

高速铁路混凝土连续梁桥-棚洞一体化结构设计

张悦

中国铁路设计集团有限公司 土建工程设计研究院 天津 300308

【摘要】新建雄安新区至忻州高速铁路一桥梁侧面紧邻山坡坡体，采用桥上设置钢筋混凝土防护棚洞的(40+64+40.75+23.95)m混凝土连续梁方案。基于midas civil及ANSYS有限元软件，对该一体化结构的主梁强度与抗裂安全系数、主梁横桥向三支座支反力分配比及棚洞在不同工况下的受力特性与结构配筋进行了分析与计算。结果表明，该一体化结构主梁各截面的应力、强度安全系数等指标满足规范要求，方案安全可行；主梁横桥向三支座，边支座与中支座竖向支反力比值可采用1:1.5，可采用此比值选取支座规格；棚洞结构在落石冲击力及地震作用下，结构内力情况符合框架结构受力特征，设计控制截面明确，在各种荷载组合作用下，棚洞各截面的应力、裂缝宽度等指标满足规范要求，结构安全，相关成果可为类似工程提供参考借鉴。

【关键词】铁路桥；防护结构；混凝土连续梁；梁棚洞一体化；高速铁路

1 工程概况

新建雄安新区至忻州高速铁路清水河特大桥跨越山间河流时，采用孔跨布置为(40+64+40.75+23.95)m的预应力混凝土连续箱梁结构。线路右侧紧邻山坡坡体，如图1所示，坡面岩体破碎，部分危岩底部悬空，依靠危岩与母岩的连接作用支撑，悬挂在坡表面，在重力作用下，后部的陡倾结构面不断发育扩展，存在危岩发生坠落失稳破坏的可能性。工程中，针对危岩落石的防护主要采用综合主动防护、被动防护的防止技术体系^[1]。为防止危岩落石对行车产生影响，在该桥40.75m跨及23.95m跨桥面设置混凝土防护棚洞，如图2所示。桥梁棚洞一体化结构不需要单独修建棚洞基础，施工更方便^[2]。



图1: 线路走向及右侧坡体

桥址区范围地层为太古界五台期早期后坪片麻岩套(Hgnp¹)黑云斜长片麻岩、元古界晋宁期辉绿岩脉($\beta \mu_2^2$)辉绿岩脉。桥址范围地震动峰值加速度值为0.15g，反应谱特征周期为0.45s。结构设计活载为ZK活载，双线线间距5.0m，无砟轨道，设计时速350km。桥梁范围线路平面为半径R=8500m圆曲线，纵断面坡度为i=30%，如图3所示。连续梁及棚洞施工采用支架现浇法施工。

2 主梁与棚洞概况

2.1 主梁构造

主梁桥面布置需要考虑行车限界、检修通道、通信信号设备等，常规时速350km双线混凝土梁桥的桥面宽度为12.6m，本结构尚需考虑棚洞立柱布置及其施工需要，桥面宽度取值14.3m，全桥等宽，截面采用直腹板单箱三室形式。梁体为变高度连续箱梁，边支点、23.95m跨中支点及64m跨跨中等高段梁体高度为3.5m，梁底下缘按二次抛物线变化至64m跨中支点6.5m高度，如图4所示。

顶板、底板、腹板厚度的设置需结合结构受力、预应力钢束构造要求确定。边腹板位置结合棚洞立柱位置确定，本梁边腹板中心与立柱中心对齐设置，以便棚洞与梁体力的传递。边腹板与顶板加腋尺寸的确定适当加大，以满足棚洞与梁体的连接构造要求。

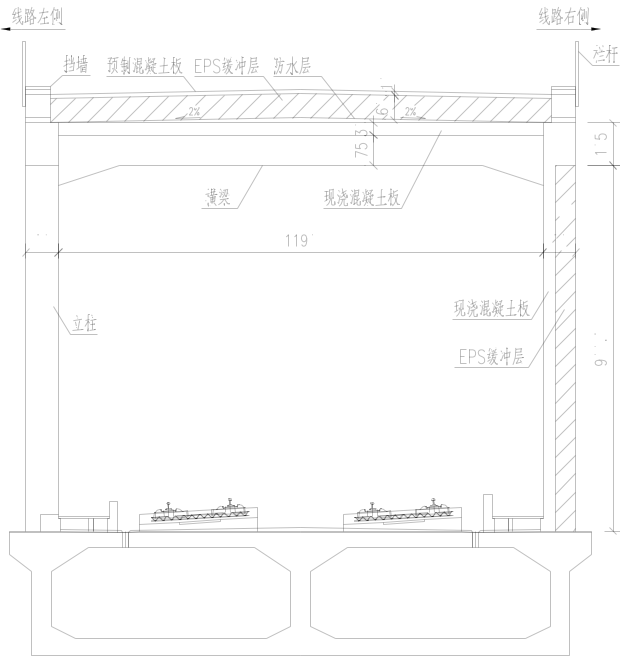


图5: 梁-棚洞一体化结构横断面 (单位: cm)

3 结构计算分析

结构计算荷载依据《铁路桥涵混凝土结构设计规范》(2017)计算取值, 主要包括恒载(自重、二期恒载、支点沉降、混凝土收缩徐变)、ZK列车活载和温度作用等附加力。特殊荷载主要考虑落石冲击力和地震力的作用。

3.1 主梁结构计算

为考虑主梁与棚洞间的相互作用, 采用MIDAS CIVIL建立梁-棚洞整体空间有限元模型, 主梁、棚洞均采用梁单元模拟, 棚洞现浇混凝土板采用板单元模拟, 棚洞与主梁之间采用弹性连接(刚性)模拟, 支座采用弹性连接模拟, 模型如图7所示。

3.1.1 主梁刚度检算

主梁在ZK活载作用下, 梁端转角为0.25%。主梁在双线活载与温度的组合作用下, 64m跨挠跨比为1/7356, 主梁竖向变形能够满足刚度要求。

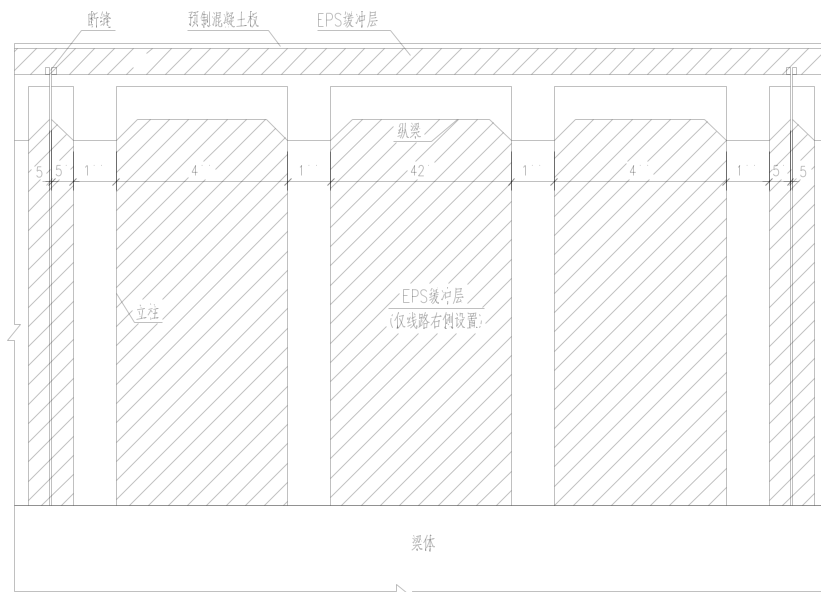


图6: 棚洞立面图 (单位: cm)

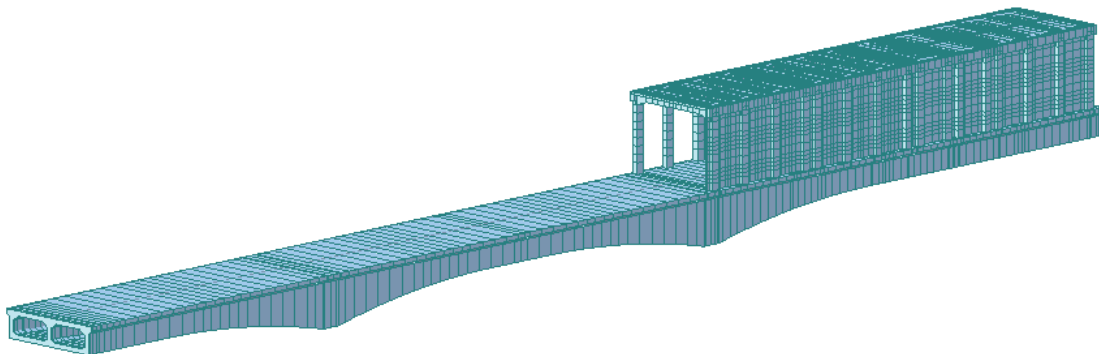


图7: 梁-棚洞整体有限元模型

3.1.2 主梁强度等检算

主力、主力+附加力组合作用下，主梁检算结果如表1所示。可以看出，各种荷载组合作用下，主梁各截面的应力、强度安全系数等指标满足规范要求。

表1：主梁截面验算结果表

项目	上缘正应力MPa		下缘正应力MPa		剪应力MPa	主应力MPa		强度安全系数	抗裂安全系数	
	max	min	max	min		max	min		上缘	下缘
	主力	13.31	1.84	14.75		1.11	3.60		18.74	-2.03
主+附	16.35	0.14	15.16	0.99	3.66	19.24	-2.90	2.40	1.22	1.99

3.1.3 主梁支反力

由于设置棚洞范围内主梁边腹板与棚洞立柱对齐设置，棚洞立柱底竖向反力传递路径较为明显，边腹板承担比例较大，因此未设置棚洞段主梁支点截面，横桥向三个支座支反力分配不均的情况较为明显。为确定合理的支座规格，采用ANSYS建立主梁中支点、边支点节段有限元模型，主梁采用实体单元模拟，支座采用对支座板范围内的节点进行位移约束的方式进行模型，模型如图8所示。主力工况下，中腹板位置单个支座竖向支反力与边腹板位置单个支座竖向支反力比值计算结果如表2所示。

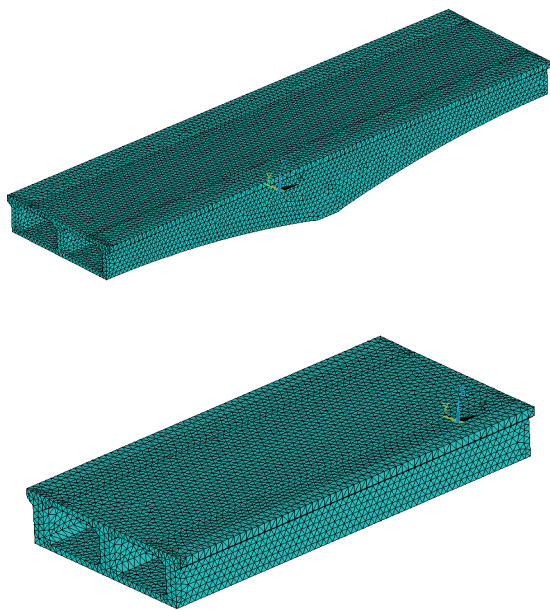


图8：中支点、边支点主梁节段有限元模型

表2：主梁支座竖向支反力比值结果表

支座位置	比值
64m跨中支点	1.33
23.95m跨中支点	1.52
边支点（无棚洞位置）	1.51

结果表明，横隔板面内刚度影响支点截面横桥向三支座竖向反力的分配，面内刚度越大，横桥向三支座竖向反力的分配越趋于均匀。在主力工况下，未设置棚洞段主梁支点截面横桥向三个支座竖向支反力，单个边腹板支座与单个中腹板支座比值可采用1：1.5，可采用此比值选取支座规格。

3.2 棚洞结构计算

落石冲击力按1000kN进行设计。经过计算分析，在不同荷载工况下棚洞设计的控制截面位置如表3所示。由表3可知，棚洞结构在落石冲击力及地震作用下，结构内力情况符合框架结构受力特征^[7]。

表3：不同荷载工况下的设计控制截面

荷载工况	控制截面位置
主力	横梁跨中、横梁端部、立柱顶板
主力+附加力	横梁跨中、横梁端部、立柱顶板
恒载+落石冲击力	横梁跨中、横梁端部、混凝土现浇板
横向地震	立柱底部、立柱顶板、横梁端部
纵向地震	立柱底部、立柱顶板、纵梁端部

棚洞检算结果如表4所示。

表4：棚洞配筋检算结果表

位置	工况	混凝土	钢筋	裂缝
		压应力	拉应力	计算值

立柱	主力	12.79	168.8	0.119
	主+附	13.58	177.6	0.125
	纵向罕遇	31.6	479	/
	横向罕遇	31.26	647.9	/
纵梁	纵向罕遇	16.03	461.6	/
横梁	主力	3.12	137.4	0.092
	主+附	3.26	154.6	0.104
	恒载+落石冲击力	6.14	264.9	/
	横向罕遇	14.62	373.4	/
现浇混凝土板	恒载+落石冲击力	16.93	222.6	/

由表4可知,按弹性理论检算,立柱、纵梁在罕遇地震工况下,钢筋拉应力大于400MPa,已屈服,需考虑结构延性进行抗震检算。通过计算立柱、纵梁截面等效屈服弯矩,结果如表5所示。

表5: 棚洞截面延性检算结果表

位置	工况	等效屈服弯矩 (kN·m)	截面弯矩值 (kN·m)	安全系数
立柱	纵向罕遇地震	4558	3867	1.18
	横向罕遇地震	3656	2945	1.24
纵梁	纵向罕遇地震	2492	1813	1.38

可以看出,各种荷载组合作用下,棚洞各截面的应力、

裂缝宽度等指标满足规范要求。

4 结论

新建雄忻高速铁路采用了混凝土连续梁-棚洞一体化结构,通过计算分析,得出以下结论:

(1) 主梁结构刚度较好,受力状态明确,主梁刚度、应力、强度安全系数等指标满足规范要求,能满足线路运营需求。

(2) 主梁横隔板面内刚度影响支点截面横桥向三支座竖向反力的分配,支座规格的选取可按单个边腹板支座与单个中腹板支座竖向反力比值1:1.5进行。

(3) 混凝土框架式棚洞受力符合框架结构受力特征,设计控制截面明确,棚洞各截面应力、裂缝宽度等指标满足规范要求,满足落石防护要求。

参考文献:

- [1] 王坛华,陈剑平,安鹏程. 边坡滚石灾害的作用机理与防治对策[J]. 世界地质, 2008, 27(1): 68-72, 88.
- [2] 刘伟,孙宗磊. 钢筋混凝土桥梁棚洞一体化结构研究[J]. 中国铁路, 2021(9): 102-109.
- [3] 史先伟. 艰险山区高速铁路隧道洞口新型棚洞结构研究[J]. 铁道工程学报, 2017(6): 60-64.
- [4] 王东坡,何思明,吴永等. 滚石防护棚洞EPS垫层结构缓冲作用研究[J]. 振动与冲击, 2014(4): 199-214.
- [5] 熊志远. 聚苯乙烯泡沫(EPS)力学行为的实验研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2007.
- [6] 吴佳楠. 钢棚洞结构EPS-细砂复合缓冲层性能[D]. 成都:西南交通大学, 2018.
- [7] 戴鸿哲,王伟,王焕定. 结构力学[M]. 第4版. 高等教育出版社, 2022.

作者简介:

张悦,男,硕士研究生,研究方向:大跨桥梁设计。