

文章编号: 1000-7598 (2010)增刊 2-0189-05

巨粒土大型三轴试验研究

秦尚林, 陈善雄, 韩 卓, 许锡昌

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 通过大型三轴试验, 对巨粒土在低围压下的应力-应变特性、抗剪强度特性以及水对强度和变形的影响进行了分析。结果表明: 在较低围压情况下, 应力-应变曲线表现为弱应变软化型或应变硬化型, 其形态主要决定于围压的大小, 而其体变特征首先表现出体积收缩, 随着轴向应变的增加, 逐渐转为体积膨胀, 随着围压的增大, 剪胀逐渐减弱并过渡到完全体缩, 但体缩率逐渐减小直至趋于稳定; 巨粒土的抗剪强度随着应力水平的变化, 表现出非线性特性, 一般随着围压增大, 强度参数 ϕ 降低; 水对巨粒土的压缩特性和剪切特性有重要影响, 主要表现为压缩系数增大, 抗剪强度降低。

关 键 词: 巨粒土; 大型三轴试验; 变形与强度特性; 颗粒破碎

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Large-scale triaxial test study of behavior of over coarse-grained soils

QIN Shang-lin, CHEN Shan-xiong, HAN Zhuo, XU Xi-chang

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The stress-strain relationship, shear strength behavior and the influence of water on strength and deformation under low confining pressures are analyzed detailedly via large-scale triaxial test. Test results indicate that under low confining pressures over coarse-grained soils are characterized by weak strain softening or strain hardening. The form rests with the value of confining pressure. At the same time, volume shrink happens first and cubic dilation develops gradually with the increase of axial strain. The sample varies from dilation to volume shrink with the increase of confining pressure. But the shrinkage degree decreases little by little till stability. The shear strength of over coarse-grained soils shows nonlinear characters with the stress level. It decreases generally with the increase of confining pressure. Water has important effect on the compression characters and the shear characters of over coarse-grained soil. It mostly makes the compression coefficient degree increase and the parameter of shear strength decrease.

Key words: over coarse-grained soils; large-scale triaxial test; characteristics of deformation and strength; particle breakage

1 引 言

巨粒土是试样中巨粒组质量大于总质量 50% 的土, 我国公路与水利方面相关规范中具有明确的定义, 国内外文献中常见的粗粒土、粗粒料、土石混合体等比较广义的概念, 往往也属于巨粒土的范畴, 它具有粒径大与颗粒破碎的特点^[1]。巨粒土具有良好的工程特性, 越来越广泛地应用于填筑工程中, 尤其是在公路路基工程中。但由于相关研究尚有待深入, 特别是巨粒土力学特性方面的研究, 以至目前我国相关行业规范中对巨粒土路基填筑方面尚无具体规定。大型三轴试验具有明确的边界条

件和排水条件, 一直是粗颗粒土力学特性研究的一个重要手段^[2]。张启跃^[3]通过大型三轴仪对土石混合料应力-应变特性进行了研究, 提出了土石混合料的本构关系; 甘霖、袁光国^[4]通过粗粒土的大型高压三轴试验研究了粗粒土的强度特性; 李鹏等^[5]、张少宏等^[6]采用大型高压三轴仪, 通过对粗粒土高压三轴湿化试验研究, 揭示了在高压三轴条件下湿化试验的湿化变形特点, 阐述了湿化试验的抗剪强度特性; 刘萌成等^[7]在两种堆石料饱和试样大三轴试验成果的基础上, 对其变形与强度特性变化规律进行了总结; 张嘎等^[8]基于亚塑性理论的基本框架和对粗粒土力学特性的认识, 建立了一个新的粗粒

收稿日期: 2010-05-12

基金项目: 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿资助项目 (No.O727031Q01)。

第一作者简介: 秦尚林, 男, 1973 年生, 博士, 副研究员, 主要从事地基处理的理论和应用研究工作。E-mail: qinshlin@sina.com

土亚塑性损伤模型。

尽管国内外学者对巨粒土力学特性进行了一定程度的研究^[9-12]，但由于巨粒土材料的复杂性，其强度与变形特性等方面还有很多问题模糊不清，使得巨粒土在工程上的应用没有取得应有的良好效果，也影响到其进一步的推广使用。本文拟通过巨粒土室内大型三轴剪切试验，对巨粒土的力学特性以及水对其性质的影响进行研究。

2 试验简介

2.1 试验材料

试验材料取自河南 S325 候饭线汝禹界至东车坊段改建工程 K8+650~K8+750 处填方材料，母岩成分主要为片岩、灰岩以及强风化碎石土。表 1 为现场筛分得到的典型颗粒级配组成，其颗粒粒径分布特征指标不均匀系数 $C_u = 15.5$ ，曲率系数 $C_c = 2.47$ ，同时满足 $C_u > 5$ ， $1 < C_c < 3$ 的条件，属于良好级配土石混合料。混合料中巨粒组平均含量约占 55%，含泥量($d < 0.01 \text{ mm}$) 低于 5%，属无黏性巨粒土。

表 1 典型颗粒级配组成
Table 1 Typical particle size distribution

| 粒径 /mm | 400~200 | 200~100 | 100~60 | 50~40 | 40~20 | 20~10 | 10~5 | 5~2 | <2 |
|-------------|---------|---------|--------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 质量配 比 /% | 8.51 | 24.11 | 21.69 | 11.87 | 12.96 | 6.88 | 4.45 | 4.20 | 5.32 |

2.2 试料制备

由于试料的粒径和试样尺寸的限制，室内试验时需对材料的原始级配进行缩尺。根据本试料的特点，试验采用混合法对试料进行缩尺备样。根据现场典型颗粒级配，先按 1/4 的比例缩尺（相似级配模比 $M = 4$ ），再采用等量替代法对超径颗粒以大于 5 mm 的颗粒粒组等量替代。原级配和试验级配曲线如图 1 所示。

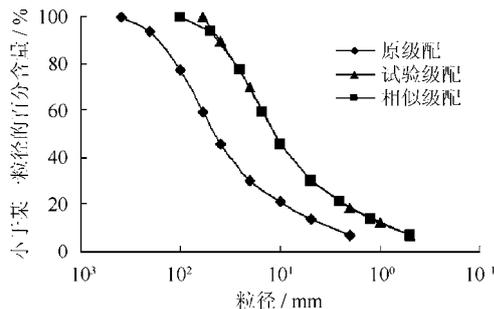


图 1 原级配和试验级配曲线
Fig.1 Curves of particle size distribution

2.3 试验方法

试验采用直径为 300 mm、高为 600 mm 的大型三轴剪力仪进行，考虑到实际工程最大填方高度约 20 m，试验时确定最大围压为 400 kPa，试样允许最大粒径为 60 mm。将制备好的试样分 6 层用振动压实方法装填，按照《公路土工试验规程》进行试验，并在试验前后对所有试样均进行了筛分。本次试验备样设计干密度为 2.18 g/cm^3 ，采用振动压实法成型，试样饱和采用水头饱和法。试验进行了饱和以及非饱和条件下的固结排水试验，其中非饱和和样为现场所取土样，含水率约 6%~10%。

试验破坏标准如下：当应力-应变曲线出现峰值时，取峰值点为破坏点；当应力-应变曲线无峰值时，取应变 15%所对应的点为破坏点。

3 三轴试验成果及分析

3.1 应力-应变关系特性

试样在不同围压下的的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 和 $(\sigma_1 / \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线见图 2、3。

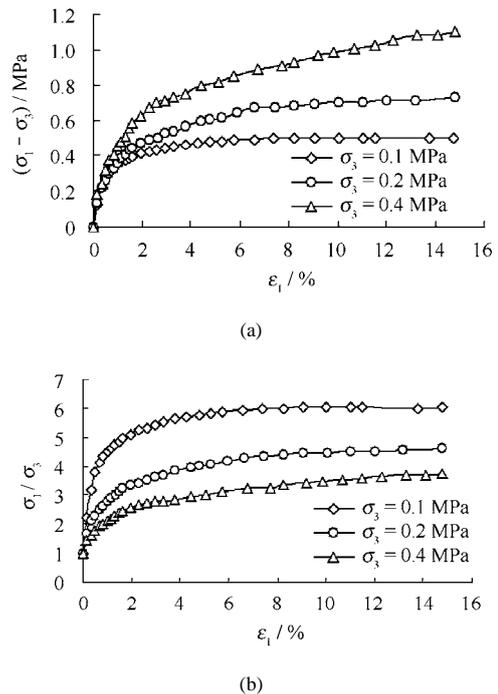
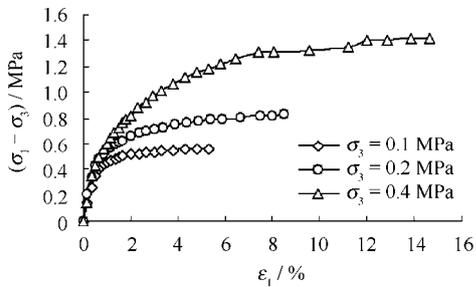


图 2 饱和试样在不同围压下的应力-应变关系曲线
Fig.2 Stress-strain curves of saturated sample under different confining pressures

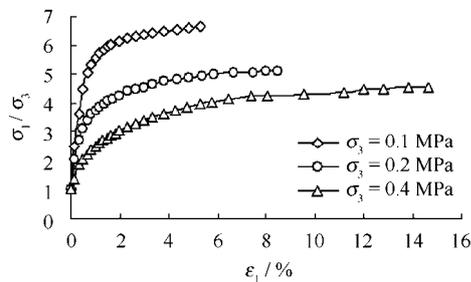
从图中可以看出：

(1) 在试验条件下，围压 $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$ 时，应力-应变关系为弱软化型，随着围压的升高，逐渐变为硬化型。围压越高，初始切线模量也越大。这说明，当初始密度相同时，应力-应变关系曲线的形态主要决定于侧压力的大小。一般侧压力愈大，对剪

切破坏中颗粒移动的阻力愈大，达到最大应力状态时的应变值愈大，应力-应变的形态为应变硬化型；相反，侧压力愈小，对颗粒移动的阻力愈小，在较小应变下应力达最大值，应力-应变的形态多为应变软化型。



(a)



(b)

图3 非饱和试样在不同围压下的应力-应变关系曲线
Fig.3 Stress-strain curves of unsaturated sample under different confining pressures

巨粒土应力-应变受颗粒的影响，在中低压范围内，颗粒破碎主要是受应变大小的控制。随着应变的增加，总破碎量是以减速率增加的，因而应变特性呈硬化型或弱软化型。

(2) 峰值主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 随围压增大而增大，而峰值主应力比 (σ_1 / σ_3) 则随围压的增大而减小。

3.2 变形特性

图 4~7 分别是试样在饱和状态下和非饱和状态下的 $(\epsilon_3 - \epsilon_1)$ 和 $(\epsilon_v - \epsilon_1)$ 关系曲线。图示结果表明：

(1) 在低围压状态下，剪切过程中先出现体积收缩，随着轴向应变的增加，逐渐转为体积膨胀。说明随着偏应力的增大，颗粒运动经历了彼此充填孔隙到翻越相邻颗粒的发展过程。

(2) 随着围压的增大，剪胀逐渐减弱并过渡到完全体缩，但体缩率逐渐减小，直至趋于稳定。主要原因是在较高围压下，试样在剪切过程中出现明显的颗粒破碎，使颗粒移动变得更加容易，抑制了剪胀的发生。

(3) 饱和试样在围压 $\sigma_3 = 200$ kPa 时，已经

完全剪缩，而当围压 $\sigma_3 = 200$ kPa 时，非饱和试样仍然表现出剪胀特性。说明在饱和状态下，颗粒由于浸水软化，强度降低，在相同的围压下，较非饱和试样更易于发生颗粒破碎而抑制了剪胀现象。

(4) 试样的 $\epsilon_3 - \epsilon_1$ 曲线初始阶段非线性化程度

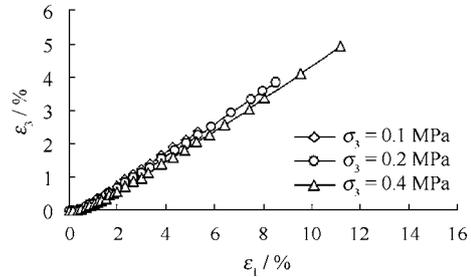


图4 饱和试样在不同围压下的 $\epsilon_3 - \epsilon_1$ 关系曲线
Fig.4 Curves of $\epsilon_3 - \epsilon_1$ of saturated sample under different confining pressures

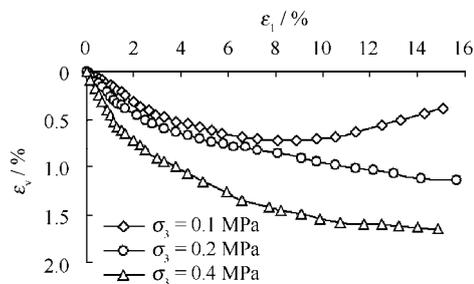


图5 饱和试样在不同围压下的 $\epsilon_v - \epsilon_1$ 关系曲线
Fig.5 Curves of $\epsilon_v - \epsilon_1$ of saturated sample under different confining pressures

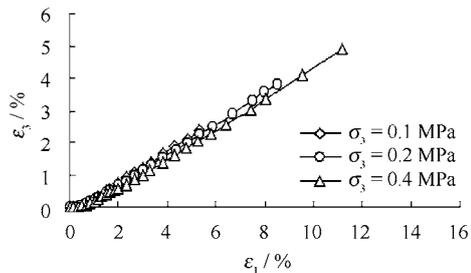


图6 非饱和试样在不同围压下的 $\epsilon_3 - \epsilon_1$ 关系曲线
Fig.6 Curves of $\epsilon_3 - \epsilon_1$ of unsaturated sample under different confining pressures

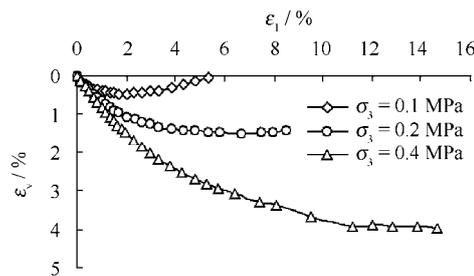


图7 非饱和试样在不同围压下的 $\epsilon_v - \epsilon_1$ 关系曲线
Fig.7 Curves of $\epsilon_v - \epsilon_1$ of unsaturated sample under different confining pressures

高,而在进入破坏阶段则变为直线关系,且在不同围压下的直线斜率均趋近于0.5。

3.3 抗剪强度特性

图8是其中1组试样(其余试样与之类似)在不同围压下的摩尔圆和非线性强度包线。结果表明:强度包线为曲线,而且随着围压的增大,强度包络线弯曲程度逐渐降低,内摩擦角减小。究其原因,主要是剪切过程中,试样发生颗粒破碎需要消耗部分能量,这部分能量由剪切做功提供^[1-10]。内摩擦角的减小也说明围压增加而导致颗粒破碎效应对强度的影响逐渐增加。

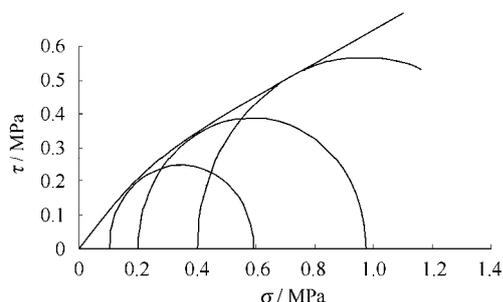


图8 巨粒土摩尔圆和非线性强度包线
Fig.8 Mohr circles and nonlinear failure envelopes of over coarse-grained soils

实际上,国内外大量的试验证明,粗颗粒土的抗剪强度随着应力水平的提高,其内摩擦角降低,即强度参数逐渐降低,表现出明显的非线性特性。抗剪强度参数之所以降低,主要是因为颗粒破碎后细粒含量增加所致。

3.4 饱和作用的影响

图9是同一级配、同样的初始密度和含水率的试样在饱和、非饱和状态下的应力-应变关系曲线。

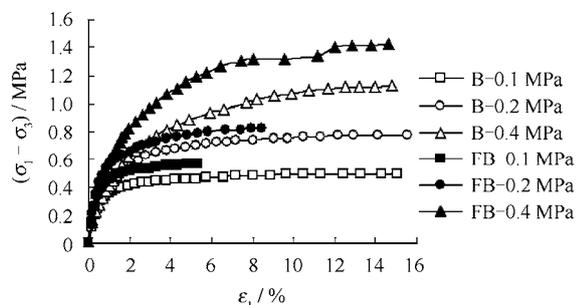


图9 饱和和非饱和状态下不同围压下的应力-应变关系曲线(B饱和,FB非饱和)

Fig.9 Stress-strain curves of saturated and unsaturated sample under different confining pressures (B-saturate, FB-unsaturate)

结果表明:试样浸水后,抗剪强度明显降低,

而破坏时的应变增加。这是因为,对于饱和固结排水剪切试验来讲,试样在剪切前就进行了浸水饱和和固结,而试样浸水使得风化的试样颗粒发生软化,在剪切过程中颗粒破碎,由于水的大量存在,也使试样颗粒间的润滑作用增强,从而导致了强度的降低;而对于非饱和试样剪切试验来讲,由于在整个试验剪切过程中,试样处于干燥状态,试样颗粒也具有一定的强度,其剪切过程中克服颗粒间的摩擦力所作的功相应来说,就要比饱和固结排水剪切试验的大,所以其强度比饱和试样的要高。

4 结论

(1) 水对巨粒土的压缩特性和剪切特性有重要影响,主要表现为压缩系数增大,抗剪强度降低。原因是试样浸水后使颗粒软化,更容易破碎。

(2) 在试验条件下,应力-应变曲线表现为弱应变软化型或应变硬化型,其形态主要决定于围压的大小。

(3) 在低围压状态下,剪切过程中先出现体积收缩,随着轴向应变的增加,逐渐转为体积膨胀。随着围压的增大,剪胀逐渐减弱并过渡到完全体缩,但体缩率逐渐减小直至趋于稳定。

(4) 巨粒土的抗剪强度随着应力水平的变化,表现出非线性特性。一般随着围压增大,强度参数 ϕ 降低。

参考文献

- [1] 日本土质工程协会. 粗粒料的现场压实[M]. 郭熙灵, 文丹译. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [2] 张嘎, 张建民. 粗颗粒土的应力应变特性及其数学描述研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1587-1591.
ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Study on behavior of coarse grained soil and its modeling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(10): 1587-1591.
- [3] 张启跃, 司洪洋. 粗粒土大型三轴压缩试验与应力应变特性[J]. 水利学报, 1982, (9): 22-31.
ZHANG Qi-yue, SI Hong-yang. Strength and stress strain behaviour of large triaxial compression tests on coarse granular materials[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1982, (9): 22-31.
- [4] 甘霖, 袁光国. 粗粒土的三轴测试及其强度特性[J]. 水电工程研究, 1996, (1): 29-35.
- [5] 李鹏, 李振, 刘金禹. 粗粒料的大型高压三轴湿化试验

- 1994, (31): 989—1003.
- [3] Ai Z Y, CHENG Z Y. Plane strain Biot's consolidation of multi-layered soils with compressible constituents[C]// Proceedings of GeoCongress 2008, ASCE Geotechnical Special Publication, Characterization, Monitoring, and Modeling of GeoSystems, [S. l.]: [s. n.], 2008.
- [4] 陈开旭, 陈光敬. 解析法求解成层渗透各向异性地基 Biot 固结轴对称问题[J]. 应用力学学报, 2000, 17(2): 7—11.
CHEN Kai-xu, CHEN Guang-jing. Solutions for axisymmetric Biot consolidation problems of layered and anisotropic permeability soil by analytics[J]. **Chineses Journal of Applied Mechanics**, 2000, 17(2): 7—11.
- [5] 艾智勇, 梅阿敏. 多层渗透各向异性地基非轴对称固结分析[J]. 工业建筑, 2008, 38(11): 58-62.
AI Zhi-yong, MEI A-min. Asymmetric consolidation of multi-layered soils with anisotropic permeability[J]. **Industrial Construction**, 2008, 38(11): 58—62.
- [6] CHEN G J. Consolidation of multilayered half space with anisotropic permeability and compressible constituents[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2004, (41): 4567—4586.
- [7] SNEDDON I N. The use of integral transform[M]. New York: McGraw-Hill, 1972.
- [8] TALBOT A. The accurate numerical inversion of Laplace transforms[J]. **Journal of Institute of Mathematics and Its Application**, 1979, (23): 97—120.
- [9] BOOKER J R, SMALL J C. A method of computing the consolidation behavior of layered soils using direct numerical inversion of Laplace transforms [J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geo-mechanics**, 1987, (11): 363—380.
- [10] AI Z Y, YUE Z Q, THAM L G, YANG M. Extended Sneddon and Muki solutions for multilayered elastic materials[J]. **International Journal of Engineering Science**, 2002, 40(13): 1453—1483.

上接第 192 页

- 研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 231—234.
LI Peng, LI Zhen, LIU Jin-yu. Slaking test study of coarse aggregate under high triaxial stress condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(2): 231—234.
- [6] 张少宏, 张爱军, 陈涛. 堆石料三轴湿化变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5938—5942.
ZHANG Shao-hong, ZHANG Ai-jun, CHEN Tao. Triaxial slaking test research on rock fill deformation feature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Suup.2): 5938—5942.
- [7] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙, 等. 堆石料变形与强度特性的大型三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1102—1111.
LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long, et al. Large-scale triaxial test study on deformation and strength characteristics of rock fill materials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(7): 1102—1111.
- [8] 张嘎, 吴伟, 张建民. 粗粒土亚塑性损伤模型[J]. 清华大学学报, 2006, 46(6): 793—796.
ZHANG Ga, WU Wei, ZHANG Jian-min. Hypoplasticity damage model of coarse grained soils[J]. **Journal of Tsinghua University**, 2006, 46(6): 793—796.
- [9] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1970, 96 (5): 1629—1653.
- [10] 秦红玉, 刘汉龙, 高玉峰, 等. 粗粒料强度和变形的大三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1575—1580.
QIN Hong-yu, LIU Han-long, GAO Yu-feng, et al. Research on strength and deformation behavior of coarse aggregates based on large-scale triaxial tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1575—1580.
- [11] 沈广军. 邓肯-张 $E-\mu$ 模型的改进[J]. 河海大学学报, 2010, 38(1): 109—114.
SHEN Guang-jun. Improvement of Duncan-Chang $E-\mu$ model[J]. **Journal of Hohai University**, 2010, 38(1): 109—114.
- [12] 程展林, 姜景山, 丁红顺, 等. 粗粒土非线性剪胀模型研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 460—467.
CHENG Zhan-lin, JIANG Jing-shan, DING Hong-shun, et al. Nonlinear dilatancy model for coarse-grained soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(3): 460—467.