

# 下穿公路对既有铁路桥梁位移与内力的参数敏感性分析

徐有为

(湖南聚创建筑科技有限公司, 湖南 长沙 410205)

**摘要:** 对下穿公路填方进行数值模拟, 从桥墩水平位移、竖向沉降、桩基附加力等方面分析土体弹性模量、土体黏聚力、土体内摩擦角、软土厚度、公路填土高度、桥墩高度、铁路扣件参数等变化对既有铁路桥梁位移和内力的影响。结果表明, 铁路结构水平位移对土体内摩擦角的变化最敏感, 竖向位移对软土厚度、土体弹性模量、公路填土高度的变化较敏感, 桩基附加力对公路填土高度的变化较敏感。

**关键词:** 桥梁; 下穿公路; 内力; 位移; 参数敏感性

**中图分类号:** U445.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2023)04-0125-05

随着公路网与铁路网的不断完善, 不可避免地出现公路与铁路交叉的情况。中国铁路项目尤其是高速铁路大都以桥梁为主, 桥下空间足够, 新建公路与既有铁路交叉时常采用新建公路下穿铁路的方式。新建公路下穿既有铁路桥梁对铁路桥梁基础的加载与卸载会导致铁路桥梁产生安全隐患, 对影响铁路桥梁安全运营的参数的敏感性进行分析有利于在项目实施前有针对性地进行规避并制定相应措施。综合相关文献研究成果<sup>[1-3]</sup>, 本文选用土体弹性模量、土体黏聚力、土体内摩擦角、软土厚度、公路填土高度、既有桥梁桥墩高度、铁路扣件参数为既有铁路桥梁位移和内力的影响参数, 分别给予单一参数 $\pm 1\%$ 的摄动幅度, 其他参数均为基准值且保持不变, 进行模型计算分析, 得到高速铁路桥墩位移、轨道形位和桩身轴力变化及对各参数的敏感性系数, 根据敏感性系数大小区分主要敏感参数与次要敏感参数<sup>[4-5]</sup>。为便于各参数敏感性比较分析, 仅给出各参数单个变化量的计算结果。

## 1 工程背景及有限元模型

某新建公路下穿既有高速铁路 32 m 简支梁桥, 该桥采用圆端形桥墩, 基础为钻孔灌注桩。公路与高速铁路正交, 路基高 2 m, 路面宽 20 m。新建公路断面布置见图 1。为减小公路填方施工对既有高速铁路桥梁横向位移的影响, 采用从高速铁路交叉处里程向两侧对称施工的方式。

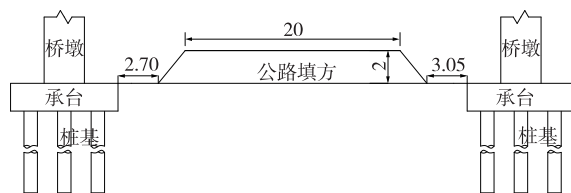


图 1 新建公路断面布置(单位:m)

采用 ABAQUS 有限元软件建立三跨 32 m 铁路标准简支梁桥三维有限元模型<sup>[6]</sup>, 土体模型平面尺寸为 120 m  $\times$  138 m, 高度为 150 m。采用混合单元, 土体采用 C3D8I 单元, 划分为 40 200 个单元、43 896 个节点。下部基础按实际尺寸建模, 采用线弹性本构模型, 桥墩、承台和基础合建为一个部件, 墩身采用 C40 混凝土, 承台和基础采用 C30 混凝土。下部基础采用 C3D8R 单元, 划分为 36 745 个单元、66 732 个节点。箱梁和钢轨采用梁单元模拟, 箱梁梁体采用 C40 混凝土。轨道为 60 型标准钢轨, 采用 B32 单元, 单元数量为 4 906 个。桥墩和梁单元之间采用耦合接触, 梁与钢轨之间采用弹簧接触(见图 2)。下穿段为软土路基, 各地层岩土力

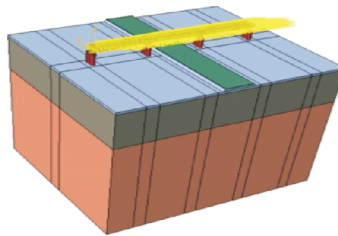


图 2 新建公路下穿既有高速铁路桥梁数值模型

学参数见表 1,其中人工填土(粉质黏土)厚度为 2 m,粉质黏土层厚度为 31 m,细砂层厚度为 116.45 m。

表 1 各地层岩土力学参数

岩土名称	密度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )	凝聚 力/kPa	压缩模 量/MPa	基本承 载力/kPa
粉质黏土 1	19.50	14.40	44.62	4.68	135.00
粉质黏土 2	20.00	13.18	40.07	6.27	150.00
细砂	20.00	25.85	—	15.00	250.00

2 下穿公路对既有铁路桥梁位移和内力的影响

2.1 下穿公路对既有铁路桥梁水平位移的影响

新建公路路基填土对高速铁路桥梁产生加载作用,因新建公路与铁路正交,铁路桥梁水平位移以顺桥向位移为主。公路填土高度为 2 m 时,离填土较近的 6# 墩、7# 墩受影响最大,两墩的位移见图 3、图 4、表 2、表 3。从表 2、表 3 可以看出:新建公路填土对既有铁路产生加载作用,使两边桥墩墩顶向填土方向移动,6# 墩、7# 墩墩顶顺桥向最大位移分别为 0.580 9 mm、-0.303 6 mm,横桥向最大位移分别为 0.003 7 mm、0.002 7 mm,横桥向位移较小。新建公路填土引起的墩顶顺桥向水平位移对铁路轨道平顺性有直接影响,须重点关注墩顶的顺桥向位移。

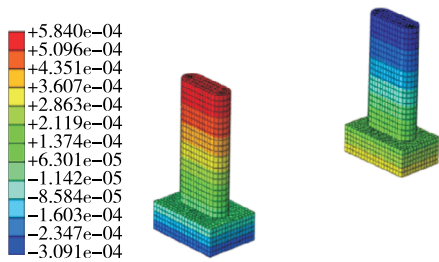


图 3 6# 墩、7# 墩的顺桥向位移(单位:m)

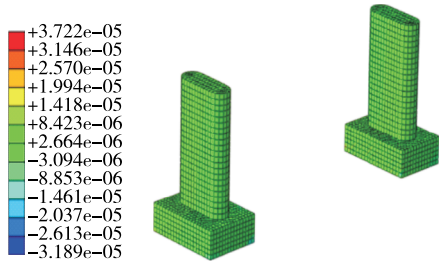


图 4 6# 墩、7# 墩的横桥向位移(单位:m)

表 2 6# 墩水平位移计算结果 单位:mm

测点	顺桥向 位移	横桥向 位移	测点	顺桥向 位移	横桥向 位移
$D_1$	0.580 9	0.003 7	$D_3$	0.573 0	0.003 6
$D_2$	0.573 2	0.003 6	$D_4$	0.580 7	0.003 7

表 3 7# 墩水平位移计算结果 单位:mm

测点	顺桥向 位移	横桥向 位移	测点	顺桥向 位移	横桥向 位移
$D_1$	-0.303 3	0.002 7	$D_3$	-0.303 3	0.002 5
$D_2$	-0.303 2	0.002 5	$D_4$	-0.303 6	0.002 7

轨道顺桥向、横桥向水平位移见表 4,梁长 0 处为 6# 墩。由表 4 可知:轨道顺桥向最大变形为 0.326 0 mm,出现在梁长 12.5 m 处。轨道顺桥向位移变化趋势与桥墩墩顶顺桥向位移大致相同,数值差别不大,轨道位移略小于墩顶位移,这主要是因为箱梁与轨道之间实际是以扣件连接,而计算模型中采用弹簧装置模拟它们之间的约束。轨道横桥向最大位移为 0.003 7 mm,出现在梁长 0 处,位移大小和趋势与墩顶位移基本一致。

表 4 轨道的水平位移计算结果

梁长/m	顺桥向 位移	横桥向 位移	梁长/m	顺桥向 位移	横桥向 位移
0.00	0.250 0	0.003 7	17.50	0.309 0	0.003 2
2.50	0.285 0	0.003 6	20.00	0.275 0	0.003 1
5.00	0.297 0	0.003 5	22.50	0.236 1	0.003 0
7.50	0.306 0	0.003 4	25.00	0.201 0	0.002 9
10.00	0.314 0	0.003 3	27.50	0.152 0	0.002 8
12.50	0.326 0	0.003 3	30.00	0.125 0	0.002 6
15.00	0.321 0	0.003 2	32.00	0.005 0	0.002 5

综上所述,当公路填土高度为 2 m 时,既有高速铁路桥梁桥墩顶的顺桥向水平位移最大值为 0.580 9 mm,横桥向水平位移最大值为 0.003 7 mm,墩顶顺桥向位移远大于横桥向位移,主要是因为新建公路采用与铁路正交的下穿方式,铁路线左右两侧的荷载大致相同,引起的墩顶横桥向位移较小。对于这类下穿工程,水平位移主要考虑墩顶顺桥向水平位移。

如果填土不是对称填筑,而是从一侧往另一侧填筑,将产生对铁路单侧加载工况,此时铁路桥梁桥墩顶及轨道的横桥向最大位移分别为-0.405 2 mm、

-0.412 9 mm。

2.2 下穿公路对既有铁路桥梁竖向位移的影响

新建公路填土会使铁路桥梁发生竖向位移,对离填土较近的 6#墩、7#墩的影响最大。公路填土高度为 2 m 时,6#墩、7#墩的竖向位移见图 5、表 5,轨道的竖向位移见表 6。由表 5、表 6 可知:6#墩、7#墩墩顶竖向最大位移分别为-1.134 8 mm、-1.108 6 mm;轨道的最大竖向位移为-1.162 4 mm,发生在梁长 15.0 m 处,位移趋势与墩顶位移基本一致。墩顶的竖向位移大于水平位移,但未超过无砟轨道静定结构相邻墩台沉降量之差≤5 mm 的限值<sup>[7]</sup>。

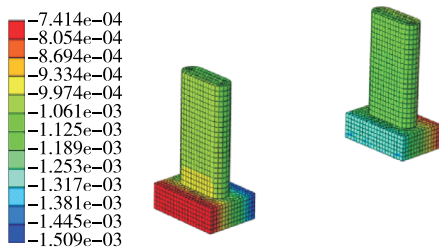


图 5 6#、7#墩的竖向位移(单位:m)

表 5 6#墩、7#墩的竖向位移计算结果 单位:mm

6#墩测点	6#墩竖向位移	7#墩测点	7#墩竖向位移
D <sub>1</sub>	-1.046 6	D <sub>1</sub>	-1.108 6
D <sub>2</sub>	-1.134 8	D <sub>2</sub>	-1.020 4
D <sub>3</sub>	-1.134 2	D <sub>3</sub>	-1.020 5
D <sub>4</sub>	-1.046 0	D <sub>4</sub>	-1.108 6

表 6 轨道的竖向位移计算结果

梁长/m	轨道竖向位移/mm	梁长/m	轨道竖向位移/mm
0.00	-1.131 2	17.50	-1.160 2
2.50	-1.138 6	20.00	-1.152 3
5.00	-1.141 2	22.50	-1.154 5
7.50	-1.150 3	25.00	-1.157 4
10.00	-1.160 6	27.50	-1.142 5
12.50	-1.161 4	30.00	-1.132 7
15.00	-1.162 4	32.00	-1.127 3

2.3 下穿公路对既有铁路桥梁桩基受力的影响

软土区域土层承载力较薄弱,新建公路导致铁路桩基周围土体的沉降大于桩本身的沉降时,将对桩基产生向下的负摩阻力,不仅造成桥梁基础沉降不均匀,还会降低桩基的竖向承载力。高速铁路对

梁轨系统的平顺性要求严格,在软土地区新建公路下穿铁路时须验算桩基础的桩侧摩阻力和桩基附加轴力<sup>[8-9]</sup>。该项目主要分析影响较大的 6#墩、7#墩桩基受力的变化,选择受力较大的角桩进行分析。

6#墩、7#墩角桩的附加轴力变化见图 6。由图 6 可知:6#墩桩基轴力最大附加值为 658.173 kN,出现在 50%桩长处;7#墩桩基轴力最大附加值为 645.772 kN,出现在 52%桩长处。公路填土距离两桥墩基础角点的净距分别为 2.7 m、3.0 m,相差不大,故两桥墩轴力附加值也相近。

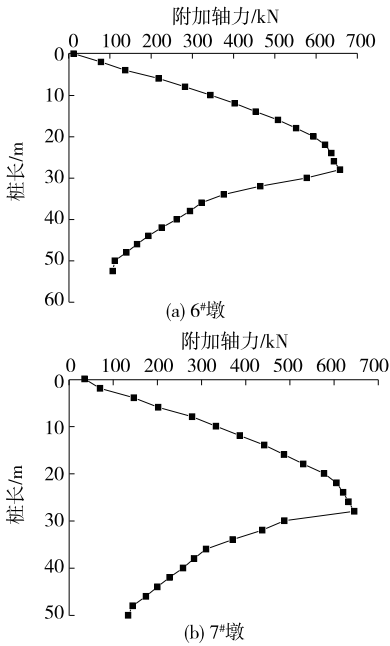


图 6 新建公路下穿铁路时铁路桥梁桩基的附加轴力

6#墩、7#墩桩身的附加摩阻力变化见图 7。从图 7 可以看出:6#墩桩身附加摩阻力最大值为-12.896 kPa,中性点相对系数为 0.50;7#墩桩身附加摩阻力最大值为-12.228 kPa,中性点相对系数为 0.52。

综上,桩身轴力在软质黏土至砂土的过渡层处产生突变,主要是因为上部桩身位于软土地基、下部桩身位于较坚硬土层中,软土地基中土体受扰动产生的位移大于桩身位移,导致桩基产生负摩阻力,桩身轴力附加值表现为先增大后减小。

3 既有铁路桥梁位移和受力对各参数的敏感性分析

选取土体弹性模量、土体黏聚力、土体内摩擦角、软土厚度、桥墩高度、公路填土高度、铁路扣件参数为影响参数,采用单一变量法,摄动值取±1%,扣

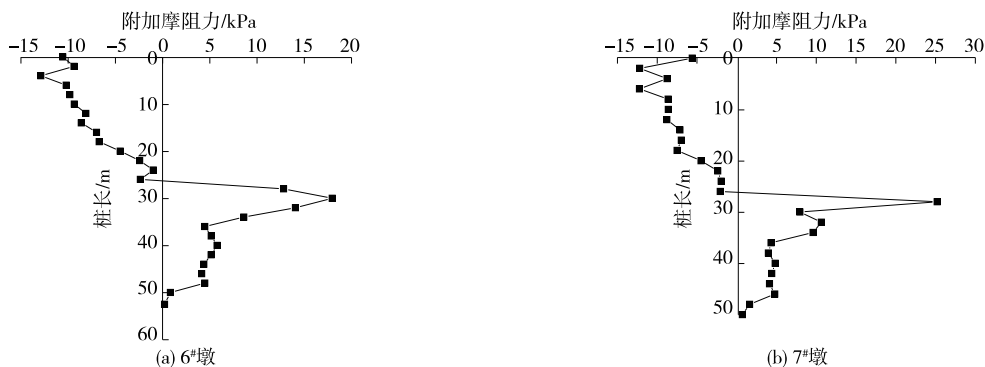


图 7 新建公路下穿铁路时铁路桥梁桩基的附加摩阻力

件参数分为铁路无载工况和有机车荷载工况,分析不同参数变化影响下既有高速铁路的附加水平位移、附加竖向位移和桩基附加力的变化,研究位移和桩基受力对各参数的敏感性<sup>[10-11]</sup>。

3.1 铁路桥梁墩身和轨道顺桥向位移对各参数的敏感性

根据各工况下既有铁路桥梁在填土荷载作用下的位移,得出铁路桥梁墩身和轨道顺桥向水平位移

对各参数的敏感性系数(见表 7)。因横桥向位移较小,不做讨论。

由表 7 可知:高速铁路结构顺桥向水平位移对土体内摩擦角和扣件参数的变化最敏感,对土体黏聚力、粉质黏土层厚度变化的敏感性次之,填土高度和土体弹性模量也对高速铁路结构水平位移有一定影响;桥墩高度对铁路顺桥向水平位移的影响较小,说明基础未发生较大转动。

表 7 铁路桥梁墩身和轨道顺桥向位移对各参数的敏感性系数

铁路构件	铁路顺桥向水平位移对各参数的敏感性系数						
	土体弹性模量	土体黏聚力	土体内摩擦角	软土厚度	桥墩高度	公路填土高度	扣件参数
6# 墩	0.59	1.03	3.89	2.05	0.15	0.83	4.58
7# 墩	0.46	2.08	6.55	3.13	0.66	0.23	6.13
轨道	0.64	1.23	4.94	2.21	0.28	0.89	1.50

3.2 铁路桥梁墩身和轨道竖向位移对各参数的敏感性

各参数折减 1%,提取铁路桥梁墩身和轨道各测点处竖向位移,得到各参数折减情况下铁路桥梁墩身和轨道的累积竖向位移(见表 8)。由表 8 可知:高速铁路结构的竖向位移对软土厚度、填土高度、土体弹性模量的变化最敏感,对土体内摩擦角变化的敏感性次之,土体黏聚力和扣件参数变化对高速铁路结构竖向位移有一定影响,桥墩高度对铁路竖向位移的影响较小。

3.3 铁路桥梁桩基受力对各参数的敏感性

根据各工况下既有铁路桥梁在填土荷载作用下的位移,得出 6# 墩、7# 墩桩基轴力和摩阻力对各参数的敏感性系数(见表 9)。

由表 9 可知:高速铁路桩基附加轴力对填土高度的变化最敏感,对桥墩高度和扣件参数的敏感性次之,土体弹性模量、土体黏聚力、土体内摩擦角、软土厚度对桩基附加轴力有一定影响;高速铁路桩基附加摩阻力对桥墩高度的变化最敏感,其他参数对附加摩阻力的影响较小。

表 8 铁路桥梁墩身和轨道竖向位移对各参数的敏感性系数

铁路构件	铁路竖向位移对各参数的敏感性系数						
	土体弹性模量	土体黏聚力	土体内摩擦角	软土厚度	桥墩高度	公路填土高度	扣件参数
6# 墩	1.33	0.12	0.28	1.67	0.03	1.38	0.19
7# 墩	1.37	0.13	0.31	1.70	0.02	1.38	0.17
轨道	1.33	0.22	0.64	1.63	0.25	1.44	0.52

表9 铁路桥梁6#墩、7#墩桩基附加轴力、附加摩阻力对各参数的敏感性系数

项目	桩基附加轴力、附加摩阻力对各参数的敏感性系数						
	土体弹性模量	土体黏聚力	土体内摩擦角	软土厚度	桥墩高度	公路填土高度	扣件参数
6#墩轴力	0.26	0.20	0.53	0.01	0.49	1.46	0.93
7#墩轴力	0.33	0.16	0.21	0.36	0.86	1.83	0.16
6#墩摩阻力	0.96	0.15	0.60	0.00	49.16	1.37	0.15
7#墩摩阻力	8.34	9.11	9.58	8.85	41.85	7.19	2.80

4 结论

本文通过单一参数摄动法分析新建公路下穿既有铁路桥梁时不同参数对铁路桥梁桥墩顶位移、桩基受力的影响,主要结论如下:

(1) 公路下穿工程引起墩顶顺桥向最大水平位移为 0.580 9 mm,横桥向最大水平位移为 0.003 7 mm,桥墩和轨道的顺桥向位移大于横桥向位移。

(2) 公路填筑对既有地基产生较大附加重力荷载,由此引起的桥梁桥墩顶最大竖向位移为-1.134 8 mm,竖向位移是下穿工程的关键控制指标。

(3) 公路下穿工程引起的桥墩桩基轴力最大附加值为 658.173 kN,桩侧摩阻力最大附加值为-12.896 kPa,摩阻力中性点位于 50%~52%桩长处。

(4) 高速铁路结构顺桥向水平位移对土体内摩擦角和扣件参数的变化最敏感,墩顶敏感性系数大于 2,其余参数的敏感性大小排序为土体黏聚力>地基软土层厚度>填土高度>土体弹性模量>桥墩高度。桥墩高度对墩顶水平位移的影响很小,说明承台转动不大。高速铁路桥梁竖向位移对软土厚度的变化最敏感,最大敏感性系数为 1.7;其次是填土高度和土体弹性模量,敏感性系数为 1.38;扣件参数、土体黏聚力和内摩擦角的变化对竖向位移有一定影响,敏感性系数为 0.1~0.4;桥墩高度变化对桥墩竖向位移的影响最小。

(5) 高速铁路桩基附加轴力对填土高度的变化最敏感,敏感性系数大于 1;对其他参数变化的敏感性系数为 0~1。高速铁路桩基附加摩阻力对桥墩

高度的变化最敏感,敏感性系数大于 40;对其他参数变化的敏感性系数在 10 以下。

参考文献:

[1] 中交一公局集团有限公司.公路桥涵施工技术规范:JTG/T 3650—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.

[2] 张军辉,周剑坤,周平.软土地区高速公路路基沉降监测及预测分析[J].公路与汽运,2020(3):64—68.

[3] 史豪杰,李富相,李志勇.公常路下穿改造工程深基坑开挖施工监测与稳定性分析[J].公路与汽运,2021(4):97—100+165.

[4] 周勇.新东路下穿京港澳高速箱涵施工技术[J].湖南交通科技,2015,41(1):143—146.

[5] 刘榕,伍英,丁延书,等.多塔矮塔斜拉桥结构参数敏感性分析[J].铁道科学与工程学报,2018,15(5):1224—1230.

[6] 左亚飞.新建公路工程下穿既有高速铁路桥梁影响的研究[D].北京:北京交通大学,2016.

[7] 中国铁道科学研究院.铁路工程沉降变形观测与评估技术规程:Q/CR 9230—2016[S].北京:中国铁道出版社,2017.

[8] 陆莎莎.高速公路下穿既有铁路工程安全风险评估及控制研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.

[9] 高世强.高速铁路桥梁桥下新建公路工程的安全性分析[J].铁道标准设计,2015,59(4):63—67.

[10] 王景春,刘旭菲,侯卫红.新建桥梁对运营高铁基础变位的影响研究[J].铁道工程学报,2017,34(7):60—65+83.

[11] 高云娇.高速铁路下穿既有铁路线路的变形规律和施工技术研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2013.

收稿日期:2022—12—27