

土石混合料干密度和粒度的强度效应研究

刘建锋, 徐 进, 高春玉, 李朝政
(四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 将密度、砾石含量和最大粒径这 3 个指标作为高速公路路堤室内试验的控制条件和计算分析的基础, 进行一系列大型三轴试验研究及控制试验条件与抗剪强度关系的计算分析。试验和计算结果表明: 土石混合料的骨架作用明显, 抗剪强度主要受粗颗粒、细颗粒和粗细颗粒的共同作用影响; 土石混合料的抗剪强度随试验干密度的增加有所提高, 咬合力随砾石含量 p_5 值的增加和最大粒径的增大而降低, 当 p_5 为 50%~60% 时抗剪强度最低, p_5 值的最佳范围为 65%~70%; 最大粒径最佳范围为 40~50 mm, 考虑剔除粒径大于 50 mm 的颗粒会给实际工程施工造成困难, 故工程应用中应严格控制压实度。

关键词: 土力学; 土石混合料; 干密度; 砾石含量; 最大粒径

中图分类号: TU 44

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 3304 - 07

STUDY ON STRENGTH EFFECTS OF DRY DENSITY AND GRANULARITY ON EARTH AND ROCK MIXTURES

LIU Jianfeng, XU Jin, GAO Chunyu, LI Chaozheng

(College of Water Resources and Hydropower Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: As the control conditions of laboratory test and the basis of numerical analysis for the three indexes, i.e. the density, the gravel content and the maximum grain, the laboratory tests on series large-scale triaxial test are carried out. The results are as follows: (1) the framework action is prominent and the shear strength is mostly influenced by coarse grain, fine grain and the actions of coarse grain and fine grain on earth and rock mixtures; (2) the shear strength of earth and rock mixtures is enhanced with the test dry density increasing, but the interlocking force decreases with the p_5 increasing and the maximum grain increasing; (3) because the shear strength value is the minimum when the p_5 varies from 50% to 60%, it is advised to control the p_5 value varying from 65% to 70% in filling compound embankment which is the optimum range for the p_5 value; and (4) because of the shear strength value is maximum when the maximum grain is in the range of 40 mm to 50mm, it is better to control the maximum grain size in this range. Therefore, the condition that the maximum size is over 50 mm should be noted, especially the compaction degree should be strictly controlled.

Key words: soil mechanics; earth and rock mixtures; dry density; gravel content; maximum grain

1 引 言

土石混合料作为一种填筑材料, 具有良好的工

程特性, 被广泛用于公路、铁路、水利等工程建设之中, 其力学性质和工程性质与组成和级配有密切关系。1987 年, P. D. Ayers^[1]通过 3 种土石混合料的扭剪试验, 得到了土石混合料的类型与内摩擦角、黏

收稿日期: 2007 - 06 - 05; **修回日期:** 2007 - 06 - 23

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412705, 2002CB412707); 国家自然科学基金资助项目(50620130440, 50221402, 50579042)

作者简介: 刘建锋(1979 -), 男, 2002 年毕业于山东科技大学土木工程学院建筑工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。

E-mail: ljf7908@yahoo.com.cn

聚力和密度、含水率之间的关系式。1994 年, N. Tokiharu 等^[2]通过土石混合料压实试验, 指出随最大粒径增大, 最大干密度线性递增, 最佳含水量线性递减, 得到了其相互关系外推方程式, 并用两种情况证明了方程式是适用的。2000 年, T. G. Sitharam 和 M. S. Nimbkar^[3]在研究土石混合料和填石料对粒状材料的性能的影响时指出, 在保持最小粒径相同时, 随级配的变化, 内摩擦角和体应变增加。

国内研究人员^[4~14]通过研究, 主要得到了以下结论: (1) 土石混合料的多级加荷三轴试验在技术上是可行的, 且是一种经济实用、工效显著的方法。(2) 土石混合料的最大干密度随含石量的变化而变化; 含石量相同时, 粗粒粒径愈大, 混合料的最大干密度也越大。(3) 干密度越大其内摩擦角和咬合力也越大。当干密度增加到一定程度后, 内摩擦角和咬合力的增加梯度变小。(4) 土石混合料的抗剪强度一般由细粒土的黏聚力、粗颗粒之间的摩擦力与咬合力、粗颗粒与细颗粒之间的黏附力 3 部分组成。(5) 砾石含量 $p_5 < 30\%$ 时, 随粗料含量增加剪切强度稍有增加; 当 $p_5 > 70\%$ 时, 剪切强度主要是粗料料间的摩擦力和咬合力; 而当 $70\% > p_5 > 30\%$ 时, 随粗料增加剪切强度显著增大。

本文选择不同干密度、不同砾石含量和不同最大粒径等实际施工中易于测定的指标作为系列试验的控制因素, 研究这 3 个指标变化对无黏性土石混合料力学特性的影响。

2 试验仪器及试验条件

2.1 试验仪器和土料

采用土石混合料大型三轴试验机进行试验。该可进行体变、孔隙水压力等测量, 试样尺寸: $\phi 300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 。

试验土样取自渝黔高速公路路堤示范工程, 其为暗紫红色, 所含粗粒部分最大直径超过 $\phi 100 \text{ mm}$ 以上; 几何形状极不规则, 呈棱角状; 母岩岩性为浅紫红色钙泥质胶结细粒砂岩, 偶见方解石。风干土样筛分结果表明, 土样中粒径小于 0.1 mm 的颗粒含量小于 5% , 为无黏性粗粒土; 击实试验结果表明, 其最佳含水量为 8.5% 。

2.2 试验级配及方案

首先确定土样的相似级配, 再用等质量代换法按(JTJ051-93)^[15, 16]对相似级配中的超粒径颗粒进行计算和代换。图 1 和 2 分别为不同密度和不同 p_5

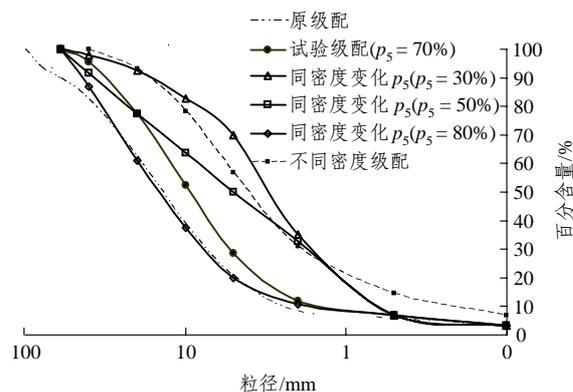


图 1 不同密度和不同 p_5 试验级配曲线

Fig.1 Grading curves of different densities and values of p_5 for experimental grading

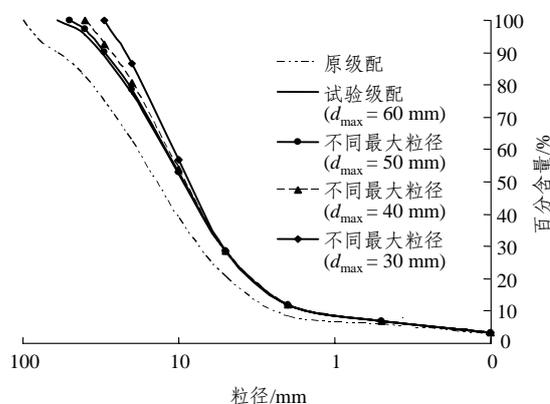


图 2 不同最大粒径试验级配曲线

Fig.2 Grading curves of different maximum grains for experimental grading

及不同最大粒径试验级配曲线。

表 1 中方案 1 的同密度为最大干密度 4 个试样, 方案 2~4 分别为单个试验试样分 4 级施加围压, 各方案所加围压均有 4 个(100, 150, 200 和 250 kPa)。多级施加围压试验时, 按轴向应变 $0\% \sim 5\%$ 施加第 1 级围压(100 kPa), 轴向应变 $5\% \sim 15\%$ 按三等分分别施加第 2 级围压(150 kPa)、第 3 级围压(200 kPa) 和第 4 级围压(250 kPa)。试验控制剪切速率 1.5 mm/min 。

3 试验结果与分析

3.1 强度包络线及拟合曲线

图 3 为不同干密度强度的包络线及拟合曲线。图 3 表明, 不同密度下强度参数的变化具有很强的规律: 试验干密度从 1.76 g/cm^3 增加到 2.12 g/cm^3 , 强度值呈线性递增。表明随试验干密度增加, 土石

表 1 试验方案及试验条件

Table 1 Experimental plans and experimental conditions

试验方案	试验条件		
	$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	d_{max}/mm	$p_5/\%$
1	2.12	60	70
	1.96		70
2	1.86	40	70
			70
			80
3	1.96	60	70
			50
			30
4	1.96	40	70
		30	70

混合料颗粒间的接触和咬合力都同时增大, 强度也随之增加。其中图 3(a)为方案 1 同最大干密度不同围压 4 个试样的强度包络线。

图 4 为不同砾石含量强度包络线及拟合曲线。图 4 表明, 不同砾石含量对土石混合料的力学特性有显著影响: c 值随 p_5 的增加而减小, φ 值在某一 p_5 值两侧变化趋势相反。因此, 两个强度参数随 p_5 值增加, 变化趋势不完全一致。

图 5 为不同最大粒径强度的包络线及拟合曲线。图 5 表明, 试验干密度相同时, 调整试样最大粒径, 分别进行单个试样多级加荷试验, 当最大粒径 d_{max} 从 30 mm 增加到 60 mm, 试样强度参数也随之变化: 咬合力 c 值下降, 内摩擦角 φ 值则在某一最

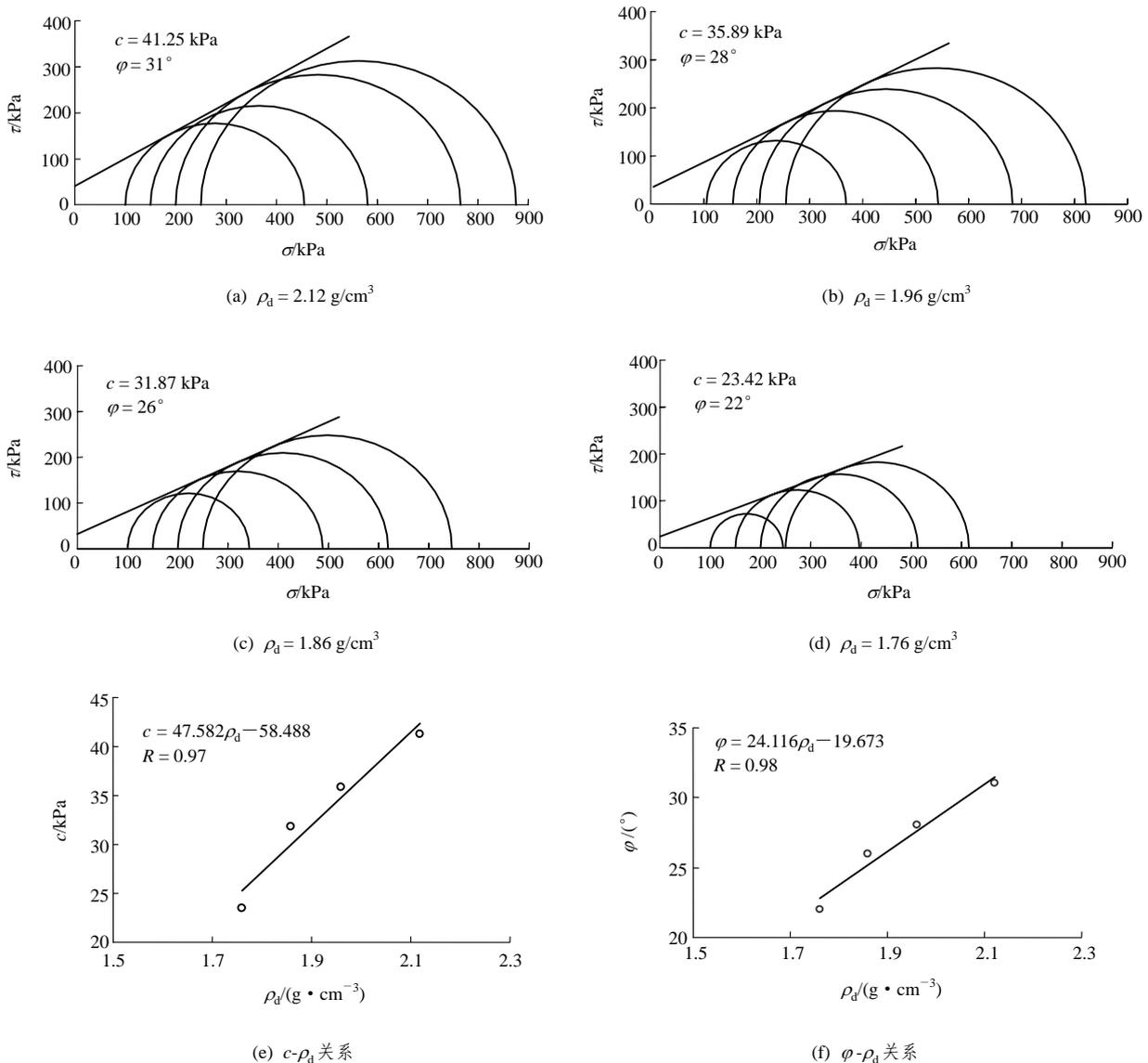


图 3 不同干密度强度包络线及拟合曲线

Fig.3 Strength envelopes and fitting curves with different dry densities

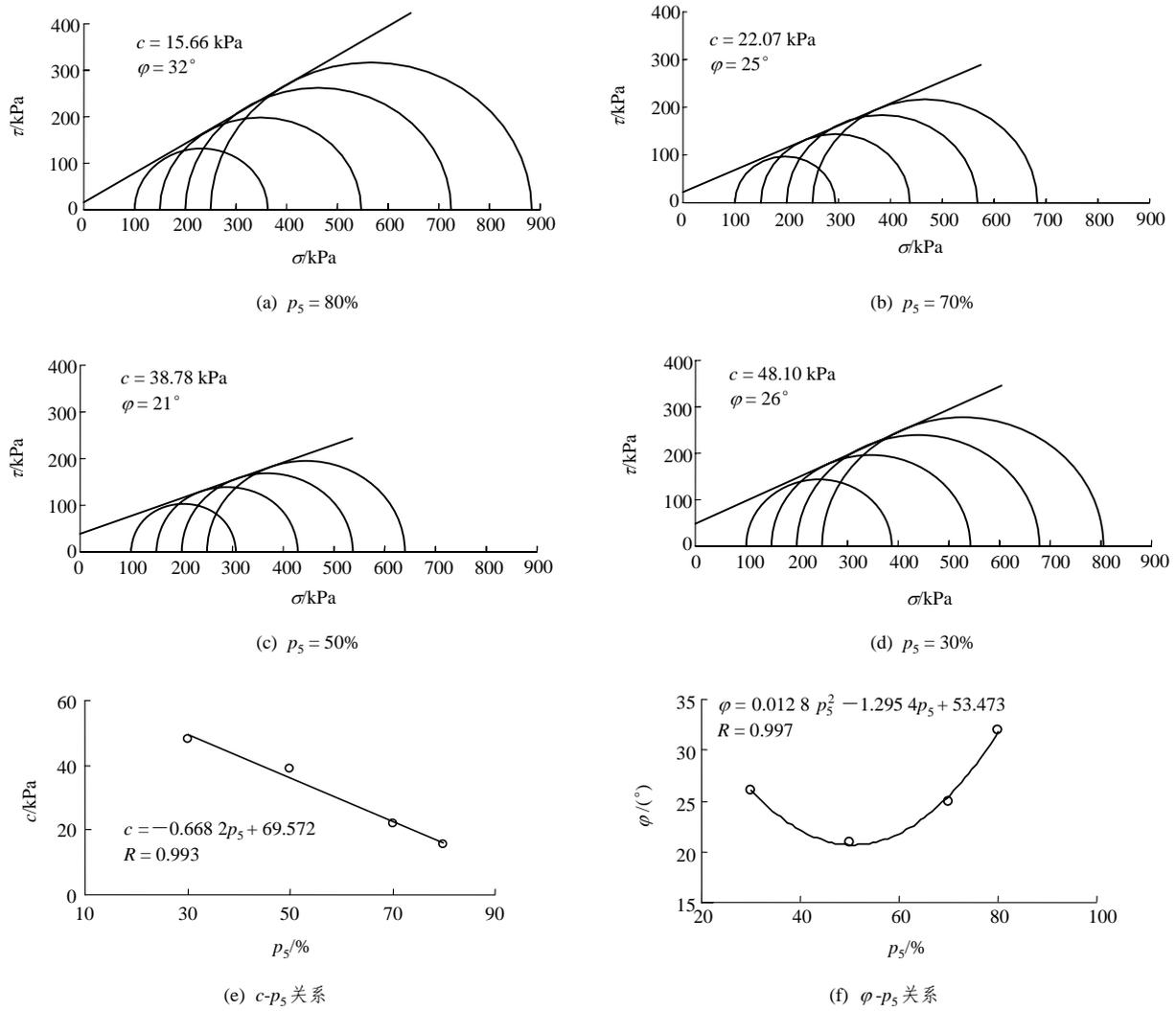
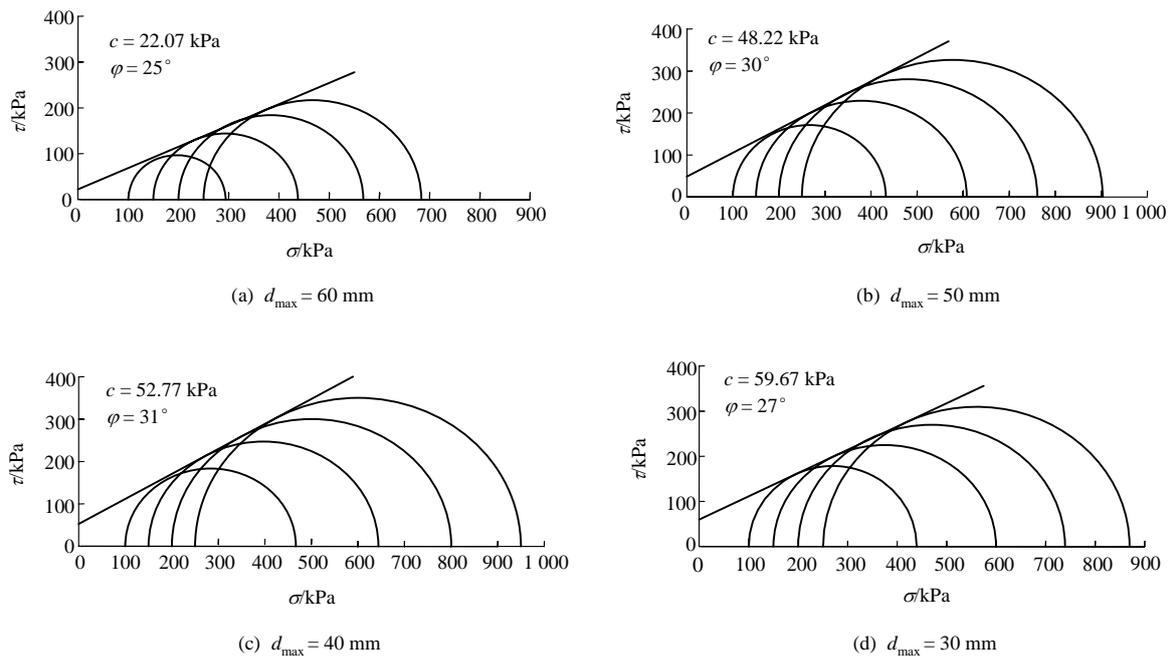


图 4 不同砾石含量强度包络线及拟合曲线

Fig.4 Strength envelopes and fitting curves with different contents of gravel



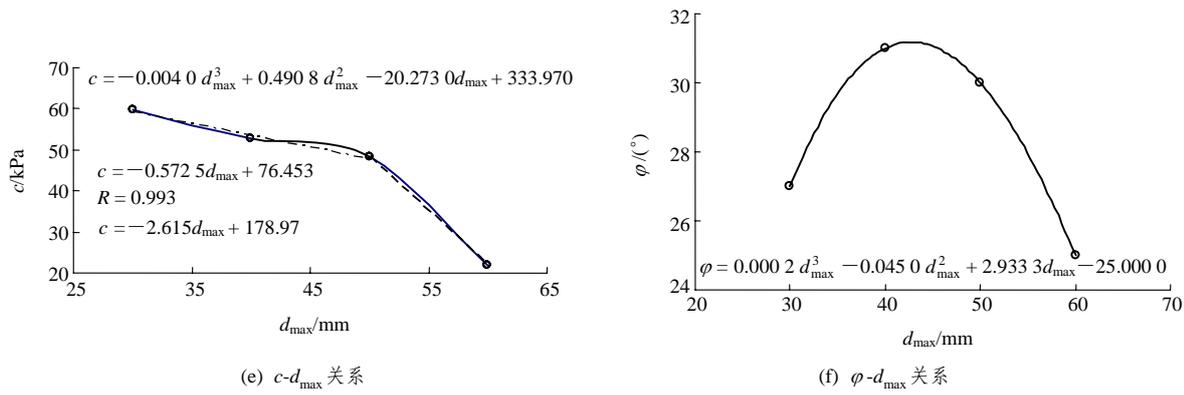


图5 不同最大粒径强度包络线及拟合曲线

Fig.5 Strength envelopes and fitting curves with different maximum grains

大粒径两侧变化趋势相反。由于图 5(e)中 4 个最大粒径点的拟合曲线有一定失真，不能完全真实地反映实际关系，故采用分段拟合其线性关系。

3.2 应力 - 应变关系曲线

图 6 为不同密度、砾石含量和最大粒径 3 组试验的单个试样分级加载的应力 - 应变关系曲线。

由图 6 的 3 组试验单个试样分级加载的应力 - 应变关系曲线，得到以下结论：

(1) 图 6(a)随试验干密度由 1.76 g/cm^3 增加到 1.98 g/cm^3 时，不同密度试样的应力 - 应变曲线峰值呈现递增趋势。

(2) 图 6(b)为不同砾石含量一组中， $p_5 = 50\%$ ， 70% ， 80% 的应力峰值呈逐渐上升趋势，表明在一定范围($p_5 > 30\%$)内，不同砾石含量的应力值随 p_5 值的升高而增大。但 $p_5 = 30\%$ 的总应力强度偏高，其最大主应力差为 $p_5 = 70\% \sim 80\%$ ；与 $p_5 = 50\%$ ， 70% 和 80% 相比， $p_5 = 30\%$ 的级配情况良好，粗、细粒料的充填密实，颗粒间的接触和咬合都很好，可能是出现强度偏高的原因。

研究资料表明，砾石含量为 30% 和 70% 是 2 个影响土石混合料工程特性变化的特征点，据此将土石混合料分为三大类：当粗粒含量 $p_5 \leq 30\%$ 时，工程特性主要决定于细粒性质；当 $p_5 = 30\% \sim 70\%$ 时，工程特性决定于粗、细粒的共同作用；当 $p_5 > 70\%$ 时，工程特性主要决定于粗粒的性质。

(3) 图 6(c)中， $d_{max} = 30, 40, 50 \text{ mm}$ 三个试样主应力峰值较为集中，且都大于 $d_{max} = 60 \text{ mm}$ 的试样。说明土石混合料强度取决于粗、细颗粒的共同作用，当粗、细颗粒级配均匀，土颗粒间充填密实时强度就高。

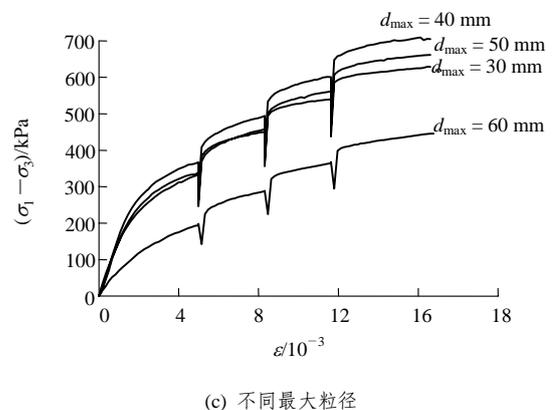
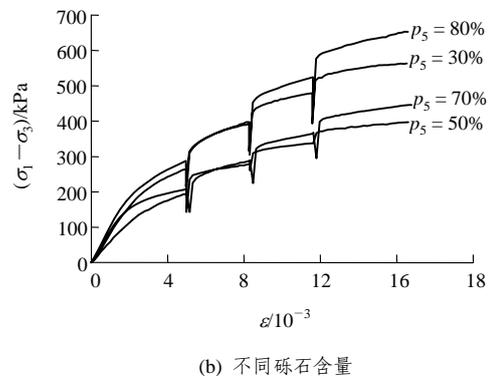
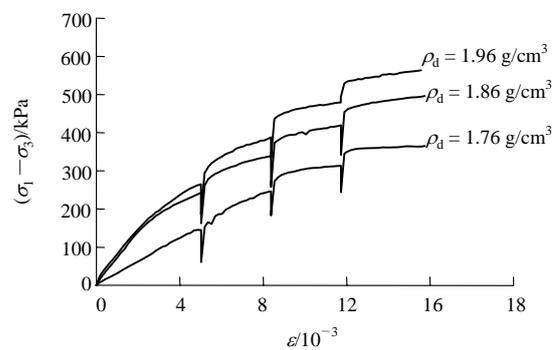


图6 应力 - 应变关系图

Fig.6 Relationship schemes between strain and stress

3.3 控制试验条件与抗剪强度的关系

在本文研究的密度变化范围内, 土体咬合力与内摩擦角变化趋势相同, 均为单调函数, 表明随密度的增大, 土石混合料抗剪强度增加。

图 4, 5 中 p_5 与抗剪强度指标 c , φ 的关系有时候是相反的, 即 p_5 增加 c 减小, 但 φ 不一定减小。为揭示 p_5 对抗剪强度的影响, 将 p_5 与 c 和 φ 的关系式代入库仑强度定律 $\tau_f = \sigma \tan \varphi + c$ 中。考虑填筑路堤的高度, 假定 $\sigma=100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700$ kPa, 分别得到 p_5 由 30% 增加到 80% (最大粒径由 30 mm 增加到 60 mm) 时 τ_f 的相关关系表达式见表 2, 3, 并对各表达式在其定义域内求驻点的 p_5 值 (驻点的最大粒径值)。

表 2 不同正应力下 τ_f-p_5 方程列表

Table 2 Equation lists of τ_f and p_5 for different positive stresses

σ /kPa	抛物线方程	相关系数	驻点 p_5 值
100	$\tau_f = 0.0308 p_5^2 - 3.6880 p_5 + 183.97$	0.9975	59.87
150	$\tau_f = 0.0463 p_5^2 - 5.1979 p_5 + 241.10$	0.9969	56.13
200	$\tau_f = 0.0617 p_5^2 - 6.7078 p_5 + 298.36$	0.9968	54.36
250	$\tau_f = 0.0771 p_5^2 - 8.2177 p_5 + 355.56$	0.9969	53.29
300	$\tau_f = 0.0925 p_5^2 - 9.7270 p_5 + 412.76$	0.9970	52.58
400	$\tau_f = 0.1234 p_5^2 - 12.7470 p_5 + 527.15$	0.9972	51.65
500	$\tau_f = 0.1426 p_5^2 - 14.6790 p_5 + 619.32$	0.9993	51.47
600	$\tau_f = 0.1711 p_5^2 - 17.8420 p_5 + 729.27$	0.9994	51.09
700	$\tau_f = 0.1996 p_5^2 - 20.2840 p_5 + 839.22$	0.9994	50.81

表 3 不同正应力下 τ_f-d_{max} 方程列表

Table 3 Equation list of τ_f and d_{max} for different positive stress

σ /kPa	抛物线方程	相关系数	驻点 d_{max} 值
100	$\tau_f = -0.0926 d_{max}^2 + 7.6310 d_{max} - 37.199$	0.9746	41.11
150	$\tau_f = -0.1143 d_{max}^2 + 9.7374 d_{max} - 54.231$	0.9791	42.60
200	$\tau_f = -0.1360 d_{max}^2 + 11.8440 d_{max} - 71.263$	0.9841	43.54
250	$\tau_f = -0.1577 d_{max}^2 + 13.9500 d_{max} - 88.295$	0.9884	44.23
300	$\tau_f = -0.1794 d_{max}^2 + 16.0570 d_{max} - 105.33$	0.9919	44.75
400	$\tau_f = -0.2110 d_{max}^2 + 18.5400 d_{max} - 86.374$	0.9862	43.93
500	$\tau_f = -0.2661 d_{max}^2 + 24.4820 d_{max} - 173.46$	0.9979	46.00
600	$\tau_f = -0.3095 d_{max}^2 + 28.6950 d_{max} - 207.52$	0.9989	46.36
700	$\tau_f = -0.3529 d_{max}^2 + 32.9080 d_{max} - 241.59$	0.9995	46.63

表 2 中各正应力对应驻点 p_5 值均为 50%~60%, 表明土石混合料 p_5 在该范围内的土体抗剪强度值最小, 该范围外随 p_5 增加或减少, 土石混合料抗剪强度均递增。

表 3 中各正应力对应驻点最大粒径范围为 41~47 mm, 表明土石混合料最大粒径在该范围内土体抗剪强度值最大, 该范围外随最大粒径递增或递减, 其抗剪强度均递减。由于最大粒径大于 50 mm 时, 随最大粒径的增大土石混合料抗剪强度减小, 故路堤填筑时最大粒径宜不大于 50 mm 为最佳。

4 结 论

(1) 土石混合料的骨架作用明显, 抗剪强度主要由粗颗粒、细颗粒和粗细颗粒的共同作用组成。当级配良好, 粗、细颗粒的填充密实, 颗粒间的接触和咬合都很好, 强度就高。

(2) 随干密度增加土石混合料强度增加, 故在路堤施工中应严格控制压实密度。

(3) 随 p_5 值增加, 土石混合料咬合力降低, 且抗剪强度在 $p_5 = 50\% \sim 60\%$ 时最低, 工程施工中土石混合料 p_5 值低于 50% 时会造成施工困难、土料浪费及不经济等, 故在实际工程中宜控制 p_5 值在 65%~70%。

(4) 随最大粒径增大, 土石混合料咬合力降低。当最大粒径为 40~50 mm 时, 其抗剪强度达最大值, 当最大粒径大于 50 mm 时, 随最大粒径增大, 抗剪强度迅速下降, 故实际施工宜将最大粒径控制在 40~50 mm。由于实际工程中不可能将粒径大于 50 mm 的颗粒剔除, 故施工时应特别慎重, 尤其要严格控制压实度。

参考文献(References):

[1] AYERS P D. Moisture and density effects on soil shear strength parameters for coarse-grained soils[J]. Trans. Am. Soil. Agric. Eng., 1987, 30(5): 1 282 - 1 287.

[2] TOKIHARU N, AKITOSHI M, OSAMU S. Evaluation of density from compaction tests on coarse-grained soil[C]// Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers. [S. l.]: [s. n.], 1994: 177 - 185.

[3] SITHARAM T G, NIMBKAR M S. Micromechanical modelling of granular materials: effect of particle size and gradation[J]. Geotechnical and

- Geological Engineering, 2000, 18(2): 91 - 117.
- [4] 刘开明. 粗粒土的工程特性及本构模型研究[J]. 成都科技大学学报, 1993, 73(6): 93 - 102.(LIU Kaiming. Study on engineering property and construction model of coarse-grained soil[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1993, 73(6): 93 - 102.(in Chinese))
- [5] 四川联合大学水利系. 砾石土宽级配土料在高坝应力状态下工程性质的研究[R]. 成都: 四川联合大学水利系, 1994.(Department of Water Conservancy, Sichuan Unite University. Study on engineering property of wide grade earth materials for gravel earth under high dam stress[R]. Chengdu: Department of Water Conservancy, Sichuan Unite University, 1994.(in Chinese))
- [6] 赵久柄, 王正良. 西宝高速公路粗粒土路基压实度的试验研究[J]. 国外公路, 1996, 16(6): 18 - 22.(ZHAO Jiubing, WANG Zhengliang. Test study on road-bed compactness of coarse-grained soil for Xi'an—Baoji Highway[J]. Foreign Road, 1996, 16(6): 18 - 22.(in Chinese))
- [7] 申爱弦. 粗粒土室内试验及成果分析[J]. 电力勘测, 1999, (4): 18 - 21.(SHEN Aixuan. Analysis of laboratory test and results for coarse-grained soil[J]. Electric Power Survey, 1999, (4): 18 - 21.(in Chinese))
- [8] 李远贤, 梁 军. 堆石粗粒土多级加荷三轴试验分析[J]. 大坝观测与土工测试, 2001, 25(1): 40 - 42.(LI Yuanxian, LIANG Jun. Multistage loading triaxial test analysis of rock-fill coarse-grained soil[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2001, 25(1): 40 - 42.(in Chinese))
- [9] 屈智炯, 何昌荣, 刘双光, 等. 新型石渣坝 - 粗粒土筑坝的理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.(QU Zhijiong, HE Changrong, LIU Shuangguang, et al. New type detritus dam: theory and practice of building dam on coarse-grained soil[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002.(in Chinese))
- [10] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙, 等. 粗粒料大三轴试验研究进展[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 217 - 221.(LIU Mengcheng, GAO Yufeng, LIU Hanlong, et al. Development of study on a large-scale triaxial test of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(2): 217 - 221.(in Chinese))
- [11] 高春玉. 土石混合料路用性能的试验研究[硕士学位论文][D]. 成都: 四川大学, 2004.(GAO Chunyu. Test study on road utility and property for earth and rock mixtures[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Sichuan University, 2004.(in Chinese))
- [12] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.(GUO Qingguo. Engineering property and application of coarse-grained soil[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 1998.(in Chinese))
- [13] YANG S J. Impact compaction of coarse-grained soil subgrade[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 1999, 16(1): 1 - 6.
- [14] 李 振, 刑义川. 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): 2 255 - 2 260.(LI Zhen, XING Yichuan. Effects of dry density and percent fines on shearing strength of sandy cobble and crushed stone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2 255 - 2 260.(in Chinese))
- [15] 中华人民共和国行业标准编写组. JTJ051 - 93 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 1993.(The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. JTJ051 - 93 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 1993.(in Chinese))
- [16] 中华人民共和国行业标准编写组. SL237 - 1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.(The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. SL237 - 1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999.(in Chinese))