

# 钢管约束的低碳超高强石渣混凝土的力学性能

陈国灿<sup>1,2</sup>

(1. 莆田学院土木建筑工程学系, 福建 莆田 351100;

2. 福建建筑设计有限公司, 福建 福州 350001)

**摘 要:** 低碳超高强石渣混凝土是作者利用地方原材料自主研发的强度达到 137.3 MPa 的新型环境友好型混凝土. 本文通过 14 个试件的轴心抗压试验, 考察并分析了钢管约束超高强石渣混凝土的破坏形态, 研究了影响核心混凝土强度增长率的因素和规律. 试验结果表明: 钢管内填充低碳超高强石渣混凝土可以解决由于自收缩偏大引起的钢管混凝土脱空的问题; 在试验参数范围内, 钢管约束超高强石渣混凝土的强度增长率与套箍指标成正比; 低碳超高强石渣混凝土用钢管约束后脆性性能得到显著的改善, 位移延性系数达到 6.5~26.3; 所有的试件都是因为剪切而破坏, 同时对其破坏机理进行了分析.

**关键词:** 力学性能; 低碳超高性能石渣混凝土; 钢管约束超高强石渣混凝土; 延性; 破坏机理

**中图分类号:** TU528.31

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1674-2869.2010.12.014

## 0 引 言

超高强混凝土具有比强度高、能源资源消耗少、全寿命周期的建筑成本低等优点, 已成为近几年研究的热点<sup>[1-8]</sup>, 建设部发布的“十一五”国家科技支撑计划重点项目“现代建筑设计与施工关键技术研究”课题申请指南中, 明确要求研究利用地方原材料和普通成型工艺配制出 C100 以上高性能混凝土的关键技术.

为解决河砂资源短缺地区配制超高强混凝土的技术难题, 作者利用本地廉价的石渣替代河砂以低至 350 kg/m<sup>3</sup> 的水泥消耗量自主研发了强度超过 137.3 MPa 的低碳超高强石渣混凝土, 试验证明此举可妥善地解决高水泥用量引发的混凝土体积稳定性的问题<sup>[6]</sup>. 然而超高强石渣混凝土的高脆性<sup>[3]</sup>限制了其在实际工程中的应用, 因此超高强石渣混凝土必须用延性的材料约束才能充分显示它的优越性能.

钢管混凝土由于能够适应现代工程结构向大跨度、高耸、重载发展和承受恶劣条件的需要等优点, 受到人们的青睐, 得到了迅猛的发展. 但钢管超高强混凝土的基础理论及应用研究等各个方面都还有待于深入<sup>[5-7]</sup>, 对钢管一超高强石渣混凝土的研究更少<sup>[6]</sup>.

在结构中混凝土一般处于复杂应力状态<sup>[9]</sup>,

但由于多轴试验的复杂性, 国内外专家对混凝土的多轴强度和变形进行的研究与分析还缺乏系统性<sup>[9]</sup>, 对超高强混凝土材料的力学特性研究也多局限于单向应力状态<sup>[3-4]</sup>. 针对钢管混凝土中核心混凝土处于等侧压的三向应力状态的特点, 共制作了 14 个试件, 以混凝土强度和试件的直径、径厚比为参数, 通过试验, 研究钢管约束情况下超高强石渣混凝土的破坏形态和强度变化规律, 积累试验数据, 为建立合理的强度准则提供依据, 为系统研究钢管与超高强石渣混凝土组合结构的性能打下基础.

## 1 实验简况

### 1.1 构件的制作与养护

钢管超高强石渣混凝土试件的制作在莆田学院土木工程试验中心完成, 钢管由 20 号无缝钢管加工制作而成, 内填立方体抗压强度为 111.8~137.3 MPa 的超高强石渣混凝土; 试件的参数资料、核心混凝土的配合比分别见表 1 和表 2.

超高强石渣混凝土在强制式搅拌机中搅拌后, 先在钢管底部装入约为体积 1/3 的混凝土, 然后将钢管竖立于磁性振动台上, 然后开动振动台, 一边振动一边添料, 同时用同一盘混凝土混合料制作边长为 100 mm 的立方体试块 1 组.

试件成型后, 上端立即用塑料薄膜紧密封头,

收稿日期: 2010-10-06

基金项目: 福建省自然科学基金计划资助项目(基金项目编号: 2007J0163); 莆田市科技计划资助项目(2007G26)

作者简介: 陈国灿(1963-), 男, 福建仙游人, 副教授, 高级工程师. 研究方向: 低碳超高强混凝土的研发与应用研究.

在试验室内进行绝湿养护;混凝土试块拆模后,用 塑料袋紧密包裹,与钢管混凝土同条件绝湿养护.

表 1 钢管约束超高强石渣混凝土试件参数一览表

Table 1 Parameters of GSHPCUS filled with steel tubes short columns

试件	$D\times t/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$f_y/\text{MPa}$	配比	$f_{cu}/\text{MPa}$	$N_u/\text{kN}$	$\varepsilon_u/\%$	$\varepsilon_F/\%$	$\theta$	$\eta_1$	$\eta$
G106	121×5	370	295	A3	137.3	1 927	0.946	24.843	0.577 96	26.261	0.493 98
G112	127.4×5.7	390	295	A3	137.3	2 217	1.46	21.182	0.632 94	14.508	0.549 75
G118	127.4×8.5	390	295	A3	137.3	2 563	2.159	23.877	1.0180 7	11.0593	0.767 75
G124	152×5.5	465	295	A3	137.3	2 764	0.963	16.054	0.497 59	16.671	0.344 2
G130	133×5	405	275	A3	137.3	2 178	0.822	17.83	0.484 17	21.691	0.423
G132	121×5	370	295	A5	130.1	1 963	1.251 4	14.778	0.609 94	11.8092	0.617 52
G135	127.4×5.7	390	295	A5	130.1	2 217	1.028	11.726	0.667 97	11.406 6	0.635 51
G141	127.4×8.5	390	295	A5	130.1	2 532	1.91	15.018	1.074 41	7.862 8	0.830 02
G147	152×5.5	465	295	A5	130.1	2 734	0.877	8.129	0.525 13	9.269 1	0.397 5
G153	133×5	405	275	A5	130.1	2 070	1.153	17.983	0.510 96	15.597	0.4019 5
G137	121×5	390	295	A6	111.8	2 078	1.387	12.892	0.777 3	9.294 9	0.735 16
G143	127.4×5.7	390	295	A6	111.8	2 544	1.215	7.887	1.250 27	6.491 4	1.145 58
G149	127.4×8.5	465	295	A6	111.8	2 662	1.114	6.452	0.611 09	5.791 7	0.567 33
G155	152×5.5	405	275	A6	111.8	2 002	0.765	9.012	0.594 6	11.780 4	0.558 3

注: $D$ ——钢管外径实测值; $t$ ——钢管厚度实测值; $L$ ——钢管的长度; $f_y$ ——钢管的屈服强度; $f_{cu}$ ——边长为 100 mm 的超高强石渣混凝土立方体抗压强度; $f_c$  核心混凝土轴心抗压强度,根据试验结果分析  $f_c/f_{cu}=0.7$ ; $\theta=f_yA_s/(f_cA_c)$ ——套箍指标; $\eta_1=\varepsilon_F/\varepsilon_u$ ——位移延性系数; $\eta$ ——核心混凝土强度增长率,按式(2)计算.

表 2 低碳超高强石渣混凝土的配合比汇总表

Table 2 Mixture ratio of GSHPCUS

配合比	水泥:硅粉:偏高岭土:粉煤灰:石渣:碎石:减水剂	水胶比	水泥用量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$f_{cu}/\text{MPa}$
A3	1:0.167:0.167:0.333:2.028:3.056:0.069 4	0.22	350	137.3
A5	1:0.175:0.175:0.337 5:1.750:2.575:0.062 5	0.22	380	130.1
A6	1:0.167:0.0:0.500:2.028:3.056:0.044 4	0.25	350	111.8

注:养护条件为绝湿养护; $f_{cu}$ ——超高强石渣混凝土 100 mm 立方体 60 d 的抗压强度.

1.2 构件的测试

当钢管超高强石渣混凝土短柱试件成型 50 d 后,托运到中南大学防灾科学与技术研究所着手做测试的准备工作.

试件的测试工作中南大学土木工程安全实验室 TYS—500 型长柱压力机上进行.大致在试件的中部附近对称位置粘贴了 4 对应变片(每对应变片包含纵向、环向各一片)(加载与量测装置见图 1).

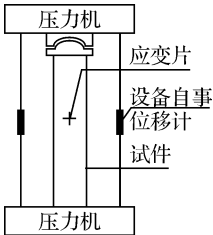


图 1 加载与量测装置

Fig.1 Test set-up

轴向荷载、位移数据由试验机自带的软件自动采集.轴向、横向的应变则通过 DH3818 静态应变测试仪静态电阻应变仪由电脑自动采集.

本试验采用分级加载,每级荷载约为极限荷载的 1/10,达到每级荷载后,持荷约 1 min,达到极限荷载后则采用连续加载,直至试件达到极限变形时,终止试验.

2 试验结果与分析

2.1 构件加载前的宏观特征与分析

高强混凝土、超高强混凝土的水泥用量通常偏大,较大的自收缩导致钢管混凝土界面过早脱空而影响钢管混凝土柱的力学性能<sup>[7]</sup>.低碳超高强石渣混凝土由于采用低水泥用量方案,加上石渣中石粉的填充效应,混凝土的自收缩量明显减小.

试件制作与养护的全过程观察表明,钢管内的低碳超高强石渣混凝土均未见明显的收缩,试件表面均未采用高强砂浆补平;钢管与核心混凝土界面也未出现过早脱空的现象.

2.2 构件破坏特征与分析

2.2.1 构件的破坏特征 对试验的全过程观察表明,在本次试验参数范围内,所有的试件都呈现剪切型“破坏”的特征(见图 2),貌似腰鼓型破坏的 G143 试件,剥离外层的钢管后,仍可观察到核心混凝土呈现出明显的剪切型破坏的特征(见图 2).

2.2.2 试件的破坏机理分析 由于超高强石渣混凝土具有高度脆性的特点,在受压变形过程中,横向应变与纵向应变的比值(即泊桑比)几乎保持不变(见图 3),其值(约为 0.256<sup>[3]</sup>)小于钢管的泊松比(0.283),因此,在核心混凝土的泊桑比达到钢管的

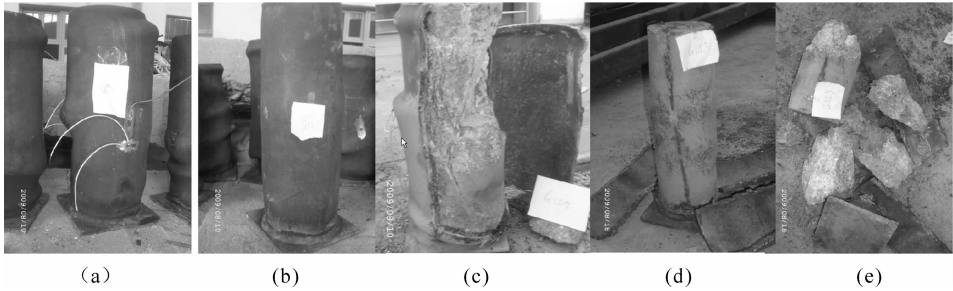


图 2 钢管超高强石渣混凝土轴心受压短柱的破坏形态

Fig. 2 Failure mode of GSHPCUS filled with steel tubes short columns subjected to axial load

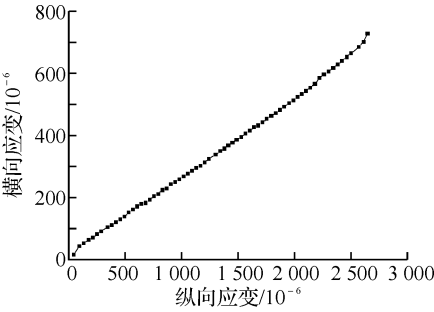


图 3 超高强石渣混凝土的横向应变与纵向应变的关系曲线

泊松比之前,钢管与混凝土之间不存在相互作用的问题,核心混凝土处于单向受压状态。

当核心混凝土接近轴心抗压强度时,核心混凝土内产生了微裂缝并形成破裂面,假如不受任何约束,荷载稍微增大,超高强混凝土即刻产生剪切破坏(见图 4);在钢管约束的混凝土中,当横向变形增大至泊桑比等于或大于钢管的泊松比时,核心混凝土与钢管之间在径向产生相互作用力,核心混凝土因此受到延性钢管的约束,具有较高抗剪能力的钢管与核心混凝土一起共同抵抗截面的剪切变形,延缓剪切破坏的发生,所以,试件破坏时出现较明显的剪切变形。



图 4 低碳超高强石渣混凝土的破坏形态

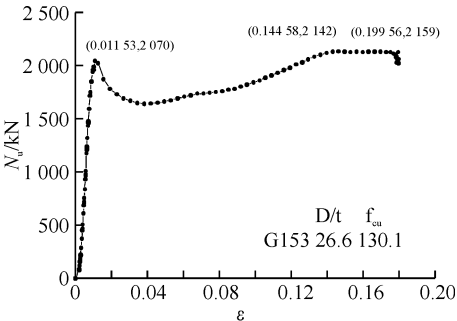
Fig. 4 Failure mode of GSHPCUS

2.3 钢管超高强石渣混凝土试件的变形性能

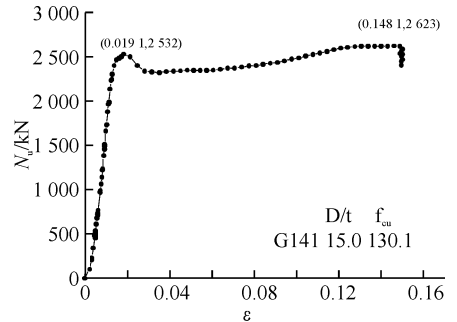
钢管超高强石渣混凝土试件和超高强石渣混凝土的破坏形态分别见图 2(a)和图 4,从破坏形态观察对比可初步得出结论,钢管超高强石渣混凝土试件具有良好的变形性能。

钢管超高强石渣混凝土组合短柱的荷载与平均应变关系曲线见图 5,从图 5 及表 1 可知,在试验参数范围内,无论钢管直径大小,核心混凝土强度高,套箍指标大小,钢管超高强石渣混凝土试件都具有很强的塑性变形能力,实测试件的最大压缩应变值达到 6.45%~24.84%(见表 1),根据文献[6]的方法计算,位移延性系数达到 6.5~26.3。

因此,高脆性的超高强石渣混凝土用钢管约束后,其脆性性能得以显著的改善。



(a) 荷载-轴向平均应变关系曲线



(b) 荷载-轴向平均应变关系曲线

图 5 荷载-平均轴向应变关系曲线

Fig. 5 Load &-average strain curves

2.4 钢管约束的超高强石渣混凝土的强度增长率

根据叠加计算理论,受钢管约束的钢管超高强石渣混凝土极限承载力的计算公式<sup>[10]</sup>是

$$N_u = (\eta + 1)f_c A_c + f_y A_s \tag{1}$$

所以,受钢管约束的核心混凝土的强度增长率  $\eta$  为:

$$\eta = (N_u - f_y A_s - f_c A_c) / f_c A_c \tag{2}$$

在分析试验数据内在规律的基础上,假设钢管约束超高强混凝土的强度增长率  $\eta$  与套箍指标  $\theta$  满足线性关系:

$$\eta=a+b\theta \tag{3}$$

其中  $a$  和  $b$  为参数.

假设残差  $e_i=\eta_i-(a+b\theta_i)$  数列服从平均值为零,方差为  $\sigma_i^2$  的正态分布,采用文献[6] 相同的处理方法, $a$  和  $b$  由最小二乘法确定,即利用残差平方和  $Q(\theta,\eta)=\sum_{i=1}^ne_i^2$  最小求得斜率  $b_0$  和截距  $a_0$ .

$$b_0=\frac{\sum_{i=1}^n\theta_i\eta_i-n\bar{\theta}\bar{\eta}}{\sum_{i=1}^n\theta_i^2-n(\bar{\theta})^2};a_0=\bar{\eta}-b_0\bar{\theta} \tag{4}$$

其中:  $\bar{\theta}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\theta_i;\bar{\eta}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\eta_i$  (5)

拟合的标准差为

$$SD=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(\eta_i-a-b\theta_i)^2}{n-2}} \tag{6}$$

相关系数按下列公式计算:

$$r=\frac{\sum_{i=1}^n(\theta_i-\bar{\theta})(\eta_i-\bar{\eta})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n(\theta_i-\bar{\theta})^2\sum_{i=1}^n(\eta_i-\bar{\eta})^2}} \tag{7}$$

将 14 组试验数据代入公式(3~7),得到参数  $a\approx0.0,b\approx0.84$ ;相关系数  $r=0.950\ 29$ ;拟合的标准差  $SD=0.069\ 14$ ,显著性水平  $P<0.000\ 1$ .

因此,低碳超高强石渣混凝土在钢管约束下的强度增长率与套箍指标之间成比例关系,见式(8)和图 6.

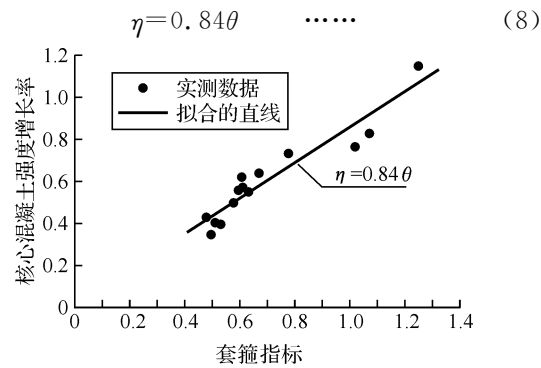


图 6 实测数据与计算结果比较图

Fig. 6 Experiment results & calculating results

3 结 语

通过试验研究与分析,得出以下结论:

a. 采用低水泥用量方案水泥配制的低碳高强石渣混凝土自收缩量小,低碳超高强石渣混凝土

与钢管复合组成的钢管超高强石渣混凝土柱可以解决由于自收缩偏大导致钢管高强混凝土界面脱空的问题.

b. 钢管约束的超高强石渣混凝土的强度增长率与试件的套箍指标成比例关系.

c. 在核心混凝土的泊桑比达到钢管的泊松比(0.283)之前,核心混凝土内产生的微裂缝已经形成破裂面,由于受钢管的抑制,剪切破坏延缓发生,所以试件均呈现剪切破坏的特征,并出现较大的剪切变形.

d. 超高强石渣混凝土用延性的钢管约束后,其脆性性能得到显著的改善,显示出明显的塑性材料的特征.

e. 钢管约束的混凝土所受的侧压是由构件受压引起的,与处于一般复杂应力状态的混凝土相比,其受力特点迥然不同,在研究钢管约束的混凝土受力性能的试验设计中应予以注意.

谢辞:本文是在中南大学土建学院博士生导师徐志胜教授的指导下完成的,在试验实施过程中张焱博士给予了无私的帮助,中南大学杨智硕博士生、莆田学院的王林、田智友、杨丽娟、汤伟红、龙小湖、陈继耀等同学参与了试件的制作,谨致以诚挚的谢意.

参考文献:

[1] Altcin. Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes [J]. ACI Materials Journal,1997,94(4):286-290.

[2] 陈国灿. 低碳超高强石渣混凝土的抗火性能研究[J]. 武汉工程大学学报,2010(11):36-41.

[3] 陈国灿. 低碳超高强石渣混凝土的力学性能试验研究[J]. 佳木斯大学学报:自然科学版,2010(5):693-697.

[4] 蒲心诚. 超高性能混凝土[M]. 重庆:重庆大学出版社,2004.

[5] 谭克锋,蒲心诚. 钢管超高强混凝土长柱和偏压柱的性能与极限承载力的研究[J]. 建筑结构学报,2000(2):12-19.

[6] 陈国灿. 钢管聚丙纤维超高强石渣混凝土短柱的静力特性研究[J]. 武汉大学学报:工学版,2010(5):617-622.

[7] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构(修订版) [M]. 北京:人民交通出版社,2007.

[8] 陈国灿,徐志胜. 预制钢管超高强石渣混凝土叠合柱的轴压试验[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2010(6):819-825.

[9] 闫东明,林皋. 三向应力状态下混凝土强度和变形特性研究[J]. 中国工程科学,2007,9(6):64-70.