

基于应力等效的桥梁预制梁静载试验内力计算探讨

何智¹, 李娟娟^{2*}

(1. 四川省兴冶岩土工程检测有限责任公司, 四川 成都 610036; 2. 四川省治勘设计集团有限公司, 四川 成都 610036)

摘要:为计算预制梁静载试验目标内力,针对静载试验效率等问题进行探讨,阐述应力等效的基本原理,提出试验中确定目标内力的计算方法,并将其用于某预制箱梁的静载试验中。研究发现:① 现行公路桥梁荷载试验规程对静载试验效率计算的规定有待进一步完善;② 应力等效,其实质是在试验荷载作用下的应力与某设计荷载作用下最不利受力状态时的应力情况相同,可将应力等效的原理用于预制梁静载试验计算;③ 若预制梁在后续施工过程中,存在体系转换,则应考虑施工过程对预制梁受力的影响。

关键词: 桥梁工程; 预制梁; 应力等效; 静载试验; 探讨

中图分类号: U441

文献标志码: A

现代桥梁建设中,随着施工单位设备保有量日益增加,要求尽可能减少对环境和既有交通的影响,同时考虑经济、高效的原则,装配式桥梁作为一种技术成熟的结构形式,往往是首先被考虑的桥型。装配式桥梁,多数是在施工条件较好的梁场预制梁片,批量化生产,保证梁体质量的同时,大大缩短了施工时间,预制场的硬化层也可合理再利用^[1],为公路桥梁建设带来了巨大的技术经济效益。

为检验预制梁片的设计与施工质量,评定结构的工作状态,静载试验是最直接、有效的检测手段。静载试验是通过直接测量结构在静力试验荷载作用下的一系列响应(包括变形、应力等)来了解结构的实际性能。当前,对公路桥梁结构进行静载试验主要执行的规范标准有 JTG/T J21-01-2015《公路桥梁荷载试验规程》^[2]、JTG/T J21-2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》^[3]等。静载试验时,如何准确计算预制梁的目标内力,以使试验时结构的受力状态与设计荷载作用下最不利受力状态一致是该文探讨的出发点。

1 静载试验效率的探讨

静载试验效率的本质是在试验静荷载作用下结构产生的效应与设计荷载效应的比值,交通运输部颁布实施的 JTG/T J21-01-2015《公路桥梁荷载试验规程》规定,静载试验效率按式(1)计算:

$$\eta_q = \frac{S_s}{S'(1+\mu)} \quad (1)$$

式中: S_s 为静载试验荷载作用下,某一加载试验项目对应的加载控制截面内力或位移的最大计算效应值; S' 为设计荷载产生的同一加载控制截面内力或位移的最不利效应计算值; μ 为按规范取用的冲击系数^[1]。

实际静载试验计算中,大多是先在规范要求范围内初拟一静载试验效率值,反算加载的试验荷载。式(1)中, S' 是计算试验荷载的关键参数,若设计荷载包括汽车荷载、人群荷载或其他不考虑冲击系数的荷载时,采用上述表达式容易产生歧义。严格来说,当不同的作用效应可按线性关系考虑时,此时若要采用上述表达式, S' 则应采用式(2)进行换算,或将式(1)改写为式(3)。

$$S' = S_q + S_r / (1 + \mu) \quad (2)$$

$$\eta_p = \frac{S_s}{S_q(1+\mu) + S_r} \quad (3)$$

式中: S_q 为考虑冲击系数的荷载; S_r 为不计入冲击系数的荷载(如人群荷载)。

此外,JTG/T J21-01-2015《公路桥梁荷载试验规程》中并未明确阐述这一最不利效应计算值的深刻含义,主要包括:① 最不利效应计算值应考虑哪些荷载作用;② 如何考虑荷载效应组合。总之,静载试验效率计算时,最主要的问题在于如何准确得到最不利效应计算值,现行规范对此并未阐述清楚,建议在后续修订时提出指导性、原则性的意见。

收稿日期:2021-07-01(修改稿)

作者简介:何智,男,硕士,工程师, E-mail:360298264@qq.com

* 通信作者:李娟娟,女,硕士, E-mail:448201210@qq.com

针对预制梁静载试验,该文以下分析中最不利效应为控制截面内力,暂考虑结构恒载和移动荷载,采用标准组合形式。

2 基于应力等效的试验内力计算

2.1 应力等效原理

对于预应力混凝土预制梁而言,多数是采用空心板、小箱梁或 T 梁等结构形式,单片试验梁与结构体系中的梁受力是不相同的。主要表现在:① 若结构为先简支后连续体系,负弯矩区的预应力能减小跨中截面正弯矩,从而提高结构承载力,而预制梁试验时则往往为简支构件;② 结构体系梁通过铰缝、湿接缝和横隔板等与相邻梁联结,其受力状态与结构整体布置有关;③ 结构体系梁有现浇层,现浇层具有联络主梁共同受力的作用,同时也可以分散荷载并作为主结构的一部分参与受力^[4],增大了梁的截面刚度,相比预制试验梁,其承载能力明显较大,且这一影响较为显著^[5],以高 1.2 m 箱梁、现浇层 8 cm 混凝土为例,其差异可达 14%。

所谓的应力等效是指对预制梁进行静载试验产生的应力与施工过程中或成桥后某状态下的应力相同。基于这一原理,可对预制梁在整个生命周期内某时刻的受力进行模拟试验,以判断预制梁的设计与施工质量。也就是说,对预应力混凝土预制梁进行静载试验时,应分析梁体在后续施工、运营过程中的受力情况,以最不利状态时的应力作为目标,通过这一应力反算静载试验的最不利效应内力。

为进一步描述这一理念,以某先简支后连续结构的预制箱梁为例阐述如下。

桥梁上部结构的施工过程如图 1 所示,分析其整个施工及后续通车运营过程中边跨箱梁底板底面跨中截面处的应力可知:当箱梁完成预制平放搁置于台座上时,自重不产生内力(不考虑预制梁的预拱度),此时底板底面主要由于预应力钢束而具有较大的压应力储备;当架设到盖梁上时,自重产生拉应力使底板底面压应力减小;施工湿接缝、横隔板等横向联结时,同样使底板底面压应力减小;张拉负弯矩区预应力钢束使箱梁跨中有上拱趋势,底板底面压应力增大;施工现浇层、沥青层和护栏以及后续通车运营均使跨中截面产生正弯矩,底板底面压应力进一步减小,其应力变化如图 2 所示。显然,从理论上讲,当负弯矩区的预应力布置很大,而桥面二期恒载和移动荷载较小时,箱梁在施

工湿接缝和横隔板等横向联结后底板底面的压应力储备可能最小,则为最不利状态。对大多数公路桥而言,二期恒载和移动荷载在跨中截面底板底面产生的拉应力较大,考虑移动荷载的运营通车阶段往往是箱梁底板底面压应力储备较小的状态,甚至可能出现拉应力。因此,若准确计算得到这一最不利状态下箱梁底板底面的应力,可利用应力等效的原理,以此反算预制箱梁静载试验的目标内力和试验荷载,此时静载试验效率为 1.00。

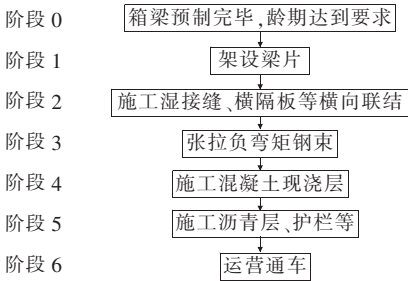


图 1 上部结构施工流程

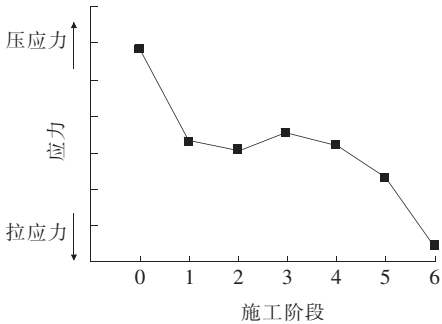


图 2 箱梁底板底面跨中截面应力变化

2.2 最不利效应内力计算

如前文所述,要计算最不利效应内力,关键是寻求最不利状态下截面应力,可直接建立有限元模型,进行施工阶段和移动荷载分析,通过“施工阶段联合截面”等功能来考虑湿接缝、混凝土现浇层参与结构受力,以此可获得最不利状态下截面应力。考虑建立施工阶段模型繁冗,该文提出采用以下思路确定截面最不利状态下内力。

2.2.1 简支梁结构

对简支结构的预制梁静载试验而言,多数是在梁场进行,按简支梁的边界条件对其进行支承,此时,预制梁的受力状态与实际施工架设完毕后的状态相同,假设此时梁体自重和预应力作用下控制截面应力为 σ_1 ,这一应力已真实存在于预制梁中,因此,静载试验时,不考虑这一应力。将后续各施工阶段所考虑的荷载简化为均布荷载、集中荷载,即可采用结构力学方法

计算控制截面弯矩,进而可用材料力学方法计算各项应力。后续施工过程中,施工湿接缝和横隔板在控制截面产生应力 σ_2 、施工整体现浇层产生应力 σ_4 、施工沥青铺装层和护栏产生应力 σ_5 以及移动荷载产生应力 σ_6 ,其计算如表1所示。不考虑预制梁自重和预应力情况下,后续施工和运营过程中,预制梁控制截面尚有 σ_2 、 σ_4 、 σ_5 、 σ_6 的应力增量,设应力增量和为 $\Delta\sigma$,根据应力等效原理,静载试验亦应使箱梁底面产生 $\Delta\sigma$ 的

应力增量,则此时控制截面应加载产生的内力为:

$$M=\frac{\Delta\sigma\times I}{y}\tag{4}$$

式中: M 为试验静荷载在控制截面应产生的弯矩; I 为预制梁的截面抗弯惯性矩; y 为预制梁中性轴至截面边缘距离。

当考虑静载试验效率时,在式(4)分子部分乘以系数 η_q 即可。

表1 应力计算

序号	应力项目	计算公式	符号说明
1	σ_2		M 为施工湿接缝、横隔板等荷载增量在控制截面产生的弯矩。对于中梁,近似计算为一道完整湿接缝和两片梁间现浇横隔板部分产生的弯矩;对于边梁,取其一半; I 、 y 分别为预制梁的截面抗弯惯性矩、中性轴至截面边缘距离(浇筑初期,湿接缝等并未参与受力,其湿重由原有预制梁承担)
2	σ_4	$\sigma_i=\frac{M_i}{I_i}y_i$	M 近似各片梁均分; I 、 y 分别为考虑了湿接缝参与受力的截面抗弯惯性矩、中性轴至截面边缘距离(湿接缝、横隔板等已具有刚度,参与整体受力)
3	σ_5		M 包括沥青铺装层、人行道板、护栏等作用产生的弯矩。对于沥青层荷载, M 近似各片梁均分,若边梁有较宽人行道,且试验对象为边梁,则按试验梁横向分布情况计算;对于人行道板和护栏, M 根据试验梁横向分布情况计算; I 、 y 分别为考虑了湿接缝、整体现浇层参与受力的截面抗弯惯性矩、中性轴至截面边缘距离(湿接缝、现浇层等参与整体受力)
4	σ_6		M 根据试验梁横向分布情况计算; I 和 y 含义同上一条

2.2.2 连续梁结构

对于简支变连续的结构体系而言,混凝土现浇层、沥青层和护栏等在结构转变为连续体系之后进行施工,可对整体结构进行分析,得到目标跨的弯矩值,再根据表1计算 $\sigma_4\sim\sigma_6$ 。

结构在施工完湿接缝和横隔板之后,进行负弯矩区预应力张拉实现体系转换,此时控制截面在自重、湿接缝和横隔板作用下产生的应力与试验时简支状况并不相同,负弯矩区的预应力张拉使跨中截面下缘的压应力储备增大,再叠加 $\sigma_4\sim\sigma_6$ 应力,下缘的拉应力水平会小于简支情况(压应力水平大于简支情况),因此,需要建立有限元模型进行施工阶段分析,计算完成体系转换之后控制截面的真实应力再进行叠加即为最不利状态的真实应力,设为 σ ,则预制梁试验时应产生的应力增量 $\Delta\sigma=\sigma-\sigma_1$,再根据式(4)即可计算控制截面的加载内力。

另一种思路是:设预制梁简支状态下的控制截面应力为 σ_1 ,与架设后应力状态完全一致,施工湿接缝和横隔板仍然是在结构处于简支状态下进行,很容易

得到控制截面的应力增量 σ_2 ,再对整体模型(仅施工完湿接缝和横隔板状态)施加负弯矩区预应力,可得控制截面的应力变化 $\Delta\sigma_{\text{预}}$ (对边跨最大正弯矩截面底面, $\Delta\sigma_{\text{预}}$ 为压应力,取为负值),控制截面此时的应力为 $\sigma_1+\sigma_2+\Delta\sigma_{\text{预}}$,再叠加 $\sigma_4\sim\sigma_6$ 应力,即:

$$\sigma=\sigma_1+\sigma_2+\Delta\sigma_{\text{预}}+\sigma_4+\sigma_5+\sigma_6\tag{5}$$

而对预制梁进行静载试验时, σ_1 已存在于结构内部,因此,其静载试验的应力增量为:

$$\Delta\sigma=\sigma_2+\Delta\sigma_{\text{预}}+\sigma_4+\sigma_5+\sigma_6\tag{6}$$

值得注意的是:在计算 $\sigma_4\sim\sigma_6$ 时,应分析试验梁处于的桥跨位置,通常情况下,边跨在对应荷载作用下受力最不利。考虑各桥跨纵向的内力分布与桥梁各跨整体的刚度比有关,因此,可简单处理为在成桥后单独考虑混凝土现浇层、沥青层和护栏等(模拟为线荷载)获取试验截面的内力,再根据表1计算 $\sigma_4\sim\sigma_6$ 。

3 试验荷载计算

静载试验大多是在预制梁施工完毕且材料龄期满

足要求后在梁场进行,普遍采用水箱、砂袋、千斤顶辅以其他压重等方式进行加载。无论采用哪种加载方式,试验荷载均不是理想的集中力,而是具有一定的分布宽度,其示意图见图 3。

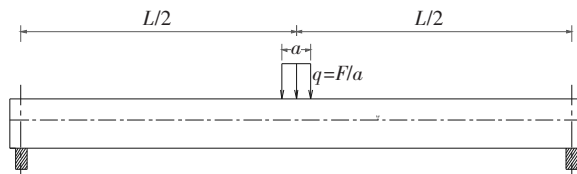


图 3 试验荷载计算示意图

考虑荷载分布长度为 a 时,有:

$$M = \frac{qaL}{4} - \frac{qa^2}{8} \quad (7)$$

令 $qa = F$, 则:

$$M = F(L/4 - a/8) \quad (8)$$

$$F = \frac{8M}{2L - a} \quad (9)$$

式中: M 为跨中截面试验内力; F 为等效集中力; L 、 a 见图 3。

当采用水箱、砂袋等重物加载时,其荷载分布长度较长,均布荷载大小则为:

$$q = \frac{8M}{(2L - a)a} \quad (10)$$

当考虑静载试验效率时,在式(9)、(10)分子乘以系数 η_q 即可,针对预应力混凝土梁板静载试验,建议 η_q 取值为 0.95~1.05。

4 工程应用

某预应力混凝土桥跨径组合为 6×20 m,采用预制小箱梁先简支后连续结构形式,分左右两幅,单幅全宽 11.25 m,单幅横向布置 4 片小箱梁,中心间距 2.90 m。预制小箱梁高 1.2 m,顶面宽 2.40 m,湿接缝宽 0.50 m,在支点附近布置两道端横隔板,采用 C50 混凝土。设计荷载:公路—I 级(JTG D60—2004《公路桥涵设计通用规范》规定)。其施工流程为预制箱梁(同时施工下部结构)→架设箱梁→施工横向联结、浇筑连续段混凝土→张拉负弯矩区预应力→施工整体现浇层、沥青层、护栏和伸缩缝等→运营通车。拟对边跨预制中梁进行静载试验。

采用 Midas/Civil 针对整体结构、试验中梁建立有限元模型。

预制中梁完成后简支时底板底面应力如图 4 所

示,施工横向联结时边跨中梁产生的弯矩如图 5 所示;张拉墩顶负弯矩区预应力钢束对箱梁底板底面产生的应力如图 6 所示,结构连续后施工整体现浇层以及移动荷载产生的弯矩如图 7、8 所示。

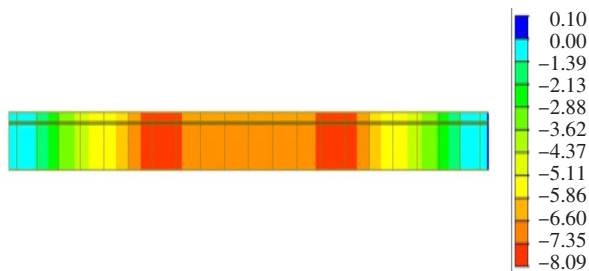


图 4 预制中梁简支时底板底面应力(单位: MPa)

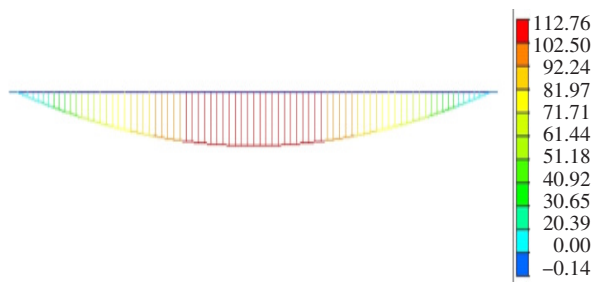


图 5 施工横向联结时中梁弯矩图(单位: kN·m)

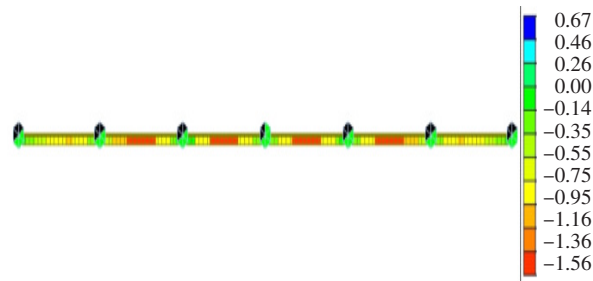


图 6 张拉负弯矩区钢束对底板底面的应力(单位: MPa)

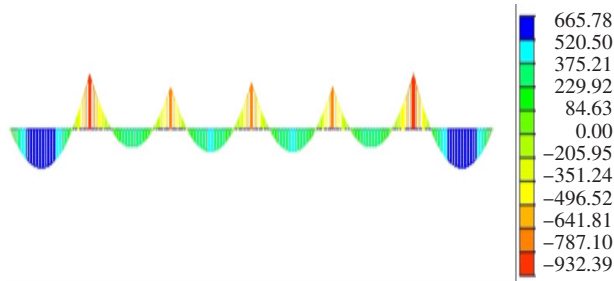


图 7 施工整体现浇层结构弯矩图(单位: kN·m)

施工整体现浇层、沥青层产生的弯矩近似处理为各片梁均分,护栏和移动荷载对于中梁产生的弯矩根据中梁横向影响线进行分配,进而可计算施工护栏以及移动荷载作用下中梁承担内力值。控制截面底面应力计算结果见表 2。

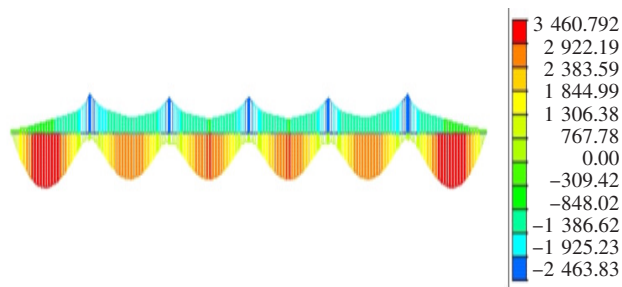


图8 移动荷载作用下弯矩图(双车道)(单位:kN·m)

对整体有限元模型进行考虑预应力等荷载的施工阶段分析,张拉负弯矩区预应力钢束后控制截面底板底面的应力为 -7.67 MPa ,叠加表2计算的 $\sigma_4\sim\sigma_6$,则成桥运营阶段边跨控制截面底板底面最不利状态下绝对应力 $\sigma=-1.45\text{ MPa}$ 。试验中梁控制截面在预制完成后简支时底板底面的绝对应力为 -7.17 MPa ,因此,静载试验应产生的应力增量为 5.72 MPa 。

第二种思路计算如下:预制梁在简支状态下,施工

表2 控制截面底面应力计算

应力项目	边跨总弯矩/(kN·m)	横向分布系数	中梁分担弯矩/(kN·m)	I/m^4	y/m	应力/MPa
σ_2	—	—	112.76	0.166 8	0.739	0.50
σ_4	656.35	0.250	164.09	0.178 4	0.771	0.71
σ_{51}	644.68	0.250	161.17	0.220 2	0.857	0.63
σ_{52}	1 213.52	0.247	299.74	0.220 2	0.857	1.17
σ_6	3 460.79	0.551(单车道)	953.45	0.220 2	0.857	3.71

注: σ_{51} 、 σ_{52} 分别指施工沥青层、护栏对中梁控制截面底板底面产生的应力。

湿接缝、横隔板等在控制截面底板底面产生应力 $\sigma_2=0.50\text{ MPa}$,张拉负弯矩区预应力引起控制截面底板底面的应力 $\sigma_{\text{预}}=-1.00\text{ MPa}$,再叠加 $\sigma_4\sim\sigma_6$ 。同样可得应力增量 $\Delta\sigma=5.72\text{ MPa}$ 。

预制中梁控制截面抗弯惯性矩为 0.166 8 m^4 ,截面中性轴至底面距离为 0.739 m ,根据式(4)计算试验荷载应在控制截面产生的弯矩为 $1\text{ 291.06 kN}\cdot\text{m}$ 。假定试验时支承中心线间距 19 m ,取静载试验效率为 1.00 ,当采用 5 m 长的均布荷载加载时,均布荷载为 62.60 kN/m ;当采用反力千斤顶(近似考虑分布长度 30 cm)进行加载时,千斤顶提供集中力为 273.96 kN 即可。

5 结论

运用应力等效原理能将结构应力状态相同转换为内力计算,从而与规范要求的根据内力(或位移)计算静载试验效率相吻合。通过对应力等效原理的阐述,分析简支和连续结构预制梁静载试验的计算,得到以下结论:

(1) 现行规范 JTG/T J21-01-2015《公路桥梁荷载试验规程》对静载试验效率的计算规定容易产生歧义,且并未深刻阐述最不利效应计算值的含义,建议在后续修订时提出指导性、原则性的意见。

(2) 应力等效,就是在试验荷载作用下的应力与

设计荷载作用下最不利受力状态的应力相同,将应力等效的原理用于预制梁静载试验计算,其思路简明清晰,能将应力转换为与规范要求吻合的内力,从而计算静载试验效率。

(3) 针对先简支后连续结构体系,张拉负弯矩区预应力能增大正弯矩区控制截面底面的压应力,进一步提高其压应力储备,对预制梁静载试验时,应充分考虑这一影响。

(4) 计算试验荷载时,应考虑试验荷载分布长度的影响,特别是当静载效率系数取规范要求下限值时,简单地将分布长度较短的荷载考虑为集中力易导致截面真实效率系数不满足规范要求。

参考文献:

[1] 王敬飞,吴文亮,李明汇. 高速公路桥梁预制场硬化层再利用技术研究[J]. 中外公路,2018,38(5):140-143.

[2] 长安大学. 公路桥梁荷载试验规程:JTG/T J21-01-2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

[3] 交通运输部公路科学研究院. 公路桥梁承载能力检测评定规程:JTG/T J21-2011[S]. 北京:人民交通出版社,2011.

[4] 刘旭政,桂奇琦,张翼飞,等. 考虑桥面板现浇层刚度对连续梁桥静动力性能的影响[J]. 中外公路,2019,39(1):64-67.

[5] 卢绍鸿,韩海影,林敏. 预应力混凝土预制梁试验荷载的计算方法[J]. 广东土木与建筑,2001(12):6-8.