

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.02.009

鄱阳湖地区级配不良偏细砂砾石料力学特性

吴平¹, 凌华^{2,3}, 石北啸^{2,3}, 傅华^{2,3}, 韩华强^{2,3}

(1. 中铁水利水电规划设计集团有限公司, 江西 南昌 330029; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210029;
3. 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 基于大型三轴试验数据, 研究了级配和相对密度 D_r 对鄱阳湖地区级配不良偏细砂砾石料强度和变形特性的影响。结果表明: 随着小于 5 mm 粒径颗粒质量分数的增加, 砂砾石料压实性能降低; 随着大于 5 mm 粒径颗粒质量分数 P_5 和 D_r 的增大, 强度指标、初始切线弹性模量与体积模量增大; 本文研究范围内, 随 P_5 和 D_r 的增大, 强度指标 c 、 φ 、 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 线性增大, 且 P_5 和 D_r 对强度指标的作用效应几乎不存在相互影响; 随 P_5 和 D_r 的增大, 邓肯 $E-B$ 模型参数 K 、 K_b 增大, 且 P_5 越高 D_r 对 K 、 K_b 的影响越显著, D_r 越大时 P_5 对 K 、 K_b 的影响越强烈, 存在相互影响效应; 提出了考虑级配与 D_r 双重影响的强度指标和变形参数经验计算公式, 该公式能高精度预测鄱阳湖地区级配不良偏细砂砾石覆盖层料的力学指标。

关键词: 砂砾石料; 颗粒级配; 强度指标; 变形; 力学特性; 相对密度; 鄱阳湖地区

中图分类号: TV41 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2024)02-0069-08

Mechanical properties of poorly-graded sandy gravel with high content of fine particles in Poyang Lake area

WU Ping¹, LING Hua^{2,3}, SHI Beixiao^{2,3}, FU hua^{2,3}, HAN Huaqiang^{2,3}

(1. China Railway Water Resources and Hydropower Planning and Design Group, Nanchang 330029, China;
2. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
3. MWR Key Laboratory of Reservoir Dam Safety, Nanjing 210029, China)

Abstract: A series of large-scale triaxial tests are conducted on the influence of particle grading and relative density on the strength and deformation characteristics of sandy gravel with high content of particles smaller than 5 mm. It shows that the compaction performance of sandy gravel decreases with the increasing mass fraction of particle less than 5 mm. Strength parameters and deformation parameters increase with the increase of the mass fraction of particles larger than 5 mm P_5 and relative density D_r . The strength parameters, c , φ , φ_0 and $\Delta\varphi$, increase linearly with the growth of P_5 and D_r , and there is almost no interaction between influences of P_5 and D_r on strength parameters. The test results also show that the Duncan $E-B$ model parameters K and K_b increase with the growth of P_5 and D_r , the effects of D_r on K and K_b are greater for sandy gravel with higher content of particles larger than 5 mm, and the effects of P_5 on K and K_b are more significant for sandy gravel with higher relative density. The empirical formulas, considering the effects of particle grading and D_r , are proposed to predict mechanical properties and Duncan $E-B$ model parameters, and the formulas have high precision in prediction of mechanical indexes of poorly-graded sandy gravel with high content of fine particles for overburden in Poyang Lake area.

Key words: sandy gravel; particle gradation; strength index; deformation; mechanical properties; relative density; Poyang Lake area

水利水电工程建设中常利用天然砂砾石覆盖层作为坝基修建土石坝和闸坝等^[1-4], 以达到节省投资、缩短工期和绿色环保的目的。由于砂砾石料压实后具有模量高、颗粒破碎低等特性, 且相比堆石料, 砂砾石料更为低廉, 因此很多土石坝根据因料设计原则也采用天然砂砾石料作为大坝的坝体填筑料^[5-7]。天然砂砾石料一般因级配离散、缺乏中间粒径而级配不良, 且由于埋深和沉积等原因密度分布不均, 导致其力学特性非

基金项目: 江西省水利厅科技项目(202124ZDKT06); 国家重点研发计划项目(2022YFC3005502); 国家自然科学基金面上项目(52279135)

作者简介: 吴平(1980—), 男, 正高级工程师, 主要从事水文地质与工程地质研究。E-mail: 285676627@qq.com

引用本文: 吴平, 凌华, 石北啸, 等. 鄱阳湖地区级配不良偏细砂砾石料力学特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 69-76.

WU Ping, LING Hua, SHI Beixiao, et al. Mechanical properties of poorly-graded sandy gravel with high content of fine particles in Poyang Lake area[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(2): 69-76.

常复杂,是相关工程建设需要重点研究的问题。

已有研究表明,砂砾石料中小于5 mm 细料含量对其力学特性、渗透特性具有重要影响,一般达到30%~35%时,细粒能较好地充填于粗颗粒骨架的孔隙之中,并能参与骨架作用,碾压后能获得较大的干密度^[7-8]。褚福永等^[9-10]通过三轴试验发现,相对密度对砂砾料的强度和变形具有重要影响,且强度指标随相对密度呈线性变化。李振等^[11]通过直剪试验研究了细粒含量对砂砾石料强度指标的影响,认为当细粒含量较少时,摩擦角几乎为定值;当细粒含量较高时,随细粒含量的增加,摩擦角迅速减小。吴梦喜等^[12]进行了三轴试验和压缩试验,给出了邓肯 *E-B* 模型参数与细颗粒流失量之间的表达式。褚福永等^[13]在缩尺效应研究时,讨论了级配对相同相对密度堆石料的力学特性的影响。王柳江等^[14]利用三轴试验和压缩试验改进了 hhu-SH 模型,使其适用性由细粒土扩展至粗颗粒土。

由于天然砂砾石料级配离散,且往往级配不良,密度分布不均,因此其物理性质和力学特性非常复杂,需要开展大量的室内试验和现场测试,勘察工作任务重、耗时长。因此建立考虑级配离散和密度变化等复杂条件下的地区性经验公式,无疑可减少试验和勘察工作量、缩短勘察周期、节省经费,也可为类似区域工程覆盖层研究提供参考。

本文针对鄱阳湖地区级配不良偏细砂砾石覆盖层料,开展系统性大型三轴试验,研究级配和相对密度对强度和变形特性的影响,基于邓肯 *E-B* 模型提出了考虑级配与相对密度双重影响作用的模型参数经验公式,可高精度预测鄱阳湖地区覆盖层的力学特性。

1 试验材料和方法

1.1 试样级配

根据鄱阳湖覆盖层砂砾石大口径钻孔料的颗分试验结果,得到级配包络线(表1)。砂砾石料检测级配最大粒径为60 mm,小于5 mm 粒径颗粒质量分数高达42.2%~59.4%,小于0.075 mm 粒径颗粒质量分数为0.3%~1.2%,不均匀系数 C_u 为18.9~38.5,曲率系数 C_c 为0.13~0.62。由于不能同时满足 $C_u \geq 5$ 和 $1 \leq C_c \leq 3$,根据 GB/T 50145—2007《土的工程分类标准》,各组料均为级配不良砾。鄱阳湖覆盖层砂砾石料具有最大粒径小、细颗粒含量高、级配不良等显著特点。

表1 级配包络线与试样干密度
Table 1 Grading envelope and dry density of test samples

检测级配特性	小于某粒径颗粒的质量分数/%										最小干密度/ (g/cm ³)	最大干密度/ (g/cm ³)	相对密度	试验干密度/ (g/cm ³)
	60 mm	40 mm	20 mm	10 mm	5 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.075 mm				
上包线	100.0	99.6	86.7	69.6	59.4	48.2	42.5	28.5	8.2	1.2	1.81	2.10	0.55,0.68,0.80	1.96,2.00,2.03
平均线	100.0	98.9	79.3	60.5	50.8	39.6	34.4	22.1	5.8	0.7	1.85	2.16	0.55,0.68,0.80	2.01,2.05,2.09
下包线	100.0	98.2	71.9	51.4	42.2	31.0	26.2	15.6	3.3	0.3	1.91	2.22	0.55,0.68,0.80	2.07,2.11,2.15

由于最大粒径为60 mm,因此直接采用检测级配的上包线、平均线和下包线作为试验级配。其中上包线试样大于5 mm 粒径颗粒含量 P_5 为40.6%,平均线级配 P_5 为49.2%,下包线级配 P_5 为57.8%。

1.2 试样密度

为系统研究级配不良偏细砂砾石料的强度变形特性,对各级配包络线均选择了0.55、0.68和0.80共3种相对密度开展三轴试验,试验干密度见表1。表中相对密度试验依据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》进行。

由表1可知,下包线试样最小干密度和最大干密度最大、上包线最小、平均线居中,砂砾石料的压实性能与级配或小于5 mm 粒径颗粒质量分数密切相关。当小于5 mm 粒径颗粒质量分数较低时,细颗粒主要充填粗颗粒形成的骨架孔隙中,此时随细粒增加,击实后土样越易趋于密实。当细颗粒质量分数达到30%~35%时,细颗粒能较好地充填至粗颗粒骨架的孔隙中,达到临界点;对于文中砂砾料,细颗粒质量分数较高,达到了42.2%~59.4%,细颗粒含量的增大会阻断骨架和隔离粗颗粒,土性由粗粒土逐渐过渡至砂性土,因此随细颗粒含量增大,在同等击实功能情况下上包线最小干密度和最大干密度都最小,下包线最大,平均线居中。

1.3 三轴试验

利用南京水利科学研究院的大型三轴仪,依据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》进行了不同级配

包络线、不同相对密度砂砾石料的大型三轴试验。试样直径 300 mm、高度 700 mm,试验围压 σ_3 为 200、400、600、800 kPa。

不同级配包络线试样在相对密度 $D_r=0.68$ 时的三轴试验对比曲线见图 1(图中 ε_v 、 ε_1 分别为体积应变和轴向应变),平均线级配试样($P_5=49.2\%$)在不同 D_r 时的三轴试验对比曲线见图 2。由图 1 可知,虽然 D_r 相同,但随着 P_5 增大,应力应变曲线软化型越显著,相同围压条件下剪切破坏峰值高且到达峰值时的轴向应变小;剪切过程中产生的体积应变小、剪胀性增强。主要原因在于,下包线试样中的细颗粒能较密实填充于粗颗粒形成的骨架孔隙中,粗细颗粒共同分担荷载,另外由于压实性能最优,相同 D_r 时的试验干密度也最大,因此试验表现出剪切破坏峰值最大、应力应变关系软化型最显著、体变剪胀现象最强烈。对于上包线试样,细粒含量高达 59.4%,影响了骨架形成甚至可能包裹部分大粒径颗粒,使砂砾石料的力学性质向砂性土过渡,因此其剪切破坏峰值最小、应力应变关系软化型趋势和体变剪胀程度最低。

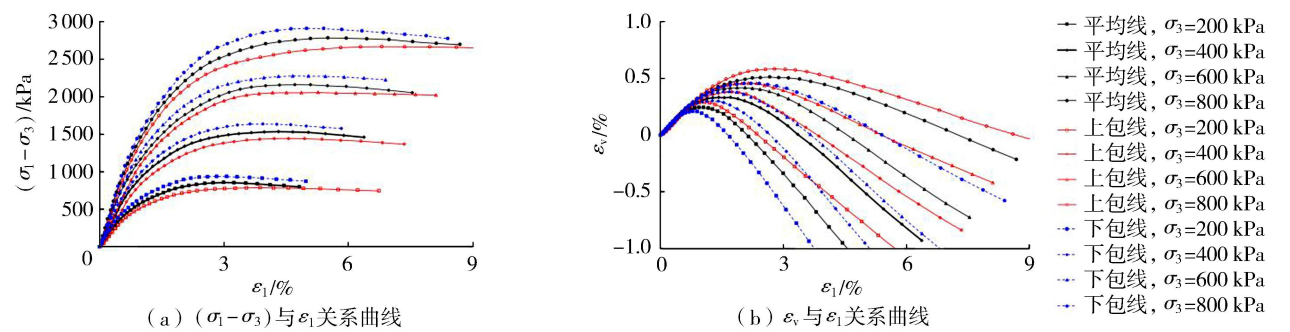


图 1 不同级配试样三轴试验对比曲线 ($D_r=0.68$)

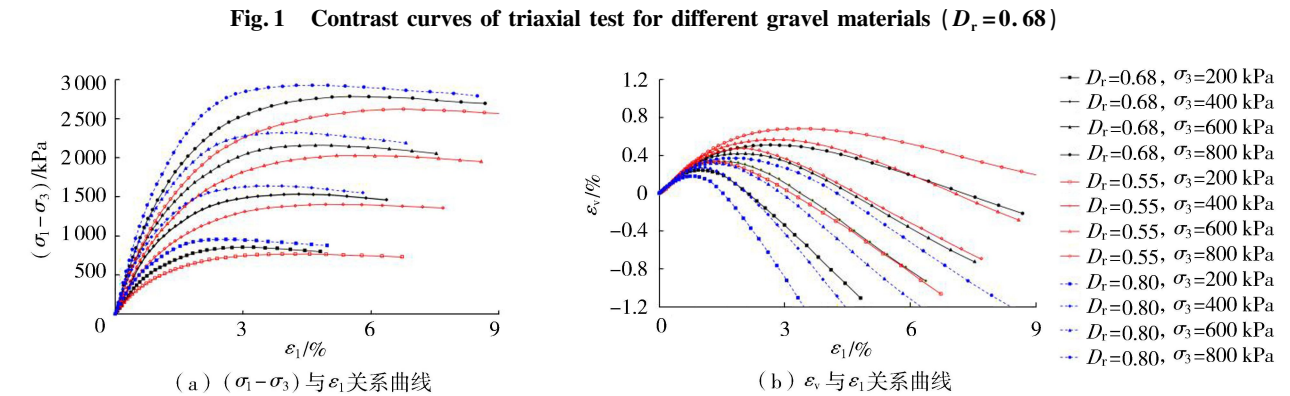


图 2 平均线级配试样不同相对密度三轴试验对比曲线

Fig.2 Contrast curves of triaxial test for average grading samples with different relative density

由图 2 可知,随 D_r 的增大,试样的剪切破坏峰值增大,应力应变关系越趋向软化形态,剪胀现象越强烈。这主要是 D_r 增大后,试样干密度增大、内部孔隙减小、颗粒之间的接触点增加所引起的。

2 强度指标定量研究

根据三轴试验结果,得到不同级配包络线、不同相对密度砂砾石料的线性强度指标黏聚力 c 、内摩擦角 φ 和非线性强度指标 φ_0 、 $\Delta\varphi$ (表 2)。

由表 2 可知,当 P_5 相同时,随 D_r 的增大, c 、 φ 、 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 均变大;当 D_r 相同时,随 P_5 的增大, c 、 φ 、 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 均变大。主要原因是 P_5 和 D_r 增大后,试样干密度变大、大粒径颗粒含量增加、试样中的粗细颗粒充填关系改善且颗粒之间的咬合更加紧密。

相同 D_r 时、砂砾石料 c 随 P_5 的变化,如图 3(a) 所示。随 P_5 增大, c 可近似看成线性增加。斜率 k 为 1.72~1.89,相差不大,可认为对于不同 D_r 试样, P_5 增大导致 c 增大的幅度一致,即 P_5 对 c 的作用效应几乎不受 D_r 状态的影响。取斜率均值 1.78,即 P_5 每增加 1%, c 增加 1.78 kPa。

随 D_r 的增大,不同级配试样 c 的变化如图 3(b) 所示。 c 随 D_r 线性增大,且增大幅度相近,即 D_r 对 c 的作用效应几乎也不受级配特性影响。斜率为 $1.35\times100\sim1.45\times100$,取平均值为 1.41×100 ,即 D_r 每增大

0.01(对于文中试验, D_r 增大0.12,干密度增大0.03~0.04 g/cm³), c 增大1.41 kPa。

表2 砂砾石料强度指标试验值与计算值对比

$P_5/\%$	D_r	c/kPa		$\varphi/(\text{^\circ})$		$\varphi_0/(\text{^\circ})$		$\Delta\varphi/(\text{^\circ})$	
		试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值
40.6	0.55	24.1	24.1	37.1	37.1	40.3	40.3	2.9	2.9
40.6	0.68	42.4	42.8	37.6	37.7	42.9	42.6	4.7	4.4
40.6	0.80	57.8	60.1	38.1	38.2	45.0	44.8	6.1	5.8
49.2	0.55	38.8	39.5	37.4	37.5	42.4	42.2	4.5	4.2
49.2	0.68	56.0	58.2	38.0	38.1	44.7	44.6	5.9	5.7
49.2	0.80	74.4	75.5	38.5	38.6	46.9	46.7	7.4	7.1
57.8	0.55	54.1	54.8	37.9	38.0	44.4	44.1	5.7	5.4
57.8	0.68	72.0	73.5	38.4	38.5	46.6	46.5	7.2	7.0
57.8	0.80	90.4	90.8	39.1	39.1	48.7	48.6	8.4	8.4

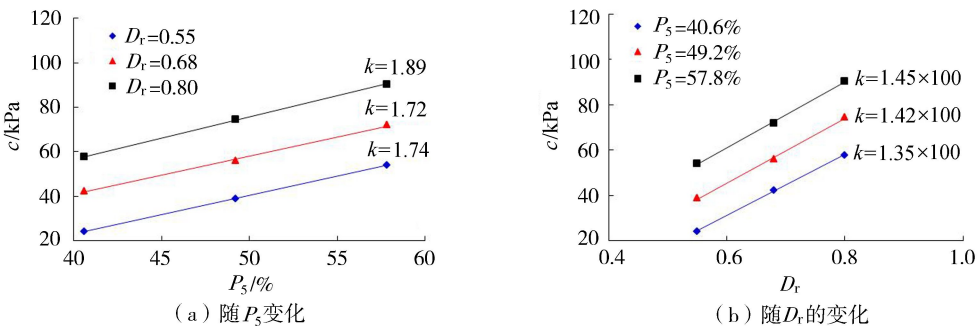


图3 c 值随 P_5 和 D_r 的变化

Fig.3 Change of c with P_5 and D_r

根据上述分析,砂砾石料 P_5 为 40.6%~59.8%、 D_r 为 0.55~0.80 时, c 可表达为

$$c = c_0 + (P_5 - 40.6)a_c + (D_r - 0.55)b_c$$
 (1)

式中: c_0 为 $P_5=40.6\%$ 、 $D_r=0.55$ 时的黏聚力,即 24.1 kPa(表 2); a_c 、 $b_c/100$ 分别为 P_5 增大 1% 和 D_r 提升 0.01 时引起的黏聚力增加值,即 1.78 kPa 和 1.41 kPa。需注意的是, P_5 代入式(1) 计算时不计百分号,下文同。

由图 4 可知,随 P_5 、 D_r 增大, φ 均可视为线性增大。类似 c ,两图中的斜率即 φ 增加幅度均较接近,可认为 P_5 几乎不影响 D_r 对 φ 的作用效应,而 D_r 也几乎不影响 P_5 对 φ 的作用效应,即 P_5 与 D_r 对 φ 单独影响,不存在相互作用。取斜率平均值,当 P_5 为 40.6%~59.8%、 D_r 为 0.55~0.80 时,砂砾料 φ 可表示为

$$\varphi = \varphi_{01} + (P_5 - 40.6)a_\varphi + (D_r - 0.55)b_\varphi$$
 (2)

式中: φ_{01} 为 $P_5=40.6\%$ 、 $D_r=0.55$ 时的摩擦角,即 37.1°; a_φ 、 $b_\varphi/100$ 分别为 P_5 增大 1% 和 D_r 提升 0.01 引起的摩擦角增量,即 0.05°和 0.044°。

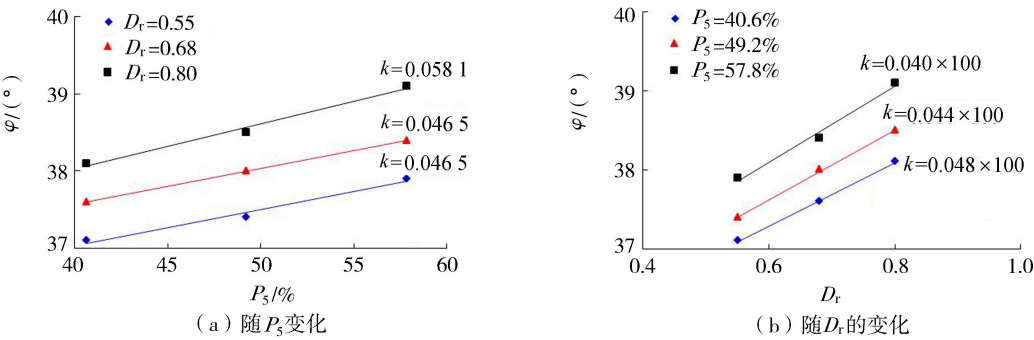


图4 φ 值随 P_5 和 D_r 的变化

Fig.4 Change of φ with P_5 and D_r

非线性强度指标 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 随 P_5 和 D_r 的变化规律与线性强度指标 c 、 φ 类似,即:

$$\varphi_0 = \varphi'_0 + (P_5 - 40.6)a_{\varphi_0} + (D_r - 0.55)b_{\varphi_0}$$

(3)

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 + (P_5 - 40.6)a_{\Delta\varphi} + (D_r - 0.55)b_{\Delta\varphi}$$

(4)

式中: φ'_0 、 $\Delta\varphi_0$ 分别为 $P_5=40.6\%$ 、 $D_r=0.55$ 时的 φ_0 与 $\Delta\varphi$,即 40.3° 和 2.9° ; a_{φ_0} 、 $a_{\Delta\varphi}$ 分别为 P_5 增大 1% 引起的 φ_0 和 $\Delta\varphi$ 增量; $a_{\varphi_0}/100$ 、 $a_{\Delta\varphi}/100$ 分别为 D_r 提升 0.01 引起的 φ_0 和 $\Delta\varphi$ 增量; a_{φ_0} 、 $a_{\Delta\varphi}$ 、 $a_{\varphi_0}/100$ 、 $a_{\Delta\varphi}/100$ 分别为 0.223° 、 0.147° 、 0.180° 和 0.117° 。

为验证式(1)~(4)的准确性和合理性,进行了不同级配、不同相对密度试样的各强度指标计算值与试验值对比,见表 2,计算值均与试验值接近,误差较小,具有较高的计算精度。

式(1)~(4)表明,当 P_5 和 D_r 处于一定范围时,随 P_5 、 D_r 增大, c 、 φ 、 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 均可视为线性增大,且 P_5 和 D_r 的作用效应独立,不相互影响。式(1)~(4)揭示了强度指标随级配特性和相对密度的变化规律,并具有较高的精度,可预测 P_5 和 D_r 处于一定范围内的鄱阳湖地区级配不良偏细砂砾石覆盖层料的强度指标,避免了复杂而烦琐的大量试验和勘察工作,具体应用时可稍微拓展范围,如 P_5 为 $35.6\% \sim 62.8\%$ 、 D_r 为 $0.50 \sim 0.85$ 。

3 变形参数定量研究

考虑到邓肯 $E-B$ 模型在水利水电工程中运用最为广泛,基于邓肯 $E-B$ 模型研究砂砾石覆盖层的变形参数。根据试验结果,整理得到的各包络线不同相对密度砂砾石料的邓肯 $E-B$ 模型变形参数见表 3。土石坝的计算经验表明,切线弹性模量参数 K 、切线体积模量参数 K_b 对坝体沉降和变形影响占主导地位,因此论文重点分析参数 K 与 K_b 。

由图 5(a)可知,当 D_r 为定值时,仍可用线性关系描述 P_5 增大引起的 K 变化,但不同 D_r 时的斜率 k 相差较大,且随 D_r 增大斜率越大,因此与强度指标不同, D_r 影响了 P_5 对 K 的作用效应, D_r 越大作用效应越显著。

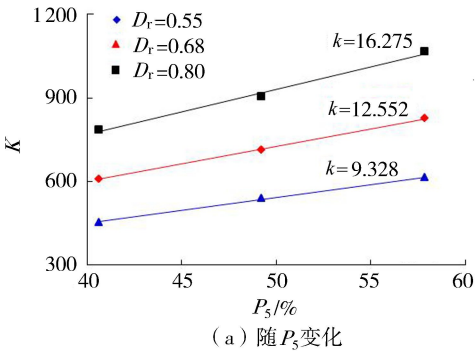


表 3 砂砾石料邓肯 $E-B$ 模型变形参数
Table 3 Deformation parameters of Duncan $E-B$ model for sandy gravel

级配特性	D_r	K	n	R_t	K_b	m
上包线 $P_5=40.6\%$	0.55	453.5	0.62	0.66	300.5	0.54
	0.68	610.1	0.58	0.65	441.7	0.51
	0.80	785.1	0.54	0.64	666.3	0.45
平均线 $P_5=49.2\%$	0.55	539.1	0.57	0.66	382.8	0.48
	0.68	713.4	0.54	0.65	572.1	0.44
	0.80	904.6	0.50	0.61	835.2	0.40
下包线 $P_5=57.8\%$	0.55	614.1	0.52	0.65	465.3	0.43
	0.68	826.2	0.49	0.64	694.7	0.40
	0.80	1065.3	0.46	0.60	989.7	0.36

注: n 为切线弹性模量系数; R_t 为破坏比; m 为切线体积模量系数。

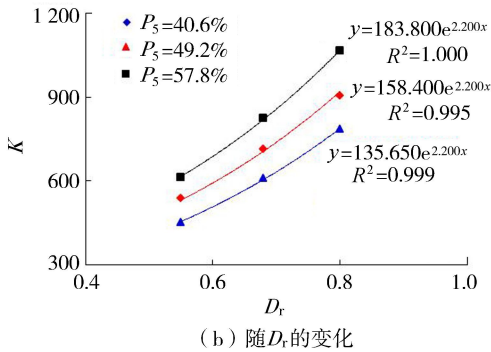


图 5 K 随 P_5 和 D_r 的变化

Fig.5 Change of K with P_5 and D_r

由图 5(b)可知, K 随 D_r 的变化符合指数函数分布,但函数系数随 P_5 增大而增大,反映了 P_5 变化影响 D_r 对 K 的作用效应。 P_5 越高, D_r 对 K 的影响作用效应越显著。

综上, P_5 和 D_r 对 K 的作用效应并不独立,存在相互影响,不能用类似式(1)~(4)的简单线性公式描述 P_5 和 D_r 对 K 的综合影响。

由图 5(b)可知,当指数函数的幂统一取 $2.20D_r$ 时, K 随 D_r 的变化具有非常高的拟合度。即级配相同时,相对密度为 D_{r1} 砂砾料的模型参数 K 为 K_1 ,相对密度 D_{r2} 的 K 为 K_2 ,其比值 $K_1/K_2 = e^{2.20D_{r1}}/e^{2.20D_{r2}}$ 。当各级配料 $D_r=0.55$ 时的 K 确定后,就可以此为基准值,得到不同级配、不同相对密度砂砾料的 K 。结合图 5(a),可得:

$$K = [K_0 + (P_5 - 40.6)a_k]e^{D_r b_k}/e^{0.55b_k}$$

(5)

式中: K_0 为 $P_5=40.6\%$ 、 $D_r=0.55$ 时砂砾石料的 K ,即453.5(表3); a_k 、 b_k 为拟合参数,分别为9.328(图5(a))、2.20(图5(b))。式(5)反映了 P_5 和 D_r 对邓肯 $E-B$ 模型参数 K 的相互作用效应和综合影响。

K_b 随 P_5 和 D_r 的变化如图6所示。与参数 K 类似, P_5 和 D_r 对 K_b 的作用效应存在相互影响,且可用描述为

$$K_b = [K_{b,0} + (P_5 - 40.6)a_{k_b}]e^{D_r b_{k_b}}/e^{0.55b_{k_b}} \tag{6}$$

式中 $K_{b,0}$ 、 a_{k_b} 、 b_{k_b} 为拟合参数,其中 $K_{b,0}=300.5$ (表3)、 $a_{k_b}=9.572$ (图6(a))、 $b_{k_b}=3.03$ (图6(b))。

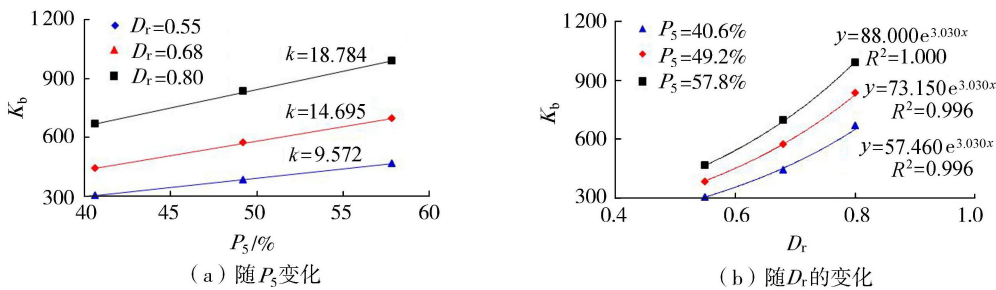


图6 K_b 随 P_5 和 D_r 的变化

Fig.6 Change of K_b with P_5 and D_r

由表3可知,邓肯 $E-B$ 模型参数 n 、 m 随 P_5 和 D_r 的增加而降低,且 m 一般比 n 低约0.07~0.1。有限元数值计算中,参数 K 、 K_b 对结构物变形起关键作用,指数 n 、 m 的影响相对要小,可利用表3插值可得到 n 、 m , R_f 可类似处理,不再赘述。

根据式(5)(6),计算了 P_5 为35.6%~62.8%、 D_r 为0.50~0.85范围内的砂砾石邓肯模型参数 K 和 K_b ,见表4。

表4 变形参数试验值与计算值对比

Table 4 Comparison of test and calculated deformation paramenters

$P_5/\%$	D_r	K			K_b		
		计算值	试验值	相对误差/%	计算值	试验值	相对误差/%
35.6	0.50	364.5			217.1		
	0.55	406.9			252.6		
	0.68	541.6			374.6		
	0.80	705.2			538.9		
	0.85	787.2			627.0		
40.6	0.50	406.3			258.3		
	0.55	453.5	453.5	0.0	300.5	300.5	0.0
	0.68	603.7	610.1	-1.1	445.6	441.7	0.9
	0.80	786.0	785.1	0.1	640.9	666.3	-3.8
	0.85	877.4			745.8		
49.2	0.50	478.1			329.0		
	0.55	534.0	539.1	-1.0	383.1	382.8	0.1
	0.68	710.8	713.4	-0.4	568.0	572.1	-0.7
	0.80	925.5	904.6	2.3	817.0	835.2	-2.2
	0.85	1032.7			950.1		
57.8	0.50	550.0			399.7		
	0.55	614.3	614.1	0.0	465.5	465.3	0.0
	0.68	817.7	826.2	-1.0	690.2	694.7	-0.7
	0.80	1064.7	1065.3	-0.1	992.8	989.7	0.3
	0.85	1188.5			1155.2		
62.8	0.50	591.8			440.9		
	0.55	660.6			513.0		
	0.68	879.4			760.6		
	0.80	1145.0			1094.2		
	0.85	1278.2			1273.2		

由表 4 可知:参数 K 计算值与试验值的相对误差为 $-1.1\% \sim 2.3\%$; K_b 的相对误差为 $-3.8\% \sim 0.9\%$, 计算和预测精度较高。外推得到的 P_s 为 35.6% 和 62.8% 、 D_r 为 0.50 和 0.85 的参数 K 、 K_b 也符合砂砾石料力学特性的正常认知,参数也在《土工原理》^[15] 所列的范围内。

为了验证本文成果的合理性,首先采用计算值进行了 $P_s=49.2\%$ 、 $D_r=0.8$ 试样的三轴曲线反演,并与试验曲线进行对比验证,如图 7 所示。对于应力-应变曲线,在破坏峰值点前试验曲线和反演曲线几乎重合;对于体积应变曲线,前期拟合较好,但剪胀后的体积变形曲线相差较大,这是由于邓肯 $E-B$ 模型本身不能反映剪胀特性导致的。其次以式(3)(4)确定非线性指标 φ_0 与 $\Delta\varphi$,式(5)式(6)确定 K 、 K_b ,由表 4 插值得到 n 、 m 、 R_f ,预测了 $P_s=49.2\%$ 、 $D_r=0.85$ 试样和 $P_s=57.8\%$ 、 $D_r=0.85$ 试样的三轴试验曲线(图 7),由图 7 可知,当 $P_s=49.2\%$ 时, D_r 由 0.8 增大至 0.85 ,剪切破坏峰值提高,模量增加,剪切过程中产生的体积变形小;当保持 $D_r=0.85$ 不变, P_s 由 49.2% 增大至 57.8% 后,剪切破坏峰值进一步提高,模量增加,体积变形进一步减小。反映了对于鄱阳湖地区级配不良偏细砂砾石料, D_r 增大、粗颗粒含量增大后,其强度指标增大、模量增大的特性。因此,经验公式(3)~(6)可用于高精度预测鄱阳湖地区级配不良偏细砂砾石覆盖层料完整的邓肯 $E-B$ 模型参数。运用经验公式,能显著减少室内和现场试验和覆盖层勘察工作,缩短覆盖层勘察周期并节省投资,也为类似工程建设提供了参考依据。

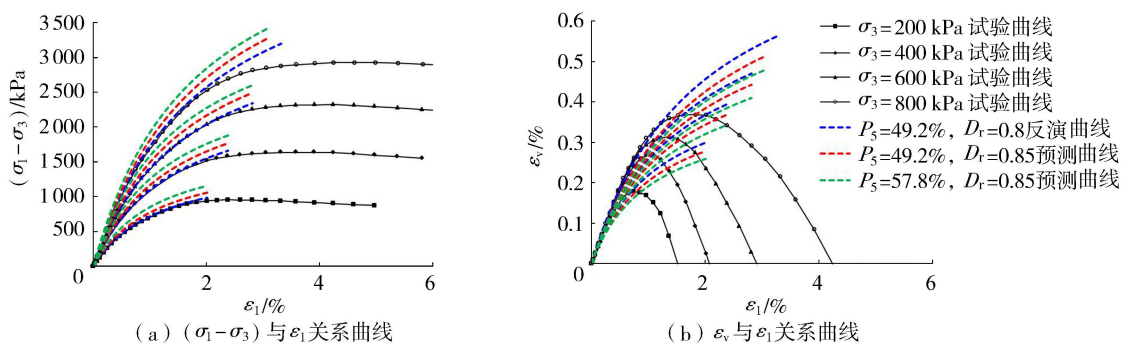


图 7 三轴曲线反演与预测曲线

Fig.7 Inversion curve and prediction curve of triaxial tests

4 结 语

对于级配不良偏细砂砾石料,随着小于 5 mm 粒径颗粒含量的增加,压实性能降低,力学性质逐渐偏向砂性土,力学指标逐渐降低。在本文研究范围内,随着大于 5 mm 粒径颗粒含量 P_s 和 D_r 的增大,线性强度指标 c 、 φ 和非线性强度指标 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 均可视为线性增加,且 P_s 和 D_r 对强度指标的作用效应几乎不存在相互影响。在本文研究范围内,邓肯 $E-B$ 模型参数 K 、 K_b 随 P_s 和 D_r 的提升而增大。 P_s 越高、 D_r 对 K 、 K_b 的影响作用越显著; D_r 越大, P_s 对 K 、 K_b 的影响作用越强烈, P_s 和 D_r 对 K 、 K_b 的作用效应存在相互影响。提出了强度指标及邓肯 $E-B$ 模型变形参数的经验公式,可用于高精度预测鄱阳湖地区级配不良偏细砂砾石覆盖层的力学特性指标,能显著减少覆盖层试验和勘察的工作量和周期。

需指出的是,本文研究的砂砾石料细粒含量较高,已超出 $30\% \sim 35\%$ 的临界点,随细粒含量的增大,相同相对密度时所对应的干密度减小,强度指标减小、邓肯模型参数 K 与 K_b 降低。当覆盖层具有宽级配特性,相同相对密度时,随细粒含量的增大,试样的干密度会增加;细粒含量达到 $30\% \sim 35\%$ 时干密度达到最大峰值;其后继续增大细粒含量,密度又会逐渐降低,力学特性指标也会呈现本文的变化规律。因此,随 P_s 的减小,强度指标、初始切线弹性模量与体积模量等可能会呈现出先增加至峰值后再减小的复杂趋势,这也是后续进一步的研究方向。

参考文献:

[1] 邓铭江,严寒,高震. 深覆盖层混凝土面板坝关键技术研究综述[J]. 岩土工程学报,2012,34(6):986-996. (DENG Mingjiang, YAN Han, GAO Zhen. Advances in key technology for concrete face dams with deep overburden layers under cold and seismic conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6):986-996. (in Chinese))

[2] 凤家骥,张国安. 柯柯亚面板坝的防渗设计与原型观测[J]. 水力发电,1989,15(3):17-20. (FENG Jiaji, ZHANG Guoan.

Seepage control design and prototype observation for Kekeya face rockfill dam [J]. Water Power, 1989, 15 (3): 17-20. (in Chinese))

[3] 韦春侠,陈洪武,王占巨. 察汗乌苏水电站混凝土面板砂砾石坝关键技术[J]. 葛洲坝集团科技,2009,90(2):15-18. (WEI Chunxia,CHEN Hongwu,WANG Zhanju. Key technology of the CF sand and gravel rockfill dam of the Chahanwusu Hydropower Station[J]. Gezhouba Group Science & Technology,2009,90(2):15-18. (in Chinese))

[4] 赵大洲,赵宇瑶,王新奇. 软岩填筑高面板堆石坝分区及材料设计[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6):73-78. (ZHAO Dazhou,ZHAO Yuyao,WANG Xinqi. Design of dam zoning and construction materials for a high concrete-faced rock-fill dam with soft rock[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(6):73-78. (in Chinese))

[5] 陈生水,凤家骥,袁辉. 砂砾石面板坝关键技术研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(1):16-20. (CHEN Shengshui,FENG Jiaji,YUAN Hui. Research on key techniques of facing sandy gravel dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2004,26(1):16-20. (in Chinese))

[6] 周恒,李学强,苗喆,等. 大石峡特高面板砂砾石坝设计安全标准及安全控制指标研究[J]. 西北水电,2021(6):140-145 (ZHOU Heng,LI Xueqiang,MIAO Zhe,et al. Study on the design safety standards and safety control indicators of the dashixia super-high concrete faced sand-gravel dam [J]. Northwest Hydropower,2021(6):140-145. (in Chinese))

[7] 陈生水,凌华,米占宽,等. 大石峡砂砾石坝料渗透特性及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(1):26-31. (CHEN Shengshui,LING Hua,MI Zhankuan,et al. Experimental study on permeability and its influencing factors for sandy gravel of Dashixia dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(1):26-31. (in Chinese))

[8] 凌华,陈生水,翟迎春,等. 宽围压加卸荷条件下特高坝填筑料强度变形研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(1):27-33. (LING Hua,CHEN Shengshui,ZHAI Yingchun,et al. Experimental study on strength and deformation of filling materials of super-high dams with wide confining pressures under loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(1):27-33. (in Chinese))

[9] 褚福永,朱俊高. 砂卵砾石料强度及变形大型三轴试验研究[J]. 水力发电学报,2014,33(6):209-214. (CHU Fuyong,ZHU Jungao. Large-scale triaxial test study of strength and deformation behaviors of sand-grained materials[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2014,33(6):209-214. (in Chinese))

[10] 孙明辉,朱俊高,沈靠山,等. 密实度对砂卵砾石料强度及变形特性的影响[J]. 水利水运工程学报,2015(4):43-47. (SUN Minghui,ZHU Jungao,SHEN Kaoshan,et al. Density effects on strength and deformation behavior of sandy gravel[J]. Hydro-Science and Engineering,2015(4):43-47. (in Chinese))

[11] 李振,邢义川. 干密度和细粒含量对砂卵石及碎石抗剪强度的影响[J]. 岩土力学,2006,27(12):2255-2260. (LI Zhen,XING Yichuan. Effects of dry density and percent fines on shearing strength of sandy cobble and broken stone[J]. Rock and Soil Mechanics,2006,27(12):2255-2260. (in Chinese))

[12] 吴梦喜,叶发明,张琦. 细颗粒流失对砂砾石土本构关系的影响研究[J]. 岩土力学,2017,38(6):1550-1556. (WU Mengxi,YE Faming,ZHANG Qi. Effect of fine grain loss on the stress-strain relationship of sand and gravel soils[J]. Rock and Soil Mechanics,2017,38(6):1550-1556. (in Chinese))

[13] 褚福永,朱俊高,翁厚洋,等. 堆石料强度及变形特性缩尺效应试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(4):381-386. (CHU Fuyong,ZHU Jungao,WENG Houyang,et al. Experimental study of scale effect on strength and deformation characteristics of rock-fill materials[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(4):381-386. (in Chinese))

[14] 王柳江,刘啸宇,刘斯宏,等. 改进 hhu-SH 模型及其在面板堆石坝工程中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):64-72. (WANG Liujiang,LIU Xiaoyu,LIU Sihong,et al. Modified hhu-SH model and its application in the concrete-faced rockfill dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):64-72. (in Chinese))

[15] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007:228.

(收稿日期:2023-04-25 编辑:刘晓艳)