

Chair-Shaped Sheet-Pile Retaining Wall and Its Design Calculation Method

Wubin Wang^{1,2}, Hao Bai³, Yali Cui¹

¹School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China

²National Engineering Laboratory for Technology of Geological Disaster Prevention in Land Transportation, Chengdu, China

³Sichuan Expressway Construction & Development Group CO.LTD, Chengdu, China

Email address:

15908147006@126.com (Wubin Wang), swjtu136@163.com (Hao Bai), cuiyali0526@sina.com (Yali Cui)

To cite this article:

Wubin Wang, Hao Bai, Yali Cui. Chair-Shaped Sheet-Pile Retaining Wall and Its Design Calculation Method. *Science Discovery*.

Vol. 6, No. 6, 2018, pp. 542-550. doi: 10.11648/j.sd.20180606.36

Received: July 9, 2018; Accepted: December 4, 2018; Published: December 12, 2018

Abstract: New-type chair-shaped sheet-pile retaining wall has achieved good effect recently, when it was used on steep slope subgrade and deep overburden soil slope subgrade section. However, its theoretical research is seriously lagging behind, which needs to carry out appropriate research. In the paper, chair-shaped pile is classified according to its set position and structure measure, some key issues and applicable conditions of design calculations are discussed when this structure is used under different circumstances and the working mechanism of chair-shaped pile is comparative analysis, through data research and laboratory model experiments and other methods. The results show that the synergistic effect between chair-shaped pile frame structure and slope can resist larger lateral thrust and vertical loads to meet the requirements of stability and deformation of embankment slope. Besides, chair-shaped sheet-pile retaining wall can be used in slope retaining engineering because of its retaining, resisting, bearing characters, when the geological conditions are complex, such as steep slope, deep overburden soil slope, etc. On this basis, the working mechanism of bearing capacity, anti-slide and retaining is discussed considering soil-pile interaction and the design calculation method of chair-shaped pile is proposed based on the elastic foundation beam method under the lateral restraint, which has a good effect on engineering application.

Keywords: Chair-Shaped Sheet-Pile Retaining Wall, Working Mechanism, Elastic Foundation Beam Method, Application Condition

椅式桩板墙及其设计计算方法

王武斌^{1,2}, 白皓³, 崔雅莉¹

¹西南交通大学土木工程学院, 成都, 中国

²陆地交通地质灾害防治技术国家工程实验室, 成都, 中国

³四川高速公路建设开发集团有限公司, 成都, 中国

邮箱

15908147006@126.com (王武斌), swjtu136@163.com (白皓), cuiyali0526@sina.com (崔雅莉)

摘要: 新型椅式桩板墙近年来在陡坡路基和深厚覆土斜坡路基地段取得了良好的工程效果, 但是其理论研究严重滞后, 亟需开展相应的研究。通过资料调研与室内模型试验等方法, 按照椅式桩的设置位置和构造措施对其进行了分类, 讨论了不同情况下设计计算时应考虑的一些关键问题及适用条件, 并对比分析了椅式桩的工作机理。结果表明, 椅式桩框架结构和坡体的协同作用可抵抗较大的横向推力与竖向荷载, 能够满足路基边坡的稳定性和抗变形要求; 椅式桩板墙具有支挡、阻滑和承载三重功能, 适用于深厚软弱土斜坡、陡坡等复杂地形地质条件下的边坡支挡工程。在此基础

上,按照桩土相互作用原则,探讨了其承载、阻滑和支挡的工作机理,基于横向约束的弹性地基梁法提出了椅式桩的设计计算方法,而且其工程应用效果良好。

关键词: 椅式桩板墙, 工作机制, 弹性地基梁法, 适用条件

1. 引言

我国山区修建高速公路、高速铁路遇到了“地质地形条件急变”的挑战[1,2],出现了大量高填深挖的路基工程,常采用悬臂式桩板墙进行边坡支挡[3]。但是,当边坡的坡度较大或土体覆土厚度较厚时,易出现由于桩基悬臂长度过大导致变形量超过规定值的现象,为此科技工作者又提出了预应力锚索桩板墙[4]、锚定板桩墙[5]、锚拉式桩板墙[6]等改进型支挡结构,然而由于锚索横向受力不明确、耐久性差与施工质量保证率低等问题[7-9]尚未完全解决,难以满足斜坡路基长期稳定性和变形控制的要求。因此,针对一些地质地形条件极其复杂、气候环境极其恶劣的斜坡地段,桩板墙的结构型式逐渐向结构化、组合化的方向发展,椅式桩板墙就是其中最为典型的一种。兰渝客运专线与叙大铁路就分别在岩质陡坡和深厚软土斜坡路堤地段首次使用了椅式桩板墙[10],该结构充分利用框架桩-简支板-岩土体三者之间的协同作用来满足斜坡路基的技术要求。该结构嵌入稳定地层,竖向承受填料和车辆荷载的压力作用,横向承受岩土体的推力作用,其工作机理有别于传统的双排桩类支挡结构。目前,双排桩类支挡的研究主要集中在深基坑工程[11]、滑坡治理[12]等方面,仅

有个别案例涉及路基边坡支挡,其研究内容也主要局限于横向抗滑性能[13,14]和简化计算方法[10,15]等方面,理论研究远落后于工程实践。而且本文的椅式桩板墙与已有研究的双排桩类支挡结构在结构型式和地基条件等方面有较大的差异,因此对椅式桩板墙的工作机理与计算分析方法尚认识不足。

本文基于椅式桩板墙的现有研究成果,总结出了其常见的组合形式,探讨了该结构在设计计算时应考虑的一些关键问题。在此基础上,按照桩土相互作用原则,探讨了其承载、阻滑和支挡的工作机理,提出了基于弹性地基梁法的设计计算方法和设计流程。实际工程的应用效果也验证了本方法所得结果的合理性和正确性。

2. 椅式桩板墙形式

2.1. 结构形式定义

椅式桩板墙是一种根据山区斜坡路基特殊要求提出的,由钢筋混凝土椅式桩(主桩、副桩和横梁)、承载板和挡土板组成的,兼有承重、阻滑和支挡三重功能的新型支挡结构。椅式桩板墙的结构形式如图1所示。

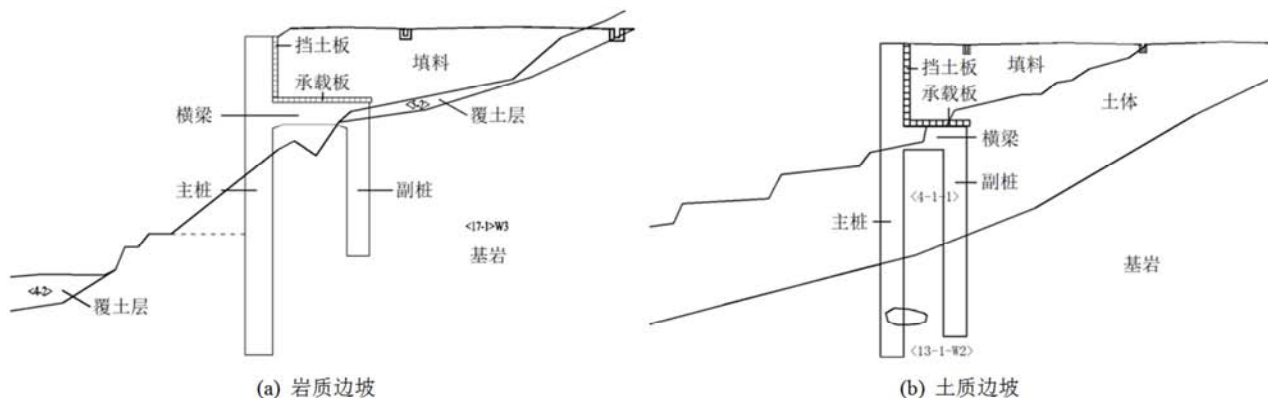


图1 椅式桩板墙典型断面图。

2.2. 结构形式分类

椅式桩板墙通过双桩结构抵抗下部较大的岩土体压力或滑坡推力,利用主桩悬臂段支挡上部推力较小的岩土体或路基填料,其具有较强的抗滑支挡能力,主要适用于岩质陡坡、厚层土质斜坡或滑坡的路基填方、挖方工程中。依据椅式桩设置形式,路基椅式桩板墙可以分为2种形式,即外椅式与内椅式,主要差异在于副桩是否位于主桩支挡范围内的岩土体中(即上部荷载引起的内力性质差异)。

(1) 内椅式桩板墙。其横梁和承载板同衡重式桩板墙挡卸荷板的工作原理相似,对主桩起到了明显的卸荷作用。在这种布置形式中,副桩除了承受通过桩间岩土体和

横梁传递来的横向作用之外,还要承受承载板和横梁传递来的竖向荷载作用。此时,横梁可简化为弯拉(或弯压)构件,主副桩基则视为弯压构件。

(2) 外椅式桩板墙。其副桩位于主桩支挡土体范围之外,与普通桩板墙工作原理相似,椅式桩之间的相互作用仅通过挡土板与桩间岩土体进行传递。副桩除直接承受通过横梁传递来的横向作用,还要承受岩土层层间滑动力作用,因此副桩在设计计算过程中主要考虑其抗弯强度和抗剪强度。此时,横梁一般简化为轴向受力构件,主副桩视为纯弯构件。

3. 椅式桩板墙工作机理

3.1. 工作原理

椅式桩板墙的工作机制主要表现出承载、支挡与阻滑3个方面。根据布设位置与条件的不同, 结构主要体现出来的功能有所差异。

当应用于岩质陡坡上时, 上部竖向荷载通过横梁与承载板传递到桩体, 再由桩基扩散到岩体中; 侧向荷载通过桩基传递到地基中, 主副桩通过横梁刚性连接形成空间结构、共同抵抗推力作用, 其表现出承载和支挡双重功能; 当岩体中存在节理面或软弱带时, 椅式桩还要起到稳定岩体的作用, 增大了滑面的抗剪能力, 此时又体现出其抗剪阻滑的特性。

当应用于土质斜坡上时, 部分横向推力作用通过挡土板和承载板间接传递给椅式桩, 滑坡推力和部分横向推力直接传递给椅式桩, 然后再由椅式桩传递到稳定地层; 另外, 主桩悬臂段支挡填土和维持线型, 上部荷载作用于承

载板上起到后移支挡结构重心的作用, 其主要表现出阻滑与支挡双重功能。

3.2. 模型验证试验简介

以椅式桩与悬臂桩为对象, 建立软岩陡坡(50°)、土质斜坡(30°)条件下缩尺模型试验, 对比分析不同类型支挡结构的变形规律。相关试验参数另文说明, 以下为试验情况简介。

(1) 模型材料。以砂、土、石膏和水泥等加水拌合、压实而成的混合料为软岩坡体介质, 选用粉质粘土模拟边坡土体, 选用级配不良的中粗砂模拟路基填料。椅式桩(Y)和悬臂桩(X)采用同等级的微骨料钢筋混凝土, 配筋率基本不变, 挡土板与承载板以等效抗弯刚度理论和挠曲相似原则选用木模板模拟。

(2) 试验槽与模型方案。模型试验系统主要由模型槽、加载装置及测试系统组成。试验采用的砖砌模型槽纵向净长为4.0m, 净宽为2.5m, 高为2.0m。结构布置如图2和图3所示。

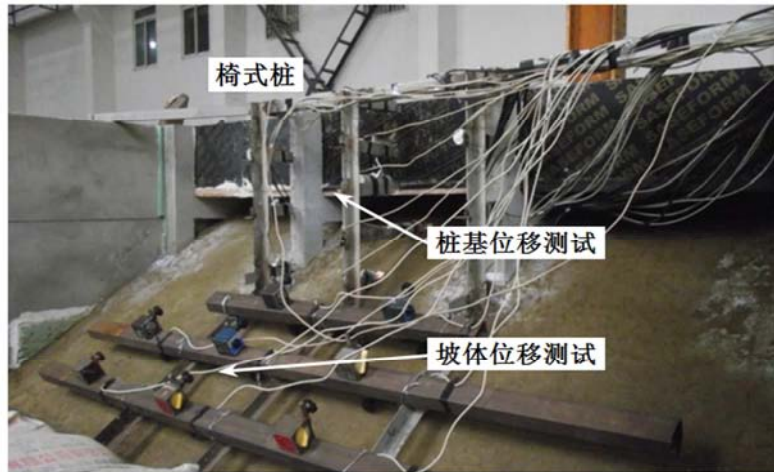


图2 模型试验系统示意图。

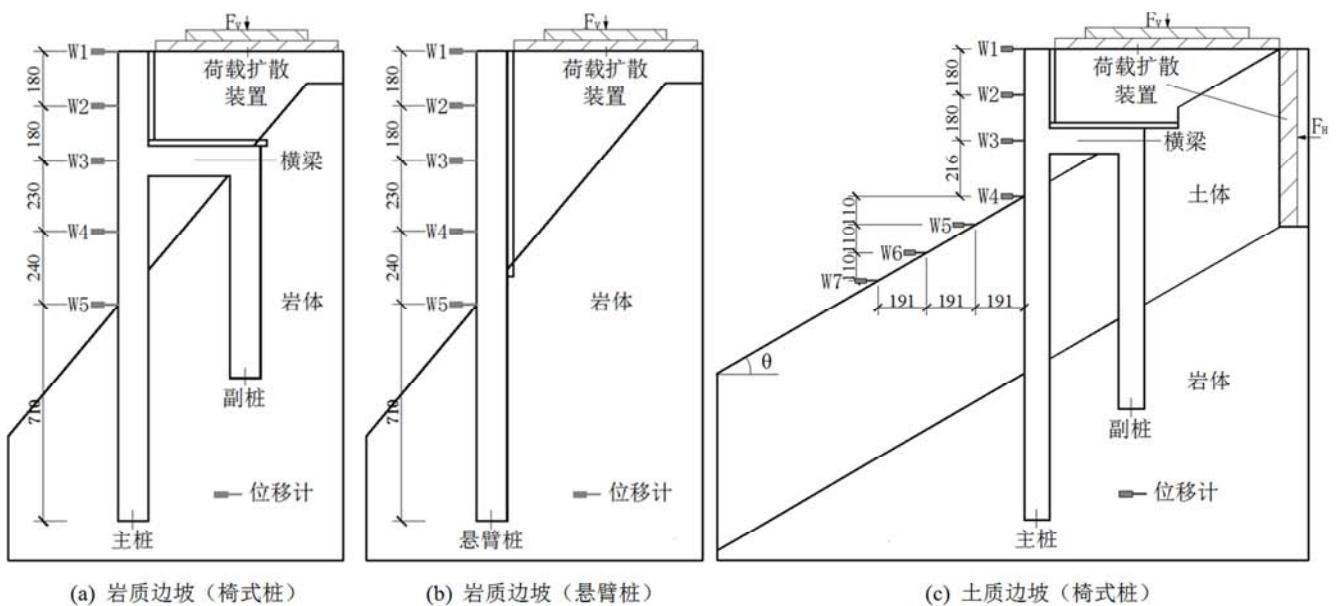


图3 试验布置简图(单位: mm)。

(3)试验量测与量测。模型试验系统的变形测点布置，通过安装在坡面与桩体前侧的位移计观测变形情况。根据试验结果确定路基面荷载作用下椅式桩板墙的变形规律。图中，“W1”中“W”表示位移测点，“1”表示测点编号，并按各部分单独编号的原则标示。岩质陡坡模型仅施加路基面竖向荷载(V)，土质斜坡模型施加路基面竖向荷载(V)和坡体横向荷载(H)。试验采用分级加载的模式进行，最多

共分10级，每级10kPa，每一级荷载保持稳定后再施加下一级。

3.3. 模型试验结果分析

以桩基横向位移为主要研究对象，其变化与分布规律如图4和图5所示。

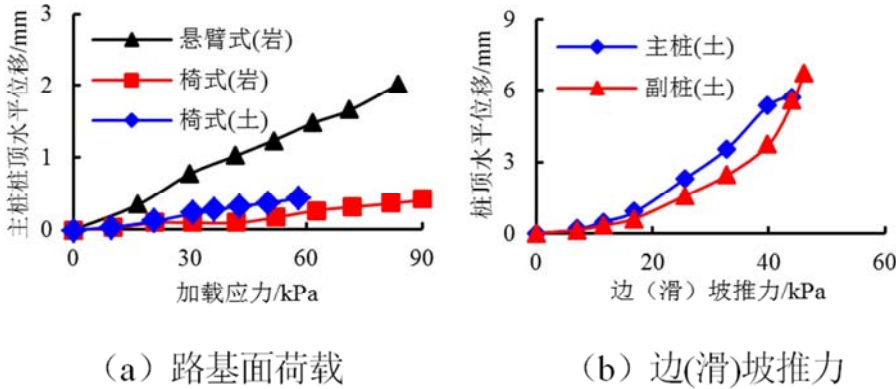


图4 桩顶的荷载-位移曲线。

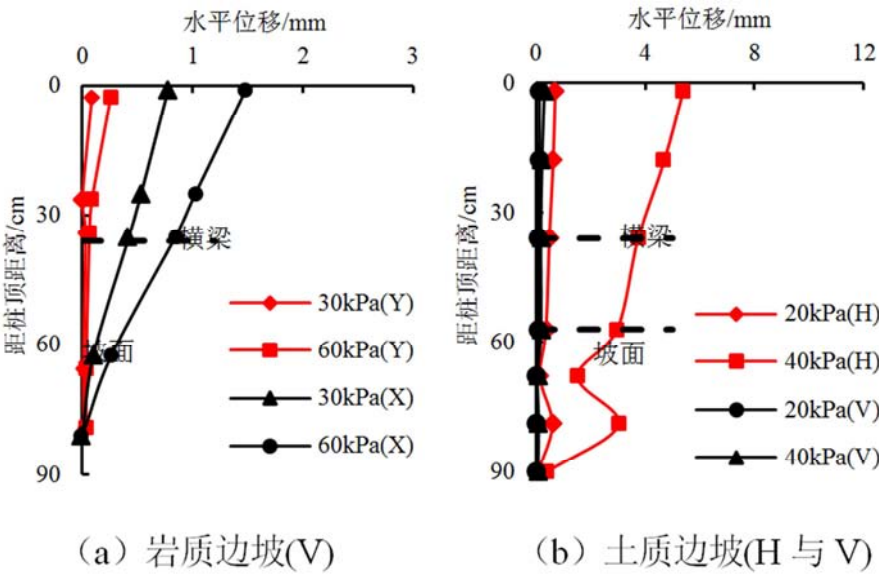


图5 主桩及坡面水平位移竖向分布曲线。

由图可以看出，路基面荷载作用下，椅式桩变形量远小于悬臂桩，仅约为悬臂桩桩顶变形量的21%；边坡体类型对椅式桩变形也有一定影响，位于岩质边坡上时同等荷载作用下产生的变形约为位于土质边坡上时的46%；此时主要体现了其竖向承载特性。边(滑)坡推力作用下，椅式桩形变响应远大于路基面荷载作用下的形变响应，两者比值约为7.5，显而易见更大于悬臂桩的变形，此时主要体现其横向支挡、抗剪阻滑功能。另外，由于横梁长度较小，桩梁结点视为刚性结点，因此横梁的弯拉(或压)变形可以忽略不计，横梁两端主副桩的横向变形基本一致。按照位移测试结果，可绘出图6所示的椅式桩变形图，可以看出

横梁发生倾斜变形，其趋势是顺坡方向一侧向下而另一侧向上，但两者差别较小。根据这些试验结果可将这种椅式桩简化为平面刚架结构，如图7所示。主副桩通过横梁刚性连接，在上部荷载或边(滑)坡推力作用下随横梁一起发生竖向或横向变形，因此在横梁的约束下主副桩和岩土体共同发挥作用。试验揭示了这种结构的受荷机制，在竖向与横向荷载作用下，主桩按弯压构件考虑，横梁和副桩按弯拉(或压)构件考虑。因此，只有桩间距、桩长等参数取值合理才能充分发挥椅式桩主副桩及坡体的协同作用，才能有效保证斜坡路基的稳定性、抗变形能力和耐久性。本文基于这种工作机制，提出了基于横向约束弹性地基梁法的设计计算方法。

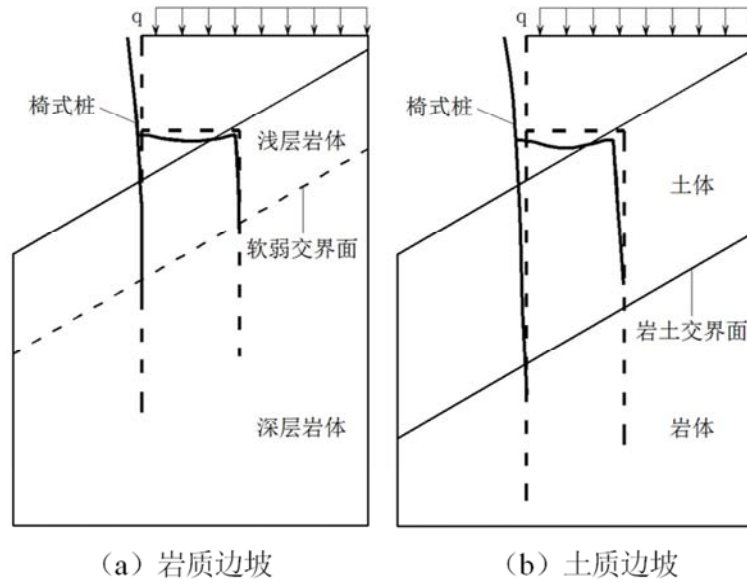


图6 椅式桩变形图。

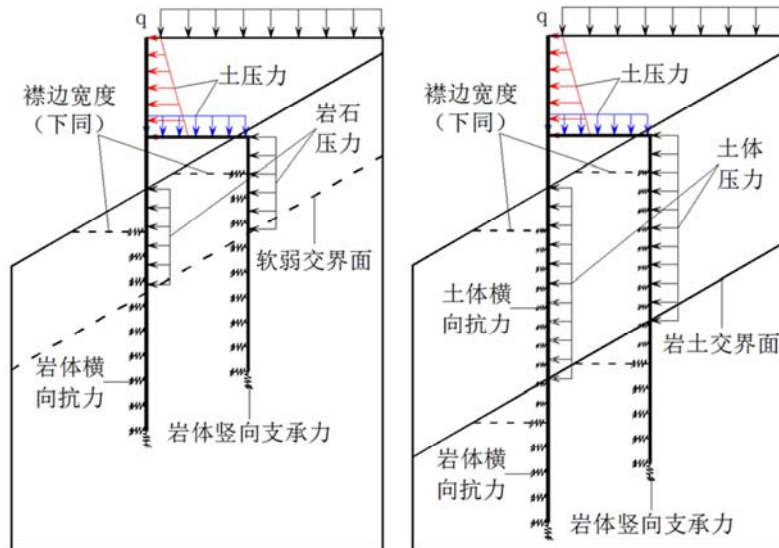


图7 椅式桩计算模型。

4. 椅式桩板墙设计计算

4.1. 计算假定

以椅式桩在填方地段的应用为例,根据其工作机理和变形规律,建立设计计算模型时需要对计算条件作一定假设。

(1)在正常使用状态下椅式桩板墙构件处于弹性工作状态。

(2)边(滑)坡推力由椅式桩下部刚架承担,椅式桩悬臂段承受填料及外荷载的作用。

(3)椅式桩和周围岩土体的相互作用符合文克尔弹性地基理论,受荷段地基反力系数 $K_1(y,z) = mz$,嵌固段地基反力系数 $K_2(y,z) = mz + c$ 。

(4)考虑桩前滑体的弹性抗力,但总和不应大于桩前滑体的抗滑力,桩侧应力不应超过桩周岩土允许水平承载力,变形量应满足规范要求。

(5)椅式桩的变形主要由于弯矩、剪力与轴力引起,桩侧摩阻力、桩身自重随深度线性变化。

(6)弯矩以桩身左侧受拉为正、剪力以构成顺时针力矩为正、位移向右为正、土压力桩右侧受压为正。

4.2. 计算模型

将椅式桩简化为平面刚架,其刚性结点处各汇交构件端部连成一个整体,承载板和挡土板简化为均匀受荷的简支梁。外荷载与抗力按理论方法确定:(1)悬臂段侧向土压力可根据桩间岩(土)体的稳定情况按全部岩(土)压力或按部分岩(土)压力计算,其计算方法较多,诸如等效内摩擦角法、条带极限平衡理论等;(2)横梁竖向土压力可

需要考虑填料自重和列车荷载，列车荷载按弹性理论计算；(3)当岩质边坡存在顺层时，层厚范围内还存在岩石压力；(4)当位于土质边坡时，需要考虑潜在滑面以上的土压力作用；(5)岩土体抗力按弹性地基梁考虑；(6)桩端竖向支承可简化为铰接或固接。椅式桩计算模型如图7所示。

4.3. 内力与变形计算

椅式桩构件内力主要包括弯矩、剪力和轴力作用，计算时可按横向和轴向同时受荷的杆件单元考虑（如图8所示），湖南大学赵明华教授团队对此研究较多，本文参考其成果[17]进行应用分析，此处不再赘述。此计算方法的主要步骤包括：微分方程的建立和幂级数求解，主要计算条件包括：边界条件和内力变形连续条件。

由于存在临空段、滑面上下桩基的受荷情况差异，需要分别建立微分方程：

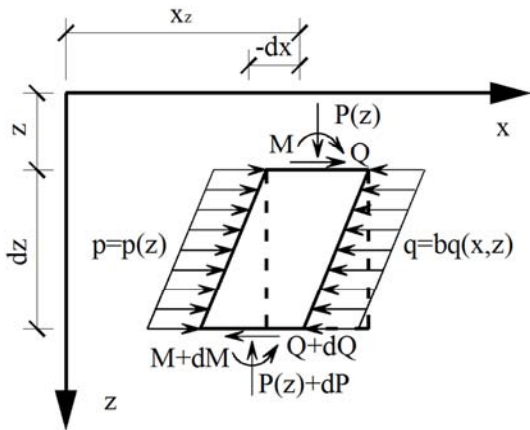


图8 桩基微元受力示意图。

(1) 临空段
临空段包括主桩 $l_1 \sim l_3$ 段、横梁 l_6 段、副桩 l_7 段，此时 $q(x,z)=0$ 、 $p(z) \neq 0$ 或 $=0$ ，其微分方程为：

$$\frac{d^3x}{dz^3} + (\lambda^2 + k^3z) \frac{dx}{dz} - \lambda_k^2 = 0$$

(2) 滑面上桩基
滑面上桩基包括主桩 l_5 段、副桩 l_9 段，此时 $q(x,z) \neq 0$ 、 $p(z) \neq 0$ ，其微分方程为：

$$\frac{d^4x}{dz^4} + (\lambda^2 + k^3z) \frac{d^2x}{dz^2} + k^3 \frac{dx}{dz} + \alpha^5xz - \gamma^4z = 0$$

(3) 滑面下桩基
滑面下桩基包括主桩 l_4 段、副桩 l_8 段，此时 $q(x,z) \neq 0$ 、 $p(z) = 0$ ，其微分方程为：

$$\frac{d^4x}{dz^4} + (\lambda^2 + k^3z) \frac{d^2x}{dz^2} + k^3 \frac{dx}{dz} + \alpha^5zx + \beta^4x = 0$$

式中： $\lambda^2 = \frac{P}{EI}$ ， $k^3 = \frac{f}{EI}$ ， $\alpha^5 = \frac{mb_1}{EI}$ ， $\lambda_k^2 = \frac{Q_0}{EI}$ ， $\beta^4 = \frac{Cb_1}{EI}$ ， $\gamma^4 = \frac{bk}{EI}$ ， λ 、 k 、 α 、 λ_k 、 β 和 γ 的单位均为 m^{-1} ； b_1 为桩基有效计算宽度； EI 为桩基截面刚度，为地基抗力比例系数。
显然，在桩梁交接处、滑面处，微分方程的解答必须满足位移、转角、内力、弯矩等连续条件，结合边界条件，在明确外荷载与抗力分布的基础上，采用矩阵计算方法，可得到椅式桩内力分析计算的幂级数解。在一般情况下，幂级数取6项即可满足精度要求。

5. 计算案例

5.1. 工程概况

选择叙大铁路龙山车站货场高路堤路段椅式桩板墙工点，如图1(b)所示。其左侧路肩高填方工点填方高度为15m~17m，为左低右高的斜坡路基。段内属低山区构造剥蚀地貌，沟谷斜坡地形，地形起伏较大，相对高差达70m，自然坡度一般为15°~20°，局部达25°。段内上覆第四系全新统坡残积（ Q^{4dl+el} ）层粉质粘土，一般厚2~10m，局部厚度达20m以上，下伏基岩为二叠系下统茅口组（ P_1m ）灰岩。岩土体力学参数如表1所示。

表1 岩土体物理力学指标统计一览表。

层号	名称	状态	重度/(kN/m ³)	c/kPa	ϕ /(°)	基本承载力/kPa	单轴极限抗压强度/MPa
Q_4^{ml}	人工填土	松散	18	25	25	150	/
Q^{4dl+el}	粉质粘土	硬塑	19	15	18	150	/
P_1m	灰岩	弱风化	22	200	40	400	7

选取典型断面为计算断面（如图1(b)）。主桩与副桩的截面尺寸均为2.25m×3.25m，主桩桩长为50m，副桩桩长为33m，嵌入基岩14m；横梁截面尺寸为2.25m×3.0m，横梁长6m；均采用C30混凝土浇筑。延线路纵向的中心桩间距为6m，延线路横向的中心桩间距为9.25m、净间距6.00m；副桩桩顶距主桩桩顶13m。路基面列车荷载可利用换算土柱法进行转换，换算土柱高度取3.4m。
悬臂段和横梁上部的土压力、桩侧抗力按4.2节所述进行计算，并按规范要求考虑荷载系数。桩侧推力与抗力极限值可利用传递系数法计算出安全系数为1.35时剪出

口的滑坡推力与剩余抗滑力，计算结果为15900kN与10417kN（考虑6m的宽度），计算时将悬臂端所受土压力合力扣除后均布到副桩内侧上；主桩内侧承受桩间土体的推力，可按周翠英[16]法进行计算。
5.2. 实例计算分析
根据图7所示的计算图式及4.3节所述方法，可解得椅式桩的结构内力并进而算得地层反力，则整个椅式桩的弯矩、剪力和轴力分布图如图9所示。在前述试验研究的基础上，在该供电的实际设计中采用了这种分析方法，工程

已经取得了成功,说明用该方法进行设计计算分析是合理有效的。

采用弹性地基梁法计算的椅式桩内力和变形结果如下图所示。

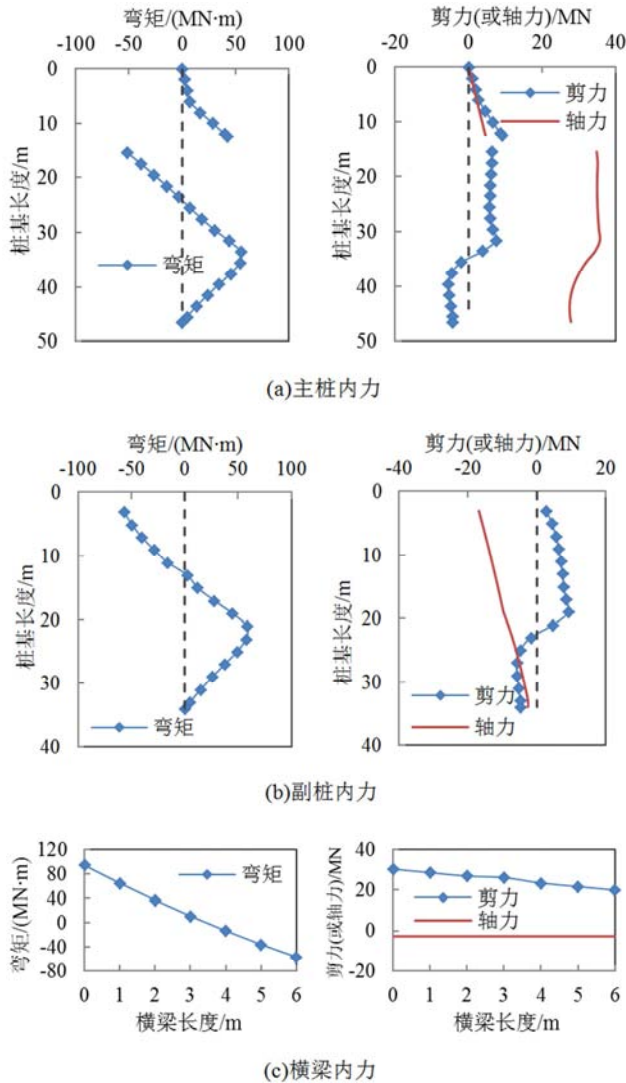


图9 结构内力分布曲线。

6. 主要设计计算内容

根据椅式桩板墙的结构特点,建议设计计算的主要内容如下:

(1) 确定椅式桩板墙的桩间距

椅式桩板墙的桩间距包括横向桩间距和纵向桩间距,合理的桩间距一方面应确保桩间的岩土体不被挤出而造成失稳,另一方面又要保证其发挥一定的承载能力。根据理论分析和工程经验,纵向桩间距一般取3~5倍的桩径或桩宽、或者5~8m,横向桩间距一般取2.5~4倍的桩径或桩宽,岩土条件好时取上限值,差时则取下限值。

(2) 确定椅式桩板墙上的荷载与抗力系数

作用在承载板和挡土板上的荷载作用有填料自重及外荷载附加应力,作用在椅式桩上的荷载主要有桩前抗力、桩间和桩后的边(滑)坡推力,根据软弱面(或滑面)的位置计算作用在桩体上的荷载。

(3) 椅式桩板墙的内力计算

根据椅式桩板墙上的荷载进行内力变形计算,按照本文建议的横向约束弹性地基梁法,确定结构的轴力、弯矩、剪力和变形。

(4) 结构设计

根据内力计算得出的结构内力确定桩径、桩长、材料等,并进行裂缝宽度验算。

(5) 稳定性验算

进行沿软弱面(或滑面)的抗剪稳定性验算,并控制椅式桩和坡体的变形,使之在允许范围内。

(6) 设计图绘制

根据椅式桩板墙设计结果,绘制相关的设计图。

7. 工程应用

根据本文研究成果制定的技术方案和施工方法,已在西南山区新建铁路高填方路基支挡工程中得到成功应用,保证了铁路路基稳定和变形控制要求。应用的工点主要有兰渝铁路和叙大铁路的岩质陡坡和厚层覆土斜坡地段路堤边坡挡防工程,如图10和图11所示。



图10 兰渝客运专线。



图11 叙大铁路。

8. 结论

本文的研究深化了对椅式桩板墙工作机制的认识, 提出了相应的设计计算方法, 可以得出如下几点结论:

(1) 椅式桩板墙具有较强的抗滑和抗变形能力, 适用于深厚软弱土斜坡、大型滑坡体、山区陡坡、深大路堑等复杂地形地质条件下的边坡支挡工程, 能取得较好的工程效果。

(2) 岩土体边坡的地质地形条件复杂, 应针对工程功能需要选用椅式桩的结构型式, 根据具体情况可将椅式桩设置于路肩、坡脚或坡中。

(3) 具有刚性横梁连接主副桩的椅式桩, 支挡及抗滑机制包括自身的空间抗变形能力和增强滑面的抗剪强度, 另外承载上部竖向荷载, 改善结构受力特征和后移支挡结构重心, 此三重工作机制是通过发挥椅式桩与岩土体协同作用来实现的。

(4) 椅式桩可按本文提出的基于横向约束弹性地基梁法的计算模型分析内力, 由此形成的设计计算方法可以得出较为合理的计算结果, 应用效果也较好。

基金项目

国家重点研发计划项目《高填路基全生命期健康监测与服役安全评价理论与技术》(NO.2016YFC0802203-2);

国家重点研发计划项目《基于健康表征指标体系的高速铁路特殊路基监测技术与全生命期安全评价》(NO.2016YFC0802203-3)

参考文献

- [1] 杨林, 姚令侃. 复杂山区高速公路工程与环境协调的选线技术[J]. 地质灾害与环境保护, 2004, 15(3): 70-74.
- [2] 陈义军, 刘长武, 徐进等. 山区公路斜坡填筑路堤应力应变特征及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1051-1056.
- [3] CHEN Yi-jun, LIU Chang-wu, XU Jin etc. Analysis deformation stress feature and influential factors about road-dike on ramp in mountainous region expressway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1051-1056.
- [4] 黄治云, 张永兴, 董捷. 桩板墙土拱效应及土压力传递特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1887-1892.
- [5] HUANG Zhi-yun, ZHANG Yong-xing, DONG Jie. Experimental Study of soil arching and transfer behavior of earth pressure about sheet-pile walls[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1887-1892.
- [6] 曲宏略, 张建经, 王富江. 预应力锚索桩板墙地震响应的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 313-320.
- [7] 卢肇钧, 吴肖茗, 张肇仲. 锚定板挡土结构的研究[J]. 土木工程学报, 1980, (1): 66-77.
- [8] 何昌荣, 李彤, 陈群. 锚拉式桩板墙的三维有限元计算分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2002, 34(6): 9-13.
- [9] HE Chang-rong, LI Tong, CHEN Qun. 3-D FEM Analysis of Anchor Sheet-pile Retaining Wall[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2002, 34(6): 9-13.
- [10] 李中国. 基于结构-土相互作用的高填方锚索桩板墙设计理论的研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2010.
- [11] 杨松林, 徐卫亚, 黄启平. 节理剪切过程中锚杆的变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3268-3273.
- [12] YANG Song-lin, XU Wei-ya, HUANG Qi-ping. Analysis on the Bolt Deformation as Result of Joint Shear Displacement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3268-3273.
- [13] 陈华, 赵有明, 张发春. 预应力锚索桩板墙工程病害分析及整治措施[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版). 2010, 29(1): 11-15.
- [14] CHEN Hua, ZHAO You-ming, ZHANG Fa-chun. Engineering Diseases Analysis of Pre-stressed Sheet-pile Wall and Regulation Measures[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science). 2010, 29(1): 11-15.
- [15] 白皓, 苏谦, 郑键斌等. 岩质陡坡椅型桩板结构路基设计计算方法与分析[J]. 铁道建筑, 2013, (1): 56-58.

- [16] 何颐华, 杨斌, 金宝深, 等. 深基坑护坡桩土压力的工程测试及研究[J]. 土木工程学报, 1997, 23(1): 16-24。
- [17] HE Yi-hua, YANG Bin, JIN Bao-sen,. Study on the earth pressure of fender piles for excavations in real projects and model tests[J]. Journal of Civil Engineering, 1997, 23(1): 16-24.
- [18] 欧孝夺, 唐迎春, 崔伟, 等. h型抗滑桩模型试验及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1936-1944。
- [19] OU Xiao-duo, TANG Ying-chun, CUI Wei, etc. Model test and numerical simulation of h-shaped anti-sliding pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1936-1944.
- [20] 铁道部第二勘测设计院科研所抗滑桩研究组. 排架抗滑桩与双排单桩对比模型试验报告[J]. 路基工程, 1986, (1): 70-81。
- [21] 肖世国. 边(滑)坡治理中h 型组合抗滑桩的[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2146-2052.
- [22] XIAO Shi-guo. Analytical method for h-type combined anti-sliding pile retaining landslide or excavated slope and its application to practical projects[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2146-2052.
- [23] 闵顺南, 徐凤鹤. 椅式桩墙的研究[J]. 铁道学报, 1981, 3(4): 64-74。
- [24] MIN Shun-nan, XU Feng-he. Study on the Chair-Shaped Retaining Wall[J]. Journal of the China Railway Society, 1981, 3(4): 64-74.
- [25] 周翠英, 刘祚秋, 尚伟等. 门架式双排抗滑桩设计计算新模式[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 441-444。
- [26] ZHOU Cui-ying, LIU Zuo-qiu, SHANG Wei etc. A new mode for calculation of portal double row anti-sliding piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 441-444.
- [27] 杨明辉, 赵明华, 刘建华, 邬龙刚. 高陡边坡桥梁基桩内力计算的幂级数解[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(3): 561-566。
- [28] YANG Ming-hui, ZHAO Ming-hua, LIU Jian-hua, WU Long-gang. Power-progression solution for inner-force analysis of bridge pile in steep slope[J]. J. Cent. South Univ. (Science and Technology), 2007, 38(3): 561-566.

作者简介



王武斌 (1983.3-), 陕西富平人, 实验师, 从事路基工程支挡新结构和新材料研究。