

刘天翔, 何思明, 王东坡, 等. S210线轻钢结构滚石防护棚洞动力响应与优化研究[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 69-74.
[Liu Tianxiang, He Siming, Wang Dongp, et al. Dynamic Response and Optimization Study about Light Steel Rock-Shed on the S210 Road [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1): 69-74.]

S210线轻钢结构滚石防护棚洞动力响应与优化研究^{*}

刘天翔¹, 何思明², 王东坡³, 程 强¹, 倪 红⁴, 胡显明¹

(1. 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610041; 2. 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; 3. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 4. 四川公路桥梁建设集团有限公司, 四川 成都 610093)

摘 要:以2013年芦山7.0级地震生命通道S210线滚石灾害防治为背景,在崩塌滚石灾害特征调查和研究的基础上,根据S210线应急抢险的需求,提出一种新型轻钢结构滚石防护棚洞技术:采用钢板和槽钢为主骨架,双层钢板夹EPS材料为顶板,并将顶板设为20°~25°以提高抗冲击能力。通过动力有限元数值模拟,开展滚石冲击荷载下轻钢结构棚洞动力响应机理与优化设计研究。计算结果表明:轻钢结构棚洞具有较强的抗滚石冲击能力,能承受1500 kJ滚石冲击能量,且施工方便快捷,不影响正常交通,是S210线应急保通较为理想的滚石防护措施。目前轻钢结构棚洞已在S210线滚石危险区段投入使用,效果显著,对确保震后S210线畅通和灾后重建发挥了重要作用,也可在类似山区公路滚石灾害防治中推广应用。

关键词:芦山7.0级地震; S210线; 滚石灾害; 轻钢结构棚洞; 动力响应

中图分类号: TU443; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2015)01-0069-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.01.014

1 工程背景

2013年4月20日发生的芦山7.0级地震诱发大量崩滑灾害,给灾区公路造成严重损毁^[1-2],尤其是S210线芦山至宝兴段沿河谷布线,是自雅安进入宝兴县城的唯一公路通道。公路沿线河谷两侧岸坡高陡,地震诱发高陡边坡崩塌落石灾害对公路构成严重危害。通过现场调查,该段公路全长42 km,地震诱发高陡边坡崩塌灾害点(群)58处,主要分布在铜头至朱砂溪砾岩峡谷段(K311~K319)和上坝至宝兴段(K288~K301)灰岩、岩浆岩峡谷段,灾害点连续、密集分布^[2]。大量崩塌灾害掩埋公路、砸毁路面,给公路造成严重损害。地震诱发上边坡崩塌灾害的同时,还在陡坡段残留大量震裂松动岩体,并在冲沟及坡面堆积大量松散堆积物,成为震后崩塌灾害危险源,严重威胁震后公路运营安全。

针对震后S210线高陡边坡崩塌落石灾害异常严重的特征及其危害,为确保抢险救灾阶段生命通道的畅通与灾后重建过程中的行车安全,避免

崩塌落石灾害造成二次伤害,在S210线抢通保通阶段对滚石灾害进行有效防护就显得极其重要。

目前国内外滚石灾害治理技术主要分为主动防治技术和被动防治技术两大类^[3]。芦山地震诱发的崩塌灾害点多面广,多为高位崩塌,一般距路面高差几十米到百余米,再加上坡体上还大量残留震裂松动岩体和崩塌后堆积在坡面上的块石,主动加固的难度极大、风险极高,施工安全难以保证,且施工工期长,无法满足震后抢通保通的要求,故主动加固防护难以实施。根据震后滚石灾害沿S210线线状分布特征,被动防护措施为更适合的防护方案。在被动防护措施中,落石槽、拦石墙受场地、地形的限制和自身结构的局限,防护高位崩塌滚石的效果有效;被动网在汶川地震灾区广泛应用,但效果不佳,极易损坏失效,再加上S210线多处高位崩塌所处坡体为近直线性陡坡,崩塌滚石沿陡立坡面往下滚动,几乎没有缓冲带,对被动网结构冲击极大,更难以防护较大滚石的冲击危害;棚洞结构是相对较为理想的滚石防护结构,得到了广泛的应用^[4-6],但普通钢

^{*} 收稿日期: 2014-05-04

修回日期: 2014-06-10

基金项目: 科技部支撑项目(2011BAK12B03); 国家自然科学基金(41272346); 973计划项目(2013CB733201)

作者简介: 刘天翔(1980-),男,四川自贡人,主要从事公路路基、边坡病害防治工程设计方面的工作。

E-mail: 411495191@qq.com

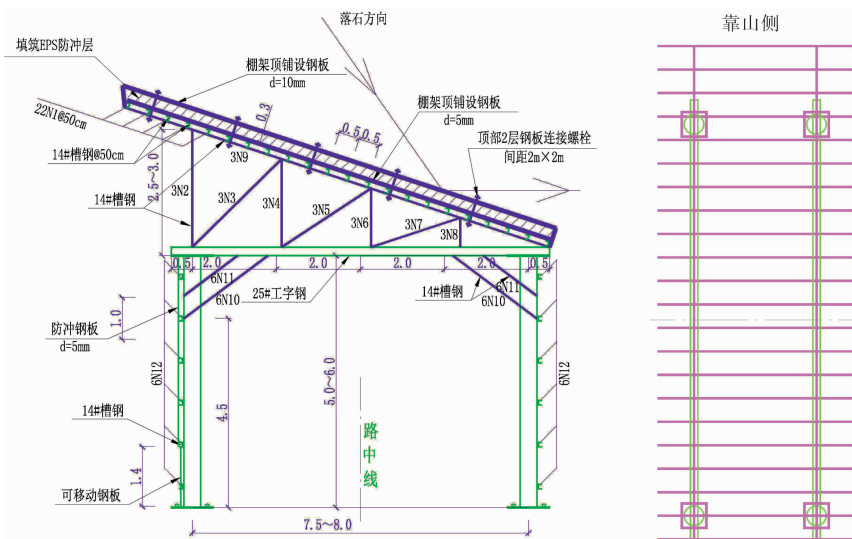


图1 轻钢结构棚洞剖面与平面布置图

钢筋混凝土棚洞施工周期长,并将严重影响公路正常通行,完全不能满足震后 S210 生命线的应急抢通保通的要求。

为此,本文针对芦山地震灾区公路沿线震后崩塌灾害应急防治问题,研发了一种新型轻钢结构棚洞,作为一种临时防护结构以满足抗震救灾和震后一段时间的道路保通需要。该轻钢结构棚洞具有抗滚石冲击能力强,投资低,现场加工、组装便利,施工周期短,不影响正常交通的特点和优势,是一种理想的应急保通临时防护措施。该结构在 S210 线沿线 6 个灾害点得以实施,在震后 15 天时间里快速加工、安装了共计 288 m 的轻钢结构棚洞,对 S210 生命线的安全、畅通起到了至关重要的作用。

2 新型轻钢结构棚洞构造

作为震后应急保通棚洞结构,需要具备快速安装、快速拼接施工到位、防灾能力强的特点,因此本文设计新型轻钢结构棚洞主要构造特点如下:

(1) 采用钢管作为主骨架,钢板和槽钢作为顶棚,以焊接和螺栓连接为主形成结构骨架。

根据对沿线主要灾害点冲击能量估算并考虑轻钢结构棚洞实施可行性,最大冲击能量设计目标为 1 500 kJ。轻钢结构棚洞需满足震后一段时间内的保通需要,设置为双车道,高 5 ~ 6 m,宽 8 m,由直径为 500 mm 的钢管作为立柱,外侧采用 5 mm 钢板密封;在靠近山体一面钢板下部 1.2 m 处设移动钢板,便于对堆积起的碎石进行清理。轻钢结构详细构造见图 1 所示。

(2) 采用双层钢板夹 EPS 泡沫材料作为顶部防冲击层。

棚顶设置两层防冲钢板,上层钢板厚 10 mm,下层厚 5 mm,钢板间填充致密的 EPS 防冲层,填

筑厚度 30 cm, EPS 材料(聚苯乙烯泡沫)弹性模量要求不小于 11.5 MPa,密度不小于 40 kg/m³。顶部 2 层钢板间采用连接螺栓固定,防止其滚石冲击滑落,连接螺栓间距 2 m × 2 m。靠山侧棚顶钢板需伸至现有坡面,使防冲钢板与坡面交接紧密。

(3) 顶板倾斜,以提高防冲击能力。

S210 公路两侧多为高陡岩质边坡,文献[2]中的实测剖面统计表明在边坡灾害点中,失稳区坡度均在 40 度以上的共 61 处,占总数量的 95.3%,表明芦山地震灾区边坡高陡。汶川地震崩塌滚石坡面运动特征研究表明^[7],滚石坡面运动可划分为启动阶段、运动阶段和堆积阶段;56°为启动区滚石自由坠落模式和滑动、滚动模式界限,堆积区最大角度为 39.6°,26°以下区域为减速带。依据汶川地震崩塌滚石坡面运动特征及统计公式分析,S210 线大部分灾害点位于滚石直接坠落、滚动威胁范围之内。

为此,在钢棚洞上部设高差为 3 m 的调坡架,调坡架顶面分为三层,通过调坡架顶部倾角坡度使坠落飞石顺利滑落于道路之外。根据 Parham Ashayer 等人的研究^[8],被动防护结构顶部倾斜角度在 15°以下,被动防护结构自身所吸收的能量最大,也就是说对结构自身的安全最不利,随着角度的增加结构所吸收的能量逐渐减小,至 45°~50°达到结构自身所吸收的能量最小,即对结构自身的安全最为有利。但根据老关口路段的实际地形情况,临空方向路肩外侧为 15 m 高的陡坡,外侧钢管立柱地基条件较差,襟边宽度不足,外侧立柱为受压构件,压力过大可能会造成轻钢结构棚洞在滚石的冲击力作用下整体失稳,所以调坡架顶部倾斜角度最终设计采用 20°~25°,既可以让轻钢结构棚洞尽量少吸收滚石的能量,也可以保证轻钢结构棚洞整体稳定性。

(4) 采用场外制作,整体现场拼装施工工艺。

钢管、顶棚的钢板和槽钢采用场外加工、焊接,再运至现场进行基座安装,钢管主骨架与顶

棚的安装、拼接, 可以尽量减小对应急保通阶段的道路干扰, 保证生命通道的畅通。钢棚洞以 4 m 为一个单元, 每 4 m 一个单位均需采用型钢双面焊接连成整体。

3 滚石冲击荷载下轻钢结构棚洞动力响应与优化计算

3.1 轻钢结构棚洞动力有限元模型构建

为确保轻钢棚洞在滚石冲击荷载下的可靠性, 采用动力有限元方法研究了滚石冲击荷载下棚洞的动力响应, 依据设计文件构建了动力有限元模型(如图 2、图 3)。

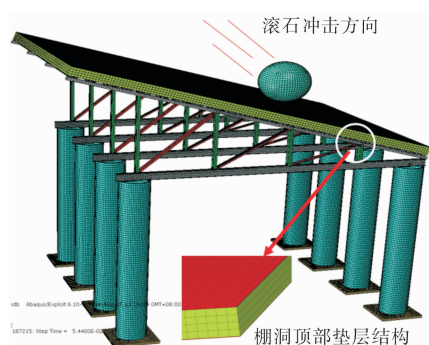


图 2 轻钢结构棚洞数值计算模型

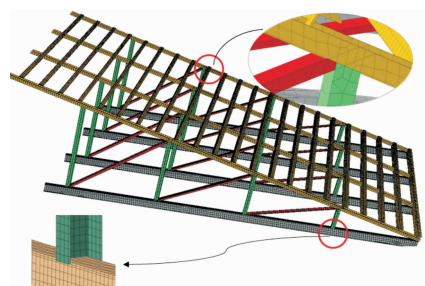


图 3 棚洞钢架数值计算模型

棚洞钢架结构中 H 型钢采用 S4R 壳单元进行离散, 给不同厚度的壳面赋不同厚度值。支撑圆管采用 B31 梁单元进行离散, 对模型中的各种梁单元进行截面类型的赋值。壳单元网格绝大部分是形状规则的 4 节点四边形单元, 极少数单元可退化为 4 节点三角形过渡单元。球形滚石采用 C3D8R 单元离散, 滚石与棚洞顶部相接触的区域网格相应细化, 以提高计算精度。为提高计算效率, 假定滚石以某速度冲击棚洞, 分析步仅模拟冲击过程, 设置整个冲击持续时间为 0.1 s。由于选用动力求解器, 滚石与棚洞之间的接触采用通用接触, 摩擦系数设为 0.5, 采用罚函数接触算法。H 型拱形梁的底部施加全约束边界条件。滚石和 H 型钢之间施加接触边界条件, 并采用罚函数接触算法计算滚石和型钢之间的相互作用。计算采用通用接触, 由于图中所有钢管、槽钢、钢板连接处, 除局部便于安装点采用螺栓连接外, 其他部位均采用焊接, 使之成为一整体, 故在建

模时焊接位置采用共节点使之成为整体, 螺栓固定与地基基础采用位移约束条件使其固定。

3.2 材料参数及计算工况

棚洞钢结构材料均选用 HPB345 号钢, 其力学参数如下: 密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 206 GPa, 泊松比为 0.3, 屈服极限为 345 MPa, 切向模量取弹性模型的 1/100。滚石假设为弹性材料, 弹性模量为 25 GPa, 泊松比为 0.2, 密度为 2500 kg/m^3 。EPS 材料采用线性强化弹塑性模型, 假设塑性硬化模量是弹性模量的 1/10, 并遵循 Mises 应力准则。

根据现场调查, 滚石冲击方向与棚洞顶板大致成 37° 夹角(图 4)。选定滚石冲击棚洞的 2 处特征点(图 5), 研究不同滚石冲击能量(1 200 kJ、1 500 kJ、2 000 kJ)下轻钢结构棚洞动力响应。

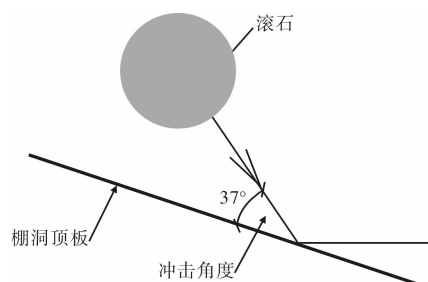


图 4 滚石冲击棚洞入射角

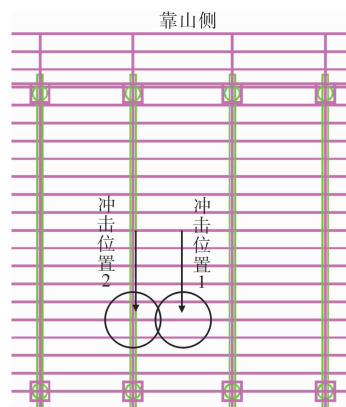


图 5 滚石冲击棚洞位置

3.3 滚石冲击荷载下轻钢结构棚洞动力响应

(1) 不同冲击能量下棚洞钢架应力云图与失效分析

施加在轻钢结构棚洞上的滚石冲击力通过棚洞钢架传递到棚洞立柱, 再传递到地基。因此, 钢架结构是否发生局部或整体破坏是轻钢结构棚洞是否安全的关键。图 6 为不同冲击能量下滚石冲击不同位置处钢架受力最大时应力云图, 其中灰色区域为钢结构发生塑性变形区域。

棚洞钢架冲击应力云图表明: 1 200 kJ 冲击能量施加在冲击位置 1 时, 棚洞钢架未发生应力屈服现象, 斜向支撑杆变形较大, 但钢架结构整体稳定, 轻钢棚洞结构安全可靠。相同冲击能量施加在冲击位置 2 时, 由于荷载直接作用在钢架上, 导致钢架局部位置产生应力屈服, 塑性区出现在竖

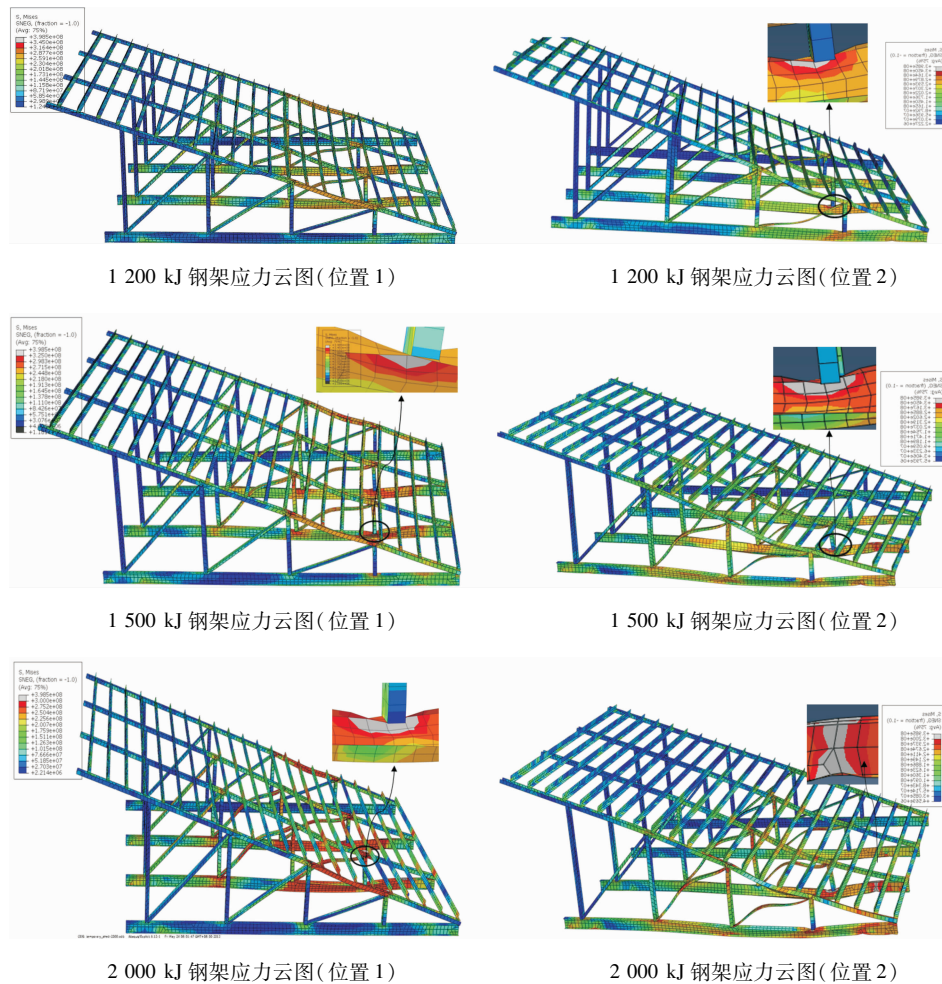


图6 不同滚石冲击能量下钢架应力云图

向杆与工字钢连接位置,其中工字钢塑性区占截面的 $1/5$,整体钢架结构未出现较大变形,棚洞结构整体是安全的。

当 $1\,500\text{ kJ}$ 滚石冲击能量作用在位置1时,在距离冲击位置较近的竖向杆与工字钢连接位置发生应力屈服,工字钢塑性区开展达到工字钢截面的 $1/4$,斜向支撑杆产生较大变形,但棚洞整体未出现较大变形,棚洞结构仍是安全的。当滚石荷载施加在冲击位置2时,在距离冲击位置较近的竖向杆与工字钢连接位置塑性区进一步扩大,其中工字钢塑性区扩大到 $1/3$,斜向支撑杆产生较大变形,结构有失稳风险,此外,工字钢与钢管柱连接位置由于发生较大变形同时开始产生塑性应变。

当滚石冲击能量达到 $2\,000\text{ kJ}$ 冲击能量,冲击位置1,竖向杆与工字钢连接位置发生应力屈服,工字钢塑性区扩展到工字钢截面的 $1/2$,斜向支撑杆产生较大变形,工字钢结构也产生较大压缩变形,棚洞结构已现整体失稳现象。因此可认为在 $2\,000\text{ kJ}$ 冲击能量下,轻钢结构棚洞虽未发生整体坍塌,但结构已失去再次抵抗滚石冲击能力,棚洞结构失效。冲击位置2时,竖向杆与工字钢连接位置应力屈服现象进一步扩大,工字钢塑性区超过截面的 $1/2$,斜向支撑杆产生较大变形,工字钢与钢管柱连接位置产生塑性应变且塑性区贯通,

结构整体失稳,因此,轻钢结构棚洞无法承受 $2\,000\text{ kJ}$ 滚石冲击能量。

综上所述,当滚石冲击能量在 $1\,500\text{ kJ}$ 以内时,轻钢结构棚洞处于稳定状态,当冲击能量超过 $1\,500\text{ kJ}$ 时,轻钢棚洞结构将进入快速屈服阶段,结构存在较大整体坍塌风险,为此认定所设计轻钢结构棚洞能够承受冲击能量上限为 $1\,500\text{ kJ}$ 。

(2)不同滚石冲击能量下支座反力随时间演化关系曲线

地基基础承载力与棚洞侧向约束力是轻钢结构棚洞设计的重要指标,因此,合理的棚洞结构设计应保证在最大滚石冲击能量下,结构处于稳定状态且侧向约束力及地基承载力满足抗滚石冲击要求。

滚石以一定入射角冲击轻钢棚洞结构,使得棚洞支座处产生较大的侧向支座反力,图7为不同冲击能量下,滚石冲击不同位置处时支座侧向反力与时间关系曲线。结果表明: $1\,200\text{ kJ}$ 滚石冲击能量施加冲击位置1处时,支座最大侧向反力为 $1\,991\text{ kN}$; $1\,500\text{ kJ}$ 时,支座最大侧向反力为 $2\,041\text{ kN}$; $2\,000\text{ kJ}$ 时,支座最大侧向反力为 $2\,511\text{ kN}$ 。 $1\,500\text{ kJ}$ 滚石冲击能量施加冲击位置2时,支座最大侧向反力为 $1\,860\text{ kN}$; $1\,500\text{ kJ}$ 下,支座最大侧向反力为 $2\,191\text{ kN}$ 。随着滚石冲击能量增加,侧向

支座反力呈现增加趋势, 且冲击位置 1 较冲击位置 2 侧向支座反力增加更为明显, 冲击力也较大, 说明滚石冲击位置 1 时轻钢结构棚洞所传递的侧向荷载更大。在轻钢结构棚洞设计中, 若侧向支座约束不足, 将会导致轻钢结构棚洞发生侧向倾覆, 因此, 棚洞侧向支撑应满足滚石冲击能量下侧向支座反力的要求。

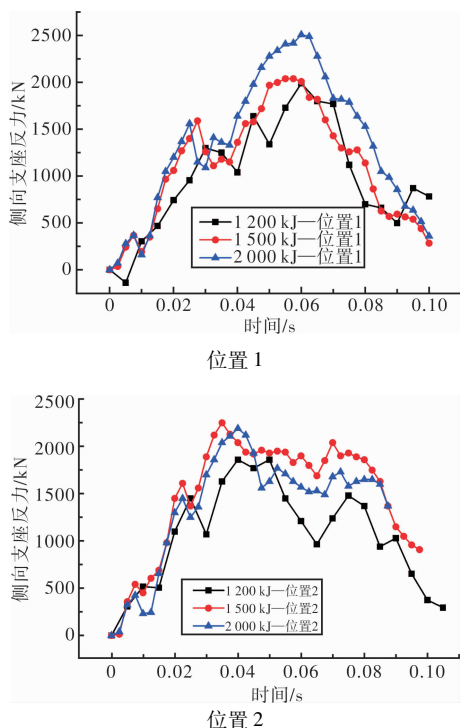


图 7 不同冲击能量下侧向支座反力与时间关系曲线

图 8 所示为不同冲击能量下滚石冲击不同位置处法向支座反力与时间关系曲线。结果表明: 1 200 kJ 滚石冲击能量施加在冲击位置 1 时, 支座最大法向反力为 1 768 kN; 1 500 kJ 时, 支座最大法向反力为 1 796 kN; 2 000 kJ 时, 支座最大法向反力为 2 565 kN。1 200 kJ 滚石冲击能量施加冲击位置 2 时, 支座最大法向反力为 1 376 kN; 1 500 kJ 下, 支座最大法向反力为 1 461 kN; 2 000 kJ 下, 支座最大法向反力为 1 473 kN。棚洞法向支座反力随滚石冲击能量增加而增加, 因此, 在进行棚洞结构设计时, 地基基础承载力应满足法向支座反力的要求。

图 7、图 8 计算结果表明: 冲击位置 2 处支座反力均小于冲击位置 1 处支座反力, 支座反力增加不明显, 原因在于滚石冲击位置 2 时, 滚石直接冲击钢架结构, 钢架结构产生较大局部变形, 棚洞顶板 EPS 垫层完全被压缩, 能够耗散更多的滚石冲击能量, 进而产生较小的冲击反力。

在轻钢结构棚洞设计时, 应综合考虑冲击位置 1 与冲击位置 2 处支座反力, 侧向支撑应满足滚石冲击能量下侧向支座反力的要求, 确保棚洞基础承载力应满足支座反力要求。

(3) 不同冲击能量下冲击变形随时间演化关系曲线

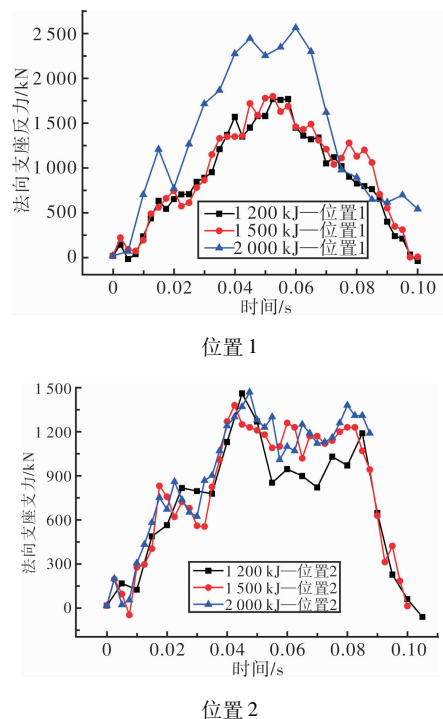


图 8 不同冲击能量下法向支座反力与时间关系曲线

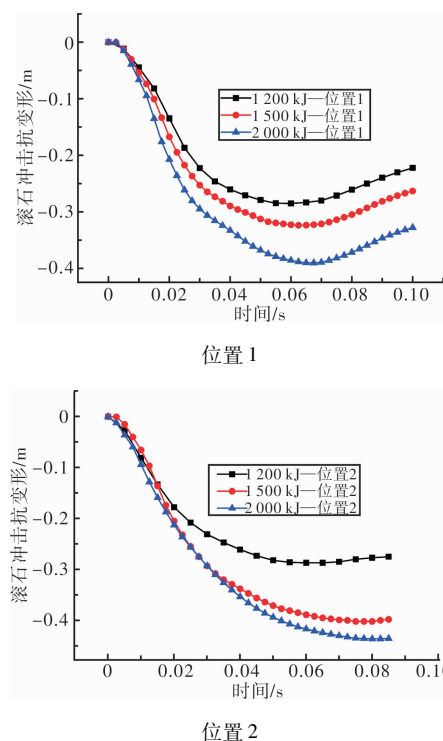


图 9 不同冲击能量下滚石冲击变形与时间关系

图 9 为不同冲击能量下结构变形与时间关系曲线图。结果表明: 随着冲击能量的增大, 结构变形显著增大。冲击位置 1 处时, 变形主要是来自于棚洞顶板在滚石冲击下的局部变形; 冲击位置 2 处时, 结构变形主要来自于 EPS 垫层的压缩变形及钢架所产生的永久变形。

根据本文研究内容设计制作的轻钢结构棚洞已在芦山地震灾区 S210 线老关口路段等 6 个滚石灾害点得以成功应用(图 10), 经过近 1 年多时间

的运行,效果非常显著,对确保进出灾区生命线工程的安全发挥了至关重要的作用。



图 10 S210 线轻钢结构棚洞应急抢险工程

4 结论

S210 线为“4·20”芦山 7.0 级地震生命通道,崩塌滚石灾害极为严重,在现有主动加固和被动防护技术不能满足抗震救灾和道路保通需要的情况下,提出了一种新型轻钢结构棚洞技术用于 S210 线震后崩塌滚石应急减灾,并通过动力有限元数值模拟,研究了不同冲击能量下冲击不同位置轻钢结构棚洞冲击动力响应,在此基础上进行结构优化设计。

(1) 动力有限元计算结果表明:在给定冲击角度下,轻钢结构棚洞可承受最大 1 500 kJ 滚石冲击能量。

(2) 轻钢结构棚洞法向、侧向支座反力均随冲击能量的增加而增大,在进行轻钢结构棚洞基础

设计时,必须同时考虑法向与侧向支座反力荷载的影响,否则可能导致棚洞倾覆。

(3) 轻钢结构棚洞冲击变形随冲击能量的增加而增大,结构变形包括 EPS 压缩变形和钢架结构变形两部分。

(4) 轻钢结构棚洞具有良好的抗滚石冲击效果,施工方便、安装迅速、不影响正常交通,特别适合应急抢险,可在我国西部山区崩塌滚石多发区作为一种临时被动防护措施推广应用。

参考文献:

- [1] 裴向军,黄润秋.“4·20”芦山地震地质灾害特征分析[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2013,40(3):257-263.
- [2] 程强,郑同建. 芦山地震公路地质灾害调查及评估[J]. 灾害学,2014,29(1):131-135.
- [3] 沈均,何思明,吴永. 滚石灾害研究现状及发展趋势[J]. 灾害学,2008,23(4):122-125.
- [4] 冉利刚,陈赤坤. 高速铁路棚洞设计[J]. 铁道工程学报,2008(6):61-66.
- [5] Delhomme F, Mommessin M, Mouglin J P. Behavior of a structurally dissipating rock-shed: Experimental analysis and study of punching effects[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(14):4204-4219.
- [6] Berthet-Rambaud P, Mazars J, Daudeville L. Impact on a RC rock-shed slab: FEM modelling[J]. Computational Modelling of Concrete Structures, 2006:689-698.
- [7] 程强,苏生瑞. 汶川地震崩塌滚石坡面运动特征[J]. 岩土力学,2014,35(3):772-776.
- [8] Parham Ashayer. Application of rigid body impact mechanics and discrete element modeling to rockfall simulation[M]. Tonoto: University of Toronto, 2007.

Dynamic Response and Optimization Study about Light Steel Rock-Shed on the S210 Road

Liu Tianxiang¹, He Siming², Wang Dongpo³, Cheng Qiang¹, Ni Hong⁴, Hu Xianming¹

(1. Sichuan Province Communications Department Highway Planning Survey, Design and Research Institution, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. Sichuan Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on prevention and cure of rock-fall hazard in the life line S210 after Lushan M7.0 earthquake in 2013, and according to the investigation on distribution and risk zoning study on the disasters, a new light steel rock-shed technology is proposed in accordance with the emergency needs of the line. Dynamic response and optimization design of the rock-shed is analyzed by dynamic finite element method. The results show that the light steel rock-shed structure, in a manner, saved the construction investment, could be constructed quickly and in the greatest degree ensure the structure safety and reliability, which gives this technology a vast prospect to ensure the road smooth after earthquake. And now the project has been completed and come into service on the road of S210 line. It proves that the technology has played an active role to ensure the S210 line traffic smooth. Meanwhile, the technology could be applied to the similar mountainous road which might encounter the collapses and rock-falls disasters.

Key words: Lushan earthquake; S210 line; rock-fall disaster; light steel rock-shed; dynamic response