

邵帅,邵生俊,郑芸昕.盾构隧道的液化危害性分析[J].地震工程学报,2020,42(6):1615-1622.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1615

SHAO Shuai, SHAO Shengjun, ZHENG Yunxin. Analysis of Liquefaction Hazard in Shield Tunnels[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1615-1622. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1615

盾构隧道的液化危害性分析

邵 帅¹, 邵生俊^{1,2}, 郑芸昕¹

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 目前对地下结构液化破坏的研究尚不完善,很有必要对地铁隧道等地下结构可液化土层的液化势进行分析。本文以太原地铁隧道液化破坏为研究对象,应用 Tokimatsu 和 Yoshimi, Seed, Japan Road Associate 和中国建规 4 种方法,分析其抗液化性,评价场地的整体液化风险;依据振动液化动剪应力比、抗液化安全系数、标贯击数与体应变的关系评价盾构隧道的液化沉降变形。在粉质砂土和黏质粉土盾构隧道仰拱基底二次灌浆抗液化的基础上,建议太原地铁可液化砂土地层采用水泥基悬液二次灌浆加固处理地基,以提高其抗液化能力,减小液化沉降变形。

关键词: 盾构隧道; 饱和砂土; 液化势; 沉降; 加固处理

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)06-1615-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1615

Analysis of Liquefaction Hazard in Shield Tunnels

SHAO Shuai¹, SHAO Shengjun^{1,2}, ZHENG Yunxin¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: The current status of research on liquefaction failure in underground structures is not ideal. It is necessary to analyze the soil liquefaction potential of underground structures such as subway tunnels. In this paper, the anti-liquefaction safety of the Taiyuan metro tunnel was analyzed using four methods, i.e., those used by Tokimatsu and Yoshimike, Seed, the Japan Road Association, and the Chinese code. The overall liquefaction risk level of the site was evaluated. Based on the dynamic shear-stress ratio of vibration liquefaction, the anti-liquefaction safety factor, the relationship between the standard penetration test number and volumetric strain, and the liquefaction settlement deformation of the shield tunnel were evaluated. By the adoption of the anti-liquefaction technique of secondary grouting of the shield tunnel in silty sand and the clay silt stratum, it is suggested that secondary grouting of a cement-based suspension be used to reinforce the foundation of the Taiyuan Metro to improve its anti-liquefaction ability and reduce the deformation associated with liquefaction-induced settlement.

Keywords: shield tunnel; saturated sand; liquefaction potential; settlement; reinforcement

收稿日期: 2019-11-20

第一作者简介: 邵 帅(1991-), 男, 在读博士研究生, 主要从事黄土力学与土动力学研究。E-mail: 315602024@qq.com。

通信作者: 邵生俊(1964-), 男, 教授, 主要从事黄土力学与土动力学研究。E-mail: sjshao@xaut.edu.cn。

0 引言

中国大陆位于菲律宾板块挤压的欧亚板块前缘,邻近环太平洋地震带。中国大陆的扬子板块已经发生过多地地震活动,如1966年的邢台7.2级和1976年的唐山7.8级地震。在强地震作用下,如果松散饱和砂土的动孔隙水压接近有效侧限应力,则可能会丧失强度,产生液化^[1]。液化破坏可能引起地基承载力降低、建筑结构倾覆、地下结构上浮或下沉、土与结构相互作用增强。

邢台地震和唐山地震后,不仅桥梁、建筑物等结构受到液化作用发生倾斜、倾覆,道路、地下结构等也遭到破坏。一般而言,液化引起的危害分为上部结构破坏、地基失稳和地下结构破坏。前两类破坏发生在地表,容易被发现;而地下结构埋置于地下,液化对其造成的破坏由于缺乏实测资料和液化区的勘察困难而不易被发现。此外,盾构隧道和综合管廊等地下结构受到围岩地层的侧向约束作用,地层液化导致其破坏比地面结构小。与刚性结构比较,地下柔性结构在强震动作用时可以更有效地保持与围岩变形的一致性,从而减小破坏。液化破坏一般位于地表下浅层土,而盾构隧道的埋深一般较深(约为10 m以上),因此液化对其影响较小。当盾构隧道穿越松散饱和砂土地层时,可以通过加固地基来提高围岩的抗液化能力。

地铁隧道作为大型公共交通设施,强震作用下的结构安全性是其关键问题。当盾构隧道穿越可液化地层时,液化势分析是必不可少的。本文以太原地铁隧道场地为研究对象,针对可液化地层场地的液化破坏可能造成的危害,应用Iwasaki提出的液化危害指标,对场地的液化风险进行全面评估,并分析土层液化引起的隧道上浮位移。同时,应用Tokimatsu和Seed^[2-6],Ishihara和Yoshimine^[7]分别提出的震后固结体应变确定方法,对液化土层引起的沉降进行评估。依据场地液化势及注浆处理可液化土层的实践,采用二次灌浆以消除地层的液化可能性,并减少由液化引起的地表沉降。

1 场地概况

场地位于祁吕贺“山”字型构造及新华夏系构造影响的太原盆地。地层表明第四纪沉积物覆盖层上部主要包括上更新统沉积层及全新世沉积层。其中上更新统沉积层由粉质黏土层、粉砂层、砾砂和细圆砾土组成,厚度约为25~40 m;全新世沉积层由粉

质黏土、粉土及粉细砂、中砂、细圆砾土等组成,厚度约为15~30 m。场地地层土存在的主要工程问题是由土的高压缩性和低抗剪强度引起的。依据场地内隧道左、右线地质剖面图(图1),隧道上覆地层和仰拱下地基土层主要是黏质粉土和粉砂。由于隧道拱顶和仰拱下分布了疏松的粉土和粉砂,因此在地震作用下易受动荷载作用产生液化。

盾构隧道中心深度在地面以下13~14 m间。其中隧道位于全新世沉积层,其内径为5.6 m,外径为6.1 m。图2给出了不同埋深土体的物性指标以便于对液化势进行分析。

2 液化势分析

工程中地基土液化判定的常用方法是依据标准贯入击数确定抗液化剪应力,其是建立在与地震作用下动剪应力进行比较的基础上。场地地层土的液化分析采用以下四种方法:Seed等^[6],Tokimatsu和Yoshimi^[8],Japan Road Associate^[9]以及建筑抗震设计规范^[10]。场地相关参数为:震级7.1级,地表水平方向设计峰值加速度0.20g,地下水位埋深1.0 m,标贯试验锤击能量比60%。

根据图1所示的钻孔探测结果,分别利用上述四种方法对现场场地的液化势进行评价,计算其抗液化安全系数(F_L)并绘于图3。

$$F_L = \frac{R}{L} \quad (1)$$

式中: R 为抗液化势; L 为液化势。

此外,1982年Iwasaki提出了液化风险系数(liquefaction risk index)(P_L)用于评价现场场地液化的综合风险:

$$P_L = \sum_{i=1}^n (1 - F_{L,i}) \bar{W}_i(z) \Delta z_i \quad (2)$$

式中: $F_{L,i}$ 为第*i*层土的抗液化安全系数; $\bar{W}_i(z)$ 为第*i*层土与深度相关的权重系数。

根据场地液化土层的埋深和厚度对应的抗液化安全系数(F_L)确定了8个钻孔地层土的液化风险系数(P_L),并列于表1。结合液化安全系数的调查结果可以得到以下结论:

(1) 液化势的研究主要集中在隧道围岩及底部土层。

(2) 四种不同方法的分析结果表明,隧道围岩中易受地震液化的有两部分,其中隧道上覆土层大部分有液化的可能性,而隧道底部土层易液化区域主要集中在M2XZ1-13、M2XZ1-28、M2XZ1-39、

M2XZ1-18、M2XZ1-17、M2XZ1-27、M2XZ1-46。液化土层平均厚度为 2~3 m。

(3) 除了 Seed 等分析法外,其余分析方法都表明隧道底部土层易液化,液化土层平均厚度为 2~3 m。

(4) 应用液化风险指数 (P_L) 可以进一步了解

液化破坏的风险。根据表 1 所列,可以预计隧道围岩在液化作用下会有轻微到中等程度的破坏。

(5) 根据围岩在不同深度位置的标贯击数及液化安全系数的剖面图(图 4),对所有钻孔进行全面分析,整体评估其液化风险系数,以确定原位场地最

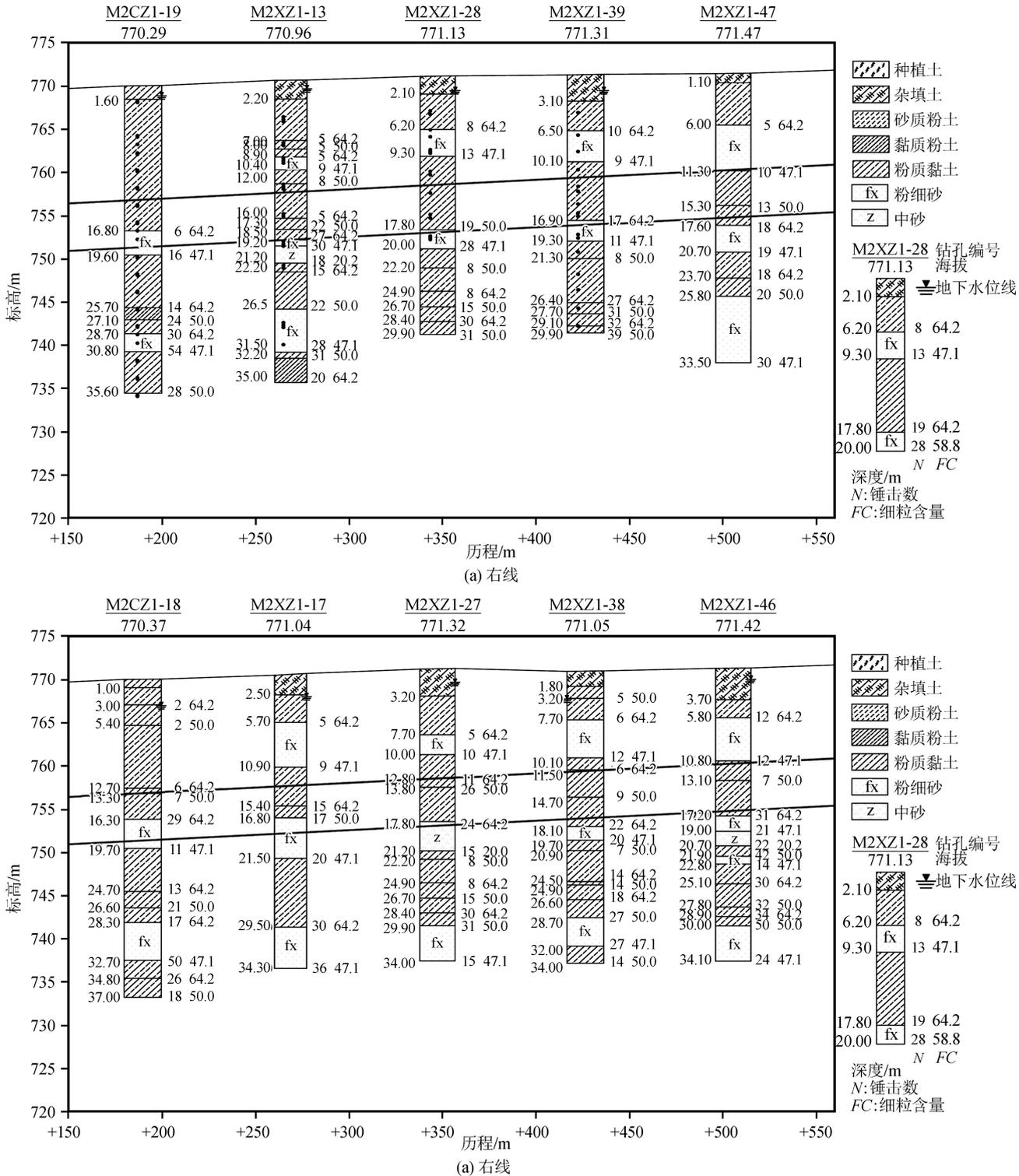


图 1 沿隧道轴线的地层剖面

Fig.1 Stratigraphic profile along the tunnel axis

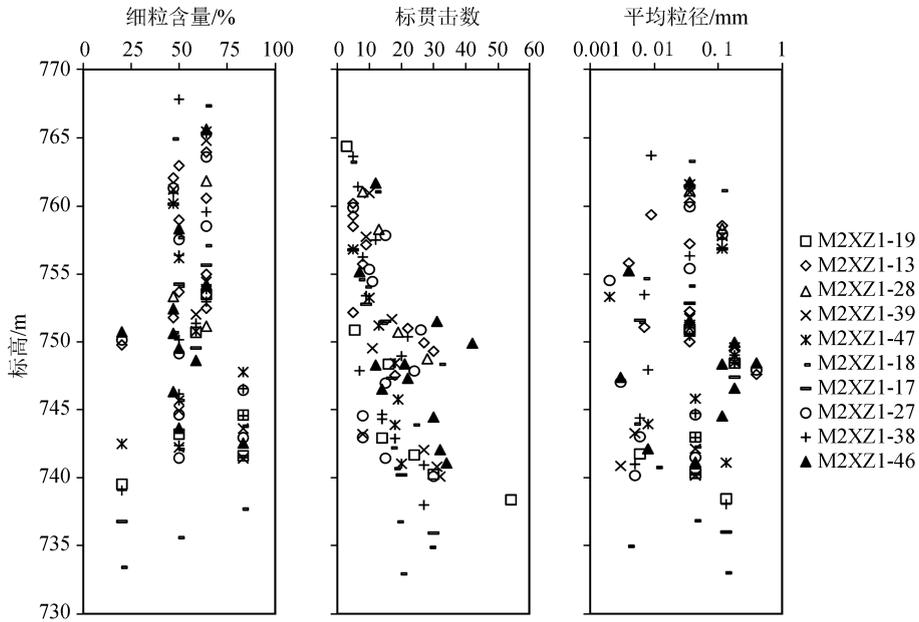


图2 土的相关参数随深度变化

Fig.2 Variation of Related soil parameters with depth

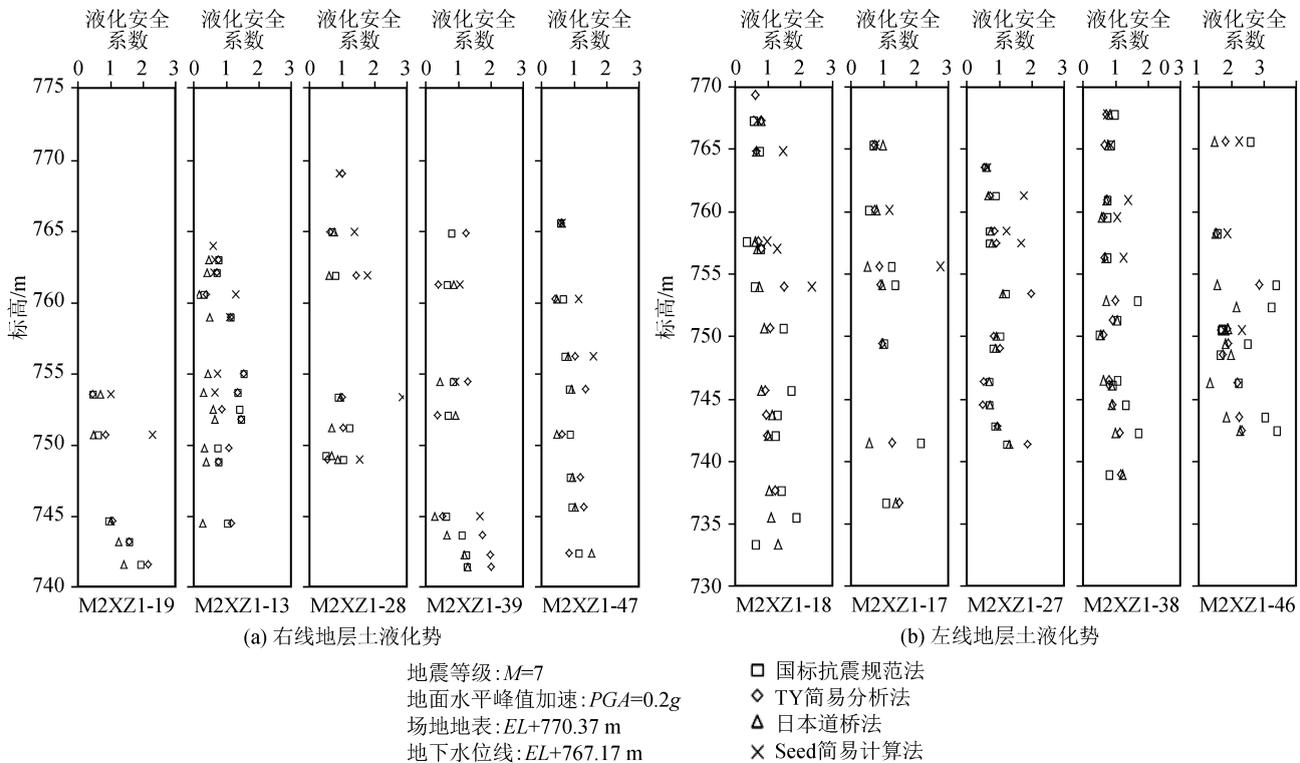


图3 液化势结果分析

Fig.3 Analysis results of liquefaction potential

易受液化影响的区域。最终结果表明隧道下覆砂土层易发生液化。

3 液化隆起

在地震动过程中,超静水孔压的产生会导致土

体有效应力减小,使其逐步接近液化状态。液化引起的破坏包括地下结构的上浮或下沉、地基承载力的降低和侧向压力的增加。通过对日本地下结构的调查,发现地震对隧道的影响不大。在隧道和管道的设计中,不仅应考虑液化引起的沉降现象,还应

表 1 液化风险指数表

Table 1 Results of liquefaction risk index

钻孔编号	液化指数 P_L			
	Seed 简易计算分析法	日本道桥法	国标抗震规范法	TY 简易计算分析法
M2XZ1-19	0	0.05	11.6	6.3
M2XZ1-13	16.9	35.4	10.1	7.2
M2XZ1-28	0	11.6	2.4	8.1
M2XZ1-39	0	18.3	12.9	7.6
M2XZ1-47	0	23.7	17.7	18.3
M2XZ1-18	5.64	22.7	28.7	19.2
M2XZ1-17	0	15.4	15.6	10.2
M2XZ1-27	0	16.2	12.1	12.4
M2XZ1-38	0.7	19.8	12.8	14.6
M2XZ1-46	0	14.1	10.9	0
AVE	2.324	17.73	13.48	10.39
评价结果	轻度液化	重度液化	中度液化	中度液化

注: $0 \leq P_L \leq 5$ 为轻度液化; $5 < P_L \leq 15$ 为中度液化; $P_L > 15$ 为重度液化

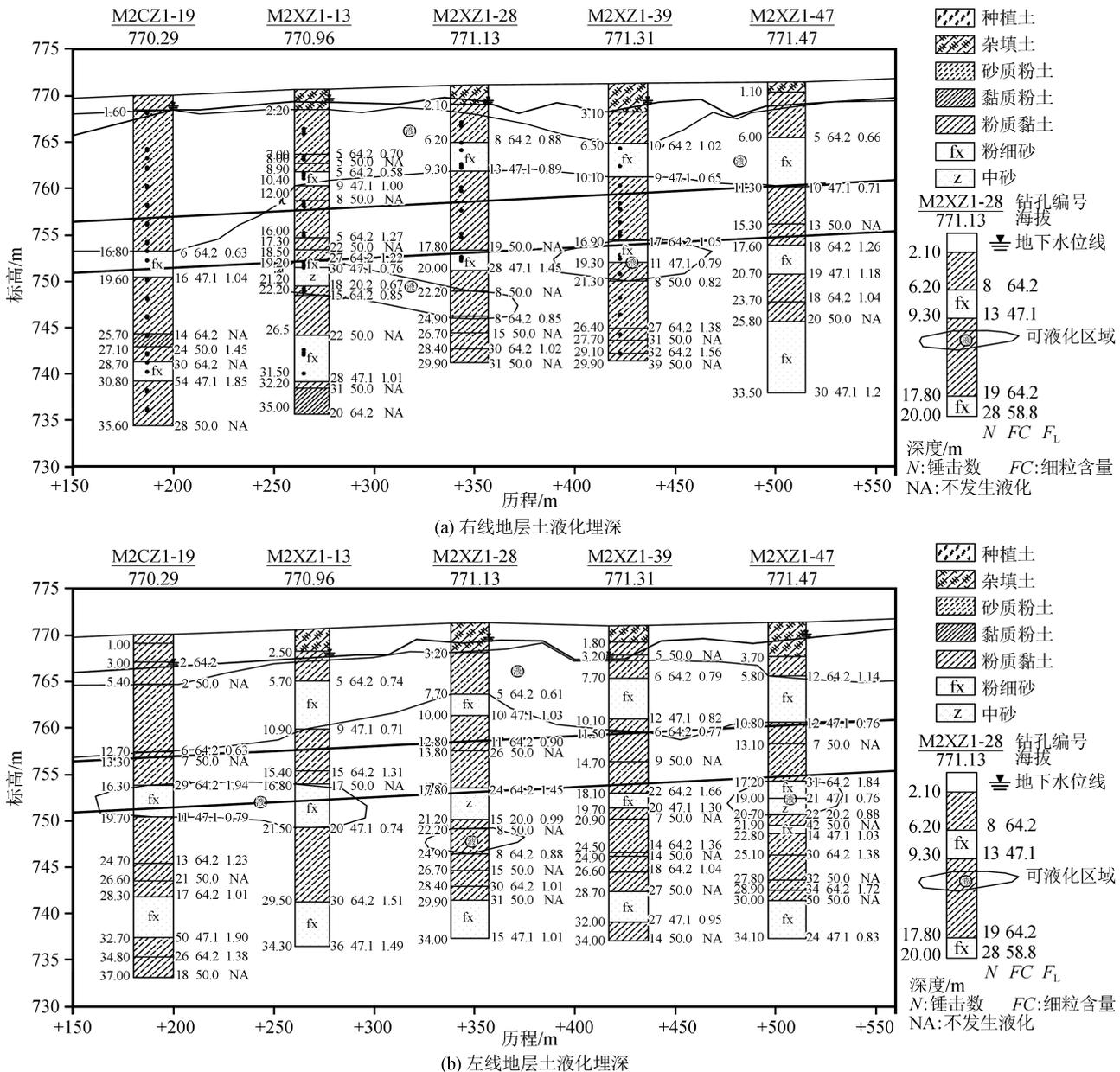


图 4 液化势的总体评价(四种方法液化安全系数均值)

Fig.4 Overall assessment of liquefaction potential (average value of safety factor resulting from four methods)

考虑其上浮导致的隆起变形。日本道路协会 1991 年颁布的管道设计准则中^[11],依据地下结构与围岩的阻力、抗液化安全系数以及受液化作用产生的超静水压力,可评价由液化引起的隆起。

根据液化分析的结果,场地隧道底部附近土层抗液化安全系数主要在 0.8~1.2 间。此外,液化风险指数分析结果表明该场地可划分为液化危害程度中等偏下。选择钻孔 M2XZ1-17 验算液化引起隆起的可能性。根据文献^[11]中的隆起计算公式,计算出抗隆起安全系数为 1.25,大于规范中的规定值 1.1,因此液化引起隧道隆起破坏的可能性低。

4 液化沉降

饱和砂土受其密度、最大剪应变以及地震产生的超静水压力的影响会在震后致密。室内试验表明在初始液化后,随着相对密度和最大剪应变的变化体应变也会发生变化。Tokimatsu 和 Seed, Ishihara 和 Yoshimine 分别提出了由饱和砂土地层液化导致地表沉降的评价方法。如图 5 所示, Tokimatsu 和 Seed 建立了体应变与标准贯入试验击次 (N_1)₆₀ 和 7.5 级地震作用下液化循环应力比之间的关系。在 7.5 级地震作用下,饱和砂土液化后的体应变可以直接依据循环应力比和 (N_1)₆₀ 估算。Ishihara 和 Yoshimine 建立了依据抗液化安全系数、

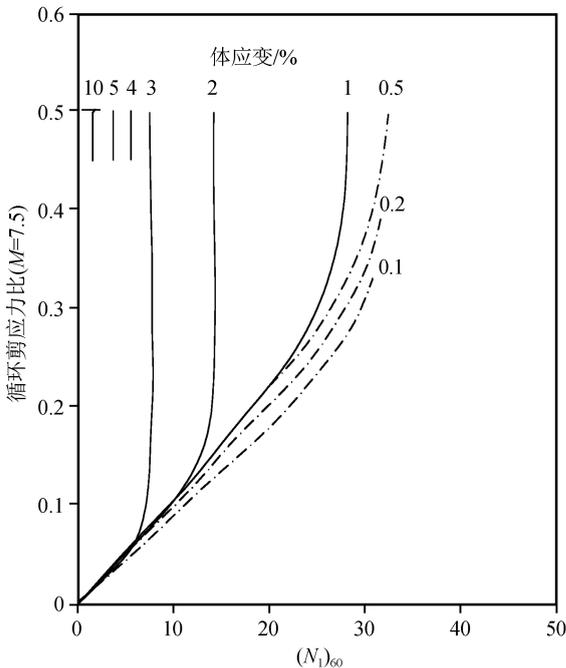


图 5 体应变与循环剪应力比和标贯击次的关系
Fig.5 Relationship among volumetric strain, cyclic stress ratio (CSR), and (N_1)₆₀

最大剪应变、相对密度、标准贯入阻力 (N_1)₆₀ 或圆锥贯入阻力估算地震后体应变的方法(图 6)。

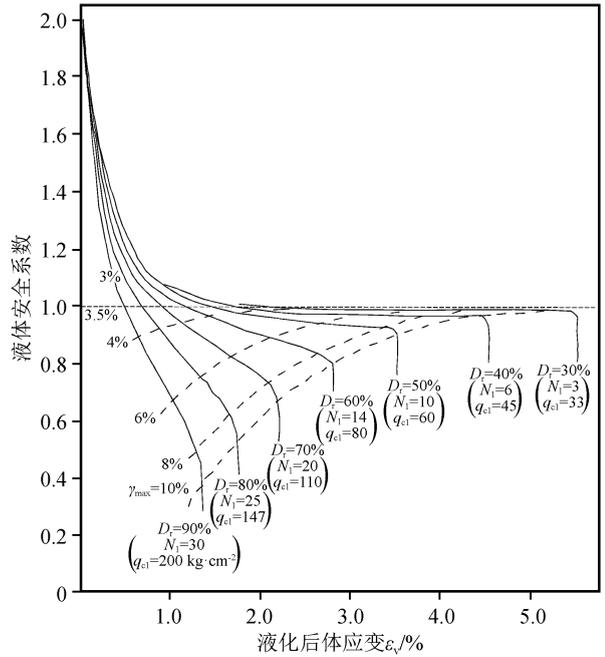


图 6 液化后体应变与液化安全系数之间的关系
Fig.6 Relationship between volumetric strain and safety factor against liquefaction (F_L)

针对现场原位钻孔 M2XZ1-17 土柱,采用 Seed 方法确定土的循环应力比,评价其抗液化安全系数,分析可液化层土体液化引起沉降的体应变,将分析结果列于表 2。其中 Tokimatsu 和 Seed 方法评价地表总沉降与隧道底部总沉降分别为 26.9 cm 与 3.9 cm,而 Ishihara 和 Yoshimine 方法分别为 30.5 cm 与 8.4 cm。由此可见,饱和砂土震后致密导致隧道下部液化层产生了较大沉降。

5 盾构隧道抗液化措施

5.1 地基处理方法

上述分析表明,在松散-中密粉质细砂的场地可能存在局部液化。由于预期液化引起隧道沉降,隧道周围的土需要加固处理。可采用的改良技术包括:(1)在隧道下面的支护土上提供防止液化的保护措施;(2)减少液化引起的沉降;(3)减少震后液化土层的流动。

土体松散与超静水压力不能迅速消散是致使液化的原因,因此可以通过增加场地土体的密度或改善排水途径等方法防止液化产生。地基加固措施包括土桩加固、压密注浆、高压喷射注浆和二次灌浆(注浆管)等方法。比较各种方法的费用及对环境的

影响可知,二次灌浆(注浆管)方法对环境无影响、造价低,是最佳处理措施。

综合分析表明,二次灌浆(注浆管)在隧道内部施工,对交通、环境、工期和振动无影响,可以用来进行隧道地基加固处理。在预制管片上设置备用注浆孔,依次打入注浆管,进行二次灌浆。同时盾构隧道可以继续施工,不影响施工进度。相比上述其他方

法,二次灌浆的施工成本可大幅度降低。隧道仰拱下管片上间隔预设注浆孔,设置 3 m 的二次灌浆注浆管,仰拱下 3 m 范围内进行注浆加固。二次灌浆既可以提高围岩土的抗剪强度,又可以减少由液化引起沉降,同时还可以保证盾构隧道管片结构具有一定的柔性。衬砌管片背填灌浆后,二次灌浆的具体设计如图 7 所示。

表 2 液化诱发沉降的预测

Table 2 Prediction of liquefaction-induced settlement

深度/m	N	$(N_1)_{60}$	N_1	F_L	Tokimatsu 与 Seed		Ishihara 与 Yoshimine	
					体应变/%	分层沉降高度/cm	体应变/%	分层沉降高度/cm
7	5	3.8	4.8	0.56	4.9	23.52	5.5	26.4
8.9	5	5.7	4.3	0.53	3.8	3.42	4.5	4.05
19.2	20	20.1	11.2	0.96	0.8	0.56	1.5	1.05
21.2	18	18.9	9.7	0.98	0.9	1.8	1.6	3.2
22.2	15	15.9	7.9	0.82	1.5	1.5	4.1	4.1
					地表总沉降:26.9		地表总沉降:30.5	
					隧道底部总沉降:3.9		隧道底部总沉降:8.4	

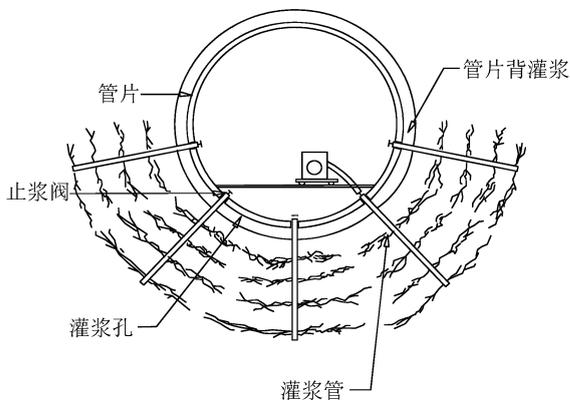


图 7 二次灌浆示意图^[12]

Fig.7 Sketch of secondary grouting^[12]

5.2 二次灌浆实例

盾构法施工中二次灌浆采用双管双封侵入与渗透混合式灌浆技术,使水泥和膨润土浸入到裂隙和孔隙中胶结和强化围岩。合理配制硅基化学灌浆材料注入渗透围岩,可增加砂土的抗剪强度和耐久性,使得松散砂土结构能稳定抵抗液化破坏。围岩经过二次灌浆将大幅度提高其工程性质,例如东京地铁盾构隧道在二次灌浆后其围岩粉土黏聚力由 27.6 kPa 增加到 60 kPa,动模量也增加了 2.8 倍。在 1995 年阪神地震后的修复工程中,采用注入比为 30% 的双管双封混合式灌浆,使加固处理过后的围岩强度达 500 kPa。

二次灌浆技术在日本 3 个工程和台北 6 个工程的软黏土、粉质黏土、砂质黏土、粉质砂土地层盾构隧道中开展了研究。该技术现已在中国台湾得到了

广泛应用。灌浆材料分为溶液型、半悬浮型和悬浮型三类,其中水泥基悬液通过灌浆压力可保证加固效果。根据地铁粉质砂土地层围岩上覆荷载,确定灌浆压力约为 500 kPa,3% 水泥基悬液的灌浆加固效果最好。

这种灌浆加固技术可以应用于太原地铁松散饱和砂土隧道建设。

6 结论与建议

依据不同埋深土层的液化安全系数,综合评价了 0.2g 峰值加速度作用下场地地层的液化风险系数,认为隧道围岩在液化作用下会有轻微到中等程度的破坏;评价了隧道仰拱地层的液化分布范围,发现隧道仰拱下厚度约为 5 m 的土层液化。由于土层的液化及上覆土层的围岩压力作用,隧道结构未产生隆起位移;由于仰拱地层液化后排水体变,隧道结构产生沉降。场地地表及隧道仰拱地层产生沉降分别为 29.6~30.5 cm 和 3.9~8.4 cm。采用抗液化措施既可以减少液化层流动,也可以减小液化引起的沉降变形。

综合比较松散饱和砂土抗液化的工程措施,隧道仰拱下围岩加固处理采用双管双封混合式灌浆的二次灌浆技术可有效抑制液化破坏。具体措施是在仰拱管片间设置 3 m 的注浆管,灌浆压力为 500 kPa,采用水泥基悬液。二次灌浆能够有效提高仰拱下地层的强度,减小液化引起的沉降。

地下结构液化破坏的研究尚不完善,针对液化土层中地铁隧道等地下结构地层的液化势分析是必不可少的。本文利用现有方法对太原地铁可液化土层盾构隧道进行了研究,建议采用双管双封混合式灌浆的二次灌浆抗液化措施。

参考文献(References)

- [1] 谢定义.土动力学[M].北京:高等教育出版社,2011.
XIE Dingyi. Soil Dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press,2011.
- [2] TOKIMATSU K, SEED H B. Evaluation of Settlements in Sands Due to Earthquake Shaking[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(8): 861-878.
- [3] SEED H B, MARTIN G R, Lysmer J. LYSMER J. Pore Water Pressure Change during Soil Liquefaction [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1976, 102(6): 105-134..
- [4] SEED H B, LEE K L. Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, 1966, 92(6): 105-134.
- [5] SEED H B. Soil Liquefaction and Cyclic mobility Evaluation for Lever Ground During Earthquakes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1979, 105: 201-255.
- [6] SEED H B, TOKIMATSU K, HARDER L F, et al. Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(12): 1425-1445.
- [7] ISHIHARA K, YOSHIMINE M. Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction during Earthquakes[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(1): 173-188.
- [8] TOKIMATSU K, YOSHIMI Y. Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-Value and Fines Content [J]. Soils and Foundations, 1983, 23(4): 56-74.
- [9] Specifications for Highway Bridges; Part V. Earthquake Resistant Design[S]. Tokyo: Japan Road Association, 1996.
- [10] 建筑抗震设计规范: GB50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Code for Seismic Design of Buildings; GB50011-2010[S]. Beijing: China Building & Architecture Press, 2010.
- [11] Design Guideline for Common Duct: JIS A4413-1991[S]. Tokyo: Japan Road Association, 1991.
- [12] CHOU H S, YANG C Y, HSIEH B J, et al. A Study of Liquefaction Related Damages on Shield Tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 185-193.