

文章编号: 1006—2106(2009)10—0064—05

# 狮子洋隧道明挖敞开结构抗浮设计<sup>\*</sup>

阳 芳<sup>\*\*</sup>

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

**摘要:** 研究目的: 广深港客运专线狮子洋隧道是我国第一条水下铁路隧道, 也是世界上行车速度目标值最高的水下隧道。本文结合广深港客运专线狮子洋隧道, 阐述明挖隧道结构抗浮设计中存在的一些问题, 通过分析与计算, 提出明挖隧道结构设计中可采取的抗浮水位、浮力、抗浮力建议值和抗拔桩的配筋量, 可为类似工程抗拔桩设计提供借鉴。

**研究结论:** 目前由于抗浮水位的选取没有统一标准, 既有浮力计算理论不考虑结构所处地层的渗透特性, 导致抗浮设计结果与实际情况有一定偏差。通过分析与计算提出: 当抗拔桩桩长大于 10 m 时, 采用分段方式配筋, 以节约成本; 在抗拔桩设计时应同时考虑其作为承压桩的可能性, 并验算抗拔桩的设置对隧道结构内力的影响。

**关键词:** 水底隧道; 敞开段; 抗浮; 抗拔桩

**中图分类号:** U452.2<sup>+</sup>5 **文献标识码:** A

## Design of the Open Structure of Shiziyang Tunnel for Float—resistance

YANG Fang

(China Railway Survey and Design Group Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430063, China)

**Abstract:** Research purposes: The Shiziyang Tunnel of Guangzhou—Shenzhen—Hongkong Passenger Dedicated Line is the first underwater railway tunnel in China and the highest—speed underwater railway tunnel in the world. In this paper, compared with construction of Shiziyang Tunnel, the introduction is given to the problems in design of tunnel structure for float—resistance. Based on the analysis and calculation, the advisable values of float—resistant water level, buoyant force and buoyant force—resistance and the reinforcement number of uplift pile are offered for design of open cut tunnel structure to provide the reference to the similar works.

**Research conclusions:** As there is no uniform standard for selection of the float—resistant water level and the current theory about calculating buoyant force does not regard the penetration of the soil layers where the tunnel structure is on, the design result of float—resistance deviates from the real situation. From the analysis and calculation, it is concluded when the pile length of uplift pile is longer than 10 m, the sectional reinforcement should be conducted to save the cost. The possibility of taking uplift pile as load bearing pile should be considered in design of the uplift pile and the influence of installation of uplift pile on the internal force of the tunnel structure should be calculated.

**Key words:** underwater tunnel; open section; float—resistant; uplift pile

随着水底隧道设计与施工技术的成熟, 水底隧道作为继桥梁之后一种新的高效的越江交通方式越来越

受到人们的欢迎。目前国内已竣工和正在建设的下穿长江的有武汉、南京、上海水底交通隧道; 下穿钱塘江

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2009—05—19

<sup>\*\*</sup> 作者简介: 阳芳, 1979年出生, 女, 工程师。

的庆春路、钱江隧道; 下穿珠江的狮子洋隧道; 下穿浏阳河的公路和铁路隧道; 下穿黄浦江的隧道多达十几条。水底隧道丰富了过江交通方式, 开创了江上架桥、江面行船、江底通隧的交通新格局。

水底隧道与两岸地面一般采用一定坡度的暗埋段和敞开段进行连接。明挖结构距江河较近, 丰水期地下水位较高, 甚至可能发生内涝, 故水底隧道的抗浮设计十分关键。敞开段和覆土较浅的暗埋段结构抗浮不满足要求时, 根据具体工程需采取临时或永久性的抗浮措施。本文结合广深港客运专线狮子洋隧道, 就明挖隧道结构抗浮设计中存在的一些问题进行探讨。

1 工程概况

狮子洋隧道位于珠江三角洲平原地区, 穿越珠江入海口的狮子洋, 水面宽 6 100 m 全长 10 8 km 其中盾构段长 9 340 m。该隧道是我国第一条水下铁路隧道, 设计车速为 350 km/h 是世界上行车速度目标值最高的水下隧道, 也是广深港客运专线控制性工程。

隧道引道敞开段围护结构采用钢板桩, 在底板结构下设置  $\phi$ 800 抗拔桩进行抗浮。

运营期隧道抗浮设计原则是抗浮稳定安全系数, 不考虑摩阻力时不小于 1.1, 考虑摩阻力时不小于 1.2。

2 敞开段抗浮设计

敞开段结构不存在覆土, 因而抗浮问题尤为突出。本文以隧道出口第 15 节为例探讨敞开段的抗浮设计。该节里程 DK 43+650~+680 长 30 m。结构横断面如图 1 所示。地层情况经地质钻探自上而下揭示为表 1 所示。结构底板位于淤泥层, 基底承载力不满足要求, 基坑施工前采用  $\phi$ 800 旋喷桩加固淤泥层。

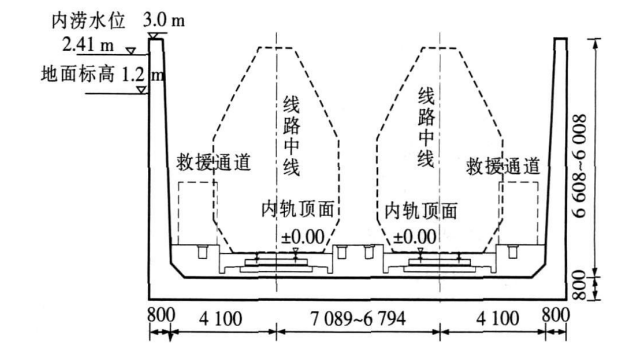


图 1 结构横断面图 (单位: mm)

表 1 地层参数表 (钻孔编号: JZ-III05-隧莞岸 77)

岩土分层	岩土名称	时代成因	状态	天然重度 $\gamma$ / (kN $\cdot$ m $^{-3}$ )	层厚 / h	桩极限侧摩阻力标准值 $q_{sk}$ / kPa	桩极限端阻力标准值 $q_{pk}$ / kPa	渗透系数 / (m $\cdot$ d $^{-1}$ )
(1)	人工填土	$Q_4^{ml}$	松散	18.0	0.7	—	—	—
(2)2	淤泥	$Q_4^{nc}$	流塑	15.6	5.7	10	—	0.000 1
(3)1	粉质粘土	$Q_4^{al}$	硬塑	19.4	5.4	40	—	0.003 2
(3)3	粉细砂层	$Q_4^{sl}$	松散	19.0	0.9	20	—	5
(5)1	全风化岩石	$K_1 b$	坚硬土状	20.3	2.1	80	1 200	1
(5)2	强风化岩石		碎块状	22.0	10.8	100	1 600	1.2
(5)3	弱风化岩石		柱状、块状	26.0	5.8	500	4 000	—

2.1 抗浮水位选取

地下结构抗浮水位没有统一的规定, 其选取存在较大的随意性, 故导致计算结果存在一定的差异。该问题已引起有关学者的重视, 在文献 [1]、[2]、[3]、[10] 中均对地下结构抗浮设计水位进行了合理的阐述, 但实际操作仍十分困难。合理的抗浮水位需要对长期水位观测数据进行系统分析, 在主体结构设计使用年限内, 选择一个合理的可靠度指标, 使结构上浮概率满足设计要求, 在此基础上确定抗浮水位。

目前, 设计抗浮水位一般依据勘察报告并结合各地区工程经验确定。根据本工程岩土工程勘察报告, 隧道出口段勘察期间地下水位标高 -0.59~0.85 m, 内涝水位标高 2.41 m。结合周边工程经验, 经过比较选取内涝水位作为抗浮设计水位, 敞开段结构侧墙按

高出该水位 0.5 m 设计。

2.2 浮力计算

DK 43+650 处底板底标高 -4.408 DK 43+680 处底板底标高 -3.808 结构底板宽度 16.74 m 根据阿基米德定律, 浮力等于它所排开水的体积之重量, 则其浮力  $F$  为:

$$F = \rho g V = \gamma_w V = [2.41 - (-4.408) + 2.41 - (-3.808)] \div 2 \times 10 \times 16.74 \times 30 = 32\,733.4 \text{ kN}$$

公式表明浮力大小与结构所处土层没有联系。由于地下结构与地基土直接接触, 地层介质的渗透性将直接影响到其所受浮力的大小。假设地层渗透系数无限大, 即结构泡在水中, 可按阿基米德理论公式计算浮力; 假设地层渗透系数为 0 即地层完全不透水且与结构底板光滑接触, 则结构浮力也为 0。实际地层渗透

性介于两者之间,可以认为地下水对地下结构的浮力比理论值小,但实际大小需进一步研究确定。当基底所处(2)2淤泥层作为隔水层,其上为潜水层,如图2所示。

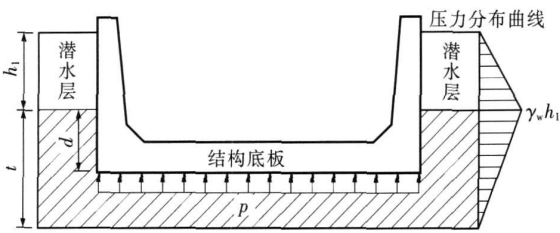


图 2 浮力计算模型

根据文献[2]提供的浮力计算方法,其浮力  $F$  为:

$$F = 16.74 \times 30 (h - h_d) \gamma_w = (2.88 - 2.88 \times 3.64 / 5.7) \times 10 \times 16.74 \times 30 = 5227.1 \text{ kN}$$

计算结果表明两者相差很大。

2.3 抗浮力计算

如果不采取抗浮措施,结构抗浮力主要由结构自重、覆土重、结构侧壁摩阻力组成。结构侧壁摩阻力一般作为安全储备。本工程结构为敞开段,不存在覆土,抗浮力由结构自重和轨下垫层组成。

结构自重  $G_1$  为:

$$G_1 = \{ [(0.4 + 0.8) \times (6.608 + 6.008) / 2 + 2] + 16.74 \times 0.8 \} \times 30 \times 25 = 15721.2 \text{ kN}$$

轨下结构重  $G_2$  为:

$$G_2 = (10.0128 + 10.3579) / 2 \times 30 \times 23 = 7027.9 \text{ kN}$$

抗浮力  $G$  为:

$$G = G_1 + G_2 = 22749.1 \text{ kN}$$

2.4 抗拔桩计算

桩的抗拔侧阻力与抗压侧阻力是有区别的,随着上拔量的增加,桩的侧阻力会因土层松动及侧面积减少等原因而低于抗压侧阻力,文献[4]认为引起这一差异的主要原因在于桩周边土的剪胀性及主应力方向的旋转。文献[5]引入抗拔系数  $\lambda$  与勘察报告中提供的抗压侧阻力相乘得到抗拔侧阻力。抗拔侧阻力取决于桩周土层的力学性质,根据试验<sup>[5]</sup>抗拔系数灌注桩高于预制桩,长桩高于短桩,粘性土高于砂土。根据实际工程经验,砂性土抗拔系数  $\lambda = 0.50 \sim 0.70$  粘性土抗拔系数  $\lambda = 0.7 \sim 0.8$ 。

抗拔桩的破坏模式因桩距大小不同而呈现基桩分离的非整体拔出破坏和桩土呈整体拔出破坏,故规范<sup>[5]</sup>规定了群桩效应系数。适当扩大抗拔桩的间距可使各抗拔桩的抗拔力得到充分发挥,抗拔桩宜选择

长型灌注桩,桩中心距宜大于6倍桩径。第15节  $\phi 800$  抗拔桩纵向间距5 m 横向均匀布置4根,横向间距5.073~5.155 m 共布置抗拔桩24根,如图3所示。

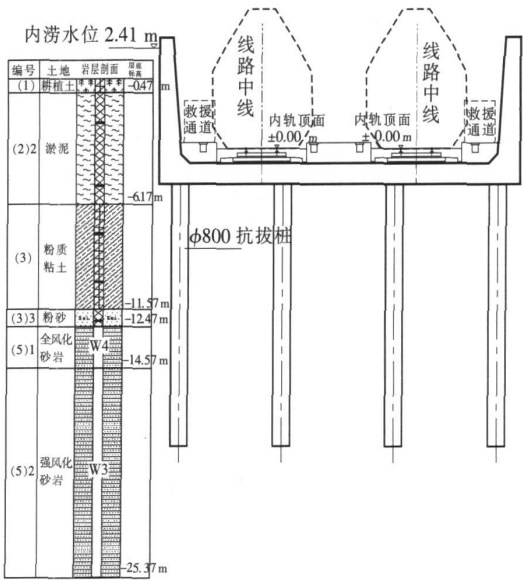


图 3 地质情况及抗拔桩布置图 (单位: mm)

单根抗拔桩需提供的抗拔力  $N_k$  为:

$$N_k = (1.1 \times F - 0.9 \times G) / 24 = 647.2 \text{ kN}$$

单桩竖向抗拔极限承载力应通过现场单桩上拔静载荷试验确定。如未进行上述实验,可根据岩土工程勘察报告按式(1)<sup>[5]</sup>计算:

$$N_k \leq T_{uk} / 2 + G_p \tag{1}$$

$$\text{其中: } T_{uk} = \sum \lambda_i q_{ik} u_i \tag{2}$$

式中  $T_{uk}$ ——基桩抗拔极限承载力标准值;  
 $G_p$ ——基桩自重,地下水位以下取浮容重;  
 $\lambda_i$ ——桩侧第  $i$  层土的抗拔系数;  
 $q_{ik}$ ——桩侧第  $i$  层土的抗压极限侧摩阻力标准值;  
 $u_i$ ——桩侧第  $i$  层土的土层厚度。

试算取桩长 14 m 则  $T_{uk} = 1094.28 \text{ kN}$

$$T_{uk} / 2 + G_p = 652.6 \text{ kN}$$

$$N_k < T_{uk} / 2 + G_p \text{ 满足抗浮要求。}$$

综上所述,第15节采用24根  $\phi 800$  抗拔桩,桩长 14 m 单桩抗拔承载力为 647.2 kN

2.5 抗拔桩配筋

在抗拔桩设计中,配筋计算除了满足桩身抗拔承载力要求外,作为主体结构的一部分,为避免钢筋锈蚀影响抗拔桩的耐久性,还需验算正常使用极限状态下的裂缝宽度。

根据岩土工程勘察报告,地下水对混凝土结构有盐类结晶的弱侵蚀性。由工程所处环境类别和水土介

质腐蚀性等级, 按文献 [5] 确定桩身最大裂缝宽度为  $0.2 \text{ mm}$ , 单桩抗拔承载力为  $647.2 \text{ kN}$ , 主筋净保护层厚度为  $50 \text{ mm}$ 。按轴心受拉构件裂缝开展宽度计算公式为:

$$\omega_{\max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} (1.9 c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}}) \quad (3)$$

纵向受拉钢筋截面面积取  $A_s = 3980 \text{ mm}^2$  时,  $\omega_{\max} = 0.165 \text{ mm}$ , 选配  $7\phi 20 + 7\phi 18$  沿桩周均匀布置。

关于抗拔桩的配筋方式新旧规范表述有所不同, 文献 [6] 中表述为“专用抗拔桩应通长配筋”, 而文献 [5] 中表述为“抗拔桩应等截面或变截面通长配筋”。实际上, 抗拔桩的桩顶荷载由桩侧摩阻力承担, 其桩身轴力分布与桩周地质条件密切相关, 桩侧摩阻力以剪力形式传递给桩周土体, 其桩身荷载分布如图 4 所示<sup>[7]</sup>。一般桩顶轴力最大, 桩端轴力最小, 中部轴力介于两者之间。

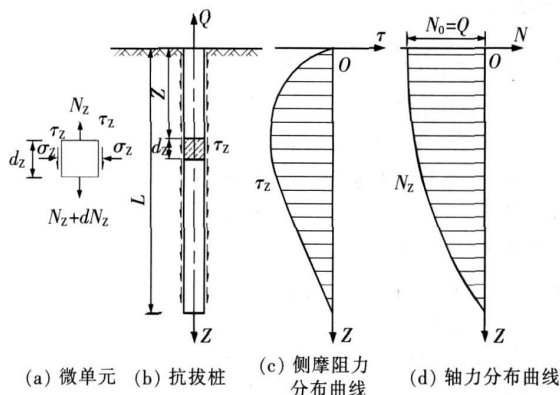


图 4 抗拔桩竖向荷载传递

如果桩身通长按最大抗拔力作用下满足裂缝宽度要求的配筋量配置钢筋, 将造成较大的浪费。因此对抗拔桩可以采取分段配筋的方式, 在一定程度上减少配筋量, 以节约成本。

第 15 节抗拔桩桩长  $14 \text{ m}$  拟采用两段式配筋, 上部配置  $7\phi 20 + 7\phi 18$  下部配置  $7\phi 20$  即桩身  $7\phi 20$  通长配置,  $7\phi 18$  仅在桩顶  $l_r$  范围内配置。根据下部配筋量反算出满足裂缝宽度要求的轴力  $N_0 = 375 \text{ kN}$ , 桩顶  $l_r$  的范围按式 (4) 和式 (5) 反算得出:

$$N_k - N_0 \leq T_{ulq} / 2 + G_1 \quad (4)$$

$$T_{ulq} = \sum \lambda_i q_{ik} u_i l \quad (5)$$

式中  $T_{ulq}$  ——  $l_r$  段抗拔极限承载力标准值;  
 $G_1$  ——  $l_r$  段基桩自重, 试算取  $l_r = 8 \text{ m}$ ;  
 则:  $T_{ulq} = 429.8 \text{ kN}$

$$N_k - N_0 = 647.2 - 375 = 272.2 \text{ kN}$$

$$T_{ulq} / 2 + G_1 = 275.2 \text{ kN}$$

计算表明满足要求, 因此  $7\phi 18$  在桩顶以下  $8 \text{ m}$  范围内配置。

## 2.6 承压验算

由于地下水位变化以及荷载组合形式不同, 可能出现抗拔桩转换成承压桩的情况。抗拔桩的设计应综合考虑其作为承压桩也能满足设计要求。

本例中对抗浮有利的活荷载如列车荷载仅考虑其对地基承载力和沉降的不利影响, 不考虑其对抗浮的有利条件。列车荷载近似按  $3 \text{ m}$  土柱 (土重度  $18 \text{ kN/m}^3$ ) 计算, 分布宽度按  $3.4 \text{ m}$  考虑<sup>[8]</sup>。

据勘察报告, 影响地下水动态的变化因素主要是降雨, 在河流的两侧还分别与河水的涨落及潮汐顶托有关。该工程地下水变幅最大可达  $3 \text{ m}$ , 最低地下水位取  $-0.59 \text{ m}$ 。采用最低地下水位按理论公式计算浮力  $F$ :

$$F = ((-0.59 - (-4.408)) + (-0.59 - (-3.808))) / 2 \times 10 \times 16.74 \times 30 = 17669.0 \text{ kN}$$

按文献 [2] 计算浮力  $F$ :

$$F = (h - h \times d / 9) \times \gamma_w \times 16.74 \times 30 = (0 - 0 \times 3.64 / 5.7) \times 10 \times 16.74 \times 30 = 0 \text{ kN}$$

不考虑桩土共同作用, 单桩承担竖向荷载:

$$N_k = 1406.9 \text{ kN}$$

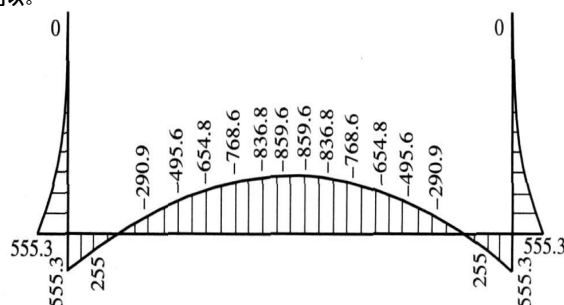
单桩竖向承载力标准值:

$$Q_{dk} = \psi \psi_{si} q_{sik} l + \psi_p q_{pk} A \quad (6)$$

将抗拔桩参数代入式 (6) 计算得到  $Q_{dk} = 2833.7 \text{ kN}$ , 基桩竖向承载力特征值:  $R = Q_{dk} / 2 = 1416.9 \text{ kN}$ , 可见  $N_k < R$  抗拔桩能够满足承载要求。

## 2.7 抗拔桩对结构影响分析

结构底板底部设置了刚度较大的抗拔桩后, 底板增加了中间约束, 单跨板变为多跨连续板, 底板受力得到改善。选取 DK43+650 断面进行计算, 计算结果如图 5 和图 6 所示。图 5 为未设置抗拔桩而采用压顶梁抗浮的底板弯矩和剪力, 图 6 为设置抗拔桩后的底板弯矩和剪力, 抗拔桩采用可受拉压的大刚度弹簧模拟。



(a) 弯矩图 (单位:  $\text{kN} \cdot \text{m}$ )

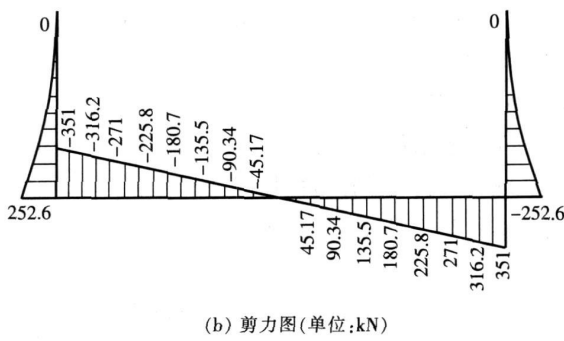


图 5 未设置抗拔桩时底板内力图

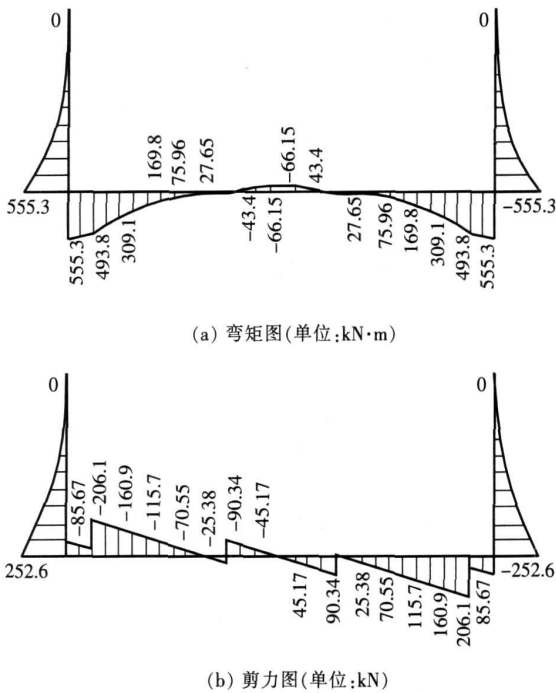


图 6 设置抗拔桩时底板内力图

比较图 5和图 6可以看出, 设置抗拔桩后底板负弯矩减小, 但抗拔桩处剪力发生突变, 必须对该处底板的抗冲切能力进行验算, 如果不满足要求, 可采取底板设置暗梁或抗拔桩与底板节点设置抗冲切加强钢筋进行处理。

### 3 结论

(1) 抗浮计算结果与实际情况有一定出入, 如抗浮水位的选取、浮力的计算、抗拔桩的配筋等。原因是由于地下工程不确定性的因素较多造成的, 包括地质条件、水文资料、施工质量等, 设计取值略为保守是合理的。

(2) 地下结构所受实际浮力大小与结构周边土层含水情况及渗透性密切相关。某些情况下, 理论计算结果与实际情况差别很大, 应加强此方面的研究。

(3) 对于桩长超过 10 m 的抗拔桩建议采用分段配筋, 以节约成本。

(4) 抗拔桩设计时应考虑到其作为承压桩的可能性, 并取两者的较大值作为设计依据。

(5) 抗拔桩的设置对结构内力影响不可忽视, 必要时应采取补强措施。

### 参考文献:

- [1] 王建英, 余广洪, 程学军. 建筑物抗浮设计中的几个问题的分析[J]. 建筑技术, 2005 36(7): 544—545
- [2] 李镜培, 孙文杰. 地下结构的浮力计算与抗拔桩设计方法研究[J]. 结构工程师, 2007 23(2): 80—84
- [3] 裴豪杰. 地下结构的抗浮设计探讨[J]. 福建建筑, 2004 (85): 59—60
- [4] 杜广印, 黄锋, 李广信. 抗压桩与抗拔桩侧阻的研究[J]. 工程地质学, 2000(1): 91—93
- [5] JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S].
- [6] JGJ94—94 建筑桩基技术规范[S].
- [7] 王曙光, 刘刚. 抗拔桩的分段配筋设计[J]. 建筑结构, 2006(36): 47—49
- [8] 铁建设[2007] 47号, 新建时速 300 ~ 350 公里客运专线铁路设计暂行规定[S].
- [9] GB 50009—2001 建筑结构荷载规范[S].
- [10] 曾桂新. 浅析地下水抗浮验算及抗浮措施[J]. 甘肃水利水电技术, 2004(2): 116—117.

(编辑 梅志山)