引用格式：刘荣阳，张威，曲慧，等．不同螺栓孔型下高强度螺栓连接抗剪试验及有限元分析[J]．工业建筑，2026，56(3)：136-143．LIU Rongyang，ZHANG Wei，QU Hui，et al．Shear Testing and Finite Element Analysis of High-Strength Bolted Connections with Different Bolt Hole Types[J]．Industrial Construction，2026，56(3)：136-143 (in Chinese)．DOI：10．3724/j．gyjzG23011005

不同螺栓孔型下高强度螺栓连接抗剪试验及有限元分析*

刘荣阳[1]　张　威[2]　曲　慧[2]　刘广信[1]　冯　强[1]　杨彦青[1]

（1．山东高速路桥国际工程有限公司，济南　250014；2．烟台大学土木工程学院，山东烟台　264005）

摘　要　基于Q235级钢材、Q355级钢材、10．9级高强度螺栓设计了4组12个不同孔型高强度螺栓连接试件，并对其进行了抗剪试验研究。采用有限元分析方法，建立了不同孔型高强度螺栓抗剪连接分析模型，研究了螺栓孔型、预紧力损失程度以及抗滑移系数3个参数对连接抗剪性能的影响，得到了预紧力以及抗滑移系数对不同螺栓孔型连接的变化规律。结果表明：螺栓孔型和预紧力的改变对高强度螺栓连接试件的极限抗剪承载力影响较小；抗滑移系数的改变对标准孔型试件的滑移荷载和极限抗剪承载力影响最大；对内力与槽孔长向垂直的槽型孔试件的初始滑移荷载影响最小。

关键词　高强度螺栓；扩孔；预紧力；抗滑移系数；数值模拟；参数分析

Shear Testing and Finite Element Analysis of High-Strength Bolted Connections with Different Bolt Hole Types

LIU Rongyang[1]　ZHANG Wei[2]　QU Hui[2]　LIU Guangxin[1]　FENG Qiang[1]　YANG Yanqing[1]

(1. *Shandong Hi-Speed Road & Bridge International Engineering Co. , Ltd. , Jinan* 250014, *China*; 2. *School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai* 264005, *China*)

Abstract: Four groups of twelve high-strength bolted connection specimens with different hole types were fabricated and tested in shear using Q235 steel, Q355 steel, and Grade 10. 9 high-strength bolts. A finite element model was established to analyze the shear performance of high-strength bolted connections with different hole types, investigating the effects of three factors: bolt hole type, preload loss rate, and anti-slip coefficient. The variation patterns of preload force and anti-slip coefficient for connections with various bolt hole types were identified. The results showed that changes in bolt hole type and preload force had a minor effect on the ultimate shear bearing capacity of the specimens. In contrast, the anti-slip coefficient had the greatest influence on the slip load and ultimate shear bearing capacity of standard hole specimens, and the smallest effect on the initial slip load of slotted hole specimens with internal force perpendicular to the slot direction.

Keywords: high-strength bolt; enlarged holes; preload; anti-slip coefficient; numerical simulation; parametric analysis

0　引　言

工程中常利用扩孔型高强度螺栓连接在长圆孔中摩擦滑移来改善构件的耗能和结构的延性、抗震性能，使其在震后可以达到快速恢复结构功能的

* 山东省自然科学基金(ZR2020ME238)；烟台市科技发展计划项目(2020XDRH104，2022MSGY052)。

第一作者：刘荣阳，工程师，主要从事钢结构设计与施工研究。

通信作者：曲慧，博士，教授，quhui@ytu. edu. cn。

收稿日期：2023-01-10

目标，故多被应用于消能梁段、偏心支撑钢框架等结构体系中。

扩孔导致螺栓与板件之间的接触面积减小，导致接触应力增加进而压平接触面上的凹凸，降低了滑动阻力。GB 50017—2017《钢结构设计标准》[1]对高强度螺栓扩孔系数进行了明确规定：大圆孔取 0.85，内力与槽孔方向垂直时取 0.7，内力与槽孔方向平行时取 0.6。胡鹏天等[2]通过大圆孔承压型高强度螺栓连接有限元分析得出，扩孔对螺栓的破坏形式没有很大的影响，大圆孔的折减系数可取 0.8。彭铁红等[3]探究了不同孔型对高强度螺栓预紧力损失和抗滑移系数的影响，得出随开孔尺寸的增加，螺栓预紧力损失增加且抗滑移系数降低，并给出了高强度螺栓摩擦型连接孔型系数取值的建议。

在扩孔板件的研究中，黄东等[4]通过有限元分析发现：当高强度螺栓连接的芯板和盖板全部开孔时，螺栓抗滑力损失最大；仅对芯板开孔时，滑移荷载下降程度最小。Cavène 等[5]通过改变槽孔长度，对带槽孔的螺栓板件进行拉伸试验，发现孔长越大，板件极限抗拉承载力越小。

针对高强度钢材螺栓连接，Zhang 等[6]考虑了抗滑移系数和预紧力对高强度螺栓连接的影响，指出随预紧力的减小，连接的滑移载荷和屈服载荷相应减小。另外，柳长江[7]和李启才等[8]对摩擦型高强度螺栓连接进行抗拉试验，发现螺栓的预紧力只影响试件开始滑移时的荷载，对高强度螺栓连接的极限承载力影响不大。

利用有限元软件，国内外学者[9-13]分析了高强度螺栓连接的抗剪性能。杜富强等[14]通过有限元研究发现在高强度螺栓承压型连接中，预紧力的增加可以提高连接的极限承载力，而抗滑移系数对极限承载力影响不大。韩腾飞等[15]通过有限元分析研究了抗滑移系数和预紧力的改变对高强度螺栓摩擦型连接中摩擦阶段与滑移阶段的力学性能的影响，研究表明完全滑移荷载对应的位移与抗滑移系数、预紧力两个参数均无明显相关性。

很多学者分析了抗滑移系数和预紧力对高强度螺栓连接的力学性能的影响，但不同孔型对高强度螺栓连接力学性能的影响研究较少，因此有必要研究不同孔型下高强度螺栓连接受剪力学性能。本文设计了 4 组不同孔型共 12 个高强度螺栓连接进行抗剪试验研究，并建立有限元模型，通过比较试验数据，验证有限元模型的有效性。对高强度螺栓连接的孔型、抗滑移系数和预紧力三个参数进行研究，确定每个参数对高强度螺栓连接不同阶段的荷载和位移的影响，为高强度螺栓连接设计提供参考。

1　试件概况

1.1　试件制作

按照 JGJ 82—2011《钢结构高强度螺栓连接的设计、施工及验收规程》[16]和 GB 50017—2017[1]中抗滑移试验的要求和方法，设计了 12 个高强度螺栓连接件，将 12 个试件分别编号为 B01~B03、Y01~Y03、CC01~CC03、CP01~CP03。本试验考虑螺栓孔型的影响，试件具体尺寸和参数如表 1、图 1 所示。试件盖板为 Q235 级钢材，芯板为 Q355 级钢材，钢材表面均经过抛丸处理，摩擦面的抗滑移系数为 0.415，螺栓采用 10.9 级 M16 高强度螺栓，螺栓拧紧过程分为初拧和终拧，螺栓终拧预紧力为 100 kN。

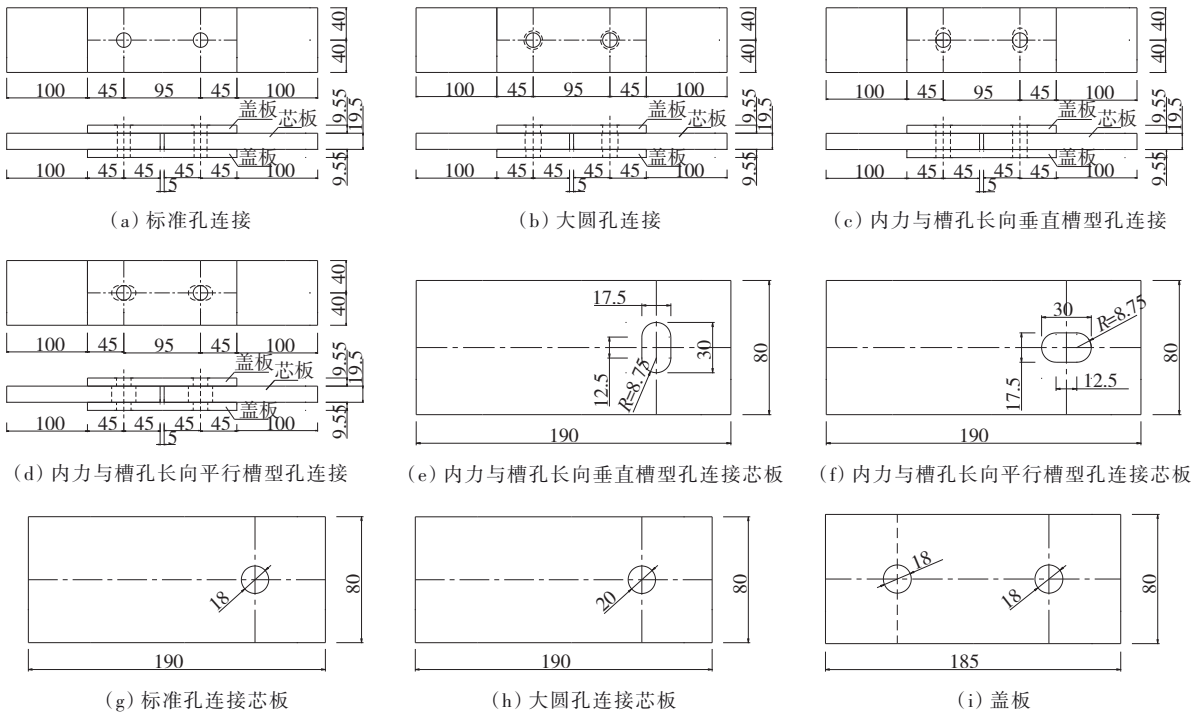
表 1　连接构件基本参数

Table 1　Basic parameters of connection components　mm

孔型	试件编号	芯板螺栓孔径	盖板螺栓孔径	芯板尺寸	盖板尺寸
标准孔	B01	18	18	190×80×19.5	185×80×9.55
	B02	18	18	190×80×19.5	185×80×9.55
	B03	18	18	190×80×19.5	185×80×9.55
大圆孔	Y01	20	18	190×80×19.5	185×80×9.55
	Y02	20	18	190×80×19.5	185×80×9.55
	Y03	20	18	190×80×19.5	185×80×9.55
内力与槽孔长向垂直槽型孔	CC01	17.5×30	18	190×80×19.5	185×80×9.55
	CC02	17.5×30	18	190×80×19.5	185×80×9.55
	CC03	17.5×30	18	190×80×19.5	185×80×9.55
内力与槽孔长向平行槽型孔	CP01	17.5×30	18	190×80×19.5	185×80×9.55
	CP02	17.5×30	18	190×80×19.5	185×80×9.55
	CP03	17.5×30	18	190×80×19.5	185×80×9.55

1.2　材料参数

根据 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》[17]的要求对连接的各部件进行材性试验，如图 2 所示。可看出：Q235、Q355 钢材、高强度螺栓弹性模量分别为 2.06×10^5，2.03×10^5，1.96×10^5 MPa；Q235、Q355 钢材和高强度螺栓屈服强度分别为 297.48，399.31，1121.89 MPa；Q235、Q355 钢材和高强度螺栓抗拉强度分别为 420.76，524.09，1176.48 MPa。



(a) 标准孔连接　(b) 大圆孔连接　(c) 内力与槽孔长向垂直槽型孔连接

(d) 内力与槽孔长向平行槽型孔连接　(e) 内力与槽孔长向垂直槽型孔连接芯板　(f) 内力与槽孔长向平行槽型孔连接芯板

(g) 标准孔连接芯板　(h) 大圆孔连接芯板　(i) 盖板

图 1　不同孔型高强度螺栓连接尺寸　mm

Fig. 1　Dimensions of high-strength bolted connections with different hole types

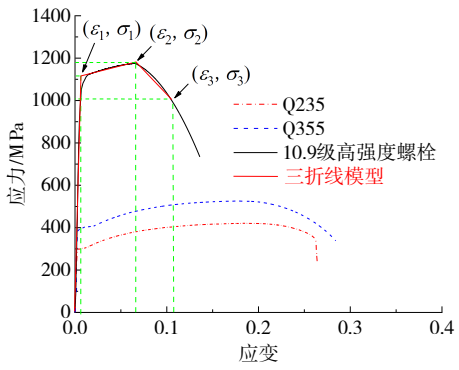


图 2　钢材与螺栓的应力-应变曲线

Fig. 2　Stress-strain curves of steels and bolts



图 3　试验装置

Fig. 3　Test set-up

1.3　试验加载方案及装置

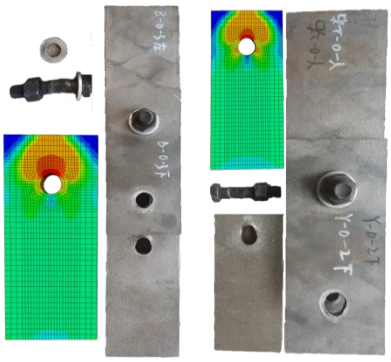
采用烟台大学土木工程学院结构大厅SDS500电液伺服动静万能试验机进行抗剪试验,见图3。

试验期间采用位移加载方式对试件进行单调拉伸,位移加载速率取2 mm/min,直到试件发生螺杆剪断现象。

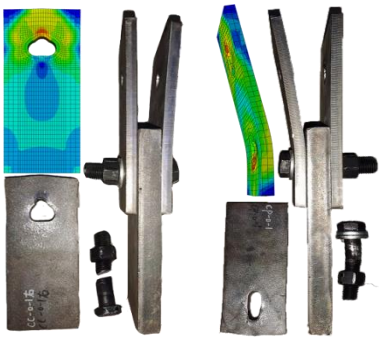
2　高强度螺栓连接抗剪试验

12个试件破坏模式全部为螺栓杆被剪断,盖板发生不同程度的翘曲现象,芯板螺栓孔在平行于荷载方向受螺栓杆挤压出现微小变形。这是由于随着荷载不断增大,螺栓杆受盖板与芯板挤压弯曲,造成螺帽与螺母向芯板运动的方向倾斜,使盖板受挤压而发生翘曲变形,典型的试件破坏模式见图4。

12个试件的初始滑移荷载、完全滑移荷载以及极限荷载如表2所示,各试件的荷载-位移曲线见图5,其中拉伸B01试件时油压不稳,表现在图5(a)中位移14~20 mm时荷载的突然波动以及初始滑移荷载大小的异常。从图5可看出:荷载-位移曲线可划分为3个阶段[18]。在第Ⅰ阶段(摩擦阶段),芯板与盖板未发生相对滑动,整个高强度螺栓连接处于弹性工作阶段,此时荷载呈线性增长。当荷载达到初始滑移荷载(F_1)后,芯板与盖板之间最大静摩擦力被克服,高强度螺栓连接开始发生滑动,进入第Ⅱ



（a）试件 B03　（b）试件 Y02



（c）试件 CC01　（d）试件 CP01

图 4　试件破坏模式

Fig. 4　Failure modes of specimens

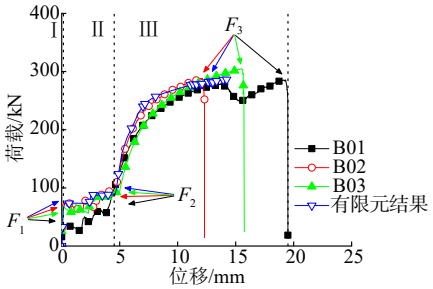
表 2　高强度螺栓连接试验结果

Table 2　Test results of high-strength bolted connections

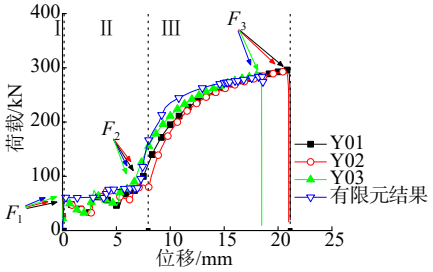
kN

试件	初始滑移荷载 F_1	完全滑移荷载 F_2	极限荷载 F_3
B01	—	54.30	285.52
B02	76.94	86.09	288.03
B03	72.22	94.57	301.28
CC01	62.67	80.88	294.02
CC02	58.65	84.75	291.91
CC03	50.45	65.07	293.41
Y01	58.44	84.52	296.75
Y02	63.20	79.36	293.44
Y03	63.89	82.27	287.06
CP01	56.27	82.43	297.73
CP02	43.55	45.22	297.20
CP03	55.63	98.63	291.08

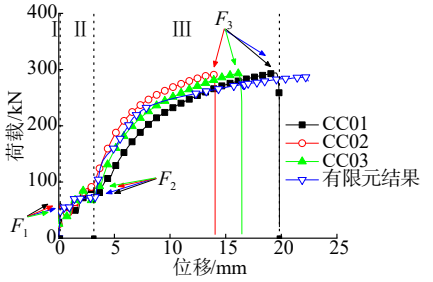
阶段（滑移阶段）。该阶段不同孔型高强度螺栓连接均发生了 2~4 次波动，其原因是螺栓杆与芯板、盖板孔壁之间存在一定的间隙，在荷载作用下，芯板带动螺栓杆在间隙中移动直至与孔壁接触，此时达到全滑移荷载（F_2），进入第Ⅲ阶段。在第Ⅲ阶段中，随着荷载的增大，位移增长速度变慢，表现为荷载-位移曲线斜率逐渐变小直至拐点极限荷载（F_3）的出现，此时标志着第Ⅲ阶段结束。



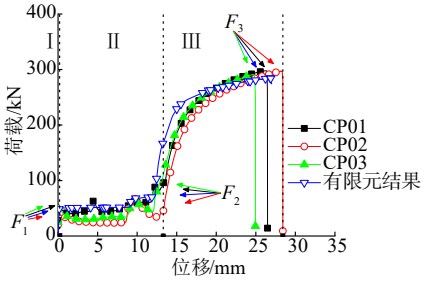
（a）标准孔 B 系列



（b）大圆孔 Y 系列



（c）内力与槽孔长向垂直槽型孔 CC 系列



（d）内力与槽孔长向平行槽型孔 CP 系列

图 5　高强度螺栓连接试验结果

Fig. 5　Test results of high-strength bolted connections

GB 50017—2017[1]中规定不同孔型有不同的孔型系数。观察表 2 可知：除由于试验误差，没有测到试件 B01 初始滑移荷载之外，大圆孔型（Y）与槽型孔型（CC、CP）比标准孔型（B）高强度螺栓连接的初始滑移荷载有不同程度的折减，其中大圆孔是标准孔的 82.92%；内力与槽孔长向垂直槽型孔是标准孔的 76.77%；内力与槽孔长向平行槽型孔是标准

孔的69.48%;与规范[1]中规定的孔型系数误差均不超过10%,试验结果符合规范[1]规定数值的要求。

3 有限元模型分析

3.1 不同扩孔形式高强度螺栓连接有限元模型的建立

根据表1高强度螺栓连接的基本参数,采用有限元软件建立4种不同孔型的高强度螺栓连接的有限元模型,如图6所示。高强度螺栓连接一侧的芯板末端为固接,对另一侧芯板的末端施加位移荷载,采用控制位移的方法进行加载,在Bolt Load模块中对高强度螺栓施加预紧力。分析过程中,高强度螺栓连接模型中包含螺杆和孔壁接触、芯板表面与盖板表面接触、螺帽表面与盖板表面接触共3个接触对。根据高强度螺栓连接接触的性质,各个接触滑移均定义为有限滑移,各接触面均采用表面与表面接触的相互作用类型,将螺栓与孔壁、芯板与盖板、螺帽与盖板、螺母与盖板定义为法向硬接触。由试验可得不同孔型连接各接触面的抗滑移系数,结果见表3。分析过程中,盖板、芯板和螺栓均采用三维八结点缩减积分六面体单元(C3D8R)。

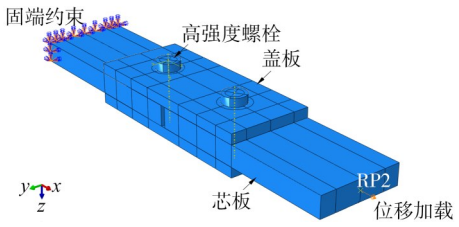


图6 高强度螺栓连接有限元模型

Fig. 6 Finite element model of high-strength bolted connection

表3 不同孔型下各接触面的抗滑移系数

Table 3 Anti-slip coefficients of contact surfaces with different hole types

接触面	标准孔	大圆孔	内力与槽孔长向垂直槽型孔	内力与槽孔长向平行槽型孔
芯板和盖板	0.373	0.309	0.286	0.259
螺杆和孔壁	0.373	0.309	0.286	0.259
螺帽和盖板	0.1	0.1	0.1	0.1

3.2 材料特性

将高强度螺栓应力-应变关系曲线的弹性阶段、强化阶段和颈缩阶段简化为三折线弹塑性模型(图2),屈服强度σ_1、极限强度σ_2、破坏强度σ_3分别为1123,1278,1025 MPa,其对应的应变ε_1、ε_2、ε_3分别为0.002,0.064,0.118,螺栓为10.9级高强度螺栓。计算中假定钢板为理想弹塑性材料,芯板与盖板采用1.2节中的数据,两者泊松比均取0.3。

3.3 有限元模型验证

为验证有限元模型的准确性,分别将4种不同孔型高强度螺栓连接的试验结果与有限元模型分析结果进行对比,结果见图5。可看出:对于4种不同孔型的试件试验结果和有限元分析结果在荷载和位移方面均吻合较好。通过图4可看出,有限元模拟高强度螺栓连接抗剪破坏现象与试验结果吻合,证明了有限元分析模型的可靠性。

4 高强度螺栓连接抗剪性能的影响因素分析

4.1 孔型的影响

孔型是影响高强度螺栓连接抗剪性能的重要因素。为了研究不同孔型对高强度螺栓连接抗剪性能的影响,本节基于标准孔型(B),分别对采用了不同扩孔方式的大圆孔(Y)、内力与槽孔长向垂直槽型孔(CC)以及内力与槽孔长向平行槽型孔(CP)共4种孔型进行分析,连接的荷载-位移曲线见图7,有限元结果见表4。

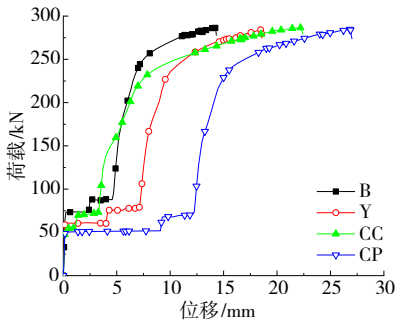


图7 不同孔型的高强度螺栓连接荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of high-strength bolted connections with different hole types

表4 不同孔型的高强度螺栓连接有限元计算结果

Table 4 Results of FEM for high-strength bolted connections with different hole types kN

孔型	初始滑移荷载	完全滑移荷载	极限荷载
标准孔	73.43	87.75	286.47
大圆孔	60.89	79.02	284.15
内力与槽孔长向垂直槽型孔	54.89	75.78	286.56
内力与槽孔长向平行槽型孔	50.36	72.96	284.66

由图7和表4可知,4种孔型下各连接的极限承载力没有明显差异。大圆孔型、内力与槽孔长向垂直槽型孔型和内力与槽孔长向平行槽型孔型的高

强度螺栓连接的初始滑移荷载与完全滑移荷载均比标准孔型高强度螺栓连接小，这是由于在预紧力保持不变的情况下，孔径增大导致摩擦面面积减小，抗滑移能力下降。另外，内力与槽孔长向平行槽型孔型连接的荷载-位移曲线在第Ⅱ阶段（滑移阶段）中变形最大，这是因为在第Ⅱ阶段中随着荷载的增加，螺栓杆在芯板开孔中逐渐移动至与芯板孔壁接触，因此，平行于荷载的孔径越大，第Ⅱ阶段变形越大。

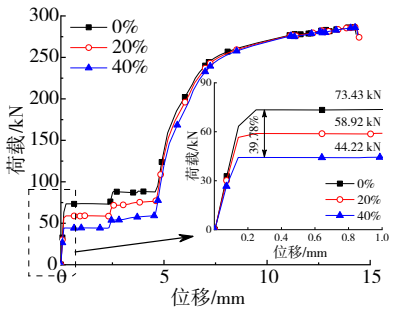
4.2　预紧力损失程度的影响

施工中钢板表面处理方式、人工操作误差及施拧顺序等都会导致预紧力损失，在螺栓终拧结束后，螺栓预紧力损失可以达到 30% 甚至更多[19-20]。本文研究了不同孔型连接下预紧力损失率分别为 40%，20%，0% 时的荷载-位移曲线和初始滑移荷载，结果见图 8。可看出：在相同预紧力损失率下，高强度螺栓连接在滑移阶段的承载力随扩孔尺寸的增大，下降程度减小；当预紧力损失率从 0% 增大到 40% 时，标准孔型连接的起滑荷载下降幅度最大，为 39.78%；内力与槽孔长向垂直槽型孔连接的起滑荷载下降幅度最小，为 38.71%。另外，高强度螺栓预紧力的大小并不影响试件在完全滑移荷载下的位移[15]以及极限承载力。对 4 种孔型高强度螺栓连接来说，预紧力损失率越小，滑移阶段出现越晚，这是因为预紧力越大，最大静摩擦力越大，达到起滑承载力的时间越长，在这种情况下试件受拉，连接件会较晚地进入滑移阶段。

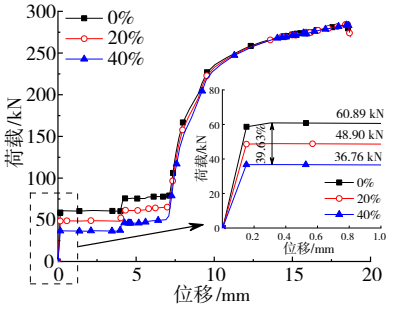
4.3　抗滑移系数影响

为考察抗滑移系数大小在不同孔型高强度螺栓连接中的影响，本文研究了不同孔型连接下抗滑移系数分别为 0.45，0.35，0.3，0.25 时的荷载-位移曲线和初始滑移荷载，结果见图 9。

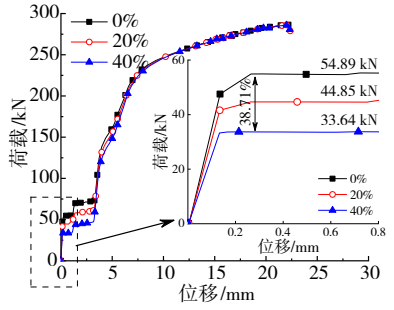
从图 9 可看出：4 种孔型连接的初始滑移荷载随抗滑移系数的减小呈下降趋势；当抗滑移系数从 0.45 下降到 0.25 时，标准孔型的初始滑移荷载下降最大，下降了 44.07%，其次为大圆孔型，下降了 44.03%；扩孔程度越大，初始滑移荷载下降程度越低，内力与槽孔长向垂直、平行的槽型孔型分别下降了 43.33%、43.52%；对抗剪极限承载力来说，标准孔型连接的下降最为明显，下降了 3.12%，其次内力与槽孔长向平行的槽型孔型下降了 2.54%，内力与槽孔长向垂直槽型孔型最不明显，下降了 2.03%。



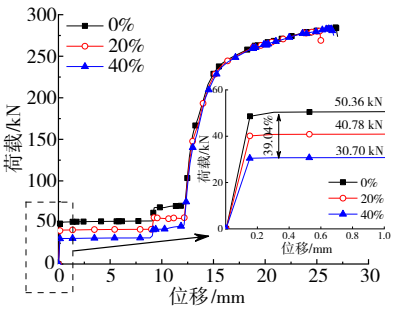
（a）标准孔系列



（b）大圆孔系列



（c）内力与槽孔长向垂直槽型孔系列

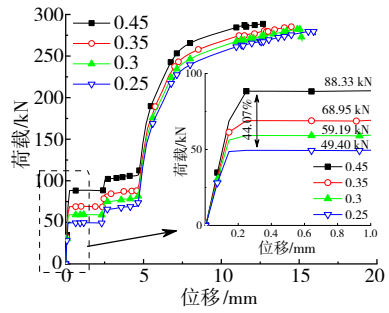


（d）内力与槽孔长向平行槽型孔系列

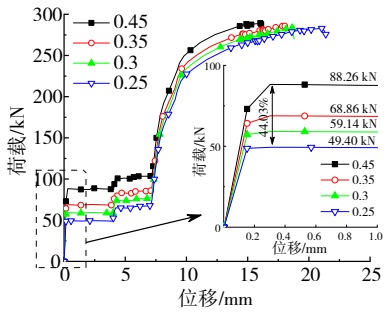
图 8　不同预紧力损失率下高强度螺栓连接荷载-位移曲线

Fig. 8　Load-displacement curves of high-strength bolted connections with different preload loss rates

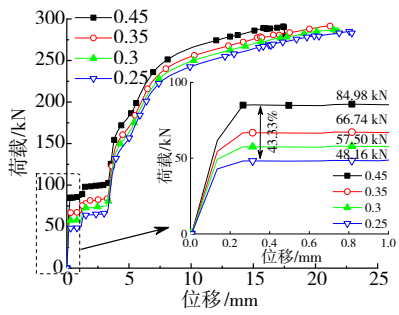
综上所述，改变抗滑移系数对初始滑移荷载和极限荷载影响最大的孔型为标准孔型试件，且扩孔程度越大，所受影响程度越小。这是因为孔径越小，摩擦面面积越大，所以当摩擦面的抗滑移系数改变时，所受影响也越大。



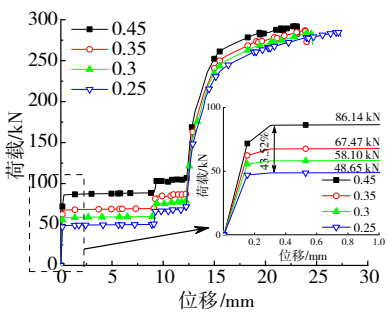
(a) 标准孔系列



(b) 大圆孔系列



(c) 内力与槽孔长向垂直槽型孔系列



(d) 内力与槽孔长向平行槽型孔 CP 系列

图 9 不同抗滑移系数下高强度螺栓连接荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves of high-strength bolted connections with different anti-slip coefficients

5 结 论

本文对高强度螺栓连接进行了抗剪试验,并通过有限元对螺栓孔型、预紧力损失率、抗滑移系数3个参数进行了高强度螺栓连接的抗剪性能分析,得出以下主要结论:

1)对芯板为Q355钢、盖板为Q235钢的10.9级M16高强度螺栓抗剪连接的试验,其剪切破坏模式均为螺栓被剪断,且盖板出现不同程度的面内翘曲。

2)螺栓孔型对高强度螺栓连接的抗剪极限承载力没有明显影响。

3)预紧力较大的连接件,滑移阶段出现较晚。当发生预紧力损失时,螺栓孔直径越大,初始滑移荷载下降程度越小,在预紧力损失率从0%到40%时,标准孔型连接的初始滑移荷载下降程度最大,为39.78%。由于标准孔型高强度螺栓摩擦型连接在工程中广泛使用,因此应注意预紧力损失带来承载能力下降过大的危害。

4)连接初始滑移荷载和抗滑移系数均呈下降趋势,且连接扩孔程度越大,初始滑移荷载的变化受抗滑移系数的影响程度越小。改变抗滑移系数对内力与槽孔长向垂直槽型孔试件的初始滑移荷载和极限承载力影响最小,因此在受环境影响而高强度螺栓连接抗滑移系数发生改变的工程中,若不可避免采用槽型扩孔时,建议将外力垂直作用于槽孔长向。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准. GB 50017—2017 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.

[2] 胡鹏天,石永久,王元清,等. Q345级大圆孔高强度螺栓连接承压性能研究和设计建议[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2014,30(4):585-592.

[3] 彭铁红,侯兆欣,文双玲,等. 螺栓孔径与孔型对高强度螺栓摩擦型连接承载能力影响的试验[J]. 钢结构,2007,22(7):30-34.

[4] 黄东,高小成,安永日. 圆形扩孔对摩擦型高强度螺栓承载力影响分析[J]. 公路交通技术,2019,35(6):55-60.

[5] CAVÈNE E, DURIF S, BOUCHAÏR A, et al. Experimental study of slotted hole bolted cover-plate connection using full field measurement[J]. Structures, 2020, 23: 573-587.

[6] ZHANG X, LIN X, SUN L, et al. Double shear tests of high-strength steel bolted connections with reduced tightening [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 46:103842.

[7] 柳长江. 高强度螺栓连接的有限元分析[J]. 潍坊学院学报,2007(4):123-125.

[8] 李启才,顾强,苏明周,等. 摩擦型高强螺栓连接性能的试验研究[J]. 西安科技学院学报,2003(3):322-324.

[9] SHI Y, WANG M, WANG Y. Analysis on shear behavior of high-strength bolts connection[J]. International Journal of Steel Structures, 2011, 11(2): 203-213.

[10] LYU Y F, LI G Q, WANG Y B, et al. Bearing behavior of multi-

bolt high strength steel connections[J]. Engineering Structures, 2020, 212:110510.

[11] LI D, UY B, WANG J, et al. Behaviour and design of high-strength Grade 12.9 bolts under combined tension and shear[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 174:106305.

[12] PEIXOTO R M, SEIF M S, VIEIRA Jr L C M. Double-shear tests of high-strength structural bolts at elevated temperatures [J]. Fire Safety Journal, 2017, 94: 8-21.

[13] 王萌,石永久,王元清. 高强度螺栓连接抗剪性能研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(3):27-34.

[14] 杜富强,郑云,刘晓刚,等. Q550钢材高强螺栓连接承压性能研究[J]. 钢结构,2018,33(11):16-20.

[15] 韩腾飞,徐刚,李亮,等. 高强螺栓摩擦型连接抗剪性能研究[J]. 工业建筑,2020,50(11):133-136.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构高强度螺栓连接的设计、施工及验收规程: JGJ 82—2011 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

[17] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.

[18] WANG H, TANG F, QIN S, et al. Corrosion-induced mechanical degradation of high-strength bolted steel connection[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(8):04020203.

[19] 洪绍正,孔正义. 高强螺栓预紧力损失的试验研究[C]//2020第七届海洋材料与腐蚀防护大会暨2020第一届钢筋混凝土耐久性与设施服役安全大会摘要集. 无锡:2020.

[20] 施刚,石永久,王元清,等. 钢结构端板连接高强度螺栓应变松弛的试验研究[J]. 施工技术,2003(11):15-17.