文章编号:1005-0523(2024)02-0033-08

带肋钢筋与高强水泥土黏结性能试验研究

李青强[1],刘银芳[2],雷祖祥[1],周宇航[1],胡扬扬[1],胡椿华[1],耿大新[1],童立红[1]

(1. 华东交通大学江西省地下空间技术开发工程研究中心,江西 南昌 330013; 2. 福建岩土工程勘察研究院有限公司,福建 福州 350001)

摘要:【目的】为揭示带肋钢筋和高强水泥土之间的黏结作用机理,利用既有水泥土固化剂配比制作了33个尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的立方体拉拔试样。**【方法】**通过直接拔出试验,分析锚固长度、水泥土保护层厚度和钢筋直径对钢筋水泥土黏结性能的影响。**【结果】**试验表明:钢筋与水泥土界面黏结强度随着锚固长度的增加而减小,钢筋和水泥土最佳保护层厚度为钢筋直径的2至3倍。**【结论】**随着钢筋直径的增加,直径大于10 mm后,钢筋直径增长变化对黏结强度影响幅度变小。

关键词:高强水泥土;界面黏结强度;固化剂

中图分类号:TU52;U414 **文献标志码:**A

本文引用格式:李青强,刘银芳,雷祖祥,等. 带肋钢筋与高强水泥土黏结性能试验研究[J]. 华东交通大学学报,2024,41(2):33-40.

Experimental Study on Adhesion Performance between Ribbed Steel Bar and High-Strength Cement Soil

Li Qingqiang[1], Liu Yinfang[2], Lei Zuxiang[1], Zhou Yuhang[1], Hu Yangyang[1], Hu Chunhua[1], Geng Daxin[1], Tong Lihong[1]

(1. Jiangxi Underground Space Technology Development Engineering Research Center, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Fujian Geotechnical Engineering Exploration and Research Institute Co., Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract:【Objective】The aim of this study is to uncover the bonding mechanism between ribbed steel bars and high-strength cementitious soil. Thirty-three cubic pull-out specimens with dimensions of 150 mm×150 mm×150 mm were produced using an existing cementitious soil solidifier ratio.**【Method】**Through direct pull-out tests, the influence of anchorage length, cementitious soil cover thickness, and steel bar diameter on the bonding performance between steel bars and cementitious soil was analyzed.**【Result】**The experiments indicate that the bonding strength at the interface between steel bars and cementitious soil decreases with the increase of anchorage length. The optimal cover thickness for steel bars and cementitious soil is between 2 to 3 times the diameter of the steel bar.**【Conclusion】**As the diameter of the steel bar increases, the impact of the diameter growth on the bonding strength decreases, especially when the diameter exceeds 10 mm.

Key words: high-strength cement soil; interfacial bonding strength; curing agent

Citation format: LI Q Q, LIU Y F, LEI Z X, et al. Experimental study on adhesion performance between ribbed

收稿日期:2023-02-28

基金项目:国家自然科学基金项目(52238009)

steel bar and high-strength cement soil[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(2): 33−40.

【研究意义】水泥土搅拌桩支护结构一般由水泥土挡墙与型钢组成，凭借其造价低廉，施工高效，且具有较好的抗渗和挡土功效等优势，发展和应用前景广阔[1]。然而，在面临深大基坑及复杂周边环境的工况时，水土侧压力几乎由型钢单独承担[2]，水泥土墙体强度较低故而难以完全发挥筋体与水泥土界面的黏结特性。开展带肋钢筋与高强水泥土黏结性能试验研究，对于深大基坑及复杂周边环境的工程，理解并提升黏结性能有助于设计更为合适的支护结构，以适应高侧压、不均匀载荷等复杂情况具有重要的实际意义。

【研究进展】近年来，型钢水泥土搅拌墙技术[3]在提倡可持续发展和低碳经济的时代得以推广，同时部分学者针对型钢与水泥土之间相互作用展开了研究。周燕晓等[4]通过室内拉拔试验探究了型钢水泥土复合构件中黏结应力的分布情况及变化规律。张冠军等[5]结合室内模拟试验和工程实践验证了型钢-水泥土之间黏结力的有效性，并提出了有效回收型钢的验算方法。顾士坦[6]研究分析了型钢拔出的受力机理，以期优化工程设计，提高施工效率和质量。

目前，针对钢筋和水泥土协同变形作用机理的研究相对缺乏。梁仁旺等[7]和于宁等[8]初次开展钢筋与水泥土握裹力试验，为钢筋水泥土应用于支护工程提供试验依据。陈昌富等[9]以玻璃纤维增强聚合物（GFRP）作为受力筋体，开展GFRP筋-水泥土中心拉拔试验，分析影响界面黏结强度的各项因素，并构建出完整的黏结强度预测模型。黄佳彬[10]通过拉伸试验、抗压强度测定以及研究推导，建立了描述GFRP筋-水泥土界面蠕变行为的模型。Chen等[11]针对GFRP筋胶结土（GTRCS）的界面黏结强度力学特性，研究了不同含水率、水泥掺入比和养护龄期对GTRCS抗拉强度和无侧限抗压强度的影响规律。张根宝等[12]采用MatDEM软件模拟了GFRP筋与水泥土界面相对位移的变化，进一步阐述界面黏结滑移机制。

【创新特色】综上所述，现有的加筋水泥土黏结性能研究主要围绕特殊筋体与普通水泥土展开，难以直接指导服务于实际工程，而普通带肋钢筋与高强水泥土尚未见文献报道。研究通过深入了解带肋钢筋与高强水泥土之间的黏结性能，优化工程设计，提高结构的整体承载力和稳定性，从而保证工程安全。**【关键问题】**基于此，本文以带肋钢筋和经过固化改良后的高强水泥土为研究对象，通过直接拉拔试验分析锚固长度、水泥土保护层厚度和钢筋直径对钢筋-水泥土黏结性能的影响，绘制拉拔荷载-位移曲线，探究带肋钢筋与高强水泥土界面黏结特性，为实际工程设计加筋水泥土构件提供参考依据。

1 钢筋−水泥土拉拔试验

1.1 试验材料

本试验用土取自南昌市地铁2号线东延沈桥站基坑开挖的粉质黏土。先将原料土放入烘箱中进行烘干处理，温度控制在105 ℃左右，时间超过8 h，之后用工具击碎烘干后的土样，过5 mm筛子去除大粒径杂质，最后将制备好的土放置于密封容器中以备试验使用。本试验使用的固化剂材料均由合作单位提供，能够保证其有效性。

1）水泥：采用普通硅酸盐水泥（P.O.）42.5级水泥，密度为3.05~3.15 g/cm^3，各项指标都符合《通用硅酸盐水泥》（GB 175—2007）标准。

2）水玻璃：普通硅酸钠水溶液，呈无色半透明黏稠状。

3）生石灰：白灰色状粉末，其主要成分为CaO，灼烧后氧化钙含量不低于98%。

4）聚丙烯酰胺（polyacrylamide，PAM）：一种线形高分子聚合物，呈现白色颗粒状。

1.2 试验装置及方法

设计制作适用于本试件的拉拔模具。模具由下底板、侧面挡板和中隔板三部分组成。侧面挡板根据要求开有不同直径的小孔，与相匹配的亚克力套管相连。

拉拔加载设备采用UTM5305型万能试验机，其构造包括：测量系统、驱动系统、控制系统和电脑，可以根据不同的负荷要求进行分级加载，搭配自制试件夹具共同使用。

1.3　试件设计与制备

为了保持水泥土强度的一致性，选用课题组内研制的单一固化剂，具体配比为：水泥掺入比24%，水玻璃掺量8%，生石灰掺量2%，PAM掺量1.5%；同时为了试验操作便捷，自由端钢筋设置长30 mm，拉拔端钢筋长180 mm，试验所用芯材统一使用HRB400带肋钢筋。通过改变内插亚克力管的长度、钢筋直径及钢筋芯材所处截面位置，以实现对锚固长度、钢筋直径和保护层厚度与黏结强度之间的相关性研究。试件设计如图1所示，其中a为亚克力套管长度，b为水泥土保护层厚度。

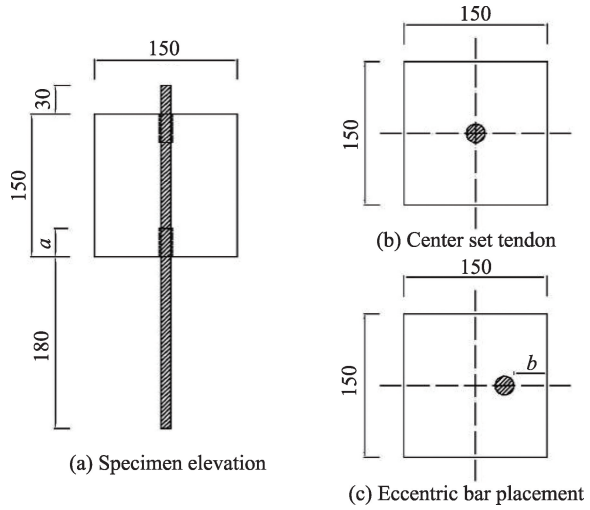


图1　钢筋-水泥土拉拔试件设计图(单位：mm)

Fig. 1　Design drawing of reinforcement-cement drawing specimen (Unit:mm)

拉拔试验共设计制作11组试件，每组3个平行试样(150，150，150 mm)，每组试件参数详见表1，d为钢筋的直径。此外，单独留样制作6个尺寸为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的立方体水泥土试块用于无侧限抗压强度测试，经过机械搅拌和振捣后装模密封袋，置于恒温地下室中养护28 d后，将试样取出进行加载测试。

2　试验结果

经测定，此固化剂配比所制作的6个立方体试块无侧限抗压强度均达到8.0 MPa以上，且在8.3 MPa左右波动，保证了该配比下水泥土强度的高强性和强度的平稳表现，测试结果如表2所示。

根据规范《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)，采用式(1)计算平均黏结强度。

表1　试件参数

Tab.1　Specimen parameters　　mm

Test piece group number	Rebar diameter	Anchorage lengthmm	Protection layer thickness
A1	10	5d	70
A2	10	8d	70
A3	10	9d	70
A4	10	11d	70
B1	10	9d	20
B2	10	9d	30
B3	10	9d	40
B4	10	9d	50
B5	10	9d	60
B6	10	9d	70
C1	10	9d	70
C2	12	9d	69
C3	14	9d	68

表2　水泥土立方体无侧限抗压强度结果

Tab. 2　Results of unconfined compressive strength of cement soil cubes

specimen No.	1	2	3	4	5	6
Compressive Strength/MPa	8.0	8.3	8.2	8.4	8.3	8.6

$$\tau=\frac{F}{\pi dl} \tag{1}$$

式中：τ为钢筋与水泥土黏结强度的实测值，N/mm^2；F为钢筋与水泥土黏结破坏的最大荷载实测值，N；d为钢筋的直径，mm；l为钢筋的锚固长度，mm。

3　钢筋-水泥土界面荷载位移曲线

本试验共得到33组数据，绘制图2。对图2进行分析可知，4组荷载位移曲线图在位移2 mm前都呈线性上升且相同试件曲线基本重合，除了A3组和A4组。锚固长度为5d的3个试件的荷载-位移曲线呈现上升段、下降段和上升段；锚固长度为8d的3个试件的荷载-位移曲线，其中2条曲线呈现上升段、下降段，1条曲线呈现上升段、下降段和上升段；锚固长度为9d的3个试件的荷载-位移曲线呈现上升段、下降段；锚固长度为11d的3个试件的荷载-位移曲线呈现上升段、下降段。

从4组荷载位移曲线可以看出，随着锚固长度

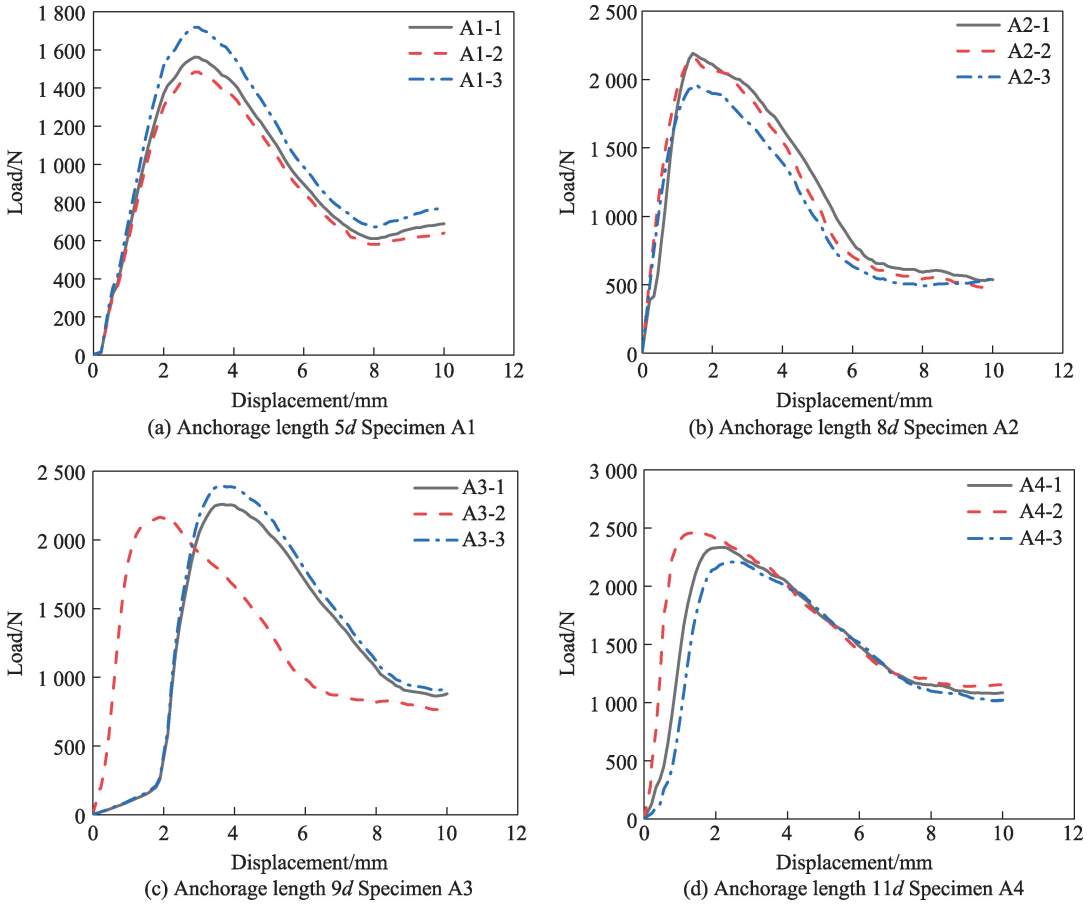


图2 锚固长度不同的荷载位移曲线

Fig. 2 Load displacement curves for different bond lengths

的增加，荷载位移曲线的上升段越来越陡峭，这一现象也说明了界面黏结性能随着锚固长度的增加而逐渐增强。

从图3可以看出，保护层厚度为20 mm的3个试件的荷载-位移曲线呈现上升段、下降段、上升段和下降段；保护层厚度为30 mm的3个试件的荷载-位移曲线呈现上升段、下降段、上升段和下降段；保护层厚度为40 mm的3个试件的荷载-位移曲线，其中2条曲线呈现上升段和下降段，一条曲线呈现上升段、下降段和下降段；保护层厚度为50 mm的3个试件的荷载-位移，其中1条曲线呈现上升段和下降段，两条曲线呈现上升段、下降段和上升段；保护层厚度为60 mm的3个试件的荷载-位移曲线呈现上升段和下降段。

在保护层厚度为20~40 mm时，荷载呈现上升趋势，在保护层厚度为50~70 mm时，荷载几乎不变，这也说明保护层厚度有一个最优值。

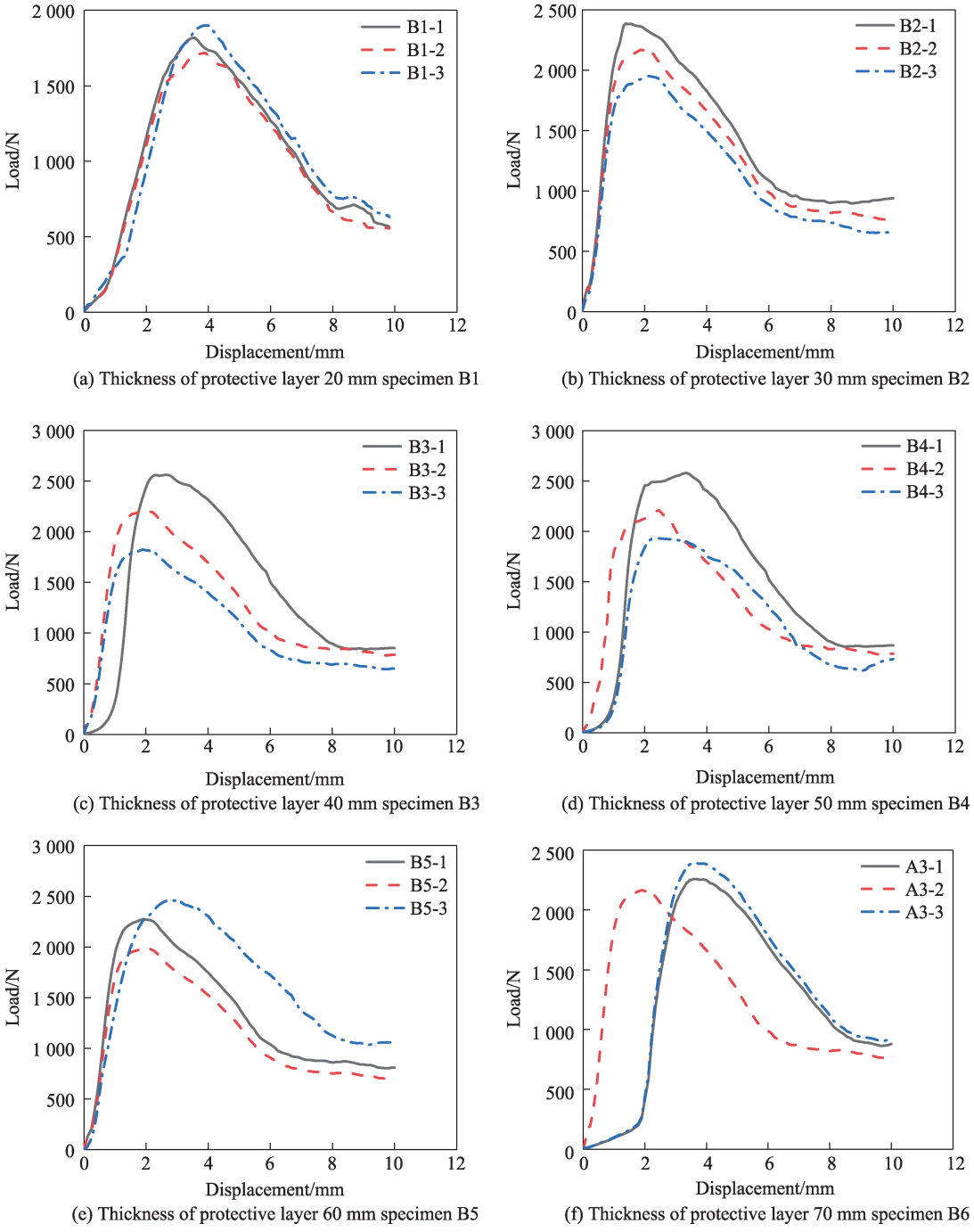
从图4中可以看出，钢筋直径为12 mm的3个试件的荷载-位移曲线呈现上升段和下降段；钢筋直径为14 mm的3个试件的荷载-位移曲线呈现上升段和下降段。比较图4中的3幅子图可知，钢筋-水泥土界面黏结强度随着钢筋直径增加而增加。

对以上荷载位移曲线图进行分析，发现HRB-400钢筋和水泥土的曲线基本分为4个阶段，第1阶段线性上升段：这一阶段，钢筋和水泥土界面基本处于弹性阶段；第2阶段荷载强化段：荷载继续增加，位移增加显著；第3阶段下降段：拉拔荷载减小，位移持续增加；第4阶段残余段：荷载下降到一定阶段后不再下降，基本稳定，有些甚至出现微小上升。

4 钢筋-水泥土界面黏结强度变化分析

4.1 锚固长度对黏结强度的影响

通过本次试验，研究了不同锚固长度对黏结强度的影响，其中选择了4个不同长度，分别为5d，8d，9d，11d。将保护层厚度和钢筋直径相同的拉拔试



(a) Thickness of protective layer 20 mm specimen B1　(b) Thickness of protective layer 30 mm specimen B2

(c) Thickness of protective layer 40 mm specimen B3　(d) Thickness of protective layer 50 mm specimen B4

(e) Thickness of protective layer 60 mm specimen B5　(f) Thickness of protective layer 70 mm specimen B6

图3　不同保护层厚度的荷载位移曲线

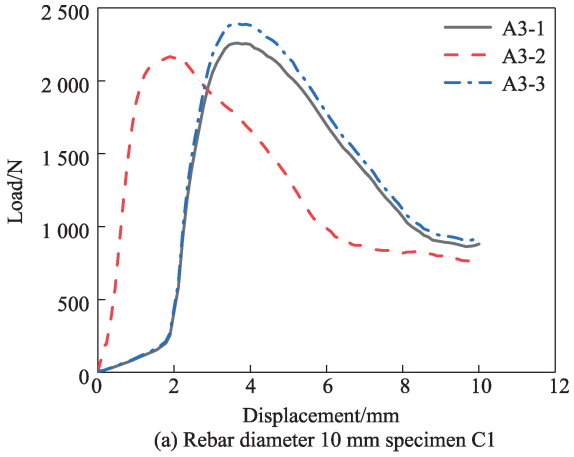
Fig. 3　Load displacement curve with different protection layer thickness

件的最大平均黏结强度绘制在一条曲线上，如图5所示。

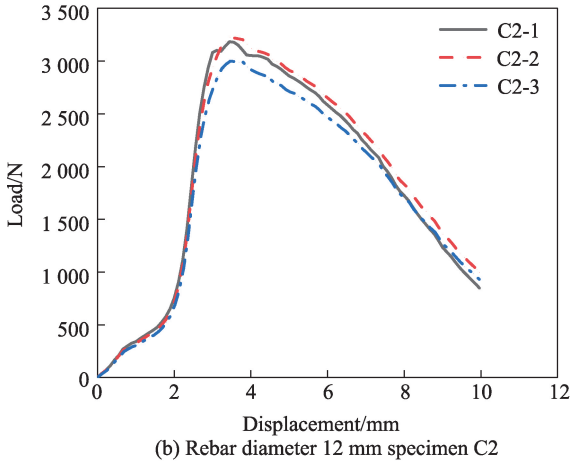
从图5中可以看出，锚固长度为5*d*~11*d*，保护层厚度为70 mm，直径为10 mm的钢筋与水泥土界面的黏结强度的变化趋势，黏结强度曲线总体呈现下降的趋势。其他因素不变时，钢筋与水泥土界面黏结强度随着锚固长度的增大而减小，在拉拔力变化不大时，随着接触面积增大黏结强度反而减小。

4.2　保护层厚度对黏结强度的影响

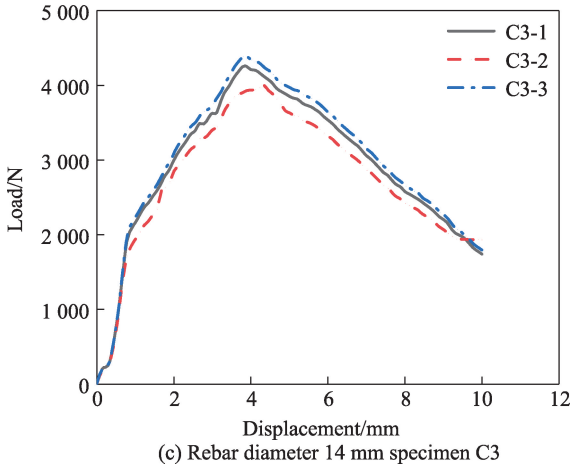
本组试验探究保护层厚度对黏结强度的影响，对保护层厚度取6个水平分别为20，30，40，50，60，70 mm。将相同锚固长度和钢筋直径的拉拔试件的最大平均黏结强度绘于一条曲线上，如图6所示，黏结强度随钢筋直径变化如图7所示。



(a) Rebar diameter 10 mm specimen C1



(b) Rebar diameter 12 mm specimen C2



(c) Rebar diameter 14 mm specimen C3

图4 不同钢筋直径的荷载位移曲线

Fig. 4 Load displacement curves for different steel diameters

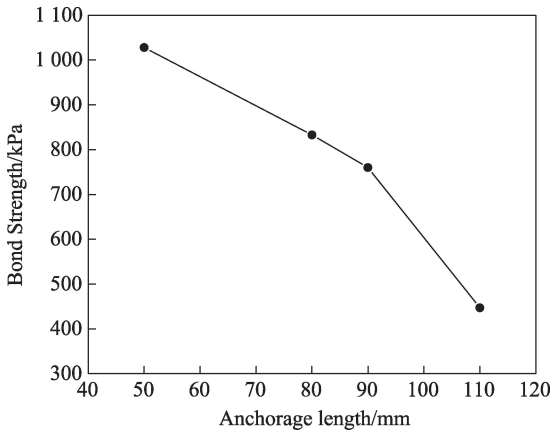


图5 黏结强度随锚固长度变化图

Fig. 5 Variation of bond strength with anchorage length

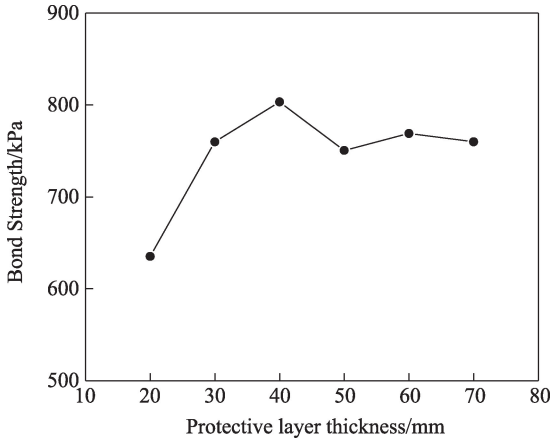


图6 黏结强度随保护层厚度变化图

Fig. 6 Variation of bond strength with thickness of protective layer

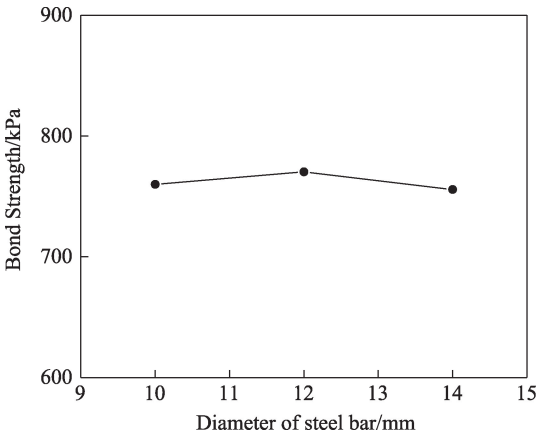


图7 黏结强度随钢筋直径变化图

Fig. 7 Variation of bond strength with diameter of reinforcement

从图6可以看出锚固长度为9d,保护层厚度为20~70 mm,直径为10 mm的钢筋与水泥土界面的黏结强度的变化趋势,黏结强度曲线总体呈现先上升后保持平衡的趋势。黏结强度随保护层厚度的增加上升幅度减缓,最后基本保持水平,说明当保护层厚度在20~30 mm时,即为钢筋直径2~3倍时,钢筋和水泥土界面的黏结强度达到最大值。

4.3　钢筋直径对黏结强度的影响

本组试验探究钢筋直径对黏结强度的影响，对钢筋直径取3个水平分别为10，12，14 mm。将相同锚固长度和保护层厚度的拉拔试件的最大平均黏结强度绘与一条曲线上，如图6所示。

从图中可以看出锚固长度为9d，保护层厚度为70 mm，直径为10~14 mm的钢筋与水泥土界面的黏结强度的变化趋势，黏结强度总体呈现保持水平的趋势。随着钢筋直径的增加，黏结强度大小基本没有变化，说明钢筋在这3种直径下变化对黏结强度的影响并不大。

经比较，各因素对钢筋与水泥土黏结性能影响程度从大到小依次为：锚固长度，保护层厚度和钢筋直径。

5　黏结滑移机理分析

在对11组试件进行拉拔试验研究过程中，仅出现HRB400钢筋拔出破坏，并未出现泥固化土劈裂破坏和HRB400钢筋受拉导致筋体断裂破坏。

将出现HRB400钢筋拔出破坏的试件从中部切割开，HRB400钢筋和水泥土接触界面几乎被磨平，HRB400钢筋筋体的肋间都被水泥土填满。拉拔试验刚开始时拉拔荷载较小，HRB400钢筋与水泥土之间主要依靠化学黏结力平衡拉拔力。经过多次试验，HRB400钢筋与水泥土的拉伸负荷不断增加，而其之间的摩擦力和机械紧固力也在不断减弱，最终完全替代了化学黏结力。随着拉拔荷载不断增大，HRB400钢筋与水泥土之间产生位移，在产生位移的同时，HRB400钢筋磨平了与水泥土凸出来的部分，这使HRB400钢筋和水泥土之间的机械咬合力降低，这也意味着现阶段黏结作用主要依靠两种材料之间的摩擦力，界面黏结强度减小。最终，HRB400钢筋逐渐从水泥土中拔出，从仪器读数可知，拔出时的拉拔荷载已经远小于最大拉拔荷载。

根据上述分析可知HRB400钢筋和水泥土的黏结力主要包括3个部分。

1）化学黏结力：HRB400钢筋表面和水泥土胶凝体之间的胶结力；

2）摩擦力：由于水泥土对HRB400钢筋握裹且筋体表明粗糙，钢筋拔出过程中便会产生摩擦力；

3）机械咬合力：带肋钢筋表面凸起部分和水泥土之间产生的机械咬合力。

6　结论

1）HRB400钢筋和水泥土的荷载-位移曲线基本分为线性上升段，荷载强化段，下降段，残余段4个阶段。

2）钢筋与水泥土界面黏结强度随着锚固长度的增加而减小；探究保护层厚度对黏结强度的影响，发现钢筋和水泥土最佳保护层厚度为2d~3d之间；在既有尺寸的试块试验中，随着钢筋直径的增加，黏结强度大小基本没有变化，钢筋直径在10~14 mm范围内变化对黏结强度的影响并不大。

3）拉拔试验中试件只出现了钢筋拔出破坏一种破坏形式，钢筋的HRB400钢筋在本试验范围内不发生材料屈服破坏，能够较好保存位移荷载曲线。

4）各因素对钢筋与水泥土黏结性能影响程度从大到小依次为：锚固长度，保护层厚度，钢筋直径。

参考文献：

[1] 王卫东, 丁文其, 杨秀仁, 等. 基坑工程与地下工程: 高效节能、环境低影响及可持续发展新技术[J]. 土木工程学报, 2020, 53(7): 78-98.
WANG W D, DING W Q, YANG X R, et al. Deep excavation engineering and underground engineering: New techniques of high-efficiency and energy-saving, low environmental impact, and sustainable development[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(7): 78-98.

[2] 张璞, 柳荣华. SMW工法在深基坑工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 22(S1): 1104-1107.
ZHANG P, LIU R H. The application of SMW method in foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 22(S1): 1104-1107.

[3] 梁志荣, 李忠诚. 型钢水泥土连续墙在基坑工程应用中的关键问题及新发展[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 290-296.
LIANG Z R, LI Z C. Key problems and new development of soil mixed walls in excavation engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (S1): 290-296.

[4] 周燕晓, 黄新, 麻志刚. 型钢水泥土构件界面黏结应力试验研究[J]. 路基工程, 2010(4): 165-167.
ZHOU Y X, HUANG X, MA Z G. Experimental study on bond stress of profile bars reinforced cement soil component interface[J]. Subgrade Engineering, 2010(4): 165-

167.

[5] 张冠军, 徐永福, 傅德明. SMW工法型钢起拔试验研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002(3): 444-448.
ZHANG G J, XU Y F, FU D M. Testing study and application of shape steel pullout in SMW construction method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002(3): 444-448.

[6] 顾士坦. 基于层间应力的SMW工法型钢起拔力分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008(1): 166-169.
GU S T. Analysis of shaped steel extraction force of SMW engineering method considering interlaminar normal stress[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008(1): 166-169.

[7] 梁仁旺, 于宁. 加筋水泥土梁力学性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2000(3): 267-270.
LIANG R W, YU N. An experimental study of mechanical properties of reinforced cemented-soil beams[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000(3): 267-270.

[8] 于宁, 朱合华, 梁仁旺. 插钢筋水泥土力学性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2004(11): 78-84.
YU N, ZHU H H, LIANG R W. Experimental study on mechanical properties of reinforced cemented-soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2004(11): 78-84.

[9] 陈昌富, 黄佳彬, 张根宝, 等. 水泥土中GFRP筋的界面黏结特性试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(S1): 120-127.
CHENG C F, HUANG J B, ZHANG G B, et al. Bond behavior of tensioned GFRP tendons embedded in cemented soils[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(S1): 120-127.

[10] 黄佳彬. 水泥土中GFRP筋黏结特性试验研究及应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
HUANG J B. Experimental characterization and application on bond behavior of tensioned GFRP tendons embedded in cemented soil[D]. Changsha: Hunan University, 2019.

[11] CHEN C, ZHANG G, ZORNBERG J G, et al. Interface bond behavior of tensioned glass fiber- reinforced polymer (GFRP) tendons embedded in cemented soils[J]. Construction and Building Materials, 2020, 263: 120132.

[12] 张根宝, 何仕林, 陈昌富, 等. 基于离散元的GFRP筋-水泥土界面黏结特性分析[J]. 工程地质学报, 2022, 31(6): 2115-2124.
ZHANG G B, HE S L, CHEN C F, et al. Discrete element method-based characterization of interface bond behavior of GFRP tendon embedded in cemented soils[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 31(6): 2115-2124.

第一作者:李青强(1999—),男,硕士研究生,研究方向为岩土工程。E-mail: 1145142253@qq.com。

通信作者:雷祖祥(1986—),男,教授,博士,博士生导师,德国洪堡学者,江西省“双千”计划人才,研究方向为岩土工程及复合材料。E-mail: zxlei@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑:姜红贵)