

DOI: 10.11779/CJGE2019S1015

盾构隧道在可液化场地中的地震响应分析

朱 彤^{1, 2}, 王 睿^{1, 2}, 张建民^{*1, 2}

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 清华大学土木水利学院岩土工程研究所, 北京 100084)

摘要: 盾构隧道的装配式管片是其显著的结构特点, 目前的抗震研究主要采用简化方法, 少有能有效反映管片和接头细部特征的动力反应分析方法, 对其在可液化场地中的地震响应规律也需要进一步研究。本文建立了一种精细化装配式管片结构计算模型, 并基于砂土液化大变形统一本构模型, 采用弹塑性有限元动力时程分析, 分析了盾构隧道在可液化场地中的地震响应特征及规律。结果表明接头处响应是盾构隧道抗震的重要考虑因素。装配式管片结构相比于整体式结构柔度更大, 受力较小, 变形较大。在可液化场地中盾构隧道由于水平向作用力显著增加, 在水平向被挤压, 受力分布和抗震不利位置相比非液化场地有明显区别。

关键词: 盾构隧道; 有限元法; 可液化场地

中图分类号: TU435; U455.43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S1-0057-04

作者简介: 朱 彤(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事地下结构抗震的相关研究工作。E-mail: zhut1994@163.com。

Seismic response analysis of shield tunnels in liquefiable soils

ZHU Tong^{1, 2}, WANG Rui^{1, 2}, ZHANG Jian-min^{1, 2}

(1. Skate Key Laboratory of Hydroscience & Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The prefabricated lining segments of shield tunnels are their most significant structural feature. The current researches on the seismic response of shield tunnels mainly adopt simplified methods, lack of dynamic response analysis, which can reflect the characteristics of tunnel segments and joints effectively. Further researches are needed to understand the seismic response of shield tunnels in liquefiable soils. A computational model for prefabricated tunnel linings is proposed in FEM program. A unified constitutive model for large post-liquefaction deformation of sand is used for liquefiable ground. The analysis results show that the joint is a key aspect of the seismic design of shield tunneling. The fabricated tunnel segment structure is more flexible than the monolithic structure under seismic loading. The tunnel is horizontally compressed in liquefiable soil, and the seismic response is distantly different from that in the non-liquefiable soils.

Key words: shield tunnel; FEM; liquefiable soil

0 引言

地下空间的科学开发是未来城市发展的重要方向, 其中, 地铁作为重要的城市基础设施, 也处于新的建设热潮之中。盾构法施工由于具有受环境制约因素少、安全程度高、施工速度快等优点成为地铁隧道修建中应用最广泛的施工技术。在各大城市的地铁规划中, 地铁车站和区间隧道时常不可避免地穿越可液化地层, 在地下结构抗震设计中增加了很大的安全隐患^[1]。目前隧道工程抗震设计中多采用简化的拟静力方法进行分析, 不能合理反映包括可液化场地在内的复杂地层中的动力响应, 对于隧道结构在可液化地层中地震响应规律的认识还需要做进一步的研究^[2-3]。目前, 针对可液化场地中的盾构隧道, 鲜有既能精细准确地描述管片及接头结构特征, 又能科学合理地描述

液化土的动力响应的方法。本文建立了精细化装配式管片结构模型, 并基于砂土液化大变形统一本构模型^[4-5], 采用弹塑性有限元动力时程分析, 分析了盾构隧道在可液化场地与非可液化场地中的地震响应特征及规律, 并与整体式隧道结构做了对比分析, 对比了不同隧道结构形式在不同场地中地震响应规律的机理。

1 计算模型

1.1 盾构管片和接头模型

由接头拼装而成的盾构管片相比整体浇筑的衬砌

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51708332); 国家自然科学基金面上项目(51678346)

收稿日期: 2019-04-29

*通讯作者(E-mail: zhangjm@tsinghua.edu.cn)

环, 整体性和抗弯刚度都有所不同, 影响到隧道结构的受力和变形, 同时接头部位也是盾构隧道的薄弱环节, 因此, 管片及接头的力学性能研究及在数值计算中的合理模拟, 是盾构隧道研究领域中的重点内容。

目前考虑接头性能的管片环计算模型有均质圆环模型、多铰圆环模型、梁-弹簧模型等, 多用于荷载-结构法等抗震设计方法中, 而这些计算模型也具有接头抗弯刚度参数取值复杂、梁单元无法反映管片结构细部响应特征等问题。对于能充分考虑结构、场地动力反应及其相互作用的动力时程有限元计算方法, 尚需在计算条件允许下进行精细化建模, 从而更好地揭示盾构隧道结构的地震响应规律。

本文基于 OpenSees 开源有限元计算程序, 建立了可以反映接头力学特征的管片模型并用于动力时程计算。模型采用 10 层四节点单元模拟管片, 接头处两侧管片上对应的节点对采用零长单元连接, 其中螺栓位置处选取钢筋材料模型, 其余位置处选取抗压不抗拉材料模型, 以模拟接头处抗压衬垫的接触力学作用; 由于抵抗错台能力的因素较多, 故未考虑错台变形, 通过绑定节点对错动方向自由度来处理。何川等^[6]开发了多功能盾构隧道结构原型组合加载试验系统, 对南京长江隧道的管片接头进行了加载试验。本文也相应建立了图 1 所示的计算模型, 根据试验材料信息, 取混凝土管片弹性模量为 36 GPa, 轴心抗压强度为 45 MPa, 螺栓取 M36 高强螺栓, 弹性模量为 200 GPa, 屈服强度为 480 MPa, 在相同加载条件下进行计算, 通过得到的接头张开量及张开缝隙高度计算接头转角, 结果如图 2, 可见整体上接头力学响应与试验结果吻合良好, 说明该计算模型具备可靠性。

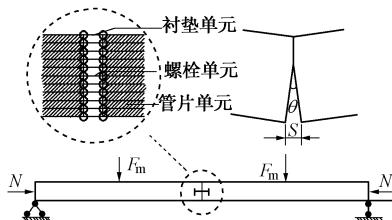


图 1 管片及接头计算模型

Fig. 1 Computational model for segments and joints

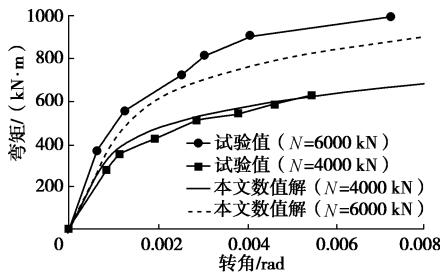


图 2 接头弯矩-转角关系

Fig. 2 Relationship between joint moment and rotation

1.2 几何模型

场地与隧道模型如图 3, 基岩深度取 50 m, 隧道埋深为 15 m, 隧道断面内径为 6.4 m, 外径为 7 m, 管片厚为 0.3 m, 分为 6 片圆心角 60° 的管片, 顶部分缝, 从右上方接头起逆时针顺序顺次编号为 1 到 6 号接头, 每个管片径向分 10 层单元, 环向 12 层单元, 地基土采用四节点流固耦合单元, 结构采用四节点实体单元, 在隧道周围设置一层 0.05 m 厚的土-结构接触面单元。

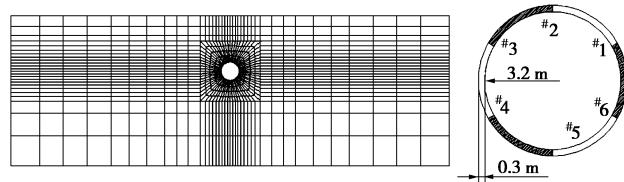


图 3 隧道结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of tunnel structures

1.3 材料模型

可液化土采用三维砂土液化大变形统一本构模型进行模拟, 在 OpenSees 中为 CycLiqCPSP 模型^[7-8], 模型参数见表 1。管片结构采用 D-P 本构模型, 选用 C50 混凝土参数。接头处选用两根 4.8 级 M24 螺栓, 长度 500 mm, 材质为 HRB335 钢, 采用可考虑屈服的滞回本构模型 Giuffre-Menegotto-Pinto 模型。土-结构接触面采用 Clough-Duncan 本构模型。此外, 也计算了隧道结构在非可液化场地中的地震响应作为对比, 非液化地基土采用线弹性模型进行简化, 变形模量分别取 50, 100, 150 MPa。

表 1 可液化土 CycLiqCPSP 材料模型参数

Table 1 Parameters of CycLiqCPSP material model

G_0	κ	h	M	$d_{re,1}$	$d_{re,2}$	d_{ir}	α
125	0.006	0.6	1.25	0.02	40	0.5	90
$\gamma_{d,r}$	n^p	n^d	λ_c	e_0	ξ	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$k/(m \cdot s^{-1})$
0.05	1.1	8	0.023	0.837	0.7	1.961	0.002

1.4 地震波与分析步

本文在 Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) 地震动数据库中选取匹配目标反应谱的地震波, 设计反应谱选取 8 度设防区罕遇地震, II 类场地, 第一组, 在 PEER 数据库以设计谱为目标函数进行检索, 选择均方差较小的地震动记录, 本文中选取 1971 年 San Fernando 地震中 Palmdale Fire Station 测站的地震动记录, 加速度峰值为 $0.4g$ 。

计算步骤模拟暗挖法施工过程, 先对土体进行重力步计算, 得到初始自重应力场, 再进行土体开挖并安装管片结构, 再次进行重力步计算, 稳定后进行地震动加载, 在基岩面均匀一致输入动荷载。

2 计算结果与分析

2.1 盾构隧道在可液化场地中地震响应一般规律

图 4 为场地液化范围最大时刻 23.6 s 的超静孔压比分布与远场近场 6 个观测点的超静孔压比时程。地震过程中场地上层液化程度高, 且更早达到液化; 结构下方土体液化程度高, 结构两侧土体液化程度低。

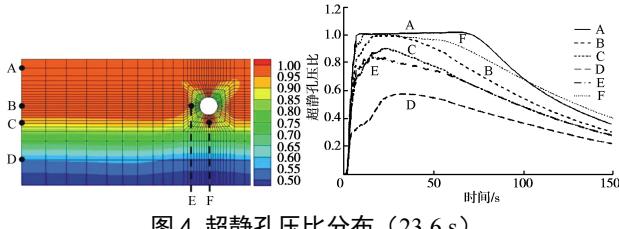


图 4 超静孔压比分布 (23.6 s)

Fig. 4 Contours of excess pore water pressure ratio (23.6 s)

地下结构地震反应主要受土体变形控制, 计算发现结构存在两种协调变形作用: 用顶、底板水平位移差表征的剪切作用, 用左、右顶点水平位移差表征的挤压作用。结果表明, 剪切变形最大值为 23.5 mm, 挤压变形最大值为 10.6 mm (水平向受压为正), 关于两种作用的受力机理将在后文 2.3 中论述。

规定外侧受弯为结构弯矩正方向, 绘制结构弯矩时程图和包络图如图 5, 可见结构弯矩分布为典型的“花生形”, 受力成中心对称分布, 顶底板处外侧受弯, 左右顶点处内侧受弯, 侧方位处内外弯矩交替分布, 其中 45° 处正负弯矩近分布对称, 最大正弯矩出现在 60° 附近, 最大负弯矩出现在 30° 附近。

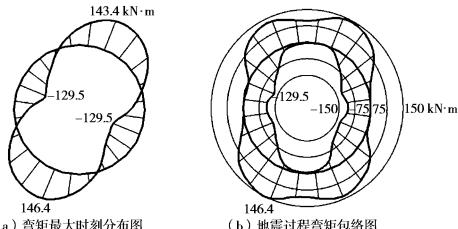


图 5 隧道弯矩最大时刻分布图与地震过程弯矩包络图

Fig. 5 Distribution of maximum moment of tunnel moment and envelopes of dynamic moment

接头响应由所在位置处弯矩和抗弯刚度共同决定, 图 6 为 6 个接头地震过程中内外侧张开量最大值, 结合接头位置及弯矩分布, 可见在本文的接头位置下, 侧方位 #3 接头内侧张开量最大, 是该工况下抗震不利位置, 而顶底板位置处的 #2, #5 接头张开量较小。进一步以 #2 接头和 #3 接头为例进行分析, 接头外侧、内侧张开量时程如图 7, 对比图 5 可见接头响应特征应与弯矩保持一致, #2 接头位于顶板处, 始终外侧受弯, 故始终外侧张开, #3 接头处张开量交替分布, 且由于负弯矩作用显著, 因此内侧张开量更大。两接头处螺栓应力时程如图 8, 可见螺栓响应与所在接头受力规

律一致, 初始时刻结构受周围土体压力, 螺栓均处于受压状态, #2 接头地震过程中张开量较小, 该位置螺栓始终处于受压状态, 应力变化幅度不大, #3 接头地震过程张开量较大, 该位置螺栓会承受较大拉应力, 最大值达到 139 MPa, 但也未达到屈服。

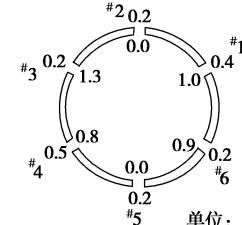


图 6 接头内外侧最大张开量

Fig. 6 Maximum openings of joints

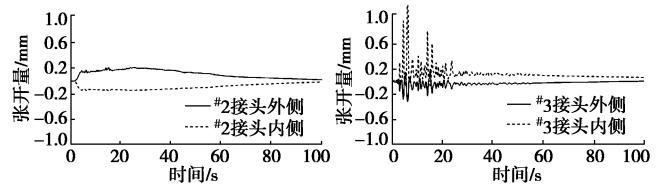


图 7 #2, #3 接头张开量

Fig. 7 Openings of joint No.2 and 3

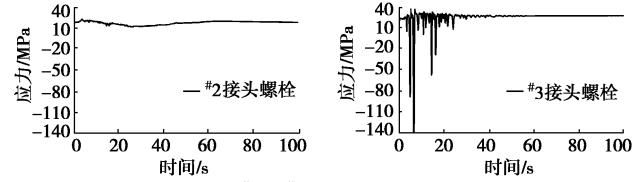


图 8 #2, #3 接头螺栓应力

Fig. 8 Stresses of joint bolt No.2 and 3

2.2 管片隧道与整体式隧道地震响应规律对比

分析装配式管片隧道和整体式隧道的差异。整体式隧道计算模型中除结构环不分成管片外其余条件均相同。整体式隧道剪切变形为 22.0 mm, 挤压变形为 10.4 mm, 均小于管片隧道; 弯矩图如图 9, 可见整体式隧道受力更小。盾构隧道装配式管片结构由于接头处刚度折减, 相比整体式结构整体性减弱、不均匀性增强, 因此更偏向于柔性结构, 形成三个特点: ①变形协调性更强, 受力减弱, 最大正负弯矩分别减小 8.7% 和 23.1%; ②结构变形量相应增大; ③接头成为结构薄弱部位, 管片受力减弱的同时牺牲的是接头处抗震安全性, 而接头在同样弯矩下更容易破坏。

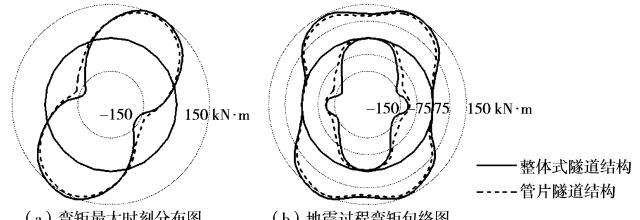


图 9 两种结构弯矩最大时刻分布图与地震过程包络图对比

Fig. 9 Distribution of maximum moment and envelopes of dynamic moment for two kinds of structures

2.3 可液化场地与非液化场地中地震响应规律对比

图 10 是结构在非液化场地中的弯矩包络图, 变形模量为 50, 100, 150 MPa 的土层中, 最大弯矩值分别为 170.2, 136.6, 124.7 kN·m, 剪切变形分别为 40.6, 31.6, 15.6 mm, 可见土层模量越小, 结构受力和变形越大。隧道结构在两种场地中受力分布不同, 非液化场地中最大正负弯矩均在共轭 45° 处, 拱肩和墙角处是地震作用下最不利位置, 顶底板、左右顶点处受弯矩较小, 即无明显挤压变形作用影响。受力分布影响接头响应, 非液化场中结构各位置接头内外侧张开量较均衡对称, 规律不同于液化场, 因此在接头抗震设防上有所差异。

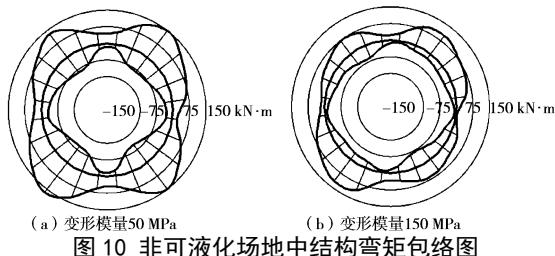


图 10 非可液化场地中结构弯矩包络图

Fig. 10 Distribution of maximum moment of structures in non-liquefiable soils

对于不同场地中的隧道响应差异, 进一步分析机理。液化场在地震过程中, 由于结构周围土超静孔压累积和土体侧压力系数变化, 土对结构作用力也会发生变化。分析地震过程中结构四个顶点处所受法向土水压力, 如图 11, 可液化场中左右顶点处土对结构的平均压力增量远大于上下顶点处的平均压力增量, 这个受力差值远大于非可液化场地, 从而在液化场中, 土对结构会产生左右两侧向中间的挤压作用, 这也是结构在可液化场与非可液化场中地震响应的主要区别, 这也会直接影响结构受力、变形和接头响应。

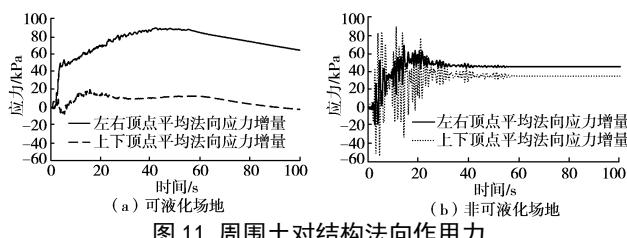


Fig. 11 Normal forces of surrounding soils on structures

3 结 论

本文建立了盾构隧道装配式管片结构模型, 通过有限元计算分析了盾构隧道在可液化场地中的地震响应规律, 并分别以整体式结构和非液化场地作对比分析, 在该计算条件下得到以下几点结论。

(1) 本文计算模型可以有效模拟盾构隧道管片及

接头的地震动力响应, 如结构变形、受力, 接头张开量, 螺栓应力等, 其中接头处是抗震不利位置, 张开量取决于所在位置处结构弯矩, 进而影响螺栓受力。

(2) 装配式管片隧道结构和整体式隧道结构在液化场地中变形和受力形式相似, 前者更偏向于柔性结构, 在管片接头处造成刚度折减, 整体性下降, 相比后者变形增大, 受力减小, 其中负弯矩减小更显著。

(3) 可液化场中, 盾构隧道结构在地震过程中除受周围土层的剪切作用外, 还受到由于超静孔压累积引起的挤压作用, 造成结构变形和受力的差异, 相应地, 接头响应也产生差异, 抗震设防上有不同要求。

参 考 文 献:

- 1] CHEN R R, TAIEBAT M, WANG R, et al. Effects of layered liquefiable deposits on the seismic response of an underground structure[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, **113**: 124 - 135.
- 2] 施仲衡. 地下铁道设计与施工[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. (SHI Zhong-heng. Design and construction of metro[M]. Xi'an: Shaanxi Scientific and Technical Publishers, 1997. (in Chinese))
- 3] THOMAS R. Earthquake design criteria for subways[J]. Journal of the Structural Division, 1969, **9**(6): 1213 - 1231.
- 4] ZHANG J M. Cyclic critical stress state theory of sand with its application to geotechnical problems[R]. Tokyo: Research Report of Tokyo Institute of Technology, 1997.
- 5] ZHANG J M, WANG G. Large post-liquefaction deformation of sand, part I: physical mechanism, constitutive description and numerical algorithm[J]. Acta Geotechnica, 2012, **7**(2): 69 - 113.
- 6] 何川, 张建刚, 苏宗贤. 大断面水下盾构隧道结构力学特性[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (HE Chuan, ZHANG Jian-gang, SU Zong-xian. Structural mechanical characteristics of underwater shield tunnel with large cross section[M]. Beijing: Science Press, 2010.)
- 7] 王睿, 张建民, 王刚. 砂土液化大变形本构模型的三维化及其数值实现[J]. 地震工程学报, 2013, **35**(1): 91 - 97. (WANG Rui, ZHANG Jian-min, WANG Gang. Multiaxial formulation and numerical implementation of a constitutive model for the evaluation of large liquefaction-induced deformation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, **35**(1): 91 - 97. (in Chinese))
- 8] WANG R, ZHANG J M, WANG G. A unified plasticity model for large post-liquefaction shear deformation of sand[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **59**: 54 - 66.