中国农村水利水电
China Rural Water and Hydropower
www.irrigate.com.cn

文章编号:1007-2284(2023)06-0255-06
水力发电

超高性能混凝土基于抗剪切强度参数的Mohr-Coulomb破坏准则

王晓飞,周海龙,姚占全

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,内蒙古 呼和浩特 010018)

摘　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和60 MPa)下进行常规三轴压缩试验,基于直线型摩尔强度包络线及试验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,由c值和φ值计算确定Mohr-Coulomb破坏准则中的参数,得到不同围压不同钢纤维含量下的Mohr-Coulomb破坏准则,经检验这种随围压与钢纤维含量不同而变参数值的Mohr-Coulomb破坏准则能较好的描述超高性能混凝土三轴抗压强度的发展规律。

关键词:超高性能混凝土;钢纤维;围压;内摩擦角;黏聚力;破坏准则

中图分类号:TU528.572　　**文献标识码:**A　　**DOI:**10.12396/znsd.221418

王晓飞,周海龙,姚占全.超高性能混凝土基于抗剪切强度参数的Mohr-Coulomb破坏准则[J].中国农村水利水电,2023(6):255-260. DOI:10.12396/znsd.221418.

WANG X F, ZHOU H L, YAO Z Q. Mohr-Coulomb failure criterion of ultra-high performance concrete is based on the shear strength parameters[J]. China Rural Water and Hydropower,2023(6):255-260. DOI:10.12396/znsd.221418.

Mohr-Coulomb Failure Criterion of Ultra-high Performance Concrete is Based on the Shear Strength Parameters

WANG Xiao-fei, ZHOU Hai-long, YAO Zhan-quan

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

Abstract: Through the conventional triaxial compression experiment of ultra-high performance concrete with 4 kinds of steel fiber volume contents(0%,1%,2% and 3%)at 5 grades confining pressures (0,10,20,40 and 60 MPa), The specific values of internal friction angle φ and adhesion c in different confining pressure of each steel fiber content ultra-high performance concrete are deduced from the test data, the parameter in the Mohr-Coulomb failure criterion is determined by the c and φ values, and the specific expression of Mohr-Coulomb failure criterion under different confining pressures and different steel fiber contents are obtained too. It is found that the Mohr-Coulomb failure criterion can better describe the development law of the triaxial compressive strength of ultra-high performance concrete.

Key words: ultra-high performance concrete; steel fiber; confining pressure; internal friction angle; adhesion force; failure criterion

0　引　言

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete,简称UHPC)是一种基于双掺技术(掺高效减水剂和超细活性粉末)经湿热养护获得的具有超高强度、高耐久性、力学性能优异的水泥基复合材料[1-3]。素UHPC性脆,常掺入钢纤维以改善其延性与韧性[4]。由于力学性能及耐久性优异,其在桥梁工程、核工业及军事防护工程中应用广泛[5-7]。

收稿日期:2022-07-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51969025,51869022)。

作者简介:王晓飞(1979-),男,讲师,从事UHPC力学性能及数值模拟研究。E-mail:wxf.225@163.com。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由于钢纤维UHPC黏性大，不易泵送，且适于湿热养护，工程中常以预制构件的形式出现，工程中的UHPC预制构件常处于三向应力状态，UHPC三轴应力状态下的强度对于构件尺寸的选择，最大外荷载的确定、以及在经济性与安全性之间良好平衡的选择上至关重要。钢纤维超高性能混凝土强度高，其三轴试验对试验设备的加载能力及变形量测系统要求较为严格，同时试验过程费时费力。如果能找到一种表达式简单、精度足够的强度准则来预测钢纤维UHPC的三轴强度，这样不仅能满足设计上的相关需求，同时也不用进行繁琐的试验过程，省时省力。

目前，国内外许多学者针对各类混凝土已提出了多种不同破坏准则，这些准则都是基于材料特性、破坏机理，根据主应力空间中破坏包络曲面形状给出具体表达式，再由试验数据拟合得到表达式中的参数值，以确定破坏准则的具体表达式并加以应用。如二参数的幂律准则、三参数的八面体强度准则、五参数的willian-warnke准则和单参数的Mohr-Coulomb准则[8-11]。其中单参数的Mohr-Coulomb破坏准则表达式简单，含义明确，如果预测精度足够，是能被广大科研及相关设计人员接受并加以应用的。

经旁证试验数据检验，由本文确定的参数值随c和φ值变化的Mohr-Coulomb破坏准则能较好的预测钢纤维UHPC的三轴强度。

1 试 验

1.1 原材料

制备UHPC用到的原材料有：①盾石牌P·O52.5型普通硅酸盐水泥；②石英砂（粒径范围0.3~1 mm）；③300目石英粉；④UHPC专用硅灰；⑤长度为13 mm，直径为0.22 mm的圆直镀铜钢纤维；⑥聚羧酸高效减水剂；⑦自来水。

1.2 配合比

UHPC配合比见表1。

表1 UHPC配合比 kg/m^3

Tab.1 The mixing proportions of UHPC

钢纤维体积含量/%	水泥	硅灰	石英砂	石英粉	水	减水剂	钢纤维
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 试样制备方法

制备UHPC投料顺序、搅拌时间及养护制度详见文献[13]，后经过钻、锯和磨三道工序，形成直径约50 mm，高约110 mm的圆柱体试件。图1为加工好的UHPC圆柱体试样。

UHPC圆柱体试件三轴压缩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，见图2。

为了防止试验过程中发生漏油现象（施加围压的航空油与试件接触），试验前用一层热缩管对试件进行包裹，每种钢纤维含量UHPC在每档围压下平行压缩两块试件，数据离散时补做试验。

图1 UHPC圆柱体试样

Fig.1 Cylindrical specimens of UHPC

图2 电液伺服岩石三轴试验仪

Fig.2 Electro-hydraulic servo rock triaxial tester

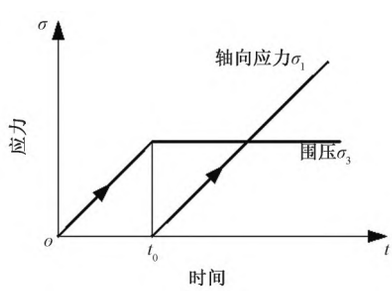

图3 三轴试验加载路径

Fig.3 Triaxial test loading path

2 试验结果与分析

2.1 应力应变全曲线

图4~7中纵坐标$q = \sigma_1 - \sigma_3$，由图4~7可知，4种钢纤维含量UHPC在不同围压下轴向应力应变全曲线形状相似，可分为3个阶段，第一阶段为弹性段，该阶段应力与轴向应变近似呈线性关系，轴向应变随应力成比例增加，该阶段发生的变形绝大部分为弹性变形，可以恢复。第二阶段为塑性强化阶段，该阶段从弹性变形终点到峰值应力点，这一阶段起初在试件内部会出现大量的微裂隙，随应力的增加，微裂隙不断扩展、交叉，应力达到峰值点时，试件内部形成宏观贯通缝，试件破坏，轴向应力应变曲线表现出非线性的变形特点。第三阶段为破坏后阶段（峰后段），试件承载力达到峰值后，其内部结构完全破坏，该阶段的轴向变形主要由试件沿宏观破裂面的滑移形成，试件承

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

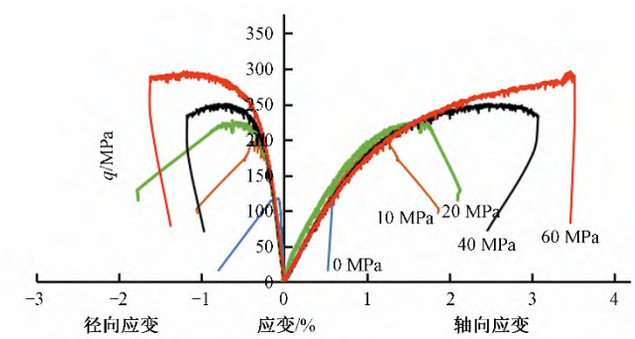

图4　素UHPC应力应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of plain UHPC

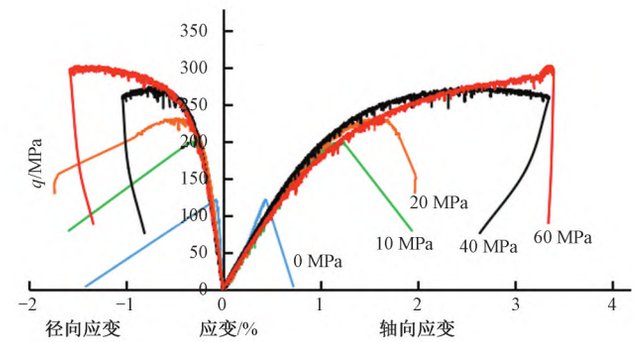

图5　钢纤维含量1% UHPC应力应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of UHPC with steel fiber content of 1%

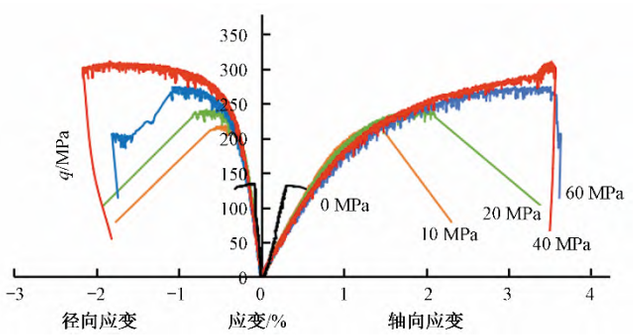

图6　钢纤维含量2%UHPC应力应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of UHPC with steel fiber volume content of 2%

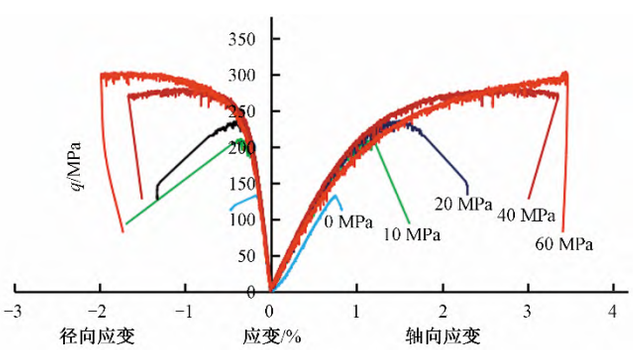

图7　钢纤维含量3%UHPC应力应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of UHPC with steel fiber volume content of 3%

载力随应变增大先保持平稳发展后缓慢下降，最后迅速降低。

径向应力应变全曲线形状也相似，也可分为三阶段，分别与轴向应力应变全曲线三阶段对应。弹性阶段径向应力应变曲线近似为直线，径向应变值很小。塑性强化阶段径向应变增长速率比应力增长速率快，这一阶段径向应力应变曲线表现为连续光滑的上凸弧状曲线。破坏后阶段随应力平稳缓慢下降，到最后的迅速降低，对应的径向应变发展很快。表2为4种钢纤维含量UHPC在不同围压下抗压强度实测值表。

表2　UHPC试件抗压强度实测值

Tab.2 Measured value of UHPC specimens compressive strength

试件编号	钢纤维含量/%	围压/MPa	抗压强度/MPa	抗压强度平均值/MPa
1	0	0	117.96	119.7
2	0	0	121.48	
3	0	10	197.06	198.8
4	0	10	200.54	
5	0	20	223.08	219.4
6	0	20	215.67	
7	0	40	250.46	252.2
8	0	40	253.87	
9	0	60	292.02	294.8
10	0	60	297.54	
11	1	0	129.36	132
12	1	0	134.61	
13	1	10	197.96	200
14	1	10	201.43	
15	1	20	230.92	232.7
16	1	20	234.43	
17	1	40	271.03	277.6
18	1	40	284.15	
19	1	60	300.12	301.2
20	1	60	302.34	
21	2	0	150.07	151.6
22	2	0	153.12	
23	2	10	200.82	202.3
24	2	10	203.87	
25	2	20	238.59	241.0
26	2	20	243.56	
27	2	40	270.31	272.6
28	2	40	274.79	
29	2	60	307.60	310.3
30	2	60	313.05	
31	3	0	133.08	135.3
32	3	0	137.45	
33	3	10	211.78	213.6
34	3	10	215.33	
35	3	20	234.22	236.3
36	3	20	238.34	
37	3	40	274.07	277.1
38	3	40	280.05	
39	3	60	302.43	305.0
40	3	60	307.54	

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.2 强度特点

由表2可知，0围压时，钢纤维含量为2%的UHPC峰值强度最高为151.6 MPa，钢纤维含量为1%和3%时，UHPC峰值强度分别为132 MPa和135.3 MPa，数值很接近近似相等，素UHPC峰值强度最低为119.7 MPa。

围压为10 MPa时，素UHPC峰值强度为198.8 MPa，钢纤维含量为1%、2%和3%时，UHPC峰值强度分别为200、202.3和213.6 MPa。该围压下，4种钢纤维含量UHPC峰值强度很接近，近似相等。

围压为20、40和60 MPa时，4种钢纤维含量UHPC峰值强度也有相同的变化规律，即围压相同，峰值强度近似相等。

同时4种钢纤维含量UHPC峰值强度都表现为随围压的增大而增大。围压的变化会显著影响UHPC试样的峰值强度。

钢纤维含量变化对UHPC试样抗压强度的影响在单轴加载条件下较为明显，在围压大于等于10 MPa时不明显。4种钢纤维含量UHPC在不同围压下的强度变化曲线见图8。

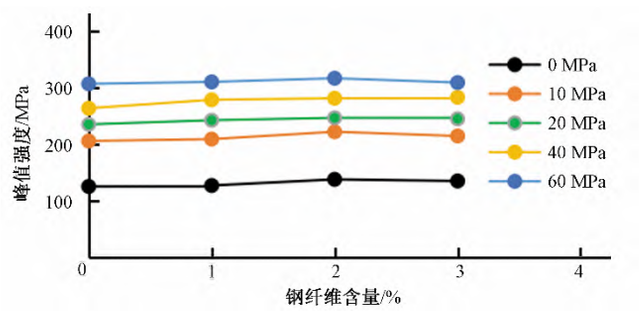

图8 4种钢纤维含量UHPC在不同围压下的峰值强度

Fig.8 Peak strength of 4 kind of steel fiber contents UHPC at different confining pressures

2.3 超高性能混凝土不同围压下的应力圆

由表2数据可得到4种钢纤维含量UHPC在不同围压时的应力圆，图9为UHPC在不同围压下应力圆示意图。

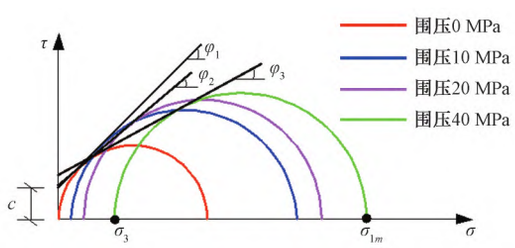

图9 UHPC应力圆

Fig.9 Stress circle of ultra-high performance concrete

2.4 超高性能混凝土不同围压下c值和φ值的确定

UHPC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，直线型摩尔强度包络线如图10所示。

由图10可知：

$$\sin\varphi = \frac{(\sigma_{1m} - \sigma_3)/2}{(\sigma_{1m} - \sigma_3)/2 + c\cot\varphi} \tag{1}$$

简化后得：

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

同时有：

$$\sigma_c = 2c\tan(45^\circ + \varphi) \tag{3}$$

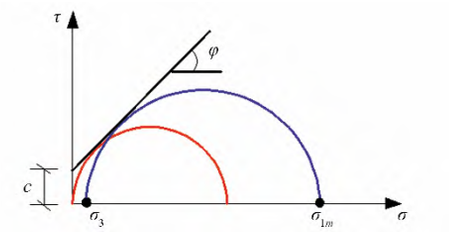

图10 直线型摩尔强度包络线

Fig.10 Straight line mohr strength envelope

由式(2)和式(3)结合表2数据，可求得每种钢纤维含量UHPC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3 UHPC黏聚力c和内摩擦角φ值

Tab.3 c and φ value of ultra-high performance concrete specimens

围压/MPa	钢纤维含量							
	0%		1%		2%		3%	
	c/MPa	φ/(°)	c/MPa	φ/(°)	c/MPa	φ/(°)	c/MPa	φ/(°)
10	21.3	50.8	25.3	48.0	33.9	41.8	24.4	50
20	27.0	41.6	29.4	42.0	36.0	39.2	30.0	42
40	33.0	32.4	34.6	34.7	43.9	30.0	35.8	34.1
60	35.1	30.0	39.3	28.5	46.9	26.6	40.1	28.6

超高性能混凝土内摩擦角与黏聚力随围压与钢纤维含量增大的变化规律及机理分析详见文献[13]。

2.5 Mohr-Coulomb破坏准则

单参数Mohr-Coulomb准则可表述为：

$$f_{3c} = f_c + K\sigma_3 \tag{4}$$

$$K = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$$

式中：f_{3c}为三轴抗压强度；f_c为单轴抗压强度；σ_3为围压；φ为材料内摩擦角。

该强度准则意义明确简单，就是三轴抗压强度等于单轴抗压强度加上围压的增强效应，式(4)中未体现钢纤维UHPC在加载后期邻近破坏时应力应变曲线的非线性。对单参数的Mohr-Coulomb准则稍做修改，改进后的Mohr-Coulomb准则能体现钢纤维UHPC在加载后期临近破坏时应力应变曲线的非线性，具体表达式如下：

$$f_{3c} = f_c + K\sigma_3 - 0.1c \tag{5}$$

式中：c为黏聚力。

由表3数据得到UHPC在不同围压、不同钢纤维含量时的K值与c值，具体见表4。

表4 Mohr-Coulomb破坏准则参数值

Tab.4 Mohr-Coulomb criterion parameters values

围压/MPa	钢纤维含量							
	0%		1%		2%		3%	
	c/MPa	K	c/MPa	K	c/MPa	K	c/MPa	K
10	21.3	7.9	25.3	6.8	33.9	5.0	24.4	7.5
20	27.0	5.0	29.4	5.0	36	4.4	30.0	5.0
40	33.0	3.3	34.6	3.6	43.9	3.0	35.8	3.6
60	35.1	3.0	39.3	2.8	46.9	2.6	40.1	2.8

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.6 破坏准则验证

由文献[8]第41页到第43页中钢纤维含量为1%和2%的超高性能混凝土在围压为10、20和40 MPa时的常规三轴压缩试验强度数据来验证式(5)表述的Mohr-Coulomb破坏准则。所引文献[8]数据与本文数据试验类型、混凝土种类相同,区别是试验设备与制备原材料不同。

表5中的实测值为文献[8]中的试验数据,预测值为式(5)Mohr-Coulomb破坏准则的计算值。

由表5可知,围压为10 MPa时,素UHPC Mohr-Coulomb破坏准则三轴抗压强度预测值与实测值之间的差值占实测值的10.4%,钢纤维含量为1%和2%时,该比例为6.3%和3.1%;围压为20 MPa时,钢纤维含量为0%、1%和2%时该比例分别为5.2%、4.7%和1.8%;围压为40 MPa时该比例分别为2.8%、1.0%和7.6%。影响UHPC常规三轴压缩试验强度的因素有很多,比如原材料的种类与品质、配合比、骨料的颗粒级配、成型工艺及养护条件、试件形状及尺寸大小以及试验条件等等,以上哪一项不同都会造成UHPC常规三轴压缩试验强度的离散与差别,本文最大的预测误差为素UHPC在围压为10 MPa时的10.4%,实测值与预测值差14.3 MPa,根据大量的UHPC常规三轴压缩试验过程和经验,这种误差即使原材料相同,成型工艺相同,同一批次的UHPC试件之间也属正常。所以基于抗剪切强度指标值的Mohr-Coulomb破坏准则对UHPC常规三轴试验压缩强度的预测精度足够,期待以后有更多的试验数据来检验该模型的精度和适用性。

表5　Mohr-Coulomb破坏准则预测值对比表　MPa

Tab.5 Comparison table of mohr-coulomb criteria for ultra high-performance concrete

围压/MPa	钢纤维含量							
	0%		1%		2%		3%	
	实测值	预测值	实测值	预测值	实测值	预测值	-	-
0	75.6	-	93.26	-	108.1	-	-	-
10	138.0	152.3	149.20	158.6	151.0	155.7	-	-
20	164.4	172.9	181.70	190.3	189.8	193.1	-	-
40	210.1	204.3	236.10	233.8	243.0	224.5	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-

3 结　论

(1)4种钢纤维含量UHPC在不同围压下轴向应力应变全曲线形状相似,可分为3个阶段,分别为弹性阶段、塑性强化阶段和破坏后阶段;UHPC在不同围压下径向应力应变全曲线形状也相似,也可分为3个阶段,分别与轴向应力应变全曲线三阶段相对应。

(2)0围压时,钢纤维含量为2%的UHPC峰值强度最高为151.6 MPa,钢纤维含量为1%和3%时,UHPC峰值强度分别为132和135.3 MPa,数值很接近近似相等,素UHPC峰值强度最低为119.7 MPa。

(3)钢纤维含量变化对UHPC抗压强度的影响在单轴压缩条件下较为明显,当围压大于等于10 MPa时不明显。

(4)由直线型摩尔强度包络线确定4种钢纤维含量UHPC在不同围压下的抗剪强度指标c和φ值,由c值和φ值计算Mohr-Coulomb破坏准则中的参数,得到不同围压、不同钢纤维含量时Mohr-Coulomb破坏准则的具体表达式。

(5)经检验,提出的随围压与钢纤维含量不同而变参数值的Mohr-Coulomb破坏准则能较好的描述超高性能混凝土三轴抗压强度的发展规律。

参考文献:

[1] 张倩倩,魏　亚,张景硕,等.钢纤维掺量对活性粉末混凝土断裂性能的影响[J]. 建筑材料学报,2014,17(1):24-29.
ZHANG Q Q, WEI Y, ZHANG J S, et al. Influence of steel fiber content on fracture properties of RPC [J]. Journal of Building Materials,2014,17(1):24-29.

[2] 鞠　杨,贾玉丹,刘红彬,等.活性粉末混凝土钢纤维增强增韧的细观机理[J]. 中国科学(E辑:技术科学),2007,37(11):1 403-1 416.
JU Y, JIA Y D, LIU H B, et al. Strengthening and toughening mechanisms of reactive powder concrete by steel fiber[J]. Science in china (Series E: Technological Sciences, in Chinese), 2007, 37 (11): 1 403-1 416.

[3] 鞠　杨,刘红彬,陈　健,等. 超高强度活性粉末混凝土的韧性与表征方法[J]. 中国科学(E辑:技术科学),2009,39(4):793-808.
JU Y, LIU H B, CHEN J, et al. Toughness and characterization method of ultra high strength active powder concrete [J]. Science in China (Series E: Technological Sciences, in Chinese), 2009, 39 (4): 793-808.

[4] 王晓飞,王阳平. 钢纤维活性粉末混凝土力学特性[J]. 建筑材料学报,2015,18(6):942-945.
WANG X F, WANG Y P. Mechanical properties of RPC with different steel fiber volume contents [J]. Journal of Building Materials, 2015,18(6):942-945.

[5] 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 M Z, WANG H, WANG Y, et al. Durability of reactive powder concrete under action of seawater freeze-thaw cycle [J]. China railway science,2018,39(2):1-7.

[6] 闫光杰. 200 MPa级活性粉末混凝土(RPC200)的破坏准则与本构关系研究[D]. 北京:北京交通大学,2005.
YAN G J. Study on failure criterion and constitutive relationship of 200 MPa reactive powder concrete (RPC 200)[D]. Beijing: Beijing jiaotong University,2005.

[7] 余自若,秦　鑫,安明喆. 活性粉末混凝土的常规三轴压缩性能

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

试验研究[J]. 中国铁道科学,2012,33(2):38-42.
YU Z R,QING X,AN M Z. Experimental research on the conventional triaxial compressive properties of reactive powder concrete[J]. China railway science,2012,33(2):38-42.

[8] 仵鹏涛. 三向应力状态下超高性能混凝土材料静态力学性能研究[D]. 天津:天津大学,2019.
WU P T. Study of static mechanical properties of ultra high performance concrete under triaxial stress states[D]. Tianjin: Tianjin University,2019.

[9] 梁 伟,吴佩刚,赵光仪,等. 高强混凝土三轴强度规律与破坏准则[J]. 建筑结构,2003,33(1):17-19.
LIANG W,WU P G,ZHAO G Y,et al. Triaxial strength law and failure criterion of high-strength concrete[J]. Building structure, 2003, 33(1):17-19.

[10] 周 俊. 三向应力状态下高性能混凝土的本构关系研究[M]. 合肥:合肥工业大学,2011.
ZHOU J. A study on constitutive relationship of high performance concrete under triaxial stress states[M]. HeFei,HeFei university of technology,2011.

[11] OTTOSEN N S. A failure criterion for concrete. Journal of ASCE, 1977,103(EM4):527-535.

[12] 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 L C,WANG Z,LIU D,et al. Effect of confining pressure and steel fiber volume content on mechanical property of reactive powder concrete[J]. Journal of Building Materials, 2018,21(2):208-215.

[13] 王晓飞,周海龙,王海龙. 超高性能混凝土的抗剪强度[J]. 硅酸盐学报,2022,50(8):1-6.
WANG X F,ZHOU H L,WANG H L. Shear strength of ultra high performance concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society. 2022,50(8):1-6.

(上接第254页)

LI W S, YAO C L, ZOU D B. Experimental study on Grouting without cover weight in the bank slope dam section of Goupitan Hydropower Station [J] Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009,26(1):54-56.

[5] 彭爱华,傅 建,刘加龙,等. 无盖重固结灌浆在构皮滩水电站工程中的应用[J]. 贵州水力发电,2009,23(3):47-50.
PENG A H, FU J, LIU JIA L, et al. Application of consolidation grouting without cover weight in Goupitan Hydropower Station [J] GuiZhou Hydropower, 2009,23(3):47-50.

[6] 白俊光,李蒲健,武志刚,等. 拉西瓦水电站枢纽关键技术[J]. 水力发电,2009,35(11):10-15.
BAI J G, LI P J, WU Z G, et al. Key technologies of Laxiwa Hydropower Station [J] Water Power, 2009,35(11):10-15.

[7] 李 琪,李若东,赵海峰,等. 拉西瓦大坝陡坡基础有盖重固结预埋灌浆管法工艺试验及应用[J]. 青海大学学报(自然科学版),2010,28(1):60-63.
LI Q, LI R D, ZHAO H F, et al. The process test and application on a pre-embeded grouting pipe method under the consolidation with a cover weight on the rapid ascent substructure in Laxiwa dam [J]. Journal of Qinghai University(Nature Science), 2010,28(1):60-63.

[8] 杨世伟,李德勇. 锦屏一级水电站坝基无盖重固结灌浆施工工艺探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(8):56-58.
YANG S W, LI D Y. Discussion on Construction Technology of Consolidation Grouting without Concrete Covering for Dam Foundation in Jinping 1 Hydropower Station [J] Exploration Engineering (Geotechnical Drilling and Excavation Engineering), 2011,38(8):56-58.

[9] 祝海霞,潘肖红. 锦屏一级水电站左岸抗力体固结灌浆处理设计及效果评价[J]. 水电站设计,2015,31(3):13-18.
ZHU H X, PAN X H. Design and effect evaluation of consolidation grouting treatment for resistance mass on the left bank of Jinping I Hydropower Station [J] Hydropower Station Design, 2015, 31(3): 13-18.

[10] 刘 强,尹华安,李瑞青. 溪洛渡水电站大坝基础固结灌浆设计[J]. 水电站设计,2012,28(4):16-19.
LIU Q, YIN H A, LI R Q. Consolidation grouting design for dam foundation of Xiluodu Hydropower Station [J] Hydropower Station Design, 2012,28(4):16-19.

[11] 王 毅,杨建宏. 溪洛渡水电站河床坝基固结灌浆与检测评价[J]. 工程地质学报,2015,23(1):499-503.
WANG Y, YANG J H. Consolidation grouting and inspection evaluation of riverbed dam foundation of Xiluodu Hydropower Station [J] Journal of Engineering Geology, 2015,23(1):499-503.

[12] 丁 刚,施华堂. 乌东德水电站坝基裸岩无盖重固结灌浆试验研究[C]//地基与基础工程技术创新与发展 2017 第14次全国水利水电地基与基础工程学术研讨会论文集. 2017: 298-305.
DING G, SHI H T. Experimental study on uncovered rock consolidation grouting of dam foundation of Wudongde hydropower station [C]// Technical Innovation and Development of Foundation and Foundation Engineering 2017:298-305.

[13] 施华堂,王汉辉,翁永红,等. 一种混凝土高坝全坝无仓面固结灌浆结构: 中国:CN201920309048.9[P]. 2019.03.12.
SHI H T, WANG H H, WENG Y H, et al. A consolidation grouting structure without storehouse surface for high concrete dam: China: CN201920309048.9[P] 2019.03.12.

[14] 丁 刚,施华堂,王汉辉,等. 一种岩体宽大裂隙封闭结构: 中国:CN201721555828.9[P]. 2017.11.20.
DING G, SHI H T, WANG H H, et al. A kind of large fissure closed structure in rock mass: China: CN201721555828.9 [P] 2017.11.20.

[15] 徐年丰,施华堂,王汉辉,等. 钻孔内埋式任意球径向灌浆抬动变形观测装置: 中国:CN201410252634.6[P]. 2014.9.24.
XU N F, SHI H T, WANG H H, et al. Borehole embedded arbitrary ball radial grouting uplift deformation observation device: China: CN201410252634.6[P] 2014.9.24.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net