

长列高强螺栓接头传力特性的有限元数值模拟

张石波, 王荣辉, 黄永辉, 刘小刚

(华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510640)

摘要:为研究摩擦型高强螺栓连接接头的传力特性与应力状态,采用通用有限元软件 ANSYS 建立三维有限元实体模型,对东江大桥中 14 个不同的螺栓连接接头进行了细致的有限元数值模拟分析。重点研究了长列螺栓群各排螺栓传力比、栓孔应力集中系数,高强螺栓的应力状态以及孔前传力系数等参数的变化规律,明确提出了各参数的取值范围,可为该类型节点的设计验算提供参考。

关键词:摩擦型高强螺栓;传力特性;传力比;应力集中系数;孔前传力系数

中图分类号:TU391 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)06-0074-05

Finite Element Analysis of Mechanical Behavior of High Strength Bolt Friction Grip Long Joint

ZHANG Shi-bo, WANG Rong-hui, HUANG Yong-hui, LIU Xiao-gang

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China)

Abstract: In order to study the mechanical behavior and stress state of the high strength bolt friction grip long joint, fourteen different bolted connections are studied with the three-dimensional finite element analysis which is based on the general FE software ANSYS. The force-delivering ratio of each bolt, the stress concentration at the edge of the bolt hole, the stress state of the high strength bolt and the force-delivering coefficient before the bolt hole are specially studied. Also, the ranges of these parameters' value are presented clearly. The results presented would be useful as references to these type joint's design and computation.

Key words: high strength bolt friction grip; mechanical behavior; force-delivering ratio; stress concentration; force-delivering coefficient before bolt hole

高强螺栓摩擦型连接已成为钢桥的主要连接形式。对高强度螺栓接头已作了大量研究工作,主要集中在高强度螺栓材质选择,制造工艺、摩擦面喷涂材料、喷涂工艺及摩擦系数试验、接头的疲劳强度等方面,接头的螺栓数多在 5 排以下。文献[1]指出,1965 年美国 W. Fisher 等多排承压型高强度螺栓接头进行了研究,对于多排螺栓的长接头,给出了螺栓平均剪切强度的折减计算方法。1985 年,日本马场贤三等进行了 6、12、18 排 M30 高强度螺栓的接头试验,以全面滑移为极限状态,认为多排螺栓的连接中不可断定螺栓排数增多平均承载力一定降低。

对于高强度螺栓摩擦型接头(简称 HSFG 接头)使用极限状态工作特点及分析,需进一步研究,尤其是多排高强螺栓的长列接头。1982 年于瑞士洛桑国际桥梁与结构工程论文讨论会上,关于该种接头应力集中情况,中国工程师提出一个分析,认为当接头沿受力方向螺栓排数增多时,其应力集中系数接近带孔板的应力集中系数 3.0。

随着有限元方法与计算机软硬件的发展,越来越多的学者采用有限元数值模拟方法来研究高强螺栓的传力特性。但目前的文献多集中于研究建筑结构上常用的梁柱节点的数值模拟^[2-6],这些节点与桥

收稿日期:2010-04-18

基金项目:广东省交通厅科技项目(2007-15)

作者简介:张石波(1969-),男,博士生,主要从事桥梁结构理论及试验研究,(E-mail) 13924116830@139.com。

梁结构中的长列螺栓摩擦型连接接头不太一致,其螺栓数目少,受力特点也不相同。文献^[7]采用有限元分析软件中约束方程的方法,对造桥机高强螺栓群进行了有限元计算分析,其拼接板件采用板壳单元模拟,螺栓采用杆单元模拟,无法得到栓孔附近以及摩擦面的应力状态。文献^[8]通过非线性有限元分析研究了荷载水平、螺栓排数和螺栓间距等因素对头排螺栓传力比的影响,其研究的内容仅限于螺栓的传力比。文献^[9]采用 ANSYS 软件建立了考虑接触状态的三维有限元实体模型,对钢桁桥长列高强螺栓群优选布置进行了研究。该文将采用三维有限元实体单元模拟的方式,对长列螺栓群连接接头的传力特点与应力状态进行了细致的分析,得到了螺栓传力比,栓孔应力集中系数,螺栓应力状态以及孔前传力系数等一系列重要的设计参数取值范围。

1 工程背景

在建的东莞市东江大桥主桥是1座双层公路桥,上层为莞深高速公路,布置双向6车道,下层为北五环路,为城市快速路,布置双向8车道。主桥跨径布置为(112 m+208 m+112 m)^[10],为双层刚性悬索加劲三跨连续钢桁梁桥,采用焊接整体节点和节点外拼接技术,上下平联节点板以及横梁接板均与节点板焊成整体,主桁分节段在桥梁厂预制,主桁一个节段长16 m,各节段之间以及节点各附属结构与大节点板之间均采用高强螺栓连接。高强度螺栓采用20 MnTiB,螺母采用15 MnVB,垫圈采用45号钢,高强螺栓的型号有M24, M30等。为验证主桁上下弦杆各节点高强螺栓连接的可靠性,对高强螺栓连接在最不利荷载组合作用下的受力特性进行了有限元数值模拟。图1为东江大桥节点编号图。

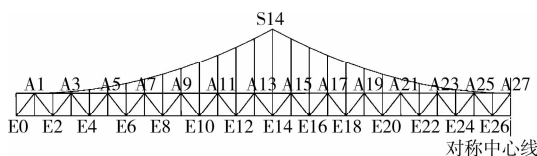


图1 东江大桥节点编号图

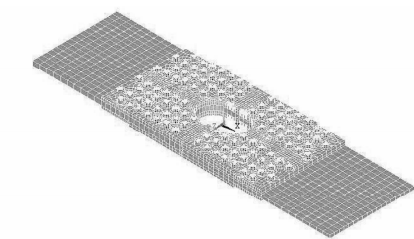
2 模型的建立

采用通用有限元软件 ANSYS 进行模拟计算,连接板及高强螺栓均采用 Solid45 实体单元建模,拼接板与芯板之间的接触面采用 Contal73 接触单元模拟,高强螺栓的预拉力通过预应力单元 Prets179 单元施加^[11],由于拼接板和芯板的刚度都较大,应

选取足够大的接触刚度以保证接触面无穿透,此处采用程序默认值即可达到要求,接触算法采用罚函数法。各有螺栓连接接头有限元模型采用一端固定,另一端施加面荷载(应力)的方式来施加荷载,荷载按成桥在恒载+活载作用下的最大值取值(由空间梁单元计算结果提供)。该文共计算了14个节点高强螺栓拼接接头模型,各模型施加的荷载值如表1所列,各模型除 E12, E14 采用 Q420qC 钢材外,其余均采用 Q370qC 钢材。模型按不同方式分类可分为以下几种类型,有填板模型和无填板模型;有通人孔模型和无通人孔模型;单层拼接板模型和叠合拼接板模型,螺栓连接接头有限元模型如图2所示。螺栓全部采用 10.9S 级 M30 螺栓,设计预拉力为 360 kN,螺栓采用 20 MnTiB 钢材,设计规范要求板间摩擦系数 $\mu \geq 0.45$,有限元模拟时,摩擦系数取最小值 0.45。高强螺栓的材料属性按规范(GB 3077-1999)^[12]取值, Q420qC、Q370qC 钢材材料属性按规范(GB/T 714-2000)^[13]取值。

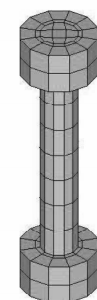
表1 各模型施加荷载值

节点	E8	E10	E12	E14	E16	E18	E20
荷载/MPa	-176	-195	-202	-192	-192	-161	-88
节点	A5	A13	A14	A15	A21	A23	A27
荷载/MPa	-185	232	236	154	-203	-236	-153



joint A14 local stress analysis

(a) 拼接接头模型



joint A14 local stress analysis

(b) 螺栓模型

图2 有限元模型

3 结果分析

主要对以下内容进行分析:1) 高强螺栓的传力比分布规律;2) 栓孔应力集中系数;3) 螺栓的正应力及剪应力状态;4) 孔前传力系数。

3.1 螺栓传力比汇总

栓接接头在承受外力时,每排螺栓所传递的外

力与全部螺栓所传递的总外力之比称为传力比,若 N 排螺栓均匀传力,则每排螺栓的传力比为 $1/N$ 。表 2 为各节点各排螺栓的传力比汇总, β 表示传力比,数字下标表示螺栓排号。图 3 为节点 E12, E14 各排螺栓传力比柱状图。

表 2 各节点各排螺栓传力比汇总

节点	各排螺栓传力比/%												
	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}	β_{11}	β_{12}	β_{13}
E8	45.8	16.6	3.5	0.5	0.2	1.9	6.4	25.0	—	—	—	—	—
E10	35.0	20.0	6.1	1.3	1.1	2.4	9.4	24.7	—	—	—	—	—
E12	28.8	18.8	7.6	2.7	0.4	1.9	2.7	2.1	2.2	2.1	3.5	8.9	18.2
E14	30.3	22.9	10.6	3.0	1.5	0.1	0.3	0.3	0.5	1.0	3.2	7.8	18.9
E16	27.8	13.7	4.5	3.4	4.8	5.8	6.1	13.1	20.6	—	—	—	—
E18	44.5	10.8	4.0	1.2	9.5	30.0	—	—	—	—	—	—	—
E20	57.5	8.5	3.3	6.7	24.0	—	—	—	—	—	—	—	—
A5	40.8	17.9	4.3	1.1	0.9	8.1	26.8	—	—	—	—	—	—
A13	14.4	30.5	13.3	3.5	1.7	0.8	2.7	8.4	24.6	—	—	—	—
A14	10.6	22.1	12.4	5.8	5.8	7.3	13.2	22.9	—	—	—	—	—
A15	23.5	28.8	8.4	2.1	2.2	6.7	28.3	—	—	—	—	—	—
A21	37.9	20.0	5.7	1.5	0.3	2.4	8.1	24.2	—	—	—	—	—
A23	30.2	22.9	9.0	2.1	0.7	0.6	2.5	9.3	22.6	—	—	—	—
A27	53.3	10.5	2.4	0.3	6.3	27.2	—	—	—	—	—	—	—

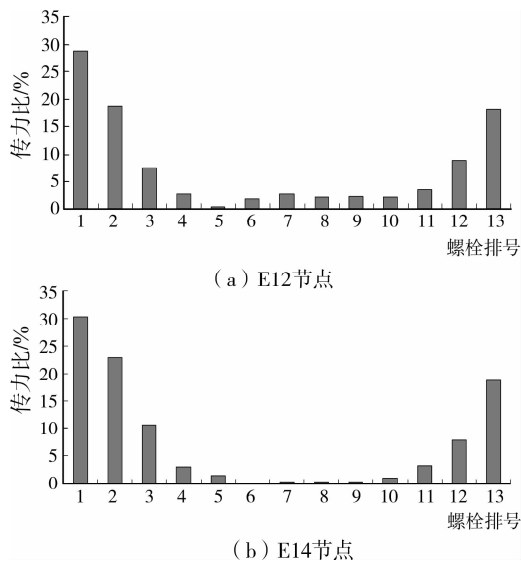


图 3 螺栓传力比图

由图 3 可知,各排螺栓的传力比均呈马鞍型分布,头尾几排的传力比较大,而中间几排螺栓的传力比很小。而头尾 2 排螺栓的传力比就其大小来看,一般都是头排螺栓(远离拼接接头一端)的传力比更

大,末排(拼接盖板中部)较小,呈不对称分布。A13, A14, A15 节点第 2 排螺栓的传力比要大于第一排螺栓的传力比,这主要是因为构造的原因,在 A13, A14, A15 节点拼接接头中,头排只布置有 4 个螺栓,而第 2 排布置有 8 个螺栓,因此,头排传力的轴力小于第 2 排。

另外由表 2 可知,对于不同螺栓排数的接头,其头排螺栓传力比不尽相同,大体的趋势是:在保证螺栓未发生滑移前,头排螺栓的传力比随螺栓排数的增加而减少,螺栓排数越少,头排螺栓的传力比越大,由头排螺栓传递的轴力也就越大。中国《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB10002.2-2005)^[14]规定,当双抗滑面连接的螺栓排数超过 6 排时,第 1 排螺栓的传力比按 0.30 验算。在这里,根据本文数值模拟结果,当双抗滑面连接的螺栓排数超过 9 排时,第 1 排螺栓的传力比才是 0.30 左右,当螺栓排数为 6 排时,第 1 排螺栓传力比为 0.45 左右,如果仍按 0.30 验算,连接接头的安全系数将可能得不到保证。

3.2 芯板最大纵向应力及应力集中系数比较

由于开孔的影响,将在栓孔边产生一定程度的应力集中,应力集中系数由栓孔边的最大应力除以栓孔截面平均应力得到,即 $k = \sigma_{max} / \bar{\sigma}$ 。表 3 为芯板最大纵向应力及应力集中系数汇总,由表可知,栓孔边应力集中系数最小为 1.078,最大为 1.564。无填

板节点的栓孔边应力集中系数比较平均,其数值在 1.3~1.5 之间,平均值约为 1.40。对于有填板节点,由于填板的影响,栓接接头两端的芯板厚度不一致,两板的应力水平也不一致,并且,按该文方式加载将有微小的偏心,产生弯曲应力,导致其孔边应力集中系数离散性较大,这与填板的厚度有较大关系。

表 3 芯板最大纵向应力及应力集中系数比较

节点	E8	E10	E12	E14	E16	E18	E20
加载应力/MPa	-176	-195	-202	-196	-192	-161	-88
有无填板	无	无	无	无	无	有	有
孔边最大应力/Mpa	-331	-422	-443	-401	-382	-259	-133
净截面平均应力/Mpa	-246.8	-273.5	-283.3	-274.9	-269.3	-225.8	-123.4
应力集中系数	1.341	1.543	1.564	1.459	1.419	1.147	1.078

续表 3

节点	A5	A13	A14	A15	A21	A23	A27
加载应力/MPa	-185	232	236	154	-203	-236	-153
有无填板	无	有	无	有	无	无	无
孔边最大应力/Mpa	-394	402	404	256	-428	-454	-302
净截面平均应力/Mpa	-259.5	270.9	275.5	179.8	-237.0	-275.5	-178.6
应力集中系数	1.519	1.484	1.466	1.424	1.503	1.372	1.407

3.3 螺栓正应力及剪应力比较

表 4 为螺栓正应力与剪应力汇总,20 MnTiB 10.9s 级高强度螺栓的设计正应力 642.1 MPa,设计剪应力为 370.2 MPa^[4]。由图 4 可知,受压节点的螺栓最大正应力普遍大于设计应力,受拉节点的螺栓最大正应力普遍小于设计应力。这是因为:对

于受压节点,由于杆件被压缩导致螺栓被拉长,使得螺栓预拉力增大,相当于螺栓“超拧”,对于受拉节点则相反。因此,在工程中应该充分考虑压,拉节点的螺栓“超拧”与“欠拧”现象。由图 5 直观的看到,所有节点螺栓的剪应力均小于设计剪应力,满足要求。

表 4 螺栓正应力与剪应力汇总

节点	E8	E10	E12	E14	E16	E18	E20
螺栓最大正应力	677.0	663.8	703.4	685.8	751.9	662.0	699.9
螺栓最大剪应力	180.0	180.0	208.0	207.0	260.0	180.0	173.0

续表 4

节点	A5	A13	A14	A15	A21	A23	A27
螺栓最大正应力	687.6	610.0	614.4	623.2	684.9	679.6	709.6
螺栓最大剪应力	210.0	166.0	160.0	168.0	195.0	206.0	198.0

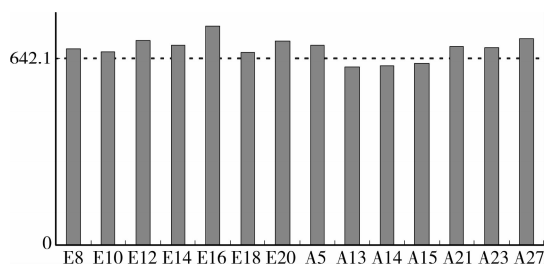


图 4 各节点螺栓正应力柱状图

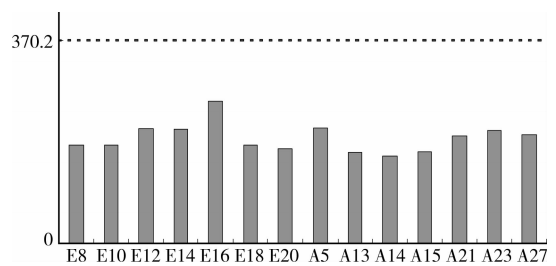


图 5 各节点螺栓剪应力柱状图

3.4 孔前传力比较

当采用摩擦型高强螺栓的对接连接时,构件的内力是依靠连接板件间的摩擦力传递的,如图 6 所示,假设构件承受的拉压力为 N ,一进入连接盖板范围就开始由摩擦力传给盖板。对构件来说,危险截面仍然是第一排螺栓处,该处的内力较大,且有栓孔削弱。与普通螺栓连接不同的是,每个螺栓引起的摩擦力可认为均匀分布螺栓四周,而在栓孔之前就传走了一部分力,孔前传走的这部分力占总传递力的比值即为孔前传力系数,具体计算公式为: $(N - N')/N$ 。西德是最早研究孔前传力系数的国家,早在 1963 年、1974 年的规范中就明确规定,在拉力构

件设计时,用净截面积计算,孔前传力系数按 40% 取值。在中国的《钢结构高强度螺栓连接的设计、施工及验收规程》(JGJ 82-91)^[15]中式(2.2.4-1)中规定对于普通钢构件,孔前传力系数按 0.5 计算。表 4 为各节点孔前传力系数汇总,由表可知,由有限元数值模拟得到的孔前传力系数比较平均,其值在 45%~53% 之间,孔前传力系数采用 0.5 是合适的。

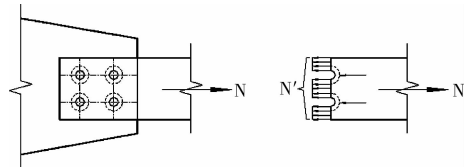


图 6 高强度螺栓的孔前传力

表 5 各节点孔前传力系数汇总

节点	E8	E10	E12	E14	E16	E18	E20
孔前传力系数/%	52.75	45.91	48.43	47.93	45.99	50.95	52.12

续表 5

节点	A5	A13	A14	A15	A21	A23	A27
孔前传力系数/%	48.97	49.65	51.71	49.75	47.74	44.08	46.01

4 结论

通过东江大桥 14 个节点高强螺栓拼接接头的有限元数值模拟,得到以下主要结论:

1) 中国《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB10002.2-2005)规定,当双抗滑面连接的螺栓排数超过 6 排时,第 1 排螺栓的传力比按 0.30 验算,根据文中数值模拟结果,当双抗滑面连接的螺栓排数超过 9 排时,第 1 排螺栓的传力比才是 0.30 左右,当螺栓排数为 6 排时,第 1 排螺栓传力比为 0.45 左右,如果仍按 0.30 验算,连接接头的安全系数将可能得不到保证。

2) 由于开孔的影响,在栓孔边均存在一定程度的应力集中,孔边应力集中系数比较平均,其数值在 1.3~1.5 之间,平均值为 1.4。设计时为保守起见,可取应力集中系数 $k=1.5$ 。

3) 对于受压节点,由于杆件被压缩导致螺栓被拉长,使得螺栓预拉力增大,相当于螺栓“超拧”,对于受拉节点则相反。因此,在工程中应该充分考虑压,拉节点的螺栓“超拧”与“欠拧”现象。

4) 由有限元数值模拟得到的孔前传力系数比较平均,其值在 45%~53% 之间,孔前传力系数采用 0.5 是合适的。

参考文献:

- [1] 党志杰. 摩擦型长列高强度螺栓接头研究[J]. 桥梁建设,1993(1): 52-57.
DANG ZHI-JIE. Research on high strength bolt friction grip long joint[J]. Bridge Construction, 1993(1): 52-

57.

- [2] SARRAJA M, BURGESS I W, DARISONA J B, et al. Finite element modelling of steel fin plate connections in fire[J]. Fire Safety Journal, 2007, 42(6/7): 408-415.
[3] DING K, DHANASEKAR M. Flexural behaviour of bonded-bolted butt joints due to bolt looseness[J]. Advances in Engineering Software, 2007, 38(8/9): 598-606.
[4] HONGXIA YU, BURGESS I W, DAVISON J B, et al. Numerical simulation of bolted steel connections in fire using explicit dynamic analysis [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(5): 515-525.
[5] 李国强, 殷颖智. 钢结构高强度螺栓连接抗火性能的有限元分析[J]. 土木工程学报, 2003, 36(6): 18-25.
LI GUO-QIANG, YIN YING-ZHI. Fire-resistant behavior of high-strength bolted connections for steel structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(6): 18-25.
[6] 朱爱珠, 郭耀杰, 程超, 等. 变电构架柱的节点试验研究与有限元分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(11): 9-14.
ZHU AI-ZHU, GUO YAO-JIE, CHENG CHAO, et al. Experimental study and finite element analysis on the joint of power transformation struss-column[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(11): 9-14.
[7] 王斌华, 吕彭民, 吴纪生. 造桥机主梁高强连接螺栓群的有限元计算[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(1): 97-100.
WANG BIN-HUA, LV PENG-MIN, WU JI-SHENG. Finite Element Analysis of High-strength Bolts for Overhead Launching Gantry's Main Girder, Journal of Chang'An University: Natural Science Edition, 2006, 26

- (1): 97-100.
- [8] 张晔芝, 侯文崎, 叶梅新. 摩擦型高强度螺栓长接头螺栓传力比研究[J]. 长沙铁道学院学报. 2000, 18(4): 6-10.
ZHANG YE-ZHI, HOU WEN-QI, YE MEI-XIN. Study on the Force-delivering Ratio of High Strength Bolt Friction Grip Long Joint. Journal of Changsha Railway University. 2000, 18(4): 6-10.
- [9] 朱铭, 王荣辉, 黄永辉. 钢桁桥长列高强螺栓群优选布置的有限元分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(4): 59-32.
ZHU MING, WANG RONG-HUI, HUANG YONG-HUI. Finite element analysis on optimized arrangement of long list bolts group with high strength in steel truss bridges[J]. Journal of Chang an University (Natural Science Edition), 2009, 29(4): 59-32.
- [10] 谭明鹤, 王荣辉, 黄永辉, 等. 刚性悬索加劲钢桁梁桥特殊节点模型试验[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 47-52
TAN MING-HE, WANG RONG-HUI, HUANG YONG-HUI, et. al. Special Joint Model Test of Stiff Suspension Reinforced Steel Truss Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 47-52.
- [11] 王秀丽, 沈世钊, 殷占忠, 等. 钢框架梁腹板开孔型连接节点力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(6): 65-76
WANG XIU-LI, SHEN SHI-ZHAO, YIN ZHAN-ZHONG, et. al. Experimental Research on Mechanical Behavior of Beam-column Connections with Openings on Beam Webs in Steel Frames [J]. Engineering Mechanics. 2006, 23(6): 65-76.
- [12] 中华人民共和国国家标准. GB/T 3077-1999 合金结构钢[S]. 1999.
- [13] 中华人民共和国国家标准. GB/T 714-2000 桥梁用结构钢[S]. 2000.
- [14] 中华人民共和国行业标准 TB 1002.2-99 铁路桥梁钢结构设计规范[S]. 2000.
- [15] 中华人民共和国行业标准. JGJ 82-91 钢结构高强度螺栓连接的设计、施工及验收规程. 1992.

(编辑 胡玲)

(上接第73页)

式路面, 沥青面层可以有效减小 CRCP 面板的损伤并且有利于拉伸裂缝最终趋于闭合。其改善结构受力状况的作用不应被忽视。因此在 CRCP+AC 复合式路面有关沥青面层合理厚度的设计中应综合考虑 CRCP 面板的温缩特性和损伤特性。

参考文献:

- [1] 王秉刚, 郑木莲. 水泥混凝土路面设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] MICHAEL I DARTER, LAURA B, HECKEL NASIR G, et al. Field performance of continuously reinforced concrete pavement in illinois [R]. Urbana: Illinois Cooperative Highway and Transportation Press, 1999.
- [3] 姚祖康. 水泥混凝土路面设计理论和方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003
- [4] J LUBLINER, S OLLER J OLIVER, E ONATE. A plastic-damage model for concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25: 299-329.
- [5] J LEE, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.
- [6] 董侨. 沥青混凝土+连续配筋水泥混凝土复合式路面结构与材料研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [7] 郑健龙, 周志刚. 沥青路面抗裂设计理论和方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [8] HIBBIT KARLSSON, SORENSEN. Anaqus user subroutines reference manual[M]. Rising Sun Mills, 166 Valley Street, Providence RI USA: ABAQUS, Inc., 2006.
- [9] 宋福春. 沥青路面非线性瞬态温度场分析[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 2003, 19(4): 264-267.
SONG FU-CHUN. Nonlinear analysis for transient temperature field of asphalt pavement [J]. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute, 2003, 19(4): 264-267.
- [10] HIBBIT KARLSSON, SORENSEN. Anaqus keywords reference manual [M]. Rising Sun Mills, 166 Valley Street, Providence RI USA: ABAQUS, Inc., 2006.
- [11] HIBBIT KARLSSON, SORENSEN. Anaqus /Cae user's manual [M]. Rising Sun Mills, 166 Valley Street, Providence RI USA: ABAQUS, Inc., 2006.
- [12] WANG BIN, YANG JUN. Evaluation on the effects of heavy vehicle dynamic loading on CRCP by 3D finite element method [C]//6th International Conference on Road and Airfield Pavement Technology, Sapporo, Japan: 2008, 07: 103-110.
- [13] HIBBIT KARLSSON, SORENSEN. Anaqus verification manual [M]. Rising Sun Mills, 166 Valley Street, Providence RI USA: ABAQUS, Inc., 2006
- [14] 黄仰贤. 路面分析与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.

(编辑 王秀玲)