

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.02.007



嵌岩桩与多层土质构造下摩擦桩的自平衡法测试

胡晓波¹, 刘仁阳², 夏明亮³, 李 军¹, 肖柏军¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075; 2. 中铁五局集团海外工程公司, 贵阳 550002;
3. 中铁第五勘察设计院集团有限公司, 北京 102600)

摘 要:结合检测工况对测试数据的影响,对自平衡“精确转换法”进行改进,提出摩擦桩位移协调转换法和嵌岩桩的荷载协调转换法,实际应用结果说明两种转换方法合理。所得测试结果表明湄公河大桥桩基承载力符合设计要求;分析湄公河大桥试桩的侧摩阻力和端承力分布,嵌岩桩和摩擦桩纵向承载均以侧阻力为主。

关键词:桩基;自平衡试验;转换方法;嵌岩桩;摩擦桩

中图分类号:TU473 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)02-0039-08

Foundation pile test by self-balanced method of rock-socketed piles and friction piles in multilayer soil geological structure

Hu Xiaobo¹, Liu Renyang², Xia Mingliang³, Li Jun¹, Xiao Bojun¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, P. R. China;
2. Overseas Engineering Company of China Railway No. 5 Engineering Group Co., Ltd. Guiyang 550002, P. R. China;
3. China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd. Beijing 102600, P. R. China)

Abstract:Based on the impact of detecting condition on testing data, the self-balanced "exact conversion method" was improved. And friction pile displacement coordinate conversion method and loads coordinate transformation method of rock-socketed piles were proposed. The results illustrated that the practical application of the two conversion methods were reasonable and Mekong Bridge pile foundation met the design requirements. Analyzing the lateral friction and end bearing force distribution of tested pile, the results show that, similar to friction piles, the main vertical bearing capacity of rock-socketed piles were the main lateral friction in the Mekong Bridge.

Key words: foundation pile; self-balanced loading test; rock-socketed piles; friction pile; conversion method

基桩承载力的自平衡试验方法是 20 世纪 80 年代末形成的新型桩基静载测试技术^[1-2],首先在欧美和东亚得到应用^[3-5],此后,中国也开始研究和应用该项技术^[4,6],制订行业标准^[7],并在南京长江三桥

等一些重大工程中应用该测桩技术^[8-11]。

Q-S 曲线向 P-S 曲线的转换方法是桩基自平衡检测技术应用的关键,也是自平衡法检测理论研究的重点。转换方法研究的主要问题包括:桩-土

收稿日期:2014-08-02

基金项目:大湄公河次区域南北经济走廊国际桥梁项目

作者简介:胡晓波(1961-),男,教授,博士,主要从事土木工程材料和工程检测研究,(E-mail)xbhu@csu.edu.cn.

Received:2014-08-02

Foundation item:GMS North-South Economic Corridor International Bridge Project (Houayxay-Chiang Khong)

Author brief:Hu Xiaobo(1961-), professor, PhD, main research interests: civil engineering materials, civil engineering detection, (E-mail)xbhu@csu.edu.cn.

(岩)关系及其计算模型的影响,上段桩 $Q-S$ 曲线转换结果与下段桩 $Q-S$ 曲线的叠加关系,以及检测工况对 $Q-S$ 及转换结果的影响等。

受检测工况和桩-土(岩)关系等因素的影响,桩基自平衡测试中荷载传递情况与桩实际承载时的存在一定差异;又由于实际地质条件下的岩土种类和性状的多样性,桩-土(岩)关系及其计算模型也有所区别,需要研究有针对性的转换方法。目前,中国围绕土体性质和桩-土间荷载传递以及自平衡转换问题的研究有:齐静静等^[12]的湿陷性黄土的湿陷性下沉及负摩阻力影响,桩承载力和位移的转换公式研究;熊巨华等^[13]根据弹性和塑性硬化特征,利用桩-土侧摩阻力双折线模型和桩端土的三折线模型的转换方法;朱向荣等^[14]对土体连续性的影响及超长桩转换方法改进的研究。多层土地质情况下自平衡测试结果转换方法同样值得关注。

在嵌岩桩应用自平衡方法的应用基础和工程实践的研究方面,聂如松等^[15]运用 Mindlin 应力解和叠加原理求解,研究避免引进经验系数的等效转换方法等;高平等^[16]和龚成中等^[17]进行了软岩条件下试桩自平衡检测的研究;龚成中等^[18]还分析孔壁特征对桩的承载特性的影响,Charles 等^[19]、符勇等^[20]则就桩身参数对荷载传递影响,和大直径嵌岩桩承载特性进行研究;Williams 等^[21]研究了不同岩性对侧摩阻力的影响;曹汉志^[22]认为一定条件下传递函数可采用全塑模型,龚成中尝试将该模型用于自平衡转换中。对于岩貌较完整、岩性良好条件下的嵌岩桩,一般设计为端承桩,较难进行自平衡检测,随着对抗震和防侧推等问题的重视,设计深嵌岩桩的工程增多,进行自平衡方法在嵌岩桩检测中的应用也相当重要。

在转换方法的叠加关系问题上有经验法和精确转换法。在经验法的研究中,鲍育明等^[23]针对等位移法在叠加两段桩 $Q-S$ 为 $P-S$ 结果时,因荷载箱位置影响的上、下段桩 $Q-S$ 曲线不对称,引起 $P-S$ 曲线不完整和判断极限承载力困难的问题进行研究,并提出通过修正系数(λ_1, λ_2)实现转化的等荷载法。文献[6]的精确转换法和 JT/T 738—2009 所给“桩身轴向力实测值”情况的转换,则将试桩分割成 n 单元(桩段),逐段推算至上段桩的桩头(桩端)位移(S_0^i),按 S_0^i 和下段桩桩头(荷载箱处)的位移(S_2^j)协调原则和叠加方法,获得整桩的 $P-S$ 转换结果。

检测工况的影响,除荷载传递和文献[23]涉及到的 $Q-S$ 曲线对称性问题外,还有环境温度变化及施工干扰的影响。温度波动和施工的影响主要在于实测位移量的偏差,及其引起的 $Q-S$ 曲线的形状及转

换后 $P-S$ 关系的精度,这种影响在位移量较小的情况下不可忽略,如嵌岩桩的检测等。

总之,按照 JT/T 738—2009 进行试桩检测已相当普遍,但仍有多种检测工况影响下的检测和转换方法有待细化。

1 嵌岩桩与多层土地质构造下摩擦桩的等效转换方法

基于桩-土荷载传递的弹-全塑模型和软化模型的理想塑性和软化特征,参照文献[6]的位移协调法和文献[23]的等荷载法,结合摩擦桩和嵌岩桩检测工况与实测 $Q-S$ 曲线特征,在湄公河大桥桩基检测中采用如下 $P-S$ 曲线转换处理方法。

1.1 摩擦桩位移协调法

摩擦桩位移协调法即根据自平衡结果,以加载值(Q_i/γ)作为传统静载的桩顶加载值 P^i ,并设自平衡法所测上段桩的 S_1^i 为对应的桩顶位移(S^i),按自平衡加载级次 $i(i=1,2,\dots,m)$,逐段推算位移和轴力传递至上段桩的桩端位移(S_0^i)和轴力(Q_0^i),获得 $S_0^i-Q_0^i$ 关系;按位移(S_0^i)与下段桩桩头位移(S_2^j)协调连续为条件,确定桩顶荷载传至下段桩,通过下段桩 Q_2^j 和 S_2^j 的叠加方法,获得整桩的 $P-S$ 转换, $P-S$ 曲线由转换得到的(P^k, S^k)点绘得, $k=1,2,\dots,n, m \leq n \leq 2m$ 。

其中,逐段推算位移(S_0^i)和轴力(Q_0^i)时,设桩-土侧摩阻力关系为理想塑性状态,则推算所需的桩-土侧摩阻力的取值是,桩侧土位移达到极限值前采用实测结果;达到极限值后,继续取极限侧摩阻力值计算。

位移(S_0^i)与下段桩桩头位移(S_2^j)协调连续条件,即转换为传统静载时上、下段桩在平衡点处的位移协调相同。协调连续方法是:若荷载箱处于实际平衡点,或略偏上情况,当 $i=j \leq m$ 时, $S_0^i \geq S_2^j$,即可顺利地将上、下段的承载力叠加获得 P^j ;若荷载箱低于实际平衡点,当 $j=m$ 时,则可能 $S_0^m < S_2^j$,但若 $S_0^m > 0$,仍可将上、下段的承载直接叠加获得 P^j ;如若荷载箱远低于实际平衡点, $S_0^m = 0$,则按 S_0^m 和 S_2^j 线性连续,插入 $S-Q$ 点使上、下段桩荷载传递,获得 P^j 。

叠加关系处理是转换的荷载(位移)传至下段桩时,以 $S_2^j-Q_2^j$ 为基础,叠加上段桩对应的承载力和弹性变形,获得桩顶 P 和 S 的处理方法。叠加关系为

$$P^i = Q_2^j + Q_1^i/\gamma \quad (1)$$

$$S^i = S_2^j + (P^i - Q_1^i/\gamma) \times L/(E_p \times A_p) \quad (2)$$

式中: γ 为 JT/T 738—2009 所给修正系数; L 为上段桩桩长; E_p 为上段桩弹性模量; A_p 为上段桩弹性截面面积;其余符号同前;上标 t 表示荷载传至下段桩后, P^k 的后续加载级次, $j < t \leq 2m$ 。 $t > j$ 情况下,

式(1)中 Q_i 应为 Q_i' ,按桩-土侧摩阻力关系的假设,上段桩各段未达到理想塑性状态前, Q_i' 还会继续增大,为简化计算,本文 Q_i' 取固定值 Q_i'' 。所得 P - S 转换结果亦偏于安全。

实际检测中不同岩土层和浸水浮力的影响、承载力确定等问题,仍按 JT/T 738—2009 的规定和方法处理。

以 P^i 、 S^i 和 P^j 、 S^j 作为 P^k 、 S^k ,绘制 P - S 曲线

1.2 嵌岩桩荷载协调法

同摩擦桩位移协调法,以加载值 (Q_i/γ) 作为 P^i ,逐段推算上段桩的桩端轴力 (Q_0^i) 和位移 (S_0^i),获得 Q_0^i - S_0^i 关系;按轴力 (Q_0^i) 与下段桩桩头轴力 (Q_2^j ,即荷载箱加载值)协调连续为条件,确定桩顶荷载传至下段桩,通过叠加方法,获得整桩的 P - S 转换,同样, P - S 曲线由转换得到的 (P^k , S^k) 点绘得。

其中,设桩-岩侧摩阻力关系为理想摩擦,则逐段推算桩头(桩端)轴力 (Q_0^i) 时,达到极限值前,桩-岩侧摩阻力采用实测结果;达到极限值后,继续取极限土-岩侧摩阻力值计算。

轴力 (Q_0^i) 与下段桩桩头轴力 (Q_2^j) 协调连续,即以 Q_0^i 和 Q_2^j 对应相等为条件,实现传统静载下平衡点处的 Q_0^i - S_0^i 和 Q_2^j - S_2^j 的连续。连续方法是:若荷载箱处于实际平衡点,或偏上情况,当 $i=j \leq m$ 时, $Q_0^i \geq Q_2^j$,即可将上、下段的承载力对应叠加获得 P^j ;若荷载箱低于实际平衡点,当 $j=m$ 时,则可能 $Q_0^i < Q_2^j$,若 $Q_0^i > 0$,仍可将上、下段的承载力叠加获得 P^j ;如若 $Q_0^i = 0$,则按 Q_0^i 和 Q_2^j 线性连续,插入 Q - S 点使上、下段桩荷载传递,再叠加获得 P^j 。

因岩石情况 $\gamma=1$,荷载(位移)传至下段桩时桩顶 P 和 S 的叠加计算式为

$$P^j = Q_0^i + Q_2^j \quad (3)$$

$$S^j = S_2^j + (P^j - Q_2^j) \times L / (E_p \times A_p) \quad (4)$$

式中符号同前。

Q_i' 的简化计算方法和浸水浮力的影响问题等同摩擦桩。

2 等效转换方法在湄公河大桥桩基测试中的应用

2.1 桥址地质概况和试桩测试参数

湄公河大桥是昆曼公路跨越老挝会晒与泰国清孔间湄公河的关键工程,为五跨四墩的预应力混凝土现浇连续箱梁桥。桥的起止桩号为: SAT. 4+978.565 ~ SAT. 5+458.565,主桥全长 480 m,桥面标准横断面为主线双向 2 车道。桥址处的湄公河位于山埡式冲积平原边缘,微地貌为:左岸(老挝会晒侧)为山脚下覆有砂黏土的基岩斜坡;右岸(泰国清孔侧)为冲积平原的漫滩和河岸。主桥四墩中 M7 墩基础位于清孔侧河岸, M10 墩基础位于会晒侧河岸; M8 和 M9 的墩基础分别位于主航道两侧。M7 和 M8 墩的地质情况为砂黏土、粉砂、砂砾、砂卵石夹泥和硬黏土组成的多层式地层构造, M9 和 M10 墩为覆有砂土的高度至中度风化流纹凝灰岩地质条件。桥墩为群桩基础,桩径均设计为 1.5 m,依据地质情况设计有嵌岩桩和摩擦桩两种,各桩桩长不等。所测四根桩中,摩擦桩: M7-B3 桩顶标高 341.1 m,桩底标高 296.1 m, M8-B2 桩顶标高 341.6 m,桩底标高 286.7 m;嵌岩桩: M9-B5 桩顶标高 341.6 m,桩底标高 317.5 m, M10-A4 桩顶标高 341.6 m,桩底标高 324.2 m。其中 M8 和 M9 为高桩基承台墩,且各桩施工时均加有长度不一的钢护筒,桩的有效承载桩长有所不同。施工采用冲击钻孔-灌注成桩工艺。各试桩的地质情况见表 1。

表 1 试桩位置地质情况

Table 1 Geological condition in test piles locality

层号	M7-B3		M8-B2		M9-B5		M10-A4	
	土层名称	层厚/m	土层名称	层厚/m	土(岩)层名称	层厚/m	土(岩)层名称	层厚/m
1	松散粉砂	0.9	粉砂(钢护筒至冲刷线)	4.6	密实黏性砾砂(钢护筒)	4.0	高塑性砂黏土(钢护筒)	1.8
2	密实砂砾	12.0	砂卵石	22.0	密实黏性砾砂	1.0	密实粉砂(钢护筒)	2.0
3	密实粉砂	2.0	砂卵石夹泥	25.3	高度至中度风化流纹凝灰岩	14.5	高度至中度风化流纹凝灰岩	13.6
4	密实砂砾	13.0						
5	密实粉砂	2.0						
6	密实砂砾	6.0						
7	密实粉砂	2.0						
8	硬黏土	7.1						

注: M7-B3、M9-B5 和 M10-A4 桩地质情况按 Engineering Service Consultants Co., Ltd(泰国)的地勘资料-钻孔柱状图确定; M8-B2 桩因无地勘资料,其地质情况根据钻孔渣样确定。实际测试时参考施工钻孔渣样进一步确定地质情况。

按 JT/T 738—2009 方法和 JTG D63—2007 所置见表 2。
列侧摩阻力参数确定平衡点。试桩参数和荷载箱位

表 2 试桩参数
Table 2 Parameters of test piles

试桩编号	桩基类型	桩径/m	桩长/m	有效桩长/m	桩基承载力设计值/kN	检测加载设计值/kN	荷载箱距桩端距离/m	桩端持力层
M7-B3	摩擦桩	1.5	45.0	45.0	7 500	2×7 500	17.7	硬黏土
M8-B2	摩擦桩	1.5	54.9	47.3	7 500	2×7 500	18.0	砂卵石夹泥
M9-B5	嵌岩桩	1.5	24.1	15.5	7 500	2×7 500	6.0	高度至中度风化流纹凝灰岩
M10-A4	嵌岩桩	1.5	17.4	13.6	7 500	2×7 500	6.4	高度至中度风化流纹凝灰岩

注:1. M8 和 M9 为高台桩, M8-B2 和 M9-B5 桩有效桩长以外的部分在冲刷线以上水中;2. M10-A4 的荷载箱位置受施工进度影响而设定。

为测试试桩各段轴力及桩-土(岩)的侧摩阻力,在各岩土层界面设置应变计,当土(岩)层较厚或较薄时增减应变计设置,各试桩的应变计布置如表 3。各截面对称布置 4 个应变计,应变计为振弦式混凝土应变计。由测取的桩身应变,和桩身刚度(弹性模量)计算轴力。限于工地试验条件,混凝土和钢筋(钢护筒)弹性模量参照 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》所给对应等级的数据取值。

表 3 各试桩应变计位置

Table 3 Locations of strain gauge in different test pile

设置应变计截面序号	设置应变计截面的标高/m			
	M7-B3	M8-B2	M9-B5	M10-A4
①	339.6	340.1	336.3	337.3
②	328.6	332.6	331.3	332.4
③	315.6	306.5	325.3	329.1
④	312.3	303.2	322.0	324.7
⑤	306.1	288.2	318.0	
⑥	304.1			
⑦	297.6			

2.2 试桩检测情况和结果

各试桩均在混凝土灌注成桩达到龄期后检测,采用慢速维持荷载法进行加载测试,试桩的加载量按检测加载设计值的 1/10 进行,第 1 级加载为两倍分级荷载,卸载按 5 级进行。

2.2.1 试桩 Q-S 曲线的测试结果 测试所得 M7-B3、M8-B2、M9-B5 和 M10-A4 的 Q-S 曲线如图 1、图 2、图 3 和图 4。

M7-B3 和 M8-B2 同为摩擦桩,图 1 和图 2 显示两桩的 Q-S 曲线为缓变型曲线,加载至设计值,两试桩中上、下段桩的最大位移值分别为 18.60 mm 和 20.68 mm,小于终止加载条件的要求。图 3 和图

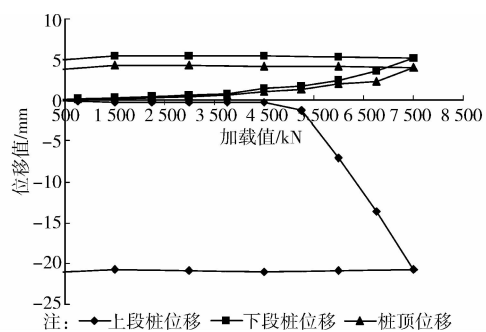


图 1 M7-B3 的 Q-S 曲线
Fig. 1 Q-S curve of M7-B3

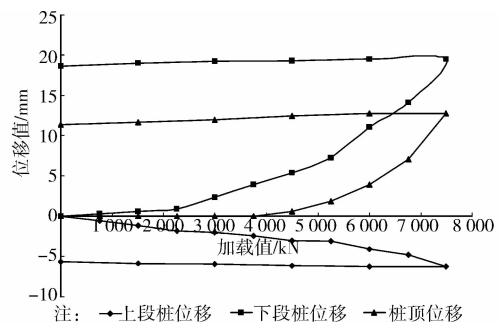


图 2 M8-B2 的 Q-S 曲线
Fig. 2 Q-S curve of M8-B2

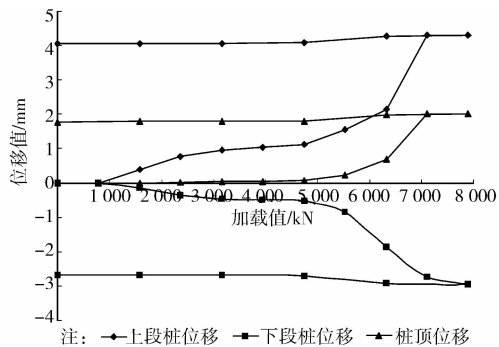


图 3 M9-B5 的 Q-S 曲线
Fig. 3 Q-S curve of M9-B5

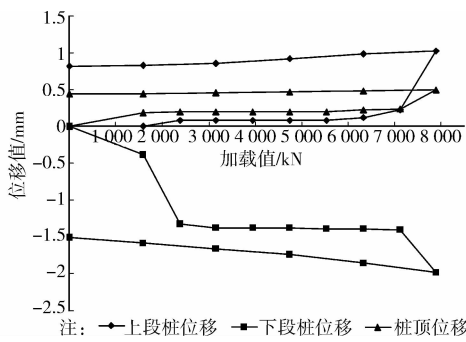


图 4 M10-A4 的 Q-S 曲线

Fig. 4 Q-S curve of M10-A4

4 所示 M9-B5 和 M10-A4 的 Q-S 曲线同样为缓变型曲线,两试桩对应最大加载设计值的上、下段桩位移读数的最大值显示为 4.29 mm。

受桩位地质条件差异及对应平衡点选择的影响, M7-B3 和 M8-B2 试桩的 Q-S 曲线上、下段不完全对称。同样,图 3 和图 4 所示 M9-B5 和 M10-A4 的 Q-S 曲线存在不完全对称问题。自平衡方法在实际测试中获得不对称 Q-S 曲线应该是较为普遍现象。

图 3 和图 4 所示的 Q-S 曲线还显示位移测读结果的影响,表现为 M9-B5 桩和 M10-A4 桩的 Q-S 曲线出现不连续性。该不连续现象来源于位移值的波

动偏差,位移值的偏差在桩基静载检测中同样是普遍问题,来源于位移测读装置和环境条件,自平衡试验主要是温度变化引起基准梁变形的影响。相对而言,摩擦桩的位移沉降量较大,可以忽略其影响,但嵌岩桩则不同,嵌岩桩在加载中发生的真实位移量小,位移量偏差接近桩的加载位移,所以, M9-B5 和 M10-A4 桩 Q-S 曲线呈明显的不连续性。

2.2.2 试桩侧摩阻力-位移关系的测试结果 测试侧摩阻力-位移关系是桩基静载试验的重要内容,也是自平衡测试技术进行精确转换的条件之一。根据测得应变和位移,并考虑各单元桩段的自重(或浮重)等构造因素,和上段桩类似抗拔桩的侧摩阻力-位移关系,按 JT/T 738—2009 所列系数和方法予以修正,获得 M7-B3、M8-B2、M9-B5 和 M10-A4 桩在荷载作用下的各段侧摩阻力-位移关系。试桩各段最大侧阻力与对应位移列于表 4。由于温度引起的基准梁变形对位移测试结果的影响,进而影响所得试桩各段的侧摩阻力-位移曲线。相对位移量较大的摩擦桩,温度等因素引起的位移量偏差占嵌岩桩的位移量的比例较高,所得嵌岩桩各段对应摩阻力的位移量偏差较明显,由表 4 中 M9-B5 和 M10-A4 桩的位移可以见得。

表 4 各试桩土(岩)层摩阻力

Table 4 Frictional Resistance between different soil layers or rock layers in different test pile

摩擦桩				嵌岩桩			
M7-B3		M8-B2		M9-B5		M10-A4	
土层名称	标高/m	实测最大侧阻力/kPa	对应位移/mm	土层名称	标高/m	实测最大侧阻力/kPa	对应位移/mm
松散粉砂	341.6~340.2			水	341.6~338.6		
密实砂砾	340.2~328.2	111	4.19	粉砂(钢护筒)	338.6~334	15	17.94
密实粉砂	328.2~326.2	42	4.99	砂卵石	334~312	98	19.02
密实砂砾	326.2~313.2	92	5.09	砂卵石夹泥		135	19.40
密实粉砂	313.2~311.2	258	13.50	砂卵石夹泥	312~286.7	92	6.17
密实砂砾	311.2~305.2	23	20.23	砂卵石夹泥		65	5.64
密实粉砂	305.2~303.2	173	19.83				
硬黏土	303.2~295.0	77	19.65				
				凝灰岩	336.3~331.3	29	4.10
				凝灰岩	331.3~325.3	249	4.11
				凝灰岩	325.3~323.8	243	1.08
				凝灰岩	323.5~322.0	179	2.74
				凝灰岩	322.0~317.5	160	2.066
				凝灰岩	337.6~332.4	237	0.08
				凝灰岩	332.4~330.9	305	0.03
				凝灰岩	330.6~329.1	306	1.84
				凝灰岩	329.1~324.2	237	1.45

自荷载箱向上段桩和下段桩的桩端(顶)达到所测最大侧阻力时,各桩段的中点位移逐渐减小,表明桩-土(岩)的荷载作用具有传递特征,这与桩基承载

的一般规律一致。侧摩阻力-位移关系还表明,本文的转换方法中采用的理想塑性和理想摩擦假设,基本合理。

表 4 结果还表明:所测各试桩在不同岩(土)层的侧摩阻力-位移关系总体变化和趋势与既有研究结果基本符合,与 JTG D63—2007《公路桥涵地基与基础设计规范》所列土层侧阻力标准值,及岩层侧阻力推算值(220 kPa)比较接近。

2.3 试桩检测结果分析与讨论

2.3.1 试桩 Q-S 曲线等效转换为 P-S 曲线 依据图 1~图 4 所得 Q-S 和桩侧摩阻力-位移关系,并考虑各段桩刚度、渗水浮力和转换修正系数的差异,其中, M7-B3 试桩计算中考虑了粉土和砂土层的转换修正系数(取 $\gamma=0.8$), M8-B2 试桩砂土层的转换修正系数取 $\gamma=0.7$,按上述摩擦桩位移协调法和嵌岩桩荷载协调法,分别获得 M7-B3 和 M8-B2 摩擦桩, M9-B5 和 M10-A4 嵌岩桩的 P-S 曲线,如图 5、图 6、图 7 和图 8 所示。

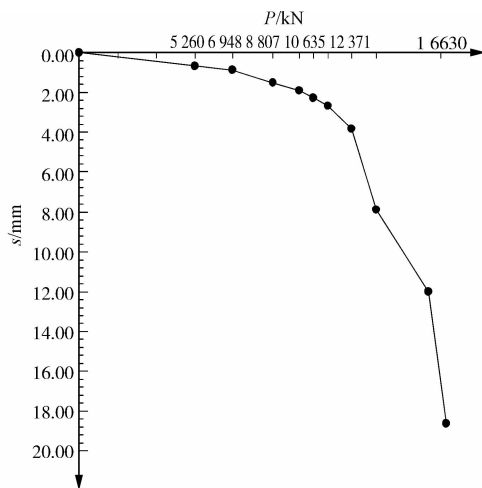


图 5 M7-B3 桩 P-S 等效转换曲线

Fig. 5 Equivalent P-S curve of pile M7-B3

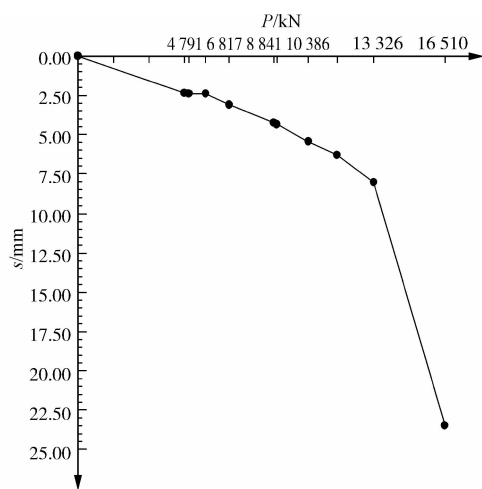


图 6 M8-B2 桩 P-S 等效转换曲线

Fig. 6 Equivalent P-S curve of pile M8-B2

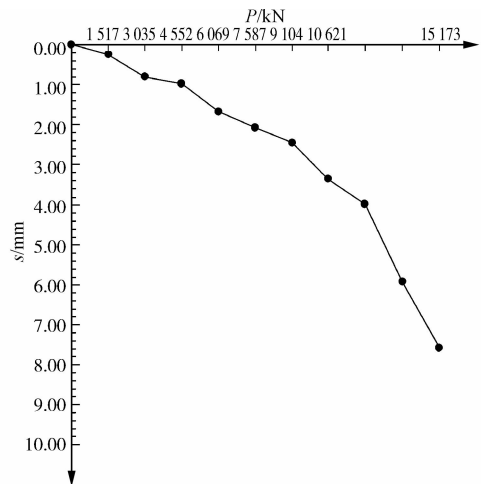


图 7 M9-B5 桩 P-S 等效转换曲线

Fig. 7 P-S equivalent converted curve of pile M9-B5

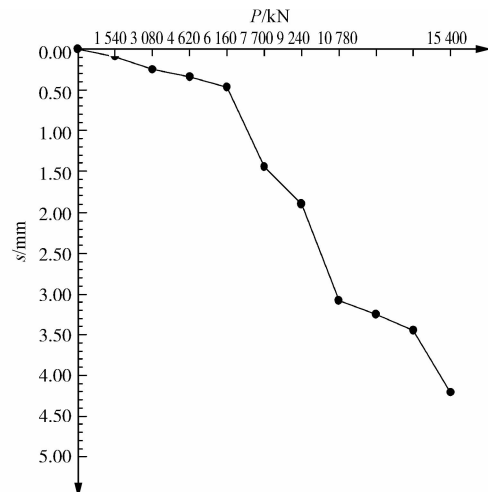


图 8 M10-A4 桩 P-S 等效转换曲线

Fig. 8 P-S equivalent converted of pile M10-A4

确定平衡点是自平衡方法的难点和关键,平衡点既影响 Q-S 曲线的对称性,又对等效转换为 P-S 曲线产生影响,由图 1~图 8 可见其影响。在摩擦桩位移协调时,按逐级加载推算的上段桩的桩端位移(S_1^k)与下段桩桩头位移(S_2^k)的协调,得到的 P-S 曲线中就会出现(P^k, S^k)点非等步现象,如图 5 和图 6。在平衡点选择合适或偏下时,转换容易进行;当平衡点偏高,下段桩的向下位移较小,如 M8-B2 桩(图 2),则需以 Q-S 测试中 $i+1$ 级时的(P^k, S^k),获得完整 P-S 曲线(图 6 中第 11 点)。因本文所取侧摩阻力-位移的值较小,所得承载力(P)较小,位移(S)略大,该结果应偏于保守,嵌岩桩荷载协调法的非等步现象不突出。

图 5~图 8 所示的测点(P^k, S^k)偏差,引起 P-S 曲线的波动连续,主要受位移测读偏差等检测工况因素的影响,不影响结果的合理。

表5 试桩承载特性
Table 5 Bearing parameters of test pile

试桩类型	试桩编号	加载力/kN	桩端承载力/kN	桩端承载力系数/kPa	桩端相应位移/mm	桩侧阻力/kN	桩顶位移/mm
摩擦桩	M7-B3	16 630	903	511	-12.99	15 727	-18.65
	M8-B2	16 510	588	333	-13.88	15 922	-23.51
嵌岩桩	M9-B5	15 173	1 240	702	-1.88	14 471	-7.58
	M10-A4	15 400	1 025	580	-1.26	14 375	-4.21

总之,摩擦桩通过采用位移协调法转换可以获得较完整的 $P-S$ 曲线,嵌岩桩采用荷载协调法,减少和避免位移读数偏差对转换 $P-S$ 曲线的影响,便于对试桩承载能力检测和设计加载极限下试桩竖向承载特性分析。转换所得各试桩 $P-S$ 曲线与传统测试结果相符合。

2.3.2 试桩竖向承载力和承载特性分析 根据前述各测试结果,按承载力公式和位移公式,进一步计算分析桩基竖向承载力和承载特性,结果列于表5。

数据结果表明:湄公河大桥主桥各试桩的承载力均达到设计要求。承载特性为:摩擦桩 M7-B3 和 M8-B2 的桩端阻力为桩承载力的 5.4% 和 3.6%,嵌岩段总侧阻力为桩承载力的 94.6% 和 96.4%;嵌岩桩 M9-B5 和 M10-A4 的桩端阻力为桩承载力的 8.2% 和 6.6%,嵌岩段总侧阻力为桩承载力的 91.8% 和 95.4%。嵌岩桩的桩端承载力偏低,因桥墩处流纹岩力学性能好于预计,嵌岩桩的端承作用没有发挥,就竖向承载力而言设计偏于保守,但对桩的抗震和抗滑坡侧推有利。

3 结论

归纳摩擦桩位移协调法和嵌岩桩荷载协调法在湄公河大桥桩基承载力检测中应用和研究,主要得到以下几点结论:

1)对于多层土质的地质条件下,桩基静载试验采用的理想塑性假设,由上而下推算上段桩的荷载和位移传递,摩擦桩按位移协调的叠加转换方法,合理且简便可行。

2)受多因素的影响,桩基静载试验中桩的加载位移存在偏差,影响测试结果。对于加载位移较小的嵌岩桩,按理想摩擦假设,和荷载协调进行叠加转换,可减少位移偏差影响,转换结果可靠,方法适用。

3)湄公河大桥主桥各墩的桩承载力均达到设计要求。承载特性分析表明,摩擦桩和嵌岩段纵向承载均以侧阻力为主。

参考文献:

[1] Osterberg J. New device for load testing driven piles

and drilled shaft separates friction and end bearing [J].

Piling and deep foundations, 1989, 989(1): 421-427.

[2] Osterberg J O. The osterberg load test method for bored and driven piles, the first ten years [C]// Proceeding of the Seventh International Conference and Exhibition on Piling and Deep Foundations. Vienna, Austria: [s. n.], 1998: 15-17.

[3] Schmertmann J H, Hayes J A, Molnit T, et al. O-cell testing case histories demonstrate the importance of bored pile (drilled shaft) construction technique [C]// Proceedings, Fourth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, MO. 1998: 1103-1115.

[4] 刘朝钢,方磊,黄锋,等. Osterberg 测桩法模型试验研究 [J]. 铀矿地质, 1996, 12(6): 369-374.

Liu C G, Fang L, Huang F, et al. Study on the osterberg pile loading test by using similitude method [J]. Uranium Geology, 1996, 12(6): 369-374. (in Chinese)

[5] Bengt H F, Ameir A, Richard K, et al. O-cell testing and FE analysis of 28-m-deep barrette in Manila, Philippines [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(7): 566-575.

[6] 龚维明,戴国亮,蒋永生,等. 桩承载力:自平衡测试理论与实践 [J]. 建筑结构学报, 2002, 23(1): 82-88.

Gong W M, Dai G L, Jiang Y S, et al. Theory and practice of self-balanced loading test for pile bearing capacity [J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(1): 82-88. (in Chinese)

[7] 中华人民共和国交通行业标准. JT/T 738—2009 基桩静载试验 自平衡法 [S]. 2009.

[8] 程晔,龚维明,薛国亚. 南京长江第三大桥软岩桩基承载性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2005, 38(12): 94-98, 114.

Cheng Y, Gong W M, Xue G Y. The bearing characteristics of piles embedded in weak rocks for the third bridge over the Yangzi River at Nanjing [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(12): 94-98, 114. (in Chinese)

[9] 黄思勇,熊刚,罗昊冲,等. 津滨轻轨基础托换桩基承载力的自平衡试验 [J]. 武汉大学学报:工学版, 2010, 43

- (4):511-514.
Huang S Y, Xiong G, Luo H C, et al. Self-balanced loading test for pile bearing capacity of pile underpinning on Jin-binlight track [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(4): 511-514. (in Chinese)
- [10] 王中文, 刘志峰, 罗永传. 港珠澳大桥大直径钻孔灌注桩自平衡法实验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(Sup2): 1216-1219.
Wang Z W, Liu Z F, Luo Y C. Self-balanced method for large-diameter bored piles of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Sup2): 1216-1219. (in Chinese)
- [11] 樊玲, 彭述权, 尹小波, 等. 南水北调澧河渡槽基桩承载力测试案例分析[J]. 岩土力学与工程学报, 2012, 31(Sup1): 3421-3427.
Fan L, Peng S Q, Yin X B, et al. Case study of pile bearing capacity test at lihe river aqueduct of south-to-north water transfer project [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup1): 3421-3427. (in Chinese)
- [12] 齐静静, 徐日庆, 龚维明, 等. 湿陷性黄土地区自平衡测试结果转换方法研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2006, 40(12): 2196-2200.
Qi J J, Xu R Q, Gong W M, et al. Research on conversion method of self-balanced pile test in collapsible loess [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 40(12): 2196-2200. (in Chinese)
- [13] 熊巨华, 蒋益平, 杨敏. 自平衡试桩结果的解析转换法[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2007, 35(2): 161-165.
Xiong J H, Jiang Y P, Yang M. Analytical solution transformation method for data of O-cell pile testing [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(2): 161-165. (in Chinese)
- [14] 朱向荣, 汪胜忠, 叶俊能, 等. 自平衡试桩荷载传递模型及荷载-沉降曲线转换方法改进研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1717-1721.
Zhu X R, Wang S Z, Ye J N, et al. Load transfer model and improved transition method for load-settlement curve under O-cell pile testing method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1717-1721. (in Chinese)
- [15] 聂如松, 冷伍明, 魏巍. 自平衡试桩法一种等效转换方法[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(Sup2): 188-191.
Nie R S, Leng W M, Wei W. Equivalent conversion method for self-balanced tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Sup2): 188-191. (in Chinese)
- [16] 高平, 杨建民, 杨旭. 自平衡静载试验在软岩地区桩基设计验证中的应用[J]. 公路工程, 2012, 37(3): 234-238.
Gao P, Yang J M, Yang X. The design of the pile foundation in soft rock strata verification by self-balanced static load test [J]. Highway Engineering, 2012, 37(3): 234-238. (in Chinese)
- [17] 龚成中, 何春林, 龚维明. 深嵌岩桩承载特性及其荷载传递法应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(4): 84-88
Gong C Z, He C L, Gong W M. Bearing characteristics of deep rock-socketed piles and application of load transfer method [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(4): 84-88. (in Chinese)
- [18] 龚成中, 龚维明, 何春林, 等. 孔壁粗糙度对深嵌岩桩承载特性的影响[J]. 中国公路学报, 2012, 24(2): 56-61
Gong C Z, Gong W M, He C L, et al. Influence of hole side roughness on bearing characteristic of deep rock-socketed pile [J]. China Journal of Highway and Transpo, 2012, 24(2): 56-61. (in Chinese)
- [19] Charles W W N, Terence L Y Y, Jonathan H M L, et al. Side resistance of large diameter bored piles socketed into decomposed rocks [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(8): 642-657.
- [20] 符勇, 曹吉鸣, 楼晓明, 等. 桩身参数对单桩荷载传递影响的模拟分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(7): 991-996.
Fu Y, Cao J M, Lou X M, et al. Simulation analysis on influence of parameters of pile on load transfer of pile [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(7): 991-996. (in Chinese)
- [21] Williams A F, Pells P J N, Source U. Side resistance rock sockets in sandstone, mudstone and shale [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1981, 18(4): 502-513.
- [22] 曹汉志. 桩的轴向荷载传递及荷载-沉降曲线的数值计算方法[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(6): 37-49.
Cao H Z. Axial loading transfer of pile and numerical calculation method of loading-settlement curve [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(6): 37-49. (in Chinese)
- [23] 鲍育明, 刘亚文, 李志成, 等. 自平衡法在桩基承载力检测中的应用[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版, 2003, 4(3): 49-52.
Bao Y M, Liu Y W, Li Z C, et al. Application of self-balanced method for pile bearing capacity test [J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science, 2003, 4(3): 49-52. (in Chinese)