

文章编号: 1000-582X(2012)12-084-10

新建立交隧道施工对既有隧道影响的模型试验

刘新荣^{1a,1b}, 王吉明^{1a,1b}, 郭子红^{1a,1b,2}, 林志³, 裴丽^{1a,1b}

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;
2. 四川农业大学 城乡建设学院, 四川 都江堰 611830; 3. 重庆交通科研设计院, 重庆 400067)

摘要: 为分析新建立交隧道施工对既有隧道的影响, 采用公路隧道结构与围岩综合试验系统对立交隧道进行三维物理模型试验。对既有隧道 2 个剖面的围岩压力、围岩内部位移及支护内力进行全程监测, 通过分析得出: 既有隧道 I 剖面围岩压力受到的影响较大, II 剖面围岩压力受到的影响较小, 各监测点的围岩压力基本处于减小状态, 拱底围岩的稳定性降低; 拱顶和拱腰围岩内部位移表现为拉伸变形, 且拱顶处的变化值远大于拱腰处的变化值; 既有隧道支护轴力变化的最终值基本为增加, 支护弯矩变化的最终值都为减小; 0.25D 立交间距下既有隧道的围岩压力、内部位移及支护内力受新建隧道的影响较大, 建议将立交隧道的立交间距控制在 0.5D 以上。

关键词: 立交隧道; 既有隧道; 围岩压力; 支护内力

中图分类号: U451

文献标志码: A

Model test of influence of excavating new interchange tunnel on existing tunnel

LIU Xinrong^{1a,1b}, WANG Jiming^{1a,1b}, GUO Zihong^{1a,1b,2}, LIN Zhi³, PEI Li^{1a,1b}

(1 a. Civil Engineering College; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
2. Urban and Rural Construction College, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611830, Sichuan, China; 3. Chongqing Communications Research and Design Institute, Chongqing 400067, China)

Abstract: In order to analyze the influence of construction of new interchange tunnel on existing tunnel, a three-dimension model test of interchange tunnel is carried out with the system of structure and surrounding rockmass of highway tunnel. Existing tunnel's surrounding rock pressure, internal displacement and supporting internal force are measured. The results show that, firstly, excavating new tunnel has obvious influence on section I of existing tunnel, and has little influence on section II. All surrounding rock pressure keeps decreasing and arch bottom surrounding rock's stability reduces. Secondly, crown and hance internal displacement manifest tensile deformation, and the deformation at crown is bigger than that at hance. Thirdly, exiting tunnel's supporting axial force keeps increasing and supporting moment keeps decreasing. Finally, excavating new interchange tunnel has obvious influence on exiting tunnel's surrounding rock pressure, internal displacement and supporting internal force when adjacent space is 0.25D, and it indicates that interchange tunnel's adjacent space should be no less

收稿日期: 2012-07-10

基金项目: 国家 863 计划项目(2007AA11Z110); 国家自然科学基金创新群体基金(50621403)

作者简介: 刘新荣(1969-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事地下空间与隧道工程研究,
(E-mail)liuxrong@126.com。

than 0.5D.

Key words: interchange tunnel; existing tunnel; surrounding rock pressure; supporting internal force

城市化进程的不断推进,地面交通枢纽已经不能满足社会的需求,对地下空间的开发与利用是倍受关注的课题。地下交通枢纽的修建是地下空间开发与利用的重要体现,人们很重视对隧道的变形^[1]、应力分布^[2-3]、围岩及支护结构稳定性^[4-7]等方面的研究,采用的主要方法有数值分析和模型试验等^[8-12]。近年来工程实际中常会出现新建隧道靠近既有隧道、建筑基础、桩基础等的近接工程,对它们的研究也取得相应成果^[13-15]。但目前国内立交隧道相对较少,对地下立交的研究有待于进一步深入。厦门市机场路地下互通立交隧道、云南省盐津县白水江三级电站引水隧洞下穿内昆铁路手扒岩隧道、宝岗路一笋岗路立交等地下立交隧道的出现给地下立体交通空间结构建造技术提出新的挑战^[16-18]。

为加强“一岛两岸”交通联系,兼顾节约土地、减少拆迁、保护城市景观和城市形态,促进城市健康发展,重庆提出构建两江隧道的设想,如图 1 所示。该立交工程共有 6 处平交、5 处近距离立交隧道。以重庆两江隧道中出现的立交隧道为研究背景,采用公路隧道结构与围岩综合实验系统(CTSSSRH)对立交隧道进行 2 组大型三维物理模型试验,研究 4 种不同立交间距下新建隧道施工对既有隧道支护结构的影响的力学机制与影响程度,为同类立交隧道的设计与施工提供参考。

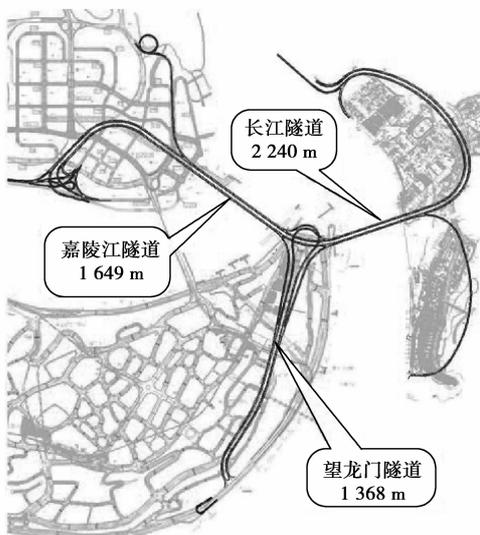


图 1 重庆两江隧道布置

1 相似原理及相似材料确定

1.1 相似原理

模型现象与原型现象相似必需满足一定的条件,采用弹性或弹塑性理论建立的静力平衡方程、位移方程和物理方程为基础确定的相似判据为^[16]

$$C_i = \frac{C_\sigma}{C_L C_\rho} = \frac{C_L C_\epsilon}{C_\Delta} = \frac{C_E C_\epsilon}{C_\sigma C_\mu} = 1, \quad (1)$$

式中: C_i 为相似指标; C_σ 为应力相似系数; C_L 为几何相似系数; C_ρ 为密度相似系数; C_ϵ 为应变相似系数; C_Δ 为位移相似系数; C_E 为弹模相似系数; C_μ 为泊松比相似系数。

1.2 相似材料确定

相似材料由细砂、石膏粉和石灰配置而成,拌和水灰比为 1:9。选取 4 组不同配比编号进行相似材料的物理力学参数进行试验,获得相似材料的物理力学参数如表 1 所示。配比编号中各数字含义为:第 1 位数字表示砂胶比;第 2 位数字表示胶结物中石膏粉含量的比例;第 3 位数字表示胶结物中石灰含量的比例。

表 1 相似材料物理力学参数

配比 编号	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	内摩擦角/ ($^\circ$)	单轴抗压 强度/MPa	泊松比	弹性模量/ MPa
473	1.7	38	0.438	0.37	35
682	1.7	35	0.416	0.35	41
482	1.7	51	0.539	0.26	100
582	1.7	47	0.485	0.28	81

地质勘察资料表明重庆两江隧道隧址的大部分区域综合评定为 IV 围岩,围岩的物理力学参数如表 2 所示。根据相似判据式(1)可得配比号为 582 相似材料的相似提线指标 $C_i = 99.93\%$,内摩擦角相似比为 1,单轴抗压强度与弹性模量两者的相似比接近,能较好地满足相似要求。

表 2 围岩物理力学参数

围岩 等级	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角/ ($^\circ$)	单轴抗压 强度/MPa	泊松比	弹性模量/ GPa
IV	2 200	47	25.73	0.28	4.19

1.3 选取支护参数

既有隧道支护结构厚 150 mm, 弹性模量 20 GPa, 获得满足相似条件的模型支护结构厚度为 3.75 mm, 弹性模量为 0.386 GPa。对衬砌结构安全起控制作用的是抗弯能力和弯曲应变, 模型相似应以抗弯刚度为主^[19]。模型既有隧道支护结构的选取采用保持隧道横截面等面积不变条件下, 理想模型支护结构抗弯刚度 EI 与实际采用模型支护结构 EI 相等原则。

2 立交隧道三维相似模型

模型试验采用重庆交通科研设计院自行研制公路隧道及围岩综合试验系统, 如图 2 所示。采用液压千斤顶在模型顶部加载模拟上覆岩土层自重, 模型两侧加载模拟围压, 用内置千斤顶模拟被开挖体应力响应, 所有千斤顶的荷载均由液压稳压器调控, 数据实现采集、存储和处理自动化^[20]。

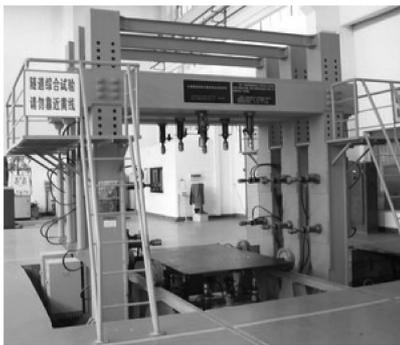


图 2 公路隧道及围岩综合试验系统

根据规划中重庆两江隧道中出现的立交形式, 完成了 2 组模拟试验(4 种不同立交间距: 第 1 组为 0.25D 和 0.5D 2 种间距; 第 2 组为 0.75D 和 1.00D 间距, D 为隧道的直径), 选取模型试件的几何相似比为 1:40。新建隧道位于下部, 由试验系统自带标准截面, 模型隧道轴线平行于模型底面和前后两侧面; 既有隧道位于新建隧道的上部, 隧道轴线平行模型底面, 并与新建隧道成 90° 立交, 每组模拟试验如图 3 所示。

3 试验详细内容

3.1 传感器布置

为研究新建立交隧道对既有隧道围岩及支护结构的影响, 传感器主要沿既有隧道周边布置。既有隧道支护结构上的应变片主要布置于立交隧道 1-1

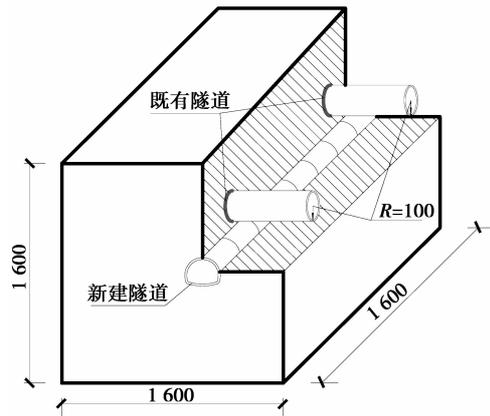


图 3 模型试件

断面和 2-2 断面, 用于测试既有隧道支护结构内力变化规律; 压力盒主要布置于立交隧道 1-1 断面和 2-2 断面的拱顶、拱腰和拱底; 内部位移计主要布置于 1-1 断面既有隧道的拱顶和拱腰; 新建隧道(内加载系统)共有 8 个截面, 如图 4 所示。

传感器布置原则为: 1) 围岩内压力盒用于测试径向的应力; 2) 围岩内内部位移计采用应变片制成, 通过测定围岩的应变推算围岩两点间的位移, 其应变片首先专用胶水贴于一个固定条上, 然后用软胶密封完整, 并且要求固定条本身的力学参数与相似材料相同, 应变片埋设点到既有隧道周边的距离分别为: 0D、0.25D、0.5D、0.75D、1D; 3) 支护结构内壁和外壁对称贴应变片。

3.2 模型试验过程

试验从相似材料准备到试验结束流程如图 5 所示, 实验过程中的部分现场情况如图 6 所示。模型养护完成后, 加上传力板进行试验的外观如图 7 所示。以油泵为动力系统, 模型上下两侧垂直方向的千斤顶和左右两侧水平方向的千斤顶分别向模型周边的传力板施加集中力, 再以传力板将集中力均布应力的方式传给模型的上下左右 4 个面, 以此模拟原始地应力场; 前后 2 块钢板用于约束模型前后位移。

隧道的原始地应力场为: 水平方向 2.07 MPa; 垂直方向 3.05 MPa, 包括地面高层建筑的荷载。通过相似理论转化为模型隧道边界上压力分布: 水平边界 40 kPa; 垂直边界 59 kPa; 内加载系统表面 49.5 kPa。总荷载分 6 步均匀增加, 第 1 次加载与第 2 次加载间隔 20 min, 之后每加载 1 次间隔 5 min, 当达到最终荷载标准稳压 1 h 后模拟开挖。

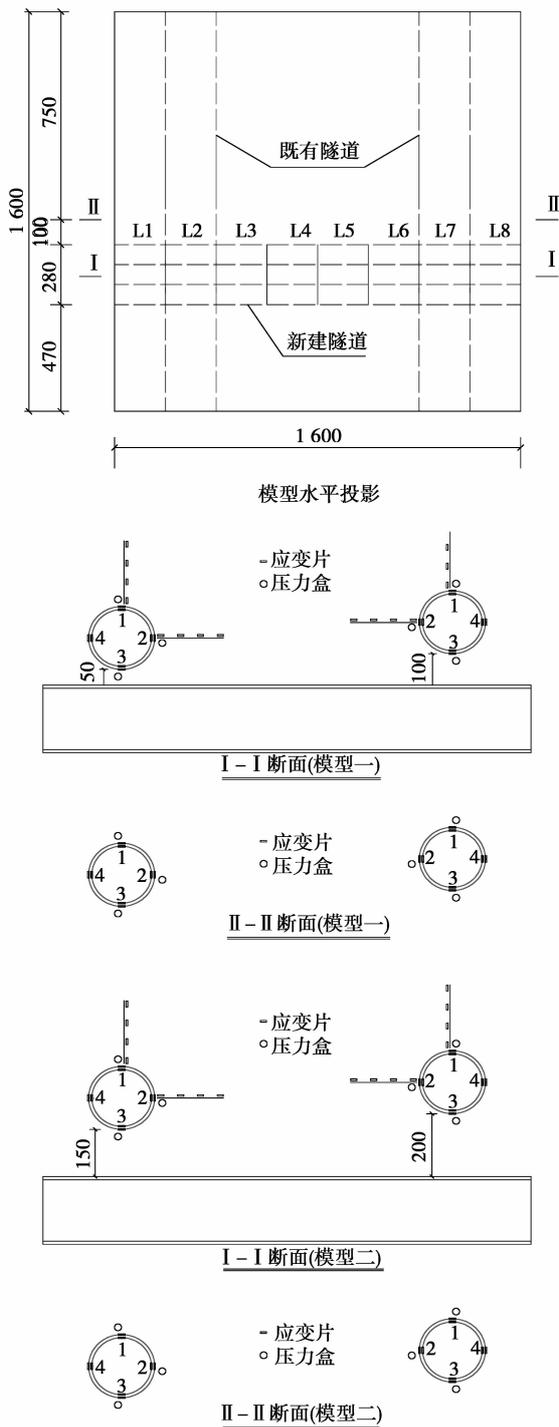


图 4 传感器布置详图

内加载系统的 8 个独立截面分别为 L1~L8,每个截面有 3 个独立模拟开挖模具,即拱顶和两侧拱腰,隧道开挖通过油压自动控制箱改变开挖模具内部油压大小实现。开挖方法采用上下台阶法,开挖整个顺序如表 3 所示。其中 Lx-y 的意义为:x 表示截面编号;y 表示每个截面的 3 个独立模拟开挖模具编号,1 为左侧拱腰,2 为拱顶,3 为右侧拱腰。时间相似

比设定为 1:48,每两次开挖间隔 30 min,试验过程中每 1 min 采集一次数据。

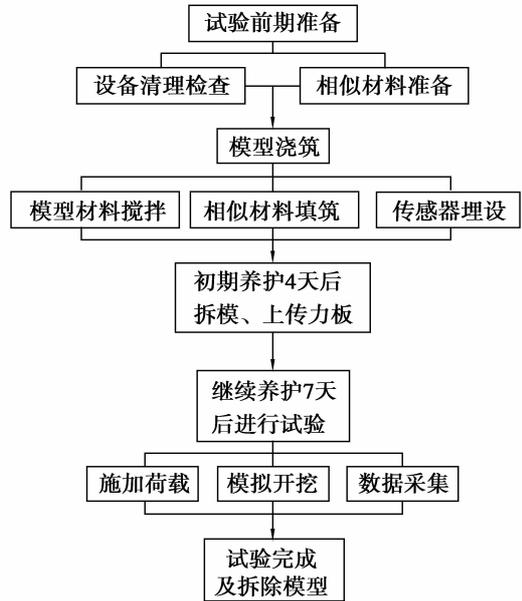


图 5 模型试验流程

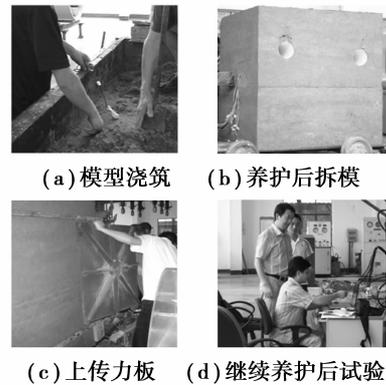


图 6 模型试验现场



图 7 模型试验外观

表 3 模型开挖顺序

截面编号	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
	L1-1	L2-1	L3-1	L4-1	L5-1	L6-1	L7-1	L1-1
	(8)	(7)	(5)	(3)	(3)	(5)	(7)	(8)
开挖模具编号	L1-2	L2-2	L3-2	L4-2	L5-2	L6-2	L7-2	L1-2
(开挖次序)	(6)	(4)	(2)	(1)	(1)	(2)	(4)	(6)
	L1-3	L2-3	L3-3	L4-3	L5-3	L6-3	L7-3	L1-3
	(8)	(7)	(5)	(3)	(3)	(5)	(7)	(8)

4 不同立交间距下新建隧道对既有隧道的影响

试验数据分析详情:1)由于第一步开挖对既有隧道的影响相对较小,所有数据从第二开挖步开始;2)试验过程中有的压力盒或应变片破坏而没有数据;3)只分析支护结构中间拱腰的内力变化。

正负号约定:1)围岩压力:压为正,拉为负;2)内部位移:拉伸变形为正,压缩变形为负;3)支护轴力:压为正,拉为负;4)支护弯矩:导致结构外侧受拉为正,导致结构内侧受拉为负。

4.1 新建隧道对既有隧道围岩压力的影响

4.1.1 I 剖面既有隧道围岩压力变化趋势

I 剖面既有隧道拱顶围岩压力变化如图 8 所示,立交间距为 $0.5D$ 和 $1.0D$ 条件下,既有隧道拱顶处围岩压力具有减小趋势; $0.25D$ 立交间距时围岩压力总体呈增加趋势,但新建隧道在开挖立交处的上台阶时,既有隧道拱顶处的围岩压力突然减小,之后又增加。 $0.25D$ 立交间距时围岩压力同时存在增加和减小区域,变化比较明显,表明在此条件下既有隧道拱顶围岩压力对新建隧道的施工比较敏感。

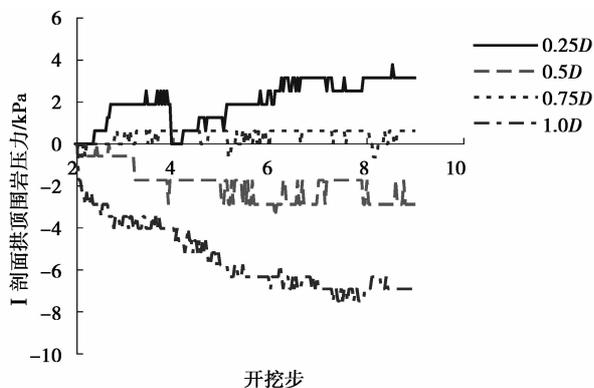


图 8 I 剖面拱顶围岩压力

I 剖面既有隧道拱腰围岩压力变化如图 9 所示,随着新建隧道的开挖既有隧道拱腰围岩压力呈

减小趋势,在新建隧道开挖立交处的上台阶时既有隧道拱腰围岩压力剧减。且同样在 $0.25D$ 立交间距下既有隧道拱腰围岩压力对新建隧道的施工比较敏感。

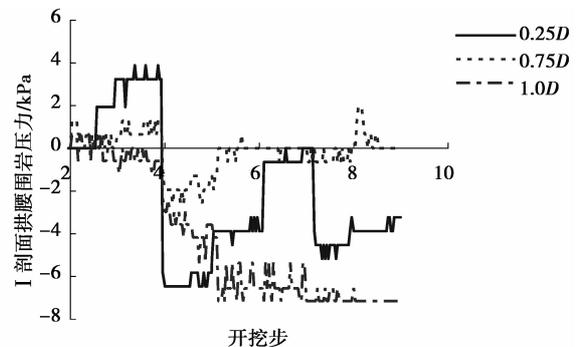


图 9 I 剖面拱腰围岩应力

I 剖面既有隧道拱底围岩压力变化如图 10 所示,不同间距下既有隧道拱底的围岩压力都处于减小状态,且都在开挖立交处新建隧道的上台阶时剧减,该处的减小值最大。 $0.5D$ 立交间距下既有隧道拱底的减小值约为 20 kPa 。

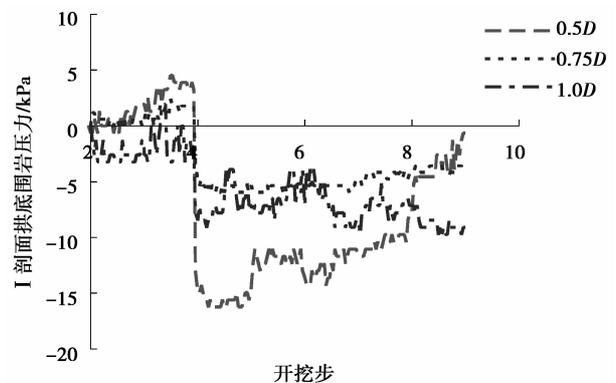


图 10 I 剖面拱底围岩应力

I 剖面既有隧道拱底围岩切向应力(与拱底围岩压力方向垂直)变化如图 11 所示, $0.75D$ 和 $1.0D$

立交间距下既有隧道拱底围岩切向应力处于增加状态;0.25D 和 0.5D 立交间距下既有隧道拱底围岩切向应力于第 4 开挖步处发生突然减小的现象,在其它开挖步处于增加状态。新建隧道开挖后形成临空面,从而一定区域的应力释放,与此同时沿新建隧道切向会有应力集中的产生,所以此处的应力应为两者的叠加,立交间距为 0.25D 和 0.5D 时围岩应力受应力集中和应力的影响都比较大,但此处主要表现为应力的减小,此时可能出现塑性变形。既有隧道独立在时拱底围岩压力应小于拱底围岩切向应力,而新建隧道开挖后既有隧道拱底围岩压力继续减小,拱腰围岩压力反而增加,从岩石的破坏准则可知,新建隧道开挖后既有隧道拱底围岩更易破坏。

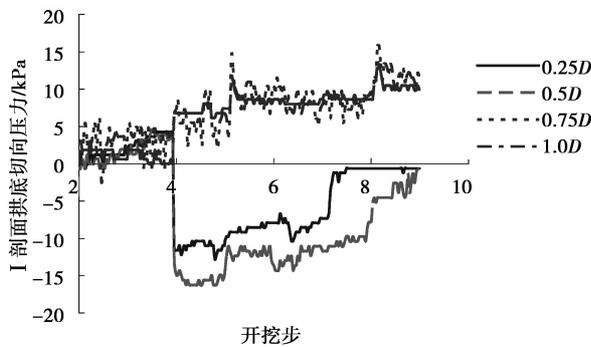


图 11 I 剖面拱底围岩切向应力

4.1.2 II 剖面既有隧道围岩应力变化趋势

II 剖面既有隧道拱顶围岩压力变化如图 12 所示,围岩压力同时存在增加和减小区域,总体上围岩压力的变化较小。0.5D 和 0.75D 立交间距下拱顶的围岩压力表现为增加趋势,1.0D 立交间距下拱顶的围岩压力表现为减小趋势。

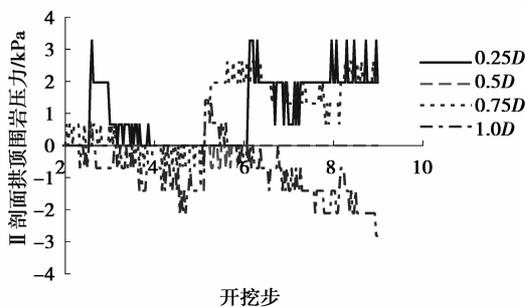


图 12 II 剖面拱顶围岩压力

II 剖面既有隧道拱腰围岩压力变化如图 13 所示,0.7D 和 1.0D 立交间距下既有隧道围岩压力变化很小;0.5D 立交间距下既有隧道围岩压力表现出

微小的增加。

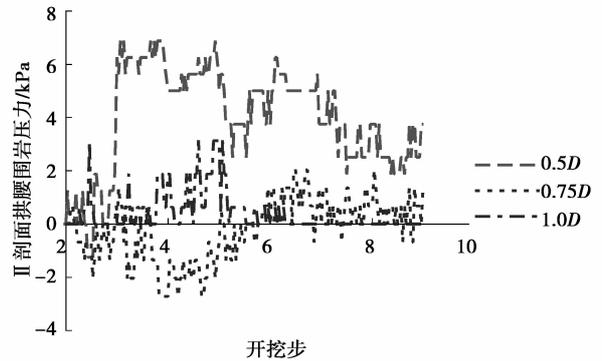


图 13 II 剖面拱腰围岩压力

II 剖面既有隧道拱底围岩压力变化如图 14 所示,不同间距下此处的围岩压力都为减小趋势,其中 0.5D 和 1.0D 立交间距下的 2 组数据比较平稳,波动幅度较小,该 2 组数据较为可靠。新建隧道的开挖导致 II 剖面既有隧道拱底围岩压力产生释放,同时由于新建隧道周边的应力集中对既有隧道拱底围岩压力产生影响。但既有隧道拱底围岩压力总体表现为微弱减小。

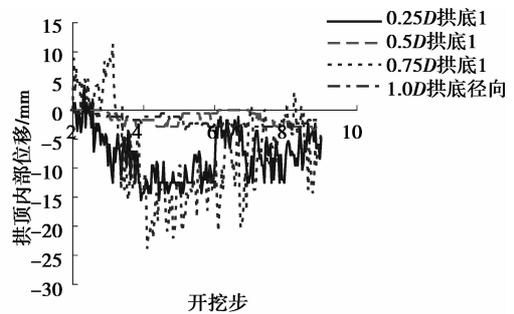


图 14 II 剖面拱底围岩应力

4.2 既有隧道围岩内部位移的变化规律

既有隧道拱顶围岩内部位移变化如图 15 所示,立交间距为 0.25D 和 1.0D 时,新建隧道施工对既

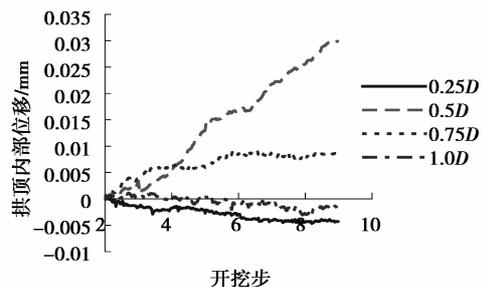


图 15 拱顶围岩内部位移

有隧道拱顶围岩内部位移的影响较小;立交间距为 $0.5D$ 和 $0.75D$ 时,新建隧道施工对既有隧道拱顶围岩内部位移的影响较大,主要表现为拉伸变形,最大值约 0.029 mm 。

既有隧道拱腰围岩内部位移变化如图 16 所示,所有围岩内部位移都表现为拉伸变形,但变形量较小,其最大值约 0.007 mm ,远小于拱顶处变形的最大值 0.029 mm ,表明新建隧道施工对既有隧道拱腰围岩内部位移的影响远小于对既有隧道拱顶围岩内部位移的影响。

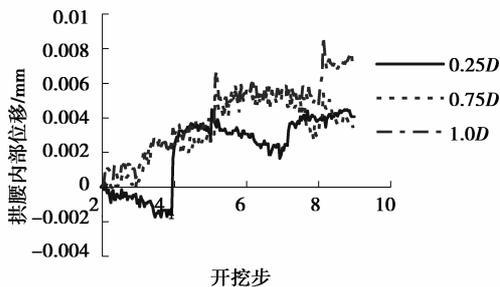


图 16 拱腰围岩内部位移

4.3 新建隧道对既有隧道支护结构的影响

根据模型试验初始数据可知:既有隧道支护轴力全为压力,拱顶和拱底的支护弯矩为负,两侧拱腰

的支护弯矩为正。

4.3.1 I 剖面支护结构内力变化趋势

新建隧道对既有隧道 I 剖面支护结构轴力的影响如图 17 所示,既有隧道拱顶支护结构轴力具有增加趋势,最大增加值在 1 N 左右。既有隧道支护结构拱腰轴力具有增加趋势,在开挖步 4 处, $0.25D$ 立交间距下支护结构拱腰的轴力剧减, $1.0D$ 立交间距下支护结构拱腰的轴力剧增,最终 $1.0D$ 立交间距下支护结构拱腰的轴力增加量最大,约 1.8 N 。 $0.75D$ 和 $1.0D$ 立交间距下支护结构拱底的轴力具有缓慢增加的趋势, $0.25D$ 和 $0.5D$ 立交间距下支护结构拱底的轴力变化的最终值为负,但其间轴力具有较大的减小区域和增加区域。

总体可看出,既有隧道 I 剖面支护结构轴力基本表现为增加。但在立交间距为 $0.25D$ 时拱腰和拱底的支护轴力具有较大的减小区域,主要体现在开挖步 4 处轴力减小最明显,拱底支护轴力约减小 3.3 N ;开挖步为 7 时既有隧道拱腰的支护轴力具有减小趋势,拱底支护轴力具有增加趋势。同时也表明立交间距为 $0.25D$ 时既有隧道 I 剖面的支护轴力受新建隧道施工的影响较大。

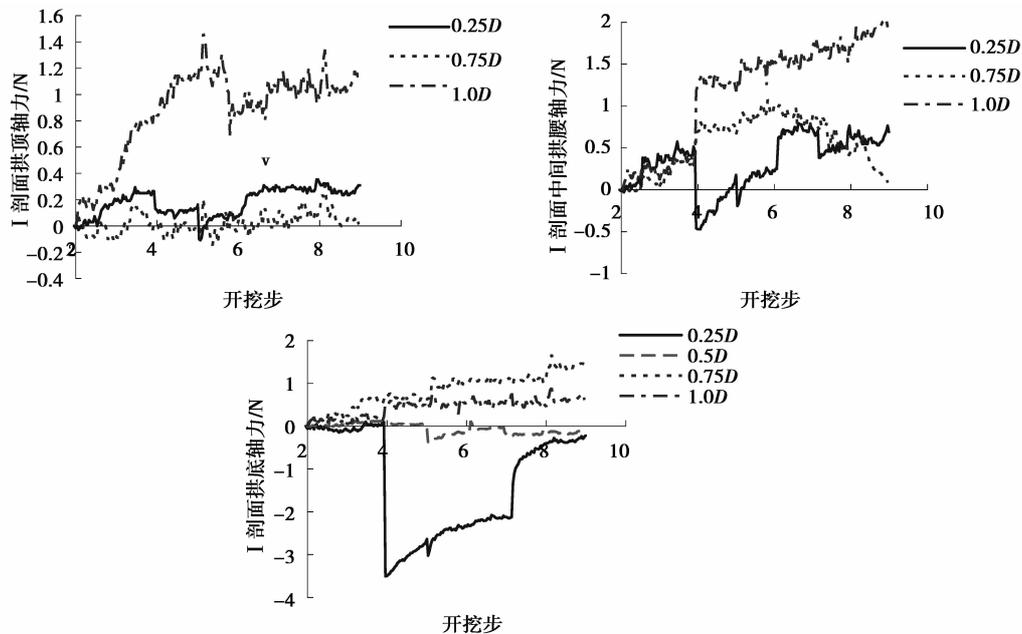


图 17 I 剖面支护结构轴力变化趋势

新建隧道对既有隧道 I 剖面支护结构弯矩的影响如图 18 所示,既有隧道拱顶支护弯矩沿正方向减小,减小值在 $0.33\text{ N}\cdot\text{mm}$ 左右。 $0.75D$ 和 $1.0D$ 立

交间距下既有隧道拱腰支护弯矩沿负方向减小,立交间距为 $0.25D$ 时既有隧道拱腰支护弯矩最终变化量不大,但在开挖步为 4 时支护弯矩剧增,增加值

达 $0.7 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 左右。既有隧道拱底支护弯矩主要 表现为沿正方向减小,减小值在 $0.33 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 左右。

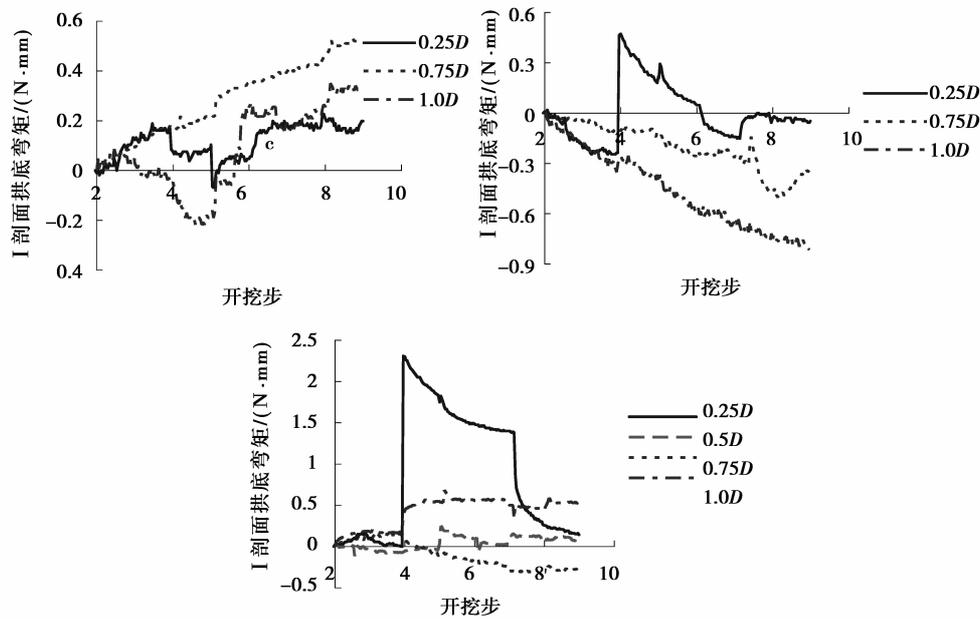


图 18 I 剖面支护结构弯矩变化趋势

0.25D 立交间距时新建隧道施工对既有隧道拱腰和拱底的支护弯矩影响较大。拱腰支护弯矩变化的最终值虽然不大,但开挖步 4 处拱腰的支护弯矩突然增加约 $0.7 \text{ N} \cdot \text{mm}$,容易导致支护结构失稳。拱底支护弯矩存在明显的减小和增加区域,在开挖步 4 处拱腰的支护弯矩剧减约 $2.2 \text{ N} \cdot \text{mm}$,其数值太大,可能造成反向受弯。

4.3.2 II 剖面支护结构内力变化趋势

新建隧道对既有隧道 II 剖面支护结构轴力的影

响如图 19 所示,既有隧道支护轴力变化的最终值既有增加的,又有减小的,但相对于剖面 I 既有隧道支护轴力的变化情况,剖面 II 既有隧道支护轴力的变化较小。

0.25D 立交间距时既有隧道支护轴力的变化对新建立隧道施工较敏感,开挖步 4 处拱顶、拱腰及拱底的支护轴力剧减,最大减小值为约 3.2 N ;开挖步 7 处轴力增加明显。

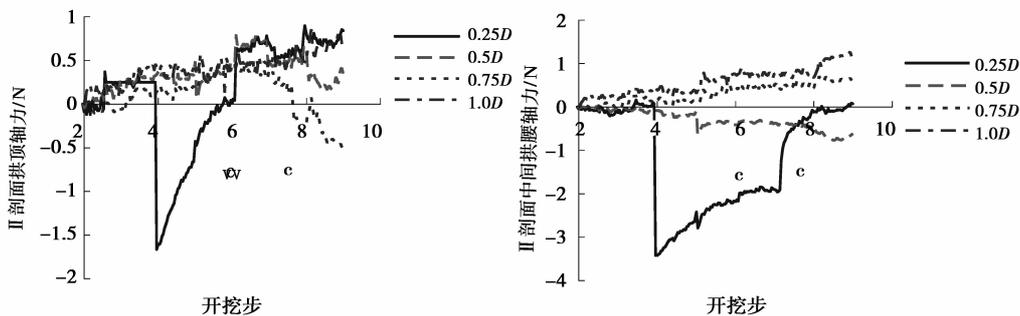


图 19 II 剖面支护结构轴力变化趋势

新建隧道对既有隧道 II 剖面支护结构弯矩的影响如图 20 所示,0.25D 和 0.5D 立交间距下既有隧道 II 剖面拱顶支护弯矩变化很小,0.75D 和 1.0D 立交间距下拱顶支护弯矩为沿正方向减小趋势,但变化量较小;既有隧道拱腰支护弯矩主要表现为沿负方向减小,0.5D 立交间距处拱腰支护弯矩表现出

增加趋势;既有隧道拱底支护弯矩都为沿正方向减小。立交间距为 0.5D~1.0D 区域既有隧道拱底支护弯矩受新建隧道的影响较小,且变化缓慢。立交间距为 0.25D 时拱腰和拱底的支护弯矩受到较大影响,开挖步 4 拱腰支护弯矩沿负方向减小约 $2.2 \text{ N} \cdot \text{mm}$,拱底支护弯矩沿正方向减小约 $2.3 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 。表明新

建立交隧道施工致使既有隧道 II 剖面的支护弯矩减小,但间距小于 $0.25D$ 立交间距时其变化值很大。

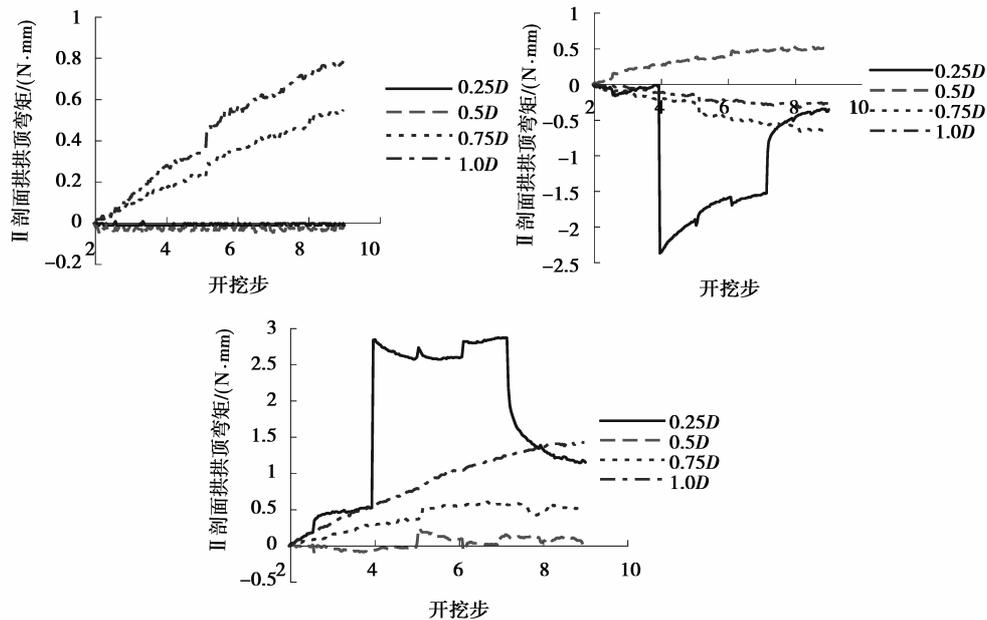


图 20 II 剖面支护结构弯矩变化趋势

5 结 论

根据立交隧道模型试验结果获得新建隧道施工对既有隧道的影响主要表现在以下方面。

1) 新建隧道施工对既有隧道 I 剖面围岩压力的影响相对较大,对 II 剖面围岩压力的影响相对较小;围岩压力多数表现为减小状态,但 $0.25D$ 立交间距时拱顶围岩压力具有明显增加,且拱底围岩的安全性降低。

2) 新建隧道施工致使既有隧道拱顶和拱腰的围岩内部位移表现为拉伸变形,但拱顶处围岩的内部位移远大于拱腰处围岩内部位移,且 $0.5D$ 立交间距下拱顶的内部位移较大,而 $0.25D$ 和 $1.0D$ 立交间距下拱顶的内部位移相对较小。

3) 新建隧道施工致使既有隧道 2 个剖面上的支护轴力和支护弯矩都处于增加状态或最终变化值较小。

4) $0.25D$ 立交间距时 I 剖面既有隧道拱顶和拱腰围岩压力变化较为敏感,具有明显的增加和减小区域;既有隧道拱腰支护弯矩在第 4 开挖步处剧增 $0.7 \text{ N} \cdot \text{mm}$,而拱底支护弯矩在第 4 开挖步处剧减 $2.2 \text{ N} \cdot \text{mm}$,可能导致反向受弯。

5) $0.25D$ 立交间距时 II 剖面既有隧道拱顶和拱腰围岩压力的变化相对较小;在第 4 开挖步处既有隧道所有的支护轴力剧减,最大值达 3.2 N ,拱腰和

拱底支护弯矩减小量也较大,约 $2.2 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 。

6) 立交间距在 $0.5D$ 以上时新建隧道施工对既有隧道的影响相对较小,立交间距小于 $0.25D$ 时既有隧道的围岩压力、围岩内部位移和支护内力对新建隧道施工很敏感,受到的影响较大,建议将立交隧道的立交间距控制在 $0.5D$ 以上。

参考文献:

- [1] Kim S H. Interaction behaviours between parallel tunnels in soft ground[C]// Proceedings of the 30th Itaites World Tunnel Congress on Tunnelling and Underground Space Technology, May 22-27, 2004, Singapore. [S.l.]: Elsevier, 2004, 19(4/5): 448.
- [2] Yoon J, Ru C Q, Mioduchowski A. Effect of a thin surface coating layer on thermal stresses within an elastic half-plane [J]. Acta Mechanica, 2006, 185(3/4): 227-243.
- [3] Verruijt A. Deformations of an elastic half plane with a circular cavity[J]. International Journal of Solids and Structures, 1998, 35(21): 2795-2804.
- [4] 章慧健,仇文革,冯冀蒙. 小净距隧道夹岩力学特征分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 434-439. ZHANG Huijian, QIU Wenge, FENG Jimeng. Mechanical performance of shared rock of neighborhood tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 434-439.
- [5] Chen S L, Lee S C, Gui M W. Effects of rock pillar width on the excavation behavior of parallel tunnels[J].

- Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(2): 148-154.
- [6] 齐静静, 徐日庆, 魏纲. 双线平行盾构法隧道施工附加荷载的计算分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1665-1670.
 QI Jingjing, XU Riqing, WEI Gang. Analysis and calculation of superimposed load induced by double parallel shield tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1665-1670.
- [7] Li S C, Wang M B. Elastic analysis of stress-displacement field for a lined circular tunnel at great depth due to ground loads and internal pressure[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(6): 609-617.
- [8] 王汉鹏, 李术才, 张强勇. 分岔隧道模型试验与数值模拟超载安全度研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2521-2526.
 WANG Hanpeng, LI Shucui, ZHANG Qiangyong. Model test and numerical simulation of overload safety of forked tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2521-2526.
- [9] Hefny A M, Chua H C, Zhao J. Parametric studies on the interaction between existing and new bored tunnels [C]// Proceedings of the 30th International World Tunnel Congress on Tunnelling and Underground Space Technology, May 22-27, 2004, Singapore. [S. l.]: Elsevier, 2004, 19: 471.
- [10] Jeon S, Kim J, Seo Y, et al. Effect of a fault and weak plane on the stability of a tunnel in rock: a scaled model test and numerical analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(3): 1-6.
- [11] Shin J H, Choi Y K, Kwon O Y, et al. Model testing for pipe-reinforced tunnel heading in a granular soil[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(3): 241-250.
- [12] Zhou S, Wang Y Y, Huang X C. Experimental study on the effect of injecting slurry inside a jacking pipe tunnel in silt stratum[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 466-471.
- [13] Yamaguchi I, Yamazaki I, Kiritani Y. Study of ground-tunnel interactions of four shield tunnels driven in close proximity, in relation to design and construction of parallel shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 1998, 13(3): 288-304.
- [14] 王桂林. 岩石洞室地基稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学博士学位论文, 2004.
- [15] Lee Y J, Bassett R H. Influence zones for 2D pile-soil-tunnelling interaction based on model test and numerical analysis [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22(3): 325-342.
- [16] 黄宣明. 大型地下立交隧道施工技术探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 765-769.
 HUANG Xuanming. Study on the construction technology of large-scale 3-D traffic tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4): 765-769.
- [17] 龚伦. 上下交叉隧道近接施工力学原理及对策研究[D]. 成都: 西南交通大学博士学位论文, 2008.
- [18] 张玉军, 刘谊平. 上下行隧道立交处围岩稳定性的有限元计算[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 511-515.
 ZHANG Yujun, LIU Yiping. 3D finite element analysis for stability of surrounding rockmass at grade separation section of up tunnel and down tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4): 511-515.
- [19] 周小文, 濮家骝. 隧洞结构受力及变形特征的离心模型试验研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(8): 110-112, 116.
 ZHOU Xiaowen, PU Jialiu. Centrifuge model test study of the earth pressure and deformation of tunnel lining[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2001, 41(8): 110-112, 116.
- [20] 蒋树屏, 刘洪洲, 鲜学福. 大跨度扁坦隧道动态施工的相似模拟与数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 567-572.
 JIANG Shuping, LIU Hongzhou, XIAN Xuefu. Physical simulation and numerical analysis on dynamic construction behavior of large-span flat tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 567-572.

(编辑 陈移峰)