文章编号：1000-5773(2011)05-0444-07

冲击载荷下土的动态力学性能研究*

朱志武[1,2]，宁建国[3]，刘　煦[1]

(1.西南交通大学力学与工程学院，四川成都　610031；
2.冻土工程国家重点实验室，甘肃兰州　730000；
3.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京　100081)

摘要：利用分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar，SHPB)技术，研究了土体在不同应变率条件下的冲击动态力学性能，发现土体有明显的应变率效应，与静载相比，冲击载荷下土的动强度和动模量均有很大的提高。根据实验曲线的特征，以一根线性弹簧和两个不同松弛时间的Maxwell体并联的粘弹性模型来表达土体的损伤型粘弹性本构模型，两个Maxwell体分别表示土体的低应变率响应和高应变率响应，模型的数值拟合曲线与实测动态本构曲线具有较好的一致性。拟合参数表明，土体对低应变率的响应与混凝土相同，对高应变率的敏感性远远高于混凝土。

关键词：土；霍普金森压杆；冲击；动态；高应变率
中图分类号：O347.3　　**文献标识码**：A

1　引　言

土体材料广泛应用于民用和国防工程建设中，这些构筑物在其工作过程中，除了承受正常的设计荷载外，往往还要承受诸如冲击、爆炸和撞击等强动荷载。因此，土体材料在高应变率下的力学行为及其本构描述越来越成为一个迫切需要解决的问题。

早在1948年，美国学者卡萨格兰德(A. Cassagrande)就已设计了多种冲击试验仪，以测定冲击荷载作用下土的动力特性。之后各国学者继续对这一问题进行研究，他们利用分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar，SHPB)装置，对干土和非饱和土进行了高应变率下的实验研究[1-6]，但由于问题的复杂性以及实验条件和手段的限制，到目前为止，人们对土体动态力学行为的认识仍很不完善，尚没有一种普适的土体冲击动态本构模型。

基于此，本研究利用SHPB实验技术，对土体在不同高应变率下的力学性能进行了系统研究，根据实验曲线，利用数值计算，发展了土体冲击动态非线性粘弹性损伤本构模型，利用模型和实验结果的对比，得到了很好的效果。

2　土体准静态力学实验

为了便于同SHPB实验进行比较，并对所实验的土质进行充分了解，须对土体的基本物理参数进行测量并做必要的准静态力学实验。

---

* **收稿日期**：2010-09-20；**修回日期**：2010-11-26
基金项目：国家自然科学基金(11172251)；冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE201001)；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(SWJTU09CX069)
作者简介：朱志武(1974—)，男，博士(后)，副教授，主要从事土体材料本构关系研究. E-mail：zzw4455@163.com

2.1　干容重的测量

土体材料为含水量为 15%的散黄土,采用蜡封法对试件进行容重测量。将土试样用石蜡包裹,用量筒、电子秤测得蜡封试样的体积和质量;通过计算得到蜡封所用石蜡的体积,再由此得到试样体积;土试样的质量与体积之比即为湿密度,除去试样中所含水分,通过计算最终得到试样的干密度。重复进行 3 次测量(结果见表 1),取其平均值作为最终结果。本实验所用土试样的平均密度为 $\rho=1.699\ \mathrm{g/cm^3}$。

表 1　土体干容重测量数据

Table 1　The dry bulk density measurements of soil

No.	Sample mass /(g)	Sample mass after wax seal /(g)	Sample volume after wax seal /(cm^3)	Wax volume /(cm^3)	Sample volume /(cm^3)	Wet density /(g/cm^3)	Dry density /(g/cm^3)
1	23.03	24.14	14	1.206 52	12.793 5	1.800 135 9	1.565 335 6
2	24.38	24.72	12	0.369 57	11.630 4	2.096 224 3	1.822 803 7
3	22.63	23.09	12	0.500 00	11.500 0	1.967 826 1	1.711 153 1

2.2　颗粒分析

为了测量土体中不同尺寸的颗粒所占土体的总质量分数,以明确土粒大小分布情况,须对选用土样进行颗粒分析。颗粒分析采用筛分法,实验结果见表 2。由表 2 可得到土样的颗粒配比,其结果见表 3。

表 2　土试样颗粒分析数据

Table 2　The particle analysis data of soil sample

Sieve number	Aperture /(mm)	The soil mass of stay sieve /(g)	The soil mass of less than the diameter /(g)	The soil mass fraction between the two aperture /(%)	The soil mass fraction less than the aperture /(%)
1	2.00	1.31	116.82	1.11	98.89
2	0.50	67.52	49.30	57.16	41.73
3	0.25	0.83	48.47	0.70	41.03
4	0.10	23.92	24.55	20.25	20.78
Chassis	0.00	24.55	0.00	20.78	0.00

表 3　土样颗粒配比

Table 3　The particle size distribution in the soil sample

Particle diameter /(mm)	Proportion /(%)	Particle diameter /(mm)	Proportion /(%)	Particle diameter /(mm)	Proportion /(%)
<0.1	20.78	0.25～0.50	0.7	>2.0	1.11
0.1～0.25	20.25	0.50～2.00	57.16		

2.3　无侧限抗压实验

采用 TSZ30-2.0 型应变控制式三轴仪测定土体在准静态加载下的强度,实验所用试样尺寸为 ∅30 mm×75 mm。为了便于对比,在同一应变率下共进行 3 次实验。所得到的土体在无侧限条件下的抗压 σ-ε 曲线如图 1 所示。

从图 1 可以看出,实验具有很好的一致性,土试样曲线没有明显的屈服阶段,可承受的最大压力范围为 0.6～0.7 MPa,即当应变达到 4.5%左右时开始出现明显裂纹,产生破坏,裂纹大约成 45°角,从底端延伸到中部,如图 2 所示。

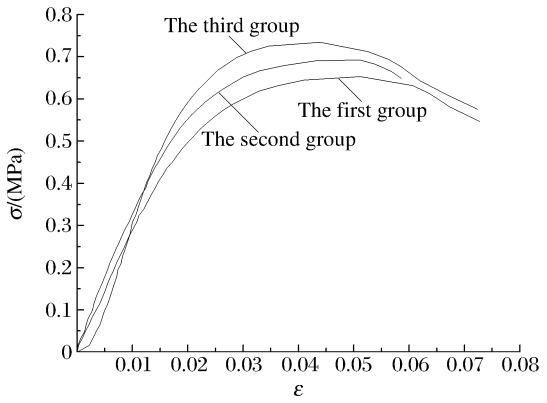


图 1 土体在无侧限条件下的抗压 σ-ε 曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of the soil



图 2 经过准静态加载后的土试样

Fig. 2 The soil sample after the static loading

3 冲击载荷下土体的力学性能实验

3.1 实验方法及原理

材料动态力学实验技术远比静态力学实验复杂，所采用的设备必须满足以下要求：首先要有能够重复产生冲击载荷的装置以及高频信号采集系统；另外还要充分考虑应变率和惯性这两种十分重要的动力学效应。

分离式霍普金森压杆(SHPB)装置集成了符合以上要求之功能。1949 年，Kolsky[7] 的研究被视为 SHPB 实验技术的创始。国内自 20 世纪 80 年代拥有首个 SHPB 装置后，已有多家科研单位利用不同口径的 SHPB 装置，对金属、岩石、复合材料、混凝土等进行了大量的实验研究，但对土体材料的冲击实验研究仍鲜有报道。

实验采用贴于金属压杆中部的应变片作为测量传感器，记录输入杆上的入射波 ε_i、反射波 ε_r 和输出杆上的透射波 ε_t。按照一维应力波理论，测试过程中试件的平均应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$、平均应变 $\varepsilon(t)$、试件两端面应力的平均值(可称其为有效平均应力或可测平均应力)$\sigma(t)$ 为[8]

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{v_1 - v_2}{l_s} = \frac{C_0}{l_s}(\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \tag{1}$$

$$\varepsilon(t) = \frac{C_0}{l_s}\int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t)\mathrm{d}t \tag{2}$$

$$\sigma(t) = \frac{1}{2}\left[\frac{A}{A_s}E(\varepsilon_i + \varepsilon_r) + \frac{A}{A_s}E\varepsilon_t\right] = \frac{A}{2A_s}E(\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \tag{3}$$

式中：v_1、v_2 分别为试样两个端面的瞬时速度，l_s、A_s 分别为试样的长度和横截面积，A、E 分别为压杆的面积和弹性模量，C_0 为应力波在杆件中的传播速度，其计算公式为

$$C_0 = \sqrt{E/\rho} \tag{4}$$

式中：ρ 为压杆密度。

若对试件引入均匀性假设，即 $\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t$，则(1)式～(3)式变为

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_0}{l_s}\varepsilon_r \tag{5}$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2C_0}{l_s}\int_0^t \varepsilon_r \mathrm{d}t \tag{6}$$

$$\sigma(t) = \frac{A}{A_s}E\varepsilon_t \tag{7}$$

(5)式～(7)式即为经典的二波法测试数据处理公式。

3.2 动态冲击实验及结果分析

通常使用 SHPB 装置和 CS-1D 型超动态应变仪进行土体试样在冲击载荷下的力学性能测试，应变

仪记录间隔为 0.5 μs。实验采用的土原料同样为含水量为 15%的散黄土,土体试样的规格为∅30 mm×18 mm 的圆柱形,入射杆、透射杆和土体试样的直径相同。考虑到输出信号可能很弱,为了便于更好地捕捉和测量信号,并进行对比,分别加工了两套输入-输出杆试件,材质分别为铝和 45 钢。实验共分为 18 组,每组实验条件见表 4。实验中,各项参数取值分别为 $E_{Al}=71$ GPa,$E_{45\ steeel}=210$ GPa,$l_s=18$ mm,$\rho_{Al}=2.7$ Mg/m^3,$\rho_{45\ steeel}=7.8$ Mg/m^3,$A_s=A$。

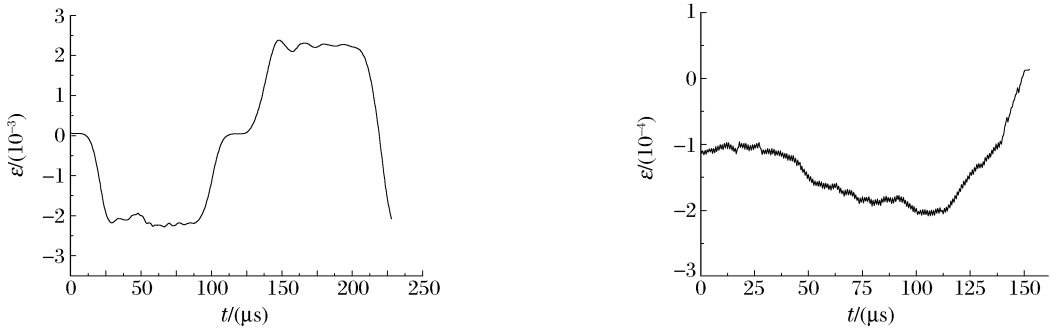
表 4　各组实验条件

Table 4　Dynamic testing conditions for soil experiments

Exp. No.	Striker speed /(m/s)	Specimen moisture content w/(%)	Bar material	
			Incident bar	Transmitted bar
1-3	27	15	Aluminum	Aluminum
4-6	38	15	Aluminum	Aluminum
7-9	47	15	Aluminum	Aluminum
10-17	42	Dry soil	Steel	Aluminum
18	42	Dry soil	Steel	Steel

由于透射信号较弱,所以先从图像中直观读取入射波、反射波、透射波的起点及透射波的终点,再根据透射波的长度来确定入、反射波的长度。之后将选取的 3 个波形数据带入预先编好的 MATLAB 程序进行计算,最终得到土体动态冲击的应力-应变曲线。

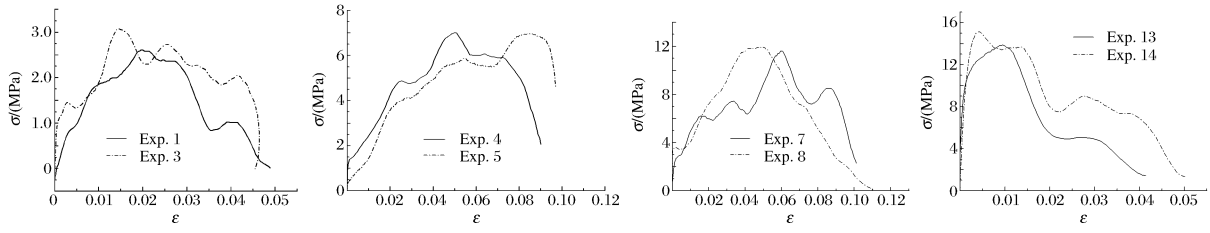
实验测得的典型波形如图 3 所示。图 3(a)和图 3(b)中的时间并不是相互对应的,$t=0$ 时刻即为各自波形图中截取的初始时刻。从图 3(b)中读取透射波的长度,在图 3(a)中确定入、反射波的起点,再根据已知的透射波长度来确定相对应的入、反射波的波形数据。经过计算,得到各组土试样的应力-应变关系(见图 4)。



(a) Incident wave and Reflected wave　　(b) Transmitted wave

图 3　实验测到的典型波形图

Fig. 3　A typical set of oscilloscope records in the SHPB experiment on the soil



(a) $v_{bullet}=27$ m/s　(b) $v_{bullet}=38$ m/s　(c) $v_{bullet}=47$ m/s　(d) $v_{bullet}=42$ m/s

图 4　不同子弹速度下各组试样的 σ-ε 曲线

Fig. 4　Stress-strain curves of the soil under the different striker speeds

为直观比较土体在受冲击载荷和准静态加载时的不同特性，分别从准静态及不同冲击速度的动态实验结果中选取一组数据，即在准静态加载和动态冲击载荷条件下，进行土体应力-应变关系的对比。如图 5 所示。

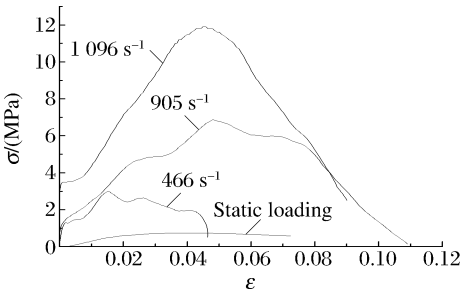


图 5 准静态加载与冲击载荷条件下土体的 σ-ε 曲线对比

Fig. 5 Stress-strain curves of the soil at various strain rates

从图 5 中可以看出，与准静态加载相比，冲击载荷下土的动强度和动模量均有很大的提高；在冲击载荷作用下，土体的弹性段不明显且没有明显的屈服过程。该土体材料随着应变率的提高，即冲击速度的提高，冲击强度迅速提高，具有很强的应变率效应。

如图 6 所示，土试样经过冲击载荷的作用，在中部出现横裂纹，导致土体破坏。其破坏的原因是：冲击应力的反射波对土体产生拉应力，当某一时刻其拉应力值超过土体的抗拉极限时，试样开始出现裂纹，最终导致破坏。

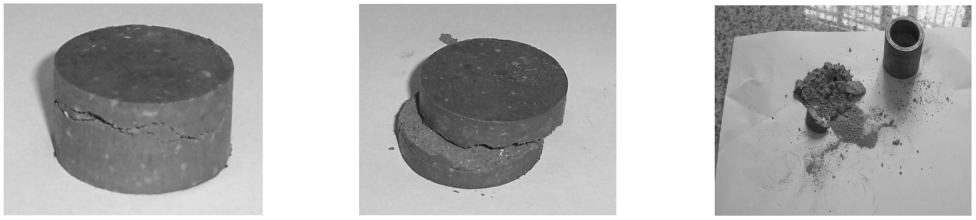


图 6 经过冲击作用后的土体试样

Fig. 6 The soil sample after impact

4 土体冲击动态本构模型研究

岩土动态本构模型一直是岩土动力学研究的重点内容。过应力模型曾一度是研究的主流，但过应力模型只能反映强度随应变率的提高而提高，不能反映弹性模量随应变率而变化的特点。在最近几年出现了几种粘弹性损伤本构模型，但关于土体的动态本构模型尚未见报道。朱兆祥、王礼立和唐志平经多年研究提出了一个由一个非线性弹簧、一个低频 Maxwell 体和一个高频 Maxwell 体三者并联(见图 7)组成的典型非线性粘弹性本构模型[9]。

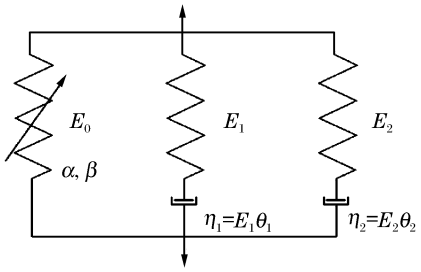


图 7 Z-W-T 非线性粘弹性本构模型

Fig. 7 The Z-W-T Viscoelastic Nonlinear Constitutive model

该模型由胡时胜和王道荣在研究混凝土的动态本构模型时进行了改进，表达式为[10]

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_{m1} + \sigma_{m2} = E_0(\varepsilon) + E_1\int_0^t \dot{\varepsilon}\exp\left(-\frac{t-\tau}{\varphi_1}\right)\mathrm{d}\tau + E_2\int_0^t \dot{\varepsilon}\exp\left(-\frac{t-\tau}{\varphi_2}\right)\mathrm{d}\tau \tag{8}$$

式中：E_0、E_1、E_2 均为弹性常数；$\varphi_1=\eta_1/E_1$、$\varphi_2=\eta_2/E_2$，均为松弛时间。这些系数需要对实验数据进行拟合确定。

材料在冲击载荷作用下的破坏行为应当考虑损伤的影响，为了便于用实验曲线度量损伤，本研究用弹性模量的减弱来定义损伤[11]

$$D(\varepsilon_i) = [E_b - E(\varepsilon_i)]/E_b = e(\varepsilon_i)/E_b \tag{9}$$

式中：E_b 为曲线的初始弹性模量，$E(\varepsilon_i)$为曲线上任意一点与原点的割线模量，$e(\varepsilon_i)$为割线模量与初始模量的差。

(9)式对损伤的定义与其它通过模量的降低来度量损伤在形式上是一致的，但其实质有所不同。

一般的定义认为 $E(\varepsilon_i)$为应力-应变曲线上 i 点的弹性模量,应当通过 i 点的卸载和重新加载实验来确定,而对于冲击加载实验这是不可能的,只能通过"损伤冻结"实验来确定。

为了分析问题的方便,本研究不考虑损伤的发展机制,认为土体中的损伤是宏观各向同性的,因此考虑损伤的土体粘弹性本构关系为[11]

$$\sigma=(1-D)\cdot\left[E_0(\varepsilon)+E_1\int_0^t\dot{\varepsilon}\exp\left(-\frac{t-\tau}{\varphi_1}\right)\mathrm{d}\tau+E_2\int_0^t\dot{\varepsilon}\exp\left(-\frac{t-\tau}{\varphi_2}\right)\mathrm{d}\tau\right] \tag{10}$$

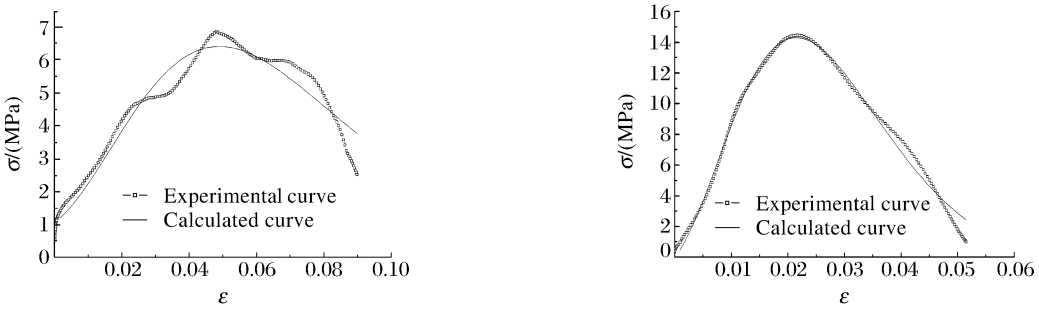
在恒定应变率下,(10)式可以简化为

$$\sigma(t)=(1-D)\cdot\left\{E_0(\varepsilon)+E_1\varphi_1\dot{\varepsilon}\left[1-\exp\left(-\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}\varphi_1}\right)\right]+E_2\varphi_2\dot{\varepsilon}\left[1-\exp\left(-\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}\varphi_2}\right)\right]\right\} \tag{11}$$

下面给出用(10)式计算的图 5 中几个典型的动态应力-应变曲线的数值模拟结果(见图 8)。

(1) 当应变率为 905 s^{-1}时,拟合参数为:$E_1=46$ MPa,$\varphi_1=0.37$ s^{-1},$E_2=691.2$ MPa,$\varphi_2=11.26$ s^{-1},$E_0=447.5$ MPa。

(2) 当应变率为 1 096 s^{-1}时,拟合参数为:$E_1=46$ MPa,$\varphi_1=0.37$ s^{-1},$E_2=468.7$ MPa,$\varphi_2=11.26$ s^{-1},$E_0=306.4$ MPa。



(a) $\dot{\varepsilon}=905$ s^{-1}　　(b) $\dot{\varepsilon}=1096$ s^{-1}

图 8　不同应变率下的实验与拟合的应力-应变曲线

Fig. 8　Experimental and calculated stress-strain curves at various strain rates

图 8 中的拟合曲线与实验曲线具有较好的一致性,尤其在前期吻合得相当好,表明本研究中所引入的损伤型粘弹性本构关系及参数确定方法适合所研究的土体材料。拟合参数表明,反映低应变率响应的 Maxwell 体的松弛时间 φ_1 数值较小,处于次要地位;反映高应变率响应的 Maxwell 体的松弛时间 φ_2 数值较大,处于主要地位。与混凝土相比,φ_1 不变,说明许多岩石、混凝土类材料具有比较一致的低应变率响应特性;φ_2 更大,说明所研究的土体材料对高应变率的敏感性比混凝土强烈。由于高应变率下松弛时间很长,积蓄的能量过多,将产生过破碎;相反,低应变率下的松弛时间较短,不会积蓄过多能量,不会产生过破碎。

5　结　论

(1) 通过采用 TSZ30-2.0 型应变控制式三轴仪,获得了土体材料在准静态下的应力-应变曲线,并利用 SHPB 实验装置,研究了不同高应变率下土体材料的冲击动态力学性质。与准静态加载相比,土体材料在冲击载荷作用下的动强度和动弹性模量都有明显的增加。

(2) 在所研究的应变率范围内,初始密度为 1.699 g/cm^3 的土体表现出明显的应变率效应。随着应变率的增加,即子弹冲击速度的增加,土体的冲击动强度显著增加。

(3) 基于所研究土体材料的冲击动态实验曲线,通过理论分析,对既有岩土动态本构模型进行了分析和初步的拟合后,引入了损伤型粘弹性本构模型,该模型的数值拟合曲线与实测动态本构曲线具有很好的一致性。

References:

[1] Bragov A M, Grushevsky G M, Lomunov A K. Use of the Kolsky Method for Confined Tests of Soft Soils [J]. Exp Mech, 1996, 36: 237-242.

[2] Bragov A M, Kotov V L, Lomunov A K, et al. Measurement of the Dynamic Characteristics of Soft Soils Using the Kolsky Method [J]. J Appl Mech Technol Phys, 2004, 45: 580-585.

[3] Bragov A M, Lomunov A K, Sergeichev I V, et al. Dynamic Compressibility of Clay and Loam [J]. J Phys IV Fr, 2006, 134: 275-280.

[4] Gaffney E S, Brown J A, Felice C W. Soils as Samples for the Split Hopkinson Bar [A]// Proceedings of the Second Symposium on the Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures [C]. Panama City Beach, FL, 1985: 397-402.

[5] Charlie W A, Ross C A, Pierce S J. Split-Hopkinson Pressure Bar Testing of Unsaturated Sand [J]. Geotech Test J, 1990, 13: 291-300.

[6] Veyera G E, Charlie W A, Ross C A. Strain-Rate Effects in Unsaturated Soils [A]//Proceedings of the Fourth International Symposium on the Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures [C]. Panama City Beach, FL, 1989: 17-21.

[7] Kolsy H. An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading [J]. Proc Phys Soc B, 1949, 62: 676.

[8] Wang L L. The Basis of Stress Wave [M]. 2nd ed. Beijing: National Defence Industry Press, 2010. (in Chinese)
王礼立. 应力波基础 [M]. 第 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2010.

[9] Wang L L, Yu T X, Li Y C. Advances in Impact Dynamics [M]. Hefei: University Press of Science and Technology, 1992: 88-101. (in Chinese)
王礼力, 余同希, 李永池. 冲击动力学进展 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1992: 88-101.

[10] Hu S S, Wang D R. The Dynamic Constitutive of Concrete under Impact [J]. Explosion and Shock Wave, 2002, 22(3): 242-246. (in Chinese)
胡时胜, 王道荣. 冲击载荷下混凝土材料的动态本构关系 [J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3): 242-246.

[11] Shan R L, Cheng R Q, Gao W J. Study on Dynamic Constitutive Model of Anthracite of Yunjialing Coal Mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2254-2263. (in Chinese)
单仁亮, 程瑞强, 高文蛟. 云驾岭煤矿无烟煤的动态本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2254-2263.

Dynamic Mechanical Behaviors of Soil under Impact Loads

ZHU Zhi-Wu[1,2], NING Jian-Guo[3], LIU Xu[1]

(1. *School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu* 610031, *China*;
2. *State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Lanzhou* 730000, *China*;
3. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The test of the impact characteristic of soil is made on split Hopkinson pressure bar at various strain-rates. The dynamic mechanics properties and the strain-rate effect of soil are discussed. Based on the characteristics of measured dynamic stress-strain curves, as well as preparatory simulation, a new viscoelastic damage model has been introduced. A linear spring is put to parallel to two Maxwell units with different relaxing time to express distinct plastic flow. In the constitutive model, one Maxwell unit with low relaxing time is used to describe the low strain-rate response of soil; and the other one with high relaxing time is used to describe the high strain-rate response of soil. Simulated stress-strain curves using the model is of good consistency with measured curves, and the simulated parameters indicate that the response of the low strain-rate of soil is just the same as that of concrete. Howevwe, the response of the high strain-rate of soil is much more violent than that of concrete.

Key words: soil; Hopkinson pressure bar; impact; dynamic; high strain-rate