

文章编号:1671-6833(2015)04-0092-04

超宽“321”型装配式公路钢桥的第二类稳定性研究

李斐然

(河南省交通规划勘察设计院有限责任公司, 河南 郑州 450052)

摘 要:以新型超宽“321”型装配式公路钢桥为研究对象,采用考虑材料非线性的有限元法,基于多级收敛准则研究超宽装配式公路钢桥的第二类稳定性. 研究表明:超宽装配式公路钢桥的第二类稳定系数偏小,结构偏于不安全;在跨中增加一个支点后稳定系数得到大幅度提高,但应避免在非支撑杆位置增设中支点,以避免局部先于整体屈服;对于准则 I 与准则 II 在 3 个支点数量以内时稳定系数几乎呈线性增加,但对于准则 III 在跨中支点增加到两个以上后不再显著提高,即在实际应用中支点数量增加到两个以上后不能再提高第二类稳定系数.

关键词:“321”型装配式公路钢桥;大横梁;超宽;承载力;设计

中图分类号: U442.5 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2015.04.021

0 引言

采用装配式公路钢桥^[1]对桥梁进行承载力提高^[2]是一种常见的措施,目前我国储备和应用最广泛的装配式公路钢桥为“321”型^[3-4],但该类型装配式公路钢桥桥面净宽仅为 3.7 m,导致超宽超重车辆难以采用“桥上桥”的加固方案. 为了改变这种情况,一种新型的“321”型装配式公路钢桥横梁布置方式被提出,可将桥面净宽由 3.7 m 提高到 6.5 m 以上,这种结构形式可以承担更大的车辆荷载和提供更宽的通行宽度,同时充分利用了原有装配式公路钢桥的桁架结构,其结构形式如图 1 所示,但这种新型装配式公路钢桥的受力性能尚缺乏研究,特别是极限承载状况即第二类稳定性^[5-7]的研究尚未开展. 目前仅有时党勇等^[8]分析了常规装配式公路钢桥设计中所采用的简化计算方法的不足,并使用有限元法对装配式公路钢桥的受力情况和承载力进行了分析,但其对承载力的研究仍在弹性范围内,是满足设计状态要求的承载力,这尚不属于第二类稳定性的研究. 由于超宽装配式公路钢桥(以下简称超宽钢桥)在标准装配式公路钢桥的基础上进行了横梁加宽,并且改变了横梁的安装位置,这将会对装配式公路钢桥的承载力产生较大的影响,笔

者基于多级收敛准则对超限车辆作用下的新型超宽钢桥第二类稳定性进行研究.

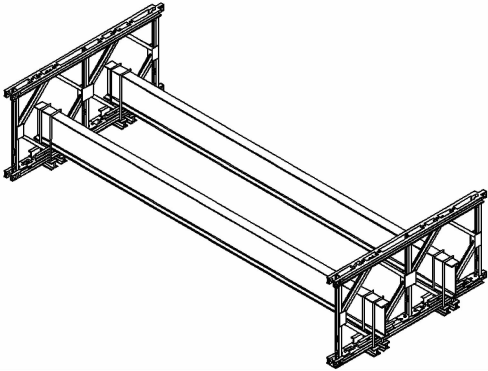


图 1 超宽钢桥结构图

Fig.1 Structure diagram of super wide steel bridge

1 第二类非线性稳定

1.1 计算模型

采用大型有限元分析软件 ANSYS 分析超宽钢桥的第二类稳定性问题,空间模型以双层 3 排加强型“321”装配式公路钢桥为依据,桥梁跨径为 40 m,整体模型如图 2 所示. 模型中,上下弦杆等都采用 beam188 单元模拟,采用 mpc184 单元模拟刚臂. beam188 梁单元能够准确地模拟截面的形状,而且支持几何非线性和材料非线性的计

收稿日期:2015-02-23;修订日期:2015-04-22

基金项目:河南省交通科技重点资助项目(2012D19)

作者简介:李斐然(1983-),男,河南禹州人,河南省交通规划勘察设计院有限责任公司高级工程师,博士,研究方向:桥梁新结构设计,E-mail:lifairan@sina.com.

算,能够满足本结构的计算要求. 全桥共有 7 762 个单元,其中 beam188 梁单元 7 762 个,mpc184 单元 12 个. 荷载主要考虑了结构自重和大件运输的超重超宽车辆荷载.

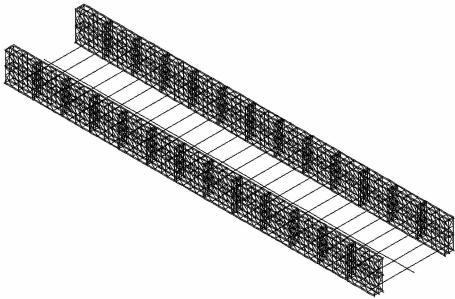


图 2 超宽钢桥有限元模型
Fig.2 FE model of super wide steel bridge

1.2 材料非线性

考虑材料非线性的有限元分析在有些方面不同于弹性有限元分析,对于装配式公路钢桥,各构件均为钢结构,材料非线性特性较为简单,但部分构件失效后结构的变形状况较为复杂.

关于第二类稳定性^[9]分析,需考虑材料的非线性,因为钢材具有理想的弹塑性性能,计算模型中对于桁架按照屈服应力为 345 MPa 的双线性本构关系进行计算,表达式为

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & |\varepsilon| \leq f_y/E; \\ f_y, & |\varepsilon| > f_y/E. \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_y 为材料屈服强度; E 为弹性模量; ε 为应变; σ 为应力.

1.3 多级收敛准则

材料非线性分析的收敛准则是确定第二类稳定系数的依据,但目前对收敛准则的制订因定义不同而差别较大,实际上,无论何种形式定义的单一模式收敛准则均不能充分体现桥梁的稳定水平,合理的收敛准则一方面要保持与桥梁实际情况的一致性,另一方面要充分利用材料的塑性性能. 多级收敛准则是一种更为全面的方法,既能保持非线性稳定系数的多元性,又便于实际应用和理解,具体如下.

准则 I :拉压应力小于设计允许值. 此准则主要针对拉压性能均较好的材料,如钢材等,当材料的受力满足此准则时,结构处于良好的受力状态,与现行公路桥梁规范中对钢结构正常使用极限状态的规定一致,此稳定系数属于在桥梁结构设计要求范围内的承载力富余.

准则 II :材料应变达到屈服极限值. 当不满足此准则时材料会发生不可逆转的损伤,即使卸载

也会产生永久变形,结构整体的受力特性发生变化,该准则在实桥计算中由于定义明确,因此具有良好的可操作性.

准则 III :总刚度矩阵不再保持正定或求解发散. 本准则从目前有限元程序的非线性求解能力出发,在考虑非线性效应的稳定性分析中,结构整体刚度矩阵不正定则有限元求解失败,求解发散则得不到稳定解,此时可将前一荷载步收敛时的荷载系数作为非线性稳定系数.

三级收敛准则可整理成如下的数学表达式:

$$\begin{cases} \sigma_e/[\sigma] \leq 1 \ \& \ \sigma > 0 \text{ (准则 I)}; \\ W_{ik}/[W] \leq 1 \ \& \ \varepsilon \leq [\varepsilon_y] \text{ (准则 II)}; \\ |K_T| \leq 0 \text{ (准则 III)}. \end{cases} \quad (2)$$

多级收敛准则分别从结构的局部特征和求解性能两方面制定,前两个准则考虑材料的塑性发展过程,以弹性边界、屈服边界定义材料非线性分析的稳定系数,既体现了对桥梁规范的继承,又有着明确的意义;最后一个准则从结构的整体求解进行考虑,以非线性程序发散定义稳定系数.

2 超宽钢桥第二类稳定分析结果

2.1 第二类稳定分析结果

根据计算模型,荷载逐步施加,直至结构进入相应的极限状态. 对于准则 I ,跨中位置上弦杆与下弦杆的应力最大,荷载系数为 0. 654 时,上下弦杆达到了允许应力 200 MPa,但远小于 345 MPa 的屈服应力. 对于准则 II ,当荷载系数增大到 1. 129 倍时,跨中位置上弦杆与下弦杆普遍达到了屈服应力 345 MPa. 进一步加大荷载时,上下弦杆位置的塑性区域迅速增大,跨中位移发生突变,当加大到 1. 167 倍时满足了准则 III ,结构变为几何可变结构,失去承载能力,图 3 是跨中竖向位置的荷载位移曲线.

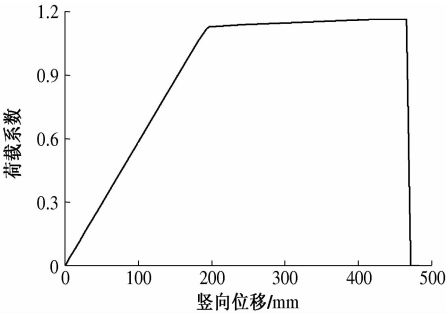


图 3 跨中位置荷载位移曲线
Fig.3 Load-displacement curve of middle span

因此,对于准则 I 稳定系数为 0. 654,不稳定

系数大于 1 的要求,对于准则 II 稳定系数为 1.129,对于准则 III 稳定系数为 1.167,虽然稳定系数大于 1,但安全富余度较小.

2.2 增加跨中支点后的第二类稳定分析结果

在跨中增加支点可以减小超宽钢桥的计算跨径,理论上可成倍提高装配式公路钢桥的承载力,下面在跨中位置的加强竖杆处和非加强竖杆处分别增加支点,研究其第二类稳定性.

2.2.1 增加一个支点(加强位置)

在跨中支撑杆位置增加一个中支点后的第二类稳定性分析计算结果如图 4 和图 5 所示.其中,图 4 为跨中及中支点位置的荷载位移曲线图,图 5 为分别提取中支点位置的斜腹板、竖杆的轴向应力与荷载系数的对应关系图.根据这两个图形可以看到,在支撑杆位置增加一个支点对于准则 I 稳定系数为 1.33,对于准则 II 稳定系数为 1.96,对于准则 III 稳定系数为 2.65,即在跨中增加一个支点后,结构各准则下的稳定系数均得到了大幅度提高.

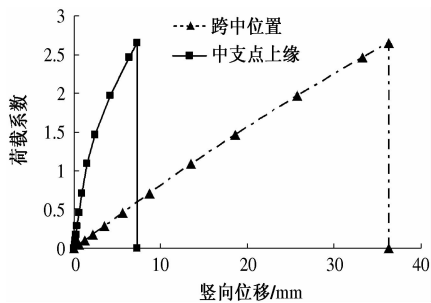


图 4 跨中位置及中支点位置的荷载位移曲线
Fig. 4 Load-displacement curve of middle span and support

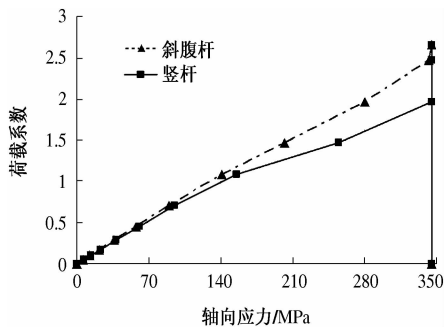


图 5 斜腹杆轴向应力与荷载系数的关系曲线
Fig. 5 Axial stress-load curve of bevel shaft

支点位置相关全部杆件的 Mises 应力图如图 6 所示,图中可以看到竖杆与斜腹杆均在最后发生了明显的屈服,屈服应力达到了 345 MPa 的极限,结合图 5 可以看到竖杆先发生了屈曲,之后斜腹杆进入屈曲状态,最后因支点位置杆件失效,结

构发生了整体屈曲.

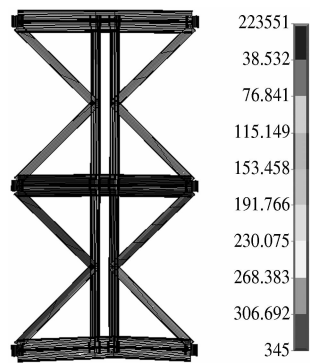


图 6 支点位置单元的 Mises 应力图 (MPa)
Fig. 6 Mises stress of support element (MPa)

2.2.2 增加一个支点(非加强位置)

在非支撑杆位置增加一个跨中支点后的第二类稳定性的分析计算结果如图 7 所示,对于准则 I 稳定系数为 0.264,对于准则 II 稳定系数为 0.456,对于准则 III 稳定系数为 2.534.虽然准则 III 下的稳定系数得到了提高,但准则 I 与准则 II 下的稳定系数反而出现了下降,从图 7 中可以看到跨中位置和中支点上缘的荷载位移曲线上均未表现出明显的屈服点.

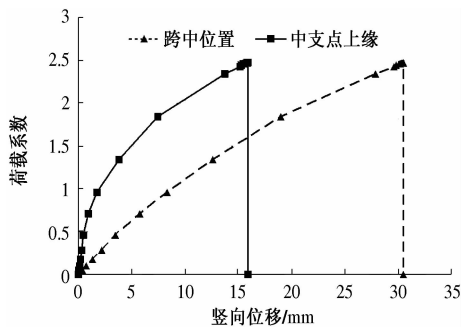


图 7 跨中位置及中支点位置的荷载位移曲线
Fig. 7 Load-displacement curve of middle span and support

为了更进一步分析增加支点后结构的屈服过程,分别提取中支点位置的斜腹板、竖杆的轴向应力与荷载系数的对应关系,得到的分析结果如图 8 所示.从该图中可以看出,竖杆在荷载较小时就发生了屈服,符合荷载位移曲线图中各类稳定系数的计算特征,斜腹板在竖杆屈服后受力状态发生大幅度改变,由受拉杆件变为受压杆件.对图 8 各杆件的受力状态情况进行分析,结构的破坏过程可描述为:中支点竖杆先发生屈服,中支点上弦杆与斜腹杆接着相继发生屈服,在中支点上弦杆位置形成塑性铰,由于结构属于一次超静定结构

暂未丧失承载力,继续加载结构变为可变结构完全失去承载力。

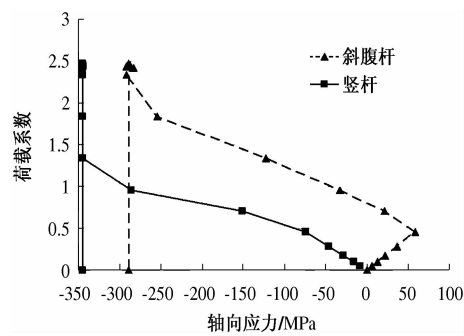


图 8 斜腹杆轴向应力与荷载系数的关系曲线
Fig.8 Axial stress-load curve of bevel shaft

中支点位置全部杆件的应力图如图 9 所示。从图 9 中可以看到下层的斜腹杆与竖杆均达到了临界屈服应力状态,中支点位置下弦杆部分位置则达到屈服应力状态,其中下弦杆下翼缘处于受压状态,即下弦杆部分位置发生了屈服,但上弦杆尚处于弹性受力状态,未发生屈服,表明上弦杆受力状况较好。

综上所述,中支点若放在未加强的竖杆处,将导致结构很快出现了屈服,虽然最大稳定系数得到了提高,但竖杆与斜腹板均发生了屈服,在实际中应避免在非加强竖杆位置增设支点。

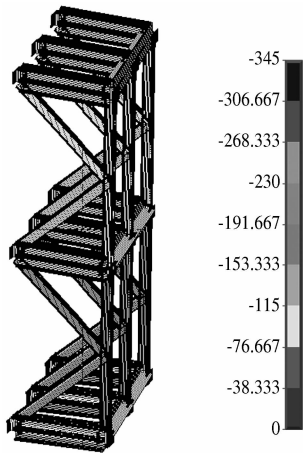


图 9 准则 II 时支点位置结构的应力图
Fig.9 Structure stress by criterion II

2.3 支点数量对第二类稳定性的影响情况

按照跨中无支点、一个支点、两个支点和 3 个支点下的支撑(加强位置)状况,对比 4 种支撑条件下的稳定系数,得到支点数量与第二类稳定系数的关系图如图 10 所示,该图表明,在各级准则下第二类稳定系数均随跨中支点数量的增加而提高,对于准则 I 与准则 II 在 3 个支点数量以内时几乎呈线性

增加,但对于准则 III 在跨中支点增加到两个以上后稳定系数基本不变,也就是说在支点数量增加到两个以上后第二类稳定系数不再提高。

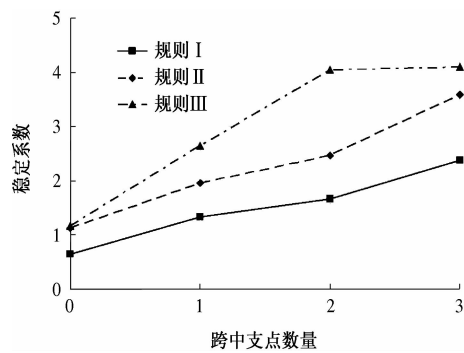


图 10 跨中支点数量与第二类稳定系数的关系图
Fig.10 Curve of middle supports number and second stability factors

3 结论

(1)不设置跨中支点时,超宽钢桥的第二类稳定系数偏小,结构偏于不安全。

(2)在跨中增加一个支点后,结构各准则下的稳定系数均得到了大幅度提高;但在非支撑杆位置增加一个跨中支点,会导致竖杆与斜腹板很快发生屈服,在实际中应避免在非加强竖杆位置增设支点。

(3)在跨中支撑杆位置增加两个跨间支点时结构各准则下的稳定系数得到了进一步大幅度提高;在增加 3 个支点时,准则 I 与准则 II 下的稳定系数得到了提高,但准则 III 下的稳定系数提高幅度不大。

(4)对比 4 种支撑条件下的稳定系数,对于准则 I 与准则 II 在 3 个支点数量以内时几乎呈线性增加,但对于准则 III 在跨中支点增加到两个以上后基本不变。

参考文献:

[1] 苏善根,喻忠权,郝海龙. 装配式公路钢桥的演变[J]. 公路,2010(7): 39-42.

[2] 严波,周余辉,宋殿义. 装配式公路钢桥临时加固梁桥实例分析[J]. 公路,2009(2): 22-24.

[3] 徐关尧,孙宏才,田平. “321”装配式公路钢桥安全性评价[J]. 国防交通工程与技术,2009(2): 9-12.

[4] 欧阳初,马广顺,徐关尧,等. 装配式钢桥健康监测及安全评价系统的设计[J]. 钢结构,2010,25(12): 45-46,62.