

基于低碳目标的城市地下道路明挖结构 精细化设计研究

袁森林, 陈淙岑, 邓任臻

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 在低碳战略的背景下, 大体量地下混凝土结构生产建设中的碳排放控制被提出了相应的要求。在分析城市地下道路4种典型明挖结构形式的刚度设计、价格设计理念的基础上, 拓展了碳排放评价环节, 采用层次分析法处理多目标评价的问题, 根据不同设计理念可为影响因素赋予不同的权重, 由此初步建立了地下道路明挖钢筋混凝土结构的低碳设计方法。采用低碳设计理念来控制混凝土和钢筋的设计配比和材料用量, 并与传统刚度导向、价格导向下的设计方案进行对比, 为混凝土结构物化阶段的碳排放控制提供重要的科学依据。

关键词: 地下道路; 明挖结构; 层次分析法; 碳排放量; 设计导向

中图分类号: U412.37+3.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)04-0028-06

Study on Refined Design of Excavated Structures of Urban Underground Roads Based on Low-carbon Target

YUAN Senlin, CHEN Congcen, DENG Renzhen

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: In the context of low-carbon strategy, the corresponding requirements are put forward to control the carbon emissions in the production and construction of large-scale underground concrete structures. On the basis of analyzing the stiffness design and price design concepts of four typical excavated structural forms of urban underground roads, the carbon emission assessment link is expanded. The analytic hierarchy process is used to handle the problem of multi-objective evaluation. The different weights can be assigned to the influencing factors according to different design concepts. Thus, a low-carbon design method for excavated reinforced concrete structures of underground roads is initially established. The low-carbon design concept is used to control the design ratio and material consumption of concrete and rebar. And the comparison is carried out with the design schemes under the traditional stiffness and price orientations, which provides the important scientific basis for the control of carbon emissions in the materialization stage of concrete structures.

Keywords: underground road; excavated structure; analytic hierarchy process; carbon emissions; design-oriented

0 引言

在全球气候危机的背景下, 我国提出了“2030年碳达峰、2060年碳中和”的重大战略决策, 对建筑工程行业低碳转型提出了迫切需求。城市地下道路的建设拓展了交通空间层次, 减少地面用地面积, 提升吸收CO₂的强度, 对于低碳城市建设具有积极意义。

建构筑物的低碳理念应贯穿于设计、施工、运维

全过程中, 张凯等^[1]通过对比国内高层住宅建筑全生命周期碳排放发现, 建筑物仅在物化阶段的碳排放量占比就可超过20%。而混凝土结构建设尤其具有碳排放密集的特点, 通常认为碳排放来源主要为: 材料生产与制备占比5%~85%、运输过程占比10%~18%、施工过程占比5%~10%。水泥与钢材的生产分别产生了7%~10%与7%~9%的全球年碳排放量, 而全球约68%的水泥与约23%的钢材用于混凝土结构的建造中, 是混凝土结构高碳排放现状的主因^[2]。传统的混凝土结构设计思路除了满足规范要求的承载能力与正常使用要求外, 通常以工程造价作为最重要的优化调整方向^[3]。因此亟需在现有的结构可

收稿日期: 2024-06-06

作者简介: 袁森林(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事隧道及地下工程等领域的咨询与设计工作。

靠性设计理论的基础上,拓展碳排放评价环节,形成新的低碳设计理念与方法。

近年来已有不少国内外学者开展了该方面的理论研究。王健等^[4]以满足混凝土材料产生碳排放量最小为目标,初步建立了新的混凝土组分定量分析模型。章旻^[5]在简单的钢筋混凝土框架结构设计比选中发现,采用高强建材可以有效减少钢筋和混凝土用量,减少碳排放量。肖建庄等^[2]总结了混凝土行业低碳转型的历史与趋势,提出了当下混凝土结构低碳设计创新发展的新需求。

目前地下工程正在往体量更大、重要性更高的方向发展,同时地下混凝土结构设计理论以裂缝控制配筋,与地上工程也有所不同,因此地下结构的混凝土和钢筋碳排放量会远高于常规建筑物,其低碳设计意义更加重大。关于地下混凝土结构低碳设计的研究仍然较少涉及,除了选用环保材料(如高性能混凝土、粉煤灰等)、关注节能设计等措施外,还可以将钢筋和混凝土的碳排放量作为指标来控制材料用量,以实现更精细化的低碳设计。

本文总结归纳了地下道路明挖结构设计过程中重要的控制影响因素,对钢筋混凝土结构碳排放量的影响因素进行分析,并采用层次分析法对各影响因素赋予权重,将传统的刚度设计、造价设计思路导向与低碳设计导向下的结果进行对比,初步建立了地下混凝土结构低碳设计方法,分析了碳排放评价环节对工程实际中混凝土和钢筋用量的影响。

1 结构碳排放影响因素分析

在地下结构设计过程中,通常情况下是在某些特定的荷载效应下进行结构构造与配筋设计,最为关键设计参数就是截面板厚与配筋率,其次则是混凝土和钢筋材料参数。要对碳排放环节进行评价,首先需要研究这些设计参数对结构碳排放量的影响规律。

首先,在给定的结构板厚和同一的荷载效应下对截面进行配筋设计,不妨设板厚为 1 000 mm,弯矩设计值为 1 650 kN/m。若采用 HRB400 钢筋,设计配筋率采用 0.80% 不变,仅将混凝土强度等级从 C30 逐级提高至 C45,发现其可有效降低裂缝开展宽度,并略微提高截面承载力;若将钢筋牌号从 HRB400 提高至 HRB500,可有效提高截面承载力,但对裂缝控制并无贡献,如图 1 所示。

若仍采用 HRB400 钢筋,将设计配筋率从 0.80%

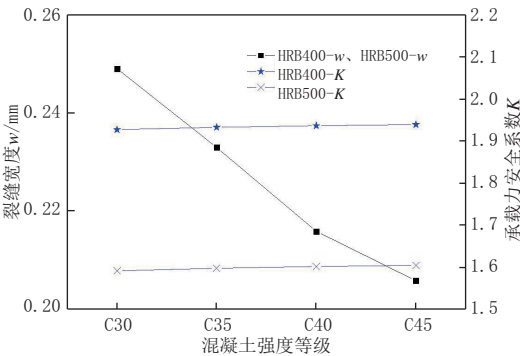


图 1 混凝土强度等级和钢筋牌号对结构极限状态的影响曲线图

提高至 0.92%,发现其可同时提高截面承载力,并减小裂缝开展宽度,如图 2 所示。这一变化规律与常规的设计认知相符,由此也可知,设计时可通过提高配筋率的方式满足结构极限状态,同时可通过提高混凝土强度等级的方式适当减少混凝土或钢筋用量。但较高标号的混凝土大体积浇筑易产生收缩裂缝,在实际施工中需考虑施工过程的控温及养护措施。

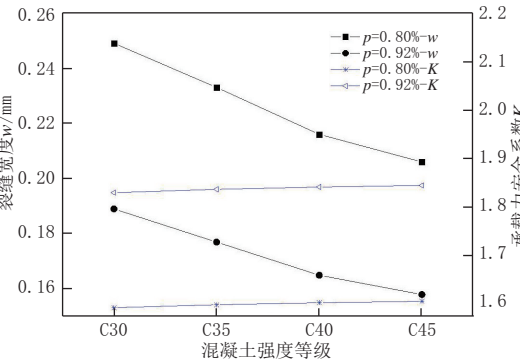


图 2 混凝土强度等级和配筋率对结构极限状态的影响曲线图

接下来,在不同的设计方案下进行结构碳排放量的计算,结果如图 3 所示。本文选用《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)^[6]附录 D 中所提供的建材碳排放因子, C30 混凝土碳排放因子 CO₂e 为 295 kg/m³, C50 混凝土碳排放因子 CO₂e 为 385 kg/m³, 热轧碳钢钢筋碳排放因子 CO₂e 为 2 340 kg/m³。C35、C40、C45 混凝土的碳排放因子 CO₂e 根据线性插值获得,分别为 317.5、340、362.5 kg/m³。需要注意的是,此处计算的钢筋碳排放量,仅指受荷载效应影响较大的受力主筋的碳排放量,并非是实施该结构全部的碳排放量。

仍在相同的荷载效应工况下进行结构配筋设计。根据前文所述规律,在满足规范规定的结构裂缝宽度及承载力按要求的前提下,分别采用如下两种设计模式:其一,结构板厚 h 不变,增大混凝土强度等级,以减少截面配筋率;其二,截面配筋面积 A_s

不变,增大混凝土强度等级,以减少结构板厚。分别计算每延米结构板的碳排放量,结果如图3所示。发现两者均会引起碳排放量的增加,且碳排放量增长速度较为一致,随着混凝土强度等级提高,碳排放量逐级增加约3%。因此,设计时通过提高混凝土强度等级的方式,以期减少碳排放量并不合适。

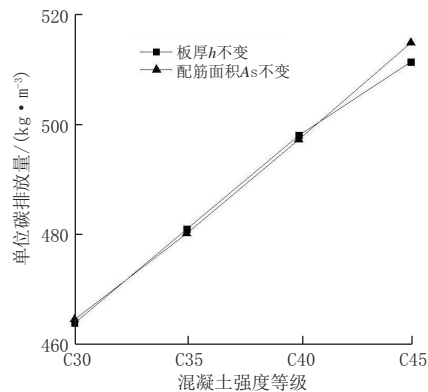


图3 混凝土强度等级对结构碳排放量的影响曲线图

同时,分别计算混凝土与钢筋碳排放量在其中的占比,可发现被采纳的不同种设计方案中混凝土碳排放量约占63%,受力主筋碳排放量约占37%,两者比值约2:1,保持不变,如图4所示。

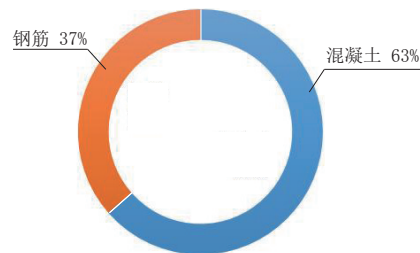


图4 钢筋混凝土结构碳排放量占比图示

2 设计目标影响因素的权重

2.1 层次分析法

钢筋混凝土结构设计实际上是一个多目标评价的问题,且目标之间具有矛盾性和不可共度性。本文使用层次分析法^[7]来建立这一问题的模型。为使结构设计目标可以量化,将结构刚度、工程造价、碳排放量作为主要的因素,采用层次分析法求出设计目标中各项影响因素的权重,比较同一层次中设计影响因素与其他因素的相对重要性,构造比较矩阵。矩阵A中I1表示结构刚度因素,I2表示工程造价因素,I3表示碳排放量因素。表中, a_{ij} 表示的含义如下。

- (1)若 $a_{ij}=1$,则元素*i*与元素*j*同等重要。
- (2)若 $a_{ij}=3$,则元素*i*比元素*j*略重要。
- (3)若 $a_{ij}=5$,则元素*i*比元素*j*重要。
- (4)若 $a_{ij}=7$,则元素*i*比元素*j*重要得多。

(5)若 $a_{ij}=9$,则元素*i*比元素*j*极其重要。

(6)若重要性程度相反,则以 $1/a_{ij}$ 表示。

求出矩阵A的特征向量W即为影响因素的权重向量,并根据公式检验需求模型的一致性。一致性反映的是矩阵中的两两重要性程度比较时是否出现了矛盾,如当元素*i>j,j>k*时,必须得出*i>k*的结论。

在用该法确定权时,可以用 $\lambda_{\max}-n$ 来度量矩阵A中各元素估计的一致性,为此引入一致性指标CI,CI与同阶矩阵RI(三阶矩阵的取值RI=0.58)之比称为一致性比率CR,若CR<0.1,即认为矩阵A中 a_{ij} 的估计基本一致,对比矩阵保持一致性,向量W即可作为权重。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$
(1)

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0.1$$
(2)

2.2 不同设计导向下的设计影响因素权重

(1)刚度导向的权重计算,见表1、表2所列。

表1 层次分析法影响因素比较矩阵一			
矩阵A	I1	I2	I3
I1	1	7	9
I2	1/7	1	3
I3	1/9	1/3	1

表2 层次分析法求影响因素权重及矩阵一致性			
影响因素	W	AW	AW/W
I1	0.777	2.477	3.190
I2	0.155	0.471	3.043
I3	0.069	0.206	3.013
CR	0.071 < 0.1		

(2)价格导向的权重计算,见表3、表4所列。

表3 层次分析法影响因素比较矩阵一			
矩阵A	I1	I2	I3
I1	1	1/9	1/3
I2	9	1	7
I3	3	1/7	1

表4 层次分析法求影响因素权重及矩阵一致性			
影响因素	W	AW	AW/W
I1	0.069	0.206	3.013
I2	0.777	2.477	3.190
I3	0.155	0.471	3.043
CR	0.071 < 0.1		

(3)低碳导向的权重计算,见表5、表6所列。

表5 层次分析法影响因素比较矩阵一			
矩阵A	I1	I2	I3
I1	1	1/7	1/9
I2	7	1	1/3
I3	9	3	1

表 6 层次分析法求影响因素权重及矩阵一致性

影响因素	<i>W</i>	<i>AW</i>	<i>AW/W</i>
I1	0.057	0.171	3.012
I2	0.295	0.908	3.082
I3	0.649	2.043	3.150
CR		0.070 < 0.1	

以上 3 种矩阵比较判断的方案表现了 3 种不同的结构设计思维。方案一为刚度导向的设计思维,其认为在满足规范的承载力与裂缝控制标准之外,结构正常使用状态下的变形控制仍然居于十分重要的地位,该种思路往往出现在设计边界条件中地下结构周边环境复杂,存在重要风险源的情况下,最为有效的设计措施即使增加结构板厚度来加强刚度,因此也必然导致工程造价和碳排放量的提高。方案二是价格导向的设计思维,其认为在满足规范标准、确认结构安全的前提下,应尽可能控制工程造价,通过控制结构板厚来减少混凝土和钢筋用量,这也是传统结构设计中最为常见的设计思路。方案三是低碳导向的设计思维,其认为,在满足规范标准、确认结构安全的前提下,控制工程建设过程中碳排放量居于最为重要的地位,目前有效的设计措施是选用高性能材料,但同时也需要兼顾价格因素。从权重计算结果看来,方案一的权向量 $W1=(0.777, 0.155, 0.069)$, 方案二的权向量 $W2=(0.069, 0.777, 0.155)$, 方案三的权向量 $W3=(0.057, 0.295, 0.649)$ 。

可以看出虽然影响因素重要性的主观判断会对权重产生一个直接且明显的影响,但是各个影响因素中谁占主导地位,谁居次要地位,往往比较客观明确,把握影响因素之间相对重要性的次序后,可以使权重计算结果保持在一个较为合理的范围内。

3 钢筋混凝土结构设计控制指标

3.1 碳排放量指标

《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)指出,建筑物碳排放包括运行阶段、建造及拆除阶段、建材生产及运输阶段,碳排放累计在建筑物全生命周期中。根据其附录 D 中所提供的建材碳排放因子,C30 混凝土碳排放因子 CO_2e 为 295 kg/m^3 , C50 混凝土碳排放因子 CO_2e 为 385 kg/m^3 , 热轧碳钢钢筋碳排放因子 CO_2e 为 $2\,340\text{ kg/m}^3$ 。采用设计结构混凝土方量与设计配筋含钢量即可求得单位体积钢筋混凝土,在建材生产过程中的碳排放量,以 $\text{kg } CO_2e$ 为单位。

3.2 价格指标

本文以混凝土单价 $1\,000\text{ 元/m}^3$, 钢筋单价 $6\,500\text{ 元/m}^3$, 为价格指标进行计算,可以求得单位体积钢筋混凝土的单价,以 万元/m^3 为单位。建材价格往往随时间、地区以及其他特殊情况波动,存在较大的不确定性,在实际设计时工程造价的评价应根据当时、当地的实际情况选择合适的单价指标。

3.3 刚度指标

地下混凝土结构设计理论以裂缝控制配筋,其结构尺寸与配筋率往往较一般地上结构更大,其承载能力极限状态通常均能够满足要求。此时结构板厚及刚度是一个可以直观评价设计是否趋于保守的指标,本文以结构延米板平均刚度 $I(\text{m}^4)$ 作为刚度指标。

$$I = b \times h^3 / 12 \tag{3}$$

3.4 设计目标值

因为各项影响因素的评价指标具有不同的量纲,评价指标的数值大小差别也很大,需要对各项指标值进行非量纲化和归一化。非量纲化可以消除目标间的不可公度性,消除量纲对评估结果的影响,仅用数值大小来反映属性值的优劣;归一化即把表中数值均变换到 $[0, 1]$ 区间上,使数据更加直观,便于比较。一般指标按以下公式进行标准 0-1 变换,根据不同结构在不同因素下的评价指标值即求得设计目标:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq n} x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} x_{ij}} \tag{4}$$

式中: i 为影响因素评价指标的序号; j 为设计结构的序号; r_{ij} 为结构 j 关于设计影响因素评价指标 i 的设计目标值; x_{ij} 为结构 j 关于影响因素 i 的评价指标值; $\min x_{ij}$ 是对于该项评价指标值,各结构中纵向比较下的最小值; $\max x_{ij}$ 是对于该项评价指标值,各结构中纵向比较下的最大值。

同时,为使非量纲化和归一化后的指标可以用于评价,不妨令 $[0, 1]$ 区间上的指标越趋近于 1 则越接近于设计目标,越趋近于 0 则越无法被设计师所接受。对于价格指标和碳排放量指标,均是越低越趋近于设计目标,因此这两项指标的数学处理方式与刚度指标完全相反,如式(5)所示。

$$r_{ij} = \frac{\max_{1 \leq i \leq n} x_{ij} - x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq n} x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} x_{ij}} \tag{5}$$

最后,将 3 项指标在不同设计导向(即不同权向

量)下的加权求和值定义为“设计目标”,设计目标值同样在[0,1]区间上波动。对相同工况下的不同混凝土和钢筋配比方案进行比较,设计目标值越接近于1,则更为合理。

4 低碳设计导向对结构设计的影响

4.1 工程案例

常规城市地下道路设计规模包括双向四车道、双向6车道、双向8车道、单向两车道(匝道)等4种典型形式,如图5、图6所示。采用明挖法施工时,分别采用单箱双孔、单箱单孔等结构类型,其中双4断面单孔跨度约9.25 m,双6断面单孔跨度约12.75 m,双8断面单孔跨度约16.25 m,两车道断面单孔跨度约8 m。本文以典型的3 m覆土厚度为例,分别对4种典型明挖结构进行设计影响分析。

为比较低碳导向的设计思路与传统的结构设计在材料用量上的异同,分别为如上所述典型断面设计了3~4种结构厚度与配筋方案,均为设计中可能出现的较为合理的方案,3种方案中结构平均板厚相差100 mm,随着板厚增加、混凝土用量增长,含钢量逐渐减少。其延米混凝土用量与对应含钢量下的延米钢筋用量统计如表7所列,并可求得延米钢筋混凝土的工程造价和碳排放量。结合设计指标与权重向量,即可求出每一个方案下的设计目标值。隧道设计采用C40混凝土,本文以规范提供数值的平均值碳排放因子 CO_2e 340 kg/m^3 进行计算。其他计算指标分别选用热轧碳钢钢筋碳排放因子

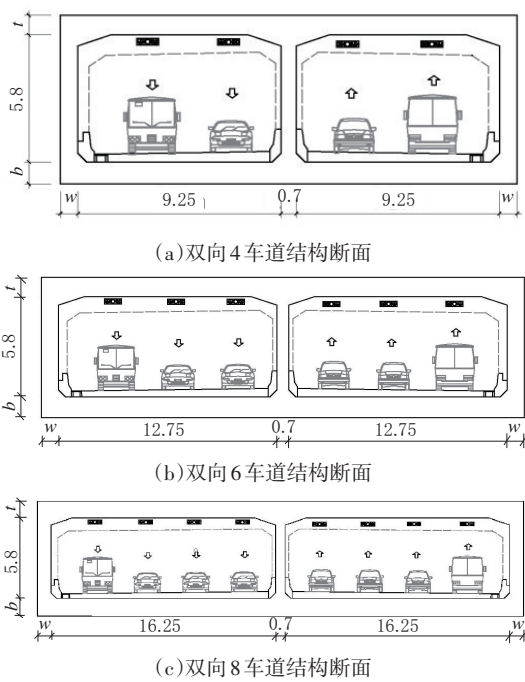


图5 明挖段单箱双室隧道结构示意图(单位:m)

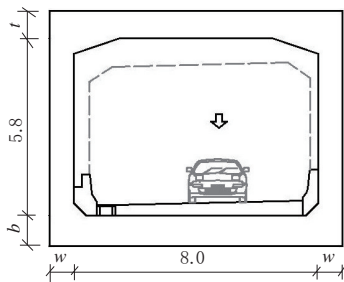


图6 明挖段单箱单室隧道结构示意图(单位:m)

CO_2e 2 340 kg/m^3 ,混凝土单价1 000 $\text{元}/\text{m}^3$,钢筋单价6 500 $\text{元}/\text{m}^3$ 。

表7 隧道结构设计参数及钢混凝土材料用量统计表

设计方案		平均板厚/m	刚度 MN/m ²	混凝土方量/ m ³	含钢量/ (kg·m ⁻³)	钢混凝土单价/ (元·m ⁻³)	总价/ 万元	钢混凝土碳排放/ (kg·m ⁻³)	总碳排放/t
双 4	1	0.7	929	67.35	121	1 786.5	12.03	623.14	41.97
	2	0.8	1 387	75.78	112	1 728.0	13.09	602.08	45.63
	3	0.9	1 974	81.18	110	1 715.0	13.92	597.40	48.50
	4	1.0	2 708	89.82	95	1 617.5	14.53	562.30	50.51
双 6	1	0.9	1 974	100.08	189	2 228.5	22.30	782.26	78.29
	2	1.0	2 708	110.82	141	1 916.5	21.24	669.94	74.24
	3	1.1	3 605	121.68	134	1 871.0	22.77	653.56	79.53
	4	1.2	4 680	132.66	118	1 767.0	23.44	616.12	81.73
双 8	1	1.0	2 708	132.82	196	2 274.0	30.20	798.64	106.08
	2	1.1	3 605	144.78	185	2 202.5	31.89	772.90	111.90
	3	1.2	4 680	157.86	170	2 105.0	33.23	737.80	116.47
	4	1.3	5 950	171.06	152	1 988.0	34.01	695.68	119.00
单 2	1	0.6	585	18.60	185	2 202.5	4.10	772.90	14.38
	2	0.7	929	21.88	150	1 975.0	4.32	691.00	15.12
	3	0.8	1 387	25.24	123	1 799.5	4.54	627.82	15.85

4.2 不同权重下的钢筋混凝土用量对比

如表 8 所列,统计了如上所述 4 种典型明挖隧道的结构形式根据几种设计方案中钢筋混凝土的配

比,计算得到刚度指标、价格指标和低碳指标,并且采用不同设计导向下的权重向量 W_1, W_2, W_3 计算获得其设计目标值。

表 8 不同设计导向下的隧道结构设计目标值比较表

设计方案		平均板厚/m	归一化 0-1			设计目标值		
			刚度指标	价格指标	低碳指标	刚度导向	价格导向	低碳导向
双 4	1	0.7	0.00	1.00	1.00	0.223	0.931	0.943
	2	0.8	0.26	0.57	0.57	0.328	0.552	0.555
	3	0.9	0.59	0.24	0.24	0.510	0.265	0.257
	4	1.0	1.00	0.00	0.00	0.777	0.069	0.057
双 6	1	0.9	0.00	0.52	0.46	0.112	0.473	0.451
	2	1.0	0.27	1.00	1.00	0.434	0.950	0.959
	3	1.1	0.60	0.31	0.29	0.536	0.325	0.316
	4	1.2	1.00	0.00	0.00	0.777	0.069	0.057
双 8	1	1.0	0.00	1.00	1.00	0.223	0.931	0.943
	2	1.1	0.28	0.56	0.55	0.339	0.537	0.536
	3	1.2	0.61	0.20	0.20	0.517	0.231	0.222
	4	1.3	1.00	0.00	0.00	0.777	0.069	0.057
单 2	1	0.6	0.00	1.00	1.00	0.223	0.931	0.943
	2	0.7	0.43	0.50	0.49	0.444	0.491	0.491
	3	0.8	1.00	0.00	0.00	0.777	0.069	0.057

由以上 3 种设计导向下的对比可以发现,同一工况下的 3 种设计方案中,当以刚度导向设计时,显然应以结构板厚最厚的方案为最优设计。层次分析法计算结果与设计经验相符合,当以价格导向和低碳导向设计时,均以结构板厚较薄的方案为最优设计。当然,也会出现结构厚度过小、导致配筋率剧增从而使价格和碳排放量增加的相对不合理方案,如表 7、表 8 中双 6 车道设计方案 1 的情况。并且该规律并未随着不同结构形式跨度的变化有明显的改变。在双 4、双 6、双 8、单 2 的设计方案评价中,最优方案的设计目标值基本一致,刚度导向下的最优设计目标值约为 0.78,价格导向和低碳导向下的最优设计目标值为 0.93~0.95。

可见在合理范围内控制结构厚度,适当增加配筋率,可有效减少工程造价和材料碳排放量。并且在当前的计算指标下,低碳设计与传统的价格导向设计相贴合,在控制碳排放量的同时也能够有效控制工程造价。但是在具体的工程设计中,应在层次分析法的框架基础上,选用具有针对性的单价指标和碳排放量指标进行计算分析,达到精准设计方案的目的。

5 结 语

本文通过研究地下混凝土结构的设计思路,拓

展碳排放评价环节,初步建立了基于低碳设计的方法,得到如下结论。

(1)通过对地下结构不同截面配筋设计方案的对比,考虑碳排放指标后,碳排放量随混凝土强度等级的提高而增加,通过较大幅度提高混凝土强度以期减少碳排放量并不理想。

(2)层次分析法可以有效处理多目标评价的问题,消除目标之间的矛盾性和不可共度性,为结构低碳设计理念与传统设计思路的结合奠定了基础。

(3)低碳设计理念在地下混凝土结构设计中与传统的价格导向设计较为贴合,常规地下结构混凝土碳排放量与受力主筋碳排放量占比约为 2:1,在确保可靠刚度的基础上,适当选取较小板厚,可有效减少工程造价和材料碳排放量。

参考文献:

[1] 张凯,李岳岩,何晓东.国内高层钢筋混凝土结构住宅建筑全生命周期碳排放对比分析[J].城市建筑,2020,17(25):36-38.

[2] 肖建庄,夏冰,肖绪文,等.混凝土结构低碳设计理论前瞻[J].科学通报,2022,67(28):3425-3438.

[3] 钟锋.基于工程造价控制的钢筋混凝土建筑结构优化设计[J].江西建材,2014(17):238-239.

[4] 王一健,陆春华,袁思奇.基于碳排放量的混凝土组分优化设计方法研究[J].建筑节能,2018,46(12):105-109.

[5] 章旸.不同强度等级建材在钢筋混凝土结构设计中的能耗及碳排放分析[J].福建建设科技,2022(3):86-88.

[6] GB/T 51366—2019,建筑碳排放计算标准[S].

[7] 许晓东.定量分析方法[M].武汉:华中科技大学出版社,2008.