

# 地聚物混凝土构件的纯扭性能试验

周芬,蒋正男

(湖南大学土木工程学院,湖南长沙410082)

**摘要** 目的 研究地聚物混凝土构件的受扭性能,并探讨现有普通混凝土结构设计规范对地聚物混凝土构件的适用性。方法 研究参数为配箍率(0.42%和0.99%)与纵筋配筋率(0.65%和1.17%),共设计3种试验工况,通过试验观察构件的破坏形态、裂缝发展情况;并记录扭矩-扭转角曲线、扭矩-钢筋应变曲线、扭矩-混凝土应变曲线,分析各参数对构件抗扭性能的影响。结果 地聚物混凝土构件的破坏模式与普通混凝土构件相似,有少筋破坏、适筋破坏以及部分超筋破坏三种破坏模式;构件的极限扭矩基本随配箍率与纵筋配筋率的增大而增大;构件的主裂缝倾角均随配筋强度比的增加而减少。结论 增加构件的配筋率可以显著提高地聚物构件的抗扭承载力;《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)对地聚物构件的极限扭矩预测效果较好,预测值与试验值比值的均值为0.92、变异系数为13.6%。

**关键词** 纯扭性能;地聚物混凝土;破坏模式;单位扭转角

中图分类号 TU375

文献标志码 A

**引用格式:**周芬,蒋正男.地聚物混凝土构件的纯扭性能试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(4):597-607.(ZHOU Fen,JIANG Zhengnan. Experiment on the pure torsional performance of geopolymer concrete members[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(4):597-607.)

## Experiment on the Pure Torsional Performance of Geopolymer Concrete Members

ZHOU Fen,JIANG Zhengnan

(College of Civil Engineering,Hu'nan University,Changsha,China,410082)

**Abstract:** In order to investigate the torsional performance of geopolymer concrete members, and discuss the application of existing codes for design of concrete structures to geopolymer concrete members. The investigated parameters include stirrup ratio(0.42% and 0.99%), and longitudinal reinforcement ratio(0.65% and 1.17%). A total of 3 test members were designed. Through the test, the failure modes and crack propagation were observed, the torque-angle of twist curves, torque-reinforcement strain curves and torque-concrete strain curves of the members were recorded, and the influence of various parameters on the torsional performance of geopolymer

收稿日期:2024-01-03

基金项目:国家自然科学基金项目(52178206)

作者简介:周芬(1973—),女,副教授,主要从事地聚物材料及构件等方面研究。

concrete members was investigated. The failure modes of geopolymer concrete members closely resemble that of ordinal concrete members, which are under-reinforced failure, suitably reinforced failure and partially over-reinforced failure. The ultimate torque of geopolymer concrete members essentially increases with the increase of stirrup ratio and longitudinal reinforcement ratio. The main crack inclination angles of members decrease as the reinforcement strength ratio increases. The results show that increasing the reinforcement ratio of members can improve the torsional bearing capacity of geopolymer members obviously. *Code for design of concrete structures* (GB50010—2010) can predict the ultimate torque of geopolymer concrete members well. The mean value and coefficient of variation of the ratio between the predicted value and experimental value are 0.92 and 13.6%.

**Key words:** pure-torsional behavior; geopolymer concrete; failure mode; angle of twist

地聚物混凝土 (Geopolymer Concrete, GPC) 是一种采用地质聚合物 (Geopolymer) 作为胶凝材料的混凝土, 其原料可以来自天然矿物或者固体废弃物<sup>[1-2]</sup>, 相较于普通混凝土 (Portland Cement Concrete, PCC), GPC 能更显著地降低 CO<sub>2</sub> 的排放<sup>[3]</sup>。GPC 的弹性模量通常低于 PCC, 且 GPC 的脆性更强, 塑性性能更弱<sup>[4-5]</sup>, 然而 GPC 具有更高的早期强度、更为优良的耐高温与抗化学腐蚀性能<sup>[6-9]</sup>。材料的不同可能会导致构件受力性能上的差异。相较于 PCC 构件, GPC 构件通常具有更低的初始抗弯刚度, 但后者的极限弯矩更大<sup>[10-11]</sup>。目前, 针对 GPC 构件的研究主要集中在抗弯、抗剪与抗压性能上, 关于其抗扭性能方面的研究仍显不足。为了推动地聚物混凝土在工程中的应用, 有必要对 GPC 构件的抗扭性能开展更为深入的研究。

基于 PCC 构件在纯扭作用下的性能研究表明, 混凝土强度、配箍率及纵筋配筋率等因素是影响构件抗扭性能的主要因素<sup>[12-16]</sup>。混凝土强度对纯扭构件的影响体现在一方面影响构件的开裂扭矩<sup>[13]</sup>, 另一方面影响构件的极限扭矩<sup>[17]</sup>。配筋对抗扭构件的影响也体现在一方面影响构件的抗扭延性, 另一方面提升配箍率和纵筋配筋率可以提升适筋构件的极限扭矩。综合来看, 构件的延性随配箍率与纵筋配筋率的增加呈现先增加后减少的趋势。

目前关于 GPC 构件抗扭性能的研究较少。C. K. Lau 等<sup>[17]</sup>探究了钢纤维对 GPC 构件抗扭性能的影响, 结果表明, 钢纤维的掺入可以改善 GPC 构件裂缝分布, 提高开裂后延性; A. J. Daniel 等<sup>[18]</sup>研究了硅灰基 GPC 构件在不同配筋率的极限扭矩, 结果表明, GPC 梁与 PCC 梁相比有相近的扭转刚度与相似的破坏形态。但以上研究对 GPC 构件的计算理论均未进行深入研究, 现行规范对 GPC 构件能否适用依旧值得探讨。同时, 由于 GPC 的材料性能受原料影响较大, 不同配比的 GPC 构件的抗扭性能上可能存在差异。N. Li 等<sup>[19]</sup>提出了一种 GPC 材料的配比方法, 该方法配制的 GPC 不仅具有优良的力学性能, 还具有良好的施工性能。

基于上述分析, 笔者采用文献[20]中 GPC 的配合比, 以纵筋配筋率和配箍率为试验变量来研究 GPC 构件在纯扭作用下的力学性能, 并探讨 GPC 构件的抗扭计算理论, 分析现行规范的适用性; 结果表明, 增加构件的配筋率可以显著提高构件的抗扭承载力, 且《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 对 GPC 构件的预测结果较好。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

本研究使用的地聚物混凝土由矿渣、粉煤灰、粗骨料、细骨料、碱激发剂和水混合而

成。碱激发剂由 NaOH 粉末(纯度 99%)、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  粉末、水玻璃溶液(模数为 3.32)按一定配合比混合而成,碱激发剂需提前制备并密封保存,以防碳化和水分蒸发。粗骨料采用碎石,细骨料采用细度模数 2.8 的中砂。

表 1 地聚物混凝土配合比

Table 1 The mix proportion for GPC								kg
型号	$m$ (矿渣)	$m$ (粉煤灰)	$m$ (碎石)	$m$ (砂)	$m$ (NaOH 固体)	$m$ (纯碱)	$m$ (水玻璃溶液)	$m$ (水)
GPC70	397	100	1 034	661	15.2	214.2	17	38.8

1.2 试件设计与制作

本研究设计了 3 种试验工况。研究变量为纵筋配筋率( $\rho_l$ )与配箍率( $\rho_v$ )。所有试验构件的截面长×宽为 300 mm×350 mm,构件的总长度为 1 800 mm,纯扭试验段的长度

为 1 200 mm。为了避免构件纯扭段以外的部分发生破坏,需要对试验构件的两端进行加强<sup>[23]</sup>,构件两端的箍筋间距为 50 mm。构件的尺寸与配筋信息见图 1。

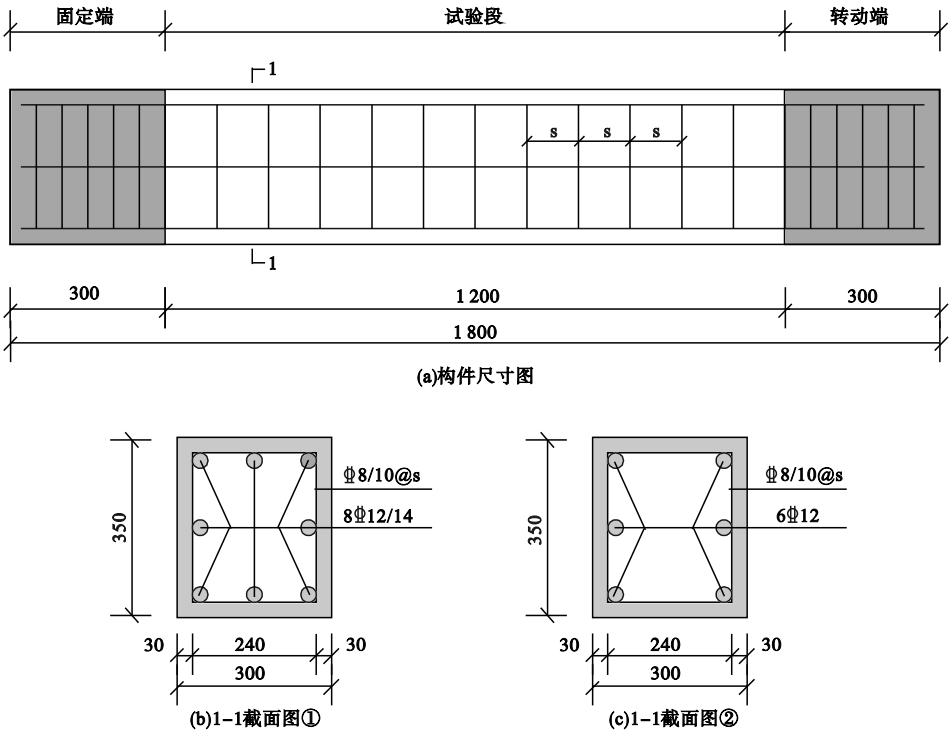


图 1 构件尺寸与配筋信息

Fig. 1 Dimensions and reinforcement information of the members

根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)<sup>[20]</sup>,测得混凝土的立方体抗压强度 $f_{cu}$ 、劈裂抗拉强度 $f_t$ 与弹性模量 $E_c$ ,再根据《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)<sup>[21]</sup>计算出轴心抗压强度 $f_c=0.8f_{cu}$ 。测量与计算结果如表 2 所示, $\varepsilon_{cu}$

为极限压应变。

表 2 混凝土力学性能

Table 2 Mechanical properties of the concrete					
型号	$f_{cu}/\text{MPa}$	$f_c/\text{MPa}$	$f_t/\text{MPa}$	$E_c/\text{GPa}$	$\varepsilon_{cu}/10^{-6}$
GPC70	71.38	57.10	4.13	30.50	2 556

试验构件的更多细节信息见表 3。 $\zeta$  为

抗扭纵筋与箍筋的配筋强度比,  $\zeta = \rho_l f_{yl} / \rho_f f_{yv}$ 。  $\rho_{total}$  为构件的总配筋率,  $\rho_{total} = \rho_l + \rho_t$ 。 构件的命名主要由三部分组成, 第一部分代

表混凝土种类与强度, G70 代表使用的 C70 的地聚物混凝土; 第二部分代表纵筋配筋率; 第三部分代表配箍率。

表 3 构件参数

Table 3 Test parameters of the members

构件编号	$f_c/\text{MPa}$	纵筋数量/根	纵筋直径/mm	$\rho_l/\%$	箍筋直径/mm	箍筋间距/mm	$\rho_t/\%$	$\rho_{total}/\%$	$\zeta$
G70-065-042	57.10	6	12	0.65	8	120	0.42	1.07	1.53
G70-117-042	57.10	8	14	1.17	8	120	0.42	1.59	2.77
G70-117-099	57.10	8	14	1.17	10	80	0.99	2.16	1.18

1.3 试验加载

参考已有的纯扭试验加载装置<sup>[17-19]</sup>, 本研究自行设计的试验加载装置见图 2, 构件的转动示意图见图 3。 构件两端均被钢梁夹持, 转动端的顶部与底部均设置球铰支座, 顶部的球铰支座与反力架之间设置液压千斤顶。

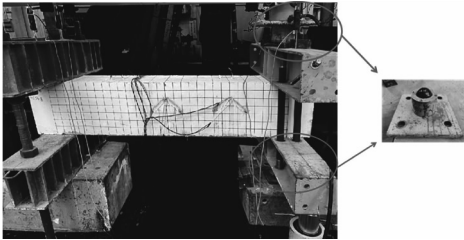


图 2 构件的加载装置

Fig. 2 Loading device for the members

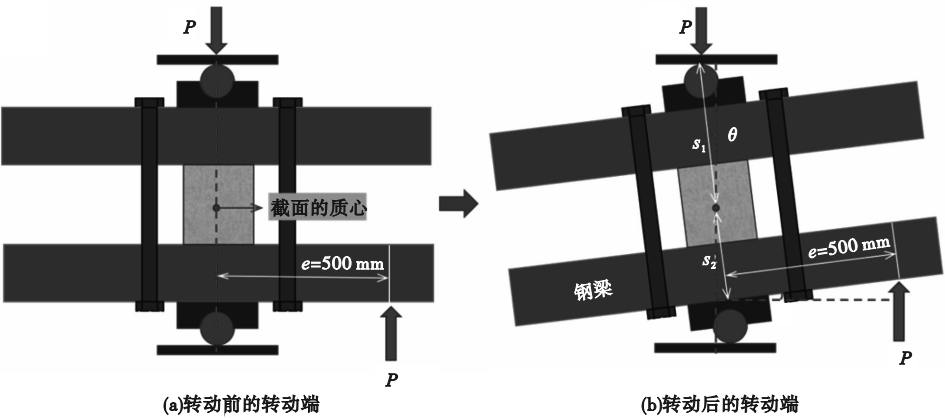


图 3 构件转动前后的转动端

Fig. 3 The rotational end before and after rotating the members

在转动端下部钢梁的一侧安装液压千斤顶, 此时千斤顶所施加的集中力对截面形心的力矩即为试验的扭矩, 集中力与截面形心的距离即为扭转的力臂  $e$ , 本试验为 500 mm。按照式(1)计算构件上施加的扭矩  $T$ 。但由于扭转角  $\theta$  过小, 最大扭转角不超过  $5^\circ$ , 因此可以忽略扭转角的影响, 带来的扭矩  $T$  的最大误差不超过 1%。由于梁的重力荷载穿过扭转的矩心, 因此可以忽略自重的影响。

$$T = P \cdot s_1 \sin \theta + P \cdot (s_2 \sin \theta + e \cos \theta) = P \cdot e$$

(1)

试验根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)<sup>[22]</sup> 的要求分级加载, 由下方千斤顶施加对应荷载。在构件开裂以前, 每级荷载为预估开裂荷载的十分之一。根据《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)<sup>[21]</sup> 对构件的开裂扭矩进行预估, 因此在开裂以前, 构件的荷载增量分别设置为 6 kN, 开裂以后荷载增量降至

3 kN。当荷载达到极限荷载以后,使用扭转角控制加载。

构件的正立面、背立面各布置 4 个混凝土应变片,混凝土应变片的方向与构件轴向夹角为  $\pm 45^\circ$ ,位置及布置方向见图 4(a)。构件内每根纵筋的中点及四分点处沿纵向布

置纵筋应变片,箍筋的前后两侧沿竖向布置应变片,构件每侧布置 4 个箍筋应变片,具体布置情况见图 4(b)。在构件两端各布置两个位移计,具体布置情况见图 4(c),测得四个测点的位移,根据构件扭转时构件两端位移与扭转角的关系,计算出构件扭转角。

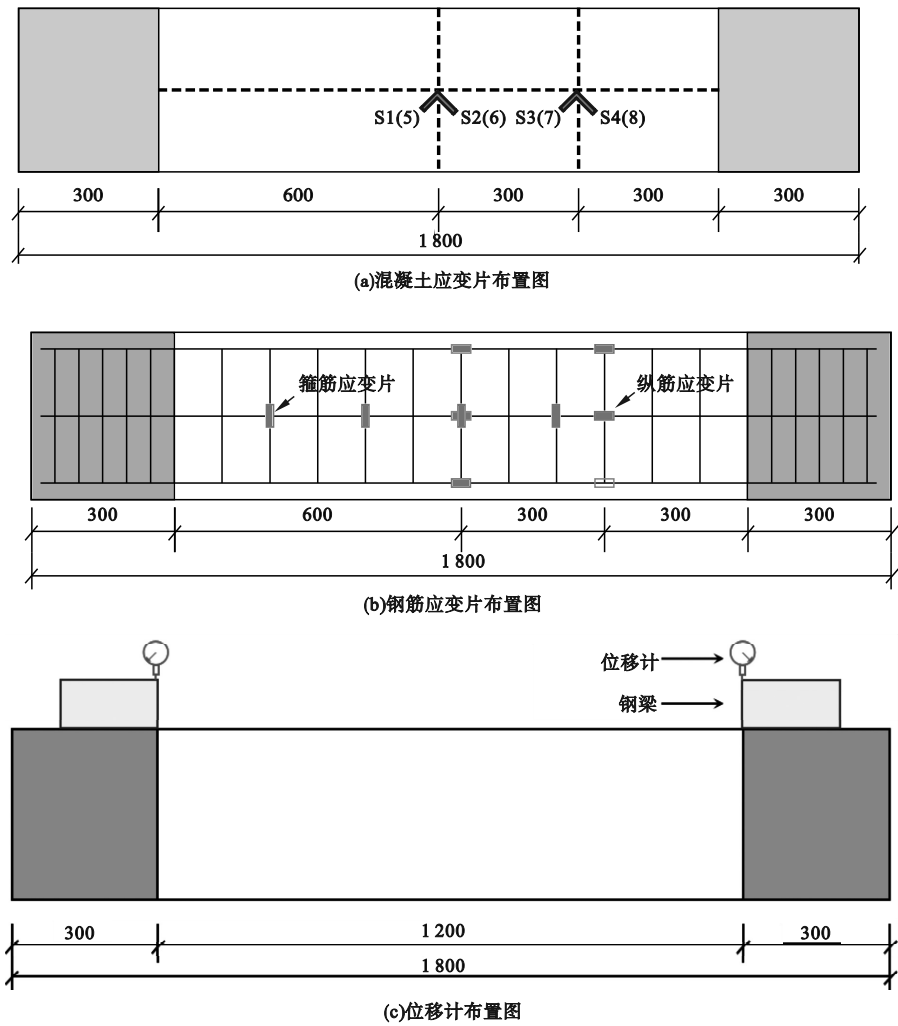


图 4 应变与扭转的测量方案

Fig. 4 The measurement schemes for strain and rotational deformations

2 试验结果分析

2.1 扭矩－单位扭转角曲线与特征扭矩

试验各构件的扭矩－单位扭转角曲线见图 5。由图 5 可知,少筋构件破坏时的单位扭转角远低于其余构件,构件从加载到破坏的过程中变形较小,且极限扭矩最低。相较于前者,部分超筋构件曲线在第二阶段的单

位扭转角有明显增长,从加载到破坏的过程中有较大的变形,且极限扭矩介于适筋构件与少筋构件之间。适筋构件的曲线在达到极限扭矩之后下降缓慢,从加载到破坏的过程中变形最大,且适筋构件的极限扭矩最大。由图可知,构件的极限扭矩基本随配箍率的增大而增大、随纵筋配筋率的增大而增大。

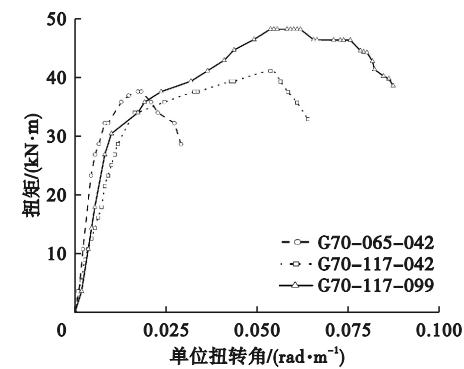


图5 扭矩-单位扭转角曲线

Fig. 5 The torque-twist angle curves

由图5可知,所有曲线均可分为三个阶段:第一阶段为构件达到开裂扭矩之前的曲线,该段曲线表现为一直线段;第二阶段为构件开裂扭矩至极限扭矩之间,曲线的斜率较第一阶段显著降低;第三阶段为极限扭矩之后曲线,该阶段为卸载阶段。每根构件的破坏模式与特征扭矩见表4。

表4 测试结果

Table 4 The test results

构件 编号	开裂位置		极限位置		$k_{cr}/(kN\cdot m^{-2})$	破坏模式
	$T_{cr}/(kN\cdot m)$	$\theta_{cr}/(rad\cdot m^{-1})$	$T_u/(kN\cdot m)$	$\theta_u/(rad\cdot m^{-1})$		
G70-065-042	32.5	0.008 1	37.6	0.018 2	503	少筋破坏
G70-117-042	34.0	0.016 4	41.1	0.053 7	188	部分超筋破坏
G70-117-099	30.5	0.010 1	48.3	0.053 6	408	适筋破坏

注:开裂后的扭转刚度  $k_{cr} = (T_u - T_{cr})/(\theta_u - \theta_{cr})$ 。

初始裂缝出现的位置、主裂缝的位置以及主裂缝与轴线的夹角  $\theta_c$  见表5,少筋构件的裂缝形态见图6(a)。初始裂缝出现以后构件表面还会出现数条细长的斜裂缝以及一些细小裂缝,裂缝之间的间距相对较大且分布不均匀,随着扭矩的增加裂缝发展迅速;适筋构件的裂缝形态见图6(b),构件在开裂以

2.2 构件破坏模式与裂缝分布

根据配筋率与配筋强度比  $\zeta$  的不同,构件会表现出3种破坏模式,结果见表4。总配筋率为1.07%的构件,开裂以后构件的变形迅速增大,钢筋很快达到屈服,表现为脆性破坏特征,因此定义该类构件为少筋构件;对于总配筋率大于1.07%且配筋强度比  $\zeta$  在0.6~1.7的构件,在构件破坏以前纵筋与箍筋均已屈服,表现为明显的延性破坏特征,定义该类构件为适筋构件;对于总配筋率大于1.07%且配筋强度比  $\zeta$  等于2.77的构件,随着扭矩的增加箍筋屈服,最终混凝土被压碎标志着构件破坏,构件破坏时纵筋仍未屈服,构件的破坏具有一定的延性性质,定义该类构件为部分超筋构件。从破坏模式来看,GPC构件的与PCC构件一致,破坏模式主要受配筋率与配筋强度比的影响。

后的裂缝宽度发展速度比较缓慢,构件破坏时的裂缝宽度都较小,裂缝分布密集且细小裂缝数量较前者有明显增长;部分超筋构件的裂缝形态见图6(c),该类构件的裂缝发展速度介于少筋构件与适筋构件之间,且最终破坏时该类构件的裂缝更宽。

表5 裂缝参数

Table 5 Parameters of the cracks

构件编号	初始裂缝位置/cm	主裂缝位置/cm	$\zeta$	$\theta_c/(^{\circ})$
G70-065-042	32-41(B)	30-53(B)	1.53	50.3
G70-117-042	35-47(B)	32-51(B)	2.77	44.3
G70-117-099	21-33(B)	32-62(B)	1.18	48.9

注:表中记录的裂缝位置以构件的固定端为起点,B面为背立面。



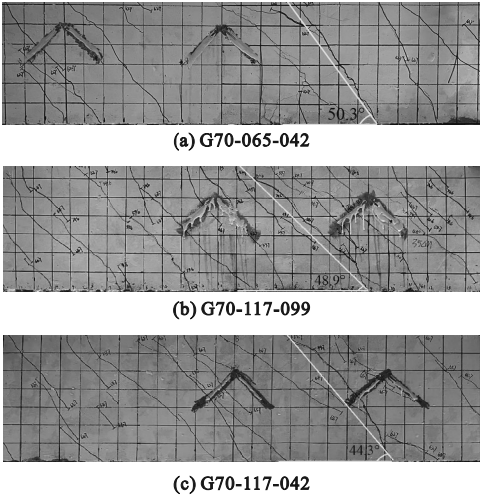


图6 裂缝分布比较

Fig. 6 Comparisons of the crack distribution

由表5可知,所有构件的主裂缝倾角随配筋强度比 $\zeta$ 的增加而减少,部分超筋构件的 $\zeta$ 最大而具有最小主裂缝倾角。

2.3 扭矩-应变曲线

2.3.1 扭矩-混凝土应变

测得的混凝土应变曲线见图7。图中的混凝土压应变曲线均可分为三个阶段,分别

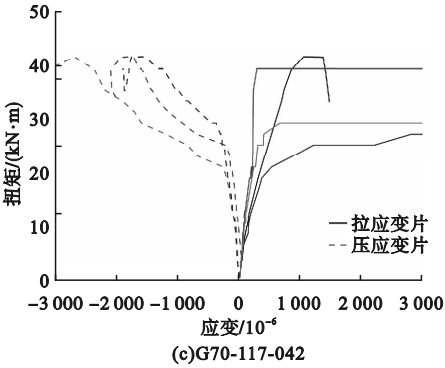


图7 扭矩-混凝土应变关系曲线

Fig. 7 The torque-concrete strain curves

为斜率较大的初始阶段、斜率较小的中间阶段以及最后的卸载阶段。同样混凝土的拉应变曲线也有类似的划分,不过部分应变片在初始阶段以后因裂缝扩展而断裂。

对比不同破坏类型构件的最大压应变,少筋 GPC 构件、适筋 GPC 构件以及部分超筋 GPC 构件的最大压应变分别为  $-1.26 \times 10^{-3}$ 、 $-1.61 \times 10^{-3}$  和  $-3.08 \times 10^{-3}$ ,与表2的混凝土极限压应变 $\epsilon_{cu}$ 相比,少筋与适筋构件的最大压应变均低于对应的 $\epsilon_{cu}$ ,而部分超筋构件则大于对应的 $\epsilon_{cu}$ ,这也与部分超筋构件裂缝间的混凝土被压碎的实验现象相印证。

2.3.2 扭矩-纵筋应变

构件的扭矩-纵筋应变曲线见图8,其中纵筋应变取值为所有纵筋应变片所测数据的平均值。

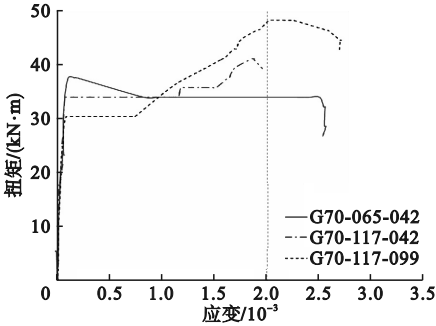
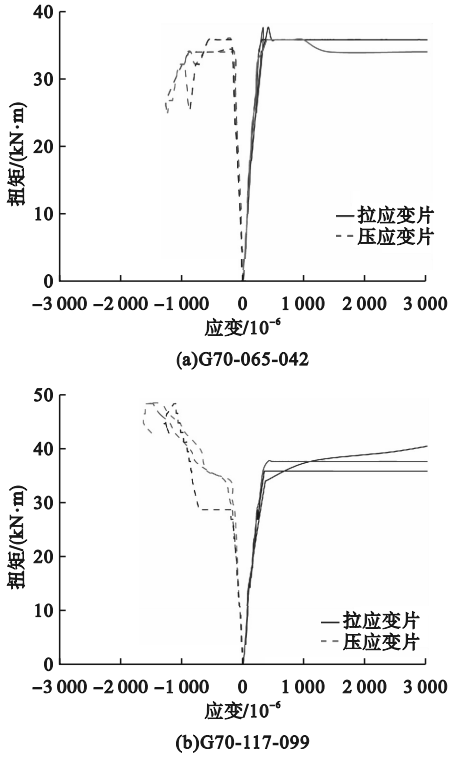


图8 扭矩-纵筋应变关系曲线

Fig. 8 The torque-longitudinal reinforcement strain curves

由钢筋的屈服强度计算出钢筋的平均屈服应变为  $2.0 \times 10^{-3}$ 。构件的扭矩-纵筋应

变曲线变化规律与构件的破坏模式相关,对于适筋与部分超筋构件而言,在线性段以后曲线有一个明显的过渡台阶,此时的扭矩不再增加而纵筋应变逐渐增加,原因是混凝土开裂以后原本由混凝土承担的扭矩逐渐转移到钢筋上。最后对比极限状态时纵筋的屈服情况,部分超筋构件的应变小于 $2.0 \times 10^{-3}$ ,适筋构件的应变大于 $2.0 \times 10^{-3}$ ,认为极限状态下部分超筋构件的纵筋未屈服而适筋构件的纵筋屈服;对少筋构件而言,构件开裂时测点的纵筋应变为 $0.065 \times 10^{-3}$ ,当到达极限扭矩时测点处的纵筋应变为 $0.105 \times 10^{-3} \sim 0.18 \times 10^{-3}$ ,表明测试构件的纵筋应变从开裂扭矩发展到峰值扭矩时增加有限。

2.3.3 扭矩-箍筋应变

构件的扭矩-箍筋应变曲线见图9,其中箍筋应变取值为所有箍筋应变片所测数据的平均值。

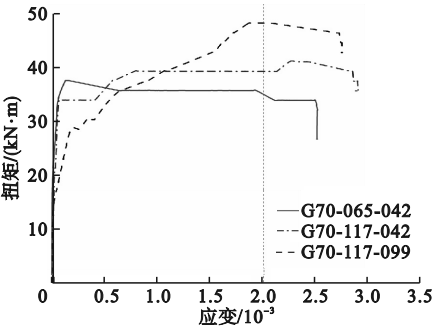


图9 扭矩-箍筋应变关系曲线

Fig. 9 The torque-stirrup strain curves

扭矩-箍筋应变曲线的变化规律同样与

表6 构件开裂扭矩与极限扭矩的计算公式

Table 6 Calculation formulas for the cracking torque and ultimate torque

公式来源	开裂扭矩公式	极限扭矩公式	备注
文献[21]	$T_{cr,1}=0.7f_tW_t$	$T_{u,1}=0.35f_tW_t+1.2\sqrt{\frac{f_{yv}A_{sv}}{s}}A_{cor}$	$W_t$ 为截面受扭塑性抵抗矩, $W_t=b^2(3h-b)/6$ ; $A_{cor}$ 为核心截面部分的面积
文献[23]	$T_{cr,2}=0.33\sqrt{f_c}\frac{A_c^2}{u}$	$T_{u,2}=\varphi\frac{2A_oA_{sv}f_{sv}}{s}\cot\theta$	$\varphi$ 为强度折减系数,对受扭计算取0.85; $A_o$ 为剪力流包围的面积, $A_o=0.85A_{oh}$ ; $A_{oh}$ 为受扭箍筋所围区域面积
文献[24]	$T_{cr,3}=2A_kf_t t_{ef}$	$T_{u,3}=\frac{2A_kA_{sv}f_{sv}}{s}\cot\theta$	$A_k$ 为薄壁中心连线所围成的面积, $A_k=(b-2t_{ef})(h-2t_{ef})$ ; $t_{ef}$ 为有效管壁厚, $t_{ef}=A/u$

破坏模式相关,情况与纵筋类似。对于适筋构件与部分超筋构件而言,在线性段以后曲线有一个过渡台阶。最后对比极限状态下两者的箍筋应变,构件的应变均大于 $2.0 \times 10^{-3}$ ,认为极限状态下部分超筋构件与适筋构件的箍筋屈服。同样,少筋构件的箍筋应变从开裂扭矩发展到峰值扭矩时增加有限。

2.4 刚度

构件在开裂后的扭转刚度 $k_{cr}$ 见表4,对于适筋构件与部分超筋构件而言,随着配箍率的增加,其开裂后刚度 $k_{cr}$ 不断增加。但对于少筋构件而言,其刚度大于相同混凝土强度下的适筋构件。原因是钢筋的引入使混凝土与钢筋的界面产生了界面削弱,而这种削弱的界面对开裂后的刚度降低起到了主导作用。

3 现有公式及适用性

3.1 开裂扭矩

笔者列举了三种计算混凝土构件开裂扭矩的方法,如表6所示。《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)<sup>[21]</sup>的公式基于塑性理论,美国规范<sup>[23]</sup>和欧洲规范<sup>[24]</sup>的计算公式则是基于空间桁架模型。将本研究与M. K. Kumar<sup>[25]</sup>以及C. K. Lau<sup>[17]</sup>试验中的地聚物混凝土构件的开裂扭矩与上述规范中的公式进行比较,结果见表7与图10。其中, $T_{cr,e}$ 为测量值, $T_{cr,1}$ 、 $T_{cr,2}$ 与 $T_{cr,3}$ 分别为按照中国规范、美国规范与欧洲规范计算出来的理论值。



表 7 GPC 构件开裂扭矩的试验值与理论值比较结果

Table 7 The comparison of theoretical and experimental cracking torque for GPC members							
数据来源	$T_{cr,e}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$T_{cr,1}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$T_{cr,1}/T_{cr,e}$	$T_{cr,2}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$T_{cr,2}/T_{cr,e}$	$T_{cr,3}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$T_{cr,3}/T_{cr,e}$
本文	32.54	32.53	1.000	18.92	0.581	39.39	1.210
	34.02	32.53	0.956	18.92	0.556	39.39	1.158
	30.45	32.53	1.068	18.92	0.621	39.39	1.294
文献[17]	5.70	4.04	0.709	3.88	0.681	2.76	0.485
	5.80	4.04	0.697	3.88	0.669	2.76	0.476
	7.50	4.04	0.539	3.88	0.518	2.76	0.368
文献[25]	4.40	4.84	1.100	3.52	0.801	2.55	0.581
	4.40	4.84	1.100	3.52	0.801	2.55	0.581
	4.80	4.84	1.008	3.52	0.734	2.55	0.532
	5.20	4.84	0.931	3.52	0.677	2.55	0.491

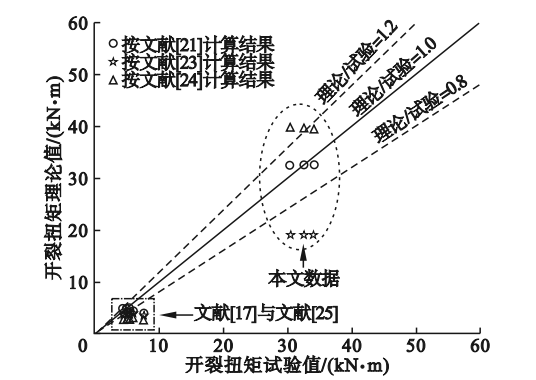


图 10 GPC 构件开裂扭矩的试验值与理论值比较

Fig. 10 Comparison of theoretical and experimental cracking torque for GPC members

由表 7 可知, $T_{cr,1}/T_{cr,e}$ 的平均值与变异系数分别为 0.91 和 21.4%, $T_{cr,2}/T_{cr,e}$ 的平均值与变异系数分别为 0.66 和 14.6%, $T_{cr,3}/T_{cr,e}$ 的平均值与变异系数分别为 0.72 和 49.3%。通过上述对比,发现  $T_{cr,1}$  与试验结果吻合较好, $T_{cr,2}$  与  $T_{cr,3}$  则偏保守。

对于开裂扭矩而言,中国规范的适用性较好,而其他规范则偏保守。由于数据来源不同且混凝土强度与截面尺寸变化较大, $T_{cr,1}$  的变异系数较大,但中国规范基于塑性理论考虑了全截面的抗扭作用因此吻合效果较好。其他规范则是低估了剪力流包围的面积,导致计算的开裂扭矩过于保守。

3.2 极限扭矩

笔者列举了三种计算混凝土构件抗扭承载力的方法,如表 6 所示。中国规范采用的是半经验半理论二项叠加形式的公式<sup>[21]</sup>;美国规范<sup>[23]</sup>和欧洲规范<sup>[24]</sup>的计算公式则是基于空间桁架模型,两者的计算形式极为接近,不同的是欧洲规范并未引入折减系数且选取的剪力流包围的面积不同。将本研究、文献[25]以及文献[17]试验中的地聚物混凝土构件的极限扭矩与上述规范中的公式计算值进行比较,结果见图 11 与表 8。其中, $T_{u,e}$  为测量值, $T_{u,1}$ 、 $T_{u,2}$  与  $T_{u,3}$  分别为按照中国规范、美国规范与欧洲规范计算出来的理论值。

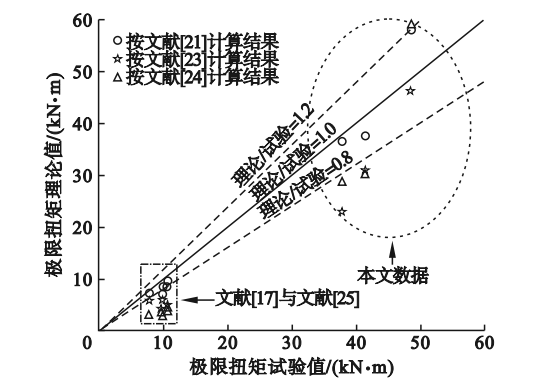


图 11 GPC 构件极限扭矩的试验值与理论值比较

Fig. 11 Comparison of theoretical and experimental ultimate torque for GPC members

表 8 GPC 构件极限扭矩的试验值与理论值比较结果

Table 8 The comparison of theoretical and experimental ultimate torque for GPC members

数据来源	$T_{u,e}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$T_{u,1}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$T_{u,1}/T_{u,e}$	$T_{u,2}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$T_{u,2}/T_{u,e}$	$T_{u,3}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$T_{u,3}/T_{u,e}$
本文	48.26	57.74	1.196	46.21	0.958	58.62	1.215
	41.11	37.48	0.912	30.67	0.746	29.98	0.729
	37.61	36.38	0.967	22.76	0.605	28.43	0.756
文献[17]	9.80	7.01	0.716	5.87	0.599	2.90	0.296
	7.60	7.01	0.923	5.87	0.773	2.90	0.381
	7.70	7.01	0.911	5.87	0.763	2.90	0.376
文献[25]	9.60	8.42	0.877	4.09	0.426	3.45	0.360
	10.40	8.42	0.809	4.09	0.393	3.45	0.332
	9.60	9.61	1.002	4.76	0.496	4.14	0.432
	10.40	9.33	0.897	4.57	0.440	3.98	0.382

由表 8 可知, $T_{u,1}/T_{u,e}$ 的平均值与变异系数分别为 0.92 和 13.6%, $T_{u,2}/T_{u,e}$ 的平均值与变异系数分别为 0.62 和 30.0%, $T_{u,3}/T_{u,e}$ 的平均值与变异系数分别为 0.53 和 55.3%。通过上述对比,发现  $T_{u,1}$  的值与试验结果吻合效果较好, $T_{u,2}$  与  $T_{u,3}$  则偏保守。

对于抗扭强度而言,中国规范的适用性较好而其余规范偏保守。美国规范与欧洲规范均未考虑混凝土强度对极限扭矩的影响,因此  $T_{u,2}/T_{u,e}$  与  $T_{u,3}/T_{u,e}$  的平均值都偏低,而欧洲规范因为未引入折减系数而相对略高,但其平均值低于 1.0。中国规范考虑了混凝土的贡献而具有较好适用性。

4 结 论

(1)地聚物混凝土构件在纯扭作用下的破坏模式与裂缝发展情况与普通混凝土构件类似,破坏模式可分为少筋破坏、适筋破坏与部分超筋破坏,主要受配筋率与配筋强度比影响;随着扭矩的增加,构件的斜裂缝不断发展,且其中一条或几条发展为主裂缝。

(2)地聚物混凝土构件的极限扭矩同样受配箍率与纵筋配筋率的影响,随配箍率和纵筋配筋率的增加而增加;引入钢筋导致钢筋与混凝土界面的削弱,少筋构件的开裂后刚度高于适筋构件。

(3)依据不同规范对开裂扭矩与极限扭矩的分析,《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中的理论值与试验值吻合较好,且具有一定的安全储备,因此适用于地聚物混凝土梁的抗扭设计,其余规范则偏保守。

参考文献

[1] 何月,李星辰,丁锐. 碱激发胶凝材料的进展[J]. 北方建筑,2020,5(4):47-51.  
(HE Yue,LI Xingchen,DING Rui. Development of alkali activated cementitious materials [J]. Northern architecture,2020,5(4):47-51.)

[2] 郑文忠,邹梦娜,王英. 碱激发胶凝材料研究进展[J]. 建筑结构学报,2018,40(1):28-39.  
(ZHENG Wenzhong, ZOU Mengna, WANG Ying. Literature review of alkali-activated cementitious materials [J]. Journal of building structures,2018,40(1):28-39.)

[3] HEATH A,PAINE K,MCMANUS M. Minimising the global warming potential of clay based geopolymers [J]. Journal of cleaner production,2014,78(1):75-83.

[4] PAN Z,SANJAYAN J G,RANGAN B V. Fracture properties of geopolymer paste and concrete [J]. Magazine of concrete research,2011,63(10):763-771.

[5] THOMAS R J,PEETHAMPARAN S. Alkali-activated concrete: engineering properties and stress-strain behavior [J]. Construction and building materials,2015,93(1):49-56.

[6] ZHANG J,SHI C,ZHANG Z,et al. Durability of alkali-activated materials in aggressive environments:a review on recent studies [J]. Construction and building materials,2017,152(1):598-613.

[7] 刘翼玮,张祖华,史才军,等. 硅灰对高强度地聚物胶凝材料性能的影响[J]. 硅酸盐学报,

- 2020,48(11):1689–1699.  
(LIU Yiwei, ZHANG Zuhua, SHI Caijun, et al. Influence of silica fume on performance of high-strength geopolymer [J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2020, 48(11):1689–1699.)
- [8] LI N, FARZADNIA N, SHI C. Microstructural changes in alkali-activated slag mortars induced by accelerated carbonation [J]. Cement and concrete research, 2017, 100(1):214–226.
- [9] GUNASEKARA C, LAW D, BHUIYAN S, et al. Chloride induced corrosion in different fly ash based geopolymer concretes [J]. Construction and building materials, 2019, 200:502–513.
- [10] 杜运兴, 王佳. 基于性能要求的碱激发混凝土梁弯曲性能试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(12):3166–3173.  
(DU Yunxing, WANG Jia. Experimental study on flexural behaviour of performance-based alkali activated concrete beams [J]. Journal of railway science and engineering, 2020, 17(12):3166–3173.)
- [11] 徐勇, 毛宇光, 刘翼玮, 等. 翼缘尺寸对地聚物混凝土 T 形梁抗弯性能的影响 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(2):1–10.  
(XU Yong, MAO Yuguang, LIU Yiwei, et al. Influence of flange size on flexural behavior of geopolymer concrete T-beams [J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2024, 43(2):1–10.)
- [12] 郑末娟, 叶英华, 邹煜良. 基于变角空间桁架理论的钢筋混凝土构件抗扭承载力分析 [J]. 工业建筑, 2010, 40(增刊1):142–145.  
(ZHENG Leijuan, YE Yinghua, ZOU Yuliang. Analysis of torsional capacity of reinforced concrete member based on variable-angle space truss theory [J]. Industrial construction, 2010, 40(S1):142–145.)
- [13] LI C, ZHOU J, KE L, et al. Failure mechanisms and loading capacity prediction for rectangular UHPC beams under pure torsion [J]. Engineering structures, 2022, 264(1):114426.
- [14] FANG I K, SHIAU J K. Torsional behavior of normal-and high-strength concrete beams [J]. Structural journal, 2004, 101(3):304–313.
- [15] KIM C, KIM S, KIM K H, et al. Torsional behavior of reinforced concrete beams with high-strength steel bars [J]. ACI structural journal, 2019, 116(6):330–331.
- [16] RAHAL K N. Torsional strength of normal and high strength reinforced concrete beams [J]. Engineering structures, 2013, 56(1):2206–2216.
- [17] LAU C K, HTUT T N S, MELLING J J, et al. Torsional behaviour of steel fiber reinforced alkali activated concrete [J]. Materials, 2020, 13(15):3423.
- [18] DANIEL A J, SIVAKAMASUNDARI S, NISHANTH A. Study on partial replacement of silica fume based geopolymer concrete beam behavior under torsion [J]. Procedia engineering, 2017, 173(1):732–739.
- [19] LI N, SHI C, ZHANG Z, et al. A mixture proportioning method for the development of performance-based alkali-activated slag-based concrete [J]. Cement and concrete composites, 2018, 93(1):163–174.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties; GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.)
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures; GB50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of concrete structures; GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)
- [23] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI 318—19 [S]. Farmington Hills Michigan: American Concrete Institute, 2019.
- [24] British Standards Institution. Eurocode 2: design of concrete structures-part 1–1. general rules and rules for buildings; BS EN 1992–1–1:2004 [S]. London: British Standards Institution, 2004.
- [25] KUMAR M K, RAMASUBRAMAI R. Experimental study on the behaviour of torsion in geopolymer concrete beams with steel fibers [J]. Journal of industrial pollution control, 2017, 33(1):1294–1299.  
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)