

DOI: 10.11779/CJGE201808024

砂质黄土地层中既有隧道上方挖方离心模型试验研究

王希元¹, 龚 伦¹, 吴金霖¹, 马相峰¹, 仇文革¹, 敖维林², 李 洋³

(1. 西南交通大学土木工程学院交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院, 四川 成都 610017; 3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘 要: 以既有隧道上方挖方工程为背景, 运用离心模型试验方法, 研究了砂质黄土地层中既有隧道衬砌围岩压力在上方挖方时的变化规律: 提出根据衬砌和围岩是否按刚度分配荷载划分深浅埋、以及是否存在挟持力划分浅埋与超浅埋的标准, 得到了 $1.25D \sim 1.75D$ (D 为既有隧道跨度)为深埋和浅埋的分界埋深范围, $0.75D \sim 1.25D$ 为浅埋和超浅埋的分界埋深范围; 同时发现既有隧道衬砌刚度越大, 承载拱范围越小, 即刚性支护承载拱边界为 $1.5D$, 柔性支护承载拱边界为 $1.8D$; 并提出基于衬砌围岩压力相对比例的近接影响分区控制标准, 得到刚性支护的强影响区、弱影响区和无影响区分界埋深分别为 $1.5D$, $2D$, 柔性支护的强影响区、弱影响区和无影响区分界埋深分别为 $1.5D$, $2.5D$; 对比 $0.5D$ 和 $0.3D$ 挖方步距, 发现步距会造成挖方过程中围岩应力路径的差异, 施工时宜选用 $0.3D$ 或更小的挖方步距。试验揭露了砂质黄土地层中既有隧道受上方挖方影响的普遍规律, 成果可为类似工程提供借鉴和指导。

关键词: 近接施工; 离心模型试验; 深、浅和超浅埋分界; 承载拱; 影响分区

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)08-1556-07

作者简介: 王希元(1992-), 男, 硕士, 主要从事隧道及地下工程方向的研究。E-mail: 316803032@qq.com。

Centrifugal model tests on excavation above existing tunnels in sandy loess strata

WANG Xi-yuan¹, GONG Lun¹, WU Jin-lin¹, MA Xiang-feng¹, QIU Wen-ge¹, AO Wei-lin², LI Yang³

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Ministry of Education Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Chengdu 610031, China; 2. Sichuan Communication Surveying and Design Institute, Chnegdu 610017, Chinese3. China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd, Xi'an 710043, China)

Abstract: Taking the excavation above the existing tunnels as the background, the centrifugal model tests are employed to study the change rule of pressures on the surrounding rock of the existing tunnel linings in sandy loess strata during excavation. The standards are proposed as follows: the deep and shallow tunnels are divided according to whether the loads that the linings and the surrounding rock jointly bear are distributed by the stiffness, and the shallow and ultra shallow tunnels are according to whether there exists a holding force. Then $1.25D \sim 1.75D$ (D is the span of the existing tunnels) distinguished is obtained as the range of the critical buried depth between the deep and shallow tunnels, and $0.75D \sim 1.25D$ as the range of the critical buried depth between the shallow and ultra shallow tunnels. Meanwhile, the greater the stiffness of the existing tunnel linings is, the smaller the range of the load-bearing arch is. That is to say, the boundary of the load-bearing arch is $1.5D$ for rigid supports, and the boundary of the load-bearing arch is $1.8D$ for flexible supports. The governing criteria for the adjacent influence partition based on the relative ratio of the pressures on the surrounding rock of linings are put forward. For the rigid supports, the critical buried depths of intensive-effect, weak-effect and no-effect areas are $1.5D$ and $2D$, and for the flexible supports, the critical buried depths of intensive-effect, weak-effect and no-effect areas are $1.5D$ and $2.5D$. The comparison between excavation steps of $0.5D$ and $0.3D$ indicates that the steps cause the difference of stress paths of the surrounding rock during excavation. So $0.3D$ or smaller step is suitable to be chosen. The general laws of the existing tunnels in sandy loess strata influenced by the excavation above them are released. The achievements may provide some reference and guidance for similar projects.

Key words: adjacent construction; centrifugal model test; division of deep, shallow and ultra shallow tunnels; load-bearing arch; influence partition

0 引 言

在中国“一带一路”倡议的推动下, 国内外基础

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0806000); 国家自然科学基金项目(51178399, 51478392)

收稿日期: 2017-05-11

*通讯作者(E-mail: gonglun33@126.com)

设施尤其是隧道工程处于蓬勃发展的新时期, 既有隧道上方挖方成为了建设过程中不得不面对的问题。它是隧道工程近接施工中较为典型的一类^[1]。从隧道力学理论^[2]上讲, 新建隧道开挖会使围岩发生应力重分布直至稳定, 而上方的挖方将使围岩再次发生应力重分布, 甚至当挖方到达一定深度时, 围岩的承载拱^[3]会被破坏, 使衬砌结构和围岩的受力向不利的方向发展^[4]。

在城市中, 既有隧道上方挖方主要表现为邻近下方既有地铁隧道的基坑开挖^[5-7]; 在山区中, 由于地形地貌的限制, 主要表现为上跨既有隧道的路基开挖^[8-9]。比如, 温锁林^[10]以上海东西通道上跨地铁二号线的基坑明挖工程为例, 提出有针对性的开挖方式和工程措施, 有效地保护了运营地铁隧道。胡海英等^[11]以广州某基坑工程近接既有地铁隧道为例, 应用数值计算和实测相结合的手段分析了既有地铁隧道受到的影响。孙克国等^[8]以连霍高速洛三段改扩建工程通过阆乡隧道上方挖方为例, 提出采用梁板式防护方案, 并对其安全性展开了研究。虽然该领域在目前取得了一系列成果, 但往往是对单一工程的分析, 缺乏系统性的研究。因此, 本文采用离心模型试验方法^[12], 结合衬砌刚度和挖方步距, 对既有隧道围岩压力^[13]的变化规律进行详细分析, 研究既有隧道受上方挖方力学行为的影响。

1 试验方案

1.1 相似关系

离心模型试验中, 相关参数主要有: 应力 σ , 应变 ε , 弹性模量 E , 泊松比 μ , 重度 γ , 边界力 \bar{x} , 长度 l , 位移 δ , 黏聚力 c , 内摩擦角 φ 。弹塑性力学模型相关参数表达式为

$$F(\sigma, \varepsilon, E, \mu, \gamma, \bar{x}, l, \delta, c, \varphi) = 0 \quad (1)$$

式(1)中参数总数为 10, 选择重度 γ 和长度 l 作为基本量纲, 则有 $\pi_1 = \sigma / (\gamma^a l^b) = FL^{-2} / ([FL^{-3}]^a L^b)$, 若使 π_1 成为量纲为 1 的量, 则 $\pi_1 = \sigma / (\gamma l)$; 同理可得: $\pi_2 = \varepsilon$, $\pi_3 = E / (\gamma l)$, $\pi_4 = \mu$, $\pi_5 = \bar{x} / (\gamma l)$, $\pi_6 = \delta / l$, $\pi_7 = c / (\gamma l)$, $\pi_8 = \varphi$ 。考虑模型箱尺寸和边界效应的影响, 选定几何相似比 C_l 为 100 : 1。由于离心试验采用原状土, 有 $C_E = 1$ 。根据相似准则确定其余各物理量的相似比, 应力、应变、泊松比、边界力、黏聚力和内摩擦角相似比: $C_\sigma = C_\varepsilon = C_\mu = C_{\bar{x}} = C_c = C_\varphi = 1$, 重度和加速度相似比: $C_\gamma = C_g = 1 : 100$, 位移相似比 $C_\delta = 100$ 。

在围岩固结模拟时, 模型和原型荷载条件及边界条件相同, 其固结分析可用时间分析法, 按太沙基的

固结理论: $t = \frac{H^2}{C_v} T_v$, 则有时间相似比 $C_t = 10000$ 。

1.2 试验材料

(1) 围岩材料

在郑西高铁阆乡隧道上方的施工现场中提取原状土, 其岩性主要为砂质黄土。由于原状土会受到现场取样和远距离搬运的影响, 在离心模型试验中依据击实试验确定的最优含水率 11.5%对砂质黄土进行重塑, 并采用三轴不固结不排水试验和直剪试验测定重塑土的强度参数, 使重塑土与原状土的性质尽可能保持相近, 确保离心模型试验的可靠性。其物理力学参数见表 1。

表 1 围岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of surrounding rock

重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性 模量 E / GPa	泊松 比 ν	直剪试验		三轴试验	
			黏聚 力	内摩 擦角	黏聚 力	摩擦角
			c / kPa	$\varphi / (^\circ)$	c / kPa	$\varphi / (^\circ)$
18	0.774	0.35	4.5	29.5	14.2	21

(2) 衬砌材料

隧道复合式衬砌包括初期支护和二次衬砌, 但目前针对既有隧道的结构检测、安全性评估和病害整治等, 均仅对既有隧道二次衬砌进行。所以, 本次试验只对既有隧道二次衬砌进行了研究。一般情况下, 铁路隧道二衬厚度为 25~45 cm,^[14]按几何相似比计算模型厚度为 2.5~4.5 mm。若采用原型的混凝土材料, 会由于结构过薄导致制备和测试的困难, 因此选用代替材料进行模拟。试验中以材料抗弯刚度为控制指标对相似条件放宽, 即二衬的抗弯能力应与原型满足相似关系。

试验中基于相似比换算(表 2)和实际情况, 决定采用 $\Phi 100 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 6061 合金铝圆管模拟刚性支护; 采用 $\Phi 110 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 硬聚氯乙烯(PVC)圆管模拟柔性支护, 如图 1 所示。目前高铁隧道的拱墙均为圆形截面; 本离心试验的最大加速度为 100g, 故试验中采用受力状态更好的圆形截面, 能够使离心试验顺利进行。即使存在一定的误差, 针对本试验的考察对象来说, 也是极小、可忽略不计的。

1.3 试验设备

本试验采用西南交通大学 TLJ-2 型土工离心机(图 2), 最大容量为 100 g·t, 有效半径 2.7 m, 加速度值为 10~200g。由于隧道开挖引起的应力重分布存在于隧道中心 3~5 倍的范围内, 并且为了防止试验区小引起模型制作和测试元件布设困难, 故选用大试验箱, 其内尺寸为 800 mm×600 mm×600 mm。为改善试验箱的边界条件, 在箱内表面铺设双层聚乙烯薄

膜。

表 2 衬砌厚度换算

Table 2 Conversion of lining thickness				
衬砌	材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	换算厚度 /mm
原型	C30 混凝土	30	0.2	250~450
模型	6061 合金铝	70	0.3	1.85~3.33
	硬聚氯乙烯 (PVC)	2.41	0.3825	5.5~9.9

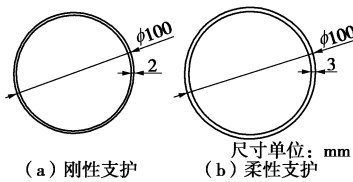


图 1 既有隧道衬砌

Fig. 1 Linings of existing tunnel

本试验的测试元件主要有围岩压力传感器，其测试数据由离心机配备的自动数据采集系统（图 3）进行采集和处理。

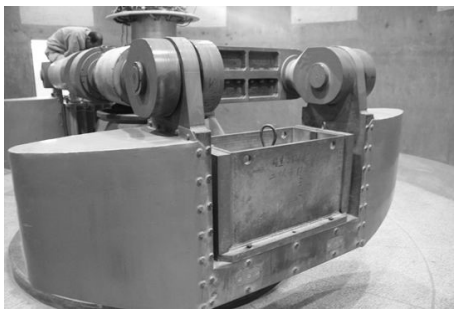


图 2 TLJ-2 型土工离心机

Fig. 2 TLJ-2 geotechnical centrifuge

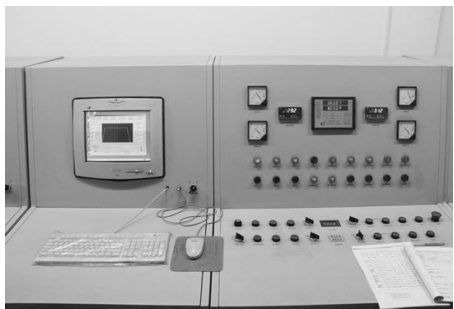


图 3 数据采集系统

Fig. 3 Data acquisition system

1.4 测试元件及测点布设

本试验采用的围岩压力传感器是中国工程物理研究院总体工程研究所传感器研究室生产的土压传感器（图 4），主要参数：直径为 8 mm；厚度为 2 mm；允许过载 120%Fs；使用温度为 0℃~45℃；综合误差为 ±1%Fs；输出电压为 0~2VDC；供电电源为 6~12 VDC。

为减小模型箱边界效应的影响，选取衬砌纵向的正中断面。沿衬砌环向仅在外侧布设#1~#8 围岩压力

传感器。当既有隧道上方存在承载拱时，地层压力由承载拱和衬砌共同承受，故在围岩中距离拱顶 3 倍洞径的相同高度处埋设#9 围岩压力传感器测试地层压力，以此来探究承载拱及相关指标的变化，测点平面布置及衬砌正中断面，布置详见图 5，6。连接围岩压力传感器的导线经绑扎后顺着衬砌纵向并沿试验箱后边界引出，最后连接在土工离心机的数据采集插口上。



图 4 围岩压力传感器

Fig. 4 Pressure sensor for surrounding rock

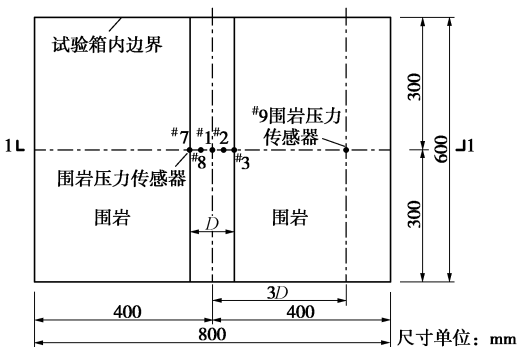


图 5 测点布置平面图

Fig. 5 Layout of measuring points

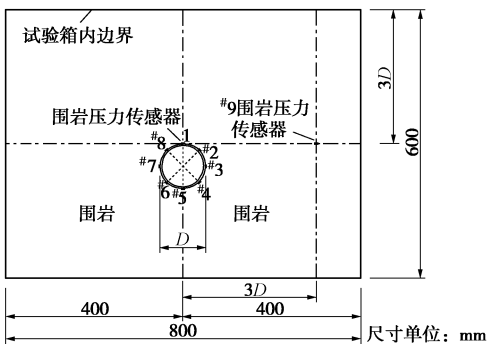


图 6 1-1 剖面测点布置图

Fig. 6 Layout of measuring points in section 1-1

1.5 衬砌模型的安装

既有隧道衬砌的安装一般采用两种方式，第一种是衬砌预埋后填土，第二种是地层装填完毕后开挖围岩安放衬砌。若采用第二种方式，首先模型处引出的导线会使得试验箱的玻璃盖板无法安装，从而缺少侧

阶段三的覆跨比范围为 0.5~1.0。

②柔性支护（挖方步距 $0.3D$ ）：阶段一的覆跨比范围为 1.8~3.0；阶段二的覆跨比范围为 1.2~1.8；阶段三的覆跨比范围为 0.6~1.2。

阶段一中围岩压力随挖方呈线性减小；阶段二中斜率明显变缓，围岩压力下降速率减慢；阶段三斜率迅速变陡，基本与拱顶同高处曲线一致。

柔性支护（挖方步距 $0.5D$ ）曲线表现为“缓→陡”的趋势，基于斜率被划分为两个阶段，分界覆跨比为 1.0。阶段一拱顶围岩压力随挖方按线性规律减小；阶段二斜率相比于阶段一明显变陡，与拱顶同高处曲线基本一致，说明挖方步距直接影响到围岩压力曲线的整体变化趋势。

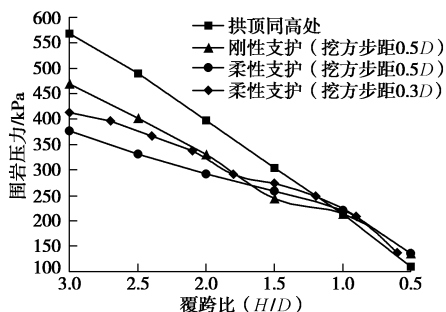


图 11 挖方时围岩压力曲线

Fig. 11 Curves of pressures on surrounding rock during excavation

(1) 深、浅和超浅埋分界

在超浅埋情况下，衬砌承受的压力直接由围岩性质和埋深决定；在浅埋情况下，围岩压力还受到两侧围岩挟持作用的影响；在深埋情况下，衬砌和围岩组成的地下结构承载体系会进行刚度分配，刚度大者受力大。因此，根据衬砌和围岩是否按刚度分配荷载划分深浅埋，以是否存在挟持力划分浅埋与超浅埋。

图 12 为刚性支护和柔性支护在 $0.5D$ 挖方步距下的围岩压力曲线。由图 12 可知，挖方开始前刚性支护受力较大，且当覆跨比大于 1.5 时，刚性支护围岩压力减小斜率明显大于柔性支护，而当覆跨比等于 1.5 时，两种支护的围岩压力基本回到同一水平，说明此时既有隧道处于深埋和浅埋的临界状态，也验证了当覆跨比大于 1.5 时，相同荷载作用下衬砌刚度越大，受力越大，挖方时减小更快。当覆跨比小于 1.0 时，两种支护的围岩压力开始以相同的规律减小，说明此时既有隧道处于超浅埋状态，在超浅埋状态下，不论衬砌刚度大小，围岩压力均按自重应力场规律减小，且不受两侧围岩挟持作用的影响。

由于挖方步距为 $0.5D$ ，所以既有隧道深埋和浅埋的分界埋深范围为 $1.25D \sim 1.75D$ ，浅埋和超浅埋的分

界埋深范围为 $0.75D \sim 1.25D$ 。

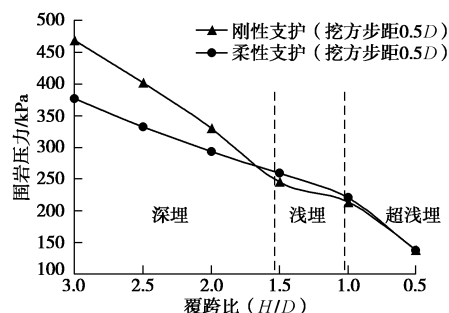


图 12 不同衬砌刚度下围岩压力曲线

Fig. 12 Curves of pressures on surrounding rock under different lining stiffnesses

(2) 承载拱

承载拱是隧道周边切向应力升高的区域，围岩自承能力的重要体现。从图 13 可以发现，刚性支护（挖方步距 $0.5D$ ）情况下，覆跨比为 1.5 时，斜率开始明显变缓，这是因为挖方进程中上覆荷载减小，同时承载拱遭到破坏后引起围岩自承能力下降所导致的。所以，刚性支护（挖方步距 $0.5D$ ）情况下，承载拱边界为 $1.5D$ 。同理可得，柔性支护（挖方步距 $0.3D$ ）情况下，承载拱边界为 $1.8D$ 。但在柔性支护（挖方步距 $0.5D$ ）情况下，较大挖方步距导致测得的围岩压力不能够突显出承载拱的破坏。

对比柔性支护和刚性支护的承载拱边界可以发现，既有隧道衬砌刚度会影响承载拱边界，表现为，刚度越大，承载拱范围越小，反之亦然。

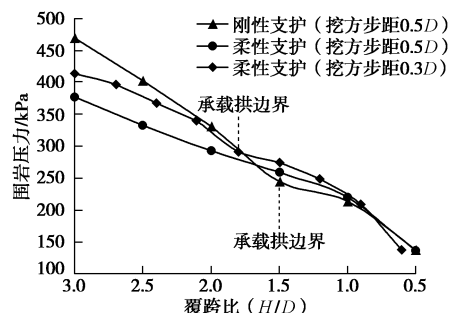


图 13 不同工况下围岩压力曲线

Fig. 13 Curves of pressures on surrounding rock under different test conditions

(3) 影响分区

在隧道及地下工程领域，支护结构与围岩是不可分割的整体^[15]。它们共同组成地下结构承载体系，会按照某一分担比例传递荷载。当衬砌的分担比例较大时，可认为隧道处于不安全的状态。试验时在拱顶相同高度处埋设了 9 围岩压力传感器，因此，定义衬砌围岩压力相对比例为：衬砌拱顶围岩压力：拱顶同高

处地层压力的比值, 并以该比例指标, 提出既有隧道上方挖方时的影响分区。

从图 14 (a)、(b) 可以发现, 随着挖方的进行, 衬砌围岩压力相对比例曲线斜率呈“缓→较陡→陡”的趋势, 说明衬砌围岩压力相对比例与既有隧道安全性的相关性较强。以斜率明显变化的分界点作为影响区域的边界, 即在柔性支护情况下, 强影响区与弱影响区的分界埋深为 $1.5D$, 弱影响区与无影响区的分界埋深为 $2.5D$; 在刚性支护情况下, 强影响区与弱影响区的分界埋深为 $1.5D$, 弱影响区与无影响区的分界埋深为 $2.0D$ 。

在不同衬砌刚度情况下, 强影响区范围一致, 但弱影响区和无影响区有所差异。这是由于柔性支护导致围岩能够发生更大的变形, 使围岩应力调整的程度更强, 从而引起弱影响区的范围更大。所以, 既有隧道衬砌刚度较大时, 影响区 (强影响区+弱影响区) 的范围会更小。

图 14 (a)、(b) 中, 当覆跨比小于 1.0 左右时, 衬砌围岩压力相对比例的数值超过了 100%, 说明此时拱顶的围岩压力大于同高处的地层压力, 这是由于上方挖方施工时围岩约束了衬砌向围岩侧的变形, 除了上覆围岩的自重以外产生了附加的地层抗力 (类似于被动土压力), 所以衬砌围岩压力相对比例的数值高于 100%。

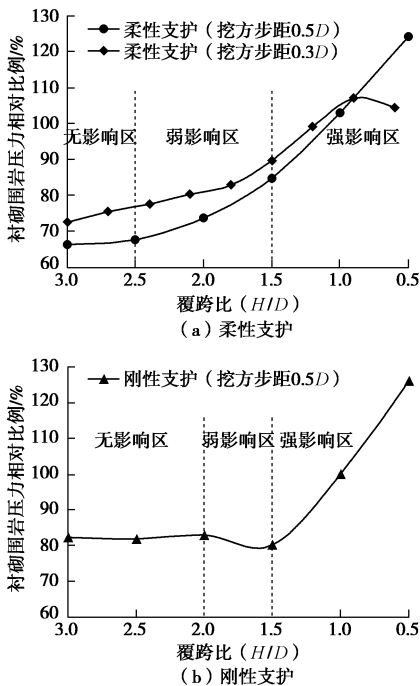


图 14 不同衬砌刚度下衬砌承担比曲线

Fig. 14 Curves of bearing ratio of linings under different lining stiffnesses

2.2 挖方步距的影响

挖方步距表征了近接施工规模的大小, 若步距较

大, 必然会对既有隧道和围岩的扰动程度更大。图 15 是两种挖方步距的围岩压力变化曲线, 两种步距下, 初始和结束状态的围岩压力基本一致, 但挖方进程中, 曲线变化规律有所不同, 说明挖方步距的不同, 导致外荷载减小规律不同而引起围岩应力路径的差异。当挖方步距为 $0.3D$ 时, 在覆跨比 $1.2\sim1.8$ 范围内, 围岩压力曲线相比于前后呈平缓状。而挖方步距为 $0.5D$ 时, 围岩压力曲线整体呈迅速下降的趋势。

综上所述, 挖方步距会造成挖方过程中围岩应力路径的差异, 在施工过程中宜选用 $0.3D$ 或更小的挖方步距。

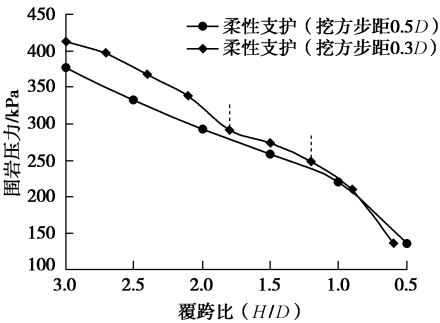


图 15 不同挖方步距下围岩压力曲线

Fig. 15 Curves of pressures on surrounding rock under different excavation steps

3 结 论

(1)既有隧道围岩压力随挖方经历“陡→缓→陡”3 个阶段。刚性支护以埋深 $1.5D$ 和 $1.0D$ 为分界点, 柔性支护以埋深 $1.8D$ 和 $1.2D$ 为分界点, 并且挖方步距会影响整体趋势, 步距增大, 曲线会由“陡→缓→陡”转变为“缓→陡”两个阶段。

(2)提出根据衬砌和围岩是否按刚度分配荷载划分深浅埋、以及是否存在挟持力划分浅埋与超浅埋的标准, 对砂质黄土地层中既有隧道的深、浅和超浅埋进行划分, 得到 $1.25D\sim1.75D$ 为既有隧道深埋和浅埋的分界埋深范围, $0.75D\sim1.25D$ 为既有隧道浅埋和超浅埋的分界埋深范围。

(3)既有隧道衬砌刚度越大, 承载拱范围越小。在砂质黄土地层中, 刚性支护承载拱边界为 $1.5D$, 柔性支护承载拱边界为 $1.8D$ 。

(4)提出基于衬砌围岩压力相对比例的近接影响分区控制标准。在砂质黄土地层中, 刚性支护的强影响区、弱影响区和无影响区分界埋深分别为 $1.5D$, $2.0D$, 柔性支护的强影响区、弱影响区和无影响区分界埋深分别为 $1.5D$, $2.5D$; 且既有隧道衬砌刚度越大, 影响区 (强影响区+弱影响区) 范围越小。

(5)挖方步距会导致既有隧道上覆荷载减小规律

不同而引起围岩应力路径的差异。在既有隧道上方挖方情况下,宜选用 $0.3D$ 或更小的挖方步距。

参考文献:

- [1] 关宝树. 隧道工程施工要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (GUAN Bao-shu. The essential collection of tunnel construction[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 关宝树. 隧道力学概论[M]. 成都: 西南交通大学, 1993. (GUAN Bao-shu. General theory of tunnel mechanics[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1993. (in Chinese))
- [3] 扈世民. 黄土隧道围岩压力拱效应分析[J]. 铁道学报, 2014, **36**(3): 94 - 99. (HU Shi-min. Analysis on pressure-arch effect of surrounding rock in loess tunnel[J]. Journal of The China Railway Society, 2014, **36**(3): 94 - 99. (in Chinese))
- [4] 王 航. 既有隧道上方挖方近接施工影响及对策研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015. (WANG Hang. The study on adjacent influence and countermeasures of excavation above existing tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese))
- [5] 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. (WEI Gang. Measurement and analysis of impact of foundation pit excavation on below existed shield tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(5): 1421 - 1428. (in Chinese))
- [6] 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**(增刊 2): 381 - 385. (HUANG Zhao-wei, HUANG Xin, HU Xue-ying, et al. Influence of foundation pit excavation on displacement of existing metro tunnels and technical measures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(S2): 381 - 385. (in Chinese))
- [7] 徐长节, 王伊丽, 徐芄蕾, 等. 新建工程基坑开挖及结构施工对既建下卧隧道的影响研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(11): 3201 - 3209. (XU Chang-jie, WANG Yi-li, XU Yuan-lei, et al. Effect of foundation pit excavation and structural construction of new engineering on existing underlying tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(11): 3201 - 3209. (in Chinese))
- [8] 孙克国, 仇文革, 王中平, 等. 高速公路改扩建工程对高铁隧道的近接施工影响[J]. 山东大学学报(工学版), 2015, **45**(5): 70 - 76. (SUN Ke-guo, QIU Wen-ge, WANG Zhong-ping, et al. Study on approaching excavation influence between expanding projects of expressway and high speed railway tunnel under operation state[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2015, **45**(5): 70 - 76. (in Chinese))
- [9] 姚 捷. 新建公路施工对赣龙铁路隧道的影晌分析[J]. 铁道工程学报, 2013, **30**(2): 81 - 85. (YAO Jie. Analysis of influence of new highway construction on tunnel of ganzhou-longyan railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, **30**(2): 81 - 85. (in Chinese))
- [10] 温锁林. 近距离上穿运营地铁隧道的基坑明挖施工控制技术[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 2): 451 - 454. (WEN Suo-lin. Construction technology of deep open excavation above running metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S2): 451 - 454. (in Chinese))
- [11] 胡海英, 张玉成, 杨光华, 等. 基坑开挖对既有地铁隧道影响的实测及数值分析[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(增刊 2): 431 - 439. (HU Hai-ying, ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, et al. Measurement and numerical analysis of effect of excavation of foundation pits on metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(S2): 431 - 439. (in Chinese))
- [12] TAYLOR R N. Geotechnical centrifuge technology[M]. London: Blackie Academic & Professional, 1995.
- [13] 李鹏飞, 赵 勇, 张顶立, 等. 基于现场实测数据统计的隧道围岩压力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(7): 1392 - 1399. (LI Peng-fei, ZHAO Yong, ZHANG Ding-li, et al. Study of distribution laws of tunnel surrounding rock pressure based on field measured data statistics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(7): 1392 - 1399. (in Chinese))
- [14] TB10003—2005 铁路隧道设计规范[S]. 2005. (TB10003—2005 Code for design on tunnel of railway[S]. 2005. (in Chinese))
- [15] 张顶立. 隧道及地下工程的基本问题及其研究进展[J]. 力学学报, 2017, **49**(1): 3 - 21. (ZHANG Ding-li. Essential issues and their research progress in tunnel and underground engineering[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, **49**(1): 3 - 21. (in Chinese))