维普资讯 http://www.cqvip.com

文章编号:1007-6069(2007)04-0061-05

动载作用下软弱岩土地质灾害流变动力学研究

胡 华,俞登荣,顾恒星
(厦门大学 土木工程系,福建 厦门 361005)

摘要:动态载荷(地震、海啸狂浪、振动等)是导致地质灾害最主要、最直接的外部动力,软弱岩土由缓慢流变演变为加速流变是灾害突发的外在表现形式。分析了我国近几年软弱岩土突发地质灾害的动力因素,探讨了动态流变力学理论方法在研究地质灾害突发机制、灾害监测预报等方面的研究思路与应用前景。测试了软弱岩土在动态载荷作用下的动态流变参数,建立了动态流变力学模型,推导出了新的流变方程。研究结果为进一步探讨突发地质灾害的临界力学条件、流变动力学方程和动力学关键指标等奠定了基础;对揭示动载作用下软弱岩土加速流变导致地质灾害的流变动力学机制,改进和完善灾害监测预报理论,提高预报的科学性和准确性有一定的意义。

关键词:流变动力学;动载荷;软弱岩土;地质灾害
中图分类号:P642.2 **文献标识码**:A

Research on rheologic dynamics for geologic disasters of soft rock-soil under dynamic loading

HU Hua, YU Deng-rong, GU Heng-xing
(Department of Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Dynamic loads such as earthquake, tsunami, raging billow, vibration and so on are mainly exterior power inducing geologic disaster, the accelerating rheologic phenomena of soft rock-soil is the appearance of bursting out disaster. Combining with the practice of soft rock-soil bursting out geologic disaster, the author discusses the technical thinking and prospect by using dynamic rheologic mechanics to study the mechanism and forecast of bursting out disaster in this article. The dynamic rheologic parameters of soft rock-soil are tested under dynamic loading, the dynamic rheologic mechanical model of soft rock-soil is established, and the rheologic equation is deduced. It settles foundation for us to deeply research critical mechanics condition, rheologic dynamic equation and dynamic key index of bursting out disaster. All these have certain theoretical and actual meaning for us to find out the rheologic dynamic mechanism of bursting out disaster under dynamic loading, improve and perfect forecast theory.

Keywords: rheologic dynamics; dynamic loading; soft rock-soil; geologic disaster

我国地形地貌多样、地质条件复杂、软弱岩土普遍覆盖、自然气候差异等多元客观因素构成了突发地质灾害的前提条件,使我国成为地质灾害多发的国家之一。软弱岩土具有流变特性,一般在静载作用下流变行为缓慢,短期内不足以产生严重的岩土地质灾害,但在外部动态载荷如地震、海啸狂浪、洪水冲刷、人类活动

收稿日期: 2006-12-30; **修订日期**: 2007-07-14
基金项目:国家自然科学基金资助项目(50678155);福建省自然科学基金资助项目(D0410008)
作者简介:胡华(1968-),男,副教授,博士,主要从事岩土工程、地质灾害等研究. E-mail: xmhuhua@sina.com

维普资讯 http://www.cqvip.com

造成的各种振动等强烈作用下，软弱岩土会加速流变，导致山体滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷等严重的地质灾害。可见，动态荷载的强烈作用是导致岩土地质灾害主要的、直接的外部动力因素，软弱岩土由原来的缓慢流变转变为快速流变是突发岩土地质灾害的外在表现方式。传统研究一般采用静力学和稳态静力加载方式研究软弱岩土流变特性及其对工程稳定性的影响，忽视了自然现象中实际存在的动态载荷激励作用和软弱岩土动态流变行为，难以准确揭示其突发机理和大位移流动变形规律，研究结果与实际情况产生偏差。因此，结合自然界中经常产生的动态作用力开展地质灾害的流变动力学机制等方面的基础研究，更具有实际指导意义；对防治和减少岩土地质灾害、提高灾害监测预报的准确性和科学性等具有重要的理论意义。

1 我国地质灾害频繁发生，危害严重

我国幅员辽阔，江、河、湖等水系发育，海岸线漫长。境内山川、丘陵、盆地遍布，地形地貌多样，且岩土地质条件复杂多变，软弱岩土覆盖面极其广泛。全国范围内自然气候和地表岩土性质随东西南北各不相同，沿长江流域地区雨季长、降水强度大，水量集中，且气候湿热，风化作用强烈，导致斜坡上残积物发育，丘陵山地、河流侵蚀作用强烈；西北地区以黄土高原及戈壁沙漠为主，且呈松散体状态，自然承载力和稳定性能较差，不利于开展各种土木工程建设；东南沿海地区，大江大河纵横交错，江河堤坝和沿海岸线工程长期被浸泡、浪击和冲刷，岩土体力学强度降低，整体稳定性下降。因此，地形地貌多样、地质条件复杂、软弱岩土普遍覆盖、自然气候差异等多元客观因素构成了突发地质灾害的前提条件，使我国成为岩土地质灾害多发的国家之一[1]。

据国土资源部地质环境公报[2]，2006年全国共发生各类地质灾害102 804起，全年因地质灾害共造成663人死亡，失踪111人，受伤453人，直接经济损失44.2亿元。2005年全国发生直接经济损失50万元以上的地质灾害854起，造成578人死亡，失踪104人，受伤339人，直接经济损失36.5亿元。可见，我国地质灾害频繁发生，危害严重，对国家基本建设和人民生命财产造成了巨大的经济损失，形势依旧严峻。

2 地质灾害发生机理研究现状

国内外许多学者对岩土地质灾害的发生机理、监测预报理论与技术等进行了大量的研究工作[2-4]，引入了耗散结构理论、突变论、分形理论、人工神经网络等非线性理论。监测预报方法有工程地质综合集成理论(EGSM)、“3S”技术等。预报判据主要有[5]：安全稳定性系数、可靠性概率、声发射参数、塑性应变率、变形速率、临界降雨强度、宏观迹象和其它相关的信息等。但总体而言，灾害监测预报的理论依据只是建立在对岩土体一些表象外观特征的静力学、运动学理论分析基础上，尤其是灾害监测预报的指标体系与判据仅以运动学指标和其它影响因素为依据，对动力学的加速度等指标参数研究不多或研究深度不够，关键的监测指标与标志没有确立，因此处于初步研究阶段。由于在岩土地质灾害监测预报中没有考虑动态载荷作用的流变动力学关键指标，忽视了问题的核心和关键要素，使预报依据不充分，导致实际预报的准确率低，造成了减灾防灾的被动局面。

2004年，国土资源部在国家地质灾害防治领域中长期科技发展规划报告中指出[6]“突发性岩土地质灾害诱发机制、形成机理研究没有突破性进展，理论基础相对薄弱，仅局限于一般总结归纳，使得预测预报理论难以突破。突发性岩土地质灾害监测预报的指标体系与判据还处于起步阶段，关键的监测指标与标志没有确立。因此，地质灾害突发机制、灾害预测预报判据、监测预报技术应成为科技攻关的重点突破口。”当前国家基础设施建设、实施西部开发、中部崛起、东南沿海大发展、长江三峡、西气东输、南水北调、西藏铁路等国家大型重点工程都涉及到软弱岩土层地基稳定性、岩土工程灾害和工程环境等问题，工程建设不同程度地影响和破坏了原有的岩土地质环境，降低了天然岩土体的力学性能和自身稳定性。如果没有相应的保护和治理措施，破坏后的岩土体在外部强烈的动态荷载扰动作用下，容易引发严重的地质灾害，对工程的安全性和稳定性构成威胁。可见，大规模的工程建设增加了地质灾害突发的可能性，进一步加大了减灾防灾的难度[7]。本研究从实际情况出发，提出“动载作用下软弱岩土突发重大岩土地质灾害的流变动力学机制研究”课题，可以弥补传统研究的不足，因而研究结论既有理论意义，又有实际应用价值。

维普资讯 http://www.cqvip.com

3　突发地质灾害的流变动力学初步研究

3.1　流变动力学研究思路

在福建省自然科学基金和国家自然科学基金的资助和支持下,课题综合运用岩土力学、岩土结构物理学、动态流变力学、连续介质动力学、减灾防灾学等多学科的基本理论,利用物理模型与数学模型相结合、动态激励与静力加载对比实验相结合、微观结构与宏观流变特性相结合等综合研究手段,采用现场调查、实验对比、微观结构显微分析等多种跨学科交叉研究方法,从动态流变力学的角度揭示软弱岩土突发岩土地质灾害的流变动力学机制,寻求动力学关键指标,补充和完善现有监测预报依据,构成新的地质灾害"动力学评价判别指标体系"。研究成果将为维护岩土工程稳定性、预防和控制岩土流变滑移,减少岩土工程事故等提供新途径;为岩土工程、建筑工程的设计提供新技术方法;为改进传统的灾害监测与预警方式,提高岩土地质灾害监测预报的科学性、准确性和及时性奠定基础;将在保护岩土地质环境、减灾防灾、灾害监测预报、社会经济发展等方面发挥巨大的作用,具有广阔的应用前景。

3.2　突发地质灾害的动力分析

我国工业与民用建筑、道路桥梁、岩土与地下工程、水利设施、海防与堤防等工程大部分建立在软弱岩土地基上。软弱岩土具有流变特性,在外部动态载荷,如地震、海啸狂浪,洪水冲刷、人类活动产生的各种振动等强烈作用下,软弱岩土会加速流变,引发岩土滑动失稳、地基沉降倾斜、大坝与桥梁及建筑物等工程开裂倒塌、堤岸崩塌或岸滑等工程安全事故和灾害。与此同时,与稳定载荷作用相比,动态作用力更容易加速软弱岩土流变,引发山体滑坡、泥石流、地面沉降(陷)、海岸侵蚀等地质灾害。地震滑坡的发生是地震作用与震区的性质、地貌、降雨、地下水等各种环境因素综合作用的结果,是地震灾害中的主要次生灾害。山岳地区强烈地震时,地震诱发的地质灾害比地震直接造成的危害还要大。我国大量的岩土边坡地震崩塌与滑动主要发生在多震的西部地区,其中,最多的为云南和四川两省[8]。在1216－1996年记载较为详细的125次地震中,西部地区占75%,引发相应的地质灾害中,西部地区占77%[8]。据国土资源部地质环境公报资料[1],矿业活动容易诱发和导致矿区地面塌陷、地面沉降、滑坡、泥石流、崩塌、地裂缝和水土流失等地质灾害。强降雨也是突发性地质灾害最主要的诱发因素,山区暴雨或持续性降雨常会形成大量的群发性滑坡和泥石流灾害。公报资料表明,90%以上的岩土地质灾害是由地震、台风暴雨、狂浪、洪水冲刷、外部振动等引发和导致。因此,动态载荷作用成为加速软弱岩土流变,并导致岩土地质灾害突发的最直接的外部动力和主要诱发因素。

3.3　软弱岩土动态黏弹性测试

软弱岩土具有流变特性,在静载作用下为稳定缓慢流变,表现为黏塑性体。但如果在外部动态载荷作用下,在动态加速流变的过程中表现为黏弹塑性的流变力学特性。动态黏弹性流变参数主要有储能模量 G'、损耗模量 G''等。储能模量 G'与以弹性能形式储存起来,并在周期性形变中释放出来的能量有关,反映弹性性能特性;损耗模量 G''与在形变时以热的形式耗散掉的能量有关,反映黏性性能特征。

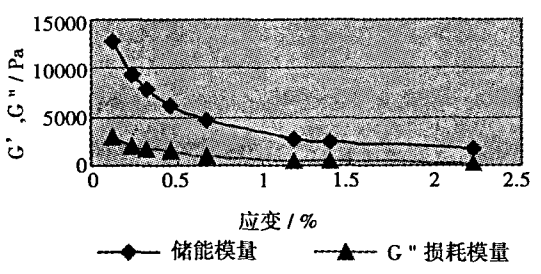


图1　频率10Hz时的黏弹性参数

Fig. 1　Viscoelastic parameters for frequency 10 Hz

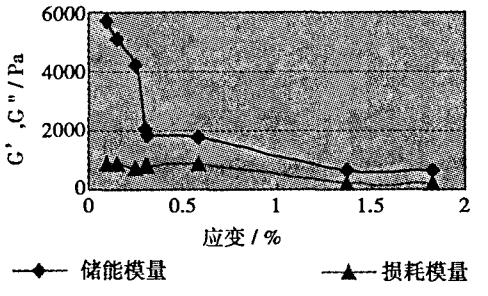


图2　频率1Hz时的黏弹性参数

Fig. 2　Viscoelastic parameters for frequency 1 Hz

以厦门地区淤泥质软土为例,选用MCR－300型流变仪测试含水率为24%的淤泥质软土在动态条件下的黏弹性参数,测试温度为25℃。在10 Hz,1 Hz动态频率条件下测试了动态黏弹性参数。其中,黏弹性参数随动态剪切应变的关系曲线见图1、图2。可见,淤泥质软土在动态载荷作用下其流变过程中表现为黏弹

维普资讯 http://www.cqvip.com

性体特征，储能模量 G'、损耗模量 G''随动态剪切应变的增大而减小，且储能模量大于损耗模量，表明在外部动态荷载作用下，其力学响应过程中弹性特征超过黏性特性。

3.4 动载作用下软土黏弹塑性流变模型与流变方程

软土具有一定的黏度和初始剪切力，当剪切外力小于初始剪切力时，不发生流动变形，大于该值时，开始发生不可恢复的塑性流动，但由于黏性作用，塑性流动的速度只能逐渐加大，在塑性流动中又表现出黏性。故在稳态载荷作用下表现为黏塑性体。

但在地震、快速振动、动态冲击和动态剪切等动态载荷作用下，弹性效应会发生重要的作用，表现出弹性体的力学特性。由于黏性作用，其弹性变形不是立即发生，在外力卸除后，变形也不是立即恢复，而是逐步恢复为零，弹性中表现出黏性，故为黏弹性体。黏性既存在于屈服前的弹性中，也存在于屈服后的塑性变形中。因此，可以作为黏弹塑性体处理。综上所述，软土在动态载荷作用下，屈服前不发生流动变形，表现为黏弹性固体特性，因此，首先在模型中考虑了用弹性元件与黏性元件并联后形成的黏弹性固体模型。屈服后表现为黏弹塑性体，开始发生塑性变形流动，表现为黏弹塑性特性。故在原模型的基础上，将一个滑块和黏缸并联后再与前面的固体模型串联，这样就可以建立起如图3所示的反映软土在外部动态载荷作用下的黏弹塑性流变力学模型[9]。其中 τ_b 为初始屈服剪切应力，η_1 为软土在动态外力作用下的弹性黏度；η_2 为软弱岩土在稳定剪切力作用下的塑性黏度。

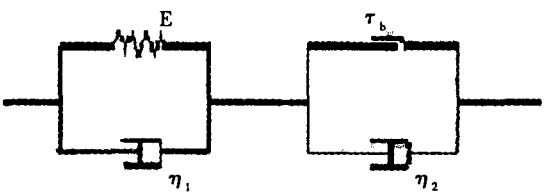


图3 动态载荷作用下软土的黏弹塑性流变力学模型

Fig. 3 Viscoelastic - plasticity rheologic mechanics model of soft rock - soil under dynamic loading

当 $\tau > \tau_b$ 时，黏塑性体参与流变，$\tau - \tau_b$ 使黏塑性体发生塑性流动。表现为黏弹塑性体。设黏弹性体和黏塑性体的位移分别为 γ_1、γ_2，剪应力分别为 τ_1、τ_2，整个系统的位移 γ。剪应力为 τ，则有：

$$\tau = \tau_1 = \tau_2; \qquad \gamma = \gamma_1 + \gamma_2; \qquad \dot{\gamma} = \dot{\gamma}_1 + \dot{\gamma}_2; \qquad \ddot{\gamma} = \ddot{\gamma}_1 + \ddot{\gamma}_2$$

对黏弹性部分：$\tau = E\gamma_1 + \eta_1\dot{\gamma}_1^n$，变形有

$$\dot{\gamma}_1 = \left(\frac{\tau - E\gamma_1}{\eta_1}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{1}$$

两边求导数，得：

$$\ddot{\gamma}_1 = \frac{1}{n}\left(\frac{\tau - E\gamma_1}{\eta_1}\right)^{\frac{1-n}{n}}\left(\frac{\dot{\tau} - E\gamma_1}{\eta_1}\right) \tag{2}$$

对黏塑性部分：$\tau - \tau_b = \eta_2\dot{\gamma}_2^n$，变形有

$$\dot{\gamma}_2 = \left(\frac{\tau - \tau_b}{\eta_2}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{3}$$

两边求导数，得

$$\ddot{\gamma}_2 = \frac{1}{n}\left(\frac{\tau - \tau_b}{\eta_2}\right)^{\frac{1-n}{n}}\left(\frac{\dot{\tau}}{\eta_2}\right) \tag{4}$$

将(3)式代入等式 $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_1 + \dot{\gamma}_2$ 得

$$\dot{\gamma}_1 = \dot{\gamma} - \left(\frac{\tau - \tau_b}{\eta_2}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{5}$$

由式(1)得：

$$\frac{\tau - E\gamma_1}{\eta_1} = \dot{\gamma}_1^n = [\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_2]^n = \left[\dot{\gamma} - \left(\frac{\tau - \tau_b}{\eta_2}\right)^{\frac{1}{n}}\right]$$

该方程变形有：

$$\left(\frac{\tau - E\gamma_1}{\eta_1}\right)^{\frac{1-n}{n}} = \left[\dot{\gamma} - \left(\frac{\tau - \tau_b}{\eta_2}\right)^{\frac{1}{n}}\right]^{1-n} \tag{6}$$

将式(2)，(4)代入关系式 $\ddot{\gamma} = \ddot{\gamma}_1 + \ddot{\gamma}_2$，有：

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$\ddot{\gamma} = \frac{1}{n}\left(\frac{\tau - E\gamma_1}{\eta_1}\right)^{\frac{1-n}{n}}\left(\frac{\tau - E\dot{\gamma}_1}{\eta_1}\right) + \frac{1}{n}\left(\frac{\tau - \tau_b}{\eta_2}\right)^{\frac{1-n}{n}}\left(\frac{\dot{\tau}}{\eta_2}\right) \tag{7}$$

将(5)式和(6)式代入上式,且当流变指数 n 为 1 时,流变方程为:

$$\eta_1\eta_2\ddot{\gamma} = (\eta_1 + \eta_2)\dot{\tau} + E(\tau - \tau_b) - E\eta_2\dot{\gamma} \tag{8}$$

式中:γ 为整个系统的位移;τ 为动态荷载作用力;τ_b 为初始屈服剪切应力;η_1 为软弱岩土在动态外力作用下的弹性黏度;η_2 为软弱岩土在稳定外力作用下的塑性黏度。

动态载荷作用下软土动态流变模型与新流变方程表明,软土突发岩土地质灾害的大位移流动变形规律与上述参数存在必然的联系,为进一步研究软弱岩土加速流变动力学方程、流变临界失稳条件、灾害突发的动力学关键指标等奠定了坚实的基础。

岩土地质灾害突发机理是我国乃至世界性难题。本文从动态流变力学角度提出一些思考和探索,是一种全新的思路和尝试,供各位同仁参考借鉴。虽然目前的研究只是前期阶段,但大量的工作即将展开,希望能获得一些更有科学理论意义和实用价值的研究成果。

4　结论

(1)软弱岩土具有流变性,一般在静载作用下流变行为缓慢,但在外部动态载荷如地震、海啸狂浪,水流冲刷、振动等强烈作用下,会加速流变行为,导致突发岩土地质灾害。可见,动态荷载的强烈作用是导致岩土地质灾害最主要、最直接的外部动力因素。因此,重点抓住动态载荷动力学因素,从动态流变力学角度研究地质灾害发生机理是一种全新的技术途径,更有针对性和实际指导意义。

(2)软弱岩土由原来的缓慢流变转变为快速流变是岩土地质灾害突发的外在表现形式。从动态流变力学角度研究大位移流动变形规律,研究对策和思路符合软弱岩土流变灾害的变形破坏特点和客观实际情况。

(3)理论分析和实验测试显示,淤泥质软土具有储能模量 G' 和损耗模量 G'',表明在动态载荷作用下软土既具有弹性特征,又具有黏性特征,因此在动态外力作用下,可作为黏弹塑性体处理,并建立了相应的流变模型。

(4)动态载荷作用下软土动态流变模型与新流变方程表明,软土突发岩土地质灾害的大位移流动变形规律与动态荷载作用力 τ、初始屈服剪切应力 τ_b、软土在动态外力作用下的弹性黏度 η_1、软土在稳定外力作用下的塑性黏度 η_2 等参数存在一定的联系,为进一步揭示软弱岩土突发地质灾害的流变动力学机制,研究软弱岩土加速流变动力学方程、流变临界失稳条件、灾害突发的动力学关键指标等奠定了坚实的基础。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国土资源部地质环境公报[R]. 北京:国土资源部,2004 年,2004 年,2006 年.

[2] 许强等. 外部扰动诱发地质灾害的机理分析[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(2):280 - 284.

[3] 苏志辉,陈旭辉. 闽南沿海地质灾害防止对策[J]. 地质灾害与环境保护,2003,14(1):1 - 3.

[4] 刘传正. 突发性地质灾害的监测预报问题[J]. 水文地质工程地质,2001,(2):1 - 4.

[5] 李秀珍等. 滑坡预报判据研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2003,14(4):5 - 11.

[6] 吴树仁等. 地质灾害防治领域重大科技问题讨论[J]. 地质力学学报,2004,(3):1 - 6.

[7] 许强等. 地质灾害发生时间与空间的预报[J]. 山地学报,2000,18(2):112 - 116.

[8] 李忠生. 地震危险区黄土滑坡稳定性研究[M]. 北京:科学出版社,2004:1 - 5.

[9] 胡华. 动载作用下淤泥质软土流变模型与流变方程研究[J]. 岩土力学,2007,28(2):237 - 240.

[10] 刘大安等. 地质灾害防治监测信息工程数据运筹技术[J]. 自然灾害学报,2001,(1):62 - 67.

[11] 陈明金等. 基于 GPRS 技术的地质灾害无线遥测系统[J]. 自然灾害学报,2004,(3):68 - 72.

[12] Wu S, Jin Z, et al. Investigations and assessment of the landslide hazards of Fengdu county in the reservoir region of the Three Gorges Project on the Yangtze River[J]. Environmental Geology, 2004,(45):560 - 566.

[13] Dai F C, et al. landslide risk assessment and management: An overview[J]. Engineering geology, 2002,(64):65 - 87.