

不同位置空洞条件下隧道的破坏模式试验研究

王述红, 王鹏宇, 刘 宇, 朱宝强

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 隧道空洞是影响隧道稳定性的重要原因之一, 因此开展了空洞在拱肩、边墙、拱脚及拱底等位置的模型试验, 总结出存在不同位置的空洞隧道的破坏形式和破坏顺序. 试验结果表明: 拱肩空洞模型在空洞的边界位置和拱脚处出现受压破坏, 底板出现开裂; 边墙空洞模型在空洞位置相应的衬砌出现压溃及拱顶产生开裂; 拱脚空洞模型是拱脚位置衬砌受压破坏以及拱顶产生开裂; 底部空洞模型是在底板衬砌位置及相应拱肩衬砌受压破坏以及拱顶出现开裂, 研究结果为隧道的顺利施工和后期维护提供参考依据.

关 键 词: 空洞; 隧道; 衬砌; 稳定性分析

中图分类号: TU 990.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2020)06-0863-07

Experimental Study on Failure Mode of Tunnel Model Containing Cavity in Different Locations

WANG Shu-hong, WANG Peng-yu, LIU Yu, ZHU Bao-qiang

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHU Bao-qiang, E-mail: zbzq2289675237@163.com)

Abstract: Cavity is an important factor affecting the stability of the tunnel. A cavity was set at the shoulder, the side wall, the arch and the floor of each tunnel model to study the failure modes and failure sequences of the tunnel. The results showed that when the cavity is near the shoulder of the tunnel, failure occurs at the boundary of the cavity and the floor, accompanied by compressive failure at the arch foot. When the cavity is near the side wall, the side wall is buckled and the crown is cracked. For model with a cavity near the arch foot, the lining near the cavity and the crown are cracked as a consequence. For model with a cavity at the bottom of the floor, failure occurs at the floor, the shoulder and the crown. These results can give some references for the construction and maintenance of tunnel.

Key words: cavity; tunnel; lining; stability analysis

隧道工程属于隐蔽工程, 存在较多的潜在危险源. 地质雷达检测发现, 隧道衬砌周围多个区域均易出现空洞现象^[1], 空洞的存在往往造成隧道衬砌受荷载不均匀, 容易出现衬砌变形、裂损、渗漏以及掉块等问题, 因此, 研究存在空洞时隧道的破坏规律对隧道安全防护具有重要价值^[2-3].

本文主要研究在Ⅳ级围岩地质条件下, 隧道存在不同位置空洞时隧道衬砌结构受力、破坏过程以及破坏顺序的规律, 本文的研究成果可为隧道结构的安全评估提供依据.

1 模型试验设计

1.1 模型尺寸的选择

辽宁省某隧道跨度 10.8 m, 高度 7.6 m. 水平方向隧道模型两边的宽度至少相当于洞宽的 2.5 倍; 竖直方向模型的高度至少要相当于洞高的 3 倍^[4]. 采用的几何相似比为 1:90, 得出模型隧道尺寸: 跨度 120 mm, 高度 85 mm, 其中直墙高度 30 mm, 模型整体的尺寸是 600 mm × 600 mm × 100 mm.

1.2 模型材料的选择和确定

为模拟Ⅳ级围岩地质条件,在试验的相似材料中骨料选择河沙,胶结材料选择石膏和水泥的混合物.石膏水泥混合物作为胶结材料保留了水泥砂浆流动性好等优点,并且克服了石膏强度低的弱点.对相似材料的破坏性质进行室内试验,发现相似材料的破坏过程和实际地质条件接近,都是以弹性阶段为起点,经过弹塑性过渡最终发生脆性破坏,符合实际需求.

1.3 配比试验

采用不同比例的原料混合制成 70 mm 的立方体试块,每组 5 个,对试块进行单轴抗压强度、密度、泊松比、弹性模量等指标的测量.加载梯度取为 0.1 MPa,加载速度取为 0.5 MPa/min,计算得出泊松比、弹性模量和极限抗压强度^[5-6].

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_l} \right|,$$

（1）

$$E_t = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a},$$

（2）

$$\varepsilon_v = |\varepsilon_l - 2\varepsilon_d|,$$

（3）

$$\sigma_{\max} = \frac{P_{\max}}{F}.$$

（4）

式中: ε_l 表示隧道模型的纵向应变; ε_d 表示隧道模型的横向应变; σ_a, ε_a 分别表示通过测量得到的应力-应变曲线中直线段开始的应力和应变; σ_b, ε_b 分别表示应力-应变曲线中直线段终点的应力和应变; P_{\max} 表示破坏荷载; F 表示试件的初始截面积; ε_v 表示体积应变.

表 1 围岩的性质

Table 1 The properties of the rock

序号	配比号	密度 g·cm ⁻³	单轴抗压 强度/MPa	泊松比	弹性模量 GPa
1	837	1.7	0.21	0.17	0.32
2	855	1.7	0.45	0.17	0.46
3	873	1.7	0.28	0.17	0.37
4	973	1.7	0.26	0.16	0.35
5	955	1.7	0.28	0.17	0.29
6	937	1.7	0.30	0.16	0.30

注:配比号中第 1 位数字表示砂胶比,第 2,3 位数字表示水泥与石膏的比例,水灰比取为 1:7.

衬砌的相似材料采用石膏,依照模型设计的要求,衬砌的厚度是 80 cm(包括初衬和二衬).C25 的抗压强度是 14~17.5 MPa,因为几何相似比是 1/90,所以模型的衬砌厚度为 1 cm,容重相似比为 1,模拟原料的强度要求在 0.156~0.194 MPa 之间.

表 2 衬砌的性质

Table 2 The properties of the lining

石膏比	抗压强度 MPa	弹性模量 GPa	容重 kN·m ⁻³
0.7	1.294	6.27	10.48
1.0	0.534	3.50	8.86
1.3	0.404	3.34	7.15
1.5	0.292	1.68	6.33
2.0	0.159	1.01	2.50

根据不同的配比,进行了多组的强度试验,最终发现围岩材料的配比选择 855,衬砌材料的水膏比为 1:1 时进行相似模型试验具有最佳的相似度.

2 试验过程

2.1 模型的制作

根据隧道调研资料将空洞的尺寸与隧道的尺寸比取为 1:20,空洞范围均为 30°^[7].根据不同的空洞位置做了 5 组模型,每组 5 个,模型尺寸为 600 mm×600 mm×100 mm,体积 0.036 m³,密度 1.7 g/cm³,得出模型总质量为 61.2 kg.水灰比 1:7,所以 $m_{\text{水}} = 61.21/8 = 7.65$ kg.依据 855 配比要求得出: $m_{\text{砂}} = 47.6$ kg, $m_{\text{膏}} = 2.975$ kg, $m_{\text{泥}} = 2.975$ kg.

2.2 测试内容及测点布置

试验采用了电测法测量应变,电测法是采用应变片和应变仪对模型进行测量.应变片型号为 SZ300-100AA,其电阻值为 $(299.3 \pm 0.3) \Omega$,灵敏系数为 2.02 ± 0.01 ,宽×长为 4 mm×100 mm.应变仪采用 CM-2B 型静态数字应变仪^[8],测量点的位置如图 1 所示.

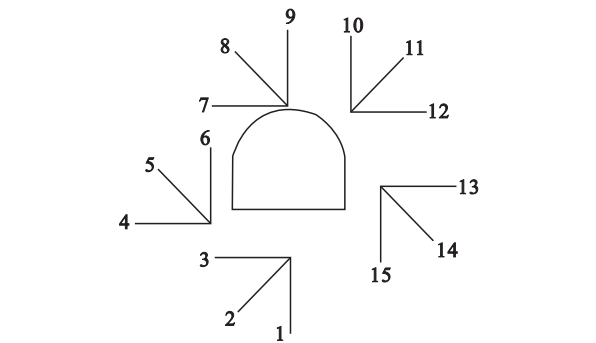


图 1 测点布置
Fig. 1 Layout of the testing points

2.3 加载方式

本文根据现场测量得到地层侧压力系数 $\lambda = 2$.试验中利用千斤顶施加荷载,钢板垫块将集中

荷载转化为均布荷载. 在千斤顶的内部活塞前加上压力传感器, 利用静态应变仪测量千斤顶的实际加载力, 提高外力施加的精确度. 采用立式台架模型约束模型的底部, 水平力与竖向力的大小比为 2:1. 试验前加载预压, 从而消除隧道和衬砌之间的间隙, 预压荷载一般为试验荷载的 1/10 ~ 1/5. 采用分级加载, 每级荷载保持 3 ~ 5 min, 记录量测数据后, 再施加下一级荷载^[9].

3 试验结果

3.1 无空洞模型试验

模型破坏如图 2 所示.



图 2 拱顶无空洞模型破坏
Fig. 2 The failure mode of tunnel model with no cavity at the crown

试验发现模型的破坏过程为: 加载初期拱顶、底板先出现裂纹, 随着荷载增加, 右拱肩与边墙结合处出现裂纹, 且原裂纹加粗; 试件的左侧边墙产生裂纹, 沿模型往上方延伸, 模型左右两侧的裂缝最终贯穿, 造成整体破坏. 无空洞模型破坏特征和破坏顺序如图 3 所示.

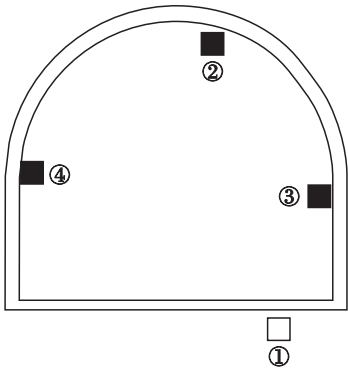


图 3 拱顶无空洞模型破坏模式
Fig. 3 The failure mode of the tunnel structure with no cavity at the crown

□表示隧道受到拉伸产生开裂; ■表示隧道受压产生压溃; ①, ②, ③, ④表示隧道发生破坏的顺序. (下同)

3.2 拱顶空洞模型试验

拱顶空洞模型破坏如图 4 所示.

模型破坏过程: 首先模型底部出现裂纹, 接着空洞处的围岩发生破坏, 随着荷载的增大, 模型左侧拱肩以及边墙部位出现裂纹, 裂纹持续增大并出现上下贯通的现象, 最终导致模型破坏. 拱顶空洞模型破坏特征和破坏顺序如图 5 所示.



图 4 拱顶空洞模型破坏
Fig. 4 The failure mode of tunnel model with a cavity at the crown

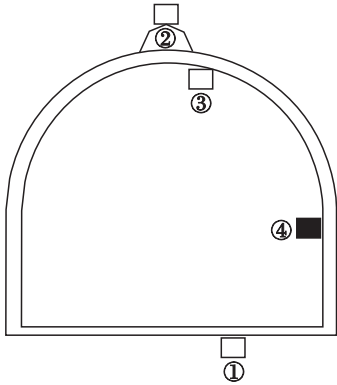


图 5 拱顶空洞模型破坏模式
Fig. 5 The failure mode of tunnel structure with a cavity at the crown

荷载 - 应变曲线如图 6 所示, 曲线的编号和图 1 保持一致. 3 - 1, 3 - 2, 3 - 3 表示底板的荷载 - 应变曲线. 3 - 4, 3 - 5, 3 - 6 表示拱脚的荷载 - 应变曲线. 3 - 7, 3 - 8, 3 - 9 表示拱顶的荷载 - 应变曲线. 3 - 10, 3 - 11, 3 - 12 表示拱肩的荷载 - 应变曲线. 3 - 13, 3 - 14, 3 - 15 表示边墙的荷载 - 应变曲线.

由图 6a 可知底板主要受到横向拉力, 横向变形逐渐增大. 由图 6b 可知拱脚受到横向拉力和竖向压力, 荷载达到 100 kN 时横向变形急剧增大. 由图 6c 可知拱顶受到横向拉力和竖向压力, 破坏之前变形较小. 由图 6d 可知拱肩受到横向拉力和竖向拉力, 荷载小于 100 kN 时变形较小, 荷载大于 100 kN 时变形急剧增大. 由图 6e 可知边墙受到横向压力和竖向压力, 变形很明显. 综合而言, 拱顶存在空洞时边墙的变形最显著, 需要重点防护.

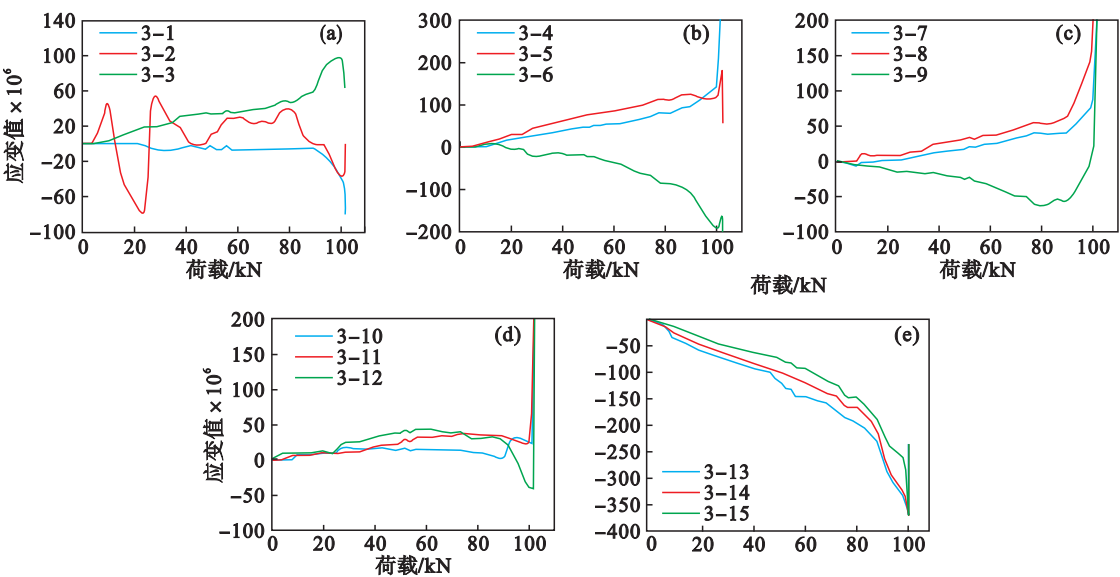


图 6 荷载 - 应变曲线
Fig. 6 Load-strain curves
(a) —底板; (b) —拱脚; (c) —拱顶; (d) —拱肩; (e) —一边墙.

3.3 拱肩空洞模型试验

拱肩存在空洞时模型破坏如图 7 所示.

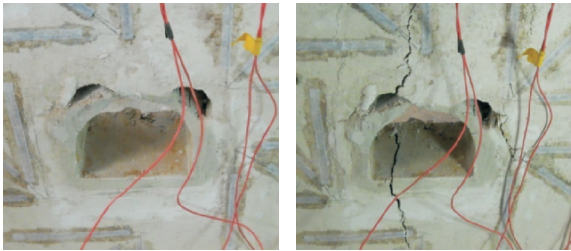


图 7 拱肩空洞模型破坏
Fig. 7 The failure mode of the tunnel model with a cavity at the shoulder

模型破坏过程: 首先模型底部和左侧空洞上方的围岩出现裂纹, 随后拱顶部位的衬砌断裂. 随着荷载的增大, 右侧空洞外侧出现裂纹, 模型底部

裂纹进一步扩大并迅速向下延伸. 最后底部裂缝和右侧裂缝贯通. 拱肩存在空洞时模型破坏类型和破坏顺序如图 8 所示.

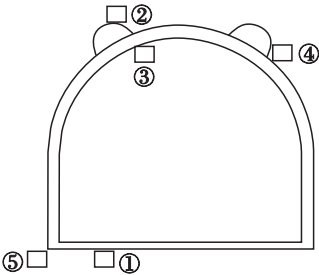


图 8 拱肩空洞模型破坏模式
Fig. 8 The failure mode of the tunnel structure with a cavity at the shoulder

各测点的荷载 - 应变曲线如图 9 所示.

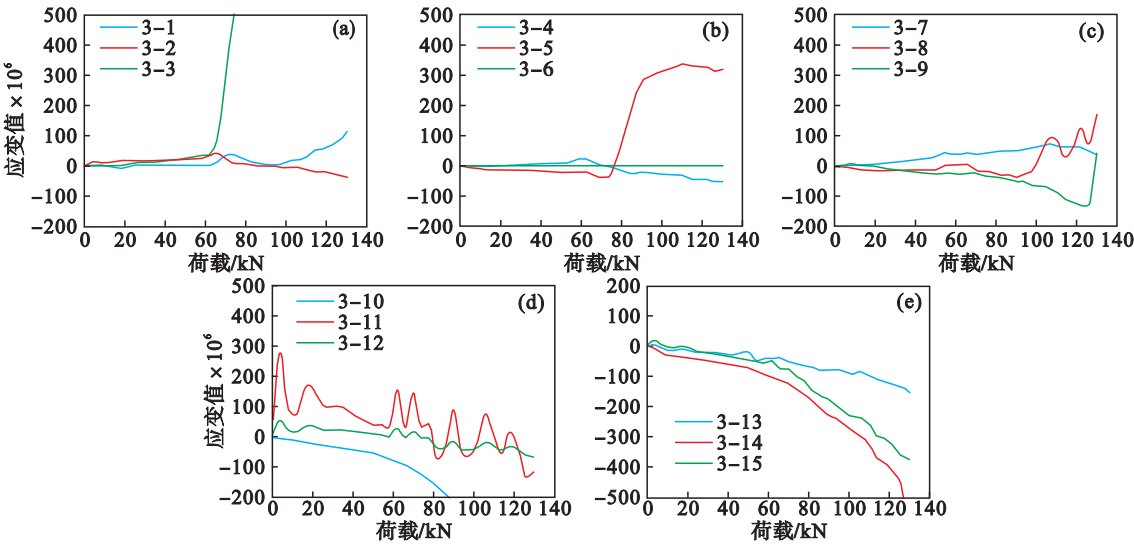


图 9 荷载 - 应变曲线
Fig. 9 Load-strain curves
(a) —底板; (b) —拱脚; (c) —拱顶; (d) —拱肩; (e) —一边墙.

由图 9a 可知底板主要受到水平拉力,荷载达到 60 kN 时变形迅速变大,可以判断此时底板发生了断裂.由图 9b 可知拱脚处变形较小.由图 9c 可知拱顶受到水平拉力和竖向压力,变形比底板和拱脚处大.由图 9d 可知拱肩主要受到横向压力,变形持续增大.由图 9e 可知边墙受到横向压力和竖向压力,边墙处发生的变形最大.当拱肩存在空洞时,边墙部位需要重点防护.

3.4 边墙空洞模型试验

隧道模型破坏如图 10 所示.

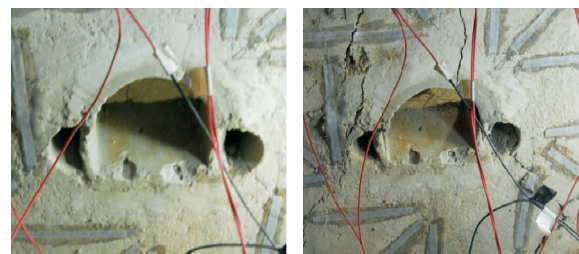


图 10 边墙空洞模型破坏
Fig. 10 The failure mode of the tunnel model with a cavity at the side wall

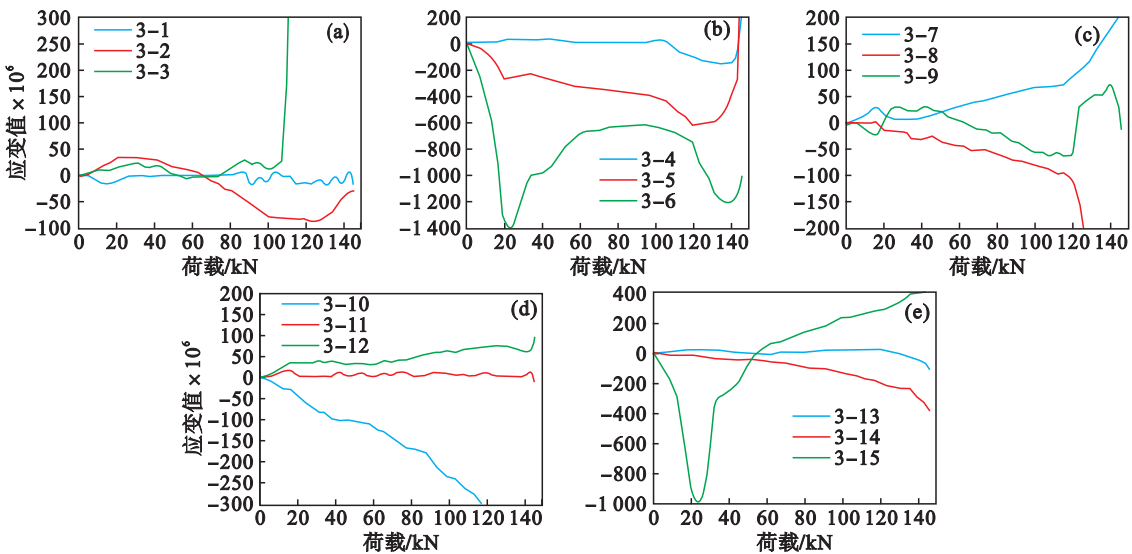


图 12 荷载 - 应变曲线
Fig. 12 Load-train curves
(a)—底板; (b)—拱脚; (c)—拱顶; (d)—拱肩; (e)—边墙.

断此时底板发生了断裂.由图 12b 可知拱脚处受到竖向压力,产生巨大的竖向变形.由图 12c 可知拱顶水平方向受拉,变形逐渐增大,荷载达到 120 kN 时拱顶变形急速增大.由图 12d 可知拱肩横向受拉,变形较小,竖向受压,变形很显著,拱肩容易发生受压破坏.由图 12e 可知边墙主要受到竖向压力,发生的变形最大,说明边墙存在空洞时边墙部位最容易发生破坏.

3.5 拱脚空洞模型试验

拱脚空洞模型破坏如图 13 所示.

模型破坏过程:首先模型拱顶位置出现裂纹,随后左侧空洞处的围岩产生裂纹并向左上方延伸,右侧空洞处的围岩产生裂纹并向右下方延伸.随着荷载的增大,裂纹迅速延伸,最终右侧边墙处的裂缝上下贯通导致模型破坏.边墙存在空洞时模型破坏的类型和破坏顺序如图 11 所示.

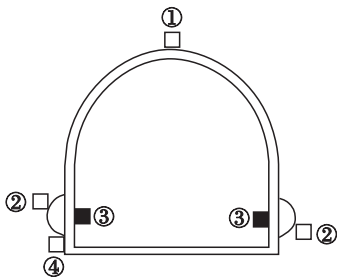


图 11 边墙空洞模型破坏模式
Fig. 11 The failure mode of the tunnel structure with a cavity at the side wall

各测点的荷载 - 应变曲线如图 12 所示.

由图 12a 可知底板主要受到水平拉力,变形较小,当荷载超过 110 kN,变形急速增大,可以判

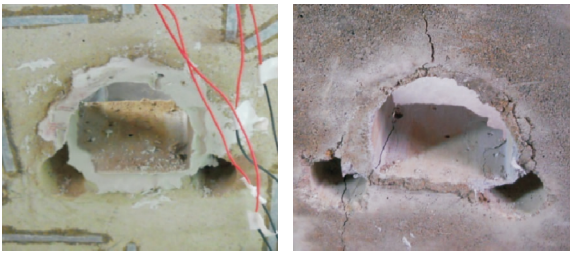


图 13 拱脚空洞模型破坏
Fig. 13 The failure mode of the tunnel model with a cavity at the arch foot

模型破坏过程:首先拱顶出现裂纹,之后右侧和左侧空洞处的围岩均产生向上方延伸的裂纹.荷载继续增大,左侧空洞处的围岩产生向下的裂纹,最终模型因上下裂缝贯穿而破坏.拱脚存在空洞时模型破坏类型和破坏顺序如图 14 所示.

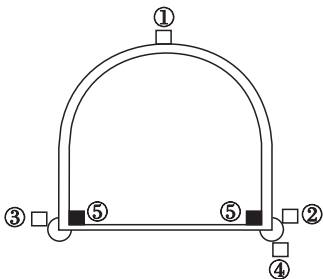


图 14 拱脚空洞模型破坏模式
Fig. 14 The failure mode of the tunnel structure with a cavity at the arch foot

各测点的荷载 - 应变曲线如图 15 所示. 由图 15a 可知底板横向受压,竖向受拉,变形较小. 由图 15b 可知拱脚横向受压,竖向受压,荷载达到 110 kN 时竖向变形迅速增大,此时拱脚发生破坏. 由图 15c 可知拱顶横向受拉,竖向受压,荷载达到 110 kN 时横向变形和竖向变形迅速增大,拱顶发生破坏. 由图 15d 可知拱肩处横向受压,应变较小;竖向受压,荷载达到 70 kN 时竖向变形迅速增大. 由图 15e 可知边墙主要受到竖向拉力影响,荷载为 80 kN 时变形最大.

3.6 底板空洞模型试验

底板空洞模型破坏如图 16 所示. 模型破坏过程:首先拱顶出现裂纹,随后模型底部空洞处产生裂纹并向下延伸,造成底部衬砌断裂,然后左侧拱肩处围岩产生裂纹并向上延伸,

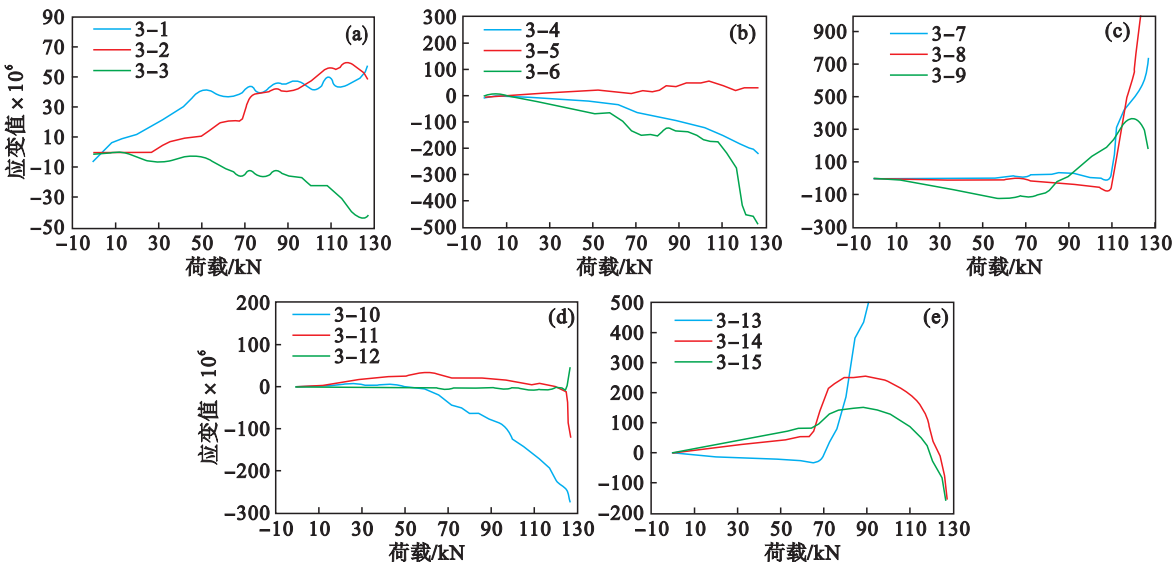


图 15 荷载 - 应变曲线
Fig. 15 Load-strain curves
(a) — 底板; (b) — 拱脚; (c) — 拱顶; (d) — 拱肩; (e) — 一边墙.



图 16 底板空洞模型破坏
Fig. 16 The failure mode of the tunnel model with a cavity at the floor

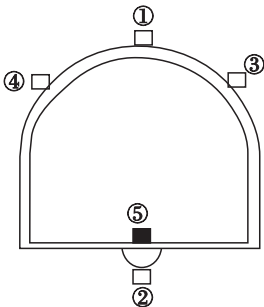


图 17 底板空洞模型破坏模式
Fig. 17 The failure mode of the tunnel structure with a cavity at the floor

该部位的衬砌受压破坏. 荷载持续增大,右侧拱肩处围岩产生裂纹并向下延伸,最后左右裂缝贯通模型破坏.拱底存在空洞时模型破坏类型和破坏顺序如图 17 所示.

各测点的荷载 - 应变曲线如图 18 所示. 由图 18a 可知底板主要受到竖向拉力影响,变形逐渐增大. 由图 18b 可知拱脚主要受到竖向

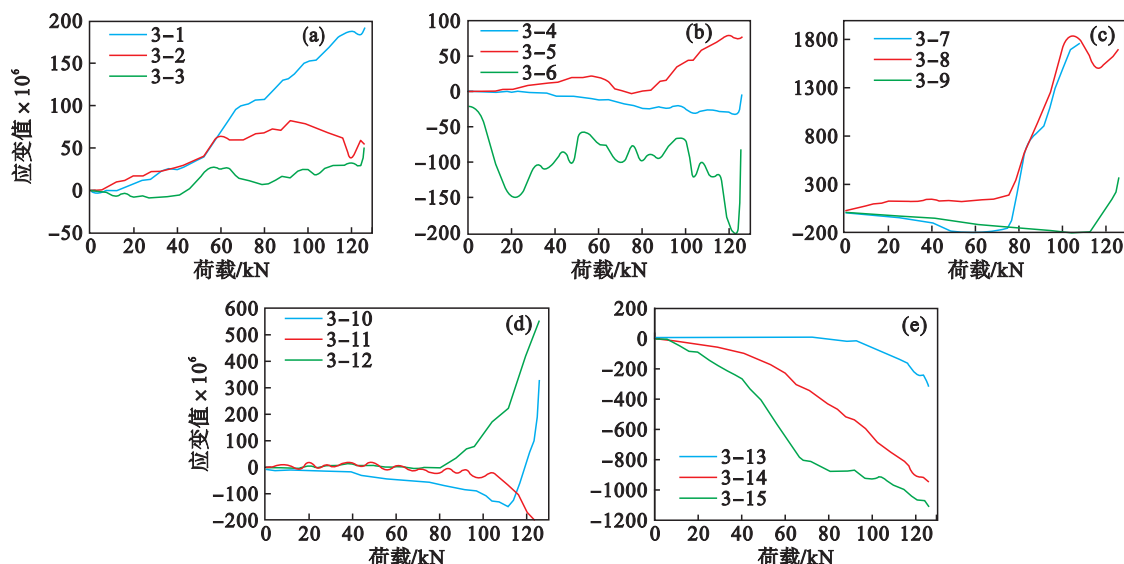


图 18 荷载 - 应变曲线
Fig. 18 Load-strain curves

(a) —底板; (b) —拱脚; (c) —拱顶; (d) —拱肩; (e) —边墙.

压力,荷载为 20 kN 时变形便达到最大值,说明拱脚处最先破坏.由图 18d 可知拱肩处变形较小,荷载达到 100 kN 时变形迅速增大,说明此时拱肩发生破坏.由图 18e 可知边墙主要受到竖向压力,变形逐渐增大.拱底存在空洞时模型拱顶和底板位置变形最显著,而拱脚处最先发生破坏.

综上所述,空洞在不同的位置,会因为衬砌没有背部支撑,围岩与衬砌之间的接触存在不均匀的情况,从而在围岩压力下产生应力集中,最后导致衬砌内部受压、外部受拉.

4 结 论

1) 空洞的存在会显著影响隧道的稳定性,使衬砌受力状况不佳,进而导致围岩越来越不稳定,最终衬砌开裂.空洞位置不同,模型的受力表现形式不同,发生破坏的部位不同.

2) 确定了模型试验的合理尺寸,选取了合理的试验材料,以河砂、石膏、水泥为材料来模拟石英岩.通过相似材料的配合比试验确定了本文试验的材料配比,为隧道相似模型试验提供依据.

3) 通过模型试验得出了存在不同位置空洞时隧道的破坏模式、破坏顺序等规律.无缺陷时,隧道破坏产生在拱顶、底板的开裂和拱肩的压溃.拱顶空洞隧道模型拱肩发生开裂、两侧的边墙受压而破坏、底板开裂;拱肩空洞隧道模型的空洞边界和拱脚受压破坏,底板开裂;边墙空洞模型的边墙衬砌出现压溃及拱顶开裂;拱脚空洞模型的拱脚衬砌受压破坏以及拱顶开裂;底部空洞模型的

底板衬砌和拱肩衬砌受压破坏、拱顶开裂.

参考文献:

- [1] 王述红,唐春安.大跨度浅埋隧道工程地质特征及自稳能力分析[J].东北大学学报(自然科学版),2005,26(11):1111-1114.
(Wang Shu-hong, Tang Chun-an. Analysis of engineering geological characteristics and self-stability of large-span shallow tunnels [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2005, 26(11): 1111-1114.)
- [2] Cai M, Kaiser P K. Assessment of excavation damaged zone using a micromechanics model [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2005, 20(4): 301-310.
- [3] Young R P, Collins D S. Seismic studies of rock fracture at the underground research laboratory [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(6): 787-799.
- [4] 刘宇.施工缺陷对隧道稳定性影响的模型试验研究[D].沈阳:东北大学,2011.
(Liu Yu. Model test study on the influence of construction defects on tunnel stability [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.)
- [5] Wang S H, Liu J X, Tang C A. Stability analysis of a large-span and low-deep tunnel [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(3): 870-875.
- [6] Wang S H, Ni P P, Guo M D. Spatial characterization of joint planes and stability analysis of tunnel blocks [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 38: 357-367.
- [7] 刘海京,夏才初,蔡永昌.存在衬砌背后空洞的隧道计算模型研究及应用[J].公路隧道,2007(4):41-45.
(Liu Hai-jing, Xia Cai-chu, Cai Yong-chang. Research and application of tunnel computing model with cavity behind lining [J]. *Highway Tunnel*, 2007(4): 41-45.)
- [8] Wang S H, Huang R Q, Ni P P, et al. Fracture behavior of intact rock using acoustic emission: experimental observation and realistic modeling [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2013, 36(6): 903-914
- [9] Wang S H, Liu J X, Tang C A, et al. Stability analysis of a large-span and deep tunnel [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(3): 870-875.