

基于等代加速度的地下洞室抗震简化设计法*

崔臻, 盛谦, 冷先伦, 朱泽奇

(中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要:在基于性能的地震工程框架之下,地下洞室的地震稳定性评价方法可根据掌握难易程度、计算工作量、结果详尽程度划分为简化及精细两类方法。而当前对地下洞室的地震稳定性研究多针对动力数值方法,也即精细化分析方法,而对简化设计方法设计较少。针对这一现状,引入拟静力形式的等代加速度法,对于等代加速度法应用于地下洞室群地震响应分析的一些问题进行了探讨。并在考虑洞室埋深和岩体性质的基础上,基于位移等效原则,通过数值试算,得到等代地震加速度修正系数的取值范围与回归公式。结果表明,当采用修正系数对利用等代地震加速度得到的结果进行修正后,与动力时程计算得到的结果吻合度较好。本文的研究内容为地下洞室地震稳定性的简化设计分析提供了一种新的思路。

关键词: 地下洞室;地震响应;简化方法;拟静力;等代加速度

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2017)03-0724-08

Discussion on a Simplified Analysis Method for Underground Rock Cavern Based on Equivalent Static Method

Cui Zhen, Sheng Qian, Leng Xianlun, Zhu Zeqi

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P.R. China)

Abstract: On the basis of performance-based earthquake engineering, analysis methods for underground rock caverns may be categorized into a simplified method and a sophisticated method, based on respectively difficulty level, calculation burden, and level of detail for results. However, many efforts have been paid on the full dynamic method, i.e. sophisticated method, yet less attention has been given to the simplified method. An equivalent static method based simplified method was presented and verified. Correction coefficients for respectively index were given via numerical trail calculation in accordance with the equivalence displacement. It is found that the proper corrected results of simplified analysis method agree well with that of the full dynamic method. In this way, the proposed method may provide certain reference for other researches for this issue.

Keywords: underground cavern; seismic response; simplified method; quasi-static; equivalent acceleration

0 引言

地下洞室群工程地震稳定性评价问题可以认为是考虑了地下洞室群工程独有特点的一种地下工程地震稳定性评价的特例^[1]。而地震稳定性评

价是抗震设计工程的一部分,可以认为,抗震设计工作是地震稳定性评价和地震灾变控制措施二者的动态结合。

地下洞室地震稳定性评价的计算方法是随着对地下工程动力响应特征认识的不断发展,以及近

* 收稿日期:2016-10-24(修改稿)
作者简介:崔臻(1986-),男,重庆石柱人,在站博士后,主要从事岩土地震工程研究。E-mail:zcui@whrsm.ac.cn
基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401803),国家自然科学基金(51409263,11472292,41672319)

年来历次地震中地下工程震害的调查、分析总结以及相关研究的不断深化而发展的。在20世纪中叶以前,地下洞室工程尚未得到较大规模的开发,无论是单体规模还是总体数量都处于一个较低的水平,与地面工程相比,强震特别是灾难性强震中地下工程的破坏实例及调查研究都较少,故在地下工程的设计计算中,地震因素还未成为一个必须考虑的因素,更没有系统的地下工程地震稳定性计算方法。20世纪中叶后,地下洞室工程开发逐渐得到重视,工程建设也逐渐增多。地下洞室工程的地震稳定性问题也进入人们的视野,各类地下洞室工程的设计计算中也开始考虑地震的作用。目前,地下洞室工程考虑地震作用的稳定性计算方法大致有拟静力法、自由场变形法等^[2],这些设计方法本质上属于静力计算方法。随着数值计算技术的发展,尤其是动力数值计算技术的发展,使用数值方法进行抗震稳定性计算的方法也得到了很大的发展。目前静力方法仍在使用,但主要用于工程结构形式和地址条件较为简单或粗略估计地震动作用时的情况。与静力方法相比,动力方法适用于结构形式和地质条件更复杂、或用静力方法进行简化处理会得到较大误差的情况。动力方法计算成本高、方法复杂,一般工程设计人员较难掌握,在使用上受到一定的限制。

基于性能的地震工程(Performance-Based Earthquake Engineering, PBEE),或性能化抗震设计(Performance-Based Seismic Design, PBS D)^[3-4],是近年来工程抗震学科最受关注的新一代抗震设计理论,被认为是未来抗震设计的主要指导思想。在基于性能的地震工程框架下,特别强调根据具体的性能水平采用相应的计算方法^[5-6],因此有必要对不同的计算方法按照原理、难易程度、在稳定性评价中适用的阶段进行分类^[7]。如国际岩土工程抗震规范ISO23469—2005^[8]就将分析计算方法分为简化与精细两大类。美国规范ATC-40^[9]和FEM273^[10]将抗震分析方法分为线性、非线性两大类。

在这一思想下,本文也试图将地下洞室地震稳定性评价计算方法概括为简化与精细方法两类。由于弹塑性动力分析方法最能反映对象工程在地震作用下真实的响应情况,所以将其作为精确校核方法,无需更多讨论。但弹塑性动力分析方法用于工程设计时,费时耗力,不易被一般的工程人员所掌握,在工程界推广应用还有一定的困难,故对于简化分析设计方法,采用较简单的拟静力方法形式

更为合适。而当前的研究工作中,恰恰多针对动力数值方法,并取得了较多的成果,但对简化设计方法涉及较少。

本文拟针对这一问题,引入等代加速度法作为地下洞室地震稳定性的简化设计方法,探讨其适用性,并给出等代地震加速度修正系数的取值范围与回归公式。本文的研究内容为地下洞室地震稳定性的简化设计分析提供了一种新的思路。

1 基于等代加速度法的地下洞室抗震简化分析设计方法的提出

1.1 方法的提出

拟静力方法中最具代表性的可能是响应位移法^[11]。这类方法采用一维等效线性化模型等计算自由场响应,再将自由场位移通过土弹簧施加于结构上求解。响应位移法等方法简化了动力计算的繁琐,但仍存在以下缺陷:^[12]

(1)响应位移法对于一般工程设计人员来说,仍显繁琐;

(2)该方法主要针对浅埋地下结构,采用了土弹簧这一概念,而在深埋地下工程中,一般没有采用这一概念;

(3)该方法无法考虑深埋地下工程中常用的支护结构——锚杆/锚索。

等代加速度法的原理是用修正地震加速度的作用效应来等代地震动力响应。等代加速度的大小是按极限作用效应相等的原则,采用修正系数来确定的。等代地震加速度法是目前国内第一部地下结构专用抗震规范DG/T J08—2064—2009^[13]中采用的一种主要简化设计方法,本文拟基于此,探讨在地下洞室地震响应分析领域采用这一方法的可行性,并给出初步可用的计算步骤和修正参数。

1.2 计算步骤

等代加速度方法的核心即为用修正水平地震加速度的作用效应来等代地震动力响应。为简化起见,此处在考虑地下洞室工程的加速度修正系数时,将其考虑为最简单的常数形式,得到的加速度分布形式如图1所示。其中, A 为等代修正地震系数, a_{\max} 为地震加速度峰值。

在对地下洞室施加上述的等代修正加速度后,得到洞室群在 a_{\max} 下的各响应值为:

边墙中部最大相对位移: D_s 。

喷层结构弯矩: M_s 。

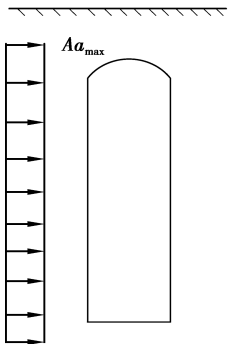


图 1 地下洞室等代修正水平地震加速度分布图

Fig.1 Layout of the corrected horizontal equivalent earthquake acceleration

喷层结构轴力: N_s
喷层结构剪力: Q_s
锚杆内力: C_s

其中,下标 s 代表拟静力 (quasi-Static)。以上等代修正加速度方法得到的响应指标仅在分布形式上与完全动力计算得到的结果基本一致(下文可见),但量值需要采用修正系数进行修正,各指标的修正系数如下:

边墙中部最大相对位移: $D=A_D D_s$
喷层结构弯矩: $M=A_M M_s$
喷层结构轴力: $N=A_N N_s$
喷层结构剪力: $Q=A_Q Q_s$
锚杆内力: $C=A_C C_s$

其中, A_i 代表相对于响应值指标 i 相应的修正系数。

2 修正系数的确定

等代加速度法中,等代加速度的大小是按极限作用效应相等的原则采用修正系数 A 来确定的。而这个极限作用,可以为位移、弯矩、内力等响应值指标中的任意一种。由于地下洞室地震响应计算中更关心位移指标,故此处等代地震修正系数 A 拟按边墙中点最大相对位移相等的原则确定,即采用 $A_D=1$ 的等效原则,而锚杆内力、喷层弯矩、内力、剪力等指标通过各自的修正系数 A_i 确定。

等代地震修正系数 A 的取值与地下洞室的埋深、岩体性质等多个因素有关,需要通过大量试算研究得到。本文将采用动力时程分析方法,通过大量不同埋深、岩体性质的地下洞室的试算结果,确定等代地震修正系数 A 的取值,并在此基础上求得其他响应指标的修正系数 A_i 。

2.1 等代地震修正系数 A 的确定

以白鹤滩水电站地下洞室为作为基本模型,在仅考虑洞室空腔存在的简化前提下,考虑埋深分别为 100 m、200 m、300 m、400 m、500 m,岩体变形模量分别为 5 GPa、10 GPa、15 GPa、20 GPa 共计 20 种工况。施加的支护结构为水电工程地下洞室常用的普通砂浆锚杆 $\phi 28$ mm, $L=8$ m@1.5 m \times 1.5 m,和 C25 喷混凝土 15 cm,如图 2 所示。采用针对白鹤滩设计谱的修正汶川地震波作为代表性地震动(如图 3),在单位地震作用下进行动力计算。

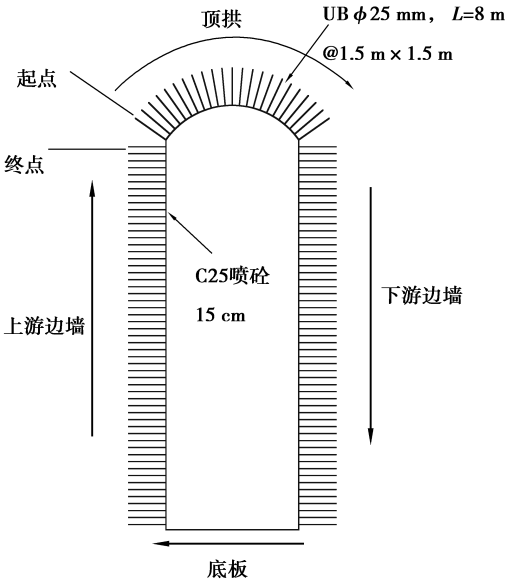


图 2 地下洞室支护结构示意

Fig.2 Support structure of underground cavern

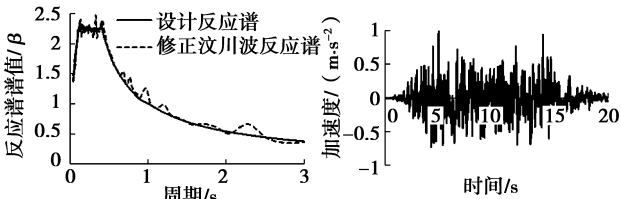


图 3 白鹤滩设计谱修正的汶川波

Fig.3 Wenchuan record corrected with Baihetan design spectrum

以动力计算结果为基准,20 个方案各自的等代地震修正系数结果如表 1 所示。

表 1 基于位移等效准则得到的等代修正系数 A 列表
Table 1 Correction coefficient A based on displacement equivalence

岩性/GPa	埋深/m				
	100	200	300	400	500
5	0.63	1.04	1.42	1.90	2.22
10	0.98	1.28	1.75	2.22	2.84
15	0.95	1.29	1.72	1.81	2.63
20	1.09	1.52	1.78	2.06	2.94

若对表 1 中的数据进行二元线性回归,得到等代修正系数与埋深和岩体变模的关系如下式

$$A = 2.669\ 4 - 0.004\ 2x + 0.023\ 6y \quad (1)$$

式中: x 为洞室埋深,m; y 为岩体变模,GPa。

若需要根据某一实际工程的埋深和岩性参数求其等代地震修正参数时,可根据洞室埋深和岩体参数在表 1 中插值选取,或采用式(1)进行计算。

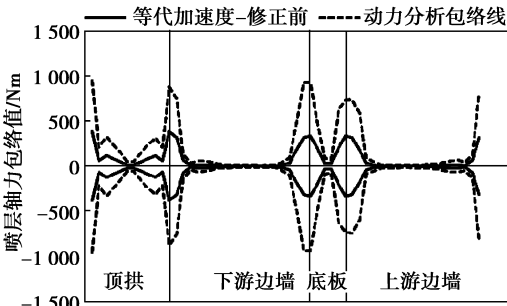
2.2 各响应指标的修正系数 A_i

在采用等代地震加速度对地下洞室进行拟静力计算后,得到的响应指标仅在分布形式上与完全动力计算得到的结果一致,但量值需要采用修正系数进行修正。根据 20 个方案的试算结果,各指标的修正系数分别讨论如下:

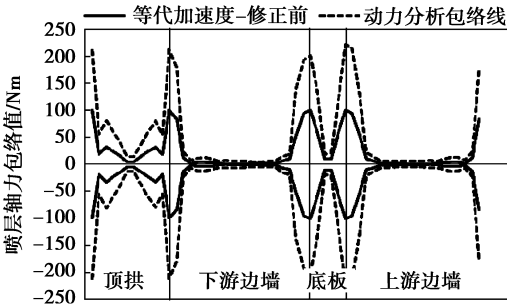
在讨论支护结构的部位时,以上游拱脚为起点,顺时针方向对支护结构进行表述,如图 2 所示。其中,喷层在顶拱、下游边墙、底板和上游边墙均有布置,而锚杆仅在顶拱、下游边墙、上游边墙有布置。

2.2.1 喷层弯矩修正系数 A_M

图 4 给出了未经过修正的等代加速度法/完全动力法计算得到的洞室各部位喷层弯矩包络值的对比。可见,分布形式上二者是较为一致的,但量值需要采用修正系数进行修正。根据 20 个试算方案的结果,得到的修正系数如表 2 所示。



(a) 埋深400 m, $E=5$ GPa



(b) 埋深200 m, $E=15$ GPa

图 4 未修正的等代修正加速度拟静力计算/完全动力计算得到的弯矩包络值对比(部分结果)

Fig.4 Comparison of uncorrected equivalent quasi-static acceleration/ bending moment envelope values obtained by full dynamic calculation (partial results)

表 2 基于位移等效准则得到的喷层弯矩修正系数 A_M

Table 2 Correction coefficient A_M based on displacement equivalence

岩性/GPa	埋深/m				
	100	200	300	400	500
5	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5
10	3.0	2.5	2.5	2.2	2.2
15	2.5	2.2	2.2	2.2	2.2
20	2.2	2.2	2.2	2.2	2.0

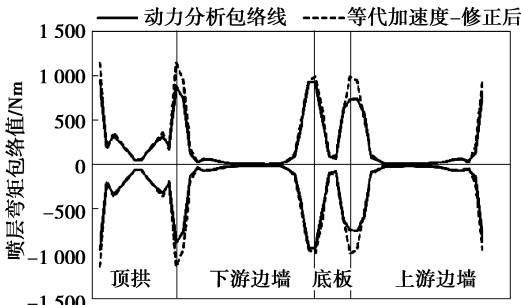
若对表 2 中的数据进行二元线性回归,得到喷层弯矩修正系数与埋深和岩体变模的关系如下式

$$A_M = 2.555\ 0 + 0.001\ 4x - 0.042\ 8y \quad (2)$$

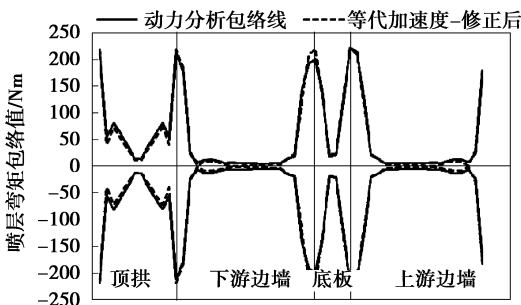
式中: x 为洞室埋深,m; y 为岩体变模,GPa。

若需要根据某一实际工程的埋深和岩性参数求其喷层弯矩修正系数时,可根据洞室埋深和岩体参数在表 2 中插值选取,或采用式(2)进行计算。

图 5 给出了修正后的等代加速度法/完全动力法计算得到的洞室各部位喷层弯矩包络值的对比,可见,在分布形式和量值上吻合程度均较好,说明了本方法的合理性及修正系数的正确性。



(a) 埋深400 m, $E=5$ GPa, 修正系数2.2



(b) 埋深200 m, $E=15$ GPa, 修正系数2.2

图 5 修正后的等代修正加速度拟静力计算/完全动力计算得到的弯矩包络值对比(部分结果)

Fig.5 Comparison of corrected equivalent quasi-static acceleration/ bending moment envelope values obtained by full dynamic calculation (partial results)

2.2.2 喷层轴力修正系数 A_N

图6给出了未经过修正的等代加速度法/完全动力法计算得到的洞室各部位喷层轴力包络值的对比。可见,分布形式上二者是较为一致的,但量值需要采用修正系数进行修正。根据20个试算方案的结果,得到的修正系数如表3所示。

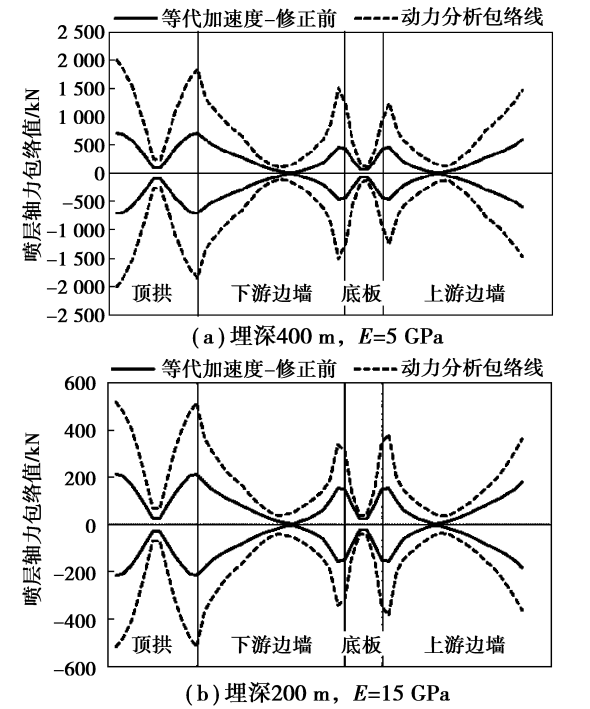


图6 未修正的等代修正加速度拟静力计算/完全动力计算得到的轴力包络值对比(部分结果)

Fig.6 Comparison of uncorrected equivalent quasi-static acceleration/axial force envelope values obtained by full dynamic calculation (partial results)

表3 基于位移等效准则得到的喷层轴力修正系数 A_N
Table 3 Correction coefficient A_N based on displacement equivalence

岩性/GPa	埋深/m				
	100	200	300	400	500
5	4.0	3.0	2.5	2.5	2.5
10	3.0	2.5	2.2	2.2	2.2
15	2.5	2.5	2.2	2.2	2.2
20	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2

若对表3中的数据进行二元线性回归,得到喷层弯矩修正系数与埋深和岩体变模的关系如下式

$$A_N = 2.537\ 5 + 0.001\ 6x - 0.044\ 0y \quad (3)$$

式中: x 为洞室埋深,m; y 为岩体变模,GPa。

若需要根据某一实际工程的埋深和岩性参数

求其喷层轴力修正系数时,可根据洞室埋深和岩体参数在表3中插值选取,或采用式(3)进行计算。

图7给出了修正后的等代加速度法/完全动力法计算得到的洞室各部位喷层轴力包络值的对比。可见,在分布形式和量值上吻合程度均较好,说明了本方法的合理性及修正系数的正确性。

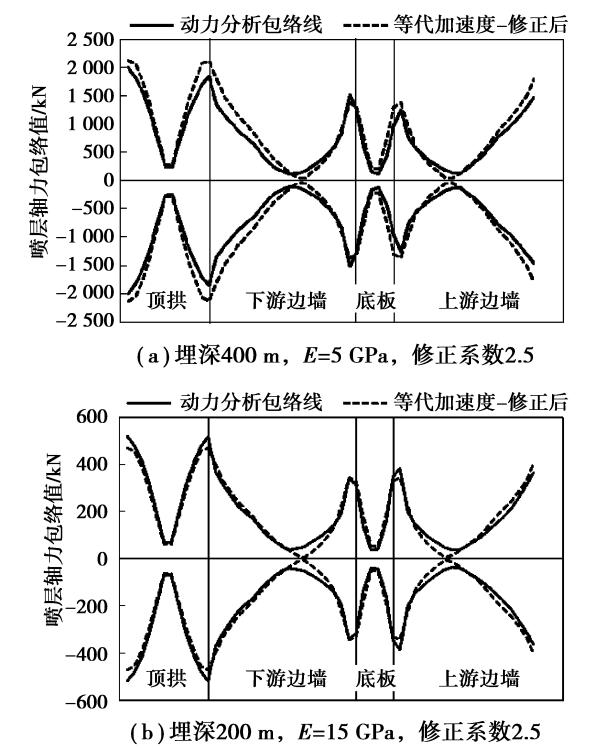


图7 修正后的等代修正加速度拟静力计算/完全动力计算得到的轴力包络值对比(部分结果)

Fig.7 Comparison of uncorrected equivalent quasi-static acceleration/axial force envelope values obtained by full dynamic calculation (partial results)

2.2.3 喷层剪力修正系数 A_Q

图8给出了未经过修正的等代加速度法/完全动力法计算得到的洞室各部位喷层剪力包络值的对比。可见,分布形式上二者是较为一致的,但量值需要采用修正系数进行修正。根据20个试算方案的结果,得到的修正系数如表4所示。

表4 基于位移等效准则得到的喷层剪力修正系数 A_Q 列表
Table 4 Correction coefficient A_Q based on displacement equivalence

岩性/GPa	埋深/m				
	100	200	300	400	500
5	5.0	4.0	3.5	3.0	3.0
10	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0
15	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
20	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0

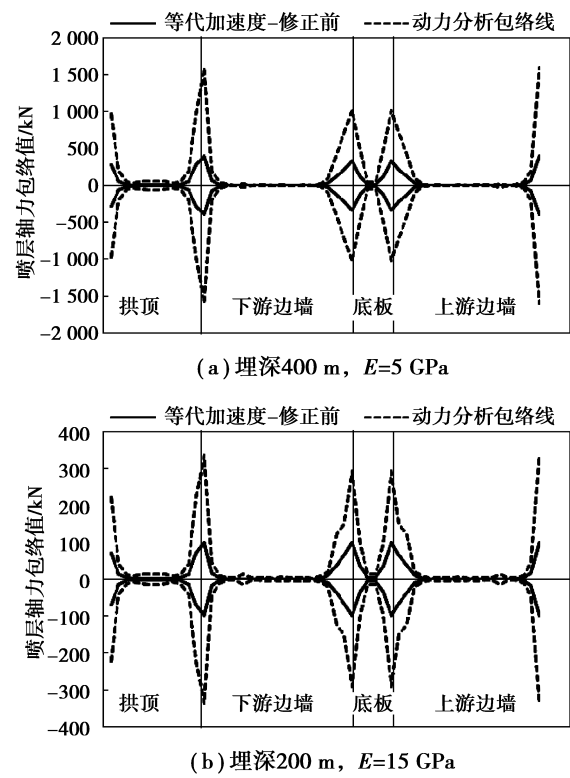


图8 等代修正加速度拟静力计算/完全动力计算得到的剪力包络值对比(部分结果)

Fig.8 Comparison of corrected equivalent quasi-static acceleration/shear force envelope values obtained by full dynamic calculation (partial results)

若对表4中的数据进行二元线性回归,得到喷层剪力修正系数与埋深和岩体变模的关系如下式

$$A_Q = 3.637\ 5 + 0.000\ 9x - 0.052\ 0y \quad (4)$$

式中: x 为洞室埋深,m, y 为岩体变模,GPa。

若需要根据某一实际工程的埋深和岩性参数求其喷层剪力修正系数时,可根据洞室埋深和岩体参数,在表4中插值选取,或采用式(4)进行计算。

图9给出了修正后的等代加速度法/完全动力法计算得到的洞室各部位喷层剪力包络值的对比。可见,在分布形式和量值上吻合程度均较好,说明了本方法的合理性及修正系数的正确性。

2.2.4 锚杆内力修正系数 A_c

图10给出了未经过修正的等代加速度法/完全动力法计算得到的洞室各部位喷层轴力包络值的对比。可见,分布形式上二者是较为一致的,但不同部位的修正系数可能并不一致,故将修正系数分为顶拱,上部边墙、下部边墙3个部位进行研究。根据20个试算方案的结果,得到的3个部位的修正系数如表5所示。

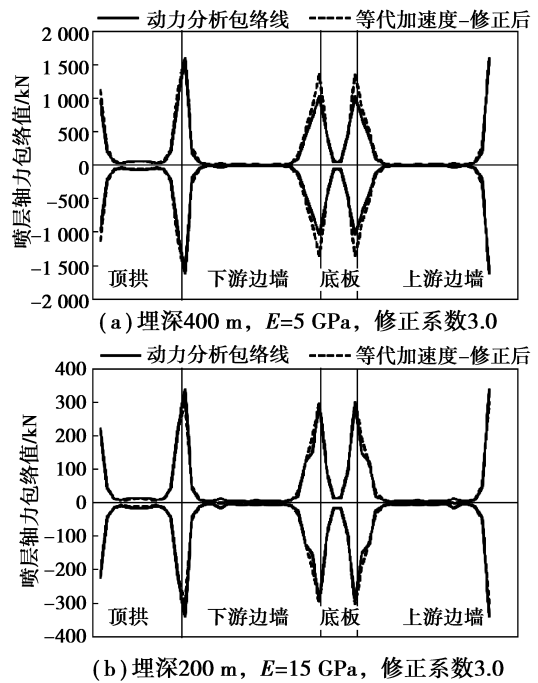


图9 未修正的等代修正加速度拟静力计算/完全动力计算得到的剪力包络值对比(部分结果)

Fig.9 Comparison of uncorrected equivalent quasi-static acceleration/shear force envelope values obtained by full dynamic calculation (partial results)

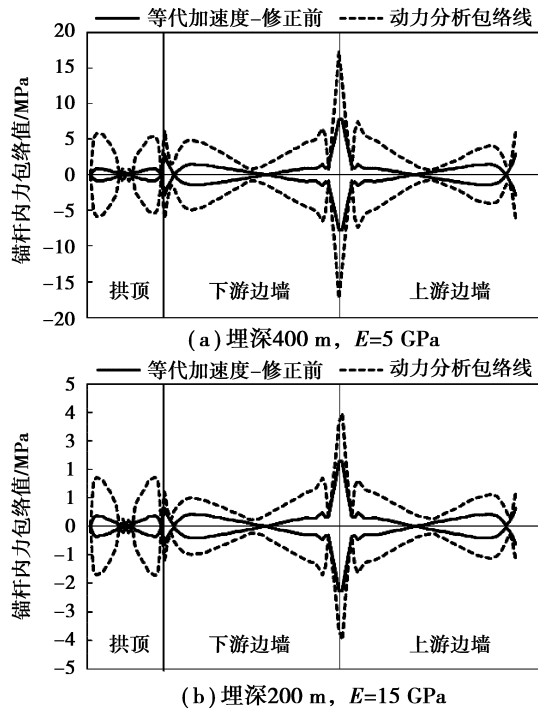


图10 未修正的等代修正加速度拟静力计算/完全动力计算得到的锚杆内力包络值对比(部分结果)

Fig.10 Comparison of uncorrected equivalent quasi-static acceleration/cable stress envelope values obtained by full dynamic calculation (partial results)

表 5 基于位移等效准则得到的喷层剪力修正系数 A_c 列表
Table 5 Correction coefficient A_c based on displacement equivalence

岩性/GPa	埋深/m				
	100	200	300	400	500
5	8.0	7.0	7.0	7.0	7.0
10	6.0	5.0	4.5	4.0	4.0
15	5.0	5.0	4.0	4.0	4.0
20	5.0	5.0	4.0	4.0	3.0

上部边墙					
5	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0
10	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5
15	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5
20	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0

下部边墙					
5	8.0	7.0	5.0	5.0	5.0
10	6.0	5.0	4.0	4.0	4.0
15	6.0	5.0	4.0	4.0	4.0
20	6.0	5.0	4.0	3.5	3.0

若对表 5 中的数据进行二元线性回归,得到锚杆内力修正系数与埋深和岩体变模的关系如下式

$$A_{C\text{顶拱}} = 6.325\ 0 + 0.003\ 8x - 0.186\ 0y$$
$$A_{C\text{上部边墙}} = 2.800\ 0 + 0.001\ 5x - 0.042\ 0y\ (5)$$
$$A_{C\text{下部边墙}} = 4.237\ 5 + 0.006\ 4x - 0.102\ 0y$$

式中: x 为洞室埋深,m, y 为岩体变模,GPa。
需要根据某一实际工程的埋深和岩性参数求其锚杆内力修正系数时,可根据洞室埋深和岩体参数在表 5 中插值选取,或采用式(5)~(7)进行计算。

图 11 给出了修正后的等代加速度法/完全动力法计算得到的洞室各部位喷层剪力包络值的对比。可见,除边墙墙脚等个别部位外,在分布形式

和量值上吻合程度均较好,说明了本方法的合理性及修正系数的正确性。

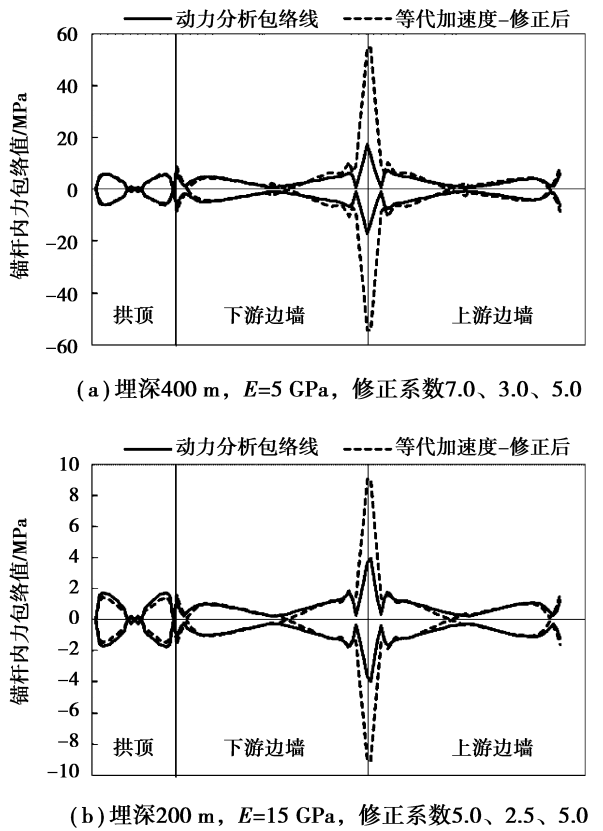


图 11 修正后的等代修正加速度拟静力计算/完全动力计算得到的锚杆内力包络值对比(部分结果)
Fig.11 Comparison of corrected equivalent quasi-static acceleration/cable stress envelope values obtained by full dynamic calculation (partial results)

3 结论

针对地下洞群地震稳定性分析缺少简化分析方法的现状,本文引入等代加速度法作为地下洞室地震稳定性的简化设计方法,对于等代加速度法应用于地下洞室群地震响应分析的一些问题进行了探讨,通过数值试算,给出了各修正系数的范围和回归公式。初步结论如下:

- (1)采用等代水平地震加速度法所得的内力分布图与动力时程分析得到的内力包络图分布形式接近。
- (2)在考虑洞室埋深和岩体性质的基础上,基于位移等效原则,通过数值试算,得到等代地震加速度修正系数的取值范围与回归公式。

(3)在考虑洞室埋深和岩体性质的基础上,通过数值试算,等到了对应于等待地震加速度修正系数的支护结构各内力修正系数。

(4)对于研究中考察的数值算例,当采用修正系数对利用等代地震加速度得到的结果进行修正后,与动力时程计算得到的结果吻合度较好。

(5)本文的工作仅在线性条件下为地下洞室的抗震设计提供了一种思路,而对于非线性条件下的抗震设计方法还亟待继续进行更多研究工作。

参考文献(References)

- [1] Sharma S, Judd W R. Underground opening damage from earthquake [J]. Engineering Geology, 1991, 30 (3): 263-276.
- [2] Hashash Y M A, Hook J J, Schmidt B, et al. Seismic design and analysis of underground Structures [J]. Tunnelling and Underground Space Techn-ology, 2001, 16(4): 247-293.
- [3] 谢礼立, 马玉宏, 翟长海. 基于性态的抗震设防与设计地震动[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (Xie Lili, Ma Yuhong, Zhai Changhai. Performance-based seismic design and design ground motion[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [4] Federal Emergency Management Agency. FEMA - 445: Next-generation performance-based seismic design guideline[R]. Washington, D. C.: Federal Emergency Management Agency, 2006.
- [5] 贾超, 王志鹏, 朱维申. 地下洞室地震动态响应规律的影响因素分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9 (4): 808-812. (Jia Chao, Wang Zhipeng, Zhu Weishen. Study on Influencing Factors of Dynamic Response of Underground Cavern under Earthquake [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9 (4): 808-812. (in Chinese))
- [6] 贾超, 王振, 徐坤. 节理岩体地下洞室稳定性的静动力响应分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(5): 1011-1018. (Jia Chao, Wang Zhen, Xu Kun. Static and Dynamic Response Analysis on Stability of Underground Cavern with Joints[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9 (5): 1011-1018. (in Chinese))
- [7] 韩建平, 吕西林, 李慧. 基于性能的地震工程研究的新进展及对结构非线性分析的要求[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(4): 15-23. (Han Jianping, Lü Xilin, Li Hui. State-of-the-art of performance-based earthquake engineering and need for structural nonlinear analysis [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27 (4): 15-23. (in Chinese))
- [8] International Organization of Standardization. Bases for design of structures-seismic actions for designing geotechnical works (ISO23469—2005) [S]. Geneva: International Organization of Standardization, 2005.
- [9] Applied Technology Council. Seismic evaluation and retrofit of existing concrete building(ATC 40) [S]. Red wood City, 1996.
- [10] FEMA273 NEHRP commentary on the guideline for the rehabilitation of buildings [R]. Washington, D. C.: Federal Emergency Management Agency, 1996.
- [11] 建筑抗震设计规范(GB50011—2010) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (Compilation Group of People's Republic of China. Code for seismic design of buildings (GB50011—2010) [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese))
- [12] 李琦, 卢晓莉. 地下洞室群的拟静力地震响应分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(S2): 2019-2024. (Li Qi, Lu Xiaoli. Pseudo-static Seismic Response Study on Underground Group Caverns [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10 (S2): 2019-2024. (in Chinese))
- [13] 上海市城乡建设和交通委员会. 地下铁道建筑结构抗震设计规范(DG/TJ08—2064—2009) [S]. 上海: 上海市建筑建材业市场管理总站, 2009. (Shanghai Urban and Rural Construction and Transportation Committee. Code for seismic design of subway structures (DG/TJ08—2064—2009) [S]. Shanghai: Shanghai Building Materials Industry Market Board, 2009. (in Chinese))