·机械工程·

文章编号：1003－1251(2024)05－0083－08

极限搭接长度下约束浆锚连接的弹簧－梁单元模型 *R* 参数研究

周文君，聂红鑫，王 璇，李令令

（吉林建筑科技学院 土木工程学院，长春 130114）

摘 要：为保证“弹簧－梁单元”模型能够可靠模拟约束浆锚连接粘结破坏前受力，选取文献中的约束浆锚连接试验试件，应用“弹簧－梁单元”模型对其进行有限元建模，并严格按照文献中方式加载，调整圆截面梁单元半径 *R* 参数值，通过模拟计算得到与试验接近的结果，分析影响 *R* 参数变化的因素。研究结果表明：*R* 值受加载形式、搭接钢筋直径及搭接长度、螺旋箍筋配筋形式影响极小；恰当选择 *R* 参数是准确模拟约束浆锚连接粘结破坏前受力的关键，工程应用中确定某种浆锚连接节点 *R* 参数时仅需考虑灌浆料强度和预留孔道直径两个因素。

关 键 词：约束浆锚；弹簧－梁单元；粘结破坏；有限元

中图分类号：TU311.41 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1003－1251.2024.05.013

Research on the *R* Parameter of the Spring-beam Element Model of Restrained Slurry Anchor Connection Based on the Limit Lap Length

ZHOU Wenjun，NIE Hongxin，WANG Xuan，LI Lingling

（Civil Engineering College，Jilin University of Architecture and Technology，Changchun 130114，China）

Abstract：In order to ensure that a spring-beam element model can reliably simulate the mechanical change before the bond failure of restrained anchor connection，the restraint anchor connection test specimens in the literature are selected. The spring-beam element model is applied to perform the finite element modeling. The method referred in the literature is strictly followed in loading. The parameter value of the radius *R* of the circular section beam unit is adjusted. The results are simulated close to the test，and the factors affecting the change of the circular section beam unit radius *R* parameter are analyzed. The results show that the variation of beam element radius is little affected by the loading form，the diameter and length of the lap reinforcement and the reinforcement form of the spiral stirrup. The proper selection of beam element radius is the key to accurately simulate the force before the bond failure of the restrained grouting anchor. In engineering practice，only the strength of grouting material and diameter of reserved hole should be considered to determine the radius of the beam element of the anchor joint.

Key words：restrained anchor；spring-beam element；bond failure；finite element

预制混凝土(PC)构件钢筋连接形式主要有套筒灌浆连接和约束浆锚连接两种。套筒灌浆连接技术适合框架结构中较大直径钢筋间的连接，在国内外应用广泛，发展较为成熟，对于设备和施

收稿日期：2023－12－07

基金项目：吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20221213KJ)

作者简介：周文君(1991—)，男，讲师，研究方向为计算力学；聂红鑫(1987—)，通信作者，女，讲师，研究方向为装配式结构设计。

工人员技术水平要求高,经济成本高;浆锚连接施工工艺简单,经济成本低,广泛应用于剪力墙结构体系,但相应技术应用标准尚不成熟。因此,对浆锚连接力学性能进行研究具有重要意义。

国内外学者在约束浆锚连接试验方面进行了深入研究。谢快等[1]设计了 33 个约束浆锚连接接头试件,对接头试件进行单向拉伸、高应力反复拉压、大变形反复拉压试验,证明浆锚连接强度足够,连接传力效果良好,是可靠预制 PC 构件的钢筋连接形式。吴东岳等[2]对一浆锚连接装配式剪力墙空间结构模型进行了低周反复加载试验,得出了浆锚连接在搭接区边缘存在两个新薄弱面的结论,建议在装配式剪力墙中重视连梁合理设计。郭家旭等[3]设计制作了 18 组连接件,并进行了拉拔试验,结果表明,为确保正常工作中充分发挥钢筋的力学性能,在实际工程应用中锚固长度不应小于钢筋直径的 10 倍。Wu 等[4]采用钢筋 – 金属波纹管浆锚连接实现了钢梁与预制混凝土柱的拼装,并研究了采用该连接形式的组合框架抗震性能。Hosseini 等[5-6]研究了螺旋箍筋间距对钢筋 – 金属波纹管浆锚连接锚固性能的影响,试验结果表明,螺旋箍筋间距为 25 mm 时滑移量较小。

试验是结构安全研究最为可靠的手段,但全面的试验研究成本投入大,一些极端情况下的结构设计可通过有限元计算并辅助少量试验论证,能确保研究准确性,并有效降低项目资金投入,控制设计成本。已有的大量试验研究成果为将有限元技术用于浆锚连接结构的研发提供了基础依据。石棚等[7]采用有限元法对钢筋插入式波纹管浆锚连接轴向拉伸作用下的力学行为进行了精细化模拟分析,并与试验结果对比,验证了数值模拟研究的准确性,但没给出浆锚搭接节点的标准建模工艺和材料选定方法。周文君等[8-9]提出了浆锚连接有限元计算“弹簧 – 杆单元”模型及“弹簧 – 梁单元”模型,其中应用“弹簧 – 梁单元”模型计算得到的浆锚连接装配式剪力墙混凝土损伤状态、滞回曲线及等效刚度与试验结果更接近,如满足建模条件,应用“弹簧 – 梁单元”模型模拟浆锚连接传力,其计算结果与实际相符。聂红鑫等[10]采用“弹簧 – 梁 – 块单元”模型研究钢筋套筒灌浆连接的有限元计算问题,给出了弹簧单元刚度与梁单元半径的理想控制范围。在极端荷载作用下,带约束浆锚连接的装配式结构可能由于局部失去柱或墙体,导致相邻构件的剪力与弯矩显著增大,搭接节点率先破坏,如继续应用现浇结构的有限元建模规则处理装配式结构模型并提交计算,会导致抗连续倒塌问题分析不准确。

结构模型建立中需考虑浆锚搭接薄弱情况,其抗连续倒塌分析结果会更加可靠。基于此,本文选取文献中的试验试件为研究对象,首先对其进行有限元建模,将模拟计算结果与试验结果进行对比,验证“弹簧 – 梁单元”模型的可靠性,然后进一步研究极限搭接长度下约束浆锚连接的“弹簧 – 梁单元”模型中圆截面半径 R 参数的影响因素,为后续“弹簧 – 梁单元”模型在工程中应用奠定基础。

1 模型描述

1.1 浆锚连接

浆锚连接是将预制构件表面外伸一定长度的不连续钢筋插入所连接预制构件对应位置的预留孔道内,钢筋与孔道内壁之间填充无收缩、高强度灌浆料,在钢筋搭接完成之后灌注砂浆并养护硬化。浆锚连接构造如图 1 所示。



图 1 浆锚连接构造

Fig. 1 The structure of slurry anchor connection

1.2 “弹簧 – 梁单元”模型

“弹簧 – 梁单元”模型将浆锚连接节点破坏视为两个阶段:第一阶段为粘结破坏,即砂浆与钢筋相对位移缓慢增加时段;第二阶段为滑移破坏,即砂浆与钢筋相对位移迅速增加时段。第一阶段采用梁单元模拟,第二阶段采用弹簧单元模拟,可准确反映浆锚连接发生强度破坏及之后的滑移脱离现象。

建模时,梁单元与弹簧单元间隔建立,替代砂浆。采用杆单元建立钢筋模型,采用块体单元建立混凝土模型,浆锚搭接节点范围内各混凝土块体单元为同尺寸六面体,钢筋杆单元与块体单元在沿金属波纹管轴向方向尺寸一致,杆单元节点和对应位置的块单元节点连线与金属波纹管轴向垂直。“弹簧 – 梁单元”模型如图 2 所示。

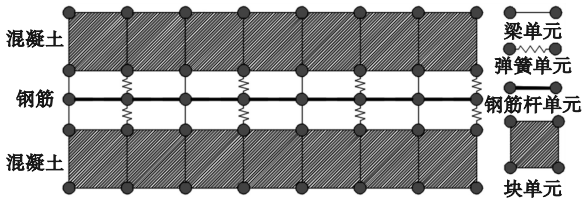


图 2　“弹簧 – 梁单元”模型

Fig. 2　The spring-beam element model

计算时,梁单元应力迅速下降前,即发生大变形前,搭接钢筋计算位移应与节点粘结破坏阶段试验滑移量相符,搭接节点计算承载力与搭接钢筋承载力接近。梁单元应力迅速下降后,即发生大变形后,搭接钢筋计算位移应与节点滑移破坏阶段试验滑移量相符。

2　材料本构模型

2.1　混凝土

ABAQUS 软件中含有 3 种本构模型用于模拟混凝土,即脆性断裂模型、弥散开裂模型、损伤塑性模型。在拉压反复荷载下,混凝土材料的受力性能变化比较复杂,且会产生损伤、刚度恢复等,损伤塑性模型适用于描述这种复杂受力状态下混凝土的本构行为,故本文采用损伤塑性模型模拟混凝土的力学性能[11-13]。

混凝土损伤塑性模型本构关系如图 3 所示。图中:ε_t 和 ε_c 分别为混凝土单轴受拉和受压时的应变;σ_t 和 σ_c 分别为混凝土单轴受拉和受压时的应力;d_t 和 d_c 分别为混凝土单轴受拉和受压损伤因子,按 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》取值;E_0 为混凝土弹性模量;σ_{t0} 和 σ_{c0} 分别为混凝土单轴受拉和受压时的屈服应力;σ_{cu} 为混凝土单轴受压极限强度;ε_t^{pl} 和 ε_t^{el} 分别为混凝土单轴受拉时考虑损伤和未考虑损伤的应变;ε_c^{pl} 和 ε_c^{el} 分别为混凝土单轴受压时考虑损伤和未考虑损伤的应变。

损伤塑性模型本构关系在单轴受拉时表现为:破坏应力达到 σ_{t0} 之前线性上升,之后软化下降。在单轴受压时表现为:应力达到 σ_{c0} 之前为线性上升段,然后为强化段,达到 σ_{cu} 后为软化下降段。

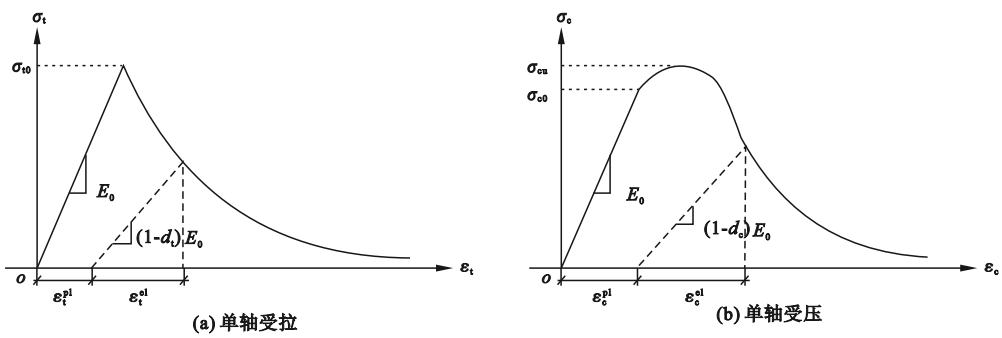


图 3　混凝土损伤塑性模型本构关系

Fig. 3　Constitutive relation of concrete damage plasticity model

2.2　钢筋

ABAQUS 软件常使用理想弹塑性模型、强化双折线模型、三折线模型模拟钢筋力学性能,一般屈服台阶对模型计算影响较小,因此本文采用强化双折线模型模拟钢筋力学性能[11-13]。钢筋强化双折线模型本构关系如图 4 所示。图中:ε 和 σ 分别表示应变和应力;E_s 为钢筋弹性模量;ε_y 为钢筋弹性应变;σ_y 为钢筋屈服应力;σ_u 为钢筋极限强度;ε_u 为钢筋极限应变。

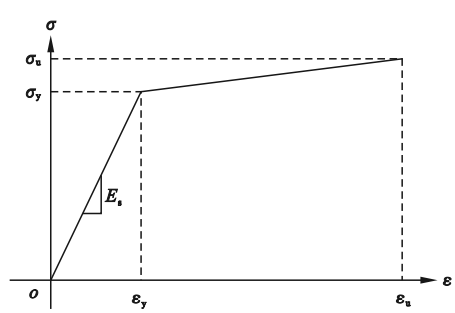


图 4　钢筋强化双折线模型本构关系

Fig. 4　Constitutive relation of the steel strengthen double fold line model

2.3　梁单元

在砂浆与钢筋及混凝土发生粘结破坏前,粘结破坏位置处的砂浆会经历弹性变形、塑性变形、断裂破坏过程,采用梁单元断裂本构模型模拟粘结破坏前砂浆行为。本文采用四折线模型模拟梁单元力学行为,本构关系如图 5 所示。图中:ε_e 为弹性极限应变;ε_p 为塑性极限应变;ε_b 为断裂应变;σ_1 表示梁单元强度,为砂浆抗压强度标准值;

σ_2 表示粘结破坏时梁单元保持的微弱粘结力；E_1 为梁单元弹性模量；E_2 为梁单元断裂模量。

梁单元断裂本构关系曲线分为四段：应变在 $0 \sim \varepsilon_e$ 阶段，为梁单元弹性变形阶段，应力线性增加（砂浆弹性特性）；应变在 $\varepsilon_e \sim \varepsilon_p$ 阶段，为梁单元塑性变形阶段，应力保持常值，变形增加（砂浆塑性特性）；应变在 $\varepsilon_p \sim \varepsilon_b$ 阶段，为梁单元断裂阶段，应力骤降（砂浆断裂）；应变大于 ε_b 阶段，梁单元应力保持极小常值（砂浆粘连），变形增加。

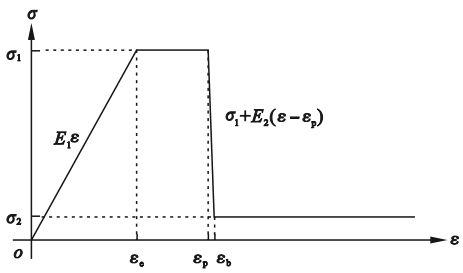


图 5 梁单元断裂模型本构关系

Fig. 5 Constitutive relation of the beam element fracture model

2.4 弹簧单元

本文采用非线性弹簧单元模拟砂浆与钢筋及混凝土发生粘结破坏后粘结破坏位置的滑移状态。由于本文研究浆锚连接节点粘结破坏前砂浆行为，该行为与非线性弹簧单元材料关系不大，故确定弹簧单元的虚设参数，下文中所有试件均采用该参数模拟弹簧单元行为。弹簧单元滑移模型力 – 位移关系如图 6 所示。图中：$\Delta_{\text{s-spring}}$ 为弹性极限拉伸变形；$\Delta_{\text{u-spring}}$ 为塑性极限拉伸变形；$F_{\text{u-spring}}$ 为极限拉力。

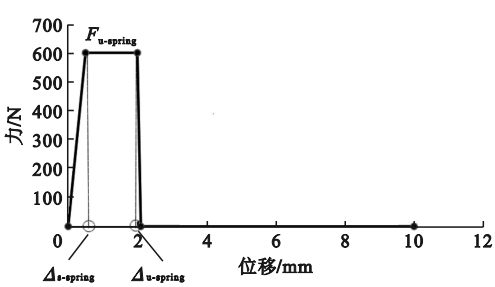


图 6 弹簧单元滑移模型力 – 位移关系

Fig. 6 Force-displacement relation of the spring element slip model

非线性弹簧单元力 – 位移关系曲线分为四段：位移在 $0 \sim \Delta_{\text{s-spring}}$ 阶段，反映梁单元断裂后砂浆与钢筋和混凝土间未产生滑动前的静摩擦力增长过程；位移在 $\Delta_{\text{s-spring}} \sim \Delta_{\text{u-spring}}$ 阶段，反映梁单元断裂后砂浆与钢筋和混凝土间产生滑动后的滑动摩擦力保持过程；位移大于 $\Delta_{\text{u-spring}}$ 阶段，反映梁单元断裂后滑动位移过大、砂浆与钢筋和混凝土间丧失作用力的过程。

3 “弹簧 – 梁单元”模型梁单元参数研究

3.1 试件设计及加载方案

3.1.1 试件设计

本文以文献[14]中的约束浆锚钢筋搭接连接试件为研究对象，试件截面尺寸为 150 mm × 150 mm，混凝土强度等级 C30，搭接纵筋是强度为 HRB400 的钢筋，直径分别为 12 mm 和16 mm，螺旋箍筋直径为 4 mm 和 6 mm，强度为 HPB235。以搭接长度和螺旋箍筋配箍率为变化参数，螺旋箍筋配箍率通过箍筋环径 D 和箍筋间距 S 控制。试件构造及尺寸如图 7 所示，设计参数如表 1 所示。表 1 中试件编号（如 16-4@20-23d-5）表达形式中四个部分分别表示搭接筋直径、配箍形式、搭接长度、加载方案，当搭接长度为 17.5d 时，省略表达搭接长度，试件编号（如 12-4@40-1）中三个部分分别表示搭接筋直径、配箍形式、加载方案。

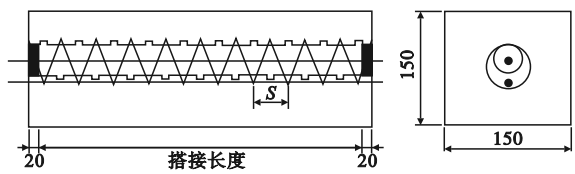


图 7 试件构造及尺寸（单位：mm）

Fig. 7 Structure and size of the testpiece (unit: mm)

3.1.2 试件加载

试件一端固定，另一端施加荷载，加载形式如图 8 所示。

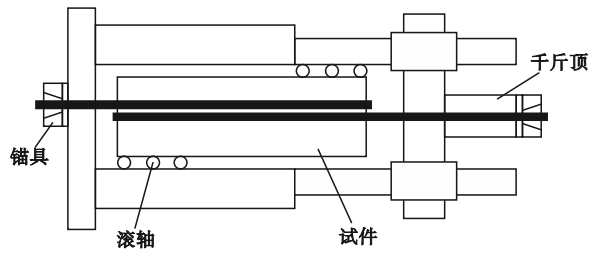


图 8 试件加载形式

Fig. 8 Test piece loading form

表 1 中加载方案以 JGJ 107—2016《钢筋机械连接技术规程》为基础，并加以调整[14]。以 f_{yk} 代表钢筋屈服强度标准值、ε_{yk} 代表钢筋应力达到屈服强度标准值时的应变，加载方案具体说明如下。

表 1　试件设计参数及加载方案

Table 1　Test piece design parameters and loading scheme

试件编号	搭接筋直径 d /mm	搭接长度 /mm	环径 D /mm	配箍形式	加载方案
12-4@40-1	12	210	60	ϕ4@40	1
12-4@40-2					2
12-4@40-4					4
12-4@40-10d-5		120			5
16-4@20-3	16	280		ϕ4@20	3
16-6@30-3				ϕ6@30	3
16-2×6@40-3				2ϕ6@40	3
16-4@20-20d-5		320		ϕ4@20	5
16-4@20-23d-5		368		ϕ4@20	5

方案 1:0→0.6f_{yk}(反复 5 次)→破坏。

方案 2:0→0.9f_{yk}(反复 20 次)→破坏。

方案 3:0→ – 0.7f_{yk}(反复 20 次)→0→0.9f_{yk}(反复 20 次)→破坏。

方案 4:0→2ε_{yk}(反复 5 次)→0→5ε_{yk}(反复 5 次)→破坏。

方案 5:0→0.9f_{yk}(反复 5 次)→0→2ε_{yk}(反复 5 次)→0→5ε_{yk}(反复 5 次)→破坏。

3.2　试件有限元模型

有限元模型中混凝土网格应用 ABAQUS 隐式计算 C3D8R 单元;钢筋网格应用 ABAQUS 隐式计算 T3D2 单元;浆锚连接梁单元网格应用 ABAQUS 隐式计算 B31 单元;浆锚连接弹簧单元网格应用 ABAQUS 隐式计算 DASHPOTA 单元。网格尺寸控制在 25 mm。“弹簧 – 梁单元”体系如图 9 所示。

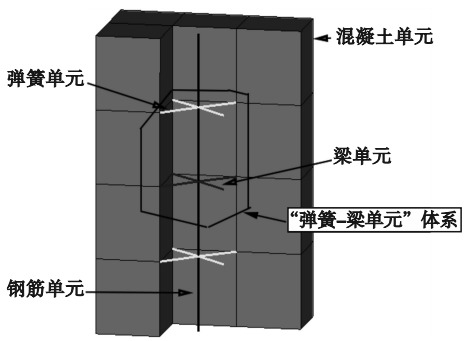


图 9　“弹簧 – 梁单元”体系

Fig. 9　Spring-beam unit system

有限元模型中钢筋材料参数按文献[14 – 15]给出,如表 2 所示,表中 σ_s 为屈服强度;有限元模型中混凝土材料及塑性损伤参数按文献[14]给出,如表 3 所示;有限元模型中梁单元材料参数按文献[14]给出,如表 4 所示,表中 E_1 取为灌浆料弹性模量,σ_1取为灌浆料抗压强度。

表 2　钢筋材料参数

Table 2　Steel materials parameters

钢筋直径/mm	密度/(kg·m^{-3})	E_s/MPa	泊松比	σ_s/MPa	σ_u/MPa	ε_u
12	7 850	201 000	0.3	424.6	620.4	0.205
16	7 850	201 000	0.3	447.1	697.1	0.205
4/6	7 850	201 000	0.3	307.0	453.0	0.242

表 3　混凝土材料及塑性损伤参数

Table 3　Concrete materials and plastic damage parameters

密度/(kg·m^{-3})	E_0/MPa	泊松比	混凝土塑性损伤参数				
			膨胀角/(°)	抗压强度比	偏心率	常应力比值	粘滞系数
2 500	30 000	0.2	40	1.16	0.1	0.67	0.05

表 4 梁单元材料参数

Table 4 Parameters of the beam unit material

E_1/MPa	σ_1/MPa	σ_2/MPa	ε_e	ε_p	ε_b
36 500	73.43	5	0.011	0.03	0.031

3.3 不同梁单元圆截面半径模拟结果

本文采用“弹簧 - 梁单元”模型对文献[14]中的试件 12-4@40-1、12-4@40-2、12-4@40-4、12-4@40-10*d*-5、16-4@20-3、16-6@30-3、16-2×6@40-3、16-4@20-20*d*-5、16-4@20-23*d*-5 进行反复模拟,对标试验数据,结果如表 5 所示。表中:滑移量指受力钢筋自由端的最大滑移量;残余变形指试件按加载方案加载至破坏前一步所留下的残余变形;破坏力指加载至破坏的最大承载力[10]。

表 5 不同梁单元圆截面半径模拟结果

Table 5 Simulation results of circular section radius of different beam units

试件编号	获取结果方法	梁单元圆截面半径 R/mm	位移量/mm	破坏力/kN	残余变形/mm	滑移量/mm
12-4@40-2	模拟	5.7	0.332	61.54	0.054 1	0.073 4
		5.6	0.345	57.29	0.085 5	0.080 5
		5.5	0.357	57.55	0.078 1	0.095 8
		(5.4)	(0.364)	(59.65)	(0.039 8)	(0.091 2)
		5.3	0.376	60.16	0.069 9	0.104 0
	试验			70	0	0.04
16-2×6@40-3	模拟	5.3		94.5	0.154	∞
		(5.4)		(105)	(0.071)	(∞)
		5.5		106	0.089	∞
		5.6	0.597 5	119	0.152 5	0.387 5
		5.7	0.514 6	112	0.064	0.149 2
	试验			120	0.020	∞
16-6@30-3	模拟	5.2	0.807 7	107.2	0.014 0	0.583 6
		5.3	0.807 7	107.2	0.014 0	0.594 6
		5.4		94.5	0.110 8	∞
		(5.5)		(107.0)	(0.073 8)	(∞)
		5.6	0.807 7	107.2	0.014 0	0.583 6
	试验			105	0.020 0	∞
16-4@20-3	模拟	5.7				
		5.3	0.705 5	105.2	0.094 2	0.519 0
		(5.4)		(95.2)	(0.132 7)	(∞)
		5.5		117.5	0.156 5	∞
		5.6	0.705 5	105.2	0.094 2	0.519 0
	试验			100	0.02	∞
12-4@40-1	模拟	(5.4)	(0.366 9)	(59.12)	(0.029 3)	(0.198 6)
		5.5	0.376 3	57.27	0.022 2	0.227 6
		5.6	0.359 1	57.79	0.032 9	0.198 8
		5.7	0.335 0	58.03	0.031 4	0.185 0
		5.3	0.399 3	57.67	0.017 8	0.217 7
	试验			62.00	0	0.150 0
12-4@40-4	模拟	(5.3)	(1.414 2)	(64.51)	(0.057 1)	(1.074 6)
		5.4	1.292 5	64.65	0.095 7	0.965 7
		5.5	1.433 5	65.88	0.205 5	1.117 2
		5.1	5.176 6	64.38	0.089 1	4.807 4
		5.2	1.338 2	63.54	0.077 3	0.984 4
	试验			71	0	1.32

续表

试件编号	获取结果方法	梁单元圆截面半径 R/mm	位移量/mm	破坏力/kN	残余变形/mm	滑移量/mm
12-4@40-10d-5	模拟	5.2		46.86	0.519 64	∞
		(5.3)		(55.52)	(0.267 75)	(∞)
		5.4	0.7148	58.96	0.187 26	0.268 56
		5.5		63.60	0.153 30	∞
		5.6		68.79	0.115 35	∞
	试验			63	0	∞
16-4@20-20d-5	模拟	5.2		101.51	0.313 21	∞
		5.3		113.34	0.325 69	∞
		(5.4)		(120.23)	(0.137 73)	(∞)
		5.5		127.39	0.102 37	∞
		5.6		131.36	0.090 88	∞
	试验			124	0.03	∞
16-4@20-23d-5	模拟	5.2	2.308 6	107.64	0.164 57	1.712 06
		5.3	3.158 7	112.01	0.204 53	2.620 49
		(5.4)	(3.666 2)	(107.11)	(0.190 45)	(3.168 83)
		5.5	3.354 8	116.14	0.145 99	2.888 89
		5.6	3.481 8	117.55	0.148 68	3.039 79
	试验			138	0.07	0.5

模拟破坏力与试验破坏力比较如图 10 所示,图中纵坐标 $k=\log_{F_t}F_s(R)$,其中 $F_s(R)$ 为不同 R 下模拟破坏力,F_t 为试验破坏力。模拟滑移量与试验滑移量比较如图 11 所示,图中纵坐标 $L=\log_{10}S_s(R)$,其中 $S_s(R)$ 为不同 R 下模拟滑移量,纵坐标采用对数坐标系,方便表达滑移量为无穷大时模拟滑移量与试验滑移量接近程度。

图 10 中曲线与基准线的接近程度反映模拟破坏力与试验破坏力的接近程度,可以看出,各种箍筋、搭接筋类型的浆锚节点在不同加载方案下,R 在 5.3 ~ 5.4 mm 附近时计算得到的模拟破坏力与试验破坏力比较接近。由图 11 可见,R 在 5.3 ~ 5.4 mm 附近时计算得到的模拟滑移量与试验滑移量比较接近。综合考虑破坏力、残余变形、滑移量的计算结果与试验结果接近程度,调整 HRB400 级搭接钢筋、HPB235 级螺旋箍筋、环径 $D=60$ mm 的约束浆锚搭接节点,仿真计算采用的梁单元截面半径 R 参数见表 5 中括号内数据。

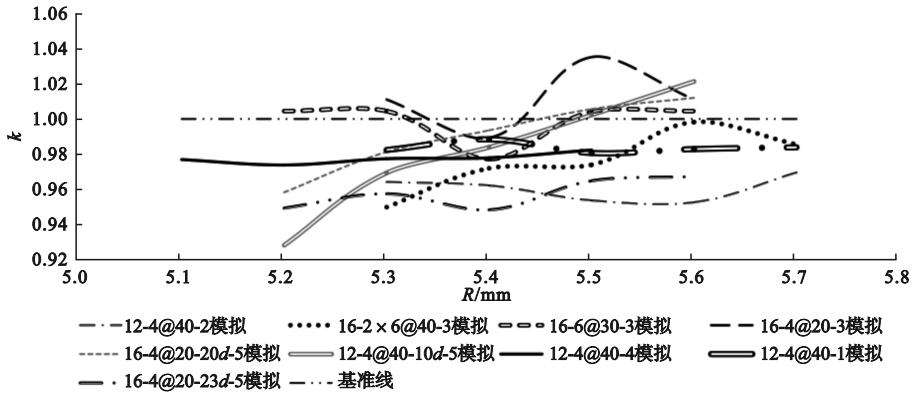


图 10　模拟破坏力与试验破坏力比较

Fig. 10　Comparison of simulated and test destructive forces

3.4　参数分析

对比模拟结果与试验数据中的破坏力、残余变形、滑移量,分析如下。

1)12-4@40-1、12-4@40-2 试件取梁单元参数 $R=5.4$ mm 时,12-4@40-4 试件取梁单元参数 $R=5.3$ mm 时,模拟结果与试验数据最为接近。12-4@40-1、12-4@40-2、12-4@40-4 试件只有加载形式不同,梁单元参数 R 理想取值波动在 0.1 mm 内,说明加载形式不同对梁单元参数 R 的取值影响不大。

2)16-4@20-3、16-2×6@40-3 试件取梁单元参数 $R=5.4$ mm, 16-6@30-3 试件取梁单元参数

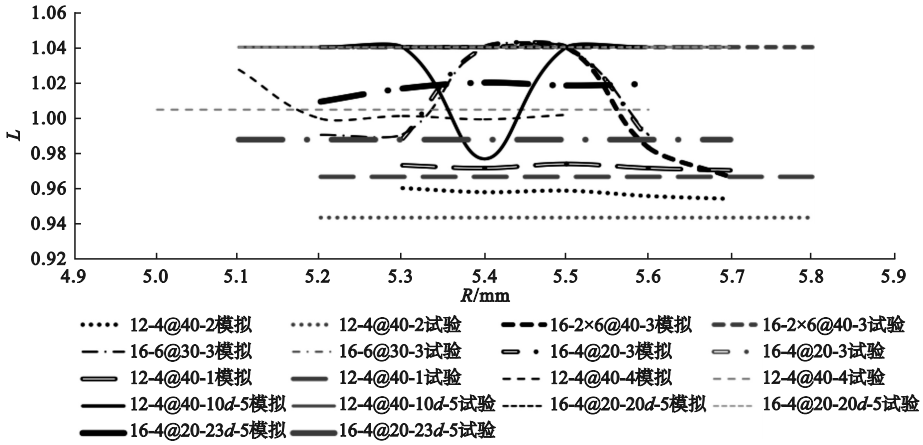


图 11 模拟滑移量与试验滑移量比较

Fig. 11 Comparison of simulated and experimental slip amounts

R = 5.5 mm时,模拟结果与试验数据最为接近。16-4@20-3、16-2×6@40-3、16-6@30-3 试件只有箍筋形式不同,梁单元参数 R 理想取值波动幅度在 0.1 mm 内,说明箍筋配置不同对梁单元参数 R 的取值影响不大。

3)12-4@40-10d-5 试件取梁单元参数 R = 5.3 mm时,16-4@20-23d-5 试件取梁单元参数R = 5.3 mm 时,模拟结果与试验数据最为接近,梁单元参数 R 理想取值波动幅度在 0.1 mm 内,说明钢筋浆锚搭接长度不同对梁单元参数 R 的取值影响不大。

4)12-4@40-1、12-4@40-2、12-4@40-4、12-4@40-10d-5、16-4@20-3、16-6@30-3、16-2×6@40-3、16-4@20-20d-5、16-4@20-23d-5 试件梁单元参数 R 理想取值波动幅度均在 0.2 mm 内,可知浆锚连接钢筋直径不同对梁单元参数 R 的取值影响亦不大。

5)图 10 中 R 在 5.3 ~ 5.4 mm 附近时模拟得到的破坏力比试验结果略低,应用“弹簧 - 梁单元”模型计算浆锚连接试件比试验测定结果保守,可作为工程计算中合适的 R 取值范围。

4 结论

1)应用“弹簧 - 梁单元”模型模拟约束浆锚连接节点受力行为,梁单元圆截面半径 R 理想取值不受节点受荷形式、节点箍筋配置情况、节点连接钢筋直径、节点钢筋搭接长度等参数影响;

2)应用“弹簧 - 梁单元”模型模拟能够替代约束浆锚连接节点受力试验,降低约束浆锚连接构件研发成本,且计算结果略保守;

3)工程中使用“弹簧 - 梁单元”模型进行约束浆锚连接节点设计,仅需考虑灌浆料强度和预留孔道直径因素,可通过试验与模拟对标方法确定某种浆锚连接节点 R 参数取值。

参考文献(References):

[1] 谢快,谷倩,王朝晖. 预制 PC 构件钢筋浆锚连接接头性能试验研究[J]. 混凝土,2018(2):124 - 129.
XIE K,GU Q,WANG Z H. Study on precast PC components connection of steel joint performance[J]. Concrete,2018(2):124 - 129. (in Chinese)

[2] 吴东岳,梁书亭,郭正兴,等. 浆锚连接装配式剪力墙空间结构模型试验研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(7):110 - 116.
WU D Y,LIANG S T,GUO Z X,et al. Experimental study on spatial structural model with grouted connected precast shear-wall[J]. Journal of Building Structures,2020,41(7):110 - 116. (in Chinese)

[3] 郭家旭,胡少伟,齐浩,等. 考虑灌浆料龄期的钢筋—金属波纹管浆锚连接锚固性能试验研究[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文),2022:1 - 10(2022 - 06 - 28)[2023 - 10 - 07]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.tu.20220624.1705.002.html. DOI:10.11835/j.issn.2096 - 6717.2022.056.
GUO J X,HU S W,QI H,et al. Experimental study on anchorage property of rebar-metallic bellows slurry anchor connection considering grout age[J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering,2022:1 - 10(2022 - 06 - 28)[2023 - 10 - 07]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.tu.20220624.1705.002.html. DOI:10.11835/j.issn.2096 - 6717.2022.056. (in Chinese)

[4] WU Y T,XIAO Y,ANDERSON J C. Seismic behavior of PC column and steel beam composite moment frame with posttensioned connection[J]. Journal of Structural Engineering,2009,135(11):1398 - 1407.

[5] HOSSEINI S J A,RAHMAN A B A,OSMAN M H,et al. Bond behavior of spirally confined splice of deformed bars in grout[J]. Construction and Building Materials,2015,80:180 - 194.

[6] HOSSEINI S J A,RAHMAN A B A. Effects of spiral confinement to the bond behavior of deformed reinforcement bars subjected to axial tension[J]. Engineering Structures,2016,112:1 - 13.

(下转第 96 页)