

剪力键对预制拼装盖梁受力特性的影响研究

黄本才, 黄宇辰*, 张松

(中设设计集团股份有限公司, 南京 江苏 210014)

摘要:采用横向分段干接缝连接的预制拼装盖梁具有施工速度快、对交通影响小、施工质量易控等优点,但由于存在接缝剪力键,其受力情况复杂。为了更准确分析预制拼装盖梁的受力特性,以城市高架桥倒T形盖梁为对象建立精细化分析模型,探讨剪力键对预制拼装盖梁受力特性的影响;并研究剪力键数量、高深比对盖梁受力特性的影响规律。研究结果表明:设置剪力键会增大接缝区域最大主应力、改变盖梁的极限状态并减小接缝截面的竖向相对滑移;另外,剪力键设置数量及高深对接缝区域的应力分布也有较大影响,在设计时应进行参数敏感性分析,合理布置剪力键以获得恰当的传力路径。

关键词:倒T形盖梁; 预制拼装盖梁; 剪力键; 高深比; 受力特性

随着中国经济发展方式的转变和“绿色建造”理念的倡导,预制拼装桥梁在一些经济发展较快的城市桥梁中正逐渐推广应用。预制拼装技术以施工便捷、质量稳定可靠、对交通及环境影响小等特点,已成为当今国内外桥梁施工的趋势,而上部结构采用装配式小箱梁的全预制拼装桥梁,其关键是下部结构的节段拼装技术。

目前,国内外针对墩柱节段拼装的分析已相对成熟,但关于预制拼装盖梁技术的文献研究较多偏向体量较小的盖梁,主要适用于整体预制的形式,而城市高架桥梁的盖梁尺寸较大,若采用整体预制方案,则预制成的盖梁自重很大,对起重和运输机械的要求较高,施工适应性差。因此,城市高架桥梁的大尺寸盖梁宜采用分段预制拼装的方案;目前中国国内对预制节段拼装盖梁的研究尚未形成系统,2017年,葛继平从时效性、功能性、操作性三方面对中国现有盖梁节段拼装工艺进行了对比分析,并给出了各种工艺实际应用条件方面的建议,分析结果表明,横桥向的分段拼装方式是综合评价较好的施工方案;沙丽新、李国平针对城市高架倒T形盖梁,对比分析了横向分段及竖向分层两种预制方案的受力性能,但分析中采用了折减混凝土抗拉强度的方式模拟横向接缝,未考虑剪力键,同时仅验证了两种方案的可行性,并未揭示各方案预制拼装盖梁的受力机理。不同于盖梁的其他拼装方案,采用横向分段干接缝连接的分段盖梁由于存在接触面和剪力键,其

受力情况复杂,具有高度非线性的力学行为。因此,明确剪力键对预制拼装盖梁受力特性的影响对设计中剪力键构造及位置的确定具有重要意义。

该文以城市高架桥梁倒T形预制拼装盖梁为对象,将盖梁横向分为悬臂段盖梁与中段盖梁,采用干接缝节段拼装工艺,利用Abaqus平台建立盖梁分析模型,对设置剪力键及不设置剪力键两种节段盖梁方案进行弹塑性分析,探讨剪力键设置与否、剪力键位置及尺寸等参数对盖梁受力特性的影响,为预制拼装盖梁设计提供参考。

1 有限元计算模型建立

选取某桥面宽为26 m、汽车设计荷载为城—A级的主线高架桥梁倒T形预制拼装盖梁为实例,基于Abaqus建立有限元分析模型,盖梁采用C40混凝土,相应截面尺寸、接缝构造及预应力布置如图2所示,钢束N1~N3均为 $15\phi^*15.2$ 型号。

另外,参考相关规范及文献[4]、[5]的研究成果,并结合以往节段拼装梁设计经验,初步拟定将设置剪力键的模型,在接缝处截面翼缘从上至下布置4排高深比为3、尺寸为 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 的梯形剪力键(图1)。有限元模型中混凝土采用损伤塑性模型,材料应力—塑性应变曲线如图2所示,该模型采用各向同性弹性

收稿日期:2019-12-19(修改稿)

作者简介:黄本才,男,硕士,高级工程师, E-mail:36991251@qq.com

* 通信作者:黄宇辰,男,硕士,助理工程师, E-mail:jxlchyc920712@yeah.net

损伤结合各向同性拉伸、压缩塑性理论来表征混凝土的非线性行为,对于其塑性参数,剪胀角取 30° ,曲线流动势偏移量为0.1,双轴抗压与单轴抗压极限强度比取1.16;预应力钢束及普通钢筋采用嵌入式钢筋单元模拟,材料本构取双折线模型,屈后刚度比为0.01,钢束(钢筋)单元划分尺寸为混凝土单元的一半,预应

力以降温法施加,考虑实际预应力损失后降温参数为 560°C ;接缝处采用基于有限滑移的“硬”接触模型,切向摩擦系数取光滑混凝土接触面之间的摩擦系数0.4;施工阶段中上部单片箱梁恒载下支座反力取792 kN,使用阶段中接缝最不利车辆布载位置为盖梁悬臂段内侧垫石处,模型材料强度均取标准值。

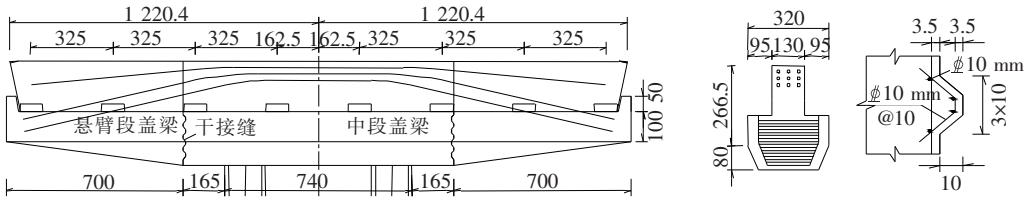


图1 预制拼装盖梁构造尺寸及剪力键构造配筋图(单位:cm)

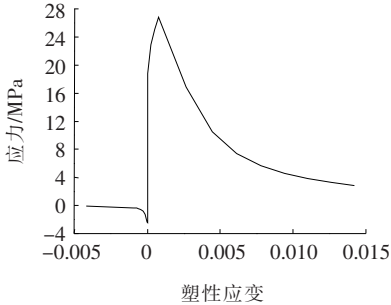


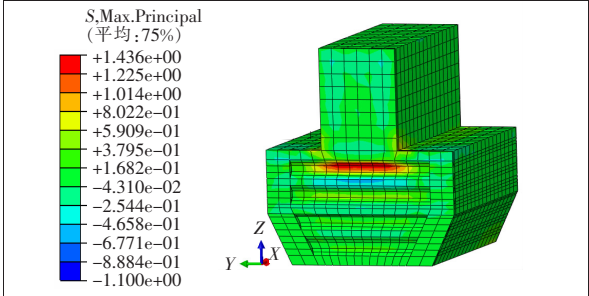
图2 混凝土材料应力—塑性应变曲线

2 剪力键对盖梁受力特性的影响

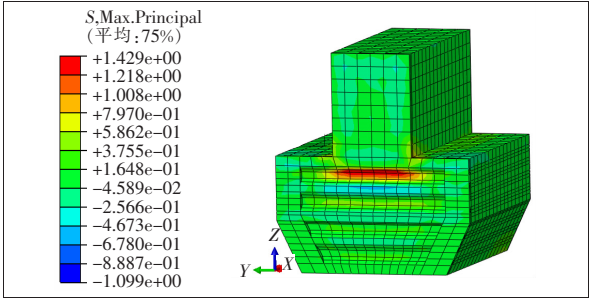
2.1 剪力键对施工阶段下盖梁受力特性的影响

基于建立的干接缝预制拼装盖梁精细化有限元模型,将接触面在翼缘处设置4排素混凝土梯形剪力键的模型设为工况Ⅰ;在翼缘处设置4排钢筋混凝土梯形剪力键的模型设为工况Ⅱ;将接触面不设置齿槽剪力键,仅靠预应力实现节段连接的模型设为工况Ⅲ,其中剪力键详细大样图及配筋图如图1所示。图3、4为3个工况下中段盖梁的主应力(方向为拉正压负)与接触面法向应力云图。

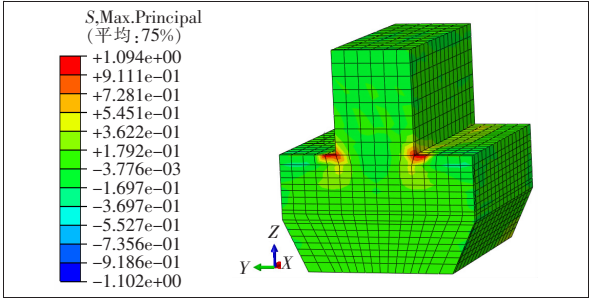
由图3可知:在施工阶段下,盖梁设置剪力键会改变接缝区域的受力状态;在无剪力键时,接缝处较大的主拉应力主要集中在翼缘顶与肋板的转角处,最大主拉应力为1.09 MPa,而设置剪力键后,接缝处较大的主拉应力主要在剪力键根部,最大主应力约为1.44 MPa。即剪力键的设置增大了接缝区域的最大主应力并改变了应力分布,主要是因为接缝截面的预应力主要作用在肋板处,此时在翼缘处设置剪力键会导致肋板与翼缘连接处的截面削弱、接缝截面整体性变差,从



(a) 工况Ⅰ



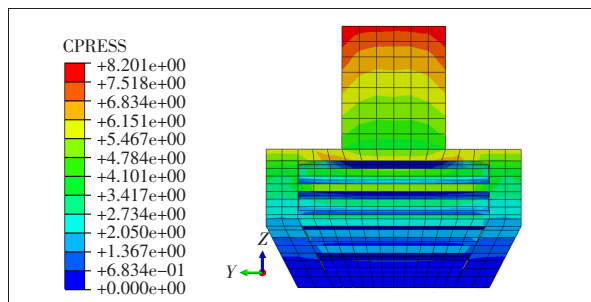
(b) 工况Ⅱ



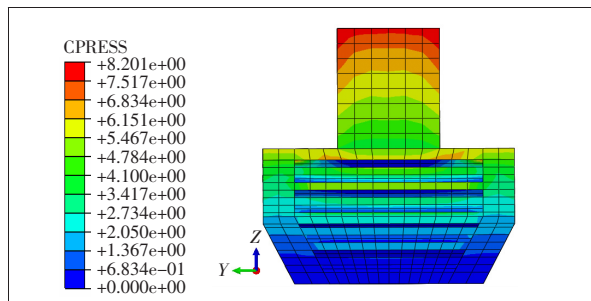
(c) 工况Ⅲ

图3 施工阶段接缝处主应力云图(单位:MPa)

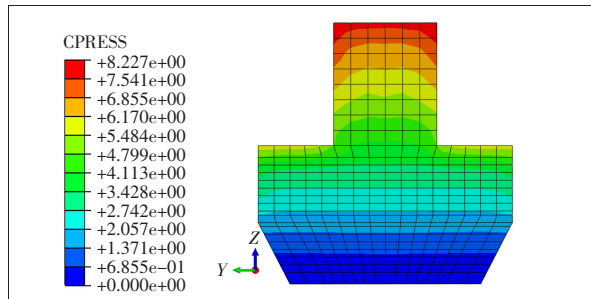
而使肋板与翼缘连接处的剪力键根部产生较大应力集中(图4);需要指出的是在施工阶段下,设置剪力键对盖梁除接缝区域外其他区域受力影响不大。



(a) 工况 I



(b) 工况 II



(c) 工况 III

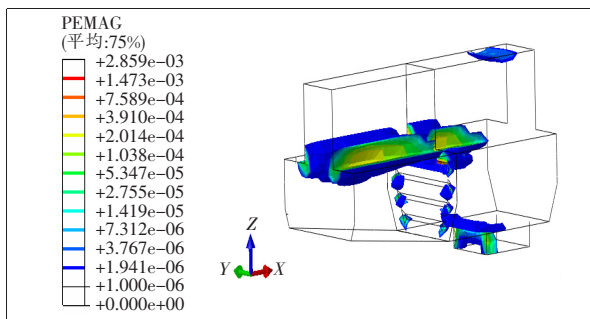
图 4 施工阶段接触面法向应力云图(单位:MPa)

另外如图 3 所示,工况 I 与工况 II 在施工阶段下接缝区域应力状态基本一致,且其接触面法向应力也相等,表明在剪力键中配置钢筋对接缝区域弹性状态下的受力基本没有影响。

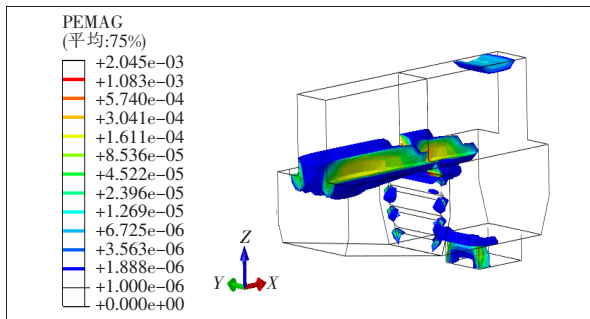
2.2 剪力键对使用阶段下盖梁极限状态的影响

针对前述 3 个工况,根据接缝最不利车辆布载位置在两个垫石上逐步施加相同的均布荷载,直至结构的塑性应变因达到极限值而发生破坏,分析剪力键对使用阶段下预制拼装盖梁极限状态的影响。分析得到:工况 I、II、III 的极限荷载合力分别为 8 342、8 481、8 577 kN,3 个工况下模型能承受的极限荷载在总体上相差不大,在剪力键中增配钢筋后会使得极限承载力提高约 2%。图 5 为 3 个工况下盖梁达到极限状态时结构的塑性应变分布云图。

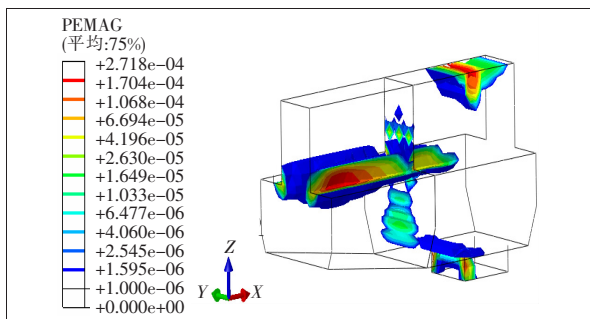
由图 5 可见:设置剪力键会较大程度改变中段盖梁极限状态的受力情况,而悬臂段盖梁的应力状态基



(a) 工况 I



(b) 工况 II



(c) 工况 III

图 5 极限状态下的塑性应变云图

本不变,说明剪力键会改变接缝处的传力路径。当盖梁未设置剪力键时,随着外荷载的增大,接缝处截面产生较大负弯矩,此时大部分截面压应力从翼缘的平接触面传递给中段盖梁,使中段盖梁承受很大偏压弯矩,导致墩顶处盖梁截面上缘严重开裂。而当设置剪力键后,由于剪力键的位移限制效应,较大部分截面压应力从翼缘第 1 排剪力键传递给中段盖梁,偏心效应较小,墩顶处盖梁截面上缘的开裂程度也较小;另外,此时剪力键的根部与边角处成为接缝连接处的位移限制区域,伴随外荷载的增大,会产生应力集中效应而出现较大塑性应变,由此可见工况 I、II 在极限状态下的最大塑性应变值较工况 III 有很大程度提高。

此外,对比工况 I、II 可发现:在剪力键中配置普通钢筋虽然不会改变盖梁塑性应变的分布状态,但会

较大程度地降低剪力键的塑性应变峰值;同时查询 3 个工况下盖梁的位移结果可知,未设置齿槽剪力键的盖梁悬臂段接缝截面 Z 向位移要比设置了剪力键的盖梁增大约 17%,表明设置剪力键会减小接触面产生的滑移。

综上所述,预制拼装盖梁在接缝处设置剪力键会改变施工阶段下接缝处的应力分布,增大接缝处主应力值;同时,剪力键的位移限制效应会改变接缝处的传力路径,使盖梁极限状态发生变化,并减小接缝截面的竖向滑移,在剪力键中配置普通钢筋能较大程度地降低剪力键破坏时的塑性应变峰值;另外,剪力键的根部与边角处易产生应力集中而发生破坏,在设计时应给予重视。

3 预制拼装盖梁受力特性参数研究

3.1 剪力键高深比的影响

相关研究表明,梯形剪力键的高深比对剪力键的受力状态影响很大,是剪力键的关键参数之一;当高深比较大时,剪力键一般发生局部压坏,而当高深比较小时,剪力键一般发生剪切破坏;当剪力键达到一定深度时,其抗压能力大于抗剪能力,继续提高键深对承载能力影响不大。为研究剪力键高深比对预制拼装盖梁受力特性的影响,保持工况Ⅱ模型其他参数不变,通过调整键深改变剪力键高深比,对盖梁结构进行受力特性分析,各高深比下盖梁施工阶段接缝处的最大主应力

如图 6 所示,另外表 1 给出了各高深比下盖梁结构使用阶段的破坏状态差异。

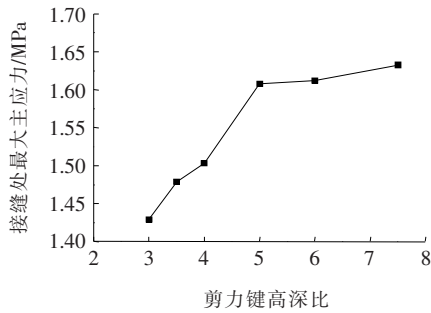


图 6 高深比对施工阶段接缝处最大主应力的影响

由图 6 可知:剪力键高深比与盖梁施工阶段接缝区域最大主应力呈双线性变化关系,随着高深比的提高,接缝区域的最大主应力逐渐增大,而出现最大主应力的位置基本无变化。其中,当高深比从 3 增大到 5 时,最大主应力增幅较大,随后增幅变小。

另外,由表 1 可得:剪力键高深比为 3~4 时,盖梁接缝区域的破坏主要集中在翼缘顶与肋板转角处及第 1 排剪力键根部;而当剪力键高深比大于 4 时,盖梁接缝区域的第 2~4 排剪力键也开始出现开裂破坏,这主要是因为当高深比较大时,第 1 排剪力键容易发生局部受压而较快开裂,位移协调后使其余剪力键开始均匀受力并发生开裂。随着高深比的提高,接缝截面的竖向位移逐渐增大,接缝区域的最大塑形拉应变先逐渐增大,当高深比大于 5 时转而减小;高深比对盖梁能承受最不利布置的极限荷载影响较小。

表 1 各高深比下盖梁极限状态

高深比	接缝区域破坏状态	极限荷载/ kN	接缝区域最 大塑性拉应变	悬臂段接缝截面 竖向位移/mm
3.0	接缝处翼缘顶与肋板转角处拉裂破坏,第 1 排剪力键根部及	8 480.8	0.002 05	1.61
3.5	墩顶肋板截面上缘开裂破坏,其余剪力键仅存在边角破坏	8 503.7	0.002 36	1.63
4.0		8 514.2	0.002 79	1.64
5.0	接缝处翼缘顶与肋板转角处拉裂破坏,4 排剪力键根部及墩	8 569.4	0.005 87	1.67
6.0	顶肋板截面上缘均存在不同程度的开裂破坏	8 561.2	0.005 23	1.69
7.5		8 552.1	0.004 08	1.71

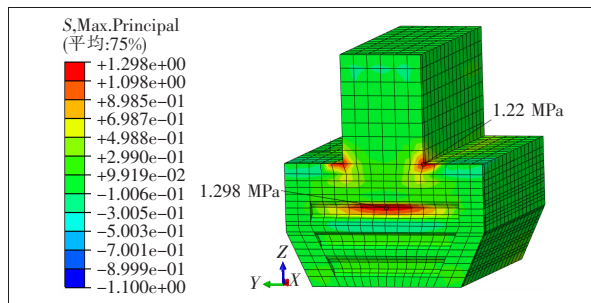
因此,为防止施工阶段下接缝区域主应力超限,且考虑到剪力键在高深比较大时易出现局部压坏对结构不利,在实际工程设计中,剪力键应取较小高深比,对于该文案例,剪力键的高深比应该控制为 3~4。

3.2 剪力键数量的影响

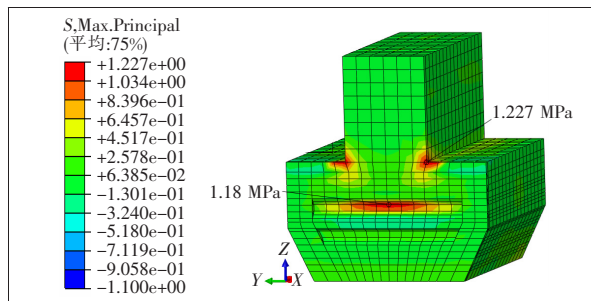
当接缝设置多排剪力键时,各排剪力键受力并不均匀,协同受力的过程也随剪力键数量及外荷载的改

变而变化,因此,剪力键的数量并非越多越好,如何确定恰当的剪力键数量对工程设计具有重要意义。为分析剪力键数量对预制拼装盖梁受力特性的影响,保持工况Ⅱ模型其他参数不变,通过调整盖梁翼缘处的剪力键数量,对盖梁结构进行受力特性分析,不同剪力键数量下盖梁施工阶段接缝处的最大主应力如图 7 所示[其中 4 排剪力键工况如图 3(b)],另外图 8 给出了不

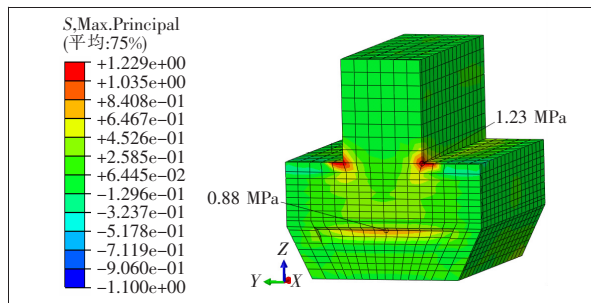
同剪力键数量下盖梁结构使用阶段的破坏状态[其中 4 排剪力键工况如图 5(b)]。



(a) 3 排剪力键下



(b) 2 排剪力键下

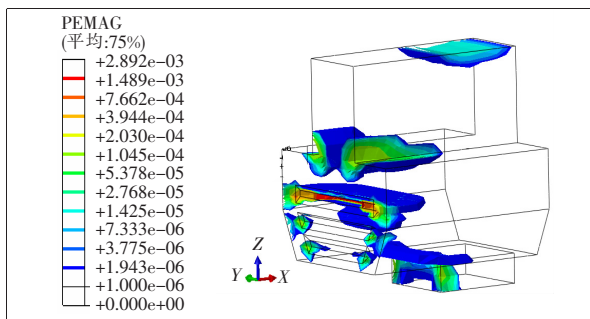


(c) 1 排剪力键下

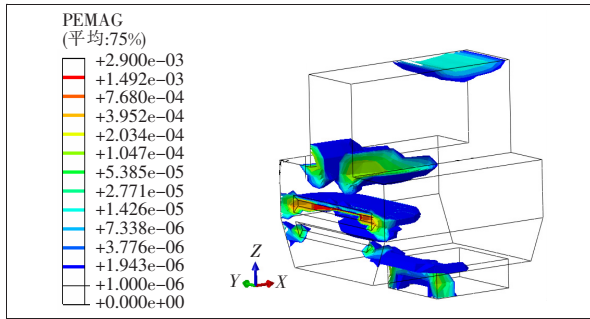
图 7 不同剪力键数量下盖梁施工阶段接缝处的最大主应力(单位:MPa)

由图 3(b)与图 7 可知:在施工阶段下,剪力键数量越多,剪力键根部的最大主应力越大;当在翼缘设置 4 排剪力键时,剪力键根部的最大主应力为 1.43 MPa,随着剪力键数量的降低,剪力键根部的最大主应力也逐渐降低至 0.88 MPa;同时,分析发现,当取消第 1 排剪力键后,接缝区域翼缘顶与肋板转角处的最大主应力从 0.89 MPa 增加至 1.22 MPa。

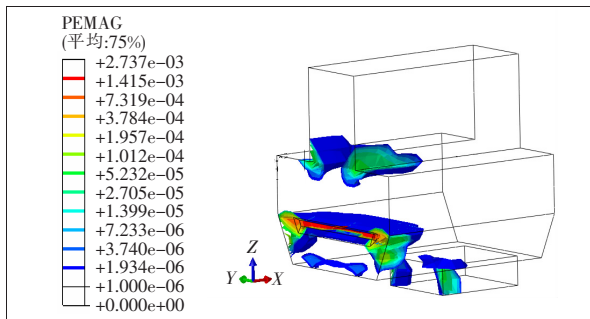
另外,由图 5(b)与图 8 可得:当设置的剪力键数量大于 2 排时,其极限荷载基本一致,接缝区域破坏状态均为翼缘顶与肋板转角处、翼缘最上排剪力键根部及墩顶肋板截面上缘的开裂破坏;当仅设 1 排剪力键时,其极限荷载较设置多排剪力键的工况要降低约 16.6%,接缝区域仅翼缘顶与肋板转角处与剪力键根



(a) 3 排剪力键下



(b) 2 排剪力键下



(c) 1 排剪力键下

图 8 不同剪力键数量的接缝极限状态塑性应变

部发生破坏。这表明,仅设置 1 排剪力键会使塑性应变主要集中在单排剪力键根部且无其他剪力键分担,较大程度地降低了盖梁接缝承受荷载的能力。在设计中应避免仅设单排剪力键,同时考虑剪力键数量对盖梁应力的影响来确定恰当的剪力键数量;对于该文算例,剪力键设为 2 排较为合适。

4 结论

针对城市高架桥倒 T 形预制拼装盖梁,基于剪力键设置与否及剪力键配筋与否分别建立了 3 个盖梁有限元仿真模型,探讨了剪力键对预制拼装盖梁受力特性的影响,并进行了参数研究。结果表明:

(1) 设置剪力键会增大接缝区域的最大主应力;

大断面、小净距隧道施工力学效应分析

马敬夫

(中交第四公路工程局有限公司,北京市 100022)

摘要:在中国公路隧道建设中,小净距隧道有时难以避免。大断面、小净距隧道施工的难点是支护设计参数、合适净距的确定,以及特定地质条件下施工方法的选定。该文以福州绕城隧道工程实例为依托,应用 Ansys 软件对单侧壁导坑法、双侧壁导坑法、CD 法 3 种可行方案进行了模拟,通过变形、应力的分析和比较,确定了最优实施方案。

关键词:大断面;小净距;施工;模拟;分析

1 概述

小净距隧道是指相邻隧洞的间隔岩壁厚度小于规范中独立双洞的最小净距要求,布置形式较为特殊的一种隧道。其设计和施工技术难点为:小净距隧道合适净距的确定,支护设计参数的选定,不同地质条件各施工方法的比较和确定,两隧洞施工时的相互影响,以及中央岩加固技术等。针对这类问题,中国国内很多学者已经开始了探索,如戴俊等对小净距隧道的施工方法进行了模拟研究;罗玉虎等对小净距隧道施工力学响应进行了研究;龚建伍等对小净距隧道施工方案

进行了优化分析等。但是地质条件千差万别导致不同实际工程必须进行实事求是的研究。

该文依托福州绕城项目隧道,全长为 879 m,高度为 8.255 m,含仰拱的总高度为 10.5 m,最大开挖宽度达 16.792 m,位于两个断裂带中间的次级断块。隧道洞口从内向外依次为Ⅳ、Ⅴ级围岩,中部的断层为 60 m Ⅳ、Ⅴ级围岩,剩余都是凝灰熔岩的Ⅲ级围岩。两个独立双洞的最小距离为 24.6 m,小于规范要求的Ⅲ级围岩 $2B$ 、Ⅳ级围岩 $2.5B$ 、Ⅴ级围岩 $3.5B$ (B 为开挖断面的宽度),属于小净距隧道。由于隧道大部分岩层倾向与纵向轴向夹角较小,存在施工难度大、易于塌方、控制难度大等问题。

同时会改变盖梁受最不利车辆荷载布置时的极限承载状态,使剪力键根部与边角处率先发生破坏,并减小接缝截面的竖向相对滑移;另外,在剪力键中配置普通钢筋能较大程度地降低剪力键破坏时的塑性应变峰值。在设计时应重视剪力键根部与边角处的应力集中效应,合理布置剪力键以获得恰当的传力路径。

(2) 随着剪力键高深比的增大,施工阶段下盖梁接缝区域的最大主应力逐渐增大;极限状态下最大塑性拉应变有先增大后减小的趋势,接缝截面的竖向相对滑移也随之增大。剪力键高深比对盖梁能承受最不利布置的极限荷载影响较小,在设计中应避免剪力键高深比过大对结构产生的不利影响。

(3) 随着剪力键布置数量的增加,施工阶段下剪力键根部的最大主应力增大;另外,当剪力键仅设置 1 排时,会增加接缝区域的应力集中效应,降低预制拼装

盖梁能承受的极限荷载。设计时,应在满足剪力键不少于 2 排的前提下,进行参数敏感性分析,合理确定剪力键数量。

参考文献:

- [1] 葛继平,梅德磊,闫兴非,等. 预制拼装盖梁施工方式对比分析[J]. 应用技术学报,2018(1).
- [2] 沙丽新,李国平. 典型城市高架倒 T 盖梁预制装配化设计关键技术研究[J]. 中国市政工程,2017(3).
- [3] 王志刚,余顺新,陈亚莉. 桥梁快速建造技术[J]. 中外公路,2018(4).
- [4] 陈黎. 预制节段式混凝土桥梁干接缝抗剪性能研究[D]. 广东工业大学硕士学位论文,2013.
- [5] JGJ 1—2014 装配式混凝土结构技术规程[S].
- [6] 张沛. 既有钢筋混凝土柱后接梁连接的抗剪承载力试验研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文,2007.