

上海地区独柱简支桥梁的横向稳定验算与加固方法

曹 奕

上海建瓴工程咨询有限公司

摘 要:为解决独柱桥梁的横向稳定安全性问题,比较和分析了现有规范中横向稳定的验算条文、受力特性及相关事故案例的侧翻成因,提出了适用于上海市独柱简支梁桥的横向稳定验算方法和验算指标,即通过支座反力、倾覆稳定系数、构件强度 3 种指标进行判定,对无法满足判定条件的桥梁提出优先考虑增设支座或加大支座间距等加固方案,希望对实际工程起到指导作用。

关键词:独柱墩简支梁桥 横向倾覆稳定 验算判定指标 加固

独柱墩梁桥因占地面积小、工程造价低、桥型优美等优点被广泛应用于城市桥梁。早期对独柱墩简支梁桥的受力特性认识不足,在工程实践中桥梁侧翻事故时有发生。随之,针对独柱简支桥梁倾覆安全性问题的验算方法和设计标准被不断提出。2018 年《公路桥梁设计规范》增补了相关横向稳定的验算条文。

1 现有桥梁横向稳定验算标准和指标

1.1 桥梁横向稳定验算标准

在铁路桥梁相关规范中最先给出了横向倾覆稳定性验算标准。《铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范》(TB 10002.3—2005)^[1]4.1.1 条规定,桥跨的横向倾覆稳定系数(稳定力矩与倾覆力矩之比)应大于等于 1.3;《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTGD 62—2004)^[2]虽未包含针对倾覆稳定验算的指标,但提出了禁止支座脱空的要求;《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2015)^[3]新增了针对桥梁倾覆稳定性的验算内容(与 2004 版规范相比),要求桥跨的横向倾覆稳定系数大于等于 2.5;《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)^[4]新增了混凝土箱梁桥抗倾覆验算要求(与 2004 版规范相比),其横向倾覆稳定系数要求和计算方法类似于 2015 版规范。

1.2 验算标准比较

各倾覆稳定的验算标准各有特点和侧重,各标准的验算内容和考虑的受力问题对比见表 1。

表 1 验算标准对比

验算标准	TB 10002.3 —2005	JTGD62 —2004	JTGD 62 —2015	JTG 3362 —2018
支座脱空	不脱空	不脱空	不脱空	不脱空
倾覆稳定系数	有要求	无要求	有要求	有要求
临界稳定系数	1.3	无要求	2.5	2.5
梁体转角	无要求	无要求	无要求	无要求
下部结构强度	无要求	无要求	无要求	无要求
车辆荷载提高	无要求	无要求	无要求	无要求
非线性效应	无要求	无要求	无要求	无要求

由表 1 可知:①支座脱空是各项规范中都提及的验算内容,这与结构倾覆前期会发生支座脱空的表象特征有关;②将上部结构视为刚体,对其整体进行倾覆稳定系数验算也是一项被普遍认可的验算指标,但倾覆稳定系数的临界值取值存在较大差异,从 1.3 到 2.5 不等,这与标准对车辆荷载和超载情况的考虑有关;③至于车辆荷载,国家标准均考虑了车辆的超载问题,在原有规范荷载的基础上提高了系数。

2 梁桥倾覆机理与判别方法

2.1 梁桥倾覆机理研究

2.1.1 桥梁倾覆事故案例

(1) 内蒙古自治区包头市民族东路高架桥倾

覆事故(见图 1)。2007 年 10 月 23 日包头市民族东路高架桥引桥的其中一跨发生侧翻,并造成桥下铁路中断。倾覆桥跨长 35 m、桥宽 25.5 m,采用圆弧底箱形断面,桥梁采用独柱墩并设置横向间距较小的双支座,此桥通行车辆限速 60 km/h,限载 35 t。事故发生时,3 辆重型超载汽车(分别超载 151.215 t、112.98 t、112.55 t)同时行驶在该跨桥面上。



图 1 包头市民族东路高架桥事故现场

(2) 浙江省上虞市春晖互通立交桥倾覆事故(见图 2)。2011 年 2 月 21 日上虞市南春线 7K+966 春晖互通立交,绍兴至宁波、台州方向的匝道发生倾覆事故。事故发生时,共有 4 辆货车位于匝道上。该桥桥墩绝大多数采用独柱墩形式,设单支座。经事后检测,事故发生时 4 辆货车均有超载现象,其中一辆车超载 217.5%。



图 2 上虞市春晖互通立交桥事故现场

(3) 黑龙江省哈尔滨市群力高架桥倾覆事故(见图 3)。2012 年 8 月 24 日哈尔滨市三环路群力高架桥鸿福路段上行匝道发生倾覆。事故发生时,共有 4 辆货车行驶在桥梁一侧。经实际称重,4 辆货车均严重超载,4 辆车的车货总重达 485.2 t。



图 3 哈尔滨市群力高架桥事故现场

(4) 粤赣高速公路匝道断裂坍塌事故(见图 4)。2015 年 6 月 19 日凌晨粤赣高速公路河源南出口的 C 匝道发生侧翻,该匝道为单车道桥梁,长 130 m、宽 8.5 m、高 11 m,跨径组合为 $2 \times 25 \text{ m} + 3 \times 25 \text{ m}$,第二号桥墩至第五号桥台之间的主墩发生整体坍塌,导致上部结构塌落,4 辆货车翻落桥面。每

辆货车均为 6 轴大货车,4 辆货车的车货总重分别为 117.7 t、111.4 t、78.7 t、116.7 t。



图 4 粤赣高速公路河源城南出口匝道事故现场

(5) 上海市中环高架桥翘起受损事故(见图 5)。2016 年 5 月 23 日零时 10 分许上海市中环高架路跨沪太路口的一跨钢箱梁(桩号为 ZN834-ZN835)发生货车单车事故,车上装载的水泥管桩散落至桥面致使高架路段主线桥面翘起损毁,桥面最大高差约 40 cm。



图 5 上海中环高架桥事故现场

2.1.2 桥梁倾覆事故原因分析

桥梁在车辆荷载作用下发生倾覆,存在不同的倾覆历程和控制破坏因素,结构破坏的原因也不尽相同。因此,明确梁桥倾覆的机理对建立针对性的验算内容、评估结构倾覆稳定安全具有重要意义。

按照规范^[3]的倾覆稳定系数计算方法,对上述 5 座事故桥梁进行计算,计算结果见表 2。

表 2 倾覆稳定系数验算结果

案例	事故桥梁	基于规范荷载的倾覆稳定系数	基于实际车辆荷载的倾覆稳定系数
1	包头市民族东路高架桥	2.8	0.5
2	上虞市春晖互通立交桥	21.6	9.4
3	哈尔滨市群力高架桥	8.3	2.8
4	粤赣高速公路河源城南出口匝道	2.8	1.3
5	上海中环高架桥	2.0	0.8

由表 2 可知,案例 1 和案例 5 在实际车辆荷载作用下的倾覆稳定系数 < 1 ,表明自重产生的稳定力矩小于车辆荷载产生的倾覆力矩,整体结构发生失稳。但是,其他几座事故桥的倾覆稳定系数均表明结构不会在事故车辆荷载作用下发生整体倾覆,实际事故原因并非整体失稳,而是由于下部结构支承失效造成桥梁倒塌。

根据上述 5 起倾覆事故,将倾覆原因归为 3

类:整体失稳,盖梁破坏,失去有效支承(非线性破坏),桥墩倒塌,失去有效支承。

(1) 整体失稳。桥梁在极端偏载重车作用下,由于车辆产生的倾覆作用大于结构的抗力,导致结构整体绕着外侧支座连线发生整体转动,形成类似跷跷板一样的整体倾覆。这是最直观也是最被人们所认知的一类事故原因。目前大多数规范提出的倾覆稳定系数的验算就是基于上述倾覆机理形成,目的是为防止此类整体失稳事态的发生。

(2) 盖梁破坏,失去有效支承(非线性破坏)。案例 3 表明,由于该桥桥墩盖梁承受了极大的荷载作用,导致盖梁自身结构破坏,引起支座的竖向反力重新分布,结构整体丧失有效支承导致结构整体失稳。随着梁体转动角度的增加,端部一侧支座和盖梁承受的竖向荷载迅速增大,这是传统线性设计中未考虑到的特殊工况。该桥在最不利情况下的支座反力是自重下的 10 余倍。

(3) 桥墩倒塌,失去有效支承。案例 2 表明桥梁在偏载车辆作用下,梁体发生一定转角,墩梁之间产生一定量级的水平力。一般在设计中只考虑量级较小的汽车制动力,桥墩的抗推强度不足,最终导致桥墩被推倒,结构失去有效支承后倾倒。案例 4 也有类似的情况,主梁在倾斜到一定角度后下滑,同时侧向水平力导致桥墩被推倒。

2.1.3 梁桥倾覆机理研究结论

综合上述事故的失效机理分析结果,梁桥在极端偏载作用下可能的失效历程汇总见图 6。总体分 3 种:① 联端支座脱空是梁体倾覆的开始,但支座脱空不一定发生倾覆破坏;② 梁体转动引起结构几何非线性效应(偏心距增大),不可忽略;③ 诱发结构失效的是稳定问题,最终导致破坏的是强度问题,倾覆是极端偏载下,梁体转动引起支撑体系强度破坏导致的结构失效。

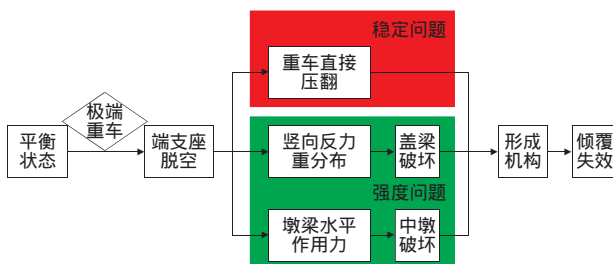


图 6 桥梁垮塌事故原因分析

2.2 基于倾覆机理的验算内容

若整体倾覆稳定不通过,则必然发生事故,若

梁体转角超限,将导致非线性效应增加,加剧支反力重分布,有发生倾覆的风险,若支座脱空,说明结构在验算极端重车偏载下处于不利状态,需进一步加强监测。

根据上两节桥梁倾覆失效机理,需要通过结构验算防止上述所有类型的失效才能有效防止结构的倾覆。由此根据多种不同严格等级形成多级验算内容。

(1) 等级一:严禁支座脱空(过于严格)。支座脱空是结构倾覆的必要非充分条件,在最不利情况下如果墩梁之间不出现脱离,则结构不会发生整体倾覆。在相同的荷载条件下,这种限制条件最为保守,因为支座在极端荷载作用下的瞬时脱空并不一定引起结构的倾覆。

(2) 等级二:控制非线性效应(较严格)。如果允许支座在最不利的瞬时荷载作用下出现脱空,则需要同时预防结构整体像刚体一样失稳,同时保证结构在转动后考虑非线性效应条件下的强度安全。前者可以通过倾覆稳定系数计算控制,后者则可以通过控制梁体的转角来限制非线性效应的出现。

(3) 等级三:保证强度稳定(较为适中和经济)。比等级二更为经济的做法是既允许支座在瞬时的最不利工况下出现脱空,又允许结构发生一定的转动,只要墩梁在这种转动下能够承受相互作用力的激变,则结构即使丧失功能也不会发生整体破坏。

(4) 根据上述不同控制等级验算内容及控制因素。不同控制等级的验算内容见表 3。

表 3 基于倾覆机理的验算内容

序 号	验算内容	控制因素
等级一	支座反力	支座不允许脱空
等级二	支座反力 倾覆稳定系数 梁体转角 构件强度	采用倾覆稳定系数和梁体转角作为主要控制因素
等级三	支座反力 倾覆稳定系数 构件强度	倾覆稳定系数和构件强度作为主要控制因素

3 适用于上海地区现役独柱梁桥倾覆验算方法

3.1 适用于上海地区现役独柱梁桥倾覆验算指标

根据前文,现有规范对独柱梁桥的验算标准基本聚焦于上部结构的横向整体稳定验算和支座脱空验算。

但实际上部分事故是由于非线性破坏或者下部结构失稳引起,而非上部结构横向稳定不足引起。这说明目前的相关规范对桥梁的横向稳定判定

指标还存在不足,体现在:①对造成梁桥倾覆破坏的原因及机理认识不足;②运营期结构抵抗超载车辆偏载作用下的侧向倾覆作用的安全储备不足;③部分桥梁未设置可靠的限位构造,造成桥梁滑落;④对超载运输的管控力度不足。

综上,桥梁横向稳定判定指标应包含:①梁端部支座反力;②整体倾覆稳定系数;③在一定转角位移情况下结构构件强度(见图7)。

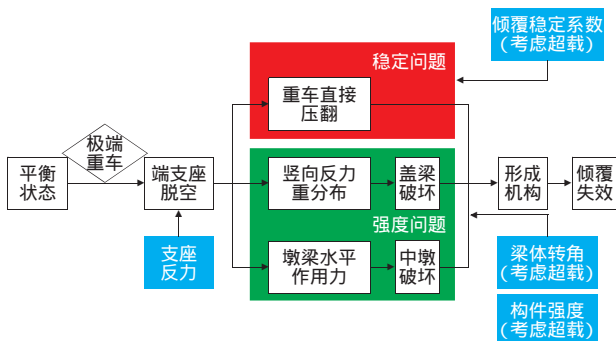


图7 桥梁横向失稳判定条件

3.2 倾覆验算的可靠度标准

工程实际应用中,常用可靠指标(β)来表示结构的失效概率(P_f)。当计算得到 β 大于或等于预先给定的目标可靠指标(β_t)时,可认为结构满足预期的性能要求。

目前,在确定结构设计目标可靠指标时,为了与以往规范保持连贯性,采用“校准法”并结合工程经验加以确定。我国《工程结构可靠性设计统一标准》^[5]依据国际标准《结构可靠性总原则》(ISO 2394:1998)制定。因此本文中梁桥倾覆验算的目标可靠指标的取值也依据该标准,同时参考我国公路行业标准《公路工程结构可靠度设计统一标准》^[6](下称《统一标准》)确定。ISO2394:1998和统一标准中可靠指标的具体取值见表4、表5。

表4 ISO2394:1998 目标可靠指标

安全措施成本	相对低成本的安全措施	中等成本的安全措施	相对高成本的安全措施
轻微后果的失效	$\beta=0.0$	$\beta=1.3$	$\beta=2.3$
一般后果的失效	$\beta=1.5$	$\beta=2.3$	$\beta=3.1$
中等后果的失效	$\beta=2.3$	$\beta=3.1$	$\beta=3.8$
严重后果的失效	$\beta=3.1$	$\beta=3.8$	$\beta=4.3$

表5 《统一标准》目标可靠指标

结构破坏	类型	延性破坏	脆性破坏
结构安全等级	一级	$\beta=4.7$	$\beta=5.2$
	二级	$\beta=4.2$	$\beta=4.7$
	三级	$\beta=3.7$	$\beta=4.2$

参考上述标准的取值,事关结构安全的承载能

力极限状态的目标可靠指标,可根据其失效时破坏类型、失效后果和维护加固成本等因素综合确定。对于桥梁结构整体横向倾覆破坏,在破坏前无明显征兆,归类为脆性破坏。而桥梁的结构安全性要求较高,一般要求取相对较大的可靠指标,目标可靠指标取5.2。

对于结构构件的强度验算,仍然按照目前规范的可靠度要求验算。桥梁端部盖梁的正截面受弯承载力、中间独柱墩的大偏压受弯承载力,破坏类型为延性破坏,取目标可靠指标4.7;而桥梁端部盖梁的受剪承载力、中间独柱墩的受剪承载力,一般为脆性破坏,取目标可靠指标5.2。

独柱连续梁桥的倾覆机理表明,结构倾覆始于一侧单向受压支座脱空,但支座脱空并不一定发生倾覆,因此支座是否脱空是关乎使用性能的正常使用寿命。目前国际上正常使用极限状态的年失效概率约 1.3×10^{-3} ,对应的年目标可靠指标为3.0,换算至设计基准期100年的可靠指标为1.5,对应的失效概率为0.13,该值介于我国现行规范建议的0.05~0.25之间。因此可考虑支座脱空的目标可靠指标取1.5。

倾覆效应验算目标可靠指标取值汇总见表6。

表6 倾覆验算目标可靠指标

验算	支反力验算	整体横向倾覆	受弯、大偏心强度验算	受剪、局部承压计算
β_t	1.5	5.2	4.7	5.2

3.3 适用上海地区现役独柱桥梁的验算指标

本节以概率可靠性理论为基础,结合上一节中桥梁倾覆机理确定适用于上海地区现役独柱梁桥的倾覆验算方法,即按照上节提及的等级三,综合考虑支座脱空、上部结构整体稳定和构件结构强度因素的倾覆验算方法。

3.3.1 桥梁构件结构强度验算

对于一般结构构件桥梁结构,承载能力或正常使用极限状态的功能函数见式(1)。

$$Z=R-S=0 \quad (1)$$

式中 R —结构构件的真实抗力

S —结构构件承受的荷载效应

Z —极限状态的功能函数

3.3.2 桥梁支座反力验算

对于单向受压支座,其正常使用时保持受压状态(支座反力验算)的极限状态方程见式(2)。

$$F_{br} \geq \Psi_1 \times F \quad (2)$$

式中: F_{br} —恒载产生的使支座受压的竖向反力

Ψ_1 —倾覆力矩的频预值系数 取 0.85

F —活载倾覆力矩产生的竖向反力

3.3.3 桥梁结构整体横向稳定验算

桥梁结构整体横向倾覆的极限状态方程见式(3)。

$$S_{bk} \geq \gamma_{qt} \times S_{sk} \quad (3)$$

式中: S_{bk} ——使上部结构保持稳定的抗倾覆力矩

S_{sk} ——使上部结构失稳的倾覆力矩

γ_{qt} ——为 $\beta_1=5.2$ 时对应的倾覆分项系数 取 2.5

4 结语

4.1 适合上海简支独柱梁桥横向稳定的验算方法及判定指标

4.1.1 综合经济性和安全性的判定指标

(1) 根据主要规范或标准, 结合桥梁倾覆原因分析, 得出 3 项主要判定标准。① 判定条件一: 支座是否脱空, 按式(2)进行判别; ② 判定条件二: 整体倾覆稳定性是否满足, 按式(3)进行判别; ③ 判定条件三: 下部结构构件承载能力是否满足, 按式(1)进行判别。

算法及公式应根据规范^[4]进行计算, 应以判定条件二是否满足, 作为横向稳定验算的主要判别依据。

(2) 抗倾覆验算中, 当桥墩的变形对桥梁抗倾覆不利时, 应将下部结构一并纳入分析。

(3) 当单侧支座发生脱空时, 另一侧支座会受到较大的支座反力, 还需对梁端近支座位置的构件局部稳定性进行验算。

(4) 验算中应首先考虑在永久荷载作用下双支座布置的独柱墩(即抗扭墩)支座反力的均匀性, 然后再分析汽车荷载作用下支座反力的变化, 以保证支座不出现拉力。

4.1.2 整体倾覆稳定性系数取值

由于规范^[4]中增加了针对桥梁倾覆稳定性进行验算的条文, 结合上海市内较为良好的超载治理情况, 主要收费站及出入口匝道均有设置动态称重设施的实际情况, 认为参照各现行规范要求, 即取用抗倾覆稳定系数 2.5 作为判定指标是合适的。

4.2 既有独柱梁桥的加固措施方案

(1) 为判断现役的独柱简支梁桥的横向稳定情况, 建议优先针对独柱简支或连续钢箱梁桥跨进行验算和判别。

(2) 对于判定条件二无法满足的桥跨, 应遵循加固由小到大的原则, 可优先考虑增设支座或加大支座间距等措施、加设小盖梁措施, 增加桥梁整体横向稳定的安全性。

进行加固方案设计时, 由于改为多点支承、拉大支座间距或增加盖梁, 改变了横梁原有的受力情况, 如增加支座, 应优先设在隔板与加强肋交叉点处, 并要经过验算, 新增支座会引起桥梁的支座受力不均匀等问题, 引起墩柱受力改变的, 应对墩柱进行强度验算。

(3) 对于判定条件一、三无法满足的, 主要以增加限制位移和转角的线位装置为主, 如与桥墩或相邻桥跨设置抗拔约束装置。

4.3 建议

本文涉及到三类从严格到适中的横向稳定控制防范, 建议综合安全性和经济性原则, 对新建桥梁采用严格标准(等级一、等级二)、对现状的在役桥梁选取经济标准(等级三)。可分门别类按单跨简支、多跨独柱连续、钢结构、混凝土结构、单车道、双车道、多车道桥梁, 从对支座横向间距等的构造设计上加以规定, 采取经济合理的构造措施, 从而提高横向稳定的安全储备。

参考文献:

- [1] 铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范: TB 10002.3—2005[S].
- [2] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTGD 62—2004[S].
- [3] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTGD 62—2015[S].
- [4] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTGD 62—2018[S].
- [5] 工程结构可靠性设计统一标准: GB 50153—2008[S].
- [6] 公路工程结构可靠性设计统一标准: JTGD 2120—2020[S].

(收稿日期 2022-04-20)