

文章编号:1006-2106(2015)04-0054-06

## 桩板结构在强发育岩溶无砟轨道中的应用研究<sup>\*</sup>

隋孝民 许志勇<sup>\*\*</sup>

(铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300142)

**摘要:**研究目的:强烈发育的岩溶地区修建无砟轨道时,有条件设桥地段多以桥梁通过,对没有改桥条件的车站咽喉区高填方路基的设计方案一直以来就是一道难题,因为路基填筑会增加岩溶顶板的附加荷载,进一步恶化岩溶稳定性,进而加速岩溶塌陷的发生。本文旨在研究一种既能控制路基填筑对岩溶的影响、减小岩溶塌陷对路基安全稳定的影响,又能控制岩溶覆盖土层的压缩沉降的设计方案。

**研究结论:**(1)埋入式托梁桩板结构利用其承载板将上部荷载通过混凝土托梁传递到下部桩体,进而把荷载扩散到桩底下卧硬层或岩石层,既可解决岩溶地基处理问题,又可避免填土对岩溶顶板的附加荷载;(2)托梁式桩板结构具有良好的整体性和稳定性;(3)托梁式桩板结构的受力计算从多桩超静定结构转化为静定结构,可简化计算;(4)托梁式桩板结构可用于基底软硬不均差异沉降控制困难的路基设计,并具有较好的技术和经济优越性,可以在类似的山区铁路工程中推广应用。

**关键词:**托梁桩板结构;岩溶;无砟轨道;高填方

中图分类号:U213.1 文献标识码:A

## Application Study of the Structure of RC Pile – plank in Strong Development of Karst and Ballastless Track Railway

SUI Xiao – min, XU Zhi – yong

(The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300251, China)

**Abstract; Research purposes:** When build ballastless track railway in the karst region with strong development, the district which is conditional to set bridge selects bridges, but for the station throat area without the condition of bridge, the high fill subgrade design is a difficult problem, because filling the embankment will increase the additional load of karst roof, accelerate the occurrence of karst collapse. How to take measures to control the influence of the subgrade filling on karst, reduce the impact of karst collapse on safety and stability of subgrade, and control the compression settlement of covered soil on karst is the key to solve the problem.

**Research conclusions:** The embedded type RC pile – plank with joist is the use of the upper bearing plank, the load will transmit to the pile, the pile will transfer load to the stable bedrock, both can solve the problem of karst ground treatment, and avoid the additional load of the filling against karst roof. The type RC pile – plank with joist has good integrity and stability. Its stress calculation changes from multiple pile of statically indeterminate structure to statically determinate structure, simplifies the calculation. It can be used for basal uneven hardness and difficult control of differential settlement of subgrade design, and has a good technical and economic superiority, can be applied in similar mountain railway engineering.

**Key words:** the structure of RC pile – plank with joist; karst; ballastless track; high filling

\* 收稿日期:2014-10-11

\*\* 作者简介:隋孝民,1969年出生,男,教授级高级工程师;许志勇,1987年出生,男,助理工程师。

## 1 研究背景

随着高速铁路、客运专线的快速发展,为了确保列车高速、安全及平稳运行,路基结构应具有足够的强度、稳定性和耐久性。同时对路基沉降的控制也越来越高,无砟轨道铁路路基过渡段工后沉降控制在5 mm以内,一般地段控制在15 mm以内,这种毫米级的沉降控制对路基这种土工结构物来说,设计难度之大可想而知。就高路堤填筑本体而言,其填筑后的沉降一般为填筑高度的1‰~3‰,那么填高10 m的路堤,本体沉降至少达到10 mm,对地基的沉降仅仅剩余5 mm,可以说地基沉降控制难度很大。

在一些岩溶强烈发育区,岩溶空洞大、溶蚀面低,有些段落岩溶空洞达到二、三十米,采用注浆方案处理岩溶时,注浆后的注浆体收缩大且浆液的灌注不易控制,进而难以保证路基的稳定性和轨道的平顺性;同时填筑路基本体过程中会增加岩溶顶板的附加荷载,加速岩溶塌陷的发生。以往地基处理多采用桩网结构,即地基采用刚性桩加固,桩顶设褥垫层,垫层内夹铺高强土工格栅的方案,桩网方案中桩间土会承受一定的附加荷载,从而也会对岩溶顶板施加一定的附加荷载,对岩溶的稳定不利,还可能加速岩溶顶板的塌陷,极易形成工程隐患。那么在岩溶强烈发育区怎样才能既控制路基沉降,又确保岩溶稳定呢?下面以某无砟轨道客运专线强发育岩溶工点设计为例,阐述埋入式托梁桩板结构的应用。

## 2 工程概况

某无砟轨道客运专线铁路DK 335+879.30~DK 336+179.10岩溶地段高路堤,位于车站咽喉区,两端均与桥梁相接,路堤中心最大填高14.2 m,最大边坡高16.0 m。

该段地表覆盖中厚层稍密~中密的细圆砾土层,下伏基岩主要为灰岩。勘察根据钻探揭示,结合地震CT(孔透)成果资料综合分析,该低桩板地段下伏石炭系中上统黄龙、船山组(C<sub>2+3</sub>)白云质灰岩,岩溶强发育,岩溶形式以水平方向发育的串珠状溶洞和溶槽为主。溶洞埋深5.6~79.0 m,溶洞高度0.2~24.3 m,溶洞分布标高158.38~232.54 m,多数无充填,少数由软~流塑状黏性土及稍密碎石类土半充填~全充填,岩溶遇洞率为71.89%,线溶率为0.36%~45.46%,平均线溶率为16.09%,因岩溶发育的不均匀性,低桩板址区岩溶发育程度变化较大,多数溶洞无充填,少数为半充填和全充填,充填物以细角砾土和粉质黏土为主。该段岩溶为覆盖型岩溶,局部溶洞顶板很薄,地表覆盖

层属于不稳定~较不稳定,属岩溶极易塌陷区。

## 3 岩溶整治方案

由于该段高路堤同时存在岩溶塌陷和沉降控制两方面的风险,传统的刚性桩地基处理结合岩溶注浆方案造价高,施工接口多,施工周期长,且岩溶注浆后浆液凝固收缩量大,为工程安全埋下一定的隐患,故首先舍弃了该方案。而桩板方案中钻孔灌注桩不仅可以处理岩溶,还可以处理岩溶上第四系覆盖层,技术上可行,经济上节约,施工接口少,周期短,所以桩板方案在这种工点的使用更为稳妥。

桩板结构是地基处理和岩溶整治的一种新结构型式,由路基本体、钢筋混凝土基桩、钢筋混凝土承载板和托梁组成,基桩与钢筋混凝土板或托梁刚接或铰接。其主要的工作机理是,通过承载板将上部荷载传到桩体,桩体把荷载扩散到桩间土、下卧层中,从而达到控制路基沉降与变形破坏的目的。岩溶极易塌陷区,桩底嵌岩的桩板结构基本不需要桩间土来承受荷载,既解决了岩溶顶板的附加荷载问题,又可基本消除覆盖土层的压缩沉降,减少岩溶塌陷影响行车安全的风险。桩板结构路基较传统的路基形式而言,不仅是无砟轨道一种新的路基结构形式,也是一种新型的地基处理技术与岩溶整治方法,是介于桥梁与传统路基之间的一种特殊的结构形式。下面进行桩板结构类型的比选和高、低桩板的优缺点分析。

### 3.1 不同低桩板结构形式方案比较

桩板结构是一种较为灵活的结构形式,大致可以分为以下三种方案:

#### 3.1.1 独立墩柱式

独立墩柱式桩板结构为桩基与承载板直接相连接的结构,承载板直接固接或铰接于桩上,此时承载板为多跨连续双向板,结构模型如图1所示。

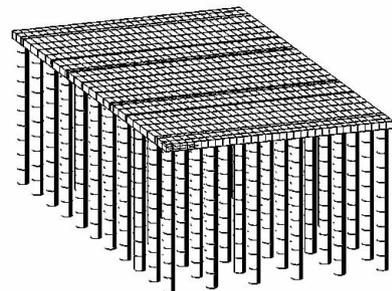


图1 独立墩柱式桩板结构模型图

#### 3.1.2 托梁式

托梁式桩板结构由桩基、托梁与承载板三部分组成,托梁连接横向桩基,其上再与承载板相连,桩基与

托梁固接,承载板与托梁固接、铰接或者搭接,此时承载板为多跨连续单向板,在局部活载作用下为双向板,结构模型如图2所示。

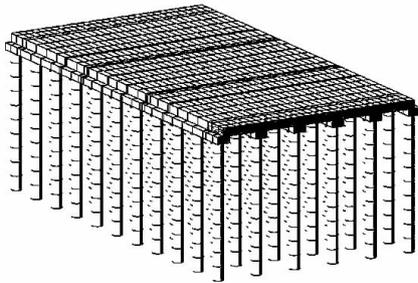


图2 托梁式桩板结构模型图

情况可以任意方向共同受力。托梁式板体则主要纵方向受力,总体来讲,托梁式桩板结构形式是典型的桩板梁式结构,设计相对简单,有利于推广。

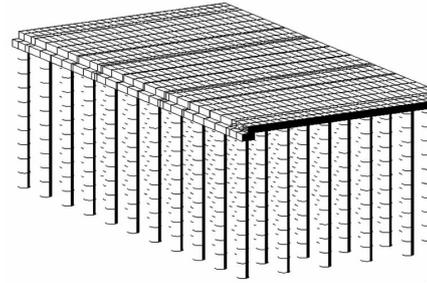


图3 复合式桩板结构模型图

### 3.1.3 复合式

复合式则为独立墩柱式、托梁式的组合结构,中跨采用独立墩柱式,边跨为托梁式,结构模型如图3所示。

三种桩板结构有很多共性又各有其特点,其中独立墩柱式板体不单单是纵横两方向受力,而且视支撑

无论采用何种形式的具体桩板结构,在独立墩柱式、托梁式及复合式桩板结构之间需进行进一步计算比选,以找到最优结构方案。以承载板上15 m高填土、考虑列车荷载为例,通过Midas软件建立的计算模型来确定板厚、桩径、托梁尺寸等设计方案,进而进行方案的优缺点比较,如表1所示。

表1 桩板结构形式方案比较采用的模型参数

	板厚/m	托梁厚/m	托梁宽度/m	桩径/m	桩长/m	纵向桩间距/m	横向桩间距/m
独立墩柱式	1.2	-	-	1.5	20	6	5.5
托梁式	1.0	1.0	1.8	1.5	20	6	5.5
复合式	1.0	1.0	1.8	1.5	20	6	5.5
荷载组合	承载能力	1.1 × 1.2 × (轨道 + 自重 + 15 m高填土) + 1.1 × 1.4 × 列车荷载					
	正常使用	1.0 × 轨道 + 1.0 × 自重 + 1.0 × 15 m高填土 + 1.0 × 列车荷载					

按照上述方案,分别对独立墩柱式、托梁式、复合式三种结构在同等外力的条件下进行了受力分析,计算结果如表2所示。

表2 计算结果比较

结构形式受力情况	独立墩柱式	托梁式	复合式
承载能力状态下板弯矩/(kN·m)	3 413	2 883	3 456
承载能力状态下板剪力/kN	3 441	2 890	3 550
正常使用状态下板位移/mm	-5.37	-5.09	-5.7
承载能力状态下托梁弯矩/(kN·m)	-	1 976	1 713
承载能力状态下托梁剪力/kN	-	1 793	1 443
正常使用状态下托梁位移/mm	-	-4.84	-2.39
承载能力状态下桩轴力/kN	16 488	17 024	16 858

续表2 计算结果比较

结构形式受力情况	独立墩柱式	托梁式	复合式
每米板纵向钢筋	22φ28	19φ25	22φ28
托梁纵向钢筋	-	18φ22	16φ22
桩顶冲切	满足	满足	满足
托梁顶冲切	-	满足	满足

从受力计算比较中可以看出,与托梁式桩板结构形式相比,独立墩柱式及复合式桩板结构中承载板所受的剪力、弯矩均比托梁式大,使得承载板相应配筋及截面增加,造价相对较高;托梁式桩板结构与独立墩柱式及复合式相比,由于托梁的作用,桩身载荷相对更大,从而相对减少了承载板的载荷,进而减少了桩间土层的荷载,更符合岩溶发育区桩板结构的设计理念,故推荐托梁式低桩板结构作为岩溶发育区高路堤工程设计中的首选方案。

### 3.2 高、低桩板方案比较

DK 335 + 879.30 ~ DK 336 + 179.10段以高填方通过,设计分别采用了低桩板和高桩板两种方案,下面

对两种方案进行比较。

### 3.2.1 低桩板方案

板设置于路基基底,板宽按轨道板外缘 1:1 的应力影响线控制,线间站台部分一并处理,处理宽度大,典型断面图如图 4 所示。横向桩间距 5.5 m,布置 7~19 根桩,纵向间距 6.0 m,板厚 0.8~1.0 m。本段共需设置桩径 1.2 m 灌注桩 440 根、桩径 1.5 m 灌注桩 685 根,总桩长 37 124 m,低桩板结构投资共需 26 275.6 万元。

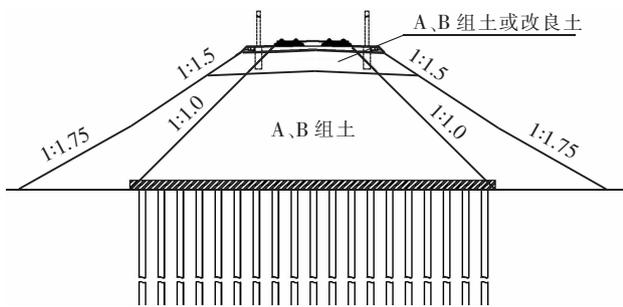


图 4 低桩板设计方案布置图

### 3.2.2 高桩板方案

板设置于路基面以下 1.0~1.2 m,板宽按轨道板外缘 1:1 的应力影响线控制,线间站台部分一并处理,典型断面图如图 5 所示。线外站台范围未处理,横向桩间距 5.5 m,纵向间距 6.0 m,板厚 0.8 m。本段共需设置桩径 1.2 m 灌注桩 307 根、桩径 1.5 m 灌注桩 534 根,总桩长 33 633 m,高桩板结构投资共需 20 037.7 万元。

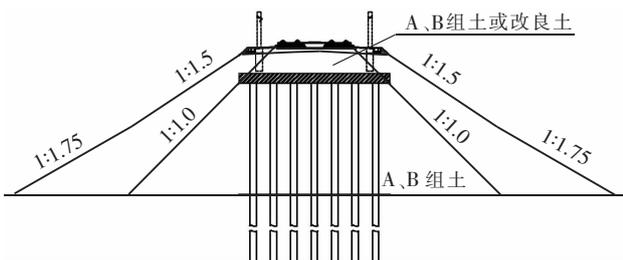


图 5 高桩板设计方案布置图

### 3.2.3 方案的优缺点分析

#### 3.2.3.1 低桩板方案

优点:低桩板结构受力明确,与旅客地道、涵洞等结构干扰小,不会破坏路基填土的密实状态,与接触网支柱等无接口问题;路基填筑在托梁板上面进行,几乎不影响岩溶顶板的受力状态,不加大岩溶塌陷的可能性。

缺点:纵向高度变化,板间搭接多,投资相对高。

#### 3.2.3.2 高桩板方案

优点:纵向平顺,投资相对低,较低桩板方案节省 6 238 万元。

缺点:高桩板结构是在路基填筑至板顶高程后进行钻孔灌注桩施工,不可避免的恶化路基体的工程条件,而且路基填高大,在填筑过程以及钻孔过程中都可能造成地面和路基填土的塌陷,与旅客地道、涵洞等结构干扰大、接口多,尚需预留接触网支柱基础、站台雨棚支柱基础位置等。

综上所述,虽然低桩板方案造价稍高,但其避免了由于填筑路基对岩溶顶板产生附加荷载进而加速岩溶空洞塌陷而形成的重大安全事故,在确保路基稳定方面优势明显,所以最终确定采用低桩板方案。

## 4 受力计算

该段埋入式托梁低桩板结构组成如图 6 所示,设计采用 Midas - civil 软件进行结构的内力计算,包括:承载板的纵、横向弯矩、剪力,托梁的横向弯矩、剪力,基桩的轴力等。在桩板结构内力计算的基础上,给出相应的顶板、托梁及桩基配筋,并且对桩、托梁顶部的抗冲切进行了相应验算。

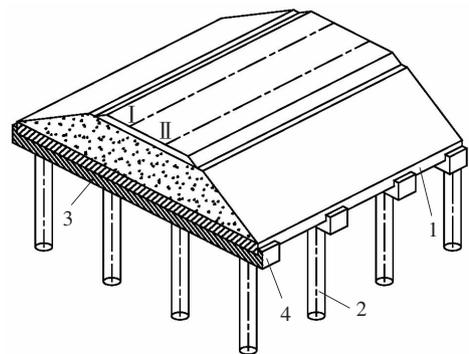


图 6 托梁桩板结构整体示意图

注:1—承载板;2—钻孔灌注桩;3—托梁;4—托梁翼柱

选取板上部填土高度为 2 m、2~5 m、5~9 m、9~13 m、13~15 m 的不同工况进行计算。下面以板上填土高度为 15 m 时的工况为例对埋入式托梁低桩板结构的受力计算进行介绍,其他工况不再赘述。

方案中横向桩间距 5.5 m,纵向桩间距 6 m,沿线路方向共 5 跨,沿承载板横向共 11 排桩,承载板连续铺设。列车荷载及轨道荷载在板顶处的换算土柱高度分别为 0.2 m、0.07 m,并按 45° 向下传递。土的重度

$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ , 桩长取为 20 m, 直径 1.5 m, 顶板厚度 1.2 m, 托梁高 1.0 m, 宽度为 1.8 m, 考虑 2、3 线两线行车, 3 线左侧及 4 线右侧均作用有站台及人群荷载。桩板结构形式及荷载组合如表 3 所示, 计算模型如图 7 所示。

设计中针对不同填土高的实际情况分别对承载板、托梁的极限承载能力下和正常使用状态下的弯矩、剪力、位移进行了计算, 也对桩在极限承载能力下和正常使用状态下的轴力进行了计算。结合桩与托梁、托梁与板间的抗冲切及剪力计算确定了托梁和承载板的截面尺寸, 根据弯矩计算和裂缝控制确定了承载板、托梁配筋, 具体结果如表 3 所示。

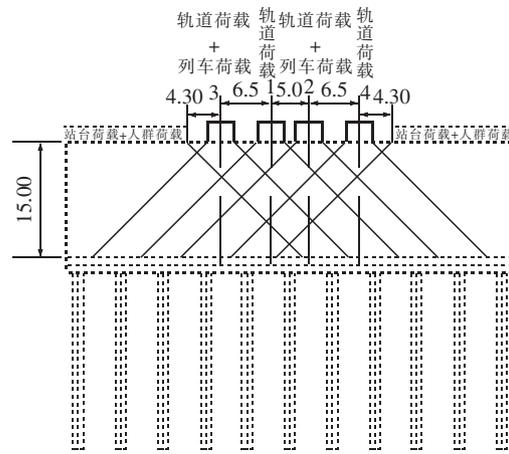


图 7 荷载传递示意图(单位:m)

表 3 实际采用的桩板结构设计结果

填土高度/m 结构形式及配筋	≤2	2~5	5~9	9~13	13~15
线路数目	2	4	4	4	4
板厚/m	0.8	0.8	1.0	1.0	1.2
托梁宽度/m	1.5	1.5	1.5	1.8	1.8
托梁高度/m	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0
桩径/m	1.0	1.2	1.2	1.2	1.5
横向桩间距/m	6.0	6.0	6.0	5.5	5.5
纵向桩间距/m	7.0	6.0	6.0	6.0	6.0
板截面设计	纵筋 12φ25 箍筋 φ10@160 六肢	纵筋 14φ25 箍筋 φ12@150 五肢	纵筋 20φ22 箍筋 φ12@200 六肢	纵筋 21φ22 箍筋 φ10@140 七肢	纵筋 20φ25 箍筋 φ12@100 六肢
托梁截面设计	纵筋 20φ20 箍筋 φ10@200 八肢	纵筋 20φ22 箍筋 φ12@180 八肢	纵筋 20φ22 箍筋 φ10@140 八肢	纵筋 24φ20 箍筋 φ10@180 八肢	纵筋 24φ22 箍筋 φ10@180 六肢
桩截面设计	纵筋 20φ20	纵筋 36φ20	纵筋 36φ20	纵筋 36φ20	纵筋 57φ20
桩顶冲切	满足	满足	满足	满足	满足
托梁顶冲切	满足	满足	满足	满足	满足

### 5 现场沉降观测情况分析

现场对 DK 335 + 879.30 ~ DK 336 + 179.10 岩溶地段高路堤沉降做了重点观测分析, 该段桥头填高达 14.2 m 的路基沉降观测结果如图 8 ~ 图 11 所示。

由沉降观测资料可以看出:

一是, 路基沉降主要发生在填筑阶段及填筑完成后 3 ~ 4 个月内, 占总沉降量的 80% 以上, 在静置后期沉降较小, 沉降量趋于稳定。

二是, 路基总体沉降量较小, 累计在 4 mm 以下, 说明地基沉降已稳定, 沉降板和路基面沉降桩总沉降量基本一致, 说明路基填筑质量较好。

三是, 采用双曲线法预测路基沉降能够满足工程

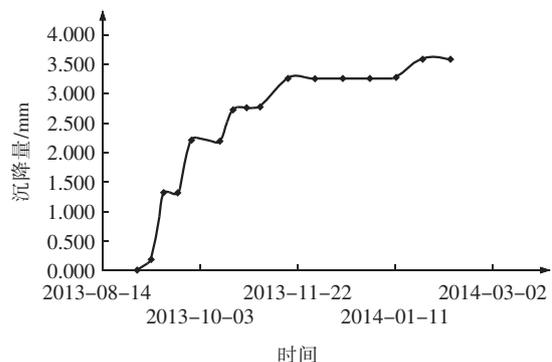


图 8 DK 335 + 879 沉降板观测数据

要求, 根据目前的预测情况, 该段高路堤能够达到路基工后要求。

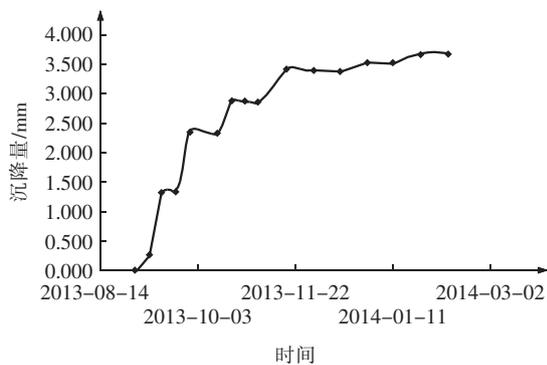


图9 DK 335 + 879 路基面沉降桩观测数据

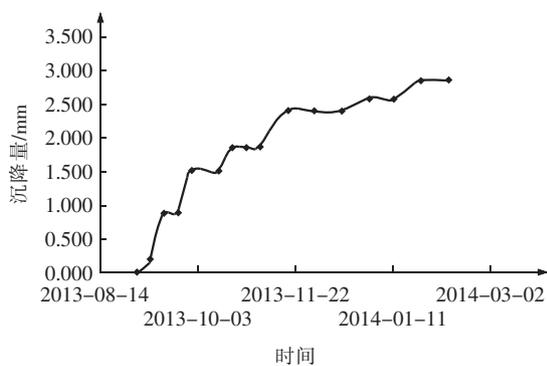


图10 DK 335 + 920 沉降板观测数据

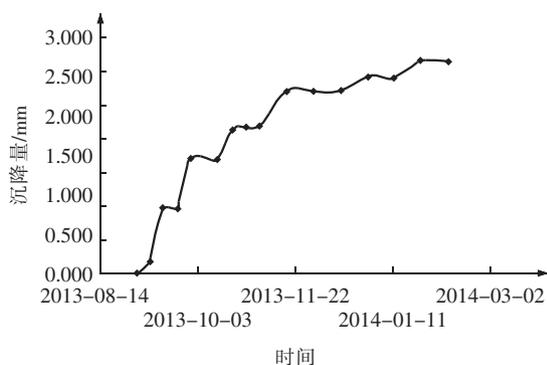


图11 DK 335 + 920 路基面沉降桩观测数据

四是,端承桩低桩板结构控制沉降效果良好,是沉降控制的一种较为有效的方案。

## 6 结论

本处桩板结构及上部填土于2013年8月施工完成,至今已经一年多,且通车已经近半年时间,通过沉降观测数据发现,累计沉降小于4 mm,达到了岩溶整治和地基处理的预期效果。

(1)埋入式托梁桩板结构是利用其承载板将上部荷载通过混凝土托梁传递到下部桩体,进而把荷载扩散到桩底下卧硬层或岩石层,既解决了岩溶地基处理

问题,又避免了填土对岩溶顶板的附加荷载,是一种岩溶区十分有效的地基处理方案。

(2)埋入式托梁桩板结构具有良好的整体性,特别适用于基础变形控制严格的岩溶强烈发育地区、深厚软弱地基及湿陷性黄土地基上修建路基的情况,同时,对于基底软硬不均差异沉降控制困难的路基、受地形条件限制不能修建传统桥梁结构的路基地段等,托梁式桩板结构都具有较好的技术和经济优越性,可以在类似的山区客专等铁路工程中推广应用。

(3)承载板上填土很高时,承载板上的荷载很大,使得其所受冲切力也很大,但应该对板厚和配筋进行合理的匹配,尽量避免由于承载板过厚或其配筋率太高而引起的经济上的不合理。

(4)托梁式桩板结构相对无托梁的桩板结构而言,从多桩超静定结构优化为静定结构,简化了计算;同时在横向通过托梁把桩连在一起,增强了桩的整体性,降低了由于单桩有缺陷时产生的灾难性危害,而且大大减少了板的冲切力,从而减小承载板厚度,可以说这种托梁式桩板结构在创新的同时,也使桩板结构的计算更为简捷、更为可靠。

(5)目前对低桩板结构的受力计算已相对成熟,但尚需通过一定数量的现场试验进一步优化和完善结构设计。

## 参考文献:

- [1] 詹永祥,蒋关鲁,魏永幸. 无砟轨道桩板结构路基在地震荷载下的动力响应分析[J]. 中国铁道科学,2006(6): 22-26.  
Zhan Yongxiang, Jiang Guanlu, Wei Yongxing. Dynamic Response Analysis on the Pile - Plank Structure Roadbed of Ballastless Track under Earthquake Load [J]. China Railway Science, 2006(6): 22-26.
- [2] 魏永幸. 客运专线无砟轨道桩-板结构路基[J]. 铁道工程学报,2008(4): 19-22  
Wei Yongxing. Study on Pile - slab Structure Subgrade for Ballastless Track of Passenger Dedicated Line [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(4): 19-22.
- [3] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].  
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structure [S].
- [4] TB 10005—2010, 铁路混凝土结构耐久性设计规范[S].  
TB 10005—2010, Code for Durability Design on Concrete Structure of Railway [S].
- [5] TB 10035—2006, 铁路特殊路基设计规范[S].  
TB 10035—2006, Code for Design on Special Subgrade of Railway [S].