

隧道与地下空间多因素围岩压力计算理论 正确性检验与验证

童景盛,张伟强,赵国锐,黎大玮

(中国市政工程西北设计研究院有限公司,甘肃 兰州 730000)

摘 要:采用直接和间接检验方法,通过文献调查、数据监测和统计分析计算,全面对比和验证了多因素围岩压力研究理论计算值与实测值非常接近且误差较小可信度高的客观结论。在直接检验与验证方法中,通过实测塌方高度、垂直向和侧向水平实测荷载等方面的验证,得出研究计算理论在 I~VI 级不同围岩级别下围岩压力计算值与实测值基本吻合;在间接检验与验证方法中,经实测侧向压力和安全系数、数值模拟分析等检验方法的验证,得出研究计算理论值与实测荷载、变形、松弛压力及破坏情况基本一致,研究计算值在有限元模拟云图的有效数值范围之内,间接验证了研究计算理论的合理性和适用性。

关键词:隧道;地下空间;多因素围岩压力;计算理论;检验与验证

中图分类号: U451+.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)11-0022-07

0 引 言

隧道与地下空间围岩压力计算理论的研究经历了对古典理论逐步发展至现代解析法和数值模拟等研究方法地认识和不断完善的过程。至今,其理论仍然伴着力学方法和计算技术的不断进步,向着更全面真实地反映岩体力学性态的研究方向发展。

我国在围岩压力计算理论方面的研究起步较晚,直至 1980 年前后,才有学者研究并计算求解了圆形隧道的弹塑性、黏弹塑性位移解与围岩压力解析解,形成了特征线解法^[1];2004 年,胡文清等学者^[2]应用有限元强度折减法求解隧道围岩安全系数,并研究了隧道的破坏状态,推进了隧道在破坏机理与设计方法方面的研究和应用;2010 年,朱合华教授^[3]对变埋深下软弱破碎围岩破坏试验与数值进行了模拟,对隧道围岩渐进性破坏及机理进行了研究,提出动态压力拱随着隧洞变形和塌方而发展的特点;2022 年,林庆元等学者^[4]基于地层结构法,采用反分析方法得到了围岩压力值与实测值较为接近的结论。

本文通过对多年来大量工程实例数据地统计分

析与理论研究,结合工程实测值、数值模拟分析及规范理论计算法进行综合对比分析的基础上,对隧道与地下空间围岩压力计算通式、支护承载机理、各种型式不同孔跨的隧道在不同环境、不同埋深、不同围岩级别等情况下进行了研究推导计算和验证。一方面,建立客观的能够反映多因素影响指标的围岩压力通用计算理论通式,修正目前围岩压力计算理论参数不足的问题;另一方面,提出与围岩压力计算和应用相关的成套专利和关键技术,改进常用的设计与施工工艺,解决具体项目中的实际应用问题。

1 多因素围岩压力计算理论研究通式

2010 年至今,本文研究团队通过对现有大量隧道与地下空间工程实例数据统计、监测及对比计算分析,探究了目前国内外关于围岩压力常用计算公式的适用性和局限性,并分别采用解析法、数值法和工程实用计算方法的推导分析,经与实测值、数值模拟值及《公路隧道设计规范》(JTG D70—2018)计算值进行大量工程实例和各影响因素的对比研究,提出不同于常用计算方法的研究思路和模型,将目前对围岩压力计算的影响因素由 3~7 项增加至 10 项,建立了客观多因素围岩压力计算理论和方法,提出一种更简单适合工程应用的围岩压力通用简化计算公式^[5-7],如式(1)~(3)所示:

(1)隧道顶部垂直围岩压力通用简化计算公式

收稿日期: 2024-08-26

基金项目: 甘肃省建设厅重大专项研发课题(JK2024-29);甘肃省科技厅重点研发计划项目(24YFGA057)

作者简介: 童景盛(1973—),男,博士,教授级高级工程师,副总工程师,注册土木工程师,从事道桥隧研究与设计咨询工作。

$$\begin{cases} \delta = \gamma H \left[1 + \frac{1+2n}{2a_1 n} \left(\frac{H}{2} \xi \tan \varphi + \frac{c}{\gamma} \right) \right] \\ a_1 = a + \gamma \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

(2) 简化后隧道垂直围岩压力计算式

$$\delta = \frac{(a_1 n' \gamma - c)^2}{2a_1 n' \gamma \xi \tan \varphi} \quad (2)$$

(3) 深浅埋分界深度简化判断通式

$$\begin{cases} H_{\max} = \frac{n' a_1 - c}{\xi \tan \varphi} = \frac{n' a_1 \gamma - c}{\gamma \xi \tan \varphi} \\ n = \frac{L}{2a_1} \\ n' = \frac{2n}{1+2n} \end{cases} \quad (3)$$

式中: δ 为垂直围岩压力; a_1 为洞宽方向地层滑动面半宽; a 为毛洞半宽; φ 为地层内摩擦角; γ 为洞室计算高(近似取洞高 y' , 偏于安全); γ 为重度; H 为覆盖层厚度; ξ 为侧压力系数; c 为黏聚力。

多因素围岩压力计算理论的研究, 集合了大量工程实例的分析与推理, 通过对各种型式不同孔跨隧道在不同环境、不同埋深、不同围岩级别等综合交错复杂的情况下进行比较分析, 推导了客观的能够反映多因素指标的围岩压力通用计算公式, 经与实测值、数值模拟值及《公路隧道设计规范》(JTG D70—2018) 计算值的对比和验证, 与工程实测值非常接近并吻合, 相关系数在 0.96 以上, 平均误差在合理范围之内, 其围岩压力值在深浅埋分界处是连续的, 验证了通用计算方法的可行性与客观性。目前, 国内外常见围岩压力计算理论曲线比较如图 1 所示。

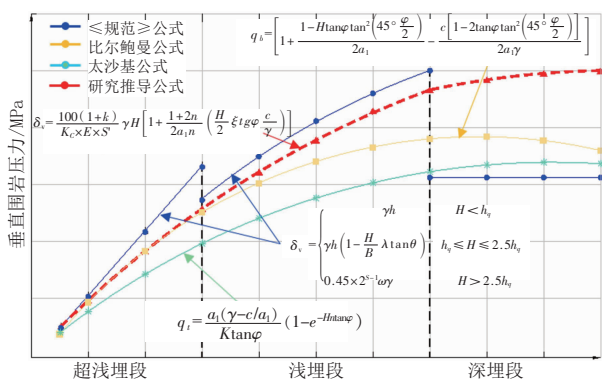


图 1 常见围岩压力计算理论曲线比较图

2 计算通式正确性检验与验证

多因素围岩压力计算理论采用直接检验法和间接检验法进行检验与验证。直接检验法包括塌方高度、实测荷载、已建工程总体、天然洞室稳定等五种检验方法; 间接检验包括实测变形和衬砌厚度方面

的检验与验证。各检验方法仍包含多种检验内容, 课题研究分别从多角度、多因素进行不同方法的检验与验证, 用来证明多因素围岩压力计算理论与实际工程测量数据的相符性、一致性和合理性, 目的是希望研究计算理论能够更可靠、客观地早日广泛应用于实际工程中。

2.1 直接检验与验证

2.1.1 实测塌方高度检验与验证

经验公式法计算围岩压力是目前应用广泛和发展较为成熟的确定围岩压力计算方法^[8]。我国比较有代表性的围岩压力公式有《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016) 中的基于 1 025 个塌方资料和《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004) 关于围岩应力的计算方法, 代表了我国当前围岩压力计算的理论水平。这些公式与关宝树教授编著的《隧道工程设计要点集》^[9] 中介绍的 357 个调查数据整理的各类围岩单线隧道塌方统计数据基本一致, 也与李宁军等学者编著的《隧道设计与施工百问》中 411 座铁路隧道施工塌方资料统计分析相同^[10]。

课题研究对围岩压力计算理论检验与验证分别选用了单车道、2 车道、3 车道、4 车道公路隧道在 I~VI 级不同围岩级别下围岩压力的对比分析与检验(本文仅图 2 表示 4 车道相关数据), 详见图 2 与表 1。

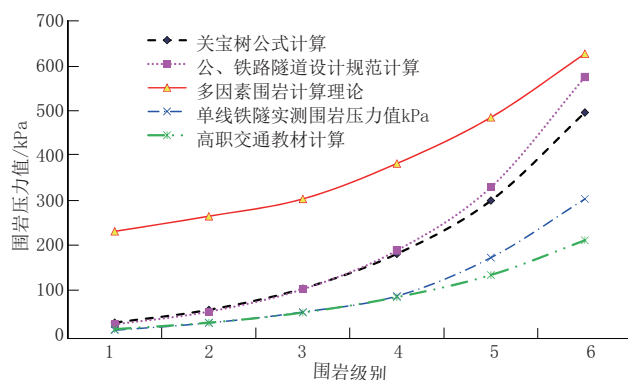


图 2 4 车道公路隧道塌方荷载检验对比图

根据检验分析与比较发现, 单车道实测荷载值与本研究理论计算值比较接近, 最大误差 7.6%; 其他多车道在不同围岩类型条件下计算值与实测值比较接近, 规律曲线也是一致的。而经验公式和现行规范计算值与实测值比较, 仍有一定偏离, 特别是在软弱围岩条件下, 与实测值相比偏离更大, 最大误差 15% 左右。

2.1.2 实测荷载检验与验证

研究中, 选用了 10 项具体工程特例, 分别在浅

表 1 四车道公路隧道塌方荷载计算比较表

围岩级别 s	I	II	III	IV	V	VI
关宝树公式 / kPa	34.25	62.55	109.5	186.03	303.57	497.91
公、铁路隧道设计规范 /kPa	30.375	58.5	108	193.5	333	576
研究计算理论 /kPa	235.69	269.05	307.21	385.32	487.13	627.73
单线铁隧实测值 /kPa	17.55	33.54	57.6	92.88	177.6	307.2
高职交通教材 /kPa	19.81	34.15	56.43	90.49	139.38	215.78
实测值 /kPa			289.50	382.0	478.50	
跨度 /m	20	20	20	20	20	20

埋与深埋条件下,研究多因素围岩压力计算理论与公路、铁路隧道规范公式计算值、实测值进行检验比较,详见表 2~3 所列。

由统计图 3、表比较可以看出,对该 10 项工程围岩压力值实测值与计算值比较接近;而采用《公路隧道设计规范》(JTG D70—2018)理论计算,无论是深埋还是浅埋,整体误差均比研究通式计算值大。

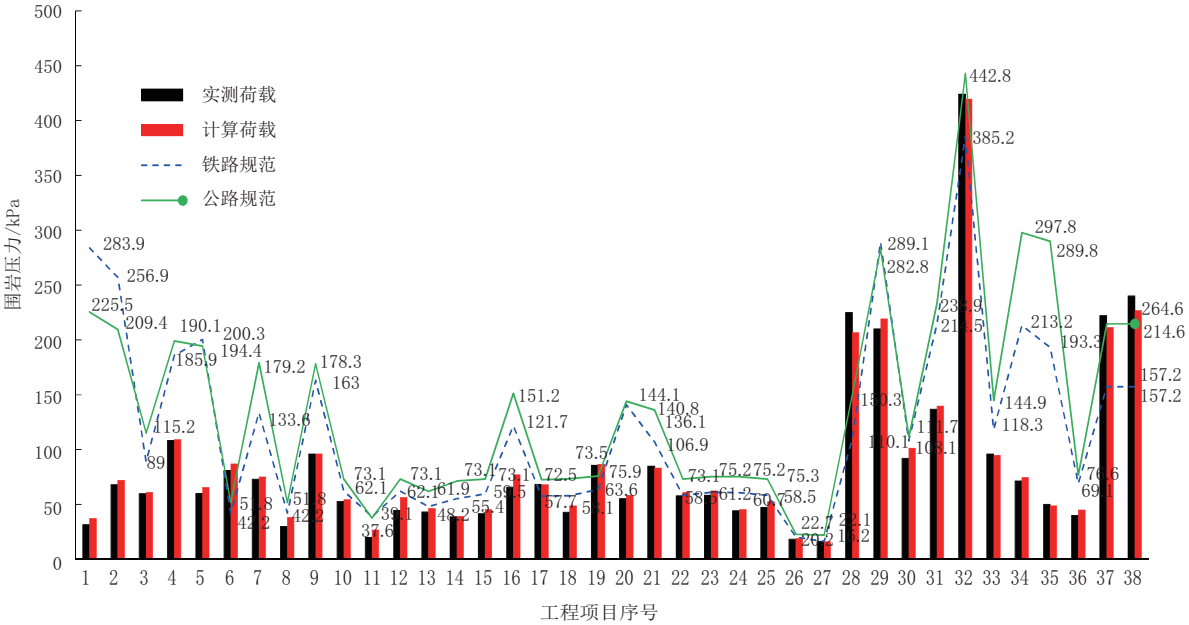


图 3 实测值与各计算方法荷载值统计比较图

该试验工程包括不同跨度(2.9~15.6 m)、不同埋深(9~300 m)、不同围岩承载长跨比(0.4~139.8)、不同衬砌型式(复合式、双层式、整体式、组合式)隧道,其垂直荷载计算值与实测值误差在 -8.1%~34.5% 范围内变化,平均误差 6.2%,相关系数 0.998。

2.1.2.2 侧向水平围岩压力实测检验

侧向水平围岩压力检验与验证采用 8 项工程特例的实测侧荷载系数与计算值的比较,误差在 -6.3%~9.1% 范围内变化,相关系数 0.993 (见表

表 3 实测深埋荷载检验计算比较表

工程名称	山西省 314 上导洞	山西 313 洞全洞	新庄岭隧道	土家湾隧道	软质石灰岩飞机库
公、铁路隧道设计规范 /kPa	179.172	199.08	442.829	276.67	89.165
研究理论 /kPa	75.41	110.27	417.58	139.26	94.19
q 实测 /kPa	73	108.2	424.1	136.8	96
埋深	深埋	深埋	深埋	浅埋	深埋

表 2 实测浅埋荷载检验计算比较表

工程名称	山西省 575 洞三断面	某浅埋隧道	金山隧道西线	金山隧道东线	上海长宁区隧道
公、铁路隧道设计规范 / kPa	97.95	127.7	204.23	217.98	186.22
研究理论 / kPa	54.73	87.53	211.7	227.18	205.99
实测值 q/kPa	52.5	81	222	240	225
埋深	浅埋	浅埋	浅埋	浅埋	浅埋

2.1.2.1 垂直围岩压力实测检验

根据分布在山西、陕西、河南、甘肃、上海、安徽、广东等广大区域的 38 个隧道工程实测围岩压力数据进行分析,如图 3 所示。

4)。按围岩级别计算的侧荷载系数与国内外实测统计资料相符合,但普遍比现行隧道设计规范规定的侧压力系数高,而且不存在侧压力为 0 的情况。

侧向水平侧压力实测数据较少,通常根据室内静止侧压力试验或者根据泊松系数或内摩擦角试验值推算得出,与实测值相比较仍有一定差距,其根本原因是未考虑到洞室开挖后垂直压力向两侧传递的实际情况。特别是现行规范采用的侧压力系数值,均比计算值和实测值小,使得设计与实际工程情况脱

表 4 试验工程实测侧荷载系数与计算侧荷载系数对比表			
工程名称	围岩级别	研究计算侧荷载系数	实测侧荷载系数
京广南双线隧道	Ⅵ	1.599	1.575
渭南新奥法施工黄土坑道	Q3	0.83	0.88
兰州黄土试验洞	Q2	0.6	0.5~0.6
上海亚黏土圆形隧道	亚黏土	0.75	0.7~0.73
成昆南段隧道	Ⅲ~Ⅳ	0.65~0.75	0.6~0.8
成昆北段隧道	Ⅳ	0.75	0.7~0.9
奥塞尼克铁路隧道	Ⅲ~Ⅳ	0.65~0.75	0.7

离。根据国内外实测资料统计发现,侧压力系数一般取值在 0.5~5.5 范围,大部分取值在 0.8~1.2 之间。我国现有实测资料表明:侧压力系数取值为 0.8~3.0,大部分在 0.8~1.2 之间。而我国的隧道设计规范,虽然几次修改规定的侧压力系数有所增大,但至今条文规定后侧压力系数仍然局限于 0~1 之间,且对 I~II 级围岩的侧压力系数取值为 0(见表 5),不仅与实测资料偏离,也与林培源通过国内部分量测数据得出的“不论石质还是土质,隧道的侧压力系数基本都在 0.6~1.0 之间”的结论是不相符的。

表 5 多因素理论计算、规范、实测侧压力系数比较表						
围岩级别	I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	V	Ⅵ
双线隧道侧压力系数	0.18~0.64	0.25~0.72	0.33~0.8	0.43~0.92	0.54~1.08	0.67~1.28
规范侧压力系数	0	0	0~0.15	0.15~0.3	0.3~0.5	0.5~1
实测侧压力系数	大部分 0.8~1.2					

2.1.2.3 实测承载力检验

大量实验数据表明,采用研究理论计算通式计算荷载与实测荷载是相符的^[5-8]。新庄岭隧道工程在实施过程中做了围岩压力和承载力实测试验,具体设计拱形和隧道尺寸(见表 6),这为深入通过承载能力来检验隧道安全合理性提供了必要条件。新庄岭隧道实测垂直荷载为 424.1 kPa,实测侧压力系数为 0.56~0.71;左侧平均侧压力为 301 kPa,右侧平均侧压力为 238 kPa。而采用研究多因素围岩压力理论计算时,垂直荷载为 419.5 kPa,水平侧向荷载为 295.3 kPa,侧压力系数为 0.70,两者计算结论基本吻合。

2.2 计算荷载和安全系数检验施工安全

静宁隧道是双车道黄土隧道,埋深 40 m,属 VI

表 6 新庄岭隧道实测和计算数据比较表				
比较项目	公路隧道规范	铁路隧道规范	实测值	研究理论计算
垂直压力 /kPa	733.5		424.1	417.7
水平压力 /kPa			238~301	297
深浅埋分界深 /m	65.2	40		50.9(2.3vhp)
原设计衬砌总厚度 /cm			80~100	满足要求 $K_{\min}=4.75$
原设计一衬总厚度 /cm			45~65	不满足要求 $K_{\min}=1.22$
优化衬砌设计厚度 /cm			65	满足要求 $K_{\min}=3.22$
优化拱形设计厚度 /cm			36	满足要求 $K_{\min}=2.53$

级围岩,洞顶平坦,排水不利,因降雨渗入,对湿陷性黄土物理力学指标降低显著,施工一次衬砌后未及时进行二次衬砌,造成坍塌。

根据一次衬砌为 C25 混凝土 50 cm 厚计算,当一衬承载长度大于 15 m 时,一衬的安全系数均小于 1(见表 7),属于不安全状态。实际施工采用了一次开挖长度远超过 15 m,造成安全系数严重不足,使得塌方段达 63 m。原理论对衬砌支护并没有考虑一次开挖和承载长度问题,而多因素围岩压力理论考虑并开发相关计算软件可便捷地计算任意施工状态的洞室安全程度,为安全施工创造了有利条件。

表 7 静宁隧道的一次衬砌安全承载长度分析			
一次衬砌承载长度 /m	垂直荷载 q /kPa	侧向荷载 e /kPa	一次衬砌安全系数
1	117	150	3.49
2	130	168	2.67
4	155	200	1.89
15	238	307	0.94
24	275	354	0.77
100	363	467	0.54
200	386	497	0.5
2 679	413	528	0.47

2.3 间接检验与验证

通过采用实测衬砌变形可以正确推算围岩荷载的大小和分布,并将已建隧道衬砌厚度与按研究理论计算求得的衬砌厚度相比较,间接推断计算荷载的可信度。

2.3.1 工程变形实测数据检验

2.3.1.1 实测侧向压力和安全系数检验

《京广双线隧道地压量测及其结果》指出,长

714 m 的双线隧道,连续施工长达 5 a 之久,主要原因是按照《公路隧道设计规范》(JTG D70—2018)确定的偏小的侧压力系数并引用了标准图($f=0.6$)之因,非最佳拱轴线合理受力而造成拱顶内缘压酥、拱腰拱趾拉裂破坏。本文提出“压力盒量测出应有不小的侧向压力。如果只有竖向荷载,无论竖向荷载怎样分布不均,都不可能使拱顶内缘受压,而实测的三个隧道的拱顶内缘都是受压的。得出结论‘双线隧道拱部衬砌产生裂缝的主要原因是尖拱型衬砌型式不适应实际土压力大小及分布’”,其破坏情况如表 8 所列。

表 8 某京广线南段某双线隧道设计与实测值比较表

荷载	垂直 压力 / kPa	水平 压力 / kPa	最大偏 心距 / cm	最小安 全系数	位移 情况	破坏 情况
规范 荷载	246.5	123.2	38.0	10.4	拱顶内移, 拱腰外移	不破坏
研究 理论	219.4	350.9	58.0	1.19	拱顶外移, 拱腰内移	拱顶压碎, 拱腰裂缝
实测 荷载	209.4	330.0	65.0	1.30	拱顶外移, 拱腰内移	拱顶压碎, 拱腰裂缝

按实测平均荷载和实际净空尺寸计算,原标准图设计拱顶厚 100 cm,拱脚厚 215 cm,仍不能满足工程安全要求;拱顶 0 截面安全系数仅 1.3,负弯矩产生拱顶内缘压酥的破坏;拱腰 3、4、5 截面,安全系数 2.14~3.06,也不符合规范要求,正弯矩产生拱腰内缘拉裂破坏。由上表实测变形分析与计算结果对比可知,多因素围岩压力计算理论与实测荷载、位移及破坏情况基本是一致的。

2.3.1.2 实测松弛压力检验

通过如下 5 项工程实测松弛压力值分别与规范计算值、研究理论计算值的对比分析,验证多因素围岩压力计算理论的客观性,如表 9 所列。

表 9 实测松弛压力检验比较表

单位:kPa

工程名称	山西省 313 全洞 实测山体 压力	山西省 314 上导 洞实测山 体压力	河南 10 m 跨黄土洞 室实测荷 载	京广线双 线隧道地 压量测	上海长宁 区隧道
公、铁路 隧道规范	199.08	179.172	194.4	244.83	111.74
研究理论 计算	110.2	75.53	67.29	218.81	100.87
q 实测	108.2	73	60	210	92
埋深	深埋	深埋	深埋	浅埋	深埋

表 9 看出,实测松弛压力实测变形值与研究理论围岩压力计算值非常接近。

2.3.2 已建项目衬砌厚度和衬砌型式检验

2.3.2.1 优化衬砌厚度对围岩压力影响检验

用已建项目衬砌厚度反算并判断承载能力来检验计算荷载正确性,在岩土工程中是一种可行的验证方法。因此,采用课题研究优化拱形衬砌厚度与其实际衬砌厚度比较,可间接推算计算荷载的正确性。研究选择跨度 5~31 m 的 11 项隧道工程实际衬砌总厚度和二衬厚度与本研究计算优化衬砌厚度比较如表 10 所列。

表 10 计算荷载和优化拱形衬砌厚度与实际衬砌厚度比较表

工程名称	跨度 / m	计算优 化衬砌 厚度 / cm	实际衬砌 总厚度 / cm	实际 二衬 厚度 / cm	优化厚度 比总厚度 减薄 / %	优化厚 度比二 衬减薄 / %
单线 V 级 围岩	5.00	26	45	30	-42.2	-13.3
双线 V 级 围岩	8.54	21	45	30	-53.3	-30.0
V 级围岩	9.06	26	40	30	-35.0	-13.3
IV 级围岩 深埋	15.10	33	58	35	-43.1	-5.7
IV 级围岩 浅埋	15.10	33	58	35	-43.1	-5.7
III 级围岩双 线 8 车道	18.65	42	55	55	-23.6	-23.6
IV 级围岩 双线 8 车道	18.65	53	75	55	-29.3	-3.6
V 级围岩 双线 8 车道	18.65	74	90	65	-17.8	13.8
大连金州 隧道	22.48	85	96	70	-11.5	21.4
四线 V 级 围岩	23.24	110	130	105	-15.4	4.8

由表 10 比较可知,采用课题研究拱形优化后的衬砌厚度比实际复合式衬砌总厚度平均减薄 29.5%,两者相关系数达 0.985;优化衬砌厚度比实际二衬厚度平均减薄 5.5%,两者相关系数达 0.974。工程算例中,优化后衬砌厚度比日本单双线隧道和新干线平均减薄衬砌 31.76%,比现代复合式衬砌规范推荐厚度减薄 39%,但优化拱形后,在衬砌减薄的情况下,已建工程运行均是安全的,间接验证了采用衬砌厚度反算承载力检验研究计算理论是可行的。

2.3.2.2 衬砌型式对围岩压力影响检验

通过收集统计的 38 项详细数据和围岩压力计算比较表明,无论是复合式衬砌、双层式衬砌、整体式衬砌来说,衬砌型式变化对围岩压力影响很小,采用多因素围岩压力理论计算荷载值与实测荷载值都非常吻合,荷载计算比较柱状图如图 4 所示。

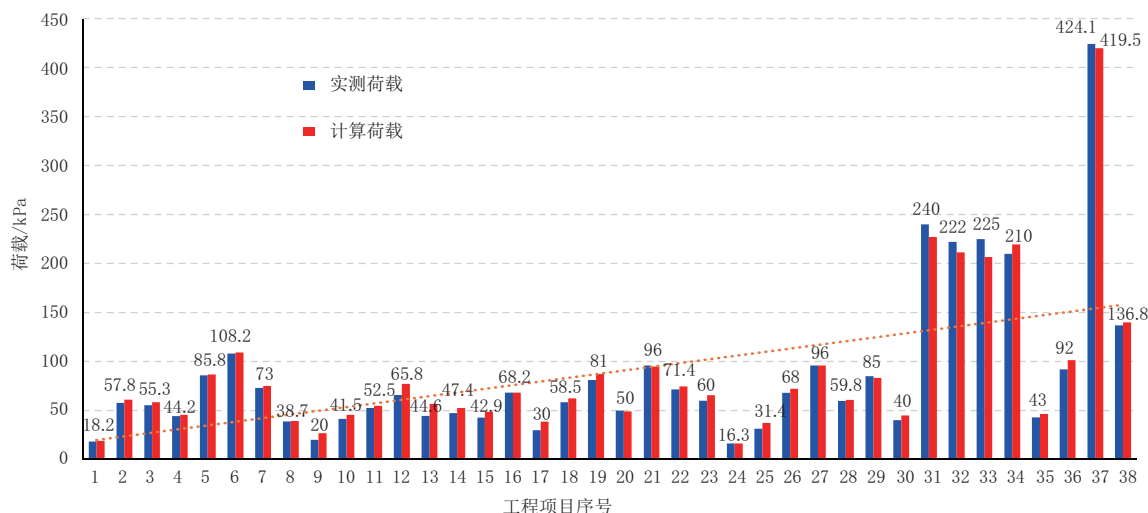


图 4 实测荷载与研究计算荷载统计比较图

2.3.3 数值模拟检验

根据工程实例并运用 MIDAS GTS 软件进行有限元建模分析:模型尺寸 120 m × 120 m, 网格为自动生成三角形网格, 单元尺寸设置为 1 m, 分为开挖区、基础区、初衬区。

边界条件:模型底部设置竖向位移约束, 左边界和右边界设置水平位移约束; 施工阶段采用 2 步进行数值模拟:第一步, 生成初始地应力场, 并将自重应力引起的围岩位移清零; 第二步, 工况开挖分三次开挖, 分别进行开挖引起的围岩应力应变计算。

课题研究对 I~VI 级围岩在深埋情况下, 同孔跨断面与埋深情况下的隧道围岩压力进行模拟分析, 并与研究计算值、《公路隧道设计规范》(JTG D70—2018) 计算值、部分围岩级别同类型条件下的实测值进行分析和比较, 检验研究计算理论的可行性与正确性, 数值模拟 I~VI 级围岩的围岩压力云图如图 5 所示^[11-12]。

对以上 I~VI 级云图有效范围内围岩压力分析统计如表 10 所列, 结合《公路隧道设计规范》(JTG D70—2018) 计算值、研究公式计算值及实测拱顶围岩压力值进行分析和比较如表 11 所列。

表 11 数值可以看出, 实测围岩压力基本小于研究计算公式计算值, 但是比规范计算值大很多, 并在有限元模拟云图有效数值范围之内。规范计算值对本试验段 IV~V 级围岩来说, 计算值偏小, 因而在工程实际应用中来说, 是偏于不安全的, 从而间接的验证了研究计算公式的合理性和适用性。

3 结 语

本文通过文献调查和工程实测数据、统计分析计算, 分别从多角度、多因素不同角度和方法对国内

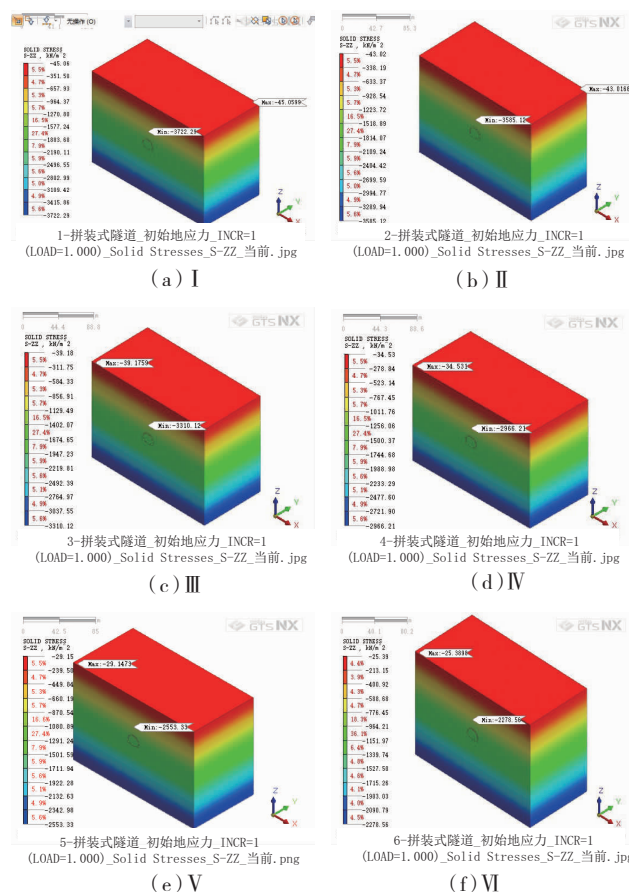


图 5 数值模拟垂直向围岩 (I~VI 级围岩) 压力云图

表 11 各级围岩压力 (I~VI 级) 统计分析比较表 单位: kPa

序号	围岩类别	有限元数值模拟值	《公路隧道设计规范》(JTG D70—2018) 计算值	研究公式计算值	实测拱顶围岩压力值
1	I	240~600	25.27	333.88	
2	II	300~700	48.67	503.38	
3	III	400~800	89.86	666.46	650.0
4	IV	450~900	160.99	820.12	805.0
5	V	650~1 200	277.06	909.27	880.0
6	VI	750~1 300	479.23	935.98	

外大量工程实例现有资料的实测数据、主导理论以及近年来工程试验的相关资料进行了研究、理论计算与试验量测对比,来验证多因素围岩压力计算理论的客观性,结论如下。

(1)多因素围岩压力计算理论的研究,集合了大量工程实例的分析与推理,经与实测值、数值模拟值及《规范》计算值的对比检验得出,其计算值与工程实测值非常接近并吻合,相关系数在 0.96 以上,其围岩压力值在深浅埋分界处是连续,验证了研究计算理论的可行性,可为隧道与地下空间的设计与施工提供重要的参考与指导。

(2)采用直接检验与验证方法,分别通过实测塌方高度、垂直向和侧向水平实测荷载、实测承载力、计算荷载和安全系数等方面大量工程实例相关数据的分析计算和验证,认为采用研究课题计算理论在 I~VI 级不同围岩级别下围岩压力计算值与实测值基本吻合,统计工程实测值与研究计算值最大误差 13.17%,最小误差 -22.02%,相关系数达 0.998,说明研究计算值可信度高,与工程实际情况相吻合。

(3)采用间接检验与验证方法,经实测侧向压力和安全系数、实测松弛压力、已建项目衬砌厚度和型式、数值模拟分析等检验方法对研究计算理论进行验证,认为多因素围岩压力计算理论值与实测荷载、变形、松弛压力及破坏情况基本是一致的;采用课题研究的优化拱形衬砌厚度与其实际衬砌厚度比较,能够比实际复合式衬砌总厚度平均减薄 30%左右;采用数值模拟分析发现,研究计算值在有限元模拟云图有效数值范围之内,而规范计算值在 IV~V 级围岩计算值偏小,是偏于不安全的,间接验证了研究计

算公式的合理性和适用性。

参考文献:

- [1] 于学馥.岩石力学的数学描述与计算试验技术[J].岩石力学与工程学报,1997,1(3):93-96.
- [2] 郑颖人,胡文清,王敬林.强度折减有限元法及其在隧道与地下洞室工程中的应用[C]//中国土木工程学会第十一届论文集.北京:中国土木工程学会,2004:247-251.
- [3] 朱合华,黄峰.变埋深下软弱破碎隧道围岩渐进性破坏试验与数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2010,29(6):1113-1121.
- [4] 林庆元,尤昭.基于地层结构法的隧道围岩压力反分析[J].交通科技,2022(5):85-89.
- [5] Jingsheng Tong.General formulas for calculating surrounding rock pressure of tunnels and underground spaces[J].KSCE Journal of Civil Engineering,2020,24(4):1348-1356.
- [6] Jingsheng Tong.Research on application of multi-factor surrounding rock pressure calculation theory in engineering [J].KSCE Journal of Civil Engineering,2021,25(6):1-12.
- [7] 童景盛,王胜利,韩秀丽,等.隧道与地下空间深、浅埋垂直围岩压力通用设计计算方法:中国,CN106383945B[P].2019-08-06.
- [8] Bhawani singh,Goel R K,Jethwa J L.Support pressure assessment in arched underground openings through poor rock masses[J].Engineering Geology,1997,48(2):59-81.
- [9] 关宝树.隧道工程设计要点集[M].北京:人民交通出版社,2003:120-135.
- [10] 李宁可,曹文贵,刘生.隧道设计与施工百问[M].北京:人民交通出版社,2004:217-225.
- [11] J.S. Tong,H.M. Zhang,W.Q. Zhang.Application and numerical simulation of key technologies for deep foundation pit support[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Civil Engineering,2023.New York :New York Science Publishing Group,427-438.
- [12] 童景盛,张伟强,赵国锐.地下空间深基坑支护关键技术应用与数值模拟分析[C]//2024 世界交通运输大会(WTC2024)论文集.隧道工程,北京:人民交通出版社,471-477.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com