

文章编号: 1000-7598-(2013)增2-0067-07

基于大型直剪试验的强风化粗粒料 剪胀特性试验研究

张家铭¹, 胡明鉴², 侯国强³, 张表志^{1,4}, 陈拥军⁵

(1.中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074; 2.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; 3.中铁十七局集团第一工程有限公司, 太原 030032; 4.交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 5.中国核工业第二建设有限公司, 湖北 宜昌 443101)

摘要: 剪胀性是岩土材料的重要特性之一, 为研究不同工况条件下粗粒料室内大型直剪试验中的剪胀特性, 采用新型室内大型直剪仪对3组不同含水率、4组不同剪切速率、5组不同含砾率等3种不同影响因素的试样进行了室内大型直剪试验, 分析了剪切时试样的垂直位移与水平剪切位移及垂直应力的关系。试验结果表明: 在保持其他影响因素相同条件下, 垂直应力的增加导致相同水平剪切位移对应的剪缩量增加; 试样的最大剪缩量随着含水率的增加有一定程度的增大, 而随着剪切速率的增加而减小; 含砾率低于30%试样的最大剪缩量较含砾超过30%试样的剪缩量大很多, 最大剪缩量差别为3倍。当试样含砾率小于50%时, 由于试样中富含细颗粒的影响, 使得应力-应变曲线具有应变软化属性以及剪胀性趋于一固定值。峰值强度前的应力比-位移增量关系采用非线性的二次项拟合比线性关系的拟合度更好, 认为Matsuoka提出的二维剪胀公式不适用于粗粒料, 将其修正成二次多项式并给出试验中的经验参数 μ 的取值区间。

关键词: 大型直剪试验; 粗粒料; 剪胀特性; 含砾率; 剪切速率

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Dilatant behavior of intensely weathered coarse-grained soils in large-scale direct shear tests

ZHANG Jia-ming¹, HU Ming-jian², HOU Guo-qiang³, ZHANG Biao-zhi^{1,4}, CHEN Yong-jun⁵

(1. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. China Railway 17 Bureau Group No.1 Engineering Co., Ltd., Taiyuan 030032, China; 4. Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 5. China Nuclear Industry 22nd Construction Co., Ltd., Yichang, Hubei 443101, China)

Abstract: Shear dilatancy is one of the most common phenomena of geological materials. A series of experiments were conducted in a newly manufactured large-scale direct shear apparatus to study the dilatant behavior of intensely weathered coarse-grained soils, including that 3 groups of various moisture contents, 4 groups of various shearing rates and 5 groups of various gravel contents samples were tested, respectively. Dependence of vertical and horizontal displacements on the applied normal stress was analyzed. The results show that when other controlling conditions are fixed, the shear shrinkage increases with the applied normal stress. The maximum shrinkage increases with the increase of moisture content or the decrease of shearing rate; and the shrinkage of samples with gravel content less than 30% is significantly larger than that with higher gravel content. Our results suggested that for those samples with gravel content less than 50%, the effect of fine content became significant, so that the samples show a strain-softening behavior; and the dilation tends to a fixed value. It is shown that the two-dimensional dilation formulation proposed by Matsuoka is not applicable to the coarse-grained materials. Instead of the formulation, a quadratic polynomial can be adopted to represent the relationship between the stress ratio and the strain increment at the peak strength, the value range of experience parameters μ in this formula is given.

Key words: large-scale direct shear test; coarse-grained soil; shear dilatancy; gravel content; shearing rate

1 引言

剪胀性是岩土材料的重要特性之一, 广义的剪

胀包括剪胀及剪缩^[1]。Reynolds^[2]在试验中发现并定性地指出密砂在排水条件下存在剪胀现象。Casagrande^[3-4]基于试验解释了土体摩擦角对体变

收稿日期: 2013-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(No.41002104, No.41172283), 交通部科技项目(No. 2009-353-342-540)

第一作者简介: 张家铭, 男, 1976年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土力学试验研究方面的工作。E-mail: zjmm@163.com

的影响,并在研究砂土液化时根据剪胀性提出了临界孔隙比的概念,标志着剪胀性应用于土力学学科。Rowe^[5]提出应力-剪胀理论之后,诸多国内外研究人员深入研究了土的剪胀特性,并取得了诸多成果。

大量的研究数据表明,粗粒料具有低压剪胀以及明显的颗粒破碎等复杂工程性质,且其剪胀性受到颗粒组成、母岩抗压强度、固结压力与应力状态等诸多因素的影响显著^[6]。围绕粗粒料三轴试验成果的剪胀性研究较为常见,如刘萌成^[7]根据宜兴抽水蓄能电站筑坝堆石料大型三轴试验成果,分析了堆石料剪胀性质与初始孔隙比与固结压力之间的变化关系,提出了新的应力-剪胀方程以及破坏剪胀率计算公式,并由此获得了堆石料剪胀剪缩转化的判断准则。而具有垂直位移记录功能的室内大型直剪仪尚不多见,直剪剪胀性研究大多停留在定性描述阶段^[8]。Matsuoka^[9]基于直剪试验提出了二维剪胀方程,其公式表示为 $\tau/\sigma_N = \lambda(-d\varepsilon_N/d\gamma) + \mu$ 。在此基础上,Liu等^[10]通过直剪的离散元模拟,引入颗粒间接触力和可变摩擦角,从细观角度对该公式进行解释,认为宏观量 τ/σ_N 、 $-d\varepsilon_N/d\gamma$ 分别与平均角和粒间接触角相关,并将该结论应用于宜兴抽水蓄能电站上库堆石料新型现场直剪试验成果中,指出试样峰值强度前应力比与位移增量比的关系近似直线关系是试验合理性的一种验证^[11]。

纵观已有的研究工作,针对土体剪胀性的研究方法主要以静力学、耗散等理论分析及离散元模拟和极少数三轴试验成果来取得土体剪胀性的相关结论。但鉴于粗粒料三轴试验成本比较昂贵,且试验过程复杂,为了节省成本同时研究粗粒料直剪剪胀特性,本文采用带有垂直位移自动采集的室内大型直剪仪,通过一系列不同含水率、含砾率、剪切速率及垂直应力的室内大型直剪试验,分析垂直位移与各种剪胀影响因素之间的关系,探讨剪切过程中剪胀在不同环境下的特征和规律。

2 粗粒料大型直剪试验

2.1 试验设备

本试验采用1 000 kN应力-应变双控制式室内大型直剪仪(见图1)。该设备主要由承载机架、剪切盒、垂直加载装置、剪切加载装置、液压系统、计算机控制及数据采集系统等6部分组成,其几何尺寸为500 mm×500 mm×410 mm(长×宽×高)。上、下剪切盒之间通过轴承及滚珠连接,以减小剪切盒之间的摩擦,加载系统采用微机电液伺服闭环

测量控制,可以实现等速应力、等速位移控制。

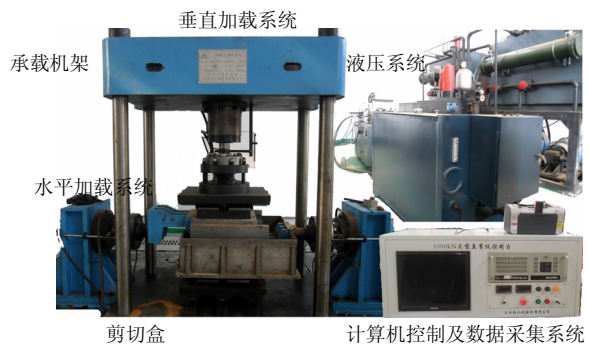


图1 室内大型直剪系统

Fig.1 Indoor direct shear apparatus system

2.2 试验方案及试样制备

规范^[12]规定 D/d_{\max} 为8~12, H/d_{\max} 为4~8(D 为直剪盒的长度, d_{\max} 为最大土颗粒粒径, H 为直剪盒的高度)。为了尽量减小粗粒土的尺寸效应,在所有试验中控制土样颗粒的最大直径为60 mm。常用的级配模拟方法主要有相似级配法、等重量替代法、剔除法及混合法^[13],鉴于取样时60 mm以上土颗粒占全部土颗粒重量比例小于5%,故采用剔除法制备试样,忽略不均匀系数 C_u 减小对剪切时垂直位移的影响,采用剔除法制备后粗粒料级配曲线见图2。

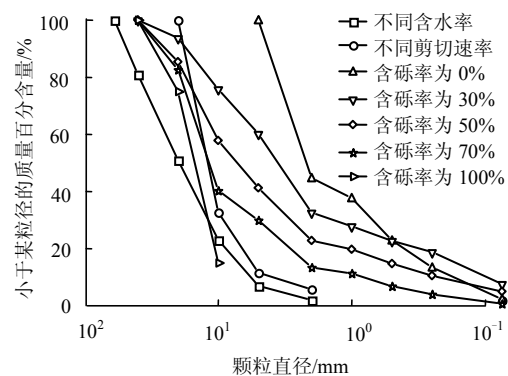


图2 粗粒料试验前级配曲线

Fig.2 Grading curves of granular soils before testing

郭庆国^[14]认为决定粗粒料工程特性的主要因素是颗粒组成,将5 mm定义为粗细粒分界线,并提出粗粒含量 P_5 为30%和70%时是影响工程特性变化的特征点。另外,剪切速率和含水率对直剪强度有明显的影响^[15-16]。为了进一步探讨直剪垂直位移与含水率、剪切速率及含砾率之间的关系,设计了如表1所示的试验方案。

物性试验测得某高速公路边坡粗粒土的平均

相对密度为 2.79，堆置风干含水率约 3%。制样时，控制试样干密度均为 1.73 g/cm³。试验前，根据试验方案设计配制不同含水率和含砾率的试样，拌合均匀后用薄膜闷料 24 h。土样分 3 层装入剪切盒内，填装时，根据试样的密度和剪切盒的体积确定装样的质量，层间刨毛，用击实锤夯击直至控制高度，形成均质体，之后取下固定插销，施加 1 kN 垂直压力使各部件接触，再施加垂直压力，达到预定值后采用快剪，剪切速率见试验方案，当上下盒相对水平剪切位移达到 100 mm 时停止剪切。

表 1 大型直剪力学特性试验方案

方案编号	垂直应力 /kPa	含水率 /%	剪切速率 /(mm/min)	含砾率 /%
1	100, 200, 400, 800	3.0, 8.0, 23.7	2	93.0
2	100, 200, 400, 800	5.0	2, 5, 10, 20	88.5
3	100, 200, 400, 800	5.0	5	0, 30.0, 50.0, 70.0, 100.0

3 不同试验条件剪胀趋势分析

为了研究不同控制因素对剪切过程胀缩性的影响，取相对水平剪切位移与垂直位移为研究对象，探讨剪切过程中不同垂直应力和影响因素下的最大剪缩量，同时对 Matsuoka 提出的二维剪胀方程进行试验验证分析，给出二维剪胀公式的经验系数。该二维剪胀方程中的 $-d\varepsilon_N / d\gamma$ 可由下式表示：

$$-\frac{d\varepsilon_N}{d\gamma} = -\left(\frac{dh}{L}\right) / \left(\frac{dD}{L}\right) = -\frac{dh}{dD} \quad (1)$$

式中： $d\varepsilon_N$ 为垂直应变增量； $d\gamma$ 为剪应变增量； L 为剪切盒高度； dh 为垂直位移增量，本文约定剪缩

为正，剪胀为负； dD 为相对水平剪切位移增量。

3.1 不同含水率结果分析

不同含水率条件下相对水平剪切位移-剪应力-垂直位移的关系如图 3(a)~(c)所示(相对水平剪切位移为 D ，剪应力为 τ ，垂直位移为 h)。相同含水率、不同垂直应力时，最大剪缩量发生时的相对水平剪切位移不断增加，最大剪缩量随垂直应力的增加而增加(见后文分析)，在垂直应力 $\varepsilon_N \leq 400$ kPa 时，3 组试样均先发生剪缩后剪胀，并且剪缩转化为剪胀的相对水平剪切位移随着含水率的增加而增加。在 100 kPa 垂直应力时，含水率 3.0%剪缩转化为剪胀的相对水平剪切位移约 15 mm，含水率为 8.0%的相对水平剪切位移为 26 mm，而含水率 23.7%剪缩转化为剪胀的相对水平剪切位移约 40 mm，较含水率 3.0%的增幅达 62%左右；垂直应力为 200 kPa 时，剪缩转为剪胀的相对水平剪切位移分别为 30、35、73 mm；垂直应力为 400 kPa 时剪缩转为剪胀的相对水平剪切位移分别为 58、60、96 mm。而且可以明显看出，在垂直应力为 800 kPa 时，随着含水率的增加，剪缩越难转为剪胀，说明含水率的增加使得相同条件下的剪缩量增加。为了验证这一假设，绘制不同含水率条件下的垂直应力-最大剪缩量关系如图 4 所示。从图中看出，除了垂直应力为 400 kPa、含水率为 23.7% (饱和试样) 的最大剪缩量比含水率为 3.0%及 8.0%的都小外，其他数据均表明随着含水率增加，最大剪缩量有一定程度的提高，约 1.5 mm 范围内变化，说明含水率高的情况下，水对某高速公路边坡粗粒土颗粒有软化作用，水沿着其风化的裂隙侵入土颗粒，造成其原有结构面的软化，但由于水的浸泡时间不长，软化作用对粗粒料造成的影响有限。

一般的， τ / σ_N 与 $-dh / dD$ 之间符合良好的线性关系即不同剪切速率颗粒最大直径为 20 mm。

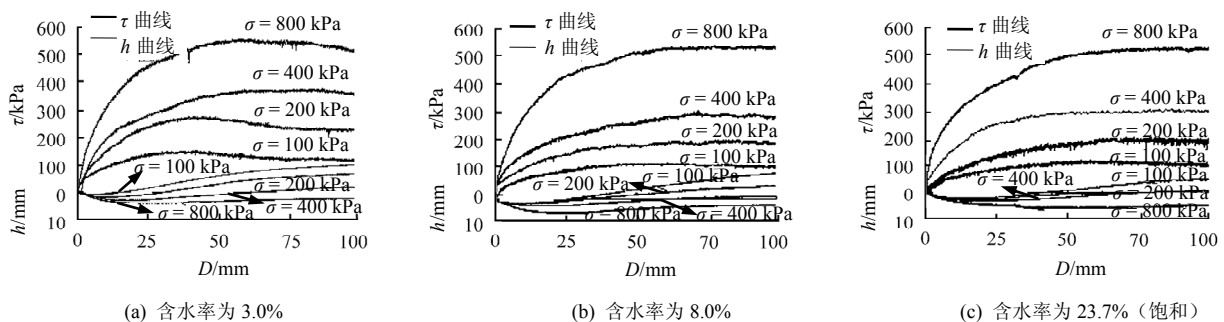


图 3 不同含水率相对水平剪切位移-剪应力-垂直位移关系

Fig.3 Relationship of shear displacement, shear stress and axial displacement of samples with different water contents

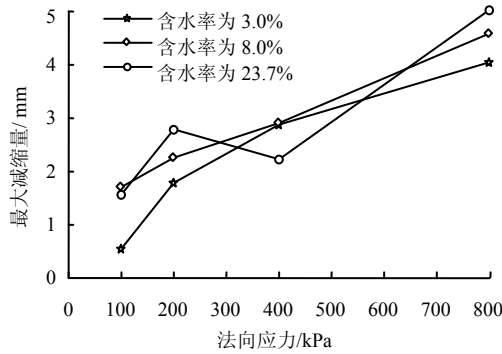


图4 不同含水率条件下最大剪缩量
Fig.4 Largest shear shrinkage of samples contraction with different water contents

剪切速率被认为对剪切试验的结果影响较为理想^[11], 本文试图从试验角度对该理论进行重新检验。不同含水率条件下, 以 τ/σ_N 为纵坐标和以 $-dh/dD$ 为横坐标的关系 (见图5)。可以看出, 应力比-位移增量基本聚集于一个区域内, 但有些点的离散性比较大, 这也证明实际某高速公路边坡粗粒土与理想玻璃棒导出的模型之间存在较大的区别。在实际剪切过程中, 颗粒间的接触并非像完全的理想模型那样是圆颗粒接触, 故颗粒间接触会导致试验结果与模型间的差别。笔者提出剪切时应变软化峰值强度前应力比-位移增量比之间更符合二次多项式, 即

$$\frac{\tau}{\sigma_N} = \lambda_1 \left(-\frac{dh}{dD} \right)^2 + \lambda_2 \left(-\frac{dh}{dD} \right) + \mu \quad (2)$$

式中: λ_1 、 λ_2 、 μ 为拟合参数, 本次试验中 μ 的取值范围 0.35~0.85。

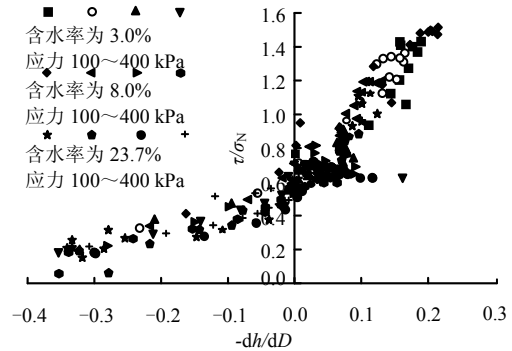


图5 不同含水率时峰值强度前应力比-位移增量比的关系
Fig.5 Stress ratio vs. displacement increment ratio before peak strength of samples with different water contents

3.2 不同剪切速率结果分析

剪切速率不同时, 相对水平剪切位移-剪应力-垂直位移的关系见图6。在垂直应力为 100、200 kPa 时先发生剪缩再发生剪胀, 这与不同含水率剪胀缩性的主要差别来源于试样的颗粒级配不同, 不同含水率试验的最大颗粒粒径为 60 mm, 而剪切速率为 20 mm/min, 其他剪切的相对水平剪切位移随着垂直应力的增加而增加, 且相同剪切速率时发生最大剪缩的相对水平剪切位移随着垂直应力的增加而增加。

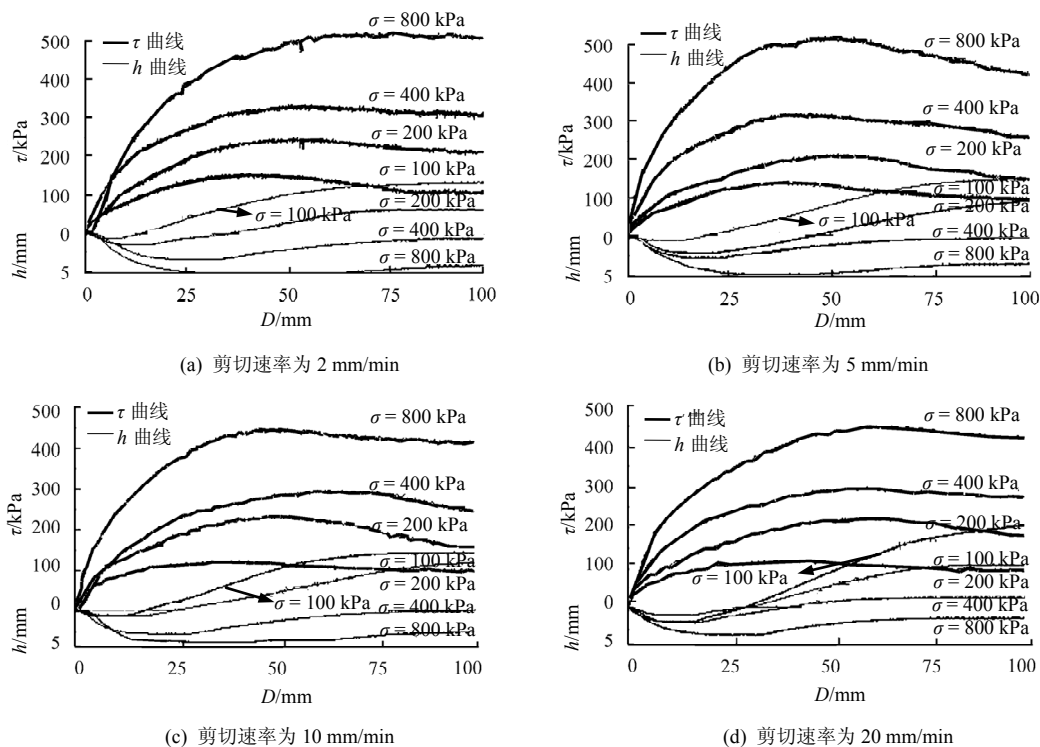


图6 不同剪切速率下相对水平剪切位移-剪应力-垂直位移关系
Fig.6 Relationship of shear displacement, shear stress and axial displacement of samples under different shear rates

分析不同剪切速率条件下最大剪缩量随垂直应力的变化情况如图 7。可以看出，相同垂直应力时随剪切速率的增加，最大剪缩量不断减小，即剪胀增加。相同剪切速率时，不同最大剪缩量随垂直应力的增加而增加，且垂直应力对剪缩量的影响显著。

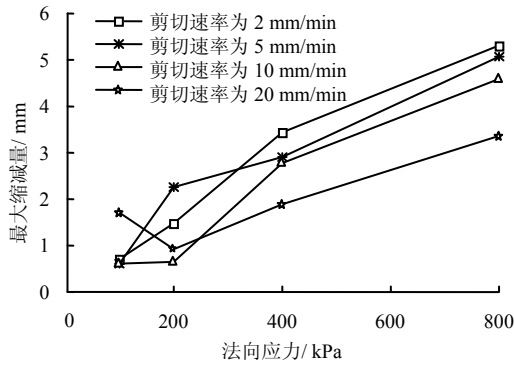


图 7 不同剪切速率条件下最大剪缩量
Fig.7 Largest shear shrinkage of samples under different shear rates

另外，不同剪切速率条件下峰值强度前的应力比-位移增量关系(图 8)也存在明显的非线性关系。且垂直应力较小的数据点多聚于纵坐标的右端，其应力比相对较大。而垂直应力较大的数据点多聚集于纵的左端，其应力比相对较小。

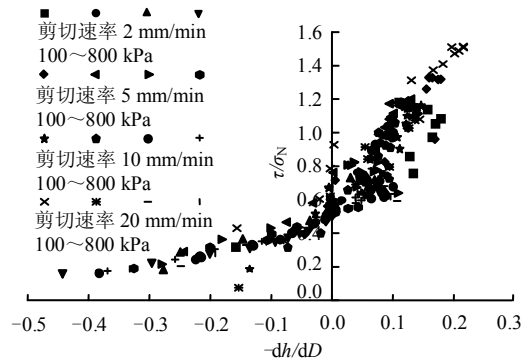


图 8 不同剪切速率时峰值强度前应力比-位移增量比关系
Fig.8 Stress ratio vs. displacement increment ratio before the peak strength of samples under different shear rates

3.3 不同含砾率结果分析

不同含砾率相对水平剪切位移-平均剪应力-垂直位移关系如图 9 所示，含砾率 50%之前相对水平剪切位移-平均剪应力曲线存在明显的应变软化现象。此时，垂直位移在应变软化峰值后阶段趋于一定值并保持不变。当含砾率为 0%时，所有垂直应力条件下均发生剪缩，并没有剪胀现象；含砾率为 30%和 50%时，垂直应力为 100 kPa 时先剪缩后发生剪胀，其余垂直应力仍发生剪缩；当含砾率大于 70%时，垂直应力 $\sigma_N \leq 400$ kPa 均先剪缩后发生剪胀，且剪胀十分明显。可以看出，粗粒含量对剪胀的影响十分明显。

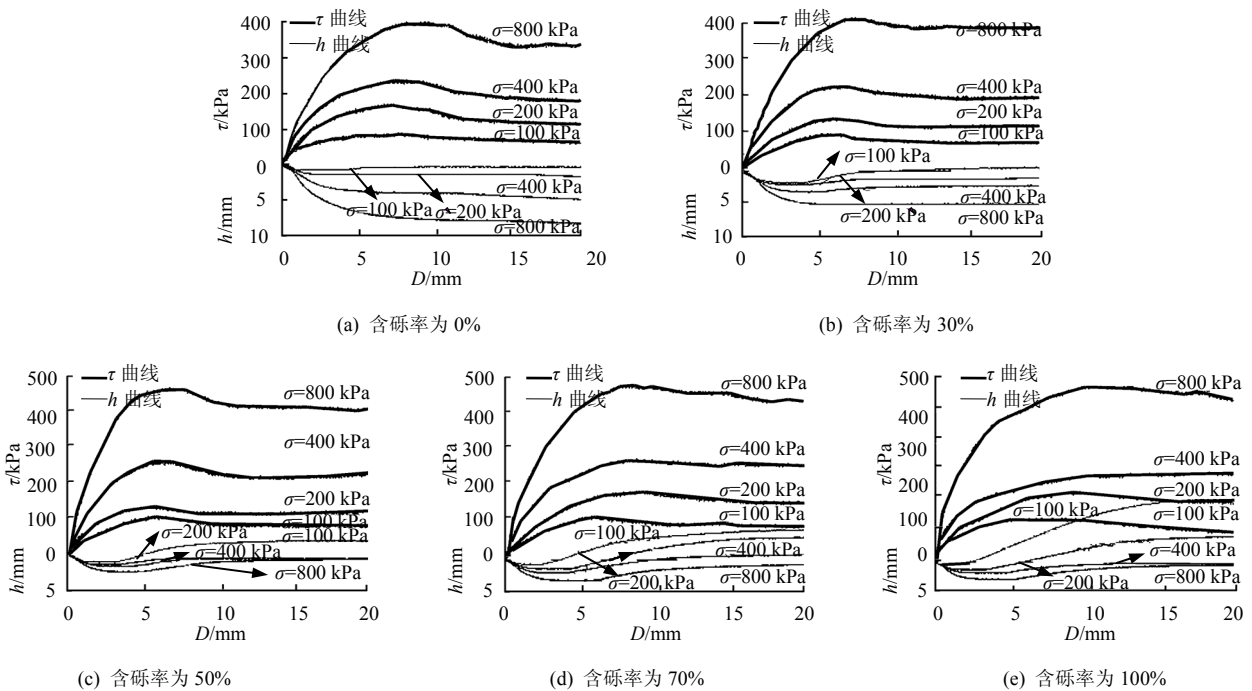


图 9 不同含砾率时相对水平剪切位移-剪应力-垂直位移关系
Fig.9 Relationship of shear displacement, shear stress and axial displacement of samples with different gravel contents

研究不同含砾率时最大剪缩量随垂直应力的关系(如图10),含砾率为50%、70%及100%时的最大剪缩量比较接近(相差在0.5 mm以内),认为此时剪切盒内部构成了以粗粒土为骨架的结构,剪切过程中力通过主力链传播。但含砾率小于50%时,细粒土比表面积较大。由于压实作用造成最大剪缩量比较明显,在高垂直应力情况下,含砾率为0%试样的最大剪缩量是含砾率为100%的近3倍。

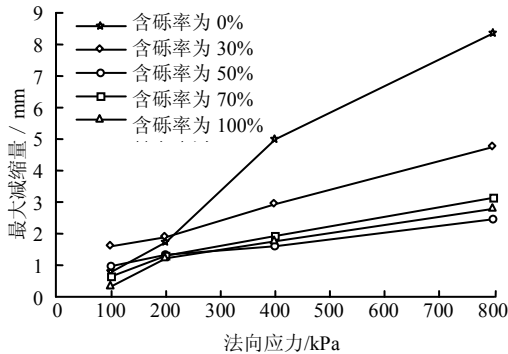


图10 不同含砾率条件下最大剪缩量
Fig.10 Largest shear shrinkage of samples with different gravel contents

不同含砾率时应力比-位移增量关系如图11所示。由图可知,非线性拟合更适合于应力比-位移增量的关系模拟。相同垂直应力时,含砾率越大的应力比越大,即强度越高,其 $-dh/dD$ 也越大,表现在图中为显示在越右上角,即含砾率越大其剪胀越明显。

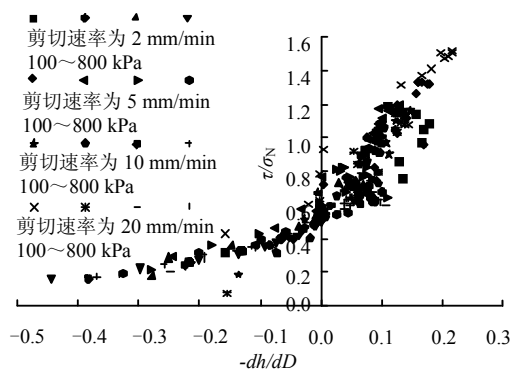


图11 不同含砾率时峰值强度前应力比-位移增量比的关系
Fig.11 Stress ratio vs. displacement increment ratio before the peak strength of samples with different gravel contents

4 结论

(1) 粗粒料的剪胀性与其垂直应力、含水率、剪切速率、含砾率均有密切的关系。最大剪缩量随着垂直应力的增加而增加,但是含砾率(或称为颗

粒级配)对剪胀性的影响尤为显著。控制其他影响因素不变,最大剪缩量及剪缩转为剪胀的相对水平剪切位移随着含水率的增大趋于增大,剪切速率减小时最大剪缩增加比较明显。

(2) 当含砾率小于30%时,由于土颗粒间没有构成稳定的骨架结构,其最大剪缩量较含砾率大于30%的大很多,最大减缩量差别为3倍。含砾率小于50%时,由于细颗粒的影响,使试样水平剪切应力-应变曲线呈现应变软化特性并使得剪胀性最终趋于一稳定值。

(3) 将峰值强度前的水平剪切应力比-位移增量关系采用非线性的二次项 $\tau/\sigma_n = \lambda_1(-dh/dD)^2 + \lambda_2(-dh/dD) + \mu$ 拟合比线性关系的拟合度更好,本次试验中的经验参数 μ 取值区间为0.35~0.85。

参考文献

- [1] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [2] REYNOLDS O. On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact[J]. *Philosophy Magazine*, 1885, 20(5): 469-482.
- [3] CASAGRANDE A. Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slope sand earthfills[J]. *Journal of the Boston Society of Civil Engineering*, 1936, 23(1): 257-276.
- [4] CASAGRANDE A. The shearing resistance of soils and its relation to the stability of earth dams[C]//*Proceedings of Soils Foundation Conference of the U.S. Engineering Department*. Boston: [s.n.], 1938.
- [5] ROWE P W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact[C]//*Proceedings of Royal Society (Series A)*. London: *Mathematical and Physical Sciences*. 1962: 500-527.
- [6] 日本土质工学会. 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: 2-56.
- [7] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙. 堆石料剪胀特性大型三轴试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(2): 205-211.
LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long. Study on shear dilatancy behaviors of rockfills in large-scale triaxial tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(2): 205-211.
- [8] 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.
WANG Guang-jin, YANG Chun-he, ZHANG Chao, et al.

- Experimental research on particle breakage and strength characteristics of rock and soil materials with different coarse-grain contents[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3649—3654.
- [9] MATSUOKA H. A microscopic study on the shear mechanism of granular materials[J]. **Soils and Foundations**, 1974, 14(1): 29—43.
- [10] LIU S H, MATSUOKA H. Microscopic interpretation on a stress-dilatancy relationship of granular materials [J]. **Soils and Foundations**, 2003, 43(3): 73—84.
- [11] 刘斯宏, 肖贡元, 杨建州, 等. 宜兴抽水蓄能电站上库堆石料的新型现场直剪试验[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 772—776.
LIU Si-hong, XIAO Gong-yuan, YANG Jian-zhou, et al. New in-situ direct shear tests on rockfill materials at Yixing pumped storage power station project[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(6): 772—776.
- [12] 交通部公路科学研究院. JTG E40-2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [13] 南京水利科学研究院. SL 237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [14] 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.
- [15] 周杰, 周国庆, 赵光思, 等. 高应力下剪切速率对砂土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2805—2810.
ZHOU Jie, ZHOU Guo-qing, ZHAO Guang-si, et al. Analysis of influence of shear rate on shear strength of sand under high stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2805—2810.
- [16] 胡昕, 洪宝宁, 杜强, 等. 含水率对煤系土抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2291—2294.
HU Xin, HONG Bao-ning, DU Qiang, et al. Influence of water contents on shear strength of coal-bearing soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(8): 2291—2294.
- 上接第 66 页
- [9] 姚令侃, 黄艺丹, 杨庆华. 地震触发崩塌滑坡自组织临界性研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5): 33—43.
YAO Ling-kan, HUANG Yi-dan, YANG Qing-hua. The self-organized criticality of landslides triggered by earthquake[J]. **Journal of Sichuan University: Engineering(Science Edition)**, 2010, 42(5): 33—43.
- [10] 钱海涛, 张力方, 兰景岩, 等. 强震作用下山区滑坡稳定临界位移分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 2619—2628.
QIAN Hai-tao, ZHANG Li-fang, LAN Jing-yan, et al. Analyses of critical sliding displacement of landslide induced by strong earthquake in mountainous area[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Supp.1): 2619—2628.
- [11] HUDSON J A, FAIRHURST C. Tensile strength, Weibull's theory and a general statistical approach to rock failure[C]//Proceedings of Civil Engineering Materials Conference on Structure, Soil Mechanics and Engineering Design(Part 2). Southampton: Pergamon Press, 1969: 901—914.
- [12] 秦四清. 斜坡失稳过程的非线性演化机制与物理预报[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1241—1248.
QIN Si-qing. Nonlinear evolutionary mechanisms and physical prediction of instability of planar-slip slope[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(11): 1241—1248.