

# 预制 - 现浇复合梁抗弯性能试验研究

姜炜州<sup>1</sup>, 刘泽<sup>1</sup>, 马哲<sup>2</sup>, 楼华锋<sup>2</sup>, 吴疆<sup>1</sup>, 叶仁斌<sup>1</sup>

<sup>1</sup>湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

<sup>2</sup>浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2025年2月26日; 录用日期: 2025年3月18日; 发布日期: 2025年3月31日

## 摘要

基于锚杆挡土墙装配化的需要, 设计了一种由预制板和现浇混凝土构成的复合梁, 通过四点弯曲试验测试了复合梁的抗弯承载力的特性, 并分析了复合梁预制层的作用。主要结论有: 弯矩作用下复合梁的破坏发生在预制板拼接处, 其变形失效过程可分为弹性、带缝工作和破坏三阶段, 最终破坏型式为拼接处的预制板一侧张开、另一侧压缩破坏; 复合梁的实测极限承载力要明显高于由预制板拼接处有效截面尺寸计算的承载力理论值; 预制板对提高梁承载力的作用主要源自两方面: 一是约束了接缝截面两侧混凝土的变形, 使梁只能沿接缝截面发生破坏, 二是在复合梁受压侧预制板间的间隙会因芯梁压缩而消失并增加梁的受压区截面尺寸。

## 关键词

预制板, 复合梁, 四点弯曲试验

# Experimental Study on Flexural Performance of Precast Cast-in-Place Composite Beams

Weizhou Jiang<sup>1</sup>, Ze Liu<sup>1</sup>, Zhe Ma<sup>2</sup>, Huafeng Lou<sup>2</sup>, Jiang Wu<sup>1</sup>, Renbin Ye<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

<sup>2</sup>Zhejiang Shuzhi Jiaoyuan Technology Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Received: Feb. 26<sup>th</sup>, 2025; accepted: Mar. 18<sup>th</sup>, 2025; published: Mar. 31<sup>st</sup>, 2025

## Abstract

A composite beam composed of prefabricated panels and cast-in-place concrete was designed based on the assembly needs of anchor retaining walls. The bending bearing capacity characteristics of the composite beam were tested through four point bending tests, and the role of the prefabricated

layer of the composite beam was analyzed. The main conclusions are as follows: the failure of composite beams under bending moment occurs at the junction of prefabricated slabs, and its deformation failure process can be divided into three stages: elastic, jointed work, and failure. The final failure mode is the opening of one side of the prefabricated slab at the junction and the compression failure of the other side; the measured ultimate bearing capacity of composite beams is significantly higher than the theoretical value of bearing capacity calculated from the effective cross-sectional dimensions at the joints of prefabricated panels; the role of prefabricated panels in improving the bearing capacity of beams mainly comes from two aspects: firstly, it constrains the deformation of concrete on both sides of the joint section, so that the beam can only be damaged along the joint section; secondly, the gap between prefabricated panels on the compression side of the composite beam will disappear due to the compression of the core beam and increase the cross-sectional size of the compression zone of the beam.

## Keywords

Prefabricated Panels, Composite Beam, Four Point Bending Test

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

工程结构装配化具有构件质量可控、现场施工效率高等诸多优点，近年来已成为当前工程建设的主流方向。但预制构件需要采用合适的连接方式才能装配成型，从而使得连接方式成为装配式结构的关键。

目前，国内外许多学者都对装配式混凝土预制构件的连接方式开展了研究，发展了诸如螺栓连接、榫卯连接、浆锚连接、预应力连接、灌浆套筒连接等多种方式[1]-[5]。吴水根等[5]在预制混凝土剪力墙拼接中使用螺栓对剪力墙进行连接，并使用有限元软件对其进行受力分析。吕芳[6]分析了预制结构连接节点施工流程的重要性。在建筑工程中，梁柱的装配式连接较为重要，陈百玲等[7]采用夹心钢板组合板与高强度螺栓构成梁-柱连接节点，并通过数值模拟分析了预制构件连接节点与现浇节点承载性能的差别。邹艳花等[8]梳理了现有混凝土结构柱-柱连接的方式，分析指出了干法、湿法连接方式的优缺点。在路基工程中，近年来挡土墙的装配化研究也非常火热。孙宝昌[9]提出了在立壁底部预留钢筋，到现场装配时将这部分钢筋浇注到后趾板中的连接方法；刘泽[10]设计预留钢筋焊接、螺栓角钢连接、锚栓连接等多种节点并通过节点模型试验分析三种节点的承载性能；汤丽燕等[11]研究了装配式挡墙构件采用凸榫连接的可行性并与螺栓连接、钢板焊接等方式进行对比。

在挖方工程中，锚杆挡土墙具有开挖量小、支挡主动、荷载大等优点而得到广泛应用，但目前对锚杆挡土墙的装配化研究还非常少，有针对性的节点研究更是非常缺乏。为了探索锚杆挡土墙的装配化途径，笔者结合锚杆挡土墙的特点，在将混凝土面板构件化的基础上，设计了一种免模板的挡土墙肋柱，以实现预制面板与锚杆的高效连接。为了验证这种肋柱的力学性能，本文设计并制作了一种由预制面板端部与现浇混凝土构成的复合梁，在四点弯曲试验的基础上，分析预制面板对复合梁抗弯能力的影响，为工程设计提供了参考。

## 2. 方案设计

### 2.1. 方案设计与构件制作

锚杆挡墙是挖方边坡工程中常用的一种支挡结构，一般由锚杆和混凝土墙面组成。近年来，随着支

挡结构的装配化发展, 锚杆挡墙的混凝土墙面也由现浇转变为预制结构, 预制面板与锚杆之间则通过现浇肋柱实现连接(图 1)。为减少肋柱混凝土浇注时的支模作业, 可在预制面板两端设置挡块, 使预制面板拼合时可形成一凹形空间(图 1(b)), 在这一位置浇注混凝土后可以形成肋柱。由于构成的肋柱是一个预制—现浇复合梁, 其性能直接影响到挡土墙的结构设计。

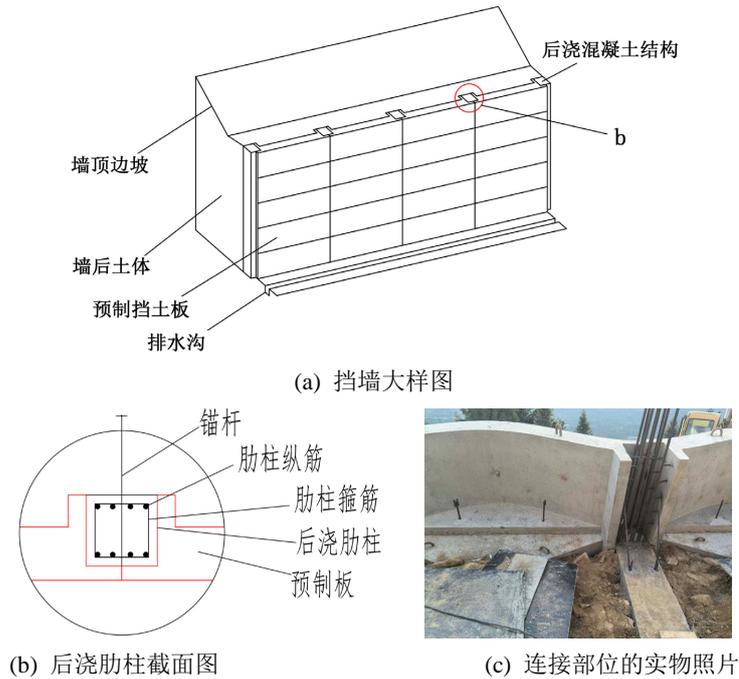


Figure 1. Node diagram of prefabricated retaining wall  
图 1. 装配式锚杆挡墙的节点

为了验证这种预制—现浇肋柱的承载性能, 笔者设计了一组复合梁试验。梁的结构如图 2 所示: 先由两块 L 型预制板形成一凹形空间并构成梁的外层, 再在凹槽内浇注混凝土形成梁。试验梁长度  $L = 2$  m, 截面尺寸为  $48\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ , 预制 L 型板长度为 1 m, 底板厚度为 8 cm, 侧板厚度为 10 cm。梁所用钢筋参数见表 1。试验梁采用 C30 混凝土浇注。

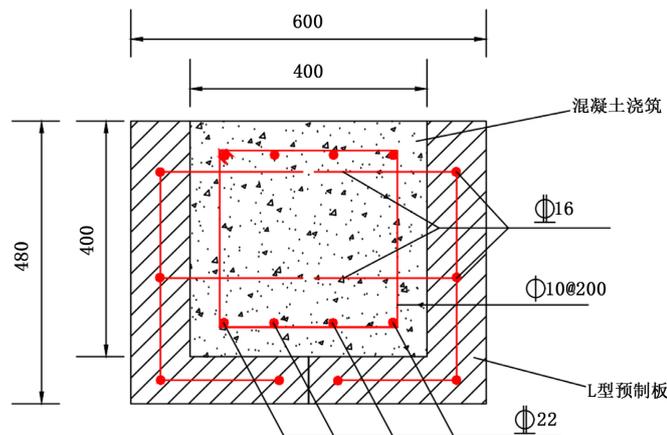
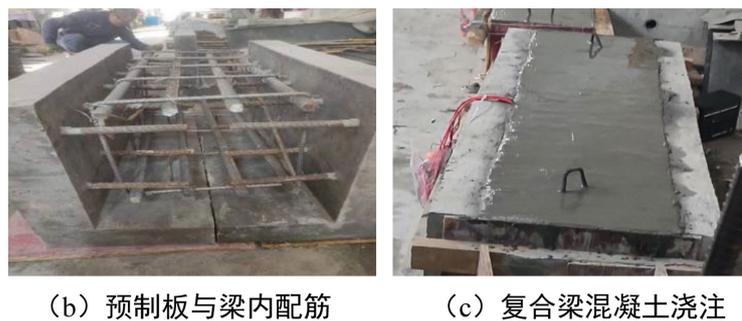


Figure 2. Test beam cross-sectional size and reinforcement diagram (unit: mm)  
图 2. 试验梁截面尺寸与配筋图(单位: mm)

**Table 1.** Composite beam reinforcement use grade table  
**表 1.** 复合梁钢筋使用等级表

序号	等级	直径(mm)	使用范围
1	HRB400	16	L 型预制板
2	HRB400	16	预留钢筋
3	HRB400	22	后浇梁纵筋
4	HPB300	10	后浇梁箍筋

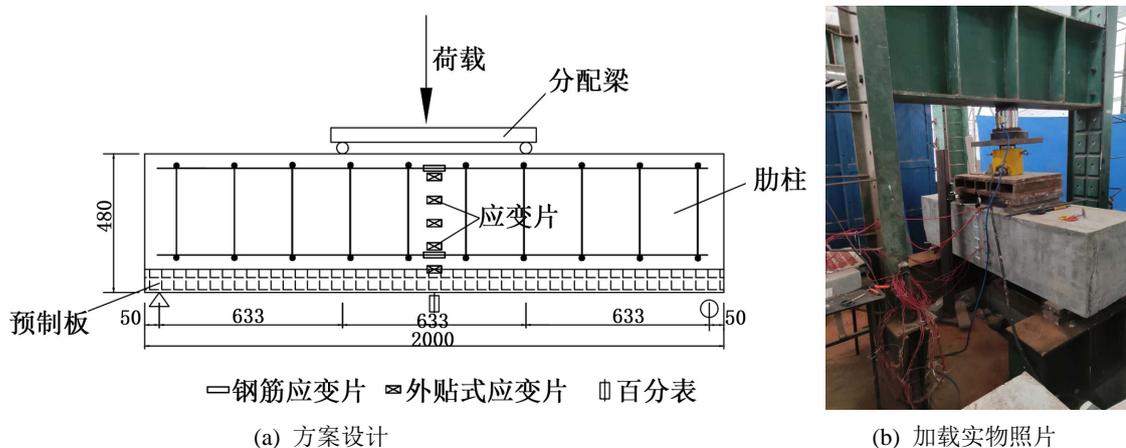
试验梁的制作两步进行：先预制 4 块 L 型预制板，预制板内预留有面板与肋柱连接用钢筋；预制板养护并达到强度后，将其拼成槽型，并在槽内配置肋柱钢筋，再浇注混凝土形成预制 - 现浇复合梁。制作过程见图 3。



**Figure 3.** Pouring of test beams  
**图 3.** 试验梁制作

## 2.2. 试验加载方案

试验采用四点弯曲法进行，测试弯矩作用下复合梁的抗弯能力与破坏方式。为了获得梁的应力应变发展规律，构件制作时在肋柱纵向钢筋的跨中处布置了应变片、在梁的跨中(预制板拼接处)外侧沿高度方向布置了 5 层应变片，并采用百分表测量梁跨中的挠度。试验方案与加载装置见图 4。试验采用元器件参数见表 2。



**Figure 4.** Layout of test equipment and measuring points (unit: mm)  
**图 4.** 试验方案与加载装置(单位: mm)

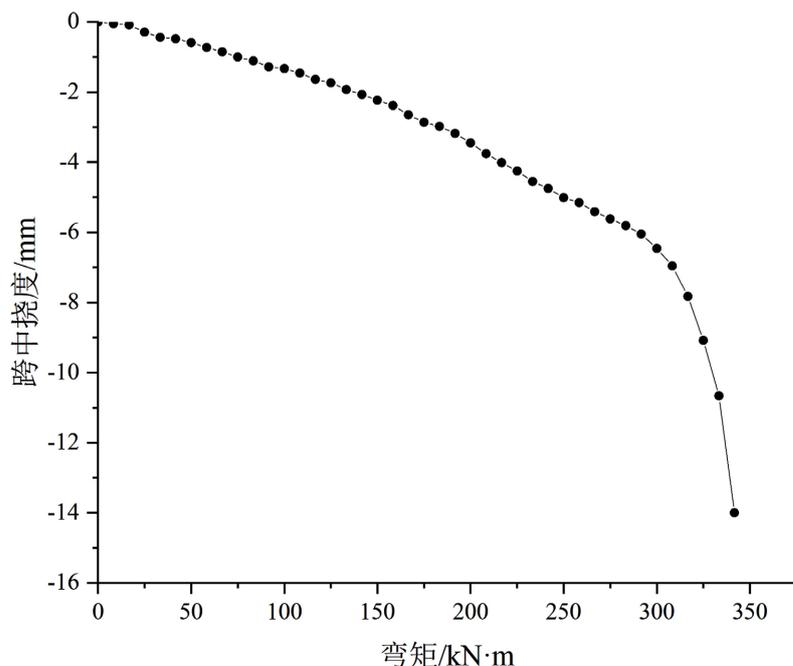
**Table 2.** List of composite beam test components**表 2.** 复合梁试验元器件一览表

序号	元器件名称	测试项目	数量	量程	型号规格
1	应变片	钢筋应变	8	10 mm	10AA
2	应变片	梁体外侧应变	10	50 mm	50AA
3	百分表	梁体跨中挠度	2	200 mm	HCYL-60
4	荷载传感器	施加荷载	1	300 t	JMZX-3810HAT

### 3. 试验结果分析

#### 3.1. 加载过程与破坏现象

图 5 为复合梁跨中的弯矩 - 挠度发展曲线, 图 6 为复合梁加载过程照片。分析可知, 复合梁的跨中挠度随弯矩增加而增大, 整个过程可以分为三个阶段: 当荷载处于  $0 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ~ $108.3 \text{ kN}\cdot\text{m}$  间时, 弯矩与挠度间基本上呈线性关系, 复合梁处于弹性阶段, 复合梁最大挠度仅为  $1.46 \text{ mm}$ ; 随着弯矩进一步增大, 曲线的斜率增大、相同弯矩增量下的挠度增量增大; 此时在梁的外侧可以看到: 在复合梁的梁中上部出现了一些细微的裂纹, 而在梁中下部预制板开始分离, 表明梁顶部和底部的混凝土开始出现破坏, 拉应力开始转移到钢筋上, 且随着荷载增大, 梁上部的裂纹增多, 下部预制分离的间距增大。当荷载增加到  $291.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$  时, 梁的最大挠度为  $8.51 \text{ mm}$ 。这个阶段可称为梁的带缝工作阶段; 当荷载进一步增加达到  $300 \text{ kN}\cdot\text{m}$  时, 跨中挠度出现突增, 且随弯矩进一步增大, 挠度的增量一级大过一级, 且梁体上部混凝土破碎区的范围不断加大, 并出现混凝土脱落现象, 下部预制板分离的间距迅速加大, 最大值达至  $3 \text{ cm}$ ; 当弯矩  $345 \text{ kN}\cdot\text{m}$  时, 跨中挠度达到为  $14.12 \text{ mm}$ , 复合梁完全发生破坏无法再继续施加, 试验中止, 为梁的破坏阶段。由试验获得梁的极限承载力为  $291.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

**Figure 5.** Development curve of mid span deflection of composite beam**图 5.** 复合梁跨中挠度的发展曲线

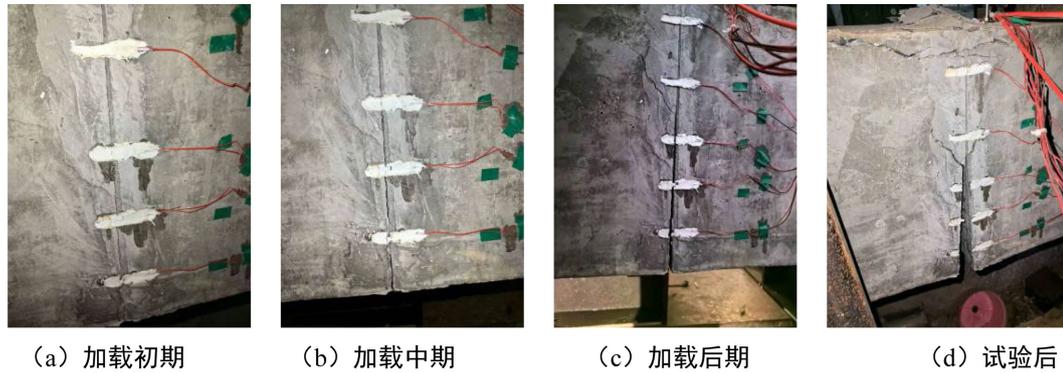


Figure 6. Composite beam failure process  
图 6. 复合梁破坏过程

### 3.2. 钢筋应变

设的拉应变为正、压应变为负。图 7 为复合梁内肋柱现浇部分纵向钢筋的应变发展曲线。从图 7(a) 中可以看出, 当弯矩在  $66.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$  以内时, 受拉侧钢筋几乎不发生受力, 此时荷载主要由混凝土承担; 当荷载进一步增大时, 钢筋应变才开始增大, 表明受拉侧钢筋逐渐发挥作用, 当至弯矩达到  $266.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$  后, 钢筋应变达到  $1633 \mu\epsilon$ , 此后荷载完全由钢筋承担, 钢筋应变迅速增大, 钢筋开始屈服, 钢筋应变最大达到  $4000 \mu\epsilon$  左右, 随后弯矩增大, 钢筋发生断裂, 复合梁发生破坏。

而钢筋受压侧钢筋应变(图 7(b))在加载前期、中期, 应变都随着弯矩增加而增大, 最大应变为  $-372.5 \mu\epsilon$ , 但当弯矩达到  $316.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$  时, 受压侧钢筋应变出现急剧增大的现象, 随后复合梁发生破坏。从钢筋屈服顺序来看, 受拉侧钢筋先于受压侧后发生破坏, 表明该复合梁破坏的形式为适筋破坏。

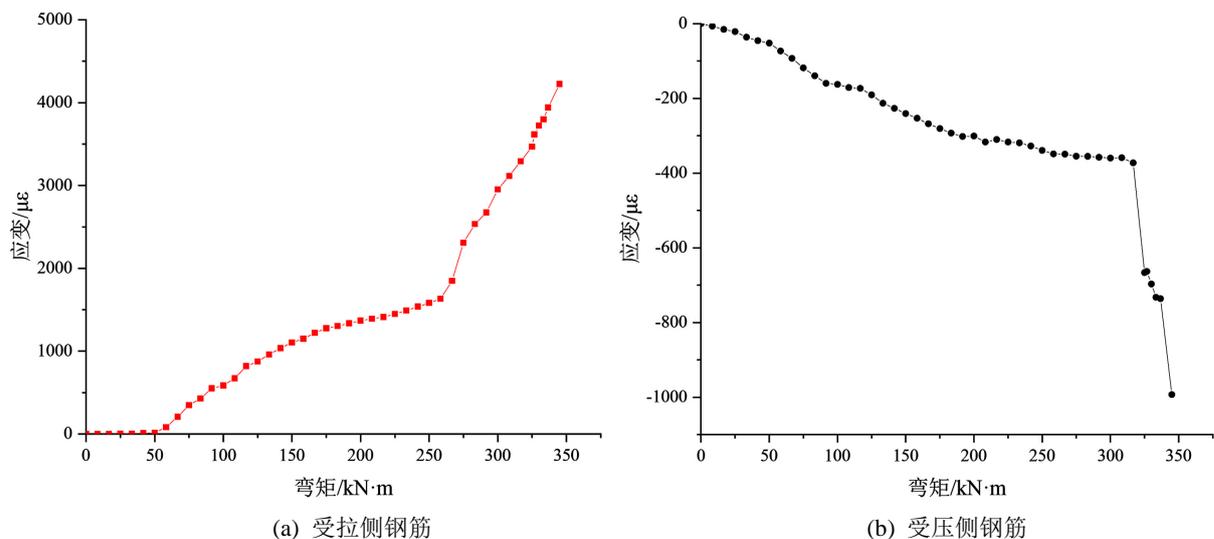


Figure 7. Beam reinforcement strain variation  
图 7. 梁内纵向钢筋的应变发展曲线

### 3.3. 梁体外侧表面应变

在试验前, 在梁跨中截面处从下而上依次等间距布设了 5 组应变片, 用于试验时梁跨中截面沿高度方向的变形情况。图 8 为梁外侧应变的发展曲线图。由于当荷载超过  $108 \text{ kN}\cdot\text{m}$  后, 梁体上部压缩破坏、

下部预制板出现张开现象已非常明显而使部分应变片失效,故图中仅有荷载  $\leq 108 \text{ kN}\cdot\text{m}$  时的数据。分析可知,当荷载  $\leq 50 \text{ kN}\cdot\text{m}$  时,5个测点的数据变化都比较小,但呈现出了明确拉压特征:位于下方的两个测点(H/6, 2H/6)为受拉、上方的两个测点(4H/6, 5H/6)为受压,中间测点(3H/6)基本上位于中性层上,应变基本不变;但当荷载增加  $60 \text{ kN}\cdot\text{m}$  后, H/6 和 2H/6 处的两个测点的应变增量明显增加,相应的曲线开始向上发展;当荷载进一步增加到  $68 \text{ kN}\cdot\text{m}$  时,位于 3H/6 处的测点的应变也开始呈受拉状态并急剧增加;当荷载进一步增加到  $75 \text{ kN}\cdot\text{m}$  时,原本为压缩变形的 4H/6 测点也演化为拉应变,且随着荷载增加应变呈线性增大。表明随着荷载的增大,复合梁的应力增加,混凝土会逐渐产生拉压破坏,使得应力出现重分布,且随着拉伸裂缝的延伸,原本中性层、压缩区的混凝土也会逐渐承受拉应力。

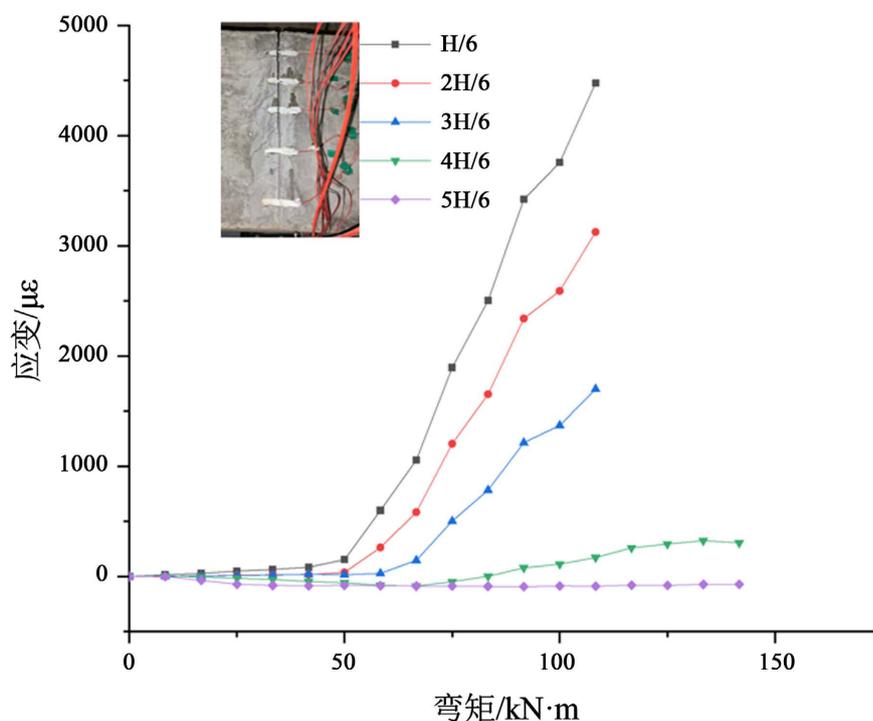


Figure 8. Strain diagram of the outside of the beam  
图 8. 梁外侧应变图

#### 4. 复合梁预制层的作用分析

本文实验梁是由四块 L 型预制板与一根现浇芯梁构成的复合梁,由于混凝土间的粘结性和 L 型预制板内设计连接用钢筋,这些钢筋插入到了芯梁内,使得 L 型预制板与芯梁可以很好的形成一个整体,但 L 型预制板的长度小于复合梁,在梁的长度方向上预制板存在拼接缝,使得复合梁在预制板拼接处的有效高度出现减小。

弯矩作用下梁的抗弯承载能力[12]可由式(1)进行计算。

$$M \leq \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_y' A_s' (h_0 - \alpha_s') \quad (1)$$

式中:  $\alpha_1$  系数,取 1.0;  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度设计值;  $b$  矩形截面宽度;  $x$  为受压区高度;  $h_0$  截面有效高度;  $f_y'$  钢筋受拉强度设计值;  $A_s'$  为受压区纵向普通钢筋截面面积;  $\alpha_s'$  受压区纵向普通钢筋合力点至截面受压边缘的距离。

分别以式(1)计算接缝截面和非接缝截面的抗弯承载能力,得到接缝截面的抗弯承载力为 231 kN·m、非接缝截面的抗弯承载力为 332.64 kN·m。而试验结果为 291.7 kN·m,虽然小于非接缝截面的承载力,但也为接缝截面承载力的 1.26 倍,表明 L 型预制板还是发挥了一定的作用,其作用主要来自:一方面预制板在增加非接缝截面的尺寸,且预制板内也有配筋钢筋,在提高梁强度的同时,有效的约束了接缝截面两侧混凝土的变形,使弯矩作用下梁只能沿接缝截面发生破坏;另一方面,弯矩作用下预制板在梁受拉侧虽然没有抗拉发挥作用,但在受压侧预制板间的间隙因芯梁压缩而消失并承受压应力,从而延缓了梁的破坏、提升了梁的承载力。为此,应考虑预制板对受压区宽度的影响,对式(1)进行修正可得如式(2)所示的复合梁抗弯承载力计算方法。

$$M \leq \alpha_1 f_c x (b + 2c) \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_y' A_s' (h_0 - \alpha_s') \quad (2)$$

式中:  $c$  为  $L$  预制板厚度,其它符号意义同上。

再以式(2)计算复合梁接缝所在截面的抗弯承载力,结果为 278.42 kN·m。与实验结果相比,误差仅为 4.6%,可见式(2)具有较高的精度,可用于对复合梁的承载力计算。

## 5. 结论

为提高锚杆挡土墙装配化的效率,本文设计了一种由预制面板和现浇混凝土构成的复合梁,通过四点弯曲试验测试了复合梁的抗弯承载力的特性,并分析复合梁预制层的作用。主要结论有:

- 1) 弯矩作用下复合梁的破坏发生在预制板拼接处,主要原因在于拼接处的有效截面高度小于梁的高度。
- 2) 弯矩作用下复合梁的变形失效过程可分为弹性、带缝工作和破坏三个阶段,而最终破坏型式为拼接处的预制板一侧张开、另一侧压缩破坏。
- 3) 复合梁的实测极限承载力要明显高于由预制板拼接处有效截面尺寸计算的承载力理论值,表明预制板对提高梁的承载力发挥了一定的作用。
- 4) 预制板一方面可以约束接缝截面两侧混凝土的变形,使弯矩作用下梁只能沿接缝截面发生破坏;一方面,在复合梁受压侧预制板间的间隙会因芯梁压缩而消失并承受压应力,从而延缓了梁的破坏、提升了梁的承载力。
- 5) 提出了一个考虑预制板作用的复合梁承载力计算方法。

## 基金项目

湖南省教育厅重点科研项目(23A0368)、杭州市建设科技项目(2023154)、浙江省建筑业技术创新协会科研项目(2023B104)。

## 参考文献

- [1] Men, P., Chen, F., Qin, F., Peng, X., Di, J. and Jiao, H. (2025) Behavior of Composite Beams with UHPC-Concrete Composite Slabs under Negative Bending Moment. *Journal of Constructional Steel Research*, **227**, Article ID: 109415. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109415>
- [2] Geng, J., Wang, F., Liu, C., Wang, J. and Zhao, Z. (2022) Parametric Study on Seismic Performance of Prefabricated Bridge Piers Connected by Ultra-High Performance Concrete Grout. *Structural Concrete*, **23**, 1469-1491. <https://doi.org/10.1002/suco.202100179>
- [3] Xie, X., Wang, D., Qian, Y. and Jin, Y. (2019) Summary of Research Status of Assembly Nodes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **330**, Article ID: 022072. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/330/2/022072>
- [4] Wang, H., Li, M. and Qiao, N. (2018) The Study of Steel Transfer Parts in Assembled Building Connection. *IOP*

*Conference Series: Materials Science and Engineering*, **399**, Article ID: 012054.

<https://doi.org/10.1088/1757-899x/399/1/012054>

- [5] 吴水根, 张海鹏, 潘钻峰, 等. 螺栓连接预制装配式混凝土剪力墙承载力计算方法[J]. 结构工程师, 2023, 39(1): 8-14.
- [6] 吕芳. 装配式混凝土结构施工现场连接技术研究[J]. 散装水泥, 2024(6): 26-28, 31.
- [7] 陈百玲, 殷悦, 高海洋, 等. 预制钢板夹心混凝土组合板与柱连接及其有限元分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(10): 1476-1484.
- [8] 邹艳花, 刘玲. 装配式混凝土结构柱-柱连接节点分析[J]. 砖瓦, 2023(4): 54-56, 60.
- [9] 刘子祺, 黎丹. 装配式混凝土结构连接方式探讨[J]. 新型工业化, 2020, 10(6): 143-144.
- [10] 刘泽, 何砚, 黄天棋, 等. 装配悬臂式挡土墙节点承载特性试验研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(9): 25-33.
- [11] 汤丽燕, 顾宽海, 牟云彤. 装配式 L 形挡墙在某护岸工程中的应用[J]. 水运工程, 2023(5): 22-27.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.