

胶凝砂砾石坝新型防渗体与渗透溶蚀耐久性研究

俞钦 郑发顺 林诚魁 李焯明 吴叶

(福建省水利水电勘测设计研究院 福建福州 350001)

摘要:

莆田西音水库为南方温和地区第一座永久性胶凝砂砾石坝,缺少类似工程经验。本文针对工程关注的迫切问题,通过对大坝防渗体材料深入试验研究,推荐采用富浆胶凝砂砾石作为大坝防渗材料,拌和方式采用机拌变态,与坝体胶凝砂砾石同步上升。利用研发新型渗透溶蚀仪进行胶凝砂砾石材料离散性、含泥量、层间结合以及胶凝材料用量对渗透溶蚀影响的系统性研究,采用最高允许渗透系数和抗溶蚀允许使用年限来评价胶凝砂砾石渗透溶蚀性能,结果表明,胶凝砂砾石坝体与防渗体的抗渗透溶蚀允许年限远大于设计使用年限,具有良好的抗溶蚀性能,为胶凝砂砾石在永久性工程中实践打下坚实基础。

关键词:

温和地区 防渗体 渗透溶蚀 机拌变态富浆胶凝砂砾石

1 引言

胶凝砂砾石坝是一种介于面板堆石坝和碾压混凝土坝间的坝型,即将当地原材料(天然砂砾料或开挖弃渣)剔除 150mm 以上粒径后,用少量胶凝材料胶结(胶材用量 $80\text{kg}/\text{m}^3$ 左右),通过简易拌和,经摊铺、振动碾压后使之胶结成具有一定强度的凝聚体。胶凝砂砾石筑坝技术是国际上近年发展起来的新型筑坝技术,国内外坝工专家对胶凝砂砾石筑坝技术进行积极探索与实践。

胶凝砂砾石坝作为一种新坝型已在我国水利工程多座围堰等临时工程中应用,但在永久性大坝工程中建成的实例极少。对于永久工程,需设可靠防渗保护层^[1]。莆田市西音水库位于庄边镇西音村,是一座以灌溉、供水为主,兼有发电功能的综合性水库,工程由拦河坝、发电厂房及升压站组成,最大坝高 52.8m,总库容 2755 万 m^3 ,工程坝址附近拥有丰富的天然砂砾料,拦河坝采用胶凝砂砾石坝。西音水库胶凝砂砾石坝为南方温和地区第一座该类型的永久工程,缺少类似坝型的防渗体结构与材料相关经验。本文探究合适防渗形式,并研究其渗透溶蚀耐久性。

2 坝址区附近天然砂砾料

西音水库工程坝址区附近有可供开采的砾 I (I 区)、砾 I (II 区)料场,根据地质料场勘察,砾 I (I 区)有天然砂砾料 25 万 m^3 、砾 I (II) 区有天然料场 9 万 m^3 。天然砂砾料场

剔除大于 150mm 砾石后，含砂率 12.1%~28.6%，平均值为 19.6%，其中 5~40mm 颗粒平均含量为 40.0%，基本上呈连续分布，满足《胶结颗粒料筑坝技术导则》中宜为 35%~65%要求，但偏下限值，见图 1。料场砂砾混合物含泥量为 1.94%~5.00%，基本满足导则中 $\leq 5\%$ 要求，无明显泥块含量。总体上比较适合配制胶凝砂砾石。

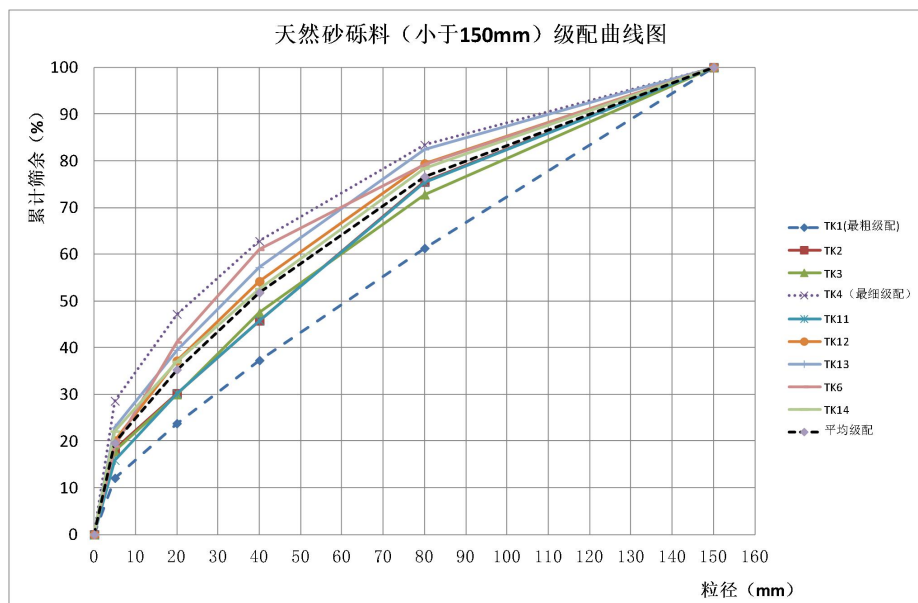


图 1 天然砂砾石（小于 150mm）级配曲线图

3 防渗体结构材料试验研究

莆田西音水库地处南方温和地区，气温年变幅小，工程抗冻耐久性要求相对低，防渗体混凝土设计指标为 $C_{180}20W6F50$ 。经过比选，胶凝砂砾石坝的防渗体结构主要有：干硬性富浆胶凝砂砾石防渗体、机拌变态富浆胶凝砂砾石防渗体、防渗面板与加浆反铲拌合富浆胶凝砂砾石防渗体等方案^[2]。

考虑本工程天然砂砾料较丰富，且砂砾料颗粒基本上连续分布，遵循“宜材适构”理念，可以优先选用天然砂砾料作为防渗体混凝土的骨料。

3.1 天然砂砾石作为防渗体骨料

以天然砂砾料作为防渗体骨料，一般采取富浆胶凝砂砾石形式。富浆胶凝砂砾石指的是增加胶凝材料用量的胶凝砂砾石。室内进行“干硬性富浆胶凝砂砾石”、“机拌变态富浆胶凝砂砾石”防渗材料性能试验。干硬性胶凝砂砾石比较了掺气与不掺气状态，在不掺气状态下，富浆胶凝砂砾石抗冻性略差。机拌变态富浆胶凝砂砾石为可振捣状态，较一般常态混凝土干稠，坍落度一般为 30~50mm，可以是原级配、也可以是剔除级配（一般剔除 80mm 以上粗颗粒），机拌变态富浆胶凝砂砾石较干硬性胶凝砂砾石更易引气。

在引气情况下，胶凝砂砾石呈蓬松感，可改善骨料离析，试件成型易泛浆、密实，引气是满足混凝土抗冻性能的前提条件，但过多的引气会削弱混凝土强度，胶凝砂砾石材料含气量宜控制在 3.0%~4.5%。经试验推荐的满足设计指标要求的富浆胶凝砂砾石配合比见表 1。

表 1 防渗体富浆胶凝砂砾石推荐配合比

配比编号	混凝土类别	设计强度等级	水胶比 W/C+F	砂率 (%)	配合比 (每方混凝土材料用量, kg/m ³)						
					水	水泥	粉煤灰	砂	砾石 (5~150mm)	高效减水剂	引气剂
HP-1	干硬性富浆胶凝砂砾石	C ₁₈₀ 20W6 F50	0.46	27	88	99	92	559	1512	3.44	0.0668
HP-2	机拌变态富浆胶凝砂砾石 (原级配)		0.48	27	112	152	82	538	1456	4.21	0.0187
HP-3	机拌变态富浆胶凝砂砾石 (三级配)		0.46	29	115	162	88	570	1395 (砾石 5~80mm)	4.50	0.02

3.2 防渗形式比选与推荐

(1) 干硬性富浆胶凝砂砾石

采取干硬性的富浆胶凝砂砾石作为防渗体,其施工工艺与大坝主体胶凝砂砾石相同,但其与上游模板交界处采用加浆方式进行振捣,由于西音水库上游坡比为 1:0.4,增加了碾压不到、需加浆振捣的区域,增加了加浆设备与人工的投入。一些工程实践表明仓面加浆处理,浆液分布不太均匀,不能很好的浸入胶结砂砾石下部,导致下部振捣困难且不利于层面结合。

(2) 机拌变态富浆胶凝砂砾石

将干硬性富浆胶凝砂砾石施工区域与未能碾压到的加浆振捣成型区域并在一起,全部采用机拌变态富浆胶凝砂砾石进行施工,这样可以简化仓面分区与过渡带处理措施,简化工艺,均匀性好,不需要仓面加浆设备与人工的投入,提高施工效率与降低成本。

(3) 其它工程的防渗面板与加浆反铲拌合富浆胶结砂砾石防渗体方案

防渗面板作为胶凝砂砾石坝防渗保护层的方案,其施工工艺相对复杂,比较适合对抗冻性能要求较高的北方地区。西音水库地处南方温和地区,气温年变幅小,工程抗冻耐久性指标相对较低,可以不必单独设置防渗面板来提高其抗冻性能。

加浆反铲拌合富浆胶结砂砾石因增加一道反铲拌合环节,且反铲拌合的不太均匀,效果欠佳,需要二次装车运输,技术与经济优势不明显。

胶凝砂砾石坝常见几种防渗体方案比较结果见表 2。

表 2 胶凝砂砾石坝防渗体方案比较

防渗体形式	骨料	拌合机械	仓面施工方式	与坝体胶凝体结合面处理	坍落度/Vc 值	效果
防渗面板	常规二级配 (骨料要求相对高)	常规拌合	振捣	分期施工	5~7cm	均匀性好, 工艺复杂, 结合面需要处理, 成本较高
常态混凝土	常规二级配 (骨料要求相对高)	常规拌合	振捣	不同层上升	5~7cm	均匀性好, 结合面需要处理, 成本较高
富浆胶凝砂砾石	料场砂砾石	连续式专用搅拌系统+制浆	富浆碾压+加浆振捣	同步施工	5~10s	干硬性, 不易引气, 浆液分布均匀性差, 不利于与下部层面结合
加浆反铲拌合富浆胶凝砂砾石	料场砂砾石	连续式专用搅拌系统+制浆+反铲拌合	变态振捣	同层上升或不同层上升	5~12cm	均匀性一般, 依赖于反铲拌合效果
机拌变态富浆胶凝砂砾石	料场砂砾石	连续式专用搅拌系统或常规拌合	变态振捣	同步施工, 结合面加强	3~5cm	机拌均匀性好, 引气效果好, 坍落度可控

西音水库地处南方温和地区, 气温年变幅小, 工程抗冻耐久性指标相对较低, 优先推荐采用机拌变态富浆胶凝砂砾石方案。所需要加入的浆液在胶凝砂砾石拌和生产系统内加入, 形成机拌变态胶凝砂砾石, 自卸车运输卸料至仓面所需部位, 振捣器振捣施工, 与坝体胶凝砂砾石同步施工、同步上升。

4 胶凝砂砾石渗透溶蚀试验研究

混凝土的溶蚀破坏是一个从混凝土开始用于水下工程就出现的问题。由于混凝土中或多或少存在孔洞、孔隙、不密实等缺陷, 在压力水作用下会形成渗漏通道, 渗漏水通过物理、化学作用将水泥水化产物中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶出, 随着溶蚀进行, 维持水泥水化产物的稳定所需的碱度不足, 固液相平衡被破坏。此时水泥水化产物中水化硅酸钙、水化铝酸钙就开始分解, 形成低盐基的水化物并分离出 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 溶液重新达平衡。如果石灰不断被溶出带走, 使得水化产物的分解持续进行, 剩下胶凝能力相对差的凝胶体 SiO_2 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$, 混凝土结构将疏松、强度降低^[3]。测试渗透溶出的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 能反映出混凝土的溶蚀情况。

胶凝砂砾石材料的胶凝用量少, 施工工艺较常态混凝土大大简化, 骨料就地取材, 仅经过简单粗筛, 导致填筑的混凝土结构填充不密实, 孔隙率增大, 粗孔、连通孔数量增多, 使得胶凝砂砾石抗溶蚀性能降低。

目前, 业界对胶凝砂砾石的渗透溶蚀研究相对较少, 或仅采用湿筛的小试件进行相关研究。本课题研究在压力软水作用并产生渗漏的条件下, 含砂量、胶材用量、砾料的最粗级配、最细级配、含泥量以及层间结合面对胶凝砂砾石渗透溶蚀性能的影响, 并对坝体胶凝砂砾石与防渗体富浆胶凝砂砾石的使用年限进行评估。

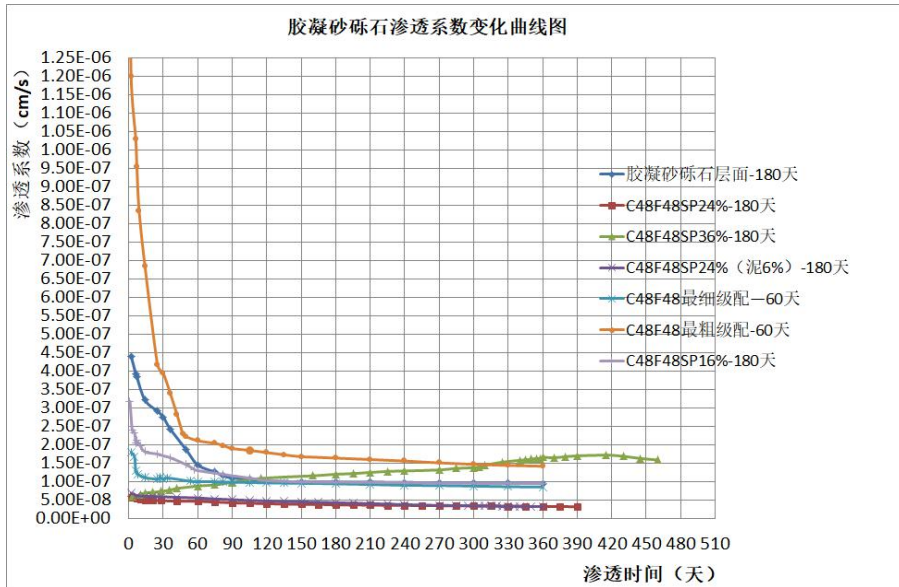


图3 胶凝砂砾石渗透系数变化曲线图

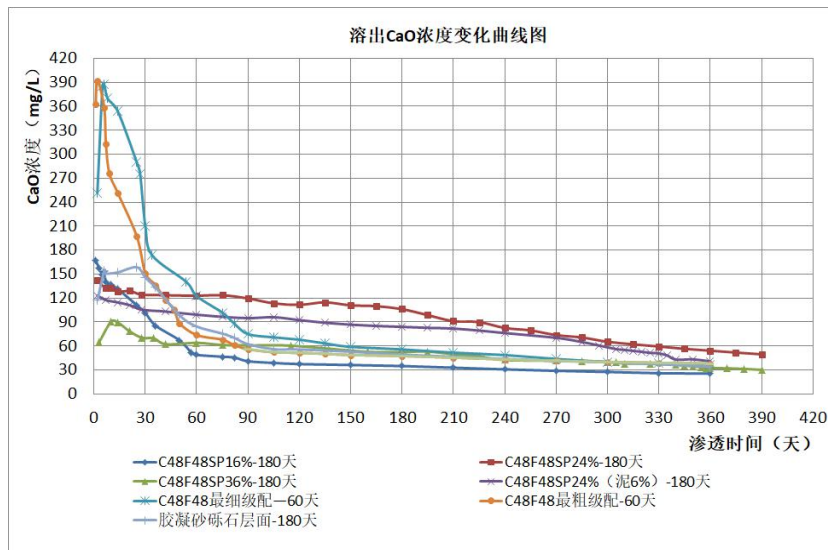


图4 CaO浓度与渗透历时的关系曲线图

(1) 渗透系数

胶凝砂砾石渗透系数为 $i \times 10^{-6} \sim i \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ ($i=1 \sim 9$)，与材料离散性相关。随着渗透龄期的增长，胶凝砂砾石混凝土渗透系数多呈逐渐减小的趋势，约一年溶蚀历时，降幅为40.6%~92.4%，其中初始渗透系数最大的“最粗级配”降幅最明显。但“C48F48SP36%”渗透系数随龄期增长而缓慢增长，约一年溶蚀历时，渗透系数增幅为177%，约400天龄期后，趋于稳定。

由于渗透是通过混凝土水泥浆体中存在的孔隙和微裂纹进行的，而孔隙和微裂纹数量和大小随龄期的增长和水化产物增加不断变少和减少^[4]。所以混凝土的密实性和抗渗性并不是常数，是随渗透时间变化的，早期渗透系数变幅明显，90d时变幅趋向稳定，胶凝砂砾石渗透随时间出现不同程度自愈现象。

随着含砂量多时,细骨料的总表面积增大,对于贫胶材的胶凝砂砾石,水泥浆未能完全包裹砂颗粒表面、胶结薄弱,同时骨料表面包裹的起润滑作用浆量减薄,为保证一定流动性,增加了用水量。因此,含砂率大(C48F48Sp36%)的胶凝砂砾石其填充粗骨料砂浆体孔隙率大、粘聚性差、略松散;对于粗骨料级配差,含砂量少的“最粗级配”与C48F48SP16%,属易产生粗骨料分离,本身浆体振动可泛浆,但浆体不足以填充或很好包裹粗骨料表面,成型困难、形成局部架空性孔洞,这类孔洞大面积连通性的可能性比较小,可能存在一些粗孔等,渗透系数相对大,但随着渗透溶蚀进程的发展,水化产物填充孔隙以及未水化的水泥粒子和溶蚀脱落颗粒随水流在内部迁移充填堵塞等,渗透系数总体上呈减少趋势;含泥量为6%时,初始渗透系数较不掺(泥含量约2.0%)的略大,但随着渗透溶蚀进程发展,由于粘土颗粒较细,水泥水化产物形成网状结构骨架粘结部分的土料颗粒,增加混凝土密实性,渗透系数减少趋势较明显。

(2)溶出的CaO浓度

单位体积渗透液中携带的CaO随渗透时间的延长而逐渐减少,初期减少明显,中期小幅下降,后期相对稳定缓慢下降趋向稳定,约一年渗透溶蚀历时,溶出水中CaO浓度为20~40mg/L。

(3)CaO溶出量与溶出的CaO占比

CaO日溶出量的降低得益于渗透水中CaO浓度降低和渗透速度大幅减少的结果。室内试验,同一胶凝材料用量下,胶凝砂砾石约一年溶蚀历时CaO累计溶出占比为2.9%~12.2%,其中,“最粗级配”>“层间结合”>“最细级配”>“SP16% ”>“ SP36% ”>“SP24%”>“SP24%+泥6%”。

(4)溶蚀后强度变化

经过室内1~2年溶蚀历时,CaO累计溶出占比为2.9%~12.2%,取出溶蚀后试件进行抗压强度试验,抗压强度较同龄期养护试件下降13.9%~26.4%。

4.2.2 防渗体富浆胶凝砂砾石渗透溶蚀结果

试验配合比采用满足C₁₈₀20W6F50设计指标的推荐配合比HP-1、HP-2,以及相应减少胶凝材料用量的HP-J1、HP-J2,试验结果见表3。防渗体富浆胶凝砂砾石相对富浆、密实,渗透系数小且呈减小趋势,初始渗透系数为 2.80×10^{-9} cm/s~ 1.14×10^{-8} cm/s,一年多渗透溶蚀历时,渗透系数为 1.81×10^{-9} cm/s~ 6.40×10^{-9} cm/s,降幅为23.2%~43.8%。试验结束时CaO累计溶出占比为0.10%~0.27%,溶蚀后抗压强度较同龄期养护试件降低不明显,下降率小于5%。

富浆胶凝砂砾石CaO溶出量较级配、龄期、溶蚀历时相近的胶凝砂砾石C48F48SP24%(累计CaO溶出占比2.90%)小得多,主要得益于水泥等胶凝材料增加、混凝土的密实性提高,故浆富浆胶凝砂砾石、机拌变态富浆胶凝砂砾石可作为防渗体材料。

表3 坝体与防渗体胶凝砂砾石渗透溶蚀试验结果

试验编号	坝体胶凝砂砾石							防渗体富浆胶凝砂砾石			
	CSG-1	CSG-2	CSG-3	CSG-4	CSG-5	CSG-6	CSG-7	HP-1	HP-2	HP-J1	HP-J2
	C48F48 SP16%	C48F48 SP24%	C48F48 SP36%	C48F48 SP24% (泥 层间结合 6%)	最粗级配	最细级配		C99F92SP27% 富浆胶凝砂 砾石	C152F82SP27% 机拌变态胶 凝砂砾石	C80F90SP27% 富浆胶凝砂 砾石	C95F95SP27% 机拌变态胶凝 砂砾石
试验开始龄期 (天)	180	180	180	180	180	60	60	180	180	180	180
初始渗透系数 (cm/s)	3.18×10^{-7}	5.78×10^{-8}	5.98×10^{-8}	6.86×10^{-8}	4.40×10^{-7}	1.55×10^{-6}	1.80×10^{-7}	2.80×10^{-9}	3.20×10^{-9}	3.41×10^{-9}	1.14×10^{-8}
试验结束前渗透系数 (cm/s)	1.13×10^{-7}	3.26×10^{-8}	1.66×10^{-7}	3.27×10^{-8}	1.39×10^{-7}	1.17×10^{-7}	1.07×10^{-7}	2.12×10^{-9}	1.81×10^{-9}	2.62×10^{-9}	6.40×10^{-9}
渗透系数变化幅度 (%) “-”减少, “+”增加	-64.4	-43.6	+177	-52.3	-68.4	-92.4	-40.6	-24.3	-43.0	-23.2	-43.8
初始当日溶出 CaO 量 (mg)	1299	201	275	123	1183	13294	1073	34.4	39.3	22.6	38.8
试验结束前当日溶出 CaO 量 (mg)	60	43	127	36	100	84	85	3.9	3.3	4.0	4.6
累计溶出 CaO 量占比 (%)	4.04	2.90	3.89	2.78	6.75	12.2	6.50	0.16	0.10	0.18	0.27
溶蚀后强度较同龄期养护 试件下降幅度 (%)	-16.6	-13.9	-17.6	-14.8	-26.4	-23.4	/	0	-2.8	-5.0	-4.2

4.3 耐久年限计算

根据西音水库大坝设计资料，坝前最大水头为 50.48m，最大底宽 55.0m，防渗体厚度 2.5m。针对渗透溶蚀作用下混凝土性能衰减规律，国内外学者进行了一系列研究，前苏联学者 B. M. 莫斯克文总结已有研究资料认为，当混凝土中 CaO 溶出 10% 后（按原始水泥用量计算），混凝土的强度迅速下降，而且水泥石在混凝土中的状态也不稳定了。参照这一标准，允许从胶凝砂砾石中带走的 CaO 不能大于 10%^[5]。

4.3.1 最高允许渗透系数计算

取坝下部面积为 1cm^2 的细长柱状体单元为研究对象，西音水库大坝最大底宽 $b=55.0\text{m}$ ，最高水头压力 $h=50.48\text{m}$ 。计算该单元体中在大坝设计寿命 $\tau=100$ 年，使用期间允许水泥中 CaO 溶出率 α 为 10% 时，其最大允许的渗透系数。在使用期间，每 1cm^2 渗透面积允许带走的 CaO 量 Q_{CaO} 为：

$$Q_{\text{CaO}}=C \cdot \alpha \cdot q_{\text{CaO}} \cdot b \text{-----} (1-1)$$

式中， C 为胶凝砂砾石中水泥含量； q_{CaO} 为每克水泥中 CaO 含量。

带走上述数量的 CaO 所需渗透水量为：

$$\omega = Q_{\text{CaO}} / P_{\text{cp}} \text{-----} (1-2)$$

式中， P_{cp} 为渗透水中 CaO 浓度。根据达西定律，满足使用寿命 $\tau=100$ 年要求，水通过胶凝砂砾石坝的渗透系数 k 为：

$$k = \omega \cdot b / (h \cdot \tau) \text{-----} (1-3)$$

将各式 (1-1)、(1-2) 代入 (1-3)，得下式：

$$k = (C \cdot \alpha \cdot q_{\text{CaO}} \cdot b \cdot b) / (P_{\text{cp}} \cdot h \cdot \tau)$$

根据图 4，取渗透水 CaO 浓度 $P_{\text{cp}}=100\text{mg/L}$ ，计算得到最高允许渗透系数为 $5.82 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 。胶凝砂砾石渗透系数为 $i \times 10^{-6} \sim i \times 10^{-8} \text{cm/s}$ ($i=1 \sim 9$)，小于该最高允许渗透系数。

4.3.2 抗溶蚀允许使用年限计算

在室内进行的原级配渗透溶蚀试验基础上，经过一年溶蚀历时，渗透系数、 Ca^{2+} 溶出量均趋稳，较初期明显减少，取当日溶出 CaO 值为基准，计算后面的使用年限，整个使用年限以 CaO 允许溶出率 α 为水泥中氧化钙的 10% 为准。通过试验试件与结构体的水力梯度比，换算结构体抗溶蚀允许使用年限，结果见图 5。

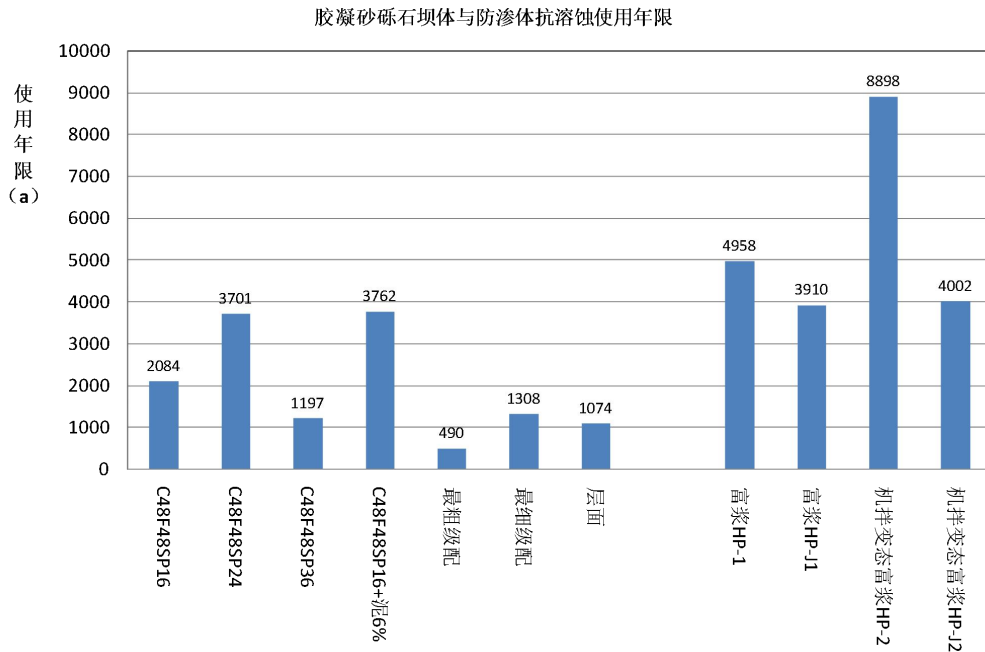


图5 通过室内溶蚀试验计算坝体与防渗体使用年限

由于坝体渗流场渗径长，水力梯度小，不同胶凝砂砾石计算的坝体结构体抗溶蚀允许使用年限在 490~3762 年范围内；富浆胶凝砂砾石、机拌变态富浆胶凝砂砾石防渗体抗溶蚀允许使用年限明显更长，达 3910~8898 年。胶凝砂砾石坝体及富浆胶凝砂砾石防渗体的结构体抗溶蚀允许使用年限都较长，远大于设计使用年限，但不同级配的差异较大，“最粗级配”、“最细级配”、“层面”、“大砂率”的结构体抗溶蚀允许使用年限较其它的相对低，防渗体结构较薄，在工程实践时应改善级配均匀性、加强层间结合。

6 结语

(1)通过相关研究和方案比选，推荐采用机拌变态富浆胶凝砂砾石作为西音水库坝体防渗体材料，该防渗结构形式对于胶凝砂砾石坝属新型的防渗结构，比较适合南方温和地区的。所需要加入的浆液在拌和生产系统内加入，形成机拌变态胶凝砂砾石，仓面振捣施工，可与坝体胶凝砂砾石同步施工、同步上升，简化施工工序。

(2)胶凝砂砾石渗透系数随渗透历时增加，多呈逐渐减少趋势，胶凝砂砾石出现不同程度自愈现象。

(3)通过原级配渗透溶蚀试验，按照允许从胶凝砂砾石中带走的 CaO 限值计算坝体和防渗体抗溶蚀允许使用年限，其结果远大于设计使用年限。

(4)胶凝砂砾石材料渗透溶蚀耐久性随材料离散波动范围大，工程实践时应改善级配均匀性。防渗体尤其需采用更严格的施工质量控制措施，适当优选坝料，不宜直接利用临近最粗或最细级配的，同时应采取措施加强层间结合。

参考文献

- [1]张凤德, 李秀文, 彭云枫, 王万顺. 胶凝砂砾石坝防渗措施及应力分析[中国水利水电科学研究院学报], 2015, 13 (3): 194-200.
- [2]郑瑾莹, 贾金生, 杨会臣, 等. 守口堡胶凝砂砾石坝防渗保护方案研究[C]//堆石坝建设和水电开发的技术进展—中国大坝协会 2013 学术年会暨第三届堆石坝国际研讨会论文集. 昆明, 2013.
- [3]方永浩, 安普斌, 赵伟, 等. 含裂缝水泥基材料的渗透溶蚀及其自愈[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36 (4) 451-456.
- [4]陈霞, 曾力, 何蕴龙, 方坤河. Hardfill 坝材料的渗透溶蚀性能[J]. 武汉大学学报, 2009, 42 (1): 42-45.
- [5] B. M. 莫斯克文等著, 倪继森等译. 混凝土和钢筋混凝土的腐蚀及防护方法. 化学工业出版社, 北京, 1988.

第一作者简介: 俞钦 (1978-), 女, 福建福清, 高级工程师, 主要从事水工材料试验研究与工程检测

手机: 13763831078

电子邮箱: 13763831078@163.com

地址: 福州市东大路 158 号