



存在软弱夹层的高桩码头接岸结构地基稳定验算

寇本川，苏航，刘贻华，夏冬飞

(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：地基稳定验算是保证高桩码头接岸结构安全的重要步骤，而选用什么样的地基稳定验算方法至关重要。针对这个问题，结合工程案例，选用简单条分法和复合滑动面法进行抗力分项系数计算比较，并提出了软弱夹层处理方案。同时在原设计方案基础上，结合两种方法对软弱夹层关键参数黏聚力、内摩擦角和厚度进行敏感性分析，并对抗力分项系数进行了相关性分析。结果表明：存在软弱夹层的高桩码头接岸结构应同时采用简单条分法和复合滑动面法进行地基稳定验算；在同样变化率下，内摩擦角对抗力分项系数的影响明显高于黏聚力的影响；两种方法计算的抗力分项系数最小值在一定条件下具有高度相关性。结论可为类似条件下高桩码头接岸结构地基稳定验算提供一定的参考。

关键词：高桩码头接岸结构；软弱夹层；简单条分法；复合滑动面法；敏感性分析

中图分类号：U 656.1⁺³

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)07-0199-06

Foundation stability calculations for structure connecting shore of high piled wharf with weak intercalation

KOU Ben-chuan, SU Hang, LIU Yi-hua, XIA Dong-fei

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Foundation stability calculation is an important step to ensure the safety of the structure connecting shore of the high piled wharf, and the choice of foundation stability calculation method is crucial. To solve this problem, we choose the Swedish slices method and composite sliding surface method for the comparison of resistance division coefficient calculation and propose a treatment scheme for weak interlayer. At the same time, based on the original design, the sensitivity analysis of the key parameters of the weak interlayers, such as cohesion, internal friction angle, and thickness, and the correlation analysis of the coefficient of frictional resistance, are combined with the two methods. The results show that two methods should be used for the foundation stability calculations; under the same rate of change, the influence of the internal friction angle resistance component coefficient is significantly higher than the influence of the cohesion force; the minimum values of the fractional coefficients calculated by the two methods are highly correlated. The conclusion can provide a reference for the foundation stability calculations under similar conditions.

Keywords: structure connecting shore of high piled wharf; weak intercalation; Swedish slices method; composite sliding surface method; sensitivity analysis

随着高桩码头建设向深水化和大型化方向发展，地质条件越来越复杂，接岸结构的处理在码

头安全中的作用越来越重要，而地基稳定验算则是保证接岸结构安全的重要步骤。安全失稳事故

收稿日期：2020-10-26

作者简介：寇本川(1985—)，男，硕士，高级工程师，注册土木工程师(港口)，注册安全工程师(建筑施工)，从事水运工程技术管理和安全研究工作。

多发生在施工时期，轻则在岸坡坡顶沿顺岸方向产生裂缝；重则使岸坡连同建筑物一起滑动，造成重大经济损失^[1]。有关学者采用传统方法对边坡稳定进行了验算分析^[2-4]，同时对存在软弱夹层时的复合滑动面法进行公式推导和模型试验^[5-6]，结果表明受软弱夹层的影响，边坡不再是整体圆弧滑动破坏，而是部分沿着软弱夹层滑动破坏。港口工程地基计算系统(2008版)按照规范要求的方法，可实现简单条分法和复合滑动面法的计算，其中复合滑动面法包含圆弧面、螺旋面、平面-圆弧面-平面、平面-螺旋面-平面等的计算^[7]。

本文结合工程案例，在对原设计方案进行地基稳定验算时，采用简单条分法计算的结果符合规范要求，而采用复合滑动面法计算的结果不符合规范要求，因而提出挖除软弱夹层的新设计方案。同时在原设计方案基础上，以抗力分项系数为基准，对软弱夹层的关键参数黏聚力、内摩擦角和厚度进行敏感性分析，并对两种方法获得的最小计算值进行了相关性分析，可供同类工程设计参考。

1 工程概况

1.1 设计方案

某工程建设规模为 30 万 DWT 铁矿石接卸泊

位 1 个，考虑码头结构远期发展并充分利用优越的水深条件，码头结构按靠泊 40 万 DWT 散货船设计。码头前沿设计底高程为 -28.00 m，码头面高程为 5.50 m。码头结构总长 420 m，采用高桩梁板结构形式，共分为 7 个结构段。

原设计方案：基槽底部开挖至④₃碎石层顶部，高程为-48.00 m，底宽30.00 m，两侧边坡均为1:3。基槽开挖完成后，换填碎石至-30.50 m，打设前桩台桩基，完成后回填碎石至-17.50 m，打设后桩台桩基，之后回填10~100 kg块石堤心，外坡1:20，内坡1:1.25。外侧用200~300 kg块石护面，在高程-15.0 m处设置戗台。内侧铺设二片石垫层、混合倒滤层及土工布滤层，二片石最小厚度为500 mm，混合倒滤层最小厚度为1 000 mm，倒滤层内侧坡度为1:1.5。接岸结构顶部采用浆砌块石挡土墙，挡土墙底宽4.00 m、顶宽1.80 m，顶部1.50 m高度为钢筋混凝土压顶。后方陆域回填中粗砂。

新设计方案：基槽底部挖除软弱夹层⑥黏土层，下挖至⑥₁粗砾砂层顶部，高程为-53.00，底宽16.00 m，两侧边坡均为1:3。其余同原设计方案。见图1。

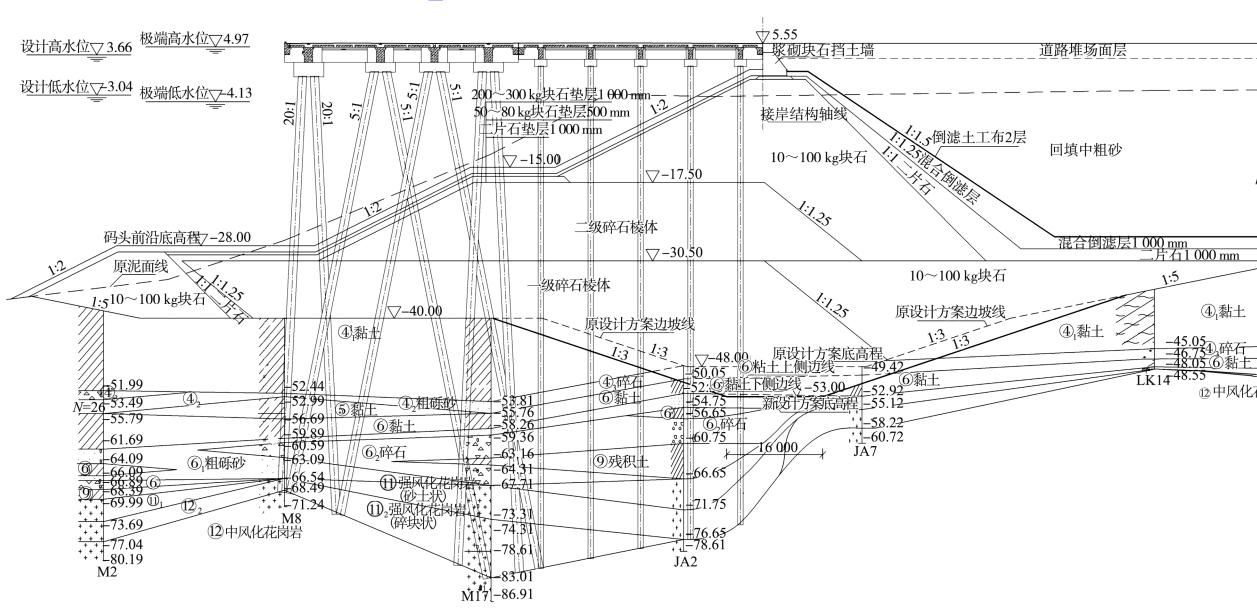


图 1 高桩码头接岸结构典型断面 (单位: m)

1.2 地形地貌及地质

拟建场地处于陆域向海域过渡地带, 场地西南侧、西北侧为陆地, 东侧连北侧为海域。海域主要为海滩沉积地貌。场地地势总体呈西南高、东北低, 从陆域向海域倾斜, 地形起伏变化大。海域地段勘探点孔口地面高程变化在-40.53~1.63 m, 陆域区勘探点孔口地面高程变化在1.08~48.87 m。

拟建港区地层上部主要为海相沉积、陆相冲洪积层, 底部为燕山晚期钾长花岗岩风化带, 局部地表部分有薄层素填土。场地岩土层按其成因及力学强度不同分为12个工程地质层, 典型断面主要岩土层分别为: ①流泥、②淤泥、③₁黏土、

④₁黏土、④₁¹黏土、④₂粗砾砂、④₃碎石、⑤黏土、⑥黏土、⑥₁粗砾砂、⑥₂碎石、⑨残积土、⑩全风化花岗岩、⑪₁强风化花岗岩(砂土状)、⑪₂强风化花岗岩(碎块状)、⑫中等风化花岗岩。地基稳定性验算主要岩土参数见表1。

其中⑥黏土为深灰色、青灰色, 局部腐殖质含量较高呈灰褐色, 可塑, 土质较均匀, 偶含泥质结核, 结核粒径0.5~1.0 cm, 局部夹腐木薄层, 最大腐木层厚10 cm左右, 偶夹中粗砂-粗砾砂及弱泥炭质土薄层; 该层分布较连续, 靠近岛侧缺失, 分层厚度1.40~5.90 m, 平均层厚3.60 m。平均标贯击数N=9.1击。

表1 地基稳定性验算主要岩土参数

名称	天然密度/(t·m ⁻³)	浮密度/(t·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/°	高程/m	备注
回填中粗砂	1.800	0.950	0.00	30.00	-	-
回填碎石	1.700	1.100	0.00	38.00	-	-
回填块石	1.700	1.000	0.00	45.00	-	-
①流泥	1.495	0.508	2.00	0.80	-40.04~-10.01	直剪快剪
② ₂ 淤泥	1.655	0.655	13.00	2.70	1.50~14.80	直剪快剪
③ ₁ 黏土	1.835	0.835	39.00	8.60	-34.40~-22.41	直剪快剪
④ ₁ 黏土	1.799	0.807	45.00	3.00	-42.54~-29.10	直剪快剪
④ ₁ ¹ 黏土	1.794	0.795	36.00	3.90	-40.34~-25.50	直剪快剪
④ ₂ 粗砾砂	1.850	1.000	0.00	36.00	-48.72~-54.63	-
④ ₃ 碎石	1.700	1.100	0.00	38.00	-56.10~-49.03	-
⑤黏土	1.933	0.944	55.00	16.6	-52.99~-51.95	直剪快剪
⑥黏土	1.832	0.841	45.00	6.60	-57.83~-53.08	直剪快剪
⑥ ₁ 粗砾砂	1.850	1.000	0.00	36.00	-61.69~-54.48	-
⑥ ₂ 碎石	1.700	1.100	0.00	38.00	-66.89~-54.50	-
⑨残积土	2.000	1.042	59.00	12.90	-68.39~-43.75	-
⑩全风化花岗岩	1.820	0.960	160.00	35.00	-	-
⑪ ₁ 强风化花岗岩(砂土状)	2.280	1.300	690.00	39.33	-69.99~-9.13	-
⑪ ₂ 强风化花岗岩(碎块状)	2.280	1.300	690.00	39.33	-73.69~-11.85	-
⑫中等风化花岗岩	2.600	1.600	3 290.00	62.73	-	-

2 地基稳定性验算方法

土坡和地基的稳定性验算, 其危险滑动面均应满足以下极限状态设计表达式:

$$\gamma_0 M_{sd} \leq \frac{1}{\gamma_R} \cdot M_{Rk} \quad (1)$$

式中: γ_0 为重要性系数, 取1.00; M_{sd} 为作用于危险滑动面上滑动力矩的设计值(kN·m/m); γ_R 为抗力分项系数; M_{Rk} 为危险滑动面上抗滑力矩的

标准值(kN·m/m)^[8]。

2.1 简单条分法

高桩码头接岸结构地基稳定性验算采用简单条分法时, 计算公式如下:

$$M_{sd} = \gamma_s [\sum (h_i - z_R) (W_{ki} + q_{ki} b_i) h'_i + M_p] \quad (2)$$

$$M_{Rk} = \sum (h_i - z_R) \cdot$$

$$[(W_{Aki} + q_{ki} b_i) U_i \tan \varphi_{ki} + W_{Bki} \tan \varphi_{ki} + c_{ki} b_i (1 + h'^2_i)] \quad (3)$$

式中: γ_s 为综合分项系数, 可取1.00; h_i 为第*i*土

条滑动面上中点的垂直坐标值(m); z_R 为圆心的垂直坐标值(m); W_{ki} 为第 i 土条重力标准值(kN/m), 可取均值, 零压线以下用浮密度计算; q_{ki} 为第 i 土条顶面作用的可变作用标准值(kN/m²); b_i 为第 i 土条宽度(m); h'_i 为第 i 土条滑动面上中点的滑动面一阶导数值; M_p 为其他原因, 如作用于直立式防波堤的波浪力标准值引起的滑动力矩(kN·m/m); U_i 为第 i 土条滑动面上的应力固结度; φ_{ki} 、 c_{ki} 分别为第 i 土条滑动面上的内摩擦角(°)和黏聚力(kPa)标准值, 可取均值; W_{Aki} 为第 i 土条填土重力标准值(kN/m), 可取均值, 零压线以下用浮密度计算; W_{Bki} 为第 i 土条原地基土重力标准值(kN/m), 可取均值, 零压线以下用浮密度计算; h'_i 为第 i 土条滑动面上中点的滑动面一阶导数值。

2.2 复合滑动面法

高桩码头接岸结构地基稳定性验算采用复合滑动面法时, 计算图示见图 2, 计算公式如下:

$$M_{sd} = \gamma_s [\sum (h_i - z_R) (W_{ki} + q_{ki} b_i) h'_i + M_p] \quad (4)$$

$$M_{Rk} = \sum (h_i - z_R) \cdot$$

$$[(W_{Aki} + q_{ki} b_i) U_i \tan \varphi_{ki} + W_{Bki} \tan \varphi_{ki} + c_{ki}] (1 + g_i) \quad (5)$$

$$g_i = -h'_i \frac{x_i - x_R}{h_i - z_R} + \left[h'_i - F_{\varphi i} + (1 + h'_i F_{\varphi i}) \frac{x_i - x_R}{h_i - z_R} \right].$$

$$\frac{2h'_i - F_{\varphi i} + h'^2 F_{\varphi i}}{(1 + F_{\varphi i}^2)(1 + h'^2)} \quad (6)$$

$$F_{\varphi i} = \tan \varphi_{ki} / \gamma_R \quad (7)$$

采用圆弧面时, g_i 由下式替代:

$$g_i = \frac{(h'_i - F_{\varphi i})^2}{1 + F_{\varphi i}^2} \quad (8)$$

式中: γ_s 为综合分项系数, 可取 1.00; x_i 、 h_i 为第 i 土条滑动面上中点的水平、垂直坐标值(m); x_R 、 z_R 为取矩点的水平、垂直坐标值(m); W_{ki} 为第 i 土条重力标准值(kN/m), 可取均值, 零压线以下用浮密度计算; 当有渗流时, 计算低水位以上零压线以下用饱和密度计算; q_{ki} 为第 i 土条顶面作用的可变作用标准值(kN/m²), 应按现行行业标准《港口工程荷载规范》确定; b_i 为第 i 土条宽度(m); h'_i 为第 i 土条滑动面上中点的滑动面一阶导数值; M_p 为其他原因, 如作用于直立式防

波堤的波浪力标准值引起的滑动力矩(kN·m/m); W_{Aki} 为第 i 土条填土重力标准值(kN/m), 可取均值, 零压线以下用浮密度计算; U_i 为第 i 土条滑动面上的应力固结度; φ_{ki} 、 c_{ki} 分别为第 i 土条滑动面上的内摩擦角(°)和黏聚力(kPa)标准值, 可取均值; W_{Bki} 为第 i 土条原地基土重力标准值(kN/m), 可取均值, 零压线以下用浮密度计算。

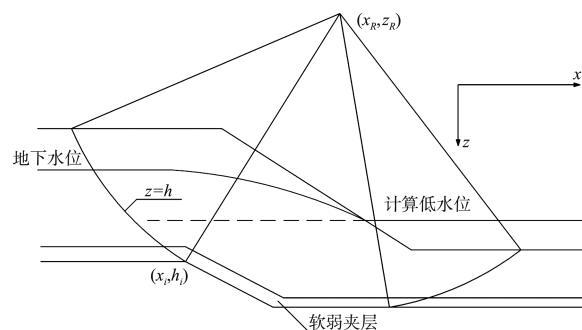


图 2 复合滑动面法计算图示

3 计算结果分析

3.1 计算假设

考虑短暂状况, 岩土参数采用直剪快剪指标, 水位为极端低水位, 不考虑渗透性对水位的影响, 不进行应力固结度计算, 桩尖已打入基础下比较硬的岩土层, 不考虑码头面荷载和桩重力因素影响, 也不考虑地震、波浪等因素影响。接岸结构陆域侧 0~20 m 均布荷载为 30.00 kPa, 20~70 m 均布荷载为 60.00 kPa, 超过 70 m 均布荷载为 300.00 kPa。在敏感性分析过程中, ⑥黏土层厚度以接岸结构轴线位置处厚度为基准, 其厚度变化时, 该土层下侧其他岩土层整体向上或向下移动。其中, 厚度减小值不能超过⑥黏土层接岸结构轴线位置处厚度与最小厚度的差值。

3.2 计算流程

采用港口工程地基计算系统(2008 版)进行计算, 先进行简单条分法计算, 抗力分项系数 $\gamma_R \geq 1.10$ 时, 下一步开展复合滑动面法计算, 否则调整设计方案重新建模计算。采用复合滑动面法计算, 抗力分项系数 $\gamma_R \geq 1.20$ 时, 进行下一步计算, 否则调整设计方案重新建模计算。以原设计方案为基础, 针对软弱夹层⑥黏土层的关键参数黏聚力、内摩擦角和厚度进行敏感性分析。最后

对上述分析两种方法计算获得的抗力分项系数进行相关性分析, 得出结论。计算流程见图3。

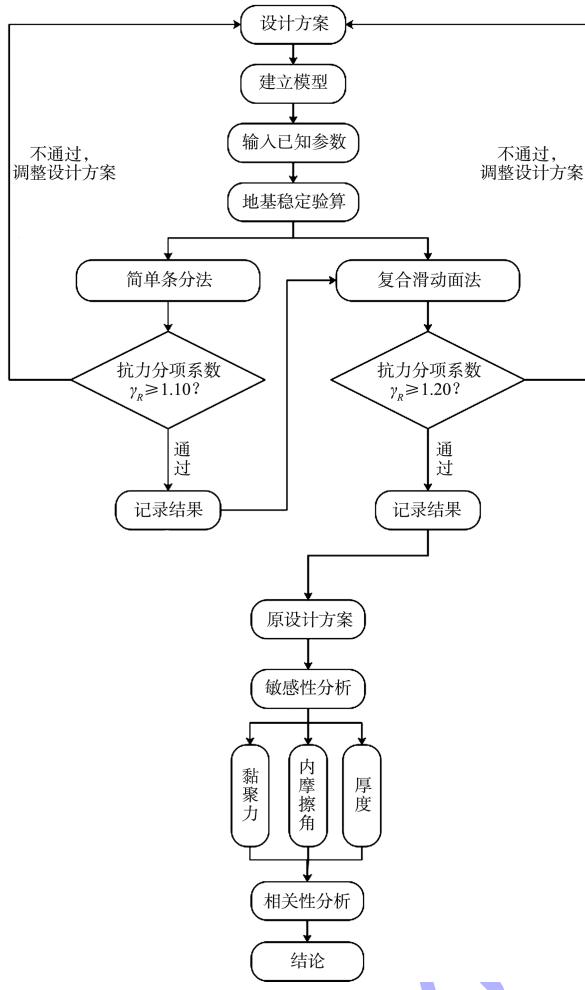


图3 模型计算流程

3.3 计算结果

通过计算, 原设计方案采用简单条分法计算的抗力分项系数 γ_R 为1.20, 大于1.10, 符合规范要求; 但是复合滑动法计算的抗力分项系数 γ_R 最小值为1.00, 不符合规范要求大于1.20的要求。

因此新设计方案考虑挖除软弱夹层⑥黏土层, 两种方法计算的抗力分项系数 γ_R 分别为1.45和1.43, 均满足规范要求。计算结果见表2, 滑动面位置见图4、5。

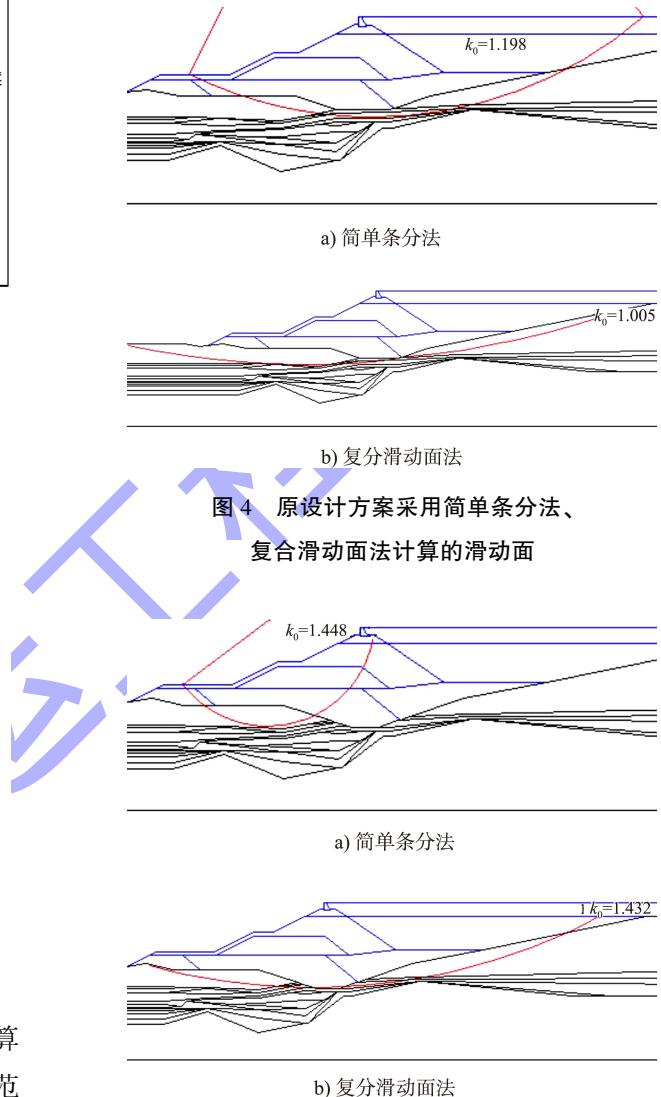


图4 原设计方案采用简单条分法、
复合滑动面法计算的滑动面
图5 新设计方案采用简单条分法、
复合滑动面法计算的滑动面

表2 不同设计方案抗力分项系数计算结果

计算方法	简单条分法	复合滑动面法					最小值
		圆弧面	螺旋面	平面-圆弧面-平面	平面-螺旋面-平面		
原方案计算结果	1.20	1.27	1.00	1.04	1.19	1.00	
新方案计算结果	1.45	1.63	1.46	1.43	1.49	1.43	

3.4 敏感性计算

针对软弱夹层⑥黏土层的关键参数黏聚力、

厚度、内摩擦角进行敏感性分析, 抗力分项系数计算结果见表3~5。

表 3 抗力分项系数关于黏聚力的敏感性计算结果

黏聚力/ kPa	变化率/ %	简单条分法 抗力分项系数	变化率/ %	复合滑动面法抗力分项系数					变化率/%
				圆弧面	螺旋面	平面-圆弧面-平面	平面-螺旋面-平面	最小值	
4.50	-90	1.08	-10	1.13	0.98	0.89	0.96	0.89	-11
18.00	-60	1.12	-7	1.19	0.98	0.94	0.99	0.94	-6
31.50	-30	1.26	5	1.23	0.99	0.99	1.02	0.99	-1
45.00	0	1.20	0	1.27	1.00	1.04	1.19	1.00	0
58.50	30	1.24	3	1.31	1.30	1.08	1.12	1.08	8
72.00	60	1.26	5	1.35	1.31	1.13	1.29	1.13	13
85.50	90	1.26	5	1.39	1.31	1.18	1.21	1.18	18

表 4 抗力分项系数关于内摩擦角的敏感性计算结果

内摩擦角/ (°)	变化率/ %	简单条分法 抗力分项系数	变化率/ %	复合滑动面法抗力分项系数					变化率/%
				圆弧面	螺旋面	平面-圆弧面-平面	平面-螺旋面-平面	最小值	
0.66	-90	1.00	-17	1.03	0.97	0.79	0.86	0.79	-21
2.64	-60	1.07	-11	1.12	0.95	0.87	1.04	0.87	-13
4.62	-30	1.13	-6	1.20	1.00	0.95	1.01	0.95	-5
6.60	0	1.20	0	1.27	1.00	1.04	1.19	1.00	0
8.58	30	1.26	5	1.34	1.28	1.11	1.19	1.11	11
10.56	60	1.26	5	1.40	1.31	1.19	1.35	1.19	19
12.54	90	1.26	5	1.46	1.31	1.26	1.35	1.26	26

表 5 抗力分项系数关于厚度的敏感性计算结果

厚度/ m	变化率/ %	简单条分法 抗力分项系数	变化率/ %	复合滑动面法抗力分项系数					变化率/%
				圆弧面	螺旋面	平面-圆弧面-平面	平面-螺旋面-平面	最小值	
1.733	-40	1.26	5	1.35	1.23	1.14	1.20	1.14	14
2.022	-30	1.24	3	1.33	1.00	1.14	1.04	1.00	0
2.889	0	1.20	0	1.27	1.00	1.04	1.19	1.00	0
3.756	30	1.13	-6	1.14	1.00	1.03	1.19	1.00	0
4.622	60	1.13	-6	1.14	1.00	1.03	1.19	1.00	0
5.489	90	1.13	-6	1.14	1.00	1.03	1.19	1.00	0

3.5 相关性计算

以原设计方案敏感性分析获得的抗力分项系数值为基础, 对简单条分法计算值和复合滑动面法最小计算值进行相关性计算, 相关系数为 0.87, 线性拟合直线为 $y = -0.471 + 1.267x$, 拟合度为 0.742, 见图 6。

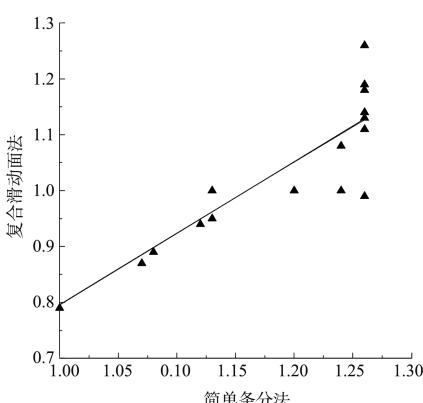


图 6 相关性计算的点分布和拟合曲线

3.6 数据分析

1) 在一定范围内, 抗力分项系数与黏聚力变化正相关。简单条分法计算时抗力分项系数对黏聚力减少敏感性更高, 当黏聚力增加到一定程度后, 计算值不再变化。复合滑动法计算时抗力分项系数对黏聚力减少和增加均敏感, 敏感性略高于简单条分法。

2) 在一定范围内, 抗力分项系数与内摩擦角变化正相关。简单条分法计算时抗力分项系数对内摩擦角减少敏感性更高, 当内摩擦角增加到一定程度后, 计算值不再变化。复合滑动法计算时抗力分项系数对内摩擦角减少和增加均敏感, 敏感性略高于简单条分法。

3) 在一定范围内, 简单条分法和复合滑动法计算时抗力分项系数对厚度增加不敏感, 当厚度减小到一定范围时, 出现负相关变化。