



复杂条件下高滩守护工程 岸坡渗流破坏影响因素

刘林双, 刘 林, 李 彪

(长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430011)

摘要: 针对荆江河段岸坡渗流破坏情况, 结合破坏案例分析岸坡渗流破坏原因, 确定岸坡渗流破坏主要影响因素——地质因素、水文因素和降水因素。荆江河段岸坡地质结构主要分为3类, 即单一砂性土地质结构、上黏性土下砂性土双层地质结构以及由黏性土和砂性土组成的互层、夹层等结构土体。荆江河段地下水和江水补给关系复杂——汛期江水补给地下水, 枯水期地下水补给江水。三峡蓄水后, 汛后退水速度进一步加快, 地下水和江水之间的渗流坡降进一步增加。荆江河段强降水天气分布出现频次和范围仍较高。在此基础上, 进一步揭示高滩守护工程区域岸坡渗流破坏机理。

关键词: 渗流破坏; 水文条件; 地质条件; 强降水天气

中图分类号: U 612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)07-0071-06

Influential factor of bank slope seepage failure of high beach protection under complicated condition

LIU Lin-shuang, LIU Lin, LI Biao

(Changjiang Waterway Planning, Design and Research Institute, Wuhan 430011, China)

Abstract: In view of the bank slope seepage failure in Jinjiang river reach, we analyze the reasons for the failure based on a practical case and find out the main influential factors for the failure, i. e. geologic factor, hydrologic factor and meteorological factor. The geological condition of Jingjiang reach includes single sandy soil structure, upper layer clay and lower layer sand, as well as interlayer and cross layer which consists of sand and clay. The supply relationship between groundwater and river water was complex. River water supplies groundwater in the flood season, and groundwater supplies river water in the dry season. After the impoundment of the Three Gorges reservoir, water level dropping speed was accelerated, and the seepage gradient between groundwater and river water was increased. The occurrence frequency of heavy precipitation weather is still high, and its range keeps still large. Finally, the bank slope seepage failure mechanism of Jingjiang beach is revealed.

Keywords: seepage failure; hydrologic condition; geologic condition; heavy precipitation weather

目前, 长江中下游高滩守护工程岸坡破坏主要分3类: 因地下水渗流导致的岸坡流土、坡面鼓包、易触变等渗流破坏^[1-2]; 因冲刷导致的岸坡坡脚变陡、失稳等冲刷破坏^[3-4]; 因人为活动如船体撞击、停船抛锚导致的人为破坏^[5-6]。对于高滩

守护工程, 冲刷破坏和人为破坏在水利和航道整治工程中均存在, 对其研究较多, 维护、维修等措施也较多^[7-8]。但对于荆江及类似复杂边界条件下河段高滩守护工程地下水渗流破坏, 如碾子湾水道鲁家湾护岸工程、沙市河段腊林洲护岸工程、

瓦口子至马家嘴河段雷家洲护岸工程等,则因其影响因素及破坏机理较为复杂,而相应研究较少,因此需要深入研究。本文以外界条件较为复杂的荆江河段为背景,研究河段高滩守护工程渗流破坏影响因素,揭示高滩守护工程渗流破坏机理。

1 渗流破坏案例分析

通过对长江中下游高滩守护工程调研,选取地下水渗流比较严重的河段高滩守护工程,分析岸坡破坏原因及主要影响因素。

1.1 碾子湾水道鲁家湾护岸工程

碾子湾水道位于长江中游,历史上一直属碍航浅水道,浅区一般位于柴码头—寡妇矶过渡段内,上、下边滩不稳定,过渡段主流易摆动,导致航槽出浅。2000—2004年实施了鲁家湾护岸工程。从渗流破坏情况看,10年汛后退水过程中,鲁家湾护岸陆上护坡段局部坡面出现结构鼓包和塌陷破坏,同时汛后江水退水后,岸坡局部仍出现明显流土现象,进一步威胁岸坡的稳定。其破坏原因主要如下。1)地质原因:此处高滩守护工程枯水平台及水上岸坡大部分为淤泥质,地下水排出较困难,渗流现象较严重。2)结构本身原因:经过6年运行后,盲沟无纺布出现淤堵,岸坡渗流状况进一步加剧,同时由于岸面采用六角混凝土块,岸坡表层水很难通过混凝土块渗到坡面上,地下水排水不畅,部分区域淤泥质土向外挤压表层混凝土块结构,形成鼓包。部分区域土壤随地下水外渗而流失,形成塌陷。3)河段地处长江中游,雨季雨水补充地下水,且江水上涨,地下水含量进一步升高,进一步加大了地下水排出困难。

1.2 沙市河段腊林洲守护工程

沙市河段位于长江中游,多年来河床演变剧烈,主流摆动频繁、洲滩互为消长、汉道兴衰交替,长期以来一直是长江中游重点碍航水道。长江航道局于2010—2014年开展腊林洲边滩中上段守护工程。2010年11月初,护岸工程开始进行削整边坡施工,现场开挖后淤泥质土层处地下水排出较困难,机械难以立足。其原因主要如下。1)地质原因:实际淤泥质粉质黏土分布情况与钻探资

料有一定偏差。淤泥质粉质黏土层虽沿程分布,但是其厚度从上至下沿程减小,高程沿程下降,岸坡中部分区域淤泥质土层位于31.4 m以下,淤泥质土层处地下水排出较困难。2)地下水降水互补关系:汛期以江水补充地下水为主,汛后淤泥质黏土含水量丰富,地下水排出速率较慢,不利于饱和地下水短时间内迅速排出,一旦江水退水过程过快,将因地下水排出不畅而致岸坡渗流破坏。

1.3 瓦口子—马家嘴河段雷家洲护岸工程

瓦口子—马家嘴河段位于上荆江河段,河道中两水道放宽段洲滩冲淤消长,主泓摆动频繁。针对此,长江航道局于2010—2013年开展了雷家洲边滩守护工程。2010年11月初,雷家洲护岸工程开始进行削整边坡施工,大部分地段刚开挖坡面主要为较稀淤泥,淤泥质土层处渗水较少,但现场仍有两处岸坡地质情况较差区域,有大量地下水渗出,导致局部岸坡发生渗流破坏。其原因主要如下。1)地质原因:河段地质由淤泥质和沙质多层结构组成,沙质土层渗透率高,含水量低,淤泥质土层则相反,在两土层边界处易形成由沙质土层指向淤泥质土层的渗透压力,造成淤泥质土层渗透破坏。2)水文原因:江水和地下水互补关系较为复杂,退水期淤泥质黏土含水量丰富,地下水排出速率较慢,一旦江水退水过程过快,将因地下水排出不畅而致岸坡渗流破坏。

2 岸坡地质影响

荆江两岸地势总体西高东低,工程河段两岸物质组成沿程有一定差异。藕池口以上,河岸结构以土、砾为主,在主泓摆动范围内,为土-砂-砾3层结构,其中,上部土层厚8~16 m,中部砂层顶板高程一般在枯水位以下,下部砾石层轻度胶结、抗冲能力强。河岸结构对水流具有一定约束力,河岸崩退缓慢,不利于河曲发育。藕池口以下河段,河岸主要为土-砂二元结构,上部土层厚3~14 m,下部中细砂层较上荆江厚,一般超过30 m,河岸抗冲性小于上荆江。荆江河段整个洲滩颗粒粒径沿程自上而下总体变细,实测资料表

明, 藕池口以上河段砂质洲滩中值粒径一般为 0.20~0.22 mm, 藕池口以下为 0.14~0.15 mm。依据工程地质勘察知, 荆江高滩守护工程区内地质结构类型分为 3 类, 其中:

I 类地质结构类型: 单一砂性土结构, 岸坡主要由单一土层组成。按土类不同分为 2 个亚类: II 类, 岸坡均由黏性土组成; I2 类, 岸坡均由砂性土组成。荆江河段共 4 段, 长 8.475 km, 占总长的 20.6%。在荆江河段主要以 I2 类为主。

II 类地质结构类型: 双层结构, 岸坡由厚度大于 5 m 的黏性土和砂性土组成。上黏性土、下砂性土为 III1 类, 上砂性土、下黏性土为 III2 类。荆江河段共 8 段, 长 18.380 km, 占总长的 44.7%, 荆江河段以 III1 类为主。

III 类地质结构类型: 多层结构, 由黏性土和砂性土互层组成, 可夹有透镜体。单层厚度一般小于 5 m 的为 III1 类, 中部及上部黏性土厚度较大者为 III2 类。荆江河段共 5 段, 长度为 14.271 km, 占总长的 34.7%。

荆江河段航道整治工程区域土层分类特征见表 1。

表 1 荆江河段航道整治工程区域土层分类特征

地质结构类别	地质结构特征	河段	工程名称
I 类: 单一砂性土结构	岸坡主要由砂性土组成	沙市河段	腊林州中部守护
		周天河段	天星洲左缘守护
		碾子湾河段	南碾子湾上段守护
		姚监一大马洲河段	丙寅洲高滩守护工程
		周天河段	右岸南五洲岸线守护及加固
II 类: 双层结构	岸坡以上黏性土下砂性土为主	藕池口水道	天星洲左缘下段守护
		莱家铺水道	桃花洲边滩守护
		莱家铺水道	莱家铺边滩守护
		广兴洲边滩守护	广兴洲边滩守护
		铁铺—熊家洲河段	盐船套高滩守护
III 类: 多层结构	岸坡由黏性土与砂性土互层状或夹层透镜状	斗湖堤水道	南星洲下缘守护
		周天河段	江陵高滩守护
		莱家铺水道	新厂高滩右缘守护
		姚监一大马洲河段	中州子高滩守护工程
		姚监一大马洲河段	大马洲右缘高滩守护

3 江水和地下水互补关系

3.1 三峡蓄水后调度过程

三峡工程大坝高程 185 m, 蓄水高程 175 m。于 2003 年 6 月进入蓄水期, 2006 年汛后初期蓄水, 2008 年汛末进行 175 m 试验性蓄水, 至今每年汛末均蓄至 175 m。坝前水位变化见图 1。

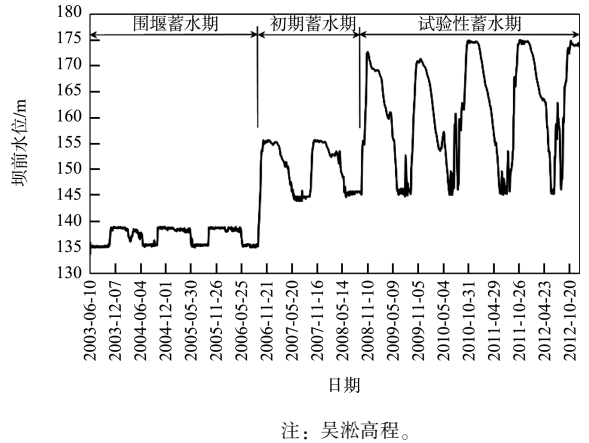


图 1 三峡工程蓄水以来坝前水位过程线

3.2 蓄水后坝下水文变化过程

从年际水文过程来看, 蓄水以来坝下径流过程总体呈略偏枯状态 (表 1), 蓄水后至 2010 年, 较蓄水前明显偏枯的有 2006 和 2011 年, 略偏枯的有 2003、2004、2007、2008、2009 年。即使是蓄水以来水量较大的 2005、2010 和 2012 年, 也仅仅是较蓄水前均值略大。总体偏枯主要是因为上游和支流来水偏枯, 与三峡工程调度运行关系不大。自 2010 年开始按 175-145-155 m 方式运行, 坝前每年起止水位均为 175 m 左右, 蓄水对年径流量无明显影响, 为典型的年内调节型枢纽。

从年内径流量变化看 (图 2), 蓄水后, 进出库控制站径流量关系主要在枯水期、消落期、蓄水期 3 个阶段发生明显变化。

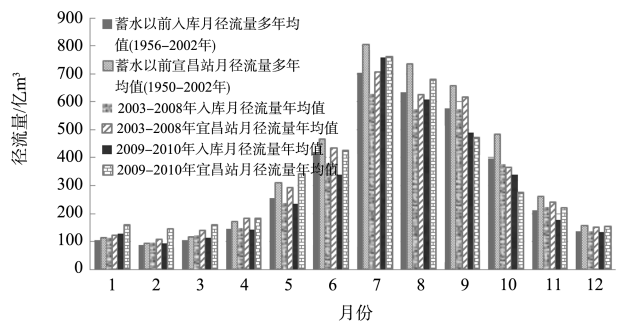


图 2 蓄水前后三峡水库出、入库月径流量年均值变化

5—6月为水库消落期，下游径流量增加明显，蓄水前5—6月年均入、出库总流量分别为675亿和776亿 m^3 ，出库较入库增加约15%；蓄水后，2003—2008年年均入、出库总流量分别为618亿和727亿 m^3 ，出库较入库增加约18%，175 m试验性蓄水的2009—2012年，年均入、出库总径流量分别为573亿和767亿 m^3 ，出库较入库增加约34%。进入175 m试验性蓄水期后，9—10月为主要蓄水期，出库宜昌站月径流量较入库有明显减少。蓄水前，9—10月年均入、出库总径流量分别为973亿和1 140亿 m^3 ，出库流量较入库流量增加约17%；175 m试验性蓄水的2009—2012年，年均入、出库总径流量分别为830亿和749亿 m^3 ，出库较入库减少约10%。从坝下其它水文站分析来看，受水库调蓄作用影响，坝下河段各水文站（宜昌站、监利站、螺山站、汉口站）（图3），蓄水后汛后退水速度均明显加快。

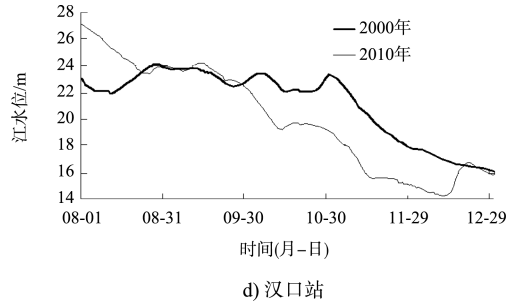


图3 三峡蓄水前后坝下各站水文过程比较

3.3 退水过程加快对岸坡渗流破坏影响

三峡蓄水后，坝下多年径流量总体变化不大，但年内退水过程明显加快，对于荆江岸坡，江水和岸坡地下水存在着较复杂补给关系，一旦对于枯水河槽塑造较为重要的汛后退水过程发生变化，江水与岸坡地下水的补给关系也将发生改变，岸坡渗流破坏程度也随之改变。荆江河段江水和岸坡地下水存在着较为复杂的补给关系：汛期，江水水位相对较高，补给地下水；退水期则由地下水补给江水。三峡蓄水后，荆江河段退水过程加快，地下水和江水间渗流坡降进一步增加，一旦突破相应河段岸坡土层临界水力坡降，岸坡即发生渗流破坏。

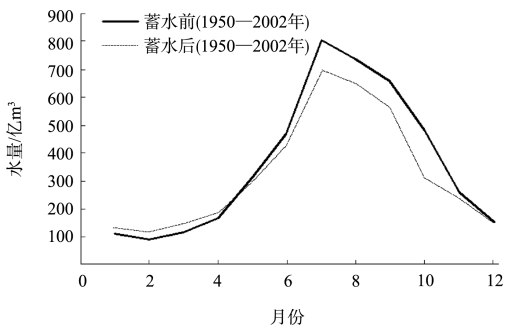
4 局部强降水影响

4.1 降水量特点

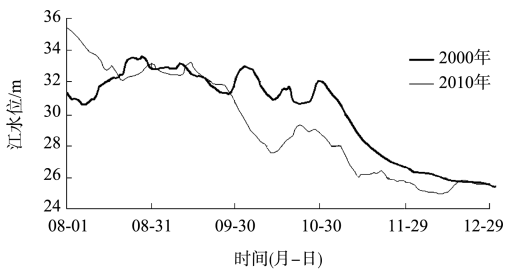
工程河段位于长江中游河段，该地区属亚热带季风气候，冬季寒冷干燥，降雨偏少，夏季炎热，春、秋季雨量偏多。对河段降雨量进行统计见表2。在我国通常把日降水量超过50 mm的降水事件称为暴雨，把日降水量超过25 mm的降水事件称为大雨。由表2知，一方面年均降雨量达1 253.6 mm，年平均降雨天数达103.5 d，说明长江中游河段降水量较高；另一方面，日最大降雨量为183.9 mm，而年最长降雨天数达18 d也说明局部时间段降雨量更大，局部区域局部时间段降雨量则可能更大。

表2 长江流域中游地区降雨量统计

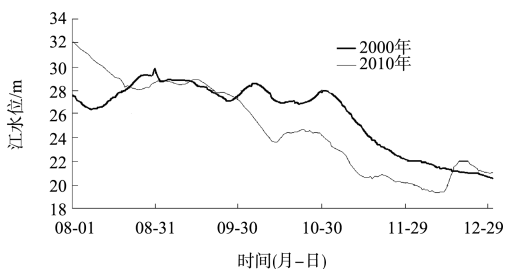
年最大降雨量/mm	年最小降雨量/mm	年平均降雨量/mm	日最大降雨量/mm	年平均降雨天数/d	连续最长降雨天数/d
1 775.4	757.2	1 253.6	183.9	103.5	18



a) 宜昌站



b) 监利站



c) 螺山站

4.2 强降水空间分布

统计长江中游相关汛期极端强降水事件平均发生频次, 把 1971—2000 年逐年日降水量序列的第 95 个百分位值的 30 a 平均值定义为极端强降水事件阈值, 在长江中游局部区域强降水发生频次仍然较高(图 4), 最高汛期平均极端强降水事件发生频率达 6 以上。统计长江中游汛期总降水量空间分布, 降水量在 1 000 mm 以上区域仍较为广泛(图 5)。

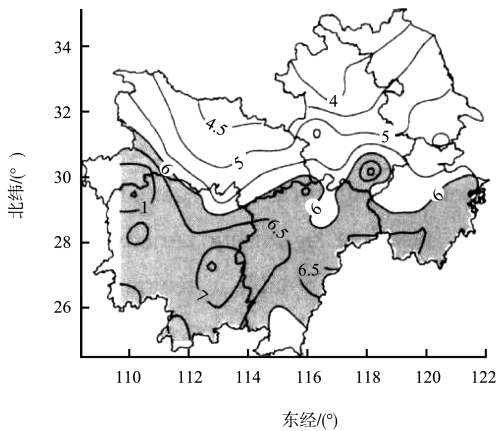


图 4 1996—2004 年强降水事件平均发生频次分布(单位:次)

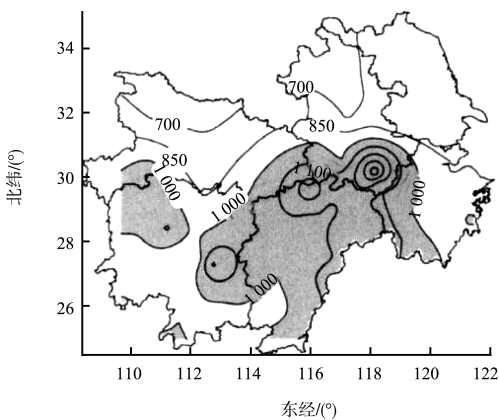


图 5 1996—2004 年汛期总降水量的空间分布(单位:mm)

4.3 强降水对岸坡地下水的影响

对于涉水工程, 降水除对工程施工造成影响外, 也对工程所依赖的土层结构造成影响。降水为江水和岸坡地下水主要补给源之一, 但降水过度补给则容易造成灾害。如, 降水过度补给江水, 则易造成河道水位上涨, 形成洪涝灾害; 降水过度补给地下水, 岸坡地下水排出速度一旦低于降水对地下水的补给速度, 则岸坡淤泥质将进一步

饱和。因此, 河段局部一旦发生强降水, 一方面河道水位上涨, 岸坡地下水的排出更为困难; 另一方面, 降水也对地下水进一步补充, 地下水含量进一步升高, 最终导致土层地下水含量过高, 渗透坡降过大, 从而发生渗流破坏。

5 岸坡渗流破坏机理

高滩守护工程岸坡渗流破坏主要原因包括地质原因、江水地下水互补关系、降水强度等因素。对于不同类型地质条件, 其渗流破坏机理分述如下。

黏性土土体具有含黏土粒较多, 土体透水性小等特点, 其特殊孔隙结构对渗流影响较大。一般而言, 黏性土孔隙小, 渗流速度慢, 使得表面张力、边界层作用以及黏土矿物与水之间的复杂强烈的物理、化学作用均较为显著, 土层保水作用也进一步增强, 且孔隙越小, 结合水含量越高。结合水是非牛顿流体, 具有一定抗剪强度, 同时对于主要被结合水占据的孔隙, 水压力必须首先克服其抗剪强度, 另外结合水具有较强黏滞性, 决定了外加水头或外力在饱和黏性土中传递时有损耗, 其渗透系数一般在 1.0 以下(表 3)。对于实际岸坡工程区域, 一旦黏性土含量过高, 则土体易因结合水难以排出, 产生土体鼓包、塌陷等现象, 同时若地下水排除过程中大量带出土体, 则易发生流土而影响岸坡的稳定。

表 3 黏性土渗透系数值 K

表 3 黏性土渗透系数值 K					m/d
高液限黏土	黏土质砂	含砂低液限黏土	含砂低液限粉土	低液限黏土(黄土)	粉土质砂
<0.001	0.001~0.05	0.05~0.10	0.10~0.50	0.25~0.50	0.5~1.0

无黏性土则具有压实性好、抗压强度高、透水性强等特点(表 4)。研究中常用 5 mm 的固定粒径作为粗粒土区分粒径, 不同粒径无黏性土渗透特点差别较大。对于无黏性砂的破坏目前一般认为, 无黏性土体主要由骨架颗粒和可动颗粒两部分组成, 其中骨架颗粒粒径相对较大, 位置固定, 形成土体骨架。可动颗粒填充于骨架颗粒形成的孔隙中, 小于骨架孔隙的最小孔径, 不承担荷载。

一旦土体内外侧因水位不同产生渗流水力坡度，当梯度达到一定程度，可动颗粒砂将被带出，若可动颗粒带出过多，骨架颗粒无法承担岸坡荷载，

岸坡便会发生坍塌，此外，若可动颗粒向外运动集中发生于局部区域，也容易形成管涌、流沙等破坏现象。

表 4 无黏性土渗透系数值 K

m/d

粉砂	细砂	中砂	粗砂	极粗的砂	砾石夹砂	带粗砂的砾石	源砾石	圆砾大源石
1~5	5~10	10~25	25~50	50~100	75~150	100~200	200~500	500~1 000

荆江河岸土质组成复杂，主要包括单一砂性土结构、上黏性下砂性土结构和、复杂的双层、夹层、夹透镜体多层结构土体。对于单一砂性土河段，在地下水作用下，因可动砂（细砂为主）颗粒大量被带出，骨架颗粒无法承担岸坡荷载，致使岸坡易产生坍塌、管涌、流沙等破坏现象；对于二元相地质结构，尤其是存在粉细沙层夹杂淤泥质粉质黏土时，在开挖揭露了地表土层后，由于淤泥质粉质黏土的饱和含水量很高而渗透性低，其自身的强度低，因此在岸坡开挖形成临空面后，地下水长时间难以及时排出，出现大面积垮塌、流土等现象；而对于极薄层粉质黏土与粉细砂层互层的土质，在冲积过程中形成明显的水平层理结构，具有明显渗流各向异性特征，在岸坡开挖形成临空面后，地下水主要由粉细砂层水平向排出，粉细砂发生渗透变形破坏，导致与淤泥质粉质黏土层相邻的沙层出现流沙（流土）、空洞等现象，继而出现大面积的岸坡渗流破坏。

同时，荆江河段地处三峡大坝下游，蓄水前，河段年内汛期江水补给岸坡地下水，枯水期地下水补给江水（图 6）。三峡蓄水以后，汛枯两期江水地下水补给规律不变，但由于汛后退水过程进一步加快，退水期内，河岸内外侧渗透水力坡度加大，岸坡渗透压力进一步增大（图 7）。此外，荆江河段地处长江中下游流域，降水强度和频率仍较大，易导致岸坡地下水渗透坡降过大，进一步加剧岸坡渗流破坏的发生。

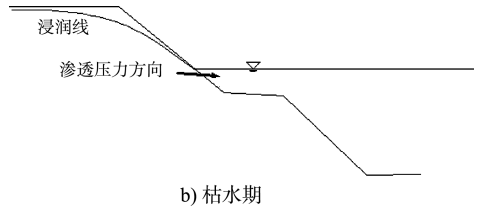


图 6 汛期和枯水期地下水和江水补给

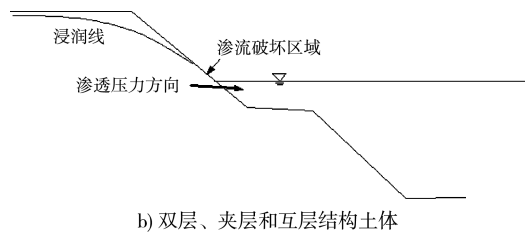
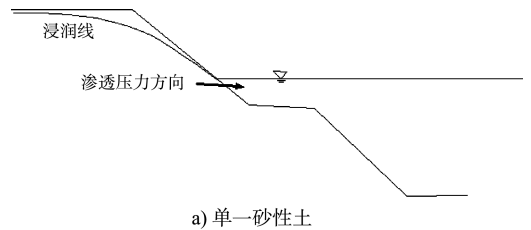


图 7 汛后退水过程中地下水和江水补给

6 结论

1) 选取荆江河段高滩守护工程中渗流破坏较严重的岸坡进行分析，确定岸坡渗流破坏影响因素，主要包括地质、江水和地下水互补关系和强降水分布等因素。

2) 荆江河段岸坡地质主要分为单一砂性土，上黏性土下砂性土，由黏性土和砂性土组成的互层、夹层等地质结构类型。河段地下水和江水补给关系复杂，汛期江水补给地下水，枯水期地下水补给江水，三峡蓄水后汛后退水速度进一步加快，地下水和江水之间渗流坡降进一步增加。荆江河段强降水天气分布出现频次和范围仍较高。

