

陕西省地方标准

DB61

DB 61/ XXXX—XXXX*

小跨径梁桥波纹钢外骨骼加固技术规程

Technical specification for corrugated steel exoskeleton reinforcement of small
span beam bridges

(征求意见稿)

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

陕西省市场监督管理局 发布

目 次

前 言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和符号 2

4 材料 3

5 结构构造 5

6 结构设计 9

7 拱式波纹钢外骨骼施工 14

8 检验规则 20

附录 A （规范性附录） 公路常用波纹钢板截面特性参数表 22

附录 B （规范性附录） 波纹钢板件螺栓孔分布展开示意图 23

附录 C （规范性附录） 药包式化学锚栓单个锚栓设计及安装参数表 24

附录 D （规范性附录） 波纹钢外骨骼加固法的整体设计流程图 25

附录 E （规范性附录） 波纹钢外骨骼加固法的整体施工流程图 26

附录 F （规范性附录） 波纹钢外骨骼加固法模型试验 27

附录 G （规范性附录） 波纹钢外骨骼加固法计算示例 37

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由陕西省交通运输厅提出并归口。

本文件起草单位：陕西省交通规划设计研究院有限公司、长安大学、西安世纪金属结构有限公司。

本文件主要起草人：

本文件首次发布。

本文件由陕西省交通规划设计研究院有限公司负责解释。

联系信息如下：

单位：陕西省交通规划设计研究院有限公司

电话：029-86718637

地址：陕西省西安市科技六路 37 号

邮编：710065

小跨径梁桥波纹钢外骨骼加固技术规程

1 范围

本文件所指波纹钢外骨骼技术加固技术的适用范围为单孔板式桥涵，跨径在 13m 以下，桥台为薄壁桥台或者墙式桥台的小跨径桥涵。

本文件提供的小跨径梁桥性能提升的波纹钢外骨骼技术适用于公路桥梁的加固应用，城市桥梁和铁路桥梁可参考使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用标准，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 34567-2017	冷弯波纹钢管
JT/T 791-2010	公路涵洞通道用波纹钢管（板）
JTG/T 3650-2020	公路桥涵施工技术规范
JTG 3362-2018	公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
JTG D60-2015	公路桥涵设计通用规范
JTG/T J22-2008	公路桥梁加固设计规范
JTG/T J23-2008	公路桥梁加固施工技术规范
JTG F80/1-2017	公路工程质量检验评定标准
GB/T 2518-2019	连续热镀锌和锌合金镀层钢板及钢带
GB/T 3274-2017	碳素结构钢和低合金结构钢热轧钢板和钢带
GB T 709-2019	热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差
GB/T 1231-2006	钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件
GB 50205-2020	钢结构工程施工质量验收标准
GB 50017-2017	钢结构设计标准
GB 50300-2013	建筑工程施工质量验收统一标准
GB/T 22083-2008	建筑密封胶分级和要求
JC/T 483-2022	聚硫建筑密封胶
GB 16776-2005	建筑用硅酮结构密封胶
GB/T 1839-2008	钢产品镀锌层质量试验方法
GB/T 470-2008	锌锭
JTG/T-3360-01-2018	公路桥梁抗风设计规范
JTG/T D65-06-2015	公路钢管混凝土拱桥设计规范
JTGF80/1-2017	公路工程质量检验评定标准
JB/T 9186-1999	二氧化碳气体保护焊工艺规程

3 术语和符号

下列术语适用于本文件。

3.1 术语

3.1.1 波纹钢外骨骼 corrugated steel exoskeleton

基于人体外骨骼产生启发，在桥梁加固领域应用波纹钢外骨骼加固法，通过结构外围增加经形弧加工制成的具有一定曲率的波纹钢板转移部分受力，从而减轻结构自身受力要求，达到结构的安全使用。

3.1.2 波纹钢板 corrugated steel plate

采用符合规定要求厚度和性能的热轧钢板为板材，按照规定的尺寸，经过波形轧制及冷弯加工而制成的一种波纹板状材料。

3.1.3 波纹钢板件 corrugated steel plate section

波纹钢板经形弧制成的一定曲率的板件。

3.1.4 波纹钢顶板 corrugated steel top plate

波纹钢顶板指位于拱式外骨骼拱顶部位的板件。

3.1.5 波纹钢肩板 corrugated steel shoulder plate

波纹钢肩板指位于拱式外骨骼拱肩部位的板件。

3.1.6 波纹钢板件宽度 width of corrugated steel plate

波纹钢板件的水平投影宽度。

3.1.7 性能提升 performance improvement

指的是桥梁承载能力的提升程度。

3.1.8 下拉牵引力 tractive force

指的是牵引装置对波纹钢外骨骼施加的竖向力。

3.1.9 模袋混凝土 bagged concrete

模袋是一种由高强土工织物制成的袋状结构，模袋混凝土是在模袋内灌注流动性混凝土（或砂浆），经固化后起模板作用的结构物。

3.1.10 波距 wave pitch

相邻两个波峰或波谷之间的距离。

3.1.11 波高 wave depth

波峰与波谷之间的垂直距离。

3.1.12 浅波 shallow wave

波深在 1mm~49mm 的波形。

3.1.13 中波 middle wave

波深在 50mm~99mm 的波形。

3.1.14 深波 deep wave

波深在 100mm~149mm 的波形。

3.1.15 大波 big wave

波深在 149mm 以上的波形。

3.2 符号和说明

下列符号适用于本文件。

- h: 波高，单位为毫米（mm）
- L: 波距，单位为毫米（mm）
- t: 钢板厚度（含镀锌层厚度），单位为毫米（mm）
- T: 直线段长度（mm）
- R: 圆弧半径（mm）
- θ : 半个圆弧段角度（°）
- d: 圆心到 X 轴的距离（mm）

4 材料

4.1 波纹钢材料

4.1.1 波纹钢板的尺寸允许偏差应符合表 1 的规定：

表 1 波纹钢板件的尺寸允许偏差

序号	项目			允许偏差
1	钢板厚度 t（mm）			下偏差：0mm
2	波距 L	中波形	220mm×55mm	±3mm
		深波形	330mm×110mm	±3mm
	波高 h	中波形	220mm×55mm	-2mm~+3mm
		深波形	330mm×110mm	±3mm
3	跨径，矢高	≤1000mm		±3%

		>1000mm	±2%
4	波纹钢板件孔中心到板边长度		0mm~+5mm
5	板件搭接长度		±5mm

- 4.1.2 波纹钢板材料采用碳素结构钢时，其性能、抗拉强度应符合 GB/T 3274 的规定。
- 4.1.3 波纹钢板件所用的钢板强度应符合 GB/T 3274 的规定，其尺寸、外形、重量及允许偏差应符合 GB/T 709 的规定。
- 4.1.4 采用连续热镀锌钢板加工波纹钢板件时，其性能、尺寸、外形、重量及允许偏差、抗拉强度应符合 GB/T 2518 的规定。

4.2 连接件

- 4.2.1 连接件采用 10.9 级高强度螺栓，其性能指标应符合 GB/T 1231 的要求。
- 4.2.2 高强度螺栓、螺母规格为 M16、M20、M22、M24，螺栓紧固后锚栓外露丝扣不应少于两扣。
- 4.2.3 结构用高强度垫圈应符合 GB/T 1231 的规定。

4.3 注浆混凝土

- 4.3.1 注浆混凝土强度对波纹钢板结构的受力和变形影响较小，建议采用 C20、C25 或 C30 的注浆混凝土。随着注浆混凝土强度的增加，波纹钢的最大应力和跨中最大挠度变形都呈现逐渐减小的趋势，但变化较小。
- 4.3.2 注浆混凝土需要养护到设计强度的 90%再解除牵引装置。

4.4 模袋

注浆混凝土的模板换成定制模袋混凝土可以减小注浆混凝土厚度，而且也具备支撑作用。本文件附录 F 实例所用模袋为 320g 加厚型。

4.5 密封材料

- 4.5.1 密封材料可选用天然橡胶、氯丁橡胶、聚乙烯泡沫或耐候密封胶。应根据不同的地区和气候条件选择相应材料。其质量应符合 GB/T 22083 的有关规定。
- 4.5.2 高强度螺栓的钢垫片、螺帽应采用密封圈或密封胶防渗密封，采用聚硫密封胶防渗处理时，密封胶质量应符合 JC/T 483 的有关规定。
- 4.5.3 波纹钢板件之间的搭接采取密封措施。密封材料应具有弹性和不透水性，并应

填塞紧密。低温条件下密封材料应具有良好的抗冻、耐寒性能。

4.5.4 本文件实例采用的密封材料为中性胶，规格为 20 支/箱，要求满足规范 GB/T 16776-2005 要求，具备良好的耐色变、粘接强、耐候久性能。

4.6 防腐材料

4.6.1 热浸镀锌防腐处理所用的锌应符合现行 GB/T 1839-2008 的规定，单位面积质量不小于 600g/m^2 。

4.6.2 防腐漆要求耐水、耐油、耐酸碱、防腐防锈性能好，而且涂层要具有良好的附着力。

4.6.3 防腐材料及工艺亦可采用其他新材料、新工艺。

4.6.4 本文件实例中所用的防腐漆规格为 30kg/桶。

5 结构构造

波纹钢外骨骼加固体系如图 1 所示：

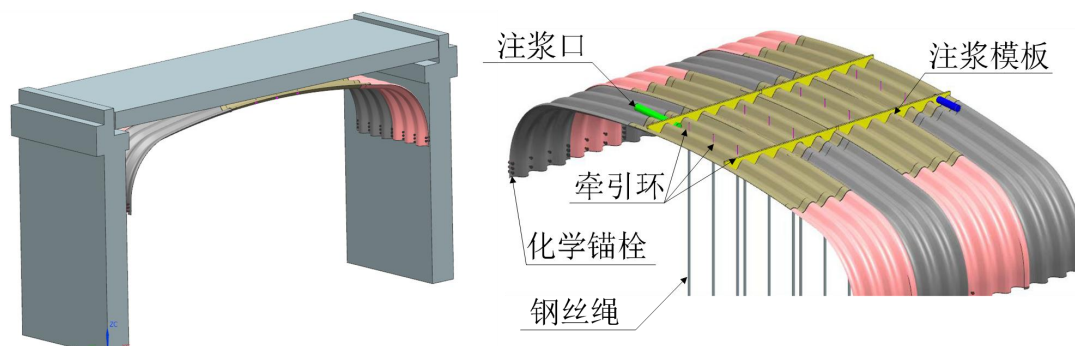


图 1 波纹钢外骨骼加固示意图

5.1 波纹钢外骨骼外部连接构造

5.1.1 波纹钢外骨骼与支撑边界连接

1 锚固连接

如图 2 所示，在波纹钢板拱脚部位焊接底部挡板防止漏浆，底部挡板外侧焊接多个滑槽，将滑槽孔的位置与波纹钢板上的预留螺栓孔对齐，使滑槽可以刚好扣在下排锚固的螺栓上，这样在上部第一排螺栓受力的基础上，使得下排螺栓也能受力，保证工程安全。该锚固连接方案适合于多段圆弧拼接的箱形波纹钢板拱，且梁底对净空要求较高的情况。此外，在应用上述方案前，需对拱脚螺栓进行受力分析，保证螺栓的受剪承载力

和波纹钢板的承压承载力都满足规范要求。

锚固所用到的螺栓除了高强螺栓还可以采用药包式化学锚栓，药包式化学锚栓是继膨胀型锚栓之后的一种新型锚栓，药包式化学锚栓主要由螺栓和化学药包两部分组成，其中螺栓的材料和尺寸可根据工程要求定制，单个锚栓设计及安装参数参见附录 C。

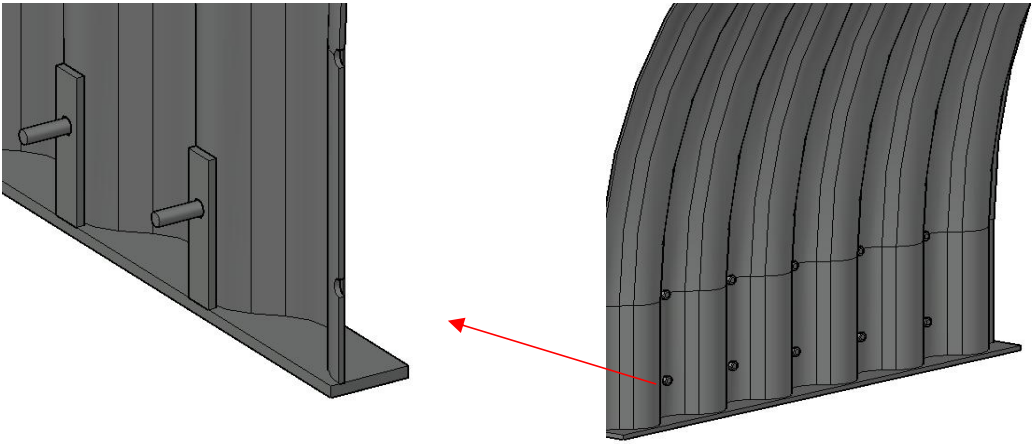


图 2 波纹钢板与支承边界锚固连接

2 新增拱座连接

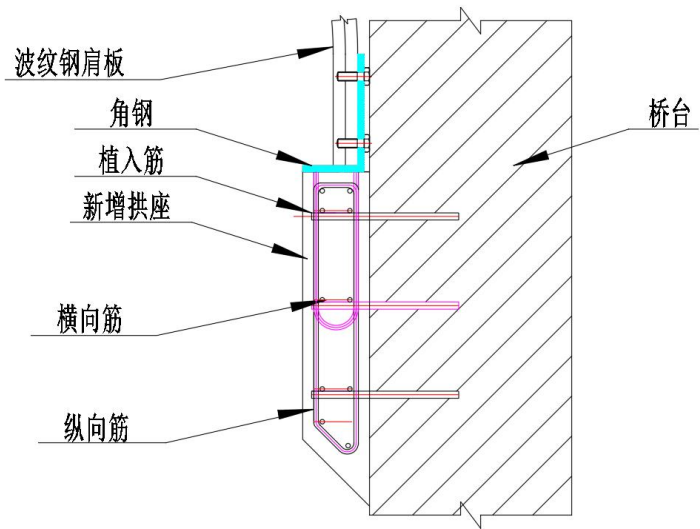


图 3 波纹钢板与支承边界通过新增拱座连接

如图 3 所示，根据设计图纸要求施工新增拱座，并在混凝土浇筑前埋设地脚螺栓，在混凝土浇筑后用来连接新增拱座和波纹钢肩板，新增拱座与原桥梁桥台之间通过植筋连接，在新增立墙上端通过地脚螺栓固定不等边角钢，波形钢板通过角钢底座及地脚螺栓与新增拱座连接。拱座不宜过宽，为了尽可能减小对桥底通行宽度的影响，拱座宽度不宜超出排水沟宽度，拱座高度不通长布置。

5.1.2 波纹钢外骨骼与原桥连接

如果只靠纯波纹钢板直接连接旧桥并承受荷载，其承载能力是不能够满足规范设计指标的，故需要对波纹钢板采取连接加强措施。波纹钢板与待加固结构的连接加强措施主要有：注浆混凝土、波纹钢加劲肋、钢筋混凝土加劲肋等。

1 注浆混凝土

注浆混凝土主要是将桥面板受到的力传递给波纹钢外骨骼，起到帮助拱式波纹钢和原桥梁共同工作的协同作用。施加牵引力时拱肩部位可能会产生不利变形，所以在拱肩位置注浆混凝土可以防止波纹钢局部屈曲，还可以提高波纹钢稳定系数。拱顶位置的混凝土起到支座的作用。在跨中拱顶处和两端拱肩处回填混凝土示意图如图 4 所示。为了减小注浆混凝土厚度且方便施工，采用第 4.4 节所述定制模袋混凝土代替注浆混凝土。

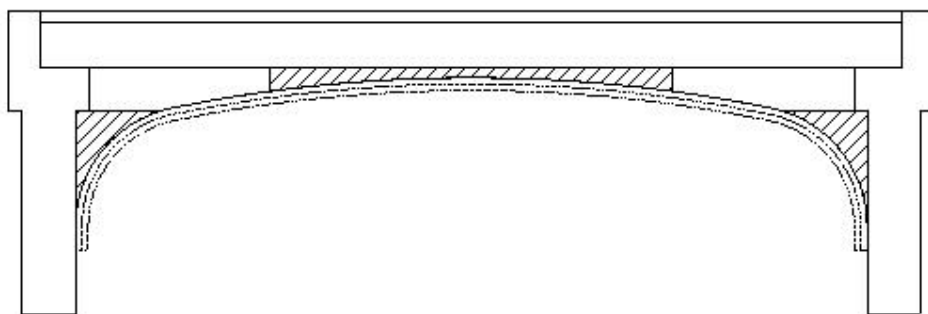


图 4 局部注浆混凝土示意图

2 波纹钢加劲肋

如图 5 所示，在波纹钢拱跨中拱顶位置附加相同截面尺寸的波纹钢板加劲肋，与主体波纹钢板焊接形成双壁波纹钢板，来环向增强波纹钢结构的刚度和承载能力。采用波纹钢板加劲肋只能对波纹钢板结构的局部进行加固，如果对全跨进行加固，则会出现波纹钢板局部拉裂破坏的现象。

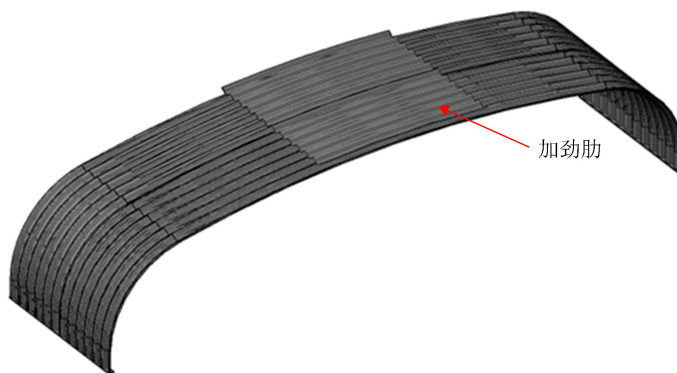


图 5 波纹钢拱跨中拱顶加劲肋构造图

5.1.3 波纹钢拱下拉牵引力构造措施

为了防止施加牵引力时波纹钢出现应力集中，波纹钢外骨骼需要在拱顶间隔 0.8m 布置牵引环的位置焊接槽钢，使牵引环设置在槽钢上，槽钢的布置如图 6 所示。

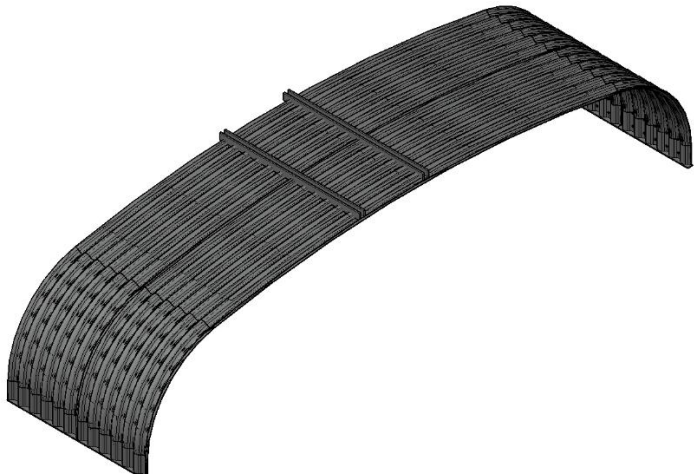


图 6 波纹钢板拱顶槽钢布置

5.2 波纹钢构造

波纹钢板标准截面形式如图 7 所示，波纹钢常用尺寸有 150×50、175×65、200×55、230×64、300×110、380×140、400×150（单位均为 mm×mm），部分截面特性信息见附录 A，本文件示例中所用波形截面特性参数表见附录 A。

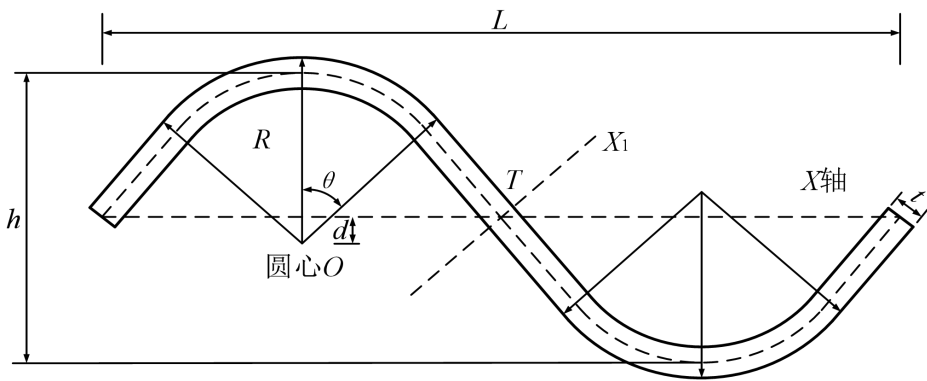


图 7 波纹钢腹板截面形式

5.3 波纹钢外骨骼板间连接构造

拼装波纹钢板之间的连接件主要采用高强螺栓和螺母（图 8），不同波形的拼装波纹钢板螺栓孔的分布也有相应的区别，具体各类波纹钢板件螺栓孔分布见规范 GB/T

34567-2017，附录 F 计算示例用到的波纹钢板件螺栓孔分布及各类波形标准板片的波形净宽和周向孔间距要求参见附录 B。

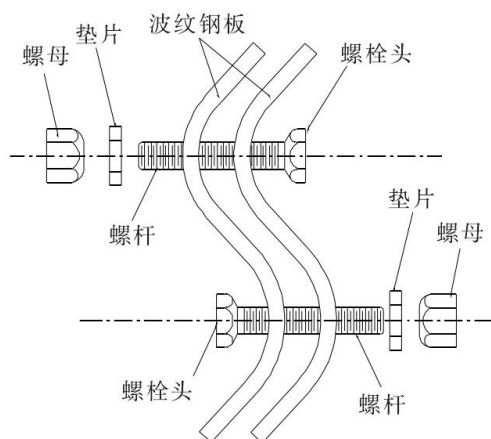


图 8 波纹钢板高强度螺栓连接示意图

6 结构设计

6.1 一般规定

6.1.1 根据使用条件和环境要求，对目标加固桥梁进行承载力折减评估，承载力折减评估应当符合 JTG/T J21-2011 的规定，根据评估结果进行数值模拟计算。

6.1.2 波纹钢外骨骼加固梁桥可按附录 D 的流程图进行设计。

6.1.3 波纹钢外骨骼加固小跨径梁桥设计应考虑永久作用、可变作用和地震作用。

6.1.4 波纹钢外骨骼加固小跨径梁桥应按照承载能力极限状态进行设计，作用的组合方法应按 JTG D60 的规定确定。

6.1.5 波纹钢外骨骼波形的设计应当符合 GB/T 34567-2017 的规定。

6.1.6 建议采用有限元法等数值计算方法对结构设计进行校核。

6.1.7 波形选择应与跨径相匹配，板厚根据计算确定。选用钢板的厚度宜 $\leq 10\text{ mm}$ ，应 $\leq 12\text{ mm}$ 。

6.2 外骨骼曲率半径与波形设计

波纹钢外骨骼的波高受到外骨骼曲率半径的限制，既定曲率半径下的波形范围按照表 2 选择。

表 2 肩板曲率半径与波形范围选取

肩板曲率半径	波形范围
780mm-950mm	200*55 及以下
950mm-1050mm	300*110 及以下
1050mm-1200mm	380*140 及以下

6.3 波纹钢外骨骼线形设计

- 6.3.1 线形设计的规则是：先满足净空需要，再满足肩板曲率半径要求。
- 6.3.2 先确定两边肩板的曲率半径，再根据肩板的曲率半径确定顶板的曲率半径，要保证顶板和肩板连接段咬合顺利。

6.4 外骨骼拼接板件设计

- 6.4.1 拼接板件数量划分根据波纹钢外骨骼竖向投影长度及原桥跨径和桥宽进行划分，可以参考本文件附录 F 示例的划分方式。
- 6.4.2 波纹钢顶板与波纹钢肩板搭接设计：搭接部分长度根据板件连接处打孔数目确定，开孔采用梅花形，波谷和波峰的孔水平中心间距为 50mm，布置形式如下图 9 所示。打孔数目需要根据跨径和板厚计算得到。

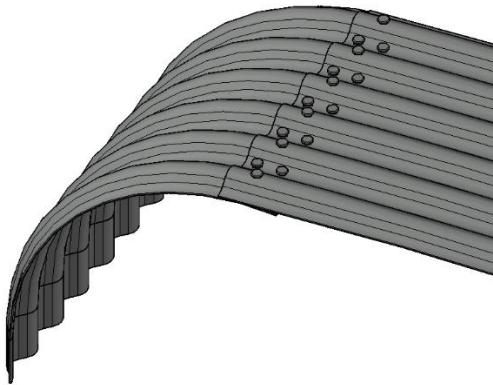


图 9 搭接位置开孔布置

- 6.4.3 搭接处接头缝隙不得超过 5cm。
- 6.5 作用
- 6.5.1 承载能力极限状态的设计作用符合以下规定：
- 1 永久作用应考虑结构顶部所有恒载；
 - 2 可变作用应分别考虑施工阶段的施工车辆荷载及运营阶段的车辆荷载。

3 地震效应的计算应符合 JTG/T3360-01 的规定。

6.5.2 按承载能力极限状态进行作用效应组合，按式（1）和式（2）计算的设计作用组合效应 E_d 进行设计：

运营阶段的永久作用与可变作用组合：

$$E_d = (\gamma_G G, \gamma_Q Q) \quad (1)$$

运营阶段的永久作用与地震作用组合：

$$E_d = (\gamma_G G, \gamma_E E_u) \quad (2)$$

式中： $\gamma_G, \gamma_E, \gamma_Q$ ——永久作用、可变作用、地震作用的组合系数，按现行《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60-2015）取值；

G ——永久作用；

Q ——运营阶段的可变作用；

E_u ——竖向地震作用。

6.6 结构计算

6.6.1 承载能力极限状态计算（加公式）

1 承载力验算

1) 按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）第 5 章相关规定进行验算。

2) 外骨骼尺寸如图 10 所示，利用有限元法等数值计算方法验证其安全性，不同参数情况下承载力提升验算结果见附录 F。

3) 参照附录 F 第 F.3.1 节计算表格，可以根据实际工程要求选择合理的加固形式。

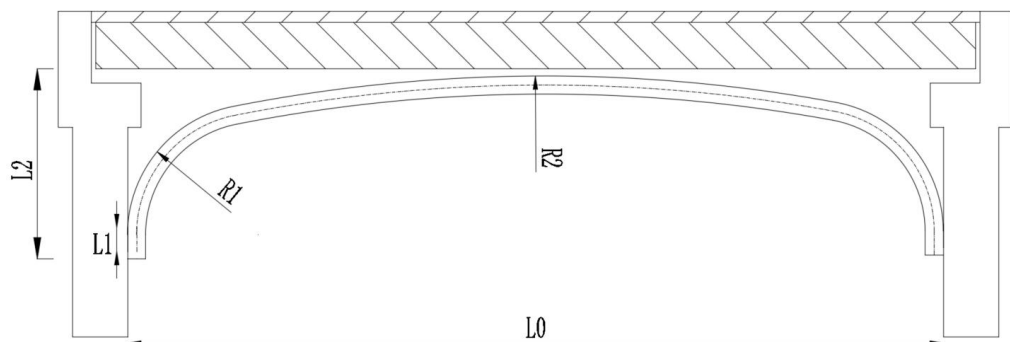


图 10 外骨骼尺寸示意图

2 稳定性验算

1) 弹性屈曲稳定系数应满足《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG-T D65-06-2015) 相关规定。

2) 弹性屈曲稳定系数按照式 (3) 计算：

$$\omega = \frac{\omega_0}{F} \quad (3)$$

式中： ω ——弹性屈曲稳定系数；

ω_0 ——波纹钢外骨骼临界荷载（1KN 对应的弹性屈曲稳定系数）；

F ——下拉牵引力（KN）。

3) 对于实际施工中所选取的其他波纹钢拱线性或跨度，利用有限元法等数值计算方法验证其安全性。

4) 可参考附录 F 第 F.3.2 节计算表格，根据具体施工要求和工程实际选取合适的下拉牵引力。

6.6.2 挠度验算

1 根据《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64-2015）中的规定进行挠度验算。

2 可直接采用有限元精细化分析，得出该波纹钢板的挠度限值，保证计算值低于规范挠度限值。

6.6.3 应力验算

1 波纹钢应力验算要满足《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64-2015）相关规定。

2 分别计算牵引力张拉阶段和加固后运营阶段波纹钢板的最大应力，保证最大应力低于规范限值。

6.6.4 拱脚受力验算

拱脚剪力验算应满足《钢结构设计规范》（GB50017-2017）相关规定，验算步骤如下：

- 1) 利用杆系有限元等数值计算方法获取拱脚剪力，并根据拱脚剪力和拱脚抗剪螺栓形式确定螺栓个数，决定螺栓布置数目的主要因素是波纹钢及角钢的局部屈服。
- 2) 根据具体施工要求和工程实际选择合理的螺栓布置形式；
- 3) 利用板壳-实体有限元等数值计算方法验证其安全性。

6.7 模袋混凝土布置范围

- 6.7.1 对于采用模袋混凝土进行波纹钢自身加固的桥梁，需要进行填充的位置共 3 处，分别为梁底波纹钢外骨骼顶板处以及两侧梁底外骨骼肩板处。
- 6.7.2 梁底波纹钢外骨骼顶板处模袋范围建议为跨中 $\frac{1}{3}$ 跨径内，两侧梁底外骨骼肩板处建议为拱脚至外骨骼 $\frac{2}{3}$ 矢高处，如图 11 所示。

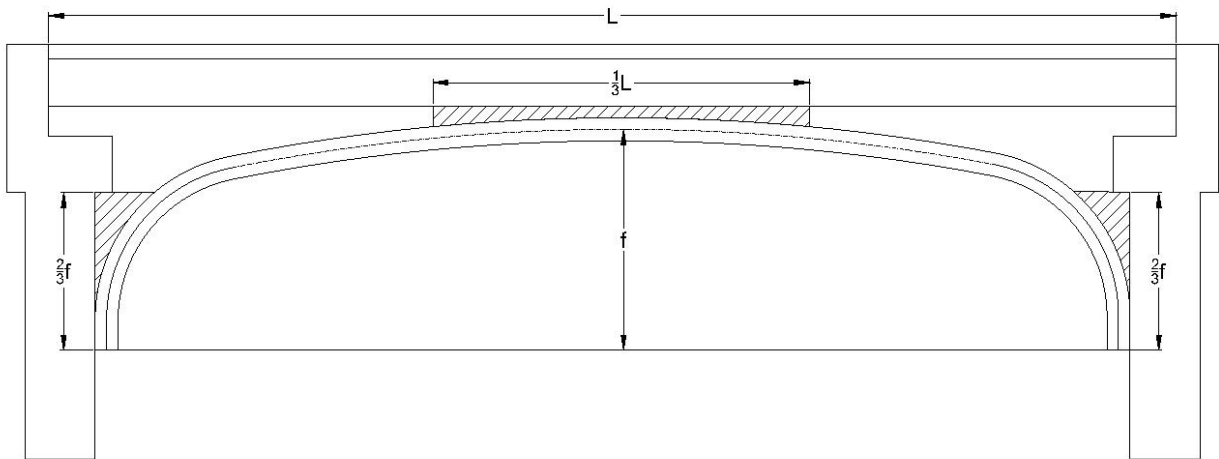


图 11 注浆混凝土布置范围

6.8 耐久性设计

6.8.1 防腐镀层的类型及要求

采用碳素结构钢的波纹钢板及高强度螺栓、螺母，出厂前应进行热镀锌防腐处理，方法如下：

- 1 热浸镀锌所用的锌应为 GB/T 470-2008 所规定的 1 号锌或 0 号锌，钢表面处理的最低等级为 Sa2.5，热浸镀锌技术质量应符合表 3 的规定
- 2 当采用热浸镀锌、静电喷涂等其他防腐方法代替镀锌时，应有试验验证资料，确保其防腐性不能低于表 3 规定的热浸镀锌方法的相关要求。

表 3 热浸镀锌质量要求

项目	要求
单面附着量 (g/m ²)	强腐蚀环境：波纹钢板≥600；螺栓、螺母≥350； 中等腐蚀环境和弱腐蚀环境：波纹钢板≥300； 螺栓、螺母≥175
镀锌层附着性	镀锌层应与金属牢固结合，经锤击试验不剥离、 不凸起
外观质量	镀锌层应均匀完整、颜色一致，无漏镀缺陷，表 面光滑，不允许有流挂、滴瘤或结块
镀锌层均匀性	镀锌层应均匀，无金属铜的红色沉淀物
镀锌层耐盐雾性	耐盐雾性试验后，基材不应出现腐蚀现象
注：强腐蚀性：指金属表面均匀腐蚀大于 0.5mm/年；中腐蚀性：指金属表面均匀腐蚀（0.1~0.5） mm/年；弱腐蚀性：指金属表面均匀腐蚀小于 0.1mm/年；	

6.8.2 防腐涂层的类型及选取

在镀锌防腐的基础上还可采用喷涂沥青等非金属覆盖层以增强防腐性能。

1 当采用涂装时，涂装的总厚度应大于 120um，表面应均匀光滑、连续，无肉眼可分辨的孔隙、裂缝、脱皮及其他缺陷；

2 当采用喷涂沥青时，沥青涂层的厚度应为 0.5mm~1mm，涂层应均匀光滑、连续，无肉眼可分辨的孔隙、裂缝、脱皮及其他缺陷。

7 拱式波纹钢外骨骼施工

7.1 一般规定

7.1.1 采用拱式波纹钢外骨骼加固桥涵的施工过程主要包括：材料检验及现场准备、波纹钢板加工及安装、牵引力张拉施工、填充模袋混凝土。

7.1.2 拱式波纹钢外骨骼的施工基本要求如下：

- 1 波纹钢板出厂时，应附有产品质量合格证书；
- 2 波纹钢板运到施工现场后，应逐块检查，凡在运输过程中变形的钢板不得使用。应对波纹钢板的质量、钢板厚度、镀锌层厚度、波形的几何尺寸等进行检测。质量合格后才能进行拼装；
- 3 波纹钢板在安装时，拼接处应清理干净，以确保接缝搭接紧密；

4 波纹钢板安装铺设应平顺、稳固；

5 高强度螺栓紧固后，应在波纹钢板搭接位置处用密封材料进行密封处理，然后再进行二次防腐处治，搭接位置处用的密封材料应具有良好的弹性和不透水性等特点，且在低温环境下能够抵御严寒，并具有良好的抗裂性能；

6 验收表格式应符合《公路工程质量检验评定标准》JTGF80/1-2017 规定。

条文说明：

波纹钢板与板之间是采用高强度螺栓进行连接，每块波纹钢板的尺寸大小与曲率都有一定的区别，如果尺寸大小和曲率相对设计图纸发生了变化，将影响波纹钢板的安装质量，并出现工程问题。因此，在波纹钢板安装之前，必须认真核查预先的设计图纸，确定每块波纹钢板的尺寸以及安装位置，避免出现因安装错误而导致波纹钢板变形报废。

7.1.3 波纹钢板采用热镀锌钢板，钢板基材根据实际所需，可采用 Q235、Q345、Q355 钢。波纹钢板单元在工厂制作，性能、尺寸、外形、重量及允许偏差应符合本文件第 4.1 条的规定。

7.1.4 波纹钢板环向与纵向单元采用钢板与钢板搭接用螺栓进行连接，连接件采用高强度螺栓、螺母时，强度等级应不低于 8.8 级，其力学性能指标应符合本文件第 4.2 条的规定。

7.2 材料的检验及现场准备

材料的检验及现场准备的一般规定应满足以下要求：

1 波纹钢板在出厂前应严格按钢制波纹板加工验收标准进行验收，并进行必要的预拼装。施工前，对现场设备电路进行检查，确保满足正常作业要求。

2 波纹钢板的拼装，应严格按照设计图纸进行；

3 安装波纹钢板前将全桥出现的破损、剥落病害进行维修，并对全桥空心板的裂缝进行处治；

4 利用已知导线成果表定后视后，经过坐标计算在混凝土路面及墙面上做好放线记号，通过升降车在桥顶用记号笔做记号；

5 做好标记后用墨斗分别把做好的记号点之间弹好标记线，施工人员就可以根据施工线固定钢波纹板位置并进行施工。按钢波纹板预留螺栓孔在墙体用电钻开孔，以用于化学锚栓连接安装。

7.3 波纹钢板加工组装及运输

7.3.1 波纹钢板件的加工及组装基本要求如下：

- 1 波纹钢板件长度和宽度应根据钢板尺寸及吊装、运输和拼装条件确定；
- 2 为保证波纹钢板结构的防腐蚀性能，波纹钢板在工厂加工时，采用 0 号热镀锌进行处理。在每片波纹钢板构件拼接前，需要将拼接处清洗干净；
- 3 波纹钢板件拼装时，板件之间应采用搭接，并用高强度螺栓连接，不应采用焊接。板件环向搭接的重叠部分边缘至最外缘螺栓孔距离应大于 50 mm，轴向搭接螺栓孔边缘距离视波距大小而定；
- 4 波纹钢板件的拼装应按安装图纸或施工作业书进行，必要时可以利用支撑装置来维持设计截面的形状；
- 5 波纹钢板件搭接应结合紧密，在同一位置不得重叠四张以上的波纹钢板。在波纹钢板件连接处可用衬垫或填充物来减小空隙；
- 6 每米长度拼装成型后，要测定一次截面形状，达到标准后再继续拼装，达不到标准应及时调整。圆周向拼装到环形圈合拢时，测定截面形状，采用定位拉杆固定，调整预紧螺栓，拼装顶部第一块波纹板；
- 7 螺栓预紧力扭矩应满足 GB 50205-2020 的要求。

7.3.2 波纹钢板从加工现场运输到施工现场过程中，车辆运输速度应控制在 10km/h 以内，避免各类构件相互挤压，产生较大的累积变形。

7.4 波纹钢板吊装施工

7.4.1 波纹钢板加固体系统整体安装顺序为：左右肩板直线段装上角钢螺栓打紧，每个相邻肩板搭接完成拼装并装上螺栓打紧；涵洞内居中装上反力上升架；将左右肩板立在反力架两侧，上顶板与两边肩板搭接拼装螺栓此时不要打紧；完成拼装后用葫芦牵拉反力架整体提升外骨骼框架；升至距梁底 50cm 左右，在顶板中间位置抹胶并顺着波峰波谷固定模袋；继续提升至与梁底间隙 5-6cm 左右规定距离，打紧搭接处螺栓保证两边贴紧墙体两侧；角钢底板下面钻孔至钢筋抬住外骨骼框架撤掉反力架；划线规划摆放植入拱座墙体钢筋扎紧，角钢底部焊接 U 型钢筋；支模板浇筑拱座及两侧肩板处混凝土；混凝土凝固后拆模用反力架或水箱加载牵拉；给模袋压浆填满；凝固后卸掉加载水箱或反力架装置即可。具体安装流程图见附录 E。

7.4.2 使用小型汽车吊将单张钢波纹板吊起，各单元之间采用螺栓连接。为保证安全，支撑必须稳定牢固；吊装前，做好全面仔细的检查核实工作，吊装索具的系接必须牢固；起吊前进行试吊试验，使各部分具有协调性和安全性；下落及就位时，应严格按照信号工指示慢放慢落，操作工人配合吊装。吊装作业时控制吊装高度，吊臂不宜伸出过长，控制吊臂旋转角度，保持吊车重心稳定，操作过程必须缓慢稳定，避免急停急转。

7.4.3 为了避免波纹钢板出现受力集中，在波纹钢板拱顶布置牵引环的位置，提前焊接好槽钢，然后将波纹钢板与槽钢同时钻孔，让牵引环通过钻孔固定在波纹钢板上。

条文说明：

将牵引环直接与波纹钢板连接可能会导致波纹钢板应力较大，为了防止出现应力集中，对拱顶结构进行局部优化，在波纹钢板拱顶间隔 0.8m 布置牵引环的位置焊接槽钢，使牵引环布置在槽钢上。

7.5 新增拱座连接工艺

7.5.1 角钢焊接采用二保焊（二氧化碳气体保护焊），焊接质量满足 JB/T 9186-1999 相关要求。

7.5.2 与波纹钢连接处角钢的开孔布置形式为梅花桩，在波纹钢贴近角钢的波上开孔，数量根据波纹钢宽度选择。

7.6 牵引力张拉施工

7.6.1 水箱装配工艺

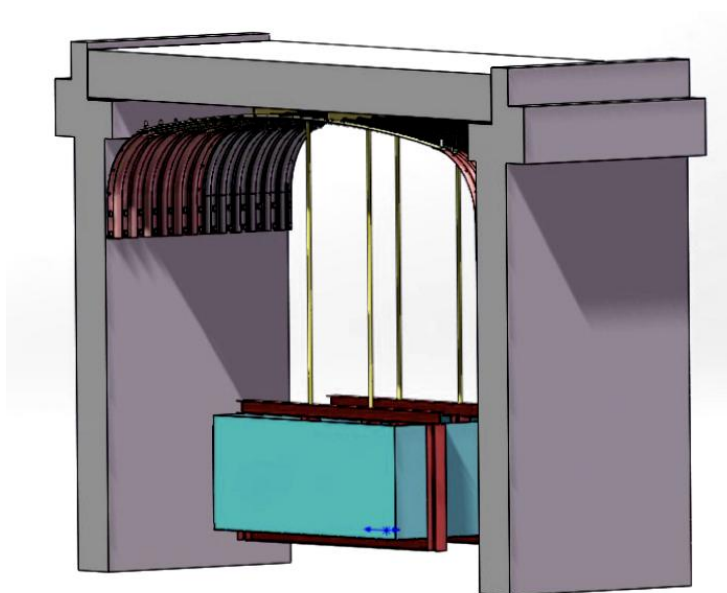


图 12 水箱装置图

1 考虑到水箱加水后自重较大，导致钢丝绳与水箱连接部位受力较大，故按照计算要求，在水箱焊接如图所示工字钢。

2 利用钢丝绳将加载水箱吊起，根据计算要求，在水箱内加入规定量的水，向下张拉波纹钢板，使波纹钢板发生一定弹性变形。

7.6.2 反力架装配工艺

1 反力架牵引装置由滑轮轴组、静态横梁、动态横梁、纵梁、配重块（可选用水泥墩、钢锭或水马等）、千斤顶等组成，图 13 中，各类数字分别表示：1-桥台，2-台帽，3-桥梁板，4-加固波纹顶板，5-混凝土注浆块；6-反力架牵引装置，601-滑轮轴组，602-静态横梁，603-动态横梁，604-纵梁，605-配重块，606-千斤顶；7-钢丝绳。

2 波纹钢板通过设置在顶部的牵引环与反力架牵引装置连接，张拉步骤如下：

1) 将拼装成拱形的波纹钢板推入桥体，并固定，由于波纹钢板上弯，使顶板高于原桥梁板下端面所在平面；

2) 在波纹钢板正下方的地面上布置反力架牵引装置；

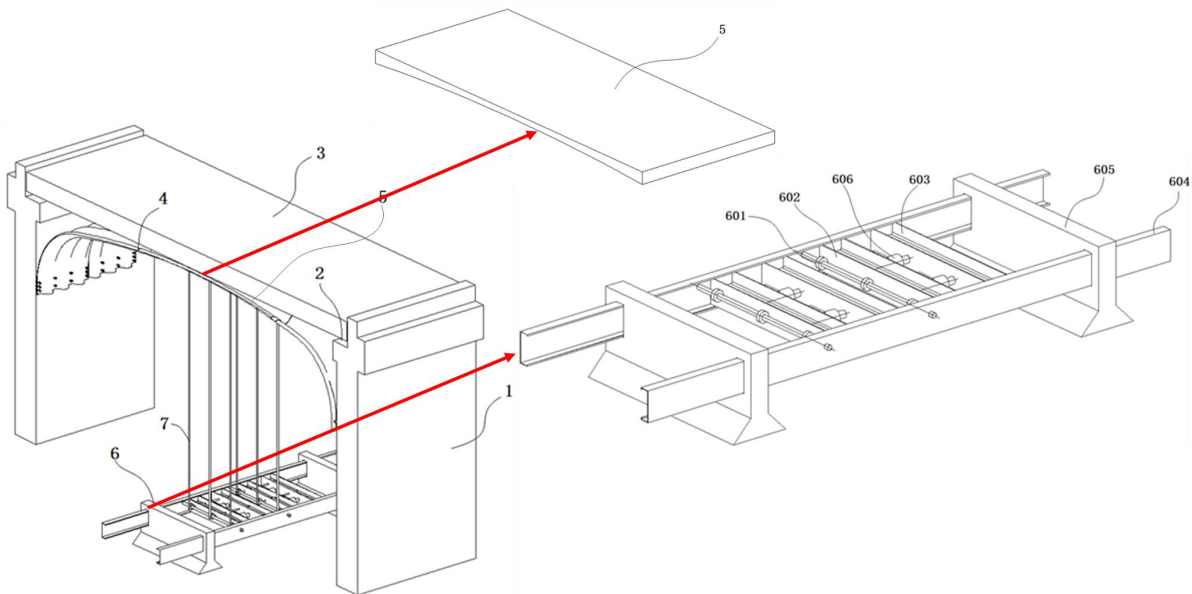


图 13 反力架装置示意图

3) 将拼装成拱形的波纹钢板推入桥体，并固定，由于波纹钢板上弯，使顶板高于原桥梁板下端面所在平面；

4) 在波纹钢板正下方的地面上布置反力架牵引装置；

5) 给波纹钢板下端中部的牵引环上分别连接钢丝绳，钢丝绳的另一端依次绕过定滑轮、钢丝绳通孔，最后与动态横梁固定连接；

6) 启动千斤顶，千斤顶的推杆推动动态横梁沿着滑轨向远离静态横梁的方向滑移，两组反力推杆部的动态横梁牵动多根钢丝绳给加固波纹钢板向下的持续的均匀拉力，使得加固波纹钢板的拱顶向下缓慢变形一段距离，最终拱顶等于或低于原桥梁板下端面所

在的平面；

7) 在加固波纹钢板上端和连接端位置混凝土注浆块，待混凝土达到设计强度后，桥梁板找平，通过吊车或者千斤顶将桥梁板缓慢置回两侧桥台的台帽，此时桥梁板的下端面与混凝土注浆块不接触或者轻微接触；

8) 启动千斤顶，千斤顶的推杆回缩，动态横梁向靠近静态横梁的方向滑移，多根钢丝绳释放拉力，加固波纹钢板回弹并向上拱起，通过混凝土注浆块给原桥梁板一个向上的支撑力。

7.7 注浆工艺

7.7.1 施工准备

1 施工开始前，应阅读图纸，做好技术交底。

2 为保证波纹板与既有衬砌结构成为整体结构从而达到共同受力的要求，波纹板与衬砌背后空隙应选用合理等级的注浆混凝土进行填筑。

7.7.2 使用挡板的注浆工艺流程如下：

1 钻孔，按照设计沿注浆挡板一定距离钻孔，钻孔直径根据实际情况拟定。

2 按照纵向间距 5.0 m×环向间距 3.5 m 安装适当长度、直径的注浆软管。

3 注入水料比为 0.18~0.25 的微膨胀混凝土，采用分层施工、对称施工，注浆压力为 0.1~0.2 MPa。

4 注浆完毕后，用速凝水泥封孔。

7.7.3 使用模袋混凝土的注浆工艺流程如下：

1 铺设混凝土模袋，并使用粘结材料将混凝土模袋固定在波纹钢外骨骼相应位置；

2 铺设好的模袋验收合格后，将适当长度、直径的注浆软管安装在模袋上；

3 先泵送一次水泥砂浆润滑管道，并在过浆后立即注入微膨胀水泥浆，注浆压力为 0.2~0.3 MPa，密切观察注浆口充填范围内的饱和度，近饱满时，可暂停 5~10min，待模袋中空气析出后，再充填至饱满，填充效果以模袋饱满密实、无灌注不足或超灌为准。

4 注浆结束后，应将注浆口系紧，防止混凝土外溢。

7.7.4 模袋注浆施工要求

- 1 注浆按照先拱顶、后两侧拱脚的顺序，即先上后下的次序进行。
- 2 注浆前应进行压水试验，检查机械设备是否正常，管路连接是否正确，为加快注浆速度和发挥设备效率，可采用群管注浆（每次 2~3 根）。
- 3 注浆过程中要随时观察注浆压力及注浆泵排浆量的变化，分析注浆情况，防止堵管、跑浆、漏浆。
- 4 注浆过程中要时刻注意波纹钢板的变形，达到预定变形量（即模袋混凝土刚好与梁底接触）时及时停止注浆。

7.8 解除牵引装置

待注浆混凝土强度达到 90%，在确保现场操作安全的情况下，缓慢解除牵引装置。

8 检验规则

8.1 检查和验收

产品的检查和验收由供方技术监督部门进行，需方有权按本标准进行检查和验收。

8.2 组批规则

波纹钢板应成批验收。每批由同一原材料、同一工艺连续生产的同一规格板材作为一批，检验批的划分和检验批抽检数量可按现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300-2013 的规定执行。

8.3 一般项目

- 8.3.1 波纹钢板抽检项目及允许偏差按本文件执行。
- 8.3.2 观察波纹钢板全局，波纹钢板件镀锌层外观质量应均匀完整、颜色一致，无漏镀缺陷，表面平整光滑，无流挂、滴瘤或结块、损伤、裂纹、孔洞等现象。
- 8.3.3 测量模袋的位移是否超限，模袋的位移要求不超过 5mm。
- 8.3.4 全面检查螺栓质量证明文件、检验报告及质量验收记录，并抽检螺栓连接副的单面镀锌层厚度。

附录 A
(规范性附录)

公路常用波纹钢板截面特性参数表

公路常用波纹钢板截面特性见表 A. 1

表 A.1 公路常用波纹钢板截面特性

分类	波距 mm	波高 mm	规定厚度 mm	截面面积 mm ² /mm	转动惯矩 mm ⁴ /mm	回转半径 mm
波纹钢板	150	50	5	6.211	1840.13	17.213
			6	7.460	2230.13	17.290
			7	8.711	2629.50	17.375
			8	9.964	3039.13	17.465
	200	55	5	5.915	2288.80	19.671
			6	7.103	2765.85	19.733
			7	8.293	3251.17	19.799
			8	9.486	3745.58	19.871
	300	110	5	6.533	9925.92	38.919
			6	7.870	11956.88	38.978
			7	9.189	14005.36	39.039
			8	10.511	16072.34	39.103
	380	140	5	6.477	15117.75	48.313
			6	7.776	18194.44	48.373
			7	9.076	21291.06	48.435
			8	10.377	24408.55	48.500
注：本表中未涉及的波纹钢板截面特性可按照 GB/T 34567 选用。						

附录 B

(规范性附录)

波纹钢板件螺栓孔分布展开示意图

中波和深波波纹钢板件螺栓孔分布展开示意图见图 B.1 和图 B.2，各类波形的板形净宽和周向孔间距要求见表 B.1：

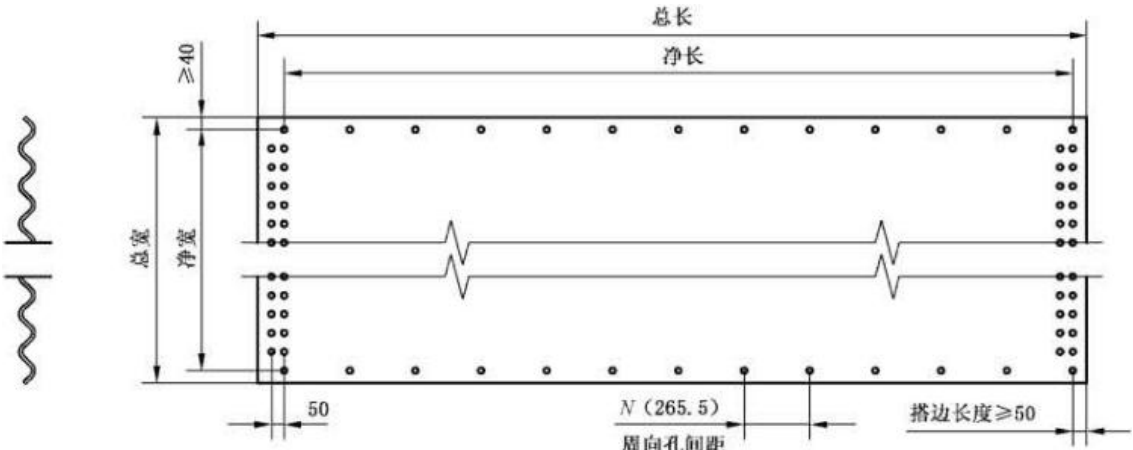


图 B.1 中波波纹钢板件螺栓孔分布展开示意图（mm）

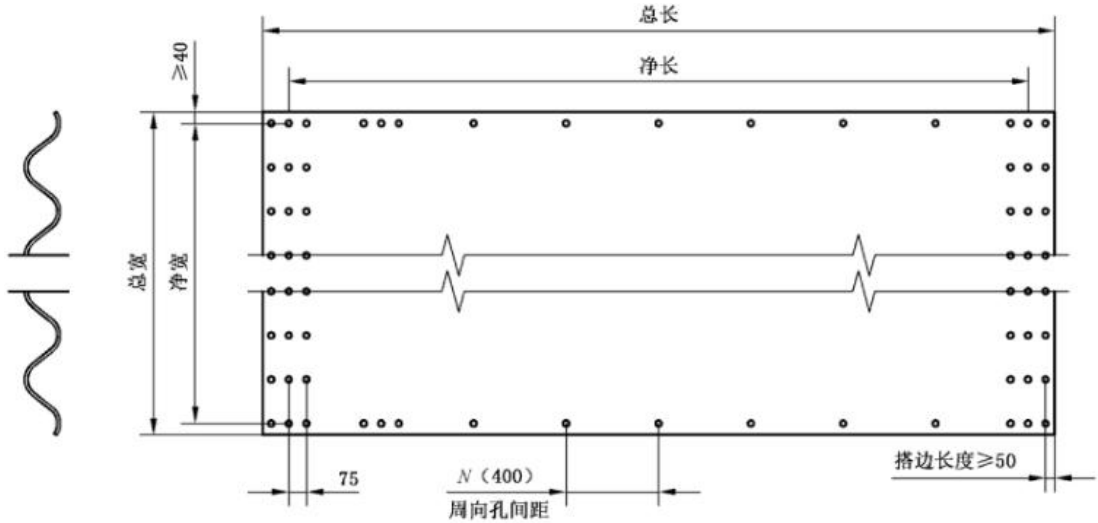


图 B.2 深波波纹钢板件螺栓孔分布展开示意图（mm）

表 B.1 各类波形的板形净宽和周向孔间距要求

波形尺寸（mm×mm）	波形净宽（mm）	周向孔间距（mm）
200×55	≤1200	≤270
300×110	≤1500	≤270

附录 C

(规范性附录)

药包式化学锚栓单个锚栓设计及安装参数表

药包式化学锚栓单个锚栓设计及安装参数见表 C.1

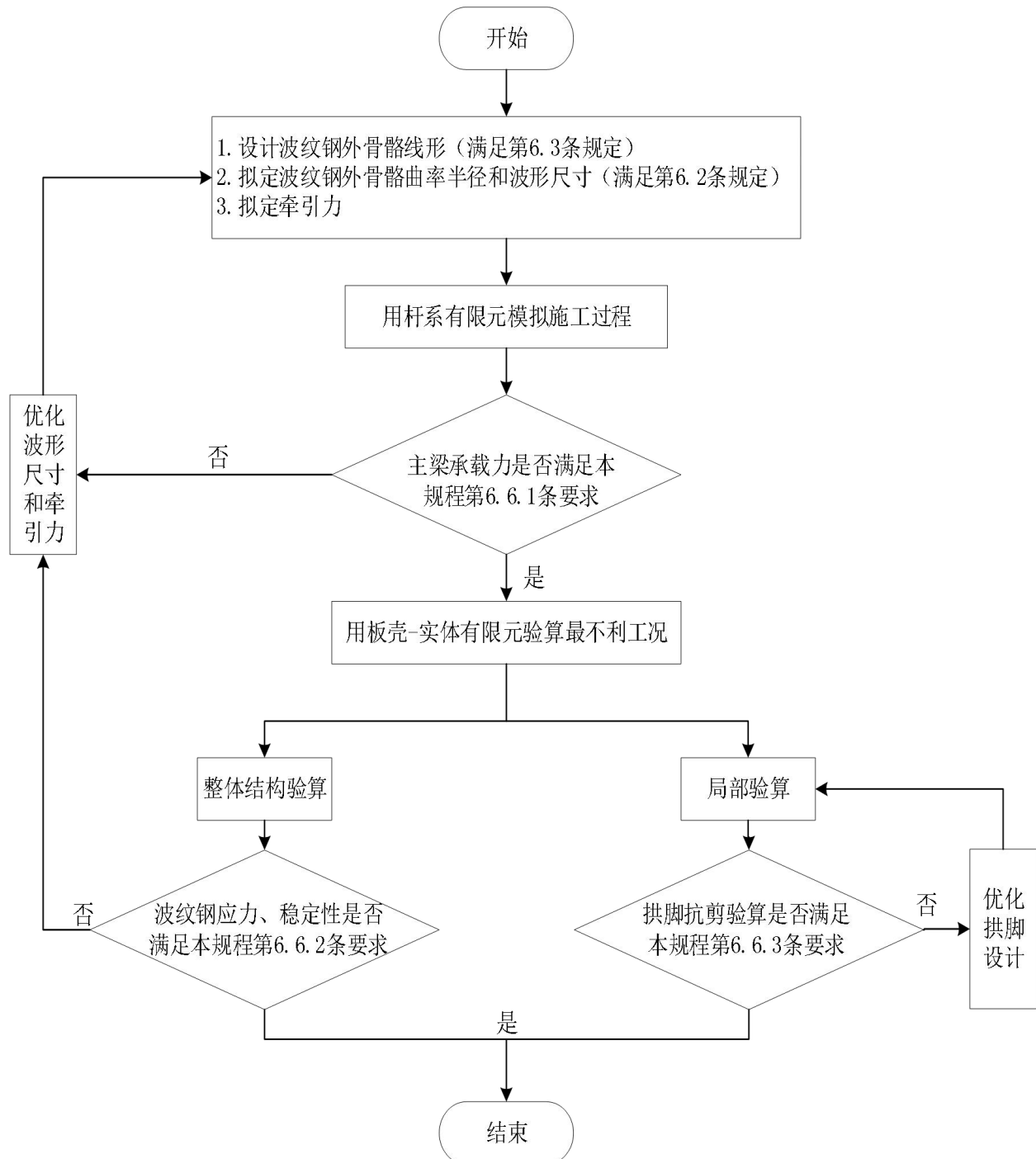
表 C.1 药包式化学锚栓单个锚栓设计及安装参数表

螺杆尺寸	螺杆应力截面面积(mm ²)	建议设计抗拉力(kN)	建议设计抗剪力(kN)	破坏锚固力(kN)	钻孔直径 D (mm)	钻孔深度 h (mm)	最大安装厚度 t (mm)
M10×130	58.0	11.2	12.2	≥30.2	12	90	20
M12×160	84.3	17.4	17.8	≥43.8	14	110	25
M16×190	157	24.0	33.0	≥81.6	18	125	35
M20×260	245	43.2	51.9	≥127	25	170	60
M24×300	353	60.0	74.2	≥184	28	210	65
M30×380	561	79.1	120.0	≥292	35	280	65

附录 D

(资料性附录)

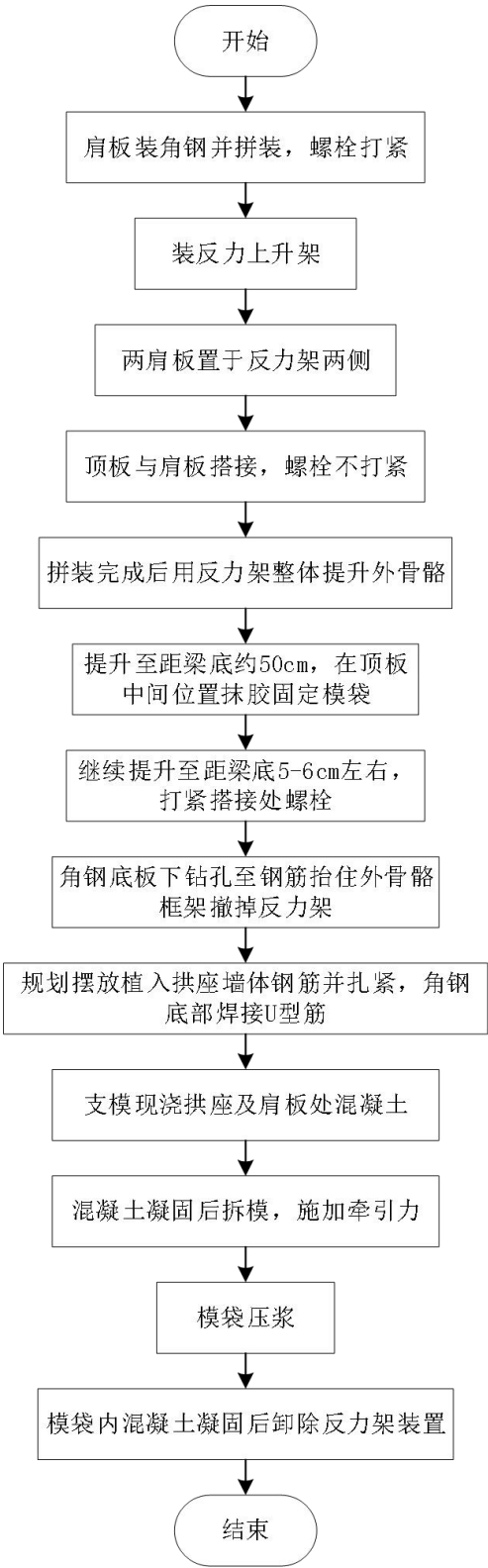
波纹钢外骨骼加固法的整体设计流程图



附录 E

(资料性附录)

波纹钢外骨骼加固法的整体施工流程图



附录 F

(资料性附录)

波纹钢外骨骼加固法模型试验

为了探索波纹钢外骨骼法的力学特性，验证波纹钢外骨骼法的有效性，对波纹钢外骨骼法加固板桥进行了室外加载试验，试验分为 3 组，包括单独的混凝土试验梁、波纹钢外骨骼跨中单点接触混凝土试验梁形成的加固体系和波纹钢外骨骼跨中双点接触混凝土试验梁形成的加固体系。采用反力架和液压加载设备进行试验，通过试验现象及采集的波纹钢应变、跨中荷载-位移曲线等试验数据分析波纹钢外骨骼法的破坏机理与基本力学性能。

F.1 试件设计及加工

为研究波纹钢外骨骼加固体系的基本受力性能和破坏模式，共设置的 3 组试验，所用试件的设计参数如表 F.1 所示，3 组试验的编号分别为 T1、T2、T3，其中 T1 为未采用任何加固措施的钢筋混凝土板，作为评估加固效果的依据；T2 为采用波纹钢外骨骼在跨中单点支撑加固的混凝土试验梁；T3 为采用波纹钢外骨骼在跨中两点支撑加固的混凝土试验梁，具体布置方式见图 F.1。

3 组试验选用相同的混凝土试验梁（图 F.2），试验梁钢筋包括纵筋、纵向架立筋、面筋和箍筋，纵筋采用 15C18，纵向架立筋采用 4A10，面筋采用 5A10，箍筋为 A10@122，设计试验加载方案为简支，跨中单点加载。

试验 T2 和 T3 选用相同的波纹钢拱作为加固构件，试验 T2 在跨中位置设置接触点，在接触点放置矩形管垫块，并保证矩形管垫块和波纹钢拱的总高度高出支座约 20mm，以消除波纹钢外骨骼和混凝土试验梁之间的间隙及波纹钢拱之间由于施工误差存在的间隙，避免接触不良而造成试验失败，同时作为预加牵引力；试验 T3 分别在距离跨中 1000mm 的左右两侧设置两个接触点放置，并保证矩形管垫块和波纹钢拱的总高度高出支座约 14mm。

表 F.1 试件设计参数

试验 编号	桥面板		波纹钢拱			钢垫块		
	材料	尺寸 (长*宽*高) (mm)	材料	截面 (mm)	尺寸 (长*宽*高) (mm)	材料	截面 (mm)	尺寸 (长) (mm)
T1	C35	4980*990*320	~	~	~	~	~	~
T2	C35	4980*990*320	Q345	200*55	4880*990*1138	Q235	100*50*6	990
T3	C35	4980*990*320	Q345	200*55	4880*990*1138	Q235	100*50*6	990

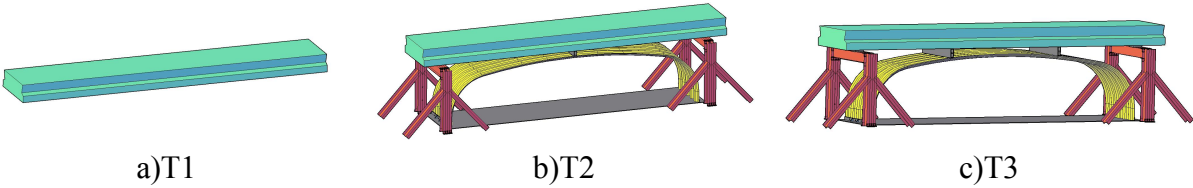


图 F.1 T1、T2、T3 布置方式示意图

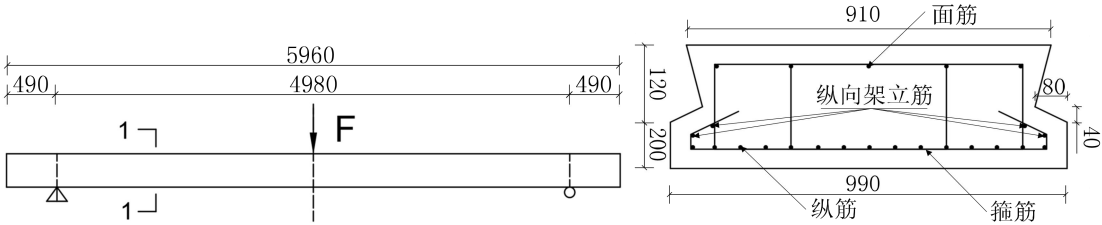


图 F.2 试验梁截面详细参数

F.2 试验装置

加固体系往往是由于在简支板的跨中截面产生塑性铰而破坏，因此采用跨中单点加载方式。试验加载装置见图 F.3，试验加载装置可分为试件、钢底座、反力装置和加载装置共四部分，所有连接均为刚接。采用力加载的方式缓慢持续加载，注意加载速度的控制，通过千斤顶提供加载动力，荷载首先传到分配梁上，然后通过分配梁传给试件，此外，为在实验过程中更好的模拟支座对波纹钢拱的约束作用，同时平衡试验中产生的水平推力，将波纹钢拱两拱脚固定在一块 6mm 厚的平钢板上，并增加了小三角形钢片对拱脚进行局部加固（图 F.4）。

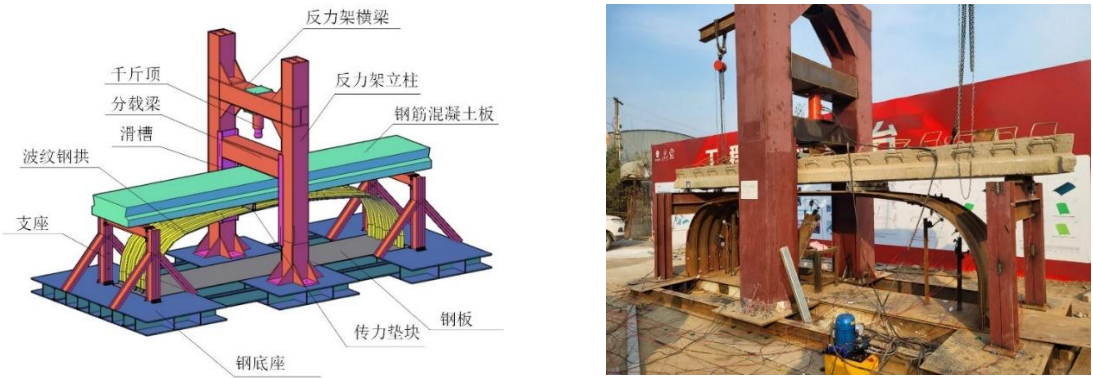


图 F.3 跨中加载试验装置布置示意图

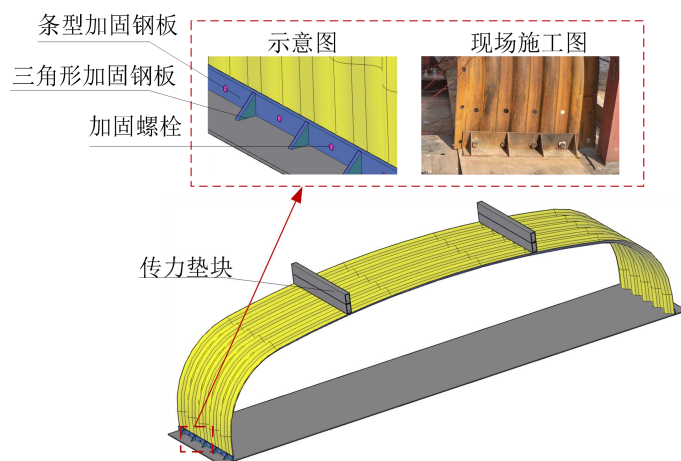


图 F.4 波纹钢拱脚连接

F.3 试验结果分析

F.3.1 破坏模式

T1 试件的最终破坏形态如图 F.5 所示，试验梁在跨中单点加载作用下主要承受弯矩作用，破坏形态为弯曲破坏。在加载过程中，跨中梁底混凝土首先出现受拉裂缝，随着荷载的增大，裂缝不断向两端扩展，裂缝发展速度逐渐变快，这是由于受拉区钢筋逐渐屈服，受拉钢筋刚度逐渐减小，出现加载外力不变，但变形逐渐增加的现象。T1 的混凝土试验梁破坏现象最终表现为受拉区出现大量裂缝，同时受压区混凝土被压碎，整个破坏过程出现明显的适筋梁破坏特征，表现出良好的延性性能。

T2、T3 试件的最终破坏形态如图 F.6、图 F.7 所示，对于 T2、T3，加固系统在跨中单点加载作用下，试验梁的破坏过程与 T1 相似，均表现为为弯曲破坏特征。对于波纹钢外骨骼加固系统，随着跨中荷载的加大，波纹钢拱逐渐产生向下的弯曲变形，混凝土试验梁在外荷载的作用下，首先在跨中受拉区萌生裂缝，随着外荷载的加大，裂缝逐渐向梁体两端扩展，波纹钢拱顶部也逐渐变的平坦，拱肩向外突出，在大变形情况下，外荷载发生重分配，梁体一部分受力转由波纹钢拱承担，通过波纹钢拱将一部分竖向的力转化为水平力。结构体系最终表现为混凝土试验梁的底面和侧面出现大量裂缝，受压区混凝土被压碎，波纹钢拱线形发生明显变化。由于波纹钢拱的存在，混凝土试验梁裂缝开展相对来说较为缓慢，说明波纹钢拱外骨骼法具有较好的塑性变形能力。



图 F.5 T1 破坏模式



图 F.6 T2 破坏模式



图 F.7 T3 破坏模式

F.3.2 跨中荷载-位移曲线

实验 T1-3 的跨中荷载-位移曲线如图 F.8 所示, 从图 F.8 可以看出, T1-3 的塑性大变形阶段较长, 说明 T1-3 均表现为良好的延性, 此外, T1-3 试验梁的破坏特征相似, 均与适筋梁相同, 根据跨中荷载位移曲线特征, 可以将整个过程分为两个阶段, 即弹性阶段和塑性大变形阶段。在加载前期, 荷载-位移曲线基本上处于弹性阶段, 试验梁的刚度退化不明显, 当荷载增大到一定值后, 试验梁的刚度迅速下降, 进入塑性大变形阶段, 此时试验梁仍然具有较大的承载能力, 表现出明显的塑性破坏特点。

由图 F.8 的跨中荷载位移曲线可以看出, 经波纹钢外骨骼加固后的混凝土试验梁的承载能力和刚度都有一定的提升, 表 F.2 列出了试验梁各个阶段对应的跨中荷载及位移, 其中 F_u 、 U_u 分别为试验加载构件达到抗弯破坏状态时对应的荷载和位移, F_d 、 U_d 分别为试验加载构件在加载范围内能够达到的最大荷载和对应的位移, 为该范围内的抗弯极限荷载和对应的抗弯极限位移。由此可见, 试验 T1、T2、T3 的抗弯破坏承载力分别为 348kN、405.75kN、433.09kN, 相较于 T1, T2 和 T3 的抗弯破坏承载力分别提高了 16.59%、24.45%, 试验 T1、T2、T3 的抗弯极限承载力分别为 361.71kN、428.54、444.1kN, 相较于 T1, T2 和 T3 的抗弯极限承载力分别提高了 18.48%、22.78%, 说明波纹钢外骨骼对混凝土试验梁有较好的加固效果。同样, 相较于 T2, T3 的抗弯破坏承载力和抗弯极

限承载力分别提高了 6.74%、3.63%，说明波纹钢的加固效果与桥面板和波纹钢外骨骼之间的连接形式存在一定的关联性，这可能与波纹钢外骨骼在不同的受力形式下刚度的差异有关。

表 F.2 承载力试验结果

编号	U_u	F_u	U_d	F_d
T1	30.1	348	35.73	361.71
T2	35.12	405.75	78.19	428.54
T3	34.9	433.09	93.85	444.1

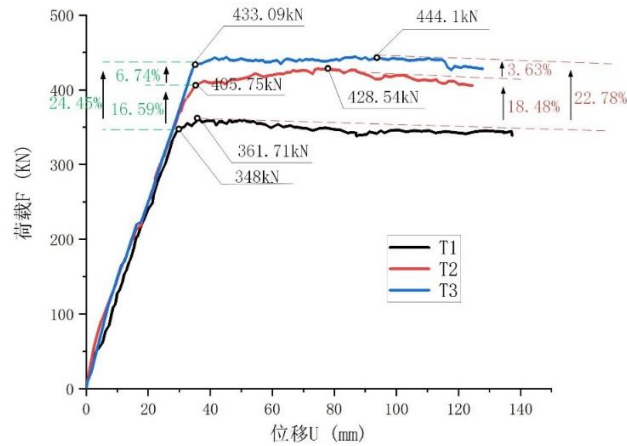


图 F.8 跨中荷载-位移曲线

F.3.3 支反力-跨中加载曲线

由于波纹钢外骨骼对试验梁的顶撑作用，T1 支座处的初始荷载为 23.5kN，T2 支座处的初始荷载为 14.39kN，T3 支座处的初始荷载为 9.40kN，可见，波纹钢外骨骼起到了加固支撑作用，在一定程度上对试验梁的自重起到很好的卸载效果。见 F.3.3，随着跨中外荷载 F1 的加大，试验梁支座处的支反力也随之增大，当跨中加载力增大到一定值后，试验梁支座处的支反力突降，对于 T1，这可能由于试验试件进入塑性阶段，随着外荷载的加大，混凝土试验梁产生了不可逆的塑性变形，梁体发生弯曲，支座处梁体有向上运动的趋势，从而支反力迅速下降，对于 T2 和 T3 来说，试验梁支座处支反力的突降除了有与 T1 相同的原因外，还可能与混凝土试验梁梁体进入塑性后刚度迅速减小，导致此时刻混凝土试验梁的刚度与波纹钢外骨骼的刚度的比值减小，由于力的分配与各部件的刚度有密切关系，此时波纹钢外骨骼将会分担更多的外荷载，而混凝土试验梁的分担的荷载相应减少。

相较于未采用波纹钢外骨骼加固的试验梁 T1，在采用波纹钢外骨骼的措施加固后，T2 和 T3 的 F2-F1 曲线的斜率明显减小，说明在同等外荷载作用下，相较于 T1，T2 和 T3 支座处的反力更小，波纹钢外骨骼的存在对试验梁混凝土板起到很好的分载效果，随着跨中外荷载的加大，有一部分外荷载由波纹钢外骨骼分担。同时，相较于 T2，T3

的斜率相对较小，支座反力的增速相对较小，说明 T3 的加固形式对混凝土试验梁所受活载能够起到更好的分载作用，这也进一步解释了相较于 T2，T3 有更好加固效果的原因。

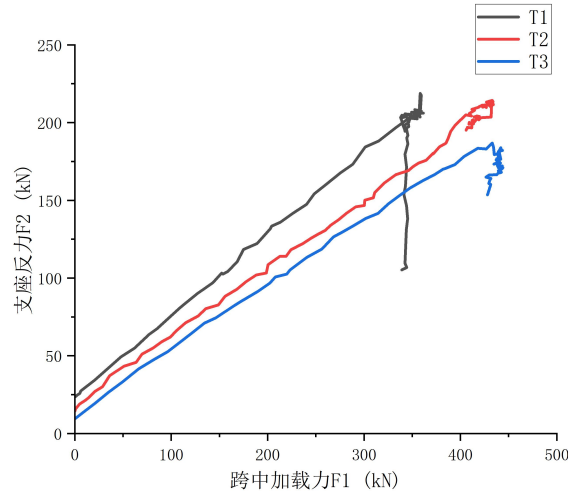


图 F.9 支座反力-跨中加载力

F.3.4 应变及曲率分析

(1) 分析波纹钢拱的截面应变有助于判别波纹钢的受力特点，图 F.10 是 T2、T3 的波纹钢拱在 6 个不同受力阶段的波峰、波谷沿跨度的应变分布，分别是：波纹钢外骨骼加固体系达到抗弯破坏状态时 (F_d)、达到抗弯极限状态时 (F_u) 以及 $0.2-0.8 F_u$ 时的应变分布，由图 F.10 可以得出以下结论：

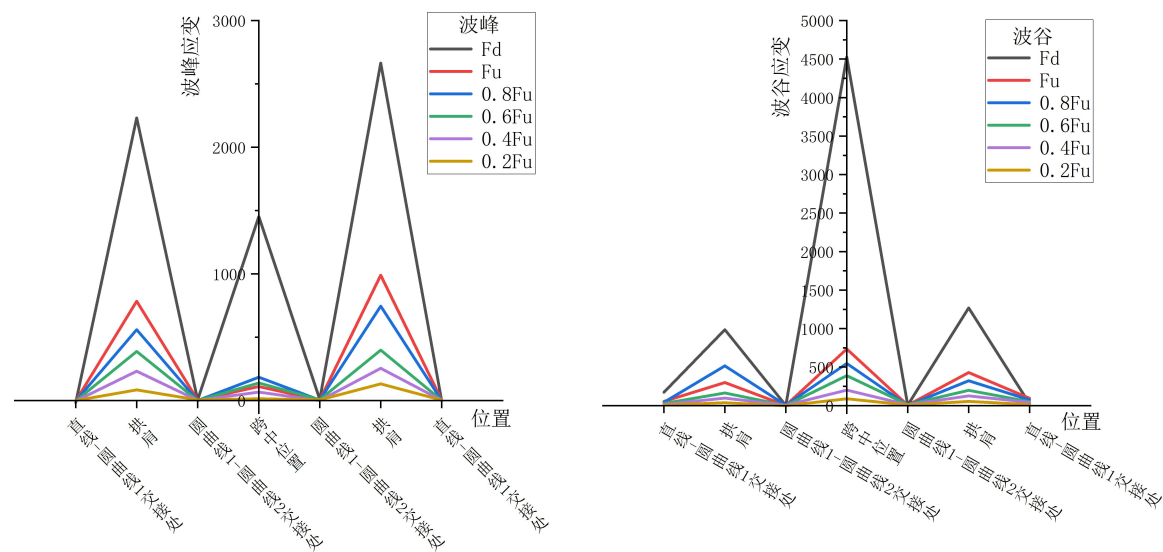
1) 在跨中荷载作用下，波纹钢应变沿跨度方向分布不均匀，随着外荷载的加大，波纹钢拱各点的应变随之增大，波纹钢拱的受力方式以受拉为主；

2) 对于 T2，波纹钢拱的波峰位置在左右拱肩处产生的应变值最大，而在波谷位置，波纹钢拱在跨中区域产生的应变最大；对于 T3，波纹钢拱的波峰、波谷位置均是在左右拱肩处产生的应变值最大，其他位置相对较小；

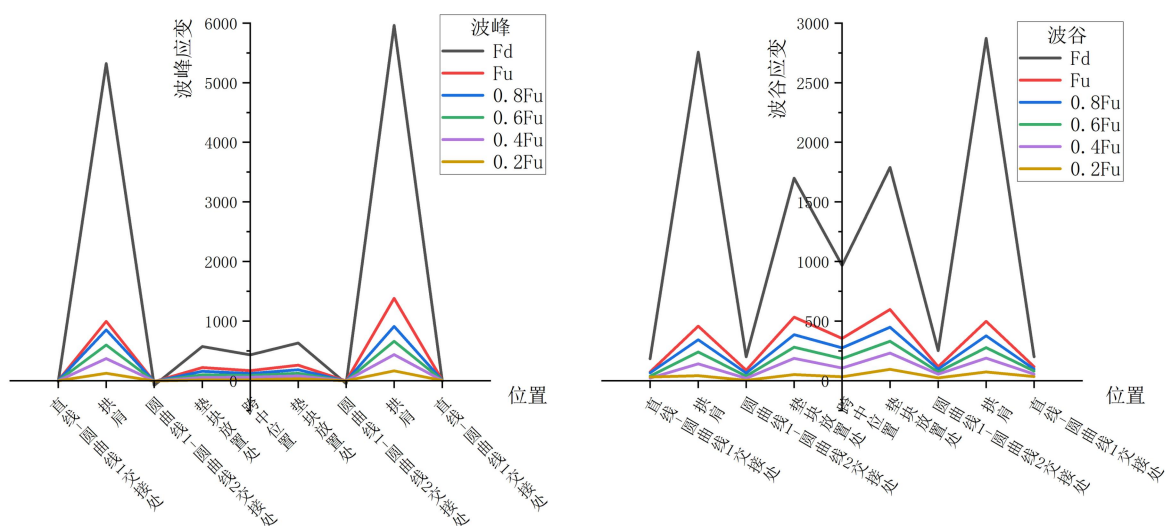
3) 对于 T2 和 T3 的波峰位置，左右拱肩处的钢材在达到 F_d 之前就已经进入屈服阶段，在达到 F_d 后，跨中位置的钢材接近屈服；对于 T2 的波谷位置，跨中位置的钢材在达到 F_d 之前就已经进入屈服阶段，对于 T3 的波谷位置，左右拱肩及左右矩形管垫块位置处的钢材在达到 F_d 之前就已经进入屈服阶段。

4) 对于 T2 和 T3，在矩形管传力垫块处的应变较大，这很可能与该位置处出现应力集中有关。

5) 波纹钢拱在圆曲线 1-圆曲线 2 交接处应变发生转折，说明波纹钢拱在受到由矩形垫块传递下来的外力作用时会绕大小圆曲线交界点转动，此点为变形的旋转中心点。



a)T2



b)T3

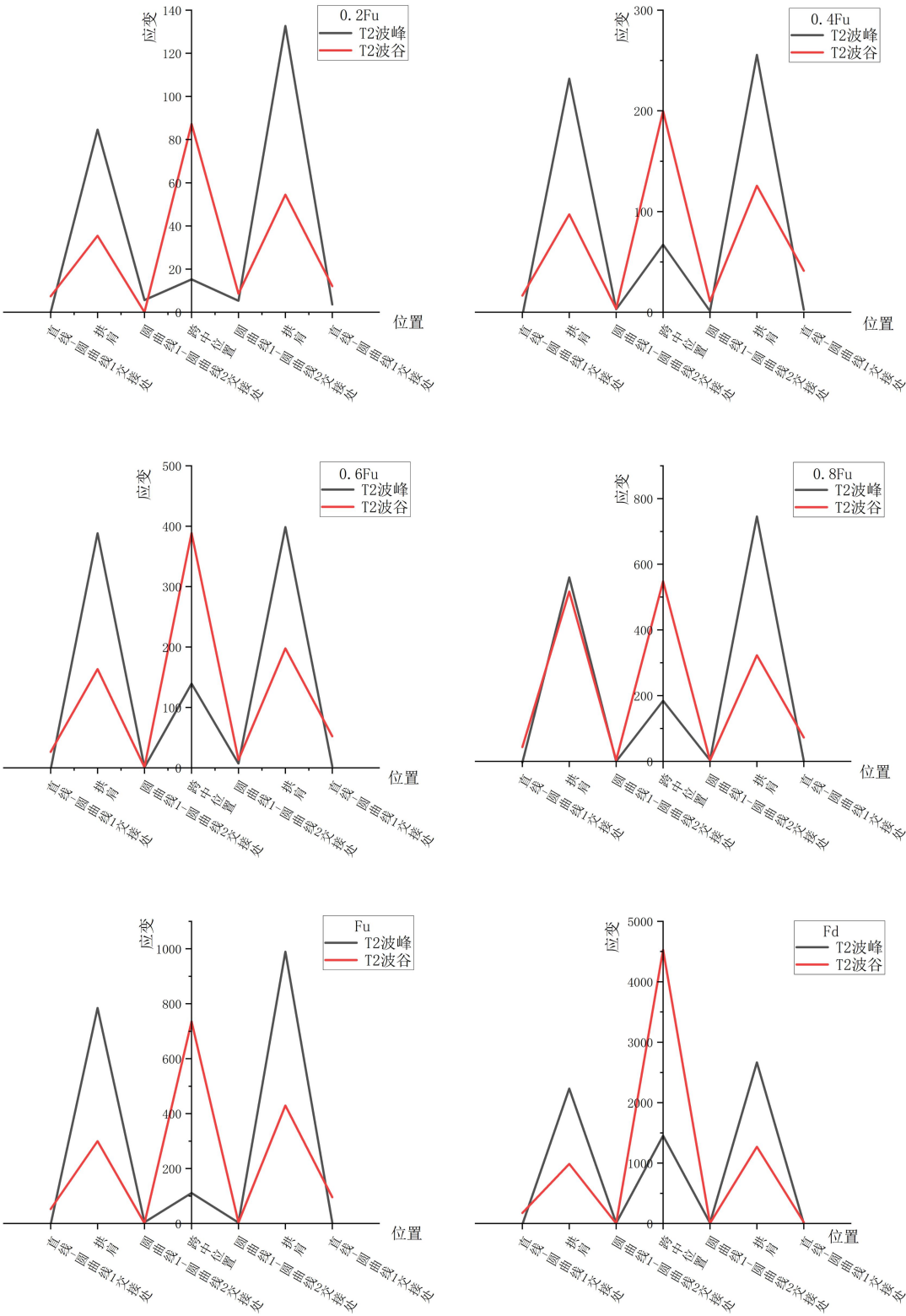
图 F.10 波纹钢拱沿跨度方向关键截面的应变变化情况

图 F.11 表示同一荷载作用下 T2、T3 的波峰波谷应变对比图，由图 F.11 可以得出以下结论：

1) 在拱肩位置，相较于波谷，波峰的应变更大，在跨中位置，相较于波谷，波峰的应变更小。

2) 对于 T2 的波峰位置，在外荷载为 $0.4F_u$ - F_u 时，波纹钢拱的左侧直线-圆曲线 1 交接处产生受压应变，当外荷载为 F_d 时，波纹钢拱的左右两侧直线-圆曲线 1 交接处产生受压应变，其余位置均产生受拉应变；对于 T2 的波谷位置，波纹钢拱的应变均为受拉应变。对于 T3 的波峰位置，当外荷载为 $0.2F_u$ - F_u 时，在左右两侧圆曲线 1-圆曲线 2 交接处的波纹钢拱受压，当外荷载为 F_d 时，波纹钢拱的左右两侧直线-圆曲线 1 交接处、

左右两侧圆曲线 1-圆曲线 2 交接处的波纹钢拱受压，除此之外的其余位置均产生受拉应变；对于 T2 的波谷位置，波纹钢拱的应变均为受拉应变。



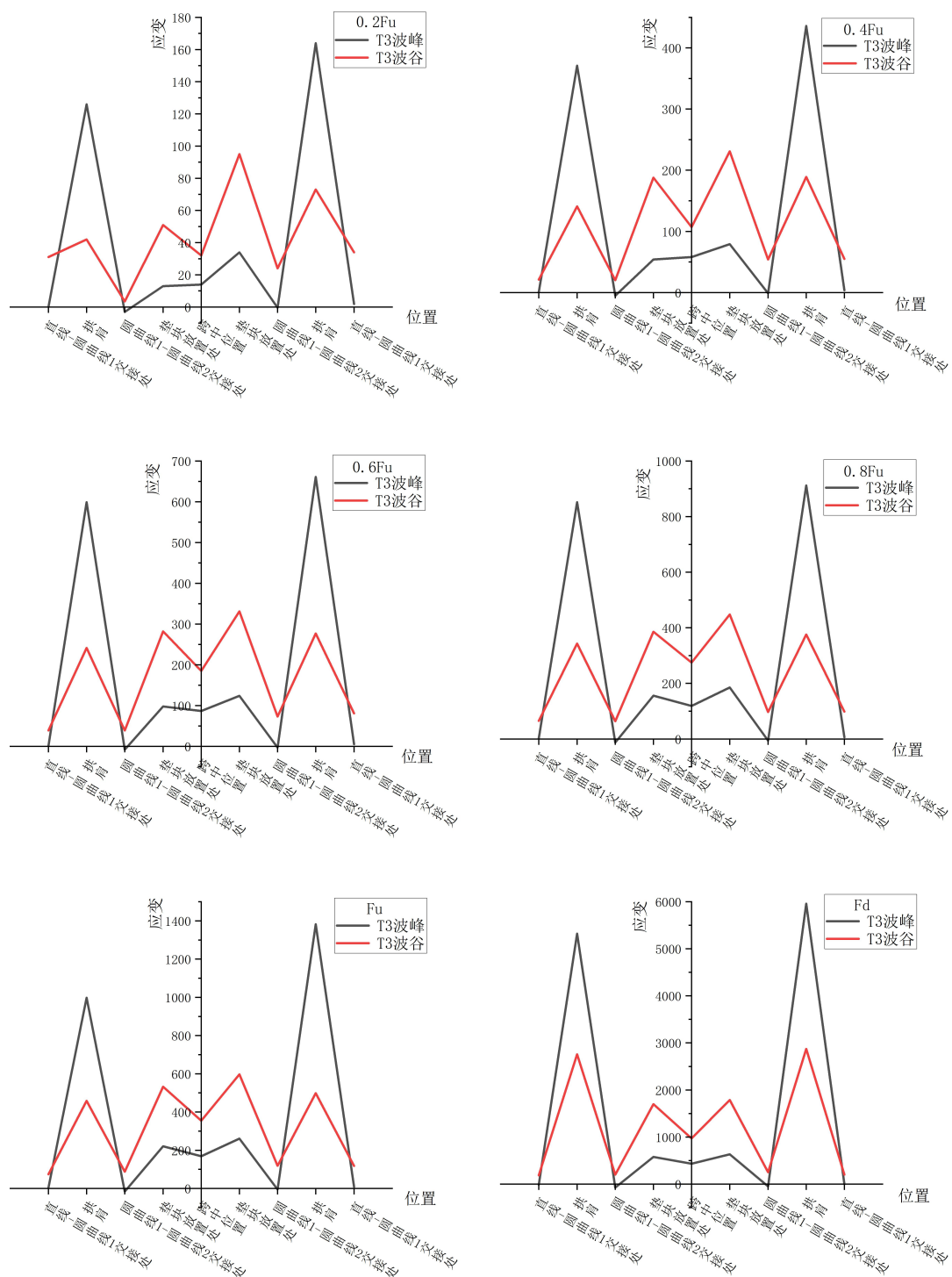


图 F.11 不同外力加载条件下各截面波峰波谷的应变对比

(2) 曲率分析

波纹钢截面的应力较难获取，可以通过对截面曲率的分析，获取波纹钢外骨骼在加固体系中的变形特征，探究其受力特点。见图 F.12 所示，T2 和 T3 截面曲率随着荷载的

增大而不断增加，在外荷载作用下，波纹钢外骨骼在拱顶圆曲线范围内承受正弯矩作用，产生下凹，旋转中心点在圆曲线 1-圆曲线 2 相交处，拱肩圆曲线及拱脚直线段承受负弯矩作用，产生外凸，这个现象间接说明了波纹钢很可能在拱顶圆曲线范围内承受竖向荷载（主动荷载作用），拱肩和拱脚直线段范围内则承受来自波纹钢本身线性和拱脚的约束作用（被动荷载作用）。其中，主动荷载作用表现为：千斤顶加载过程中，简支板发生受弯破坏，荷载通过传力垫块传递至波纹钢拱顶部位，使波纹钢拱顶承受千斤顶传递过来的荷载；被动荷载作用表现为：拱顶承受的荷载使波纹钢拱顶向下挠曲，拱脚约束及波纹钢抵抗来自拱顶圆曲线产生的变形，这个抵抗变形的荷载就是被动荷载作用。

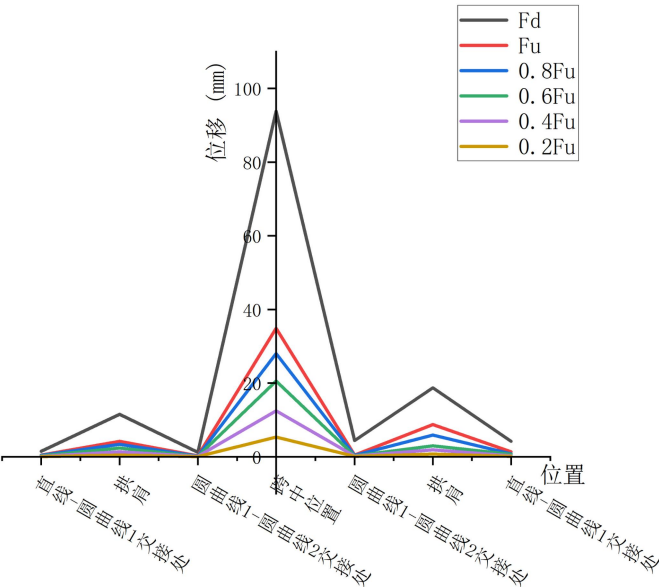
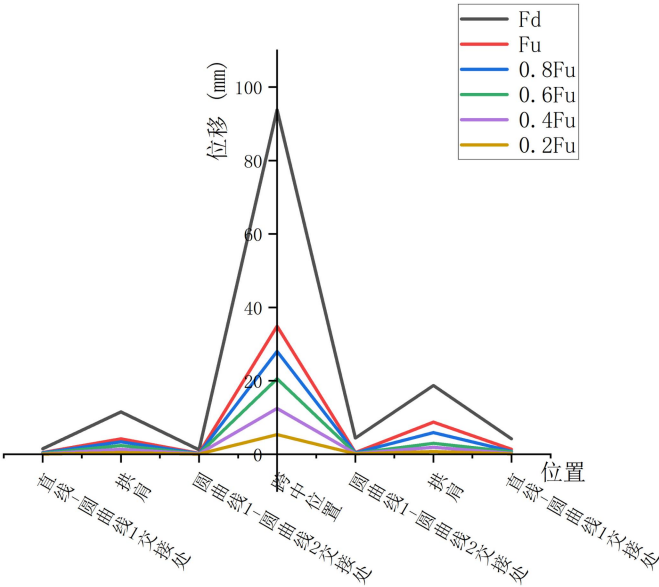


图 F.12 波纹钢拱垂直于截面的位移

附录 G

(资料性附录)

波纹钢外骨骼加固法计算示例

本算例依托工程为国家高速公路京昆线（G5）陕西境蒲城至涝峪公路改扩建工程，选取沿线跨径分别为 6m、8m、10m、13m 的通道涵，按照本文件所述内容进行加固计算，对比说明波纹钢加固效果。

G.1 原桥工程背景

上部结构为钢筋混凝土空心板单跨简支梁，下部结构为钢筋混凝土轻型桥台，基础形式采用扩大基础。下穿道路为地方小路，原有梁桥荷载等级为汽车-超 20 级，挂车-120 级。通过波纹钢外骨骼加固措施，对其进行承载性能提升，使改扩建后的公路能够满足公路 I 级设计荷载的要求。原桥中板和边板横截面如图 G.1~图 G.4 所示。

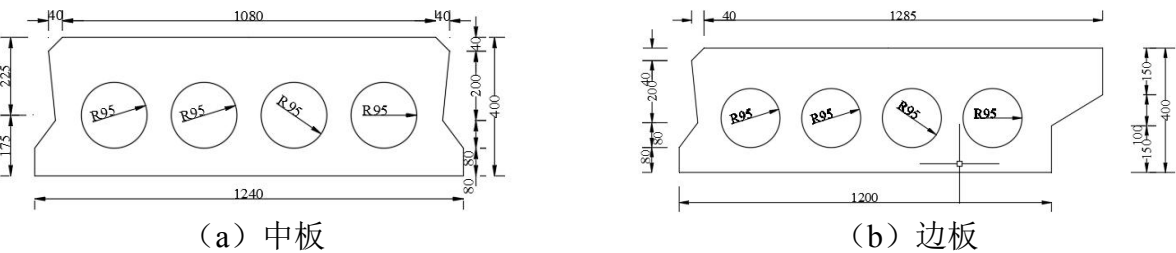


图 G.1 6m 桥梁横截面 (mm)

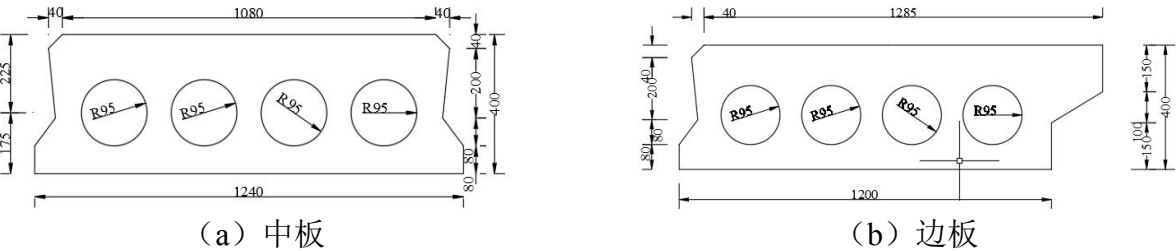


图 G.2 8m 桥梁横截面 (mm)

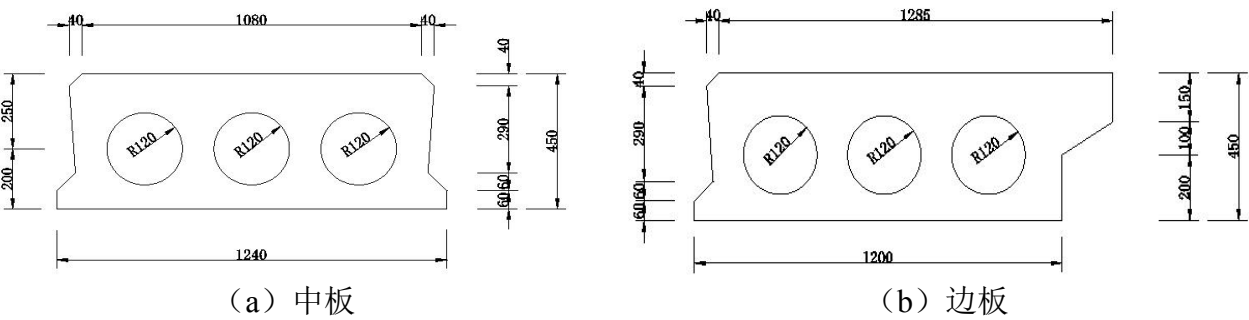


图 G.3 10m 桥梁横截面 (mm)

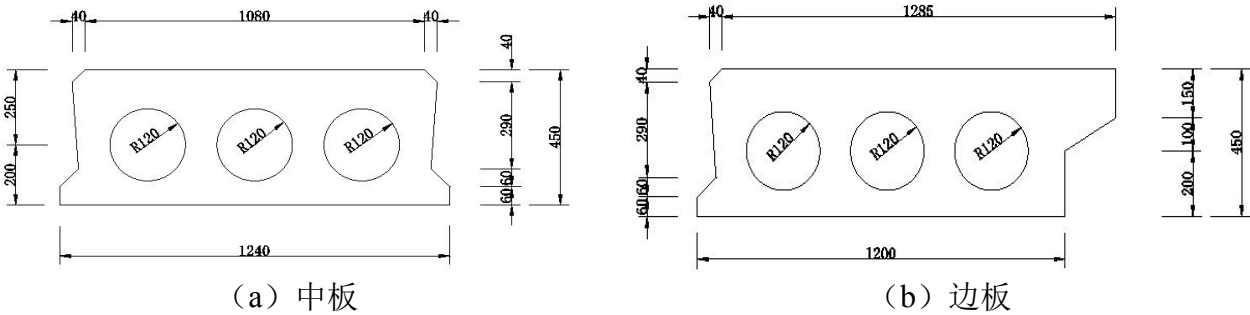


图 G.4 13m 桥梁横截面（mm）

G. 2 波纹钢基本信息

G. 2. 1 波纹钢属性

参考《冷弯波纹钢》GB/T 34567-2017，选取截面尺寸为 200mm×55mm 和 300mm×110mm，厚度为 5mm、6mm、7mm、8mm 的波纹钢。截面特性见表 G.1。

表 G.1 所选波纹钢截面特性

分类	波距 mm	波高 mm	规定厚度 mm	截面面积 mm ² /mm	转动惯矩 mm ⁴ /mm	回转半径 mm
波纹钢板	200	55	5	5.915	2288.80	19.671
			6	7.103	2765.85	19.733
			7	8.293	3251.17	19.799
			8	9.486	3745.58	19.871
	300	110	5	6.533	9925.92	38.919
			6	7.870	11956.88	38.978
			7	9.189	14005.36	39.039
			8	10.511	16072.34	39.103

G. 2. 2 波纹钢外骨骼线形

波纹钢线形设计根据本文件第 6.3 节规定，如图 G.5~图 G.8 所示。

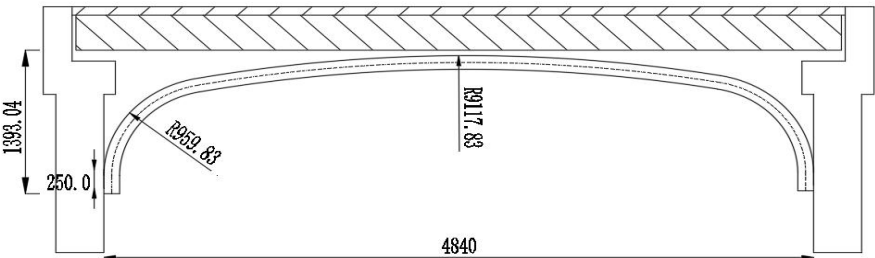


图 G.5 6m 桥梁波纹钢线形（mm）

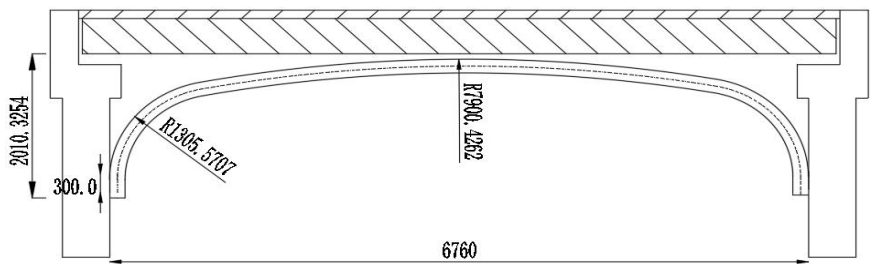


图 G.6 8m 桥梁波纹钢线形 (mm)

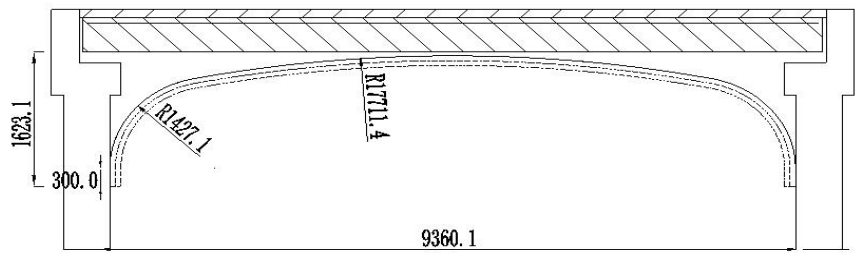


图 G.7 10m 桥梁波纹钢线形 (mm)

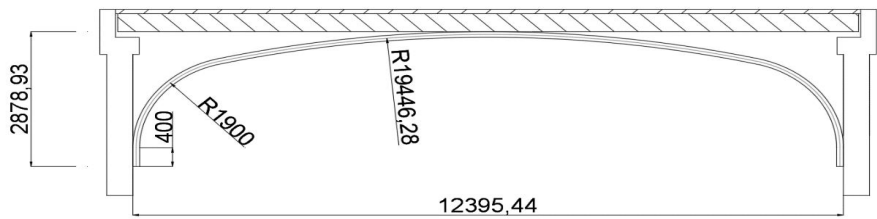


图 G.8 13m 桥梁波纹钢线形 (mm)

G. 2. 3 波纹钢板件数量划分

波纹钢拼接板件数量划分如表 G.2 所示：

表 G.2 拼板数量划分

原桥跨径 (m)	原桥宽 (m)	波纹钢竖向投 影长度 (m)	板件划分数量	
			纵向 (块)	横向 (块)
6	4.8	4.7	1	2
8	6.8	6.7	2	2
10	9.4	9	2	2
13	12.4	12	3	2

G. 3 计算结果

G. 3. 1 承载力计算结果

利用有限元法等数值计算方法验证其安全性，不同参数情况下承载力提升验算结果见表 G.3~表 G.6。

表 G.3 6m 桥梁加固后承载力验算（以 1.2m 桥宽为例）

基本信息	桥梁跨径(m)	6															
	梁片	中板								边板							
	波形尺寸(mm)	200×55				300×110				200×55				300×110			
	板厚(mm)	5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8
	波纹钢长度L0	4840				4840				4840				4840			
	直线段长度L1	250				250				250				250			
	波纹钢拱高度L2	1393				1393				1393				1393			
	拱肩处R角	959.8				959.8				959.8				959.8			
	拱顶处R角	9117.8				9117.8				9117.8				9117.8			
指标	原梁桥支反力 (KN) ①	288.7	288.7	288.7	288.7	288.7	288.7	288.7	288.7	291.7	291.7	291.7	291.7	291.7	291.7	291.7	291.7
	加固后梁桥支反力 (KN) ②	278.7	279	279.3	279.6	278.8	279.1	279.4	279.6	281.6	281.9	282.2	282.4	281.7	281.9	282.2	282.5
	支反力降低效果 (②-①)/①	3.46%	3.36%	3.26%	3.15%	3.43%	3.33%	3.22%	3.15%	3.46%	3.36%	3.26%	3.19%	3.43%	3.36%	3.26%	3.15%
	原梁桥最大弯矩 (KN·m) ③	376.35	376.35	376.35	376.35	376.35	376.35	376.35	376.35	380.67	380.67	380.67	380.67	380.67	380.67	380.67	380.67
	加固后梁桥最大弯矩 (KN·m) ④	278.64	274.78	271.16	267.75	278.05	274.16	270.53	267.12	283.51	279.8	276.32	273.02	282.95	279.21	275.71	272.42
	弯矩降低效果 (③-④)/③	25.96%	26.99%	27.95%	28.86%	26.12%	27.15%	28.12%	29.02%	25.52%	26.50%	27.41%	28.28%	25.67%	26.66%	27.57%	28.44%

按照《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60-2015）验算，边板、中板的最大抗力分别是 306.32KN·m、311.10KN·m，其承载能力不能满足 15 规范要求，在使用波纹钢外骨骼加固后，桥面板所承受的最大弯矩效应均小于其所能承受的最大抗力，且具有一定的安全储备。

（注：对波纹钢拱施加 24KN 的下拉牵引力）

表 G.4 8m 桥梁加固后承载力验算（以 1.2m 桥宽为例）

基本信息	桥梁跨径(m)	8															
	梁片	中板								边板							
	波形尺寸(mm)	200×55				300×110				200×55				300×110			
	板厚(mm)	5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8
	波纹钢长度L0	6760				6760				6760				6760			
	直线段长度L1	300				300				300				300			
	波纹钢拱高度L2	2010.3				2010.3				2010.3				2010.3			
	拱肩处R角	1305.6				1305.6				1305.6				1305.6			
	拱顶处R角	7900.4				7900.4				7900.4				7900.4			
指标	原梁桥支反力 (KN) ①	360.8	360.8	360.8	360.8	360.8	360.8	360.8	360.8	365	365	365	365	365	365	365	365
	加固后梁桥支反力 (KN) ②	301.3	301.4	301.4	301.5	301.3	301.4	301.4	301.5	305.5	305.5	305.6	305.7	305.5	305.5	305.6	305.7
	支反力降低效果 (②-①)/①	16.49%	16.46%	16.46%	16.44%	16.49%	16.46%	16.46%	16.44%	16.30%	16.30%	16.27%	16.25%	16.30%	16.30%	16.27%	16.25%
	原梁桥最大弯矩 (KN·m) ③	648.26	648.26	648.26	648.26	648.26	648.26	648.26	648.26	656.68	656.68	656.68	656.68	656.68	656.68	656.68	656.68
	加固后梁桥最大弯矩 (KN·m) ④	464.35	460.39	456.59	452.91	463.69	459.68	455.84	452.15	473.32	469.54	465.9	462.38	472.69	468.86	465.19	461.65
	弯矩降低效果 (③-④)/③	28.37%	28.98%	29.57%	30.13%	28.47%	29.09%	29.68%	30.25%	27.92%	28.50%	29.05%	29.59%	28.02%	28.60%	29.16%	29.70%

按照《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60-2015）验算，边板、中板的最大抗力分别是 500.96KN·m、500.96KN·m，其承载能力不能满足 15 规范要求，在使用波纹钢外骨骼加固后，桥面板所承受的最大弯矩效应均小于其所能承受的最大抗力，且具有一定的安全储备。

（注：对波纹钢拱施加 24KN 的下拉牵引力）

表 G.5 10m 桥梁加固后承载力验算（以 1.2m 桥宽为例）

基本信息	桥梁跨径(m)	10															
	梁片	中板								边板							
	波形尺寸(mm)	200×55				300×110				200×55				300×110			
	板厚(mm)	5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8
	波纹钢长度L0	9360.1				9360.1				9360.1				9360.1			
	直线段长度L1	300				300				300				300			
	波纹钢拱高度L2	1623.1				1623.1				1623.1				1623.1			
	拱肩处R角	1427.1				1427.1				1427.1				1427.1			
	拱顶处R角	17711.4				17711.4				17711.4				17711.4			
指标	原梁桥支反力 (kN) ①	352.3	352.3	352.3	352.3	352.3	352.3	352.3	352.3	369.4	369.4	369.4	369.4	369.4	369.4	369.4	369.4
	加固后梁桥支反力 (kN) ②	306.6	307.8	308.9	310.0	317.4	319.8	322.0	324.0	318.9	320.0	321.1	322.1	328.8	331.1	333.2	335.1
	支反力降低效果 (①-②)/①	12.97%	12.63%	12.32%	12.01%	9.91%	9.23%	8.60%	8.03%	13.67%	13.37%	13.08%	12.80%	10.99%	10.37%	9.80%	9.29%
	原梁桥最大弯矩 (kN·m) ③	739.3	739.3	739.3	739.3	739.3	739.3	739.3	739.3	775.3	775.3	775.3	775.3	775.3	775.3	775.3	775.3
	加固后梁桥最大弯矩 (kN·m) ④	502.9	492.7	483.5	475.3	459.5	449.8	446.7	443.8	524.1	513.1	503.3	494.6	477.8	468.7	465.3	462.2
	弯矩降低效果 (③-④)/③	31.98%	33.36%	34.60%	35.71%	37.85%	39.16%	39.58%	39.97%	32.40%	33.82%	35.08%	36.21%	38.37%	39.55%	39.98%	40.38%

按照《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60-2015）验算，边板、中板的最大抗力分别是 527.32kN·m、526.27kN·m，其承载能力不能满足 15 规范要求，在使用波纹钢外骨骼加固后，桥面板所承受的最大弯矩效应均小于其所能承受的最大抗力，且具有一定的安全储备。

（注：对波纹钢拱施加 24kN 的下拉牵引力）

表 G.6 13m 桥梁加固后承载力验算（以 1.2m 桥宽为例）

基本信息	桥梁跨径(m)	13															
	梁片	中板								边板							
	波形尺寸(mm)	200×55				300×110				200×55				300×110			
	板厚(mm)	5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8
	波纹钢长度L0	15,363.70				15,363.70				15,363.70				15,363.70			
	直线段长度L1	400				400				400				400			
	波纹钢拱高度L2	2778.3				2778.3				2778.3				2778.3			
	拱肩处R角	1900				1900				1900				1900			
	拱顶处R角	22490.6				22490.6				22490.6				22490.6			
指标	原梁桥支反力(KN)①	276	276	276	276	276	276	276	276	282.8	282.8	282.8	282.8	282.8	282.8	282.8	282.8
	加固后梁桥支反力(KN)②	266.17	266.15	266.13	266.1	265.93	265.9	265.8	265.7	273.01	272.99	272.84	272.94	272.8	272.7	272.65	272.6
	支反力降低效果(②-①)/①	3.56%	3.57%	3.58%	3.59%	3.66%	3.66%	3.70%	3.73%	3.46%	3.47%	3.52%	3.49%	3.54%	3.57%	3.59%	3.61%
	原梁桥最大弯矩(KN·m)③	786.2	786.2	786.2	786.2	786.2	786.2	786.2	786.2	807.2	807.2	807.2	807.2	807.2	807.2	807.2	807.2
	加固后梁桥最大弯矩(KN·m)④	702.9	699.8	696.7	693.7	660.2	651	643.8	635.9	724.4	721.4	715.7	715.6	683.5	674.6	667.5	659.9
	承载力提升效果(④-③)/③	10.60%	10.99%	11.38%	11.77%	16.23%	17.20%	18.11%	19.12%	10.26%	10.63%	11.34%	11.35%	15.32%	16.43%	17.31%	18.25%

按照《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60-2015）验算，边板、中板的最大抗力分别是 787.6KN·m、748.2KN·m，其承载能力不能满足 15 规范要求，在使用波纹钢外骨骼加固后，桥面板所承受的最大弯矩效应均小于其所能承受的最大抗力，且具有一定的安全储备。

（注：对波纹钢拱施加 24KN 的下拉牵引力）

G.3.2 波纹钢稳定性验算

依据本文件 6.6.2 节进行不同参数波纹钢稳定性验算，计算结果见表 G.7，可参照表 G.7，根据具体施工要求和工程实际选取合适的下拉牵引力。

表 G.7 不同参数波纹钢屈曲稳定系数（1KN）（以 1.2m 桥宽为例）

波形	跨径 (m)	板厚 (mm)			
		5	6	7	8
200mm×55mm	6	604.32	906.41	1298.69	1790.59
	8	457.30	681.43	971.16	1333.20
	10	248.83	371.86	530.16	645.19
	13	185.48	275.90	314.02	343.75
300mm×110mm	6	1284.10	1718.42	2225.35	2816.88
	8	998.33	1335.29	1725.55	2178.00
	10	462.96	669.10	918.14	1172.30
	13	348.98	502.01	681.19	880.49

G.3.3 波纹钢拱脚剪力验算

根据本文件第 6.6.3 节对波纹钢外骨骼拱脚剪力的验算步骤，计算得到所选波纹钢拱脚竖向剪力多在 40~60kN 之间，按照高强螺栓抗剪承载力，仅需少数螺栓即可满足抗剪的需求。