

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.06.016



植筋梁中植筋端头加设箍筋对梁 受力性能的影响

阎西康^{a,b}, 梁琛^a, 梁琳霄^a, 庞玉松^a

(河北工业大学 a. 土木与交通学院; b. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

摘要:为研究植筋梁中植筋端头加设箍筋对梁受力性能的影响,对 3 根植筋深度为 $20D$ 、 $25D$ 、 $30D$ (D 为植筋的直径) 的植筋端头未加设箍筋的植筋梁进行静载试验,对 3 根植筋深度为 $20D$ 、 $25D$ 、 $30D$ 的未加设箍筋的植筋梁和 3 根植筋深度为 $20D$ 、 $25D$ 、 $30D$ 的加设箍筋的植筋梁进行循环荷载试验,并用 ANSYS 模拟植筋深度为 $20D$ 、 $25D$ 、 $30D$ 的植筋梁进行静力受弯力学性能的模拟分析,绘制跨中荷载-挠度曲线,研究植筋随荷载的应力变化,进而反映有无加设箍筋对梁受力性能的影响,并整理了植筋端头加设箍筋的端头应变和未加设箍筋植筋端头应变的关系。循环荷载试验及有限元分析表明:在植筋端头加设箍筋可以缓解植筋端头应力集中现象,并提高植筋梁的延性、开裂荷载、极限荷载,降低了植筋应变、残余变形。

关键词:箍筋;有限元分析;混凝土梁;受力性能

中图分类号: TU375.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)06-0116-07

Effect of reinforcing stirrups on the mechanical performances of reinforcing bar at ends

Yan Xikang^{a,b}, Liang Chen^a, Liang Linxiao^a, Pang Yusong^a

(a. School of Civil and Transportation Engineering; b. Development Research Center of Civil Engineering of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China)

Abstract: In order to study the beam end anchorage bar with effect of stirrups on the structural behavior of beams, static loading tests were carried out for three root anchorage depths of $20D$, $25D$, $30D$, respectively from the anchorage end without a stirrup anchorage beam. ANSYS finite element simulations for anchorage depths of $20D$, $25D$, $30D$ of the anchorage beam were also conducted to investigate the flexural mechanical properties, the drawing span load deflection curves, the bar with load stress changes. It is found that the reaction has no additional effect on the beam stirrups. The cyclic loading tests and FE simulations show the addition of stirrups at the end of the anchorage can alleviate the concentration and improve the general ductility, anchorage beam cracking load, ultimate load stress of anchorage end, and reduce the reinforcement strain, as well as the residual deformation.

Keywords: stirrup; finite element analysis; concrete beam; mechanical behavior

收稿日期:2017-09-06

基金项目:河北省住房和城乡建设厅项目(2014-124)

作者简介:阎西康(1966-),男,教授,博士生导师,主要从事工程结构加固与维修、工程施工新技术研究, E-mail: 1773807155@qq.com。

Received: 2017-09-06

Foundation item: Project of Hebei Province Housing and Urban-Rural Construction (2014-124)

Author brief: Yan Xikang(1966-), professor, doctoral supervisor, main research interests: new technology of engineering structure reinforcement and maintenance and engineering construction, E-mail: 1773807155@qq.com.

植筋加固技术,是一项既简捷又有效的连接锚固技术^[1]。植筋是指在混凝土、墙体岩石等基材上钻孔,然后注入高强植筋胶,再插入钢筋或型材,胶固化后将钢筋与基材粘接为一体。与其他加固方法^[2-3]相比,植筋加固技术具有方便快捷、步骤简单等优点,在工程加固中广泛应用。

目前,Shieh-beygi 等^[4]、Yilmaz 等^[5]、Cook 等^[6]、Mu 等^[7]、Eligehausen 等^[8]对植筋的研究中拉拔试验较多,集中在植筋孔径、使用环境、植筋深度对拉拔性能的影响。舒睿彬等^[9]、郑晓芬等^[10]通过拉拔试验得出了静力试验下植筋系统中植入钢筋与植筋胶、植筋胶与混凝土界面的粘结机理,但没有指出循环荷载下是否适用^[9-10]。对植筋框架节点抗震性能的研究^[11]表明,植筋深度足够时,植筋系统的锚固能力能达到抗震要求,但地震荷载与桥梁使用中承受的循环荷载作用时间和频率并不相同,植筋结构在循环荷载作用下是否具有同样的效果,还需深入探讨。张建荣等^[12]、徐莉艳^[13]、文国想等^[14]针对植筋梁受弯性能设计了试验,但由于植筋深度不足,植入钢筋未屈服,发生了脆性破坏。对植筋梁进行的静载和循环荷载试验^[15-16]发现,植筋端头未加设箍筋的植筋梁在疲劳试验中发生脆性破坏,但对植筋梁中植筋端头加设箍筋对受力性能的影响研究较少,所以,在植筋端头加设箍筋进行对比试验具有重要意义。

笔者通过对 6 个植筋梁进行循环荷载试验,并通过有限元模拟 6 个植筋梁进行静载试验,研究植筋端头加设箍筋对植筋梁的受力性能的影响和植筋端头应变的变化规律。

1 植筋梁的受弯试验

1.1 试验构件概况

静载试验植筋深度为 $20D$ 、 $25D$ 、 $30D$,植筋端头未设箍筋的静载试验植筋梁编号分别为 J1、J2、J3,循环荷载试验植筋端头未设箍筋的植筋梁编号为 P1、P2、P3,加设箍筋的植筋梁为 P4、P5、P6。各试验梁的详细情况见表 1,尺寸见图 1~图 3,配筋情况见图 4。在植筋端头贴应变片直接测得试验中的植筋应变数值。通过静载试验和循环荷载试验分析植筋端头加设箍筋是否能改善植筋梁各方面的受力性能。

表 1 试验梁明细表
Table 1 Test beam list

梁编号	埋置深度/mm	是否加设箍筋	加载方式
J1	500	否	静载

续表 1

梁编号	埋置深度/mm	是否加设箍筋	加载方式
J2	620	否	静载
J3	750	否	静载
P1	500	否	循环荷载
P2	620	否	循环荷载
P3	750	否	循环荷载
P4	500	是	循环荷载
P5	620	是	循环荷载
P6	750	是	循环荷载

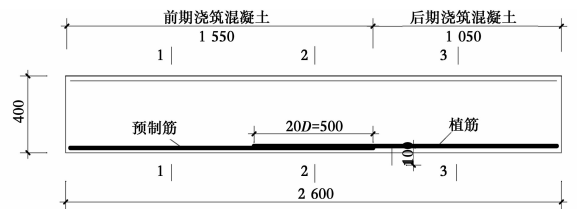


图 1 J1、P1、P4 梁尺寸图

Fig. 1 J1, P1, P4 beam size drawing

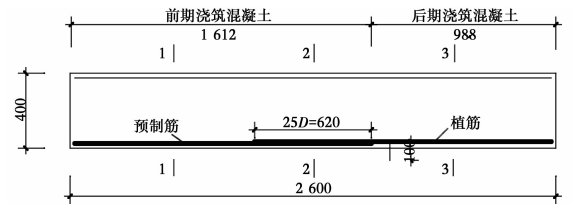


图 2 J2、P2、P5 梁尺寸图

Fig. 2 J2, P2, P5 beam size drawing

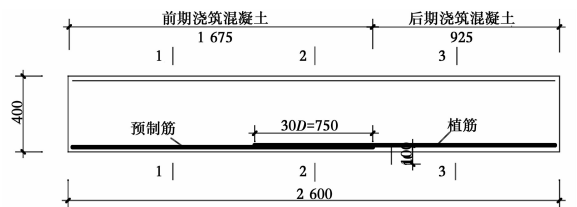


图 3 J3、P3、P6 梁尺寸图

Fig. 3 J3, P3, P6 beam size drawing

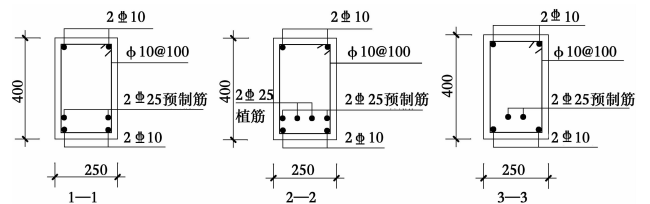


图 4 试验梁配筋图

Fig. 4 Test beam reinforcement diagram

混凝土采用 C30 商品混凝土,纵向受拉钢筋、植纵向钢筋采用 HRB400,直径为 25 mm。架立筋、箍筋采用 HPB300,直径为 10 mm,箍筋间距 100 mm。植筋胶均采用德国慧鱼植筋胶。

1.2 加载方案

静载试验采用集中力分级(每级 10 kN)加载方案。临近开裂荷载时,每级加载改为 5 kN 一级,直到产生第一条裂缝。求得开裂荷载后,再转换为每级 10 kN。临近破坏时,改为位移加载,速度采用 1 mm/min,直至试验梁破坏。

疲劳试验在 100T 加载架下进行,采用跨中集中力加载。疲劳试验开始前,先进行预加载,检查设备是否工作正常。之后进行一次静载试验,分级加载至疲劳上限,每级 10 kN。目的是对比试件经过疲劳后的性能变化。随后分级卸载,每级 30 kN。再进行疲劳试验,上限 90 kN,下限 50 kN,频率为 7 Hz。加载至 1 万次、10 万次、50 万次、100 万次、150 万次,停机进行一个循环的静载试验。当加载至 200 万次时,对试件施加静载直至破坏。

1.3 试验结果分析

1.3.1 静载试验梁跨和循环试验梁中荷载-挠度曲线 图 5 为植筋端头未加设箍筋的 3 根植筋梁荷载-挠度曲线。由图 5 可知,曲线分为 3 个阶段,第 1 阶段 3 条曲线几乎重合;第 2 阶段,到达开裂荷载以后,3 条曲线的斜率发生变化,由几乎重合变为分离上升,直至峰值;第 3 阶段,达到峰值之后,均有下降趋势,植筋深度越大下降越平缓,植筋梁的延性越好。综合 3 条曲线,变化规律与植筋梁的植筋深度有直接关系,3 条曲线的斜率表明,试验梁的变形能力随植筋深度的增加而增强。图 6 与图 7 分别为循环荷载加载完毕后植筋端头未加设箍筋和植筋端头加设箍筋的植筋梁荷载-挠度曲线。与静载时植筋梁的荷载-挠度曲线不同,开始阶段两图中 3 条曲线均没有重合,且经过峰值之后下降段均比较平缓。比较图 6 与图 7,当荷载相同时,植筋端头加设箍筋的植筋梁挠度比植筋端头未加设箍筋的植筋梁挠度减小 10%左右。由此可见,在植筋端头加设箍筋可以有效提高植筋梁的刚度。

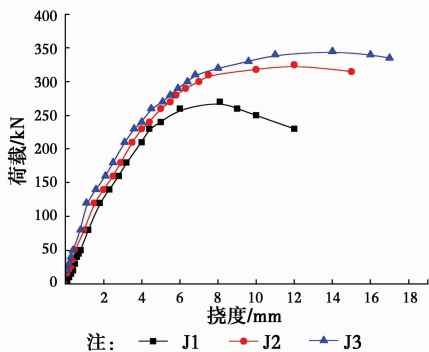


图 5 静载试验梁 J1~J3 跨中荷载-挠度曲线

Fig. 5 Static load test beam J1-J3 span load - deflection curve

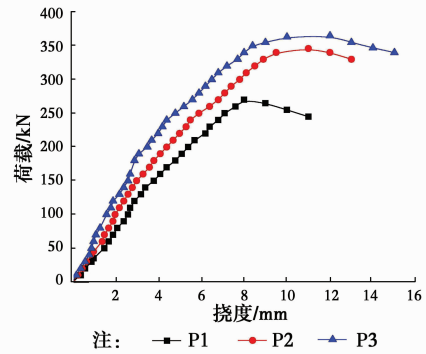


图 6 循环荷载试验梁 P1~P3 跨中荷载-挠度曲线

Fig. 6 Cyclic loading test beam P1-P3 span load - deflection curve

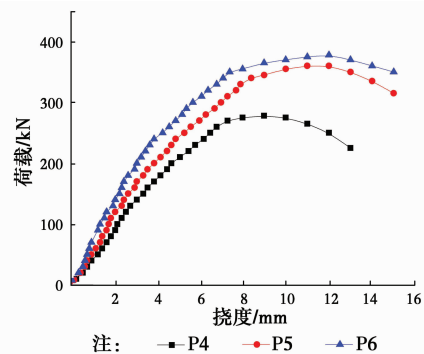


图 7 循环荷载试验梁 P4~P6 跨中荷载-挠度曲线

Fig. 7 Cyclic loading test beam P4-P6 span load - deflection curve

1.3.2 循环荷载试验梁的跨中残余挠度与循环次数曲线 图 8 为循环荷载试验梁的跨中残余挠度与循环次数曲线。残余挠度是指混凝土植筋梁在完全卸载后植筋梁相对于加载前的挠度。混凝土植筋梁在经过循环荷载作用后,0 万次和 10 万次跨中残余挠度逐渐增大,此过程中的跨中残余挠度明显增大,主要是由于植筋与混凝土的错位引起的。随后的循环加载中期,植筋梁内部趋于稳定,跨中的残余挠度逐渐趋于稳定。将图中 6 条曲线分为 3 组,可以从两个方面进行分析。第一方面:跨中残余挠度随植筋深度的增加而减小。在循环荷载作用的过程中,植筋深度越深,植筋梁的抗变形能力越强,植筋梁的整体刚度随植筋深度的增加而增大。第二方面:当植筋深度相同时,植筋端头加设箍筋的植筋梁,跨中残余挠度均小于植筋端头未加设箍筋的植筋梁,所以,植筋端头加设箍筋对植筋梁的抗变形能力有良好的改善作用。分析其原因,植筋端头加设箍筋可以改善植筋端头的受力状态,约束植筋端头,从而提高梁的整体性。由此可以进一步确定在植筋端头加设箍筋能提高植筋梁的整体刚度。

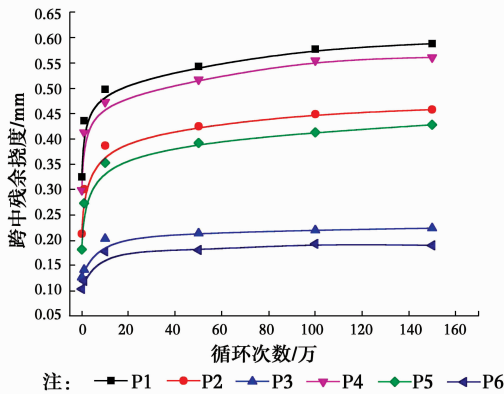


图 8 循环荷载试验梁的跨中残余挠度与循环次数曲线

Fig. 8 Residual deflection and cycle number curves of beams in cyclic load test

1.3.3 循环荷载植筋梁植筋端头应变分析 图 9 为循环荷载植筋端头应力图。P1、P2、P3 分别为植筋深度为 $20D$ 、 $25D$ 、 $30D$ 的植筋端头未设箍筋的 3 根植筋梁。P4、P5、P6 分别为植筋深度为 $20D$ 、 $25D$ 、 $30D$ 的植筋端头加设箍筋的植筋梁。比较 P1、P2、P3 梁荷载与植筋端头应变曲线可以看出,当循环荷载加载前 50 万次时,曲线随着荷载的增加可分为两部分,其中应变较高的部分为植筋端头未设箍筋的 P1、P2、P3,而应变较低的为植筋端头加设箍筋的 P4、P5、P6,说明在循环荷载初期,植筋端头加设箍筋可以有效减小植筋梁植筋端头的应变。当循环荷载继续加载,6 根植筋梁的植筋端头应力不同程度增大,观察在第 100 万次和 200 万次循环荷载后,植筋梁植筋端头应变呈现出有规律上升。第一,将 P1、P2、P3 的曲线分为一组,P4、P5、P6 的曲线分为一组,植筋深度为植筋梁中植筋端头应变的直接影响因素。植筋深度越大,植筋端头的应变随着荷载逐级增加越小,在植筋端头应变与荷载曲线中表现出植筋深度越大,曲线的斜率越小,也就是应变随荷载增加变化较小。所以,增加植筋深度对改善植筋梁植筋端头的应变有显著作用。第二,当植筋深度相同时,植筋端头加设箍筋的植筋梁,其植筋端头的应变总会小于植筋端头未加设箍筋的植筋梁的植筋端头应变,即 P4 的曲线随着荷载的增加,其位置都在 P1 之下。P5 与 P2、P6 与 P3 的位置关系与之相同。分析数据得,未进行循环荷载时,植筋端头加设箍筋的植筋梁植筋端头应变比未加设箍筋的植筋梁植筋端头应变降低 43.7%;加载至 50 万次时,降低 27.5%;加载至 100 万次时,降低 25.8%;加载至 200 万次时,降低 20.4%。由于植筋梁变形植筋端头承受荷载为水平和竖直两个方向,当加设箍筋时,其承受的剪力由箍筋承担,因此,加设箍筋的植筋端

头应变较未加设箍筋的要小。所以,当植筋深度相同时,植筋端头加设箍筋的植筋梁植筋端头的应变均小于未加设箍筋的植筋梁植筋端头的应变,并且随着循环荷载的进行,两者存在一定的转化关系。

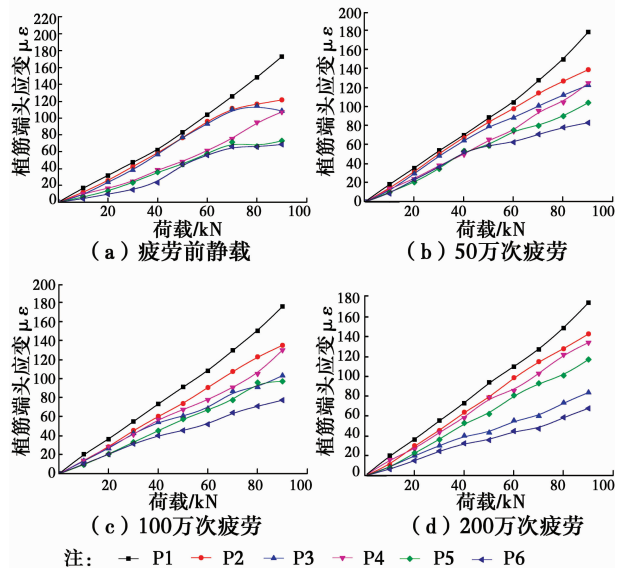


图 9 循环荷载植筋端头应力图

Fig. 9 Cyclic loading anchorage end stress diagram

1.3.4 不同受力状态下植筋端头应变分析 与同样植筋深度、植筋直径下拉拔实验结果对比,承受相同极限荷载时,受弯构件所需植筋深度更小。同样荷载下,受弯构件植筋端头应变较小的原因是:受弯作用时,植筋端头的受力和单纯受拉不同,弯剪构件由于植筋梁变形,所承受荷载分为水平和竖直两个方向,水平方向受拉,竖直方向受剪,当受力相同时,受弯构件的水平方向分力较拉拔时小,剪力由箍筋承担,所以,植筋梁中的所需植筋深度较小。《混凝土结构加固设计规范》中按单纯受拉计算植筋深度,但实际工程中植筋受弯剪作用,根据所需承载力计算出的植筋深度过长,实际施工时不宜操作,所以,植筋深度的计算应参考植筋受弯剪作用的数据。植筋端头加设箍筋因抗剪承载力提高承担的竖向分力增大,植筋梁承担的极限承载力增大,植筋深度可以适当减小。

2 有限元分析

采用分离式有限元方法建立 J1、J2、J3 的试验梁验证模型,混凝土采用 solid65 单元,钢筋采用 link8 杆单元^[17-19],用钢筋与混凝土之间公用节点来模拟植筋胶的粘结作用。有限元模型计算得出的开裂荷载、极限荷载、受拉钢筋应力等与试验值的相对误差均小于 10%,有限元分析结果与试验结果吻合良好,证实了植筋梁有限元模型可靠性良好。试验

没有对植筋端头加设箍筋的植筋梁进行静载试验,所以,建立植筋梁有限元模型,植筋端头加设箍筋的植筋梁编号为 GJ1、GJ2、GJ3。图 10 为植筋梁网格划分,图 11 为钢筋单元图,图 12 为加设箍筋局部钢筋单元图。

表 2 有限元模拟梁明细

梁编号	埋置深度/mm	是否加设箍筋	加载方式
J1	500	否	静载
J2	620	否	静载
J3	750	否	静载
GJ1	500	是	静载
GJ2	620	是	静载
GJ3	750	是	静载

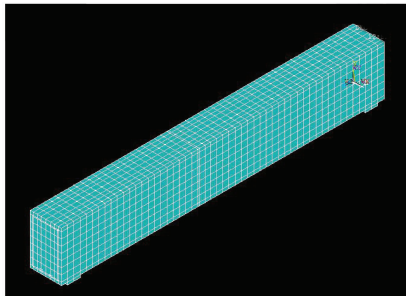


图 10 植筋梁网格划分

Fig. 10 Reinforcement beam mesh

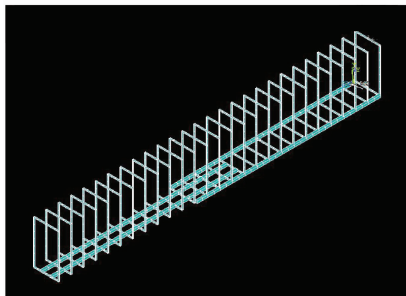


图 11 钢筋单元图

Fig. 11 Reinforcement units

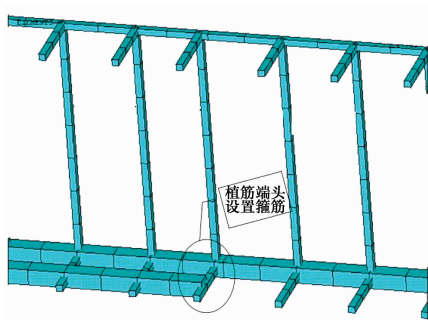


图 12 加设箍筋局部钢筋单元图

Fig. 12 Adding stirrups to local reinforcement units

在建立的 J1、J2、J3 试验梁有限元米线的基础上,再建立分别与 J1、J2、J3 相对应的 3 根植筋端头加设箍筋试验梁 GJ1、GJ2、GJ3 的有限元模型。

2.1 有限元模拟结果

表 3、表 4、表 5 分别为试验梁的开裂荷载、极限荷载和最大应力值。

表 3 混凝土开裂荷载

植筋混凝土梁模型编号	开裂荷载/kN	增长/%
J1	35	
GJ1	38	11.4
J2	40	
GJ2	44	10.0
J3	40	
GJ3	41	2.5

表 4 植筋混凝土梁的极限荷载

植筋混凝土梁编号	极限荷载/kN	极限荷载增加/%	极限挠度/mm	极限挠度增加/%
J1	274		6.215	
GJ1	310	13.1	8.51	36.9
J2	332		11.2	
GJ2	364	9.6	13.55	20.1
J3	335		10.89	
GJ3	340	1.5	11.3	3.8

表 5 植筋最大应力对比

植筋混凝土梁模型编号	最大应力值/MPa	差值/%
J1	323.3	
GJ1	419.36	29.7
J2	456.4	
GJ2	527.6	15.6
J3	470.5	
GJ3	523.2	11.

综合表 3、表 4、表 5,对比有限元模拟的 6 根梁的植筋混凝土梁开裂荷载、植筋混凝土梁的极限荷载、植筋最大应力,植筋端头加设箍筋的植筋梁在钢筋的受力性能和混凝土的受力性能以及植筋梁整体的受力性能均优于未设置箍筋的植筋梁,说明对植筋端头处加设箍筋可以明显提高植筋混凝土梁的受力性能。

2.2 植筋端头应变对比图

图13为有限元模拟的植筋梁在循环荷载前植筋端头应变-荷载曲线。模拟结果与实验数据对比,此图与循环荷载植筋梁植筋端头应力分析中的图9(a)受力环境相同,其中,J1、J2、J3为植筋端头未加设箍筋的植筋梁,GJ1、GJ2、GJ3为植筋端头加设箍筋的植筋梁。随着荷载逐级增大,6条曲线清晰地自成两组。第2组GJ1、GJ2、GJ3植筋端头的应变均低于第1组J1、J2、J3的植筋端头的应变。分析植筋端头应变发现:植筋端头加设箍筋的植筋梁的应变比植筋端头未加设箍筋的植筋梁的应变减小41.3%。分析图9(a)植筋端头应变发现:植筋端头加设箍筋的植筋梁的应变比植筋端头未加设箍筋的植筋梁的应变减小43.7%,说明在循环荷载施加之前的静载阶段,植筋端头加设箍筋可以减小植筋在工作过程中的应变。分析植筋梁在循环荷载加载过程中50万次、100万次、200万次的植筋端头应变发现,加设箍筋与否与植筋端头的应变有一定转化关系,且与植筋深度无关。所以,结合建立的有限元模型的数据和试验梁测得的植筋梁植筋端头的应变,整理出植筋梁有无箍筋时的植筋端头应变关系。

$$\begin{cases} \alpha_1 = 0.563\alpha_2 & N = 0 \\ \alpha_1 = (0.629 + 0.24\ln N)\alpha_2 & N \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: N 为循环荷载次数; α_1 为植筋端头加设箍筋的植筋端头应变; α_2 为植筋端头未加设箍筋的植筋端头应变。

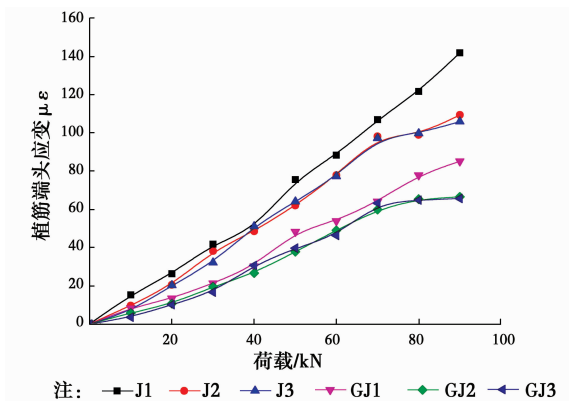


图13 有限元模拟植筋梁植筋端头应变对比图

Fig. 13 The strain comparison diagram of the end-head of the implant is simulated by finite element method

3 结论

分析静载试验和循环荷载试验荷载-挠度曲线,在植筋梁的受力环境相同时,植筋端头加设箍筋可以有效减小跨中挠度,所以,在植筋梁的植筋端头加设箍筋可以有效提高植筋梁的抗变形能力。6根植

筋梁在循环荷载下的残余挠度对比表明:植筋梁的整体刚度随植筋深度的增加而增大;植筋端头加设箍筋能有效提高植筋梁的整体刚度。

静载试验和循环荷载试验证明植筋端头加设箍筋可以改善植筋梁中植筋的受力环境和应变。循环荷载下植筋端头应变表明,植筋深度越大,植筋端头的应变随荷载增加的变化率越小;当植筋深度相同时,在同样的受力状态下,植筋端头加设箍筋的植筋梁应变均小于植筋端头未加设箍筋的植筋梁的应变,且差值随循环荷载增加而减小。植筋梁受弯剪作用所需植筋深度较受拉时更小,实际工程中植筋受弯剪作用,植筋端头加设箍筋有利于提高弯剪作用下植筋梁的受力性能。

用ANSYS模拟植筋端头加设箍筋的植筋梁进行静载试验,结果表明,植筋端头加设箍筋可以提高植筋梁的开裂荷载、极限荷载,并且其增长率在一定范围内随着植筋深度的增加而减小。通过分析有限元模拟的数据和试验所测数据,整理出植筋端头加设箍筋的植筋端头应变和未加设箍筋植筋端头应变的关系且与植筋深度无关。该关系能与实验数据良好吻合,能实现植筋梁中植筋端头有无箍筋时的植筋端头应变的转化。

参考文献:

- [1] 淳庆,邱洪兴. 钢筋混凝土结构的植筋技术及工程应用[J]. 特种结构, 2006, 23(1): 86-89.
CHUN Q, QIU H X. Rebar planting technology and engineering application of reinforced concrete structure [J]. Special Structure, 2006, 23 (1): 86-89. (in Chinese)
- [2] 聂建国,王宇航. 钢-混凝土组合梁疲劳性能研究综述[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 1-11.
NIE J G, WANG Y H. Summary of fatigue properties of steel-concrete composite beams [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(6): 1-11. (in Chinese)
- [3] 丁智,张霄,吴云双,等. 碳纤维布与芳纶布加固钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36 (Sup2): 270-276.
DING Z, ZHANG X, WU Y S, et al. Carbon fiber and aramid fabric reinforcement test of reinforced concrete beams [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36 (Sup2): 270-276. (in Chinese)
- [4] SHIEH-BEYGI B, PIETRUSZCZAK S. Numerical analysis of structural masonry: Mesoscale approach [J]. Computers & Structure, 2008, 86 (21/22): 958-973.
- [5] YILMAZ S, ÖZEN M A, YARDIM Y. Tensile

- behavior of post-installed chemical anchors embedded to low strength concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 10(47): 861-866.
- [6] COOK R A, COLLINS D M, KLINGNER R E. Bond stress model for design of adhesive anchors [J]. *ACI Structure Journal*, 1993, 90(5): 514-524.
- [7] MU J C, XI H F, WU Y H, et al. Numerical simulation analysis of pullout test of planting steel-A new reinforcement technique [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 1067(163): 3739-3744.
- [8] ELIGEHAUSEN R, MALLE R, REHM G. *Fastenings with bonded anchors* [M]. Berlin: Betonwerk Fertigteil-technik, 1984: 825-829.
- [9] 舒睿彬, 张建荣, 张春. 自由拉拔植筋系统的粘结滑移受力机理分析[J]. *结构工程师*, 2008, 64(5): 65-70.
SHU R B, ZHANG J R, ZHANG C. Analysis of the mechanism of bond slip force in the free drawing bar planting system [J]. *Structural Engineer*, 2008, 64(5): 65-70. (in Chinese)
- [10] 郑晓芬, 张建荣, 艾永江. 植筋胶与混凝土界面结合性能的试验研究[J]. *结构工程师*, 2016, 32(5): 139-145.
ZHENG X F, ZHANG J R, AI Y J. Experimental study on interfacial adhesion between adhesive and concrete interface [J]. *Structural Engineers*, 2016, 32(5): 139-145. (in Chinese)
- [11] 邓宗才, 钟林杭. 植筋框架节点抗震性能研究[J]. *国防交通工程与技术*, 2009(5): 11-13.
DENG Z C, ZHONG L H. Research into the anti-seismic performance of RC structures with post-installed reinforcement [J]. *Traffic Engineering and Technology for National Defence*, 2009(5): 11-13. (in Chinese)
- [12] 张建荣, 吴进, 杨建华, 等. 植筋搭接混凝土梁静力及疲劳受弯试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2005, 26(5): 96-103.
ZHANG J R, WU J, YANG J H, et al. Experimental study on static and fatigue bending of steel bonded lap joint beam [J]. *Journal of Building Structures*, 2005, 26(5): 96-103. (in Chinese)
- [13] 徐莉艳. 植筋搭接梁静力受弯性能分析[J]. *安徽建筑*, 2010(4): 48-50.
XU L Y. Static bending performance analysis of steel bonded lap beam [J]. *Anhui Architecture*, 2010(4): 48-50. (in Chinese)
- [14] 文国想, 程材渊. 植筋及植筋混凝土梁力学性能的试验研究[J]. *佳木斯大学学报*, 2011, 29(5): 667-672.
WEN G X, CHENG C Y. Mechanics of concrete beam and experimental study on anchorage performance of planting reinforcing bar [J]. *Journal of Jiamusi University*, 2011, 29(5): 667-672. (in Chinese)
- [15] 阎西康, 魏兴磊, 等. 不同植筋深度下的植筋梁疲劳试验研究[J]. *天津: 河北工业大学*, 2017.
YAN X K, WEI X L, et al. Experimental study on fatigue of reinforced concrete beams under different planting depth [J]. *Tianjin: Hebei University of Technology*, 2017. (in Chinese)
- [16] 孔德震. 植筋混凝土梁疲劳性能的试验研究与分析[D]. *天津: 河北工业大学*, 2014
KONG D X. Experimental study and analysis of fatigue performance of steel reinforced concrete beam [D]. *Tianjin: Hebei University of Technology*, 2014. (in Chinese)
- [17] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
WANG X M. ANSYS numerical analysis of engineering structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese)
- [18] 何政, 欧进萍. 钢筋混凝土结构非线性分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
HE Z, OU J P. Nonlinear analysis of reinforced concrete structures [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [19] 郝文化. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
HAO W H. ANSYS civil engineering application example [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2005. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)