

耦合动荷载作用下重载铁路路基下部 穿越隧道动力响应分析

董捷^{1,2,3}, 杨博^{1,2,3}, 李成献^{1,2,3}

(1. 河北建筑工程学院 土木工程学院, 河北 张家口 075000; 2. 河北省寒冷地区交通基础设施工程技术创新中心, 河北 张家口 075000; 3. 河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000)

摘要:为揭示耦合动荷载对重载铁路路基下部穿越隧道的影响规律,采用有限差分软件FLAC^{3D},建立不同净距、不同交叉角度的高速公路隧道下穿重载铁路路基结构三维数值模型,用激振函数模拟重载列车振动荷载,采用埃尔森特罗波作为模型输入的地震波,重点分析下部隧道在耦合动荷载作用下的加速度、位移和最大主应力响应特征,并结合敏感性分析的方法对影响因素进行分析。主要结论如下:① 在地震作用下同时考虑上部重载列车作用将会对下部隧道安全产生更为严重的影响;② 随着净距的增大,下部隧道各监测点加速度峰值与位移峰值随之减小,最大主应力峰值随之增大;③ 交叉角度仅对下部隧道受影响范围产生影响,对其最大主应力峰值影响很小;④ 建议设计类似工程时,应首先考虑净距,其次考虑交叉角度,净距与交叉角度均应尽量加大。

关键词:公路隧道;重载铁路;动力响应;数值模拟;耦合动荷载;敏感性分析

中图分类号:U456

文献标志码:A

随着京津冀一体化、京津冀城市群、北京张家口联合申办冬奥会、雄安新区建设等国家重大战略的逐步实施,华北地区多条高速公路相继开工。而在中国华北地区分布有大秦铁路、朔黄铁路、张唐铁路等多条重载干线铁路,且上述铁路在平原区和浅山区多以路基形式修筑^[1]。因此,部分新建公路不可避免地会与既有重载铁路干线形成交叉,且受既有线接触网及地形因素影响,新建公路被迫采用隧道形式下穿既有铁路路基,形成一定数量的具有极高风险的隧道下穿重载铁路路基的复杂工程。另外,中国华北地区多处于地震频发带,若列车运行通过上方路基时偶遇地震力作用,下部穿越结构存在极高的安全隐患。因此,研究既有路基下部隧道在耦合动荷载作用下的动力响应具有重要的现实意义。

近年来,国内外诸多学者对隧道下穿形成的地下穿越结构在施工时的动力响应做了大量分析研究^[2-6]。另外,对地下穿越结构受列车荷载^[7-10]或地震荷载^[11-15]影响下结构的变形与围岩动力特性均有一定研究,但对隧道下穿路基结构受地震与重载列车荷载耦合作用下的动力响应还鲜有报道。重载列车与普通列车相比,在载重与行车速度上有较大差异,运营

安全要求高,现场动力实测难度较大,且构建隧道下穿路基结构力学解析模型也相对复杂。鉴于此,该文采用有限差分软件建立隧道下穿路基结构动力分析模型,对下部公路隧道结构在重载列车荷载与地震力耦合作用下的动力响应进行研究,以期类似穿越工程提供借鉴。

1 三维数值模型与计算条件确定

1.1 三维数值模型和参数

指定沿上部重载铁路路基方向为X轴正向,与重载铁路路基水平垂直方向为Y轴正向,竖直向上为Z轴正向。参照TB 10625—2017《重载铁路设计规范》,上部重载铁路路基面宽度为12 m,路堤本体厚度为2.2 m,基床厚度为2 m,道床厚度为0.6 m。JTG D70—2004《公路隧道设计规范》提供了高速公路两车道隧道标准内轮廓断面图纸,结合实际工程图纸,下部隧道设计洞跨为13 m,高度为10.6 m(高度为仰拱底至拱顶的高差),隧道与上部重载铁路路基交叉角度为90°。为减小边界效应的影响,隧道边界距模型左右边界43.5 m,隧底距模型下部边界55.5 m,则计算模型

收稿日期:2020-08-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878242);河北省人才工程培养资助项目(编号:A201901067)

作者简介:董捷,男,博士,教授。E-mail: 493564550@qq.com

的长×宽×高为:100 m×100 m×80 m。结构三维计算模型与监测点布置如图 1 所示。

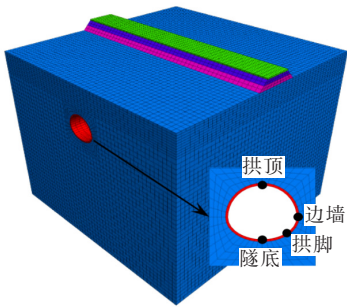


图 1 计算模型和监测点布置

围岩、基床与路堤本体视为摩尔—库仑理想弹塑性材料,衬砌与道床为弹性材料,结构具体参数参照 TB 10001—2016《铁路路基设计规范》、TB 10625—2017《重载铁路设计规范》和 JTG D70—2004《公路隧道设计规范》,参数见表 1。

表 1 结构力学参数

材料种类	重度/ (kN·m ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松比	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ MPa
衬砌	25.0	26.0	0.20	—	—
道床	22.0	0.25	0.25	—	—
路堤本体	18.5	0.08	0.30	25	0.06
基床	20.0	0.15	0.30	30	0.08
围岩	23.0	3.00	0.32	35	0.40

1.2 重载列车荷载的确定

常用列车荷载确定方法有实测加速度法和经验公式法,由于重载列车荷载现场实测难度较大,该文采用经验公式法对其进行确定。研究表明:在数值计算中一般对列车的振动荷载进行简化处理,其大小可用一个激振力函数来模拟^[16-18]。前人对列车振动荷载产生的机理及影响因素进行了综合考虑,并对已有的激振力函数进行了修正与完善,使其能够较好地模拟列车振动荷载,具体表达式如下:

$$P(t)=k_1k_2[P_0+P_1\sin(\omega_1t)+P_2\sin(\omega_2t)+P_3\sin(\omega_3t)]$$

(1)

式中: k_1 为相邻轮轨力叠加系数,一般为 1.2~1.7,取 1.5; k_2 为钢轨分散系数,一般为 0.6~0.9,取 0.8; P_0 为车轮静载; P_1 、 P_2 、 P_3 为振动荷载。

列车簧下质量为 m_0 ,则相应的振动荷载幅值为:

$$P_i=m_0a_i\omega_i^2$$

(2)

式中: a_i 为按行车平稳性、作用到线路上的动力附加荷载以及波形磨耗 3 种情况下的典型矢高; ω_i 为对应车速下相应 3 种情况不平顺振动波长下的圆频率,按

式(3)计算:

$$\omega_i=2\pi\frac{v}{L_i}$$

(3)

式中: v 为列车运行速度; L_i 为 3 种情况下的典型波长。

根据中国铁路设计要求,计算时取单边静轮重 $P_0=135\text{ kN}$,簧下质量 $m_0=3\text{ t}$,计算车速为 100 km/h。激励荷载中的波长和矢高根据中国铁路运行标准选取,具体为: $L_1=10\text{ m}$, $a_1=3.5\text{ mm}$; $L_2=2\text{ m}$, $a_2=0.4\text{ mm}$; $L_3=0.5\text{ mm}$, $a_3=0.08\text{ mm}$ 。

1.3 地震波的处理与加载

根据数值模型中场地的类别、土层参数及设计地震动参数,选取地震波埃尔森特罗波(EI Centro)作为向基岩输入的地震波。在输入模型计算之前,首先利用 FLAC^{3D} 内置 Wizard 模块对该波进行滤波处理,然后进行基线校正,经过反演计算得出它的 8 s 加速度时程曲线。输入地震波时,将地震波的振动加速度峰值调整为 0.1g,从模型底部横向 X 方向和竖向 Z 方向同时输入。

1.4 计算工况

在耦合动荷载作用下,针对隧道下穿路基结构净距、交叉角度对其动力响应的影响进行系统研究。根据大量计算分析,并结合研究目的,确定该文的基准计算条件:耦合动荷载作用(重载列车荷载+地震荷载),净距为 1D(D 为隧道跨度),交叉角度为 90°。具体计算工况如表 2 所示。

表 2 计算工况

工况	荷载作用方式	净距	交叉角度/(°)
1	耦合动荷载	1D	90
2	重载列车荷载	1D	90
3	耦合动荷载	0.5D	90
4	耦合动荷载	1.5D	90
5	耦合动荷载	2D	90
6	耦合动荷载	1D	0
7	耦合动荷载	1D	30
8	耦合动荷载	1D	60

2 计算结果分析

2.1 荷载作用方式的影响

下部隧道各典型监测点在只受重载列车荷载(工况 2)、受耦合动荷载(工况 1)作用下的加速度峰值(加速度最大绝对值)、位移峰值和最大主应力峰值沿隧道方向变化曲线如图 2~4 所示。

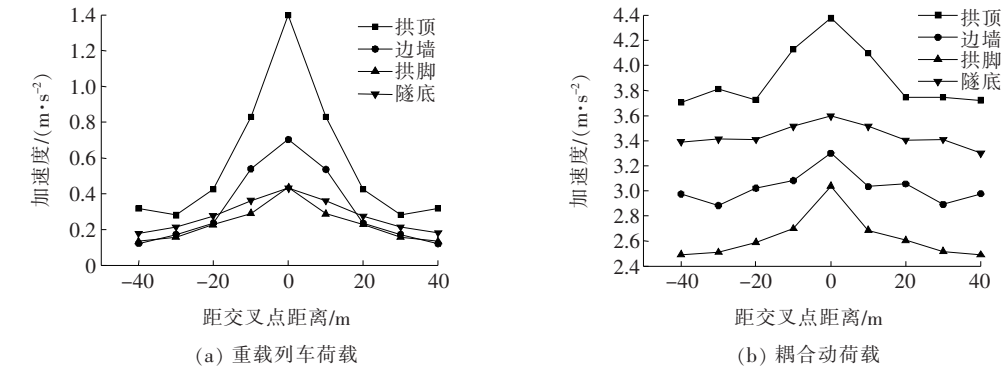


图 2 加速度峰值曲线

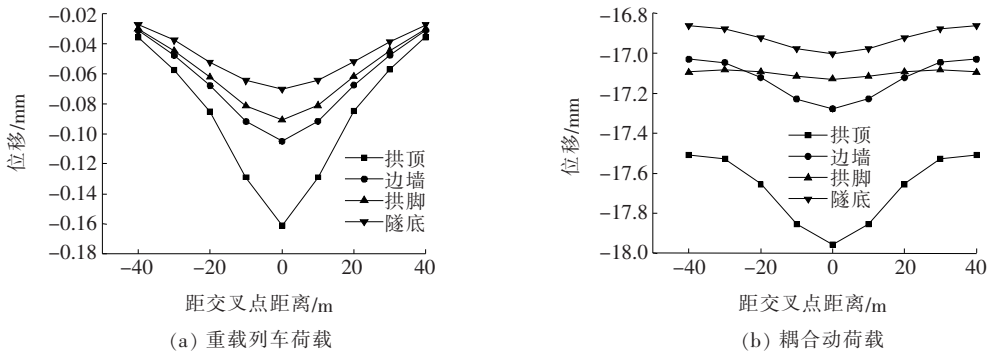


图 3 位移峰值曲线

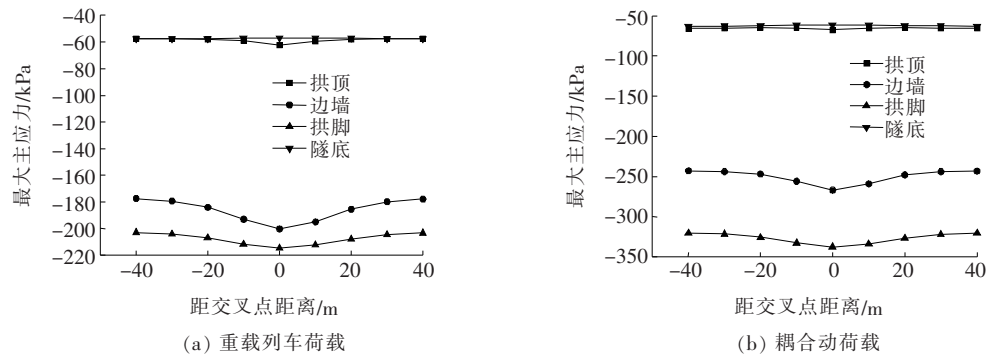


图 4 最大主应力峰值曲线

由图 2~4 可以看出：

(1) 各监测点在两种荷载作用方式下加速度峰值、位移峰值与最大主应力峰值沿隧道方向变化曲线呈现相似的趋势，表现出中间大、两头小的规律，距交叉点越远，曲线越平缓。在两种荷载作用方式下，各监测点加速度峰值、位移峰值与最大主应力峰值在交叉点处呈现最大值，这是由于交叉点处相比隧道其余监测点距上部重载列车荷载更近，上部列车荷载对交叉段影响更为显著。

(2) 各监测点加速度峰值、位移峰值与最大主应力峰值在耦合动荷载作用下比只有重载列车荷载作用

时大。说明耦合动荷载对下部隧道安全产生更为不利的影响。

(3) 通过对比各条曲线，发现相比其余监测点，隧底监测点处加速度峰值、位移峰值与最大主应力峰值曲线较为平缓，交叉点处与沿隧道方向其余监测点相差较少，说明相比拱顶、边墙和拱脚，隧底处受上部重载列车荷载影响最小。

(4) 在两种荷载作用方式下，各监测点最大主应力峰值由大到小依次为拱脚、边墙、拱顶和隧底，且拱顶、隧底与拱脚、边墙相比相差较大。以最不利位置交叉段为例，重载列车荷载单独作用下，拱顶、边墙、拱脚

和隧底的最大主应力峰值分别为 -62.22 kPa 、 -200.21 kPa 、 -214.49 kPa 和 -57.14 kPa ；耦合动荷载作用下，各监测点最大主应力峰值分别增大到 -67.62 kPa 、 -266.74 kPa 、 -337.45 kPa 和 -61.76 kPa 。因此在进行隧道抗震设计时，应对边墙和拱脚处重点加固。

2.2 净距的影响

下部隧道边墙监测点在不同净距下(工况 1、3、4、5)加速度峰值、位移峰值与最大主应力峰值沿隧道方向变化曲线如图 5 所示(限于篇幅,仅给出边墙变化曲线,其余监测点变化曲线与图 5 类似)。

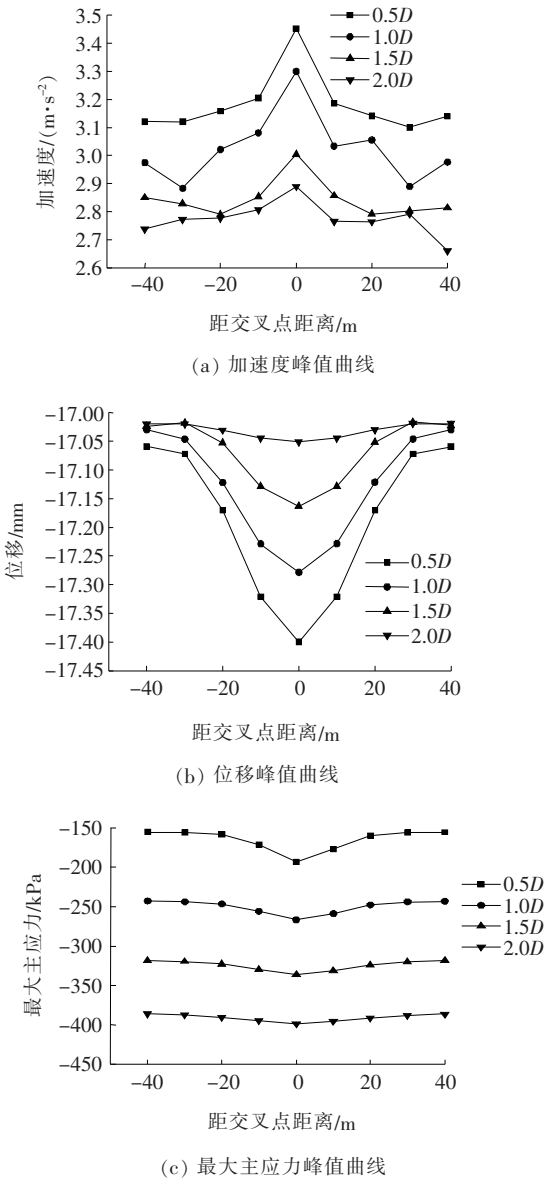


图 5 边墙动力特性随净距变化曲线

不同净距下交叉段各监测点加速度峰值、位移峰值和最大主应力峰值如图 6 所示。

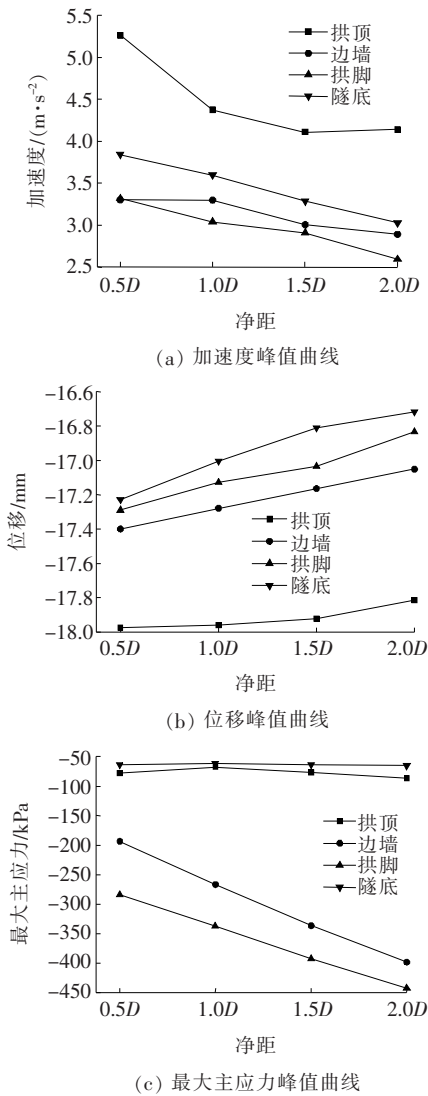


图 6 交叉段监测点动力特性随净距变化曲线

由图 5、6 可知：

(1) 随着净距的增大，隧道边墙监测点加速度峰值、位移峰值均有所减小，但最大主应力峰值随之增大。以交叉点为例，交叉段边墙监测点在 0.5D、1D、1.5D、2D 时加速度峰值分别为 3.45 m/s^2 、 3.29 m/s^2 、 3.00 m/s^2 、 2.89 m/s^2 ，位移峰值分别为 -17.40 mm 、 -17.28 mm 、 -17.16 mm 、 -17.05 mm ，最大主应力峰值分别为 -193.53 kPa 、 -266.74 kPa 、 -336.44 kPa 、 -398.35 kPa 。对比分析其余监测点计算结果，发现相似的规律。这是由于净距越大，隧道埋深越深，距离震源越近，且所受自重应力越大，因此下部隧道各监测点最大主应力随净距的增大而增大，但埋深越深导致隧道所受约束越大，距离地面越近所受约束越小，因此下部隧道各监测点加速度峰值、位移峰值随净距的增大而减小。

(2) 随着净距的增大,边墙监测点沿隧道方向加速度峰值、位移峰值、最大主应力峰值变化曲线趋于平缓,交叉点处与沿隧道方向其余监测点差值逐渐减小。对比拱顶、拱脚与隧底计算结果,发现相似的规律。说明随着净距的增大,隧道距离上部路基的距离变大,上部重载列车运行对下部隧道的影响逐渐减弱。

(3) 随着净距的改变,交叉段 4 个监测点的加速度峰值、位移峰值、最大主应力峰值大小关系不变。加速度峰值由大到小依次为拱顶、隧底、边墙和拱脚;位移峰值由大到小依次为拱顶、边墙、拱脚和隧底;最大主应力峰值由大到小依次为拱脚、边墙、拱顶和隧底。说明净距的改变不会改变隧道各监测点的动力响应特征大小关系。

(4) 综合第(1)、(2)条结论,为类似工程提供建议,由于隧道的振动加速度响应与位移响应随着净距的增大而减小,且净距增大会使上部重载列车运行对下部隧道的影响变小。因此,在设计类似穿越工程时,在规范允许与施工方便的前提下,应加大隧道与路基间的距离。

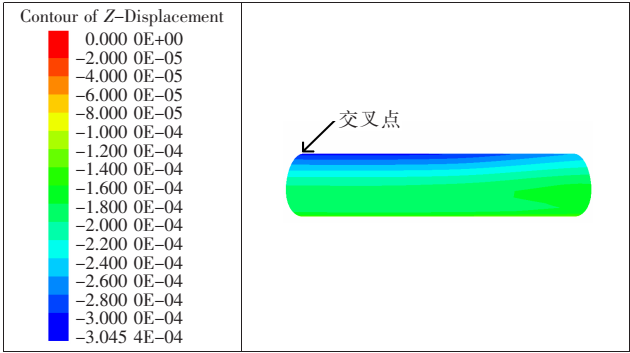
2.3 交叉角度的影响

图 7 为耦合动荷载下下部隧道衬砌在不同交叉角度下(工况 1、6、7、8)竖直方向位移云图(为便于比较,截取交叉点后 50 m)。

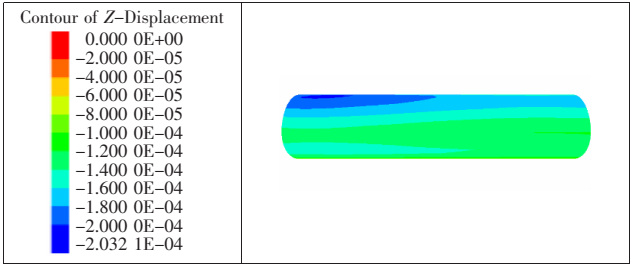
由图 7 可以看出:不同交叉角度下衬砌竖直方向整体位移有一定差别,0°与 90°时整体位移相比 30°与 60°时较大,但相差很小,而交叉角度对下部隧道的主要受影响范围影响较大,随着交叉角度的增大,下部隧道衬砌竖直方向位移受上部运行条件的影响范围逐渐减小。在交叉角度为 0°时(上部路基与下部隧道平行),下部隧道衬砌竖直方向位移沿隧道方向无变化,即下部隧道整体受影响;在交叉角度为 30°、60°和 90°时,相对于整条隧道,产生较大位移的范围分别为交叉点后 26 m、16 m 和 12 m。这是因为随着交叉角度的增大,上部路基与下部隧道形成的重叠区域逐渐减小。

交叉段各典型监测点在不同交叉角度下最大主应力峰值如表 3 所示。

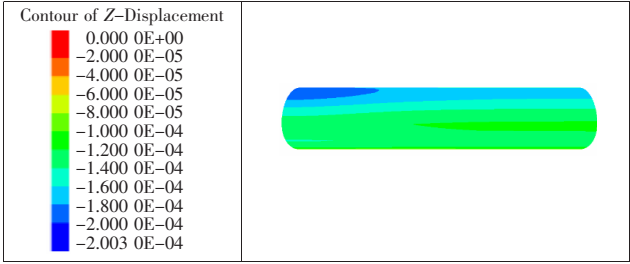
根据计算结果及分析表 3 可以看出:下部隧道交叉段各监测点最大主应力峰值在不同交叉角度下有一定差别。以边墙监测点为例,其在 0°、30°、60°和 90°下最大主应力峰值分别为-269.46 kPa、-265.20 kPa、-265.14 kPa 和 -266.74 kPa,说明交叉角度对各监测点最大主应力峰值有一定影响,但影响很小。



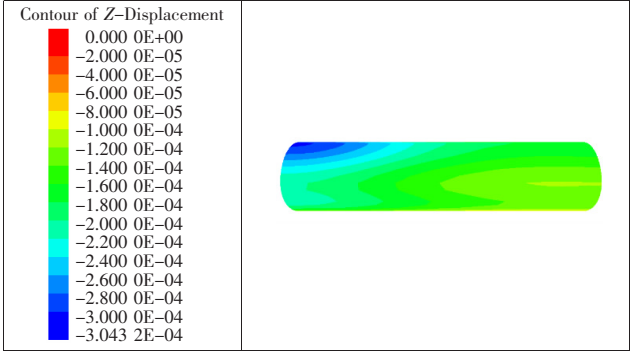
(a) 0°



(b) 30°



(c) 60°



(d) 90°

图 7 不同交叉角度下隧道衬砌竖直方向位移云图(单位:m)

综上所述,发现交叉角度对交叉段监测点最大主应力峰值影响较小,但与下部隧道受影响范围有一定关系,交叉角度越大,下部隧道受影响范围越小。因此,在设计类似工程时,在满足规范设计要求的前提下,应尽量增大其交叉角度。

表3 交叉段监测点最大主应力峰值

交叉角度/ (°)	最大主应力峰值/kPa			
	拱顶	边墙	拱脚	隧底
0	-64.96	-269.46	-332.30	-60.45
30	-64.60	-265.20	-331.68	-61.18
60	-62.40	-265.14	-330.44	-60.94
90	-67.62	-266.74	-337.45	-61.76

3 敏感性分析

通过前文分析发现,下部隧道结构在耦合动荷载下的动力响应受到净距和交叉角度的影响,因此在进行实际工程设计和施工时,需要对净距和交叉角度进行重点考虑。下面利用参数敏感性分析的方法研究净距和交叉角度对下部隧道在耦合动荷载下最大主应力峰值的影响程度大小。

敏感性分析是在分析系统稳定性时一种常用的分析方法。主要通过数值分析的方法分析各影响因素对系统的敏感性,最终得到各影响因素的敏感度因子,根据其大小关系进行排序,敏感度因子越大,说明其对系统的影响程度越大,敏感度因子越小,影响程度越小。

目前,敏感性分析方法有很多种,该文参考文献[19-20]给出一种常用的敏感性分析方法,主要步骤如下:

(1) 利用回归分析的方法分别分析各影响参数对系统特性 P 的影响,给出函数关系式:

$$P=f\{a_1^*,\cdots,a_{k-1}^*,a_k,a_{k+1}^*,\cdots,a_k^*\}=\varphi_k(a_k)$$
(4)

根据式(4)绘制特性曲线 $P-a_k$ 。

(2) 定义无量纲形式的敏感度函数:

$$S_k(a_k)=(|\Delta P|/P)/(|\Delta a_k|/a_k)=|\Delta P/\Delta a_k|\cdot(a_k/P)$$
(5)

式中: a_k 为影响参数; $k=1,2,3,\cdots,n$; $|\Delta P|/P$ 为系统特性 P 的相对误差; $|\Delta a_k|/a_k$ 为影响因素 a_k 的相对误差。

(3) 根据式(5)绘制出 a_k 的敏感度函数曲线 S_k-a_k 。取 $a_k=a_k^*$,即可得到影响参数 a_k 的敏感度因子 S_k^* :

$$S_k^*=S_k(a_k^*)=\left|\left(\frac{d\varphi_k(a_k)}{da_k}\right)_{a_k=a_k^*}\right|\frac{a_k^*}{P^*}$$
(6)

通过对敏感度因子的比较,对各影响因素的敏感

性进行评价。

应用上述方法,对各影响参数进行逐个分析。下面给出隧道边墙最大主应力峰值 σ 与净距 J 之间的分析过程。

根据计算结果,采用线性拟合的方法,建立 σ 与 J 之间的函数关系式:

$$\sigma=-136.84J-127.72$$
(7)

再由式(5)、(6)得到敏感度函数:

$$S_J=\left|\frac{-136.84J}{-136.84J-127.72}\right|$$
(8)

将基准值 $J=1D=13\text{ m}$ 代入式(8),得出其敏感度因子为 0.933。

对其余敏感度因子做类似计算分析,得出各参数基准值的敏感度因子见表 4。

表4 敏感度因子计算结果

影响因素	敏感度因子			
	拱顶	边墙	拱脚	隧底
净距	0.562	0.933	0.856	0.187
交叉角度	0.026	0.010	0.013	0.018

由表 4 可知:耦合动荷载下对下部隧道交叉段监测点影响敏感度较大的为净距,交叉角度的敏感度因子小,且与净距的敏感度因子相差较大。以拱顶为例,净距的敏感度因子为 0.562,交叉角度的敏感度因子为 0.026。说明相比交叉角度,净距对下部隧道在耦合动荷载下的动态特性影响程度大。因此,在进行类似穿越工程设计时,应首先考虑净距,其次考虑交叉角度。

4 结论

建立了重载列车运行与地震力耦合作用下高速公路隧道下穿重载铁路路基结构动力分析模型,重点研究了荷载形式、净距、交叉角度对下部隧道结构动力特性的影响,并运用敏感性分析的方法对影响因素进行了分析,主要结论如下:

(1) 在两种不同荷载形式下,下部隧道加速度峰值、位移峰值、最大主应力峰值沿隧道方向变化曲线呈现相似的规律,表现为中间大两头小,在交叉点处出现最大值,距离交叉点越远,曲线越平缓。并且在耦合动荷载下加速度峰值、位移峰值和最大主应力峰值比只有重载列车荷载作用时大。说明在地震作用下考虑上部重载列车作用将会对下部隧道安全产生更为严重的

影响。

(2) 随着净距增大,下部隧道在耦合动荷载下各监测点最大主应力峰值随之增大,而由于隧道埋深增大,导致隧道所受约束越大,因此,下部隧道各监测点加速度峰值与位移峰值随净距的增大而减小。

(3) 交叉角度对下部隧道的影响仅限于下部隧道的受影响范围,对其最大主应力峰值响应影响很小。交叉角度为 0° 时,下部隧道整体受影响;而交叉角度分别为 30° 、 60° 、 90° 时,对应的下部隧道主要受影响范围为 26 m、16 m、12 m,可见,随着交叉角度的增大,下部隧道受影响范围逐渐减小。

(4) 由敏感性分析可得,耦合动荷载下,对下部隧道影响较敏感的因素是净距,交叉角度对其影响较小。结合前述分析,建议设计类似工程时应首先考虑净距,其次考虑交叉角度,在规范允许前提下净距与交叉角度应尽量加大。

参考文献:

- [1] 胡亚东.我国铁路重载运输技术体系的现状与发展[J].中国铁道科学,2015,36(2):1-10.
- [2] 李丰果,赵元红.超浅埋特大断面直墙隧道下穿城市主干道暗挖施工关键技术[J].隧道建设(中英文),2018,38(11):1 868-1 877.
- [3] 朱正国,杨利海,王道远,等.立体交叉隧道爆破动力响应和安全范围研究[J].铁道工程学报,2019,36(1):59-64.
- [4] 刘鑫榕.地铁隧道长距离下穿高速公路施工扰动影响及控制技术研究[J].中外公路,2019,39(4):192-195.
- [5] 黄明利,瞿晓巍,谭忠盛,等.地铁重庆北站零距离立体交叉暗挖施工力学效应分析[J].土木工程学报,2017,50(S2):21-27.
- [6] 王海龙,赵岩,王永佳,等.新建京张高铁立体交叉隧道爆破振动控制研究[J].铁道标准设计,2018,62(7):130-134.
- [7] 董捷,王志岗,仲帅.新建隧道下穿高速公路动力响应及变形控制研究[J].铁道标准设计,2019,63(8):133-

139.

- [8] BALENDRA T,KOH C G,HO Y C. Dynamic Response of Buildings Due to Trains in Underground Tunnels [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,1991,20(3):275-291.
- [9] 董捷,仲帅,王志岗.基底脱空条件下交叉隧道动力放大效应[J].科学技术与工程,2019,19(17):293-299.
- [10] 杨敏,靳军伟.桩基础与既有地铁隧道相互影响的研究进展[J].建筑结构学报,2016,37(8):90-100.
- [11] CHEN L J,LIANG B,WANG Z Y. Dynamic Response Analysis for Intersection of Transverse Traffic Tubes and Main Tunnel in a Highly Seismic Region[J]. Advanced Materials Research,2011,255-260(5):2 510-2 514.
- [12] LIU J B,ZHANG X B. Practical Seismic Analysis of Large Underground Structures: Theory and Application [J]. Science China Technological Sciences,2018,61(9):1 417-1 425.
- [13] 李雪红,梁陈,徐秀丽,等.上部建筑物对隧道结构地震响应的研究[J].建筑结构学报,2018,39(S1):329-336.
- [14] 朱正国,杨利海,王晓男.交叉隧道耦合动荷载动力响应及安全分析[J].铁道工程学报,2018,35(3):63-68.
- [15] 岳庆霞,任晓丹,张鑫.考虑土体弹性模量随机场的隧道结构地震响应分析[J].建筑结构学报,2016,37(S1):356-361.
- [16] 梁波,蔡英.不平顺条件下高速铁路路基的动力分析[J].铁道学报,2013,30(3):66-70,113.
- [17] 冯军和,闫维明.列车随机激振荷载的数值模拟[J].振动与冲击,2008(2):49-52.
- [18] 翟婉明.列车-轨道-桥梁动力相互作用理论与工程应用[M].北京:科学出版社,2011.
- [19] 章光,朱维申.参数敏感性分析与试验方案优化[J].岩土力学,1993,14(1):51-58.
- [20] 朱正国,杨利海,刘桂朋,等.地震对交叉隧道影响机制及抗震方案研究[J].铁道工程学报,2018,35(9):61-66.