

地下道路结构中反应位移法计算参数影响分析

顾志超

(上海市政交通设计研究院有限公司, 上海市 200030)

摘要: 在已有研究的基础上, 针对地下道路结构中反应位移法各计算参数对计算结果的影响进行相关探讨, 建立多个模型对比分析。结果表明, 对于某一特定地区的单层地下道路结构而言, 地震作用下结构最不利位置处于结构覆土厚度最大、基准面深度最小、土体剪切波速最大处。结构横断面宽度对结构各内力的影响不尽相同, 需具体分析。

关键词: 地下道路结构; 反应位移法; 计算参数; 内力放大系数

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)06-0224-03

0 引言

随着经济和社会的发展, 城市人口日趋集中, 交通拥堵问题日益严重, 修建地下道路也成为各大城市改善交通环境的一个发展趋势^[1]。

我国位于世界两大地震带——环太平洋地震带与欧亚地震带之间, 受太平洋板块、印度板块和菲律宾海板块的挤压, 地震断裂带十分活跃。1995年日本阪神地震和2008年中国汶川地震都表明, 地下结构在地震作用下并不是绝对安全的, 应加强地下结构抗震设计^[2-3]。

目前地下结构抗震分析理论主要分为解析法、数值法和简化实用分析方法。其中, 简化分析方法由于具有概念明确、计算简单、精度相对较高等特点, 在实际工程设计中得到了广泛应用^[4]。GB/T 51336—2018《地下结构抗震设计标准》中明确推荐地下道路结构采用反应位移法进行抗震分析。

反应位移法取地震时地下结构周边地层的变形作为地震作用, 该方法概念清晰, 比较符合地下结构的地震振动特性。刘晶波等^[5-7]指出经典反应位移法是一种较为实用的地下结构地震反应分析方法, 反应位移法的计算结果易受计算参数的影响, 在各计算参数中, 地层剪应力对结构内力计算结果影响最大, 地层变形其次, 然后是惯性力, 弹簧系数的影响最小。

本文在已有研究的基础上, 针对地下道路结构中反应位移法各计算参数对计算结果的影响进行相

关探讨, 以期找出地震情况下地下道路结构最不利断面所处位置, 为实际工程设计提供参考。

1 反应位移法基本原理

根据 GB 50909—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》相关规定, 采用反应位移法进行抗震分析时, 主要需要计算土层位移、结构惯性力、土层剪力, 并确定地基弹簧, 见图1。

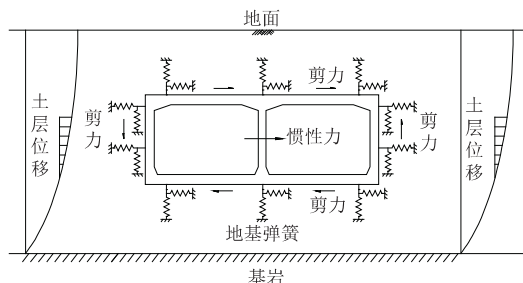


图1 计算模型简图

1.1 土层位移

土层位移假设为余弦函数, 具体公式如下:

$$U(z) = \frac{1}{2} u_{\max} \cos \frac{\pi z}{2h} \quad (1)$$

式中: $u_{\max}$ 为场地地表最大位移, 可根据地震动峰值加速度按规范取值; z 为计算点埋深, h 为设计地震作用基准面的深度。由此可见, 对于某一特定地区的地下道路结构而言, 影响土层位移的主要参数为结构覆土厚度 h_1 和基准面深度 h 。

1.2 结构惯性力

对于某一特定地区的地下道路结构而言, 结构惯性力只与结构质量有关。

1.3 土层剪力

对土层位移微分求出土层应变, 再通过物理关系

收稿日期: 2020-10-27

作者简介: 顾志超(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事地下结构设计工作。

可确定土层剪力:

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u(z)}{\partial z} = -\frac{\pi}{2h} \frac{1}{2} u_{\max} \sin \frac{\pi z}{2h} \quad (2)$$

$$\tau = G\gamma_{xz} \quad (3)$$

$$G = \rho c_s^2 \quad (4)$$

式中: ρ 为土的质量密度; c_s 为土体的剪切波速。由此可见,对于某一特定地区的地下道路结构而言,影响土层剪力的主要参数为结构覆土厚度 h_1 、基准面深度 h 和土体剪切波速 c_s 。

1.4 地基弹簧

地基弹簧不是一个独立的土体特性,他的取值与土体性质、基础尺寸等均有关系^[8]。目前,地基弹簧的取值方法主要有试验法、有限元法和经验公式法。试验法和有限元法可以较为准确的得出地基弹簧系数,但是无法反映出地基弹簧与土体性质、基础尺寸的具体关系。为更加准确的研究各计算参数对反应位移法结果的影响,本文采用李英民法^[9]来确定地基弹簧系数。李英民法地基弹簧经验公式可表示为:

结构底板法向和切向弹簧:

$$K_{n1} = 2\rho c_s^2 (1+\nu) a_1^{-1} (Bh_1)^{-b1} \quad (5)$$

$$K_{v1} = \rho c_s^2 a_3^{-1} (Bh_2)^{-b3} \quad (6)$$

结构侧墙法向和切向弹簧:

$$K_{n2} = 2\rho c_s^2 (1+\nu) a_2^{-1} (Bh_2)^{-b2} \quad (7)$$

$$K_{v2} = \rho c_s^2 a_4^{-1} (Bh_2)^{-b4} \quad (8)$$

式中: B 为结构横截面宽度; H 为结构横截面高度(对于单层地下道路结构而言, H 变化不大,可取为常数); h_2 为结构底板至基准面的土层厚度; a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 为系数。土体泊松比 ν 一般在0.25~0.4之间, ν 的取值对地基弹簧系数取值的影响只有12%,对结构性状变化影响更小^[10]。为便于分析, ν 统一取为0.25。由此可见,对于某一特定地区的单层地下道路结构而言,影响地基弹簧的主要参数为结构覆土厚度 h_1 、基准面深度 h 、土体剪切波速 c_s 和结构横断面宽度 B 。

综上所述,对于某一特定地区的单层地下道路结构而言,影响反应位移法计算结果的主要参数为结构覆土厚度 h_1 、基准面深度 h 、土体剪切波速 c_s 和结构横断面宽度 B 。

2 模型建立

西安地区某地下道路工程双向四车道标准断面见图2,结构横断面宽度 $B=21.1$ m,结构高度 $H=8.1$ m,结构覆土厚度 $h_1=3$ m,土体剪切波速 $c_s=250$ m/s,基准面深度 $h=70$ m。场地抗震设防烈度为8度,设计

基本地震加速度为0.20g,所属设计地震分组为第二组,场地类别为Ⅱ类。

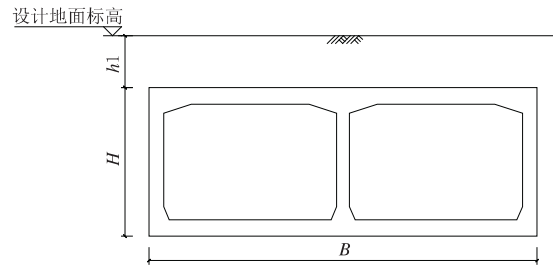


图2 地下道路结构横断面图

采用Autodesk Robot Structural Analysis Professional结构有限元计算软件建立上文所述基本模型,并分别单独变化结构覆土厚度 h_1 、基准面深度 h 、土体剪切波速 c_s 和结构横断面宽度 B 这四个参数,其中结构覆土厚度 h_1 取1.5 m、3 m、4.5 m、6 m、7.5 m,基准面深度 h 取30 m、40 m、50 m、60 m、70 m,土体剪切波速 c_s 取100 m/s、150 m/s、200 m/s、250 m/s、300 m/s,结构横断面宽度 B 取14.1 m(双向二车道)、21.1 m(双向四车道)、28.1 m(双向六车道)、35.1 m(双向八车道)、42.1 m(双向十车道)。以此观察每个参数的变化对结构地震作用结果的影响。

3 反应位移法计算参数影响分析

由于在承载能力极限工况下地下道路结构内力也会随着结构覆土厚度 h_1 、基准面深度 h (影响地基弹簧)、土体剪切波速 c_s (影响地基弹簧)和结构横断面宽度 B 这四个参数的变化而变化,为了更加准确地反映出上述四个参数对地震作用结果的影响,选取结构内力放大系数 η (地震作用工况下结构内力与承载能力极限工况下结构内力的比值)作为参数影响分析的指标。根据地下道路结构断面形式,分别选取顶板-弯矩(T-M)、底板弯矩(B-M)、侧墙-弯矩(S-M)、顶板-剪力(T-S)、底板-剪力(B-S)、侧墙-剪力(S-S)、顶板-轴力(T-A)、底板-轴力(B-A)、侧墙-轴力(S-A)、中墙-轴力(M-A)进行分析。

3.1 结构覆土厚度的影响

以基本模型为基础,结构覆土厚度 h_1 分别取1.5 m、3 m、4.5 m、6 m、7.5 m,建立5个模型,并采用反应位移法计算各模型的结构内力放大系数 η 。为便于比较,对结构内力放大系数 η 以基本模型 $h_1=3$ m为基准作归一化处理,可得结构覆土厚度变化对结构内力放大系数的影响趋势,见图3。

由图3可以看出,随着结构覆土厚度的增大,结

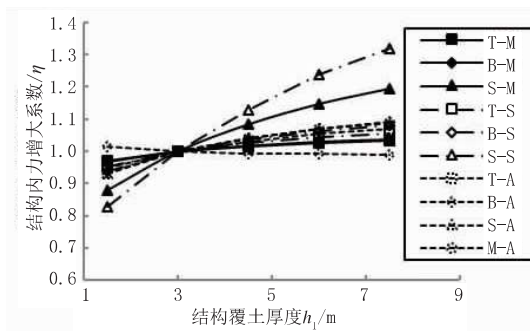


图3 结构内力放大系数与结构覆土厚度关系图

构各部位内力放大系数增大,其中侧墙剪力的放大系数变化最大,覆土厚度 $h_1=7.5$ m 的模型结构侧墙剪力放大系数约为覆土厚度 $h_1=3$ m 的 1.32 倍。

3.2 基准面深度的影响

以基本模型为基础,基准面深度 h 分别取 30 m、40 m、50 m、60 m、70 m,建立 5 个模型,并采用反应位移法计算各模型的结构内力放大系数 η 。对结构内力放大系数 η 以基本模型 $h=70$ m 为基准作归一化处理,可得基准面深度变化对结构内力放大系数的影响趋势,见图 4。

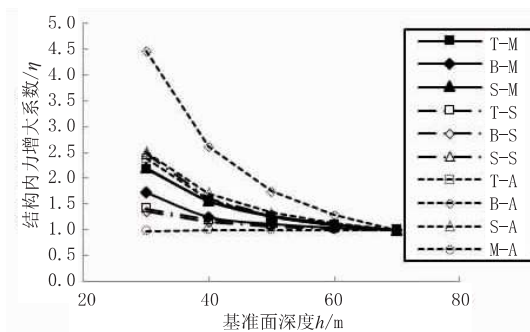


图4 结构内力放大系数与基准面深度关系图

由图 4 可以看出,随着基准面深度的增大,结构各部位内力放大系数减小,其中底板轴力的放大系数变化最大,基准面深度 $h=30$ m 的模型结构底板轴力放大系数约为基准面深度 $h=70$ m 的 4.47 倍。

3.3 土体剪切波速的影响

以基本模型为基础,土体剪切波速 c_s 分别取 100 m/s、150 m/s、200 m/s、250 m/s、300 m/s,建立 5 个模型,并采用反应位移法计算各模型的结构内力放大系数 η 。对结构内力放大系数 η 以基本模型 $c_s=250$ m/s 为基准作归一化处理,可得土体剪切波速变化对结构内力放大系数的影响趋势,见图 5。

由图 5 可以看出,随着土体剪切波速的增大,结构各部位内力放大系数增大,其中底板轴力的放大系数变化最大,土体剪切波速 $c_s=250$ m/s 的模型结构底板轴力放大系数约为土体剪切波速 $c_s=100$ m/s 的 2.22 倍。

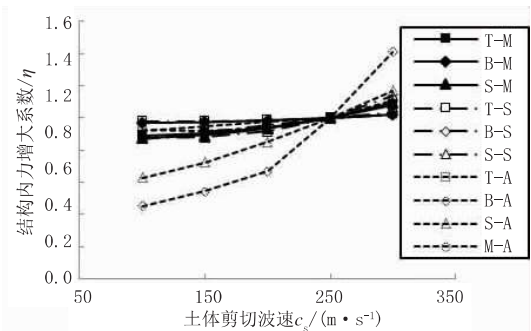


图5 结构内力放大系数与土体剪切波速关系图

3.4 结构横断面宽度的影响

以基本模型为基础,结构横断面宽度 B 分别取 14.1 m、21.1 m、28.1 m、35.1 m、42.1 m,建立 5 个模型,并采用反应位移法计算各模型的结构内力放大系数 η 。对结构内力放大系数 η 以基本模型 $B=21.1$ m 为基准作归一化处理,可得结构横断面宽度变化对结构内力放大系数的影响趋势,见图 6。

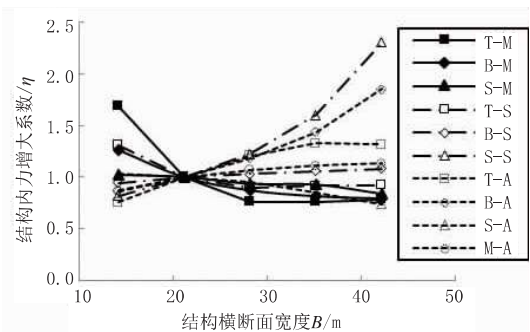


图6 结构内力放大系数与结构横断面宽度关系图

由图 6 可以看出,随着结构横断面宽度的增大,结构各部位弯矩放大系数减小、侧墙剪力放大系数增大、顶板及底板轴力放大系数增大、侧墙轴力放大系数减小,其中侧墙剪力的放大系数变化最大,结构横断面宽度 $B=42.1$ m 的模型结构侧墙剪力放大系数约为结构横断面宽度 $B=21.1$ m 的 2.31 倍。

4 结 论

本文在已有研究的基础上,针对地下道路结构中反应位移法各计算参数对结构内力变化的影响进行相关探讨,得出以下主要结论:

(1)地震作用下,随着结构覆土厚度的增大,结构各部位内力放大系数增大。

(2)地震作用下,随着基准面深度的增大,结构各部位内力放大系数减小。

(3)地震作用下,随着土体剪切波速的增大,结构各部位内力放大系数增大。

(4)地震作用下,随着结构横断面宽度的增大,结构各部位弯矩放大系数减小、侧墙剪力放大系数

(下转第 245 页)

表 7 组合最小反力 单位:kN

项目	荷载工况	1号梁	2号梁	3号梁	4号梁	5号梁
左支撑	预制梁	402.2	381.7	370.5	366	366.2
	铺装	139.9	130.1	124.9	122.9	122.8
	城-A级最小	-23.6	-2.2	0	-0.3	-0.7
	1.2恒+1.4活	599.1	600.5	589.3	584.4	586.1
右支撑	预制梁	338.1	335.1	363.7	366.6	365.6
	铺装	116.3	120.4	122.5	123.1	122.5
	城-A级最小	-15.5	-1.1	0	-0.3	-0.6
	1.2恒+1.4活	542.1	577.7	586.2	588.2	585.3

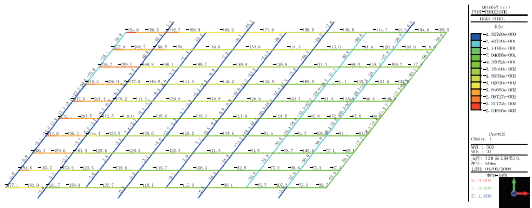


图 7 结构在城-A级车道荷载作用下的最小扭矩(单位:kN·m)

4.6 对比结果分析

斜交桥的力学特性与正桥有很大区别,对于斜交角度较大的桥梁,采用正桥的分析方法(单梁模型)并不合适。通过本工程实例采用的梁格分析表明:

(1)斜交梁桥与正桥计算结果的误差较大,弯矩和剪力的差别均超过10%。

(2)支座反力分布不均匀,钝角处出现较大的反

力。

(3)上部结构承受较大的扭转,需要按照现行规范核实截面及配筋。

5 结 语

梁格分析法是一种分析桥梁上部比较适用有效的空间分析方法,用等效梁格代替上部结构,分析梁格的受力状态从而得到桥梁的实际受力情况,具有基本概念清晰、易于理解和使用、计算量相对较小等特点。因此本文以温榆河跨河桥为例,对斜交的简支T梁进行分析,利用梁格分析法,考虑斜桥空间上的弯扭耦合效应,得到桥梁上部结构的纵横向内力与变形,并通过与单梁模型的对比,分析2种模型产生的内力、反力及位移变化,以期为此类斜交跨越的设计方案提供参考。

参考文献:

[1] 姚玲森.对于偏心荷载作用下曲线梁和斜支承梁内弯曲、剪切和扭转的预应力(上、下)[J].国外公路,1989(3/4):28-33.
[2] E·C·汉勃利.桥梁上部构造性能[M].北京:人民交通出版社,1982.
[3] 李静斌,葛素娟.改进梁格法在分体组合箱梁桥结构分析中的应用[J].中外公路,2010(6):147-150.
[4] 邢志成.斜梁桥荷载的横向分布[J].中南公路工程,1988(10):34-43.

(上接第226页)

增大、顶板及底板轴力放大系数增大、侧墙轴力放大系数减小。

根据上述结论,对于某一特定地区的单层地下道路结构而言,可以快速判断出在地震作用下结构最不利位置处于结构覆土厚度最大、基准面深度最小、土体剪切波速最大处。结构横断面宽度对结构各内力的影响不尽相同,需具体分析。

参考文献:

[1] 刘韵.城市地下快速道路建设动因分析[J].地下空间与工程学报,2006,2(8):1293-1296.
[2] 于翔.地下建筑结构应充分考虑抗震问题——1995年阪神地震破坏的启示[J].工程抗震,2002(4):17-20.
[3] 高波,王峥峥,袁松,等.汶川地震公路隧道震害启示[J].工程抗震,

2009,44(3):336-374.
[4] 许成顺,许紫刚,杜修力,等.地下结构抗震简化分析方法比较研究[J].地震工程与工程振动,2017,37(2):65-80.
[5] 刘晶波,王文晖,张小波,等.地下结构横断面地震反应分析的反应位移法研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(1):161-167.
[6] 邓宇洁,梁发云.地下结构地震反应规范计算方法的对比分析[J].地震工程学报,2018,40(5):996-1003.
[7] 宾佳,景立平,崔杰.反应位移法计算参数的灵敏度分析[J].防灾减灾工程学报,2015,35(2):270-276.
[8] 钟锁庆,张西平,潘海利.地基土基床系数研究[J].地下空间与工程学报,2005,1(7):1109-1112.
[9] 李英民,王璐,刘阳冰,等.地下结构抗震计算地基弹簧系数取值方法研究[J].地震工程与工程振动,2012,32(1):106-113.
[10] 高大钊.岩土工程勘察与设计[M].北京:人民交通出版社,2010.