

基于荷载结构法和强度折减法的人防工程 安全性评估方法

曹嘉祺¹, 王洪新², 王 平², 孙德安¹

(1. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444; 2. 上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海 200065)

摘 要: 科学有效地对既有人防工程结构进行安全评估, 已成为保证城市地下安全的关键。为了克服现有安全评估方法的不足, 提出了基于荷载结构法和强度折减法的安全评估方法。利用荷载结构法, 将土体对人防工程衬砌的作用转化为荷载以及地基弹簧作用, 采用混凝土损伤塑性模型模拟衬砌结构损伤情况, 通过荷载增大法和刚度折减法得到衬砌的安全系数值 K_1 ; 采用强度折减法对土体-衬砌进行有限元建模分析, 得到结构或围岩土体破坏时的安全系数值 K_2 。结构的整体安全系数 K 为两者的较小值。利用上述方法分析了裂缝工况、水位变化等不同因素对结构安全系数的影响。结果表明: 荷载结构法和强度折减法均可用于人防工程结构的安全评估; 结构的安全系数主要受裂缝和水位的影响, 裂缝越深, 对结构的安全越不利, 安全等级越低; 当地下水位高于结构底部且内部渗水时, 水位越高, 结构越安全; 结构内部不渗水时, 水位越高, 结构安全系数越小。人防工程结构安全的定量评估有利于工程后续处置, 研究成果为地下结构安全评估提供了新途径。

关 键 词: 人防工程; 安全评估; 荷载结构法; 强度折减法

中图分类号: TU929

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2023)07-2105-10

A method for evaluating safety of civil air defense structure based on load structure method and strength reduction method

CAO Jia-qi¹, WANG Hong-xin², WANG Ping², SUN De-an¹

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co. Ltd., Shanghai 200065, China)

Abstract: Scientific and effective safety assessment of existing civil air defense structures has become a key issue to ensure urban underground safety. In order to overcome the shortcomings of the existing safety evaluation methods, a safety evaluation method based on load structure method and strength reduction method is proposed. First, the load structure method is used to convert the impact of surrounding soils on the tunnel lining into load and foundation spring. The concrete damage plastic (CDP) model is used to simulate the damage of lining structure, and the value of safety factor (K_1) of lining is obtained by load increasing method and stiffness reduction method. Meanwhile, the finite element modeling analysis of soil lining is carried out by using the strength reduction method, and the safety factor value (K_2) of the structure or soil mass at failure is obtained. The overall safety factor (K) of the structure is the smaller value of both. Finally, the influence of different factors such as crack condition and water level change on the structural safety factor is analyzed by using the above methods. The results show that the load structure method and strength reduction method can be used for evaluating the safety of civil air defense structures. The safety factor of the structure is mainly affected by cracks and water level. The deeper the crack is, the more unfavorable it is to the structure, and the lower the safety level of the structure is. When the underground water level is above the structure bottom and there is water seepage inside the structure, the higher the water level is, the safer the structure is. When there is no water seepage inside the structure, the higher the water level is, the lower the safety factor of the structure is. The quantitative evaluation of structures is conducive to the subsequent disposal, and the research results provide a new way for the safety assessment of underground structures.

Keywords: civil air defense structure; safety assessment; load structure method; strength reduction method

1 引言

20 世纪 60–70 年代,我国很多城市在地下修建了早期人防工程^[1-3]。受当时条件限制,很多工程建设标准较低。经过半个多世纪,这些工程质量劣化趋势明显,结构安全问题突出^[4-6]。随着城市的发展,这些临近或超过使用寿命的人防工程大多地处繁华区域,易导致地下管线损坏、附近建筑物沉降和地面塌陷事故等^[7-8]。

鉴于老旧人防工程的潜在安全风险逐渐显现,工程技术人员和学者采用数值模拟和室内模型试验等手段进行了相关研究。郭骞^[9]勘查了废弃的地下人防工程并对其稳定性进行了研究;林丽伟等^[10]引入综合评价方法中的层次分析法建立了宜宾地区人防工程病害因素选择的层次分析模型;孙海朋等^[4]结合早期人防工程结构特点和管理需求,提出了一套早期人防工程质量检测评估方法。在与人防洞室类似的隧道工程中,李秀地等^[11]用强度折减法分析静荷载作用下海底钢筋混凝土沉管隧道的安全稳定性;张黎明等^[12]采用有限元强度折减法求得的安全系数与潜在滑动面,评价公路隧道的稳定性和设计的合理性;江权等^[13]提出了基于强度折减技术的地下洞室群整体安全系数求解方法;周卫敏等^[14]将有限元强度折减法应用于隧洞围岩稳定分析中,为水工隧洞的设计提供定量依据。人防工程是埋置在地层中带有衬砌的结构物,可用强度折减法分析其破坏规律,对工程结构存在的风险进行科学的分析和评价。

现有研究多是针对老旧人防工程的外观进行定性分析并归类,而对人防工程当前实际的承载能力和安全状态的定量评估研究成果较少。针对已经出现缺陷的人防工程结构进行定量评估,以确定是否属于退出序列,需要回填处理,是亟待解决的问题。另外,相比土质防空洞,带衬砌的人防工程结构变化和破坏规律更为复杂。目前,也缺乏对这类有衬砌老旧人防工程破坏规律的研究,使老旧人防工程的安全状态定量评估更加困难。

本文以某城市老旧钢筋混凝土人防工程为背景,针对地下水位变化和钢筋混凝土性能下降的现实情况,通过数值模拟,并利用强度折减有关概念实现有缺陷人防工程安全状态的定量评估,并研究了不同类型人防工程的破坏规律和影响其安全状态的有关因素,为确定老旧人防工程是否需要回填提供理论依据。

2 存在结构缺陷人防工程的安全评估方法

传统上,定量评估地下人防工程的安全系数(以下称安全度),采用强度折减法较为通用。但由于主要结构物是钢筋混凝土衬砌,如果在对土层进行强度折减时,不折减衬砌结构会导致安全系数明显偏大。混凝土衬砌结构不属于摩尔-库仑材料,直觉上,对衬砌刚度进行折减,会得到更合理的安全系数。但是,刚度折减值用多少要有理论依据。通过荷载-结构法,用增大荷载和减小衬砌结构刚度 2 个思路就可以获得更合理的刚度折减值。下面详细论述上述思路。

2.1 采取实体模型运用强度折减法评估人防工程安全度

地下人防工程的主要结构物是钢筋混凝土衬砌,可用地层结构法和荷载结构法分析计算。地层结构法将地层和衬砌视为完整受力体,引入合适的地层与衬砌的界面接触模型,基于连续介质理论分别计算地层和衬砌的内力,并据此验算地层结构的稳定性,该方法符合衬砌的实际受力特点,但理论计算复杂,大部分问题为数值解,且计算量较大^[15]。强度折减法^[16]是典型的基于地层结构法的分析方法,该方法通过不断折减土体强度,直至地层破坏,将土体抗剪强度与实际剪应力的比值定义为安全系数 F_s ,基本原理表达为

$$\tau' = \frac{\tau}{F_s} = \frac{c + \sigma \tan \varphi}{F_s} = \frac{c}{F_s} + \sigma \frac{\tan \varphi}{F_s} = c' + \sigma \tan \varphi' \quad (1)$$

式中: c' 为折减后土体虚拟的黏聚力; φ' 为折减后土体虚拟的内摩擦角; τ' 为折减后的抗剪强度; c 为折减前土体的黏聚力; φ 为折减前土体的内摩擦角; τ 为折减前土体的抗剪强度; σ 为土体破裂面上的法向应力。 F_s 从一个较小的值逐渐增大,土体处于临界破坏状态时其对应的 F_s 值是土体的安全系数。

材料的强度准则含有黏聚力和内摩擦角两参数是使用强度折减法的必要条件,导致此方法在地下工程的使用范围较多局限在土质无衬砌隧洞^[17]。地下人防工程洞室含有钢筋混凝土衬砌,只对土体强度进行折减将得不到符合实际的安全系数,计算结果明显偏大。为解决此问题,有研究者在处理类似问题时将混凝土结构等效为摩尔-库仑材料来进行强度折减^[11],这种等效方法的合理性有待商榷。

本文为了实现有隧道衬砌的定量安全度评估,提出了一种把衬砌刚度折减与土体强度折减相结合

的人防工程安全度评估方法。

2.2 采用荷载结构法评估人防工程安全度

从另一个思路出发,也可用荷载结构法分析存在缺陷隧道结构的安全度。尽管荷载结构法^[18-19]不考虑地层与隧道衬砌的共同作用,但由于只把衬砌作为实体模型,就可以模拟有衬砌的情况。荷载结构法把地层作为荷载作用于衬砌结构,用梁式受弯杆件和土弹簧模型组合来模拟衬砌,在此基础上计算衬砌在荷载作用下产生的内力和变形。这种方法由于模型中只有衬砌结构,计算上较为简单,荷载取值较为清晰,是一种偏于安全的计算评估方法,该模型如图1所示。为了考虑衬砌缺陷的影响,采用混凝土损伤塑性模型(concrete damage model,简称CDP)模拟衬砌结构损伤情况。CDP模型基于Lubline等^[20]提出的损伤塑性模型,考虑材料拉压性能的差异,可用于模拟低静水压力下由损伤引起的不可恢复的材料退化。

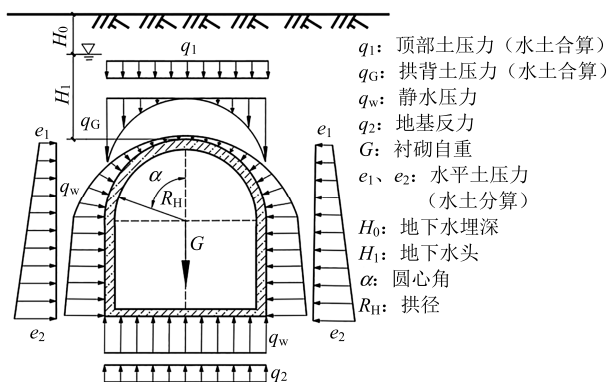


图1 荷载结构法示意图

Fig.1 Schematic diagram of load structure method

具体计算时,采取荷载增大法,即按比例放大荷载,并计算结构的内力和变形;当结构达到破坏时,荷载的放大倍数就是安全系数。结构的破坏根据关键点(取变形最大点—拱顶)的位移随荷载变化趋势来判断。具体操作时,先计算初始荷载 q_0 下拱顶处下沉,随后将周边荷载增大 k' 倍,得到新的拱顶位移 δ ,最后得到 $k'-\delta$ 关系曲线,如图2所示。然而,究竟取何值为破坏值时尚无法确定。另外,采用强度折减法同时考虑土体-衬砌时,如果不对衬砌刚度进行折减,会导致安全系数严重偏大。如何折减衬砌的刚度并没有现成的方法,但可利用荷载结构法为折减衬砌刚度提供依据。为此,保持土层荷载不变,折减衬砌刚度,计算拱顶下沉,绘制 $\beta-\delta$ 图,如图3所示,其中, β 为刚度折减系数。

这样可得到2条曲线,如图4所示,取其交点

K_1 为荷载结构法的安全系数, $\delta_{\max}$ 为结构破坏时的拱顶位移值。上面所述增大荷载法相当于对衬砌周边土体进行强度折减以不断增加衬砌上的土压力,而刚度折减法可以解决土体-衬砌共同作用时的强度折减法遇到的问题,为建立实体单元计算安全系数时的衬砌刚度折减提供了依据。

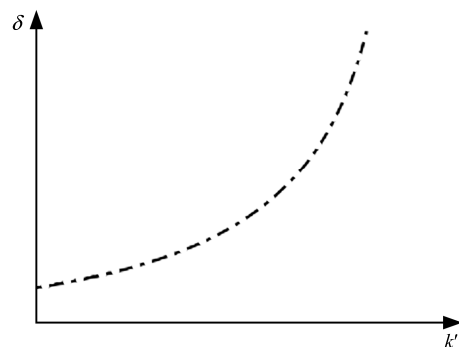


图2 荷载增大法示意图

Fig.2 Schematic diagram of load increasing method

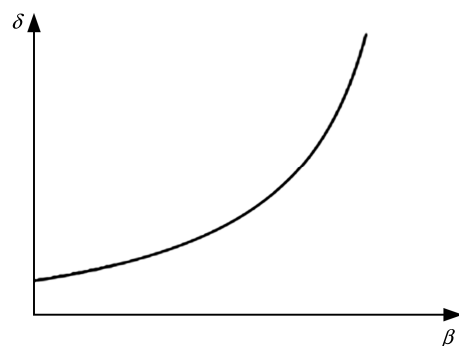


图3 刚度折减法示意图

Fig.3 Schematic diagram of stiffness reduction method

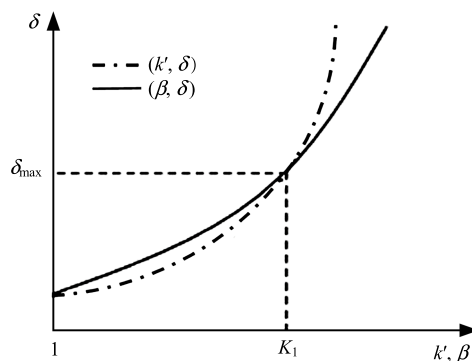


图4 安全系数的确定

Fig.4 Determination of safety factor

2.3 考虑衬砌刚度变化的强度折减法评估人防工程安全度

运用荷载结构法分析衬砌安全性时,围岩土体被简化为作用在衬砌上的荷载,不考虑土体自身结

构性和土体与衬砌共同作用, 导致整体结构安全系数被低估; 也无法分析结构破坏时土体破坏形式和影响范围。建立实体模型后, 如果只对衬砌周边土体进行强度折减, 把衬砌当成弹性体时安全系数明显偏大, 计算没有实用意义; 把衬砌假定成摩尔-库仑材料^[11]也是一种尝试, 但计算结果合理性有待继续论证。为此, 本文提出一种考虑衬砌刚度变化的强度折减法评估方法。具体计算方法是, 将钢筋混凝土衬砌刚度折减 K_1 倍, 即把前文得到的刚度折减值作为计算的初值, 同时, 折减土层的 c 、 φ 值直至破坏, 得到破坏时的折减系数 F_s 。这样, 算得的 F_s 与 K_1 不会正好相等, 将得不到统一的安全系数。为此, 通过试算, 直到二者相等, 此时的值为强度折减法的安全系数, 记为 K_2 。计算流程如图 5 所示。

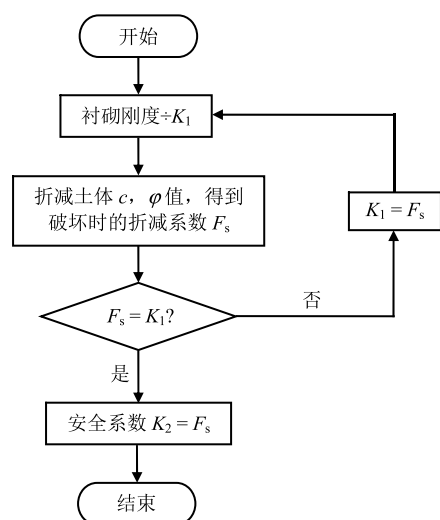


图 5 强度折减法流程图

Fig.5 Flow chart of strength reduction method

3 工程案例

3.1 工程概况

某省会城市于 1975 年动工建设长度 3 100 m 的人防工程, 1984 年停工, 路线呈直线状。该工程为钢筋混凝土结构坑道工程, 采用暗挖支撑施工工艺, 基础为钢筋混凝土反拱结构, 拱底上用素混凝土找平至洞室地面标高处, 衬砌采用 C30 现浇混凝土和 Q235 碳素结构钢, 设计使用年限 50 a。工程基底距地表 22~30 m 不等, 主要隧道断面内部宽为 4.2 m、高为 4.5 m。

根据工程项目鉴定报告, 该人防工程两侧侧墙及拱顶一共存在渗水点 186 处、漏水点 93 处、露筋点 29 处, 墙面裂缝若干, 其中最长水平裂缝长度为

60 m, 最大裂缝宽度为 5.46 mm, 最大裂缝深度约为 156 mm。该工程存在两处支洞连通口塌方和一处支洞坍塌, 现状如图 6 所示。



图 6 工程缺陷示意图

Fig.6 Schematic diagrams of structural defects

原设计和施工时, 人防工程主体结构(洞室衬砌)完全位于水位线以上。随着近年来周边工业企业的迁移, 用水量大幅下降, 引起地下水位上升, 2000 年左右水位已完全上升至该工程主体结构以上, 近些年水位还在持续上升。

3.2 计算模型与参数

选取如图 7 所示的典型断面建立平面应变有限元模型, 该断面处总宽度为 4.8 m, 总高度为 5.4 m, 洞室衬砌厚为 0.3 m。分别采用荷载结构法和强度折减法进行数值分析。

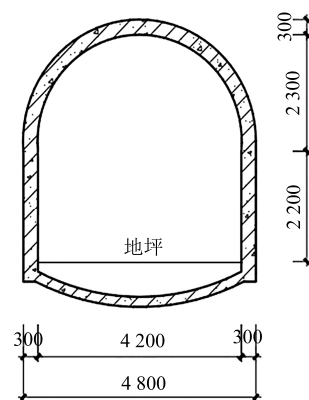


图 7 典型断面(单位: mm)

Fig.7 Typical section(unit: mm)

荷载结构法分析时使用有限元程序 ABAQUS 建立了“荷载-结构”模型, 如图 8 所示。洞室结

构所用的 C30 混凝土，其弹性模量为 21.1 GPa，泊松比为 0.2，材料进入塑性后，假定服从混凝土损伤塑性模型 CDP 模型的应力-非弹性应变关系，其损伤因子-非弹性应变关系和模型参数如表 1 和表 2 所示。

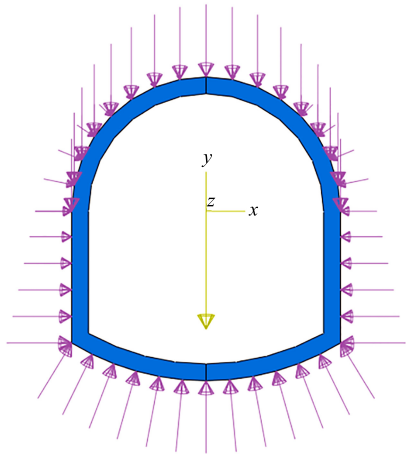


图 8 荷载-结构法计算模型
Fig.8 Calculation model of load-structure method

表 1 混凝土材料计算参数
Table 1 Calculation parameters of concrete materials

抗压强度 /MPa	非弹性应变 /%	受压损伤 因子	抗拉强度 /MPa	开裂应变 /%	开裂损伤 因子
15.45	0	0	2.010	0	0
18.48	0.015 1	0.065	0.660	0.035 0	0.359
19.93	0.037 6	0.137	0.419	0.064 7	0.620
20.10	0.051 5	0.178	0.319	0.093 7	0.756
19.61	0.083 3	0.264	0.226	0.151 3	0.876
15.88	0.189 3	0.501	0.180	0.208 7	0.924
12.49	0.293 7	0.665	0.152	0.266 0	0.949
10.07	0.393 4	0.767	0.130	0.332 7	0.964
7.50	0.552 8	0.861			
4.89	0.899 5	0.939			

表 2 CDP 模型参数
Table 2 CDP model parameters

膨胀角/(°)	偏心率	f_{b0}/f_{c0}	k	黏性系数
30	0.1	1.16	0.667	0.000 5

注： f_{b0} 为双轴极限抗压强度， f_{c0} 为单轴极限抗压强度。

表 3 建成初期混凝土本构模型参数
Table 3 Constitutive model parameters of concrete at early stage after completion of construction

$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E_{28}/kPa	ν	$f_{c,28}/\text{kPa}$	f_{c0n}	f_{cfn}	f_{cun}	$G_{c,28}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
27	2.8×10^7	0.16	3.0×10^4	0.25	0.1	0.1	50
$\varphi_{\max}/(^{\circ})$	$\psi/(^{\circ})$	η_c	$f_{t,28}/\text{kPa}$	f_{tun}	$G_{t,28}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$		η_t
40	5	1	3 000	1	0.08		1

表 4 和表 5 分别为计算断面处各土层的物理力学指标和小应变硬化模型(hardening soil model with small-strain stiffness, 简称 HSS 模型)的参数值。

强度折减法计算时使用有限元程序 PLAXIS 2D 建立的人防隧道及周围土体的有限元模型如图 9 所示，水平向和竖直向的计算范围分别为 55、42 m，衬砌外侧的线条和符号表示在土体和衬砌的接触面设置了负向界面。有限元模型选用了 15 节点三角形单元来模拟土体和衬砌结构，为了保证计算结果的精确性，在 人防隧道衬砌与土体的结合面附近增加了网格的密度。有限元模型底部固定，两侧边界施加水平约束，顶部为自由边界，洞室顶部距地表 18 m。

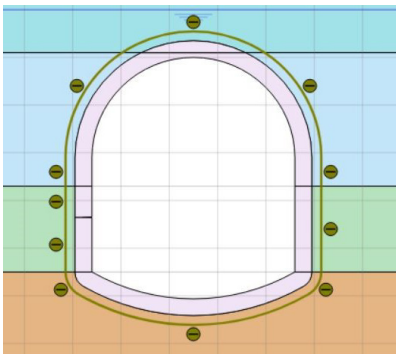


图 9 强度折减法有限元模型
Fig.9 Finite element model with strength reduction method

强度折减法计算中，衬砌材料使用 PLAXIS 2D 自带的混凝土本构模型，该模型相比线弹性模型，考虑混凝土材料的非线性，可以获得更真实的应力和应变分布，表 3 汇总人防工程建成初期衬砌结构混凝土本构模型参数的取值。表中 γ 为混凝土重度， E_{28} 为混凝土杨氏模量， ν 为混凝土泊松比， $f_{c,28}$ 为混凝土抗压强度， f_{c0n} 为归一化失效强度， f_{cfn} 为归一化初始动强度， f_{cun} 为归一化残余强度， $G_{c,28}$ 为混凝土的压缩断裂能， $\varphi_{\max}$ 为最大摩擦角， ψ 为剪胀角， η_c 为抗压强度安全系数， $f_{t,28}$ 为混凝土的单轴抗拉强度， f_{tun} 为残余抗拉强度与峰值抗拉强度之比， $G_{t,28}$ 为混凝土的拉伸断裂能， η_t 为抗拉强度安全系数。

各土层的本构模型采用 HSS 模型，相比线弹性模型和摩尔-库仑弹塑性模型，HSS 模型考虑了土体硬化并能反映土体小应变特性。

表4 土层物理力学参数

Table 4 Physico-mechanical parameters of soil layers

层号	土层	厚度 /m	天然密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率 /%	孔隙比	黏聚力 /kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
①	亚黏土	8.2	1.91	12.7	0.60	68	32.23
②	细砂	1.1	1.72	5.3	0.63	18	32.50
③	亚黏土	8.6	1.91	12.7	0.60	68	32.23
④	亚砂土	2.8	1.80	6.9	0.56	59	30.88
⑤	中砂	1.8	1.53	6.8	0.87	0	37.00
⑥	亚黏土	17.6	1.94	20.3	0.69	69	30.30

表5 各层土体 HSS 模型参数

Table 5 HSS model parameters for each soil layer

层号	K_0	$E_{\text{sed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	m	R_f	$\psi/(^{\circ})$
①	0.47	11.43	11.43	91.43	91.43	1.3	0.8	0.9	2.23
②	0.46	10.80	10.80	86.40	86.40	1.3	0.7	0.9	2.50
③	0.47	11.43	11.43	91.43	91.43	1.3	0.8	0.9	2.23
④	0.49	10.40	10.40	83.20	83.20	1.3	0.7	0.9	0.88
⑤	0.40	15.39	15.39	123.10	123.10	1.3	0.7	0.9	7.00
⑥	0.50	12.07	12.07	96.57	96.57	1.3	0.8	0.9	0.30

注: K_0 为正常固结条件下静止侧压力系数; $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 为固结试验中的参考切线模量; E_{50}^{ref} 为三轴排水剪切试验的参考割线模量; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为三轴排水剪切试验的参考加卸载模量; G_0^{ref} 为小应变刚度试验的参考初始模量; $\gamma_{0.7}$ 为割线剪切模量衰减到初始剪切模量 70% 时所对应的剪应变; m 为刚度应力水平相关的幂指数; R_f 为破坏比。

强度 30 MPa 左右,近期的勘察报告显示,混凝土强度已降至 25 MPa 左右。为了分析结构材料性能下降对安全度的影响,用荷载结构法和强度折减法分别计算了该人防工程结构在建设初期强度和当前强度下的安全系数。

先按 C30 混凝土初期强度设置荷载-结构模型中衬砌的模型参数,联合使用荷载增大法和刚度折减法,计算得到如图 10 所示的衬砌塑性损伤因子分布云图和如图 11、12 所示的荷载增大系数、刚度折减系数与关键点(拱顶)位移的关系。塑性损伤因子是无量纲量,该值为 0 表示混凝土无损伤,为 1 表示混凝土完全损伤,衬砌塑性损伤因子分布云图

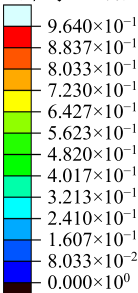
塑性损伤因子
(平均: 75%)

图 10 衬砌塑性损伤因子分布云图

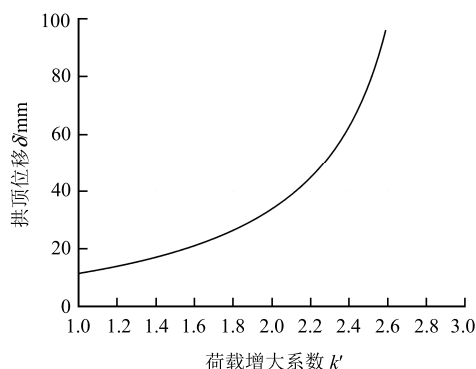
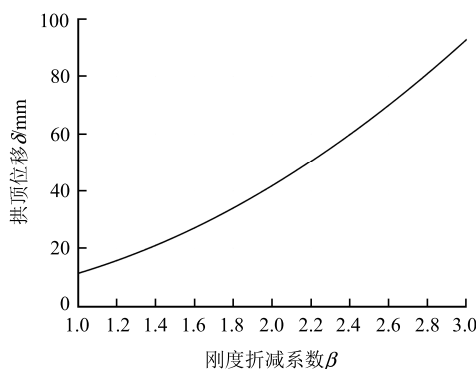
Fig.10 Distribution nephogram of lining plastic damage factor

4 分析结果与讨论

本文涉及的人防工程服役年限较长,混凝土结构强度下降,部分位置出现开裂,性能可能发生了变化,分析该人防工程不同时期和工况下的安全性,可为类似案例的处置提供借鉴。

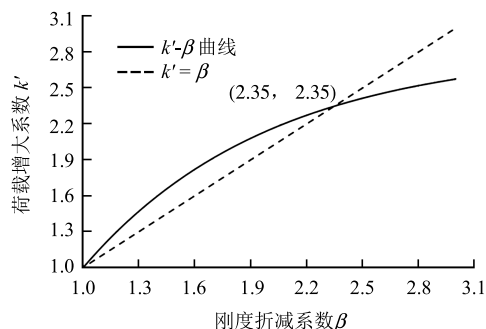
4.1 混凝土材料老化

本人防工程使用了 C30 混凝土,建成初期抗压

图 11 $k'-\delta$ 关系曲线Fig.11 $k'-\delta$ relation curve图 12 $\beta-\delta$ 关系曲线Fig.12 $\beta-\delta$ relation curve

显示随荷载增大和刚度折减时衬砌可能发生破坏的

位置和程度。以相同拱顶位移下刚度折减系数 β ($\beta = E_0/E$, E 为经刚度折减系数折减后的刚度, E_0 为初始刚度) 为自变量、荷载增大系数 k' ($k' = Q/Q_0$, Q 为经荷载增大系数放大后的荷载值, Q_0 为初始荷载值) 为因变量, 得到图 13 所示的 k' - β 曲线, 在该曲线与直线 $k' = \beta$ 的交点处, 拱顶位移对应相等的荷载增大系数和刚度折减系数, 认为此时结构破坏, 故取折减系数 2.35 作为安全系数 K_1 的值。

图 13 K_1 的确定Fig.13 Determination of K_1

将 K_1 值用作强度折减法的衬砌刚度折减值, 得到安全系数 $K_2 = 2.47$, 破坏时衬砌周边的总位移分布如图 14 所示, 位移较大的腰侧出现破坏的可能性较大。取 K_1 、 K_2 的较小值 2.35 为建成初期结构的安全系数。结构经过长期服役, 认为表 1、2、4、5 的数据相比工程结构建成初期未发生变化, 而混凝土的强度和刚度下降, 故改用表 6 所示的参数, 用前述方法得到该人防工程当前的安全系数。

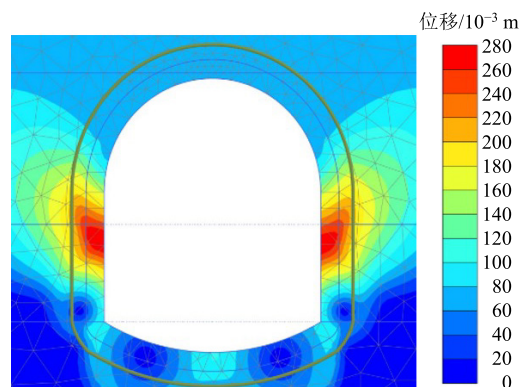


图 14 破坏时的总位移云图

Fig.14 Total displacement nephogram at failure

表 6 老化后混凝土本构模型参数

Table 6 Constitutive model parameters of concrete after aging

$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E_{28}/kPa	ν	$f_{c,28}/\text{kPa}$	f_{c0n}	f_{cfn}	f_{cun}	$G_{c,28}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
27	2.3×10^7	0.16	2.5×10^4	0.25	0.1	0.1	41
$\phi_{\max}/(^{\circ})$	$\psi/(^{\circ})$	η_c	$f_{t,28}/\text{kPa}$	f_{tun}	$G_{t,28}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	η_t	
40	5	1	2 500	1	0.06	1	

建成初期和现在安全系数的对比如表 7 所示, 并附上把衬砌等效为摩尔-库仑材料进行强度折减的计算结果作为参照。表 7 的数据显示, 结构当前安全裕度较建成初期有了大幅下降。说明表现较好的人防工程, 由于混凝土老化等因素也会导致结构的安全性下降。

表 7 建设初期和当前无缺陷条件下的安全系数

Table 7 Safety factors at the initial stage of construction and at present without defects

工况及安全系数	荷载结构法 K_1	强度折减法 K_2	K	衬砌等效为摩尔-库仑材料时
建设初期	2.35	2.47	2.35	2.53
当前无缺陷	1.62	1.67	1.62	1.71

4.2 裂缝存在

除混凝土老化外, 在长期主动土压力作用下, 洞室内拱腰等处的混凝土被拉裂, 开展的裂缝加剧了结构破坏的风险程度。在所研究的区段中, 目前最严重的裂缝出现在拱腰位置, 缝宽为 5.46 mm,

缝深为 156 mm。现场观察发现该裂缝位置恰好为结构施工缝, 裂缝的发展可能是由于当初施工缝质量问题加上长期混凝土劣化所致。现场调查还发现, 裂缝也有一些出现在拱顶等关键位置处, 但不深。本文采用上述方法对不同位置存在裂缝时的安全系数进行了计算分析。

为了探讨拱腰处裂缝对结构安全性的削弱程度, 如图 15 所示, 在衬砌计算模型中拱腰位置处加了一条宽为 5 mm、深为 150 mm 的裂缝, 用荷载结构法得到安全系数 $K_1 = 1.1$, 强度折减法得到安全系数 $K_2 = 1.18$, 取较小的 1.1 为安全系数。同时还计算了裂缝处于拱顶、拱底等不同位置时的安全系数, 探讨了不同裂缝深度对安全系数的影响, 具体计算结果见表 8。从表可得到以下结论:

(1) 衬砌表面存在裂缝时会降低结构的安全系数, 这是由于裂缝会削弱结构的承载面积并产生应力集中, 导致裂缝进一步扩展, 降低结构的承载力, 引起结构过大的变形。

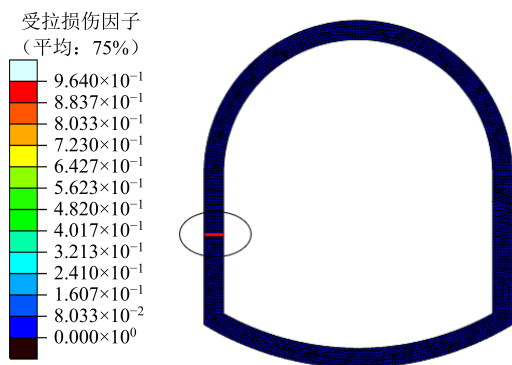


图 15 裂缝位置示意图

Fig.15 Schematic diagram of crack location

(2) 不同位置出现的裂缝对衬砌结构安全系数的影响程度不同,其中拱顶出现裂缝对结构最不利。这是因为结构的变形主要集中在拱顶处,当拱顶出现裂缝时会导致该处的刚度降低,变形进一步增大。而拱底裂缝对结构的安全系数影响不大,这是因为下部还有地基的支撑,即使出现裂缝,结构依旧具有一定的承载力。

(3) 裂缝深度对结构安全系数的影响很大,浅裂缝对结构安全的影响不显著,而当裂缝深度发展到超过衬砌厚度的一半时,结构安全系数会明显下降。

表 8 有裂缝衬砌的安全系数
Table 8 Safety factors of lining with crack

安全系数	拱顶			拱腰			拱底		
	浅 (5 cm)	中 (15 cm)	深 (25 cm)	浅 (5 cm)	中 (15 cm)	深 (25 cm)	浅 (5 cm)	中 (15 cm)	深 (25 cm)
K_1	1.384	1.186	1.020	1.502	1.365	1.046	1.505	1.405	1.378
K_2	1.632	1.193	1.061	1.586	1.225	1.020	1.638	1.603	1.561
K	1.384	1.186	1.020	1.502	1.225	1.020	1.505	1.405	1.378

本人防工程裂缝开展区段的安全系数计算结果如表 9 所示,大部分区段结构的安全系数 $K < 1.5$,接近承载力的极限状态,应将其列为退出序列人防工程或进行加固处理。

表 9 不同区段安全系数
Table 9 Safety factors of different sections

区段	裂缝宽度/mm	安全系数 K
K0+278~K0+285	2.26	1.22
K0+307~K0+313	0.78	1.60
K0+253~K0+313	5.46	1.10
K1+639~K1+648	1.86	1.43
K1+695~K1+704	2.46	1.27
K1+700~K1+713	2.82	1.10
K1+791~K1+794	1.92	1.42
K1+791~K1+799	2.24	1.31
K2+007~K2+019	1.46	1.48

4.3 地下水位的影响

本文人防工程的地下水位变迁情况如图 16 所示,1978 年工程建设时,隧洞衬砌完全处于当时的地下水位线上方,此后水位逐年上升,90 年代时已上升至衬砌结构所在的位置,近年逐渐逼近 1959 年的历史最高水位。地下水位上升和高强度降雨导致洞室完全淹没,增大了改造加固的难度,为了探讨被淹没人防工程排水作业的可能性,分别计算了不同水位以及洞室不同程度进水情况下的安全系数。图 17 表示了某一地下水位下洞室内无水与洞室内外水位一致时的计算模型与计算结果,图 18 表示

了不同水位条件下衬砌透水与不透水时洞室结构安全系数的对比。

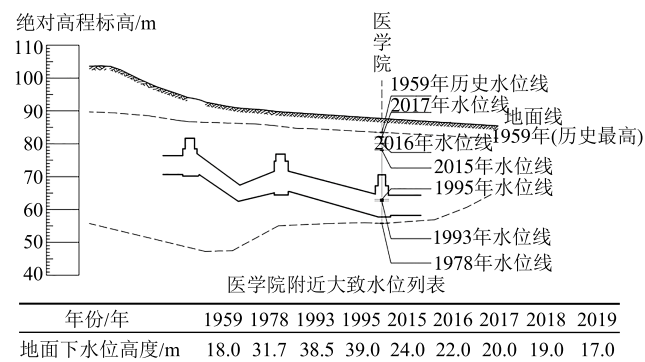


图 16 地下水位变迁图

Fig.16 Change map of groundwater level

由计算结果可知,当地下水位线(-23 m)在洞室结构以下时,结构的安全系数不受水位的影响,这是因为地下水位线在洞室结构以下变动几乎不改变结构的受荷条件。当地下水位线超过结构底部后,若结构防水措施失效,洞室内的水位将随地下水位线的抬升而上升直至完全被淹没,在这种情况下,结构安全度随地下水位线上升而增大,这是由于洞内水压力的增大提高了衬砌抗力;若结构防水措施有效,在地下水位线上升后洞内仍能保持干燥,这种情况下,水位线越高,衬砌越危险,这是由于随地下水位线升高而增大的水头压力作为荷载作用在

洞室衬砌上。因此,在处置已经进水且地下水位线较高的地下人防工程时,贸然进行排水作业将使结构本来相对有利的受荷条件发生逆转,增大风险。

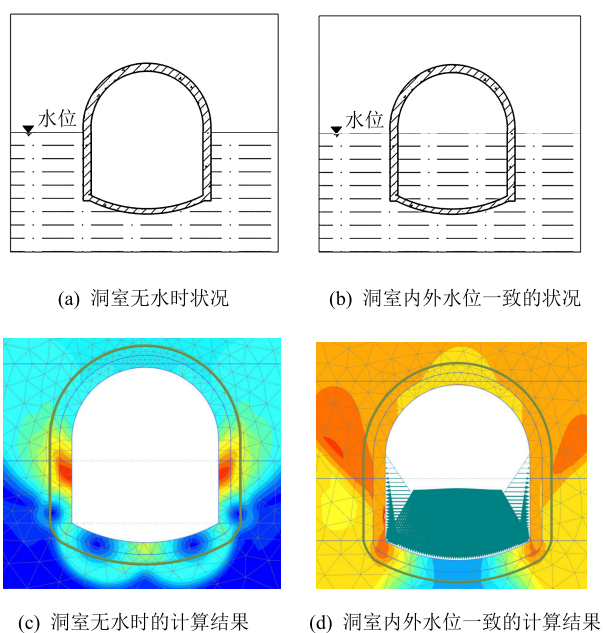


图 17 有限元模型及计算结果云图
Fig.17 Finite element models and result nephograms

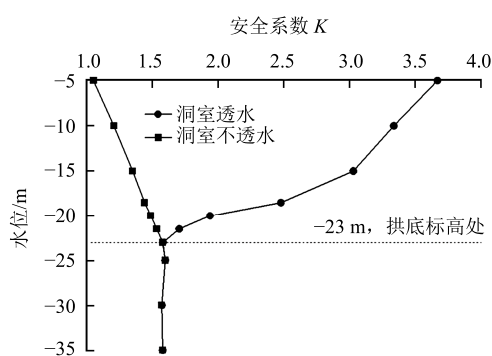


图 18 洞室透水与不透水时结构安全系数对比
Fig.18 Comparison of structural safety factors between permeable and impermeable caverns

5 结 论

(1) 联合使用荷载结构法和强度折减法可以用于人防工程结构的安全评估,该方法兼具荷载结构法理论清晰和强度折减法更符合地下洞室受荷实际的特点,可得到合理的结构安全系数。

(2) 随着人防工程服役年限增加,钢筋混凝土结构的强度下降是导致老旧人防工程安全系数降低的主要原因,对现在的混凝土强度进行检测有利于掌握人防工程的安全状态。

(3) 裂缝是出现在人防工程结构上的典型缺陷,风险程度主要取决于裂缝深度,浅裂缝对结构影响

不大,当裂缝深度发展到超过衬砌厚度一半时结构安全度会急剧下降。

(4) 防水措施有效的人防工程,在地下水位线处于结构上方时能正常使用,但安全性会随着水位上升而降低;防水措施失效的人防工程在地下水位线上升后被淹没而失去使用功能,但结构安全度在洞内水压作用下会有所上升。淹没的人防工程排水时存在风险。

参 考 文 献

- [1] 刘新宇, 华瑞平, 习剑. 重庆市万州区淹没人防工程结构加固治理研究[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2000, 1(1): 68-70.
LIU Xin-yu, HUA Rui-ping, XI Jian. The research on technical treatment of submerged civil defense fortifications in the Wanzhou district of Chongqing[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2000, 1(1): 68-70.
- [2] 毛伟刚, 杨芳, 赵华. 基础下早期人防工程处理的实践与探索[J]. 山东建筑工程学院学报, 2002, 17(1): 95-98.
MAO Wei-gang, YANG Fang, ZHAO Hua. Practice and study on the treatment of early civil air defense works under the foundation[J]. *Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering*, 2002, 17(1): 95-98.
- [3] 曹静, 鞠晓, 王建华. 郑州某超深基坑支护设计与防空洞处理[J]. 河南建材, 2015(2): 5-7.
CAO Jing, JU Xiao, WANG Jian-hua. Support design and air raid shelter treatment of an ultra deep foundation pit in Zhengzhou[J]. *Henan Building Materials*, 2015(2): 5-7.
- [4] 孙海朋, 卓卫东. 早期人防工程检测评估方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(增刊 1): 268-273.
SUN Hai-peng, ZHUO Wei-dong. Research on detection and evaluation method of early-built civil air defense works[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(Suppl.1): 268-273.
- [5] 邓鹏. 刍议新时期下老旧人防工程升级改造[J]. 山东工业技术, 2016(8): 100.
DENG Peng. Discussion on upgrading old civil air defense projects in the new era[J]. *Shandong Industrial Technology*, 2016(8): 100.
- [6] 焦斌. 早期人防工程安全评估方法研究[J]. 科技经济市场, 2010(4): 41-43.
JIAO Bin. Study on safety assessment method of early civil air defense engineering[J]. *Scientific and Technological*

- Economic Market**, 2010(4): 41-43.
- [7] 李树民. 人防工程造成建筑物基础损伤的加固方法[J]. 黑龙江科技信息, 2004(6): 125.
LI Shu-min. Reinforcement method of building foundation damage caused by civil air defense engineering[J]. **Heilongjiang Science and Technology Information**, 2004(6): 125.
- [8] 王维维, 孙丽莎. 城区隐含塌陷及废弃空间探测治理技术探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(增刊 2): 2053-2057.
WANG Wei-wei, SUN Li-sha. Discussion on the survey and control technology of hiding collapsed pit and unused spaces in downtown area[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2013, 9(Suppl.2): 2053-2057.
- [9] 郭骞. 废弃地下人防工程洞室稳定性研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
GUO Qian. Study on the stability of abandoned underground civil air defense projects[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.
- [10] 林丽伟, 严春风, 王建刚. 层次分析法在人防工程病害防控决策中的应用——以四川宜宾地区人防工程为例[J]. 四川建筑, 2008, 28(4): 73-75.
LIN Li-wei, YAN Chun-feng, WANG Jian-gang. Application of analytic hierarchy process in disease prevention and control decision-making of civil air defense engineering, taking civil air defense engineering in Yibin, Sichuan as an example[J]. **Sichuan Architecture**, 2008, 28(4): 73-75.
- [11] 李秀地, 郑颖人, 袁勇, 等. 沉管海底隧道强度折减法分析探讨[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1876-1882.
LI Xiu-di, ZHENG Ying-ren, YUAN Yong, et al. Strength reduction method for submarine immersed tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(10): 1876-1882.
- [12] 张黎明, 郑颖人, 王在泉, 等. 有限元强度折减法在公路隧道中的应用探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 97-101, 106.
ZHANG Li-ming, ZHENG Ying-ren, WANG Zai-quan, et al. Application of strength reduction finite element method to road tunnels[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(1): 97-101, 106.
- [13] 江权, 冯夏庭, 向天兵. 基于强度折减原理的地下洞室群整体安全系数计算方法探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2483-2488.
JIANG Quan, FENG Xia-ting, XIANG Tian-bing. Discussion on method for calculating general safety factor of underground caverns based on strength reduction theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(8): 2483-2488.
- [14] 周卫敏, 欧阳君. 水工隧洞围岩稳定性分析中的有限元强度折减法[J]. 湖南水利水电, 2015(4): 1-4.
ZHOU Wei-min, OU Yang-jun. Finite element strength reduction method in stability analysis of surrounding rock of hydraulic tunnel[J]. **Hunan Hydro & Power**, 2015(4): 1-4.
- [15] 鞠杨, 徐广泉, 毛灵涛, 等. 盾构隧道衬砌结构应力与变形的三维数值模拟与模型试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(3): 157-165.
JU Yang, XU Guang-quan, MAO Ling-tao, et al. 3D numerical simulation of stress and strain properties of concrete shield tunnel lining and modeling experiments[J]. **Engineering Mechanics**, 2005, 22(3): 157-165.
- [16] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. **Geotechnique**, 1975, 25(4): 671-689.
- [17] 郑颖人, 赵尚毅. 岩土工程极限分析有限元法及其应用[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 91-98, 104.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Limit state finite element method for geotechnical engineering analysis and its applications[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2005, 38(1): 91-98, 104.
- [18] 杜志田, 朱双燕, 赵福全, 等. 铁路隧道衬砌厚度及强度不足安全性影响分析[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(10): 93-98.
DU Zhi-tian, ZHU Shuang-yan, ZHAO Fu-quan, et al. Safety influence analysis of insufficient thickness and strength of railway tunnel lining[J]. **Railway Standard Design**, 2021, 65(10): 93-98.
- [19] 王华牢, 李宁, 褚方平. 公路隧道衬砌厚度不足对衬砌安全性影响[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(2): 32-38.
WANG Hua-lao, LI Ning, CHU Fang-ping. Effect of lining thickness lack on lining safety for highway tunnel[J]. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, 2009, 9(2): 32-38.
- [20] LUBLIN J, OLIVER J, OLLER S. A plastic-damage model for concrete[J]. **International Journal of Solid Structures**, 1989, 25(3): 299-326.