

上海软土地区受卸荷影响的基坑工程被动区 土体加固深度研究

秦爱芳¹, 胡中雄², 彭世娟¹

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200072; 2. 同济大学地下系, 上海 200042)

摘要: 基坑开挖, 坑底被动区土体卸荷, 坑底一定范围内土体强度降低较大, 竖向回弹量较大、侧压力发生变化较大, 这些将对基坑的变形产生不利影响。以卸荷试验为基础, 根据直剪试验中受卸荷影响最大深度、常规固结试验中的强回弹深度、 K_0 固结试验中的侧压力变化较大提出了上海软土地区基坑工程中被动区土体的合理加固深度; 并通过计算及工程实践加以验证。得出的结论对该类地区受卸荷影响的基坑工程的加固设计具有参考价值。

关键词: 软土地区; 基坑开挖; 被动区土体; 加固深度

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2008)06-0935-06

作者简介: 秦爱芳(1966-), 女, 副教授, 博士研究生, 从事岩土力学与工程的教学与研究。E-mail: qinaifang@21cn.com。

Depth of soil stabilization in passive area of foundation pits for Shanghai soft clay

QIN Ai-fang¹, HU Zhong-xiong², PENG Shi-juan¹

(1. Dept. of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. Dept. of Subsurface, Tongji University, Shanghai 200042, China)

Abstract: Based on the unloading experiments and according to the extreme depth affected by unloading in the direct shear tests, the strong rebound depth in the conventional consolidation tests and the large depth with varying lateral pressures in K_0 consolidation tests, the proper stabilization depth of soil in passive area of foundation pits was put forward, and was verified through calculation and engineering practice. The obtained results were valuable to the reference for engineering design of stabilization affected by unloading.

Key words: soft-clay area; excavation of foundation pits; soil in passive area; stabilization depth

0 前言

随着城市建设的发展, 越来越多的基坑不得不在施工场地狭小、施工条件复杂的市区内进行, 特别是在软土地区, 基坑设计已由强度控制转变为变形控制, 控制基坑开挖中支护结构的变形、减小基坑开挖对周围环境的影响是基坑设计及施工的一个首要内容, 采用坑内被动区土体注浆加固是该类地区提高支护结构安全度, 减小基坑开挖对周围环境的影响的一项重要措施^[1-3]。

蔡伟铭通过理论分析证明了加固被动区土体比加固主动区土体更有效^[1]。林鹏通过工程实践结合实测资料对被动区土体的加固方式及效果进行了分析^[2]。黄宏伟就坑内被动区加固对改善和提高坑内土体力学参数的效果及对墙体位移的影响进行了分析^[4]。笔者在长期模拟基坑开挖试验的基础上, 提出了从卸荷后

土体强度、竖向变形、侧压力变化的规律出发, 对加固深度进行确定的思路。该方法为受卸荷影响的基坑工程的被动区加固深度的合理确定提供了理论依据。

1 试验内容及试验结果分析

1.1 强度变化试验内容及试验结果分析

(1) 试验内容

土样取用上海浦东某工地基坑挖土至坑底设计标高时坑底及以下不扰动原状土。土样基本物理性质指标如表 1。

试验按土样天然固结压力大小分成三大组, 固结压力分别取 $p_0=200, 300, 400$ kPa, 在五联式直剪仪上分别进行以下试验:

表 1 土样物理性质指标

Table 1 The parameters of physical properties of soil sample

土样埋深/m	重度/(kN·m ⁻³)	含水率 w/%	比重 G _s	孔隙比 e	饱和度 S _r /%	液限 w _L /%	塑限 w _p /%	液性指数 I _L	塑性指数 I _p
10~16	17.1	53.4	2.74	1.47	99.7	38.8	21.6	1.84	17.2

a) 分三大组分别对试样进行逐级加荷固结, 至固结稳定 (一般 24 h 以上)。

b) 对 p₀=300 kPa 组按固结时间分成 1, 3, 4, 7, 14 d 五小组。

c) 分别在不排水条件下不同程度的卸荷, 每次卸荷量为 50 kPa, 卸荷后立即进行快剪 (对应于基坑开挖很快, 土体还来不及膨胀的强度变化路径), 做出 τ-σ 关系线。

(2) 试验结果分析

a) 加、卸荷时土体强度变化路径不同, 卸载状态下土体强度不同程度降低。加荷及不同固结压力下卸荷土体强度变化路径如图 1; 大量试验表明土样加荷固结后, 部分卸荷其快剪强度降低与土体的卸荷比 R 有关。h=0, 卸荷比 R=1, 随着土体深度的增加其卸荷比逐渐减小, h 越大, 卸荷比 R 越小,

$$R = \frac{p}{p_c} = \frac{\alpha\gamma H}{\gamma(H+h)} = \frac{\alpha H}{H+h} \quad (1)$$

式中 p 为土体的卸荷应力; p_c 为初始上覆荷载; H 为基坑开挖深度; h 为计算点到坑底的距离; α 为矩形荷载中心点下竖向附加应力系数, 可查土力学教材中附加应力表; γ 为土体重度。

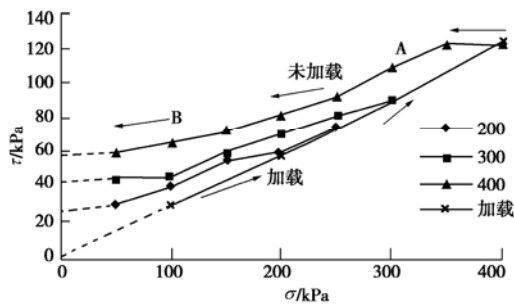


图 1 不同固结压力下卸荷土体强度变化路径

Fig. 1 Variation of the strength changing path of unloaded soil under different consolidation pressures

b) 卸荷 τ-σ 曲线具有明显的三个阶段, 对应两个关键点 A, B, 这两点的确定工程意义很大。A 点之下土体强度几乎不再下降, 工程定义该点为卸荷最大影响深度, 用 h_{cr} 表示 (见图 2); B 点相应坑底附近处, B 点之上土体强度下降幅度最大, 工程定义该点为受卸荷影响程度最大深度, 用 h_u 表示, 本文重点讨论受卸荷影响程度最大深度 h_u。h_u 的确定采用强度残留率 f_r 与卸荷比 R 的关系进行定量分析。

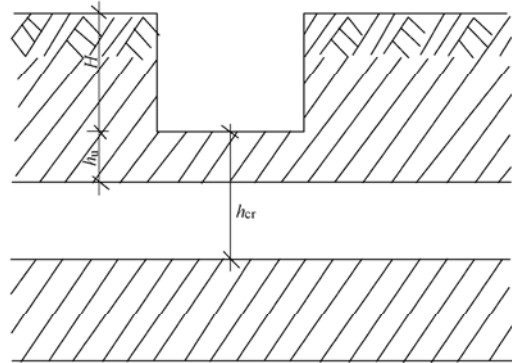


图 2 卸荷影响深度

Fig. 2 The depth affected by unloading

c) p₀=400 kPa 荷重下, 固结 24 h 土样卸荷试验的 f_r-R 关系曲线如图 3, 曲线可近似地用三条直线来拟合, 定义 h_u 对应的卸荷比为极限卸荷比 R_u, 图 3 得出: 该土样极限卸荷比 R_u=0.68, 推得 h_u=0.47 H, h_u=0.47 H 深度以上土体强度降低幅度最大, 约 43%。

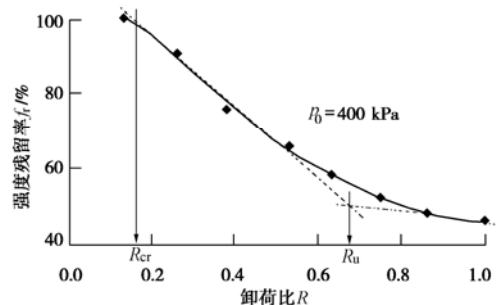


图 3 强度残留率 f_r 与卸荷比 R 的关系

Fig. 3 Relationship between f_r and R

d) 固结时间与卸荷比 R_u 的关系

对 σ₀=300 kPa 组土样分别固结 1, 3, 4, 7, 14 d, 然后进行卸荷快剪试验, 将试验结果变换成 f_r-R 曲线, 如图 4。

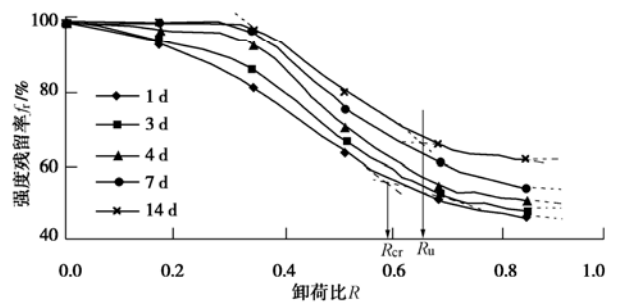


图 4 不同固结时间强度残留率 f_r 与卸荷比 R 的关系

Fig. 4 Relationship between f_r and R under different consolidation time

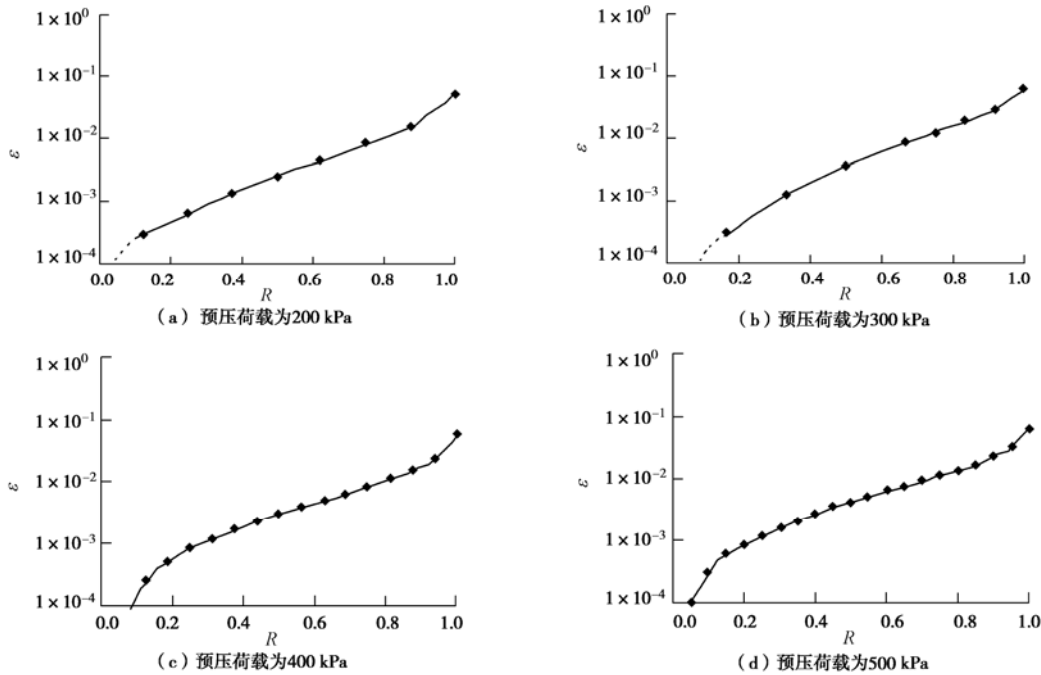


图 5 预压荷载为 200, 300, 400, 500 kPa 时回弹应变与卸荷比的半对数关系

Fig. 5 The semi-logarithmic relationship between ε and R under preloading 200, 300, 400, 500 kPa

试验发现土样固结时间长短对极限卸荷比 R_u 影响不大, 同一土样 ($p_0=300$ kPa) 固结 14 d 的极限卸荷比 $R_u=0.65$, 固结 1 d 的 $R_u=0.58$, 相差不大。(另外固结压力对 R_u 影响也不大, $\sigma_0=400$ kPa 时, 固结 1 d 的 $R_u=0.68$)。

对上海软土 10 m 以内基坑, 极限卸荷比 R_u 取 0.67 左右, h_u 约为 $0.5 H$, 该部分土体强度降低幅度最大, 约 40%, 软土基坑一般对该范围土体进行加固^[5]。

1.2 竖向变形试验内容及试验结果分析

(1) 试验内容

试验土样取自上海金桥某工地的基坑坑底的不扰动原状土, 系上海地区土层中具有代表性的第四层灰色淤泥质黏土, 基本物理性质指标见表 2。

表 2 土样物理性质指标

Table 2 The parameters of physical properties of soil sample			
重度/($kN \cdot m^{-3}$)	含水率 $w/\%$	比重 G_s	孔隙比 e
18	41.6	2.74	1.164

试验按土样天然固结压力大小分成四大组, 固结压力分别取 $p_0=200, 300, 400, 500$ kPa, 在常规固结仪上模拟基坑开挖坑底被动区土体受力性状进行固结、卸荷试验:

a) 按土体的天然固结压力对试样进行逐级加载固结, 至固结稳定 (一般 24 h 以上)。

b) 模拟基坑开挖逐级卸荷, (每级卸荷量为 25 kPa), 每一级卸荷达到稳定后记录相关的数据, 进行下一级的卸荷, 直至土体完全卸荷。试验结果见图 5。

(2) 试验结果分析

根据试验数据, 将 $p_0=200$ kPa (及 $p_0=400$ kPa) 时卸荷回弹应变 $\varepsilon (\Delta H/H)$ 与 R 的关系整理在半对数坐标系统中, 如图 6 所示: 可以得出:

a) 每条曲线中都有两个拐点, 分别将其对应的卸荷比称为临界卸荷比 R_{cr} 和分界点卸荷比 R_{ct} 。两个卸荷比将土体卸荷分为三个部分。

b) 当分界点卸荷比 $R > R_{ct}$ 时 (R_{ct} 约取 0.8), 其回弹应变较大 (大于 0.01), 且 $\Delta H/H$ 随着 R 的增大而急剧增大, 此时土体所处的区域称之为强回弹区 (文献[6]也分析了土体中存在的强回弹区)。

c) 对应于基坑工程, $R=R_{ct}=0.8$ 对应的深度 h_{ct} 为基坑的强回弹区深度。

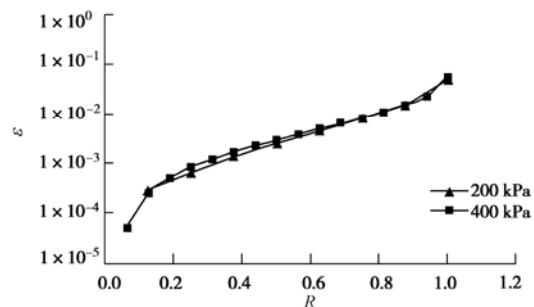


图 6 ε 与卸荷比 R 的关系曲线

Fig. 6 The relationship between ε and R

1.3 侧向应力变化试验内容及试验结果分析

(1) 试验内容

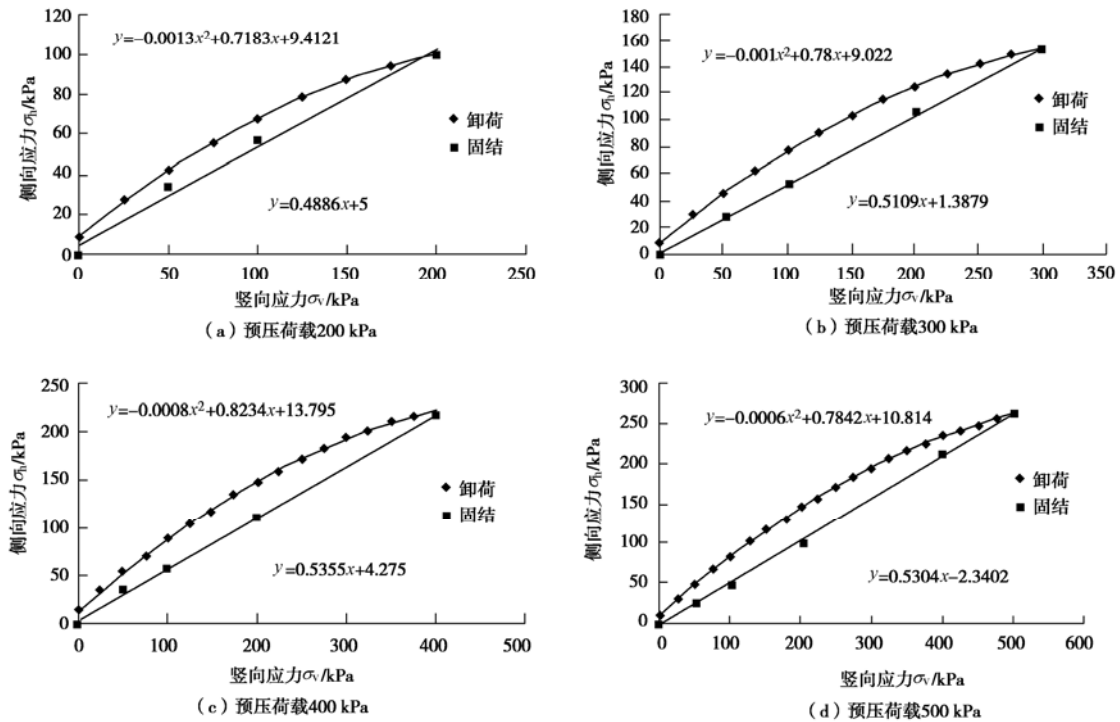


图7 竖向应力 σ_v 与侧向应力 σ_h 之间的关系曲线

Fig. 7 The relationship between vertical stress and lateral stress

试验土样及分组同竖向变形试验；按土体的天然固结压力对试样进行逐级加载固结，至固结稳定（一般 24 h 以上）；模拟基坑的开挖逐级卸荷（每级卸荷量为 25 kPa），每一级卸荷达到稳定后记录相关的数据，并进行下一级的卸荷，直至土体完全卸荷。

(2) 试验结果分析

a) 竖向应力 σ_v 与侧向应力 σ_h 之间的关系如图 7，从图中可以看出：①当土体固结时，竖向应力与侧向应力之间具有线性关系，即静止土压力系数 K_0 为一固定值。从拟合的线性公式来看，试验中土体的固结静止土压力系数在 0.5 左右；②当土体卸荷时，竖向应力与侧向应力之间是非线性关系，而且可以用二次曲线来模拟之间的关系。这说明当土体卸荷时，土体的静止土压力系数并不是一个常数，而是随着土体的卸荷而不断变化的。

b) 卸荷时的静止土压力系数

以 K_{0ul} 表示土体卸荷时的静止土压力系数，以 K_{0n} 表示土体正常固结时的静止土压力系数，对 K_0 固结卸荷试验的结果进行处理。参照超固结土静止土压力系数与正常固结土静止土压力系数的关系^[7]，进行分析，分析发现，不同的预压荷载对卸荷时土体静止土压力系数影响较小，可将不同的预压荷载下的 $\lg(K_{0ul}/K_{0n})$ 与 $\lg(1/(1-R))$ 拟合到一条曲线上，见图 8 所示。

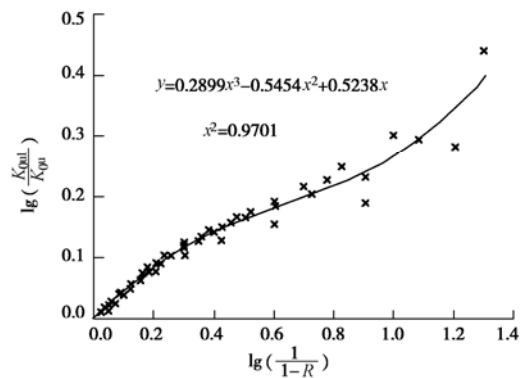


图8 $\lg(\frac{K_{0ul}}{K_{0n}})$ 与 $\lg(\frac{1}{1-R})$ 关系曲线

Fig. 8 The relationship between $\lg(\frac{K_{0ul}}{K_{0n}})$ and $\lg(\frac{1}{1-R})$

图中， $\lg(K_{0ul}/K_{0n})$ 与 $\lg(1/(1-R))$ 近似于线性关系，将它们之间的关系模拟成三次多项式关系时（确保截距为 0），效果更好，此时的相关系数为 0.9701。得到 $\lg(K_{0ul}/K_{0n})$ 与 $\lg(1/(1-R))$ 之间的关系表达为

$$\lg \frac{K_{0ul}}{K_{0n}} = 0.2899 \left(\lg \frac{1}{1-R} \right)^3 - 0.5454 \left(\lg \frac{1}{1-R} \right)^2 + 0.5238 \left(\lg \frac{1}{1-R} \right) \quad (2)$$

根据上式可以得到 K_{0ul} 与卸荷比 R 之间的关系曲线（取 $K_{0n}=0.51635$ ），见图 9。

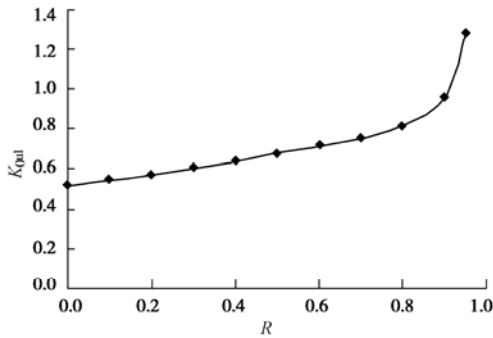


图 9 静止土压力系数 K_{0ul} 与卸荷比 R 关系曲线

Fig. 9 The relationship between K_{0ul} and R

从图中可以看出：①曲线有一个拐点，将其对应的卸荷比也称为分界点卸荷比 R_{ct} ， $R_{ct}=0.8$ 。②当 $R < R_{ct}=0.8$ 时（与试验土样的性质有关）， K_{0ul} 与 R 之间的变化比较稳定，且接近于线性关系；当 $R > R_{ct}=0.8$ 左右时， K_{0ul} 随着卸荷比 R 的增大急剧增大。

2 加固范围的探讨

2.1 试验结果分析

基坑开挖卸荷，坑底土体的强度、变形模量、侧压力均发生变化。

从强度角度分析，受影响程度最大的卸荷比极限卸荷比 R_u 一般取 0.67 左右， h_u 约为 $0.5H$ ，该部分土体强度降低幅度最大，约 40%，软土基坑一般对该范围土体进行加固。

从变形角度考虑，受影响程度最大的卸荷比分界点卸荷比 R_{ct} 一般取 0.8， h_{ct} 约为 $0.25H$ ，该部分回弹应变较大，该部分回弹约占总回弹量的 60%~70%。

从侧应力变化角度分析，受影响程度最大的卸荷比也称为分界点卸荷比， R_{ct} 一般也取 0.8， h_{ct} 约为 $0.25H$ ，该部分土体侧压力系数变化较大，将加大围护结构的变形，对基坑稳定极为不利。

在以上分析中，从变形角度与从侧应力变化角度分析得出的受影响程度最大卸荷比较接近，与强度试验得出的结果相差较大，分析原因主要有两个：

(1) 强度试验在直剪仪上进行，直剪试验不能反映实际应力路径，得出的强度变化值与实际有出入。

(2) 变形模量变化、侧压力变化试验采用的土样相同，试验条件也相同，而强度试验采用的土及其试验条件与这两个试验不同。

2.2 数值分析

(1) 分析方法

对加固深度的研究，采用有限元方法，分析中不考虑支护结构的支撑影响^[8]，支护结构水平位移的大小主要取决于：①右侧土体对支护结构作用的水土压

力（主动土压力、水压力）；②支护结构本身的性质；③坑底土体阻挡支护结构的变形能力。

(2) 分析内容

a) 坑底土层的软硬及厚度对墙体位移的影响

假定基坑底部土体发生变化，出现一层较硬或较软土层，软硬土层均以它们的压缩模量与原坑底土压缩模量的比值来反映，则土层软硬及厚度变化与支护结构顶点位移关系如图 10，分析中假定基坑深度为 6 m。考虑坑底土对支护结构的作用时，可将坑底土的刚度凝聚到与支护结构相接触的界面上。

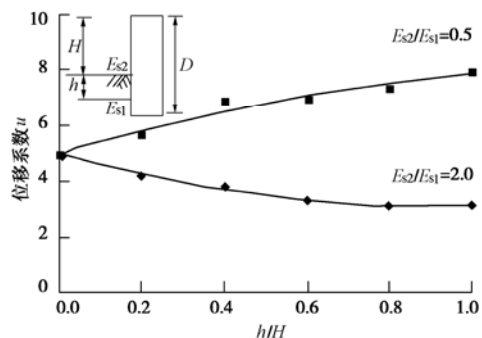


图 10 坑底土层的软硬对墙体位移的影响

Fig. 10 Wall displacement affected by the hardness of the bottom

分析表明：如基底表面出现一层较软土层，将使支护结构位移增大，而基底表面若有一层较硬土层时，可使支护结构位移减小。特别是当基坑表面较硬土层厚度不到开挖深度的一半时，随较硬土层厚度的增加，减小墙体位移的作用相当明显。即在坑底范围加固将有效的减小支护结构的位移。

b) 加固深度对墙体位移的影响

图 11 为加固深度与墙体位移之间的关系，假定加固区域模量为未加固区域的 2 倍（较常采用的基坑加固方式 - 注浆加固，加固后压缩模量提高约 1.5~2.0 倍^[9]）。分析发现：不管支护结构插入深度深浅，当加固深度小于开挖深度的一半时，加固深度的增加对减小墙体的位移作用相当明显。当超过一半的开挖深度时，加固深度的增加对减小墙体位移的效果不明显。

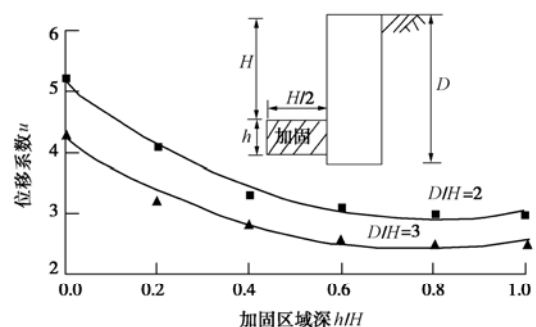


图 11 加固深度对墙体位移的影响

Fig. 11 Wall displacement affected by stabilization depth

2.3 加固范围的确定

通过试验及数值分析得出, 基坑开挖坑底被动区土体加固是一种有效的减小支护结构位移及坑底隆起的方法^[10], 对受影响程度最大范围内的土体加固是较适宜的, 综合以上试验及经验, 上海软土地区的加固深度建议取 $0.3H \sim 0.5H$ ^[6], 大于 $0.5H$ 是不经济的。

3 小 结

(1) 基坑开挖, 坑底被动区土体卸荷, 坑底一定范围内土体强度降低较大, 竖向回弹量较大、侧压力发生变化较大, 这些将对基坑的变形产生不利影响。

(2) 坑底被动区土体加固是减小支护结构变形、减小回弹, 减小侧压力变化的一种有效方法, 综合三方面试验结果并结合工程经验, 建议上海地区加固深度一般在 $0.3H \sim 0.5H$ 基坑深度左右。还可根据加固目的调整。

4 结 论

(1) 本文仅是对受卸荷影响被动区土体加固深度的研究。考虑其它因素的被动区土体加固另做讨论。

(2) 加固深度的确定与基坑形状有关, 基坑形状的影响可通过 α 体现, 对于大面积卸荷情况及坑底附近, 式 (1) 中的 $\alpha \approx 1$ 。

(3) 竖向回弹、侧压力变化试验中未考虑固结时间对 R_{ct} 的影响, 进一步的试验将考虑这一影响。

(4) 关于受卸荷影响被动区土体加固深度的确定, 通过试验得出: 从强度角度分析, 受影响程度最大的卸荷比极限卸荷比 R_u 约 0.67 左右, 从变形角度考虑, 受影响程度最大的卸荷比分界点卸荷比 R_{ct} 约 0.8, 从侧应力变化角度分析, 受影响程度最大的卸荷比也称为分界点卸荷比 R_{ct} 约 0.8。由于试验数据不多, 且强度试验所采用土样与后两者不同, 进一步的试验拟取与另外两个试验相近的土样, 采用三轴卸荷试验对强度影响进行分析研究。随着进一步试验资料的积累及现场实测资料的收集等, 本文的结果可能会有所修正。

参考文献:

[1] 蔡伟铭. 水泥土挡墙结构的水平位移计算[M]// 软土地基的理论与实践. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992. (CAI Wei-ming. Calculation of the horizontal displacement of the cement-soil retaining wall structure[M]// The Theory and Practice of Soft Soil Ground. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992. (in Chinese))

[2] 林 鹏. 软土基坑开挖中考虑被动区加固的工程实践[J]. 建筑技术开发, 2002, 29(3): 17 - 23. (LIN Peng. The case studies about the application of the ground improvement in the passive zone in the soft clay excavation[J]. Building Technique Development, 2002, 29(3): 17 - 23. (in Chinese))

[3] 陈兴年, 刘国彬, 王忠远. 关于软土基坑加固的一点看法[J]. 地下空间, 2003, 23(1): 79 - 82. (CHEN Xin-nian, LIU Guo-bin, WANG Zhong-yuan. Some viewpoints on consolidation of soft soil foundation[J]. Underground Space, 2003, 23(1): 79 - 82. (in Chinese))

[4] 黄宏伟. 深基坑内加固与墙体侧向位移的相互影响实测分析[J]. 建筑结构, 2000, 30(11): 55 - 57. (HUANG Hong-wei. Interaction analysis on consolidation of soil and lateral deformation of retaining wall in excavation pit[J]. Building Structure, 2000, 30(11): 55 - 57. (in Chinese))

[5] 秦爱芳. 软土卸荷时土体强度变化试验研究[J]. 建筑结构, 2002, 32(7): 29 - 31. (QIN Ai-fang. Experimental research on change of soil strength during excavation of foundation pit[J]. Building Structure, 2002, 32(7): 29 - 31. (in Chinese))

[6] 沈跃伟, 赵锡宏. 基坑土层局部加固对减小支护结构位移的效果分析[J]. 勘察科学技术, 1996(1): 11 - 15. (SHEN Yue-wei, ZHAO Xi-hong. Influence analysis of the pit partial reinforcement on the displacement reduction of support structure[J]. Reconnaissance Science and Technology, 1996(1): 11 - 15. (in Chinese))

[7] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. (QIAN Jia-hua, YIN Zong-ze. Principle and calculation of geotechnical[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996. (in Chinese))

[8] 袁 静, 龚晓南. 基坑开挖过程中软土性状若干问题分析[J]. 浙江大学学报, 2001, 35(5): 465 - 470. (YUAN Jing, GONG Xiao-nan. Analysis of soft clay during excavation[J]. Journal of Zhejiang University, 2001, 35(5): 465 - 470. (in Chinese))

[9] 秦爱芳, 李永圃, 陈有亮. 上海地区基坑工程中的注浆加固研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(1): 69 - 72. (QIN Ai-fang, LI Yong-pu, CHEN You-liang. Study on stabilizing grout of excavation pits in shanghai district[J]. Journal of Civil Engineering, 2000, 33(1): 69 - 72. (in Chinese))

[10] 应宏伟. 软土地基深基坑工程性状的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1997. (YING Hong-wei. Study on the character of deep excavation in soft soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1997. (in Chinese))