DOI:10.16285/j.rsm.2012.08.025

文章编号：1000－7598 (2012) 08－2415－07

盾构隧道地震响应分析方法及工程应用

赵武胜[1]，何先志[2]，陈卫忠[1]，杨建平[1]，王 辉[1]，袁敬强[1]

（1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩石力学与工程国家重点实验室，武汉 430071；2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司，武汉 430056）

摘 要：盾构隧道在地震作用下可发生接头螺栓剪断、管片开裂、管片端部混凝土脱落、大变形及错台等震害，将影响隧道的安全与正常使用，因此，建立合理的分析模型与计算方法来研究隧道可能的震害具有重要的工程防震减灾意义。采用嵌入梁单元模拟接头，厚壳单元模拟管片，无限元作为动力人工边界，同时在管片之间及管片与地层间设置非连续接触关系，更好地模拟了管片厚度方向应力及管片与地层间的相互作用，建立了厚壳-接触-无限元地震响应分析模型。并将该模型运用于某大直径越江盾构隧道的抗震分析中，计算结果与盾构隧道震害特征较为吻合，表明该模型可反映盾构隧道的真实地震动响应。并应用该模型分析了壁后注浆层材料参数及结构与土体相互作用对管片动力响应的影响。所建模型对于研究盾构或 TBM 施工隧道的震害分析具有很好的推广价值。

关 键 词：盾构隧道；管片；接头；地震响应；相互作用；接触；无限元；壁后注浆

中图分类号：P 65 **文献标识码**：A

Method for analyzing seismic response of shield tunnel and its application

ZHAO Wu-sheng[1]，HE Xian-zhi[2]，CHEN Wei-zhong[1]，YANG Jian-ping[1]，WANG Hui[1]，YUAN Jing-qiang[1]

（1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Second Highway Consultants Co., Ltd., China Communications Construction Corporation, Wuhan 430056, China）

Abstract: Seismic load can bring serious damage to shield tunnel. Reasonable seismic analysis of tunnel can help to reduce or avoid potential seismic hazard. So it is necessary to establish efficient model for seismic response of shield tunnel. Segment connectors are simulated by embedded beam elements, and segments are simulated by thick shell elements. At the same time, noncontinuous contact is built between segments and between segment and surrounding soil, which can better simulate stress in thickness direction and the interaction between segments. Thereby, the thick shell-contact-infinite element model for dynamic analysis of shield tunnel is built. Actual seismic disaster data and project results prove that the model has good accuracy. Finally, the model is used to analyze grouting material parameters and contact nonlinearity on the impact of seismic response of segments. This model has a good popularization value for seismic disaster analysis of shield tunnels or tunnels constructed by TBM.

Key words: shield tunnel; segment; connector; seismic response; interaction; contact; infinite elements; backwall grouting

1 引 言

由于盾构法隧道具有目标工期及工程造价可控性好、风险相对较小等优点，在国内外隧道工程中被广为采用。但盾构隧道存在大量连接缝，整体性差，抗震性能低于一般隧道。1985 年墨西哥 M8.1 级地震中，地下输水盾构隧道发生管环相对错位连接螺栓被剪断、管片端部混凝土脱落等震害；1995 年日本兵库县南部 M7.2 级地震中，部分盾构隧道管片接头破坏，接头附近混凝土破损出现裂缝发生漏水[1]。尤其对越江盾构隧道，其一般处于地下水位以下，防水要求很高，一旦经历地震作用发生类似震害，将会严重影响隧道的安全。因此，开展盾构隧道地震响应研究意义重大。

目前地下结构抗震分析手段主要有原位观测、模型试验及理论分析。由于地震的偶然性导致原位观测资料较少，而模型试验受到尺寸和相似比的限制又难以真实反映隧道地震响应。因此建立合理的理论分析模型及高效的计算方法成为地下结构抗震分析的重要内容。

对盾构隧道管片及接头的地震响应研究，目前多采用自由圆环模型、多铰圆环模型、梁-弹簧模

收稿日期：2011-04-08
基金项目：国家自然科学基金重大国际合作项目(No. 50720135906)；国家自然科学基金(No. 41072238，No. 51009133，No. 51004097)。
第一作者简介：赵武胜，男，1987 年生，博士研究生，主要从事隧道及地下结构抗震方面的研究工作。E-mail: zhaowusheng@yahoo.com.cn

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

型[2−3]、薄壳-弹簧模型[4−5]等。而这些模型大都将接头模拟成弹簧单元，难以模拟接头与管片的相互作用；将管片模拟成梁或薄壳单元，难以模拟管片之间及管片与围岩土体间真实的相互作用；目前考虑隧道管片与围岩之间相互作用时，一般不考虑管片与围岩之间及管片之间的相对滑移与分离。而实际震害表明，在地震荷载作用下，尤其当管片与围岩力学性质差别较大时，可能出现接触非线性[6]。

本文采用梁单元模拟接头单元，并将梁单元嵌入实体厚壳中，反映了接头与管片间的相互作用；采用厚壳单元模拟管片，考虑管片间及管片与土体间的挤压与摩擦作用，分析了接触非线性对管片接头动力响应的影响；近似考虑了封顶块的楔形角度及错缝连接，采用无限元动力人工边界，建立了厚壳-接触-无限元盾构隧道动力分析模型。

2 计算模型

2.1 接头

管片连接螺栓为盾构隧道最易发生破坏的部位，接头在实际的受力过程中主要受拉与抗剪，抗弯与抗压性能则主要由管片间的相互挤压与摩擦来承担，且连接螺栓与管片可发生相互作用。均质圆环模型未考虑接头单元，梁-弹簧模型及薄壳-弹簧模型又将抗弯、抗剪性能集中在接头上，与实际管片接头受力有较大差异[7]。采用梁单元模拟接头，并将梁单元嵌入到管片单元中，既可模拟接头的抗拉、压、剪力学性质，也可模拟接头与管片之间的相互作用。

2.2 管片

通常采用梁或薄壳单元模拟管片，但梁单元及薄壳单元不能很好地模拟管片之间相互作用。薄壳理论是建立在基尔霍夫－乐甫假设（当结构厚度方向的尺寸远小于其他方向，并忽略厚度方向的应力）的基础之上的，而盾构隧道管片的厚度与幅宽之比一般稍大于 1/5，不能满足上述假设，同时管片厚度方向的应力也不宜忽略，因此，管片宜使用厚壳单元进行模拟（见图 1）。采用厚壳单元具有以下优点：

（1）采用厚壳单元可以考虑管片厚度及横向剪切应力及剪切应变。

（2）厚壳单元未引入常规壳单元中的转动自由度，因此，可方便地与实体单元连接，更好模拟管片与围岩之间的相互作用。同时对于描述动力作用下包括大转动在内的大位移问题较薄壳单元更适合。

（3）由于以上两点，在模拟管片之间接触关系时，厚壳单元考虑了双面接触中厚度的变化，厚壳单元比薄壳单元更精确。

（4）与采用实体单元相比，采用厚壳单元可以通过节点局部坐标系确定厚壳单元的厚度方向、环向、轴向，能很方便地分析管片轴向、径向、环向轴力及弯矩。厚壳单元相应的单元的轴力及弯距定义为

$$(SF1,\ SF2,\ SF3,\ SF4,\ SF5,\ SF6) = \int_{-h/2}^{h/2}(\sigma_{11},\ \sigma_{22},\ \sigma_{12},\ \sigma_{13},\ \sigma_{23},\ \sigma_{33})\mathrm{d}z \tag{1}$$

式中：$SF1$、$SF2$、$SF6$ 为厚壳单元局部坐标系中 3 个主方向的轴力；$SF3$、$SF4$、$SF5$ 为厚壳单元局部坐标系中 3 个主方向的剪力；h 为单元厚度；σ_{11}、σ_{22}、σ_{12}、σ_{13}、σ_{23}、σ_{33} 为单元的应力；z 为单元厚度方向坐标。

$$(SM1, SM2, SM3) = \int_{-h/2}^{h/2}(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12})z\mathrm{d}z \tag{2}$$

式中：$SM1$、$SM2$、$SM3$ 为单元关于局部坐标系 3 个主方向的弯矩。

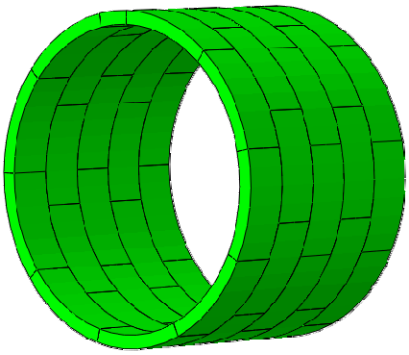

图 1 盾构隧道管片有限元模型

Fig.1 Finite element model of segments of shield tunnel

2.3 人工边界

地震波传播至地下结构及介质发生变化处均会发生散射，当传播至地表面处又会发生反射。如在模型侧边及底边采用简单固定边界，地震波的散射波及反射波传播至人为划割的边界时会发生反射，这与实际地震波的传播过程不符，为了消除这种非真实反射波，需引入人工吸收边界，本文采用无限元动力人工边界。

（1）无限元作为一种常用的人工边界，它可模拟远场对地震波的吸收。

在边界地基为弹性及地震波为平面波的假定下，由虎克定律[8]可得

$$\sigma = \rho c v \tag{3}$$

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中：σ 为地震波在无限弹性介质中产生的应力；ρ 为介质密度；c 为地震波速，压缩波对应 c_p，剪切波对应 c_s；v 为地震波引起质点的振动速度，压缩波对应 v_p，剪切波对应 v_s。

无限元阻尼力定义为

$$\sigma_{damp} = -dv \tag{4}$$

式中：σ_{damp} 为无限元阻尼力；d 为无限元阻尼常数，压缩波对应 d_p，剪切波对应 d_s。

对压缩波、剪切波引入无限元阻尼常数：

$$d_p = \frac{\lambda + 2G}{v_p} = \rho c_p \tag{5}$$

式中：λ，G 为弹性常数。

$$d_s = \rho c_s \tag{6}$$

由式（4）～（6）代入式（3）可得

$$\sigma + \sigma_{damp} = 0 \tag{7}$$

因此，引入以上无限元阻尼常数，无限元就可以充当吸收边界，吸收传向远场的地震波。

（2）无限元远端节点处位移默认为 0，从而可模拟远场地基初始地应力及无穷远处位移为 0 的边界条件。有限元-无限元耦合计算模型如图 2 所示。

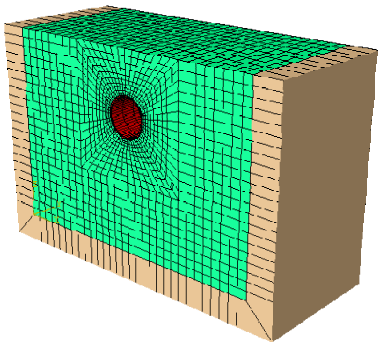

图 2　有限元计算模型

Fig.2　Computational model of shield tunnel

3　管片与土体及管片间的相互作用

实际观测资料表明，在地震荷载作用下，特别是在围岩与管片力学性质差别较大时，会出现相对滑移和分离，即接触的非线性。同时，小泉[1]通过隧道横向反应的振动试验得出，由于地基位移和环向剪切力产生的断面内力，比率约为 1：1，因此，进行盾构隧道横断面的抗震研究时，环向剪切力不可忽略。而能同时考虑管片围岩的接触非线性及环向剪切应力最有效的方式是建立起管片-管片、管片-土体间的接触非连续模型。

3.1　接触面法向力与位移关系

接触面法向力与位移关系采用惩罚刚度模型：

$$\left.\begin{aligned} &p = 0,\ (h < 0) \\ &p > 0,\ (h = 0) \\ &p = f(k_{in}, h),\ (h > 0) \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

式中：P 为接触法向力；h 为嵌入量；k_{in} 为接触面嵌入惩罚刚度；f 为惩罚函数。

事实上，管片之间及管片与土体之间相互接触过程中不存在相互穿透的情况，但数值计算中不可避免会出现接触面之间的穿透，如图 3 所示，考虑法向接触力与接触面穿透量之间采用指数形式的惩罚函数关系。接触面穿透量可通过接触法向刚度及最大允许过盈量来控制。

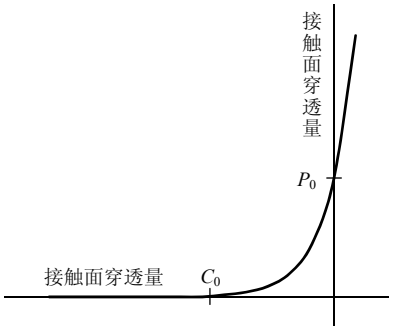

图 3　接触面法向力-位移关系

Fig.3　Relationship between force and displacement on contact surface

3.2　接触面切向力与位移关系

接触面切向力与位移关系采用Coulomb摩擦模型，接触面等效摩擦应力为

$$\tau_{eq} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} \tag{9}$$

式中：τ_1、τ_2 为摩擦面内两垂直方向剪切应力。

临界剪切应力为

$$\tau_{crit} = \mu p \tag{10}$$

式中：μ 为摩擦系数。

对于摩擦系数 μ，经验数据表明，静摩擦系数与动摩擦系数不同，两者近似满足以下指数关系：

$$\mu = \mu_k + (\mu_s - \mu_k)e^{-d_c \dot{\gamma}_{eq}} \tag{11}$$

式中：μ_k 为动摩擦系数；μ_s 为静摩擦系数；d_c 为折减系数；$\dot{\gamma}_{eq}$ 滑动应变率。

相对滑移发生条件：

当 $\tau_{eq} \geqslant \tau_{crit}$ 时则发生相对滑移；

当 $\tau_{eq} < \tau_{crit}$ 时则不发生相对滑移。

各方向的滑移速度由下式确定：

$$\frac{\tau_i}{\tau_{eq}} = \frac{\gamma_i}{\gamma_{eq}} \tag{12}$$

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中：τ_i 为 i 方向的剪切应力；γ_i 为 i 方向剪切滑移速度；γ_{eq} 为总的剪切滑移速度。

3.3 计算方法

有限元软件 ABAQUS 中的显示动力分析方法[9]对爆炸、冲击、高速动力等非线性问题十分有效且具有强健的接触功能甚至能够解决最复杂的接触模拟。采用该分析方法可以迅速建立起复杂的接触关系且可解决其他计算方法耗时过长等问题，从而使该模型进行动力分析简单且实用。

4 工程应用

4.1 场地基本资料

某越江隧道为双线双层八车道，工程场地存在 6 条大的破碎带及 4 条小型破碎带，近场区遭遇 6.0 级以上地震 3 次。地震基本烈度为Ⅶ度，暂按Ⅷ度设防。根据地基土波速试验，场地 20m 为浅平均剪切波速约为 120 m/s，根据规范[10]，判定场地土类型为软弱土，建筑场地为Ⅲ类，场地特征周期为 0.45 s，场地所处的抗震地段为不利地段，地层计算参数见表 1。隧道最大设计水深约为 62 m，最小埋深约为 20 m。管片外径为 14.5 m。属于大直径、高水压穿越液化地层和破碎带的盾构隧道，进行抗震研究是必要的。

表 1 隧道穿越地层计算参数

Table 1 Computational parameters of soils of tunnel passing though

隧道穿越土层	压缩模量/MPa	重度/(kN/m^3)	c/kPa	摩擦角/(°)	泊松比	侧压力系数
黏土	3.89	18.3	15	12.3	0.39	0.65
淤泥质粉质黏土	3.51	18.1	16	13.6	0.42	0.72
粉细砂	13.80	19.3	1	34.4	0.29	0.40
粉细砂	14.44	19.5	1	34.0	0.27	0.37
中粗砂	14.83	20.7	0	35.0	0.26	0.35
砾砂	15.00	20.3	0	38.0	0.23	0.30
泥岩	2 133.00	24.0	800	45.0	0.15	0.18

4.2 管片基本参数

普通衬砌环由钢筋混凝土构成，混凝土强度等级为 C60。衬砌环分 10 块，具体分为 7 块标准块、2 块邻接块和 1 块封顶块。管片采用错缝连接，内径为 13.3 m，幅宽为 2 m，厚度为 60 cm。每个纵缝采用 3 根 M36 螺栓，环缝采用 42 根 M30 螺栓连接。

4.3 地震动输入

参照地震安评报告，场地设计地震动加速度按 100 a 基准期超越概率 2%的地震加速度取值，峰值加速度为 0.2 g，波形采用 1940 年美国帝国谷 EI-CENTRO 地震（南北向，震级为 M6.7，震中距为 9.3 km，最大加速度为 2.49 m/s^2，持续时间为 25 s）中的加速度时程作为输入地震动。并将 EI-CENTRO 波峰值等比例放大，从而得到 100 a 2%场地基岩设计加速度时程曲线（见图 4）。地震动输入分横向和竖向 2 个方向进行，竖向设计地震动峰值加速度取水平向的 2/3，采用底部输入方式。

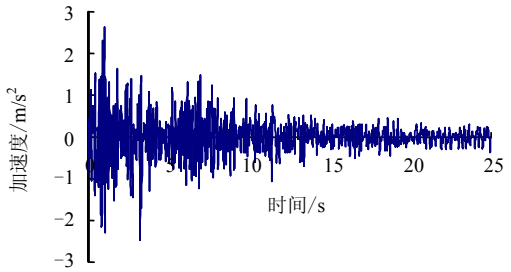

图 4 EI-CENTRO 地震加速度-时程曲线

Fig.4 EI-Centro earthquake acceleration history curve

4.4 计算结果

管片轴力、弯矩：地震荷载作用下，由于管片直径较大，埋深较浅，管片顶部与底部竖向压力差较大。环向轴力（见图 5）与弯矩（见图 6）沿厚度方向变化明显，环向拉伸轴力主要分布在拱顶和拱底的内侧及两侧拱腰的外侧。管片厚度方向轴力（图见 7）在管片连接缝处出现非连续性，且在管片接头处出现明显的应力集中现象。

管片变形：从放大 20 倍的变形图（见图 8）可以看出，在管片连接处，刚度发生突变，在地震荷载作用下导致环内接头两侧管片及环与环之间发生了相对滑移与分离现象。

接头轴力、剪力及弯矩：从图 9、10 可以看出，在管片连接处，接头轴力、剪力及弯矩较其他位置明显偏大。这是由于在管片接触处，管片刚度降低，在动力作用下连接缝两侧管片有相对错动的趋势，接头在此处受力较大，易发生剪断破坏。

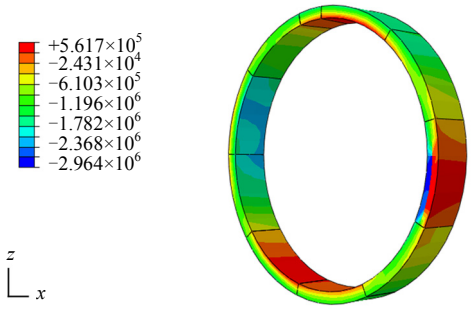

图 5 管片环向轴力（单位：N）

Fig.5 Axial force in circumferential direction (units: N)

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

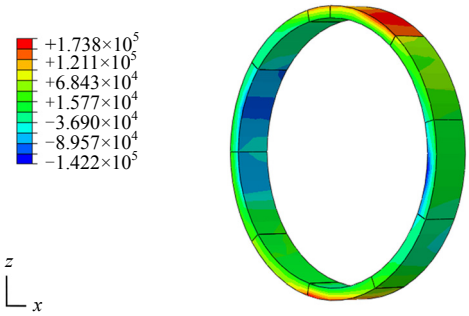

图 6　管片环向弯矩（单位：N・m）

Fig.6　Moment in thickness direction (units: N・m)

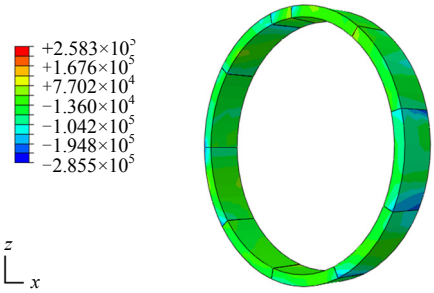

图 7　管片厚度方向轴力（单位：N）

Fig.7　Axial force in thickness direction (units: N)

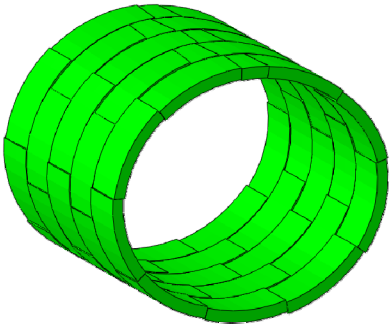

图 8　放大 20 倍管片变形

Fig.8　Segment deformation after 20 times magnification

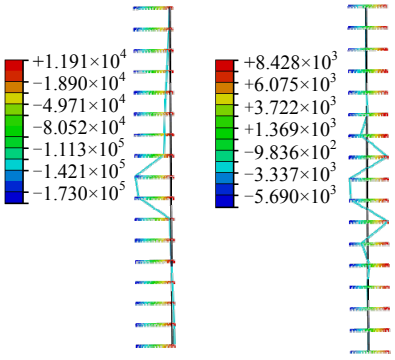

图 9 管片接头轴力与剪力（单位：N）

Fig.9　Axial force and shear force of connectors (units: N)

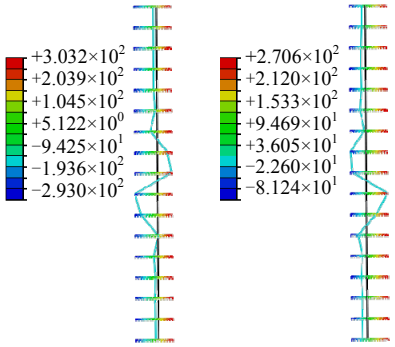

图 10　管片接头弯矩（单位：N・m）

Fig.10　Moment of segment connectors (units: N・m)

从轴力分析结果可以看出，管片在环内及环间接头处刚度发生突变，在地震荷载作用下发生应力集中现象，当应力达到一定值会发生管片剥皮破坏；同时从管片变形图可以看出，应力集中区刚度较小，地震荷载作用下连接缝两侧管片发生相对位移，如变形过大将引起管片漏水；正是由于管片的相对滑移，导致接头在管片连接缝处受力较大，管片的错动将会引起接头螺栓被剪断、接头处管片开裂等震害。上述计算结果与前言部分所述震害资料[1]相符，表明本文提出的模型能较好地模拟盾构隧道在地震作用下的受力破坏。

5　注浆层对管片动力响应影响

5.1　计算工况

盾构隧道壁后注浆层可尽早填充管片与土体之间的空隙，保证管片早期及后期的稳定性；控制地表变形、提高管片的防渗性[11]。为分析壁后注浆层材料参数及土体与衬砌接触非线性对管片动力响应的影响，设置以下 3 种工况。

工况Ⅰ：注浆层材料参数采用注浆层实际参数，考虑管片与土体接触面的相对滑移与分离。

工况Ⅱ：将注浆层材料参数提高至与管片材料参数相同，其余与工况Ⅰ相同。

工况Ⅲ：衬砌节点与注浆层节点位移耦合，不考虑管片与土体间的相对滑移及分离，其余与工况Ⅰ相同。

选取轴力及弯矩的控制单元作为监测单元进行不同工况下管片接头动力性能的对比。

5.2　各计算工况下节点相对位移

选择以下位移监测节点：拱顶外侧节点 4989、拱底外侧节点 3918、左拱腰外侧节点 5802、右侧拱腰外侧节点 14788。水平相对位移监测节点取 5802、14788，竖向相对位移监测节点取 4989、3918。各计算工况下节点相对位移见表 2。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 不同工况下监测节点相对位移

Table 2 Relative displacements between monitoring nodes under different conditions

工况	最大水平相对位移/m	最大竖直相对位移/m
Ⅰ	0.065 5	0.065 0
Ⅱ	0.056 5	0.056 5
Ⅲ	0.048 1	0.049 2

上述结果表明，管片与土体的接触非线性对管片节点相对位移影响较大；提高注浆层材料强度，管片监测节点间相对位移减小。

5.3 各计算工况下管片接头轴力与弯矩

选择管片一环内接头单元作为监测单元，分析不同工况下管片接头的动力反应。不同工况下接头轴力及弯矩见表 3。

表 3 不同工况下接头轴力及弯矩

Table 3 Axial forces and moments of segment connector under different conditions

工况	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(N·m)
Ⅰ	159.90	34.36	−89.55
Ⅱ	126.50	2.72	−77.50
Ⅲ	16.31	0.64	−4.38

上述结果表明，注浆材料强度的提高，管片接头轴力、剪力及弯矩减小；不考虑管片衬砌与土体间的接触非线性，接头轴力、剪力、弯矩明显减小。管片与土体的接触非线性对管片接头轴力、剪力及弯矩影响较大，

5.4 管片-土体接触非线性对管片动力响应的影响

考虑管片与土体间接触非线性后，管片受土体的约束作用变小，地震荷载作用下管片与土体发生了切向相对滑移和法向分离现象，管片之间在连接处的相对变形增大。管片轴力（见图 11，12）、弯矩（见图 13）、位移及接头轴力与弯矩（见表 3）均明显变大，因此，在地震荷载，尤其在强震作用下考虑管片与土体的接触非线性是必要的。

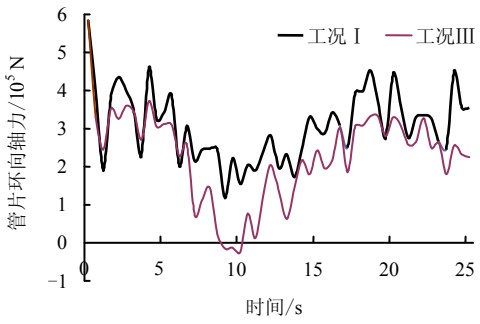

图 11 管片监测单元环向轴力时程曲线

Fig.11 Axial force history curves of monitoring element in circumferential direction of case I and III

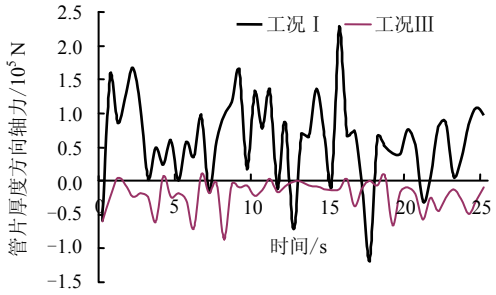

图 12 管片监测单元厚度方向轴力时程曲线

Fig.12 Axial force history curves of monitoring element in thickness direction of case I and III

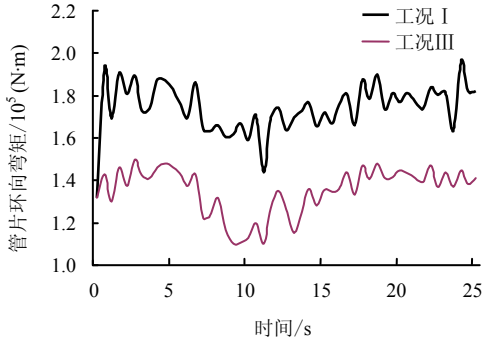

图 13 管片监测单元环向弯矩时程曲线

Fig.13 Moment history curves of monitoring element in circumferential direction of case I and III

5.5 注浆层材料参数对管片动力响应的影响

隧道注浆层材料强度的提高，注浆层对管片变形的约束增强，管片的整体性增强，管片轴力（见图 14，图 15）、弯矩（见图 16）及节点位移（见表 2）均有所降低，接头内力（见表 3）明显减小。事实上，提高注浆层参数在一定程度上相当于增加了衬砌厚度，从而验证了软土地层中设置抗震层的抗震效果。

因此，在保证注浆层活易性、流动性及填充度的前提下，通过改良注浆材料，适当提高注浆层的强度、黏聚力等措施不仅可以增强其防渗性及管片前期的稳定性，还将有利于提高隧道的抗震性能。

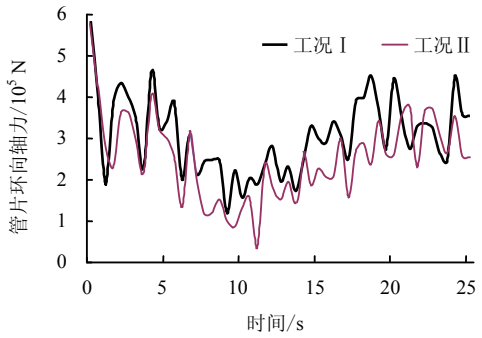

图 14 管片监测单元环向轴力时程曲线

Fig.14 Axial force history curves of monitoring element in circumferential direction of case I and II

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

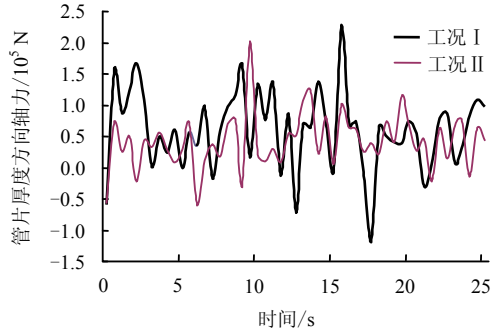

图 15　管片监测单元厚度方向轴力时程曲线

Fig.15　Axial force history curves of monitoring element in thickness direction of case I and II

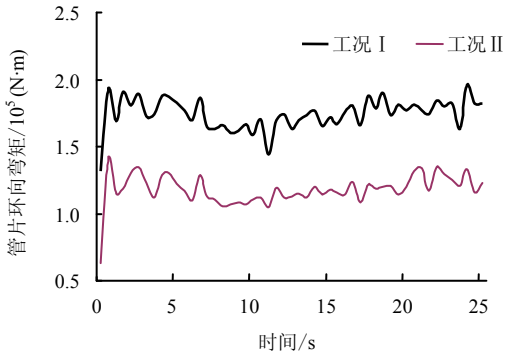

图 16　管片监测单元环向弯矩时程曲线

Fig.16　Moment history curves of monitoring element in circumferential direction of case I and II

6　结　论

（1）厚壳-接触-无限元动力分析模型及相应的计算方法可以考虑盾构隧道管片的非连续性、管片接头及错缝连接，可模拟管片间及管片与围岩间复杂的相互作用，工程实例分析结果与地震观测资料对比表明，该计算模型可反映盾构隧道管片、接头在地震荷载作用下受力破坏特征，可用于隧道洞口段、典型横断面及隧道纵向抗震分析，对于研究盾构或 TBM 施工隧道的震害分析具有很好的推广价值。

（2）提高壁后注浆层材料强度及土体与衬砌间的切向摩擦力可有效降低管片内力、位移及接头内力；土体与管片的接触非线性对管片、接头动力性能影响较大，在隧道穿越抗震不利地层时，盾构隧道抗震分析需考虑管片与土体间接触面的非线性。

（3）对软土地层中的盾构隧道而言，适当提高注浆层材料参数及注浆层厚度，增加土体与管片间的黏结力，减小管片与土体之间的相对滑动；在管片连接处合理设置弹性垫片、止水橡胶等措施缓解管片及接头应力集中，将有利于提高盾构隧道抗震性能。

参 考 文 献

[1]　小泉淳. 盾构隧道的抗震研究及算例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

[2]　侯公羽, 杨悦, 刘波. 盾构管片接头模型的改进及管片内力的数值计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 4284－4286.
HOU Gong-yu, YANG Yue, LIU Bo. Improved joint model of shield tunnel segments and numerical calculation of inner forces[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.2): 4284－4286.

[3]　官林星, 朱合华, 于宁. 考虑荷载工况组合的盾构衬砌横向受力分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1302－1306.
GUAN Lin-xing, ZHU He-hua, YU Ning. Analysis of internal force of shield lining in cross-section considering load combination[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(8): 1302－1306.

[4]　张建刚, 何川, 杨征. 大断面宽幅盾构管片三维内力分布分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2058－2062.
ZHANG Jian-gang, HE Chuan, YANG Zheng. Analysis of 3D internal forces distribution of wide segment lining for large-section shield tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 2058－2062.

[5]　张建刚, 何川, 杨征. 武汉长江隧道管片衬砌结构受幅宽影响的力学分布特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 3764－3768.
ZHANG Jian-gang, HE Chuan, YANG Zheng. Study of mechanical distribution characteristic of lining structure influenced by segment width for Wuhan Yangtze River tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.2): 3764－3768.

[6]　CHOI JUN SEONG, LEE JONG SEH, MEMBER ASCE, et al. Nonlinear earthquake response analysis of 2-D underground structures with soil-structure interaction including separation and sliding at interface[C]//15th ASCE Engineering Mechanic conference. New York: Columbia, 2002: 1－8.

[7]　苏宗贤, 何川. 盾构隧道管片衬砌内力分析的壳-弹簧-接触模型及其应用[J]. 工程力学, 2007, 24(10): 131－136.
SU Zong-xian, HE Chuan. Shell-spring-contact model for shield tunnel segmental lining analysis and its application[J]. **Engineering Mechanics**, 2007, 24(10): 131－136.

[8]　周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.

[9]　黄胜, 陈卫忠, 杨建平. 地下工程地震动力响应及抗震研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 483－490.
HUANG Sheng, CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, et al. Research on earthquake-induced dynamic responses and aseismic measures for underground engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(3): 0483－0490.

[10]　中华人民共和国住房与城乡建设部. GB 50011－2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[11]　罗超红, 付亚伟. 盾构壁后充填注浆材料分析[J]. 公路与汽运, 2007, (5): 176－178.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net