

中文引用格式:王善刚,余群舟,于警举. 基于熵权云模型的盾构下穿建筑安全评价与控制[J]. 中国安全科学学报,2026,36(2): 262-270.

英文引用格式:WANG Shangang, YU Qunzhou, YU Jingju. Safety evaluation and control of shield tunnel underpass buildings based on entropy weight cloud model [J]. China Safety Science Journal,2026,36(2):262-270.

基于熵权云模型的盾构下穿建筑安全评价与控制^{*}

王善刚, 余群舟^{**} 副教授, 于警举

(华中科技大学 土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074)

中图分类号:X913.4;U455.43 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.02.0643

【摘要】 为解决盾构下穿建筑安全评价时指标体系不全面、计算结果准确性低及控制措施适用性不强等难题,提出基于熵权云模型的盾构下穿建筑安全状态评价方法。首先分析影响项目安全状态的各种因素,确定项目整体安全水平,它是房屋建筑原始安全水平和下穿施工过程扰动效应共同作用的结果;其次建立由建筑既有抗变形能力、建筑健康完损状态与建筑物重要性3类因素共13项指标组成的建筑物原始安全状态评价指标体系,以及由开挖面失稳、盾构机环侧土体位移、后续土体固结、施工管理水平和建筑与隧道位置关系5类因素共22项指标组成的下穿施工过程安全评价指标体系;然后利用熵权法确定各指标权重,基于云模型确定指标数字特征,通过模糊贴近度(FSM)算法确定安全水平与发展趋势,并利用加权拟合权重值判断主次风险控制点;最后以某地铁下穿2个建筑项目为例,验证指标体系与评价方法。研究表明:2个建筑原始安全状态和下穿2个建筑施工过程均为一般安全,整体风险在可接受范围之内;对于非项目固有属性的二级指标,将加权拟合权重值超过平均水平(0.04)的因素作为关键控制点,0.02~0.04之间的作为次要控制点,0~0.02的作为一般控制点。

【关键词】 盾构下穿建筑; 熵权法; 云模型; 安全评价; 控制措施; 模糊贴近度(FSM); 评价指标体系

Safety evaluation and control of shield tunnel underpass buildings based on entropy weight cloud model

WANG Shangang, YU Qunzhou, YU Jingju

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and
Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: In order to solve the problems of incomplete index system, low accuracy of calculation results and weak applicability of control measures when evaluating the safety of shield tunneling underpasses, a method for evaluating the safety status of shield tunneling underpasses was studied based on entropy weight cloud model. By analyzing various factors affecting the safety status of the project, it was determined that overall safety level was jointly determined by the original safety level of building and disturbance effect of

^{*} 文章编号:1003-3033(2026)02-0262-09; 收稿日期:2025-09-11; 修稿日期:2025-12-06

^{**} 通信作者:余群舟(1970—),男,湖北孝感人,博士,副教授,主要从事地下工程施工与安全管理方面的研究。E-mail: yuqunzhou@ hust. edu. cn.

underpass construction process. An original safety status evaluation index system for buildings was established, which consisted of 13 indicators in three categories: the existing deformation resistance of the building, the healthy and intact state of the building, and the importance of building. A safety evaluation index system for underpass construction process was established, which consisted of 22 indicators in five categories: excavation face instability, displacement of soil on side of shield machine ring, subsequent soil consolidation, construction management level, and relationship between building and tunnel. The weights of each index were determined by entropy weight method, the digital characteristics of the index were determined based on the cloud model, safety level and development trend were determined by FSM algorithm, and the weighted fitting weight value was used to judge the primary and secondary risk control points. Taking a subway project under two buildings as an example, the index system and evaluation method were verified. The results show that original safety status of two buildings and the construction process under two buildings are generally safe, and overall risk is within an acceptable range. For secondary indicators that are not inherent attributes of the project, the factors with weighted fitting weight values exceeding the average level (0.04) are used as key control points, those between 0.02 and 0.04 are used as secondary control points, and those between 0 and 0.02 are used as general control points.

Keywords: shield tunnel underpasses buildings; entropy weight method; cloud model; safety evaluation; control measures; fuzzy similarity measure (FSM); evaluation index system

0 引言

盾构法被应用广泛于地铁建设中,然而在下穿建筑时,隧道、土体和建筑之间会产生复杂的力学作用,对上部建筑安全产生威胁,极易造成建筑沉降、倾斜、开裂等问题,存在较大风险。为减轻对建筑的损害,保障施工过程安全性,需对盾构下穿建筑施工安全状态进行评价,并采取有效的控制措施。

针对盾构下穿建筑施工安全问题,现有研究主要集中在下穿施工引起建筑受损分析、既有建筑对隧道施工影响以及项目整体安全水平评价3方面。针对隧道下穿施工引起建筑受损问题,学者们从房屋建筑结构安全角度出发,分析了建筑物损坏判断方法以及可能诱使建筑受损的外界因素,如刘祥勇等^[1]将角变形和水平应变作为建筑受损评价指标,并引入损伤势指标来衡量建筑受损程度;DING Zhi^[2]则认为,建筑变形与施工工艺、建筑物自重、地基刚度、建筑隧道间距以及隧道埋深等因素有关。而关于上部既有建筑对施工过程产生的影响,有学者通过数值模拟分析了建筑不同特征对隧道的作用,如KATEB^[3]和ZAKHEM^[4]等通过三维有限元模型,分别分析了地层参数、隧道深度、建筑物对衬砌荷载的作用机制,以及由筏板基础支撑的新建建筑对原有隧道的影响水平;而WU Hao^[5]和GONG

Chenjie^[6]等则分别通过随机有限元和明德林解分析了隧道施工过程中邻近建筑物对地面移动的影响,结果表明:既有建筑刚度和荷载对地面变形影响显著。针对项目整体安全水平评价,有学者构建了相应的指标体系和评估模型,如CHEN Hongyu^[7]和WANG Qian^[8]等在构建指标体系时考虑了隧道特性、地质条件、建筑条件、掘进参数、管理等因素的影响,并在此基础上建立了基于改进拓展云、集对分析理论以及模糊层次分析等方法的风险评估模型;此外,ZHANG Limao等^[9]基于云模型和证据理论提出了一种混合信息融合方法,并用该方法评估隧道引起的建筑物损坏风险;GUO Desai等^[10]提出了基于变权理论和云模型的隧道穿越建筑物风险评估模型。

然而,盾构下穿建筑整体安全状态由下穿扰动效应和建筑自身状况共同决定^[11],同一建筑在不同施工扰动下受损程度不同,同时对于同一下穿施工过程,不同建筑破坏特征也会存在差异。评价结果偏高会使措施过于保守,增加成本;评价结果偏低会使措施不足以完全控制项目风险,进而引发安全事故,而现有成果在这方面的研究还不清晰。基于此,本文将通过熵权云模型分别评价建筑原始安全状态和下穿施工过程安全状态,并制定差异化控制措施,确保下穿过程顺利进行。

1 盾构下穿建筑安全评价指标体系构建

1.1 隧道-土体-建筑相互作用机制

盾构下穿建筑产生的作用力会在盾构机、土体和建筑之间相互传递。一方面工作面开挖会改变土

体应力状态,诱使其产生隆沉和水平位移,改变建筑基础受力环境并引发上部建筑发生外观、功能和结构上的破坏,降低建筑结构安全状态;另一方面建筑基础和上部结构会形成系统刚度,该特性会抵抗盾构施工的不利扰动,并对地层移动和变形产生一定的约束作用^[12]。力学传递链模型如图1所示。

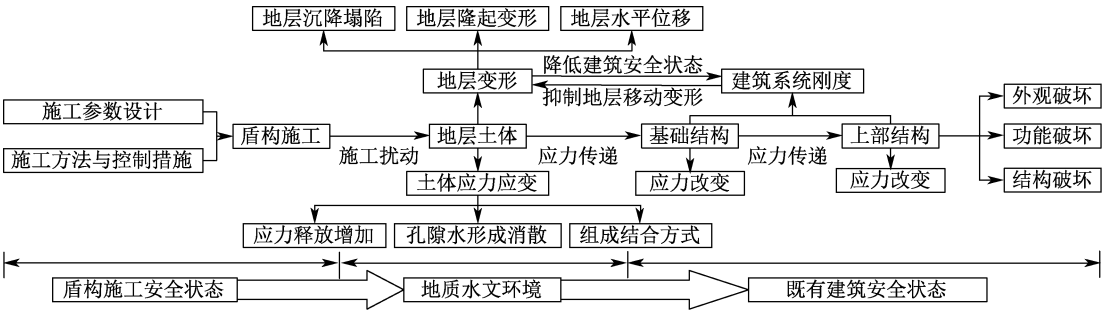


图1 隧道—土体—建筑相互作用模型
Fig.1 Tunnel-soil-building interaction model

1.2 建筑原始安全状态评价指标体系

房屋建筑原始安全状态首先受到其自身抗变形能力的影响^[13],建筑基础形式和上部结构特征共同决定了其抵抗外界干扰的原始能力。随着建筑使用年限的增加,在没有后期修缮和加固的情况下,建筑刚度会逐渐下降。建筑重要性也需重点考虑,若建筑价值较高则需规避风险,基于此可建立房屋建筑原始安全评价指标体系,见表1。

状态下的直观体现,对于同一监测点,会依次经历开挖面失稳坍塌、盾构机环侧土体位移以及后续较长范围内的土体固结3个阶段,土体损失和沉降不断演化发展并累及至地表,管理水平体现了对风险识别和应对能力,而隧道与建筑相对位置关系则反映了扰动影响传递到建筑的削弱程度。通过故障树对施工扰动分解,并将基本事件进行组合,可以确定下穿施工过程安全评价指标体系见表2。

2 盾构下穿建筑安全评价方法实例应用

2.1 典型盾构下穿建筑工程概况

某地铁项目在2个连续区间段分别下穿交警大队建筑及地方储备粮库建筑,2个区间长度分别为1 814.25和703.37 m。隧道与粮库建筑竖直距离为10.98 m,与粮库建筑长边夹角为30°;隧道与交警大队建筑竖直距离为14.42 m,与长边夹角基本为0°。隧道直径6 980 mm,埋深10~15 m。2个下穿段地质水文条件近似相同,地层结构松散且疏密不均,工程性能一般。通过实地调研和相关设计资料,得到2个建筑基本特征见表3。

2.2 盾构下穿房屋建筑安全状态评价

2.2.1 数据收集

在确定指标重要性和安全状态时采用专家打分法。将指标重要性和所处状态划分为[0,1)、[1,2)、[2,3)、[3,4)、[4,5]共5个区间,指标重要性分值越

1.3 下穿施工过程安全评价指标体系

盾构施工诱发的地层变形是周围受扰动土体在多因素耦合作用下随施工进度和时间变化而在空间

表1 既有房屋建筑原始安全状态评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of original safety status of existing buildings

准则层	一级指标	二级指标	指标符号
既有房屋建筑原始安全状态 B	建筑既有抗变形能力 B1	基础形式	B11
		基础埋深	B12
		结构形式	B13
		建筑形态	B14
		长高比	B15
		层数	B16
	建筑健康完损状态 B2	构件变形开裂	B21
		已有倾斜沉降值	B22
		建设使用年限	B23
		周围环境	B24
	建筑物重要性 B3	直接经济损失	B31
		损坏后的社会效应	B32
		建筑使用性质或用途	B33

表 2 盾构下穿施工过程安全状态评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of safety status during shield tunneling construction

准则层	一级指标	二级指标	指标符号
盾构下穿施工过程安全状态 C	开挖面失稳 C1	土舱压力设置合理性	C11
		推进和出土速度控制效果	C12
		地下水稳定性	C13
		盾构机和千斤顶性能	C14
		刀盘设计合理性	C15
		渣土改良剂效果	C16
		勘探资料准确性	C17
		盾构机停留时间	C18
		隧道埋深	C19
		水平方向控制效果	C110
	盾构机环侧土体位移 C2	盾构机和围岩摩擦力	C21
		不良地质条件	C22
		地下管网保护效果	C23
		管片密封效果	C24
		同步注浆合理性	C25
	后续土体固结 C3	静孔水压力消散	C31
		二次注浆合理性	C32
	施工管理水平 C4	参建方工程经验	C41
		控制措施落实情况	C42
	建筑与隧道位置关系 C5	建筑与隧道水平位置	C51
		建筑与隧道竖直距离	C52
		隧道与建筑长边夹角	C53

表 3 建筑物基本特征

Table 3 Basic characteristics of buildings		
特征	粮库建筑	交警大队建筑
基础形式	浅基础	条形基础
基础埋深/m	3	1.5
结构形式	平方仓砣	砖混
建筑形态	较为规整	较为规整
长高比	6.25	2
层数	1	4
变形开裂	较多裂纹	较少
沉降倾斜	较小	较小
建设时间	2010 年	90 年代
周围环境	一般	较好
用途	粮食存储	办公

大则其越重要,指标安全状态分值越大则其越不安全,依次为安全(Ⅰ)、较安全(Ⅱ)、一般安全(Ⅲ)、较不安全(Ⅳ)和不安全(Ⅴ)。

2.2.2 熵权法确定指标权重

熵权法依据数据携带的信息来确定权重系数^[14],信息熵值越小则其对结果的影响越大。假设有 m 个指标, n 个评价对象,各指标信息熵可表示为:

$$e_i = - \frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n y_{ij} \ln y_{ij}, (i = 1, 2, \cdots, m)$$

(1)

式中: e_i 为第 i 个指标的熵值; y_{ij} 为第 i 个指标第 j 个对象所占的比重大小,通过熵值得指标权重 w_i :

$$w_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^m (1 - e_i)}$$

(2)

基于专家打分数据和熵权法计算公式可得房屋建筑二级指标权重 $W_{B1} = [0.181\ 8, 0.111\ 3, 0.297\ 9, 0.082\ 5, 0.144\ 5, 0.182\ 1]$ 、 $W_{B2} = [0.398\ 0, 0.322\ 6, 0.253\ 4, 0.026\ 1]$ 、 $W_{B3} = [0.304\ 0, 0.307\ 3, 0.388\ 7]$ 、盾构下穿施工过程二级指标权重 $W_{C1} = [0.195\ 0, 0.115\ 9, 0.090\ 4, 0.059\ 7, 0.105\ 7, 0.101\ 2, 0.057\ 3, 0.101\ 8, 0.094\ 9, 0.078\ 0]$ 、 $W_{C2} = [0.304\ 4, 0.169\ 9, 0.119\ 8, 0.159\ 0, 0.246\ 9]$ 、 $W_{C3} = [0.465\ 6, 0.534\ 4]$ 、 $W_{C4} = [0.440\ 1, 0.559\ 9]$ 、 $W_{C5} = [0.314\ 7, 0.400\ 4, 0.284\ 9]$ 。将原始打分数据和二级指标权重进行拟合,可得一级指标权重值 $W_B = [0.130\ 9, 0.489\ 9, 0.379\ 2]$ 、 $W_C = [0.209\ 8, 0.142\ 0, 0.249\ 6, 0.170\ 7, 0.228\ 0]$ 。

2.2.3 生成评价云模型

云模型^[15]可实现定性概念和定量表示相互转化,对不确定性问题进行建模分析^[16],并通过期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 表示。各指标评价云 $R(E_x, E_n, H_e)$ 可通过下式计算:

$$E_x = \bar{x} = \text{mean}(x_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

(3)

式中: $\bar{x}$ 为评价值的平均值; x_i 为评价值。

$$E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - E_x|$$

(4)

式中 N 为样本点(云滴)的总数量。

$$H_e = \sqrt{S - E_n^2}$$

(5)

式中 S 为样本方差。

将专家打分数据和加权拟合数据带入逆向正态云发生器,可得各指标云模型数字特征见表 4。

表 4 盾构下穿房屋建筑一级指标安全状态评价云

Table 4 Safety state evaluation cloud of primary indicators for shield tunneling under buildings

指标	盾构下穿粮库建筑			盾构下穿交警大队建筑		
	E_x	E_n	H_e	E_x	E_n	H_e
B1	2.834	0.394	0.101	2.690	0.417	0.176
B2	2.516	0.478	0.261	1.678	0.460	0.125
B3	2.849	0.565	0.269	2.357	0.469	0.112
C1	1.819	0.458	0.159	1.949	0.501	0.206
C2	1.908	0.674	0.193	2.083	0.459	0.251
C3	2.001	0.532	0.195	2.084	0.282	0.213
C4	2.542	0.436	0.105	2.655	0.358	0.084
C5	2.922	0.449	0.339	2.332	0.500	0.207

2.2.4 模糊贴近度(FSM)计算

评价云和标准云相似度可通过夹角余弦法和期望曲线法等定量方法或二者形状确定,但该方法稳定性稍差。模糊贴近度 (Fuzzy Similarity Measure, FSM)算法^[17]综合考虑 3 个数字特征对结果的影响,计算结果更加精准。

设论域 U 上的模糊幂集 $\Psi(U)$ 及任意模糊数 $\tilde{P}, \tilde{Q}$, 存在映射 $\Psi(U) \times \Psi(U) \rightarrow [0,1]$, $(\tilde{P}, \tilde{Q}) \mapsto F(\tilde{P}, \tilde{Q}) \in [0,1]$ 且 $\tilde{P}, \tilde{Q} \in \Psi(U)$, 满足 $F(\tilde{P}, \tilde{P}) = 1, F(\tilde{P}, \tilde{Q}) = F(\tilde{Q}, \tilde{P})$, 则认为 $F(\tilde{P}, \tilde{Q})$ 为 $\tilde{P}, \tilde{Q}$ 的贴近度,并有以下计算公式:

$$F_1(\tilde{P}, \tilde{Q}) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} [\tilde{P}(x) \wedge \tilde{Q}(x)] dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} [\tilde{P}(x) \vee \tilde{Q}(x)] dx} \quad (6)$$

$$F_2(\tilde{P}, \tilde{Q}) = \frac{2 \int_{-\infty}^{+\infty} [\tilde{P}(x) \wedge \tilde{Q}(x)] dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{P}(x) dx + \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{Q}(x) dx} \quad (7)$$

式中 $F_1(\tilde{P}, \tilde{Q})$ 、 $F_2(\tilde{P}, \tilde{Q})$ 分别为 2 个模糊数交叉面积与非交叉面积和总面积的比值。

对于 $R_1(E_{x_1}, E_{n_1}, H_{e_1})$ 、 $R_2(E_{x_2}, E_{n_2}, H_{e_2})$, 二者组合 FSM (Combined FSM, CFSM) (R, R_2) 计算公式如下:

$$CFSM(R_1, R_2) = \left| \frac{1}{2} + \frac{1}{2\Phi(\xi)} - \Phi(\xi) \right| \quad (8)$$

$$\xi = \frac{|E_{x_2} - E_{x_1}|}{\sqrt{E_{n_1}^2 + H_{e_1}^2} + \sqrt{E_{n_2}^2 + H_{e_2}^2}} \quad (9)$$

$$\Phi(\xi) = \int_{-\infty}^{\xi} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (10)$$

式中: ξ 为中间变量; t 为积分变量。

利用 FSM 算法,可以得出粮库建筑(BG)、交警大队建筑(BP)、下穿粮库施工过程(CG)以及下穿交警大队施工过程(CP)各指标所处的安全状态及演化趋势。计算结果见表 5。

表 5 盾构下穿建筑一级指标评价云与标准云相似度

Table 5 Similarity between primary indicator evaluation cloud and standard cloud for shield tunneling under buildings

一级指标	评价标准云					安全等级
	安全(Ⅰ) (0.5,0.167,0.03)	较安全(Ⅱ) (1.5,0.167,0.03)	一般安全(Ⅲ) (2.5,0.167,0.03)	较不安全(Ⅳ) (3.5,0.167,0.03)	不安全(Ⅴ) (4.5,0.167,0.03)	
BG1	0.000 20	0.028 09	0.515 98	0.237 07	0.006 99	Ⅲ
BG2	0.003 52	0.118 81	0.973 57	0.129 41	0.004 04	Ⅲ
BG3	0.002 21	0.066 78	0.574 78	0.333 92	0.027 65	Ⅲ
BP1	0.000 21	0.036 63	0.677 66	0.139 05	0.002 02	Ⅲ
BP2	0.051 26	0.712 04	0.157 56	0.003 54	0.000 01	Ⅱ
BP3	0.003 36	0.147 24	0.764 87	0.060 79	0.000 77	Ⅲ
CG1	0.035 67	0.546 59	0.242 46	0.008 55	0.000 04	Ⅱ
CG2	0.080 26	0.554 11	0.412 08	0.050 61	0.002 13	Ⅱ
CG3	0.030 69	0.411 27	0.413 31	0.030 95	0.000 49	Ⅲ
CG4	0.001 15	0.080 99	0.924 66	0.105 47	0.001 79	Ⅲ
CG5	0.000 17	0.022 91	0.436 06	0.306 52	0.012 27	Ⅲ
CP1	0.035 18	0.452 48	0.369 15	0.024 95	0.000 34	Ⅱ
CP2	0.016 57	0.324 11	0.461 05	0.030 48	0.000 35	Ⅲ
CP3	0.002 74	0.224 58	0.366 18	0.007 06	0.000 01	Ⅲ
CP4	0.000 28	0.042 63	0.730 84	0.125 50	0.001 72	Ⅲ
CP5	0.008 90	0.199 05	0.753 76	0.082 82	0.002 16	Ⅲ

2.3 评价结果分析

2.3.1 建筑原始安全状态评价

建筑原始安全状态评价结果如图 2 所示。粮库建筑一级指标均为一般安全,但 BG1 和 BG3 介于等级Ⅲ和Ⅳ,BG2 近似为一般安全,粮库原始安全状

态评价云 $C_{BG}(2.684\ 0,0.503\ 3,0.249\ 4)$,与标准云相似度为 $[0.002\ 07,0.079\ 91,0.734\ 45,0.207\ 48,0.009\ 62]$,即粮库建筑为一般安全,但倾向于较不安全。

交警大队建筑 BP2 和 BP3 介于等级Ⅱ和Ⅲ之

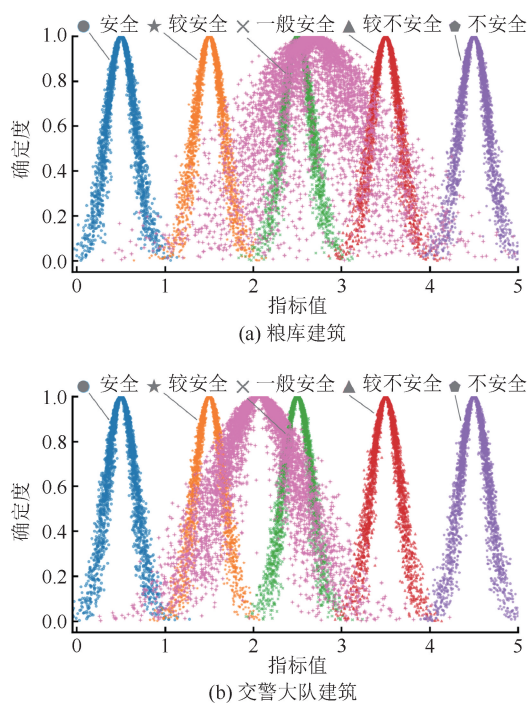


图 2 2 个建筑原始安全状态评价云图

Fig. 2 Safety state evaluation cloud diagram of original state for two buildings

间,但 BP2 处于安全等级Ⅱ,BP3 则处于安全等级Ⅲ,BP1 为一般安全水平。该建筑安全状态评价云为 $C_{BP}(2.251\ 9,0.507\ 3,0.219\ 3)$,与标准云相似度为 $[0.011\ 15,0.305\ 04,0.418\ 63,0.019\ 64,0.000\ 12]$,交警大队建筑整体为一般安全。虽然 2 个建筑均为一般安全,但交警大队建筑比粮库建筑稍安全。

2.3.2 盾构下穿施工过程安全状态评价

下穿粮库建筑施工过程安全评价云 $C_{CC}(2.251\ 9,0.507\ 3,0.219\ 3)$,贴近度为 $[0.011\ 30,0.235\ 42,0.653\ 05,0.063\ 32,0.001\ 36]$;下穿交警大队建筑施工过程安全状态评价云 $C_{CP}(2.209\ 5,0.425\ 7,0.200\ 4)$,贴近度为 $[0.005\ 57,0.210\ 05,0.564\ 73,0.032\ 66,0.000\ 25]$,根据计算结果,盾构施工对 2 个建筑扰动影响近似相同,均为一般扰动,评价云如图 3 所示。

具体来看,下穿粮库建筑时,CG2 为较安全,但偏向于一般安全,而下穿交警大队建筑 CP2 为一般安全,但偏向于较安全。此外 CG5 和 CP5 虽均为一般安全,但 CG5 有向较不安全发展的趋势,而 CP5 却偏向于较安全状态,这是由于隧道与粮库建筑竖直距离更近,施工扰动更易传递至上部建筑。

2.3.3 盾构下穿建筑施工整体安全状态分析

综合来看,隧道下穿 2 建筑均为一般安全(图 4),但下穿交警大队建筑状态介于等级Ⅱ和等

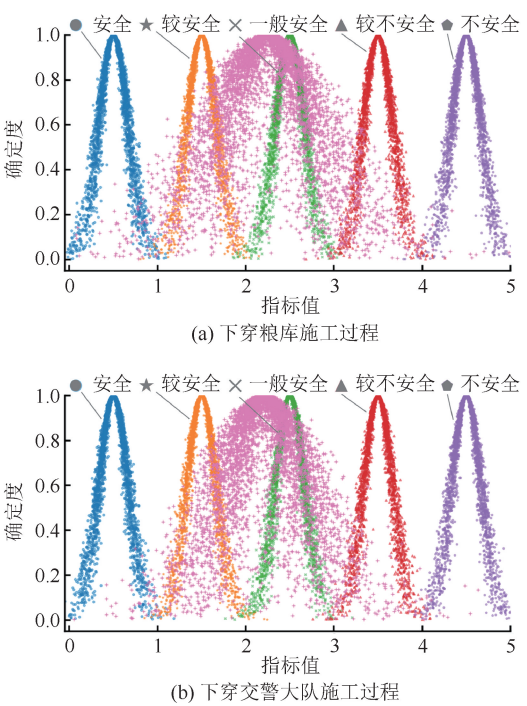


图 3 盾构下穿两建筑施工过程安全状态评价云图

Fig. 3 Safety state evaluation cloud diagram of two buildings during shield tunneling construction process

级Ⅲ,并偏向于等级Ⅲ,而下穿粮库则近似为安全等级Ⅲ,相较而言,下穿粮库较下穿交警大队建筑危险。这是由于下穿施工对 2 个建筑扰动影响近似相同,但粮库比交警大队建筑原始安全状态差。

3 盾构下穿建筑施工控制措施

3.1 敏感致险因子提取

评价结果表明:2 个项目整体风险在可接受范围之内,施工时需重点关注直接影响项目整体安全水平且处于等级Ⅳ的二级指标。而 FSM 结果显示,安全等级Ⅳ的二级指标均为项目固有属性,无法对其控制,因此,可对等级Ⅲ的二级指标进行常规化管理。指标权重值代表其对上层因素的影响程度,为了以较小的成本实现控制效果的最优化,可差异化控制处于等级Ⅲ的二级指标。将下穿施工过程中安全等级Ⅲ的二级指标权重值与一级指标权重值进行拟合,得出敏感致险因子见表 6。

表 6 基于加权拟合权重值的敏感致险因子				
Table 6 Sensitive risk factors based on weighted fitting weight values				
二级指标	二级指标权重值	一级指标权重值	加权拟合权重值	安全状态
C11	0.195 0	0.209 8	0.040 9	一般安全
C12	0.115 9	0.209 8	0.024 3	一般安全

续表 6

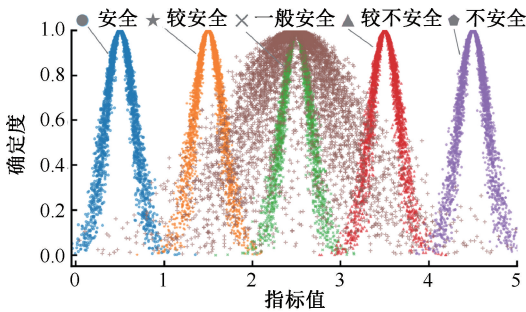
二级指标	二级指标权重值	一级指标权重值	加权拟合权重值	安全状态
C13	0.090 4	0.209 8	0.019 0	一般安全
C16	0.101 2	0.209 8	0.021 2	一般安全
C17	0.057 3	0.209 8	0.012 0	一般安全
C21	0.304 4	0.142 0	0.043 2	一般安全
C22	0.169 9	0.142 0	0.024 1	一般安全
C25	0.246 9	0.142 0	0.035 1	一般安全
C31	0.465 6	0.249 6	0.116 2	一般安全
C32	0.534 4	0.249 6	0.133 4	一般安全
C41	0.440 1	0.170 7	0.075 1	一般安全
C42	0.559 9	0.170 7	0.095 6	一般安全

次要控制点有推进速度和出土速度控制、渣土改良效果控制、不良地质条件控制以及同步注浆合理性控制。主要措施包括开展数值模拟或试掘进来选取合适的掘进参数、根据推力和扭矩变化情况进行动态调整改良剂成分、对建筑周边地质条件进行详细勘探和复测以及优化注浆材料配比与注浆参数。

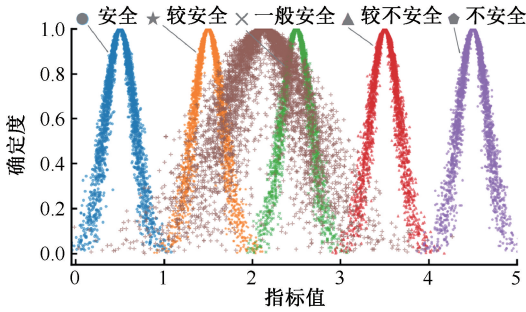
一般控制点有地下水稳定引起的开挖面涌水涌沙风险控制与勘探资料准确性控制。由于地质勘探结果显示,下穿 2 个建筑区间的地质条件较为稳定,因此,在施工时采取常规措施即可。

3.3 评价结果与控制效果分析

原始方案认为,需对交警大队建筑拆除重建以及加强对粮库建筑的监测,而根据安全评价结果,只需对安全等级Ⅲ的二级指标进行常规管控。施工沉降监测数据如图 5 所示。



(a) 下穿粮库建筑



(b) 下穿交警大队建筑

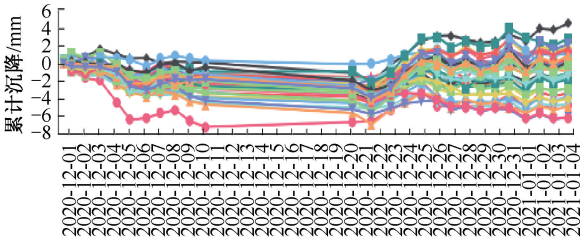
图 4 盾构下穿两建筑整体安全状态评价云图

Fig. 4 Safety state evaluation cloud diagram of overall safety state for two buildings under shield tunneling

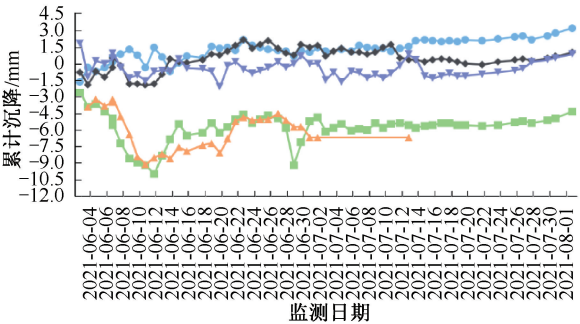
3.2 差异化应对措施

在日常管理中,将拟合权重值超过平均水平(0.04)的因素作为关键控制点,0.02~0.04 之间的作为次要控制点,0~0.02 的作为一般控制点。

关键控制点有 6 个,土舱压力设置合理性控制,可准确计算水土压力或通过仿真模拟土舱压力对地层影响;盾构机和围岩摩擦力控制,可计算摩擦力数值或使用膨润土;静孔水压力和二次注浆控制,需根据勘探资料判断地下水含量及稳定性,合理设置注浆参数;参建方经验不足和措施落实不到位风险控制,可加强考核和过程监督。



(a) 2020-11-25—2021-01-10 粮库建筑沉降监测数据



(b) 2021-06-02—2021-08-01 交警大队建筑沉降监测数据

图 5 盾构下穿粮库和交警大队建筑沉降监测数据

Fig. 5 Monitoring data on settlement of shield tunneling through grain depots and traffic police brigade buildings

监测结果显示,粮库和交警大队 2 个建筑最大沉降值分别为 8 和 10 mm 左右,最大差异沉降分别为 10 和 12 mm 左右,均在较低水平,表明下穿对 2 个建筑影响较小,与评价结果一致。施工后期交警大队建筑沉降未能在短时间内趋于稳定,通过二次注浆将最大累计沉降值从 10 mm 减小至 4.5 mm,验

证了将二次注浆作为关键控制点的合理性。

4 结 论

1) 盾构下穿房屋建筑系统安全水平受既有建筑原始状态和下穿施工扰动效应共同影响,其中,建筑原始安全水平由建筑既有抗变形能力、健康完损程度及建筑物重要性3类因素决定,下穿施工过程中安全状态由开挖面失稳、盾构机环侧土体位移、后续土体固结、施工管理水平以及建筑与隧道位置关系5类因素决定。

2) 熵权云模型可用于隧道下穿建筑安全状态

评价,其中熵权法用于确定指标权重,云模型用于将不确定性信息定量化表示,通过评价云和标准云之间的位置关系可初步判断指标安全等级,利用FSM算法可计算评价云和标准云之间的相似度,进而确定指标所处的安全状态与发展趋势。

3) 制定控制措施时应重点关注安全等级较差且为非项目固有属性的二级指标,由于指标权重值代表了其对上层因素的影响程度,为了以较小成本实现控制效果最优化,可基于二级指标与一级指标的加权拟合权重值制定差异化的控制措施,其中超过拟合值均值的二级指标应当作为关键控制对象。

参 考 文 献

- [1] 刘祥勇,张鑫,王军,等. 盾构施工对邻近建筑物群结构影响评价[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2022, 4(3): 99-106.
LIU Xiangyong, ZHANG Xin, WANG Jun, et al. Evaluation of shield tunneling-induced structural response [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2022, 4(3): 99-106.
- [2] DING Zhi, WEI Xinjiang, ZHANG Xiao, et al. Analysis of the field monitoring data on soil movements and adjacent building settlement due to shield tunnelling[J]. Engineering Computations, 2019, 36(4): 1 219-1 237.
- [3] KATEBI H, REZAEI A H, HAJIALILUE B M, et al. Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specifications on shield tunnel lining loads (by FEM) [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 49: 67-78.
- [4] ZAKHEM A M, NAGGAR H E. Three-dimensional investigation of how newly constructed buildings supported on raft foundations affect pre-existing tunnels[J]. Transportation Geotechnics, 2020, 22: DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100324.
- [5] WU Hao, GAN Xiaolu, LIU Nianwu, et al. Analysis of tunneling-induced ground movements in spatially variable soil under the influence of existing building [J]. Computers and Geotechnics, 2024, 166: DOI: 10.1016/j.compgeo.2023.106003.
- [6] GONG Chenjie, XIE Chaoran, LIN Zhanquan, et al. Ground deformation prediction induced by shield tunnelling considering existing multi-story buildings[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(4): 1 373-1 387.
- [7] CHEN Hongyu, YANG Sai, FENG Zongbao, et al. Safety evaluation of buildings adjacent to shield construction in karst areas: an improved extension cloud approach[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 124: DOI: 10.1016/j.engappai.2023.106386.
- [8] WANG Qian, YANG Changming, TIAN Lin, et al. Safety risk assessment of heritage buildings in metro construction based on SPA theory: a case study in Zhengzhou, China[J]. Heritage Science, 2020, 8: DOI: 10.1186/s40494-020-00439-3.
- [9] ZHANG Limao, WU Xianguo, ZHU Hongping, et al. Perceiving safety risk of buildings adjacent to tunneling excavation: an information fusion approach[J]. Automation in Construction, 2017, 73: 88-101.
- [10] GUO Desai, MENG Fanyan, WU Huaina, et al. Risk assessment of shield tunneling crossing building based on variable weight theory and cloud model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 145: DOI: 10.1016/j.tust.2024.105593.
- [11] 骆建军,张顶立,王梦恕,等. 地铁施工对邻近建筑物安全风险管控[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1 477-1 482.
LUO Jianjun, ZHANG Dingli, WANG Mengshu, et al. Security risk management of neighboring buildings during metro construction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1 477-1 482.
- [12] 梁超强,葛忻声,赵娟,等. 盾构下穿浅基础建筑的沉降规律分析[J]. 太原理工大学学报, 2021, 52(2): 256-262.

LIANG Chaoqiang, GE Xinsheng, ZHAO Juan, et al. Analysis of settlement of buildings induced by shield tunnels under construction [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2021, 52(2): 256-262.

[13] 陈大川,刘翔,何蓓,等. 长沙城际铁路隧道沿线砌体房屋安全风险研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(6):87-94.

CHEN Dachuan, LIU Xiang, HE Bei, et al. Research on safety risk of masonry structure buildings along tunnel of Changsha intercity railway [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(6):87-94.

[14] 孙斌,李浩,毛占利,等. 基于序关系分析法的大型综合体火灾风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(2): 81-88.

SUN Bin, LI Hao, MAO Zhanli, et al. Fire risk assessment of large complex based on order relation analysis method[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(2):81-8.

[15] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6):15-20.

LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators [J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 32(6):15-20.

[16] 李长明,赵开功,张晓蕾,等. 煤矿智能化项目风险评价云模型及其应用[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5): 168-174.

LI Changming, ZHAO Kaigong, ZHANG Xiaolei, et al. Cloud model for risk evaluation of coal mine intelligent projects and its application [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 168-174.

[17] 龚艳冰,蒋亚东,梁雪春. 基于模糊贴近度的正态云模型相似度度量[J]. 系统工程, 2015, 33(9):133-137.

GONG Yanbing, JIANG Yadong, LIANG Xuechun. Similarity measurement for normal cloud models based on fuzzy similarity measure [J]. Systems Engineering, 2015, 33(9): 133-137.

作者简介： 王善刚 （1996—）,男,河南信阳人,硕士,研究方向为隧道与地下工程。E-mail:1689324983@qq.com。

《科技期刊世界影响力指数(WJCI)报告》(2024)发布
《中国安全科学学报》继续入选 Q2 区



2025 年 11 月,《科技期刊世界影响力指数(WJCI)报告》(2024 版)(以下简称《WJCI 报告》)正式发布,《中国安全科学学报》入选。

《WJCI 报告》是中国科协系列课题《面向国际的科技期刊影响力综合评价方法研究》等的研究成果,该系列课题旨在建立新的期刊评价系统,探索面向全球的更为科学、全面、合理的期刊影响力评价方法,为世界学术评价融入更多中国观点,中国智慧,推动世界范围内科技期刊的公平评价、同质等效使用。在《WJCI 报告》中,《中国安全科学学报》入选安全技术、灾害及其防治学科,在统计周期内的总被引频次为 4 345,影响因子为 1.827, WJCI 为 2.019, WJCI 学科排名为 20/71,位于 Q2 区。