

文章编号: 1006-6616 (2005) 04-0377-09

地震断层粘滑错动对青藏铁路变形 效应的有限元分析 ——以东昆仑活动断裂为例

欧阳永龙¹, 胡道功¹, 王连捷¹, 张 有², 陈新龙³

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 北京矿务局综合地质工程公司, 北京 102300; 3. 北京市地质矿产勘查开发局, 北京 100050)

摘 要: 东昆仑断裂是青藏高原北部现今仍在强烈活动的左旋走滑地震断裂之一, 该断裂的未来地震活动及其突发性粘滑错动是青藏铁路面临的重大工程地质问题。本文基于断裂几何学和运动学特征, 通过加入 8m 的水平左旋位移, 模拟了东昆仑断裂未来地震活动震中位于铁路线附近时铁路变形效应。结果表明, 震中位于铁路线附近时, 基岩整体移动, 而第四纪松散层和道床则发生了变形, 靠近断裂带附近的第四系自下而上水平位移明显减小, 而铁轨和道床没有明显的断错, 表现为长度约为 25m 的连续左旋弯曲变形; 在铁路东、西两侧形成 NE 向的张裂隙和 NW 向的地震鼓包。在断裂带附近, 铁轨发生了严重扭曲, 铁轨应力自断裂带向两侧逐渐降低, 而且铁轨的最大剪应力平面与铁轨的延伸方向垂直, 因而在地震影响下, 铁轨最有可能发生的破坏是剪切性的, 并提出加宽路基、置换土层等工程防治措施。

关键词: 东昆仑活动断裂; 粘滑错动; 有限元分析; 铁路变形; 青藏铁路

中图分类号: 315.2

文献标识码: A

青藏铁路是国家实施西部大开发战略的重要组成部分, 也是未来西藏连接全国各地的一条铁路大动脉。但是, 这项功在当代、利在千秋、造福百姓的生命线工程却不可避免地面临着断层活动、冻融冻胀和地震等一系列的地质灾害。青藏铁路格尔木-拉萨段所经区域分布有 20 条断裂带和 5 个主要的地震构造带, 其中东昆仑地震构造带及当雄-羊八井地震构造带可能对铁路工程建设及公路、铁路安全运营带来严重后果^[1]。因此, 未来地震活动对青藏铁路的变形破坏可能是青藏铁路面临的最严重的地质灾害, 尤其是东昆仑活动断裂更是对青藏铁路建设和安全运营构成潜在危险^[1,2]。不过, 青藏铁路正在修建当中, 而未来地震活动究竟会对青藏铁路造成什么样的破坏, 多大程度的破坏, 我们都不得而知。因此, 本文运用有限元的分析方法, 借助通用有限元分析软件 ANSYS, 并以东昆仑活动断裂为例, 采用计算机模拟手段, 模拟了未来地震震中位于铁路线附近 (同震位移为 8m) 时的铁路破坏效应, 重点是铁轨可能发生的位移大小及变形效应, 进而在分析模拟结果的基础上, 讨论了工程的

收稿日期: 2005-09-06

基金项目: 中国地质调查局“青藏铁路活动断裂调查与监测”(1212010541403)项目成果。

作者简介: 欧阳永龙 (1975-), 男, 硕士研究生, 主要从事工程地质研究。sini417@sohu.com。

稳定性,提出了一些防治建议。

1 东昆仑活动断裂和 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震

东昆仑活动断裂是青藏高原北部的巨型左旋走滑活动断裂系,西起青海与新疆交界的鲸鱼湖以西,往东经库赛湖、西大滩、东大滩、秀沟纵谷、阿拉克湖、托索湖、玛沁等至甘肃省玛曲以东的若尔盖,绵延 2000km^[3]。总体走向近 EW 向,倾角 55°~85°,各段倾向不一,总体向北。

根据断裂的结构组成、构造类型和空间分布,自西往东主要可划为 6 段^[4],即库赛湖段、西大滩—秀沟段、秀沟—阿拉克湖段、阿拉克湖—托索湖段、托索湖—东倾沟段和玛沁—玛曲段。2001 年 11 月 14 日的昆仑山口西 8.1 级大地震即沿库赛湖段发生。

此次强震发生在东昆仑构造带青海与新疆交界处的昆仑山口西,是近 50 年来在我国大陆发生的震级最大,地表破裂最长的地震事件。地震产生的近 EW 向的同震破裂在地表延伸至少 350km^[5]或至少 400km^[6]。由一系列走向 N72°~78°E 的张性裂缝、N70°~80°E 的张剪性裂缝、NW-NWW 向压剪性裂缝、NW 向鼓包和裂陷坑等斜列组合而成^[5]。此次地震产生的地表破裂带重叠在古地震形变带上,是东昆仑断裂库赛湖段再次突发性粘滑错动的产物。库赛湖东北部的昆仑山南麓地带地震地表破裂带宽度可达 600m 左右,最大左旋同震位移 7.6m,是本次地震地表破裂带最宽、水平位移量最大的地段,推测是本次地震的宏观震中所在地。昆仑山口段同震位移为 4m 左右,总体变化趋势是从西到东位移量逐渐降低^[7]。从运动学背景来看,本次地震的主动盘为南盘,且破裂面自西向东发展。因此,位于北盘的新疆且末、若羌等距离震中较近地区对这次地震反应不明显,而位于东侧和南侧震感却反应较强烈^[8]。

2 计算模型

2.1 地质和工程模型的建立

在模拟计算中,针对东昆仑活动断裂的地质特征及 ANSYS5.6 通用软件的可操作性,建立的地质和工程模型见图 1。

模型特点:

(1) 为不失一般性,地质和工程模型体主要由基岩、第四纪松散层、道床、混凝土枕木和铁轨组成,且各种介质的接触面在 ANSYS 计算机模拟过程中处理为胶结。

(2) 地质模型体中的模拟断裂带走向为 EW 向,倾角为 90°,断裂带以北的部分称为北盘,以南的部分成为南盘,断裂带为一个不连续面,接触面为断裂面,处于断裂面两侧的南盘和北盘可以沿着此断裂面滑动。在模拟计算过程中将断裂带处理为一接触对。铁轨的延伸方向为南北向,并且垂直通过断裂带。

(3) 为减少计算机处理数据的压力,将混凝土枕木的间距加大,并且枕木简化为一长方体。铁轨的截面简化为矩形。

(4) 坐标原点位于整个模型的西北角的底端(基岩的底面),往南为 X 轴方向(铁轨延伸方向),往东为 Y 轴方向,往上为 Z 轴方向。

(5) 简化以后模型的尺寸规格见表 1。

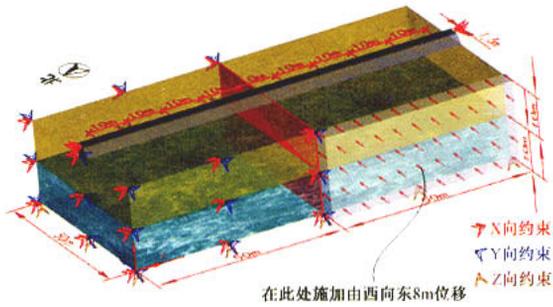


图 1 计算模型图
Fig.1 Calculation model

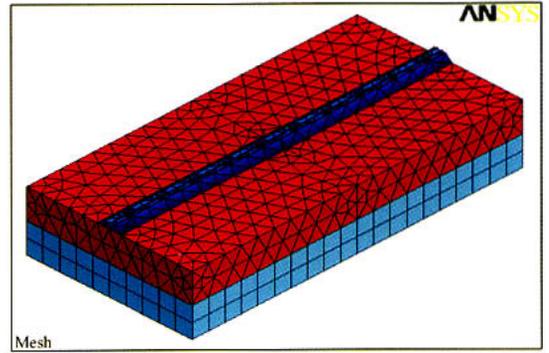
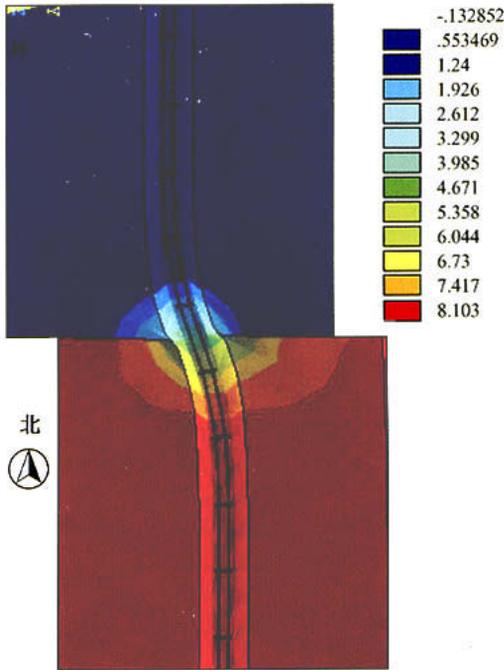
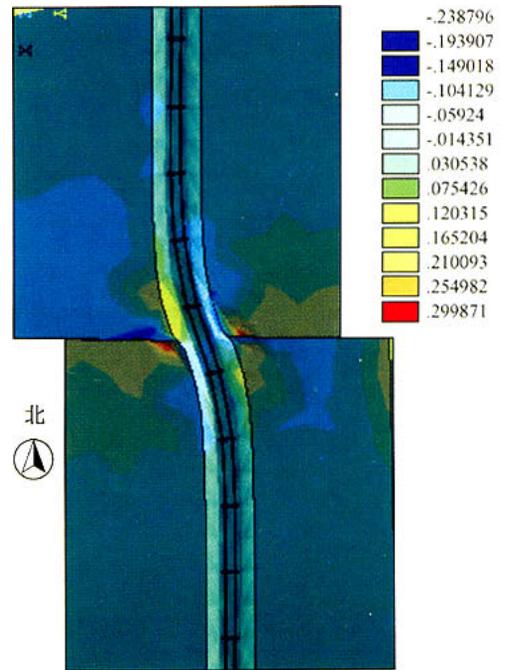


图 2 划分风格后的几何计算模型
Fig.2 Meshed geometric model



(a) 平面位移(东西向)云图



(b) 垂直位移云图

图 3 铁路及其下覆介质的变形位移图 (单位: m)

Fig.3 Displacement of the railway and its underlying medium (unit: m)

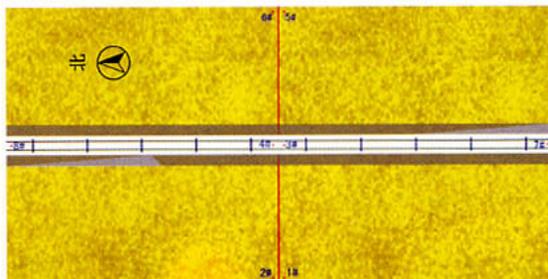


图 5 路径设置俯视图
Fig.5 Bird's-eye view of 8 paths

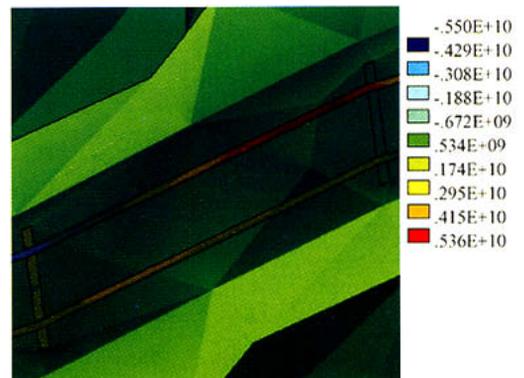


图 8 断裂带附近铁轨剪应力云图
Fig.8 Shear stress map of rails near the fault(xy plane)

表 1 计算模型材料参数及尺寸表

Table 1 Material parameters and geometric sizes for each substance of the model

材料类型	弹性模量 (MPa)	泊松比	尺寸规格
基岩	21000	0.20	长 × 宽 × 高 = (50 + 50) m × 50m × 10m
第四纪松散层	21	0.35	长 × 宽 × 高 = (50 + 50) m × 50m × 10m
道床	65	0.30	顶宽 3.4m, 高度 2m, 坡角 45°
混凝土枕	34500	0.15	长 × 宽 × 高 = 2.5m × 0.28m × 0.2m, 间距 10m
铁轨	300000	0.27	截面积 0.15m × 0.176m, 间距 1.5m, 长度为 100m

2.2 单元的选择和网格的划分

计算单元选用软件自身所提供的 SOLID45、TARGE170、CONTA174 单元。给模型中的各种材料赋值 (表 1), 并进行网格划分, 以便进行有限元的计算。此计算模型共划分单元网格 5376 个, 节点数 2024 个。网格划分见图 2。

2.3 施加边界条件和位移荷载

约束模型的北盘, 也即垂直铁轨方向, 将断裂带以北的北盘东西两侧和北侧 (包括基岩与第四纪松散层) 在 X 和 Y 方向均施加位移约束; 铁轨 X 轴方向施加位移约束; 在整个基岩底部施加 Z 轴方向上的位移约束。

在模型南盘的西侧, 施加由西向东的位移荷载, 也就是沿着 Y 轴方向, 施加水平位移荷载 8m。施加边界条件和位移荷载见图 1。

施加了位移约束与荷载后, 应用 ANSYS 软件进行分析。

3 模拟结果分析

3.1 位移分析

求解后, 在 Y 轴方向 (EW 向) 上发生的水平位移云图见图 3 (a), 在 Z 轴方向上发生的垂直位移云图见图 3 (b), 东边铁轨在水平方向上的位移见图 4。

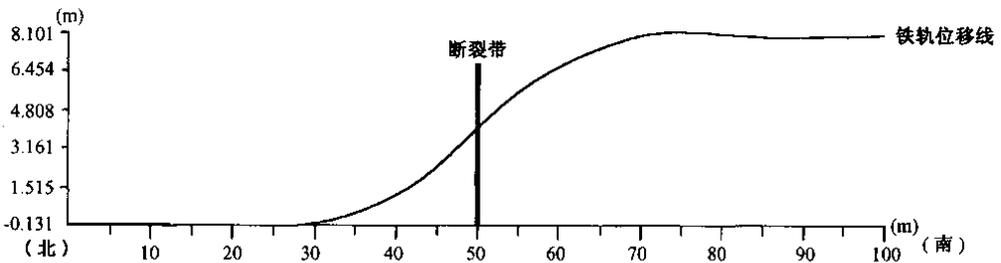


图 4 东边铁轨水平位移图

Fig.4 Horizontal displacement of the eastern rails

为详细了解各处位移的大小, 运用 ANSYS 的路径处理, 在模型的重要部位设立 8 条竖直方向的路径 (图 5)。其各条路径空间位置为:

- 1 # (X = 51, Y = 1, Z = 0 ~ 20); 2 # (X = 49, Y = 1, Z = 0 ~ 20);
3 # (X = 51, Y = 25, Z = 0 ~ 22); 4 # (X = 49, Y = 25, Z = 0 ~ 22);

5 # (X = 51, Y = 49, Z = 0 ~ 20); 6 # (X = 49, Y = 49, Z = 0 ~ 20);
 7 # (X = 99, Y = 25, Z = 0 ~ 22); 8 # (X = 1, Y = 25, Z = 0 ~ 22)

各条路径在 Y (平面方向) 方向上与 Z (垂直方向) 方向上的位移见图 6 (a), 图 6 (b)。

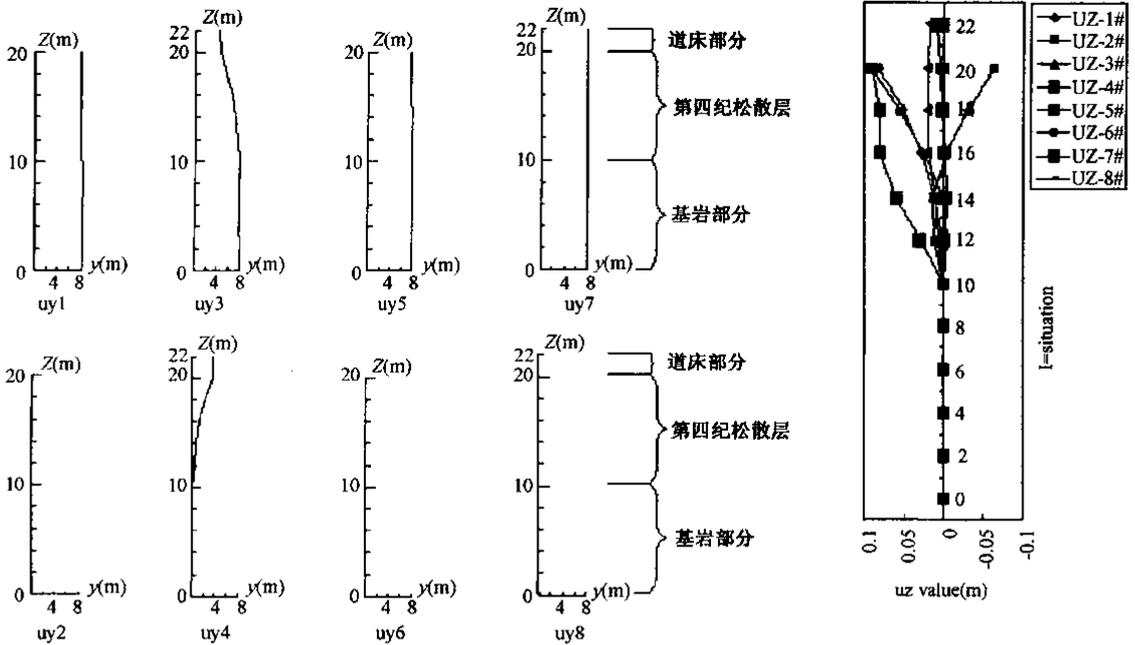


图 6 各条路径的位移值
 Fig.6 Displacement of each path

根据以上图形和表格中的数据，可以得出以下一些认识：

①由图 3 (a) 可知，地震发生时，当地震震中处于铁路线附近，地震断层发生了 8m 的左旋水平粘滑错动时，断裂南盘大约在离断裂带 12m 的位置一直往南，这一部分中的基岩、第四纪松散层、道床、铁轨整体向东大致移动了 8m。而从断裂南盘离断裂带 12m 的位置一直往北，通过断裂带延伸到断裂北盘离断裂带约 10m 的位置，这部分却出现从南到北，向东的水平位移逐步减少的趋势。在大约 20m 的区域内，向东移动的位移从约 7.42m 减少到 1.24m。到离断裂北盘 10m 的位置一直往北，在东西方向上的水平位移变化的趋势却明显要比断裂带附近这一区域变化的幅度要小得多。而且，铁轨与道床之间，有着明显的位移差，这主要是因为地震力的影响下，断裂南盘的基岩和第四纪松散层的左旋错动引起覆盖在第四纪松散层之上的道床的左旋错动，而铁轨本身的强度会阻止支承它的道床的左旋错动，正因为存在着这对对道床起着不同作用的介质的共同作用下，地震发生时，便不可避免地会造成铁轨与道床之间的相对滑移。

②考察 8 个特殊路径点 (图 5) 的东西向位移，从图 6 (a) 可以看出，断裂南盘中的 1 #, 7 # 路径，从基岩底到道床顶，其水平位移基本上没太大的变化。5 # 路径从基岩到第四纪，东西向的位移逐步减少，基岩底的位移为 7.99m，第四纪松散层的顶部位移为 7.46m，在 20m 的深度范围内，它们的错动位移差为 0.53m。3 # 路径却因为上部有铁路经过，它在东西方向上的位移就显得复杂得多。但是，在总体上，它的东西向的位移从下往上也是逐步

减少。不过,这种减少的幅度却很大,基岩底的位移为7.99m,而第四纪顶的位移为4.61m,道床顶的位移只有4.39m。在东西方向上,基岩与道床两种介质的位移差达到了3.6m。断裂北盘中的2#,4#,6#路径,从基岩底到道床顶,基本上呈逐步增大的趋势。不过4#路径与3#路径同样,变化的趋势很明显(图6(a))。它的基岩部分基本没有什么位移,而第四纪松散层在10m的高度范围内,则出现了3m的相对位移差,到道床顶其水平位移达到了3.63m。这样,铁轨与基岩部分在东西方向上形成了约3.2m的位移差。

③从图3(b)可以了解到,在垂直方向上的位移,它变形的幅度比水平方向要小得多,它最大的位移变化也只有30cm。其中位移较大的位置出现在断裂带附近,分布在铁路线的两侧。虽然在垂直方向上,位移的幅度很小,但它的范围却比较广,基本上覆盖了整个断裂南盘和北盘。而且,它在垂直方向的位移也并非是一致的,它既有向上的位移,也有向下的位移,这可以从图6(b)可以看出,从而造成出露于地表的隆起和张裂隙。它的分布形式与昆仑山地震地表破裂形成的NW向地震鼓包和NE向张裂隙是一致的。

3.2 铁轨应力分析

为了解铁轨在地震活动影响下的变形程度和破坏程度,现对两条铁轨的应力进行考察。

东边铁轨:路径10(X=0,1,2,3……,98,99,100;Y=25.75;Z=22.28)

西边铁轨:路径9(X=0,1,2,3……,98,99,100;Y=24.25;Z=22.28)

对上述两条铁轨的第一主应力 σ_1 ,第三主应力 σ_3 ,以及 $\sigma_1 - \sigma_3$ 和剪应力(xy平面)进行考察。两条铁轨主应力情况如图7。断裂带附近铁轨剪应力情况及主应力矢量见图8,图9。

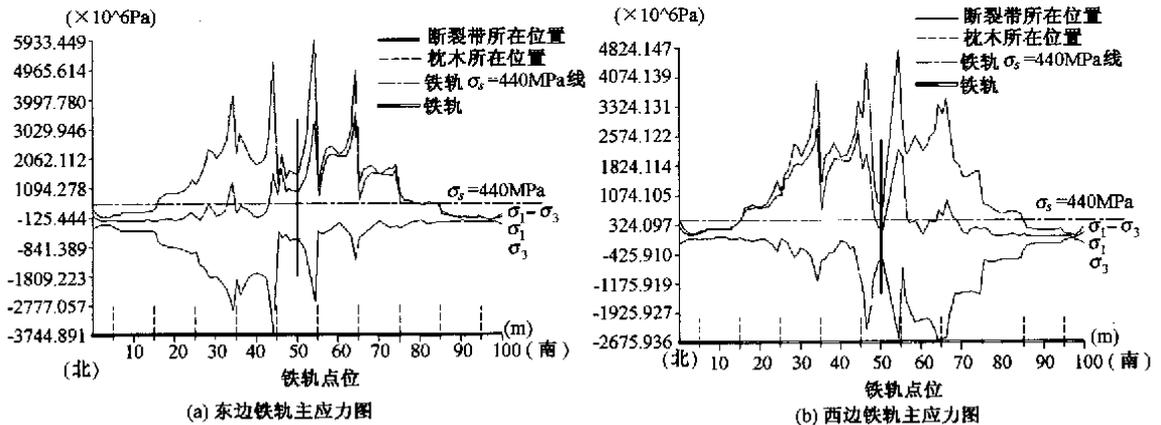


图7 铁轨主应力图

Fig.7 Principal stress map of rails

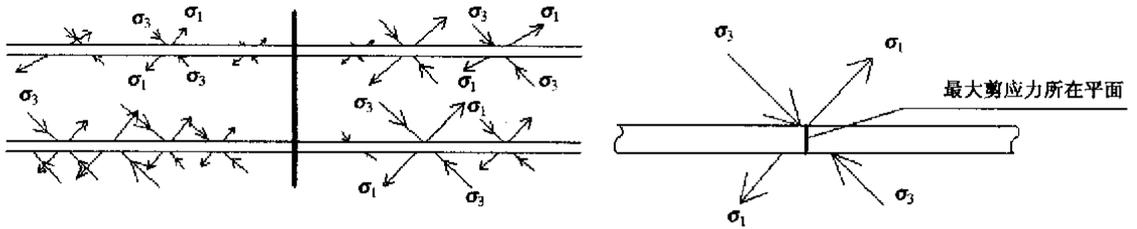
根据第三强度理论,无论材料在什么应力状态下,只要最大的剪应力达到在轴向拉伸中破坏时的数值,材料就要发生破坏。按照这个理论建立的强度条件是

$$\sigma_3 = \sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma] \quad \text{式中 } \sigma_3 \text{ 表示第三强度理论的相当应力。}$$

由于铁轨为弹塑性材料,在此处取 $[\sigma] = \sigma_s = 440\text{MPa}$, σ_s 是钢轨屈服极限(MPa)。

由图7(a)可以看出,东边铁轨中的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} = 5933.449\text{MPa}$,由图7(b)可以看出,西边铁轨中的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} = 4824.147\text{MPa}$;显然 $5933.449 > 4824.147 > 440$,因此铁轨已经进入塑性变形阶段。

由图7(a)及图7(b)还可以得知,在整个铁轨长度范围内,它们的应力变化是不规

图9 铁轨剪应力 (xy 平面) 图Fig.9 Shear stress (xy plane) of rails

则的,在某些地方应力大小出现反复的现象。但从整体来看,应力出现如下的变化规律: a. 从断裂带往两侧,应力在总体水平上呈现逐步减小的趋势; b. 在有枕木和铁轨接触的地方,应力出现了突变的现象; c. 枕木之间铁轨的应力,在断裂带附近变化很大,而离开断裂带越远,铁轨应力在枕木之间变化的越平缓; d. 应力最大的位置出现在处于断裂带两侧,并与断裂带相距最近的两根枕木与铁轨相连接的地方。

显然应力从断裂带往两侧减小,这跟断裂两盘左旋错动有很大关系,从图7可以得知,地震活动对铁轨本身的影响,在断裂带附近是最大的。而越远离断裂带这种影响就越小。这与前面的位移分析,得出在断裂带附近,铁轨发生了严重的扭曲变形的结论是一致的。因此,铁轨本身的应力在断裂带附近出现峰值就显得很正常。

由图8可知,在断裂带附近铁轨的剪应力值出现了正值和负值,说明断裂带南侧铁轨已发生顺时针方向的扭曲,断裂带北侧铁轨已发生逆时针方向的扭曲。由图9(b)及图9(c)可知道,断裂带附近铁轨段的第一主应力为拉应力,第三主应力为压应力,而且其主应力的方向均与铁轨成 45° 角。因而,最大剪应力所在平面与铁轨的延伸方向是保持垂直的,铁轨最有可能发生的破坏是剪切性破坏。

4 工程评价及建议

运用 ANSYS 大型通用有限元软件对东昆仑断裂未来大地震活动时,断裂粘滑错动对青藏铁路破坏效应的定量模拟结果可以看出,在未来东昆仑断裂再次发生7~8级强烈地震时,如地震震中位于铁路线附近,其断裂的突发性粘滑错动将会直接破坏青藏铁路。

当地震发生时,基岩部分基本上是以整体移动的。可是第四纪松散层和道床在它们的垂直范围内,底面和顶面的位移却出现了较大的差异,这种差异会造成第四纪松散层和道床这两种介质的变形,而正是因为他们这种内部本身的变形,从而减轻了地震对依附于它们之上的铁路的破坏程度。这个结果似乎可以说明,各种介质由于自身弹性模量、泊松比,密度等一些力学性质的差异,尤其是弹性模量的较大差异,导致在变形过程中,也会出现不同的变形后果。这种结论可以在现实过程中得到印证,昆仑山 $M_s 8.1$ 级地震所造成的地表破裂带穿切109国道时,破裂发生明显折射扩散,主破裂在路基层中向北弧形拐弯,并扩散为3~5条小破裂切割公路沥青质路面,使地震破裂带的位移急剧降低,路面上的单条破裂左旋同震位移仅10~30cm,5条小破裂累计左旋位移小于 $1m^{[7]}$ 。因而从模拟结果及结合破坏现场的观察可以得出,只要工程路基的力学性态与路基下的介质有较大差异,就能够降低地震破裂

的破坏程度,从而减轻危害。

根据对铁轨应力的分析,在铁轨中存在有某一段,它们的 $\sigma_1 - \sigma_3$ 应力均超过了铁轨本身的 σ_s ,即根据第三强度的理论,铁轨已经进入到塑性变形的阶段。由图7可知,当断裂南盘错动8m时,在这种情况下进入到塑性变形的铁轨长度大约达到70m;且分布在断裂带的两侧。

由前面的模拟结果来看,当地震震中处于铁路线附近,地震发生时,对铁路的破坏是极具的。不过,铁路的建设也在一定程度上影响了它下边地质体的变化,因而我们也可以采取以下一些措施,来减缓这种地震破坏的严重后果。

(1)地震发生时,在断裂带附近,基岩的位移在深度范围内基本上是一致的,但是到了第四纪松散层,由于第四纪松散层本身的变形,它的错动位移却出现了明显的衰减。针对这种情况(此处没有考虑地震波影响),在选线时,在条件允许时,优先考虑在有第四纪覆盖层的地方修建铁路,减少地震对铁路的破坏作用。而且,第四纪松散层的厚度越大,衰减的程度也会越大,安充分利用原有地质条件达到减少震害的目的。

(2)当地震发生时,道床本身会发生变形,进而会造成铁轨与道床之间的滑移,当地震震中处于铁路线附近时,这种滑移的程度会更大,因此我们可以考虑在修建铁路时,在一定程度上将道床的宽度加大,尤其是在断裂带附近的区域,以此来减少当地震发生时,铁轨滑出道床的可能性,从而避免造成更大程度的破坏。

(3)因为各种介质的物性参数不同而导致各种介质在变形上的差异,因此,我们可以充分利用这种特性,选用较好的材料,尤其是延展性比较好,而且强度也满足要求的建筑材料,在断裂带附近,置换掉一部分不太理想的下覆介质,这样就能有效地利用这种材料本身的蠕滑特性,来减轻在其上的铁轨的扭曲变形。

(4)从道床方面考虑,一则可以选用延展性好的材料,二则可以考虑加大道床的厚度,这也同样能起到减轻震害的目的。

参 考 文 献

- [1] 王治华. 青藏公路及铁路沿线的活动构造与其次生灾害[J]. 现代地质, 2003, 17(3): 227~236.
- [2] 董治平, 张守洁, 简春林. 青藏铁路未来地震灾害问题讨论[J]. 灾害学, 2003, 18(4): 35~39.
- [3] 青海省地震局. 东昆仑活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社, 1999. 1~186.
- [4] 刘光勋. 东昆仑活动断裂带及其强震活动[J]. 中国地震, 1996, 12(2): 119~126.
- [5] 党光明, 王赞军. 青海昆仑山口西 $M_s 8.1$ 级地震地表破裂带特征与主要震害——对青藏高原区域稳定性评价的制约[J]. 地质通报, 2002, 21(2): 105~108.
- [6] Lin A, Fu B, Guo J et al. Co-seismic strike-slip and rupture length produced by the 2001 $M_s 8.1$ Central Kunlun earthquake[J]. Science, 2002, 296(14): 2015~2017.
- [7] 吴树仁, 李贵书, 何锋, 等. 昆仑山地震地表破裂带东段几何学与运动学[J]. 地质通报, 2002, 21(8~9): 554~561.
- [8] 赵瑞斌, 李军, 向志勇, 等. 昆仑山口西8.1级地震地表破裂带西段考察[J]. 内陆地震, 2002, 16(2): 175~179.

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF EFFECTS OF STICK-SLIP MOVEMENT OF THE SEISMOGENIC FAULT ON THE DEFORMATION OF THE QINGHAI-TIBET RAILWAY ——A CASE STUDY OF THE EAST KUNLUN ACTIVE FAULT

OUYANG Yong-long¹, HU Dao-gong¹, WANG Lian-jie¹,
ZHANG You², CHEN Xin-long³

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Geological Engineerings Corporation, Beijing Mining Service Bureau, Beijing 102300, China;*

3. *Beijing Geology and Mineral Prospecting and Developing Bureau, Beijing 100050, China*)

Abstract: The East Kunlun fault (EKF) is one of the present-day most active, left-lateral strike-slip seismogenic faults in the northern Qinghai-Tibet Plateau. Future seismic activities or abrupt strike-slip movement of the EKF will cause serious engineering-geological problems to the Qinghai-Tibet Railway. On the basis of the geometric and kinematic characteristics of the EKF, the deformation effects of the rails occurring when the epicenter of a future earthquake is located near the railway were simulated, with 8 m horizontal left-lateral displacement added. The results show that the bedrock moves 8 m en masse when the epicenter is located near the railway, while the Quaternary loose sediments and groundsill are deformed. The horizontal displacement of the Quaternary close to the fault is obviously smaller from above downward, while the rails and groundsill show successive left-lateral crooked deformation for about 25 m. There occur a NE-trending tensional graben and a NW-trending seismic drumlin on the east and west sides of the railway respectively. The rails are seriously distorted near the fault and the stress of the rails is reduced toward both sides of the fault and the maximum shear stress plane of the rails is perpendicular to the direction of elongation of the rails; therefore the rails are most likely to be subjected to shear once an earthquake happens. On the basis of the simulation, the paper puts forward such countermeasures as widening of the groundsill and replacement of the soil layer near the fault.

Key words: East Kunlun fault; strike-slip movement; finite element analysis; railway deformation; Qinghai-Tibet Railway