

文章编号: 1674—8247(2018)03—0041—05

## 岩石地区铁路嵌固桩设计

王 聪 袁 明 鄢 勇 陈扬义

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**鲁南高速铁路临曲段、日临段由于基岩强度高、弱风化层基岩埋藏较浅而大量采用了嵌固桩。但岩石地区铁路嵌固桩设计案例较少,因此有必要对嵌固桩的设计进行深入研究,以确定本线嵌固桩基础的设计方法和原则。通过研究,总结了嵌固桩的计算方法,并得到以下结论:(1)嵌固桩必须检算基底应力;(2)嵌固桩主要由嵌固深度控制设计,高烈度地震区基底应力有可能会控制设计;桩基承载力、下部结构组合刚度、墩顶纵横向位移、桩身强度及桩侧土压力等检算均不控制设计;(3)进行嵌固深度计算时,对基岩的单轴抗压强度宜进行折减修正。

**关键词:**嵌固桩; 岩石地区; 设计

**中图分类号:**U443.11 **文献标志码:**A

## Design of Railway Embedded Piles in the Rock Areas

WANG Cong YUAN Ming YAN Yong CHEN Yangyi

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** A lot of embedded piles are adopted because of high bedrock strength and shallow buried weak weathered layer in Lin-Qu section and Ri-Lin section of South Shandong high-speed railway. However, there are few design cases for the railway embedded piles in the rock areas, so it is necessary to study the design of the embedded pile to determine the design method and principle of embedded pile foundation of this line. The calculation method of the embedded piles is summarized by studying and the following conclusions are obtained: (1) The foundation stress should be checked for the embedded piles; (2) The embedded piles is mainly controlled by embedded depth calculation, and the design of foundation stress calculation in high earthquake intensity areas may be controlled, however, the design of calculation of the pile foundation bearing capacity, the composite stiffness of the lower structure, the vertical and horizontal displacement of the pier head, the strength of the pile body and the soil pressure at the side of the piles are not controlled. (3) When the embedded depth is calculated, the uniaxial compressive strength  $R$  of the bedrock should be corrected.

**Key words:** embedded pile; rock area; design

嵌固桩是一种介于明挖基础和桩基础(柱桩)之间的基础形式,主要用于地质条件较好的岩石地区,且岩石弱风化层埋藏深度为4~7 m的情况。岩石弱风化层埋藏过浅时,可直接设计为明挖基础;埋藏过深

时,则开挖不便,施工安全隐患较大,且经济性不明显,此时宜设计为桩基础。因此,在鲁南高速铁路桥梁基础设计中,对明挖基础、嵌固桩和桩基础的各自适用原则确定如下:从原地面起算,最大挖深在6 m左右,开

收稿日期:2017-08-22

作者简介:王聪(1979-),男,高级工程师。

引文格式:王聪,袁明,鄢勇,等. 岩石地区铁路嵌固桩设计[J]. 高速铁路技术,2018,9(3):41-45.

WANG Cong, YUAN Ming, YAN Yong, et al. Design of Railway Embedded Piles in the Rock Areas [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(3): 41-45.

挖深度范围内无地下水且基底基本承载力时采用明挖基础;挖深在 6~10 m,开挖深度范围内无地下水且岩石弱风化层的单轴抗压强度时采用嵌固桩;其余情况下采用桩基础<sup>[1]</sup>。其透视图如图 1 所示。

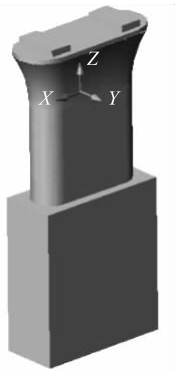


图1 鲁南高速铁路简支梁桥墩及嵌固桩三维图(墩高5 m)

嵌固桩在构造上类似于常在西北地区使用的挖井基础,但在具体适用环境、设计条件下有明显差异。挖井基础是某设计院于上世纪九十年代提出的一种介于明挖和沉井基础之间的基础形式<sup>[2]</sup>,其基础平面尺寸较明挖基础大,适用于不宜采用明挖而桩基础又不经济的情况,井深一般不大于 15 m(已报道的挖井基础最大井深能达到 18 m),主要用于西北老黄土地区及地下水埋藏较深的砂砾石、卵石环境。嵌固桩与挖井基础的主要差异点如 1 表所示<sup>[3-4]</sup>。

表1 嵌固桩、挖井基础的异同点汇总表

	嵌固桩	挖井基础
适用地质条件	挖深在 10 m 左右,无地下水且岩石弱风化层的饱和单轴抗压强度	西北老黄土地区及地下水埋藏较深的砂砾石、卵石环境
基础平面尺寸	基础尺寸比相同墩高、桥跨条件下的明挖基础小	基础尺寸比相同墩高、桥跨条件下的明挖基础大
基础最大挖深	10 m 左右	一般 15 m 以内,最大 18 m 左右

目前,关于岩石地区嵌固桩基础研究和应用的文献较少,其设计方法仍处于摸索、总结阶段。在鲁南高速铁路临沂至曲阜段、日照至临沂段设计中大量采用了嵌固桩<sup>[5-6]</sup>,现将其设计要点及有关思考总结如下,供相关单位、部门参考。

1 嵌固桩的设计要点

岩石地区嵌固桩的设计主要依据TB 10093-2017《铁路桥涵地基和基础设计规范》(以下简称为“《桥涵地基规范》”)中柱桩算法及其“附录 D.0.3 基础的分析计算”中的“一般情况”<sup>[7-8]</sup>,现将其归纳总结如下。

1.1 嵌固深度计算

嵌固桩下端嵌入岩石弱风化层内,假定桩身弯矩

均由锚固侧岩石承担,则锚固深度由《桥涵地基规范》6.2.3 条计算确定。设计采用的嵌固桩均为矩形截面,故设计所需要的嵌固深度为:

h=√(M/(0.083K×R×b)) (1)

式中:M——桩下端锚固点处的弯矩(kN·m);  
K——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——岩石单轴抗压强度(kPa);  
b——垂直于弯矩作用平面桩的边长(m)。

1.2 单桩承载力计算

单桩的轴向容许承载力应分别按桩身材料强度和岩土阻力进行计算,取其较小值作为控制值。按桩身材料强度计算时,按轴心抗压强度考虑<sup>[9]</sup>。

嵌固桩下端嵌入岩石弱风化层内,按岩土阻力计算时,其单桩容许承载力应按《桥涵地基规范》6.2.2-4 条中“嵌入岩石层内的钻孔灌注桩”来计算容许承载力,即:

[P]=R(C1A+C2Uh) (2)

式中:A——桩底面积(m²);  
U——嵌入岩石层内桩的周长(m);  
h——自新鲜岩石面算起的嵌入深度(m);  
C1、C2——系数,根据岩石层破碎程度和清底情况决定,按《桥涵地基规范》表 6.2.2-7 采用。

根据《桥涵地基规范》6.2.6-2 条的要求“柱桩桩顶承受的轴向压力加桩身自重不应大于第 6.2.2 条岩石强度计算的单桩容许承载力”,即嵌固桩承载力应满足:

N+G≤[P] (3)

式中:N——作用于桩顶的竖直轴向力(kN);  
G——包括填充物在内的构件自重(kN)。

1.3 基底地基竖向压应力检算

《桥涵地基规范》附录 D 中要求“对嵌入岩石内的基础,h>4.0/α时,可不检算基底应力”,也就是说,h≤4.0/α时,应检算嵌固桩基底应力。

设计常用简支梁墩的嵌固桩尺寸(顺线路方向长 2.4~3.0 m,垂直线路方向宽 6.4~7.0 m,桩长不超过 10 m)对应的基础变形系数 α=√(mb0/EI)一般在 0.15~0.32 之间,则4.0/α=12.5~26.7>h。因此,根据

规范要求,设计此类嵌固桩应检算基底应力。

计算嵌固桩桩底的竖向力时应考虑嵌固桩入岩部分的侧面摩阻力,该部分摩阻力按  $T = R(C_2Uh)$  计算,则桩底竖向力为  $N_h = N + G - T = N + G - R(C_2Uh)$ 。实际设计中由于  $N + G \ll R(C_2Uh)$ ,由此计算得到的  $N_h < 0$ ,故取  $N_h = 0$ 。

桩底截面的弯矩按附录 D.0.3-6 式计算,即:

$$M_y = \alpha EI(\alpha x_0 A_3 + \varphi_0 B_3) + M_0 C_3 + \frac{Q_0}{\alpha} D_3 \quad (4)$$

其中,  $x_0 = Q_0 \delta_{QQ} + M_0 \delta_{QM}$ ,  $\varphi_0 = -(Q_0 \delta_{MQ} + M_0 \delta_{MM})$  为地面或局部冲刷线处构件的水平位移(m)和转角(rad);  $Q_0$ 、 $M_0$  分别表示嵌固桩于地面或局部冲刷线处的剪力(kN)和弯矩(kN·m);  $\delta_{QQ}$ 、 $\delta_{QM} = \delta_{MQ}$ 、 $\delta_{MM}$  按《桥涵地基规范》中附 D.0.3-1 式计算;  $A_3$ 、 $B_3$ 、 $C_3$ 、 $D_3$  均为系数,按  $\bar{h} = \alpha y$  查附表 D.0.3-1 而得。

由于基底截面为纯弯状态( $N_h = 0$ ),偏心大于桩底截面核心距,因此验算基底应力应考虑应力重分布影响。嵌固桩在桩侧受到岩石的紧密抱箍,桩底不可能出现拉应力,只能绕角点 A 发生转动变形,如图 2 所示。根据平衡移轴公式和力的平衡条件<sup>[10]</sup>,不难推导出桩底截面在纯弯荷载  $M_y$  作用下的最大压应力为:

$$\sigma_x = \frac{3M_y}{BH^2} \quad (5)$$

式中:  $B$ 、 $H$ ——垂直于弯矩作用方向和顺弯矩作用方向的桩底截面尺寸。

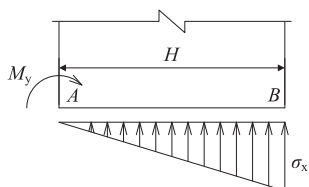


图2 嵌固桩桩底应力图示

当桩身受双向弯矩作用时,按上述方法分别计算出两个方向的最大压应力,然后予以叠加得到桩底的控制应力  $\sigma_{\max} = \sigma_x + \sigma_y$ ,并应满足条件  $\sigma_{\max} \leq [\sigma]$ ,其中  $[\sigma]$  为基底岩石的容许承载力。

#### 1.4 下部结构组合刚度计算

根据《桥涵地基规范》附录 D.0.3-2 式可算出当嵌固桩地面(或局部冲刷线)处作用单位横向力  $Q_0 = 1$  和单位力矩  $M_0 = 1$  时,该处构件的横向位移和转角为:

$$\delta_{QQ} = \frac{1}{\alpha^2 EI} \cdot \frac{B_2 D_1 - B_1 D_2}{A_2 B_1 - A_1 B_2} \quad (6)$$

$$\delta_{MQ} = \frac{1}{\alpha^2 EI} \cdot \frac{A_2 D_1 - A_1 D_2}{A_2 B_1 - A_1 B_2} \quad (7)$$

$$\delta_{QM} = \frac{1}{\alpha^2 EI} \cdot \frac{B_2 C_1 - B_1 C_2}{A_2 B_1 - A_1 B_2} \quad (8)$$

$$\delta_{MM} = \frac{1}{\alpha EI} \cdot \frac{A_2 C_1 - A_1 C_2}{A_2 B_1 - A_1 B_2} \quad (9)$$

$$\delta_{MQ} = \delta_{QM} \quad (10)$$

式中:  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $D_1$ 、 $D_2$ ——系数,按  $\bar{h} = \alpha y$  查附表 D.0.3-1 而得。

如果墩身部分的线刚度为  $K_{墩}$ ,墩顶至嵌固桩地面线(或局部冲刷线)的高度为  $H_{总}$ ,则墩身与嵌固桩的组合线刚度为:

$$K_{组合} = \frac{1}{\frac{1}{K_{墩}} \delta_{QQ} + H_{总} \cdot \delta_{MQ}} \quad (11)$$

下部结构的纵横向组合刚度均可按上述步骤开展计算。

对于简支梁结构,待求得其下部结构的纵向组合刚度后,应根据 TB 10002-2017《铁路桥涵设计规范》5.4.3 条或 TB 10621-2014《高速铁路设计规范》7.3.8 条核查  $K_{纵} \leq [K_{纵}]$ <sup>[11-12]</sup>。

#### 1.5 桥梁结构墩顶位移计算

已知嵌固桩地面线(或局部冲刷线)处作用的横向力  $Q_1$  和力矩  $M_1$ ,墩顶至嵌固桩地面线(或局部冲刷线)的高度为  $H_{总}$  时,可按《桥涵地基规范》中附录 D.0.3-5 式求出墩顶水平位移:

$$\delta = Q_1 \cdot \delta_{QQ} + M_1 \cdot \delta_{QM} - H_{总} (Q_1 \cdot \delta_{MQ} + M_1 \cdot \delta_{MM}) + \delta_{墩} \quad (12)$$

式中:  $\delta_{墩}$ ——该组荷载组合下地面(或局部冲刷线)以上部分基础和墩身变形引起的墩台顶面水平位移;

$\delta_{QQ}$ 、 $\delta_{QM} = \delta_{MQ}$ 、 $\delta_{MM}$ ——系数,按《桥涵地基规范》中附录 D.0.3-1 式计算。

得到墩顶纵横向位移后,核查  $\delta_{墩顶} \leq [\delta]$ ,确保结构变形满足要求<sup>[11-12]</sup>。

#### 1.6 嵌固桩桩身强度及桩侧土应力验算

按《桥涵地基规范》中附录 D.0.3-6 式计算出嵌固桩于地面(或局部冲刷线)以下深度处构件截面上的弯矩(kN·m)、剪力(kN)和桩侧土的压应力(kPa)如下:

$$M_y = \alpha EI(\alpha x_0 A_3 + \varphi_0 B_3) + M_0 C_3 + \frac{Q_0}{\alpha} D_3 \quad (13)$$

$$Q_y = \alpha^2 EI(\alpha x_0 A_4 + \varphi_0 B_4) + \alpha M_0 C_4 + Q_0 D_4 \quad (14)$$

$$\sigma_x = m\gamma \left( x_0 A_1 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_1 \right) + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_1 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_1 \quad (15)$$

嵌固桩于地面(或局部冲刷线)以下的构件部分根据上述  $M_y$ 、 $Q_y$  值,偏安全和简便地按纯弯构件验算其抗弯、抗剪强度及裂缝宽度。

嵌固桩于地面(或局部冲刷线)以上的构件部分,无土体对桩身的抵抗作用,按偏压构件验算其抗弯、抗剪强度及裂缝宽度。

当桩侧土压力的极值发生在  $y \leq \frac{h}{3}$  处时,桩侧土压力应满足:

$$\sigma_{x\max} \leq \eta_1 \eta_2 k \left[ \gamma y (\eta K_p - K_a) + 2c (\eta \sqrt{K_p} + \sqrt{K_a}) \right] \quad (16)$$

当桩侧土压力的极值发生在  $y > \frac{h}{3}$  处时,桩侧土压力应满足:

$$\sigma_{x\max} \leq \eta_1 \eta_2 k \left[ \gamma \frac{h}{3} (\eta K_p - K_a) + 2c (\eta \sqrt{K_p} + \sqrt{K_a}) \right] \quad (17)$$

式中:  $\gamma$ ——土的容重( $\text{kN/m}^3$ );

$c$ ——土的粘聚力( $\text{kPa}$ );

$\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $K_a$ 、 $K_p$ ——系数,详见《桥涵地基规范》附录 D 中注释。

## 2 关于嵌固桩设计的经验总结及有关探讨

(1) 嵌固桩必须检算应力。由于嵌固桩桩长相对较短( $h \leq \frac{4.0}{\alpha}$ ),根据《桥涵地基规范》附录 D,此时应检算嵌固桩基底应力,其中在计算桩底作用于基底的竖向力时应考虑桩身与基岩之间竖向摩阻力影响。

(2) 因嵌固桩一般用于地质条件较好的岩石地区(岩石弱风化层的饱和单轴抗压强度  $R \geq 15 \text{ MPa}$  时),一般由嵌固深度计算控制桩长设计。

高烈度地震区( $a \geq 0.20g$  时),因墩底弯矩较大,基底竖向压应力有可能控制嵌固桩设计,此时可适当加大桩身截面尺寸或增加桩长,因嵌固桩随着  $\bar{h} = \alpha y$  的增加,桩底的内力能快速衰减,有时适当增加桩长比增加截面尺寸更为经济。

嵌固桩设计中,一般单桩承载力、下部结构组合刚度、墩顶纵横向位移、桩身强度及桩侧土压力等检算均不控制设计。

(3) 确定嵌固桩桩长时应考虑稳定嵌岩面的

影响。

嵌固桩下端嵌入岩石内的锚固点应视桩所处的岩石坚硬程度、岩石完整程度、节理发育程度、风化程度和岩面起伏程度而定。参照《铁路桥梁钻(挖)孔桩基础设计一般规定》<sup>[13]</sup> 和以往设计经验和施工实际情况,锚固点最外侧距稳定基岩面的最小水平距离  $d$  按以下规定确定,如图 3 所示。

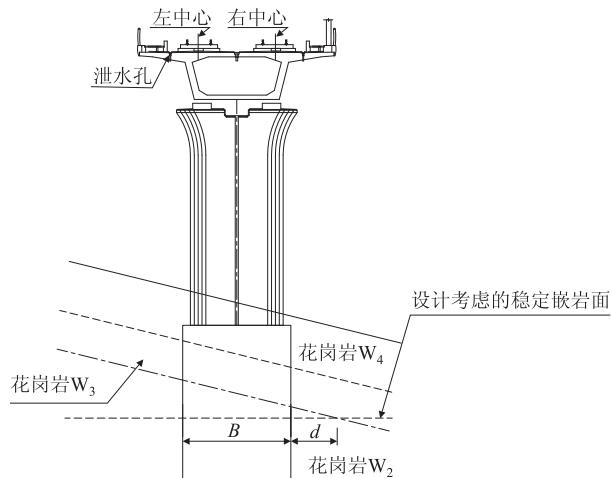


图3 嵌固桩稳定嵌岩面的确定

①弱风化的硬质岩取 1.5~2 倍桩身尺寸  $B$ ,且不小于 3 m。

②弱风化的软质岩取 2.5 倍桩身尺寸  $B$ ,且不小于 4 m。

(4) 嵌固桩尽管在形式上介于明挖基础和桩基础之间,但在设计方法上却基本与桩基础一致,从受力特征上看,嵌固桩是只有“一根桩”的桩基础。

由于嵌固桩比常用群桩基础中的单根桩尺寸要大得多,因此在确定嵌固桩竖向承载力以及嵌固深度时,宜考虑嵌固桩桩身的尺寸效应,对岩石的单轴抗压强度值应进行适当折减。目前缺少该方面的理论研究成果和实践经验,具体折减系数需根据工程经验进行摸索。 $R$  值采用桩端岩石的饱和单轴抗压强度,黏土质岩取天然湿度单轴抗压强度<sup>[14]</sup>。

(5) 嵌固桩不适合于桩身范围有地下水的情况。嵌固桩在施工中主要靠人工挖掘、控制爆破、水磨钻施工等方法实施,实施中需要人下到桩底进行操作;为了防止塌孔,保证操作人员安全,应在开挖过程中在非岩石地层内采用锁口护壁措施,并避免在有水的地质条件下采用嵌固桩基础。为了加强嵌固作用,基岩  $W3$ 、 $W2$  中的基坑开挖时应不留襟边、不放坡,采用垂直开挖,基础满灌施工。

参考文献:

[1] 中铁二院工程集团有限责任公司. 鲁南高铁日临段初设修编主要设计原则[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2016.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Primary Design Principles for the Preliminary Design Revised Edition of the Newly Built Southern Shandong High-speed Railway[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2016.

[2] 王军. 铁路桥梁墩台基础设计经验小结[J]. 甘肃科技, 2008, 24(8): 121 - 122.  
WANG Jun. The Summary of the Experience in the Design of Railway Bridge Piers and Foundations[J]. Gansu Science and Technology, 2008, 24(8): 121 - 122.

[3] 田宜鑫. 侯月铁路上的浚河特大桥[J]. 铁道标准设计, 1996, 40(3): 4 - 5.  
TIAN Yixin. The Huihe River Bridge on Hou Yue Railway[J]. Railway Standard Design, 1996, 40(3): 4 - 5.

[4] 孙学先. 黄土地基挖井基础试验与桥涵设规方法计算结果比较[J]. 铁道标准设计, 1997, 41(10): 6 - 8.  
SUN Xuexian. Dug Well Foundation Test of Loess Foundation and Comparison of Calculation Results of Bridge and Culvert Design[J]. Railway Standard Design, 1997, 41(10): 6 - 8.

[5] 中国铁路经济规划研究院. 关于发送新建鲁南高速铁路临沂至曲阜段初步设计咨询意见的函[R]. 北京: 中国铁路经济规划研究院, 2016.  
China Railway Economic and Planning Research Institute. Letter of the China Railway Economic and Planning Research Institute on the Preliminary Design Advice of the Linyi-Qufu Section of the Newly Built Southern Shandong High Speed Railway[R]. Beijing: China Railway Economic and Planning Research Institute, 2016.

[6] 中国铁路经济规划研究院. 关于发送新建鲁南高速铁路日照至临沂段初步设计咨询意见的函[R]. 北京: 中国铁路经济规划研究院, 2017.  
China Railway Economic and Planning Research Institute. Letter of the China Railway Economic and Planning Research Institute on the Preliminary Design Advice of the Rizhao-Linyi Section of the Newly Built Southern Shandong High Speed Railway[R]. Beijing: China Railway Economic and Planning Research Institute, 2017.

[7] TB10093 - 2017 铁路桥涵地基和基础设计规范[S].  
TB 10093 - 2017 Code for Design on Subsoil and Foundation of Railway Bridge and Culvert[S].

[8] 铁道第三勘察设计院. 桥涵地基和基础[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.  
China Railway Third Survey and Design Institute. Ground Base and Foundation of Bridges and Culverts[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.

[9] TB 10092 - 2017 铁路桥涵混凝土结构设计规范[S].  
TB 10092 - 2017 Code for Design of Concrete Structures of Railway Bridge and Culvert[S].

[10] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学(第三版, 下册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1994.  
SUN Xunfang, FANG Xiaoshu, GUAN Laitai. Mechanics of Materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 1994.

[11] TB 10002 - 2017 铁路桥涵设计规范[S].  
TB 10002 - 2017 Code for Design on Railway Bridge and Culvert[S].

[12] TB 10621 - 2014 高速铁路设计规范[S].  
TB 10621 - 2014 Code for Design of High Speed Railway[S].

[13] 中铁二院工程集团有限责任公司. 铁路桥梁钻(挖)孔桩基础设计一般规定[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2007.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. General Provisions for Design of Drilling (Dug) Pile Foundation for Railway Bridges[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2007.

[14] JTG D63 - 2007 公路桥涵地基与基础设计规范[S].  
JTG D63 - 2007 Code for Design of Ground Base and Foundation of Highway Bridges and Culverts[S].

(编辑: 车晓梅 苏玲梅)