

新型逃生管道在公路隧道施工中的应用

徐 智

(北京城建道桥建设集团有限公司, 北京 100022)

摘要: 本文提出新型应急逃生通道研发的必要性和设计思路, 介绍对逃生管道结构设计中的冲击效应的分析方法、复合截面的比对分析方法, 包括截面受力分析、截面结构分析和数值模拟分析的方法。按照分析结果研制出新型管道, 并以此为例进行多项对比试验, 试验结果表明: 新型管道材性、耐腐蚀性均满足规范要求, 并满足无毒、无害、防火、自发光等性能并且具有比重轻、强度高、韧性好、塑性变形小、受冲击荷载回弹率高的优点。同时2m节段的钢管便于人工搬运, 无须借助其他辅助设备, 管道节段采用承插式连接, 拼接速度快、效率高。

关键词: 应急逃生通道; 冲击效应; 结构设计; 结构改进

中图分类号: U455.1 **文献标识码:** A

目前隧道施工逃生管道部分使用钢质、聚乙烯管道, 在管道架设时管道节段过长、过重, 运输不方便, 并且存在不便于操作、连接方式不灵活、抗冲击性能不足、塑性变形大、不能适用于恶劣复杂的施工环境等缺点, 结合逃生管道使用现状, 现对逃生管道进行重新设计。本文主要研究隧道发生塌方时, 岩块下落对圆管的影响。

1 逃生管道结构选择

依据国家高速公路网G5615、G8013高速公路云南省蒙自至文山至砚山段高速公路第2合同段两阶段施工图设计, 为保证隧道掌子面塌方后被困人员能够得到快速、有效的救援, 最大限度地降低事故损失, 在靠近掌子面处设置150m ($\phi 950\text{mm}$, 壁厚10mm) 长的钢管作为逃生管。为保证施工安全及现场施工可操作性, 结合美国应用人体测量学著名专家阿尔文·R.蒂利对人体测量学中全身进入式通行圆形洞口爬行的研究成果, 得出最小管径为0.585m。同时, 考虑公路隧道施工现场使用中, 逃生管道需要装卸搬运、拼装、移动, 为使上述操作能由2~4名工人在没有机械设备的辅助下完成, 拟定使用长度为3m、内径为0.6m、重量为90kg的新型玻璃钢管作为逃生管道。

2 新型管道材料性能特点

结合有限元分析结果对钢管和铝箔-玻璃纤维复合管道的比强度、比重、管道节段连接密封性、抗冲击性及管道弹塑性进行对比试验, 根据管道材料的各项指标得到新型管材和钢管性能差异如下: (1) 比强度高, 新型逃生管道密度为 $1.5\sim 1.7\text{g}/\text{cm}^3$, 抗拉强度为1000MPa, 比强度为0.65; 钢管密度为 $7.5\sim 8.0\text{g}/\text{cm}^3$, 抗拉强度为1010MPa, 比强度为0.13N/tex, 新型逃生管道的比强度是钢管的5倍。(2) 新型管道韧性

好, 塑性变形小, 受冲击荷载回弹率高。冲击试验在加工厂内进行, 300kg石头从4m高砸下, 管材变形不显著, 回弹率在95%以上。(3) 管道质量轻, 便于人工搬运, 无需其他施工设备。同样内径DN600逃生管道, 新型逃生管延米重量为30kg, 单根长3m, 重量90kg, 人工搬运即可完成拼装。而普通钢管每延米重122kg, 单根长12m, 重量为1464kg, 需要人工配合机械完成安装, 操作不便。(4) 采用承插式连接, 拼接方便, 无须焊接。用O形胶圈柔性连接, 密封性好, 有良好的抗不均匀沉降性能。(5) 价格较高, 新型逃生管道的价格为同尺寸普通钢管的1.46倍。

3 逃生管道结构设计中冲击效应分析

3.1 圆管冲击的理论分析

(1) 冲击力计算

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

式中, m 为岩石质量; g 为重力加速度; h 为下落高度; v 为岩块碰撞圆管时的瞬间速度。

$$P = P_e - 2\pi \int_0^{a_p} [p(r) - p_y] r dr \quad (2)$$

式中, P_e 为按照完全弹性碰撞所确定的名义接触压力; a_p 为塑性区半径; $p(r)$ 为接触压应力; p_y 为接触屈服压应力。

(2) 块石对结构的冲击力

$$P_{\text{emax}} = \frac{4}{3}ER^{\frac{1}{2}} \left[\frac{15m(v\cos\theta)^2}{16R^{\frac{1}{2}}E} \right]^{\frac{3}{5}} \quad (3)$$

式中, E 为等效弹性模量, $\frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$ (其中 E_1 、 ν_1 、 E_2 、 ν_2 为两个接触体的弹性模量和泊松比); R 为等效半径, $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ (其中 R_1 、 R_2 为两个接触体的半径); m 为等效质量, $\frac{1}{m} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}$ (其中 m_1 、 m_2 为两个接触体的质量); v 为块石的冲击速度; e 为冲击角度。

$$P = \frac{4}{3}ER^{\frac{1}{2}} \left[\frac{15m(v\cos\theta)^2}{16R^2E} \right]^{\frac{3}{5}} - P = P_e - 2\pi \int_0^{a_r} [p(r) - p_y] r dr \quad (4)$$

式中, a_p 、 p_y 、 $p(r)$ 可以通过理论分析确定, 从而可计算块石对结构物的冲击力。

3.2 隧道块石下落受冲击圆管的凹陷变形计算

钢管选用 $D = 820$ 的钢管, 厚度初步选为 10mm , 圆管参数取值为: 屈服强度 $\sigma = 215\text{GPa}$; 弹性模量 $E = 40\text{GPa}$; 泊松比 $\nu = 0.25$; 直径 $D = 0.82\text{m}$ 。

岩石为花岗岩, 岩块直径为 0.5m 。岩体参数取值为: 弹性模量 $E_{\text{石}} = 40\text{GPa}$; 泊松比 $\nu_{\text{石}} = 0.2$; 重度 $\gamma_{\text{石}} = 2500\text{kg/m}^3$; 岩块直径 $D_{\text{石}} = 0.5\text{m}$; 岩块质量 $W_{\text{石}} = 160\text{kg}$ 。

取隧道中心及边顶部到圆管顶部高度分别为 7m 和 5m , 取不同圆管壁厚进行计算, 不同壁厚尺寸的圆管冲击变形值的计算结果如表 1 所示。

表 1 不同壁厚尺寸的圆管冲击变形值

壁厚 H/mm	凹陷变形值 A_0/m	
	$h = 7\text{m}$ 时	$h = 5\text{m}$ 时
6	0.429	0.369
8	0.305	0.250
10	0.221	0.175
12	0.159	0.117

4 复合截面比对分析

4.1 截面受力分析

管道受到上部冲击荷载作用, 管道微元体主要受到弯曲应力的影响。由材料力学可知, 管壁上下缘承受主要的弯曲应力, 管壁中层承受较小的应力, 故设计的新型逃生管道管壁采取中空的结构形式, 可实现轻质、高强^[1]。

4.2 截面结构分析

根据管道受到冲击破坏的受力特征, 对管道中空部分进行了结构设计, 中空部分材料为轻质蜂窝铝箔金属结构, 如图 1、图 2 所示。

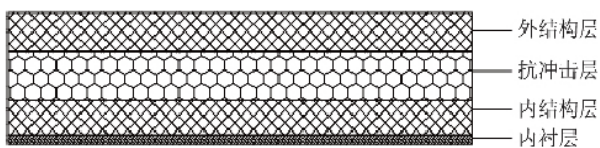


图 1 管壁构造图

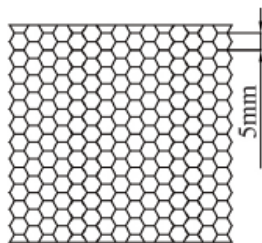


图 2 中间金属层细部图

4.3 数值模拟分析

有限元模型分别取落石直径为 0.5m 、 0.75m

和 1.0m ; 逃生管内径为 0.6m , 壁厚分别为 13mm 、 20mm , 长度为 8m 。落石采用实体单元模拟, 按弹性材料考虑, 弹性模量 $E = 40\text{GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.2$, 重度 $\gamma = 25\text{kN/m}^3$ 。

5 管道结构设计

3.1 初步设计

参考阿尔文·R.蒂利的研究成果, 针对我国隧道施工人员身体情况和隧道坍塌规律研究结果, 适合人员爬行的管道管径内径应 $\geq 60\text{cm}$, 为便于拼装和搬运, 两个工人能轻松搬运的重物应控制在 100kg 左右, 初拟定隧道逃生管道尺寸: 长 3m , 内径 60cm , 外径 64cm , 壁厚 2cm 。

5.2 管道材料性能试验

通过表 2 对比分析, 新型管材和钢管性能差异主要体现在四个方面: 一是密度小、比强度高; 二是韧性好, 塑性变形小, 受冲击荷载回弹率高; 三是管道质量轻, 便于人工搬运, 无须其他施工设备; 四是承插式连接, 拼接方便, 无须焊接。

表 2 复合型管道与钢管性能参数比对

对比项目	玻璃钢复合管 $\text{DN}600 \times 18$	钢 $\text{DN}600 \times 8$
环刚度	$\geq 25\text{kN/m}^2$	$\geq 25\text{kN/m}^2$
比强度	高, 抗拉强度 1000Mpa , 密度 $1.5 \sim 17$, 比强度 0.65N/tex	低, 比强度 0.13N/tex
管材轻	50kg , 施工方便	米重 122kg/m , 施工复杂
管材连接密封性	采用 O 行密封圈, 密封性好, 接头强度是本体强度 2 倍	易渗漏, 连接不方便
管材韧性	韧性好, 回弹率高	差, 不回弹
价格	复合型管道造价是同尺寸钢管的 1.46 倍	

6 结构改进试验

逃生管道还没有满足轻量化设计要求, 且管道连接部位受到冲击无法拆卸。现对管道结构尺寸进行重新调整。

管道连接部位采用承插式, 连接较为牢固, 为了防止施工碰撞扰动, 在连接口处增设了连接开关, 关闭开关即可锁定管道连接。在每节管道端部都设置反光条, 以便在黑暗中便于管道定位及拆卸^[2-3]。

6.1 试件描述

新改进的逃生管道尺寸为: 长为 3m , 内径为 60cm , 外径为 62.6cm , 壁厚为 1.3cm , 质量为 92.5kg 。较初步设计管道相比, 管道内径仍为 60cm , 外径由原来的 64cm 降至 62.6cm , 壁厚由原来的 2cm 调整为 1.3cm 。

对新加工的逃生管道进行称量, 结果表明新加工逃生管道单节质量为 92.5kg , 质量由之前 120kg 减小至 92.5kg , 质量减轻了 22.9% , 已满足轻量化设计要求。在管道安装和搬运过程中完全可以由人工进行搬运和安装, 不需要借助任何机械装置进行搬运, 体现出新型管道轻型便捷的特点。

6.2 试验内容

6.2.1 静力加载试验

课题组对逃生管道进行了静力加载试验，在加载试验机上进行持荷加载一定时间，在试验过程中，分别测试管材各个阶段的变形，以及卸载后的残余变形，通过试验数据分析管道在荷载作用下抵抗变形的能力。试验表明，逃生管道在荷载43.226kN持续作用10min下，最大变形量为100mm。环刚度和抵抗变形能力已满足设计要求。

6.2.2 落石单点冲击试验

石块动力冲击试验显示，新型逃生管道能抵御石块的冲击，满足逃生管道强度和刚度的设计要求。在石块冲击后，管道回弹性比较好，残余变形不大。虽然管道局部有表皮纤维组织脱落现象，但不影响逃生人员的通过，完全满足人员逃生的需要^[4]。

6.2.3 均布荷载冲击试验

试验通过不同的车辆荷载碾压模拟均布受力，观察管道的变形及破坏情况。试验现场开挖长300cm、深30cm地沟，放置管道节段，管道一半在地沟中，一半露出地面，车辆荷载从顶部碾压，过程中观察管壁破坏情况及测试管道变形情况。

(1) 3.5T叉车碾压试验

管道安置在地沟内，叉车匀速从管道上驶过。由试验过程可以明显地看出，在叉车碾压时，管道受挤压部位有明显变形，由于叉车配重在后部，因此后轴碾压变形较前轴更为显著。

由试验结果来看，管道具备重复利用的条件，能够为施工人员紧急逃生提供较为有效的通道。

(2) 18T日立挖机EX210碾压试验

从损伤程度来看，挖机荷载作用时，管道大部分区域受到冲击力影响，管道壁发生变形较大，挖机荷载全部作用在管道上时，管径整体变形12cm。

由试验结果来看，管道在极限荷载冲击下能够为施工人员紧急逃生提供避险通道，但刚度损失较大，已经报废，不可重复利用。

7 管道受冲击边界条件研究

7.1 受冲击力学管道模型边界条件工况分析

采用大型有限元计算程序模拟落石冲击逃生管的接触过程，落石直径取0.5m，逃生管内径为0.6m，壁厚为1.3mm，长度为3m。落石采用实体单元模拟，按弹性材料考虑，弹性模量 $E = 40\text{GPa}$ ，泊松比 $\nu = 0.2$ ，重度 $\gamma = 25\text{kN/m}^3$ 。逃生管采用壳单元模拟，采用双线性各向同性硬化模型，弹性模量 $E = 206\text{GPa}$ ，泊松比 $\nu = 0.27$ ，屈服强度 $\sigma_s = 235\text{MPa}$ ，切线模量 $G = 10\text{GPa}$ ，重度 $\gamma = 78.5\text{kN/m}^3$ 。固定钢筋采用梁单元模拟。沙袋垫层采用橡胶非线性弹性模型，重度 $\gamma = 17\text{kN/m}^3$ ，剪切模量 $G = 16.26\text{MPa}$ 。落石与逃生管之间、逃生管与沙袋之间均采用自动接触。初始条件为球形落石在圆管顶部1m

处以初速度12.65m/s下落。

7.2 结果对比分析

(1) 管体受冲击断面变形及整体稳定性分析管体冲击点位移随时间变化曲线和管体整体稳定性评价见表3。

表3 管体冲击点位移变化规律和管体整体稳定性评价

模型特征描述	位移振动幅度	位移收敛速度	收敛位移/mm	管体整体稳定性
底部竖向约束	大	快	-46	好
底部竖向约束+固定钢筋	小	快	-52.1	好
底部竖向约束+水平约束	小	快	-49.6	好
岩石基面无垫层	大	慢	14.8	差
岩石基面无垫层+固定钢筋	小	快	-45.9	好
岩石基面设垫层	大	慢	16.7	差
岩石基面设垫层+固定钢筋	小	快	-46.3	好

(2) 分析结论。

①此类模型管体位移条件受限较多，与工程实际存在一定的偏差，管体受力和变形结果偏大，以此作为设计依据是偏于安全的。

②在确保受冲击后管节之间不脱节、管体位置相对稳定的前提下，适当增加管体自由度，对提高管体抗冲击性能将起到事半功倍的效果。

③垫层可在一定程度上缓解冲击力，在凹凸不平的基面上为逃生管提供相对平整的底部接触边界，使其与基面的接触更加均匀，避免应力集中。同时，垫层可有效延长冲击接触时间，降低落石冲击力，减小管体变形。

8 结束语

(1) 新型管道材料性质、耐腐蚀性均满足规范要求，并满足无毒、无害、防火、自发光等性能。

(2) 新型管道环刚度 $\geq 25\text{kN/m}^2$ ，具有如下特点：密度小、比强度高；韧性好，塑性变形小，受冲击荷载回弹率高（回弹率高达95%~98%）；2m节段的钢管便于人工搬运，无须借助其他辅助设备；管道节段采用承插式连接，拼接方式高效等。

参考文献

- [1] 张瑜, 丁庆荣, 狄先均, 等. 隧道逃生管道的冲击试验与仿真模拟[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2018(2): 87-89, 94.
- [2] 杨飏, 庄富盛. 新型隧道逃生管道设计模拟及现场试验研究[J]. 公路交通技术, 2013(2): 111-114.
- [3] 张臻. 公路隧道逃生方案研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [4] 李昌洪. 新型逃生管道在公路隧道施工中的应用[J]. 交通世界(下旬刊), 2021(5): 19-20.