

超贫胶结材料三轴试验

孙明权 彭成山 李永乐 邢振贤

(华北水利水电学院水利学院 , 河南 郑州 450008)

摘要 在前期大量单轴试验的基础上 , 对超贫胶结材料试件进行了三轴试验 , 得到不同胶凝材料用量、不同围压下的应力-应变曲线 , 分析了胶凝材料用量及围压对应力-应变曲线的影响 , 探讨了不同试验条件下试件的强度、体积变形规律以及残余强度等 , 为超贫胶结材料本构模型的建立奠定了基础。

关键词 超贫胶结材料 ; 应力-应变关系 ; 三轴试验

中图分类号 : TV64

文献标识码 : A

文章编号 : 1006-7647(2007)04-0046-04

Triaxial test of over lean cemented material // SUN Ming-quan , PENG Cheng-shan , LI Yong-le , XING Zhen-xian (Faculty of Water Conservancy , North China University of Water Conservancy and Electric Power , Zhengzhou 450008 , China)

Abstract : Based on great deal of uniaxial tests in former stage , triaxial tests were performed on over lean cemented material specimens , and the stress-strain curve for the specimens with different amounts of cementing material under different confining pressures were obtained . The influences of dosage of cementing material and confining pressure on the stress-strain curve were analyzed , and the strength , the law of volume variation , and the residual strength of over lean cemented material under different test conditions were also discussed . The present study provides a basis for establishment of the constitutive model for over lean cemented material .

Key words : over lean cemented material ; stress-strain relationship ; triaxial test

通过前期大量的单轴试验^[1]发现 , 当胶凝材料用量低于 $60\text{kg}/\text{m}^3$ 时 , 超贫胶结材料的轴心抗压强度低于 2MPa , 难以满足按重力坝设计的抗压强度要求 , 这时的超贫胶结材料坝类似于土石坝 , 剖面比较肥大 , 整体稳定基本不存在问题 , 坝体最大最小应力也不出现在坝体表面 , 坝体运行过程中发生剪切破坏的可能性增大 , 因此有必要研究其抗剪强度问题。为此 , 对胶凝材料用量在 $60\text{kg}/\text{m}^3$ 以下的超贫胶结材料进行了大型三轴试验 , 以寻求其应力及变形规律和相应的抗剪强度指标 , 为超贫胶结材料本构关系的建立和坝体剖面设计提供科学依据。

1 材料配合比及试件成型

材料采用 32.5R 水泥作为胶凝材料 , 以砂砾料作为骨料。根据前期大量的单轴试验(试验方法参照 SL48—94《水工碾压混凝土试验规程》^[2])得到材料的基本性能如下 :

a. 水泥。通过水泥用量对强度影响的敏感性分析 , 在水泥用量相同的条件下 , 用 42.5R 硅酸盐水泥拌制的超贫胶结材料各项性能都比用 32.5R 矿渣

水泥拌制的高 , 但不太明显 , 而 32.5R 矿渣水泥拌制的超贫胶结材料后期强度(90 d) 较高。考虑到水利工程的大体积混凝土多利用后期强度 , 推荐采用 32.5R 矿渣水泥作为胶凝材料。试验所采用的 32.5R 号矿渣水泥实测强度 : 7 d , 28 d , 90 d 龄期抗压强度分别为 30.3MPa , 43.9MPa , 67.8MPa , 抗拉强度分别为 5.88MPa , 7.67MPa , 8.60MPa 。

b. 骨料。试验所用的骨料取自国家重点水利工程——小浪底水利枢纽工程库区三标段砂石料场。试验时 , 采用了两种级配 : 一种是由原状砂砾料筛除粒径大于 40mm 大石子后直接应用(以下称毛料) ; 另一种是将原状砂砾料筛分后 , 在实验室人工配料(以下称精料) 。从试验结果看 , 毛料砂率 49% , 明显偏高 , 考虑理论分析所需数据的稳定性 , 本文采用了以精料作为骨料的试验结果。精料骨料级配 : $5\sim 10\text{mm}$, $10\sim 20\text{mm}$, $20\sim 40\text{mm}$ 和 40mm 以上骨料累计筛余分别为 18% , 35% , 45% 和 2% , 砂率为 33% 。

c. 粉煤灰和水。通过粉煤灰掺量对超贫胶结材料性能影响试验结果可知 , 粉煤灰掺入的方法为“超量取代法” , 超代系数为 20% 时超贫胶结材料性

能较好,并且粉煤灰对提高超贫胶结材料的后期强度和改善施工性能有利。试验所采用的粉煤灰为郑州市热电厂粉煤灰,化学成分与物理性能如下:密度 2.11 g/cm^3 , $45\text{ }\mu\text{m}$ 筛余 17% ,需水量比 102% ,烧失量 1.78% , SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 和 CaO 质量分数分别为 59.61% , 7.41% , 21.33% 和 4.24% 。拌和与养护用水为郑州市饮用自来水。

d. 水灰比。水灰比是影响超贫胶结材料配合比设计和技术性能的关键参数之一,超贫胶结材料水灰比最佳取值范围为 $0.8\sim 1.2$ 。二级配超贫胶结材料水灰比取 1.0 ,三级配超贫胶结材料水灰比取 0.9 (工程中可取 $0.9\sim 1.0$)。

e. 砂率。砂率是影响超贫胶结材料配合比设计的另一个关键参数,根据本试验结果,超贫胶结材料的最优砂率为 20% 。

试件成型采用自落式搅拌机搅拌、振动台振动方法成型,试件成型尺寸为 $\varnothing 15\times 30\text{ cm}$ 圆柱体。成型压重块压强为 4.9 kPa ,试件脱模后送入养护室标准养护, 28 d 期龄后开始进行三轴试验。

2 三轴试验装置及试验方法

a. 试验装置。超贫胶结材料三轴试验是在 SY250-2.5 型三轴压缩仪上进行的,该仪器最大轴向出力 250 kN ,周围压力 $0\sim 2.5\text{ MPa}$,反压力 $0\sim 2.5\text{ MPa}$,轴向升降速度(15 档) $0.0019\sim 3.0\text{ mm/min}$,轴升范围 100 mm ,上述指标满足超贫胶结材料三轴试验要求,可进行试件尺寸为 $\varnothing 15\times 30\text{ cm}$ 和 $\varnothing 10\times 20\text{ cm}$ 粗料土及混凝土三轴压缩试验。

b. 试验方法。超贫胶结材料的三轴试验研究在国内是空白,试验方法需要探讨研究。考虑到超贫胶结材料坝的施工方法介于碾压混凝土坝和土石坝之间,也采用碾压式施工,所以试验参照 SL237—1999《土工试验规程》^[3] 进行。

试验采用不固结不排水试验(不饱和)和饱和状态下的固结排水试验两种方法,对不饱和试验结果和饱和试验结果^[1] 进行对比。试件尺寸采用 $\varnothing 15\times 30\text{ cm}$ 圆柱体,不饱和试件采用期龄 28 d 的试件直接进行试验,饱和试件采用期龄 28 d 的试件浸泡饱和,并在三轴仪上反压饱和。将制备好的试件装入 SY250-2.5 型三轴仪压力室内,外套橡皮隔膜,然后对试件施加一定的围压 σ_3 (σ_3 分别为 0.2 MPa , 0.4 MPa , 0.6 MPa 和 0.8 MPa),以 0.6 mm/min 的加荷速度进行垂向荷载的施加,并记录应力、应变数据,当应变值大于 12% 或试件完全破坏时停止试验。

因为胶凝材料用量对超贫胶结材料的强度影响显著,所以按胶凝材料用量取 0 kg/m^3 , 20 kg/m^3 ,

30 kg/m^3 , 40 kg/m^3 , 50 kg/m^3 , 60 kg/m^3 6 个等级(分别表示为 C0 ,C20 ,C30 ,C40 ,C50 ,C60),根据前期单轴试验提供的配合比^[1] 成型 6 批试件,每批试件共 6 组。

3 试验结果分析

3.1 应力-应变曲线分析

在不饱和试验条件下,选取有代表性的一组试件结果,得到不同胶凝材料用量、不同围压下超贫胶结材料的应力-应变曲线,见图 1~6。

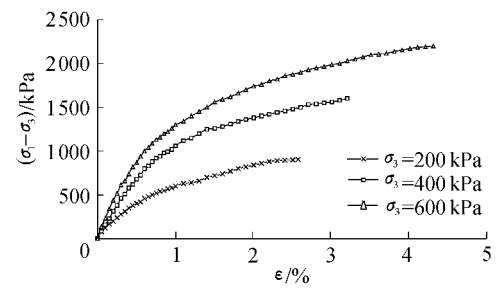


图 1 C0 试件应力-应变曲线

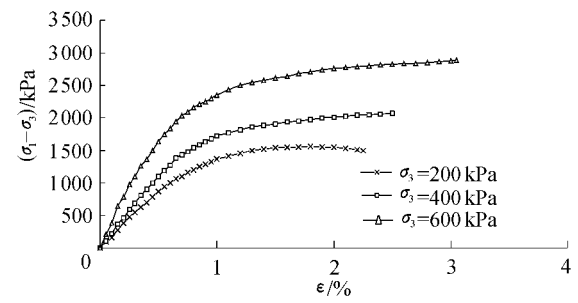


图 2 C20 试件应力-应变曲线

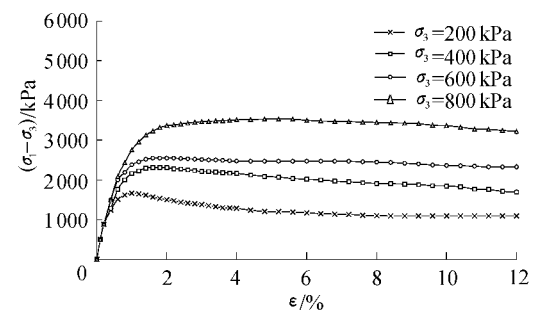


图 3 C30 试件应力-应变曲线

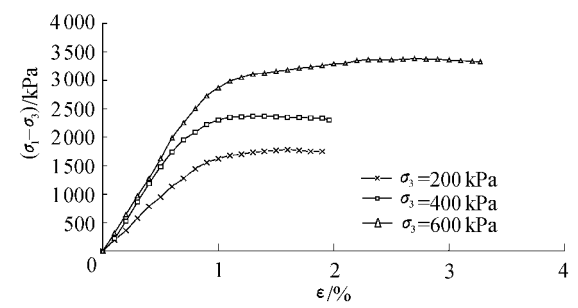


图 4 C40 试件应力-应变曲线

通过对上述应力-应变曲线的分析,可知超贫胶结材料的应力-应变曲线具有以下特点:当胶凝材料用量大于 30 kg/m^3 时,应力-应变曲线存在一个峰

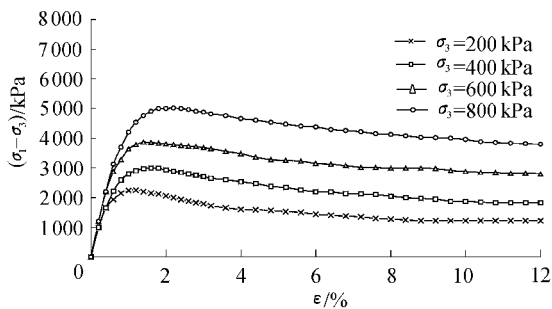


图5 C50 试件应力-应变曲线

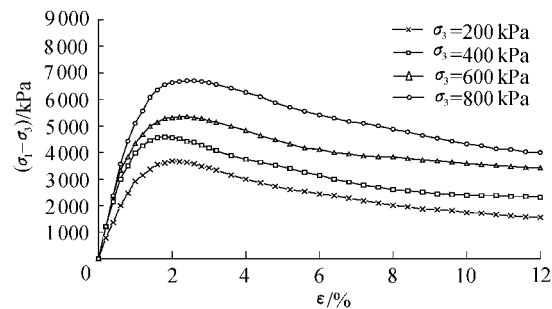


图6 C60 试件应力-应变曲线

值 轴向应变 ε 随着偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的增加而增加,但增加梯度逐渐变缓,表现出应力与应变曲线的非线性特征, ε 与 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 基本呈双曲线关系;在 $\varepsilon = 2\%$ 左右,曲线达到峰值;继续施加轴向荷载, ε 在 $2\% \sim 6\%$ 的阶段时,试件的抗剪强度下降很快; $\varepsilon > 6\%$ 以后,试件的抗剪强度下降趋缓,最后逐步趋于一个定值——材料的残余强度。显然,曲线达到峰值后,应力-应变曲线呈软化形态,且胶凝材料用量越高其峰值强度越高,软化形态越明显。在应力-应变曲线组上,取同一应变下不同围压的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 做强度包络线,得到不同应变下的试件抗剪强度参数 c, φ ,按峰值计算的试件强度见表 1。以 C50 为例,强度包络线如图 7 所示。

表 1 按峰值计算的静力学参数

试验方法	胶凝材料用量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	c/kPa	$\varphi(^{\circ})$
不 饱 和	0	0	38.7
	20	76.5	42.5
	30	82.5	46.2
	40	122.8	48.5
	50	204.9	48.7
	60	245.7	49.3
饱 和	20	102.0	38.5
	30	189.0	41.1
	40	201.0	41.8
	50	255.0	44.3
	60	324.0	45.5

3.2 胶凝材料用量及围压对应力-应变曲线的影响

图 1~6 表明:①在同一围压下,随着胶凝材料用量的增加,强度值亦随着增加,当掺入胶凝材料用量 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 后材料强度就有明显增长;②在胶凝材

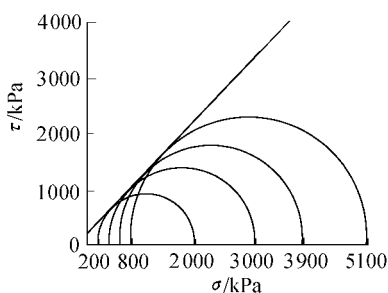


图7 C50 试件强度包络线示意图

料用量相同的情况下 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 峰值随着围压的增大而明显增大。围压越大,试件破坏时的应力值就越高,说明围压对超贫胶结材料强度的影响显著。

3.3 不同试验条件下的强度分析

为了模拟超贫胶结材料构筑坝体后未来的工作状态,本次三轴试验分别进行了不饱和不固结排水强度试验和饱和情况下的固结排水强度试验。表 1 的试验结果表明:同一胶凝材料用量的试件,在饱和情况下固结排水试验的黏聚力大于不饱和情况下不固结排水试验的黏聚力,而内摩擦角则小于不饱和情况下不固结排水试验的内摩擦角。

3.4 应力应变条件下试件体积的变化

本次试验得到了 C30、C50 在不同围压下体积的变化情况,见图 8 和图 9。结果表明:试件在 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 较小时,试件体积随着 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的增加而减小,体积减小的幅度也随着 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的增加而减小,并逐渐减小至零。之后随着 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的增加,试件呈

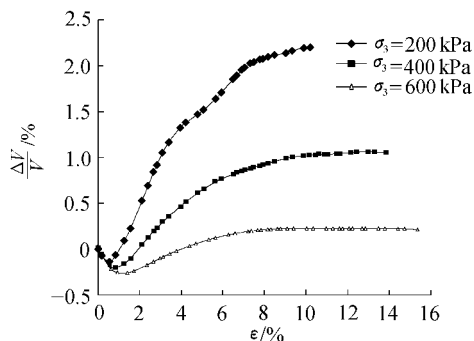


图8 C30 试件体积变化

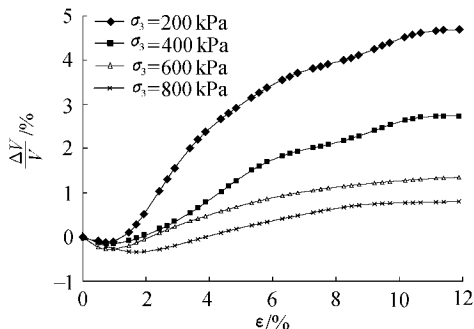


图9 C50 试件体积变化

现剪胀性特征,即试件体积随着($\sigma_1 - \sigma_3$)的增加而逐渐增大。

材料的侧膨胀性在坝体应力变形分析中起着十分重要的作用,不同本构模型所计算得到的坝体应力变形不同,在很大程度上是由于它们反映的材料侧膨胀性不同。因此研究不同应力应变条件下试件体积的变化,即从材料侧膨胀性的角度来研究本构模型,是本构模型理论研究的重要方面。

3.5 超贫胶结材料的残余强度分析

由图 1~6 可以看出,试件的抗剪强度达到峰值后,继续施加轴压,随着 ϵ 的增加,剪切位移克服了颗粒之间的咬合作用,颗粒结构崩解变松,因此,黏聚力很快降低,而颗粒之间的内摩擦力还在起作用,因此试件内摩擦角 φ 还有一定的强度值。综上分析可知,试件的残余强度主要产生于颗粒之间的内摩擦力。当 $\epsilon = 10\%$ 左右时,抗剪强度趋于一个定值,即材料的残余强度(见表 2)。

由表 2 分析可知:对于同一胶凝材料用量的超贫胶结材料,围压越高,残余强度值越高;而在同一围压下,胶凝材料用量越大,则残余强度值就越高。

(上接第 22 页)

5 结 语

夹江段处于淮河入江水道的下游归江河道段,是淮河入长江的最末段。通过评价发现该段的结构稳定性属于不稳定等级,景观适宜性很好,生态健康性属于健康等级,生态安全性属于次安全等级,生态总体状况属于良好状态。

虽然该段的生态总体状况处于良好状态,但由于该段的结构稳定性较差,影响了该段的总体生态状态,而且还存在着影响生态健康、生态安全的因素,所以为了提高该段的总体生态水平,应对该段进行生态治理,重点应该加强结构稳定性的治理,使其达到生态河岸带的要求,从而可以保护水体生态环境和沿线生态环境,既满足行洪的要求,又满足作为南水北调东线水源区的要求。

参考文献:

[1] 江苏省地方志编纂委员会. 江苏省志·水利志[M]. 南京:江苏古籍出版社, 2001: 78-100.
[2] 夏继红, 严忠民. 生态河岸带研究进展与发展趋势[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(3): 252-255.
[3] 夏继红, 严忠民, 蒋传丰. 河岸带生态综合评价指标体系研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 345-348.

表 2 超贫胶结材料残余强度

材料	残余强度/kPa			
	$\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$	$\sigma_3 = 400 \text{ kPa}$	$\sigma_3 = 600 \text{ kPa}$	$\sigma_3 = 800 \text{ kPa}$
C30	1 050	1 640	2 300	3 100
C50	1 310	1 900	2 820	3 730
C60	1 500	2 200	3 310	4 020

4 结 语

根据对超贫胶结材料试件进行的大型三轴试验,给出了超贫胶结材料三轴试验的试验结果并进行了分析,得到了不同胶凝材料用量超贫胶结材料的应力-应变关系曲线,分析了各种因素对试验结果的影响,为了解超贫胶结材料的力学特性和建立超贫胶结材料的本构模型奠定了基础。

参考文献:

[1] 张镜剑, 孙明权. 超贫胶结材料土石面板坝研究阶段报告[R]. 郑州: 华北水利水电学院, 2002.
[2] SL48—94 水工碾压混凝土试验规程[S].
[3] SL237—1999 土工试验规程[S].

(收稿日期: 2006-02-15 编辑: 熊水斌)

[4] 樊彦芳, 刘凌, 陈星, 等. 层次分析法在水环境安全综合评价中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(5): 512-514.
[5] XIA Ji-hong, WU Wei, YAN Zhong-min, et al. Comprehensive assessment model of ecological riparian zone[C]//JUN B H, LEE S L, SEO I W, et al. Proceedings of XXXI IAHR Congress. Soul: Korea Water Resources Association, 2005: 6296-6304.
[6] 夏继红. 生态河岸带综合评价理论与应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.

(收稿日期: 2006-09-03 编辑: 熊水斌)

