

DOI: 10.19479/j.2095-719x.2501027

## 预制混凝土外挂墙板锚栓承载力试验研究

张育恺, 杨新磊

(天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384)

**摘要:** 为研究预制混凝土外挂墙板预埋连接件不同锚固形式对其承载能力的影响, 本文开展了四组不同锚固形式的锚栓拉拔试验, 考虑的主要参数包括 90° 弯折后锚固段长度和是否采用预埋锚固板。试验结果表明, 弯折后锚固段长度由  $5d$  增加至  $15d$  时, 尽管预埋锚栓的极限承载能力有所提升, 但效果并不显著, 提高约 8%; 在水平锚固段端部设置锚固板时, 预埋锚栓的极限承载能力约为  $15d$  的 1.78 倍, 且表现出较好的延性。说明预制混凝土外挂墙板预埋连接件采用锚固板的构造形式具有良好的受力性能, 且节约材料、便于施工, 具有较好的工程应用前景。

**关键词:** 预制混凝土外挂墙板; 拉拔试验; 预埋锚栓; 锚固板

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 2095-719X(2025)01-0027-05

### Experimental Study on the Bearing Capacity of Anchor Bolts for Prefabricated Concrete External Wall Panels

ZHANG Yukai, YANG Xinlei

(School of Civil Engineering, TCU, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** In order to study the influence of different anchorage forms on the bearing capacity of pre-cast concrete wall panels with pre-embedded connectors, this paper carried out four groups of pull-out tests of anchor bolts with varying forms of anchorage, and the main parameters taken into consideration included the length of the anchorage section after bending at 90° and whether or not to use pre-embedded anchorage plates. The test results show that when the length of anchorage section after bending is increased from  $5d$  to  $15d$ , although the ultimate bearing capacity of the pre-buried anchor bolts is increased, the effect is not significant, and the increase is about 8%; when the anchor plate is set at the end of the horizontal anchorage section, the ultimate bearing capacity of the pre-buried anchor bolts is about 1.78 times of that of the  $15d$ , and it shows a better ductility. It shows that the pre-cast concrete exterior wall panel with pre-embedded connectors using anchorage plate construction form has good force performance, saves materials, is easy to construct, and has a better engineering application prospect.

**Key words:** prefabricated concrete external wall panel; pull-out test; embedded anchor bolt; anchor plate

外挂墙板作为一种外围护结构, 不参与结构的整体受力, 只承受自重、风荷载和地震作用下的荷载, 所以无论是预制工厂制作还是现场的节点连接过程, 施工都较为方便。近年来随着装配整体式混凝土结构的大力发展, 房屋结构等建筑物外墙普遍采用预制混凝土外挂墙板<sup>[1]</sup>。其中, 预埋连接件是外挂墙板与主体结构之间的关键部件, 其力学性能直接影响到外挂墙板的安全性。国内外学者对于外挂墙板节点连接形式以及连接件自身抗拔、抗剪等力学性能方面进行了一系

列研究。张鹏<sup>[2]</sup>设计了一种将承重和限位功能集成在一体的连接节点, 并通过数值模拟的方法对其受力性能进行研究。翟传明等<sup>[3]</sup>对金属板式连接件的抗拔、抗剪等力学性能进行试验, 并研究了保温层厚度对其力学性能的影响程度。完海鹰等<sup>[4]</sup>通过抗拉、抗压、抗剪试验, 研究墙板下节点在多种荷载作用下的破坏形态和承载性能。翟希梅等<sup>[5]</sup>进行了新型复合式连接件抗拉、抗剪性能试验研究, 分析了对连接件力学性能产生影响的主要因素。谷倩等<sup>[6]</sup>对两种不同预埋形式的

收稿日期: 2023-09-11; 修订日期: 2023-10-10

作者简介: 张育恺(1997—), 男, 甘肃兰州人, 天津城建大学硕士生

通讯作者: 杨新磊(1977—), 男, 教授, 博士, 从事装配式结构抗震、结构加固研究。E-mail: yxl@tcu.edu.cn.

节点开展了抗弯试验以及抗剪试验,研究连接节点的受力机理及破坏模式.曹石等<sup>[7]</sup>提出一种新型外挂墙板连接节点的设计以及验算方法,并通过有限元软件对其承载力进行研究分析.吴金虎等<sup>[8]</sup>通过对上承式节点的受力以及传力途径进行分析,提出了节点在不同荷载作用下的计算方法和各组成部件相关承载力验算方法.薛伟辰等<sup>[9]</sup>开展了预制混凝土夹心保温外挂墙板桁架式不锈钢连接件的抗拔与抗剪性能试验,研究其破坏模式和承载能力. Clay Naito 等<sup>[10]</sup>通过抗剪试验对不同类型连接节点的强度和变形能力进行研究. Ekenel Mahmut<sup>[11]</sup>通过试验研究分析混凝土夹芯板中纤维增强复合材料连接件的剪切应力传递能力.

综上所述,外挂墙板节点连接构造形式会直接影响到外挂墙板抵抗外力变形的能力,因此连接件本身要有足够好的抗拔性能.所以通过改进预埋连接件的构造形式,对于提高预制混凝土外挂墙板的承载能力有着十分重要的实际意义.本文通过 4 组预制混凝土外挂墙板预埋锚栓的拉拔试验,在外包混凝土强度、

保护层厚度、配筋率一定的条件下,对比分析不同构造形式预埋锚栓的抗拔能力,研究结果可为工程中外挂墙板预埋连接件的设计提供参考.

## 1 拉拔试验概况

### 1.1 试验设计

本文共设计了 4 组拉拔试验,4 组试件水平锚固段均为 90 mm,前 3 组试件水平锚固段之后为 90°弯折锚固段,长度分别为 360 mm(15d)、240 mm(10d)、120 mm(5d),第 4 组试件在水平锚固段端部设置锚固板,锚固板尺寸为 100 mm × 100 mm × 12 mm. 4 组试件墙板尺寸均为 2 000 mm × 500 mm × 120 mm,混凝土设计等级为 C30,钢筋强度等级为 HRB400 级,锚栓强度等级为 M24 10.9 级.对于每组试件 3 个预埋锚栓分开布置,间距为 500 mm,预埋件及连接材料设计满足规范要求,试件构造图见图 1.混凝土墙板 3 个锚栓预埋位置及截面配筋均一致,见图 2.

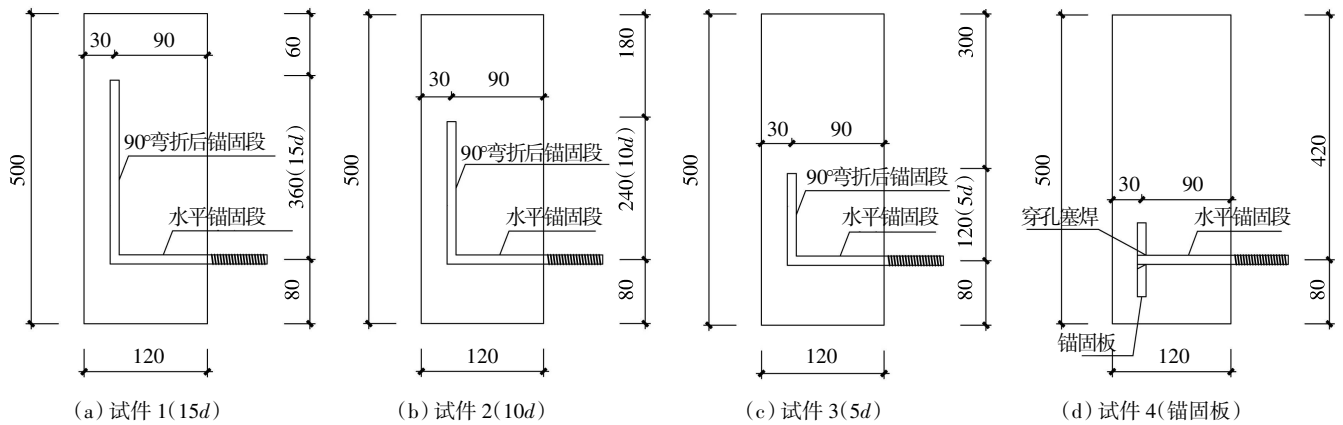


图 1 试件构造图

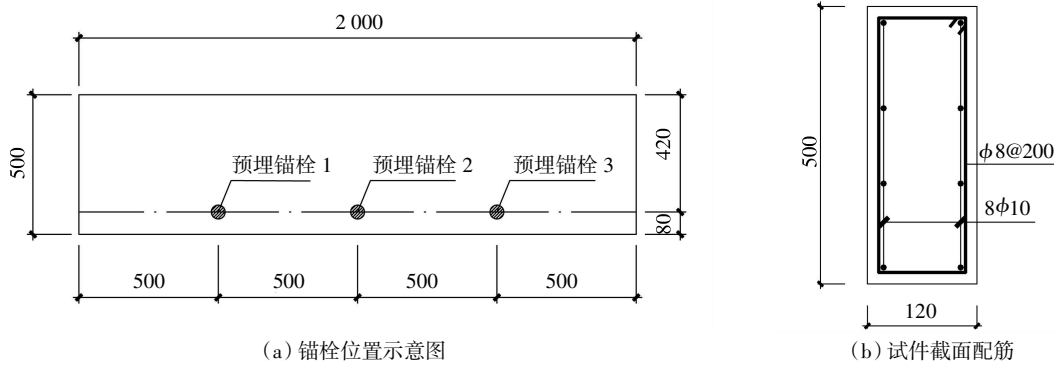


图 2 试件锚栓位置及截面配筋图

### 1.2 试验加载

试验加载装置如图 3 所示,在预埋锚栓上部架设加载装置,锚栓上方通过套筒连接一段锚杆增加长

度,锚杆穿过空心式液压千斤顶与穿心力传感器并用螺母固定.试验时通过空心式液压千斤顶以 10 kN 为一级匀速加载直至试件破坏,拉拔荷载值采用穿心力

传感器采集,沿锚栓竖向布置钢筋应变片以测量锚栓应变值,试验过程中观察混凝土表面裂缝出现情况.

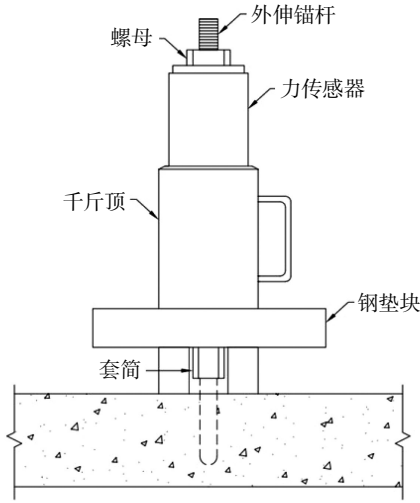


图 3 试验加载装置示意图

### 1.3 混凝土材性试验

本试验所用的混凝土设计强度为 C30,在浇筑过程中预留 4 个混凝土立方体试块(100 mm × 100 mm × 100 mm),并将制作完成的试块与混凝土墙板在相同条件下养护 28 d,混凝土试块养护完成后依据规范对其进行抗压试验,测试结果详见表 1.

表 1 混凝土材性试验结果

编号	极限承载力/kN	抗压强度/MPa	抗压强度平均值/MPa
C1	348.4	34.8	35.6
C2	361.3	36.1	
C3	363.8	36.4	
C4	351.7	35.2	

## 2 拉拔试验结果及分析

### 2.1 试验破坏现象

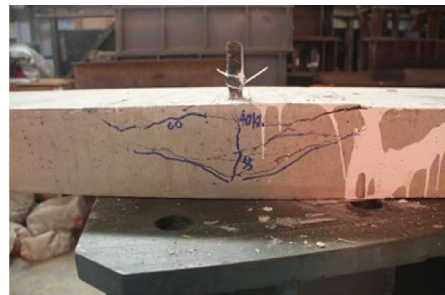
4 组试件在加载前期破坏形态相似,表现为锚栓周围混凝土最先出现细微裂缝,随着荷载增加裂缝呈放射状向外扩展;在加载后期,前 3 组试件在裂缝贯通后,弯折锚固段上方混凝土被局部掀起,试件失去承载力并迅速破坏,而试件 4 在混凝土上表面裂缝贯通后随着荷载的继续增加原有裂缝继续扩展,尤其是侧面裂缝相对于前 3 组试件扩展得更加明显,此时试件并未破坏而是继续保持承载能力,直至预埋锚固板上方混凝土被大量掀起之后试件破坏,试件 4 整体破坏程度更加严重.

观察试件侧面破坏形态发现前 3 组试件掀起部

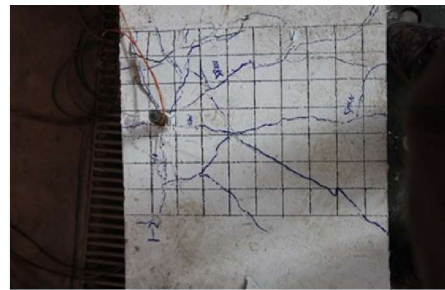
位裂缝集中在侧边中心线以上位置,距离预埋锚栓位置有一定距离,而试件 4 则是整个锚固板上方混凝土被全部掀起,透过裂缝能够看到预埋在混凝土墙板内部的锚固板. 试件典型破坏现象如图 4 所示.



(a) 锚栓上方混凝土掀起



(b) 混凝土侧面裂缝



(c) 锚栓周围裂缝贯通



(d) 锚固板上方混凝土掀起

图 4 试件典型破坏现象

前 3 组试件破坏机理大体相似:混凝土上部锚栓处出现裂缝后作为中心逐渐向外扩展,随着荷载增大,裂缝的长度和宽度不断发展,最终混凝土板上出现贯通裂缝,侧面预埋锚栓上方的混凝土被掀起,此时应力值迅速下降,试件破坏. 分析原因是由于预埋

锚栓弯折段挤压混凝土造成的,使得墙板表面裂缝快速发展至贯通,且随着弯折段锚栓长度增加,弯折段锚栓对上部混凝土的挤压力也相对增大,贯通裂缝发展更为密集,在靠近锚栓的侧面混凝土也出现较多斜裂缝.三组试件破坏时,预埋锚栓处混凝土被掀起程度较轻,试件破坏部位集中在预埋锚栓周围.

试件 4 的破坏机理为:随着荷载逐级增加,混凝土上部锚栓处出现裂缝后作为中心逐渐向外扩展,之后裂缝的长度和宽度不断发展,混凝土板上出现贯通裂缝,贯通裂缝出现后继续加载,试件并没有像前 3 组试件一样迅速破坏,而是随着荷载的增加原有裂缝继续扩展,直至荷载达到 105 kN 左右时应力值才迅速下降,并在预埋锚固板上方混凝土被掀起之后试件破坏.试件 4 破坏时,预埋锚固板处混凝土被掀起程度较前 3 组试件相比更加严重,混凝土板侧面裂缝延伸更长,试件破坏部位集中在预埋锚固板上方.

### 2.2 锚栓荷载-应变曲线分析

4 组试件锚栓 2 处荷载-应变曲线如图 5 所示,90°弯折锚固的 3 组试件极限荷载值集中在 60 kN 左右;预埋锚固板试件的极限承载力相比于前 3 组试件有明显提高,荷载值接近 102 kN.

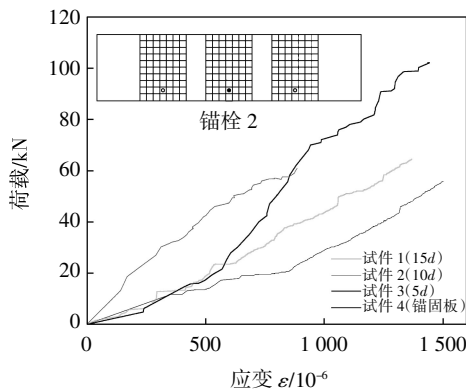


图 5 锚栓 2 荷载-应变曲线

分析 4 组试件锚栓应变增长情况发现,当试件达到极限荷载时,混凝土墙板中的预埋锚栓应变值较小,尚未进入屈服阶段,说明锚栓预埋长度过短不利于抑制混凝土的破坏,在锚栓未完全破坏的情况下,锚栓上方的混凝土先发生破坏.

### 2.3 锚栓极限承载力对比

4 组试件锚栓极限承载力见表 2.

90°弯折锚固的 3 组试件极限承载力平均值差别不大,集中在 55~60 kN. 通过对比试件 2 和试件 3 发现:在弯折段锚固段过短的情况下(5d)通过增加锚固段长度(10d)能适当提高试件的极限承载力,但提升

效果有限;对比试件 1 和试件 2 发现:当弯折锚固段达到一定长度后(15d)试件极限承载力不再继续上升;试件 4(锚固板)的极限承载力较前 3 组试件有了显著提高,较前 3 组弯折锚固试件极限承载力均值提高了约 1.8 倍.

表 2 锚栓极限承载力 kN

编号	锚栓 1	锚栓 2	锚栓 3	平均值
试件 1	59.58	65.42	52.50	59.19
试件 2	60.42	55.83	62.71	59.65
试件 3	53.13	61.46	49.44	54.67
试件 4	104.70	101.88	109.58	105.41

前 3 组试件中间位置锚栓 2 的极限承载力都高于两侧位置锚栓 1 与锚栓 3, 而相对应的试件 4 则表现为锚栓 2 锚栓极限承载力最小. 通过观察试件 4 侧面破坏情况,发现在试件 4 第 1 个锚栓拉拔试验结束后,侧面的裂缝横向延伸范围大并在第 2 个锚栓破坏之后 2 个位置的侧面裂缝贯穿在一起,说明在第 1 个锚栓拉拔之后,侧面的水平裂缝扩展到了中间锚栓裂缝扩展范围内,使得中间锚栓边缘混凝土在拉拔试验之前便已经发生了一定程度上的破坏,因此对中间锚栓的极限承载力造成了影响.

## 3 结 论

通过分析对比 4 组拉拔试验中试件受力过程、破坏形态和承载能力后得出研究结论如下:

- (1) 当水平锚固长度相同时,90°弯折锚固的 3 组试件破坏程度轻于水平锚固段端部设置锚固板试件.
- (2) 弯折锚固段为 15d 时较弯折锚固段为 5d 时的极限承载力提高约 8%,说明通过增加弯折段长度能一定程度上提高极限承载力,但提升空间有限;弯折锚固段为 15d 与 10d 承载力接近,说明当弯折段长度超过 10d 之后对极限承载力不再有明显提升.

- (3) 将弯折锚固改为锚固板锚固后,试件极限承载力较前 3 组弯折锚固试件极限承载力均值提高了约 1.8 倍,锚固性能提升著.

### 参考文献:

[1] 卢家森,周成功,郑振鹏. 预制外挂墙板分析方法[J]. 中外建筑,2013(1): 105-107.  
 [2] 张 鹏. 预应力混凝土外挂墙板及其连接节点受力性能研究[J]. 建筑结构,2023,53(增刊 1): 1685-1690.  
 [3] 翟传明,张 超,王娟娟,等. 夹芯保温墙板金属板式连接件力学性能研究[J]. 建筑科学,2020,36(5): 26-32.

- [4] 完海鹰,秦昊雯,陈安英. 夹心复合外挂墙板与钢框架点式连接节点的静力性能试验研究[J]. 建筑结构,2020,50(22): 16-20.
- [5] 翟希梅,王雪明. 预制夹芯墙体中新型复合式连接件受力性能试验研究[J]. 建筑结构,2018,48(7): 73-78.
- [6] 谷倩,周珣,舒松,等. 新型泡沫混凝土轻质墙板外挂节点力学性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,2015(11): 70-74.
- [7] 曹石,舒赣平,林坤洪,等. 一种新型装配式钢结构外挂墙板连接节点的受力性能分析和设计方法[J]. 建筑结构,2017, 47(10): 46-52.
- [8] 吴金虎,卢家森,许正东,等. 预制混凝土外挂墙板上承式节点设计方法[J]. 建筑结构,2014,44(13):47-51.
- [9] 薛伟辰,姜伟庆,宋佳崢,等. 预制混凝土夹心保温外挂墙体桁架式不锈钢连接件抗拔与抗剪性能试验研究[J]. 施工技术,2018,47(12): 95-99.
- [10] NAITO C, BEACRAFT M, HOEMANN J M, et al. Performance and characterization of shear ties for use in insulated precast concrete sandwich wall panels[J]. Journal of Structural Engineering,2012,138(1): 52-61.
- [11] EKENEL M. Testing and acceptance criteria for fiber-reinforced composite grid connectors used in concrete sandwich panels[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2014, 26(6): 1-5.

(上接第26页)

- [16] ZHANG P, SHI J, DING H, et al. Design of offshore wind power foundation with multi-bucket[J]. Transactions of Tianjin University, 2016,22(6):502-507.
- [17] KIM D J, CHOO Y W, KIM J H, et al. Investigation of monotonic and cyclic behavior of tripod suction bucket foundations for offshore wind towers using centrifuge modeling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2014,140(5): 04014008.
- [18] KIM S R, HUNG L C, OH M. Group effect on bearing capacities of tripod bucket foundations in undrained clay[J]. Ocean Engineering,2014,79: 1-9.
- [19] WANG L Z, WANG H, ZHU B, et al. Comparison of monotonic and cyclic lateral response between monopod and tripod bucket foundations in medium dense sand[J]. Ocean Engineering, 2018,155:88-105.
- [20] CHENG X, CHENG W, ZHANG J, et al. Response of offshore wind turbine tripod suction bucket foundation to seismic and environmental loading[J]. Ocean Engineering,2022,257:111-708.
- [21] DAFALIAS Y F, MANZARI M T. Simple plasticity sand model accounting for fabric change effects[J]. Journal of Engineering Mechanics,2004,130(6):622-634.
- [22] ITASCA CONSULTING GROUP. Guide to the FLAC3D Help File—PFC 6.0 documentation. Minnesota.2004[EB/OL].(2021-11-19)[2023-04-04]. <https://docs.itascacg.com/pfc600/flac3d/docproject/source/modeling/introduction/guidetohelp.html>.
- [23] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5-mw reference wind turbine for offshore system development[Z]. USA:National Renewable Energy Laboratory,2009.
- [24] ESFEH P K, KAYNIA A M. Numerical modeling of liquefaction and its impact on anchor piles for floating offshore structures[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2019, 127: 105839.
- [25] RAMIREZ J, BARRERO A R, CHEN L, et al. Site response in a layered liquefiable deposit: evaluation of different numerical tools and methodologies with centrifuge experimental results[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018,144(10): 04018073.1-04018073.22.
- [26] ZHU B, ZHANG W L, YING P P, et al. Deflection-based bearing capacity of suction caisson foundations of offshore wind turbines[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2014,140:04014013.