

[文章编号] 1003-4684(2021)05-0081-05

老木山隧道爆破振动影响因素灰色关联分析

丁志刚¹, 唐益新², 包文成¹, 胡其志²

(1 中交路桥南方工程有限公司, 北京 101149; 2 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘要] 隧道爆破对围岩的稳定性产生较大影响,其中爆心距、单段最大药量和雷管数等因素直接影响爆破对围岩的扰动程度。依托在建的老木山隧道工程,通过对施工爆破监测数据进行分析,建立该工程爆破振动影响因素指标体系;通过对灰色关联理论中的原参考序列与比较序列绝对差进行修正,对两者 k 时刻绝对差采用平均法计算,获得修正后的关联系数和灰色关联模型;利用该模型对老木山隧道爆破振动影响因素进行灰色关联分析,确定了各因素间主次关系,依据灰色模型分析结果,对老木山爆破施工方案进行了优化,使得爆破产生的断面峰值振速平均减振率达到 28%,有效降低了爆破振动对围岩的影响。

[关键词] 隧道爆破;灰色理论;围岩稳定;模型修正;参数优化

[中图分类号] TU997 **[文献标识码]** A

随着我国经济建设的发展以及“交通强国”战略的实施,全国公路总里程数不断增加,为适应山区地形,保证公路平曲线顺畅,公路隧道所占比例逐渐扩大。目前,钻爆法在山岭隧道工程施工中广泛应用,钻爆法施工会产生爆破振动效应,一般来说,爆破振动效应的主要影响因素分为爆源和传播途径^[1]。在钻爆法施工过程中,受爆破荷载的影响,隧道围岩变形程度受其影响较大。因此,考虑到影响隧道爆破振动影响因素较繁杂且量纲不一的特点,对各爆破振动影响因素间关联度的分析和比较,评价系统内各因素对围岩扰动程度的大小,预测可能出现的结果对整个系统的影响,对优化隧道爆破参数具有很好的现实意义。

杨珊、陈建宏、李斌等^[2-3]采用灰色关联分析法(GRA)对爆破振动的影响因素进行分析,并结合具体实际工程爆破实测数据,得到爆破振动影响因素的主次顺序,对爆破参数进行优化,从而有效地控制爆破振动的影响。范孝锋、周传波^[4]通过对 2 个露天矿山生产爆破及其震动实测资料的计算分析,得出了爆破震动各影响因素的主次关系,为准确有效控制爆破震动效应提供了依据。沈蔚、徐全军等^[5]通过对灰关联度矩阵的分析,得到了影响爆破震动强度的主要因素,认为爆破点与测点之间的高差为影响爆破震动参数的准优因素,为爆破参数优化提

供理论基础。黄冬梅、谭云亮等^[6]针对深部巷道围岩稳定性影响因素问题,运用灰色关联分析法,分析地质特性、环境因素及人为工程等因素之间的关联度,确定了主要相关因素,并验证了该方法获取的围岩稳定性影响因素的主次关系与实际情况吻合度较好。邹宝平、杨建辉^[7]基于灰色系统理论和 BP 神经网络,对大断面隧道爆破参数进行预测优化,得到了爆破参数优选值且预测精度较高。

灰色系统理论由我国学者邓聚龙教授于 1982 年创立。其特点是:“少数数据建模”、“对外延明确,内涵不明确的对象”着重研究,重点分析。与传统的层次分析法、回归分析法以及方差分析法^[8-10]相比,灰色关联分析法可以弥补传统分析法对系统数据量要求大、计算繁杂,且易出现量化结果与定性分析结果误差等缺点。隧道爆破施工是根据有限的地质勘测资料及现场试验数据来确定爆破参数和后期支护方案,其本质上满足灰色系统的特征。因此,采用灰色关联分析法精准的分析爆破振动效应影响因素,为爆破方案优化提供理论基础。

本文依托在建的老木山隧道工程,通过对施工爆破监测数据分析,建立该工程爆破振动影响因素指标体系;通过对灰色关联理论中的原参考序列与比较序列绝对差进行修正,对两者 k 时刻绝对差采用平均法计算,获得修正后的关联系数和灰色关联

[收稿日期] 2020-12-27

[基金项目] 国家自然科学基金(51978249)

[第一作者] 丁志刚(1983-),男,内蒙古商都人,中交路桥南方工程有限公司工程师,研究方向为道路与桥梁工程的施工技术及管理

[通信作者] 胡其志(1969-),男,湖北红安人,湖北工业大学教授,研究方向为道路与桥梁工程

模型;利用该模型对老木山隧道爆破振动影响因素进行灰色关联分析,并对各影响因素关联度排序,确定了各因素间主次关系,为老木山爆破施工方案优化,提供理论指导。

1 隧道爆破振动影响因素指标体系

隧道光面爆破受多种因素影响,包括围岩强度、整体性、节理、层理等地质因素。爆破振动的主要影响因素分为爆源和传播途径,根据爆破振动效应各影响因素,构建出其影响指标体系,如图1所示。爆炸荷载激发围岩振动的特性受荷载和荷载作用边界的影响。爆炸荷载峰值、荷载上升时间、荷载衰减时间以及开挖面大小会对爆破振动质点峰值振动速度和振动频率产生影响。从以往大量实际工程实例可以看出,隧道爆破开挖,爆破动荷载会使围岩原始平衡状态遭到破坏,导致应力重分布,围岩扰动程度与爆破参数以及工程地质特性直接相关,因此爆破振动效应是受多重因素影响的非线性空间系统。

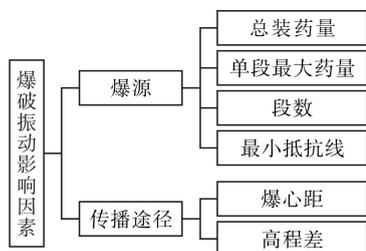


图1 爆破振动影响因素指标体系

2 灰色关联分析步骤

灰色理论模型是一种研究少数数据、贫信息不确定性问题的新方法,依据影响系统各因素之间的异同程度,分析其之间的相关性。建模时,通常采用累加生成或累减生成对原始数据进行处理,使生成数据序列变成有规律的序列。与传统分析方法相比,灰色关联分析对系统样本量及系特征数据间的线性相关性无特殊要求。因而,灰色理论模型在土木工程实践中得到广泛应用,其具体的分析步骤如下:

1)确定参考序列和比较序列 灰色关联分析是在数据数列基础上,通过数理统计的方法对系统内各因素进行分析评价。因此,首先要确定系统参考数据数列和与参评数列相对比的比较数列,并根据比较序列的类型确定其参考值。参考序列:

$$X_0(k) = \{X_0(1), X_0(2), X_0(3), \dots, X_0(n)\} \quad (1)$$

比较序列:

$$X_i(k) = \{X_1(k), X_2(k), X_3(k), \dots, X_m(k)\} \quad (2)$$

其中, $k=1, 2, \dots, n$; m 为参考序列个数。

2)无量纲化处理 由于原始数据数列单位不一致,为了保证分析过程中数据的可靠性和准确性,需

要对原始数据进行无量纲化处理,消除量纲。采用区间值变化法处理数据,如式(3)所示。

$$Y_i(k) = \frac{\max X_i(k) - X_i(k)}{\max X_i(k) - \min X_i(k)}$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, m; k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

其中: $Y_i(k)$ 为无量纲化后的值; $X_i(k)$ 为原始值; $\max X_i(k)$ 为数列最大值; $\min X_i(k)$ 为数列最小值

3)求取灰色关联系数 根据邓式灰色理论,定义比较序列与参考序列在第 k 个指标的对应差为关联系数 $\xi_{io}(k)$ 。将其表示为:

$$\xi_{io}(k) =$$

$$\frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, m; k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

其中, $|X_0(k) - X_i(k)|$ 为 k 时刻 X_0 与 X_i 的绝对差; $\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)|$ 为两极最小差; $\rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|$ 为两极最大差; ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$, 通常取 0.5。

4)计算关联度 根据式(4)计算的关联系数多且繁杂,为了更好的比较各个时刻的各要素间的关联程度,需要将求得的关联系数计算加权平均数,定义该加权平均值为关联度 R_{io} , 即

$$R_{io} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{io}(k)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, m; k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

5)灰色关联度分析 灰色关联分析实质上是通过计算参考序列与比较序列的关联系数和关联度来确定各影响因素的主次关系。分析和比较计算得到的灰色关联度,并对系统内各因素进行多级综合评价,一般来说,表征系统内各因素水平关联度越大,对系统整体影响就越小,从而有利于决策者做出综合客观评价。

3 关联系数的修正

传统灰色关联模型中,通常采用区间值变化法处理各序列数据,以达到对原始序列消除量纲的目的,灰色关联度计算是对应参考序列和比较序列第 k 个指标数理统计的结果, k 值的选取表示集中序列数据的多少,若集中的序列数据达不到精度要求,则该指标值的选取直接对比较序列的相关程度产生影响,在式(4)中 $|X_0(k) - X_i(k)|$ 为 k 时刻 X_0 与 X_i 的绝对差, $|X_0(k) - X_i(k)|$ 与关联系数 $\xi_{io}(k)$ 具有负相关性,即 k 时刻 X_0 与 X_i 的绝对差越小,灰色关联系数越大,各因素间相关性越好。实质上, $|X_0(k) - X_i(k)|$ 反映的是参考序列和比较序列在

k 时刻接近程度。因此参考序列的选取及 k 值指标会直接决定灰色关联度精确性。

为避免 k 值指标选取对灰色关联度计算的影响,方便集中更多的序列数据,对式(4)中原参考序列与比较序列绝对差做修正,对两者 k 时刻绝对差采用平均法计算,即修正后的关联系数 $\xi_{io}(k)$ 公式如式(6)所示:

$$\xi_{io}(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (6)$$

4 实例分析

4.1 工程概况

选取贵州石阡至玉屏(大龙)高速公路老木山隧道为研究对象。老木山隧道共划分V、IV、III级三个围岩级别,左右线围岩级别长度所占隧道长度比例情况为:V级围岩约占9.8%(215 m)、IV级围岩约占58.3%(1280 m)、III级围岩约占31.9%(700 m)。隧道各级围岩开挖均采用钻爆法施工。根据文献[11],爆破峰值振速、主振频率、振动持续时间作为衡量爆破振动影响程度大小的指标,灰色关联分析中,可看成系统特征变量,记作 $Y_i(i=1,2,3)$ 。将影响爆破振动的主要因素:总装药量、单段最大药量、段数、最小抵抗线、爆心距、高程差作为相关因素变量,分别记为 $X_j(j=1,2,\dots,6)$ 。影响隧道爆破振动效应的因素很多,各因素在不同等级围岩中变化规律也存在差异。笔者在对现场爆破振动监测数据分析基础上,结合有限差分软件FLAC 3D对老木山爆破振动围岩力学响应机理和各因素变化规律进行研究^[12],本文选取具有代表性的5组现场爆破监测数据作为研究基础(表1)。

表1 爆破振动实测数据样本

编号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	Y_1	Y_2	Y_3
1	76	3.6	3	0.65	15.34	1.2	6.39	40.0	1536
2	89	6.7	3	0.71	12.12	1.4	7.24	41.3	1605
3	102	7.8	5	0.85	10.74	1.6	8.38	30.2	1800
4	97	8.4	5	0.76	11.93	1.7	7.26	34.7	1575
5	78	3.3	4	0.68	15.44	1.8	6.07	40.5	1692

X_1 为总装药量,kg; X_2 为单段最大药量,kg; X_3 为段数; X_4 为最小抵抗线,m; X_5 为爆心距,m; X_6 为高程差,m; Y_1 为峰值振速, $m \cdot s^{-1}$; Y_2 为主振频率,Hz; Y_3 为持续时间,ms。下同

4.2 灰色关联分析

根据表1中的原始数据,选取影响爆破振动效应的各因素为比较矩阵 x_i ,爆破产生的振动效应监测值为参考矩阵 $x_0(k)$,分别建立比较矩阵序列和

参考矩阵序列,如:

$$x_i = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 76 & 89 & 102 & 97 & 78 \\ 3.6 & 6.7 & 7.8 & 8.4 & 3.3 \\ 3 & 3 & 5 & 5 & 4 \\ 0.65 & 0.71 & 0.85 & 0.76 & 0.68 \\ 15.34 & 12.12 & 10.74 & 11.93 & 15.44 \\ 1.2 & 1.4 & 1.6 & 1.7 & 1.8 \end{bmatrix}$$

$$x_0(k) = \begin{bmatrix} x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.39 & 7.24 & 8.38 & 7.26 & 6.07 \\ 40.0 & 41.3 & 30.2 & 34.7 & 40.5 \\ 1536 & 1605 & 1800 & 1575 & 1692 \end{bmatrix}$$

由于爆破振动监测值与爆破效应影响因素的参数值的单位不一致,为了方便计算、保证计算结果的准确性,根据式(3)采取区间值变化法对影响爆破振动效应因素的参考序列和比较序列进行量纲归一化处理,并求取差异性序列矩阵,应用修正后的灰色模型得到灰色关联系数及各因素灰色关联度排序如表2、表3所示。

表2 爆破振动影响因素灰色关联系数

灰色关联矩阵	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
峰值振速 Y_1	0.512	0.664	0.495	0.579	0.582	0.573
主振频率 Y_2	0.617	0.591	0.514	0.533	0.803	0.554
持续时间 Y_3	0.663	0.566	0.674	0.548	0.556	0.546
总和	1.792	1.821	1.683	1.660	1.941	1.673

表3 各因素灰色关联度排序表

影响因素	关联度	排序
总装药量	0.597	3
单段最大药量	0.607	2
段数	0.561	4
最小抵抗线	0.553	6
爆心距	0.647	1
高程差	0.558	5

根据表2中各影响因素灰色关联系数可以看出,隧道爆破施工产生的振动效应是多因素作用的结果。影响峰值振速的主要因素是单段最大药量、爆心距和最小抵抗线,其中单段最大药量灰色关联系数达到0.664,远大于总装药量和爆心距灰色系数,而最小抵抗线引导爆破主导方向,岩石阻力最小的方向即是爆破作用最集中且岩石受爆破作用峰值振速最大处,但受岩层性质和传播途径的影响,最小抵抗线对峰值振速影响程度相对较小。影响主振频率和爆破持续时间的最主要因素分别是爆心距和雷管段数,其次单段最大药量、总装药量对主振频率和爆破振动效应持续时间影响也较大。对影响隧道爆破振动效应的诸多因素中灰色关联度排序,可以得到:爆心距>单段最大药量>总装药量>雷管段数>高程差>最小抵抗线,爆心距可看作是准优因素,单段最大药量和雷管段数是可控准优因素。其中,爆心距属于爆破传播途径对振动效应的影响,属于

非可控因素。因此,通过对隧道光爆面可控准优因素参数调整可达到爆破方案优化的效果。

5 老木山隧道爆破控制

根据灰色关联分析结果,确定了影响老木山隧道爆破振动效应的主要因素,对光爆面爆源参数进行优化,从而可以达到理想的爆破效果,减少爆破振动危害对围岩稳定性的影响。

5.1 原始爆破方案

老木山隧道采用上下台阶法施工,上台阶高约5 m,下台阶高约3 m,上、下台阶分别采用楔形掏槽掘进爆破和水平孔拉槽爆破。爆破选用直径为33 mm的2号岩石乳化炸药,掏槽眼孔径为42 mm,控制掘进循环尺寸在1.8~2.3 m,断面共布置149个炮孔,单段最大药量8.6 kg,总药量108.6 kg,线装药密度0.36 kg/m。根据现场爆破试验及监测结果分析。原始爆破方案,单段最大装药量过大,线装药密度均超过设计值且底板眼装药过于局部集中,导致爆破损伤范围较大,损伤程度较重,加上围岩原生节理的存在,与爆破损伤裂痕交错,进而引起隧道断面拱顶处峰值振速达到6.45 cm/s,超过安全振速,主振频率为28.5 Hz。原爆破方案下开挖后的掌子面均出现不同程度的超挖现象。

5.2 爆破方案优化

隧道爆破开挖要求光爆面成洞效果好,对围岩超欠挖及损伤程度、炮孔利用率等有严格要求。因此根据灰色关联分析结果,在单段最大药量,雷管段数,炮孔布置结构等方面提出优化。原定爆破施工方案没有达到理想的效果和技术规定指标,根据围岩掌子面实际情况对原定爆破方案和参数提出优化,以达到更好的爆破效果。一般来说,根据围岩岩层性质,可以调整适当的炮眼间距、单段最大装药量和段数。1)根据工程经验,炮眼间距一般为炮孔直径的10—15倍左右,围岩等级较高,岩性较差的情况下,可以适当减小炮眼间距或者增加炮眼,根据灰色关联分析结果并结合现场爆破试验,光面爆破的半孔多且长,效果良好,因此缩小Ⅳ、Ⅴ级围岩爆破周边孔间距,由原定的45 cm,缩短至40 cm,炮眼数量由原来的28个增加到35个,Ⅲ级围岩掏槽眼增加两排;2)为使光面爆破达到均匀理想的效果,调整分散光爆孔装药量和单段最大装药量,单段最大装药量由原来的6.7 kg减少到5.2 kg;3)上部水平掘进孔深为3.6 m,孔距为1.1 m,孔间距为0.8 m,为了缩小爆破抵抗线,掏槽孔上部掘进孔需要一定的角度,雷管段数由原来的5排增加到8排。另外,各级围岩周边孔采用轴向空气间隔分段均匀装药,

采用导爆索起爆,有助于使相邻周边眼裂隙相同,达到整体爆破的效果。

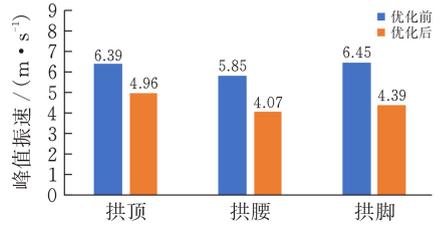


图2 优化前后峰值振速对比

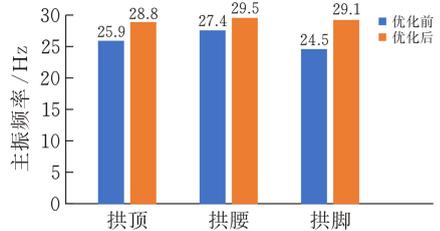


图3 优化前后主振频率对比

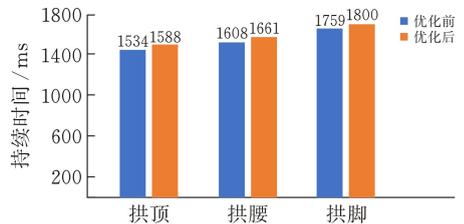


图4 优化前后振动持续时间对比

选取老木山隧道Ⅳ级围岩某断面为例,爆破方案优化前后效果如图2—4所示。从上图可以看出,与参数优化前爆破方案对比,爆破参数优化后爆破效果有了明显的改善。峰值振速、主振频率、持续时间都发生较大变化,断面最大峰值振速出现在拱脚处,从6.45 m/s减小到4.39 m/s,减振率达到32%,拱部平均减振率28%,减振效果显著,有效的减小了爆破波产生的振动危害。另外,最大主振频率由原来的27.4 Hz变为29.5 Hz。增加雷管段数后,持续时间比原设计方案增加约55 ms。

6 结论

1)采用钻爆法开挖隧道时,爆破波传播过程受围岩夹制作用会产生波阻抗,但由于隧道内部自由面受限,爆源对振动效应影响程度略大于爆破波传播途径因素。

2)用灰色关联分析法明确了影响爆破振动效应各影响因素的重要性关系,计算得到灰色关联度排序:爆心距>单段最大药量>总装药量>雷管段数>高程差>最小抵抗线,爆心距可看作是准优因素,单段最大药量和雷管段数是可控准优因素。根据灰色关联计算结果,对老木山隧道针对性的提出爆破参数优化方案,爆破参数优化后爆破效果有了明显

的改善,断面峰值振速平均减振率达到28%,有效的减小了爆破波产生的振动危害。

3)影响测点峰值振速的主要因素是单段最大药量和爆心距,而爆心距为非人为影响因素,通过减小单段最大药量可有效控制测点峰值振速在安全范围内;影响主振频率的因素除了爆心距以外,总装药量灰色关联度也较高,但在合理微差条件下总药量对主振频率的影响可近似忽略;雷管段数为影响爆破振动持续时间的主要因素,随着雷管段数的增加,振动持续时间与之成正相关增加。

4)灰色关联分析通过分析影响爆破振动效应各因素矩阵列相关性,弥补传统分析法对系统数据量要求大、计算繁杂,且易出现量化结果与定性分析结果误差等缺点。计算结果直观精确,可广泛应用于土木工程实践。

[参 考 文 献]

- [1] 霍永基.建筑结构爆破震动效应及安全分析研究[J].爆破,2003(1):1-6.
 [2] 杨珊,陈建宏,郭宏斌,等.隧道爆破振动影响因素的灰色关联分析[J].中国安全科学学报,2011,21(6):

- 65-71.
 [3] 李斌,毕延华,刘新伟.基于灰色关联分析浅埋隧道爆破振动影响因素[J].工程爆破,2018,24(4):86-90.
 [4] 范孝锋,周传波,陈国平.爆破震动影响因素的灰关联分析[J].爆破,2005(2):100-102+105.
 [5] 沈蔚,徐全军,黄文华,等.用灰关联分析法确定爆破震动参数的主要影响因素[J].工程爆破,2000(4):6-8+13.
 [6] 黄冬梅,谭云亮,常西坤,等.深部巷道围岩稳定性影响因素的灰色关联分析[J].煤矿安全,2016,47(3):202-204.
 [7] 邹宝平,杨建辉,王建秀,等.基于灰色理论与BP神经网络的特长瓦斯隧道爆破参数优选[J].铁道标准设计,2015,59(8):131-136.
 [8] 张光州,王德胜,丁剑锋.运用MATLAB对爆破震动数据的回归分析[J].山西建筑,2005(16):102-103.
 [9] 张世雄,陈庆发,许名标.模糊层次分析法在爆破方案优化选择中的应用[J].爆破,2004(4):83-85.
 [10] 贾俊平.统计学[M].北京:人民大学出版社,2008.
 [11] 张继春,钮强,徐小荷.用灰关联分析方法确定影响岩体爆破质量的主要因素[J].爆炸与冲击,1993(3):212-218.
 [12] 胡其志,唐益新,卢国兴.钻爆法施工对软硬围岩过渡段振动特性研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(S1):201-207.

Grey Correlation Analysis of Influencing Factors of Blasting Vibration in Laomushan Tunnel

DING Zhigang¹, TANG Yixin², BAO Wencheng¹, HU Qizhi²

(1 Zhongjiao Luqiao South Engin. Co., Ltd., Beijing 101149, China;

2 School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: Tunnel blasting has a greater impact on the stability of the surrounding rock, among which factors such as the blasting center distance, the maximum charge in a single section and the number of detonators directly affect the degree of disturbance of the surrounding rock by blasting. Relying on the Laomushan tunnel project under construction, by analyzing the construction blasting monitoring data, an index system of factors affecting the blasting vibration of the project is established; by correcting the absolute difference between the original reference sequence and the comparison sequence in the grey relational theory, the absolute difference of their K time point is calculated by the average method, and the revised correlation coefficient and gray correlation model are obtained; using this model, the gray correlation analysis of the influencing factors of the blasting vibration of Laomushan tunnel is carried out. The correlation degree of each influencing factor is sorted, and the main factors among the factors are determined. The results show that the blasting center distance is the quasi-optimal factor, and the maximum charge of a single segment and the number of detonator segments are the controllable quasi-optimal factors; based on the gray model analysis results, the Laomushan blasting construction plan is optimized to make the peak vibration of the section produced by blasting, The speed average damping rate reaches 28%, effectively reducing the impact of blasting vibration on surrounding rock.

Keywords: tunnel blasting; grey theory; surrounding rock stability; model modification; parameter optimization

[责任编辑: 裴 琴]

[文章编号] 1003-4684(2021)05-0086-05

CFRP 圆钢管混凝土短柱偏压试验研究

吴凌霄, 周金枝, 冷 鋆, 龙宇华

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 为研究圆截面 CFRP 钢管混凝土短柱的偏压受力性能,对 11 根环向全包裹 CFRP 圆钢管混凝土短柱进行偏压试验,研究不同混凝土强度、含钢率、CFRP 层数和偏心率对其极限承载力的影响。试验结果表明:圆截面 CFRP 钢管混凝土偏压短柱的破坏形态表现为受压区的钢管屈曲和中部及中上部的 CFRP 断裂。试件达到极限承载力后在经历较大变形的同时仍然可以保持一定的承载能力,属于延性破坏。极限承载力随着试件偏心率的增加而减小;混凝土强度、含钢率和 CFRP 层数的增加可以有效提升试件的极限承载力,其中 CFRP 层数的提升最为显著。

[关键词] 碳纤维增强复合材料(CFRP); 偏压性能; 极限承载力; 钢管混凝土

[中图分类号] TU393 **[文献标识码]** A

钢管混凝土是建筑结构中最基本的承重结构之一,在近几十年的工程实践中一直被广泛使用,有着良好的建筑效果。然而,随着越来越高的承载力需求,为提高构件的承载力,最常见的做法就是选用更高强度的混凝土和钢管来替换,或提升钢材的含量,但这些方法往往会带来更高的工程施工难度和更低的经济效益。因此,需要一种新型结构来改善这个局面。

碳纤维增强聚合物(CFRP)是一种具有轻质高强、易于操作和日益低廉的价格等优点的复合材料。王庆利^[1-3]提出 CFRP 钢管混凝土结构,这是一种在钢管内部浇灌混凝土,在钢管外表面包裹 CFRP 的新型组合结构,这种结构是在钢管混凝土的基础上用碳纤维布替代部分钢材和钢管一起约束混凝土。由于碳纤维布拥有低于钢材的泊松比,高于钢材的强度和相似的弹性模量,因而可以和钢管协同工作对混凝土提供更大的紧箍力。和钢管混凝土一样,CFRP 钢管混凝土同样可以利用三向受压混凝土强度高这一优点,并有着更高的承载力。

近年来,国内外已有许多学者^[4-6]对 CFRP 钢管混凝土柱开展了轴压性能、受弯性能、稳定性能和抗震性能等方面的试验研究、数值模拟、理论分析等的相关研究工作,其中武汉大学刘兰^[7]针对三种 FRP 钢管混凝土短柱进行了轴心受压的试验研究和数值

模拟;大连海事大学顾威^[8]针对 CFRP 钢管混凝土中长柱进行了轴心受压的试验研究和理论分析;沈阳建筑大学王庆利^[9]针对圆截面 CFRP 钢管混凝土柱进行了受弯性能的试验研究。相关研究主要集中在轴压和受弯的力学性能上,然而在实际工程里,柱经常会同时受到压力和弯矩的作用,所以在既有的 CFRP 钢管混凝土短柱轴压的基础上尚应研究偏压构件的力学性能。目前针对 CFRP 圆截面钢管混凝土短柱的偏压试验研究较少,研究方向主要集中在长细比和偏心距对其极限承载力上^[10],本试验在此基础上为探讨不同强度混凝土、不同含钢率和不同 CFRP 层数对 CFRP 圆截面钢管混凝土偏压短柱极限承载力的影响,对 11 根环向全包裹 CFRP 圆钢管混凝土短柱进行偏压试验和分析。

1 试验概况

1.1 试件设计

试件采用 Q235 圆截面钢管,外径为 165 mm,内径分别为 160.75 mm,161.5 mm 和 162.5 mm,长度为 500 mm。钢管两端均加有一正方形截面钢板,边长为 380 mm,厚度为 10 mm,材料与钢管相同。本次试验的主要参数为偏心距:0, 20, 40, 60 mm;CFRP 层数:0, 1, 2, 3;钢管壁厚:2.5, 3.5, 4.25 mm 和混凝土强度:C40, C50, C60。试件具体

[收稿日期] 2021-1-25

[基金项目] 桥梁结构健康与安全国家重点实验室(BHSL19-04-KL)

[第一作者] 吴凌霄(1996-),男,湖北孝感人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为工程力学

[通信作者] 周金枝(1964-),女,湖北武汉人,工学博士,湖北工业大学教授,研究方向为土木工程材料和结构强度计算与仿真

参数如表 1 所示。

表 1 试件参数

试件编号	偏心距/mm	混凝土强度	钢管壁厚/mm	CFRP 层数
CF-1	0	C40	3.5	1
CF-2	20	C40	3.5	1
CF-3	40	C40	3.5	1
CF-4	60	C40	3.5	1
CF-5	20	C50	3.5	1
CF-6	20	C60	3.5	1
CF-7	20	C40	2.5	1
CF-8	20	C40	4.25	1
CF-9	20	C40	3.5	0
CF-10	20	C40	3.5	2
CF-11	20	C40	3.5	3

对比偏心距:CF-1、CF-2、CF-3、CF-4; 对比混凝土强度:CF-2、CF-5、CF-6; 对比含钢率:CF-2、CF-7、CF-8; 对比 CFRP 层数:CF-2、CF-9、CF-10、CF-11。

1.2 试件制作

1.2.1 试件所用材料性能 本次试验采用自密实混凝土,原料选用 525 号硅酸盐水泥、自来水,硅砂为细骨料,最大粒径为 20 mm 的石灰岩为粗骨料,另添加适量粉煤灰、高效减水剂和 S95 矿粉,具体配合比和混凝土参数如表 2 和表 3 所示。试验采用无缝钢管和单向碳纤维布,其主要性能如表 4 和表 5 所示。

表 2 混凝土配合比

等级	水泥	砂	石	水	S95 矿粉	减水剂	粉煤灰
C40	260	807	1027	148	70	8	70
C50	340	740	1066	195	60	9.2	60
C60	380	676	1102	142	60	10.5	60

表 3 混凝土参数

混凝土强度	抗压强度/MPa	弹性模量/($N \cdot mm^{-2}$)	泊松比
C40	41.7	3.25×10^4	0.2
C50	50.4	3.45×10^4	0.2
C60	61.3	3.60×10^4	0.2

表 4 钢材参数

钢材型号	Q235 钢
弹性模量/($N \cdot mm^{-2}$)	1.81×10^5
屈服强度/MPa	235
极限强度/MPa	430
屈服应变/ $\mu\epsilon$	1400
延伸率/%	27

表 5 碳纤维布参数

型号	SKO
厚度/mm	0.167
抗拉强度/MPa	3500
弹性模量/($N \cdot mm^{-2}$)	2.51×10^5
延伸率/%	1.7

1.2.2 试件的制作 首先将钢管和两端盖板按设

计尺寸加工,将其中一端盖板与钢管焊接,保证两者的轴心对齐,另一端盖板于混凝土养护完成后再焊接。将混凝土从竖立的钢管顶端倒入,倒入时使用振捣棒振捣至密实,为防止因混凝土在养护时出现收缩而导致钢管内顶部混凝土部分缺失,在浇筑混凝土时将混凝土略高出于钢管,待其硬化后再进行打磨找平。试件养护采用 28 天自然养护。

混凝土养护完成后用角磨机和砂纸对钢管表面进行除锈除污处理,将树脂和固化剂按 2:1 的重量比混合在一起,搅拌 3 min 直至混合均匀,用配制好的浸渍胶将事先裁剪好的碳纤维布(搭接长度为 10 mm)粘贴在钢管表面,本次试验粘贴方式采用环向全包裹,粘贴时先用滚筒刷将浸渍胶在需要粘贴 CFRP 的钢管表面部位涂抹一遍,再将 CFRP 包裹在钢管表面,在纤维布表面再涂抹一遍胶水,使胶水浸透纤维布。粘贴完成后在试件表面覆盖一层塑料膜,养护一周后拆除。

1.3 试验方案

本次试验在湖北工业大学结构大厅的 5 MN 微机控制电液伺服压力试验机上进行,为达到偏心加载的效果,在试件两端放置模具刀铰,试验中移动模具位置即可改变偏心距,同时也能实现两端铰接的边界条件。为保证试验过程中试件和加载板有较好的接触,在加载前对两端钢板打磨找平处理。正式加载前,为了确保试件的布置妥当和仪器的正常使用,以 10% 的极限承载力理论计算值的荷载对试件进行 2 次预加载。试验采用分级加载制,正式加载时,试验初期每级以极限承载力理论计算值 1/10 的荷载大小进行加载,仪器读数在每级加载后采集,每级荷载进行 3 min 的持载,当荷载加载至极限承载力理论计算值的 60% 后,每级加载值调整为极限承载力理论计算值的 1/15。当荷载加载至临近极限承载状态时,适量减缓加载速度,连续记录读数,直到荷载不再增长降至极限承载力理论计算值的 80% 时,此时试件鼓曲严重不宜继续受载,停止试验。



图 1 试验装置

1.4 试验布置

试验中,通过与试验机配套的力传感器记录试件的承载过程;将 4 个环向应变片和 4 个纵向应变

片分别粘贴于钢管的中截面对称分布4点处,用来测量钢管的环向和纵向应变;将4个环向应变片粘贴于CFRP管的中截面对称分布4点处,用来测量CFRP的环向应变;将两个纵向位移计对称布置于试件的受拉受压两侧,用来测量试件的纵向位移;将3个侧向位移计布置于试件受拉侧沿高度方向四等分点处,用来测量试件的侧向挠度。具体布置如图2所示。

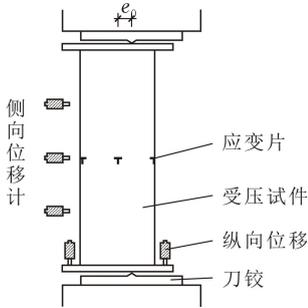


图2 试件布置

2 试验现象与分析

2.1 试验现象与破坏形态

试验初期阶段,试件没有明显的变化;当荷载达到约极限承载力预估值的70%时,断断续续可以听到一些轻微的黏胶开裂的声音;当荷载达到约极限承载力预估值的90%时,试件中截面受压区向外凸曲,凸曲处的CFRP开始断裂,由于CFRP提供了一部分箍力,此时试件变形并不显著;当荷载近乎达到极限承载力预估值时,此时钢管受压侧中截面处凸曲明显,凸曲处四周CFRP断裂,试件变形明显加大;当荷载不再增长并降到约极限承载力预估值的80%时,钢管受压侧中截面处凸曲严重,试件受压侧中部及中上部CFRP完全断裂,试件已明显弯曲,为保证试验安全,不宜继续加载,试验结束。

以上现象表明,偏压短柱在到达极限承载力后仍然可以保持一定的承载能力,属于典型的延性破坏。试件受压侧中截面处钢管严重凸曲使得凸曲处周围大量CFRP发生断裂,而受拉侧并无明显变化。



图3 试件破坏图

2.2 极限承载力

试件的极限承载力试验值和极限承载力计算值如下表所示,试验结果与理论计算结果之比平均值为1.01,标准差为0.026,试验值与理论值较为吻合。

表6 各试件的承载力试验值与计算值比较

试件编号	试验值 N_1/kN	理论计算值 N_u/kN	N_1/N_u
CF-1	1611	1644	0.98
CF-2	1412	1370	1.03
CF-3	1106	1117	0.99
CF-4	989	951	1.04
CF-5	1575	1544	1.02
CF-6	1673	1690	0.99
CF-7	1122	1145	0.98
CF-8	1499	1456	1.03
CF-9	1176	1164	1.01
CF-10	1615	1648	0.98
CF-11	1916	1996	0.96

2.2.1 偏心率的影响 为方便计算,本组试件的核心混凝土半径 r_c 取80 mm,偏心率 $e = e_0/r_c$ 。由表6可知,试件极限承载力随着偏心率的增加有了明显的下降。与偏心率为0的1号轴压短柱相比,偏心率 $e=0.25, 0.5, 0.75$ 的偏压试件极限承载力分别降低了12.4%,31.3%,38.6%,对比相邻试件,偏心率为0.5的试件较于0.25的极限承载力降低了21.6%,偏心率为0.75的试件较于0.5的极限承载力降低了10.6%,说明虽然试件极限承载力随着偏心率的增大而降低,但下降幅度也在逐渐减少。

2.2.2 混凝土强度的影响 由表6可知,随着试件混凝土强度的提高,偏压短柱的极限承载力有所提升。C50和C60的试件较于C40极限承载力提升了11.6%和18.6%,而C60较于C50只提高了6.2%,这表明虽然混凝土强度的提升可以提高偏压短柱的极限承载力,但提升幅度有限。

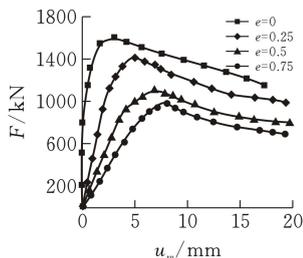
2.2.3 含钢率的影响 由公式 $\alpha = A_s/A_c$ (式中 α 为含钢率, A_s 为钢管横截面积, A_c 为混凝土横截面面积)和表6可知,含钢率为0.09和0.11的偏压试件较于0.06的极限承载力提高了25.8%和33.6%,含钢率为0.11的偏压试件较于0.09的极限承载力提高了6.2%,说明随着含钢率的增大,偏压短柱的极限承载力能得到一定的提升,提升幅度大于混凝土强度。

2.2.4 CFRP层数的影响 由表6可知,包裹CFRP1,2,3层的偏压试件较于没有包裹CFRP试件的极限承载力分别提升了19.9%,37.3%,62.9%,对比相邻试件,2层试件较于1层提高了14.5%,3层试件较于2层提高了18.6%,随着碳纤

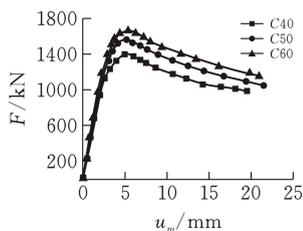
维布层数的增加,CFRP 钢管混凝土的极限承载力有着较大幅度地增长,且在3层以内每层的涨幅都较为稳定。

2.3 荷载—中截面挠度曲线

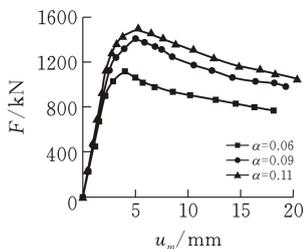
荷载—中截面挠度曲线描述了由加载之初到加载结束试件承载力与中截面挠度变化的全过程。对于CFRP圆钢管混凝土偏压短柱来说,在试验之初的弹性阶段,挠度只有少量增加,曲线呈线性增长,各组曲线的发展趋势基本吻合;随后曲线进入弹塑性阶段,变形开始加速,挠度的增长速度显著提升;达到极限荷载后,曲线进入下降阶段,挠度开始大幅度增加,此时荷载缓慢下降,说明试件仍然保持一定的承载能力,属于延性破坏。



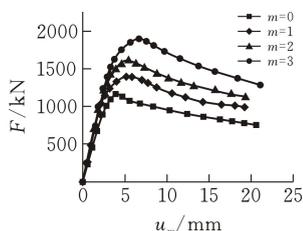
(a) 偏心率的影响



(b) 混凝土强度的影响



(c) (3) 含钢率的影响



(d) CFRP 层数的影响

图4 荷载—中截面挠度曲线

力,属于延性破坏。试件的荷载—中截面挠度曲线可划分为弹性阶段、弹塑性阶段和下降阶段。

2) 通过对比各组数据可知,随着偏心率增加,CFRP圆钢管混凝土短柱的极限承载力明显降低,偏心率为0.25,0.5,0.75的试件分别降低了12.4%,31.3%,38.6%;混凝土强度、含钢率和CFRP层数的提高都可以在一定程度上提升偏压柱的极限承载力,其中CFRP层数的提升效果最佳,在3层内每层的提升可以平均提高约17.7%的极限承载力;含钢率为0.09和0.11的试件分别提高了25.8%和33.6%,相对CFRP而言对试件极限承载力的提升较小;混凝土强度为C50和C60的试件分别提高了11.6%和18.6%,提升效果不佳。

[参 考 文 献]

- [1] 王庆利,顾威,赵颖华. CFRP—钢复合圆管内填混凝土轴压短柱试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(10): 44-48.
- [2] 王庆利,赵颖华,顾威. 圆截面CFRP-钢复合管混凝土结构的研究[J]. 沈阳建筑工程学院学报(自然科学版), 2003(4): 272-274.
- [3] 王庆利,车媛,谭鹏宇,邵永波. CFRP-钢管混凝土结构研究的进展与展望[J]. 工程力学, 2010, 27(S2): 48-60.
- [4] 苗亚军. 圆CFRP-钢复合管约束混凝土短柱轴压静力性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [5] YU CHEN, KAI WANG, KANG HE, et al. Compressive behavior of CFRP-confined post heated square CFST stub columns[J]. Thin-Walled Structures, 2018, (127)434-445.
- [6] JINGFENG WANG, QIHAN SHEN, FENGQIN WANG, et al. Experimental and analytical studies on CFRP strengthened circular thinwalled CFST stub columns under eccentric compression [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 1(27): 102-119.
- [7] 刘兰. FRP与钢管混凝土复合柱基本力学性能研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.
- [8] 顾威. CFRP钢管混凝土柱的力学性能研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
- [9] 王庆利,叶茂,周琳. 圆CFRP-钢管混凝土构件受弯性能研究[J]. 土木工程学报, 2008(10): 30-38.
- [10] 车媛. CFRP-钢管混凝土压弯构件的力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

3 结论

1) CFRP圆钢管混凝土偏压短柱达到极限承载力后在经历较大变形的同时可以保持相当的承载能

Experimental Study on Eccentrically Compressed Concrete Filled Circular CFRP Steel Tubular Columns

WU Lingxiao, ZHOU Jinzhi, LENG Jun, LONG Yuhua

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to study the eccentric compression performance of CFRP circular concrete-filled steel tube short columns, eccentric compression tests were carried out on 11 CFRP circular concrete-filled steel tube short columns, and to study the influence of different concrete strength, steel ratio, CFRP layer number and eccentricity on its ultimate bearing capacity. The results showed that the failure modes of CFRP round concrete-filled steel tube stub columns under eccentric load are shown as buckling of the steel tube in the compression zone and CFRP fracture in the middle and upper part. After the specimen reaches the ultimate bearing capacity, it can still maintain a certain bearing capacity while undergoing greater deformation, which is a ductile failure. The ultimate bearing capacity of the specimen decreases with the increase of eccentricity; The increase in concrete strength, steel content and the number of CFRP layers can effectively increase the ultimate bearing capacity of the specimen, and the increase in the number of CFRP layers is the most significant.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer(CFRP); concrete filled steel tube; eccentric compression performance; ultimate bearing capacity

[责任编辑: 裴 琴]

(上接第 72 页)

Research on Mechanical Property of High-Strength Two-Component Polyurethane Waterproof Coating

FENG Xiaoqian, WANG Nan, ZHANG Jinming, ZHANG Gaowen

(Hubei Provincial Key Laboratory of Green Materials for Light Industry, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: The two-step prepolymerization method is used to synthesize the A-component prepolymer with raw materials diphenylmethane diisocyanate (MDI) and polyether polyol. The A-component prepolymer is then prepared with B component containing a small amount of polyether polyol and curing agent to obtain the environmentally friendly high-strength two-component polyurethane waterproof coating. The mechanical properties and microstructure of the waterproof coating film were analyzed by electronic tensile machine and the scanning electron microscope (SEM). The results show that the use of isocyanate MDI with more benzene ring as the monomer can obtain a higher strength coating film. And when the monomer is added separately at one time, the strength of the coating film can be further improved. With the increase of the R value in the A component, the tensile strength tends to increase, whereas the elongation at break tends to decrease. The use of non-silicone defoamers has better defoaming effect and is beneficial to the improvement of the mechanical strength of the coating film.

Keywords: polyurethane; waterproof coating; two-component; high-strength

[责任编辑: 张 众]