

# 水下盾构隧道抗震设计分析方法的适应性研究

耿萍, 何川, 晏启祥

(西南交通大学 地下工程系, 四川 成都 610031)

**摘要:** 针对断面大、水头高, 结构复杂的水下盾构隧道, 通过分析其在横向和纵向结构特点, 提出了合理的抗震设计方法。在地层条件较均匀的横断面, 通过成层重复反射理论, 计算出工程场地地层的实际地震响应, 采用反应位移法对隧道典型断面进行地震反应分析, 再将其结果与静力计算结果叠加后作为抗震设计的依据。纵向则考虑线状结构特点、沿隧道纵向地层的不均匀性、地震行波效应和边界效应等方面的因素, 应用三维时程响应法加以计算分析。对 2 种方法的特点、适用条件和分析流程进行了系统阐述, 并将其应用于越长江盾构隧道工程, 揭示了该典型水下盾构隧道的动力响应特征及抗震的薄弱部位。

**关键词:** 隧道工程; 抗震设计; 反应位移法; 时程响应法

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增 2 - 3625 - 06

## APPLICABILITY STUDY ON ASEISMIC DESIGN METHOD OF SUBMARINE SHIELD TUNNEL

GENG Ping, HE Chuan, YAN Qixiang

(Department of Underground Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** Based on structural features in both transverse and longitudinal directions, a reasonable aseismic design method for structurally complicated subriver shield tunnels with large cross-section and deep underwater pressure is proposed. For the design of transverse direction of tunnel with relatively regular ground that is different from the hypothesis of boundary displacement sine wave distribution mode, practical seismic responses from the ground where the tunnel will be constructed have been calculated according to the theory of ground stratification reflection theory. Using seismic deformation method, the seismic response of a typical section of the tunnel was analyzed. The result was used in combination with static calculations as support for aseismic designs. For the longitudinal direction, the 3D time-domain response method should be used due to the requirement of considering linear structural features, the irregular ground along longitudinal direction of the tunnel, seismic traveling wave effects, and boundary effects, etc.. The features, applications, and analytical process of these two methods are discussed. The design method has been applied to a shield tunnel crossing the Yangtze River, and the seismic behaviors and the aseismic-weaker parts of this typical subriver shield tunnel are also indicated.

**Key words:** tunneling engineering; aseismic design; response deformation method; time-domain response method

## 1 引言

近年来, 国内外越来越多地使用盾构法修建水下隧道, 在上海、重庆、武汉、南京、杭州等已建

或在建的这类隧道具有断面大、水头高, 结构复杂的特点。据不完全统计, 国内在未来 10 a 内, 将有 50~60 座大型水下隧道需要开工建设。这些隧道大多数处于地震高烈度地区, 存在的地震震害问题将严重危及隧道的营运安全和使用寿命。

**收稿日期:** 2007 - 06 - 14; **修回日期:** 2007 - 07 - 18

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2006AA11Z116); 武汉长江隧道工程专项科研项目(WHCHSD/KY/01 - 01 - 2005)

**作者简介:** 耿萍(1964 - ), 女, 1984 年毕业于四川大学水电学院水工专业, 现为博士研究生, 主要从事地下结构与隧道工程方面的研究工作。  
E-mail: gengp@scjtm.gov.cn

目前,我国尚未形成比较系统和完整的地下结构抗震设计方法,通常采用的地震系数法<sup>[1]</sup>是将惯性力乘以一个系数来考虑地震的作用,这对于惯性力影响较大地表结构比较适合,但不能全面有效地反映和揭示地下结构,特别是处于水下,由管片通过环向和纵向螺栓拼装而成的盾构隧道的地震响应特性。因此针对其特点,进行水下盾构隧道抗震设计方法的应用研究具有非常重要的现实工程意义。

地震对水下隧道的作用包括:(1)地震引起的地基土和结构的变形;(2)结构自重引起的惯性力;(3)地震引起的土压力;(4)地震时的动水压力<sup>[2]</sup>。近年来,数值模拟、地震观测和动力模型试验证明:地震时地下结构的振动对地层的振动具有追随性,结构所产生的地震附加应力和变形主要是由地层的相对位移引起的<sup>[3~9]</sup>。因此应该针对隧道横断面方向和纵向的结构特点,考虑周围地层的动力状态和稳定性,寻求合理和实用的隧道抗震设计方法。

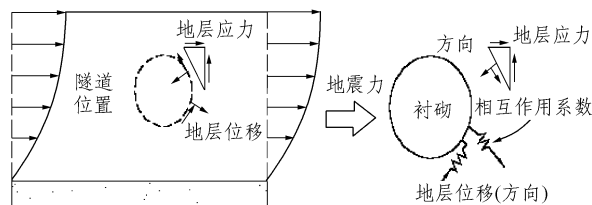
基于地下结构振动特性的反应位移法概念明确、计算简便,在均匀地层中得到较好应用<sup>[10~12]</sup>。因此在地层条件较均匀的水下盾构隧道横断面方向,应当采用反应位移法进行地震反应分析;纵向则应考虑线状结构特点、沿隧道纵向地层的不均匀性、地震行波效应和边界效应等方面的因素,采用三维时程响应法加以计算分析<sup>[13~16]</sup>,同时,以武汉越长江盾构隧道为例,进行横断面方向和纵向的抗震设计。

## 2 横断面方向的反应位移法

### 2.1 计算流程

对水下盾构隧道横断面方向进行抗震设计,应先选取典型断面进行静力分析,再采用反应位移法对其进行动力分析。将隧道典型断面在常时荷载作用下计算出的内力、应力和位移值与地震荷载产生的相应值进行叠加,便得到抗震设计所需要的断面内力、应力和位移的控制值。

反应位移法的计算流程是:先计算隧道所处位置尚未修建隧道时空洞地层的位移响应,再以强制位移的形式通过地层弹簧作用于隧道结构上进行“拟动力”分析。实际运用时,按天然地层求出隧道所在地地层的位移分布,同时在分析模型上附加一个相当于空洞壁面作用的周面剪力,二者共同作用来等价空洞地层的位移影响。计算模型中,将强制位移施加于地层弹簧的固定端,周面剪力直接作用于隧道结构上,分析模型如图1所示。



地震力的计算:自然地层的地震响应

(a) (b)

图1 反应位移法模型

Fig.1 Model of response deformation method

与通常将边界位移随深度的变化模式简化为呈正弦波分布不同,按照隧道所在地的实际地层,根据一维土柱运动微分方程,本文采用成层重复反射理论,进行天然地层的动力响应分析。

考虑到地震时表层地层实际呈现的非线性特性,选用 Hardin-Drnevich 动本构模型来反映剪切弹性模量  $G$  和等价衰减系数  $h$  与应变的相关性,可表示为

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (1)$$

$$h = h_{\max} \left( 1 - \frac{G}{G_{\max}} \right) \quad (2)$$

式中:  $\gamma_r$  为标准剪应变,  $h_{\max}$  为最大衰减比。

地层物理力学参数见表1。采用 100 a 超越概率为 2% 的人工地震波,峰值加速度为  $1.431 \text{ m/s}^2$ ,从基底进行单向激励(见图2),计算出地层各层加

表1 地层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of ground

岩性	密度 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	动弹性模量 $E/\text{GPa}$	动剪切模量 $G/\text{GPa}$	泊松比	厚度 /m
粉细砂岩	2.01	0.42	0.17	0.25	11.5
中粗砂岩	2.05	0.72	0.27	0.25	3.5
粉细砂岩	2.01	0.45	0.18	0.25	15.0
混凝土	2.50	30.00		0.35	

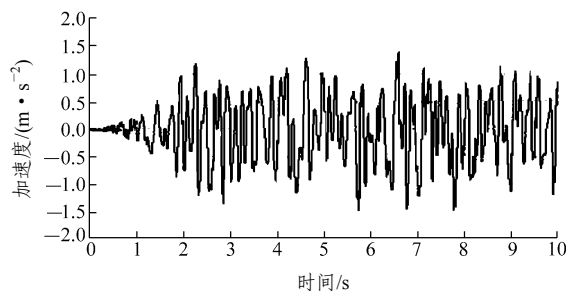


图2 输入地层加速度时程曲线

Fig.2 Input curves of ground time-history acceleration

速度、速度、位移和层间剪应力的反应值。

根据常时荷载静力分析的典型工况, 选取的隧道横断面计算深度为 55 m, 隧道埋深 22 m; 震动基准面的速度反应谱  $S_u = 0.0887$ , 地层固有周期  $T_s = 1.0475$  s, 动剪切模量  $G = 0.124$  GPa。隧道内径  $\phi 10.0$  m, 外径  $\phi 11.0$  m, 幅宽 2.0 m, 以 9 等分管片错缝  $10^\circ$  拼装(见图 3)。管片接头自动成为节点, 并在接头节点之间均匀增加一些节点, 节点总数为 72 个(图 4(b), 圆点代表环向接头)。将管片简化为刚度相同的曲梁单元, 管片间的接头设置为可承受一定弯矩的弹性铰单元, 同时选取三环作为计算对象, 以考虑纵向环间接头的影响。

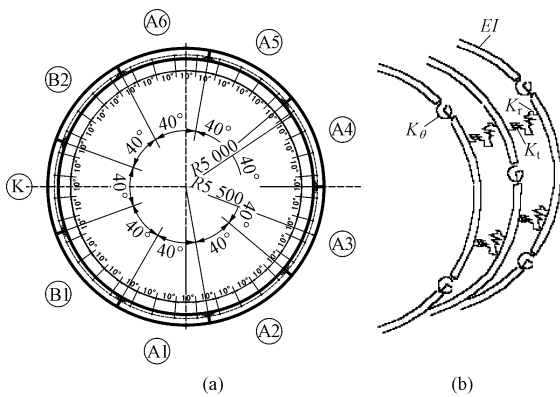


图 3 管片环分块及考虑管片接头的梁-弹簧模型

Fig.3 Segment of lining ring and beam spring model with the joints

依据反应位移法, 把在地层的地震响应分析中所得到的天然地层的剪力和地层位移分别按径向和切向作用于模型上进行结构计算(见图 1), 可得到地震作用产生的断面内力、应力和位移值。

### 2.2 抗震分析

隧道横断面分别在静载和地震作用以及二者叠加后的变形和内力极值如表 2 所示, 叠加后的变形和内力如图 4 所示。由表 2 可知: 结构的变形和内力, 在叠加地震作用后都有所增大, 说明地震作用对盾构隧道管片衬砌是不利的。截面抗震设计的控制值应该是静载和地震作用叠加后的极值。

(1) 隧道变形: 静力作用下横截面变形十分规则, 但叠加地震作用之后, 变形偏向右侧的上部(见图 4(a)), 且最大变形量增加约 33%, 达 15.75 mm。

(2) 剪切效应: 叠加地震作用后的最大剪力增加了约 33%, 依然在隧道顶部偏左, 最大负剪力从静载作用下顶部附近移到底部偏右位置(见图 4(b))。

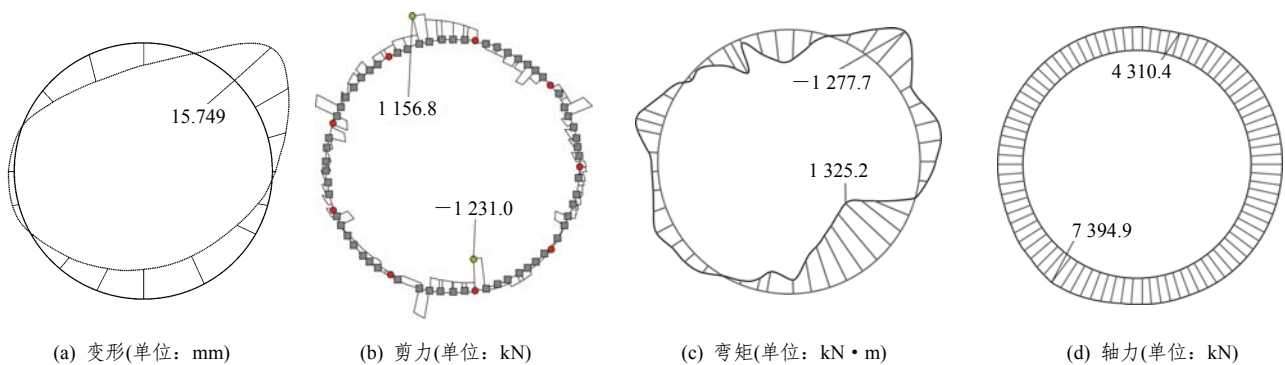
(3) 弯曲效应: 叠加地震力作用后, 横截面的最大负弯矩增大明显, 接近静载作用时的两倍, 出现在盾构隧道右上部; 最大正弯矩从静力作用下的顶部转移到右下部, 增大了 11%(见图 4(c))。

(4) 最大轴力在盾构隧道左下部, 比静力作用值增大 33%, 叠加后的轴力都是压力(见图 4(d))。

表 2 横截面抗震设计变形和内力的极值

Table 2 Maximum displacements and inner forces of aseismic cross-section design in transverse direction

取值类型	地震作用				静载作用				叠加后的控制值			
	变形/mm	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	变形/mm	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	变形/mm	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
最大值	11.82	2 028.3	783.3	1 125.3	11.78	5 551.5	840.5	1 193.2	15.75	7 394.9	1 156.8	1 325.2
最小值		-410.1	-830.0	-633.7		3 819.1	-859.3	-644.0		4 310.4	-1 231.0	-1 277.7



(a) 变形(单位: mm)

(b) 剪力(单位: kN)

(c) 弯矩(单位: kN·m)

(d) 轴力(单位: kN)

图 4 管片环的变形、剪力、轴力和弯矩

Fig.4 Displacement, shear force, axial force and bending moment of tunnel linings

### 3 纵向的时程响应法

#### 3.1 计算流程

时程响应法将结构和土层作为一个整体建立运动微分方程，通过直接输入地震加速度时程曲线，计算各时刻结构的加速度、速度、位移和应力。根据水下盾构隧道特殊的构造形式及线状结构的纵向特性，考虑计算能力的可行性和消除人工边界导致的地震波反射作用，对水下盾构隧道纵向三维时程响应分析模型进行如下处理：

(1) 将盾构隧道简化成刚度沿纵向不变的连续梁，考虑环间纵向接头的影响，根据等效变形的原则，计算隧道在拉(压)、剪切和弯矩作用下不同的刚度折减系数 $\eta_N$ 、 $\eta_Q$ 和 $\eta_M$ ：

$$\eta_N = \frac{K_r}{K_r + \frac{EA}{L_s}} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \quad (3)$$

$$\eta_Q = \frac{K_t}{K_t + \frac{GA}{L_s}} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \quad (4)$$

$$\eta_M = \frac{K_\theta}{K_\theta + \frac{EI}{L_s}} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \quad (5)$$

式中： $L_s$ 为盾构隧道管片的幅宽， $EA$ 为管片环的轴向拉(压)刚度， $K_r$ 为隧道纵向接头轴向拉(压)弹簧的弹性系数， $GA$ 为管片环的剪切刚度， $K_t$ 为隧道纵向接头剪切弹簧的弹性系数， $EI$ 为管片环的弯曲刚度， $K_\theta$ 为隧道纵向接头弯曲弹簧的弹性系数。

(2) 地层边界用弹簧阻尼单元模拟，可以有效消除边界能量，较好地反映边界上波的透射，避免由于固定约束所引起的能量全反射。

弹性系数的取值，参考我国核电厂抗震设计规范<sup>[18]</sup>的规定，即

$$\left. \begin{aligned} k_t &= 3DG \\ k_n &= 1/(3\pi DG) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： $k_t$ 、 $k_n$ 分别为地层沿隧道轴向和横向的弹簧常数； $D$ 为隧道的直径。

阻尼采用瑞利阻尼，即

$$C = \alpha M + \beta K \quad (7)$$

式中： $C$ 为阻尼矩阵； $M$ 、 $K$ 分别为质量及刚度矩阵； $\alpha$ 、 $\beta$ 分别为质量比例阻尼系数和刚度比例阻尼系数。

计算输入参数为中心阻尼比 $\xi_{\min}$ 和中心频率 $\omega_{\min}$ ，即

$$\xi_{\min} = (\alpha\beta)^{1/2}, \quad \omega_{\min} = (\alpha/\beta)^{1/2} \quad (8)$$

(3) 地震波在地层介质中按一定方向、以一定速度传播，使地层中的结构依次受到激振，由于波到达时间的不同和具有一定的相位差，使结构处于异步运动状态，该现象对隧道这种线状结构的影响尤为明显。当结构尺寸接近或大于地震波的波长时，宜采用自由场行波输入。若把第 $i$ 个节点的时滞数记为 $n_i$ ，则有

$$n_i = \text{int} \frac{l_i}{v_a \Delta t} \quad (9)$$

式中： $l_i$ 为第 $i$ 个输入点到第一个输入点水平距离， $v_a$ 为行波视速度， $\Delta t$ 为时间步长，int表示取整。

外径 $\phi$  11.0 m的越江盾构隧道纵向时程响应分析模型如图5。计算范围在三个坐标轴 $z$ 、 $x$ 、 $y$ 轴方向分别为1 000 m×60 m×30 m(长×宽×高)。模型按实际地层情况建立(见表1)。通过式(3)~(5)，可以采用纵向1 000 m共500环等效成一环进行刚度等效处理。

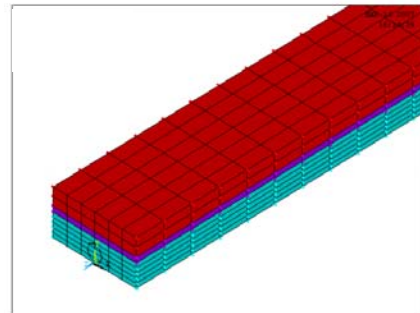


图5 时程响应法分析模型

Fig.5 Model of time-domain response method

计算采用Newmark- $\beta$ 法瞬态多载荷文件循环求解方式，由于场地地层的地震响应最大值都大约发生在3~8 s；8 s以后呈较强的衰减趋势<sup>[19]</sup>，故取人工地震波的前10 s(见图2)作为行波输入。考察了沿结构纵向传播的剪切波作用(工况1)、沿结构纵向传播的压缩波作用(工况2)以及与结构纵向成45°方向传播的剪切-压缩波(工况3)作用下结构和土层的地震响应。

#### 3.2 抗震分析

计算3种工况下的地震响应，可以分别输出不同时刻的土体变形、隧道变形、隧道轴力、剪力、弯矩、隧道主应力及相应的时程图，选择输出了 $t = 2, 4, 6, 8, 10$  s时的结果<sup>[19]</sup>。表3列出了其变形、

表 3 纵向抗震设计变形和内力的控制值

Tab.3 Controlling values of displacement and inner force of aseismic cross-section design in longitudinal direction

工况	变形/mm	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	$\sigma_1$ /MPa	$\sigma_3$ /MPa
1	24.9	$5.84 \times 10^6$	$8.42 \times 10^3$	$1.02 \times 10^6$	2.92	-2.92
2	19.0	$1.25 \times 10^5$	$2.04 \times 10^3$	$3.20 \times 10^4$	7.90	-5.60
3	14.0	$4.19 \times 10^4$	$4.33 \times 10^3$	$6.08 \times 10^4$	4.40	-3.16

内力和应力的最大值。

隧道纵向三维时程响应分析结果显示:

(1) 行波效应: 土体沿隧道纵向的变形明显呈现出行波效应。 $t = 2$  s 时, 波只行进了约 600 m, 沿隧道纵向尚有部分土体未发生变形;  $t = 4$  s 时, 计算范围内土体都开始产生变形;  $t = 6, 8$  和 10 s 时, 整个计算范围内土体都产生明显变形(见图 6)。从隧道截面内力时程曲线可见, 离来波距离最远的节点最后响应, 这也显示了行波效应。

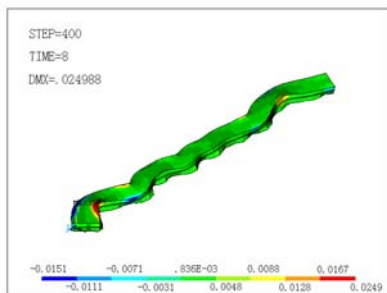


图 6 土体位移(工况 1, 第 8 秒; 单位: m)

Fig.6 Displacements of ground(case 1, at  $t = 8$  s; unit: m)

(2) 隧道变形: 剪切波作用下的变形值最大, 表现为水平面内的相对错动; 其次是压缩波作用, 变形为竖向的隆起和沉降; 沿  $45^\circ$  方向传播的剪切压缩波作用下的变形最小, 是水平面的扭曲。

(3) 轴力: 压缩波作用时, 轴力最大, 沿隧道纵向的轴力为拉、压交替出现; 剪切压缩波作用下隧道轴力较小; 剪切波作用下的隧道轴力最小, 接近于 0。

(4) 剪力: 剪切波作用时, 剪力主要表现在水平方向,  $t = 8$  s 时产生最大水平剪力  $Q_x$ (见图 7)。正是由于  $Q_x$  的作用, 引起了以  $y$  为中性轴的弯矩  $M_y$ , 使隧道在水平面内发生错动; 压缩波作用下的剪力值最小。

(5) 弯矩: 剪切波作用下的弯矩  $M_y$  最大, 由于  $M_y$  是  $Q_x$  与相应距离的乘积, 因此  $Q_x$  和  $M_y$  的频率接

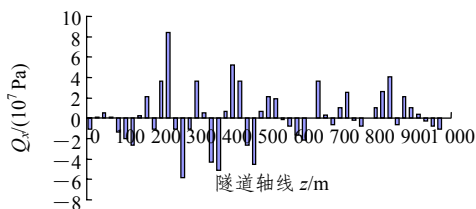


图 7 隧道剪力(工况 1, 第 8 秒; 单位: Pa)

Fig.7 Shearing force of tunnel(case 1, at  $t = 8$  s; unit: Pa)

近, 对应节点的相对大小关系相同; 压缩波作用下的弯矩  $M_x$  最小。

(6) 主应力: 剪切波作用下盾构隧道的最大及最小主应力分别是 2.92 和 -2.92 MPa, 均发生在  $t = 8$  s(见图 8); 压缩波作用下的最大及最小主应力最大, 分别是 7.90 和 -5.60 MPa。剪切压缩波作用下的最大及最小主应力分别是 4.40 和 -3.16 MPa。由于 C50 素混凝土的轴心抗拉强度为 3.0 MPa, 轴心抗压强度为 35.0 MPa, 这表明盾构隧道可能发生拉裂破坏, 在其纵向的抗拉强度值得重视。

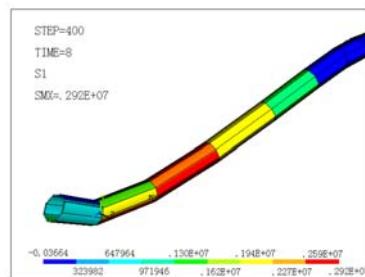


图 8 隧道最大主应力  $\sigma_1$ (工况 1, 第 8 秒; 单位: Pa)

Fig.8 Maximum principal stress  $\sigma_1$  of tunnel(case1, at  $t = 8$  s; unit: Pa)

## 4 结论和建议

本文采用反应位移法对水下盾构隧道横断面进行了抗震分析。计算是依据实际地层的地震响应结果, 考虑了地层和结构各自的震动特征、地层和结构的相互作用、环向接头和纵向接头的影响等因素。由计算结果可知: 盾构隧道横断面右上部和右下部, 左上部和左下部大约  $45^\circ$  方向附近区域是抗震的薄弱部位, 这与现场震害观测结果一致<sup>[3]</sup>。计算时, 应对该区域附近的相应节点进行重点处理。从管片材料抗弯及抗压角度看, 隧道横断面的抗震性能是可以达到的, 从隧道运营角度来看, 地层 16 mm 的变形也可以接受。

采用梁 - 弹簧模型, 将水下盾构隧道纵向刚度进行了适当的处理, 通过自由场行波输入对隧道进行了三维时程响应分析。计算结果表明: (1) 横向

剪切波导致的隧道变形和截面剪力主要表现在剪切波激振的方向；弯矩以激振方向剪力引起的弯矩为主；隧道的最大应力基本在材料强度的允许范围内。(2) 纵向压缩波作用下的轴力较大，轴向最大应力可能造成结构纵向的拉伸破坏，建议增大环间纵向接头的柔性。(3) 沿  $45^\circ$  方向传播的剪切压缩波激振时，隧道在各个方向的变形、内力和主应力都处于三种工况的中间位置。

综上所述，反应位移法具有模型清晰，方法明确，简便易行的特点，而三维时程响应分析能较好地反映了动力响应的全过程，且能直观地显示出结构的变形，便于识别结构的薄弱环节。实际工程应用表明，采用反应位移法来计算水下隧道横断面不同部位的局部内力和位移，并对结构-地层系统进行三维纵向动力响应分析，以检算整个结构体系的抗震性能，是合理、经济和实用的水下盾构隧道的抗震设计方法。

### 参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组. JTJ004 - 89 公路工程抗震设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1990.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTJ004 - 89 Code for aseismic design of highway[S]. Beijing: China Communications Press, 1990.(in Chinese))
- [2] 日本土木工程师学会地震工程委员会. 日本沉管隧道抗震设计特点[J]. 世界隧道, 1997, (3): 53 - 62.(JSCE Seismic Engineering Committee. Aseismic design features of Japanese submerged tunnel[J]. World Tunnels, 1997, (3): 53 - 62.(in Chinese))
- [3] JSCE. The 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake[J]. Japan Society of Civil Engineers, 1996, 81(3): 38 - 45.
- [4] 川岛一彦. 地下构筑物之抗震设计[M]. 东京: 鹿岛出版会, 1994: 43 - 60.(KAWAMATA K. Seismic design of underground structure[M]. Tokyo: Kajima Press, 1994: 43 - 60.(in Japanese))
- [5] 潘昌实. 隧道及地下结构抗震问题的研究概况[J]. 世界隧道, 1996, (5): 7 - 16.(PAN Changshi. Researches on aseismic design of tunnels and underground structures[J]. World Tunnels, 1996, (5): 7 - 16.(in Chinese))
- [6] 郑永来, 杨林德. 地下结构震害与抗震对策[J]. 工程抗震, 1999, (4): 23 - 28.(ZHENG Yonglai, YANG Linde. Earthquake damage and resistant measure of underground structures[J]. Engineering Resistant Engineering, 1999, (4): 23 - 28.(in Chinese))
- [7] 于加云. 隧道地震反应的数值分析[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(5): 42 - 45.(YU Jiayun. Numerical analysis of responses of a tunnel under earthquake[J]. Modern Tunnelling Technology, 2005, 42(5): 42 - 45.(in Chinese))
- [8] 刘晶波, 李彬, 谷音. 地铁盾构隧道地震反应分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(6): 757 - 760.(LIU Jingbo, LI Bin, GU Yin. Seismic response analysis of shielded subway tunnels[J]. Journal Tsinghua University(Science and Technology), 2005, 45(6): 757 - 760.(in Chinese))
- [9] 庄海洋, 陈国兴. 软弱地基浅埋地铁区间隧洞的地震反应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2 506 - 2 512.(ZHUANG Haiyang, CHEN Guoxing. Earthquake response of shallow subway tunnels in soft foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2 506 - 2 512.(in Chinese))
- [10] HE C, KOIZUMI A. Study on seismic behavior and seismic design methods in transverse direction of shield tunnels[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2001, 11(6): 651 - 662.
- [11] JSCE. The tunnel standard specifications(for shield tunneling)[S]. Tokyo, Japan Society of Civil Engineers, 1996: 49 - 53.
- [12] PWRI. Guideline for seismic design methods of large underground structures(a draft)[R]. Tsukubashi: Technical Memorandum of PWRI, Public Works Research Institute, 1992: 37 - 43.
- [13] 高峰, 李德武. 隧道三维地震反应分析若干问题的研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 48 - 53.(GAO Feng, LI Dewu. A study on some problems concerning 3D analysis of seismic responses of tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(4): 48 - 53.(in Chinese))
- [14] 韩大建, 周阿兴, 黄炎生. 珠江水下沉管隧道的抗震分析与设计(I)——时程响应法[J]. 华南理工大学学报, 1999, 27(11): 115 - 121.(HAN Dajian, HOU Axing, HUANG Yansheng. Aseismic analysis and design of the pearl river tunnel(I)—time domain response method[J]. Journal of South China University of Technology, 1999, 27(11): 115 - 121.(in Chinese))
- [15] 祝彦知, 冯紫良, 方志. 地震动下考虑各向异性土体-盾构隧道数值模拟[J]. 岩石力学, 2005, 26(5): 710 - 716.(ZHU Yanzhi, FENG Ziliang, FANG Zhi. Numerical simulation of shield tunnel dynamic response to earth motions taking account of anisotropy of layered soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 710 - 716.(in Chinese))
- [16] 严松宏, 高峰, 李德武, 等. 南京长江沉管隧道的地震安全性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增2): 260 - 263.(YAN Songhong, GAO Feng, LI Dewu, et al. Estimation on seismic safety of Nanjing Changjiang submerged tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp.2): 260 - 263.(in Chinese))
- [17] HE C, KOIZUMI A. Seismic behavior in longitudinal direction of shield tunnel located at irregular ground[C]// The First International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics. Seoul, Korea: [s. n.], 1999: 23 - 25.
- [18] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50267 - 97 核电厂抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1997: 76 - 79.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50267 - 97 Code for seismic design of nuclear power plants[S]. Beijing: China Planning Press, 1997: 76 - 79.(in Chinese))
- [19] 西南交通大学. 盾构隧道地震响应分析与抗震措施研究[R]. 成都: 西南交通大学, 2005.(Southwest Jiaotong University. Earthquake response of shield tunnel and research of aseismic measures[R]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.(in Chinese))