

唐家山堰塞体渗流稳定及溃决模式分析

胡卸文¹, 罗刚¹, 王军桥¹, 刘娟¹, 胡恒洋²

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 土木工程系, 四川 峨眉山 614202)

摘要: 在准确获取唐家山堰塞体地质结构(从上到下依次为①层碎石土、②层块碎石和③层似层状碎裂岩 3 层结构)及相关渗透参数基础上, 采用 Visual Modflow 可视化三维软件, 模拟 4 种堰塞湖水位(710, 720, 730 和 740 m)条件下不同土层的渗流速度和渗透坡降, 表明由于②, ③两层颗粒粗大、渗透性好, 总体表现出稳定流的渗水特点, 整体坡降变化稳定, 中间不会出现如低渗透黏性土的紊流状态、渗透坡降出现拐点以及管涌渗透特点。而下游侧①层碎石土由于沿第③层形成的贯通性渗流在下游侧穿越该层渗出形成的最大坡降会大于允许坡降, 将导致堰塞体下游发生零散或局部渗流破坏, 且临界堰塞湖水位为 726 m。随堰塞湖水位抬升, 整个堰塞坝体出现的溃决模式为: 下游侧表层碎石土层因渗透破坏和溯源侵蚀, 同时因进口段地表水流漫顶淘刷, 最终导致上部第①层碎石土被侵蚀、淘刷带走。随着第①层被淘刷、水流速度加大又进而会带动第②层块碎石被逐渐冲刷下切, 但不会发生整体溃决, 而第③层似层状碎裂岩将保持稳定, 侵蚀和淘刷的下限深度就是第③层似层状碎裂岩顶部。

关键词: 边坡工程; 唐家山堰塞坝; 渗流场; 渗透坡降; 溃坝

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)07 - 1409 - 09

SEEPAGE STABILITY ANALYSIS AND DAM-BREAKING MODE OF TANGJIASHAN BARRIER DAM

HU Xiewen¹, LUO Gang¹, WANG Junqiao¹, LIU Juan¹, HU Hengyang²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. Department of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Emeishan, Sichuan 614202, China)

Abstract: Based on accurately obtained data of Tangjiashan barrier dam on geological structure(three-layer structures from top to bottom: gravel soil, blocks and gravels, stratoid cataclastic rocks) and the relevant parameters, using the Visual Modflow, which is a three-dimensional visualization software, seepage field of the dam under four conditions of water levels(710, 720, 730 and 740 m) of the dammed lake are simulated. According to the results of simulated calculation, each soil layer's seepage velocity and seepage gradient are calculated, and the analytical results show that the first and the second layers have the characteristics of coarse particles and high permeability, so the overall performance is of a stable flow, with the characteristics of seepage and stable change of overall gradient, and it will not have turbulent conditions of low-permeability clay, inflexion of seepage gradient and the characteristics of piping. The maximum seepage gradient in gravel soil of the first layer is more than allowed gradient in the transition between the first layer and the third layer, so it will cause sporadic or partial seepage destruction on downstream of barrier dam. And simulated results show that gravel soil of the first layer

收稿日期: 2010 - 01 - 28; **修回日期:** 2010 - 04 - 23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40972175, 40772175)

作者简介: 胡卸文(1963 -), 男, 博士, 1985年毕业于成都地质学院水文地质专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事工程地质、环境地质方面的教学与研究工作。E-mail: huxiewen@163.com

will experience seepage failure when the water level of dammed lake is more than 726 m. With the uplift of water level, the dam-breaking mode of overall barrier dam is that gravel soil of the first layer will be eroded and washed away by the seepage failure and head erosion, also by the down-cutting caused by overflow. The blocks and gravels of the second layer are gradually washed away and down-cut because the first layer is washed and water velocity increased, but it will not happen overall breaking. The stratoid cataclastic rocks of the third layer will remain stable, and the depth of erosion and down-cutting is the top of the third layer.

Key words: slope engineering; Tangjiashan barrier dam; seepage field; seepage gradients; dam-breaking

1 引言

2008年5月12日四川汶川发生8.0级大地震产生了大量的崩塌、滑坡等地质灾害,在距北川县城上游约4.7 km处的通口河右岸唐家山发生高速滑坡堵江,并形成顺河向长803.4 m,横河向最大宽度611.8 m,坝高82~124 m,平均面积约 $30 \times 10^4 \text{ m}^2$,推测体积为 $20.37 \times 10^6 \text{ m}^3$ 规模的堰塞坝。截止到2008年6月9日,堰塞湖蓄水^[1, 2]已经达到 $24.25 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。随着堰塞湖水位逐渐抬升,堰塞坝上下水头差不断增大,水流已通过坝体向下游渗透,堰塞坝是否会因渗透而发生破坏,进而导致整体溃坝成为众人关注的问题。基于堰塞坝与水利水电土石坝相类似特点,据国内对土石坝的破坏统计,从241座大型水库发生的1 000次事故分析,由渗流破坏引起的占32%;从2 391座水库失事分析,由上述原因造成垮坝的占29%。据世界各国统计,如美国对206座土石坝失事分析,由渗流破坏而造成的占39%、日本占44%、瑞士占40%^[3],由此可看出渗流破坏对坝体安全的危害性。

为了充分剖解唐家山堰塞坝体渗漏变形破坏特点,在获取唐家山堰塞坝地质结构和各土层性质资料基础上,采用Visual Modflow可视化三维地下水流动模型软件,从堰塞湖不同蓄水位条件下堰塞坝坝体内部的地下水渗流场变化出发,计算分析出坝体各介质的渗透坡降,并与相应土层的允许渗透坡降对比,判断堰塞坝体渗流稳定性及相应的溃决模式,对深化唐家山堰塞坝体渗流模式及其稳定性研究具有理论和实际意义。

2 唐家山堰塞坝基本概况

如节1所述,通过对高速滑坡形成的地质环境条件分析,在滑坡相对高差540 m,所在通口河宽约100 m的临空条件下,在短短的半分钟内快速下滑并堵江,滑坡体内原坡体结构完全解体并破碎的

可能性不大,因此分析认为除堰塞坝体前缘及上、下游两侧解体破碎强烈外,其余部位在很大程度上仍将保持原坡体岩体结构特点,即在剖面上,从上到下,依次为黄褐色坡残积碎石土(推测5~15 m)、强风化似层状硅质岩碎裂岩(推测10~15 m)和弱风化似层状硅质岩碎裂岩^[4, 5]。经过后期地质勘探揭露,自上而下分成四层:碎石土层、块碎石层、似层状碎裂岩、灰黑色粉土质砂砾层(此层为原河床覆盖层)^[1, 6],也证实了上述地质结构分层,坝体纵剖面 and 横剖面见图1。堰塞体不同部位地质结构见图2。

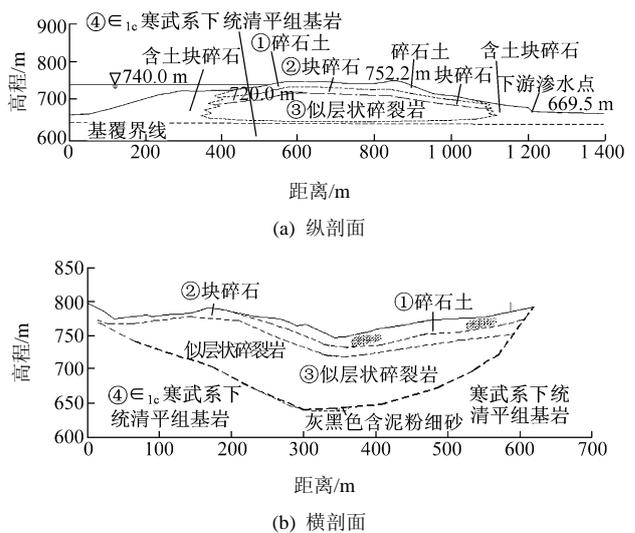


图1 唐家山堰塞坝地质剖面示意图

Fig.1 Geological profile of Tangjiashan barrier dam



(a) 靠上游侧碎石土



(b) 泄流后冲刷显示底部似层状碎裂岩



(c) 下游侧块碎石土



(d) 前缘巨大块石

图 2 堰塞坝体不同部位地质结构

Fig.2 Geological structures of different parts of barrier dam

3 Visual Modflow 基本理论

Visual Modflow(简称 VM)可视化三维地下水流动模型软件, 是目前最流行并被公认的三维地下水水流和溶质数值模拟评价的标准可视化专业软件系统, 在地下水模拟领域得到广泛应用^[7~13]。

Visual Modflow 是 Modflow 的一个三维有限差

分地下水流动模型, 它基于以下常密度地下水三维流动基本方程^[14]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)-w=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中: k_{xx} , k_{yy} , k_{zz} 分别为沿 x , y , z 坐标轴方向上的渗透系数($m \cdot s^{-1}$); h 为测压管水头(m); w 为在非平衡状态下通过均质、各向同性土壤介质单位体积的通量(s^{-1}), 即地下水的源和汇; S_s 为孔隙介质的储水率(m^{-1}); t 为时间(s)。

对于地下水三维稳定流动, Modpath 质量平衡方程可用有效空隙率和渗流流速表达:

$$\frac{\partial(nV_x)}{\partial x}+\frac{\partial(nV_y)}{\partial y}+\frac{\partial(nV_z)}{\partial z}=w \quad (2)$$

式中: V_x , V_y , V_z 分别为线性流动流速矢量在 x , y , z 轴方向的分量($m \cdot s^{-1}$); n 为含水层有效空隙率(%); w 为由含水层内部单位体积源和汇产生的水量(s^{-1})。

污染物输运模型 MT^{3D} 的基本方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial}{\partial x_i}(V_i C)+\frac{q_s}{Q}C_s+\frac{\sum R_k}{Q} \quad (3)$$

式中: C 为地下水中污染物浓度($g \cdot m^{-3}$), x_i 为沿坐标轴各方向的距离(m), D_{ij} 为水力扩散系数, V_i 为地下水渗流流速($m \cdot s^{-1}$), q_s 为单位体积含水层出现在流动的源(正的)和汇(负的)处的容积流量(s^{-1}), C_s 为源和汇的浓度($g \cdot m^{-3}$), Q 为含水层孔隙率(%), $\sum R_k$ 为化学反应项。

4 堰塞体地质模型建立

尽管唐家山堰塞坝坝体结构较为复杂, 组成坝体的土体性质在坝体不同部位表现出不均一性, 但根据钻孔揭露, 总体上还是表现出 3 层地质结构, 即(1) 层碎石土层、(2) 层块碎石层和(3) 层似层状碎裂岩, 坝体下伏为基岩(由于原河床沙砾卵石覆盖层很薄, 本次模拟将其忽略)。因此对堰塞坝体渗流模型将按上述地质结构进行概化处理, 首先是四周边界的确定, 横河向两侧边界为堰塞体与两岸基岩山体的接触界面, 底部边界则为下伏基岩界面, 上述界面均作为相对隔水层, 顺河向两侧为自由临空面。其次考虑同一土层土体性质为均一性, 即假设同一土层各处具有相同的物理力学性质, 模型中主

要为渗透系数均一。最后假设堰塞湖水位在模拟时间段内水位随时间变化幅度小，即堰塞湖湖水水位和下游出水口处水位不变，并作为定水头边界处理。

因此堰塞坝模型所选范围为顺河长 864 m，横河宽度 722 m，模型在平面上被划分成 100×100 个网格单元，在其各自方向上网格间距离相等。模型总共划分了 4 层，分别为①层碎石土层、②层块碎石层、③层似层状碎裂岩和④层基岩，堰塞坝三维模型如图 3 所示。

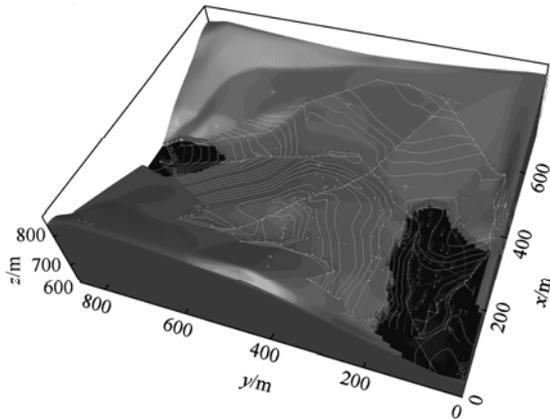


图 3 唐家山堰塞坝体三维模型

Fig.3 Three dimensional model of Tangjiashan barrier dam

模型中各土层的渗透系数根据钻孔抽水试验获取，见表 1。从表中可知，两侧山体及下伏基岩渗透系数最小，且远小于其上覆似层状碎裂岩的渗透系数，故在模拟中假设基岩为相对隔水层。

5 堰塞坝体渗流场模拟分析

结合唐家山堰塞湖水位变化情况，共模拟了堰

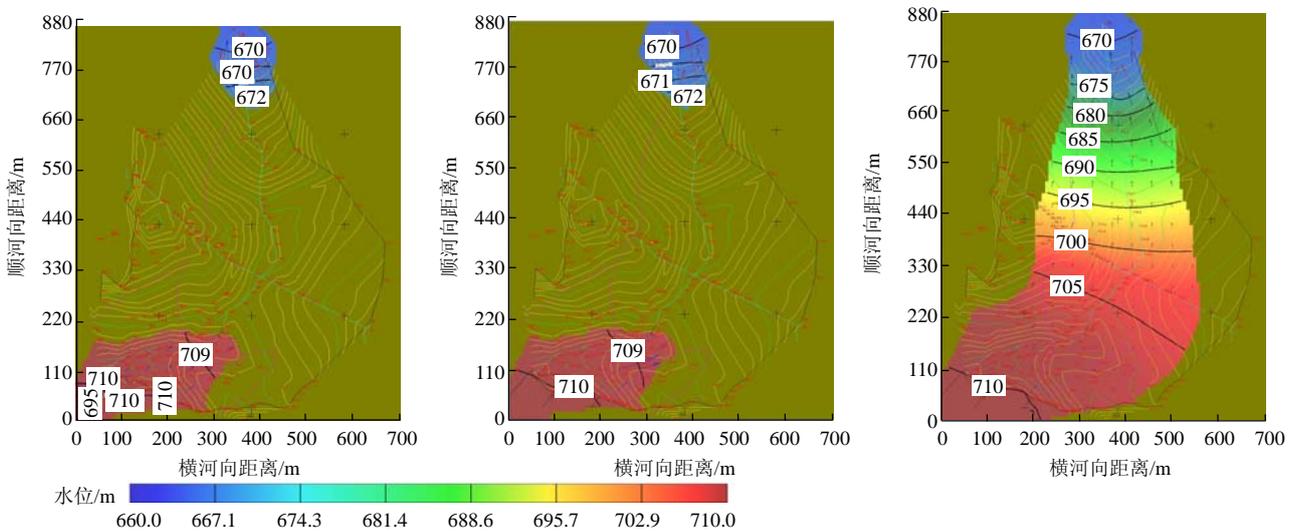
表 1 唐家山堰塞坝模型渗透系数

Table 1 Penetration coefficients of Tangjiashan barrier dam model

材料	渗透系数/(cm · s ⁻¹)		
	K _{xx}	K _{yy}	K _{zz}
① 碎石土(delQ ₄)	0.000 05	0.000 05	0.000 05
② 块碎石层(delQ ₄)	0.050 00	0.050 00	0.050 00
③ 似层状碎裂岩(delQ ₄)	0.005 00	0.005 00	0.005 00
④ 基岩	0.000 01	0.000 01	0.000 01

塞湖水位分别为 710, 720, 730, 740 m 条件下堰塞坝体的渗流场变化。各种水位条件下堰塞体各层的渗流场的平面和纵剖面分布如图 4~7 所示(图中从左到右为：①层碎石土、②层块碎石、③层似层状碎裂岩)。

对 4 种堰塞湖水位条件下模拟的渗流场结果显示，当水位为 710, 720, 730 m 时，坝体渗流主要发生在第③层即似层状碎裂岩中，第①, ②层内只靠上游堰塞湖侧有水渗入，但未沿此两层贯通至下游形成渗流。但因①, ②两层直接覆于③层之上，尤其是堰塞体下游侧厚度更大，因此第③层形成的贯通性渗流在下游侧将穿越①, ②两层渗出。而当水位为 740 m 时，第②层即块碎石层渗流面积明显增大，渗流已出现在坝体中部，但仍未贯通至下游形成渗流，不过仍存在沿第③层形成的贯通性渗流在下游侧将穿越①, ②两层渗出，且渗水量明显增大。随着堰塞湖水位的逐渐抬升至 740 m 以上，渗流将在块碎石层中贯通，因该层渗透系数较大，在坝体下游局部地区将发生渗流潜蚀破坏。根据模拟计算得出不同堰塞湖水位条件下不同层位渗透坡降见表 2。



(a) 平面分布

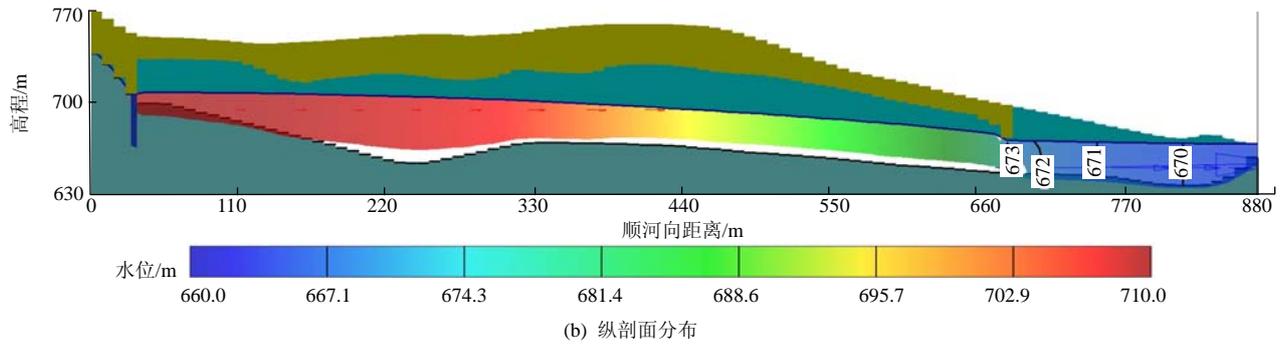


图 4 710 m 水位下堰塞坝体渗流场

Fig.4 Distribution of seepage field of Tangjiashan barrier dam at water level of 710 m

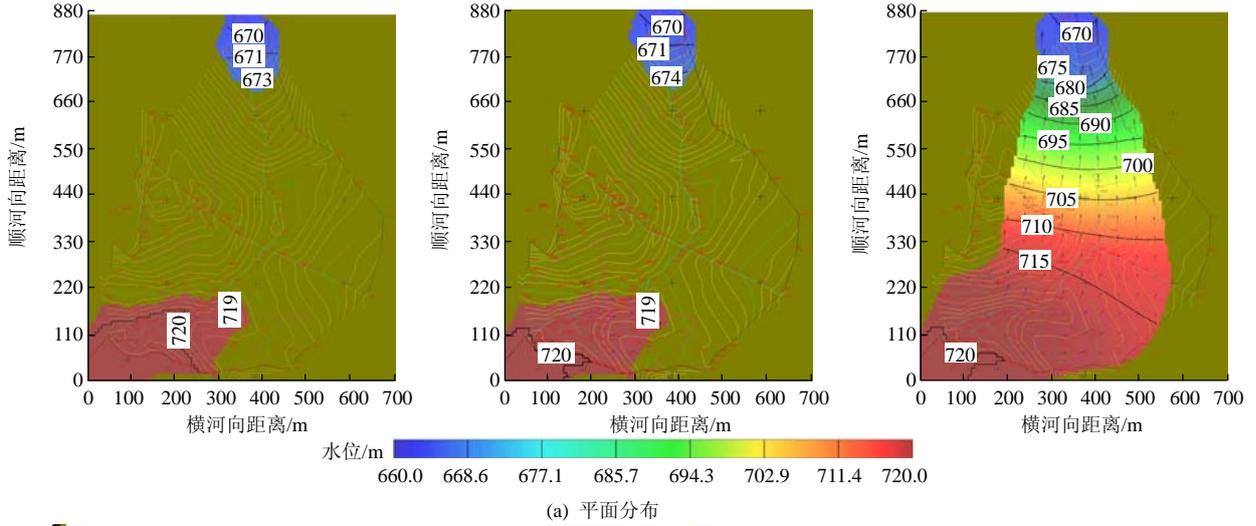
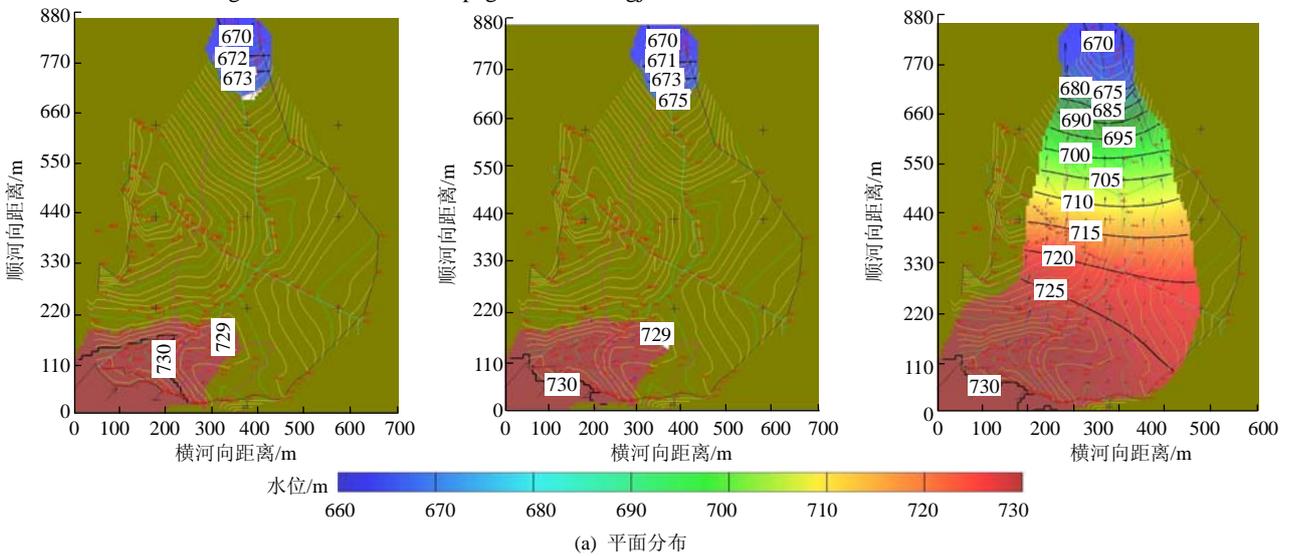
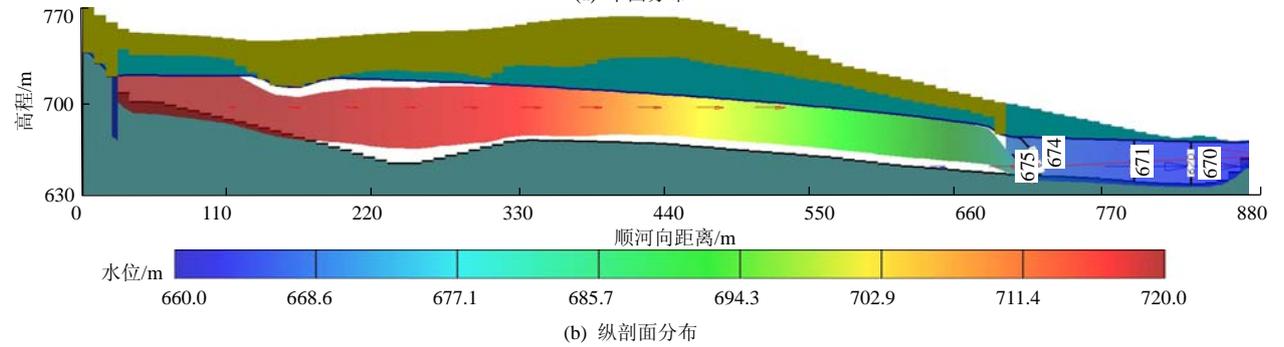
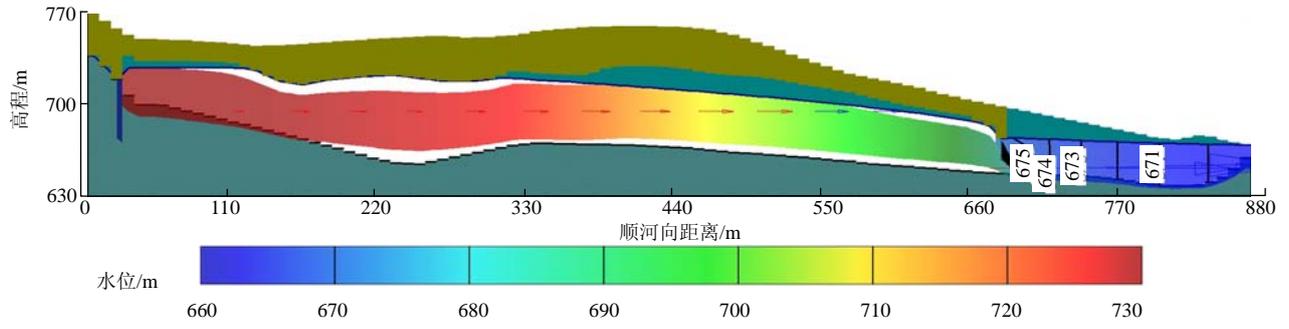


图 5 720 m 水位下堰塞坝体渗流场

Fig.5 Distribution of seepage field of Tangjiashan barrier dam at water level of 720 m

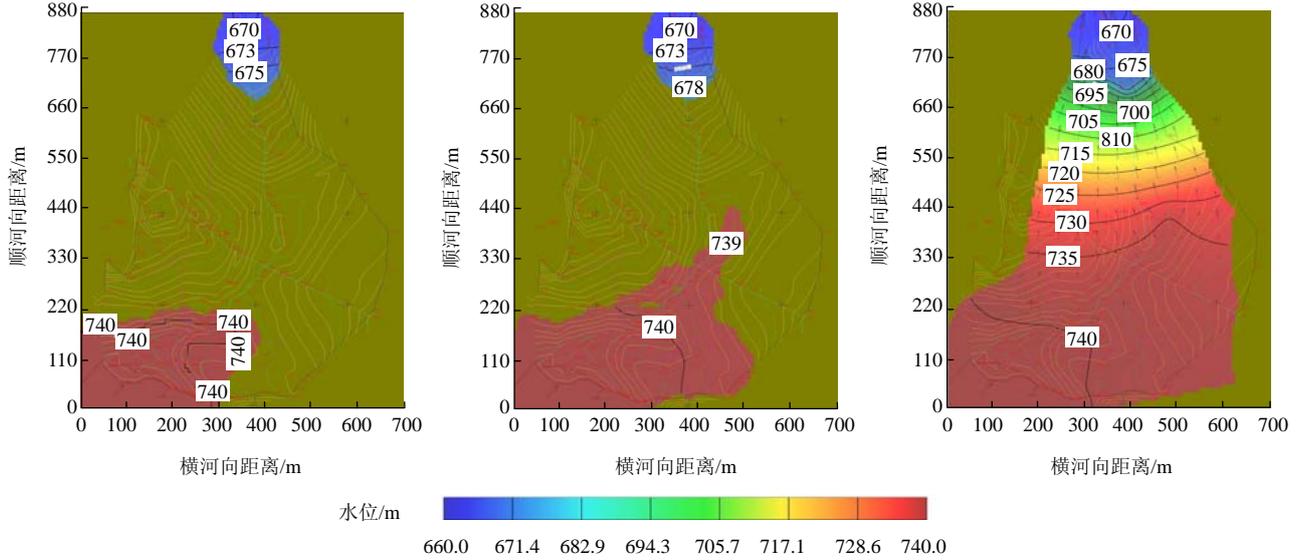




(b) 剖面分布

图 6 730 m 水位下坝体渗流场纵

Fig.6 Distribution of seepage field of Tangjiashan barrier dam at water level of 730 m



(a) 平面分布

图 7 740 m 水位下坝体渗流场

Fig.7 Distribution of seepage field of Tangjiashan barrier dam at water level of 740 m

表 2 不同水位条件下堰塞体不同层位渗透坡降计算结果

Table 2 Calculation results of seepage gradient on different layers of Tangjiashan barrier dam at different water levels

坡降土层	堰塞湖水位/m											
	740			730			720			710		
	渗透坡降		允许坡降	渗透坡降		允许坡降	渗透坡降		允许坡降	渗透坡降		允许坡降
平均坡降	最大坡降		平均坡降	最大坡降		平均坡降	最大坡降		平均坡降	最大坡降		
碎石土	0.128	0.784	0.35~0.50	0.090	0.523	0.35~0.50	0.075	0.396	0.35~0.50	0.037	0.193	0.35~0.50
块碎石层	0.116	0.370	0.40~0.60	0.087	0.213	0.40~0.60	0.058	0.138	0.40~0.60	0.041	0.095	0.40~0.60
似层状碎裂岩	0.099	0.250	0.70	0.084	0.200	0.70	0.070	0.160	0.70	0.056	0.138	0.70

另从 4 种蓄水位下堰塞体渗流场变化规律看, 由于②, ③两层颗粒粗大、渗透性好, 因此总体表现出稳定流的渗水特点, 整体坡降变化稳定, 中间不会出现如低渗透黏性土的紊流状态、渗透坡降出现拐点以及“管涌”渗透特点^[15~17]。

从表 2 可以看出, 当堰塞湖水位达到 710 m 时, ①, ②, ③层渗透坡降均小于相应的允许坡降, 坝体整体和局部均保持稳定; 当水位达到 720 和 730 m 时, ②, ③两层渗透坡降仍小于各自的允许坡降, 而①层碎石土的平均坡降也小于其允许坡降, 但沿第③层形成的贯通性渗流在下游侧穿越①, ②两层渗出形成的最大坡降会大于允许坡降下限, 因而导致下游局部会发生零散或局部渗流破坏, 但不影响坝体整体稳定性。

当水位为 740 m 时, ②, ③两层渗透坡降同样仍表现为小于各自的允许坡降, 而位于堰塞体下游侧的①层碎石土因沿第③层形成的贯通性渗流在下游侧穿越①, ②两层渗出形成的最大坡降将大于允许坡降上限, 且下游中部等水位线密集, 该处渗流坡降大, 将发生较大范围的渗透破坏。

从图 8, 9 中可以看出, 随着上游堰塞湖蓄水位的逐渐抬升, 各层渗透坡降均逐渐增大, 其中又表现为①层碎石土的渗透坡降增加幅度最大, 其次为②层块碎石, ③层似层状碎裂岩增长幅度最小, 这表明颗粒越粗、渗透坡降越小、渗流场变化最稳定, 颗粒越细、渗透坡降越大、渗流场变化逐渐不稳定。因此堰塞湖水位抬升对表层碎石土层的稳定性影响较大, 而对其他两层影响相对较小。

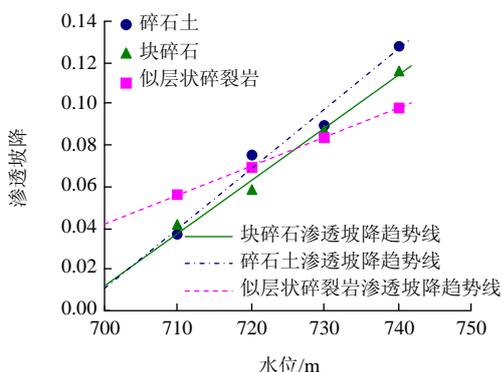


图 8 堰塞坝体各土层渗透坡降与堰塞湖水位变化关系
Fig.8 Relationship between each soil layer seepage gradient and dammed lake water level

图 9 中还反映出不管堰塞湖水位如何变化, ②, ③两层渗透平均或最大坡降均表现为小于各自的允许坡降上限值, 因此不会发生渗透破坏。但就①层碎石

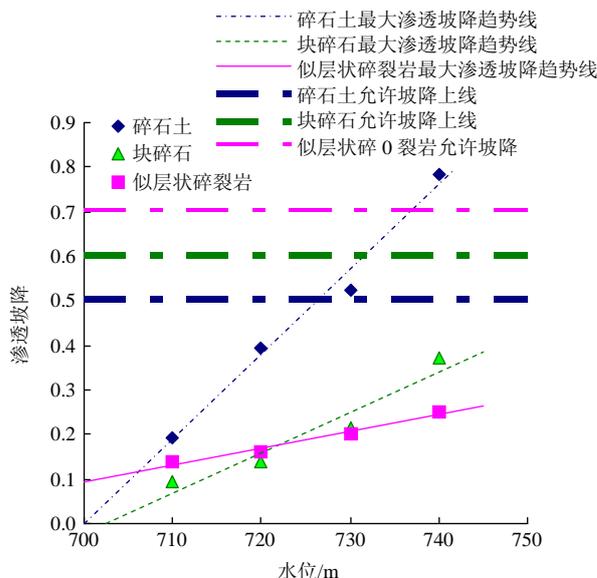
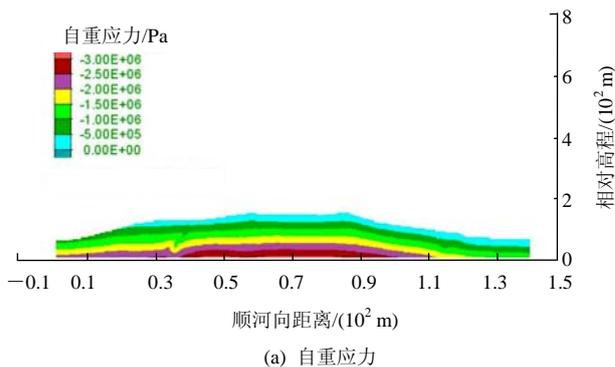


图 9 堰塞坝体各土层最大渗透坡降与允许坡降关系
Fig.9 Relationship between each soil layer maximum seepage gradient and allowable gradient

土而言, 当堰塞湖水位大于 726 m 时, 位于堰塞体下游侧部位因沿第③层形成贯通性渗流而穿越①, ②两层渗出形成的最大渗透坡降已经超过允许坡降的上限, 说明该层在水位超过 726 m 时, 下游局部地区将发生渗流破坏, 这与实际状况相符。

另外考虑到堰塞坝厚度 82~124 m 不等, 其应力场主要表现为自重应力, 为了分析自重应力对渗流场的变化, 还进行了基于 FLAC^{2D} 渗流 - 应力耦合计算(见图 10), 可见在堰塞湖 740 m 水位下自重应力场和孔隙水压力场均显示出变化稳定的特点, 自重应力变化范围在 0~3 MPa, 孔隙水压力一般在 0~1.25 MPa, 其分布均匀, 过渡平缓。只是因堰塞湖静水压力影响, 上游侧坡体表部土应力远大于下游部位应力, 孔隙水压力也表现出上游侧大于下游侧的特点。但从自重应力对坝体中孔隙水压力影响效果看, 两者变化基本同步, 因此对渗流场的变化有影响, 但影响程度不如介质本身的渗透性。



(a) 自重应力

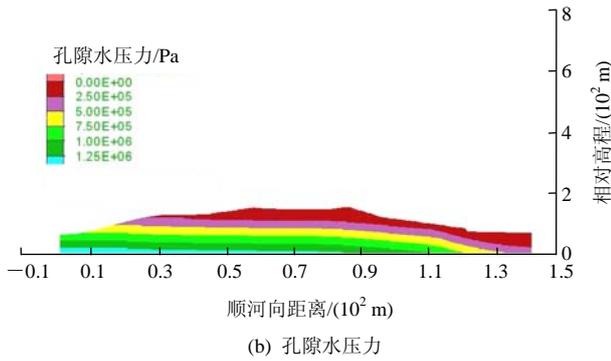


图 10 740 m 水位下堰塞坝应力分布图

Fig.10 Pressure contours of Tangjiashan barrier dam at water level of 740 m

综上所述，堰塞湖从 710~740 m 蓄水位变化条件下，除堰塞体下游侧表层碎石土因结构松散、颗粒较细而表现出局部渗透坡降超过允许坡降，可能会造成局部渗透破坏外，下部块碎石层和似层状碎裂岩不论是局部还是整体平均渗透坡降均小于允许坡降值，因此不会出现渗透破坏(管涌)，地下水对堰塞体整体溃坝影响较小。

因此从因堰塞湖导致的地下水渗流场变化分析，随着堰塞湖水位的抬升，唐家山堰塞坝坝体整体稳定，只有表层碎石土会因下游侧渗透变形而稳定性较差。整个堰塞坝体出现的溃决模式为：下游侧表层碎石土层因渗透破坏和溯源侵蚀，同时因进口段地表水流漫顶淘刷，最终导致上部第①层碎石土被侵蚀、淘刷带走。随着第①层被淘刷、水流速度加大又进而会带动第②层块碎石被逐渐冲刷下切，但不会发生整体溃决，而第③层似层状碎裂岩将保持稳定，侵蚀和淘刷的下限深度就是第③层似层状碎裂岩顶部。

6 结 论

(1) 由于唐家山滑坡下滑时间短、滑距有限，导致原始坡体结构完全解体并破碎的可能性不大，除堰塞坝体前缘及上、下游侧解体破碎强烈外，其余部位在很大程度上仍将保持原坡体地质结构特点，根据钻孔揭露，从上到下依次为①层碎石土(对应于原坡残积层)、②层块碎石(对应于原强风化基岩)和③层似层状碎裂岩(对应于原弱风化基岩)。

(2) 从 4 种蓄水位 710, 720, 730 和 740 m 下堰塞体应力 - 渗流场变化规律看，随着上游堰塞湖

蓄水位的逐渐抬升，各层渗透坡降均逐渐增大，其中又表现为①层碎石土的渗透坡降增加幅度最大，其次为②层块碎石，③层似层状碎裂岩增长幅度最小，表明颗粒越粗、渗透坡降越小、渗流场变化最稳定，颗粒越细、渗透坡降越大、渗流场变化逐渐不稳定。因此堰塞湖水位抬升对表层碎石土层的稳定性影响较大，而对其他两层影响相对较小。

(3) 由于②, ③两层颗粒粗大、渗透性好，因此总体表现出稳定流的“渗水”特点，整体坡降变化稳定，中间不会出现如低渗透黏性土的紊流状态、渗透坡降出现拐点以及“管涌”渗透特点。而①层碎石土由于沿第③层形成的贯通性渗流在下游侧穿越该层渗出形成的最大坡降会大于允许坡降，将导致堰塞体下游局部会发生零散或局部渗流破坏，且临界堰塞湖水位为 726 m。

(4) 基于 FLAC^{2D} 渗流 - 应力耦合计算结果表明，堰塞坝体自重应力对坝体孔隙水压力影响效果看，两者变化基本同步，其对渗流场的变化有影响，但影响程度不如介质本身的渗透性。

(5) 从因堰塞湖导致的地下水渗流场变化分析，整个堰塞坝体出现的溃决模式为：下游侧表层碎石土层因渗透破坏和溯源侵蚀，同时因进口段地表水流漫顶淘刷，最终导致上部第①层碎石土被侵蚀、淘刷带走。随着第①层被淘刷、水流速度加大又进而会带动第②层块碎石被逐渐冲刷下切，但不会发生整体溃决，而第③层似层状碎裂岩将保持稳定，侵蚀和淘刷的下限深度就是第③层似层状碎裂岩顶部。

参考文献(References):

[1] 胡卸文, 黄润秋, 施裕兵, 等. 唐家山滑坡堵江机制及堰塞坝溃坝模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 181 - 189.(HU Xiewen, HUANG Runqiu, SHI Yubing, et al. Analysis of dam-breaking mode of Tangjiashan barrier dam in Beichuan County[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 181 - 189.(in Chinese))

[2] 谢作涛, 陈肃利. 唐家山堰塞坝溃坝可能性及冲刷形式初步分析[J]. 人民长江, 2008, 39(22): 71 - 78.(XIE Zuotao, CHEN Suli. Dam-break possibilities and preliminary analysis of scouring form of Tangjiashan barrier dam[J]. Yangtze River, 2008, 39(22): 71 - 78.(in Chinese))

[3] 牛运光. 从我国几座土石坝渗流破坏事故中吸取的经验教训[J].

- 水利水电技术, 1992, (7): 50 - 54.(NIU Yunguang. Lessons learned from destruction of earth-rock dam seepage accident in China[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1992, (7): 50 - 54.(in Chinese))
- [4] 马贵生, 罗小杰. 唐家山滑坡形成机制与堰塞坝工程地质特征[J]. 人民长江, 2008, 39(22): 46 - 47.(MA Guisheng, LUO Xiaojie. Formation mechanism and engineering geological characteristics of Tangjiashan barrier dam[J]. Yangtze River, 2008, 39(22): 46 - 47.(in Chinese))
- [5] 郭爱清, 林绍忠, 马贵生, 等. 唐家山堰塞坝形成机制 DDA 模拟研究[J]. 人民长江, 2008, 39(22): 91 - 95.(WU Aiqing, LIN Shaozhong, MA Guisheng, et al. Formation mechanism analysis of Tangjiashan barrier dam by DDA software[J]. Yangtze River, 2008, 39(22): 91 - 95.(in Chinese))
- [6] 汪明元, 徐 晗. 唐家山堰塞坝泄流对坝坡稳定的效果分析[J]. 人民长江, 2008, 39(22): 48 - 51.(WANG Mingyuan, XU Han. Analysis of discharge effects on Tangjiashan dam slope[J]. Yangtze River, 2008, 39(22): 48 - 51.(in Chinese))
- [7] 丁 飞, 何 霖, 张奇林, 等. Visual Modflow 在平原型水库水环境数值模拟中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(2): 79 - 81.(DING Fei, HE Lin, ZHANG Qilin, et al. Application of Visual Modflow numerical simulation to water environment in a plain reservoir[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008, 19(2): 79 - 81.(in Chinese))
- [8] 胡 轶, 谢水波, 蒋 明, 等. Visual Modflow 及其在地下水模拟中的应用[J]. 南华大学学报, 2006, 20(2): 1 - 5.(HU Yi, XIE Shuibao, JIANG Ming, et al. Visual Modflow and Its application to groundwater simulation[J]. Journal of Nanhua University, 2006, 20(2): 1 - 5.(in Chinese))
- [9] 杨青春, 卢文喜, 马洪云. Visual Modflow 在吉林省西部地下水数值模拟中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(3): 67 - 69.(YANG Qingchun, LU Wenxi, MA Hongyun. Groundwater simulation in west of Jilin Province by Visual Modflow[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 32(3): 67 - 69.(in Chinese))
- [10] 武 强, 董东林, 武 钢, 等. 水资源评价的可视化专业软件(Visual Modflow)与应用潜力[J]. 水文地质工程地质, 1999, 26(5): 21 - 23.(WU Qiang, DONG Donglin, WU Gang, et al. Introduction of Visual Modflow and its application potential[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999, 26(5): 21 - 23.(in Chinese))
- [11] 涂 亮, 宋汉周. 基于 Visual Modflow 的黑河中游地下水流数值模拟[J]. 勘察科学技术, 2009, (2): 19 - 23.(TU Liang, SONG Hanzhou. Numerical simulation of groundwater flow in the middle reaches of Heihe River based on Visual Modflow[J]. Investigation Science and Technology, 2009, (2): 19 - 23.(in Chinese))
- [12] 刘永良, 潘国营. 基于 Visual Modflow 的岩溶水疏降场模拟和涌水量预测[J]. 河南理工大学学报, 2009, 28(1): 51 - 54.(LIU Yongliang, PAN Guoying. Mine inflow prediction and numerical simulation on descending flow field of karst water based on Visual Modflow[J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2009, 28(1): 51 - 54.(in Chinese))
- [13] 封丽华, 向 永, 潘孔钊. Visual Modflow 建模应用的探讨[J]. 新疆地质, 2004, 22(3): 275 - 277.(FENG Lihua, XIANG Yong, PAN Kongzhao. Discussion of Visual Modflow modelling applications[J]. Xinjiang Geology, 2004, 22(3): 275 - 277.(in Chinese))
- [14] 何 彬. Processing Modflow 软件在地下水污染防治中的应用[J]. 水资源保护, 1999, 57(3): 16 - 18.(HE Bin. Application of Processing Modflow software in the prevention and control of groundwater pollution[J]. Water Resources Protection, 1999, 57(3): 16 - 18.(in Chinese))
- [15] 朱崇辉, 王增红, 刘 俊. 粗粒土的渗透破坏坡降与颗粒级配的关系研究[J]. 中国农村水利水电, 2006, (3): 72 - 74.(ZHU Chonghui, WANG Zenghong, LIU Jun. Study on the relation between the permeation damage slope and the grain composition of coarse-grained soil[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006, (3): 72 - 74.(in Chinese))
- [16] 毛昶熙, 段祥宝, 吴良骥. 砂砾土各级颗粒的管涌临界坡降研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3 705 - 3 709.(MAO Changxi, DUAN Xiangbao, WU Liangji. Study of critical gradient of piping for various grain sizes in sandy gravels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3 705 - 3 709(in Chinese))
- [17] 张我华, 余功栓, 蔡袁强. 堤与坝管涌发生的机制及人工智能预测与评定[J]. 浙江大学学报, 2004, 38(7): 902 - 908.(ZHANG Wohua, YU Gongshuan, CAI Yuanqiang. Mechanism model and artificial intelligence method for prediction and judgment of piping occurring in embankment[J]. Journal of Zhejiang University, 2004, 38(7): 902 - 908.(in Chinese))