

文章编号: 1001-4632 (2026) 02-0096-12

引用格式: 严爱国, 王新国, 王存国, 等. 山区斜坡地形条件下桥梁嵌入式基础稳定性分析及设计方法[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(2): 96-107.

Citation: YAN Aiguo, WANG Xinguo, WANG Cunguo, et al. Stability Analysis and Design Method of Embedded Foundation for Bridges under Mountainous Slope Terrain Conditions [J]. China Railway Science, 2026, 47 (2): 96-107.

山区斜坡地形条件下桥梁嵌入式基础稳定性分析及设计方法

严爱国¹, 王新国¹, 王存国¹, 郭攀¹, 付晓东^{2,3}, 周永强^{2,3}, 丁海锋^{2,3}

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

3. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

摘要: 随着我国西部建设的不断推进, 对复杂地形条件下桥梁基础承载机理与设计方法的研究日益重要。围绕山区铁路桥梁嵌入式基础的受力特性与结构设计, 研究组合荷载作用下边坡岩体的潜在破坏模式, 建立斜坡地形条件下嵌入式基础-岩体体系的理论计算模型, 揭示基础与边坡岩体之间的相互作用机理; 在此基础上, 结合极限平衡理论, 推导斜坡条件下竖向嵌入式基础与拱座倾斜嵌入式基础的极限承载力计算式, 并对在建河特大桥梁嵌入式基础的设计合理性进行验证。结果表明: 竖向嵌入式基础的主要破坏模式为桩端岩体的整体剪切破坏, 随着坡外剪力和弯矩荷载的增大, 基础-岩体体系易发生水平剪切破坏; 拱座倾斜嵌入式基础的主要破坏模式则为桩端与桩侧的联合破坏, 桩基上部区域受荷载变形显著, 呈现柔性特征, 而下部区域以刚性变形为主; 依据验算结果, 2类基础的设计参数均满足承载要求。研究成果为山区桥梁基础设计和稳定性分析提供了理论依据与工程参考。

关键词: 山区铁路; 嵌入式基础; 极限平衡理论; 稳定性分析; 破坏模式; 设计方法

中图分类号: TU473.1; U448.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.02.09

我国西南地区山体众多, 地势起伏剧烈, 地理环境险恶。随着西部建设的不断推进, 由高速公路和高速铁路组成的交通路网不可避免地向山区发展。跨越峡谷必然需要桥梁进行连接, 而由于桥梁所受到的荷载最终通过各种方式由基础承担, 所以对桥梁基础的研究就显得非常重要。在复杂山区斜坡地形条件下, 桥梁基础普遍面临如下工程问题: ①地形高差显著导致荷载传递复杂化^[1]; ②岩体节理裂隙发育、风化程度较高, 导致岩体完整性与承载力显著降低, 边坡稳定性不足^[2]; ③施工条件受限, 传统基础施工造价高, 对生态环境破坏严重^[3]。因此, 对山区斜坡条件下桥梁基础设计方法

的研究, 具有重要的理论意义和工程应用价值。围绕山区铁路桥梁嵌入式基础承载机理与结构设计方法, 国内外学者在桥梁基础和岩体的相互作用机理、嵌入式基础的工程应用等方面开展了深入的研究。

桥梁工程中针对桩基础、沉井基础等基础与岩体的相互作用机理已有大量的研究。解刚等^[4]研究了黄土沟谷地区中冲刷深度和边坡削切对桩基础极限承载力的影响, 提出了考虑冲刷效应后斜坡桩基的竖向承载力计算式。夏伟等^[5]讨论了膨胀土边坡基坑回填对桥梁基础的影响, 结果表明, 当回填材料刚度大且基坑坡比大时, 降雨对桥梁基础的影响较大。刘彦峰等^[6]对某深厚淤泥土层悬索桥

收稿日期: 2025-07-15; 修订日期: 2025-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52179117); 湖北省自然科学基金资助项目 (2023AFB802); 中铁第四勘察设计院集团有限公司科技研究开发计划项目 (2022K085)

第一作者: 严爱国 (1971—), 男, 安徽潜山人, 正高级工程师。E-mail: 1261309610@qq.com

通讯作者: 周永强 (1990—), 男, 江西南昌人, 副研究员, 博士。E-mail: yqzhou@whrsm.ac.cn

沉井基础下沉阻力进行施工监测,发现沉井基础侧壁土压力沿深度方向呈增长趋势,沉井底面支撑力受深度影响较小,而刃脚底面反力受深度影响较大。Liu等^[7]通过对桩基础进行一系列的准静力循环加载试验,揭示了不同桩型布置下部分埋设群桩基础的破坏机理。Mucciacciaro等^[8]在考虑地震活动、荷载输入方式以及沉箱和桥墩的几何形状等因素的情况下,提出了地震作用下桥墩弯矩的解析计算式。施洲等^[9]针对大型沉井初沉阶段土体受力安全问题,通过数值模拟和现场试验,分析了沉井初沉阶段受力特征和混凝土开裂规律。宋旭明等^[10]针对软土地区群桩基础地基系数 m 值取值困难的问题,提出了基于试验和数值仿真的软土群桩基础 m 值取值方法。

针对嵌入式基础的研究,在设计方法方面,1968年Poulos^[11]提出了相互作用系数的概念,分析了群桩基础的沉降规律。在Poulos工作的基础上,1978年Wolf等^[12]首次对群桩基础进行动力分析,考虑土体的辐射阻尼,计算桩土相互作用下单桩的柔度系数,并提出了群桩基础的动力阻抗函数。随后,Dobry等^[13]、Kaynia等^[14]、Miura等^[15]也相继推导出求解动力阻抗函数。进入21世纪后,Kappos等^[16]利用分层温克尔地基梁模型对桥梁群桩地基模型进行地震响应分析,并采用双线性荷载-位移曲线表征地基土的本构关系。在工程应用方向,Mamoon等^[17]进一步分析了群桩基础在地震作用下的动力响应。近十年,嵌入式基础因其能大幅减少山体开挖、保护山区环境的优点,在输电杆塔方面得到了广泛的应用。Mors^[18]和鲁先龙等^[19]先后对浅基础抗拔承载力进行理论研究、模型试验以及现场试验,提出了土体极限承载力计算理论。李永祥^[20]对不同埋深的嵌入式基础进行现场试验,分析了基础的承载特性和破坏机理,成功应用于甘肃750 kV永登-白银同塔双回输电线路,并取得较好的经济性和环保性,验证了大荷载下嵌入式基础的可靠性。汪德敏等^[21]针对西南区域典型上覆浅层黏土岩石地基,对比了斜柱式基础、直柱式基础和掏挖式基础的技术经济指标,发现嵌入式基础的经济效益和环保效益明显高于常规基础结构。郑卫锋等^[22]基于强风化地区嵌入式基础抗拔性能现场试验和数值模拟研究,从岩石破坏模式、荷载-位移曲线以及极限承载力3方面对比分析了不同埋深和不同类型基础的抗拔性能,并结合经济效益分析比选出合适的山区输电线嵌入式

基础结构形式。

综上所述,目前桥梁的各种基础与岩体的相互作用机理研究较为成熟,但传统的基础工程量大、造价高、对环境破坏大。而嵌入式基础安全可靠、经济环保,能满足桩基承载能力的要求,具有良好的抗拔和抗倾覆性能,有着广泛的应用前景。目前嵌入式基础的应用主要集中在输电线路方面,较少涉及桥梁工程,国内外亦无相关的设计标准规程,嵌入式基础和岩体的相互作用机制研究还处于起步阶段。因此,本研究依托新建沪渝蓉高速铁路项目忠建河特大桥工程,分别建立竖向嵌入式基础和拱座倾斜嵌入式基础数值模型,通过在基础顶部施加组合荷载的形式,计算分析嵌入式基础与边坡岩体的相互作用机理以及潜在破坏模式。在此基础上,基于极限平衡理论,提出山区斜坡桥梁嵌入式基础设计方法,并采用该方法验证忠建河特大桥嵌入式基础设计参数的合理性。

1 工程概况

研究依托新建沪渝蓉高速铁路项目五峰至恩施段的忠建河特大桥工程。桥址地处湖北省恩施州宣恩县万寨乡六堰塘村与茶盘村之间,属构造侵蚀、溶蚀中低山地貌区,系武陵山支脉。桥址区位于谷地内,跨越忠建河测绘范围内,最高山峰位于拟建桥梁西侧,高程约947 m,地形低点为忠建河,高程约402 m,地形高差约545 m,地势起伏很大,两侧地势较陡,坡度 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$,局部近直立。忠建河特大桥地形地貌如图1所示。

研究区域工程地质纵断面如图2所示。图中: σ 为斜坡地基承载力。地质平面图如图3所示。根据本次测绘资料及钻探成果显示,桥址区桥台始覆土层为第四系全新统冲洪积层(Q4al+pl)粉质黏土,卵石土,第四系全新统坡残积层(Q4el+d1)粉质黏土。下伏基岩主要为三叠系下统大冶组(T1d)灰岩、二叠系上统(P2)炭质页岩、二叠系下统茅口组(P1m)、栖霞组(P1q)灰岩。研究区域岩性特征如图4所示。

根据忠建河特大桥设计任务书及相关规范要求,桥梁基础需满足以下条件:①承载力方面,嵌入段地基承载力特征值不低于2.0 MPa,以保证拱脚传力安全;②变形控制方面,基础在正常荷载作用下的竖向沉降应小于10 mm,水平位移不超过

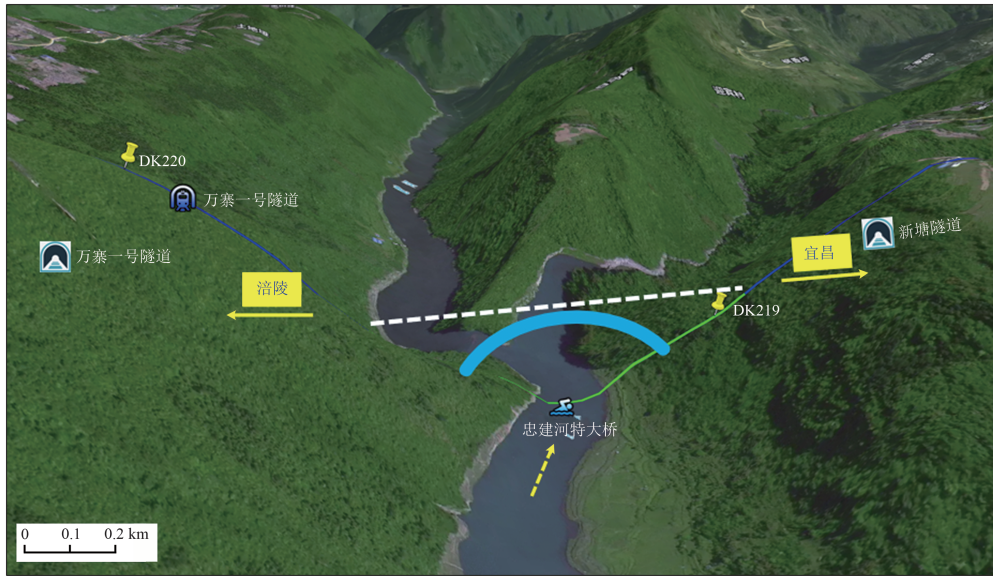


图 1 研究区域地形地貌

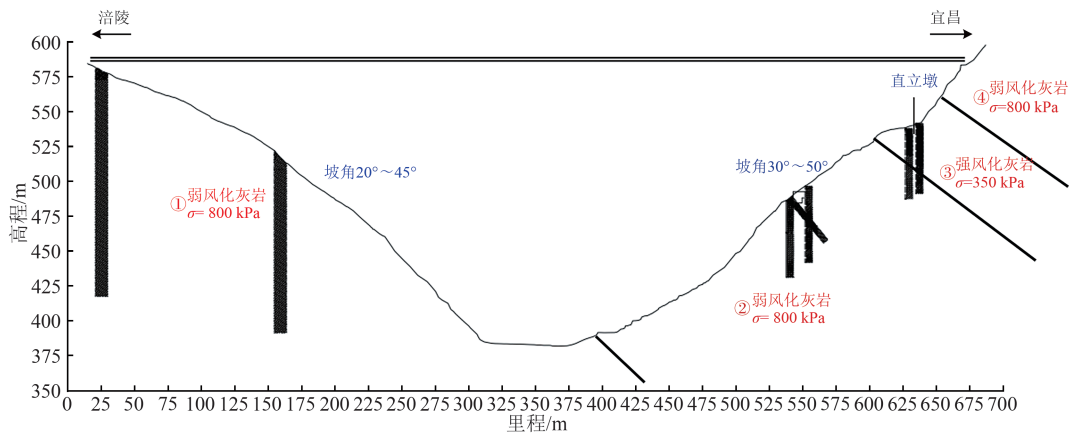


图 2 忠建河特大桥梁工程地质纵断面

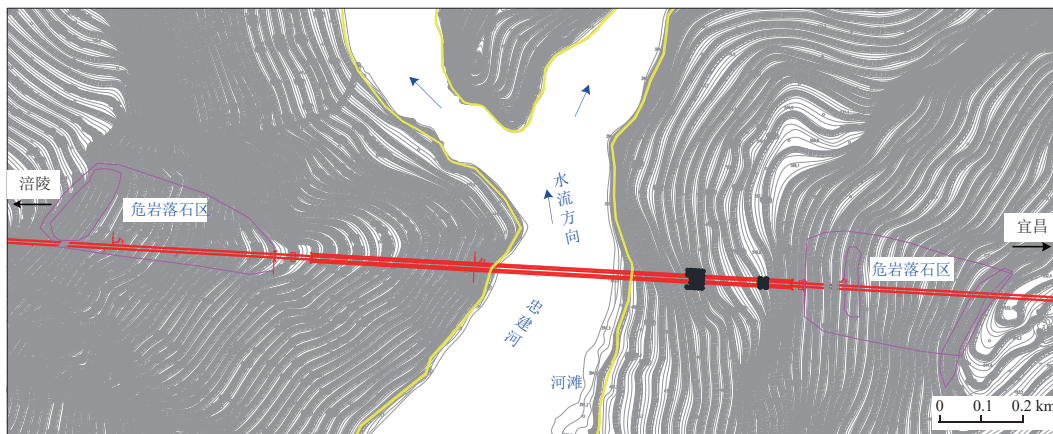


图 3 忠建河特大桥梁工程地质平面图

2 mm, 以避免拱桥推力导致的结构失稳; ③整体稳定性方面, 要求基础具备抗倾覆和抗滑移能力, 安全系数不小于 2.0; ④耐久性方面, 嵌入段岩体应选取风化程度低、节理裂隙相对闭合的灰岩段,

以保证长期服役性能。

忠建河特大桥梁桥址区位于深谷之中, 小里程岸坡角度 30°~53°, 大里程岸坡角度 20°~45°, 桥面距水面约 208 m。从经济、施工、养护及景观等方



(a) 现场灰岩



(b) 灰岩岩芯

图 4 研究区域岩性特征

面综合考虑，选用嵌入式基础具有较强的适应性和针对性。忠建河特大桥全桥布置图如图 5 所示。图中①—⑯分别为桥梁桩基础编号。忠建河特大桥桥型拟采用主跨 400 m 上承式钢管混凝土拱桥方案。拱肋矢高 90 m，矢跨比 1/4.44；拱肋轴线采用悬链线，拱轴系数 m 为 2.0。拱肋采用钢管混

土桁架形式，拱顶处拱肋桁高 8.0 m，拱脚处拱肋桁高 14.0 m。全桥共有 2 片桁架式拱肋，每片拱肋由双肢钢管组成。拱肋钢管直径 1.8 m，壁厚 28~56 mm，内灌 C60 高强混凝土。桥梁全长 707 m，孔跨布置为刚构连续组合梁，全联采用钢混组合梁，不设断缝，梁端设钢轨伸缩调节器。

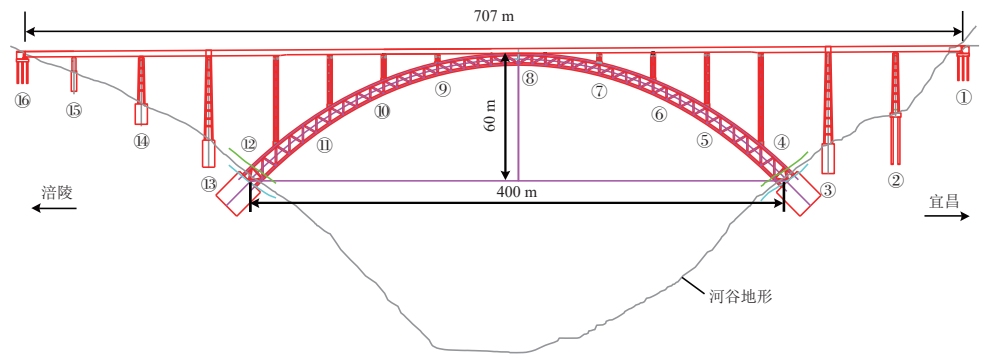


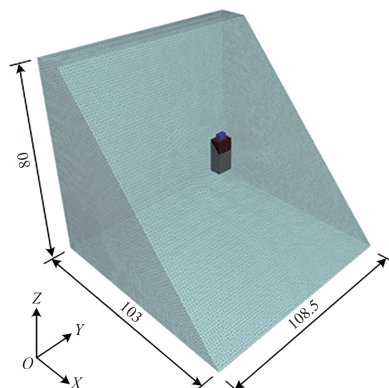
图 5 忠建河特大桥全桥布置

2 竖向嵌入式基础

基于忠建河特大桥灰岩地基中的竖向嵌入式基础，建立山区斜坡地形条件下竖向嵌入式基础数值模型，计算分析竖向嵌入式基础的受力机理及竖向桩基-岩土体系破坏模式。

竖向嵌入式基础计算模型如图 6 所示。图中设定斜坡模型垂直方向为 Z 轴方向，水平方向为 X 轴方向，走向为 Y 轴方向。竖向嵌入式基础位于忠建河特大桥桥梁小里程侧岸，基础内部浇筑 C30 混凝土，尺寸为 $3\text{ m} \times 8.5\text{ m}$ ，所处边坡稳定坡角为 45° ，嵌入式基础整体立面保持 Z 轴垂直方向，顶端一侧位于斜坡表面，与模型顶端和两侧的距离分别是 30 和 50 m。为便于对基础施加弯矩，在基础顶部设计高度为 4 m，尺寸为 $2\text{ m} \times 6\text{ m}$ 的加载区。模型底部采用固定约束，侧面约束其法向位移，坡

顶和坡面设置为自由表面。由于嵌入式基础内部的筋体与注浆体之间的作用不是本项目的研究重点，因此在建立几何模型的过程中将其建立为一体，并以综合截面参数反映锚杆普通锚固段的物理和力学参数。



(a) 整体计算模型

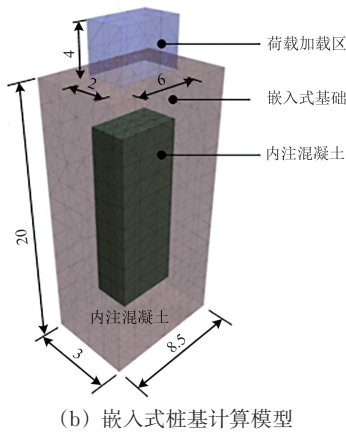


图 6 竖向嵌入式基础计算模型 (单位: m)

嵌入式基础采用线弹性本构, 岩土体模型选用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型。竖向嵌入式基础模型参数取值见表 1。荷载通过基础顶部的加载区施加, 并考虑了竖向力、剪力、扭矩及弯矩的组合作用, 设计荷载见表 2。

表 1 竖向嵌入式基础模型参数

材料	黏聚力/ MPa	内摩 擦角/(°)	体积 模量/GPa	剪切 模量/GPa	重度/ (kN·m ⁻³)
灰岩	1.65	38	29.2	13.5	26.7
嵌入式基础			25.0	11.5	25.0
内部混凝土			16.1	12.1	24.0

表 2 竖向嵌入式基础模型设计荷载

荷载 类型	轴向力/ kN	Y向 剪力/ kN	Z向 剪力/ kN	扭矩/ (kN·m)	Y向 弯矩/ (kN·m)	Z向 弯矩/ (kN·m)
加载量	-9 834.81	57.56	184.69	-2.12	759.25	232.39

2.1 变形分析

竖向嵌入式基础 X 方向水平位移云图如图 7 所示。由图 7 可知: 竖向嵌入式基础最大水平位移出现在桩顶加载位置附近, 并沿基础周身向下逐渐减小; 基础上半部分受影响较大, 这是由于基础上半部分挤压的岩体处于临空面, 当荷载较大时基础周围岩体不足以抵抗荷载, 导致荷载向下传递; 基础

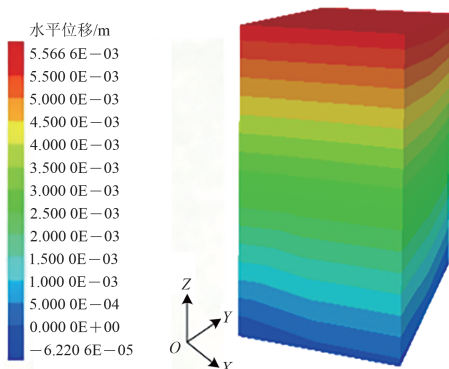


图 7 竖向嵌入式基础 X 方向位移云图

下半部分受影响较小, 下半区域被岩体牢牢嵌固基本不发生位移。

桩端岩体 X 方向水平位移云图如图 8 所示。由图 8 可知: 受设计荷载方向的影响, 基础周围岩体位移趋于荷载加载的方向; 靠临坡侧岩体位移较大, 荷载持续增大时有局部剪切破坏的趋势。

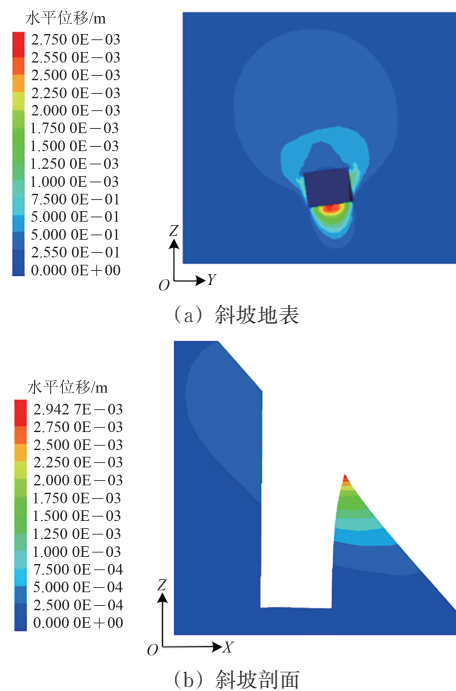


图 8 桩端岩体 X 方向水平位移云图

塑性区云图主要用于显示地质体在特定方向上的塑性体应变, 可直观地反映地质体的变形情况, 有助于了解地质体的变形特征和变形程度。竖向嵌入式基础桩端岩体塑性区如图 9 所示。由图 9 可知: 基础周围岩体塑性区域集中分布在基础下坡侧临坡面岩体区域。

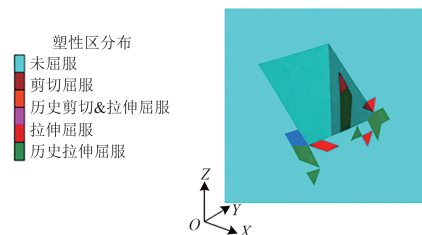


图 9 竖向嵌入式基础桩端塑性区

数值模拟中破裂面的形状通常用最大剪应变云图表示。最大剪应变可以有效地定量表示局部破坏或位移集中的情况, 可直观分析破坏面的形态和分布范围。桩端岩体最大剪应变云图和增量剖面图如图 10 所示。由图 10 可知: 岩体的破裂面位于基础靠下坡一侧一定深度位置, 破裂面呈剪切特征, 其

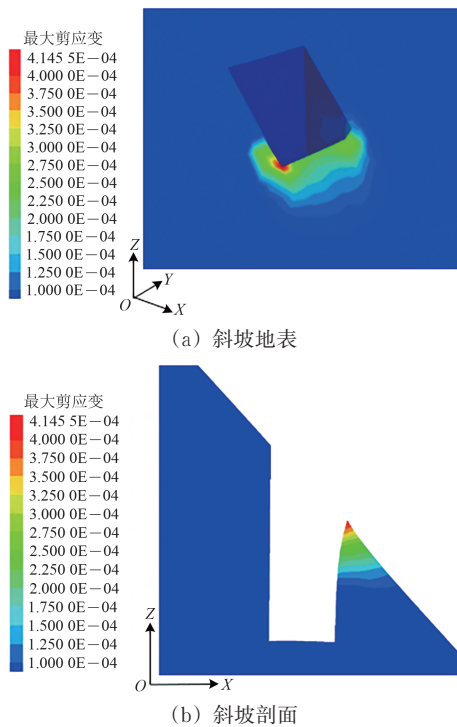


图 10 桩端岩体最大剪应变云图

角度约为 0° 。

2.2 破坏模式

竖向桩基主要承受竖向荷载，其破坏模式主要包括以下 3 种。

(1) 桩身材料强度不足导致的压屈破坏。当桩顶荷载较大，桩身长度较长且长径比较大，而桩身材料的强度不足以承受这种荷载时，桩身可能会发生屈曲变形，最终导致破坏。这种破坏模式主要发生在桩身材料强度相对较低的嵌岩桩中。破坏前桩身会出现明显的弯曲变形，桩顶沉降迅速增加，承载力急剧下降。

(2) 桩端岩体整体剪切破坏。当桩端嵌入的岩体强度较低，或桩端承受的荷载超过岩体的抗剪强度时，桩端岩体可能发生整体剪切破坏。这种破坏模式表现为桩端岩体的剪切面滑动，导致桩的承载力降低。破坏时桩端位移突然增大，伴随着明显的声响和岩体碎片的脱落。

(3) 桩身与岩体界面破坏。在某些情况下，桩身与岩体之间的界面可能因黏结强度不足或施工质量问题而发生破坏。这种破坏模式可能表现为桩身与岩体之间的滑移或脱开。破坏前可能伴有桩顶沉降的缓慢增加和界面处的微小滑移现象。

忠建河特大桥桥基所在山体岩性为灰岩，岩体中节理裂隙发育，易在荷载作用下扩展形成剪切

面，导致岩体整体剪切破坏，故竖向桩基重点分析桩端岩体整体剪切破坏。当竖向桩基承受荷载时，荷载通过桩身传递至桩端，并对桩端岩体施加压力，这一过程可能最终导致基础靠下坡一侧岩体发生剪切破坏，进而引起桩基失稳。破坏过程可分为以下 4 个阶段：①随着外荷载不断增大，桩端压力持续升高，当该压力超过岩体的抗剪强度时，岩体内部开始产生剪应力；②伴随着剪应力的逐渐积累，岩体中潜在剪切面逐步形成并扩展；③当剪切面发育至临界程度，岩体将沿此面发生整体滑动，导致桩端丧失有效支承；④最终，桩基承载力急剧下降，桩端岩体呈现明显滑动痕迹，桩身也往往因失去支撑而产生倾斜或沉降。

3 拱座倾斜嵌入式基础

为探究山区斜坡地形条件下桥梁拱座倾斜嵌入式基础的荷载传递规律与岩土相互作用特性，基于忠建河特大桥灰岩地基的拱座倾斜嵌入式桩基础，通过建立山区斜坡地形条件下拱座倾斜嵌入式基础数值模型，系统分析桩基-岩土体系破坏模式。

该基础位于忠建河特大桥桥梁大里程侧岸，结构类型为拱座倾斜嵌入式基础，基础内部浇筑 C30 混凝土，尺寸为 $8\text{ m} \times 20\text{ m}$ ，所处边坡稳定坡角为 45° ，嵌固深度 25 m。拱座倾斜嵌入式基础采用线弹性本构，岩土体模型选用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型。拱座倾斜嵌入式基础的数值模型如图 11 所示。坡面形态是依据忠建河特大桥大里程侧岸坡的地表高程数据生成的。模型中，嵌入式基础的整体立面保持与 Z 轴平行（即竖直方向），其顶端仍覆盖有带开挖岩体。基础顶端至模型顶面的距离以及基础底面至自然地面的距离均设置为 30 m。2 根桩基础的中心间距为 15 m，每根桩与模型侧边的距

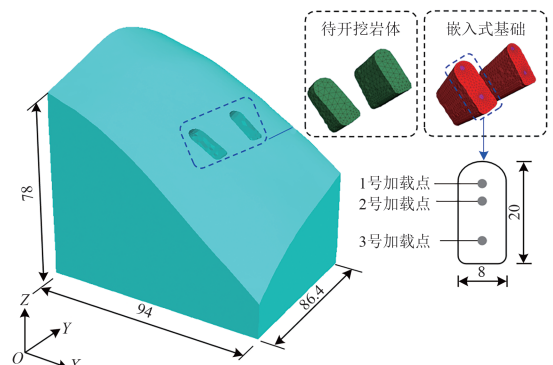


图 11 拱座倾斜嵌入式基础计算模型 (单位: m)

离也为30 m。桩体均以45°倾角斜向植入斜坡岩土体中模型计算参数取值见表1,设计荷载见表3。

表3 拱座倾斜嵌入式基础模型设计荷载

加载位置	轴向力/ kN	Y向 剪力/ kN	Z向 剪力/ kN	扭矩/ (kN·m)	Y向 弯矩/ (kN·m)	Z向 弯矩/ (kN·m)
加载点1	-73 736	-1 788	-1 125	-47	-8 307	-11 801
加载点2	-15 921	-747	-3 594	-47	-874	-673
加载点3	-108 499	-1 408	-1 572	-358	-10 262	-11 856

3.1 变形分析

拱座倾斜嵌入式基础的X方向水平位移云图如图12所示。由图12可知:桩身的变形由2部分组成,一部分是桩身在荷载作用下的自身变形,另一部分则为桩身在地基中的转动变位。具体而言,上部区域的挠曲变形主要由桩自身的变形与转动变形叠加而成,表现出一定的柔性特征;而下部区域的变形主要以转动为主,呈现出一定的刚性。

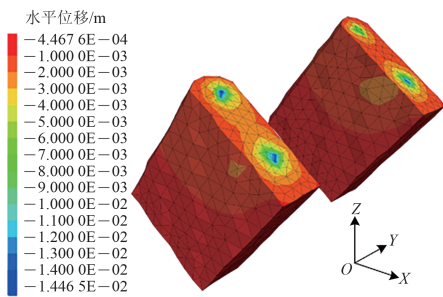


图12 拱座倾斜嵌入式基础水平位移云图

桩端岩体X方向水平位移云图如图13所示。由图13可知:基础周围岩体在临坡面位移增大,但总体位移不超过1 mm;桩体两侧岩体位移较大,荷载持续增大时有整体剪切破坏的趋势。

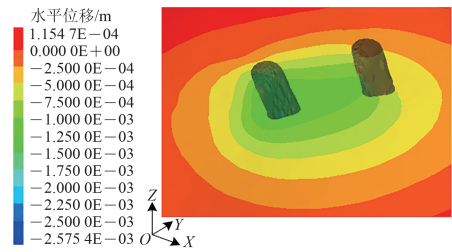
拱座倾斜嵌入式基础桩端岩体的塑性区如图14所示。由图14可知:嵌入式基础与岩体上边缘交界处形成了明显的塑性区,说明拱座倾斜嵌入式基础桩端的临空面岩体发生了明显的破坏。

拱座倾斜嵌入式基础在剪应力为控制荷载条件下基础周围岩体的最大剪应变云图如图15所示。由图15可知:桩端岩体的最大剪应变较大,表明在该荷载条件下临空面岩体处于较高应变状态,基础-岩体体系易发生失稳破坏。

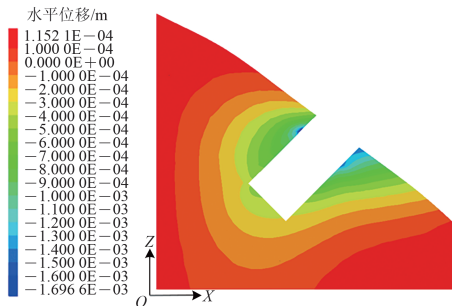
3.2 破坏模式

拱座倾斜嵌入式主要承受斜向荷载,其破坏模式相对复杂,主要包括以下3种。

(1) 轴向屈曲与侧向弯曲组合破坏。由于斜向



(a) 斜坡地表



(b) 斜坡剖面

图13 桩端岩体水平位移云图

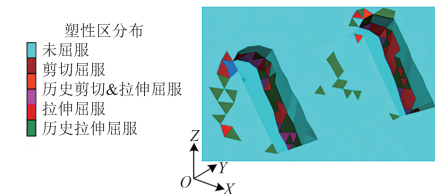
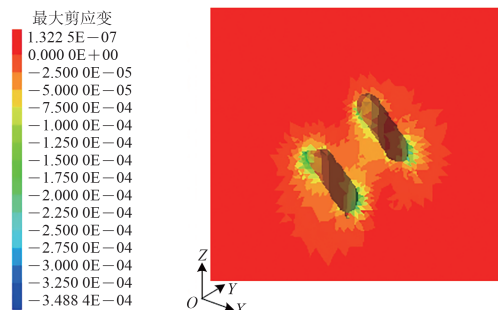
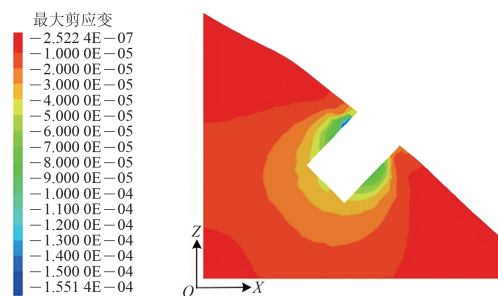


图14 拱座倾斜嵌入式基础桩端塑性区



(a) 斜坡地表



(b) 斜坡剖面

图15 桩端岩体最大剪应变云图

荷载的作用,拱座倾斜嵌入式基础桩基可能同时发生轴向屈曲和侧向弯曲。这种破坏模式表现为桩身

在轴向和侧向均发生明显的变形。破坏时桩身形态复杂，可能伴随有桩顶沉降和侧向位移的同时增加。

(2) 桩侧土体滑动破坏。当桩侧土体强度较低，或斜向荷载产生的水平分力较大时，桩侧土体可能发生滑动破坏。这种破坏模式表现为桩侧土体沿着滑动面滑动，导致桩的承载力降低。破坏时桩侧土体出现明显滑动痕迹，桩身可能受到侧向挤压而变形。

(3) 桩端与桩侧联合破坏。在某些情况下，拱座倾斜嵌入式基础桩基可能同时发生桩端岩体的剪切破坏和桩侧土体的滑动破坏。这种破坏模式表现为桩端和桩侧同时出现破坏迹象，桩的承载力受到严重影响。破坏时桩端和桩侧均出现明显破坏现象，桩身可能受到多个方向的力的作用而变形复杂。

忠建河特大桥桥基所在山体地质条件复杂，岩层分布不均，土层性质多变，拱座倾斜嵌入式基础桩基受多个方向力的作用，故研究重点分析桩基的桩端与桩侧联合破坏。拱座倾斜嵌入式基础桩基在承受荷载时，荷载不仅通过桩身直接传递至桩端，还通过桩侧与土体之间的摩擦和剪切作用分散至周围土体。桩端所承受的压力与桩侧土体的反力共同作用，形成一个复杂的应力分布体系：①若桩端嵌入的岩体或土体强度不足，可能在压力作用下发生压碎、剪切或滑移等破坏现象；②桩端一旦破坏，将导致桩的承载力显著降低，进而加剧桩侧土体的变形和破坏；③同时，桩侧土体在桩身挤压及水平荷载作用下，可能产生塑性变形、剪切破坏或整体滑动；④桩侧土体的破坏会引起土体应力状态的重分布，进一步影响桩的承载性能和整体稳定性。

综上，桩端与桩侧土体的破坏并非孤立，而是相互关联、彼此加剧，形成联合破坏机制：桩端破坏使桩侧土体承受更大压力，而桩侧土体的失效又削弱了对桩端的支撑作用，最终往往表现为桩身倾斜、沉降加剧或断裂等破坏形式。

4 山区斜坡桥梁嵌入式基础设计方法

4.1 设计方法

根据前文所述竖向嵌入式基础和拱座倾斜嵌入式基础的破坏模式，可得桩端岩体整体剪切破坏示意图如图 16 所示。图中： d 为弯矩作用平面内基础边长； b 为垂直于弯矩作用平面的基础边长； h 为

自基础下端锚固点算起的锚固深度； h_r 为自基础下端抗剪最不利处锚固深度，取值为 $h/4$ ； H_1 为基础侧壁摩阻段长度； H_2 为基础锚固点至摩阻段长度； α 为岩体摩擦角； θ 为基础与水平面夹角； a 为基础下端锚固点至坡面垂直距离； l 为锚固面最不利处至坡面垂直距离， a 和 l 由几何关系可得； M_0 为基础拱脚处弯矩； M_G 为基础自重弯矩； Q_0 为基础拱脚处剪力； Q_t 为端承面摩擦力； G 为基础自重； F 为基础拱脚处剪力； P 为自基础轴向压力。

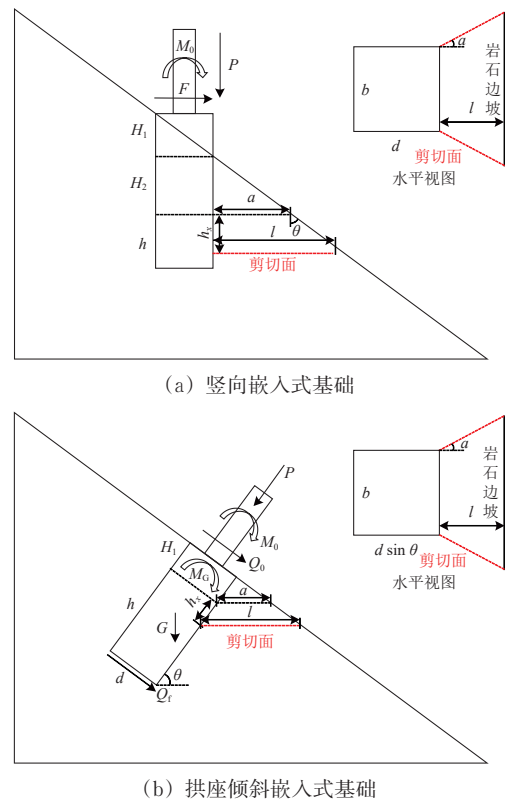


图 16 嵌入式基础桩端岩体整体剪切破坏示意图

M_0 和 Q_0 由规范中设计荷载给出， M_G 、 G 以及 Q_t 计算式如下

$$Q_t = fbd \tag{1}$$

$$G = \rho g b d H_1 \tag{2}$$

$$M_G = G \frac{H_1}{2} \cos \theta \tag{3}$$

式中： f 为基础混凝土与岩石的容许摩阻力； ρ 为基础混凝土密度； g 为重力加速度。

嵌入式基础的设计基于极限平衡理论，包括如下步骤：①初拟嵌入式基础设计参数；②根据锚固点应力计算锚固面以下抗剪最不利处侧向压力 P ；③计算锚固面以下最不利处范围岩体抗剪能力 T ；④判断锚固面以下最不利处岩体抗剪能力 T 是否大

于锚固面以下最不利处侧向压力 P ，并基于判断结果确定锚固长度。具体如下。

1) 初拟设计参数

竖向嵌入式基础的嵌固深度 h 可按下式计算^[23]。

$$h \geq \sqrt{\frac{M}{0.083KRb}} \quad (4)$$

其中，

$$M = M_0 + FH_1 - \tau H_1 d \frac{H_1}{2}$$

式中： K 为根据岩层构造在水平方向的岩石容许压力换算系数，取0.5~1.0； R 为岩石饱和单轴抗压强度； M 为基础下端锚固点处的弯矩； τ 为基础混凝土与岩石的容许摩阻力。

倾斜嵌入式基础的嵌固深度 h 可按下式计算^[24]。

$$h \geq \frac{C + \sqrt{C^2 - 4B(D - E)}}{2(E - D)} \quad (5)$$

其中，

$$B = \frac{6(M_0 + M_G + Q_0 H_1)}{b}$$

$$C = \frac{4Q_0 + 4G \cos \theta + 2Q_f}{b}$$

$$D = \frac{G}{H_1} \cos \theta - 3 \frac{Q_f}{b}$$

$$E = K_1 K_2 R$$

式中： K_1 为安全系数，取0.5； K_2 为根据岩层构造在水平方向的岩石容许压力换算系数，取0.5~1.0。

2) 计算侧向压力 P

侧向压力 P 的计算式为

$$P = (1 - \frac{h_x}{h}) \sigma h_x b \quad (6)$$

其中，

$$\sigma = \frac{M}{0.166bh^2}$$

式中： σ 为自基础下端锚固点应力。

3) 计算岩体抗剪能力 T

岩体抗剪能力 T 的计算式为

$$T = SC \quad (7)$$

式中： S 为岩体抗剪区域面积； C 为岩体设计抗剪强度； T 为自基础下端抗剪最不利处抗剪能力，包括侧面抗剪能力和底面抗剪能力。

针对不同的嵌入式基础，其桩端岩体抗剪区域亦有所不同，下面给出竖向嵌入式基础和拱座倾斜嵌入式基础2种情况下的计算式。

竖向嵌入式基础侧面抗剪能力 T_1 和底面抗剪

能力 T_2 的计算式为

$$T_1 = \frac{\tau(2a + h_x \tan \theta) h_x}{\cos \alpha} \quad (8)$$

$$T_2 = [a + (a + h_x \tan \theta) \tan \alpha] (a + h_x \tan \theta) \tau \quad (9)$$

拱座倾斜嵌入式基础侧面抗剪能力 T_1 和底面抗剪能力 T_2 的计算式为

$$T_1 = f \frac{(a + l) h_x \sin \theta}{\cos \alpha} \quad (10)$$

$$T_2 = f(b + l \tan \alpha) l \quad (11)$$

4) 确定锚固长度

(1) $T \geq P$ ，则确定嵌固基础长度 $H = H_0$ 。

(2) $T < P$ ，则增加嵌固基础长度，令 $H = H_0 + 0.5m$ ，即假设锚固面下移0.5 m。重复步骤①，修正嵌固点弯矩值 M 、最小嵌固深度 h ，根据最小嵌固深度 h 确定新的锚固面位置；根据新的锚固面位置，确定临空面岩石襟边宽度 a 和侧壁约束段长度 H_1 ；重复步骤②，计算锚固面以下最不利处侧向压力 P ；重复步骤③，计算锚固面以下最不利处范围岩体抗剪能力 T ；若 $T \geq P$ 则确定嵌固基础长度 $H = H_0 + 0.5m$ ，若 $T < P$ 则持续增加嵌固基础长度 H ，直至随着临空面岩石襟边宽度 a 临空面覆盖层襟边宽度和侧壁约束段长度 H_1 的增加，其锚固面以下最不利处岩体抗剪能力 $T \geq P$ 为止。

4.2 设计验算

1) 竖向嵌入式基础

针对忠建河特大桥2号桥墩竖向嵌入式基础进行验证，基本参数见表4。

表4 竖向嵌入式基础设计参数

设计参数	参数取值	
基础尺寸	b	3 m
	d	8.5 m
	H_0	20 m
岩体参数	τ	12 MPa
	α	38°
设计荷载	M_0	6 388 kN·m
	Q	1 224 kN
边坡坡度	45°	

将表4参数代入式(4)、式(6)、式(7)、式(9)和式(10)，解得 $h = 9.0$ m。计算可得 $P = 1 661.0$ kN， $T = 1 889.7$ kN，可得 $P < T$ ，竖向嵌入式基础桩端最不利压力 P 为抗剪能力87.9%，所以竖向嵌入式基础的设计尺寸 H_0 满足要求。

2) 拱座倾斜嵌入式基础

针对忠建河特大桥大里程侧拱座倾斜嵌入式基础进行验证,基本参数见表5。

表5 拱座倾斜嵌入式基础设计参数

设计参数	参数取值	
基础尺寸	b	20 m
	d	8 m
	H_0	25 m
	ρ	$2\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
岩体参数	f	0.25 MPa
	α	38°
	K_1	0.5
	K_2	2
设计荷载	R	20 MPa
	M_0	10 262 kN·m
	Q	1 788 kN
边坡坡度	45°	

嵌固深度 h 取最小值计算,将表5参数代入式(5)、式(6)、式(7)、式(11)和式(12),解得 $h=13.2\text{ m}$ 。计算可得 $P=72\,789.7\text{ kN}$, $T=121\,129.6\text{ kN}$,可得 $P<T$,倾斜嵌入式基础桩端最不利压力 P 为抗剪能力60.1%,所以拱座倾斜嵌入式基础的设计尺寸 H_0 满足要求。

5 结论

(1) 根据桩基的受力方向,嵌入式桩基可分为竖向嵌入式基础和拱座倾斜嵌入式基础2类,竖向嵌入式基础为桩端岩体整体剪切破坏,拱座倾斜嵌入式基础为桩端与桩侧联合破坏。

(2) 依托忠建河特大桥工程开展的数值模拟结果表明,针对竖向嵌入式基础,当朝向坡外剪力和弯矩越大,嵌入式基础周围岩体越容易发生剪切破坏,剪切面位于朝坡外一定深度的岩体中,剪切面近似水平;针对拱座倾斜嵌入式基础,基础上部区域由于受荷载影响大,变形相对明显,表现为一定的柔性,下部区域主要是桩身的转动变形,表现为一定的刚性,但总体变形不超过1 mm。拱座倾斜嵌入式基础可能同时发生桩端岩体的剪切破坏和桩侧岩体的滑动破坏。

(3) 基于极限平衡理论,分别提出了山区斜坡桥梁嵌入式基础的设计方法,并验算了忠建河特大桥嵌入式基础的设计合理性。验算结果表明,竖向嵌入式基础桩端最不利压力 P 为抗剪能力的87.9%,倾斜嵌入式基础桩端最不利压力 P 为抗剪能力的60.1%,这表明,提出的设计方法能确保基础具有足够的安全储备,且倾斜嵌入式基础在本工程中展现出更优的抗剪性能,为山区斜坡桥梁的基础选型提供了重要参考。

参 考 文 献

- [1] 冯波,乃麒元,徐华,等.施工期斜坡段桥梁双桩基础受力特性现场监测[J].公路交通科技,2021,38(2):73-79,109.
(FENG Bo, NAI Qiyuan, XU Hua, et al. Field Monitoring and Mechanical Characteristics of Double-Pile Foundation of Bridge in Slope during Construction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (2): 73-79, 109. in Chinese)
- [2] 王航.山区桥梁基础的设计与研究[J].中外公路,2008,28(6):152-154.
(WANG Hang. Design and Research of Bridge Foundation in Mountainous Area [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28 (6): 152-154. in Chinese)
- [3] ZHANG M Y, LUO H. Research on Deformation and Force of Bridge Pile Foundation on High and Steep Slope in Mountainous Area [J]. World Journal of Engineering and Technology, 2020, 8 (3): 551-564.
- [4] 解刚,刘海鹏,赵宝俊,等.考虑冲刷效应的黄土沟壑区桥梁桩基极限承载力计算方法[J].建筑科学与工程学报,2020,37(4):108-115.
(XIE Gang, LIU Haipeng, ZHAO Baojun, et al. Calculation Method of Ultimate Bearing Capacity of Bridge Pile Foundation in Loess Gully Area Considering Scour Effect [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37 (4): 108-115. in Chinese)
- [5] 夏伟,杨立功,李建东,等.基坑回填对膨胀土边坡桥梁基础影响研究[J].水道港口,2020,41(4):469-475.
(XIA Wei, YANG Ligong, LI Jiandong, et al. Study on the Influence of Foundation Pit Backfilling on Bridge Foundation

- of Expansive Soil Slope [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2020, 41(4): 469-475. in Chinese)
- [6] 刘彦峰,刘少成,黄锐.深厚淤泥土层大型沉井基础下沉阻力研究[J].*世界桥梁*,2020,48(3):58-62.
(LIU Yanfeng, LIU Shaocheng, HUANG Rui. Study of Resistances to Large Caisson Sinking in Thick Clay Layer [J]. *World Bridges*, 2020, 48 (3): 58-62. in Chinese)
- [7] LIU T F, WANG X W, YE A J. Roles of Pile-Group and Cap-Rotation Effects on Seismic Failure Mechanisms of Partially-Embedded Bridge Foundations: Quasi-Static Tests [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 132: 106074.
- [8] MUCCIACCIARO M, GEROLYMOS N, SICA S. Seismic Response of Caisson-Supported Bridge Piers on Viscoelastic Soil [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 139: 106341.
- [9] 施洲,李佳奇,秦搏聪,等.大型沉井基础初沉阶段受力特性及开裂控制[J].*中国铁道科学*,2021,42(2):9-18.
(SHI Zhou, LI Jiaqi, QIN Bocong, et al. Mechanical Characteristics and Cracking Control of Large Caisson Foundation in Initial Sinking Stage [J]. *China Railway Science*, 2021, 42 (2): 9-18. in Chinese)
- [10] 宋旭明,王天良,唐冕,等.基于试验和数值仿真的软土群桩基础m值研究[J].*中国铁道科学*,2023,44(1):58-66.
(SONG Xuming, WANG Tianliang, TANG Mian, et al. Research on m Value of Pile Group Foundation in Soft Soil Based on Test and Numerical Simulation [J]. *China Railway Science*, 2023, 44 (1): 58-66. in Chinese)
- [11] POULOS H G. Analysis of the Settlement of Pile Groups [J]. *Géotechnique*, 1968, 18 (4): 449-471.
- [12] WOLF J, VON ARX G A. Impedance Function of a Group of Vertical Piles [C]// *Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference*. Pasadena, USA. Reston: Geotechnical Engineering Division of ASCE, 1978: 1024-1041.
- [13] DOBRY R, GAZETAS G. Simple Method for Dynamic Stiffness and Damping of Floating Pile Groups [J]. *Géotechnique*, 1988, 38 (4): 557-574.
- [14] KAYNIA A M, KAUSEL E. Dynamics of Piles and Pile Groups in Layered Soil Media [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1991, 10 (8): 386-401.
- [15] MIURA K, KAYNIA A M, MASUDA K, et al. Dynamic Behaviour of Pile Foundations in Homogeneous and Non-Homogeneous Media [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1994, 23 (2): 183-192.
- [16] KAPPOS A J, SEXTOS A G. Effect of Foundation Type and Compliance on Seismic Response of RC Bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2001, 6 (2): 120-130.
- [17] MAMOON S M, BANERJEE P K. Response of Piles and Pile Groups to Travelling SH-Waves [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1990, 19 (4): 597-610.
- [18] MORS H. Methods of Dimensioning for Uplift Foundations of Transmission Line Towers [J]. *CIGRE Paper*, 1964: 07-210-1964.
- [19] 鲁先龙,杨文智,童瑞铭,等.输电线路掏挖基础抗拔极限承载力的可靠度分析[J].*电网与清洁能源*,2012,28(1):9-15,44.
(LU Xianlong, YANG Wenzhi, TONG Ruiming, et al. Reliability Analysis on Ultimate Uplift Bearing Capacity of Belled Pier Foundation in Transmission Line Engineering [J]. *Power System and Clean Energy*, 2012, 28 (1): 9-15, 44. in Chinese)
- [20] 李永祥.岩石嵌固式基础在750 kV输电线路中的应用研究[J].*电力建设*,2009,30(6):39-42.
(LI Yongxiang. Application and Study on Rock-Embedded Foundation in 750 kV Transmission Line [J]. *Electric Power Construction*, 2009, 30 (6): 39-42. in Chinese)
- [21] 汪德敏,阮少林,刘长征.上覆浅层黏土的嵌固式岩石基础上拔试验研究[J].*黑龙江电力*,2015,37(1):49-53.
(WANG Demin, RUAN Shaolin, LIU Changzheng. Research on Uplift Test of Rock Embedded Foundation Covered by Shallow Clay [J]. *Heilongjiang Electric Power*, 2015, 37 (1): 49-53. in Chinese)
- [22] 郑卫锋,韩杨春,聂兰磊.输电线路岩石嵌固基础抗拔试验及数值模拟分析[J].*地震工程学报*,2016,38(5):738-744.
(ZHENG Weifeng, HAN Yangchun, NIE Lanlei. Uplift Tests and Numerical Simulation Analysis of Transmission Line with Rock Embedded Foundation [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2016, 38 (5): 738-744. in Chinese)
- [23] 陈克坚,胡玉珠,艾智能,等.一种高陡边坡桥梁嵌固基础的设计方法:中国,CN113158285B[P].2022-5-17.
(CHEN Kejian, HU Yuzhu, AI Zhining, et al. A Design Method for Embedded Foundation of High and Steep Slope Bridges: China, CN113158285B [P]. 2022-5-17. in Chinese)

- [24] 宋随弟, 马庭林, 廖成强, 等. 大跨拱桥超大型倾斜式独桩基础构造: 中国, CN104389317B [P]. 2017-10-10.
(SONG Suidi, MA Tinglin, LIAO Chengqiang, et al. Construction of Ultra Large Inclined Single Pile Foundation for Long-Span Arch Bridges: China, CN104389317B [P]. 2017-10-10. in Chinese)

Stability Analysis and Design Method of Embedded Foundation for Bridges under Mountainous Slope Terrain Conditions

YAN Aiguo¹, WANG Xinguo¹, WANG Cunguo¹, GUO Pan¹, FU Xiaodong^{2,3},
ZHOU Yongqiang^{2,3}, DING Haifeng^{2,3}

(1. China Railway Fourth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan Hubei 430063, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan Hubei 430071, China;

3. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With the continuous advancement of infrastructure construction in western China, research on the bearing mechanisms and design methods of bridge foundations in complex terrain has become increasingly important. Focusing on the mechanical properties and structural design of embedded foundations for railway bridges in mountainous areas, this study investigates the potential failure modes of slope rock mass under combined loads. A theoretical calculation model for the embedded foundation-rock mass system under slope terrain conditions was established, revealing the interaction mechanism between the foundation and the slope rock mass. Based on this, combined with limit equilibrium theory, formulas for the ultimate bearing capacity of vertical embedded foundations and inclined arch-abutment embedded foundations under slope conditions were derived. The design rationality of the embedded foundation for the Zhongjian River Bridge was verified. The results show that the primary failure mode of vertical embedded foundations is overall shear failure of the rock mass at the pile end. As the shear force and bending moment loads outside the slope increase, the foundation-rock mass system is prone to horizontal shear failure. For inclined arch-abutment embedded foundations, the main failure mode involves combined failure at the pile end and along the pile side. The upper part of the pile foundation exhibits significant load-induced deformation, showing flexible characteristics, while the lower part mainly undergoes rigid deformation. Verification results indicate that the design parameters of both types of foundations meet bearing capacity requirements. The results provide a theoretical basis and engineering reference for the design and stability analysis of bridge foundations in mountainous areas.

Key words: Mountain railway; Embedded foundation; Limit equilibrium theory; Stability analysis; Failure mode; Design method

(责任编辑 王蕴嘉)