

文章编号:1673-2049(2019)06-0001-09

法向力作用下钢-混界面黏结滑移性能

苏小卒, 张 强

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要:采用 ABAQUS 连接器单元模拟钢-混界面黏结滑移特性,并将预应力效应转化为界面法向力作用,建立了考虑法向力作用的钢板-混凝土界面黏结滑移试验的有限元模型,比较了试验和有限元模型的黏结滑移形态和黏结滑移曲线,分析了钢-混界面黏结滑移受力性能,研究了混凝土强度和法向力大小对界面黏结滑移性能的影响。通过有限元模型结果与试验结果,验证了该建模方法的有效性。结果表明:ABAQUS 连接器单元能比较合理地模拟钢板-混凝土界面的黏结滑移性能;法向力对界面峰值黏结力和残余阶段黏结力影响显著,但对峰值滑移量影响较小;混凝土强度显著影响峰值黏结力,但对峰值滑移量和残余黏结力影响较小;所得结论可为钢-混界面黏结滑移性能研究的有限元建模及黏结滑移关系选择提供参考。

关键词:预应力型钢混凝土结构;钢-混界面黏结-滑移;连接器单元;法向力

中图分类号:TU398 **文献标志码:**A

Bond-slip Behavior of Steel-concrete Interface Under Normal Stress

SU Xiao-zu, ZHANG Qiang

(Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The ABAQUS connector element model was used to simulate the bond-slip behavior of steel-concrete interface, and the prestressing effect was transformed into the normal stress of interface. The finite element model of bond-slip test of steel-concrete interface considering the normal stress was established. The bond-slip forms and bond-slip curves of the test and the finite element model were compared, and the bond-slip behavior of steel-concrete interface was analyzed. The influence of concrete strength and normal stress on the bond-slip behavior of interface was studied. The validity of the method was verified by the results of finite element model and experiment. The results show that ABAQUS connector element can reasonably simulate the bond-slip behavior of steel plate and concrete interface. The normal stress has a significant effect on the peak and residual stage bonding force, but has little effect on the peak slip. The concrete strength has a significant effect on the peak slip and residual bonding force, but has a little effect on the peak slip and the residual bonding force. The research results can provide a reference for the finite element modeling of bond-slip behavior of steel-concrete interface and the selection of bond-slip relationship.

Key words: prestressed steel reinforced concrete structure; bond-slip of steel-concrete interface; connector element; normal stress

收稿日期:2018-12-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51178328)

作者简介:苏小卒(1956-),男,河南内黄人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:xiaozusu@tongji.edu.cn。

0 引言

预应力型钢混凝土 (Prestressed Steel Reinforced Concrete, PSRC) 结构广泛应用于大开间、大跨度转换层、连廊及大跨度桥梁等结构,同时预应力型钢混凝土构件的承载力、刚度、裂缝及破坏模式等均会受到型钢-混凝土界面黏结滑移特性的影响^[1]。国内外有关型钢混凝土结构 (Steel Reinforced Concrete, SRC) 钢-混界面黏结滑移性能的研究较多,文献[2]~[7]采用推出试验研究了不同因素对黏结强度的影响效应以及黏结应力的分布规律;杨勇等^[8]、郑山锁等^[9-10]在构件层次研究了型钢混凝土钢-混界面黏结强度及黏结应力分布规律;文献[11], [12]研究了栓钉受剪承载力对界面黏结承载力的影响。对 PSRC 结构钢-混界面黏结滑移性能的研究国内外均少见报道,本课题组对 PSRC 结构钢-混界面的黏结滑移性能进行了一系列研究,基本思想是将预应力转化为界面的法向力,在微小界面层次上研究钢-混界面黏结滑移性能。丁阳^[13]与白洁^[14]对无栓钉预应力型钢混凝土黏结滑移性能进行了研究;黄长鑫等^[15-16]及刘雪毅^[17]分别研究了单调荷载与反复荷载作用下含栓钉及法向力的钢板-混凝土界面黏结滑移性能。在数值模拟方面,薛建阳等^[18-19]利用 ANSYS 软件采用 3 个非线性弹簧单元 (Combination 39) 分析和模拟了型钢混凝土连接面上的相互作用,但荷载-滑移曲线拟合差异较大;王隼^[20]利用 ABAQUS 有限元软件采用弹簧接触单元模拟组合梁栓钉受力性能,对一系列栓钉推出试验进行了分析;Nguyen 等^[21]采用黏结层单元 (Cohesive Element) 模拟了钢-混界面的黏结滑移特性。

数值试验能否真实地模拟实体试验关键在于以下 3 个方面:①材料定义能否反映真实材性;②各种不同材料之间的界面关系处理能否模拟实际受力情况;③加载制度能否还原实际加载情形等。除此之外,有限元计算结果及收敛性还受网格划分和单元类型选择等因素的制约。本文利用大型通用有限元软件 ABAQUS 建立了考虑法向力作用的钢板-混凝土界面黏结滑移试验的有限元模型,采用不同的连接单元和建模方式,分析了各因素的影响,得到了能够真实反映钢-混界面黏结性能的有限元建模方法,为钢-混界面黏结滑移性能研究的有限元建模及黏结滑移关系选择提供参考。

1 试验说明

丁阳^[13]采用与以往在构件层次研究钢板混

土黏结滑移性能不同的研究手段,进行了钢-混界面层次黏结滑移关系研究,得到了含法向力的钢-混界面黏结滑移本构关系;黄长鑫^[15]进行了单调加载下无栓钉及含栓钉的钢板-混凝土界面黏结滑移关系试验研究,获得了相应的黏结滑移关系。本文将基于上述试验进行有限元建模,模拟钢-混界面黏结滑移接触关系。

文献[13]试验(下文简称试验 1)的试件尺寸见图 1,试件加载见图 2。混凝土采用 C40 与 C60,钢板采用 Q235 钢,钢筋分别为 8 mm HPB235 箍筋、12 mm 和 14 mm HRB335 纵筋。

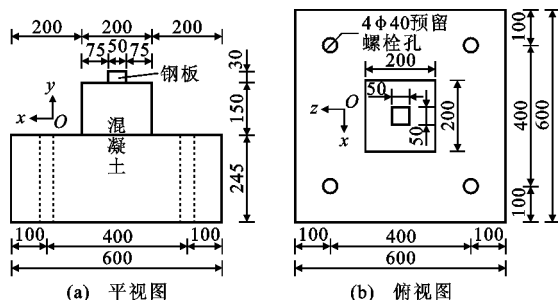


图 1 试验 1 试件尺寸 (单位:mm)

Fig. 1 Specimen Size in Test 1 (Unit:mm)



图 2 试验 1 试件加载

Fig. 2 Specimen Loading in Test 1

文献[15]试验(下文简称试验 2)分别研究了无栓钉、含单个栓钉及 2 个栓钉 3 种情形,本文仅模拟不含栓钉的情况,试件设计尺寸如图 3 所示,试件加载如图 4 所示。混凝土强度分别为 C30, C40, C50, 钢板为 Q235,受力筋规格为 12 mm HRB400 钢筋,箍筋为 6 mm HRB400 钢筋。

2 有限元建模过程

2.1 数值模拟试验参数

本文选取试验 1 及试验 2 中的 11 个试件进行有限元模拟,并将混凝土强度及法向力作为试验变量,各试件参数取值如表 1 所示。

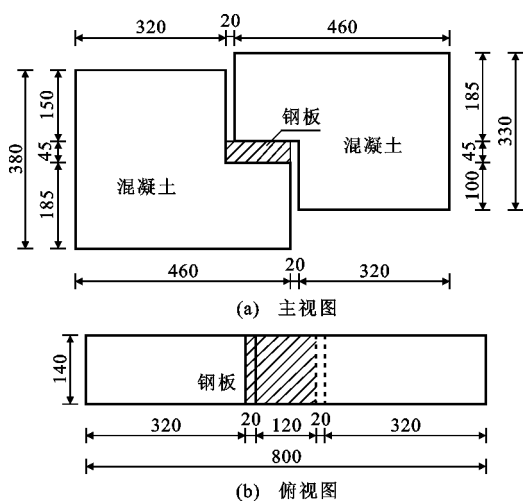


图 3 试验 2 试件尺寸(单位:mm)

Fig.3 Specimen Size in Test 2 (Unit: mm)

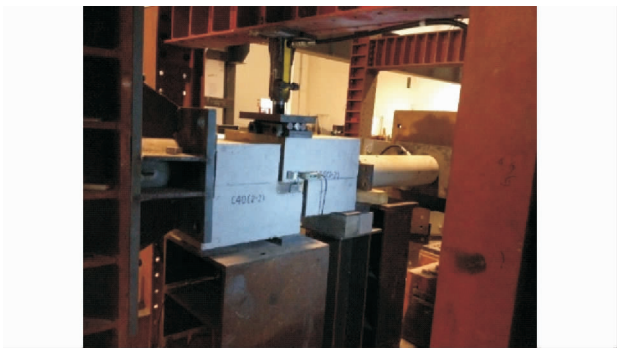


图 4 试验 2 试件加载

Fig.4 Specimen Loading in Test 2

表 1 数值模拟试验参数

Tab.1 Experimental Parameters of Numerical Simulation

试件编号	试验来源	混凝土强度等级	法向力/kN
D-C4-1	试验 1	C40	0.00
D-C4-2	试验 1	C40	20.00
D-C4-3	试验 1	C40	40.00
D-C4-4	试验 1	C40	60.00
D-C6-1	试验 1	C60	0.00
D-C6-2	试验 1	C60	29.00
D-C6-3	试验 1	C60	58.00
D-C6-4	试验 1	C60	87.00
H-C4-1	试验 2	C40	3.21
H-C5-1	试验 2	C50	77.62
H-C6-1	试验 2	C60	46.20

2.2 材料参数确定

2.2.1 混凝土材料

本文采用混凝土损伤塑性(Concrete Damaged Plasticity,CDP)模型模拟混凝土材料。ABAQUS 中 CDP 模型以塑性损伤因子来反映混凝土刚度和

强度退化,本文模型采用张劲等^[22]提出的损伤因子计算方法。混凝土单轴受拉及受压应力-应变关系采用混凝土结构设计规范中的计算方法^[23]。在定义混凝土塑性特性时,经多次试算及分析比较得出混凝土膨胀角宜取为 30°~35°,黏性系数宜取为 0.000 5。

2.2.2 钢板材料

本文钢板采用理想弹塑性模型,试验 1 和试验 2 的弹性模量均为 206 000 MPa,屈服强度均为 370 MPa。

2.2.3 垫板与加载板材料

为了更好地模拟实际情况,垫板及加载板采用线弹性模型,其弹性模量取为普通钢材 10 倍,以保证加载装置具有足够的刚度。

2.3 单元类型及网格划分

根据试验 1 和试验 2 的试件尺寸建立的有限元模型如图 5(a)及图 6(a)所示。本文有限元模型采用隐式算法,混凝土、钢板、垫板及加载装置均采用 8 节点减缩积分实体单元 C3D8R,加强沙漏控制;钢筋采用三维两节点杆单元 T3D2。试件实体单元及钢筋网格划分如图 5(b)、图 6(b)及图 7 所示。

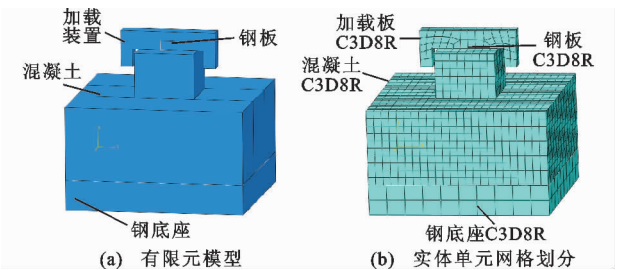


图 5 试验 1 有限元模型

Fig.5 Finite Element Model of Test 1

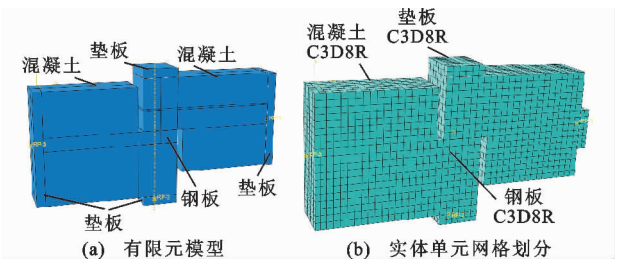


图 6 试验 2 有限元模型

Fig.6 Finite Element Model of Test 2

2.4 定义界面关系及边界条件

2.4.1 加载板与钢板

加载装置主要用来传递荷载,其与钢板之间的连接必须保证荷载传递的可靠性和真实性,故在钢板与加载板之间的界面关系采用“硬接触”定义。

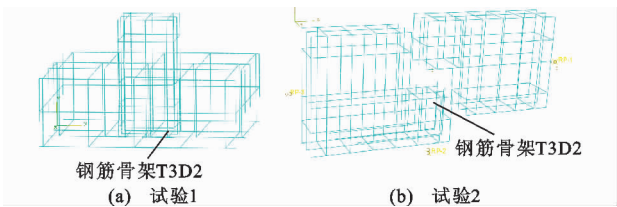


图 7 钢筋骨架网格划分

Fig. 7 Reinforcement Skeleton Meshing

2.4.2 钢底座与混凝土

钢底座主要用于模拟试验中的固定装置,故其与混凝土间采用绑定(Tie)连接。钢底座的固定采用与参考点耦合(Coupling),再将参考点 6 个自由度全部约束的方式。

2.4.3 钢筋骨架与混凝土

钢筋与混凝土之间采用嵌入(Embed)方式,能够比较合理地模拟二者之间的传力机制。

2.4.4 钢板与混凝土

钢板与混凝土间的界面关系定义是此模型的关键所在及复杂之处,以往的数值模拟研究中大多采用弹簧(Spring)、摩擦罚函数(Friction Penalty)以及黏结层(Cohesive Layer)的方式进行处理。在 ABAQUS 中,弹簧定义较为复杂,不利于建模;摩擦罚函数模拟黏结滑移形式太过简单,难以真实反映界面特性;黏结层采用 T-S 模型(Traction-Separation)时上升段为直线,很难反映黏结破坏阶段,另外 T-S 模型的参数需通过多次试算才确定,且参数往往只能较好地反映单一试验,对不同试验则又需重新试算确定,不具普遍性^[22]。

上述界面定义方法均存在一定不足之处,因此本文采用在钢板与混凝土重合或近似重合的节点间定义连接器(Connector)单元的方式模拟钢-混界面黏结滑移关系。连接器单元的具体类型为 Axial,可根据钢-混界面黏结滑移本构关系定义 Axial 的刚度曲线(F - D 曲线, F 表示节点力, D 表示节点相对位移),进而模拟钢-混界面的黏结滑移性能。本文采用文献[13]中提出的分段黏结滑移本构,如公式(1)~(4)所示。本文中采用的黏结滑移特征值如表 2 所示,根据特征值即可得到界面剪力-位移(τ - S)曲线,由界面上定义的连接器数量得到每个连接器所属面积,二者相乘即可得到 F - D 曲线。在钢板与混凝土之间还需要定义接触,法向为硬接触,切向无摩擦。各界面连接关系如图 8 所示。

$S=0 \qquad 0 \leq \tau \leq \tau_s \qquad (1)$

$\tau = \tau_s + S/(a + bS) \qquad 0 < S \leq S_u \qquad (2)$

表 2 钢-混界面黏结滑移关系特征值

Tab. 2 Eigenvalue of Bond-slip Relationship at Interface

试件编号	初始滑移 S_s /m	极限滑移 S_u /mm	残余滑移 S_r /mm
D-C4-1	0.001	0.274	2.615 0
D-C4-2	0.001	0.224	4.340 0
D-C4-3	0.001	0.180	1.660 0
D-C4-4	0.001	0.108	0.618 0
D-C6-1	0.001	0.133	3.160 0
D-C6-2	0.001	0.287	5.402 0
D-C6-3	0.001	0.679	4.618 0
D-C6-4	0.001	0.250	0.661 0
H-C4-1	0.099	0.251	4.043 0
H-C5-1	0.125	0.417	6.081 0
H-C6-1	0.129	0.303	4.043 0
D-C4-1	0.492	0.900	0.788 0
D-C4-2	1.096	6.520	4.160 0
D-C4-3	3.956	11.104	9.880 0
D-C4-4	2.220	16.244	15.214 0
D-C6-1	0.364	1.368	0.813 8
D-C6-2	1.120	8.268	4.640 0
D-C6-3	2.512	15.648	15.054 0
D-C6-4	5.724	21.212	19.764 0
H-C4-1	1.710	2.140	0.930 0
H-C5-1	4.590	4.890	3.860 0
H-C6-1	4.310	5.860	2.970 0

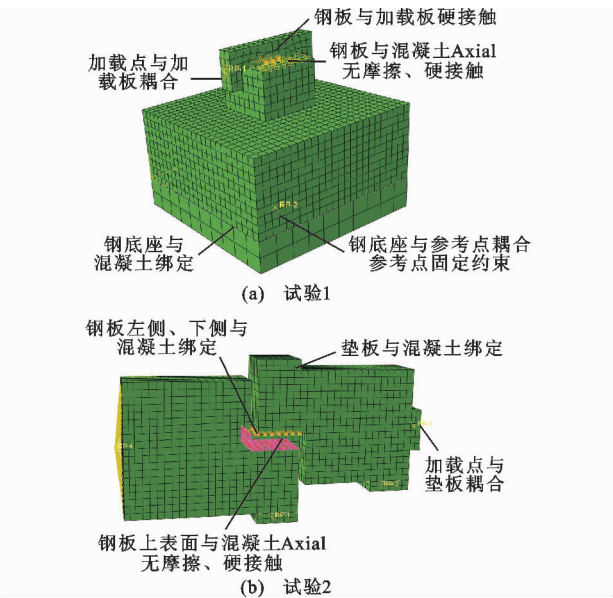


图 8 界面关系及边界条件定义

Fig. 8 Definition of Interface Relation and Boundary Conditions

$\tau = \tau_u - \frac{S - S_u}{c + d(S - S_u)} \quad S_u < S \leq S_r \qquad (3)$

$\tau = \tau_r \qquad S_r \leq S \qquad (4)$

$$a=1.47S_u/[0.46(\tau_u-\tau_s)]$$

$$b=1/[0.46(\tau_u-\tau_s)]$$

$$c=1.065(S_r-S_u)/[0.088(\tau_u-\tau_r)]$$

$$d=1/[0.088(\tau_u-\tau_r)]$$

式中: τ_s , τ_u , τ_r 分别为初始剪力、极限剪力和残余剪力。

2.5 加载步骤

本文试验 1 及试验 2 的有限元模拟均设置 2 个加载步, Step1 为法向力加载, Step2 为水平位移加载, 如图 9 所示。

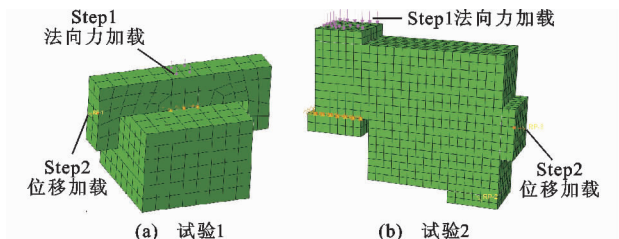


图 9 加载步骤

Fig. 9 Loading Step

3 数值模拟结果与分析

3.1 黏结滑移形态对比

图 10 给出了试验 1 试件 D-C4-4 和试验 2 试件 H-C5-1 的试验结果与有限元模拟的黏结滑移形态对比, 其他试件与其类似。从图 10 可以看出: 试件 D-C4-4 钢板沿界面滑移, 滑移比较均匀, 由于法向力较大, 部分钢板压入混凝土中; 试件 H-C5-1 混凝土沿界面滑移, 有明显的滑移痕迹; 采用了连接器的有限元模型能较为合理地模拟钢-混界面的黏结滑移情况。

3.2 钢-混界面黏结滑移受力性能分析

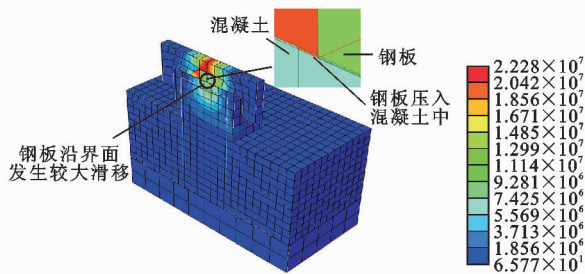
试验很难测得界面上每一点处黏结力和滑移的大小, 而有限元模拟可以得到不同单元节点上的黏结力和滑移, 图 11 给出了数值试验 D-C6-4 和 H-C5-1 中钢-混界面不同位置节点黏结力随加载过程(峰值附近)的变化规律, 其他试验有相似的结果。

从图 11 可以看出, 钢-混界面上沿加载方向不同节点的黏结力不完全一致, 而垂直加载方向不同节点的黏结力基本一致, 图 11 仅展示了黏结力的变化规律, 而滑移也具有同样的规律。换言之, 界面上不同位置处黏结滑移性能不完全同步, 即界面上仍存在黏结传递效应, 尽管试验 1 和试验 2 设计的初衷是得到“界面层次”的黏结滑移本构关系, 但它们仍具有“结构”的特性, 即加载过程中, 试件本身的变形会影响界面滑移, 从而表现出黏结力自加载端向远离加载端传递。

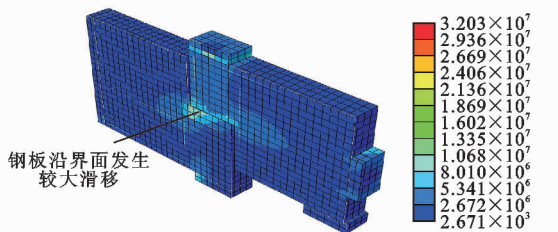


(a) D-C4-4试验结果

(b) H-C5-1试验结果



(c) D-C4-4有限元模拟结果(单位:Pa)



(d) H-C5-1有限元模拟结果(单位:Pa)

图 10 钢-混界面黏结滑移形态对比

Fig. 10 Comparison of Bond-slip Morphology of Steel-concrete Interface

为了更加直观地研究界面上不同位置处的黏结滑移特性, 以数值试验 D-C6-4 为例, 把界面上中心节点作为基准, 将其他节点的黏结力与基准节点进行差值(同一时间各节点黏结力与基准节点黏结力之差)比较, 结果如图 12 所示。从图 12(a)可以看出, 整个加载过程中界面上其他节点与基准节点的黏结力基本无差异, 局部放大后如图 12(b)所示, 各差值基本在 $-0.05 \sim 0.075$ kN 的范围内, 这些差异主要集中在黏结滑移峰值附近, 而残余阶段基本无差异。在黏结滑移峰值附近, 界面上各节点的黏结力差值($-0.05 \sim 0.075$ kN)与基准点峰值黏结力(5.9 kN)相比, 相对差值基本在 1.27% 以内, 故可认为界面上不同点处的黏结滑移特性基本一致, 而其他的数值试验也可得出相似的结论。因此, 试验 1 和试验 2 得到的黏结滑移关系尽管仍然是平均意义上的, 但在工程领域, 已经足以反映钢-混界面处的黏结滑移本质特性。

3.3 钢-混界面黏结滑移曲线比较

试验 1 和试验 2 中均取加载点荷载和界面平均位移作为界面上黏结荷载和滑移量, 本文提取 ABAQUS 模型的加载点荷载和界面平均位移, 试

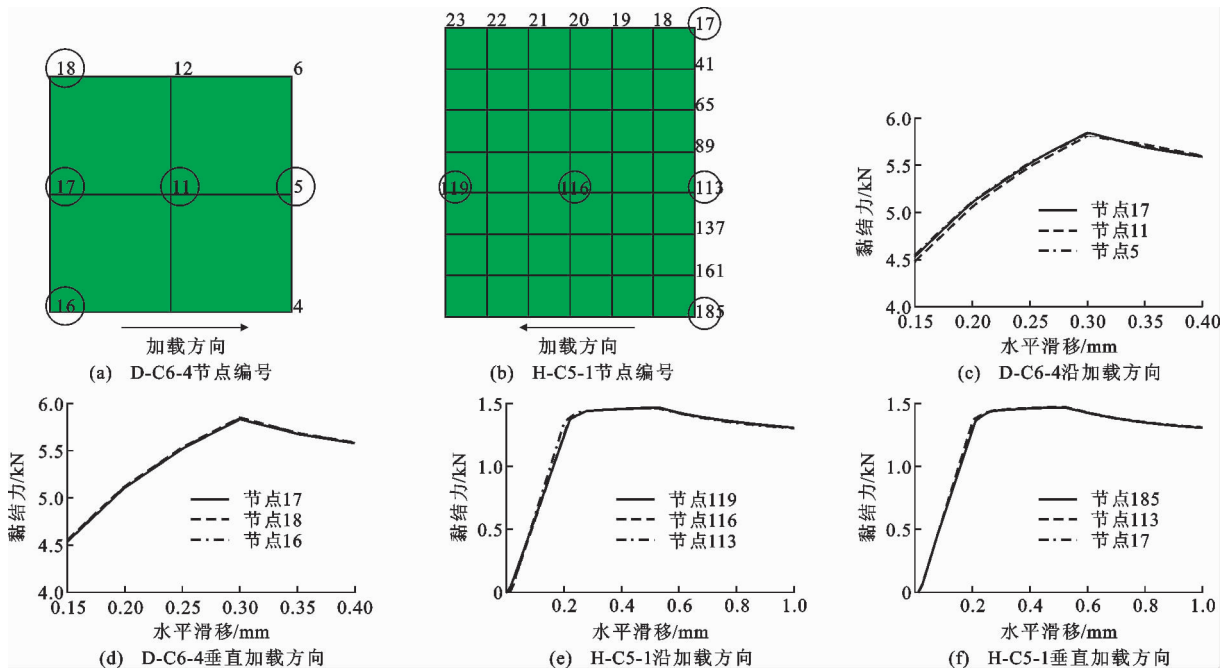


图 11 加载过程中不同节点黏结力变化比较

Fig. 11 Comparison of Bond Force of Different Nodes During Loading

(2) 大部分有限元模拟的结果与试验数据基本相符[图 13(a), (b), (c), (f), (g), (i), (j)], 说明文献[13]提出的钢-混界面黏结滑移本构关系较为合理, 可适用于不同情形的有限元模拟分析, 进一步说明了采用连接器单元模拟界面黏结滑移关系的合理性, 可为研究钢-混界面黏结滑移性能提供一定的参考。

(3) 试件 D-C4-4 与试件 D-C6-4[图 13(d), (h)]前期曲线非常吻合, 而在黏结滑移残余阶段黏结力有所上升, 主要是因为法向力过大(界面平均法向压力分别为 24, 34.8 MPa), 导致一小部分钢板被压入混凝土中, 加载过程中混凝土对钢板形成了阻挡效应, 致使荷载增大。试件 D-C6-1[如图 13(e)]下降段试验结果出现波动, 可能是由于试验过程中数据记录问题, 而有限元模拟结果与试验结果的包络线吻合较好, 更能反映界面的黏结滑移特性。试件 H-C6-1 下降段出现荷载骤降和瞬滑现象[如图 13(k)], 主要是该试件在加载过程中界面附近混凝土破坏严重, 此时的荷载滑移并不能真实反映界面的情况。

3.4 不同影响因素分析

图 14 及图 15 分别比较了法向力和混凝土强度等级对钢-混界面黏结滑移性能的影响。

由图 14 可以看出, 相同混凝土强度等级下, 法向力对界面的峰值黏结力和残余黏结力有较大影响, 而对峰值滑移量影响较小。该结果与钢-混界面

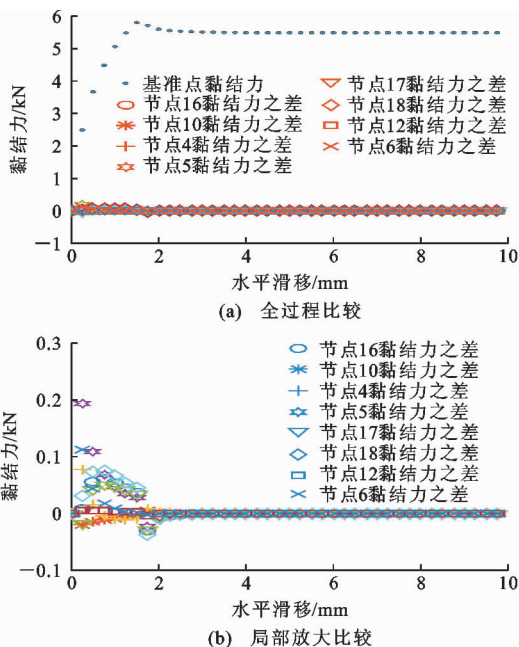


图 12 D-C6-4 试验界面上各节点黏结力差异比较

Fig. 12 Comparison of Difference of Bonding Forces

Between Nodes on Interface of D-C6-4

验曲线、有限元模拟结果以及数值计算结果比较如图 13 所示。从图 13 各试件的试验数据、数值计算结果和有限元模拟结果可以看出:

(1) 通过数值计算的钢-混界面黏结滑移结果与有限元模拟的结果吻合较好, 说明有限元模型建模方法的可靠性与合理性, 黏结滑移界面上的连接器单元能较好地模拟界面黏结滑移作用。

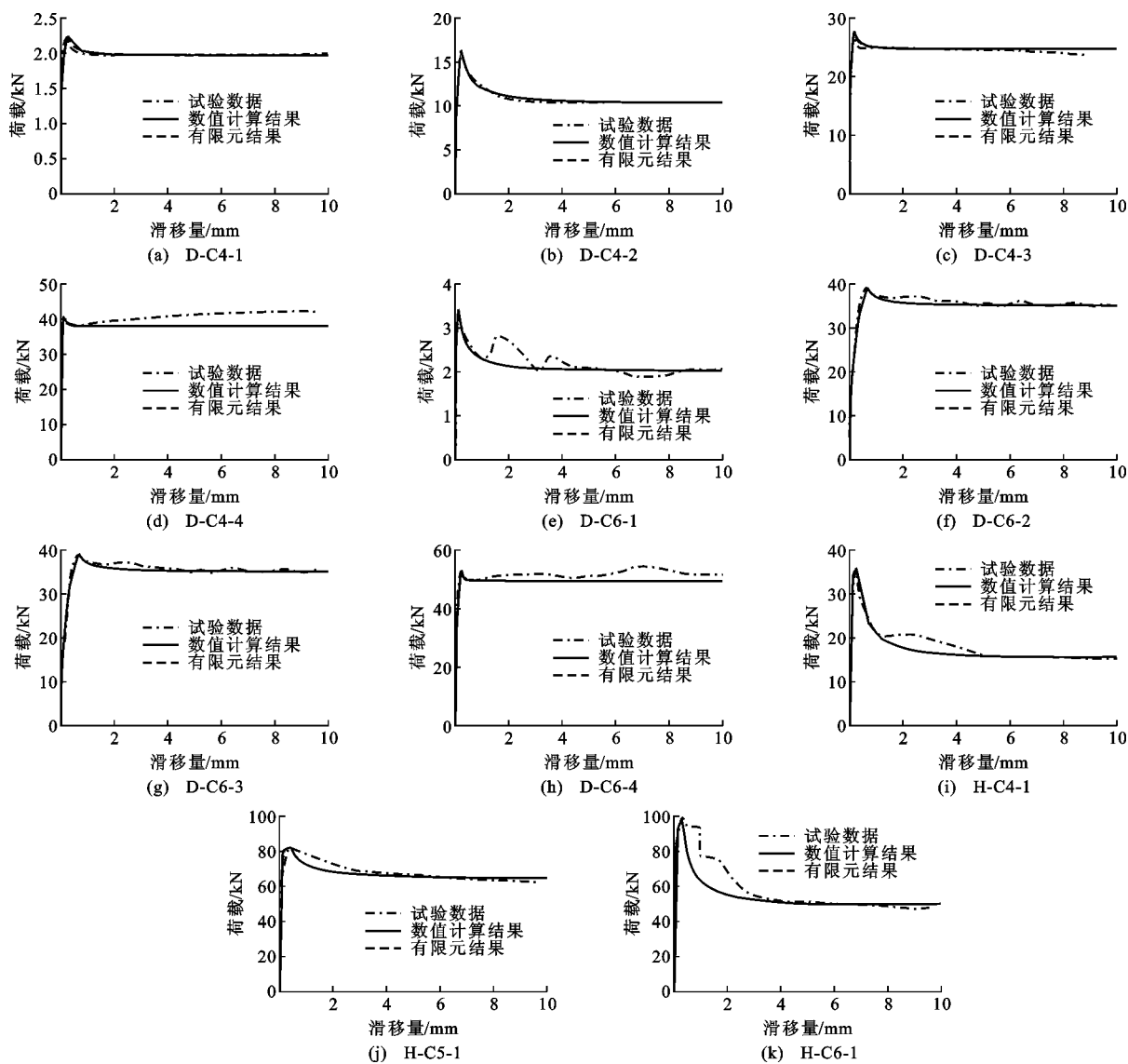


图 13 各试件黏结-滑移曲线比较

Fig. 13 Comparison of Bond-slip Curves of Different Specimens

的黏结滑移机理相符,法向力的施加增大了界面的机械咬合力和摩阻力,而峰值滑移量则主要取决于钢、混 2 种材料的化学胶结力,受法向力影响较小。

由图 15 可以看出,在相同法向力作用下,不同混凝土强度等级对界面黏结滑移的影响主要体现在峰值黏结力,而对峰值滑移量和残余阶段的黏结力影响较小。

4 结 语

(1)本文借助大型通用有限元软件 ABAQUS 建立了考虑法向力作用的钢板-混凝土界面黏结滑移试验的有限元模型,讨论了不同的连接单元和建模方式,得到了通过定义连接器单元模拟钢板-混凝土界面黏结滑移性能的有限元建模方法。研究发

现:法向力大小和混凝土强度等级都会明显影响钢-混界面黏结滑移性能,其中法向力对界面的峰值黏结力和残余阶段黏结力影响显著,对峰值滑移量影响较小;混凝土强度等级则会显著影响峰值黏结力,而对峰值滑移量和残余黏结力影响较小。

(2)本文研究结果能够为钢-混界面黏结滑移性能研究的有限元建模及黏结滑移关系选择提供一定的参考。

(3)本文未涉及含栓钉情况,对于含栓钉情况,可以以本文的建模方法和钢-混界面黏结滑移关系为基础,进行进一步的研究。

参考文献:

References:

[1] 杨 勇,薛建阳,赵鸿铁.型钢混凝土结构粘结强度分

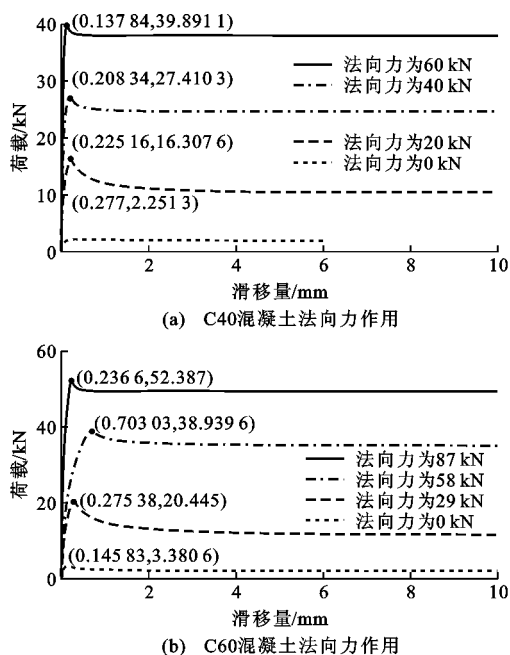


图 14 相同混凝土等级不同法向力作用下黏结-滑移曲线

Fig. 14 Bond-slip Curves of Same Concrete Grade Under Different Normal Stress

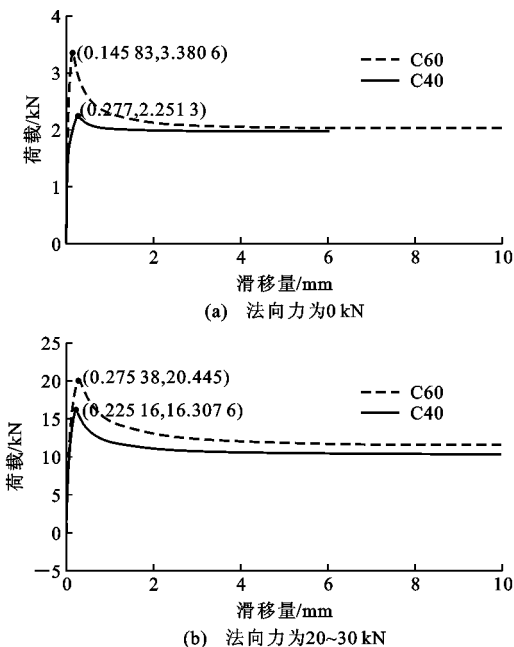


图 15 相同法向力作用不同混凝土强度等级黏结滑移曲线

Fig. 15 Bond-slip Curves of Different Concrete Strength Grades Under Same Normal Stress

析[J]. 建筑结构, 2001, 31(7): 31-34.

YANG Yong, XUE Jian-yang, ZHAO Hong-tie. Analysis of Bond Strength of Steel Reinforced Concrete Structures[J]. Building Structure, 2001, 31(7): 31-34.

- [2] BRYSON J O, MATHEY R G. Surface Condition Effect on Bond Strength of Steel Beams in Concrete [J]. Journal of ACI, 1962, 59(3): 397-406.

- [3] HAWKINS N M. Strength of Concrete-encased Steel Beams[J]. Civil Engineering Transactions of the Institution of Engineers, 1973, 15(1/2): 29-45.
- [4] ROEDER C W. Bond Stress of Embedded Steel Shapes in Concrete[C]//ASCE. Composite and Mixed Construction. New York: ASCE, 2010: 227-240.
- [5] WIUM J A, LEBET L P. Simplified Calculation Method for Force Transfer in Composite Columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(3): 728-745.
- [6] HUNAITI Y M. Bond Strength in Battened Composite Columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(3): 699-714.
- [7] FURLONG R. Binding and Bonding Concrete to Composite Columns [C]//ASCE. Composite and Mixed Construction. New York: ASCE, 1984: 330-336.
- [8] 杨 勇, 赵鸿铁, 薛建阳. 型钢混凝土粘结滑移性能试验分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2002, 34(3): 205-209.
- YANG Yong, ZHAO Hong-tie, XUE Jian-yang. Experimental Analysis on the Bond-slip Properties of Steel Reinforced Concrete Structures [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2002, 34(3): 205-209.
- [9] 郑山锁, 邓国专, 杨 勇, 等. 型钢混凝土结构粘结滑移性能试验研究[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 63-69.
- ZHENG Shan-suo, DENG Guo-zhuan, YANG Yong, et al. Experimental Study of Bond-slip Performance Between Steel and Concrete in SRC Structures [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(5): 63-69.
- [10] 郑山锁, 邓国专, 田 微, 等. 型钢与混凝土之间粘结强度的力学分析[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 96-100, 105.
- ZHENG Shan-suo, DENG Guo-zhuan, TIAN Wei, et al. Theoretical Study on Bond Strength Between Shaped Steel and Concrete in SRC Composite Structures [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1): 96-100, 105.
- [11] VIEST I M. Investigation of Stud Shear Connectors for Composite Concrete and Steel T-beams [J]. ACI Journal, 1956, 27(8): 875-981.
- [12] SLUTTER R G, DRISCOLL G C. The Flexural Strength of Steel-concrete Composite Beams [J]. Journal of the Structural Division, 1965, 91(2): 71-99.
- [13] 丁 阳. 预应力型钢混凝土结构粘结滑移性能研究 [D]. 上海: 同济大学, 2013.
- DING Yang. Study on Bond-slip Relationship in Prestressed Steel Reinforced Concrete Structure [D].

- Shanghai: Tongji University, 2013.
- [14] 白洁. 无栓钉预应力型钢混凝土界面粘结滑移本构关系研究[D]. 上海: 同济大学, 2015.
- BAI Jie. Bond-slip Relationship of Steel-concrete Interface in Prestressed Steel Reinforced Concrete Without Stud[D]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- [15] 黄长鑫. 含栓钉的预应力型钢混凝土界面粘结滑移本构关系研究[D]. 上海: 同济大学, 2015.
- HUANG Chang-xin. Study on Bond-slip Relationship in Prestressed Steel Reinforced Concrete Structure with Stud Shear Connectors [D]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- [16] 苏小卒, 黄长鑫. 受栓钉强度控制的钢板-混凝土界面黏结滑移性能试验与本构模型[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(3): 167-174.
- SU Xiao-zu, HUANG Chang-xin. Experiment and Constitutive Modeling of Bond-slip Behavior of Steel Plate-concrete Interface with Strength Controlled by Stud Shear Connectors[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(3): 167-174.
- [17] 刘雪毅. 有栓钉及法向力时型钢砼的滞回粘结滑移关系研究[D]. 上海: 同济大学, 2016.
- LIU Xue-yi. Study on Hysteretic Bond-slip Relationship in SRC with Stud Shear Connectors and Normal Force[D]. Shanghai: Tongji University, 2016.
- [18] 薛建阳, 赵鸿铁, 杨勇, 等. 型钢混凝土柱粘结滑移性能及 ANSYS 数值模拟方法研究[J]. 建筑钢结构进展, 2006, 8(5): 8-16.
- XUE Jian-yang, ZHAO Hong-tie, YANG Yong, et al. Research on the Bond-slip Behavior and Numerical Simulation of Steel Reinforced Concrete Columns by ANSYS Program [J]. Progress in Steel Building Structures, 2006, 8(5): 8-16.
- [19] 杨勇, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 型钢混凝土基准粘结滑移本构关系试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2005, 37(4): 445-449, 467.
- YANG Yong, ZHAO Hong-tie, XUE Jian-yang, et al. Experiment Study on Basic Bond-slip Constitutive Relationship Models Between Shaped-steel and Concrete in SRC Structures[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & technology: Natural Science Edition, 2005, 37(4): 445-449, 467.
- [20] 王隽. 组合梁中栓钉受力的有限元模拟分析[J]. 建筑钢结构进展, 2011, 13(3): 20-28.
- WANG Jun. Numerical Investigation into the Structural Behavior of Shear Connectors in Composite Beams [J]. Progress in Steel Building Structures, 2011, 13(3): 20-28.
- [21] NGUYEN H T, KIM S E. Finite Element Modeling of Push-out Tests for Large Stud Shear Connectors[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(10/11): 1909-1920.
- [22] 张劲, 王庆扬, 胡守营, 等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. 建筑结构, 2008, 38(8): 127-130.
- ZHANG Jin, WANG Qing-yang, HU Shou-ying, et al. Parameters Verification of Concrete Damaged Plastic Model of ABAQUS [J]. Building Structure, 2008, 38(8): 127-130.
- [23] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].