

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2020.12.049

横向联结系对中小跨径钢板组合梁桥静力性能影响研究

沈 翀¹, 季云峰¹, 王全录², 林立宏³

(1.同济大学桥梁工程系, 上海市 200092; 2. 内蒙古交通设计研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010;

3. 台州市交通投资集团有限公司, 浙江 台州 318001)

摘 要: 结合常用中小跨径钢板组合梁的构造, 利用有限元软件计算分析横向联结系的数量、截面形式对钢板组合梁桥受力性能的影响。计算结果表明: 对于跨中截面, 跨间小横梁数量越多, 则混凝土板顶面纵桥向压应力越大、底面纵桥向压应力越小、混凝土板顶面横桥向拉应力越小、底面横桥向拉应力越大; 而跨间小横梁数量对支点处混凝土板和所有钢梁的受力性能几乎无影响。跨间布置奇数道小横梁比布置偶数道小横梁对结构受力更有利。建议中小跨径钢板组合梁跨间布置不少于3道小横梁; 小横梁数量对主梁挠度影响较小, 其影响程度远远小于混凝土板厚度改变对主梁挠度的影响。

关键词: 横向联结系; 钢板组合梁; 静力性能; 有限元

中图分类号: U44

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2020)12-0180-06

0 引 言

钢板组合梁是最常用的组合结构桥梁形式, 由混凝土桥面板、工字形钢主梁以及将二者连接为一体的剪力连接件组成; 多组钢板组合梁通过横向联结系连接成一体后形成多主梁钢板组合梁桥^[1-2]。钢板组合梁的横向联结系一般由纵桥向端部、中支点大横梁及跨内小横梁组成, 其不仅可在施工过程中避免钢主梁失稳, 并且可以参与多主梁之间的横向传力^[1, 3]。《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG/T D64—2015)明确要求钢板组合梁的横向联结系间距不宜大于受压翼缘宽度的30倍。然而在实际钢板组合梁设计中, 往往按照横向分布系数采用单梁模型进行计算, 并未对横向联结系进行专门计算, 仅凭经验或参考以往的设计资料逐级增加安全系数, 导致横向联结系设置不合理。鉴于此, 本文针对日前工程上应用最为广泛的 3×30 m、 3×35 m、 3×40 m的钢板组合连续梁桥, 通过建立空间板壳-实体有限元模型, 研究横向联结系对钢板组合连续梁桥静力性能的影响, 旨在为该类型桥梁的设计及推广应用提供参考。

收稿日期: 2020-08-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978501); 浙江省公路管理局科研项目(ZJXT-SGL-201803); 台州市路泽太高架快速路有限公司研究项目

作者简介: 沈翀(1996—), 男, 硕士在读, 主要从事钢-混凝土组合结构桥梁研究工作。

1 钢板组合梁桥结构

本文以跨径布置分别为 3×30 m、 3×35 m和 3×40 m 4主梁形式的连续钢板组合梁为例, 研究横向联结系对结构静力性能的影响。

3×30 m钢板组合梁单幅桥宽度为12.75 m, 上部结构高度为1.75 m, 断面布置如图1所示。其钢主梁高1.4 m, 上翼缘宽度为600 mm、厚度为20~32 mm, 下翼缘宽度为800 mm、厚度为24~40 mm, 腹板厚度为16~20 mm。钢主梁间混凝土板厚250 mm, 悬臂端混凝土板厚180 mm, 根部混凝土板厚350 mm。混凝土桥面板与钢梁通过剪力钉连接。钢主梁间采用横向联结系, 跨间设置小横梁, 小横梁顶板与底板板宽度为400 mm, 厚度为18 mm; 腹板高度为400 mm, 厚度为16 mm; 支点处设置实腹式大横梁, 高度为600 mm。钢主梁与横梁间采用焊接连接。

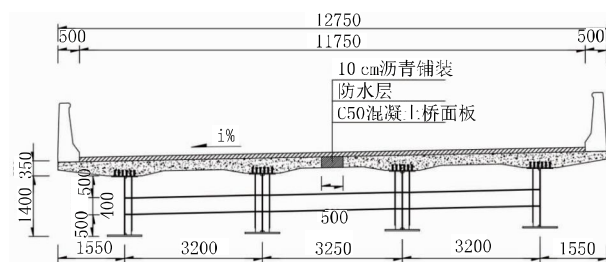


图1 跨间小横梁断面布置(单位:mm)

3×35 m 3跨连续钢板组合梁上部结构高度为1.95 m, 钢主梁高度为1.6 m, 跨间小横梁高度为450 mm, 支点处大横梁高度为700 mm; 钢主梁上

翼缘板、腹板与下翼缘板厚度略大于 3×30 m 钢板组合梁,其余截面尺寸、构件连接方式与其一致。

3×40 m 连续钢板组合梁上部结构高度 2.15 m,钢主梁高 1.8 m,跨间小横梁高度为 500 mm,支点处大横梁高度为 800 mm;钢主梁上翼缘板、腹板与下翼缘板厚度略大于 3×35 m 钢板组合梁,其余截面尺寸、构件连接方式与其一致。

这 3 种跨度的 3 跨连续钢板组合梁桥的施工工序为:(1)架设钢梁;(2)将正弯矩区预制混凝土板吊装就位并浇筑湿接缝处混凝土;(3)待正弯矩区湿接缝混凝土达到设计龄期后吊装负弯矩区预制混凝土板并浇筑湿接缝处混凝土;(4)施工防撞护栏和二期铺装。

2 有限元计算分析

采用 Ansys 有限元计算软件,对 30 m、35 m 和 40 m 3 跨连续钢板组合梁进行静力计算分析。以 shell181 板壳单元模拟钢结构部分、solid65 实体单元模拟混凝土板建立连续组合梁有限元模型,共 228 480 个节点,172 881 个单元。连续组合梁 Ansys 有限元模型如图 2 所示。

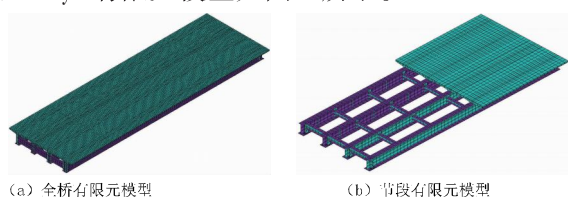


图 2 连续组合梁 Ansys 有限元模型示意图

建模时不考虑桥面横坡及纵坡,不考虑钢筋的作用,不考虑组合梁混凝土板与钢顶板之间的滑移,即认为钢和混凝土完全连接,钢-混之间的连接通过共节点实现。荷载考虑恒载与活载的标准组合,恒载分为混凝土板和钢梁自重、栏杆和桥面铺装,模型中通过在不同区域施加不同集度的面荷载实现;活载考虑 3 车道横向偏载布置,并根据横向布置方式给主梁编号①~④(见图 3);纵向以 3 跨连续梁边跨跨中、中跨跨中和中支点处截面为研究关注截面,基于各截面的最不利弯矩影响线进行布载。施工过程基于 Ansys 生死单元功能,按照钢梁一次落架、施工正弯矩区混凝土、施工负弯矩区混凝土及施加二期恒载和活载的方式模拟施工步骤。

3 横向联结系数量对各构件受力性能的影响

为探究 30 m、35 m 和 40 m 跨径 3 跨钢板组

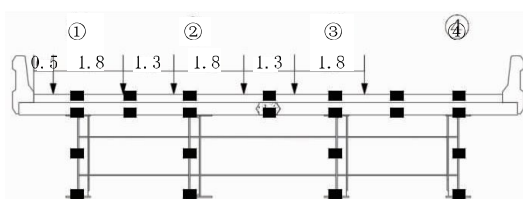


图 3 活载横向布置及主梁编号示意图(单位:m)

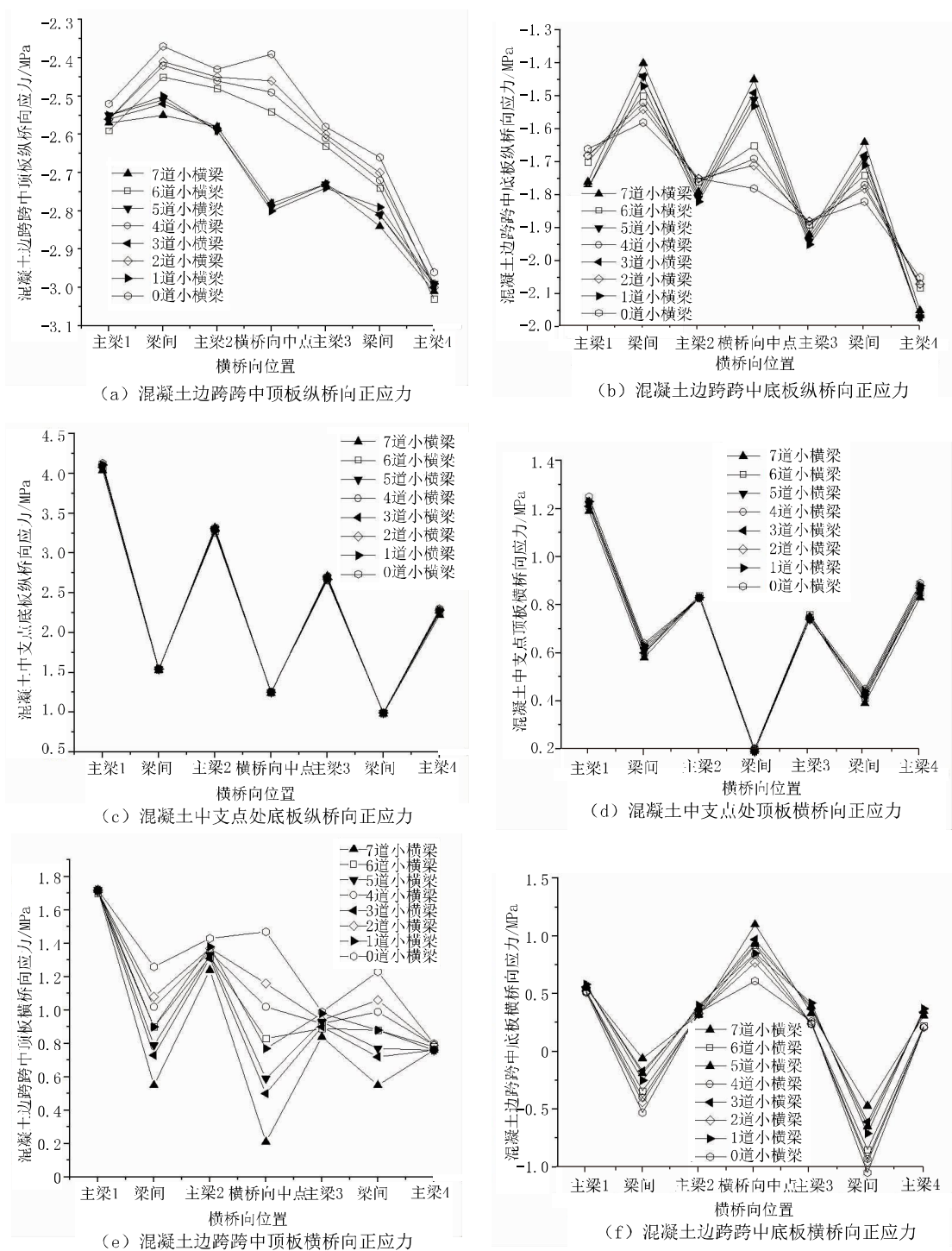
合梁横向联结系数数量变化对主梁受力性能的影响,保持混凝土桥面板、钢主梁各板件及加劲肋、结构端部大横梁和中支点大横梁的尺寸、位置不变,仅在每一跨等间距设置若干道尺寸完全相同的小横梁,其中 30 m 与 35 m 跨径的连续梁每跨设置 0~6 道小横梁;40 m 跨径的连续梁每跨设置 0~7 道小横梁。荷载工况采用恒载和活载标准组合,计算结果根据活载横桥向布置位置,混凝土桥面板及钢主梁应力提取如图 3 所示,其中混凝土部分包括主梁和主梁中间位置混凝土板顶板与底板的横桥向、纵桥向正应力,钢结构部分包括钢主梁顶板、腹板和底板处的 Mises 应力。

3×40 m 连续钢板组合梁小横梁数量对混凝土桥面板受力性能的影响见图 4。

由图 4(a)可见,不论是主梁位置还是梁间位置,顶板正应力由主梁①向主梁④方向逐渐减少,这是由偏载荷载的作用引起;在横桥向跨中位置处,小横梁数量变化对桥面板纵向正应力的影响明显大于横桥向两边;当小横梁数量为奇数即跨中位置处有小横梁时,混凝土顶面纵桥向压应力较大,而当小横梁数量为偶数即跨中位置处无小横梁时,混凝土顶面纵桥向压应力较小;每跨小横梁数量越少,混凝土顶面纵桥向压应力越小。当小横梁数量在 0~7 之间变化时,边跨跨中横桥向中点混凝土板顶面纵桥向正应力值在 $-2.35 \sim -2.80$ MPa 之间。

由图 4(b)可见,不论是主梁位置还是梁间位置,底板正应力由主梁①向主梁④方向逐渐减少。当跨中位置处有小横梁且小横梁个数越多时,混凝土底面纵桥向压应力越小;小横梁数量的变化对主梁之间的混凝土底板纵桥向正应力影响明显比主梁位置处大,主要原因是在该位置上混凝土底板与钢梁上翼缘连接为一体,钢梁对混凝土有约束作用。当小横梁数量在 0~7 之间变化时,边跨跨中横桥向中点混凝土板底面纵桥向正应力值在 $-1.43 \sim -1.78$ MPa 之间。

由图 4(c)和图 4(d)可见,小横梁数量在 0~7 之间变化时,中支点处混凝土板底面纵桥向正应力值在 0.8~4.2 MPa 之间,混凝土板顶面横桥向正应力值在 0.2~1.3 MPa 之间,但小横梁数量对该处

图4 3×40 m 钢板组合梁小横梁数量对混凝土桥面板受力性能的影响

混凝土板纵桥向受力性能影响并不明显,主要是由于该位置存在梁高较高的中支点横梁,而跨间小横梁距离该位置较远。

由图 4(e)和图 4(f)可见,小横梁数量变化对主梁之间混凝土顶板和底板的受力影响大于主梁位置处的混凝土;随着小横梁数量的增加,主梁间混凝土的应力水平降低,当小横梁数量在 0~7 之间变化时,边跨跨中横桥向中点混凝土板顶面横

桥向正应力值在 0.17~1.48 MPa 之间,当小横梁设置成奇数道时,横桥向应力减少的幅度要比设置成偶数道时更为明显。

小横梁数量对中跨跨中混凝土板受力性能的影响与边跨跨中相似。

以 3×40 m 钢板组合梁为例,钢梁关键截面部分板件 Mises 应力分布见图 5。由图 5(a)可见:钢梁①向钢梁④过渡时,钢梁应力逐渐减小,这主

要是施加的偏载作用所致；随着小横梁数量的增加,呈现出钢梁顶板的应力大部分在增加的规律,但是应力变化幅度较小,相对于钢材的设计强度基本可以忽略。由图 5(b)可见:主梁腹板的应力受小横梁位置的影响较大,当小横梁数量为偶数时,跨中腹板的应力变化明显大于小横梁数量为奇数时,但是二者的应力相差不超过 2 MPa,相对于钢材的设计强度而言,该变化基本可以忽略。由图 5(c)可见:主梁底板的应力受小横梁位置的影响表现出不同的规律,当小横梁数量为偶数时,跨中主梁②和主梁③的受力要小于主梁①和主梁④;当小横梁数量为奇数时,主梁②和主梁③的受力要大于主梁①和主梁④;小横梁数量变化时,各底板应力相差不超过 4 MPa。由图 5(d)可见,中支点处钢梁底板的应力受跨间小横梁数量的影响很小。

综上所述,由小横梁数量变化引起的钢梁应力变化幅值很小,在设计计算时可以忽略。

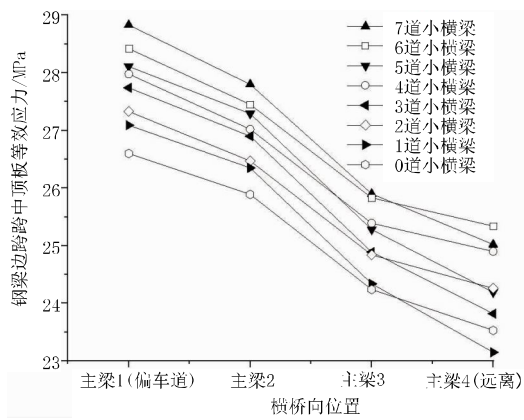
表 1 给出了 2 种极端情况下小横梁设置时的支座竖向反力。由表 1 可知,小横梁设置与否对结构支座反力影响很小。

跨径 30 m 与 35 m 的 3 跨连续钢板组合梁计

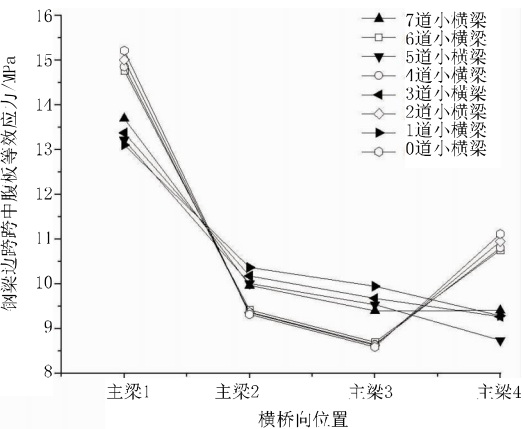
算结果与上述跨径 40 m 组合梁一致。

4 横向联结系数对各主梁挠度的影响

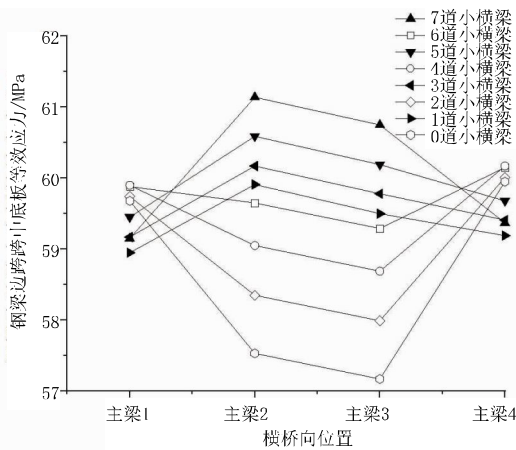
将单车道荷载横向分别布置于图 3 所示主梁①或主梁②处,车道宽度 1.8 m,纵向边跨布置均布荷载及跨中处布置集中荷载,计算各钢主梁挠度,见图 6(a)、图 6(b)。由此可以看出,设置了跨间小横梁的主梁挠度明显小于不设置跨间小横梁的情况,主梁①与主梁②挠度分别减小了 0.7 mm 和 0.9 mm。这里将设置与不设置小横梁时的梁体挠度差值与不设置小横梁时的梁体挠度之比值定义为挠度变化程度。如不设置跨间小横梁与跨间设置 7 道小横梁时,横向荷载作用于主梁①时的挠度减少了 4.0%,横向荷载作用于主梁②时的挠度减少了 8.0%。如图 6(c)所示,当小横梁数量为偶数时,横向荷载作用于主梁①时的挠度减少了 0.9%~2.0%,且挠度变化程度随小横梁数量增加而增大;小横梁数量为奇数即跨中位置处有小横梁时,横向荷载作用于主梁①时的挠度减少了 2.3%~4.0%,且挠度变化程度总体上随小横梁数量增加而增大,其中小横梁个数为 3 和 5 时的挠度变化



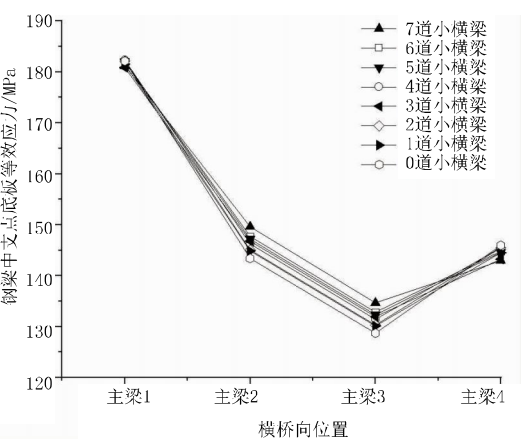
(a) 钢梁边跨跨中顶板Mises应力



(b) 钢梁边跨跨中腹板Mises应力



(c) 钢梁边跨跨中底板Mises应力



(d) 钢梁中支点处底板Mises应力

图 5 3×40 m 钢板组合梁小横梁数量对钢主梁受力性能的影响

表1 3×40 m 钢板组合梁小横梁数量对支座反力的影响

小横梁数量	端部支座反力 /kN				中支点支座反力 /kN			
	梁①	梁②	梁③	梁④	梁①	梁②	梁③	梁④
0	1 131	937	894	847	2 622	2 211	2 065	2 102
7	1 140	939	896	850	2 670	2 225	2 068	2 105

程度接近。如图6(d)所示,当横向荷载作用于主梁②时,小横梁数量为偶数时的挠度减小程度为2.0%~4.1%,小横梁数量为奇数时挠度减小程度为5.0%~8.0%,挠度变化程度随小横梁数量的变化规律与图6(c)一致。因此,建议小横梁在跨间选择奇数道布置,每跨布置不少于3道。

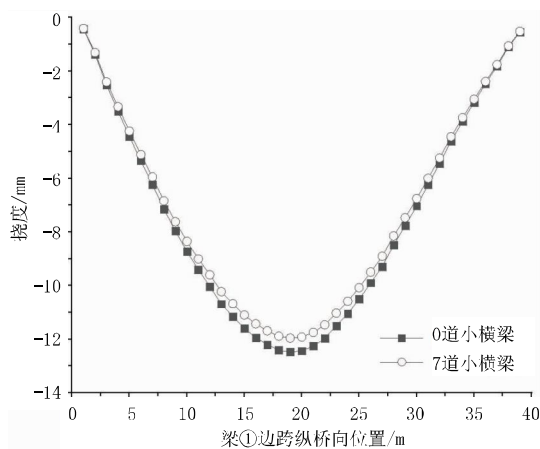
现以3×40 m连续钢板组合梁为例,将单车道荷载横向布置于梁②,计算各钢主梁挠度,并以梁②的挠度为基准,通过梁①、梁④的挠度与梁②挠度的比值来定义各主梁的挠度变化系数。当某点挠度变化系数大于1时,说明梁①、梁④在该处的挠度大于梁②;挠度变化系数越接近1,说明挠度变化程度越小。

挠度变化系数计算结果如图7所示。由图7

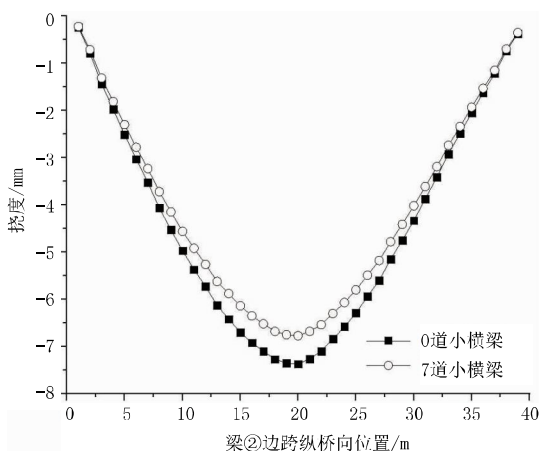
可见,对于梁①,设置7道小横梁时其边跨挠度变化系数为1.05~1.12,无小横梁时其挠度变化系数为0.90~0.95;设置小横梁时主梁①的挠度大于主梁②,不设置小横梁时主梁①的挠度小于主梁②,这说明设置小横梁可以有效地在主梁之间传递荷载;对于梁④,设置7道小横梁时边跨挠度变化系数为0.45~0.68,无小横梁时挠度变化系数为0.25~0.60,说明横向联结系增强了主梁间的横向联系,提高了结构整体刚度,同时改善了偏载下的荷载横向分布。

5 横向联结系刚度与混凝土桥面板刚度的对比

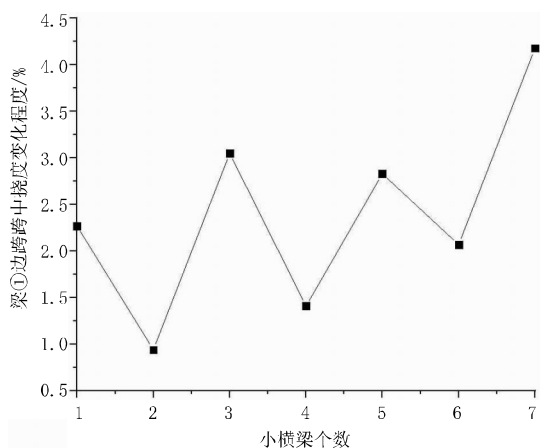
为探究横向联结系截面形式对桥梁受力性能的影响,以3×40 m连续钢板组合梁为例,在上述计算基础上假定每跨小横梁数量为7道,将小横梁截面高度从原设计的500 mm增至与端横梁同高800 mm,计算单车道活载作用于梁①时各主梁跨中位置处的挠度,计算结果如图8(a)所示。由图(a)可以看出,小横梁高度为500 mm与800 mm时,4根主梁边跨跨中挠度基本相同,所以小横梁



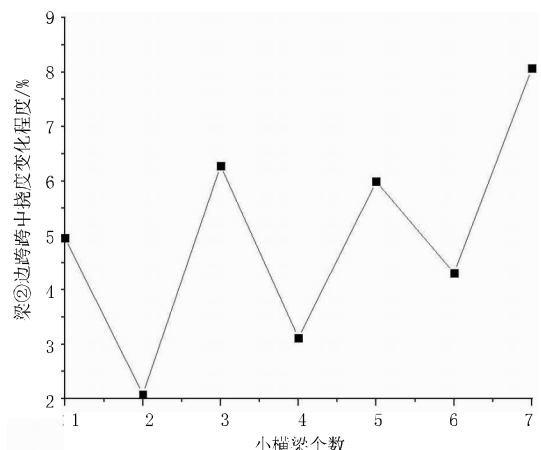
(a) 横向荷载作用于主梁①时梁①挠度对比



(b) 横向荷载作用于主梁②时梁②挠度对比



(c) 横向荷载作用于主梁①时梁①挠度变化程度



(d) 横向荷载作用于主梁②时梁②挠度变化程度

图6 3×40 m 钢板组合梁小横梁数量对钢主梁挠度的影响

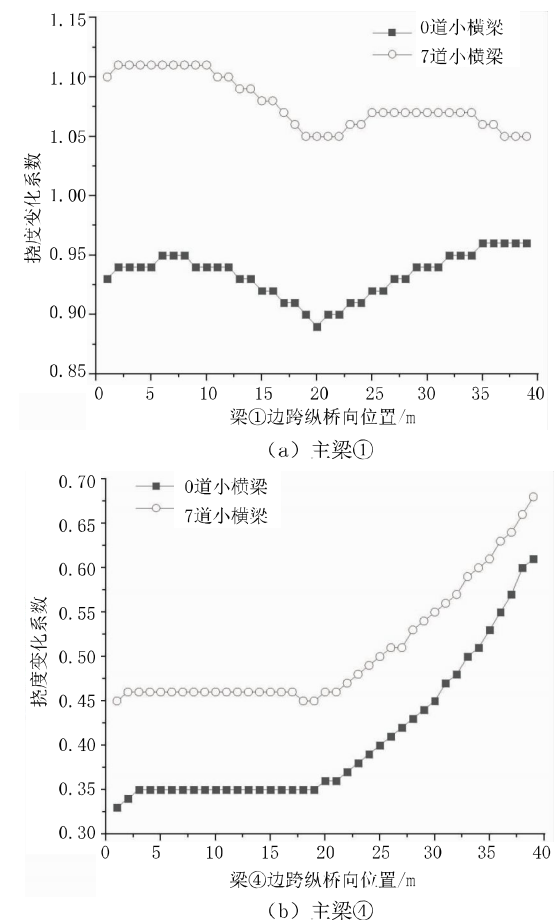


图 7 3×40 m 钢板组合梁小横梁数量对不同主梁挠度的影响
截面高度对结构受力性能影响很小。

现假设小横梁的尺寸固定(高度 500 mm),改变每跨小横梁的个数,分析混凝土板厚度变化下小横梁参与结构受力的敏感性。依然以 3×40 m 连续钢板组合梁为例,混凝土板在原设计基础上变板厚设置为整体高度减少 50 mm 与增加 50 mm,单车道活载加载在梁①上。不同小横梁数量下混凝土桥面板厚度变化时的梁体挠度如图 8 (b)所示。由图 8(b)可以看出,混凝土厚度变化对主梁挠度的影响比较明显,当混凝土板厚度增加后梁体挠度明显减少,而当混凝土桥面板厚度减少时梁体挠度明显增加。经计算得到:小横梁数量为 7 个,混凝土桥面板厚度由原设计 250 mm(主梁之间位置处)减少到 200 mm 时,梁①边跨跨中挠度由 12.0 mm 增加到 13.2 mm,增幅为 10%;混凝土桥面板厚度由原设计 250 mm 增加到 300 mm 时,梁①边跨跨中挠度由 12.0 mm 减少到 10.9 mm,减幅为 9.2%。

上述计算分析表明,钢板组合梁中横向联结系对梁体变形的影响相对于混凝土桥面板要小得多,前者的影响基本可以忽略不计,主要原因是横向联结系的刚度相对于混凝土桥面板的刚度要小得多。

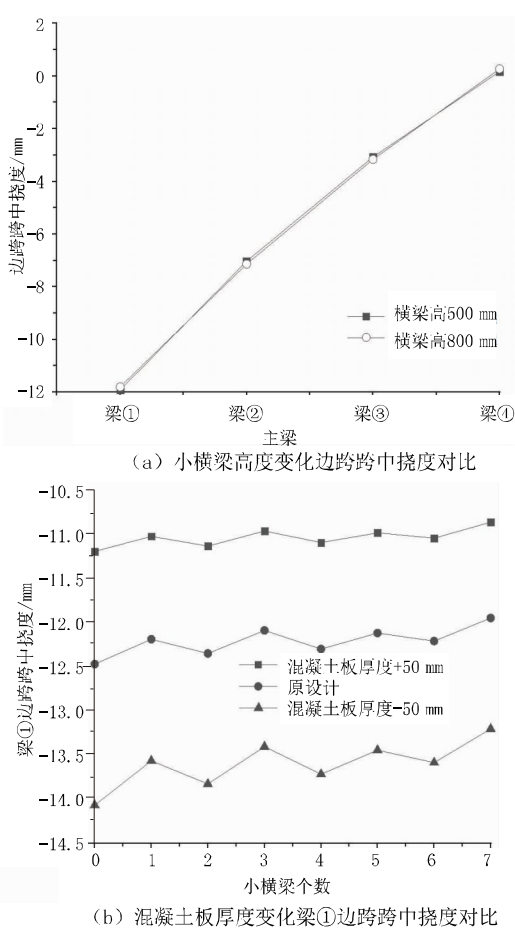


图 8 结构横向刚度变化对结构受力性能的影响

6 结 语

- (1)跨间布置横向联结系对组合梁的混凝土桥面板和钢梁的受力会产生一定影响。结合钢材和混凝土材料的设计强度,设置跨间小横梁对混凝土受力影响较大,但对钢结构受力的影响可以忽略。
- (2)跨间设置奇数横梁或偶数横梁对组合梁受力的影响不同。总体上,在跨间设置奇数横梁对桥面板受力更为有利,并推荐钢板组合梁跨间布置不少于 3 道小横梁。
- (3)跨间设置横梁有助于改善主梁之间的传力,但是横梁刚度远远小于混凝土桥面板的刚度,在钢板组合梁中通过改变横梁刚度和数量来改善主梁之间的传力效果远不及改变混凝土桥面板厚度产生的效果。

参考文献:

[1] 周青,傅晨曦,韩大章.中小跨径钢与组合结构桥梁选型研究[J].城市道桥与防洪,2020(5): 16-17,108-110.

[2] 苏庆田,胡一鸣,徐晨,等.整体预制钢-混凝土组合梁桥合理结构研究[J].建筑钢结构进展,2020,22(2):93-100.

[3] 张钱贵,张善勇.钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展[J].科技视界,2015,35:296.