文章编号：1000－7598－(2008) 08－2257－05

BS-100 型土壤固化剂在季冻区的路用性能试验研究

戴文亭[1]，陈 瑶[2]，陈 星[1]

（1. 吉林大学 交通学院道桥系，长春 130025；2. 黑龙江大学，哈尔滨 150080）

摘 要：采用美国 Base-Seal 固化剂（BS-100 型），对长春地区典型黏性土进行了固化处理，同时对其加固土的路用性能进行了系统地试验研究。首先，进行了 Base-Seal 固化剂加固土的最佳配合比筛选试验，在此基础上进行了最佳配合比条件下加固土的无侧限抗压强度、间接抗拉强度、室内回弹模量、冻稳定性、水稳定性和渗透性等路用性能指标方面的试验研究，得出 Base-Seal 固化剂加固土作为路面基层材料具有早期强度和回弹模量高、抗弯拉性能、冻稳定性能、水稳定性能和抗渗性能好的结论，适合在长春地区及其气候、土质相似地区的道路工程中应用。

关 键 词：季冻区；Base-Seal 固化剂；冻融循环；无侧限抗压强度；路用性能

中图分类号：TU 445 **文献标识码**：A

Test study on road performance of soils stabilized by BS-100 Model stabilizer in seasonally frozen region

DAI Wen-ting[1], CHEN Yao[2], CHEN Xing[1]

(1. Department of Road and Bridge Engineering, College of Traffics, Jilin University, Changchun 130025, China;
2. Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: Aiming at the typical clay in Changchun, the Base-Seal stabilizer(BS-100 Model) from America is used to stabilize the clay. Then series of tests on the road performance of Base-Seal stabilized clay are conducted systematically. First, tests about the optimal proportion of stabilized soil are carried out. On this base, series of tests on the road performance indexes such as the unconfined compressive strength, indirect tensile strength, resilience modulus, frost stability, etc., are carried out in the condition of the optimal proportion. Base-Seal stabilized soil as base material has high early stage strength, high long stage strength and well frost stability has been put forward. And it is especially fit for Changchun and any other regions where the climate, sorts of soil similar to Changchun.

Key words: seasonally frozen region; Base-Seal stabilizer; freeze-thaw cycles; unconfined compressive strength; road performance

1 前 言

土壤固化剂加固土是近年来的主要发展方向之一[1−7]，其作为一种新型的筑路固化材料，目前在欧美等发达国家已广泛使用，效果良好。20 世纪 90 年代起，我国也开始引进和研制土壤固化剂[8, 9]，但由于气候与土壤条件以及依据的技术规范要求的不同，多数液体固化剂无法在我国直接使用，也无法满足我国现有规范对水稳性的要求，对土壤的稳定作用缓慢而复杂[8]。国内经土壤固化剂加固后的固化土普遍存在强度低、抗渗能力差和抗冻性差等缺点，多数达不到工程对耐久性的要求，固化剂稳定土用于修筑高等级公路路面基层更是缺乏有力依据[1, 4, 5, 7, 10]，因而非常有必要进行此方面地研究，弄清固化剂的使用条件，确定应用方法以及不同产品的地域适用性。

本次研究采用美国贝赛尔国际有限公司生产的 Base-Seal 土壤固化剂，对处于典型季冻区的长春地区典型的粉质轻亚黏土进行了加固性试验。

2 原材料技术性质

原材料主要包括土壤固化剂、熟石灰、水泥、

收稿日期：2007-09-05
作者简介：戴文亭，男，1964 年生，工学博士，主要从事道路岩土工程、隧道等方面的教学与科研工作。E-mail: daiwenting64@163.com

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

土，其性质如下：Base-Seal 土壤固化剂是美国贝赛尔国际有限公司提供，为一种基于聚合物的土壤添加剂，分子结构稳定，常温下可长期储存，具有无毒、无害、无污染、无腐蚀的特点，属于多用途液体环保产品，符合美国环保署标准，本次试验采用 BS-100 固化剂，试验采用的熟石灰的有效钙镁含量达到相应的技术标准，即有效钙+氧化镁含量为 55.3 %，符合《公路路面基层施工技术规范》[12]中Ⅲ级消石灰钙镁含量技术要求。试验用的水泥为虹桥牌 C32.5 普通硅酸盐水泥。土样取自吉林省长农高速公路取土场，为粉质轻亚黏土。相应物理指标：液限 $\omega_l = 38.1$ %，塑限 $\omega_p = 23.0$ %，塑性指数 $I_p = 15.1$。

3 固化剂加固土最佳配合比筛选

已有研究结果表明[1, 2, 4, 7, 8]，若使用液体类固化剂稳定土壤并达到我国规范的技术要求，需要同时加入一些无机结合料，如石灰、水泥等。鉴于以上原因，本次研究仅分别对石灰稳定土和水泥稳定土做了不同固化剂掺量及配比的方案筛选试验[12]。为了找到 Base-Seal 固化剂加固土的最佳配合比及掺加不同剂量固化剂的加固土的物理力学特点，试验以 7 d 饱水无侧限抗压强度为依据，确定最佳配合比见表 1。

表 1 配合比方案及试验数据

Table 1 Mix proportion scheme and test data

配合比方案		无侧限抗压强度 /MPa	配合比方案		无侧限抗压强度 /MPa
石灰掺量 /%	固化剂掺量 /%		水泥掺量 /%	固化剂掺量 /%	
3	0.25	0.93	2	0.32	0.60
3	0.28	1.03	3	0.28	1.03
3	0.32	1.06	3	0.32	0.98
5	0.25	1.62	4	0.25	1.33
5	0.28	1.79	4	0.28	1.40
5	0.32	1.69	5	0.25	1.51
7	0.25	1.78	5	0.28	1.58
7	0.28	1.67	6	0.25	1.66
7	0.32	1.60	6	0.28	1.68
2	0.28	0.74			

由表 1 可见，掺加 Base-Seal 固化剂的石灰加固土比掺加 Base-Seal 固化剂的水泥加固土固化效果好，前者的石灰掺量为 3 %的 Base-Seal 固化剂，加固土的 7 d 饱水无侧限抗压强度值较低，最大值为 1.06 MPa。从石灰掺量为 5 %和 7 %的 Base-Seal 固化剂加固土的试验数据中可见，7 d 饱水无侧限抗压强度值并不是随着石灰掺量和固化剂掺量的增加而一直提高的，对于石灰掺量为 7 %的固化剂加固土，其无侧限抗压强度值随固化剂掺量的提高反而降低。对比两种不同石灰掺量的加固土抗压强度数据，由于随着固化剂和石灰掺量的增加，无侧限抗压强度值的增长不是特别显著，同时考虑到经济性等方面因素，故选择（土+石灰 5 %+固化剂 0.25 %）作为试验的最佳配合比。

4 固化剂加固土的路用性能试验

以下各性能指标试验中固化剂和石灰的掺量均按以上确定的最佳配合比进行。

4.1 固化剂加固土的无侧限抗压性能试验

本次试验采用 ϕ100 mm×100 mm 的圆柱体试件，按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》[13]进行无侧限抗压强度试验。为了使试验结果较为符合实际的工程情况，试件成型压实度控制在 98 %，在温度 20℃±2 ℃和相对湿度大于等于 95 %的条件下标准养生，到达规定龄期后进行饱水无侧限抗压强度试验，分别测试了 Base-Seal 固化剂加固土龄期 7，28，90 d 和 180 d 的饱水无侧限抗压强度，结果见表 2。

表 2 无侧限抗压强度试验数据

Table 2 The data of unconfined compressive strength

固化土配合比 /%		不同龄期无侧限抗压强度 /MPa			
石灰掺量	固化剂掺量	7 d	28 d	90 d	180 d
5	0.25	1.55	2.24	3.04	3.92

分析上述试验数据：掺加 Base-Seal 固化剂的石灰加固土 7 d 饱水无侧限抗压强度为 1.55 MPa，我国《公路沥青路面设计规范》[14] 第 6.1.8 节对石灰粉煤灰稳定类基层材料 7 d 无侧限抗压强度的要求是大于等于 0.8 MPa，可见该种固化土同龄期抗压强度比规范中的规定值提高了 0.75 MPa。随着龄期的增长，固化剂加固土的无侧限抗压强度持续增长，并且保持较高的增长速率：龄期 28 d 时固化土的抗压强度为 2.24 MPa，比龄期 7 d 时的抗压强度增长了 44.5 %；龄期 90 d 时固化土的抗压强度为 3.04 MPa，比龄期 7 d 时的抗压强度增长了 96.13 %，比龄期 28 d 时的抗压强度增长了 35.71 %；龄期 180 d 时固化土的抗压强度为 3.92 MPa，比龄期 28 d 时的抗压强度增长了 75 %，比龄期 90 d 时的抗压强度增长了 28.9 %。图 1 为 Base-Seal 固化剂加固土的无侧限抗压强度随龄期增长趋势曲线。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

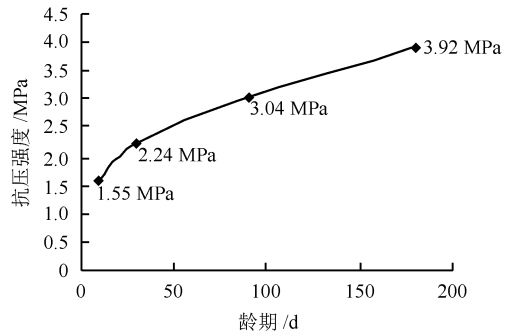


图 1　Base-Seal 固化剂加固土的强度增长趋势图
Fig.1　The trend of unconfined compressive strength

4.2　固化剂加固土的间接抗拉性能试验

间接抗拉性能是材料的一个重要力学性质。本试验根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》[13]中间接抗拉强度试验方法进行，试件成型压实度控制在 98 %。本文分别测定了固化剂加固土试件 28，90 d 和 180 d 的饱水间接抗拉强度，试验结果见表 3。

表 3　劈裂强度试验结果
Table 3　The data of indirect tensile strength

固化剂类型	掺量 /%	龄期 /d	劈裂强度 /MPa
BS–100	0.25	28	0.26
BS–100	0.25	90	0.38
BS–100	0.25	180	0.45

由表 3 可知，掺加 Base-Seal 固化剂的石灰加固土早期劈裂强度较高，龄期 28 d 时的劈裂强度达到 0.26 MPa。随着龄期的增长，固化剂加固土的劈裂强度继续增强，龄期 90 d 的固化土劈裂强度为 0.38 MPa，比 28 d 的强度增长了 46.2 %；龄期 180 d 的固化土劈裂强度为 0.45 MPa，比 28 d 的强度增长了 73.1 %，比 90 d 的强度增长了 18.4 %。图 2 为 Base-Seal 固化剂加固土的劈裂强度随龄期增长趋势曲线。

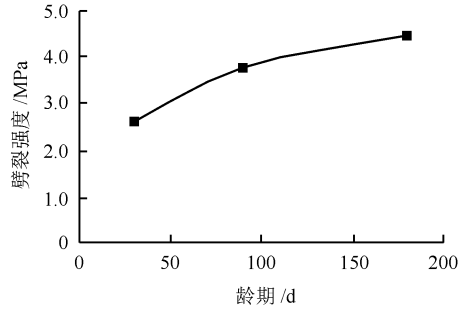


图 2　加固化剂加固土劈裂强度增长趋势图
Fig.2　The trend of indirect tensile strength

4.3　固化剂加固土的回弹模量试验

抗压回弹模量是路面结构设计的一个重要参数，反映了路面结构层的强度。本次试验根据规范[13]中室内回弹模量试验之承载板法进行，将成型试件放在温度为 20 ℃±2 ℃，相对湿度大于等于 95 %的条件下标准养生 7 d 和 28 d，饱水后测试其抗压回弹模量，试验结果见表 4。

表 4　室内抗压回弹模量的试验数据
Table 4　The data of resilience modulus

固化剂类型	掺量 /%	龄期 /d	平均抗压回弹模量 /MPa
BS–100	0.25	7	262
BS–100	0.25	28	447

由表 4 可知，Base-Seal 固化剂石灰加固土养生龄期 7 d 时的抗压回弹模量为 262 MPa，随着龄期的增长，其 28 d 的抗压回弹模量比 7 d 的提高 70.6 %，达到 447 MPa。按照规范石灰掺量为 8 %～12 %的石灰稳定土 180 d 的抗压回弹模量规范建议值在 400~700 MPa 之间，而测得的 Base-Seal 固化剂石灰加固土 28 d 抗压回弹模量便达到 447 MPa，已经超出规范建议范围的下限，并且可以肯定的是随着龄期的增长，其抗压回弹模量还会继续提高，直到最后趋于稳定。

4.4　固化剂加固土冻融循环试验

路面的稳定性包括温度稳定性和水稳定性，前者是路面基层材料性能控制的重要指标之一。目前关于这一路用性能指标的试验尚没有明确的试验方法。本文参考前人关于土及混凝土冻融循环试验的经验[15]，同时考虑长春地区冬夏季的气温特点，制定的试验方案为：试件养生期为 28 d，循环时在 –35 ℃±2 ℃的冰箱内冻 24 h，取出后在 20±2 ℃、相对湿度大于等于 95 %的恒温恒湿养护箱内融 24 h，为一个冻融循环，如此反复进行 5 次。达到规定的循环次数时停止试验，测试冻融试件的抗压强度见表 5。

表 5　冻融循环试验结果
Table 5　The data of freeze-thaw cycle exiperiment

固化剂类型	掺量 /%	冻融次数	检验强度 /MPa	冻后强度 /MPa	强度损失 /%
BS–100	0.25	5	2.24	1.99	11.16

分析表 5 数据可见，随着冻融循环次数的增加固化土的抗压强度逐渐降低。观察试验过程中试件

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的变化情况，经过 5 次冻融循环试验后试件状态较完好，只有个别试件柱身表面出现不明显横向裂纹，又进行第 2 次饱水后试件的外表面及边缘脱落现象也很轻微，该组试件的平均抗压强度为 1.99 MPa，强度损失为 11.16 %，冻稳定系数为 88.83 %，抗冻效果十分明显。

4.5 固化剂加固土水稳定性试验

为测定固化土在水分作用下材料抵抗破坏的能力，进行固化土的水稳定性试验对于渠道防渗和路基、路面建设等有着重要意义。本文主要参照有关文献中的试验方法制定了相应的方案：试验共制备 Base-Seal 固化剂石灰加固土试件（ϕ100 mm×100 mm）共 4 组。将成型后的第 1 组加固土试件作为检验试件，标准养护 7 d 后测试其干抗压强度，另外 3 组试件标准养护 6 d，并在水中浸泡不同时间后分别测试各自的饱水抗压强度，计算相应的水稳定系数和强度损失，预测其变化规律。第 2 组试件饱水 1 d，第 3 组试件饱水 3 d，第 4 组试件饱水 7 d，其结果见表 6。由表 6 可见，不同龄期饱水试验后加固土饱水 1 d 的无侧限抗压强度为 1.55 MPa，强度损失为 26.54 %，水稳定系数为 73.46 %；加固土饱水 3 d 的无侧限抗压强度为 1.46 MPa，比饱水 1 d 的抗压强度降低了 0.09 MPa，与检验试件强度相比，强度损失达到 30.81 %，水稳定系数为 69.19 %，这 2 组试件均随着固化土在水中浸泡时间的增加，其饱水无侧限抗压强度比同龄期下未浸水的固化土无侧限抗压强度有所降低，即随着固化土在水中浸泡时间的增加，固化土的强度损失逐渐加大，水稳定系数逐渐降低。对于加固土饱水 7 d 的无侧限抗压强度，其值为 1.59 MPa，比前两种饱水试件的无侧限抗压强度分别提高了 0.04 MPa 和 0.13 MPa，强度损失下降为 24.64 %，水稳定系数提高为 75.36 %。图 3 为 Base-Seal 固化剂加固土水稳定性试验抗压强度对比图。

表 6 水稳定性试验抗压强度结果

Table 6 The data of water stability

固化剂类型	掺量 /%	龄期 /d	检验强度 /MPa	抗压强度 /MPa	强度损失 /%
BS−100	0.25	1	2.11	1.55	26.54
BS−100	0.25	3	2.11	1.46	30.81
BS−100	0.25	7	2.11	1.59	24.64

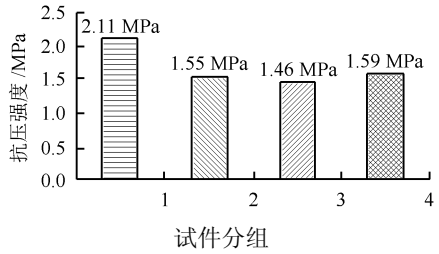


图 3 加固土浸水不同龄期后抗压强度对比示意图

Fig.3 The strength contrast of water stability

4.6 固化剂加固土抗渗性能试验

本次试验用土属于粉质轻亚黏土，参照渗透试验有关规定，黏性土应采用南 55 型渗透仪进行变水头法渗透试验，分别测定了固化剂加固土标养 7 d 和 28 d 后的渗透系数，结果见表 7。

表 7 抗渗性能试验结果

Table 7 The data of impermeability test

固化剂类型	掺量 /%	龄期 /d	渗透系数 /cm·s^{-1}
BS−100	0.25	7	3.76×10^{-6}
BS−100	0.25	28	2.83×10^{-6}

备注：石灰掺量为 5 %。

参照《渠道防渗工程技术规范》，土料类（主要原材料为素土、石灰、砂、石等）防渗材料的防渗效果一般为 8.1×10^{-5}~1.9×10^{-4}m/d 之间，而表 7 显示 Base-Seal 固化剂石灰加固土 7 d 和 28 d 的渗透系数都达到了 10^{-6}，养生龄期 7 d 时渗透系数为 3.76×10^{-6}m/d，养生龄期 28 d 时渗透系数为 2.83×10^{-6}m/d，比 7 d 时的渗透系数有所降低，下降了 24.73 %，比较规范中建议的数值可以看出，固化土的渗透系数较低，防渗效果有很大幅度的提高。

5 结 论

试验研究结果表明，Base-Seal 固化剂作为一种新型的土壤固化材料，经其加固后的长春地区的黏性土具有良好的物理力学性能：

（1）早期强度高，后期强度增长迅速，这一特点对于工程中缩短工期具有重要意义。

（2）具有较高的间接抗拉强度，这对于工程实际来说，劈裂强度高，可以减少路面结构层面层裂缝的产生，并使基层裂缝少，提高防水性等性能指标。

（3）Base-Seal 固化剂对提高土体的抗压回弹模量、增强路面结构层的强度具有显著效果，对提高路面结构承载力具有重要意义。

（4）Base-Seal 固化剂加固土的抗冻效果十分

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

明显，具有较好的温度稳定性。

（5）随着 Base-Seal 固化剂加固土在水中浸泡时间增长，加固土水稳定系数的降幅越来越小，强度损失也越来越小，并逐渐趋于稳定，当达到固化土在水的长期作用下强度损失的下限时，固化土的无侧限抗压强度反而随着龄期的增长而增长，只不过受到水分侵蚀作用，增长幅度比较小，但不会出现二次泥泞现象，水稳定性能比较好。

（6）由于试验养生龄期等的约束，对 Base-Seal 固化剂加固土的渗透性与龄期的关系只测得前期 7 d 和 28 d 的相关数据，对于固化土随着龄期增长其渗透性能的发展趋势还有待于进一步的试验研究，但可以肯定的是，随着固化土后期强度的增长，其渗透系数还会有所降低。从目前所得到的数据中可以看出，该种固化土抗渗性能和抗冻融稳定性良好，这对于防治季冻区道路常发生的冻融沉陷、翻浆等病害具有重要意义。

综上所述，Base-Seal 土壤固化剂比较适合在长春地区及其气候、土质相似地区的道路工程中应用。

参 考 文 献

[1] 方祥位，孙树国，陈正汉. GT 型土壤固化剂改良土的工程特性研究[J]. 岩土力学，2006，27（9）：1 545－1 548.
FANG Xiang-wei, SUN Shu-guo, CHEN Zheng-han. Study on engineering properties of improved soil by GT soil firming agent[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(9): 1 545－1 548.

[2] 董邑宁，张青娥，徐日庆. ZDYT－2 固化软土试验研究[J]. 土木工程学报，2002，35（3）：82－86.
DONG Yi-ning, ZHANG Qing-e, XU Ri-qing. Experimental study on strengthened soft clay with stabilizer ZDYT－2[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2002, 35(3): 82－86.

[3] 董邑宁，徐日庆，龚晓南. 固化剂 ZDYT-1 加固土试验研究[J]. 岩土工程学报，2001，23（4）：472－475.
DONG Yi-ning, XU Ri-qing, GONG Xiao-nan. The experimental research of the clay stabilized with solidified agent ZDYT-1[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 472－475.

[4] 田见效，彭波. S 土壤稳定剂路用性能[J]. 长安大学学报（自然科学版），2002，22（5）：20－23.
TIAN Jian-xiao, PENG Bo. Properties of S-soil-solidified-agent for road performance[J]. **Journal of Chang'an University** (Natural Science Edition), 2002, 22(5): 20－23.

[5] 刘凤梧，董峰亮. 土壤固化剂在道路基层中的应用[J]. 市政技术，2003，21（5）：308－309.
LIU Feng-wu, DONG Feng-liang. Application of soil solidify agent in road basic layer[J]. **Municipal Engineering Technology**, 2003, 21(5): 308－309.

[6] 汪益敏，贾娟，张丽娟. ISS 加固土的微观结构及强度特征[J]. 华南理工大学学报（自然科学版），2002，30（9）：96－99.
WANG Yi-min, JIA Juan, ZHANG Li-juan. Microstructure and strength feature of ISS stabilized soil[J]. **Journal of South China University of Technology** (Natural Science Edition), 2002, 30(9): 96－99.

[7] 黄维蓉，陈伟，刘大超. 固土剂稳定土路面基层材料的性能与应用研究[J]. 公路，2003，（7）：156－159.
HUANG Wei- rong, CHEN Wei, LIU Da-chao. Research on properties and application of road base materials stabilized by QJ-type soil-solidified agent[J]. **Highway**, 2003, (7): 156－159.

[8] 彭波，李文瑛，戴经梁. 液体固化剂加固土的研究[J]. 西安公路交通大学学报，2001，21（1）：15－18.
PENG Bo, LI Wen-ying, DAI Jing-liang. Research on liquid stabilizer reinforced soil[J]. **Journal of Xi'an Highway University**, 2001, 21(1): 15－18.

[9] 刘顺妮，林宗寿，陈云波. 高含水率黏土固化剂的研究[J]. 岩土工程学报，1998，20（4）：83－86.
LIU Shun-ni, LIN Zong-shou, CHEN Yun-bo. On the stabilizer for the soil with higher water content[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(4): 83－86.

[10] 汪益敏，张丽娟. 离子土固化剂加固堤坝道路路面的路用性能[J]. 华南理工大学学报（自然科学版），2006，34（9）：56－61.
WANG Yi-min, ZHANG Li-juan. Pavement performances of dam embankment roads strengthened by ionic soil stabilizer[J]. **Journal of South China University of Technology** (Natural Science Edition), 2006, 34(9): 56－61.

[11] 林彤，刘祖德. 粉煤灰与生石灰加固软土的室内试验研究[J]. 岩土力学，2003，24（6）：1 049－1 052.
LIN Tong, LIU Zu-de. Study on indoor tests of fly ash and quick lime improving soft soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(6): 1 049－1 052.

[12] 张凯. JTJ34－2000　公路路面施工技术规范[S]. 北京：人民交通出版社，2000.

[13] 中华人民共和国交通部. JTJ057－94　公路工程无机结构料稳定材料试验规程[S]. 北京：人民交通出版社，1996.

[14] 王大雁，马巍，常小晓，等. 冻融循环作用对青藏粘土物理力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报，2005，24（23）：4 313－4 319.
WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao, et al. Physico-mechanical properties changes of Qinghai-Tibet clay due to cyclic freezing and thawing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(23): 4 313－4 319.

[15] 中华人民共和国水利部. SL18－2004　渠道防渗工程技术规范[S]. 北京：中国水利水电出版社，2005.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net