

钢筋-地聚物超高性能混凝土黏结性能研究

Bond Behavior of Ultra High Performance Geopolymer Concrete and Steel Bar

仵鹏涛^{1,2}, 谢智杰³

(1. 天津市建筑材料集团(控股)有限公司, 天津 300381; 2. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384;
3. 中建三局集团北京有限公司, 北京 102600)

摘要: 为研究地聚物超高性能混凝土(GUHPC)与钢筋的黏结性能,通过钢筋拉拔试验研究了钢筋与GUHPC的黏结性能,探讨了钢筋直径、钢筋类型以及混凝土抗压强度等参数对黏结性能的影响,并运用ABAQUS软件,建立实体钢筋单元,使用Python二次开发,批量建立Connector单元,同时考虑材料本构,并与试验结果对比验证。研究表明:极限黏结强度随直径的增大而减小;GUHPC黏结强度较普通地聚物混凝土受外形影响更大;GUHPC与钢筋具有更优秀的黏结性能;同时验证采用Connector单元模拟方法可以较为准确地模拟钢筋和GUHPC黏结性能,发展曲线符合一般规律。

关键词: 地聚物混凝土; 钢筋; 黏结滑移; 数值模拟

中图分类号: TU528.41

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249(2025)03-0001-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.03.001

WU Pengtao^{1,2}, XIE Zhijie³

(1. Tianjin Building Construction Materials Group (Holding) Co., Ltd., Tianjin 300381, China;
2. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;
3. China Construction Third Engineering Bureau Group Beijing Co., Ltd., Beijing 102600, China)

Abstract: To investigate the bonding properties of geopolymer ultra-high performance concrete (GUHPC) with steel bars. The bonding properties of rebar and GUHPC have been studied through steel bar drawing tests. The influence of parameters such as steel bar diameter, steel bar type and concrete compressive strength on the bonding performance was discussed. ABAQUS software was used to establish solid steel bar units, and Python was used for secondary development to set up Connector units in batches. At the same time, the material constitutive was considered, and the experimental results were compared and verified. The results show that the ultimate bonding strength decreases with the increase of diameter. The bonding strength of GUHPC is more affected by the shape than that of ordinary polymer concrete. GUHPC has better bonding performance with steel bars. Meanwhile, it is verified that the Connector unit simulation method can simulate the bonding performance between reinforcing bars and GUHPC more accurately, and the development curve conforms to the general law.

Key words: geopolymer concrete; steel bar; bond behavior; numerical simulation

基金项目: 国家自然科学基金(52308518); 天津科技企业特派员资助项目(23YDTPJC00100); 天津市建筑结构防护与加固重点实验室开放基金(FHJG-2024-03)。

作者简介: 仵鹏涛(1989—), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 高性能与超高性能混凝土结构防护。

收稿日期: 2024-12-25

0 引言

随着我国城镇化快速发展,混凝土作为主要建筑材料被广泛应用。传统混凝土中的水泥作为胶凝材料,其生产过程中不仅会排放大量温室气体 CO₂,还会释放二氧化硫、氮氧化物等多种有害气体,导致严重的生态破坏。开发低碳环保的新型胶凝材料已成为迫切需求。地聚物是一种新型无机胶凝材料,由于其生产过程能耗少,显著减少污染物排放,同时具有早期强度高、耐久性和耐火性能优异等特点,越来越受到业内学者们的注意^[1-2]。在钢筋混凝土结构设计中,要实现结构构件之间的可靠传力,必须保证钢筋与混凝土界面黏结的可靠性。

近十年来,众多学者对钢筋与混凝土之间的黏结性能进行了研究。Ranjbar 等^[3]研究表明,地聚物混凝土具有略高于普通混凝土的钢筋黏结强度,且黏结强度受养护条件影响,一定程度升温养护能提升黏结强度;米渊等^[4]通过钢筋与 PVA-ECC 拉拔试验研究了钢筋与 PVA-ECC 的粘结破坏机理和破坏形态,分析了钢筋类型、锚固长度、保护层厚度和配箍率等因素对钢筋与 PVA-ECC 粘结性能的影响;肖彦君^[5]研究了常温及高温后地聚物再生砖骨料混凝土与钢筋黏结-滑移性能,提出了高温后地聚物再生砖骨料混凝土拉拔试件剩余黏结强度和峰值滑移变化公式并建立了高温后黏结滑移模型;张海燕等^[6]研究钢筋-普通地聚物混凝土黏结性能发现,在混凝土立方体平均抗压强度为 48 MPa 时,不同直径钢筋黏结强度分析,钢筋直径 10~25 mm,极限黏结强度下降 2.5 MPa;赵灿晖等^[7]研究了含粗骨料超高性能混凝土(UHPC)与带肋钢筋的黏结性能;王毅红等^[8-10]研究发现钢筋与 UHPC 的黏结强度随着钢筋直径的增加而增加,黏结强度与保护层厚度成正比,与黏结长度成反比;Cai 等^[11]研究了工程水泥基复合材料(ECC)中变形钢筋在直接拉拔条件下与混凝土的黏结行为,提出了一种考虑钢筋影响的有限元分析模型,并用试验结果进行了验证;魏巍等^[12]对钢-聚乙烯混杂纤维水泥基复合材料与钢筋黏结锚固试件的性能进行 ABAQUS 有限元分析,结果表明,计算分析结果与试验结果吻合较好,所建立的计算模型准确可靠;王权等^[13-14]

对高强钢筋与超高性能混凝土黏结性能进行了研究,提出了黏结锚固长度设计建议公式;李鑫平等^[15]采用中心拉拔试验方法,分析钢筋锈蚀率、黏结锚固长度、钢筋直径和纤维掺量等因素对黏结性能的影响。

目前对地聚物超高性能混凝土(GUHPC)与钢筋黏结性能进行研究较少。基于此,研究混凝土强度、钢筋直径、钢筋外形等对钢筋-GUHPC 黏结强度的影响,将试验数据应用 ABAQUS 建立有限元模型,进一步分析研究钢筋与 GUHPC 之间的黏结性能。

1 试验

1.1 试件制作

超高性能地聚物混凝土主要原材料及配合比见表 1。

表 1 超高性能地聚物混凝土配合比
Table 1 The mix ratio of ultra high performance geopolymer concrete / (kg/m³)

矿粉	硅灰	粉煤灰	硅微粉	细砂	中砂	粗砂	硅酸钠溶液	氢氧化钠	高效减水剂	水
900.0	150.0	116.0	162.0	521.0	369.0	178.0	594.0	105.0	11.2	80.0

按照设计的配合比准备各种材料;向搅拌机中依次加入砂子、硅粉、水泥、纳米材料,搅拌 5 min,确保干料搅拌均匀;加入设计配合比中水的 70%搅匀,之后加入减水剂,用剩余 30% 的水来涮洗盛减水剂的容器并将其加入到搅拌机中;待搅拌均匀之后,按配合比加入称量好的钢纤维,继续搅拌 5 min;将拌合物自搅拌机中卸出,浇入准备好的模具中。中心拉拔试件采用水域养护 2 d,室内养护 28 d,试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm,所有试件基础掺 2.5% 含量钢纤维,每组三个试件,当同一组试件试验数据误差超过 20% 时重新做该组试件,试件属性见表 2。其中,钢筋拔出试件制作同时每组

表 2 中心拉拔试件属性
Table 2 Properties of the specimens

试件编号	试件强度 /MPa	钢筋类型	粘接长度/d	保护层厚度 /mm	破坏特征
GP-14-1	100	带肋	3	68	拔出破坏
GP-8-1	100	光圆	3	71	拔出破坏
GP-8-2	100	带肋	3	71	钢筋拉断

注:试件编号 GP-14-1 中 GP 表示为地聚物混凝土,14 代表中心拉拔试验试件中钢筋直径为 14 mm,1 代质表钢筋外形为带肋钢筋,2 为光圆钢筋,其余同。

浇筑三个 100 mm × 100 mm × 100 mm 立方体抗压试件，用来测量地聚物混凝土抗压强度。钢筋材料性能见表 3。

表 3 钢筋材料属性
Table 3 Properties of steel bars

钢筋直径 /mm	钢筋牌号	钢筋类型	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa
8	HPB300	光圆	332.62	456.73
8	HRB335	带肋	366.35	460.80
14	HRB400	带肋	482.63	567.60

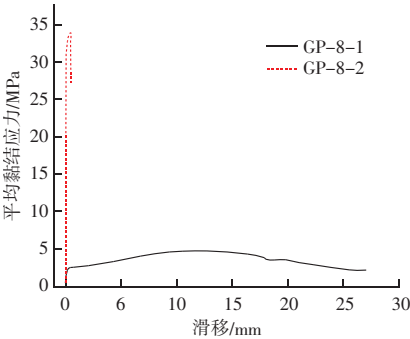
1.2 试验过程

试验采用 WE-300 型号试验机，加载速度为 1.2 mm/min。先放置试件；在试件自由端和加载端各布置两个位移传感器；加载开始时，为了使试件与夹具下端板完全接触，先进行力加载，随后转化为位移加载，直至试件破坏或者测试的黏结力不再大幅度下降时停止加载。

1.3 试验结果和分析

由图 1 (a) 可知，滑移量为钢筋自由端和混凝土的相对滑移，钢筋直径为 14 mm 的地聚物混凝土试件为拔出破坏，极限黏结强度 τ_u 为 30.34 MPa，钢筋直径为 12 mm 的地聚物混凝土试件为钢筋拉断破坏，极限黏结强度 τ_u 至少为 46.67 MPa。随着钢筋直径的增大，GUHPC 和钢筋之间的黏结强度逐渐减小，破坏形式由钢筋拉断破坏转变为拔出破坏，不同钢筋直径黏结强度不同，钢筋直径 12 mm 增加到 14 mm，极限黏结强度下降 16.33 MPa。

由图 1 (b) 可知，8 mm 光圆钢筋为拔出破坏，极限黏结强度 τ_u 为 4.72 MPa，8 mm 带肋钢筋为钢筋拉断破坏，极限黏结强度 τ_u 为 34.34 MPa。光圆钢筋的拔出破坏 $\tau-s$ 曲线可分为陡升段，缓升段，下降段和残余段四个阶段，陡升段钢筋－UHPGC 黏



(b) 不同钢筋外形曲线

图 1 不同钢筋曲线

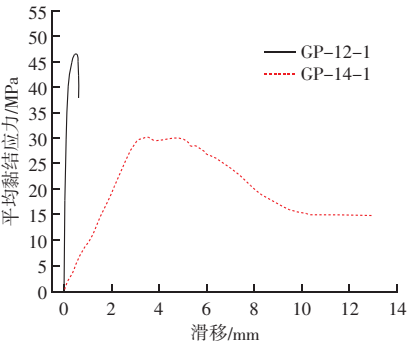
Fig. 1 Different reinforcement curves

结强度迅速上升，之后黏结强度缓慢上升进入缓升段，其黏结力为摩擦作用和光圆钢筋因生产表面粗糙产生的咬合力，然后光圆钢筋进入下降段，最后进入残余段，残余段主要黏结强度为光圆钢筋和混凝土的摩擦。带肋钢筋与光圆钢筋有很大提升，故钢筋－GUHPC 受钢筋外形影响较普通地聚合物混凝土（GNC）更大。

2 数值模拟

2.1 数值模型建立

使用 ABAQUS 软件建立钢筋－GUHPC 黏结滑移模型。模型主要包括混凝土、钢筋及两者的接触部分。钢筋采用直径 14 mm，强度为 HRB400 级，试件黏结长度为直径的 3 倍，黏结段总长度 42 mm，边界条件为混凝土加载面全截面铰接。混凝土及钢筋均采用三维实体单元 C3D8R 单元，单元网格划分，钢筋及混凝土黏结区段均为 2 mm，且黏结区段钢筋与混凝土网格共节点，两者之间的相互作用采用 Python 二次开发批量建立 Connector 单元来实现，共建立 352 个连接单元，模型如图 2 所示，运用 Connector 单元来实现钢筋与混凝土之间的黏结滑移，并通过 $\tau-s$ 曲线来对比验证。三维实体模型钢筋节点众多，必须批量设置，通过二次开发来实现，如图 3 所示；为避免应力集中导致计算结果的偏差，运用 Coupling 命令建立耦合参考点；ABAQUS 软件混凝土采用塑性损伤模型，需计算地聚物混凝土损伤因子——塑性应变，受拉应力设定在峰值之前为弹性应力，之后为塑性阶段。损伤参数 d 根据 Sidoroff 能量等价原理，受损材料与无损材料弹性余能形式相同，应力改为等效应力。最终得出关系式 $\sigma = E_0(1 - d)^2 \varepsilon$ ，



(a) 不同钢筋直径曲线

材料科学

则 $d = 1 - \sqrt{\frac{\sigma}{E_0 \varepsilon}}$ ，其他混凝土基本参数见表 4。

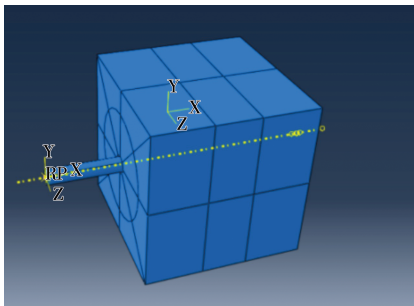


图 2 三维模型图

Fig. 2 3D model of specimen

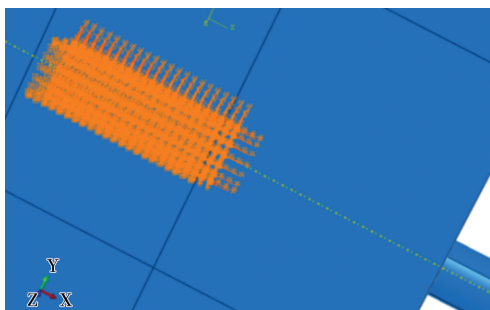


图 3 python 批量建立 connector 单元

Fig. 3 Connector units established by python

表 4 混凝土材料基本参数

Table 4 Basic parameters of model

密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比	粘性系数
2 900	37	0.2	0.005

2.2 模型结果验证

采用和试验相同的加载方式和速率，模拟结果与试验对比如图 4 所示，试验极限黏结强度为 30.34 MPa，对应混凝土与钢筋的极限滑移为 14.1 mm，模拟结果为极限黏结强度 30.21 MPa，对应黏结滑移 15.5 mm，模拟结果基本一致，且从图中可知加载段黏结滑移曲线与试验曲线发展一致，可以较为准确

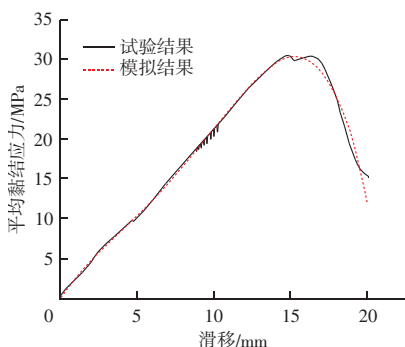


图 4 黏结-滑移曲线试验与模拟对比图

Fig. 4 Comparison diagram of test

模拟钢筋与混凝土之间的黏结滑移。

2.3 模型分析

由图 5 可知，钢筋应力从自由端至加载端逐渐增加，与钢筋实际应力规律相符，加载端应力处于较小时，黏结应力就已经沿全长分布，并随着荷载等级的增加而增加。在加载端附近有应力突变增加，故在加载端附近黏结应力最大。

图 6 为极限黏结强度对应荷载作用下混凝土损伤，试件破坏沿黏结面整体破坏，与试验实际破坏形式一致。

图 7 为整个试件最大应力云图，钢筋加载端应力最大，在黏结段由于黏结力作用下减小，自由端钢筋应力为零，符合试验规律。

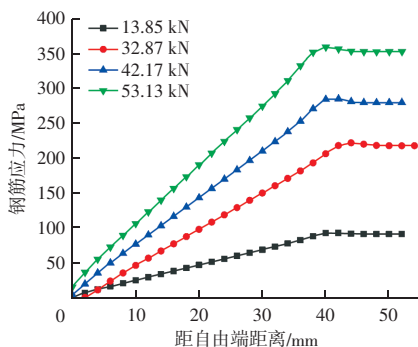


图 5 不同荷载等级钢筋应力沿路径变化

Fig. 5 The stress of steel bar on different load along path

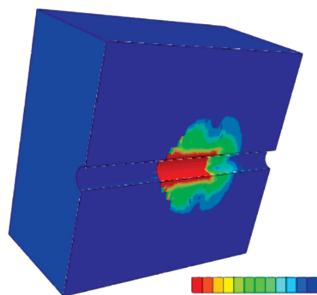


图 6 混凝土损伤云图

Fig. 6 Concrete damage

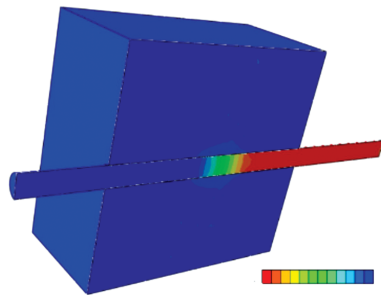


图 7 试件应力云图

Fig. 7 The specimen stress

3 结论

基于地聚物基超高性能混凝土配合比, 制备了钢筋-混凝土拉拔试件。研究了试件的破坏形态、粘结机理、粘结应力-滑移曲线以及影响因素。通过建立有效的钢筋-地聚物基超高性能混凝土有限元三维实体模型, 并进行参数化分析, 分析了钢筋与地聚物基超高性能混凝土之间的粘结性能。得到了以下结论:

(1) 钢筋-GUHPC 极限黏结强度随着钢筋直径的增大而减小。

(2) 钢筋-GUHPC 极限黏结强度受钢筋直径及钢筋外形较 GNC 影响更大。

(3) 为保证试件不发生拔断破坏, 测量钢筋与超高性能地聚物混凝土极限黏结强度宜采用 HRB500 级、HRB600 级等高强钢筋。

(4) GUHPC 与钢筋具有更优秀的黏结性能, 100 MPa 级地聚物混凝土, 钢筋直径小于等于 12 mm, 当保护层厚度满足不发生劈裂破坏时, 使用 HRB400 级及以下轴心受拉构件钢筋直锚长度 3 d 即可满足构件直锚要求。

(5) 采用 Python 二次开发批量建立 Connector 单元模拟钢筋-超高性能地聚物混凝土黏结性能是可行的。

(6) 利用 Connector 单元模拟可以较为准确的模拟钢筋-超高性能地聚物混凝土的极限黏结强度, 发展曲线符合一般规律。

参 考 文 献

[1] 徐海燕, 杨雪雷, 王爱国, 等. 地质聚合物基防护涂料及其性能提升技术的研究进展 [J]. 材料导报, 2022, 36 (19): 232-238.

- [2] 陈永亮, 张轶轲, 陈铁军, 等. 碱激发高钙粉煤灰发泡地聚合物的制备及机理 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (8): 2787-2798.
- [3] RANJBAR N, TALEBIAN S, MEHRALI M, et al. Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites [J]. Composites Science & Technology, 2016, 122 (JAN. 18): 73-81.
- [4] 米渊, 潘金龙, 周青山. 钢筋与纤维增强水泥基复合材料粘结性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2016, 46 (15): 69-73.
- [5] 肖彦君. 常温及高温后地聚物再生骨料混凝土与钢筋粘结-滑移性能研究 [D]. 福建: 福建工程学院, 2023.
- [6] 张海燕, 闫佳, 吴波. 地聚物混凝土与钢筋黏结性能研究 [J]. 土木工程学报, 2016, 49 (7): 107-115.
- [7] 赵灿晖, 李浩稻, 邓开来. 钢筋与粗骨料超高性能混凝土粘结性能试验研究 [J]. 西南交通大学学报, 2019, 54 (5): 937-944.
- [8] 王毅红, 赵小琴, 姚圣法, 等. 高强变肋钢筋与混凝土间粘结锚固性能梁式试验 [J]. 重庆大学学报, 2020, 43 (9): 32-40.
- [9] 秦凯强, 张建莉, 向勇, 等. 不同筋材种类混凝土结构锚固性能综合对比研究 [J]. 公路, 2025, 70 (2): 380-384.
- [10] 胡翱翔, 梁兴文, 史庆轩, 等. 高强钢筋与超高性能混凝土黏结性能试验研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2021, 53 (4): 534-544, 610.
- [11] CAI J, PAN J. Bond behaviours of deformed steel rebars in engineered cementitious composites (ECC) and concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020. 119082.
- [12] 魏巍, 刘诗恒, 毛维浩. 钢-聚乙烯混杂纤维水泥基复合材料与钢筋粘结锚固性能有限元分析 [J]. 特种结构, 2021, 38 (6): 21-23.
- [13] 王权. 高强钢筋与超高性能混凝土界面粘结性能试验研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2022.
- [14] 李艳艳, 赵银磊, 武凯, 等. 高强钢筋与超高性能混凝土粘结性能及可靠度分析 [J/OL]. 工程力学, 1-10 [2024-12-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20230731.1427.026.html>.
- [15] 李鑫平, 车佳玲, 刘海峰, 等. 工程水泥基复合材料与锈蚀钢筋黏结性能研究 [J]. 重庆大学学报, 2025, 48 (1): 90-97.