

SMP 准则修正的土压力在上海中心大厦 基坑的应用研究

姚正源

(上海勘察设计研究院(集团)有限公司,上海 200093)

摘要:本文给出了基于 SMP 准则修正的土压力在主动区、被动区以及不同水土分合算条件下的计算公式,与上海中心大厦基坑土压力实测数据和朗肯土压力计算结果进行对比,结果表明:相较于朗肯土压力,基于 SMP 准则修正的土压力与实测值更为吻合,且有一定的安全储备。

关键词:SMP 准则;土压力;朗肯土压力;基坑;上海中心大厦

中图分类号:TU47 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)06-0083-05

Application of earth pressure based on SMP failure criteria in foundation pit of Shanghai Center Tower

YAO Zhengyuan

(SGIDI Engineering Consulting <Group> Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract: This paper presents the calculation formula of earth pressure based on SMP failure criteria in the active zone, passive zone, and different soil and water conditions. The calculation results based on SMP failure criteria of Shanghai Center Tower is compared with the measured data and the calculation results of Rankine's earth pressure. The results show that compared with that of Rankine's earth pressure, the earth pressure based on SMP failure criteria is more consistent with the measured value, and provides some safety margin.

Key words: SMP failure criteria; earth pressure; Rankine's earth pressure; foundation pit; Shanghai Center Tower

1 工程概况及地质条件

1.1 工程概况

上海中心大厦工程位于上海浦东新区陆家嘴中心区 Z3-1、Z3-2 地块(银城中路 501 号),即原陆家嘴高尔夫球场。场地东临东泰路,西靠银城中路,南接陆家嘴环路,北望花园石桥路。

上海中心大厦由 1 幢 121 层主楼(结构高度 580 m、建筑顶高度 632 m)和 1 幢 5 层商业裙房(高度 38 m)组成,整个场地下设 5 层地下室,基础形式均采用桩筏基础,主楼基础埋深为 31.1 m,裙房基础埋深约为 26.3 m^[1]。主楼桩基采用后注浆钻孔灌注桩,桩径 1000 mm,核心筒区有效桩长 56.0 m,扩展区有效桩长 52.0 m。裙房桩基采用钻孔灌注桩,立柱桩使用桩端后注浆工艺,桩径 1000 mm,有

效桩长为 35.7 m,抗拔桩桩径 700 mm,有效桩长 35.7 m。主楼基坑先施工,待主楼地下室施工出土 0 后再施工裙房基坑。主楼区域地下结构采用明挖顺作法施工,裙房区域地下结构采用逆作法施工。

1.2 工程地质条件

根据上海岩土工程勘察设计院有限公司提供的勘察报告(编号 2008-A-002),拟建场地属正常地层分布区,浅部土层分布较稳定,中下部土层除局部区域有夹层或透镜体分布外,一般分布较稳定。塔楼中心实施的 17 号勘探孔在 289.57 m 深度范围内揭示,本场地第四系覆盖层厚度为 274.80 m,属第四系下更新统 Q₄ 至全新统 Q₄ 沉积物,主要由粘性土、粉土、砂土组成,一般具有成层分布特点;深度 274.80 m 以深为花岗岩层(燕山期侵入岩)。根据

收稿日期:2019-04-16; **修回日期:**2019-05-15 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2019.06.015

作者简介:姚正源,男,汉族,1990 年生,岩土工程专业,硕士,从事岩土工程工作,上海市杨浦区水丰路 38 号,391016348@qq.com。

引用格式:姚正源.SMP 准则修正的土压力在上海中心大厦基坑的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(6):83-87.

YAO Zhengyuan. Application of earth pressure based on SMP failure criteria in foundation pit of Shanghai Center Tower[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(6):83-87.

土的成因、结构及物理力学性质差异,第四系土层可划分为14个主要层次(上海市统编地层第⑧层粘性土层缺失)。其中第⑤、⑦、⑨层根据土的成因、土性特征分为若干亚层和次亚层及透镜体(第⑤_{1a}、⑤_{1b}

层;第⑦₁、⑦₂、⑦₃层;第⑨₁、⑨₂₋₁、⑨₂₁、⑨₂₋₂、⑨₃、⑨₃₁层)。地层剖面示意图见图1。基坑设计参数见表1。

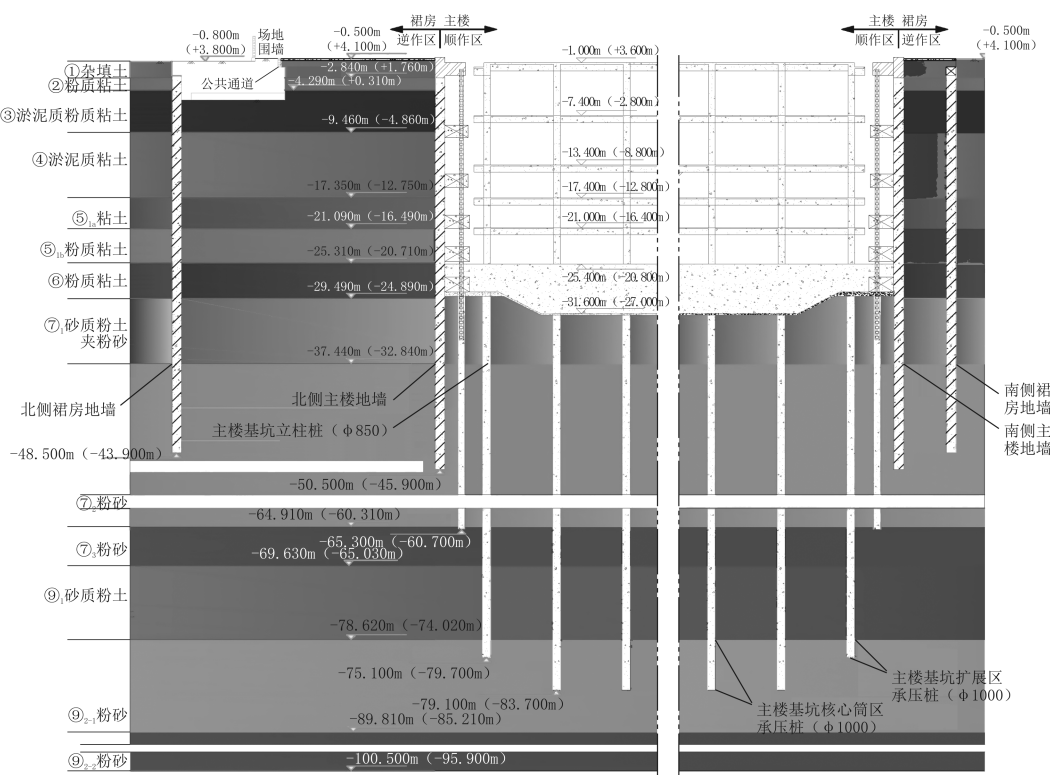


图1 上海中心大厦地层剖面示意

Fig.1 Stratigraphic profile at Shanghai Center Tower

表1 上海中心大厦基坑设计参数

Tbale 1 Foundation pit containment parameters of Shanghai Center Tower

层号	土层名称	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	固结快剪	
			c /kPa	φ /($^{\circ}$)
②	粉质粘土	18.4	19	17.0
③	淤泥质粉质粘土夹砂质粉土	17.7	7	18.0
④	淤泥质粘土	16.7	13	10.5
⑤ _{1a}	粘土	17.6	16	13.0
⑤ _{1b}	粉质粘土	18.4	14	19.5
⑥	粉质粘土	19.8	44	15.5

第①层杂填土,松散,表层0.5~1.5m深度范围内夹大量碎砖、碎石等杂物,局部区域为混凝土地坪,下部多以粘性土为主,夹植物根茎、石子等。

第②层褐黄—灰黄色粉质粘土,可塑—软塑,层面埋深约2.3m,含氧化铁斑点和铁锰质结核,局部以粘土为主。杂填土较厚区域该层缺失。

第③层灰色淤泥质粉质粘土夹砂质粉土,流塑,层面埋深约3.5m,在5.0~7.0m深度范围夹层状

粉性土较多,土质不均匀。

第④层灰色淤泥质粘土,流塑,层面埋深8.0~10.0m,分布较为稳定,土质较均匀,属软弱粘性土。

第⑤层根据土性不同可分为2个亚层:第⑤_{1a}层灰色粘土,软塑,层面埋深16.0~18.0m,在拟建场地内分布稳定,土质较均匀;第⑤_{1b}层灰色粉质粘土,软塑—可塑,层面埋深19.5~21.5m,该层底部夹多量粉性土。

第⑥层暗绿色粉质粘土,硬塑,含氧化铁斑点和铁锰质结核,该层在拟建场地大部分区域分布稳定,层面起伏平缓,层面埋深一般在24.0m左右,仅在场地东北侧层面埋深略偏深(层面埋深27.2~28.5m),厚度较薄。

第⑦层据土性不同可分为3个亚层:第⑦₁层草黄色砂质粉土夹粉砂,中密—密实,在拟建场地分布稳定;第⑦₂层草黄—灰黄色粉砂,密实,土质均

匀,在拟建场地内分布稳定;第⑦₃层灰色粉砂,密实,夹砂质粉土及薄层粘性土,土质不均匀。

第⑨层根据土性不同可分为⑨₁、⑨₂、⑨₃层 3 个亚层,其中第⑨₂、⑨₃层中局部分布有透镜体;第⑨₁层灰色砂质粉土,密实;第⑨₂₋₁层灰色粉砂,密实;第⑨₂₁层灰色粉质粘土夹粘质粉土,可塑—硬塑,夹层状粉砂,土质不均;第⑨₂₋₂层灰色粉砂,密实;第⑨₃层灰色细砂,密实,土质均匀;第⑨₃₁层灰色粉质粘土,可塑—硬塑。

1.3 水文地质条件

根据上海岩土工程勘察设计研究院有限公司提供的勘察报告(编号 2008-A-002),场区地下水根据埋藏条件可划分为浅层潜水及承压水。

1.3.1 潜水

本场地浅部地下水属潜水类型,主要补给来源为大气降水、地表迳流。勘探期间由钻孔中测得的地下水埋深一般为 0.75~3.90 m,相应绝对标高为 3.36~0.40 m。上海地区地下水年平均水位埋深为 0.5~0.7 m,低水位埋深为 1.5 m。

1.3.2 承压水

拟建场地深部第⑦层属上海地区第一承压含水层,其层顶埋深为 28~30 m,其承压水位埋深一般在 3~11 m,承压水位一般呈周期性变化,随季节、气候、潮汐等因素变化。正常情况下承压水水位埋深为 8.50~10.20 m。本场区由于缺失第⑧层粘性土,第 I、第 II 承压含水层(即第⑦层、第⑨层)相互连通,总厚达 97 m,含水量极其丰富。开挖过程中持续稳定按需降低承压水,是本区基坑安全及施工顺利实施的关键之一。

1.4 基坑围护形式

采用地下连续墙(墙厚 1.2 m、墙深 50 m)作为围护结构^[2]。主楼区基坑内设置 6 道环形支撑,顶面设置 4 个挖土平台。各道环撑及栈桥范围内支撑实景图见图 2,支撑情况见表 2。

2 SMP 土压力计算原理

就材料的破坏准则而言,以金属材料为对象,有著名的二维应力状态下的特莱斯卡(Tesca)准则和三维应力状态下的米泽斯(Mises)准则。而对于土这样的粒状材料,有著名的二维应力状态下的莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)准则,和由莫尔-库仑准则推广而得到的 SMP(松岗-中井)准则^[3-5]。基于 SMP



图 2 上海中心大厦支撑实景图

Fig.2 Support system of Shanghai Center Tower

表 2 上海中心大厦支撑情况

Tbale 2 Support system of Shanghai Center Tower

支撑层数	截面尺寸/mm	支撑中心相对标高/m
第一道	3700×1500	-1.75
第二道	2800×1500	-9.30
第三道	2800×1600	-15.30
第四道	3000×1600	-20.30
第五道	3000×1800	-24.90
第六道	3000×1800	-28.90

理论,结合土的抗剪强度与内摩擦角^[6],将三维情况下的土体破坏情况进行分析,SMP 土压力计算原理分述如下^[7-8]。

2.1 地下水位以上或水土合算的土层^[9-10]

$$p_{ak} = (1/R_{PS})[\sigma_{ak} + (1-R_{PS})c \cot\varphi] \quad (1)$$

$$p_{pk} = R_{PS}\sigma_{pk} + (R_{PS}-1)c \cot\varphi \quad (2)$$

式中: $R_{PS} = (1/4)(\sqrt{8\tan^2\varphi+9} + \sqrt{8\tan^2\varphi+6} - 2\sqrt{8\tan^2\varphi+9} - 1)^2$

2.2 水土分算的土层

$$p_{ak} = (1/R_{PS})[\sigma_{ak} - u_a + (1-R_{PS})c \cot\varphi] + u_a \quad (3)$$

$$p_{pk} = R_{PS}(\sigma_{pk} - u_p) + (R_{PS}-1)c \cot\varphi + u_p \quad (4)$$

2.3 作用在挡土构件上的分布土反力^[11]:

$$p_s = k_s v + p_{s0} \quad (5)$$

$$k_s = \eta m (z - H) \quad (6)$$

2.3.1 被动区初始土压力—主动

合算:

$$p_{s0} = (1/R_{PS})\sigma_{pk} \quad (7)$$

分算:

$$p_{s0} = (1/R_{PS})(\sigma_{pk} - u_p) + u_p \quad (8)$$

2.3.2 被动区初始土压力—被动

合算:

$$p_{s0} = R_{PS} \sigma_{pk} \quad (9)$$

分算:

$$p_{s0} = R_{PS} (\sigma_{pk} - u_p) + u_p \quad (10)$$

3 算例与分析

3.1 主动土压力算例

图3给出了上海中心大厦基坑主动土压力随开挖深度的曲线。

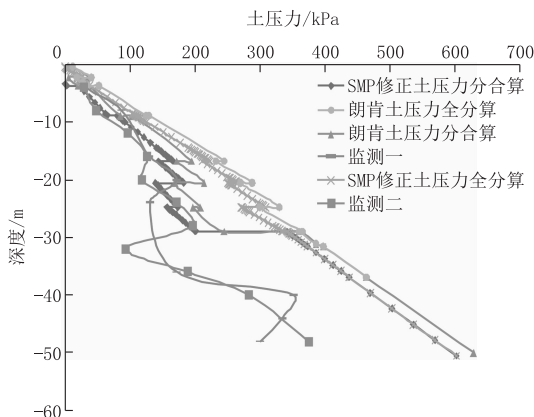


图3 SMP修正土压力与朗肯土压力在主动土压力情况下的对比

Fig.3 Comparison of SMP failure criteria and Rankine's earth pressure in the active zone

两种理论方式的计算与实测曲线的对比表明:

- (1) 基于SMP修正的土压力在坑底以上小于朗肯土压力, 约为朗肯土压力的85%;
- (2) 基于SMP修正的土压力在坑底以下略小于朗肯土压力, 约为朗肯土压力的95%;
- (3) 基于SMP修正的土压力在按照土性分合算的情况下与坑底以上监测值更为吻合。

这说明基于SMP修正的土压力相对于朗肯土压力而言, 更接近实测值。采用基于SMP修正的土压力计算, 能够解决朗肯土压力计算值过大的问题, 并且对于支护结构仍留有一定的安全储备, 在实际工程设计中有广泛的应用前景。

3.2 被动土压力算例

图4给出了上海中心大厦基坑被动土压力随开挖深度的曲线。

两种理论方式的计算与实测曲线的对比表明:

- (1) 基于SMP修正的土压力与朗肯土压力计算值在被动区趋势相反;
- (2) 基于SMP修正的土压力更符合实测数据的趋势;

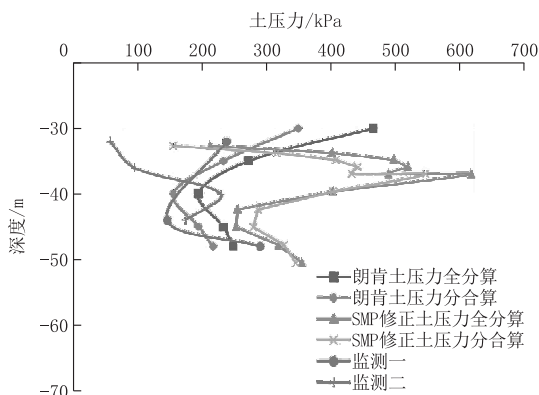


图4 SMP修正土压力与朗肯土压力在被动土压力情况下的对比

Fig.4 Comparison of SMP failure criteria and Rankine's earth pressure in the passive zone

(3) 朗肯土压力在被动区出现了小于实测值的情况, 偏不安全。

这说明基于SMP修正的土压力相对于朗肯土压力而言, SMP修正的土压力与实测值最为接近, 且仍留有一定的安全储备。

4 结论

(1) 本文给出了SMP土压力计算原理在水土分算、水土合算以及被动区土压力的计算公式, 有利于工程师今后在实际工程中对SMP修正土压力的运用。

(2) 对比监测数据, 由朗肯土压力公式所得主动土压力值通常都较实测值偏大, 过于保守。SMP修正土压力比传统的朗肯土压力理论更接近实测值, 能够更好地发挥支护结构的强度潜力, 采用SMP修正土压力进行围护设计可产生良好的经济效益。

(3) 在被动区, 基于SMP修正的土压力相对于朗肯土压力而言, 更接近实测值, 且更符合实测值的趋势, 并有一定的安全储备, 故基于SMP修正的土压力更接近被动土压力。

参考文献 (References):

- [1] 翟文信. 上海中心大厦裙房基坑逆作法支护体系实测分析[J]. 施工技术, 2012, 41(18): 31-34.
ZHAI Wenxin. Monitoring analysis on supports of reversed constructed podium foundation excavation in Shanghai Tower [J]. Construction Technology, 2012, 41(18): 31-34.
- [2] 朱建明. 上海中心大厦主楼地下连续墙施工技术[J]. 建筑施工, 2010, 32(4): 325-327.
ZHU Jianming. Construction technology of diaphragm wall for main building of Shanghai Center Tower [J]. Building Construction, 2010, 32(4): 325-327.

- [3] 赵成刚, 白冰, 王运霞. 土力学原理(修订本)[M]. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2009.
ZHAO Chenggang, BAI Bing, WANG Yunxian. Theory of soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, Beijing Jiaotong University Press, 2009.
- [4] 赵成刚, 韦昌富, 蔡国庆. 土力学理论的发展和面临的挑战[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3521—3540.
ZHAO Chenggang, WEI Changfu, CAI Guoqing. Development and challenge for soil mechanics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3521—3540.
- [5] 应宏伟, 张金红, 王小刚, 等. 有限土体刚性挡墙平动模式被动土压力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 978—986.
YING Hongwei, ZHANG Jinhong, WANG Xiaogang, et al. Experimental analysis of passive earth pressure against rigid retaining wall under translation mode for finite soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 978—986.
- [6] Matsuoka, H., Nakai, T. Stress-deformation and strength characteristics of soil under three different principal stresses[J]. Proc. of JSCE, 1974, 232: 59—70.
- [7] 江强, 朱建明, 姚仰平. 基于 SMP 准则的土体三维应力状态土压力问题[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S1): 1415—1417.
JIANG Qiang, ZHU Jianming, YAO Yangping. Earth pressures of three-dimensional soil stress states based on SMP failure criterion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S1): 1415—1417.
- [8] 苏辉. 基于 SMP 准则的土压力计算方法研究及应用[J]. 工程勘察, 2016, 44(S2): 166—171.
SU Hui. Research and application of soil pressure calculation base on SMP criterion[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2016, 44(S2): 166—171.
- [9] 谷云峰. SMP 强度准则在岩土工程计算中的应用[D]. 安徽合肥: 合肥工业大学, 2004.
GU Yunfeng. Application of SMP strength criterion in geotechnical engineering[J]. Hefei Anhui: Hefei University of Technology, 2004.
- [10] 胡贺祥, 宋福渊, 耿冬青, 等. Lade-Duncan 准则在土压力计算中的应用[J]. 工业建筑, 2013, 43(12): 109—112, 166.
HU Hexiang, SONG Fuyuan, GENG Dongqing, et al. Application of Lade-Duncan criterion in earth pressure calculation[J]. Industrial Construction, 2013, 43(12): 109—112, 166.
- [11] Matsuzawa H, Hazarika H. Analyses of active earth pressure against rigid retaining wall subjected to different modes of movement[J]. Soils and Foundations, 1996, 36(3): 51—65.

(编辑 周红军)

(上接第 82 页)

- [19] 刘利平, 刘晶晶, 张鹏, 等. 土钉和桩锚组合式支护体系受力和变形的数值模拟[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(8): 53—57.
LIU Liping, LIU Jingjing, ZHANG Peng, et al. Numerical simulation of stress and deformation on combined retaining system of soil nails and pile-anchors[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(8): 53—57.
- [20] 欧阳劲. 某基坑桩锚支护结构监测分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(1): 87—91.
OUYANG Jin. Monitoring and analysis of a deep foundation pit with pile-anchor retaining structure[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013, 10(1): 87—91.
- [21] 王超, 朱勇, 张强勇, 等. 深基坑桩锚支护体系的监测分析与稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 2918—2923.
WANG Chao, ZHU Yong, ZHANG Qiangyong, et al. Monitoring analysis and stability evaluation of pile-bolt support system in deep pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 2918—2923.
- [22] 黄敏, 刘小丽. 土岩组合地区桩锚支护基坑开挖地表沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(S1): 571—575.
HUANG Min, LIU Xiaoli. Ground settlement induced by excavation of pile-anchor retaining foundation pits in soil-rock mixed areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 571—575.
- [23] 解磊, 董礼. 深基坑放坡-桩锚联合支护结构的监测及数值模拟[J]. 沈阳建筑工程学院学报(自然科学版), 2015, 31(2): 228—235.
XIE Lei, DONG Li. Monitoring and numerical simulation of slope grading and pile-anchor combined support structure for deep foundation pit[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2015, 31(2): 228—235.
- [24] 时伟, 刘继明, 章伟. 深基坑桩锚支护体系水平位移试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(S1): 2355—2358.
SHI Wei, LIU Jiming, ZHANG Wei. Testing study on horizontal displacement of anchor-pile bracing structure for deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S1): 2355—2358.

(编辑 周红军)