

文章编号:1004-4574(2013)03-0229-07

## 阳坝落石对输油管道的冲击分析

王东源<sup>1,2,3</sup>, 赵宇<sup>1,2</sup>, 王成华<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院地表过程与山地灾害重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**兰成渝成品油管道在甘肃康县段遭受了严重的落石灾害,其中08年汶川地震触发的阳坝落石造成管道破坏和巨大经济损失。根据对阳坝落石现场的调查和管道遭受落石冲击的分析,为管道在康线段的减灾防灾提供理论依据和分析方法。系统对比分析了国内外普遍采用的5种落石冲击力算法,并推荐了最出符合实际的算法。通过现场取样和室内实验获取土体力学强度参数,经与工程地质手册推荐的经验数据比对后选择最适合的参数进行计算。选取Marston提出的沟内埋管竖直土压力计算模型分析管道的应力与变形,结果表明:(1)事故原因是管材自身的强度和变形不足以抵抗落石产生的巨大冲击荷载,应力和变形均失效。(2)在落石区进行管道设计时,建议引入日本道路公团方法计算落石最大冲击力。(3)管道在康县区域内再次遭受崩塌灾害的概率很大,有必要对区域内崩塌灾害点进行重点排查,做好相应的管道防护措施。

**关键词:**崩塌;落石;埋地管道;冲击力;计算方法

**中图分类号:**P642.21;TE973

**文献标志码:**A

## Analysis of rockfall impact on buried oil pipeline at Yangba

WANG Dongyuan<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Yu<sup>1,2</sup>, WANG Chenghua<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;

2. Key Laboratory of Mountain Surface Process and Hazards, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China;

3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Lanzhou-Chengdu-Chongqing end product oil pipeline suffered serious rockfall disaster in the section of Kangxian County, Gansu Province. Yangba rockfall triggered in 2008 Wenchuan earthquake seriously damaged the pipeline and brought about enormous property loss. Based on the investigation of rockfalls, this study provided an analysis method and theoretical basis for the prevention of rockfall disasters. In this paper, five calculation methods of rock fall impact force commonly used at home and abroad were systematically compared and analyzed, and the most realistic algorithms were recommended. Through field investigation and laboratory experiments, the mechanical strength parameters of the soil were obtained. Then the experimental data and empirical data recommend in engineering geological manuals were compared, and the most suitable parameters were selected to calculate. The trench pipe vertical soil pressure calculation model proposed by Marston was used to analyze pipeline's stress and deformation. Results show that: first, the pipe strength and deformation are not enough to resist the intensive impact of falling rocks, which would cause the stress and deformation failure and pipeline damage; second, the method recommended by the Japanese Road Association is advised to calculate the maximum rock fall impact force in collapse zone; third, collapse hazard of the pipeline is likely to occur again in Kangxian

收稿日期:2012-09-10; 修回日期:2012-12-13

基金项目:中国石油集团工程设计有限责任公司科研基金项目(CPE-2011-06)

作者简介:王东源(1987-),男,硕士,主要从事岩土力学研究. E-mail:wangdongyuan@imde.ac.cn

通讯作者:赵宇,副研究员,博士. E-mail:zhaoyu@imde.ac.cn

County, and investigation of collapse hazard points in the region is necessary for take effective protection measures in advance.

**Key words:** collapse; rockfall; buried pipeline; impact force; calculation method

兰(州)—成(都)—渝(重庆)成品油管道(以下简称兰成渝管道)是我国第一条长距离成品油输送管道,是国家实施西部大开发战略十大重点工程之一。兰成渝管道于 2002 年 9 月投产,年累计输送原油  $500 \times 10^4$  t,在国民经济中发挥着巨大的作用。但兰成渝管道敷设的地质、地貌环境复杂,沿途发育着众多地质灾害,特别是在甘肃省康县段属于灾害次密集发育区<sup>[1]</sup>。受 2008 年汶川地震的影响,康县段阳坝发生体积近  $1\ 000\ m^3$  的崩塌(图 1、图 2),其中最大块石直径 4 m,近 50 t 的巨石将兰成渝管道接头处砸开,造成柴油泄漏。除此以外,管道还面临着滑坡、泥石流和不稳定斜坡等众多地质灾害的威胁,在此区域管道遭受地质灾害非常典型。本文以阳坝落石为例分析兰成渝管道受到的冲击影响。

崩塌落石主要指处在悬崖或高陡斜坡上的岩土体,在地震动和地表破裂的作用下发生断裂、倾倒,进而失稳脱离母体以翻滚、跳跃、自由落体等形式跌落到坡下的块体运动现象<sup>[2]</sup>。目前在埋地管道遭受落石冲击分析方面主要存在 3 方面的问题,一是落石冲击力算法合理性选取问题:国内可参照的算法仅有路基规范方法<sup>[3]</sup>、隧道手册方法<sup>[4]</sup>、杨其新等<sup>[5]</sup>方法及其改进型<sup>[6]</sup>;国外常采用基于落石现场冲击力试验的半经验半理论算法<sup>[7]</sup>,例如日本道路公团方法<sup>[8]</sup>和瑞士方法<sup>[9]</sup>。针对上述算法在实际工程应用中暴露出的冲击力计算不准,造成结构失效等问题,本文将上述算法进行了系统对比分析,推荐出符合实际的算法用以分析落石对管道的冲击作用,充分保证今后类似工程分析结果的准确性。二是算法中土体力学强度参数的选取问题:土体力学参数是落石冲击力计算和埋地管道受力分析的关键和难点,选取合适、准确的强度参数至关重要<sup>[10]</sup>。在各种工程实例分析研究中普遍采用经验法选取土体力学参数<sup>[11]</sup>,而获取土体力学性能参数最为可信的方法是室内试验法<sup>[12]</sup>,仅仅凭借经验法无法保证参数选取准确性。因此本文在野外调查时进行了阳坝落石现场土体取样工作,通过室内分析土体组成成分和力学性能参数,同时与工程地质手册推荐的经验数据对比后选择适合的力学参数进行计算。三是埋地管道遭受冲击力的计算模型:鉴于目前对埋地管道遭受落石冲击的研究主要是管道遭受冲击荷载作用下的力学性状研究,至今没有成熟的理论,但是 Marston 理论<sup>[13]</sup>作为分析埋地管道受力基础用以计算管道外荷载效果很好,被广泛接受并使用。因此本文选取沟内埋管竖直土压力计算模型分析管道的力学性状。



图 1 管道经过康县崩塌区

Fig. 1 Pipeline through collapse area in Kangxian County

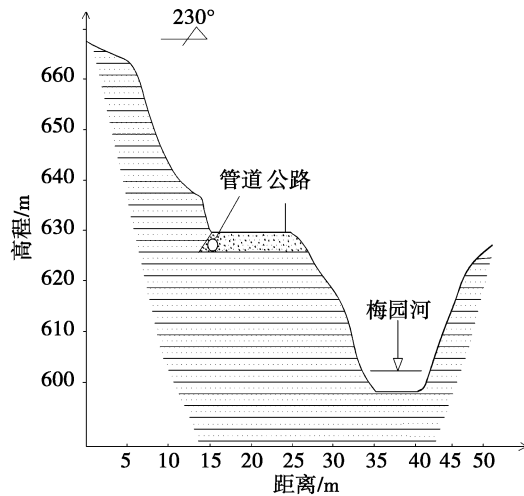


图 2 康县崩塌剖面图

Fig. 2 Section drawing of collapse in Kangxian County

### 1 研究区概况

阳坝落石位于兰成渝管道甘肃省康县段内,该段线路地处西秦岭东西向褶皱带发育的陇南山地,是秦巴山区、青藏高原、黄土高原三大地形交汇区域。管线区域在境内海拔  $1\ 000 \sim 1\ 800\ m$ ,相对高差  $500 \sim 1\ 000$

m,呈现坡陡谷深、地形强烈起伏的地貌特征。管道主要沿河谷、山脊敷设,沿线穿越河谷地貌、低山、中山等多个地貌单元,地质灾害在部分管段较为发育。经调查发现管道沿线主要地质灾害类型为崩塌、滑坡、泥石流和不稳定斜坡等,其中崩塌灾害占灾害总数的50%。崩塌主要为基岩崩塌,在空间分布上呈现出沿河床两侧和交通干线边坡集中分布的规律。主要原因是管道和交通干线在施工时进行了人工削坡,改变了天然斜坡的平衡条件,侧壁较陡容易产生崩塌。具体的灾害种类、规模和数量如表1所示,表中各种地质灾害的规模(易发程度)依据《公路工程地质勘察规范》(JTG C20-2011)进行划分。

表1 兰成渝成品油管道康县段地质灾害统计表

Table 1 Statistics of geological disasters in Kangxian County section for Lanzhou-Chendu-Chongqing end product oil pipeline

地质灾害种类	不稳定斜坡		泥石流		滑坡		崩塌		合计
	规模(易发程度)	小型	小型	中型	小型	中型	大型		
数量/个		1	3	3	7	13	1	28	
百分比/%		3.6	10.7	10.7	25	46.4	3.6	100	

从表1可以看出,研究区域兰成渝管道遭受崩塌等地质灾害的风险极大,管线的安全运营存在潜在危险,未来再次遭受落石撞击的概率很大。因此研究本区域内落石对埋地管道的冲击影响就显得很重要,对于管线的安全防护具有指导意义。

## 2 分析方法

### 2.1 冲击力算法选取

在阳坝落石冲击兰成渝管道事件中,落石冲击力是威胁管道安全的主要荷载之一。本文选择国内外代表性的5种冲击力算法进行系统对比分析,目的是寻找最符合实际的算法,将其引入落石对埋地管道冲击分析中使用。

5种代表性的冲击力算法分别为路基规范方法<sup>[3]</sup>、隧道手册方法<sup>[4]</sup>、杨其新等<sup>[5]</sup>方法、日本道路公团方法<sup>[8]</sup>和瑞士方法<sup>[9]</sup>。以上算法之间的理论基础、计算模式差异较大,为讨论各算法公式的异同、合理性和实用性,本文进行系统对比分析。依据各算法的假定,将落石假定为均质球体,为对比各算法在不同质量、落距、管道埋深条件下的冲击力异同,设定如下条件:

(1)落石直径设定0.5 m,1.0 m,1.5 m,2.0 m,2.5 m,3.0 m共6个落石直径级差。

(2)落距设定5 m,10 m,15 m,20 m,25 m,30 m共6个级差,对应的速度约为10~25 m/s。

(3)管道埋深取0.5 m,1.0 m,1.5 m,2.0 m,2.5 m共5个级差。

(4)管道填土为黏土层,重度取19 kN/m<sup>3</sup>,内摩擦角取25°,弹性模量为35 MPa,变形模量为2 500 kPa,拉梅常数取1 000 kN/m<sup>3</sup>,泊松比为0.35,落石重度取27 kN/m<sup>3</sup>。

在上述设定的条件下进行五种冲击力算法的系统对比分析,由于不同直径的落石在不同算法中所得到的冲击力结果对比的变化规律类似,现以直径1.5 m为例说明(图3)。

从图3可以看出5种算法的结果都反映了冲击力随着落石体积和落距的增加而不断增大的趋势,但是不同算法的计算结果差异极大。同等条件下的冲击力计算结果差异达数倍,甚至几十倍。为了使各算法计算值之间存在的差异直观明了表现出来,以计算值最小的隧道手册法为比较对象,将其值假设为1,其他算法计算值与其倍数关系如表2所示。特别地,在落距为5m情形下,日本算法计算结果是隧道手册算法计算结果的27.9倍;在其他落距计算中,二者冲击力计算结果差异均在几十倍量级。总体上以日本道路公团方法最大,其次为瑞士方法,隧道手册方法最小,路基规范方法和杨其新等方法居中。通过对每种算法的理论基础分析:隧道手册方法实质上是利用冲量定理求得的平均冲击力,而非所想要得到的最大冲击力;杨其新等方法是基于冲击过程落石加速度变化而建立的算法,求得的也是平均冲击力;路基规范方法理论基础为功能原理,实际求得的也是平均冲击力。以上3种算法所得计算结果偏小,对于实际管道工程的设计而言处于偏危险状态,建议摒弃。日本道路公团方法和瑞士方法均是基于落石现场实验实测冲击力结果所建立,所反映的冲击力即为最大冲击力,这也是它们算得结果远大于其他3种算法的原因。

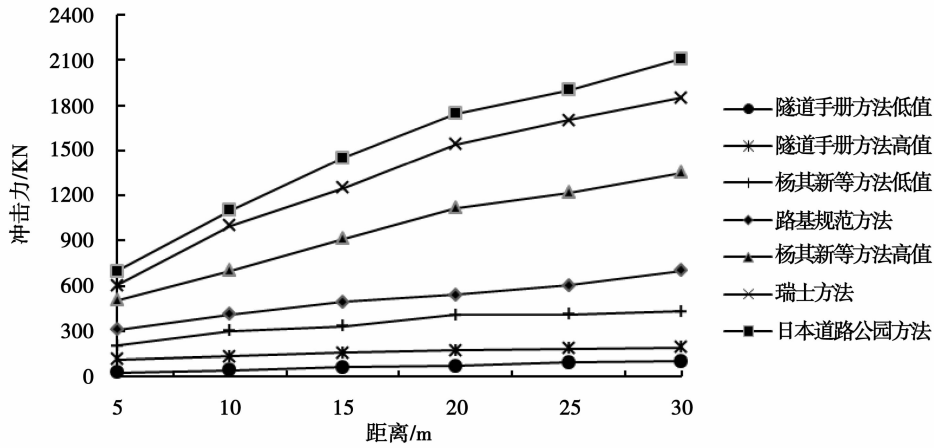


图 3 直径 1.5 m 落石冲击力比较

Fig. 3 Comparison of impact force of rock fall with 1.5 m diameter

表 2 各种算法冲击力倍数表

Table 2 Multiples table of impact force obtained from different algorithms

算法落距/m	隧道手册方法	路基规范方法	杨其新等方法	瑞士方法	日本道路公园方法
5	1	12.4	20.2	24	27.9
10	1	10	17.1	24.4	26.8
15	1	7.9	14.7	20.2	23.4
20	1	7.6	15.7	21.7	24.6
25	1	6.5	13.3	18.4	20.7
30	1	6	7	18.5	21.1

日本道路公园方法计算式为：

$$F_{max} = 2.018 \cdot m^{\frac{2}{3}} \cdot \lambda^{\frac{2}{5}} \cdot H^{\frac{3}{5}} \cdot \beta^{-1}, \tag{1}$$

$$\beta = \left( \frac{h}{L} \right)^{-0.58} \tag{2}$$

式中： $F_{max}$ 为落石最大冲击力，kN； $m$ 为落石质量，t； $\lambda$ 为拉梅常数，建议取 1 000 kN/m<sup>3</sup>； $H$ 为落石自由下落高度，m； $h$ 为管道埋深，m； $L$ 为落石直径，m。

瑞士方法计算式为：

$$F_{max} = 1.765 \cdot M_E^{\frac{2}{3}} \cdot R^{\frac{1}{3}} \cdot (QH)^{\frac{3}{5}} \tag{3}$$

式中： $F_{max}$ 为落石最大冲击力，kN； $M_E$ 为通过荷载板试验得到的缓冲土层变形模量，kPa； $R$ 为落石等效半径，m； $Q$ 为落石重量，kN； $H$ 为落石自由下落高度，m。

日本道路公园方法相比较瑞士方法的优越性在于考虑了管道埋深  $h$  与落石直径  $L$  的关系。因此在分析阳坝落石对兰成渝管道冲击时引入日本道路公园方法使用。

### 2.2 管道受力变形分析

(1)管道顶部受到的竖直土压力为方便分析计算，将落石撞击埋地管道的方式假设为落石垂直撞击埋地管道的正上方，因而只需要考虑竖直土压力的作用。根据散体极限平衡条件以及 Marston 提出的计算模型<sup>[3]</sup>可以得出埋地管道所受到的管顶单位长度垂直总土压力为：

$$N = D \left[ \frac{B(\gamma - \frac{2c}{B})}{2K \tan \varphi} (1 - e^{-2k \frac{d}{B} \tan \varphi}) + q e^{-2k \frac{d}{B} \tan \varphi} \right] \tag{4}$$

式中， $\gamma$ 为上覆土层密度，kg/m<sup>3</sup>； $c, \varphi$ 分别为填土的黏聚力(kPa)与内摩擦角(°)； $B$ 为沟槽宽度，m； $K$ 为主动土压力系数； $D$ 为埋管外径，m； $d$ 为地表到埋管顶部的填土深度，m； $q$ 为填土表面的均布荷载，kPa。

(2)冲击力引起的管顶分布荷载

假定落石最大冲击力的作用面积为落石等效直径为  $2R$  的圆形区域，并向缓冲土层深处扩散，则作用在管道顶面的分布荷载为：

$$q = \frac{F_{\max}}{\pi(R+h \tan \varepsilon)^2} \quad (5)$$

式中:  $F_{\max}$  为落石最大冲击力, kN;  $R$  为落石等效半径, m;  $h$  为管道埋深, m;  $\varepsilon$  为扩散角, 目前隧道手册中建议扩散角取  $40^\circ$ 。

由式(4), (5)可以得到在落石冲击作用下埋地管道上部总荷载为:

$$Q = D \left[ \frac{\gamma(D+b) - 2c}{2K \tan \varphi} (1 - e^{-2k \frac{d}{D+b} \tan \varphi}) + q e^{-2k \frac{d}{D+b} \tan \varphi} \right] \quad (6)$$

### (3) 埋地管道应力分析

输油气埋地管道多属于薄壁钢管, 通过对管道的力学分析可知, 管道主要受到环向应力和环向弯曲应力作用, 前者是由管道内压引起的, 后者是由外部土壤荷载和冲击荷载引起的。管道的强度主要受两种应力相互叠加的影响, 两种应力的计算可以通过以下公式计算得出:

$$\sigma_h = \frac{PD}{2t} \quad (7)$$

$$\sigma_{hb} = \frac{6K_b Q E t R}{E t^3 + 3K_z P D^3} \quad (8)$$

式中:  $\sigma_h$  为管壁的环向应力, kPa;  $P$  为管道内压, kPa;  $t$  为管道壁厚, mm。  $\sigma_{hb}$  为管道的环向弯曲应力, kPa;  $E$  为管道弹性模量, kPa;  $K_b$  为弯曲系数,  $K_z$  为挠度参数(对于开挖管沟  $K_b$  取 0.235,  $K_z$  取 0.108)。

根据应力叠加原理可得输油气埋地管道总环向应力为:

$$\sigma = \sigma_h + \sigma_{hb} = \frac{PD}{2t} + \frac{6K_b Q E t R}{E t^3 + 3K_z P D^3} \quad (9)$$

输油管道工程设计规范<sup>[14]</sup>规定: 由内压力和外部荷载作用所产生的环向应力之和不得超过钢管的许用应力, 即  $\sigma \leq [\sigma]$ 。输油管道的许用应力为:

$$[\sigma] = F \Phi \sigma_s \quad (10)$$

式中:  $F$  为强度设计系数(取 0.72);  $\Phi$  为钢管焊缝系数(取 1.0);  $\sigma_s$  为钢管规定的屈服强度。

### (4) 埋地管道变形分析

假设管道断面为一个没有有效横向土壤支撑的弹性环, 在冲击荷载作用下, 其竖向变形量完全由管壁弯曲作用的弹性抗力控制。根据管道失效评定原理<sup>[15]</sup>, 无内压是管道发生竖向变形的最坏荷载情况, 故在计算中忽略内压的影响, 由爱荷华计算公式可得竖向变形位移  $\Delta$  为:

$$\Delta = \frac{1.5K_z Q D^3}{E t^3} \quad (11)$$

输油管道工程设计规范规定管道安全规定管道允许的最大变形量不得超过钢管外径的 3%, 即

$$\Delta/D \leq 3\% \quad (12)$$

## 2.3 现场取样与室内试验

室内试验是获取土体力学性能参数最为可信的方法<sup>[16]</sup>。为了尽可能地获取准确的埋地管道上覆土层强度参数进行计算, 在对阳坝落石现场考察时进行了土体取样工作, 共取得土体试样 6 个, 通过室内直接剪切试验测得土力学强度参数(表 3)。



图 4 试验前的试样

Fig. 4 Samples before test



图 5 试验后破坏的试样

Fig. 5 Destroyed samples after test

表3 直剪试验结果表  
Table 3 Results of direct shear test

土体试样编号	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$
1	13.81	29.88
2	15.11	25.43
3	9.74	30.33
4	7.23	29.63
5	3.62	29.53
6	14.25	30.05
均值	10.63	29.14

将上述试验结果与工程地质手册推荐的经验数据进行比较,最终选取土体强度参数: $c = 10\text{kPa}$ ,  $\varphi = 30^\circ$ 。

### 3 算例与结果

根据上述分析方法将阳坝落石事件的参数带入算法中,可以得出兰成渝管道在落石冲击作用下的应力和变形值。具体计算参数与计算结果见表4。

表4 计算参数和结果  
Table 4 Calculation parameters and results

计算参数	落石直径 $L/\text{m}$	重量 $m/\text{t}$	落距 $H/\text{m}$	管道埋深 $h/\text{m}$	管道壁厚 $t/\text{mm}$	弹性模量 $E/\text{GPa}$
	4	50	37	1.5	7.1	210
泊松比 $\mu$	内压 $P/\text{MPa}$	屈服应力 $\sigma_s/\text{MPa}$	填土重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^3)$	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	
	0.3	10	517	17.3	10	30
计算结果	环向应力	环向弯曲应力	总应力	许用应力	变形量	$\Delta/D$
	$\sigma_h/\text{MPa}$	$\sigma_{hb}/\text{MPa}$	$\sigma/\text{MPa}$	$[\sigma]/\text{MPa}$	$\Delta/\text{mm}$	$\%$
	357.75	98.48	456.23	372.24	22.17	4.4

比较:

$$\sigma = 456.23 \text{ MPa} > [\sigma] = 372.24 \text{ MPa}.$$

显然由内压力和外部荷载作用所产生的环向应力之和已经超过钢管的许用应力,强度不满足要求。

$$\Delta/D = \frac{22.17}{508} = 4.4\% > 3\%.$$

管道变形超出规范规定值,变形不满足要求。

综上所述,兰成渝管道在阳坝落石冲击作用下强度和变形均不能满足设计规范中规定的要求,管道已经被破坏,无法进行正常生产。计算结果与现场实际具有较好的吻合性。

### 4 结论

(1) 阳坝落石事件中兰成渝管道被破坏的原因是管材的强度和变形不足以抵抗落石产生的巨大冲击荷载,造成管道接头处被砸开。

(2) 在落石区进行管道设计工作时,由于控制设计的应为最大冲击力,冲击力计算偏小对于埋地管道而言是一种偏于危险的状态,因此建议引入日本道路公团方法计算落石最大冲击力。

(3) 兰成渝管道在康县段内再次遭受崩塌灾害的概率很大,有必要对区域内崩塌灾害点进行重点排查,做好相应的管道防护措施。

### 参考文献:

[1] 郝建斌,刘建平,石蕾. 兰成渝成品油管道沿线地质灾害危险度区划[J]. 油气储运, 2008, 27(4): 49-53.

HAO Jianbin, LIU Jianping, SHI Lei. Zonation of danger degree of geological hazards over Lanzhou - Chengdu - Chongqing products pipeline[J].

- Oil & Gas Storage and Transportation, 2008, 27(4): 49-53. (in Chinese)
- [2] 崔云, 孔纪名, 吴文平. 汶川地震次生山地灾害链成灾特点与防治对策[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(1): 109-116.  
CUI Yun, KONG Jiming, WU Wenping. Cause characteristics and prevention/control strategies of the secondary mountain disaster chain of the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(1): 109-116. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国交通部. 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Subgrades [S]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese)
- [4] 铁道第二勘测设计院. 铁路工程设计技术手册·隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999: 141-191.  
Institute of The Second Railway Survey and Design. Railway Engineering Technical·Tunnel[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1999: 141-191. (in Chinese)
- [5] 杨其新, 关宝树. 落石冲击力计算方法的试验研究[J]. 铁道学报, 1996, 18(1): 101-106.  
YANG Qixin, GUAN Baoshu. Test and research on calculating method of falling stone impulsive force[J]. Journal of The China Railway Society, 1996, 18(1): 101-106. (in Chinese)
- [6] 唐红梅. 危岩拦石墙计算方法研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(3): 12-15.  
TANG Hongmei. Research on calculation method of volley-unstable rock retaining wall [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(3): 12-15. (in Chinese)
- [7] Dussauge C. Statistical analysis of rockfall volume distributions; implications for rockfall dynamics [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(B6): 2.1-2.11.
- [8] Kawahara S, Muro T. Effects of dry density and thickness of sandy soil on impact response due to rockfall [J]. Journal of Terramechanics, 2006, 43: 329-340.
- [9] Labiouse V, Descoedres F, Montani S. Experimental study of rock sheds impacted by rock blocks [J]. Struct Eng Int, 1996, 3(1): 171-175.
- [10] 田斌, 戴会超, 王世梅. 滑带土结构强度特征及其强度参数取值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2887-2892.  
TIAN Bin, DAI Huichao, WANG Shimei. Strength characteristics of soli in slide zone and determination of its parameters [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 2887-2892. (in Chinese)
- [11] 谢秀栋, 方建瑞, 范炜. 基于可靠度理论的边坡稳定性分析研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(2): 110-115.  
XIE Xiudong, FANG Jianrui, FAN Wei. Research on analysis of slope stability based on reliability theory [J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(2): 110-115. (in Chinese)
- [12] 张晓曦, 周立荣. 基于非线性破坏准则的边坡稳定性分析[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(1): 53-60.  
ZHANG Xiaoxi, ZHOU Lirong. Slope stability analysis based on non-linear failure criterion [J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(1): 53-60. (in Chinese)
- [13] Chauva K T, Wonga J. Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, 39(69): 69-77.
- [14] 中华人民共和国建设部. 输油管道工程设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for Design of Oil Transmission Pipeline Engineering [S]. Beijing: China Plan Press, 2003. (in Chinese)
- [15] 帅健, 于桂杰. 管道及储罐强度设计[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 39-43.  
SHUAI Jian, YU Guijie. Pipelines and Tank Strength Design [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 39-43. (in Chinese)
- [16] 裘国荣, 石玉成, 刘红玫. 黄土震陷的微结构损伤模型[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(5): 210-215.  
QIU Guorong, SHI Yucheng, LIU Hongmei. Microstructural damage model of seismic subsidence of loess [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(5): 210-215. (in Chinese)