

钢混结构有限元分析载荷子步设置方法研究

石端伟, 吴志纯, 张 炎, 王志远
(武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:为了解决钢混结构非线性有限元分析计算收敛困难的问题,首先建立了矩形截面钢混筒支梁 ANSYS 有限元模型,并通过设置多载荷步和不同载荷子步对模型进行了求解,得出了相应的迭代收敛曲线。研究表明,采用多载荷步,同时对于迭代曲线波动大的时段,加大求解载荷子步,能有效改善钢混结构非线性有限元分析计算收敛性。

关键词:钢混结构;有限元;载荷子步

中图分类号:TU375

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)10-0005-04

Research on load substep settings of FEA for reinforced concrete structure

SHI Duan-wei, WU Zhi-chun, ZHANG Yan, WANG Zhi-yuan

(School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to solve the problem in keeping the calculation results convergent in the nonlinear FEA for reinforced concrete structure, the ANSYS model of rectangular cross-section reinforced concrete beam was established, and the corresponding iterative curves were obtained by setting multi-load step and different load substeps to solve the model. The results show that it can efficiently improve the convergence of calculation in the nonlinear FEA by multi-load step and increasing load substeps for the volatile period of the iterative curve.

Key words: reinforced concrete structure; finite element; load substep

0 引 言

利用 ANSYS 软件对钢混结构进行有限元分析时,由于钢混结构工作环境的复杂性、模型的大型化及混凝土材料的非线性特性等,结构计算的收敛问题一直是工程应用中的一个难题,需要进行许多的求解设置和引入众多的参数以保证计算结果的稳定性和可靠性。

对于结构非线性问题的求解,较为常用的方法有增量法、迭代法和混合法 3 种^[1]。ANSYS 中采用混合法求解非线性问题,将增量法与 Newton-Raphson 平衡迭代相结合,迫使每个载荷增量的末端解趋于平衡收敛(在某个容限范围内),并提供一系列的命令来增强问题的收敛性,较为常用的有载荷步、载荷子步、平衡迭代步、自适应下降、线性搜索等。为提高分析的收敛

性,建议钢混结构非线性分析中应设置合适的载荷子步,太大或太小的子步数均不利于计算收敛^[2-3]。但现有的文献资料均没有对钢混结构有限元分析的载荷步设置提出有效办法。

本研究从迭代收敛曲线的角度出发,分析不同载荷步设置对计算收敛性的影响,并对工程应用对策提出看法。

1 有限元模型

1.1 模型几何参数

本研究采用文献[4]中的矩形截面钢混筒支梁作为研究对象,如图 1 所示。梁截面尺寸为 120 mm × 200 mm,跨度为 2 000 mm,净跨为 1 950 mm。纵向架立筋为 2 × Ø6 HRB235 级圆钢筋,纵向受力钢筋为

2 × Ø12 HRB335 变形钢筋;箍筋为 16 × Ø6 HRB235 级圆钢筋。混凝土等级为 C30,保护层厚度为 20 mm。

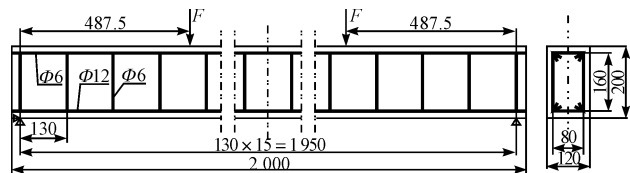


图 1 矩形截面钢筒简支梁

1.2 钢筋材料性质

箍筋、架立筋和受拉筋的力学性能如表 1 所示。

表 1 钢筋材料参数

钢筋类别	钢筋直径/ mm	屈服强度/ MPa	弹性模量/ MPa	泊松比 μ
箍筋	6	235	2.06×10^5	0.3
架立筋	6	235	2.06×10^5	0.3
受拉筋	12	335	1.99×10^5	0.28

1.3 混凝土材料性质

利用 ANSYS 对钢混结构进行有限元分析,需要对混凝土材料的本构关系和破坏准则加以确定。本研究中,采用 GB 50010-2002 推荐的混凝土本构关系表达式^[5]如下:

$$\begin{cases} \sigma_c = f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^n \right] & \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \\ \sigma_c = f_c & \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (1)$$

式中 σ_c —混凝土压应变为 ε_c 时对应的混凝土压应力; f_c —混凝土轴心抗压强度设计值; ε_0 —混凝土压应力刚达到 f_c 时的压应变,当计算 ε_0 值小于 0.002 0 时取 $\varepsilon_0 = 0.002 0$; ε_{cu} —正截面的混凝土极限压应变,当计算 ε_{cu} 值大于 0.003 3 时取 $\varepsilon_{cu} = 0.003 3$,当处于轴心受压时 $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_0$; n —系数,取 $n = 2.0$ 。

其应力应变曲线按多折线方式输入,破坏准则采用 William-Warnke 五参数准则,关闭混凝土压碎选项,具体参数如表 2 所示。

根据文献[6],混凝土材料裂缝开口裂缝剪应力传递系数 $C_1 = 0.45$,闭合裂缝剪应力传递系数 $C_2 = 0.95$ 。

表 2 混凝土 C30 的材料参数

弹性模量 E/MPa	2.5×10^4
泊松比 μ	0.167
轴心抗拉强度/MPa	2.01
轴心抗压强度/MPa	15.6
开口裂缝剪应力传递系数 C_1	0.45
闭合裂缝剪应力传递系数 C_2	0.95

1.4 有限元模型

C30 混凝土采用 SOLID65 单元模拟;钢筋采用

BEAM188 单元模拟,箍筋、纵向架立筋和纵向受力钢筋采用双线性随动强化模型 (BKIN)。单元尺寸为 50 mm。

为避免应力集中的影响,在约束处和加载处增加厚度为 20 mm 的弹性垫块,材质为 Q235,采用 SOLID45 单元模拟。按简支梁施加约束,工作载荷 $2F = 40 \text{ kN}$,如图 1 所示。

求解设置中采用位移收敛准则,收敛精度为 5%。

1.5 粘结滑移的简化处理

在钢混结构中,粘结是保证钢筋与混凝土协同工作的重要前提,粘结滑移的性能直接影响结构的受力特性与载荷分布。在非往复荷载作用下,钢混结构的滑移影响可以通过折减钢筋弹性模量加以模拟,并推荐使用折减量为 65 ~ 80%^[7]。

本研究模型中采用折减钢筋单元弹性模量模拟粘结滑移,折减系数取 0.85^[8-10]。

2 载荷子步设置与模拟

计算得到的钢混结构跨中载荷-挠度曲线如图 2 所示。由图 2 可以看出,在工作载荷作用下,结构的受力情况大体经历了混凝土初始开裂、钢筋工作和钢筋屈服 3 个阶段,与文献[4]中的试验结果较为吻合。

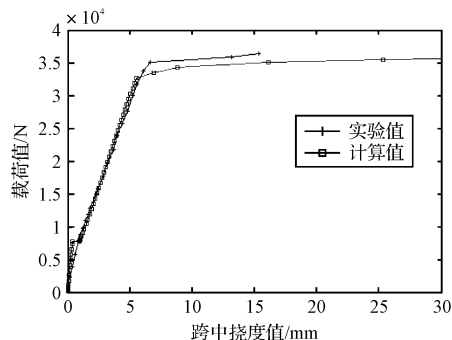


图 2 结构跨中载荷-挠度曲线计算结果

为判断载荷子步设置对钢混结构计算收敛性的影响,本研究首先对较小载荷子步设置和较大载荷子步设置的计算收敛情况进行了分析。

2.1 较小载荷子步时的收敛特征

当载荷子步 $\text{NSUBST} = 25$ 时,钢混结构计算的迭代收敛曲线,总时间历程 $\text{TIME} = 1$,如图 3 所示。由图 3 可以看出,采用较小的载荷子步,在混凝土初始开裂处,即在时间历程 $\text{TIME} = 0.2$ 左右(对应载荷值为 8 kN),位移范数与收敛值均出现较大波动,超过系统上限,出现刚体位移,计算不收敛。主要原因是:①载荷子步数较小,则在每一子步内的载荷增量较大,由于

混凝土在初始开裂时,承载能力降低,结构出现短暂的刚度下降现象,较大的载荷增量导致计算出现较大的位移增量,造成“塑性屈服”的假象;②随着裂缝增多,钢筋开始投入工作,结构承载能力回升,计算可以继续,但结果可靠性较低。

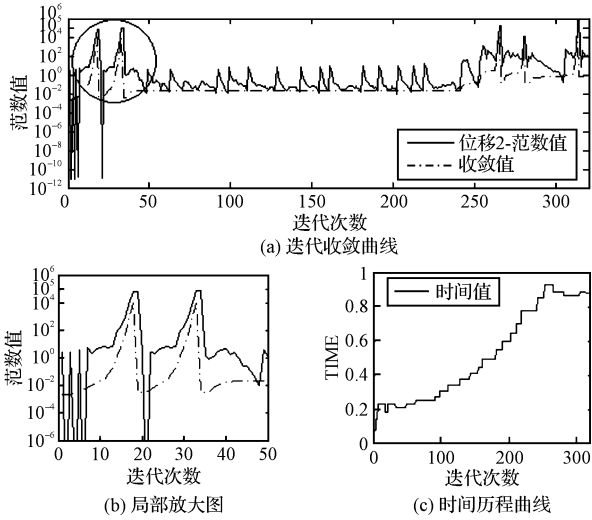


图 3 NSUBST = 25 的模型迭代收敛曲线

2.2 较大载荷子步时的收敛特征

当载荷子步 NSUBST = 500 时,钢筋混凝土简支梁的迭代收敛曲线,总时间历程 TIME = 1,如图 4 所示。

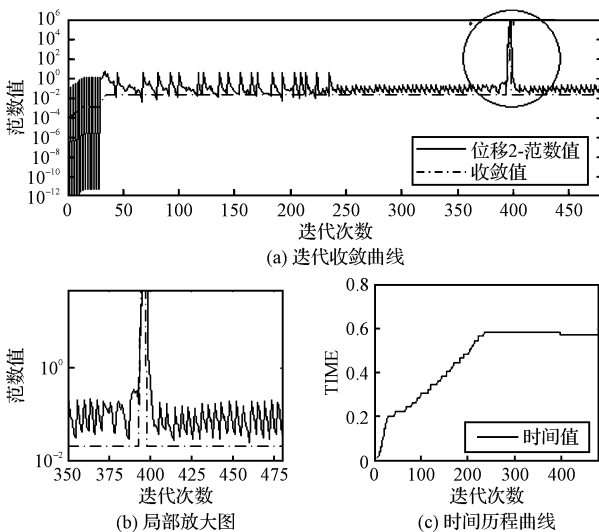


图 4 NSUBST = 500 的模型迭代收敛曲线

由图 4 可以看出,较大的载荷子步可以有效改善钢混结构在混凝土初始开裂载荷处的计算收敛性,但是随着载荷的不断增加,在时间历程 TIME = 0.5 后(对应载荷值为 20 kN),位移范数曲线长时间处于收敛值之上,甚至超出系统限值,造成刚体位移,计算结果不收敛。原因可能是:①虽然由于混凝土开裂造成结构状态改变,收敛困难,但是当载荷步数较大时,计算得到在每一载荷步内的载荷增量较为平缓,每一载

荷子步内结构变形相对较小,不会引起结构塑性屈服;②由于结构每一载荷子步内结构变形平缓,在相同的收敛容差下,计算收敛值略有下降,同时,由于混凝土应力-应变曲线随着应变增大趋于平缓,导致位移范数曲线长时间位于收敛值之上,计算结果不收敛。

2.3 载荷子步设置处理方法

根据上述分析,为提高钢混结构有限元分析的收敛性,载荷子步的设置应考虑加载平缓性与混凝土应力-应变曲线斜率之间的关系。据此,笔者认为:为提高计算收敛性,钢混结构非线性有限元分析中可以将加载过程分成多个载荷阶段,采用多载荷步方法,在混凝土初始开裂时适当减小载荷增量,钢筋投入工作后,适当加大载荷增量,以提高计算收敛性。

由图 2 可知,在工作载荷 40 kN 作用下,结构初始开裂载荷约为 8 kN,初始屈服载荷约为 35 kN,对应时间历程分别为 TIME = 0.2 和 TIME = 0.87。在相同求解设置条件下,采用多载荷步方法,将加载过程分成初始开裂、钢筋工作和初始屈服三段,对于迭代曲线波动大的位置,加大求解载荷子步,对于迭代曲线变化过于平缓的位置,则减小载荷子步设置,分别设置三阶段的载荷子步数为 25 步、50 步和 150 步,命令流如下:

```
! 初始开裂阶段,TIME,0.18
CMSEL,S,N_ZAIJIA
* GET,COUNT_N,NODE,,COUNT
F,ALL,FZ,-40000*0.18/COUNT_N
TIME,0.18
KBC,0
CNVTOL,U,,.05,2,,
NSUBST,25
ALLSEL,ALL
LSWRITE,1
! 钢筋工作阶段,TIME,0.75
CMSEL,S,N_ZAIJIA
* GET,COUNT_N,NODE,,COUNT
F,ALL,FZ,-40000*0.18/COUNT_N
TIME,0.75
KBC,0
CNVTOL,U,,.05,2,,
NSUBST,50
ALLSEL,ALL
LSWRITE,2
! 初始屈服阶段,TIME,1
CMSEL,S,N_ZAIJIA
* GET,COUNT_N,NODE,,COUNT
F,ALL,FZ,-40000*0.18/COUNT_N
TIME,1
KBC,0
CNVTOL,U,,.05,2,,
NSUBST,150
ALLSEL,ALL
LSWRITE,3
LSSOLVE,1,3,1
```

艺孔等结构的细节设计,以满足液压套装工具的方便使用和转子动平衡等试验的顺利进行,从而确保设计的工业汽轮机转子安全可靠的运行。

参考文献 (References) :

[1] SIEMENS A G. TEK-Richtlinie and TEB-Richtlinie [M]. SIEMENS A G,1994.

[2] 方 寅,严建敏,毛汉忠. G25 汽轮机转子的国产化设计与制造 [J]. 机电工程,2002,19(2) :52 - 56.

[3] American Petroleum Institute. Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries-Steam Turbines-Special-Purpose Applications(API612 - 2003) [S]. American Petroleum Institute,2003.

[4] American Petroleum Institute. Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries-Steam Turbines-Special-Purpose Ap-

plications(API612 - 2005) [S]. American Petroleum Institute,2005.

[5] ISO14661 - 2000. 国际标准中译本 [S]. 2000.

[6] American Petroleum Institute. Special-Purpose Couplings for Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services(API671 - 2007) [S]. American Petroleum Institute,2007.

[7] American Petroleum Institute. Petroleum, Petrochemical and natural Gas industries-Flexible couplings for mechanical power transmission-Special-purpose applications (ISO10441 - 2007) [S]. American Petroleum Institute,2007.

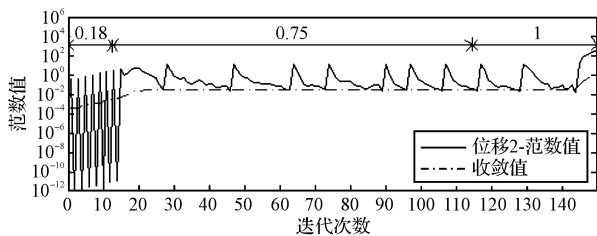
[8] 吴厚钰. 透平零件结构和强度计算 [M]. 北京:机械工业出版社,1980.

[9] 何雄志,吴大转. 基于有限元法的搅拌轴转子动力学分析 [J]. 轻工机械,2009(4) :46 - 49.

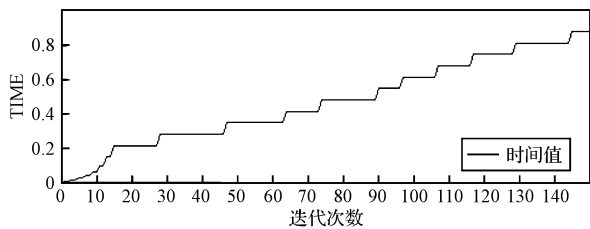
[编辑:柴福莉]

(上接第 7 页)

计算得到的迭代收敛曲线及时间历程曲线如图 5 所示。由图 5 可知,加载过程被分为时间历程 TIME = 0.18 初始开裂、TIME = 0.75 钢筋受力、TIME = 1 初始屈服 3 个阶段,对应的载荷子步为 25 步、50 步和 150 步。由此可见,采用多载荷步方法对加载过程进行细化处理,可以有效地提高计算的收敛性。



(a) 迭代收敛曲线



(b) 时间历程曲线

图 5 多载荷步的模型迭代收敛曲线

3 结束语

对复杂钢混结构进行非线性有限元分析时,载荷子步数可以根据模型的迭代收敛曲线变化情况进行设置:如果位移范数曲线在收敛曲线上部偏移很大,则可以考虑加大子步数;如果位移范数曲线长时间处于收敛曲线上部,且曲线上下跌宕幅度较小,则可以考虑减少子步数。同时,为提高计算收敛性,可以采用多载荷步的方法对加载过程进行细化处理。

参考文献 (References) :

[1] 商跃进. 有限元原理与 ANSYS 应用指南 [M]. 1 版. 北京:清华大学出版社,2005:122 - 125.

[2] 齐 峰,张有才,汤广田. 用 ANSYS 模拟钢筋混凝土的常见问题与对策 [J]. 焦作工学院学报,2003,22(4) :269 - 272.

[3] 曾 鹏,刘 清,叶建荣. 利用 ANSYS 模拟钢筋混凝土中的收敛问题的对策 [J]. 四川建筑,2008,28(3) :113 - 117.

[4] 张海龙. 钢筋混凝土结构极限承载力分析的非线性有限元法 [D]. 西安:长安大学公路学院,2005:71 - 88.

[5] SHI Duan-wei, CAI Dong-cai, WU Zhi-chun. Finite element analysis on nut post structure of three gorges project ship lift [J]. **Journal of Central South University of Technology**,2009,16(4) :614 - 620.

[6] 罗如登. ANSYS 中砧单元 SOLID65 的裂缝间剪力传递系数取值 [J]. 江苏大学学报,2008,29(2) :169 - 172.

[7] 陆新征,江见鲸. 用 ANSYS Solid65 单元分析复杂应力条件下的混凝土结构 [J]. 建筑结构,2003,33(6) :22 - 24.

[8] CHANSAWANT K. Nonlinear Finite Analysis of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates [D]. Oregon: Oregon State University,2003.

[9] SANTHAKUMAR R, CHANDRASEKARAN E, DHANARAJ R. Analysis of retrofitted reinforced concrete shear beams using carbon fiber composites [J]. **Electronic Journal of Structural Engineering**,2004(4) :66 - 74.

[10] 聂建国,陈 戈. 钢-混凝土梁组合梁计算中栓钉单元的讨论 [C] // 中国建筑学会,第八届全国混凝土结构基本理论及工程应用学术会议论文集:重庆,2004:135 - 137.

[编辑:张 翔]