

DOI: 10.11779/CJGE201407023

基于薄壁圆柱壳理论的盾构隧道抗震拟静力分析法

晏启祥, 唐茂皓, 何 川, 耿 萍*

(西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要: 为简化盾构隧道抗震分析, 在获得深埋盾构隧道周边自由场剪应变和剪应力的基础上, 基于弹性薄壁圆柱壳理论, 给出了求解深埋盾构隧道水平地震剪切波作用下的附加内力计算公式, 并与同等条件等效刚度数值分析方法结果进行了对比。研究表明: 滑移和不滑移条件下的拟静力计算结果与相应的数值分析结果具有良好的一致性, 说明基于弹性薄壁圆柱壳理论获得的盾构隧道拟静力公式具有良好的合理性。研究还表明: 水平地震剪切波作用下, 可滑移条件下的附加弯矩和附加剪力分别大于不滑移条件下的附加弯矩和附加剪力, 可滑移条件下的附加轴力小于不滑移条件下的附加轴力; 附加弯矩和附加轴力呈现反对称分布特性, 其最大值通常分布在 45° 和 225° 雷达对称轴或 135° 和 315° 雷达对称轴上, 附加剪力最大值一般分布在 0° 和 180° 雷达对称轴上。研究结论对盾构隧道工程抗震设计具有一定的参考价值。

关键词: 深埋盾构隧道; 薄壁圆柱壳理论; 地震效应; 拟静力法

中图分类号: U452.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)07-1371-06

作者简介: 晏启祥(1971-), 男, 四川泸县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事现代盾构隧道理论、隧道结构动力学以及水热力多场耦合理论等方面的研究。E-mail: 764365015@qq.com。

Pseudo-static analysis method for shield tunnels based on theory of thin-walled cylindrical shell

YAN Qi-xiang, TANG Mao-hao, HE Chuan, GENG Ping

(Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To simplify the aseismic analysis of deeply-buried shield tunnels, a formula is proposed for solving the additional internal force in the tunnel linings of a deeply-buried shield tunnel under horizontal seismic shear waves based on the acquisition of the shear strain and shear stress of free-field around it and the utilization of the theory of elastic thin-walled cylindrical shell. Then, a model of numerical analysis of equivalent stiffness under the same condition is established for comparison. The research shows that the pseudo-static and numerical results have a good consistency under full slip and no slip conditions. The proposed pseudo-static formula for shield tunnels based on the theory of elastic thin-walled cylindrical shell is reasonable. Meanwhile, under the horizontal seismic shear waves, the additional bending moment and shear under full slip are larger than those under no slip, and the additional axial force under no slip is larger than that under full slip. The additional bending moment and axial force exhibit features of antisymmetric distribution, and their maximum values distribute on radar axis of 45° and 225° or 135° and 315° , and the maximum values of shear distribute on radar axis of 0° and 180° . The research results have certain reference value for the seismic design of shield tunnel engineering.

Key words: deeply-buried shield tunnel; theory of thin-walled cylindrical shell; earthquake effect; pseudo-static analysis method

0 引 言

地下结构相对地面结构具有一定的抗震优势, 特别是盾构隧道这种柔性隧道结构型式, 长期被认为具有很强的适应地震变形的能力, 因而其相关抗震设计和分析方法相对滞后且极不完善。1995年阪神大地震导致神户地铁遭受严重破坏, 且破坏后的地下结构修复的难度和代价较大, 随后地下结构的抗震设计才获

得业界重视, 国内外科研人员也开始积极研究地下结构抗震设计和分析的可行方法。吕和林^[1]提出了一种

基金项目: 教育部新世纪人才资助项目 (NCET-11-0713); 国家科技支撑计划课题 (2013BAB10B04); 国家自然科学基金项目 (51178400, U1134208)

收稿日期: 2013-12-03

*通讯作者

分别计算体波和面波影响的浅埋隧道拟静力抗震分析方法; 杨小礼等^[2]在考虑洞顶土压、震动孔隙水压、水平和垂直方向震动等因素的基础上, 给出了圆形隧道内力计算公式; 刘如山等^[3]从地震时一维土层反应应力入手, 对有限元反应加速度法的地震荷载加载方法进行了改进, 提出了有限元反应应力法; 张栋梁等^[4]采用平面弹性复变函数理论, 并利用土与结构间的力和位移协调条件, 推导了圆形衬砌内力解析解; 梁能山^[5]等利用拉普拉斯变换和逆变换得到了地下结构的位移表达式, 再通过留数定理求解出地下结构的位移和内力; 还毅等^[6]提出了一种考虑时空耦合的等效惯性加速度分布模式, 并对日本神户大开地铁车站进行了 Pushover 分析; 刘晶波等^[7]通过直接建立土-结构分析模型, 避免引入地基弹簧带来的计算量和计算误差, 提出了地下结构抗震分析的整体式反应位移法; 陶连金等^[8]对反应位移法、整体式反应位移法、强制反应位移法、张建民地震土压力方法、简化地震土压力方法、反应加速度法、地下结构 Pushover 分析方法等地铁地下结构抗震设计方法进行了对比分析; 刘晶波等^[9]还对地震系数法、自由场变形法、土-结构相互作用系数法、反应位移法、反应加速度法等多种拟静力方法进行研究, 结果表明反应加速度法与动力时程分析法较为接近。

上述研究基于不同的理论基础, 考虑的因素和关注的重心也各不相同, 具有各自的优势和适用性。为丰富圆形盾构隧道抗震设计拟静力分析方法, 这里阐述一种在水平地震剪切波作用下基于弹性薄壁圆柱壳理论的盾构隧道地震响应拟静力解析公式, 并将其与相近条件下的拟静力有限元数值分析结果实施对比, 验证其合理性。

1 弹性薄壁圆柱壳内力理论

对于圆形盾构隧道, 考虑接头效应并推导出其较为严密的拟静力公式几乎是难以实现的, 故此, 这里采用通行的做法, 即根据盾构隧道刚度折减系数将盾构隧道横断面简化成等效刚度均质圆环; 水平剪切地震波作用下, 均质地层周边地层剪切应力为 τ_{ff} , 等同于周边边界发生等值拉压情形。当在里面开挖形成一个圆形隧道后, 隧道与土体之间将存在径向和切向的地震诱发的附加应力 σ_r 和 $\tau_{r\theta}$:

$$\sigma_r = \tau_{ff} \cos 2\theta, \quad (1)$$

$$\tau_{r\theta} = -\tau_{ff} \sin 2\theta. \quad (2)$$

图 1 中 γ_{ff} 为均质地层剪切应变, G_s 为均质地层剪切模量。 θ 为偏离隧道断面纵轴的角度, 逆时针方向为正, 如图 2 所示。

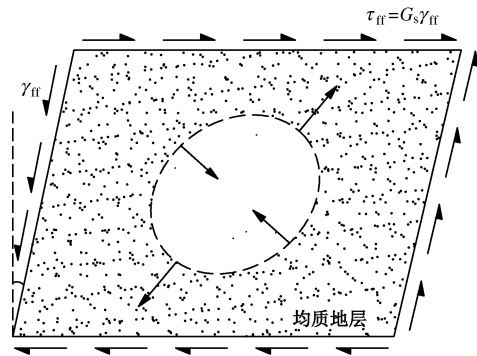


图 1 隧道远场剪应变和剪应力

Fig. 1 Far-field shear strain and shear stress of tunnel

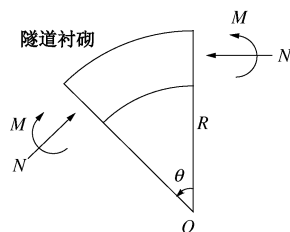


图 2 结构内力正负号约定

Fig. 2 Sign specification of internal force of structure

地震诱发的附加应力 σ_r 和 $\tau_{r\theta}$ 一部分由隧道衬砌结构承担, 一部分由土体自己承担。衬砌承担的应力可由下式表示:

$$p(\theta) = \sigma_r - \sigma_r^s, \quad (3)$$

$$\tau(\theta) = \tau_{r\theta} - \tau_{r\theta}^s, \quad (4)$$

式中, σ_r^s , $\tau_{r\theta}^s$ 分别为隧道边界上土体自身承担的附加地震应力。衬砌承担的应力最终可以由径向和切向荷载系数确定, 对于水平剪切地震作用而言, $p(\theta)$, $\tau(\theta)$ 最终可由下式表示^[10]:

$$p(\theta) = P(t) \cos 2\theta, \quad (5)$$

$$\tau(\theta) = T(t) \sin 2\theta, \quad (6)$$

式中, $P(t)$ 和 $T(t)$ 为径向和切向荷载系数。

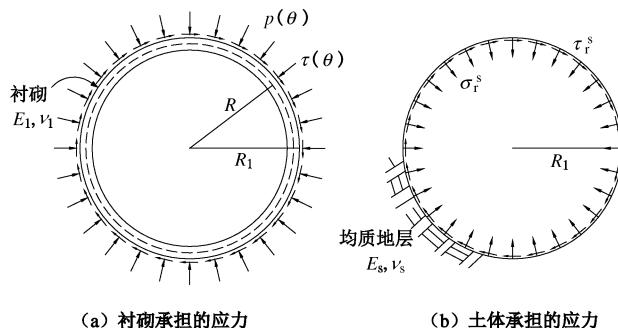


图 3 地震诱发的附加应力分解

Fig. 3 Decomposition of additional stress induced by earthquake

图 3 中 E_l 为隧道衬砌的弹性模量, ν_l 为隧道衬砌的泊松比, E_s 为均质地层的弹性模量, ν_s 为均质地层的泊松比, R 为衬砌中轴线半径, R_1 为隧道外半径。

通过衬砌与土体接触面上的变形系数获得衬砌和土体分别承担的应力值, 代入参考文献[4]中可获得衬砌和土体接触面上的应力 $p(\theta)$, $\tau(\theta)$ 。假定隧道衬砌无限长, 且隧道衬砌的厚度远小于其曲面半径, 则可以根据薄壁圆柱壳的弯矩理论, 求得衬砌单位长度上的弯矩 M 和薄膜力 N , 计算示意图见图 4。

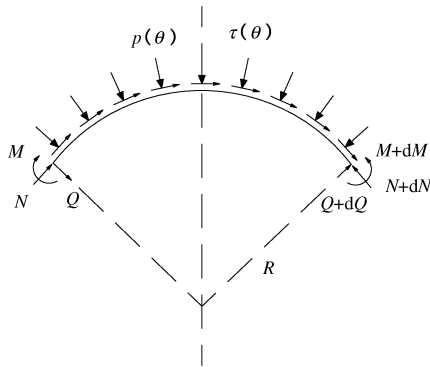


图 4 衬砌计算模型

Fig. 4 Computational model for lining

根据薄壁圆柱壳计算理论, 无限长圆形隧道衬砌的计算基本平衡微分方程为

$$\frac{1}{R} \frac{\partial M}{\partial \theta} - Q = 0 \quad (7)$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial N}{\partial \theta} - \frac{Q}{R} + \tau(\theta) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial Q}{\partial \theta} + \frac{N}{R} + p(\theta) = 0 \quad (9)$$

式 (7) 和 (8) 联立中消去 Q , 式 (7) 和 (9) 联立消去 Q , 则分别得控制方程:

$$R \frac{\partial N}{\partial \theta} - \frac{\partial M}{\partial \theta} = -R^2 \tau(\theta) \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 M}{\partial \theta^2} + RN = -R^2 P(\theta) \quad (11)$$

结合几何方程、物理方程可求解出衬砌的弯矩 M , 轴力 N 和剪力 Q 如下^[11-12]:

(1) 界面滑移情况:

$$M(\theta) = \frac{4(1-\nu_s)}{(2F+5-6\nu_s)} \cos 2(\theta + \frac{\pi}{4}) G_s \gamma_{ff} R^2 \quad (12)$$

$$N(\theta) = -\frac{4(1-\nu_s)}{(2F+5-6\nu_s)} \cos 2(\theta + \frac{\pi}{4}) G_s \gamma_{ff} R \quad (13)$$

$$Q(\theta) = -\frac{8(1-\nu_s)}{(2F+5-6\nu_s)} G_s \gamma_{ff} R \cos 2\theta \quad (14)$$

上述弯矩、轴力和剪力公式也可改写为

$$M(\theta) = \frac{12(1-\nu_s)}{3(5-6\nu_s) + (1-\nu_s)F_1} \tau_{ff} R^2 \sin 2\theta \quad (15)$$

$$N(\theta) = -\frac{12(1-\nu_s)}{3(5-6\nu_s) + (1-\nu_s)F_1} \tau_{ff} R \sin 2\theta \quad (16)$$

$$Q(\theta) = \frac{24(1-\nu_s)}{3(5-6\nu_s) + (1-\nu_s)F_1} \tau_{ff} R \cos 2\theta \quad (17)$$

式中,

$$F_1 = \frac{E_s R^3 (1-\nu_s^2)}{E_l I_1 (1-\nu_s^2)} \quad (18)$$

这表明式 (12) ~ (14) 与式 (5) ~ (17) 是一致的。

(2) 界面不滑移情况:

$$M(\theta) = \frac{4(1-\nu_s)}{\alpha} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2} - \nu_s \right) C \right\} \cos 2(\theta + \frac{\pi}{4}) G_s \gamma_{ff} R^2 \quad (19)$$

$$N(\theta) = -\frac{4(1-\nu_s)}{\alpha} \left\{ F + \left(\frac{1}{2} - \nu_s \right) C + 2 \right\} \cos 2(\theta + \frac{\pi}{4}) G_s \gamma_{ff} R \quad (20)$$

$$Q(\theta) = -\frac{8(1-\nu_s)}{\alpha} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2} - \nu_s \right) C \right\} G_s \gamma_{ff} R \cos 2\theta \quad (21)$$

式中,

$$\alpha = F[(3-2\nu_s) + (1-2\nu_s)C] + C \left[\frac{5}{2} - 8\nu_s + 6\nu_s^2 \right] + 6 - 8\nu_s \quad (22)$$

$$C = \frac{E_s (1-\nu_s^2) R}{E_l A_l (1+\nu_s) (1-2\nu_s)} \quad (23)$$

$$\gamma_{ff} = \frac{u(z_1, t_c) - u(z_2, t_c)}{z_2 - z_1} \quad (24)$$

$$u(z, t_c) = \frac{2}{\pi^2} S_u T_G \cos(\frac{\pi z}{2H}) \quad (25)$$

上述式中 A_l 为隧道衬砌的断面面积, I_l 为隧道衬砌断面的惯性矩, $u(z, t_c)$ 为水平地层位移差最大的 t_c 时刻对应的 z 位置处水平位移分布函数, z_1 , z_2 分别为自由场上两个特定位置点的埋深, S_u 为基岩面速度反应谱, T_G 为地层的自振周期, z 为计算点埋深, H 为基岩离地表面的深度。

2 工程算例

2.1 计算参数

以某深埋盾构隧道为分析对象, 该盾构隧道衬砌的外径 6.0 m, 衬砌厚度为 0.3 m, 管片衬砌混凝土弹性模量为 32.5 GPa, 泊松比为 0.2, 重度为 26 kN/m³, 管片衬砌环的横向等效刚度系数取为 0.85, 隧道顶部埋深 29.0 m。隧道位于均质黏土层当中, 黏土层厚为 64 m, 其下为基岩, 均质黏土层弹性模量为 32.5 MPa, 泊松比为 0.4, 黏聚力为 15.0 kPa, 摩擦角为 15.0°, 重度为 19.0 kN/m³; 地层的动剪切模量为 11.61 MPa, 自振周期为 0.698 s, 基岩面速度反应谱为 0.171 m/s。鉴于拟静力公式针对的是均质圆环, 下文将其内力解

称为等效刚度拟静力解；数值模拟中模拟相同刚度的数值解称为等效刚度数值解。等效刚度是在均质圆环刚度的基础上乘以等效刚度系数 $\eta=0.85$ 获得的。

2.2 计算模型

为验证式(12)~(17)和式(19)~(21)的合理性，建立如图5所示的等效刚度数值验证模型。隧道洞室上、下、左、右方向各取5倍洞室直径范围模拟地层。在地层四周施加均匀的远场剪切力 τ_{ff} 以模拟水平地震剪切波作用。地层采用二维实体结构单元(plane42)模拟，隧道衬砌采用梁单元(beam3)模拟。

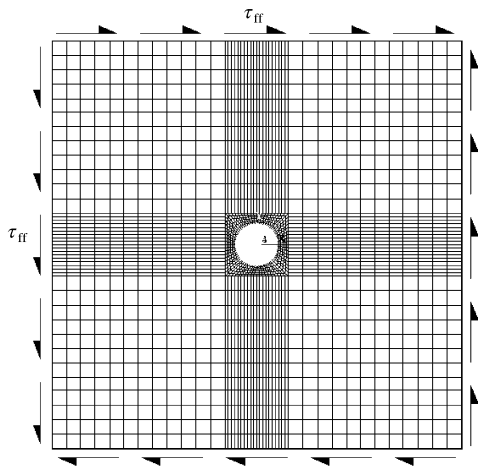


图5 数值模拟模型示意
Fig. 5 Numerical model

当地层与衬砌结构之间可滑移时，采用摩擦单元(contact、target)模拟相互的作用界面，相应的摩擦系数可按下式取值^[13-14]：

$$k_f = \frac{E_s(1-\nu_1^2)R^3}{6E_lI_l(1+\nu_s)}。$$
 (26)

当地层与衬砌结构之间不滑移时，通过地层和结构节点耦合的方式模拟。这样，就可以采用前述的等效刚度拟静力法和等效刚度数值法进行界面之间有无

滑移的分析。

2.3 计算流程

对于拟静力解，首先通过式(25)计算出在 t_c 时刻的最大水平地层位移差 $u(z_1,t_c)-u(z_2,t_c)$ ，然后将两特定点的位移差 Δu 和埋深差 Δz 代入式(24)中，得出均质地层的远场剪应变，并根据 $\tau_{ff}=G_s\gamma_{ff}$ 一式得出在水平剪切地震波作用下，均质地层周边地层剪切应力，将所得的剪应变分别代入界面滑移情况下的式(12)~(14)和界面不滑移情况下的式(19)~(21)，可得两种条件下等效刚度原型隧道拟静力解。

对于数值解，将上述求得的剪应力作用在等效刚度数值模型边界上，分别采用摩擦单元和节点耦合模拟界面滑移和不滑移条件，并开展有限元静力分析，即可得界面滑移和不滑移情况下的等效刚度数值解。

2.4 结果分析

将两种方法在界面滑移和不滑移条件下的水平剪切地震波导致的附加内力极值列于表1。并将相应的拟静力解和数值解之间的差异用误差来表示。

从表1可看出，附加弯矩、附加轴力和附加剪力无论是在滑移还是不滑移条件下，其拟静力解均大于数值解，同时附加弯矩和附件剪力的拟静力解和数值解在滑移下的值均大于不滑移情况下的值；而附加轴力呈现相反的规律，即附加轴力静力解和数值解在不滑移条件下的值均远大于滑移情况下的值。

图6为两种方法不同界面滑移条件下获得的结构附加内力。从图6(a)可以看出，在滑移和不滑移条件下，拟静力解和数值解相应弯矩的分布规律基本相同，都以45°，225°和135°，315°雷达轴为对称轴。在滑移条件下，衬砌135°和315°共轭方向附加弯矩的拟静力解与数值解最大，分别为21.52 kN·m和16.90 kN·m；衬砌45°和225°共轭方向附加弯矩的拟静力解与数值解最小，分别为-21.52 kN·m和-17.00 kN·m。由图6(b)可以看出，等效刚度拟静力解和数

表1 两种方法的附加内力极值

Table 1 Limit values of additional internal forces by two methods						
工况	最大附加正弯矩/(kN·m)			最大附加负弯矩/(kN·m)		
	拟静力解	数值解	误差	拟静力解	数值解	误差
滑移	21.52	16.90	0.21	-21.52	-17.00	0.21
不滑移	19.78	16.44	0.17	-19.78	-16.44	0.17
工况	最大附加正轴力/kN			最大附加负轴力/kN		
	拟静力解	数值解	误差	拟静力解	数值解	误差
滑移	7.17	6.18	0.14	-7.17	-5.38	0.25
不滑移	20.72	18.25	0.12	-20.72	-18.27	0.12
工况	最大附加正剪力/kN			最大附加负剪力/kN		
	拟静力解	数值解	误差	拟静力解	数值解	误差
滑移	14.35	11.42	0.20	-14.35	-11.11	0.20
不滑移	13.19	10.94	0.16	-13.19	-10.94	0.16

值解获得的附加轴力分布与附加弯矩分布基本呈相反
的分布特征。在滑移和不滑移条件下, 拟静力解和数
值解都以 45° , 225° 和 135° , 315° 雷达轴为对称
轴。在滑移条件下, 衬砌 45° 及 225° 共轭方向附加
轴力的拟静力解与数值解最大, 分别为 7.17, 6.18 kN;
 135° 及 315° 共轭方向轴力的拟静力解与数值解最
小, 分别为 -7.17, -5.38 kN。

由图 6 (c) 可以看出, 在滑移和不滑移条件下,
拟静力解和数值解对应的附加剪力分布规律基本相
同, 都以 0° , 180° 和 90° , 270° 雷达轴为对称轴。
在滑移条件下, 衬砌 0° 和 180° 共轭方向附加剪力的
拟静力解与数值解最大, 分别为 14.35, 11.42 kN;
 90° 和 270° 共轭方向附加剪力的拟静力解与数值解
最小, 分别为 -14.35, -11.11 kN。

地震剪切波作用下附加弯矩和附加剪力在滑移
和不滑移两种条件下的值相差较小, 说明在地震剪切
波作用下衬砌附加弯矩和附加剪力受地层与隧道界面
的相互作用影响较小; 而附加轴力在滑移与不滑移
两种条件下的数值相差较大, 说明在地震剪切波作用
下衬砌附加轴力受地层与隧道界面的相互作用影响
较大。

从图 6 中还可看出, 附加弯矩和附加轴力绝对值
的最大值均出现在衬砌 45° , 135° , 225° , 315°
等方向上, 表明这些位置是地震作用下隧道受力的不
利位置。等效刚度拟静力解由于难以充分考虑土体与
结构之间的作用关系, 附加内力结果相对于等效刚度
数值解要大, 但附加弯矩、附加轴力和附件剪力的变
化规律与数值解基本一致, 相对误差最大值在 25% 以
内, 这表明等效刚度拟静力解与等效刚度数值解具有
良好的近似性, 也表明按等效刚度拟静力公式进行抗
震计算有足够的安全性。

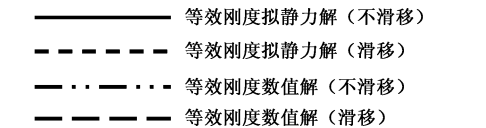
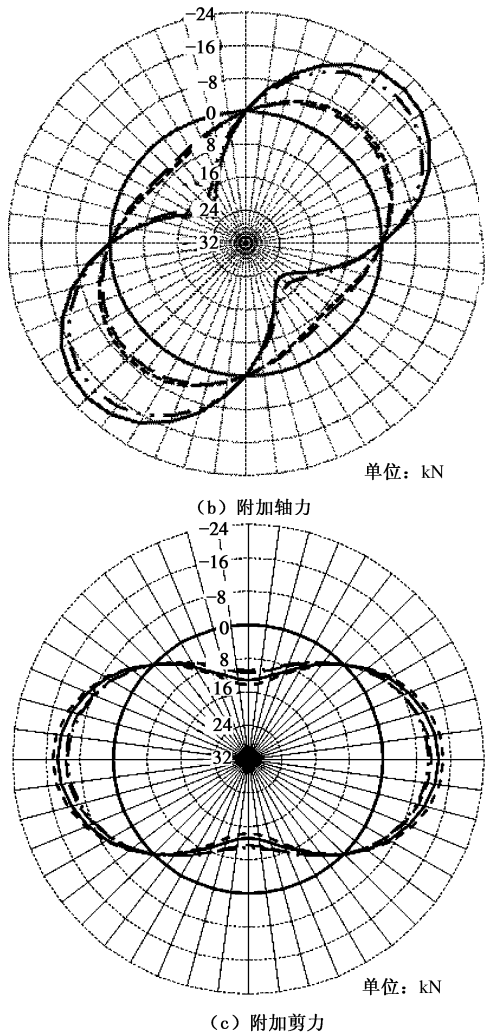
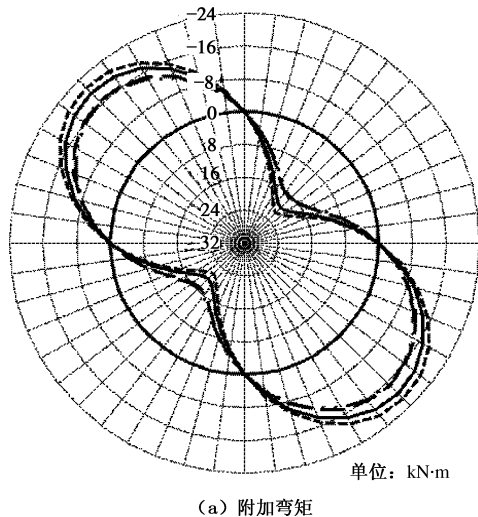


图 6 等效刚度拟静力解与等效刚度数值解对比

Fig. 6 Comparison between pseudo-static and numerical results under equivalent stiffness

3 结 语

基于弹性薄壁圆柱壳理论, 在考虑地层与结构相
互作用以及界面滑移特性的基础上, 给出了深埋圆形
盾构隧道在地震剪切波作用下的附加内力拟静力求解
公式。对于均质地层, 当已知隧道周边一定距离地层
层间剪切位移或剪切力, 且该剪切位移或剪切力沿该
范围高度的差异可以忽略时, 即可利用该拟静力公式
进行盾构隧道的抗震近似计算, 有效地降低盾构隧道
抗震分析的复杂性。通过建立考虑地层结构相互作
用的数值模型, 开展相同条件下的分析对比表明, 该
拟静力方法与数值分析方法获得的附加内力分布规律
基本一致, 数值也较为接近, 表明基于弹性薄壁圆柱
壳理论的盾构隧道拟静力分析方法具有较好的合理性和
应用价值。

采用拟静力法和数值法分析表明,水平剪切波作用下,拟静力法获得的附加内力皆大于数值方法获得的附加内力。同时,可滑移条件下的附加弯矩大于不滑移条件下的附加弯矩,可滑移条件下的附加轴力小于不滑移条件下的附加轴力,可滑移条件下的附加剪力大于不滑移条件下的附加剪力。

水平剪切波作用下,附加弯矩和附加轴力分布图呈现反对称特性,其最大值通常分布在 45° 和 225° 雷达对称轴上或者 135° 和 315° 雷达对称轴上;附加剪力最大值一般分布在 0° 和 180° 雷达对称轴上。抗震设计时,可将盾构隧道的附加应力与常时荷载下结构的内力叠加,并按叠加后内力的控制值开展抗震设计。

参考文献:

- [1] 吕和林. 一种用于浅埋隧道抗震分析的拟静力数值方法[J]. 西南交通大学学报, 1999, **34**(3): 315 - 319. (LÜ He-lin. A mimetic statics numeric method on earthquake resistance analysis of shallow buried tunnel[J]. Journal Of Southwest Jiaotong University, 1999, **34**(3): 315 - 319. (in Chinese))
- [2] 杨小礼, 李亮, 刘宝琛. 强震作用下交通隧道的拟静态反应[J]. 中国公路学报, 2001, **14**(4): 55 - 58. (YANG Xiao-li, LI Liang, LIU Bao-chen. Response of transportation tunnel due to strong earthquake[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, **14**(4): 55 - 58. (in Chinese))
- [3] 刘如山, 胡少卿, 石宏彬. 地下结构抗震计算中拟静力法的地震荷载施加方法研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(2): 238 - 242. (LIU Ru-shan, HU Shao-qin, SHI Hong-bin. Study on seismic loading of pseudo-static approach used in the seismic design of underground structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(2): 238 - 242. (in Chinese))
- [4] 张栋梁, 杨林德, 谢永利, 等. 盾构隧道抗震设计计算的解析解[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(3): 543 - 549. (ZHANG Dong-liang, YANG Lin-de, XIE Yong-li, et al. Analytical solution for aseismic design calculation of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(3): 543 - 549. (in Chinese))
- [5] 梁能山, 戚承志, 王明洋. 结构体系的一种新型半解析动力算法——地下结构动力分析的拉普拉斯积分变换解法[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增刊 1): 198 - 206. (LIANG Neng-shan, QI Cheng-zi, WANG Ming-yang. A new dynamic semi-analytical algorithm of structural system-laplace integral transform method of dynamic analysis of underground structures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S1): 198 - 206. (in Chinese))
- [6] 还毅, 方秦, 柳锦春, 等. 考虑时空耦联的等效惯性加速度加载的地下结构 pushover 分析[J]. 地震工程与工程振动, 2011, **31**(4): 64 - 70. (HUAN Yi, Fang Qin, LIU Jin-chun, et al. Pushover analysis of underground structure by the time-space coupled equivalent inertial acceleration[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, **31**(4): 64 - 70. (in Chinese))
- [7] 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬, 等. 地下结构抗震分析的整体式反应位移法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(8): 1618 - 1624. (LIU Jing-bo, WANG Wen-hui, ZHAO Dong-dong, et al. Integral response deformation method for seismic analysis of underground structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(8): 1618 - 1624. (in Chinese))
- [8] 陶连金, 王文沛, 张波, 等. 地铁地下结构抗震设计方法差异性规律研究[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(12): 170 - 176. (TAO Lian-jin, WANG Wen-pei, ZHANG Bo, et al. Difference law study of seismic design methods for subway structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(12): 170 - 176. (in Chinese))
- [9] 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬. 地下结构横截面地震反应拟静力计算方法对比研究[J]. 工程力学, 2013, **30**(1): 105 - 111. (LIU Jing-bo, WANG Wen-hui, ZHAO Dong-dong. Comparison of the pseudo-static methods for seismic analysis of the underground structures[J]. Engineering Mechanics, 2013, **30**(1): 105 - 111. (in Chinese))
- [10] 刘干斌, 谢康和, 施祖元. 黏弹性地基中深埋圆形隧道的应力和位移分析[J]. 工程力学, 2004, **21**(5): 132 - 138. (LIU Gan-bin, XIE Kang-he, SI Zhu-yuan. Analysis of stress and displacement around a deep circular tunnel in viscoelastic soil[J]. Engineering Mechanics, 2004, **21**(5): 132 - 138. (in Chinese))
- [11] PARK K H, TANTAYOPIN K, TONTAVANICH B, et al. Analytical solution for seismic-induced ovaling of circular tunnel lining under no-slip interface conditions: A revisit[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009(24): 231 - 235.
- [12] BOBET A. Drained and undrained response of deep tunnels subjected to far-field shear loading[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010(25): 21 - 26
- [13] WANG J N J. Seismic design of tunnels: a simple state-of-the-art approach[M]. New York: Parsons Brinckerhoff Inc, 1993.
- [14] SEDARAT H, KOZAK A, HASHASH Y M A. Contact interface in seismic analysis of circular tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009(24): 482 - 490.