

基坑多级支护破坏模式研究

郑 刚^{1,2}, 聂东清^{1,2}, 刁 钰^{1,2}, 程雪松^{1,2}

(1、天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072; 2、天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘 要: 基坑多级支护结构随着两级支护间距离 B 的增加可以分为 3 种主要的破坏模式, 即整体式、关联式和分离式。采用抗剪强度折减法对多级支护达到分离式破坏模式的条件进行了研究, 分析了土体强度及第一级支护结构长度 L_1 和第二级支护结构长度 L_2 三个主要参数对分离式破坏临界宽度 $B_{\text{分离}}$ 的影响, 为了反映土体强度的影响, 引入了“独立安全系数比 R_{fos} ” (即两级间距离无限远时各自安全系数的比值)。计算结果表明, $B_{\text{分离}}$ 随着 R_{fos} 的增加而减小, 当 R_{fos} 较小时多级支护结构的破坏模式只存在整体式和分离式, $B_{\text{分离}}$ 可以根据基于极限分析上限理论的简化算法求得, 当 R_{fos} 超过一定数值 $B_{\text{分离}}$ 达到下限分离式破坏临界宽度, 下限分离式破坏临界宽度与两级支护中稳定安全系数较低一级的破坏面宽度一致; $B_{\text{分离}}$ 随着 L_1 的增加而近似线性增加, $B_{\text{分离}}$ 随 L_2 的变化分为两部分, 当 R_{fos} 较小时 $B_{\text{分离}}$ 随 L_2 的增加而增加, 当 R_{fos} 较大时 $B_{\text{分离}}$ 随 L_2 的增加而减小。

关 键 词: 多级支护; 基坑; 破坏模式; 极限分析; 强度折减; 稳定性

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2017) 增 1—0313—010

Failure mechanism of multi-bench retained foundation pit

ZHENG Gang^{1,2}, NIE Dong-qing^{1,2}, DIAO Yu^{1,2}, CHENG Xue-song^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: There are three different failure mechanisms of multi-bench retained foundation pit with different widths of the bench, i.e. overall overturning failure, mutual-effect failure and separate failure. The separate failure mechanism is studied with shear strength reduction method; and the influences of three main factors, i.e. soil strength; the length of first retaining structure L_1 and the length of second retaining structure L_2 , to the critical bench width of separate failure B_s , are studied. The results show that the relative stability of the two level retaining structures of the multi-bench system changes with different soil strength. The parameter “ R_{fos} ” is introduced to reflect the influence of the soil strength, which is the ratio of the factor of safeties of the two level retaining structures when they are separated; B_s decreases with the increase of R_{fos} . A simplified analysis method is proposed to find B_s when R_{fos} is small; B_s will be constant when R_{fos} is large enough; B_s increases with the increase of L_1 ; while it increases with the increase of L_2 when R_{fos} is small, it decreases with the increase of L_2 when R_{fos} is large.

Keywords: multi-bench retained foundation pit; failure mechanism; limit analysis; shear strength reduction; stability

1 引 言

随着城市的发展, 城市人口日益增加, 拓展城市地下空间的需求不断加大, 城市中的基坑工程数量急剧增加, 目前软土地区的基坑工程设计中, 为了减小基坑开挖对周边环境的影响, 深基坑多采用围护桩 (墙) 加内支撑的支护体系。这种支护体系的缺点在于耗费材料, 支撑系统的施工和拆除影响

总体施工工期, 针对此问题郑刚等^[1]提出了基坑无支撑多级支护的概念, 无支撑多级支护技术已经在国内一些工程中得到了应用^{[2]~[4]}, 并取得了良好的效果, 同一个基坑内开挖深度不同时可形成阶梯型基坑, 也可形成多级支护。

对于无支撑多级支护的设计仍然采用传统悬臂支护的设计方法, 其工作机理尚不清楚。一些研究者对多级支护进行了研究。郑刚等^[5]分别采用强度

收稿日期: 2017-01-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 41630641); 国家自然科学基金项目 (No. 51308389); 天津市应用基础与前沿技术计划 (No. 14CQNJC07500)。

This work was supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China (41630641), the National Natural Science Foundation of China (51308389), and the Tianjin Research Program of Application Foundation and Advanced Technology (14CQNJC07500).

第一作者简介: 郑刚, 男, 1967 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事软土地基与地下工程方面的研究工作。E-mail: zhenggang1967@163.com

折减法和物质点法 (MPM) 研究了两级支护基坑的剪切滑动面开展及破坏, 认为各级支护结构在一定条件下具备整体性。任望东等^[6]同样采用强度折减法研究了多级支护几何参数对其稳定性的影响。进一步, 郑刚等^[7]通过研究不同两级支护间距离的多级支护基坑的破坏, 得到了多级支护的整体式、关联式和分离式 3 种破坏模式, 郑刚等^[1]同时提出了考虑多级支护破坏模式的设计方法。通过模型试验研究了多级支护的工作机制, 验证了多级支护的 3 种破坏模式。

上述研究定义了多级支护的 3 种破坏模式, 总结了各种破坏模式的特征, 并且提出了对于不同破坏模式的多级支护基坑, 应采用相应的设计计算方法, 但是, 对于不同破坏模式的判定方法还没有相应研究, 无法直接指导工程实践, 需对多级支护不同破坏模式发生的条件开展进一步研究。

本文采用有限差分软件 FLAC^{3D} 建立了平面应变的两级支护基坑模型, 采用强度折减法计算分析了多级支护中两级支护结构长度、土体强度对多级支护破坏模式的影响。根据多级支护破坏面的开展特点, 基于极限分析上限理论提出在一定范围内适用的决定破坏模式变化的两级支护间距离临界值的确定方法和稳定性计算方法。

2 多级支护破坏模式初步研究

2.1 工程应用实例

天津市金钟河大街与育红路交口地块建设金钟河大街项目 1C 地块基坑项目, 拟建物包括 19 栋高层, 整体地下室, 地下室局部地下 2 层, 其他部位地下 1 层。基坑开挖深度为 3.9~9.9 m, 基坑支护面积约 60 920 m², 基坑面积大, 周边环境条件简单, 基坑开挖影响范围内基本无建筑物、构筑物及管线。基坑设计中对于开挖深度 4.2~5.1 m 处采用放坡, 深坑处采用双排桩结合单排桩的多级支护形式, 多级支护剖面如图 1 所示。基坑开挖完成后, 在多级支护第一级双排桩的前排桩布置的测斜监测点测得的最终侧向位移为 23 mm。

2.2 数值分析

郑刚等^[1]在如图 1 所示的工程实例基础上, 开展了数值分析, 并提出了随着多级支护宽度的变化可存在的 3 种破坏模式, 如图 2 所示。

2.3 模型试验

郑刚等^[7]对多级支护工作机制和破坏模式开展了模型试验研究。试验 MG1 的破坏模式 (见图 3), 破坏发生时坑外产生了近似三角形的破坏面。两级

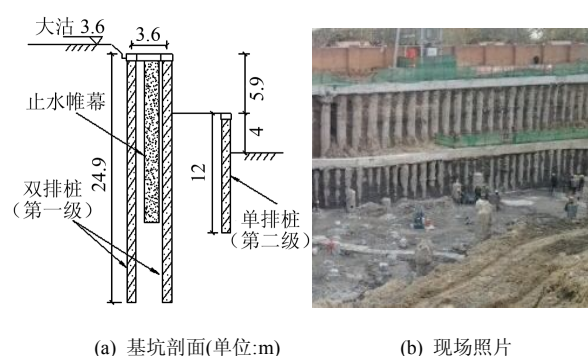


图 1 金钟河大街项目 1C 地块基坑
Fig.1 Foundation pit of Jinzhonghe Street project 1C

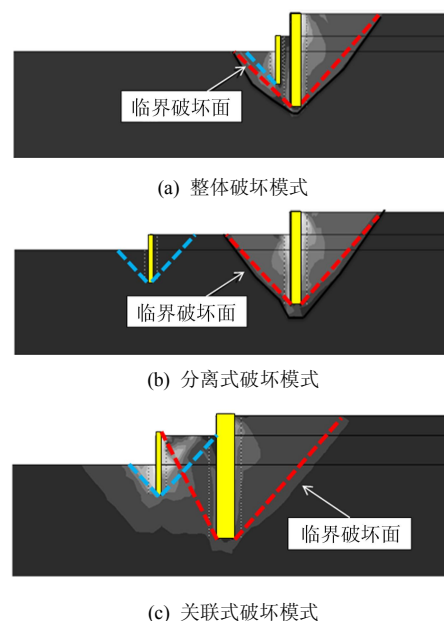
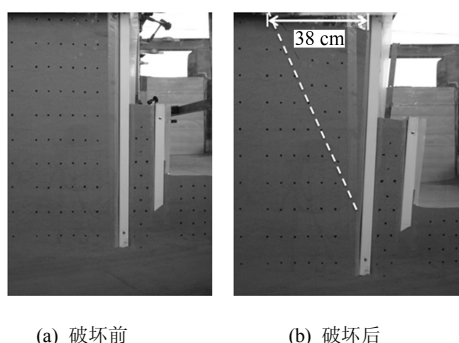


图 2 多级支护破坏模式分类^[1]
Fig.2 Classification of failure modes of multi-bench retaining^[1]

支护桩同时出现了向坑内倾覆的现象, 并且倾斜的角度一致。桩顶位移出现很大突变。两级桩间的土体保持完整, 未出现滑动面。MG1 的破坏模式符合整体式破坏的定义。两级支护桩及二者之间的土体形成了一个类似整体的重力式挡土墙, 发生整体倾覆破坏。MG2 失稳破坏前后的基坑剖面图见图 4。由于试验中通过在第二级基坑进行超挖达到破坏, 因此 MG2 的破坏面首先在两级桩间的土体内产生, 第二级支护桩发生倾覆。随后第一级支护桩向坑内倾覆, 倾角小于第二级支护桩。MG2 的破坏符合关联式破坏的特征。两级支护桩的破坏有很强的关联, 其中一级破坏时, 另一级随之破坏, 有明显先后顺序关系。MG3 基坑破坏始于第二级支护桩的倾覆, 桩间土体同时出现两道破坏面, 其中较长的破坏面由第二级桩底部延伸到桩间平台的中间部位 (见图 3)。第一级桩并未出现倾覆现象, 坑外土体也未出

现明显的破坏。符合分离式破坏的特征, 即两级支护结构的破坏相对独立, 其中一级结构失稳并不引发另一级支护失稳。

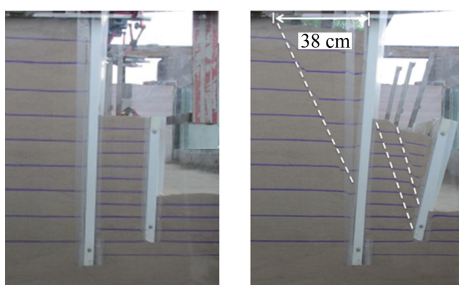


(a) 破坏前

(b) 破坏后

图 3 整体式破坏(MG1)

Fig.3 Overall overturning failure(MG1)

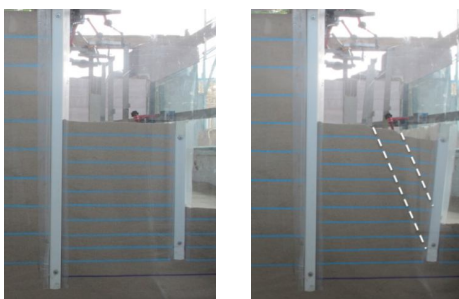


(a) 破坏前

(b) 破坏后

图 4 关联式破坏(MG2)

Fig.4 Mutual-effect failure(MG2)



(a) 破坏前

(b) 破坏后

图 5 分离式破坏(MG3)

Fig.5 Separate failure(MG3)

试验结果表明, 文献[1]提出的多级支护 3 种破坏模式是合理的, 由于试验中对第二级基坑超挖达到最终破坏, 关联式破坏从第二级支护倾覆开始, 而分离式破坏时仅发生第二级支护倾覆, 实际上多级支护的关联式和分离式破坏可以始于任意一级支护的破坏。

2.4 多级支护破坏模式的区分

根据上述模型试验和数值分析, 本文进一步系统提出 3 种破坏模式的定义。

(1) 整体式

整体式破坏的定义为多级支护基坑达到临界状

态时桩间土未发生破坏, 见图 2(a)和图 3, 且其安全系数与多级支护及其桩间土简化为整体式挡土墙 (简称等效异形挡土墙, 见图 6) 的基坑安全系数一致, 在数值模拟中可以对比多级支护和等效异形挡土墙的安全系数及破坏面开展情况, 如果安全系数非常接近, 且桩间土没有明显贯通的剪切破坏面, 则认为是整体式破坏。

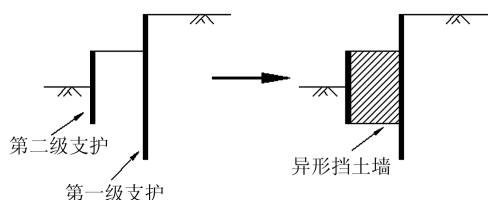


图 6 多级支护与异形挡土墙

Fig.6 Multi-bench system and out-of-shape retaining wall

(2) 分离式

分离式破坏的定义为达到极限状态时, 各级支护结构的破坏没有任何关联, 破坏面能够独立形成, 见图 2(b)和图 5。数值计算中, 如果多级支护安全系数随两级支护间距离 B 的增长速度突然下降, 之后不再随 B 的增长而增长, 且各级基坑的破坏面没有明显的关联, 则说明多级支护发生分离式破坏。

(3) 关联式

关联式破坏定义为各级支护结构都发生倾覆破坏, 但并不是同时倾覆, 支护结构间土体存在明显的滑动破坏面, 见图 2(c)和图 4。数值计算得到的多级支护安全系数介于整体式和分离式之间, 两级支护结构的破坏面相互关联, 则多级支护破坏模式为关联式。

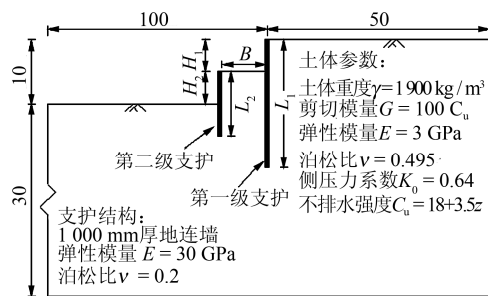
尽管对多级支护的 3 种破坏模式有了明确的定义, 但发生 3 种破坏模式所需要的条件尚不清楚, 已进行的模型试验和数值分析揭示, 两级支护间距离 B 对多级支护稳定性及破坏模式影响最大, 其他条件不变时, 随着 B 的增加, 多级支护的破坏模式逐渐由整体式向分离式过渡^[6], 因此, 确定多级支护破坏模式的主要问题是确定不同参数组合条件下破坏模式发生变化的临界 B 值。

本文定义: 随着 B 的增加, 破坏模式由整体式破坏转变为关联式破坏的 B 值称为整体式破坏临界宽度 $B_{\text{整体}}$, 由关联式破坏转变为分离式破坏的 B 值称为分离式破坏临界宽度 $B_{\text{分离}}$ 。

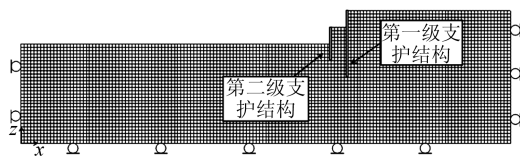
3 有限差分模型的建立

有限差分模型如图 7 所示。为便于分析, 采用了两级支护的基坑模型, 基坑宽 200 m, 考虑对称

性取 100 m 进行建模。模型总长度为 150 m, 高 40 m。基坑开挖深度为 10 m, 第一、二级基坑开挖深度 H_1 、 H_2 均为 5 m。两级支护结构均采用厚度为 1 m 的地下连续墙支护。第一、二级支护结构长度分别为 L_1 和 L_2 , 两级支护间距离为 B 。模型网格划分见图 7(b)。在模型的左右两个竖向边界约束水平向位移, 模型底部约束竖向位移。



(a) 模型几何尺寸及参数(单位: m)



(b) 模型网格划分

图 7 有限差分模型

Fig.7 Finite difference model

模型土体采用不排水条件下的黏性土, 参数选取参考文献[5]中的简化参数。用总应力法计算, 见图 7(a)。土体不排水强度 C_u 沿深度线性增加。土体本构模型采用摩尔-库仑模型。

有限差分模型中地连墙采用线弹性的衬砌单元 (liner) 模拟, 其弹性模量 $E = 30$ GPa, 泊松比 $\nu = 0.2$ 。FLAC^{3D} 中, 在衬砌单元两侧都可以建立与实体单元的接触面[8]。衬砌单元与土体的接触面强度为 0.7 倍土体强度, 界面法向刚度 K_n 及切向刚度 K_s 按式 (1) [8] 确定。

$$K_n = K_s = 10 \max \left(\frac{\left(K + \frac{4}{3} G \right)}{\Delta z_{\min}} \right) \quad (1)$$

式中: K 为土体体积模量; G 为剪切模量; $\Delta z_{\min}$ 为与接触面相连单元在法线方向上的最小尺寸。

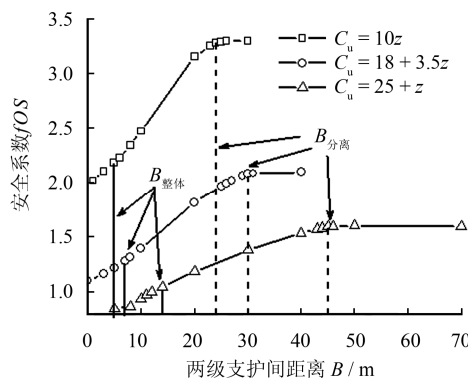
模型计算过程中分两步开挖到底, 开挖完成后采用抗剪强度折减法进行安全系数计算和滑动破坏面分析。抗剪强度折减法近年来已经广泛应用于基坑和边坡稳定性问题[9, 12]。

4 临界宽度的影响因素

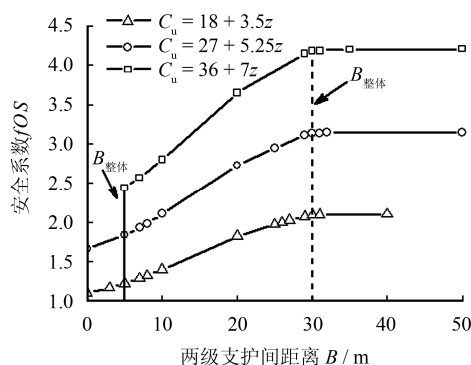
已进行的研究[1, [5]-[7]主要考虑了多级支护中几何参数对稳定性的影响, 尚未考虑土体强度因素的

影响, 本文中除了研究几何参数的影响外, 重点对土体强度的影响进行了计算分析。

为了研究土体强度对多级支护破坏模式的影响, 计算中考虑了多种不排水强度随深度变化的分布模式, 图 8(a) 为相同几何参数条件下不同土体强度沿深度变化模式时多级支护安全系数与 B 的关系。从图中可以看出, 在几何参数相同的情况下, 由于土体强度不同, $B_{\text{整体}}$ 、 $B_{\text{分离}}$ 的数值不相同, 说明了土体强度参数对多级支护破坏模式有着直接影响。但如图 8(b) 所示, 同样是不同的土体强度参数情况下图 8(b) 中 $B_{\text{整体}}$ 和 $B_{\text{分离}}$ 的数值均一致, 是由于图 8(b) 中不同土的强度是成比例关系的, 而图 8(a) 中不同土的强度没有比例关系, 说明土体强度的绝对值不是影响多级支护破坏模式的关键因素。因此, 需引入不直接依赖于土体强度绝对值的参数来考虑土体强度的影响。



(a) 土体强度不成比例



(b) 土体强度成比例

图 8 $L_1=15$ m、 $L_2=15$ m、 $H_1/H_2=5/5$ 时多级支护安全系数与 B 关系

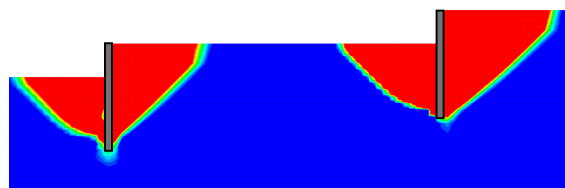
Fig.8 Relationships between B and foS of multi-bench retained foundation pit when $L_1=15$ m, $L_2=15$ m, $H_1/H_2=5/5$

当两级支护结构间距离无限远的时候, 第一与第二级支护的稳定性及破坏模式是不相关的, 其中任意一级支护的破坏不会引发另一级支护的破坏。把此时第一、二级支护各自的稳定性安全系数定义

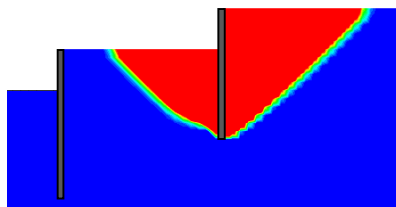
为独立安全系数, 即各自悬臂支护基坑的稳定性安全系数, 可以采用悬臂支护的稳定性算法确定。

对于图 8 中的计算工况, 两级支护结构插入比相同 (均为 $(L_1-H_1)/H_1=(L_2-H_2)/H_2=2$), 由于第二级支护结构处于较深的土层中, 则土体强度随深度变化越小, 两级支护结构各自的独立安全系数越接近, 反之, 第二级支护结构的独立安全系数将远大于第一级支护结构。

从图 8(a)可见, 土体强度随深度变化越小, $B_{\text{整体}}$ 和 $B_{\text{分离}}$ 的值越大, 是因为当土体强度随深度变化越小时两级支护各自的独立安全系数越接近, 强度折减计算时两级支护的破坏面越会趋于同时形成, 只有 B 值大于二者破坏面宽度之和时才能发生分离式破坏, 如图 9(a)所示。当土体强度随深度增加量很大时第二级支护的稳定性安全系数更高, 进行强度折减时第一级支护倾覆, 破坏面形成, 而第二级支护保持稳定, 此时 B 值大于第一级支护破坏面宽度即达到分离, 如图 9(b)所示。



(a) R_{fos} 很小时的剪应变率云图

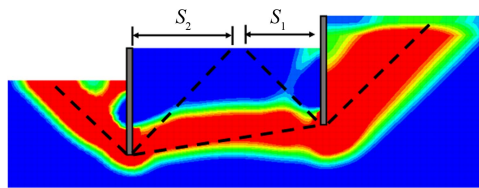


(b) R_{fos} 很大时的剪应变率云图

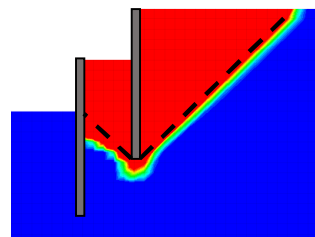
图 9 R_{fos} 不同情况下的分离式破坏情况
Fig.9 Separate failure mechanism when different values of R_{fos}

整体式破坏情况与分离式破坏类似, 当土体强度随深度变化越小, 两级支护各自的独立安全系数越接近, 进行强度折减计算时即使两级支护间距离较大, 也可能出现整体式破坏, 见图 10(a)。图中, S_1 、 S_2 分别为两级支护独立破坏时第一级支护被动侧和第二级支护主动侧破坏面宽度。虽然在第一级支护被动区出现少量不连续的剪切带, 计算结果表明此时的多级支护安全系数与等效异型挡土墙安全系数一致, $B_{\text{整体}}$ 很大。当土体强度随深度增加量很大时第二级支护的稳定性安全系数更高, 即使两级支护间距离很小, 也不会出现整体式破坏的情况,

此时 $B_{\text{整体}}$ 几乎为 0, 见图 10(b)。



(a) R_{fos} 很小时的剪应变率云图



(b) R_{fos} 很大时的剪应变率云图 (非整体式破坏)

图 10 R_{fos} 不同情况下的整体式破坏情况
Fig.10 Overall overturning failure mechanism when different values of R_{fos}

上述分析表明, 土体强度及其沿深度的变化对多级支护破坏模式的影响主要是影响了两级支护的相对稳定性大小。本文的分析中引入稳定性安全系数较高的一级支护结构的独立安全系数与稳定性安全系数较低一级支护结构的独立安全系数的比值, 作为反映土体强度的分析参数, 称其为“独立安全系数比 R_{fos} ”。

$$R_{fos} = \frac{fos^{\text{upper}}}{fos^{\text{lower}}} \quad (2)$$

式中: fos^{upper} 为稳定性安全系数较高一级支护结构的独立安全系数; fos^{lower} 为稳定性安全系数较低一级支护结构的独立安全系数。从定义可见, $R_{fos} \geq 1$, 但两级支护间距离足够大而发生分离破坏时, 可能发生第一级支护的破坏也可能发生第二级支护的破坏。 $R_{fos} = 1$ 时则两级支护同时破坏。为了便于分析, 本文计算中始终保证第一级支护的独立安全系数低于第二级支护的独立安全系数。

由上述分析可知, 土体强度对于多级支护破坏模式的影响主要是对两级支护各自的独立安全系数的影响, 因此采用独立安全系数比 R_{fos} 作为反映土体强度影响的参数。计算中, 通过改变土体不排水强度沿深度的变化规律可以得到同一几何参数组合下不同的 R_{fos} 。同时, 为了分析第一级支护结构长度 L_1 和第二级支护结构长度 L_2 的影响, 计算分析了相同的 R_{fos} 条件下 L_1 、 L_2 的变化对多级支护破坏模式的影响, 具体计算参数见表 1。

限于篇幅, 本文重点开展决定分离式破坏与关

联式破坏的临界界限宽度的研究。

表 1 计算参数取值范围
Table 1 Range of parameter values

参数	取值范围
独立安全系数比 R_{fos}	1.0~3.0
第一级支护结构长度 L_1 / m	10、15、20
第二级支护结构长度 L_2 / m	10、15、20、25

5 分离式破坏临界宽度影响分析

5.1 独立安全系数比 R_{fos} 的影响

图 11 为几何参数不变情况下 ($L_1=15$ m、 $L_2=20$ m) $B_{分离}$ 随着独立安全系数比 R_{fos} 的变化情况。从图中可以看出, $B_{分离}$ 随着 R_{fos} 的增加首先急剧减小, 随后减小趋势趋于平缓, 达到一个稳定值。

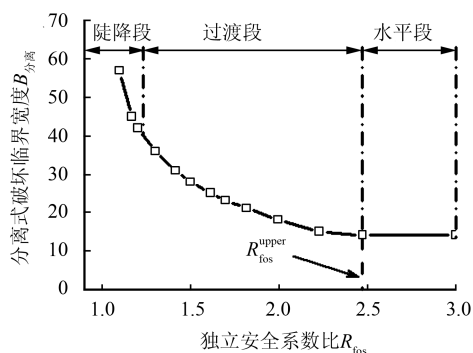


图 11 $L_1=15$ m、 $L_2=20$ m 时 $B_{分离}$ 与 R_{fos} 关系
Fig.11 Relationship between B_s and R_{fos} when $L_1=15$ m and $L_2=20$ m

由于本文计算中第一级支护的独立安全系数低于第二级支护的独立安全系数, 发生分离式破坏时主要是第一级支护发生倾覆破坏, 当 R_{fos} 很小 (约 1.0~1.2) 时两级支护的独立安全系数接近, 分离式破坏时两级支护分别发生倾覆, 但破坏面不相关联, 类似图 9(a)。B 达到 $B_{分离}$ 前破坏面开展情况类似图 10(a), 破坏面主要在第一级支护的主动区和第二级支护被动区展开, 而在两级支护间破坏面由第一级支护结构的底部向第二级支护结构底部发展贯通, 此时的多级支护安全系数与等效异型挡土墙的安全系数相等, 表明此时的破坏模式仍然为整体式。随着 B 的增加, 多级支护破坏模式直接由整体式转变为分离式, 不存在关联式破坏, 这一段是 $B_{分离}$ 的“陡降段”。

值得注意的是, 图 10(a)中 B 已经大于两级支护独立破坏时的破坏面宽度之和, 此时两级支护间距离已经大于二者独立破坏面宽度之和, 但破坏模式仍然为整体式破坏, 这一现象可以根据极限分析上

限法的原理^[13]解释, 具体见章节 6。

当 R_{fos} 大于某一极限值的时候, 第一级支护的倾覆对于第二级支护的稳定性完全没有影响。 $B_{分离}$ 正好等于第一级支护的被动破坏面宽度。之后, $B_{分离}$ 不再随着 R_{fos} 的增加而增加, 此时的分离式破坏临界宽度可以称为“下限分离式破坏临界宽度 $B_{分离}^{lower}$ ”。刚好达到下限分离式破坏临界宽度的 R_{fos} 值可以称为“上限独立安全系数比 R_{fos}^{upper} ”, 这一段可以称为“水平段”。

陡降段与水平段之间是“过渡段”, 此时两级支护的独立安全系数相差较大, 存在明显的关联式破坏。B 达到 $B_{分离}$ 时, 其中一级支护发生倾覆破坏。

综上所述, $B_{分离}$ 与 R_{fos} 的关系曲线可以大致分为 3 段 (见图 11), 第一段是 $B_{分离}$ 的陡降段, 范围约为 R_{fos} 取 1.0~1.2 之间时两级支护的独立安全系数差距很小, 达到分离破坏时两级支护分别发生倾覆。第二段是过渡段, 两级支护的独立安全系数相差较大, 此时分离式破坏不再是两级支护分别倾覆, 而是只有其中一级支护发生破坏。第三段是 $B_{分离}$ 不再变化的水平段, 这时两级支护的独立安全系数差距极大, 两级支护间的距离只需要大于稳定安全系数较低一级支护的主动或被动破坏面宽度即发生分离式破坏。

5.2 L_1 的影响

第一级支护结构长度 L_1 对分离式破坏临界宽度的影响如图 12 所示。本文仅考虑第一级支护的稳定安全系数低于第二级支护的情况, 过大的 L_1 无法保证这一点, 计算选取了 3 种 L_1 的取值。这里 L_1 的影响, 实际上即稳定安全系数较低的一级支护结构长度的影响。

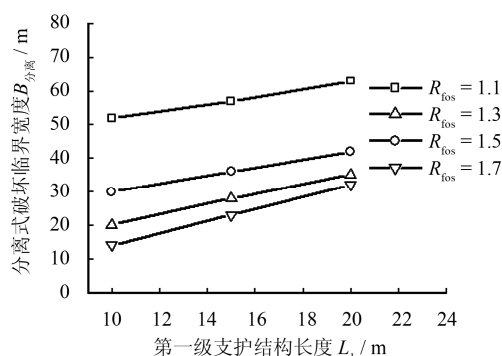


图 12 $L_2=20$ m 时 $B_{分离}$ 与 L_1 的关系
Fig.12 Relationships between B_s and L_1 when $L_2=20$ m

在 R_{fos} 相同的情况下 $B_{分离}$ 随着 L_1 的增长而近似线性增长, 因为第一级支护结构在计算中为稳定安全系数较低的结构, 第一级支护在强度折减时必然发生倾覆, L_1 越大, 其被动区的破坏面宽度越大,

分离宽度越大。

图 13 为 $L_2 = 20$ m 时不同的 L_1 情况下 $B_{\text{分离}}$ 与 R_{fos} 关系。显然, L_1 的增加使得下限分离式破坏临界宽度增加, 且 $R_{\text{fos}}^{\text{upper}}$ 随着 L_1 的增加而增加。 L_1 增加使得破坏发生时第一级支护被动区影响范围增加, 第二级支护的独立安全系数必须相应增加才能保证不受第一级支护倾覆的影响。

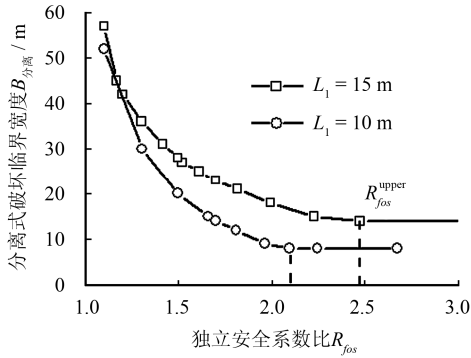


图 13 $L_2 = 20$ m 时不同 L_1 对 $B_{\text{分离}}$ 与 R_{fos} 关系的影响

Fig.13 Influence of L_1 on relationships between B_s and R_{fos} when $L_2 = 20$ m

5.3 L_2 的影响

第二级支护结构长度 L_2 对 $B_{\text{分离}}$ 的影响如图 14 所示。对于 $L_1 = 10$ m 的情况, 当 $R_{\text{fos}} < 1.5$ 时, $B_{\text{分离}}$ 随着 L_2 的增加而增加; 当 $R_{\text{fos}} > 1.5$ 时, $B_{\text{分离}}$ 随着 L_2 的增加而减小。

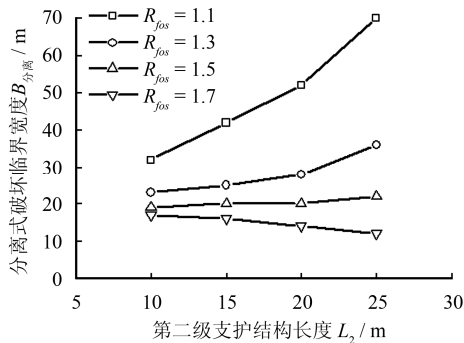


图 14 $L_1 = 10$ m 时 $B_{\text{分离}}$ 与 L_2 的关系

Fig.14 Relationships between B_s and L_2 with $L_1 = 10$ m

当 R_{fos} 较小的时候, 两级支护独立安全系数接近, 发生分离破坏时, 由于两级支护分别发生倾覆, 需要两级支护间的距离满足两级支护的独立破坏面宽度要求, L_2 增加使得第二级支护主动破坏面宽度增加, 因而 L_2 增加导致 $B_{\text{分离}}$ 的增加。当 R_{fos} 较大时, $B_{\text{分离}}$ 随着 L_2 的增加而减小的原因与章节 5.2 中 $R_{\text{fos}}^{\text{upper}}$ 随着 L_1 的增加而增加的原因类似。由于 R_{fos} 较大时, 第二级支护稳定性安全系数更大, 分离破坏时只有第一级支护发生倾覆, 因此第二级支护的嵌固深度越大, 第一级支护倾覆对第二级支护主动区的影响

范围就越小, 第二级支护结构嵌固深度越大, 分离式破坏临界宽度越小。如图 15 所示, $R_{\text{fos}}^{\text{upper}}$ 随着 L_2 的增加而减小。

实际上, 对于 L_2 足够大或者 R_{fos} 足够大的情况 (或者说 $R_{\text{fos}} > R_{\text{fos}}^{\text{upper}}$ 的情况), 第一级支护的倾覆对第二级支护的稳定性几乎没有影响, 是由于第二级支护对第一级基坑的加固效果, B 较小时的多级支护安全系数反而高于分离破坏模式时 (B 较大) 的多级支护。

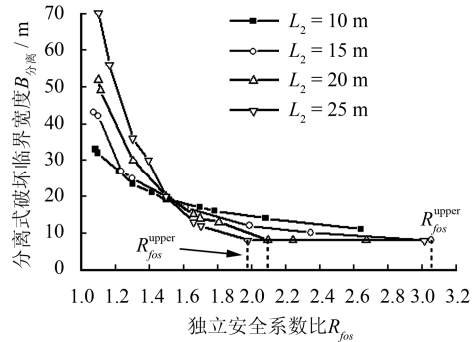


图 15 $L_1 = 10$ m 时不同 L_2 对 $B_{\text{分离}}$ 与 R_{fos} 关系的影响

Fig.15 Influence of L_2 on the relationships of B_s between R_{fos} when $L_1 = 10$ m

6 基于上限法的简化算法

章节 5.1 说明, 当 R_{fos} 很小时多级支护的破坏模式可以只分为整体式和分离式。本文根据图 10(a) 中的破坏面开展情况, 建立了基于极限分析上限法的多级支护稳定性安全系数简化算法, 极限分析上限法被广泛用于岩土工程稳定问题的分析^[13-14]。

上限法的核心在于确定合理的运动机构, 参考数值计算的结果, 假定两级支护结构的位移模式均为平移模式, 且两级支护结构的平移速度 V 相同。简化的运动模式和速度间断面 (破坏面) 分布如图 16 所示。在 R_{fos} 较小的情况下 $B < B_{\text{分离}}$ 时, 破坏模式为整体式, 速度间断面由 X_{1a} 、 X_3 、 X_{2p} 组成, 其中间断面 X_{1a} 、 X_{2p} 倾角可由郎肯理论得到。由于土体内摩擦角为 0, 则速度间断面上土体的速度与速度间断面平行。整体式破坏发生时土体重力做功大于速度间断面上黏聚力做功产生的能量耗散:

$$W_{1a} + W_{2p} + W_3 > U_{1a} + U_{2p} + U_3 \quad (3)$$

式中:

$$W_{1a} = G_{1a}V_{1a}^v; W_{2p} = G_{2p}V_{2p}^v; W_3 = G_3V_3^v \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} U_{1a} &= V_{1a} \int_{X_{1a}} \frac{C_u(z)}{m} ds \\ U_{2p} &= V_{2p} \int_{X_{2p}} \frac{C_u(z)}{m} ds \\ U_3 &= V_3 \int_{X_3} \frac{C_u(z)}{m} ds \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: W_{1a} 、 W_{2p} 分别为间断面 X_{1a} 、 X_{2p} 上部的土体重力做功; W_3 为间断面 X_3 上部的土体重力做功; G_{1a} 、 G_{2p} 、 G_3 分别为间断面 X_{1a} 、 X_{2p} 、 X_3 上部的土体重力; V_{1a}^v 、 V_{2p}^v 、 V_3^v 分别为间断面 X_{1a} 、 X_{2p} 、 X_3 上部土体的竖向速度, 三者均可根据速度相容原则求出; U_{1a} 、 U_{2p} 、 U_3 分别为间断面 X_{1a} 、 X_{2p} 、 X_3 上由于土体黏聚力做功而产生的能量耗散; $C_u(z)$ 为土体不排水强度, 是深度 z 的函数; m 为强度折减系数; $\int_{X_{1a}} \frac{C_u(z)}{m} ds$ 、 $\int_{X_{2p}} \frac{C_u(z)}{m} ds$ 及 $\int_{X_3} \frac{C_u(z)}{m} ds$ 分别为强度折减后的 $C_u(z)$ 沿着 X_{1p} 与 X_{2a} 上的第一类曲线积分, 即分别是强度折减后间断面 X_{1p} 、 X_{2a} 、 X_3 上强总的抗剪强度; V_{1a} 、 V_{2p} 、 V_3 分别为间断面 X_{1a} 、 X_{2p} 、 X_3 上土体相对间断面的速度, 可以根据速度相容原则求出。

根据式 (3) 可求出不同 B 时的安全系数 (强度折减系数) m , 当 $m < fos^{lower}$ 时, 破坏模式为整体式, m 即此时的安全系数; 当 $m > fos^{lower}$ 时, 破坏模式为分离式, 安全系数为 fos^{lower} ; 当 $m = fos^{lower}$ 时, 此时的 B 即为 $B_{分离}$, 安全系数为 $m (fos^{lower})$ 。

根据上限法的原理, R_{fos} 较小时 $B_{分离}$ 远大于独立破坏时第一级支护被动破坏面和第二级支护主动破坏面宽度之和, 是由于 X_{1p} 、 X_{2a} 长度不变, 只有 X_3 长度足够大时整体式破坏在 X_3 上的能量耗散才大于在 X_{1p} 、 X_{2a} 上的能量耗散之和。

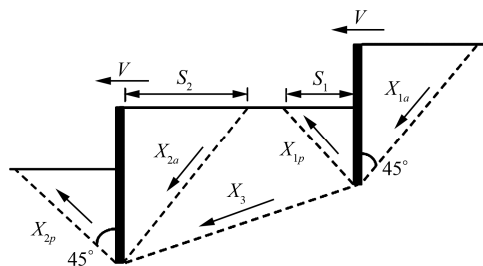


图 16 R_{fos} 较小时的简化分析模型
Fig.16 Simplified analysis model when R_{fos} is small

采用式 (3) 计算得到的分离式破坏临界宽度与数值计算结果的对比如图 17 所示。简化算法计算得到的 $B_{分离}$ 与数值计算结果相当吻合, 证明简化算法的假定是合理的。但是, 对于 $L_2 = 25$ m 的情况, 简化算法得到的 $B_{分离}$ 明显小于数值计算结果, 产生这一结果的原因是由于第二级支护结构的底部深度远大于第一级支护结构时, 破坏面并不是从第一级支护结构的底部经过, 而是从更深的位置穿过, 并在基坑外形成比第一级支护的主动破坏面更宽的破坏面, 如图 18 所示。

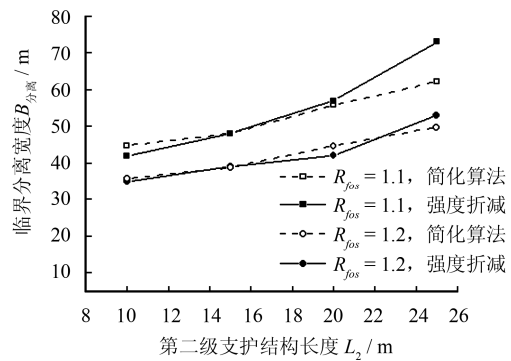


图 17 强度折减和简化算法得到的 $B_{分离}$ 对比 ($L_1=15$ m)
Fig.17 B_s obtained from shear strength reduction and simplified analysis method ($L_1=15$ m)

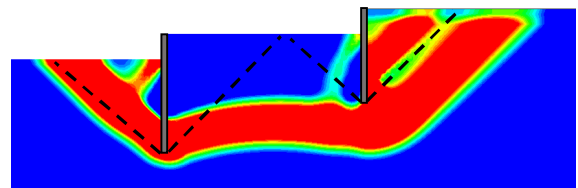


图 18 两级支护结构底部高差较大时的剪应变率云图
Fig.18 Shear strain rates with large difference of elevation of bottoms of two retaining structures

当 $R_{fos} > 1.2$ 后简化算法不再适用, 此时在整体式和分离式破坏之间存在关联式破坏, 关联式破坏的滑动面会从两级支护结构之间的土体穿过, 如图 19 所示。

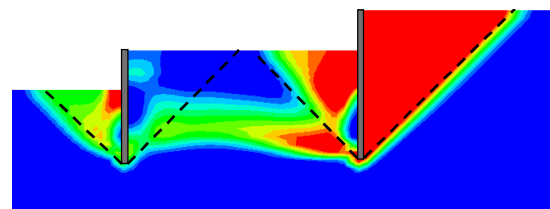


图 19 $R_{fos}=1.3$, $L_1=20$ m, $L_2=15$ m, $B=30$ m 时的剪应变率云图
Fig.19 Nephogram of Shear strain rates when $R_{fos}=1.3$, $L_1=20$ m, $L_2=15$ m, $B=30$ m

图 20 为简化算法计算得到的多级支护安全系数与强度折减得到的安全系数对比。当 $B > 5$ m 时, 简化算法得到的安全系数与数值计算结果十分接近; 当 $B < 5$ m 时, 简化算法结果明显偏高。主要原因是此时第二级支护的主动破坏面 (见图 21) 已经完全将第一级支护结构完全包括, 原破坏面的假定 (见图 22 中 X_{1a} 、 X_3) 显然不符合实际, 这时的破坏面 (速度间断面) 应完全由第二级支护决定 (见图 22 中 X_{2a} 、 X_{2p})。修正后的计算结果如图 20 所示。

根据上述分析, 对于 R_{fos} 较小 (< 1.2) 的情况, 简化计算方法的假定是符合实际的, 并且简化方法的适用性可以进一步表明, 多级支护结构在 R_{fos} 较小的情况下的破坏模式实际上只有整体式和分离式

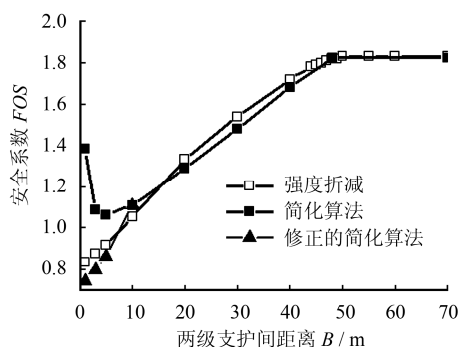


图 20 $R_{fos} = 1.1$ 、 $L_1 = 15$ m、 $L_2 = 15$ m 时强度折减和简化算法得到的安全系数对比

Fig.20 Comparison of factors of safety obtained by shear strength reduction and simplified analysis method when $R_{fos} = 1.1$, $L_1 = 15$ m, $L_2 = 15$ m

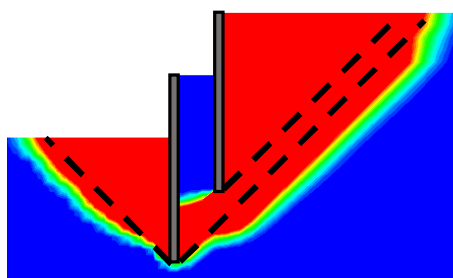


图 21 B 很小时的剪应变率云图

Fig.21 Shear strain rates when B is small

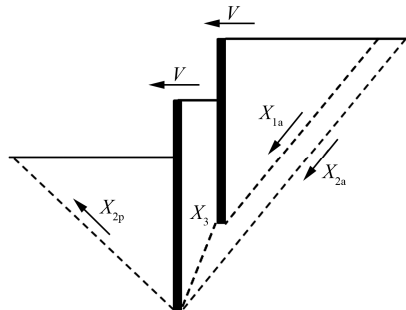


图 22 B 很小情况下的简化分析模型

Fig.22 Simplified analysis model when B is small

两种, 而不存在关联式破坏。尽管简化方法仅适用于 R_{fos} 较小的情况, 但由于实际工程中多级支护的各级支护独立安全系数差距很大是不经济的, 简化算法仍然具有一定实用价值。

设计时以两级支护为例, 可先假定两级支护的形式及开挖深度, 根据悬臂支护的稳定性计算方法求得两级支护各自独立安全系数, 进而求出 R_{fos} 。当 R_{fos} 接近 1 时, 则可以采用本文提出的简化算法求出多级支护的安全系数。

7 结 论

(1) 土体强度对多级支护破坏模式的影响比较复杂。本文定义了“独立安全系数比 R_{fos} ”反映

这一影响。多级支护的分离式破坏临界宽度随着独立安全系数比的增加而减小。当 R_{fos} 很小时多级支护破坏模式只有整体式和分离式, 当 R_{fos} 大于某一值时达到下限分离式破坏临界宽度。下限分离式破坏临界宽度等于两级支护结构中稳定安全系数较低一级的独立破坏面(位于两级支护间)宽度。

(2) 分离式破坏临界宽度随着第一级支护结构(或稳定安全系数较低的一级支护结构)长度的增加而近似线性增加。

(3) 第二级支护结构(或稳定安全系数较高的一级支护结构)长度对分离式破坏临界宽度的影响可以分为两部分。当独立安全系数比较小的时候, 分离式破坏临界宽度随着独立安全系数比的增加而增加, 当独立安全系数比较大的时候, 分离式破坏临界宽度随着独立安全系数比的增加而减小。

(4) 当独立安全系数比较小(约 1.0~1.2)时, 分离式破坏临界宽度和多级支护稳定性安全系数可以采用本文提出的简化算法估计。设计时可先确定各级支护独立安全系数, 进一步根据简化算法计算多级支护稳定性安全系数。

参 考 文 献

- [1] 郑刚, 郭一斌, 聂东清, 等. 大面积基坑多级支护理论与工程应用实践[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 290—298.
ZHENG Gang, GUO Yi-bin, NIE Dong-qing, et al. Theory of multi-bench retaining for large area foundation pit and its engineering application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(Supp.2): 290—298.
- [2] 任望东, 李春光, 田建平, 等. 软弱土中大面积深基坑工程快速支护施工技术[J]. 施工技术, 2013, 42(1): 35—39.
REN Wang-dong, LI Chun-guang, TIAN Jian-ping, et al. Rapid construction method of large area deep foundation excavation in soft soil[J]. *Construction Technology*, 2013, 42(1): 35—39.
- [3] 翁其平, 王卫东. 多级梯次联合支护体系在上海虹桥综合交通枢纽基坑工程中的设计与实践[J]. 建筑结构, 2012, 42(5): 172—176.
WENG Qi-ping, WANG Wei-dong. Design and construction of multi-level supporting system for deep foundation pits excavation of Shanghai Hongqiao

- integrated transport hub[J]. **Building Structure**, 2012, 42(5): 172—176.
- [4] 张在明, 沈小克, 周宏磊, 等. 国家大剧院工程中的几个岩土工程问题[J]. **土木工程学报**, 2009, 42(1): 60—65.
- ZHANG Zai-ming, SHEN Xiao-ke, ZHOU Hong-lei, et al. Geotechnical aspects of the National Centre for the Performing Arts[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2009, 42(1): 60—65.
- [5] 郑刚, 程雪松, 刁钰. 无支撑多级支护结构稳定性与破坏机理分析[J]. **天津大学学报**, 2013, 46(4): 304—314.
- ZHENG Gang, CHENG Xue-song, DIAO Yu. Analysis of the stability and collapse mechanism of non-prop and multi-stage retaining structure[J]. **Journal of Tianjin University(Science and Technology)**, 2013, 46(4): 304—314.
- [6] 任望东, 张同兴, 张大明, 等. 深基坑多级支护破坏模式及稳定性参数分析[J]. **岩土工程学报**, 2013, 35(增刊 2): 919—922.
- REN Wang-dong, ZHANG Tong-xing, ZHANG Da-ming, et al. Parametric analysis of failure modes and stability of multi-level retaining structure in deep excavations[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Supp.2): 919—922.
- [7] 郑刚, 聂东清, 程雪松, 等. 基坑分级支护的模型试验研究[J]. **岩土工程学报**, 待刊.
- ZHENG Gang, NIE Dong-qing, CHENG Xue-song, et al. Experimental study of the multi-bench retained foundation pit[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, in press.
- [8] Itasca Consulting Group, Inc.. FLAC fast Lagrangian analysis of continua(version 5.0)/User's manual[M]. Minneapolis, MN, Itasca Consulting Group, Inc., 2009.
- [9] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. **岩土工程学报**, 2002, 24(3): 343—346.
- ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(3): 343—346.
- [10] 黄茂松, 杜佐龙, 宋春霞. 支护结构入土深度对黏土基坑抗隆起稳定的影响分析[J]. **岩土工程学报**, 2011, 33(7): 1097—1103.
- HUANG Mao-song, DU Zuo-long, SONG Chun-xia. Effects of inserted depth of wall penetration on basal stability of foundation pits in clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(7): 1097—1103.
- [11] 李忠超, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 软黏土中某内支撑式深基坑稳定性安全系数分析[J]. **岩土工程学报**, 2015, 37(5): 769—775.
- LI Zhong-chao, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min, et al. Factor of safety of a braced deep excavation in soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(5): 769—775.
- [12] 孙书伟, 陈冲, 丁辉, 等. 微型桩群加固土坡稳定性分析[J]. **岩土工程学报**, 2014, 36(12): 2306—2314.
- SUN Shu-wei, CHEN Chong, DING Hui, et al. Stability analysis of earth slopes reinforced with micropiles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(12): 2306—2314.
- [13] CHEN W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. York: Elsevier Scientific Publishing Co., 1975.
- [14] 陈祖煜. 土力学经典问题的极限分析上、下限解[J]. **岩土工程学报**, 2002, 24(1): 1—11.
- CHEN Zu-yu. Limit analysis for the classic problems of soil mechanics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(1): 1—11.