

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.10.054

# 地铁车辆段软土区 PHDC 桩板结构线路沉降 数值模拟计算分析

夏高峰<sup>1</sup>, 杨雪<sup>1</sup>, 王小军<sup>2,3</sup>, 安志强<sup>2,3</sup>

(1.中铁十局集团第五工程有限公司,江苏 苏州 215011; 2.浙大宁波理工学院,浙江 宁波 315100; 3.重庆交通大学,重庆市 400074)

**摘要:** 依托宁波市轨道交通 5 号线经堂庵跟车辆段整体道床线路,运用 abaqus 有限元软件计算分析了在轨道和列车荷载换算土柱作用下,桩长、桩径、桩体刚度及桩间距对地铁车辆段软土区 PHDC 桩板结构线路沉降的影响,得出了最佳桩长和纵向合理桩间距,发现桩径对穿越软土层的那一段 PHDC 桩基沉降有显著影响,而桩体弹性模量的变化对线路沉降量的影响微乎其微。

**关键词:** 地铁车辆段;软土区;PHDC 桩;桩板结构线路;数值模拟计算

**中图分类号:** TU473.1;U231.+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2022)10-0215-06

## 0 引言

整体道床桩板结构地铁线路由下部刚性桩基、上部钢筋混凝土承载板和无碴轨道结构组成,充分发挥了无碴轨道结构与桩基础的各自特点,利用桩-土和板-土的共同作用来满足整体道床沉降变形要求<sup>[1]</sup>。桩基础一般以钢筋混凝土、PHC 管桩较多,PHDC 竹节桩较少。王业顺等<sup>[2]</sup>基于 Boussinesq 理论推导了钢筋混凝土桩基的桩板结构路基沉降计算解析解,并与 FLAC 3D 数值计算进行对比,发现两者计算结果基本吻合。詹永祥<sup>[3]</sup>等采用 ANSYS 有限元软件对硬质黏土中钢筋混凝土桩基无碴轨道桩板结构路基沉降进行了影响因素及其变化规律分析,为相关路基沉降提供了计算参考。雷长顺<sup>[4]</sup>通过松软土地区高速铁路钻孔灌注桩板结构路基的内力和沉降计算发现,数值模拟计算的内力略大于理论计算值,但分层总和法与数值模拟计算结果基本相符。Chen 等<sup>[5]</sup>利用分层计算法和数值模拟法研究了软土地基桩板结构加固效果,发现桩板结构可以有效控制路基沉降。肖汉等<sup>[6]</sup>对高速铁路桩板结构粉质黏土地基中 PHC 桩沉降计算的两种规范方法<sup>[7-8]</sup>进行了探讨,认为沉降理论计算需与其他方法对比分析加以完善。秦晓光<sup>[9]</sup>对上海市现代有轨电车深厚软土地基 PHC 桩板结构线路沉降量进行数值模拟并优

化了设计方案。目前对软土区 PHDC 桩板结构线路沉降的理论计算,特别是数值模拟分析鲜有报道,为此,现依托宁波市轨道交通 5 号线软土区经堂庵跟车辆段整体道床线路,运用 abaqus 有限元软件研究分析了桩长、桩径、桩体刚度及桩间距对 PHDC 桩板结构线路沉降的影响规律。

## 1 工程概况及工后沉降控制标准

为了满足无碴轨道线路工后沉降量不超过 15 mm 的基本要求<sup>[10-11]</sup>,宁波市轨道交通 5 号线经堂庵跟车辆段整体道床及库内地坪线路采用桩板结构路基形式。该桩板结构由桩长 36 m 的 PHDC 管桩、100 mm 厚混凝土板和 600 mm 厚承载板组成,见图 1。PHDC 桩的结构型号为 PHDC 400-350(80),是桩身直径及壁厚分别为 350 mm 和 80 mm、竹节的直径、长度及间距分别为 400 mm、175 mm 和 1 000 mm 的 C80 预应力混凝土竹节桩,桩体强度为 C80,单桩竖向抗压承载力设计特征值为 700 kN。PHDC 桩穿越 15 m 左右的厚层软土且桩底放置于⑥<sub>1</sub>粉质黏土层,土层情况见表 1。整体道床线路间地板连接构造断面见图 1。每条整体道床线路横向布设 2 根 PHDC 桩,桩间距为 1.6m;线路纵向排桩间距介于 2.70~6.25 m 之间;多条线路的中心线间距均为 4.6 m,见图 2。

## 2 作用荷载、数值模型与参数选取

### 2.1 作用荷载

如图 2 所示,数值模型是按照三条平行线路的中间线路典型区域选取的。选定区域平面范围(图中虚

收稿日期:2021-12-27

基金项目:滨海软土区域大型地铁车辆段施工综合技术研究

作者简介:夏高峰(1983—),男,本科,高级工程师,从事土建工程、城市轨道交通工程的施工技术与管理工

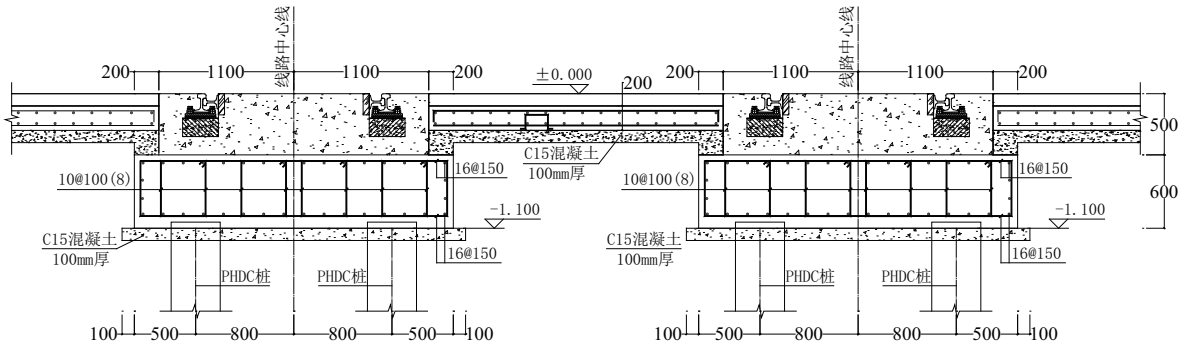


图1 桩板结构整体道床线路及横向连接混凝土地板断面图(单位:mm)

表1 地基土物理力学性质指标一览表

土层名称	层厚 /m	$\rho / (g \cdot cm^{-3})$	$c / kPa$	$\varphi / (^\circ)$	压缩模量 /MPa
① <sub>1b</sub> 填土	0.3	1.90	11.0	10	/
① <sub>2</sub> 黏土	0.8	1.86	20.6	5.9	4.1
① <sub>3T</sub> 泥炭质土	1.9	1.40	5.2	3.9	1.5
① <sub>3a</sub> 淤泥	7.5	1.68	5.6	3.5	2.0
② <sub>2b</sub> 淤泥	4.5	1.73	6.9	3.5	2.2
⑤ <sub>1a</sub> 黏土	4.4	1.97	46.7	9.9	7.3
⑤ <sub>1T</sub> 黏质粉土	4.6	1.92	6.8	25.8	9.2
⑤ <sub>2</sub> 粉质黏土	6.2	1.94	32.8	10.5	6.1
⑤ <sub>4a</sub> 粉质黏土	5.4	1.91	29.5	9.5	5.6
⑥ <sub>1</sub> 粉质黏土	4.0	1.99	44.7	11.6	7.6
⑥ <sub>2</sub> 粉质黏土	2.2	1.97	31.5	14.0	7.2
⑥ <sub>4a</sub> 粉砂	3.2	2.02	4.7	29.4	12.6
⑧ <sub>1</sub> 粉砂、细砂	10.5	2.01	5.5	30.1	12.0
⑧ <sub>3b</sub> 砾砂	7.9	2.02	2.8	29.4	13.3
⑫ <sub>1a</sub> 泥质粉砂岩	16.6	1.99	59.4	32	8.9

面,法向定义为罚(Penalty)函数,切向定义为硬接触(Hard),摩擦系数取4.0,滑移公式为有限滑移。其余接触均采用绑定(tie)接触。PHDC 桩板结构、整体道床及地基三维计算模型、PHDC 双排桩桩板结构三维计算模型分别见图3和图4。采用摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)本构模型,用 abaqus 软件进行计算分析。

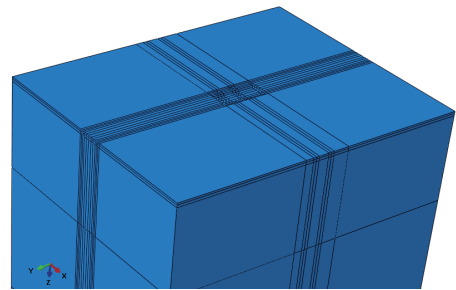


图3 PHDC 桩板结构、整体道床与地基三维计算模型

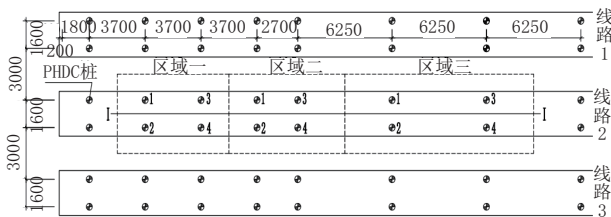


图2 整体道床线路的PHDC 桩位平面布置及数值模型选定区域范围图(单位:mm)

线范围)内的作用荷载包括桩板结构自重、整体道床线路间地板楼面荷载及轨道和列车换算土柱荷载,车辆段列车轴重为140 kN,属Ⅱ级轻型;轨道和列车荷载换算土柱的宽度3.3 m,高度3.3 m,密度18 kN/m<sup>3</sup>,荷载强度58.5 kPa/m,沿线路纵向条形分布。整体道床线路间地板荷载为1.5 kPa。桩板结构自重按照实际尺寸和钢筋混凝土密度计算。

### 2.2 数值计算模型

根据单条线路轨道和列车荷载换算土柱和PHDC 桩长的影响范围,数值计算模型的地基土体尺寸按土柱荷载宽度和桩基长度的2~3倍取值,为宽度40 m×长度50 m×深度80 m。对于桩-土接触

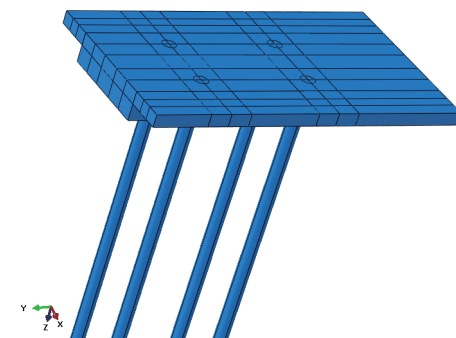


图4 PHDC 双排桩桩板结构三维计算模型

### 2.3 参数选取

PHDC 桩穿越地基土分布情况见表1。考虑到 abaqus 有限元软件计算的时效性和准确性,将表1的相近土层进行归一化处理,指标数据按照层厚进行加权平均;归一化后土层的弹性模量按其压缩模量的三倍取值<sup>[12]</sup>,地基土数值模拟参数见表2。PHDC 桩及顶板、地板及换算土柱荷载参数见表3。

## 3 PHDC 桩板结构线路沉降数值模拟验证分析

选定图2中的区域二进行数值模拟计算与理论

表2 地基土数值模拟参数

归一化土层编号	层厚/m	$\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	弹性模量/MPa	泊松比
1(①、②)	15.0	1674	6.85	3.8	6.45	0.3
2(⑤、⑥)	30.0	1953	28.8	15	23	0.3
3(⑧)	18.4	2014	4.3	29.8	37.7	0.3
4(⑫)	16.6	1990	59.4	32	26.7	0.3

表3 PHDC桩及顶板、地板及换算土柱荷载参数

模拟对象	结构尺寸	材料模型	$\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量/MPa	泊松比
PHDC桩	长36 m, 外径350/400 mm, 壁厚80 mm	线弹性	2 500	38 000	0.2
桩顶板	宽2.6 m, 厚0.7 m, 长n米	线弹性	2 500	32 500	0.2
两侧地板	宽2×1.0 m, 厚0.3 m, 长n米	线弹性	3 000	32 500	0.2
换算土柱荷载	宽3.3 m, 高3.3 m, 长n米	线弹性	1 800	2 000 000	0.2

注:n为选定区域轨道和列车荷载换算土柱条形荷载作用长度,随所取数值计算模型的平面位置和区域范围而变化,主要与排桩纵向间距的不同有关;按照图2,选定区域一时,n=7.4 m,选定区域二时,n=7.675 m,选定区域三时,n=12.5 m。

分析结果的对比验证。该计算区域有四根桩,两排桩纵向间距为2.7 m,大于6D(PHDC桩直径 $D=0.35\text{ m}$ ),故理论计算中,不考虑群桩效应。该区域外左侧最近排桩纵向间距为3.7 m,右侧最近排桩纵向间距为6.25 m,所以右侧单排(3号和4号)PHDC桩上承担的作用荷载要比左侧单排(1号和3号)PHDC桩上承担的作用荷载大,因此右侧单排桩的沉降量大于左侧单排桩的沉降量。作用荷载下PHDC桩板结构、整体道床与地基三维沉降云图见图5,桩板结构PHDC桩的三维沉降云图见图6。依据图5和图6确定的桩板结构沉降量<sup>[13-14]</sup>和桩身压缩量见表4。右侧单排桩处桩板结构的沉降量理论计算值和数值模拟值对比分析见表4。从表4中可见,对于桩身压缩量而言,理论计算值为3.132 mm,数值模拟值为3.136 mm,两者相差0.004 mm;对于桩板结构沉降量而言,理论计算值为5.170 mm,数值模拟值为5.177 mm,两者相差0.007 mm。由此说明,该数值模型是准确合理可行的。以下按此建模方法进行PHDC桩桩板结构整体道床线路沉降影响因素及优化分析。

#### 4 PHDC桩桩板结构整体道床线路沉降主要影响因素分析

除“4.4节”外,以下各节均采用图2中的区域二

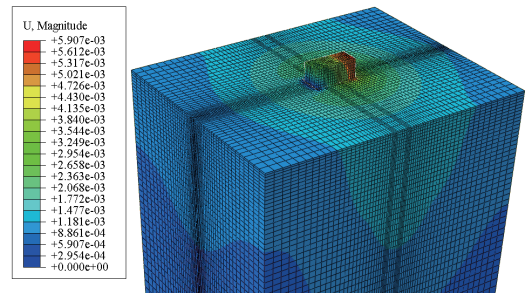


图5 作用荷载下PHDC桩桩板结构、整体道床与地基三维沉降云图

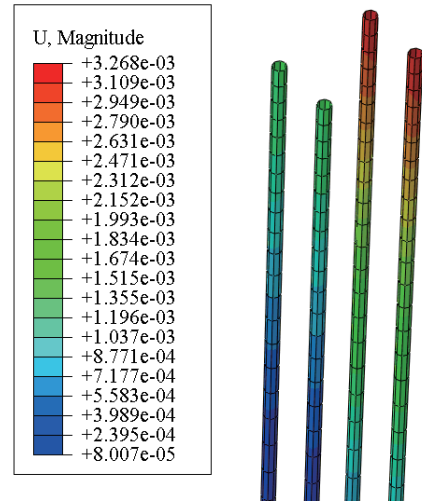


图6 桩板结构PHDC桩的三维沉降云图

表4 右侧单排桩处桩板结构沉降量理论计算值和数值模拟值对比表

分析方法	桩身压缩量/mm	桩底沉降量/mm	桩板结构沉降量/mm
理论计算值	3.132	2.038	5.170
数值模拟值	3.136		5.177

进行数值模拟计算分析。

#### 4.1 桩长对PHDC桩桩板结构线路沉降的影响

其他参数不变,PHDC桩长分别取30 m、33 m、39 m和42 m,以便与设计桩长36 m进行对比分析。不同桩长条件下,3号PHDC桩体沉降量沿桩长的变化曲线及PHDC桩板顶I-I断面沉降量变化曲线见图7和图8。

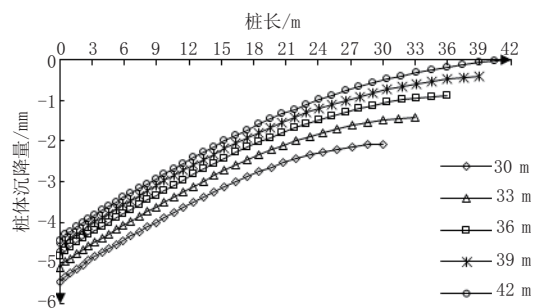


图7 不同桩长条件下3号PHDC桩体沉降量沿桩长变化曲线图  
从图7可见,(1)不同桩长时,桩体沉降量沿桩长的变化曲线规律总体相同,即桩顶最大,沿着桩长



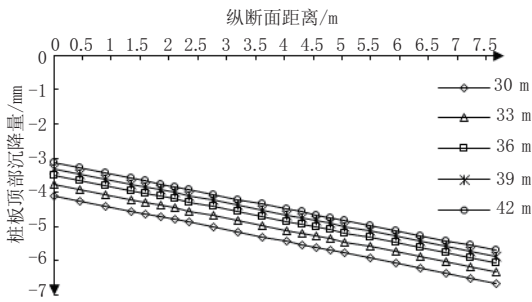


图8 不同桩长条件下PHDC桩板顶I-I断面沉降量变化曲线图  
逐渐减少,至桩底最小;因为15 m深度范围内是软土层,15 m深度以下是性质越来越好的硬质土层,所以,该曲线可分为两段:第一段,基本为线性变化;第二段,为微弯曲线变化段,且随着桩长由30 m增加到42 m,弯曲的程度越来越小。(2)当桩长为30 m时,桩顶和桩底沉降量相对最大,分别为5.5 mm和2.2 mm;当桩长为42 m时,桩顶和桩底沉降量相对最小,分别为4.4 mm和0.0 mm;所以,当桩长由30 m增加到42 m时,桩顶和桩底沉降量,分别减少了1.1 mm和2.2 mm,桩顶和桩底的沉降量减少幅度不同,这是因为上软下硬的土层性质决定的。

从图8可见,(1)不同桩长时,PHDC桩板顶I-I断面沉降量变化曲线的规律总体相同,均为线性变化;随着桩长由30 m增加到42 m,线性曲线逐渐向上平移,沉降量减少了1 mm,幅度不大。(2)当桩长为30 m时,沉降量相对最大,最大数值为6.7 mm;当桩长为42 m时,沉降量相对最小,最大数值为5.7 mm;均满足15 mm的基本要求。

为了对桩长进行合理优化,又对25 m和20 m的桩长进行了数值模拟分析,沉降云图分别见图9和图10。从图中可见,桩长由25 m减少到20 m时,桩板结构的最大沉降量由6.9 mm增大到8.8 mm,增幅为1.9 mm,相对于桩长由30 m减少到25 m时0.9 mm的增幅,产生了较大的变化,而且,最大沉降量发生范围也显著扩大了。此时,因为6.9 mm和8.8 mm的2倍分别为13.8 mm和17.6 mm,分别接近和超越了15 mm,安全储备不足。所以,桩长为30 m是较合理和经济的桩长。

#### 4.2 桩径对PHDC桩板结构线路沉降的影响

其他参数不变,PHDC桩径分别取300 mm、400 mm、450 mm和500 mm,以便与设计桩径350 mm进行对比分析。不同桩径条件下,3号PHDC桩体沉降量沿桩长的变化曲线及PHDC桩板顶I-I断面沉降量变化曲线分别见图11和图12。

从图11可见:(1)不同桩径时,桩体沉降量沿桩

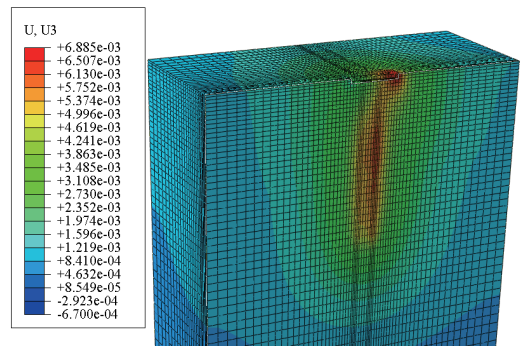


图9 桩长25 m时PHDC桩板结构I-I断面沉降云图

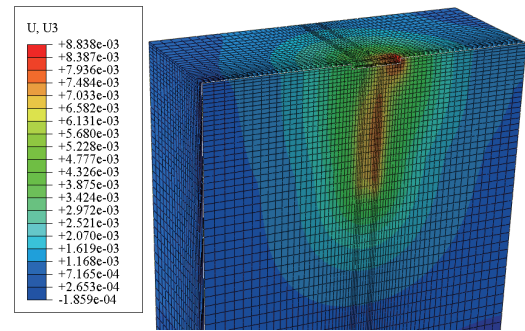


图10 桩长20 m时PHDC桩板结构I-I断面沉降云图

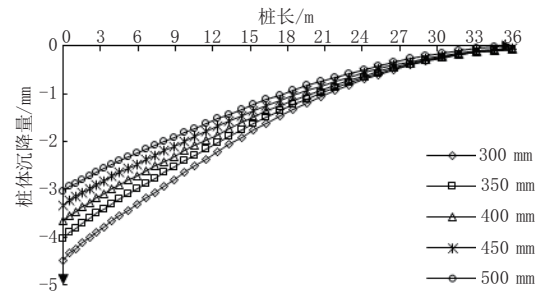


图11 不同桩径条件下3号PHDC桩体沉降量沿桩长的变化曲线图

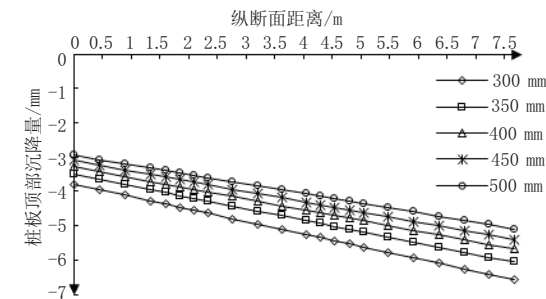


图12 不同桩径条件下PHDC桩板顶I-I断面沉降量变化曲线图  
长的变化曲线,在桩顶数值最大,且不同桩径的曲线区分度也最大,沿着桩长数值逐渐减少,至桩底最小,且趋于收敛一致。(2)当桩径为300 mm时,桩顶沉降量相对最大,为4.5 mm;桩径为500 mm时,桩顶沉降量相对最小,为3.0 mm;当桩径由300 mm增加到500 mm时,桩顶沉降量减少了1.5 mm,说明桩径的变化对桩顶沉降量有一定影响。(3)因为15 m深度内是软土层,15 m深度以下是性质越来越好的硬质土层,所以,不同桩径的桩体沉降量沿桩长的变

化曲线在 15 m 深度内呈现斜率不同但基本线性的喇叭状收口变化;15 m 以下为轻微弯曲并收敛于桩底的漏斗状曲线变化。由此说明,桩径的变化,对地表 15m 深度内软土层中的那一段 PHDC 桩基沉降有显著影响。

从图 12 可见,(1)不同桩径时,PHDC 桩板顶 I-I 断面沉降量曲线均为线性变化,但斜率略有不同,随着桩径由 300 mm 增加到 500 mm,线性状曲线逐渐向上移动,斜率逐渐微小变缓。(2)当桩径为 300 mm 时,沉降量相对最大,最大数值为 6.6 mm;当桩径为 500 mm 时,沉降量相对最小,最大数值为 5.1 mm;沉降量减少了 1.5 mm。均满足 15 mm 的基本要求。说明桩径对 PHDC 桩桩板结构线路沉降有一定影响。

#### 4.3 桩体刚度对 PHDC 桩桩板结构线路沉降的影响分析

其他参数不变,PHDC 桩采用不同的混凝土强度等级来调节桩体弹性模量,以研究桩体刚度的变化对 PHDC 桩桩板结构线路沉降的影响。即 C40,  $E_c=32.5$  GPa; C50,  $E_c=34.5$  GPa; C60,  $E_c=36$  GPa; C70,  $E_c=37$  GPa; C80,  $E_c=38$  GPa, 以便进行对比分析。不同桩体弹性模量下,3 号 PHDC 桩体沉降量沿桩长变化曲线及 PHDC 桩板顶 I-I 断面沉降量变化曲线,分别见图 13 和图 14。

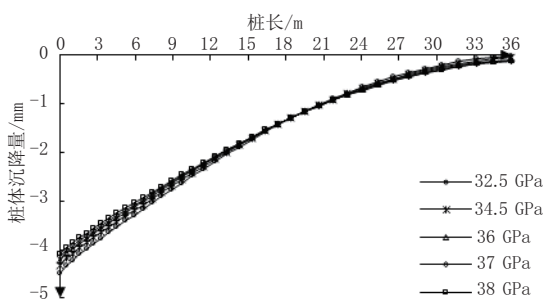


图 13 不同桩体弹性模量下 3 号 PHDC 桩体沉降量沿桩长变化曲线图

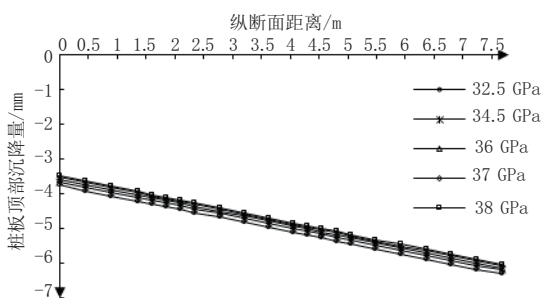


图 14 不同桩体弹性模量下 PHDC 桩板顶 I-I 断面沉降量变化曲线图

从图 13 可见:(1)不同桩体弹性模量条件下,桩体沉降量沿桩长的变化曲线总体规律基本相同,即

桩顶最大,沿着桩长逐渐减少,至桩底最小,曲线区分度不大;受土层性质影响,沿桩长可分为三段:第一段曲线:穿越 15 m 厚软土层,曲线族由发散状过渡收敛到一起;第二段曲线:埋深 15~24 m,穿越⑤<sub>1a</sub>黏土和⑤<sub>1r</sub>黏质粉土层,曲线族为一条曲线;第三段曲线:埋深 24~36 m,穿越⑤<sub>2</sub>粉质黏土、⑤<sub>4a</sub>粉质黏土和⑥<sub>1</sub>粉质黏土层,曲线族由收敛到可忽略的微小发散。由此说明,受微小影响的主要是 15 m 厚软土层段的桩体沉降量。(2)当  $E_c=32.5$  GPa 时,桩顶沉降量相对最大,为 4.5 mm;当  $E_c=38$  GPa 时,桩顶沉降量相对最小,为 4.2 mm;桩顶沉降量减少了 0.3 mm。由此说明,桩体弹性模量的变化,对桩体沉降量的影响微乎其微。

从图 14 可见:不同桩体弹性模量时,PHDC 桩板顶 I-I 断面沉降量变化曲线的规律总体相同,均为线性变化;随着桩体弹性模量由 32.5 GPa 增加到 38 GPa,线性曲线逐渐向上平移,最大处沉降量减少了 0.3 mm,变化幅度不到 1 mm。说明通过改变 PHDC 桩体弹性模量的方法来降低桩板结构线路的沉降量是不可取的。

#### 4.4 桩间距对 PHDC 桩桩板结构线路沉降的影响

其他参数不变,依据图 2 区域一、区域二和区域三中排桩纵向间距的不同,数值模拟分析桩间距对 PHDC 桩板结构线路沉降的影响。(1)区域一:两排桩纵向间距为 3.7 m,区域外最近一排桩的间距左右对称,为 3.7 m,换算土柱条形荷载作用长度  $n=7.4$  m。(2)区域二:两排桩纵向间距为 2.7 m,区域外最近一排桩的间距左右不对称,左侧为 3.7 m,右侧为 6.25 m,  $n=7.675$  m。(3)区域三:两排桩纵向间距为 6.25 m,区域外最近一排桩的间距左右对称,均为 6.25 m,  $n=12.5$  m。不同区域桩间距时,3 号 PHDC 桩体沉降量沿桩长的变化曲线及 PHDC 桩板顶 I-I 断面沉降量变化曲线,分别见图 15 和图 16 所示。

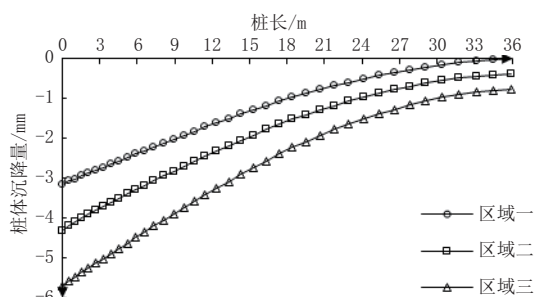


图 15 不同区域桩间距时 3 号 PHDC 桩体沉降沿桩长变化曲线图

从图 15 可见:(1)不同区域桩间距时,桩体沉降量沿桩长的变化曲线规律基本总体相同,即桩顶最

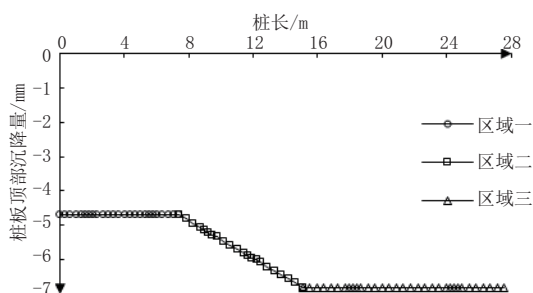


图 16 不同区域桩间距时 PHDC 桩板顶部 I-I 断面沉降量变化曲线图

大,沿着桩长逐渐减少,至桩底最小;区域一时,两排桩纵向间距为 3.7 m,曲线偏上分布,桩体沉降量最小;区域三时,两排桩纵向间距为 6.25 m,曲线偏下分布,桩体沉降量最大;区域二时,两排桩纵向间距为 2.7 m,曲线适中分布,桩体沉降量介于中间。虽然区域二比区域一的两排桩内部纵向间距减少了 1 m,但由于在区域二中,域外右侧最近一排桩的纵向间距为 6.25 m,比区域一左右对称的域外排桩最近间距 3.7 m 大 2.55 m,所以区域二要比区域一的右侧单排 PHDC 桩上承担的作用荷载大,故相应的桩体沉降量也要大一些。由此说明桩间距对桩长范围的沉降量都有影响且要考虑所选区域内外桩间距的综合影响。(2)区域一时,桩顶沉降量为 3.2 mm;区域二时,桩顶沉降量为 4.3 mm;区域三时,桩顶沉降量为 5.8 mm。区域一和区域二的情况,具有可比性,排桩纵向间距由 3.7 m 增加到 6.25 m 时,桩顶沉降量增加了 2.6 mm,说明桩间距的变化对桩顶沉降量的影响是非常显著的。

从图 16 可见:区域一时,PHDC 桩板顶 I-I 断面沉降量变化曲线为水平线,沉降量为 4.7 mm。区域三时,断面沉降量变化曲线也为水平线,沉降量为 6.8 mm。区域二时,断面沉降量变化曲线为斜直线,与区域一和区域三的断面沉降量变化曲线尾首相接,从 4.7 mm 增加到 6.8 mm,但均满足线路平顺性和 15 mm 的基本要求。所以,单从沉降量控制和选择安全系数为 2 的安全储备考虑,PHDC 桩纵向间距为 6.25 m 的桩板结构线路是最经济可行的。

## 5 结 语

在对 PHDC 桩板结构线路沉降数值模拟进行验证分析基础上,通过 abaqus 有限元软件研究分析了桩长、桩径、桩体刚度及桩间距对地铁车辆段软土区 PHDC 桩板结构整体道床线路沉降的影响,得出了以下结论:

(1)在特定软土工程地质条件下,区域内两排 PHDC 桩纵向间距为 2.7 m,区域外最近排桩间距左右不对称,左侧为 3.7 m,右侧为 6.25 m,在轨道和列车荷载换算土柱作用下,右侧单排 PHDC 桩要比左侧单排 PHDC 桩上承担的作用荷载大,所以右侧单排桩要比左侧单排桩的沉降量大。经过桩长对 PHDC 桩板结构线路沉降的影响对比分析,桩长由 36 m 优化到 30 m 是合理经济的。此时,PHDC 桩板结构线路最大沉降值为 6.7 mm,考虑 2 倍的安全储备,也完全满足 15 mm 的基本要求。

(2)桩径的变化,对穿越 15 m 深度软土层的这段 PHDC 桩基沉降有显著影响,且 PHDC 桩板顶部纵断面沉降量曲线均为线性变化,当桩径为 300 mm 时,沉降量相对最大,最大值为 6.6 mm;当桩径为 500 mm 时,沉降量相对最小,最大值为 5.1 mm;沉降量减少了 1.5 mm。均满足 15 mm 的基本要求。说明桩径对 PHDC 桩板结构线路沉降有一定影响。

(3)不同桩体弹性模量时,PHDC 桩板顶部纵断面沉降量曲线均为线性变化;随着桩体弹性模量由 32.5 GPa 增加到 38 GPa,线性曲线逐渐向上平移,最大处沉降量仅减少了 0.3 mm。由此说明,改变 PHDC 桩体弹性模量的方法来降低桩板结构线路沉降量是不可取的。

(4)对比区域一和区域二,排桩纵向间距由 3.7 m 增加到 6.25 m 时,桩顶沉降量增加了 2.6 mm,说明桩间距的变化对桩顶沉降量的影响是非常显著的。线路从区域一、区域二到区域三时,PHDC 桩板顶部沉降量从 4.7 mm 过渡到 6.8 mm。满足线路平顺性和 15 mm 的基本要求。所以,单从沉降量和安全储备考虑,PHDC 桩纵向间距为 6.25 m 的桩板结构线路是最经济可行的。

(5)综合分析而言,维持 PHDC 桩的设计桩径 350 mm 不变,优化后的桩长和纵向间距分别为 30 m 和 6.25 m。

### 参考文献:

- [1] 詹永祥,蒋关鲁.土质路基上桩板结构路基设计关键性技术探讨[J].路基工程,2009(2):29-30.
- [2] 王业顺,陈晓斌,蔡德钧.桩板结构路基沉降计算方法及对既有桩基侧摩阻力的影响[J].铁道建筑,2019(2):22-25.
- [3] 詹永祥,蒋关鲁,魏永幸.桩板结构路基沉降影响因素的有限元分析[J].路基工程,2007(3):12-14.
- [4] 雷长顺.桩板结构在松软土地区高速铁路路基中的应用分析[J].铁道勘察,2017(1):45-49.
- [5] CHEN H, XU S H, ZHANG B Q. Reinforcement Effectiveness-



### 5 防渗膜截渗墙帷幕截水效果

从1990年8月15日开始疏干排水至2010年末,日均排水量为43.8万 m<sup>3</sup>/d。历年排水量见表4。

表4 矿内年度疏干排水量

年度	疏干排水量 /m <sup>3</sup>	年度	疏干排水量 /m <sup>3</sup>	年度	疏干排水量 /m <sup>3</sup>
1990	54 685 809	1997	188 916 154	2004	161 336 658
1991	161 209 050	1998	212 469 376	2005	154 057 860
1992	182 756 670	1999	155 339 018	2006	169 241 172
1993	168 136 700	2000	13 666 021	2007	171 009 507
1994	174 454 010	2001	160 254 797	2008	150 391 807
1995	171 722 303	2002	154 570 693	2009	174 335 703
1996	172 758 098	2003	153 428 305	2010	154 903 961
总计			3 259 643 672		

在防渗膜截渗墙施工完成后,该矿内日均疏干排水量为7.2708万 m<sup>3</sup>/d,日均排水量较1990—2010年减少36.5292万 m<sup>3</sup>,减少幅度达到83.4%。该结果表明,防渗膜截渗墙对于矿区内截水防渗作用非常明显,能大幅度降低矿内疏干排水量与排水费用。

### 6 结论

基于某露天煤矿防渗膜截渗墙项目,综合分析防渗膜地连墙的施工过程,结合现场施工实况,得出如下结论:

(1)采用自制铺膜机进行防渗膜垂直铺设效果优良,该铺膜机可以作为后续类似工程辅助工具。

(2)防渗膜截渗墙防渗效果能充分满足露天煤矿防渗要求,极大地降低矿区内排水费用,经济性佳。

(3)提出的防渗膜截渗墙是该类工程新的截渗方法,该方法的提出拓展了地连墙的应用领域,具有良好的应用前景。

#### 参考文献:

[1] 周金阳.混凝土防渗墙加固的土石坝有限元分析研究[D].南昌:南昌大学,2010.

[2] 陈庚仪.我国混凝土防渗墙技术的概况和今后发展趋势[J].水利水电技术,1978(1):31-37.

[3] 高波,田赞,孙凯,等.塑性混凝土垂直防渗墙在田村水库除险加固工程中的应用[J].中国水利,2021(14):38-39.

[4] 于广斌,双学珍.水利水电工程中塑性混凝土防渗墙施工工艺及应用实践[J].四川水泥,2021(9):39-40.

[5] 姜殿斌.水利工程防渗墙构造设计及混凝土浇筑技术[J].科学技术创新,2021(21):132-133.

[6] 郭广善.混凝土防渗墙施工技术在水利水电工程中的应用[J].中国新技术新产品,2021(8):117-119.

[7] 王京军.混凝土防渗墙在水库除险加固工程中的应用[J].内蒙古水利,2021(7):50-52.

[8] 万建平.水库除险加固工程中低弹模混凝土防渗墙的应用[J].水利科学与寒区工程,2019,2(1):122-124.

[9] 陈居铮.深基坑支护地下连续墙施工技术[J].科技风,2021(21):96-97.

[10] 洪成溪.建筑深基坑工程地下连续墙施工技术[J].城市住宅,2021,28(5):239-240.

[11] 伍军,邓稀肥.超深基坑地连墙十字钢板接头变形控制方法[J].现代隧道技术,2021,58(2):204-207,237.

[12] 彭剑,杨清平.塑性混凝土防渗墙在深基坑开挖中的应用[J].中国港湾建设,2014(6):48-50.

(上接第220页)

sAnalysis of Road Pile-plank Structure in Soft Soil Area [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 482: 227-232.

[6] 肖汉,郭永春.桩板结构下桩基沉降计算方法适用性探讨[J].铁道建筑,2012(1):96-98.

[7] GB5 0007—2011,建筑地基基础设计规范[S].

[8] JGJ 94—2008,建筑桩基技术规范[S].

[9] 秦晓光.现代有轨电车线路深厚软土地基一体化桩板结构沉降控制

研究[J].城市轨道交通研究,2019(6):80-84.

[10] GB 50157—2013,地铁设计规范[S].

[11] TB 10001—2016,铁路路基设计规范[S].

[12] 尧俊凯.高速铁路刚性桩桩网复合地基沉降特性研究[D].西南交通大学,2016.

[13] TB 10093—2017,铁路桥涵地基和基础设计规范[S].

[14] TB 10106—2010,铁路工程地基处理技术规程[S].