岩石颗粒, 其颗粒粒径大于 4.75 mm。碎石是一种松散粒料结构, 不传递拉应力、拉应变, 将一定级配的碎石作为公路路基、坝基或复合地基的上部基层材料, 使其处于三向受压的状态, 能吸收其下层裂缝释放的应变能, 在很大程度上能够防止和减少下部基层的反射裂缝, 达到抑制裂缝的效果; 同时级配碎石基层还能起到排水作用。因此, 近年来, 碎石材料在岩土工程界得到了广泛应用, 不少学者通过理论研究和试验测试研究了碎石材料的相关力学特性。

但是, 由于受试验条件的限制, 以往对碎石材料进行的应力应变试验研究很少, 在复合地基的设计计算中一般将其作为弹性材料, 试验结果表明, 碎石的应力应变关系具有显著的非线性, 作为弹性材料并不合适。工程中多用加州承载比  $CBR$  值作为评定基层材料承载能力的标准。 $CBR$  值反映了材料在一定变形下的承载力, 一定程度上反映了材料的强度, 但是将  $CBR$  值作为级配碎石材料的评价标准具有局限性:  $CBR$  试验过程中施加给材料的力, 与实际工程中的材料受力状态相差甚远;  $CBR$  值反映的是材料在荷载作用下变形的一个点的特性, 不能反映变形的发展过程,

无法预测材料在使用过程中的变形发展过程;  $CBR$  试验不能分离出材料在一定荷载作用下的弹性变形和塑性变形, 也不能反映出累积塑性总变形。因此, 试验过程中操作人员获得的监测结果不够精确。

近年来, 针对碎石材料开展的试验主要集中在研究级配和压实度等对碎石材料性能的影响方面, 三向受压状态下碎石材料变形特征的试验研究并不多见。本文采用大型柔性加载试验机来研究碎石材料在三轴压缩状态下的变形破坏特征, 具有重要的工程意义和实用价值。

## 2 不同边界条件下的材料力学响应

对于岩土力学试验来说, 加载端的边界条件有两种, 一种是由刚性边界提供的均匀位移边界条件, 现有的岩土力学实验设备几乎都是采用这种条件; 另一种是由柔性边界提供的均匀力边界条件, 虽然这种边界条件的试验机不多见, 但它对研究岩土体的力学性质具有重要的意义。已有的研究成果表明, 两种不同边界条件下获得的试验结果是有区别的。

Hill 认为: 当微结构代表性体积单元足够大时, 材料在均匀力边界条件和均匀位移边界条件下的整体响应将趋于一致。否则均匀力边界条件将给出材料有效特性的下限解, 而均匀位移边界条件将给出有效特性

收稿日期: 2008-12-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 10702072); 国家自然科学基金重点项目(编号: 10632100)

作者简介: 欧阳振华, 男, 博士, 助理研究员. E-mail: oyzhua@imech.ac.cn

的上限解。Heut 对含有随机颗粒增强体的复合材料在弹性范围内进行了两种边界条件的加载试验发现,当代表性体积单元不具有统计性时,均匀力边界条件所得弹性模量确实小于均匀位移边界条件所得弹性模量,见图 1。Jiang 等对含有随机颗粒增强体的复合材料进行了弹塑性加载试验,不仅发现均匀位移边界条件所得响应高于均匀力边界条件所得响应,而且发现塑性应变的分布也有所不同。位移边界条件产生更为密集、均匀分布的滑移带,而力边界条件产生更为局部化的变形场。

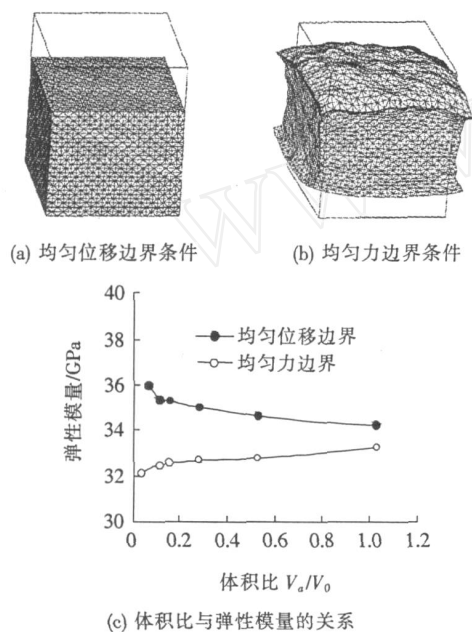


图 1 不同边界条件及其对材料弹性模量的影响

### 3 试验原理及其设备

碎石体是由粒径大小不一的岩石颗粒和空隙组成的一种不均匀的复杂地质体材料。对这种非均匀的材料而言,其力学参数在各点是不同的,如果在外载荷作用下,其内部某些区域块体或颗粒之间的作用力很大,而另外的区域受力很小甚至不受力。所以,如果采用刚性边界加载的试验机来进行碎石材料的力学试验,力的不均匀性就会反映在边界上,导致边界上作用力的分布不均匀和不确定,这给分析试验结果的规律性带来很大的困难。碎石材料的特点决定了很难用传统的试验设备来研究其变形特征,这就需要采用新的试验装置,确保试验中施加的边界力是均匀的。

因此,本研究采用中国科学院力学研究所自主研

发的具有自主知识产权的柔性加载试验机来研究碎石在三向受压状态下的变形特征。该试验机主要由柔性加载系统(图 2)、围压伺服加载控制系统、位移监测系统、电气控制系统等部分组成。该试验机轴向压力由柔性水囊提供,从而保证了承载面上各点处的压力相等,轴向能提供的最大压力为 10 MPa;围压范围为 0 ~ 5 MPa。

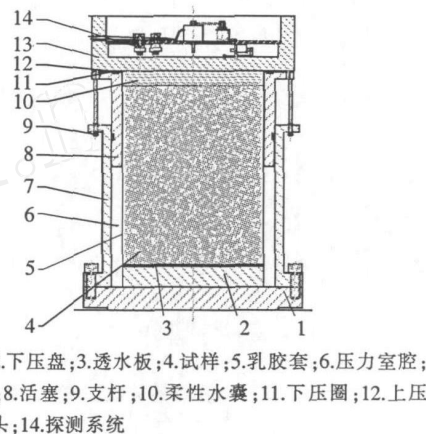


图 2 柔性加载系统

## 4 试验结果及其分析

### 4.1 柔性加载试验

为了研究碎石材料在一定围压作用下的变形特点以及变形与围压的关系,对自然风干状态下具有相同颗粒级配的碎石材料,共进行了 5 种围压水平下的多次柔性加载条件下的三轴压缩试验。碎石粒度成分见表 1,试验时围压分别为 0.15、0.30、0.40、0.50 和 0.60 MPa。

表 1 碎石的颗粒组成

粒径/mm	含量/%	粒径/mm	含量/%
> 16	35.7	5 ~ 10	22.0
10 ~ 16	31.7	< 5	10.6

柔性加载试验机与刚性加载试验机的区别只是在于二者提供的边界条件不同,前者提供的是均匀力边界条件,后者提供的是均匀位移边界。因此,在试验方法上没有太大的区别,但在进行试样制备过程中需要注意以下几点:

(1) 试验试样的制备需要在承模筒内完成,为了避免试样太过松散,需要借助于振动器、击实器来将碎石材料捣实。

(2) 碎石试样装在柔性胶囊内,胶囊和试样形成一个密闭系统,确保试验过程中碎石材料与提供围压的水分开。

(3) 试样制备完成后,在试样表面还需要放置 1~2 层土工布,避免碎石棱角刺破提供轴向压力的液压胶囊。

图 3 是试样装好后的表面照片,装好试样后,就可以利用柔性加载试验机,通过控制加载速率或变形速率加载,获得均匀力边界条件下的碎石体变形曲线。

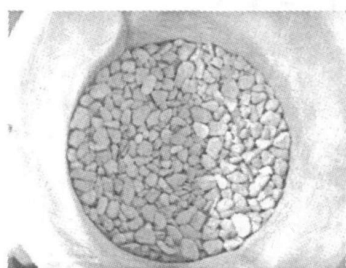


图 3 装好的碎石试样

#### 4.2 典型应力 - 应变曲线

图 4 是利用柔性加载试验机获得的均匀力边界条件下的碎石材料应力 - 应变关系曲线。

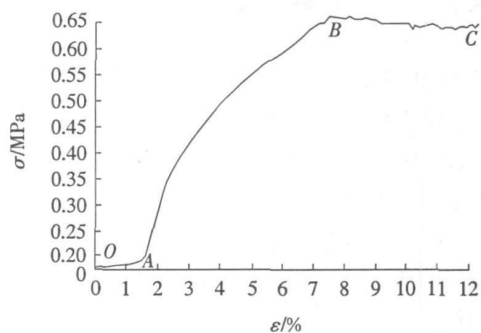


图 4 均匀力边界条件下的碎石材料应力 - 应变曲线

从图 4 可以看出,曲线可以明显分成几个阶段:

OA 段是碎石试样压密阶段。在这一阶段,由于碎石试样装样时没有完全被压实,加之碎石体本身就是一种多孔隙材料,所以在其内部存在较多空隙,在轴向压力作用下,碎石试样被压密,很小的轴压就可以造成较大的轴向变形,横向膨胀很小。

AB 段为碎石试样破坏阶段。在这一阶段,应力应变曲线根据增长的速率不同可以分为两段。在前一阶段,应力随着应变的增加而急剧增加;后一阶段,应力随着应变增加的趋势变缓,但一直保持非线性增长关系,直至达到破坏。

BC 段为碎石试样破坏后阶段。在这一阶段,应

力应变曲线没有出现急剧下滑,而是基本维持在一定的水平。说明碎石材料破坏后虽然内部某些岩石颗粒发生了搓动,但由于材料接触面比较粗糙,颗粒之间存在一定的咬合力,阻止了岩石颗粒搓动的进一步发展,基本上没有宏观断裂面的出现。

#### 4.3 碎石破坏强度

试验获得的 5 种围压水平作用下的碎石试样破坏时对应的主应力差值如表 2 所示。

表 2 不同围压下的碎石样承载力

试样号	围压 (σ <sub>2</sub> = σ <sub>3</sub> ) / MPa	轴压 (σ <sub>1</sub> ) / MPa
SS - 1	0.15	0.67
SS - 2	0.30	1.14
SS - 3	0.40	1.54
SS - 4	0.50	1.83
SS - 5	0.60	2.45

如果对 σ<sub>1</sub> 和 σ<sub>3</sub> 采用线性回归,可得到如图 5 所示的关系曲线,线性相关系数为 0.962,说明 σ<sub>1</sub> 与 σ<sub>3</sub> 具有较好的线性相关性,线性方程为:

$$\sigma_1 = 3.83 \sigma_3 + 0.03 \quad (1)$$

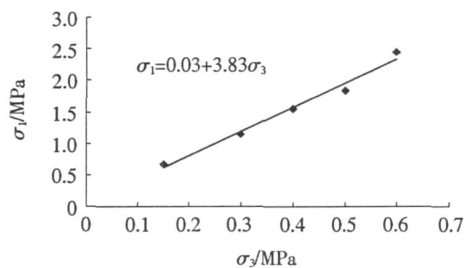


图 5 σ<sub>1</sub> - σ<sub>3</sub> 关系曲线

根据 5 种围压水平下的三轴压缩试验结果可以绘出 5 个莫尔圆,如图 6 所示。

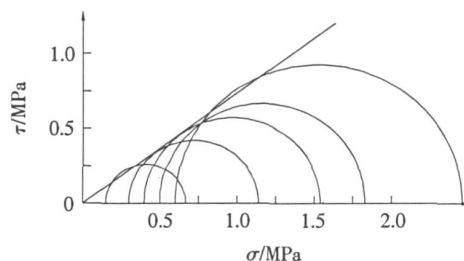


图 6 碎石强度包络线

假定存在一条直线  $\tau = k\sigma + c$ ,第  $i$  个莫尔圆的直径为  $r_i$ ,其圆心到这条直线的距离为  $d_i$ ,求函数:

$$f(k, c) = \sum_{i=1}^5 (d_i - r_i)^2 \quad (2)$$

的最小值,确定  $k$  和  $c$ ,可得这条直线的方程为:

$$= 0.733 + 0.002 \quad (3)$$

如果认为这条直线就是莫尔 - 库仑强度曲线,则可确定所测碎石样的粘聚力为 0.002 MPa,内摩擦角为  $36.2^\circ$ ,这与实际比较吻合。再者  $\sigma_1$  与  $\sigma_3$  具有较好的线性相关性,说明较大尺寸的碎石体试样在载荷作用发生破坏时可以采用莫尔 - 库仑破坏准则来描述其在外荷载作用下的变形破坏。

## 5 结论

(1) 相对于提供均匀位移边界条件的刚性加载试验机来说,提供均匀力边界条件的柔性加载试验机更适合用来研究碎石材料的变形特性。

(2) 从碎石材料的应力 - 应变关系曲线来判断,以往把碎石材料完全当成弹性材料来研究是不妥的,它的性能需要进一步的研究。

(3) 碎石材料在外载作用下发生破坏,破坏后材料内部没有宏观的断裂面出现,破坏后的碎石体还具有一定的承载力。

(4) 具有较大尺寸的碎石体试样在载荷作用发生破坏时,最大主应力和最小主应力具有较好的线性相关性,可以采用莫尔 - 库仑破坏准则来描述其在外荷载作用下的变形破坏。

### 参考文献:

- [1] GB/T 14685 - 2001, 建筑用卵石、碎石[S].
- [2] 邢皓枫, 龚晓南, 杨晓军. 碎石桩复合地基固结简化分析[J]. 岩土工程学报, 2005(5).
- [3] 徐学祖, 孙斌祥, 刘琦, 等. 碎石铺设位置及粒径对路基效果影响的室内试验[J]. 岩土工程学报, 2005(3).
- [4] 徐光辉, 高辉, 王哲人. 级配碎石振动压实过程的连续动态监控分析[J]. 岩土工程学报, 2005(11).
- [5] 胡力群, 沙爱民. 商开高速公路水泥稳定碎石基层抗裂性研究[J]. 中外公路, 2005(2).
- [6] 覃峰, 包惠明, 董开亮. 同步碎石应力吸收层特性研究[J]. 中外公路, 2007(5).
- [7] 朱志铎, 刘义怀. 碎石变形特征及挤密碎石桩复合地基效果评价[J]. 岩土力学, 2006(7).
- [8] Krietch A J. Leachability of Asphalt and Concrete Pavements[R]. Indiana: Indianapolis, 1992.
- [9] 王龙, 孟书涛, 徐全亮. 级配碎石基层的设计参数研究[J]. 公路交通科技, 2006(8).
- [10] 马翥, 莫石秀, 王秉纲. 级配碎石抗剪切性能试验研究[J]. 公路交通科技, 2005(12).
- [11] 曹建新. 级配碎石材料级配设计方法探讨[J]. 中外公路, 2008(3).
- [12] 刘杰. 混凝土面板坝碎石垫层料最佳级配试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2001(4).
- [13] 梁向前, 王园, 孙进忠, 等. 碎石土振动压实特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(增1).
- [14] 赵川, 周亦唐. 土工格栅加筋碎石土大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2001(4).
- [15] 黄仙枝, 岂连生, 白晓红. 软土地基土工带加筋碎石垫层的应力扩散研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(17).
- [16] Hill, R.. Elastic Properties of Reinforced Solids: Some Theoretical Principles [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1963, 11: 357 ~ 372.
- [17] Huet, C.. Coupled Size and Boundary - Condition Effects in Viscoelastic Heterogeneous and Composite Bodies [J]. Mech. Mater, 1999, 31: 787 ~ 829.
- [18] Jiang, M., Ostoja - Starzewski, M., Jasiuk, I. Scale - Dependent Bounds on Effective Elastoplastic Response of Random Composites [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2001, 49: 655 ~ 673.
- [19] 孟祥跃, 李世海, 张均锋. 柔性边界加载试验机研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(10).

## 京承高速“北京第一桥”合龙

中铁二十二局集团承建的(北)京承(德)高速公路三期工程清水河2号桥上部连续刚构左右幅两个中跨合龙段,于2009年7月15日全部浇筑完成。该桥地处密云县北庄镇,河底至桥面最大高差达61.7m,主跨120m,最高墩48.9m,是北京市“第一大跨、第一高墩悬浇混凝土箱梁”。

该桥自2007年11月24日开工以来,建设者攻克了特殊地质条件下深基坑的开挖与防护、挂篮施工、箱梁节段现浇等一系列施工技术难题,克服了施工环境差、材料涨价、资金紧张等困难,确保了施工进度。据悉,京承高速公路(三期)将于2009年“十一”前实现全线正式通车。届时,北京到承德只需2h。

摘自:《中国公路网》2009.07.17