

钢桁梁桥新型波形钢—RPC 组合桥面板 非线性有限元分析

石柱¹, 项超群^{1,2*}, 上官兴^{1,2}, 郭文华³

(1.湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙 410004; 2.湖南联智桥隧技术有限公司; 3.中南大学 土木工程学院)

摘要:提出了一种能适用于大跨径钢桁梁桥的新型波形钢—RPC 组合桥面板,基于 Ansys 14.0 建立了有限元模型,对 Ansys 模型参数、桥面板的几何和材料参数进行了计算分析。研究表明:跨中荷载大于 820 kN 后 RPC 的材料非线性效应逐渐显现,钢材的材料非线性对组合桥面板承载性能影响尤其明显;Solid65 单元剪力传递系数对组合桥面板承载性能影响很小;计算时应考虑 Solid65 单元形函数附加项的影响;在新型组合桥面板中,波形钢腹板高度和波腹工梁钢底板厚度对结构承载性能影响最大,RPC 具有足够的安全富余量,对组合桥面板承载性能影响比波腹工梁小。

关键词:活性粉末混凝土(RPC);波形钢腹板;组合桥面板;钢混组合结构

钢桁梁以其构件质量轻、运输架设方便、施工周期短和耐久性好等优点,在大跨度桥梁中得到了广泛的应用。钢桁梁桥面系主要有以下两种形式:① 纵向小工字钢上架设混凝土预制板,在工字钢上翼缘焊接栓钉再现浇混凝土湿接缝。该种桥面系恒载大,主缆、主塔和锚碇工程量都会增加。在已经运营的该类桥面系中,混凝土板、工字钢之间易出现裂缝,耐久性难以保证;② 正交异性钢桥面板上沥青混凝土铺装,其质量约为混凝土桥面板的 1/2~1/3,能有效地减少上部恒载,但在运营中,钢桥面系普遍出现了两大顽疾,即正交异性钢桥面板疲劳开裂和沥青混凝土铺装层使用寿命偏短,易出现开裂、车辙、拥包等病害。如中国武汉白沙洲长江大桥,10 年内桥面维修 24 次,广东虎门大桥几乎每年维修一个车道。

波形钢腹板具有抗剪强度高、稳定性好、自重轻、抗震性能好等优良性能,目前的研究应用主要集中在波形钢腹板 PC 组合箱梁中用于取代混凝土腹板。活性粉末混凝土(RPC)具有强度高、韧性大、耐久性好等特点,其优异的力学及物理性能是普通混凝土甚至其他高性能混凝土都无法相比的。该文充分利用波形钢腹板和 RPC 的优势,提出一种能适用于大跨径钢桁梁桥的新型波形钢—RPC 组合桥面板,基于 Ansys 14.0

建立有限元模型,对 Ansys 模型参数、桥面板的几何和材料参数进行研究,旨在为大跨径钢桁梁悬索桥提供一种全新的桥面系方案。

1 波形钢—RPC 组合桥面板结构

波形钢—RPC 组合桥面板利用波形钢腹板、钢顶板、钢底板组成波腹工梁,在钢顶板上焊接横波形钢板,作为 RPC 施工时的底模板,RPC 强度形成后和波腹工梁、横波形钢板组成钢混组合桥面板,几何参数见图 1。波形钢—RPC 组合桥面板在横桥向分为多片,通过先焊接或螺栓连接翼缘板下横波形钢板,然后浇筑湿接缝,进而组成钢混组合截面在横桥向成为整体。

2 波形钢—RPC 组合桥面板有限元模型

2.1 组合桥面板有限元基本参数

波形钢—RPC 组合桥面板有限元模型中,波腹工梁和横波形钢板采用 4 节点有限应变壳单元 Shell181,通过实常数控制壳单元的厚度,波腹工梁有限元模型见图 2。

钢筋活性粉末混凝土采用分离式模型,把钢筋和

收稿日期:2019-08-09(修改稿)

基金项目:湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(编号:201613);2016 年度广东省交通运输厅市场主导性科技计划项目(编号:15)

作者简介:石柱,男,大学本科,高级工程师,E-mail:106398095@qq.com

* 通信作者:项超群,男,博士,高级工程师,E-mail:xiangcq@csu.edu.cn

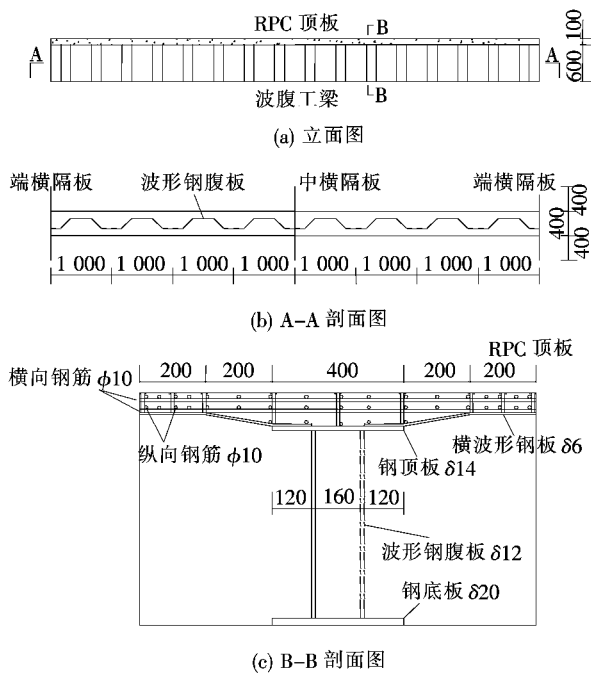


图1 新型波形钢—RPC组合桥面板(单位:mm)

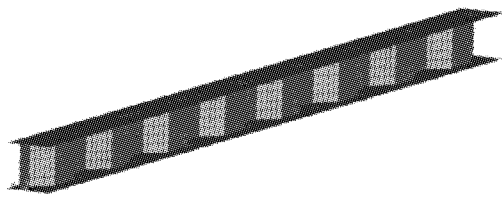


图2 波腹工梁有限元模型

RPC作为不同的单元来处理,不考虑钢筋的滑移,二者之间通过共用节点实现耦合。钢筋采用3D杆单元Link8,屈服强度 $F_y=300\text{ MPa}$,弹性模量 $E_s=2.06\times 10^5\text{ MPa}$,泊松比 $\nu_s=0.3$ 。RPC采用3D混凝土实体单元Solid65,单轴抗压强度 $f_c=102.28\text{ MPa}$,单轴抗拉强度 $f_t=10.19\text{ MPa}$,泊松比 $\nu_s=0.22$,RPC应力应变曲线如图3所示。

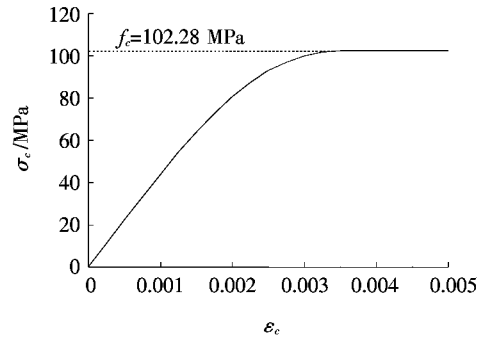


图3 RPC应力—应变曲线

在桥面板两端横隔板下缘施加约束,形成简支体

系。为避免荷载直接施加在RPC上造成应力集中,在跨中RPC顶板上桥面板长度方向40 cm、宽度方向120 cm范围内设置5 cm厚度的钢垫板,钢垫板与RPC桥面板节点通过CP命令耦合自由度,在钢垫板上施加均布面荷载。分析中关闭压碎选项,采用位移收敛准则,收敛条件设为5%。打开自动时间步控制、线性搜索和预测器以加快收敛速度。

该文主要研究波形钢—RPC组合桥面板纵向受力特性,下文中波腹工梁钢底板应力是指跨中位置波腹工梁钢底板的纵桥向应力,顶板RPC应力是指跨中位置RPC顶板上缘的纵桥向应力,顶板钢筋应力是指跨中位置RPC顶板中上层纵桥向钢筋的应力,挠度指跨中截面钢底板下挠值。

2.2 Solid65 单元剪力传递系数选取

在波形钢—RPC组合桥面板跨中施加1 000 kN荷载,研究剪力传递系数与挠度、钢底板应力、RPC应力 and 钢筋应力4个指标的关系。取闭合裂缝的剪力传递系数 $\beta_c=0.95$,张开裂缝的剪力传递系数 $\beta_t=0.1\sim 0.9$,以 $\beta_t=0.1$ 时各指标的结果为基准值,分别得到其他 β_t 各指标结果与基准值的比值,结果如图4(a)。取 $\beta_t=0.5, \beta_c=0.1\sim 1.0$ 进行计算,以 $\beta_c=0.1$ 时各指标的结果为基准值,分别得到其他 β_c 各指标结果与基准值的比值,结果见图4(b)所示。研究表明:裂缝剪力

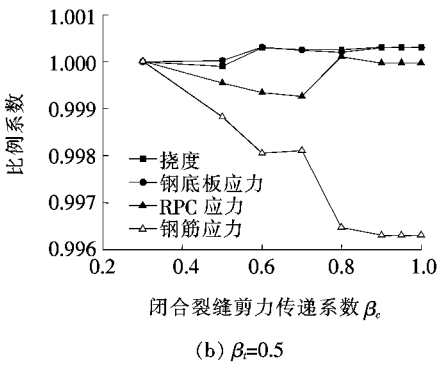
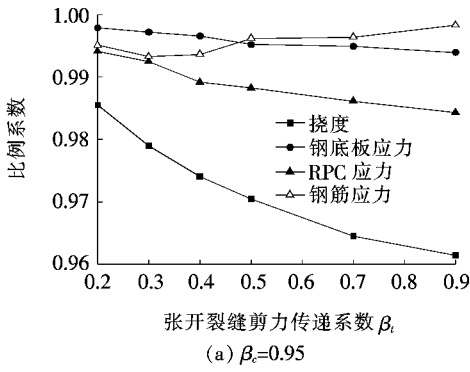


图4 裂缝剪力传递系数—组合桥面板计算结果比例系数曲线

传递系数对各指标结果影响不大,挠度和顶板 RPC 应力随着 β_i 的增大略有减小,顶板钢筋应力随着 β_c 的增大而略有减小,其他指标随剪力传递系数的变化更小。结合相关资料后续研究中取 $\beta_i=0.5, \beta_c=0.95$ 。

2.3 Solid65 单元形函数附加项选取

计算了计入形函数附加项和不计形函数附加项两种情况下组合桥面板跨中在荷载1 000 kN 作用下的挠度、波腹工梁钢底板应力、顶板 RPC 应力和顶板钢

筋应力(图 5)。由图 5 可知:① 对于挠度、顶板 RPC 应力和顶板钢筋应力在线弹性范围内时,形函数附加项影响不大,但结构进入塑性阶段后,形函数附加项的作用逐渐增大,在荷载1 000 kN 时,不计形函数附加项结果偏小 10%~17%;② RPC 实体单元 Solid65 形函数附加项对波腹工梁钢底板应力影响较小,计算范围内两者差值均在 3%以内。

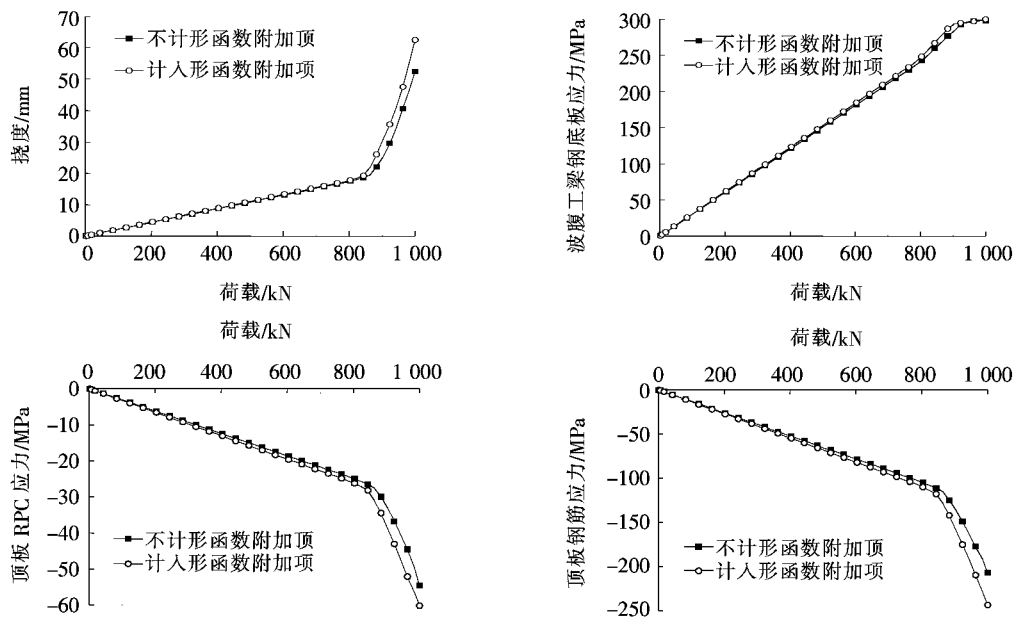


图 5 形函数附加项对组合桥面板计算结果的影响

2.4 材料本构关系

钢材弹塑性模型包括双线性随动强化模型 BKIN 和双线性等向强化模型 BISO,其中 BKIN 模型采用 Mises 屈服准则和随动强化准则,BISO 采用等向强化的 Mises 屈服准则。RPC 采用多线性随动强化模型 MKIN 和多线性等向强化模型 MISO。同时,作为对比计算了钢材和 RPC 均为线弹性材料工况。在波形钢—RPC 组合桥面板跨中施加1 000 kN 荷载,共计算了 9 种工况(表 1)。组合桥面板挠度、波腹工梁钢底板应力 and 顶板 RPC 应力计算结果见图 6。

表 1 RPC 和钢材本构关系组合计算工况

RPC	工况		
	线弹性	BISO	BKIN
线弹性	1	2	3
MISO	4	5	6
MKIN	7	8	9

由图 6 可知:

- (1) 荷载较小时,钢材和 RPC 按线弹性材料计算结果是可靠的;随着荷载的增大,钢材的材料非线性对结果影响逐渐增大,按线弹性材料计算的结果将偏于不安全,RPC 的材料非线性略有影响,其主要原因是模型中 RPC 设计的安全富余量很高。
- (2) 在荷载 800 kN 以前,考虑材料非线性的挠度值同线弹性挠度值基本吻合,但荷载超过 800 kN 后考虑钢材非线性的挠度值迅速增长,在1 000 kN 时挠度值同线弹性结果相差 3 倍,结构表现出明显的塑性变形。
- (3) 在荷载 800 kN 以前,考虑材料非线性的波腹工梁钢底板应力同线弹性结果基本吻合,荷载超过 800 kN 后考虑钢材非线性时拉应力大于线弹性结果,但荷载超过 900 kN 后,非线性的拉应力几乎不再增长,而线弹性拉应力一直增加。
- (4) 在荷载 800 kN 以前,考虑材料非线性的顶板 RPC 应力同线弹性结果基本吻合,之后考虑钢材非线性时压应力迅速增大,在1 000 kN 时 RPC 应力值相

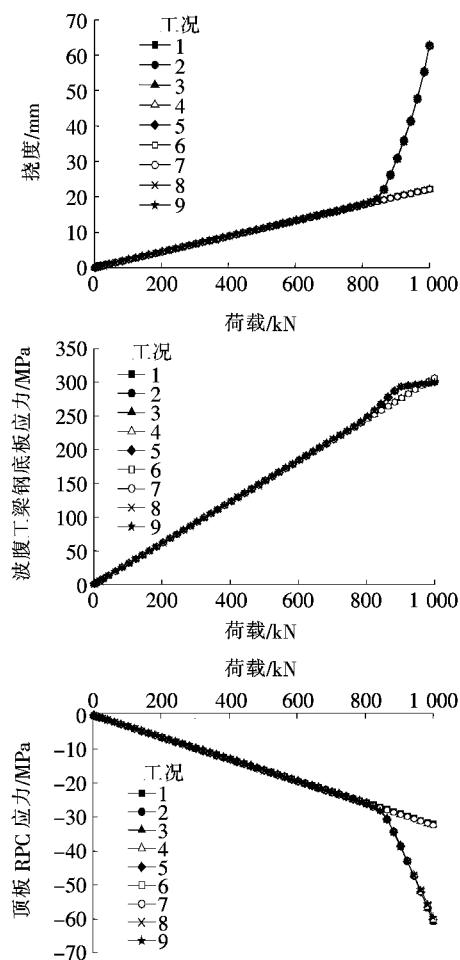
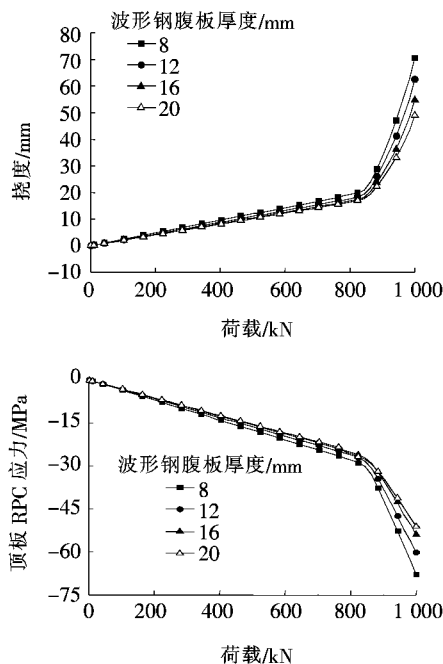


图 6 材料本构关系对组合桥面板的影响



差两倍。钢材为线弹性时,考虑 RPC 的材料非线性时 RPC 应力略大于线弹性应力结果。

在该文后续的研究中 RPC 选用 MISO 模型,钢材选用 BISO 模型。

3 组合桥面板结构参数分析

3.1 波形钢腹板厚度

取波形钢腹板厚度为 8、12、16、20 mm,分别计算组合桥面板跨中截面挠度、波腹工梁钢底板应力、顶板 RPC 应力和顶板钢筋应力(图 7)。由图 7 可知:① 随着波形钢腹板厚度的增加,挠度、顶板 RPC 应力和顶板钢筋应力均得到了明显的减小,以 20 mm 和 8 mm 两个计算工况对比,在荷载 1 000 kN 时分别相差 30%、24%和 22%;② 波形钢腹板厚度对波腹工梁钢底板应力影响很小,在荷载 1 000 kN 时 4 种不同厚度下钢底板应力差值在 3%以内;③ 波形钢腹板厚度对结构进入塑性变形阶段的临界荷载影响很小,4 种不同厚度下均在荷载达到 850 kN 后变形和应力急剧增大。

3.2 波形钢腹板高度

取波腹工梁的波形钢腹板高度为 516、566 和 616 mm,分别计算组合桥面板跨中截面挠度、波腹工梁钢底板应力、顶板 RPC 应力 and 顶板钢筋应力(图 8)。

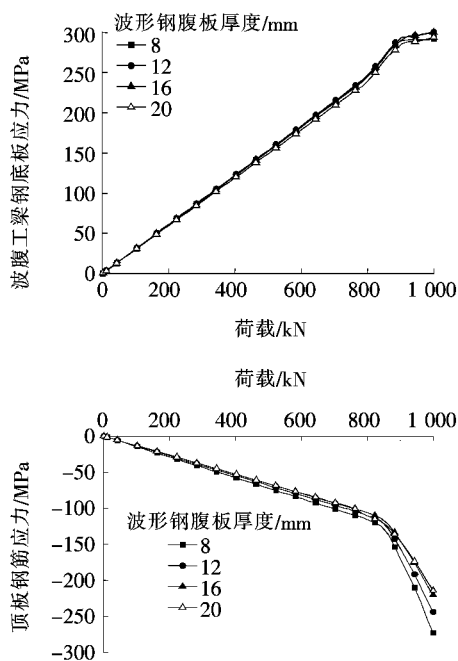


图 7 波形钢腹板厚度对组合桥面板的影响

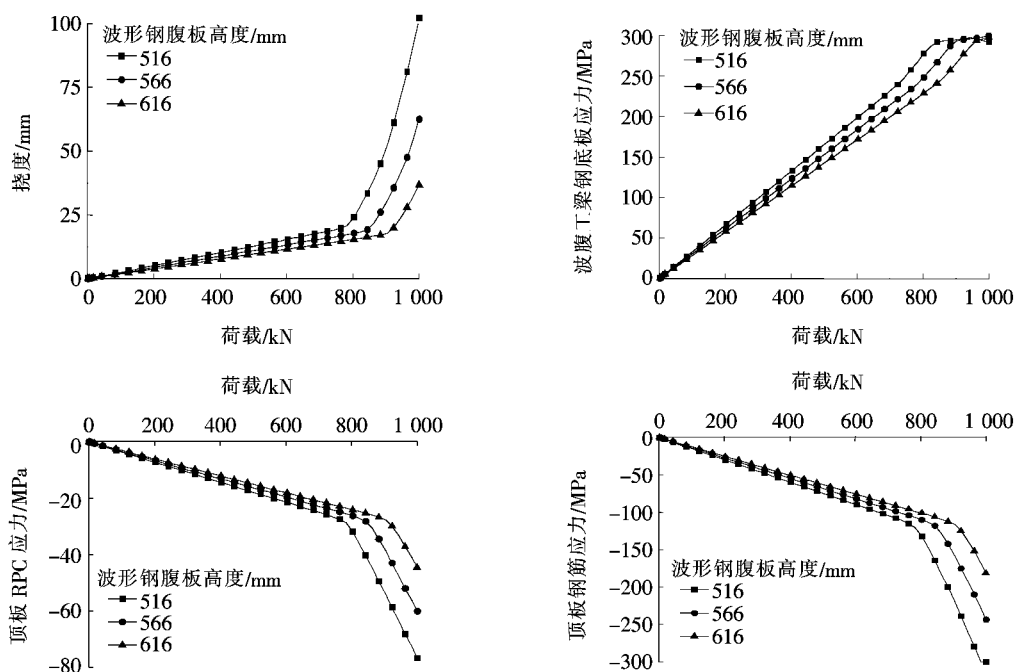


图 8 波形钢腹板高度对组合桥面板的影响

由图 8 可知:① 随波形钢腹板高度的增加组合桥面板跨中截面挠度、波腹工梁钢底板应力、顶板 RPC 应力和顶板钢筋应力均得到了显著的减小,如高度 516 mm 和 616 mm 两个计算工况,在荷载 1 000 kN 时挠度相差 65%;② 随波形钢腹板高度的增加结构进入塑性阶段的荷载值得到了有效提高。从挠度曲线分析,波形钢腹板高度 516 mm 时荷载 784 kN 结构进入塑形变形阶段,波形钢腹板高度 616 mm 时荷载增大到 884 kN 结构才进入塑形变形阶段。

3.3 波腹工梁钢底板厚度

取波腹工梁钢底板厚度为 10、15、20、25 和 30 mm,分别计算组合桥面板跨中截面挠度、波腹工梁钢底板应力和顶板 RPC 应力(图 9)。顶板钢筋应力和 RPC 应力变化规律相似,下面的分析中不再单独列出。由图 9 可知:波腹工梁钢底板厚度对组合桥面板受力有重要影响,钢底板厚度为 10 mm 时,在荷载达到 440 kN 时结构进入塑性阶段,变形开始急剧增加,将钢底板厚度增加到 20 mm 时进入塑性变形的荷载增大 90%。

3.4 波腹工梁钢顶板厚度

取波腹工梁钢顶板厚度为 10、14、18 和 22 mm,计算组合桥面板跨中截面挠度、波腹工梁钢底板应力和顶板 RPC 应力(图 10)。图 10 表明:波腹工梁钢顶板厚度对组合桥面板受力影响较小,其原因主要是钢顶板离中性轴较近,对截面抗弯惯性矩的作用不大。

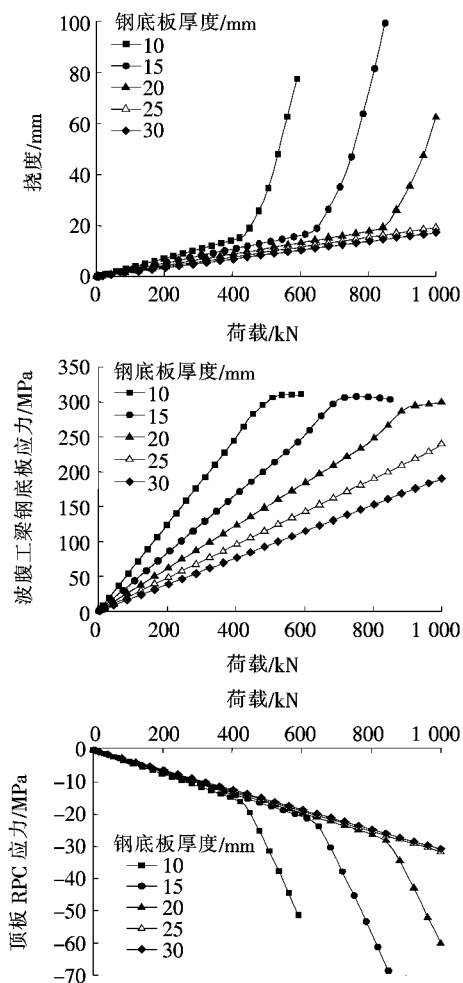


图 9 波腹工梁钢底板厚度对组合桥面板的影响

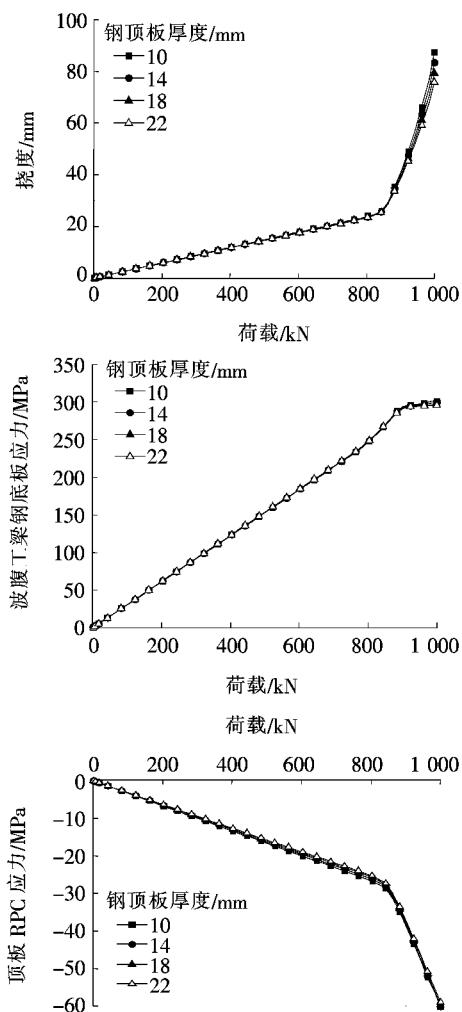


图 10 波腹工梁钢顶板厚度对组合桥面板的影响

3.5 RPC 顶板厚度

取组合桥面板的 RPC 顶板厚度为 5、7、9 和 11 cm, 计算组合桥面板跨中截面挠度、波腹工梁钢底板应力和顶板 RPC 应力(图 11)。图 11 表明:① RPC 顶板厚度对组合桥面板进入变形急剧增大的塑性阶段临界荷载有一定影响, 顶板 11 cm 相比 5 cm 临界荷载增大了 10%;② 相比组合桥面板处于线弹性阶段, RPC 顶板厚度对组合桥面板跨中截面挠度和顶板 RPC 应力在结构进入塑性变形后影响更大。

3.6 RPC 单轴抗压强度

取 RPC 单轴抗压强度为 60、80 和 102.28 MPa, RPC 本构关系中的应力根据单轴抗压强度按比例进行相应的转换, 计算组合桥面板跨中截面挠度、波腹工梁钢底板应力和顶板 RPC 应力(图 12)。由图 12 可知:① RPC 单轴抗压强度对组合桥面板跨中挠度在弹性阶段的影响不大, 随着荷载的进一步增大, 影响逐渐增大, 在荷载 1000 kN 时, 60 MPa 的挠度值比 102.28

MPa 增大 30%;② RPC 单轴抗压强度对其自身的应力影响较大, 在荷载 1000 kN 时, 单轴抗压强度 60 MPa 的应力值比 102.28 MPa 的低 22%;③ RPC 单轴抗压强度对波腹工梁钢底板应力影响较小, 计算范围内, 最大差值小于 3%。

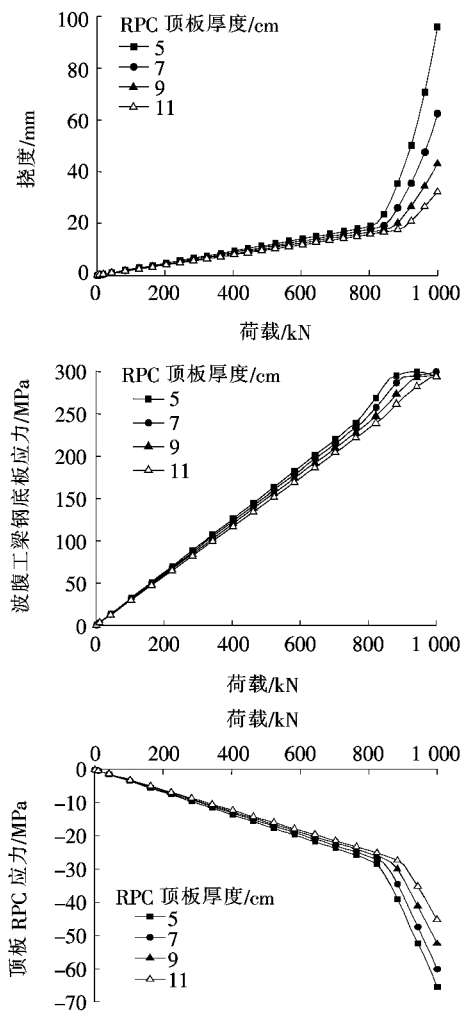


图 11 RPC 顶板厚度对组合桥面板的影响

4 结论

(1) 在荷载小于 820 kN 时, 钢材和 RPC 按线弹性材料计算结果是可靠的。随着荷载的增大, RPC 的材料非线性效应逐渐显现, 钢材的材料非线性对组合桥面板承载性能影响尤其明显, 按线弹性材料计算的结果偏于不安全, 因此当荷载大于 820 kN 时应考虑材料非线性。

(2) Solid65 单元剪力传递系数取值对组合桥面板计算结果影响很小; 计算时宜考虑 Solid65 单元形函数附加项, 尤其在荷载大于 820 kN 结构进入塑性

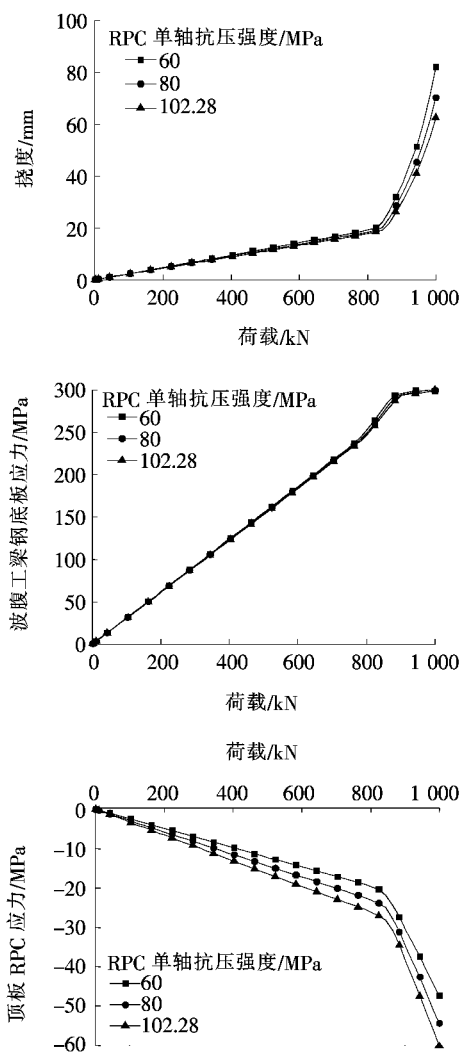


图 12 RPC 单轴抗压强度对组合桥面板的影响

阶段后考虑形函数附加项荷载效应更大。

(3) 在新型波形钢—RPC 组合桥面板中,波形钢腹板高度和波腹工梁钢板厚度对结构承载性能影响最大;波腹工梁钢顶板离截面中性轴较近,对抗弯惯性矩的作用不大,因此其厚度对结构承载性能的影响较小;RPC 强度很高,安全富余量很足,研究中对组合桥面板承载性能影响比波腹工梁小,在后续的研究中应对 RPC 板厚进行优化。

参考文献:

[1] 滕小竹.大跨度钢桁梁悬索桥关键问题研究[D].同济大

学硕士学位论文,2008.

- [2] GDJTG/T A01—2015 超高性能轻型组合桥面结构技术规程[S].
- [3] 郑中岳,唐冕,吕韶全.桥面铺装对城市钢箱梁桥面板疲劳性能的影响[J].铁道科学与工程学报,2016(9).
- [4] A. A. Elkawas, M. F. Hassanein, M. H. El—Boghdadi. Numerical Investigation on the Nonlinear Shear Behaviour of High—Strength Steel Tapered Corrugated Web Bridge Girders[J].Engineering Structures, 2017,134:358—375.
- [5] 苏家战,傅元方,黄卿维,等.钢筋超高性能混凝土梁受弯试验和有限元分析研究[J].中外公路,2017(6).
- [6] 万水,李淑琴,马磊.波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁结构在中国桥梁工程中的应用[J].建筑科学与工程学报,2009(2).
- [7] 胡建华,刘海波,狄瑾.波形钢腹板 PC 组合箱梁扭转性能分析[J].中外公路,2017(3).
- [8] Davood Mostofinejad, Mojtaba Rostami Nikoo, Seyed Arman Hosseini.Determination of Optimized Mix Design and Curing Conditions of Reactive Powder Concrete (RPC) [J].Construction and Building Materials, 2016, 123:754—767.
- [9] 方志,杨剑.FRP 和 RPC 在土木工程中的研究与应用[J].铁道科学与工程学报,2005(4).
- [10] 刘数华,阎培渝,冯建文.活性粉末混凝土在桥梁工程中的研究和应用[J].公路,2009(3).
- [11] 乔朋,狄瑾,秦凤江.单箱三室波形钢腹板 PC 组合箱梁的受力性能研究[J].中外公路,2016(5).
- [12] 陆新征,江见鲸.用 ANSYS Solid 65 单元分析混凝土组合构件复杂应力[J].建筑结构,2003(6).
- [13] 郑文忠,李莉,卢姗姗.钢筋活性粉末混凝土简支梁正截面受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2011(6).
- [14] 邹茗地,唐亮,李成君,等.基于弹塑性损伤本构的混凝土裂缝扩展分析[J].中外公路,2015(4).
- [15] 司炳君,孙治国,艾庆华.Solid65 单元在混凝土结构有限元分析中的应用[J].工业建筑,2007(1).
- [16] 王新敏.ANSYS 工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [17] 周细辉,黄坤.钢桥面板纵肋对接焊缝疲劳裂纹扩展特性及加固方法研究[J].中外公路,2019(3).
- [18] 彭辉彬.RPC—正交异性组合桥面考虑轮载横向分布的疲劳效应分析[J].中外公路,2018(1).