第 36 卷　第 1 期　　石家庄铁道大学学报(自然科学版)　　Vol. 36　No. 1
2023 年 3 月　Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)　Mar. 2023

斜拉桥损伤诊断有限元建模与数据提取方法研究

刘　杰[1,2,3]，　杨朋远[1,3]

(1. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室，河北 石家庄　050043；
2. 河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室，河北 张家口　075000；
3. 石家庄铁道大学 土木工程学院，河北 石家庄　050043)

摘要：为便于斜拉桥损伤诊断的快速建模和分析，在已有研究方法基础上，基于 ABAQUS 有限元软件提供的 PYTHON 语言接口和 GUI 程序，提出了一种斜拉桥有限元建模与数据提取的方法。利用 RSG 构造器和调用 Mdb 对象中 Part 与 Assembly 对象编写程序，提出批量和点选相结合交互生成空间三维钢筋、预应力钢筋和斜拉索的方法；利用 RSG 构造器和调用 Odb 数据库中模型数据与结果数据的对象编写程序，提出点选、节点或单元集及编号 3 种形式相结合提取 Odb 数据库静力与动力瞬态响应数据到 Excel 表格的方法。通过算例展示了所提出方法的应用过程，表明了所提出方法的实用与高效。

关键词：斜拉桥损伤诊断；建模与数据提取方法；ABAQUS 二次开发；PYTHON 语言

中图分类号：U448.27　**文献标志码：**A　**文章编号：**2095-0373(2023)01-0027-06

近年来，国内外修建的大跨度斜拉桥的健康监测系统数量逐渐增多[1]，损伤诊断是健康监测系统的核心，基准有限元模型是常用损伤诊断的前提[2]。在 ABAQUS 中创建基准有限元模型时，由于斜拉桥中分布着大量钢筋、预应力钢筋和斜拉索，频繁地手动创建会消耗大量时间，也可能由于手动操作的失误导致模型出错，延长建模时间；提取结果数据方面，软件提供的 3 种方式：场输出报告、场变量 X-Y 数据及查询值，都需要手动多次操作界面得到损伤诊断需要的结果数据，这 3 种方式均不适于对斜拉桥损伤诊断有限元模型进行数据提取。因此对斜拉桥损伤诊断的建模与数据提取方法研究具有重要意义。

目前，国内外学者对基于 ABAQUS 的相关开发[3-6]进行了研究。Dong et al[7]用 PYTHON 语言编写内核脚本，控制 ABAQUS 的建模过程，实现建模过程的快速输入；连昌伟等[8]使用 PYTHON 对 ABAQUS 模拟产生的结果数据库进行处理，可以得到所要查看的厚度数据，为浏览结果以及指导后续的模拟优化提供了便利；张慎等[9]用 ABAQUS 二次开发语言 PYTHON 对 ABAQUS 进行二次开发，开发了高层建筑结构动力弹塑性分析后处理软件，将 ABAQUS 弹塑性分析结果整理成层间位移角、楼层剪力等数据存入 SQLite 数据库文件。在已有文献中，尚未发现斜拉桥钢筋、预应力钢筋与斜拉索快速建模的方法，也未发现针对斜拉桥损伤诊断需要的数据快速提取方法。为此，基于 PYTHON 在 ABAQUS 中的二次开发技术，利用 RSG 构造器和调用 Mdb 与 Odb 对象编写脚本文件生成插件，实现钢筋、预应力钢筋与斜拉索的快速建模及数据的批量提取，最后以某斜拉桥的实际应用验证了该方法的可行性。

1　面向斜拉桥损伤诊断的建模和数据提取方法

基于 ABAQUS 有限元软件提供的 PYTHON 语言接口，通过 PYTHON 语言脚本和 GUI 程序相结合的方式[10-15]，提出了一种斜拉桥损伤诊断建模与数据提取的方法。

收稿日期：2022-11-14　**责任编辑：**车轩玉　DOI：10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20220344
作者简介：刘杰(1977—)，男，讲师，研究方向为结构健康监测、损伤诊断研究。E-mail：liudingwen@stdu.edu.cn
刘杰，杨朋远. 斜拉桥损伤诊断有限元建模与数据提取方法研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版)，2023，36(1)：27-32.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.1 空间三维钢筋、预应力钢筋和斜拉索建模方法

1.1.1 基本内容

提出的斜拉桥损伤诊断建模方法,需要编写图形界面、注册和内核文件,图形界面、注册文件会在保存插件时自动生成,不过多叙述。研究方法的关键技术是内核文件,可以通过宏命令和读取 rpy 文件 2 种方式进行该文件编写,采用 Notepad++编辑器对 rpy 文件进行编写,所提出方法的基本内容主要包括:

(1)在 Part 模块中通过"创建线"功能创建一根钢筋、预应力钢筋和斜拉索二维部件,然后在 Assembly 模块中创建实体,通过偏移和旋转实体创建三维部件。

(2)在 rpy 文件中找到创建上述部件的代码,其代码是利用 Datum Point By Coordinate 构造函数创建基准点,通过构造函数 Wire Poly Line 将基准点进行连接形成钢筋、预应力钢筋和斜拉索,修改代码并导入 readline 函数读取外部 txt 文件,文件中每行数据代表一根钢筋、预应力钢筋和斜拉索关键点坐标,利用 PYTHON 中 for 循环语句循环读取 txt 文件每行数据,即可批量生成空间三维钢筋、预应力钢筋和斜拉索,按照读取坐标的顺序进行基准点的连接。

(3)利用 Assembly 模块中用 Instance 构造函数把生成的钢筋、预应力钢筋和斜拉索进行装配。

(4)将上述步骤编写的代码复制到 rebarformFunction 函数中,并定义该函数的关键字,形成内核文件。

(5)利用 ABAQUS 自带的 RSG 构造器创建 GUI 程序,界面组成包括:下拉菜单框、文本框、检查按钮、单选按钮、文件选择框、拾取按钮及表格框等部分,其每部分的关键字都需和内核文件中的关键字一一对应。

(6)在 kernel 标签页,选择 rebarformFunction 函数作为加载内核模块,切换到 GUI 标签页,点击保存键,图形界面、注册与内核文件会自动保存到 ABAQUS 指定文件 abaqus_plugins 中。

斜拉桥损伤诊断建模方法技术路线如图 1 所示,建模(Rebar-Coordinate)插件界面如图 2 所示。

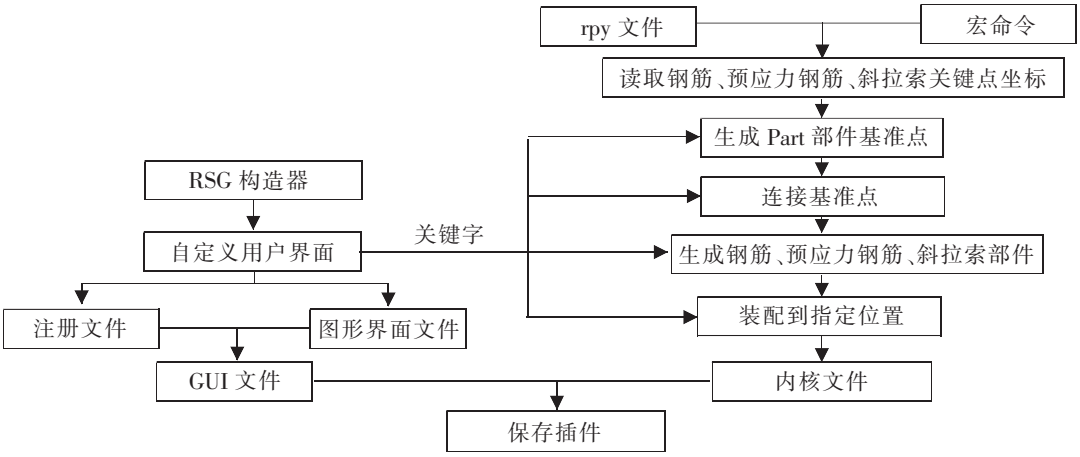


图 1 斜拉桥损伤诊断建模方法技术路线

1.1.2 实现过程及代码

建模方法实现过程如下:

(1)编写图形界面、注册与内核文件,通过关键字绑定,形成建模插件。

(2)将 3 个文件打包放到 ABAQUS 工作目录指定文件夹 abaqus_plugins 下。

(3)在软件前处理界面 Plug-ins 菜单栏中找到该插件。

(4)根据图纸将钢筋、预应力钢筋和斜拉索关键点坐标写入到 txt 文件中。

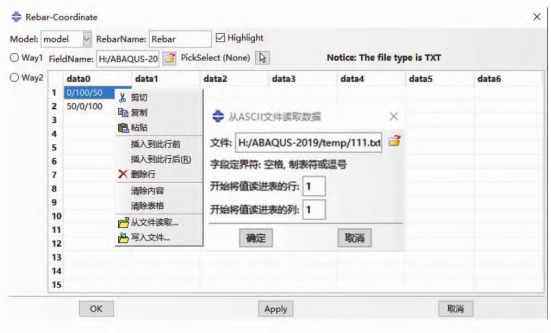


图 2 建模插件(Rebar-Coordinate)界面

(5)改变插件界面参数设置,读取外部 txt 文件,批量生成空间三维钢筋、预应力钢筋和斜拉索。

内核文件部分实现代码如下:

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

```
def rebarformFunction(form,models1,Rebar,VFrame,pick):
p = aa.Part(name=Rebar+str(qq), dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
ww=list(map(float,b))
p.DatumPointByCoordinate(coords=ww)
……
p.WirePolyLine(points=(f),mergeType=IMPRINT,meshable=ON)
a1 = mdb.models[models1].rootAssembly
a1.Instance(name=Rebar+str(qq)+'-1', part=p, dependent=ON)
……
```

1.2　静力与动力瞬态响应数据提取方法

1.2.1　基本内容

斜拉桥损伤诊断的数据提取方法是依据 Odb 数据提出的，提取位移、应变、应力、速度及加速度等数据的方法基本相同，其基本内容主要包括（以提取应力和应变数据为例）：

（1）调用 ABAQUS 提供的 print、printPaths、printTypes、getPaths、getTypes 和 prettyPrint 等函数，建立模型数据与结果数据的访问路径。

（2）利用 getSubset 函数获取模型对应的结果数据。

（3）调用 values 成员变量读取 6 个方向的应力和应变数据。

（4）在 ABAQUS 自带 PYTHON 解释器中调用外部库 xlsxwriter，将读取的数据写入 Excel 文件。

（5）将上述步骤编写的代码复制到 StrssStrainFunction 函数中，并定义该函数关键字，完成内核脚本编写。

（6）利用 ABAQUS 自带的 RSG 构造器创建 GUI 程序，界面组成包括：下拉菜单框、文本框、检查按钮及单选按钮等部分，其每部分的关键字都需和内核文件中的关键字一一对应。

（7）在 kernel 标签页，选择 StrssStrainFunction 函数作为加载内核模块，切换到 GUI 标签页，点击保存键，图形界面、注册与内核文件会自动保存到 ABAQUS 指定文件 abaqus_plugins 中。

斜拉桥损伤诊断数据提取方法技术路线如图 3 所示，位移（Displacement-Data）、应力与应变（Stress-Strain-Data）、速度与加速度（Velocity-Acceleration-Data）插件界面如图 4 所示。

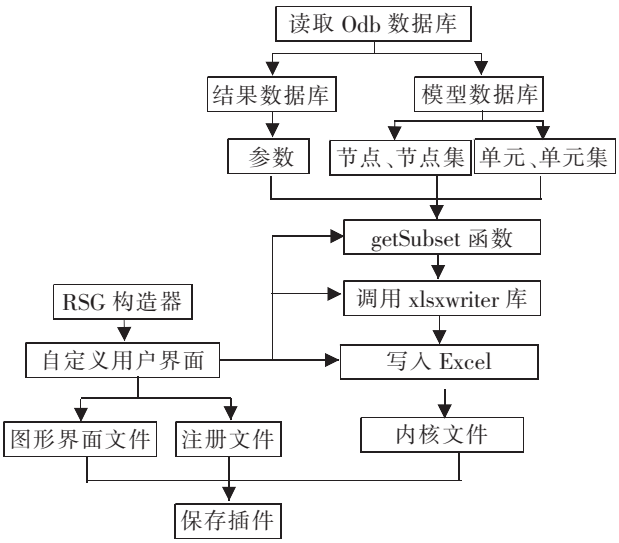
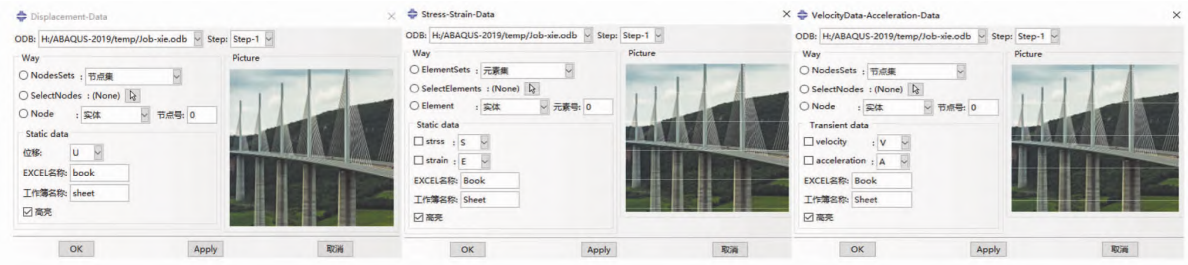


图 3　斜拉桥损伤诊断数据提取方法技术路线



(a)Displacement-Data 插件界面　　(b)Stress-Strain-Data 插件界面　　(c)Velocity-Acceleration-Data 插件界面

图 4　数据提取插件界面

1.2.2　实现过程及代码

数据提取方法实现过程如下：

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(1)编写图形界面、注册与内核文件,通过关键字连接。

(2)将 3 个脚本打包放到 ABAQUS 工作目录指定文件夹 abaqus_plugins 下。

(3)在软件后处理界面 Plug-ins 菜单栏中找到该插件。

(4)通过下拉菜单选择不同的分析步,输出该分析步下数据信息。

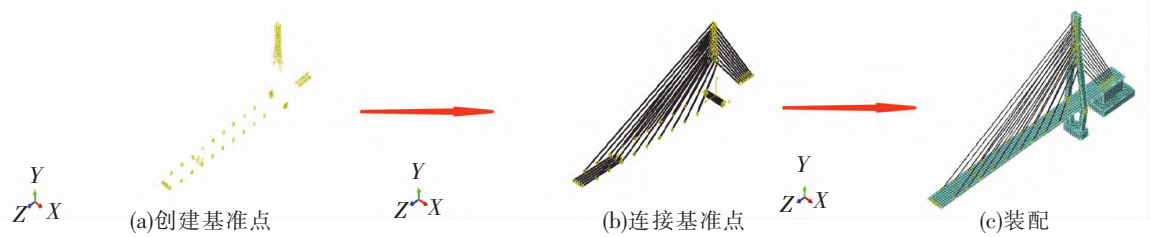
(5)输出信息写入 Excel 文件。

内核文件部分实现代码如下:

```
DefStrssStrainFunction(stepName, odbName, nnodesets, book, sheet, SS, EE, strs, stra, hh, HFrame, Instancenodes, Instance, ket):
    code=xlsxwriter.Workbook(book+'.xlsx')
    odb = openOdb(odbName)
    noteset0=myAssembly.elementSets[nnodesets]
    ……
    content.write(1,6*j+1,'S11')
    STRESS=allFrame[i].fieldOutputs['S']
    abc=DispValues[j]
    content.write(i+2,6*j+1,float(abc.data[0]))
    ……
```

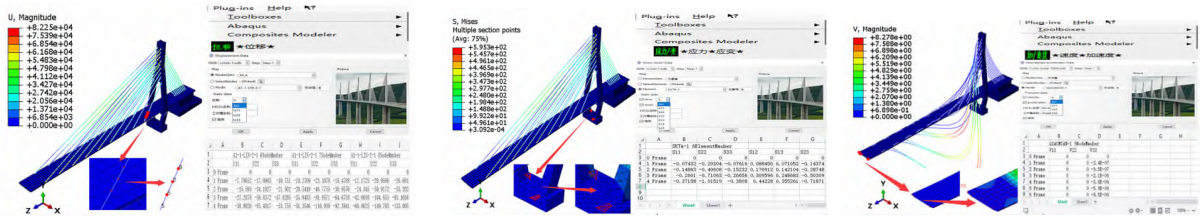
2 实际应用及分析

以装有健康监测系统的预应力混凝土斜拉桥为例,对所提方法创建的插件进行应用与分析。该桥为(76+22.5)m 单塔双跨斜拉桥,索塔和主梁采用 C40 混凝土,墩台采用 C30 混凝土;主梁采用纵向预应力钢筋,预应力钢筋采用 7A15.24 钢绞线,标准强度为 1 860 MPa;索塔采用横向预应力钢筋,预应力钢筋采用 15A12 钢绞线,标准强度 1 860 MPa;斜拉索采用扇形布置,主跨拉索梁上间距 7.0 m,锚固跨梁上索距 0.9 m,索塔塔索距分别为 1.7 m(主跨拉索)和 1.9 m(锚固跨拉索),主跨侧(双索面)有 9 对拉索,锚固跨(单索面)有 9 根拉索,斜拉索采用 SNS/S-7×37 低松弛镀锌高强钢丝。在 ABAQUS 中主梁和索塔采用 C3D8R 单元,普通钢筋、预应力钢筋和斜拉索采用 T3D2 单元,利用建模插件读取斜拉桥钢筋、预应力钢筋和斜拉索的关键点坐标,在装配模块中直接生成,如图 5 所示。施加环境激励并待模型运行完成后,利用数据提取插件对斜拉桥损伤诊断响应数据进行提取,提取界面如图 6 所示。



(a)创建基准点 (b)连接基准点 (c)装配

图 5 斜拉桥模型



(a)位移数据提取 (b)应力、应变数据提取 (c)速度、加速度数据提取

图 6 斜拉桥数据提取

结合健康检测系统对斜拉索、主梁与索塔确定测点并进行实测数据提取,由于斜拉桥实测数据的有限

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

性，故仅对斜拉索应力、主梁和索塔应变进行对比验证，如表 1 所示，直观显示对比效果如图 7 所示。

表 1　斜拉桥数据

左跨斜拉索编号	测点编号	本文方法应力/MPa	实测数据应力/MPa	主梁测点编号	应变方向	本文方法应变/με	实测数据应变/με	索塔测点编号	应变方向	本文方法应变/με	实测数据应变/με
C1	L1	1 753.3	1 742.6	Z6	E11	−25.257 8	−24.352 7	S7	E11	−57.155 8	−60.013 6
	L2	1 759.7	1 750.2		E22	15.661 4	15.034 9		E22	−20.256 7	−19.628 7
	L3	1 760.9	1 766.3		E33	−15.955 9	−16.434 5		E33	36.131 6	37.179 4
C2	L1	1 849.3	1 839.3	Z7	E11	−27.334 7	−26.870 0	S8	E11	−10.472 3	−10.880 7
	L2	1 855.3	1 860.1		E22	17.210 0	17.055 1		E22	−78.626 1	−77.525 3
	L3	1 856.1	1 849.6		E33	11.957 6	11.395 6		E33	37.734 6	37.055 3
C3	L1	1 996.3	1 987.3	Z8	E11	−29.206 7	−28.505 7	S9	E11	−23.872 8	−23.108 8
	L2	1 993.4	1 988.9		E22	20.262 8	20.911 2		E22	−75.067 6	−73.866 5
	L3	2 000.8	1 991.9		E33	−29.859 3	−29.202 3		E33	35.858 4	35.177 0

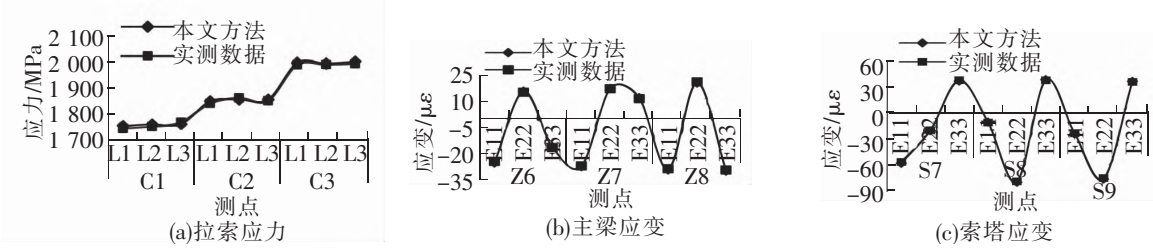


图 7　斜拉桥数据对比图

由表 1 和图 7 可知，斜拉索应力最大误差在斜拉索 C1(L1)处，误差值为 10.7，相对误差为 0.61%；主梁应变最大误差在测点 Z6(E11)处，误差值为 0.905 1，相对误差为 3.58%；索塔应变最大误差在测点 S7(E11)处，误差值为 2.857 8，相对误差为 5.00%。数据提取结果和实测结果基本吻合，说明了本文所提出方法的正确性和有效性。

此外，进行了本文方法和传统方法在建模和数据提取效率上的对比，如表 2 所示，利用本文所提方法所花时间较少，说明本文所提方法是高效的。

表 2　本文方法和传统方法建模效率对比

模型名称	建模方式	建模时间/h	建模效率	提取数据时间/s	提取效率
斜拉桥	传统方法	10	低	27	低
	本文方法	1	高	2	高

3　结论

(1)基于 ABAQUS 对斜拉桥空间三维钢筋、预应力钢筋和斜拉索的建模方法进行了研究，实现了利用“创建线”功能完成斜拉桥有限元前处理建模操作，并开发了参数化建模前处理插件，设计了模块专用 GUI 界面，使用户可以根据实际参数快速建模。

(2)利用 ABAQUS 后处理脚本接口，访问 Odb 数据库提取响应数据的技术路线是可行的，编写提取静动响应数据的内核脚本程序，借助 RSG 构造器开发了后处理数据提取插件，实现了数据的批量提取。

(3)在 ABAQUS 软件中通过插件界面的方式完成参数化建模和自动化数据提取，比传统手动方法具有优越性和高效性。

参　考　文　献

[1]孙利民，尚志强，夏烨. 大数据背景下的桥梁结构健康监测研究现状与展望[J]. 中国公路学报，2019，32(11)：1-20.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[2]梁鹏,李斌,王秀兰,等.基于桥梁健康监测的有限元模型修正研究现状与发展趋势[J].长安大学学报(自然科学版),2014,34(4):52-61.

[3]郁荣,陈剑波,李欣烨,等.基于PYTHON语言的ABAQUS前处理程序在内凹蜂窝的应用[J].船舶工程,2020,42(S1):153-156.

[4]Wang Fengfeng, Yang Guolai. Parametric design and analysis of a mortar base plate[J]. Vibroengineering PROCEDIA, 2019, 29:201-206.

[5]李华伟,王文达.ABAQUS二次开发在钢管混凝土结构有限元分析中的应用[J].建筑结构学报,2013,34(S1):353-358.

[6]Zhang X, Ma W, Jiao X. Secondary development and application of satellite dynamic simulation platform based on ABAQUS[J]. Materials Science and Engineering, 2018, 436(1):95-100.

[7]Dong H, Zhang M. Application of ABAQUS secondary development platform in TC4 alloy cutting simulation[C]// 2019 3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE). [S. l.]: IEEE, 2019:726-730.

[8]连昌伟,王兆远,杜传军,等.ABAQUS后处理二次开发在塑性成形模拟中的应用[J].锻压技术,2006(4):111-114.

[9]张慎,李霆,徐厚军,等.基于ABAQUS的高层建筑结构动力弹塑性分析后处理软件的研究与开发[J].建筑结构,2015,45(23):79-85.

[10]Cai X Y, Zhao N Z, Ming M Y, et al. High-speed cutting finite element model parametric modeling based on ABAQUS [J]. Materials Science Forum, 2014, 3256:800-801.

[11]王伏林,陶琪,徐磊磊.基于PYTHON语言金属切削仿真平台开发[J].吉林大学学报(工学版),2019,49(2):492-498.

[12]马川. 基于ABAQUS二次开发的框架结构设计平台研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2018.

[13]Wang Z Y. A Plug-In for automating the finite element modeling of flatfoot[J]. Cham: Springer International Publishing, 2018, 98:248-259.

[14]张群杰. 基于ABAQUS二次开发的框架及框架—支撑结构优化研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2017.

[15]王国梁. ABAQUS GUI二次开发技术在材料领域的研究与应用[D]. 兰州:兰州理工大学, 2009.

Research on Finite Element Modeling and Data Extraction Methods for Damage Diagnosis of Cable-Stayed Bridge

Liu Jie[1,2,3], **Yang Pengyuan**[1,3]

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. Hebei Key Laboratory of Diagnosis, Reconstruction and Anti-disaster of Civil Engineering, Zhangjiakou 075000, China;
3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to facilitate the rapid modeling and analysis of cable-stayed bridge damage diagnosis, a finite element modeling and data extraction method of cable-stayed bridge was proposed based on the existing research methods, PYTHON language interface and GUI program provided by ABAQUS finite element software. By using RSG constructor and calling Part and Assembly object in Mdb object to write programs, a method of generating spatial three-dimensional steel bars, prestressed steel bars and stay cables by batch and click interaction was proposed. By using RSG constructor and calling the object of model data and result data in Odb database, a method of extracting static and dynamic transient response data from Odb database to Excel table by combining three forms of point selection, node or unit set and numbering was proposed. The application process of the proposed method was demonstrated with an example, which showed that the proposed method was practical and efficient.

Key words: damage diagnosis of cable-stayed bridge; modeling and data extraction methods; ABAQUS secondary development; PYTHON language

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net