

地震中隧道上方土体作用问题研究

高峰¹,孙常新^{1,2},丁其乐¹,谭绪凯¹,贺清碧¹

(1. 重庆交通大学 山区桥梁与隧道工程国家重点实验室培育基地,重庆 400074;

2. 华北水利水电大学 资源与环境学院,郑州 河南 450011)

摘要:当前隧道相关规范中提供的计算隧道上方土体对衬砌地震作用力的方法,仍采用静压力拱的高度来确定衬砌上方土体的地震作用高度,其准确性有待确定。本文采用解析计算与有限元计算对比分析的方法,通过研究隧道上方竖向应力在地震前后沿深度的变化,来确定隧道上方土体的地震作用高度 H_p ,给出了考虑隧道跨度、围岩级别、隧道结构形状及埋深等因素的隧道上方土体对衬砌地震作用高度的计算公式,确定了衬砌上的作用力,明确了其作用方式,并验证了其适用性。研究表明:解析计算和有限元计算所得结果沿隧道衬砌的分布规律一致;隧道埋深较小时,隧道规范计算出的 H_p 偏大;埋深较大时,隧道规范计算出的 H_p 偏小,采用该方法确定隧道上方土体地震作用高度 H_p 是可行的;衬砌上的作用力以切向力形式分布在衬砌的上半拱。研究结果可为隧道抗震计算及设计提供参考。

关键词:隧道工程;隧道上方土体;地震作用;计算方法;作用方式;对比分析

中图分类号:U451.2

文献标志码:A

Research on earthquake action of soil above the tunnel

GAO Feng¹, SUN Chang-xin^{1,2}, DING Qi-le¹, TAN Xu-kai¹, HE Qing-bi¹

(1. State Key Laboratory Breeding Base of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. School of Resources & Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, Henan, China)

Abstract: The current calculation method of seismic force provided for soil above the tunnel lining was not accurate enough, which still used hydrostatic pressure arch height to determine the earthquake height of soil above the lining. Combined finite element method with analytical calculation, this paper defined the earthquake height H_p of soil above the tunnel by researching the change of vertical stress above the tunnel along depth before and after earthquake, gave out the formula for H_p considering tunnel span, rock types, shape and depth of the tunnel and many other factors, determined the forces acting on the lining, cleared its mode of action, and verified its applicability. The results show that the distribution of analytical calculation results is same to that of the results gained from finite element method. The H_p calculated by tunnel specification is bigger when the tunnel depth is small; on the other hand, the H_p calculated by tunnel specification is smaller when the tunnel depth is big. The method used to define H_p is feasible.

收稿日期:2015-09-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51178490,51408222);山区桥梁与隧道工程国家重点实验培育基地开放基金项目(CQSLBF-Y12-2, CQSLBF-Y14-14)

作者简介:高峰(1964-),男,浙江云和人,教授,博士研究生导师,E-mail:gaofeng1964@163.com。

The action mode on lining is distributed over half-arch lining as tangential force. The results can provide a reference for seismic calculation of tunnel. 2 tabs, 13 figs, 22 refs.

Key words: tunnel engineering; soil above the tunnel; earthquake action; calculation method; mode of action; comparative analysis

0 引言

与地面建筑不同,隧道结构受到周围土体的压力和约束,这种作用在地震中体现的更加明显,致使隧道结构在地震中的稳定情况明显优于地面建筑。地震中,隧道衬砌受到四周土体产生的作用力是主要荷载。隧道上方土体对衬砌的作用受土体破坏情况、隧道埋深和接触关系等因素的影响比较复杂,需要进行单独研究,研究的重点主要体现在地震中隧道上方土体的计算高度和作用方式 2 个方面。

当前,在隧道衬砌上部荷载计算方面,浅埋隧道经常取全部土层厚度重量;深埋隧道厚度较大,往往采用土柱理论、压力拱理论或经验法等^[1]。地震中隧道上方土体产生的动荷载一般仍然按照计算静荷载时选取土体产生的地震惯性力来计算,地震前后隧道上方土体的计算高度不变,这点与地震常识不符,需要进行修正。何川等在Ⅳ级围岩条件下,分别采用地震系数法、反应位移法和时程分析法对不同跨度的洞室进行抗震计算,并通过振动台试验结果验证,最终获得Ⅳ级围岩中不同跨度下地震系数法的上覆土柱合理计算高度^[2];耿萍等对不同跨度的洞室进行抗震计算,最终得出Ⅴ级围岩条件、不同跨度下地震系数法的上覆土柱合理计算高度。在围岩土体对衬砌结构作用方面,以圆形隧道和盾构隧道的研究居多^[3]。Schmidt 提出按弹性介质分析,并考虑地层与衬砌间相互作用的方法,该方法适用于相当厚的衬砌^[4];Hewett 等最早提出圆形衬砌应考虑弹性抗力,根据圆形衬砌水平直径处位移等于 0 的条件来计算地层给予衬砌的抗力^[5];波德洛夫等提出了著名的链杆法,以刚性链杆模拟衬砌结构与地层间的直接接触作用,地层受力与变形的关系按 Winkler 假设^[6];日本土木工程协会(JSCE)提出惯用设计法,这种方法不考虑管片接头柔性特征,地层抗力假设仅在水平方向正负 45°范围内按三角形规律分布^[7];侯学渊运用弹塑性理论和位移协调方程,解出了可考虑衬砌刚度的地层压力值,该方法将地层自重理想化为无限远的荷载^[8];朱合华等研究了盾构隧道的梁-弹簧模型^[9];钟祖良等对桃树垭隧道的软岩围岩进行测量后发现,隧道拱顶处在衬砌完

成之后会产生较大的松散地压,进而推导了隧道衬砌上的作用荷载计算方法^[10];王明年等通过数值计算等方法研究了浅埋隧道上方土柱地震力传递机制^[11-12];宋玉香等提出了将荷载作用于地层边界共同作用模型,即用均匀施加在四周的荷载代替围岩产生的压力,同时又用围岩自身的形变来抑制支护结构的位移,将围岩作为荷载的传递介质,充分体现了围岩和支护结构的共同作用和变形协调^[13]。

综上所述,国内外学者对地震中隧道上方土体计算高度和对衬砌的作用方式等方面开展了大量研究^[14-15],但是由于该问题很复杂,需要考虑的方面很多,还需进行更为深入的研究。鉴于此,本文采用解析计算与有限元计算对比分析的方法,通过研究隧道上方竖向应力沿深度的变化,来确定隧道上方土体的地震作用高度,以隧道上方竖向应力随深度变化的转折点至隧道顶部的距离作为隧道上方土体的地震作用高度,并分析衬砌上的作用力及作用方式,以验证其适用性。

1 地震中隧道上方作用土体计算

1.1 当前计算隧道上方作用土体高度的方法

中国交通系统的一些单位根据各类围岩中的大量塌方资料,用数理统计的方法加以整理,从而得出计算各类围岩塌方高度的经验公式,用以代替普氏公式。在《公路隧道设计细则》(JTJ/T D70—2010)中规定:对于浅埋隧道,隧道衬砌上部地震作用力计算时,土柱高度取隧道埋深(从地面到隧道顶部的距离);对于深埋隧道,按照经验公式来确定计算高度^[14],即

$$H_p = (2.0 \sim 2.5)h_q \quad (1)$$

$$h_q = \frac{q}{\gamma} \quad (2)$$

$$q = \gamma h \quad (3)$$

$$h = 0.45 \times 2^{S-1} \omega \quad (4)$$

$$\omega = 1 + i(B_t - 5) \quad (5)$$

式中: H_p 为隧道上方土体计算高度(m),采用矿山法施工时,Ⅳ~Ⅴ级围岩, $H_p = 2.5h_q$,Ⅰ~Ⅲ级围岩, $H_p = 2.0h_q$; h_q 为荷载等效高度(m); γ 为土体重度(kN/m³); q 为深埋隧道垂直压力(kN/m²);

h 为计算参数(m); S 为围岩级别; ω 为宽度影响系数; B_i 为考虑超挖影响的隧道最大开挖跨度(m); i 为 B_i 每增减 1 m 时的围岩压力增减率,当 $B_i < 5$ m 时,取 $i = 0.2$,当 $B_i > 5$ m 时,取 $i = 0.1$ 。

隧道承受地震动力荷载作用的机理与静力作用有所不同,对于深埋隧道,压力拱的高度在地震作用下有所变化,仍用静力压力拱的高度来确定衬砌上方土体的高度已不适用,应该采用地震作用下隧道上方压力拱的实际高度作为计算高度,即需要进行修正。

1.2 本文计算隧道上方作用土体高度的方法

压力拱在隧道结构中是客观存在的^[15-16]。从力的传递角度来讲,压力拱的形成必然会改变竖向应力从地面向下逐渐增大的变化趋势^[17-18],受此启发,可以通过研究隧道上方竖向应力沿深度的变化来确定隧道上方压力拱的计算高度,以隧道上方竖向应力随深度变化的转折点至隧道顶部的距离作为隧道上方土体的计算高度 H_P 。采用动力时程法分别计算不同围岩、埋深、跨度和隧道结构形状等情况下,毛洞隧道上方的竖向应力^[19-22],并绘出随高度的变化曲线,用于确定隧道上方压力拱土体的计算高度 H_P 。

1.3 影响地震中隧道上方土体计算高度的因素

利用本文提出的计算方法分别研究围岩类别、隧道跨度、隧道结构形状对隧道上方围岩应力的影响。

1.3.1 围岩类别不同时隧道上方围岩应力变化

隧道埋深分别为 202.86、52.86 m 时,Ⅱ、Ⅳ类围岩竖向应力 σ_y 的变化如图 1、图 2 所示,该计算均针对跨度 B 为 32 m 的马蹄形隧道进行。综合图 1、图 2 可知:①开挖前自重状态下隧道上方土体内的竖向应力成线性分布,符合自重应力的计算原理;②隧道开挖后和地震后,隧道上方竖向应力沿深度的变化均出现转折,由此可确定出 H_P ;③埋深对地震前后测得的 H_P 影响不大;④在其他条件相同时,围岩类别越高(Ⅱ~Ⅳ类),地震前后的应力曲线差别越大。

1.3.2 跨度不同时隧道上方围岩应力变化

隧道埋深分别为 202.86、52.86 m,跨度分别为 16、32 m 时,围岩竖向应力 σ_y 的变化如下页图 3、图 4 所示,该计算均针对Ⅳ类围岩马蹄形隧道进行。综合图 3、图 4 可知:①隧道跨度对 H_P 的影响较大,但对地震前后的应力曲线影响较小;②埋深较浅时,当跨度增大,竖向应力随深度的变化中转折逐渐变

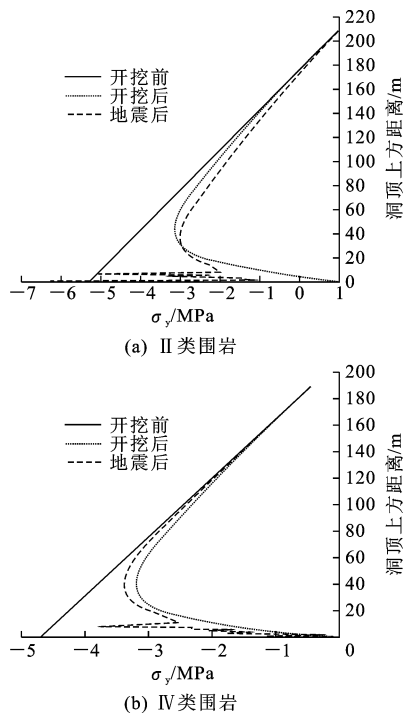


图 1 埋深 202.86 m 时Ⅱ、Ⅳ类围岩竖向应力变化
Fig. 1 Vertical stress change comparison on the conditions of class Ⅱ, Ⅳ and depth 202.86 m

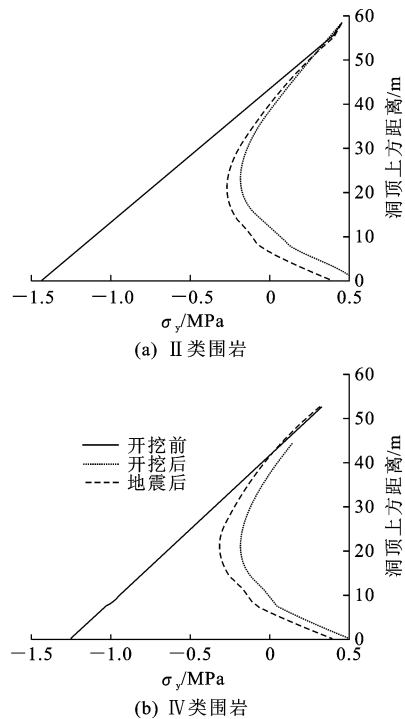


图 2 埋深 52.86 m 时Ⅱ、Ⅳ类围岩竖向应力变化
Fig. 2 Vertical stress change on the conditions of class Ⅱ, Ⅳ and depth 52.86 m

得不太明显。

1.3.3 结构形状不同时隧道上方围岩应力变化

隧道埋深为 202.86 m,跨度为 32 m,隧道结构

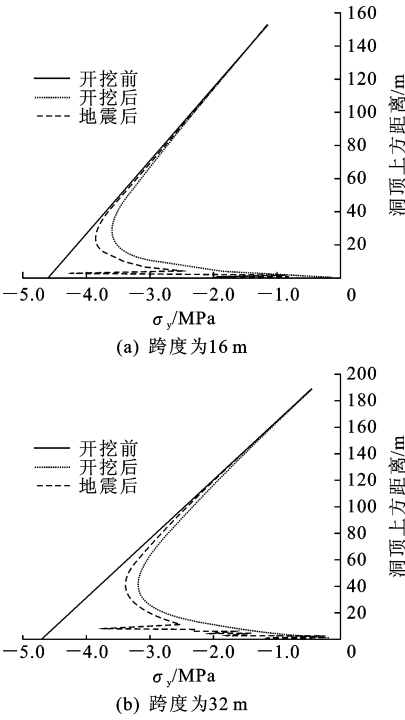


图3 埋深 202.86 m, 跨度 16、32 m 时Ⅳ类围岩竖向应力变化
Fig. 3 Vertical stress change on the conditions of span 16, 32 m and depth 202.86 m

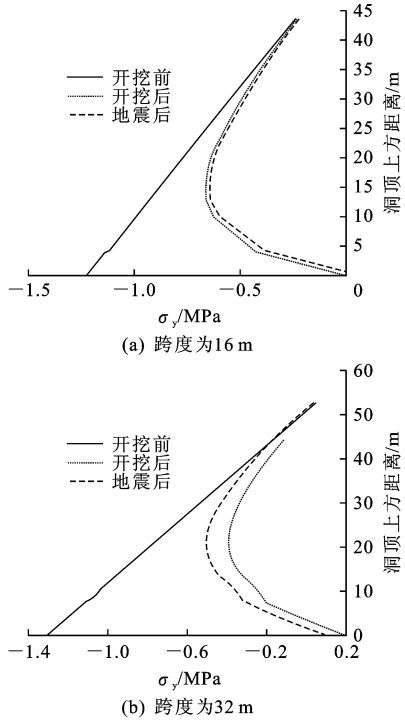


图4 埋深 52.86 m, 跨度 16、32 m 时Ⅳ类围岩竖向应力变化
Fig. 4 Vertical stress change on the conditions of span 16, 32 m and depth 52.86 m

形状分别为矩形、马蹄形、圆形时,隧道上方Ⅳ类围岩竖向应力 σ_y 的变化如图 5 所示。由图 5 可知:①当隧道埋深 h 为 202.86 m 时, H_P 随隧道结构形状

的变化不大;②矩形隧道的 H_P 与马蹄形、圆形隧道有所区别。

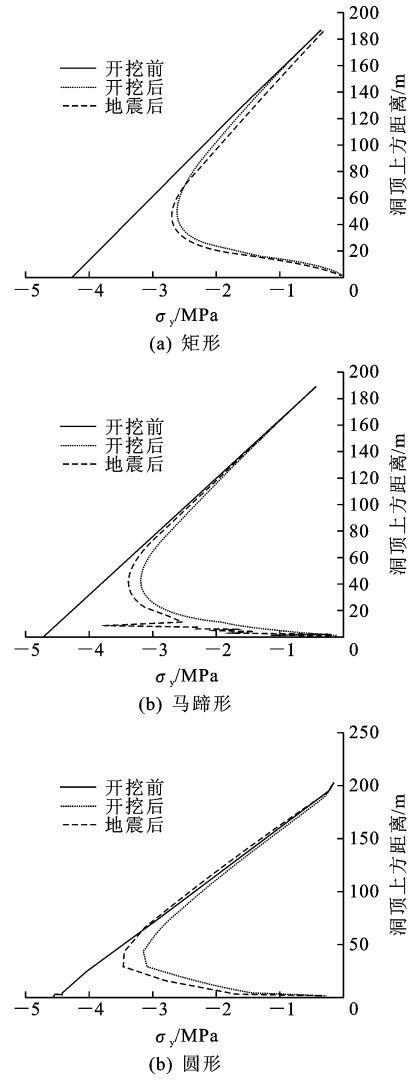


图5 矩形、马蹄形、圆形隧道结构的应力对比
Fig. 5 Stress change comparison on rectangle, U-shaped and circle tunnels

将本节计算结果与规范值进行对比,从中发现:①本文方法计算地震时上方土体计算高度与静力状态下使用规范提供的经验公式计算结果相近,但有变化,说明地震前后隧道上方压力拱高度有所变化;②隧道埋深较小时,使用静力规范法计算出的 H_P 偏大;隧道埋深较大时,使用静力规范法计算出的 H_P 偏小。

1.4 地震时隧道上方土体计算高度的计算公式

由前面的计算结果和相关曲线可以看出,影响地震作用下隧道上方土体计算高度最重要的因素是跨度,但也受到隧道埋深、隧道结构形式和围岩类别等因素的影响。

埋深为 52.86 m,Ⅳ类围岩时, H_P 与隧道跨度

的关系如图 6 所示。从图 6 中可以看出,计算高度与隧道跨度近似成线性关系。在前述大量计算数据的基础上,考虑隧道埋深、结构形式和围岩类别等众多影响因素,可以用公式近似计算地震作用下隧道上方土体计算高度 H_P

$$H_P = \alpha B_t + c \tag{6}$$

式中: α 为隧道跨度影响系数,按照表 1 选取; c 为综合影响系数,按照表 2 选取。

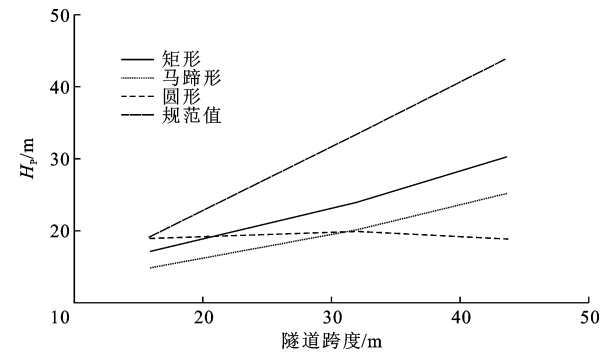


图 6 埋深 52.86 m,Ⅳ类围岩时 H_P 与隧道跨度的关系
Fig. 6 Relationship between H_P and tunnel span on the condition of class Ⅳ and depth 52.86 m

表 1 隧道跨度影响系数 α 的取值

Tab. 1 Values of tunnel span influence coefficient- α				
埋深/m	52.86		102.86	
围岩种类	Ⅱ类	Ⅳ类	Ⅱ类	Ⅳ类
矩形	0.438 8	0.469 0	0.540 8	0.540 8
马蹄形	0.434 9	0.359 3	0.590 1	0.480 4
圆形	0.034 0	0.003 8	0.370 7	0.340 5
埋深/m	152.86		202.86	
围岩种类	Ⅱ类	Ⅳ类	Ⅱ类	Ⅳ类
矩形	0.888 6	0.718 6	0.718 6	1.096 9
马蹄形	0.722 4	0.737 6	0.548 5	0.737 6
圆形	0.692 2	0.692 2	0.548 5	0.556 1

表 2 综合影响系数 c 的取值

Tab. 2 Values of comprehensive influence coefficient- c				
埋深/m	52.86		102.86	
围岩种类	Ⅱ类	Ⅳ类	Ⅱ类	Ⅳ类
矩形	9.269 6	9.347 5	16.154 0	16.154 0
马蹄形	11.053 0	9.030 1	11.315 0	12.998 0
圆形	18.295 0	19.217 0	14.680 0	14.602 0
埋深/m	152.86		202.86	
围岩种类	Ⅱ类	Ⅳ类	Ⅱ类	Ⅳ类
矩形	14.553 0	18.060 0	23.060 0	8.174 1
马蹄形	13.277 0	9.144 0	21.587 0	14.144 0
圆形	15.199 0	15.199 0	21.587 0	22.021 0

隧道上方形成压力拱需要 2 个条件:①隧道埋深大于成拱高度;②隧道两侧(压力拱拱角处)的围

岩要有足够的强度。鉴于这 2 个成拱条件,本文主要研究深埋隧道(埋深为 50~200 m)和围岩条件较好(围岩种类为Ⅱ~Ⅳ类)的情况,其他条件下隧道在地震作用下上方土体计算高度的确定可以参考本文方法。

1.5 隧道上方土体对衬砌的作用和计算

《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)、《公路隧道设计规范》(JTG D70/2—2014)及《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2001)并未明确规定上覆土柱地震水平力的计算方法;而根据《隧道手册》,地震水平力的作用点位于土柱质心,《公路隧道设计细则》(JTG/T D70—2010)中规定“假定该土压力均匀分布于拱部”。由分析可知,该作用力是由洞顶土柱产生的,根据《隧道手册》,地震水平力应作用在洞顶土柱的形心处,但若真的作用在洞顶土柱的形心处,就会造成实际施加上的困难,并且会产生弯矩,而衬砌和接触土体之间是不能传递弯矩的,本文用作用在衬砌上的切向力来等效该地震水平力。

隧道上方土体对衬砌的作用方式针对深埋隧道和浅埋隧道有所不同,本节分别进行说明。

1.5.1 浅埋隧道衬砌上受到的地震荷载

如图 7 所示,对于浅埋隧道,隧道上方不能形成压力拱,隧道上方土体重力作为荷载作用在隧道衬砌上,在水平地震作用下产生水平方向的惯性力,这些力以切向力的形式作用在隧道的上半个衬砌上,具体求解时可以将隧道上方土体按照一定宽度分成多个竖条,每个土条在地震作用下产生的惯性力可以看做以切向力 τ_i 的形式分布在土条下方的衬砌上,使用式(7)进行计算

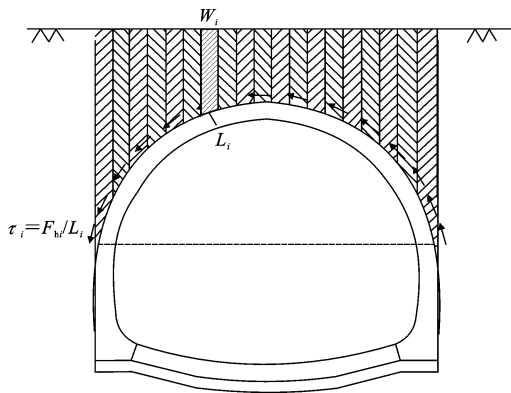


图 7 浅埋隧道水平地震作用
Fig. 7 Horizontal seismic action of shallow tunnel

$$\tau_i = F_{hi} / L_i \tag{7}$$

$$F_{hi} = C_i C_z K_h W_i \tag{8}$$

式中: F_{hi} 为地震力的水平分力; L_i 为土条下方衬砌

弧长; W_i 为隧道上方任意一个土条的重量,可以由土体重度和土条的体积求得; C_i 为重要性修正系数,可根据规范选取; C_z 为场地影响系数,可根据规范选取; K_h 为水平地震系数,可根据规范选取。

具体计算时,可以根据衬砌单元的宽度来确定划分土条的宽度。

1.5.2 深埋隧道衬砌上受到的地震荷载

对于深埋隧道,由前面分析可知,隧道上方将形成压力拱,压力拱以下土体的重力作为荷载作用在隧道衬砌上,如图 8 所示。在水平地震作用下产生水平方向的惯性力,这些力以切向力的形式作用在隧道的上半个衬砌上,具体求解时由于在压力拱作用下衬砌上方土条的高度相差不大,可近似认为作用在衬砌上的切向力 τ 相等,按式(9)计算

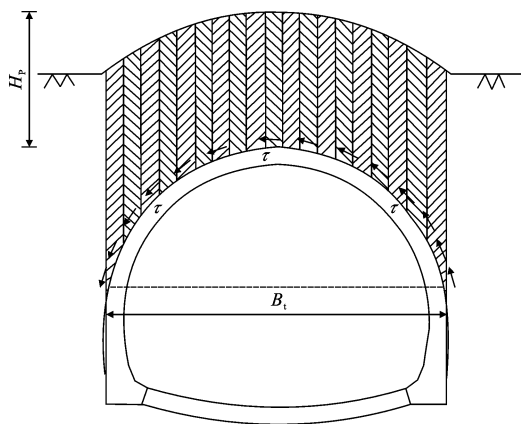


图 8 深埋隧道水平地震作用示意

Fig. 8 Horizontal seismic action of deep tunnel

$$\tau = C_i C_z K_h B_i H_p \gamma / L \quad (9)$$

式中: L 为衬砌上方圆弧长度。

2 计算对比

前面分别就地震中隧道上方土体的计算高度和作用方式 2 个方面问题进行了分析,给出了相应的计算方法。本节使用这种计算方法针对具体隧道结构进行计算,将计算结果与动力有限元方法的结果进行对比分析,以验证其适用性。将两者的计算结果绘制在同一张图中进行比较,绘图时将整个衬砌分成 64 个部分,将每部分的应力值沿衬砌圆周位置依次绘制在“雷达图”上。本节计算针对马蹄形隧道,图中所示为最大主应力 σ_1 的绝对值。

2.1 当前规范值与有限元结果对比

使用当前规范中提供的计算方法^[16],并分别针对埋深为 7.86、27.86 m 这 2 种深埋隧道进行了衬砌地震力计算,将计算结果与数值计算结果进行对

比,如图 9 所示。由图可知:当埋深较大时,用规范公式计算出的结果和数值结果相差很大,并且隧道埋深越大,两者的计算结果差别就越大,说明使用当前规范的计算公式不能完全反映埋深的影响,需进行修正。

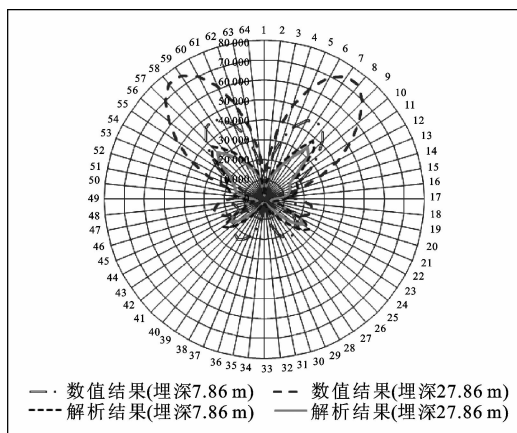


图 9 不同埋深计算结果对比

Fig. 9 Results comparison of different tunnel depths

2.2 本文方法与有限元结果对比

由图 10、下页图 11~图 13 可知:①本文方法的计算结果与数值计算结果的数值相当,沿衬砌的分布基本一致;②在水平地震作用下隧道墙脚处的应力值较大;③与 II 类围岩相比, V 类围岩隧道衬砌两侧的应力值有所增加。

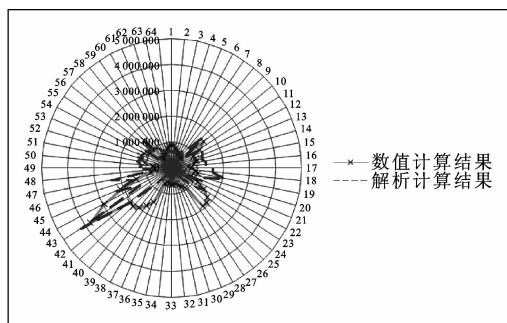


图 10 计算结果对比(埋深 3.86 m, II 类围岩)

Fig. 10 Results contrast (depth 3.86 m, Class II)

通过上述计算结果对比分析可知,本文提出的解析计算方法与数值计算方法的计算结果沿衬砌单元的分布规律一致,证明本文计算方法(公式)适用。

3 结 语

(1)分析了影响隧道上方土体地震作用高度的因素,其中,跨度为最重要因素,但隧道埋深、隧道结构形式和围岩级别等因素对其也有一定的影响。

(2)给出了考虑隧道跨度、围岩级别、隧道结构形状和埋深等因素的隧道上方土体对衬砌地震作用

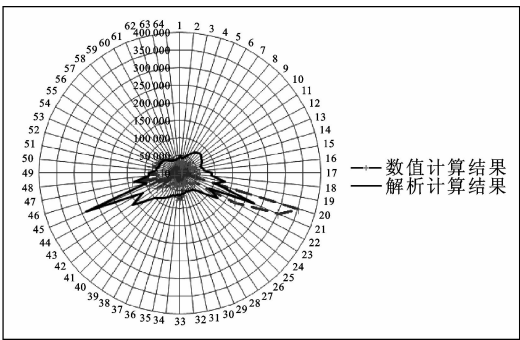


图 11 计算结果对比(埋深 3.86 m, V 类围岩)
Fig. 11 Results contrast (depth 3.86 m, Class V)

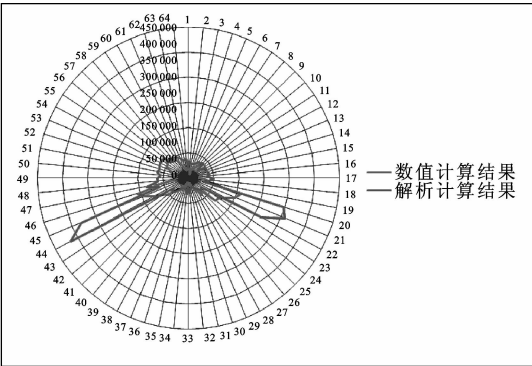


图 12 计算结果对比(埋深 52.86 m, II 类围岩)
Fig. 12 Results contrast (depth 52.86 m, Class II)

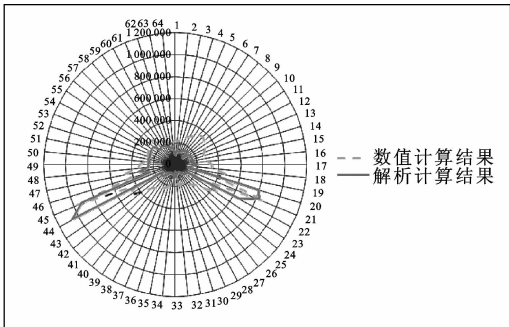


图 13 计算结果对比(埋深 52.86 m, V 类围岩)
Fig. 13 Results contrast (depth 52.86 m, Class V)

高度的计算公式,并与有限元方法的计算结果进行了对比分析。结果表明,采用隧道上方竖向应力沿深度变化确定隧道上方土体地震作用高度 H_P 的方法可行;隧道埋深较小时,隧道规范计算出的 H_P 偏大,隧道埋深较大时,隧道规范计算出的 H_P 偏小。

(3)确定了作用在衬砌上的作用力,明确了其作用方式是以切向力的形式分布在衬砌上半拱,并验证了其适用性,该研究成果可为隧道的抗震计算和设计提供参考。

(4)本文研究了地震中隧道上方土体的计算高度和作用方式,下一步可进行地震中两侧土体的作

用方式研究和三维模型计算分析。

参考文献:

References:

[1] 张厚美,吕国梁.圆形隧道衬砌结构计算模型综述[J].世界隧道,2000(2):1-6.
ZHANG Hou-mei, LU Guo-liang. Review on calculating model of lining for circular tunnel[J]. World Tunneling and Underground Works, 2000 (2): 1-6. (in Chinese)

[2] 何川,耿萍,晏启祥.Ⅳ级围岩铁路隧道抗震计算上覆土柱合理计算高度[J].土木工程学报,2013,46(5):144-150.
HE Chuan, GENG Ping, YAN Qi-xiang. Advisable calculation heights of overburden soil for railway tunnel seismic computation in surrounding rock of class IV[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(5): 144-150. (in Chinese)

[3] 耿萍,何悦,何川,等.地震系数法隧道上覆土柱的合理计算高度[J].重庆大学学报,2013,36(4):159-164.
GENG Ping, HE Yue, HE Chuan, et al. Advisable calculation heights of tunnel overlaying soil with earthquake coefficient method[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(4): 159-164. (in Chinese)

[4] SCHMIDT B. Tunnel lining design-do the theories work? [C]//BARTON A C T. Proceedings of Austral-New Zealand Geomechanics Conference. Perth: Institution of Engineers, 1984:682-693.

[5] HEWETT B H M. Shield and compressed air tunneling[M]. Charleston: Nabu Press, 2010.

[6] 李术才,徐帮树,李树忱.海底隧道衬砌结构选型及参数优化研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(21):3894-3902.
LI Shu-cai, XU Bang-shu, LI Shu-chen. Lining structure type of subsea tunnel and its support parameters optimizing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3894-3902. (in Chinese)

[7] 黄宏伟,徐凌,严佳梁,等.盾构隧道横向刚度有效率研究[J].岩土工程学报,2006,28(1):11-18.
HUANG Hong-wei, XU Ling, YAN Jia-liang, et al. Study on transverse effective rigidity ratio of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1): 11-18. (in Chinese)

[8] 侯学渊.地下圆形结构弹塑性理论[J].同济大学学报,1982,20(4):50-61.
HOU Xue-yuan. Elasto-plastic theory of the underground circular structure[J]. Journal of Tongji Uni-

- versity, 1982, 20(4): 50-61. (in Chinese)
- [9] 朱合华, 陶履彬. 盾构隧道衬砌结构受力分析的梁-弹簧系统模型[J]. 岩土力学, 1998, 19(2): 26-32.
ZHU He-hua, TAO Lu-bin. Study on two beam-spring models for the numerical analysis of segments in shield tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(2): 26-32. (in Chinese)
- [10] 钟祖良, 刘新荣, 王道良, 等. 桃树垭隧道底鼓发生机理与防治技术研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3): 471-476.
ZHONG Zu-liang, LIU Xin-rong, WANG Dao-liang, et al. Mechanism analysis of floor heave in Taoshuya Tunnel and its prevention techniques[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(3): 471-476. (in Chinese)
- [11] 王明年, 林国进, 于丽, 等. 隧道抗震与减震[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
WANG Ming-nian, LIN Guo-jin, YU Li, et al. Tunnel seismic and shock absorption[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [12] 张丹. 浅埋隧道衬砌结构抗震计算方法分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
ZHANG Dan. Analysis of structure's seismic calculation method of shallow buried tunnel lining[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [13] 宋玉香, 刘勇, 齐键旭. 铁路隧道复合衬砌内力计算方法研究[J]. 铁道工程报, 2015(8): 73-75.
SONG Yu-xiang, LIU Yong, QI Jian-xu. Research on the calculation method of composite lining internal force for railway tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015(8): 73-75. (in Chinese)
- [14] 高峰, 孙常新, 赵冯兵. 地下结构波动法与振动法的对比[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2012, 31(4): 764-768.
GAO Feng, SUN Chang-xin, ZHAO Feng-bing. Contrast of wave and vibration methods for underground structure[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2012, 31(4): 764-768. (in Chinese)
- [15] 孙常新, 刘桂香. 改进振动法在地下工程动力时程计算中的应用[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(3): 66-71, 78.
SUN Chang-xin, LIU Gui-xiang. Application of the improved vibration method to dynamic time-history calculations for underground works[J]. Modern Tunneling Technology, 2013, 50(3): 66-72. (in Chinese)
- [16] JTG/T D70—2010, 公路隧道设计细则[S].
JTG/T D70—2010, Guidelines for design of highway tunnel[S]. (in Chinese)
- [17] KOVARI K. Erroneous concepts behind the new Austrian tunnelling method[J]. Tunnels & Tunnelling International, 1994, 26(11): 38-42.
- [18] 高峰, 谭绪凯, 孙常新. 隧道动力深浅埋界限及其影响因素研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2013, 32(3): 438-441, 493.
GAO Feng, TAN Xu-kai, SUN Chang-xin. Boundary between shallowly-buried and deeply-buried tunnel dynamic and its influence factors[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2013, 32(3): 438-441, 493. (in Chinese)
- [19] 孙常新, 吕晓春. 基于改进动力强度折减法的隧道地震破坏机理探讨[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(6): 41-49.
SUN Chang-xin, LU Xiao-chun. Discussion of the seismic failure mechanism of a tunnel based on the improved dynamic strength reduction method[J]. Modern Tunneling Technology, 2014, 51(6): 41-49. (in Chinese)
- [20] 高峰, 孙常新, 谭绪凯, 等. 不同埋深隧道的地震响应振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2517-2522, 2531.
GAO Feng, SUN Chang-xin, TAN Xu-kai, et al. Shaking table tests for seismic response of tunnels with different depths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2517-2522, 2531. (in Chinese)
- [21] 于翔, 陈启亮, 赵跃堂, 等. 地下结构抗震研究方法及其现状[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2000, 1(5): 63-69.
YU Xiang, CHEN Qi-liang, ZHAO Yue-tang, et al. The status quo and methods of antiseismic research of underground structure[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science, 2000, 1(5): 63-69. (in Chinese)
- [22] 高波, 王峥峥, 袁松, 等. 汶川地震公路隧道震害启示[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(3): 336-341, 374.
GAO Bo, WANG Zheng-zheng, YUAN Song, et al. Lessons learnt from damage of highway tunnels in Wenchuan earthquake[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(3): 336-341, 374. (in Chinese)