

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.06.027

引用格式:夏志浩,徐金颖,孟海伦.基于路面结构应力计算的通组公路经济性分析[J].公路与汽运,2024,40(6):139-145+151.

Citation: XIA Zhihao, XU Jinying, MENG Hailun. Analysis of economic characteristics of rural highway based on pavement structural stress calculation[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(6): 139-145+151.

## 基于路面结构应力计算的通组公路经济性分析\*

夏志浩<sup>1</sup>, 徐金颖<sup>2</sup>, 孟海伦<sup>1</sup>

(1.中冶南方工程技术有限公司,湖北武汉 430223;2.云基智慧工程股份有限公司,广东深圳 518000)

**摘要:**为进一步加快农村通组公路建设,基于路面结构应力计算,结合不同路面结构的造价,分析不同结构组合的经济性,推荐适宜农村通组公路的路面结构。结果表明,设计轴载作用次数下单层水泥混凝土板的经济性最佳,而疲劳极限轴载作用次数下双层水泥混凝土板的经济性、耐久性最佳;两种轴载作用次数下,小尺寸板体的经济性均优于大尺寸板体;建议农村通组公路建设中采用单层小尺寸水泥混凝土板路面结构。

**关键词:** 工程经济;通组公路;路面结构;应力计算;经济性分析

中图分类号:U415.13

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)06-0139-07

农村公路高速发展的同时,经费一直是困扰其初期建设、后期养护和可持续发展的问题。“费改税”后,中央财政收入相对增加,地方财政则受限于地方经济发展,尤其是中西部地区,而该地区是目前农村公路建设的主战场,存在地方财政困难、难以保障农村公路高质量发展的问题<sup>[1]</sup>。中国现有建制村55.6万个<sup>[2]</sup>,随着农村公路里程的快速增长,2020年已完成建制村通硬化路和客车,但达成公路组组通还需要较长的时间。通组公路是打通农村公路网“最后一公里”的关键环节,是全国公路网的毛细血管,工程里程数以百万计,对于体量如此庞大的工程,路面每减薄1 cm即可节约上百亿元,如何通过技术手段节省工程建设资金有待研究。文献[3-7]对农村公路的路面类型及典型路面结构进行了研究。凌云等建议选用轴载为单轴双轮30 kN的四轮低速货车作为小交通量通组公路水泥混凝土路面结构计算的标准轴载<sup>[8]</sup>。通组公路的交通量较小、技术等级低且经费筹措困难,目前缺乏全面且有针对性的研究,JTG 2111—2019《小交通量农村公路工程技术标准》<sup>[9]</sup>提出的典型路面结构不足以以点概面。考虑到目前农村公路主要以水泥路面为主,本文对常见尺寸的单层、双层水泥混凝土板在不同荷载作用下的受力进行计算,结合施工造价进行经济性对比,提出经济性较优的通组公路路面结构组合。

### 1 应力分析

农村通组公路常见板宽为3.5 m,JTG D 40—2011《公路水泥混凝土路面设计规范》<sup>[10]</sup>规定面板的长宽比不宜超过1.35,选择3.00 m×3.5 m、3.50 m×3.5 m、4.00 m×3.5 m 3种大尺寸路面进行分析。考虑到小尺寸板体的温度应力较低,选择1.50 m×1.75 m、1.75 m×1.75 m、2.00 m×1.75 m 3种小尺寸路面进行对比。

#### 1.1 路面结构参数

根据实地调研结果,初步拟定水泥混凝土板模量 $E_c$ 、水泥板厚度 $h_c$ 、基层模量 $E_b$ 、基层厚度 $h_b$ 和土基顶面回弹模量 $E_t$ 进行正交试验,双层板路面结构参数见表1<sup>[8]</sup>,去除表1中基层参数即为单层板路面结构参数。按 $L_{16}(4^5)$ 进行正交设计,结果见表2<sup>[8]</sup>。

表1 不同水平下路面结构参数

水平	$E_c$ /MPa	$h_c$ /m	$E_b$ /MPa	$h_b$ /m	$E_t$ /MPa
1	23 000 (C20)	0.14	1 000	0.14	30
2	25 000 (C25)	0.16	1 500	0.16	60
3	27 000 (C30)	0.18	2 000	0.18	90
4	29 000 (C35)	0.20	2 500	0.20	120

\* 基金项目:交通运输部重点研发项目(2020-MS1-061)

表 2 不同组合下路面结构参数正交试验方案

组合编号	$E_c$ /MPa	$h_c$ /m	$E_b$ /MPa	$h_b$ /m	$E_i$ /MPa
1	23 000	0.14	1 000	0.14	30
2	23 000	0.16	1 500	0.16	60
3	23 000	0.18	2 000	0.18	90
4	23 000	0.20	2 500	0.20	120
5	25 000	0.14	1 500	0.18	120
6	25 000	0.16	1 000	0.20	90
7	25 000	0.18	2 500	0.14	60
8	25 000	0.20	2 000	0.16	30
9	27 000	0.14	2 000	0.20	60
10	27 000	0.16	1 000	0.18	30
11	27 000	0.18	2 500	0.16	120
12	27 000	0.20	1 500	0.14	90
13	29 000	0.14	2 500	0.16	90
14	29 000	0.16	2 000	0.14	120
15	29 000	0.18	1 500	0.20	30
16	29 000	0.20	1 000	0.18	60

1.2 计算结果

对表 2 所示路面结构组合,结合应力回归公式<sup>[8,11]</sup>进行极限状态校核,其他计算条件如下:标准荷载为 30 kN 单轴双轮,极限荷载为 55 kN 单轴双轮<sup>[5]</sup>,设计年限为 10 年,年平均日交通量为 400 pcu/d。

根据 JTG D40—2011《公路水泥混凝土路面设计规范》中可靠度设计标准及可靠度系数  $\gamma_r$  (见表 3、表 4)进行可靠度设计标准及可靠度系数取值,

农村公路安全等级为三级,变异水平按照较差情况选择高等级,目标可靠度为 70%,可靠度系数  $\gamma_r$  取 1.07,自然区划选择 IV 区(湖北省)。按式(1)、式(2)对路面结构的疲劳断裂和极限断裂进行判断,结果见图 1、图 2。

表 3 可靠度设计标准

公路等级	安全等级	设计基准期/年	目标可靠度/%
高速公路	一级	30	95
一级公路	一级	30	90
二级公路	二级	20	85
三级公路	三级	15	80
四级公路	三级	10	70

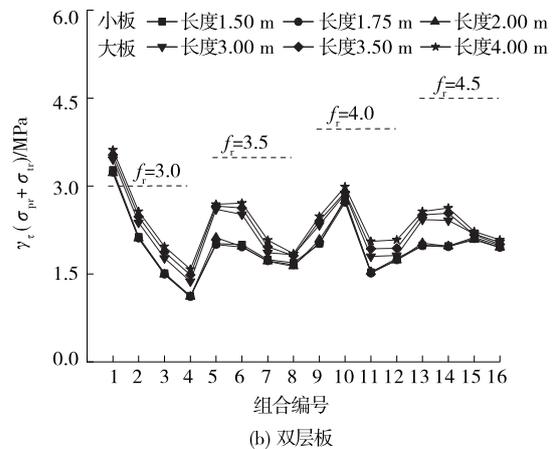
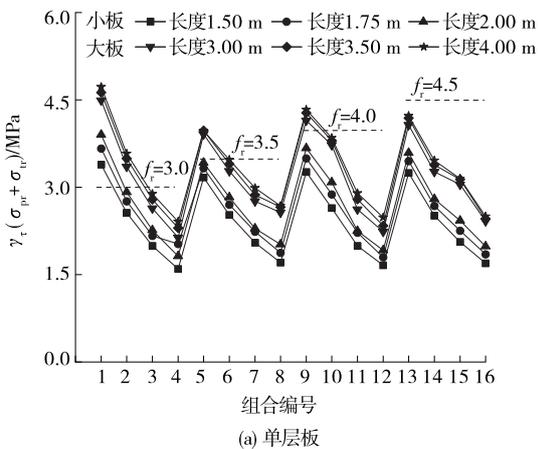
表 4 可靠度系数

变异水平等级	不同目标可靠度(%)下可靠度系数			
	95	90	85	70~80
低	1.20~1.33	1.09~1.16	1.04~1.08	—
中	1.33~1.50	1.16~1.23	1.08~1.13	1.04~1.07
高	—	1.23~1.33	1.13~1.18	1.07~1.11

$$\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_r \tag{1}$$

$$\gamma_r(\sigma_{p,max} + \sigma_{t,max}) \leq f_r \tag{2}$$

式中: $\sigma_{pr}$ 为设计荷载在临界荷位处产生的荷载疲劳应力; $\sigma_{tr}$ 为临界荷位处产生的温度疲劳应力; $f_r$ 为混凝土设计弯拉强度; $\sigma_{p,max}$ 为最重轴载在临界荷位处产生的最大荷载应力; $\sigma_{t,max}$ 为最大温度梯度时最大温度应力。



虚线上部的组合不能通过验算。图 2 相同

图 1  $\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr})$  应力

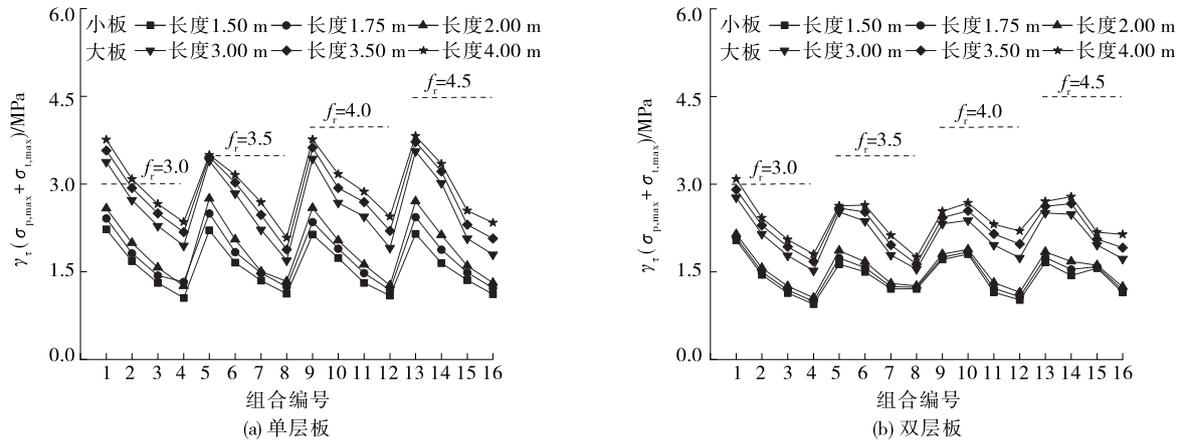


图 2  $\gamma_t(\sigma_{p,max} + \sigma_{t,max})$  应力

路面结构组合中混凝土强度有 4 种,组合 1~4 为 C20,组合 5~8 为 C25,组合 9~12 为 C30,组合 13~16 为 C35,弯拉强度分别为 3.0 MPa、3.5 MPa、4.0 MPa、4.5 MPa。由图 1 可知:通过对板体的“切割”,疲劳应力( $\sigma_{pr} + \sigma_{tr}$ )变化最大的是单层板结构,发生在单层板长 3.00 m、组合 8 情况下,且“切割”对单层板疲劳应力影响的平均差异为 22.2%,而双层板的平均差异为 14.8%。由图 2 可知:“切割”对主应力( $\sigma_{p,max} + \sigma_{t,max}$ )影响较大的是单层板结构,发生在单层板长 4.00 m、组合 10 情况下,“切割”对单层板主应力影响的平均差异为 38.2%,而双层板的平均差异为 34.2%。说明“切割”板体对单层板结构的受力影响较大,导致其受荷载和温度作用时产生明显差异,即单层板路面结构受荷载和温度影响更大。其原因是单层板结构的弯曲刚度小于双层板结构。

## 2 经济性分析

对同等施工条件、不同荷载作用(设计轴载作用次数和疲劳极限轴载作用次数)下不同路面结构进行经济性分析。根据工程实际情况,对单层、双层路面结构的不同组合进行定价,定额参照 2022 年 3 月武汉市建筑材料市场均价及 2018 版《湖北省市政工程消耗量定额及全费用基价表》。分析中假定不同强度水泥混凝土面层的施工方法、所用设备、所需工时及其他费用相近,只有材料费不同,材料费差别仅为水泥剂量不同。基层也是如此。参考文献[12],面层和基层的造价分别见表 5、表 6,不同路面结构组合的造价见表 7。

### 2.1 设计寿命下的经济性

根据不同路面结构组合的造价,利用总造价/设

表 5 1 cm 厚水泥混凝土面层的造价

混凝土等级	造价/ (元·m <sup>-2</sup> )	混凝土等级	造价/ (元·m <sup>-2</sup> )
C20	21.46	C30	21.78
C25	21.61	C35	21.94

表 6 1 cm 厚水稳基层的造价

基层模量/MPa	水泥剂量/%	造价/(元·m <sup>-2</sup> )
1 000	3.0	7.16
1 500	5.0	7.30
2 000	6.5	7.52
2 500	7.5	7.62

表 7 不同路面结构组合的造价

组合 编号	造价/(元·m <sup>-2</sup> )		组合 编号	造价/(元·m <sup>-2</sup> )	
	单层板路 面结构	双层板路 面结构		单层板路 面结构	双层板路 面结构
1	300.44	400.68	9	304.92	455.32
2	343.36	460.16	10	348.48	477.36
3	386.28	521.64	11	392.04	513.96
4	429.20	581.60	12	435.60	537.80
5	302.54	433.94	13	307.16	429.08
6	345.76	488.96	14	351.04	456.32
7	388.98	495.66	15	394.92	540.92
8	432.20	552.52	16	438.80	567.68

计寿命评价路面结构的经济性,其中设计寿命取 10 年,交通量按 JTG 2111—2019《小交通量农村公路工程技术标准》取年平均日交通量为 400 pcu/d。

不同路面结构的成本系数见表 8、表 9。由表 8、表 9 可知:单层板结构的经济性高于双层板结构,小板的经济性优于大板。

表 8 设计寿命下单层板路面结构的成本系数

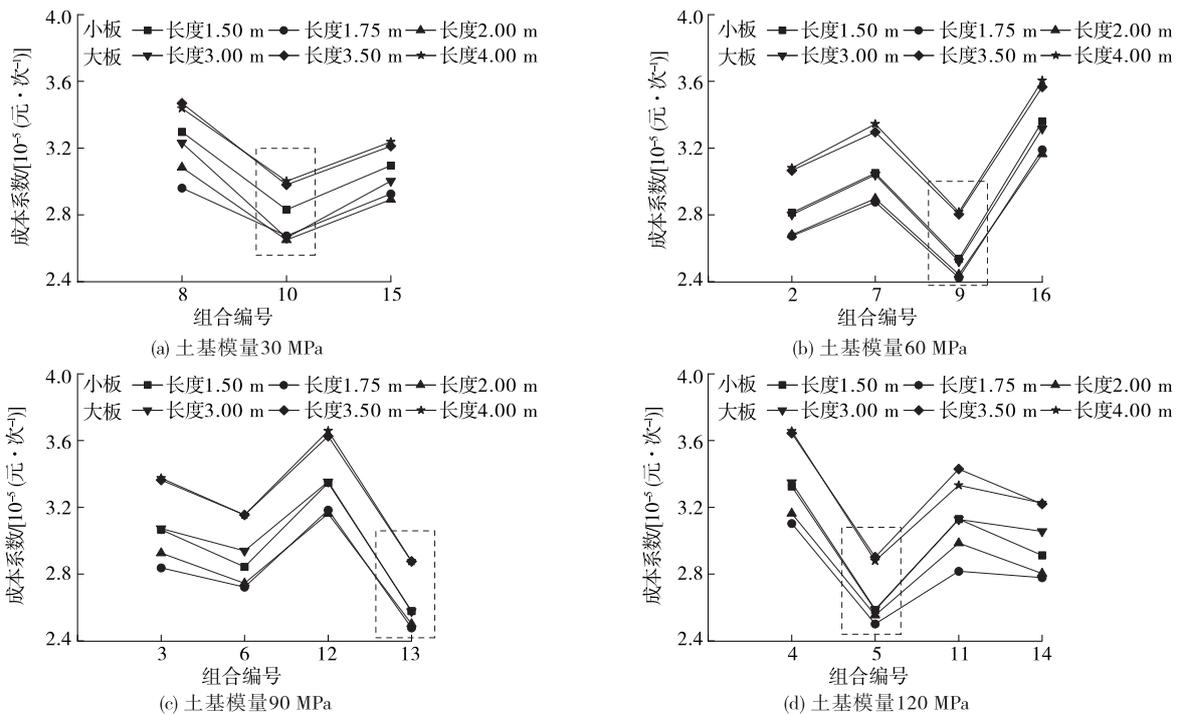
组合编号	不同板长(m)下成本系数/[10 <sup>-5</sup> (元·次 <sup>-1</sup> )]					
	1.50	1.75	2.00	3.00	3.50	4.00
1	—	—	—	—	—	—
2	2.81	2.67	2.68	—	—	—
3	3.07	2.54	2.93	3.07	3.36	3.38
4	3.33	3.10	3.16	3.35	3.64	3.66
5	2.58	2.50	2.55	—	—	—
6	2.84	2.72	2.74	2.94	3.15	3.15
7	3.05	2.88	2.90	3.04	3.30	3.35
8	3.30	2.96	3.08	3.23	3.47	3.44
9	2.54	2.42	2.44	—	—	—
10	2.83	2.67	2.65	2.66	2.98	3.00
11	3.13	2.82	2.99	3.13	3.43	3.33
12	3.35	3.18	3.16	3.35	3.63	3.66
13	2.58	2.48	2.50	2.58	2.88	2.88
14	2.91	2.78	2.80	3.06	3.22	3.23
15	3.10	2.93	2.89	3.00	3.21	3.24
16	3.36	3.19	3.16	3.32	3.57	3.60

注:“—”表示未通过极限状态校核,不列入计算。下同。

表 9 设计寿命下双层板路面结构的成本系数

组合编号	不同板长(m)下成本系数/[10 <sup>-5</sup> (元·次 <sup>-1</sup> )]					
	1.50	1.75	2.00	3.00	3.50	4.00
1	—	—	—	—	—	—
2	5.02	5.60	5.62	4.04	4.51	4.52
3	5.50	6.27	6.25	4.43	5.04	5.03
4	6.12	6.79	6.80	4.93	5.47	5.47
5	5.18	6.00	6.02	4.17	4.83	4.84
6	5.38	6.04	6.01	4.33	4.86	4.83
7	5.14	5.63	5.67	4.13	4.53	4.56
8	5.43	5.85	5.86	4.37	4.71	4.71
9	5.61	5.57	5.54	4.51	5.21	4.46
10	5.01	5.28	5.56	4.03	3.38	4.48
11	5.46	6.09	5.43	4.39	4.90	4.37
12	5.31	5.78	5.80	4.28	4.65	4.67
13	5.13	5.93	5.94	4.13	4.77	4.78
14	4.97	5.56	5.56	4.00	4.47	4.47
15	5.37	5.81	6.11	4.32	4.68	4.91
16	5.59	5.77	6.05	4.50	4.64	4.87

按土基模量将单层板结构分成 4 组进行成本系数比较,结果见图 3。土基模量为 30 MPa 时,组合 10 的经济性最优;土基模量为 60 MPa 时,组合 9 的



虚线部分为经济性最优组合。图 5 相同

图 3 设计寿命下不同土基模量时单层板结构的成本系数

经济性最优;土基模量为 90 MPa 时,组合 13 的经济性最优;在土基模量为 120 MPa 时,组合 5 经济性最优。可根据不同土基情况进行路面结构选择。

根据图 3 初步确定土基模量为 60 MPa、90 MPa、120 MPa 时最佳面层厚度为 0.14 m,土基模量为 30 MPa 时最佳面层厚度为 0.16 m。这是由于正交试验不具备全样本,缺少土基模量为 30 MPa 时路面结构厚度为 0.14 m 的计算结果。经核算,厚度 0.14 m 能通过验算。最后对经济性较高的单层板结构进行不同面层模量分析,极限状态下校核结果见表 10,最优路面结构厚度下成本系数和路面结构见表 11。只考虑设计寿命时,由于通组公路车辆轴载较轻,单层板路面结构的性价比优于双层板,小尺寸板体的经济性优于大尺寸板体。

表 10 极限状态下单层板结构校核结果

土基模量/MPa	面层厚度/m	不同面层模量(MPa)下校核结果			
		23 000	25 000	27 000	29 000
30	0.14	—	—	—	✓
60	0.14	—	—	✓	✓
90	0.14	—	—	✓	✓
120	0.14	—	✓	✓	✓

注:土基模量 30 MPa 为规范给定的最小值;“—”表示不能通过校核;“✓”表示能通过校核。

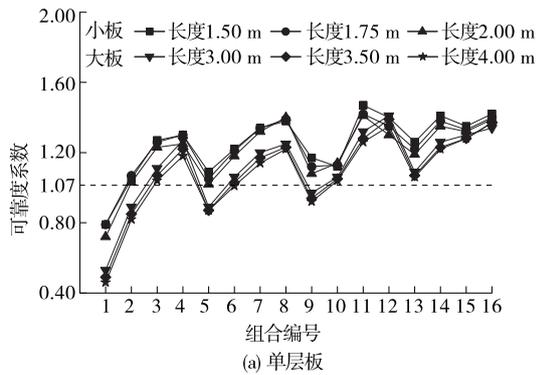
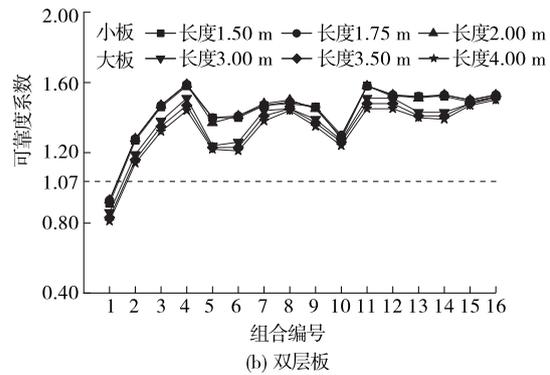


表 11 最优路面结构厚度下成本系数及路面结构

土基模量/MPa	成本系数/[10 <sup>-5</sup> (元·次 <sup>-1</sup> )]	单层小板
30~60	≥2.604 4	14 cm 水泥混凝土面层 (f <sub>t</sub> ≥4.5 MPa)
60~120	≥2.542 3	14 cm 水泥混凝土面层 (f <sub>t</sub> ≥4.0 MPa)
≥120	≥2.501 6	14 cm 水泥混凝土面层 (f <sub>t</sub> ≥3.5 MPa)

按照 10 年设计寿命进一步分析结构可靠度,利用可靠度系数评价设计寿命下结构的安全性。可靠度系数为面层弯拉强度与设计寿命下疲劳应力之比,根据式(1)和图 1 中极限疲劳破坏状态推算每种组合的疲劳应力,单层板、双层板结构的可靠度系数见图 4。由图 4 可知:路面结构安全性由高到低依次为双层小板、双层大板、单层小板、单层大板,安全性最高的是双层小板,最低的是单层大板。造价高低与路面结构安全性一致。



可靠度系数小于 1.07 为不能通过验证(安全等级为三级,变异水平选择高等级)

图 4 不同路面结构组合的可靠度系数

### 2.2 使用寿命下的经济性

根据不同路面结构组合的造价,利用总造价/使用寿命评价经济性和耐久性,其中使用寿命为疲劳破坏下累计轴载作用次数。使用寿命下不同路面结构的成本系数见表 12、表 13。由表 12、表 13 可知:双层板结构的经济性和耐久性高于单层板结构,不同组合路面结构的经济性和耐久性差异较大。由于材料的

疲劳强度需经过反算得到轴载作用次数,加上回归公式中每种路面结构的换算系数不同,导致差异较大。

按土基模量 30 MPa、60 MPa、90 MPa、120 MPa 将双层板结构分成 4 组进行成本系数比较,结果见图 5。从图 5 可以看出:采用双层板结构,小板的经济性和耐久性略优于大板,与轴载换算系数相同<sup>[8]</sup>,说明路面结构厚度对经济性和耐久性的影响较大。

表 12 使用寿命下下层板路面结构的成本系数

组合编号	不同板长(m)下成本系数/(元·次 <sup>-1</sup> )					
	1.50	1.75	2.00	3.00	3.50	4.00
1	—	—	—	—	—	—
2	$1.75 \times 10^{-6}$	$6.24 \times 10^{-6}$	$1.62 \times 10^{-5}$	—	—	—
3	$2.34 \times 10^{-8}$	$8.33 \times 10^{-8}$	$2.09 \times 10^{-7}$	$2.88 \times 10^{-6}$	$7.38 \times 10^{-6}$	$1.51 \times 10^{-5}$
4	$5.26 \times 10^{-10}$	$3.20 \times 10^{-8}$	$4.73 \times 10^{-9}$	$6.52 \times 10^{-8}$	$1.73 \times 10^{-7}$	$3.67 \times 10^{-7}$
5	$4.49 \times 10^{-6}$	$1.04 \times 10^{-5}$	$1.71 \times 10^{-5}$	—	—	—
6	$9.11 \times 10^{-8}$	$2.88 \times 10^{-7}$	$6.57 \times 10^{-7}$	$8.71 \times 10^{-6}$	$1.65 \times 10^{-5}$	$2.67 \times 10^{-5}$
7	$2.48 \times 10^{-9}$	$1.13 \times 10^{-8}$	$1.72 \times 10^{-8}$	$4.74 \times 10^{-7}$	$8.28 \times 10^{-7}$	$1.64 \times 10^{-6}$
8	$1.13 \times 10^{-10}$	$5.28 \times 10^{-10}$	$1.97 \times 10^{-9}$	$1.39 \times 10^{-7}$	$2.57 \times 10^{-7}$	$3.15 \times 10^{-7}$
9	$6.99 \times 10^{-7}$	$2.29 \times 10^{-6}$	$5.36 \times 10^{-6}$	—	—	—
10	$1.95 \times 10^{-8}$	$8.33 \times 10^{-8}$	$2.79 \times 10^{-7}$	$7.56 \times 10^{-6}$	$1.09 \times 10^{-5}$	$1.50 \times 10^{-5}$
11	$1.56 \times 10^{-10}$	$9.27 \times 10^{-10}$	$1.23 \times 10^{-9}$	$1.29 \times 10^{-8}$	$2.72 \times 10^{-8}$	$4.51 \times 10^{-8}$
12	$6.53 \times 10^{-10}$	$2.65 \times 10^{-10}$	$7.94 \times 10^{-10}$	$1.24 \times 10^{-9}$	$1.99 \times 10^{-9}$	$3.80 \times 10^{-9}$
13	$8.21 \times 10^{-8}$	$2.37 \times 10^{-7}$	$4.78 \times 10^{-7}$	$3.96 \times 10^{-6}$	$6.33 \times 10^{-6}$	$8.18 \times 10^{-6}$
14	$1.06 \times 10^{-9}$	$3.15 \times 10^{-9}$	$6.75 \times 10^{-9}$	$7.36 \times 10^{-8}$	$1.11 \times 10^{-7}$	$1.54 \times 10^{-7}$
15	$3.43 \times 10^{-9}$	$1.57 \times 10^{-9}$	$5.70 \times 10^{-9}$	$3.23 \times 10^{-8}$	$5.34 \times 10^{-8}$	$6.06 \times 10^{-8}$
16	$1.20 \times 10^{-10}$	$5.31 \times 10^{-10}$	$1.80 \times 10^{-10}$	$6.17 \times 10^{-10}$	$8.10 \times 10^{-10}$	$9.88 \times 10^{-10}$

表 13 使用寿命下双层板路面结构的成本系数

组合编号	不同板长(m)下成本系数/(元·次 <sup>-1</sup> )					
	1.50	1.75	2.00	3.00	3.50	4.00
1	—	—	—	—	—	—
2	$1.26 \times 10^{-7}$	$1.18 \times 10^{-7}$	$1.13 \times 10^{-7}$	$4.98 \times 10^{-7}$	$1.01 \times 10^{-6}$	$1.83 \times 10^{-6}$
3	$3.28 \times 10^{-10}$	$3.13 \times 10^{-10}$	$3.02 \times 10^{-10}$	$1.57 \times 10^{-9}$	$3.32 \times 10^{-9}$	$6.09 \times 10^{-9}$
4	$2.02 \times 10^{-12}$	$1.89 \times 10^{-12}$	$1.82 \times 10^{-12}$	$9.94 \times 10^{-12}$	$2.05 \times 10^{-11}$	$3.77 \times 10^{-11}$
5	$3.29 \times 10^{-9}$	$3.29 \times 10^{-9}$	$6.25 \times 10^{-9}$	$1.07 \times 10^{-7}$	$1.61 \times 10^{-7}$	$1.93 \times 10^{-7}$
6	$2.94 \times 10^{-9}$	$2.32 \times 10^{-9}$	$2.49 \times 10^{-9}$	$7.63 \times 10^{-8}$	$1.49 \times 10^{-7}$	$2.40 \times 10^{-7}$
7	$2.52 \times 10^{-10}$	$2.25 \times 10^{-10}$	$2.08 \times 10^{-10}$	$4.66 \times 10^{-10}$	$7.95 \times 10^{-10}$	$1.41 \times 10^{-9}$
8	$1.56 \times 10^{-10}$	$1.18 \times 10^{-10}$	$8.84 \times 10^{-11}$	$4.99 \times 10^{-10}$	$4.57 \times 10^{-10}$	$5.13 \times 10^{-10}$
9	$3.48 \times 10^{-10}$	$3.38 \times 10^{-10}$	$4.43 \times 10^{-10}$	$1.48 \times 10^{-9}$	$2.19 \times 10^{-9}$	$2.86 \times 10^{-9}$
10	$8.77 \times 10^{-8}$	$6.15 \times 10^{-8}$	$7.38 \times 10^{-8}$	$1.15 \times 10^{-7}$	$1.05 \times 10^{-7}$	$2.07 \times 10^{-7}$
11	$2.54 \times 10^{-12}$	$2.40 \times 10^{-12}$	$2.73 \times 10^{-12}$	$9.38 \times 10^{-12}$	$1.76 \times 10^{-11}$	$3.37 \times 10^{-11}$
12	$3.08 \times 10^{-11}$	$2.68 \times 10^{-11}$	$2.45 \times 10^{-11}$	$4.03 \times 10^{-11}$	$6.75 \times 10^{-11}$	$1.26 \times 10^{-10}$
13	$3.14 \times 10^{-11}$	$3.36 \times 10^{-11}$	$4.09 \times 10^{-11}$	$2.57 \times 10^{-10}$	$3.82 \times 10^{-10}$	$4.93 \times 10^{-10}$
14	$2.63 \times 10^{-11}$	$2.63 \times 10^{-11}$	$2.83 \times 10^{-11}$	$2.44 \times 10^{-10}$	$4.28 \times 10^{-10}$	$6.26 \times 10^{-10}$
15	$1.02 \times 10^{-10}$	$9.40 \times 10^{-11}$	$8.02 \times 10^{-11}$	$1.34 \times 10^{-10}$	$1.25 \times 10^{-10}$	$1.49 \times 10^{-10}$
16	$3.24 \times 10^{-11}$	$2.44 \times 10^{-11}$	$2.54 \times 10^{-11}$	$4.25 \times 10^{-11}$	$3.21 \times 10^{-11}$	$4.52 \times 10^{-11}$

经济性和耐久性由高到低依次为双层小板、双层大板、单层小板、单层大板,与可靠度系数一致。相比

于大板、小板的宽度变化,长宽比变化对经济性的影响不明显。

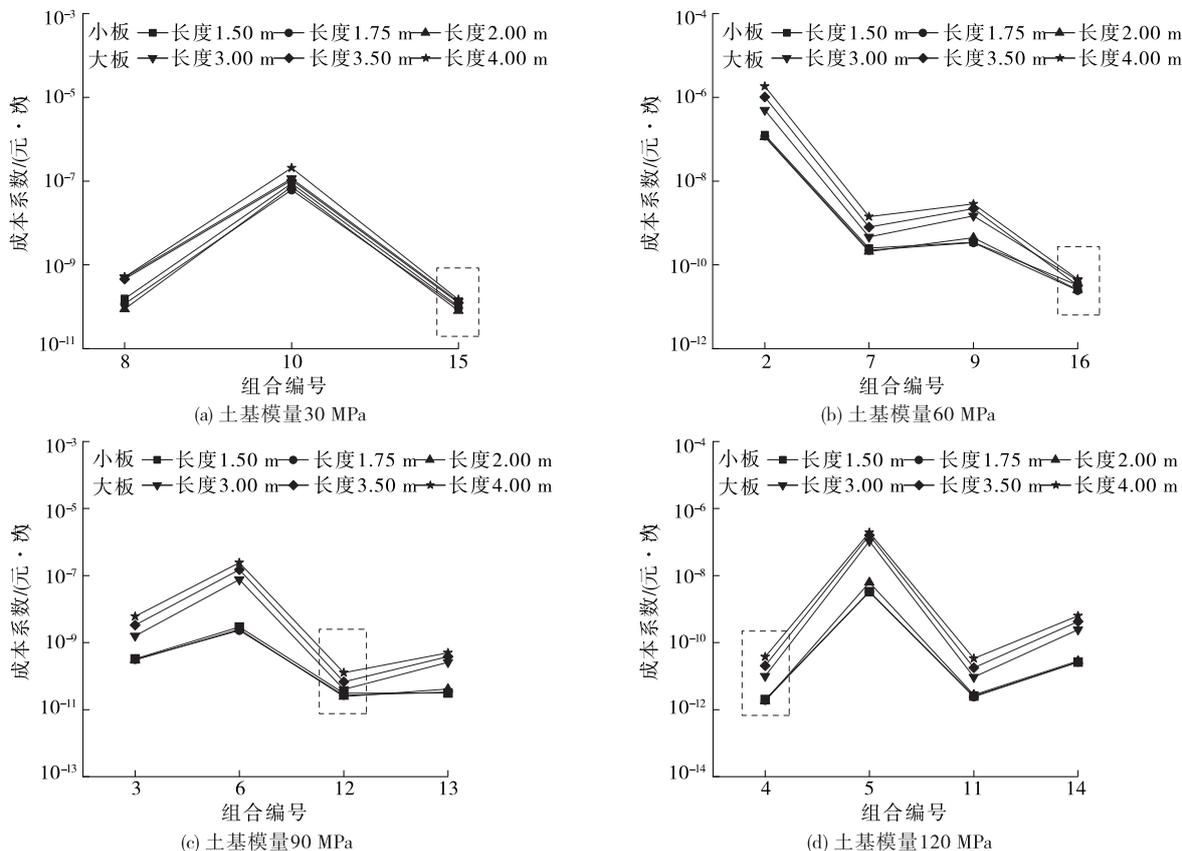


图 5 使用寿命下不同土基模量时的成本系数

### 3 结论

通过对大、小尺寸板体组成的 32 种不同路面结构的正交分析,得到如下结论:

(1) 交通量为 400 pcu/d、设计寿命为 10 年时,利用总造价/设计寿命评价路面结构的经济性,单层板结构的经济性高于双层板结构,小尺寸板体的经济性优于大尺寸板体。

(2) 利用可靠度系数评价设计寿命下结构安全性,结构安全性最高的是双层小尺寸板路面结构,安全性最低的是单层大尺寸板路面结构,其规律与造价一致。

(3) 考虑路面结构的理论使用寿命,利用总造价/理论使用寿命评价路面结构的经济性和耐久性,双层板结构的经济性和耐久性高于单层板结构,小尺寸板体的经济性和耐久性优于大尺寸板体。

(4) 在财政支出有限的情况下,建议按照土基模量范围选取路面结构,土基模量为 30~60 MPa 时,推荐采用 14 cm 厚 C35 混凝土路面结构;土基

模量为 60~120 MPa 时,推荐采用 14 cm 厚 C30 混凝土路面结构;土基模量大于 120 MPa 时,推荐采用 14 cm 厚 C25 混凝土路面结构。

### 参考文献:

- [1] 赵国斌.地方债限额背景下“四好农村路”建设融资问题研究[D].郑州:华北水利水电大学,2020.
- [2] 交通运输部.2019 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL].(2020-05-12)[2023-12-10].[https://www.gov.cn/xinwen/2020-05/12/content\\_5510817.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2020-05/12/content_5510817.htm).
- [3] 肖达勇,郑兴水,李卓伦,等.浅谈农村公路路面类型比较及选择[J].公路交通科技(应用技术版),2015,11(4):55-57.
- [4] 万冬华.重庆农村公路路面耐久性改善对策研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
- [5] 何金兰,黄慧,张洪刚.广西地区普通公路典型路面结构应用调查研究[J].公路与汽运,2017(4):56-58.
- [6] 王春红.云南农村公路新型路面典型结构研究[D].西安:长安大学,2011.

(下转第 151 页)

## 参考文献:

- [1] 陈舞,张国华,王浩,等.基于粗糙集条件信息熵的山岭隧道坍塌风险评价[J].岩土力学,2019,40(9):3549-3558.
- [2] 陈兴海,周航,张广泽,等.山岭隧道大变形危险性评价的能效系数法研究[J].铁道工程学报,2022,39(8):59-65.
- [3] 王峥峥,张哲,高波,等.山岭隧道洞口震害因素分析与抗震风险模糊综合评价[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(3):1122-1130.
- [4] 陈钊,袁航,黄鹏宇,等.基于改进条件概率的贝叶斯网络隧道坍塌安全风险评价[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(1):327-340.
- [5] OU G Z, JIAO Y Y, ZHANG G H, et al. Collapse risk assessment of deep-buried tunnel during construction and its application [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 115: 104019.
- [6] 王金梁,王道隆,陈祖斌,等.基于模糊可拓集的特长隧道施工风险评估[J].公路与汽运,2021(2):150-154+160.
- [7] 乔晓青,杨云.基于粗糙集和风险矩阵的隧道施工塌方风险评估研究[J].公路与汽运,2021(6):162-167.
- [8] DENG X, XU T, WANG R. Risk evaluation model of highway tunnel portal construction based on BP fuzzy neural network [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2018, 2018: 8547313-8547328.
- [9] 黄震,傅鹤林,黄宏伟,等.一种运营地铁盾构隧道结构健康状况评价方法[J].地下空间与工程学报,2018,14(5):1410-1418.
- [10] LIN C J, ZHANG M, LI L P, et al. Risk assessment of tunnel construction based on improved cloud model [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34(3): 04020028.
- [11] 任志华,张博,丁祖德,等.基于云模型的山岭隧道衬砌服役状况评价方法研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(10):2618-2625.
- [12] 倪菲,王凡鑫,徐俊起,等.基于云理论的电磁悬浮系统控制回路性能评估[J].同济大学学报(自然科学版),2021,49(12):1660-1670.
- [13] 宋亮亮,张劲松,杜建波,等.基于云模型的水利工程运行安全韧性评价[J].水资源保护,2023,39(2):208-214.
- [14] 张琦,易云帆,夏鹏.基于熵权云模型的高速公路交通安全风险评估研究[J].公路与汽运,2022(6):20-25+36.
- [15] 傅鹤林,黄震,黄宏伟,等.基于云理论的隧道结构健康诊断方法[J].工程科学学报,2017,39(5):794-801.
- [16] 罗勋,谢文强,曾发宾.基于云模型的复杂艰险山区深埋隧道施工通风系统综合评估[J].铁道学报,2022,44(3):123-131.
- [17] 黄震,傅鹤林,张加兵,等.基于云理论的盾构隧道施工风险综合评价模型[J].铁道科学与工程学报,2018,15(11):3012-3020.
- [18] 刘敦文,贾昊燃,周唱晓,等.基于云模型的盾构隧道开挖面稳定性评价[J].北京交通大学学报,2019,43(3):43-49.
- [19] ZHANG L, WU X, QIN Y, et al. Towards a fuzzy Bayesian network based approach for safety risk analysis of tunnel-induced pipeline damage [J]. Risk Analysis, 2016, 36(2): 278-301.
- [20] 陈舞,孙海清,王浩,等.山岭隧道坍塌风险评价的熵权-集对分析模型及工程应用[J/OL].工程科学与技术:1-12[2023-03-13].
- [21] 陈洁金,周峰,阳军生,等.山岭隧道塌方风险模糊层次分析[J].岩土力学,2009,30(8):2365-2370.
- [22] 交通运输部工程质量监督局.公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估制度及指南解析[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [23] 严钧,王丹妮,伏里为.基于层次分析法的风雨桥价值评价体系与分级保护研究[J].公路与汽运,2023(6):128-131.

收稿日期:2023-11-30

\*\*\*\*\*  
(上接第 145 页)

- [7] 马山松.新疆农村公路路基断面形式及典型路面结构研究[D].西安:长安大学,2015.
- [8] 凌云,夏志浩,白桃,等.小交通量通组公路水泥混凝土路面轴载换算研究[J].公路,2022,67(1):36-46.
- [9] 北京交科公路勘察设计研究院有限公司.小交通量农村公路工程技术标准:JTG 2111—2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [10] 中交公路规划设计院有限公司.公路水泥混凝土路面设计规范:JTG D40—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [11] 高维成.水泥混凝土路面疲劳特性研究[D].西安:西安公路交通大学,2000.
- [12] 李笑盈.路面基层水泥稳定碎石的强度和模量取值研究[D].西安:长安大学,2016.

收稿日期:2023-12-14