

文章编号: 1008-2786-(2014)3-345-05

一种改进的落石冲击力计算方法

郭绍平^{1 2} 王全才^{1 2*} 吴清^{1 2} 张群利^{1 2}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室/中国科学院水利部成都山地灾害环境研究所, 四川 成都 610041;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了寻找一种合理、正确的落石冲击力计算方法, 为落石灾害防治中棚洞工程的设计提供合理可靠的理论依据, 对现有的几种落石冲击力理论计算方法进行了对比研究, 分析了现有计算方法的理论基础及存在缺陷, 并在此基础上进行改进。针对现有计算方法中存在的问题, 将可以反映落石质量、缓冲土层厚度以及冲击速度影响的冲击历时计算公式引入隧道计算方法, 同时引入放大系数 k , 形成了改进的隧道公式方法。通过将改进方法和现有几种计算方法进行对比, 以及用数值模拟结果进行验证, 证明改进方法计算落石冲击力的结果是可靠的, 它比路基规范方法、原隧道方法和杨其新方法更切合实际, 同时又弥补了日本和瑞士方法中理论基础和斜碰问题的缺陷, 为以后棚洞的工程设计提供了新的理论依据。

关键词: 落石; 冲击力; 计算方法; 改进

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

棚洞作为一种环保型结构, 在防治落石灾害问题中得到越来越多的重视和应用^[1-3]。落石冲击力计算是进行棚洞设计的基础, 合理确定落石冲击力大小是正确设计棚洞的关键, 它直接关系到棚洞类型的选择和结构尺寸拟定等^[4-5]。我国在落石冲击力方面的研究还相对欠缺, 很多规范仅仅指出按照有关经验计算确定, 国外常用的多为基于落石现场冲击力试验所得的经验公式^[6-7]。合理确定一种落石冲击力计算方法尤为重要。

1 现有落石冲击力理论计算方法

目前所用于计算冲击力的方法很零散, 这对冲击力的计算带来了很大不便, 总结现有落石冲击力计算方法有以下几种。

1.1 路基规范方法

根据《公路路基设计规范》(JTGD30 -

2004)^[8], 落石的冲击力由下式计算

$$P = P_{(Z)} F = 2\gamma Z [2tg^4(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) - 1] \times F \quad (1)$$

$$Z = v \times \sqrt{\frac{Q}{2g\gamma F \times [2 \times tg^4(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) - 1]}} \quad (2)$$

式中 P : 落石冲击力(kN); $P_{(Z)}$: 落石冲击土堤后陷入缓冲层的单位阻力(kPa); γ : 缓冲填土层重度(kN/m³); g : 重力加速度(9.8 m/s²); φ : 缓冲填土的内摩擦角(°); Z : 落石冲击时陷入缓冲土层的深度(m); v : 落石接触缓冲土层时的速度(m/s); Q : 石块重量(kN); F : 落石等效球体的截面积(m²)。

1.2 隧道手册方法

《铁路工程设计技术手册·隧道》^[9]中推荐落石冲击力计算式为

$$P = \frac{Qv_0}{gT} \quad (3)$$

收稿日期(Received date): 2013-09-12; 改回日期(Accepted): 2013-11-14。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(51068006); 中国科学院知识创新项目(KZCX2-YW-332)资助。[Supported by Knowledge Innovation Program of CAS(KZCX2-YW-332).]

作者简介(Biography): 郭绍平, 男, 山东滨州人, 1988年生, 硕士研究生, 主要从事防灾减灾技术与防护工程。[Guo Shaoping(1988-), male, Binzhou of Shandong province, Master degree candidate, mainly engaged in disaster prevention and mitigation and protection engineering.] Tel: 15928801343. E-mail: guoshaopingyes@163.com

* 通信作者(Corresponding author): Wang Quancai. E-mail: slopeok@imde.ac.cn

$$T = \frac{2h}{c} \quad (4)$$

$$c = \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \times \frac{E}{\rho} \quad (5)$$

式中 P : 落石冲击力(kN); Q : 落石重量(kN); g : 重力加速度(9.8 m/s^2); v_0 : 落石冲击速度(m/s); T : 冲击持续时间(s); h : 缓冲土层计算厚度(m); c : 压缩波在缓冲土层中的往复速度(m/s); μ : 回填土泊松比; E : 回填土弹性模量; ρ : 回填土密度(kg/m^3)。

1.3 杨其新方法

杨其新、关宝树^[10]基于室内试验结果建立了一套经验公式,以自由落体冲击得到冲击力计算方法

$$P = \zeta \frac{Q}{g} a_{\max} \quad (6)$$

$$a = \frac{\sqrt{2gH}}{T} \quad (7)$$

$$T = \frac{1}{100} (0.097Q + 2.21h + \frac{0.045}{H} + 1.2) \quad (8)$$

式中 P : 落石冲击力(kN); Q : 石块重量(kN); ζ : 和缓冲填土层密度有关的系数,试验时取1; a_{\max} : 最大加速度(m/s^2),实际计算中取为平均加速度 a ; H : 落石自由下落高度(m); T : 冲击时间(s); h : 缓冲层厚度(m)。

1.4 日本方法和瑞士方法

日本方法[7,10]和瑞士方法^[10]均是基于落石冲击现场试验数据而建立的落石冲击力计算方法。经验日本方法求落石最大冲击力采用以下公式

$$P = 2.108 \times (Mg)^{2/3} \times \lambda^{2/5} \times H^{3/5} \times \beta^{-1} \quad (9)$$

$$\beta = (h/2R)^{-0.58} \quad (10)$$

瑞士方法落石冲击力按下式计算

$$P = 1.765 \times M_E^{2/5} \times R^{1/5} \times (QH)^{3/5} \quad (11)$$

式中 P : 落石最大冲击力(kN); M : 落石质量(t); λ : 拉梅常数,建议取 1000 kN/m^2 ; M_E : 通过荷载板试验测得的缓冲土层变形模量。

2 现有计算方法对比分析

对比以上几种计算方法的结果,发现其差异非常大,而实际中同样条件下最大冲击力的精确值只有一个,说明当前常用的冲击力计算方法规范还存在一定的缺陷。

路基规范方法是一种基于冲击土层陷入深度的计算方法,它假设冲击力的大小与落石陷入土层深

度成正比,其理论基础为功能原理,假定落石动能损失与冲击力所做的功相等,最终求得的也是一个平均冲击力;这种计算方法不能反映缓冲土层厚度变化对冲击力的影响,比较适用于深厚土层情形。隧道方法实际上是对落石碰撞过程做一定简化,基于冲量定理建立的计算方法,相比而言其计算结果最小,分析原因主要有:1. 从计算公式看,它求得的是平均冲击力而非最大冲击力;2. 该方法认为落石冲击缓冲层后速度衰减为零,不发生反弹;3. 没有考虑冲击过程中的落石重力的影响。杨其新方法计算得到的冲击力实际上也是落石冲击过程平均冲击力,但其冲击历时计算方法可反映落石质量、缓冲土层厚度以及冲击速度的影响,基本满足试验所反映的规律性,计算结果比较符合实际,但由于理论基础的原因,加之没有考虑落石反弹以及重力影响,该公式计算得到的冲击力仍然偏小。日本和瑞士公式均是基于现场落石试验测定的最大冲击力所建立的经验公式,求得的是最大冲击力,从计算结果上明显大于路基、隧道和杨其新方法;此二者求得的冲击力大小很接近,计算方法简单,能较好的符合实际,在目前阶段建议引入使用;但日本和瑞士公式均基于自由落体的正碰冲击,不涉及斜碰问题,而且没有反映缓冲层厚度变化对落石冲击力的影响。

3 改进的落石冲击力计算方法

从对现有落石冲击力计算方法的对比分析可知,隧道方法是一种基于冲量定理的计算方法,其计算结果与实际相差较大的最主要原因有两点,一是该法求得的力为平均冲击力,二是该方法计算出的冲击时间过长。针对这两点,本文对隧道方法进行以下改进。

3.1 计算模型简化

1. 将落石视为均质刚性球体;
2. 落石冲击上覆土层的过程中保持初始形态而不发生任何破碎或崩解;
3. 冲击过程中,落石只发生平动没有转动;
4. 由于落石回弹的速度一般很小,因此不考虑落石的回弹;
5. 忽略冲击时回填土的飞溅。

3.2 计算方法的改进

原隧道方法采用的冲击时间计算方法求得的冲击时间过长,而从前人已有的现场落石冲击试验资料可知,落石的实际冲击历时在 $0.02 \sim 0.18 \text{ s}$ 间。鉴

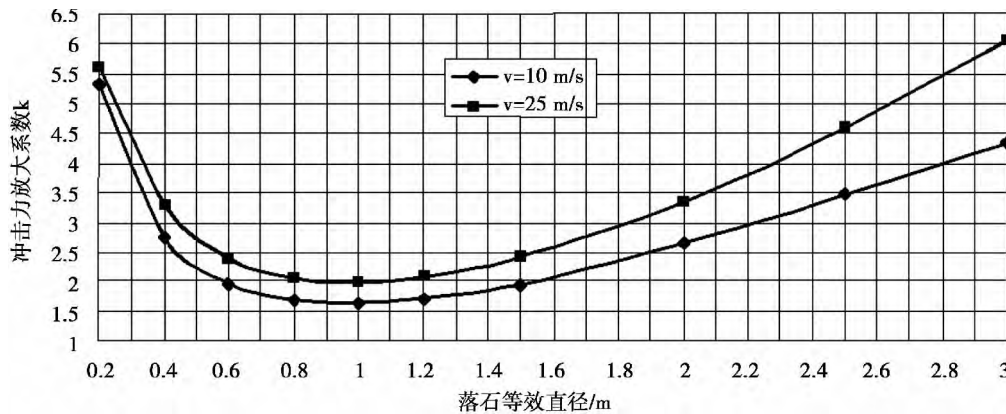


图1 冲击力放大系数取值曲线

Fig. 1 The impact force amplifying coefficient curve

于杨其新、关宝树方法求得的冲击时间与实际比较相符,此处借鉴

$$T = \frac{1}{100} (0.097Q + 2.21h + \frac{0.09g}{v_0^2} + 1.2) \quad (12)$$

工程上更多关注的是冲击力最大值而非平均冲击力,因此这里引入叶四桥关于冲击力放大系数的概念,即定义 k 为冲击力放大系数,最大冲击力

$$P_{\max} = k \times P = K \times \frac{Qv_0}{g} \quad (13)$$

式中 k 按照图1进行取值^[11]。若落石与倾角为 α 的土体发生碰撞,则撞击时刻落石速度在接触面法向上的分量 v_n 是计算落石冲击力大小的有效速度

$$v_n = v_0 \times \cos\alpha \quad (14)$$

此时冲击力可按照下式计算

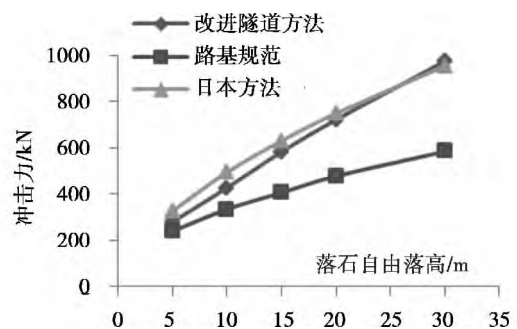
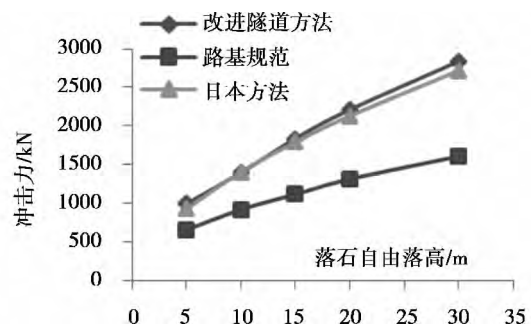
$$P_{\max} = k \times P \cos\alpha = k \cos\alpha \times \frac{Qv_0}{gT} \quad (15)$$

4 改进隧道方法的验证

假定参数:填土重度为 19 kN/m³,内摩擦角为 28°,弹性模量 35 MPa,泊松比为 0.37,落石重度取 25 kN/m³。

4.1 改进隧道方法和其他理论方法的对比

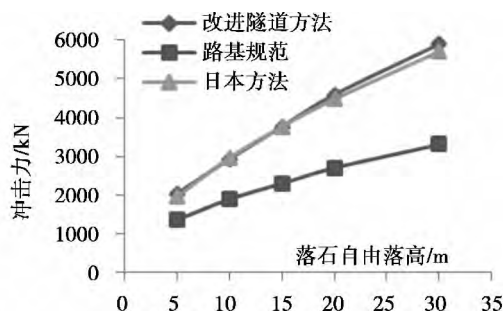
用改进隧道方法计算不同质量落石从不同高度下落时的冲击力,并和现有方法求出的冲击力进行对比,设置 15 种工况进行计算。落石等效直径 D 分 3 个级别:1.0 m、1.5 m、2.0 m;落石下落高度 H 设置 5 个级别:5 m、10 m、15 m、20 m、30 m,相对应的垂向速度分别为:10 m/s、14 m/s、17.3 m/s、20 m/s、24.5 m/s;求得落石冲击力结果对比见图 2~图 4。

图2 落石冲击力对比,等效直径 $D=1$ mFig. 2 Rockfall impact force comparison, equivalent diameter $D=1$ m图3 落石冲击力对比,等效直径 $D=1.5$ mFig. 3 Rockfall impact force comparison, equivalent diameter $D=1.5$ m

从以上结果可以看出,同样工况下,本文改进隧道方法基于冲量定理求出的最大冲击力和日本公式计算的结果基本一致,相对于路基规范方法求得的偏小结果而言,其计算结果更能符合实际。

4.2 数值模拟验证

假设等效直径为 2 m 的落石从 10 m 高处下落,冲击位置缓冲土层厚度为 2 m。根据改进的隧道方法,求得落石冲击力大小为: $P_{\max} = 2925.6$ kN。另外,隧道方法提出了落石冲击力通过土层传递到结

图4 落石冲击力对比,等效直径 $D = 2\text{ m}$ Fig. 4 Rockfall impact force comparison equivalent diameter $D = 2\text{ m}$

构顶部的冲击强度计算方法,即

$$q = \frac{P}{\pi(R + h_0 \tan \varepsilon)^2} \quad (16)$$

式中 ε 为冲击力的分布角,按 40° 计; h_0 为土层计算厚度/m;求得棚顶冲击位置的冲击力强度为

$$q = 212.9\text{ kPa}$$

采用 LS-DYNA 对冲击过程进行模拟,计算冲击力。得到落石加速度历时曲线图及撞击位置正下方棚洞顶板处冲击力强度历时曲线图,分别见图5及图6。从曲线可知: $a_{\max} = 295\text{ m/s}^2$,求得 $F_{\max} = 3085.7\text{ kN}$,落石最大冲击力 $P'_{\max} = 3085.7\text{ kN}$,棚洞顶部冲击力强度 $q' = 224.5\text{ kPa}$ 。对比结果发现,改进隧道方法和数值模拟方法求出的落石最大冲击力和棚洞顶部冲击力强度大小差别不大。

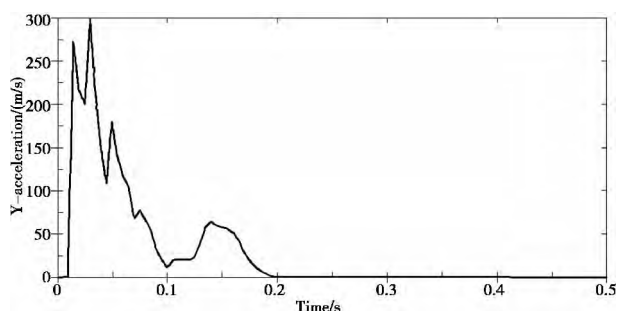


图5 落石加速度历时曲线

Fig. 5 Rockfall acceleration duration curve

5 结论

目前计算落石冲击力的方法有多种,还没有形成一个统一的标准和规范,如何合理的计算落石冲击力对棚洞的设计而言至关重要。本文对现有落石冲击力理论计算方法进行了总结,分析各方法的理论基础和存在的问题,并对几种方法进行了对比。

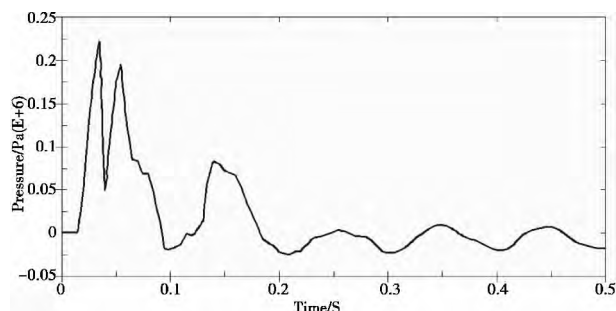


图6 棚洞顶板处冲击力强度历时曲线

Fig. 6 The hangar tunnel roof impact strength duration curve

结果显示,路基规范方法、隧道手册方法、杨其新方法求得的冲击力与实际相比严重偏小,这对于棚洞的设计来说偏于危险,不建议采用;日本、瑞士公式求得的冲击力结果相对符合实际,但不涉及斜碰问题,且没有反映缓冲层厚度变化对落石冲击力的影响。

在对各冲击力计算方法研究的基础上,本文针对隧道手册方法进行了改进,将杨其新方法中冲击历时计算公式引入隧道计算方法,同时引入叶四桥关于冲击力放大系数的概念,形成了改进的隧道公式方法,最后通过和日本公式、路基方法的对比,以及数值模拟验证,确定了改进隧道方法计算冲击力的可靠性。与原隧道方法相比,改进的隧道计算方法继承了其概念明确、计算简单的优点,且克服了原隧道方法中因计算冲击时间过长、求得的力为平均冲击力而导致的计算结果与实际相比偏小的问题;相对于日本和瑞士的经验公式而言,改进隧道方法基于冲量定理,且解决了斜碰问题,在应用上更有优势,为以后棚洞的工程设计提供了新的理论依据。

参考文献(References)

- [1] Wang Quancai, Wang Lansheng, Li Zongyou et al. Open tunnel engineering and secondary disasters of earthquake in the post-earthquake reconstruction projects along Duwen road [J]. Mountain Research, 2011 29(3): 356-361 [王全才,王兰生,李宗有,等.都汶路恢复重建中的主要地震次生山地灾害与明洞工程[J].山地学报, 2011 29(3): 356-361]
- [2] Bao Fei, Hu Xuhui. Application of the Shed Hole on the Yu-Xiang express way [J]. Highway 2009 (10): 260-262 [包飞,胡旭辉.棚洞在渝湘高速公路中的应用[J].公路 2009 (10): 260-262]
- [3] Yi Pengying, Chen Hongka. Application of cantilever rigid frame loo-kum in Tianshan highway disease [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University 2003 22(3): 25-27 [易朋莹,陈洪凯.悬臂式棚洞在天山公路病害整治中的运用[J].重庆交通学院学报 2003, 22(3): 25-27]

- [4] He Siming ,Shen Jun ,Wu Yong. Rock shed dynamic response to impact of rock-fall [J]. Rock and Soil Mechanics 2011 32(3) : 781 – 788 [何思明 ,沈均 ,吴永. 滚石冲击荷载下棚洞结构动力响应 [J]. 岩土力学 2011 32(3) : 781 – 788]
- [5] Jiang Shuping. Long-span special-shaped hangar tunnel structure of mountain road [M]. Beijing: Science Press 2010: 40 – 69 [蒋树屏. 山区公路大跨异形棚洞结构 [M]. 北京: 科学出版社 2010: 40 – 69]
- [6] Cagnoli B ,Manga M. Pumice-pumice collisions and the effect of the impact angle [J]. Geophysical Research Letters 2003 30(12) : 38 – 1 – 38 – 4
- [7] Kawahara S ,Muro T. Effects of dry density and thickness of sandy soil on impact response due to rockfall [J]. Journal of Tereamechanics 2006 43(3) : 329 – 340
- [8] JTGD30—2004 ,Standard of Ministry of Communications. Specifications for design of highway subgrades [S]. 2005. [JTGD30—2004. 中华人民共和国行业标准. 公路路基设计规范 [S]. 2005.]
- [9] Second Survey and Design Institute of Railways. Railway engineering technical manual-tunnel [M]. Beijing: China Railway Publishing House 1999: 141 – 191 [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]
- [10] Ye Siqiao ,Chen Hongkai ,Tang Hongmei. Comparative research on impact force calculation methods for rockfalls [J]. Hydrogeology & Engineering Geology 2010 37(2) : 59 – 64 [叶四桥 ,陈洪凯 ,唐红梅. 落石冲击力计算方法的比较研究 [J]. 水文地质工程地质 2010 37(2) : 59 – 64]
- [11] Ye Siqiao ,Chen Hongkai ,Tang Hongmei. The calculation method for the impact force of the Rockfall [J]. China Railway Science , 2010 31(6) : 56 – 62 [叶四桥 ,陈洪凯 ,唐红梅. 落石冲击力计算方法 [J]. 中国铁道科学 2010 31(6) : 56 – 62]

An Improved Impact Force Calculation Method for Rockfall

GUO Shaoping^{1 2} ,WANG Quancai^{1 2} ,WU Qing^{1 2} ,ZHANG Qunli^{1 2}

(1. Key laboratory of Mountain Hazards and Surface Process ,Chinese Academy of Science/Institute of Mountain Hazards and Environment , Chinese Academy of Sciences ,Chengdu 610041 ,Sichuan ,China; 2. University of Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100049 ,China)

Abstract: A reasonable calculation method of rockfall impact force is very important to the design of hangar tunnel. To find a reasonable and correct rockfall impact force calculation method ,several kinds of existing impact force calculation methods for rockfall were studied ,and the theoretical basis and the faultiness of these methods were compared. Aiming at the problems in the existing calculation methods ,an impact duration calculation formula was introduced in the Tunnel method ,so it can reflect the effect of rock quality ,thickness of the buffer layer and striking velocity. An amplification factor was also used ,forming an improved calculation method. By comparing the improved method and other existing methods ,the credibility of this new method was proved. And the results of numerical simulation also proved this. The results confirmed that the improved impact force calculation method was more accurate than the Subgrade method ,Tunnel method and Yang Qixin method. At the same time ,the new method made up the defect of the theory foundation and oblique impact problem in Japanese and Swiss methods. The improved calculation method provided a new theoretical basis for the design of hangar tunnel.

Key words: rockfall; impact force; calculation method; improve