

补水条件下土体水分场的动态测试

侯仲杰,毛雪松,马 磊

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

摘 要:为了揭示土体中水分迁移的运动机理,应用美国水分传感器及采集设备(6050X1 trase system),对封闭系统的小型试件进行恒温条件下底部补水的动态测试,得出土体含水体积分数随时间的变化曲线、浸润面上升速率和水通量与浸润面上升高度的曲线,并回归出浸润面上升速率与上升高度以及水通量与浸润面上升高度的关系式。研究结果表明:在试件中引起水分迁移最主要的因素是基质势和重力势;土体中各点的含水体积分数从试件底部开始到试件顶部逐渐增大,土体浸润面上升速率和水通量随迁移路径的增长呈减小趋势;土体的三相介质构成及孔隙连通性等因素是影响水分迁移路径与迁移动力的重要因素。

关键词:道路工程;水分场;动态测试;补水条件;浸润面

中图分类号:U416 **文献标志码:**A

Dynamic test of moisture field in soil under supplying water

HOU Zhong-jie, MAO Xue-song, MA Biao

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To discover the movement mechanism of the moisture in the soil, the experiments are carried out on the small size sample of the closed system under constant temperature. During the experiments the water is supplied from the bottom of the sample all the time. The dynamic observation is implemented by the moisture sensor and the data acquisition facility (6050X1 trase system). The curve of the moisture value changing with time and the curves of the rise rate of soakage side and the water flux with the rising height of soakage side are analyzed. The expressions among the water flux, the rising rate and the height of the soakage side are regressed. The experiments showed that the base tendency and the gravity tendency are the most important factors to induce the moisture migration in the soil. The moisture content fraction of the soil increases from the bottom to the top for the sample, and the rising rate of the soakage side and water flux decrease with the transferring distance increasing. The results indicate the structure of soil with three mediums and the connectedness of hole are critical to the path of moisture moving and the migration motivity. 1 tab, 4 figs, 9 refs.

Key words: road engineering; moisture field; dynamic testing; supplying water condition; soakage side

收稿日期:2007-02-26

基金项目:国家自然科学基金项目(50708009);陕西省自然科学基金项目(2006E209)

作者简介:侯仲杰(1955-),男,甘肃庆阳人,高级工程师,E-mail:zhongjiehou@126.com。

0 引 言

路基中水分场的分布及变化规律是一个复杂问题。土体作为一个多孔介质,是由无数松散的、形状不规则且排列复杂的固体颗粒组成,多孔介质内部孔隙的大小、形状及连通性各不相同,极大地影响着水分的运动特征^[1]。土体中引起水分迁移的动力是由多种因素构成的,如重力势、压力势、基质势、溶质势和温度势等^[2]。水分迁移动力的多样性、迁移路径的随机性,导致土体中的水分动态变化规律呈多变性,水分分布特征具有明显的不均匀性。路基中水分场的动态变化导致路基的承载性能也在动态变化^[3-5]。大量的工程实践证明,水分迁移引起路基承载能力下降是造成路基病害的重要原因之一。

目前,国内外学者在水分场的建模及迁移动力方面进行了大量的研究^[6-9],但由于测试手段及方法的限制,使得研究人员在动态测试土样瞬态含水体积积分数的变化方面仍无法得到满意的效果。

本次试验突破以往试验只能通过解剖土样测试土体初态和终态含水体积分数的限制,引进美国水分传感器及采集设备(6050X1 trase system),在不破损土样的前提下,测试土体中任一点含水体积积分数的变化。在等温及补水条件下,观测土样任一点的瞬态含水体积分数,以便了解和研究整个试验过程中试件内部含水体积积分数的动态变化过程。

1 试验装置及试验方法

水分迁移测试系统是由试件、水分传感器及采集设备、补水装置(马氏瓶)、温度传感器及采集设备和控温装置(热交换器、低温冷浴)等部件构成,试验装置如图 1 所示。试件高 100 cm、直径 15 cm。在试件中心每 5 cm 安装一水分传感器及温度传感器进行温度、水分测量,两端安装可循环恒温液体的热交换器进行温度控制。试件外用保温材料进行隔热处理。补水系统用马氏瓶测定补水液面高度,温度控制采用低温恒温浴将恒温液体循环到热交换器实现,水分和温度采集利用专用仪器通过计算机来实现。

1.1 土体含水体积积分数的测试原理

本次试验设备的核心是水分传感器及采集设备,其工作原理为:能量脉冲的传递速度取决于组成物质的介电常数,当介电常数越大时,其能量脉冲的传递速率越小。饱和土体是由土颗粒、水两项介质构成,而非饱和土体是由土颗粒、水及空气三相介质构成。土颗粒、水及空气的介电常数如表 1 所示。

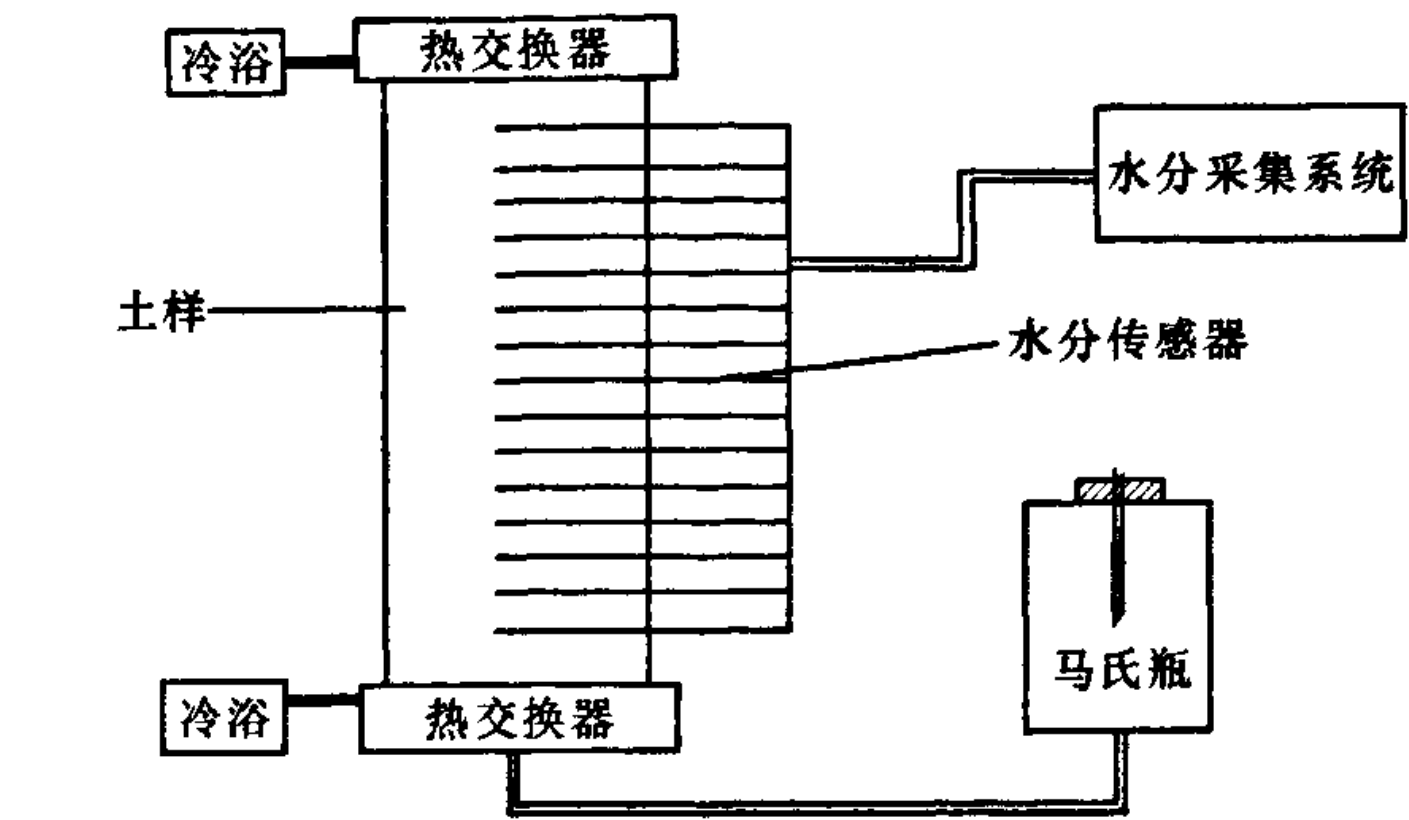


图 1 水分迁移系统

表 1 土颗粒、水及空气的介电常数

参 量	空气	土颗粒	水
介电常数	1	2~4	80

由于不同介质的介电常数均不相同,能量脉冲在土体内部的传播速率也不相同。因此土体的介电常数 K_s 的计算公式为

$$K_s = \left(\frac{tc}{L}\right)^2$$

(1)

式中: L 为水分传感器探头的长度(cm); t 为能量脉冲通过水分传感器探头的传递时间(10^{-9} s); c 为光速(cm/s)。

以精确的测量建立土体介电常数与已知含水体积积分数的土体之间关系,来标定水分传感器,进而测试土体的含水体积分数。

1.2 土样及试验方法

试验采用西安黄土,将烘干的土样粉碎后过 1.0 mm 筛,配制成含水体积分数为 20% 的土样;再经过 10 h 以上的闷料;然后将其分层装入试件模中,经击实使其达到要求的密实状态;同时将水分传感器预埋在指定位置,最低的水分传感器距底部透水板的距离为 20 cm,最高的水分传感器距顶部透水板的距离为 10 cm,中间每 5 cm 安装一支传感器;最后安装上下热交换器,进行保温处理,连接水分传感器到采集仪。试件制好后,开始恒温 24 h,由马利奥特(Mariotte)瓶经由试件底部透水板进行补水。该补水装置简称马氏瓶,能够自动补水,且使供水水位保持不变。本次试验中,补水水位距试件底部透水板为 10 cm,土样的干密度为 1.8 g/cm³。试验持续 19 354 min,每隔 10 min 记录一组温度传感器和水分传感器的读数。待补水马氏瓶中水液面高度无变化或水分传感器测试无变化时,试验结束。

2 试验结果分析

经过试验,得出了不同时刻试件中各点的含水体积分数随时间的变化曲线(图 2)。由图 2 可看出,

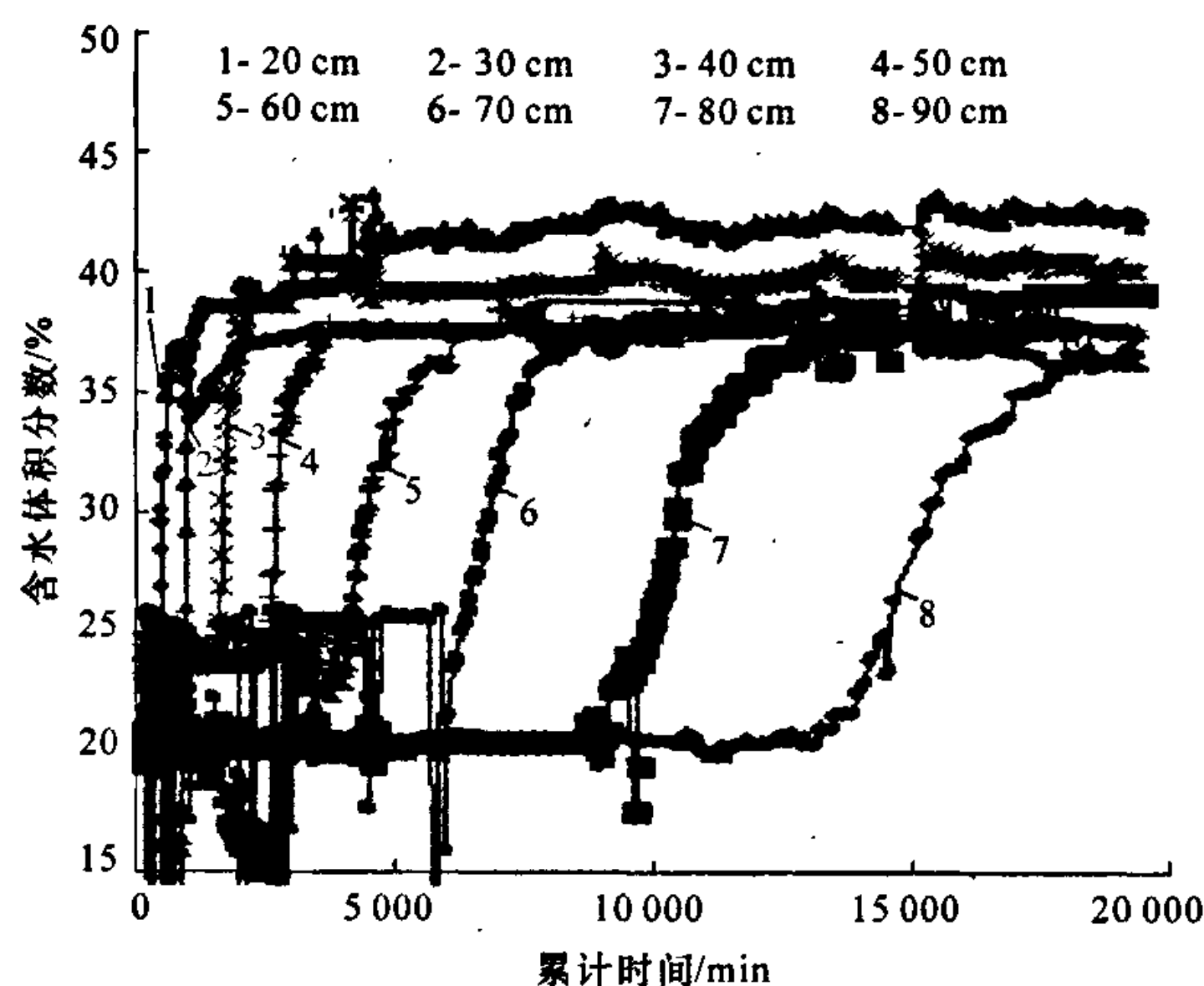


图2 不同时刻试件中各点的含水体积分数随时间变化的曲线

土样由初态含水体积分数变化至饱和状态时,水分传感器的测试值会出现异常抖动,这是由于水分突然进入某一断面,造成土颗粒、水分和气态不均衡所致。该种现象随着补水速率的下降而有所减缓,即随着试件高度增加,传感器所测试值不再出现异常变化。在试件底部补水试验中,水分是从下而上逐渐渗入的,因此试件中各点的含水体积分数由试件底部开始到试件顶部逐渐增大,同时越接近底部透水板,浸润面上升的速率越快。所谓的浸润面,表示含水体积分数由接近饱和状态过渡到初态的区段。浸润面以下含水体积分数变化接近饱和,浸润面以上的土样含水体积分数接近于初态含水体积分数。图3给出浸润面上升速率与上升高度的关系。由图3可以明显看出,浸润面上升速率与上升高度呈幂指数递减关系,经回归得计算公式为

$$h = 1.917v^{-0.6383} \quad (2)$$

式中: h 为浸润面上升高度(cm); v 为浸润面上升速率(cm/min)。

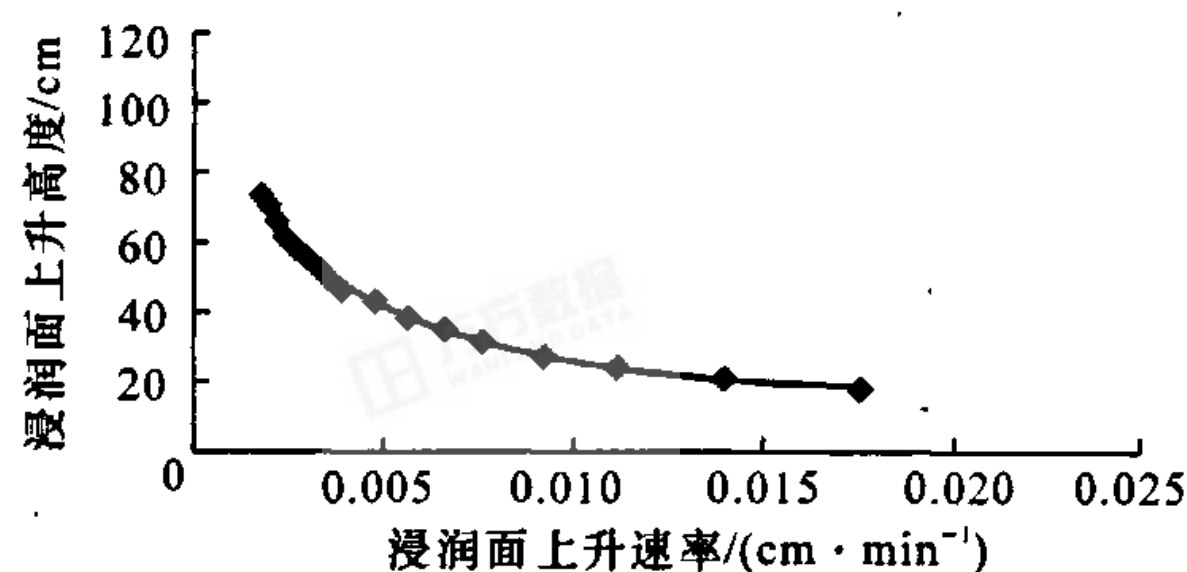


图3 浸润面上升速率与上升高度的关系曲线

分析其原因,在该试件中引起水分迁移最主要的因素是基质势和重力势,基质吸力的作用使得水分通过透水板向上迁移,而土体中水分的重力起相当于反向力的作用,它将不利于水分由下向上迁移。随着水分在试件中升高,即迁移路径的增长致使土体中水分重力势也增大,因此出现了浸润面上升速度随试件高度而减小的现象。另一方面,由于土体

中水分的迁移路径增大(水分在试件中升高),补水阻力也增大,导致浸润面供水不足,使得浸润面上升速率减小。

由图4可以看出,水通量随着浸润面上升高度的增加呈递减趋势。在试验初期,浸润面上升高度为7.5 cm时,水通量为0.052 mL/(min·cm²);当浸润面上升高度为40 cm时,水通量却为0.002 mL/(min·cm²)。通过对实测结果回归分析,得到水通量和浸润面上升高度的关系式

$$h = 1.613q^{-0.5196} \quad (3)$$

式中: q 为水通量(mL/(min·cm²))。

水通量与浸润面上升高度呈幂指数递减趋势,进一步证明了水分迁移路径的阻力是影响含水体积分数变化的重要因素之一。

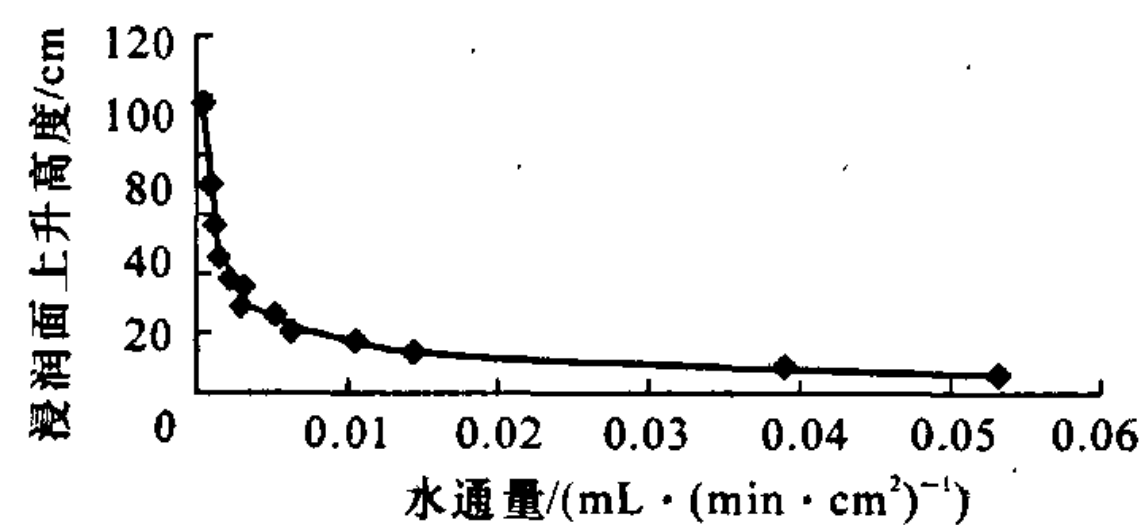


图4 水通量与浸润面上升高度的关系曲线

3 结 语

(1) 动态测试了补水条件下土体含水体积分数随时间变化的过程,通过分析浸润面上升速率和水通量与浸润面上升高度的曲线,得出土体浸润面上升速率及水通量随迁移路径的增长呈减小趋势。

(2) 土体三相介质的构成及孔隙连通性等多因素是影响水分迁移路径与迁移动力极其重要的因素,而土体中水分的迁移又受水分迁移路径及迁移动力的影响。

参考文献:

References:

- [1] 毛雪松,胡长顺,窦明健,等. 正冻土中水分场和温度场耦合过程的动态观测与分析[J]. 冰川冻土,2003,25(1):55-59.
MAO Xue-song, HU Chang-shun, DOU Ming-jian, et al. Dynamic observation and analysis of moisture and temperature field coupling process in freezing soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003,25(1):55-59.
- [2] 王铁行,李 宁,谢定义. 非饱和黄土重力势、基质势和温度势探讨[J]. 岩土工程学报,2004,26(5):715-718.

(下转第31页)

参考文献:

References:

- [1] Pan C, White T D. Evaluation of stripping for asphalt concrete mixtures using accelerated testing methods[J]. Transportation Research Record, 1998, 1630:98-105.
- [2] Epps J A, Sebaaly P E, Penaranda J, et al. Compatibility of a test for moisture-induced damage with superpave volumetric mix design [R]. Washington D C: National Research Council, 2000.
- [3] Bahia H, Ahmad S. Evaluation and correlation of lab and field tensile strength ratio (TSR) procedures and values in assessing the stripping potential of asphalt mixes [R]. Wisconsin: Wisconsin Department of Transportation, 1999.
- [4] 马明国,管 频,李志强,等. 基于遥感与 GIS 的甘肃省公路工程困难指数计算[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2):45-50.
MA Ming-guo, GUAN Pin, LI Zhi-qiang, et al. Calculation of difficulty index of highway engineering in Gansu province based on remote sensing and GIS [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2):45-50.
- [5] 李 芳,李 斌,陈 建. 中国公路盐渍土的分区方案 [J]. 长安大学学报:自然科学版, 2006, 26(6):12-15.
LI Fang, LI Bin, CHEN Jian. Highway-related dividing scheme of salty soil[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(6):12-15.
- [6] 高 英,曹荣吉,刘朝晖,等. 高速公路沥青路面渗水性能[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(3):12-16.
GAO Ying, CAO Rong-ji, LIU Zhao-hui, et al. Permeability of asphalt pavement at expressway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(3):12-16.
- [7] Terrel R L, Al-Swailmi S. Water sensitivity of asphalt-aggregate mixes: test selection[R]. Washington D C: National Research Council, 1994.
- [8] Scholz T V, Terrel R L, Bea J, et al. Water sensitivity: binder validation [R]. Washington D C: National Research Council, SHRP-A-402, 1994.
- [9] 沈金安. 道路沥青及沥青混合料的气候分区及关键性技术指标[J]. 中国公路学报, 1997, 10(1):1-9.
SHEN Jin-an. Climatic zoning for road asphalt and asphalt mixture and the key technical index[J]. China Journal of Highway and Transport, 1997, 10(1):1-9.
- [10] 孙长新,赵毅强,叶燕呼,等. 广东省公路沥青路面气候影响分区[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(1):16-19.
SUN Chang-xin, ZHAO Yi-qiang, YE Yan-hu, et al. Regionalizing for asphalt pavement in Guangdong Province according to the climate influence[J]. Journal of Xi'an Highway University, 2000, 20(1): 16-19.
- [11] Harvey J, Chong A, Roesler J. Climate regions for mechanistic - empirical pavement design in California and expected effects on performance[R]. California: University of California at Berkeley, 2000.
- [12] 交通部公路规划设计院. 公路自然区划标准[M]. 北京:人民交通出版社, 1986.
- (上接第 20 页)
- WANG Tie-hang, LI Ning, XIE Ding-yi. Gravitational potential, matrix suction and thermal potential of unsaturated loess soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5):715-718.
- [3] 刘巍然,高江平. 压实黄土路基中水分迁移的数值模拟[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2006, 26(4):5-7.
LIU Wei-ran, GAO Jiang-ping. Numerical modelling on water migration in loess subgrade[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(4):5-7.
- [4] 毛雪松,李 宁,王秉纲,等. 考虑相变作用的冻土路基应力与变形分析模型[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(1):58-62.
MAO Xue-song, LI Ning, WANG Bing-gang, et al. Analysis model of stress and deformation of permafrost subgrade with phase changing[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(1):58-62.
- [5] 王铁行. 多年冻土地地区路基冻胀变形分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2):1-5.
WANG Tie-hang. Analysis of frost heave on subgrade in permafrost region [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2):1-5.
- [6] Sally A S, Susan R B. Moisture migration during freeze and thaw of unsaturated soils: modeling and large scale experiments[J]. Cold Regions Science and Technology, 1997, 25(2):33-45.
- [7] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 冻土的温度水分应力及其相互作用[M]. 兰州:兰州大学出版社, 1989.
- [8] 徐学祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [9] 胡长顺,何子文,窦明健,等. 青藏公路纵向裂缝成因及处治对策研究总报告[R]. 西安:长安大学, 2003.