DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250865

G354 公路土质路堑拱形骨架防护对边坡变形的控制效应研究

侯永彪,贾　尤,刘　鹏
(兴仁市交通运输局,贵州 兴仁 562300)

摘　要: 为评估拱形骨架结构对土质路堑边坡的稳定控制效能,以贵州 G354 线典型高陡土质边坡工程为例,结合 GNSS 现场监测与 FLAC3D 数值模拟手段,系统分析拱形骨架在不同工况下的变形响应与力学特征。研究设置自重、暴雨、堆载及复合作用 4 种典型扰动工况,开展坡体安全系数、水平位移、主应力与沉降规律的对比分析。结果表明:拱形骨架可显著提升边坡稳定性,平均安全系数提升幅度达 14%,极端工况下仍维持 1.22 以上的安全裕度;水平位移降低 36.1% ~ 46.2%,表现出优良的变形控制能力;主应力集中区由中上部转向拱脚,有效分散结构荷载;沉降响应减幅达 40.4%,抑制软弱带压缩变形。拱形骨架通过"拱脚锚固 - 拱顶传压"的多路径协同机制,在复合扰动下构建出完整的抗滑与释荷体系。研究成果可为山区土质边坡的护坡设计提供重要参考。

关键词: 拱形骨架;边坡;数值模拟;位移;变形;多工况扰动
中图分类号: U416.1;TU997　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0175-06

Study on Control Effect of Arched Framework Protection of Soil Cutting on Slope Deformation of G354 Highway

HOU Yongbiao, JIA You, LIU Peng
(Xingren Municipal Transportation Bureau, Buyi and Miao Autonomous Prefecture in Southwest Guizhou, Xingren 562300, China)

Abstract: In order to evaluate the stability control effectiveness of the arched framework structure on soil cutting slopes, taking a typical high soil steep slope project on Guizhou G354 Line as an example, and combined with GNSS field monitoring and FLAC3D numerical simulation methods, the deformation response and mechanical characteristics of the arched framework under the different working conditions are systematically analyzed. Four typical disturbance conditions including self-weight, heavy rain, piled load and combined action are studied and set up, and the comparative analysis on the safety factors, horizontal displacement, principal stress and settlement laws of the slope are carried out. The results show that the arched framework can significantly improve the stability of the slope, the average safety factor can be increased by 14%, and a safety margin can be still kept more than 1. 22 under extreme working conditions. The horizontal displacement is reduced by 36. 1% ~ 46. 2%, showing the excellent deformation control ability. The main stress concentration area shifts from the middle and upper part to the arch foot, effectively dispersing the structural load. The settlement response is reduced by 40. 4%, inhibiting the compression deformation of the weak zone. Through the multi-path collaborative mechanism of "arch foot anchorage - crown pressure transfer", a complete anti-slip and load relief system of the arched framework is built under compound disturbances. The research results provide an important reference for slope protection design of mountainous soil slopes.

Keywords: arched framework; slope; numerical simulation; displacement; deformation; multi-condition disturbance

0　引　言

随着我国山区交通基础设施的快速发展,高边坡工程日益增多,尤其在深挖方路堑施工中,边坡长期暴露于自然环境,易受强降雨、堆载扰动等多重因素影响而发生浅层滑塌、局部失稳等灾害[1]。土质高边坡因其抗剪强度较低、渗透性差、结构松散等特点,稳定性问题更为突出。特别是在汛期,雨水入渗引发的孔压升高将显著降低坡体抗剪强度,成为诱

收稿日期:2025-08-30
作者简介:侯永彪(1986—),男,学士,工程师,主要从事公路与桥梁建设项目工程管理工作。

发滑动破坏的关键因素[2-4]。因此，寻求一种兼具结构支护与变形控制能力的高效防护措施，是当前山区公路边坡工程中的核心问题。

拱形骨架护坡作为近年来兴起的一种结构型防护形式，通过在坡面布设规则分布的预制或浆砌结构框架，形成“骨架-土体”协同体系，有效抑制边坡表层滑移、削弱软弱带集中变形趋势，逐渐在实践中获得广泛应用[5]。研究表明，拱形骨架依托其“拱脚锚固—拱腰转力—拱顶释荷”的力学路径，在遭遇降雨或堆载扰动时能构建稳定的受力闭环，显著提升坡体的整体刚度与滑动阻力[6-8]。此外，拱形结构本身具备良好的自稳能力与荷载分散能力，可与回填土形成复合承载体，提升坡体对复合扰动的适应性。然而，已有研究多集中于黄土或碎石类边坡，且多基于定性描述[9]，缺乏对结构受力机制、变形响应及多工况适应性的定量评价与对比研究。

鉴于此，本文以G354龙场至兴仁县城公路改扩建工程典型土质边坡为研究对象，结合GNSS连续监测与FLAC3D数值模拟，构建拱形骨架协同支护模型，开展多工况下的稳定性演化与受力响应分析。研究模拟自重、暴雨入渗、施工堆载及其复合作用等典型扰动情景，对比分析拱形骨架结构在不同条件下对坡体水平位移、沉降、主应力与安全系数的调控效果，旨在揭示其核心受力机制与适应边坡扰动的关键路径。研究结果可为山区土质路堑边坡防护设计提供理论依据与工程参考。

1 工程概况与现场监测分析

1.1 工程区地质与边坡特征

龙场至兴仁县城公路改扩建工程是国道G354国家公路网的重要组成部分，路线位于贵州省西南部的低山丘陵区，区域地貌以侵蚀－剥蚀丘陵为主，地形起伏大，相对高差40～80 m。路线地处路线典型湿润季风气候区，年均降雨量1 350～1 450 mm，雨季集中在5—9月，占全年降雨量的70%以上，暴雨频发且历时较长。

场区地层以第四系红黏土、粉质黏土及强－中风化泥岩互层为主，局部夹薄层粉砂质岩。红黏土层厚度3～5 m，结构松散、透水性弱，受含水量变化影响显著；下伏泥岩风化较强，节理裂隙发育，局部软弱夹层易形成潜在滑动带。地下水类型以大气降水入渗型为主，丰水期地下水位上升明显，具有明显的季节性。

设计边坡最高开挖高度达22.7 m，典型工段坡高约10 m，坡度近40°，常采用1∶1.5至1∶1.8的边坡坡比。该工段整体属于典型高陡土质路堑边坡类型，在强降雨作用下易产生浅层软化、局部滑移及坡脚隆起等失稳现象，对防护结构的承载与排水性能要求较高。

1.2 拱形骨架护坡设计

本工程边坡防护设计采用浆砌片石拱形骨架结构，兼具抗滑稳定性与生态恢复功能。单个拱架设计为拱高2 m、拱跨3 m、厚度约0.25 m的圆弧形结构，顺应坡面自然地形进行布设。各拱架纵横交错成网，形成“骨架－土体”协同受力体系。骨架间空隙内回填黏性土并种植植被，以改善坡面排水与抗冲蚀性能。

设计通过调整拱间距与纵向排布，使骨架受力均匀，坡脚段加密布设拱架并配合锚固基础，增强抗滑稳定。该型式兼具结构刚度、柔性协调与排水性能，可有效分散坡面应力、限制滑移带扩展，适应本区高降雨、高湿度的服役环境。

1.3 监测方案设计

为评估拱形骨架护坡结构对边坡浅层变形的控制效果，在试验段布设GNSS自动监测点共5处，沿坡面自坡顶至坡脚分层设置，分别对应坡高的0%、25%、50%、75%、100%，监测点位命名为H1至H5。其中：H1位于坡顶后缘1.0 m处，用于监测上部沉降与后缘位移；H2、H3分别布设于上、下级边坡中部，反映拱形骨架中部与拱腰区的变形特征；H4位于坡脚上缘，记录拱脚锚固带的响应；H5设于坡脚处，用于监测整体滑动趋势及地基变形。

监测周期覆盖主汛期（5—8月），采用30 min采样频率连续采集各点水平位移数据，以捕捉降雨扰动期间的边坡响应。

2 数值模拟分析

2.1 模型建立

本研究采用FLAC3D建立三维数值模型，对边坡－拱形骨架系统进行协同受力分析。模型结构包含原状边坡体、地基、垫层及骨架护坡结构，其中拱形骨架采用实体单元建模，以反映其高刚度属性。填土及地基区域划分不同材料单元，依据实际地层构造设置。数值模型如图1所示。

边界条件方面，模型底部施加三向全约束，左右侧设定水平限位以模拟侧向围岩约束，坡面则设为

图 1　三维数值模型图

自由排水边界。渗流条件采用出逸边界设定，允许坡面和坡脚孔压自然排出，以更真实地反映降雨入渗过程中的地下水流动特征。

2.2　岩土参数与本构模型

本研究所用FLAC3D模型中的岩土材料参数依据现场工程特性与文献资料设定，土体及砂砾石采用摩尔-库仑本构模型进行模拟。回填土为中密度碎石土，具良好排水性与较高摩擦角；地基土为粉质黏土，强度中等，渗透性弱。拱形骨架结构采用浆砌片石建造，整体刚度大，计算中简化为弹性本构模型。模型相关计算力学参数见表1。

表 1　模型计算力学参数表

材料类型	重度/(kN·m^{-3})	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比	渗透系数/(m·s^{-1})
原状土	16	12	28	40	0.35	5×10^{-5}
地基	19	22	32	45	0.30	1×10^{-6}
拱形骨架	23.5	—	—	1.50×10^{3}	0.20	1×10^{-9}

2.3　模型验证

为了验证FLAC3D数值模拟结果的可靠性，选取坡顶至坡脚沿边坡剖面布设的5个典型高程点位进行对比分析。监测数据来源于GNSS连续位移观测，模拟数据提取自FLAC3D模型计算结果。坡体关键点水平位移分布如图2所示。

图 2　边坡关键点水平位移分布

由图2可得，无论是实测数据还是数值模拟，在自重情况下坡体的变形趋势呈中部鼓胀型分布，即坡体中段水平位移最大，向上或向下均略有减小，表现出一定的“拱胀趋势”而非线性递增。该变形模式可解释为：在无外部扰动作用的纯自重条件下，坡体表层尚未出现明显滑移破坏，重力引起的剪切主要集中发生在坡体中段区域，地表剪切带尚未向深部或坡脚发展，从而在中部区域形成应力释放和剪胀主导的“鼓胀式位移”响应。此特征在FLAC3D模拟中亦得以准确反映，说明模型较好地捕捉到了浅层边坡在初始重力状态下的真实变形模式。

对比两组数据来看，模拟与实测在各典型点位的水平位移趋势高度一致，误差控制在±10%以内，说明所建立的数值模型能较准确反映边坡拱形骨架结构下的变形响应规律，为进一步的多工况评价分析提供了有效支撑。

2.4　典型扰动条件下的工况设定与模拟方案

为系统评估拱形骨架在复杂扰动下的稳定性控制效能，设置4种典型工况，综合考虑自然重力、降雨入渗及施工堆载等因素。具体设定如下：

（1）工况1：自重

仅考虑坡体自重作用，用于分析边坡的初始应力与变形状态，为其他工况提供基准。

（2）工况2：自重+暴雨入渗

模拟强降雨条件下的非饱和渗流－力学耦合响应。降雨强度取60 mm/h，历时6 h，地表边界设为定水头入渗条件，坡面及坡脚为自由排水边界。通过孔压变化反映降雨入渗对边坡抗剪强度的削弱效应。

（3）工况3：自重+堆载

在坡顶设置3 m宽堆载区，距坡顶临空面水平距离1.5 m，等效均布荷载取25 kPa，用于模拟施工堆土及机械荷载引起的附加应力。堆载采用恒定竖向压力加载方式，加载区底部与坡顶节点连续连接，确保荷载传递合理并与实际施工情景相符。

（4）工况4：自重+暴雨入渗+堆载

叠加工况2和工况3的条件，反映汛期施工阶段

的最不利状态。该工况同时考虑降雨入渗引起的孔压增长及堆载附加应力，侧边界为水平限位，底部为固定约束，坡面设自由排水边界。

其余材料参数、几何尺寸及骨架布设保持一致。各工况在相同计算步长下进行强度折减与变形分析，通过对比安全系数、位移及主应力分布，定量评估拱形骨架的综合防护效能。

3 计算结果分析

3.1 整体稳定性分析

为评估拱形骨架对边坡整体稳定性的提升效果，本文采用FLAC3D强度折减法对未设骨架与设骨架条件下的4种典型工况进行了安全系数计算，结果见表2。总体来看，在自重工况下，未设骨架的边坡安全系数为1.42，设置骨架后提升至1.52，表明结构具备一定的初始稳定增效；在叠加暴雨或堆载荷载后，未设骨架的边坡稳定性显著下降，安全系数分别降低至1.15和1.21，而设置骨架防护的边坡安全系数分别提升至1.33和1.38，平均提升幅度超过14%；在最不利的“自重+暴雨+堆载”工况下，未设骨架时边坡安全系数降至1.03，已接近规范极限[10]，而设置骨架后，安全系数仍可维持在1.22，具备一定的安全裕度。分析表明，拱形骨架在暴雨入渗和堆载扰动双重影响下，能有效稳定表层滑移体、抑制软弱带扩展，并通过其“拱-土”结构协同机制提升坡体整体刚度与抗滑能力，表现出优良的抗扰动稳定储备。

表2 不同工况下安全系数对比表

编号	工况描述	未设骨架	设置骨架
1	自重	1.42	1.52
2	自重+暴雨	1.15	1.33
3	自重+堆载	1.21	1.38
4	自重+暴雨+堆载	1.03	1.22

3.2 水平位移控制效果分析

图3为边坡最大水平位移。如图所示，边坡在不同工况下的最大水平位移呈现出显著差异。未设骨架条件下，随着外部扰动的叠加，最大位移从自重工况的3.9 cm迅速上升至复合扰动工况（自重+暴雨+堆载）的9.7 cm，表明边坡结构对降雨渗透与临时堆载十分敏感，极易引发浅层滑动。在设有拱形骨架的情况下，各工况下的最大位移显著降低，其中自重工况下仅为2.1 cm，暴雨与堆载复合作用下控制在6.2 cm以内，表现出良好的稳定性。

图3 边坡最大水平位移

从减幅角度看，自重、暴雨、堆载等单一扰动下的位移降低幅度普遍超过40%，其中自重工况下的减幅高达46.2%，而在最不利工况下的减幅也维持在36.1%，说明即使在极端边坡受扰条件下，拱形骨架结构仍具较强的变形约束能力。这种效果主要归因于骨架结构对坡面滑移力的传递分散作用与其对地表软弱层的加筋稳固效应。

总体来看，拱形骨架结构在不同荷载组合条件下对边坡变形具有显著的控制效果，不仅显著减小了位移峰值，也有效延缓了位移发展的突变趋势，是一种适用于土质路堑边坡的高效防护结构型式。

3.3 拱形骨架受力机制分析

图4展示了边坡在不同工况下沿高程方向的最大主应力分布规律。从图中可以看出，主应力在坡体中部至坡脚区域持续增大，整体呈现“由上而下增强”的趋势，体现出地表荷载与骨架自重在传力路径中的叠加效应。自重工况下主应力值在10 m处为0.45 MPa，坡脚处增至1.30 MPa，表明即使无外部扰动，骨架在重力作用下已承担明显的基础支撑作用。当施加暴雨扰动后，坡脚主应力提升至1.75 MPa，涨幅达34.6%；加入堆载后进一步增至2.01 MPa，较自重工况增加了54.6%。这类非线性增长说明边坡中下部为主应力集中区，是拱形骨架稳定性分析的关键部位。

应力分布曲线还揭示了不同扰动源对结构受力机制的影响特征：暴雨作用导致中部以下应力突增，尤其在5 m以下段落，增长曲线陡峭，说明渗流引起的孔隙水压力上升是骨架结构受力增大的主要外因；堆载工况在7.5 m以上段落产生更大幅度的应力抬升，表明骨架在承受集中面荷载时，其上部结构需要具备良好的承压能力；复合作用使得应力沿高程方向呈现更为陡峭的“梯度增长”态势，说明骨架在

图 4　边坡最大主应力分布

多源扰动下的受力机制由“线性扩散”转向“协同集中”模式。

综上所述，拱形骨架结构的主应力分布不仅受控于高程与荷载类型，还与其几何形态密切相关。其结构通过拱脚锚固、拱腰转力、拱顶传压的分力协作机制，在上覆扰动荷载作用下逐步传导并释放能量，从而显著提升了坡体浅层稳定性。尤其在暴雨与堆载共同作用下，该结构能有效将集中推力向下扩散至基础区域，构建了完整的抗滑拱效应体系。

3.4　降雨－堆载复合扰动下的变形响应差异

为进一步验证滑动面的发育与贯通情况，基于强度折减法提取了不同工况下的塑性区分布特征，结果见表 3。可以看出，在单一扰动工况下，塑性区主要集中于坡脚局部，尚未形成连续破坏带；在复合扰动工况下，未设拱形骨架的边坡塑性区沿中下部贯通，占坡体面积 52.8%，表明滑动面基本形成；设置拱形骨架后，塑性区面积降至 27.6%，连续带被明显切断，说明拱形骨架通过约束坡体中下部剪切区的扩展，有效阻滞了滑动面的贯通发展，与位移分布规律相互印证。

表 3　不同工况下塑性区分布特征对比表

编号	未设拱形骨架塑性区面积占比/%	设拱形骨架塑性区面积占比/%	主要分布位置
1	12.6	8.3	坡脚局部
2	36.4	19.5	坡中部至坡脚
3	29.7	17.2	中下部
4	52.8	27.6	中下部连续带

图 5 和图 6 分别展示了极端复合工况下边坡水平位移与沉降的分布规律。整体来看，坡体在复合扰动作用下变形显著增强，表现出明显的渐进性、梯度性和结构控制差异。

在水平位移方面：未设拱形骨架时，最大水平位移出现在坡脚位置，达 13.2 cm，沿高程方向由坡顶

图 5　极端工况下边坡水平位移分布

图 6　极端工况下边坡沉降分布

向坡脚逐渐增大，变形曲线斜率较大，表明滑移面已向下延伸并趋于贯通；设置拱形骨架后，同一位置的最大水平位移降低至 8.5 cm，整体曲线趋于平缓，梯度显著减小，特别是在 2.5 m 以下区域，水平位移降低至原来的 60% 以内，表明拱形结构在中下部滑移区的约束作用突出，其通过“拱脚锚固－拱腰传力－拱顶释荷”的多级传力机制，有效阻断了降雨－堆载耦合诱发的推力传递路径。

在竖向沉降方面：未设骨架时坡脚沉降达 5.2 cm，沉降曲线呈“自上而下累积”特征，反映出暴雨渗流与堆载压实共同引起的地基压缩效应；设置拱形骨架后，最大沉降值减小至 3.1 cm，降幅达 40.4%，不仅显著提高了坡体的竖向刚度，还在局部形成“应力拱”区域，削弱了软弱带的应力集中效应，从而有效抑制了竖向沉降。

总体而言，拱形骨架结构在复合扰动工况下显著减小了坡体水平位移与竖向沉降的集中趋势，优化了坡体的应力－变形协调关系。与未设防护的自然边坡相比，该结构通过构建三维空间受力体系，显著增强了边坡对降雨与堆载叠加荷载的适应性与抗扰动能力，是山区公路边坡应对强降雨－施工堆载复合风险的有效防护形式。

4 结 论

本文以贵州G354线典型高陡土质路堑边坡为研究对象，结合GNSS监测与FLAC3D数值模拟，系统分析了拱形骨架护坡结构在多工况扰动下的稳定性与变形控制效应。主要结论如下：

（1）拱形骨架可显著提升边坡整体稳定性。4种扰动工况下安全系数平均提高约14%，在最不利的“自重+暴雨+堆载”复合工况下仍维持在1.22以上，有效避免临界失稳。

（2）拱形骨架具有良好的变形约束能力。水平位移减幅30%～46%，极端工况下最大位移由9.7 cm降至6.2 cm；结构通过拱脚锚固与拱腰传力机制有效限制滑移面扩展。

（3）受力传递路径清晰。主应力集中于坡体中下部并沿“拱脚—拱腰—拱顶”路径逐级分散，形成稳定的抗滑拱效应，显著提高坡体的整体刚度与抗剪强度。

（4）结构具备显著的竖向刚度提升作用。极端扰动下坡脚沉降由5.2 cm减至3.1 cm，降幅达40.4%；拱形骨架在竖向形成“应力拱”区，有效削弱地基压缩与渗流致密引起的沉降累积。

参考文献：

[1] 李永钊，潘本金，惠军武，等.深挖方路堑边坡三同步施工技术[J].公路，2020，65（9）：347-352.
[2] 连继峰，罗强，蒋良潍，等.顺坡渗流条件下土质边坡浅层稳定分析[J].岩土工程学报，2015，37（8）：1440-1448.
[3] 李龙.骨架防护在黄土路基边坡防护中的应用[J].交通标准化，2012（9）：117-119.
[4] 连继峰，罗强，魏明，等.雨水入渗下非饱和黏性土路基边坡浅层稳定分析[J].铁道学报，2021，43（9）：109-117.
[5] 郑明新，许润龙，蒋新龙，等.泰赣高速公路K211段高边坡工程防护效果数值分析[J].公路交通科技，2005，22（11）：68-70.
[6] 连继峰，罗强，谢涛，等.路基边坡浅层稳定的骨架防护效应及结构优化[J].铁道学报，2017，39（7）：133-141.
[7] 张洪杰.黄土地区拱形骨架边坡防护机理及结构优化[J].铁路技术创新，2022（5）：61-68.
[8] 姚政羽.公路路基拱形骨架防护工程施工技术[J].交通世界，2021（22）：68-69.
[9] 赵守良.某高速公路滑坡稳定性分析及治理方案设计[J].福建交通科技，2022（2）：35-39.
[10] JTG D30—2015，公路路基设计规范[S].

（上接第174页）

[6] 孟祥虎.城市旧水泥路面改造工程共振碎石化工艺分析[J].工程与建设，2025，37（5）：1627-1630.
[7] 曾坚.共振碎石化在惠盐高速深圳段改扩建工程中的应用[J].城市道桥与防洪，2021（1）：52-54.
[8] 张歆瑜.“柔基强面”共振碎石化路面结构在港区市政重载道路的应用[J].城市道桥与防洪，2023（6）：45-49.
[9] 石发进，刘伟.水泥混凝土路面共振碎石化改造技术的应用研究[C]//2013年全国公路养护技术学术年会论文集路面卷.厦门：中国公路学会，2014:1-19.
[10] 潘双平.水泥混凝土路面改造共振碎石化技术应用[J].交通世界（中旬刊），2022（11）：73-74.
[11] DB33/T 2191—2019，公路水泥路面共振碎石化及沥青路面加铺设计和施工技术规范[S].
[12] DB36/T 1381—2021，旧水泥混凝土路面共振碎石化施工技术规范[S].
[13] 杨国富，孙浩，金孝泽.共振碎石化技术在马鞍山市市政道路改造中的应用[J].建筑技术开发，2024，51（12）：134-136.
[14] 陆志远.共振碎石化技术在市政道路“白改黑”工程中的应用[J].四川水泥，2025（6）：250-252.
[15] DB31/T 828—2014，水泥混凝土路面共振碎石化技术规程[S].
[16] JTG/T F31—2014，公路水泥混凝土路面再生利用技术细则[S].
[17] 祁亮.共振碎石化技术在城市主干道改造中的应用[J].工程技术研究，2021，6（5）：70-71.
[18] 张传利.共振碎石化技术在市政道路改造中的应用[J].建筑建材装饰，2022（14）：178-180；153.
[19] 关维溢，吕瑞东，杨峻峰.旧水泥混凝土路面共振碎石化及沥青加铺技术应用[J].广东交通科技，2024，48（4）：1-6.
[20] 周祖兰.碎石化技术在旧水泥混凝土路面改造施工中的应用[J].筑路机械与施工机械化，2018，35（9）：105-108.