

考虑状态含水率和密度的膨胀土 膨胀模型试验研究

黄 斌^{1,2}, 饶锡保^{1,2}, 王章琼³, 谭 凡^{1,2}

(1. 长江科学院 土工研究所, 武汉 430010; 2. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010;
3. 中国地质大学(武汉) 研究生院, 武汉 430074)

摘 要: 以邯郸强膨胀土为研究对象, 通过室内 K_0 应力状态膨胀试验, 研究了膨胀土的膨胀率与压实度、初始含水率、上覆荷载之间的关系, 进而建立了考虑上述 3 种影响因素的膨胀率公式。同时, 建立了终了含水率与初始含水率、压实度、上覆荷载之间的关系, 从而得到了膨胀土线膨胀系数表达式。利用提出的膨胀模型可以得出任一含水率状态下膨胀土的膨胀本构关系。该试验操作简单, 模型表达式简洁, 具有较强的实用性, 可为膨胀土工程的设计施工提供理论依据和参考。

关 键 词: 膨胀土; 膨胀模型; 状态含水率; 有荷膨胀率

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

Experimental study of expansion model of expansive soil considering state water content and density

HUANG Bin^{1,2}, RAO Xi-bao^{1,2}, WANG Zhang-qiong³, TAN Fan^{1,2}

(1. Geotechnical Division, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;
2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China;
3. Graduate School, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The relationships between compactness, initial water content, cover load and expansion rate have been studied through expansion experiments at the state of K_0 stress for Handan strong expansive soil. Then a constitutive model of expansive soil which considered the effects of these three factors is set up. The relationship between ultimate water content, compactness, initial water content and cover load is also set up. Finally, a constitutive equation for linear expansion coefficient of Handan strong expansive soil is proposed. It takes compactness, initial water content, cover load and ultimate water content as variables. With this constitutive equation, constitutive relation of any water content can be obtained. The experiments and expression of this model are relatively simple and of certain practical use. This model can provide theoretical basis and reference for design and construction.

Key words: expansive soil; expansion model; state water content; loaded expansion ratio

1 引 言

膨胀土工程问题被称之为“工程中的癌症”, 具有多次反复性和长期潜伏性。南水北调中线工程涉及膨胀土的渠段累计约 340 km, 约占明渠段的 1/3, 膨胀土不进行处理的话造成的经济损失十分巨大, 因此, 开展对膨胀土的研究, 尤其是膨胀模型的研究, 对于工程建设具有重要的意义。

膨胀土的工程特性与初始条件、含水率、温度、

吸湿速率等因素密切相关, 因而膨胀土的研究较一般土更加困难。到目前为止, 膨胀土膨胀模型的研究取得了许多进展。研究范围不断扩大, 研究内容不断深入, 主要体现在 3 个方面: (1) 从一维模型发展到三维模型^[1-3]; (2) 从线性模型到非线性模型^[4-5]; (3) 从仅考虑典型因素的影响到考虑多影响因素的耦合效应^[6-7]。目前对于膨胀本构模型的研究, 主要集中在三维非线性方面, 且考虑多因素耦合影响的本构研究, 这是膨胀土本构模型研究的发

展方向^[8]。显然,考虑多因素耦合影响的三维非线性膨胀模型具有较高的精确度,更能真实反映膨胀土的膨胀特性。但在实际工程当中,有些影响因素是难以控制的,如温度、吸湿速率等,且三维非线性膨胀模型的研究需要借助特殊的三轴设备;因此,就实用性和操作的简易性而言,考虑压实度、初始含水率及上覆荷载的一维膨胀本构模型更容易得到推广。

本文拟通过室内 K_0 应力状态膨胀率试验,研究南水北调中线工程邯郸强膨胀土的膨胀特性,为工程中通过控制膨胀土的膨胀特性以减小其工程危害及工程验算提供理论参考。

2 有荷膨胀率试验

2.1 试验仪器及试验土料

本试验采用 DGY-ZH 型轴承式单杠杆固结仪,以邯郸强膨胀土为研究对象,土样的物理性质见表 1。从表可以看出:邯郸强膨胀土属于高液限黏土,自由膨胀率为 124%,大于 90%,属于强膨胀土。

表 1 膨胀土物理性质试验成果
Table 1 Physical properties of expansive soil

黏粒含量 /%	胶粒含量 /%	液限/%	塑限/%	塑性指数	自由膨胀率 /%
37.8	25.0	62.4	26.2	38.1	124

2.2 试验方法

试验参考《土工试验规程》(SL237-1999),进行 K_0 应力状态膨胀性试验。试验采用邯郸强膨胀土扰动样制备重塑试样,为了与原状土样所处自然环境保持一致(原状样含水率约为 30.5%),初始含水率分别采用 27.5%、30.5%、33.5%、36.5%,每组含水率下的试样分别采用 90%、92%、95%、99% 4 种压实度进行击实,同一压实度的 6 个试样分别在 6 个不同上覆荷载下进行试验。

2.3 成果分析

不同初始含水率、不同压实度、不同荷载下的有荷膨胀率试验成果见表 2。不同初始含水率、不同压实度、不同荷载下的终了含水率试验成果见表 3。

由表 2、图 1 可知中,压实度越大,膨胀率越大;随初始含水率增大,膨胀率减小;相同初始含水率和压实度下,膨胀土的膨胀率随上覆压力增大而减小;在荷载较小时,膨胀率随荷载的变化程度较大,表明较小的上覆荷载对膨胀土吸水膨胀即具

有明显的抑制作用,但随着荷载的增大,这种抑制作用逐渐减弱。

由表 3 可知,压实度越大,终了含水率越小;随初始含水率增大,终了含水率减小;相同初始含水率和压实度下,膨胀土的终了含水率随上覆压力增大而减小。

表 2 膨胀土击实样有荷膨胀率(%)试验成果
Table 2 Loaded expansion ratios of compacted expansive soil

初始含水率 /%	压实度 /%	不同竖向压力/kPa					
		6.25	12.5	25.00	50.00	100.00	200.00
27.5	90	10.13	7.80	5.57	3.34	1.23	-1.19
	92	10.17	8.79	5.92	3.69	1.92	-0.40
	95	11.14	9.15	7.56	6.32	3.91	1.09
	99	12.13	10.12	8.85	6.71	4.95	2.99
30.5	90	7.23	5.26	3.38	1.62	-0.76	-2.53
	92	7.31	5.35	3.47	1.85	-0.50	-1.62
	95	7.45	5.94	4.79	2.91	1.26	-0.3
	99	8.76	6.76	5.04	3.75	2.14	0.84
33.5	90	5.58	3.66	1.93	-0.09	-2.29	-3.84
	92	5.75	4.35	2.72	0.65	-1.88	-3.03
	95	6.38	4.70	3.43	2.05	0.26	-1.57
	99	7.57	5.25	4.00	2.96	1.05	-0.61
36.5	90	3.36	1.55	-0.12	-1.80	-3.49	-5.20
	92	3.55	1.92	0.30	-1.42	-2.95	-4.59
	95	4.16	2.72	1.24	-0.30	-1.67	-3.13
	99	4.52	3.13	1.73	0.33	-1.07	-2.47

表 3 膨胀土重塑样终了含水率(%)试验成果
Table 3 Ultimate water contents of compacted expansive soil

初始含水率 /%	压实度 /%	不同竖向压力/kPa					
		6.25	12.5	25.00	50.00	100.00	200.00
27.5	90	46.37	44.95	43.32	41.39	39.86	38.24
	92	45.68	44.50	43.18	41.28	39.71	38.16
	95	41.92	41.09	40.58	39.46	38.52	37.92
	99	41.31	40.34	39.52	39.26	38.04	37.75
30.5	90	44.43	43.02	40.92	39.22	38.02	36.42
	92	43.68	42.70	40.69	39.11	37.89	36.35
	95	40.27	39.41	38.53	37.93	36.81	36.41
	99	40.10	39.25	38.62	38.08	37.14	36.45
33.5	90	43.08	41.50	39.43	38.15	36.78	35.60
	92	42.61	40.81	39.01	37.97	36.47	34.54
	95	38.63	37.82	37.01	36.11	35.29	34.90
	99	38.89	38.46	37.67	36.87	36.13	35.16
36.5	90	41.53	40.28	38.43	37.28	35.74	34.14
	92	41.16	39.90	38.03	36.86	35.40	33.99
	95	37.64	36.86	36.09	35.31	34.53	33.75
	99	37.02	36.16	35.50	34.74	34.18	33.60

3 膨胀模型

3.1 膨胀率公式的建立

由表 2 可知,压实度为 90 % 时,不同初始含水

率的强膨胀土有荷膨胀率随荷载变化的半对数拟合曲线如图 2 所示。

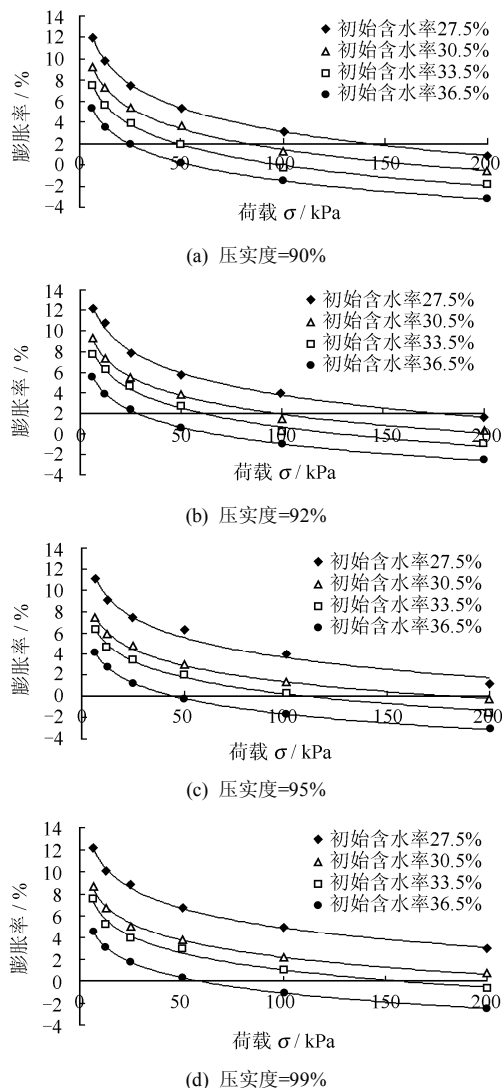


图 1 膨胀土重塑样不同初始含水率下膨胀率与荷载的关系曲线

Fig.1 The relationship curves between expansion ratio and load of compacted expansive soil with different initial water contents

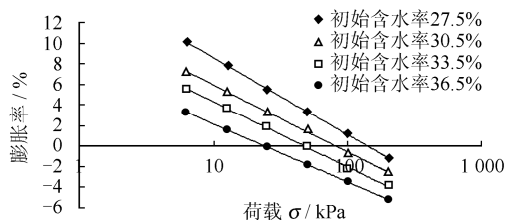


图 2 压实度为 90% 时膨胀土有荷膨胀率与荷载半对数关系曲线

Fig.2 The semilog relationship curves between expansion ratio and load of expansive soil with compactness of 90%

可以发现, 压实度为 90% 时, 不同初始含水率下的有荷膨胀率与荷载的对数呈较好的线性关系, 压实度为 92%、95%、99% 时亦呈现相同规律。因

此, 有荷膨胀率可以用下式统一表示^[9-10]:

$$\delta_{ep} = a \ln \frac{\sigma}{P_0} + b \quad (1)$$

式中: δ_{ep} 为膨胀土有荷膨胀率, (%); σ 为荷载; a 、 b 为与初始含水率有关的系数, $P_0 = 1 \text{ kPa}$ 。

对图 2 中的 4 条曲线进行线性回归分析, 结果如表 4 所示。

表 4 不同初始含水率下线性回归系数

Table 4 Linear regression coefficient with different initial water contents

初始含水率	回归参数		
	a	b	R^2
0.275	-3.236 6	16.019	0.999 7
0.305	-2.829 4	12.454	0.998 6
0.335	-2.760 2	10.667	0.998 5
0.365	-2.456 2	7.8107	0.999 9

以初始含水率为横坐标, a 、 b 为纵坐标, 分别得到 a 、 b 随初始含水率的变化关系图, 如图 3、4 所示。

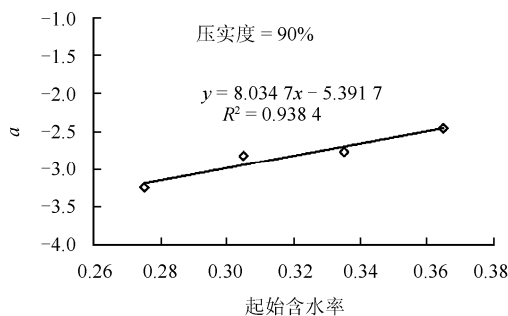


图 3 a 随初始含水率变化关系图

Fig.3 The relationship curve between a and initial water content

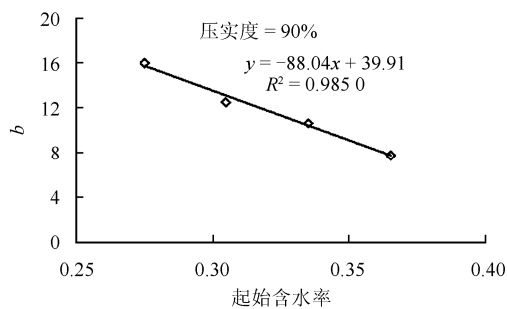


图 4 b 随初始含水率的变化关系图

Fig.4 The relationship curve between b and initial water content

可见, a 、 b 与初始含水率的变化均呈良好线性关系。将 a 、 b 代入式 (1) 可得:

$$\delta_{ep1} = (8.035w_0 - 5.392) \ln \frac{\sigma}{P_0} + (-88.04w_0 + 39.91) \quad (2)$$

同理,可以得到压实度为 92%、95%、99% 时有荷膨胀率与初始含水率和荷载的关系式分别为

$$\delta_{ep2} = (7.562w_0 - 5.112)\ln\frac{\sigma}{P_0} + (-86.49w_0 + 39.41) \quad (3)$$

$$\delta_{ep3} = (6.650w_0 - 4.472)\ln\frac{\sigma}{P_0} + (-87.74w_0 + 39.75) \quad (4)$$

$$\delta_{ep4} = (5.957w_0 - 4.193)\ln\frac{\sigma}{P_0} + (-91.16w_0 + 41.46) \quad (5)$$

对比式 (2) ~ (5) 可以发现,它们具有相同的结构形式,可用一个通式进行表示:

$$\delta_{ep} = (mw_0 + n)\ln\frac{\sigma}{P_0} + (rw_0 + s) \quad (6)$$

不同压实度的有荷膨胀率公式中的 m 、 n 、 r 、 s 4 个系数是有差异的,它们与压实度的关系如表 5 所示。

表 5 m 、 n 、 r 、 s 与压实度关系
Table 5 The relationship between m , n , r , s and compactness

压实度	m	n	r	s
0.90	8.035	-5.392	-88.040	39.910
0.92	7.562	-5.112	-86.487	39.413
0.95	6.650	-4.472	-87.853	39.780
0.99	5.967	-4.193	-91.160	41.456

将 m 、 n 、 r 、 s 与压实度的关系绘制在同一坐标系中,如图 5 所示,可知 m 、 n 、 r 、 s 与压实度均呈线性关系,回归参数见表 6 所示。

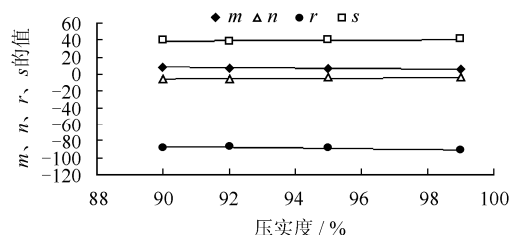


图 5 m 、 n 、 r 、 s 随压实度变化关系曲线
Fig.5 The relationship curves between m , n , r , s and compactness

表 6 m 、 n 、 r 、 s 与压实度线性回归参数
Table 6 The linear regression coefficients between m , n , r , s and compactness

系数	回归参数 (回归方程 $y = aP + b$)	
	a	b
m	-23.425	29.073
n	13.812	-17.776
r	-40.259	-50.542
s	18.683	22.578

注: P 为压实度 (%)。

将回归参数代入式 (6) 得到:

$$\begin{aligned} \delta_{ep} = & (mw_0 + n)\ln\frac{\sigma}{P_0} + (rw_0 + s) = \\ & [(-23.425P + 29.073)w_0 + (13.812P - 17.776)]\ln\frac{\sigma}{P_0} + \\ & [(-40.259P - 50.542)w_0 + (18.683P + 22.578)] \end{aligned} \quad (7)$$

式中: δ_{ep} 为有荷膨胀率(%); P 为压实度; w_0 为初始含水率。此式便是邯郸强膨胀土考虑荷载、初始含水率与压实度的有荷膨胀率模型公式。

3.2 线膨胀系数公式的建立

根据试验结果 (表 3), 按照膨胀率模型建立思路, 可建立考虑初始含水率、压实度及上覆荷载的终了含水率模型, 如式 (8) 所示。

$$\begin{aligned} w_{ult} = & [(-5.757P + 6.208)w_0 + (16.761P - 17.641)]\ln\frac{\sigma}{P_0} + \\ & [(88.148P - 134.18)w_0 + (-108.57P + 162.88)] \end{aligned} \quad (8)$$

式中: w_{ult} 为邯郸强膨胀土终了含水率, (%)。

膨胀土的线膨胀系数是指膨胀土单位含水率变化引起的膨胀率改变量。膨胀土的膨胀特性是由内因和外因两个方面决定的^[11], 含水率的变化是引起膨胀土体积胀缩的主要外因, 含水率变化越大, 则土的胀缩形变越大, 这是定性的结论, 无法表征不同膨胀土单位含水率变化下体积的变化量。而线膨胀系数则可以定量评价膨胀土胀缩形变量与含水率变化量之间的关系, 反映的是内因, 即膨胀土本身含有的特殊物质成分和结构特征^[12]对其膨胀特性的影响程度。

由定义可知, 当终了含水率、膨胀率及初始含水率已知的条件下, 可以得出膨胀土的线膨胀系数。以邯郸强膨胀土为例, 其线膨胀系数可以表达为

$$\begin{aligned} a = \frac{\delta_{ep}}{w_{ult} - w_0} = & \left\{ \frac{[(D_1P + D_2)w_0 + (D_3P + D_4)]\ln\frac{\sigma}{P_0}}{+[(D_5P + D_6)w_0 + (D_7P + D_8)]} \right\} / \\ & \left\{ \frac{[(D_9P + D_{10})w_0 + (D_{11}P + D_{12})]\ln\frac{\sigma}{P_0}}{+[(D_{13}P + D_{14})w_0 + (D_{15}P + D_{16})] - w_0} \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: 参数 $D_1 \sim D_{16}$ 分别表示一定压实度下与初始含水率有关的系数。邯郸强膨胀土线膨胀系数的模型参数值如表 7 所示。

表 7 邯郸强膨胀土线膨胀系数模型参数值

Table 7 The parameters of linear expansion coefficient for Handan strong expansive soil

参数	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
数值	-23.425	29.073	13.812	-17.776	-40.259	-50.542	18.683	22.578
参数	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16
数值	-5.757	6.208	16.761	-17.641	88.148	-134.18	-108.57	162.88

3.3 膨胀模型的验证

为检验有荷膨胀率公式的可靠性, 现将试验的荷载、初始含水率和压实度的值代入式 (7), 以试验实测值为横坐标, 计算值为纵坐标, 在直角坐标系中绘制两者之间的散点图, 并与直线 $y = x$ 作比较, 见图 6。可以看出, 计算值与实测值散点图基本上分布在直线 $y = x$ 附近, 说明计算值能够较好地反映实测值, 可以认为式 (7) 求出的有荷膨胀率是准确可靠的。

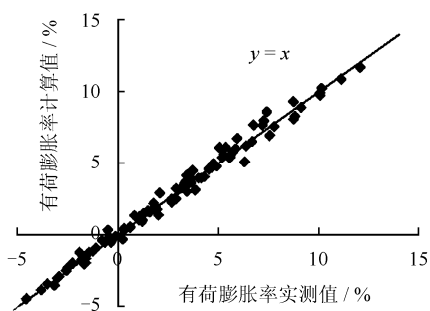


图 6 膨胀土有荷膨胀率计算值与实测值散点图

Fig.6 The scatter diagram of calculated values and measured values for loaded expansion ratio of expansive soil

为检验线膨胀系数公式的可靠性, 现将试验的荷载、初始含水率和压实度的值代入式 (9), 以试验实测值为横坐标, 计算值为纵坐标, 在直角坐标系中绘制两者之间的散点图, 并与直线 $y = x$ 作比较, 见图 7。可以看出, 计算值与实测值散点图基

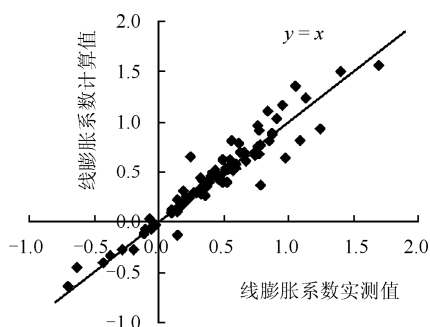


图 7 膨胀土线膨胀系数计算值与实测值散点图

Fig.7 Scatter diagram of calculated values and measured values for linear expansion coefficient of expansive soil

本上分布在直线 $y = x$ 附近, 说明计算值能够较好地反映实测值, 可以认为式 (9) 求出的终了线膨胀系数是准确可靠的。

4 结 论

(1) 压实度越大, 膨胀率越大; 随初始含水率增大, 膨胀率减小。这是因为压实度越高的膨胀土, 其制样的击实功也相应越高, 高击实功减小了土颗粒表面吸附的水膜厚度, 当膨胀土吸湿时, 水膜厚度小的试样表现出更高的膨胀潜势, 相应的膨胀率也越大。与之相反, 初始含水率越高的试样, 吸附在黏粒周围的水膜越厚, 膨胀潜势低, 于是体现出膨胀率越小的规律。

(2) 相同初始含水率和压实度下, 膨胀土的膨胀率随上覆压力增大而减小, 在半对数坐标中呈线性关系; 在较小压力作用下, 其膨胀率相对无荷载条件而言急剧下降, 表明较小的上覆荷载对膨胀土吸水膨胀即具有明显的抑制作用, 但随着荷载的增大, 这种抑制作用逐渐减弱。

(3) 根据试验结果, 建立了膨胀土的膨胀率、终了含水率、线膨胀系数与压实度、初始含水率、上覆荷载之间的关系, 即膨胀本构模型。经验证, 该模型具有较好的可靠性。且该模型所考虑的因素在实际工程中是可以控制或获取相关信息的, 因此, 该模型具有较强的实用性, 用该模型指导设计施工, 可以取得较好的效果。

(4) 由线膨胀系数的表达式, 可以得到初始含水率和饱和含水率之间任一含水率状态下的膨胀率表达式, 即考虑了状态含水率与膨胀土膨胀率之间的关系。实际工程中的膨胀土不一定会吸水达到饱和状态, 而是含水率介于初始含水率和饱和含水率之间, 该模型充分考虑到这一特点, 因而具有更广泛的适用性。

(5) 课题组还针对南阳中膨胀土与南阳弱膨胀土均做过类似的研究, 研究表明, 本文提出的膨胀模型对不同膨胀等级的膨胀土均适用, 只是参数的取值存在差异。需针对不同的膨胀土进行相应的不同初始含水率、不同密度的有荷膨胀试验, 从而得到膨胀土的膨胀模型参数。

参 考 文 献

- [1] 杨庆. 膨胀岩与巷道工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- [2] 刘晓丽, 王思敬, 王恩志, 等. 含时间效应的膨胀岩膨胀本构关系[J]. 水利学报, 2006, 2(2): 195—199.

- LIU Xiao-li, WANG Si-jing, WANG En-zhi, et al. Study on time-dependent swelling constitute relation of swelling rock[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2006, 2(2): 195—199.
- [3] GYSEL M. Design methods for structure in swelling rock[C]//ISRM. [S. l.]: [s.n.], 1975.
- [4] 徐晗, 黄斌, 饶锡保, 等. 膨胀岩处理措施合理性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 12(6): 139—141.
- XU Han, HUANG Bin, RAO Xi-bao, et al. Study on rationality of treatment measures of expansive rock[J]. **South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology**. 2009, 12(6): 139—141.
- [5] 缪林昌, 殷宗泽, 刘松玉. 非饱和膨胀土强度特性的常规三轴试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2000, 1(1): 121—125.
- MIAO Lin-chang, YIN Zong-ze, LIU Song-yu. Study on the strength characteristic of unsaturated expansive soil[J]. **Journal of Southeast University(Natural Science Edition)**, 2000, 1(1): 121—125.
- [6] 谢云, 陈正汉, 李刚. 考虑温度影响的重塑非饱和膨胀土非线性本构模型[J]. 岩土力学, 2007, 9(9): 1937—1942.
- XIE Yun, CHEN Zheng-han, LI Gang. Thermo-nonlinear model for unsaturated expansive soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 9(9): 1937—1942.
- [7] 李冬梅. 非饱和膨胀土的 GA-NN 本构模型[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2010, (1): 68—72.
- LI Dong-mei. The GA-NN constitutive model of unsaturated expansive soil[J]. **Journal of Inner Mongolia University of Technology(Natural Science)**, 2010, (1): 68—72.
- [8] 梅正君. 膨胀土弹塑性本构模型研究进展[J]. 广州建筑, 2009(4): 20—24.
- MEI Zheng-jun. Advances on study of elastic-plastic model for expansive soil[J]. **Guangzhou Architecture**, 2009, (4): 20—24.
- [9] 韦秉旭, 周玉峰, 刘义高, 等. 基于工程应用的膨胀土本构模型[J]. 中国公路学报, 2007, 3(2): 18—23.
- WEI Bing-xu, ZHOU Yu-feng, LIU Yi-gao, et al. Constitutive model for expansive soil based on engineering application[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2007, 3(2): 18—23.
- [10] 韦秉旭, 周玉峰. 宁明膨胀土侧限有荷膨胀变形试验研究[J]. 力学与实践, 2006, 12(6): 64—68.
- WEI Bing-xu, ZHOU Yu-feng. Experimental research on lateral restricted swelling strains of Ningming expansive soil on Nanyou expressway[J]. **Mechanics and Practice**, 2006, 12(6): 64—68.
- [11] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
- [12] GRIME R E. Clay mineralogy[M]. New York: Mcgraw Hill, 1986.