

悬臂栈道嵌固端破坏机理分析及工程实践

黄福祥

(厦门市市政工程设计院有限公司, 福建 厦门 361015)

摘 要: 根据不同的悬臂栈道梁端嵌固约束方式, 利用 Midas GTS 有限元软件建立了 4 种模型工况, 并采用有限元软件提供的强度折减法进行分析计算, 得出了不同梁端嵌固约束方式下悬臂栈道的破坏模式、安全系数以及正常使用条件下梁的竖向位移。通过对 4 种模型工况下计算结果的分析对比, 得出了梁端的合理嵌固方式, 提出了锚杆设置长度与斜撑设置的原则, 并将研究成果应用于工程实践中。通过工程案例的实施, 论证了研究结论的合理性。鉴于现行规范无针对悬臂栈道的专门规定, 提出了工程设计中依据《建筑边坡工程设计与规范》的相关安全系数进行设计的建议。

关键词: 悬臂栈道; 有限元分析; 嵌固端破坏; 强度折减法

中图分类号: U448.18

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)10-0115-04

0 引 言

为践行以人为本和可持续发展的理念, 建设人与自然和谐共生的现代化城市, “慢道” 越来越引起城市建设者的关注。各种滨水慢道、山林慢道不仅为市民出行带来方便, 更成为旅游、休闲与健身的新去处, 成为城市的新名片。

慢道的建设, 或受地形所限, 或为增添景观, 线路经常沿陡峭岩壁布设。如何在悬崖峭壁建设慢道, 成为摆在城市建设者面前的一道新课题。虽然悬臂栈道在我国已有几千年的历史, 但更多的是基于经验的应用, 部分栈道建设者也在理论与实践上做过一些总结, 如刘润峰等^[1]对栈道横梁结构梁体型式进行了研究; 赵光贞等^[2]对悬臂栈道的施工过程进行了叙述, 但在涉及悬臂栈道的关键技术问题——嵌固端破坏机理方面缺少研究, 现行规范也未针对悬臂栈道嵌固端的破坏进行规定。本文结合贵阳市开阳县清龙河流域环境整治慢道工程, 通过有限元软件对悬臂栈道嵌固端破坏机理进行分析, 得出梁端的合理约束方式, 并推广应用于工程实践中。

1 工程概况

贵阳市开阳县清龙河流域环境综合整治工程慢道沿清龙河两岸东西方向布置, 慢道全长约 26 km。为减少对河道、树木影响, 部分线路采用悬臂栈道形

式布置, 其中悬臂栈道长约 400 m, 桥面板梁采用轻巧流畅的钢筋混凝土板梁。栈道桥宽 2.5 m, 标准跨径 3 m, 3 跨为 1 联, 桥面设计荷载 5 kPa。悬臂栈道段岩壁陡峭, 倾角约 70°~90°, 表面覆盖厚 0.1~0.5 m 强风化层且附生植被, 局部岩石裸露, 覆盖层下岩石为中风化—微风化石灰岩。岩土体参数见表 1。

表 1 岩土体参数表

岩土体	重度 / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / ($^{\circ}$)	与锚杆的极限 黏结强度 /kPa
表层覆盖层	23	28	26	120
中风化白云岩	26	300	40	800

2 技术难点分析及对策

悬臂栈道通常采用梁板体系, 行道板或与横梁整体浇筑或搁置于横梁之上, 横梁则嵌固于岩壁之中。如何保证横梁嵌固端的安全可靠, 事关悬臂栈道实施的成败, 一旦梁端约束失效, 整体栈道将失去支撑, 造成的安全事故是不可估量的。同时由于悬臂栈道施工条件苛刻, 属于高空作业, 一旦梁端约束失效, 事故后的修复难度极其巨大。因此, 合理的梁端约束成为了悬臂栈道建设的关键技术难点。而梁端嵌固于岩体之中, 涉及梁岩相互作用, 类似于受横向荷载的桩土相互作用, 但较桩土相互作用更为复杂。《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008) 提供了受水平荷载的桩的计算方法, 悬臂栈道梁岩相互作用可借鉴桩土作用, 同时引入岩体抗力系数以考虑梁与岩体间的垂直向相互作用。较之于桩土相互作用, 梁岩相互作用还涉及嵌固端岩体的局部失稳、岩体自身失稳以及锚固端拔

收稿日期: 2022-12-06

作者简介: 黄福祥(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 副总工程师, 从事路桥设计和研究工作。

出等问题。本文采用有限元软件建立不同锚固方式下的计算模型,分析悬臂栈道嵌固端破坏机理,总结嵌固端破坏的影响因素并应用于工程实践中。

3 有限元分析的技术路线

3.1 有限元分析模拟方法

岩体属于弹塑性材料,弹塑性数值分析严格应用了弹塑性力学原理,具有较高的精度,但通过数值分析不能获得岩体的破坏状态与破坏面,也无法求出极限荷载与稳定安全系数。将数值分析法与极限分析法结合起来,就可以简便地获得破坏状态,也可以求出极限荷载与稳定安全系数,如郑颖人等^[3]提出的有限元极限分析法就已在土坡与岩坡中得到了广泛应用。本文采用 Midas GTS 提供的强度折减法来计算分析悬臂栈道梁岩相互作用下的破坏面和安全系数。为考虑岩土体地应力的影响,采用 Midas GTS 提供的施工阶段分析方法进行自重地应力、开挖、梁体浇筑与外荷载施加等各阶段的数值分析,并在外荷载施加阶段通过强度折减法分析该阶段的破坏面和安全系数。由于悬臂栈道的受力机理趋近于平面应变,而本文关注的是垂直于岩面方向岩土体的受力状态,因此采用平面应变模型进行建模分析。

3.2 屈服准则与极限状态判据

有限元分析中通常采用的岩土屈服准则是广义米塞斯准则与莫尔-库伦准则,本分析采用莫尔-库伦准则。有限元计算分析的一个关键问题是如何根据计算结果来判别岩土体是否达到极限破坏状态,极限状态判据为同时满足塑性区贯通与有限元计算不收敛。Midas GTS 计算软件中的强度折减法已考虑了上述极限状态的判据,岩土体的破坏面可根据最大应变贯通面进行查看,因此本次分析采用 Midas GTS 计算软件。

3.3 有限元模型的建立

为分析不同梁端约束条件下,岩土体破坏状态的差异,建立了4种模型工况,见表2。

表2 数值分析模型工况

模型工况	约束条件
模型 I	梁端嵌入岩体 0.5 m
模型 II	梁端嵌入岩体 0.5 m,设置 1.5 m 锚杆锚入岩体
模型 III	梁端嵌入岩体 0.5 m,设置 2.5 m 锚杆锚入岩体
模型 IV	梁端嵌入岩体 0.5 m,并悬臂梁设置斜撑

各模型均在横梁上施加 15 kN/m 的均布荷载以模拟悬臂栈道的实际荷载,各模型均采用相同的岩

土体外部约束。模型 I 的有限元网格划分、模型尺寸、边界条件及梁上荷载见图 1(其余模型类同),图中所示约束位置均为固定约束。各工况有限元模型岩土体和结构体的特性参数见表 3。

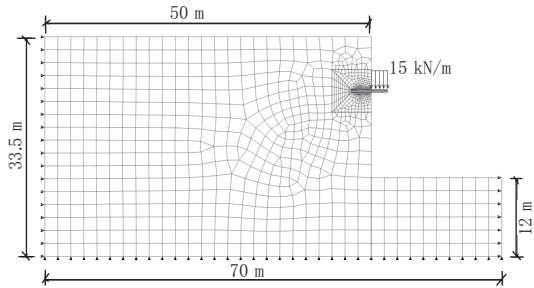


图1 模型 I 有限元网格图

表3 岩土体及结构体特性参数表

项目	中风化岩体	悬臂梁板	梁钢筋 / 锚杆 / 桁架 / 植入式桁架	斜撑	梁岩接触面
单元类型	平面应变	平面应变	桁架 / 植入式桁架	梁单元	界面
本构模型	莫尔-库伦	弹性	线弹性	弹性	库仑摩擦
弹性模量 / MPa	6 000	30 000	200 000	30 000	
泊松比	0.2	0.2	0.3	0.2	
容重 / (kN·m ⁻³)	26.0	24.0	78.5	24.0	
黏聚力 / kPa	300				300
内摩擦角 / (°)	40				40
截面尺寸 / mm			D28	300 × 300	
法向刚度 / (kN·m ⁻³)					60 000
切向刚度 / (kN·m ⁻³)					25 000

4 有限元计算结果及分析

针对上述4种模型工况,采用弹塑性数值分析得出正常使用条件下的变形与内力结果;采用强度折减法分析得出极限状态下的屈服破坏形态(见图2~图5)。4种模型工况的重要计算结果见表4(表中位移为悬臂梁自由端最大竖向位移)。

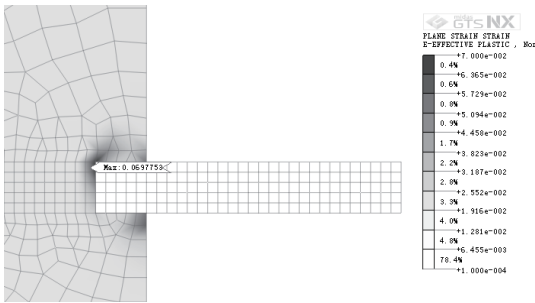


图2 模型 I 强度折减法极限状态下的破坏形态图

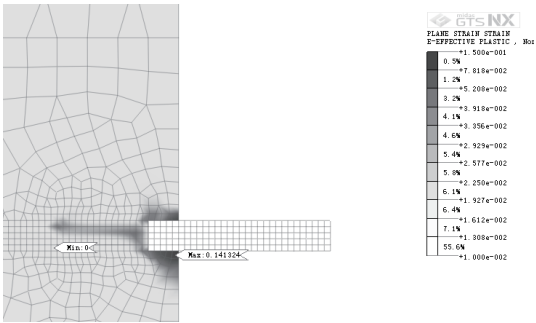


图 3 模型Ⅱ强度折减法极限状态下的破坏形态图

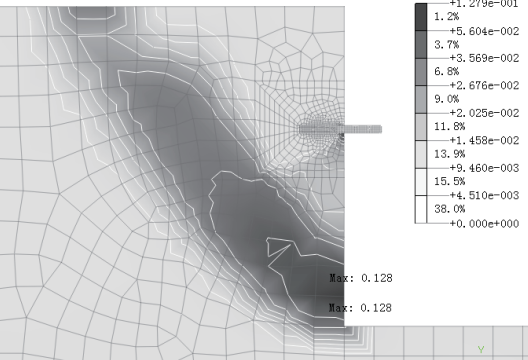


图 4 模型Ⅲ强度折减法极限状态下的破坏形态图

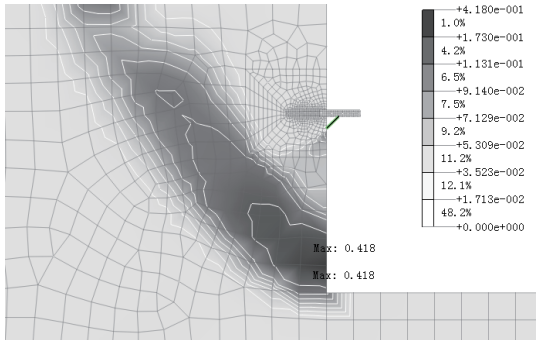


图 5 模型Ⅳ强度折减法极限状态下的破坏形态图

表 4 各模型计算结果对比

模型工况	位移/mm	安全系数	锚杆拉力/kN
模型Ⅰ	6.40	2.70	
模型Ⅱ	6.36	4.96	18
模型Ⅲ	6.36	5.13	18
模型Ⅳ	4.25	5.13	

从上述 4 种模型的有限元结果对比分析可看出:

(1)当梁端不设置岩体锚杆时,模型Ⅰ屈服破坏区出现在梁嵌固端附近,且靠近上端部位的岩体承受更大应力而形成一个潜在破裂楔体。

(2)当梁端设置 1.5 m 锚杆锚入岩体时,上层锚杆承受拉应力,并将应力扩散至锚杆周边岩体范围,潜在屈服破坏区向岩层深处扩展,提高了安全系数,而下层锚杆承受压应力,应力扩散范围有限。

(3)当梁端锚杆锚入岩体的深度加长至 2.5 m 时,塑性破坏区出现在贯通坡底至坡顶的斜面上,而不出现在梁端局部范围。这说明随着锚杆锚入岩体长度的增加,梁端应力继续往岩土体深处扩散,整个体系的极限状态已由岩石体自身整体稳定控制。由锚杆的拉应力分布情况还可看出,当其锚入岩体的长度超过 1.5 m 后,锚杆拉应力迅速减小,这表明锚入岩体的锚杆长度超过梁端尺寸一定长度后,锚杆发挥作用效果不明显,由表 4 可见,模型Ⅲ的安全系数仅比模型Ⅱ提高 3.4%。

(4)横梁加设斜撑后的模型Ⅳ其安全系数与模型Ⅲ相同,但这不代表斜撑不增加安全系数,而是因为加了斜撑,整体安全系数已由岩石体自身整体稳定控制。增加斜撑后,梁端应力承受区由上下两部分组成,明显扩大了梁端应力扩散范围,因而在岩体自身稳定系数足够大时候,所设斜撑与悬臂梁共同构成了斜撑框架,传力路径更为明确,能更多地承受栈桥竖向荷载。

(5)从使用阶段梁的最大位移可以看出,设置锚杆对梁端竖向位移影响不明显,而设置斜撑可提高整体刚度,对减小梁的挠度位移作用明显。

5 工程实例应用

5.1 清龙河流域环境整治慢道工程

贵阳市开阳县清龙河流域环境综合整治工程悬臂栈道为本文分析所依据的工程项目。根据本文的分析研究,采用了设锚杆的悬臂栈道型式。栈道桥宽 2.5 m,标准跨径 3 m,3 跨为 1 联。施工时对岩体表面进行清表,去除岩体表面不良土体、阻碍通行的树木、有安全隐患的石块等,悬臂梁端嵌固约束方式采用清理后梁端嵌入中风化岩体 0.5 m 并设置 1.5 m 锚杆锚入岩体,悬臂梁截面 0.5 m×0.5 m。项目实施后运行状况良好,项目建成后实景图见图 6。



图 6 清龙河慢道悬臂栈道实景图

5.2 平潭环北部湾旅游观光道工程

福州市平潭环北部湾旅游观光道工程位于平潭

岛北部滨海地带,为平潭岛重要的滨海旅游景观项目。为尊重生态理念,减少对岩石的破坏,保护岩石及周边环境的原生态,景观节点“望海角”采用观景悬挑平台,绕战壕遗址岩石由西往东设置悬挑结构,全长41 m。栈道段崖壁倾角 $70^{\circ}\sim 90^{\circ}$,基岩为中风化花岗岩,岩体完整程度为较破碎—较完整,岩体基本质量等级为Ⅲ~Ⅳ类。设计悬挑最大长度为3.6 m,平台采用梁格体系,上铺钢格栅形成桥面。梁端嵌固约束方式采用梁端嵌入岩体0.5 m,并设置1.5 m锚杆锚入岩体+斜撑梁,悬臂梁截面 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$,斜撑尺寸为 $0.3\text{ m}\times 0.3\text{ m}$ 。平潭环北部湾旅游观光道工程实施后荣获交通部2020年度“我家门口那条路——最具人气的路”,中国公路学会“第二届全国最美乡村路”等多项国家部委、省部级奖项,而“望海角”悬臂栈道已成为项目中耀眼的网红节点,其建成效果见图7。



图7 “望海角”观景悬挑平台实景图

6 结 论

(1)悬臂栈道不同约束方式下的受力机理和潜在

破坏形态不同。

(2)梁端锚杆可有效提高嵌固端安全系数,但锚入长度超过一定值后,提高效应不明显,设计中不可一味提高锚杆锚入长度。

(3)嵌固端上层受拉锚杆作用明显,下层受压锚杆对岩土体受力影响较小。实际实施中,可采用上下层不等长锚杆布置。

(4)设置斜撑可减小悬臂栈道的变形,扩大嵌固端应力扩散范围,提高安全储备,对于岩体完整性较差、悬臂较长栈道宜增设斜撑。

(5)悬臂栈道的嵌固端嵌岩深度不宜小于500 mm,嵌固深度应除去外层强风化岩层厚度。

(6)对于悬臂栈道,现有规范未有针对性的规定。根据受力机理,栈道所在岩体的整体稳定可按《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)关于边坡稳定性评价标准进行判定,栈道锚固端局部稳定及锚杆的安全可按锚杆(索)章节进行验收;鉴于悬臂栈道破坏后果性,安全等级应取一级。

参考文献:

- [1] 刘润峰,赵子捷,严霄汉,等. 栈道横梁结构力学性能分析与优化设计[C]//北京力学学会第二十八届学术年会论文集(上).北京:北京力学学会,2022:428-430.
- [2] 赵光贞,盛根来.蓬莱田横山栈道工程设计与施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2002(增刊1):263-265.
- [3] 郑颖人,赵尚毅,李安洪,等.有限元极限分析法及其在边坡中的应用[M].北京:人民交通出版社,2011.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com