

基于统一强度理论的组合锤法复合地基极限承载力

The Ultimate Bearing Capacity of Composite Foundation by Combined Hammer Method Based on Unified Strength Theory

乐平

Ping Le

江西省中赣投勘察设计有限公司 中国·江西 南昌 330000

Jiangxi Zhonggan Investment Survey and Design Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330000, China

摘要: 现有的 Mohr-Coulomb 强度理论及地基极限承载力公式, 如朗肯、太沙基、迈耶霍夫等, 极限承载力公式大都是基于 Tresca 准则或 Mohr-Coulomb 准则推导而得。但是, Mohr-Coulomb 强度理论和 Tresca 准则只考虑了最大、最小剪应力和作用于该面上的最大、最小两个主应力 σ_1 、 σ_2 , 而没有考虑中间面上剪应力及主应力 σ_2 的影响。太沙基土力学、单剪土力学或不考虑中间主应力的土力学统称为传统土力学。论文通过算例可以知道, 地基极限承载力随着中间主应力系数 b 的增大而显著增加, 说明中间主应力对地基极限承载力有明显影响。

Abstract: Existing Mohr-Coulomb strength theory and foundation limit bearing capacity formulas, such as Langken, Tasha aki and Meyerhov etc, the ultimate bearing capacity formulas are mostly derived based on Tresca criterion or Mohr-Coulomb criterion. However, the Mohr-Coulomb strength theory and Tresca criterion only take into account the maximum, minimum shear stress and two main stress σ_1 , σ_2 , acting on this surface, but not the effect of shear stress and main stress σ_2 on the middle surface. Tisha-based soil mechanics, single shear soil mechanics or soil mechanics without considering intermediate principal stress are collectively referred to as traditional soil mechanics. In this paper, we can know that the foundation ultimate bearing capacity increases significantly with the increase of the intermediate main stress coefficient b , which shows that the intermediate main stress has an obvious impact on the foundation ultimate bearing capacity.

关键词: 中间主应力; 极限承载力; 统一强度理论

Keywords: intermediate main stress; ultimate bearing capacity; unified strength theory

DOI: 10.12346/etr.v3i12.5093

1 引言

20 世纪 90 年代出现的统一强度理论引入土力学, 并将其应用于土力学的三个基本问题(地基、土压力与挡土结构、边坡和滑坡), 不仅在理论上解决了土力学没有考虑中间主应力的根本问题, 而且在土体强度理论和土体结构强度理论方面都产生了一系列新的结果, 为工程应用提供了更多的结果。1985 年, 俞茂宏教授提出了广义双剪强度理论, 1991 年提出了适用于不同材料的统一强度理论, 这在学界称之为“基于统一强度理论的土力学”, 其系列化极限面覆盖了从内边界到外边界的全部区域。莫尔-库伦强度理论是所有可

能的强度理论的内边界(下限), 俞茂宏教授在 1985 年提出的双剪强度理论是所有可能的强度理论的外边界(上限), 而统一强度理论的极限面覆盖了从内边界到外边界的全部区域。

2 统一强度理论公式的推导

2.1 基本假设

①基础底面粗糙。当地基发生整体剪切破坏并形成延伸至基底平面高程处的连续滑动面时, 基底以下有一部分土体将随基础一起移动而始终处于弹性状态, 该部分土体为弹性楔体。弹性楔体的边界 ab 为滑动边界的一部分, 并假设与

【作者简介】 乐平 (1973-), 男, 中国江西南城人, 本科, 岩土工程高级工程师、注册土木工程师(岩土), 从事地基处理、基坑(边坡)支护的设计等研究。

水平面的夹角为 $\Psi^{[1]}$ 。

除弹性楔体外，在滑动区域范围内的所有土体均处于塑性状态，滑动区由径向剪切区 II 和朗肯被动区 III 组成，径向剪切区的边界 bc 由对数螺旋曲线表示，即：

$$r=r_0e^{\theta tg\varphi_{UST}}$$

$$\varphi_{UST}=\arcsin\frac{b(1-m)+(2+bm+b)\sin\varphi_0}{2+b+b\sin\varphi_0}$$

式中， φ_{UST} 为统一强度理论的内摩擦角； $m=2\sigma_2/(\sigma_1+\sigma_3)$ ； φ_0 为岩土体材料的内摩擦角； r_0 为起始矢径； θ 为任一矢径与起始矢径 r_0 的夹角。朗肯被动区 III 的边界 cd 为直线与水平面成 $45^\circ + \varphi_{UST}/2$ 。

② 不考虑基底以上基础两侧土体的抗剪强度的影响，而用相应的均布荷载 $q=rD$ 表示。

2.2 地基极限承载力的确定

根据上述基本假定由上图中的弹性楔体 aba₁ 的平衡条件可得整体剪切破坏时的极限荷载，即：

$$Q_u=2P_p\cos(\Psi-\varphi_{UST})+C_{UST}B\tan\Psi-rB^2\tan\Psi/4$$

$$C_{ust}=\frac{2(1+b)c_0\cos\varphi_0}{2+b+b\sin\varphi_0}\cdot\frac{1}{\varphi_{UST}}$$

式中， φ_0 为岩土材料的内摩擦角； C_0 为岩土材料的凝聚力； B 为基础宽度； γ 为地基土的容重； p 为作用于弹性楔体边界 ab 上的被动土压力的合力，即：

$$P_p=P_{pc}+P_{pq}+P_{pr}$$

$$P_p=\frac{B}{2\cos^2\varphi_{UST}}[C_{UST}k_{pc}+qk_{pq}+\frac{1}{4}rB\tan\varphi_{UST}k_{pr}]$$

$$F=\sigma_1-\frac{\alpha}{1+b}(b\sigma_2+\sigma_3)=\sigma_r, \text{ 当 } \sigma_2\leq\frac{\sigma_1+\alpha\sigma_3}{1+\alpha}$$

$$F'=\frac{1}{1+b}(\sigma_1+b\sigma_2)-\alpha\sigma_3=\sigma_r, \text{ 当 } \sigma_2\geq\frac{\sigma_1+\alpha\sigma_3}{1+\alpha}$$

其中，根据公式可知：

$$k_{pc}=\frac{\cos\varphi_{UST}}{\cos\varphi}\cot\varphi_{UST}[e^{(\frac{3\pi}{2}+\varphi_{UST}-2\Psi)\tan\varphi_{UST}}(1+\sin\varphi_{UST})-1]$$

$$k_{pq}=\frac{\cos^2\varphi_{UST}}{\cos^2\Psi}e^{(\frac{3\pi}{2}+\varphi_{UST}-2\Psi)\tan\varphi_{UST}}\tan(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi_{UST}}{2})$$

k_{pr} 为 γ 项的被动土压力系数，通过试算确定。

将上式代入 Q_u 计算式可得：

$$q_u=\frac{Q_u}{B}=C_{UST}N_c+qN_q+\frac{1}{2}\lambda BN_r$$

其中，根据公式可知：

$$N_c=\tan\Psi+\frac{\cos(\varphi-\varphi_{UST})[e^{(\frac{3\pi}{2}+\varphi_{UST}-2\Psi)\tan\varphi_{UST}}(1+\sin\varphi_{UST})-1]}{\cos^2\Psi\sin\varphi_{UST}}$$

$$N_q=\frac{\cos(\varphi-\varphi_{UST})e^{(\frac{3\pi}{2}+\varphi_{UST}-2\Psi)\tan\varphi_{UST}}}{2\cos^2\Psi}\tan(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi_{UST}}{2})$$

$$N_r=\frac{1}{2}\tan\varphi(\frac{k_{pr}\cos(\Psi-\varphi_{UST})}{\cos^2\Psi\cos\varphi_{UST}}-1)$$

式中， Q_u 是在基底粗糙的条件下得到的，其中弹性楔体边界 ab 与水平面的夹角 Ψ 为未定值。在进行极限承载力计算时作如下假定：

① 假定基础完全粗糙。此时可假定弹性楔体边界 ab 与水平面的夹角为 $\Psi=\varphi_{UST}$ 时，则上式可以写成如下形式：

$$N_c=(N_q-1)\cot\varphi_{UST}$$

$$N_q=\frac{e^{(\frac{3\pi}{2}-\varphi_{UST})\tan\varphi_{UST}}}{2\cos^2(\frac{\pi}{4}+\varphi_{UST})}$$

$$N_r=\frac{1}{2}\tan\varphi_{UST}(\frac{k_{pr}}{\cos^2\varphi_{UST}}-1)$$

从上式可知：承载力系数均与内摩擦角有关，被动土压力系数 k_{pr} 经试算确定。为了便于计算，结合太沙基经验公式，即：

$$N_r=1.8(N_q-1)\tan\varphi_{UST}$$

② 假定基底完全光滑。此时弹性楔体已不再存在而成为朗肯主动区，并整个滑动区域已演变为与普朗特完全相同。朗肯主动区的边界与水平面的夹角为 Ψ ，即 $\Psi=45^\circ + \varphi_{UST}/2$ ，将 $\Psi=45^\circ + \varphi_{UST}/2$ 代入系数 N_c 、 N_q 、 N_r 计算式，则基础完全光滑的承载力 Q_u 可确定^[2]。

3 算例

某拟建场上部为 3~8m 厚粘性土回填，以下为厚层状粉质粘土 ($f_{ak}=200\text{kPa}$)，拟建建筑物为 9F 框架结构，基础拟采用条形基础形式 (基础布置形式见图 1)，基础埋深 $D=1.5\text{m}$ ，基础宽度 $B=2.0\text{m}$ 。上部素填土采用组合锤法地基处理技术进行夯实处理，经处理后的复合地基要求承载力设计值 $f_{ak}\geq 200\text{kPa}$ 。经组合锤法地基处理后，经承载力静载荷试验检测和现场原位标准贯入试验，上部土体的承载力满足设计要求 $f_{ak}\geq 200\text{kPa}$ ，土体的粘聚力和内摩擦角值分别为 $C_0=18\text{kPa}$ ， $\varphi_0=15^\circ$ 。

组合锤法处理地基系指采用柱锤、中锤、扁锤，分阶段、分序次分别对地基土进行挤密夯实或置换，形成夯实或置换墩体和墩间土共同作用，以提高地基承载力和改善地基土工程性质的人工处理地基。采用组合锤法地基处理技术施工后的墩体剖面及楔形单墩模型 (如图 1 所示)，组合锤法地基处理平面布置图 (条形基础) 如图 2 所示。

3.1 假设基底完全粗糙，地基承载力的计算

① 利用太沙基公式 ($b=0$ ， $m=1$)。

由 $\varphi_0=18^\circ$ ，可得到 $N_q=6.04$ 、 $N_r=2.95$ 、 $N_c=15.52$ 。由此得太沙基极限承载力为 $q_u=Q_u/B=C_{ust}N_c+qN_q+N_r\lambda B/2=466.98\text{kPa}$ 。

② 当 $b=0.2$ 、 $b=0.4$ 、 $b=0.6$ 、 $b=0.8$ 、 $b=1.0$ ， m 均等于 1 时，分别计算得极限承载力为 $q_u=537.36\text{kPa}$ 、 $q_u=600.85\text{kPa}$ 、 $q_u=658.16\text{kPa}$ 、 $q_u=709.98\text{kPa}$ 、 $q_u=756.97\text{kPa}$ 。

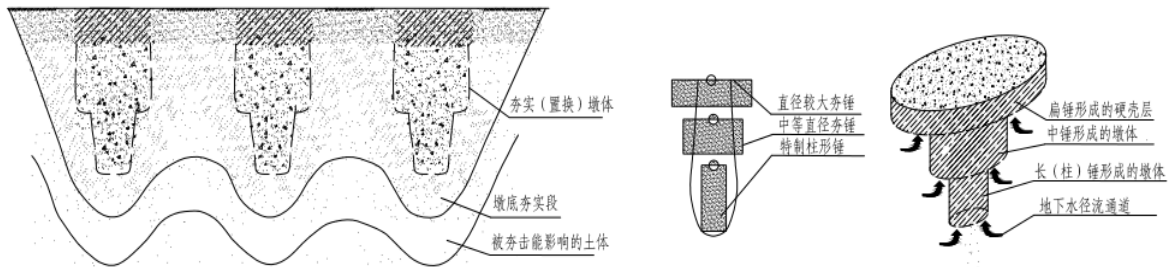


图1 组合锤法形成的复合地基剖面及楔形单墩模型图

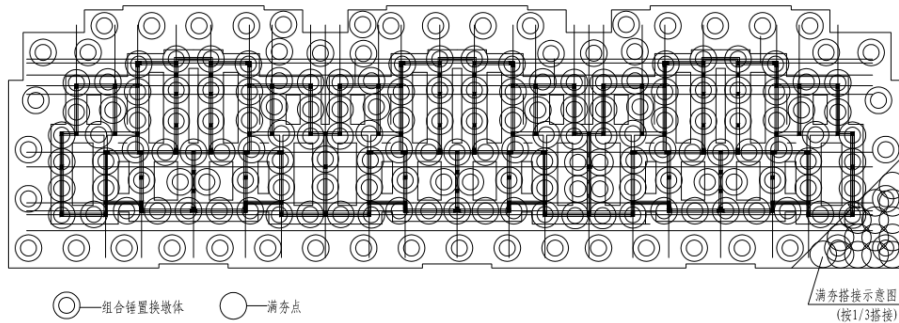


图2 组合锤法地基处理平面布置图(条形基础)

表1 基底完全粗糙时不同 b 值地基承载力计算结果

b	C_{ust}	Φ_{ust}	N_q	N_r	N_c	q_u
0.0	15.00	18.00	6.04	2.95	15.52	466.98
0.2	16.02	19.14	6.80	3.62	16.71	537.36
0.4	16.85	20.05	7.48	4.26	17.75	600.85
0.6	17.53	20.79	8.09	4.84	18.66	658.16
0.8	18.10	21.41	8.63	5.39	19.47	709.98
1.0	18.59	21.93	9.13	5.89	20.18	756.97

表2 基底完全光滑时不同 b 值地基承载力计算结果

b	C_{ust}	Φ_{ust}	N_q	N_r	N_c	q_u
0.0	15.00	18.00	4.36	1.96	10.33	320.64
0.2	16.02	19.14	4.81	2.38	10.98	363.04
0.4	16.85	20.05	5.21	2.77	11.54	400.73
0.6	17.53	20.79	5.56	3.12	12.02	434.36
0.8	18.10	21.41	5.88	3.44	12.45	464.48
1.0	18.59	21.93	6.16	3.74	12.82	491.58

由表1的相关计算结果可知基底完全粗糙时,地基极限承载力随统一强度理论参数 b 的增大而提高,当 m=1 时,其 b=1 时的相应值与双剪强度理论的极限承载力值相当;当 0 < b < 1 时的值均比经典太沙基承载力要大。这说明中间主应力对地基承载力有较大影响,而中间主剪应力系数 b 越大,地基极限承载力越大。

3.2 假设基底完全光滑,地基承载力的计算

①利用太沙基公式 (b=0, m=1)。

由 $\phi_0=18^\circ$, 可得到 $N_q=4.36$ 、 $N_r=1.96$ 、 $N_c=10.33$ 。由此得太沙基极限承载力为: $q_u=Q_u/B=C_{ust}N_c+qN_q+N_r \lambda B/2=320.64\text{kPa}$ 。

②当 b=0.2、b=0.4、b=0.6、b=0.8、b=1.0, m 均等于 1 时,

分别计算得极限承载力为 $q_u=363.04\text{kPa}$ 、 $q_u=400.73\text{kPa}$ 、 $q_u=434.36\text{kPa}$ 、 $q_u=464.48\text{kPa}$ 、 $q_u=491.58\text{kPa}$ 。

由表2的相关计算结果可知基底完全光滑时,地基极限承载力随统一强度理论参数 b 的增大而提高,当 m=1 时,其 b=1 时的相应值与双剪强度理论的极限承载力值相当;当 0 < b < 1 时的值均比经典太沙基承载力要大。这说明中间主应力对地基承载力有较大影响,而中间主剪应力系数 b 越大,地基极限承载力越大^[3]。

4 结语

对于组合锤法复合地基承载力的确定,通常采用现场载荷试验和原位测试试验等方法综合确定。对于其承载力计算,常采用经典太沙基地基极限承载力公式计算,但实际按照设计要求的极限承载力进行载荷试验时,Q-S 曲线结果显示采用经典太沙基地基极限承载力公式往往偏小,即未能充分发挥地基的承载力。如果能合理的利用俞茂宏教授的统一强度理论,考虑中间主应力的影响,必将充分的利用地基土体承载性能,发挥岩土体自身的承载能力,可带来较好的经济效益,对建筑行业实现节能减排,国家降低碳排放标准具有重要意义^[4]。

参考文献

- [1] 俞茂宏.土力学新论[M].杭州:浙江大学出版社,2020.
- [2] 隋凤涛,王士杰.统一强度理论在地基承载力确定中的应用研究[J].岩石力学,2011,32(10):3038-3042.
- [3] 沈君,林光国,王启贵.基底完全粗糙时统一强度理论夏的极限承载力[J].大坝与安全,2016(2):41-44.
- [4] 俞茂宏.强度理论新体系:理论、发展与应用[M].西安:西安交通大学出版社,2011.