

doi:10.3799/dqkx.2013.066

冲积层中劈裂注浆现场模型试验

程盼¹, 邹金锋¹, 李亮¹, 罗伟¹, 赵炼恒¹, 赵娟²

1. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075

2. 云南铜业三木矿业有限责任公司, 云南昆明 650041

摘要: 河流堤坝多位于深厚冲积层上, 而冲积层含砂石量大等特点对堤坝防渗、稳定性是不利的, 对堤坝进行注浆加固是必要的, 而研究浆液在冲积层中的分布扩散规律是首要任务。基于传统注浆理论, 通过现场注浆模型试验, 得出浆液在冲积层中的分布扩散规律、浆液劈裂机理、土的加固特性以及注浆加固过程中应注意的问题。指出浆液在冲积层中一般先沿土石分界面进行充填、劈裂, 并以水平向劈裂为主。在注浆过程中宜采用多次重复注浆方式以达到提高加固效果的目的。对冲积层中堤坝注浆加固有一定的参考与指导作用。

关键词: 冲积层; 模型试验; 劈裂注浆; 扩散分布规律; 加固效果; 工程地质。

中图分类号: TU472.6

文章编号: 1000-2383(2013)03-0649-06

收稿日期: 2012-07-19

Experiment of Fracture Grouting in Alluvium with Physical Model

CHENG Pan¹, ZOU Jin-feng¹, LI Liang¹, LUO Wei¹, ZHAO Lian-heng¹, ZHAO Juan²

1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China

2. Yunnan Copper Group Sanmu Mining Industry Co., Ltd., Kunming 650041, China

Abstract: Dams are mainly located at the deep alluvium, where large amount of sand and gravel is adverse to prevention of seepage and maintenance of stability of the dams. Therefore it is necessary to reinforce the dams by grouting, and the primary task is to do research on the laws of diffusion and distribution of the slurry in the alluvial layer. The present study is based on the traditional theory of grouting and the laws of diffusion and distribution of the slurry, the slurry splitting mechanism, the characteristics of soil reinforcement are obtained. In addition, it is found by on-site grouting model tests that the slurry is generally filling and splitting along the interface between the earth and rock, and mainly splitting in the horizontal direction in grouting reinforcement process. To improve the reinforcement effect, the repeated injection should be adopted in grouting process. The study results will facilitate future dam grouting reinforcement projects in alluvial layer.

Key words: alluvium; model test; fracture grouting; regulation of diffusion and distribution; effect of reinforcement; engineering geology.

冲积层是在河谷内由流水裹挟岩屑沉积而形成的堆积物, 其特点是含有大量砂、砾石等, 且具有良好的磨圆度和分选性(陈希哲, 2004; 蒋恕等, 2008; 陈洪江, 2010)。中国幅员辽阔, 江河湖泊众多, 往往形成深厚的冲积层, 而堤防建设通常也位于冲积层上。冲积层含砂石量大, 而砂石与土之间的薄弱面对堤坝的安全是不利的, 加之多数堤防建设都是就近取土且年代久远, 在雨季或者汛期渗漏、溃坝、决堤的情况也时有发生(李广诚等, 2005), 这严重威胁着

国家与人民的利益, 所以, 对已有危险堤坝的加固刻不容缓。

注浆加固技术目前广泛应用于多个领域(王杰等, 1997; 岩土注浆理论与工程实例协作组, 2001; 李亮等, 2009; 徐晓峰, 2010; 赵炼恒等, 2010), 对已有堤坝的加固也是行之有效的。国内一些学者采用室内试验以及工程实践的方法对浆液在冲积层、砂砾石层中的注入机理、加固范围等方面做了一些有意义的探讨(葛家良和陆士良, 1997; 杨坪等, 2006; 张

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51078359); 湖南省交通科技项目(No. 201018); 贵州省交通运输厅科技项目(No. 2010-122-009); 湖南省研究生科研创新项目(No. CX2011B098)。

作者简介: 程盼(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事隧道限排水和注浆工程方面的研究。E-mail: chengpan1020@163.com

忠苗等,2009),但是并没有直观地反映出浆液在岩土体中的走向与分布情况,本文针对冲积层,采用大型现场模型试验,从土体注浆开挖后的现场情况,直观地研究了注浆过程中的劈裂过程、浆液扩散分布规律以及加固效果等.

1 现场模型试验设计与模型修筑方案

1.1 现场试验方案设计

在现场修筑模型槽,在填筑填料前埋设注浆管,利用专业注浆设备进行注浆,并全程记录注浆压力以及注浆量等参数,注浆结束待浆体凝结后,对填料物理力学性质进行测试并与注浆前的土体进行对照,最后对整个注浆体进行全断面开挖,全面直观地了解注浆前后填料的性质变化、加固效果、浆液扩散范围以及分布规律等.

1.2 模型修筑与现场布设

模型槽采用红砖垒砌而成(图 1),外包尺寸为 $3.0\text{ m} \times 3.0\text{ m} \times 1.6\text{ m}$,壁厚 25 cm ,内部尺寸则约为 $2.5\text{ m} \times 2.5\text{ m} \times 1.6\text{ m}$.模型槽修筑完成后,填筑填料至模型槽顶部.填料为冲积土.在填料的过程中,每填筑 30 cm 整平压实,以符合现场土的力学状态.

注浆设备选用 XZ50/20 型活塞式注浆泵,最大注浆压力为 2.5 MPa .并安装注浆压力与注浆量自动记录装置.选用直径为 25 mm 钢管作为注浆管,共布设 3 根注浆管,平行间距为 0.8 m (图 2),注浆管底端距离槽底部约 0.4 m ,在埋设段内设置注浆小孔,孔径为 8 mm ,间距 0.5 m .选用纯水泥浆作为注浆材料,浆液配比为:水灰比(W/C)= $0.6\sim 0.7$.



图 1 模型槽现场

Fig. 1 Model tank on-site

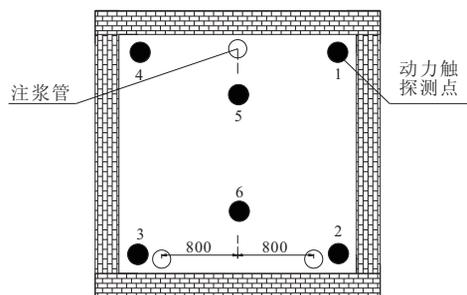


图 2 注浆管及动力触探测点布置(单位:mm)

Fig. 2 The layout of grouting pipe and dynamic penetration test point

2 注浆过程及试验控制

在注浆过程中控制注浆压力,若发现模型槽外壁有浆液渗出或出现地面抬动现象,即停止一次注浆,间隔 10 min 再进行二次注浆.灌浆结束后 7 天对土体进行轻型动力触探试验以及室内土工试验.在取样过程中分别取注浆管底部以下土体与上部土体做土工试验,以对比其物理力学性质变化情况.最后对其进行全断面开挖以直观地了解整个注浆情况.

3 模型试验结果与分析

在注浆过程中,一般都是先渗透、后压密的过程,当注浆压力达到一定值时,土体发生劈裂,浆体将在压力的作用下劈裂前行,直到浆体能量衰减至无法继续前行,达到浆体扩散范围,通过形成的浆脉胶结、压密土体,改善土体物理力学性质(岩土注浆理论与工程实例协作组,2001;罗恒,2010).

3.1 现场注浆压力与注浆量变化情况

现场间歇性地共进行了 4 次注浆,通过现场自动记录装置得出其注浆压力随时间变化图(图 3).

在注浆过程中,4 次注浆中每次注入的浆液量相同,由图可知,注浆压力的总趋势是上升的,后序注浆平均压力要大于前序注浆平均压力.说明在注浆过程中随着浆液的注入,土体中应力持续增长,要求有更大的注浆压力才能注入更多的浆液.而在第 2 次注浆过程中,浆液产生劈裂,因而注浆压力维持在一个较小水平下轻微波动.随着劈裂的进行,注浆压力逐渐升高.

另外,4 次注浆历时分别为 14 min 、 20 min 、 21.5 min 、 25 min .而在注浆量相同的条件下,说明

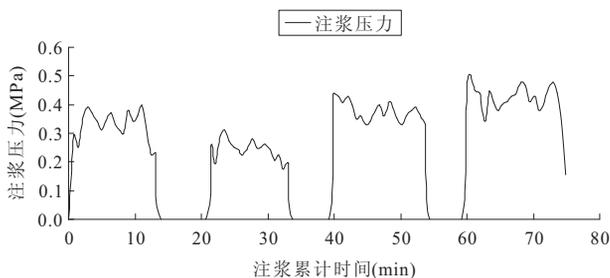


图3 注浆压力随时间变化

Fig. 3 Values of grouting pressure changed with time

注浆速率逐渐减小。前期压力小、进浆速率大,说明土体主要以充填、压密作用为主,随着土体中的缝隙充填完成以及缓慢的劈裂,填料单位时间注浆量逐渐减小,直到土体中应力水平达到一定值,浆液无法再形成新的劈裂,从而从侧壁渗漏或者从顶部冒浆。

3.2 土的物理力学性质对比变化

在注浆前后,均采用钻孔取样方法测试土的基本物理力学参数。通过室内土工试验与现场试验,计算得填料物理力学性质参数(表1)。

从表中可以看出,土的各项指标均有一定程度的提高,其中土的平均密度提高5.53%;含水量分别减小了18.11%和1.60%;天然土孔隙比分别减小14.5%和7.9%;注浆有效地改善了填土的力学性能,其粘聚力分别增长了35.7%和52.4%,而内摩擦角基本上未变;其压缩系数在注浆后分别减小40%和35%,而压缩模量分别增加64.8%和54.6%。

3.3 试验结果分析

(1)填料的各项物理与力学指标在注浆后得到了不同程度的改善,其中密度、含水量变化幅度较小,而孔隙比、抗剪强度、压缩模量变化幅度较大。这主要是由注浆过程中的渗透、胶结、挤密作用造成的。其中,上层土普遍比下层土提高幅度要大,这是由于在注浆过程中,注浆管并未埋至模型槽底部,而浆液扩散形状一般为球形与柱形(岩土注浆理论与工程实例协作组,2001)。上部浆脉丰富,土体胶结、压密作用更加明显,参数值提高幅度较大,而模型槽底部填料含浆量较少,仅仅由于上部土体重力附加应力以及轻微压密作用使得下部土体物理力学参数指标有部分增长。

(2)注浆较大程度改善了土的自稳性能,在凿除模型槽四周砖墙后,南面土体迅速坍塌,壁上只见少量浆脉,而东、西、北三面土体能够自稳,壁上浆脉明显,说明浆液充填压密作用明显,能显著改善土的

强度。

3.4 浆液扩散分布规律

在注浆完毕7天后进行开挖,以便直观地观察注浆效果以及浆体的分布扩散规律。

(1)浆液扩散规律。开挖后注浆效果见图4,从图中可以看出,浆脉的基本走向为水平方向,宽度一般为0.3~2.0 cm之间,扩散半径一般在0.5 m左右,在注浆过程中,浆液首先填充已有裂隙,然后通过浆泡压密注浆管周围土体,当浆液完成充填与压密作用后,随着压力的增加,浆液将在土体中产生劈裂。劈裂面首先产生在阻力较小的水平方向上,裂隙在压力的推动下向前延伸,直到能量衰减至无法继续前行。在注浆过程中,首先在砖墙侧壁出现浆液渗出的现象也可以说明浆液先产生水平向劈裂的事实。随着压力的继续增加,地层中大小主应力方向发生改变(邹金锋等,2006a, 2006b),此时水平向主应力大于竖向主应力,浆液产生竖向劈裂。

基于传统注浆劈裂理论(岩土注浆理论与工程实例协作组,2001),3个方向应力大小关系为主应力 σ_1 >中主应力 σ_2 >小主应力 σ_3 ,即竖向主应力大于水平向主应力,所以应该首先在竖向上产生竖向劈裂,然后随着注浆压力增大,水平向主应力大于竖向主应力后,产生水平向劈裂。但是在现场开挖后发现,主要以水平向劈裂为主。分析其原因主要有以下几个方面:①冲积土在江河搬运沉积过程中,砂卵石及土颗粒长轴一般趋向于水平方向,在浆液沿土石软弱面劈裂的过程中,各个土石薄弱面更容易连通从而形成水平方向的浆脉;②在正常固结土与欠固结土中,小主应力是水平的(黄树炉,2007)。而在填料填筑过程中,改变了地基土的应力状态,一般为欠固结土,所以浆液首先沿水平方向劈裂,而这与堤坝的填筑也是一致的;③在填筑填料的过程中,虽然尽力避免因人工填筑而形成水平方向的薄弱面,但由于不是整体搬运,无法百分百消除人为造成的薄弱面,所以这也是出现水平方向浆脉居多的原因所在。

在注浆管周围结石体开挖情况来看,结石体包裹注浆管,半径大约为30 cm,这也说明在土石混填介质中,花管注浆浆体一般呈柱状扩散,首先形成柱状体压密土体,然后在土体中形成劈裂缝,通过浆液的能量挤密土体。

(2)浆液分布规律。开挖后,通过观察浆脉的扩散情况得知,浆脉主要充填于粘土与砂卵石的交接面,部分包裹整块卵石,部分劈开两块紧靠的卵石形成劈裂通道(图4)。在砂卵石分布均匀的地区,浆液

表 1 填料物理力学性质参数

Table 1 Physical mechanical parameters of fillers

项目指标	密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水量(%)	孔隙比	$C(\text{kPa})$	$\Phi(^{\circ})$	压缩系数	压缩模量(MPa)
注浆前	1.99	12.7	0.380	42.5	35	0.20	6.65
注浆后上层土	2.10	10.4	0.325	64.4	35	0.12	10.96
注浆后下层土	2.10	12.5	0.350	57.3	33	0.13	10.28

注:压缩模量为 100~200 kPa 压力作用下所对应值。

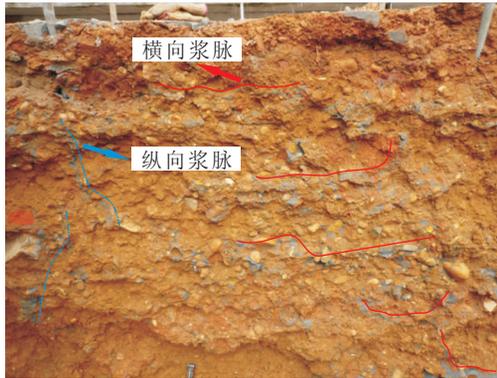


图 4 浆脉基本走向

Fig. 4 The basic trend of pulp veins



图 5 开挖后填料中存留的劈裂缝

Fig. 5 The cleavage crack remained after the excavation

分布也较均匀,其加固效果较好,而在砂卵石含量较少的区域,见少量浆脉,其加固效果不理想,在凿开砖墙后,填料立即坍塌。由于土与石物理力学性质的差异,其界面上粘结强度较粘性土中的粘结力要小,在外荷载作用下土-石界面成为土石混合体的应力集中部位,也是最为软弱的地带(张宏明,2011),而浆体也总是先沿软弱面劈裂流动。所以,在注浆压力的作用下,浆脉首先沿着土石界面劈裂,待土石界面间的应力大于土体中的主应力时,浆脉将在土体中形成劈裂缝进而扩展。

(3) 土体劈裂裂缝情况。在注浆过程中,浆体在压力的推动下劈开土体进而扩张土体前行,随着裂

缝的不断扩展,浆体能量衰减量增大,到最后浆体的劈裂应力小于土体中的拉应力时,浆脉将达到扩展范围而不再前行,此时将在注浆管周围形成新的劈裂。在模型槽开挖后,可见多处未闭合的劈裂缝存在(图 5),裂缝间距在 0.3~2.0 cm 不等,此裂隙即为浆液输送通道。整个注浆体中存在多条裂缝将势必影响到浆体整体的刚度,这对整体稳定性与强度是不利的。

分析可能的原因有 3 个:①只进行了一次注浆,在注浆完毕后,浆液有部分回流的现象,从而产生小的裂缝;②在注浆过程中有天然的浆液排出通道或者出现土层冒浆现象,当停止注浆后,浆液将无法充满整个通道,从而留下劈裂缝;③浆液在凝结过程中的收缩也是形成裂缝的原因。这些缝隙短期内无法闭合甚至永远也无法闭合,这个对注浆效果是不利的。

所以,建议在注浆过程中采用多次重复注浆的方案,这样可以充填未能闭合的劈裂缝。另外,在二次注浆过程中,先前已灌注的岩土体能够阻止灌注浆液前行,从而产生新的劈裂缝并且加强先前灌注浆脉的挤密作用,从而提高注浆的加固效果。

(4) 注浆加固效果评价。从开挖后的填料整体情况来看,土体在注浆后形成了纵横交错的网状浆脉,对岩土体中的裂隙进行了充填,并通过浆脉对整个土体进行了压密,而纵横交错的浆脉也起到“加筋”作用,通过“加筋”与压密的共同作用使得整体致密性与刚度较注浆前有较大程度的提高。总体上横向浆脉的数量多于纵向浆脉,纵向浆脉的长度与宽度也大于横向浆脉,所以,在砂卵石地层中以横向加固为主。

为了验证注浆前后的岩土体强度与刚度改善情况,在填料四周及中部选取 6 个点(图 2),进行了轻型动力触探原位测试试验,选取其中 2 个点的数据,结果如图 6。

由图中曲线可知,注浆后土体较注浆前,其承载力都有提高,总体趋势上承载力提高幅度上部>中部>下部,主要是因为注浆管底部埋深为 1.2 m,而

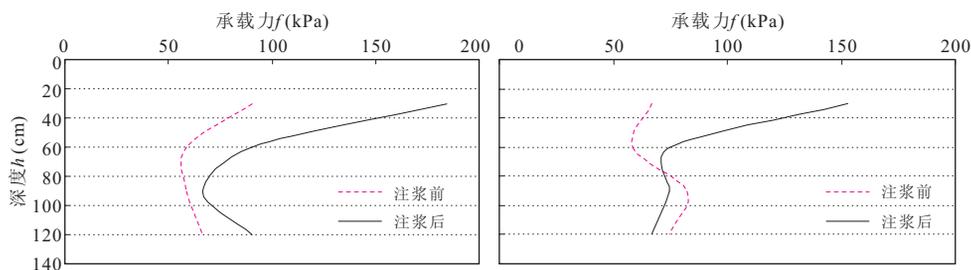


图6 轻型动力触探原位测试

Fig. 6 The result of light dynamic penetration test

浆液扩散范围有限,所以下部土体加固效果不明显,提高幅度较小。而在浆液凝结过程中,上部凝结速度要快于中部,所以上部提高幅度较大。

4 结论

通过模型试验,对冲积层中注浆效果进行了分析与评价,对浆液扩散范围及分布规律进行了探讨,得出结论如下:(1)通过注浆对岩土体物理力学参数都有不同程度的提高,加强了土体自稳性能。有浆液充填区域加固效果较没有浆液充填区域的加固效果好;(2)花管注浆浆体呈柱面扩散,扩散半径约0.5 m。浆脉整体呈水平向分布。在砂卵石地层中,以水平向加固为主;浆脉走向主要沿砂卵石粘土界面,包裹砂卵石或者劈开砂卵石形成劈裂通道,在冲积层中,浆脉首先沿土石界面扩展,当土石界面上应力大于土层中主应力时,浆脉将沿土体纵向劈裂;(3)浆液劈裂前行会形成劈裂缝,在只进行一次注浆的情况下或者注浆压力过大出现冒浆的情况下,劈裂缝会出现无法闭合的现象,这对浆体整体刚度以及致密性产生影响,在注浆过程中应该进行多次重复注浆以消除无法闭合的劈裂缝的影响,并且有助于加固土体。(4)通过本试验可以对以后在冲积层中注浆的布置、注浆控制以及效果评价方面起到参考作用。

References

Chen, H. J., 2010. Civil Engineering Geology. China Building Materials Press, Beijing (in Chinese).
 Chen, X. Z., 2004. Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Tsinghua University Press, Beijing (in Chinese).
 Ge, J. L., Lu, S. L., 1997. Study on Grouting Simulation Experiment and Its Application. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 19(3): 28-33 (in Chinese

with English abstract).

Huang, S. L., 2007. Research of Grouting Consolidation Technology in Sandy Gravel Ground by Undercutting under Shallow Cover Tunnel near Bridge Pile (Dissertation). Beijing Jiaotong University, Beijing (in Chinese with English abstract).
 Jiang, S., Wang, H., Weimer, P., 2008. Sequence Stratigraphy Characteristics and Sedimentary Elements in Deepwater. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 825-833 (in Chinese with English abstract).
 Li, G. C., Si, F. A., Bai, X. M., 2005. China Levee Engineering Geology. China Water Power Press, Beijing (in Chinese with English abstract).
 Li, L., Zhao, L. H., Zou, J. F., et al., 2009. Experimental Research on Horizontal Flexible Reinforced Grouting with Physical Model. *Rock and Soil Mechanics*, 30(7): 2081-2086 (in Chinese with English abstract).
 Luo, H., 2010. Studies on Grouting Theories and It's Applications in Highway Engineering (Dissertation). Central South University, Changsha (in Chinese with English abstract).
 The Research Group of Grouting Theories and Case Histories, 2001. The Grouting Theories and Case Histories. Science Press, Beijing (in Chinese).
 Wang, J., Du, J. H., Chen, S. Y., 1997. Developing and Prospects of the Grouting Technology. *Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute*, 13(1): 60-65 (in Chinese with English abstract).
 Xu, X. F., 2010. The Anchor Pipe Grouting Test and Research of Side Slope Bedded Rock. *Shanxi Architecture*, 36(14): 104-106 (in Chinese with English abstract).
 Yang, P., Tang, Y. Q., Peng, Z. B., et al., 2006. Study on Grouting Simulating Experiment in Sandy Gravels. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 28(2): 2134-2138 (in Chinese with English abstract).
 Zhang, H. M., 2011. Research on Mechanics Characteristics

- and Mechanism of Deformation and Failure of Unsaturated Soil-Rock Mixture (Dissertation). Changjiang River Science Research Institute, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Zou, J., He, J. Y., et al., 2009. Laboratory Tests on Compaction Grouting and Fracture Grouting of Clay. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 31(12): 1818—1824 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, L. H., Luo, H., Li, L., et al., 2010. Experimental Research on Implementing Method of Backfill of Abutment Back with Horizontal Flexible-Reinforced Grouting Technology. *Rock and Soil Mechanics*, 31(1): 199—205 (in Chinese with English abstract).
- Zou, J. F., Li, L., Yang, X. L., et al., 2006. Energy Dissipation Analysis for Crack Grouting. *China Railway Science*, 27(2): 52—55 (in Chinese with English abstract).
- Zou, J. F., Li, L., Yang, X. L., et al., 2006. Method of Energy Analysis for Compaction Grouting. *Rock and Soil Mechanics*, 27(3): 475—478 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈洪江, 2010. 土木工程地质. 北京: 中国建材工业出版社.
- 陈希哲, 2004. 土力学地基基础. 北京: 清华大学出版社.
- 葛家良, 陆士良, 1997. 注浆模拟试验及其应用研究. *岩土工程学报*, 19(3): 28—33.
- 黄树炉, 2007. 砂卵石地层浅埋暗挖隧道近桥桩施工注浆加固技术研究(硕士学位论文). 北京: 北京交通大学.
- 蒋恕, 王华, Paul Weimer, 2008. 深水沉积层序特点及构成要素. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(6): 825—833.
- 李广诚, 司富安, 白晓民, 等, 2005. 中国堤防工程地质. 北京: 中国水利水电出版社.
- 李亮, 赵炼恒, 邹金锋, 等, 2009. 柔性加筋注浆现场模型试验研究. *岩土力学*, 30(7): 2081—2086.
- 罗恒, 2010. 注浆理论研究及其在公路工程中的应用(博士学位论文). 长沙: 中南大学.
- 岩土注浆理论与工程实例协作组, 2001, 编著. 岩土注浆理论与工程实例. 北京: 科学出版社.
- 王杰, 杜嘉鸿, 陈守庸, 1997. 注浆技术的发展与展望. *沈阳建筑工程学院学报*, 13(1): 60—65.
- 徐晓峰, 2010. 边坡层状岩体中的锚管注浆试验及研究. *山西建筑*, 36(14): 104—106.
- 杨坪, 唐益群, 彭振斌, 等, 2006. 砂卵(砾)石层中注浆模拟试验研究. *岩土工程学报*, 28(2): 2134—2138.
- 张宏明, 2011. 非饱和土石混合体的力学特性与变形破坏机制研究(博士学位论文). 武汉: 长江科学院.
- 张忠苗, 邹健, 贺静漪, 等, 2009. 黏土中压密注浆及劈裂注浆室内模拟试验分析. *岩土工程学报*, 31(12): 1818—1824.
- 赵炼恒, 罗恒, 李亮, 等, 2010. 土石混填料台背回填柔性加筋注浆技术加固试验研究. *岩土力学*, 31(1): 199—205.
- 邹金锋, 李亮, 杨小礼, 等, 2006a. 劈裂注浆能耗分析. *中国铁道科学*, 27(2): 52—55.
- 邹金锋, 李亮, 杨小礼, 等, 2006b. 压密注浆的能量分析方法. *岩土力学*, 27(3): 475—478.