论 文

# 膨胀土填料改进 CBR 试验方法的提出与验证

杨和平，赵鹏程，郑健龙

（长沙理工大学道路结构与材料交通行业重点实验室，湖南 长沙 410076）

摘 要：针对膨胀土的本质特征及其 CBR 强度往往达不到现行路基设计规范要求（≥3%）的现象，从制件时的浸水方式、上覆压力以及制样含水率三方面着手，全面分析了标准 CBR 试验方法用于评价膨胀土填料强度特性的不合理性。依据封闭包盖法成功修建填芯路堤实体工程中膨胀土的实际工况，提出一套评价膨胀土这类特殊土真实强度的改进 CBR 试验方法：采用重型击实标准、湿法最佳含水率制件，改试件浸泡顶部浸水为侧向浸水并增大上覆压力。通过对比分析两种土类（膨胀土和非膨胀土）六个土样的标准试验方法与改进试验方法的 CBR 测试结果，验证了改进试验方法的合理性和可行性，为膨胀土地区的路堤修建直接采用不同胀缩等级的膨胀土填筑下路堤提供了依据。

关键词：膨胀土；CBR；改进试验方法；侧向浸水；湿法击实试验

中图分类号：U416.12 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2007)12－1751－07

作者简介：杨和平(1954－ )，男，教授，博士生导师，主要从事路基路面工程、特殊土路基的教学科研工作。E-mail: cscuyang@163.com。

## Suggestion and verification on modified CBR test method for expansive soils fill

YANG He-ping，ZHAO Peng-cheng，ZHENG Jian-long

(Key Laboratory of Road Structure and Material of the Ministry of Communications, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

**Abstract:** In view of the characteristics of expansive soils and the situation that CBR (California Bearing Ratio) of expansive soils seldom satisfied the requirements of current specifications for the design of highway subgrades (CBR≥3%), from three aspects, i. e., soaking method of prepared samples, surcharge during soaking period and moisture content of prepared samples, the irrationality of using standard CBR test to estimate the bearing capability of expansive soils was extensively analyzed. According to the actual condition that the envelope and water barrier method was used to successfully build test embankments with core filled with expansive soils, a modified CBR test method to evaluate the real bearing capability of this kind of special soils was suggested and studied. The method included preparing samples with heavy compaction standard and the optimum moisture content in light of wet compaction test, changing the water soaking method from the top to the lateral of samples, meanwhile, increasing the load on the samples during the soaking period. The rationality and feasibility of the modified method were verified by comparing the test results of routine and modified CBR tests on six samples including expansive soils and nonexpansive soils. The evidence was provided for the construction of embankments in areas of expansive soils where the expansive soils with different swelling potentials could be directly used to fill the lower part of the embankments.

**Key words:** expansive soils; California Bearing Ratio; modified test method; lateral soaking; wet compaction test

## 0 前 言

膨胀土是自然地质过程中形成的一种多裂隙并具有显著胀缩特性的非饱和土，其典型特征是富含蒙脱石及混层矿物的胶粒（<0.002 mm）含量多，吸水后体积膨胀强度骤降，经压密后透水性差，渗透系数仅为 $10^{-10}$～$10^{-7}$ m/s。不泡水条件下，其无侧限抗压和抗剪强度常高于一般黏性土。

按照我国公路路基设计规范[1]，路堤填料必须满足 CBR 强度要求，这也是改革开放以来从国外引进的一项先进技术成果，对保证高速公路的建设质量起到了非常重要的作用。但凡真正的膨胀土，不论胀缩等级，其标准 CBR 测试结果往往达不到要求（CBR ≥ 3%）。因此，除少数经济发达地区将膨胀土掺灰改性做路堤填料外[2-4]，其它膨胀土地区（尤其西部）的路基修建往往采用弃土换填，造成极大的经济损失和

基金项目：交通部西部交通建设重点资助项目（2002318000）

收稿日期：2006－11－29

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

严重的生态环境破坏。膨胀土能不能作填料，现规范要求对膨胀土到底合适与否，这些问题一直为岩土及道路工程师所关注。为此许多专家学者开展过相关试验研究[5-8]。文献[5]研究的结论为“现行规范中的承载比试验环节不能完全适合膨胀土 CBR 试验，对像膨胀土这类特殊黏性土的 CBR 试验应该进行必要的补充”。文献[6]发现不同胀缩等级膨胀土 CBR 峰值对应的含水率均大于重型压实标准最佳含水率。文献[7]指出“CBR 试验规程还存在不足之处，应按照所在地区的水文地质特点以及路面的额定设计承载能力要求加以确定”。文献[8]对云南楚大公路膨胀土进行了大量 CBR 试验，发现试件泡水 4 d 后，顶层表土已完全膨胀、松散、泥化，无强度可言，而贯入试验又恰好在其上进行，3/4 以上试件测得贯入深度为 5 mm 比 2.5 mm 时的 CBR 值大，由此对用这种方法评价膨胀土填料提出质疑。

课题组分别在广西南友路、水南路和湖南常张路上修筑了十段膨胀土路堤实体工程，其中八段采用封闭包盖（非膨胀土包边、土工格栅边部加筋）技术将膨胀土直接填筑于下路堤堤芯，这些路段都经历三年以上通车考验，使用状态良好。南友路实体工程修筑前，笔者开展了不泡水的膨胀土 CBR 试验，以模拟路堤膨胀土被有效封闭后其 CBR 强度与土体初始含水率的关系，发现 CBR 值随制样含水率增加而降低，当试件含水率小于 25%以前 CBR 均大于 10%[9]，说明含水率是影响膨胀土强度的主要因素，若能把握好路堤土湿度的变化范围，膨胀土用作填料完全能满足强度要求。由此可见，膨胀土直接用作路堤填料是否可行，关键在于对其工程性质及 CBR 强度的认识是否正确，能否根据路基工程的受力特点将其填筑在路堤的合适部位，并采取正确的工程措施来保持其强度和稳定性。由于在我国的高速公路建设中 CBR 指标已深入人心，因此有必要研究并提出评价膨胀土填料强度的改进 CBR 试验方法。

## 1 标准试验方法存在的主要问题

### 1.1 浸水方式

《公路土工试验规程》（JTJ051-93）规定，试件泡水时水面应保持在试件顶面以上约 25 mm，时间为 4 昼夜（96 h），以模拟材料在使用过程中的最不利状态。对普通材料而言这种做法是合适的，但对膨胀土却不能反映其真实强度。为了证实这一点，取长沙黏土（低液限黏土）、宁明膨胀页岩风化破碎土（中膨胀土）和百色膨胀土（中膨胀土）三种土样，用标准击实（干法）得到的最佳含水率制作试件，上部泡水 4 d 后进行标准贯入，之后将试件分别脱模并测定其不同部位的含水率见表 1 和图 1。

表 1 标准 CBR 试件浸水后不同深度的含水率

Table 1 Moisture content at different depths of CBR samples after soaking

| 长沙黏土(19%) | | 宁明膨胀土(15%) | | 百色膨胀土(16%) | |
|---|---|---|---|---|---|
| 浸水深度/cm | 含水率/% | 浸水深度/cm | 含水率/% | 浸水深度/cm | 含水率/% |
| 1.2 | 21.0 | 1 | 29.8 | 1 | 28.1 |
| 3.6 | 19.8 | 3 | 25.3 | 2 | 23.8 |
| 6.0 | 19.7 | 5 | 21.3 | 6 | 18.6 |
| 8.4 | 20.4 | 7 | 19.9 | — | — |
| 10.8 | 20.3 | 9 | 20.5 | 10 | 19.5 |
| — | — | 11 | 22.2 | — | — |

注：括号内为最佳含水率。

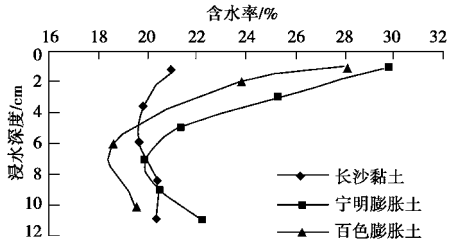



图 1 标准 CBR 试件含水率沿浸水深度变化

Fig. 1 Variation of moisture content of soaking standard CBR samples with soaking depth

可以看出：

(1) 试件含水率沿浸水深度变化呈非线性，中部变化最小，底部含水率明显低于顶部含水率。

(2) 膨胀土试件沿高度含水率变化大，说明其透水性差；长沙黏土由上而下含水率差值不到两个百分点，说明顶部浸水对正常土影响较小。

(3) 膨胀土试件顶部含水率均超出其制件含水率十几个百分点，充分反映了浸水方式的影响，也验证了文献[8]的结论。

### 1.2 上覆压力

标准试验方法规定在泡水和贯入过程中需在试样顶部加荷载板,目的是模拟该材料层受到路面结构重量产生的竖向力，并规定上覆荷载为 50 N（2.7 kPa）。但规范对填料 CBR 的取值标准则按路堤土填筑的部位划分，填筑层位不同所受上覆压力也不同，实体工程中膨胀土只用来填下路堤（路面底面下深度 1.5 m 以下），其上的填筑材料厚度（含路面）会大于 2 m，按土的重度，上覆压力至少可达 35 kPa。另一方面，增大上覆压力可使泡水试件的土粒间距减小，渗透性

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

减弱。为了模拟填料的真实工作状态，避免泡水试件极度饱水，试件泡水时有必要增大上覆压力。

### 1.3　试件制备时的含水率

膨胀土的天然含水率常很高，施工中通过晾晒很难满足干法击实最佳含水率条件，实际工程中多用湿法击实试验测得其最佳含水率进行施工控制，而标准 CBR 试验常用干法制件，这与实际也不相符。为此，对宁明膨胀土进行不同制件含水率下的标准 CBR 试验，结果见表 2、图 2。

表 2 宁明膨胀土 CBR 试验结果

Table 2 CBR test results of Ningming expansive soils

| 含水率/% | 15 | 17 | 21 | 25 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|
| CBR/% | 2.1 | 2.3 | 2.9 | 3.0 | 2.4 |

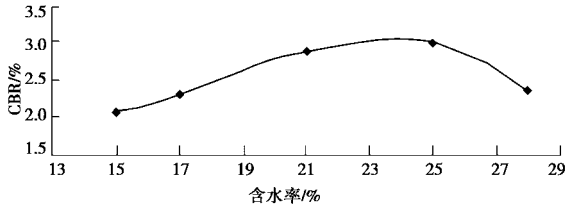



图 2 标准 CBR 值与制件含水率的关系

Fig. 2 Relationship between standard CBR and the initial moisture content

CBR 值随制件含水率的变化类似于击实曲线，这一结论同文献[6]。含水率较小时，CBR 随其增加而增大，当含水率达到 25%（该土的天然含水率平均值为 24.9%）左右时，CBR 出现最大值，它远大于干法最佳含水率（15%）的对应值。可见，制件含水率对 CBR 试验结果的影响之大。由膨胀土的性质可知，土的含水率越低，干密度越大，遇水后其膨胀量越大，强度衰减也越厉害，由此可见，标准试验方法测得的 CBR 不能真实反映膨胀土填料在实际工作状态下的强度。

## 2　改进 CBR 试验方法的提出

国际上一些岩土工作者[10-11]室内测定黏性土基静回弹模量时，在试样制备、浸水方式、模拟土体现场湿度变化等方面做了很多符合实际的改进，由于湿度是影响土基强度的根本原因，他们特别注重两点：①准确把握路基工作时的含水率（即平衡含水率）。该值通常大于施工时最佳含水率，按两者之差确定土体湿度变化范围来测定模量。②试筒侧向留孔，让水由试件侧面自由渗入，实现击实试件泡水时湿度均匀变化并充分饱水。这种改变可使试验条件更符合路基的实际工况，完全可借用来进行膨胀土填料强度的评价。

### 2.1　试验条件的改进

（1）浸水方式：由上部浸水改为侧向浸水，水位尽可能高但不淹没试筒。

（2）上覆压力：根据填料在路基中的填筑层位确定泡水试件顶部应施加的荷载大小，通过调整荷载块的数量来实现。

（3）制件含水率：采用湿法重型击实标准的最佳含水率。

### 2.2　试验仪器的改进

基本思路是沿用标准试验仪器并稍加改进，以满足改进的试验方法。

（1）试筒。在标准 CBR 试筒壁上均匀钻 3～6 mm 直径的群孔（见图 3），分布见图 4，使水能自由渗入且击实时土粒不易挤出。



图 3 改进的 CBR 筒

Fig. 3 Modified CBR cylinder

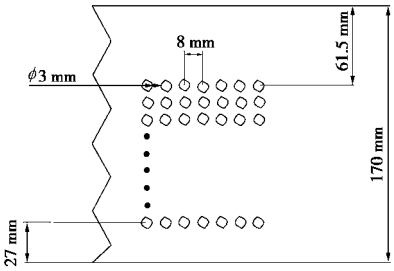



图 4 透水孔布置图

Fig. 4 Distribution of water-passing hole

（2）支架。为施加上部荷载块及安装百分表，自制了整体式量测支架（见图 5，6）。该装置可同时测试 8 个试件的膨胀变形量，每个试件用水桶单独泡水并与支架配套。



图 5 支架

Fig. 5 Bracket

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

表 3 三种膨胀土的土性指标

Table 3 Properties of three kinds of expansive soils

| 土样 | 天然含水率 $w$/% | 比重 | 液限/% | 塑性指数/% | 有效蒙脱石含量/% | 线缩/% | 体缩/% | 自由膨胀率/% | 颗粒组成/% | | | | 膨胀势 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | >0.075 mm | 0.075～0.005 mm | <0.005 mm | <0.002 mm | |
| ① | 24.9 | 2.77 | 52.91 | 25.45 | 17.64 | 7.5 | 14.58 | 45 | 1.48 | 56.04 | 42.48 | 40.12 | 中 |
| ② | 21.0 | 2.75 | 51.03 | 27.65 | 12.76 | 2.0 | 16.68 | 87 | 0.30 | 51.84 | 47.84 | 46.72 | 中 |
| ③ | 25.0 | 2.76 | 59.20 | 34.70 | 26.73 | 6.0 | 19.01 | 98 | 8.76 | 42.2 | 49.04 | 48.19 | 强 |

注：①宁明膨胀土②百色膨胀土③邓县膨胀土

表 4 三种非膨胀土的土性指标

Table 4 Properties of three kinds of nonexpansive soils

| 土样 | 比重 | 液限/% | 塑限/% | 塑性指数 | <0.074 mm 含量/% | <0.002 mm 含量/% | 土样定名 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 校园土 | 2.8 | 50.50 | 27.10 | 23.40 | 62.38 | 27.16 | 含砂高液限黏土 |
| S211 土 | — | — | — | — | 10.62 | — | 含细粒土砂 |
| 长沙黏土 | 2.7 | 43.43 | 22.81 | 20.62 | 82.10 | 13.00 | 低液限黏土 |



图 6 竖向百分表

Fig. 6 Vertical gauge

(3) 荷载块：根据上覆压力大小选取相应数量的荷载块施加于试件顶部，实现对实际工况的模拟（见图 7)。



图 7 施加荷载块

Fig. 7 Application of load

(4) 滤纸。规格为 50 cm×12.5 cm，将其覆盖与试件接触的筒内壁，一方面避免击实过程中土颗粒由透水孔挤出。另一方面利用滤纸本身的吸湿性能，使试件浸水更均匀（见图 8)。

### 2.3 试验操作及要点

基本操作同标准试验，不同点有：①由湿法重型击实确定土样的最佳含水率；②土料倒入试筒前，先安放滤纸并使之紧贴筒壁覆盖所有透水孔；③根据选定的上覆压力确定荷载块数量，将其置于试件顶部的多孔板上。调整支架和拉杆并安装好百分表；④试件泡水时，控制水面淹没最上一排透水孔不溅入试筒内。



图 8 滤纸

Fig. 8 Filter paper

## 3 改进试验方法的验证

为验证改进 CBR 试验方法的合理性以及改进仪器的可靠性，对三种膨胀土（宁明、百色、邓县膨胀土）及三种非膨胀土（长沙黏土、校园土、S211 土）进行了标准方法和改进方法的 CBR 对比试验。

### 3.1 试验用土基本性质

三种膨胀土及三种非膨胀土的土性指标见表 3 和表 4。

### 3.2 浸水方式对 CBR 试验的影响

由重型标准干法击实确定的最佳含水率制备试件，两种方式浸水，上覆压力均采用 2.7 kPa，泡水 4 d 后进行标准贯入，测试结果见表 5 (括号内为试件距顶面 1 cm 处土样含水率)。

表 5 不同浸水方式下六种土的 CBR 测试值

Table 5 CBR of six samples under different soaking states 单位 %

| 土样 | 侧向浸水 | 上部浸水 |
|---|---|---|
| 宁明膨胀土 | 2.4(27.4) | 2.1(29.8) |
| 百色膨胀土 | 3.2(25.9) | 2.3(28.1) |
| 邓县膨胀土 | 2.7(28.7) | 2.4(29.2) |
| 校园土 | 25.7(21.1) | 23.3(22.4) |
| S211 土 | 38.3(12.3) | 41.2(12.1) |
| 长沙黏土 | 16.7(20.3) | 16.4(21.0) |

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

由表 5 可以看出，浸水方式对膨胀土的 CBR 值影响很大，与上部浸水相比，侧向浸水测得的 CBR 值均增大；而非膨胀性土无论何种浸水方式，同一种土所测得的 CBR 值及测点含水率都相差不大（CBR 的相对误差均小于 10%）。因此，浸水方式直接影响膨胀土强度测试结果，侧向浸水能够较好的反映膨胀土的真实强度。

为了深入探讨浸水方式的影响，将试件脱模后沿不同高度取样测含水率，得两种浸水方式下各试件含水率沿浸水深度的变化规律见图 9。

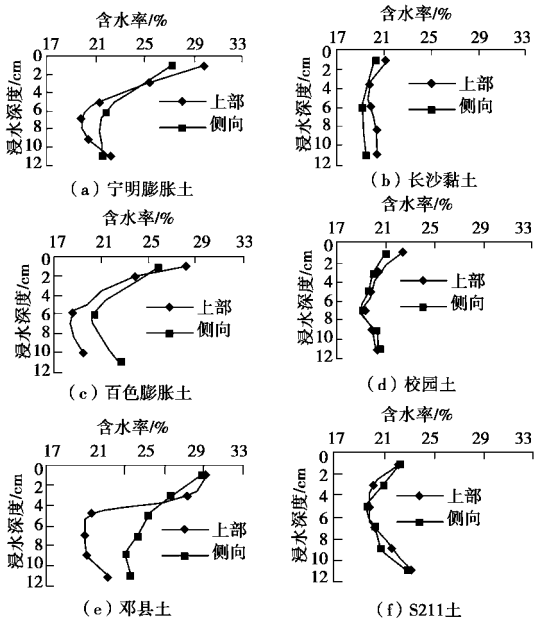



图 9 两种浸水方式下试件含水率沿试件高度的变化

Fig. 9 Variation of moisture content of samples with height under two different soaking states

分析图 9 不难发现：

（1）非膨胀性土渗水较均匀，三种土的两对比曲线都很靠近，且含水率沿深度（12 cm 内）的最大变化值都不超过 3%（仅 S211 土为 3%），再次表明浸水方式对正常土的影响小。

（2）膨胀土对比曲线的形状明显不同于正常土，试件顶部比中部的含水率大得多，两种浸水方式下试件沿深度的含水率差值都较大。

（3）膨胀土侧向浸水的效果优于上部浸水：①整个试件湿度的变化相对均匀；②试件总的含水率增大。其结果是能更好地反映其真实强度。

为进一步分析浸水对不同土类的影响，将侧向浸水试件脱模后按上、中、下切成三个土饼，每个土饼沿径向由外到内依次挖取 3 个土样测其含水率，得到浸水后不同层位径向含水率的变化规律，结果见表 6。

表 6 六种土侧向浸水含水率径向分布

Table 6 Radial distribution of moisture content of samples of six kinds of soils　　单位：%

| 土名 | 层位 | 试件径向由外至内/mm | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 12.0 | 36.0 | 60.0 |
| 长沙黏土 | 上 | 20.4 | 20.4 | 20.3 |
| | 中 | 19.6 | 19.3 | 19.1 |
| | 下 | 19.9 | 19.8 | 19.5 |
| 百色膨胀土 | 上 | 30.1 | 29.2 | 28.1 |
| | 中 | 23.9 | 21.5 | 20.4 |
| | 下 | 23.7 | 22.2 | 22.6 |
| 宁明膨胀土 | 上 | 30.2 | 28.9 | 27.4 |
| | 中 | 22.0 | 21.7 | 21.9 |
| | 下 | 22.5 | 21.8 | 21.5 |
| 邓县膨胀土 | 上 | 28.0 | 26.7 | 24.9 |
| | 中 | 24.2 | 23.1 | 22.9 |
| | 下 | 20.9 | 20.1 | 21.1 |
| 校园土 | 上 | 20.9 | 20.3 | 19.5 |
| S211 土 | 上 | 12.3 | 11.5 | 11.3 |

分析表 6 得出总的变化规律是：

（1）黏粒含量多的土（粒径<0.002 mm，含宁明、百色、邓县、校园土）含水率沿径向变化较大（外大内小），粗粒为主的变化较小，表明细粒土透水性较差。

（2）膨胀土比非膨胀土沿径向的含水率变化大（均为上层），邓县土的差值为 3.1%，宁明土为 2.8%，百色土为 2.0%，校园土为 1.4%。

（3）膨胀土上、中、下三层沿径向含水率变化不一样，上层含水率变化最大，下层其次，中层最小。

### 3.3　上覆压力对 CBR 试验的影响

对六种土样进行侧向浸水不同上覆压力下的 CBR 试验。其中宁明土为湿法最佳含水率（21%）制件，其余均以干法最佳含水率制件，见表 7 图 10。

表 7 六种土样不同荷载下 CBR 值

Table 7 CBR of six kinds of soils under different loads　　单位：%

| 土样 | 荷载/kPa | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2.7 | 10 | 20 | 30 | 40 | 增量相对变化率 |
| 宁明土 | 3.5 | 6.2 | 8.7 | 10.2 | 10.8 | 2.09 |
| 百色土 | 3.2 | — | 5.1 | 5.9 | 6.5 | 1.03 |
| 邓县土 | 2.7 | — | 13.3 | — | 22.1 | 7.18 |
| 校园土 | 25.7 | — | 33.3 | — | 43.2 | 0.68 |
| S211 | 38.3 | — | 49.2 | — | 52.9 | 0.38 |
| 长沙黏土 | 16.7 | — | — | — | 20.0 | 0.20 |

注：增量相对变化率 $=\dfrac{\text{40 kPa对应的CBR值}-\text{2.7 kPa对应的CBR值}}{\text{2.7 kPa对应的CBR值}}$。

表 7、图 10 说明：

（1）增大试件上覆压力可提高其 CBR 强度。因上覆压力增大，土中有效应力随之增大，同时试件中土颗粒间距变小，阻碍了水分向土中渗入。

（2）膨胀土比非膨胀土的 CBR 增量相对变化率大，黏粒含量多的土比粗粒土的 CBR 增量相对变化率大，说明增大上覆压力对膨胀土有利，是合理的。

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

（3）即使侧向浸水且增大上覆压力，膨胀土的 CBR 强度仍比非膨胀性土的小得多，说明浸水后膨胀土强度性能较差。

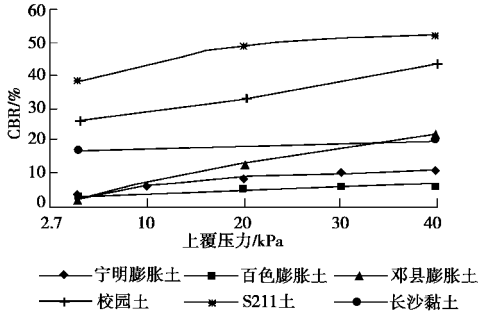



图 10 不同荷载下的 CBR 值

Fig. 10 CBR under different loads at lateral soaking state

### 3.4 制件含水率对 CBR 值的影响

为研究制件含水率对改进 CBR 试验的影响，对三种膨胀土进行不同试件制备含水率、两种浸水方式下的 CBR 试验，采用重型击实且泡水时的上覆压力均为 2.7 kPa，测试结果见表 8。

表 8 三种膨胀土 CBR 试验结果

Table 8 CBR test results of three kinds of expansive soils

单位：%

| 制件含水率/% | 宁明膨胀土 | | 邓县膨胀土 | | 百色膨胀土 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 上部浸水 | 侧向浸水 | 上部浸水 | 侧向浸水 | 上部浸水 | 侧向浸水 |
| 13 | — | — | 1.9 | 2.5 | — | — |
| 15 | 2.1 | 2.4 | — | — | 2.2 | 2.9 |
| 16 | — | — | 2.4 | 2.7 | — | — |
| 17 | 2.3 | 3.1 | — | — | 2.4 | 3.4 |
| 19 | — | — | 3.6 | 4.0 | 2.7 | 4.0 |
| 20 | — | — | — | — | 2.6 | — |
| 21 | 2.9 | 3.5 | — | — | — | 3.5 |
| 22 | — | — | 6.9 | 8.2 | 1.9 | — |
| 23 | — | — | — | — | — | 2.8 |
| 25 | 3.0 | 4.6 | 5.4 | 5.8 | — | — |
| 28 | 2.4 | 2.9 | — | — | — | — |

分析图 11、表 8 可发现

（1）不管哪种膨胀土和浸水方式，CBR 值随制件含水率的变化规律类似于击实曲线，两种浸水方式下的 CBR 峰值大致对应同一个含水率。

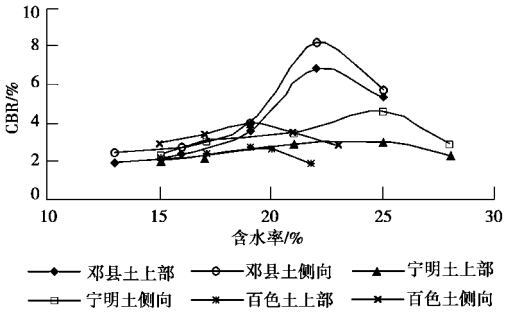



图 11 侧向浸水 CBR 值与制件含水率的关系

Fig. 11 Relationship between lateral soaking CBR and initial moisture content

（2）侧向浸水 CBR 值变化曲线均位于对应的上部浸水 CBR 值变化曲线的上方，说明改进试验方法确实能够提高膨胀土的 CBR 强度。

（3）宁明土 CBR 峰值对应的含水率为 25%，远大于干法重型击实的最佳含水率（15%），很接近其天然含水率（24.9%），对应的稠度为 1.10；邓县土 CBR 峰值对应的含水率为 22%，也远大于干法重型击实的最佳含水率（16%），接近天然含水率（25%），对应稠度为 1.07；百色土 CBR 峰值对应的含水率为 19%，同样远大于干法重型击实的最佳含水率（16%），也接近天然含水率（21%），对应的稠度为 1.16。

（4）制件含水率对测试结果有很大影响。天然含水率附近压实的膨胀土，其强度和水稳性最好。而湿法重型击实最佳含水率比较接近天然含水率（宁明土的湿法 $w_{OP}$=21%，天然含水率为 24.9%），因此，考虑路基的长期强度和稳定性，宜用湿法 $w_{OP}$ 制备试件。

### 3.5 两种上覆压力下 CBR 随制件含水率的变化规律

对三种膨胀土采用侧向浸水、20 kPa 的上覆压力进行试验，测得 CBR 值随不同制件含水率的变化曲线并与 2.7 kPa 上覆压力下对应的曲线进行比较，结果如图 12 所示，可以看出：

（1）20 kPa 上覆压力下的关系曲线同样具有峰值。且三条曲线都位于 2.7 kPa 下对应曲线的上方，表明增大上覆压力能提高 CBR 值。

（2）与 2.7 kPa 上覆压力相比，20 kPa 下的 CBR

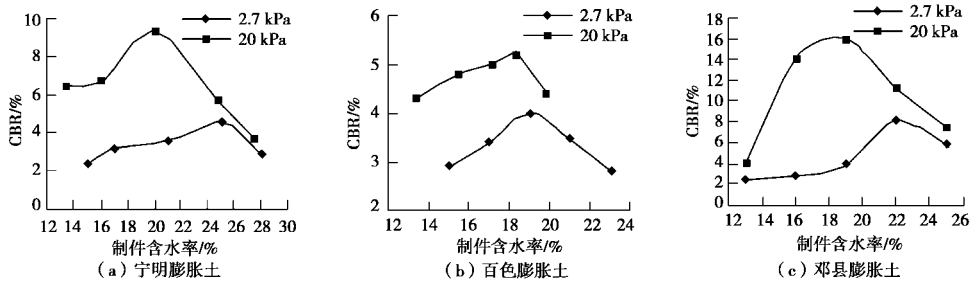



图 12 两种不同上覆压力下 CBR 随初始含水率的变化

Fig. 12 Variation of CBR with initial moisture content under two different surcharges

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

峰值对应的含水率有所减小。其中宁明土降幅最大（5%），但仍为 20%，非常接近湿法重型击实的 $w_{OP}$。

（3）与 2.7 kPa 上覆压力相比，20 kPa 下的 CBR 峰值增大较多，分别提高 102%（宁明土）、30%（百色土）、94%（邓县土）。若考虑到泡水时上覆压力的增大，评价路堤填料的 CBR 指标取值也提高 50%，三种膨胀土仍都满足填料的强度要求，这也表明用改进 CBR 试验方法评价填料时像邓县土这样的强膨胀土也可用作下路堤填料。

## 4 结　论

（1）膨胀土不是一种理想的筑路材料这是不争的事实。但从 21 世纪高速公路建设经济、环保和可持续发展的理念出发，有必要探讨它在路基修建中直接作为填筑材料的可行性。

（2）膨胀土因其特殊的工程性质以及在路堤实体工程中的填筑状态，采用标准 CBR 试验方法来评价它能否用作路堤填料存在不合理性，为了真实地反映其强度，有必要提出更切合实际的试验条件对现有的方法进行相应的改进。

（3）标准 CBR 试验方法在浸水方式、浸水时的上覆荷载和制件含水率方面都不能真实反映路堤填芯膨胀土实际工作状态，本文提出了改进试验方法：①试件浸泡采用侧向浸水；②浸水时的上覆荷载采用 20 kPa；③土样制件含水率采用湿法重型击实的最佳含水率。这些改进的有效性和合理性都得到了试验验证。

（4）系统的室内试验研究结果以及现场多个实体工程的应用效果表明，无论从强度和稳定性考虑，膨胀土可以直接用作下路堤填芯材料，但其前提条件是必须采取物理处治技术，即对膨胀土填芯部分进行有效的封闭包盖。

（5）若只以 CBR 强度作为评价标准，采用本文提出的改进 CBR 试验方法，甚至某些强膨胀土也可直接用做填料，这是对现行标准和规范的一个突破，具有重大的工程价值。

参考文献：


[1] JTGD30—2004 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005. (JTGD30—2004 Design code of highway subgrade[S]. Beijing: China Communications Press, 2005. (in Chinese))

[2] 王保田, 武良金, 向文俊, 等. 改良膨胀土筑堤技术研究[J]. 岩土力学, 2005, **1**: 87－90. (WANG Bao-tian. WU Liang-jin, XIANG Wen-jun, et al. A study of construction of expressway embankment with modified soies[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **1**: 87－90. (in Chinese))

[3] 郭爱国, 刘观仕, 孔令伟, 等. 高速公路建设中中膨胀土特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, **3**: 397－403. (GUO Ai-guo, LIU Guan-shi, KONG Ling-wei, et al. Testing study on properties of mid-expansive soil for expressway construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **3**: 397－403. (in Chinese))

[4] 郭兴伦, 秦诗平. 膨胀土作为路堤填料的应用探讨[J]. 交通科技与经济, 2004, **6**: 13－15. (GUO Xing-lun, QIN Shi-ping. Discussion of application of expanding soil to the road bank padding[J]. Technology and Economy in Areas of Communications, 2004, **6**: 13－15. (in Chinese))

[5] 郑　波, 杨果林. 膨胀土的承载比试验初步探讨[J]. 西部矿探工程, 2005, **3**: 42－43. (ZHENG Bo, YANG Guo-lin. Elementary research of bearing rate of expansive soil[J]. West-China Exploration Engineering, 2005, **3**: 42－43. (in Chinese))

[6] 孔令伟, 郭爱国, 陈善雄. 膨胀土的承载强度特性与机制[J]. 水利学报, 2004, **11**: 1－9. (KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, CHEN Shan-xiong. Characteristics and mechanism of bearing strength of expansive soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, **11**: 1－9. (in Chinese))

[7] 陈柏年, 朱凤艳, 韩　勤. CBR 试验内在机理研究及影响因素的分析[J]. 交通标准化, 2001, **1**: 28－30. (CHEN Bo-nian, ZHU Feng-yan, HAN Qin. Study on the mechanism of CBR test and analysis on its influence factors[J]. Communications Standardization, 2001, **1**: 28－30. (in Chinese))

[8] 杨和平, 郑健龙. 云南楚大公路膨胀土的土性试验研究[J]. 中国公路学报, 2002, **1**: 10－14. (YANG He-ping, ZHENG Jian-long. Experimental research on properties of expansive soil on Chu-Da expressway in Yunnan[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, **1**: 10－14. (in Chinese))

[9] YANG He-Ping, ZHENG Jian-Long. The new engineering treatment techniques of expansive soil subgrade for Guangxi Nanning-Youyiguan expressway[C]// Proceedings of The Fourth International Conference on Unsaturated Soils, 2006: 439－450.

[10] UZAN Jacob. Characterization of clayey subgrade materials for mechanistic design of flexible pavements[J]. Transportation Research Recors, 2003, **2**(1): 189－195.

[11] 杨树荣, 拱祥生, 黄伟庆, 等. 不饱和凝聚性路基土壤回弹模数之研究[C]// 第二届全国非饱和土学术研讨会论文集, 2005, **4**: 425－435. (YANG Shu-rong, GONG Xiang-sheng, HUANG Wei-qing, et al. Resilient modulus of unsaturated cohesive subgrade soils[C]// The Second Chinese National Conference on Unsaturated Soils, 2005, **4**: 425－435. (in Chinese))


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