郭知一,周海祚,郑刚,等.隧道与联络通道连接处地震响应分析[J].地震工程学报,2021,43(6):1480-1486.DOI:10.3969/j. issn.1000-0844.2021.06.1480

GUO Zhiyi,ZHOU Haizuo, ZHENG Gang, et al. Seismic response analysis of the joint between tunnel and cross passage[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(6):1480-1486.DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1480

# 隧道与联络通道连接处地震响应分析

郭知一<sup>1,2</sup>,周海祚<sup>1,2</sup>,郑 刚<sup>1,2</sup>,杨鹏博<sup>1,2</sup>,张文彬<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;

2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要: 联络通道是长距离盾构隧道结构中不可缺少的部分,常设置于两条隧道之间,用于逃生、防火 及排水等。与此同时,联络通道与隧道的连接处构造复杂,空间效应明显。在地下结构截面突变 处,在地震荷载作用下易产生应力集中,造成结构的破坏,从而带来不可估量的震害。基于有限差 分软件 FLAC<sup>3D</sup>,以天津的典型粉质黏土为例,建立双线并行隧道及联络通道的三维模型,对场地 施加正弦波,分析隧道与联络通道连接处的应力和变形情况,并探讨隧道结构埋深、联络通道的直 径和长度等对连接处地震响应的影响。基于 Fish 语言,建立能模拟不同地震波入射方向有限差分 模型,计算表明不同地震波入射方向对结构连接处受力具有显著影响。

关键词:联络通道;有限元模拟;地震响应;入射方向

 中图分类号: TU43
 文献标志码:A
 文章编号: 1000-0844(2021)06-1480-07

 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1480

# Seismic response analysis of the joint between tunnel and cross passage

GUO Zhiyi<sup>1,2</sup>, ZHOU Haizuo<sup>1,2</sup>, ZHENG Gang<sup>1,2</sup>, YANG Pengbo<sup>1,2</sup>, ZHANG Wenbin<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

**Abstract**: As an indispensable part of long-distance shield tunnel, the cross passage is usually placed between two tunnels for escape, fire prevention and drainage. Under the action of seismic load, stress concentration is easy to occur at the joint between tunnel and cross passage, which has complex structure and obvious spatial effect, thus resulting in structural damage and immeasurable earthquake damage. Based on the finite difference software FLAC<sup>3D</sup>, a three-dimensional model for two-line parallel tunnel and cross passage was established by taking the typical silty clay in Tianjin as an example. Under the input of sine wave, the stress and deformation of the joint between tunnel and cross passage on the seismic response of joint were discussed. Based on

收稿日期:2019-09-20

**基金项目:**国家重点研发计划(2017YFC0805407);国家自然科学基金(41630641;51708045);天津市科技计划项目(16YDLJSF00040) 第一作者简介:郭知一(1992-),男,硕士研究生,从事土力学及岩土工程的科研工作。E-mail:guozhiyi@tju.edu.cn。

通信作者:周海祚,男,博士。从事结构与土相互作用方面的研究。E-mail:zhzrobby@163.com。

Fish language, a finite difference model which can simulate different incident directions of seismic waves was established. The calculation results showed that different incident directions of seismic waves have a significant impact on the stress of structural joint.

Keywords: cross passage; finite element simulation; seismic response; incident direction

# 0 引言

随着国家战略的发展,城市化进程的推进,城市 地铁,地下管线等结构的建设日益加快。在我国各 大城市,地铁已经成为人们出行的主要方式之一。 由于传统的观点认为地下结构受周围土体约束,对 其抗震能力会有一定程度的提高作用,所以长期以 来,地下结构的抗震问题没有引起学者足够的重视。 1995 年阪神地震后地铁车站及区间隧道的严重破 坏给人们敲响了警钟<sup>[1-4]</sup>。目前国内尚未建立高烈 度地震区地下隧道的成套设计理论和技术,消能减 震结构研究较少,缺乏独立的设计规范<sup>[5]</sup>。《地下铁 道设计规范》<sup>[6]</sup>和《地铁设计规范》<sup>[7]</sup>对地铁的抗震 设计都只给出了原则性规定,其原因主要是研究工 作开展不够,对地下结构抗震设计方法缺乏系统 研究。

晏启祥等[8-9]以越江盾构隧道联络通道为工程 背景,采用快速有限差分法和自由场边界,分别施加 水平横向和纵向的加速度进行了动力分析。周海祚 等[10] 通过数值模拟手段研究了天津粉质黏土区地 铁车站与隧道连接处的地震响应。孔戈等[11-12]利用 三维动力有限元方法系统研究了不同的接头形式及 参数对联络通道抗震性能的影响及各种减震措施的 效果。张志强等[13]模拟研究了冻结法施工条件下 盾构隧道与联络通道的施工力学行为,分析了交叉 部位管片的受力情况。何悦等[14]开展了振动台模 型试验模拟盾构隧道与联络横通道的刚性连接方式 和柔性连接方式下的地震响应。地下结构的地震响 应与其周围土体的变形存在密切的关系,因此在隧 道结构在其刚度突变处,如隧道与联络通道的连接 处,容易在地震作用下产生应力集中现象,对隧道结 构造成破坏。因此隧道与联络通道结合处的地震响 应应该引起重视。

现有对隧道与联络通道连接处的研究主要关注 联络通道的施工方法,针对地震波特性和隧道结构 特性对其地震响应的机理性研究还比较缺乏。本文 分析了地震作用下隧道与联络通道连接处的薄弱部 位和连接处附近的应力情况。并探究了联络通道埋 深、长度、地震波入射角对连接处应力的影响。

## 2 数值分析模型的建立

### 2.1 模型建立过程及尺寸

本文使用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup>进行分析,以 典型双线并行隧道为研究对象,在两条隧道间建立 联络通道,模型示意图如图 1 所示。参考某越江隧 道工程实例,模型的隧道外径 10 m,隧道内径9 m, 埋深 18 m。联络通道为圆形截面隧道,外径4 m,内 径 3 m。模型整体 *x* 向,*y* 向,*z* 向的长度分别为 96 m,29 m,36 m。联络通道的中心点与主隧道的中 心点在同一水平面上,隧道及联络通道模型如图 2 所示。



留 2 随道结构示息图 Fig.2 Schematic graph of tunnel structure

由于 FLAC<sup>3D</sup>软件内置的网格不包含两圆柱相 交的情况。本文基于 fish 语言对其进行相应的二 次开发,实现精确建模。模型建立及网格细节如图 3 所示。此外,模型的单元尺寸需要根据施加地震 波的不同来确定合适的范围。如果单元尺寸过大, 则波动的高频部分难以通过。Kuhlemeyer 等<sup>[15]</sup>的 研究表明,要想精确模拟模型中波的传播,模型网格 的尺寸必须小于输入地震波最高频率对应波长的 1/8。



图 3 建模过程示意图 Fig.3 Schematic graph of modelling process

数值模型分析包括两步<sup>[16]</sup>:第一步为静力分 析,地应力平衡;第二步为动力分析,在模型底部施 加地震波并进行动力计算。静力分析边界条件为: 固定模型底面,限制竖向和水平位移,模型两侧仅限 制水平方向位移,表面为自由边界。动力分析阶段: 固定模型底面,两侧为自由场边界。

#### 2.2 土体材料及模型参数

本文采用弹性模型来描述隧道结构及联络通道的力学特性。弹性模型由于其参数较少,形式简单, 所以被广泛运用于地下结构中混凝土等材料的模 拟<sup>[17]</sup>。本文中隧道模型的弹性模量为*E* = 3×10<sup>4</sup> MPa,泊松比为 0.2,密度为 2 600 kg/m<sup>3</sup>;土体采用 摩尔库伦模型。摩尔库伦模型是最通用的岩土工程 本构模型<sup>[18-20]</sup>。本文中土体的参数设置参考天津地 区典型粉质黏土<sup>[21]</sup>的情况。模型参数见表 1。

#### 2.3 地震荷载输入及材料阻尼

本文计算中采用正弦波作为地震荷载分析,峰

Table 1	Parameters of finite element model		
土体模型参数		结构模型参数	
土体重度	19.7 $kN/m^3$	结构重度	26 kN/m <sup>3</sup>
体积模量	$6.23 \times 10^7$ Pa	弹性模量	$3 \times 10^{10}$ Pa
剪切模量	$3.74 \times 10^7$ Pa	洎松比	0.2
内摩擦角	10°		
黏粘聚力	29 kPa		

表 1 有限元模型参数

值加速度为 0.3g, 频率为 10 Hz, 施加于模型底面。 为探究地震响应规律并缩短分析运算时间, 地震波 持续时间取 5 s。

在计算中设置了局部阻尼。FLAC<sup>3D</sup>中,局部阻 尼的施加方式为:在振动循环中在节点上增加或者 减小质量。由于增加的质量和减小的质量相同,因 此整个系统质量守恒。

当节点速度符号改变时,质量增加,当速度达到 最大值或者最小值时,质量减少。因此损失的能量  $\Delta W$  是最大瞬时应变能 W 的一定比例( $\Delta W/W$ ),此 比例是率无关和加载频率无关的。 $\Delta W/W$  是临界 阻尼比 D 的函数:

$$\alpha_{\rm L} = \pi D \tag{1}$$

式中: $\alpha_L$ 为局部阻尼系数;D为临界阻尼比,本文中 阻尼比选取为 5%<sup>[22]</sup>,因此局部阻尼系数设置为 0.157 1(=0.05 $\pi$ )。

# 3 连接处地震响应分析

#### 3.1 连接处应力集中分析

为分析联络通道的设置对主隧道应力集中情况 的影响,首先对比了有无联络通道两种情况下结构 的最大主应力,如图4所示。从图中可以看出,在结 合部位发生了明显的应力集中[图4(b)],其最大主 应力值约为无联络通道时的30倍。最危险位置出 现在结合部位的底部与侧部,因此在抗震分析中应 着重分析这两个部位。

# 3.2 隧道埋深对连接处应力的影响

对于地下结构的动力研究,结构的埋深是影响 其地震响应的一个重要因素。隧道埋深对连接处最 大主应力的影响如图 5 所示。图中远离连接处的点 与连接处的距离为 6 m。从图中可以看出,含联络 通道的双线隧道其连接处的最大主应力随着埋深的







Fig.5 Influence of buried depth on the maximum principal stress at the joint

增加呈现逐渐增大的趋势。一般来说,土体对地震 波有一定的吸收和缓冲的效果。随着埋深的增加, 结构与地震源之间的土层厚度也在减小,因而会造 成地震响应增大的结果。

#### 3.3 联络通道长度及直径对连接处应力的影响

为分析联络通道的设置对主隧道应力集中情况 的影响,还应考虑联络通道自身的尺寸问题。联络 通道的长度取决于主隧道之间的间距,与设计和施 工环节密切相关。联络通道长度对连接处最大主应 力的影响如图 6 所示。图中远离连接处的点与连接 处的距离为 6 m。从图中可以看出,随着联络通道 长度(主隧道间距)增加,最大主应力呈增大趋势。 联络通道长度的增加会造成隧道结构在连接处的刚 度不均匀性更大,应力集中现象会更加明显。



当隧道间距确定后,联络通道直径的不同也会



Fig.6 Influence of cross passage length on the maximum principal stress at the joint

影响连接处应力情况。隧道间距为 10 m 时,联络 通道直径对连接处最大主应力的影响如图 7 所示。 图中远离连接处的点与连接处的距离为 6 m。本文 对联络通道的直径做无量纲化处理,表示为联络通 道与主隧道直径比值的形式。从图中可以看出,随 着联络通道直径增加,最大主应力呈减小趋势。联 络通道直径的增加可在一定程度上减小隧道结构在 连接处的刚度不均匀性,在一定程度下减小应力集 中程度。



图 7 联络通道直径对连接处最大主应力的影响 Fig.7 Influence of cross passage diameter on the maximum principal stress at the joint

# 4 地震波入射方向对连接处地震响应的影响分析

# 4.1 模型的建立

在实际的工程灾害中,地震波的入射方向不确 定,地震波的入射角可能和隧道的横断面形成不同 的角度。但由于数值模拟方法的局限性,以往学者 在大多情况下只研究地震波入射方向垂直或平行于 隧道横断面的情况,或采用将两个方向地震波叠加 的方法来模拟地震波斜向入射的情况。本文利用 FLAC<sup>3D</sup>软件中的 fish 语言功能,创建了一种圆柱状 土体,并将地下结构与圆柱状土体整体转动特定的 角度,在地震波入射方向不变的情况下可以很好地 模拟地震波入射方向对地下结构地震响应的影响。 旋转 30 度后的模型整体示意图如图 8 所示。

### 4.2 入射角方向对连接处应力的影响

地震波与结构横断面夹角对连接处最大主应力 的影响如图 9 所示。图中远离连接处的点与连接处 的距离为 6 m。从图中可以看出,对于选取的三个 特征点,在地震波入射方向与隧道方向斜交(40°~60°)时,其应力的值最大。地震波与隧道横断面夹角0°或90°时,连接处应力状态属于单向拉压或纯 剪切状态为主的情况,在斜交情况下,连接处单元的 应力状态属于拉压和剪切共同作用状态,其最大主 应力值会相应增大。



图 8 旋转 30 度后的模型示意图

Fig.8 Schematic graph of the model after rotating 30°





Fig.9 Influence of the angle between incident direction and structure cross section on the maximum principal stress at the joint

通过观察地震后的隧道最大主应力云图(图 10)可以发现,当地震波入射方向与隧道横断面的夹 角在(30°~60°)时,联络通道的底部出现了条带状 的应力集中区。这说明当地震波入射方向不确定 时,联络通道的底部也应该是需要加强的部位。

# 4.3 入射角方向对隧道结构变形的影响

本文研究了不同地震波入射方向下隧道的变 形。通过监测主隧道及联络通道的拱顶、拱底位移 值来推算隧道在地震波斜向入射时的变形情况,隧 道变形参量如图 11 所示。图中α表示隧道整体相 较于水平面发生的倾斜。β表示两条主隧道间发生 的相对扭转。隧道在不同地震波入射方向下的变形 如图 12 所示。结构下方的角度表示地震波入射方 向与隧道横断面的夹角。其中隧道轴向垂直纸面方 向的情况为 0°,隧道轴向平行纸面方向的情况为 90°。为表示清楚,图中的变形放大了 20 倍。从图 中可以看出,随着地震波入射方向与隧道横断面的 夹角的增加,隧道结构的变形形式也会发生变化。 夹角小于 15°时,隧道结构的变形形式从倾斜为主 转向扭转为主。当夹角超过 60°后,隧道结构的倾 斜变形和扭转变形都逐渐减小。



- 图 10 地震波与隧道横断面夹角对主应力云图的影响
- Fig.10 Influence of the angle between incident direction and tunnel cross section on the maximum principal stress contour



Fig.11 Schematic diagram of tunnel deformation parameters

## 5 结论

本文建立了有限差分模型,研究了隧道与联络 通道连接处的地震响应,分析了地震作用下隧道与 联络通道连接处的薄弱部位,探究了地震波入射角、 埋深、联络通道长度对连接处应力的影响。通过分 析数值模拟的结果,可以得出以下结论:

(1)对比同一双线并行隧道在有无联络通道下的最大主应力云图,可以看出联络通道的存在对主隧道结构的安全性非常不利。在隧道与联络通道连

郭知一,等:隧道与联络通道连接处地震响应分析

接处会出现明显的应力集中。主隧道应力最大的位 在结合处的上下两侧。在设计和施工时应当重点关 置在结合处的前后两侧,联络通道应力最大的位置 注这些位置。 (a)  $0^{\circ}$ (b) 15° (c) 30°  $\alpha = 0.42^{\circ} \beta = -0.1^{\circ}$ α=0.39° β=0.01° α=0.31° β=0.41° (f) 75° (d) 45° (e) 60° (g) 90° α=0.12° β=0.63° α=0.02° β=0.58° α=0.01° β=0.22°  $\alpha=0^{\circ}\beta=0.01^{\circ}$ 

图 12 地震波不同入射方向的模型变形示意图

Fig.12 Schematic diagram of model deformation under seismic waves in different incident directions

(2)随着隧道埋深的增加,连接处的最大主应 力呈上升趋势。造成这种情况的原因为结构与地震 源之间的土层厚度减小,使得土体对地震波的缓冲 和吸收作用降低。

(3)联络通道作为两条主隧道的连接结构造成 了主隧道结构的刚度不均匀性。联络通道越长越 细,这种不均匀性就会越大。数值模拟的计算结果 表明,联络通道在满足条件的情况下要尽可能短而 粗,这样可以减小连接处的最大应力。

(4) 地震波的入射方向会对地下结构的地震响 应产生显著的影响。在地震波与隧道斜交时,联络 通道与隧道连接处的应力最大,且在联络通道底部 会形成应力集中条带。随着地震波入射方向与隧道 横断面夹角角度的变化,隧道结构的变形形式也会 发生变化。进行抗震设计时,需要考虑最不利的情 况。即分析地震波入射方向与隧道横断面夹角为 45°左右时的地震响应。

#### 参考文献(References)

[1] 陈国兴,陈苏,杜修力,等.城市地下结构抗震研究进展[J].防 灾减灾工程学报,2016,36(1):1-23.

CHEN Guoxing, CHEN Su, DU Xiuli, et al. Review of seismic damage, model test, available design and analysis methods of urban underground structures: retrospect and prospect [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(1): 1-23.

[2] 王雪剑,庄海洋,陈国兴,等.地下连续墙对叠合墙式地铁车站
 结构地震反应的影响研究[J].岩土工程学报,2017,39(8):
 1435-1443.

WANG Xuejian, ZHUANG Haiyang, CHEN Guoxing, et al. Effect of diaphragm wall on earthquake responses of an underground subway station[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(8):1435-1443.

- [3] IIDA H, HIROTO T, YOSHIDA N, et al. Damage to Daikai subway station[J]. Soils and Foundations, 1996, 36:283-300.
- [4] 杜修力,李洋,许成顺,等.1995年日本阪神地震大开地铁车站 震害原因及成灾机理分析研究进展[J].岩土工程学报,2018, 40(2):223-236.

DU Xiuli, LI Yang, XU Chengshun, et al. Review on damage causes and disaster mechanism of Daikai subway station during 1995 Osaka—Kobe Earthquake[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 223-236.

 [5] 李彬.地铁地下结构抗震理论分析与应用研究[D].北京:清华 大学,2005.
 LI Bin. Theoretical analysis of seismic response of underground

subway structures and its application [D]. Beijing: Tsinghua University,2005.

- [6] 中华人民共和国建设部.地下铁道设计规范:GB 50157-1992 [S].北京:建筑工业出版社,1992.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中华人民共和国 建设部.地铁设计规范:GB 50157—2003[S].北京:中国标准出 版社,2003.

Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2003[S].Beijing: Standards Press of China, 2003.

[8] 晏启祥,陈诚,黄希,等.盾构隧道与横通道交叉结构的列车振 动响应特性分析[J].土木工程学报,2015,48(增刊1):228-235.

YAN Qixiang, CHEN Cheng, HUANG Xi, et al. Analysis on vibration response characteristics of cross structure between shield tunnels and cross passage induced by the train[J].China Civil Engineering Journal,2015,48(Suppl01):228-235.

[9] 晏启祥,何川,耿萍.盾构隧道联络通道的地震响应分析[J].现 代隧道技术,2008,45(增刊1):159-164.

YAN Qixiang, HE Chuan, GENG Ping. Seismic response

analysis of cross passages of shield tunnels[J].Modern Tunnelling Technology,2008,45(Suppl01):159-164.

[10] 周海祚,郑刚,李笑穹,等.软土地铁结构非线性地震反应分析 [J].天津大学学报,2016,49(4):361-368.

ZHOU Haizuo, ZHENG Gang, LI Xiaoqiong, et al. Nonlinear seismic responses analysis of subway structure in soft soil[J]. Journal of Tianjin University, 2016, 49(4); 361-368.

[11] 孔戈.盾构隧道地震响应分析及抗减震措施研究[D].上海:同 济大学,2007.

> KONG Ge.Study on seismic response analysis and shock absorption measures of shield tunnel[D].Shanghai:Tongji University,2007.

- [12] 徐建平,周健,孔戈.接头形式对联络通道抗震性能影响的研究[J].工程抗震与加固改造,2008,30(2):57-61,47.
   XU Jianping,ZHOU Jian,KONG Ge.Study on the influence of the type of joints on seismic behavior of connectional passages[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008,30(2):57-61,47.
- [13] 张志强,何川.用冻结法修建地铁联络通道施工力学研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(18):3211-3217.
  ZHANG Zhiqiang, HE Chuan.Study on construction of cross connection of shield tunnel and connecting aisle by freezing method[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(18):3211-3217.
- [14] 何悦,何川,耿萍,等.盾构隧道联络横通道地震响应振动台试 验[J].中国公路学报,2017,30(8):193-200.

HE Yue, HE Chuan, GENG Ping, et al. Shaking table test on seismic response of structure at shield tunnel and transverse passage[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8):193-200.

- [15] KUHLEMEYER R L.LYSMER J.Finite element method accuracy for wave propagation problems[J].Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,1973,99(5):421-427.
- [16] ITASCA CONSULTING GROUP.FLAC<sup>3D</sup>-Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions; Ver. 5.0 User's Guide [M].Minneapolis:Itasca;2012.
- [17] 张波.地铁车站地震破坏机理及密贴组合结构的地震响应研究[D].北京:北京工业大学,2012.
   ZHANG Bo. Study on seismic failure mechanism of subway

station and the seismic response of closely-attached subway structures [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012.

- [18] SUN Q Q.DIAS D.Significance of Rayleigh damping in nonlinear numerical seismic analysis of tunnels[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 115, 489-494.
- [19] ALSALEH H.SHAHROUR I.Influence of plasticity on the seismic soil-micropiles-structure interaction[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29(3):574-578.
- [20] GHANDIL M, BEHNAMFAR F. The near-field method for dynamic analysis of structures on soft soils including inelastic soil-structure interaction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 75:1-17.
- [21] 郑刚,张涛,程雪松,等.天津地铁车站基坑立柱回弹的实测统 计分析[J].岩土力学,2017,38(增刊1):387-394.
  ZHENG Gang,ZHANG Tao,CHENG Xuesong, et al.Statistical analysis of measured data of center post upheaval in metro station excavations in Tianjin[J].Rock and Soil Mechanics, 2017,38(Suppl01):387-394.
- [22] ISHIHARA K.Soil behavior in earthquake engineering[M]. Oxford:Clarendon Press,1996.