

# 膨胀土地基增湿变形的离心模型试验研究

邢义川<sup>1</sup>, 李京爽<sup>2</sup>, 杜秀文<sup>3</sup>

(1 中国水利水电科学研究院, 北京 100044; 2 中国建筑科学研究院, 北京 100013; 3 中国灌溉排水发展中心, 北京 100053)

**[摘要]** **【目的】**根据渠道地基的运行特点,对浸水条件下的膨胀土渠道地基进行离心模拟试验。**【方法】**将模型离心加速度增加到 60 g,然后浸水并保持水头 8.5 cm,再用各种传感器测量浸水过程中模型的表面位移、内部土压力和吸力。**【结果】**在上覆水压力作用下,膨胀土先发生压缩,然后由于水分浸入发生轻微膨胀,并导致侧压力系数逐渐增大。试验后对模型含水量和干密度的测定表明,模型内形成了含水量梯度,干密度随深度逐渐增加而增大。**【结论】**模型变形和内部土压力变化是模型内部含水量变化的结果,同时也受上覆压力影响;基质吸力主要与含水量有关,受重力加速度变化的影响较小。

**[关键词]** 离心模型试验;非饱和土;膨胀土;基质吸力

**[中图分类号]** TU443

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2010)09-0229-06

## Centrifugal modeling of expansive soil foundation upon wetting

XING Yi-chuan<sup>1</sup>, LI Jing-shuang<sup>2</sup>, DU Xiu-wen<sup>3</sup>

(1 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China; 2 China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 3 China Irrigation and Drainage Development Center, Beijing 100053, China)

**Abstract:** **【Objective】** According to the characteristics of canal foundation, a centrifuge test was conducted to model the behavior of foundation upon wetting. **【Method】** The model was firstly accelerated to 60 g and then infiltrated from the model surface with a constant water head of 8.5 cm. The surface settlement, earth pressure and suction were monitored with various transducers. **【Result】** Settlement was firstly observed due to the water pressure acting on the model surface, and then slight expansion occurred due to infiltration. The infiltration also yielded an increase of coefficient of lateral earth pressure. Further measurement showed that the water content gradient had formed and the dry density increased with the height. **【Conclusion】** It was included that the model deformation and earth pressure were influenced by both the model water content and the pressure acting on the model surface, and the suction was mainly influenced by the water content while the influence of acceleration can be negligible.

**Key words:** centrifuge test; unsaturated soil; expansive soil; matrix suction

离心模型试验是利用模拟重力场来模拟实际工程状态的一种方法。试验中,模型尺寸取为原型的 $1/n$ ,为使模型与原型的对应点具有相同的应力状态,在模型材料和原型材料模量相同的条件下,模型的重力加速度必须是原型的 $n$ 倍<sup>[1]</sup>, $1/n$ 即为缩尺比例。离心模拟试验技术已经广泛应用于土坝、堆

石坝、堤防等水利工程的试验研究<sup>[2]</sup>,近期在非饱和膨胀土地基和渠道(边坡)的试验研究中得以应用。饶锡保等<sup>[3]</sup>利用离心模拟技术研究了膨胀土渠道边坡坡比和输水运行对边坡稳定性的影响,试验中测量了模型位移场。王国利等<sup>[4]</sup>利用离心模拟技术研究了新疆膨胀土边坡在干湿循环条件下的稳定性。

\* [收稿日期] 2010-05-25

[基金项目] 水利部“948”计划技术创新与转化项目(CT200408);国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD11B03)

[作者简介] 邢义川(1956—),男,陕西镇安人,教授,博士,博士生导师,主要从事岩土力学与工程研究。

E-mail: xingych@iwhr.com

徐光明等<sup>[5]</sup>利用离心模拟技术对新疆膨胀土边坡稳定性进行了研究,并采用浸水模拟雨水入渗。此外,陈生水等<sup>[6]</sup>也对新疆膨胀土在干湿循环条件下的边坡稳定性做了离心模拟试验。这些针对非饱和膨胀土渠道或边坡的离心模拟试验均测量了模型位移,但忽略了反映土体变化的另外 2 个重要变量,即应力和基质吸力。胡再强等<sup>[7]</sup>对非饱和湿陷性黄土渠道进行了离心模拟试验研究,除了位移外,他们采用清华大学李未显等<sup>[8]</sup>研制的 TS-2 型热传导传感器来测量基质吸力。李京爽等<sup>[9]</sup>曾分析了这种传感器在离心模拟试验中的可行性。

基质吸力是非饱和土特有的状态参数,非饱和土许多重要的性质都可以与基质吸力联系起来,同时它也是非饱和土本构模型的应力状态变量之一<sup>[10-13]</sup>。在涉及非饱和土问题的实验室研究、现场监测和工程设计中,基质吸力已逐渐成为必需考虑的重要因素。本试验根据渠道地基的运行特点,对人工膨胀土地基的浸水变化进行了离心模拟研究,试验中除对浸水过程中地基的土压力和变形进行观测外,还利用微型吸力传感器测量了基质吸力,旨在探明膨胀土地基的增湿变形特性。

## 1 试验设备及测量仪器

### 1.1 离心机

试验采用中国水利水电科学研究院的 LXJ-4-450 大型土工离心模型试验机,其主要性能指标为:最大加速度 300 g,有效负重 1.5 t,有效负荷 450 g×t,最大半径 5.03 m,吊篮尺寸 1.5 m×1.0 m×1.2 m(长×宽×高),驱动电机功率 700 kW。该离心机加速到 300 g 所需时间为 15~20 min,可连续工作时间为 48 h,总质量 58 t。

### 1.2 位移传感器

采用常规线性差分位移传感器 LVDT 和英国 Wenglor 公司制造的微型激光位移传感器。

### 1.3 土压力传感器

采用日本 KYOWA 株式会社制造的 2 种土压力传感器:BE10-KD 和 PS-B 系列。BE10-KD 系列直径 3 cm,厚约 0.5 cm,有效测量直径为 2.5 cm,最大测数为 1 MPa。PS-B 系列直径为 6 mm,体形微小,测量应力为 200 kPa~7 MPa。试验采用测量应力分别为 1 和 2 MPa 2 种土压力传感器。在测量时,将其粘接在方形塑料薄片上。

### 1.4 基质吸力传感器

在离心模型试验中,测量饱和土的正孔隙水压

力时,常采用 PDCR-81 微型孔隙水压力传感器,该传感器由于体积小,在离心模型试验中得到了广泛使用。其呈圆筒状,长 12 mm,直径仅为 6.5 mm。但如将该传感器用于非饱和土吸力的测量,则应该注意 2 点:第一,PDCR-81 微型孔隙水压力传感器所采用陶瓷板的进气值仅约 90 kPa,不能直接测量较高基质吸力;第二,在离心模型中采用 PDCR-81 微型孔隙水压力传感器应考虑其达到平衡的时间和保持平衡的时间。达到平衡的时间是指从将 PDCR-81 微型孔隙水压力传感器埋入土体中到其能测量出土体吸力的时间,如果达到平衡时间过长,在试验中就测量不出吸力的变化。另外,即使在基质吸力不超过进气值的情况下,空气也会通过陶瓷板慢慢地扩散。采用 PDCR-81 微型孔隙水压力传感器测量非饱和膨胀土基质吸力的方法详见文献<sup>[9]</sup>。

## 2 模型设计与试验方案

试验土样取自陕西省安康市工业园区,取土深度约 1.5 m,该土样红棕色,有裂隙发育,呈油压光泽,物理指标<sup>[14]</sup>为:比重 2.71,天然含水量 22.4%,天然干密度 1.68 g/cm<sup>3</sup>,液限 51%,塑限 26.5%,塑性指数 24.5%,自由膨胀率 91%;颗粒组成比例为:粒径 2~0.075 mm 颗粒为 3.0%,粒径 0.075~0.005 mm 颗粒为 37.0%,粒径<0.005 mm 颗粒为 60%。参照《土工试验规程》<sup>[15]</sup>,首先将土样用粉碎机打碎,过孔径 2 mm 筛,使其含水量为 23%,密封静置 24 h 以上,然后将土样分层放在模型箱中夯实,初始干密度为 1.50 g/cm<sup>3</sup>,初始饱和度为 77.4%,每层土样厚度 4~5 cm。

模型尺寸为 65.5 cm×40 cm×20 cm(长×宽×高)。在模型中埋设 8 个微型土压力传感器(EPT1~EPT8),从模型底部起,每隔 5 cm 高分别布置 EPT1、EPT4、EPT5 和 EPT6,分别测量模型中不同高度的侧向压力;与测量模型底部侧向压力的 EPT1 对应,EPT2 和 EPT3 均放置于模型底部,测量模型底部的竖向压力;EPT6 与 EPT7 对应,分别测量同一点的侧向和竖向土压力;EPT8 用来测量模型端部侧向土压力。在模型中埋设 8 个吸力传感器,分别为 PPT1~PPT8,布设位置和微型土压力传感器相对应。安装 3 个 LVDT 位移传感器测量表面位移,各传感器的具体位置见图 1。在模型与模型箱接触的侧面涂抹适量凡士林以防水分沿箱壁渗透。

加水装置包括进水箱、旋转水箱、加水排管以及

软管。进水箱采用厚度 2 mm 白铁皮制作;旋转水箱为同心圆形,内圆穿过离心机转轴并固定在转臂上;加水排管采用直径约 30 mm 的普通不锈钢管,长约 30 mm 并沿长度方向布置数十个小孔,目的是防止试验中离心加速形成的高速水流直接冲击模型表面;加水排管固定在模型箱上,进水箱、旋转水箱、排管之间由普通塑料软管连接。

模型试验过程:将模型安装在离心机上,首先调整加速度为 60 g,待变形稳定后,将模型浸水,并保持水头恒定在 8.5 cm,试验中测定土压力、吸力和表面变形。试验拟定浸水时间为 5 h,然后停机拆除模型,分层测量模型含水量及密度。

根据 Taylor<sup>[1]</sup>的观点,渗透系数为材料常数,模

型水头应与原型相同。孔隙水流经路径为原型的 1/n。根据达西定律,水力梯度、渗流速度均为原型的 n 倍。在渗流理论中,水头 H 为压力水头  $P_w/g_w$  和位置水头 y 之和,对原型有  $H=\frac{P_w}{g_w}+y$ 。模型尺寸缩减 n 倍,因此对模型应有  $H=\frac{P_w}{g_w}+ny_m$ ,y 和  $y_m$  为距参考点(取模型底部为 0 点)的原型高程和模型高程。由于孔隙水流经路径为原型的 1/n,而流速为原来的 n 倍,因此时间效应是原型的  $n^2$  倍。因此模型在 60 g 下运行 5 h,相当于原型运行  $60\times 60/24\times 5=750$  d。

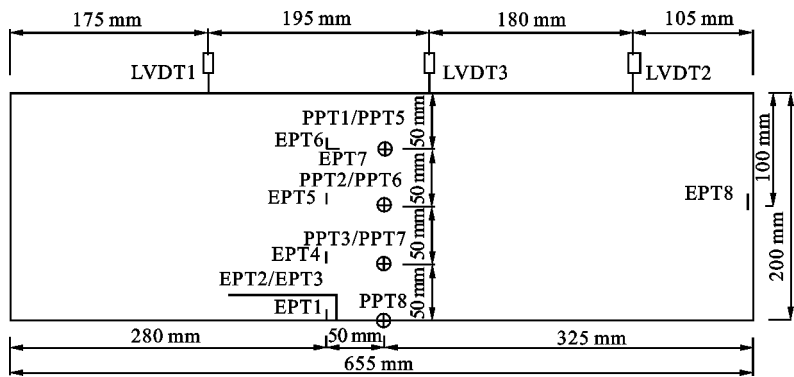


图 1 模型尺寸及传感器布置正视图

Fig. 1 Front view of the model dimensions and of transducer layout

3 结果与分析

3.1 模型表面位移的变化

本研究规定模型沉降位移为正,膨胀位移为负。试验过程中,3 个 LVDT 位移传感器测量的模型表面初始位移(加水前)差异明显,位于模型两侧的 LVDT1 和 LVDT2 测定的沉降值比模型中部的 LVDT3 大。加速到 60 g 后,3 个位移测值变化幅度不同,但均同时对加水有反应。加水后,3 个位移传感器的测值逐渐趋于稳定,LVDT1 表现为沉降位移,但 LVDT2 和 LVDT3 均测量到了明显的膨胀位移。从图 2 可以看出,加水后,LVDT2 和 LVDT3 测量的位移在 30 和 90 min 时有 2 个明显的转折点,在第 1 个转折点 after 沉降位移变化趋缓;在第 2 个转折点 after 测值由沉降位移转变为膨胀位移。第 1 个转折点前的沉降位移可以认为是模型表面加水形成的上覆荷载导致的压缩变形;2 个转折点之间的沉降位移可以认为是模型上部浸水造成的沉降位移;在第 2 个转折点 after,随着水分的浸入,模型内部发生

了膨胀变形,因此表面测得位移由沉降转为膨胀。但与离心加载前和加水前相比,模型仍然表现为沉降位移。

3.2 模型土压力的变化

可能受埋设过程以及夯实过程的影响,有些微型土压力传感器不能正常测量,故本研究只分析 3 个测量值较理想的微型土压力传感器的测量结果,图 3 为这 3 个微型土压力传感器的测量曲线,其中 EPT1 和 EPT2 分别测量模型底部侧向和竖向土压力,EPT8 测量模型右端面的侧压力。取压应力为正,后文分析也遵循此约定。

离心加速度达到 60 g 后,加水前 EPT1 测得模型底部侧向土应力约为 130 kPa,EPT2 测得相同位置处竖向土压力约为 230 kPa;按加速度 60 g 计算,模型底部竖向应力为 217 kPa,可知竖向土压力的测量值与计算值两者基本相符。此时侧压力系数约为 0.55。

加水后,EPT2 测值上升到 280 kPa 左右,EPT1 也增加到 150 kPa;然后随着时间的延长,测

值呈缓慢减少趋势;至试验结束前,EPT2 约为 254 kPa,EPT1 为 120 kPa。

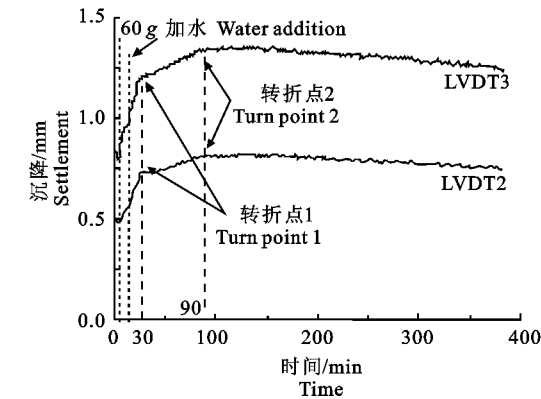


图 2 模型表面位移随时间的变化曲线

Fig. 2 Curves of measured surface displacements versus time

EPT8 在最初 22 min 内测值为零,加水后才有测值,并随时间的延长呈逐渐增大的趋势,至试验结束前,EPT8 侧压力测值约为 81 kPa。这表明 EPT8 可能与土体逐渐紧密接触。这可能是由于加水形成的附加压力作用所致,也可能与水分沿模型箱壁入渗,使土体膨胀而挤压传感器有关。

图 4 是模型中部和底部侧压力系数的变化情况(取 EPT2 测值的 1/2 作为模型中部竖向压力)。由图 4 可以看出,模型底部( $H=20\text{ cm}$ )侧压力系数有减小趋势,从加水后的 0.56 逐渐减小至试验结束前 0.47。这主要是由于 EPT1 逐渐减小的缘故,也可能是受边界条件影响所致。由于 EPT8 测值不断增

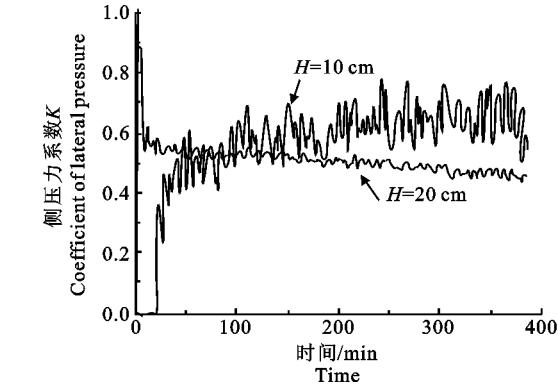


图 4 模型中部( $H=10\text{ cm}$ )和底部( $H=20\text{ cm}$ )侧压力系数的变化

Fig. 4 Coefficients of lateral pressure at the middle height ( $H=10\text{ cm}$ ) and bottom ( $H=20\text{ cm}$ ) of the model

图 5 显示,加载到 60 g 过程中,直到 30 min 前,3 个吸力传感器测值均有减小趋势。这可能与 30 min 前后模型发生了较大位移变化相关。在 30 min 前,土体在离心加载和水压力作用下发生了较大压缩变形,使模型整体密度发生较大变化,吸力传

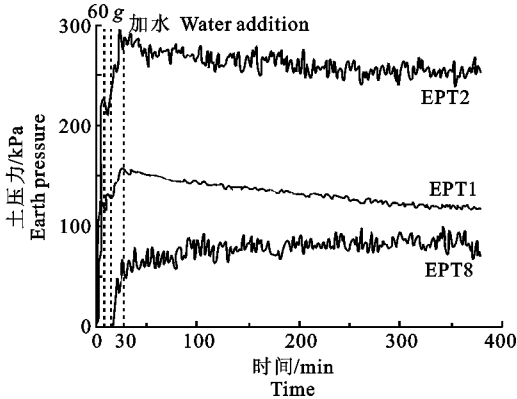


图 3 模型内部土压力随时间的变化曲线

Fig. 3 Curves of measured earth pressures versus time 大,模型 1/2 深度处( $H=10\text{ cm}$ )侧压力系数则有增大的趋势,从加水后的 0.45 增大到试验结束前的 0.6 左右。

3.3 模型吸力的变化

图 5 为试验中测量结果较好的 PPT1、PPT5 和 PPT7 的吸力曲线。模型的初始含水量相同,3 个吸力传感器初始吸力测值应相同,但 PPT7 的测值比其余 2 个大(图 5),可能是因为模型内部含水量不均匀所致。另外,由于模型体积较大,夯实也不易做到使模型内部密实度非常均匀。根据吸力试测结果<sup>[9]</sup>,PPT7 初始测值较合理,为 63 kPa。

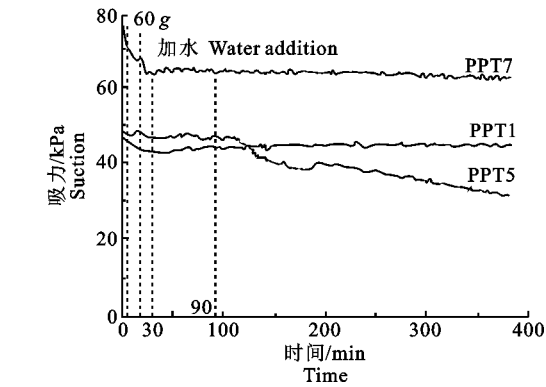


图 5 模型内部基质吸力随时间的变化曲线

Fig. 5 Curves of measured suctions versus time

感器测头周围相对含水量发生变化,导致吸力测值减小。在 30~90 min,土体压缩变形趋缓,此时模型内部含水量变化不大,因此吸力基本保持不变。随着水分进一步入渗,在 100 min 后,PPT5 测值从 47 kPa 逐渐减小至试验结束前的 31 kPa,试验后测

定该位置含水量为 28.5%。PPT7 测值在浸水过程中基本保持不变,说明此处含水量变化不大,这也由试验后测得的该处含水量得到了证实。

### 3.4 试验前后模型含水量和干密度的变化

试验结束后,沿模型深度方向用环刀取样测定含水量及干密度,结果见图 6。图 6A 表明,试验后

模型表面平均含水量为 33%;浸水后,模型内形成了含水量梯度,在 12 cm 深度以下含水量较试验前变化不大,梯度也不明显。图 6B 表明,在模型的相同深度,试验后模型的干密度较试验前大,随着深度的逐渐增大而增加,且试验后在模型底部未发现水分溢出现象。

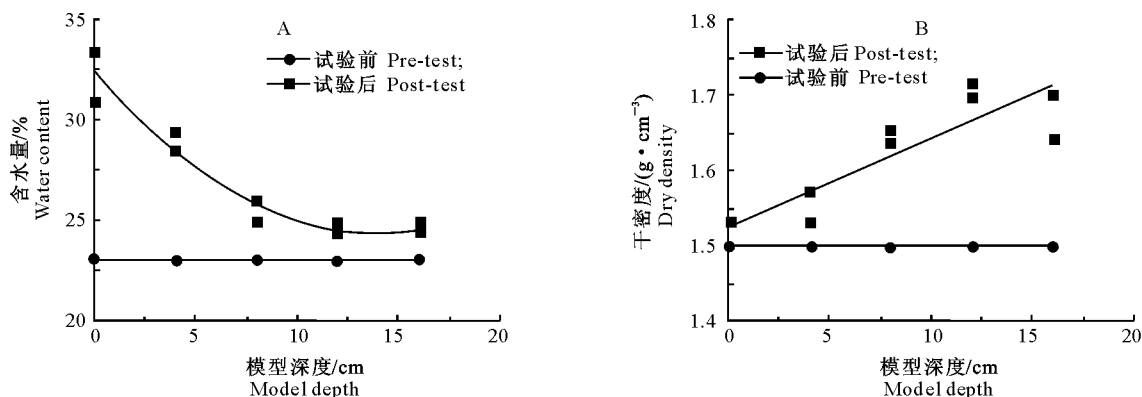


图 6 试验前后模型含水量(A)和干密度(B)的比较

Fig. 6 Comparison of water content (A) and dry density (B) before and after test

## 4 结 论

(1)利用离心模拟技术模拟了膨胀土地基浸水变形情况,应用改装的 PDCR-81 微型孔隙水压力传感器实现了离心模拟试验中非饱和土吸力的测量。本试验发现,模型中测出的吸力受土壤含水量影响较大,但受重力的影响较小。

(2)本次离心模型试验测量出了模型内的侧压力和竖向压力,计算出了相应的侧压力系数,模型底部的侧压力系数最终为 0.47。在试验中观察到了由于浸水的影响,侧压力系数呈逐渐增大的现象。

(3)在加速度为 60 g 条件下,测量发现非饱和膨胀土在浸水后发生了轻微膨胀。这是模型在水头为 8.5 cm 上覆水压力下发生的,远小于预期的膨胀变形,说明压力对膨胀土增湿变形有抑制作用。

## [参考文献]

[1] Taylor R N. Geotechnical centrifuge technology [M]. Glasgow, UK:Blackie Academic & Professional,1995.

[2] 杜延龄. 土石坝离心模型试验研究 [J]. 水利水电技术,1997,28(6):54-58.

Du Y L. Study on the centrifugal model test for earth-rock dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,1997,28(6):54-58. (in Chinese)

[3] 饶锡保,陈 云,曾 玲. 膨胀土渠道边坡稳定性离心模型试验及有限元分析 [J]. 长江科学院院报,2002,19(增刊):105-107.

Rao X B, Chen Y, Zeng L. Centrifugal model test and FEM study on slope stability of expansive soil channel of water transfer project from South to North [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2002,19(S1):105-107. (in Chinese)

[4] 王国利,陈生水,徐光明. 干湿循环下膨胀土边坡稳定性的离心模型试验 [J]. 水利水运工程学报,2005(4):6-10.

Wang G L, Chen S S, Xu G M. Centrifuge model test on stability of expansive soil slope under alternation between drying and wetting [J]. Hydro-science and Engineering,2005(4):6-10. (in Chinese)

[5] 徐光明,王国利,顾行文,等. 雨水入渗与膨胀性土边坡稳定性试验研究 [J]. 岩土工程学报,2006,28(2):270-273.

Xu G M, Wang G L, Gu X W, et al. Centrifugal modeling for instability of excavated slope in expansive soil due to water infiltration [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(2):270-273. (in Chinese)

[6] 陈生水,邓澄峰,王国利. 膨胀土边坡长期强度变形特性和稳定性研究 [J]. 岩土工程学报,2007,29(6):795-799.

Chen S S, Zheng C F, Wang G L. Researches on long-term strength deformation characteristics and stability of expansive soil slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2007,29(6):795-799. (in Chinese)

[7] 胡再强,谢定义,沈珠江. 非饱和黄土渠道浸水变形的离心模型试验研究 [J]. 西安理工大学学报,2000,16(3):244-247.

Hu Z Q, Xie D Y, Shen Z J. Centrifugal model test on unsaturated loess canal inundation deformation [J]. Journal of Xi'an University of Technology,2000,16(3):244-247. (in Chinese)

[8] Li W X, Wu X M, Chen Z Y. Improvement of thermal conductivity sensor for measuring matric suction in unsaturated soils

[M]//Proceeding of 3rd International Conference on Unsaturated Soils. Beijing: Science Press, 1998: 389-394.

[9] 李京爽, 邢义川, 侯瑜京. 离心模型中测量基质吸力的微型传感器 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2008, 6(2): 136-143.

Li J S, Xing Y C, Hou Y J. Miniature transducers for matric suction measurement in centrifuge models [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2008, 6(2), 136-143. (in Chinese)

[10] Fredlund D G, Morgenstern N R. Stress state variables for unsaturated soils [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(GT5): 447-466.

[11] Alonso E E, Gens A, Josa A. A constitutive model for partially saturated soils [J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 405-430.

[12] Sheng D C, Fredlund D G, Gens A. A new modelling approach for unsaturated soils using independent stress variables [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(4): 511-534.

[13] 李京爽, 邢义川, 王 哲, 等. 用有效应力解释非饱和土的弹塑性行为 [J]. 水利学报, 2009, 40(6): 749-755.

Li J S, Xing Y C, Wang Z, et al. Interpretation of elasto-plastic behavior of unsaturated soil based on effective stress [J]. Chinese Hydraulic Journal, 2009, 40(6): 749-755. (in Chinese)

[14] 李 振, 邢义川, 张爱军. 膨胀土的浸水变形特性 [J]. 水利学报, 2005, 36(11): 1385-1391.

Li Z, Xing Y C, Zhang A J. Inundation deformation characteristics of expansive soils [J]. Chinese Hydraulic Journal, 2005, 36(11): 1385-1391. (in Chinese)

[15] 中华人民共和国水利部. SL 237—1999 土工试验规程 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

Ministry of Water Resources, the People's Republic of China. SL 237—1999 Geotechnical test code [S]. Beijing: China Hydraulic and Hydropower Press, 1999. (in Chinese)

(上接第 228 页)

[13] 孙林松, 王德信, 谢能刚. 接触问题有限元分析方法综述 [J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(3): 18-20.

Sun L S, Wang D Y, Xie N G. A summary of finite element analysis for contact problems [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001, 21(3): 18-20. (in Chinese)

[14] Katona M G. A simple contact-friction interface element with applications to buried culverts [J]. Int J Num Anal Meth Geomech, 1983, 24(7): 371-384.

[15] 雷晓燕. 三维接触问题新模型研究 [J]. 土木工程学报, 1996, 29(3): 24-33.

Lei X Y. Research on new model for analyzing three dimensional contact problems [J]. China Civil Engineering Journal, 1996, 29(3): 24-33. (in Chinese)

[16] 王世夏. 水工设计的理论和方法 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 378-381.

Wang S X. Theories and method of hydromechanics design [M]. Beijing: China Water Power Press, 2000: 378-381. (in Chinese)

[17] 李筱艳, 王传鹏, 柳 毅. 渗流场与应力场的完全耦合模型及其在深基坑工程中的应用 [J]. 水文地质工程地质, 2004(6): 86-89.

Li X Y, Wang C P, Liu Y. Fully coupling model of seepage and stress and its application in deep foundation [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004(6): 86-89. (in Chinese)

[18] 姜 妮, 王瑞骏, 吕海东. 混凝土防渗墙均质土坝应力变形研究 [J]. 人民长江, 2008, 39(16): 58-62.

Jiang N, Wang R J, Lv H D. Research on stress-deformation of concrete cutoff wall of homogeneous earth dam [J]. Yangtze River, 2008, 39(16): 58-62. (in Chinese)