

地铁上穿工程中抗浮钢拉杆的参数优化

彭丽云,崔长泽,李广兵,朱同宇,罗涛

(北京建筑大学土木与交通工程学院,北京 102616)

摘要 目的 研究地铁上穿工程中不同钢拉杆参数对既有结构上浮的影响,为钢拉杆抗浮施工设计提供指导和借鉴。方法 基于北京某地铁上穿工程,利用FLAC3D软件建立数值模型进行分析,研究上穿过程中钢拉杆长度、角度、间距等参数变化对既有结构变形的影响。结果 钢拉杆长度增加时,既有结构上浮位移变小,但同时钢拉杆对既有结构的约束效果也逐渐减小,长度对既有结构上浮的约束能力在3个参数中约占19.79%;钢拉杆角度的变化对既有结构位移影响较小,在3个参数中比重约占1.16%;钢拉杆间距增加时,既有结构竖向位移逐渐增大,且两者近似呈线性关系,其对结构上浮影响最大,比重约占79.05%。结论 在北京地区相似地质和工程条件下,钢拉杆的最优长度为4.5 m,角度建议取 $12^{\circ} \sim 24^{\circ}$,间距取1.0~2.0 m。

关键词 钢拉杆;参数优化;上穿工程;结构抗浮;数值模拟

中图分类号 TU91

文献标志码 A

Parameter Optimization of Anti-floating Steel Tie Rods in Metro up Crossing Engineering

PENG Liyun, CUI Changze, LI Guangbing, ZHU Tongyu, LUO Tao

(School of Civil and Transportation, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, China, 102616)

Abstract: In order to provide guidance and reference for the anti-floating construction design of steel tie rod, this paper studies the influence of different parameters of steel tie rod on the floating of existing structure in subway overpass project. Based on a subway overpass project in Beijing, a numerical model was established by FLAC3D software to analyze the influence of the length, angle, spacing and other parameters of the steel tie rod on the deformation of the existing structure. When the length of steel tie rod increases, the floating displacement of the existing structure becomes smaller, but at the same time, the restraint effect of steel tie rod on the existing structure gradually decreases. The constraint ability of the length to the floating of the existing structure accounts for about 19.79% of the three parameters. The change of steel tie rod angle has little influence on the displacement of the existing structure, accounting for about 1.16% of the three

收稿日期:2020-12-25

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41772291,42172299)

作者简介:彭丽云(1979—),女,副教授,主要从事城市轨道交通工程、地下工程等方面研究。

parameters. When the distance between steel drawbars increases, the vertical displacement of the existing structure increases gradually, and the relationship between them is approximately linear, which has the greatest impact on the floating of the structure, accounting for about 79.05%. Under the similar geological and engineering conditions in Beijing, the optimal length of steel tie rod is 4.5 m, the angle is recommended to be 12° to 24° and the spacing is 1.0 ~ 2.0 m.

Key words: steel tie rod; parameter optimization; up crossing engineering; structural anti-floating; numerical simulation

地铁建设过程中不可避免会遇到穿越问题,典型表现为上穿或下穿,其中上穿工程距地表近风险性更大,且开挖卸荷会使既有结构产生隆起变形,影响列车正常运营。针对上穿问题,国内外学者进行了许多研究工作。白海卫等^[1]等基于岩石力学与隧道力学的基本原理分析了上穿工程对既有线路安全性的影响。R. Liang 等^[2-3]通过数学模型分析了新建上穿工程对既有隧道变形的影响。夏国政等^[4-6]通过数值模拟方法得出上穿工程对既有隧道的变形影响规律。

钢拉杆是一种典型的受拉构件,在工程中得到了广泛应用。孟志安等^[7]对 U 型钢拉杆的制作工艺进行了改良。仇兆吉等^[8]对钢拉杆的受力机理与疲劳性能进行了研究。贾福星等^[9]对大直径钢拉杆的制作安装进行了分析。近年来,钢拉杆也逐渐应用在地下工程中,多设置在隧道上方,一端连着既有结构,另一端斜打进两侧土体,通过一侧的 U 型接头和杆体钢筋将力传递至周围土体中。陈明昌等^[10]研究发现,钢拉杆的极限承载力通常由钢拉杆锚固端与周围岩土层界面上的粘结力决定。武瑞丫等^[11]对工程中受力的锚杆结构和与其衔接的锚固板承载性能进行了研究。F. Li 等^[12-13]通过有模拟的方法对锚杆剪应力分布、施工参数、计算模型等方面进行了研究。I. Vilanova 等^[14]对抗浮锚杆的粘结应力性能、弯曲性能、应力传递性能进行了研究。目前研究多针对钢拉杆受力机理展开,而结合实际工程的钢拉杆参数优化研究较少,而此项研究直接决定钢拉杆的抗浮效果。因此笔者以北京某地铁上穿工

程为背景,对钢拉杆抗浮方案进行数值模拟和监测对比分析,在此基础上通过改变钢拉杆参数,探究各参数对既有线结构位移的影响规律,研究结果将为地铁上穿工程中的抗浮设计提供指导。

1 工程概况

1.1 工程简介

既有站厅位于北京某交叉路口下约 50 m 范围内,全长 178.3 m,结构断面是单拱单跨断面,高度 18 m、跨度 10 m。站厅路线有上、下行两条隧道(西侧为上行,东侧为下行),线间距为 25.2 m,覆土厚度 2.5 ~ 10.0 m。新建线穿越既有站厅,主体全长为 254.8 m,分三段开挖,东、西两段长度分别为 87.8 m、136.9 m,均采用分幅盖挖法开挖,宽度 28.4 m。中段长为 30.1 m,采用暗挖中洞法开挖,宽度为 22.4 m。新建线接入既有车站站厅,轨道施工东、西段在侧上方穿越既有地铁的轨行区,中段在既有轨行区的正上方,如图 1 所示。

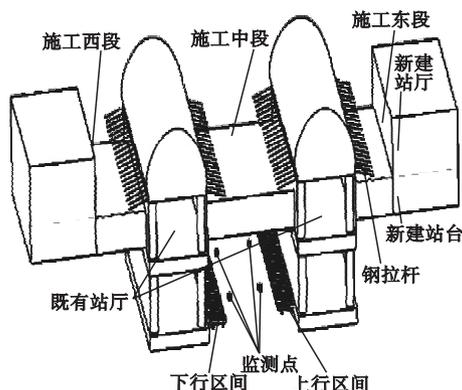


图 1 穿越关系示意

Fig. 1 Schematic diagram of crossing relationship

1.2 工程水文情况

工程勘察没有发现上层滞水,潜水埋深 15~17.2 m,承压水埋深 21.3~25.1 m。既有车站结构中部位位于潜水层,承压水位于既有车站下 17 m 左右。新建车站不在地下水影响范围之内。

1.3 钢拉杆布设

钢拉杆运用于地铁上穿工程中,主要作用是提高既有结构的稳定性、约束既有结构的竖向位移。本工程中,先将既有线上下行区间的管线进行改造,再将钢拉杆从结构顶板拱脚斜打进两侧土体中,后注入水灰质量比 1:1 的 M20 水泥砂浆,使钢拉杆与周围土体紧密连接。钢拉杆型号为 GLG345、直径 32 mm、长 4.0 m,钢拉杆倾角 15°,间距 1.5 m,抗拉极限承载力为 378 kN^[15],设计承载力不超过极限承载力的 80%^[16],即 302.4 kN。

2 模型建立与参数选取

2.1 模型概况

通过 FLAC3D 软件建立三维模型。考虑边界效应,X 方向(新建线纵向)154 m、Y 方向(既有线纵向)102 m、Z 方向(高度方向)34 m,坐标原点为西南端底角。计算模型如图 2 所示。

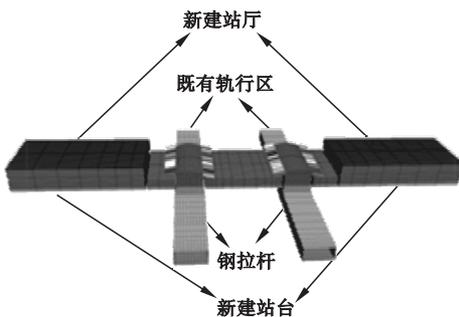


图 2 计算模型图

Fig. 2 Calculation model diagram

顶面为自由边界,其他面均为法向约束。土体、既有、新建车站均采用六面体单元,钢拉杆采用 Pile 单元,共 104 976 个单元,112 090 个节点。土体采用莫尔-库伦模型,屈服破坏准则为摩尔-库伦屈服准则;钢拉

杆、混凝土材料采用线弹性模型,钢拉杆-土体接触面采用 interface 接触面模拟。

2.2 计算参数

通过地质详勘报告确定土体参数见表 1。通过《混凝土结构设计规范》(GB/T 50010—2010)确定钢拉杆及混凝土结构参数见表 2^[17]。钢拉杆位于圆砾卵石层,接触面参数类型为钢拉杆-土接触面,黏聚力为 0,内摩擦角为 20°。

表 1 土体参数

Table 1 Soil Parameters

土层	厚度/ m	重力密度/ (kN·m ⁻³)	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ kPa	弹性模量/ MPa
杂填土	1.0	16.0	10.0	5.0	26.0
粉土填土	4.0	19.8	25.0	12.0	29.0
粉质黏土	6.0	19.9	15.0	35.0	37.6
中粗砂	3.0	20.8	30.0	0.0	135.0
圆砾卵石	4.0	21.2	40.0	0.0	146.6
细中砂	16.0	20.2	30.0	10.0	120.0

表 2 材料参数

Table 2 Material parameters

材料名称	单元类型	泊松比	弹性模 量/MPa	重力密度/ (kN·m ⁻³)
钢拉杆	Pile	0.3	2.10×10^5	76.9
初衬	Shell	0.2	3.45×10^4	24.5
二衬	Shell	0.2	3.0×10^4	24.5
注浆加固体	Shell	0.3	3.0×10^2	23.5

2.3 建模步骤

(1) 建立土层与既有车站模型,施加初始地应力,并将初始位移归零;

(2) 在既有站厅顶板的拱脚处设钢拉杆并计算,待稳定后将位移归零,后加强开挖土体模拟注浆加固;

(3) 施工西段开挖,分开挖段进行全断面超前注浆加固,分步开挖隧道土体,并施作初支及二衬;

(4) 待西段初支完成后进行东侧开挖,而后注浆、开挖土体、施作初支及二衬;

(5) 东、西两段施作完成后进行中段开

挖,步骤同前,计算模型见图2。

2.4 现场监测与数值模拟

在既有轨行区上、下行区间沿着轨道纵向分别布置监测点 Jc01 ~ Jc04。

由于较远的土体开挖对既有线影响很小,实际工程中,在东、西段靠近既有线的40 m、施工中段全长 30.1 m,如图3所示的区段施工过程中,分别对 Jc01 ~ Jc04 点进行了监测。

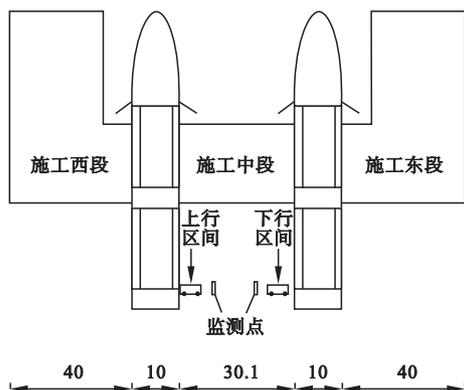


图3 新建线纵向图

Fig. 3 Longitudinal diagram of new lines

监测点 Jc01 ~ Jc04 的监测结果和数值模拟计算对比见图4,其中正值代表上浮。

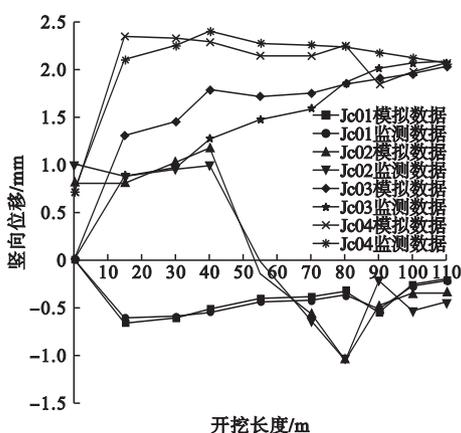


图4 不同开挖长度下模拟与实际结果对比图

Fig. 4 Comparison of numerical simulation and actual results under different excavation lengths

从图4可以看出,监测点 Jc01 在三段开挖过程中,整体处于下沉状态,沉降变形量较小并且变化不大,竖向位移最大值与最小值

差为 0.46 mm。监测点 Jc02 距离西段远,西段开挖对其影响较小,仅使其略微上浮;在东段开挖时该位置快速下沉,并由隆起状态转换成沉降状态,在东段开挖完成后达到沉降最大值;中段开挖使其上浮,三段开挖后的影响叠加使其仍处于沉降状态。监测点 Jc03、Jc04 始终处于上浮状态,因为两个监测点距离西段较近,西段开挖卸荷使这两个监测点快速上浮,并且上浮位移量较大。东段距离两个监测点较远,影响较小,在东段开挖过程中 Jc03 略有上浮, Jc04 略有下沉。中段开挖使 Jc04 先下沉后上浮,对 Jc03 的影响很小,在三段开挖完成后两位置的隆起位移量均较大且大小相当。

从监测数据可知,上、下行区间的位移变化量都小于 2.5 mm,满足工程控制值 3 mm^[18]。平均隆起位移量比平均沉降位移量大,这是因为上穿开挖卸荷的影响。中段开挖对既有线竖向位移影响较小,是由于钢拉杆的约束作用,抑制了既有线结构的上浮。对比模拟数据与实际监测数据发现,变形量与变形规律均具有较好的一致性。

3 钢拉杆参数选取及优化方案

钢拉杆施工中的主要参数有长度、角度、间距和等级型号等。长度影响锚固力的大小,长度过短不利于锚固区形成,长度过长会使成本升高,造成不必要的浪费;角度影响钢拉杆对结构约束力的大小,倾斜范围一般避开 $-10^{\circ} \sim +10^{\circ}$ ^[18],且不宜过大,防止对新建线路或临近高层建筑地基等产生不利影响;间距直接影响钢拉杆的数量,当分布过于稀疏时,钢拉杆之间相互独立抗浮效果较差,分布过于密集时施工难度较大,成本升高。直径与等级型号直接对应钢材的强度。由于工程中钢拉杆直径、材料已经确定,笔者仅对长度、角度和间距进行优化,优化方案见表3。

表3 优化方案设计

Table 3 Optimization scheme design

钢拉杆长度 L/m	钢拉杆角度 $A/(^\circ)$	钢拉杆间距 S/m
2.5、3.0、3.5、 4.5、5.0、5.5	15	1.5
4.0	12、18、21、24	1.5
4.0	15	1.0、1.2、1.7、 2.0、2.5

4 不同优化参数影响分析

4.1 钢拉杆长度的影响分析

通过模拟得到不同钢拉杆长度下既有结构的最大竖向位移曲线如图5所示。

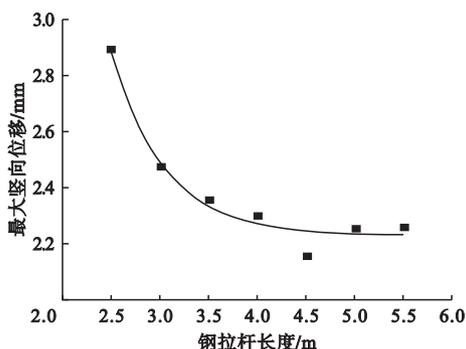


图5 钢拉杆长度与最大竖向位移关系曲线

Fig. 5 Relation curve between length of steel tie rod and maximum vertical displacement

由图5可知,随着钢拉杆长度增加,最大竖向位移逐渐减小。当长度从2.5 m增加至3.0 m时竖向位移减小了14.4%;增加至3.5 m时竖向位移又减小了4.8%;当钢拉杆长度达到4.5 m,锚固区已经形成,再增加长度对抗浮能力提效甚微或不再提高。长度为4.5 m时最大竖向位移达到最小值2.157 mm。最大竖向位移均未超过控制值3 mm。

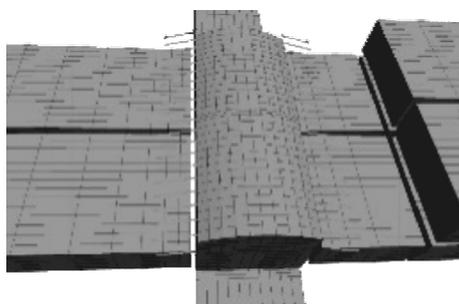
为预测钢拉杆长度为2.5~5.5 m内其他长度下既有结构的位移大小,对图5中的数据点进行拟合得:

$$y = A_1 \times e^{\frac{L}{\eta}} + y_0 \quad (1)$$

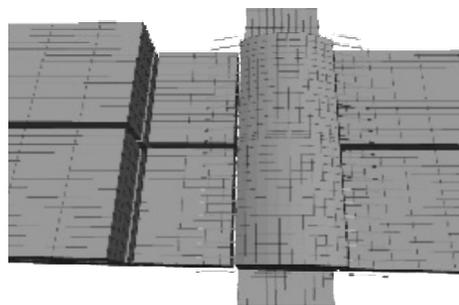
式中: y 为最大竖向位移; A_1 为拟合参数; η 为与长度相关的系数; y_0 为曲线渐近线数

值。其中, $A_1 = 69.024$, $\eta = -0.538$, $y_0 = 2.229$;拟合优度 $R^2 = 0.9555$, R^2 是衡量回归方程整体拟合度的无量纲系数,其值越接近1说明拟合效果越好。

图6为钢拉杆长度3.5 m时,上、下行区间钢拉杆应力云图。从图中可知,此时上行区间钢拉杆受力较小,这是因为上行区间上浮位移量小,部分表现为下沉;而下行区间中部上浮量最大,因此钢拉杆受力也更大。因此在后续钢拉杆应力分析中,仅取下行区间的云图进行分析,长度为5 m时应力云图如图7所示。



(a)上行区间钢拉杆应力云图



(b)下行区间钢拉杆应力云图

图6 长度为3.5 m时应力云图

Fig. 6 Stress nephogram with length of 3.5 m

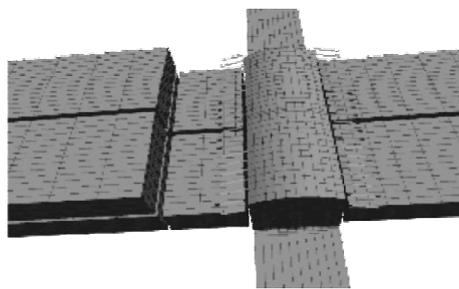


图7 长度为5.0 m时应力云图

Fig. 7 Stress nephogram with length of 5.0 m

从图7分析可知,在长度为某一定值时,既有站厅中部的钢拉杆轴力大于两侧。而对于单个钢拉杆,杆件两端的轴力大于中部,这是因为既有线结构上浮,钢拉杆受拉,两端产生了应力集中现象。

从不同钢拉杆长度应力云图中提取钢拉杆对应的最大轴力,绘制关系曲线如图8所示。

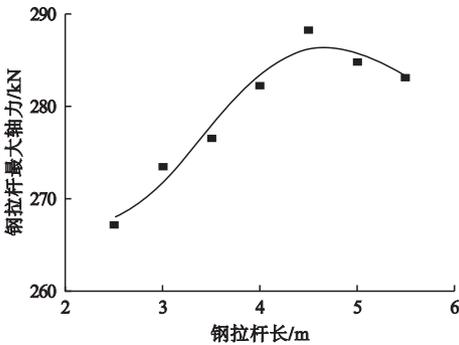


图8 钢拉杆长度与最大轴力关系曲线

Fig. 8 Relation curve between length of steel tie rod and maximum axial force

从图8可以看出,随着钢拉杆长度的增加,最大轴力先增大后减小,在4.5 m处达到最大值288.3 kN,为设计值的95%,此时既有线竖向位移也最小。长度的进一步增加并没有使竖向位移大幅增加,钢拉杆的最优长度建议取4.5 m。

为预测钢拉杆长度2.5~5.5 m内其他长度下的最大轴力,对图8中的数据进行拟合得:

$$P = P_0 + Be^{(-e^{-e^{-Z-Z+1}})} \quad (2)$$

式中: Z 为中间变量, $Z = (L - L_a)/\alpha$, L_a 为具有最大轴力的钢拉杆长度; P_0 为最大轴力最小值; α 为与反弯点相关系数; B 为系数。拟合参数: $P_0 = 266.502$, $L_a = 4.676$, $\alpha = 1.301$, $B = 19.783$; $R^2 = 0.926$ 。

4.2 钢拉杆角度的影响分析

通过计算得到不同钢拉杆角度下,既有结构上、下行区间的最大竖向位移范围为2.271~2.312 mm,均未超过控制值3 mm。

可见钢拉杆角度在 $12^\circ \sim 24^\circ$ 时,最大竖向位移变化量很小,仅为0.041 mm。钢拉杆处于圆砾卵石土层中,土质粗糙使钢拉杆表面摩擦力较大,在竖向的抗变形能力更强,在现有角度可变化范围内,角度的变化对最大竖向位移影响很小。

相同角度下钢拉杆应力上、下行区间应力对比云图如图9所示,角度为 24° 时下行区间应力云图如图10所示。

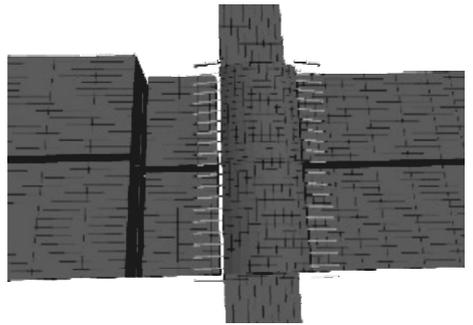


图9 角度为 12° 时应力云图

Fig. 9 Stress nephogram at 12° angle

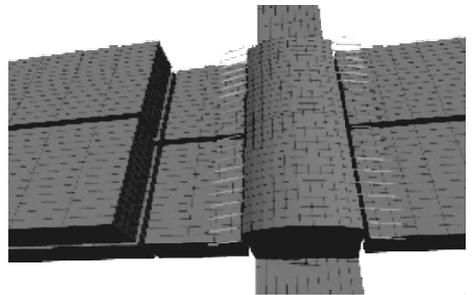


图10 角度为 24° 时应力云图

Fig. 10 Stress nephogram at 24°

从图9、图10分析可知,在不同角度下,钢拉杆应力云图与不同长度下钢拉杆的应力云图规律相似,从中提取角度和其对应的最大轴力,绘制两者关系曲线如图11所示。由图11可知,随着角度增加,钢拉杆最大轴力增大,两者近似呈线性关系,角度为 24° 时得到最大轴力值286.26 kN,仍小于工程允许值。若角度继续增加最大轴力可能会超过工程允许值(302.4 kN),故倾角建议选取 $12^\circ \sim 24^\circ$ 。

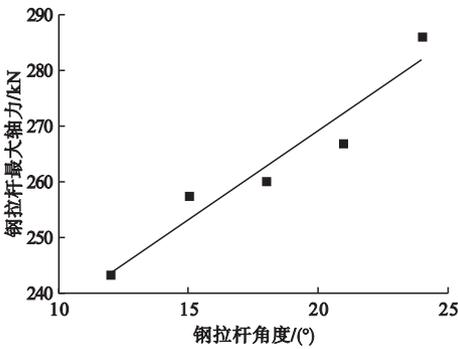


图 11 钢拉杆角度与最大轴力关系曲线

Fig. 11 Relation curve between angle of steel tie rod and maximum axial force

为预测 $12^\circ \sim 24^\circ$ 内其他角度的最大轴力,对图 11 中的数据进行拟合得:

$$P = c_1 + k_1 A. \quad (3)$$

式中: P 为最大轴力; c_1 为截距; k_1 为斜率。拟合参数 $c_1 = 205.662$, $k_1 = 3.171$, $R^2 = 0.9037$ 。

4.3 钢拉杆间距影响分析

通过模拟得到不同钢拉杆间距下既有结构的最大竖向位移曲线如图 12 所示。

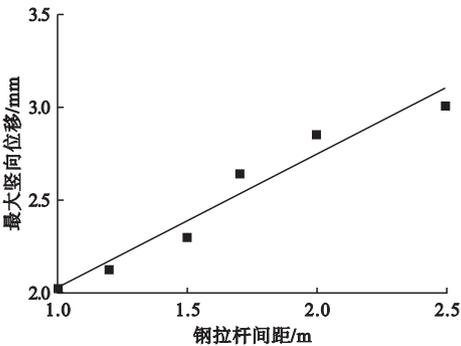


图 12 钢拉杆间距与最大竖向位移关系曲线

Fig. 12 Diagram of steel tie rod spacing and maximum vertical relationship

由图 12 可知,随着钢拉杆间距增加,最大竖向位移增大,两者近似呈线性关系。间距为 $1.0 \sim 1.5$ m 时,最大竖向位移小于 3 mm;间距 2.0 m 时接近 3 mm;间距 2.5 m 时,超出控制值 0.3%。

为预测 $1.0 \sim 2.5$ m 钢拉杆间距范围内既有结构竖向位移的大小,对图 12 中的数据进行拟合得:

$$y = c_2 + k_2 s. \quad (4)$$

式中: c_2 为截距; k_2 为斜率。拟合参数 $c_2 = 1.311$, $k_2 = 0.716$, $R^2 = 0.9333$ 。

分别取上下行区间钢拉杆不同间距的应力云图如图 13、图 14 所示。

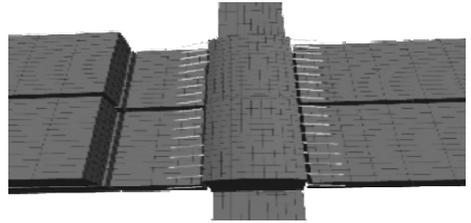


图 13 间距为 1.7 m 时应力云图

Fig. 13 Stress nephogram with spacing of 1.7 m

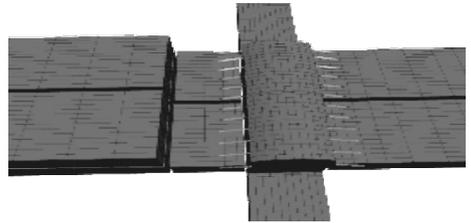


图 14 间距为 2.5 m 时应力云图

Fig. 14 Stress nephogram with spacing of 2.5 m

由于既有车站长度固定,所以钢拉杆间距直接影响其数量,间距减小数量增加使轴力的分布趋于平缓,即承担轴力的接触面增多,对于既有车站位移的约束能力也会增强。不同间距与对应的钢拉杆的最大轴力关系曲线如图 15 所示。

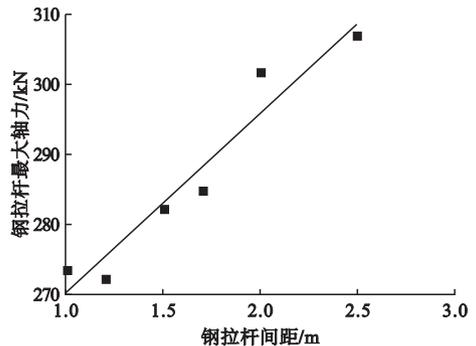


图 15 钢拉杆间距与最大轴力关系曲线

Fig. 15 Relationship between steel tie rod spacing and maximum axial force

由图 15 可知,随钢拉杆间距增大最大轴力增加,两者近似呈线性关系。间距在 $1.0 \sim$

2.0 m时,轴力均小于允许值,2.0 m达到允许值的100%;间距2.5 m时,轴力超出允许值。

为预测1.0~2.5 m内其他间距钢拉杆最大轴力,对图15中的数据进行拟合得:

$$P = c_3 + k_3 S. \quad (5)$$

式中: c_3 为截距; k_3 为斜率。拟合参数取值 $c_3 = 244.578$, $k_3 = 25.706$, $R^2 = 0.9157$ 。

综上所述,钢拉杆间距不同时,既有结构最大竖向位移与最大轴力呈现出相似的规律。钢拉杆间距越大,对既有结构的约束作用减弱。间距最佳取值为1.0~2.0 m。

5 不同参数影响综合分析

5.1 参数综合影响

从前文可知,角度对既有结构位移的影响很小, $12^\circ \sim 24^\circ$ 位移差值仅为0.041 mm。故取不同角度下既有结构位移均值作为一个点,令长度为X轴、间距为Y轴、最大竖向位移为Z轴,将各个方案计算得到的最大位移值导入该坐标系得到图16。

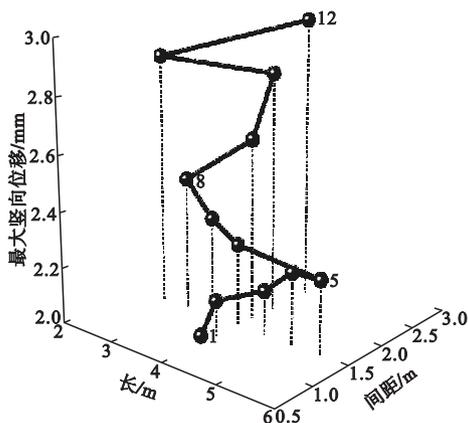


图16 3D轨线图

Fig. 16 3D track diagram

将图中点由下向上依次编号1~12,并在图中标出点1、5、8、12。可以看出3D轨线图从下到上分为三个增长阶段其中,第一阶段(1~5)最大竖向位移较小,整体有波动,但差别不大,这一段钢拉杆间距为1.0~1.5 m,长4~5.5 m。第二阶段(5~8)间距

为1.5 m,长度逐渐减小而最大竖向位移量逐渐增大,且增幅较快。第三阶段(8~12)竖向位移增幅、波动均较大,规律性差,因为该阶段既有长度变化又有间距变化,在间距2.5 m、长4.0 m时达到了最大值。

5.2 参数权重分析

将文中涉及的16种方案以最大竖向位移升序的标准排序,将数据导入MATLAB软件,利用最小二乘法拟合得:

$$y = -0.1818L - 0.0107A + 0.7262S + 2.1673. \quad (6)$$

通过式(6)可知,竖向位移与长度、角度负相关,间距与其正相关。角度对竖向位移影响最小,其次是长度,间距影响最大,由式(6)中系数可得长度、角度、间距对竖向位移的影响占比分别为19.79%、1.16%、79.05%。

6 结论

(1)上穿工程中,钢拉杆对既有结构上浮有较好的抑制作用,结构上浮量越大,钢拉杆受到的拉力也越大,材料性能发挥也越完善。

(2)既有结构的竖向上浮位移与长度、角度负相关、与间距正相关;由式中变量的系数可知,长度、角度、间距对竖向位移的影响百分比分别为19.79%、1.16%、79.05%。

(3)针对本工程,单一变量情况下,钢拉杆角度的合理范围为 $12^\circ \sim 24^\circ$,长度最优值为4.5 m,间距合理取值为1.0~2.0 m。

参考文献

- [1] 白海卫. 基于脆弱性的穿越工程中既有地铁线风险评估与控制[D]. 北京:北京交通大学,2020.
(BAI Haiwei. Research on risk assessment and control of existing metro lines in a new crossing construction based on vulnerability [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2020.)
- [2] LIANG R, XIA T, HONG Y, et al. Effects of above-crossing tunnelling on the existing shield tunnels [J]. Tunnelling and underground space technology, 2016, 58: 159 - 176.
- [3] 梁荣柱,夏唐代,胡军华,等. 新建隧道近距离

- 上穿对既有地铁隧道纵向变形影响分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊1): 391-399. (LIANG Rongzhu, XIA Tangdai, HU Junhua, et al. Analysis of longitudinal displacement of existing metro tunnel due to construction of above-crossing new tunnel in close distance [J]. Rock and soil mechanics, 2016, 37(S1): 391-399.)
- [4] 夏国政. 近距离上穿既有地铁施工机理与变形控制研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(2): 215-220. (XIA Guozheng. Construction mechanism and deformation control of new metro tunnel passing over closely existing tunnel [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2020, 18(2): 215-220.)
- [5] YANG F, LIU J Y, LIU Y. Research on spacing effect of construction of shield tunnels undercrossed existing tunnels at close distance [J]. IOP conference series earth and environmental science, 2018, 189(2): 1-6.
- [6] PAN W D, GAO Z Y, ZHENG C L, et al. Analysis on the Influence of cross tunnel construction on the deformation of the existing high-speed railway tunnel [J]. Geotechnical and geological engineering, 2018, 36(6): 4001-4013.
- [7] 孟志安, 鲁素玲, 闫华军, 等. 超大高径比棒料平锻成形钢拉杆 U 型头预制坯工艺分析及模拟[J]. 河北科技大学学报, 2021, 42(1): 82-89. (MENG Zhian, LU Suling, YAN Huajun, et al. Process analysis and simulation of flat forging and forming steel tie rod U-shaped head preforms with super large height-diameter ratio bars [J]. Journal of Hebei university of science and technology, 2021, 42(1): 82-89.)
- [8] 仇兆吉. 济南黄河公铁两用桥钢拉杆锚固形式节点试验与理论研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016. (QIU Zhaoji. Experimental and theoretical research on steel rod anchor joint in Jinan Yellow River railway bridge [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.)
- [9] 贾福兴. 深圳前海法治大厦项目钢拉杆制作安装与张拉控制[J]. 装配式钢结构建筑技术研究及应用, 2017(5): 217-220. (JIA Fuxing. Fabrication, installation and tension control of steel tie rod for Shenzhen Qianhai law building project [J]. Research and application of prefabricated steel structure construction technology, 2017(5): 217-220.)
- [10] 陈明昌. 抗浮锚杆的设计及受力变形分析[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014. (CHEN Mingchang. Seismic response analysis of sand-rubber isolation cushion [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2014.)
- [11] 武瑞丫. 抗浮锚杆钢筋锚固板承载性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020. (WU Ruiya. Research on bearing capacity of headed bars with anti-floating bolt [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.)
- [12] LI F, ZHAO Q L, CHEN H S, et al. Interface Shear stress analysis of bond RP tendon anchorage under different boundary conditions [J]. Composite interfaces, 2011, 18(2): 91-106.
- [13] 李兵, 刘阳, 李卓伦, 等. 锚杆参数对深基坑变形影响的有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(3): 404-411. (LI Bing, LIU Yang, LI Zhuolun, et al. Finite element analysis of influence of bolt parameters on deformation of deep foundation pit [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(3): 404-411.)
- [14] VILANOVA I, BAENA M, TORRES L, et al. Experimental study of bond-slip of GFRP bars in concrete under sustained loads [J]. Composites part B: engineering, 2015, 74(1): 42-52.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 钢拉杆: GB/T20934—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. (General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Steel tie rod: GB/T20934—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.)
- [16] 中国冶金建设协会. 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范: GB50086—2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015. (China Metallurgical Construction Association. Technical code for engineering of ground anchorages and shotcrete support: GB50086—2015 [S]. Beijing: Planning Press of China, 2015.)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB/T 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB/T 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [18] 中冶集团建筑研究总院. 岩土锚杆(索)技术规程: CECS 22:2005 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2005. (Research Institute of Architecture of MCC Group. Technical specification for group anchors: CECS 22:2005 [S]. Beijing: Planning Press of China, 2005.) (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)