

高面板堆石坝第二道防渗体系的设计探讨

吴梦喜^{1,2}, 杨家修³, 湛正刚³

(1. 中国科学院力学研究所, 北京市海淀区 100190; 2. 中国科学院大学, 北京市石景山区 100049;
3. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州省贵阳市 550081)

摘要:高面板堆石坝面板发生挤压或张拉等破损,从而使面板出现局部集中渗漏点或条带是大概率事件,垫层防渗是防渗体系的第二道防线。研究了面板局部破损后垫层与过渡层中的水力条件。指出垫层必须是内部稳定的,过渡层必须对垫层构成反滤保护。过渡层一般也应满足内部稳定性条件。砂砾石的内部稳定性可以根据颗粒级配曲线判别。过渡层满足内部稳定性条件时,第二道防渗体系是渗透稳定的。若过渡层不能满足内部稳定性要求,非饱和情况下,过渡层也有可能发生管涌。非饱和渗流的管涌临界渗流速度,可通过流量可控的非饱和向下渗流试验测量。过渡层非内部稳定时,其中的渗流速度应小于非饱和临界渗流速度。

关键词:渗流;颗粒级配;管涌;面板坝

中图分类号:TV641 **文献标识码:**A **学科代码:**570.25 **DOI:**10.3969/j.issn.2096-093X.2017.01.003

0 引言

混凝土面板堆石坝是以堆石体为支撑,以钢筋混凝土面板为防渗结构,因其安全性和经济性优良而极具竞争力的坝型。我国已建或在建坝高 200m 级面板堆石坝多达 10 余座,建成的水布垭面板堆石坝最高,达 233m。目前,我国混凝土面板堆石坝的设计高度已提高到 250m 级。正在研究 300m 级面板坝设计技术^[1]。

面板堆石坝向更高发展的主要难题是面板的水平开裂、挤压破坏和垂直缝与周边缝止水结构破坏带来的大坝安全性问题^[1]。现代面板堆石坝的分区中,坝上游面板前设置粉砂土铺盖,用于在面板张拉开裂之后淤堵裂缝;面板后部设置半透水的垫层,起到面板局部失效后的防渗作用;垫层与堆石之间设置过渡层,防止垫层土流失进入下游堆石^[2]。垫层和过渡层构成第二道防渗体系。目前的面板堆石坝实践中,垫层区的宽度一般为 3~4m,垫层料和过渡料的设计要求满足渗透系数和太沙基反滤准则对颗粒级配的要求^[3]。多座混凝土面板堆石坝垫层料被冲蚀以及用粉质砂土淤堵的方法不能根本解决严重渗漏的现象说明目前经验设计确定的垫层料

是不够完善的^[1,4]。对于未来的超高面板堆石坝,需要细致研究现有垫层区和过渡区反滤设计准则的适应性,确定垫层区与过渡区的颗粒级配准则^[1]。本文从垫层和过渡层的水力条件出发,分析垫层和过渡层的渗透稳定性对于颗粒级配的要求,并探讨反滤层和过渡层土料的设计方法。

1 垫层与过渡层中的水力条件

在第二道防渗体系中,垫层的作用是防渗,过渡层的作用是对垫层的反滤保护。垫层的渗透系数一般介于 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm/s}$,过渡层的渗透系数一般在 $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{cm/s}$,过渡层与垫层的渗透系数比值一般介于 10~100 倍之间^[3]。而堆石体的渗透系数,一般在过渡层的 10 倍以上。现有的过渡料设计原则都要求过渡层具有快速排除渗水,使其处于非饱和渗流状态的要求。面板破损或施工期临时度汛时库水压力直接作用于垫层,过渡料中满足非饱和渗流要求时的渗流性状如图 1 所示,垫层与过渡层的接触面是渗流的内部溢出面^[5],垫层单独承担全部压力水头的削减。由于垫层区的宽度一般仅为 3~4m,而面板破损或施工期临时度汛时垫层表面的水压力将远远大于厚度的 1 倍。由于过渡层中非饱和渗流时重力方向为渗透坡降最大的方向,因而渗流水将主要以垂直向下的方式流经过渡层进入

基金项目:华能科技项目(NHKJ15-H13)。
Huaneng Science and technology research project (NHKJ15-H13)。

其下部的堆石区。非饱和渗流时堆石浸润线以上过渡层中的渗透坡降始终等于 1.0 (忽略含水量变化引起的吸力变化)。

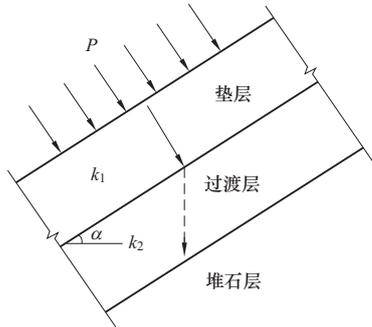


图 1 垫层与过渡层渗流示意图

Fig. 1 Sketch of seepage in cushion layer and transition layer

过渡层中的饱和渗透坡降等于 1 的状态,称之为临界饱和状态。垫层与过渡层的饱和渗透系数和渗透坡降分别用 k_1 、 J_1 和 k_2 、 J_2 表示。根据渗流的连续性条件,过渡料中处于临界饱和状态时,垫层料中的渗透坡降与渗透系数比值 k_2/k_1 成正比,可表示为式(1)。

$$J_1 = (k_2/k_1) \cos \alpha \quad (1)$$

面板堆石坝施工期面板尚未形成临时度汛和运行期局部面板防渗完全失效的渗流性状无需进行复杂的渗流数值分析,可根据图 1 做简单分析即可获得其主要渗流性状。以某面板堆石坝的设计方案为例,垫层表面的坡度约为 1 : 1.5 ($\cos \alpha = 0.832$),垫层的水平厚度为 6m (层厚 3.33m),过渡层的水平厚度为 8m (层厚 4.44m)。表 1 为过渡层处于临界饱和状态时垫层中的渗透坡降和垫层表面水压力与渗透系数比值 k_2/k_1 的关系。当过渡料与垫层的渗透系数比值仅为 10 时,过渡层临界饱和时垫层表面的压力水头为 24.9,而渗透系数比值达到 100 时,垫层表面的水压力高达 274.3。可见过渡层与垫层渗透系数的比值,是影响垫层和过渡层中渗流状态的重要参数。过渡层处于临界饱和状态时垫层中的渗透坡降与 k_2/k_1 成正比,而垫层承担的水头,则与 k_2/k_1 和垫层厚度的乘积成正比。垫层表面的临界水压力,则可以用式(2)表示。

$$P = (k_2/k_1 - 1) \cos \alpha \cdot b \quad (2)$$

式中: P ——垫层表面的压力水头;

b ——垫层的厚度。

表 1 过渡层饱和时垫层表面的最小压力水头

Tab.1 The minimum pressure head on the surface of the cushion when the transition layer is saturated

渗透系数比值	垫层渗透坡降	垫层水头差 (m)	垫层表面压力水头 (m)
10	8.32	27.7	24.9
30	24.96	83.1	80.3
50	41.6	138.5	135.8
80	66.56	221.6	218.9
100	83.2	277.1	274.3

过渡层非饱和时垫层下表面的孔隙水压力为 0, 据图 1 可得出给定面板表层的水压力情况下,垫层中的渗透坡降的计算公式见式(3)。

$$J_1 = P/b + \cos \alpha \quad (3)$$

2 垫层与过渡层的渗透稳定性要求探讨

垫层和过渡层均属于砂砾石土,砂砾石土管涌的结果是细颗粒从土体中被冲蚀出来。砂砾石土抵抗管涌的能力,与土体在渗流作用下的内部稳定性有关。管涌发生的条件一般用临界渗透坡降来表征,即管涌初始发生时土体所承受的渗透坡降。对于内部稳定土层,其渗透破坏的方式为流土,即土颗粒以颗粒群的形式同时移动的破坏形式,流土只发生在渗流的出口处或两层土之间。在填筑体或天然土的两层土之间,如面板堆石坝垫层和过渡层之间,如果过渡层对垫层不构成反滤关系,则可能发生接触流土侵蚀,即垫层土颗粒在渗流作用下剥蚀进入过渡层,并后向发展而破坏。在渗流的出口处,当渗流垂直向上时,依据太沙基渗透破坏公式,管涌临界坡降受颗粒的渗透力与浮容重平衡条件控制,内部稳定土层的管涌的临界坡降,一般在 1.0 左右。内部稳定土层在有效的反滤保护下,当反滤层在渗流过程中本身不发生破坏时,理论上无论多大的渗透坡降,都不会导致渗透破坏的发生。内部不稳定的砂砾石,渗透破坏的形式为“内管涌”(suffusion),内管涌临界坡降,一般介于 0.2 ~ 0.4 之间,内部接近稳定土层时可以高达 0.6^[6]。内部不稳定土体的渗透坡降与土体的相对密度在低临界坡降时关系很小,内部接近稳定的土层的临界坡降与土体的相对密度关系较大^[7]。

显然,在施工期临时度汛或运行期面板与止水系统破损时,依据公式(3),垫层中的渗透坡降一般远远大

于 1, 因而垫层必须是内部稳定的, 且过渡层对垫层构成有效的反滤保护。如果垫层是内部稳定的, 且过渡层对垫层具有完全的反滤功能, 垫层可满足抗渗透破坏的要求。面板坝过渡层与垫层这种应力环境, 在渗流作用下过渡层不发生影响其反滤功能的大变形时, 其抗渗坡降不存在限定值。

由于过渡层临界饱和和渗流时的渗透坡降等于 1.0, 远远高于不稳定土层的临界渗透坡降。由于土颗粒受到的渗流驱动力与渗流速度正相关, 且应为渗流速度的连续函数, 因而渗流速度的微小下降并不会改变土体中水力条件超过管涌临界条件这一状况, 可以推知非饱和渗流状态不是不发生砂砾石土渗透变形的充分条件。因此, 仅仅要求过渡层具有对穿过反滤层的渗水的快速排走能力, 即过渡层中的渗流条件为非饱和和渗流的条件不能满足过渡层自身的渗透稳定性, 是不够的。如果过渡层是内部稳定的, 则过渡层发生渗透破坏的型式只可能是接触流土。由于过渡层的粒径与其下部的堆石层相比本身要求具有衔接关系, 而高面板坝的过渡层和堆石层的相对密度又是非常高的, 因而发生接触流土的可能性是很小的。因此如果垫层和过渡层都是内部稳定的, 且过渡层对于垫层有完全的反滤关系, 则第二道防渗体系的渗透稳定性是满足要求的。在此情况下, 要求过渡层处于非饱和和渗流状态是不必要的。

一般而言, 高面板堆石坝的面板或止水系统破坏可能性较大的部位其过渡料也应满足内部稳定性要求, 或接近满足内部稳定性要求。如果过渡层的土体不能满足内部稳定性的要求, 由于其临界水力条件远远低于渗透坡降等于 1 的饱和渗流条件。过渡层处于非饱和状态是该层渗透稳定的必要条件而非充分条件。由于非饱和时过渡料中的渗透坡降始终等于 1.0, 因此非饱和土中的渗透稳定性评价不能采用渗透坡降这一指标, 而用渗流速度来代替。内部不稳定的过渡层其临界渗流速度与颗粒级配、紧密程度和渗流方向有关, 可以通过垂直向下的渗流量可控的试验装置进行非饱和和渗流试验测定。由于非饱和和渗流与饱和和渗流性状不同, 不能用饱和和渗流试验测定的临界渗流速度代替非饱和和临界渗流速度。

虽然内部不稳定土体粗颗粒构成骨架, 在面板坝中过渡料粗颗粒的移动受到其下部堆石层的约束, 但细颗

粒的流失将使其减弱甚至丧失反滤功能, 从而导致被保护的垫层料的破坏, 从而使渗流量大幅度增加, 一方面显著抬高下游堆石中的浸润线从而降低下游坝坡的稳定性甚至导致溃坝, 另一方面过大的渗流量影响大坝的正常挡水功能。因此, 如果过渡料是内部不稳定的, 其中的水力条件除了仅仅是非饱和的远远不够, 还必须满足渗流速度低于非饱和临界速度。

通过以上分析可知, 太沙基渗透破坏公式不适用于面板坝垫层料和过渡料的渗透稳定性分析。对于过渡层为内部不稳定土层时, 仅仅要求其处于非饱和渗流状态是不够的, 而必须通过非饱和向下管涌试验确定临界渗流速度。由于垂直向下的非饱和和渗流试验中的渗透坡降恒等于 1.0, 因此可以获得此状况下的渗透系数 k_2' 。计算垫层渗透坡降的公式 (1) 可以改写为式 (4)。

$$J_1 = (k_2'/k_1) \cos \alpha \quad (4)$$

式中: k_2' ——过渡层非饱和和渗透变形临界渗透系数。

依据公式 (3) 与公式 (4) 即可获得第二道防渗体系能够抵抗的最大垫层表面水压力。

综上所述, 高面板坝垫层和过渡层的设计需要满足以下原则:

- (1) 垫层必须是内部稳定的, 过渡层必须对垫层具备反滤功能;
- (2) 过渡层一般也应该是内部稳定的, 当过渡层为内部不稳定土层时, 垫层中的渗透坡降不能大于公式 (4) 的计算值。

3 土的内部稳定性判别方法

要评估土体是否可能发生“内管涌”, 必须要考虑土的颗粒组成和孔隙通道的几何数据。只有细颗粒能通过粗颗粒之间的孔隙通道, 内管涌才可能发生。由于孔隙几何数据不能准确测量, 评估仅是基于颗粒粒径分布的。如果几何准则判别出土体可能产生内管涌, 则称之为内部不稳定土体。内部不稳定土体才需要测定管涌临界坡降。

源于 Terzaghi 的滤层设计反滤准则^[8], Kezdi^[9]和 Sherard^[10]各自独立地提出了土的内部稳定性判别法则, 也称之为 Terzaghi 几何法则, 内部稳定土体需满足的条件见式 (5)。

$$d_{c, 15}/d_{f, 85} \leq 4 \text{ (Kezdi) 或 } d_{c, 15}/d_{f, 85} \leq 5 \quad (5)$$

式中： $d_{c, 15}$ ——粗颗粒部分中小于该粒径的土重占15%的粒径；

$d_{f, 85}$ ——细颗粒部分中小于该粒径的土重占总土重的85%的粒径。

对于级配不连续土，粗细两部分土是自然分开的。对于级配连续土，粗细粒径的区分可以按平均几何粒径确定^[11]，见式(6)：

$$d_q = \sqrt{d_{10}d_{70}} \quad (6)$$

式中： d_q ——粗细料之间的区分粒径；

d_{10} ——小于该粒径的土重占总土重的10%的粒径；

d_{70} ——小于该粒径的土重占总土重的70%的粒径。

将土料分成粗细粒径两个部分后，由细颗粒的含量可以对内部稳定性进行初步判别。考虑土的密实度不同，细粒含量29%（不密实）和24%（密实）是管涌土与非管涌的分界^[12]。

Kenney 和 Lau^[12] 等提出将普通的颗粒级配曲线转换为 $H-F$ 曲线。这里 H 是指小于粒径 d 的占总土体的质量百分数， F 是指 $4d$ 与 d 之间土颗粒占总土体的质量百分数。如果 $H/F < 1.3$ 则土体内部不稳定，其后又推荐为偏于不保守的 $H/F < 1.0$ ^[13]。基于大量文献试验结果，只将土体分成粗细两部分进行判别的 Terzaghi 准则对土的内部稳定性误判很多，而 $H-F$ 的最小值大于 1.0 作为土体内部不稳定判别法则误判很少，该法推荐为土的内部稳定性判别方法^[7]。

4 垫层与反滤层土料设计的方法

从渗流控制的角度，垫层和过渡层土料的选择或配置，首先这两种土体对于渗流作用必须是内部稳定的，

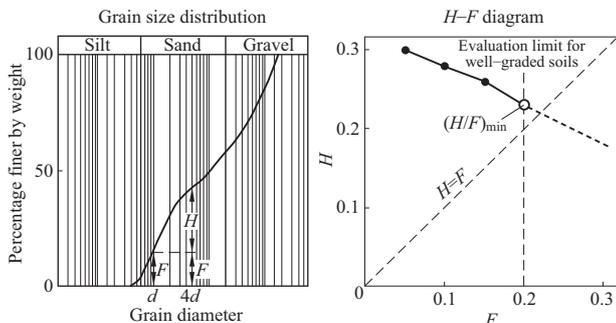


图2 土层内部结构稳定性判别几何准则^[12]

Fig.2 Geometric criteria for identification of internal structure stability of a soil layer

过渡层对垫层必须有反滤功能。垫层料和过渡料颗粒级配要满足内部稳定性要求，过渡料还要对垫层料满足反滤要求。

垫层料可首先根据渗透性和细粒含量的要求（大于24%）来设计；过渡料则根据对垫层料的反滤条件、细粒含量的要求和堆石层颗粒的过渡要求来设计。然后再用 $H-F$ 方法对垫层和过渡料的内部稳定性进行判别。垫层必须是渗透系数较小的内部稳定土体。而过渡层首先要满足对垫层的反滤要求，当内部稳定性要求能够得到满足时，一般而言，不会发生过渡层对堆石层的接触流土，垫层和过渡层的渗透稳定性可以得到保证。而当过渡层不能满足内部稳定性要求时，过渡层还需要进行渗流方向向下的非饱和管涌试验，测定非饱和临界渗流速度。过渡层中的渗流速度必须低于非饱和垂直向下情况下发生管涌的临界速度。

由于垫层所受的最大压力水头，即为该处与库水位的高程差，因此垫层处于的高程越低，可能承受的水压力越大。另外，垫层上游面板或止水的破损程度越大，垫层可能承受的压力水头与此处相对库水压力的比值越大。因此，一方面垫层所处的位置越低，需要的厚度越大；另一方面，垫层前面板和止水可能破损的程度越大，需要的垫层厚度越大。有必要时垫层的厚度可以随部位变化。

5 结束语

本文分析了面板或止水局部失效时面板堆石坝第二道防渗体系中的渗流性状，探讨了垫层和过渡层的设计原则，介绍了土体内部稳定性分析的方法，并推荐了垫层和过渡层土料的设计方法。得出以下结论：

- (1) 垫层和过渡层应为内部稳定性的土体，过渡层对垫层有效反滤保护情况下，面板坝第二道防渗体系渗透稳定性满足要求；
- (2) 垂直向下的渗流在非饱和渗流状态也可能发生渗透破坏，渗流速度是非饱和管涌试验的指标；
- (3) 过渡料不满足内部稳定性要求时，堆石体浸润线以上的过渡层中的渗流不但要处于非饱和状态，其中的渗流速度还要低于管涌破坏临界速度。☒

(下转第23页)

析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (sup.2): 3124-3135.
LI Xiaozhu, LIU Yang, WU Shunchuan. Experimental Investigation and Discrete Element Numerical Analysis of Roller Compaction Test in Site for Rockfill Dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (sup.2): 3124-3135.

- [34] 刘振平, 迟世春, 任宪勇. 基于土石坝动力特性的坝料动力参数反演[J]. 岩土力学, 2014, 35 (9): 2595-2533.
LIU Zhenping, CHI Shichun, REN Xianyong. Back Analysis of Dynamic Parameters of Dam Materials Based on Earth-rockfill Dam Dynamic Characteristics [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (9): 2595-2533.

收稿日期: 2016-09-11 修回日期: 2016-10-18

周伟 (1975—), 男, 湖南岳阳人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 高坝结构数值仿真; E-mail: zw_mxx@163.com

Analysis on the Research Development of Rockfill Scale Effect

ZHOU Wei^{1, 2}, CHANG Xiaolin^{1, 2}, MA Gang^{1, 2}, ZHANG Yi^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower

Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering of Education Ministry, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The real gradation of rockfill should be scaling on laboratory texts because of the limited size of apparatuses. The scaling will change the grading characteristics of rockfill, causing the scale effect and also exerts influences on texts. The scale effect of rockfill is influenced by many factors. The existing test results conducted by different researchers show different and even reverse trends. Based on existing researches, the influencing factors including scale method, degree of compaction control standard, particle breakage, rock strength were summarized. The causes of such influences and the mesoscopic mechanism of rockfill scale effects were analyzed. Representative achievements and research progress were introduced. Relevant problems of scale effect were discussed. These provide solid technical reserves for the design and build of high rockfill dam.

Keywords: rockfill; scale effect; scaling method; degree of compaction control standard; particle breakage

(上接第 16 页)

参考文献

- [1] 徐泽平, 邓刚. 高面板堆石坝的技术进展及超高面板堆石坝关键技术问题探讨[J]. 水利学报, 2008, 39 (10): 1226-1234.
XU Zeping, DENG Gang, Development of High CFRD and Key Technologies for Building Super-high CFRD[J]. Journal of Hydraulic Engineering. 2008, 39 (10), 1226-1234.
- [2] COOKE J. B., SHERARD J L. The concrete face Rockfill Dams: II design[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1987, 113 (10): 1113-1132.
- [3] 杨泽艳, 周建平, 蒋国澄, 孙永娟. 中国混凝土面板堆石坝的发展[J]. 水力发电. 2011, 37 (02): 18-23.
YANG Zeyan, ZHOU Jianping, JIANG Guocheng, SUN Yongjuan. Development of Concrete Faced Rockfill Dam in China[J]. Water Power. 2011, 37 (02): 18-23.
- [4] 郇能惠, 高混凝土面板堆石坝设计新理念[J]. 中国工程科学, 2011, 13 (3): 12-18, 28.
Li Nenghui. New Concept of Design for High Concrete Face Rockfill Dams, China Engineering Science. 2011, 13 (3): 12-18, 28.
- [5] WU Mengxi, YANG Lianzhi, YU Ting. Simulation Procedure of Unconfined Seepage with an Inner Seepage Face in a Heterogeneous Field[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy. 2013, 56 (6): 1139-1147.
- [6] SKEMPTON, A. W. & J. M. Brogan. Experiments on piping in sandy gravels[J]. Geotechnique, 1994, 44 (3): 449-460.
- [7] AHLINHAN, M. F. & M. Achmus. Experimental Investigation of Critical Hydraulic Gradients for Unstable Soils[C]// International Conference on Scour and Erosion 2010, 2010, ASCE, 599-608.
- [8] TERZAGHI, K., R. B. Peck and G. Mesri. Soil Mechanics in Engineering Practice[M], John Wiley & Sons, 1996.
- [9] KEZDI, A. Increase of Protective Capacity of Flood Control Dikes[D]. Department of Geotechnique, Technical University, Budapest, Report1, 1969.
- [10] SHERARD, J. L. Sinkholes in dams of coarse, broadly graded soils[C]// Transactions, 13th International Congress on Large Dams, 1979 New Delhi, India.
- [11] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制[M]. 北京, 水利电力出版社, 1992.
- [12] KENNEY, T. C. and D. Lau. Internal Stability of Granular Filters[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22 (2): 215-225.
- [13] Kenney, T. C. and D. Lau. Internal Stability of Granular Filters: Reply[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1986, 23 (3): 420-423.

收稿日期: 2016-9-15 修回日期: 2016-10-12

吴梦喜, 男, (1967—), 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 水电工程中渗流、应力变形和稳定性等相关岩土力学与土工结构问题的研究。
杨家修, 男, (1963—), 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 水电工程设计和水工结构相关问题研究。
湛正刚, 男, (1968—), 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究主向, 水电工程设计和水工结构相关问题研究。

Discuss on Design of the Second Seepage Prevention System in High Concrete Face Rockfill Dams

WU Mengxi^{1, 2}, YANG Jiaxiu³, ZHAN Zhenggang³

(1. Institute of Mechanics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited Guiyang 550081, China)

Abstract: The appearance of compression or tension breakage of a panel in a high concrete face rockfill dam is a high probability event, so that the panel may appears concentrated leaks locally. A Cushion layer is the second seepage prevention system. The hydraulic conditions in the cushion layer and in a transition layer while leakage occurs is studied. The cushion layer must be internal stable and the transition layer should meet filtration criteria to the cushion layer. The transition layer generally should be internal stable also. Internal stability of sand and gravel soils can be distinguished by methods based on the grain size distribution curve. When both layers are internal stable, the second seepage prevention system is seepage stable. If the transition layer is not internal stable, under unsaturated conditions, piping may also occur in this layer. There is an unsaturated critical piping seepage velocity, which can be measured in a flow rate controlled unsaturated downward flow test. The seepage velocity should be less than the critical seepage velocity while the transition layer is internal unstable.

Keywords: seepage; piping; concrete rock fill dam; grain size distribution curve