

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.02.012

海堤公路拓宽工程中新建路堤对老海堤沉降的影响

程 潇¹, 蔡 锐², 李秉宜¹

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 2. 南通沿海开发集团城镇建设有限公司, 江苏 南通 226006)

摘要: 通过在海域中海堤公路拓宽工程的典型断面埋设沉降监测仪器, 研究新建路堤在建设过程中对老海堤公路的影响。实测结果表明: 老海堤公路左、右两侧路肩在新建路堤建设过程中会产生较大的沉降, 且左、右路肩的沉降差异较大, 易产生裂缝。用 Plaxis 有限元软件模拟分析表明, 模拟结果与实测值有较高的一致性, 新、老海堤公路下均产生了水平位移, 老海堤公路最大位移量 0.5 m, 新建路堤最大位移量达 0.8 m, 两者位移方向相反。拓宽海域海堤公路设计时应应对这些位置的差异沉降采取适当修正措施。

关键词: 海堤公路; 拓宽工程; 差异沉降; Plaxis 有限元

中图分类号: TU447 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)02-0166-06

Impact of new embankment on settlement of old seawall in road widening project

CHENG Xiao¹, CAI Rui², LI Bingyi¹

(1. Geotechnical Research institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. City and Town Construction Co., Ltd., Nantong Coastal Development Group, Nantong 226006, China)

Abstract: By embedding settlement monitoring instruments in a typical section of a seawall road widening project in a sea area, the impact of the new embankment during its construction on the settlement of the old seawall was studied. Measured results indicate that the construction of the new embankment has caused significant settlement of the old seawall, with a large difference between the amounts of settlement at its left and right road shoulders, which leads to cracking. Simulation analysis using Plaxis finite element software shows that the horizontal displacements in opposite directions, with maximum values of 0.5 m and 0.8 m, occur under the old seawall and new embankment, respectively, and that the simulated results agree with the measured data. Thus, appropriate corrective measures should be taken in response to differential settlements during the design of the seawall road widening project.

Key words: seawall road; widening project; differential settlement; Plaxis finite element

海域上的海堤常常兼具公路的功能。随着经济的发展, 一些老海堤公路由于路面道路狭窄, 不能满足日益增长的交通流量需求, 因此需要进行拓宽。目前, 针对公路拓宽工程已经有了较为深入的研究。国外的改扩建公路主要有日本的名神高速公路、美国 Indiana 高速公路、荷兰 Rotterdam-Antwerp 高速公路等^[1]。国内沪宁高速公路的拼宽采用了“两侧拼宽为主、局部分离”的方法, 针对不同软基采取了多样化的软基处理方式^[2-4]。Hjortnaes-Pedersen 等^[5]对实际拼宽工程进行研究, 认为土工织物能够减小大变形的发生, 软土中孔隙水的排出和路旁的护坡道均能提升路基的稳定性。Brinkgreve 等^[6]、Allersma 等^[7]、van Meurs 等^[8]将现场试验、离心模型试验和有限元模拟三者结合起来, 全面分析了拼宽工程路基施工过程中软土地基的力学性能表现和固结特性。Forshman 等^[9]研究了采用土工材料结合粉喷桩以减小拼宽路堤水平位移的方法, 同时进行有限元论证。汪浩^[10]通过离心模型试验, 认为拼宽工程中新路基作为附加荷载对老路基有较大影响, 两

收稿日期: 2015-09-03

基金项目: 浙江省交通运输厅科技计划(2012H01)

作者简介: 程潇(1992—), 女, 安徽阜南人, 硕士研究生, 主要从事软土地基处理研究。E-mail: 798630792@qq.com

者会产生较大的差异沉降,道路横坡比也会发生改变。蒋鑫等^[11]采用三维弹塑性分析方法对拼宽公路进行了有限元模拟,着重分析了新老路基的不均匀沉降和应力分布规律,认为老路基下的位移和应力有向新建路基转移的趋势。章定文等^[12-13]采用有限元分析方法,将软土和填料均选为摩尔库伦本构模型,探讨不同的软土层厚度、拼宽宽度、新老海堤刚度比等多种情况下,拼宽路堤对老海堤沉降固结的影响。邢良^[14]分析了土工织物在拼宽路基中的作用原理,并运用大型有限元分析软件 Ansys 分析了土工织物在减少新老路基不均匀沉降方面的效果,同时分析了不同工况下软土路基的固结沉降规律。

综上所述,目前的研究成果主要集中在高速公路的拓宽方面,对于海堤拓宽工程,目前国内外的工程实例和研究尚少。本文依托浙江省 77 省道延伸线的海堤拓宽工程,通过现场试验和有限元分析来研究新建路堤对老海堤的沉降影响。

1 工程概况

浙江省 77 省道延伸线龙湾至洞头疏港公路工程位于温州市,该公路连接温州陆域与洞头县东海海域。公路设计为双向四车道,设计时速 80 km/h。该项目的三、四标段为海域段。该海域段原有一双向两车道海堤公路,现需要在其一侧拓宽为双向四车道,拓宽后,原海堤公路不再使用。

该工程地质条件差,路线方向为敞口海域段,软基深厚,最大软土深度达到 60 m。根据地质资料显示,该工程不良地质区域主要为海积层,厚度达 56~71.4 m,局部夹粉砂,呈软塑或流塑状,现状为滩涂,直接受潮汐影响,表面淤泥厚度 0.5~2.0 m。在勘察深度范围上部以淤泥与粉砂互层、淤泥、淤泥质黏土为主,地基承载力 35~50 kPa,层厚 30~45 m;下部为黏土、粉质黏土,含少量粉细砂、炭化物碎屑,工程地质性质一般,层厚约 21 m。主要软土物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 海域段主要软土物理力学性质指标

Table 1 Main physical and mechanical performance indexes of soft soil in study area

土层名称	含水率 $w/\%$	湿密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙比 e	快剪指标		固快指标		地基承载力/ kPa
				c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	
③ ₂ 淤泥层	57.3	1.65	1.630	9.3	1.8	15.6	6.0	35
③ ₃₋₂ 淤泥粉砂互层	42.1	1.77	1.205	16.5	4.0	19.0	8.0	50
③ ₅ 淤泥层	56.8	1.65	1.629	14.3	3.1	19.3	7.6	60
③ ₆ 淤泥质	46.3	1.72	1.335	21.4	4.8	23.0	9.0	80

从表 1 可以看出,该工程地质条件差,地基承载力低,在荷载作用下会产生相当大的沉降。而老海堤已经固结了约 6 a,固结已基本完成,所以新建路堤在建设时会与老海堤间产生相互影响。

2 仪器布置

为了实时监测施工过程中路基的沉降速率,控制路堤填筑速率、施工进度,掌握地基固结的效果以及新老路堤间的沉降情况,在典型断面处埋设相关监测仪器,动态监测海堤公路的填筑过程,并通过观测数据的分析来指导施工。在典型主控断面 K15+600 位置埋设的仪器有:路基表面沉降板、孔隙水压力计、测斜管、分层沉降环等。典型主控断面仪器布置如图 1 所示。图中,ET1、ET2 表示老海堤公路左路肩和右路肩位置处的沉降标识点,

ET3、ET4 为新建公路路基路中心、右路肩处的沉降板,用来测量整个填筑过程的沉降量。测量频率为 3~7 d,并根据现场填土情况及测试结果进行动态调整。进入预压期后,观测周期逐渐变长。

3 试验结果分析

在新建路堤开工建设后,同时对老海堤左、右路肩和新建路堤路中、右路肩位置进行沉降监测分析。根据 2011 年 2 月 23 日至 2014 年 3 月 20 日间的测量结果绘制荷载-时间-沉降曲线,如图 2 所示。

由于老海堤已经建成并使用了 6 a,堤下软土已基本固结完成,因此,在拓宽路堤施工时,老海堤的沉降

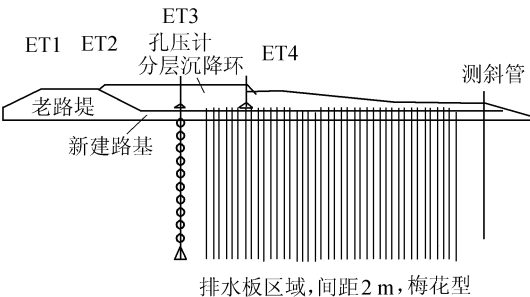


图 1 典型断面监测仪器布置

Fig. 1 Instrument layout in typical cross-section

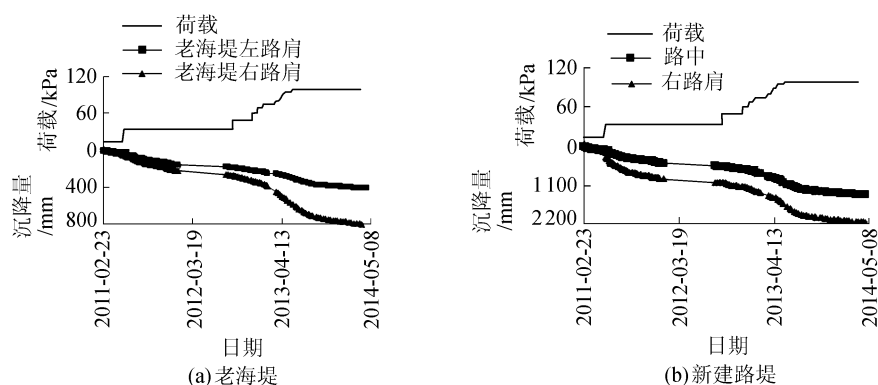


图2 老海堤、新建路堤荷载-时间-沉降速率曲线

Fig. 2 Load-time-sedimentation rate curves for old seawall and new embankment

量相对新建路堤要小得多。由图2可以看出,老海堤在新建路堤加载期间同样发生了较大的沉降,且老海堤左、右路肩之间的沉降差异较大。截至2014年3月,老海堤左路肩沉降411 mm,右路肩沉降802 mm,差异沉降量达391 mm。因此,在类似海堤公路的拓宽建设时,一定要充分考虑差异沉降,在设计时提出相应的保护措施,防止老海堤开裂甚至失稳。

从图2可以看出,初始加载时,土体沉降曲线平稳,沉降速率较低。当加载30 kPa后,沉降突然增加,沉降速率增加较大。在随后的1 a内,由于未填土,沉降曲线随着时间的延长逐步趋于平缓,沉降速率逐渐减小,说明土体在此期间慢慢固结,趋于稳定。当2012年9月再次加载后,沉降速率又有所增加,但增加幅度不及首次加载时明显。随着分层加载的逐步进行,土体沉降量逐步变大。在2013年5月该断面进入预压期后,沉降曲线再次趋于平缓。截至2014年3月,路中位置最大沉降量达1332 mm,右路肩处达1881 mm。造成路中位置沉降量远小于右路肩沉降量的原因是由于路中位置位于老海堤的一级平台上,地基已有数年的固结。新建路堤路中位置和右路肩位置的沉降差异是由于老海堤的存在造成的。

4 Plaxis 有限元分析

4.1 土体本构关系的选择

在建模的过程中,对地基软土采用软土模型,即剑桥模型,对路堤填料采用摩尔库伦本构模型,这样更符合现场的实际情况,提高模拟的准确性。

摩尔库伦本构模型主要有7个参数:土的密度 ρ 、水平和竖向渗透系数 k 、土体的弹性模量 E 、泊松比 ν 、土的黏聚力 c 、摩擦角 φ 和剪胀角 ψ 。剑桥模型主要有5个参数:修正的压缩指标 λ^* 、修正的膨胀指标 κ^* 、土的黏聚力 c 、摩擦角 φ 和剪胀角 ψ 。其中 λ^* 和 κ^* 无法从室内试验获得,可以用压缩指数 C_c 和回弹指数 C_e 替代计算。

4.2 塑料排水板简化计算

现场采用塑料排水板处理软基的方式。在有限元计算中,塑料排水板是三维固结问题,而本文通过二维平面问题来进行计算,因此需要将塑料排水板的三维固结问题转化为平面问题,即将塑料排水板等效为二维的砂墙地基。塑料排水板的等效计算方面目前已经有了较成熟的理论。本文采用赵维炳等^[15]的等效计算方法,只需调整砂墙间土体的渗透系数即可使塑料排水板与砂墙等效,而砂墙的间距可根据有限元网格划分的需要自行取值。

将塑料排水板等效为最基本的砂井地基,等效方法为

$$\begin{cases} D_x = \frac{4(n_p - s_p)^2(1 + \nu)L^2}{9n_p^2\mu_a - 12\beta(n_p - s_p)(s_p - 1)(1 + \nu)L^2} \\ D_y = \frac{2(1 + \nu)}{3} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$n_p = \frac{B}{r_e} \quad s_p = \frac{r_{sp}}{r_{wp}} \quad L = \frac{B}{r_e}$$

$$\mu_a = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln \frac{n}{s} - \frac{3n^2 - s^2}{4n^2} + \beta \frac{n^2 - s^2}{n^2} \ln s \quad \beta = \frac{k_{xa}}{k_s} \quad n = \frac{d_e}{d_w} \quad s = \frac{r_s}{r_w}$$

式中: D_x 、 D_y ——水平向和竖向渗透系数的调整系数; r_{sp} ——砂墙地基涂抹区宽度的一半; r_{wp} ——砂墙宽度的一半,即为等效砂井的半径 r_w ; B ——砂墙间距的一半; r_e ——等效砂井的影响半径,即 $d_e/2$; d_e ——等效砂井的影响直径; k_{xa} ——砂井地基间土体的水平向渗透系数; k_s ——涂抹区渗透系数; n ——井径比; r_s ——涂抹半径; d_w ——排水板等效砂井直径。

自此,所有的参数均可通过计算获得。本文计算时,取土体泊松比 $\nu = 0.3$, $s = 1.2$, $s_p = 1.2$, $\beta = 7.0$ 。设 $B = 2\text{ m}$, 代入数据, 计算得: $\mu_a = 3.4553$, $D_x = 1.806$, $D_y = 0.9$ 。

$B = 2\text{ m}$ 时,需将砂墙间土体的水平向渗透系数乘以 1.806, 竖向渗透系数乘以 0.9, 这样现场的塑料排水板即可等效为有限元中平面问题的砂墙, 这样可以简化计算过程, 同时又提高了计算结果的准确性。

4.3 建模尺寸及参数

本文研究的路堤沿纵向足够长, 且路堤尺寸沿纵向保持不变, 可作为平面应变问题分析。根据该海域路段地基软土深度达 60 m, 地基深度取 60 m, 宽度取 120 m, 左、右边界在路基两侧各向外延伸 60 m, 软土表面可自由变形, 模型左、右、下边界均受到约束, 不发生位移。左、右两边界均为不透水边界, 下层边界为可排水边界。将材料属性(表 1)给各个土层赋值后, 软件采用 fine 级别精度对模型自动划分网格, 如图 3 所示。

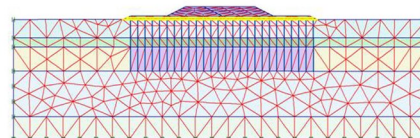


图 3 软件自动划分的网格

Fig. 3 Grids obtained by automatic division with software

之后, 设置初始条件, 包括水位、边界条件等。在模型计算中, 应尽量控制与实际填筑间隔相一致的时间。此外, 由于现场填土高度不具有规律性, 很难恰好为整数, 而在有限元计算中, 由于网格划分的需要, 模型最小的划分刻度为 1 m, 即最小填土高度需为 1 m。因此, 在模型计算中, 最小填土高度为 1 m, 分布填筑的时间尽量与现场一致, 以减小误差。

4.4 计算结果分析

4.4.1 沉降分析

通过对新建路堤过程的模拟, 软件输出竖向位移云图如图 4 所示。从图 4 可以看出, 新建路堤右路肩沉降量最大, 路中处次之。老海堤左路肩沉降量较小, 右路肩沉降量偏大。各点的沉降量如下: 老海堤左路肩沉降 471 mm, 右路肩沉降 884 mm; 新建路堤路中沉降 1 439 mm, 右路肩沉降 1 620 mm。老海堤现场实测沉降量为左路肩 411 mm, 右路肩 802 mm, 与软件输出值差异不大, 略小于计算值。

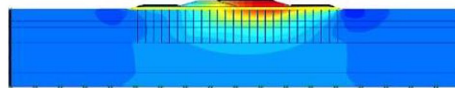


图 4 断面竖向位移云图

Fig. 4 Vertical displacement nephogram of section

新建路堤路中及右路肩处的沉降数据导出并与实测数据进行对比, 绘制荷载-时间-沉降对比图, 如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 路中位置有限元计算沉降量 1 504 mm, 实测值为 1 332 mm, 计算值比实测值偏大; 右路肩位置有限元计算沉降量 1 672 mm, 实测值为 1 881 mm, 计算值比实测值偏小。从两者的整体沉降趋势来看, 沉降曲线基本吻合, 笔者认为造成计算值偏差的原因是有限元模拟难以绝对地模拟出现场环境, 模拟与现场仍存在一些偏差。

从老海堤左、右路肩的沉降来看, 由于新填的路堤产生了新的荷载, 而新荷载距老海堤右路肩较近, 所以老海堤右路肩沉降量必然要大于左路肩。从模拟计算的结果来看, 老海堤右路肩沉降量比左路肩大 40 cm 左右。

4.4.2 水平位移分析

整个模型断面的水平位移云图如图 6 所示。计算时已将新建路堤填筑前所有位移归零, 所以图中的所有位移均是在新建路堤填筑后发生的, 不包含老海堤填筑和固结过程中的位移量。位移量以向右为正方向。

从图 6 可以看出, 新建路堤填筑后, 新老海堤下也会产生水平位移。从深度范围来看, 新、老海堤水平位移的最大影响深度分别为 32 m 和 33.5 m, 两者基本相等。从数值上看, 新建路堤下方的水平位移向右, 即向

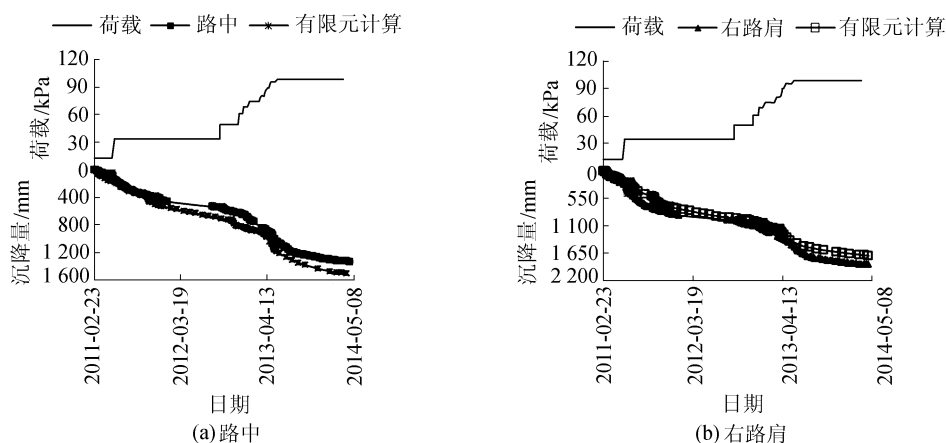


图5 新建路堤路中及右路肩沉降量实测值与计算值对比

Fig. 5 Comparison of measured and calculated settlements in middle of new embankment and at its right road shoulder

坡脚外侧。在新建路堤一级平台坡脚处,水平位移最大值达到0.8 m,发生的深度在2.5~7.5 m之间。其后,随着深度的增加,水平位移值逐渐减小。虽然现场试验中由于测斜管破坏,未能完整测量整个填筑过程水平位移数值,但是,现场试验所得数据与有限元计算数据在趋势上是一致的,即最大水平位移发生的深度均在2.5~7.5 m之间,之后,都是随着深度的增加水平位移逐渐减小。在老海堤下方,水平位移值为负,即方向向左。最大的位移值为0.5 m,发生的深度在13~22 m之间。在0~13 m范围内水平位移值逐渐增加,在22~32 m范围内,水平位移值逐渐减小。老海堤下方的最大水平位移发生深度比新建路堤下方深得多。

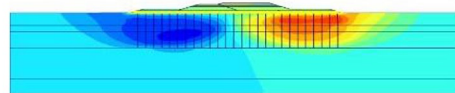


图6 新建路堤填筑后水平位移云图

Fig. 6 Horizontal displacement nephogram of section after filling of new embankment

5 结 语

a. 通过海堤拓宽工程现场试验结果可知,新、老海堤的沉降规律为:老海堤远离新建路堤一侧沉降量最小,靠近新建路堤一侧沉降量较大;越靠近老海堤的新建路堤沉降量越小;老海堤左、右路肩差异沉降较大,右路肩沉降量接近左路肩沉降量的2倍。新建路堤路中位置和右路肩位置也有较大的差异沉降,在设计时应应对这些差异沉降采取适当的修正措施。

b. 采用Plaxis有限元软件能够较好地模拟现场状况。计算时,地基软土采用剑桥模型,填料采用摩尔库伦本构模型,塑料排水板等效为连续砂墙。模拟结果与现场实测值有较高的一致性。Plaxis有限元计算结果所反映沉降规律与实测值相一致。在具体数值上计算值与实测值略有偏差。

c. 新建路堤建设后,新老海堤下均产生水平位移。老海堤水平位移方向向左,新建路堤水平位移方向向右。新建路堤最大水平位移发生在7.5 m深处,最大位移量0.8 m。老海堤最大水平位移发生在15 m深度左右,最大位移量0.5 m。

参考文献:

- [1] 高翔,刘松玉,石名磊. 软土地基上高速公路路基扩建加宽中的关键问题[J]. 公路交通科技,2004,21(2):29-33. (GAO Xiang, LIU Songyu, SHI Minglei. Key problems in embankment widening of expressway on soft ground[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(2): 29-33. (in Chinese))
- [2] 孙文智,金爱国,肖质江. 沪杭甬高速公路拓宽工程施工[J]. 中外公路,2004,24(4):34-38. (SUN Wenzhi, JIN Aiguo, XIAO Zhijiang. Construction of Shanghai Hangzhou Ningbo Expressway widening[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2004, 24(4): 34-38. (in Chinese))
- [3] 徐海虹,周金鹏,余闯. PTC管桩在沪宁高速公路拓宽改造工程中的应用研究[J]. 现代交通技术,2005,2(6):21-24. (XU Haihong, ZHOU Jinpeng, YU Chuang. Research on application of PTC tubular pile in the extension engineering of huning expressway[J]. Modern Transportation Technology, 2005, 2(6): 21-24. (in Chinese))
- [4] 徐泽中,蔡家范. 沪宁高速公路软土的工程特性研究[J]. 水利水电科技进展,1998,18(2):9-12. (XU Zezhong, CAI Jiafan.

- Study on engineering properties of soft soil in the Shanghai Nanjing Expressway[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1998, 18(2): 9-12. (in Chinese))
- [5] HJORTNAES-PEDERSEN A G I, BROERS H. The behaviour of soft subsoil during construction of an embankment and its widening[C]//International Conference Centrifuge 94. Balkema Rotterdam; Proc Centrifuge, 1994: 567-574.
- [6] BRINKGREVE R B J, VERMEER P A, VOS E. Constitutive aspects of an embankment widening project[C]//Proceedings of the International Workshop. Advances in Understanding and Modelling the Mechanical Behaviour of Peat. Balkema; Rotterdam, 1994: 143-158.
- [7] ALLERSMA H G B, RAVENSWAAY L, VOS E. Investigation of road widening on soft soils using a small centrifuge[J]. Transportation research record, 1994, 1462: 47-53.
- [8] van MEURS N G, van DEN B A. Embankment widening with the gap-method[C]//Geotechnical Engineering for Transportation in frastructure. Balkema; Rotterdam, 1999: 1133-1138.
- [9] FORSHMAN J, UOTINEN V M. Synthetic reinforcement in the widening of a road embankment on soft ground[C]//Geotechnical Engineering for Transportation in frastructure. Balkema; Rotterdam, 1999: 1489-1496.
- [10] 汪浩. 新老高速公路结合部处治技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- [11] 蒋鑫, 邱延峻. 旧路拓宽全过程三维有限元分析[J]. 工程地质学报, 2005, 13(3): 419-423. (JIANG Xin, QIU Yanjun. Three-dimensional numerical simulation of pavement performance in widened roads[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(3): 419-423. (in Chinese))
- [12] 章定文, 刘松玉. 高速公路扩建工程中新路填筑对老路影响的参数分析[J]. 公路交通科技, 2006, 23(7): 31-34. (ZHANG Dingwen, LIU Songyu. Parameter analysis of the influence of the construction of new embankment on the old embankment in the wilding of expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(7): 31-34. (in Chinese))
- [13] 章定文, 刘松玉. 软土地基高速公路扩建中新老路堤相互作用数值分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 7-12. (ZHANG Dingwen, LIU Songyu. Numerical analysis of interaction between old and new embankment in widening of freeway on soft ground [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6): 7-12. (in Chinese))
- [14] 邢良. 土工合成材料在旧路加宽工程中的应用与计算[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.
- [15] 赵维炳, 陈永辉, 龚友平. 平面应变有限元分析中砂井的处理方法[J]. 水利学报, 1998, 29(6): 53-58. (ZHAO Weibing, CHEN Yonghui, GONG Youping. Processing method of sand drain in plane strain finite element analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(6): 53-58. (in Chinese))

· 简讯 ·

“世界水日”和“中国水周”

为唤起公众的水意识,加强水资源保护,1993年1月18日第四十七届联合国大会根据联合国环境与发展大会制定的《21世纪行动议程》中提出的建议,通过了第193号决议,确定自1993年起,将每年的3月22日定为“世界水日”。中国水利部确定每年的3月22—28日为“中国水周”,从1991年起,我国还将每年5月的第二周作为城市节约用水宣传周。

2016年3月22日是第二十四届“世界水日”,3月22—28日是第二十九届“中国水周”。联合国确定2016年“世界水日”的宣传主题是“水与就业”(Water and Jobs)。经研究确定,我国纪念2016年“世界水日”和“中国水周”活动的宣传主题为“落实五大发展理念,推进最严格水资源管理”。

(本刊编辑部供稿)