

基于强度试验的胶凝堆石材料破坏准则

杨杰^{1,2}, 蔡新^{1,2,3}, 郭兴文³

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

摘要:基于胶凝堆石料的抗压、抗折和大三轴强度试验,对胶凝堆石料的基本力学特性进行了系统研究,得出试件破坏情况下的应力强度,通过拟合破坏强度和围压的关系式,推导出胶凝掺量为60 kg/m³的胶凝堆石料的破坏准则;进一步拟合破坏强度、围压和胶凝掺量的关系式,推导出胶凝掺量为变量的胶凝堆石料的破坏准则。验证结果表明,所推导的胶凝堆石料破坏准则合理可靠,具有良好的通用性。

关键词:胶凝堆石料;胶凝掺量;破坏准则;大三轴试验

中图分类号:TV42 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)02-0047-04

The failure criterion of cemented sand and gravel material based on strength test//YANG Jie^{1,2}, CAI Xin^{1,2,3}, GUO Xingwen³(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Based on compression tests, tension tests, and large scale three-axis tests on cemented sand and gravel(CSG) materials, the basic mechanical properties of CSG materials were systematically studied and the stress intensity of CSG was obtained during the CSG failure process. The correlativity between the failure strength of CSG materials and the ambient pressure was analyzed. According to the correlativity, the failure criterion of CSG materials with a cement proportion of 60 kg/m³ was established. The failure criterion of CSG materials with different cement proportions was established by fitting data of the failure strengths of CSG materials, the ambient pressures, and the cement proportions. The results show that the failure criterions of CSG materials have good performance, and show better support ability for similar applications development.

Key words: cemented sand and gravel(CSG) materials; cement proportion; failure criterion; large scale three-axis tests

胶凝堆石坝是一种综合面板堆石坝和碾压混凝土坝优点的新坝型,具有断面小、用料省、易施工、抗震性能好、适应软弱地基等特点^[1]。国内刚开始关注这种坝型,对胶凝堆石料工程特性的研究还不够深入,特别是对胶凝堆石料本构关系的研究远不能满足工程应用需求。

胶凝堆石料的本构关系研究目前尚处于弹性本构研究阶段:一是将胶凝堆石料看做混凝土材料,采用线弹性本构关系来模拟;二是将其按照堆石料进行处理,采用邓肯-张模型或将该模型修正后使用。唐新军等^[2-10]对胶凝堆石料进行了相关试验,研究其抗压强度、抗拉强度、弹性模量、非线性特征、软化特征、渗透特性和热力学特性等,并提出该材料配合

比设计的基本参数以及一些能反映非线性弹性应力应变关系的本构模型。

已有研究表明,胶凝堆石料具有明显的非线性及弹塑性特征,但目前研究成果仍主要集中在对其弹性特征的描述方面,尚无法反映其塑性变形特征。本文根据武颖利^[11]的胶凝堆石料抗压、抗折和大三轴强度试验结果,推导了胶凝堆石料的破坏准则,为进行胶凝堆石料的弹塑性本构关系研究奠定基础。

1 胶凝堆石料的强度试验

1.1 试验方法

参照 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[12]对胶凝堆石料试件进行抗压、抗

折和三大轴强度试验:①利用 P32.5 普通硅酸盐水泥和细度模数为 2.7 的中砂、碎石等材料,按照 30 kg/m³、40 kg/m³、50 kg/m³、60 kg/m³ 和 70 kg/m³ 的胶凝掺量以及固定的骨料级配制作边长为 15 cm 的立方体标准试件(龄期 28 d),采用河海大学力学实验室的电子万能伺服机及相关的数据采集系统进行抗压强度试验,结果取平均值;②采用 60 kg/m³ 的胶凝掺量制成 10 cm×10 cm×30 cm 的试件(龄期 7 d),采用电子万能伺服机(带抗折试验架)及相应的采集系统进行抗折强度试验,结果取平均值;③针对胶凝堆石料,设计 300 kPa、500 kPa 和 800 kPa 几种围压进行大三轴强度试验,按照直径 30 cm、高 60 cm 的圆柱体标准及 60 kg/m³ 胶凝掺量制作试件(龄期 30 d),采用河海大学岩土工程科学研究所 YS-30 型应力路径控制大型三轴试验机及相关的数据采集系统进行大三轴强度试验。

1.2 试验结果及分析

按照规范进行抗压、抗折和三大轴强度试验,根据试验数据以及相关材料力学公式,可以得出胶凝堆石料的抗压强度和三向正应力,如表 1 和表 2 所示。

表 1 不同胶凝掺量的胶凝堆石料抗压强度

胶凝掺量/(kg·m ⁻³)	抗压强度/kPa
30	1 580
40	1 810
50	2 120
60	2 440
70	2 980

表 2 胶凝掺量为 60 kg/m³ 的胶凝堆石料破坏时的三向正应力

试验类型	σ ₁	σ ₂	σ ₃
抗压强度试验(龄期 28 d)	2 440	0	0
抗折强度试验(龄期 7 d)	0	0	-340
大三轴强度试验 (龄期 30 d,围压 300 kPa)	4 240	300	300
大三轴强度试验 (龄期 30 d,围压 500 kPa)	5 420	500	500
大三轴强度试验 (龄期 30 d,围压 800 kPa)	7 690	800	800

结合表 1 的试验数据以及武颖利^[11]给出的胶凝堆石料胶凝掺量和抗压强度之间的关系曲线,可知胶凝堆石料抗压强度与胶凝掺量之间满足二次曲线关系。胶凝掺量越大,胶凝堆石料特性越接近混凝土材料特性,其抗压强度也趋向混凝土材料的抗压强度。

通过大三轴试验并结合孙明权等^[4]的胶凝堆石料大三轴试验结果可知围压越大,胶凝堆石料破坏强度越高。进一步对试验数据分析发现,胶凝堆石料抗压破坏强度(σ₁-σ₃)_f与围压 σ₃ 之间存在以下关系:

(σ₁ - σ₃)_f = 100ae^{cσ₃/100} (1)

式中:a、c 为试验拟合参数。利用大三轴强度试验数据以及公式(1)可绘出胶凝堆石料抗压破坏强度与围压的关系曲线,如图 1 所示,可知 a、c 分别为 28.156 和 0.11。

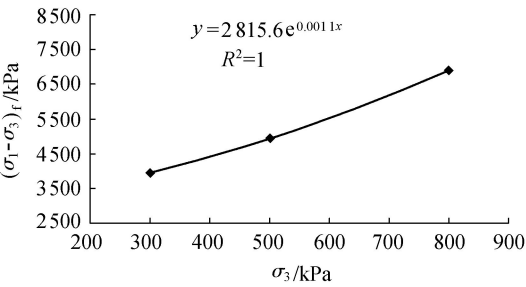


图 1 抗压破坏强度(σ₁-σ₃)_f与围压 σ₃ 的关系

2 胶凝堆石料破坏准则的推导

2.1 破坏准则概述

材料的破坏准则即以主应力空间中破坏包络曲线的数学表达式作为判定材料在受力过程中是否达到破坏或者极限强度的条件。将试验中获取的复杂应力状态下的强度值逐个在主应力坐标空间标出,连接相邻各点,可得破坏包络曲面。主应力空间内,直接对破坏包络曲面建立破坏准则有一定困难,因此改用拉压子午面和偏平面上的平面包络曲线来描述^[13]。各向同性材料的破坏包络曲线的数学表达式为

H(ξ,γ,θ) = 0 (2)

式中:H 为破坏函数;ξ 为偏应力;γ 为静水压力;θ 为洛德角。破坏函数 H 的具体表达式则需通过强度试验数据给出的破坏包络曲面得出。

M-C (Mohr-Coulomb) 准则和 D-P (Drucker-Prager) 准则是两种适用于拉压强度不等的材料破坏准则。M-C 准则偏平面曲线为六边形,有 6 个拐角,这给数值求解带来相当大的困难,而 D-P 准则在偏平面内的曲线为光滑的圆曲线,数值求解方便,因此在实际中应用较广。

胶凝堆石料属于拉压强度不等的材料,可假定胶凝堆石料的破坏准则在偏平面内与 D-P 准则一样为圆曲线,此时任意平面与破坏包络曲面相交的子午线均相同,破坏函数 H 仅为偏应力和静水压力的函数,即

H(ξ,γ) = 0 (3)

其中 ξ = (σ₁ + σ₂ + σ₃) / √3 (4)

γ = √((σ₁ - σ₂)² + (σ₃ - σ₂)² + (σ₃ - σ₁)²) (5)

2.2 胶凝掺量为 60 kg/m³ 的胶凝堆石料破坏准则

胶凝堆石料强度随龄期的增大而增大,28 d 以后强度还有增大的趋势^[14],由于上述试验在不同龄期进行的,则需转化为相同龄期下的胶凝堆石料强度值。试件的形状不同,抗压强度差别也很大。结合抗折强度曲线与抗压强度曲线,可以得出胶凝材料在拉伸阶段的变化规律与压缩阶段的比较相似,假定拉伸阶段与压缩阶段的围压对破坏强度的影响规律一致,其峰值为抗压强度的 1/8^[10],即

(σ₃ - σ₁)_b = - 1/8 (100ae^{-cσ₁/100}) (6)

式中:(σ₃-σ₁)_b 为胶凝材料的拉伸破坏强度;σ₁ 为围压。假设其他参数与其压缩阶段得到的参数一致。

依据式(4)(5)以及不同围压下的破坏强度,可换算出试件破坏时偏平面坐标内的破坏强度,如表 3 所示。

表 3 偏平面内胶凝掺量为 60 kg/m³ 的胶凝堆石料的破坏应力 kPa		
试验类型	ξ	γ
抗压强度试验	1 624	3 978
抗折强度试验	-203	497
大三轴强度试验 (围压 300 kPa)	2 794	5 572
大三轴强度试验 (围压 500 kPa)	3 707	6 958
大三轴强度试验 (围压 800 kPa)	5 364	9 744

当 γ-1.414ξ≤0 时,结合式(1)(4)(5)可得

√3ξ = 2 703ln γ/3 980 + √2/2 γ (7)

当 γ-1.414ξ>0 时,结合式(4)(5)(6)可得

√3ξ = - 2 703ln γ/497.5 - √2/2 γ (8)

将试验数据代入式(7)(8)进行验证,见表 4,则式(7)(8)为子午面坐标系内胶凝掺量为 60 kg/m³ 的胶凝堆石料的破坏准则关系式。

表 4 胶凝掺量为 60 kg/m³ 的胶凝堆石料破坏准则合理性验证

试验类型	破坏强度/kPa		误差%
	试验值	计算值	
抗压强度试验	2 815	2 815	0
抗折强度试验	-352	-352	0
大三轴强度试验 (围压 300 kPa)	3 940	3 927	0.330
大三轴强度试验 (围压 500 kPa)	4 920	4 904	0.325
大三轴强度试验 (围压 800 kPa)	6 890	6 841	0.711

从表 4 可知,试验值与计算值之间误差较小,则式(7)(8)作为胶凝掺量为 60 kg/m³ 的胶凝堆石料破坏准则是合理的。

2.3 胶凝掺量为变量的胶凝堆石料破坏准则

孙明权等^[4]根据不同的胶凝掺量(30 kg/m³、40 kg/m³、50 kg/m³、60 kg/m³)在大三轴强度试验中得出了应力-应变曲线,在抗压强度试验中得出抗压强度与胶凝掺量之间的二次曲线关系,可假定在任一围压下,胶凝堆石料胶凝掺量与抗压破坏强度之间满足二次曲线关系。再结合不同胶凝掺量(30 kg/m³、40 kg/m³、50 kg/m³、60 kg/m³)下抗压破坏强度和围压之间的关系,以围压 σ₃ 和胶凝掺量为参量,抗压破坏强度(σ₁-σ₃)_f 为函数,建立三者之间的函数关系:

(σ₁ - σ₃)_f = (2.6825x² - 192.755x + 4 710.85) · exp [(- 1.225 × 10⁻⁶ x² + 1.084 × 10⁻⁴ x - 9.945 × 10⁻⁴)σ₃] (σ₃ > 0) (9)

式中:x 为胶凝掺量。当 σ₃(σ₃>0) 为某固定值,式(9)为胶凝掺量为变量时抗压破坏强度与围压之间的关系式。

则根据式(6)和式(9)并考虑胶凝掺量和围压下的拉伸破坏强度为

(σ₃-σ₁)_b = - 1/8 (2.6825x²-192.755x+4 710.85) · exp [(- 1.225×10⁻⁶ x²+1.084×10⁻⁴ x- 9.945×10⁻⁴)σ₁] (10)

当 γ-1.414ξ≤0 时,结合式(4)(5)(9)可得

√3ξ = √2/2 γ + 3/B ln γ/√2A (11)

当 γ-1.414ξ>0 时,结合式(4)(5)(10)可得

√3ξ = - 3/B ln 4√2/A γ - √2/2 γ (12)

其中 A = 2.6825x² - 192.755x + 4 710.85
B = - 1.225 × 10⁻⁶ x² + 1.084 × 10⁻⁴ x - 9.945 × 10⁻⁴

则式(11)(12)为子午面内的胶凝掺量为变量的胶凝堆石料破坏准则。

将孙明权等^[4]试验的数据(胶凝掺量为 60 kg/m³)代入式(11)(12)中,验证结果如表 5 所示。

表 5 胶凝掺量为变量的胶凝堆石料破坏准则合理性验证

围压/kPa	破坏强度/kPa		误差%
	试验值	计算值	
200	3 438	3 485	1.40
400	4 381	4 334	1.07
600	5 423	5 390	0.61
800	6 679	6 703	0.36

从表 5 可知,试验值与计算值之间误差最大为 1.40%,误差较小。因此式(11)(12)可作为胶凝掺量为变量的胶凝堆石料破坏准则。

由于式(11)(12)是胶凝掺量为变量的破坏准则,对大部分的胶凝材料应具有良好的通用性。为验证其通用性,将表 3 的结果代入式(11)(12)中,结果如表 6 所示。

表 6 胶凝掺量为变量的胶凝堆石料破坏准则通用性验证

试验类型	破坏强度/kPa		误差%
	试验值	计算值	
抗压强度试验	2815	2802	0.46
抗折强度试验	-352	-350	0.57
大三轴强度试验 (围压 300 kPa)	3940	3887	1.35
大三轴强度试验 (围压 500 kPa)	4920	4833	1.77
大三轴强度试验 (围压 800 kPa)	6890	6703	2.70

表 6 中试验值与计算值之间误差最大为 2.70%,误差较小。因此可认为满足式(7)(8)的应力值同样能使式(11)(12)基本成立,从而说明式(11)(12)具有良好的通用性。

3 结 语

通过抗压、抗折和大三轴强度试验得出特定胶凝掺量的胶凝堆石料破坏强度与围压的关系,并根据破坏准则定义推导了胶凝掺量为 60 kg/m³ 的胶凝堆石料破坏准则,在此基础上考虑了胶凝掺量与破坏强度之间的关系,得出胶凝掺量为变量时的胶凝堆石料破坏准则,并证明此准则具有良好的通用性。

参考文献:

[1] RAPHAEL J M. The optimum gravity dam, rapid construction of concrete dams [M]. New York: ASCE, 1970.

[2] 唐新军,陆述远. 胶结堆石料的力学性能初探[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30 (6): 15-18. (TANG Xinjun, LU Shuyuan. Preliminary research on mechanical behaviors of cemented rockfill material [J]. Journal of Wuhan University of Hydr & Elic Engineering, 1997, 30 (6): 15-18. (in Chinese))

[3] 贾金生,马锋玲,李新宇,等. 胶凝砂砾石坝材料特性研究及工程应用[J]. 水利学报, 2006, 37 (5): 578-582. (JIA Jinsheng, MA Fengling, LI Xinyu, et al. Study on material characteristics of cement-sand-gravel dam and engineering application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37 (5): 578-582. (in Chinese))

[4] 孙明权,彭成山,李永乐,等. 超贫胶结材料三轴试验 [J]. 水利水电科技进展, 2007, 27 (4): 46-49. (SUN Mingquan, PENG Chengshan, LI Yongle, et al. Triaxial test of over lean cemented material [J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2007, 27 (4): 46-49. (in Chinese))

[5] 杨朝晖,赵其兴,符祥平,等. CSG 技术研究及其在道塘水库的应用 [J]. 水利水电技术, 2007, 38 (8): 46-49. (YANG Chaohui, ZHAO Qixin, FU Xiangping, et al. Study on CSG dam construction technique and its application to Daotang Reservoir Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38 (8): 46-49. (in Chinese))

[6] BATMAZ S. Clidere dam-107m high roller compacted dam (RCHD) in Thrkey [C] // Proceedings 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Madrid: [s. n.], 2003.

[7] 杨首龙. CSG 坝筑坝材料特性与抗荷载能力研究 [J]. 土木工程学报, 2007, 40 (2): 97-103. (YANG Shoulong. Charateristics and load carrying capacity of CSG dam construction materials [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40 (2): 97-103. (in Chinese))

[8] 彭成山,张学菊,孙明权. 超贫胶结材料特性研究 [J]. 水利水电科技进展, 2007, 28 (2): 26-29. (PENG Chengshan, ZHANG Xueju, SUN Mingquan. Research of super poor cemented material characteristic [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 28 (2): 26-29. (in Chinese))

[9] 何蕴龙,彭云枫. Hardfill 坝筑坝材料工程特性分析 [J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5 (4): 1-6. (HE Yunlong, PENG Yunfeng. Analysis on material property of hardfill dam [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2007, 5 (4): 1-6. (in Chinese))

[10] 蔡新,武颖利. 胶凝堆石料本构特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32 (9): 1340-1344. (CAI Xin, WU Yingli. Constitutive equation for CSG materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (9): 1340-1344. (in Chinese))

[11] 武颖利. 胶凝堆石坝坝料力学特性及大坝工作性态研究 [D]. 南京:河海大学, 2010.

[12] GB/T 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准 [S].

[13] 闫光杰. 200MPa 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.

[14] WU Mengxi, DU Bin, YAO Yuancheng, et al. An experimengtal study on stress-strain behavior and constitutive model of hardfill material [J]. Science China: Physics, Mechanics & Astronomy, 2011, 54 (11): 2015-2024.

(收稿日期:2012-05-21 编辑:周红梅)