

隧道开挖扰动对周围地层可液化性能的影响

赵武胜¹ 陈卫忠^{1,2} 宋万鹏¹ 赵坤¹ 李灿¹

(1 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室,武汉 430071;

2 山东大学岩土与结构工程研究中心,济南 250061)

摘要 地震荷载作用下饱和砂土液化会导致隧道发生严重破坏,准确判定隧道穿越地层的可液化性并采取相应的抗液化措施能够有效降低隧道相应的震害。文章基于Seed判别法,采用数值仿真技术研究了隧道开挖前后周围地层液化性能的变化,结果表明,隧道的开挖扰动可显著降低地层的抗液化性能,拱底位置地层的降幅略小于拱腰位置;随着地层点远离隧道开挖区中心,隧道开挖对地层液化性能的影响逐渐减弱。同时,隧道埋深越大,隧道开挖对地层液化性能的影响越弱。在对隧道穿越地层可液化性进行判别时,应当考虑隧道开挖扰动的影响。研究成果可为隧道开挖区地层的可液化判别提供参考。

关键词 隧道开挖 液化性能 砂土

中图分类号:U452.11 **文献标识码**:A

1 引言

随着我国对城市地下空间的开发与利用,一批城市地铁与过江隧道相继规划、建设,其中一些隧道不可避免会穿越饱和砂土可液化地层,如南京、武汉等城市的地铁与过江通道。在地震荷载作用下,这些隧道均面临由于砂土液化导致结构破坏的风险。近半个世纪以来,数次大地震中,均有地下结构由于地层液化发生严重破坏的实例,如1964年日本新潟地震中,砂土液化引起了管线上浮破坏;1989年美国加州Loma Prieta地震中,由于上覆土层的液化,连接奥克兰和Alameda岛的双线沉埋隧道出现了开裂及渗水破坏;1995年日本阪神地震及1999年中国台湾Chi-Chi地震中也有大范围地基液化造成地下结构破坏的报告^[1]。近年来,许多学者研究了地震作用下砂土液化对隧道的影响,也得到了类似的结论^[2-6]。

在工程设计与施工前,对工程场地地层的可液化性进行客观评估是抗液化措施制定的前提与基础,对减少经济损失具有重要价值。Seed^[7]最早提出

了一种地层液化的简易判别方法,该方法又被许多学者加以改进^[8,9]。该判断方法为经验方法,主要来源于野外调查与室内试验,相关参数可由常用的测试方法获得,是目前土体液化判别较实用的方法。我国规范也是沿用该方法的思想。

目前,在对隧道建设场地可液化性进行判别时,大都依据隧道施工前地层的状态。当隧道开挖后,由于开挖卸载效应,隧道周围地层的应力状态将会发生明显改变,隧道开挖引起的质量损失也会改变局部地层的动力响应。此时,隧道周围局部地层的可液化性可能随之发生变化。因此,在采用Seed法评价隧道穿越地层的可液化性时,需要考虑隧道开挖对局部地层抗液化性的影响。但目前对于隧道穿越地层的可液化性判别大都没能考虑隧道开挖对地层可液化性可能产生的影响。为此,本文依托南京纬三路过江隧道工程,以江北浅埋穿越可液化地层段为例,采用Seed法计算分析隧道开挖前后穿越地层CRR(抗液化强度)与CSR(循环应力比)的变化,进

修改稿返回日期:2015-01-24

基金项目:国家973项目(2015CB057906);国家自然科学基金资助项目(51409245);国家杰出青年基金(51225902)。

作者简介:赵武胜(1987-),男,博士,助理研究员,主要从事岩土地下工程方面的研究工作,E-mail:zhwusheng@163.com。

而得出隧道开挖对周围地层抗液化性能的影响,并给出开挖效应的影响范围。研究成果可为隧道工程场地地层液化的判定提供参考。

2 Seed 液化判别方法

土体在地震荷载作用下是否会发生液化现象,主要取决于两方面因素,一是土体自身的抗液化性,二是促使土体发生液化的动荷载。在 Seed 液化判别方法的基础上,Youd 等^[10]认为土体的抗液化系数为:

$$FS = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \times MSF \times K_\sigma \times K_\alpha \quad (1)$$

式中: $CRR_{7.5}$ 为 7.5 级地震时土体的抗液化强度; MSF 为震级修正系数; CSR 为设计地震荷载作用下土体的循环应力比; K_σ 为上覆土压修正系数; K_α 为剪应力修正系数。

当 $FS \geq 1$ 时,土体判定为不发生液化,否则判定为液化。

2.1 循环应力比

循环应力比可由下式估计:

$$CSR = 0.65 \left(\frac{\tau_{\max}}{\sigma'_{vo}} \right) \quad (2)$$

式中: τ_{\max} 为最大剪应力; σ'_{vo} 为竖直有效应力。

2.2 抗液化强度

$CRR_{7.5}$ 可由 CPT(标准贯入试验)、SPT(静力触探)及剪切波速求得。对于标准贯入试验,若实测贯入击数为 N_f ,考虑应力波能量比、钻孔尺寸、杆长、取样器等因素,标准贯入击数为:

$$N_{60} = C_E C_B C_R C_S N_f \quad (3)$$

式中: N_{60} 为标准应力波能量比的贯入击数; C_E 为应力波能量比修正系数; C_B 为钻孔修正系数; C_R 为杆长修正系数; C_S 为取样器修正系数。

经过上述修正后,贯入击数主要受试验点土体的应力状态与土体的相对密度影响。

为考虑不同埋深处上覆土压力的影响,引入上覆土压修正系数 C_N ,使贯入击数能够相互比较:

$$(N_i)_{60} = C_N N_{60} \quad (4)$$

Youd 认为上覆土压修正系数 C_N 与上覆土压力的关系可表示如下:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n \quad (5)$$

式中: P_a 为大气压力; n 为与土体的相对密度有关

的参数^[11],Liao^[12]认为 n 约为 0.5。

标准贯入击数与 CRR 有以下关系^[13]:

$$CRR = \exp \left\{ \left[\frac{(N_i)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_i)_{60cs}}{123} \right)^2 - \left(\frac{(N_i)_{60cs}}{23.6} \right)^3 + \left(\frac{(N_i)_{60cs}}{25.4} \right)^4 - 2.8 \right] \right\} \quad (6)$$

其中:

$$(N_i)_{60cs} = (N_i)_{60} + \Delta(N_i)_{60} \quad (7)$$

$$\Delta(N_i)_{60} = \exp \left(1.63 + \frac{9.7}{FC} - \left(\frac{15.7}{FC} \right)^2 \right) \quad (8)$$

式中: $(N_i)_{60cs}$ 为考虑粘粒含量修正后的贯入击数; FC 为粘粒含量。

2.3 围压修正系数 K_σ

试验结果表明,随着围压的增加, CRR 随之增加,但两者为非线性关系。围压修正系数可由公式(9)确定^[14]:

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln \left(\frac{\sigma'_{vo}}{P_a} \right) \leq 1.0 \quad (9)$$

其中: $C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55 \sqrt{(N_i)_{60}}}$ (10)

2.4 剪应力修正系数 K_α

为考虑静态剪切应力对土体液化性的影响,Seed 判别法引入了剪应力修正系数。Idris^[15]认为剪应力修正系数可由公式(11)确定:

$$K_\alpha = a + b \exp \left(\frac{-\xi_R}{c} \right) \quad (11)$$

$$a = 1267 + 636\alpha^2 - 634 \exp(\alpha) - 632 \exp(-\alpha)$$

$$b = \exp(-1.11 + 12.3\alpha^2 + 1.31 \cdot \ln(\alpha + 0.0001))$$

$$c = 0.138 + 0.126\alpha + 2.52\alpha^3$$

$$\alpha = \frac{\tau_s}{\sigma'_{vc}}$$

$$\xi_R = \frac{1}{Q - \ln(100(1 + 2K_0)\sigma'_{vc}/(3P_a))} - \sqrt{(N_i)_{60}/46} \quad (12)$$

式中: ξ_R 为土体状态参数; τ_s 为土体静态剪切应力。

2.5 震级修正系数 MSF

震级修正系数为与震级有关的参数,Idriss^[16]给出了震级与震级修正系数间的关系:

$$MSF = 6.9 \exp \left(\frac{-M}{4} \right) - 0.058 \leq 1.8 \quad (13)$$

式中: M 为震级。

3 隧道开挖对土体液化性的影响

由于隧道开挖卸载效应,隧道开挖后周围一定范围内土体的应力状态将会发生明显改变。从公式(5)、公式(9)、公式(11)可以看出,土体应力状态的改变将会影响土体的 CRR 与 CSR ,进而影响到土体的液化性。为研究隧道开挖对周围地层液化性能的影响,以南京纬三路过江隧道为依托,分析江北浅埋砂土地层在隧道开挖前后液化性能的变化规律,研究隧道开挖对周围地层可液化性能的影响。

3.1 工程概况

南京纬三路过江盾构隧道位于南京长江大桥与纬七路过江隧道之间,全长约5 km,采用双管双层X形盾构隧道方案,设计隧道外径14.5 m,管片厚0.6 m。工程场地饱和粉土、砂土发育,在设计地震荷载(设防烈度为7度,设计地震基本加速度 $0.1g$)条件下,土体存在液化失稳的危险,对工程易造成不利影响。地层液化对隧道的影 响主要表现在液化导致隧道的上浮与再固结引起的隧道不均匀沉降,所以隧道下部地层的液化性对隧道的震害起主导作用,已有研究提出的抗液化措施也主要针对隧道中下部地层^[17]。为此,选取南京纬三路过江隧道江北浅埋段,该段隧道中下部穿越易液化的饱和砂土,地层分布如图1所示,计算参数见表1。

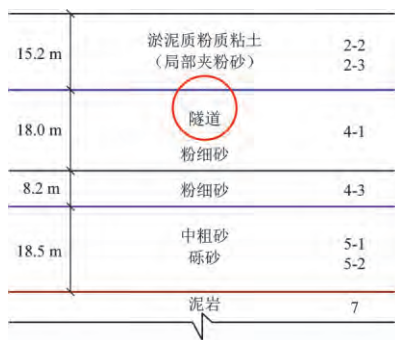


图1 地层分布示意

Fig.1 Distribution of strata

3.2 计算方法与相关参数

为分析隧道开挖对地层液化性的影响,采用数值分析方法分别求解隧道开挖前与开挖后周围地层的抗液化系数 FS 。数值求解借助有限差分软件FLAC^{3D},计算模型如图2所示,模型尺寸为长 \times 高 \times 宽 $=200\text{ m}\times 70\text{ m}\times 2\text{ m}$,采用三维8节点六面体单元,单

表1 地层参数

Table 1 Strata parameters

地层	E/MPa	ν	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	K_0	$k/(\text{m/d})$
2-1	3.89	0.39	15	12.3	0.65	0.03
2-2	3.51	0.42	15	13.6	0.72	0.05
2-3	12.5	0.3	0	30	0.43	3.0
4-1	13.8	0.29	1	34.4	0.4	5.8
4-3	14.44	0.27	1	34	0.37	6.0
5-1/2	14.83	0.26	0	35	0.35	20
7	2134	0.15	0.8	45.2	0.18	-

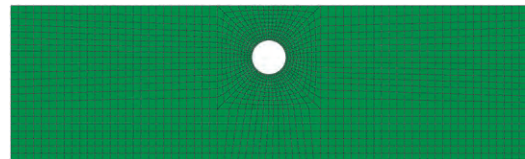


图2 数值计算模型

Fig.2 A numerical calculation model

元最大尺寸为3 m。可液化地层采用Finn模型^[17],该模型能够模拟土体在动荷载作用下孔隙水压力的变化。输入地震动采用南京人工波,波形如图3所示,持时15 s,峰值加速度为 $0.1g$,在模型底部输入垂直向上传播的S波。底部施加粘性吸收边界,四周采用自由场边界。在求解过程中,假定管片防水性能良好,土体与管片接触面为不透水面。

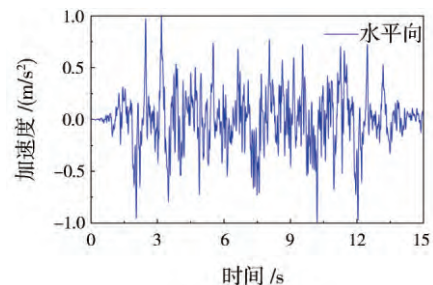


图3 南京人工地震波

Fig.3 Artificial Nanjing seismic wave

液化地层中隧道的震害主要源于隧道中下部土体的液化,同时考虑模型的对称性,布置如图4所示的5条环向监测线,监测线距隧道外径的距离分别为2.0 m,4.0 m,8.0 m,14.0 m和20.0 m。

计算过程设以下分析步:

(1) 地应力平衡分析步。根据现场勘察结果确

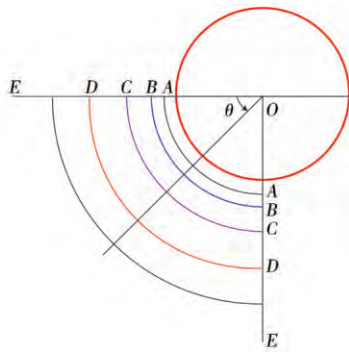


图4 监测点分布示意

Fig.4 Monitoring points distribution

定地应力水平,得到隧道开挖前各监测点竖向有效应力与剪应力,确定开挖前各监测点的围压修正系数与剪应力修正系数。

(2) 隧道的开挖与支护分析步。获取隧道开挖后监测点的有效应力与剪应力,得到隧道开挖后各监测点围压修正系数与剪应力修正系数。

(3) 地震荷载作用下的动力分析步。分别对隧道开挖前与开挖后进行动力分析,获得隧道开挖前后监测点处土体的最大剪应力值,进而得到各监测点土体的循环应力比。

由于深埋地层也有液化的风险^[19,20],为分析隧道不同埋深时,隧道开挖对周围地层可液化性能的影响,选取三个计算断面,隧道埋深分别为10 m, 12 m和15 m。

3.3 隧道10 m埋深时的计算结果

(1) $CRR_{7.5}$

盾构法施工对周围土层的扰动相对其它工法要小,在本文的研究过程中假定盾构施工前后土体的相对密度不变。从上节的分析可知,一般情况下标准贯入击数 $(N_1)_{60}$ 只与土性及相对密度有关,因此在相对密度不变的假定下隧道开挖前后 $(N_1)_{60}$ 保持不变。从公式(6)、式(7)和式(8)可以看出, $CRR_{7.5}$ 在开挖前后也保持不变。

(2) 围压修正系数 K_σ

当 $(N_1)_{60}$ 取10时,根据式(9)计算得到隧道开挖前后各监测点的围压修正系数。计算结果如图5所示,其中横坐标为开挖后监测线上各点的围压修正系数与开挖前对应值的比值, K_{σ_1} 与 K_{σ_2} 分别为隧道开挖前与开挖后监测点土体的围压修正系数;纵坐标为监测点相对隧道圆心的偏转角,如图4所示。

从图中可以看出,对于A、B、C监测线,拱腰处土体的围压修正系数之比接近于1.0,而沿监测线向下,围压修正系数逐渐增加,拱底处围压修正系数达到最大值。这是由于隧道开挖引起质量损失,隧道下侧土体竖向有效应力减小,而两侧拱腰处由于开挖荷载的对称性竖向土压力变化较小。对比不同监测线上的结果,随着监测线远离隧道开挖区,监测线上各点间的差别减小,且围压修正系数的比值趋向于1.0,即隧道开挖的扰动随着距离的增加而减小。从所有监测点的数据来看,隧道开挖前后周围土体的围压修正系数的变化较小,开挖前后的比值处在0.98~1.03之间。

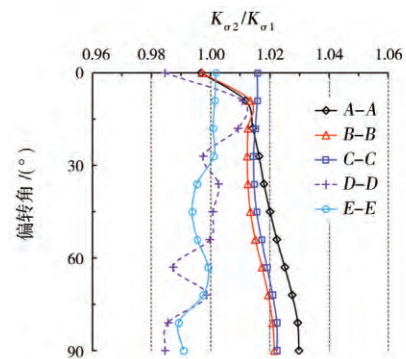


图5 隧道开挖前后监测点围压修正系数比 $K_{\sigma_2}/K_{\sigma_1}$

Fig.5 Correction coefficient ratio $K_{\sigma_2}/K_{\sigma_1}$ of the confining pressures at monitoring points before and after tunnel excavation

(3) 剪应力修正系数 K_τ

采用上述数值计算模型,模拟隧道开挖过程,得到各监测点土体的剪应力,根据公式(11)计算得到隧道开挖前后各监测点上的剪应力修正系数 K_τ 。图6为计算结果,其中 K_{τ_1} 与 K_{τ_2} 分别为隧道开挖前、后监测点处的剪应力修正系数。从图中可以看出,对于同一监测线上的各监测点,拱腰处土体剪应力修正系数的比值小于拱底,这是由于隧道开挖引起的剪应力区主要位于拱腰处,拱底处土体的剪应力小于拱腰。对比不同监测线上的计算结果可以看出,随着监测点与隧道开挖中心距离的不断增大,监测线各点剪应力修正系数之比趋向于1。从数值上看,隧道开挖对周围土体的剪应力修正系数影响较大,隧道开挖后衬砌外20 m处(E-E)土体的修正系数仍有不同程度的下降。

(4) 循环应力比 CSR

为对比隧道开挖前后土体的循环应力比,计算

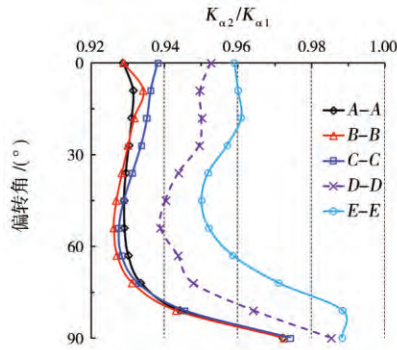


图6 隧道开挖前后监测点剪应力修正系数比值
Fig.6 Correction coefficient ratio of the shear stresses at monitoring points before and after tunnel excavation

隧道开挖后与开挖前循环应力比的比值 CSR_2/CSR_1 ，计算结果如图7所示。从图中可以看出，隧道开挖后，各监测点处地层的 CSR 值均高于隧道开挖前，这是由于隧道开挖造成土体损失，改变了开挖区域的动力特性。在靠近隧道2.0 m的位置(A-A)，地层的 CSR 有大幅提高，最大增幅约120%。随着监测点远离衬砌，隧道开挖对地层 CSR 的影响逐渐减弱，在距衬砌20 m的监测线E-E上，各监测点在隧道开挖后的 CSR 接近于开挖前的水平。上述结果表明隧道开挖对周围局部土体的地震响应有较大影响，循环应力比将大幅增加，这一影响随着距离的增加而减弱。

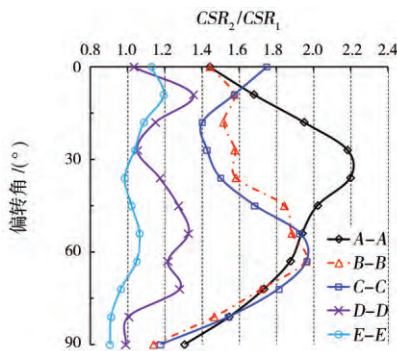


图7 隧道开挖前后监测点 CSR 比值
Fig.7 CSR ratio at the monitoring points before and after tunnel excavation

(5) 抗液化系数 FS

对于同一场地，忽略隧道开挖对地层 CRR 的影响，由式(1)可知，地层的抗液化安全系数与 CSR 、 K_a 和 K_v 有关。根据上述计算结果及公式(1)得到隧道

开挖后与开挖前周围地层的抗液化系数之比 (FS_2/FS_1)。当隧道埋深为10 m时，计算结果如图8所示。从图中可以看出，抗液化系数之比均小于1.0，即隧道开挖后周围地层的抗液化性能降低，在靠近衬砌位置处(A-A)最大降幅约60%。而在距衬砌20 m位置监测线上，隧道开挖后平均抗液化安全系数较开挖前仍有一定降低。对于同一监测线上的各监测点，拱底位置地层抗液化系数的降幅小于其余部位；对比不同监测线上的结果，随着监测点不断远离隧道，监测点处的液化系数降幅不断减小。上述结果表明隧道开挖会显著降低周围地层的抗液化性能，且影响区域较大。因此，隧道穿越区地层可液化性的判别应当考虑隧道的开挖效应。

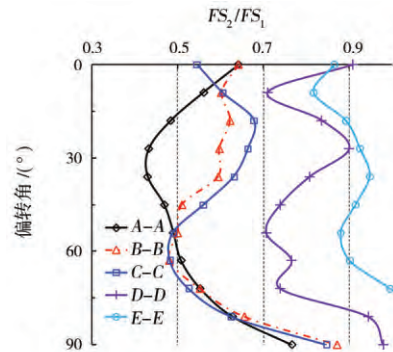


图8 隧道开挖前后监测点抗液化系数之比(埋深10 m)
Fig.8 Anti-liquefaction coefficient ratio of the monitoring points before and after tunnel excavation (Overburden 10 m)

3.4 隧道埋深效应

图9与图10分别为隧道埋深分别为12 m与15 m时的计算结果。从结果可以看出，与埋深10 m时相比，隧道开挖前后各监测点抗液化系数同样呈现拱底降幅低、其余位置降幅高的特点。但随着隧道埋深的不断增加，各监测线上地层的抗液化系数比不断增加(趋向于1.0)，即隧道开挖对地层可液化性能的影响不断减弱。当隧道埋深12 m时，各监测点抗液化系数的最大降幅约为50%；当隧道埋深为15 m时，周围地层抗液化系数最大降幅约为38%，而在D-D与E-E线上的监测点，抗液化系数之比接近于1.0。上述结果可解释为：随着隧道埋深的增加，考虑地表的放大效应，隧道周围地层的地震响应减弱；同时，随着埋深的增加，地层有效应力提高，地层的抗液化系数增加。

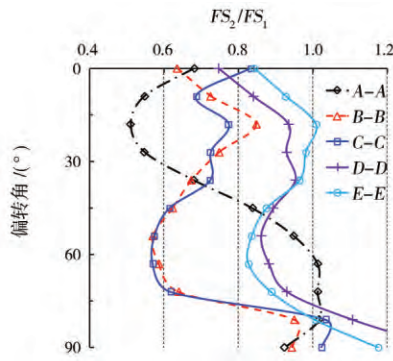


图9 埋深12 m时隧道开挖前后监测点抗液化系数比
Fig.9 Anti-liquefaction coefficient ratio of the monitoring points before and after tunnel excavation (Overburden 12 m)

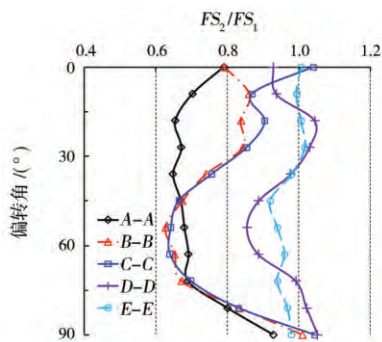


图10 埋深15 m时隧道开挖前后监测点抗液化系数比
Fig.10 Anti-liquefaction coefficient ratio of the monitoring points before and after tunnel excavation (Overburden 15 m)

4 结论

隧道开挖会引起周围地层应力状态的改变,同

时也会改变局部地层的地震动力响应。而目前对隧道穿越地层可液化性的判别一般依据隧道周围地层的应力状态与动力特性,没能考虑隧道的开挖扰动效应。为此,本文基于Seed判别方法对隧道施工前后周围地层的抗液化性能的变化进行了分析计算,得出以下结论:

(1) 由于隧道施工引起的应力释放与地层损失,周围地层的围压修正系数变化较小,而剪应力修正系数有所降低,最大降幅约7%。随着监测点远离开挖区,隧道开挖对土体剪应力修正系数的影响不断减弱。

(2) 隧道开挖引起地层的质量损失,导致周围地层的地震响应发生变化,地层的循环应力比大幅增加,当隧道埋深为10 m时,最大增幅达120%。随着监测点远离开挖区,隧道开挖对周围土体循环应力比的影响逐渐减弱,在距隧道20 m的位置,监测点的循环应力比接近开挖前的水平。

(3) 隧道开挖会降低周围地层的抗液化性能,对于衬砌外相同距离的监测点,拱底位置的降幅略小于其它部位;随着监测点远离隧道开挖区,地层的抗液化系数降幅不断减小。

(4) 随着隧道埋深的增加,隧道开挖对周围地层的抗液化性能的影响不断减弱,对于外径14.5 m的隧道而言,当隧道埋深分别为10 m,12 m和15 m时,隧道周围地层抗液化系数的最大降低分别为60%,50%和38%。

从上述结果可以看出,隧道开挖会降低周围地层的抗液化性,隧道周围地层的液化判定与隧道的抗液化设计应考虑隧道的开挖效应。

参考文献

References

- [1] 刘光磊, 宋二祥, 刘华北, 龚成林. 饱和砂土地层中隧道结构动力离心模型试验[J]. 岩土力学, 2008, 29 (8): 2070-2076.
LIU Guanglei, SONG Erxiang, LIU Huabei, GONG Chenglin. Dynamic Centrifuge Tests on Seismic Response of Tunnel in Saturated Sandy Foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (8): 2070-2076.
- [2] 陈国兴, 左熹, 王志华, 杜修力, 孙田, 胡庆兴. 近远场地震作用下液化地基上地铁车站结构动力损伤特性的振动台试验[J]. 土木工程学报, 2010, 43 (12): 120-126.
CHEN Guoxing, ZUO Xi, WANG Zhihua, DU Xiuli, SUN Tian, HU Qingxing. Large Scale Shaking Table Test Study of the Dynamic Damage Behavior of Subway Station Structures in Liquefiable Foundation Under Near-Fault and Far-Field Ground Motions[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43 (12): 120-126.
- [3] 龙慧, 陈国兴, 庄海洋. 可液化地基上地铁车站结构地震反应特征有效应力分析[J]. 岩土力学, 2013, 34 (6): 1731-1737.
LONG Hui, CHEN Guoxing, ZHUANG Haiyang. Effective Stress Analysis of Seismic Response Characteristics of Metro Station Structure in Liquefiable Foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34 (6): 1731-1737.

- [4] 黄娟, 彭立敏, 李兴龙. 可液化地层狮子洋盾构隧道横向地震响应规律及减震措施研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31 (10): 1539-1546.
HUANG Juan, PENG Limin, LI Xinglong. Transverse Seismic Responses of Shiziyang Shield Tunnel in Liquefiable Soil and Its Shock Absorption Measures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31 (10): 1539-1546.
- [5] 黄雨, 金晨, 庄之敬. 基于地震变形控制的隧道地基注浆抗液化加固效果评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (7): 1484-1490.
HUANG Yu, JIN Chen, ZHUANG Zhijing. Assessment of Anti-Liquefaction Grouting Reinforcement Effect of Tunnel Foundation Based on Earthquake-Induced Deformations Control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (7): 1484-1490.
- [6] 程选生, 王建华, 杜修力. 渗流作用下海底隧道的流-固耦合地震响应分析[J]. 现代隧道技术, 2013, 50 (6): 44-51.
CHENG Xuansheng, WANG Jianhua, DU Xiuli. Fluid-Solid Coupling Based Seismic Response Analysis of Subsea Tunnels During Seepage[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50 (6): 44-51.
- [7] SEED H. B., IDRIS I. M. A Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, 1971, 97 (9): 1249-1273.
- [8] SEED H. B. Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground During Earthquakes[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1979, 105 (2): 201-255.
- [9] SEED H. B., IDRIS I. M. Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes[M]. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
- [10] YOUNG T. L., IDRIS I. M. Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2001, 127 (4): 817-833.
- [11] BOULANGER R. W. High Overburden Stress Effects in Liquefaction Analyses[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2014, 129 (12): 1071-1082.
- [12] LIAO S. S. C., WHITMAN R. V. Overburden Correction Factors for SPT in Sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112 (3): 373-377.
- [13] IDRIS I. M., BOULANGER R. W. Semi-Empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2006, 26 (2-4): 115-130.
- [14] BOULANGER R. W., IDRIS I. M. State Normalization of Penetration Resistance and the Effect of Overburden Stress on Liquefaction Resistance[C]// Proceedings of the 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Singapore: Stallion Press, 2004: 484-491.
- [15] IDRIS I. M., BOULANGER R. W. Estimating K_{α} for Use in Evaluating Cyclic Resistance of Sloping Ground[C]// Proceedings of the 8th US-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Liquefaction, New York: MCEER, 2003: 449-468.
- [16] IDRIS I. M. An Update to the Seed-Idriss Simplified Procedure for Evaluating Liquefaction Potential[C]// Proceedings of TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction, Washington DC: Federal Highway Administration, 1999.
- [17] CHOU H. S., YANG C. Y., HSIEH B. J., CHANG S. S. A Study of Liquefaction Related Damages on Shield Tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16 (3): 185-193.
- [18] MARTIN G. R., W. D. L. FINN, H. B. SEED. Fundamentals of Liquefaction Under Cyclic Loading[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1975, 101 (GT5): 423-438.
- [19] 袁晓铭, 孙锐. 我国规范液化分析方法的发展设想[J]. 岩土力学, 2011, 32 (S2): 351-358.
YUAN Xiaoming, SUN Rui. Proposals of Liquefaction Analytical Methods in Chinese Seismic Design Provisions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (S2): 351-358.
- [20] 黄雅虹, 吕悦军, 荣棉水, 方怡. 关于深层砂土液化判定方法的探讨—以港澳特大桥水下隧道工程场地为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (4): 856-864.
HUANG Yahong, LU Yuejun, RONG Mianshui, FANG Yi. Study of Evaluation Method of Liquefaction for Sandy Soil in Deep Layer: Taking Undersea Tunnel Site of Hongkong-Zhuhai-Macao Great Bridge for Example[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (4): 856-864.

(下转第94页)

theoretical formula, surface settlement of a certain project was predicted and a comparison between the predicted data and measured data was made. The results show that: when the tunnel radius r_0 is 4.0 m, the Poisson ratio μ is 0.3, and the tunnel depth h is $2r_0$ to $6r_0$, then the maximum relative surface settlement Δv_{\max} ranges from 0.33 to 1.94, and the influence area induced by surface settlement ranges from 28.7 m to 124.1 m; the buried depth has little influence on the maximum relative horizontal displacement Δu_{\max} , which is located near the central horizontal line of a tunnel; in five different modes of displacement convergences, the solution results of two displacement boundary conditions are consistent with the measured surface settlements, and therefore these two theoretical solutions can be used as a foundation of tunnel design and construction.

Keywords Shield tunnel; Complex variable function; Displacement boundary condition; Surrounding rock displacement

(上接第 69 页)

Effects of Tunnel Excavation Disturbance on the Liquefiable Properties of Surrounding Stratum

ZHAO Wusheng¹ CHEN Weizhong^{1,2} SONG Wanpeng¹ ZHAO Kun¹ LI Can¹

(1 State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071; 2 Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061)

Abstract Saturated sand soil liquefaction may cause severe damage to tunnels under seismic loading. Accurately evaluating the liquefaction properties of the strata through which tunnels pass and taking anti-liquefaction measures can effectively reduce the seismic damages to tunnels. Based on the Seed method, a numerical simulation technique is used to analyze the changes to the liquefaction properties of surrounding stratum before and after tunnel excavation. The results show that: excavation disturbance can effectively reduce the liquefaction resistance of a stratum, and the reduction degree of the liquefaction resistance at the bottom is a little bit smaller than that of the haunch; with the increase of distance away from the tunnel excavation center, the influence of tunnel excavation on the liquefaction properties of a stratum decreases; the larger the overburden, the less effect excavation has on the liquefaction properties of the stratum; the influence of the excavation disturbance should be taken into account when the liquefaction properties of a stratum through which a tunnel passes is evaluated.

Keywords Tunnel excavation; Liquefaction property; Sandy soil