

膨胀土 CBR 强度特性机制分析

余 飞, 陈善雄, 许锡昌, 余 颂

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘 要: 以在建的周集—六安高速公路为依托工程, 采集典型弱、中膨胀土开展系统的试验研究, 探讨了膨胀土 CBR 强度随含水率、击实功和膨胀潜势的变化规律。试验研究表明: CBR 峰值含水率要大于最优含水率, 且膨胀潜势越高, 击实功越大, CBR 峰值含水率与最优含水率的差值越大。结合非饱和土气水状态理论, 分析了膨胀土 CBR 强度特性的内在机制。研究发现, CBR 强度特性的上述规律性, 主要是由不同饱和度条件下膨胀土所处的气水状态所决定的。当饱和度小于界限饱和度时, 土体处于非饱和状态, CBR 强度随饱和度的增加呈指数增长, 说明膨胀土的固有特性对 CBR 强度的影响很大; 当饱和度大于等于界限饱和度时, 膨胀土强度特性与饱和土类似, CBR 强度主要受干密度控制。

关键词: 膨胀土; 加州承载比 (CBR); 非饱和土理论; 饱和度

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

Characteristics and mechanism of California bearing ratio of expansive soils

YU Fei, CHEN Shan-xiong, XU Xi-chang, YU Song

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstracts: The influence of moisture content, compacting energy and swelling potential grade on California bearing ratio (CBR) of expansive soils is experimentally studied. It is found that the moisture content of maximum CBR is always higher than the optimum moisture content. The difference increases as the compacting energy or swelling potential grade increase. The unsaturated soils theory is applied to explain these characteristics. The regularity is due to the different gas-water phases of expansive soils with different saturation degrees. When the saturation degree is less than the boundary saturation ratio, the CBR value increase assumes the exponential relationship along with the increment of saturation degree. But when the saturation degree is more than the boundary value, the strength property is similar with saturated soil and the CBR value is controlled by the dry density.

Key words: expansive soil; California bearing ratio (CBR); unsaturated soils theory; saturation degree

1 引 言

承载比试验是由美国加州公路局首先提出来的, 简称 CBR (California Bearing Ratio) 试验, 日本也将 CBR 试验纳入全国工业规格土质试验方法规程 (JISA1211-70)^[1]。CBR 值表征材料抵抗局部荷载压入变形的能力, 是一种评定地基 (或其他路面材料) 承载能力的强度指标。近年来, 我国交通部门已将 CBR 值作为路基填料强度指标的控制参数和路基填料选择的依据, 并将其与压实度一起作为路基施工质量控制的主要指标^[2,3]。

对于砂性土或一般黏性土, 用 CBR 值作为地基的强度指标来控制压实与采用干密度来控制地基的

压实其结果基本上是相一致的。一般黏性土或砂性土在最佳含水率时压实到最大干密度, 在遇水饱和后其密实度和强度下降的幅度最小, 因此, 其水稳定性最好。这是由于在最佳含水率时, 压实到最大干密度的土体的剩余孔隙最小, 浸水时其吸水率最小, 密实度下降也最小。然而, 对于具有胀缩性的膨胀土, 浸水软化是膨胀土的典型特征, 其膨胀量受含水率控制明显, 土的膨胀性对路基的稳定性有影响, 在低于或等于最佳含水率时膨胀土的压实度和强度指标虽可达到较高值, 但由于在相对较低含水率和较大压实度条件下, 其膨胀量相对较高含水率和稍低压实度土的膨胀量要大, 致使在最佳含水率时压实的地基一旦浸水后, 其密实度和强度下降

收稿日期: 2005-06-06 修改稿收到日期: 2005-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50279050)。

作者简介: 余飞, 男, 1978年生, 博士, 副研究员, 主要从事非饱和土理论与工程特性研究。E-mail: yufei8720@163.com

的幅度是否仍为最小值得探讨，压实膨胀土的强度与水稳定性的关系是否适宜，也需要进行分析^[4]，且在膨胀土地区，往往土的天然含水率较高，有时可能超过最佳含水率很多，如按一般的砂性土或亚黏性土用最佳含水率进行压实，不仅不便于施工，而且压实后地基的强度指标也未必能达到最大值。因此，探讨膨胀土 CBR 强度特征与水稳定性对路基的填筑标准具有现实的指导意义。

国内对膨胀土 CBR 强度特性内在机制的研究较少^[5,6]，孔令伟等^[7]曾对湖北襄樊—荆门高速公路膨胀土的膨胀潜势等级、含水率与干密度对其 CBR 值的影响规律进行了系统研究，得到了膨胀土 CBR 值随制备含水率的变化规律；文中认为真正决定 CBR 值大小的是膨胀土浸水后的含水率与干密度以及结构所处状态，这一认识还有待进一步探讨。本文以在建的周集—六安高速公路为依托工程，采集典型的弱、中膨胀土开展系统的试验研究，并结合非饱和土气水状态理论，分析膨胀土的 CBR 强度特性与内在机制，探讨决定 CBR 值大小的主要影响因素。

2 典型弱、中膨胀土的基本性质

典型弱膨胀土采集于周集—六安高速公路 7-7[#] 取土坑，取土深度为 1.5~1.6 m；典型中膨胀土取自桩号 k163+300 挖方段，取土深度为 1.5~1.6 m。弱膨胀土为棕色~棕黄色，含铁、锰质结核及薄膜，呈硬塑状，柱状节理发育，节理面光滑；中膨胀土为棕红色，呈硬塑状，裂隙较发育，滑感较强。

典型弱、中膨胀土的基本物理性质如表 1 所示。以 98 击最优含水率、最大干密度为标准制备的压制样胀缩特性和强度特性如表 2、表 3 所示。

表 1 膨胀土基本物理特性

Table 1 Physical characteristics of expansive soils

土质类别	天然含水率 / %	干密度 / g·cm ⁻³	液限 / %	塑限 / %	塑性指数	标准吸湿含水率 / %	自由膨胀率 / %	<2 μm 胶粒含量 / %
弱膨胀	22.5	1.63	48.6	21.7	26.9	5.4	44	39
中膨胀	30.6	1.46	63.2	24.9	38.3	8.5	61	44

表 2 压实膨胀土胀缩特性

Table 2 Swell-shrink characteristics of compacted expansive soil

土质类别	最优含水率 / %	最大干密度 / g·cm ⁻³	50kPa 膨胀量 / %	无荷膨胀量 / %	膨胀力 / kPa	收缩系数	体缩率 / %	缩限 / %	胀缩总率 / %
弱膨胀	16.8	1.83	3.0	15.9	340	0.21	5.0	10.2	3.07
中膨胀	20.9	1.66	4.8	23.0	530	0.32	13.7	11.5	5.43

表 3 压实膨胀土强度特性

Table 3 Stength characteristics of compacted expansive soil

土质类别	最优含水率 / %	最大干密度 / g·cm ⁻³	非饱和直接快剪		饱和直接快剪		非饱和无侧限抗压强度 / kPa	饱和无侧限抗压强度 / kPa
			c / kPa	φ / (°)	c / kPa	φ / (°)		
弱膨胀	16.8	1.83	354.0	18.6	22.8	16.2	1228	12.1
中膨胀	20.9	1.66	151.7	20.4	18.4	4.5	736	0

参照《公路路基设计规范》膨胀土膨胀潜势分级的旧标准^[8]和新标准^[2]，对所取土样按自由膨胀率、液限、塑性指数、标准吸湿含水率、<2 μm 胶粒含量 5 项指标进行综合判别。表 1 数据显示所取土样为典型的弱膨胀土和中膨胀土。从表 2、表 3 可以看到，中膨胀土的胀缩性指标均高于弱膨胀土，弱膨胀土的抗剪强度和无侧限抗压强度都较中膨胀土高。这进一步证实了采集的弱膨胀土和中膨胀土具有显著的代表性。

3 膨胀土 CBR 强度特性

通过制备不同含水率的弱膨胀土和中膨胀土样品，在同一含水率条件下分别采用 98, 50 和 30 击 3 种不同击实功进行击实试验，同时开展相应的 CBR 试验。试验按《公路土工试验规程》(JTJ 051-93) 执行，备样采用干土法。

不同击实功条件下弱膨胀土和中膨胀土的 CBR 值随含水率的变化曲线如图 1、图 2 所示。表 4、表 5 给出了弱膨胀土和中膨胀土的 CBR 特征指标值。

从图 1 和图 2 可以看出，起始含水率对膨胀土 CBR 值影响显著。在不同击实功条件下，弱膨胀土的 CBR 峰值出现在起始含水率为 21.5%~23.8% 的区间内，中膨胀土的 CBR 峰值出现在起始含水率为 27.6%~30.3% 的区间内。表 4 和表 5 所列的 CBR 特征值表明，CBR 峰值含水率大于最优含水率。对

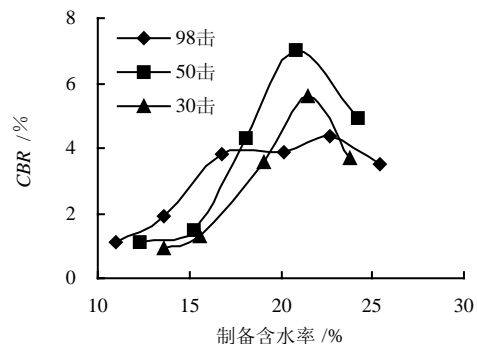


图 1 弱膨胀土 CBR 与含水率关系曲线

Fig.1 Correlative curves of the CBR with the initial moisture content(for low expansive soils)

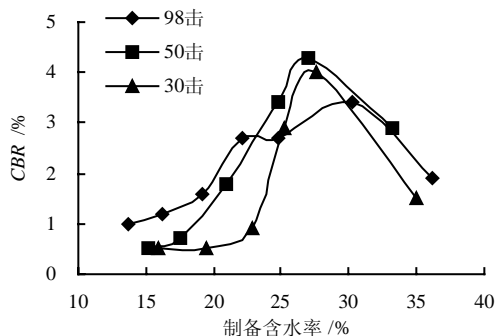


图 2 中膨胀土 CBR 与含水率关系曲线
Fig.2 Correlative curves of the CBR with the initial moisture content(for middle expansive soils)

表 4 弱膨胀土 CBR 特征指标值

Table 4 Characteristics indexes of the CBR for low expansive soils

每层 击数	最大 CBR 对应的特征值			最大干密度对应的特征值		
	含水率 /%	干密度 /g·cm ⁻³	CBR /%	最佳含 水率/%	最大干密 /g·cm ⁻³	CBR /%
98	23.8	1.65	4.4	16.8	1.83	3.8
50	20.8	1.71	7.0	18.7	1.74	4.9
30	21.5	1.68	5.6	20.1	1.69	4.4

表 5 中膨胀土 CBR 特征指标值

Table 5 Characteristics indexes of the CBR for middle expansive soils

每层 击数	最大 CBR 对应的特征值			最大干密度对应的特征值		
	含水率 /%	干密度 /g·cm ⁻³	CBR /%	最佳含 水率/%	最大干密 /g·cm ⁻³	CBR /%
98	30.3	1.45	3.4	20.9	1.66	2.6
50	27.0	1.53	4.3	23.7	1.59	2.9
30	27.6	1.51	4.0	25.9	1.57	3.2

于 98 击的弱膨胀土，最大 CBR 值对应的含水率要比最优含水率大 7 % 左右，中膨胀土最大 CBR 值对应的含水率要比最优含水率大 9.4 %，即在相同的击实功下，膨胀潜势越强，CBR 峰值含水率与最优含水率的差值越大。比较不同压实功条件下 CBR 特征值可以看到，不管是弱膨胀土还是中膨胀土，击实功越大，CBR 最大值所对应的含水率与最佳含水率的差值越大。另一方面，从图 1 和图 2 可以看到，无论是中膨胀土还是弱膨胀土，50 击压实土对应的 CBR 峰值基本都较 98 击压实土大，说明并不是击实功越大，其 CBR 值就越大，这与膨胀土在压实过程中细观结构的改变有关。在现场碾压过程中，应对干密度进行适当控制，不能要求过高，以免会出现“过压实”现象，亦即土体出现叠层破坏现象，所以，过压实反而造成压不实。

4 膨胀土 CBR 强度特性的内在机制

上节所述膨胀土 CBR 强度的基本规律与文献[7]所得到的结论是一致的，但对于出现上述特征的内在机制还不甚明确。文献[7]认为，真正决定 CBR 值大小的是膨胀土浸水后的含水率与干密度以及结构所处状态。但大量试验显示，当浸水后含水率最小、干密度最大时，其 CBR 并非最大。由于 CBR 值是击实土样浸水 4 d 后的强度值，经历了一个状态改变的过程。对于膨胀土而言，在吸水膨胀过程中会产生结构性损伤，单纯考虑某一个状态下的含水率和干密度是不合理的。探讨 CBR 值大小的主要决定因素应考虑浸水前后两种状态。

从非饱和土力学气水状态理论来看，随着含水率的逐渐增加，土中孔隙循序出现完全连通、部分连通、内部连通和完全封闭 4 种气相状态^[9]。土体基质吸力随含水率的增大而逐渐减小，当含水率较高并处于饱和状态时，土体接近完全封闭气相状态，基质吸力已很微弱，并趋于稳定值。非饱和土在不同含水率条件下，会表现出不同的变形特性和强度特性，区别不同的气水状态，是进行针对性研究的前提。

从图 1、图 2 中可以看到，CBR 强度值同时和含水率、干密度相关，要描述 CBR 值随土体状态量变化的规律，同时采用含水率和干密度两个状态变量比较困难^[7]，未能准确反映问题的实质。对于非饱和土而言，其水、气赋存状态改变的实质是土体孔隙中水与气所占比例的变化，用饱和度指标能更为准确地反映土体状态的改变。另一方面，虽然非饱和土水、气赋存状态主要与含水率有关，但不同类型的土对应的界限含水率不同，用饱和度指标比用含水率指标具有更为广泛的代表性。

图 3 和图 4 为 CBR 试验浸水前后含水率的变化 Δw 与浸水前土样饱和度 S_0 的关系曲线，CBR 值与浸水前后含水率的变化 Δw 的关系曲线如图 5、图 6 所示。从图 3 和图 4 可以看出，无论是弱膨胀土还是中膨胀土，浸水前后含水率的变化值与土样饱和度之间都有着较好的相关关系，且存在相同的变化规律。 $\Delta w - S_0$ 曲线与土-水特征曲线类似^[10]，存在明显的拐点；当土样饱和度 S_0 小于拐点饱和量和 S_t 时，浸水前后含水率的变化值 Δw 随 S_0 的增大而减小，而当 S_0 超过 S_t 后， Δw 基本趋于稳定，并逐步接近于 0，即土体基本上不再吸收水份。从物理意义上讲，当 $S_0 < S_t$ ，土体孔隙与外界存在通路，土体含水率能在基质吸力的影响下出现显著变化，当

$S_0 \geq S_l$ 时, 土体含水率的变化很小, 说明土体孔隙与外界的通路已被水膜完全封闭, 土体处于似饱和状态, 这种状态的非饱和土与饱和土很相似, 唯一区别在于非饱和土中存在可压缩气体^[9]。可见, 该拐点饱和度是非饱和土从非饱和状态向似饱和状态转变的界限值, 可称为界限饱和度。从图 3、图 4 可以看到, 界限饱和度 S_l 都在 90 %~92 % 的范围内, 似饱和状态下浸水前后含水率的变化为 1 %~2 %。当 $S_0 < S_l$ 时, 通过曲线拟合可以建立 S_0 与 Δw 的关系式:

弱膨胀土:

$$\Delta w = -0.315 9S_0 + 30.619, R^2 = 0.98 \quad (1)$$

中膨胀土:

$$\Delta w = -0.404 7S_0 + 39.916, R^2 = 0.97 \quad (2)$$

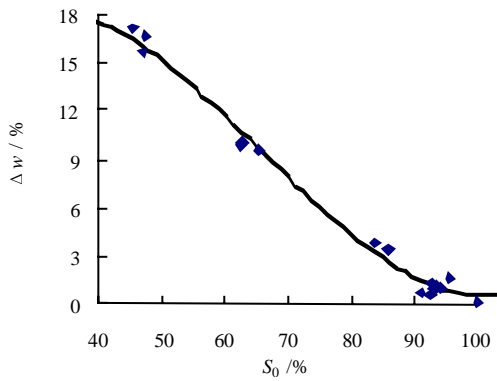


图 3 弱膨胀土浸水前饱和度与含水率变化值的关系曲线
Fig.3 Correlative curve of initial saturation ratio with the variation of moisture content(for low expansive soils)

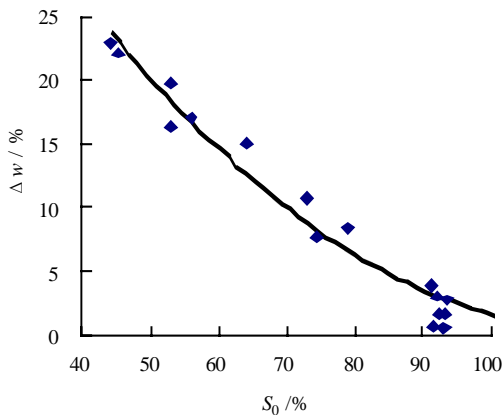


图 4 中膨胀土浸水前饱和度与含水率变化值的关系曲线
Fig.4 Correlative curve of initial saturation ratio with the variation of moisture content(for middle expansive soils)

图 5 和图 6 显示, 当浸水前后含水率的变化 Δw 大于 2 % 时, CBR 值随 Δw 的增大而减小, 且对于不同击实功下的土样, 其 CBR 值 R_{CBR} 与 Δw 有着类似的相关性, 说明 CBR 的大小直接受到含水率的变化 Δw 控制。但 Δw 是一个土体状态改变的过程量,

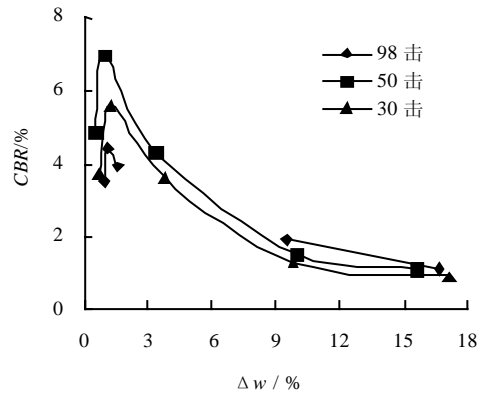


图 5 弱膨胀土 CBR 与含水率的变化值的关系曲线
Fig.5 Correlative curve of CBR with the variation of moisture content(for low expansive soils)

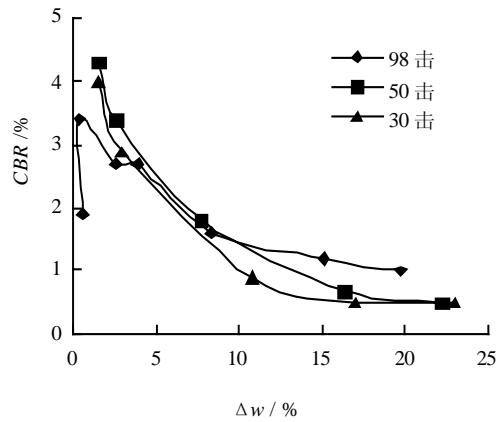


图 6 中膨胀土 CBR 与含水率的变化值的关系曲线
Fig.6 Correlative curve of CBR with the variation of moisture content(for middle expansive soils)

借助 $\Delta w - S_0$ 关系曲线可以建立 CBR 与土体初始状态量 S_0 之间的关系。结合图 3 和图 4 可以看出, 当初始饱和度 S_0 小于界限饱和度 S_l 时, 土体孔隙与外界处于连通状态。起始饱和度越小, 基质吸力越大, 吸水量越大, 对土颗粒的定向排列与孔隙结构等微观特征量影响越严重, 土体结构损伤越大, 浸水后 CBR 强度越小。所以, 当膨胀土处于非饱和状态, 即 $S_0 < S_l$ 时, CBR 强度直接决定于初始饱和度的大小。

通过曲线拟合, 可得膨胀土的 CBR 值与含水率的变化 Δw 的经验关系为:

(1) 弱膨胀土 ($S_0 < S_l$)

$$R_{CBR} = 5.591 \exp(-0.1101 \Delta w), R^2 = 0.93 \quad (3)$$

(2) 中膨胀土 ($S_0 < S_l$)

$$R_{CBR} = 3.747 \exp(-0.0917 \Delta w), R^2 = 0.90 \quad (4)$$

式中: R_{CBR} 为土体浸水 4 d 后的 CBR 强度值, 将式 (1) 和式 (2) 分别代入式 (3)、式 (4) 可以得到膨胀土 CBR 值 R_{CBR} 与初始饱和度 S_0 的关系式:

(1) 弱膨胀土 ($S_0 < S_t$):

$$R_{\text{CBR}} = 0.192 \exp(0.0347 8S_0) \quad (S_0 < 90\%) \quad (5)$$

(2) 中膨胀土 ($S_0 < S_t$):

$$R_{\text{CBR}} = 0.096 \exp(0.037 1S_0) \quad (S_0 < 90\%) \quad (6)$$

图5和图6显示,当起始饱和度 S_0 大于界限饱和度 S_t 时,浸水前后含水率的变化已很小, CBR 值出现峰值并随含水率的增加而逐渐减小(参见图1、图2)。这是因为在起始饱和度较高时,土中孔隙与外界的通道为水膜完全封闭,负孔隙水压力已不存在,土体处于似饱和状态,其强度特性与饱和土类似,其 CBR 值主要受干密度控制。对于饱和度较高($S_0 \geq S_t$)的膨胀土而言,制备含水率越高,干密度就越小,其 CBR 值也就越小,这就是图1、图2中 CBR 值达到峰值后随含水率的增加而逐渐减小的原因。可见,当起始饱和度大于界限饱和度时,决定 CBR 大小的主要因素是干密度。

综上所述,膨胀土的 CBR 强度特性机制决定于土中水、气赋存状态,不同的气水状态下,其 CBR 值大小的决定因素和变化规律存在较大的差异。当土体饱和度 S_0 小于界限饱和度 S_t ($S_t \approx 90\% \sim 92\%$),土体处于非饱和状态,基质吸力和膨胀土体积膨胀是影响 CBR 值大小的主要因素,表现为 CBR 值随归一化指标饱和度 S_0 呈指数增大;当 $S_0 \geq S_t$ 时,土体处于似饱和状态,其强度特性与饱和土类似,即 CBR 值决定于干密度的大小。

5 结 论

本文以典型弱、中膨胀土的 CBR 试验数据为基础,对 CBR 强度特性进行了分析,得到了膨胀土 CBR 值随含水率、击实功和膨胀潜力的变化规律,并采用非饱和土气水状态理论探讨其内在机制。研究表明,膨胀土 CBR 不同阶段的变化规律和影响因素是由土体中不同的气、水赋存状态所决定的。以归一化指标饱和度作为土体状态量比用含水率、干密度等状态量能更好地反映问题的实质,当饱和度小于界限饱和度时,非饱和土的基本特性直接影响着其 CBR 值的大小,且 CBR 值与饱和度有着很好的相关关系;而当饱和度大于界限饱和度时,其强度特性与饱和土类似, CBR 值决定于干密度的大小。以上研究成果为进一步认识膨胀土 CBR 强度特性和内在机制提供了新的思路。

参 考 文 献

[1] 陈柏年,朱凤艳,韩勤. CBR 试验内在机理研究及影响

因素分析[J]. 交通标准化, 2001, (1): 28—30.

[2] JTG D30-2004, 公路路基设计规范[S].

[3] 陈晓光,李俊超,冯立群. 新疆高等级公路半刚性基层土基强度等级划分[J]. 公路交通科技, 1999, 16(3): 13—16.

CHEN Xiao-guang, LI Jun-chao, FENG li-qun. Classification on subgrade strength grade s of semi-rigid base coarse for Xinjiang high-grade highway[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 1999, 16(3): 13—16.

[4] 陈善雄,孔令伟,郭爱国. 膨胀土工程特性及其石灰改性试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(增刊): 9—12.

CHEN Shan-xiong, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Experimental research on engineering properties of expansive soil and lime stabilized soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(Supp.): 9—12.

[5] 孔令伟,郭爱国,赵颖文,等. 荆门膨胀土的水稳定性及其力学效应[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 727—732

KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, ZHAO Ying-wen, et al. Water stability of Xiangjing expansive soils and their mechanical effect[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(6): 727—732

[6] 郑波,杨果林. 膨胀土承载比试验初步探讨[J]. 西部探矿工程, 2005, 106(3): 42—43.

ZHENG Bo, YANG Guo-lin. Elementary research of bearing rate of expansive soil[J]. **West-China Exploration Engineering**, 2005, 106(3): 42—43.

[7] 孔令伟,郭爱国,陈善雄,等. 膨胀土的承载强度特性与机制[J]. 水利学报, 2004, (11): 54—61.

KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, Chen Shan-xiong, et al. Characteristics and mechanism of bearing strength of expansive soils[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2004, (11): 54—61.

[8] JTG 013-95, 公路路基设计规范[S].

[9] 包承纲. 非饱和土的形状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1—14.

BAO Cheng-gang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 1—14.

[10] Briaud J L, Zhang xiong, Moon S. Shrink test – water content method for shrink and swell predictions[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2003, 129(7): 590—601.