

文章编号: 0451-0712(2005)11-0063-06

中图分类号: U448.225.51

文献标识码: B

双层桥面系杆拱桥的施工控制

孙建渊¹, 李志胜²

(1. 同济大学桥梁工程系 上海市 200092; 2. 浙江公路水运工程咨询监理公司 杭州市 310014)

摘 要: 介绍了国内第一座双层桥面城市桥梁——钱江四桥施工控制技术的应用及其成果,采用的施工控制技术及计算理论,不仅确保了大桥的施工期安全,而且结构内力状态与结构线性的监测结果与施工控制预测值符合较好,得到的结论可作为今后同类桥梁设计与施工的重要参考。

关键词: 系杆拱桥; 双层桥面; 施工控制

1 钱江四桥概况

钱江四桥为城市道路与轻轨交通结合方式的双层桥面越江桥梁,其中上层为6车道汽车快车道,下层为轻轨列车和公交车辆专用道。钱江四桥主桥跨径组合为:2×85 m+190 m+5×85 m+190 m+2×85 m;其中85 m跨径可看作下承式系杆拱桥与上承式拱桥的结合,190 m跨径可看作下承式系杆

拱桥与中承式拱桥的结合^[3]。钱江四桥是复杂的拱梁组合结构桥梁,位于钱塘江,河床较深,涌潮及风浪影响较大,施工期不能影响通航,施工过程采用缆索搬运及吊装,拱圈采用斜拉索辅助节段拼装方法安装,施工工艺复杂,对施工的技术要求较高。拱肋、吊杆、下层结构纵梁、上层结构立柱、上下层桥面结构等的安装是本桥施工中的关键步骤,保证上述各

收稿日期:2005-04-29

Time Domain Analysis of Wind-Induced Buffeting of Longtan River Bridge

LI Li¹, PENG Yuan-cheng^{1,2}, HU Liang¹, FAN Jian¹

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
2. China Communications Second Highway Survey, Design and Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Longtan River Bridge is a rigid frame concrete bridge with length 812 m. Its highest pier is as high as 179 m. The structure of the bridge is super flexible and wind-sensitive structure so that the analysis of wind-resistant capacity must be performed on the bridge. The finite element models of the bridge both in the post-construction stage and in the longest twin-cantilever construction stage are established respectively by using general finite element analysis (FEA) software ANSYS. The dynamic characteristic analysis of the two models is done. By introducing the Geodatis-innovated spectral representation method, the turbulent stochastic wind-velocity field of the bridge is simulated and checked. Then, the time history of buffeting force, which will be applied on both models, is computed according to the quasi-steady theory. Finally, the results of the time-domain buffeting analyses of the two stages are gotten by carrying out time history analysis. The wind-resistant design of the bridge can be based on that results.

Key words: Longtan River Bridge; wind field simulation; buffeting; time domain analysis

种组合构件具有足够的强度及稳定性,是大桥顺利建成通车的重要保证。因此,在建设过程中,施工控制技术及其方法的正确选择,对大桥的施工期安全及达到设计目标具有十分重要的意义。

2 施工流程及施工工艺

大型桥梁的施工及施工控制,首先应满足桥梁成桥状态内力合理、结构线形正确及确保施工期桥梁结构安全为目标,另外必须依据桥梁施工所选定的施工方法及详细的施工计划来进行施工控制,钱江四桥主桥的施工流程总体如下。

2.1 总体施工方案

(1)全桥上部结构,采用缆索吊装方案,实施结构构件的运输与拼装。

(2)85 m 跨径的钢管混凝土拱,首先施工并完成上层桥面以下的结构,各跨施工相互独立。

(3)190 m 跨径的桁架式钢管混凝土系杆拱桥,采用塔架扣索拼装拱肋,2 跨独立施工。

2.2 85 m 跨的施工工序

(1)设置拱座、拱脚段支架,安装拱脚钢管拱肋及拱脚钢骨系梁,现浇拱脚、拱座混凝土、现浇端横梁;张紧拱脚局部预应力束、拱座与桥墩临时联结。

(2)缆索对称吊装第 1 段钢管拱肋,斜拉扣挂安装钢管拱肋并调整高程,法兰螺栓临时连接。

(3)缆索吊装中间段钢管拱肋。

(4)扣索调整标高、安装横撑,拱肋焊接合拢,放松拱肋扣索。

(5)安装下层系梁吊杆,安装临时吊杆,分 6 段缆索吊装拼接钢骨系梁及临时横撑,吊杆内力初张,安装临时模板。

(6)浇注上、下游拱肋钢管混凝土,同时根据荷载增加的数量,在混凝土浇注过程中,分次将相应预应力束张拉至锚下控制力。

(7)从两端向中间一次完成系梁混凝土浇注,同时根据荷载增加的数量,在混凝土浇注过程中,分次将相应纵向预应力束张拉至锚下控制力;混凝土达到强度后,再浇注系梁湿接头混凝土。

(8)系梁混凝土达到设计强度后,第 1 次张拉吊杆,完成临时吊杆与永久吊杆的受力转换;拆除系梁模板及临时吊杆;张拉相应纵向预应力束至控制力。

(9)拆除拱座满堂支架,可靠释放拱墩临时联结,释放临时联结时,同时张拉相应预应力束,以临时约束受力最小为原则,逐渐增至锚下控制力。

(10)体系转换后,张拉相应纵向预应力束至锚下控制力;按对称均匀的原则,缆索安装拱上立柱、墩上立柱钢管,并灌注立柱混凝土。

(11)按对称均匀的原则,缆索安装墩上立柱盖梁、拱上立柱盖梁(或下层横梁),张拉相应纵向预应力束至锚下控制力。

(12)按从跨中向两侧或桥端向跨中、多点对称的原则,安装下层横梁(或上层盖梁)。

(13)第 2 次吊杆张力调整优化;并张拉相应纵向预应力束至锚下控制力。

(14)按照跨中、桥两端,全桥对称原则,安装上下层桥面板,结束后第 3 次吊杆张力调整优化。

(15)上、下层桥面铺装等桥面附属设施施工。

(16)成桥状态,第 4 次吊杆张力优化调整。

2.3 190 m 跨的施工工序

(1)端横梁及拱脚段混凝土施工;拱墩临时联结并第 1 次张拉纵向临时预应力束。

(2)塔架扣索分 13 段安装拱肋钢管,并安装对应横撑、风撑,采用半动态调索法调整拱轴线,拱肋各段由铰接转为固接并焊接拱肋接头,安装拱顶段风撑,焊接风撑接头。

(3)第 2 次张拉纵向临时预应力束,放松拱肋扣索、拆除拱肋临时横撑。

(4)第 3 次张拉纵向临时预应力束,灌注吊杆锚箱和锚座混凝土;安装墩上立柱、拱上立柱并与底座焊接,浇注柱内混凝土。

(5)安装上下层吊杆,吊装钢系梁两端各 7 段(含拱脚尚未安装的一段),从两端向跨中安装;第 4 次张拉纵向临时预应力束;再吊装钢系梁中间 7 段(含中间合拢段)。

(6)以控制钢系梁安装高程为目标,第 1 次调整下层吊杆张力;并焊接钢系梁接头,完成钢系梁合拢。

(7)缆索吊装拱肋横梁、拱上立柱横梁,安装永久体外预应力束,第 1 次张拉相应永久体外预应力束,张拉时同步卸除临时预应力束。

(8)解除拱座临时联结及拱脚段支架,完成体系转换,并第 2 次张拉相应体外预应力束。

(9)灌注拱脚哑铃形弦管平联仓混凝土。

(10)对称灌注下方钢管混凝土;达到设计强度后,对称灌注上方钢管混凝土。

(11)第 3 次张拉相应体外预应力束;从两端向跨中或跨中向两端对称施工安装下层钢横梁。

(12)第 4 次张拉相应体外预应力束,从两端向

跨中或跨中向两端对称施工安装上层钢横梁。

(13)第 5 次张拉相应体外预应力束,安装下层桥面板。

(14)第 6 次张拉相应体外预应力束;安装上层桥面板。

(15)第 7 次张拉相应体外预应力束,现浇上、下层桥面板湿接头,桥面铺装等桥面附属设施。

(16)成桥状态,进行吊杆张力优化调整。

3 施工控制的主要内容

大跨径系杆拱桥的施工控制一般有三个方面的主要任务:一是使结构在建成时达到设计所希望的几何形状;二是使结构在建成时达到合理的内力状态;三是在施工过程中保证结构的安全。针对钱江四桥桥型及施工方法的特点,总的施工控制原则是确保施工期结构安全,保证结构的稳定性并综合考虑主要结构的变形及内力控制,以最终满足结构内力及桥面线形的设计目标。因此,钱江四桥的施工控制,包括对主要承重结构工作状态的现场监测,及根据监测结果调整计算参数确保结构线形、结构内力满足设计目标的施工控制分析计算,其主要内容可概括如下。

(1)监测主要承重结构的应力、应变实际工作状态及分析承重结构的高程测量数据。

(2)配合施工单位,对缆索搬运吊装、塔架斜拉扣挂的施工方提出合理建议,提供扣索的计算张力,指导拱肋塔架扣索拼装。

(3)验算施工过程中各断面的应力状态及结构的稳定性能,对危险施工工况提出警告。

(4)复核设计单位提供的主要工况的挠度变化值。

(5)协助设计单位提供施工期合理的吊杆调整张拉力。

(6)提供合理的构件拼装及混凝土浇注方案建议。

(7)协助设计单位提供成桥状态吊杆调整张拉力。

(8)协助设计单位提供施工期及成桥状态桥面标高变化预测值。

(9)从施工角度优化设计方案,并对横向和局部应力、变形提供参考意见。

(10)对于施工工艺提供参考意见,并对于施工中出现的问和意外事故,会同有关部门提出处理方案。

4 施工控制技术

4.1 同步模拟施工过程仿真计算

对于大跨径双层桥面拱梁组合结构,由于必须经历一个较复杂的施工过程,组合结构构件可能采用预制、现浇等措施逐步形成,结构体系可能多次变化,各种荷载以不同的方式出现或消除,形成一个持续多变的施工荷载工况。对于不同的施工方法,组合结构的构件截面可能采用一次成型、部分预制部分现浇、分层多次现浇等施工工艺,因而同一截面上,在时间序列上参与结构受力的不同截面组成部分,存在着内力重分布作用,即构件后浇部分的重量先作为一种荷载作用在已建构件上,然后与预制或已现浇结硬部分形成组合截面。为了反映实际桥梁结构的形成过程,必须采用一种能够真实描述结构构件截面形成过程的方法,确保整个桥梁结构在施工过程及运营阶段的安全可靠。因此,在施工期结构模拟仿真计算过程中,采用了如下控制计算技术^[1]:

(1)同步模拟结构组合截面的形成过程,考虑组合截面不同组成部分的内力重分布变化;

(2)同步考虑施工期混凝土的时效性引起的组合截面内力重分布,即模拟应力随时间变化的混凝土的收缩、徐变;

(3)同步模拟结构体系转换及临时结构构件的拆除;

(4)模拟温度场变化对结构状态的影响。

4.2 吊杆张力多次调整控制技术

双层桥面拱梁组合桥的施工过程比较复杂,吊杆张力的变化对结构内力的分布及结构的线形具有重要影响,为确保施工期结构的安全,必须对吊杆张力进行多次张拉。对于大跨径的梁拱组合结构桥梁,由于经历了复杂的施工过程,仅利用位移作为确定成桥状态的主要手段往往是不合适的。结构的成型状态包含了成型的内力状态及成型线形状态。采用以能量最小为目标结合结构状态参数约束范围的非线性规划方法,来考虑成型内力优化,以线形偏差最小为目标及附带线形调整约束条件的线形优化方法来考虑成型线形优化,这两种成型状态的优化组合,便能形成一种较为合理的成桥状态^[2]。根据成桥状态目标及约束条件,考虑把施工期结构的吊杆张力变量与成型结构状态的目标直接、正向的联系在一起,可以得到最优目标的施工期结构状态变量吊杆张力、结构位移等。表 1 为桥面铺装前 85 m 跨吊杆张力优化调整值与实测值的比较。

表 1 85 m 跨桥面板安装结束后吊杆张力调整及实测值

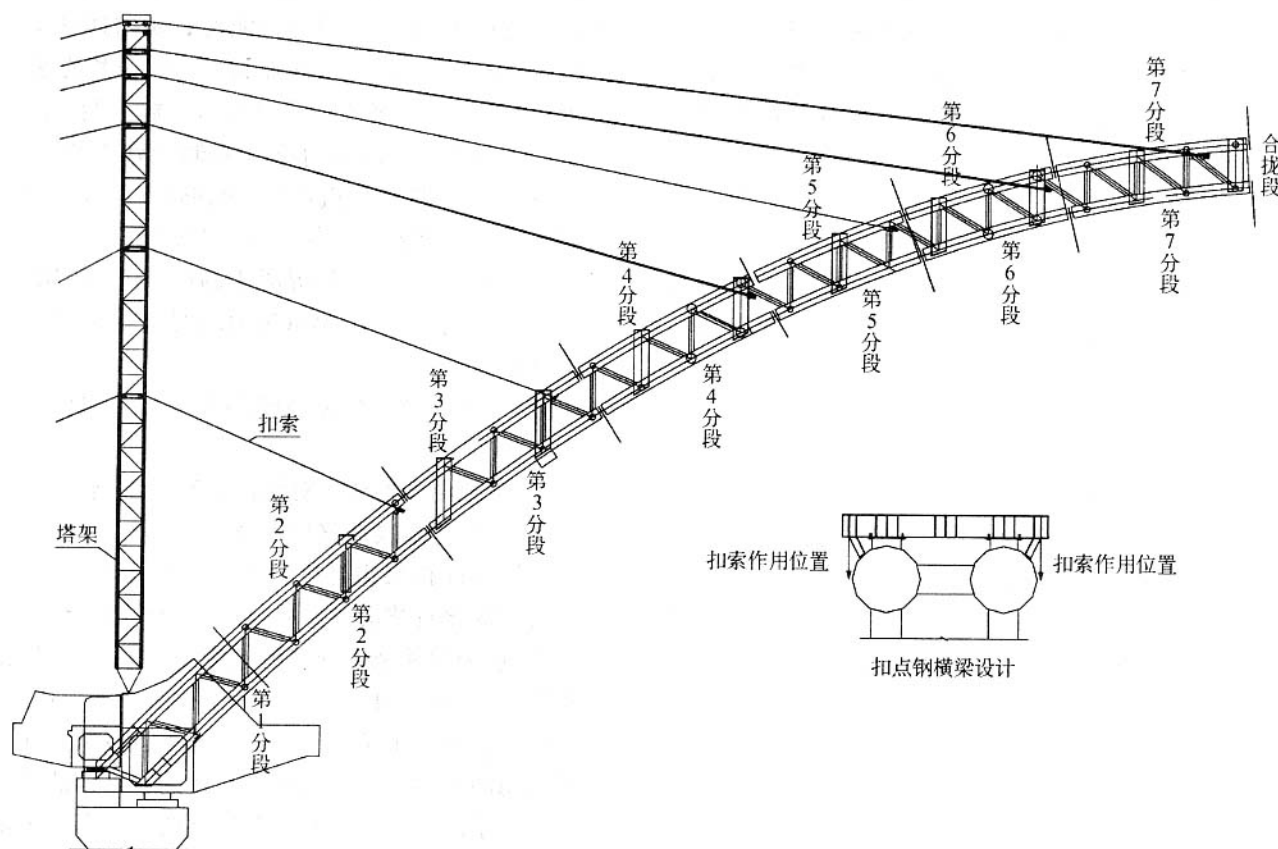
kN

吊杆编号	1(拱脚处)	2	3	4	5	6	7(跨中)
杆张力调整值	624.10	783.73	1 196.9	1 324.1	1 407.9	1 314.1	1 377.8
调整后实测值	611.6	772.7	1 178.9	1 345.3	1 427.6	1 374.7	1 401.2

4.3 多段拱肋拼装扣索张力调整技术

钱江四桥 190 m 主跨采用工厂分段预制钢结构拱肋,现场分 13 段缆索吊运,通过塔架扣索拼装成拱的施工方法,施工结构布置见图 1 所示,各段拱肋间以法兰联结,吊装 $i+1$ 段时, i 段与 $i-1$ 段间的法兰由铰接变为固结。为保证主拱肋结构的安装精度,采用了半动态调索法进行多段拱肋的拼装,既考虑

到拱脚附近段的刚度相对较大,扣索张力张拉到位后不再调整,跨中段拱肋扣索根据安装精度,进行扣索力的动态调整,以确保拱肋线形。扣索力的确定同步考虑了结构体系的转换及扣索垂度的影响,同时现场测量塔架的空间位置,利用强迫位移法进行结构修正,使计算参数符合结构的真实状态。



2组1分段	2组2分段	2组3分段	2组4分段	2组5分段	2组6分段	2组7分段	2组合拢段	2组7分段D	2组6分段D	2组5分段D	2组4分段D	2组3分段D	2组2分段D	2组1分段D
1	6	9	12	15	30	38	40	39	33	27	24	21	18	3
	7	10	13	16	31	41		34	28	25	22	19		
2	5	8	11	14	29	35	37	36	32	26	23	20	17	4
1组1分段D	1组2分段D	1组3分段D	1组4分段D	1组5分段D	1组6分段D	1组7分段D	1组合拢段	1组7分段	1组6分段	1组5分段	1组4分段	1组3分段	1组2分段	1组1分段

190 m 跨拱肋及风撑吊装顺序示意

图 1 190 m 跨多段拱肋塔架扣索安装示意

4.4 桥面线形及高程预测技术

施工监控的目的,就是通过在施工过程中对桥梁结构进行实时监测,根据监测结果,评估各主要施工阶段拱肋等主要构件的变形及材料应力变化状态是否符合设计要求,判断施工过程是否安全,结构是否正常工作;而当出现较大误差时,应对结构进行误差调整,并对设计的施工过程进行重新安排,从而保证桥梁建成时最大可能地接近理想设计状态,同时也确保施工期间的结构安全、施工质量和施工工期。钱江四桥主要采用自适应控制的方法进行桥面高程的预测及修正。当结构测量与模型计算结果不相符时,通过将误差输入到参数辨识系统中自动调节计算模型的参数,使模型的输出结果与实际测量到的结果一致。得到了修正的计算模型参数后,重新计算调整各施工阶段的理想状态。这样,经过几个工况的反复辨识后,计算模型就基本上与实际结构相一致了,在此基础上可以对施工状态进行预测控制。

正确预测双层桥面拱梁组合桥的桥面高程变化,对保证成桥状态满足设计目标十分重要,特别是承重结构成型后,上下层桥面系的施工顺序对桥面高程互相影响,必须根据施工方案不断调整桥面系结构的安装方法及其高程。桥面系构件安装的高程抛高预测,主要由构件因后续荷载引起的结构变位决定,包括:纵梁的结构变位、上下层横梁的变位、拱上立柱的变位、吊杆长度的变化、桥面板安装引起的变位,桥面铺装及其附属设施引起的变位。桥面高程的预测与施工工序密切相关,同时应考虑桥梁施工临时荷载、多种材料叠合断面的刚度计算、混凝土浇注阶段温度的影响、混凝土配合比及弹性模量的确定及混凝土参与受力龄期的影响等。表2、表3为190 m 跨首先进行上层桥面铺装施工时,对上下层桥面高程影响幅度的预测控制值报表,现场测量表明,实测值与施工控制预测值基本一致。

表 2 190 m 跨双层桥面铺装引起的上层桥面高程各吊杆处变化预测值 m

吊杆编号	拱上立柱	拱上横梁	吊 杆									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 跨中
预测值	-0.004	-0.010	-0.021	-0.028	-0.036	-0.043	-0.048	-0.053	-0.057	-0.061	-0.063	-0.065
实测值	-0.003	-0.012	-0.018	-0.027	-0.039	-0.035	-0.042	-0.055	-0.052	-0.059	-0.058	-0.061

表 3 190 m 跨双层桥面铺装引起的下层桥面高程各吊杆处变化预测值 m

吊杆编号	1 拱座处	吊 杆										
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12 跨中
预测值	-0.005	-0.010	-0.016	-0.022	-0.027	-0.033	-0.039	-0.045	-0.050	-0.054	-0.057	-0.058
实测值	-0.002	-0.008	-0.013	-0.020	-0.026	-0.030	-0.037	-0.046	-0.050	-0.051	-0.05	-0.055

4.5 施工期稳定安全性分析

钱江四桥是国内第一座双层桥面大跨径拱梁组合桥梁,作为以压弯杆件为主要受力特征的主拱圈的稳定性,对施工的安全与大桥的成桥状态满足设计目标十分重要,因此应对大桥的主要受力状态及施工过程进行施工稳定模拟分析,保证结构的空
间稳定系数满足施工安全的要求。施工过程中的结构稳定除了利用现场监测系统所反映的结构材料应力状态,进行综合判断结构的稳定性能外,还应提前分析主要施工状态的理论安全稳定系数。考虑到结构的应力应变状态在施工期基本处于弹性状态,采用空间有限元程序,考虑结构的安装状态及相关施工临时荷载等的影响,来分析全桥结构弹性稳定系数,

以确定沿主拱圈平面内及面外的稳定性。190 m 跨稳定分析的主要施工状态如下。

- (1)主桥主拱圈刚合拢时,对应一阶稳定系数为 20.8。
- (2)纵梁安装后张拉预应力束阶段,对应一阶稳定系数为 10.7。
- (3)拱圈灌注混凝土时,对应一阶稳定系数为 5.7。
- (4)安装下层横梁结束时,对应一阶稳定系数为 8.3。
- (5)安装上层横梁及其他上层横向联系构件结束时,对应一阶稳定系数为 7.5。
- (6)桥面铺装阶段或成桥状态,对应一阶稳定系

数为 5.8。

各施工阶段的一阶失稳模态均为面外失稳,从稳定系数可见,施工期结构具有足够的稳定安全性。

5 施工控制主要成果

通过施工控制的有效实施,确保了大桥的施工安全,监测结果表明成桥状态的结构内力及线形满足既定目标,因此所采用的控制方法及计算理论是符合钱江四桥双层桥面的结构特点,主要的成果可概括如下:

(1) 作为双层桥面拱梁组合结构桥, 承重结构的受力是可以线性叠加的, 采用平面有限元初等梁理论, 进行简化计算的理论与实测成果比较, 具有足够的可靠度;

(2)采用塔架扣索对多段主拱肋拼装施工,按半动态调索法合拢主拱肋的方法是可行的,安装精度基本满足要求;

(3) 85 m 跨吊杆张力在施工期的多次优化调整是必要的, 其对施工期结构的安全及成桥状态的内力、线形满足要求具有重要作用;

(4)主要承重结构材料应力应变的实测值均在弹性范围内,与施工控制仿真模拟计算理论值的误差在合理范围内。

文中图 1 由交通部公路二局钱江四桥项目部提供, 特别致谢。

参考文献:

- [1] 孙建渊. 钢劲性骨架在梁拱组合体系中的作用研究[J]. 公路, 1999, (9).
- [2] 孙建渊, 等. 梁拱组合桥吊杆多次张拉的分析研究[J]. 华东公路, 1999, (5).
- [3] 赵林强, 等. 杭州市钱江四桥总体设计[J]. 桥梁建设, 2004, (1).

Construction Control of Tied-Arch Bridges with Double-Deck

*Sun Jian-yuan*¹, *Li Zhi-sheng*²

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Zhejiang Highway and Water-Carriage Engineering Consultation and Supervise Company, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The applications of construction control technology of the 4th Qiantan River Bridge with Double-Deck in China are introduced. Construction control technology and analysis methods not only ensure the safety of the bridge in construction period, but also monitoring results of the internal force and shape of the bridge accord with predicted values of construction control better. The conclusions drawn in this paper are of important references to the design and construction of the similar bridge projects.

Key words: tied-arch bridge; double-deck; construction control

广东梅河高速公路通车

2005 年 10 月 30 日,粤东地区客家人民的致富路——梅(州)河(源)高速公路正式建成通车,梅州与广州相互间 4 h 左右可以到达,比以前缩短近 2 h。

梅河高速公路东起于梅县程江镇的湖洋唇,与梅州市西环、拟建的南环以及梅汕高速公路相接,向西经梅县、兴宁市、五华县、龙川县,终于东源县蓝口镇五星村,与河龙高速公路柳城至热水段相接,自东向西横跨五县市共 17 个镇,全长 118.41 km,总投资约 48.35 亿元,双向四车道,设计行车速度为 80 km/h。

梅河高速公路是连接广东省经济发达地区和粤东山区的交通干线,对改善粤东山区投资环境,加快山区脱贫致富,实现地区优势互补,促进全省区域协调发展具有十分重要的意义。