

落石冲击下**拱形明洞**

结构概率**可靠度分析**

LUOSHI CHONGJI XIA GONGXING MINGDONG
JIEGOU GAILU KEKAODU FENXI

王玉锁  著

四川省科技计划项目（2013GZ0047）资助

落石冲击下拱形明洞
结构概率可靠度分析

常州大学图书馆
藏书章

王玉锁 著



西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

落石冲击下拱形明洞结构概率可靠度分析 / 王玉锁
著. —成都: 西南交通大学出版社, 2017.8

ISBN 978-7-5643-5732-0

I. ①落… II. ①王… III. ①落石-冲击力-研究②
明洞-结构可靠性-分析-研究 IV. ①U216.41
②U453.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 221100 号

落石冲击下拱形明洞结构概率可靠度分析

王玉锁 著

责任编辑	柳堰龙
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	成都中铁二局永经堂印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	12.25
字 数	306 千
版 次	2017 年 8 月第 1 版
印 次	2017 年 8 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-5732-0
定 价	68.00 元


图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562



作者简介

王玉锁，男，1974年生，山西怀仁人。西南交通大学隧道及地下工程专业副教授。本科、硕士、博士均毕业于西南交通大学，中铁第一勘察设计院博士后，澳大利亚西澳大学访问学者。研究方向：地下工程围岩与支护结构相互作用机理、隧道掘进机（TBM）技术、岩石及混凝土断裂力学、危岩落石防治机理。

◎ 责任编辑 / 柳堰龙

◎ 封面设计 / JADE HE 

文軌車書
交通天下

<http://www.xnjdcbs.com>

试读结束。需要全本请在线购

www.derrongbook.com

前 言

危岩落石是常见的地质灾害之一，常见于铁路、公路高陡边坡之上，会危及交通运营安全。通常采用柔性的主动、被动防护网，以及棚洞、防石墙等被动刚性防护结构。由于我国高速铁路、公路的快速发展，需要修建大量隧道工程，限于线路走向及场地条件，很多隧道洞口段处于高陡边仰坡地段，为保证运营安全和出于环境保护需求，通常需要接长明洞来防治落石灾害，有时明洞也作为缓冲结构以消除空气动力学效应，此时，一般为突出式明洞门，上部无回填缓冲层。

我国铁路隧道明洞结构的设计引入了概率极限状态法，采用分项系数的形式进行结构可靠度设计，但没有考虑落石冲击荷载，只是提出落石冲击力作为偶然荷载。由于缺乏落石冲击力或冲击荷载的合适表达式及概率统计特征，也没有明确的落石冲击下明洞结构极限状态方程，因此无法进行落石冲击下明洞结构的概率可靠度设计。

本专著就是针对以上问题，对落石冲击下隧道明洞结构可靠性设计方法进行研究和阐述，鉴于隧道洞口段通常采用拱形明洞结构形式，本专著研究对象主要是拱形明洞结构。主要内容包括三大部分：

（1）落石冲击荷载对明洞结构的作用机理研究。

通过室内模型试验、数值模拟等方法，对落石冲击下路堑对称型及单压式拱形明洞的应力、应变、位移、应变率、基底反力等荷载效应进行了详细分析，提出结构优化设计的建议。

（2）落石冲击荷载研究。

利用离散元方法，开展了落石冲击荷载的研究，得出了平板结构落石冲击荷载的多元回归表达式，该表达式是包含了回填土厚度、落石高度等变量，是冲击过程中结构实际受到的最大冲击荷载，此荷载与通常所指的落石冲击力（指落石与缓冲层间的相互作用）是完全不同的概念，这也是本专著想重点阐明的。

（3）落石冲击下明洞结构可靠性分析及设计方法研究。

根据现场实际、室内模型试验及理论分析，开展了落石冲击下拱形明洞破坏特征及失效模式、极限承载力、落石冲击荷载及极限状态表达式等的研究，将钢筋混凝土结构各材料参数、落石冲击荷载影响因素等作为基本随机变量，利用一次二阶矩方法求出拱形明洞结构可靠指标，根据规范给出的目标可靠指标，进行了结构可靠度设计及优化。

本专著受四川省科技计划项目（2013GZ0047）资助，主要完成人员包括：唐建辉、杨超、曾宏飞、李俊杰、冯高飞、李正辉、吴浩、李亚秋、王涛、何俊男、周良、徐铭、王琦、王志龙、王岩等。在本项目的研究过程中，得到了西南交通大学峨眉校区原校长蔺安林教授的大力支持和关心，博士后期间的西南交通大学王明年教授、中铁第一勘察设计院李国良大师、杨国柱教高三位导师的指导和帮助，在此表示诚挚的感谢！

由于时间仓促，加之水平有限，本专著错误疏漏之处在所难免，望广大同行和专家批评指正。

作者

2017年7月19日

于峨眉校区西山梁实验大楼310室

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 课题研究内容及技术路线	4
第 2 章 防落石明洞落石冲击荷载的作用机理研究	5
2.1 落石冲击对无回填土的拱形明洞结构的作用机理模型试验研究	5
2.2 落石冲击路堑式拱形明洞冲击荷载及荷载效应数值模拟分析	19
2.3 落石冲击下单压式拱形明洞力学响应数值模拟研究	68
2.4 落石冲击下拱形明洞结构荷载分布研究	82
2.5 拱形明洞受落石冲击的模型简化	91
2.6 冲击作用下钢筋混凝土板极限承载力的确定	92
2.7 本章小结	95
第 3 章 防落石明洞落石冲击荷载计算模型研究	98
3.1 现有落石冲击力的计算方法	98
3.2 颗粒流模型的建立及工况组合	102
3.3 落石冲击荷载结果分析	104
3.4 落石冲击荷载回归分析	115
3.5 落石冲击力模拟分析	131
3.6 本章小结	159
第 4 章 落石冲击下拱形明洞结构概率可靠性分析	160
4.1 结构概率可靠性分析的原理	160
4.2 极限状态方程的建立	165
4.3 结构可靠指标的计算	166
4.4 本章小结	172
第 5 章 落石冲击下拱形明洞结构可靠性设计及优化	173
5.1 落石冲击下无回填土拱形明洞结构失效模式及极限承载力	174
5.2 落石冲击荷载	176
5.3 拱形明洞结构可靠度计算	178

5.4	无回填土拱形明洞结构可靠度设计	179
5.5	算例	179
5.6	本章小结	181
第 6 章	结论与展望	183
6.1	主要结论	183
6.2	问题及展望	184
参考文献	185

第1章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

为推动经济增长,带动产业转移,高速铁路工程在我国得到了空前的发展,随着铁路线路进一步向西部艰险山区的延伸,高速铁路隧道工程的修建难度和建设规模也越来越大^[1-3]。而由于隧道洞口通常位于地质条件恶劣、岩体松散破碎地段,加之施工切坡、爆破及暴雨、地震等自然灾害的影响,隧道洞口段成为最易遭受落石侵袭的地段,导致隧道洞口落石灾害也日渐突显^[4,5]。

据西安铁路局 1981 年统计,宝鸡至天水、宝鸡至上西坝线路总长 494 km,一年中发生崩塌落石 422 处,总延长 57.602 km,这给铁路运营养护造成了极大的困难。特别是宝成铁路略阳至上西坝段,线路长 127 km,当年暴雨期间出现较大病害工点 86 处,其中发生较大崩塌落石灾害工点 27 处,占比达 31.4%,后接长明洞 12 处,改建隧道 4 处^[5]。

在成昆铁路北段,落石灾害也同样突出,据统计,在 1971 年至 1983 年间,仅乌斯河工务段 171 km 路段就发生落石灾害 420 次,多次砸损隧道洞口、桥梁和道岔等结构,其中有 8 次直接击中列车。在典型的隧-桥-隧路段,为避免落石对两侧隧道口中央桥梁的冲击,被迫在桥上加建了明洞^[5]。

位于宝成铁路的 109 隧道,始建于 1954 年,原为两座隧道,后由于两侧高陡边坡落石灾害对行车安全的影响,曾先后 4 次接长明洞共计 200.82 m,将原来相邻的两座隧道连接为一座。尽管如此,在“5·12”汶川特大地震中,该隧道受山体崩塌和落石冲击的影响,隧道洞口端损坏仍十分严重^[7]。

近些年,崩塌落石对公路所造成的威胁逐渐增多。如 2011 年 9 月 13 日凌晨,由于连日降雨作用,西汉高速公路上行线户县段 1145 千米犄角岭隧道口大量山石突然滚落,巨型落石严重击毁路面,堵塞了隧道口,巨大的冲击力作用,导致桥体一侧的钢筋混凝土护栏被砸断。落石对隧道口及桥梁的影响如图 1-1 和图 1-2 所示^[8]。

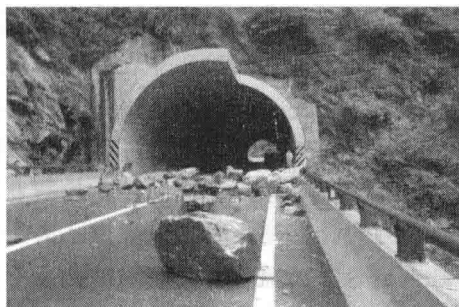


图 1-1 犄角岭隧道口滚落的巨石



图 1-2 被巨石砸断的桥梁护栏

由此看来,落石灾害对线路的建设及安全运营危害巨大,它不仅破坏线路,阻断行车,更容易直接造成行车事故和人身伤亡,给人身财产安全带来重大损失,除此之外,在后期灾害整治过程中也需要投入大量的人力、财力和物力^[9]。

我国幅员辽阔,属于多山的国家,尤其在西南和西北地区山地较多,落石分布较为广泛,灾害频发,隧道洞口段更是崩塌落石的多发地带,这给铁路建设及安全运营带来了巨大挑战。因此,开展关于隧道洞口段落石冲击灾害的研究是非常必要的。

目前,针对隧道洞口段危岩落石采取的措施主要是主动防护和被动防护两种,考虑到落石灾害的随机性和不可预见性,对落石运动路径和坍落时机往往无法做出准确预测^[10]。因此,在现行的规范标准中,建议在落石多发区采用明洞结构等被动防护措施^[11,12],其中,拱形明洞由于结构受力更加合理,抗冲击性能更强,且与暗洞过渡自然等优点^[10],在落石较多且基底地质条件较好时,多推荐采用拱形明洞^[12]。本次研究对象只针对拱形明洞,并不涉及平顶的棚洞。

在当前铁路工程设计中,虽然考虑了拱形明洞受落石冲击的影响,但由于缺乏定量分析的可靠方法和手段,关于明洞回填土及落石冲击力的设计计算仍长期处于半经验半理论水平^[13]。与此同时,用概率方法来描述工程结构的可靠性既科学合理,又能得出定量指标,在充分掌握各设计参数随机变异性的基础上,所得结果更加接近结构的实际工作状态^[14]。

因此,将落石冲击和拱形明洞结构可靠性设计进行有机结合,开展对落石冲击下拱形明洞结构概率可靠性的系统研究是非常必要的,同时也具有巨大的工程经济价值。

1.2 国内外研究现状

从目前国内外的研究现状来看,关于落石冲击对明洞结构可靠性的研究未见有翔实报道,但针对落石冲击荷载和明洞结构可靠度理论各自的研究已取得了丰硕的成果,因此,根据课题研究需要,本书从落石冲击荷载和明洞结构可靠性研究两方面的国内外研究现状进行分析。

1.2.1 落石冲击荷载研究现状

在《铁路工程设计技术手册——隧道(修订版)》中将落石冲击力作为明洞的附加荷载来考虑^[13],其计算原理是依托冲量定理,但涉及落石冲击速度和冲击持续时间的计算仍通过经验计算方法来确定,我国现行的《公路隧道设计规范》(JTG/T D70—2010)也是采用该方法来计算落石冲击力^[12]。

在落石冲击力的研究方面,日本道路公团(Japan Road Association)根据 Hertz 弹性接触理论得出了落石冲击砂垫层的冲击力计算公式^[15]。Yoshida Hiroshi(1988)通过现场试验探究了落石冲击加速度和冲击分布压力与落石重量、形状及下落高度的关系^[16]。在此基础上,瑞士学者 Vincent Labiouse(1996)又通过室内试验对冲击力的计算公式进行了修正,认为落石冲击力还与接触回填土部分的落石半径有关^[17]。Kawahara S(2006)通过模型试验进一步分析了回填土干密度和厚度对冲击力的影响^[18]。在国内,西南交通大学的杨其新、关宝树(1996)也提出了基于模型试验的冲击力回归计算公式^[19]。

上述研究主要是针对垂直下落条件下落石冲击力的计算方法的研究,而在实际工程设计中,更应该重视冲击荷载对下部结构物的影响。曾廉(1974)提出了应力扩散平均分布假设,认为作用在明洞顶部的冲击力应按照垂直均布静力荷载考虑^[20]。与此类似,《公路路基设计规范》(JTJ013—95)中也注明了落石冲击力是以35°的扩散角作用在构造物的表面,且冲击力与碰撞石块的陷入深度有关^[21]。王玉锁、唐建辉等人(2012)通过1:30室内模型试验,对不同落石形状、重量、下落高度、坡度及坡面粗糙度条件下有、无回填土的隧道拱形明洞进行冲击,通过系统分析结构应变、位移及加速度,得出了落石冲击对隧道明洞结构的影响规律^[22-25]。何思明(2011)通过假设回填土材料为理想弹塑性材料,推导了落石冲击压力的计算公式,也进一步验证了回填土材料的缓冲性能^[26]。此外,也有不少研究者采用动力有限元方法,模拟了特定条件下落石对防护结构的动力力学响应,也取得了不少成果^[27,28]。

最近,王玉锁等人(2016)通过采用三维离散元颗粒流(PFC^{3D})方法,研究了回填土底部冲击荷载随落石高度、重量及回填土厚度的变化规律,并对回填土合理厚度进行了探讨,认为离散元颗粒流数值模拟方法能更加全面考虑落石冲击影响因素,所得结果合理可靠^[29]。

1.2.2 明洞结构可靠性研究现状

目前,结构设计方法正逐渐从定值计算转变为概率描述,采用概率极限状态法将成为工程结构设计的必然趋势^[30],尤其在隧道及地下工程设计方面,受参数不确定性的影响,用概率方法来描述结构的可靠性已得到广泛认同。

日本学者松尾稔(1984)针对地下小直径埋管提出了以概率论为基础的设计及计算方法,介绍了基于动态可靠度设计的相关应用^[31]。Shigeyuki Kohno(1989)对隧道支护结构进行了可靠度分析,提出了隧道结构支护体系可靠度的概念和分析方法^[32]。我国在20世纪90年代初,由铁道部建设司组织多所高校和设计院开展了关于隧道结构可靠度分析的基础研究^[33],取得的多项成果后被《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2001)所采用^[14]。张弥(1993)通过对多座明洞资料的调研,得出了部分明洞荷载的统计特征,并首次在隧道明洞可靠性设计中引入了有限元响应面方法^[34]。张清(1994)根据当时的铁路隧道规范,提出了运用一次二阶矩方法来计算隧道衬砌结构的可靠度^[35]。杨成永(1999)通过离心机模拟试验评价了明洞填土压力的计算模式不定性,计算了土压力荷载作用下结构内力的概率统计特征值,得出了由分项系数控制的可靠度设计表达式^[36]。宋玉香(1999)通过建立“荷载-结构”模型对单线铁路隧道进行可靠度分析,给出了目标可靠指标的建议值^[37]。2002年,景诗庭通过编著《隧道结构可靠度》一书,系统地阐述了可靠度理论及方法在隧道工程中的应用^[14]。

从目前的研究现状来看,关于隧道明洞结构可靠性的研究主要集中在解决力学参数和结构荷载效应的概率统计特征等方面,基本是通过现场调研、模型试验或数值模拟等手段,结合Monte-Carlo法或响应面法(Response Surface Methodology, RSM)等方法进行处理。但在明洞荷载效应的研究中,关于落石冲击荷载的分析提及甚少,这主要是由于落石冲击灾害的随机性和不确定性,导致其统计资料难以获取。而基于回归分析的响应面法则是通过合理的试验设计建立目标与变量之间的函数关系^[38],该方法相比Monte-Carlo法并不需要做大量抽样试验,可明显提高分析效率。因此,在本书中将目标设为落石冲击荷载,变量设为影响落石冲击荷载的客观因素,如落石高度、重量及回填土厚度等,采用回归分析的方法进行研究。

1.3 课题研究内容及技术路线

针对目前落石冲击荷载和明洞结构可靠性的研究现状,以客运专线拱形明洞为研究对象,在深入学习颗粒流离散元软件 PFC^{3D} 和可靠度理论的基础上,主要从以下三个方面对落石冲击下拱形明洞结构的概率可靠性进行研究:

(1) 通过对实际落石灾害的调查,结合室内模型试验结果,对落石冲击下拱形明洞结构的破坏形态做出判定,并通过建立颗粒流离散元模型验证其合理性。以客运专线双线隧道拱形明洞为参考结构,在充分考虑其工程用途和结构受力特征的基础上,结合钢筋混凝土结构的相关研究成果,得出拱形明洞结构在落石冲击下的极限承载力 R 。

(2) 在实际落石灾害中,影响落石冲击荷载的因素有很多,如落石的高度、重量和回填土的厚度等,基于这三点影响因素,本书通过设置合理的落石工况组合,运用颗粒流离散元软件 PFC^{3D} 进行模拟,开展对拱形明洞结构受落石冲击荷载大小及分布特征的研究,并运用回归分析的方法建立落石冲击荷载 S 与各影响因素的函数关系。

(3) 根据已经得出的明洞结构极限承载力 R 和落石冲击荷载 S 的表达式,建立极限状态方程 $R-S=0$,在充分考虑各随机变量分布类型和概率统计特征的基础上,运用当量正态化法(JC法)计算拱形明洞结构的结构可靠指标 β ,并对结构的可靠性进行分析,为防落石客运专线铁路隧道拱形明洞的设计提供依据。

本书的技术路线如图 1-3 所示。

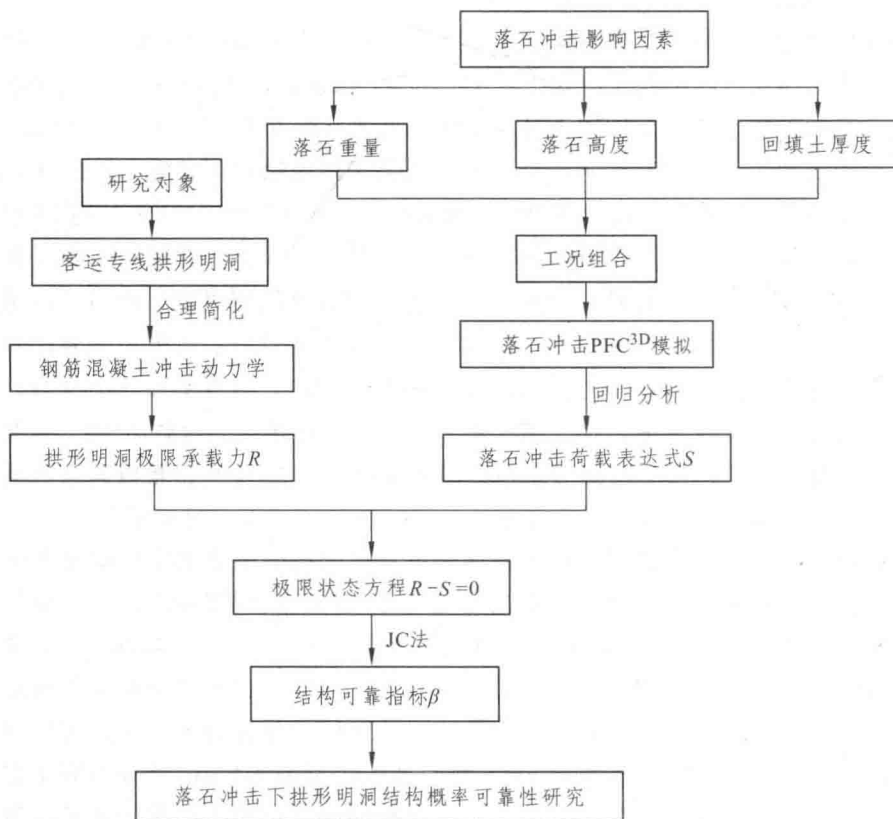


图 1-3 技术线路图

第 2 章 防落石明洞落石冲击荷载的作用机理研究

在第 1 章中已说明, 本研究主要针对拱形明洞结构。

关于结构可靠性的评判从本质上讲就是对结构极限承载力和外部荷载效应的比较, 因此, 能否准确获取落石冲击下拱形明洞结构的极限承载力对于可靠性的研究非常重要。而落石冲击下拱形明洞结构的力学响应, 与结构特征、落石条件及回填土厚度等众多因素有关, 受力机理十分复杂, 这也是目前对落石冲击下拱形明洞受力机理研究较少或进展较小的主要原因。

本书通过对过往落石灾害的调查研究, 结合室内模型试验和数值模拟对落石冲击拱形明洞的作用机理进行了研究。为了更准确地了解落石冲击荷载在拱形明洞结构表面的分布形态, 依托离散元颗粒流 (PFC^{3D}) 软件, 对落石冲击拱形明洞试验进行了模拟, 并对拱形明洞结构受落石冲击的模型进行了简化。结合目前钢筋混凝土的相关研究成果, 给出落石冲击下拱形明洞极限承载力的计算方法。

2.1 落石冲击对无回填土的拱形明洞结构的作用机理模型试验研究

在落石冲击作用下, 隧道明洞顶面最先受到撞击, 同时被影响或受损程度也通常最高, 如图 2-1 为汶川地震中被落石击穿的明洞结构, 明洞结构除顶部局部受损严重外, 其余部位仍较为完整。

在模型试验中也表现出类似的破坏特征, 通过室内试验模拟落石冲击拱形明洞的破坏机理。试验选用石膏和砂的混合料模拟拱形明洞衬砌混凝土, 铁丝网模拟内部钢筋, 通过调整石膏、砂和水的配合比以满足其强度和弹性模量。试验过程中, 先用体积较小的落石试块反复冲击坡脚部位, 后来在远离坡脚位置处采用大尺寸落石试块进行破坏性试验, 发现即使两处破坏位置很近, 大型落石试块冲击破坏范围也未与先前破坏范围相连, 从具体的破坏形态看, 除顶部受冲击部位以外, 拱肩以下部位 (如拱腰和仰拱) 则完好无损, 说明在落石冲击作用下拱形明洞模型表现为局部破坏。



图 2-1 汶川地震中被落石击穿的隧道拱形明洞^[39]

综上所述，落石冲击下拱形明洞以拱顶落石冲击部位一定范围内的局部破坏为主，所以可认为拱顶局部破坏为明洞结构的主要失效破坏形态。

而为进一步研究落石对隧道明洞结构的冲击破坏机理，通过采用室内模型试验的方法，对不同坡度、不同高度、不同质量及不同形状的落石对隧道洞口段结构的冲击效应影响规律进行全面分析。

2.1.1 室内模型试验方案

以高速铁路隧道（设计时速 350 km）采用的喇叭口倒切式洞门为对象（图 2-2），采用几何相似比为 1 : 30 的相似模型试验分别对落石冲击下明洞结构的应变、加速度和位移进行研究。

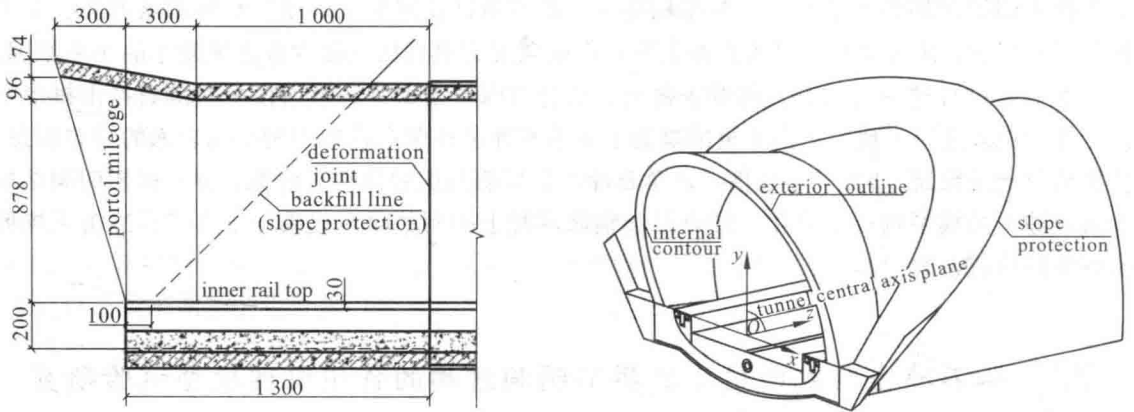


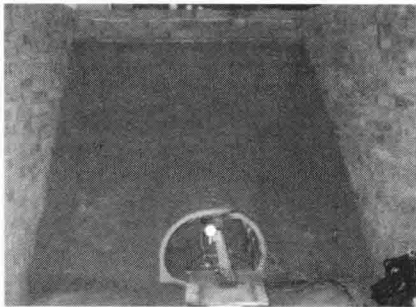
图 2-2 喇叭口隧道洞门图

1. 试验装置

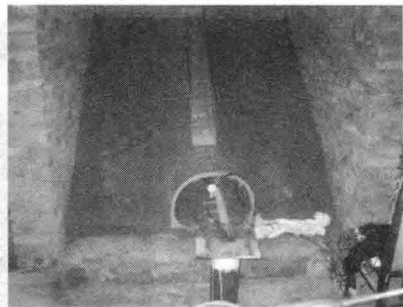
根据高铁隧道喇叭口隧道洞门结构尺寸，考虑落石运动轨迹及冲击效应影响，沿隧道横断面和纵断面方向各取一定长度，由此可得试验原型土体范围：横向×纵向×竖向=50 m×50 m×50 m，由几何相似比可得相应室内模型试验土体范围为：横向×纵向×竖向=1.5 m×1.5 m×1.5 m。

整个试验在专门制作的试验台内进行。试验台架尺寸为：横向×纵向×竖向=1.7 m×1.7 m×1.7 m。

坡面采用有槽和无槽两种，有槽采用铁皮制作，无槽指落石直接在土坡面上滚落。坡度通过对仰坡土体进行切削或加填来改变，试验装置见图 2-3。



(a) 无槽



(b) 有槽

图 2-3 落石试验装置

2. 相似材料

本次边坡岩体采用黏土材料，隧道钢筋混凝土衬砌采用石膏与 $\phi 1\text{ mm}$ 、 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 钢丝网模拟。落石采用不同质量、不同形状（球体、立方体及长方体）的石膏和水泥材料。

隧道洞门结构相似材料的力学性质见表 2-1。

表 2-1 隧道洞门结构相似材料力学性质

石膏比	抗压强度/MPa	容重/(kN/m^3)	泊松比	弹性模量/MPa
1:1	1.07	8.263 760 44	0.35	358.77

3. 应变测试测点布置

沿隧道纵向布置四个断面，距洞口距离分别为：10 cm、23.5 cm、35 cm 和 48 cm，分别对应称为第 1 断面、第 2 断面、第 3 断面及第 4 断面；每个断面分别在拱顶、拱肩和仰拱中心布置三个测点。

结构断面应变测点布置如图 2-4 所示。

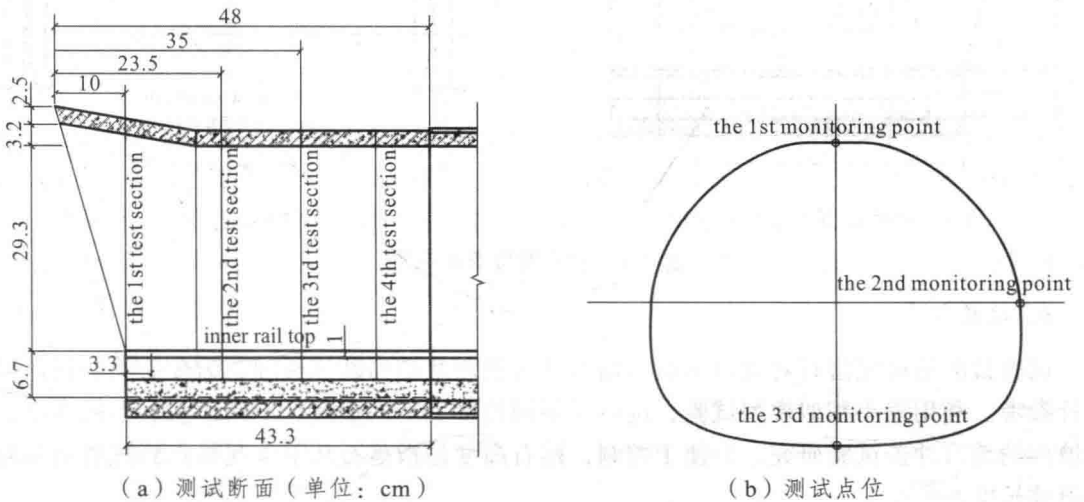


图 2-4 应变测试测点布置

4. 位移测试测点布置

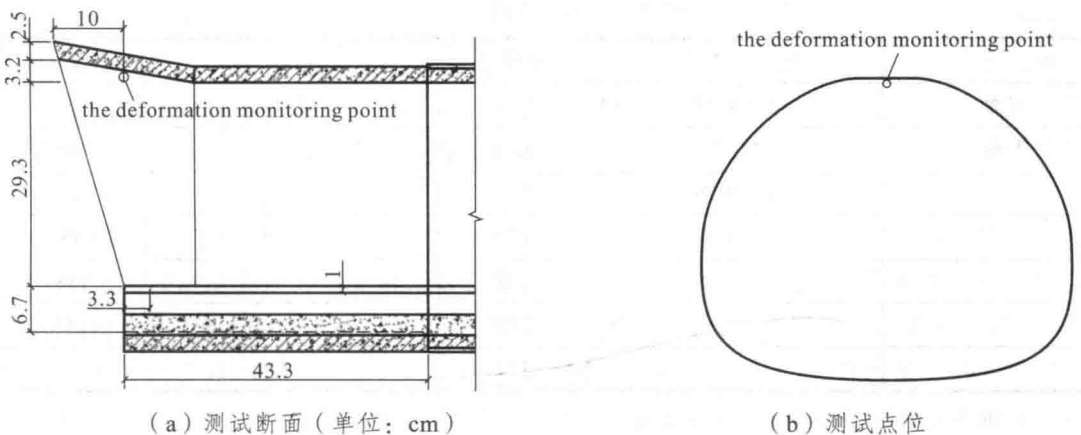


图 2-5 位移测试测点布置

将机电百分表分别布置在第 1 断面和第 4 断面的拱顶位置，距洞口的距离分别为 9 cm 和 48 cm。结构断面位移测点布置如图 2-5 所示。

5. 加速度测试测点布置

在喇叭口隧道洞门模型结构上共布置两个测试断面：第一断面距洞口 10 cm，无回填土覆盖，在拱顶布置 1#三向加速度传感器；第二断面距洞口 48 cm，有回填土覆盖，分别在拱顶和仰拱底中部布置 2#和 3#三向加速度传感器。

加速度传感器布置见图 2-6 所示。

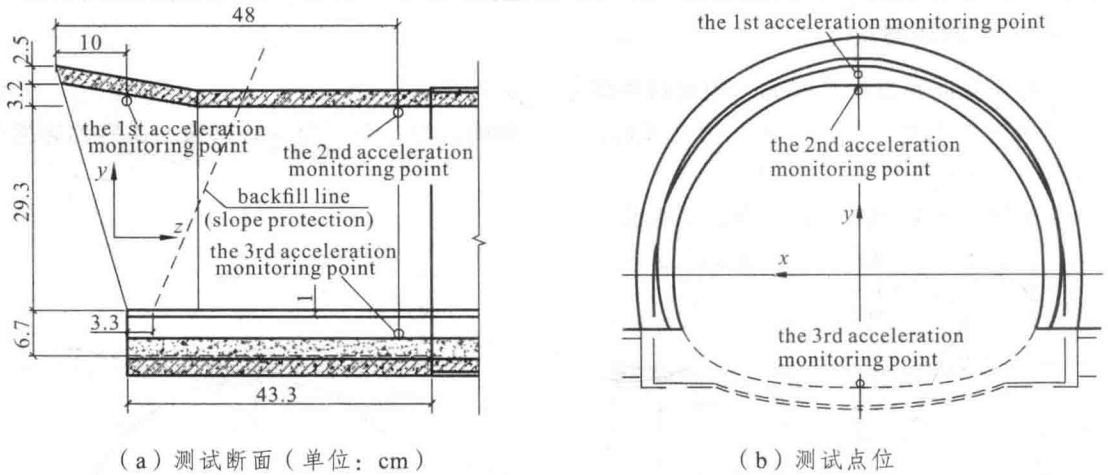


图 2-6 加速度传感器布置

6. 试验组合

试验目的是研究落石对隧道明洞结构的冲击机理及结构破坏机理，为今后明洞设计提供设计参考。利用缩小相似模型试验，进行了不同坡度、不同重量、不同形状、不同高度、不同坡面的落石冲击试验研究。为便于控制，落石高度是指落石从下落起始点到隧道顶部坡脚的斜坡长度。

试验采用全面组合方法，目的是使数据更加具有统计性，试验组合数为 $2 \times 6 \times 7 \times 4 \times 6 = 2016$ 组，试验组合见表 2-2。

表 2-2 落石试验组合

坡面性质	坡度(率) i	质量/g	形状	高度/cm
有槽	1 : 1.25	23.9	球体	26
无槽	1 : 1	48.1	板状	49
	1 : 0.75	65.2	近似立方体	72
	1 : 0.5	123	长方体	95
	1 : 0.2	133		118
	0	280		141
		524		

注：① 坡度(率) i 是指斜坡垂直高度与其水平投影距离的比值；

② 高度是指落石从下落起始点到隧道顶部坡脚的斜坡长度。