

DOI: 10.11779/CJGE20211543

多道锚杆基坑局部锚杆失效引发连续破坏的机理与控制

郑刚^{1,2}, 王若展^{1,2}, 程雪松^{*1,2}, 雷亚伟³, 李溪源², 周强⁴

(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. 天津大学土木工程系, 天津 300072;

3. 中国建筑第二工程局有限公司, 北京 100160; 4. 中国建设基础设施有限公司, 北京 100044)

摘要: 多道锚杆支护体系具有节约施工空间、变形控制效果好等优点, 广泛应用于深基坑支护中。然而局部锚杆失效引发的基坑连续破坏事故时有发生。针对此问题, 采用有限差分法研究了多道锚杆支护体系中局部锚杆失效引发的土压力与支护结构内力变化及结构连续失效规律, 初步揭示了局部锚杆失效后的荷载传递路径及其引发基坑连续破坏的机理。多道锚杆支护体系中, 首道锚杆局部失效对邻近未失效锚杆影响大, 但会引起支护桩弯矩下降, 最下道锚杆局部失效则相反, 但仅一道锚杆局部失效影响相对较小, 均小于基坑深度相同的单道锚杆支护体系, 然而多道锚杆整列同时局部失效影响显著大于单道锚杆支护体系, 更易引发连续破坏, 因此应采用隔道加强等设计或施工措施将局部锚杆失效控制在一道内。局部若干根锚杆失效导致邻近受影响最大的锚杆依次失效时, 锚杆失效数量较多后, 初始锚杆失效位置对连续破坏发展传递路径不再产生影响, 锚杆连续破坏接近于整列失效, 且呈倒梯形水平向扩展。多道锚杆支护体系中发生整列锚杆失效时, 冠梁或腰梁极易发生破坏, 造成支护桩弯曲破坏, 加快基坑连续垮塌过程, 因此应对冠(腰)梁进行局部锚杆失效工况下的设计, 以提高基坑防连续破坏整体安全性能。

关键词: 基坑; 多道锚杆基坑; 连续破坏; 荷载传递机理

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)03-0468-10

作者简介: 郑刚(1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程教学与科研方面的工作。E-mail: zhenggang1967@163.com。

Mechanism and control of progressive collapse caused by failure of local anchors in multiple-level anchored pile excavation

ZHENG Gang^{1,2}, WANG Ruo-zhan^{1,2}, CHENG Xue-song^{*1,2}, LEI Ya-Wei³, LI Xi-Yuan², ZHOU Qiang⁴

(1. MOE Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Department of Civil

Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. China Construction Second Engineering Bureau Ltd., Beijing 100160, China;

4. China Construction Infrastructure Corp., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Collapse of tied-back excavations occurs frequently. In this study, the finite difference method is used to simulate failure of anchors. In a multi-level anchored pile excavation, the failure of the first-level anchors has a great impact on the adjacent anchors and causes the bending moments of piles to decrease, while the failure of the lowest-level anchors has the opposite effects. The impact of failure of column anchors in a multi-level anchored-pile system is significantly greater than that of a single-level anchored-pile system, which easily leads to progressive collapse. Therefore, the construction or design methods, such as interval-level anchor strengthening, should be adopted to limit the failure at a certain level. When the failure of anchors causes the most affected adjacent anchors to fail progressively and even many anchors to fail, the failure position of the initial anchors does not affect the transmission path development of failure of anchors. Accordingly, the progressive failure of anchors is close to the failure of column anchors, and shows an inverted trapezoidal horizontal expansion. The failure of column anchors in a multi-level anchored pile system easily leads to damage to the beam. Then it will cause pile failure and accelerate the process of excavation collapse. Therefore, the capping (waler) beams should be designed under the failure of column anchors to improve the overall safety performance of the retaining system.

Key words: excavation; multi-level anchored pile excavation; progressive collapse; load transfer mechanism

0 引言

深基坑施工中, 桩锚支护具有变形控制好、造价

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178343); 天津市科技计划项目(19YFZCSN01160)

收稿日期: 2021-12-27

*通信作者(E-mail: cheng_xuesong@163.com)

低及节约施工空间等优点^[1],特别是在不规则基坑中,内支撑造价高,施工困难^[2],桩锚支护成为常用的支护结构。由于施工、设计、土质、水文等影响,锚杆失效导致基坑整体安全性能减低,甚至基坑垮塌事故时有发生,如日本^[3]、土耳其^[4]、中国南宁及济南等地均发生过锚杆失效引发的基坑垮塌。

国内外学者对锚杆支护事故进行了整理^[5-7],其中大多研究针对锚杆腐蚀过程中的力学性能变化,同时也有学者对锚杆受力变形特征进行研究^[8-9],指出了锚杆的内力分布规律,揭示了锚杆的土体加固机理。然而,锚杆失效对基坑整体安全性能影响的研究很少。Stille等^[10]开展了锚墙支护试验,发现锚杆失效会导致邻近锚杆承担荷载增加,最大增长达到35%,作者认为失效荷载通过地连墙和围檩传递。Itoh等^[3]开展了桩锚基坑离心机试验,发现锚杆轴力超过锚头抗拉强度会导致锚头破坏,引发基坑垮塌。Anderson等^[11]通过锚墙边坡原位试验,研究了不同位置锚杆失效对邻近锚杆的受力影响,并给出了支护结构安全性系数计算方法。Zhao等^[12]模拟了多道锚杆支护基坑中单道或两道锚杆失效,研究了失效锚杆荷载沿竖向的传递规律,以及锚杆失效后构件的安全性能。郑刚等^[13]研究了锚杆失效对单道锚杆支护的影响及其机理,并分析了局部锚杆失效后的连续破坏传递路径。

2019年,国内某支护桩加四道锚杆支护的22 m深基坑由于局部锚杆失效引发坍塌。基坑坍塌的主要原因是“在建工地的基坑支护产生变形,加上水管长期渗漏,基坑周边土体被掏空,局部土体泡软,导致水管爆裂,引发基坑锚索结构失效,最终引发坍塌事故”^[14]。该事故表明局部锚杆失效会引发基坑连续垮塌,然而局部失效锚杆如何将其承担的荷载传递给邻近结构,邻近结构的失效顺序有何规律,即连续破坏发生时的传递机理及传递路径仍不清楚,这极大的限制了局部锚杆失效险情发生后的应急措施制定,也限制了考虑基坑整体安全性能的设计理论发展。

本文以工程中桩锚基坑垮塌案例为背景,利用有限差分法模拟了多道锚杆支护体系局部锚杆失效,针对不同位置锚杆失效后土压力变化、支护结构内力与变形发展及结构连续失效规律进行了分析与对比。初步揭示了多道锚杆支护局部锚杆失效后的荷载传递路径及其引发基坑连续破坏机理,在此基础上,针对多道锚杆支护体系提出了部分防连续破坏设计建议。

1 数值模型与模拟方法

1.1 数值模型建立

模型在 x , y , z 方向尺寸为50 m×40 m×22 m,以三道锚杆模型为例,结构布置如图1。基坑模型竖

向边界固定垂直于边界的水平位移,底面采用固定边界。

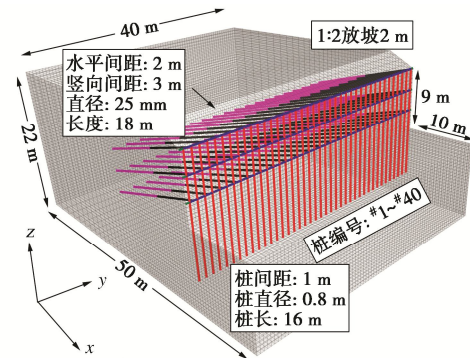


图1 有限差分网格及模型

Fig. 1 FDM meshes and model for excavation

1.2 土体和结构参数

本研究采用纯砂性土($c=0$ kPa, $\varphi=30^\circ$),土体本构为莫尔-库仑模型。砂土弹性模量以1.5 MPa/m的增长率沿深度线性增加^[15],泊松比取0.3。基坑开挖为卸荷问题,而土体卸荷模量远大于压缩模量,因此计算模型实际采用的模量参数为上述介绍的3倍^[15]。支护桩直径800 mm,间距1 m,冠(腰)梁尺寸800 mm×600 mm。弹性模量均为30 GPa,泊松比为0.2^[13]。为了避免计算时桩间土体流失,将桩后0.5m、坑底下2 m以上范围内的土体黏聚力提高到50 kPa^[13]。

参考郑刚等^[13]单道锚杆支护基坑(后文简称为单道锚杆工况)研究,同时为了与单道锚杆工况对比,锚杆同样采用直径32 mm的HRB335钢筋,水平间距2 m,竖向间距3 m,自由段长8 m,锚固段长10 m,预应力170 kPa。本文通过删除锚杆自由段模拟锚杆失效,与郑刚等^[13]在单道锚杆工况中失效方式相同。

2 两道锚杆支护下荷载传递规律分析

本节分析两道锚杆支护基坑(后文简称为两道锚杆工况),基坑深8 m,锚杆位于地面下-2 m和-5 m。基坑深度及第一道锚杆位置与文献^[13]中单道锚杆工况相同。开挖完成时,支护桩水平变形呈弓形,最大位移5.78 mm(单道锚杆工况9.74 mm);支护桩最大弯矩164.3 kN·m(单道锚杆工况206.7 kN·m);上下道锚杆轴力分别为199.2 kN和207.1 kN(单道锚杆工况240.3 kN);冠梁和腰梁绕 z 轴弯矩最大值分别为5.2 kN·m和35.4 kN·m,沿 x 轴方向剪力最大值分别为88.8 kN和93.8 kN(单道锚杆工况冠梁弯矩和剪力分别为15.0 kN·m和110.9 kN)^[13]。

实际工程中锚杆失效可能由降雨导致局部积水下渗或水管漏水引发。局部积水下渗深度浅时可导致第一道锚杆逐渐失效,下渗深度大可导致第一二道锚杆整列逐渐失效,水管破裂漏水发生在第二道锚杆深度

处时, 可导致第二道锚杆逐渐失效。因此两道锚杆支护结构考虑了 3 种工况, 具体如下: 工况 1, 第一道锚杆逐个失效 15 根; 工况 2, 第二道锚杆逐个失效 15 根; 工况 3, 两道锚杆逐列失效 15 列, 如图 2 所示。

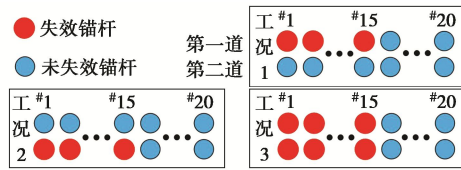


图 2 支护结构布置及锚杆失效工况

Fig. 2 Retaining structures and failure conditions of anchors

2.1 锚杆失效引起的桩身变形

图 3 为锚杆失效引起的#1 支护桩(局部破坏中心位置)桩身变形, 不同位置锚杆失效对#1 桩影响不同。随着锚杆失效数量增加, 工况 1 中第二道锚杆上方的支护桩变形模式由桩锚式变为悬臂式; 工况 2 中桩身变形增大, 但变形模式未改变; 工况 3 中支护桩变形模式变为悬臂式, 桩身变形显著增大。当锚杆失效数量超过一定值后, #1 支护桩桩身变形不再增加。工况 1, 2, 3 中, 锚杆失效后桩身最大位移分别为 12.45, 7.67, 59.62 mm (单道锚杆工况 62.97 mm) [13]。

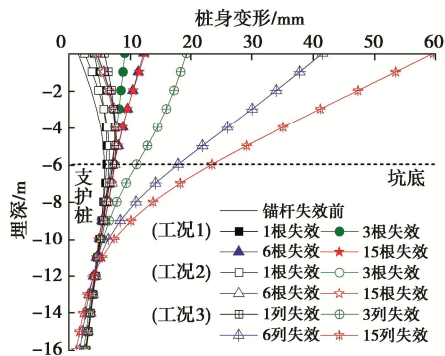


图 3 锚杆失效引起的#1 桩桩身变形

Fig. 3 Deflection of pile No. 1 induced by failure of anchors

2.2 锚杆荷载传递规律

郑刚等[13]定义锚杆的荷载(轴力)传递系数 I_t 为破坏后锚杆轴力最大值与破坏前锚杆轴力的比值。图 4 为锚杆失效阶段的 I_t 变化。锚杆失效后会将其承担的荷载沿水平和竖直方向转移至临近锚杆。工况 1 中, 第一道锚杆失效在本道锚杆内影响范围为失效范围外 4 根锚杆, 与单道锚杆工况影响范围相近[13], 在第二道锚杆中的影响范围比第一道少一根锚杆。例如, 当第一道锚杆#1~#6 失效后, 第一道锚杆#7~#10 和第二道锚杆#1~#9 受到影响。此外, 锚杆失效后两道锚杆工况最大 I_t (1.35) 小于单道锚杆工况 (1.48) [13]。这是由于两道锚杆工况中锚杆失效后荷载传递路径更多。

工况 2 中, 第二道锚杆失效在本道内影响范围为 3 根锚杆, 最大 I_t 为 1.10, 而第一道锚杆的最大 I_t 为 1.23, 远大于第二道。即第二道锚杆局部失效对第一道锚杆影响更大, 更易引发第一道失效。此外, 工况 2 中锚杆最大 I_t 小于工况 1, 原因是工况 2 中锚杆失效引起的支护桩变形增量很小, 两道锚杆位置处支护桩最大位移增量分别为 3.0 mm 和 2.7 mm, 而工况 1 中分别为 11 mm 和 6 mm, 因此工况 1 中第一道锚杆失效引发的荷载转移(土拱效应及结构内力重分布)更显著。

工况 3 中, 两道锚杆局部失效后最大 I_t (1.59) 远大于工况 1 (1.35) 和工况 2 (1.23)。原因是工况 3 锚杆局部失效程度较大。此外, 与基坑深度相同单道锚杆工况相比, 工况 3 中整列锚杆失效引发最大 I_t 大于单道锚杆工况 (1.48), 更易引发锚杆连续破坏[13]。

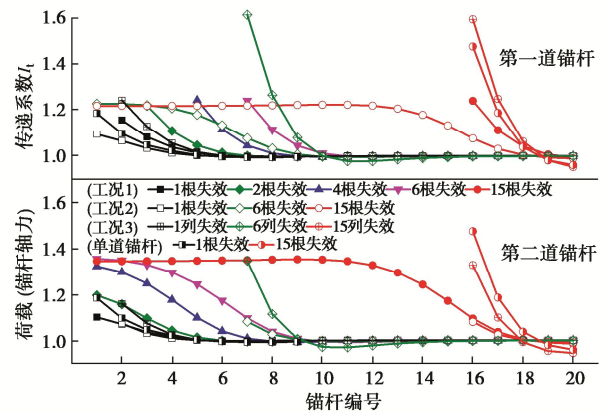


图 4 锚杆失效时荷载(锚杆轴力)传递系数变化

Fig. 4 Load transfer coefficients (axial forces) under failure conditions 1~3 of anchors

综上, 两道锚杆工况不同位置处锚杆局部失效对邻近未失效锚杆影响显著不同, 也与基坑深度相同的单道锚杆工况有较大差别。两道锚杆工况中, 第二道锚杆局部失效比第一道锚杆局部失效对邻近未失效锚杆影响小, 且均比基坑深度相同的单道锚杆工况影响小, 说明两道锚杆工况中单道锚杆失效后有更多的荷载传递路径; 然而两道锚杆整列局部失效影响显著大于单道锚杆局部失效, 也大于基坑深度相同的单道锚杆工况, 更易引发后续锚杆连续破坏。在两道锚杆工况中, 为防止锚杆连续破坏, 应适当加强第一道锚杆, 防止其局部失效, 此外, 也应避免锚杆整列失效。

2.3 局部锚杆失效对支护桩的影响规律

图 5 (a) 为作用在#1 桩上的土压力变化。3 种工况中, 随着锚杆失效数量的增加, 作用于开挖面以上的桩后土压力减小, 原因是支护桩上部变形增大。由于工况 3 中支护桩位移增加最大, 工况 2 位移增加最

小, 因此土压力减小量同样是工况 3 最大, 工况 2 最小。图 5 (b) #1 桩的弯矩变化。锚杆局部失效位置对 #1 桩的弯矩有显著影响。工况 1 中, 由于第二道锚杆上方的支护桩受力模式逐渐变为悬臂模式, 支护桩受到的弯矩方向逐渐发生变化, 锚杆失效过程中支护桩弯矩减小并逐渐由正变为负。当锚杆失效数量大于 6 根时, 最大弯矩从 124.7 kN·m 下降到 85.8 kN·m, 且支护桩上部受力由坑内侧受拉转变为坑外侧受拉。

工况 2 和工况 3 中 #1 支护桩的最大弯矩绝对值在局部失效范围较大时均显著增加, 但原因不同。随着锚杆失效数量的增加, 工况 2 中, #1 支护桩弯矩模式未发生改变, 最大弯矩逐渐增大并逐步稳定, 最大弯矩最大增加 1.30 倍。工况 3 中, #1 支护桩受力模式逐渐转变为悬臂模式, 弯矩先减小后增大, 锚杆失效数量大于 10 根后, 支护桩受力由坑内侧受拉转变为坑外侧受拉, 弯矩方向发生变化且最大弯矩增长了 3.27 倍。

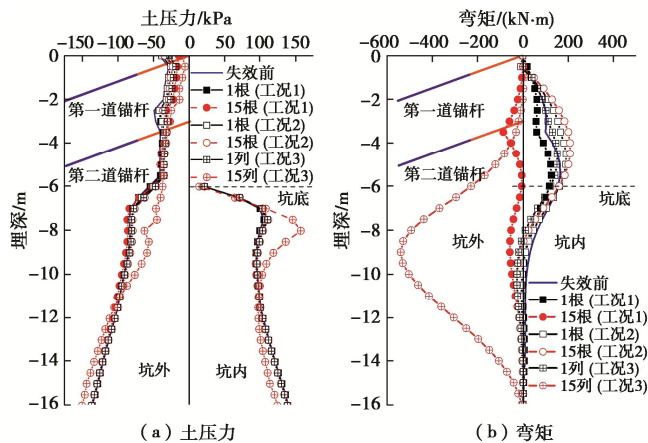


图 5 工况 1, 2, 3 锚杆失效时作用在 #1 桩上土压力与弯矩变化

Fig. 5 Earth pressures and bending moments on pile No. 1 under failure conditions 1~3 of anchors

定义失效后支护桩弯矩最大值与失效前弯矩最大值的比值为支护桩的荷载 (弯矩) 传递系数 I_m [13, 16]。图 6 为两道锚杆和单道锚杆工况中 I_m 变化。工况 1 中, 第一道锚杆失效会引起失效区域及相邻 5 根锚杆范围内 (10 根支护桩) 支护桩弯矩减小, 原因与图 5 (b) 中 #1 桩弯矩减小相同。因此, 两道锚杆支护基坑第一道锚杆失效不会导致支护桩受弯折断破坏。

工况 2 中, 第二道锚杆失效引起失效区域及相邻范围 2 根支护桩弯矩增加, 超过 4 根锚杆失效时, 支护桩 I_m 增长到极限值 (1.30)。由于极限 I_m 相对较小, 通常小于支护桩抗弯强度安全系数。因此两道锚杆工况第二道锚杆失效导致支护桩连续破坏可能性较低。工况 3 中, 锚杆失效数量少于 3 列时, 失效区域内支护桩弯矩减小。超过 3 列时, 锚杆失效会导致失效区

域内支护桩弯矩显著增加, 失效区域外邻近支护桩弯矩减小。与单道锚杆工况相似 [13], 两道锚杆工况中随着失效锚杆列数增多, 失效范围中心区域支护桩受力模式逐渐转为悬臂式, 弯矩先减小后增大。局部失效范围较大时, 支护桩的最大 I_m 为 3.27, 大于单道锚杆工况 (2.74)。因为两道锚杆工况锚杆失效前支护桩弯矩 (164 kN·m) 小于单道锚杆工况 (207 kN·m) [13], 两道锚杆工况锚杆整列失效数量较多后, 支护桩最大弯矩 (-539 kN·m) 与单道锚杆工况接近 (-570 kN·m)。因此, 支护桩安全系数相同时, 两道锚杆工况中锚杆整列失效比仅一道锚杆失效, 以及相同基坑深度时单道锚杆工况局部锚杆失效更易引发支护桩连续破坏。

综上, 两道锚杆工况中, 仅一道锚杆失效通常不会引发支护桩破坏, 锚杆失效引发支护桩弯曲破坏导致基坑连续垮塌的可能性低于相同基坑深度的单道锚杆工况, 说明多道锚杆工况荷载传递路径较多, 整体安全性能较高。但多道锚杆工况中, 若发生局部锚杆整列失效, 且失效数量较多时, 支护桩发生弯曲破坏的可能性将大幅高于相同基坑深度的单道锚杆工况。

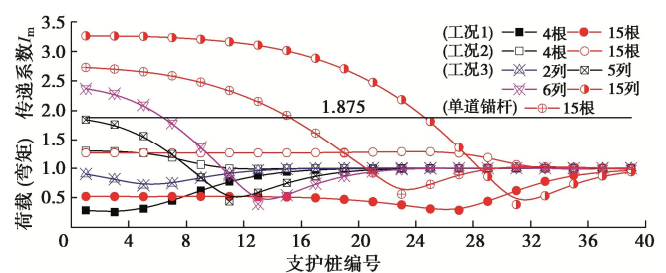


图 6 锚杆失效时支护桩荷载 (弯矩) 传递系数

Fig. 6 Load transfer coefficients (bending moments) of piles under failure conditions 1~3 of anchors

2.4 锚杆失效引起的冠梁和腰梁内力变化

锚杆失效阶段冠 (腰) 梁绕 z 轴弯矩见图 7。工况 1 与单道锚杆工况类似, 随着失效锚杆数量的增加, 局部失效中心位置冠 (腰) 梁弯矩先增大 (1~4 根) 后减小 (大于 5 根) [13], 最大达 -197 kN·m 和 -105 kN·m, 主要是失效范围内支护桩对冠 (腰) 梁的水平作用力引起。邻近失效范围外 5 根锚杆范围内, 冠 (腰) 梁弯矩也显著增大, 最大弯矩为 86 kN·m (1~4 根) 和 76 kN·m (大于 5 根), 但是符号与失效范围内相反。工况 2 中局部失效中心位置冠 (腰) 梁弯矩同样先增大 (1~4 根) 后减小 (大于 5 根), 最大达 -96.33 kN·m 和 -91 kN·m。邻近失效范围外 5 根锚杆范围内, 冠 (腰) 梁弯矩同样增大, 最大弯矩为 31 kN·m 和 49 kN·m。与工况 1 对比可见, 工况 2 对冠 (腰) 梁影响小。

工况 3 中锚杆失效列数增加后, 冠 (腰) 梁弯矩明显增大, 局部失效中心位置冠梁弯矩为 -449 kN·m; 失效范围外 5 根锚杆范围内冠梁弯矩为 332 kN·m。

依据国内现行混凝土设计规范对冠（腰）梁进行构造配筋，主筋最小配筋率为 0.21%，采用 HRB400 钢筋时，该配筋率下冠（腰）梁所能承担的极限抗弯承载力为 214 kN·m，极限抗剪承载力为 545 kN。由此，本例中两道锚杆工况，仅一道锚杆失效不会引起冠（腰）梁破坏，但整列锚杆失效，即使 1 列锚杆失效（引起最大弯矩 271 kN·m）也可能引发冠（腰）梁破坏。如图 8，1 列锚杆失效后支护桩弯矩减小，但此时冠梁弯矩达到抗弯承载力极限发生破坏，随后腰梁也发生破坏，此时#1 桩变为悬臂结构，受力瞬间增大，最大弯矩达 172 kN·m（ I_m 为 1.05）。随后，3 列锚杆失效后，#1 桩最大弯矩达 259 kN·m（ I_m 为 1.58），4 列锚杆失效后，最大弯矩达 336 kN·m（ I_m 为 2.05>1.875^[17]，1.875 为二级基坑围护桩单桩抗弯安全系数）。若冠梁和腰梁未破坏，4 列锚杆失效后，支护桩 I_m 为 1.51，不会发生支护桩破坏引发基坑垮塌，而由于冠梁和腰梁的破坏，4 列锚杆失效后，支护桩可能发生弯曲破坏引发基坑局部垮塌，加快基坑连续垮塌过程。

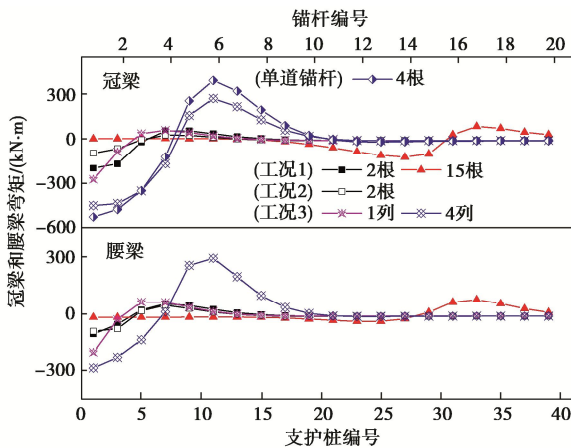


图7 不同数量锚杆失效引起冠梁和腰梁弯矩变化

Fig. 7 Bending moments on capping and waler beams under failure of different amounts of anchors

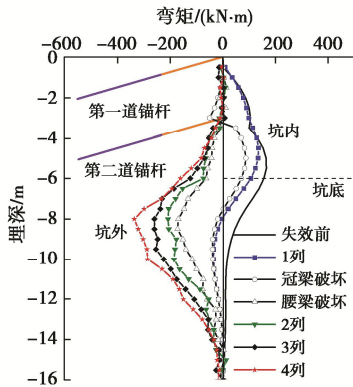


图8 考虑冠梁及腰梁破坏时支护桩弯矩变化

Fig. 8 Bending moments on piles considering failure of capping and waler beams

实际工程中，桩锚支护基坑腰梁常采用型钢（槽钢或工字钢），为研究腰梁为型钢情况下，冠梁与腰梁对连续破坏传递机理的影响，本文对腰梁为 36a 槽钢^[18]（极限抗弯承载力为 150 kN·m）的工况进行了进一步分析，同样发现 1 列锚杆失效后，冠梁最大弯矩达到 357 kN·m，发生破坏，继而引发腰梁破坏，使得支护桩转变为悬臂结构，受弯破坏，加速了基坑垮塌。因此，为保证支护体系整体性，提高其防连续破坏整体安全性能，避免冠（腰）梁在局部锚杆整列失效时过早破坏引发支护桩破坏加速基坑垮塌，建议在基坑支护结构设计阶段对冠（腰）梁进行局部锚杆失效工况下的计算与设计。

锚杆失效前后冠（腰）梁沿 x 方向剪力见图 9。工况 1 中，邻近失效范围第一根锚杆处冠梁剪力最大。随着失效数量增加，冠梁最大剪力逐渐增大，但失效数量超过 3 根后，最大剪力不再增加，约为 -232 kN，同时初始失效范围处冠梁剪力接近 0；腰梁剪力同样逐渐增大至定值，最大值约为 -132 kN。

工况 2 中，随着失效锚杆数量增加，冠梁和腰梁最大剪力分别达到 -119 kN 和 -126 kN，为破坏前的 1.34 倍和 1.42 倍。失效数量超过 3 根后，起始失效范围处冠梁剪力为 0。

工况 3 中，锚杆失效后，邻近失效范围的第一根锚杆对冠（腰）梁起支护作用，因此此处冠（腰）梁剪力最大。冠梁和腰梁最大剪力分别达到了 -386 kN 和 272 kN，为破坏前的 4.35 倍和 3.06 倍。但均未达到其按照规范中最小配筋时的抗剪承载力极限值 545 kN，因此锚杆失效导致冠（腰）梁受剪破坏的可能性较小。

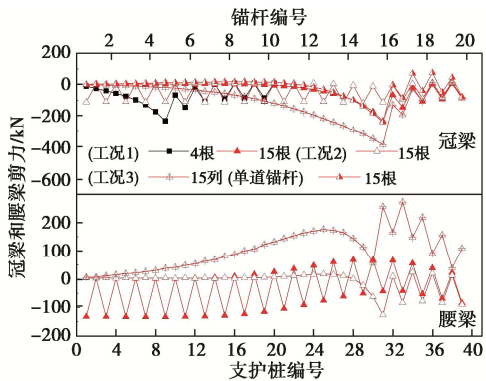


图9 不同数量锚杆失效引起冠梁和腰梁剪力变化

Fig. 9 Shear forces on capping and waler beams under failure of different amounts of anchors

3 三道锚杆支护下荷载传递规律分析

本节分析三道锚杆工况，基坑深 11 m，锚杆位于地面下 -2，-5，-8 m，最下道锚杆距坑底 3 m（与两道锚杆工况相同）。三道锚杆工况如图 10，具体如下。

工况 4, 锚杆按照第一、二、三道顺序失效, 其中每道锚杆自左至右依次失效 15 根; 工况 5, 锚杆按照第三、二、一道顺序失效, 每道锚杆失效顺序与工况 4 相同; 工况 6, 首先失效第一道第一根锚杆, 随后逐个失效未失效锚杆中 I_t 最大的锚杆; 工况 7, 首先失效第二道第一根锚杆, 后续失效原则与工况 6 相同; 工况 8, 首先失效第三道第一根锚杆, 后续失效原则与工况 6 相同。工况 6~8 模拟了实际工程中某根锚杆失效后, 锚杆连续失效可能的发展和传递路径。

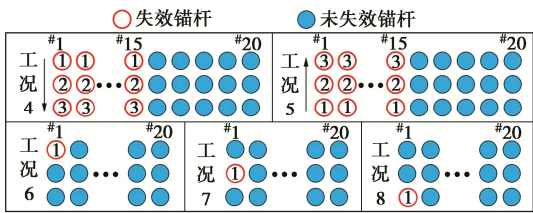


图10 支护结构布置及锚杆失效工况

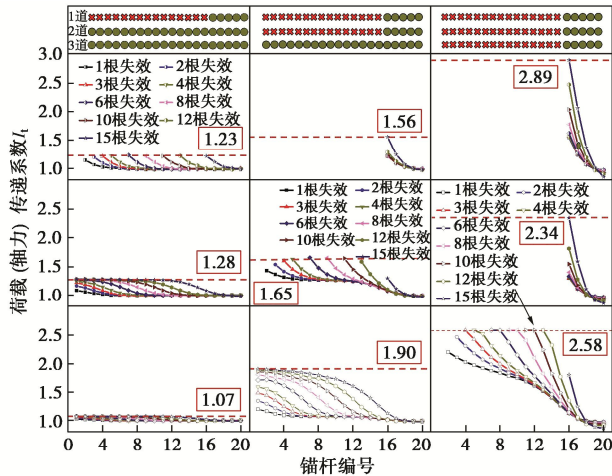
Fig. 10 Retaining structures and failure of anchors

3.1 锚杆荷载传递规律

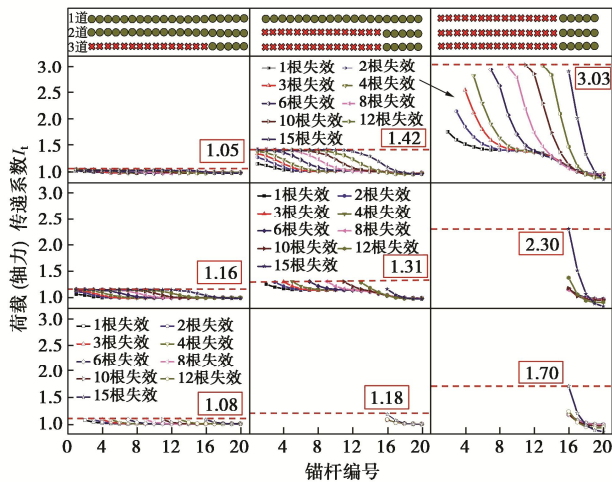
图 11 (a) 为工况 4 锚杆自上而下失效时锚杆 I_t 的变化。第一道锚杆失效对第一道未失效锚杆和第二道锚杆有加荷作用, 锚杆荷载竖向传递更明显, 对第三道锚杆加荷作用不明显, 分别引起第一、二、三道锚杆最大 I_t 为 1.23, 1.28 和 1.07。第二道锚杆失效后, 分别引起第一、二、三道锚杆最大 I_t 为 1.56, 1.65 和 1.90, 较第一道锚杆失效后增量为 0.28, 0.37 和 0.83, 第三道锚杆 I_t 增大较多, 荷载竖向传递较为显著。第三道锚杆失效后, 分别引起第一、二、三道锚杆的最大 I_t 为 2.89, 2.34 和 2.58, 较第二道锚杆失效后增量为 1.33, 0.69 和 0.68, 可见三列锚杆均失效对未失效锚杆的影响非常大。在本例中, 锚杆失效引发的荷载转移会沿水平向和竖向传递, 其中竖向传递更为显著。锚杆失效道数较少时, 荷载传递系数较小, 随着失效道数的增多, 荷载传递系数迅速增大, 并将引发不可控制的连续破坏。因此, 对于多道锚杆, 局部锚杆的失效应尽量控制在一道内 (例如采用隔道加强的设计), 避免局部锚杆失效引发其他道锚杆失效, 这样就能防止荷载传递系数过高, 引发不可控制的连续破坏。图 11 (b) 为工况 5 锚杆自下而上失效时锚杆 I_t 的变化。第三道锚杆失效后, 第二道锚杆的最大 I_t 为 1.16, 小于工况 4 中第一道锚杆失效后第二道锚杆的最大 I_t (1.28)。第二道锚杆失效后, 未失效锚杆的 I_t 同样小于工况 4。第一道锚杆失效后, 第一道未失效锚杆最大 I_t 达到了 3.03, 大于工况 4 (2.89)。三道锚杆工况与两道锚杆工况类似, 仅一道锚杆失效时, 下部锚杆失效影响小于上部锚杆。

图 12 为工况 6, 7, 8 不同初始锚杆失效位置时锚杆的失效顺序及其 I_t 变化。多道锚杆局部失效时, 锚

杆失效同样仅会导致一道中 3~4 根锚杆轴力增大, 与单道锚杆工况相同^[13]。第一道中 1 根锚杆首先失效时, 失效荷载主要向水平传递, 第一道锚杆失效 4 根后, 第二道锚杆开始破坏。第二道中 1 根锚杆首先失效时, 失效荷载首先向竖向传递, 引发第一道锚杆中 3 根锚杆发生连续破坏, 随后破坏再次传递至第二道锚杆, 第一道和第二道中 7 根锚杆失效后, 破坏传递至第三道锚杆。第三道中 1 根锚杆首先失效时, 失效荷载首先向水平传递, 但第 2 根锚杆失效后, 破坏发展至第二道锚杆, 失效荷载倾向于竖向传递。因此, 不同初始锚杆失效位置均易引发第一道锚杆失效。锚杆失效 10 根时, 3 种工况下锚杆失效范围相同, 锚杆最大 I_t 达到 1.70。失效数量较多后 (10 根), 初始锚杆失效位置对连续破坏发展传递路径不再产生影响, 3 种工况均呈倒梯形向水平方向扩展, 即在竖向上斜向传递, 然后继续沿水平方向发展, 接近于整列锚杆破坏的水平向扩展, 由此极易导致冠 (腰) 梁出现破坏, 进而引发支护桩发生大范围连续弯曲破坏, 造成基坑坍塌。



(a) 工况4 从上到下逐道破坏



(b) 工况5 从下到上逐道破坏

图 11 锚杆失效时荷载 (轴力) 传递系数

Fig. 11 Load transfer coefficients (axial forces) under failure conditions 4~5 of anchors

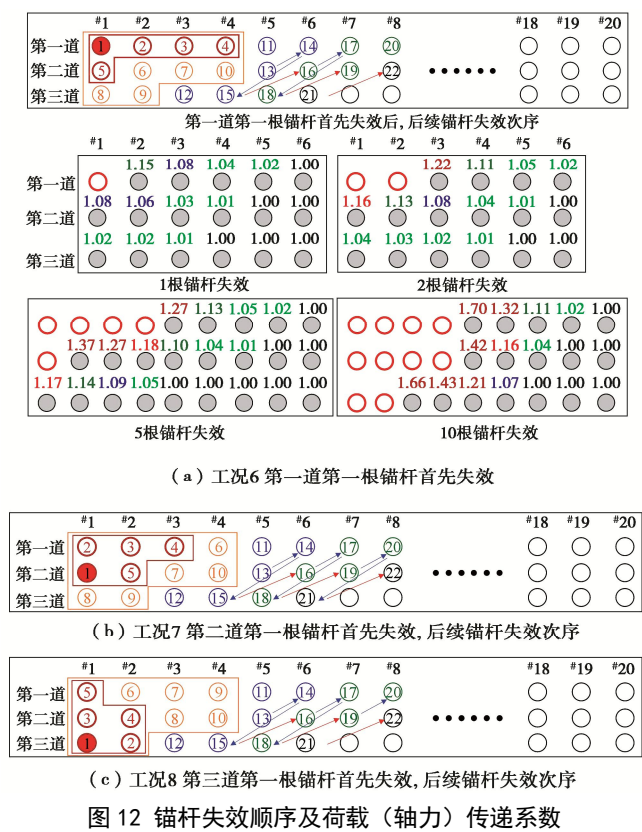


Fig. 12 Failure sequence of anchors and load transfer coefficients (axial forces) under failure conditions of 6~8

3.2 局部锚杆失效对支护桩的影响规律

图 13 为工况 4 和工况 5 锚杆失效时支护桩最大 I_m 的变化。对比发现, 仅一道锚杆局部失效时, 第一道锚杆首先失效引发支护桩弯矩下降, 第三道锚杆首先失效引发支护桩弯矩上升, 原因与两道锚杆支护体系中工况 1 和工况 2 相同。两道锚杆局部失效后, 工况 4 和工况 5 中支护桩最大 I_m 分别达到 1.46 和 1.98, 此时支护桩易发生受弯破坏。三道锚杆局部失效后, 工况 4 和工况 5 中支护桩最大 I_m 接近, 均达到了 4.5。总体来讲, 三道锚杆支护体系, 对于一道失效、两道失效的情况, 从下至上逐道失效对支护桩的影响(引发支护桩受弯破坏的可能性)均远大于从上至下逐道失效的情况。因此实际工程中, 应避免最下道锚杆首先发生失效。同时, 为避免下部锚杆局部失效引发支护桩发生受弯破坏直接导致基坑垮塌, 支护桩进行强度设计时可以进行第三道锚杆局部失效工况下的设计, 例如对于图 13 (b) 工况, 可以使支护桩的抗弯承载力安全系数大于 1.56。根据文献[17], 二级基坑围护桩的单桩抗弯安全系数可以达到 1.875, 因此支护桩的强度通常可以满足第三道锚杆局部失效工况下的设计, 即第三道锚杆局部失效直接引发支护桩受弯破坏并引发基坑垮塌的可能性较低。

图 14 (a) 是工况 6, 7, 8 中作用在#1 桩上的土压力变化。随着锚杆失效数量的增加, 作用于#1 桩后

开挖面以上的土压力减小, 原因是支护桩上部变形增大。图 14 (b) 为 3 种工况中#1 桩的弯矩变化。锚杆不同失效初始位置造成锚杆后续失效顺序不同, 因此 3 种工况下#1 桩的弯矩在锚杆失效数量较少时(小于 10 根)变化规律有显著区别。工况 6 中, 失效锚杆数量少于 7 根时, 由于锚杆失效更多在顶部第一、二道锚杆内沿水平向传递, 因此支护桩上部受力模式逐渐变为悬臂模式, 同时支护桩中产生负弯矩, 锚杆失效阶段支护桩最大弯矩首先减小, 锚杆失效数量较多后(8 根以上), 失效范围扩展至第三道锚杆, 支护桩最大弯矩增大。工况 7 中, 失效锚杆数量少于 7 根时, 锚杆失效同样主要在第一、二道内沿水平向传递, 支护桩变化规律与工况 6 类似。工况 8 中, 锚杆失效数量较少时(5 根以内), 锚杆失效主要在第二、三道内传递, 支护桩弯矩增大, 锚杆失效数量较多后(5 根以上), 锚杆失效竖向扩展至第一道, 造成#1 桩范围内锚杆整列失效, 之后锚杆连续破坏近似以整列失效模式沿水平方向扩展, 使得支护桩最大弯矩开始减小, 当整列失效范围较大时(10 根以上), 支护桩弯矩又会逐渐转变为纯悬臂模式, 最大弯矩开始上升。

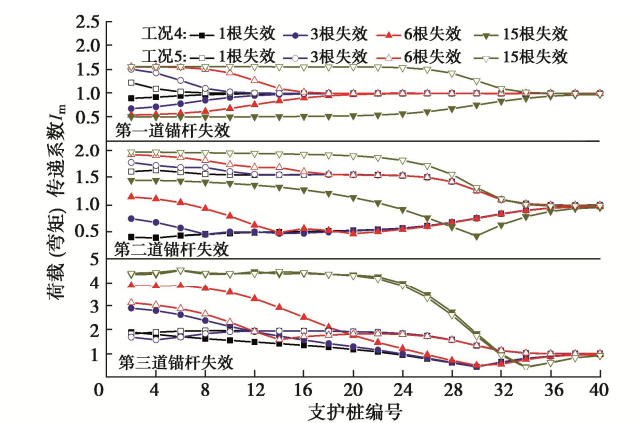


图 13 锚杆失效过程中荷载(弯矩)传递系数

Fig. 13 Load transfer coefficients (bending moments) of piles under failure conditions 4~5 of anchors

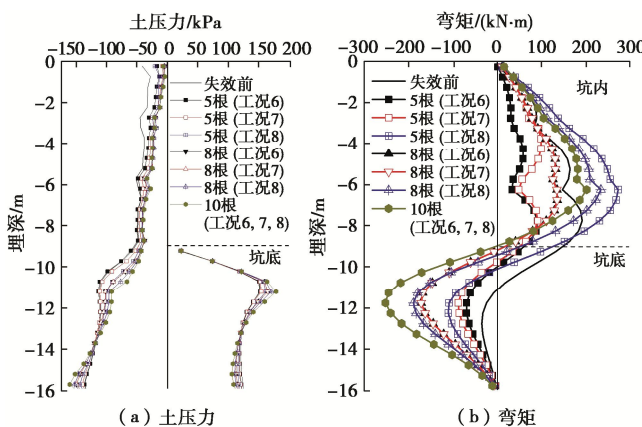


图14 工况6, 7, 8锚杆失效时作用在#1桩上土压力与弯矩变化

Fig. 14 Earth pressures and bending moments on pile No. 1 under failure conditions 6~8 of anchors

图15进一步验证了上述规律,当上部锚杆首先失效时,支护桩最大弯矩先减小后增大;下部锚杆首先失效时,支护桩最大弯矩先增大后减小,随后再次增大。若冠梁和腰梁在锚杆失效过程中不发生破坏,在锚杆整列失效呈现倒梯形水平向扩展时,在支护桩最大弯矩达到极限前,可以通过在锚杆失效传递路径上设置锚杆连续破坏阻断单元阻断锚杆连续失效。

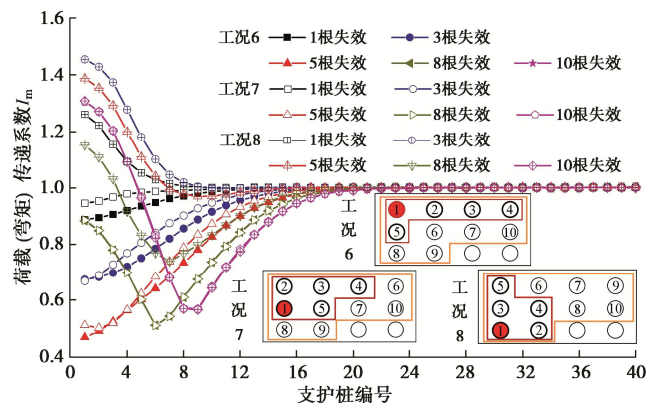


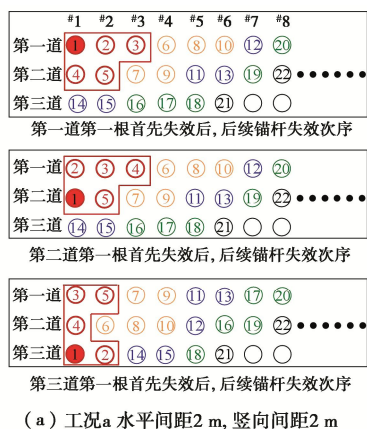
图15 锚杆失效时支护桩荷载（弯矩）传递系数

Fig. 15 Load transfer coefficients (bending moments) of piles

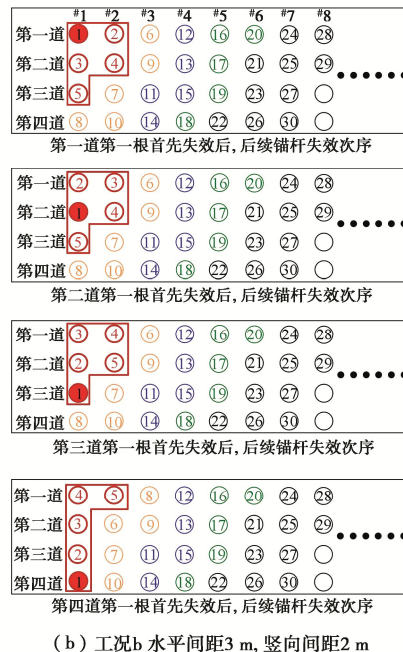
under failure conditions 6~8 of anchors

3.3 锚杆布置对荷载传递路径的影响

上文分析得到,三道锚杆工况,锚杆按两桩一锚方式布置,水平间距2 m,竖向间距3 m时,工况6~8表明,锚杆局部失效数量较多后,第一根初始锚杆失效位置对连续破坏传递路径无影响,均呈倒梯形水平向扩展。为了验证此规律是否具有普适性,本节分析了多种锚杆布置工况,具体为:工况a,三道锚杆,基坑深9 m,锚杆按两桩一锚布置,水平间距2 m,竖向间距2 m;工况b,四道锚杆,基坑深11 m锚杆按三桩一锚布置,水平间距3 m,竖向间距2 m(等面积内锚杆数量与前文三道锚杆工况相同)。不同锚杆布置方式情况下,不同初始锚杆失效位置时的连续破坏传递路径如图16所示。此外,还进行了多种锚杆不同间距工况模拟,锚杆失效数量较多后,破坏均呈现倒梯形水平向扩展,此处篇幅所限,不再一一列出。



(a) 工况a 水平间距2 m, 竖向间距2 m



(b) 工况b 水平间距3 m, 竖向间距2 m

图16 不同锚杆布置时荷载传递路径

Fig. 16 Load transfer paths with different layouts of anchors

4 结 论

本文采用有限差分软件研究了两道及三道锚杆基坑支护体系中,局部锚杆失效对土体和基坑整体支护结构的影响,分析了锚杆等支护结构连续失效的规律。得到以下4点结论。

(1) 两道及三道等多道锚杆支护体系锚杆局部失效引发的荷载传递会沿水平向和竖向发展,但水平影响范围均在邻近局部失效区域的3~4根锚杆,与单道锚杆支护体系接近。多道锚杆支护体系中,仅一道锚杆局部失效对邻近锚杆影响相对较小,最下道锚杆局部失效比第一道锚杆局部失效影响小,且均小于基坑深度相同的单道锚杆支护体系,说明多道锚杆支护体系中有更多的荷载传递路径;然而多道锚杆整列同时局部失效,影响显著大于单道锚杆局部失效,也大于基坑深度相同的单道锚杆支护体系,更易引发后续锚杆连续破坏。在多道锚杆支护体系中,为防止锚杆连续破坏发生,应适当加强第一道锚杆,防止其发生局部破坏,同时可以采用隔道加强等设计或施工措施,将局部锚杆失效控制在一道内,避免局部锚杆失效引发其他道锚杆失效,防止荷载传递系数过高,引发不可控制的连续破坏。

(2) 局部锚杆失效会引发冠(腰)梁剪力及弯矩大幅上升。冠(腰)梁按照目前规范的最小配筋率配筋时,多道锚杆支护体系中发生整列锚杆失效时,冠梁和腰梁极易发生弯曲破坏,使得支护桩完全变为悬

臂结构, 受力瞬间增大, 造成支护桩弯曲破坏引发基坑局部垮塌, 极大的加快基坑连续垮塌过程。因此, 为保证支护体系的整体性, 提高其防连续破坏整体安全性能, 避免冠(腰)梁在局部锚杆整列失效时发生破坏引发支护桩破坏造成基坑垮塌, 应该对冠(腰)梁进行局部锚杆失效工况下的设计。

(3) 多道锚杆支护体系中, 仅首道锚杆局部失效将引发支护桩弯矩下降, 仅最下道锚杆局部失效将引发支护桩弯矩上升, 为避免下部锚杆局部失效引发支护桩发生受弯破坏直接导致基坑垮塌, 支护桩进行强度设计时可以进行最下道锚杆局部失效工况下的设计。总体来讲, 多道锚杆支护体系中, 仅一道锚杆失效通常不会引发支护桩破坏, 锚杆失效引发支护桩弯曲破坏的可能性低于相同基坑深度情况下单道锚杆支护体系, 整体安全性能较高。但若局部锚杆整列失效且数量较多时, 支护桩发生弯曲破坏导致基坑垮塌的可能性将大幅高于相同基坑深度情况下单道锚杆支护体系中局部锚杆失效工况。

(4) 在多道锚杆支护体系中, 若局部某道锚杆中1~2根锚杆失效, 且导致邻近受影响最大的锚杆依次失效时, 连续失效会沿水平向和竖向传递, 且更倾向于竖向传递造成局部整列失效。当失效数量较多后(本文的半模型为大于10根), 初始锚杆失效位置对连续破坏发展传递路径不再产生影响, 锚杆连续破坏均呈倒梯形向水平方向扩展, 接近于整列锚杆破坏的水平向扩展, 由此极易导致冠(腰)梁出现破坏, 进而引发支护桩发生大范围连续弯曲破坏, 造成基坑坍塌。若冠梁和腰梁不发生破坏, 锚杆整列失效引发支护桩弯曲破坏造成基坑坍塌所需的扩展范围将更大, 即可以减缓或者避免基坑连续垮塌的发生。

参考文献:

- [1] OU C Y. Deep Excavation: Theory and Practice[M]. London: Taylor & Francis/Balkema, 2006.
- [2] HSU S T. Behavior of pressure-grouted anchors in gravel[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(6): 719-728.
- [3] ITOH K, KIKKAWA N, TOYOSAWA Y, et al. Failure mechanism of anchored retaining wall due to the breakage of anchor head[M]// Developments in Geotechnical Engineering. New Delhi: Springer India, 2015: 175-186.
- [4] ÖSER C, SAYIN B. Geotechnical assessment and rehabilitation of retaining structures collapsed partially due to environmental effects[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 119: 104998.
- [5] BILGIN Ö. Numerical studies of anchored sheet pile wall behavior constructed in cut and fill conditions[J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(3): 399-407.
- [6] 黄雪峰, 马 龙, 陈帅强, 等. 预应力锚杆内力传递分布规律与时空效应[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1521-1525. (HUANG Xuefeng, MA Long, CHEN Shuaiqiang, et al. Distribution characteristics and time-space effects of internal force of prestressed anchor rod[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1521-1525. (in Chinese))
- [7] SHU J C, ZHANG D W. A case study: observed deformation characteristics and internal force of pile-anchor retaining excavation[C]// Geotechnical Frontiers 2017. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2017: 136-148.
- [8] WEERASINGHE R B, LITTLEJOHN G S. Uplift capacity of shallow anchorages in weak mudstone[J]. Thomas Telford, 1997, 3: 23-33.
- [9] LITTLEJOHN G S. Ground anchorages: corrosion performance[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1987, 82(3): 645-662.
- [10] STILLE H, BROMS, B.B. Load redistribution caused by anchor failures in sheet pile walls[C]// Proceedings of the 6th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vienna, 1976: 197-200.
- [11] ANDERSON PECCIN D S, LUCAS F, JOAO RICARDO M. A new methodology to assess the structural safety of anchored retaining walls[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 117: 343-355.
- [12] ZHAO W, HAN J Y, CHEN Y, et al. A numerical study on the influence of anchorage failure for a deep excavation retained by anchored pile walls[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(2): 168781401875677.
- [13] 郑 刚, 雷亚伟, 程雪松, 等. 局部锚杆失效对桩锚基坑支护体系的影响及其机理研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(3): 421-429. (ZHENG Gang, LEI Yawei, CHENG Xuesong, et al. Influences and mechanisms of anchor failure on anchored pile retaining system of deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 421-429. (in Chinese))
- [14] 土木智库. 南宁深基坑坍塌事故原因初步确定, 设计图纸公布! [EB/OL]. (2019-06-12) <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1636099866858085864&wfr=spider&for=pc>. (Civil Engineering Think Tank. The Cause of the Collapse of A Deep Excavation

in Nanning Has Been Initially Determined, and the Design Drawings Have Been Announced! [EB/OL]. (2019-06-12) <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1636099866858085864&wfr=spider&for=pc>. (in Chinese))

[15] CHENG X S, ZHENG G, DIAO Y, et al. Study of the progressive collapse mechanism of excavations retained by cantilever contiguous piles[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, **71**: 72-89.

[16] 郑 刚, 雷亚伟, 程雪松, 等. 局部破坏对钢支撑排桩基坑支护体系影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(8): 1390-1399. (ZHENG Gang, LEI Yawei, CHENG Xuesong, et al. Experimental study on influences of local failure on steel-strutted pile retaining system of deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(8): 1390-1399. (in Chinese))

[17] 程雪松, 郑 刚, 邓楚涵, 等. 基坑悬臂排桩支护局部失效引发连续破坏机理研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(7): 1249-1263. (CHENG Xuesong, ZHENG Gang, DENG Chuhan, et al. Mechanism of progressive collapse induced by partial failure of cantilever contiguous retaining piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(7): 1249-1263. (in Chinese))

[18] 冯 永. 光大银行基坑支护方法的比较与数值模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2015. (FENG Yong. The Comparison and Numerical Simulation of Foundation Pit Supporting for the Everbright Bank[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese))

第十四届全国土力学及岩土工程学术大会征稿日期变更通知

由中国科学院武汉岩土力学研究所和岩土力学与工程国家重点实验室承办的中国土木工程学会第十四届全国土力学及岩土工程学术大会将于 2023 年 10 月 28 日在武汉召开, 征文截稿日期变更为 2023 年 5 月 31 日, 特此通知!

征文内容: 会议主要研讨双碳战略下岩土工程理论与实践、新技术和新方法等。组委会接受全文投稿, 大会学术委员会将组织专家成立论文评审委员会。征文内容主要包括以下 14 个方面。

- ①岩土基本性质与本构关系; ②岩土工程勘察、测试与评价; ③地基处理与基础工程; ④特殊土力学与工程; ⑤边坡工程与地质灾害; ⑥地下工程及能源储备; ⑦土动力学与岩土地震工程; ⑧海洋岩土力学与岛礁工程; ⑨环境岩土工程与固废处置; ⑩二氧化碳地质利用与封存; ⑪数值仿真与岩土工程大数据; ⑫岩土工程新材料、新装备与智能建造; ⑬岩土力学与工程前沿交叉; ⑭重大岩土工程实录。

(会议组委会)

勘 误

我刊 2023 年(第 45 卷)第 2 期第 365 页“基于 DA-DE-SVM 智能模型的煤岩体 SC-CO₂ 压裂效果预测”(作者: 闫 浩, 张吉雄, 周 楠, 时培涛)一文中, 图 5 有误, 特此更正。

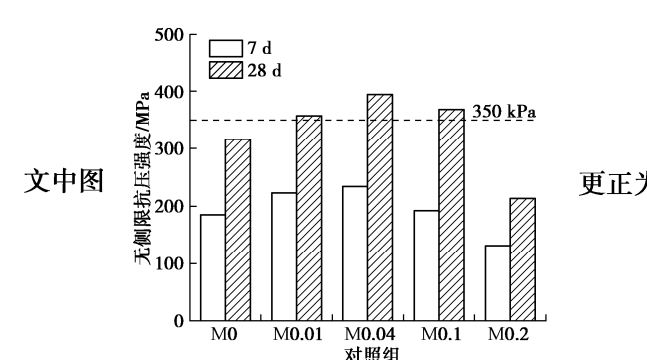


图 5 DA-DE-SVM 预测模型求解流程

Fig. 5 Solution flow of DA-DE-SVM prediction model

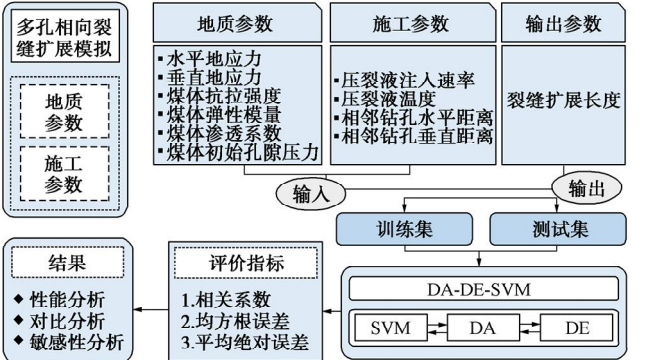


图 5 DA-DE-SVM 预测模型求解流程

Fig. 5 Solution flow of DA-DE-SVM prediction model