doi：10. 3969/j. issn. 1002-0268. 2022. 07. 013

中小跨径钢混组合梁桥经济技术性分析及设计优化比选

彭 森[1]，傅晨曦[2]

（1. 江苏省交通工程建设局，江苏 南京 210001；2. 华设设计集团股份有限公司，江苏 南京 210000）

摘要：为了合理评价钢混组合梁桥在中小跨径公路桥梁中的适应性，基于江苏省公路中小跨径桥梁的特点，对钢混组合梁桥的经济性、技术性进行研究，比较分析了钢混组合结构在中小跨径桥梁中大规模应用所具备的经济、技术优势。定义了新的设计优选指标，可综合考虑各种构件的造价及各自的活载储备系数的影响，量化参数变化对经济性和技术性的影响。对 16 m 跨径钢混组合板梁桥的设计参数进行了优化比选。结果表明：钢混组合结构自重轻，拼装方便，适合工厂化生产、装配化施工，是一种适用于中小跨径桥梁的桥型；钢混组合结构在材料用量及成本造价层面相较于传统混凝土结构桥型具有一定竞争力，钢混组合板梁初期建设成本比预制混凝土小箱梁贵 10%～15%，比现浇预应力混凝土箱梁便宜；若考虑整个服役周期，同等跨径的钢混组合板梁与相应的混凝土桥梁（装配式预应力混凝土小箱梁、T 梁）相比，全寿命周期建设成本接近，同等跨径的钢混组合箱梁的全寿命周期建设成本与现浇预应力混凝土箱梁基本持平；由于自重轻，在地质条件较差的情况，采用钢混组合梁桥会更具优势；引入活载储备系数和综合优选指标来进行桥梁结构设计优化，有利于结构设计参数的量化比选，通过 16 m 跨径钢混组合板梁桥的优化设计实例得到桥面板厚度最优的设计参数为 0. 25 m。

关键词：桥梁工程；设计优化；综合优选指标；钢混组合梁桥；经济技术分析

中图分类号：U448. 36 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-0268（2022）07-0098-08

Economic and Technical Analysis and Design Optimization Comparison of Small and Medium-span Steel-concrete Composite Bridges

PENG Sen[1], FU Chen-xi[2]

（1. Jiangsu Traffic Engineering Construction Bureau, Nanjing Jiangsu 210001, China;
2. China Design Group Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210000, China）

Abstract: In order to reasonably evaluate the adaptability of steel-concrete composite girder bridges in small and medium-span highway bridges, based on the characteristics of small and medium-span bridges in Jiangsu Province, the economy and technology of steel-concrete composite girder bridges are studied, and the economic and technical advantages of steel-concrete composite girder structure in large-scale application of small and medium-span bridges are comparatively analysed. The new design optimization indicator is defined, which can comprehensively consider the influence of the cost of various components and their respective live load reserve coefficients, and quantify the influence of parameter changes on economy and technology. The design parameters of the steel-concrete composite slab girder bridge with span of 16 m are optimized. The result shows that (1) the steel-concrete composite structure is light in weight, easy to assemble and construct, suitable for factory production and assembly, which is adaptable for small and medium-span

收稿日期：2021-11-25

基金项目：江苏省交通运输科技项目（2019Y08，2018Y12，2017T27）

作者简介：彭森（1977-），男，江苏建湖人，高级工程师.（11132755@qq. com）

bridges；（2）compared with traditional concrete structure bridges，steel-concrete composite structure has certain competitiveness in terms of material consumption and cost，the initial construction cost of steel-concrete composite slab girder is 10%−15% higher than that of precast concrete small box girders，but it is cheaper than cast-in-place prestressed concrete box girders；（3）considering the whole life-cycle，compared with the corresponding concrete bridges（fabricated prestressed concrete small box girder，T girder），the steel-concrete composite slab girder of the same span has a similar construction cost in the whole life cycle，and the construction cost is basically the same as that of the cast-in-place prestressed concrete box girder，and the life cycle construction cost of steel-concrete composite box girder with the same span is basically the same as that of cast-in-place prestressed concrete box girder；（4）due to the light weight，in the case of poor geological conditions，the steel-concrete composite girder bridge has more advantages；（5）the introduction of live load reserve coefficient and comprehensive optimization indicator to optimize bridge structure design is conducive to the quantitative comparison of structural design parameters. the optimization design example of a 16 m span steel-concrete composite girder bridge shows that the optimal design parameter for the thickness of the bridge deck is 0. 25 m.

Key words：bridge engineering；design optimization；comprehensive optimization indicator；steel-concrete composite girder bridge；economic and technical analysis

0　引言

长期以来，国内公路中小跨径桥梁以混凝土桥梁为主，桥型主要有预制空心板梁（13～20 m）、装配式预应力混凝土小箱梁（20～40 m）、混凝土 T 梁（20～50 m）、滑模或支架现浇混凝土箱梁（50～60 m）等，而钢结构桥梁使用较少，一般用在大跨径桥梁和复杂节点桥梁中。然而，过去混凝土桥梁的建设周期较长，并且随着长期运营，会出现不同部位裂缝等常见病害，导致维修加固成本较高。近几年，我国钢铁产能富足，钢桥的设计方法、制造装备和施工技术在逐渐进步，国家和行业政策提倡绿色交通基础设施建设，推广公路钢结构桥梁的应用[1]。按照国外的建设经验，钢结构桥梁在量大面广中小跨径桥梁中也具有较强的竞争力。欧美、日本等国家对于 25～60 m 的中小跨径桥梁中，大部分都采用钢与钢混组合结构桥梁。钢混组合结构桥梁充分发挥了混凝土抗压、钢材抗拉的特点，可减少钢材的用量，兼顾了桥梁的经济性要求与材料的性能优势，也回避了钢桥面铺装开裂、钢桥面板疲劳开裂等关键性问题，同时，适用于工厂化生产和装配化施工，提高了加工制造精度、缩短了工期[2-8]。因此，钢混组合结构桥梁在量大面广的常规公路桥梁中具有较大的优势。

目前，国内对于钢混组合结构桥梁的标准化设计尚未成熟，缺乏系统研究，结构设计不合理和精细化不足。设计人员在桥梁方案研究阶段，通常会因为经济性的因素，推荐采用同等跨径的混凝土桥梁，从而影响了钢混组合结构的推广应用[9]。

本研究基于江苏省平原微丘区公路中小跨径桥梁的特点，对钢混组合梁的适用性、经济性、技术性进行研究，通过与其他桥型的横向比较分析钢混组合结构在中小跨径桥梁中大规模应用所具备的经济、技术合理性。并从静力学角度研究中小跨径钢混组合梁桥的空间受力特性，为标准化设计提供静力学依据，推动钢结构尤其是钢混组合结构在中小跨径桥梁中的应用。

1　经济性与适用性分析

1.1　经济性分析

目前，江苏省内中小跨径桥梁最常用的桥型结构为装配式预应力混凝土小箱梁、T 梁和空心板，受力和营运条件好、预制化程度高、施工速度快。对于一些跨节点桥梁或者曲线桥梁，则会采用现浇箱梁。将这几种桥型与钢混组合板梁、钢混组合箱梁进行比较，分析采用钢混组合梁的经济性。另外，桥梁跨径的选择需要兼顾基础条件、施工方式以及结构的美观性。根据桥梁高度和桥位地质情况取用省内常用的、较经济的标准跨径（13，16，20，25，30，35，40，50 和 60 m）进行比较。其中，根据各桥型结构受力特点及已建工程设计经验，常见标准跨径（13～40 m）桥梁常采用空心板、小箱梁、T 梁、钢混组合板梁（钢板梁）进行方案比较；较大

跨径（50～60 m）桥梁由于对结构刚度、承载能力要求较高，通常选用钢混组合箱梁和现浇混凝土箱梁进行方案比较。钢箱梁由于造价较高，仅少量用于一些特殊节点桥，不纳入本次比较范畴。

在本次经济性比较中，装配式预应力混凝土空心板、小箱梁与 T 梁均基于省内高速公路设计中常用的通用图图纸，钢混组合板梁、钢混组合箱梁和现浇箱梁则基于省内高速公路设计常用图纸进行统计。

经济性分析桥梁典型断面选择江苏省内常用的 6 车道高速公路断面，路基宽度 33.5 m，单幅桥宽 16.25 m。下部基础形式统一采用桩柱式桥墩，假定墩柱高均为 10 m，桩底位于良好的持力层。不同桥型的断面布置如图 1 所示（以小箱梁、T 梁和钢混组合板梁为例）。

在进行结构设计后提供精准的工程量，对 30 m 跨径、四跨一联的不同桥型方案分别进行详细的材料指标分析，并在此基础上采用相同的费率与定额，进行经济性比较，得到各桥型造价与常用跨径关系如图 2 所示。

由图 2 可知，在 13～60 m 的跨径范围内，钢混组合结构建设初期成本均比混凝土结构高，但是随着跨径的增大，钢混组合结构与混凝土结构之间的造价差距占初期建设成本的比例逐渐缩小。

虽然在小跨径时，钢混组合结构梁桥在造价成本上没有优势，然而混凝土梁桥不具有材料回收利用的特性，养护维修成本也相对于钢混组合结构较高。考虑到钢混组合结构材料以钢材为主，基于钢材回收利用的价值，从全寿命周期角度[10-11]对比钢混组合结构梁桥和混凝土梁桥的造价，进一步考虑运营阶段养护、维修成本以及材料回收利用，得到常用跨径各桥型全寿命周期成本的关系如图 3 所示。由图 3 可知，进行全寿命周期成本对比时，钢混组合结构梁桥与混凝土梁桥的造价差距进一步缩小，在 13～25 m 跨径范围内，钢混组合梁造价相较于混凝土梁桥略高；在 30～60 m 范围内，钢混组合梁桥的造价与混凝土梁桥基本持平。

综上，混凝土梁的造价低，但考虑桥梁全寿命周期的经济优势并不明显，甚至当跨径较大时，钢混组合梁与混凝土梁造价持平；鉴于钢混组合梁在材料特性、结构受力、施工、养护等多方面都具有更高的适应性，且钢材是环保材料，可工厂化生产（减少现场施工作业），减少污染，进一步节省造价，钢混组合梁在经济上具有更好的应用前景。

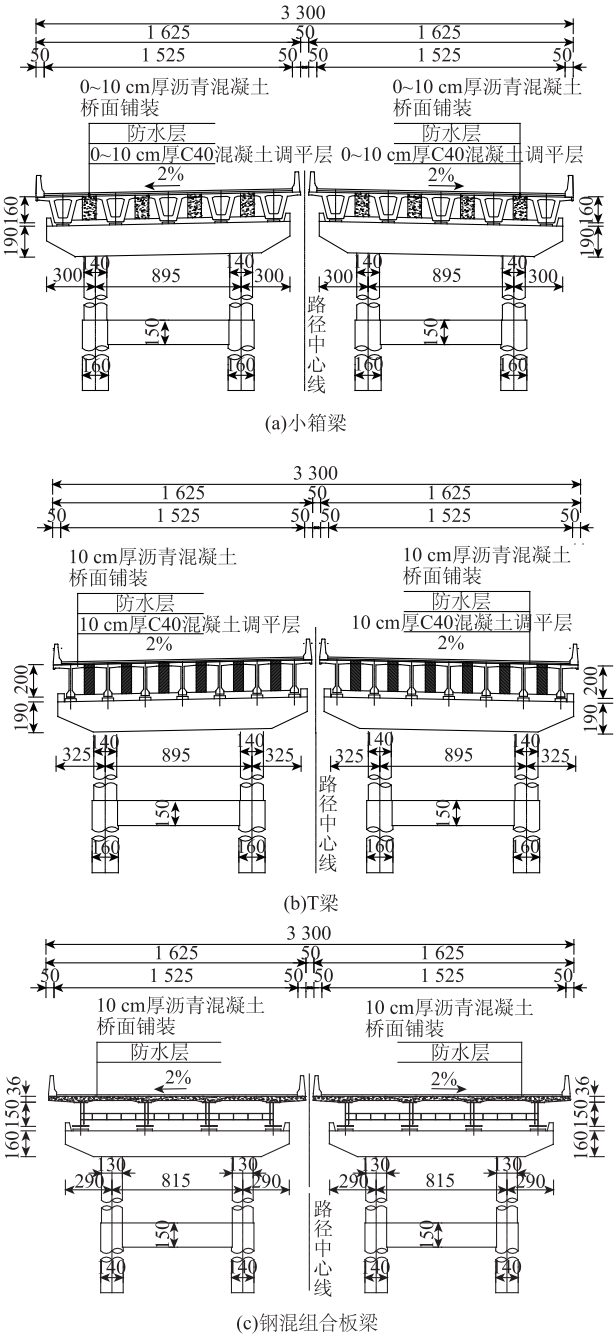


图 1 不同桥型断面布置图（单位：cm）

Fig. 1 Layouts of cross-section of different bridge types (unit: cm)

1.2 技术性分析

（1）施工便利性

混凝土 T 梁和小箱梁均采用预应力结构的加工制造工艺较为复杂。从钢筋绑扎、混凝土立模浇注、预应力张拉、压浆、养护、凿毛，每个工序投入人工和时间较长，预制构件质量较难控制。且预制梁体吊装质量大（以 30 m 小箱梁为例，单片梁质量在 100 t 左右），施工难度高，安装风险也较大。相比

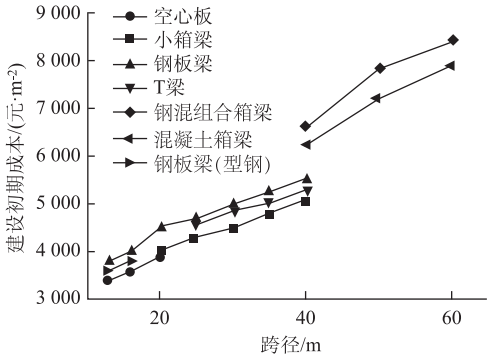


图 2　各桥型造价对比

Fig. 2　Comparison of costs of different bridge types

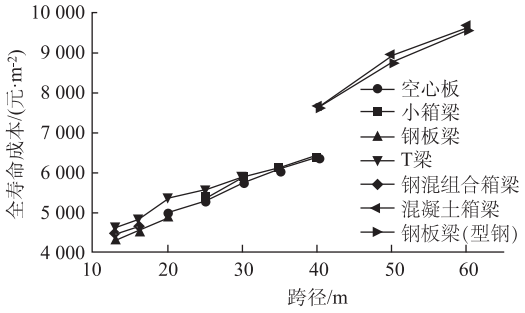


图 3　各桥型全寿命周期成本

Fig. 3　Life-cycle costs of different bridge types

之下，钢混组合梁施工灵活多变，一般采用钢梁与桥面板分步施工的方式。

钢梁在工厂加工制作，单元划分灵活，制作精度和质量均有保证。钢梁运至现场组拼安装，可采用吊装或顶推施工。由于钢梁自重轻，施工速度快，可以显著降低运输、吊装过程中的难度和风险，并减少施工时对周围环境的影响。待钢梁架设完成，形成连续梁平台后，再进行桥面板施工[12-13]。

根据现场施工条件和工期要求，桥面板可采用现浇或者预制两种方式。对于常规公路桥梁，较多采用预制桥面板进行施工，桥面板在工厂进行分块预制，质量有保证，存放一段时间后再进行架设安装，有利于减小成桥阶段收缩徐变的影响。

以 30 m 跨径钢混组合板梁为例，将钢主梁两两成对吊装，其吊重约 25 t，约为小箱梁的 25%；预制桥面板分块进行吊装，每块预制板吊重不超过 30 t。

由此可见，钢混组合梁桥非常适用于快速化、轻型化、装配化施工，具有较强的可施工性。

（2）更换便捷性

桥梁构件更换效率也是评价桥型的一项重要指标，若所更换桥梁处在重要的枢纽位置，一旦桥梁发生事故，需要进行快速更换，尽可能减小对既有交通的影响。表 1 列举了 3 座钢板组合梁桥的快速更换信息[14]。由表可见，采用钢混组合梁桥进行快速更换，持续时间可控制在 72 h 以内。相比国内混凝土 T 梁更换实例，流程较多，一般用时超过 2 个月[15]，可见在桥梁构件更换工程中，钢混组合梁桥的更换速度更快，最大化降低对既有交通的影响。

表 1　桥梁更换案例

Tab. 1　Bridge replacement cases

案例桥名和位置	桥型	更换原因	更换部位	更换持续时间/h
I-93 州际公路桥，波士顿	单跨简支钢板组合梁	桥面板开裂、钢梁腐蚀、部分钢梁屈曲	钢主梁和桥面	35
I-93 州际公路桥，波士顿	单跨简支钢板组合梁	桥面板开裂、钢梁腐蚀、部分钢梁屈曲	钢主梁和桥面	55
I-190 州际公路桥，南达科他州布法罗	三跨简支钢板组合梁	桥面板开裂、钢梁腐蚀	钢主梁和桥面	72

（3）梁高适应性

对于中小跨径钢混组合结构，常采用等高梁进行设计，更利于标准化设计和工厂化制造，经济性好，也更方便运输和架设安装。钢梁梁高随着跨径的变化而变化。

以钢混组合板梁为例，一般来讲，对于中小跨径、主梁间距 3~4 m 左右的钢混组合板梁，钢梁梁高与跨度之比 h/L 通常在 1/20~1/25 的范围，活载越大，要求的梁高越高，跨径越大，梁高与跨径之比 h/L 可以取小一些。结合经济性及与其他桥型连接的适应性角度考虑，在总梁高确定的前提下，钢主梁高度一般越高经济性越好。

综上所述，通过对中小跨径的钢混组合梁和其他混凝土结构的适应性、经济性综合对比分析，可以得到以下分析结论：

（1）若不考虑全寿命周期，钢混组合板梁初期建设成本比预制混凝土小箱梁贵 10%~15%，比现浇预应力混凝土箱梁便宜；若考虑整个服役周期，同等跨径的钢混组合板梁与相应的混凝土桥梁（小箱梁、T 梁）相比，全寿命周期建设成本很接近；而同等跨径的钢混组合箱梁的全寿命周期建设成本与现浇箱梁基本持平。

（2）对于不同工程地质条件，由于上部结构自重轻的特点，在地质条件较差的情况，采用钢混组合梁结构会更具优势。随着跨径增大，钢混组合梁的经济指标也在升高。

（3）结合适应性、经济性分析对比，钢混组合板梁更适用于 13~40 m 跨径范围，钢混组合箱梁更适用于 40~60 m 范围。

2 设计优化比选

由上述分析可知，对于中小跨径桥梁，采用钢混组合结构具有其较强的竞争力，可作为此跨径范围内的推荐方案之一。然而，现阶段钢混组合结构桥梁标准化设计程度不高，同时也缺乏兼顾经济性和结构受力性能的评价指标。本节以江苏省内高速公路常用的双向 6 车道 16 m 跨径桥梁为例，采用钢混组合板梁为分析对象，通过提出新的评价指标，可对其设计参数进行优化比选，为中小跨径组合结构桥梁设计提供新的技术手段。

2.1 定义优选指标 R

对于钢混组合板梁桥，钢梁部分采用钢材，其桥面板部分采用混凝土，本研究采用活载储备系数的概念来对不同桥梁结构的力学性能进行比选。对于桥梁结构的不同构件，通过不断增加活载倍数来考量其承载能力余量（定义桥梁活载储备系数为 K，各构件的活载储备系数为 k_i），使得各个构件的强度、刚度、裂缝、稳定性等受力指标达到规范规定的容许极值，将此时的极限活载储备系数 K_c 作为结构比选时评定指标。

基于线性权重法，将钢混组合板梁桥各类构件（桥面板、钢梁）的造价作为权重，综合考虑各类构件活载储备系数 k_i，建立桥梁的活载储备系数 K 指标的计算公式：

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{n} k_i \times m_i}{M}, \tag{1}$$

式中，m_i 为第 i 种构件的造价；M 为桥梁结构的总体造价；k_i 为第 i 种构件的活载储备系数，k_i 通过以下方式获得：设定（1 倍恒载+（k_i+1）倍活载）的荷载组合，手动调节 k_i 值，使得在（1 倍恒载+（k_i+1）倍活载）这个荷载组合作用下的构件受力指标（如桥面板横桥向弯矩、负弯矩区桥面板裂缝、钢梁应力）达到其规范规定的设计强度值（如桥面板横桥向弯矩抗力、桥面板允许最大裂缝宽度、钢梁最大容许应力），此时得到的 k_i 便是构件的活载储备系数。

求得 k_i 指标后，结合此构件造价以及桥梁结构总造价，即可求得桥梁的活载储备系数 K。活载储备系数无量纲值，代表桥梁的超载能力。

进一步，定义综合优选指标 R，用来判断桥梁结构设计参数的合理性。通常，将结构承载能力越强、造价越低，认为设计参数越合理。因此，综合优选指标 R 采用以下公式计算：

$$R = 10^6 \frac{K}{M}。 \tag{2}$$

该公式综合考虑了桥梁各构件的造价及各自的活载储备系数，以及桥梁的总体造价。桥梁结构总造价 M 越低、活载储备系数 K 值越大，则 R 值越大。因此 R 值代表桥梁在保证材料经济性前提下的活载承受能力，R 越大，则代表结构设计参数越合理。

2.2 设计参数选取

本研究选取桥宽 16 m、跨径为 4 m×16 m 的多主梁钢混组合板梁桥作为优化设计的计算模型。依据以往设计经验选取 0.6 m 高定制主梁的截面布置形式[16]，基于控制变量法，以桥面板厚度的设计参数变量为例，参数候选取值基于设计常用经验值，通过 R 指标计算，得出最优的设计结果。

以 4 片主梁为基准断面，选择桥面板厚度分别为 0.22，0.25 和 0.28 m 这 3 种作为参数模型进行分析，如图 4 所示。

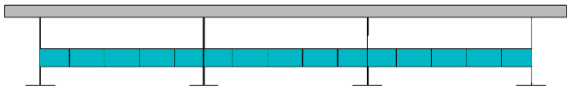


图 4 桥梁典型断面

Fig. 4 Typical cross-section of bridge

基于该变化参数分别建立全桥有限元模型，跨径 16 m 的钢混组合板梁桥，钢梁部分采用 Q355 钢材，其设计强度取 260 MPa，其桥面板部分采用 C50 混凝土，桥面板的设计强度以各厚度下实际计算值为主，针对不同变化参数分别计算 R 指标，并进行评估选出最适宜的设计参数。

2.3 R 指标计算

以桥面板厚度为研究对象，不同桥面板厚度时桥面板设计弯矩抗力计算值如表 2 所示。

表 2 桥面板横桥向弯矩抗力

Tab. 2 Transverse moment resistance of bridge deck

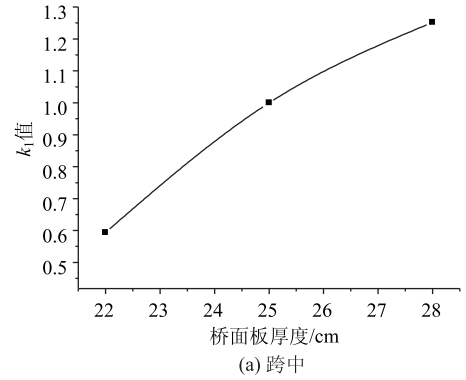
截面厚度/cm	截面位置	弯矩抗力/(kN·m)
22	跨中	91.7
	支点	165.8
25	跨中	108.6
	支点	165.8
28	跨中	125.5
	支点	165.8

桥面板厚度对桥面板横向弯矩抗力的活载储备系数 k_1 值计算如表 3 和图 5 所示。

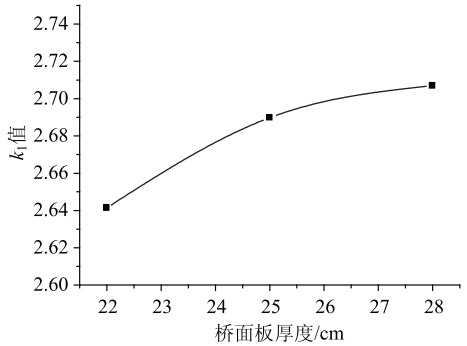
表 3　桥面板厚度 k_1 值

Tab. 3　k_1 values for bridge deck thickness

桥面板厚度/m	0. 22	0. 25	0. 28
跨中	0. 594 0	1	1. 252 1
支点	2. 641 4	2. 689 8	2. 707 0



(a) 跨中



(b) 支点

图 5　桥面板厚度 k_1 值

Fig. 5　k_1 values for bridge deck thickness

可以看出随着桥面板厚度增加，桥面板横向弯矩抗力的跨中 k_1 值稳定增加，支点 k_1 值逐渐增大，且各种桥面板厚度下，桥面板横向弯矩抗力都有一定的富余。

针对桥面板厚度取值不同对于钢板梁应力峰值的影响，取 Q355 钢材的设计强度为 260 MPa，桥面板厚度对钢板梁最大应力值的 k_2 值计算如表 4 和图 6 所示。

表 4　桥面板厚度 k_2 值

Tab. 4　k_2 values for bridge deck thickness

桥面板厚度/m	0. 22	0. 25	0. 28
k_2	2. 814 8	2. 901 2	2. 840 6

可以看出随着桥面板厚度增加，钢板梁主梁应力的 k_2 值稳定上升，且各种桥面板厚度下，钢板梁的强度都有一定的富余。

针对桥面板厚度取值不同对于桥面板负弯矩区

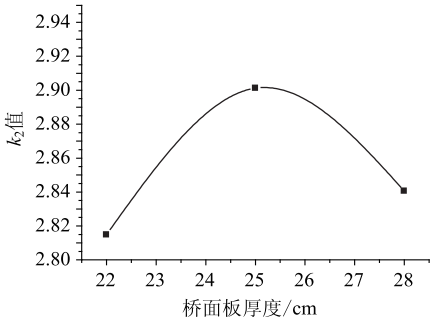


图 6　桥面板厚度 k_2 值

Fig. 6　k_2 values for bridge deck thickness

裂缝的影响，并同时考虑负弯矩区桥面板混凝土的张力刚化效应后[17-18]，桥面板厚度对桥面板负弯矩区裂缝的 k_3 值计算如表 5 和图 7 所示。

表 5　桥面板厚度 k_3 值

Tab. 5　k_3 values for bridge deck thickness

桥面板厚度/m	0. 22	0. 25	0. 28
k_3	2. 122	1. 765	1. 295

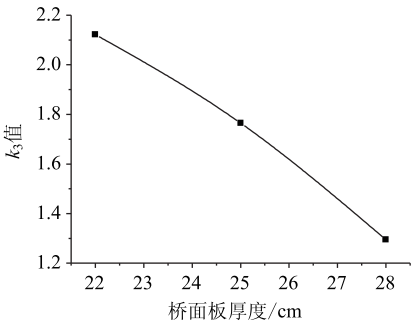


图 7　桥面板厚度 k_3 值

Fig. 7　k_3 values for bridge deck thickness

可以看出随着桥面板厚度增加，桥面板负弯矩区裂缝的 k_3 值稳定下降，且各种桥面板厚度下，桥面板负弯矩区裂缝都有一定的富余。

以主梁跨中数值作为控制指标，各厚度下的 R 指标计算结果如表 6 所示。

根据表 6 计算结果各厚度下的 R 指标，0. 22 m 和 0. 25 m 厚度的桥面板差距不大，R 值越大时，代表桥梁承担活载的能力越强而所花费的造价越少，再考虑到增加桥面板厚度有利于增强桥面板抗弯承载能力，综合考虑各因素影响，桥面板厚度取 0. 25 m 时，具有更高的安全性，为最优方案。

3　结论

本研究基于江苏省公路中小跨径桥梁的特点，对钢混组合梁的适用性、经济性、技术性进行研究，横向比较分析了钢混组合结构在中小跨径桥梁中大

表 6 桥面板厚度 R 指标计算

Tab. 6 Calculation of indicator R for bridge deck thickness

桥面板厚度/m		0.22	0.25	0.28
		跨中	跨中	跨中
桥面板横向弯矩承载力	k_1	0.594	1	1.252 1
	混凝土用量/m^3	264.6	281.3	298.1
	混凝土总造价 m_1/万元	60.858	64.699	68.563
	桥面板钢筋用量/t	7.309	8.599	10.442
	钢材总造价 m_1/万元	9.137	10.749	13.052
钢板梁最大应力	k_2	2.815	2.901	2.841
	钢材用量/ t	137.1	137.1	137.1
	钢材总造价 m_2/万元	167.878	167.878	167.878
桥面板负弯矩区裂缝	k_3	2.122	1.765	1.295
	桥面板钢筋用量/t	52.318	61.551	74.740
	钢材总造价 m_3/万元	65.397	76.938	93.425
总造价 M/万元		303.270	320.264	342.918
R		7 099.129	6 807.674	5 953.733

规模应用所具备的经济、技术性优势，并基于新定义的优选指标，对结构设计参数进行了优化比选研究，结论如下：

（1）同等跨径的钢混组合板梁与相应的混凝土桥梁（小箱梁、T 梁）相比，全寿命周期建设成本很接近；而同等跨径的钢混组合箱梁的全寿命周期建设成本与现浇箱梁基本持平。

（2）钢混组合结构自重轻，构造简单，拼装方便，更适合工厂化生产、装配化施工，具有很好的可施工性以及构件更换的便捷性；由于自重轻的特点，在地质条件较差的情况，采用钢混组合梁结构会更具优势。因此，钢混组合梁桥是一种适用于中小跨径桥梁的桥型。

（3）引入活载储备系数 K 和综合优选指标 R 来进行桥梁结构设计优化，可综合考虑桥梁各部位构件的材料用量、造价及各自的承载能力余量的影响，有利于结构设计参数的量化比选，并通过 16 m 跨径钢混组合板梁桥的桥面板厚度优化设计实例，验证了这种方法在桥梁设计优化比选时的借鉴意义。

参考文献：

References：

[1] 交通运输部. 关于推进公路钢结构桥梁建设的指导意见［R］. 北京：交通运输部，2016.
Ministry of Transport. Instructional Advice on Promoting the Construction of Highway Steel Bridges［R］. Beijing：Ministry of Transport，2016.

[2] 邵长宇. 梁式组合结构桥梁［M］. 北京：中国建筑工业出版社，2015.
SHAO Chang-yu. Composite Beam Bridge［M］. Beijing：China Architecture & Building Press，2015.

[3] 刘玉擎. 组合结构桥梁［M］. 北京：人民交通出版社，2005.
LIU Yu-qing. Composite Structural Bridge［M］. Beijing：China Communications Press，2005.

[4] 陈宝春，牟廷敏，陈宜言，等. 我国钢-混凝土组合结构桥梁研究进展及工程应用［J］. 建筑结构学报，2013，34（增 1）：1-10.
CHEN Bao-chun，MOU Ting-min，CHEN Yi-yan，et al. State-of-the-art of Research and Engineering Application of Steel-concrete Composite Bridges in China［J］. Journal of Building Structures，2013，4（S1）：1-10.

[5] 聂建国，陶慕轩，吴丽丽，等. 钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展［J］. 土木工程学报，2012，45（6）：110-122.
NIE Jian-guo，TAO Mu-xuan，WU Li-li，et al. Advances of Research on Steel-concrete Composite Bridges［J］. China Civil Engineering Journal，2012，45（6）：110-122.

[6] 贺耀北，方博夫，刘榕，等. 中小跨整体预制 Π 形钢板组合梁力学与经济性研究［J］. 公路交通科技，2019，36（12）：62-68.
HE Yao-bei，FANG Bo-fu，LIU Rong，et al. Study on Mechanics and Economy of Small and Medium-span Overall Prefabricated Π-shaped Steel Plate Composite Beams［J］. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2019，36（12）：62-68.

[7] NIE J，WANG J，GOU S，et al. Technological Development and Engineering Applications of Novel Steel-concrete Composite Structures［J］. Frontiers of Structural & Civil Engineering，2019，13（1）：1-14.

[8] 闫林君，张经伟，罗奎. 装配式多主梁钢-混组合梁桥的荷载横向分布研究［J］. 公路交通科技，2020，37（3）：59-69.
YAN Lin-jun，ZHANG Jing-wei，LUO Kui. Study on Lateral Load Distribution of Prefabricated Multi-girder Steel-concrete Composite Girder Bridge［J］. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2020，37（3）：59-69.

[9] 周青，傅晨曦，韩大章. 中小跨径钢混组合梁桥设计标准化关键参数研究［J］. 上海公路，2020（1）：43-49.
ZHOU Qing，FU Chen-xi，HAN Da-zhang. Research on Key Parameters for Design Standardization of Small and Medium-span Steel-concrete Composite Bridges［J］. Shanghai Highways，2020（1）：43-49.

[10] 胡江碧，刘妍，高玲玲. 桥梁全寿命周期费用折现率分析［J］. 公路，2008（9）：363-367.
HU Jiang-bi，LIU Yan，GAO Ling-ling. Analysis of Discount Rate of Bridge Life-cycle Cost［J］. Highway，2008（9）：363-367.

[11] 黄敏婕. 基于 CEEMDAN_GA_KELM 的国内市场钢材价格预测模型研究 [D]. 南昌：江西财经大学，2019.
HUANG Min-jie. Research of Steel Price in Domestic Market Forecasting Model Based on Ceemdan_Ga_KELM [D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2019.

[12] 张凯. 中小跨径钢板组合梁桥快速建造技术与应用研究 [D]. 西安：长安大学，2016.
ZHANG Kai. Research on Accelerated Construction Technology and Application of Composite Steel Plate Girder Bridge with Small and Medium-span [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.

[13] 梁全章. 钢-混组合梁斜拉桥主梁整体吊装受力分析 [J]. 工程建设，2018，50 (8)：39-44.
LIANG Quan-zhang. Stress Analysis on Overall Lifting of Main Girder for Cable-stayed Bridge with Steel-concrete Composite Girder [J]. Engineering Construction, 2018, 50 (8): 39-44.

[14] 刘永健，高诣民，周绪红，等. 中小跨径钢-混凝土组合梁桥技术经济性分析 [J]. 中国公路学报，2017，30 (3)：1-13.
LIU Yong-jian, GAO Yi-min, ZHOU Xu-hong, et al. Technical and Economic Analysis in Steel-concrete Composite Girder Bridges with Small and Medium-span [J]. China Journal of Highways and Transport, 2017, 30 (3): 1-13.

[15] 陈祥龙. 箱形拱桥上部 T 梁更换施工方案研究 [J]. 西南公路，2016 (2)：76-80.
CHEN Xiang-long. Research on Construction Scheme of Replacement Upper T-girder of Box Arch Bridge [J]. Southwest Highway, 2016 (2): 76-80.

[16] 傅晨曦，杨鹏，周青，等. 中小跨径钢混组合板梁合理主梁布置研究 [J]. 上海公路，2017 (2)：37-40.
FU Chen-xi, YANG Peng, ZHOU Qing, et al. Research on Reasonable Beam Arrangement of Steel-concrete Composite Slab Beam with Small and Medium-span [J]. Shanghai Highways, 2017 (2): 37-40.

[17] NIE J, FAN J, CAI C S. Stiffness and Deflection of Steel-concrete Composite Beams under Negative Bending [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130 (11): 1842-1851.

[18] LEBET J P, HIRT M A. 钢桥钢与钢-混组合桥梁概念和结构设计 [M]. 葛耀君，等译. 北京：人民交通出版社，2014.
LEBET J P, HIRT M A. Steel Bridges: Conceptual and Structural Design of Steel and Steel-concrete Composite Bridges [M]. GE Yiao-jun, et al translated. Beijing: China Communications Press, 2014.

(上接第 89 页)

XU Min. Research on Vertical Bearing Capacity of Root Foundation [D]. Nanjing: Southeast University, 2007.

[10] 木林隆，黄茂松，龚维明，等. 水平荷载作用下根式基础受力特性分析 [J]. 岩土力学，2010，31 (1)：287-292.
MU Lin-long, HUANG Mao-song, GONG Wei-ming, et al. Response Analysis of Anchorage Foundation under Lateral Loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (1): 287-292.

[11] 胡丰，龚维明，童小东，等. 含受弯根键的根式沉井承载性能分析 [J]. 计算力学学报，2010，27 (3)：505-510.
HU Feng, GONG Wei-ming, TONG Xiao-dong, et al. Analysis of Bearing Capacity of Root-caisson with Flexual Roots [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27 (3): 505-510.

[12] 付守印，黄挺. 根键角度对根式沉井水平承载力影响的数值分析 [J]. 江苏建筑，2015 (2)：51-53，78.
FU Shou-yin, HUANG Ting. Numerical Analysis of the Effect on the Angle of Rootstalk to Lateral Load Capacity of Rootstalk Caisson [J]. Jiangsu Construction, 2015 (2): 51-53, 78.

[13] 林友当，夏理巧，李凌志，等. 深厚软土区根键桩竖向承载特性的现场试验 [J]. 公路，2020，65 (11)：143-148.
LIN You-dang, XIA Li-qiao, LI Ling-zhi, et al. Experimental Study on Vertical Bearing Capacity of Root-pile Foundation in Deep and Soft Soil Areas [J]. Highway, 2020, 65 (11): 143-148.

[14] 张立奎，章征，殷永高. 根式沉井基础水平向荷载试验研究 [J]. 桥梁建设，2009 (3)：33-36.
ZHANG Li-kui, ZHANG Zheng, YIN Yong-gao. Horizontal Load Test Study of Root Type Caisson Foundation [J]. Bridge Construction, 2009 (3): 33-36.

[15] 陈育明，徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例 [M]. 2 版. 北京：中国水利水电出版社，2013.
CHEN Yu-ming, XU Ding-ping. FLAC/FLAC3D Fundamentals and Engineering Examples [M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2013.

[16] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimension [R]. Ver. 5.0, Saint Paul: Itasca Consulting Group, Inc., 2013.

[17] 胡丰. 根式沉井承载形状理论分析与试验研究 [D]. 南京：东南大学，2010.
HU Feng. Theoretical Analysis and Experimental Study on Bearing Shape of Root Caisson [D]. Nanjing: Southeast University, 2010.

[18] HUANG M, ZHANG C, MU L, et al. Analysis of Anchor Foundation with Root Caissons Loaded in Nonhomogeneous Soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48 (2): 234-268.