



隧道穿越堤防时的堤顶面沉降规律研究*

蒋建平

(上海海事大学 海洋环境与工程学院, 上海 201306)

摘要: 基于上海长江隧道工程, 用数值模拟方法对隧道穿越堤防时的堤顶面沉降规律进行了研究。研究发现, 隧道半径和隧道收敛率对堤顶面沉降的影响相对简单, 而堤身弹性模量、隧道上覆土层厚度、隧道间距对堤顶面沉降的影响相对复杂; 堤顶面沉降随隧道半径和隧道收敛率的增大而增大; 隧道正上方堤顶面最大沉降和最大差异沉降随堤身弹性模量的增大而减小, 最后趋于一稳定值; 隧道正上方堤顶面最大沉降和最大差异沉降开始时都随着隧道上覆土层厚度的增大而减小, 当覆土厚度大于20 m之后堤顶面沉降减小幅度趋缓; 在隧道间距小于10 m时两隧道之间的堤顶面沉降随隧道间距的增大而增大, 而在两隧道间距大于10 m时堤顶面沉降随隧道间距的增大而减小; 堤顶面最大沉降和最大差异沉降都和隧道间距呈S形关系。结果表明, 当隧道穿越堤防时, 可采取增大堤身弹性模量、减小隧道收敛率、采用适当的隧道半径、覆土厚度和间距来减小堤顶面沉降。

关键词: 沉降; 堤防; 隧道; 收敛率; 弹性模量; 间距

中图分类号: TU 94

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)03-0022-09

Study on settlement rules of dike top plane when tunnel penetrate dike

JIANG Jian-ping

(College of Ocean Environment and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Based on Shanghai Yangtze River tunnel, the settlement rules of dike top plane were studied when tunnel penetrate dike with numerical simulation method. It is found that the radius and convergence rate of tunnel have relative simple influence on settlement of dike top plane, while elastic modulus of dike, thickness of soil clay uplapping tunnel and distance between two tunnels have relative complicated influence on settlement of dike top plane; the settlement of dike top plane increase when the radius and convergence rate of tunnel increase; the maximal settlement and maximal difference settlement of dike top plane right above tunnel decrease when the elastic modulus of dike increase, and tend to a steady value; the maximal settlement and maximal difference settlement of dike top plane right above tunnel decrease when the thickness of soil clay uplapping tunnel increase, and then decrease slowly when the thickness of soil clay uplapping tunnel is over 20 m; the settlement of dike top plane increase with the increment of distance between two tunnels when the distance is less than 10 m, and it is inverse when the distance is over 10 m; the maximal settlement and maximal difference settlement of dike top plane have S shape relation with the distance between two tunnels. The following conclusions can be drawn that the measures such as enlarging the elastic modulus of dike, reducing the convergence rate of tunnel, taking appropriate radius, thickness of soil clay uplapping tunnel and distance between two tunnels, in order to reduce the settlement rules of dike top plane when tunnel penetrate dike.

Key words: settlement; dike; tunnel; convergence rate; elastic modulus; distance between two tunnels

收稿日期: 2012-07-30

*基金项目: 上海海事大学科研基金项目(20120074); 港口、海岸及近海工程校重点学科项目(A2120016001X)

作者简介: 蒋建平(1966—), 男, 博士, 副教授, 主要从事港口航道与海岸工程、岩土工程方面的教学和研究工作。

随着近十几年来过江、过海峡通道工程建设的蓬勃开展，越来越多的隧道要穿越海堤、河堤等堤防工程^[1-3]，如上海长江隧道采用上行线和下行线，穿越了处于浦东新区、长兴岛的长江口堤防共4次^[4]；武汉长江隧道工程^[5]、南京长江隧道工程^[6]也穿越了长江干堤；2003年11月28日，由中隧集团二处有限公司联合掘进机工程公司承建的城陵矶长江穿越隧道工程盾构段施工掘进185 m，穿越了长江干堤；马钢新区炼钢区域5#隧道穿过了东临慈湖河河堤^[7]；作为安放仪征-长岭原油管道的黄石长江盾构隧道穿越了南岸的阳新长江干堤和北岸的黄冈长江干堤；大唐宁德电厂建造了穿越新建海堤的进排水盾构隧道工程^[8]；等等。

隧道施工造成的岩土损失会引起隧道上覆岩土地层的位移，这种位移可能会引起附近建筑物或其他各类结构的损坏，因此地层位移与结构变形预测等问题引起了一定的关注，获得了一些相关的研究成果^[9-11]。但在隧道开挖时对上覆的堤防的影响方面的研究还很缺乏，亟待加强。

鉴于此，本文基于上海长江隧道工程，用数值模拟方法对隧道穿越堤防时的堤顶面沉降规律进行了研究，这对上海及其他地区隧道穿越堤防的施工有参考价值。

1 隧道穿越堤防时的堤顶面沉降规律

以上海长江隧道为蓝本，采用mohr-coulomb弹塑性有限元模型进行分析。从5个方面进行分析：1) 堤身弹性模量；2) 隧道收缩率；3) 隧道半径；4) 隧道上覆土厚度；5) 隧道间距，研究上述因素发生变化时隧道上方堤顶面的沉降规律。其中1)~4) 针对单隧道，5) 针对双隧道。这里须说明的是，因本文偏重理论分析，因此分析过程中的有些假定超出了上海长江隧道的实际情况，这也是为别的工程提供参考。

上海长江隧道是上海长江通道即上海长江大桥工程的一部分，如图1所示，它南起上海浦东新区外高桥港区东侧，向北穿越长江口南支南港水域，至长兴岛登陆。工程全长 8.9 km，分为上行线隧道和下行线隧道，可看出长江隧道共4次穿越

堤防。用于工程掘进的盾构机直径为15.43 m，是目前世界上最大直径的盾构隧道，隧道的管片外径15 m，内径13.17 m，厚度0.65 m（图2）。

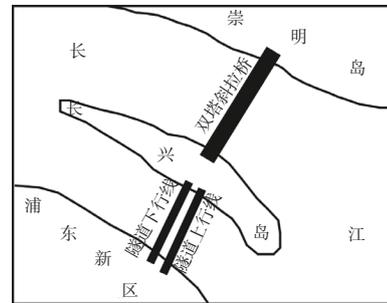


图1 上海长江隧道平面

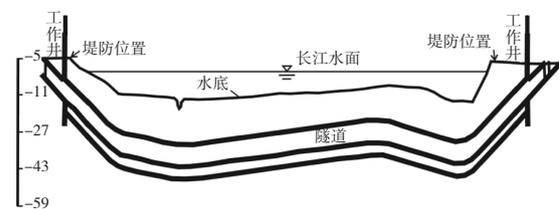
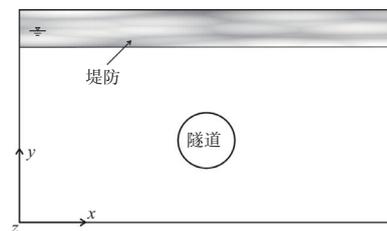


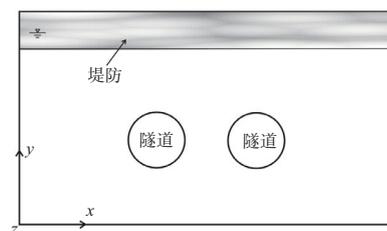
图2 上海长江隧道剖面

隧道盾构主要穿过上海深厚软土地层中的④灰色淤泥质黏土、⑤₁灰色淤泥质粉质黏土、⑤₂灰色粉质黏土夹薄粉砂、⑤₃粉质黏土。

具体以长江隧道上行线过浦东岸边的堤防为蓝本进行分析。数值模拟的计算模型如图3所示，两模型区域为长100 m，高57.5 m，堤防高10 m。



a) 单隧道



b) 双隧道

图3 数值模拟分析模型

1.1 堤身弹性模量改变时的堤顶面沉降规律

这里数值模拟的计算模型如图3 a)所示,模型区域为长100 m,高57.5 m。隧道原点坐标(50, 22.5),隧道半径7.5 m,隧道顶离堤顶面27.5 m。堤身是人工填筑,其物理力学参数往往是人为控制,这里改变堤身土的弹性模量,而保持堤身下层或隧道周围土层(即④灰色淤泥质黏土、⑤₁灰色淤泥质粉质黏土、⑤₂灰色粉质黏土夹薄粉砂、⑤₃粉质黏土等)物理力学参数不变,也同时保持隧道的所有参数不变。在这种设置下用数值模拟研究堤身弹性模量变化时的堤顶面沉降规律。

从图4可看出,当堤身土的弹性模量不同时,堤身土及隧道周围土变形的等值线云图的形状和数值有很大不同。当弹性模量 $E=1$ MPa时,堤顶线切过等值线云图的5个区域(图4 a));而当弹性模量 E 增加到900 MPa,堤顶线仅切过等值线云图的1个区域(图4 d)),且这个区域的沉降值(这里说的沉降值指的是沉降值的绝对值的大小,不包含其前面的负号,这里的负号指的是沉降的符号与 y 轴相反,下同)比1 MPa时要小很多。

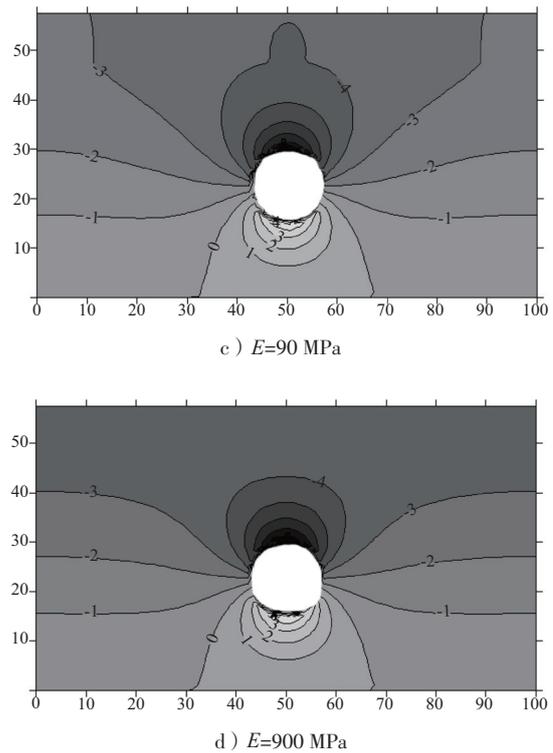
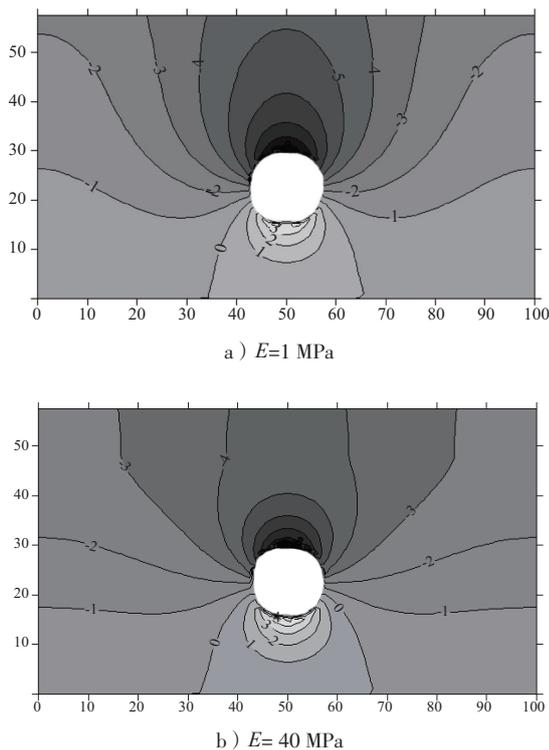
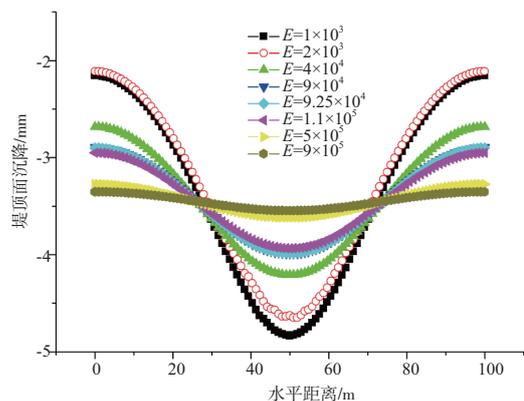


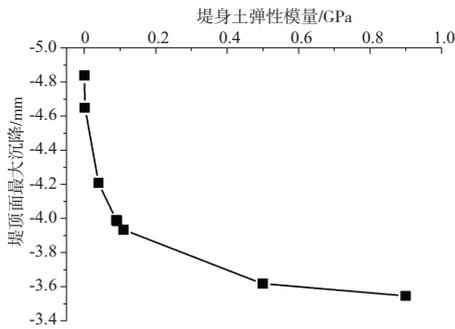
图4 堤身弹性模量不同时的竖向位移云图
(等值线上数字的单位为mm)

堤身土选用的弹性模量有 $E=1, 2, 40, 90, 92.5, 110, 500, 900$ MPa 8个数值。选用有代表性的4个变形云图如图4所示。堤顶面沉降、堤顶面最大沉降、堤顶面最大差异沉降与堤身弹性模量的关系如图5所示。

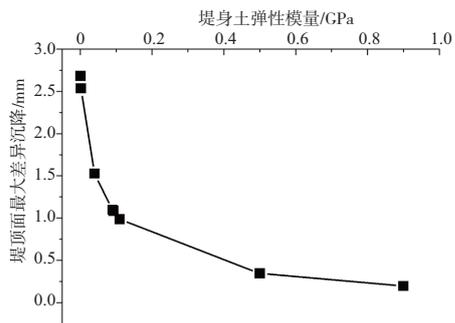
从图5 a)可发现: 1) 对同一堤身弹性模量,隧道正上方的堤顶面沉降最大; 2) 所有的曲线基本上相交于两点,这两点离原点的水平距离分别约为28,72 m; 这两点的堤顶面沉降值都为-3.5 mm; 3) 在离原点的水平距离即 x 轴的[28, 72]范围内,



a) 堤身弹性模量不同时的堤顶面沉降-水平距离关系



b) 堤顶面最大沉降-堤身土弹性模量关系



c) 堤顶面最大差异沉降-堤身土弹性模量关系

图5 堤顶面沉降-堤身弹性模量关系

堤顶面的沉降随堤身弹性模量的减小而增大；在x轴的[0, 28]、[72, 100]范围内，堤顶面的沉降基本上随堤身弹性模量的增大而增大。

图5b)、c)显示，堤顶面最大沉降、堤顶面最大差异沉降随堤身弹性模量的增大而减小。当弹性模量 $E < 110$ MPa时，堤顶面最大沉降、堤顶面最大差异沉降急剧减小；而当 $E > 110$ MPa时，堤顶面最大沉降、堤顶面最大差异沉降的减小幅度变缓，最后趋于一稳定值，这时如再提高堤身的弹性模量，对减小堤顶面沉降已无多大作用。

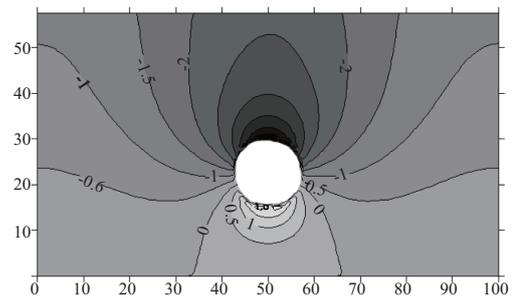
因此，当隧道穿过堤防时，要想减小堤顶面的沉降和差异沉降，可提高堤身的弹性模量或刚度。但当堤身的弹性模量提高到一定程度后，堤顶面最大沉降或最大差异沉降就会趋于一稳定值。

1.2 隧道收敛率改变时的堤顶面沉降规律

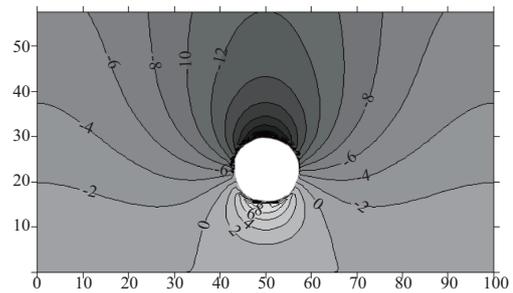
隧道空间内土体被开挖后，相当于隧道周围土体被卸荷，于是隧道周围土体存在不同程度的向隧道的收敛变形。这里以隧道的收敛率来表征这种收敛变形的大小。数值模拟过程中设置了0.1%、0.15%、0.25%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%共7种收敛率。这里数值模拟的模型区域仍为长100 m，高57.5 m，隧道原点坐标为(50, 22.5)，隧道半

径为7.5 m，隧道顶离堤顶面27.5m。

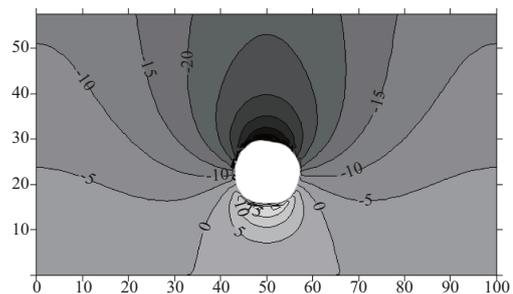
图6为7种收敛率中有代表性的4种收敛率的土体竖向变形等值线云图。从图6可看出，当隧道的收敛率不同时，堤身土及隧道周围土变形的等值线云图的形状基本类似，但等值线上的数值有很大不同。当收敛率为0.10 %时，堤顶面最大沉降介于-2.0~-2.5 mm；当收敛率为2%时，堤顶面最大沉降已达-40~-50 mm。



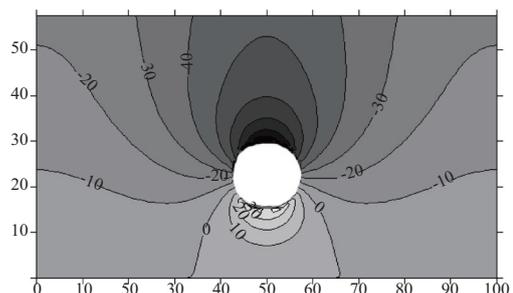
a) 收敛率0.10%



b) 收敛率0.5%



c) 收敛率1%

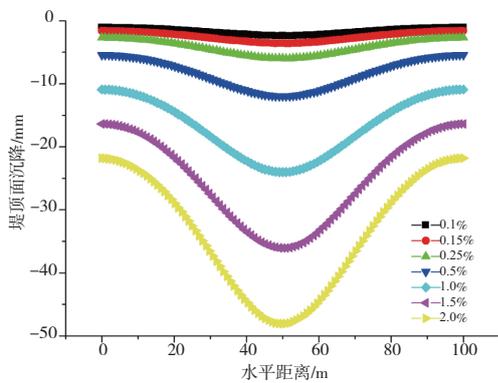


d) 收敛率2%

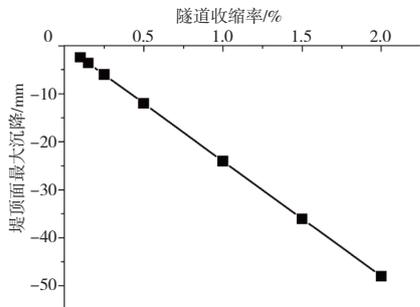
图6 隧道收敛率不同时的竖向位移云图

图7a)显示: 1) 隧道收敛率越大, 曲线的曲率越大, 也就是堤顶面的沉降越大; 2) 对同一隧道收敛率, 隧道正上方的堤顶面沉降最大; 3) 当隧道的收敛率为0.1%时, 堤顶面的沉降已经很小, 仅为-2.0 mm左右。

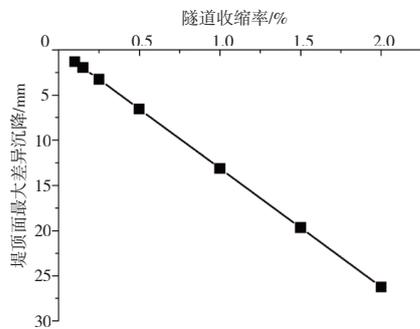
从图7b), c)可知, 堤顶面最大沉降、堤顶面最大差异沉降随隧道收敛率的增大而直线增大。说明隧道的收敛率对堤顶面的变形的影响很明显。



a) 隧道收缩率不同时的堤顶面沉降-水平距离关系



b) 堤顶面最大沉降-隧道收缩率



c) 堤顶面最大差异沉降-隧道收缩率关系

图7 堤顶面沉降-隧道收敛率关系

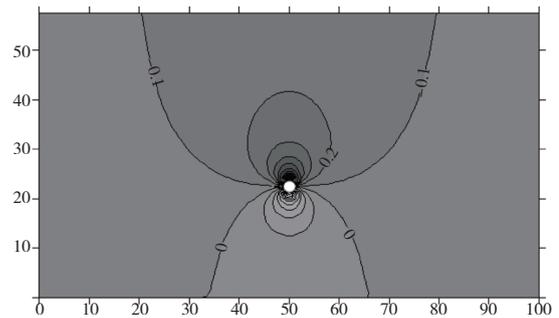
因此, 当隧道穿过堤防时, 应该采取及时的支护措施, 及在管片和周围土体之间空隙中进行

及时的填塞和注浆工作, 以尽可能减小隧道的收敛率, 从而减小堤顶面的沉降。

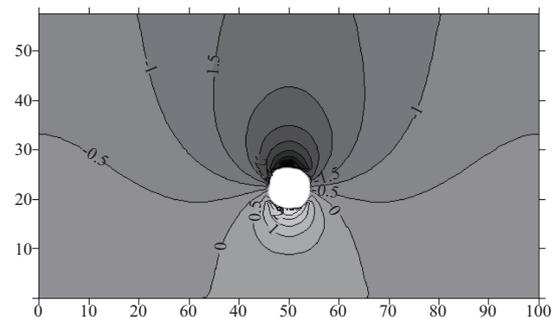
1.3 隧道半径改变时的堤顶面沉降规律

隧道半径对堤顶面的沉降也是有影响的。这里设置隧道半径为1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5 m共8种情形进行数值模拟分析, 数值计算的模型还是同前, 如图3 a)所示。数值计算的结果如图8、图9所示。

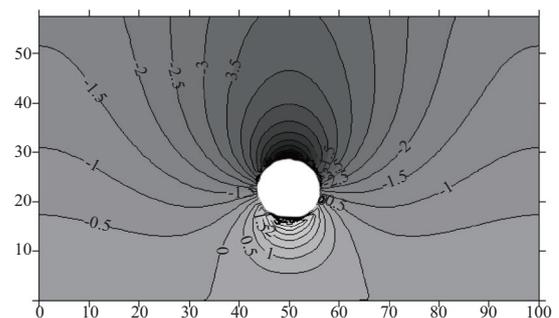
图8为8种隧道半径中有代表性的4种隧道半径的堤身土及隧道周围土竖向变形等值线云图。从图上可发现, 当隧道的半径不同时, 堤身土及隧道周围土变形的等值线云图的形状和等值线上的数值有较大不同; 总体上显示出随着隧道半径的增大堤顶面的沉降也增大的趋势。



a) $r=1.5$ m



b) $r=4.5$ m



c) $r=6.5$ m

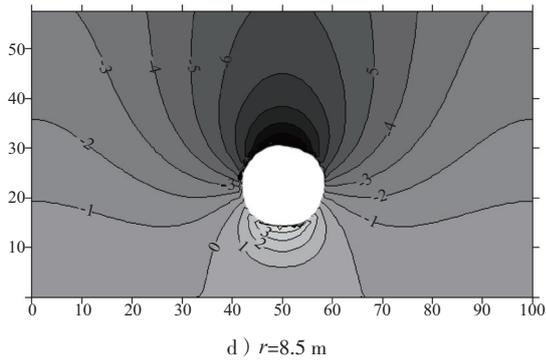
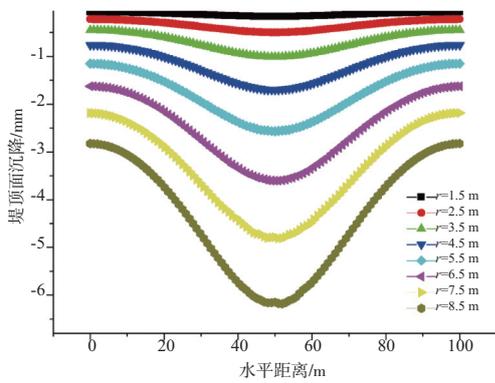
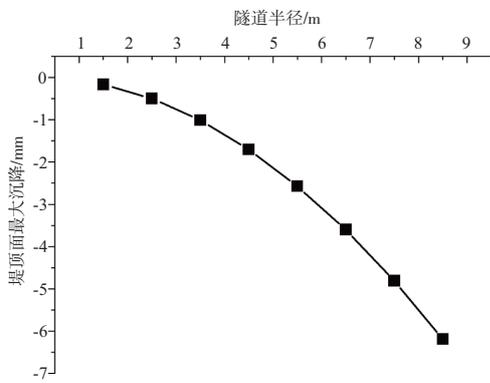


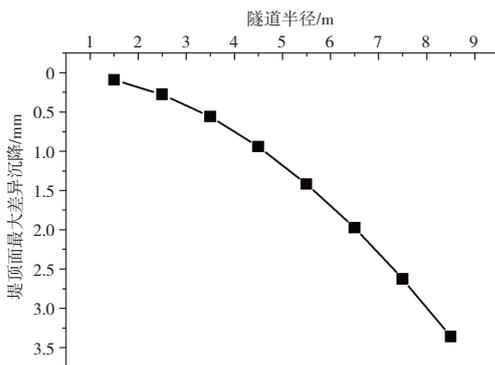
图8 隧道半径不同时的竖向位移云图



a) 隧道半径不同时的堤顶面沉降-水平距离关系



b) 堤顶面最大沉降-隧道半径关系



c) 堤顶面最大差异沉降-隧道半径关系

图9 堤顶面沉降-隧道半径关系

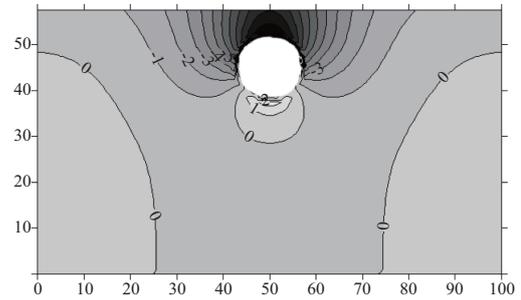
从图9 a) 可发现：1) 当其他条件不变时，隧道半径越大，曲线的曲率越大，也就是堤顶面的沉降越大；2) 对同一隧道半径，隧道正上方的堤顶面沉降最大；3) 当隧道的半径为1.5 m时，堤顶面的沉降已经很小，仅为-0.1 mm左右。

图9 a), b) 表明，堤顶面最大沉降、堤顶面最大差异沉降都和隧道半径呈近似直线的正相关关系。说明隧道的半径即隧道空间的大小对堤顶面的变形的也有明显的影响。

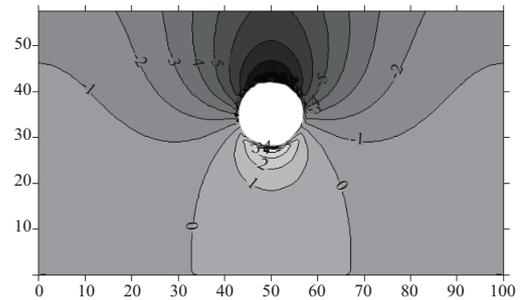
因此，在满足使用要求的情况下，应采用尽可能小的隧道半径，以减小堤顶面的沉降。

1.4 隧道上覆土厚度改变时的堤顶面沉降规律

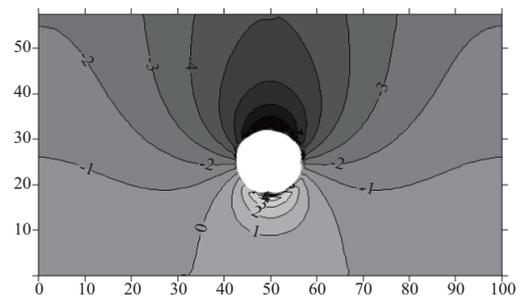
这里设置上覆土层厚度分别为5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m共7种情形来分析隧道上覆土层厚度对堤顶面沉降的影响规律。数值计算的模型基本同图3 a)，只是隧道的原点坐标是变化的。图10,11为数值模拟的计算结果。



a) 上覆土层厚5 m



b) 上覆土层厚15 m



c) 上覆土层厚25 m

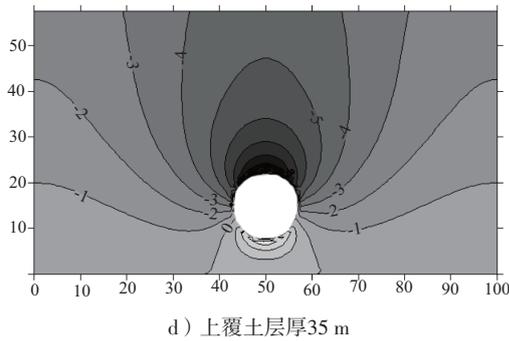


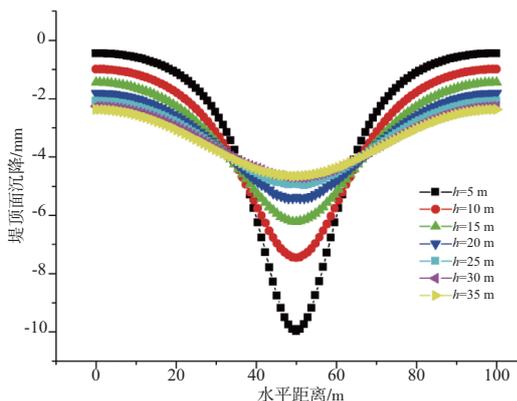
图10 隧道上覆土层厚度不同时的竖向位移云图

图10为具有代表性的4种隧道上覆土层厚度时的堤身土及隧道周围土竖向变形等值线云图。图上显示，当隧道上覆土层的厚度不同时，堤身土及隧道周围土变形的等值线云图的形状和等值线上的数值有较大不同；隧道上覆土厚度越小，堤顶面的沉降越大。

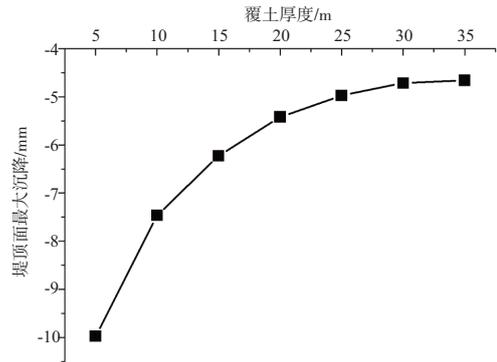
图11a)表明：1)对同一上覆土厚度，隧道正上方的堤顶面沉降最大；2)所有的曲线基本上相交于两点，这两点离原点的水平距离即x轴的值分别约为35,65 m；这两点的沉降值都为-4 mm。3)在x轴的[35, 65]范围内，堤顶面的沉降随覆土厚度的减小而增大；在x轴的[0, 35]和[65, 100]范围内，堤顶面的沉降随覆土厚度的增大而增大。

从图11b), c)可发现，堤顶面最大沉降、堤顶面最大差异沉降都和隧道上覆土层的厚度呈负相关关系。开始时，随着隧道上覆土层厚度的增大，堤顶面沉降减小，当覆土厚度大于20 m之后堤顶面沉降减小幅度趋缓。

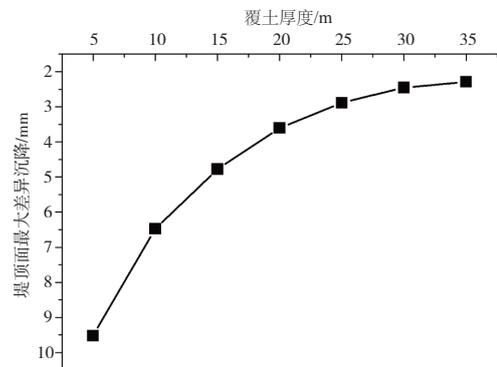
因此可发现，隧道埋藏越深，堤顶面的沉降越小。



a) 覆土厚度不同时的堤顶面沉降-水平距离关系



b) 堤顶面最大沉降-覆土厚度关系

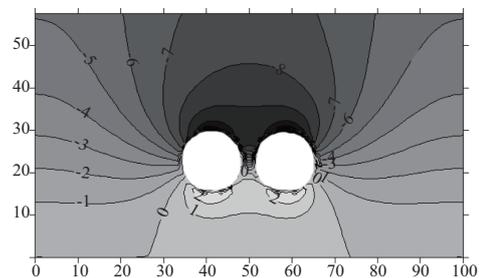


c) 堤顶面最大差异沉降-覆土厚度关系

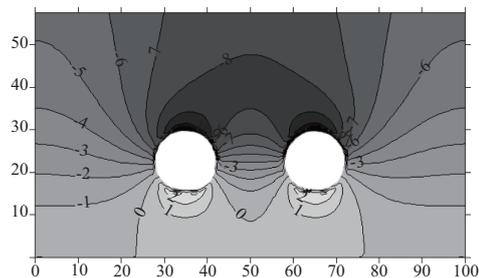
图11 堤顶面沉降-覆土厚度关系

1.5 两隧道间距改变时的堤顶面沉降规律

这里基本以图3b)为计算模型来分析两隧道间距变化时对堤顶面沉降的影响。数值模拟中设置的隧道间距有2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 m共10种情形。数值模拟结果如图12, 13所示。



a) 间距为2 m



b) 间距为15 m

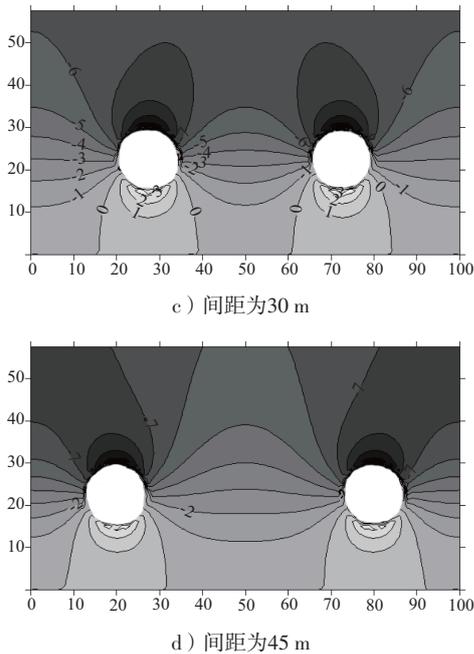
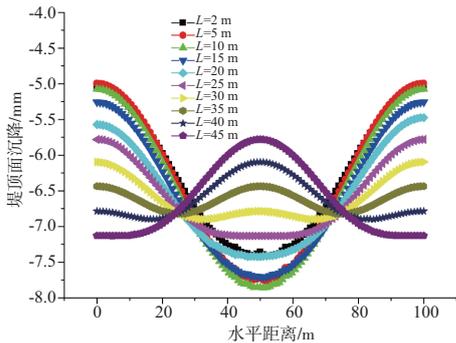
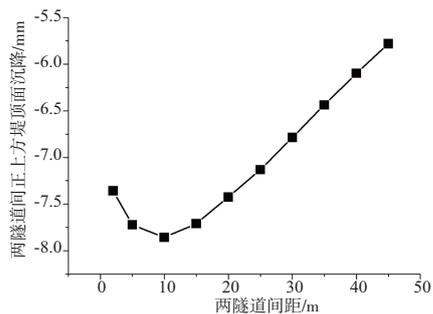


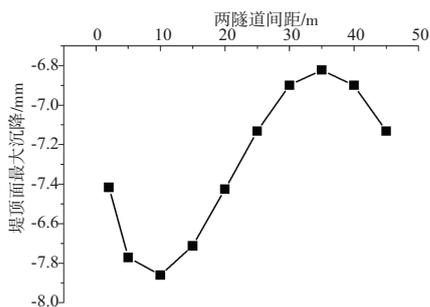
图12 两隧道间距不同时的 U_y 云图



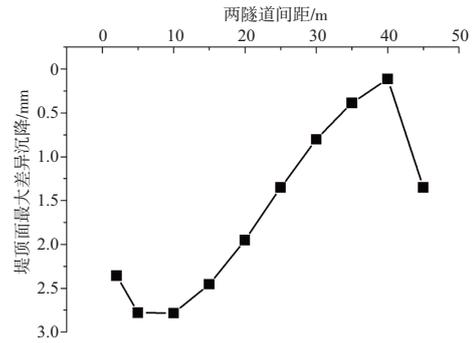
a) 隧道间距不同时的堤顶面沉降-水平距离关系



b) 两隧道间正上方堤顶面沉降-间距关系



c) 堤顶面最大沉降-隧道间距关系



d) 堤顶面最大差异沉降-隧道间距关系

图13 堤顶面沉降-隧道间距关系

堤身土及隧道周围土竖向变形等值线云图(图12)显示,当两隧道间距不同时,堤身土及隧道周围土变形的等值线云图的形状和等值线上的数值有很大的不同;当两隧道的间距由小变大时,堤顶面沉降的变化较为复杂。

由图13a)可知:1)所有的曲线基本上相交于两点,这两点离原点的水平距离分别约为25,75 m;这两点的沉降值都为-6.75 mm。2)在x轴的[25,75]范围内,不同隧道间距的堤顶面沉降-水平距离关系曲线呈纺锤形。两隧道间正上方的堤顶面沉降,即图13a)中水平距离等于50 m的堤顶面沉降)与隧道间距的关系较为复杂,在两隧道间距小于10 m时堤顶面沉降随隧道间距的增大而增大,而在两隧道间距大于10 m时堤顶面沉降随隧道间距的增大而减小,如图13b)所示;3)在x轴的[0,25]、[75,100]范围内,堤顶面的沉降基本上随隧道间距的增大而增大。

图13c),d)显示,堤顶面最大沉降、堤顶面最大差异沉降都和隧道间距呈S形关系。结合图13a)可发现,图13c),d)中曲线的前7点是在x轴的[25,75]范围内,而后3点是在x轴的[0,25]、[75,100]范围内。这些说明,当两隧道间距大于30 m时,堤顶面的最大沉降及最大差异沉降已不在两隧道之间的堤顶面上,这时两隧道的相互影响已不明显。

因此可看出,堤顶面沉降与两隧道间距的关系较为复杂,在实际工程中可根据需要选用合适的隧道间距。

2 结论

1) 随着国家经济建设的需要,越来越多的隧道工程需要穿越江河岸或海岸的堤防,因此加强隧道穿越堤防时的堤顶面沉降的研究是很有必要的。

2) 对同一堤身弹性模量,隧道正上方的堤顶面沉降最大;堤顶面最大沉降、最大差异沉降随堤身弹性模量的增大而减小;当隧道穿过堤防时,要想减小堤顶面的沉降和差异沉降,可提高堤身的弹性模量或刚度。

3) 隧道收敛率越大,曲线的曲率越大,也就是堤顶面的沉降越大;对同一隧道收敛率,隧道正上方的堤顶面沉降最大;当隧道穿过堤防时,应该采取及时的支护措施,及在管片和周围土体之间空隙中进行及时的填塞和注浆工作,以尽可能减小隧道的收敛率,从而减小堤顶面的沉降。

4) 堤顶面最大沉降、最大差异沉降都和隧道半径呈近似直线的正相关关系,说明隧道的半径即隧道空间的大小对堤顶面的变形的也有明显的影响。

5) 对同一上覆土厚度,隧道正上方的堤顶面沉降最大;堤顶面最大沉降和最大差异沉降都和隧道上覆土层的厚度呈负相关关系。

6) 当两隧道的间距由小变大时,堤顶面沉降的变化较为复杂;堤顶面最大沉降、堤顶面最大差异沉降都和隧道间距呈S形关系。

7) 本文得出的堤顶面沉降规律对上海地区及其他地区穿越堤防的隧道的施工有参考价值。

参考文献:

[1] Apel H, Merz B, Thieken A H. Influence of dike breaches on flood frequency estimation[J]. Computers & Geosciences. 2009,35: 907-923.

[2] 沈细中,冯夏庭. 山东东明黄河标准化堤防裂缝成因数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 347-354.

[3] 黄雨,八嶋厚,尺田和秀,等. 堤防地基地震液化的数值模拟[J]. 工程力学, 2007, 24(12): 82-87.

[4] 王荣彪,金清山. 上海长江隧道工程岩土地质与施工沉降控制[J]. 上海地质, 2008(2): 18-22.

[5] 李炜明. 武汉长江隧道施工对周边建筑影响的研究[M]. 武汉: 华中科技大学, 2006.

[6] 靳世鹤. 南京长江隧道不良地质对施工的影响及应对措施[J]. 地下工程风险防范技术, 2006.

[7] 程鑫. 马钢新区慈湖河段5#电缆隧道地基处理及边坡支护施工技术[J]. 安徽冶金科技职业学院学报, 2007, 17(3): 32-35.

[8] 李玲玲,王立忠. 新建海堤下盾构隧道施工技术措施及监控[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 995-1 003.

[9] Li Y, Emeriault F, Kastner R, et al. Stability analysis of large slurry shield-driven tunnel in soft clay[J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2009, 24: 472-481.

[10] Hsiao F Y, Wang C L, Chern J C. Numerical simulation of rock deformation for support design in tunnel intersection area[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24: 14-21.

[11] 贾瑞华,阳军生,马涛,等. 既有管线下盾构施工地层沉降监测和位移加载数值分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 425-430.

(本文编辑 郭雪珍)



勘 误

2012年第11期《挤密砂桩KS-REACT工法施工技术应用》P191, 2.2.2置换率计算公式中正方形布置: $as = As/A = (\sqrt{3}/2)(As/x^2)$, 应改为 $as = As/A = (2/\sqrt{3})(As/x^2)$ 。由于作者原稿有误! 特此更正。