

文章编号: 1001-4632 (2008) 02-0017-06

基于落石计算的半刚性拦石墙设计

叶四桥^{1,2}, 陈洪凯^{1,2}, 唐红梅²

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘要: 为克服传统刚性拦石墙截面大、场地适宜性差、抗冲击能力有限的不足, 提出一种半刚性拦石墙结构。该结构以桩板体系为主要受力构件, 背后填筑缓冲土堤, 在有效增强结构抗冲击力能力的同时, 保证结构体系布设的灵活性和场地的适宜性。半刚性拦石墙的布设应在对陡崖沿线所有代表性剖面落石运动路径预测和弹跳高度计算的基础上, 结合现场地形情况, 优选坡度缓、落石弹跳高度小、运动速度小、远离被保护对象的位置, 其走向延伸长度选取保护区段长度加 5~10 m 长的安全储备, 有效拦截高度选取走向沿线各计算剖面落石最大弹跳高度加 1 m 高的安全储备。改进了落石冲击力计算方法, 并以落石对缓冲土堤的冲击力和土压力为荷载依据进行半刚性拦石墙的结构设计。

关键词: 半刚性拦石墙; 落石; 落石坡面运动分类; 运动路径; 冲击力

中图分类号: U213.152.2 **文献标识码:** A

传统刚性拦石结构作为一种落石被动防护系统, 在铁路建设中得到了广泛应用。它包括落石槽、刚性拦石墙(石砌、混凝土)、拦石栅栏、拦石堤等。其最大的优点就是能够就地取材, 废弃钢材、现场开挖的石材、土料等均可利用。但其刚性特征决定了抗冲击能力有限, 一般适用于缓坡、场地宽、基础条件好的地段, 且材料用量大, 自身稳定性问题突出, 环境破坏严重^[1]。鉴于此, 本文提出了一种半刚性拦石墙结构, 并以其有效布设为目的, 在落石运动特征研究^[2-8]的基础上, 建立基于落石计算的半刚性拦石墙设计计算方法。

1 半刚性拦石墙结构特征

传统刚性拦石墙最大的弊病在于其刚性大, 且自身圬工截面较大, 在通过墙背填土增加系统抗冲击性能时, 截面尺寸剧增, 进而带来占地面积大, 限制条件多, 不经济等问题, 且降低了有效拦截高度。半刚性拦石墙结构则可避免以上不足, 在增加结构柔性的同时, 保持尽量小的结构断面, 图 1 给出了半刚性拦石墙的剖面图。

半刚性拦石墙基本组成部分包括桩(柱)板体系、缓冲土堤和落石槽。桩(柱)板结构为缓冲土

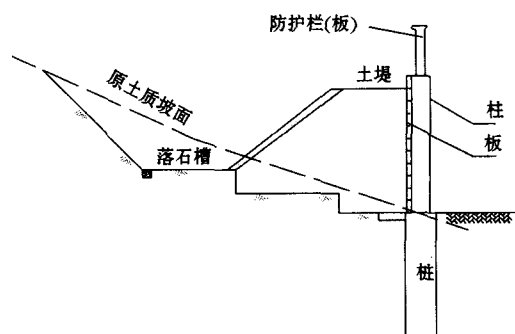


图1 半刚性拦石墙剖面图

堤提供支挡, 并最终承受落石传来的冲击力, 一般为钢筋混凝土构件, 布置灵活, 地形地质适应性强, 延性好, 且截面小, 占地少, 为缓冲土堤的设置让出了空间, 避免了圬工结构诸多缺点。桩截面可方或圆, 变截面后上部成为柱; 板可以是连续板、简支板、槽形板、空心板、拱板等。缓冲土堤直接承受落石冲击作用, 并向桩板体系传递和扩散, 从而避免桩板体系直接受落石冲击, 大大增强了结构体系抗冲击能力, 可就地利用落石槽开挖土料, 也可使用其他抗冲击材料填筑。落石槽起增加有效拦截高度, 减缓冲击和拦蓄落石的作用, 为避免落石冲击槽底而发生弹跳, 可于槽底铺筑缓冲材

收稿日期: 2007-05-20; 修订日期: 2007-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(50678182); 重庆市重点自然科学基金项目(2005BA7008)

作者简介: 叶四桥(1978—), 男, 湖北孝感人, 副教授, 博士研究生。

料。除以上主体部分外,半刚性拦石墙还有排水、反滤、桩(柱)顶防护栏等附属构造。防护栏可以是各种护栏、柔性网、钢栅栏,也可以是钢筋混凝土板等,其设置目的在于拦截小块飞石,增加系统的有效拦截高度。

2 落石路径与半刚性拦石墙布设

半刚性拦石墙的布设包括平面位置、走向、延伸长度、拦截高度,它受场地条件、落石运动路径、弹跳高度、防护安全度及经济等因素的控制。其关键在于落石运动路径预测和弹跳高度计算,包括危岩起始运动、落石坡面运动等的计算和模拟。

2.1 危岩起始运动

危岩失稳开始运动,这个过程是后续运动的基础和输入条件。

2.1.1 滑塌式危岩

该类危岩主控结构面倾角较缓,通常小于 45° ,其失稳机理表现为压剪应力作用下沿主控结构面的滑动,如图 2 所示。其初始速度为

$$v_0 = \sqrt{2(g\sin\alpha - g\cos\alpha\tan\varphi - cl/m)s} \quad (1)$$

式中: g 为重力加速度; m 为岩块质量; c 、 φ 分别为主控结构面粘聚力和内摩擦角; α 为主控结构面倾角; l 为主控结构面长度; s 为岩块滑动距离。

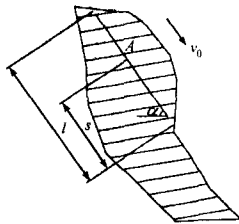


图 2 滑塌式危岩初始运动简图

2.1.2 倾倒式危岩

该类危岩主控结构面倾角通常大于 45° ,其失稳机理为绕主控结构面底端向外倾覆,表现为拉剪力作用下的倾倒,如图 3 所示。其初始速度为

$$v_0 = \sqrt{(5/3)gb(1 - \cos\Psi)} \quad (2)$$

式中: b 为块体对角线长度; Ψ 为岩块对角线转动。

2.1.3 坠落式危岩

这类危岩临空条件好,失稳机理为脱离母岩而坠落。故其为初始速度为零的自由落体运动,其落地速度 $v = \sqrt{2gH}$, H 为危岩崩落高度。

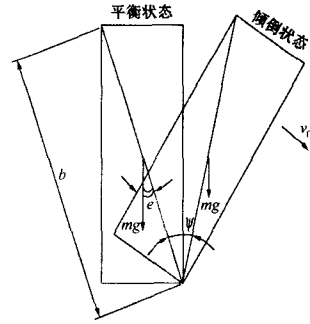


图 3 拉剪倾倒型危岩初始运动简图

2.2 落石在坡面的运动状态分类

落石在坡面上的运动状态是复杂的,既同落石自身几何特性、初始运动特性有关,又受坡面形态、坡面覆盖物等影响,偶然因素多。要尽可能准确得到落石运动过程中各阶段的运动参数,必须对可能的坡面运动进行分类。根据统计分析,结合三峡库区危岩调研和工程实践,从坡面形态特征和落石运动特征 2 个方面将危岩在坡面上的运动状态分为以下 6 类。

(1) 单坡运动。坡面坡度近似一致,落石起动后沿坡面滚动、滑动或坠落,随坡面植被和基岩出露情况的不同,落石停止在坡面上或坡角附近,如图 4 所示。

(2) 陡—缓—陡坡复合运动。两级陡崖间有缓坡或台阶,缓坡坡度小于 30° ,基岩裸露或为前期堆积块状乱石堆,落石起动后,由于上级陡崖坠落高度较大,冲击缓坡或台阶后弹跳,然后直接弹跳或滚滑进入下级陡崖后继续弹跳、滚动和滑动,如图 5 所示。

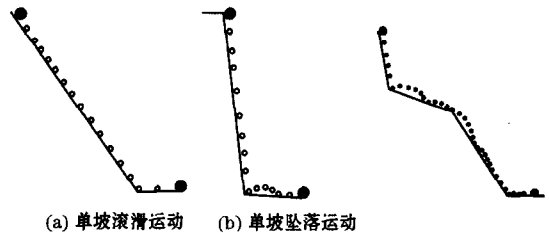


图 4 单坡运动

图 5 陡—缓—陡复合运动

(3) 陡—缓—陡坡滚滑运动。两级陡崖间有较宽缓坡,缓坡坡度小于 30° ,基岩被坡积物或植被覆盖,上级陡崖坠落高度较小,坠入台阶后短距离滚动和滑动后停止,如图 6 所示。

(4) 负地形—缓坡复合运动。多为岩腔所在位置,崖顶危岩坠落,直接冲击崖脚后弹跳,在缓坡

上继续弹跳、滚滑直至停止，如图 7 所示。



图 6 陡—缓—陡滚滑运动

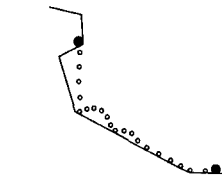


图 7 负地形—缓复合运动

(5) 缓—陡—缓坡复合运动。上部缓坡基岩裸露，光滑，落石启动后滚滑速度较快，进入缓—陡坡交界点飞出，然后做后续弹跳、滚滑运动，如图 8 所示。

(6) 缓—陡—缓坡滚滑运动。上部缓坡被植被覆盖，或基岩被坡积物覆盖，落石在该坡段滚滑运动并停止，如图 9 所示。

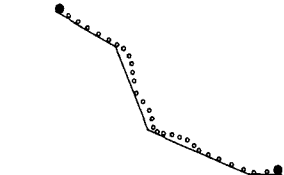


图 8 缓—陡—缓复合运动

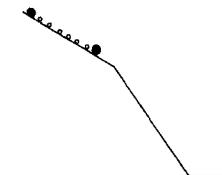


图 9 缓—陡—缓滚滑运动

需要指出的是，以上各运动状态不是绝对的，受坡表植被情况、基岩覆盖情况和落石自身形状、运动速度等的共同影响。但以上分类基本反映了各种运动状态的转换情况，若存在超过 2 级的多级陡崖，则其运动状态为上 2 级和下 2 级陡崖的分级复合。上述分类可作为落石计算运动状态预估的标准，反映的是可能的运动路径和状态。另外，综合以上运动状态分类可知，从落石启动直到停止，其运动形式可以归结为滚动、滑动和弹跳 3 种，而滚动和滑动经常同时出现也不易区分，所以，全段可以归结为跳跃段和滚滑运动段。

2.3 单一落石完整路径

依据上述分类，建立某一计算断面单一落石计算模型，从初始位置和速度开始，从坡顶向下沿坡面分段进行计算，最后将跳跃轨迹和滚滑段坡面连接起来，即得单一落石完整运动路径，这是落石被动防护系统布设的主要依据。

2.4 坡面滚滑段半刚性拦石墙的布设

滚滑运动段落石运动路径就是该段边坡坡面方程。若整个或某一坡段落石运动过程属于这种情况，则在本段设置半刚性拦石墙，仅需优选速度较小的位置，如前述 1，3，6 类运动状态，以及其他运动状态中滚滑段。落石在斜坡上任意位置处的速

度为

$$v_i = \sqrt{\sum mg(\Delta h_i - \cos\beta_i \tan\phi_i L_i) + 1/2 v_0^2} \tag{3}$$

式中： β_i 为各滚滑段斜坡的平均坡度； Δh_i 为各滚滑段斜坡的垂直高度； ϕ_i 为落石与坡面之间的综合摩擦角，可按平均坡角加 1° 计； L_i 为各滚滑段斜坡长度。

2.5 弹跳运动段半刚性拦石墙布设

落石起始运动为滚滑运动，但当坡面由缓变陡时落石由变坡点飞出，或落石坠落并同坡表面碰撞后反弹而使法向分速度大于零时，落石将脱离坡面，以弹跳运动模式下落，如前述 2，4，5 类运动状态中的跳跃段。若半刚性拦石墙布置在落石跳跃运动段，则需要综合选择弹跳高度小和动能小的位置，必须进行路径计算，算法参见文献 [1]。

2.6 半刚性拦石墙的有效布设

要进行半刚性拦石墙的有效布设，必须对陡崖沿线所有代表性剖面进行落石运动路径计算，如崩落可能性大、危岩块体尺寸大、坡度陡、基岩裸露等地段。然后综合各剖面路径计算结果，并结合现场地形情况优选坡度缓、弹跳高度小、运动速度小、远离被保护对象（可得到较大的安全用地范围）的位置布设半刚性拦石墙，走向方向延伸长度可取为保护区段长度加 5~10 m 安全储备。有效拦截高度的选择通常为走向沿线各计算剖面落石最大弹跳高度加 1 m 安全储备。

3 落石冲击力计算与缓冲土堤设计

3.1 落石对缓冲土堤冲击力

落石对缓冲土堤冲击力是半刚性拦石墙设计的主要荷载之一。可用公路和铁路系统路基防护算法进行必要的改进得到，计算简图^[9]如图 10 所示。

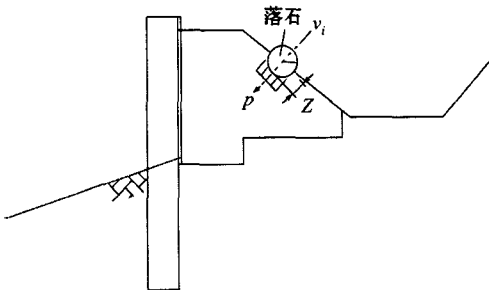


图 10 落石冲击力计算简图

落石冲击土堤后陷入缓冲层的单位面积阻力

$$p = 2\gamma Z \left[2 \tan^4 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

落石冲击土堤后的陷入深度

$$Z = v_i \sqrt{\frac{G}{2\gamma F}} \times \sqrt{\frac{1}{2 \tan^4 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) - 1}} \quad (5)$$

式中: G 为石块重量; γ 为缓冲层重度; F 为落石等效球体的截面积。

理论上可根据落石陷入土堤的最大可能深度确定最小缓冲土层的厚度, 但实际选择土堤设计堤顶厚度时, 还需要综合考虑半刚性拦石墙布设位置容许空间, 可取土方量、冲击力扩散幅度要求以及整个结构体系的经济优选。建议堤顶宽度不小于 1 m。此外, 除完全勘查确定的危岩块体外, 陡崖上落石的可能尺寸是未知的, 需要根据落石调查、安全和经济因素综合选择落石设计的代表性尺寸。半刚性拦石墙作为被动防护结构, 尽管理论上可以拦截无限大尺寸落石, 但从经济角度, 通常对大尺寸的危岩体实施主动防护。因此设计半刚性拦石墙时, 落石尺寸为可能漏勘、漏治的危岩块体尺寸。

3.2 冲击力在缓冲土堤内的扩散

冲击力在土堤中的扩散角在铁路系统中被统一取为 40° , 而公路系统统一取为 35° , 实际上由于各缓冲土堤使用的材料各异, 将其统一取值过于简化。为不失一般性, 并鉴于落石冲击导致土堤被动破坏, 可用被动破裂角 $\theta = 45^\circ - \varphi/2$ 作为扩散角, 如图 11 所示。

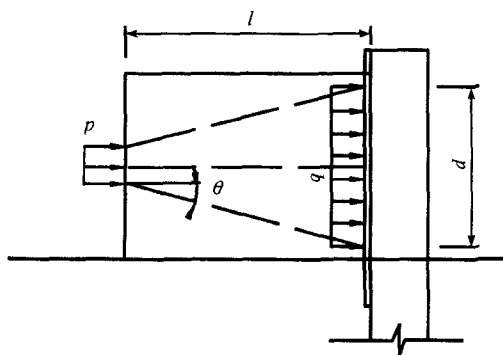


图 11 冲击力扩散模型

作用在堤表的冲击力方向为冲击速度方向, 可分解为垂直于桩板方向和平行与桩板方向, 且仅计垂直于桩板方向分力。由于冲击速度方向随机性很大, 实际处理中可偏安全的简化为 p 直接作用于垂直桩板方向, 并呈圆锥状扩散作用于板桩结构。则扩散后冲击力作用于桩板体系直径为

$$d = 2(R + l \tan \theta) \quad (6)$$

等效冲击荷载为

$$q = pR^2 / (R + l \tan \theta)^2 \quad (7)$$

式中: R 为落石半径; l 为设计缓冲层厚度。

然后结合土压力计算, 并依据所选用的结构型式按一般桩板结构设计方法进行桩基、柱板内力及配筋计算。

4 工程应用

万州城区后部的长江左岸 IV 级阶地后缘与 V 级阶地夷平面之间的陡斜坡地带存在一个太白岩危岩带, 陡崖高度约 140 m, 由 2~3 级陡崖和其间的斜坡组成。斜坡上陡下缓, 上段坡度 $70^\circ \sim 90^\circ$, 局部为负地形, 多岩腔, 以陡崖为主, 崖顶 (V 级夷平面) 高程 413.4~528 m, 崖脚高程 310~330 m。斜坡下段高程区间为 250~330 m, 总体坡度 $30^\circ \sim 35^\circ$, 坡脚为城区主干道诗仙路。岩层近似水平, 砂岩和泥岩互层。砂岩出露的部分为陡崖, 泥岩出露的部分为斜坡。陡峻的地形、软硬相间的地层结构、强烈的卸荷作用及高强度的降雨, 孕育了太白岩危岩带。危岩带共有危岩单体 100 余个一单个体积 $8 \sim 8152 \text{ m}^3$ 。自 2000 年以来多次发生危岩崩落事件, 造成人员伤亡和巨大财产损失, 严重威胁着崖下万州城区安全。2002—2003 年进行了治理: 对陡崖上已经查明的危岩体通过锚固、支撑、灌浆、封填等手段进行处置。同时, 为避免漏勘、漏治, 设置半刚性拦石墙作为被动防护。

基于前述计算理论, 现以东段 W12, W13, W14 号危岩段为例阐述半刚性拦石墙设计计算过程。依据该段地形地质特征, 落石可能运动状态属于陡—缓—陡坡复合运动状态。鉴于该段 3 个危岩单体均进行了主动防治, 在半刚性拦石墙设计时, 仅考虑漏勘、漏治的小块落石。太白岩危岩带设计选用的代表性尺寸为 0.8 m。在运动状态预估的基础上, 进行落石路径计算, 总体路径与半刚性拦石墙布设位置如图 12 所示, 有关运动参数见表 1。

按半刚性拦石墙平面位置选择原则, 选择落石运动速度小、弹跳高度小的位置。若仅考虑断面落石运动参数, E 点为较佳选择, 但考虑到 E 点处坡度变陡, 对结构受力不利, 结合本段其他断面计算的结果, 最终选择 D 点作为布设位置。该点弹跳高度为 1.39 m, 则该处墙高可取 2.4 m (1 m 安全储备)。对各计算断面综合考虑后, 最终选用的

表 1 落石运动参数

落石	A	B	C	D	E	F	G
坡面高程/m	521.6	437.6	433.7	430.8	421.2	412.7	404.3
距 A 点水平距离/m	0	5.46	9.58	13.25	21.40	25.70	29.55
速度/(m·s ⁻¹)	0	39.6	18.3	19.7	25.6	36.8	9.3
弹跳高度/m	0	0	2.34	1.39	0	2.04	0
坡表坡度/(°)	80	22	22	22	41	41	
坡面状态	裸露砂岩陡崖面	坡积层	坡积层	坡积层	坡积层	坡积层	坡积层
运动状态	坠落,在 B 点反弹	弹跳飞行	弹跳飞行	E 点反弹	弹跳飞行	G 点进入滚滑状态	

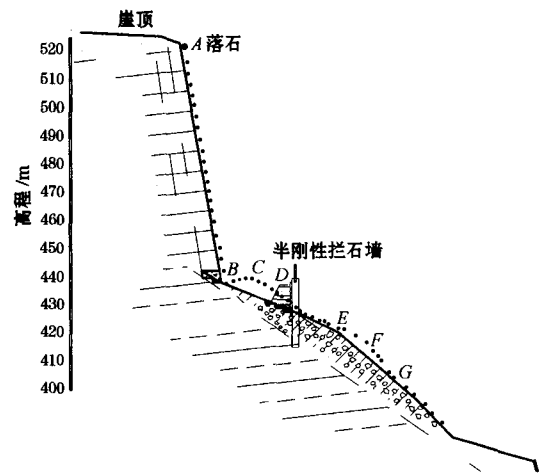


图 12 落石运动路径与半刚性拦石墙位置

拦截高度统一为 3 m。

为使作用在桩板结构上的土压力尽量小，同时具有较强的缓冲能力，土堤填料选用了加筋土。加筋土的重度取 $18\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ，内摩擦角取 35° ，设计代表性落石重取 6.86 kN ，计算得到 D 点落石作用于堤表面的冲击压强为 715.9 kPa ，冲击深度为 0.758 m ，缓冲土层厚度选取 2 m ，此时经缓冲土堤扩散作用于桩板结构的冲击压强为 55.1 kPa ，已大大减弱。最后结合土压力计算结果进行桩板体系的布置和设计。需要指出的是对板受力而言，最不利冲击点位于跨中，而对于桩的受力计算最不利冲击点为桩位处。

经过系统计算，并结合当地实际条件，优选方案为有效拦截高度 3.0 m ，填土堤顶宽度 2.0 m ，桩截面为直径 1 m 的圆形，埋深 4 m ，间距 4 m ；板截面为 $0.16\text{ m}\times 0.40\text{ m}$ 槽型板，桩露出地表后截面变为 $600\text{ mm}\times 600\text{ mm}$ 的钢筋混凝土柱，高度 4 m ，柱顶设 1.5 m 高拦石板，作安全储备，如

图 13 所示。在太白岩中段和东段第 2 级陡崖脚平台中部设置总长度约 2 km 的半刚性拦石墙。

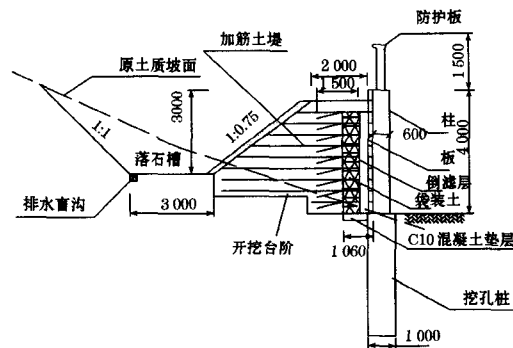


图 13 太白岩半刚性拦石墙结构图

应用表明，陡斜坡上桩板体系表现出了极强的场地和地质条件适应能力，布置非常灵活，克服了传统刚性拦石墙的主要不足。且施工期未完工的半刚性拦石墙充当了上部陡崖危岩清除时的临时拦挡结构物，人工清除的滚石和落石均被成功拦截。从 2002 年 12 月半刚性拦石墙建成迄今，陡崖发生了多次小规模落石事件，均被成功拦截。

5 结 论

半刚性拦石墙采用桩板体系作为主要受力结构，延性好，场地适应能力强，结合缓冲土堤设计，抗冲击能力强，且设计选用灵活，克服了传统刚性拦石墙的不足。出于半刚性拦石墙设计的需要，提出了陡崖落石坡面运动状态分类，并以其为基础进行落石运动路径、运动速度、弹跳高度等计算，修正了落石冲击力计算方法，为半刚性拦石墙布设提供了依据，相关计算方法也可适用于其他落石被动防护系统的设计。

参 考 文 献

- [1] 叶四桥, 唐红梅, 祝 辉. 基于落石运动特性分析的拦石网设计理念 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29 (4): 566-571.
(YE Siqiao, TANG Hongmei, ZHU Hui. Design Conception of Safe Net System Based on Analysis of Motion Trace of Rockfall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29 (4): 566-571. in Chinese)
- [2] 唐红梅, 易朋莹. 危岩落石运动路径研究 [J]. 重庆建筑大学学报. 2003, 25 (1): 17-23.
(TANG Hongmei, YI Pengying. Research on Dangerous Rock Movement Route [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2003, 25 (1): 17-23. in Chinese)
- [3] Bozzolo D, Pamini R. Simulation of Rockfalls down a Valley Side [J]. Acta Mechanica, 1986, 63: 113-130.
- [4] Azzoni A, La B G, Zaninetti A. Analysis and Prediction of Rockfalls Using a Mathematical Model [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1995, 32 (7): 709-724.
- [5] Day R W. Case Studies of Rockfall in Soft Versus Hard Rock [J]. Environmental and Engineering Geosciences, 1997, 3 (1): 133-140.
- [6] Chau K T, Wong R H C, Wu J J. Coefficient of Restitution and Rotational Motions of Rockfall Impacts [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2002, 39: 69-77.
- [7] Guzzetti F, Crosta G, Detti R, et al. Stone: a Computer Program for the Three Dimensional Simulation of Rock-Falls [J]. Computers & Geosciences, 2002, 28: 1079-1093.
- [8] 胡厚田. 崩塌与落石 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.
- [9] 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)

Design of Semi-Rigid Rockfall Barrier Wall Based on Rockfall Simulation

YE Siqiao^{1, 2}, CHEN Hongkai^{1, 2}, TANG Hongmei²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Since conventional rigid rockfall barrier wall usually has a massive cross section, many field limits and limited kinetic energy absorption capability, a semi-rigid rockfall barrier wall is presented. The structure chooses pile-plate system as the retaining components. And the filling embankment behind the pile-plate system serves as the anti-impact component. This design conception can strengthen the anti-impact ability effectively and guarantee the design flexibility and venues suitability. The design of semi-rigid rockfall barrier wall must base on rockfall trajectory and bouncing height calculation, combining with venues terrain conditions, choose the location of gentle slope, small bouncing height and velocity, and far away from protected areas. The length of semi-rigid rockfall barrier wall can select its protection segment length plus 5~10 m long security reserve. And its effective interception height can select the largest bouncing height of all calculating profiles along the cliff plus 1 m high security reserve. The rockfall impact force calculating method was improved. And the impact force and earth pressure is the main load basis for the structural design of semi-rigid rockfall barrier wall.

Key words: Semi-rigid rockfall barrier wall; Rockfall; Classification of rockfall slope motion; Trajectory; Impact force

(责任编辑 吴 彬)