

超高性能混凝土的抗剪强度

王晓飞, 周海龙, 王海龙

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘 要: 抗剪切强度指标值(黏聚力和内摩擦角)是超高性能混凝土本构关系研究和数值模拟分析的重要数据, 对揭示超高性能混凝土中钢纤维的增强增韧机理至关重要。通过对 4 种钢纤维体积含量(0%、1%、2%和 3%)的超高性能混凝土在 5 档围压(0、10、20、40 MPa 和 60 MPa)下进行常规三轴压缩试验, 得到各应力路径下超高性能混凝土的轴向、径向应力应变全曲线及应力圆。应力应变全曲线图显示, 围压为 40 MPa 时, 4 种钢纤维超高性能混凝土在三轴压缩试验中均表现出一定的流变性质, 超高性能混凝土变形性质及破坏模式由脆性开始向塑性转变。并由应力圆数据推导出每种钢纤维含量超高性能混凝土在不同围压下内摩擦角 φ 和黏聚力 c 的具体数值, 并给出了内摩擦角 φ 和黏聚力 c 随钢纤维体积分含量和围压增大的变化规律。结果显示: 钢纤维含量相同, 黏聚力随围压的增大而增大, 内摩擦角随围压的增大而减小; 同围压下钢纤维体积分含量为 2%时黏聚力最大, 内摩擦角最小, 有围压时钢纤维含量对内摩擦角的影响较小。

关键词: 超高性能混凝土; 钢纤维; 内摩擦角; 黏聚力; 应力圆

中图分类号: TU528.572 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)08-2190-06

网络出版时间: 2022-07-04



Shear Strength of Ultra-High Performance Concrete

WANG Xiaofei, ZHOU Hailong, WHANG Hailong

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: The shear strength index values (cohesion and internal friction angle) are important data for the study of constitutive relationships and numerical simulation analysis of ultra-high performance concrete, which are crucial to revealing the reinforcement and toughening mechanism of steel fibers in ultra-high-performance concrete. The axial direction and radial direction stress-strain full curves data and stress circles of ultra-high performance concrete under each stress path were obtained via conventional triaxial compression experiment of ultra-high performance concrete with different steel fiber volume contents (i.e., 0%, 1%, 2% and 3%) at different confining pressures (i.e., 0, 10, 20, 40 MPa and 60 MPa). Based on the stress-strain full curve, the ultra-high performance concretes with different steel fiber contents have some rheumatic properties in the triaxial compression process, and the deformation properties and destruction modes change from brittleness to plasticity at a confining pressure of 40 MPa. The specific values of internal friction angle (φ) and adhesion (c) at different confining pressures of each steel fiber content ultra-high performance concrete were deduced from the stress circle data, and the changes of φ and c with the increase of steel fiber content and confining pressure were also analyzed. The results show that the cohesion increases with the increase of confining pressure, and the internal friction angle decreases with the increase of confining pressure at the same steel fiber content. The maximum cohesion and the minimum internal friction angle are achieved at the same confining pressure and a steel fiber volume content of 2%. The content of steel fiber has little effect on the internal friction angle at a certain confining pressure.

Keywords: ultra-high performance concrete; steel fiber; internal friction angle; adhesion force; stress circle

收稿日期: 2022-02-22。 修订日期: 2022-03-10。

基金项目: 国家自然科学基金(52069024); 内蒙古自然科学基金资助(2020MS5076)。

第一作者: 王晓飞(1979—), 男, 博士研究生。

通信作者: 王海龙(1980—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师。

Received date: 2022-02-22. Revised date: 2022-03-10.

First author: WANG Xiaofei (1979—), male, Doctoral candidate.

E-mail: wxf.225@163.com

Correspondent author: WANG Hailong (1980—), Ph.D. Professor.

E-mail: hailong9261@163.com

超高性能混凝土(UHPC)是依据最大密实度理论和纤维增强理论制备的先进水泥基复合材料^[1-3]。与普通混凝土相比,超高性能混凝土具有高强度^[4]、高韧性^[5-6]、高耐久性^[7-8]等特点。

超高性能混凝土所用原材料、制备过程、养护及成型工艺等技术已较完善,国内外相关学者对其力学性能及耐久性也有较多研究,取得了丰硕成果,钢纤维超高性能混凝土在桥梁、核工业及军事防护工程等领域也得到了较为广泛的应用。

超高性能混凝土在单轴压缩^[9-10]、三轴压缩^[11-13]、动荷载^[14]及疲劳荷载^[15]等作用下的力学行为及相关强度指标值研究较多,但对其抗剪力学性能及相关指标值的研究很少。超高性能混凝土抗剪强度指标值(黏聚力和内摩擦角)对研究钢纤维在其基质内的增强增韧机理至关重要,同时也是钢纤维超高性能混凝土力学行为数值模拟和本构关系相关研究中不可或缺的参数。钢纤维超高性能混凝土在工程中常以预制构件的形式出现,黏聚力 c 和内摩擦角 φ 对确定其抗剪强度及其配箍率至关重要,因此研究超高性能混凝土的抗剪强度指标值现实意义重大。

当前常见的混凝土抗剪强度试验方法有矩形短梁双剪面试验^[16]、薄壁圆通受扭试验^[17]、Z型试件单剪面试验^[18]、等高变宽 4 点受力梁试验^[19]以及固定剪切面直剪试验^[20]等。前 4 种试验方法,大多针对有粗骨料的普通混凝土,剪切面上大多无法向应力,破坏点处于纯剪切状态,得到纯剪切状态下的抗剪强度,得到的抗剪强度与混凝土抗拉强度值接近。第 5 种固定剪切面试验,由试验设

备所限,剪切破坏面是固定的,在剪切破坏面上的粗骨料常常被剪断,其值不能准确反映试件先沿骨料与砂浆界面薄弱处破坏,附近区域应力重分布,然后次薄弱环节破坏,应力再重分布,直到整个试件最终破坏的实际情况,其试验结果偏大。对于不含粗骨料的高性能钢纤维混凝土的抗剪切试验相关研究成果较少。

通过在 5 档围压(0、10、20、40 MPa 和 60 MPa)下对 4 种钢纤维体积含量(0%、1%、2%和 3%)UHPC 进行常规三轴压缩试验,得到各加载路径下超高性能混凝土轴向、径向应力应变全曲线和应力圆,由应力圆数据得到不同围压不同钢纤维含量超高性能混凝土内摩擦角和黏聚力的具体数值,给出了内摩擦角和黏聚力随围压和钢纤维体积含量增加时的变化规律,为后续研究钢纤维群与超高性能混凝土基质间的作用机理、钢纤维超高性能混凝土力学行为的数值模拟及本构关系研究提供参考数据和帮助。

1 实验

1.1 原材料

用于制备超高性能混凝土的原材料有:盾石牌 P·O52.5 普通硅酸盐水泥;黄白相间石英砂,粒径范围 0.3~1.0 mm;300 目白色石英粉;圆直镀铜钢纤维,直径 0.22 mm,长度 13 mm,抗拉强度 2 800 MPa;北京邦德印合成材料研究所生产的超高性能混凝土专用硅灰;聚羧酸高效减水剂及自来水。

1.2 配合比

表 1 超高性能混凝土配合比
Table 1 Mixing proportions of UHPC

kg/m³

Steel fiber content	Cement	Silicon fume	Quartz sand	Quartz powder	Water	Water reducer	Steel fiber
0%	820	164	902	205	148	20.5	0
1%	820	164	902	205	148	20.5	74
2%	820	164	902	205	148	20.5	148
3%	820	164	902	205	148	20.5	222

1.3 试样制备

首先将水泥、硅灰、石英砂、石英粉倒入搅拌机中,干拌 3 min,然后钢纤维用细筛分次筛入,每次筛入约 500 g 后搅拌 30 s,减水剂与水的混合液分两次倒入搅拌机,第 1 次倒入混合液的 80%搅拌 6 min,第 2 次倒入 20%搅拌 5 min。

将拌合完成的钢纤维超高性能混凝土倒入 35 cm×20 cm×14 mm 规格的有机玻璃试模中,并

将试模放在高频振动台(振动频率为 50 Hz)振动 3 min 成型。

试模内超高性能混凝土在标准养护室养护 24 h 后拆模,试样拆模后立即放入热水箱中加热养护,水温以 5 °C/h 的速率升温至 90 °C 后保持恒定,并在 90 °C 养护 72 h 后拉闸断电,待热水箱水温自然冷却到室温后取出试块。

三轴试验前 1 周,完成试样的钻、切和磨的工

作, 形成直径为 5 cm, 高约 11 cm 的圆柱体试件, 试件加工精度及试验过程满足《岩石物理力学性质试验规程》(DZ/T 0276.1—2015)相关要求。

1.4 测试

试验在北京交通大学岩石力学实验室完成, 试验机为 XTR01 型电液伺服岩石三轴试验仪。轴向应变和径向应变由试验机所配套的 YSY60-6/2.6 型号三维引伸计测量。轴向加载过程位移控制, 加载速率为 0.003 mm/s。通过对 UHPC 圆柱体试样进行常规三轴压缩试验, 获得其在各应力路径下轴向、径向应力应变全曲线及应力圆数据, 进而得到 UHPC 抗剪切强度指标值 c 和 ϕ 随围压及钢纤维含量增大的变化规律, 并对变化规律进行详细的细观机理分析。

2 结果与讨论

2.1 应力应变全曲线

试验过程中发现, 超高性能混凝土存在一个临界围压带, 试验围压小于临界围压带下限值时, 其变形性质表现为脆性, 试验围压值在临界围压带区间内时, 超高性能混凝土变形性质表现出由脆性向塑性转化的过渡状态, 当围压值超过临界围压带上限围压时, 超高性能混凝土变形性质表现为延性流动。由图 1 到图 4 可知, 4 种钢纤维含量超高性能混凝土在围压为 40 MPa 时, 邻近破坏时轴向和径向应力应变曲线均出现近似水平段(应力几乎保持不变, 应变持续增加的现象), 进入脆性变形向塑性变形转化的过渡状态, 由本文数据确定的与过渡状态相对应的临界围压带下限围压值约为超高性能混凝土峰值强度的 1/3, 由于试验设备加载能力所限, 未测到临界围压带上限围压值。超高性能混凝土随围压增大变形性质由脆性向塑性过渡时, 内摩擦角减小, 黏聚力增大。

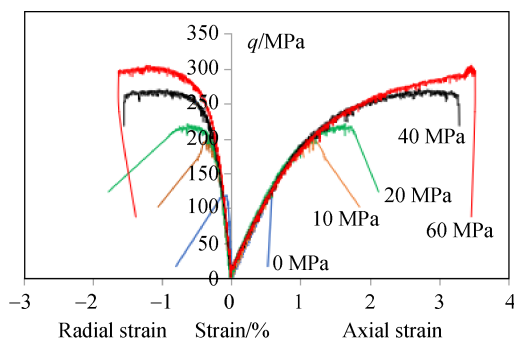


图 1 素超高性能混凝土不同围压下应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of plain ultra-high performance concrete under different confining pressures

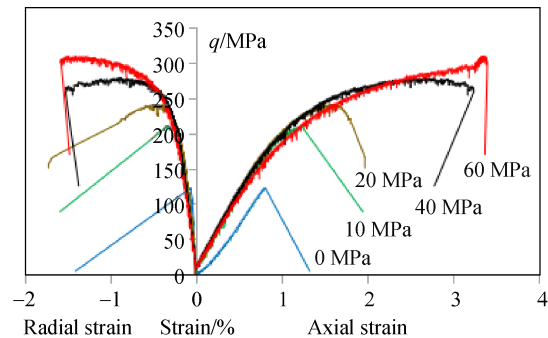


图 2 钢纤维含量 1% 超高性能混凝土不同围压下应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of ultra-high performance concrete with steel fiber volume content of 1% under different confining pressures

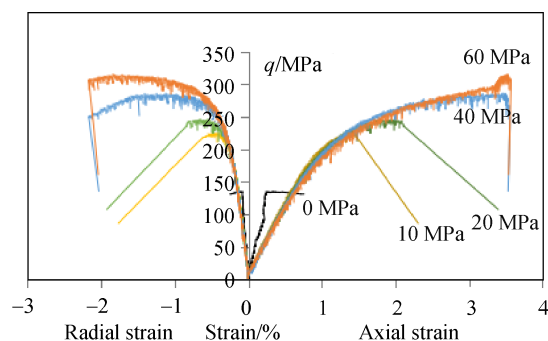


图 3 钢纤维含量 2% 超高性能混凝土不同围压下应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of ultra-high performance concrete with steel fiber volume content of 2% under different confining pressures

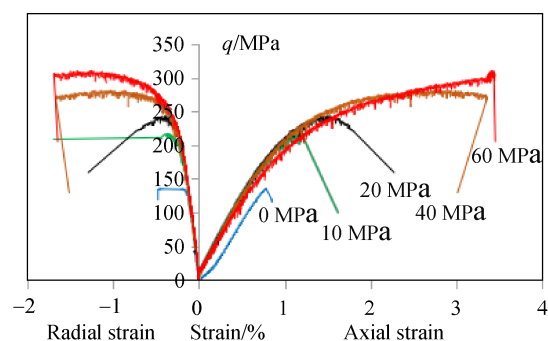


图 4 钢纤维含量 3% 超高性能混凝土不同围压下应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of ultra-high performance concrete with steel fiber volume content of 3% under different confining pressures

2.2 超高性能混凝土不同围压下峰值强度及应力圆

表 2 为不同围压下 4 种钢纤维含量超高性能混凝土轴向峰值强度实测值, 由表 2 数据可得到每种钢纤维含量超高性能混凝土在不同围压时的应力圆, 图 5 为同种钢纤维含量超高性能混凝土在不同

围压下应力圆示意图。

2.3 超高性能混凝土不同围压下 c 值和 ϕ 值的确定

图 6 为直线型摩尔强度包络线, 各钢纤维含量超高性能混凝土在不同围压下的黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 由直线型摩尔强度包络线确定。

由图 6 可知:

$$\sin \phi = \frac{(\sigma_{1m} - \sigma_3) / 2}{(\sigma_{1m} - \sigma_3) / 2 + c \cdot \cot \phi} \quad (1)$$

简化后得:

$$\sigma_{1m} = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \phi / 2) + 2c \tan(45^\circ + \phi / 2) \quad (2)$$

同时有:

$$\sigma_c = 2c \tan(45^\circ + \phi / 2) \quad (3)$$

其中 σ_{1m} 为三轴压缩强度, σ_3 为对应的围压。

由式(2)和式(3)结合表 2 数据, 可求得不同钢纤维含量超高性能混凝土在不同围压下的黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 值, 具体数值见表 3。

表 2 不同围压下超高性能混凝土峰值强度实测值

Table 2 Measured value of ultra-high performance concrete specimens peak strength σ

Confining pressure	Volume fraction of steel fiber			
	0%	1%	2%	3%
0	120	132	152	135
10	199	200	202	212
20	219	233	241	236
40	252	278	272	277
60	295	301	310	305

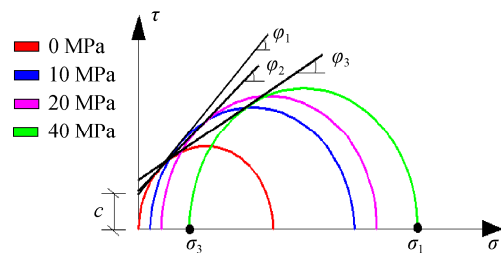


图 5 超高性能混凝土在不同围压下应力圆示意图

Fig. 5 Stress circle diagram of ultra-high performance concrete with different confining pressures

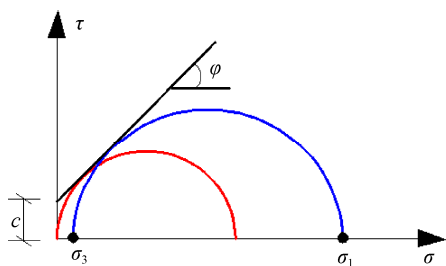


图 6 直线型摩尔强度包络线

Fig. 6 Straight line Mohr strength envelope

由表 3 数据绘制 4 种钢纤维含量超高性能混凝土黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 随围压变化曲线, 如图 7 和图 8 所示。

表 3 不同围压下超高性能混凝土黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 值
Table 3 Calculated value of ultra-high performance concrete specimens c and ϕ

σ/MPa	c/MPa				$\phi/(^\circ)$			
	0%	1%	2%	3%	0%	1%	2%	3%
10	21.3	25.3	33.9	24.4	50.8	48.0	41.8	50.0
20	27.0	29.4	36.0	30.0	41.6	42.0	39.2	42.0
40	33.0	34.6	43.9	35.8	32.4	34.7	30.0	34.1
60	35.1	39.3	46.9	40.1	30.0	28.5	26.6	28.6

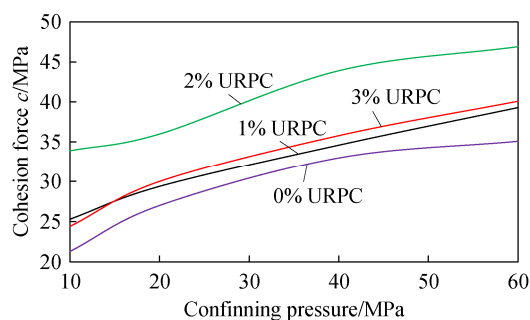


图 7 4 种钢纤维含量 UHPC 黏聚力随围压变化曲线

Fig. 7 Change curves of adhesion force of 4 kinds of steel fibers UHPC with the confining pressure increase

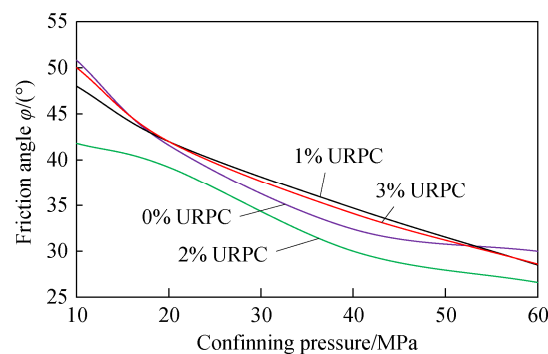


图 8 4 种钢纤维含量 UHPC 内摩擦角随围压变化曲线

Fig. 8 Change curves of inner friction angle of 4 kinds of steel fibers contents UHPC with the surrounding pressure increase

由图 7 可知, 4 种钢纤维含量超高性能混凝土黏聚力均随围压的增加而增大, 素 UHPC 相邻围压间黏聚力增幅分别为 1.27 倍、1.22 倍和 1.07 倍, 围压越大黏聚力增幅越小(黏聚力具体数值见表 3), 同围压下素 UHPC 黏聚力最小。钢纤维含量为 1% 和 3% 时, 两种超高性能混凝土黏聚力 c 随围压变化曲线形状形似, 位置接近, 近似重合, 可以认为该两种 UHPC 围压相同时黏聚力近似相等。这里

有一个特别明显的现象, 4 种钢纤维含量(0%、1%、2%和 3%) UHPC, 同围压下钢纤维含量为 2%时黏聚力最大, 围压为 10 MPa 时, 2% UHPC 黏聚力为 33.9 MPa, 约为同围压下 3% UHPC 黏聚力的 1.4 倍, 围压为 20 MPa、40 MPa、60 MPa 时, 该比例分别为 1.2 倍、1.23 倍和 1.17 倍, 钢纤维含量为 2%时增强增韧效果显著。

围压的存在, 能有效抑制 UHPC 基质在受压过程中微裂纹的产生、发展和贯通, 围压越大, 这种抑制作用越明显, 宏观上表现为黏聚力越大。这就是每种钢纤维含量 UHPC, 黏聚力随围压的增加而增大的原因。

钢纤维在 UHPC 基质内随机分布, 钢纤维体积含量为 1%时, 钢纤维与 UHPC 基质间形成的有效粘结, 能分散基质所受应力, 在一定程度上能抑制微裂纹的产生、发展和贯通, 这使得其黏聚力比同围压下素 UHPC 黏聚力大。钢纤维含量为 1%时, 钢纤维数量较少, 不足以在 UHPC 基质内部形成空间网状结构, 钢纤维在 UHPC 基质内部不能形成整体构架, 导致黏聚力增幅有限。而钢纤维体积含量为 2%时, 钢纤维的数量已满足在 UHPC 基质内部形成整体性的空间网状结构, 再有搅拌成型时较为合理的钢纤维投放方式, 此时的混合钢纤维效应最好, 增强增韧效果最好, 黏聚力的提高幅度最大。钢纤维体积含量为 3%时, 钢纤维数量较多, 在 UHPC 基质内部会出现钢纤维成簇、扎堆或聚集成球现象, 同时较多含量的钢纤维减弱了新拌 UHPC 浆料的流动性, 致使浆料中的气泡在振捣过程中较难逸出, 造成基质孔隙率增大以及钢纤维与基质间的有效粘结长度变短, 致使其混合钢纤维效应弱于 2%含量超高性能混凝土。

由图 8 可知, 4 种钢纤维含量 UHPC 的内摩擦角随围压的增大均表现出降低的趋势, 钢纤维含量为 0%、1%和 3%时, UHPC 内摩擦角随围压变化曲线形状相似, 位置接近, 近似重合, 即相同围压下, 钢纤维含量为 0%、1%和 3%的 3 种 UHPC 内摩擦角近似相等(内摩擦角具体数值见表 3)。钢纤维含量为 2%时, UHPC 在 4 种围压下(10、20、40 MPa 和 60 MPa)内摩擦角分别为 41.8°、39.2°、30°和 26.6°, 同围压下, 钢纤维含量为 2%时的内摩擦角比其它 3 种 UHPC 内摩擦角稍小, 围压为 10 MPa 时, 2%UHPC 内摩擦角与素超高性能混凝土内摩擦角之比为 0.94, 围压为 20、40 MPa 和 60 MPa 时, 该比例分别为 0.94、0.93 和 0.89。

由 4 种钢纤维含量 UHPC 在不同围压下轴向和径向应力应变全曲线知, 随围压的增大, UHPC 的变形和破坏性质由脆性向塑性转变, 围压为 40 MPa 时, UHPC 变形性质已表现出明显的塑性流动特征, 这种特征能较好的解释围压越大 UHPC 内摩擦角越小的原因。由文献[11]可知, 围压的变化会显著影响超高性能混凝土试样的峰值强度, 钢纤维掺量变化对超高性能混凝土试样抗压强度的影响只在单轴加载条件下有所体现, 在有围压条件下并不明显。故可得相似结论, 相对钢纤维而言, 围压对 UHPC 的内摩擦角的影响是主要的、关键的、核心的, 起决定性作用, 本文最小围压为 10 MPa, 故钢纤维含量对超高性能混凝土内摩擦角影响不明显。

2.4 破坏模式

4 种钢纤维含量超高性能混凝土圆柱体试件, 三轴试验破坏模式均表现为单剪切破坏, 该破坏模式既不属于脆性破坏模式, 也不属于塑性流动破坏模式, 属于脆性破坏到塑性破坏之间的过渡破坏模式。围压为 40 MPa 时, 偶见破坏后试件中部有扩容现象, 但该现象不明显。

3 结论

1) 通过对 4 种钢纤维体积分含量的超高性能混凝土在 5 档围压下进行常规三轴压缩试验, 得到各应力路径下超高性能混凝土的轴向及径向应力应变全曲线及应力圆。

2) 超高性能混凝土存在一个临界围压带, 试验围压小于临界围压带下限值时, 其破坏模式表现为脆性破坏, 试验围压值在临界围压带内时, 超高性能混凝土变形性质表现出由脆性向延性转化的过渡状态, 当围压值超过临界围压带上限围压时, 钢纤维超高性能混凝土变形及破坏呈现延性流动状态。

3) 黏聚力随围压的增加而增加, 同围压下钢纤维含量为 2%时, 黏聚力最大, 而钢纤维含量为 1%和 3%时黏聚力较为接近近似相等, 素超高性能混凝土黏聚力同围压下最小。

4) 4 种钢纤维含量超高性能混凝土的内摩擦角随围压的增大均表现出降低的趋势, 相同围压下, 钢纤维含量为 2%时的内摩擦角比其它 3 种钢纤维含量超高性能混凝土内摩擦角略小, 有围压时钢纤维含量对超高性能混凝土内摩擦角的影响较小。

参考文献:

- [1] 郑文忠, 李莉. 超高性能混凝土配制及其配合比计算方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(2): 13–17.
ZHENG Wenzhong, LI Li. J Hunan Univ (Nat Sci) (in Chinese), 2009, 36(2): 13–17.
- [2] 邓宗才, 肖锐, 申臣良. 超细水泥超高性能混凝土的配合比设计[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(4): 659–664.
DENG Zongcai, XIAO Rui, SHEN Chenliang. J Build Mater(in Chinese), 2014, 17(4): 659–664.
- [3] 郑文忠, 吕雪源. 超高性能混凝土研究进展[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 44–58.
ZHENG Wenzhong, LV Xueyuan. J Build Struct(in Chinese), 2015, 36(10): 44–58.
- [4] 安明喆, 宋子辉, 李宇, 等. 不同钢纤维含量超高性能混凝土材料受压力学性能研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(5): 34–38.
AN Mingzhe, Song Zihui, LI Yu, et al. China Railway Sci(in Chinese), 2009, 30(5): 34–38.
- [5] 鞠杨, 贾玉丹, 刘红彬, 等. 超高性能混凝土钢纤维增强增韧的微观机理[J]. 中国科学(E辑), 2007, 37(11): 1403–1416.
JU Yang, JIA Yudan, LIU Hongbin, et al. Sci China (E) (in Chinese), 2007, 37(11): 1403–1416.
- [6] 鞠杨, 刘红彬, 陈健, 等. 超高强度超高性能混凝土的韧性表征方法[J]. 中国科学(E辑), 2009, 39(4): 793–808.
JU Yang, LIU Hongbin, CHEN Jian, et al. Sci China (E) (in Chinese), 2009, 39(4): 793–808.
- [7] 寇佳亮, 刘菲菲, 赵丹丹, 等. 常温养护条件下超高性能混凝土抗硫酸盐侵蚀性能试验研究[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(3): 76–87.
KOU Jialiang, LIU Feifei, ZHAO Dandan, et al. J Nat Disasters(in Chinese), 2020, 29(3): 76–87.
- [8] 安明喆, 王华, 王月, 等. 超高性能混凝土在海水冻融作用下的耐久性[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(2): 1–7.
AN Mingzhe, WANG Hua, WANG Yue, et al. China Railway Sci(in Chinese), 2018, 39(2): 1–7.
- [9] 孙蓓, 焦楚杰. 自然养护超高性能混凝土单轴受压的试验研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(2): 114–118.
SUN Bei, JIAO Chujie. Ind Constr(in Chinese), 2019, 49(2): 114–118.
- [10] 鞠彦忠, 王德弘, 康孟新. 不同钢纤维掺量超高性能混凝土力学性能的试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(2): 299–305.
JU Yanzhong, WANG Dehong, KANG Mengxin. J Basic Sci Eng(in Chinese), 2013, 21(2): 299–305.
- [11] 吴礼程, 王哲, 刘迪, 等. 围压及钢纤维掺量对超高性能混凝土力学特性的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2): 208–215.
WU Licheng, WANG Zhe, LIU Di, et al. J Build Mater(in Chinese), 2018 21(2): 208–215.
- [12] 王哲, 吴礼程. 不同减摩条件下变长度超高性能混凝土的三轴试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(1): 40–50.
WANG Zhe, WU Licheng. J Zhejiang Univ (Eng Sci) (in Chinese), 2019, 53(1): 40–50.
- [13] 余自若, 赵海增, 安明喆, 等. 三轴压下超高性能混凝土的力学性能研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(7): 117–122.
YU Ziruo, ZHAO Haizeng, AN Mingzhe, et al. J China Railway Soc(in Chinese), 2017, 39(7): 117–122.
- [14] 赖建中, 孙伟, 戎志丹. 超高性能混凝土在多次冲击荷载作用下的力学行为[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(6): 532–537.
LAI Jianzhong, SUN Wei, RONG Zhidan. Explos Shock Waves(in Chinese), 2008, 28(6): 532–537.
- [15] 余自若, 安明喆, 郑帅泉. 超高性能混凝土疲劳后剩余抗压强度试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(1): 82–85.
YU Ziruo, AN Mingzhe, ZHENG Shuaiquan. J Build Struct(in Chinese), 2011, 32(1): 82–85.
- [16] 张振雷, 李劲松, 刘华新. 玄武岩纤维复合材料混合加固破损混凝土短梁的抗剪性能[J]. 四川建筑科学研究, 2018, 44(1): 1–6.
ZHANG Zhenlei, LI Jinsong, LIU Huaxin. Sichuan Build Sci(in Chinese), 2018, 44(1): 1–6.
- [17] 刘凯华. 再生混凝土压剪复合受力性能的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 47–49.
LIU Kaihua. Experimental study on behavior of recycled concrete under combined compressive and shearing stresses (in Chinese dissertation). Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 47–49.
- [18] WASEEM S A, SINGH B. An experimental study on shear capacity of interfaces in recycled aggregate concrete[J]. Int Federation Struct Concr, 2018, 19: 230–245.
- [19] LIU B, FENG C, DENG Z H. Shear behavior of three types of recycled aggregate concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 217: 557–572.
- [20] 陈宇良, 刘杰, 吴辉琴, 等. 直剪作用下再生混凝土力学性能及强度指标换算[J]. 复合材料学报, 2021, 38(11): 3962–3969.
CHEN Yuliang, LIU Jie, WU Huiqin, et al. Acta Mater Compo Sin(in Chinese), 2021, 38(11): 3962–3969.