



碳纤维板加固 H 型钢梁剥离过程模拟及抗力分析

张鹏旭

(中国土木工程集团有限公司,北京 100089)

摘要: 为了建立更加方便、高效、直观的 CFRP 板加固钢梁有限元模型,基于“实体-板壳”黏贴-滑移界面模型,建立碳纤维板加固钢梁的三维模型,模拟未加固钢梁和贴板 CFRP 板加固钢梁的特征荷载、破坏模式及荷载-挠度曲线,分析不同荷载下 CFRP 板的应力变化和界面剥离过程,研究梁的剪跨比、跨高比和 CFRP 板的伸长比等因素对加固梁的界面剥离及剥离抗力的影响。结果表明:1)纯弯段长度对界面应力无影响,对剥离弯矩的影响也很小;2)在 CFRP 板伸长比不变的条件下,随着剪跨比的增大,截面抗弯承载力逐渐增大;3)在 CFRP 板伸入长度不变的条件下,随着剪跨比的增大,剥离弯矩先增大后减小。本文成果可为模拟 CFRP 板黏贴加固钢梁剥离过程和优化加固效能方面提供参考。

关键词: CFRP 板; H 型钢梁; 加固; 抗力分析; 有限元; 模拟

中图分类号: TU392.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)02-0014-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.02.016

Simulation and resistance analysis of debonding process of H steel beam reinforced with carbon fiber plate

ZHANG Pengxu

(China Civil Engineering Construction Corporation, Beijing 100089, China)

Abstract: In order to establish a more convenient, efficient and intuitive finite element model of CFRP plate reinforced steel beam, a three-dimensional model of reinforced steel beam of carbon fiber plate is established based on the “solid-plate-shell” adhesion-slip interface model. The characteristic load, failure mode and load-deflection curve of the unreinforced steel beam and the steel beam reinforced with CFRP plate are simulated. The stress change and interface debonding process of the CFRP plate under different loads are analyzed. The influence of such factors as the shear span ratio, span-height-ratio of the beam and the elongation ratio of the CFRP plate on the interface debonding and debonding resistance of the reinforced beam is studied. The results show that: 1) the length of the pure bending segment has no effect on the interfacial stress and has little effect on the debonding bending moment; 2) Under the condition that the elongation ratio of the CFRP plate remains unchanged, the bending bearing capacity of the section gradually increases with the increase of the shear span ratio; 3) Under the condition that the insertion length of the CFRP plate remains unchanged, the debonding bending moment first increases and then decreases with the increase of the shear span ratio. The results can provide a certain reference for simulating the debonding process of steel beams reinforced with CFRP plates and optimizing the reinforcement efficiency.

Key words: CFRP plate; H steel beam; reinforcement; resistance analysis; finite element; simulation

纤维增强复合材料 (fiber reinforced polymer, FRP) 具有轻质、高强、耐腐蚀等优点, 用于土木

工程结构加固时, 常采用胶黏剂将布或板状纤维片材黏贴在构件表面。这种外贴加固法不仅施工

收稿日期: 2024-03-15

作者简介: 张鹏旭 (1992—), 男, 工程师, 从事土木工程项目管理工作。

特别方便，而且对构件尺寸、外观和重量几乎没有影响，因而备受青睐。钢梁进行抗弯能力加固时，一般采用碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer/plastic, CFRP)这是因为碳纤维与钢材弹性模量相当，如果采用弹性模量较低的纤维品种或者单层碳纤维布，往往其承载能力提高幅度非常有限。纤维片材与钢梁通过胶黏剂传递界面黏结应力，达到共同工作的目的。由于片材在端部切断造成材料用量突变，附近区域产生界面应力集中，即在很薄的胶层中产生较大的界面剪应力与正应力，容易引起界面过早出现端部剥离破坏。这种局部脆性破坏一旦发生，将迅速发展成为大面积脱开，进而导致加固失效。

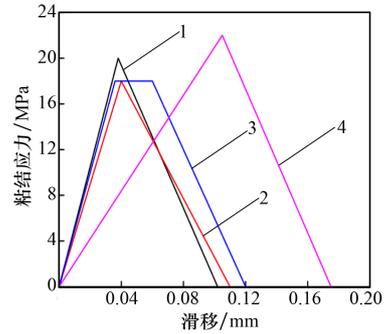
为了探究 CFRP 板加固梁的剥离破坏，不少学者开展了相关研究工作。如：艾腾腾等^[1]对考虑黏结滑移的箱型钢骨混凝土纯扭构件进行有限元模拟，发现数值分析结果与试验结果吻合较好，验证了采用模型的有效性；叶列平等^[2]介绍了结构工程中常用的纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer/plastic, FRP)材料性能和形式，分析了其优点与不足，并介绍了 FRP 加固结构的应用与发展；邓军等^[3]对 CFRP 板加固钢梁界面应力做了理论与试验研究，推导了外荷载作用下 CFRP 板加固钢梁的界面应力计算公式，探讨了静载作用下加固梁的承载力及刚度变化。本文通过界面应力分析和贴板加固钢梁加载过程数值模拟，研究纯弯段长度、剪跨比等原梁条件以及加固参数相应取值的变化对剥离特征值的影响，以期对相关工程实践提供一点参考。

1 有限元计算模型

1.1 本构关系

钢材的应力-应变关系采用三折线模型，屈服强度为 357 MPa，弹性模量为 205 MPa。CFRP 是一种线弹性材料，其受拉应力-应变关系为直线，弹性模量为 2.4×10^5 MPa。CFRP 与钢梁界面行为一般采用黏结-滑移关系进行模拟。根据文献 [2]，钢界面与 CFRP 之间的黏结-滑移关系共分为 4 种，即 Fernando 模型、Teng 模型、Dehghani 模型和 Fawzia 模型，如图 1 所示。本文基于 Teng 模型

界面黏结-滑移关系，建立“实体-板壳”界面模型。黏结层材料的属性通过定义 CFRP 与钢梁之间的界面行为来实现。CFRP 与钢梁之间的界面行为通过黏结-滑移双线性关系曲线进行约束。



模型：1—Fernando；2—Teng；3—Dehghani；4—Fawzia。

图 1 钢和 CFRP 界面黏结-滑移关系

1.2 模型建立

采用 ABAQUS 建立试件的有限元模型。在加载和支座位置均设钢垫块，钢梁采用简支约束。钢梁、CFRP 板和垫块均采用 ABAQUS 内置的实体应力单元(C3D8R)。钢梁与加载垫块、支座间采用绑定(Tie)约束。CFRP 板加固钢梁整体有限元模型各组成部分采用结构化网格，钢梁单元尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times [\text{腹板或翼缘厚度}(\text{mm})/2]$ ；CFRP 板单元尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times \text{板厚}(\text{mm})$ 。CFRP 板加固钢梁有限元模型如图 2 所示。

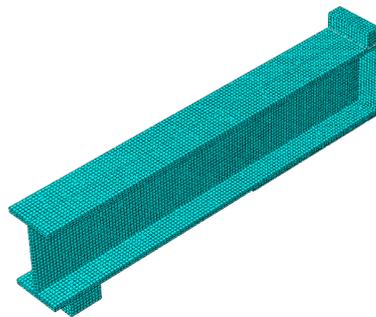


图 2 有限元模型

2 模拟结果验证

选取文献 [3] 中的试件建立有限元模型，将模拟结果与试验结果进行对比，内容包括特征荷载及破坏模式、荷载-挠度关系曲线、CFRP 板应力分布、界面应力及剥离过程。

2.1 特征荷载及破坏模式

在横截面上离中性轴越远，正应力越大。未

加固梁 S300、S400 与加固梁(S303、S304、S305、S310、S405、S406)试验结果及模拟结果如表 1 所示。其中：屈服荷载为钢梁上下翼缘有限元单元刚出现屈服时的荷载，在屈服荷载之前梁处于弹性阶段；极限荷载指整个加载过程中梁能承受的最大荷载。

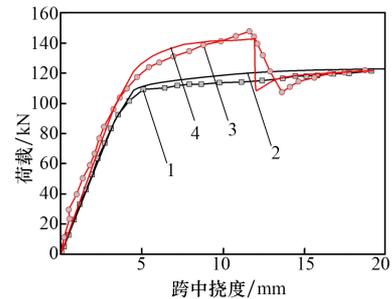
由表 1 可知：加固梁的屈服荷载和极限荷载较未加固梁均有所提高。加固梁 S303 ~ S305 的屈服荷载比未加固梁 S300 提高约 5.6%~22.2%，对极限荷载的提高约 0.8%~31.7%。加固梁 S405、S406 的屈服荷载比未加固梁 S400 分别提高 10.3%、16.8%，对极限荷载分别提高 27%、54%。综上，CFRP 板加固钢梁可提高其承载力。试件 S303 的极限荷载提高幅度最小，原因是 CFRP 板黏贴长度较短，导致过早地发生剥离破坏。

可见，试件模拟与试验结果对比中，屈服荷载相对误差均在 3.5% 以内，极限荷载相对误差均在 4.5% 以内，且破坏模式均相同，表明该有限元模型能够较准确地模拟未加固梁、纯黏贴加固梁的特征荷载，且模拟破坏模式与试验一致。

2.2 荷载 - 挠度关系曲线

图 3 为试件 S300、S305 模拟和试验的荷载 - 跨中挠度曲线。由图 3 可知：各模拟曲线和试验曲线发展规律均吻合较好。加载初期，曲线基本呈线性增长；加载至屈服荷载后，各梁的曲线斜率较前一阶段变小，但加固梁的曲线斜率始终高于未加固梁。当未加固梁跨中挠度达到 6 mm 时，钢梁已明显压弯。此后，钢梁挠度进一步增加，

但荷载增长缓慢。当荷载达到 120 kN 时，跨中已明显屈曲。当加固梁达到极限荷载时，荷载突然坠落，而此后荷载 - 跨中挠度曲线与未加固梁接近。结果表明，CFRP 板加固梁可有效提高其极限荷载^[4]。



1—S300 试验值；2—S300 模拟值；
3—S305 试验值；4—S305 模拟值。

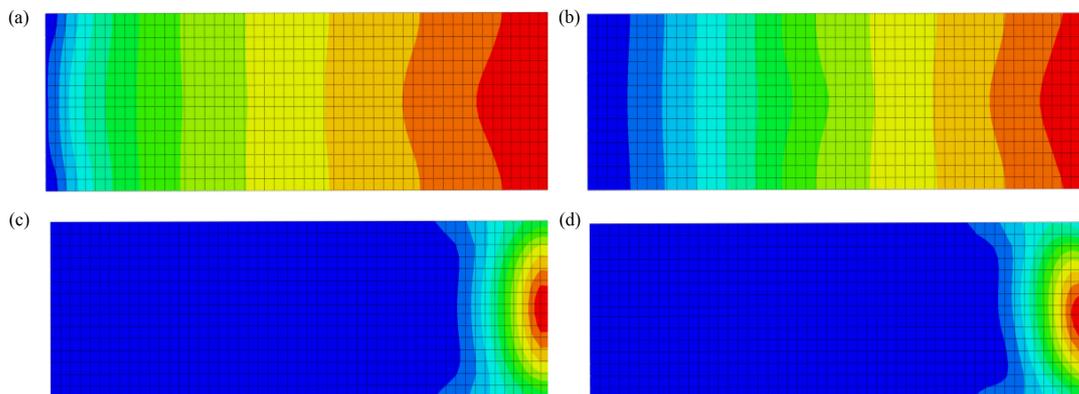
图 3 试件荷载 - 挠度曲线

2.3 CFRP 板应力分布

为进一步分析加载过程中 CFRP 板的受力情况，通过 ABAQUS 软件后处理模块，查看试件 S305 不同荷载下的 CFRP 板应力云图，如图 4 所示。由图 4 可知：随着荷载的增加 [图 4(a)、(b)]，CFRP 板应力逐渐增大，其最大应力位于板的中部，应力沿板端方向逐渐减小。极限荷载状态 [图 4(c)] 下，在距板端 100 mm 位置附近，板左右两侧的应力梯度较大；在跨中较近范围内，板的应力水平均较高。极限荷载 [图 4(d)] 后，板上应力大部分已归零，说明板的剥离扩展至跨中小范围区域，但没有完全脱落。应力分布呈不规则倾斜状，这是由于板剥离后继续加载，钢梁发生屈曲破坏，并且导致其整体失稳。

表 1 加固梁试验及模拟结果

序号	试件编号	CFRP 板 长 × 宽 × 厚/mm	试验结果			模拟结果		
			屈服荷载/kN	极限荷载/kN	破坏模式	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	破坏模式
1	S300	—	90	120	屈曲破坏	90	121	屈曲破坏
2	S303	300 × 76 × 3	95	121	剥离破坏	96	122	剥离破坏
3	S304	400 × 76 × 3	100	133	剥离破坏	101	131	剥离破坏
4	S305	500 × 76 × 3	105	147	剥离破坏	105	143	剥离破坏
5	S310	1 000 × 76 × 3	110	158	屈曲破坏	113	151	屈曲破坏
6	S400	—	107	122	屈曲破坏	109	123	屈曲破坏
7	S405	500 × 76 × 3	118	155	剥离破坏	122	159	剥离破坏
8	S406	600 × 76 × 3	125	188	剥离破坏	127	185	剥离破坏



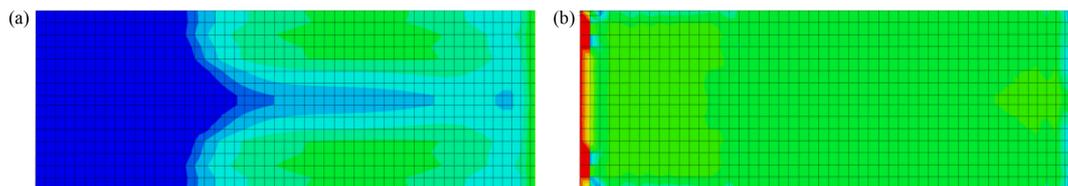
荷载/kN: (a) 60; (b) 120; (c) 143; (d) 108

图 4 S305 试件 CFRP 板不同荷载下应力云图对比

2.4 界面应力及剥离过程

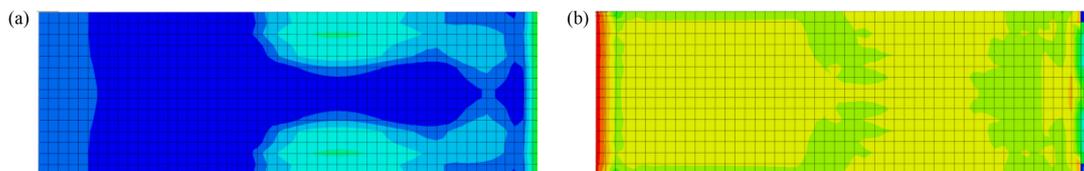
贴板加固钢梁的剥离破坏始于板的端部。剥离破坏是界面应力增大到一定程度的结果，沿板的长度不断发展，到某特定状态时，将无法保持其承载稳定性而突然出现大面积崩脱，荷载随即坠落^[5]。图 5~9 为试件 S305 剥离前后全过程中不同阶段的界面应力变化情况。由图 5~9 可知：在 CFRP 板剥离之前，当荷载为 120 kN(图 5)时，最大界面剪应力出现在板端 200 mm 范围内，并往跨中腹板下方区域延伸。继续加载至 135 kN(图

6)时，最大界面剪应力扩散至加载点腹板下方区域附近，而板端 50 mm 范围内的界面剪应力已开始下降。继续加载至 140 kN(图 7)时，最大界面剪应力仅在距板端 200 mm 附近至加载点下方区域内，且沿板端方向呈递减趋势。继续加载至 143 kN(图 8)时，最大界面剪应力区域缩小至距加载点下方 100 mm 范围内，沿板端方向呈递减趋势，此时，CFRP 板端界面剪应力已减小至 0。随后界面剪应力为零的区域迅速往跨中扩展，荷载急剧坠落(图 9)，最终，CFRP 板两侧出现大面积剥离。



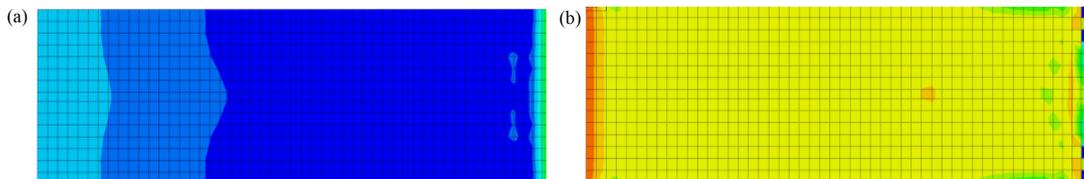
(a) 剪应力; (b) 正应力

图 5 试件 S305 剥离前板端最大剪应力



(a) 剪应力; (b) 正应力

图 6 试件 S305 剥离前板端剪应力下降



(a) 剪应力; (b) 正应力

图 7 试件 S305 剥离前剪应力向板端递减

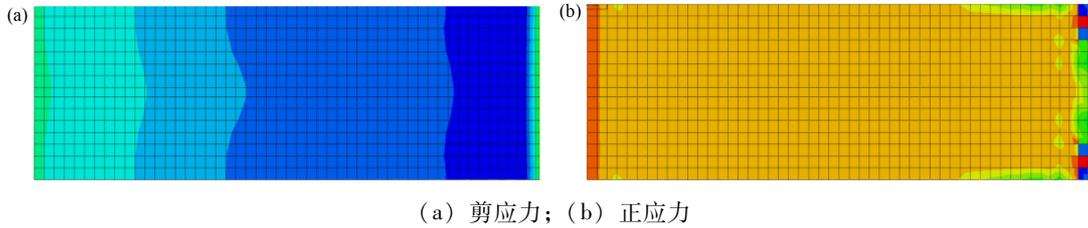


图 8 试件 S305 剥离前板端出现 0 剪应力区域

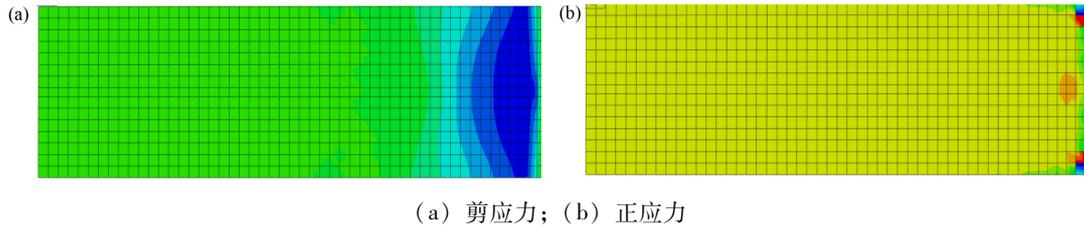


图 9 试件 S305 剥离后板端 0 剪应力区域向跨中扩展

通过上述多个角度的对比，表明所建立的数值分析模型合理可行，且其用于模拟剥离过程，将有助于弥补试验观察的不足、探明较具隐蔽性的破坏机理。

3 模拟变量说明

3.1 加固梁跨中截面弯矩计算

假若原梁和 CFRP 板之间一直黏结完好，加固钢梁不会发生剥离破坏，最终将以屈曲失稳或材料达到强度极限为破坏标志。如果稳定性能够通过构造措施得到保证，梁跨中最大弯矩将能达到一个无法超越的上限值。该值只与原梁和 CFRP 板的截面尺寸及材料性能有关，与原梁和 CFRP 板沿梁长度方向的参数无关。根据平截面假定，经推导可知，在弹性阶段，即加固梁受压翼缘屈服前，其截面满足平截面假定，此时，跨中截面应力-应变关系如图 10 所示，跨中截面弯矩如式 (1) 所示。其中： σ_1 、 ε_1 为梁跨中截面上翼缘外侧的正应力和正应变， σ_2 、 ε_2 为上翼缘下侧和腹板交接处的正应力和正应变， σ_3 、 ε_3 为下翼缘上

侧和腹板交接处的正应力和正应变， σ_4 、 ε_4 为下翼缘外侧的正应力和正应变，其中正应力单位为 N/m^2 ； x 为加固梁中性轴到受拉翼缘下表面的距离，mm； σ_{cfpr} 为 CFRP 板的正应力， N/m^2 ； ε_{cfpr} 为 CFRP 板的正应变。

$$M = \frac{t_1 + b_1(\sigma_1 + \sigma_2)}{4}(2h - 2x - t_1) + \frac{t_w \sigma_2}{3}(h - x - t_1)^2 + \frac{t_w \sigma_3}{3}(x - t_2)^2 + \frac{t_2 b_2(\sigma_3 + \sigma_4)}{4}(2x - t_2) + \frac{\sigma_f t_f b_f}{2}(2x + t_f) \quad (1)$$

式中： t_1 、 t_2 为上、下翼缘厚度，mm； b_1 、 b_2 为上、下翼缘宽度，mm； h 为梁高，mm； t_w 为腹板厚度，mm； σ_f 为 CFRP 板的正应力， N/m^2 ； t_f 为 CFRP 板的厚度，mm； b_f 为 CFRP 板的宽度，mm。当加载至加固梁上翼缘应力 $\sigma_1 = f_y$ (f_y 为加固梁上翼缘的屈服应力， N/m^2) 时，跨中截面弯矩为其屈服弯矩 $M_y (N \cdot m)$ 。

3.2 加固梁加固参数选取

影响贴板加固梁界面应力和剥离抗力的因素可分为原梁条件和加固参数两大类。已有文献对板的长度、厚度和宽度等几何尺寸、胶层厚度以及材料弹性模量等因素的影响关注较多，本文重点研究跨高比等相对尺度的影响，故不改变原梁和 CFRP 板的截面尺寸及材料性能，只改变梁长方向的相关几何参数。

两点对称集中加载的简支梁在工程实践中具有典型意义，本文以此为研究对象，其中梁的跨

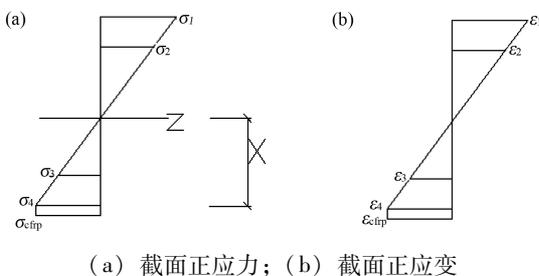


图 10 加固梁弹性阶段应力-应变关系

度包括 1 个纯弯段长度和两个剪跨段长度。由于原梁和 CFRP 板的截面尺寸及材料性能不变，加固梁所能达到的弯矩上限也不变，而相同弯矩对应的集中荷载、支座反力或剪跨段剪力受剪跨段长度影响很大，因此，以端部剥离发生时的跨中弯矩作为剥离抗力的代表值进行表征。

上述两点对称集中加载的简支梁，若剪跨段长度相同而纯弯段长度不同，则其内力图的差异只在于纯弯段最大弯矩的分布长度，此时最大弯矩虽然相同，跨中挠度却有差异。纯弯段较长时，跨中挠度也较大。如果将跨中弯矩理解为加载点弯矩（二者本来相等），由于端部剥离发生在剪跨段，而剪跨段的内力分布相同，据此推测，剥离抗力可能也与纯弯段长度无关。对此，本文将通过界面应力分析和加固梁受力剥离全过程数值模拟来进行探讨。所研究试件如表 2 所示，主要变量为钢梁的纵向尺度，包括纯弯段和剪跨段的长度以及梁跨度；考虑到 CFRP 板伸入剪跨段的长度随剪跨的变化存在不同的方式，CFRP 板的纵向尺度也作为相关参数一并研究。两端简支 H 型钢梁截面尺寸为 125 mm ×

125 mm × 9 mm × 6.5 mm（翼宽 × 腹高 × 翼厚 × 腹厚）。所有梁均采用两点对称加载，支座和集中荷载的垫板尺寸均为 125 mm × 30 mm × 25 mm（长 × 宽 × 高）。试件编号中首字母 B 为 CFRP 板纯黏贴加固梁；第二个数字为剪跨比；小数点带数字，代表 CFRP 板的伸长比（如“.6”表示伸长比为 0.6），若剪跨比与伸长比之乘积相等，则板伸入梁剪跨段长度相同；“-”后数字为纯弯段长度，缺省则指纯弯段长度为 200 mm。序号 1~4 只改变梁和 CFRP 板在纯弯段的长度；序号 2、5、6 改变剪跨比，但 CFRP 板伸入长度不变（均为 300 mm）；序号 2、7、8 改变剪跨比，但 CFRP 板伸长比不变（均为 0.6）。

4 参数影响分析

对各梁建立类似有限元模型进行数值模拟，以分析纯弯段长度和剪跨段长度等原梁条件的影响^[6]。特征弯矩如表 3 所示，其中理论屈服弯矩通过式(2)计算。由表 3 可知：跨中纯弯段长度对剥离弯矩的影响也很小，尤其是纯弯段长度达到一定程度（表 3 大约为 200 mm）以后。

表 2 CFRP 板加固钢梁参数

mm

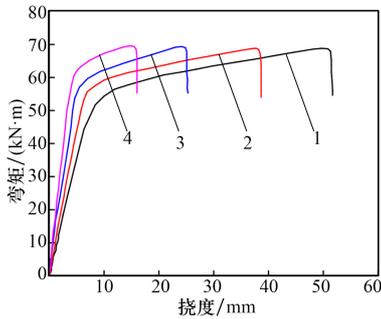
序号	梁编号	梁纵向尺度			CFRP 板尺寸	
		纯弯段长	剪跨段长	跨度	长 × 宽 × 厚	伸入剪跨
1	B4.6-30	30	500	1 030	630 × 120 × 2.4	300
2	B4.6	200	500	1 200	800 × 120 × 2.4	300
3	B4.6-400	400	500	1 400	1 000 × 120 × 2.4	300
4	B4.6-600	600	500	1 600	1 200 × 120 × 2.4	300
5	B5.48	200	625	1 450	800 × 120 × 2.4	300
6	B6.4	200	750	1 700	800 × 120 × 2.4	300
7	B5.6	200	625	1 450	950 × 120 × 2.4	375
8	B6.6	200	750	1 700	1 100 × 120 × 2.4	450

表 3 CFRP 板加固钢梁试件主要模拟结果

试件编号	屈服弯矩			极限性能模拟结果		
	理论值/(kN·m)	模拟值/(kN·m)	误差/%	破坏模式	极限弯矩/(kN·m)	变化率/%
B4.6-30	56.2	54.7	-2.7	剥离破坏	70.5	1.0
B4.6	56.2	54.2	-3.6	剥离破坏	69.8	基准值
B4.6-400	56.2	53.8	-4.3	剥离破坏	69.5	-0.4
B4.6-600	56.2	53.3	-5.2	剥离破坏	69.3	-0.7
B5.48	56.2	54.4	-3.2	剥离破坏	71.3	2.1
B6.4	56.2	54.3	-3.4	剥离破坏	70.9	1.6
B5.6	56.2	51.9	-7.7	剥离破坏	72.6	4.0
B6.6	56.2	54.8	-2.6	剥离破坏	73.7	5.6

4.1 纯弯段长度的影响

图 11 为剪跨比为 4 的梁的不同纯弯段长度弯矩 - 挠度曲线, 图 12 为不同纯弯段长度对极限弯矩的影响。由图 11、12 可知: 采用加载点的弯矩 - 挠度曲线能够剔除纯弯段长度对加固梁宏观变形的影响, 更有利于研究剪跨比等因素的影响。



1—B4.6-600; 2—B4.6-400;
3—B4.6; 4—B4.6-30。

图 11 不同纯弯段长度弯矩 - 挠度曲线对比

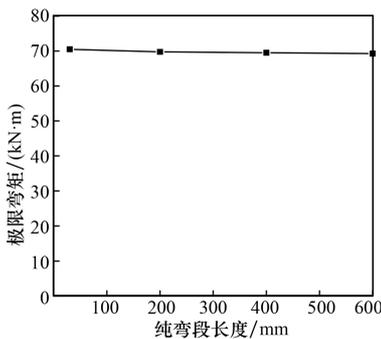


图 12 不同纯弯段长度对极限弯矩的影响

4.2 剪跨比的影响

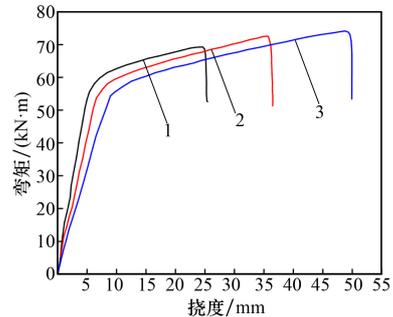
4.2.1 板伸长比不变

为了便于研究剪跨比对剥离弯矩的影响, 保持 CFRP 板伸入剪跨段的比例 0.6 保持不变。图 13 为不同剪跨比加载点弯矩 - 挠度曲线, 图 14 为剪跨比对极限弯矩的影响。由图 13、14 可知: 在加载前期, 剪跨比越大, 其刚度越小。屈服荷载后, 随着剪跨比的增大, 破坏时其截面抗弯承载力逐渐增大, 加载点挠度也明显增大。

4.2.2 板伸入长度不变

保持 CFRP 板伸入长度为 300 mm, 图 15 为不同剪跨比加载点弯矩 - 挠度曲线, 图 16 为剪跨比对极限弯矩的影响。由图 15、16 可知: 随着剪跨比的增大, 相同弯矩下加载点的挠度相应增大, 而剥离弯矩先增大后减小。这是由于保持伸长比

相同, 剪跨比越大, 剥离弯矩越大, 这时需在此基础上分别缩短相应板长, 显然, 剥离弯矩会有不同程度的减小。



1—B4.6; 2—B5.6; 3—B6.6。

图 13 不同剪跨比加载点弯矩 - 挠度曲线

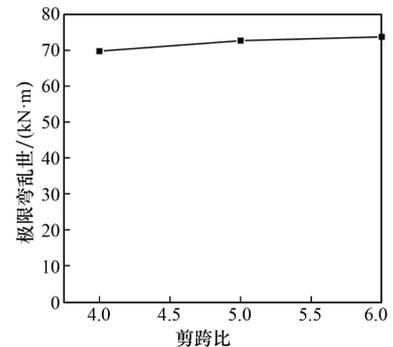
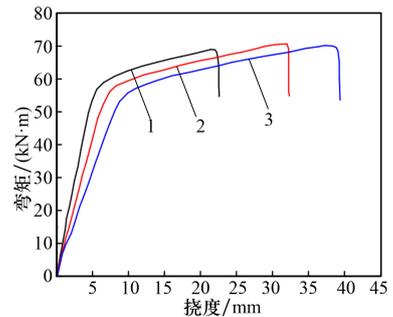


图 14 剪跨比对极限弯矩的影响



1—B4.6; 2—B5.48; 3—B6.4。

图 15 不同剪跨比加载点弯矩 - 挠度曲线对比

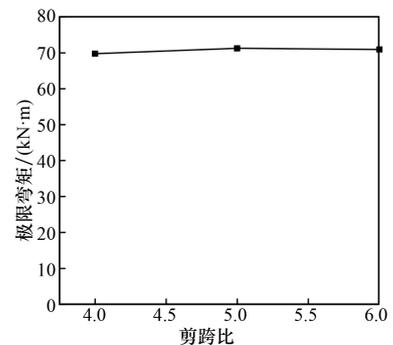


图 16 不同剪跨比对极限弯矩的影响

填形式开展了试验段研究,确定了最优的盾构掘进岩溶处置方案。通过对盾构掘进过程中的地表变形数据与掘进姿态数据进行分析可以表明,所确定的岩溶处置方案能够较好地控制地表变形与掘进姿态。本研究形成了一套完备的岩溶处置施工工艺,基于溶洞尺寸确定了钻孔的布置位置与个数,并总结了施工过程中的注浆异常情况处理与注浆效果检测方法,研究成果可为管廊盾构施工岩溶处置提供技术参考。

参考文献:

- [1] 韩艾芳. 基于克里金法的地铁车站场区岩溶分布规律研究[J]. 工程建设,2020,52(4):38-42;54.
- [2] 张志亮. 岩溶发育区地下综合管廊盾构施工注浆技术[J]. 石材,2023(12):13-15;89.
- [3] 张博. 岩溶区地铁盾构隧道施工关键技术研究[J].

中华建设,2024(2):110-112.

- [4] 崔学忠. 昆明轨道交通盾构工程岩溶处置技术研究与应用[J]. 工程建设,2019,51(12):66-73.
- [5] 王海林,王木群,傅鹤林,等. 复式向斜盆地构造富水岩溶台地特长隧道设计关键技术研究[J]. 公路工程,2023,48(3):61-67.
- [6] 徐桂林,彭学先. 非接触监控量测技术在岩溶隧道施工中的应用[J]. 湖南交通科技,2018,44(4):160-164.
- [7] 崔明,于洪彪,王超,等. 岩溶强发育区盾构隧道施工技术研究[J]. 施工技术(中英文),2023,52(1):74-79.
- [8] 吴发展,刘道炎. 城市地铁穿越岩溶地段盾构掘进技术[J]. 青海交通科技,2022,34(4):152-158.
- [9] 殷颖,田军,张永杰. 岩溶隧道灾害案例统计分析研究[J]. 公路工程,2018,43(4):210-214;273.
- [10] 苏媛. 地铁盾构区间岩溶处治技术的探讨[J]. 北方建筑,2021,6(6):20-23.

(上接第 20 页)

5 结 论

(1)使用 ABAQUS 软件较好地模拟未加固钢梁和贴板加固钢梁的特征荷载、破坏模式及荷载-挠度曲线,其中屈服荷载模拟值与试验值的相对误差为 3.5%,极限荷载模拟值与试验值的相对误差为 4.5%。

(2)纯弯段较长时,跨中挠度较大,但纯弯段长度对界面应力无影响,它对剥离弯矩的影响也很小,尤其在纯弯段长度达到一定程度后。

(3)保持 CFRP 板伸长比不变,随着剪跨比的增大,破坏时其截面抗弯承载力逐渐增大,加载点挠度也明显增大。

(4)保持 CFRP 板伸入长度不变,随着剪跨比的增大,相同弯矩下加载点的挠度相应增大,而剥离弯矩先增大后减小。

(5)通过对 CFRP 板纯黏贴加固钢梁的界面剥离过程及剥离抗力分析,建议采用 G 字夹型端部机械锚固装置加固 CFRP 板纯黏贴钢梁。在人力扭

矩扳手可以操作的扭矩范围内,对 G 字夹施加一定螺栓预紧力,可获得抵抗剥离应力的夹持预应力。

参考文献:

- [1] 艾腾腾,刘继明,宋晨晨,等. 考虑黏结滑移的箱型钢骨混凝土纯扭构件 ABAQUS 模拟方法研究[J]. 工程建设,2016,48(5):14-19.
- [2] 叶列平,冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报,2006,39(3):24-36.
- [3] 邓军,黄培彦. CFRP 板加固钢梁界面应力的理论与试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2007,35(7):10-14.
- [4] 李鹏,徐德新,张汉民. 碳纤维材料加固钢梁的试验研究[J]. 工业建筑,2004,34(7):91-92;98.
- [5] 彭福明. 纤维增强复合材料加固修复金属结构界面性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2005.
- [6] 彭福明,郝际平,杨勇新,等. CFRP 加固钢梁的有限元分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2006,38(1):18-22;68.