

土-结构相互作用的桥梁多尺度建模与分析

刘亚强^{1,2}, 王 芸³

[1.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200082;2.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司天津分公司,天津市 300202;3.山西省大同市住房和城乡建设局,山西 大同 037000]

摘 要:考虑土-结构相互作用(SSI)是地震激励下桥梁抗震性能评估的热难点之一。由于考虑土体影响多而建立的结构模型计算耗时极长,为了提高效率,现采用一致多尺度建模方法,将所研究部位建为实体单元,其他部位建为梁单元,单元之间采用适当的方法进行界面连接,保证宏观、精细单元间的变形协调,并对某一桥梁进行分析,验证了该方法的正确性。在此基础上,基于多尺度建模方法,建立三跨连续梁桥模型,对其进行弹塑性时程分析,对比分析考虑 SSI 和不考虑 SSI 效应的桥梁模型在地震激励下的响应结果,研究 SSI 效应对桥梁抗震性能的影响。结果表明:多尺度建模方法可以在保证计算精度的前提下有效地提高计算效率;考虑 SSI 效应能够有效地降低桥梁的抗震性能需求。因此,在设计时应加以考虑。

关键词:土-结构相互作用;多尺度建模方法;计算效率;桥梁工程;抗震性能

中图分类号: U442.5+5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)07-0253-05

0 引 言

桥梁工程是现代城市生命线工程的重要组成部分^[1]。桥梁一旦出现震害倒塌,将严重影响桥梁的使用性能,且难以修复。桥梁的上、下部结构通过支座组成统一的受力体系,地震发生时,能量通过土体的震动传递给桥梁下部结构(桩基),进而作用到上部结构引起桥梁的震动,当震动达到一定的强度时将造成桥梁结构的损害^[1]。大量震害分析表明,SSI 对桥梁结构的抗震性能有重要的影响。因此,研究 SSI 是非常有必要的。研究 SSI 时,需要考虑较大的岩土体积^[2],但在现阶段有限的计算条件下,较好地模拟考虑 SSI 效应的桥梁微观破坏过程是不现实的。因此,一个能够较好地模拟关键部位(精细化单元)的宏观整体模型是迫切需要的。

近年来,多尺度模拟和计算方法已成为一个研究热门。多尺度建模方法是指在同一个计算模型中即包含高精度的精细单元(一般建为小网格实体单元)又包含高效率的宏观单元(一般建为梁单元),不同类型的单元通过一定的方法将其进行界面耦合连接,使精度和效率得到双保证。各国学者们对结构多尺度建模方法都进行了初步的研究分析并加以应用。李兆霞^[3-4]等人在研究香港青马大桥的易疲劳部

位时,采用了多点约束法,通过多重子结构对该桥进行了模拟分析,然后将有限元模型的分析数据与实测数据进行对比,结果表明该方法能够较好地模拟局部应力集中对整体桥梁动力特性影响。Ben Dhia 与 Rateau^[5]基于域内耦合多尺度分析方法(Arlequin 方法)对框架耦合矩阵进行计算,并对多个框架结构进行模拟,得到了较好的计算结果。乔华^[6]等人对 Arlequin 方法进行深化研究,将其与有限单元法相结合,采用 Matlab 将计算过程编写成程序,并对不同维数的结构耦合特征与现象进行研究分析,验证了所提出多尺度模拟方法的正确性。陆新征^[6]等人研究了不同类型单元间的界面连接问题,形成了一套微观单元和整体模型协同工作的多尺度分析方法,基于此分析方法对某一复杂混合结构框架结构进行了弹塑性时程分析。

由上可知,关于考虑 SSI 效应的桥梁结构多尺度建模方法的研究现阶段还不是很多。在研究中,首先将土体进行分块,通过通用有限元软件 ABAQUS 中 couple 功能,利用参照点来约束耦合面上的耦合点,实现不同类型单元之间的变形协调,然后通过修改单元刚度的方式以达到弥补界面连接引起的刚度损失,并对比了某三跨连续梁精细模型和多尺度模型的计算结果,验证该建模方法的正确性。基于上述思想,对考虑 SSI 效应的桥梁结构进行了弹塑性时程分析,对比桥梁在考虑与不考虑土体作用下的地震响应结果,

收稿日期:2020-12-17

作者简介:刘亚强(1990—),男,硕士,工程师,一级建造师,从事结构设计与抗震方面的研究工作。

以探究 SSI 对桥梁抗震性能的影响规律。

1 多尺度模型的建立与验证

1.1 多尺度建模方法

实体单元每个面包含 4 个节点,每个节点有 3 个自由度,梁单元节点有 6 个自由度。当把不同类型单元进行界面连接时,从节点自由度会被主节点的自由度所替换,这导致整体模型的一些自由度松弛,使得其刚度减小。因此,如何较好地模拟精细实体单元和宏观梁单元之间的连接问题是多尺度建模的关键所在。

精细和宏观两种不同类型单元之间进行界面连接时,两者相交于 O 点,如图 1 所示, O 点与 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 四点形成约束关系,达到变形协调。

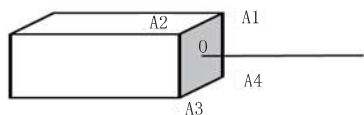


图 1 实体单元与梁单元界面连接图

在整体坐标系中,每个实体单元节点含有三个自由位移,如下:

$$[u_i, v_i, w_i]^T \quad (i=1, 2, 3, 4)$$

梁单元节点有六个自由位移为:

$$[u_0, v_0, w_0, \theta_{x0}, \theta_{y0}, \theta_{z0}]^T$$

O 到实体单元各节点的向量为 OA_i , 设 O 的坐标为 (x_0, y_0, z_0) , A_i 的坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 则:

$$OA_i(X_i - X_0)_i^p + (Y_i - Y_0)_j^p + (Z_i - Z_0)_k^p \quad (1)$$

两单元界面连接处的位移方程如公式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & (z_i - z_0) & (y_i - y_0) \\ 0 & 1 & 0 & (z_0 - z_i) & 0 & (x_i - x_0) \\ 0 & 0 & 1 & (y_i - y_0) & (x_0 - x_i) & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \\ \theta_{x0} \\ \theta_{y0} \\ \theta_{z0} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[u_0, v_0, w_0, \theta_{x0}, \theta_{y0}, \theta_{z0}]^T$$

位移变量之间的约束关系可表达为:

$$[\Delta_I] = [B] \{\Delta_{II}\} \quad (3)$$

式中: Δ_I 为单元 I 有关的节点位移变量, Δ_{II} 为单元 II 有关的节点的位移变量, B 为位移转换矩阵。

如上所述,当实体单元和梁单元界面连接共同受力变形时,假设梁单元节点为主节点,那么实体单元的节点的自由度会被替换成梁节点的自由度,导致某些自由度被松弛,由于力不能通过被松弛节点传递进而致使结构整体刚度降低。因此,该项研究采用修正结构单元刚度矩阵的方法,以抵消不同单元界面连接时,某些自由度松弛引起的整体刚度减小的问题。

1.2 模型基本参数的选取

该项研究以某三跨连续梁桥为例,桥跨为 13+16+13 m,上部结构为钢筋混凝土箱梁(采用 C50 混凝土),桥墩采用直径为 1 m 圆柱形墩(C40 混凝土),墩高 8 m,基础采用 1.2 m 的钻孔灌注桩(C35 混凝土),处于 II 类场地。地震激励下,距离结构越远的场地土影响越小,当场地土到结构的距离大于 5~10 倍结构尺寸长度时,其影响可以忽略不计^[7-8]。因此该项研究土体取为 200 m × 100 m × 40 m,场地土基本参数如表 1 所列。

表 1 场地土参数表

土层	土质类型	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 / MPa	泊松比	内摩擦角 / ($^\circ$)	内聚力 / Pa	土层厚度 / m
1	一般土层	1 970	58	0.36	24	2.6×10^4	7.5
2	软土层	1 530	2	0.4	5	6×10^3	7.5
3	一般土层	1 970	58	0.36	24	2.6×10^4	15
4	持力层	2 020	960	0.31	36	6×10^4	5

在研究中,采用两条地震波对结构进行激励,以峰值加速度作为强度指标,地震波分别为 EI Centro 波,峰值加速度为 0.341 7g(见图 2);天津波,峰值加速度为 0.145 8g(见图 3)。该项研究验证模型时,为提高计算效率,取两条地震波中具有代表性的一段进行分析。

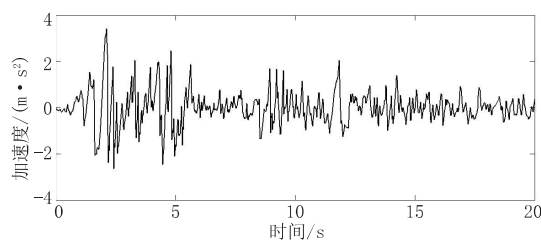


图 2 EI Centro 波图示

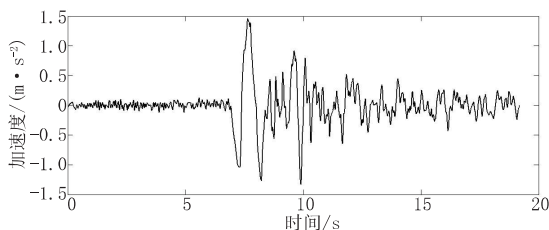


图 3 天津波图示

1.3 多尺度模型验证

该项研究采用有限元软件 ABAQUS 作为建模基础,以某三跨连续桥为例,分别建立考虑 SSI 的多尺度模型和精细模型如图 4 所示。其中,多尺度模型采用 couple 功能,利用参照点来约束耦合面上的耦合

点,实现不同类型单元之间的变形协调。

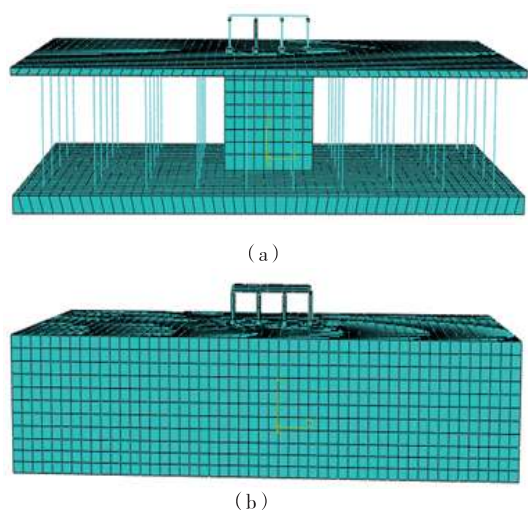


图4 多尺度模型(a)和精细模型(b)

为了解决不同类型单元连接时,由于自由度松弛引起的整体刚度减小问题,对宏观单元的刚度进行了修正,结果如图5所示。由图5可知,当宏观单元刚度较小时,如上所述自由度的松弛引起整体刚度的松弛,进而导致结构地震响应增大的结果,随着宏观单元的刚度增大,与实体模型的差距越来越小,当增大至1.96倍时,两个模型的峰值响应位移达到了很好地吻合。

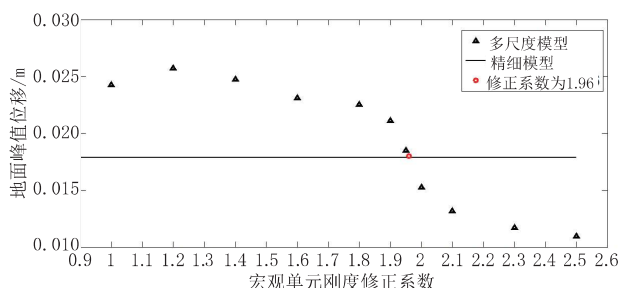
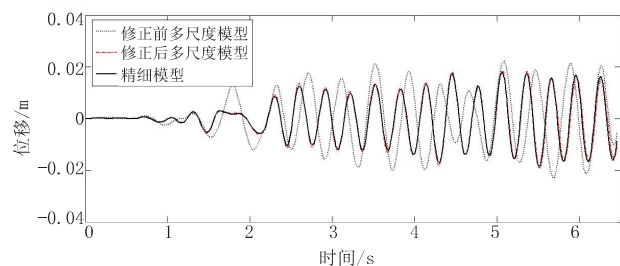
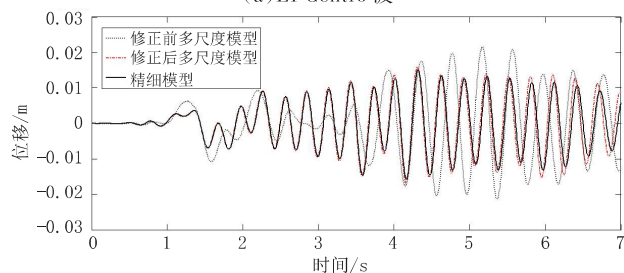


图5 刚度修正后的宏观模型与精细模型响应对比图

图6、图7、图8分别对比了修正前后的多尺度模型和精细模型的位移响应、速度响应及加速度响应的结果。由图可知刚度修正之前的响应结果与精细模型相差较大,刚度修正之后的响应结果能和精细模型达到很好的吻合。表2给出了修正的多尺度模型和精细模型的峰值响应结果参数。由表2可知,修正的多尺度模型和精细模型的峰值参数差值不大,采用修正的多尺度模型进行分析能够满足计算精度。此外,表2中还给出了各模型分析过程中的计算时间。由表2可知,多尺度模型的计算效率明显高于精细模型,提高达66.79%。综上所述,多尺度建模方法可以在保证计算精度的前提下有效地提高计算效率,减少分析精度和计算效率之间的矛盾点。

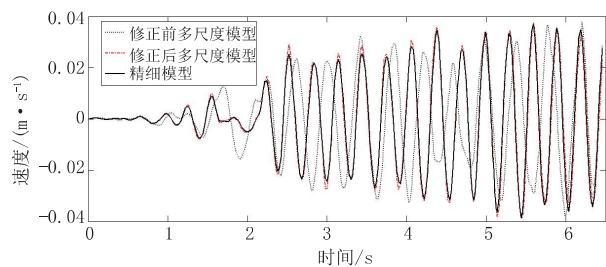


(a)EI Centro 波

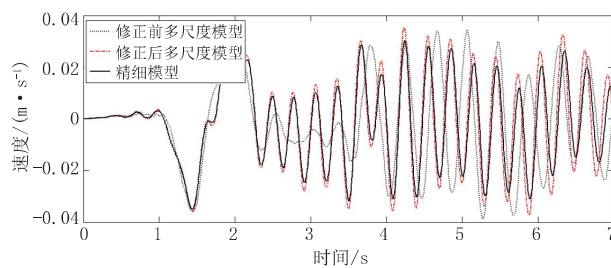


(b)天津波

图6 位移响应对比图

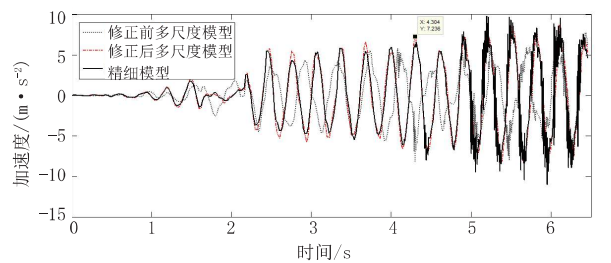


(a)EI Centro 波

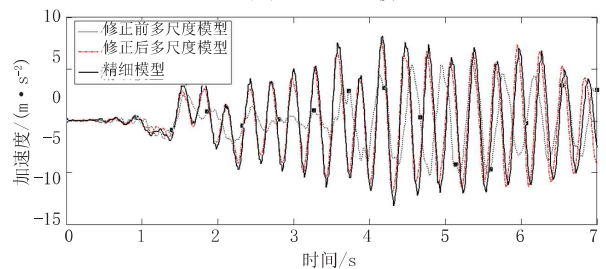


(b)天津波

图7 速度响应对比图



(a)EI Centro 波



(b)天津波

图8 加速响应对比图

表2 峰值响应结果和计算效率对比表

名称	精细模型	多尺度模型	多尺度模型相对于精细模型改变百分比
EI Centro 波	位移 /m	0.018 0.018 5	3.50%
	速度 /(m·s ⁻¹)	0.364 0.381	4.53%
	加速度 /(m·s ⁻²)	6.594 7.236	9.73%
天津波	位移 /m	0.015 0.016	4.46%
	速度 /(m·s ⁻¹)	0.303 0.350	15.8%
	加速度 /(m·s ⁻²)	7.336 7.775	5.98%
计算效率	时间 /s	10.244 3.402	66.79%

2 考虑土 - 结构相互作用的桥梁弹塑性时程分析

基于上述多尺度建模方法,分别建立了考虑 SSI 和不考虑 SSI 效应的三跨连续梁桥多尺度模型。其中,考虑 SSI 效应的多尺度模型的建立方式与第二节所述方法一致(建立上部结构、桥墩、承台、桩基和土体),而另一模型由于没有考虑土体的作用,因此在建模时仅建立上部结构、桥墩、承台和桩基,未建立土体部分,在桩基底部进行固结约束。采用地震波对模型进行激励,对比两种不同工况的地震响应结果(周期、频率、位移、剪力及滞回曲线等)^[9-11],分析考虑 SSI 效应对桥梁结构地震响应的影响规律。

2.1 土 - 结构相互作用对桥梁振动特性的影响

表3分别列出了地震荷载作用下,考虑 SSI 效应和不考虑 SSI 效应的三跨连续梁桥的振动周期和频率。

表3 桥梁的振动周期和频率一览表

模态阶次	考虑 SSI 效应		不考虑 SSI 效应	
	频率 /Hz	周期 /s	频率 /Hz	周期 /s
1	0.281	3.56	0.288	3.46
10	0.310	3.23	1.630	0.61
20	0.312	3.20	2.073	0.48
30	0.331	3.02	4.215	0.24
40	0.389	2.57	5.824	0.18

从表3可以看出,在低阶次时 SSI 效应对桥梁结构的振动特性影响很小,随着阶次的增高,考虑 SSI 效应和不考虑 SSI 效应的桥梁振动频率都呈增大趋势,周期反之,与实际情况一致;但不同的是,考虑 SSI 效应的桥梁振动频率递增很缓,不考虑 SSI 效应的桥梁振动频率随着阶次的增高急剧增大。这说明考虑 SSI 效应后,由于土体作用,一部分地震能量在作用于桥梁结构之前被耗散,进而使得桥梁的振动频率低于不考虑 SSI 效应的振动频率。

2.2 位移响应和剪力响应

图9、图10对考虑 SSI 效应和不考虑 SSI 效应两种工况下的桥梁墩顶位移和墩底剪力进行了比较分析。

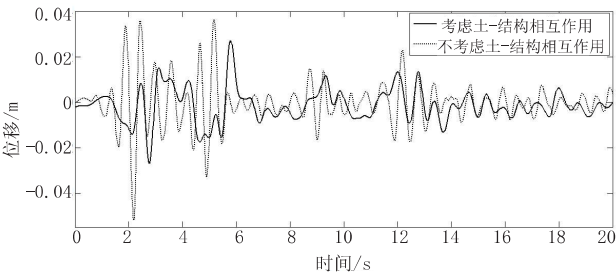


图9 墩顶位移曲线图

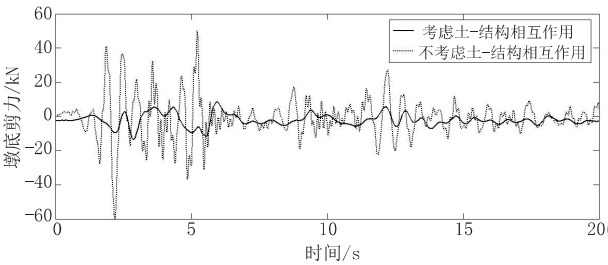


图10 墩底剪力曲线图

由图9可以看出,考虑 SSI 效应的桥梁墩顶位移远小于不考虑 SSI 效应的桥梁墩顶位移,这进一步表明考虑 SSI 效应后,土体起到了对地震能量的耗散作用,减小了对桥梁结构的激励。图10可以得出,考虑 SSI 效应的墩底剪力也远小于不考虑 SSI 效应的墩底剪力,这与墩顶位移减小的产生原因一致。由此可知,考虑 SSI 效应,可以降低桥梁结构抗震的需求,在桥梁设计中应重点关注。

2.3 滞回曲线

考虑 SSI 效应和不考虑 SSI 效应的桥梁底部剪力 - 侧移滞回曲线见图11、图12所示。对比图11、图12可以看出,考虑 SSI 效应的桥梁结构滞回环比较饱满呈椭圆形,而不考虑 SSI 效应的桥梁结构滞回曲线近似条形,其包围的面积远小于考虑 SSI 效应的面积,这再次验证了考虑 SSI 效应后,土体对地震能量的耗散作用,能够有效地减小地震对桥梁的损伤。

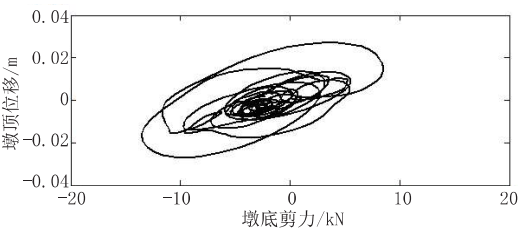


图11 考虑 SSI 效应的基底剪力 - 侧移滞回曲线图

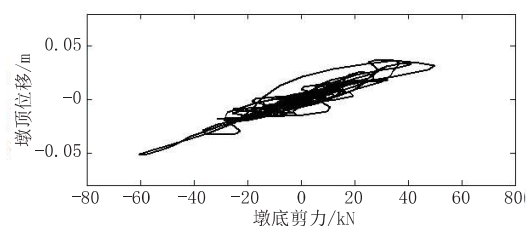


图12 不考虑SSI效应的基底剪力-侧移滞回曲线图

3 结论

该项研究首先对多尺度建模方法进行修正验证,在此基础上,对考虑SSI效应的桥梁抗震性能进行了模拟分析,总结结论如下:

(1)通过通用有限元软件,利用参照点来约束耦合面上的耦合点,能够实现宏观、精细单元间的变形协调,采用修改单元刚度的方式以达到弥补界面连接引起的刚度损失,并通过算例验证了该方法的正确性。

(2)基于多尺度建模方法,对考虑SSI效应的桥梁抗震性能进行分析,结果表明:考虑SSI效应后,土体起到了对地震能量的耗散作用,可以降低桥梁结构抗震的需求,在桥梁设计中应重点关注。

参考文献:

- [1] 范立础,胡世德,叶爱君.大跨度桥梁抗震设计[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [2] Ben Dhia H., Rateau G. The Arlequin method as a flexible engineering design tool [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, 62: 1442—1462.
- [3] 李兆霞,孙正华,郭力等.结构损伤一致多尺度模拟和分析方法[J].东南大学学报(自然科学版),2007,37(2): 251—260.
- [4] 孙正华,李兆霞,陈鸿天.考虑局部细节特性的结构多尺度模拟方法研究[J].特种结构,2007,24(1): 71—75.
- [5] 乔华,陈伟球.基于Arlequin方法的结构多尺度数值模拟[J].浙江大学学报(工学版),2010,44(12): 2314—2319.
- [6] 陆新征,林旭川,叶列平.多尺度有限元建模方法及其应用[J].华中科技大学学报(城市科学版),2008,25(4): 76—80.
- [7] 李培振,万非.考虑群体效应的高层建筑土-结构相互作用参数研究[J].结构工程师,2019,33(2): 40—51.
- [8] 李培振,吕西林.考虑土-结构相互作用的高层建筑抗震分析[J].地震工程与工程振动,2004,24(3): 130—138.
- [9] 李宇,朱晞,杨庆山.多振型效应对铁路高柔桥墩弹塑性地震响应的影响[J].铁道学报,2011,33(11): 99—105.
- [10] 周大兴.考虑土-结构相互作用大跨径连续梁桥抗震性能研究[D].北京:北京工业大学,2012.
- [11] 陈明琦.钢筋混凝土空心桥墩抗震性能试验研究[D].北京:北京工业大学,2011.

(上接第252页)

参考文献:

- [1] 张清华,卜一之,李乔.正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展[J].中国公路学报,2017,30(3):14—30,39.
- [2] 张高楠.基于3D断裂力学的正交异性钢桥肋-桥面焊缝的疲劳寿命评估[D].天津:天津大学,2014.
- [3] 刘中祥.大跨钢桥疲劳裂纹扩展的数值模拟研究[D].江苏南京:东南

大学,2015.

- [4] 黄云,张清华,余佳,等.钢桥面板与纵肋焊缝疲劳评估及裂纹扩展研究[J].西南交通大学学报,2019,54(2):260—268.
- [5] BELYTSEHKO T., BLAEK T. Elastic Crack Growth in Finite Elements with Minimal Remeshing [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 45(5): 601—620.
- [6] JTG D64—2015,公路桥梁钢结构设计规范[S].