

# 绢云母片岩粗粒料改性试验研究

秦尚林, 杨兰强, 陈荣辉, 熊署丹

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘 要:** 绢云母片岩属极软岩, 强度低, 直接作为路基填料难以压实, 易造成路基沉陷、路面开裂等不良工程现象。通过对绢云母片岩及其 4 种改性方案进行表面振动压实试验、室内重型击实试验、室内 CBR 试验以及回弹模量试验研究, 探讨绢云母片岩经改性后用作高速公路路基填料的适用性。试验表明, 绢云母片岩最大干密度采用室内重型击实与表面振动压实试验结果相差较大, 采用表面振动压实时为  $1.92 \text{ g/cm}^3$ , 采用室内重型击实时为  $2.01 \text{ g/cm}^3$ 。主要原因是由于绢云母片岩颗粒破碎的结果。绢云母片岩及其 4 种改性粗粒土的在最优含水率附近的较宽范围内的变动对压实效果的影响不大, 有利于填料的压实。绢云母片岩的回弹模量  $E$  较低, 小于 32 MPa, 经改性后的土料的回弹模量均有显著提高, 均达到 50 MPa 以上。添加 20% 红砂岩和 20% 黏土土的试料 CBR 值均只有 3.7, 添加 3% 水泥和 5% 水泥的试料 CBR 值上升明显。绢云母片岩经添加 3%、5% 的水泥化学改性后可用于高速公路上路堤及路床填筑。

**关 键 词:** 绢云母片岩; CBR 试验; 回弹模量; 改性土

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

## Modified test research of sericite schist coarse aggregates

QIN Shang-lin, YANG Lan-qiang, CHEN Rong-hui, XIONG Shu-dan

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** The surface vibration compaction test, indoor heavy compaction test, interior California bearing ratio(CBR) test and modulus of resilience test have been carried out on sericite schist coarse aggregates and four modified soils, because the sericite schist belong to the soft rock, strength low, which is easy to make road collapse and pavement cracking when it as subgrade filling material. Test results shows that it is a big difference in the maximum dry density of sericite schist coarse aggregates by using heavy compaction test in contrast to the surface vibration compaction test. The results of maximum dry density is  $2.01 \text{ g/cm}^3$  by using heavy compaction test; but another is  $1.92 \text{ g/cm}^3$ . The main reason is that due to particle breakage in sericite schist. The effects of the change of the optimum moisture content is not obvious for sericite schist coarse aggregates, as well as for four modified soils, which is beneficial to compaction. The modulus of resilience of sericite schist coarse aggregates is low, less than 32 MPa. However the modulus of resilience of modified soil have been remarkable improved, up to 50 MPa above all. The CBR both only have 3.7 when blend it with 20% red sandstone or 20% clay. But the CBR ascends obviously when to mix it with 3% or 5% cement. Sericite schist after chemical modification by adding 3%, 5% of cement can be used in the embankment of highway 94 zone and 96 zone.

**Key words:** sericite schist; california bearing ratio(CBR) test; modulus of resilience; modified soils

## 1 引 言

谷城至竹溪高速公路沿线存在大量的绢云母片岩, 岩石风化程度严重, 强度较低, 在力学性能上属于软岩范畴。软岩作为路基填料, 国内外已有较多研究。20 世纪 60 年代, 日本在东名高速公路桂川段、中原国道的西宫段、庄原段等已经开始使用

沉积软岩作为路基填料。薄宫林等<sup>[1]</sup>研究了软岩弃碴的大型填土的设计和施工。刘建等<sup>[2]</sup>进行了原状片岩的抗剪强度的水敏性研究, 发现绢云母片岩抗剪强度受水的影响很大。刘新喜等<sup>[3]</sup>对强风化软岩进行压实特性研究。郑明新等<sup>[4]</sup>针对武广客运铁路专线遇到的软质千枚状板岩和泥质粉砂岩, 分析了岩石的物理力学性质和工程特性。于德海等<sup>[5]</sup>对绿

收稿日期: 2013-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No.51079142); 湖北省谷城至竹溪高速公路科技项目资助 (GZL-KJ-02-01)。

第一作者简介: 秦尚林, 男, 1973 年生, 博士, 副研究员, 主要从事特殊土工程特性与处治方法及灾害防治技术等方面研究。E-mail: qinshlin@sina.com

泥石片岩进行了湿化三轴压缩试验。针对这种不能满足强度要求的填料进行改性案例也很多,如毛雪松等<sup>[6]</sup>对风化千枚岩进行了添加3%水泥改性处理;冯美果等<sup>[7]</sup>提出了用粉煤灰改进膨胀土的方法;余飞等<sup>[8]</sup>开展了膨胀土CMA改性和石灰改性对比试验。

作为路基填料,与其他类型软岩相比,绢云母片岩非常特殊。虽然一般软岩自身强度较低,但软岩料在压实过程中颗粒破碎强烈,经压实后可达到较高的密度,从而取得较好的力学性能<sup>[9]</sup>,往往满足高速公路路堤对填料强度的要求。绢云母片岩填料碾压过程中,虽然颗粒破碎也很剧烈,压实后的路基压实度甚至可超过100%,但现场碾压试验结果表明,其路基回弹模量小于设计要求,难以满足高速公路上路堤及路床填筑要求。另外,碾压试验还表明,经过3~5遍碾压后,绢云母片岩粗粒料表面10cm左右粉化,表现出类似粉土的碾压特征,其成型质量较差,透水性弱,一定碾压遍数后碾压功只能促使颗粒错位移动,土中孔隙没有压缩和减小,路基压实施工工艺和过程控制困难。

绢云母片岩粗粒料作为填料,目前相关研究甚少,赵学忠<sup>[10]</sup>等曾在云南昌宁明山水库建设过程中进行了绢云母微晶片岩风化料的野外碾压试验,认为其是一种很好的筑均质坝材料。由于缺乏相关资料,难以对比其所述的绢云母微晶片岩与鄂西绢云母片岩成分的区别。另外,对绢云母片岩物理力学特性、颗粒破碎特性等方面研究更鲜有相关文献报道。

谷城至竹溪高速公路25至27标段沿线主要以绢云母片岩为主,缺乏良好的路基填料。基于节省投资及保护环境考虑,对绢云母片岩粗粒料进行改性,以适合于高速公路路基填筑是非常有意义的。本文针对绢云母片岩设计了几种改性方案,并进行相关基本力学性质试验,试验内容包括绢云母片岩界限含水率、标准最大干密度试验以及绢云母片岩及其改性料的室内击实试验、承载比(CBR)试验、回弹模量试验等<sup>[11]</sup>。从而提出绢云母片岩粗粒料改性的最佳方法、配合比及其适用范围。对绢云母片岩的路基填料的应用,提出了初步的可行性方案。

## 2 试验内容

### 2.1 试验材料的基本性质分析

从高速公路现场采集的绢云母片岩属于变质岩类,片状,鳞片变晶结构,是一种极软岩,多呈灰绿色、浅灰色,母岩结构大部分已被破坏,构造不

清晰,节理裂隙十分发育,岩体较破碎,矿物成份已显著变化,岩芯多呈砂砾状、半岩半土状,部分碎石状。图1为典型的颗粒级配曲线,其颗粒粒径不均匀系数 $C_u=84.0$ ,曲率系数 $C_c=3.4$ ,不能同时满足 $C_u>5$ , $1<C_c<3$ 的条件。对其进行界限含水率试验,结果表明液限 $w_L=37.3\%$ ,塑限 $w_p=19.4\%$ 。所以绢云母片岩的细粒料塑性指数为 $w_p=17.9$ ,其黏性颗粒成分含量较大,属级配不良黏性粗粒土。

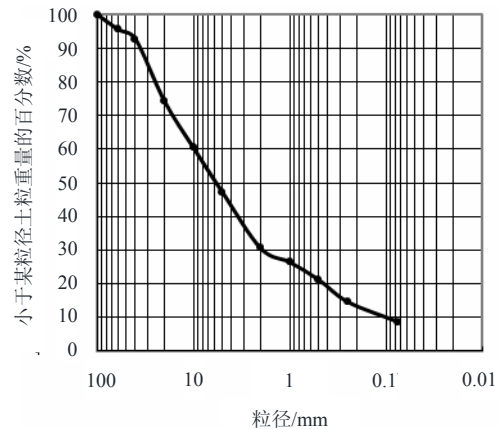


图1 绢云母片岩级配曲线

Fig.1 Grading curve of sericite schist

### 2.2 绢云母片岩改性设计

根据现场实际情况,临近区域黏土和红砂岩相对较为丰富,水泥易于购买,本文设计改性方案为:在绢云母片岩粗粒料中分别添加3%水泥、5%水泥、20%黏性土( $I_p=24$ ),20%红砂岩,见表1。

表1 绢云母片岩的改性方案

Table 1 Modification scheme of sericite schist

试样	绢云母片岩	添加材料			
		+20%黏性土	+20%红砂岩	+3%水泥	+5%水泥
土样编号	SMS	20C	20RSS	3CEM	5CEM

首先,对绢云母片岩进行表面振动压实试验,再对绢云母片岩及其改性土进行室内重型击实试验,在此基础上再进行一些强度试验,如室内CBR试验和回弹模量试验。通过改性土之间的对比,分析出最佳改性方案。

### 2.3 表面振动压实与重型击实试验结果对比

压实度是路基施工质量检测的关键指标之一,表征现场压实后的密度状况,压实度越高,密度越大,材料整体性能越好。对于路基而言,压实度是指现场实际达到的干密度与室内标准最大干密度的比值。本文采用两种方法,即表面振动压实法与室内重型击实试验来求得最大干密度。

表面振动压实法的振动作用是自土体表面垂直向下传递的，更接近于现场压路机振动碾压的实际状况。基于这样的考虑，采用干法、湿法制样均得到绢云母片岩的标准最大干密度为  $1.92 \text{ g/cm}^3$ 。

图 2 为采用室内重型击实试验得出的绢云母片岩及其改性土的含水率和干密度关系曲线。由图可以看出，(1) 绢云母片岩添加不同改良料后，最佳含水率及最大干密度有所变化，但变化不是很大。说明设计的改性料对绢云母片岩的最佳含水率影响很小，见表 2。(2) 除添加红砂岩的改性料外，绢云母片岩及其各种改性料没有明显的峰值点，表明在最优含水率附近，含水率在较宽范围内的变动对压实效果的影响不大，有利于填料的压实。(3) 绢云母片岩最大干密度采用重型击实法与表面振动压实法试验结果相差较大，当采用表面振动压实法试验结果为  $1.92 \text{ g/cm}^3$ ，当采用重型击实法时为  $2.01 \text{ g/cm}^3$ ，主要原因是由于绢云母片岩容易颗粒破碎，重型击实过程中由于破碎率更高而使试样的级配发生较大的改变。

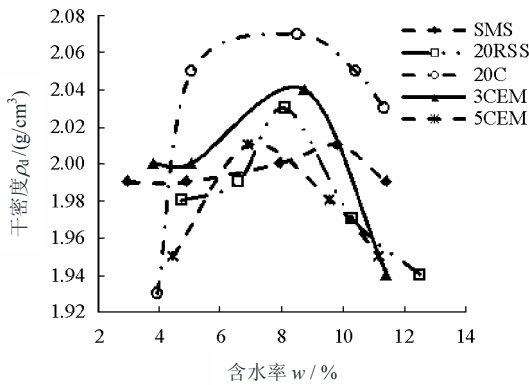


图 2 含水率与干密度关系曲线  
Fig.2 Curves of moisture contents with dry densities

表 2 试样最佳含水率与干密度情形  
Table 2 Optimum moisture content and dry density situation

参数	土样编号				
	SMS	20RSS	20C	3CEM	5CEM
最佳含水率/%	9.86	8.11	8.52	8.81	9.62
最大干密度/g·cm <sup>-3</sup>	2.01	2.03	2.07	2.04	1.97

### 2.4 室内 CBR 试验

加州承载比 (CBR) 试验是 1928 年美国加州公路局在进行沥青路面破坏调查时，为比较材料的强度而提出的<sup>[12]</sup>。CBR 试验模拟公路路基填料在满足压实度的情况时，处于受水浸泡时的最不利环境下土颗粒间孔隙被水充填，填料联结强度降低的实际

情况，是路基路面设计的主要参数之一，它不仅可与无侧限抗压强度试验作为无机结合材料的试验补充，还可解决砂砾类无黏性材料因颗粒间没有黏聚力，无法利用无侧限抗压强度试验的问题。

为获取试样对应不同压实度的 CBR 值，每种试料按最佳含水率制备 3 种干密度试件，每种干密度试件制 3 个，则共制 9 个试件，每层击数分别为 30、50、98 次，使试件的干密度从低于 95% 到等于 100% 的最大干密度。

图 3 为 4 种改性土的压实度与 CBR 之间的关系，图 4 为 4 种改性土的压实度与膨胀量的关系。

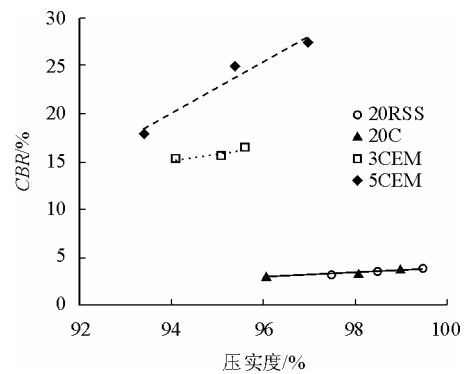


图 3 4 种改性土的压实度与 CBR 关系  
Fig.3 Relationships between degree of compaction and CBR of four modified soils

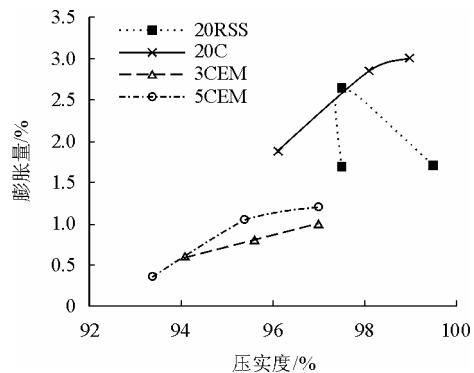


图 4 4 种改性料压实度与膨胀量关系  
Fig.4 Relationships between degrees of compaction and swell capacity of four modified soils

对比图 3 和图 4 可见，(1) 添加 20%黏性土和 20%红砂岩对该粗粒土的 CBR 均有一定影响，但幅度不是很大，这两种改性料都使 CBR 维持在 3.7 左右。满足高速公路部分下路堤的施工要求<sup>[13]</sup>。(2) 绢云母片岩土料添加 3%或 5%水泥后，CBR 值有明显提高，均可满足高速公路相关规范对路床填料 CBR 的要求，其中添加 5%水泥随压实度增大的 CBR 值的增加较添加 3%水泥更大。(3) 添加 20%

的黏性土或 20%红砂岩的压实度对 *CBR* 值影响不大,而添加 3%、5%的水泥的 *CBR* 值受压实度的影响,大致呈线性关系,与文献[14-15]所述结果一致。

(4)从图 4 形态来看,除了添加 20%的红砂岩外,其他改性料的膨胀量与压实度成正相关性,而添加 20%的红砂岩随着压实度的提高,膨胀量出现了先增后降的趋势,是由于红砂岩遇水易崩解的结果。

## 2.5 回弹模量试验

土基回弹模量可以表征土基的承载能力,能反映土基在瞬时荷载作用下的可恢复变形性质,是路面结构设计中的一个重要参数,也是衡量路基质量的基本指标之一。回弹模量较能反映土所具有的那部分弹性性质,因此土基回弹模量  $E$  的合理确定,直接关系到道路工程的经济与安全。

### 2.5.1 绢云母片岩不同击实数对强度的影响

为了能够反映不用击实功对回弹模量的影响,试验过程中控制土样的含水率为 9.86%,如图 5 所示。结果表明,(1)绢云母片岩的回弹模量与击实数成正相关性。由于这种土料属软质岩石类的粘性粗粒土,其粗颗粒间孔隙较大,导致土细颗粒很容易填充在孔隙中,而大颗粒土粒间又有一定的咬合力。另外,由于渗透系数较大,击实产生的超静孔隙水压力很快消散,使得有效应力提高。(2)绢云母片岩石料的回弹模量  $E$  较低,小于 32 MPa,如果直接作为路基填筑材料,必须采取改性措施,以满足强度要求。

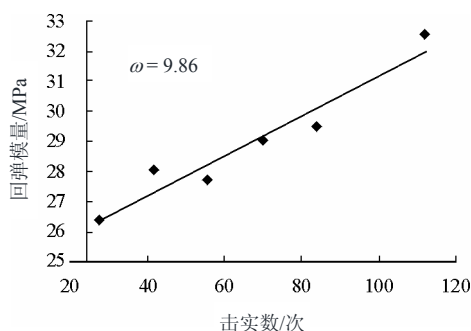


图 5 绢云母片岩的击实数与回弹模量的关系

Fig.5 Relationship between strike reals and modulus of resilience of sericite schist

### 2.5.2 室内*CBR*、回弹模量的对比分析

图 6 为绢云母片岩改性后的回弹模量和 *CBR* 对比情况。从图中可以看出,(1)绢云母片岩的回弹模量低于 32 MPa。经上述改性后的粗粒土,从图 6 可以看出回弹模量均有显著提高,均达到 50 MPa 以上。(2)添加 20%红砂岩和 20%黏性土尽管回弹模量很大,但是 *CBR* 只有 3.7,只能满足高速公路

下路堤填筑要求。(3)添加 3%水泥和 5%水泥回弹模量和 *CBR* 均很高,满足路基填筑要求。由于按照规范要求浸水 76 h,没有进行水泥养护,因此水泥改性所测得回弹模量和 *CBR* 值偏小。

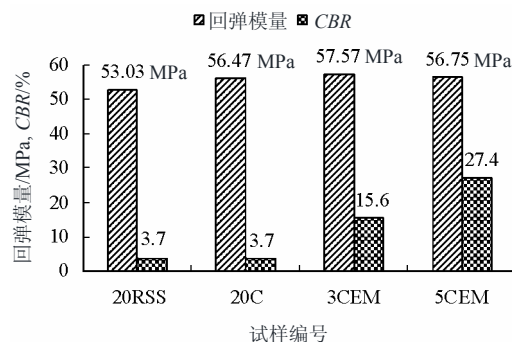


图 6 绢云母片岩改性土的回弹模量与 *CBR* 对比

Fig.6 Comparisons between modulus of resilience and *CBR* of sericite schist and its modified soils

## 3 结论

(1)绢云母片岩最大干密度采用重型击实法与表面振动压实法试验结果相差较大,当采用表面振动压实法时为  $1.92 \text{ g/cm}^3$ ,当采用重型击实法时为  $2.01 \text{ g/cm}^3$ 。这是由于绢云母片岩容易颗粒破碎,重型击实过程中由于破碎率更高而使试样的级配发生较大的改变。

(2)除添加 20%的红砂岩的改性料外,绢云母片岩及其他改性土料在最优含水率附近的较宽范围内变动对压实效果的影响不大,有利于填料的压实。

(3)绢云母片岩石料的回弹模量  $E$  较低,小于 32 MPa。经上述改性后的试料,回弹模量均有显著提高,均达到 50 MPa 以上。添加 20%红砂岩和 20%黏性土的试料 *CBR* 只有 3.7,只能满足高速公路下路堤填筑要求。添加 3%和 5%水泥改性后,*CBR* 提高幅度大,满足路基填筑要求。

(4) *CBR* 值与压实度有一定的正相关性,压实度越大, *CBR* 值也越大。添加 20%的红砂岩外,其他改性料的膨胀量与压实度成正相关性,而添加 20%的红砂岩随着压实度的提高,膨胀量出现了先增后降的趋势,是由于红砂岩遇水易崩解的结果。此外击实功对绢云母片岩的回弹模量有影响,并成正比例关系。

## 参考文献

- [1] 薄宫林, 小岛. 铁道部科学研究院译. 采用软岩弃碴的大型填土的设计和施工[J]. 土与基础, 1984, 32(7):

- 53—59.
- BO Gong-lin, Kojima Kobayashi. Design and construction of large scale sub-grade filling with soft rock and waste slag[J]. **Soil and Foundation**, 1984, 32(7): 53—59.
- [2] 刘建, 李建朋. 谷-竹高速公路原状片岩抗剪强度的水敏性研[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1719—1723.
- LIU Jian, LI Jian-peng. Study of shear strength watersensitivity of intact schist from Gu-Zhu expressway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(6): 1719—1723.
- [3] 刘新喜, 夏元友, 刘祖德, 等. 强风化软岩路基填筑适宜性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 903—907.
- LIU Xin-xi, XIA Yuan-you, LIU Zu-de, et al. Study of suitability for embankment of highly weathered soft rock subgrade[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(6): 903—907.
- [4] 郑明新, 方焘, 刁心宏, 等. 风化软岩填筑路基可行性室内试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊): 54—56.
- ZHENG Ming-xin, FANG Tao, DIAO Xin-hong, et al. Experimental study of feasibility of filled subgrade with weathered soft rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(Supp.): 54—56.
- [5] 于德海, 彭建兵. 三轴压缩下水影响绿泥石片岩力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 205—211.
- YU De-hai, PENG Jian-bing. Experimental study of mechanical properties of chlorite schist with water under triaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(1): 205—211.
- [6] 毛雪松, 郑小忠, 马磊, 等. 风化千枚岩填筑路基湿化变形现场试验分析[J]. 岩土力学, 2011, 31(8): 2300—2306.
- MAO Xue-song, ZHENG Xiao-zhong, MA Biao, et al. Field experimental analysis of wetting deformation of filled subgrade with weathered phyllite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 31(8): 2300—2306.
- [7] 冯美果, 陈善雄, 余颂, 等. 粉煤灰改性膨胀土水稳定性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1889—1893.
- FENG Mei-guo, CHEN Shan-xiong, YU Song, et al. Laboratory study on water stability of flyash-treated expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(9): 1889—1893.
- [8] 余飞, 余静, 陈善雄, 等. 膨胀土 CMA 改性与石灰改性对比试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 33(8): 100—3.
- YU Fei, YU Jing, CHEN Shan-xiong, et al. Comparison test between CMA-treated and lime-treated expansive soils[J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition)**, 2006, 33(8): 100—103.
- [9] 蒋涛, 付军, 周小文. 软岩面板堆石坝技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [10] 赵学忠. 绢云母微晶片岩风化石料做筑坝材料在昌宁县明山水库工程中的应用[J]. 水利建设与管理, 2008, (9): 39—41.
- [11] 交通部公路科学研究院. JTGE 40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [12] 三木五三郎. 日本土工试验法[M]. 陈世杰译. 北京: 中国铁道出版社, 1985: 305—406.
- [13] 中交第二公路勘察设计研究院. JTGD 30—2004 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 6—20.
- [14] 邓露, 李向东. 路基土的 CBR 强度与压实度关系的试验研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2005, 22(B05): 109—115.
- DENG Lu, LI Xiang-dong. Experiment study of the relationship between the CBR strength and degree of compaction of subgrade soil[J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology(City Science Edition)**, 2005, 22(B05): 109—115.
- [15] 朱志铎, 郝建新, 黄立平. CBR 试验影响因素及在工程中应注意的几个问题[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1593—1595.
- ZHU Zhi-duo, HAO Jian-xin, HUANG Li-ping. Influential factors in CBR test and several problems to be noticed in engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(9): 1593—1595.