

# 级配对粗粒土直剪过程中抗剪强度与变形的影响研究

黄鑫<sup>1,2</sup>, 魏玉峰<sup>3\*</sup>, 魏婕<sup>3</sup>

(1. 四川省地质灾害防治工程技术研究中心, 四川 成都 610059; 2. 四川华地建设工程有限责任公司, 四川 成都 610059;  
3. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:**为了分析级配对粗粒土直剪过程中抗剪强度和变形的影响,开展不同级配试样的室内直剪试验,并根据试验结果标定细观参数,建立粗粒土数值直剪试验模型。从宏观和细观的角度探讨级配对粗粒土强度和变形的影响。结果表明:有效粒径、中值粒径和限制粒径相差不大时,空隙填充密实,结构性好,能够承受较大外力;粗颗粒含量多,颗粒间的挤压摩擦更剧烈,强力链增多;细颗粒含量越多,颗粒间孔隙填充不均匀,更易产生压缩变形,位移场越密集;空隙率随曲率系数、不均匀系数的增加先增大后减小。

**关键词:**粗粒土;级配;抗剪强度;位移场;空隙率

粗粒土是指粒径大于 0.075 mm 颗粒含量大于 50% 的土石料。由于其抗剪强度高、地震下不易液化、压实性和透水性好等优良特性,粗粒土被广泛用于工程建设中,随着粗粒土在工程上的广泛应用,对粗粒土在外力作用下的强度与变形等性质提出了更高的要求。为适应生产发展的需要,必须深入研究粗粒土的物理与力学性质。关于粗粒土的变形性能和强度特性已有大量研究成果,例如试样尺寸、含水率、粒度、颗粒含量、颗粒形状等因素对粗粒土强度和变形的影响,但大多是通过室内土力学试验完成的(秦红玉等;徐肖峰等;饶锡保等;邓国栋等)<sup>[1-4]</sup>。潘家军等(2016)<sup>[5]</sup>通过粗粒土大三轴试验,研究了在不同中主应力系数和不同围压条件下的粗粒土剪切应力—应变特征;姜景山等<sup>[6]</sup>通过改变初始密度对砂砾石进行了大三轴试验,探讨了体变速率、压缩性以及剪胀性对应力—应变曲线为硬化型或是软化型的影响;朱俊高等<sup>[7]</sup>通过改变试样的直径,研究了粗粒土强度与变形差异性的尺寸影响;褚福永等(2012)<sup>[8]</sup>通过不同固结条件下的粗粒土大三轴试验,总结了不同加载阶段的应力—应变关系曲线的数学表达形式,并探讨了不同固结条件下的强度、弹性模量、泊松比以及剪胀性的大小。一些学者还从颗粒级配角度出发研究粗粒土的强度与变形性

质,但也大都采用的是室内试验研究。凌华等(2017)<sup>[9]</sup>设计了多组细颗粒含量不同的无黏性和含黏性粗粒土试样剪切试验,研究了围压和级配对无黏性粗粒土剪胀和颗粒破碎的影响,并从细颗粒含量的角度分析了两种粗粒土的力学表现异同;朱晟等(2018)<sup>[10]</sup>通过大三轴和相对密度试验,并以分形维数表征试样的级配,分析了堆石料强度与变形特性的级配影响效应;王光进等通过改装后的大型直剪仪,探讨了不同粗颗粒含量对粗粒土颗粒相对破碎率、应力应变特性以及摩擦角的影响。粗粒土黏聚力很小,可以视作不连续材料介质,通过不连续的颗粒离散元方法对粗粒土进行理论研究有着明显的优势(徐国建等;Jiang MJ 等;Xu YF 等;宋杨等)<sup>[12-15]</sup>。目前采用颗粒流方法对粗粒土力学和变形特性的级配影响研究成果较少。

该文基于二维离散元颗粒流理论,通过室内试验结果标定数值模型的细观参数,得到按级配生成的粗粒土二维剪切试验数值模型,将宏观剪应力—应变曲线、垂直位移—剪切位移曲线与微观的力链和位移场结合,探究级配对粗粒土抗剪强度和变形特性的影响,为工程建设中粗粒土级配的选择提供一定依据,也为粗粒土强度和变形特性在细观层面的研究提供参考。

收稿日期:2020-05-02

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2017YFC1501000);四川省教育厅科研计划重点项目(编号:18ZA0045)

作者简介:黄鑫,男,硕士研究生。E-mail:1692276944@qq.com

\* 通信作者:魏玉峰,男,博士(后),副教授。E-mail:weiyufeng@cdut.edu.cn

1 研究方法

1.1 粗粒土直剪试验

首先按给定级配将 4~40 mm 粒径范围的颗粒均匀混合配制成粗粒料(表 1)。直剪试验的法向荷载分别为 100、200、300 kPa。剪切位移由布置在试样一端的两个千分表测得,剪切变形取两者平均值。剪切位移至 75 mm 时停止试验。首先将剪切盒下盒沿轴线方向与水平施力装置和垂直施力装置轴线保持在同一条直线上放置于剪切室底座上固定;将上剪切盒同样与水平施力装置和垂直施力装置轴线保持在同一条直线上放置于剪切室内。为了保证试样具有一定的密实度,采用分层夯填的方法将粗粒土颗粒装入剪切盒内,试样分 4 次装入,每次填充厚度不超过 50 mm。

表 1 试样级配信息

试样编号	$d_{10}/\text{mm}$	$d_{30}/\text{mm}$	$d_{60}/\text{mm}$	$C_u$	$C_c$
1	15	28	36	2.40	1.45
2	6	21	31	5.17	2.37
3	17	29	38	2.24	1.30
4	7	23	33	4.71	2.29
5	6	9	25	4.17	0.45

1.2 颗粒流模拟试验

采用 PFC2D 对不同级配粗粒土试样进行模拟试验,试验采用平面应变假设。尽管平面假设得出的结果与实际土样存在局部差异,但二维数值模型可以通过不断调整计算颗粒单元的摩擦系数、接触刚度等细观参数得到与真实试样室内物理试验相似的本构行为,使得颗粒体系的细观力学特征不断接近实际土样的宏观力学表现,二维数值模型可以看作是三维模型中某一剖面的特征体现。采用颗粒流模型试验可以突破试验设备和试验条件上的不足,从而研究真实土样的宏观力学行为在细观上的响应规律。

模型尺寸为 500 mm×500 mm,剪切盒模型如图 1 所示。在生成模型至剪切试验结束过程中,应当保证墙体与颗粒之间的接触是有效的,不然会造成无法生成颗粒或者颗粒飞出墙体。首先在剪切盒范围内按给定级配生成粒径为 4~40 mm 的颗粒,考虑到粗粒土为无黏性材料,且粗粒土强度较大,在颗粒未破碎的情况下,颗粒间发生的接触可以近似为弹性,故颗粒间接触采用线性刚度模型。然后给加载板赋予初始压

力,使颗粒之间紧密接触,再筛选出剪切盒内的悬浮颗粒,运用半径扩大法使悬浮颗粒与周围颗粒紧密接触。初始模型平衡后,分别在 100、200、300 kPa 法向荷载下伺服稳定。固定剪切盒下半部分墙体,并给上部墙体施加一个向右的剪切速度,从而完成试样的剪切。剪切过程中,试样的垂直位移可通过试样高度变化获得,剪应力通过作用在左右两侧墙体上的力矢量叠加除以剪切盒宽度获得。试验停止的条件是剪切位移达到剪切盒宽度的 15%。

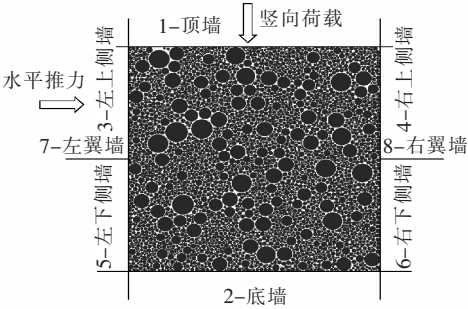


图 1 直剪试验数值模型

通过室内试验获得剪应力—剪切位移、垂直位移—剪切位移试验结果,对不同参数取值进行大量试算,从而获得细观参数(邵磊等,刘勇等,Ahad 等,Xu XF 等)<sup>[16-19]</sup>。首先对摩擦系数进行调整,获得与室内试验结果相近的峰值强度,然后调节法向刚度与切向刚度,最后调节其他细观参数,使得数值试验结果与室内试验结果较吻合,最终确定此次数值试验的细观力学参数如表 2 所示。参数标定结果如图 2 所示。

表 2 模型细观力学参数

细观参数	单位	取值
颗粒密度	$\text{kg}/\text{m}^3$	2 643
粒径范围	mm	4~40
摩擦系数		0.6
颗粒法向刚度	N/m	$4\times 10^7$
颗粒切向刚度	N/m	$3\times 10^7$
墙体法向接触刚度	N/m	$2\times 10^7$

通过数值试验获得的垂直位移—剪切位移曲线与室内试验结果仍然存在一定差异,两者在剪切位移 45 mm 之前变化趋势相近,之后出现明显偏差,试验值趋于稳定,而模拟试验剪胀效应持续增加,加载结束时偏差约 0.4 mm。这是由于数值试验采用的圆形颗粒,真实土颗粒形状不规则,颗粒间存在咬合而无法有效

填充空隙,从而数值试样更为密实,使得其剪胀效应更为明显。真实试样在加载过程中出现颗粒破碎,发生剪缩,这也使得试验值低于模拟值。

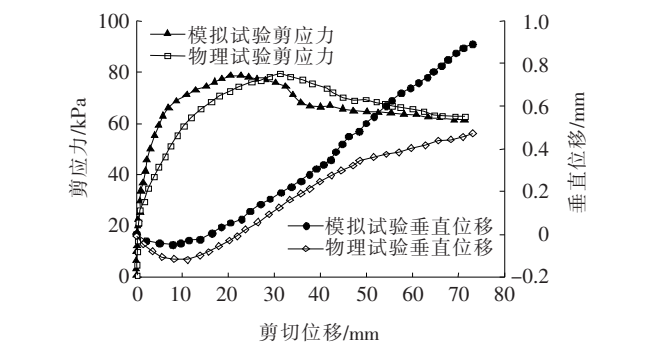


图 2 模拟试验值与物理试验值对比

## 2 试验结果分析

### 2.1 粗粒土宏观力学特性分析

#### 2.1.1 剪应力—剪切位移特性

采用上述细观参数的不同级配试样模拟结果如图 3 所示。仅试样 2 的级配良好,但其抗剪强度并非最优,可见抗剪强度的高低并不能用级配的优劣来评价,也与各关键粒径相关,试样 2 的有效粒径较小,细颗粒占比较大,空隙填充不均匀,粗粒土骨架结构性较弱,使得级配良好试样的抗剪强度反而不如级配不良的试样。粗粒土的黏聚力一般较小,试样 1、3 粗颗粒含量与细颗粒含量相对合理,空隙填充密实,结构性好,能够承受较大外力。

#### 2.1.2 级配对抗剪强度的影响

不同级配粗粒土的剪应力峰值、残余应力如表 3 所示。根据剪应力峰值,通过 SPSS 软件可定量分析不均匀系数和曲率系数对峰值强度和残余强度的影响程度,采用多元回归分析方法。多元回归分析指在相关变量中将一个变量视为因变量,其他一个或多个变量视为自变量,建立多个变量直接线性或非线性数学模型数量关系式并利用样本数据进行分析的统计分析方法。回归方程的标准化系数可以用来比较自变量对因变量的影响程度,标准化系数的绝对值越大说明对因变量的贡献越大。不均匀系数对抗剪强度的标准化系数为-0.717,曲率系数为-0.366,不均匀系数对抗剪强度的贡献约为曲率系数的 2 倍;不均匀系数对残余强度的标准化系数为-0.563,曲率系数为-0.441,可见不均匀系数对强度特征的影响高于曲率系数。

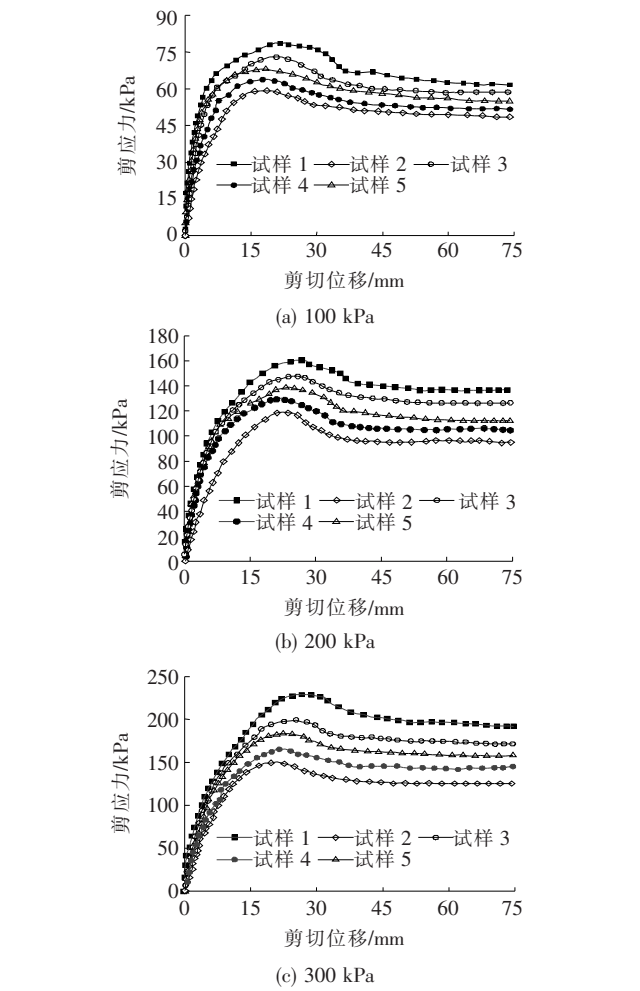


图 3 剪应力—剪切位移关系曲线

表 3 不同级配粗粒土剪应力峰值、残余应力

试样编号	垂直荷载/ kPa	峰值应力/ kPa	残余应力/ kPa
1	100	78.92	61.27
	200	164.75	137.26
	300	230.53	192.41
2	100	59.54	48.81
	200	119.03	95.30
	300	150.08	124.95
3	100	73.38	58.85
	200	147.51	127.31
	300	200.74	172.56
4	100	64.38	51.92
	200	129.69	108.10
	300	165.97	142.78
5	100	68.54	55.38
	200	139.67	113.10
	300	184.83	158.68



2.2 粗粒土变形特性分析

2.2.1 垂直位移—剪切位移特性

粗粒土垂直位移—剪切位移关系曲线见图 4。

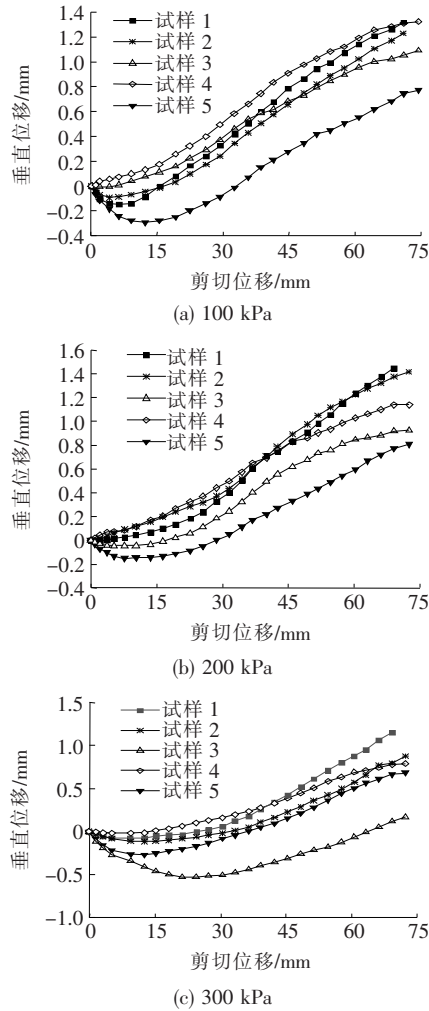


图 4 垂直位移—剪切位移关系曲线

粗粒土的变形来源于颗粒自身的变形、颗粒相对位移以及颗粒破碎,剪胀、剪缩和颗粒变位与颗粒粒径、级配、孔隙度以及粗细粒相对含量密切相关。剪胀来源于颗粒的平动、转动、抬起及爬升,而剪缩主要由颗粒破碎、小部分颗粒在剪切过程中掉出以及颗粒间的胶结破坏而产生。由图 4 可知:试样在小位移阶段出现剪缩现象,该阶段的体积缩小主要来源于颗粒间大孔隙的填充,在荷载作用下,大孔隙由于稳定性差而率先发生变化,宏观上体现为剪缩。随着正应力的增大,颗粒难以产生运动变形,产生变形的范围也变小,变形的速率也明显减小。

2.2.2 位移场分析

图 5 为 100 kPa 时不同级配试样的位移场。试样 5 的位移场最为密集,位移带距离最长,表明在剪切过

程中剪切带附近的颗粒发生了较大运动。在同样的试验条件下,试样 5 最容易产生压缩变形,这表现在垂直位移—剪切位移曲线上剪缩最为明显。试样 3 的位移场最为稀疏,表明在剪切过程中颗粒的位移较小,能较好地维持颗粒结构,在低垂直荷载下颗粒结构不易破坏,该文试验的荷载均较低,故试样 3 表现出较好的强度特性,但在较大荷载下所能承受的峰值剪应力较低,由于其含有较多粗颗粒,在剪切过程中不易发生排列重组来承受更大外力。位移场分布疏密程度越均匀表明能够产生较大位移的颗粒分布范围也越广,易产生体积变形。试样 2、4、5 的有效粒径相对于 1、3 要小得多,相应不均匀系数越大,有效粒径越小表明其所含细颗粒越多,更容易产生压缩变形。细颗粒含量越多,颗粒间的孔隙难以填充密实,在剪切过程中会由于颗粒间接触不良而易产生较大压缩变形。

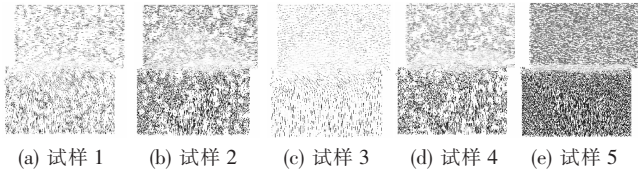


图 5 颗粒位移场

2.3 级配对孔隙的影响

2.3.1 曲率系数的影响

空隙率作为土体的一项重要指标,与粗粒土的强度和变形密切相关。空隙率反映了颗粒接触的密实程度,其大小受到颗粒级配的影响,级配良好的试样越密实,空隙率越小。由于级配包含不均匀系数和曲率系数,故通过控制变量法研究单因素下的空隙率变化。选取 10 组不均匀系数为 5.17,曲率系数不同的试样进行试验。模拟时的细观参数与表 2 相同,各级配的粒径范围相同。通过 Matlab 将图像二值化提取孔隙特征,不同曲率系数下的孔隙特征如图 6 所示。

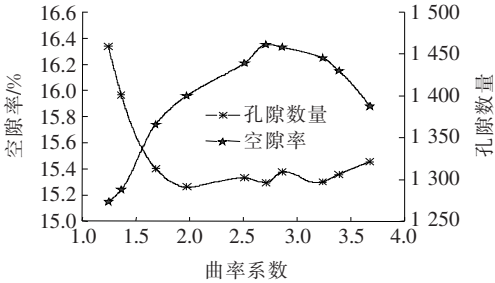


图 6 孔隙数量、空隙率与曲率系数关系

由图 6 可知:随着曲率系数的增加,孔隙数量先减小后趋于稳定,当曲率系数为 1.97~3.68 时,孔隙数

量几乎不受曲率系数的影响,最大波动幅度仅0.8%。当曲率系数从1.24增加至2.71时,空隙率明显增长,表明当曲率系数为2.71、不均匀系数为5.71时的试样是最松散的,加载初期的剪缩较大;从2.71增加至3.68时,空隙率呈下降趋势。

### 2.3.2 不均匀系数的影响

为探究不均匀系数的影响,选取10组曲率系数为2.37,不均匀系数不同的试样进行试验,得到孔隙特征如图7所示。

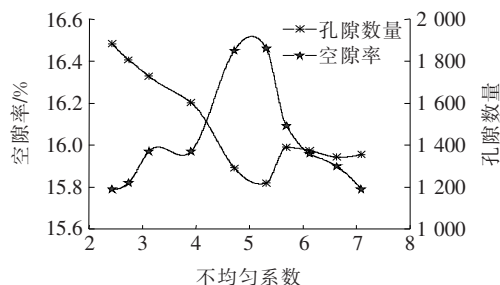


图7 孔隙数量、空隙率与不均匀系数关系

由图7可知:孔隙数量随不均匀系数增大呈先减小后增大趋势,空隙率先增大后减小,在不均匀系数为5左右到达峰值。孔隙数量谷值和空隙率的峰值所对应的不均匀系数几乎相同,此时的孔隙数量最少,但大孔隙较多,试样最为松散。

### 2.4 粗粒土颗粒间力链分析

力链的研究是数值分析的一个热点问题(Fu LL等)<sup>[20]</sup>。不同级配粗粒土试样在100 kPa下的力链分布情况如图8所示。

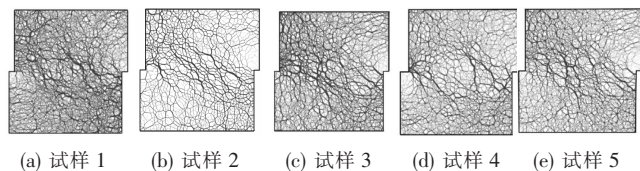


图8 力链分布

由图8可知:试样2弱力链偏多,与其有效颗粒含量相近的为试样4、5,随着不均匀系数的减少强力链增多。试样1、3粗颗粒含量较多,颗粒的平均配位数减小使得力链强度增加,颗粒间的挤压摩擦更剧烈,强力链增多。

## 3 结论

(1) 抗剪强度的高低并不能用级配的优劣来评价,也与各关键粒径相关。有效粒径、中值粒径和限制粒径相差不大时,空隙填充密实,结构性好,能够承受

较大外力。不均匀系数对抗剪强度的贡献更大。粗颗粒含量增加,强力链增多。

(2) 位移带距离最长,表明颗粒在剪切过程中发生了较大运动。位移场稀疏,表明在剪切过程中颗粒的位移较小,能较好地维持颗粒结构。

(3) 细颗粒越多,更容易产生压缩变形,颗粒间的孔隙难以填充密实,在剪切过程中由于颗粒间接触不良而易产生较大压缩变形。

(4) 孔隙数量随曲率系数增大呈先减小后趋于稳定的趋势,空隙率先增大后减小;孔隙数量随不均匀系数增大呈先减小后增大趋势,空隙率先增大后减小。

### 参考文献:

- [1] 秦红玉,刘汉龙,高玉峰,等.粗粒料强度和变形的大型三轴试验研究[J].岩土力学,2004,25(10):1575—1580.
- [2] 徐肖峰,魏厚振,孟庆山,等.直剪剪切速率对粗粒土强度与变形特性的影响[J].岩土工程学报,2013,35(4):728—733.
- [3] 饶锡保,何晓民,刘敏.粗粒含量对砾质土工程特质影响的研究[J].长江科学院院报,1999,16(11):24—28.
- [4] 邓国栋.粗粒土与混凝土接触面剪切特性试验研究[J].中外公路,2019,39(3):247—251.
- [5] 潘家军,程展林,余挺,等.不同中主应力条件下粗粒土应力变形特性试验研究[J].岩土工程学报,2016,38(11):2078—2084.
- [6] 姜景山,程展林,左永振,等.粗粒土剪胀性大型三轴试验研究[J].岩土力学,2014,35(11):3129—3138.
- [7] 朱俊高,刘忠,翁厚洋,等.试样尺寸对粗粒土强度及变形试验影响研究[J].四川大学学报(工程科学版),2012,44(6):92—96.
- [8] 褚福永,朱俊高,王平,等.K0固结条件下粗粒土变形及强度特性研究[J].岩土力学,2012,33(6):1625—1630.
- [9] 凌华,傅华,韩华强.粗粒土强度和变形的级配影响试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(S1):12—16.
- [10] 朱晟,宁志远,钟春欣,等.考虑级配效应的堆石料颗粒破碎与变形特性研究[J].水利学报,2018,49(7):849—857.
- [11] 王光进,杨春和,张超,等.粗粒含量对散体岩土颗粒破碎及强度特性试验研究[J].岩土力学,2009,30(12):3649—3654.
- [12] 徐国建,沈扬,刘汉龙.孔隙率、级配参数对粉土双轴压缩形状影响的颗粒流分析[J].岩土力学,2013,34(11):3321—3328.
- [13] Jiang MJ, Wang FZ, Zhu HH, et al. DEM Simulation of Macromicro Mechanical Properties of Dense Granular Materials in Direct Shear Test[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(5): 538—544.

# 基于法国标准的 GB3、GB4 基层材料差异性研究

臧芝树<sup>1</sup>, 曹雨杨<sup>2</sup>, 赖增成<sup>3</sup>, 霍心蕊<sup>4</sup>, 张连旭<sup>1</sup>

(1. 中国公路工程咨询集团有限公司, 北京市 100097; 2. 中咨公路养护检测技术有限公司, 北京市 100097;

3. 中国路桥工程有限责任公司, 北京市 100011; 4. 中交一公局第一工程有限公司, 北京市 102205)

**摘要:**在非洲的公路建设中,法国标准的沥青结合料基层 GB3 多被中资企业所采用,但 GB4 材料因其优异的性能、明显的经济效益,也被多数设计院所关注。GB3 与 GB4 材料的差异性主要体现在物理、力学指标的不同。在选择 GB3、GB4 基层材料时,不能以减薄路面结构厚度、降低工程造价为出发点,盲目选择 GB 材料等级进行计算,而要结合项目功能定位以及配合比设计和室内试验,通过验证去选择合适的 GB 材料等级,尤其在选择 GB4 材料时,需要首先验证其模量及疲劳特性。

**关键词:**道路工程; GB 沥青混合料; 非洲; 技术指标; 施工工艺

## 1 引言

在法国标准体系的沥青路面结构中,沥青结合料基层主要为沥青碎石(GB)和高模量沥青混凝土(EME)两类。因其施工工艺问题,在非洲应用较广的沥青结合料基层是 GB 材料。GB 类材料与中国标准的 ATB 类材料类似,是一类用于基层的碳氢化合物混合料,由碳氢化合物黏合剂、集料填料和可能的添加剂配成,主要在新建道路或旧路加固情况下使用。

法国 GB 类材料是在 20 世纪 70 年代早期开发的,根据其颗粒度,其性能被分为 3 个等级和 2 个种类(0/14 或 0/20)。3 个等级中,GB1 为低含量碳氢化合

物黏合剂,GB2 为适中含量碳氢化合物黏合剂,GB3 为用于改善耐久性的高含量碳氢化合物黏合剂<sup>[1]</sup>。

Guide CSCD 1994 和 CATA 1998 指南针对 GB 材料给出了具体的指标要求和适用情况,针对承载力要求较高的等级公路需要采用 GB3 材料,该指南在多数非洲原法属国家较为通用,也广泛被业主认可。但随着货运货车的载重能力增强和经济的增长,以及施工工艺的提高,试验条件的改善,1999 年法国颁布的 NF P98-138 规范中,针对沥青碎石材料提出了模量更高、耐久性更优的 GB4 材料,并指出 GB1 材料不再使用。2011 年颁布的法国沥青路面结构设计规范 NF P98-086 中,针对 GB4 材料,指出其使用需要根据取得的相关试验室试验结果来确定其特征。

[14] Xu YF, Feng XB, Zhu HG, et al. Fractal Model for Rockfill Shear Strength Based on Particle Fragmentation [J]. Granular Matter, 2015, 17(6): 753-761.

[15] 宋杨,王诚杰,孙文君,等. 超大粒径块石在土石混填路基中稳定性数值模拟研究[J]. 中外公路, 2018, 38(5): 12-18.

[16] 邵磊,迟世春,贾宇峰. 堆石料大三轴试验的细观模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(S1): 239-243.

[17] 刘勇,朱俊朴,闫斌. 基于离散元理论的粗粒土三轴试验细观模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(4): 58-62.

[18] Ahad Bagherzadeh - khalkhali, Mirghasemi A A. Numerical and Experimental Direct Shear Tests for Coarse-Grained Soils[J]. Particuology, 2009, 7(1): 83-91.

[19] Xu XF, Wei HZ, Meng QS, et al. Dem Simulation on Effect of Coarse Gravel Content to Direct Shear Strength and Deformation Characteristics of Coarse-Grained Soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(2): 311-316.

[20] Fu LL, Zhou SH, Guo PJ, et al. Induced Force Chain Anisotropy of Cohesionless Granular Materials during Biaxial Compression[J]. Granular Matter, 2019, 21(3): 1-16.