

DOI: 10.11779/CJGE201609018

# 沉管隧道地震反应分析局部精细化建模中的几个问题

楼梦麟<sup>1</sup>, 董云<sup>2</sup>, 张如林<sup>3</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 四川省建筑设计研究院, 四川 成都 610041;  
3. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580)

**摘 要:** 通过大型沉管隧道的实例分析和前期研究成果, 重点讨论沉管隧道地震反应分析中建立局部三维精细化模型时所应关注的 4 个问题: ①模型范围大小的问题; ②上覆水体动水作用的简化; ③时域分析中阻尼矩阵的合理建模及其影响; ④地震输入方式的选择与影响等。文中通过工程算例验证局部三维精细化建模的合理方式, 研究结果表明: 考察某段沉管管节的地震反应时, 应至少考虑该管节两端各三段相邻管节的影响和轴向 5 倍以上土层厚度范围的土层影响; 上覆水体可近似采用等效附加质量的方式模拟; 当沉管隧道-土层体系的基频低于输入地震波的卓越频率时, 易采用基于体系基频的优化方法来确定 Rayleigh 比例阻尼矩阵的比例系数; 沿沉管隧道轴向的多点地震输入对隧道地震反应有较大影响, 应加以充分关注。

**关键词:** 沉管隧道; 地震反应分析; 局部建模; 精细化计算

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)09-1705-08

**作者简介:** 楼梦麟(1947-), 工学博士, 教授, 主要研究方向为工程结构抗震防灾、土-结构动力相互作用。E-mail: lml@tongji.edu.cn。

## Several problems in refined local modeling for seismic response analysis of immersed tunnel

LOU Meng-lin<sup>1</sup>, DONG Yun<sup>2</sup>, ZHANG Ru-lin<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Sichuan Provincial Architectural Design and Research Institute, Changdu 610041, China; 3. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** Based on the case study of a large-scale immersed tunnel and the previous research results, several problems in establishing the refined local model for seismic response analysis of the immersed tunnel are discussed emphatically as follows: (1) problem of model range size, (2) simplified method for hydrodynamic action of overlying water body, (3) the proper model of damping matrix in time domain and its effect, (4) selection of seismic input mode and its effect. The reasonable way for three-dimensional refined local modeling of the immersed tunnel is verified by engineering examples. The numerical results show that when the seismic responses of an immersed tunnel pipe is investigated carefully, at least the influence of other three pipes at two sides of the pipe must be considered and the effect of the limited soil layer whose horizontal length is at least 5 times the thickness of the soil layer at two sides of the pipe should be included. The method of equivalent additional mass can be used to simulate the overlying water body. When the fundamental frequency of the immersed tunnel-soil layer system is lower than the predominate frequencies of the input seismic wave, the ratio coefficients of the Rayleigh proportional damping matrix are determined by the optimization method based on the fundamental frequency of the system. It should be fully noted that the excitation of multi-support seismic input along tunnel axis has a great influence on the seismic response of the immersed tunnel.

**Key words:** immersed tunnel; seismic response analysis; local modeling; refinement calculation

## 0 引 言

随着全球国际化趋势, 国内外已建和计划修建大型长距离越江跨海交通通道工程逐渐增多, 如目前在建的连接香港、珠海和澳门的大型跨海通道工程, 其主体工程包括约 6.7 km 的沉管隧道工程和约 23 km 的

桥梁工程。应用有限元方法计算沉管隧道地震反应的优越性在于能够细致地模拟沉管隧道的细部结构特

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAG07B01); 国家自然科学基金项目(91315301)

收稿日期: 2015-08-29

征,如不规则的几何形状、沉管管节间的细部链接构造和沉管-土体间的非线性接触等复杂力学特征,便于较为准确地分析沉管隧道在强地震作用下的非线性反应特性和合理地评估沉管隧道的抗震性能。然而采用有限元法进行包括土层场地在内的全隧道三维精细化模型的地震反应分析是一个复杂的大型动力计算问题,计算规模巨大,即使在当今计算机技术日益提高的条件下,实施起来依然有较大困难。针对沉管隧道中关键部位进行局部隧道三维精细化模型的地震反应分析,能够深入全面地揭示沉管隧道中关键部位在地震反应中的受力和变形过程及其特点,有助于进行科学合理的隧道抗震设计,而且计算规模有限,便于工程设计人员应用。本文讨论局部沉管隧道三维精细化有限元建模中应关注的几个问题。管节间接头的可靠性是沉管隧道抗震安全性设计和施工中的关键因素,管节间接头的模拟也是沉管隧道三维精细化有限元建模中应关注的主要问题之一,已有文献对GINA止水带、剪力键和接头弹簧等细部构造的力学参数和建模方式进行了全面介绍<sup>[1]</sup>,限于篇幅,本文对这类问题不作介绍。

## 1 计算范围的确定

沉管隧道施工时一般置放在经过工程处置的海床或河床上,经过多年运营后,因淤积而浅埋于土层之中。在进行隧道结构地震反应分析时,应把土层和隧道相互作用体系作为整体分析对象。当针对隧道某一特殊管节进行精细化分析时,首先遇到如何合理地确定计算范围的问题。

### 1.1 土层范围的确定

在土-结构动力相互作用体系的有限元模型中,只能取有限的土体范围进行分析。土层有限元模型一般由两部分组成,一部分是需要输出动力反应结果的核心计算区,另一部分是位于外围的旨在消除远置人工边界影响的扩展区。根据笔者的研究成果,首先不宜在土层中取假想的基岩面,而应直接取土层下卧基岩面作为输入地震的激励面<sup>[2]</sup>;其次采用简单的侧移边界作为竖向远置人工边界易于工程应用,但为了消除人工边界上的反射波能量不影响核心计算区的地震反

应,土层有限元模型中扩展区部分的水平范围应大于核心计算区外侧土层深度的5倍。这样有足够长的波动传播距离来耗散在人工边界上反射回来的波动能量,使之产生的附加振动很小,同时也可使反射回来的附加振动与实际地震反应的尾部叠加,不影响地震反应时程的主要振动部分的大小<sup>[3]</sup>。

### 1.2 相邻沉管隧道的影响范围

根据日本学者田村重四郎和冈本舜三提出的质量-弹簧模型并通过改进,建立了计算沉管隧道地震反应的三维梁简化模型。基于Windows平台集成开发环境Visual Studio中的Visual Basic语言,结合通用有限元软件ANSYS,开发了一致和非一致地震激励下超长沉管隧道整体地震反应快速分析方法软件平台<sup>[4]</sup>。在此计算模型中,隧道周边土层的动力相互作用等效为质量-弹簧模型,因此计算自由度大为减少,可进行整体隧道地震反应计算,但不能考虑沉管隧道的细部结构。本文应用这一程序,研讨相邻沉管隧道管节间的影响范围。

某沉管隧道工程的管节从东到西的布置如图1所示,两端为人工岛,通过暗埋段与沉管段相连接,共有33个管节,隧道东西两端敞开段的端头的自由度为约束状态。图中工况1,2,3,4表示以管节E17为中心、分别由3,5,7,9段管节组成的局部模型,以全隧道模型为工况5,作为评价局部隧道模型合理性的比较基础。在基岩面纵向一致地震输入下,分别计算了上述5种工况中管节E17的地震反应,包括管节两端大接头和管节内小接头的相对位移和管节内力,分别如表1~3所示。纵向输入的地震波为该工程场地地震安全性评价得到的基岩人工波,峰值加速度为0.15g。

从表1~3中数据可以看出,管节E17两端所取管节数越多,越接近整体模型的计算结果。工况1和工况2计算结果的误差较大,工况3中纵向相对位移误差在5%左右,轴力误差在6%左右,工况4纵向相对位移误差和轴力误差皆在1%左右。

管节E17所处的位置较为平缓,下面选择处于斜坡段的管节E29作为考察对象,同样以管节E29为中心,选择不同段管节数量组成的局部模型,讨论确定位于地形起伏较大处局部管节模型的计算范围。共选

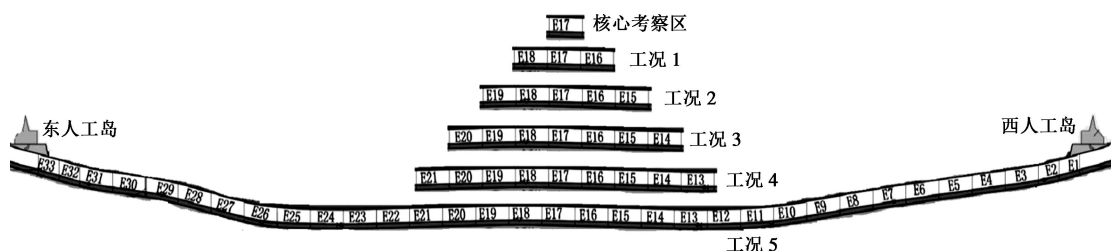


图1 沉管隧道管节布置图与平坡段局部模型示意图

Fig. 1 Sketch drawing of immersed tunnel sections and flat slope segment local models

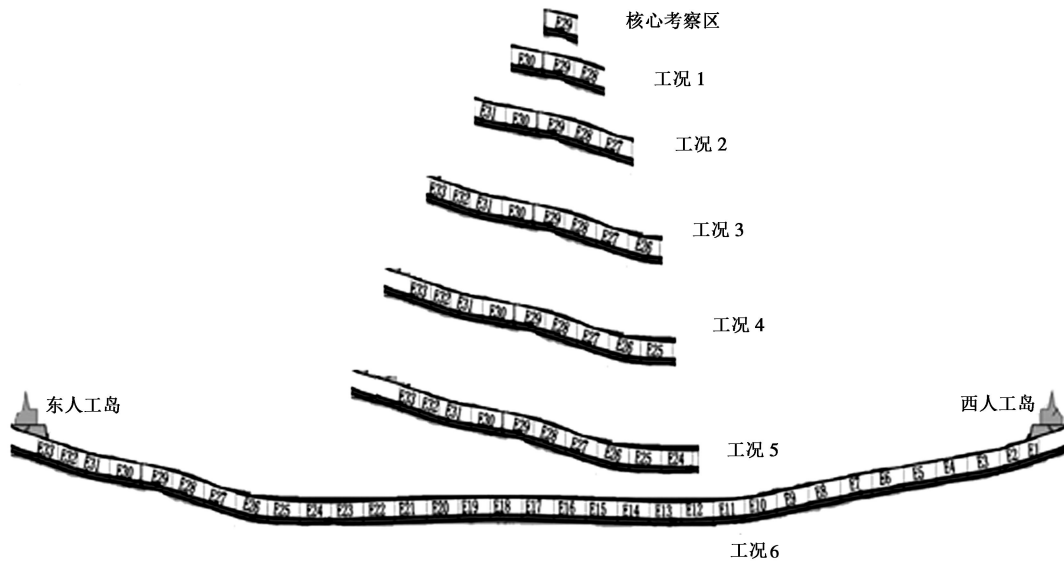


图 2 沉管隧道斜坡段局部模型示意图

Fig. 2 Sketch drawing of slope segment local models for immersed tunnel

表 1 管节 E17 纵向相对张开位移及误差

Table 1 Longitudinal open displacements of E17 and relative errors

工况	左大接头		中间小接头		右大接头	
	峰值 /mm	误差 /%	峰值 /mm	误差 /%	峰值 /mm	误差 /%
1	4.00	-31.8	2.45	-30.50	4.28	-31.0
2	4.62	-21.1	2.76	-21.60	4.86	-21.7
3	5.55	-5.15	3.34	-5.14	5.84	-5.75
4	5.76	-1.44	3.46	-1.51	6.10	-1.69
5	5.85	0	3.52	0	6.20	0

表 2 管节 E17 纵向相对压缩位移及误差

Table 2 Longitudinal compression displacements of E17 and relative errors

工况	左大接头		中间小接头		右大接头	
	峰值 /mm	误差 /%	峰值 /mm	误差 /%	峰值 /mm	误差 /%
1	2.49	-32.6	1.75	32.70	2.82	-33.0
2	2.88	-22.2	2.02	22.20	3.31	-21.5
3	3.51	-4.96	2.46	5.01	4.01	-4.78
4	3.65	-1.28	2.46	1.49	4.15	-1.36
5	3.70	0	2.59	0	4.21	0

表 3 管节 E17 纵向轴力及误差

Table 3 Longitudinal axial forces of E17 and relative errors

工况	左大接头		中间小接头		右大接头	
	峰值 /mm	误差 /%	峰值 /mm	误差 /%	峰值 /mm	误差 /%
1	9.33	-36.0	8.24	-34.6	10.4	-35.30
2	11.3	-22.7	9.65	-23.4	12.3	-23.40
3	13.8	-5.67	11.9	-5.65	15.1	-6.33
4	14.4	-1.51	12.4	-1.55	15.8	-1.77
5	14.6	0	12.6	0	16.1	0

择了 5 种局部沉管隧道模型,增加了 11 个管节的局部模型,编号为工况 5,而整体模型编号为工况 6。各工况如图 2 所示。有关计算结果列于表 4~6 中。通过对

管节 E17 和管节 E29 的误差对比分析可以看出,对于处于斜坡地段 E29 管节来说,两侧需要保留比平缓段更多的管节才能得到相对准确的计算结果。

表 4 管节 E29 纵向相对张开位移及误差

Table 4 Longitudinal open displacements of E29 and relative errors

工况	左大接头		中间小接头		右大接头	
	峰值 /mm	误差 /%	峰值 /mm	误差 /%	峰值 /mm	误差 /%
1	4.19	-38.3	2.80	-39.4	3.84	-38.4
2	5.15	-24.2	3.49	-24.5	4.72	-24.3
3	5.82	-14.2	3.96	-14.1	5.32	-14.8
4	6.29	-7.22	4.28	-7.18	5.77	-7.55
5	6.60	-2.66	4.51	-2.25	6.10	-2.26
6	6.78	0	4.62	0	6.24	0

表 5 管节 E29 纵向相对压缩位移及误差

Table 5 Longitudinal compression displacements of E29 and relative errors

工况	左大接头		中间小接头		右大接头	
	峰值 /mm	误差 /%	峰值 /mm	误差 /%	峰值 /mm	误差 /%
1	3.24	-38.6	2.41	-38.5	3.92	-38.4
2	4.02	-23.8	2.99	-23.8	4.88	-23.4
3	4.56	-13.6	3.40	-13.7	5.53	-13.2
4	4.92	-6.77	3.67	-6.59	5.93	-6.89
5	5.12	-3.16	3.80	-3.15	6.18	-2.96
6	5.28	0	3.93	0	6.37	0

通过以上比较分析可知,当地形较为平坦时,所考察沉管管节两边各选取 3,4 段管节作为模型的计算范围可以较好地模拟两边全部相邻管节的相互作用影响,避免计算结果失真;而当地形有较大起伏或者地质条件变化较大时,可在两边各选取 4,5 段管节作为模型的计算范围来模拟两边全部相邻管节的相互作用

影响。进一步分析可知，选取的局部区域模型在地震作用下有一个计算影响范围的问题，一段沉管隧道对周边的影响范围大致是所考察管节长度的4倍。

表6 管节E29纵向轴力及误差

Table 6 Longitudinal axial forces of E17 and relative errors

工况	左大接头		中间小接头		右大接头	
	峰值/mm	误差/%	峰值/mm	误差/%	峰值/mm	误差/%
1	9.69	-41.60	8.08	-41.40	7.76	-41.1
2	12.40	-25.50	10.30	-25.60	9.86	-25.2
3	14.00	-15.80	11.70	-15.50	11.03	-16.3
4	15.20	-8.13	12.70	-8.25	12.07	-8.45
5	15.90	-4.02	13.20	-4.15	12.63	-4.16
6	16.60	0	13.80	0	13.18	0

对于沉管隧道-土层相互作用体系来说，沿隧道纵向应取土层和沉管两个范围数值中的大值，竖向应取至基岩，横向由土层范围确定。

### 2 上覆水体动水作用模拟

沉管隧道地震反应分析实际上是结构-土-流体相互作用体系的三维流固耦合动力计算问题，即使实施局部建模，计算规模仍然巨大。建议采用附加质量方法代替流体有限元方法来模拟上覆水体的动水作用，最简单的方法是流体作用于场地或沉管表面的动水压力近似等于作用单位面积上流体质量与作用面处加速度之积，即附加质量等于作用面积上方的水柱质量<sup>[5]</sup>。需要指出的是：由于动水压力作用于表面的法线方向，这样同一结点不同方向上的附加质量是不同的，这是有别于代表固体惯性效应的结点质量，后者在结点三方向上是完全相同的。如图3中所有表面沿z轴方向没有动水压力，水平表面上只有y向有附加质量，而斜坡面上x, y向都有附加质量。

以二维不规则凸起海床地形模型来验证上述简化近似方法的合理性。利用对称性，海床地形模型的一半如图4所示，比较离中心对称轴线约5倍深度范围内(600 m)海床表面的地震反应。根据有限土层截取范围的要求，计算距离在600 m处再向外延伸5倍土层深度的长度，即计算模型的水平长度为1000 m。整个海床土设为均质体，剪切波波速为300 m/s。在海床底面输入El Centro地震波，最大幅值调整为

0.15g。土区的边界条件设置：水平输入时，对称轴和右侧边界竖向约束，底部固定约束；竖向输入时，对称轴和右侧边界水平约束，底部固定约束。

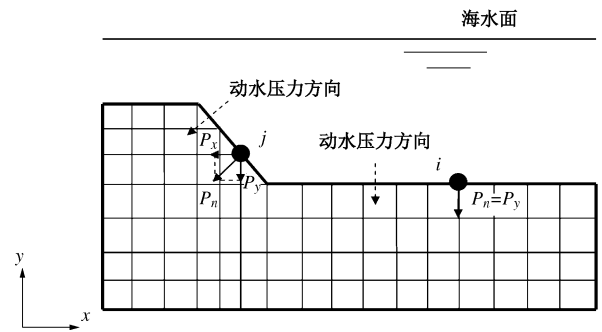


图3 海床表面动水压力分解示意图

Fig. 3 Sketch drawing of seabed surface hydrodynamic pressure decomposition

采用附加质量和流体有限元方法分别计算土层地震响应，计算结果对比如图5, 6所示。从图中可以看出，无论是在水平激励还是竖向激励下，采用流体有限元方法和附加集中质量简化算法的结果十分接近，峰值位移和峰值加速度的误差最大不超过5%。这是由于在上覆水体对场地的流固耦合作用中，水体的惯性效应是主要的，而流固之间的运动耦合作用的影响较小。

### 3 阻尼矩阵的合理建模

沉管隧道-土层相互作用体系地震反应的时域计算方程为

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = -[M]\{I\}a_g(t) \quad (1)$$

式中，阻尼矩阵多采用Rayleigh阻尼矩阵(隐式算法)或质量比例阻尼矩阵(显式算法)。一般来说，基岩地震波的主要频率分量为2~6 Hz，而沉管隧道-土层相互作用体系的基频往往低于主要地震激励频率，特别是置于较深土层上的沉管隧道体系的基频远小于主要地震激励频率。此时上述阻尼矩阵中比例系数的确定对于地震反应计算成果的影响巨大，例如，按常规以计算体系的基频来确定质量比例阻尼矩阵，将高估计算体系的地震反应，有时达1倍以上；如果采用计算

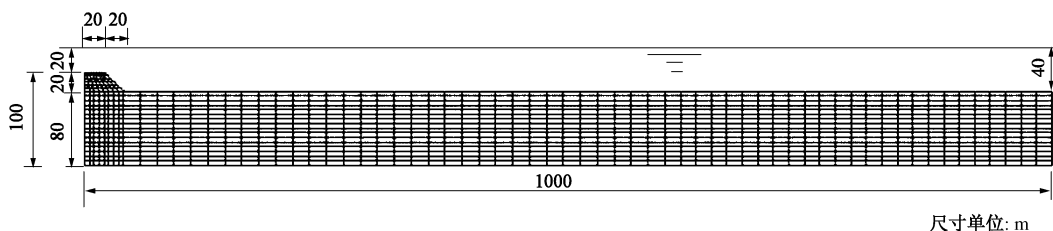


图4 海底土层有限元模型

Fig. 4 Finite element model for seabed soil layer

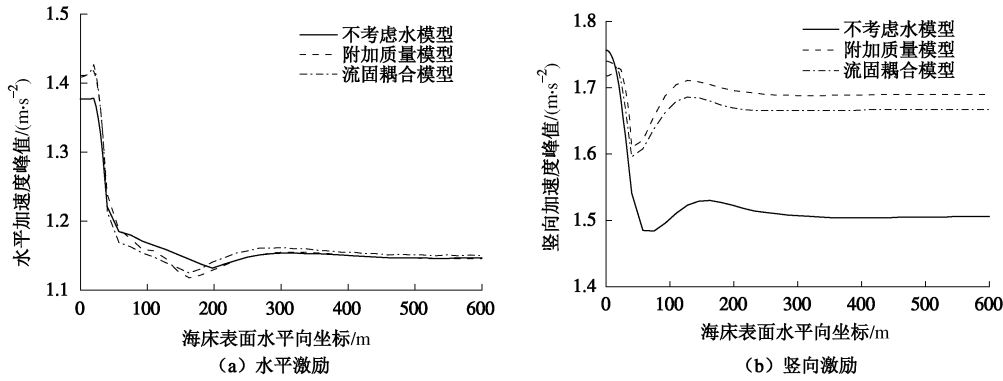


图 5 不同方向激励下海床表面加速度峰值

Fig. 5 Peak accelerations of seabed surface under different direction excitations

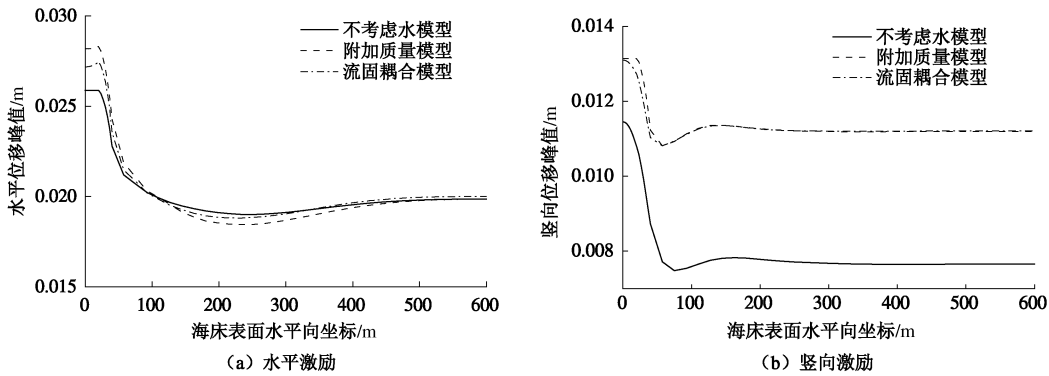


图 6 不同方向激励下海床表面位移峰值

Fig. 6 Peak displacements of seabed surface under different direction excitations

体系的 2 个低阶自振频率来形成 Rayleigh 阻尼矩阵, 将低估计算体系的地震反应, 有时只是正确解的一半。笔者研究表明<sup>[6]</sup>: 当计算体系的基频低于特别是远低于输入地震波主要分量的激振频率时, 对于质量比例阻尼矩阵, 计算质量比例系数中的频率不应取值计算体系的基频而应取值为计算体系的基频和输入地震波反应谱峰值频率的算术平均值。

Rayleigh 阻尼矩阵的数学表达式为

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

当计算体系的各阶振型阻尼比相同时,

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \frac{2\xi}{\omega_m + \omega_n} \begin{bmatrix} \omega_m \omega_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

本文重点介绍合理选择式(3)中两个计算频率的方法。图 7 所示为一大型沉管土层场地的二维有限元模型, 长约 7 km, 层厚约 24.0~89.3 m。水平地震激励时参与系数最大的前 4 阶振型分别为第 1 阶、第 2 阶、第 4 阶和第 9 阶振型, 对应的自振频率为  $f_1=0.929$  Hz,  $f_2=0.951$  Hz,  $f_4=1.012$  Hz,  $f_9=1.116$  Hz。对式

(3) 中的两个频率值 ( $f_m, f_n$ ) 采用以下 6 种组合方式: ① ( $f_1, f_2$ ), ② ( $f_1, f_4$ ), ③ ( $f_1, f_9$ ), ④ ( $f_1, f_r$ ), ⑤ ( $f_1, f_{1,\beta}$ ) 和⑥ ( $f_\alpha, f_\beta$ ), 其中  $f_r$  为输入地震加速度反应谱中谱峰值对应的频率,  $f_{1,\beta}$  为取  $f_m = f_1$  (即计算体系基频) 然后根据输入地震的频谱特征应用优化方法计算得到的  $f_n$ <sup>[7]</sup>, 而  $f_\alpha$  和  $f_\beta$  是根据输入地震的频谱特征应用优化方法计算同时得到的  $f_m$  和  $f_n$ <sup>[8]</sup>, 关

于优化计算方法文中不做介绍, 参见相关文献。显然, 前 3 种组合完全基于计算体系的自振频率, 最后一种组合主要突出了输入地震波的频谱特性, 其他 2 种组合综合考虑了计算体系的基频和输入地震波的频谱特性。下面以算例来说明各种频率组合对地震反应计算结果的影响。图 6 所示土层场地的下卧基岩面假定为刚性。选取了 10 条实测加速度地震波作为水平地震输入, 这些地震波的计算特征频率如表 7 所示。分别按上述 6 种 Rayleigh 阻尼矩阵计算在一致水平地震作用下土层地表中点的加速度和位移, 有关计算结果列于表 8, 9 中, 表中列出的准确解由振型叠加法计算而得, 共取土层 2000 阶振型参与计算, 第 2000 阶振型的频率为 18.6 Hz, 满足结构动力学中振型叠加法截断频率的要求<sup>[9]</sup>。

表 7 不同地震波的特征频率值

Table 7 Characteristic frequencies of different seismic waves (Hz)

地震波	$f_r$	$f_{1,\beta}$	$f_\alpha$	$f_\beta$
El Centro	1.579	1.447	0.843	1.648
Taft	1.845	1.548	0.917	2.224
Lan Cang	2.326	1.659	0.826	1.443
Hachinohe	3.157	1.734	0.856	1.486
Kobe	3.678	1.685	0.927	1.343
Loma Prieta	2.863	1.887	0.882	2.323
Northridge	2.175	1.793	0.935	1.814
Parkfield	2.473	1.582	0.747	1.259
Qian An	1.984	1.796	0.853	1.864
Tian Jin	2.348	1.647	0.794	1.376

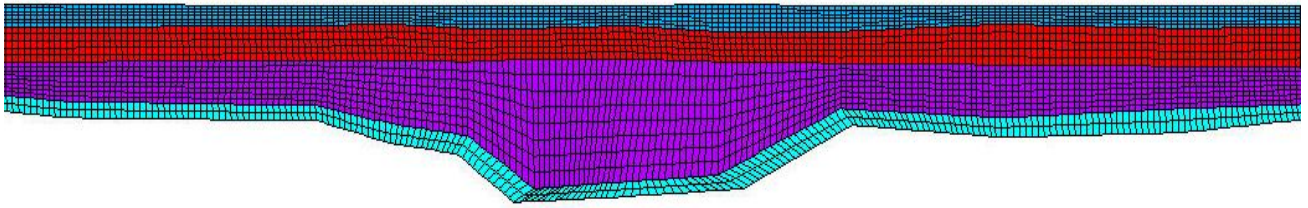


图7 沉管隧道段土层场地有限元模型(局部)

Fig. 7 Finite elements model for immersed tunnel soil site (part)

表8 地表中点处水平位移峰值

Table 8 Peak horizontal displacements of surface middle point

(cm)

地震波	Rayleigh 阻尼矩阵不同组合方式						准确解
	$(f_1, f_2)$	$(f_1, f_4)$	$(f_1, f_9)$	$(f_1, f_r)$	$(f_1, f_{1,\beta})$	$(f_\alpha, f_\beta)$	
El Centro	12.850	13.020	13.280	15.860	13.400	13.140	13.770
Taft	4.746	4.825	4.949	5.740	5.064	5.018	5.203
Lan Cang	10.720	10.850	11.060	13.180	11.390	11.010	11.710
Hachinohe	7.795	7.848	7.930	7.841	7.966	7.691	8.507
Kobe	18.720	18.900	19.170	21.800	19.690	19.140	20.660
Loma Prieta	6.450	6.546	6.710	8.538	7.103	6.818	7.387
Northridge	7.393	7.438	7.507	7.588	7.571	7.268	8.051
Parkfield	31.350	31.700	31.620	31.190	32.350	32.150	32.390
Qian An	4.104	4.114	4.130	4.799	4.149	4.139	4.627
Tian Jin	11.170	11.350	11.640	11.600	11.770	11.280	12.330

表9 地表中点处水平加速度峰值

Table 9 Peak horizontal accelerations of surface middle point

(m/s<sup>2</sup>)

地震波	Rayleigh 阻尼矩阵不同组合方式						准确解
	$(f_1, f_2)$	$(f_1, f_4)$	$(f_1, f_9)$	$(f_1, f_r)$	$(f_1, f_{1,\beta})$	$(f_\alpha, f_\beta)$	
El Centro	6.434	6.514	6.638	7.826	6.896	6.760	7.242
Taft	2.742	2.780	2.843	3.453	2.997	2.930	3.170
Lan Cang	8.285	8.367	8.495	11.130	8.703	8.638	9.035
Hachinohe	3.379	3.371	3.431	3.534	3.612	3.530	3.850
Kobe	10.760	10.750	10.560	11.710	10.290	10.450	9.433
Loma Prieta	4.887	4.971	5.109	6.456	5.710	5.528	5.970
Northridge	5.343	5.384	5.450	5.532	5.574	5.513	5.936
Parkfield	12.280	12.270	12.250	12.190	11.920	12.210	10.990
Qian An	3.815	3.856	5.095	3.618	4.875	4.964	4.445
Tian Jin	5.072	5.120	5.204	5.198	4.923	5.005	4.526

从表中数据可以看出: 相对于位移来说, 加速度峰值的计算误差变化更大, 这说明加速度反应对阻尼矩阵更为敏感, 这是由于体系第1振型在位移反应中的贡献比值要大于在加速度反应中的贡献比值, 而在形成 Rayleigh 阻尼矩阵时保证了第1阶振型阻尼比是准确的。结合土层的动力特性和不同地震波的频谱特性, 比较不同形成 Rayleigh 阻尼矩阵的方法所得的数值结果表明:

(1) 传统的确定 Rayleigh 阻尼矩阵的方法在计算体系基频与输入荷载主要频率成分接近时计算结果较为合理, 而当计算体系基频远小于输入荷载主要频率成分时, 有可能造成较大的计算误差。这是由于按传统方法所确定的 Rayleigh 阻尼矩阵使得体系高阶振型的阻尼比偏高而低估这些振型反应的贡献, 但是对应于高阶振型频率的输入地震波中的简谐分量却为卓

越分量, 从而使得所计算得到的体系地震反应不够准确。因此, 在确定 Rayleigh 阻尼矩阵的比例系数时, 同时考虑计算体系和输入地震波的卓越频率对于长周期体系是非常必要的。

(2) 采用优化方法确定 Rayleigh 阻尼系数, 因综合考虑各阶振型的影响以及地震波的频谱特性, 可避免人工选择两阶参考频率时抉择的困难, 总体上计算误差较小。尤其采用基于结构基频的优化方法不仅计算精度提高, 计算相对简便, 对于长周期计算系统是适宜的方法。

(3) 第2个频率取值为 $f_i$ 时, 总体上计算结果偏于保守, 对工程结构设计来说是偏于安全的。

#### 4 地震输入方式及其影响

地震时从震源释放出来的能量以地震波的形式传

播至地表, 而地表各点接收到的地震波是经由不同的路径、不同的地形地质条件而到达的, 因而反映到地表的地震动必然存在差异。对于超长沉管隧道而言, 地震动在传播过程中的差异性的影响应加以考虑。下文基于土层弹簧-质量模型为基础的三维梁简化模型来形成近 7 km 长的沉管隧道工程的计算模型, 分析在一致和行波地震作用下沉管隧道地震反应特点, 主要考察管节接头的张开和压缩变形、剪力键内力等地震反应的规律等。

#### 4.1 多向地震输入的影响

在基岩面同时一致输入纵向、横向和竖向地震动时隧道管节间轴向相对位移和轴力峰值分布如图 8 和图 9 所示, 图中亦给出仅纵向一致激励时的对应计算结果。对比分析表明: 计算隧道纵向地震反应时, 仅输入纵向地震将使计算结果偏小, 应进行三向激励下的地震反应计算, 其他两个方向也是如此, 相关结果不一列出。

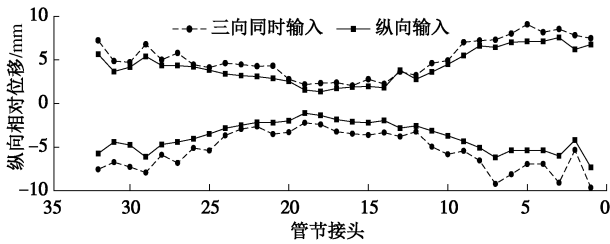


图 8 沉管隧道各管节接头的纵向相对位移峰值

Fig. 8 Peak longitudinal relative displacement of immersed tunnel section joints

#### 4.2 地震行波输入的影响

地震行波输入是考虑地震传播影响的最简单方式, 本节中在基岩面输入纵向水平地震行波, 地震波与上一节的纵向水平地震波相同, 视波速  $c$  分别为 2000, 3000, 4000 m/s, 同时考虑从东人工岛向西人工岛行进和从西人工岛向东人工岛行进两个相反的行

波输入。从东人工岛向西人工岛行进地震输入的实现方法如下: 定义东人工岛下基岩面上第 1 个结点的输入地震加速度时程为  $\ddot{u}_e(t)$ , 则与这一结点轴向水平距离为  $L_i$  的基岩面上第  $i$  个结点处的输入地震加速度时程为  $\ddot{u}_e(t - L_i/c)$ , 而在实际计算中加速度记录  $\ddot{u}_e(t)$  是离散的数值, 为此  $\ddot{u}_e(t - L_i/c)$  的离散数据应在  $\ddot{u}_e(t)$  的离散数值前填补一段 0 值, 其时间长度为  $L_i/c$ , 但应指出的是, 行波输入的时间步长往往要比  $\ddot{u}_e(t)$  原始数据的步长要小, 需要根据  $c$  和各点的  $L_i$  进行调整和合理选择, 使得各点地震输入的时间标准一致或基本一致。从西人工岛向东人工岛行进地震输入的实现方法与前基本相同, 只是定义西人工岛下基岩面上第 1 个结点的输入地震加速度时程为  $\ddot{u}_e(t)$ 。有关计算结果如表 10 和表 11 所示。表中 EJ32/33 表示图 1 中管节 32 和管节 33 之间的接头部位, 其他类推。

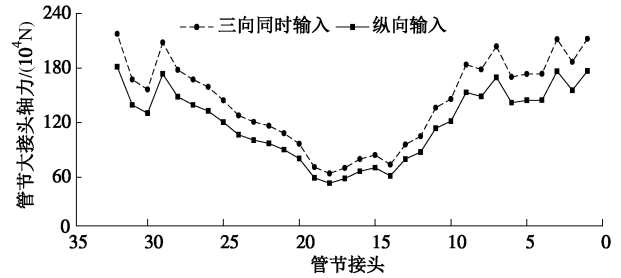


图 9 沉管隧道各管节接头的纵向轴力峰值

Fig. 9 Peak longitudinal axial forces of immersed tunnel section joints

从表中数据看出, 行波波速和方向都对沉管隧道地震反应有较大的影响, 既有增大效应, 也有减小作用。如当地震波从西人工岛向东人工岛行进时, EJ32/33 接头的轴力相比于一致输入增大 51%, 而反向行进时, 反而减小 42%, 说明超长沉管隧道地震反应分析中应充分考虑地震波的多点输入问题。

表 10 不同视波速下接头纵向相对位移

Table 10 Longitudinal relative displacements of joints under different apparent wave velocities

(mm)

接头位置	2000 m/s		3000 m/s		4000 m/s		一致输入	
	东→西	西→东	东→西	西→东	东→西	西→东		
EJ32/33	张开量	5.73	7.00	7.21	8.75	7.71	8.64	5.56
	压缩量	2.87	5.30	4.30	8.63	4.17	8.53	5.74
EJ28/29	张开量	2.18	3.67	3.20	5.30	3.55	5.39	2.08
	压缩量	2.35	4.50	3.19	5.81	3.67	5.92	4.69
EJ16/17	张开量	0.95	3.79	3.43	4.15	3.10	3.70	3.10
	压缩量	1.05	3.42	2.55	3.03	2.33	2.58	2.11
EJ6/7	张开量	3.51	2.74	7.81	3.11	8.03	4.14	5.78
	压缩量	2.69	2.93	4.55	4.16	4.66	4.44	5.38
EJ1/2	张开量	4.38	3.26	7.16	3.68	7.43	4.45	4.82
	压缩量	3.66	3.65	6.74	4.51	6.78	5.25	7.33

表 11 不同视波速下接头纵向轴力

Table 11 Longitudinal axial forces of joints under different apparent wave velocities

(10<sup>6</sup>N)

接头位置	2000 m/s		3000 m/s		4000 m/s		一致输入
	东→西	西→东	东→西	西→东	东→西	西→东	
EJ32/33	1.13	1.68	1.36	2.73	1.49	2.70	1.81
EJ28/29	0.75	1.42	1.01	1.84	1.16	1.87	1.48
EJ16/17	1.00	1.20	1.09	1.31	0.98	1.17	0.67
EJ6/7	1.17	0.59	1.58	0.84	1.62	0.90	1.42
EJ1/2	1.26	0.85	1.87	0.96	1.94	1.16	1.77

## 5 结 论

(1) 在进行沉管隧道地震反应时域计算中, 当计算体系的基频远小于输入地震波主要分量的激振频率时, 在形成阻尼矩阵过程中要充分考虑地震波主要频率的影响, 建议采用基于计算体系基频的优化方法, 确定第 2 个阻尼系数计算频率, 或简单采用输入地震波反应谱峰值频率。

(2) 海水或江水的动水压力可采用附加集中质量的简化方法, 但要注意不同方向的不一致性。

(3) 地震动的传播效应和多维地震动输入对超长沉管隧道地震反应有显著影响, 既有增大效应, 也有减小作用, 应充分加以重视。

(4) 对局部沉管隧道建立精细化分析, 有助于深入了解沉管隧道细部结构地震反应特性, 在建立局部模型时, 应要考虑周边土层和相邻沉管的综合影响, 所取范围不易过小, 应根据工程场地土层深度和沉管长度来综合考虑。

### 参考文献:

- [1] 陈 越. 港珠澳大桥岛隧工程建设技术综述[J]. 施工技术, 2013, **42**(9): 1 - 5. (CHEN Yue. Review on construction technology of tunnel and artificial islands for Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Construction Technology, 2013, **42**(9): 1 - 5. (in Chinese))
- [2] 上海市地震局, 同济大学. 上海市地震动参数区划[M]. 北京: 地震出版社, 2004. (Seismological Bureau of Shanghai City, Tongji University. Ground motion parameter zoning of Shanghai City[M]. Beijing: Seismological Press, 2004. (in Chinese))
- [3] 楼梦麟, 邵新刚. 应用通用程序计算深覆盖土层地震反应的几个问题[J]. 振动与冲击, 2015, **34**(4): 63 - 68. (LOU M, SHAO X. Several problems in seismic response calculation of soil layer with deep deposit using general software[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, **34**(4): 63 - 68. (in Chinese))
- [4] 董 云. 大型沉管隧道地震行波反应分析[D]. 上海: 同济大学, 2014. (DONG Yun. Seismic response analysis of large-scale immersed tunnel under travelling wave[D]. Shanghai: Tongji University, 2014. (in Chinese))
- [5] 张如林. 大型地下结构-土层相互作用体系的地震响应分析[D]. 上海: 同济大学, 2011. (ZHANG Ru-lin. Seismic response analysis of large-scale underground structure-soil interaction system[D]. Shanghai: Tongji University, 2011. (in Chinese))
- [6] 楼梦麟, 邵新刚. 土层地震反应显式计算中阻尼矩阵系数的选取[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, **41**(8): 24 - 30. (LOU Meng-lin, SHAO Xin-gang. Damping matrix coefficient selection in explicit calculation of soil layer seismic response[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, **41**(8): 24 - 30. (in Chinese))
- [7] 董 云, 楼梦麟. 基于结构基频确定 Rayleigh 阻尼系数的优化方法及其讨论[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, **42**(2): 8 - 13. (DONG Yun, LOU Meng-lin. An optimization solution for rayleigh damping coefficients based on the fundamental frequency of structure[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2014, **42**(2): 8 - 13. (in Chinese))
- [8] 潘旦光. 地震反应分析中 Rayleigh 阻尼系数的优化解[J]. 工程力学, 2013, **30**(4): 42 - 46. (PAN Dan-guang. An optimization solution for Rayleigh damping coefficients in seismic response analysis[J]. Engineering Mechanics, 2013, **30**(4): 42 - 46. (in Chinese))
- [9] CHOPRA A K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering[M]. New Jersey: Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1999.