

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202403006



# 节段料石拼接构造对 SCFST 柱 抗震性能影响有限元分析

杜耀峰<sup>1</sup>, 刘杰<sup>2</sup>, 苏龙辉<sup>3</sup>, 陈业伟<sup>4</sup>, 刘阳<sup>2,5</sup>, 黄玉佳<sup>2</sup>

(1. 健研检测集团有限公司, 福建 厦门 361004;

2. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

3. 中建协和建设有限公司, 福建 泉州 362700;

4. 中建四局建设发展有限公司, 福建 厦门 361006;

5. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为研究节段料石拼接构造对内填料石钢管混凝土 (SCFST) 柱抗震性能的影响, 通过 ABAQUS 软件建立 SCFST 柱的数值模型。以轴压比、钢管厚度、料石尺寸、节段料石构造为变化参数, 对 12 个试件进行低周反复荷载作用下的数值模拟。结果表明: 内填料石可显著提高试件的初始刚度、承载力及耗能能力, 但会导致试件延性系数降低; 混凝土强度、轴压比对试件的初始刚度、峰值承载力及耗能能力影响不明显, 但对延性系数影响较大; 随着料石尺寸的增大, 初始刚度基本不变, 峰值承载力最多降低 17.8%, 试件延性系数略微降低, 耗能能力显著提高; 料石节段布置与料石整体布置试件的初始刚度、峰值承载力基本相当, 但延性系数最多降低 32.7%, 且料石节段间填充混凝土拼接时可显著提高试件承载力。

**关键词:** 内填料石钢管混凝土柱; 节段料石拼接构造; 低周反复荷载作用; 延性; 承载力; 耗能能力

中图分类号: TU 392.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)02-0166-09

## Finite Element Analysis of Influence of Segment-Stone Splicing Structure on Seismic Performance of SCFST Columns

DU Yaofeng<sup>1</sup>, LIU Jie<sup>2</sup>, SU Longhui<sup>3</sup>, CHEN Yewei<sup>4</sup>,  
LIU Yang<sup>2,5</sup>, HUANG Yujia<sup>2</sup>

(1. Jianyan Testing Group Limited Company, Xiamen 361004, China;

2. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

3. Zhongjianxiehe Construction Limited Company, Quanzhou 362700, China;

4. Construction and Development Limited Company of

China Construction Fourth Bureau Investment Branch, Xiamen 361006, China;

5. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province,

Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** To study the effect of segment stone splicing structure on the seismic performance of stone prism encased concrete filled steel tube (SCFST) columns, a numerical model of SCFST columns is established by

收稿日期: 2024-03-02

**通信作者:** 刘阳 (1982-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事钢-混凝土组合结构的研究。E-mail: lyliuyang@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (52378157); 福建省自然科学基金杰出青年基金资助项目 (2020J06020); 福建省科技研究开发计划项目 (2022-K-157, 2022-K-261)

ABAQUS software. Numerical simulation is conducted on 12 specimens under low cyclic loading under different parameters, such as axial compression ratio, steel tube thickness, stone size and segment stone structure. The results show that the internal packing stone can significantly improve the specimen's initial stiffness, bearing capacity and energy dissipation capacity, but reduce the specimen's ductility coefficient. The effects of concrete strength and axial compression ratio on initial stiffness, peak bearing capacity and energy dissipation capacity are not apparent, but significantly affect the ductility coefficient. With the increase of stone size, the initial stiffness is basically unchanged, the peak bearing capacity decreases by 17.8% at most, the ductility coefficient of the specimen decreases slightly, the energy dissipation capacity increases significantly. The initial stiffness and peak bearing capacity of the specimens arranged in stone segments are the same as that arranged in stone as a whole, but the ductility coefficient can be decreased 32.7% at most, the bearing capacity of the specimens increases significantly when the concrete is filled between the stone segments.

**Keywords:** stone prism encased concrete-filled steel tube column; segment-stone splicing structure; low cyclic loading; ductility; bearing capacity; energy dissipation capacity

“双碳政策”已成为重要的国家战略,但据《2022 中国建筑能耗与碳排放研究报告》<sup>[1]</sup>统计,2020 年全国建筑全过程碳排放总量占全国碳排放的比例高达 50.9%。即使仅考虑建材生产阶段的碳排放,其碳排放比例也高达 28.2%,其中,水泥和钢材各占一半。由此可知,建筑行业的“降碳减排”是实现“双碳”目标的重要一环,而最有效的方法就是减少水泥用量,即降低混凝土的用量。石材具有抗压强度高、耐久性好、储量丰富、便于就地取材等优点,被广泛应用于建筑领域。然而,由于石材为脆性材料,抗弯强度低,抗震性能较差,应用于结构中存在安全隐患<sup>[2-3]</sup>。为了消除安全隐患,国内外学者开展了石结构加固改造研究工作<sup>[4-8]</sup>,但随着我国城镇化建设的加快,极大部分石结构建筑面临拆除改建,拆除后会产生大量废弃石材。因此,有必要对这部分石材进行回收利用,减少资源浪费。

钢管混凝土(CFST)具有承载力高、抗震防灾性能优良等特点,被广泛应用于建筑领域<sup>[9]</sup>。刘阳等<sup>[10]</sup>考虑废弃石材的资源化利用、结构的性能提升及降碳减排的需求,提出内填料石钢管混凝土(SCFST)柱,内填料石后 SCFST 柱的轴压承载力显著提升,相较于 CFST 柱,最高可提高 87%<sup>[11-13]</sup>。

由于料石节段布置对结构轴压性能的影响不大,因此,前期轴压性能研究中均采用整体料石内填于钢管混凝土中,但承受低周反复荷载作用时,受力机制发生变化,料石节段布置对结构抗震性能的影响尚不明确,且实际工程中由于料石长度受限,节段布置更适用于施工中。为揭示料石节段布置对 SCFST 柱抗震性能的影响,本文采用 ABAQUS 软件,建立 SCFST 柱的精细化模型,研究不同变化参数对 SCFST 柱抗震性能的影响。

## 1 SCFST 柱的构造

SCFST 柱是一种承载力高且抗震防灾能力优越的组合结构。SCFST 柱构造示意图,如图 1 所示。SCFST 柱由钢管、夹层混凝土和料石组成。料石置于钢管内,夹层混凝土填充于料石与外钢管内壁之间。料石为节段料石,节段数量由柱的高度确定,各节段料石间具有相同的截面形状,实际工程中各段内填料石沿钢管轴线置于钢管中,接触面重合进行拼接。

根据福建省的建筑特点,就地取材,利用石结构建筑拆除的废弃石材或采石场开采的形状规整的大块料石,经微加工后替代钢管内的大部分混凝土,填充于钢管混凝土组合结构中。钢管混凝土结构技术与石材的重复利用相结合,可有效减少混凝土的用量。同时,大块石材的直接使用又可减少粗骨料生产过程中的能耗,达到双重降碳的效益。此外,在钢管、混凝土复合约束作用下,料石处于三向受压状态,抗压强度能充分发挥,显著提升钢管混凝土柱的力学性能。

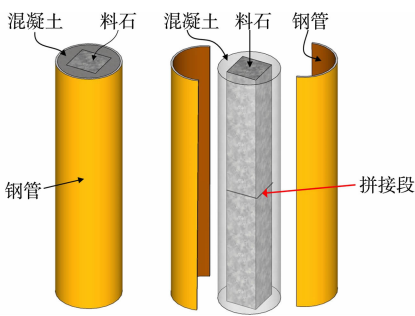


图 1 SCFST 柱构造示意图  
Fig. 1 Structure of SCFST column

2 有限元模型的设计

设计 12 个试件,包括 1 个圆形 CFST 柱和 11 个圆形 SCFST 柱试件。钢管外径( $D$ )为 219.0 mm,总高度均为 2 423 mm,试验段高度为 1 800 mm。试件的几何尺寸和构造,如图 2 所示。

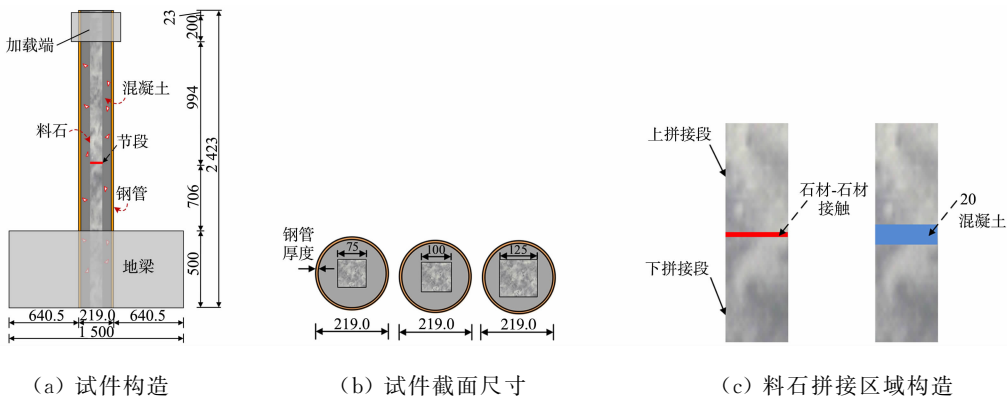


图 2 试件的几何尺寸和构造(单位:mm)

Fig. 2 Dimension and structure of specimens (unit: mm)

试件设计参数,如表 1 所示。表 1 中:试件编号的末位数字代表料石接缝数,后缀为 c 的编号代表接缝间填充 20 mm 厚的混凝土; $t$  为钢管(Q235 钢)厚度; $n$  为轴压比; $s$  为料石边长; $i$  为石材接缝数。

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of specimens

试件编号	$D/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$n$	$s/\text{mm}$	混凝土强度等级	$i/\text{个}$
t6-s0-n3-0	219	6	0.3	—	C60	—
t6-s75-n3-0	219	6	0.3	75	C60	—
t6-s75-n3-1	219	6	0.3	75	C60	1
t6-s75-n3-1c	219	6	0.3	75	C60	1
C40-t6-s75-n3-1c	219	6	0.3	75	C40	1
t6-s100-n3-0	219	6	0.3	100	C60	0
t6-s100-n3-1	219	6	0.3	100	C60	1
t6-s125-n3-0	219	6	0.3	125	C60	0
t6-s125-n3-1	219	6	0.3	125	C60	1
t6-s100-n3-1c	219	6	0.3	100	C60	1
t6-s100-n1-1	219	6	0.1	100	C60	1
t8-s100-n3-1	219	8	0.3	100	C60	1

试件轴压比的计算公式为

$$n=N_{\text{k}}/N_{\text{u}}.$$
(1)

式(1)中: $N_{\text{k}}$  为试验轴力; $N_{\text{u}}$  为试件轴心受压承载力的设计值<sup>[12]</sup>。

3 有限元模型的建立

3.1 混凝土本构

韩林海<sup>[14]</sup>经过大量试验验证后,提出钢管约束作用下核心混凝土的应力-应变( $\sigma\epsilon$ )关系,圆钢管约束混凝土的本构关系为

$$y=\begin{cases} 2x-x^2, & x\leqslant 1, \\ \frac{x}{\beta_0(x-1)^\eta+x}, & x>1. \end{cases}$$
(2)

式(2)中: $x=\epsilon/\epsilon_0$ , $\epsilon_0$  为峰值应力下的混凝土应变, $\epsilon_0=\epsilon_c+[1\ 400+800(f'_c/24-1)]\xi^{0.2}$ , $\xi$  为约束效应系数<sup>[11]</sup>, $\epsilon_c=1\ 300+12.5f'_c$ , $f'_c$  为混凝土圆柱体轴心抗压强度; $y=\sigma/\sigma_0$ , $\sigma_0=[1+(-0.054\xi^2+0.4\xi)(24/f'_c)^{0.45}]f'_c$ ; $\eta=2$ ; $\beta_0=(2.36\times 10^{-5})^{[0.25+(\xi-0.5)^7]}f'^2_c\times 3.51\times 10^{-4}$ 。

3.2 钢材本构

钢材采用 Tao 等<sup>[15]</sup>提出的应力-应变模型,如图 3 所示。图 3 中: $f_p$  为钢材比例极限强度; $f_y$  为钢材屈服强度; $f_u$  为钢材极限抗拉强度; $\epsilon_e$  为钢材比例极限应变; $\epsilon_{e,1}$  为钢材屈服应变; $\epsilon_{e,2}$  为钢材塑性极限应变; $\epsilon_{e,3}$  为钢材塑性强化极限应变;泊松比取 0.3。

3.3 石材本构

石材为脆性材料,受力性能与混凝土相似,抗压强度高,抗拉强度低。文献[16]中花岗岩的受压应力-应变关系曲线,如图 4 所示。图 4 中: $f'_{sp}$  为石材圆柱体抗压强度。

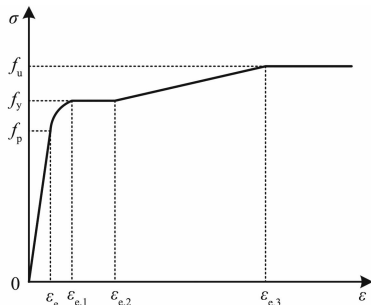


图 3 钢材应力-应变关系曲线

Fig. 3 Stress-strain relationship curves of steel

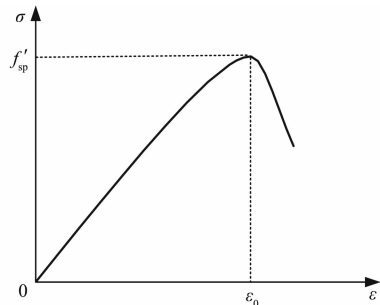


图 4 石材受压应力-应变关系曲线

Fig. 4 Stress-strain relationship curves of stone under compression

取花岗岩弹性模量为 48 GPa,泊松比为 0.29,其受压应力-应变的计算公式为

$$\sigma_c = \begin{cases} f'_{sp} \frac{n\zeta - \zeta^2}{1 + (n-2)\zeta} \zeta & \zeta \leq \epsilon_{s0} \\ f'_{sp} \frac{\zeta}{20(\zeta-1)^2 + \zeta} & \zeta > \epsilon_{s0} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $\sigma_c$  为石材受压过程中任意点的应力; $f'_{sp}$  取 120.8 MPa; $n=E_{sc}/E_{ss}$ , $E_{sc}$  为初始受压弹性模量, $E_{ss}$  为峰值点的割线模量; $\zeta=\epsilon_{sc}/\epsilon_{s0}$ , $\epsilon_{sc}$  为石材的受压应变, $\epsilon_{s0}$  为石材的峰值应变,取 0.003。用输入断裂能的方法设置石材受拉行为。

3.4 接触关系

核心混凝土与钢管、料石之间的接触界面采用面-面接触,法向界面为硬接触,切向界面摩擦公式设置为罚函数(库伦摩擦),允许接触面间有弹性滑移,将核心混凝土与钢管之间的摩擦系数设置为 0.6,核心混凝土与料石之间的摩擦系数设置为 0.7。接缝处石材与石材采用面-面接触,法向为硬接触,切向为罚函数,摩擦系数为 0.7。钢管与刚体加载端绑定,钢管与刚体地梁绑定,混凝土-地梁底部绑定,料石-地梁底部绑定。

3.5 边界条件及加载方式

有限元模型示意图,如图 5 所示。图 5 中: $U1 \sim U3$  分别为  $x, y, z$  方向上的位移; $UR1 \sim UR3$  分别为  $x, y, z$  方向上转角。模型底端采用完全固定的约束方式,顶端为自由端,对顶端耦合点 RP-1, RP-2 上施加恒定的竖向荷载和逐级增加的水平荷载。

3.6 单元选取及网格划分

混凝土、料石、刚性加载头、地梁采用八结点线性六面体减缩积分单元(C3D8R);钢管采用壳单元(S4)。

3.7 有限元模型的验证

为了验证有限元模型的合理性,采用 ABAQUS 软件对文献[17]中的 CFST 柱(试件编号 s0-t6-0.25)及试验得到的 SCFST 柱(试件编号 s100-t6-0.2, s75-t8-0.2)

的试验结果进行模拟。试验中 SCFST 柱的截面尺寸及内填料石尺寸与文中有限元模拟试件一致,试件高度为 1 570 mm。

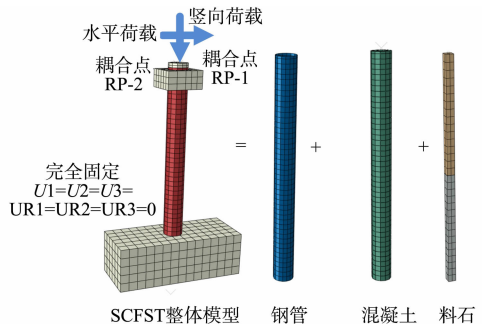


图 5 有限元模型示意图

Fig. 5 Finite element model

模拟破坏形态与试验破坏形态的对比,如图 6 所示。由图 6 可知:模拟破坏形态中的 SCFST 柱在距柱底 250 mm 范围内的钢管严重鼓曲,与试验破坏形态一致。

模拟值与试验值的对比,如图 7 所示。图 7 中: $P$  为荷载; $\Delta$  为位移。由图 7 可知:有限元模拟值与试验值总体吻合良好,表明有限元建模技术可较好地模拟 SCFST 柱的拟静力抗震性能。

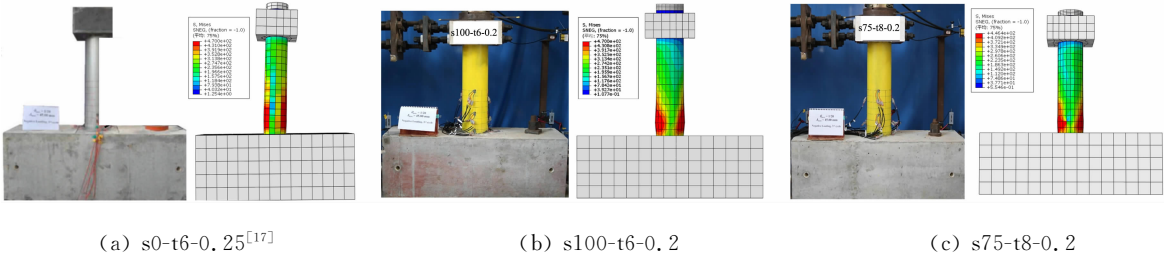


图 6 模拟破坏形态与试验破坏形态的对比

Fig. 6 Comparison between simulation failure modes and experimental failure modes

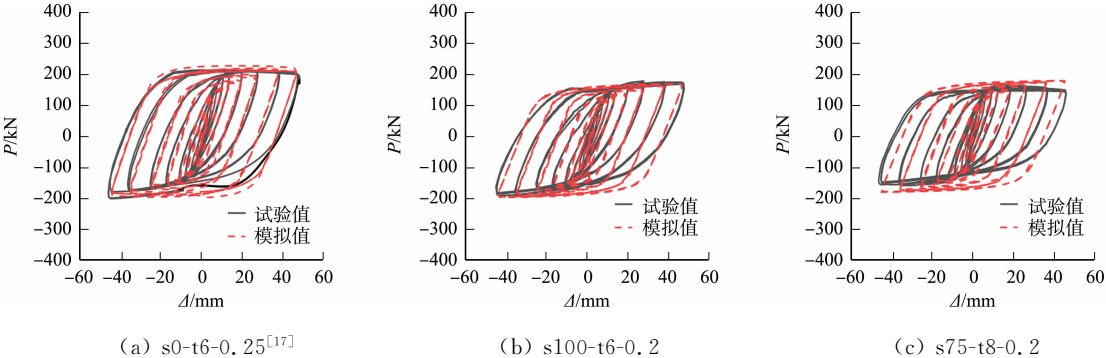


图 7 模拟值与试验值的对比

Fig. 7 Comparison between simulation values and experimental values

4 模拟结果及分析

4.1 破坏形态

部分典型试件的应力云图,如图 8 所示。由图 8 可知:SCFST 柱在距柱底 250 mm 范围内的钢管出现严重损伤,受拉及受压侧钢管屈曲,与文献[17]中 CFST 试验破坏形态类似。

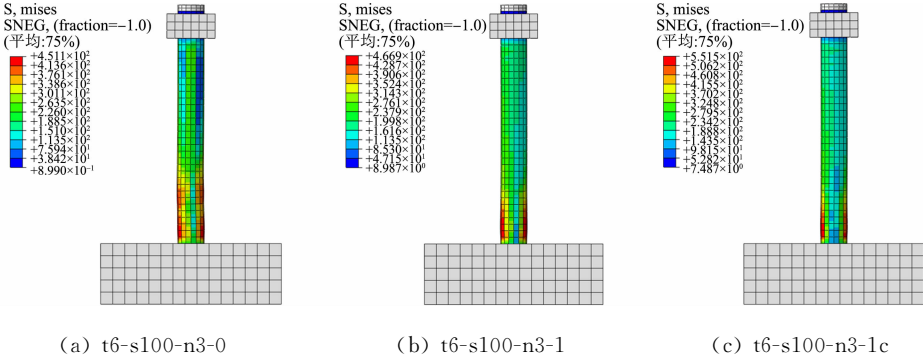


图 8 部分典型试件的应力云图

Fig. 8 Stress nephogram of some typical specimens

4.2 滞回曲线

试件的荷载-位移滞回曲线,如图 9 所示。图 9 中: $P_{\max}^+$  为正向最大峰值应力; $P_{\max}^-$  为反向最大峰值应力。由图 9 可知:所有试件的荷载-位移滞回曲线均呈对称的梭形,形状饱满,这是因为钢管有效约束了夹层混凝土及石材,限制了其内部裂缝发展,使其力学性能充分发挥,相反的,夹层混凝土和料石的存在可抑制钢管向内部屈曲,从而使试件具备较强的耗能能力;在加载初期,水平荷载-位移曲线基本呈线性变化,试件处于弹性阶段,没有明显的残余变形;随着荷载的增大,试件到达屈服阶段,滞回环越来越



饱满, 面积越来越大。

由图 9 还可知: 随着料石尺寸的增大, 滞回环面积显著增大, 形状愈发饱满, 说明料石尺寸对 SCFST 柱滞回性能的影响较大, 料石尺寸越大, 抗震性能越优; 随着轴压比的增大, 滞回曲线形状无明显变化, 说明轴压比对 SCFST 柱的滞回性能影响不大; 随着钢管厚度及混凝土强度的增大, 滞回环面积略微增大, 说明钢管厚度、混凝土强度对 SCFST 柱的滞回性能有一定影响; 节段料石构造对滞回性能的影响较大, 相较于整体料石 SCFST 柱, 节段料石试件的滞回性能略差, 但比 CFST 柱更为饱满。

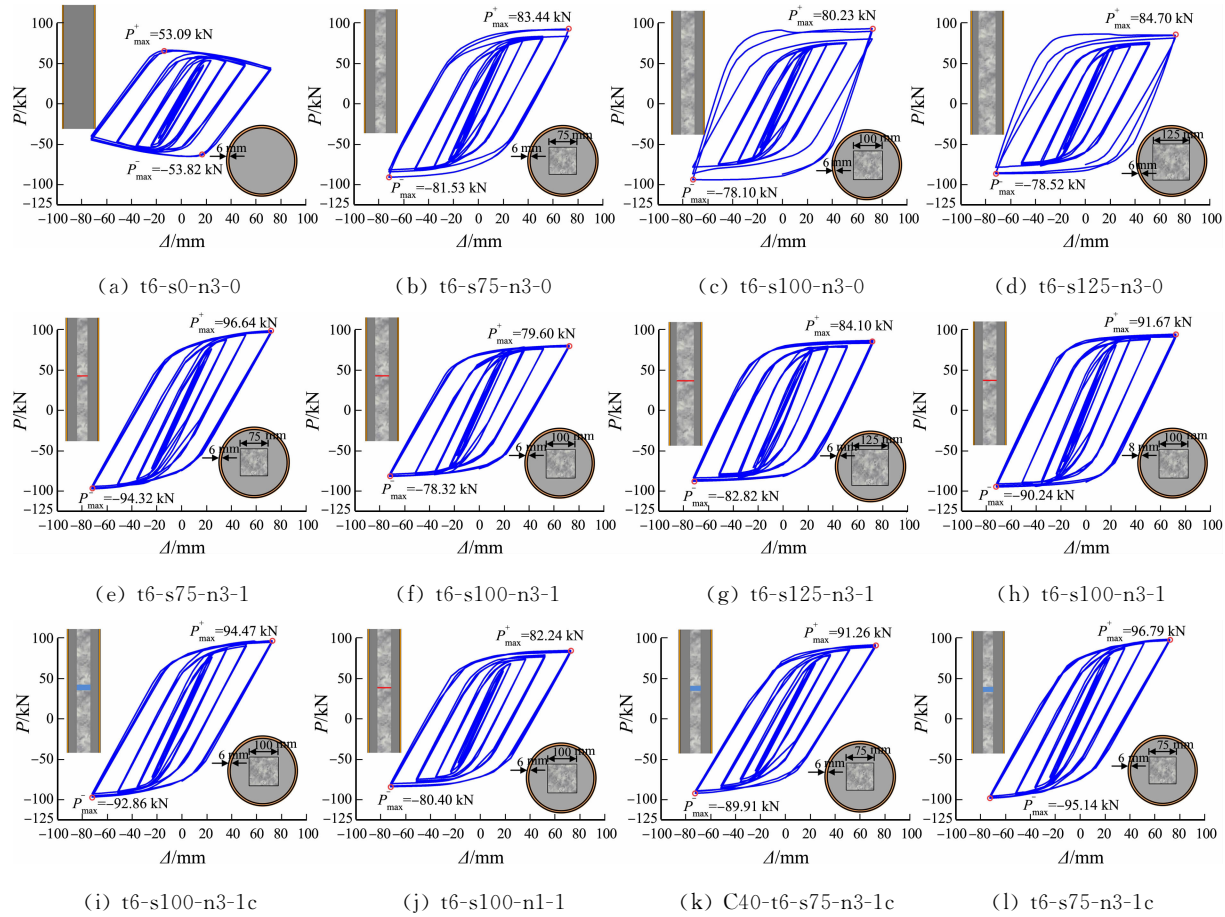


图 9 试件的荷载-位移滞回曲线

Fig. 9 Load-displacement hysteresis curves of specimens

4.3 骨架曲线

试件的荷载-位移骨架曲线, 如图 10 所示。

由图 10(a), (b) 可知: 相较于 CFST 柱, SCFST 柱的初始刚度显著增大, 且随着料石尺寸的增大, 试件初始刚度基本不变, 荷载不存在明显下降段, 保持平缓; 相较于 CFST 柱, SCFST 柱的峰值承载力最多可提高约 40.0%, 但随着料石尺寸的增大, 峰值承载力降低, 最多降低 17.8%。

由图 10(c) 可知: 随着混凝土强度的提高, 试件初始刚度明显提高, 承载力略微提高 5.5%。由图 10(d) 可知: 随着轴压比的提高, 试件的初始刚度、承载力变化不明显, 但钢管厚度越大, 试件初始刚度、承载力明显提高。

由图 10(e), (f) 可知: 料石节段布置对试件初始刚度影响不大, 且节段料石布置的峰值承载力与料石整体布置的承载力基本相当, 但当节段料石节段间填充混凝土, 试件承载力明显提高, 原因可能是节段料石间填充混凝土后改变了节段料石-料石间的传力机制。此外, 填充混凝土与节段料石之间的粘结性能也有利于抵抗外部荷载。

4.4 延性系数

采用延性系数  $\mu_p$  (试件正反向延性系数平均值) 表示试件在低周反复受力状态下的变形性能, 延性系数的计算公式为

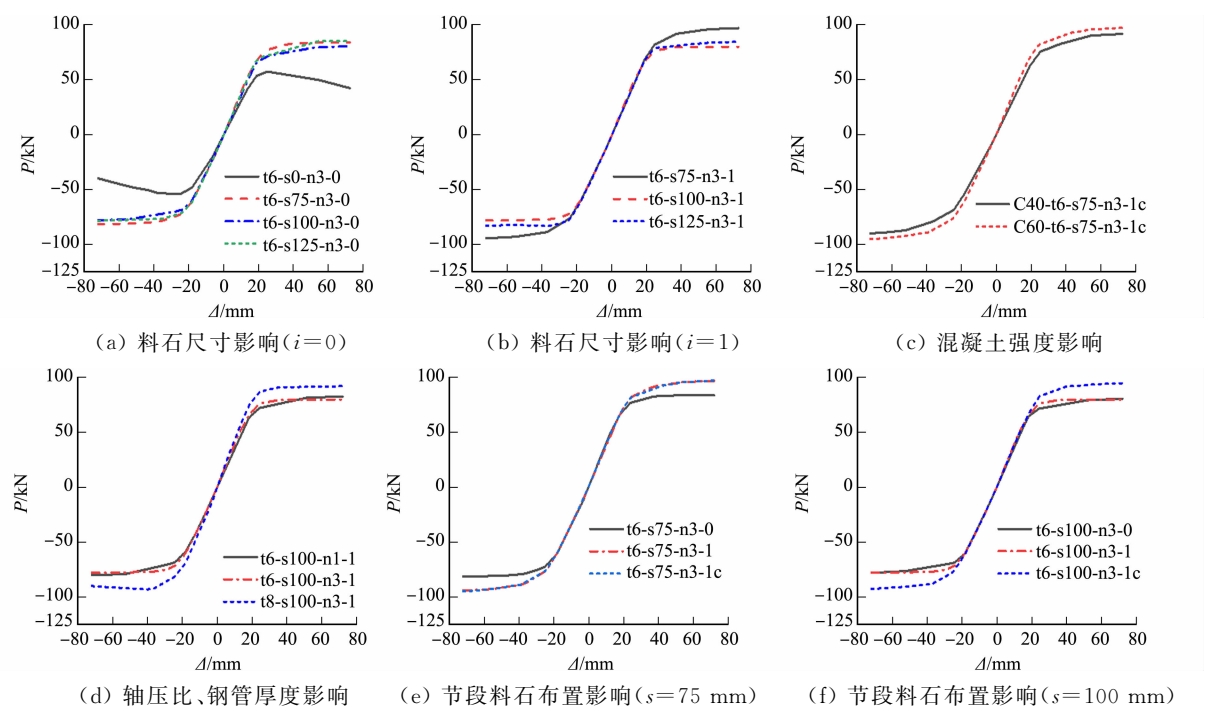


图 10 试件位移-荷载骨架曲线

Fig. 10 Displacement-load skeleton curves of specimens

$$\mu_p = \frac{\Delta_y}{\Delta_u} \tag{4}$$

式(4)中: $\Delta_y$  为试件的屈服位移; $\Delta_u$  为试件的极限位移,对于 SCFST 柱,统一取最大位移作为试件的极限位移。

不同变化参数下 SCFST 柱的延性系数,如图 11 所示。

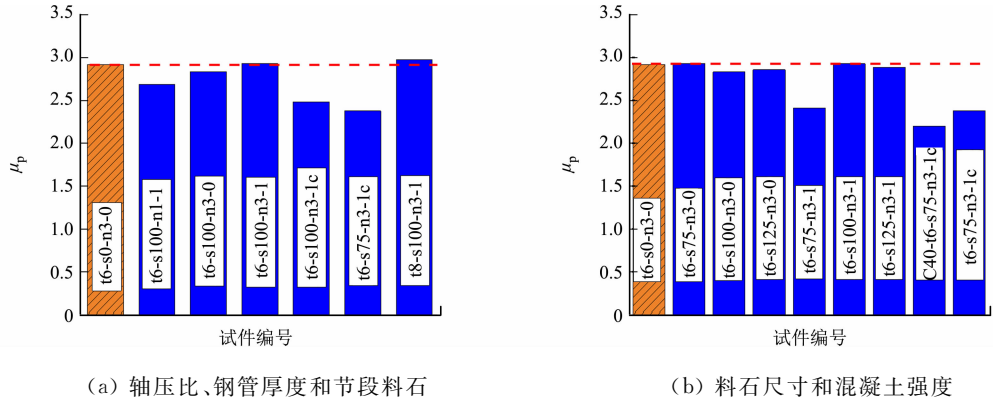


图 11 不同变化参数下 SCFST 柱的延性系数

Fig. 11 Ductility coefficients of SCFST columns under different parameters

由图 11(a)可知:内填料石后,SCFST 柱的延性系数较 CSFT 柱均有不同程度的降低,最多降低 32.7%,原因在于料石脆性极强,内填于钢管混凝土中,可降低试件的变形性能,这与 SCFST 柱的轴压性能研究结论一致,内填料石后试件的变形性能显著降低<sup>[11]</sup>;当轴压比由 0.1 增至 0.3 后,SCFST 柱的延性系数变化不大;当钢管厚度由 6 mm 增至 8 mm 时,延性系数略微提高;节段料石布置后,试件的延性系数较整体料石布置试件延性系数显著降低,最多降低约 20.0%,且节段料石间填充混凝土试件较节段料石-料石接触试件延性差,但差异较小,原因可能在于低周反复作用下,拼接段附近的混凝土更容易发生挤压开裂,从而降低试件的变形性能。

由图 11(b)可知:料石尺寸越大,试件延性系数越小,原因在于料石尺寸越大,脆性特征越明显,变形性能越差;随着混凝土强度的提高,试件延性系数略微增大。

经分析可知,在研究参数范围内,轴压比、混凝土强度、节段料石布置对试件延性影响最为显著,料

石尺寸、钢管厚度对试件延性系数影响相对较弱。

4.5 耗能能力

为反映试件在低周反复受力状态下的耗能能力,采用循环加载过程中试件的总做功,将滞回环面积作为试件的累积耗能( $E_s$ )。

试件的累积耗能,如图 12 所示。

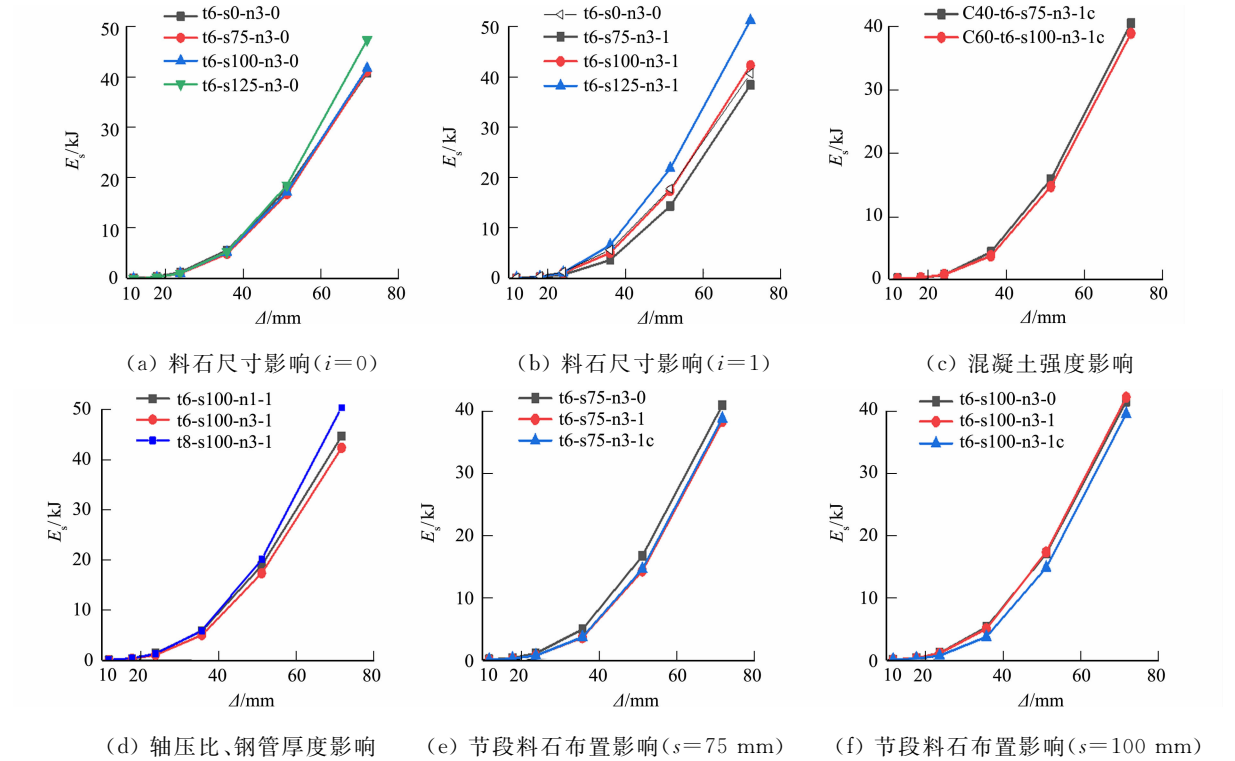


图 12 试件的累积耗能

Fig. 12 Cumulative energy dissipation of specimens

由图 12(a), (b) 可知:料石尺寸由 0 mm 增至 125 mm 后,试件的累计耗能显著增大,原因是料石尺寸越大,钢管对料石的约束越能有效传递,增强了试件的性能,提高了耗能能力。

由图 12(c) 可知:C40, C60 试件的耗能能力相差不大,说明混凝土强度对于 SCFST 柱耗能能力影响不大。

由图 12(d) 可知:轴压比由 0.1 增至 0.3 后,试件耗能能力略微降低,且试件的累积耗能差值随加载行程增大而逐渐增大;钢管厚度由 6 mm 增至 8 mm 后,试件耗能能力显著提高,原因是随着钢管厚度的增大,对核心混凝土及料石的约束效应增强,核心混凝土能够经历更大的塑性变形,从而具备较大的耗能能力。

由图 12(e), (f) 可知:节段料石布置后试件的耗能能力较整体布置试件略微降低,原因在于节段料石布置后试件的整体性较差,在拼接部位附近的混凝土极易开裂,导致耗能能力降低。

5 结论

通过对 1 个圆形 CFST 柱和 11 个圆形 SCFST 柱进行有限元模拟,可得以下 5 个结论。

1) SCFST 柱的破坏形态与 CFST 柱类似,均表现为距地梁顶端 250 mm 处出现严重损伤,受拉及受压侧钢管严重屈曲。

2) 试件的滞回曲线均呈对称的梭形,形状饱满。相较于 CFST 柱,内填料石后初始刚度显著增加,峰值承载力较 CFST 柱最多可提高约 40.0%,但随着料石尺寸的增大,峰值承载力最多降低 17.8%。料石节段布置试件的初始刚度较料石整体布置试件影响不大,峰值承载力基本相当,但当料石接缝间填充混凝土时,可明显提高试件承载力。



- 3) SCFST 柱延性系数较 CSFT 柱均有所降低,最多可降低 32.7%。节段料石布置后试件的延性系数较整体料石布置试件明显降低,最多降低约 20.0%。轴压比、混凝土强度、节段料石布置对试件延性影响最为显著。料石尺寸、钢管厚度对试件延性系数影响相对较弱。
- 4) 料石尺寸越大,试件的累计耗能越大。混凝土强度、轴压比对累积耗能的影响不大。节段料石布置后试件的耗能能力较料石整体布置试件略微降低。
- 5) 节段料石布置形式对试件的抗震性能并无不利影响,较整体料石试件滞回性能略差,但初始刚度、峰值承载力基本相当,仍比 CFST 柱优越。

参考文献:

[1] 中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专委会. 2022 中国建筑能耗与碳排放研究报告[R]. 重庆:[s. n.],2022.

[2] 刘阳,郭子雄,杨勇,等. 闽南地区农村住宅安全性现状及防灾建议[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2007,28(1): 63-67. DOI:10.3969/j. issn. 1000-5013. 2007. 01. 017.

[3] 郭子雄,柴振岭,胡奕东,等. 条石砌筑石墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(3):57-63. DOI:10.14006/j. jzjgxb. 2011. 03. 008.

[4] 刘阳,郭子雄,刘宝成,等. 嵌埋 CFRP 筋组合石梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(3):75-81. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2011. 03. 011.

[5] 张丰宇,何佰昭,吴志刚,等. 粘钢加固既有石楼板抗弯性能试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2023,31(5): 1262-1277. DOI:10.16058/j. issn. 1005-0930. 2023. 05. 016.

[6] 郑奕鹏,郭子雄,柴振岭,等. 花岗岩石材植筋锚固性能试验[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2014,35(2):202-206. DOI:10.11830/ISSN. 1000-5013. 2014. 02. 0202.

[7] SEBASTIAN W,WEBB S. Tests on prototype pretensioned natural stone beams[J]. Construction and Building Materials,2021,271:121555. DOI:10.1016/j. constrbuildmat. 2020. 121555.

[8] MIAO Wei,GUO Zixiong, YE Yong. Performance of composite stone beams with prestressed NSM longitudinal CFRP reinforcement subjected to bending[J]. Engineering Structures,2023,277:115423. DOI:10.1016/j. engstruct. 2022. 115423.

[9] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2004.

[10] 刘阳,林茂彬,陈海,等. 一种内填节段料石的钢管混凝土组合柱:201721417089. 7[P]. 2018-07-31.

[11] YE Yong,LIU Yang,GUO Zixiong,*et al.* Stone prism encased concrete-filled steel tube columns subjected to axial compression[J]. Structures,2021,33:1853-1867. DOI:10.1016/j. istruc. 2021. 05. 058.

[12] 谢菁,刘阳,叶勇,等. 内填料石钢管混凝土短柱轴压性能研究及承载力计算[J]. 建筑结构学报,2022,43(6):43-52. DOI:10.14006/j. jzjgxb. 2020. 0440.

[13] 谢菁,叶勇,刘阳,等. 内填料石钢管混凝土中长柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2023,44(2):27-36. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2021. 0584.

[14] 韩林海. 钢管混凝土结构原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2023.

[15] TAO Zhong,WANG Zhibin, YU Qing. Finite element modelling of concrete-filled steel tube columns under axial compression[J]. Journal of Constructional Steel Research,2013,89:121-131. DOI:10.1016/j. jcsr. 2013. 07. 001.

[16] 叶勇. 表层嵌埋预应力 CFRP 筋组合石梁/板受弯性能研究[D]. 厦门:华侨大学,2014.

[17] JIANG Hang, YE Yong, MIAO Wang,*et al.* Hysteretic behavior of concrete-filled bimetallic tube (CFBT) columns under combined loads[J]. Structures,2023,47:1396-1407. DOI:10.1016/j. istruc. 2022. 11. 139.

(责任编辑:钱筠      英文审校:方德平)