文章编号:1005-0523(2024)04-0036-09

波纹钢板加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验与数值分析

梁国卿[1],赵俊宇[2],毛国辉[1],朱碧堂[2,3]

(1. 江西省天驰高速科技发展有限公司,江西 南昌 330103;2. 华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013;
3. 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)

摘要:【目的】为研究波纹钢板内衬加固隧道衬砌的局部荷载传递机理和力学性能。**【方法】**将隧道衬砌单元视作为梁单元,开展了波纹钢板加固钢筋混凝土梁的抗弯性能试验,建立相应的三维精细化有限元模型,通过试验结果验证模型并对荷载传递机理进行分析。**【结果】**研究结果表明,与未加固的梁相比,波纹钢板加固梁的极限荷载提高了30%~41%,极限荷载随锚栓数量的增加而提高,波纹钢板与混凝土结构的相对滑移随锚栓数量的增加而降低。在加载初期波纹钢板均处于中性层位置,应变基本为零;达到开裂荷载后,波纹钢板波峰整体处于受压状态,而波谷一直处于受拉状态。**【结论】**通过有限元软件分析,验证了试件破坏模式及波纹钢板荷载-应变情况,模拟结果与试验结果较吻合。

关键词:波纹钢板;加固;抗弯性能试验;数值模拟

中图分类号:TU375.1 **文献标志码:**A

本文引用格式:梁国卿,赵俊宇,毛国辉,等. 波纹钢板加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验与数值分析[J]. 华东交通大学学报,2024,41(4):36-44.

Experiment and Numerical Study on the Flexural Performance of Concrete Beams Reinforced with Corrugated Steel Plates

Liang Guoqing[1], Zhao Junyu[2], Mao Guohui[1], Zhu Bitang[2,3]

(1. Jiangxi Tianchi Highway Technology Co., Ltd., Nanchang 330103, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University,Nanchang 330013, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical Infrastructure Safety and Control of Jiangxi Province, East China JiaotongUniversity, Nanchang 330013, China)

Abstract:【Objective】 In order to study the local load transfer mechanism and mechanical properties of tunnel lining reinforced with corrugated steel plate lining. **【Method】** The tunnel lining unit was regarded as a beam unit, and a bending performance test of concrete beam reinforced with corrugated steel plate was carried out. Establish a corresponding three-dimensional refined finite element model, verify the model through test results, and analyze the load transfer mechanism. **【Result】** Research results show that compared with unreinforced beams, the ultimate load of beams reinforced with corrugated steel plates is increased by 30% to 41%, and the ultimate load increases with the increase in the number of anchor bolts. The relative slip between the corrugated steel plate and the concrete structure decreases as the number of anchor bolts increases. At the initial stage of loading, the corrugated steel plate is in the neutral layer position, and the strain is basically zero; after reaching the cracking load, the entire corrugated steel plate peak is in a compressive state, while the corrugated steel plate trough is

收稿日期:2023-10-16

基金项目:江西省重点研发计划项目(20232BBE50014);江西省交通运输厅科技项目(2021H0035);江西省交通运输厅重点工程科技项目(2023C0001)

always in a tensile state.【**Conclusion**】Finally, through the finite element software analysis, the failure mode of the specimen and the load-strain of the corrugated steel plate are verified. The simulation results are in good agreement with the experimental results.

Key words: corrugated steel plate; reinforcement; bending resistance test; numerical simulation

Citation format: LIANG G Q, ZHAO J Y, MAO G H, et al. Experiment and numerical study on the flexural performance of concrete beams reinforced with corrugated steel plates[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(4): 36−44.

【**研究意义**】波纹钢板（corrugated steel plate，CSP）应用至今已有百年历史，最早应用于桥涵、涵洞等建筑物。随着波纹钢制作工艺的不断进步，现有混凝土结构年久失修的现象逐年增加，波纹钢板加固混凝土结构已运用到各类基建工程中[1-3]。本研究可为波纹钢板加固技术在实际工程中的应用提供理论基础和实验数据支持，具有重要的工程应用价值。

【**研究进展**】贺文涛等[4]以某四跨简支板桥加固改造工程为依托，通过有限元软件分析得出采用波纹钢板加固后的旧桥在车辆荷载作用下的最大弯矩降低81.19%，最大剪力降低60.99%，能够有效提高桥梁的刚度和承载能力。李勇等[5]研究了波纹钢板和平板内衬对钢筋混凝土管涵的加固效果，结果表明波纹钢板加固后的管涵极限承载力是平板加固的10倍。近年来众多学者对波纹钢板加固混凝土结构的力学性能开展了研究，肖妙武等[6]研究了端部锚固条件对波纹钢-混凝土组合板静力性能的影响，发现设置端部栓钉后组合板能提高约0.3倍的抗剪承载力，提出了波纹钢-混凝土组合板的抗剪承载力计算方法。周小淇等[7]通过对波纹钢板-混凝土组合梁的试验和有限元分析，得出了设置剪力钉、增大波距和钢板厚度均能提高组合梁的极限承载力。随着对波纹钢-混凝土组合结构受力机理进一步研究，波纹钢板在大跨度隧道衬砌加固领域的应用在近年来得到了国内外学者的探讨，陈望祺等[8]针对隧道衬砌掉落病害，通过有限元软件研究了波纹钢板单独作用、与化学锚栓共同作用、与化学锚栓和填充层共同作用条件下对加固效果的影响，发现波纹钢板+化学锚栓+填充物是最优的加固方式。叶子健等[9]依托实际工程，通过对波纹钢板套衬应用于隧道衬砌加固技术的研究以及现场监测分析得出：波纹钢板套衬能提高衬砌结构的承载力，延长隧道的使用寿命。

【**创新特色**】本文共制作了6根钢筋混凝土梁，在养护28 d后对其中4根梁采用波纹钢板锚固，并填充自密实混凝土养护28 d后进行两点加载试验，对比研究了波纹钢板加固、不同锚栓数量连接、原有混凝土缺陷（混凝土保护层开裂，纵向钢筋裸露）对试件的破坏模式、荷载-位移曲线和波纹钢板应变情况的影响。【**关键问题**】波纹钢板-混凝土组合结构的试验研究主要为栓钉与波纹钢板焊接，采用锚栓连接波纹钢板与原有衬砌形成组合结构的力学性能鲜有研究。本研究试图为波纹钢板加固大断面隧道理论研究提供试验支撑。

1　试验概况

1.1　试件设计

试验设计了6根钢筋混凝土试件，试件尺寸均为：1 500 mm×300 mm×300 mm，混凝土强度等级为C40；箍筋采用ϕ8@190的HPB300级钢筋；其中两根梁的跨中位置预制了长×宽×高=300 mm×30 mm×30 mm、开角60°的∧型槽模拟带有缺陷的开裂梁[10]。预制∧型槽及锚栓布置如图1所示。

1.2　加固方案

试件编号及加固方案如表1所示，JGL-1~JGL-4采用强度等级为Q345的波纹钢板加固，波纹钢板尺寸为：板长1 500 mm，宽300 mm，波距×波高×板厚=150 mm×50 mm×6 mm，两侧焊有厚度为6 mm的法兰板；采用M16化学锚栓和强度等级为40 MPa的自密实微膨胀混凝土（SMC40）与原有试件连接，其中锚栓沿波纹钢板波峰布设。

1.3　材料性能

试验时将C40混凝土和C40自密实混凝土的按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》（GB/T 50081—2019）制得150 mm^{3}标准块，测得的平均抗

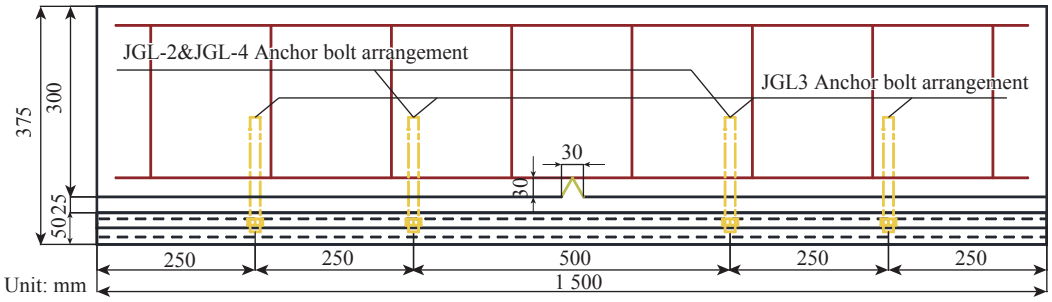


图1 预制ʌ型槽及锚栓布置

Fig. 1 Prefabricated ʌ- cracks grooves and anchor bolt arrangements

表1 试件加固方案

Tab.1 Specimen reinforcement scheme

Test number	Defect	Rein-forcement	Connection type
DZL	–	–	–
JGL-1	–	CSP	SMC40
JGL-2	–	CSP	2 M16 anchor+SMC40
JGL-3	–	CSP	4 M16 anchor+SMC40
KLL	ʌ-cracks	–	–

压强度分别为40.81,40.88 MPa;根据《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—2012)计算得出的弹性模量 E_c 均为 3.28×10^4 MPa;对所用钢材依据《金属材料弯曲试验方法》(GB/T 232—2010)及《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)测得波纹钢板、钢筋及锚栓的屈服强度 f_y,极限抗拉强度 f_u 及弹性模量 E_s 如表2所示。

表2 钢材的力学性能

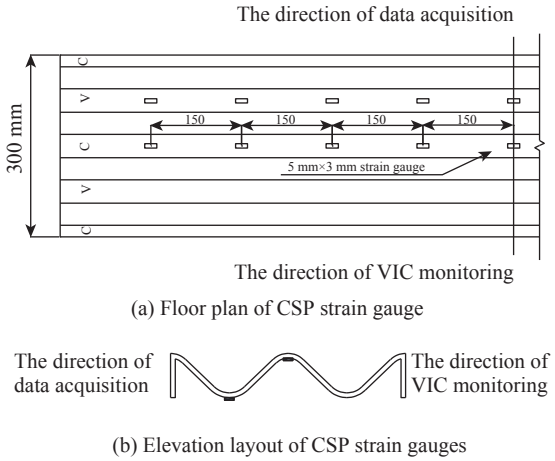
Tab.2 Mechanical properties of steel

Steel	f_y /Mpa	f_u /Mpa	E_s /Gpa
CSP	361.9	462.7	206
A8-HPB300-Rebar	410.8	570.9	200
C12-HRB400-Rebar	428.6	578.4	200
C16-HRB400-Rebar	460.3	563.8	201
Anchor bolt	380.6	576.2	200

1.4 加载方案与测点布置

试验采用两点加载方式,加载试验正式开始前,进行预加载,消除试件与加载系统之间的缝隙,并检查加载系统和监测仪器是否正常工作。正式加载采用分级加载,前100 kN,采用每级10 kN逐级加载,每级荷载持荷5 min,之后每级荷载为5 kN逐级加载,每级荷载持荷10 min,直至试件挠度迅速增大停止试验。

跨中及加载点处设有3个直线式位移计以量测试件挠度;采DICM法监测试件跨中300 mm×300 mm区域的混凝土应变;由于试件对称,在波纹钢板跨中一侧的法兰板、波峰(Crest)及相邻的波谷(Vally)位置每隔150 mm粘贴应变片以监测波纹钢板应变(图2)。



(a) Floor plan of CSP strain gauge

(b) Elevation layout of CSP strain gauges

图2 波纹钢板电阻应变片布置图

Fig. 2 Layout diagram of corrugated steel plate strain gauges

2 试验结果分析

2.1 试件破坏形态

未加固的试件DZL和KLL试验现象相似,在弯剪区段的受拉区边缘先产生少许竖向裂缝,随着荷载增加,裂缝沿竖向延伸一小段长度后,迅速斜向发展延伸形成斜裂缝。当达到临界开裂荷载 P_{cr} 时,产生较宽的临界斜裂缝,使斜截面剪压区的高度缩小,最后导致剪压区的混凝土破坏;但由于试件KLL预留ʌ型槽,裂缝首先出现在跨中位置,随后出现斜裂缝。

1)波纹钢板跨中屈服。采用波纹钢板和微膨胀混凝土加固的试件JGL-1,微膨胀混凝土能与原

有的混凝土梁有效结合并共同作用，但与钢板的接触面结合效果差，主要是靠两者之间的摩擦力相互作用。混凝土的变形先于波纹钢板，但在混凝土压溃的同时波纹钢板往往也达到塑性变形。

2）锚栓剪断。采用2根锚栓加固的试件JGL-2，波纹钢板能进一步与混凝土结构协同受力。锚栓通过化学药剂牢牢咬住混凝土结构并通过螺帽与波纹钢板固定，使混凝土结构与波纹钢板组合受力。在达到极限荷载后，二者的相对错动达到极限，锚栓的抗剪承载力无法满足，锚栓被剪断。

3）波纹钢板支座处屈服。采用4根锚栓加固的试件JGL-3，锚栓能够共同承担混凝土结构与波纹钢板之间的滑移，增强试件的协同变形，最终混凝受压区压溃，波纹钢板在支座附近发生局部屈服。

在波纹钢板加固混凝土梁试验中发现，相比于跨度与截面高度之比>4且箍筋较少的对照梁发生剪切破坏，采用波纹钢板加固后的试件能呈现受弯破坏特征。

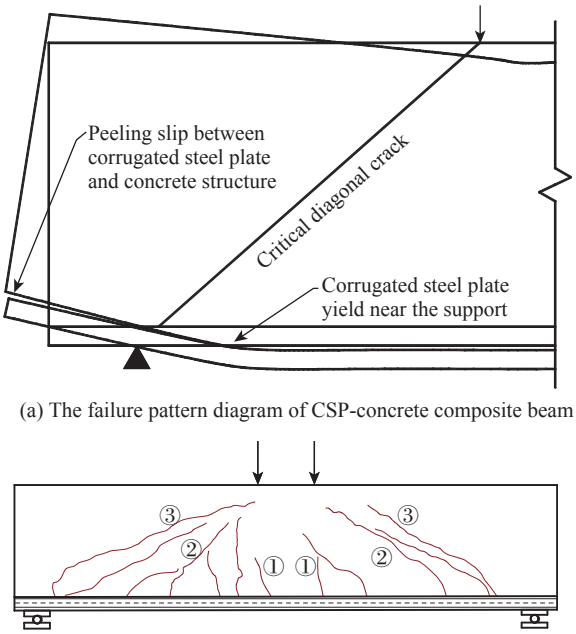
2.2　试件破坏模式分析

钢筋混凝土梁的剪切破坏一般是由剪压区的混凝土破坏或斜截面破坏引起的[11]，采用波纹钢板、微膨胀混凝土和锚栓加固的试件，支座与加载点的对角斜裂缝往往会发展成临界斜裂缝，当达到极限荷载后，临界斜裂缝迅速增宽，试件两端向上挠曲，支座附近波纹钢板屈服，波纹钢板与混凝土结构剥离，产生相对滑移以及虚线表示的变形模式，如图3(a)所示。

锚栓锚固后的试件破坏过程基本一致，裂缝开展模式如图3(b)所示。具体表现为：裂缝最先出现在加载点下方的两条竖向裂缝①，随着荷载增加，斜裂缝②从靠近跨中的锚栓附近出现，且向加载点发展，弯剪段开裂范围逐渐增大，斜裂缝宽度增大，波纹钢板与混凝土结构的相对滑移明显加快，达到临界开裂荷载时突然出现从支座处向加载点发展的临界斜裂缝③，随荷载继续增加，试件承载力依然可以缓慢增加，伴随支座附近波纹钢板屈服和混凝土局部压碎，试件达到极限状态后破坏。

2.3　试件承载力分析

试件各阶段荷载状态如表3所示，采用波纹钢板和微膨胀混凝土加固的试件，临界开裂荷载提高32%；采用波纹钢板、微膨胀混凝土和锚栓加固的试件，临界开裂荷载提高48%~61%，随锚栓数量的增加，波纹钢板与混凝土结构的协同作用加强。临界开裂荷载是指临界斜裂缝出现时的荷载。P_{cr}为临界开裂荷载；P_u为极限承载力。



(a) The failure pattern diagram of CSP-concrete composite beam

(b) Crack development mode of CSP-concrete composite beam

图3　波纹钢板-混凝土组合梁破坏形态及裂缝发展模式
Fig. 3　Failure patterns and crack development patterns of corrugated steel plate-concrete composite beams

表3　试件各阶段荷载状态
Tab.3　The load state of each stage of the specimen

Test piece number	P_{cr}/kN	P_u/kN	Ultimate load increase factor	Average relative slip/mm
DZL	230	304	–	–
JGL-1	305	396	1.3	31
JGL-2	340	415	1.37	23
JGL-3	370	430	1.41	21
KLL	195	260	–	–
JGL-4	350	405	1.53	12

采用波纹钢板、微膨胀混凝土和锚栓加固的试件JGL-2和JGL-3相比只采用波纹钢板和微膨胀混凝土加固的试件JGL-1分别减少25%，32%的相对滑移。锚栓起到降低波纹钢板与混凝土结构之间的滑移、提高二者协同变形的作用。由于试件JGL-4波纹钢板未发生整体屈服，在卸载后，波纹钢板整体回弹，最终滑移回缩。

2.4　试件荷载-挠度关系

试件挠度-荷载曲线如图4所示，试件DZL和

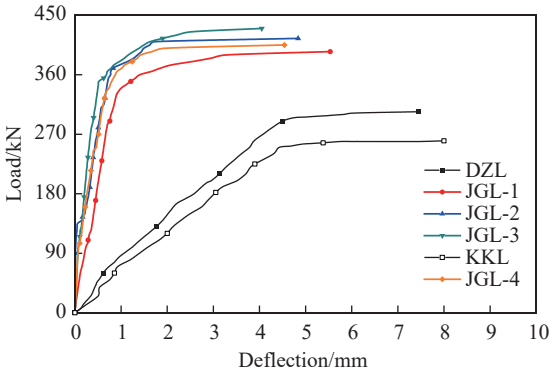


图4 试件荷载-挠度曲线

Fig. 4 Load-deflection curve of specimen

KLL荷载-挠度曲线接近，都呈线性关系，在采用波纹钢板加固试件后，试件刚度得到显著增强，但增设锚栓及其数量对试件的刚度影响不大。对于JGL-1~JGL-4来说，当荷载小于0.25P_u时，荷载-挠度曲线基本为直线，此时试件处于弹性阶段，波纹钢板应力水平较低；当荷载大于0.25P_u、小于0.85P_u时，此时试件进入弹塑性阶段，混凝土出现裂缝，进入带裂缝工作阶段，随着荷载增加，裂缝向加载点斜向发展，试件刚度下降；当荷载大于0.85P_u时，荷载-挠度曲线为接近水平，试件进入塑性阶段，临界斜裂缝出现并逐渐增宽，波纹钢板屈服，挠度迅速增大。在试验中，临界斜裂缝出现后，试件极限承载力还能继续上升，表明采用波纹钢板加固试件后能表现出延性破坏的特点。

2.5 波纹钢板波峰荷载-应变曲线

通过波纹钢板波峰荷载-应变曲线可以看出（图5），采用波纹钢板和微膨胀混凝土加固的试件JGL-1，在其弹性工作阶段，波纹钢板与混凝土组合受力，波纹钢板同纵向受拉钢筋承受拉应力，波峰位置的应变增加缓慢，此时主要由上方的混凝土结构承担荷载。当荷载达到混凝土开裂荷载时，波纹钢板与混凝土发生界面剥离，波纹钢板波峰应变迅速增加了3 400%，且跨中位置应变最大，其它位置应变相近。随着荷载增加，波纹钢板波峰应变只发生微小变化，并呈现减小的趋势，当加载接近极限荷载时，跨中和距跨中15 cm处的波峰从受拉变为受压，其它波峰应变仍处于受拉状态。

采用波纹钢板、微膨胀混凝土和锚栓加固的试件JGL-2~JGL-4，在达到混凝土开裂荷载之前，波峰基本没有变化；随荷载增加，波峰应变缓慢增长；当荷载超过临界开裂荷载 P_{cr} 后，应变呈线性增加直至试件破坏。最终，波峰处于受压状态且距跨中越近，应变越大；但由于波纹钢板锚栓孔位置会出现应力集中现象，应力传递遭受抑制，造成锚栓孔附近波峰应变测点出现受拉应力，但最终波峰应变均处于受压状态，随锚栓数量的增加，并不能降低跨中波纹钢板波峰应变。

2.6 波纹钢板波谷荷载-应变曲线

通过波纹钢板波谷荷载-应变曲线可以看出（图6），采用波纹钢板和微膨胀混凝土加固的试件，随着荷载增加，跨中0~30 cm范围波峰应变呈线性增长趋势，距跨中45 cm处波峰一直处于缓慢增长状态，距跨中60 cm处波峰受支座的影响，呈波动增加状态；当荷载达到305 kN时，即到达开裂临界荷载，波纹钢板波谷应变增加速率出现转折，并一直增加，直至试件破坏。

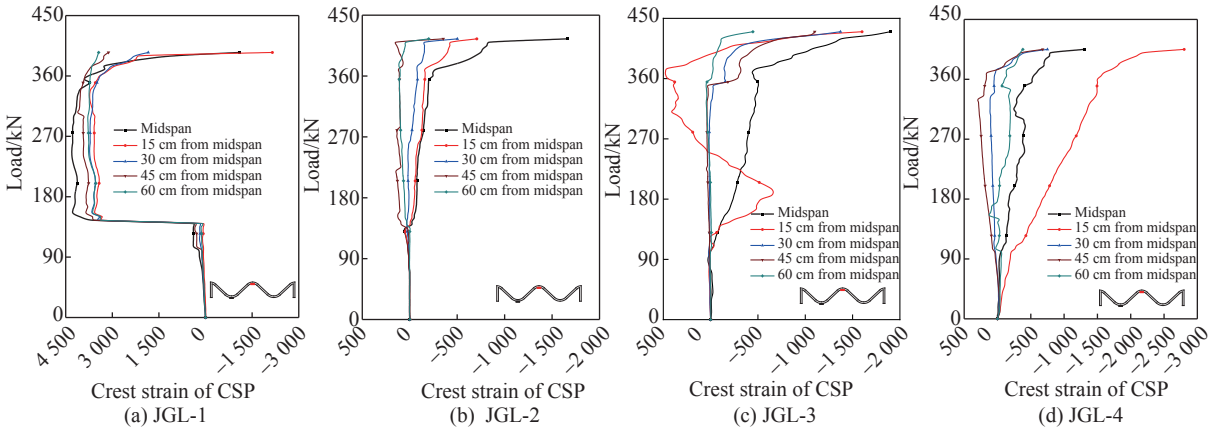


图5 波纹钢板波峰荷载-应变曲线

Fig. 5 Crest load-strain curve of CSP

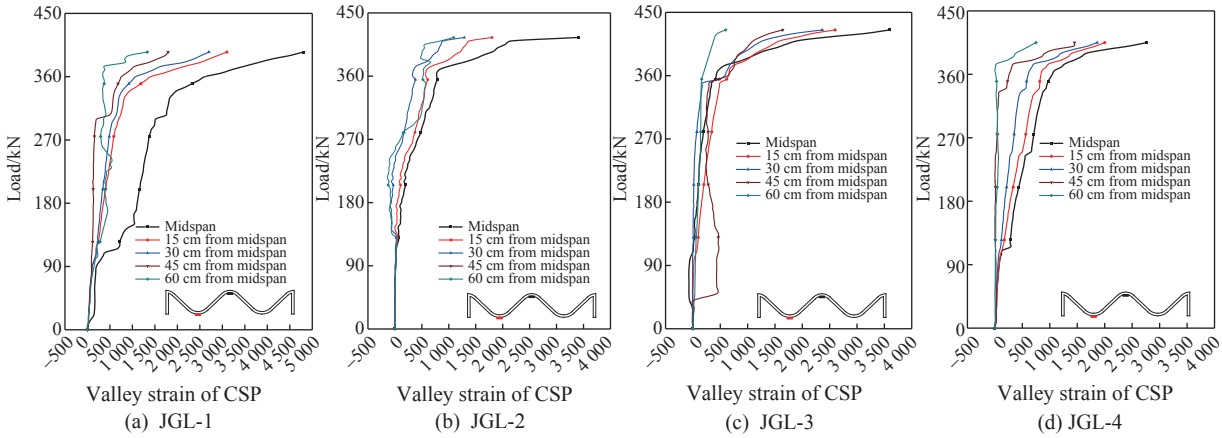


图6　波纹钢板波谷荷载-应变曲线

Fig. 6　Valley load-strain curve of CSP

采用波纹钢板、微膨胀混凝土和锚栓加固的试件在荷载达到混凝土开裂荷载之前，波纹钢板波谷应变一直在零应变附近波动。随荷载增加，波谷整体应变处于受拉状态，在靠近锚栓及支座位置，应变增长速率会受到波动。增设锚栓能够减小跨中波纹钢板波谷应变，然而，随着锚栓数量的增加，减少跨中波谷应变的效果并不显著。

2.7　波纹钢板法兰荷载-应变曲线

在临界开裂荷载之前，法兰板应变增长缓慢。在荷载达到临界开裂荷载后，应变增长曲线接近水平线。波纹钢板的法兰板应变与波谷应变变化趋势相同，且在达到极限荷载后，法兰板应变值接近波谷应变值。

2.8　混凝土跨中应变监测

采用波纹钢板、微膨胀混凝土和锚栓加固的试件JGL-1~JGL-4在临界开裂荷载和极限荷载时，跨中混凝土应变场云图如图7所示，随着荷载的增加，混凝土结构的中性层上移，到达极限荷载后，混凝土结构整体呈受拉应力。采用锚栓锚固的试件在达到临界开裂荷载后，跨中不再产生新裂缝，但原有裂缝继续发展直至试件破坏。因此，锚栓能够增强波纹钢板和混凝土之间的协同作用，从而有效提高组合结构的整体刚度。

3　数值模拟

3.1　模型建立

采用ABAQUS有限元软件建立波纹钢板加固钢筋混凝土梁的模型，除钢筋选用两结点线性三维桁架单元（T3D2）外，其余部件均采用八结点线性六面体单元（C3D8R）；波纹钢板与混凝土结构的接触属性为：法向作用采用硬接触（hard contact），切向采用罚摩擦公式，摩擦系数值为0.5[12]；锚栓和混凝土采用化学药剂粘接，因此模拟中采用Tie约束绑定，锚栓和波纹钢板预留孔接触的下边缘采用结点的Tie约束绑定；钢筋采用Embedded的方式嵌入到混凝土结构中，不考虑两者的黏结滑移；对加载垫板和支座垫板表面和底边分别取参考点，并将参考点与垫块之间建立耦合约束，边界条件如图8所示。U_1为X方向位移；U_2为Y方向位移；U_3为Z方向位移；U_{R2}为Y方向转角；U_{R3}为Z方向转角。

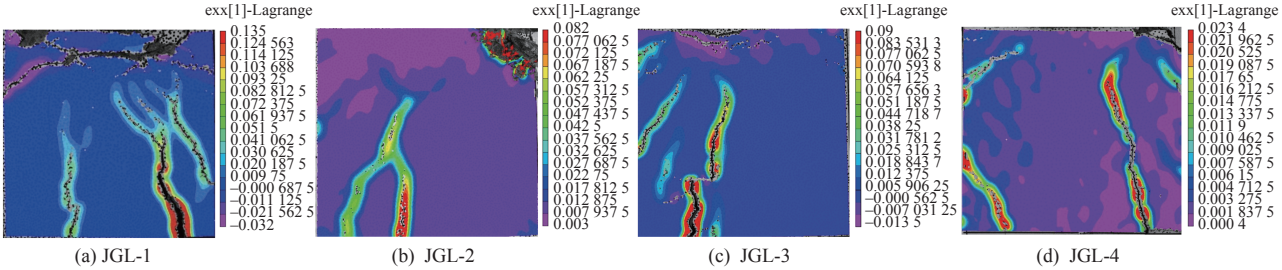


图7　跨中混凝土在 $P=P_u$ 时的应变场

Fig. 7　The strain field of mid-span concrete at $P=P_u$

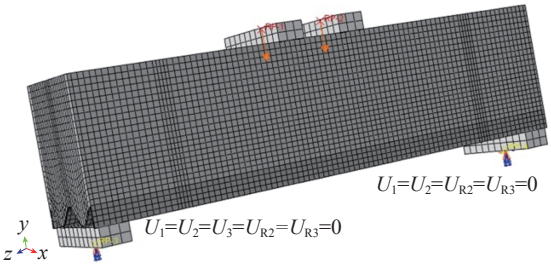


图8 模型边界条件及网格划分

Fig. 8 Model boundary conditions and mesh division

试验时发现混凝土结构可有效与自密实混凝土有效结合，因此在建模时将二者作为一个整体采用塑性损伤模型（CDP模型），其参数如表4所示[13]、单轴真实应力-真实塑性应变曲线如图9所示。锚栓和钢筋采用理想弹塑性模型，波纹钢板采用二折线形式的弹性-强化模型，无刚度退化，参数采用试验测得参数。ψ为膨胀角；ζ为流动势偏移量；f_{b0}/f_{c0}为双轴极限抗压屈服应力与单轴极限抗压屈服应力的比值；K_c为拉伸子午面上和压缩子午面上的第二应力不变量之比；μ为黏滞系数；$\sigma_{c,ture}$为单轴受压混凝土的真实应力；$\varepsilon_{c,ture}$为单轴受压混凝土的真实应变；$\sigma_{t,ture}$为单轴受拉混凝土的真实应力；$\varepsilon_{t,ture}$为单轴受拉混凝土的真实应变。

表4 混凝土塑性损伤参数

Tab.4 Plastic damage parameters of concrete

Ψ	ζ	f_{b0}/f_{c0}	K_c	μ
30°	0.1	1.16	0.667	0.000 5

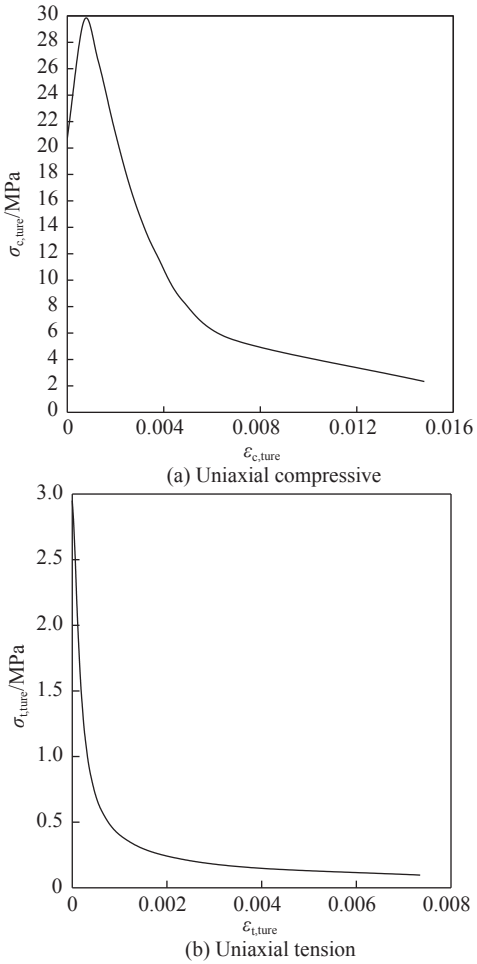


图9 C40混凝土单轴真实应力-真实塑性应变曲线

Fig. 9 Uniaxial true stress-true plastic strain curve of C40 concrete

3.2 模拟结果验证

3.2.1 受力分析

由于在试验中可以发现试件JGL-2和JGL-4的试验结果相近，因此仅对试验中的试件DZL、KLL、JGL-1~JGL3进行了建模分析计算。试件JGL-1~JGL-3的数值模拟结果与试验值较为吻合，但试件DZL和KLL的数值模拟结果的刚度要大于试验值（图10），极限承载力要小于试验值，出现该问题的原因可能为，在浇筑混凝土时，混凝土强度不能保证完全统一，钢筋位置也可能造成一定偏差，导致试件模拟结果与试验值有偏差。采用ABAQUS有限元软件计算出的极限承载力和跨中挠度的误差均在10%以内，有限元软件计算结果与试验结果吻合良好。同时可以得出，增加锚栓的数量能够提高组合梁的极限承载力，并能够抑制跨中挠曲。

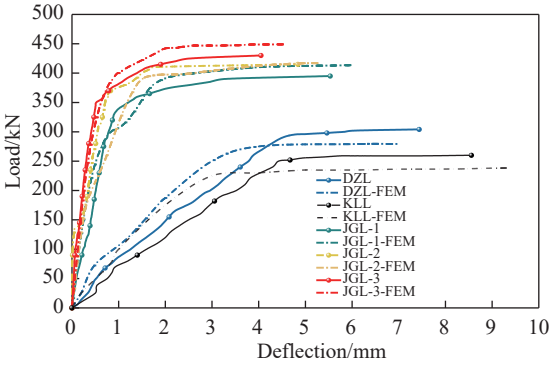


图10 数值模拟与试验的荷载-挠度曲线

Fig. 10 Load-deflection curves of numerical simulation and test

3.2.2 混凝土结构损伤情况

通过图11所示的试件DZL，KLL及JGL-1~JGL-3的混凝土塑性损伤模型可以看出，混凝土材料采用塑性损伤模型能够较好地模拟试验中混凝土开裂和裂缝发展趋势，能呈现出试件在发生剪切

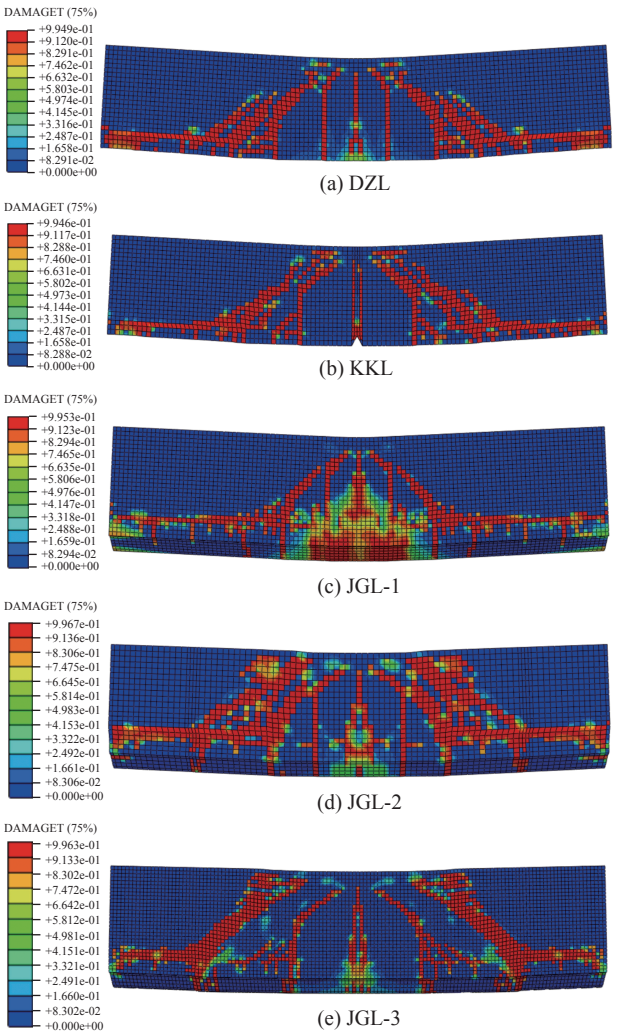


图11　混凝土结构拉伸损伤云图

Fig. 11　Damaget cloud of concrete structure

破坏时，临界斜裂缝的产生和发展。在采用波纹钢板、微膨胀混凝土和锚栓加固后，试件的受弯区混凝土裂缝增加，随着荷载的增加，裂缝从锚栓位置出现斜裂缝向支座处发展；随着锚栓数量的增加，混凝土结构和波纹钢板协同作用增强，梁的跨中挠度减小。由于有限元软件的材料本构和装配不会出现试验中的误差，因此试件的裂缝发展和变形均匀对称，有限元结果要比试验结果理想。

3.2.3　波纹钢板纵向应力情况

波纹钢板跨中位置的波峰纵向呈现压应力，波谷呈现拉应力，且跨中应力最大，远离跨中应力减小；随着荷载增加，应力从跨中位置沿纵向方向呈水波形向外传递，波谷的拉应力大于波峰的压应力；支座与锚栓孔位置存在应力集中现象。波纹钢板的法兰板随荷载增加，下部承受拉应力，上部承受压应力，并且拉应力大于压应力，中间位置存在应力为零的中性层。有限元计算得出的应力结果要小于试验中波纹钢板的应力，但整体趋势较吻合。

3.2.4　锚栓应力情况

锚栓应力集中发生在波纹钢板与混凝土结构接触面位置，并随着荷载增加，应力向上发展。远离跨中的锚栓先发生屈服，因此，该位置的锚栓容易发生剪断。在试件破坏时，由于锚栓受剪传递应力于波纹钢板锚栓孔附近，所以锚栓的应力要大于钢板的应力。

4　结论

通过室内试验和数值模拟的研究方法，开展了不同锚栓数量下波纹钢板加固梁的抗弯剪试验研究，进行了三维有限元模拟并通过试验结果进行校验，所建立的有限元模型对波纹钢板加固梁的极限荷载、混凝土塑形损伤以及波纹钢板应变分布预测良好，得出以下结论。

1）相比未加固的钢筋混凝土梁，波纹钢板加固梁的极限荷载提高了30%~41%。

2）随着锚栓的增设和数量增加，试件极限承载力增大，混凝土结构和波纹钢板的相对滑移减少，波纹钢板与混凝土结构的协同作用越好。

3）波纹钢板的波峰和波谷在加载初期均处于中性层位置，应变基本为零；达到开裂荷载后，波纹钢板波峰整体处于受压状态，而波谷一直处于受拉状态，均呈现跨中应变最大，越靠近支座应变越小的趋势。

4）有限元软件能较好地模拟实验结果，其中采用本文所给出的混凝土塑性损伤模型参数能够较吻合地模拟出混凝土裂缝发展规律。

参考文献：

[1] 何欣, 武飞, 刘保东, 等. 波纹钢-混凝土组合结构在圬工拱桥加固中的应用研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2023, 45(3): 159-165.
HE X, WU F, LIU B D, et al. Research on the application of corrugated steel-concrete composite structure in strengthening masonry arch bridge[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2023, 45(3): 159-165.

[2] 马慧君, 田四明, 付兵先, 等. 波纹管(板)在铁路工程中的技术应用与发展[J]. 中国铁路, 2019(1): 91-101.
MA H J, TIAN S M, FU B X, et al. Application and de-

velopment of corrugated pipe(plate) technology in railway engineering[J]. Chinese Railways, 2019(1): 91-101.

[3] 郭英杰, 丁文其, 李硕标, 等. 新型波纹不锈钢加固既有地铁盾构隧道数值分析[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(S1): 40-48.
GUO Y J, DING W Q, LI S B, et al. Numerical analysis of existing metro shield tunnel strengthened by new corrugated stainless steel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(S1): 40-48.

[4] 贺文涛, 刘保东, 撖刚, 等. 波纹钢-混凝土组合结构在桥梁加固改造中的应用研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(1): 104-111.
HE W T, LIU B D, QIAN G, et al. Research of corrugated steel plate and concrete composite structure in bridge reinforcement and reconstruction[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2019, 41(1): 104-111.

[5] 李勇, 符锌砂, 李百建. 不同钢内衬加固钢筋混凝土管涵力学特性试验研究[J]. 公路工程, 2020, 45(2): 116-122.
LI Y, FU X S, LI B J. Experimental study on mechanical properties of reinforced concrete pipe culvert strengthened with different steel linings[J]. Highway Engineering, 2020, 45(2): 116-122.

[6] 肖妙武, 杨金胜, 张欢, 等. 波纹钢-混凝土组合板纵剪性能试验研究与设计方法[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(4): 561-568.
XIAO M W, YANG J S, ZHANG H, et al. Experimental study and design method of longitudinal shear behavior of corrugated steel-concrete composite slabs[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition), 2022, 54(4): 561-568.

[7] 周小淇, 黄俊, 李海光. 波纹钢板-混凝土组合梁的力学性能研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S2): 656-663.
ZHOU X Q, HUANG J, LI H G. Analysis on the mechanical property of the corrugated steel-concrete composite beam[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S2): 656-663.

[8] 陈望祺, 刘保东, 刘瑞, 等. 波纹钢板套衬解决隧道衬砌掉落病害的效果分析[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(S2): 384-388.
CHEN W Q, LIU B D, LIU R, et al. Analysis of working effect of corrugated steel lining on tunnel lining fall[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(S2): 384-388.

[9] 叶子健, 刘德华, 宋延旭. 波纹钢板加固隧道衬砌的应用研究: 某隧道工程实例分析[J]. 北京建筑大学学报, 2020, 36(4): 71-78.
YE Z J, LIU D H, SONG Y X. Study on the application of corrugated steel plate to reinforce tunnel lining: an example analysis of tunnel project[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020, 36(4): 71-78.

[10] 徐鹏华. 含V型切口素混凝土梁断裂特性研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2017.
XU P H. Study on the fracture behavior of plain concrete beam with V notch[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2017.

[11] LENG Y B, SONG X B, CHU M, et al. Experimental study and theoretical analysis of resistance of steel-concrete-steel sandwich beams[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(2): 1-11.

[12] BALTAY P, GJELSVIK A. Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1990, 2(1): 46-49.

[13] JANKOWIAK T, LODYGOWSKI T. Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model [J]. Foundations of Civil and Environmental Engineering, 2005, 6(1): 53-69.

第一作者:梁国卿(1983—),男,高级工程师,研究方向为高速公路运营管理。E-mail:184821309@qq.com。

通信作者:朱碧堂(1974—),男,教授,博士生导师,研究方向为隧道,基坑,桩基和海上风电。E-mail:btangzh@hotmail.com。

(责任编辑:姜红贵)