文章编号: 1001-1455(2013)06-0625-06

含水率对非饱和黏土动态压缩特性的影响*

丁育青,汤文辉,徐 鑫,冉宪文
(国防科学技术大学理学院工程物理研究所,湖南 长沙 410073)

摘要: 为探讨含水率对非饱和黏土动态压缩特性的影响规律,利用分离式霍普金森压杆(SHPB)实验装置,针对不同含水率非饱和黏土试样开展了侧限条件下的动态压缩实验。实验结果表明,在径向变形受到约束时,当黏土中含有少量水时,比干黏土更容易压缩;而当含水率进一步增加时,试样在受压过程中逐渐接近饱和状态,黏土的抗压性能则明显提升。从能量吸收与分配角度来看,随着含水率的增加,试样所吸收的总能量在逐渐下降,体积改变能所占的比例逐渐增大,而形状改变能所占比例则逐渐减小。

关键词: 固体力学;动态压缩特性;SHPB;黏土;含水率;能量吸收
中图分类号: O347 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

土作为一种最普遍的岩土工程材料,广泛应用于各类民用和国防工程建设,通常土是作为基层材料,当上层构筑物在承受爆炸、冲击和撞击等强动载荷时,土的动态力学特性与整体结构的抗冲击性能有着密切的关联。因而,研究土材料的动态力学特性具有重要的现实意义。

土是一种松散介质,且具有很强的地域特征,不同类别土的力学特性差异很大。皮爱如等[1]、郑文等[2]利用 SHPB 实验装置,分别研究了黄土和干燥砂在侧限条件下的动态力学性能,结果表明黄土具有明显的应变率效应,而干燥砂的应变率效应不明显,但初始密度对实验结果影响显著。A. M. Bragov 等[3-4],B. Song 等[5]、M. E. Martin 等[6]、H. Luo 等[7]利用 SHPB 实验装置,分别针对不同初始密度及含水率的砂土试样,开展了不同侧限条件下的动态压缩实验,结果表明,含水率、初始密度以及静水压力对实验结果影响显著,而砂土的应变率效应并不明显。但从目前来看,针对黏土在侧限条件下的动态压缩特性研究却少见报道。

本文中利用 SHPB 实验装置,对不同含水率的非饱和黏土试样进行侧限条件下的动态压缩实验研究,分析含水率对非饱和黏土动态压缩特性的影响规律。

1 实验概述

1.1 实验准备

实验所用散黏土取自洛阳地区,采用密度计法进行土样的颗粒分析实验,测得固体颗粒密度 $\rho_s=2.74\ \mathrm{g/cm^3}$,粒径 0.005~0.075 mm 的固体颗粒占土样总体积的 71.4%,粒径小于 0.005 mm 的占 28.6%。试样设计干密度 $\rho_d=1.70\ \mathrm{g/cm^3}$,尺寸为 $\varnothing$20 mm×8 mm,试样初始物性参数如表 1 所示。表中试样的含水率 $w=(m_w/m_s)\times100\%$,试样的饱和度 $S_r=V_w/V_v=[V_w/(V-V_s)]\times100\%$,$\rho_0$ 为试样的初始密度,m_s 为土中固体颗粒的质量,m_w 为土中水的质量,V 为土样的总体积,V_s 为土中固体颗粒的体积,V_w 为土中水的体积,V_v 为土中孔隙的体积。

试样制备前先将散黏土烘干,并按照设计干密度及含水率进行配比,再将配好的含水散黏土放入压样模具中。模具由金属套筒和活塞组合而成,如图 1 所示,套筒内壁均匀涂抹油膜,油膜可以有效降低试样与套筒内壁之间的摩擦,并保证套筒与试样间的均匀径向压力传递。制样过程中通过反转试样避免试样上下端面不均匀,利用千斤顶缓慢加压,最终完成制样。金属套筒采用 LY12 铝,尺寸为内径

* **收稿日期**: 2012-06-15; **修回日期**: 2012-08-14
作者简介: 丁育青(1985—),男,博士研究生。

20 mm、外径 28 mm、高 14 mm。为了防止实验前试样中的水分蒸发,设计了尺寸为∅20 mm×5 mm 的 LY12 铝金属垫片,试样通过金属垫块与霍普金森压杆连接,垫块直径与试样直径相同,压杆在子弹撞击下,通过垫块把轴向冲击载荷施加给试样。实验中垫块和试样当作一个整体来对待,由于金属的声速远大于被测黏土试样,垫块对试样整体的应力平衡影响可以忽略。实验过程中垫块模量远高于试样,轴向变形量很小,可从总的轴向应变中扣除。

表 1 试样初始物性参数表

Table 1 The initial physical properties of the clay specimen

w/%	S_r/%	ρ_0/(g·cm^{-3})
0	0	1.70
4	18.0	1.77
8	35.9	1.84
12	53.9	1.90
15	67.4	1.96

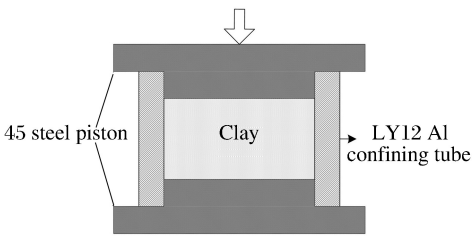

图 1 试样制备过程示意图

Fig. 1 Schematic of the specimen preparation steps for SHPB experiments

1.2 实验方法及过程

实验在国防科技大学理学院轻气炮实验室完成。实验杆材料为 LC4 铝合金,子弹长0.5 m,入射杆长 2 m,透射杆长 1 m,直径20 mm,实验装置如图 2 所示。应变测试采用 KD 6009 应变放大器,实验信号由 DPO 4104 数字存储示波器采集,实验中应用入射波整形技术,采用橡皮作整形器,以保证试样处于常应变率加载状态。由入射、透射杆上的应变片分别记录入射、反射及透射波形,试样的轴向应变 ε_{zz}、轴向应力 σ_{zz} 可以通过传统 Hopkinson 杆的理论公式求出:

$$\varepsilon_{zz}=\frac{2c_0}{l_s}\int_0^t\varepsilon_r(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{1}$$

$$\sigma_{zz}=\frac{A_s}{A_0}E_0\varepsilon_t \tag{2}$$

式中:l_s为试样初始长度,A_s、A_0分别为试样和实验杆横截面积,ε_r、ε_t分别为反射、透射应变,E_0为实验杆弹性模量。

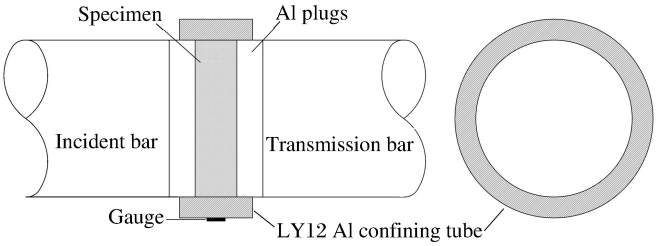

图 2 侧限 SHPB 实验装置试样位置示意图

Fig. 2 Schematic of the test section of the clay assembly on SHPB apparatus

实验过程中,在铝套筒外壁的中心位置,贴 1 个电阻应变片,如图 2 所示。试样在轴向压缩变形时,其径向膨胀受到套筒的弹性约束,由套筒外壁环向应变片记录的脉冲波形,可算得套筒外壁环向应变 ε_j,并利用厚壁圆筒理论,求得圆筒内壁的压力 p_1 以及套筒内壁的径向位移 U_r:

$$p_1=\frac{R_2^2-R_1^2}{2R_1^2}E_j\varepsilon_j \tag{3}$$

$$U_r=\frac{R_1\varepsilon_j}{2}\left[(1-\nu_j)+(1+\nu_j)\frac{R_2^2}{R_1^2}\right] \tag{4}$$

式中:R_1、R_2分别为套筒的内外半径,E_j为套筒材料的弹性模量,ν_j为套筒材料的泊松比。由于套筒内壁

与试样紧密闭合，故由界面平衡条件可知，试样所受的围压 σ_{rr} 及径向应变 ε_{rr} 分别为：

$$\sigma_{rr}=\sigma_{\theta\theta}=p_1=\frac{R_2^2-R_1^2}{2R_1^2}E_j\varepsilon_j \tag{5}$$

$$\varepsilon_{rr}=\varepsilon_{\theta\theta}=\frac{\varepsilon_j}{2}\left[(1-\nu_j)+(1+\nu_j)\frac{R_2^2}{R_1^2}\right] \tag{6}$$

计算发现，试样的径向应变 ε_{rr} 与轴向应变 ε_{zz} 相比为小量，可以忽略不计。对于轴对称试样，静水压力 p、体积变形 ε_v、剪应力 τ 及剪应变 γ_e 可由下式求出：

$$p=\frac{1}{3}(\sigma_{zz}+2\sigma_{rr}),\qquad \varepsilon_v=\varepsilon_{zz}+2\varepsilon_{rr}\approx\varepsilon_{zz} \tag{7}$$

$$\tau=\frac{1}{2}(\sigma_{zz}-\sigma_{rr}),\qquad \gamma_e=\varepsilon_{zz}-\varepsilon_{rr}\approx\varepsilon_{zz} \tag{8}$$

2　实验结果及分析

实验过程中，通过调整子弹撞击速度以及整形器尺寸，控制每发实验的加载条件，进而考察在相同的应变率条件下，含水率对黏土动态压缩性能的影响规律，本实验研究的应变率范围为 1 600～1 700 s^{-1}。图 3 为含水率为 15%的黏土试样实验典型原始波形，图中的 input 曲线代表入射杆上的实验信号，output 曲线代表透射杆上的实验信号，hoop strain 曲线代表套筒外壁应变片测得的实验信号。图 4 为试样两端的应力平衡以及围压的时程曲线，入射杆与试样界面的应力时间曲线（图中 front stress）由入射信号加上反射信号后计算得到，透射杆与试样界面的应力时间曲线（图中 back stress）由透射信号计算得到。从图 4 中可以看到，前端面的应力时间曲线有一些波动，这主要是由于在加载过程中，试样中的固体颗粒抗压性能不一致导致的，但在整个加载过程中试样达到了较好的应力平衡。

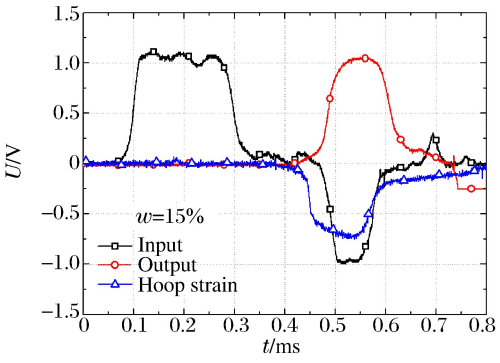

图 3　黏土试样的 SHPB 实验原始曲线

Fig. 3　Typical oscilloscope recordings of input, output, and hoop strains

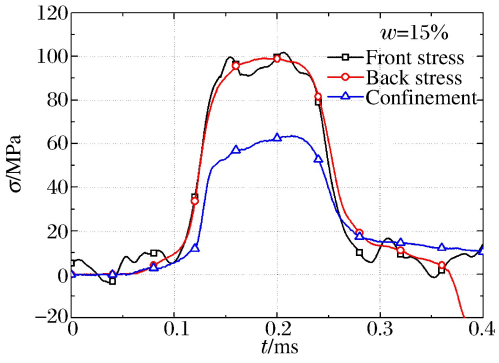

图 4　黏土试样应力平衡及围压曲线

Fig. 4　Typical dynamic stress equilibrium check and confinement pressure

图 5 为实验过程中的应变及应变率历史曲线，可以看出，在试样轴向压缩过程中应变率基本为一个平台，约为 1 700 s^{-1}，意味着实验中试样受到轴向压缩时为常应变率加载。为了保证实验的重复性和可靠性，每种试样进行四次平行实验，含水率为 4%的黏土试样的重复实验结果如图 6 所示。从测量曲线可以看出，实验的重复性较好，实验结果较为可靠。

图 7 为不同含水率试样的轴向应力应变曲线，图中曲线为平行实验的平均结果。可以看出，在相同应变率条件下，不同含水率的非饱和黏土试样呈现出不同的动态压缩特性。在受到压缩的初始阶段，试样中固体颗粒间的摩擦阻力为抵抗变形的主要机制，表现为固体颗粒间的滑移、孔隙塌缩及颗粒的重新排列。而随着含水率的提高，试样中水分的润滑作用降低了固体颗粒间的摩擦阻力，使得颗粒滑移和孔隙塌缩变得更为容易，表现为试样中水分含量越多，越容易被压缩。当试样压缩至一定程度时，应力应变曲线出现“拐点”，呈现出分段特征，这表明“拐点”前后试样的变形机制发生了变化。随着外载荷的不断增加，试样的变形也随之增大，使得试样中的孔隙变得越来越小，试样逐渐接近饱和状态，且由于动态

加载过程的瞬时性，试样中的水分来不及排出，水分开始与固体颗粒共同承担压力，成为抵抗变形的主要机制。随着试样中水分的增多，应力应变曲线的分段特征变得并不明显，这是由于试样中的水分在润滑的同时，起到压力传递的作用，从而使得应力应变曲线表现得更为连续。

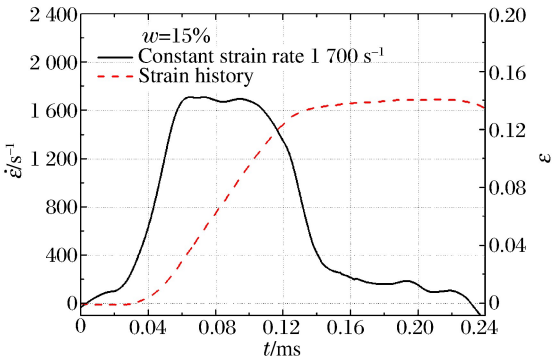

图 5 黏土试样的应变应变率历史

Fig. 5 Strain rate and strain history

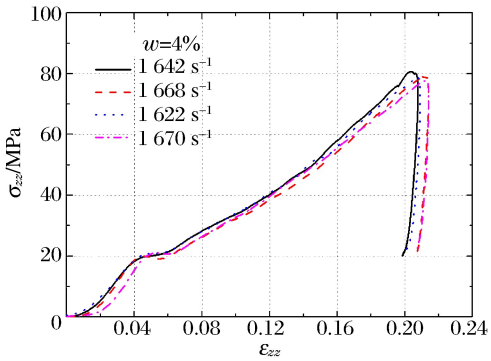

图 6 黏土试样的平行实验结果

Fig. 6 Reproducibility of axial stress-axial strain of wet clay

从图 7 中曲线可以看出，在径向变形受到约束时，相比于含水率为 0%的试样，含水率为 4%和 8%的试样更容易被压缩，表现为峰值轴向应力对应的轴向应变更大，这表明颗粒间的摩擦作用可以抵御一定的外部载荷，试样中含有少量水分时比干土更容易被压缩。当含水率进一步增加时，由于试样在受压过程中逐渐接近饱和状态，土的抗压性明显增强，表现为含水率为 12%和 15%试样的应力迅速上升，变形却很小。由表 2 可以看出，当压缩量最大时，试样的饱和度分别为 96%和 96.8%，接近完全饱和。而在径向变形受到约束的时候，饱和状态的黏土在低压状态下一般认为是不可压的。

图 8 为不同含水率试样的静水压力-体积变形曲线，可以看出，含水率对静水压力-体积变形曲线的影响趋势与轴向应力应变曲线基本一致，在相同的加载条件下，试样承受的静水压力随着含水率增加而

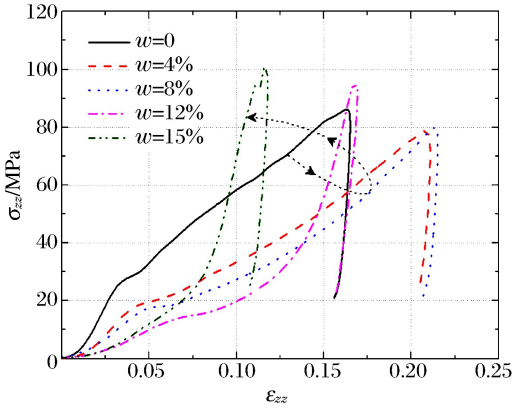

图 7 不同含水率试样的轴向应力-轴向应变曲线

Fig. 7 Results of axial stress-strain of clays with different moisture content

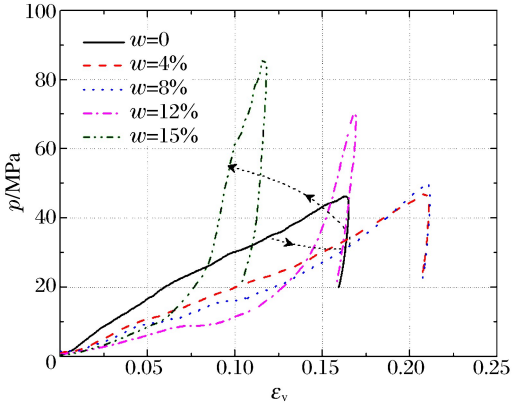

图 8 不同含水率试样的静水压力-体应变曲线

Fig. 8 Results of hydrostatic pressure vs. volumetric strain of clays with different moisture content

表 2 黏土试样的压缩与能量吸收情况

Table 2 Energy absorption and compressibility of clay on SHPB

w/%	ρ_{max}/(g·cm^{-3})	$S_{r,max}$/%	$\sigma_{zz,max}$/MPa	$\varepsilon_{zz,max}$/%	ω_{axial}/(J·g^{-1})	ω_{vol}/(J·g^{-1})	ω_{dev}/(J·g^{-1})
0	2.03	0	86.1	16.3	4.3	2.1	1.6
4	2.23	39.6	78.7	20.8	4.1	2.3	1.2
8	2.33	81.7	79.8	21.3	3.7	2.0	1.1
12	2.29	96.0	94.9	16.7	1.6	1.0	0.4
15	2.21	96.8	100.8	11.6	1.2	0.9	0.1

增大。图 9 为不同含水率试样的剪应力-剪应变曲线，可以看出，在曲线的初始阶段，随着含水率的增加，试样的抗剪性明显下降。这是由于试样中的水分起到润滑作用，从而使得试样的抗剪性大幅下降，但随着含水率的增加，孔隙被逐步压实，且由于径向变形受到约束，黏土的抗剪性有显著提升。从以上对实验结果的分析可以看出，含水率是影响非饱和黏土动态压缩特性的重要因素。

由应力应变曲线积分可得应变能密度，由此可计算出在整个加载过程中，单位质量试样所吸收的总应变能、体积改变能和形状改变能[8]，具体数值如表 2 所示，表中 ρ_{max} 为试样受压后的最大密度，$S_{r,max}$ 为试样受压后的最高饱和度，$\sigma_{zz,max}$ 为试样受到的最大轴向应力，$\varepsilon_{zz,max}$ 为试样的最大轴向应变，ω_{axial} 为轴向改变能量密度，ω_{vol} 为体积改变能量密度，ω_{dev} 为形状改变能量密度。体积改变能以及形状改变能与总应变能的比例 ω 随含水率的变化曲线如图 10 所示。可以看出，随着含水率的增加，单位质量的试样所吸收的总能量在逐渐下降，且体积改变能所占的比例逐渐增大，而形状改变能所占比例则逐渐减小，这是由于水不能承受剪切力，从而导致试样的抗剪性随之下降，但水的相对不可压缩性则为体积改变能贡献较大。黏土中的水分含量对于冲击能量的吸收和分配影响十分显著，对于含水率高的黏土吸能效果不及干黏土，这一结论可为防护工程设计提供一定的参考，并从能量分配的角度，验证了前面关于变形机制的分析。

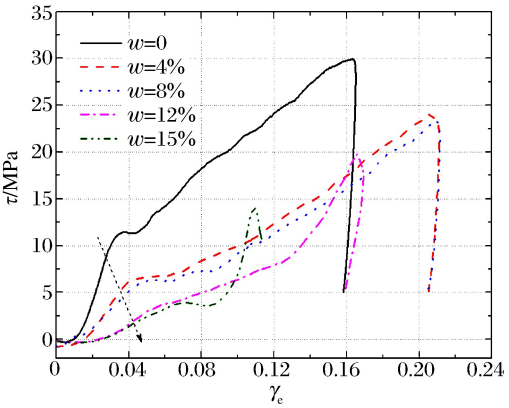

图 9　不同含水率试样的剪应力-剪应变曲线

Fig. 9　Results of shear stress vs. shear strain of clays with different moisture content

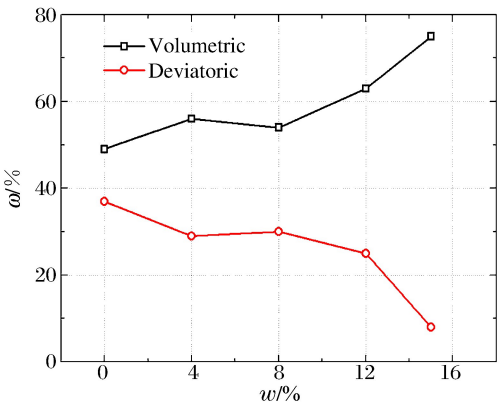

图 10　能量比例随含水率的变化趋势曲线

Fig. 10　Results of energy ratio vs. moisture content

3　结　论

(1)利用 SHPB 实验装置，对不同含水率的非饱和黏土试样进行了侧限条件下的动态压缩实验研究。通过调整子弹撞击速度及整形器尺寸，得到了相同应变率条件下试样的动态压缩实验结果，数据重复性良好。

(2)分析了在径向变形受到约束的情况下，黏土受到轴向压缩时的变形机制。可分为 2 种：一是黏土骨架受压变形，表现为固体颗粒间的滑移、孔隙塌缩及颗粒的重新排列，主要靠颗粒之间的摩擦力来抵抗变形；二是黏土中固体颗粒和水分的受压变形，随着压缩量的上升，黏土中的孔隙变得越来越小，含水黏土试样趋近饱和状态，孔隙中的水分和固体颗粒一起，共同支配着黏土的动态压缩特性。

(3)含水率是影响非饱和黏土动态压缩特性的重要因素，在径向受到约束时，黏土中含有少量的水比干黏土更容易被压缩，而当含水率进一步增加时，试样接近饱和状态，黏土的抗压性能则明显增强。

(4)从能量吸收与分配角度来看，随着含水率的增加，试样所吸收的总能量在逐渐下降，且体积改变能所占的比例逐渐增大，而形状改变能所占比例则逐渐减小。

(5)当前关于黏土的力学性能研究多局限于准静态，理论模型多为经验公式。本文工作有助于研究黏土的动态力学性能和动态本构模型。

参考文献:

[1] 皮爱如,沈兆武,王肖钧.土壤冲击特性的实验研究[J].振动与冲击,2003,22(3):28-29.
Pi Ai-ru, Shen Zhao-wu, Wang Xiao-jun. Experimental study of impact characteristic of soil[J]. Journal of Vibration and Shock, 2003,22(3):28-29.

[2] 郑文,徐松林,胡时胜.侧限压缩下干燥砂的动态力学性能[J].爆炸与冲击,2011,31(6):619-623.
Zheng Wen, Xu Song-lin, Hu Shi-sheng. Dynamic mechanical properties of dry sand under confined compression [J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(6):619-623.

[3] Bragov A M, Kotov V L, Lomunov A K, et al. Measurement of the dynamic characteristics of soft soils using the kolsky method[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2004,45(4):580-585.

[4] Bragov A M, Lomunov A K, Sergeichev I V, et al. Determination of physicomechanical properties of soft soils from medium to high strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008,35(9):967-976.

[5] Song B, Chen W, Luk V. Impact compressive response of dry sand[J]. Mechanics of Materials, 2009,41(6):777-785.

[6] Martin B E, Chen W, Song B, et al. Moisture effects on the high strain-rate behavior of sand[J]. Mechanics of Materials, 2009,41(6):786-798.

[7] Luo H, Lu H, Cooper W, et al. Effect of mass density on the compressive behavior of dry sand under confinement at high strain rates[J]. Experimental Mechanics, 2011,51(9):1-12.

[8] 陈明祥.弹塑性力学[M].北京:科学出版社,2007:71-76.

Experimental study of moisture effects on dynamic compression properties of unsaturated clay*

Ding Yu-qing, Tang Wen-hui, Xu Xin, Ran Xian-wen
(*Institute of Engineering Physics, College of Science, National University of Defense Technology, Changsha* 410073, *Hunan, China*)

Abstract: Dynamic compression experiments were performed with a modified split-Hopkinson pressure bar to explore the effects of moisture content on the dynamic compression properties of unsaturated clay under the constant strain-rate loading. The experimental results indicate that when the water content is low, the water added in the clay, the radial formation of which is confined, acts as lubricant and can reduce the friction between the clay particles so that the unsaturated lay is compressed more easily than the dry clay. But with the increasing of the water content, the voids are gradually displaced by water, making it difficult for clay particles to displace the interstitial gaps, consequently, the clay markedly becomes good in anti-compression properties. And as the water content increases, the total energy absorbed by the clay decreases, in which the portion of the volumetric deformation energy increases and the portion of the deviatoric deformation energy descends.

Key words: solid mechanics; dynamic compression property; SHPB; clay; moisture content; energy absorption

* Received 15 June 2012; Revised 14 August 2012
Corresponding author: Tang Wen-hui, wenhuitang@163.com

(责任编辑 曾月蓉)