

张颖, 李志山, 徐丽, 等. 基于柔性节点的高烈度区盾构隧道纵向地震反应减震分析[J]. 华南地震, 2017, 37(2): 79-85. [ZHANG Ying, LI Zhishan, XU Li, et al. Analysis of Seismic Longitudinal Response Control of Shield Tunnel in Highly Seismic Zone Based on Flexible Joints [J]. South china journal of seismology, 2017, 37(2): 79-85.]

基于柔性节点的高烈度区盾构隧道 纵向地震反应减震分析

张颖, 李志山, 徐丽, 陈华霆, 罗俊杰
(广州大学 工程抗震研究中心, 广州 510405)

摘要: 以某特长超大盾构海底隧道为背景, 提出了一种新型的 SMA 形状记忆合金柔性减震节点。采用基于纵向梁-弹簧模型的反应位移法, 研究了该消能减震措施对高烈度区盾构隧道纵向地震反应控制的机理和有效性。结果表明: 该柔性减震节点可有效改善土层变化区域接头的张开量, 提高整段盾构隧道的抗震性能, 且减震节点的集中变形在经历地震后可一定程度上回复原位, 确保隧道在地震作用下的安全。

关键词: 盾构隧道; 柔性减震节点; 纵向地震反应; 减震机理

中图分类号: U452.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2017) 02-0079-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.02.013

Analysis of Seismic Longitudinal Response Control of Shield Tunnel in Highly Seismic Zone Based on Flexible Joints

ZHANG Ying, LI Zhishan, XU Li, CHEN Huating, LUO Junjie
(Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

Abstract: In the background of a seismic resistant project of a super large and long shield tunnel, a novel flexible damping joint developed by SMA shaped memory alloy is proposed. The mechanism and effectiveness of the damping measure on controlling the seismic longitudinal response of shield tunnel in high intensity seismic zone is analyzed by using response displacement method based on the longitudinal beam-spring model. The results show that the openings of the joints located on the soil variation area can be mitigated obviously by adopting the flexible damping joint measure, which is able to improve the anti-seismic performance of the entire shield tunnel. The concentrated deformations of the damping joints can be restored to the original position partly after the earthquake. The control measure can well protect the shield tunnel from destroyed by earthquake.

Keywords: Shield tunnel; Flexible damping joint; Seismic longitudinal response; Control mechanism

收稿日期: 2017-03-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB013600); 教育部创新团队研究计划项目(IRT13057); 国家自然科学基金(51208129)

作者简介: 张颖 (1980-), 男, 博士, 助理研究员, 从事工程结构抗震与减震控制研究。

E-mail: jerry_zy515@163.com.

0 引言

在 1995 年以前,大家普遍认为地下结构受周围土体约束较难遭受地震灾害,对隧道结构的抗震研究关注较少。但 1995 年日本阪神地震打破了大家的传统思维。在这次地震中,地铁车站-区间隧道为代表的大型地下结构遭受严重破坏,暴露出地下结构抗震的诸多问题,引起了学者和工程师对地下结构震害的密切关注^[1]。随着我国基础建设和选址的限制,越来越多的隧道工程会不可避免的修建在活断层附近和高烈度地震区,为此,必须对高烈度地震区隧道工程的减震技术进行深入研究^[2]。

盾构隧道为地下线形结构物,纵向靠螺栓连接,存在大量的连接缝,整体性较差,地震下容易出现环缝张开量过大而渗漏的现象,故盾构隧道纵向抗震行为的研究是相当重要的课题^[3-4]。隧道的纵向地震反应通常会因土层的不连续、结构形式与材料的改变和边界条件的不同,造成部分区域有应力集中或位移过大的现象。目前,处理此问题的常见措施主要有两类方法:柔性节点和隔震。前者通过在特定位置增加隧道纵向和横向的容许位移、提供有效的防水来抵抗集中的变形^[5],柔性节点仅为构造措施,对实际地震作用并无降低;后者隔震是在隧道与土体之间增加一层弹性材料,用来有效降低土体对隧道的直接作用^[6],但造价高昂,且不利于施工。

SMA 形状记忆合金具有超弹性的性能,是良好的减震装置。一般常用的记忆合金是由 55.9% 的镍和 44.1% 的钛组成,可恢复的应变达 8%,极限应变达 17%。记忆合金能在可恢复的应变内,形成滞回曲线消散地震所产生的能量,在工程结构的减震控制当中广泛应用^[7-9]。本文研究开发了一种新型的 SMA 形状记忆合金柔性减震节点,探讨及分析了其在减少盾构隧道纵向地震反应方面的减震机理和有效性,为高烈度区盾构隧道的抗震提供了一条新的思路。

1 隧道纵向地震反应分析

1.1 分析模型

盾构隧道纵向分析简化的计算模型,目前主要有纵向梁-弹簧模型,如图 1 所示。纵向梁-弹簧模型以梁单元模拟衬砌环,以接头弹簧的轴向、剪切和转动效应模拟环向接头和螺栓,以地层弹

簧模拟围岩与隧道之间的相互作用。从工程的角度而言,梁-弹簧模型能够合理反映盾构隧道的纵向结构特性。

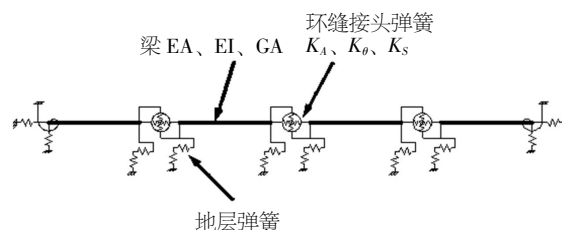


图 1 隧道纵向梁-弹簧模型

Fig.1 Longitudinal beam-spring model of the tunnel

(1) 环间接头轴向弹簧刚度 K_A 。盾构隧道管环受拉时,环间接头拉力由螺栓提供,接头的轴向抗拉刚度看成是各个连接螺栓刚度的总和;管环受压时,只有管段受压而连接螺栓不再受力,接头的轴向抗压刚度为

$$K_{AC} = E_c A_c l_s \quad (1)$$

式(1)中, E_c 为混凝土弹性模量, A_c 为管环截面面积, l_s 为管环长度。

受拉弹性刚度为

$$K_A = n k_s \quad (2)$$

式(2)中, n 为螺栓个数, k_s 为单个螺栓弹性刚度。

(2) 环间接头转动弹簧刚度 K_θ 。环间接头受弯时,在受拉区,由连接螺栓承担拉应力,在受压区,由管段混凝土单独承担压应力,管段混凝土应力始终处于弹性状态;截面变形符合平截面和小变形假定。当接头螺栓完全在弹性时,应力和变形情况如图 2 所示, x 、 φ 分别为中性轴的位置和角度,其中

$$x = r \sin \varphi \quad (3)$$

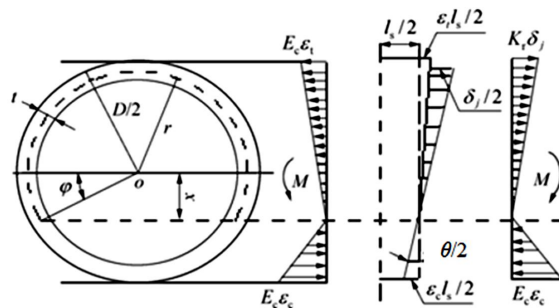


图 2 接头的弹性应变应力分布

Fig.2 Elastic strain and stress distribution of the joint

受拉区变形只含接头螺栓的变形,不含混凝土的受拉变形,这与等效连续梁模型有所差别,这是因为本模型计算过程中接头与管环分别考虑,

因此在计算接头转动刚度时受拉区只需反映环间螺栓的变形即可。

接头的变形协调条件为

$$\varepsilon_c \cdot \frac{l_s}{2} = \left(\frac{D}{2} - x\right) \cdot \frac{\theta}{2} \quad (4)$$

$$\frac{\delta_j}{2} = (r+x) \cdot \frac{\theta}{2} \quad (5)$$

式(4)、(5)中, ε_c 为管环边缘混凝土受压应变, θ 为接头转角。

接头力的平衡条件为

$$\begin{aligned} 2 \cdot \frac{E_c \varepsilon_c}{D/2-x} \int_0^{\pi/2-\varphi} r t (\cos a - x) d a \\ = 2 \cdot \frac{k_r \delta_j}{r+x} \int_0^{\pi/2+\varphi} r (\cos a + x) d a \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中, t 为管环厚度, k_r 为环间接头抗拉弹簧的线密度, $k_r = K_{j1} / (2\pi r)$ 或 $K_{j2} / (2\pi r)$ 。

将式(3)、式(5)代入式(6)中可得

$$\varphi + \cos \varphi = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1-\beta}{1+\beta} \quad (7)$$

其中, $\beta = K_{At} / K_{Ac}$

根据变形协调条件和力的平衡条件, 接头抗弯刚度表达式为

$$K_0 = \frac{\cos^3 \varphi}{\cos \varphi + (\pi/2 + \varphi) \sin \varphi} \frac{\pi r^3 t E_c}{l_s} \quad (8)$$

(3) 环间接头剪切弹簧刚度 K_s

假定环间接头的剪切弹簧刚度为无穷大。

1.2 分析方法

隧道纵向地震反应分析方法可以分为基于梁-弹簧模型的反应位移法和土、隧道结构皆为实体单元(或结构为壳单元)表达的三维有限元方法。前者较为简单, 而且可以刻画出隧道整体的宏观特性; 后者虽然可以精确表现结构部件的细观反应, 但建模复杂且计算量大。

反应位移法应用比较广泛, 最初用于埋管等线状地下结构纵向的地震响应分析中, 由于其分析方法明确、简单易行, 近来越来越多的应用于大断面隧道的计算分析中^[10-11]。反应位移法的基本原理是: 首先评价隧道与地层的相互作用, 即先计算隧道所处位置还没有修建隧道时的空洞地层位移, 再将该位移通过地层弹簧作用于隧道结构上进行分析。在实际应用中, 隧道纵向的反应位移法分为狭义反应位移法和广义反应位移法两种。本文分析采用广义反应位移法对隧道纵向进行整体抗震分析, 以强制位移的荷载形式作用于分析模型。对于隧道纵向的位移分布, 沿隧道纵向选

出若干典型土层断面进行一维场地地震响应分析, 求出隧道中心处的位移时程响应, 将一系列的位移时程响应输入到相应的地基弹簧固定端。

2 柔性减震节点

在大震作用下, 盾构隧道于环片间会因轴力损失、过大弯矩和周围土层的位移等, 导致两连环片出现张开的现象。为了减少此类的灾害发生, 于可能出现较大张开效应的位置, 安装柔性节点。常见的柔性节点, 主要为两层止水橡胶和一抗拉装置所组成。此抗拉装置不存在减震能力, 并于大震过后会存在永久变位。在传统柔性节点的基础上, 本文研究开发了一种新型的柔性减震节点, 将 SMA 形状记忆合金杆安装于抗拉装置的位置。SMA 具有超弹性、可复位性和强大的耗能特性, 是作为隧道减震节点的理想手段。

形状记忆合金的力学行为采用简化的双线性旗子状来模拟, 并仅考虑在拉方向上的作用。图3为计算时形状记忆合金应力与应变的模型, 形状记忆合金的屈服应变可以认为是, 而弹性模量为和所在的直线段为非线性应力的上下限。当应变小于时, 形状记忆合金则恢复至线弹性。

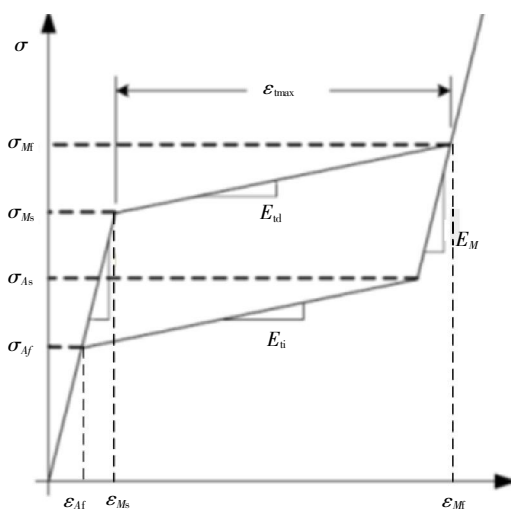


图3 形状记忆合金应力与应变关系

Fig.3 Strain-stress constitutive relations of SMA

柔性减震节点示意图如图4所示, 由以下几部分构成: ① 形状记忆合金阻尼器(由钢绞线、形状记忆合金杆、哑铃式扣件组成); ② 弹性防水垫块, 允许变形需满足计算最大张开量1.2倍的要求; ③ 波纹型防水挡块, 可拉伸变形需满足计算最大张开量1.2倍的要求。

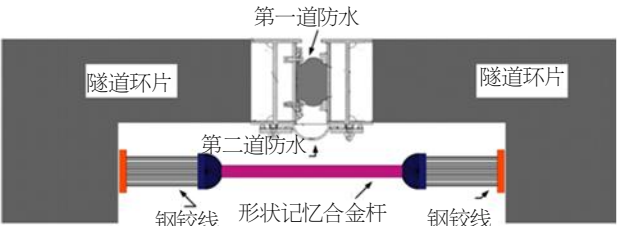


图 4 柔性减震节点示意图
Fig.4 Sketch of the flexible damping joint

由于此减震装置仅考虑抗拉的区段，必须通过钢绞线与形状记忆合金杆串联，保证整体减震装置仅受拉力作用。形状记忆合金的刚度需远小于钢绞线的总体刚度，以保证记忆合金杆的变形集中性能。钢绞线采用多束并联的方式，主要考虑当多钢绞线合成一束，因为长度较短，产生部

分的轴压刚度，不利于形状记忆合金杆保有仅受拉的特性。此外，两道防水层可保证减震节点在允许的大变形下不漏水。

3 算例分析

某特长的超大直径盾构海底隧道全长 5 300 m，其中盾构段 2 705 m，盾构段与明挖段间采用竖井连接。盾构隧道的每管片长 2 m，单管外径 14.5 m，内径 13.3 m，每管可容纳三条车道。管片环缝采用 42 个 $\phi 36$ 的螺栓连接，螺栓长度 750 mm。隧道位于 8 度地震设防区，且穿越砂土、硬岩、淤泥软土等高低错落的不同土层，地质条件复杂，对抵抗地震灾害极其不利。盾构隧道横断面图如图 5 所示。

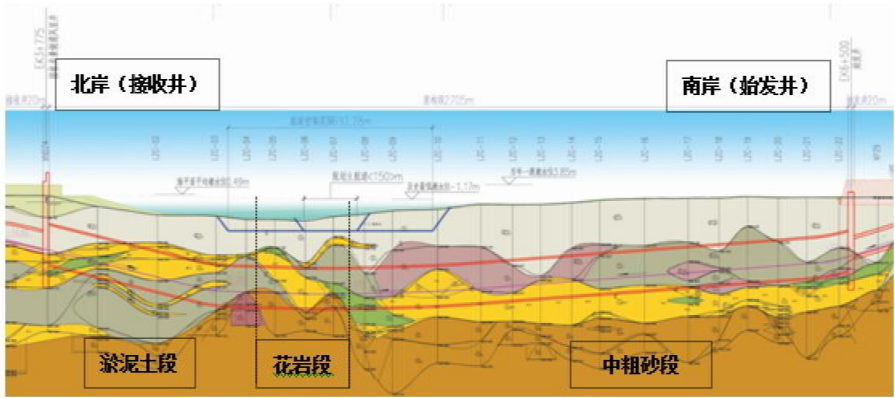


图 5 盾构隧道纵向横断面图
Fig.5 Cross-sectional profile of the shield tunnel

根据上面介绍的梁-弹簧模型，在 ABAQUS 中对该盾构隧道工程建立了三维空间有限元模型进行纵向地震反应的分析。选用中空的三维线性 B31 梁单元模拟隧道管环，其 EA、EI 与 GA 等效于实际管环。考虑隧道管环纵缝的影响，各个梁单元之间断开，通过一个旋转弹簧和拉压异性弹簧连

接。同时，由于隧道周围土体属性有差别，对于每段管环通过 4 个土层弹簧分别考虑隧道上、下、左、右 4 个方向的土体刚度属性。有限元模型如图 6 所示，环缝接头的弹簧参数和根据不同土层基床反力系数计算得到的地基弹簧参数分别如表 1 和表 2 所示。

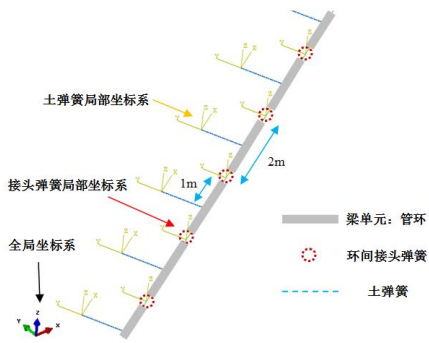


图 6 盾构隧道有限元模型
Fig.6 Finite element model of the shield tunnel

表 1 普通螺栓接头弹簧参数		
Table 1 Spring parameters of the joints		
受压刚度 K_{Ac} (kN/m)	受拉刚度 K_{At} (kN/m)	抗弯刚度 K_{θ} (kN·m/rad)
4.72E8	1.17E7	3.89E11

3.1 减震布置方案

盾构隧道由大量的管片通过螺栓等方式连结拼装而成，整个盾构隧道结构有大量的接缝。盾构隧道的纵向抗震性能，主要需考虑隧道接缝防

水性能的要求。因此可将隧道纵向环间接缝张开量作为一个重要的性能指标。采用纵向梁-弹簧模型进行初步抗震计算分析,罕遇地震下,隧道软硬岩交界

界处环缝接头受拉弯共同作用,其最大张开量在一定区域内(约 100 m)超出 15 mm,无法满足隧道防水及安全运营的要求,有必要对其采取减震措施。

表 2 隧道周围围岩地基弹簧参数

Table 2 Foundation spring parameters of surrounding soils

段号	隧道周围围岩名称				弹簧刚度/(kN·m ⁻¹)			
	上	下	左	右	上	下	左	右
1	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	3.44E4	1.38E5	5.73E4	5.73E4
2	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	4.58E4	8.02E5	1.72E5	1.72E5
3	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	3.44E4	4.58E4	1.72E5	1.72E5

注:表中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类围岩分别代表花岗岩、中粗砂和淤泥土。

拟采用形状记忆合金阻尼器柔性减震节点外加相邻局部接头螺栓加强的措施,具体方案如图 7 所示。在花岗岩两侧土层变化处布置两道柔性减震节点特殊钢管片,每管片内设置 40 套形状记忆合金阻尼器,同时在特殊钢管片两侧 100~500 m 范围内和南岸(0 坐标处)竖井 100 m 范围内的接头螺栓局部加强,最大增加至非加强区螺栓数量的两倍。柔性减震节点的横截面布置如图 8 所示,计算参数见表 3。

表 3 柔性减震节点参数

Table 2 Parameters of the flexible damping joints

SMA 直径/mm	SMA 长度/mm	SMA 套数/节点
25	750	40
轴向初始刚度/(kN·m ⁻¹)	轴向屈服刚度/(kN·m ⁻¹)	屈服位移/mm
8.38E5	4.19E4	12.2
弯曲初始刚度/(kN·m ⁻¹)	弯曲屈服刚度/(kN·m ⁻¹)	屈服转角/mm
1.03E7	5.65E5	0.002 17

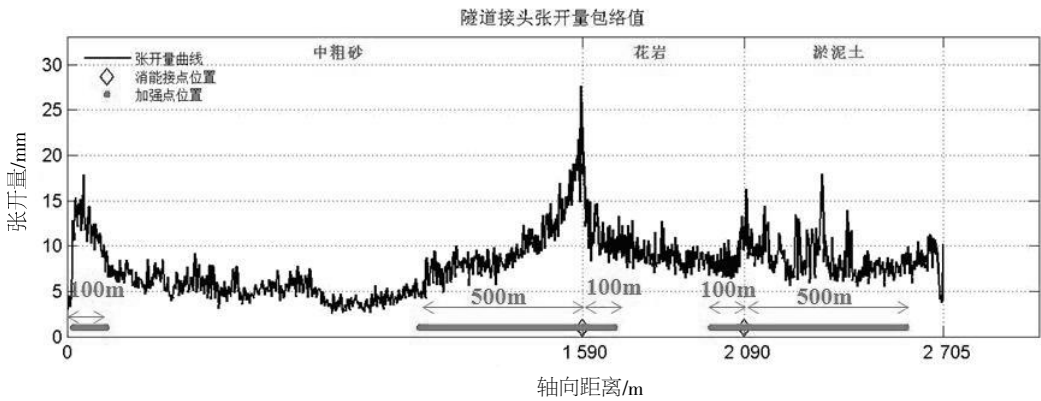


图 7 减震方案纵向布置

Fig.7 Damping Plan layout along longitude

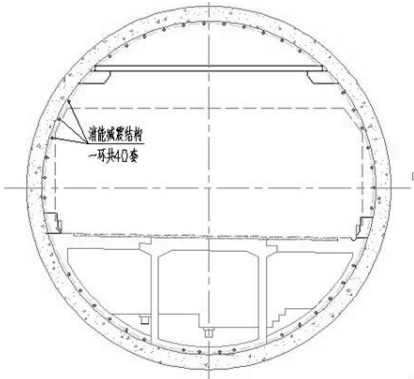


图 8 柔性减震节点横断面布置图

Fig.8 Transverse layout of the flexible damping joint

3.2 减震效果分析

通过改变设置柔性减震节点处和局部螺栓加强处的弹簧刚度参数和考虑形状记忆合金阻尼器的非线性滞回耗能性能,对采取了减震方案措施的隧道和传统抗震的隧道进行了纵向地震响应对比分析。地震动以广义位移的形式加载到模型中的土弹簧固定端,该位移波通过场地的有限元分析得到,并在基岩处考虑行波效应的影响。同时考察了隧道在罕遇烈度下(0.4 g)和超烈度地震下(0.6 g)的安全性和减震效果。

接头张开量减震效果对比结果如图 9 所示。图中红色虚线为布置了减震节点措施的接头张开量包络图；黑色实线为传统设计方案的接头张开量包络图。由图中可以看出，在柔性减震节点处，接头变形出现较明显的集中，同时改善了一定范围内(约 200 m) 其他普通接头的张开量，使其变形趋于均匀。除柔性减震节点位置，隧道全线接头张开量均小于 15 mm，确保隧道在罕遇地震作用

下处于安全状态，柔性减震节点在采取特殊的防水的处理后，可保证隧道接头不漏水。形状记忆合金杆具有复位功能，可保证经历地震后柔性减震节点处的接头在一定程度上回复原位。此外，在遭遇超烈度地震作用时，未采取减震措施的普通隧道接头张开量大量超过 15 mm，而采取减震措施后，只有极个别的隧道普通接头张开量超过 15 mm，有效地提高了隧道的地震安全储备。

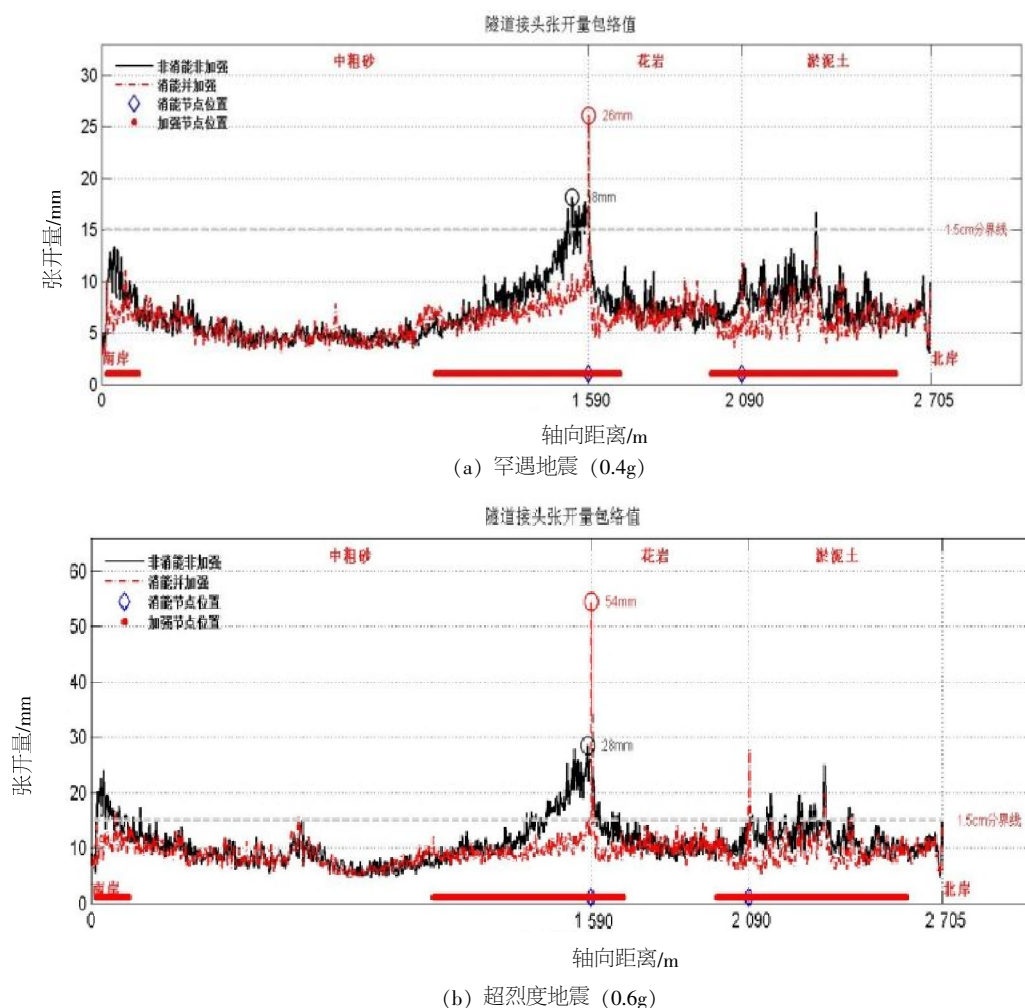


图 9 接头张开量减震效果对比图

Fig.9 Seismic response comparison of the joint openings

3.3 减震机理描述

形状记忆合金柔性节点的减震机理可描述为以下几点：① 柔性减震节点的抗拉刚度只有普通接头螺栓刚度的 1/14，能产生变形集中的效应，降低土层变化区域普通接头的地震作用；② 形状记忆合金杆具有自复位功能，适应地震过程中的往复变形，且可提供一定的残余变形恢复力；③ 柔性减震节点相邻区域的接头螺栓加强，有利于

传递远端接头变形集中至柔性节点处；④ 弹性防水垫块具有较大的压缩量，可保证在允许张开量下不漏水；波纹型防水挡板可拉伸一定的长度，构成了第二道止水措施。

4 结语

盾构隧道的减震控制是一个全新的概念和大胆的创新，具有广阔的工程应用前景。本文提出

的 SMA 形状记忆合金柔性减震节点具有耗能和自复位的功能,可改善盾构隧道土层变化处一定范围内接头的张开量,提高隧道在地震下的安全储备。同时,减震节点的集中变形在经历地震后,可一定程度上回复原位,减少维护的需求。当然,该柔性减震节点在应用于实际之前还有亟待解决的问题,如消能节点参数的优化设计、柔性减震接头的节点力学性能试验、含减震接头管环的模拟振动台试验等。

参考文献:

- [1] H.lida, T. Hiroto, N. Yoshida, M. Iwafuji. Damage to Daikai subway station. Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake[R]. Japanese Geotechnical Society, 1996: 283-300
- [2] 王明年, 崔光耀. 高烈度地震区隧道设置减震层的减震原理研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44 (8): 126-131
- [3] 小泉淳. 盾构隧道的抗震研究及算例[M]. 张稳军, 袁大军译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [4] 黄宏伟, 藏小龙. 盾构隧道纵向变形性态研究分析[J]. 地下空间, 2002, 22 (3): 244-251.
- [6] Unjoh, S., Hoshikuma, J., Nagaya, K., Mukai, K.. Draft manual for seismic isolation of underground structures[C]. In: Proceedings of the 30th Joint Meeting, Wind and Seismic Effect, 1998: 211-223
- [7] 姜 袁, 彭 刚. SMA 阻尼器在土木结构被动控制中的运用[J]. 应用力学学报, 2004, 21 (4): 88-93.
- [8] 李 惠, 毛晨曦. 形状记忆合金(SMA)被动耗能减震体系的设计及参数分析[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21 (4): 54-59.
- [9] 庄 鹏, 薛素铎, 韦捷亮, 等. 超弹性 NiTi 形状记忆合金棒力学性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32 (1): 96-103.
- [10] Youssef M. A. Hashash, Jeffrey J. Hook, Birger Schmidt, John I -Chiang Yao. Seismic design and analysis of underground structures [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16: 247-293.
- [11] 孔 戈. 盾构隧道地震响应分析及抗减震措施研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2006: 5-16.