

泥石流柔性防护系统破坏原因分析与设计对策

刘成清¹, 许城杰¹, 陈鑫¹, 夏春兰^{1,2}, 蔡宏儒¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 四川水利职业技术学院, 四川 崇州 611230)

摘要: 泥石流柔性防护系统对于中小型泥石流有很好的防治效果,但在实际工程中很容易发生破坏。为研究泥石流柔性防护系统破坏原因,介绍了泥石流柔性防护系统的构成与优势、破坏原理、破坏形式,并针对四川省道217某段公路改建工程的泥石流柔性防护工程,分析了系统的设计、构件、基础等方面的问题,得出主要破坏原因是设计不合理,未完全按照定型化设计,基础发生破坏,构件发生破坏。同时对泥石流柔性防护工程的设计提出了一些建议,以期提高其拦截能力。

关键词: 泥石流; 柔性防护; 破坏模式; 破坏原因; 设计对策

中图分类号: TU4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)05-0006-06

Failure Cause Analysis and Countermeasures Design of Flexible Debris Flow Protection System

LIU Chengqing¹, XU Chengjie¹, CHEN Xin¹, XIA Chunlan^{1,2}, CAI Hongru¹

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

2. Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chongzhou, Sichuan 611230, China)

Abstract: Flexible debris flow protection system has good control effects for small and medium debris flow, but it is easy to be destroyed in practical engineering. In order to study the failure reasons of the flexible debris flow protection system, the structure and advantages of the flexible debris flow protection system, the failure principle and the failure form are introduced. And for the Sichuan provincial road 217 a section of the highway reconstruction project of debris flow flexible protection system, the existing problems in the design, components, foundation are analyzed. The main reason is the unreasonable design, the system is not fully in accordance with the standard design, the basis of destruction, component damage. At the same time, some suggestions are proposed to design the flexible protection engineering of debris flow in order to improve its blocking ability.

Keywords: debris flow; flexible protection; failure mode; failure cause; countermeasures design

我国是一个多山地的国家,山区面积约占国土总面积的三分之二,大部分山区地形陡峭,地表植被破坏严重,岩体松散,极易导致滑坡、泥石流等地质灾害的发生。尤其对于西南地区,由于第四纪松散沉积物发育,强降雨频繁,人类工程活动严重等因素导致泥石流成为该地区主要的地质灾害^[1-3]。国内对于泥石流灾害的防治主要采用工程措施、生物措施以及二者相结合的方式^[4-5]。工程措施中泥石流柔性防护系统(见图1)以其较好的通透性和韧性成为拦截中小型泥石流的有效措施。



图1 泥石流柔性防护系统

收稿日期:2017-05-28

修稿日期:2017-06-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278428);四川省教育厅科研项目重点项目(17ZXA0391);四川省科技厅应用基础研究项目重点项目(2017JY0035);四川水利职业技术学院院级科研项目(KY2017-12)

作者简介:刘成清(1976—),男,江西赣州人,博士,博导,主要从事工程结构抗冲击与抗震等方面的工作。E-mail:lcqjd@swjtu.edu.cn

目前,国外通过现场试验、室内模拟试验、数值模拟形成了十种定型化的泥石流柔性防护系统,为中小型泥石流的防治提供了依据^[6]。国内对于柔性防护系统的应用研究主要集中在防治山体落石等灾害上^[7-10],对落石柔性防护网的构件和整体进行了研究^[11-15],但缺乏相关的设计和施工规范。由于泥石流柔性防护系统的复杂性,在工程实践中,往往难以保证设计、施工的合理性,从而导致泥石流柔性防护系统的拦截能力大大减弱,很多泥石流柔性防护系统在泥石流作用下发生破坏^[6]。因此,总结和分析泥石流柔性防护系统破坏的原因,为泥石流柔性防护系统的设计和施工提供经验借鉴,提高其拦截能力尤为重要。

1 泥石流柔性防护系统

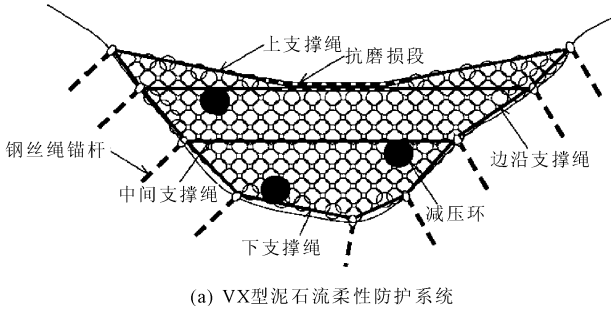
1.1 系统的构成与优势

泥石流柔性防护系统是由落石被动柔性防护网演变而来,当有泥石流作用时,柔性防护系统产生较

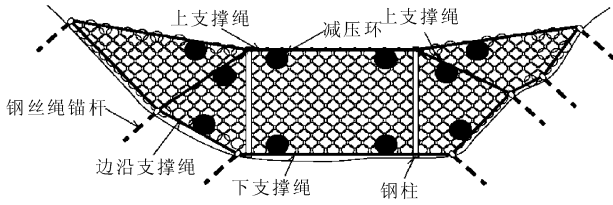
大的变形,吸收大量的冲击动能,并通过金属柔性网的空隙将水和较小的颗粒排出,较大的石块被拦截,形成一个新的防护屏障,来抵抗后续的泥石流(见图 2)。根据泥石流柔性防护系统所在的泥石流沟的宽度,可将泥石流柔性防护系统分为 VX 型(见图 3(a))和 UX 型(见图 3(b)),二者的主要区别在于结构中部是否有钢柱。其中 VX 型柔性防护网适用于宽度小于 15 m 的泥石流沟,UX 型适用于宽度在 15 m~25 m 之间的泥石流沟,并且其高度一般都小于 6 m^[6]。



图 2 泥石流被拦截形成一个新的防护屏障



(a) VX型泥石流柔性防护系统



(b) UX型泥石流柔性防护系统

图 3 泥石流柔性防护系统分类

与传统的实体重力坝、格栅坝、格宾石笼等刚度较大的泥石流拦挡工程相比,泥石流柔性防护系统优势显著。

(1) 安全性。泥石流柔性防护系统的通透性使泥石流中的细颗粒物质和水通过网片的空隙排出,降低水压力的影响。高强度、高柔性泥石流柔性防护网的拦挡面,能有效抵抗泥石流前期的冲击荷载和后期的堆积荷载,保护泥石流沟下游生命和财产的安全。

(2) 经济型。泥石流柔性防护系统自重小、构造简单、施工便捷,永久性占地少、基础埋深浅、节省投资;且各基本构件加工简便,易于工厂化批量生产;新型防腐技术的应用和构件的可替换性,大大降低了后期的运营成本。

(3) 适用性。沟谷两岸地基和连接于沟谷两岸锚杆间的支撑绳为泥石流柔性防护系统的主要支承

结构,锚杆和支撑绳的布置可根据现场条件灵活调整,使得泥石流柔性防护系统不受现场施工环境的控制,能适应不同的地形地质条件,几乎可以布置在泥石流沟的任意位置。

1.2 系统工作原理

泥石流柔性防护系统具有高抗冲击的柔性,能够充分发挥“以柔克刚”的能力,通过金属柔性网和减压环来实现系统的柔性,通过合理的计算和设计使系统具有足够的强度,以承受并扩散泥石流的冲击作用,并形成拦截屏障。通过系统的柔性,延长泥石流对系统的作用时间,削弱冲击力。减压环不断吸收和消耗冲击动能,达到拦截泥石流的目的。泥石流柔性防护系统中金属柔性网最先受到泥石流的冲击作用发生变形,由松弛状态转变为绷紧状态,接着将冲击荷载经由缝合绳传递到支撑绳上,支撑绳较强的破断力,使其成为抵抗泥石流的主要构件,随

着泥石流的不断作用,金属柔性网和支撑绳的变形不断加大,当支撑绳上的力超过减压环的启动阈值时,减压环开始启动耗能,与支撑绳相连的锚杆开始拉紧,最终由锚杆将力传递给地层。

2 泥石流柔性防护系统破坏

泥石流柔性防护系统因其设计及施工的影响,往往会发生各种各样的破坏。

2.1 系统破坏形式

(1) 结构破坏。结构构件应力超过其材料强度,或结构变形较大,不适于继续承载,导致结构破坏。如金属柔性网破坏、锚杆外露套环断裂、支撑绳断裂、锚杆钢筋拉断,钢柱支撑构件失稳、钢柱变形过大、构件腐蚀、减压环环管破裂等。

(2) 基础破坏。包括基础锚杆拔出、基础强度不足而断裂、钢柱基础侵蚀破坏,基础整体失稳,泥石流沟的下蚀与侧蚀等。

以上泥石流柔性防护系统破坏,只是从某一种形式上表现了其破坏,实际上泥石流柔性防护系统破坏往往是各个部分相互影响的结果,破坏方式呈现多样性,表现的形式也多种多样,对于泥石流柔性防护系统的破坏我们应该综合考虑。

2.2 系统破坏原因

泥石流柔性防护系统是由多种构件拼装搭配形成,其破坏原因多种多样,主要表现在:

(1) 勘察设计误差导致系统选型不合理,引起系统整体破坏。正确的地质勘查,合理的泥石流流量估计,准确的选型是系统成功拦截泥石流的关键。实际工程中,勘察过程对岩土力学性能和泥石流流量的估计不准确,导致设计缺乏足够依据,进而引起系统选型错误。

(2) 构件质量不达标导致系统破坏。构件的规格尺寸、材料特性、工艺水平等都与系统的防护能力有关。实际工程中,很多系统的构件质量都未达标,如钢丝绳质量不满足要求、连接卡扣强度不足、减压环启动效果不佳等,都降低了系统的防护能力,导致系统发生破坏。

(3) 整体与构件之间搭配不合理导致系统破坏。部分工程技术人员对于泥石流柔性防护系统的原理和特点认识不深,随意对系统进行设计配置,导致系统的防护能力降低而发生破坏。

(4) 外界环境引起破坏。泥石流柔性防护系统的原材料为钢铁类金属性材料,且多采用镀层防腐,镀层种类和厚度未达标是系统破坏的重要原因之

一。因系统构件的防腐性能较差,在降雨及泥石流的作用下,构件过早锈蚀,系统拦截泥石流的能力减低,从而在泥石流的作用下发生破坏。

3 工程实例

3.1 工程概况

省道 217 某段公路改建工程泥石流柔性防护工程,泥石流冲沟地带位于省道 217 公路一侧,泥石流形成区距公路约 0.4 km,植被稀少,主要为松散碎石角砾土。流通区松散堆积物分布广泛,长度约 0.3 km,呈宽“U”型,两侧斜坡坡度 20°~25°,且流通区接受两岸松散物质补给;泥石流沟下游的堆积区呈扇形分布,地形坡度较缓,草本植被较发育^[16]。

泥石流的重度 $\gamma_c = 1\,660\text{ kg/m}^3$,平均流速 $V_c = 2.12\text{ m/s}$,泥石流峰值流量 $Q_c = 26.87\text{ m}^3/\text{s}$,一次总流量 $Q = 57.00\text{ m}^3/\text{s}$ (考虑阻塞的东川公式^[4],50 年一遇),泥石流冲积物主要为碎石土和角砾土,表层和下部为平均粒径 2 cm~10 cm 碎石土,最大约 25 cm,表层厚约 1 m~3 m;角砾土厚度约 5.0 m~7.5 m,平均粒径 0.2 cm~2.0 cm;表层松散,下部稍密,泥石流的总储量约 100 000 m³^[16]。

根据该冲沟地带的地形地貌,拟在泥石流沟的流通区设置 8 道 VX-100 型泥石流柔性防护系统,8 道泥石流柔性防护网均采用锚杆注浆与沟谷相连。

VX-100 型泥石流柔性防护系统规格见表 1,图 4 为泥石流柔性防护系统平面布置图。

表 1 泥石流柔性防护系统规格

构件名称	环形网规格	支撑绳规格	缝合绳规格
VX-100	R9/3/300	Φ18	Φ12
备注		双绳	单绳

3.2 破坏原因

泥石流发生之后,对 8 道泥石流柔性防护系统的破坏进行分析研究,发现破坏原因主要有以下几点:

(1) 设计原因。根据定型化泥石流柔性防护系统主要结构与性能参数^[6]可知,VX-100 型泥石流柔性防护系统每根横向支撑绳上应配置两个减压环,每根边界绳上配置一个减压环,金属环形网采用 R16/3/300,支撑绳直径选用 Z22,而实际泥石流柔性防护系统设计时,每根横向支撑绳仅配置了一个减压环,边界绳上未配置减压环,并且金属环形网采用 R9/3/300,支撑绳直径选用 Z18,这样必然导致系统的承载能力下降。

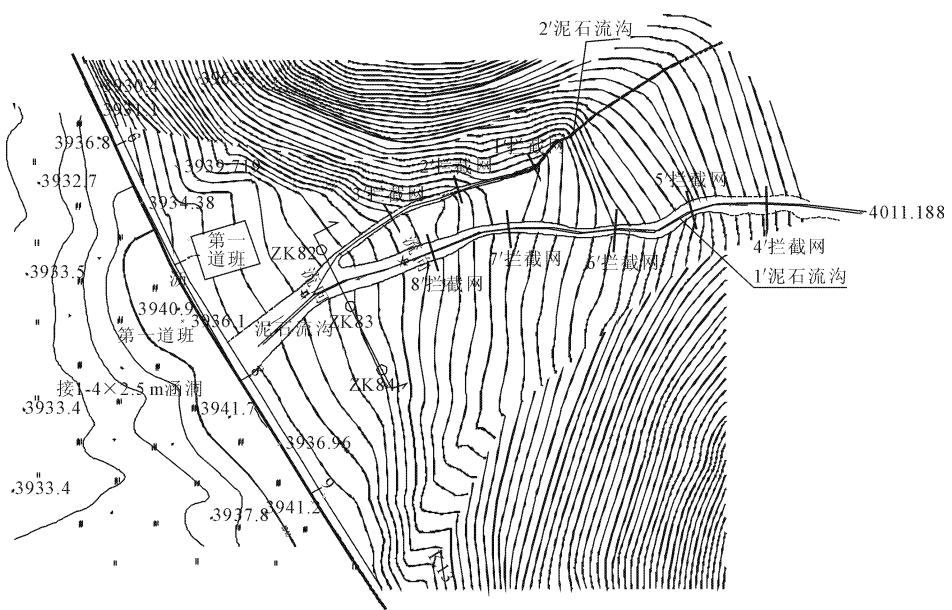


图 4 泥石流柔性防护系统平面布置图

(2) 构件原因。在调查中发现,构件的强度和质量严重影响了泥石流柔性防护系统的拦截能力。锚杆外露套环强度不足,支撑绳将荷载传递给锚杆时,锚杆外露套环发生破坏(见图 5);支撑绳强度不足,在泥石流冲击作用下被拉断(见图 6);构件的锈蚀也是系统发生破坏的原因之一,8 道泥石流柔性防护系统中很多锚杆及钢丝绳卡扣发生锈蚀(见图 7),钢丝绳卡扣的锈蚀减弱了其握裹力,使支撑绳和缝合绳发生滑移,导致支撑绳的损坏。



图 7 钢丝绳卡扣锈蚀



图 5 锚杆外露套环破坏



图 6 支撑绳断裂

(3) 基础原因。实地工程地质情况勘测不足,导致基础设计不足。如图 8 所示,由于基础设计强度的不足,在泥石流冲击作用下,基础发生破坏。钻探结果表明地表覆盖层为泥石流堆积的碎石土和角砾土,表层和下部为碎石土,表层厚约 1 m~3 m;角砾土厚度约 5.0 m~7.5 m;表层松散,下部稍密;下部为残坡积的含砾粉土,而实际工程处于高原地区,气温常年较低,雨雪频繁,在进行基础设计时未考虑冬季土体结冰情况。如图 9 所示,基础土体结冰融化,导致土体软化,土体的黏聚力和摩擦力减弱,在泥石流的作用下,锚杆被拔出。在进行柔性防护系统安装时,未考虑泥石流的下蚀和侧蚀作用。如图 10 所示,泥石流下蚀作用对沟底进行冲刷,沟底土体被泥石流挟裹而使沟床加深,由于土体的软化和泥石流的下蚀作用,导致泥石流沟谷底部土体发生流滑,与下支撑绳相连的锚杆发生破坏,泥石流从下支撑绳底部流走,使柔性防护系统整体失效。侧蚀作用使沟谷逐渐加宽,由于基础离沟岸较近,侧蚀作

用不断冲刷基础与沟岸之间的土体,降低基础的稳定性,使基础发生破坏。



图 8 基础破坏



图 9 锚杆拔出



图 10 泥石流的下蚀与侧蚀

由上可知,8道泥石流柔性防护系统基础设计不合理是其发生破坏的主要原因。对于泥石流柔性防护系统的选型和基础设计要充分考虑泥石流沟的工程地质情况,并且加强施工质量的管理与控制,严格按照规定进行构件的连接和基础的设计,保证泥石流柔性防护系统的拦截能力。

3.3 设计对策

(1) 充分调查泥石流发生区的地形地质和降雨情况,合理估计泥石流流量,在此基础上对泥石流柔性防护系统进行合理选型,对于泥石流沟谷狭窄且流经较长的泥石流,可采用梯级多道布设泥石流柔性防护系统来提高库容。

(2) 严格按照规范进行系统基础和锚杆的设计施工,保证系统不因基础的破坏而丧失拦截能力。充分考虑泥石流对沟谷的侵蚀作用,通过对沟岸及

沟底进行加固处理来防止泥石流的侵蚀作用,并且锚杆的锚固长度和注浆材料也要严格按照规范进行设计和选材,特别对于高边坡压力分散型预应力锚索施工严格进行安全质量管理^[17]。

(3) 构件的设计和配置严格按照定型化的系统进行,严格保证各构件的质量,规范施工步骤,提高施工人员对于泥石流柔性防护系统原理的认识,保证系统对于泥石流的拦截能力,提高系统各构件的防腐能力,避免出现不正当的锈蚀问题,而使系统过早出现锈蚀,降低系统的拦截能力。

(4) 做好泥石流柔性防护体系的后期维护工作,及时对损坏和锈蚀的构件进行更换,定期进行清淤处理,提高泥石流柔性防护系统的使用寿命。

4 结 论

本文对泥石流柔性防护系统的特性和工作原理进行了简要的介绍,并结合工程实例对泥石流柔性防护系统的破坏形式和破坏原因进行了分析,得出以下结论。

(1) 泥石流柔性防护网在防治中小型泥石流上与传统的圪工防护结构相比优势更明显,但我国对其整体设计方法和检验方法却相对空白,施工过程也缺乏相应规范。

(2) 从工程实例中可以看出,系统的破坏主要是基础和构件的破坏,因此,设计人员应深入现场充分考虑工程地质情况和实际泥石流规模,对泥石流柔性系统进行合理选型,严格按规范进行锚杆灌浆的设计,施工人员应严格按照设计进行施工,并充分了解主要设计意图和设计中的关键环节,严格控制构件的配置和质量。

(3) 后期运营决定了泥石流柔性防护系统的使用寿命,及时进行清淤和损坏构件的替换工作。

参考文献:

- [1] 李文杰,冯文凯,魏昌利,等.地形对泸定县兴隆镇群发性滑坡型泥石流的影响分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(1):149-154.
- [2] 周伟,吴翼.茨里沟泥石流灾害评价[J].水利与建筑工程学报,2014,12(6):154-159.
- [3] 解伟,何斌.青海玉树果波隆沟泥石流动力学特征及危险性评价[J].青海大学学报,2017,35(1):38-44.
- [4] 蒋忠信.震后泥石流治理工程设计简明指南[M].成都:西南交通大学出版社,2014:23,71-161.
- [5] 蒋忠信.震后山地地质灾害治理工程设计概要[M].成都:西南交通大学出版社,2015:100-222.

- [6] 阳友奎,原振华,杨 涛.柔性防护系统及其工程设计与应用[M].北京:科学出版社,2015:242-246.
- [7] Liu Chengqing, Wei Xiaodan, Lu Zheng, et al. Studies on passive flexible protection in resisting landslides in May 12th 2008 Wenchuan earthquake[J]. Structural Design Tall and Special Building, 2017, DOI 10.1002/tal.1372.
- [8] 刘成清,陈林雅,陈 驰,等.柔性钢棚洞结构在落石灾害防治中的应用研究[J].西南交通大学学报,2015,50(1):110-117.
- [9] 刘成清,倪向勇,杨万理,等.基于能量法的被动柔性棚洞防护结构设计理论[J].工程力学,2016,33(11):95-104.
- [10] 刘成清,陈林雅.被动柔性防护网在边坡防护中的工程应用与研究[J].公路,2015(6):44-50.
- [11] 刘成清,陈林雅,陈 驰,等.落石冲击作用下被动柔性防护网整体结构试验[J].中国地质灾害与防治学报,2014,25(4):37-44.
- [12] 田 帅,陈 驰,等.减压环在被动柔性防护网中的耗能作用研究[J].铁道标准设计,2016,60(9):36-41.
- [13] 刘成清,邓永祥,韦小丹.基于能量原理的被动柔性防护网中减压环预紧力计算方法[C]//第25届全国结构工程学术会议论文集(第I册).内蒙古包头,2016.北京:中国力学学会工程力学编辑部,2016:259-264.
- [14] 刘成清,陈林雅,陈 驰,等.被动柔性防护网中减压环力学试验及有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(6):1245-1254.
- [15] 刘成清,陈林雅,齐 欣.落石冲击作用下不同连接方式被动防护网的受力分析[J].中国铁道科学,2016,37(2):17-25.
- [16] 夏春兰.被动柔性防护网在泥石流灾害治理中的应用研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [17] 王灼英,刘成清,李俊君.高边坡压力分散型预应力锚索施工技术与安全质量管理[J].防灾减灾工程学报,2013,33(S1):63-67.

(上接第5页)

(3) 现场张力计试验测得的土-水特征曲线(SWCC)与室内张力计试验方法的结果存在差距,土-水特征曲线与土体上覆应力有关,上覆应力越大,曲线越陡。现场土-水特征曲线可用线性函数较好地拟合,在现场条件有限时可考虑用线性函数进行土-水曲线预测与取值。

参考文献:

- [1] Oh S, Lu N, Yun K K, et al. Relationship between the soil-water characteristic curve and the suction stress characteristic curve: experimental evidence from residual soils[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(1):47-57.
- [2] 董 倩,侯 龙,赵宝云.基质吸力对非饱和粉质砂土抗剪强度的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(10):4017-4021.
- [3] 梅 岭,姜朋明,李 鹏,等.非饱和土的土水特征曲线试验研究[J].岩土工程学报,2013,35(S1):124-128.
- [4] 倪晓雯,李春良.土水特征曲线在边坡稳定分析中的应用[J].建筑技术,2015(S2):154-159.
- [5] 谷 琪,王家鼎,全云莉,等.滤纸法测非饱和黄土土水特征曲线试验及拟合研究[J].土壤通报,2016,47(3):588-593.
- [6] 陈高峰,杨帅东,苏 涛,等.基于非饱和土固结仪的土水特征曲线试验研究[J].人民珠江,2016,37(11):51-54.
- [7] 贺建清,罗 婉,蒋 鑫,等.非饱和高液限红粘土土-水特征试验研究[J].自然灾害学报,2014,23(6):249-255.
- [8] 秦鸿飞.非饱和膨胀土土水特征曲线试验研究[J].河南水利与南水北调,2013(18):81-82.
- [9] 孙德安,高 游,刘文捷,等.红粘土的土水特性及其孔隙分布[J].岩土工程学报,2015,37(2):351-356.
- [10] 孙志杰.降雨对非饱和土质边坡含水率的影响分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(6):75-78.
- [11] 褚进晶,田 飞,闻 玮.扬州地区黏性土土水特征曲线试验研究及应用[J].水利与建筑工程学报,2015,13(2):73-77.
- [12] 宋亚亚,卢廷浩,季李通.应力作用下非饱和重塑黏土土水特征曲线研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(2):147-150.
- [13] 方庆军,崔 猛.干湿循环作用下高液限土抗剪性能试验研究[J].施工技术,2015(1):84-88.
- [14] 陈正汉.非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J].岩土工程学报,2014,36(2):201-272.
- [15] 李 哲,司高华,刘东旭.黏土土水特征曲线的实验研究及理论分析[J].环境科学与技术,2013,36(S2):109-112.
- [16] 白福青,刘斯宏,袁 骄.滤纸总吸力吸湿曲线的率定试验[J].岩土力学,2011,32(8):2336-2340.