

# 含砾砂岩 CBR 值的影响因素研究

庄开伟, 杨建华

(四川路桥集团 大桥分公司, 四川 成都 245200)

**摘要:** CBR 值是评定土基(或其他路面材料)承载能力的重要参数,其大小取决于许多因素。通过对不同粒径范围的含砾砂岩进行 CBR 试验,分析了颗粒粒径、矿物成分、泡水时间和击实次数等因素对 CBR 值的影响,并利用双因素无重复分析法对上述影响因素进行了显著性分析。结果表明:含砾砂岩经压实后浸水仍不易软化,强度稳定,在南方强降雨地区,可用来填筑路基;矿物组成、泡水时间和击实次数对含砾砂岩的 CBR 值影响较大,粒径大小和干密度对 CBR 值的影响相对较小;当难以通过增大夯实功来提高路基的填筑强度时,可通过增加粗颗粒的含量来实现路基承载强度的提高。

**关键词:** CBR 值; 颗粒组成; 泡水时间; 击实次数; 粗颗粒

中图分类号: TU413.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2010)04-0017-05

## Analysis on Effect Factors of CBR of Gravel-Bearing Sandstone

Zhuang Kaiwei, Yang Jianhua

(Great Bridge Branch, Sichuan Road and Bridge Group, Chengdu 245200, China)

**Abstract:** CBR is the key parameter to evaluate the load-carrying capacity of subgrade, which depends on many factors. By CBR tests on gravel-bearing sandstones of different particles, analyses the influence factors such as particle component, mineral component, immersion time and striking times, and analyses the prominent property of the above factors by means of nonrepeative double factors variance analysis. The results show that the compacted gravel-bearing sandstone after immerdion is difficult to be soften and has stable strength, which can be used to fill subgrade in southern heavy rainfall area, and the main influence factors of CBR is mineral component, immersion time and the compaction times, the impacts of particle size and dry density is relatively small. While it is difficult to improve the filling strength by increasing tamp power, increasing the content of coarse particles is a way to improve load-carrying capacity of subgrade.

**Keywords:** CBR value; particle component; immersion time; compaction times; coarse particle

## 0 引言

承载比试验是由美国加州公路局首先提出的一种评定土基(或其他路面材料)承载能力的试验,所得结果简称 CBR(california bearing ratio,即加州承载比)值,该指标能反映试件在进行贯入试验之后,部分土体与整体之间产生相对位移(即剪切)时,在滑动面(即剪切面)上所产生的抗剪力特性,是土壤抗局部

剪切力强度(潜在强度)的反映。其值反映到公路路基上,则是指路基的抗局部剪切能力<sup>[1-2]</sup>,用于评定基层、垫层或土基材料的相对承载力。近年来,我国《公路路基设计规范》和《公路沥青路面设计规范》提出将 CBR 值作为选择路基填料的双控标准之一,与压实度一起作为路基施工的控制指标。

土体的剪切阻力取决于许多因素,完整的剪切阻力方程具有下列形式:

收稿日期: 2010-04-26

通信作者: 庄开伟(1975-),男,四川阆中人,四川路桥集团大桥分公司工程师,主要从事桥梁施工与管理工作,

E-mail: 1047634861@qq.com

剪切阻力  $= f(e, \varphi, C, \sigma', c', H, T, \varepsilon, d_e, S)$ ,

式中:  $e$  为孔隙比,  $\varphi$  为内摩擦角,  $C$  为土的矿物成分,  $\sigma'$  为有效正应力,  $c'$  为粘聚力,  $H$  为应力历史,  $T$  为温度,  $\varepsilon$  为应变,  $d_e$  为应变速率,  $S$  为土的颗粒组成。

在试验条件和方法相同时, 影响土体 CBR 值的主要因素为土体的颗粒组成和矿物成分含量。目前, 关于承载比影响因素的研究并不多, 本文结合工程实际, 对含砾砂岩进行室内 CBR 试验, 研究了颗粒组成、矿物成分及泡水时间、最大颗粒粒径和击实次数对填料 CBR 值的影响。

表 1 含砾砂岩物理指标

Table 1 The physical indicates of gravel-bearing sandstone

天然含水率/%	饱和度/%	对水的相对密度	孔隙比	天然密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	液限/%	塑限/%
1.8~2.6	72.3~78.6	2.78	0.095~0.105	2.58~2.61	24.1	21.9

## 1.2 试验设计

室内 CBR 试验按《公路土工试验规程》中规定方法进行, 按击实试验重型 II·2 方法制备试件。为了研究击实功及最大颗粒粒径等对 CBR 值的影响, 分别对最大粒径为 38 mm 和 20 mm 的试样按每层 30, 50, 98 击 3 种击实次数进行击实。按泡水时间不同, 将试件分成 4 组进行试验, 第一组试件泡水 24 h (1 d), 第二组试件泡水 96 h (4 d); 第三组试件泡水 168 h (7 d); 第

## 1 CBR 试验

### 1.1 含砾砂岩天然状态和结构特征

试验所取含砾砂岩呈深褐色弥散状结构, 所嵌鹅卵石粒径最大为 15 cm, 一般粒径为 3~5 cm, 鹅卵石呈弥散状散布于砂粒和少量黏粒级基质中, 其间一般无接触。整体结构属糜棱角砾岩, 微结构较致密, 以边-面接触方式相连接, 吸附的黏粒物质较少, 结构单元无定向性。锤重敲时无凹陷, 难以破碎, 用镐不能挖掘, 弱风化至强风化呈块石状。其物理指标见表 1。

四组试件泡水 264 h (11 d)。每次试验均进行 CBR 值、浸水膨胀量、吸水量、干密度的测试, 作出含砾砂岩击实后试件 CBR 值与干密度  $\rho_d$  关系的散点图, 研究 CBR 值随泡水时间等因素的变化规律。

### 1.3 试验结果

表 2 和 3 为含砾砂岩强风化~全风化混合料试样试件经不同泡水时间的 CBR 试验结果。

表 2 粒径  $\leq 38$  mm 的击实试件 CBR 的试验结果

Table 2 Test results of CBR values of compaction samples with particle size  $\leq 38$  mm

泡水时间/d	30 击				50 击				98 击			
	CBR 值/%	膨胀量/%	吸水质量/g	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	CBR 值/%	膨胀量/%	吸水质量/g	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	CBR 值/%	膨胀量/%	吸水质量/g	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
1	63.6	0.04	104	2.14	104.6	0.03	98	2.23	177.9	0.04	89	2.30
4	46.5	0.05	107	2.15	98.4	0.04	106	2.26	158.7	0.05	105	2.29
7	45.2	0.06	110	2.17	96.8	0.04	110	2.24	156.2	0.05	109	2.28
11	43.8	0.04	111	2.16	94.8	0.04	96	2.25	155.2	0.07	103	2.32

表 3 粒径  $\leq 20$  mm 的击实试件 CBR 的试验结果

Table 3 Test results of CBR values of compaction samples with particle size  $\leq 20$  mm

泡水时间/d	30 击				50 击				98 击			
	CBR 值/%	膨胀量/%	吸水质量/g	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	CBR 值/%	膨胀量/%	吸水质量/g	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	CBR 值/%	膨胀量/%	吸水质量/g	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
1	50.6	0.04	94	2.14	99.6	0.03	98	2.23	168.9	0.04	87	2.31
4	39.5	0.05	101	2.15	87.4	0.04	99	2.26	153.7	0.05	91	2.28
7	38.2	0.06	107	2.17	86.8	0.04	102	2.24	152.2	0.05	101	2.30
11	38.8	0.04	121	2.16	84.8	0.04	111	2.25	148.2	0.07	104	2.31

总的来看含砾砂岩击实试件浸水膨胀量测试值极小, 其值在 0.03%~0.07% 之间, 说明它基本属于无膨胀性岩土, 单纯从浸水膨胀量来说, 它还是一种较好的路基填筑材料。但当浸水时间较长时, 在外表面产生薄层淤泥。随着试件被击次数的增加, CBR 值相应

增大, 粒径  $\leq 38$  mm、击实数为 30, 50, 98 次且泡水 11 d 的击实试件, 其 CBR 值分别为 43.8%, 94.8% 和 155.2%, 而吸水量有所减少。相同击实条件下, 随着泡水时间的增加, 击实试件的 CBR 值相应减少, 而吸水量相应增大。粒径  $\leq 38$  mm 且击实数 98 次的击实试件, 泡水

1 d, 4 d, 7 d和11 d对应的CBR值分别为177.8%, 158.7%, 156.2%和155.2%, 由此可以说明含砾砂岩强风化~全风化混合料击实试件强度性能好, 应用它填筑路堤刚度高, 遇水稳定性好, 完全能满足《公路路基设计规范》对 CBR 值的要求。

## 2 CBR 试验影响因素分析

在实际应用中, 一个试验结果(试验指标)往往受多个因素的影响。不仅这些因素本身会影响试验结果, 而且这些因素的不同水平的搭配也会影响试验结果。统计学上把多因素不同水平的搭配对试验指标的影响称为交互作用, 在多因素方差分析中, 把交互作用当成一个新因素来处理。

假设某个试验中, 有 2 个可控因素在变化, 因素 A 有 a 个水平, 记作  $A_1, A_2, \dots, A_a$ ; 因素 B 有 b 个水平, 记作  $B_1, B_2, \dots, B_b$ 。在它们的每一种搭配  $(A_i, B_j)$  条件下, 试验结果总体  $(\xi_{ij})$  服从正态分布  $N(\mu_{ij}, \sigma^2)$ ,  $(i=1, 2, \dots, a; j=1, 2, \dots, b)$ , 则 A 与 B 的不同水平组合  $A_i B_j$  共有 ab 个, 每个水平组合称为 1 个处理, 每个处理只作 1 次试验, 得 ab 个观测值  $X_{ij}$ , 由此可得双因素无重复实验表<sup>[3-4]</sup>。

水浸泡是 CBR 试验的基本条件, 压实度不同将会影响 CBR 值, 同时还需要对材料的粒径进行限制<sup>[5]</sup>。下面结合具体的工程试验, 分析有关因素对 CBR 试验结果的影响。

### 2.1 颗粒粒径的影响

综上所述, CBR 值反映的是试件的局部抗剪切强度。含砾砂岩只含有少量黏土, 大部分为风化块石, 因此基本没有内聚力, 其抗剪强度主要由内摩擦角组成, 这种内摩擦角包括颗粒间相对滑动、滚动和嵌接形成的阻力<sup>[6]</sup>, 而这些阻力主要与颗粒的粒度、强度、形状有关, 因此含砾砂岩的抗剪强度主要取决于土壤的成分、外形尺寸和粗糙度, 与其含水量关系不大。图 1 为击实次数为 30 次时不同颗粒组成的土样 CBR 值随泡水时间变化的曲线。

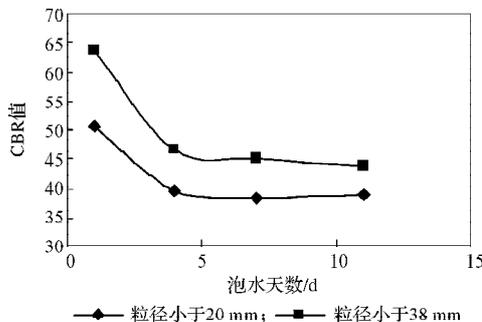


图 1 不同粒径土样 CBR 值随时间变化曲线  
Fig. 1 The time-varying wave of CBR values for the samples of different particle sizes

不难看出, 土粒径越大, CBR 值也越大。当难以通过增大夯实功来提高路基的填筑强度时, 可通过增加粗颗粒的含量来实现路基 CBR 值和强度的提高。

### 2.2 矿物组成的影响

土中的矿物成分也是影响 CBR 值的一个重要因素。室内试验对含砾砂岩的矿物组成采用 X 射线衍射分析, 结果详见表 4。

表 4 含砾砂岩矿物组成

Table 4 Mineral components of gravel-bearing sandstone

岩性	主要矿物质质量分数 /%			
	二氧化硅	白云母	高岭石	石灰石 $(\text{MgAl})_6(\text{SiAl})_4\text{O}_4(\text{OH})_8$
含砾砂岩	56.4	3.2	40.3	0.1

由表 4 可见, 含砾砂岩不含蒙脱石和高岭石, 而这些矿物成分都对软质岩的性质产生极其重要的影响。易风化和浸水易软化矿物含量不高, 属非膨胀性岩土。

### 2.3 泡水时间的影响

为了预测路基土或基层填料在使用期间经历气象变化和长年运行过程中的含水量的变化, 以及在最恶劣情况下来推算 CBR 值, 规范规定试样浸泡 96 h。当浸水后的试样发生剪切移动时, 并不是土体颗粒之间发生摩擦作用, 而是通过周围的水层相互摩擦。由于水层具有润滑作用, 因此水层越厚摩擦力就越小, 也就是说吸水量越多摩擦力就越小。图 2 为粒径小于 38 cm 时不同击实次数下 CBR 值随泡水时间变化曲线。

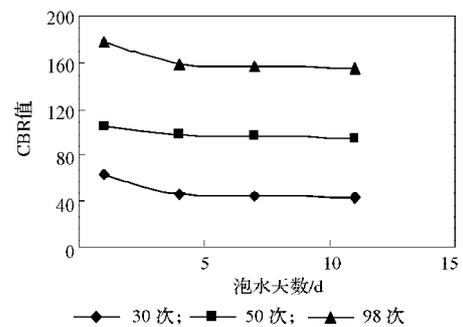


图 2 不同击实次数下 CBR 值随时间变化曲线  
Fig. 2 The time-varying wave of CBR values at different compaction times

综合图 1 和图 2 可知, 不论是粒径小于 38 mm 的土样还是粒径小于 20 mm 的土样, 在泡水时间小于 4 d (即 96 h) 时, 其 CBR 值随时间减小程度较大, 当泡水时间超过 4 d 后, CBR 值随时间变化曲线渐趋平缓。可见, 含砾砂岩在泡水初期 CBR 值减小较明显, 随着泡水时间延长, CBR 值渐趋稳定。

### 2.4 击实次数的影响

图 3 为含砾砂岩粒径小于 38 mm 时 CBR 值与击实次数的关系。从图 3 中可看出, CBR 值随击实次数的

增加而增大。当击实试件泡水时间为 1 d, 击实次数从 30 → 50 次、50 → 98 次时, 其 CBR 值分别增长了 64 % 和 70 %。当击实试件泡水时间为 4 d, 7 d 和 11 d, 击实次数从 30 → 50 次时, 其 CBR 值增长了 111 %~116 %; 击实次数从 50 → 98 次时, 其 CBR 值增长了 61 %~63 %。

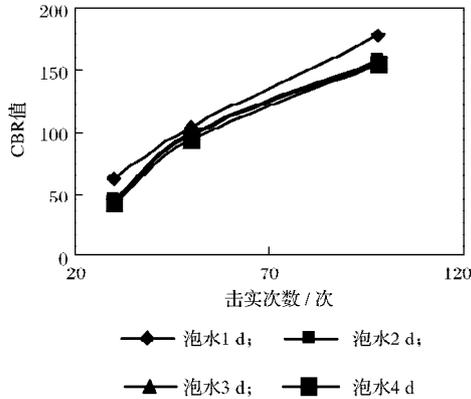


图 3 CBR 值随击实次数变化曲线

Fig. 3 The curve of CBR value varying with compaction times

## 2.5 干密度的影响

图 4 为含砾砂岩泡水时间为 11 d 时, 土样的 CBR 值随干密度变化的曲线。

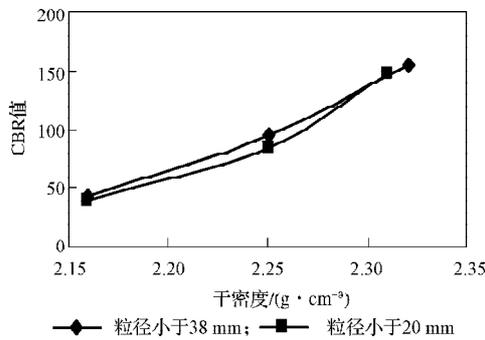


图 4 CBR 值随干密度变化曲线

Fig. 4 The curve of CBR value varying with dry density

由图 4 可见, CBR 值随干密度增大而增大, 由表 2 和 3, 发现吸水量基本变化不大, 膨胀量变化也很小。这也表明这种风化软质岩一经压实, 仍具有原岩浸水不易软化, 强度稳定的特点, 对在南方强降雨地区, 可以采用这类风化软质岩直接填筑路基, 能用于浸水地区填筑路基。

## 2.6 无重复双因素方差分析

表 5 是以粒径小于 20 mm 的含砾砂岩为试件所得到的影响因素值, 表 6 是以粒径小于 38 mm 的含砾砂岩为试件所得到的影响因素值和分析结果, 无重复双因素方差分析结果见表 7。

由方差分析结果可知, 泡水时间和击实次数的方差分析  $F$  值均远大于  $F$ -crit 值, 而且该  $F$  值对应的显著性水平均为 0.000 1~0.003 之间, 几近等于 0, 所以这

2 个因素对 CBR 值有极显著的影响, 且击实次数较泡水时间更为显著; 而粒径和最大干密度对 CBR 值的影响相对较小。

表 5 粒径 < 20 mm 含砾砂岩影响因素值

Table 5 Influence factor values of gravel-bearing sandstone with particle size < 20 mm

试验条件	观测次数	CBR 值		
		求和	平均	均方差
泡水时间 / d	1	319.1	106.37	3 533.06
	4	280.6	93.53	3 288.62
	7	277.2	92.40	3 272.52
	11	271.8	90.60	3 017.32
击实数 / 次	30	167.1	41.78	34.90
	50	358.6	89.65	45.24
	98	623.0	155.75	82.24

表 6 粒径 < 38 mm 含砾砂岩影响因素值

Table 6 Influence factor values of gravel-bearing sandstone with particle size < 38 mm

试验条件	观测次数	CBR 值		
		求和	平均	均方差
泡水时间 / d	1	346.1	115.37	3 353.06
	4	303.6	101.20	3 153.09
	7	298.2	99.40	3 085.32
	11	293.8	97.93	3 109.85
击实数 / 次	30	199.1	49.78	86.16
	50	394.6	98.65	17.90
	98	648.0	162.00	114.53

## 3 结论

结合工程实际, 对含砾砂岩进行了室内 CBR 试验。从颗粒组成、矿物成分以及泡水时间、最大颗粒粒径、击实次数和最大干密度几方面研究了其对填料 CBR 值的影响, 并对影响因素进行了显著性分析, 得出了以下结论:

1) 总的来看含砾砂岩击实试件浸水膨胀量测试值极小, 击数增多, 干密度增大, 而 CBR 值随干密度增大而增大, 但吸水量变化不大, 膨胀量亦变化很小, 表明这种风化软岩经压实, 仍具有原岩浸水不易软化, 强度稳定的特点, 对在南方强降雨地区, 可以采用这类风化软岩填筑路基。

2) 矿物成分组成, 泡水时间和击实次数对 CBR 值的影响较大, 在实际工程中, 应该控制路基的压实度, 然后根据所在地区的水文特性和路面承受荷载的实际情况, 确定浸水时间和 CBR 值的允许值, 以达到较佳的工程实用效果。

3) CBR 值随粒径大小和最大干密度增大而增大, 但受这两个因素的影响相对泡水时间和击实次数较

小, 但当填筑路基时, 如果难以通过增大夯实功来提高路基的填筑强度, 可通过增加粗颗粒的含量来实现路基承载强度的提高;

4) CBR 值还与土质类型、颗粒级配、含水量等因素有关, 本文未作全面分析, 有待进一步研究。

**表 7 无重复双因素方差分析结果综合表**

**Table 7 The results of nonrepeative double factors variance analysis**

试验条件	差异源	CBR 值平方和	自由度	CBR 值均方差	F 值	P-value 值	F-crit 值
颗 粒 粒 径 /mm	38	泡水时间	3	193.9	15.7	0.003 015	4.76
		击实次数	2	12 664.3	1 025.9	0.000 000	5.14
		误差	6	12.3			
		总计	11	25 984.40			
/mm	20	泡水时间	3	155.4	44.5	0.000 173	4.76
		击实次数	2	13 101.0	3 739.9	0.000 000	5.14
		误差	6	3.5			
		总计	11	26 689.20			
击 实 数 /次	30	击实次数	3	115.1	19.2	0.018 451	9.28
		粒径大小	1	128.0	21.3	0.019 101	10.13
		误差	3	6.0			
		总计	7	491.20			
泡 水 时 间 /d	4	击实次数	2	6 437.1	1 379.4	0.000 724	19.00
		粒径大小	1	88.2	18.9	0.049 067	18.51
		误差	2	4.7			
		总计	5	12 971.60			
/d	11	干密度	2	6 124.0	1 933.9	0.000 517	19.00
		粒径大小	1	80.7	25.5	0.037 086	18.51
		误差	2	3.2			
		总计	5	12 335.00			

**参考文献:**

[1] 杨广庆, 高民欢, 张新宇. 高速公路路基填料承载比影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 97-100.  
Yang Guangqing, Gao Minhuan, Zhang Xinyu. Study on Influence Factors of California Bearing Ratio (CBR) of Expressway Subgrade Materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1): 97-100.

[2] 刘达民, 程岩. 应用统计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.  
Liu Damin, Cheng Yan. Applied Statistics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.

[3] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.  
Sheng Zhou, Xie Shiqian, Pan Chengyi. Probability and Mathematical Statistics[M]. Beijing: Higher Education Press,

2002.

[4] 邓学钧. 路基路面工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.  
Deng Xuejun. Roadbed and Road Surface Engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2000.

[5] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.  
Chen Xizhe. Soil Mechanics and Foundation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.

[6] 叶国静. 路面永久变形的实验研究[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(1): 113-116.  
Ye Guojing. Experiment Study of Permanent Deformation of Road Surface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(1): 113-116.

(责任编辑: 李玉珍)