

王东旭, 公茂盛. 2024. 最佳替代率下石墨尾矿混凝土柱抗震性能拟静力试验[J]. 地震研究, 47(3): 474–481, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0049.

Wang D X, Gong M S. 2024. Pseudo-static experiment on the seismic performance of graphite tailings concrete columns with optimal substitution rate[J]. Journal of Seismological Research, 47(3): 474–481, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0049.

# 最佳替代率下石墨尾矿混凝土柱抗震性能 拟静力试验\*

王东旭<sup>1,2</sup>, 公茂盛<sup>2\*</sup>

- (1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;  
2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 为研究石墨尾矿替代砂子最佳比率及石墨尾矿混凝土柱抗震性能, 对 4 种比率 (10%、20%、30%、40%) 下石墨尾矿部分替代砂子的混凝土进行了抗压强度、劈裂抗拉强度和静力受压弹性模量等试验, 将试验结果与普通混凝土进行对比, 确定了石墨尾矿替代砂子的最佳比率, 然后以该替代率下的混凝土制作了一个柱试件并进行了拟静力试验, 最后根据石墨尾矿混凝土柱破坏特征、滞回曲线、骨架曲线、刚度特性及耗能能力等结果分析了其抗震性能。结果表明: 30% 替代率下的石墨尾矿混凝土抗压强度和抗拉强度均最高, 弹性模量高于其他替代率, 且与普通混凝土相差较小, 说明 30% 为最佳替代率; 石墨尾矿混凝土柱在低周往复拟静力加载下呈现弯曲破坏特征, 滞回曲线饱满圆滑并具有较好延性, 且随着加载位移的增加, 试件的割线刚度逐渐减小, 等效黏滞阻尼比逐渐增大, 整体表现出良好的耗能能力和抗震性能。

**关键词:** 石墨尾矿混凝土; 力学性能; 拟静力试验; 滞回曲线; 抗震性能

**中图分类号:** TU375.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)03-0474-08  
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0049

## 0 引言

石墨尾矿 (Graphite Tailing, 简称 GT) 是石墨进行选矿时产生的一种工业尾渣。我国是石墨的使用大国, 在石墨开采的过程中产生了大量的尾矿, 我国石墨尾矿的总体存储量在 1 亿吨以上 (唐诗洋等, 2022; 刘磊等, 2019)。经过多年的开采, 石墨尾矿固体废物的积累已经造成了许多环境问题, 不仅占用土地资源, 而且会对大气环境、地下水和土壤造成污染, 严重影响生态环境 (Torres *et al*, 2017)。宁方文等 (2008) 和韩雪冰

等 (2011) 对石墨尾矿废弃地周围土壤进行了污染特性研究, 指出石墨尾矿周围土壤中含有大量污染元素, 会对其附近的土壤有机质和生态环境产生严重危害。为解决这一问题, 何保罗和薛东才 (2001) 提出了一种高效率的尾矿回收工艺, 在一定程度上缓解了石墨尾矿对环境的破坏。也有些学者提出了各种经济环保的选矿流程, 这些方法虽然对缓解石墨尾矿的污染起到了一定的作用, 但是相比于我国巨大的石墨尾矿堆存量, 这些方法的作用还是远远不够的。笔者认为应当从石墨尾矿本身的特性出发, 尝试对其二次利用来解决尾矿的污染问题。石墨尾矿主要包含石英、

\* 收稿日期: 2023-03-15.

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目 (2019C11, 2021EEVL0301); 国家自然科学基金项目 (52178514, 51678541)。

第一作者简介: 王东旭 (1998-), 硕士研究生在读, 主要从事地震工程研究. E-mail: wdx5858@126.com.

通信作者简介: 公茂盛 (1976-), 研究员, 博士, 主要从事地震工程研究. E-mail: gmshiem@163.com.

云母族、长石、方解石、绿泥石和铁钙闪石等矿物(海韵等, 2015), 早期我国针对石墨尾矿的二次利用方法主要是将其中的矿物进行回收, 近年来, 越来越多的学者尝试将石墨尾矿处理后作为一种新型建材应用于土木领域。王丽娜和申保磊(2012)用石墨尾矿取代天然砂生产水泥砂浆并应用于道路砖面层, 试验得到的砖经检测符合国家标准。潘春娟(2013)以试验验证了用石墨尾矿掺入水泥作为公路底基层这一做法的可行性, 并通过试验对比得出了65%石墨尾矿砂+35%风化粒料的最佳混合料配比。

随着建筑行业的蓬勃发展, 人们对混凝土的需求日益增加, 混凝土生产过程中大量原材料的使用, 特别是作为细骨料的天然河砂的过度开采, 已经造成了河岸滑坡和河床降低等一系列生态问题, 对河流及其周边的生态系统产生了极大的不利影响(Xu *et al.*, 2018; Zheng *et al.*, 2018)。由于石墨尾矿与砂子在成分上相似(刘洪波, 2019), 所以用石墨尾矿部分替代砂子作为细骨料来制备石墨尾矿混凝土(Graphite Tailing Concrete, 简称GTC)的做法便应运而生。这样既解决了石墨尾矿的污染问题, 又可以规避天然砂的过度开采带来的生态破坏, 促进了石墨工业和建筑行业的双向可持续发展。国内很多学者在这方面展开了研究, 张大双(2015)在分析石墨尾矿混凝土强度时, 发现影响抗压强度的主要因素是石墨尾矿掺量和水灰比, 并且其抗压强度随石墨尾矿掺入量的增大而减小, 通过研究分析得到石墨尾矿最佳含量是10%左右。孙伟轩(2019)对3种配比的石墨尾矿混凝土进行耐久性能研究, 发现石墨尾矿取代率10%较为适宜, 此时混凝土收缩变形可降低12.6%~21.1%。张琛等(2021)利用石墨尾矿、水泥、天然河砂、花岗岩石子、建筑废弃物粗骨料制备混凝土, 研究了力学性能的变化, 根据试验结果发现混凝土抗压强度先随石墨尾矿掺量增加而增大, 然后随石墨尾矿掺量的增加而减小, 当石墨尾矿掺入量为20%时, 混凝土强度最大。

目前国内外关于GTC的研究主要集中于混凝土本身的力学和材料性能等, 但其在墙、柱和梁等混凝土结构构件中的应用研究却鲜有开展。因

此, 本文旨在通过不同砂子替代率下GTC的抗压强度、劈裂抗拉强度和静力受压弹性模量试验结果等力学性能指标来评价其最佳替代比例, 并以最佳替代率的GTC制作柱试件, 通过拟静力试验分析其抗震性能。

## 1 材料性能试验

为探究石墨尾矿最佳替代率, 依照我国《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55—2011)进行混凝土配合比设计, 石墨尾矿来源于黑龙江省鸡西市某石墨矿业公司, 经晾晒烘干符合《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ52—2006)规定后使用, 共制备了0%、10%、20%、30%、40%等5组不同石墨尾矿替代率下的GTC试块, 编号分别为GTC-0(普通混凝土)、GTC-10、GTC-20、GTC-30、GTC-40, 混凝土设计强度均为C30。根据我国《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)对养护达到龄期(28天)后的试块分别进行抗压强度试验、劈裂抗拉强度试验和静力受压弹性模量试验, 探究石墨尾矿混凝土的最佳替代率, 并对制作柱子所用的钢筋进行拉伸试验以确保其符合使用标准。

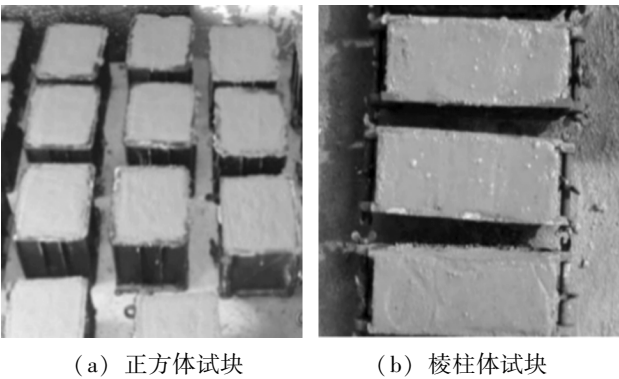
### 1.1 混凝土力学性能试验

混凝土按照体积配比法进行配合比的设计, 参考我国现行的混凝土配合比设计规范进行计算, 得出普通混凝土的配合比, 然后将石墨尾矿分别按照GTC-0中砂子质量的10%、20%、30%、40%进行替代得出GTC的配合比, 见表1。

材性试验共制备了30个150 mm×150 mm×150 mm的混凝土立方体试块, 其中, 不同编号试块各6块, 把每类混凝土分为两组, 每组3块, 分别用于抗压强度和劈裂抗拉强度测试, 测试完毕后采用平均值作为测试结果。同时, 制备30个150 mm×150 mm×300 mm的棱柱体混凝土试块, 不同编号试块各6块, 均用于静力受压弹性模量试验。制备好的试块在(20±5)℃的环境中静置, 如图1所示, 24小时后脱模, 然后将所有试块放置在标准养护室内养护28天后进行试验。

表 1 GTC 配合比  
Tab. 1 The mix proportion of GTC

编号	替代率 (%)	水灰比	材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )					
			水	水泥	砂子	石墨尾矿	碎石	减水剂
GTC-0	0	0.56	185	330.36	659.63	0	1 225.02	1.05
GTC-10	10	0.56	185	330.36	593.67	65.96	1 225.02	1.05
GTC-20	20	0.56	185	330.36	527.71	131.92	1 225.02	1.05
GTC-30	30	0.56	185	330.36	461.74	197.89	1 225.02	1.05
GTC-40	40	0.56	185	330.36	395.78	263.85	1 225.02	1.05



(a) 正方体试块 (b) 棱柱体试块

图 1 两种尺寸的混凝土试块

Fig. 1 Concrete specimens in two sizes

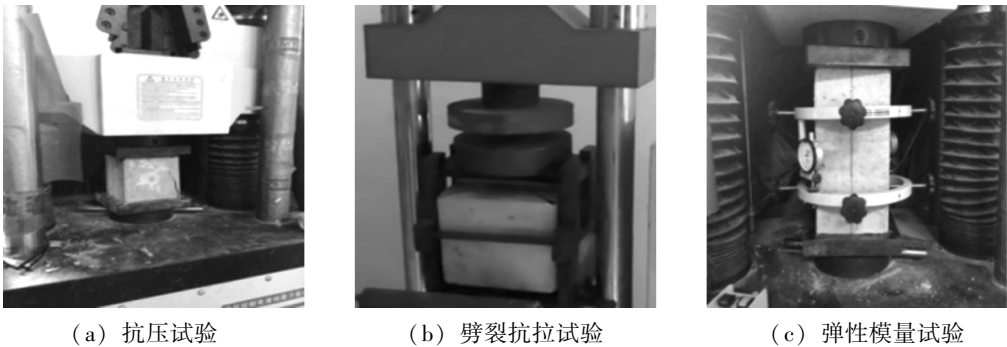
材性试验的仪器采用中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室的万能试验机, 仪器在试验前经测试均满足试验规范要求。各试验加载过程如图 2 所示。材性试验结果见表 2, 表中变化率为不同替代率下 GTC 相对于 GTC-0 材性试验结果增加(或减少)的比率。可以看到, GTC-30 具有最高的抗压强度和抗拉强度, 分别比普通混凝土(GTC-0)高出 14.5% 和 28.7%, 并且其弹性模量高于其他替代率下的混凝土, 且与 GTC-0 的相差不大, 仅小 3.7%。

表 2 GTC 力学性能试验结果

Tab. 2 Mechanical properties from the GTC test

编号	抗压强度		抗拉强度		弹性模量	
	平均值/	变化率	平均值/	变化率	平均值/	变化率
	MPa	(%)	MPa	(%)	MPa	(%)
GTC-0	29.39	0	2.51	0	30 180	0
GTC-10	30.41	3.4	3.03	20.7	27 393	-9.2
GTC-20	30.57	4.0	3.12	24.3	26 394	-12.5
GTC-30	33.64	14.4	3.23	28.7	29 073	-3.7
GTC-40	31.56	7.3	2.41	-4.0	27 303	-9.5

薛景(2019)对石墨尾矿和砂子的基本物理性质进行了试验研究, 结果见表 3。由表 3 可知, 石墨尾矿的表观密度比砂子大, 但细度模数较小, 应当属于“特细砂”, 其与作为细骨料的中砂和作为粗骨料的碎石混合后优化了混凝土的级配, 提高了混凝土的和易性。另外, 由于石墨尾矿的 pH 值大于 7, 说明石墨尾矿呈碱性, 这对于混凝土材料所需的碱性环境来说是有利的。因此用适量的石墨尾矿替代砂子可以提升混凝土的强度。但如果石墨尾矿含量过大反而会使 GTC 的强度减小, 原因是石墨尾矿的吸水率较大, 大量尾矿的加入



(a) 抗压试验 (b) 劈裂抗拉试验 (c) 弹性模量试验

图 2 GTC 力学性能试验过程

Fig. 2 Procedure of GTC mechanical properties test

会吸收很多水分导致水泥基材中的水含量缺失，影响胶凝材料的产生，从而导致 GTC 的强度下降。本文认为石墨尾矿替代砂子的最佳比例为 30%，后续将采用 GTC-30 制作柱试件进行拟静力试验。

表3 石墨尾矿与砂子物理性质对比

Tab. 3 Comparison of physical properties between the graphite tailing and the sand

物质	表观密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	细度 模数	pH 值	24 小时 吸水率
石墨尾矿	2855	0.90	10.0	30.1%
砂子	2620	2.49	7.0	21.9%

1.2 钢筋力学性能试验

制作柱子所用纵筋及箍筋的钢筋等级均为 HRB400，钢筋材料性能依据《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》（GB/T 228.1—2010）要求的拉伸试验获得。

试验中仪器的拉伸速率控制为  $20 (\text{N}/\text{mm}^2) \cdot \text{s}^{-1}$ ，根据万能试验机所得的应力-应变曲线确定钢筋的上屈服点和下屈服点，并以下屈服点所对应的应力作为钢筋的屈服强度；以峰值应力点处对应的应力作为钢筋的抗拉强度，对应的应变作为极限应变；以弹性阶段的应力与应变的比值作为弹性模量，每类钢筋测试 3 根，计算各指标的平均值，试验结果见表 4。

表4 钢筋力学性能试验结果

Tab. 4 Mechanical properties of steel bars from the test

钢筋类型	公称直径/ mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	极限 应变	弹性模量/ MPa
箍筋 (HRB400)	8	443.9	540.8	0.134	196 210
纵筋 (HRB400)	20	475.7	660.2	0.141	198 43

2 拟静力试验

2.1 试件设计

本文依据《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）设计并制作了 1 根最佳替代率下的石墨尾矿混凝土柱试件。混凝土采用 GTC-30，纵筋和箍筋所用的钢筋等级均为 HRB400。试件为倒 T 形，由柱子和基座两部分组成，其中柱的横截面尺寸为

450 mm × 450 mm，柱高为 1 900 mm，基座尺寸为 600 mm × 600 mm × 1 200 mm，柱身与基座在绑扎钢筋和支模完毕后整体浇筑混凝土。

试验竖向加载的轴压比取为 0.3，水平作动器中心点距柱顶高度为 300 mm。试件基本参数见表 5，几何形状和配筋形式如图 3 所示。

表5 试件设计参数

Tab. 5 Design parameters of the specimen

尺寸/ mm	混凝土	纵筋 配置	箍筋 配置	体积配 箍率	剪跨 比	轴压 比	轴压力/ kN
450 × 450 × 1 900	GTC-30	3 $\Phi$ 20	8 $\Phi$ 100	0.6%	4.0	0.3	868

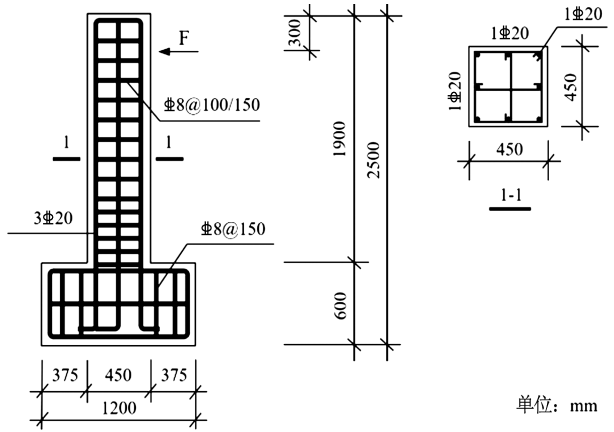


图3 试件尺寸及配筋

Fig. 3 Size and reinforcement of the specimen

2.2 加载装置及加载制度

本次拟静力试验采用中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室的拟静力加载系统对试件进行低周往复加载，试验装置如图 4 所示。

试验加载方案根据《建筑抗震试验规程》（JGJ/T 101—2015）确定。加载时，首先由竖向千斤顶施加荷载至轴压力设计值，并在试验期间始终保持不变。柱端水平方向的加载程序采用荷载-变形双重控制方法，正式加载前先进行预加载测试，施加反复荷载试验二次，每次正向和负向加载位移值均为 1 mm，确认加载装置和数采系统正常后开始正式加载。

正式加载时，在试件屈服前先采用荷载控制并分级进行加载，以水平作动器施加推力为正方

向。拉力为负方向，每级荷载往复一次，接近屈服时减小荷载级差。试件屈服后采用变形控制，变形值取屈服时试件的最大位移，并以该位移值的倍数为级差进行控制加载，每级位移往复两次，直至试件的承载力完全丧失时停止试验，加载制度如图 5 所示。

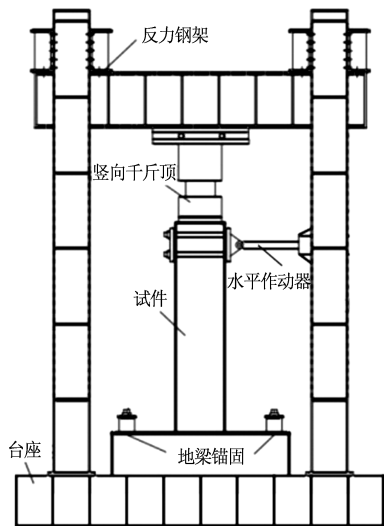


图 4 拟静力试验装置  
Fig. 4 Pseudo – static experiment setup

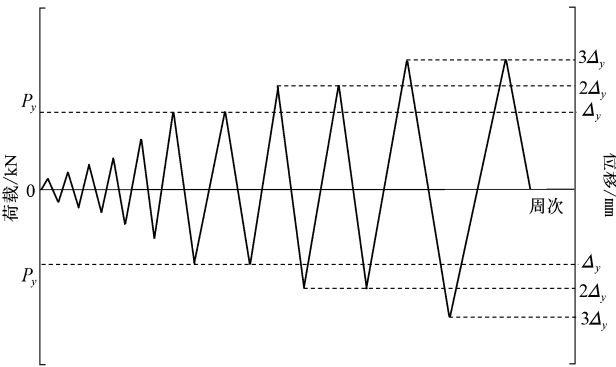


图 5 拟静力加载制度  
Fig. 5 Loading protocol of the pseudo – static experiment

2.3 试验现象

观察试验过程发现，在试件屈服前，随着荷载的逐渐增加，试件几乎无变化。当达到屈服荷载后，随着水平位移的增加，在接近柱根部出现首条裂缝，然后水平裂缝对角形成并逐渐增多，在柱纵轴附近合并为交叉裂缝。当接近峰值位移时，纵筋产生屈曲，裂缝急剧加宽增大，柱根部混凝土部分破碎剥离，并且能够听到混凝土碎裂

的声音。继续加载，最终整个柱截面呈现出一种向外凸出的灯笼状破坏形态，此时柱底部的混凝土已基本被全部压碎，位移达到峰值，试件承载力完全丧失，试验结束。

钢筋屈曲的位置发生在离柱底 10 cm 左右的高度处，试件最终破坏形态如图 6 所示。在加载的全过程中，试件表现出良好的塑性，前期水平荷载随着位移增加而不断提升，至峰值荷载后一段时间内几乎不变，直到后期试件屈曲较为严重时，水平荷载才开始逐渐下降，说明在 0.3 轴压比加载下的石墨尾矿混凝土柱的破坏特征基本属于弯曲破坏，体现出较好的延性性能。

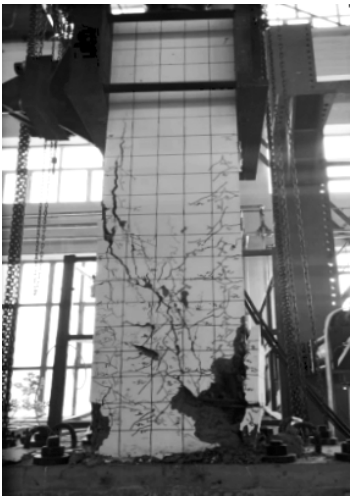


图 6 试件最终破坏形态  
Fig. 6 Failure state of the specimen

3 试验结果与分析

3.1 滞回曲线与骨架曲线

用数据采集系统记录水平方向作动器的荷载 ( $P$ ) 与加载点处的位移 ( $\Delta$ )，并以此为依据得到试件的  $P-\Delta$  滞回曲线，将滞回曲线上同向各次加载的荷载峰值点依次连接起来得到的包络曲线即为试件的骨架曲线，如图 7 所示。

由图 7 可以看出，试件的滞回曲线较为饱满圆滑，滞回环整体呈现出弓形形状。其骨架曲线在加载过程的中后期基本保持水平不变或略微下降，说明在 0.3 轴压比加载下石墨尾矿混凝土柱的塑性变形能力较强，有较好的抗震性能。

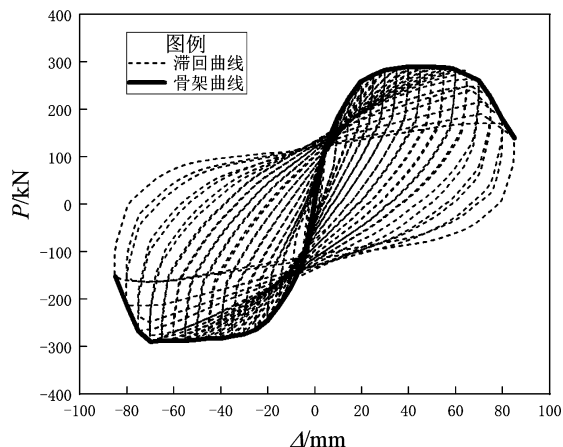


图7 滞回曲线及骨架曲线

Fig. 7 Hysteretic curves and the skeleton curve

根据滞回曲线和骨架曲线可得, 试件的正向承载力最大值为 290.0 kN, 负向承载力最大值为 282.4 kN, 试件承载力下降至 85% 峰值荷载时所对应的位移  $\Delta y = 18.8$  mm, 试件的屈服位移  $\Delta u$  由等能量法确定 (Park, 1988),  $\Delta u = 74.6$  mm, 延性系数  $\mu = \Delta u / \Delta y = 4.0$ 。试验数据表明: 试件有较强的承载能力, 并且位移延性系数较大, 体现了石墨尾矿混凝土柱良好的吸收和耗散能量的能力。

### 3.2 刚度特性分析

试件在往复荷载作用下会进入弹塑性阶段且损伤会逐渐累积, 导致其刚度随着载荷和位移的增加而不断降低, 这种现象被称为刚度退化。常用割线刚度曲线表征试件的刚度退化大小, 割线刚度 ( $K$ ) 的定义为每次循环的正向或负向最大载荷与相应位移的比值, 如图 8 所示。

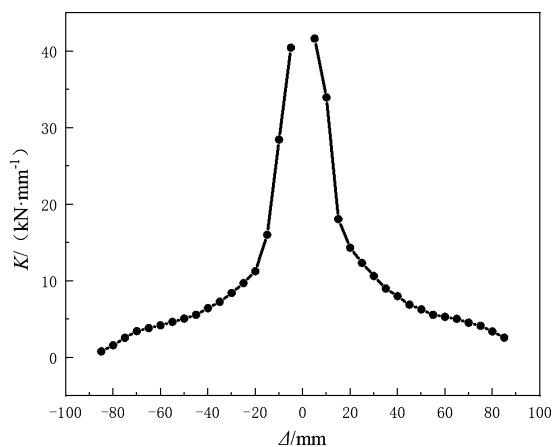


图8 割线刚度曲线

Fig. 8 The curve of secant stiffness

由图 8 可知, 在加载初期, 试件处于弹性状态, 刚度较大。继续加载至混凝土开始开裂, 此时, 由于截面变小, 试件刚度急速退化。当试件进入屈服阶段时, 由于很少有新的裂纹产生, 刚度退化速度减小。试验进入后期时, 试件破坏严重, 刚度持续降低, 至最终破坏时割线刚度接近 0, 说明此时试件的恢复力已基本丧失。

### 3.3 耗能能力分析

耗能能力是指构件在往复荷载作用下吸收能量的大小, 在工程抗震中, 常用等效黏滞阻尼比来衡量构件的耗能能力。

等效黏滞阻尼比指的是试件往复一周的单周耗能与定义每个周期相关弹性能量的直角三角形面积之比, 试件的等效黏滞阻尼比如图 9 所示。

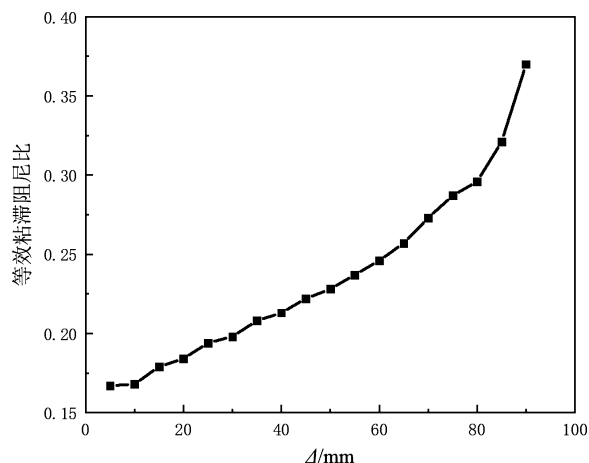


图9 等效黏滞阻尼比

Fig. 9 Equivalent viscous damping ratios

由图 9 可知, 随着加载位移的增加, 试件的等效黏滞阻尼比逐渐变大, 且前期增速相对较慢, 后期增速相对较快, 试件等效粘滞阻尼比最大值为 0.37。说明石墨尾矿混凝土柱能够吸收和耗散较多的能量, 其滞回耗能的能力较强。

## 4 结论

本文通过不同砂子替代率下的 GTC 力学性能试验确定石墨尾矿的最佳替代率, 并根据最佳替代率下石墨尾矿混凝土柱的拟静力试验分析, 得到结论如下:

(1) 石墨尾矿混凝土的最佳替代率为 30%,

其抗压强度和劈裂抗拉强度均大于其它替代率下的混凝土,弹性模量与普通混凝土接近,故可认为 30% 为石墨尾矿部分替代砂子的最佳比率。

(2) 当轴压比为 0.3 时,最佳替代率下石墨尾矿混凝土柱在水平往复加载下的破坏形式呈现出弯曲破坏特征,属于延性破坏,延性系数可达到 4.0 左右,滞回曲线较为饱满,表现出良好的延性性能,可以满足在工程结构中的应用需求。

(3) 柱试件在拟静力加载下的割线刚度呈现逐渐退化的趋势,前期退化速度较快,后期退化速度较慢,至完全破坏时刚度已基本下降为 0;而等效粘滞阻尼比呈现逐渐增大的趋势,前期增速较慢,后期增速较快,最大值达到 0.37,表现出较好的耗能能力和抗震性能。

本文只对轴压比为 0.3 时的石墨尾矿混凝土柱开展了试验,并讨论了其抗震性能,对于其他轴压比下石墨尾矿混凝土柱力学性能,仍有待于进一步开展试验和分析。

本文试验所用石墨尾矿由黑龙江大学建筑工程学院刘洪波教授提供,在此深表谢意!

## 参考文献:

- 海韵,廖立兵,吕国诚,等. 2015. 黑龙江萝北石墨尾矿的工艺矿物学研究[J]. 人工晶体学报,44(3):621-626.
- Hai Y, Liao L B, Lyu G C, et al. 2015. Mineralogical study on graphite tailings from Luobei, Heilongjiang Province[J]. Journal of Synthetic Crystals, 44(3):621-626. (in Chinese)
- 韩雪冰,王笑峰,蔡体久. 2011. 石墨尾矿库及周围土壤重金属污染特征与评价[J]. 黑龙江大学工程学报,2(2):58-62.
- Han B X, Wang X F, Cai T J. 2011. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution of graphite tailings reservoir and its surrounding soil[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2(2):58-62. (in Chinese)
- 何保罗,薛东才. 2001. 柳毛石墨浮选尾矿回收[J]. 中国非金属矿工业导刊, (4):17-18.
- He B L, Xue D C. 2001. Recovery of flotation tailings from willow wool graphite[J]. China Non-metallic Minerals Industry, (4):17-18. (in Chinese)
- 刘洪波,张玉鑫,王钟锐,等. 2019. 石墨尾矿水泥砂浆的抗压强度与抗渗性能研究[J]. 黑龙江大学工程学报,10(4):16-20.
- Liu H B, Zhang Y X, Wang Z Y, et al. 2019. Study on compressive strength and impermeability of graphite tailings cement mortar[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 10(4):16-20. (in Chinese)
- 刘磊,牛敏,郭珍旭,等. 2019. 黑龙江某鳞片石墨层压粉碎-分质分选技术研究[J]. 非金属矿,42(6):57-61.
- Liu L, Niu M, Guo Z X, et al. 2019. Study on particle breakage-grading separation technology of flake graphite from Heilongjiang[J]. Non-Metallic Mines, 42(6):57-61. (in Chinese)
- 宁方文,蔡体久,高德武,等. 2007. 鸡西市柳毛石墨矿废弃地植物多样性研究[J]. 森林工程, (4):1-4.
- Ning F W, Cai T J, Gao D W, et al. 2007. Study on the plant diversity of Liumao remains of graphite mine in Jixi City[J]. Forest Engineering, (4):1-4. (in Chinese)
- 潘春娟. 2013. 石墨尾矿在底基层中的应用[J]. 山西交通科技, 222(3):37-38.
- Pan C J. 2013. The application of graphite tailings in the subbase[J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 222(3):37-38. (in Chinese)
- 孙伟轩. 2019. 石墨尾矿混凝土耐久性能研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学.
- Sun W X. 2019. Study on the durability performance of graphite tailings concrete[D]. Harbin: Heilongjiang University. (in Chinese)
- 唐诗洋,丁会敏,张玥,等. 2022. 石墨尾矿在建材中应用的研究进展[J]. 黑龙江科学,13(24):37-39.
- Tang S Y, Ding H M, Zhang Y, et al. 2022. Research progress in the application of graphite tailings in building materials[J]. Heilongjiang Science, 13(24):37-39. (in Chinese)
- 王丽娜,申保磊. 2012. 石墨矿尾矿制备路面砖面层的试验研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, (5):24-27.
- Wang L N, Shen B L. 2012. Experimental study on preparation of the surface of pavement brick layer using graphite tailings[J]. China Non-Metallic Minerals Industry, (5):24-27. (in Chinese)
- 薛景. 2019. 石墨尾矿混凝土力学性能及导电性能研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学.
- Xue J. 2019. Study on the mechanical and conductive properties of graphite tailings concrete[D]. Harbin: Heilongjiang University. (in Chinese)
- 张琛,李桦,余盈,等. 2021. 石墨尾矿对再生粗骨料混凝土力学性能影响的研究[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 39(4):9-14.
- Zhang C, Li B, Yu Y, et al. 2021. Effect of graphite tailings on mechanical properties of recycled coarse aggregate concrete[J]. Journal of Foshan University (Natural Sciences Edition), 39(4):9-14. (in Chinese)
- 张大双. 2015. 石墨尾矿混凝土受力和导电性能研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学.
- Zhang D S. 2015. Study on the mechanical and conductive properties of graphite tailings concrete[D]. Harbin: Heilongjiang University. (in Chinese)
- GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- GB 50011—2010, Code for seismic design of buildings[S]. (in Chinese)
- GB/T 228.1—2010, 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法[S].
- GB/T 228.1—2010, Metallic materials - tensile testing - Part 1: method of test at room temperature[S]. (in Chinese)
- JGJ/T 101—2015, 建筑抗震试验规程[S].

- JGJ/T 101 – 2015, Specification for seismic test of buildings [S]. (in Chinese)
- GB/T 50081—2019, 混凝土物理力学性能试验方法标准[S].
- GB/T 50081—2019, Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties. (in Chinese)
- JGJ 52—2006, 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准[S].
- JGJ 52—2006, Standard for technical requirements and test method of sand and crushed stone (or gravel) for ordinary concrete [S]. (in Chinese)
- JGJ 55—2011, 普通混凝土配合比设计规程[S].
- JGJ 55—2011, Specification for mix proportion design of ordinary concrete [S]. (in Chinese)
- Park R. 1988. State of the art report ductility evaluation from laboratory and analytical Testing [C]//Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Kyoto, Japan; 605 – 616.
- Torres A, Brandt J, Lear K, *et al.* 2017. A looming tragedy of the sand commons [J]. Science, 357 (6355): 970 – 971.
- Xu W, Wen X, Wei J, *et al.* 2018. Feasibility of kaolin tailing sand to be as an environmentally friendly alternative to river sand in construction applications [J]. Journal of Cleaner Production, 205 (PT. 1 – 1162): 1114 – 1126.
- Zheng X, Ji T, Easa S M, *et al.* 2018. Evaluating feasibility of using sea water curing for green artificial reef concrete [J]. Construction and Building Materials, 187 (OCT. 30): 545 – 552.

## Pseudo – static Experiment on the Seismic Performance of Graphite Tailings Concrete Columns with Optimal Substitution Rate

WANG Dongxu<sup>1,2</sup>, GONG Maosheng<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

(2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

### Abstract

In order to study the optimal ratio for the graphite tailings substituting for sand and the seismic performance of the concrete column with graphite tailings, the concrete columns with graphite tailings at four ratios (10%, 20%, 30% and 40%) were tested to verify the pressive strength, the splitting tensile strength and the static compressive elastic modulus, and these parameters were compared with their corresponding parameters of the ordinary concrete and the optimal ratio for the graphite tailings substituting for sand was determined: 30%. Then a concrete column specimen at this optimal ratio was made and was subjected to a pseudo – static experiment. Based on the specimen's damage characteristics, hysteretic curve, and skeleton curve, the seismic performance of the concrete column with graphite tailings was analyzed. The results show that the compressive strength and the tensile strength of concrete with graphite tailings at optimal ratio of 30% are the highest, and the modulus of elasticity is higher than that of concrete with other ratios and close to that of the ordinary concrete, indicating that the optimal ratio is 30%. The concrete column with graphite tailings shows bending damage characteristics under low circumferential, reciprocal, and quasi – static loading, and the hysteretic curves are full and smooth, and the column has good ductility. With the increase of horizontal displacement, the secant stiffness of the specimen gradually decreases, and the equivalent viscous damping ratio gradually increases. The column as a whole exhibits good energy – consumption capacity and seismic performance.

**Keywords:** graphite tailings concrete; mechanical properties; pseudo – static experiment; hysteretic curve; aseismic capacity