

肖勇卓,刘刚. 基坑局部堆载回压对下卧隧道隆起影响[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(1):49-55. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.01.007

Xiao Y Z, Liu G. Impact of Foundation Pit Local Heaped Load on the Uplift of the Underlying Tunnel [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 35 (1) : 49 - 55. doi: 10.13582/j.cnki.1672 - 9102.2020.01.007

基坑局部堆载回压对下卧隧道隆起影响

肖勇卓¹,刘刚^{1,2*}

(1.中国矿业大学 力学与土木工程学院,江苏 徐州 221116;

2.中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221116)

摘要:为在有下卧隧道的基坑开挖过程中实现及时有效的控制隧道隆起,本文提出局部临时堆载措施,并根据 Mindlin 公式采用 MATLAB 软件分析局部堆载的 3 项参数即堆载力、堆载面积和堆载位置对附加应力的影响,基于某基坑案例采用 FLAC^{3D} 软件进行正交模拟验证.结果表明,堆载力对隧道隆起影响最大,堆载面积次之,堆载位置最小.隧道隆起值随堆载力增大呈比例减小,并随堆载面积增加而逐渐减小,减小幅度逐渐减缓,且随堆载中心与隧道轴线距离缩短,其影响程度逐渐增大.在实际工程中,优先考虑预留合适尺寸的土体并施加堆载作为局部堆载措施.当隧道位于基坑下部时,局部堆载力不得少于原有土体自重的 50%,堆载面积应大于基坑总面积的 5%;当隧道位于基坑侧面时,局部堆载力不得少于原有土体自重的 1 倍,堆载面积应大于基坑总面积的 7.5%,才能有效控制隧道沉降.

关键词:下卧隧道;隧道隆起;局部堆载;堆载力;堆载面积;堆载位置

中图分类号:TU921 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2020)01-0049-07

Impact of Foundation Pit Local Heaped Load on the Uplift of the Underlying Tunnel

Xiao Yongzhuo¹, Liu Gang^{1,2}

(1.School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology,Xuzhou 221116, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep UndergroundEngineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: For foundation pit excavation with underlying tunnel, the method of local heap load to control tunnel uplift in timely and effective was proposed. According to the Mindlin formula, MATLAB software was used to analyze the effect of three parameters which is load force, load area and load position on additional stress. Based on the actual case, the FLAC3D software was used for the orthogonal test. The results show that the stacking force has the greatest impact on the tunnel uplift, the second is the load area and the load position is the smallest. The tunnel uplift value decreases proportionally with the increase of the load force. With the increase of the stacking area, the tunnel uplift gradually decreases, however, the decreasing amplitude is gradually reduced, and the distance between the loading center and the tunnel axis is shortened, and the degree of influence is gradually increased. In the project, it is suggested to reserve suitable soil for local loading. For the underlying tunnel, the local load force shall not be less than 50% of the original soil weight, and the piled area shall be greater than 5%

收稿日期:2018-11-20

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51174196)

*通信作者,E-mail:liugangcumt@163.com

of the total pit area. When the tunnel is located on the side of the foundation pit, the local load force shall not be less than 100% of the original soil weight, and the piled area shall be greater than 7.5% of the total pit area.

Keywords: underlying tunnel; tunnel uplift; local heap load; load force; load area; load position

伴随着我国大中型城市修建地铁的热潮,在地铁沿线修建住宅区和商业圈已成常态.由于建筑设施位于地铁隧道上方,在建设初期基坑开挖过程对地铁隧道影响较大,可采用三轴混凝土加固、分块开挖和基坑堆载等^[1]措施减少隧道变形.

国内外学者对各种措施控制隧道变形的影响进行了大量研究.文献[2-4]通过模拟基坑开挖对既有地铁隧道的影响发现土体加固能减少基底土扰动程度和范围,从而控制隧道变形.文献[5-6]基于现场实测和数值模拟的分析认为分块开挖、分段堆载、土体加固及底板浇筑等措施可以有效控制既有隧道箱体的竖向位移及箱体间的差异变形.文献[7]在现场实测的基础上进行数值模拟发现土体加固和基坑堆载回压对隧道隆起位移的减小效果相近.文献[8]基于文献[9]的案例建立三维模型发现坑外加固和坑底堆载对降低隧道隆起效果明显.

基坑开挖过程中要及时控制隧道上抬,但是基坑底板浇筑形成需要一定时间,同时大范围进行临时堆载势必影响工程施工.本文提出局部临时堆载来控制隧道上抬,并根据 Mindlin 公式采用 MATLAB 软件分析局部堆载的三项参数即堆载力、堆载面积和堆载位置对附加应力的影响,基于某基坑案例采用 FLAC^{3D} 软件进行正交模拟验证上述分析的推论.

1 堆载回压机理分析

1.1 计算模型

假定隧道上方需要开挖一个尺寸为 $a \times b \times h$ 的基坑,隧道纵轴线平行于基坑一侧边,且到基坑轴线(平行于基坑长边)的距离为 L ,基坑底部与隧道顶部距离为 s ,在基坑开挖过程中对尺寸为 $a_1 \times b_1$ 的区域施加值为 P 的均布力(如图 1 所示).根据 Mindlin 基本解及相关分析^[10-13],隧道轴线上某一点 (ξ, η, H) 在基坑底部某点 (x_1, y_1, h) 卸压作用下引起的竖向附加应力如式(1).

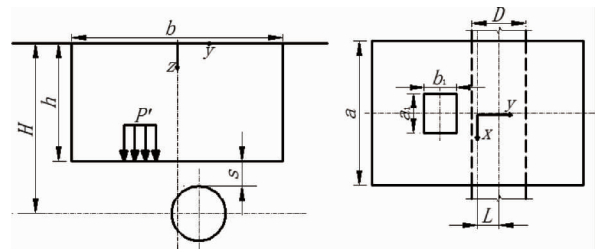


图 1 基坑局部堆载

$$\sigma_z = \frac{P}{8\pi(1-v)} \left\{ (1-2v)(H-h) \iint_{\Omega} \frac{1}{R_1^3} dx dy + 3(H-h)^3 \iint_{\Omega} \frac{1}{R_1^5} dx dy - (1-2v)(H-h) \iint_{\Omega} \frac{1}{R_2^3} dx dy + \right. \\ \left. [3(3-4v)H(H+h)^2 - 3h(H+h)(5H-h)] \iint_{\Omega} \frac{1}{R_2^5} dx dy + 30hH(H+h)^3 \iint_{\Omega} \frac{1}{R_2^7} dx dy \right\}. \quad (1)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (H - h)^2} \\ R_2 &= \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (H + h)^2} \end{aligned} \right\}.$$

式中: P 为卸压引起的集中力,Pa, $P = \gamma d$,其中 γ , d 是土层的重度(N/m^3)和厚度(m); v 为隧道所处土层的泊松比,表层土体一般为0.2~0.4; H 为隧道埋深,m; h 为基坑深度,m; D 为隧道直径,m.基于 Mindlin 基本解可知基坑底部堆载回压时可控制的影响因素包括堆载力、堆载面积和堆载位置,附加应力应随堆载力、堆载面积的增大及堆载中心与隧道轴线的距离的减小而减小.

1.2 堆载参数分析

由于引起竖向附加应力的集中力与上部土层自重相关,故堆载力 P' 应与原有土层自重 P 成比例.同时根据上述模型,隧道最大隆起位于隧道轴线平行于基坑段的中部,自该处隆起值逐渐向两侧递减^[14],为最大化降低隧道最大隆起值,堆载中心应位于 a 边的中轴线上,堆载位置只需要确定堆载中心的 y 值,该值的实质是堆载中心与隧道轴线的距离,可用偏心距 e 表示.以最大隆起值为中心的小区域内的隆起值较

大,为控制该区域的隆起,本文限定堆载形状与分块形状相似.

本文采用 MATLAB 软件分析堆载力 P ,堆载面积 S' 和堆载中心 y 对附加应力的影响程度.设定整个基坑底部对隧道上点 (ξ, η, H) 引起的附加应力为 σ_z ,堆载力引起附加应力为 σ_z' ,当堆载力的大小与开挖土体的重度相等且堆载及堆载前土体尚未卸压或卸压较少,对于底部卸压作用,则可将堆载范围内土体视为未开挖,其本质与分块分层开挖相似,故以 $i = \sigma_z' / \sigma_z$ 作为评估指标.取各层状土层泊松比加权平均值 $v = 0.2$,隧道轴线位置 $\xi = 0.0, \eta = -2.0$ m,隧道埋深 $H = 10.0$ m,基坑开挖深度为 $h = 7.0$ m,基坑尺寸 $a \times b = 10.0 \times 20.0$ m,隧道轴线与基坑中心距离为 2.0 m.局部面积初值设定为基坑底面积的 25% ,堆载力初值设定为 $P' = P$,堆载中心初值设定 $y = 0.0$.

一般情况下,基坑的附加应力 σ_z ,面积 S ,上覆堆载力 P 保持不变,根据图 2 各曲线的斜率可知对附加应力的影响程度由大到小分别是堆载力 > 堆载面积 > 堆载位置.从图 2a 可知附加应力与堆载力成正比关系,并随着测点位置远离最大隆起点,对附加应力影响程度逐渐减小,减小幅度逐渐加快;从图 2b 可知在测点 4,附加应力与堆载面积近似成正比,在测点 1(即最大隆起值点)和测点 2,附加应力随堆载面积增加逐渐增大,但增大的幅度逐渐减缓,其减小幅度较小,同时随测点位置远离最大隆起点,影响程度逐渐减小,且减小幅度加快;从图 2c 可知, y 值由 -2.0 到 2.0 m 的实质是偏心距 e 由 4.0 减少至 0.0 m,故附加应力与偏心距成幂函数关系,即随偏心距的减小,附加应力逐渐增大,直至在偏心距 $0.0 \sim 1.0$ m 之间保持不变,同时随着测点位置远离最大隆起点影响程度逐渐减小,且减小幅度加快.

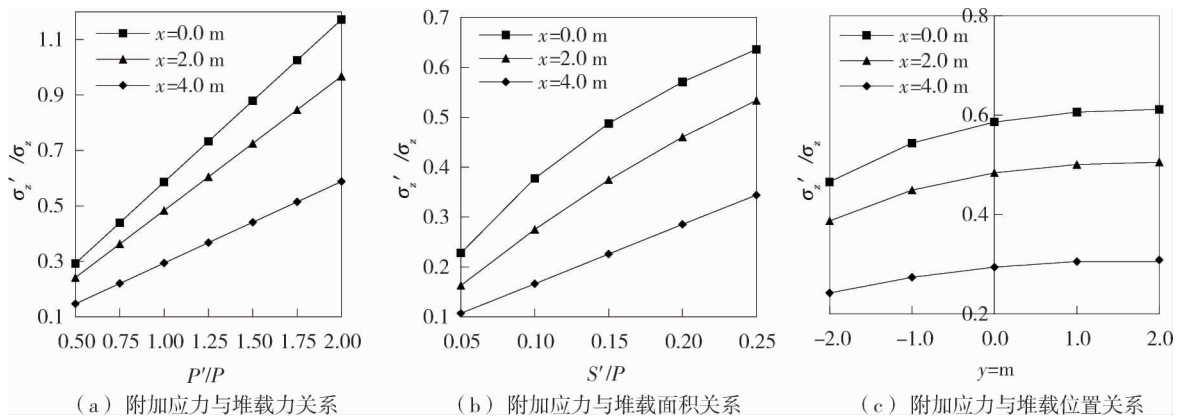


图 2 堆载参数对附加应力的影响

考虑到 Mindlin 基本解的积分区间与 y 值相关,堆载面积对附加应力的影响将随堆载位置发生变化,采用 MATLAB 软件对其影响程度进行分析.

由图 3 各曲线斜率变化,可知堆载面积对附加应力的影响受堆载位置有一定影响,随偏心距的减小堆载面积对附加应力的影响将逐渐增大,但增大幅度较小.

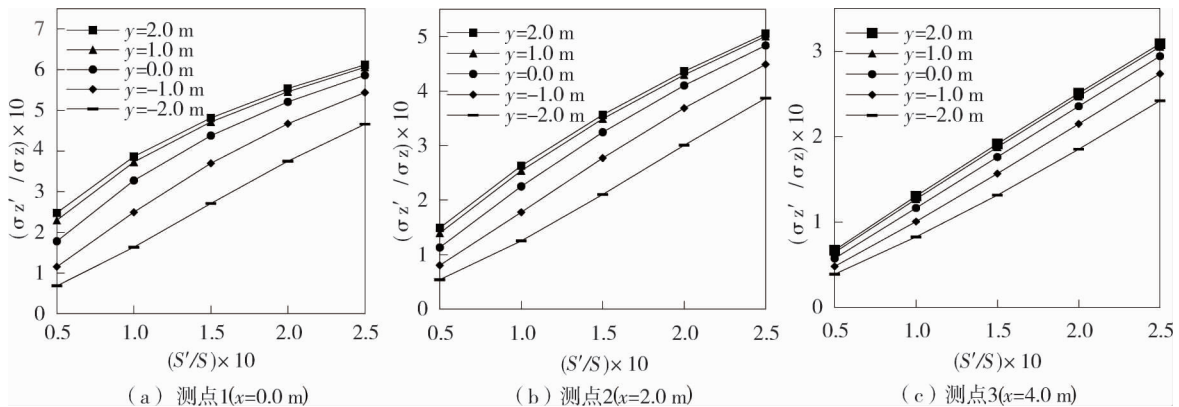


图 3 堆载位置对堆载面积的影响

基于上述分析并参考文献[11]提出的两阶段分析法和文献[15]基于分布荷载下的 Winkler 弹性地基无限长梁推导的集中力作用下的隧道某点位移公式及文献[16]参考 Mindlin 公式的层状地基中基坑开挖

对邻近隧道影响的耦合分析方法,本文认为:(1)堆载过程中对隆起值影响最大的是堆载力,其次是堆载面积,最小是堆载位置;(2)随堆载力的增大,隆起值呈现比例减少,且堆载力对隆起值的影响不受堆载位置和堆载面积的影响;(3)随着堆载面积的增加,隆起值将逐渐减小,同时堆载面积对隆起值的影响也将逐渐降低.

2 数值模拟

为达到及时有效降低基底土引起的附加应力同时不影响施工,堆载回压的3项参数应做到协同控制,本文基于杭州某基坑案例^[8-9],采用数值模拟研究堆载回压的三项参数对隧道隆起的定量影响.

2.1 工程案例

该工程为杭州市某地下通道工程的西半幅基坑,基坑平面布局成Z字形,设一个东西向主通道,基坑开挖区间东西向长14.8 m,南北向宽11.4 m,开挖深度8.2 m,地下水位为1.4~2.0 m,工程没有采取降水措施.基坑内侧采用 $\Phi 850@600$ 三轴水泥土搅拌,外侧采用 $\Phi 800@1\ 000/2\ 000$ 钻孔灌注桩作为抗拔桩,坑内采用一道截面为700 mm \times 700 mm的混凝土支撑和 $\Phi 609\times 16$ 钢管的钢支撑对侧壁进行支撑.基坑正下方有一南北向的隧道穿过,隧道平均埋深15.2 m,基坑开挖前用 $\Phi 850@600$ 三轴混凝土搅拌桩对2.9 m的坑底土体、2.5 m的坑底上部土体、宽为5.0 m的围护结构外侧土体进行了加固^[9].

2.2 基础模型

为了方便模型计算,以前人简化模型为模板,隧道衬砌和基坑浇筑底板均采用shell单元,衬砌厚度0.35 m,基坑底板厚度1.0 m;钢支撑梁和混凝土梁采用beam单元,抗拔桩和围护桩分别转化为厚度为650和600 mm的地下连续墙,加固土、抗拔桩和围护桩均采用实体单元模拟,加固土的本构模型采用莫尔库伦模型,抗拔桩和围护桩采用弹性模型,各单元力学性能如表1所示^[8].定义土体为均质土,考虑到基坑大部和隧道全部位于黏土层中,本构模型采用修正剑桥模型,其力学性能参考杭州区域黏土性能,各项参数力学性能表如表2所示^[17].

表1 各支护单元力学性能表

构件	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
加固土	20.0	200	0.20	30	40
三轴搅拌桩	22.0	10 000	0.20	—	—
钻孔灌注桩	25.0	30 000	0.20	—	—
钢筋混凝土支撑	25.0	30 000	0.20	—	—
封底	25.0	25 500	0.20	—	—
钢支撑	78.5	200 000	0.30	—	—
隧道衬砌	25.0	34 500	0.20	—	—

表2 土体修正剑桥模型参数

重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙比 e	侧压力系数	泊松比	内摩擦常量 M	正常固结曲线 λ	回弹曲线 κ
18.7	1.2	0.55	0.35	1.2	0.1	0.01

模拟步骤参考工程实际,分别是:(1)建立三维模型,土体定义为黏土模型,进行初始地应力平衡计算;(2)初始化位移,逐步开挖隧道;(3)初始化位移,对隧道周围土体及基坑四周进行加固和支护;(4)初始化位移,逐层开挖西半侧基坑,设置西侧第一层混凝土支撑;(5)逐层开挖东半侧基坑,设置东侧第一层混凝土支撑;(6)西半侧基坑开挖到底,设置西侧第二层钢支撑及西半侧封底;(7)东半侧基坑开挖到底,设置东侧第二层钢支撑及东半侧封底.

模拟过程中,在抗拔桩和围护桩施工后,隧道发生下沉,符合实际工程规律^[5-6].随着基坑开挖,下卧隧道逐渐隆起,当基坑开挖至5.0 m左右时,隧道最大隆起断面如图4a所示,隧道虽有隆起但隆起值仅为0.3 mm左右,较符合工程实测^[9].基坑继续开挖,当东侧开挖到底后,隧道最大隆起处断面如图4b所示,隧道两侧衬砌均向内收敛,隧道顶部隆起量大于底部隆起量,符合实际工程与“水平向压缩,竖向拉伸”的变化规律^[9,14,18],同时根据该断面云图可知隧道附加隆起值达到最大值3.2 mm,较实测值大0.1 mm,同时根据图5可知,隧道隆起值自最大隆起值逐渐向两侧逐渐减少,变形曲线呈正态分布,附加隆起纵向长度约为36.0 m,约为基坑短边长度的3.2倍,隆起范围较实际范围稍大,较为符合工程实际^[9,16,19-20].在东

侧底板浇筑完成后,隧道最大隆起断面如图 4c 所示,附加隆起值已降至 3.09 mm,较实测值大 0.3 mm,但隧道两侧继续向内收敛,符合实际工程变形规律^[9].整个基坑开挖过程中隧道变形规律与实测过程相似,说明本次数值模拟与实测较为接近,数值模拟的模型合理,支护参数与土体参数正确,计算结果较为可靠,可进行更进一步的深入研究.

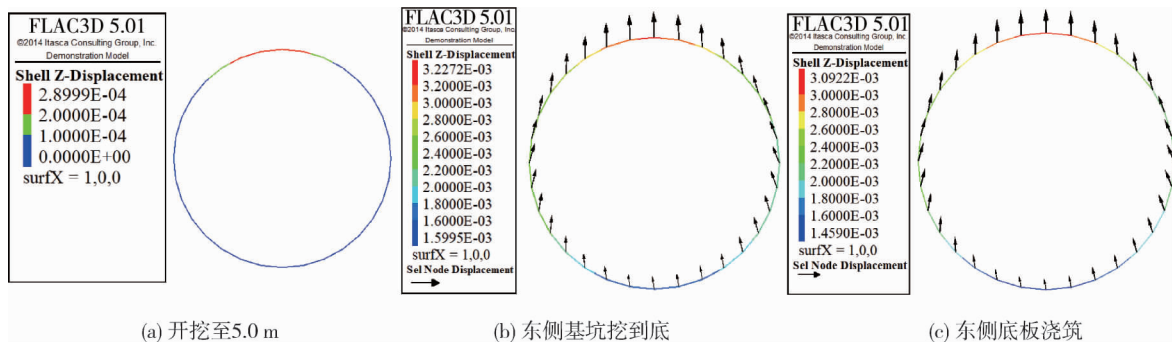


图 4 隧道隆起最大处趋势剖面

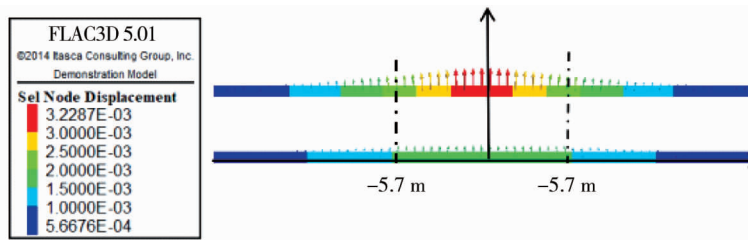


图 5 东侧开挖到底后隧道整体竖向位移

2.3 正交模拟试验及结果分析

基于上述模拟内容,为研究堆载回压影响因素,本文建立了三因素五水平正交试验表展开分析,堆载的影响参数采用如下指标表示:(1)堆载力:堆载力比=堆载力/堆载范围内原有土体重量,其水平分别是 2.5(最大值 397.65 kPa),2.0(最大值 318.12 kPa),1.5(最大值 238.59 kPa),1.0(最大值 156.60 kPa)和 0.5(最大值 78.30 kPa);(2)堆载面积:堆载面积比=堆载面积/分块面积,其水平分别是 0.05(4.22 m²),0.10(8.44 m²),0.15(12.65 m²),0.20(16.87 m²)和 0.25(21.09 m²);(3)偏心距:边长比=堆载中心至基坑长边距离/基坑短边,其水平分别是 0.3(西侧 2.22 m,东侧 0.00 m),0.4(西侧 2.96 m,东侧 0.74 m),0.5(西侧 3.70 m,东侧 1.48 m),0.6(西侧 4.44 m,东侧 2.22 m)和 0.7(西侧 5.18 m,东侧 2.96 m).正交试验表如表 3 所示.

表 3 局部堆载的正交试验表

模型	堆载面积比	堆载力比	边长比	模型	堆载面积比	堆载力比	边长比
1	0.25	0.50	0.3	14	0.15	2.00	0.3
2	0.25	1.00	0.4	15	0.15	2.50	0.4
3	0.25	1.50	0.5	16	0.10	0.50	0.6
4	0.25	2.00	0.6	17	0.10	1.00	0.7
5	0.25	2.50	0.7	18	0.10	1.50	0.3
6	0.20	0.50	0.4	19	0.10	2.00	0.4
7	0.20	1.00	0.5	20	0.10	2.50	0.5
8	0.20	1.50	0.6	21	0.10	0.50	0.7
9	0.20	2.00	0.7	22	0.10	1.00	0.3
10	0.20	2.50	0.3	23	0.10	1.50	0.4
11	0.15	0.50	0.5	24	0.10	2.00	0.5
12	0.15	1.00	0.6	25	0.10	2.50	0.6
13	0.15	1.50	0.7				

堆载回压的模拟分为 2 个方案,方案 1:仅在西侧分块堆载回压;方案 2:仅在东侧分块进行堆载回压.两方案不同点是东侧分块几何中心与隧道轴线的距离比西侧分块小 2.22 m.正交试验模拟步骤与原模型

模拟步骤相同,仅在开挖环节中及时加入堆载力.模拟结束后将模拟数据经处理后得到图7和图8.

2.3.1 堆载力

由图6可知,隧道最大隆起值随堆载力增加基本呈现成比例减少,与上述第一节的推论相符.根据输出结果与初始工况对比,当堆载力比为0.5时,方案1和方案2各测点隆起值降幅均小于10%,最小降幅为4%;堆载力比为1.0时,方案1各测点隆起值降幅均小于10%,方案2各测点隆起值降幅均在15%~18%;堆载力比超过1.5时,方案1各测点的隆起值降幅均超过15%,方案2各测点隆起值降幅均超过25%.实际工程中建议预留部分土体并在其上堆载,待开挖完毕在已浇筑的底板进行大面积堆载代替该部分.当隧道位于基坑下部时,局部堆载力不得少于原有土体自重的50%,当隧道位于基坑一侧时,局部堆载力不得少于原有土体自重的一倍,否则将无法控制基坑隆起,且堆载力控制达到原有土体自重的1.5倍时,可以有效控制隆起值.

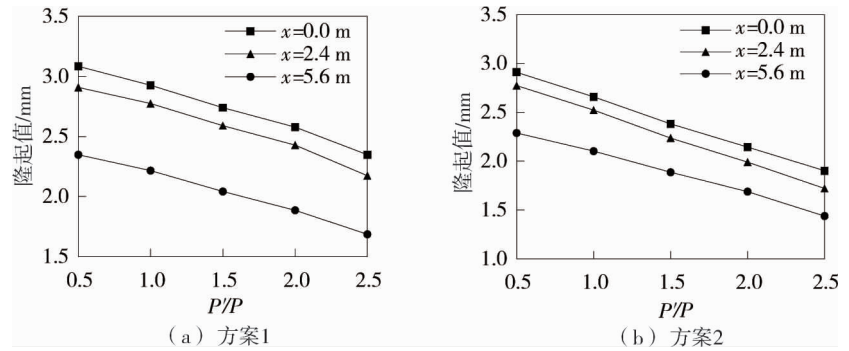


图6 堆载力对隧道隆起的影响

2.3.2 堆载面积

由图7可知,各测点隆起值均随堆载面积增大而减小,但在不同的堆载面积区间减小的快慢程度不同.在堆载面积比为0.05~0.10区间,减小幅度最快,在0.10~0.15区间,减小幅度逐渐减缓.在堆载面积为0.15~0.25区间,西侧分块的减小幅度基本为零,东侧分块的减小幅度相对上个区间略有降低.故认为随堆载面积增大,其对隆起值的影响将逐渐降低.通过分析发现,当堆载面积为0.05时,方案1和方案2各测点隆起值降幅均小于10%;当堆载面积超过0.10时,方案1各测点隆起值降幅均超过15%,方案2各测点隆起值均超过25%.当隧道位于基坑下部时,堆载面积应大于基坑总面积的5%,当隧道位于基坑侧面时,堆载面积应大于基坑总面积的7.5%,才能有效控制隧道沉降.

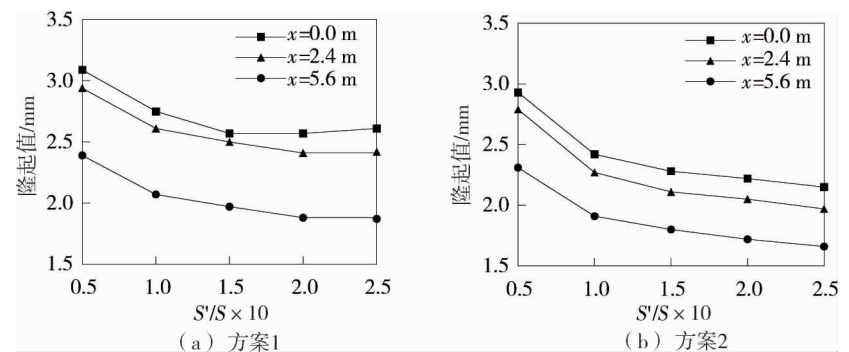


图7 堆载面积对隧道隆起的影响

2.3.3 堆载位置

由图8可知,隆起值随偏心距的增大而增大,但总体变化幅度不大,各测点隆起值随偏心距增大的最大变化幅度小于0.2 mm,且距最大隆起点越远的测点变化幅度越小.相同边长比条件下,方案2各测点隆起值比方案1略小0.2 mm左右.由于堆载位置仅在垂直隧道方向进行变化,故位置变化对隆起值的影响较低,但通过对图7~图9的测点2、测点3与测点1的隆起值进行比较,可知随测点远离最大隆起点(测点1)隆起值逐渐降低,降低幅度逐渐增大.结合上述各测点附加应力的分析,当堆载中心在平行隧道轴线方向变化时,自最大隆起点向一侧偏移过程中,最大隆起值将逐渐降低,降低幅度逐渐减缓.故实际工程中,尽可能将堆载靠近隧道轴线且位于基坑作用隧道的力场中心区域.

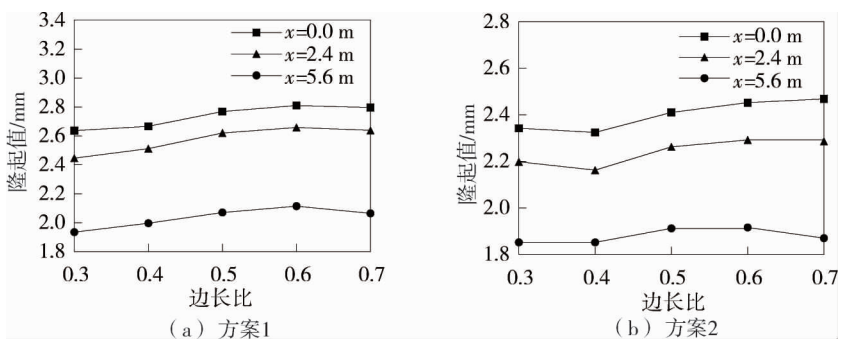


图8 堆载位置对隧道隆起的影响

综合上述分析,结合正交实验表得出的极差值及上述图表,隆起值受堆载力的影响最大,堆载面积的影响次之,堆载位置的影响最小.对比方案1和方案2,由于东侧分块堆载中心与隧道轴线距离比西侧分块

距离更近,故方案1的隆起值比方案2略大.在实际工程中,应综合考虑堆载力、堆载面积和堆载位置对隧道隆起的影响,合理设计堆载方案,有效控制隧道隆起.

缩短了 2.22 m,故方案 2 各测点隆起值比方案 1 均小 0.2 mm 左右;根据隆起值与堆载力变化曲线的斜率,可知堆载力对隆起值的影响不受堆载位置影响;根据隆起值与堆载面积变化曲线的斜率变化,认为随偏心距减小,堆载面积对隆起值的影响将逐渐增加。

3 结论

1) 基坑局部堆载回压对隧道隆起值和附加应力影响程度最大的因素是堆载力,其次是堆载面积,最小是堆载位置。在实际工程中,优先预留合适尺寸的分块作为局部堆载,并在分块上堆载实现有效控制隧道隆起值。

2) 堆载回压时隧道隆起值和附加应力随堆载力增加而呈现比例减少,且影响程度不受堆载位置和堆载面积的影响。当隧道位于基坑下部时,局部堆载力不得少于原有土体自重的 50%,当隧道位于基坑一侧时,局部堆载力不得少于原有土体自重的一倍,否则将无法控制基坑隆起,且堆载力控制达到原有土体自重的 1.5 倍时,可以有效控制隆起值。

3) 堆载回压时隧道隆起值和附加应力随堆载面积增加而减少,减小幅度逐渐减缓,且随堆载中心与隧道轴线距离缩短,其影响程度逐渐增大。当隧道位于基坑下部时,堆载面积应大于基坑总面积的 5%;当隧道位于基坑一侧时,堆载面积应大于基坑总面积的 7.5%,才能有效控制隧道沉降。

参考文献:

- [1] 王如路,贾坚,廖少明,等. 上海地铁监护实践[M]. 上海:同济大学出版社,2013.
- [2] 高盟,高广运,冯世进,等. 基坑开挖引起紧贴运营地铁站的变形控制研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(6): 818-823.
- [3] 黄兆纬,黄信,胡雪瀛,等. 基坑开挖对既有地铁隧道变位影响及技术措施分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(s2): 381-385.
- [4] 胡琦,许四法,陈仁朋,等. 深基坑开挖土体扰动及其对邻近地铁隧道的影响分析[J]. 岩土工程学报,2012,35(s2): 537-541.
- [5] 郑刚,刘庆晨,邓旭. 基坑开挖对下卧运营地铁隧道影响的数值分析与变形控制研究[J]. 岩土力学,2013,34(5): 1459-1468.
- [6] 郑刚,刘庆晨,邓旭,等. 基坑开挖对下卧运营地铁既有箱体影响的实测及分析[J]. 岩土力学,2012,33(4): 1109-1116.
- [7] 黄宏伟,黄栩,Schweiger F H. 基坑开挖对下卧运营盾构隧道影响的数值模拟研究[J]. 土木工程学报,2012,45(3): 182-189.
- [8] 魏纲,胡凌威,朱佳定. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的数值分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2014,36(4): 46-49.
- [9] 魏纲. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J]. 岩土力学,2013,34(5): 1421-1428.
- [10] Mindlin R D. Force at a Point in the Interior of a Semi-Infinite Solid[J]. PHYSICS, 1936, 5(2): 195-202.
- [11] 张治国,张孟喜,王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学,2011,32(7): 2085-2092.
- [12] Zhou Z, Chen S, Tu P, et al. An analytic study on the deflection of subway tunnel due to adjacent excavation of foundation pit [J]. Journal of Modern Transportation, 2015, 23(4): 287-297.
- [13] Liang R, Wu W, Yu F, et al. Simplified method for evaluating shield tunnel deformation due to adjacent excavation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71(6): 94-105.
- [14] 徐凌,黄宏伟. 基坑开挖对下卧地铁隧道的影响研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(s1): 164-166.
- [15] 陈郁,李永盛. 基坑开挖卸荷引起下卧隧道隆起的计算方法[J]. 地下空间与工程学报,2005,1(1): 91-94.
- [16] 周泽林,陈寿根,涂鹏,等. 基坑开挖对邻近隧道影响的耦合分析方法[J]. 岩土力学,2018,39(4): 1440-1449.
- [17] 杨永文. 杭州软土地区排桩墙与 T 型地连墙深基坑变形性状研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [18] Marta D. Tunnel complex unloaded by a deep excavation[J]. Computers and Geotechnics, 2001,28(6/7): 469-493.
- [19] Zheng G, Wei S. Numerical analyses of influence of overlying pit excavation on existing tunnels[J]. Journal of Central South University, 2008, 15(s2): 69-75.
- [20] 王立峰,庞晋,徐云福,等. 基坑开挖对近邻运营地铁隧道影响规律研究[J]. 岩土力学,2016,37(7): 2004-2010.