

边柱间距影响下桥体结构损伤演化规律

吴佩娜,王允

(余姚市交通规划设计研究院,浙江余姚315400)

摘要: 依托浙江省余姚市某在建高架桥四柱预应力盖梁结构,采用数值模拟手段对不同边柱间距工况影响下的桥体力学演化机制及损伤扩展规律进行分析,并提出相应的处治措施应用于实际施工中。研究结果表明:(1)盖梁钢筋应力随着边柱间距 L 的增加而逐步增大,当间距达到 $L=23.9$ m工况时,纵筋上方跨中及下方两侧接近破坏强度,应考虑盖梁结构安全性问题。(2)混凝土受拉区域主要集中于盖梁部位,但随着边柱间距 L 的逐步增大,受拉区域逐步由盖梁传递至边柱柱顶区域。当边柱间距 $L>18.4$ m时,边柱结构损伤破坏严重,承载能力大幅下降。(3)边柱间距过大影响桥体安全性时,提出在盖梁和边柱之间由刚性连接替换成柔性铰支座以降低其受力传递效果。

关键词: 预应力盖梁;边柱间距;数值模拟;力学特性;结构损伤

中图分类号: U441+.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)09-0246-06

0 引言

桥梁工程作为交通运输的重要纽带,对我国经济发展及社会建设起着极大的促进作用。随着桥梁运营期间长期承受超负荷工作状态,我国超三分之一桥梁处于“亚健康”状态,存在一定的安全隐患。在桥梁的各种病害问题之中,混凝土开裂损伤最常见,也是需要重点关注的问题之一^[1-4]。

鉴于桥梁混凝土结构开裂破坏存在的广泛性及危害性,国内外已有学者采用理论分析、数值模拟、模型试验等方法对诱发桥体结构破坏的原因进行相关研究。李文等^[5]通过 ABAQUS 有限元软件对不同桥体连接点位的损伤程度进行研究,分析结构连续破坏后梁单元的受力传递转变特征规律。姚晓飞等^[6]建立梁式桥体横向连接构件有限元模型,分析其结构力学损伤演化规律,并基于层次分析法对结构可靠度进行判定。黄成等^[7]基于模型试验及数值模拟对运营期桥体加固后的力学性能展开对比分析,并基于传统方法提出了计算荷载横向分布系数的新公式。Kim^[8]通过数值模拟对比了桥体加固前后在车辆荷载影响下的损伤破坏位置及损伤程度,最终确定采用 CFRP 材料的加固方式。Zhang 等^[9]通过数值模拟系统地评估了 Karagozian-case concrete(KCC)

model、Continuous surface cap (CSC) model 和 Kong-Fang (KF) concrete model 三种本构模型下汽车低速碰撞桥柱结构诱发的破坏程度及破坏规律特征,为真实汽车与桥梁的碰撞破坏情况提供参考。

本文以浙江省余姚市某高架桥互通分合流区四柱预应力盖梁结构为工程依托,通过数值模拟方式探究不同边柱间距影响条件下桥体下部结构力学性能及损伤演化过程,并针对结构开裂破坏提出相应的解决方案,为后续相关工程提供一定的参考借鉴。

1 工程概况

西环高架是余姚经济开发区西南园区配套道路(一期)工程的上层主线高架,高架起点在新庄路以西留跳台,终点在规划玉立路以西留跳台,全长 6.204 km(其中左线高架长 6.380 km,右线高架长 6.204 km)。高架采用一级公路标准兼顾城市快速路功能,双向六车道,设计速度 80 km/h。整体式高架桥标准段上部采用 30 m 跨径预制小箱梁,桥宽 26 m;下部结构为双柱预应力盖梁,中柱设置于下层地面道路中分带内。互通区增设贯通车道分合流段桥宽变为 34~42.4 m,下部结构采用四柱预应力盖梁,边柱设置于下层地面道路侧分带内,如图 1 所示。图 2 为边柱间距 14.9 m 的桥体下部结构图,随着上层高架桥宽变宽及下层地面道路交叉口渠化增设车道的需要,边柱间距由 14.9 m 逐步增大至 23.9 m。

收稿日期:2023-08-09

作者简介:吴佩娜(1985—),女,本科,高级工程师,主要从事道桥工程设计和造价技术管理工作。

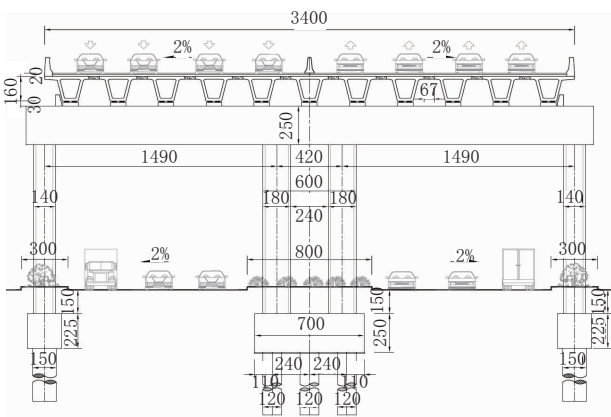


图 1 互通区分合流段四柱盖梁构造(单位:cm)

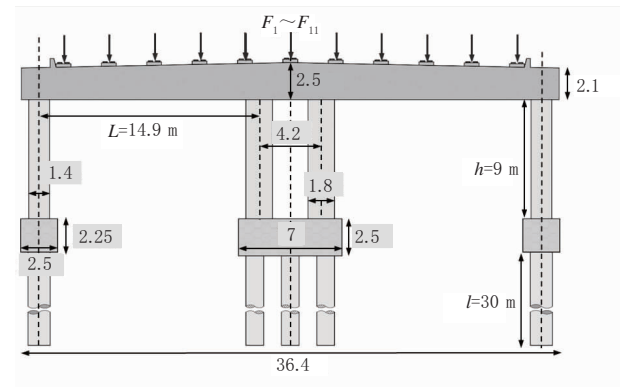


图 2 四柱盖梁桥体下部结构(单位:m)

2 数值模型建立

2.1 模型参数

针对不同边柱间距工况下诱发的桥柱结构损伤演化规律展开数值模拟研究情况。依托实际工程项目尺寸标准,通过有限元软件 ABAQUS 建立四柱式盖梁桥体下部结构有限元模型,对结构力学损伤特性进行研究。图 3 为计算模型示意图(以 $L=14.9\text{ m}$ 工况为例),整体模型由预应力钢筋混凝土结构盖梁、支撑柱、承台及桩基构成,其中通过调整边柱及中柱的间距 L 实现不同的施工工况。对于边界条件,限制桩基底部位移约束,从而保证结构整体稳定性。该模型混凝土结构部分划分采用三维线性 C3D8R 实体网格单元,嵌入钢筋部分采用一维线性 T3D2 杆单元。此外,盖梁、柱体、承台及桩基材料选用 C50 混凝土结构,盖梁内部嵌入环、纵向 HRB400 钢筋及三排预应力钢筋,材料基本物理力学参数见表 1。

为了准确模拟不同跨度的下部桥体结构在荷载作用下力学演化及破坏过程,混凝土结构选用塑性损伤本构模型(CDP 模型),参照 C50 混凝土的力学性能,其损伤演化参数见表 2^[10],与 CDP 模型相关的其他参数见表 3。

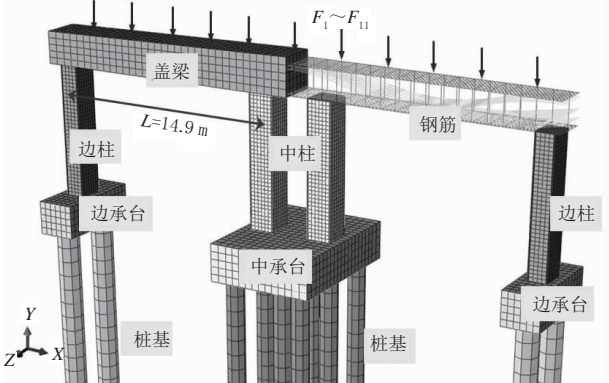


图 3 桥体下部结构计算模型

表 1 材料物理力学参数

材料类型	密度 / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 / GPa	泊松比 ν	屈服强度 f_k/MPa	构造应力 f_t/MPa
C50 混凝土	2 500	34.5	0.2	—	—
HRB400	7 698	200	0.2	400	—
预应力钢筋	7 850	195	0.2	1 860	1 395

表 2 C50 混凝土结构拉伸和压缩损伤演化参数

压应力 / MPa	非弹性应 变 / 10^{-3}	压缩损伤 系数 d_c	拉应力 / MPa	非弹性应 变 / 10^{-3}	拉伸损伤 系数 d_t
5.77	0	0	2.571	0	0
11.356	0.01	0.010 1	2.64	0.03	0.165 29
16.534	0.02	0.024 7	1.395	0.16	0.553 9
24.898	0.12	0.073	0.884	0.27	0.706 05
32.4	0.74	0.252 2	0.659	0.37	0.778 66
20.431	2.51	0.563 4	0.532	0.47	0.821 37
12.435	4.17	0.718 1	0.451	0.56	0.849 43
8.646	5.71	0.795	0.395	0.66	0.869 27
6.557	7.2	0.839 6	0.272	1.04	0.913 07
3.75	11.56	0.903 5	0.203	1.5	0.937 58
2.17	18.74	0.942 2	0.194	1.6	0.940 78
1.523	25.9	0.958 8	0.146	2.35	0.957 57
1.03	37.33	0.971 7	0.131	2.72	0.962 66

表 3 CDP 模型破坏准则相关参数

膨胀角	偏心率	f_{b0}/f_{c0}	K	黏性系数
30°	0.1	1.16	0.666 7	0.0005

注: f_{b0}/f_{c0} 表示双轴抗压强度与单轴抗压强度之比; K 表示不变量应力之比。

2.2 模型工况与载荷

依托项目实际情况,对不同断面的桥面进行变宽设计。因此,本数值模拟通过调整不同的四柱式盖梁边柱间距 L 来实现对实际工程的模拟。具体工况见表 4。

表 4 具体工况

工况	1	2	3	4	5
边柱间距 L/m	14.9	16.4	18.4	21.9	23.9

此外,考虑到上部桥梁结构自重、车辆荷载、混凝土温度收缩效应等影响,桥梁下部结构通过盖梁上部 11 处垫石均匀承担上部荷载作用,因此为模型施加 11 处等值集中力 $F_1\sim F_{11}$ 来实现下部结构承载效果(见图 3)。经实际项目施工计算, $F_1、F_2、F_3\cdots F_{11}$ 集中力大小为 1 750 kN。最终研究集中力作用下边柱间距增大导致的应力及损伤程度演化规律。

3 计算结果分析

3.1 桥体结构力学特性

(1)钢筋应力分布特征

图 4 为不同间距条件下盖梁内部钢筋应力分布云图。由图 4 可见,钢筋受拉分布区域明显,主要分布在上方纵筋中部和下方纵筋两侧区域。此外,钢筋整体受拉应力随着间距 L 增加而增大,且增幅显著。提取图中 $L=14.9\text{ m}$ 至 $L=23.9\text{ m}$ 不同间距条件下最大钢筋拉应力绘制图 5。可以看出,当边柱间距较小时 ($L=14.9\text{ m},L=16.4\text{ m}$), 钢筋最大拉应力仅有 20 MPa 左右, 远小于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定的 400 MPa 极限抗拉强度。随着间距的增加, 钢筋在不利荷载的影响下应力急剧增加,且在间距 $L=23.9\text{ m}$ 工况时,最大拉应力达到了 385.7 MPa, 接近破坏强度。此时应考虑盖梁结构安全性问题。

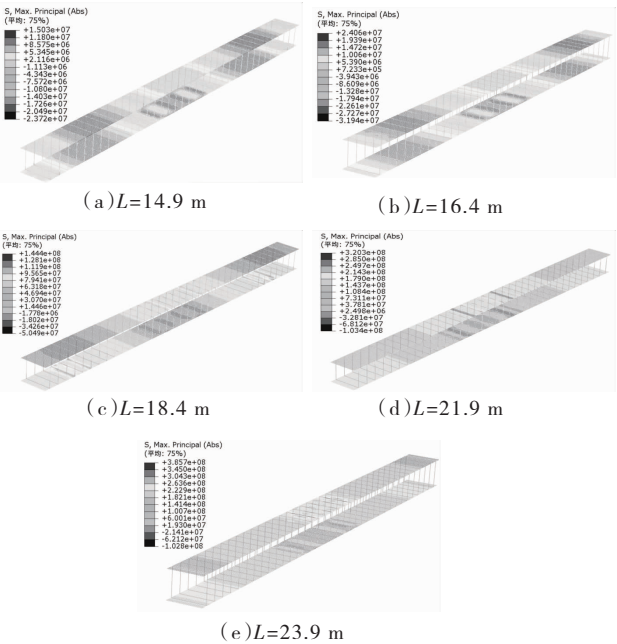


图 4 不同间距条件钢筋应力分布

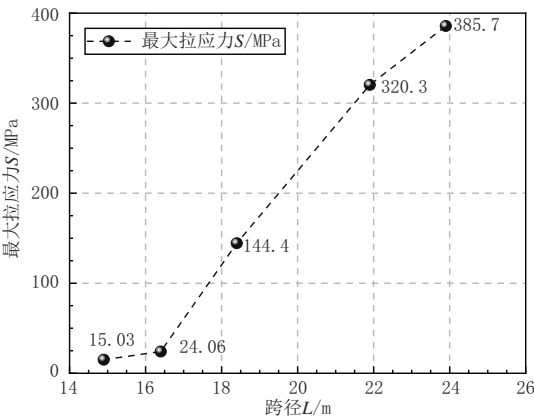


图 5 不同间距钢筋最大拉应力分布曲线

(2)混凝土应力分布特征

图 6 为不同边柱间距下混凝土下部结构应力分布云图。由图可见,盖梁结构受拉应力区域与钢筋应力分布情况一致,当边柱间距 L 距离较小时,受拉区域主要集中于盖梁部位,但随着间距 L 的逐步增大,结构稳定性下降,受拉区域逐步由盖梁传递至边柱区域。下部结构承台及桩基部位应力水平明显低于盖梁及边柱处应力。此外,由于盖梁处有普通钢筋及预应力钢筋的保护作用,因此本文重点分析边柱处应力水平分布规律。

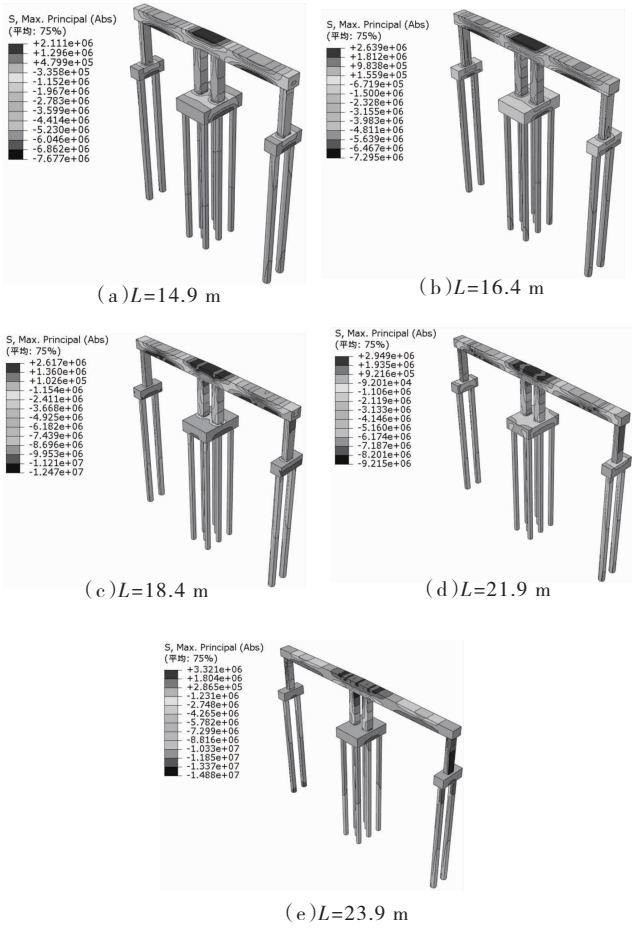


图 6 混凝土下部结构应力分布云图

图 7 为不同间距下边柱应力分布云图。当边柱间距 L 较小时,边柱整体处于低水平应力状态,且 $L=14.9\text{ m}$ 与 $L=16.4\text{ m}$ 两种工况下边柱整体受压。随着间距的不断增大($L=18.4\text{ m}$),边柱外侧应力状态由受压状态转变为受拉状态,且拉应力持续增大。当间距达到 $L=21.9\text{ m}$ 及 $L=23.9\text{ m}$ 时,边柱结构最大拉应力分别为 2.83 MPa 、 3.32 MPa 。此时结构拉应力均超出了 C50 混凝土极限抗拉强度,边柱开始产生损伤破坏。为进一步了解边柱不同高度处应力分布情况,取不同工况条件下边柱外侧中心线 AB 为应力监测线,如图 8 所示。 AB 监测线处各点应力随 L 的增加逐步由受压向受拉程度进行转变,拉应力水平不断升高,说明 L 越大,对结构安全性越不利。此外,可以看出 $L=23.9\text{ m}$ 时, AB 监测线处的拉应力水平低于 $L=21.9\text{ m}$ 工况,说明当间距 $L=21.9\text{ m}$ 时,边柱应力已达到混凝土的损伤破坏临界值时,继续增大边柱间距($L=23.9\text{ m}$),会加剧结构破坏程度,使混凝土结构承载力失效,导致应力下降明显且波动显著。因此,边柱应力分布情况表明,当间距 L 大于 18.4 m 时,边柱结构承担拉应力效果显著,易导致结构开裂失效。

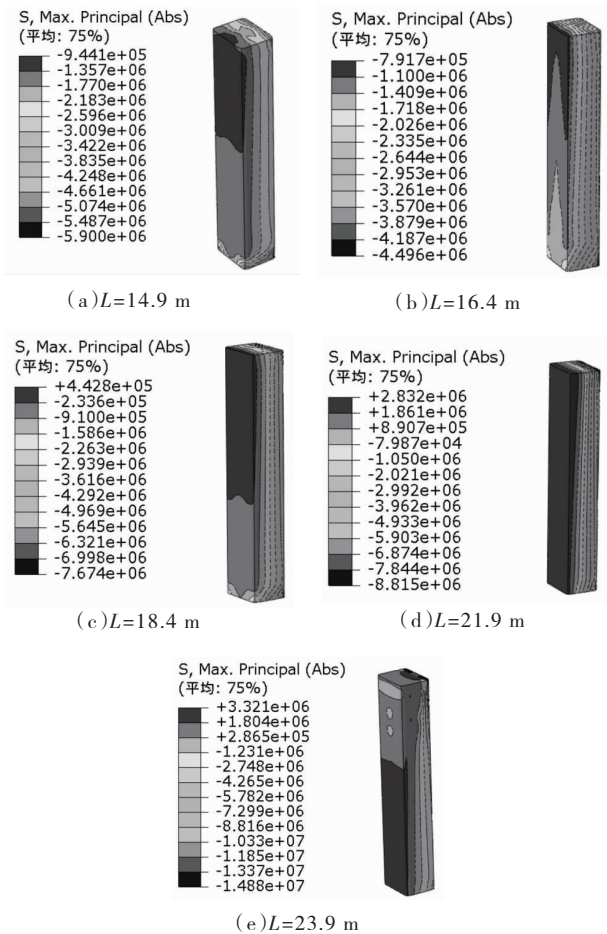


图 7 边柱应力分布云图

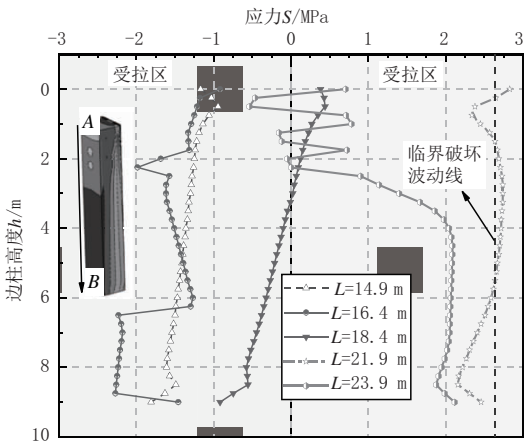


图 8 边柱测线应力分布曲线

3.2 结构损伤破坏特征

(1) 盖梁损伤演化规律

对于混凝土衬砌结构 CDP 损伤的描述,采用拉伸损伤和压缩损伤能够较好地体现衬砌混凝土力学性能的退化程度,模拟混凝土衬砌刚度的退化过程。已有研究表明^[10-11],结构损伤变量的临界值在 0.2 左右,即当损伤大于 0.2 后开始萌生裂纹,结构安全性下降,当损伤大于 0.9 时,代表混凝土衬砌完全丧失稳定性,结构完全损伤破坏。由于混凝土受压性能良好,并未出现明显的受压损伤。因此,本文重点分析结构的受拉损伤破坏程度。

图 9 为不同边柱间距影响下盖梁结构损伤云图。随着间距 L 的增大,桥体盖梁结构逐步呈现出了结构完好 $A(D=0)$ 、轻微损伤 $B(0<D<0.2)$ 、中度损伤 $C(0.2<D<0.9)$ 、重度破坏 $D(D>0.9)$ 四种状态。当 $L=14.9\text{ m}$ 时,由于边柱间距较小,结构整体受力性能良好,能够完全承担上部荷载作用,因此混凝土盖梁结构完好,并未出现损伤。当 L 继续增大至 16.4 m 时,结构受力状态劣化,盖梁下部出现轻微损伤,对结构影响性不大。随着 L 进一步增加,盖梁结构稳定性在不利荷载的影响下愈发不利,结构损伤范围进一步扩大,主要集中分布于盖梁底部两侧及顶部跨中位置。此外,结构损伤程度也随着边柱间距的持续增加由轻微损伤 $B(L=16.4\text{ m})$ 劣化为中度损伤 $C(L=18.4\text{ m})$ 、重度破坏 $D(L=21.9\text{ m}, 23.9\text{ m})$ 。

(2) 边柱损伤演化规律

当桥体上部集中作用力作用于盖梁顶部时,盖梁在承担不利荷载影响的同时还会向下部传递不利影响。当受不利影响到一定程度时,下部柱体出现损伤开裂的影响。此外,由于盖梁为预应力钢筋混凝土结构,当混凝土承载能力下降时,钢筋并未达到屈服破坏临界点,同样能够保证盖梁的安全稳定性。因

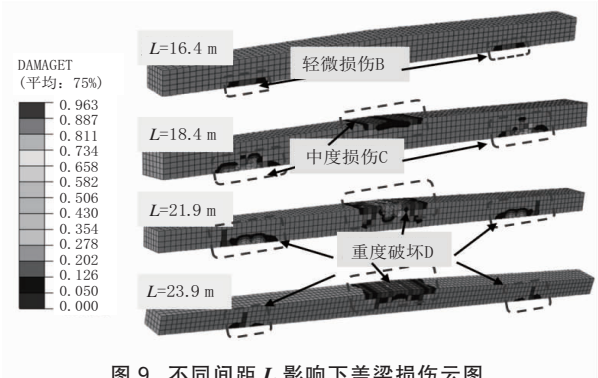


图9 不同间距 L 影响下盖梁损伤云图

此,相较于盖梁结构,边柱损伤破坏应是结构整体性关注的重点。图10为不同间距影响下边柱结构损伤云图。从中可以看出,当间距较小时,边柱结构受力条件良好,结构并未出现损伤破坏的趋势。随着边柱间距($L>18.4\text{ m}$)进一步扩大,由盖梁传递的不利荷载影响波及至边柱区域,边柱外侧区域损伤范围由顶部逐步向底部扩散,且损伤程度由 $L=21.9\text{ m}$ 时的中度损伤C加剧至 $L=23.9\text{ m}$ 的重度破坏D。为进一步了解边柱结构由顶部至底部损伤演化规律,故选取边柱外侧中心线作为监测线绘制损伤分布曲线,如图11所示。当 $L=21.9\text{ m}$ 时,结构损伤 $D>0$ 的范围高度为 6.3 m ,中度损伤程度 $D>0.2$ 以上的范围高度为 2.0 m ,分别占比边柱总高度的 70% 、 22.2% ,此时边柱并未出现重度破坏区域。当 $L=24.9\text{ m}$ 时,结构出现损伤($D>0$)的区域高度达到 7.5 m ,为整个边柱区域的 83.3% ;中度损伤以上($D>0.2$)区域高度达 3.7 m ,占比总高度的 41.1% 。因此,可见 $L>18.4\text{ m}$ 时,边柱结构损伤破坏严重,承载能力大幅下降,应制定针对性的控制措施以确保桥梁结构整体运营安全。

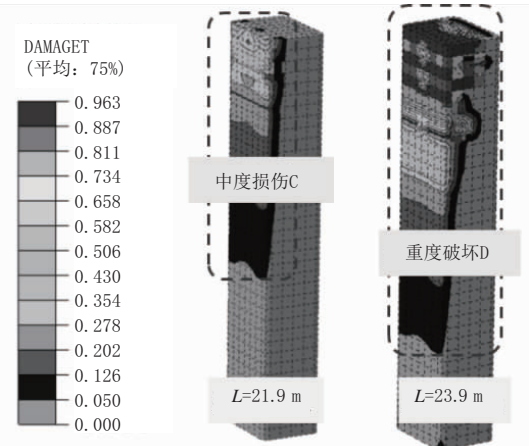


图10 不同间距 L 影响下边柱结构损伤云图

4 处治措施

数值计算结果表明,当边柱间距过大时,结构边

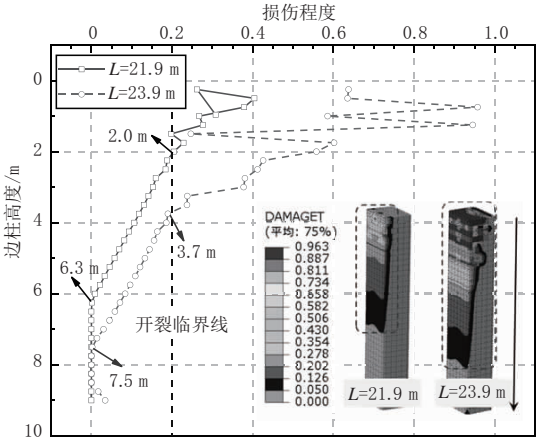


图11 边柱结构损伤分布曲线

柱承载能力急剧下降,损伤程度严重,影响车辆安全运行。由于边柱间距过大时,盖梁结构受力条件不利,而边柱和盖梁之间通过刚性支座连接,导致盖梁的应力传递至边柱,最终诱发边柱开裂破坏。因此,本文提出当边柱间距大于 18.4 m 时,在盖梁和边柱之间由刚性支座替换成柔性铰支座,从而阻断来自盖梁向边柱的应力传递,保证边柱结构安全性,如图12所示。

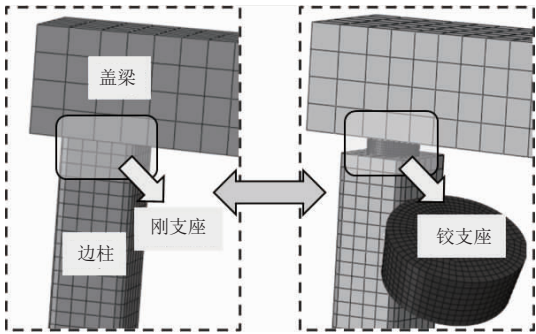


图12 支座改进方案对比

目前,该项目已通过专项评审并获得相关部门的核准和批复,于2023年3月4日正式开工建设,证明了该设计措施的可行性,对今后的四柱预应力盖梁桥体安全可靠设计具有一定的借鉴意义。

5 结论

本文以浙江省余姚市西环高架项目为工程依托,建立有限元数值模型对不同边柱间距条件下桥体下部结构力学损伤演化规律展开研究,并提出相应的处置措施,具体结论如下。

(1)盖梁顶部跨中及底部两侧区域钢筋受拉应力影响显著,且钢筋应力随着边柱间距的增加而逐步增大,当 $L=23.9\text{ m}$ 工况时,最大拉应力达到了 385.7 MPa ,接近破坏强度,应考虑盖梁结构安全性问题。

(2)当边柱间距距离较小时,混凝土受拉区域主要集中于盖梁部位,但随着边柱间距的逐步增大,受拉区域逐步由盖梁传递至边柱区域。边柱间距大于18.4 m时,边柱结构承担拉应力效果显著,易导致结构开裂失效。

(3)随着边柱间距的增加,结构受力状态劣化,盖梁结构损伤程度也由轻微损伤 $B(L=16.4\text{ m})$ 劣化为中度损伤 $C(L=18.4\text{ m})$ 、重度破坏 $D(L=21.9\text{ m}, 23.9\text{ m})$ 。此外,边柱间距 $L>18.4\text{ m}$ 时,边柱结构损伤破坏严重,承载能力大幅下降。

(4)当边柱间距大于18.4 m时,提出在盖梁和边柱之间由刚性支座替换成柔性铰支座,并成功应用于现场实际项目工程中,应用效果良好,对后续的四柱预应力盖梁桥体安全可靠施工具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 朱劲松,陈旭晟.基于应变冲击系数指标的悬索桥损伤识别方法[J]. 振动、测试与诊断,2023,43(3):450-458,617.
- [2] YIFENG Z, JINSONG Z. Damage Detection of Bridge Structures Under Vehicle Loads Using Moving-Window Correlation Coefficient of Signals with Limited Sensors [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2022, 22(9):105-134.
- [3] LU Z, DONGMING F, GANG W. Simultaneous Identification of Bridge Damage and Vehicle Parameters Based on Bridge Strain Responses [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2022, 29(6): e2945.1-e2945.20.
- [4] 秦峰.考虑结构损伤的中小跨桥梁有限元模型修正方法的研究[J]. 公路,2023,68(3):176-181.
- [5] 李文,杜伟强,武先梅.移动荷载下横向损伤对T梁桥边梁荷载横向分布的影响[J].徐州工程学院学报(自然科学版),2020,35(3):54-58,77.
- [6] 姚晓飞,徐岳,付迎春.混凝土铰接T梁桥结构体系损伤评价试验[J].长安大学学报:自然科学版,2009(2):65-69.
- [7] 黄成,郭晓光,李院军,等.考虑旧桥损伤的拼宽T梁桥荷载横向分布计算[J].铁道科学与工程学报,2019,16(9):2233-2239.
- [8] J Y K. Structural Strengthening of a Constructed Timber Bridge: Field application and numerical modeling [J]. Engineering Structures, 2023, 288(3):165-180.
- [9] NAN Z, RUIWEN L, HAO W. Assessment on Concrete Constitutive Models for Numerical Simulations of Vehicular Collisions with RC Bridge Piers[J]. Structures, 2023, 53(2):1582-1599.
- [10] B Min, C Zhang, W Zhu, et al. Influence of Cracks at the Invert on the Mechanical Behavior of the Tunnel Structures [J]. Thin-Walled Structures, 2021, 161(4):1-13.
- [11] 乐运国,李遇春,晏思聪,等.高强度混凝土I型裂纹损伤断裂判据研究[J].水电站设计,1999(1):35-39.
- [4] Navid N, Alireza A, Rezvan B. Investigation of fatigue behaviour of warm modified binders and warm-stone matrix asphalt (WSMA) mixtures through binder and mixture tests [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019, 22(8):1042-1051.
- [5] CJJ 169—2012,城镇道路路面设计规范[S].
- [6] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [7] 黎荣刚,郑木莲,陈曦.桥面铺装用环氧沥青增韧技术研究综述[C]//中国科学技术协会,交通运输部,中国工程院,湖北省人民政府.2022世界交通运输大会(WTC2022)论文集(公路工程篇).人民交通出版社股份有限公司,2022:5.

~~~~~  
(上接第234页)