

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.07.028

# 深基坑内撑式支护结构综合刚度研究

刘美麟, 房 倩, 张顶立, 侯艳娟

(北京交通大学 城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘 要:** 基于 Clough 系统刚度, 提出一种可综合考虑内撑式基坑围护墙、内支撑和墙后土体刚度的支护体系综合刚度表达式, 以较好地预测基坑变形。将 Clough 支护刚度、Bolton 支护刚度和文中综合支护刚度应用于天津地铁 6 号线 22 个基坑工程 469 个围护墙测斜案例中, 结果表明, 基坑围护结构最大变形随着无量纲综合支护体系刚度( $\eta'$ )的增大而减小, 当  $\eta'$  增大到一定值后, 其变形值趋于恒定。进一步分析土体不排水抗剪强度调动率, 得到天津地铁 6 号线地铁基坑墙后土体调动率不大于 0.6, 远小于上限值 0.8, 说明天津地铁基坑建设具有足够的安全储备。研究成果可为同类工程经济性和安全性设计提供借鉴。

**关 键 词:** 墙体侧移; 支护体系刚度; 不排水抗剪强度; 剪应变

中图分类号: TV 551.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)07-2059-06

## Research on synthetic system stiffness of strutted retaining structure for deep excavation

LIU Mei-lin, FANG Qian, ZHANG Ding-li, HOU Yan-juan

(Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Based on Clough system stiffness model, this paper introduces a novel synthetic stiffness expression of strut system for excavation. This expression considered the wall stiffness, strut stiffness and the soil stiffness behind the wall, and thus it had substantial advantage to predict the deformation induced by excavation. Clough system stiffness, Bolton system stiffness and the synthetic system stiffness proposed in this paper were applied to measure the tilt of 469 retaining walls in 22 deep excavations of Tianjin subway line 6 engineering. The maximum deformation of the retaining structure in foundation pit decreased with the increase of the stiffness  $\eta'$  of the dimensionless composite support system. The deformation value tended to be constant, until  $\eta'$  increased to a certain value. When the mobilized undrained shear strength ratio of soil was further analyzed, it is found that the ratio of the soil behind the wall along Tianjin subway line 6 was less than 0.6. The upper limit value of this ration is 0.8, which indicates that the excavation engineering of Tianjin subway line 6 has sufficient safety reserves. Therefore, research results can provide significant reference for the economic and safety design of similar engineering.

**Keywords:** wall deflection; support system stiffness; undrained shear strength; shear strain

## 1 引 言

深基坑工程是一个复杂的系统工程, 其受力和变形受多种因素的综合影响, 包括: 场地土的地质水文条件、周边环境条件(地面超载、周边建筑物、地下管线等)、基坑平面形状及规模、围护结构刚度、墙体嵌固深度、支撑形式及平面刚度、支撑预应力大小和施工方法(挡墙、支撑的施工方法, 施工质

量, 开挖顺序, 挖土时机等)等<sup>[1]</sup>。通过单一因素如: 基坑开挖深度  $H$ 、基坑开挖宽度  $B$ 、单位宽度地下连续墙刚度  $EI$ 、支撑结构的轴向刚度  $EA$  或黏土归一化的不排水抗剪强度  $S_u/\sigma'_v$  ( $S_u$  为不排水抗剪强度,  $\sigma'_v$  为有效垂直应力)等控制的基坑围护结构和墙后地表变形离散性大<sup>[2]</sup>, 不能很好地表示与基坑体系内力和位移的变化关系。

以往关于基坑变形影响因素的研究大多基于以

收稿日期: 2016-10-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 51678035); 国家自然科学基金重点项目资助(No. U1234210)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51678035) and the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (U1234210).

第一作者简介: 刘美麟, 女, 1990 年生, 博士研究生。主要从事基坑工程方面的研究。E-mail: 14115302@bjtu.edu.cn

通讯作者: 房倩, 男, 1983 年生, 博士, 副教授, 主要从事隧道与地下工程方面研究。E-mail: qfang@bjtu.edu.cn

上单一因素分析,但其变化规律不显著,因此,提出多因素综合分析的方法来预测基坑体系变形。吴恒立<sup>[3]</sup>提出了著名的综合刚度原理和双参数法,反演得到桩-土综合刚度值、土抗力指数  $1/n$  和土的比例系数  $m$ ,进而得到不同土质条件下圆截面钻孔灌注混凝土桩的综合刚度和双参数取值表。该方法对实测结果依赖性强,且仅适用于开挖深度较浅的基坑。杨敏等<sup>[4]</sup>讨论了单独的桩顶圈梁、内支撑体系和外拉锚杆的水平刚度系数的计算方法,但没有结合墙侧土体的影响。目前国内外应用最多的是 Clough<sup>[5]</sup> 支护体系刚度无量纲表达式,可综合反映围护墙刚度、支撑竖向平均间距和水重度的影响。与 Clough 支护体系刚度类似,Addenbrooke<sup>[6]</sup> 提出位移柔度的概念,并得到围护墙最大位移与其变化关系图表。大量工程实测表明,Clough 系统刚度和 Addenbrooke 位移柔度均不能较好地反映与基坑围护结构变形的函数关系<sup>[7-9]</sup>。张戈等<sup>[10]</sup>在以上研究的基础上提出基坑围护的 MVSS 综合刚度,其表达式包含围护墙刚度、基坑深度、支撑刚度、支撑水平及竖向间距、地基加固等参数,围护结构最大变形与综合刚度的拟合曲线呈逐渐衰减的指数函数关系,但表达式整体较繁琐。

本文在 Clough<sup>[5]</sup> 基坑支护体系刚度和 Bolton 等<sup>[11]</sup> 改进支护体系刚度研究基础上,引入围护结构两侧土体力学性质的影响,提出采用无量纲综合支护体系刚度表达式来预测基坑围护结构变形。通过分析天津地铁 6 号线 22 个基坑工程中 469 个实测墙体变形可知,该无量纲综合支护体系刚度可有效减小变形的离散性,基坑围护结构最大变形随着无量纲综合支护体系刚度的增大而明显减小。在此基础上得到基坑墙后土体调动率,天津地铁 6 号线地铁基坑建设均有足够的安全储备,由此可见,改进的支护体系刚度表示方法更适用于预测深基坑变形及其安全性。本文研究结果可对提高支护结构经济性和稳定性设计提供建议。

## 2 支护体系综合刚度研究

Clough 等<sup>[5]</sup>和 O'Rourke<sup>[12]</sup> 研究指出,支撑间距减小可大大提高支撑体系刚度。O'Rourke 通过对比大量实测数据和模型试验结果得到施加预应力可以有效控制基坑的变形,支撑的自身刚度对支撑体系整体刚度的影响不大。因以上分析刚度表示方法与墙体最大变形的函数关系均具有较大的离散性,Clough 等<sup>[5]</sup>进一步提出可估计标准化墙体最大水平位移  $\delta_{\text{hm}}/H$  的支护体系刚度经验表达式为

$$\eta = \frac{EI}{\gamma_w h_{\text{ave}}^4} \quad (1)$$

式中:  $EI$  为围护结构单位宽度的弹性刚度;  $\gamma_w$  为水的重度;  $h_{\text{ave}}$  为竖向平均支撑间距。

由于深基坑围护结构和周围土体相互作用,在分析支护体系刚度时不可避免地要考虑周围土体刚度的影响。墙后土体软土层厚度为  $C_{\text{max}}$ , 其下为强度、刚度均较大的硬土层。设基坑开挖影响下只有软土层发生位移,其下硬土层不受影响,MSD (mobilized strength design method) 法<sup>[13]</sup>中将开挖引起的变形影响波长  $\lambda$  表示为最下一道支撑到墙趾距离的函数:

$$\lambda = \alpha s \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  为变形区域的影响系数;  $s$  为最下一道支撑到墙趾的距离。当墙趾插入硬土中时,  $\alpha = 1$ ; 当软土层厚度远大于围护墙深度时,  $\alpha = 2$ ; 在一般深度或者中等硬度土层中,  $1 < \alpha < 2$ 。基坑分步开挖 ( $H'$ ) 产生的增量变形机制如图 1 所示,图中带箭头虚线表示变形流线,  $AB$ 、 $CD$ 、 $DE$ 、 $EF$ 、 $FH$ 、 $FI$  为等势线,即每条线位移传递量相同。

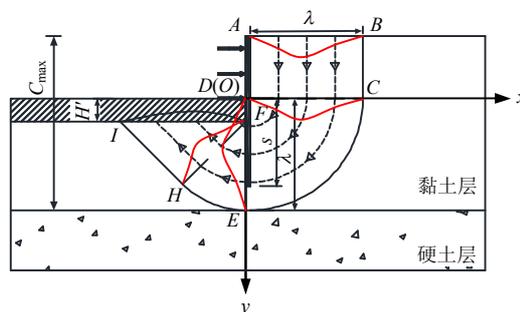


图 1 内撑式基坑开挖变形机制<sup>[13]</sup>

Fig.1 Deformation mechanism of strutted excavation<sup>[13]</sup>

变形影响波长  $\lambda$  可反映地层情况和最后一道内支撑位置的影响。由图 1 可知,基坑分步开挖产生的变形影响波长  $\lambda$  为

$$\lambda_n \approx C_{\text{max}} - h_{n-1} \quad (3)$$

式中:  $\lambda_n$  为基坑开挖第  $n$  步的变形影响波长,  $n > 1$ ;  $h_{n-1}$  为第  $n-1$  道支撑埋深。随着开挖深度的增加,变形影响波长逐渐减小,地表最大影响范围为首道悬臂开挖,约等于软土层厚度。由式 (3) 可知,  $\lambda$  由软土层厚度和内支撑埋深共同决定。

Bolton 等<sup>[11]</sup>提出,采用基坑分步开挖增量变形影响波长  $\lambda$  取代支撑竖向平均间距  $h_{\text{ave}}$ ,一方面考虑了墙后软土层的影响;另一方面也包含了内支撑位置的影响。根据 Bolton 等<sup>[11]</sup>定义的基坑内撑式支护体系刚度可表示为

$$\eta^* = \frac{EI}{\gamma_w \lambda^4} \quad (4)$$

根据 Lam 等<sup>[14]</sup>的研究, 墙体侧移与邻近土体平均剪应变可由位移协调得到:

$$\gamma_{ave} = \int_{vol} \delta\gamma dvol / \int_{vol} dvol \approx 2 \frac{\delta_{hm}}{\lambda} \quad (5)$$

式中:  $\gamma_{ave}$  为土体平均剪应变;  $\int \delta\gamma dvol$  为土体任意一点剪应变在影响范围内的积分;  $\delta_{hm}$  为墙体最大侧移。

由上式可见, 土体平均剪应变与临近墙体水平位移密切相关, 当变形影响波长一定时, 围护墙水平位移与邻近土体平均剪应变成正比。

Vardanega 等<sup>[15]</sup>研究表明, 土体的平均剪应变可由该点应力-应变曲线上 1/2 峰值剪应力对应的剪应变  $\gamma_{M=2}$  得到。Vardanega 等<sup>[15]</sup>对不同地区 19 种黏土, 115 次黏性土不排水直剪试验得到各土层应力-应变曲线, 得到黏性土不排水应力-应变曲线符合如下拟合公式:

$$\frac{c_{mob}}{c_u} = bf \left( \frac{\gamma}{\gamma_{M=2}} \right)^b \quad (6)$$

式中:  $bf$  和  $b$  均为拟合因子;  $c_{mob}$  为土体强度调动值;  $c_u$  为土体峰值强度;  $\gamma$  为土体剪应变调动值;  $\gamma_{M=2}$  为土强度调动率为 1/2 $c_u$  时的剪应变, 可反映土体刚度的影响。Vardanega 等<sup>[15]</sup>进一步得到式(6)中的拟合因子符合  $bf \approx 0.5$ ,  $b \approx 0.6$ 。

英国标准 BS8002<sup>[16]</sup>关于墙后土体不排水抗剪强度调动率  $\beta$  定义为

$$\beta = \frac{c_{mob}}{c_u} \quad (7)$$

$\beta$  越大, 说明墙后土体抗剪强度调动率越大, 基坑设计越经济,  $\beta$  值上限为 0.8<sup>[14]</sup>。

由  $\gamma = \gamma_{ave}$ , 将式 (5)、(6) 代入式 (7) 得

$$\beta = bf \left( \frac{2}{\lambda \gamma_{M=2}} \delta_{hm} \right)^b \quad (8)$$

因此, 当基坑进行稳定性和安全设计时,  $\beta$  值一定, 围护墙水平位移与墙后土体变形影响波长  $\lambda$  和邻近土体 1/2 峰值强度对应的剪应变  $\gamma_{M=2}$  成正比。

由式 (4) 可知, Bolton 已在支护体系刚度中引入  $\lambda$  的影响, 本文将  $\gamma_{M=2}$  引入 Bolton 支护体系刚度中, 得到无量纲基坑内撑式支护体系综合刚度公式为

$$\eta' = \frac{EI}{\gamma_w \lambda^4 \gamma_{M=2}} \quad (9)$$

与 Clough<sup>[5]</sup>支护体系刚度表达式相比, 用  $\lambda$  代

替支撑平均竖向间距  $h_{ave}$ , 且引入土体不排水剪应变, 从而更有效地考虑墙后土体力学性质的影响。

以下将通过天津地铁 6 号线地铁基坑工程围护结构实测变形验证该支护体系刚度表达式的合理性。

### 3 案例验证

研究天津地铁 6 号线 22 个地铁车站基坑 469 个围护结构水平位移, 可用测点得到基坑分步开挖墙体最大侧移值, 如表 1 所示。其中  $H$  为基坑开挖深度 (m);  $EI$  为围护结构抗弯刚度 ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^3$ );  $h_1$  为首道混凝土支撑埋深 (m);  $\lambda_2$  为开挖第 2 层土引起的变形影响波长 (m);  $\delta_{hm}$  为基坑开挖完成后的墙体侧移最大值 (mm)。

表 1 天津地铁 6 号线地铁车站基坑基本情况统计

Table 1 Basic statistics of deep excavation of Tianjin subway line 6

编号	名称	测点数目	$H$ /m	$EI$ /( $\text{MPa} \cdot \text{m}^3$ )	$h_1$ /m	$\lambda_2$ /m	$\delta_{hm}$ /mm
1	南何庄站	26	15.36	1 280	3.80	38.10	36.57
2	大毕庄站	26	16.82	1 280	3.38	38.05	22.42
3	金钟街站	54	16.61	1 280	4.20	38.50	38.56
4	徐庄子站	26	16.45	1 280	3.92	38.25	28.12
5	金钟河大街	50	17.79	1 280	3.90	37.60	31.20
6	民权门站	10	21.41	2 500	4.70	38.26	28.00
7	北宁公园站	31	17.50	1 280	4.07	37.85	11.71
8	天津北站	18	25.60	2 500	4.30	37.68	29.35
9	新开河站	28	24.31	2 500	4.43	37.30	25.94
10	外院附中站	28	16.80	1 280	4.17	37.58	23.14
11	天泰路站	20	16.60	1 280	5.75	37.89	28.32
12	北运河站	20	24.00	2 500	4.59	38.63	22.54
13	北竹林站	14	23.94	2 500	4.75	37.04	24.28
14	人民医院站	34	17.60	1 280	4.13	37.20	17.74
15	宜宾道站	25	15.86	1 280	3.98	37.90	14.65
16	鞍山西道站	28	16.76	1 280	4.10	37.64	31.60
17	天拖站	32	16.56	1 280	3.97	37.55	30.58
18	中心医院站	24	16.76	1 280	6.00	38.35	31.29
19	育梁道站	28	16.90	1 280	4.00	36.95	17.46
20	南翠屏站	28	16.91	1 280	4.48	38.25	3.80
21	肿瘤医院站	41	25.70	2 500	5.72	36.55	22.68
22	天津宾馆站	32	26.12	2 500	5.72	35.55	10.03

为得到各土层应力-应变关系, 由金钟街站基坑埋深 55 m 范围内各土层现场取样进行室内三轴压缩试验<sup>[17]</sup>, 采用围压  $\sigma_3 = 300 \text{ kPa}$ , 三轴试验得到的应力-应变曲线更符合实际情况。各土层工程地质参数如表 2 所示, 其中,  $L$  为各土层底板埋深 (m)、 $\gamma_{sat}$  为各土层的饱和重度 ( $\text{kN/m}^3$ )、 $c$  为各土层的黏聚力 (kPa)、 $\varphi$  为各土层的内摩擦角 ( $^\circ$ )、 $K_0$  为各土层的静止侧压力系数、 $\varphi'$  为各土层的有效内摩擦角 ( $^\circ$ )。⑨<sub>2,2</sub> 粉砂层分布不均匀, 因此, 天津

地层软土层厚度约为 30.85 m。

表 2 工程地质参数  
Table 2 Geological parameters

土层	名称	L/m	$\gamma_{sat}$ /(kN/m <sup>3</sup> )	c /kPa	$\phi$ /(°)	$K_0$	$\phi'$ /(°)
④ <sub>1</sub>		4.57	19.5	15.86	17.83	0.52	27.52
⑥ <sub>1</sub>	粉质黏土	10.85	19.2	13.63	20.50	0.55	31.62
⑦		15.35	19.8	17.67	18.21	0.53	26.60
⑧ <sub>1</sub>		17.35	20.2	15.86	18.43	0.52	29.40
⑨ <sub>1</sub>		28.85	19.9	18.28	19.46	0.45	24.65
⑨ <sub>2-2</sub>	粉砂	30.85	20.7	7.40	31.33	0.42	16.30
⑪ <sub>1</sub>	粉质	35.85	20.7	20.75	19.24	0.43	28.92
⑫ <sub>1</sub>	黏土	44.85	20.2				
⑫ <sub>2</sub>	粉砂	50.00	20.7				

将试验得到的土体不排水抗剪强度  $y$  轴  $c_{u,mob}$  对峰值抗剪强度  $c_u$  标准化,  $x$  轴  $\gamma$  对  $1/2$  峰值抗剪强度对应的剪应变  $\gamma_{M=2}$  标准化, 通过式(6)回归得到各层土不排水强度曲线, 如图 2 所示。

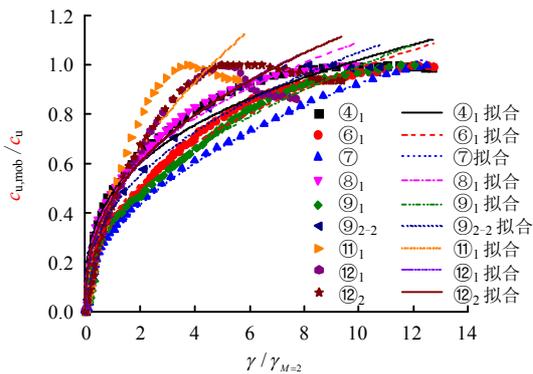


图 2 各层土不排水抗剪强度曲线  
Fig.2 Undrained shear strength curves of each soil layer

各土层的压缩指数  $C_c$ 、回弹指数  $C_s$ 、发挥  $0.5c_u$  时的剪应变值  $\gamma_{M=2}$  及根据图 2 得到各土层的拟合参数和相关性, 如表 3 所示。由表 3 可知, 相关系数均大于 0.9, 可见天津黏性土应力-应变曲线均可用式 (6) 所示的指数函数表示。

表 3 计算参数  
Table 3 Calculation parameters

土层	$C_c$	$C_s$	$\gamma_{M=2}$ /%	b	bf	$R^2$
④ <sub>1</sub>	0.33	0.027	0.97	0.33	0.48	0.96
⑥ <sub>1</sub>	0.31	0.020	2.09	0.40	0.52	0.98
⑦	0.32	0.020	2.50	0.47	0.48	0.99
⑧ <sub>1</sub>	0.27	0.015	1.09	0.36	0.49	0.97
⑨ <sub>1</sub>	0.26	0.045	2.20	0.45	0.50	0.98
⑨ <sub>2-2</sub>	0.27	0.027	1.42	0.40	0.48	0.97
⑪ <sub>1</sub>	0.24	0.018	1.12	0.51	0.49	0.93
⑫ <sub>1</sub>	0.25		1.32	0.40	0.51	0.90
⑫ <sub>2</sub>	0.11		1.22	0.40	0.50	0.91

469 个墙体侧移最大值与开挖深度的关系见图 3, 由图可知: 墙体最大侧移值介于  $(0.18 \sim 2.42)\%H$  之间, 平均  $1.31\%H$ 。与李淑<sup>[18]</sup>统计的北京地区钻孔灌注桩+内支撑支护的基坑围护结构最大侧移介于  $0.4\%H \sim 2.18\%H$  之间, 平均  $1.03\%H$  接近, 远小于徐中华<sup>[19]</sup>统计的上海地区基坑围护结构最大侧移小于  $5.5\%H$ , 平均  $2.5\%H$ , 说明基坑变形与地层条件密切相关。

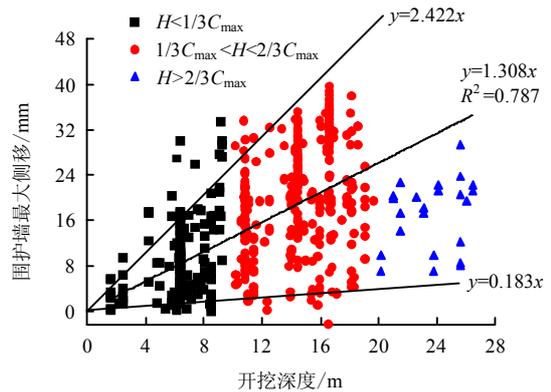


图 3 最大侧移与开挖深度的关系  
Fig.3 Relationships between the maximum wall deflection and excavation depth

由式 (1) 得到本文归一化基坑围护最大侧移  $(\delta_{hm}/H)$  与 Clough 支护体系刚度  $\eta$  的关系, 如图 4 所示。由图可知, 围护结构最大侧移随着 Clough 支护体系刚度的变化没有明显的变化趋势, 离散性较大, 尤其对于开挖深度较小的基坑。其原因可能是 Clough 支护体系刚度只反映支护结构的影响, 而没有考虑与支护结构密切相关的墙后土体, 相同的支护结构在不同土质中的变形显然大不相同, 因此, 地下工程建设需因地制宜。

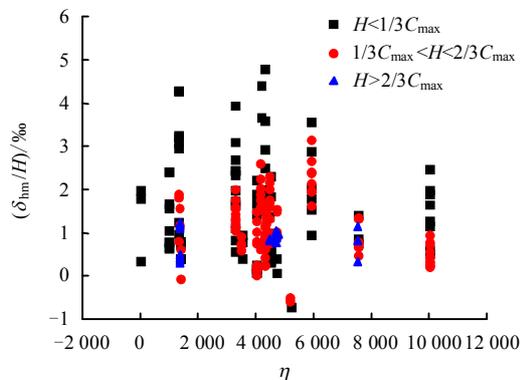


图 4 归一化墙体最大侧移与 Clough 支护体系刚度关系  
Fig.4 Relationships between normalized maximum wall deflection and Clough support system stiffness

Bolton 等<sup>[11]</sup>提出采用基坑分步开挖增量变形影

响波长  $\lambda$  取代支撑竖向间距  $s$ ，从而得到 Bolton 支护体系刚度。由式 (4) 得到归一化基坑围护最大侧移 ( $\delta_{hm}/H$ ) 与 Bolton 支护体系刚度 ( $\eta^*$ ) 的关系，如图 5 所示，其中横坐标为对数坐标系。与 Clough 支护体系刚度表示的  $\delta_{hm}/H$  相比，Bolton 支护体系刚度表示的  $\delta_{hm}/H$  离散性较小，归一化基坑围护最大侧移随着 Bolton 支护体系刚度的增大有明显的减小趋势。

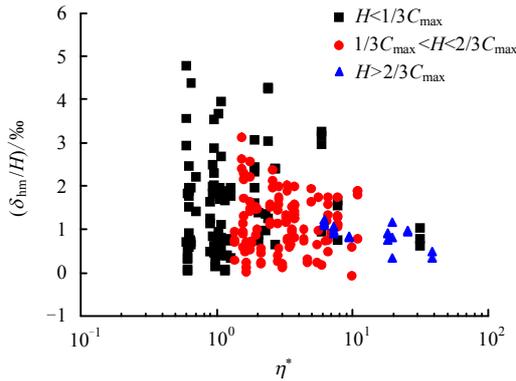


图 5 归一化墙体最大侧移与 Bolton 支护体系刚度关系  
Fig.5 Relationships between normalized maximum wall deflection and Bolton support system stiffness

黏性土应力应变曲线上 1/2 峰值强度对应的剪应变  $\gamma_{M=2}$  可反映墙后土体力学性质的影响。本文在 Bolton 支护体系刚度中引入  $\gamma_{M=2}$ ，由式 (9) 得到归一化基坑围护最大侧移 ( $\delta_{hm}/H$ ) 与本文支护体系综合刚度  $\eta'$  的关系，如图 6 所示，其中横坐标为对数坐标系。与图 4、5 相比，归一化基坑围护最大侧移随着本文支护体系综合刚度的增大而明显减小。当修正支护体系综合刚度足够大时，归一化基坑围护最大侧移趋于不变，预估其上限为

$$\delta_{hm}/H < 3.14 - 1.537 \times 10^{\eta'} \quad (10)$$

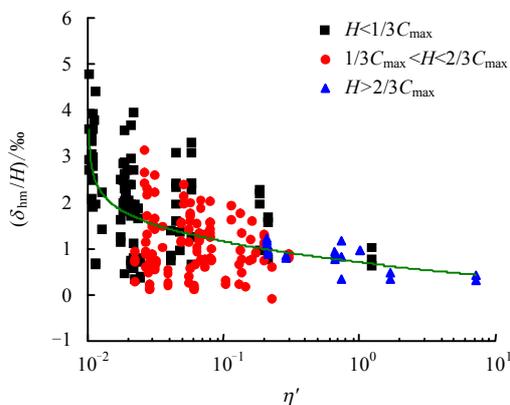


图 6 归一化墙体最大侧移与本文支护体系综合刚度关系  
Fig.6 Relationships between normalized maximum wall deflection and synthetic support system stiffness

由以上分析可知，依据已知基坑施工参数和地质条件即：围护结构刚度  $EI$ 、内支撑位置  $h$ 、墙后软土层厚度  $C_{max}$ 、墙后土体不排水剪应变  $\gamma_{M=2}$  等可预测基坑围护结构最大变形。进而通过式 (8) 得到基坑所在土体不排水抗剪强度发挥率，以分析基坑是否安全。天津地铁 6 号线基坑土体不排水抗剪强度发挥率  $\beta$  与本文支护体系综合刚度的关系如图 7 所示。其中  $\beta$  值越接近 1，说明基坑对土体强度的调用越大，基坑设计越经济， $\beta$  值上限为 0.8。由图 7 可知，本文  $\beta$  值最大不超过 0.6，可见天津地铁 6 号线基坑具有一定的安全储备。

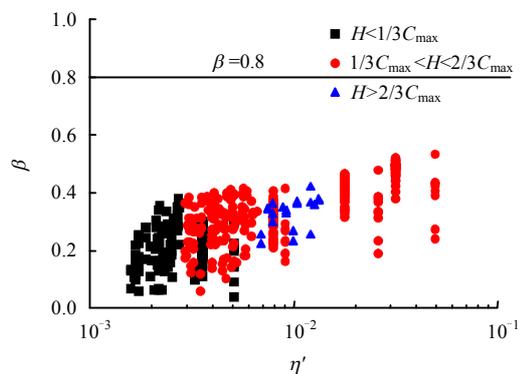


图 7 土体不排水抗剪强度发挥率  $\beta$  与支护体系综合刚度  $\eta'$  关系  
Fig.7 Relationships between undrained shear strength ratio  $\beta$  and synthetic support system stiffness  $\eta'$

## 4 结 论

(1) 本文综合支护体系刚度表达式简洁明了，参数选取依靠于施工和地层条件，可用来预测基坑围护结构的最大变形，并得到其土体不排水抗剪强度调动率，对基坑安全性进行分析。

(2) 通过天津地铁 22 个基坑工程分步开挖实测水平位移对比分析 Clough 支护刚度、Bolton 支护体系刚度和本文得到的支护体系综合刚度，研究结果表明，用本文支护体系综合刚度表示的基坑围护结构水平位移离散性明显减小，说明本文的改进方法是合理可行的。

(3) 通过分析天津地铁 22 个基坑工程墙后土体不排水抗剪强度调动率可知，天津地铁 6 号线基坑墙后土体强度调动率不大于 0.53，远小于上限值 0.8，说明天津地铁 6 号线基坑建设安全储备较高。

## 参 考 文 献

[1] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 97-98.

- LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009: 97—98.
- [2] 金雪莲, 樊有维, 李春忠, 等. 带撑式基坑支护结构变形影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 3242—3250.
- JIN Xue-lian, FAN You-wei, LI Chun-zhong, et al. Analysis of factors affecting support structure deformation of foundation pit with brace[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp. 1): 3242—3250.
- [3] 吴恒立. 计算推力桩的综合刚度原理和双参数法[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- WU Heng-li. The integrated stiffness principle and the double parameter method for calculating the thrust pile[M]. Beijing: China Communications Press, 1990.
- [4] 杨敏, 熊巨华. 建筑基坑支撑结构体系水平刚度系数的计算[J]. 岩土工程技术, 1999, 13(1): 13—16.
- YANG Min, XIONG Ju-hua. Horizontal stiffness coefficient of bracing structure in foundation excavation calculation[J]. **Geotechnical Engineering Technology**, 1999, 13(1): 13—16.
- [5] CLOUGH G W, SMITH E M, SWEENEY B P. Movement control of excavation support systems by iterative design[C]//Proceedings of Foundation Engineering: Current Principals and Practices, ASCE. New York: Geotechnical Special Publication, 1989, 2: 869—884.
- [6] ADDENBROOKE T I. A flexibility number for the displacement controlled design of multi propped retaining walls[J]. **Ground Engineering**, 1994, 27(7): 41—45.
- [7] MOORMANN C. Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database[J]. **Soils and Foundations**, 2004, 44(1): 87—98.
- [8] LEUNG E H Y, NG C W W. Wall and ground movements associated with deep excavations supported by cast in situ wall in mixed ground conditions[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2007, 133(2): 129—143.
- [9] WANG J H, XU Z H, WANG W D. Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2010, 136(7): 985—994.
- [10] 张戈, 毛海和. 软土地区深基坑围护结构综合刚度研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1467—1474.
- ZHANG Ge, MAO Hai-he. A new system stiffness of retaining structure of deep foundation pit in soft soil area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(5): 1467—1474.
- [11] BOLTON M D, LAM S Y, VARDANEGA P J. Ground movements due to deep excavations in Shanghai: Design charts[J]. **Front. Struct. Civ. Eng**, 2014, 8(3): 201—236.
- [12] O'ROURKE T D. Ground movements caused by braced excavations[J]. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, 1981, 107(9): 1159—1178.
- [13] OSMAN A S, BOLTON M D. Ground movement predictions for braced excavations in undrained clay[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2006, 132(4): 465—477.
- [14] LAM S Y, BOLTON M D. Energy conservation as a principle underlying mobilizable strength design for deep excavations[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2011, 137(11): 1062—1074.
- [15] VARDANEGA P J, BOLTON M D. Strength mobilization in clays and silts[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2011, 48(10): 1485—1503.
- [16] BSI British standard BS8002. Code of practice for earth retaining structures[S]. London: British Standards Institution (BSI), 994.
- [17] 何世秀, 韩高升, 庄心善, 等. 基坑开挖卸荷土体变形的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 17—20.
- HE Shi-xiu, HAN Gao-sheng, ZHUANG Xin-shan, et al. Experimental researches on unloading deformation of clay in excavation of foundation pit[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(1): 17—20.
- [18] 李淑. 基于变形控制的北京地铁车站深基坑设计方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- LI Shu. Study on design of Beijing subway station deep excavation based on deformation controlling[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [19] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- XU Zhong-hua. Deformation behavior of deep excavations supported by permanent structure in Shanghai soft deposit[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.