

文章编号:1006-2106(2013)08-0052-05

## 既有挡护结构排水失效的室内模型试验研究\*

魏永幸<sup>1\*\*</sup> 左德元<sup>2</sup> 谢 涛<sup>2</sup>

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

**摘要:**研究目的:既有挡护工程排水失效是常见病害。为研究既有挡护结构土压力与孔隙水压力的相互关系,揭示排水失效对既有挡护结构造成损害的作用机理,本文通过大型室内模型试验,开展两种不同粒径土样(砂性土样与黏性土样)在三种排水条件下的土压力及孔隙水压力的变化规律研究,对排水前后土压力与孔隙水压力值进行对比分析。

**研究结论:**(1)在水的作用下,如果不及时排除挡护结构后的土中水,土压力将急速增长,试验中最大增幅可达145%,墙背排水系统失效将导致挡护结构受力显著增加,挡护结构潜在被推移或推倒的可能。(2)墙背排水系统正常工作情况下,挡护结构墙背土体孔隙水压力会快速消散,但墙背排水系统部分失效将使墙背土体孔隙水压力消散时间明显延长。(3)工程应用中必须高度重视挡护结构的防排水设计。(4)该研究结果,可用于指导挡护工程设计以及既有挡护结构排水失效的处理。

**关键词:**模型试验;排水失效;土压力;孔隙水压力;既有挡护结构

**中图分类号:**U213.1 **文献标识码:**A

## Laboratory Model Test on Drainage – failure of Existing Retaining Structures

WEI Yong – xing<sup>1</sup>, ZUO De – yuan<sup>2</sup>, XIE Tao<sup>2</sup>

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract: Research purposes:** The drainage – failure of the existing retaining structures is a common disease. In order to uncover the relationship between earth pressure and pore water pressure, and to reveal the damage mechanism of existing retaining structures caused by drainage system's failure, a series of model experiments were done in the laboratory to research on the variation of earth pressure and pore water pressure under three kinds of drainage condition with two different diameters soil samples (sand and clay), the value of earth pressure and pore water pressure before and after the water draining was also analyzed to identify this kind of change.

**Research conclusions:** (1) The test result shows that the earth pressure moved up sharply when soil was submerged in water, if the water in soil is not drained in time, and the maximum value of earth pressure could increase up to 145% compared with the original value in the test. The failure of the wall drainage system will increase the stress of retaining structure significantly, and may result in the moving out or overturning of the structures. (2) Under the normal circumstances, the pore water pressure will dissipates rapidly. However, if the drainage system fails to work, the water discharge time will cast longer. (3) Therefore, the existing retaining structures should pay attention to drainage – failure in engineering application. (4) The research results may be a guidance for designs and managements of

\* 收稿日期:2012-11-10

\*\* 作者简介:魏永幸,1964年出生,男,教授级高级工程师,注册土木(岩土)工程师。

retaining structures.

**Key words:** model test; drainage – failure; earth pressure; pore water pressure; existing retaining structures

挡护结构(如重力式挡土墙、桩板墙、锚杆挡土墙、浆砌片石护坡等)广泛应用于铁路和公路路基工程、减灾防灾工程、边坡防护工程中<sup>[1-4]</sup>。在铁路、公路建设中涉及大量的挡护结构,挡护结构的工作应力及其变化直接影响加固工程的安全<sup>[5]</sup>,既有挡护工程排水失效是常见病害<sup>[6-8]</sup>。笔者通过对国内部分铁路局范围铁路既有挡护工程现状的调研、考察发现,铁路既有挡护工程因排水失效而引起挡护结构破坏、边坡失稳的案例也占比较高<sup>[9-10]</sup>。因此研究既有挡护工程排水失效的影响具有重大的现实意义。

本文通过大型室内模型试验,开展不同工况下既有挡护结构土压力及孔隙水压力的变化规律研究,以得到挡墙土压力在水作用下的变化关系,分析既有挡护结构墙背土压力随着水的介入产生的变化,其目的是使设计与施工人员提高风险意识,加强对水损害的控制与管理。

1 试验材料与方法

1.1 试验土样

本次试验根据常见铁路既有挡护工程地质环境,选用两种不同粒径的代表性土样(砂性土和黏性土)作为研究对象。首先对两类试样土进行颗粒分析,其中对砂土采用筛析法试验,对黏土采用密度计法试验,绘制级配曲线如图 1、图 2 所示,经计算,砂土的不均匀系数为 9.36,曲率系数为 1.91,黏土的不均匀系数为 9.79,曲率系数为 1.7,两类土均为良好级配。

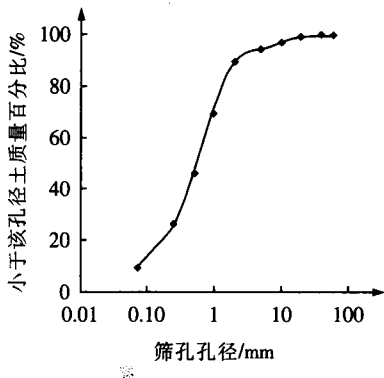


图 1 砂性土颗粒级配曲线

对两类土进行室内土工试验,测得其自身的土工参数,如表 1、表 2 所示。

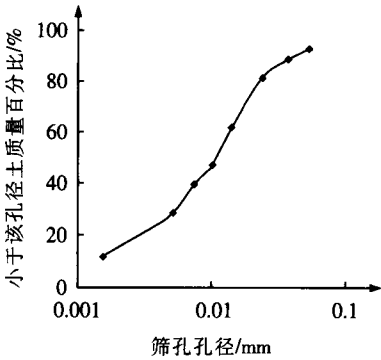


图 2 黏性土颗粒级配曲线

表 1 试验用砂土物理性质

模型填土参数	数值
天然密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.81
饱和密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.03
天然含水率/%	6.45
土粒比重	2.6
压实密度	0.9
天然砂土黏聚力/kPa	3.93
天然砂土内摩擦角/(°)	37.9
饱和砂土黏聚力/kPa	1.57
饱和砂土内摩擦角/(°)	35.5

表 2 试验用黏土物理性质

模型填土参数	数值
天然密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.95
饱和密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.01
天然含水率/%	17.07
土粒比重	2.7
压实密度	0.9
天然黏土黏聚力/kPa	28.26
天然黏土内摩擦角/(°)	28.7
饱和黏土黏聚力/kPa	6.44
饱和黏土内摩擦角/(°)	12.6

对比表 1、表 2 中天然土体及饱和土体的物理力学指标可以发现,在水的介入后,土体密度增大,黏聚力及内摩擦角减小,由此可以定性的判别出两类土体的力学指标均朝着对工程不利的方向发展。

1.2 大型室内模型试验装置

挡护结构由刚性(槽型钢)模型箱模拟,测出结果近似为静止土压力状态结果。模型箱内部大小为长 250 cm×宽 250 cm×高 150 cm。模型如图 3 所示。土压力盒 1-1,1-2,1-3,1-4 分别定位于右侧箱壁

中部铅垂方向 30 cm、60 cm、90 cm、120 cm 处,左侧下部设置可控制泄水孔,并在距离顶部 1.1 m 处设置孔隙水压力计监测水压力变化。

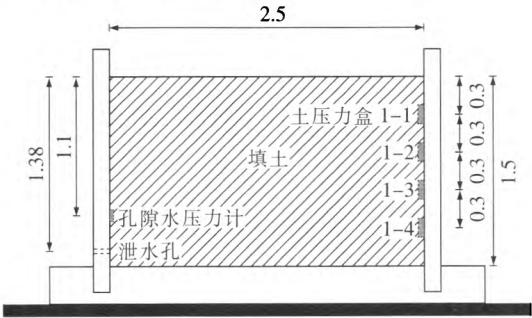


图 3 试验装置示意图(单位:m)

1.3 试验方法

模型四周铺设 PVC 薄膜,将试样土分别置入模型箱中,并采用电动振动夯锤分层夯实土体,每层夯实厚度控制在 20 cm 左右。填土完成后,测试压实度、含水率、初始土压力等指标。模型顶面铺设 PVC 薄膜,防止土体水分蒸发。模型搁置两天,让试验土体基本稳定后读取天然状态下的土压力值,然后再从箱顶均匀灌水,分别测试浸水状态下排水通畅、部分排水、不排水情况下的各土层的土压力与孔隙水压力。

既有挡土墙墙背土体排水条件对作用在挡土墙墙背土压力的影响,主要是通过三种不同排水工况的模拟试验来体现。分为完全不排水(排水阀门全部关闭)、畅通排水(排水阀门全部开启)和部分排水(排水阀门部分关闭,部分开启)。详细试验条件如表 3 所示。

表 3 试验条件

工况	土样	灌水条件(日期:月/日)
完全不排水	砂土	12/1 ~ 12/4 灌水 12/4 ~ 12/10 停止灌水,完全不排水
	黏土	12/1 ~ 12/6 灌水 12/6 ~ 12/11 停止灌水,完全不排水
畅通排水	砂土	12/16 停止灌水 12/16 ~ 12/20 观察直至土压力稳定 12/20 ~ 12/26 土压力稳定后畅通排水
	黏土	12/16 停止灌水 12/16 ~ 12/20 观察直至土压力稳定 12/20 ~ 12/26 土压力稳定后畅通排水
部分排水	砂土	3/12 停止灌水 3/12 ~ 3/15 观察直至土压力稳定 3/15 ~ 3/22 土压力稳定后部分排水
	黏土	3/12 停止灌水 3/12 ~ 3/16 观察直至土压力稳定 3/16 ~ 3/22 土压力稳定后部分排水

2 试验结果与分析

本试验共监测获得了完全不排水、排水通畅、部分排水三个工况下的土压力结果,叙述如下。

2.1 完全不排水工况

在完全不排水工况下,砂土及黏土模型箱内不同测点的土压力变化规律分别如图 4、图 5 所示。

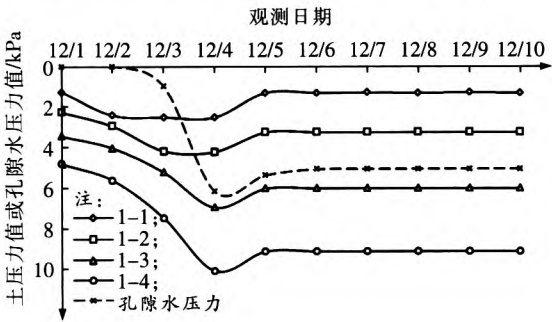


图 4 砂性土不排水测得压力随时间变化关系曲线

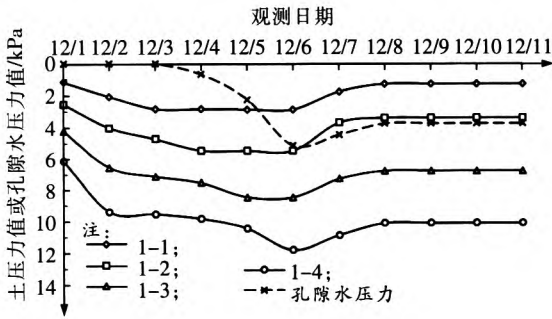


图 5 黏性土不排水测得压力随时间变化关系曲线

由图 4、图 5 不难看出:(1)12 月 1 日开始灌水,在砂性填土中,孔隙水压力读数于 12 月 2 日开始出现变化,在黏性填土中,孔隙水压力读数于 12 月 3 日开始出现变化。可认为在不同类型填土中,土的渗透系数不一,导致水在流向同一位置(孔隙水压力计所在位置)时所消耗的时间也有所不同。(2)灌水至停止灌水期间,随着灌水量的增加,水不断下渗,箱侧各点的土压力不断增大。在土体吸水饱和这一时间段内,土压力增大最为明显,这是因为在这一时间段内,土体吸水饱和,重度、内摩擦角变化最大。饱和段上部土体浸水过后,处于不完全饱和状态,较自然状态,其重度增大,内摩擦角减小,抗剪强度降低,土压力比自然状态下大。饱和段下部土体,土压力增大。在停止灌水时,各点土压力和孔隙水压力达到最大值。(3)在停止灌水后,土体中自由水慢慢填满土的孔隙,水位线降低,各点的土压力和孔隙水压力减小,最后趋于稳定。(4)将两类土灌水前及停止灌水时的土压力读数取出

做分析,如表 4 所示,砂土各深度层的土压力几乎呈现翻倍增长现象,而在黏土中,顶层土压力增长较大,达 145%,而在以下三层数据显示增长幅度呈递减趋势,

分析认为这种现象与黏土的自身性质有关,黏土相对于砂土来说具有更好的保水性,在灌水短时间内,水量在黏土上部积聚,造成上部土压力增长明显的现象。

表 4 灌水前及停止灌水时土压力的变化分析

土类	砂土(12/1~12/4)				黏土(12/1~12/6)			
土压力盒	1-1	1-2	1-3	1-4	1-1	1-2	1-3	1-4
灌水前/kPa	1.28	2.29	3.46	4.81	1.17	2.52	4.21	6.13
停止灌水/kPa	2.54	4.22	6.96	10.1	2.87	5.48	8.48	11.81
变化幅度	98%	84%	101%	110%	145%	117%	101%	93%

2.2 排水畅通工况

在排水畅通工况下,砂土及黏土模型箱内不同测点的土压力变化规律分别如图 6、图 7 所示。

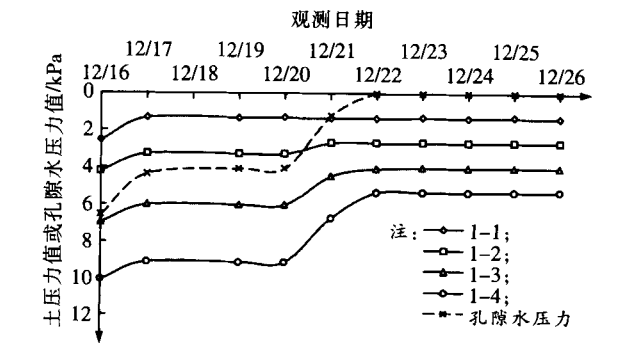


图 6 砂性土排水畅通测得压力随时间变化关系曲线

由图 6、图 7 可得出:(1)12 月 16 日停止灌水后,孔隙水压力有所下降,分析认为是刚停止灌水后,土中水逐步扩散,导致孔隙水压有所变化。此后孔隙水压达到平衡,维持恒定,此时从土压力盒所测读数来看,

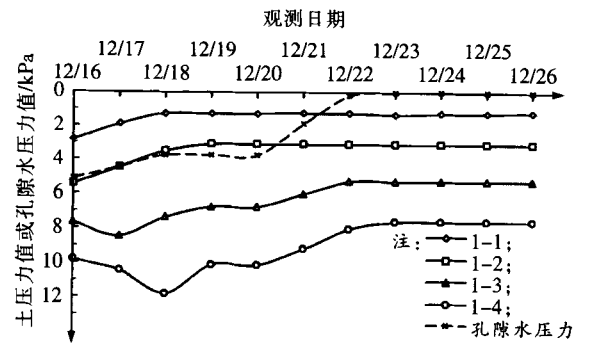


图 7 黏性土排水畅通测得压力随时间变化关系曲线

土压力也基本稳定。(2)排水过程开始后,随着土中自由水的不断排出,土压力逐渐减小,且这种减小趋势随深度的增加而越加明显。(3)随着模型箱内土体水位线的降低,孔隙水压力逐渐减小,水全部排出后,孔隙水压力减小为零。(4)将两类土排水前后的土压力读数取出做分析,如表 5 所示,由表可见,较好的排水措施对控制土压力能起到良好的成效。

表 5 畅通排水前后土压力的变化分析

土类	砂土(12/16-12/26)				黏土(12/16-12/26)			
土压力盒	1-1	1-2	1-3	1-4	1-1	1-2	1-3	1-4
排水前/kPa	2.54	4.22	6.96	10.1	2.84	5.46	7.7	9.83
排水后/kPa	1.32	2.64	4	5.29	1.22	3.11	5.28	7.61
变化幅度	-48%	-37%	-43%	-48%	-57%	-43%	-31%	-23%

2.3 部分排水工况

在部分排水工况下,砂土及黏土模型箱内不同测点的土压力变化规律分别如图 8、图 9 所示。

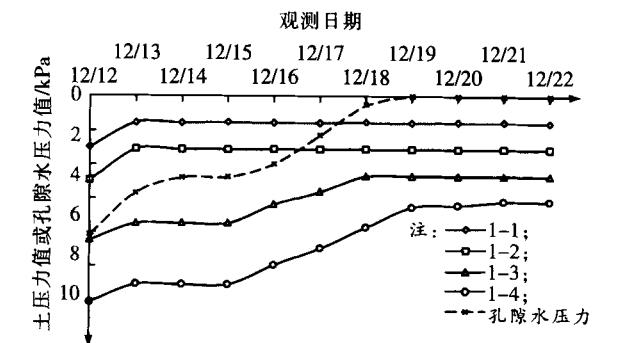


图 8 砂性土部分排水测得压力随时间变化关系曲线

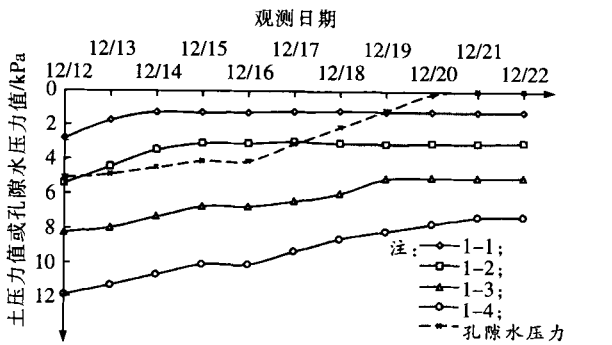


图 9 黏性土部分排水测得压力随时间变化关系曲线

由图 8、图 9 可得出以下结论:(1)在排水过程中,位于顶层的 1-1 及 1-2 号土压力盒数值变化不如底

层的 1-3 及 1-4 号明显。分析认为,在灌水后、排水前这一过程中,水位线已稳定于 1-2 号土压力盒位置以下,此时 1-1 及 1-2 位置的土压力也已经达到稳定,所以排水过程中,这两个位置土压力变化不大。此外,排水孔位于模型箱底部,底部土层土压力出现敏感变化也是合理的。(2)由于自由水的排出,土层中土

压力均呈减小趋势。(3)将两类土排水前后的土压力读数取出做分析,如表 6 所示,由表可见,在部分排水条件下,当土中孔隙水压力完全排出,墙后土压力值降低明显。与畅通排水明显不同的是,部分排水所花的排水时间约为畅通排水的一倍。

表 6 部分排水前后土压力的变化分析

土类	砂土(3/12-3/22)				黏土(3/12-3/22)			
土压力盒	1-1	1-2	1-3	1-4	1-1	1-2	1-3	1-4
排水前/kPa	2.54	4.22	7.26	10.4	2.84	5.46	8.3	11.96
排水后/kPa	1.32	2.64	4	5.29	1.28	3.06	5.1	7.37
变化幅度	-48%	-37%	-45%	-49%	-55%	-44%	-39%	-38%

综合上述试验结果,可以进一步得到以下认识:  
(1)三种排水工况(完全不排水、畅通排水、部分排水)下的试验结果表明,墙背土体含水状况对挡护结构侧向土压力影响较大。其中,在完全不排水情况下,水下土压力急速增长,最大增幅可达 145%;在畅通排水及部分排水情况下,土压力值随着孔隙水压力的消散而降低,在墙后土体自由水全部排出,孔隙水压力消减为零时,土压力值较最大值消减近半。

(2)在畅通排水工况下,砂土孔隙水压力消散的时间约为 2 天(12/20~12/22),黏土孔隙水压力消散时间约为 2 天(12/20~12/22),而在部分排水条件中,砂土孔隙水压力消散的时间约为 3 天(3/15~3/18),黏土孔隙水压力消散时间将延长,约为 4 天(3/16~3/20)。

3 结论

本文通过室内土工试验与大型室内模型试验,研究了既有挡护结构墙背土体三种工况(完全不排水、畅通排水、部分排水),两类土样(砂土及黏土)条件下土压力与孔隙水压力的变化规律。基于试验结果及分析,可得到以下结论。

(1)挡护结构墙背排水系统失效将导致在降雨条件下作用于挡护结构墙背的土压力在短时间激增,试验条件下最大增幅达 145%。试验表明,墙背排水系统失效将导致挡护结构在不利工况下受力显著增加,潜在被推移或推倒的可能。

(2)墙背排水系统正常工作情况下,挡护结构墙背土体孔隙水压力会快速消散,试验条件下砂性土与黏性土孔隙水压力消散相差不大,时间约为 2 d。墙背排水系统部分失效,挡护结构墙背土体孔隙水压力消散时间将增加,试验条件下砂性土孔隙水压力消散时间约为 3 d,黏性土孔隙水压力消散时间延迟至 4 d。因此,对于墙背排水系统,应定期检查、维修,保证排水

通畅,避免由于排水不畅造成挡护结构失稳与破坏。

参考文献:

[1] 叶武,沈辉斌,魏晓彦. 锚杆挡土墙在边坡工程中的应用[J]. 今日科苑, 2008(10):184-185.  
Ye Wu, Shen Huibin, Wei Xiaoyan. Application of Anchored Retaining Wall on the Slope Engineering[J]. Modern Science, 2008(10):184-185.  
[2] 刘德. 抗滑桩在边坡工程中的应用[J]. 科技创新与应用, 2012(10):196-197.  
Liu De. Application of Anti-slide on the Slope Engineering[J]. Pile Technology Innovation and Application, 2012(10):196-197.  
[3] 于洪刚. 预应力锚索、锚杆和重力式挡土墙联合支护在边坡工程的应用[J]. 中国房地产业, 2011(3):35-39.  
Yu Honggang. Application Combining with Prestressed Cable, Anchor Stock and Gravity Retaining Wall on the Slope Engineering[J]. Real Estate Information of China, 2011(03):35-39.  
[4] 黄晓华. 公路边坡病害治理的轻型支挡结构[J]. 重庆交通学院学报, 1999(3):90-94.  
Huang Xiaohua. The Light Retaining Structures for Controlling Damaged Highway Slope[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1999(3):90-94.  
[5] 丁乾鼎. 重力式路堤挡墙损坏原因的探讨[J]. 路基工程, 1990(4):52-56.  
Ding Qianding. An Discussion on Reasons for Damages to Gravity Embankment Retaining wall[J]. Subgrade Engineering, 1990(4):52-56.  
[6] 孔德胜. 黄土地区公路路基防护与支挡工程病害防治[J]. 硅谷, 2009(19):119-120.  
Kong Desheng. Diseases Control of Roadbed and Retaining Engineering in Loess Area[J]. Silicon Valley, 2009(19):119-120.

(下转第 67 页)

专家组评审意见一致,充分论证了基于线型加权和法多目标决策模型的铁路主要技术标准选择的技术路线科学合理性。

参考文献:

[1] 薛红波. 铁路选线设计主要技术标准的选择[J]. 铁道建筑技术,2010(9):15-16.  
Xue Hongbo. Selection of Main Technical Standard for Railway Location Design [ J ]. Beijing: Railway Construction Technology,2010(9):15-16.

[2] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 几内亚西芒杜矿山铁路投标文件[R]. 武汉:中铁第四勘察设计院集团有限公司,2012.  
China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd. Tender for Guinea Simandou Rail [ R ]. Wuhan: China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd, 2012.

[3] 易思蓉. 铁路选线设计[M]. 成都:西南交通大学出版社,2009.  
Yi Sirong. Railway Location Design [ M ]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2009.

[4] 铁道第一勘察设计院主编. 线路[M]. 北京:中国铁道出版社,1984.  
Institute of China Railway Siyuan Survey and Design Group Line [ M ]. Beijing: China Railway Publishing House,1984.

[5] 李远富,薛波,邓域才. 铁路选线设计方案多目标决策模糊优选模型及其应用研究[J]. 西南交通大学学报,2000(5):465-470.  
Li Yuanfu, Xue Bo, Deng Yucai. A Fuzzy Optimal

Selection Model and Its Application in Multi - Objective Decision Making of Variant Projects in Railway Location[ J ]. Chengdu: Journal of Southwest Jiaotong University,2000(5):465-470.

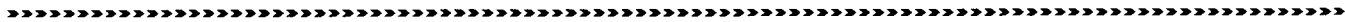
[6] 吴小萍,吴健,孙瑞义,等. 铁路线路方案多目标决策系统及其应用研究[J]. 中国铁路,2001(5):24-26.  
Wu Xiaoping, Wu Jian, Sun Ruiyi, etc. Study and Application on Multi - objective Decision Making System of Railway Line[ J ]. China Railway,2001(5):24-26.

[7] 周华国,虞卓,曾学贵. 多目标系统模糊优选模型在铁路选线方案环境决策中的应用[J]. 铁道学报,1998(4):98-105.  
Zhou Huaguo, Yu Zhuo, Zeng Xuegui. Application of Multiobjective Fuzzy Optimal Selection Model to Environmental Decision Making of Railway Route Selection [ J ]. Beijing: Journal of the China Railway Society,1998(4):98-105.

[8] 王玉泽. 铁路线路设计回顾与思考[J]. 铁道工程学报,2007(1):27-31.  
Wang Yuze. Review and Thoughts on Alignment Design of Railway Line [ J ]. Beijing: Journal of Railway Engineering Society, 2007(1):27-31.

[9] 韩元利. 基于 GIS 的数字铁路选线在工程设计中的应用[J]. 铁道工程学报,2010(8):29-33.  
Han Yuanli. Application of Digital Railway Line Based on GIS in Engineering Design [ J ]. Beijing: Journal of Railway Engineering Society, 2010(8):29-33.

(编辑 梅志山)



(上接第 56 页)

[7] 马保成. 沿河公路路基水毁灾害评价及防治措施研究[D]. 西安:长安大学,2008.  
Ma Baocheng. Study of Hazard Assessment and Prevention Measures for Highway Subgrade Washout by Flood Along Rivers [ D ]. Xi'an :Chang'an University, 2008.

[8] 程尊兰,张正波,耿学勇. 川藏公路东久河下游段路基水毁防护工程对策[J]. 四川大学学报(工程科学版),2005(3):5-9.  
Cheng Zunlan, Zhang Zhengbo, Geng Xueyong. Engineering Strategy for Prevention of Water - destruction of Road Base in Gorgy Areas of Tibet [ J ]. Journal of Sichuan University ( Engineering Science Edition ),2005(3):5-9.

[9] 中铁二院工程集团有限责任公司. 铁路既有挡护结构

病害及加固现状调研报告[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2011.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd. Investigation Report about the Diseases and Reinforcement Situation of Existing Retaining Structure in Railway [ R ]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, 2011.


[10] 张宁波. 铁路既有线路堑地段重力式挡土墙安全评估与加固技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.  
Zhang Ningbo. The Security Assessment and Reinforcement Technology Research of Gravity Retaining Wall of the Existing Railway Cutting Lots [ D ]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2012.

(编辑 赵立兰)

# 既有挡护结构排水失效的室内模型试验研究

作者：[魏永幸](#), [左德元](#), [谢涛](#), [WEI Yong-xing](#), [ZUO De-yuan](#), [XIE Tao](#)

作者单位：[魏永幸, WEI Yong-xing \(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都, 610031\)](#), [左德元, 谢涛, ZUO De-yuan, XIE Tao \(西南交通大学, 成都, 610031\)](#)

刊名：[铁道工程学报](#) 

英文刊名：[Journal of Railway Engineering Society](#)

年, 卷(期)：2013(8)

## 参考文献(10条)

1. [叶武;沈辉斌;魏晓彦](#) [锚杆挡土墙在边坡工程中的应用](#) 2008(10)

2. [刘德](#) [抗滑桩在边坡工程中的应用\[期刊论文\]-科技创新与应用](#) 2012(10)

3. [于洪刚](#) [预应力锚索、锚杆和重力式挡土墙联合支护在边坡工程的应用\[期刊论文\]-中国房地产业](#) 2011(03)

4. [黄晓华](#) [公路边坡病害治理的轻型支挡结构\[期刊论文\]- \(H\) 重庆交通学院学报](#) 1999(03)

5. [丁乾鼎](#) [重力式路堤挡墙损坏原因的探讨](#) 1990(04)

6. [孔德胜](#) [黄土地区公路路基防护与支挡工程病害防治\[期刊论文\]- \(H\) 硅谷](#) 2009(19)

7. [马保成](#) [沿河公路路基水毁灾害评价及防治措施研究\[学位论文\]](#) 2008

8. [程尊兰;张正波;耿学勇](#) [川藏公路东久河下游段路基水毁防护工程对策\[期刊论文\]- \(H\) 四川大学学报 \(工程科学版\)](#) 2005(03)

9. [中铁二院工程集团有限责任公司](#) [铁路既有线挡护结构病害及加固现状调研报告](#) 2011

10. [张宁波](#) [铁路既有线路堑地段重力式挡土墙安全评估与加固技术研究](#) 2012

引用本文格式：[魏永幸](#). [左德元](#). [谢涛](#). [WEI Yong-xing](#). [ZUO De-yuan](#). [XIE Tao](#) [既有挡护结构排水失效的室内模型试验研究\[期刊论文\]-铁道工程学报](#) 2013(8)