

DOI: 10.11779/CJGE20220315

穿断层分段柔性接头隧道纵向地震响应解析解

禹海涛¹, 卫一博²

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 地震发生伴随的断层错动是穿断层隧道灾变防控的重点和难点, 目前比较有效的措施是通过设置柔性接头来适应断层的错动, 但是对于柔性接头隧道的分段设计和参数取值缺少理论依据。以穿断层分段柔性接头隧道为研究对象, 将分段隧道简化成有限长梁, 隧道接头简化为剪切和弯曲弹簧元件, 围岩简化为 Pasternak 双参数地基。为了合理考虑断层场地的不连续性, 将断层带及上、下盘的非连续位移场等效为荷载施加在隧道梁上。基于建立的控制方程及边界条件, 推导出分段柔性接头隧道在断层错动作用下的纵向地震响应解析解。通过与相同计算条件下的模型试验和数值计算结果对比分析, 验证了解析方法的正确性。最后应用解析解对穿断层分段柔性接头隧道设计的关键参数进行敏感性分析, 揭示了分段柔性接头布置方式和隧道本体-接头刚度比等因素对隧道结构内力响应的影响规律。结果表明: 设置柔性接头可有效降低断层带影响区域内隧道结构纵向的内力响应, 且柔性接头数量越多, 隧道结构内力响应越小, 若将柔性接头分别布置于断层错动面、断层与上/下盘交界面处, 可以显著降低隧道结构的内力响应; 而通过调整接头刚度来增大隧道本体-接头刚度比可以进一步降低隧道结构的内力响应。研究可为穿断层隧道抗震分析与分段柔性接头设计提供理论依据。

关键词: 穿断层隧道; 断层错动; 分段柔性接头; 地震响应; 解析解

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)05-0912-09

作者简介: 禹海涛(1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事地下工程防灾减灾方面的研究工作。E-mail: yuhaitao@tongji.edu.cn。

Analytical solution for longitudinal seismic response of tunnels with segmental flexible joints crossing faults

YU Haitao¹, WEI Yibo²

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The seismic damage induced by fault dislocation is a long-standing problem in the disaster prevention and control of tunnels crossing faults. Setting segmental flexible joints is an effective aseismic measure in the engineering practices. At present, no analytical solutions are available for the design of segmental flexible joints. An analytical solution for longitudinal seismic response of tunnels with segmental flexible joints crossing faults is presented. For the derivation, the segmental tunnel is assumed as a finite Euler-Bernoulli beam on the Pasternak two-parameter foundation, and the tunnel joints are simplified as the shear and bending spring elements. The discontinuous displacement fields in the fault zone are simplified as the external loads exerted on the beam, which considers the discontinuity of the fault site. The analytical solution for the longitudinal seismic response of tunnels with segmental flexible joints under fault dislocation is derived based on the established governing equations and boundary conditions. The proposed solution is verified by comparing its results with those from the tests and FEM model. Finally, the sensitivity analysis is carried out to investigate the influences of the setting plans for segmental flexible joints and the tunnel-joint stiffness ratio on the response of internal force of tunnel structures. The results indicate that flexible joints can effectively reduce the response of longitudinal internal force of tunnel structures in the affected area by the fault dislocation, and the response of internal force of tunnel structures is effectively reduced with the increase of flexible joints. It is concluded that the response of internal force can be significantly reduced when the flexible joints are respectively arranged on the fault dislocation surface and the interface between the faults and the hanging wall/footwall. Besides, the response of internal force of tunnels can be further reduced by increasing the tunnel-joint stiffness ratio. The research may provide a theoretical basis for the seismic analysis and the design of

基金项目: 国家自然科学基金项目(41922059, 42177134); 中央高校基本科研业务费专项资金项目
收稿日期: 2022-03-22

tunnels with flexible joints crossing faults.

Key words: tunnel crossing fault; fault dislocation; segmental flexible joint; seismic response; analytical solution

0 引言

随着交通强国战略的持续推进,中国西部、西南部山岭地区涌现出大量的隧道工程,包括正在建设的川藏铁路工程。然而,这些地区断裂带众多、地震频发,隧道工程建设将不可避免地穿越既有活动断裂带。历史震害表明,强震伴随的断层错动会对穿断层隧道结构造成严重的破坏,如1999年中国台湾集集地震导致石坝岗引水隧道受断层错动作用发生整体剪断破坏^[1];2008年汶川地震中龙溪隧道穿断层区段产生约100 cm的错动变形,致使衬砌拱部坍塌、隧道完全丧失功能^[2]。由于地震作用下断层错动具有显著的强非连续性,因此穿断层隧道抗震设计需采取必要的工程措施以适应断层错动。

隧道设置变形缝的“铰接设计”是目前实际工程应用较为广泛的抗错断措施,例如土耳其的Bolu隧道^[3]、伊朗中部的Koohrang—III输水隧道^[4]。该方法的核心思想是通过将隧道分段并设置变形缝来提升隧道适应断层错动的变形能力,从而将断层错动作用限制在可控的范围内。模型试验是最为直观表征结构响应的分析方法之一,长大隧道试验技术的多样性发展也为穿断层隧道纵向地震响应分析打下了坚实的基础^[5-6]。刘学增等^[7]对铰接式隧道进行了拟静力试验,发现设置变形缝的隧道损伤明显轻于未设置变形缝隧道,验证了铰接式隧道适应断层错动的有效性。随后在“铰接设计”的基础上将变形缝替换为柔性接头,从而发展出“半铰接设计”的分段柔性接头隧道,如黄强兵等^[8]针对穿地裂缝地铁隧道,Melissianos等^[9]针对穿断层管道分别进行了拟静力试验研究,发现柔性接头能够有效避免应力集中,起到保护衬砌结构、适应地层不连续变形的作用;Yan等^[10]通过振动台试验验证了分段柔性接头隧道同时具有一定的抗震和抗错断能力。试验研究与工程实践均表明,分段柔性接头隧道具有良好的适应断层错动的性能,已在实际工程中推广应用,但是目前研究及工程设计并未对柔性接头隧道的分段设计及参数取值给出理论依据。

解析解因其简单、实用,在工程设计中备受青睐。学者们基于梁-弹簧模型推导出隧道纵向地震响应的解析公式。Yu等^[11]基于纵向反应位移法推导出土岩变化地层隧道结构纵向地震响应的解析表达式。刘国钊等^[12]基于弹性地基梁理论推导了穿断层隧道纵向响应的拟静力解析解,但该解析解忽略了隧道分段及接头的影响,且未合理表征断层场地变形的非连续特征。盾构隧道解析分析方法中通常以弹簧模拟管片接头的

作用。

本文针对穿断层隧道分段柔性接头设计及参数取值无可理论依据的现状,基于Pasternak双参数地基梁理论,建立了穿断层分段柔性接头隧道简化力学模型,通过求解微分控制方程及边界条件,推导出穿断层分段柔性接头隧道纵向地震响应的解析解,并基于有限元基准模型验证了该解答的有效性。应用本文给出的解析解分析了断层带宽度、分段柔性接头布置方式和隧道本体-接头刚度比等关键参数对隧道地震响应的影响规律,为分段柔性接头隧道设计提供了理论依据和快速简化分析方法。

1 模型与假定

不同类型地震断层(正/逆断层、走滑断层)的错动作用均可分解为沿隧道轴向的拉压作用和垂直于隧道轴向的剪切作用,而垂直于隧道轴向的断层剪切错动通常会导致隧道结构产生错台、坍塌等严重破坏,因此本文重点关注断层错动沿垂直于隧道轴线的剪切作用,忽略轴向拉压作用的影响。

通过分段设置柔性接头可以使隧道结构更好地适应断层错动产生的永久变形,即在断层错动影响范围内对隧道进行合理分段并以柔性接头相连。图1以任意倾角的逆断层带为例,呈现了分段柔性接头隧道在断层错动作用下的变形模式。

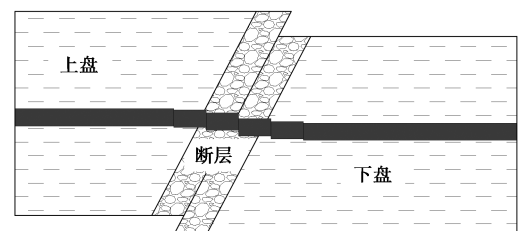


图1 分段柔性接头隧道示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tunnel with segmental flexible joints

为了得到分段柔性接头隧道在断层错动作用下的纵向响应解析解,建立相应的力学分析模型如图2所示。将穿越断层影响区隧道简化为分段的有限长欧拉梁,假设隧道分为 n 段,每段隧道的长度为 l_i ,如图2(a)所示,图中 $E_i I_i$, E_i 和 I_i 分别表示第 i 段隧道结构的抗弯刚度、弹性模量和截面惯性矩;地层简化为考虑剪切作用的Pasternak双参数地基;断层宽度为 D ,上盘、断层、下盘的地基弹簧系数分别表示为 k_1 , k_2 , k_3 ,对应的剪切模量分别表示为 G_1 , G_2 , G_3 。忽略断层错动产生的震动及惯性力效应,将断层的剪

切作用表示为施加在隧道结构上的分布荷载 $q(x)$ ，基于 Pasternak 双参数地基梁理论：

$$q(x) = ku \quad (1)$$

式中： k 为地基弹簧系数 (N/m^2)； u 为场地变形垂直于隧道轴向分量。

根据柔性接头的传力模式，将其简化为剪切和弯曲两种弹簧元件，见图 2 (b)，对应接头刚度分别表示为 K_y 、 K_φ 。

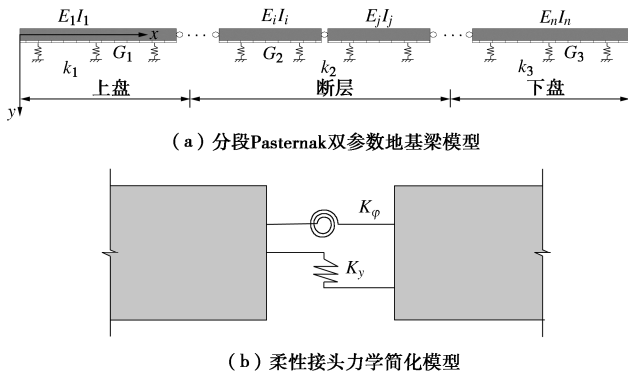


图 2 穿断层分段柔性接头隧道力学模型

Fig. 2 Mechanical model for tunnels with segmental flexible joints crossing faults

2 分段柔性接头隧道地震响应解析解

2.1 基本控制方程

由于分段柔性接头隧道可看作由一系列有限长欧拉梁组成的力学模型 (图 2)，故依据弹性地基梁理论，每段隧道均满足 Pasternak 双参数地基梁的挠曲线微分方程：

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + ky - G_s \frac{d^2 y}{dx^2} = q(x) \quad (2)$$

式中： y 为隧道位移 (m)； EI 为隧道的抗弯刚度 ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)； k 为地基弹簧系数 (N/m^2)； G_s 为地层剪切模量 (N)； $q(x)$ 为外部荷载 (N/m)。

地基弹簧及剪切层计算参数可表示为^[13-14]

$$k = 0.65 \left(\frac{E_s b}{EI} \right)^{0.0083} \frac{E_s b}{(1 - \nu_s)^2} \quad (3)$$

$$G_s = \frac{E_s H b}{6(1 + \nu_s)} \quad (4)$$

式中： E_s 为围岩弹性模量； ν_s 为围岩泊松比； H 为隧道埋深； b 隧道等效宽度。

有限长梁的任意边界条件可以表示为

$$\left. \begin{aligned} y_1''|_{x=0} &= B_1, \\ y_1^{(3)}|_{x=0} &= B_2, \\ y_n''|_{x=l_n} &= B_3, \\ y_n^{(3)}|_{x=l_n} &= B_4 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 为与边界条件相关的参数，如自由边界即为 $B_1 = B_2 = B_3 = B_4 = 0$ 。

初值条件表示为

$$\left. \begin{aligned} y|_{x=0} &= A_1, \\ y'|_{x=0} &= A_2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： A_1 、 A_2 为与初值条件相关的参数。

2.2 分段柔性接头隧道纵向响应解析解

通过自由场地分析可获得隧道埋深处垂直于隧道轴向的地层位移为 u ，那么每一分段隧道控制方程可以表示为

$$E_i I_i \frac{d^4 y_i}{dx^4} + ky_i - G_{si} \frac{d^2 y_i}{dx^2} = ku_i \quad (7)$$

对两端进行拉普拉斯变换，并考虑拉普拉斯变换的微分性质和问题的初值条件可得：

$$Y_i(\xi) = \frac{Q_i(x) + [\xi b_i(\xi) A_1 + b_i(\xi) A_2 + E_i I_i \xi B_1 + B_2]}{\xi^2 b_i(\xi) + k_i} \quad (8)$$

式中： A_{1i} 、 A_{2i} 、 B_{1i} 、 B_{2i} 为待定系数。

$$b_i(\xi) = E_i I_i \xi^2 - G_{si} \quad (9)$$

$$Y_i(\xi) = \int_0^{+\infty} e^{-\xi x} y_i dx \quad (10)$$

$$Q_i(x) = k \int_0^{+\infty} e^{-\xi x} u_i dx \quad (11)$$

再对式 (8) 进行拉普拉斯逆变换即可得到每一分段隧道位移响应解析解为

$$y(x) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\beta-j\infty}^{\beta+j\infty} \frac{Q(x) + [\xi b(\xi) A_1 + b(\xi) A_2 + EI \xi B_1 + B_2]}{\xi^2 b(\xi) + k} e^{\xi x} d\xi \quad (12)$$

基于有限长梁边界条件 (式 (8))，可获得各个接头处的内力连续方程和变形协调方程：

$$\left. \begin{aligned} E_i I_i y_i''|_{x=l_i} &= E_{i+1} I_{i+1} y_{i+1}''|_{x=0}, \\ E_i I_i y_i^{(3)}|_{x=l_i} &= E_{i+1} I_{i+1} y_{i+1}^{(3)}|_{x=0}, \\ y_i'|_{x=l_i} + \frac{1}{K_{\varphi i}} E_i I_i y_i''|_{x=l_i} &= y_{i+1}'|_{x=0}, \\ y_i|_{x=l_i} + \frac{1}{K_{yi}} E_i I_i y_i^{(3)}|_{x=l_i} &= y_{i+1}|_{x=0} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中： $i=1, 2, 3, \dots, n-1$ 。

根据式 (5)，(13)，求解多元线性方程组便可得到待定系数 A_{1i} 、 A_{2i} 、 B_{1i} 、 B_{2i} ，再代入式 (12)，即可得到每段梁的挠曲线方程，进而对方程求导得到每段梁的弯矩 M 和剪力 Q 表达式。

$$M_i(x) = \frac{E_i I_i}{2\pi j} \int_{\beta-j\infty}^{\beta+j\infty} \left\{ \frac{Q''(x) + 2\xi Q'(x) + \xi^2 Q(x)}{\xi^2 b_i(\xi) + k_i} + \right.$$

$$\left. \frac{[\xi b_i(\xi)A_1 + b_i(\xi)A_2 + E_i I_i \xi B_1 + B_2](1 + \xi)^2}{\xi^2 b_i(\xi) + k_i} \right\} e^{\xi x} \Bigg\} d\xi, \tag{14}$$
$$Q_i(x) = \frac{E_i I_i}{2\pi j} \int_{\beta-j\infty}^{\beta+j\infty} \left\{ \frac{Q_i'''(x) + 3\xi Q_i''(x) + 3\xi^2 Q_i'(x) + \xi^3 Q_i(x)}{\xi^2 b_i(\xi) + k_i} + \frac{[\xi b_i(\xi)A_1 + b_i(\xi)A_2 + E_i I_i \xi B_1 + B_2](1 + \xi)^3}{\xi^2 b_i(\xi) + k_i} \right\} e^{\xi x} d\xi. \tag{15}$$

此外,当接头刚度 K_y, K_ϕ 趋近于无穷大时,式(13)可退化为

$$\left. \begin{aligned} E_i I_i y_i'' \Big|_{x=l_i} &= E_{i+1} I_{i+1} y_{i+1}'' \Big|_{x=0}, \\ E_i I_i y_i^{(3)} \Big|_{x=l_i} &= E_{i+1} I_{i+1} y_{i+1}^{(3)} \Big|_{x=0}, \\ y_i' \Big|_{x=l_i} &= y_{i+1}' \Big|_{x=0}, \\ y_i \Big|_{x=l_i} &= y_{i+1} \Big|_{x=0}. \end{aligned} \right\} \tag{16}$$

求解式(16)即可得到穿断层无接头隧道纵向地震响应的解析解。

2.3 计算流程

针对上节推导出的任意分布荷载作用下分段柔性接头隧道位移和内力响应的解析表达式,图3给出了相应的具体求解流程。

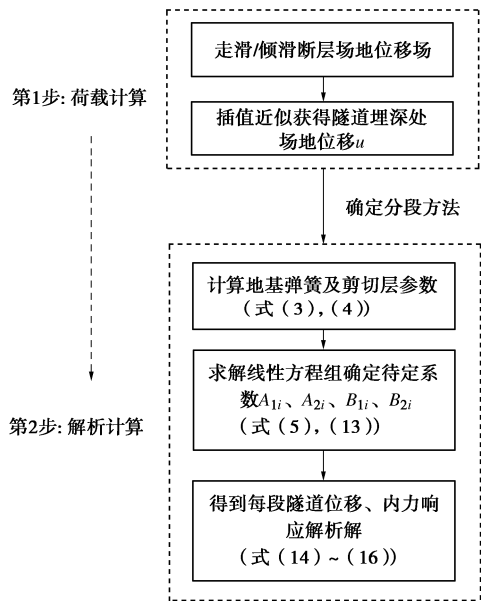


图3 解析方法计算流程

Fig. 3 Flow chart for analytical calculation

需要说明的是,本文解析解适用于任意断层场地位移分布形式 u ,具体应用可以依据断层类型通过自由场分析或者工程场地地震安全性评价报告来确定。

3 算例验证

本节给出具体算例来说明本文解析方法的计算流程,同时将解析解计算结果分别与相同计算条件下

数值模拟结果和已有模型试验数据进行对比,旨在验证本文简化模型的合理性和解析解的正确性。

3.1 与数值模拟的对比验证

假设某隧道工程穿越逆断层,隧道埋深 20 m,断层破碎带宽度 $W=10$ m,断层走向与隧道轴线正交,断层倾角 75° ,断层滑动面位于断层破碎带中央,上盘、下盘地质条件相同,断层错动量为 0.2 m。围岩和隧道的力学参数如表 1 所示。隧道结构断面抗弯刚度 $EI=2.5\times 10^9$ kN·m²。

表 1 算例验证计算参数

Table 1 Parameters for validation model

名称	密度/ (kg·m ⁻³)	杨氏模量/ GPa	剪切模量/ GPa	泊松比
断层	1700	0.94	0.34	0.38
围岩	2100	1.56	0.6	0.30
衬砌	2400	30	12	0.25

(1) 解析解计算过程

建立如图 4 所示的有限元模型计算断层位移场,采用平面应变单元模拟地层,采用摩擦接触模拟断层错动,摩擦系数取 0.6^[15]。下盘边界固定,在上盘边界施加平行于断层面的错动位移。可得到断层错动量为 0.2 m 时隧道埋深处的地层位移分布,如图 5 所示。代入式(1)计算便可得到断层错动作用的等效荷载。

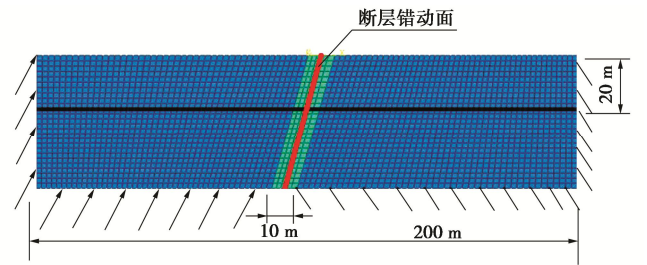


图 4 断层位移场有限元计算模型

Fig. 4 FEM model for determining field deformation of faults

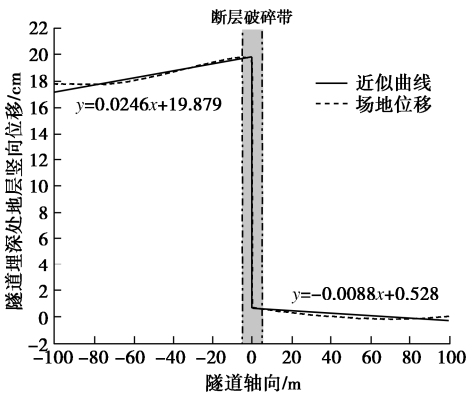


图 5 断层错动下隧道埋深处对应的自由场竖向位移

Fig. 5 Free-field vertical displacements at buried depth of tunnel under fault dislocation

通常依据断层破碎带与上、下盘交界面的位置可

以设计多种柔性接头布置方式,如图6所示,例如布置于断层带中心的单接头模式(方案B)、布置于断层带与上、下盘交界面上的双接头模式(方案C)、方案B与方案C混合应用的三接头模式(方案D)。另外,为了便于后续参数化对比分析,图6还给出了穿断层隧道的无接头模式(方案A)。

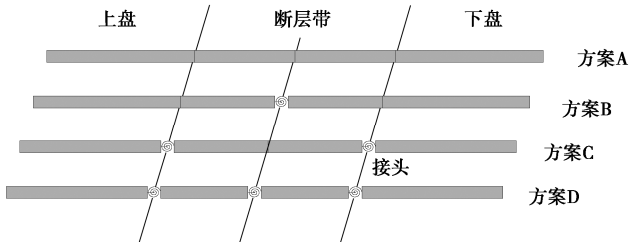


图6 柔性接头设计方案

Fig. 6 Schematic diagram of setting plans for flexible joints

限于篇幅,本验证算例选取方案D的接头设置模式,即在断层带中心、断层与上、下盘交界面处共布设3个柔性接头,且假设各接头的力学参数相同,即抗剪刚度 $K_j=1.4 \times 10^3$ kN/m,抗弯刚度 $K_\phi=2 \times 10^4$ kN·m。根据式(3),(4)可以确定解析解计算所需的上下盘地基系数 $k=3.05 \times 10^6$ kN/m²,剪切模量 $G_s=4 \times 10^6$ kN;断层破碎带地基系数 $k=1.51 \times 10^6$ kN/m²,剪切模量 $G_s=2.27 \times 10^6$ kN。将以上参数代入式(5),(14)求解线性方程组,便可得到分段柔性接头隧道的变形和内力响应。

(2) 与有限元数值结果对比验证

基于上述计算条件,采用荷载-结构法建立有限元数值模型对解析解进行验证。隧道纵向计算长度取200 m,共划分为200个欧拉梁单元,且各节点布设法向和切向地基弹簧,弹簧间距1 m。不同分段梁之间的柔性接头通过切向弹簧和弯曲弹簧元件模拟。

图7,8分别为基于有限元数值模拟和本文解析解所得的沿隧道轴线分布的结构竖向位移和弯矩响应。图中横坐标采用无量纲化的隧道轴线位置与断层带宽度比 x/W 表示。从图7,8中可见,两者分析结果基本一致,说明了本文解析解的正确性。

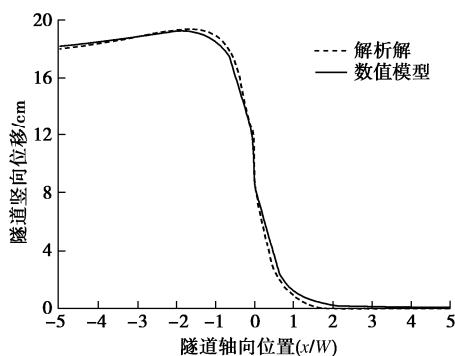


图7 不同计算方法隧道轴线偏移对比验证

Fig. 7 Comparison of deviations of tunnel axis by FEM model and analytical solution

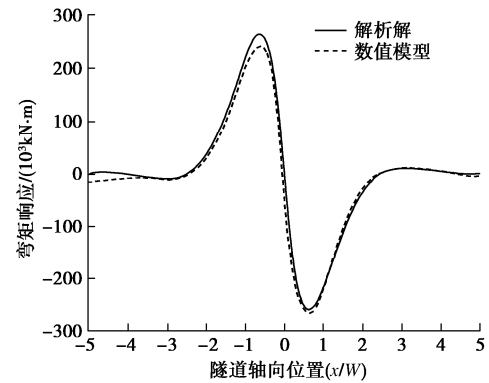


图8 不同计算方法隧道结构弯矩对比验证

Fig. 8 Comparison of bending moments along tunnel between FEM model and proposed solution

3.2 与模型试验的对比验证

为了进一步验证本文所提出的力学模型和解析解的合理性,与已有文献[16]中穿越正断层隧道模型试验的测试数据对比。该试验以剪切缝模拟断层,不计断层破碎带宽度,断层倾角为60°,断层错动面位于隧道模型中心,断层错动量为1.0 cm。隧道模型长度为5 m,断面为马蹄形断面,跨度为0.321 m,截面抗弯刚度 $EI=3.23 \times 10^2$ kN·m²;柔性接头采用橡胶圈模拟,以T形结构连接不同节段。隧道共设置15段,其中断层错动面附近#5—#11衬砌为7段24 cm长管节、两侧#2—#4、#12—#14衬砌分别为3段36 cm长管节,装置两头各设置有一段55 cm长管节。试验装置加载示意图9,隧道模型构造细节及装配分别如图10,11所示。

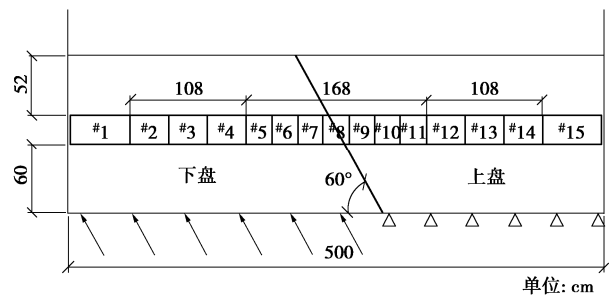


图9 试验加载原理示意图^[14]

Fig. 9 Schematic diagram of loading principle

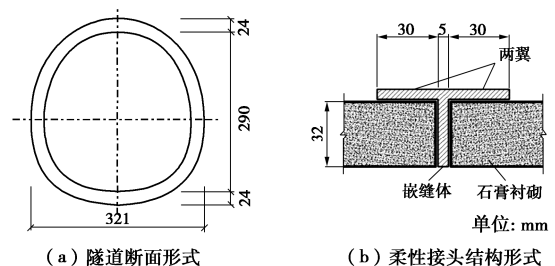


图10 隧道模型构造细节^[14]

Fig. 10 Details of tunnel plaster model

图 11 隧道模型装配^[15]

Fig. 11 Installation of tunnel plaster model

为了便于解析解的对比较证, 首先建立与试验模型相等效的力学模型, 将试验模型中管节长度相同的部分视为一个均匀连续长节段, 长节段之间用如图 11 所示的柔性接头相连^[17]。从而将试验模型等效为 5 个节段, 如图 12 所示, 其中节段 A—节段 E 长度分别为 55, 108, 168, 108, 55 cm。依据本节模型试验的隧道节段间距分布及接头构造特点, 从而确定隧道各节段模型的纵向等效刚度: 节段 A、节段 E 与试验模型一致即纵向刚度不需折减; 考虑接头作用等效后的节段 B、节段 D 的纵向刚度折减系数均为 0.6; 节段 C 的纵向刚度折减系数为 0.5。各节段之间采用柔性接头连接, 依据模型隧道及节段间橡胶圈参数, 可确定解析计算所需的接头抗弯刚度和抗剪刚度均为隧道节段本体刚度的 1/10。同样地, 根据模型试验中围岩模拟材料的力学参数, 确定解析计算所需地基系数 $k=5.04 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ 和剪切模量 $G_s=2.76 \times 10^2 \text{ kN}$ 。采用与模型试验相同的加载条件进行自由场分析可得到原试验模型在隧道埋深处的场地位移分布, 如图 12 所示。最后将以上参数代入 2.3 节的计算流程便可得到隧道结构的变形响应。

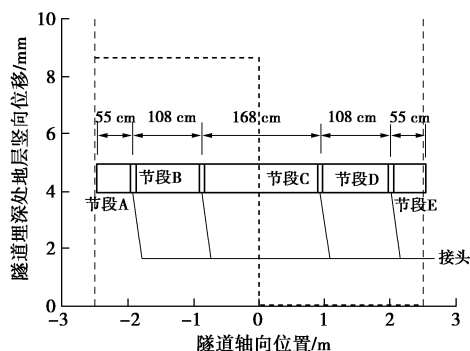


图 12 解析解计算等效模型

Fig. 12 Equivalent mechanical model for analytical solution

将试验测得的隧道拱顶和仰拱竖向位移的平均值作为隧道轴线的竖向位移, 进而与解析解计算得到的沿隧道轴线竖向位移进行对比, 如图 13 所示。从图中可以看出, 解析解计算结果与模型试验数据吻合较好, 进一步说明了本文解析解能够合理反映穿断层隧道的地震响应特性。

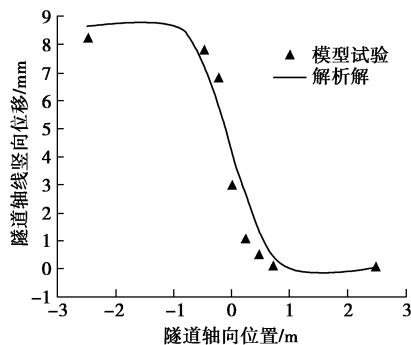


图 13 解析解与模型试验的隧道位移响应对比较证

Fig. 13 Verification of displacement responses of tunnel between analytical solutions and model tests

4 参数敏感性分析

解析解可以直观地反映各参数变化对计算结果的影响, 本节基于该解析解探究了柔性接头设置方案(数量、接头位置)、隧道本体-接头刚度比对分段柔性接头隧道纵向地震响应的影响规律。本节参数化分析均以 3.1 节算例为基础。

4.1 柔性接头隧道分段方案的影响

针对 3.1 节图 6 给出的 3 种柔性接头隧道分段设计方案(方案 B—单接头模式、方案 C—双接头模式和方案 D—混合三接头模式)进行对比分析, 研究隧道分段方案中接头数量和接头位置对隧道结构内力响应的影响规律, 不同分段方案的结果对比如图 14 所示。图中横坐标采用无量纲化的隧道轴线位置 x 和断层宽度 W 的比值来表示, 纵坐标为各分段方案隧道结构的内力响应(弯矩 M 、剪力 S)与无接头隧道(图 6 中方案 A)内力响应峰值($M_{0\max}$, $S_{0\max}$)的比值。

从中可以看出: 随着接头数量的增加(从单接头方案 B 到三接头方案 D), 隧道结构沿轴向的弯矩和剪力响应相比无接头隧道均有效降低, 说明分段柔性接头隧道可以通过适应断层错动来减小隧道响应, 这也进一步说明了分段柔性接头的设置对穿断层隧道抗震设计的重要性。相比方案 B, 方案 C 对应的上下盘与断层交界面处的隧道剪力响应显著降低, 但隧道整体的剪力响应峰值变化不大, 这与方案 C 的双接头布置位置基本一致。由此可见, 分段柔性接头隧道纵向响应的分布及减震效果与柔性接头的位置有关。

通过对比 3 种柔性接头分段方案的分析结果可知, 混合三接头模式(方案 D)结合了方案 B 和方案 C 接头布置的各自特点, 最大限度地降低了穿断层隧道结构纵向的内力响应, 即相比无接头方案(方案 A), 最大弯矩响应降低约 50%, 最大剪力响应降低约 40%。若以隧道结构内力响应为评价指标, 方案 D 是 3 种方

案中较为合理的设计方案。

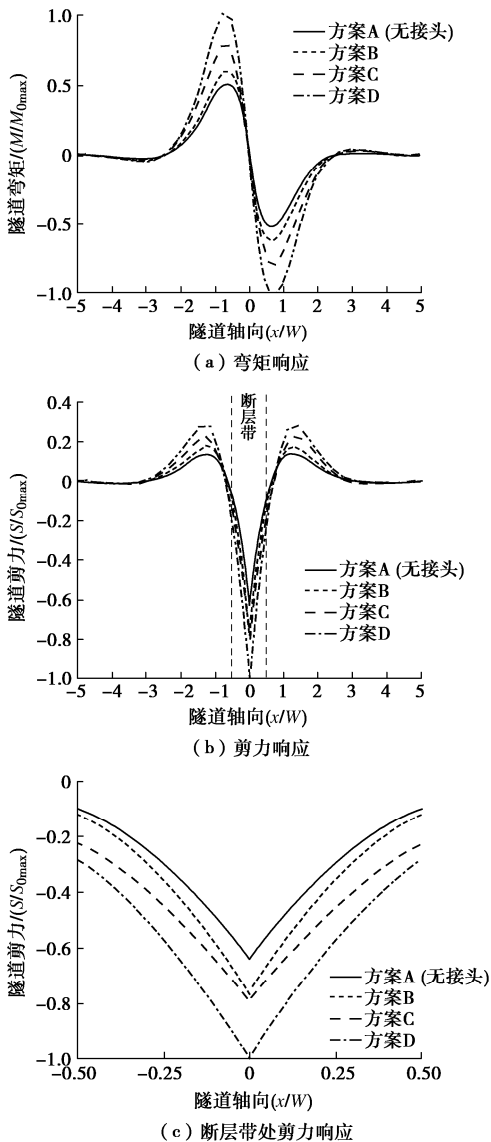


图 14 接头设计方案对隧道内力响应的影响

Fig. 14 Influences of different setting plans for joints on response of internal force of tunnel

基于本文建立的解析模型，还可得到隧道结构变形、接头张开量和错台量等变形指标，限于篇幅，不在此赘述。实际工程设计需要综合考虑结构的受力和变形分析指标，从而比选出最优的设计方案。

4.2 隧道本体-接头刚度比的影响

针对方案 D，进一步分析隧道本体刚度-接头刚度比对结构响应的影响。为量化表征接头刚度对隧道纵向内力响应的影响，引入两个无量纲参数：隧道本体-接头抗弯刚度比 ξ_M 和隧道本体-接头抗剪刚度比 ξ_S ，分别定义为

$$\xi_M = \frac{EI}{K_\phi l} \quad (17)$$

$$\xi_S = \frac{GA}{K_y l} \quad (18)$$

式中： l 为隧道纵向单位长度，取 1 m。

需要说明的是，通常接头的抗弯刚度和抗剪刚度相互耦合，本节分析中通过改变弹性模量来改变接头刚度，从而实现 ξ_M 和 ξ_S 同比例变化。图 15 呈现了隧道本体-接头刚度比和本体刚度变化对穿断层隧道纵向内力响应峰值的影响关系，图中单条曲线表示保持隧道本体刚度不变，通过改变接头刚度来实现隧道本体-接头刚度比的变化。可以看出，随着隧道本体-接头刚度比的增加，隧道结构弯矩和剪力响应峰值均逐渐减小，且在本体-接头刚度比取较小值时（接头刚度接近隧道本体刚度），隧道内力响应对其刚度比变化更为敏感，而当隧道本体-接头刚度比超过 200 时，隧道内力响应峰值随刚度比变化较为平缓，此时改变接头刚度对隧道内力响应影响较小，还需注意因接头刚度过柔导致接头变形增大所引发的接头防水等问题。

对比不同隧道本体刚度变化的分析结果可知，随着隧道本体刚度的减弱，隧道结构内力响应峰值逐渐减小，但当隧道本体-接头刚度比大于 200 时，隧道本体刚度的改变对结构内力响应几乎没有影响。实际工程设计中，隧道本体刚度的改变相比接头而言是非常有限的，因此通过穿断层隧道柔性接头刚度优化设计是更为可行的减震控制措施。

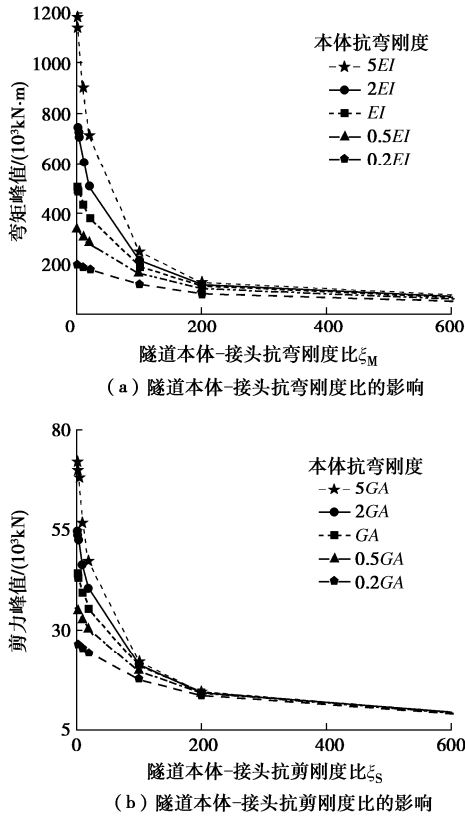


图 15 隧道本体-接头刚度比对隧道内力响应的影响

Fig. 15 Influences of tunnel-joint stiffness on response of internal force of tunnel

5 结 论

本文针对穿断层分段柔性接头隧道设计及参数取值缺少理论依据的现状,建立了合理表征穿断层分段柔性接头隧道的力学分析模型,并考虑断层带错动产生的不连续位移场分布特征,推导出分段柔性接头隧道在断层带错动作用下的纵向地震响应解析解。基于相同条件的数值模型结果和模型试验数据对比分析,验证了本文力学分析模型的合理性和解析解的正确性。基于本文解析解对穿断层分段柔性接头隧道设计的关键参数进行敏感性分析,得到2点结论。

(1)通过合理的柔性接头设计可以有效地降低断层带影响区域内隧道结构纵向的内力响应,且柔性接头的数量和布设位置均会改变隧道结构内力响应的大小及分布特征,相比而言,将柔性接头分别布置于断层错动面、断层与上/下盘交界面处的三接头模式是较为合理的设计方案。

(2)隧道本体与接头刚度比对隧道结构内力响应具有较大影响,且当接头刚度接近隧道本体刚度时,隧道结构内力响应对刚度比变化更为敏感,相比改变结构本体刚度,通过合理调整柔性接头刚度的变化是穿断层隧道设计更为有效且可行的控制措施。

本文所提出的分段柔性接头隧道纵向地震响应快速计算的解析方法,为穿断层隧道工程抗震分析和分段柔性接头的优化设计提供了理论依据。

参考文献:

- [1] WANG W L, WANG T T, SU J J, et al. Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-chi earthquake[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, **16**(3): 133-150.
- [2] YU H T, CHEN J T, BOBET A, et al. Damage observation and assessment of the Longxi tunnel during the Wenchuan earthquake[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, **54**:102-116.
- [3] DALGIC S. Tunneling in squeezing rock, the Bolu tunnel, Anatolian motorway, Turkey[J]. Engineering Geology, 2002, **67**(1/2): 73-96.
- [4] SHAHIDI A R, VAFAEIAN M. Analysis of longitudinal profile of the tunnels in the active faulted zone and designing the flexible lining (for Koohrang-III tunnel)[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, **20**(3): 213-221.
- [5] 禹海涛,袁 勇. 长大隧道地震响应分析与试验方法新进展[J]. 中国公路学报, 2018, **31**(10): 19-35. (YU Haitao, YUAN Yong. Review on seismic response analysis and test methods for long and large tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, **31**(10): 19-35. (in Chinese))
- [6] 禹海涛,李衍熹. 土-结构动力作用体系混合试验研究进展与探讨[J]. 中国公路学报, 2020, **33**(12): 105-117. (YU Haitao, LI Yanxi. Review and discussion on recent progress of hybrid simulation for soil-structure dynamic interaction system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, **33**(12): 105-117. (in Chinese))
- [7] 刘学增,林亮伦. 75° 倾角逆断层黏滑错动对公路隧道影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(12): 2523-2530. (LIU Xuezheng, LIN Lianglun. Research on model experiment of effect of thrust fault with 75° dip angle stick-slip dislocation on highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(12): 2523-2530. (in Chinese))
- [8] 黄强兵,彭建兵,门玉明,等. 分段柔性接头地铁隧道适应地裂缝大变形的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(8): 1546-1554. (HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, MEN Yuming, et al. Model test study of sectional metro tunnel with flexible joints adapting large deformation of ground fissures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(8): 1546-1554. (in Chinese))
- [9] MELISSIANOS V E, LIGNOS X A, BACHAS K K, et al. Experimental investigation of pipes with flexible joints under fault rupture[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, **128**: 633-648.
- [10] YAN G, SHEN Y, GAO B, et al. Damage evolution of tunnel lining with steel reinforced rubber joints under normal faulting: An experimental and numerical investigation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **97**: 103223.
- [11] YU H T, ZHANG Z W, CHEN J T, et al. Analytical solution for longitudinal seismic response of tunnel liners with sharp stiffness transition[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **77**: 103-114.
- [12] 刘国钊,乔亚飞,何满潮,等. 活动性断裂带错动下隧道纵向响应的解析解[J]. 岩土力学, 2020, **41**(3): 923-932. (LIU Guozhao, QIAO Yafei, HE Manchao, et al. An analytical solution of longitudinal response of tunnels under dislocation of active fault[J]. Rock and Soil Mechanics,

- 2020, **41**(3): 923-932. (in Chinese))
- [13] TANAHASHI H. Formulas for an infinitely long Bernoulli-Euler beam on the Pasternak model[J]. Soils and Foundations, 2004, **44**(5): 109-118.
- [14] VESIĆ A B. Bending of beams resting on isotropic elastic solid[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1961, **87**(2): 35-53.
- [15] 李 宏, 陈 征, 王海忠, 等. 南北带南段实测地应力特征与钻孔应变观测[C]//2014 年中国地球科学联合学术年会. 北京, 2014. (LI Hong, CHEN Zheng, WANG Haizhong, et al. In-situ stress characteristics and borehole strain observation in the southern section of north-south belt[C]// Annual Meeting of Chinese Geoscience Union. Beijing, 2014. (in Chinese))
- [16] 孙 飞. 穿越活断层地铁隧道结构损伤破坏机理及抗错动性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019. (SUN Fei. Study on Damage and Fracture Mechanism and Anti-Displacement Performance of Metro Tunnels Passing through Active Faults[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese))
- [17] SHIBA Y, KAWASHIMA K, OBINATA N, et al. Evaluation procedure for seismic stress developed in shield tunnels based on seismic deformation method.[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1989(404):385-394.

第四届全国能源地下结构与工程学术研讨会 (一号通知·征文)

为聚集优秀的学术和工程技术人员,推动能源岩土工程的研究和应用,服务千年大计和国家战略。现拟于 2023 年 9 月,在河北雄安召开第四届全国能源地下结构与工程学术研讨会。届时将邀请国内外著名的能源岩土工程专家、新区建设者就能源地下结构与工程的发展做综述报告,分享最新的研究进展和成果,交流最新的学术观点和解决实际工程问题的新方法;同时,组织参观雄安新区建设,为学术界最新科研成果创造落地场景与合作机会,促进能源岩土学科“产学研用,协同创新”。

会议议题: ①能源地下结构与工程(包括能源桩、能源隧道、能源管廊、能源筏板、能源地下连续墙、能源竖井、建筑筏板下地埋管以及大规模钻孔埋管等等); ②极端温度地下工程(冻结法隧道、高温岩石隧道、热固结地基处理工法、桩身检测热工法,隧道过火后安全评价、机场跑道及公路桥面等防冻除冰技术); ③抽水蓄能及地下压缩空气储能中的岩土工程技术; ④高放射性核废料及 CO₂ 地下封存; ⑤能源地下存储与输送; ⑥可燃冰、页岩气等油气开采相关岩土工程; ⑦浅层、中深层地热开发技术; ⑧能源地下工程中多场耦合岩土力学和

孔隙介质传输力学; ⑨其他与地热能、风能、太阳能等新能源利用相关的岩土工程问题。

主办单位: 中国岩石力学与工程学会能源地下结构与工程专委会

承办单位: 清华大学; 中国建筑科学研究院地基基础研究所; 三峡大学

重要日期: 2023 年 7 月 31 日前稿件接收截止; 2023 年 8 月 20 日前通知作者是否录用; 2023 年 8 月 31 日前提交修改后的论文。

论文出版要求: 优秀稿件推荐至《清华大学学报》(正刊)、《深圳大学学报》(正刊)、《建筑科学》(正刊)、《建筑结构》(正刊)和《防灾减灾工程学报》(专栏正刊)发表。邮寄一份电子文本,论文中请务必注明详细通讯地址、邮编、联系电话及 Email 地址。

论文投稿及会议报告事宜请联系: 清华大学土木工程系郭红仙 13811838826, energy_geotech2023@ylsas.cn (会议投稿), <https://kdocs.cn/l/cugFIoXrPltB?f=301> (模板下载)。

(中国岩石力学与工程学会能源地下结构与工程专委会 供稿)