

# Analysis of Flysch Deposits Slope Stability Based on Hoek-Brown Theory

Haibin Ren<sup>1\*</sup>, Guangsheng Yang<sup>2</sup>, Rui Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei

<sup>2</sup>China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd. International, Langfang Hebei

Email: \*renhaibin@cnpc.com.cn

Received: Apr. 1<sup>st</sup>, 2020; accepted: May 7<sup>th</sup>, 2020; published: Jun. 15<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Flysch deposits are widely distributed all over the world. They are typical alternations interlayer deposits, which have obvious sedimentary structures and bedding characteristics. Differential weather between layers makes rock mass joints development. In order to analyze and evaluate the slope stability of flysch deposits for the international project, based on the Hoek-Brown failure criterion, the realistic rock mass strength parameters can be obtained firstly. On the other hand, by using geological mapping data and geotechnical investigation results, based on kinematic theory and hemispherical projection method, the main slope failure model can be determined. The above methodology was proved and used in practical projects, also, the method can provide the principle for the slope design. Furthermore, this procedure is recognized by oversea clients and can be important reference in the similar slope project.

## Keywords

Flysch Deposits, Hoek-Brown Failure Criterion, Kinematic Analysis

---

---

\*通信作者。

# 基于Hoek-Brown岩体破坏理论的复理石地层边坡稳定性分析

任海宾<sup>1\*</sup>, 杨光升<sup>2</sup>, 刘蕊<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊

<sup>2</sup>中国石油管道局工程有限公司国际事业部, 河北 廊坊

Email: \*renhaibin@cnpc.com.cn

收稿日期: 2020年4月1日; 录用日期: 2020年5月7日; 发布日期: 2020年6月15日

## 摘要

复理石地层在全世界分布广泛, 属于典型的韵律互层结构, 具有明显的沉积构造与层理特征, 且岩层之间差异风化, 加之岩体节理发育。为了满足国际工程中对复理石地层边坡稳定性分析的需要, 基于 Hoek-Brown 强度破坏准则, 可以获取准确的岩体强度设计参数, 同时, 利用工程测绘和工程勘察数据, 基于运动学和赤平极射投影原理, 可以综合确定复理石岩质边坡的破坏模式。本文以实际工程为依托, 通过研究表明, 使用的边坡分析方法能够准确地确定场区边坡破坏模式, 为进一步边坡设计提供依据。该方法普遍被国际项目业主认可, 在今后类似边坡工程中具有重要的借鉴意义。

## 关键词

复理石地层, Hoek-Brown 强度准则, 运动学分析

Copyright © 2020 by author(s), Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

复理石属于海相沉积岩, 全球分布广泛, 岩性类型由砂岩、泥岩和灰岩为主, 具有重复性韵律层理构造, 单层厚度不一, 但总厚度巨大[1]。受岩性差异影响, 复理石地层呈现显著的差异风化[2], 加之近地表处节理裂隙发育, 选择合理的边坡稳定性分析方法尤为重要。

Hoek 和 Brown (1980) [3] [4]提出了岩体破坏准则和地质强度指标(GSI)分类标准, 2001 年, Hoek-Brown 针对复理石的特点开展了进一步研究, 并形成了其特有的评价标准。Hoek-Brown 强度破坏准则经过近 40 年的工程实践得到了充分的发展[5], 该方法在欧美地区广泛使用, 同时被国际岩石力学工程协会(简称 ISRM)和美国公路与交通管理局(简称 AASHTO) [6]确定为岩体强度参数的计算方法。基于 Hoek-Brown 强度破坏准则, 通过工程勘察和大量的现场地质测绘, 从而确定岩体力学强度, 并作为边坡稳定性分析的输入条件之一。在复理石地层边坡分析过程中, 基于运动学分析理论和赤平投影方法, 即利用立体投影与矢量代数理论, 将结构面产状、坡面信息及内摩擦角进行投影, 根据边坡不同破坏模式发生的条件, 在赤平极射投影图中初步确定边坡稳定性及破坏模式[7]。根据破坏形态的不同主要分为平

面滑动、楔形体滑动和倾倒破坏三类。

## 2. 边坡稳定性分析流程

岩质边坡是在一定工程范围内,由结构面的各类岩石所组成的地质边坡。岩质边坡的失稳破坏主要受结构面控制,通过结构面与边坡的倾向和倾角关系,采用 Dips 软件所得的直观分析图,可以分析边坡的破坏类型及其破坏发生的条件[8]。确定最危险破坏模式除需进行必要的工程地质测绘工作外,岩体强度是不可或缺的重要参数。通过采用基于 Hoek-Brown 理论的 Roc Lab 软件,能够有效地利用获取的地质信息,确定岩体强度。综上所述,岩质边坡稳定性的运动学分析流程如图 1 所示。

从图中可以看出,工程测绘和工程勘察是所有分析的输入条件,也是最重要的环节之一,详细的野外勘察和测绘记录将对最终的分析判断产生直接影响。在查清边坡岩体强度和结构面信息后,方可利用运动学原理,对其进行分类和统计,明确主要的破坏模式和分析模型,进而采取与之相应的边坡工程设计方案。

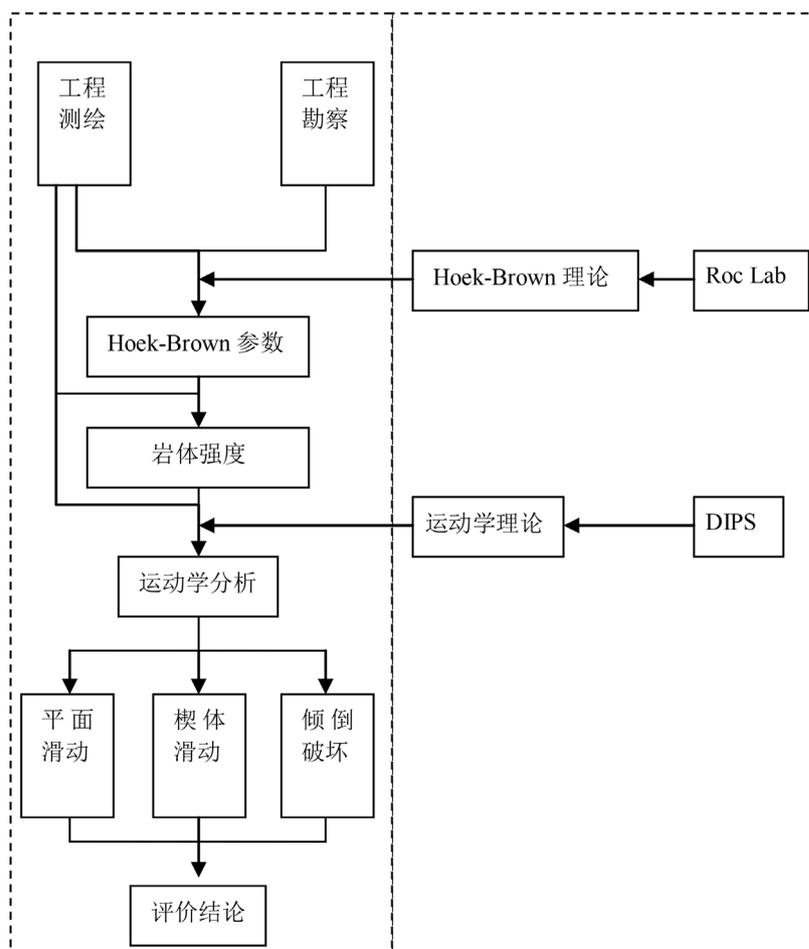


Figure 1. Procedure of kinematic analysis for flysch slope

图 1. 复理石边坡运动学分析步骤

### 2.1. Hoek-Brown 强度理论

Hoek 和 Brown 通过对大量岩石和岩体试验成果的统计分析,根据对于岩石形态的理论和实践经验,

利用试错法导出了岩体破坏时的主应力之间的关系式，即为 Hoek-Brown 强度准则[9]：

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

式(1)中， $\sigma_1$  为破坏时的最大主应力， $\sigma_3$  为最小主应力， $\sigma_{ci}$  为岩石单轴抗压强度， $m_b$  和  $s$  为岩石材料参数， $a$  为岩体常数， $m_b$ ， $s$  和  $a$  可由下式确定[10]，

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (2)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (4)$$

式(1)~式(3)中， $m_i$  为完整岩体的  $m_b$  值，定名为岩石引用指数，可按不同岩性和岩体结构选定，数值上等于岩石脆性指数， $GSI$  为地质强度指标，由工程测绘和工程勘察成果确定， $D$  岩体扰动因子。

考虑到国际上通用的强度参数以 Mohr-Coulomb 强度参数为主，包括内摩擦角和黏聚力。因此，对岩体 Hoek-Brown 强度曲线进行拟合后，岩体内摩擦角和黏聚力的表达式分别如下[9]，该过程可采用 RocLab 软件计算实现。

$$\phi = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}} \right] \quad (5)$$

$$c = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma_{3n}] (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + [6am_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}] / [(1+a)(2+a)]}} \quad (6)$$

## 2.2. 运动学理论

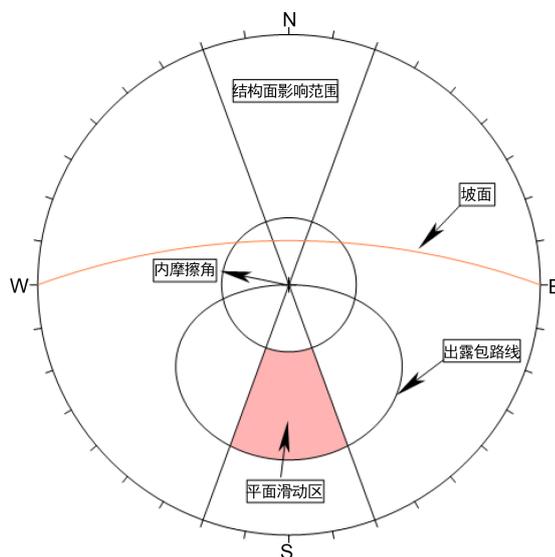
赤平极射投影可表示物体的几何要素或点、直线、平面的空间方向和它们之间的角距关系的一种平面投影。通过赤平极射投影方法可对不同岩体边坡破坏模式进行运动学分析，以球体的中心作为比较岩体边坡的几何要素(点、线、面)的方向和角距的原点，以通过球心的水平面作为投影平面，结构面对应的极点，以及结合结构面在边坡面的出露线，研究相互位置关系，进而判断边坡的主要破坏模式[11]。

### 2.2.1. 平面滑动

复理石地层边坡最显著的特点为层状结构边坡，层状结构边坡是由互相平行的结构面组成的，结构体为层状，这些结构面的连续性都较强，并且往往因存在软弱夹层而导致边坡失稳破坏。层状结构边坡的变形破坏主要表现为顺层的平面滑动。从赤平极射投影角度分析，平面滑动应满足以下 4 个必要条件：

- 结构面倾向接近坡面倾向，满足坡面倾向 $\pm 20^\circ$ 范围内。
- 结构面倾角必须小于边坡坡角，即在出露包络线内，结构面在坡面出露。
- 结构面倾角应大于岩体结构面内摩擦角。
- 不计平行于坡面倾向的侧向约束作用，对于岩石强度较低的软岩可直接忽略其影响，对于其他岩体结构，应考虑侧向结构面切割范围内的岩体。

根据以上条件，绘制赤平极射投影如图 2 所示，阴影部分为平面滑动区域。



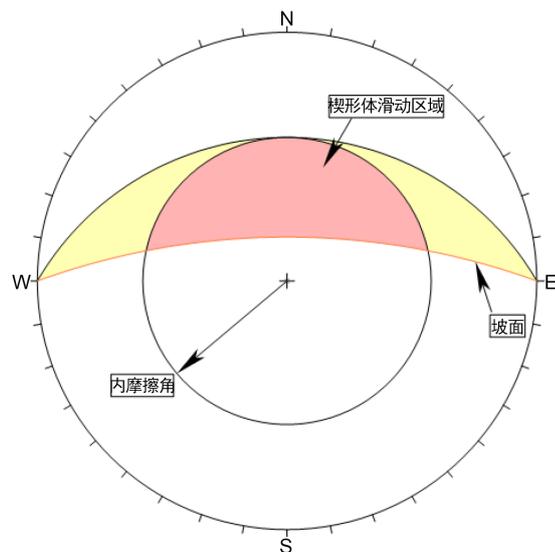
**Figure 2.** Schematic illustration of planar failure  
**图 2.** 平面滑动破坏模式

### 2.2.2. 楔形体滑动

当存在两组或两组以上不同产状的结构面组合，不稳定结构体形成多面体。无论是原生节理或构造节理，它们在岩体中往往是两组或三组互相交叉出现。因此在这类结构岩体中，边坡的滑动可能同时沿某两个甚至三个结构面向坡面滑动从而形成楔形体。从赤平极射投影角度分析，发生楔形体滑动破坏，即应具备以下三个条件：

- 两结构面交线倾向应接近边坡倾向，满足坡面倾向 $\pm 20^\circ$ 范围内。
- 两结构面交线倾角小于边坡坡角。
- 两结构面交线倾角大于结构面摩擦角。

根据以上条件，绘制赤平极射投影如图 3 所示，阴影部分为楔形滑动区域。



**Figure 3.** Schematic illustration of wedge failure  
**图 3.** 楔形体滑动模式

### 2.2.3. 倾倒破坏

在层状结构或块状结构边坡中，当主要结构面的倾角较陡，而且倾向坡内时，在平缓结构面的共同作用下，倾倒式破坏可能发生。尤其在岩体差异风化条件下，极易发生岩体倾倒破坏。不稳定边坡岩体在自重作用下，岩层反倾并向坡面以下发生弯曲，边坡的破坏体现为受拉破坏[12]。从赤平极射投影角度分析，发生倾倒破坏，即应具备以下三个条件：

- 结构面走向接近坡面走向，满足坡面走向 $\pm 20^\circ$ 范围内。
- 结构面与坡面倾向相反。
- 结构面间滑动倾角大于其摩擦角，可表述为以下公式[13]：

$$(90^\circ - \Psi_p) \leq (\Psi_f - \phi_p) \text{ 或 } (90^\circ - \Psi_f + \phi_p) \leq \Psi_p$$

其中： $\Psi_p$  为结构面倾角， $\Psi_f$  为边坡倾角， $\phi_p$  为结构面内摩擦角。

根据以上条件，绘制赤平极射投影如图 4 所示，阴影部分为倾倒破坏区域。

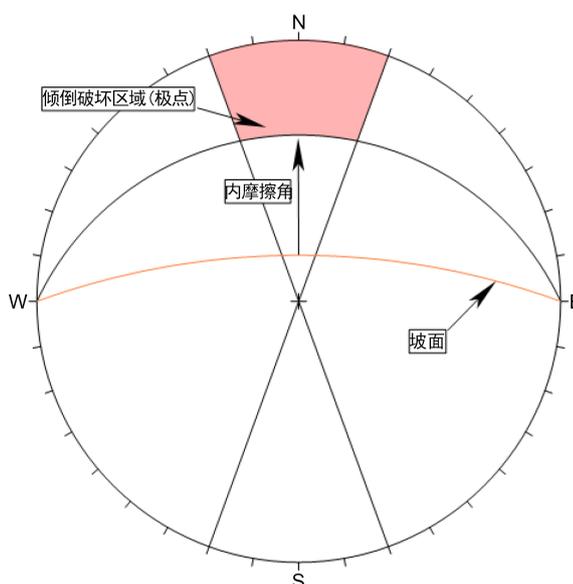


Figure 4. Schematic illustration of toppling failure  
图 4. 倾倒破坏模式

## 3. 实例分析

通过上述运动学分析流程，以阿曼拉斯玛卡兹原油储罐项目为例，该项目中海水增压泵站西南侧，需对该处自然边坡进行削方以满足场区地坪标高要求，该处将会形成近 100 m 高的岩质边坡，边坡稳定性问题十分关键。

### 3.1. 工程地质概况

泵站临近海岸，地表基岩出露，岩性为白垩纪石灰岩和泥灰岩互层，厚层至中厚层构造，岩层产状近水平，类似于“千层糕”式，通过工程勘察和测绘，判断场区地层为海相沉积，属于复理石地层。现场地质调查未发现大的构造带，一方面，由于不同时期地层组成成分的不同，造成了显著的差异风化，形成了多处断崖，尤其以平行海岸线方向为主；另一方面，边坡外侧应力释放，造成坡顶露头处节理裂隙发育。

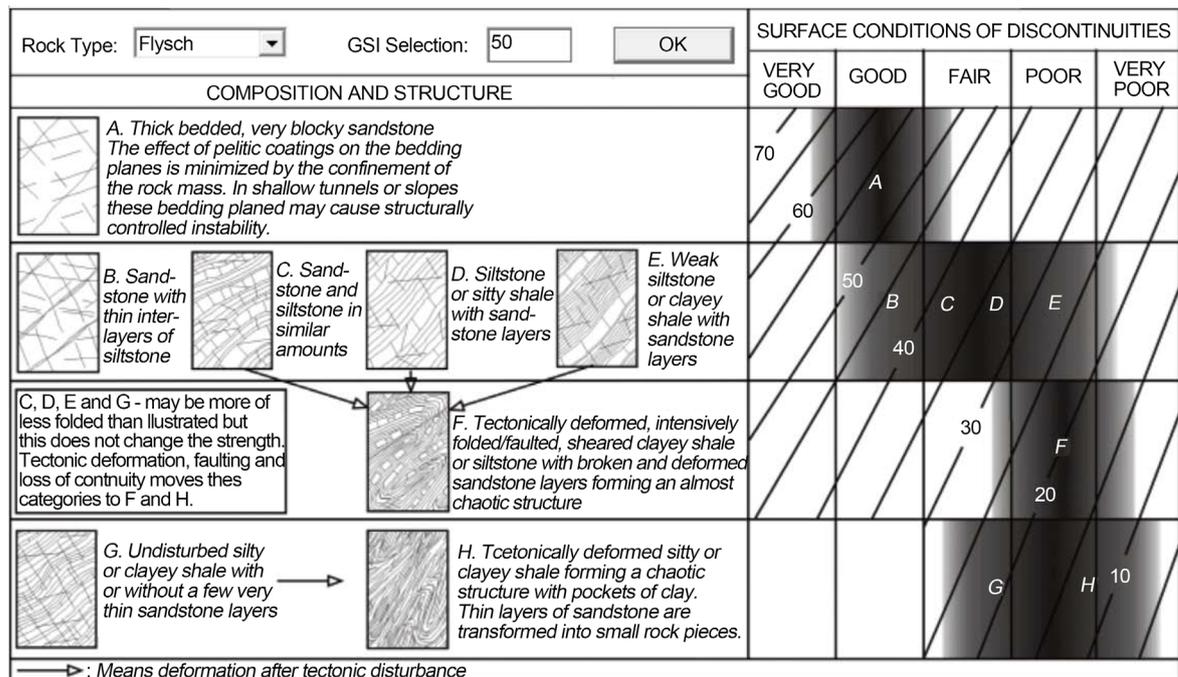
### 3.2. 岩体强度的确定

经过工程勘察，首先对场区岩石进行了大量的室内试验，同时结合工程地质测绘结果，表 1 参数作为 Hoek-Brown 强度准则输入条件。

**Table 1.** Design parameter of rock stratum  
**表 1.** 岩土参数

地质时代	地层	岩石重度	单轴抗压强度	地质力学强度指标	岩石引用指数	扰动因子	边坡高度
		$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_c$ (MPa)	GSI	mi	D	(m)
白垩纪	复理石	26	32	50	11	0.7	100

上表中，岩石重度与单轴抗压强度均为试验结果，地质力学强度指标 GSI 主要通过露头、开挖面和岩芯观测估计得出[14]，反映地质完好指数，可按图 5 中的建议选择。岩石引用指数数值上等于岩石脆性指数，根据岩性，由经验表格选取。扰动因子 D 与工程类型。岩体强度和开挖方式关联。对于边坡工程，小尺度的爆破或者控制爆破下，D = 0.7。计算后，如图 6 所示，可得出岩体强度参数。



**Figure 5.** Basic GSI chart for flysch deposits  
**图 5.** 复理石岩体地质强度指标(GSI)

由图 6 可得，经拟合后的岩体强度参数粘聚力为 0.468 MPa，内摩擦角为 34.95°，计算过程中已考虑结构面状态。因此，结构面内摩擦角 35°作为边坡运动学分析输入条件。

### 3.3. 运动学分析

现场选定两个主要的边坡坡向，分别为 NW-SE 和 ENE-WSW，因此边坡坡向 45° (代表 NW-SE，倾向 NE)和 340° (代表 ENE-WSW，倾向 NW)，通过地形图测量，边坡坡角为 70°。结构面内摩擦角选择为 35°，通过工程地质测绘，获取结构面数据，绘制节理玫瑰花图和节理极点图，如图 7 和图 8 所示。

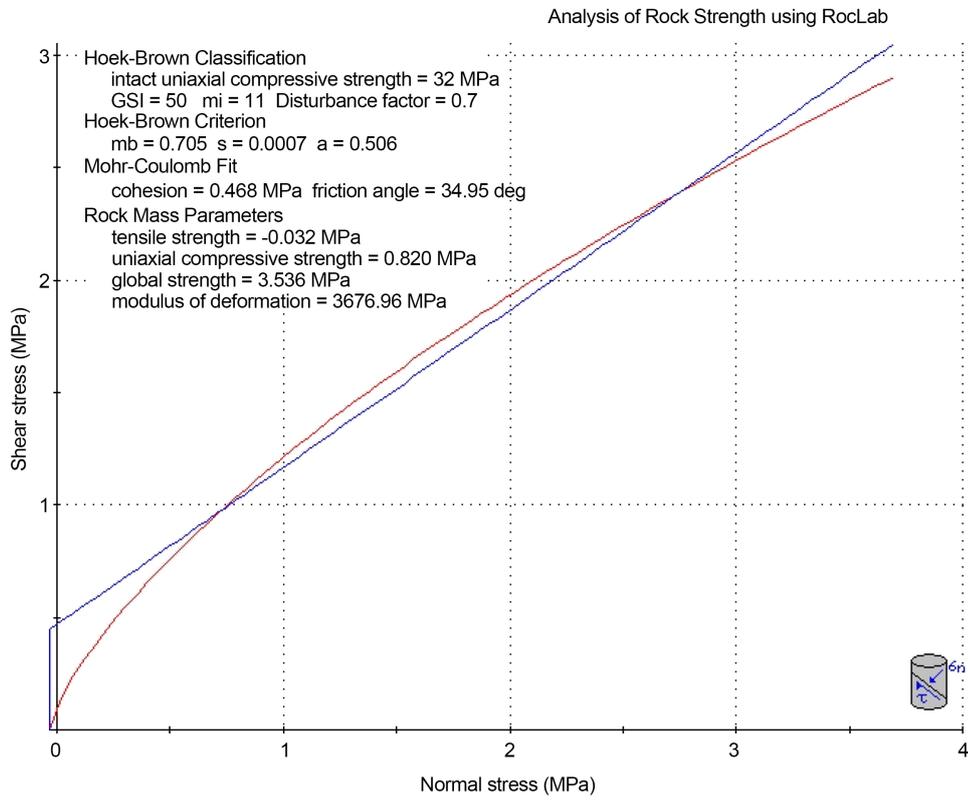


Figure 6. Result of rock strength analysis  
 图 6. 岩体强度参数结果

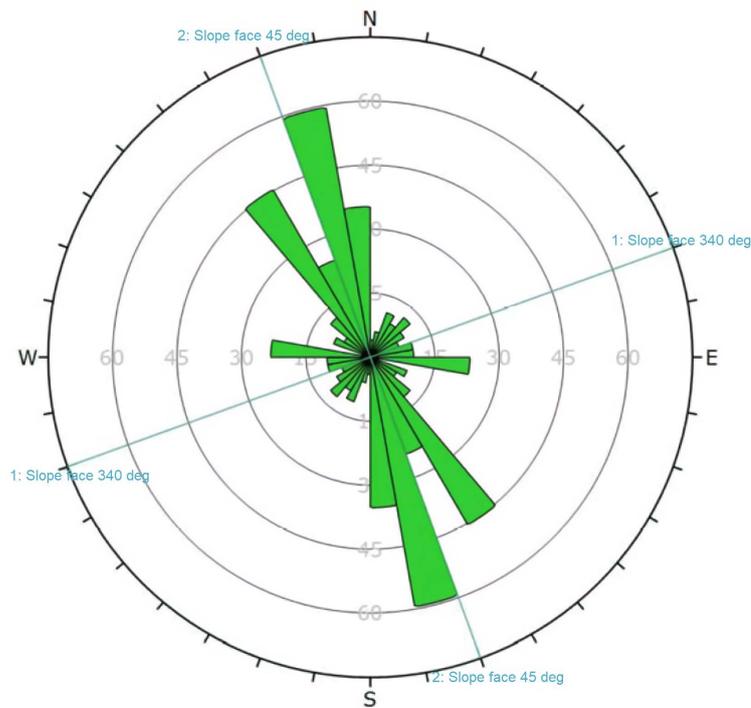
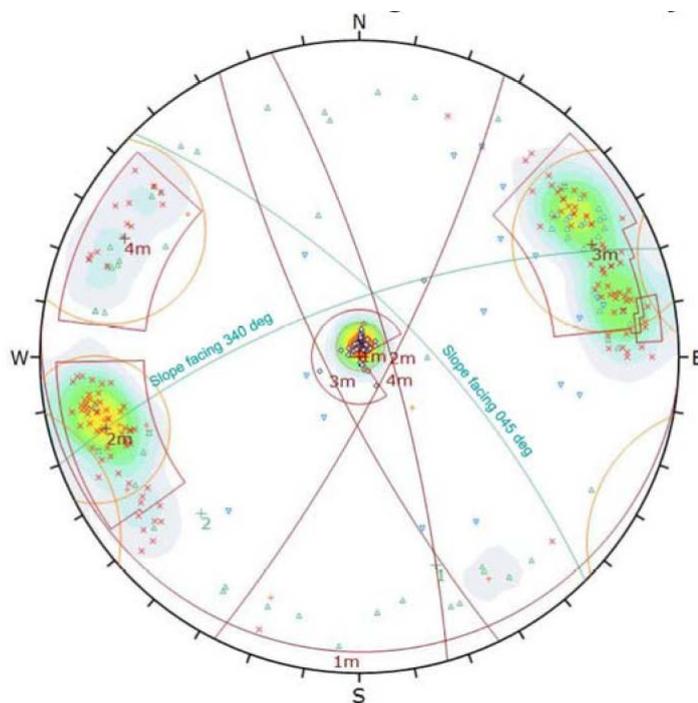
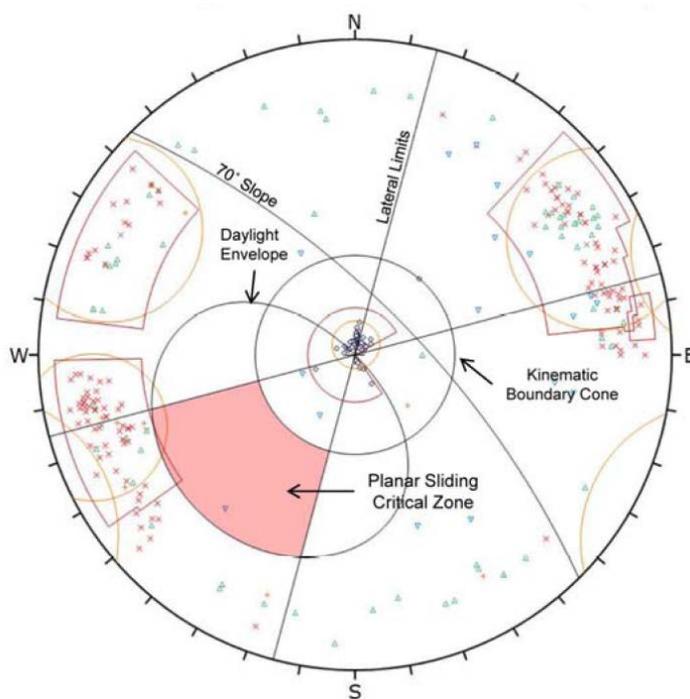


Figure 7. Discontinuity structure rosette  
 图 7. 节理玫瑰花图



**Figure 8.** Discontinuity pole plot  
**图 8.** 节理极点图

根据边坡运动学分析的过程，图 9 和图 10 为平面滑动破坏运动学分析结果，图 11 和图 12 为楔形体滑动破坏运动学分析结果，图 13 和图 14 为倾倒破坏运动学分析结果。



**Figure 9.** Planar slide failure with slope facing 45°  
**图 9.** 平面滑动破坏运动学分析结果(45°)

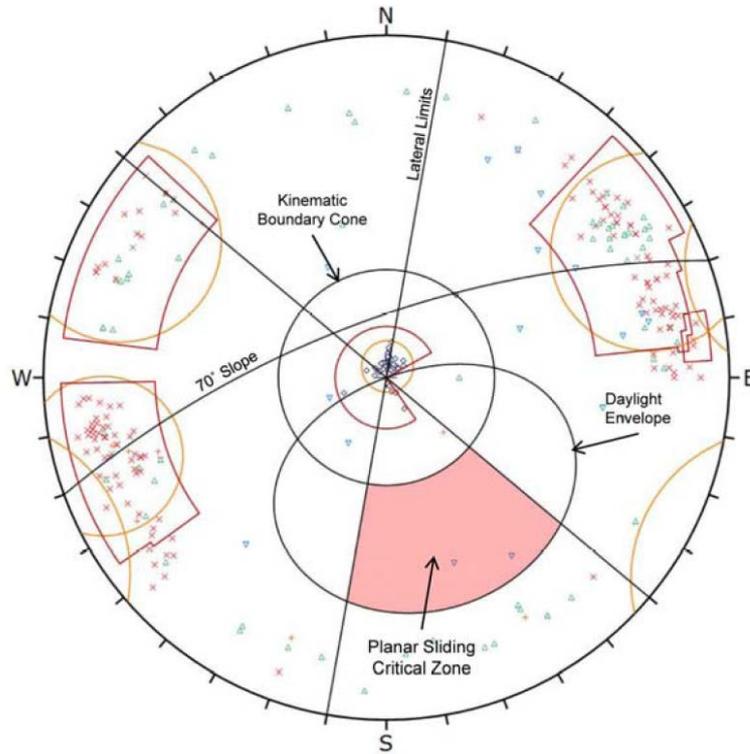


Figure 10. Planar slide failure with slope facing 340°  
图 10. 平面滑动破坏运动学分析结果(340°)

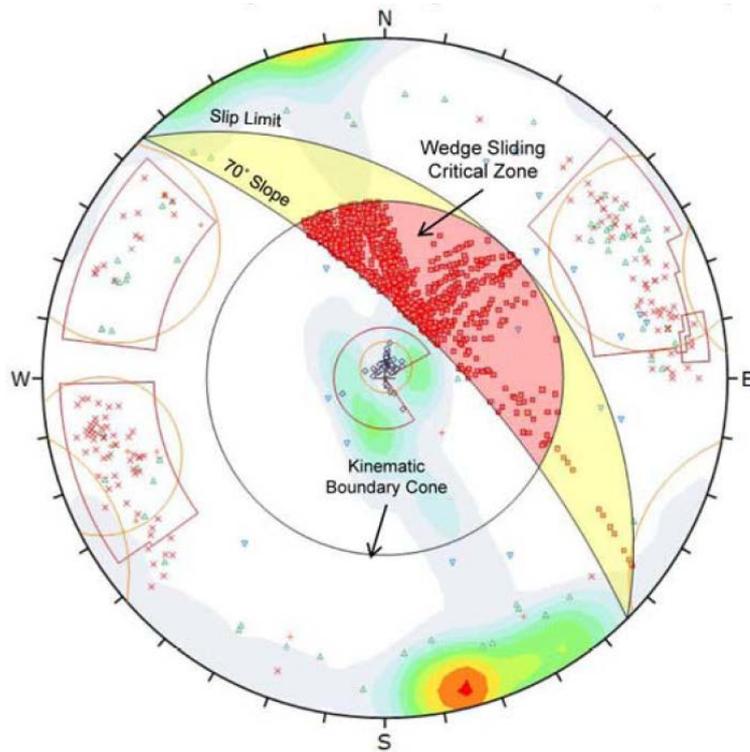


Figure 11. Wedge slide failure with slope facing 45°  
图 11. 楔形体滑动破坏运动学分析结果(45°)

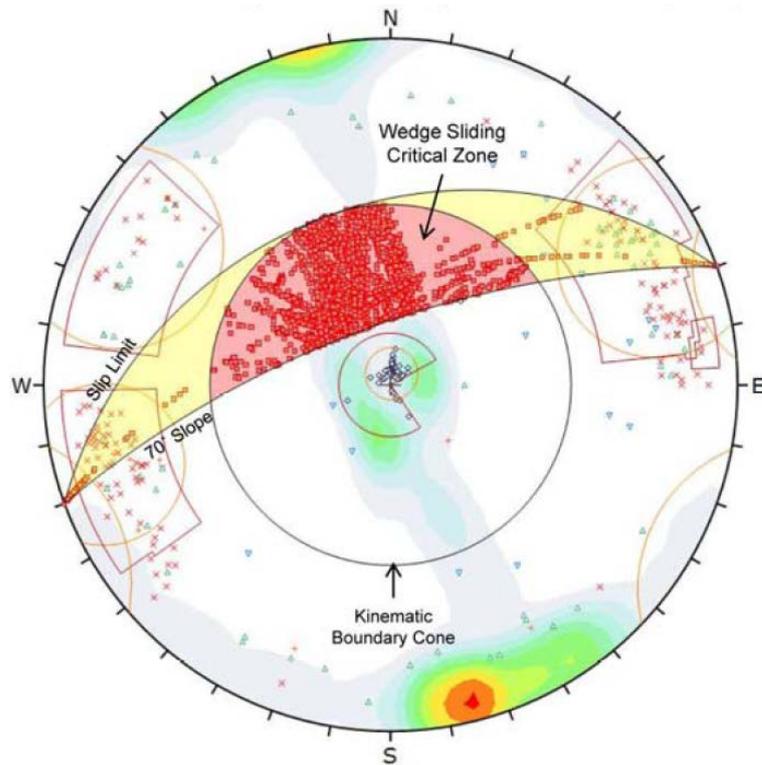


Figure 12. Wedge slide failure with slope facing 340°  
图 12. 楔形体滑动破坏运动学分析结果(340°)

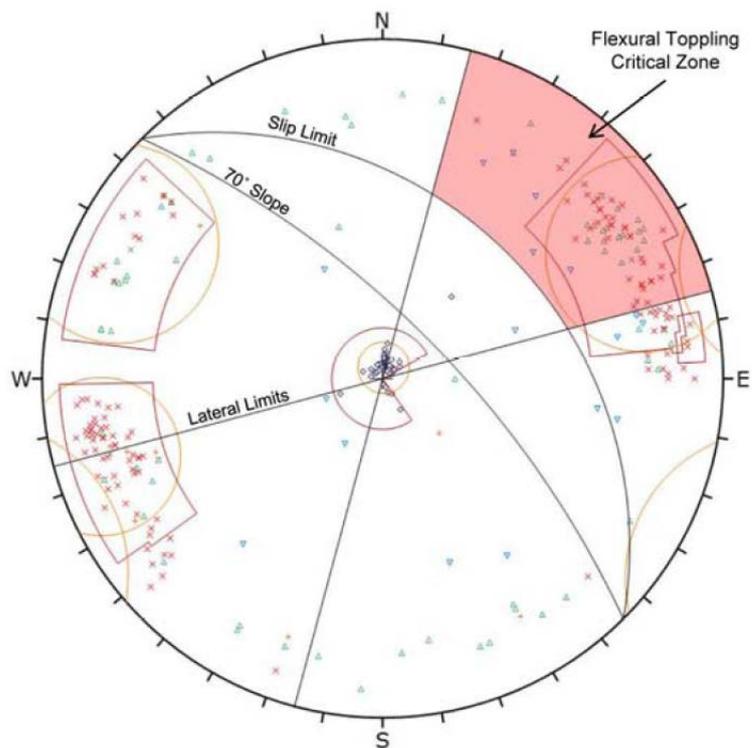
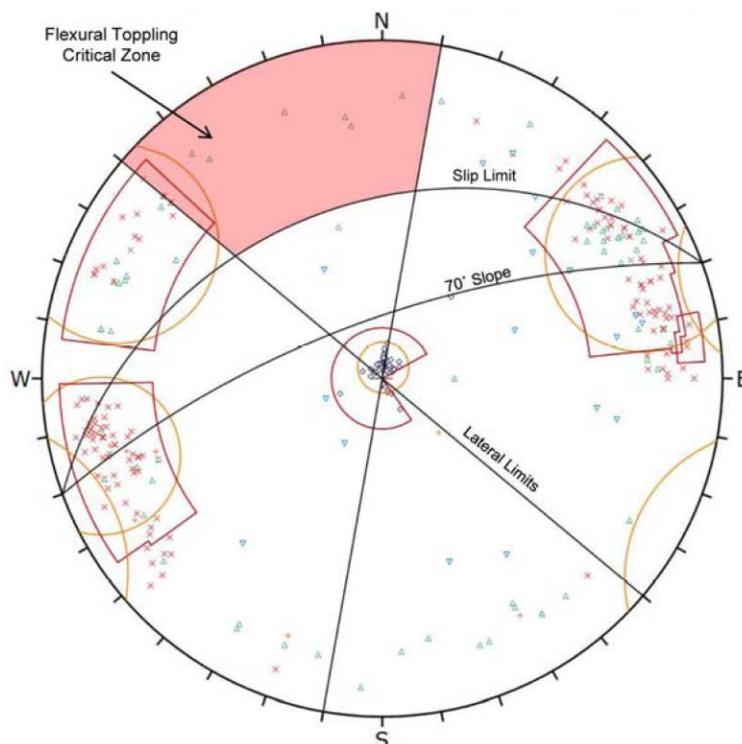


Figure 13. Flexural toppling failure with slope facing 45°  
图 13. 倾倒破坏运动学分析结果(45°)



**Figure 14.** Flexural toppling failure with slope facing 340°  
**图 14.** 倾倒破坏运动学分析结果(340°)

经过汇总统计，三种破坏模式发生概率见表 2 所示。由表可知，场区内发生平面滑动破坏和楔形体滑动破坏的概率较低，主要的边坡破坏形式为倾倒破坏，并受第 3 组节理控制。该结果对比现场断崖和边坡的形态，能够较准确地与实际相符。

**Table 2.** Summary results of kinematic stability analyses  
**表 2.** 边坡运动学分析统计

破坏模式	边坡坡向	平面滑动	楔形体滑动	倾倒破坏
破坏概率	45°	低(0.34%)	低(4.60%)	高(72.37%) 第 3 组节理
	340°	低(0.68%)	低(7.35%)	低(4%)

## 4. 结论与讨论

### 4.1. 结论

1) 复理石地层分布十分广泛，而 Hoek-Brown 准则在欧美地区已纳入规范，认可度高，且对复理石地层有针对性的研究，能够准确地获取复理石岩体强度参数。

2) 运动学分析理论在研究岩质边坡稳定性中十分简便而有效，利用赤平极射投影理论，将岩体破坏形式划分为平面滑动、楔形体滑动和倾倒破坏三个主要类型。

3) 在实际工程应用过程中，以工程勘察和工程测绘为手段，以 Hoek-Brown 准则和运动学分析理论为基础，利用 Roclab 和 DIPS 软件等工具，能够快速、准确地判断岩质边坡主要破坏模式，方法可靠，且效率很高。

4) 该方法主要用于前期定性分析和判断, 对于后期边坡设计, 仍需进一步采取极限平衡法和数值模拟等分析方法确定支护方案。

## 4.2. 讨论

1) 岩体强度不能代替结构面强度, 场地具备条件时, 尚应采取岩体结构面直剪试验, 并以此作为边坡运动学分析的输入参数。

2) 对于高陡边坡, 可利用激光雷达扫描方法采取结构面信息, 不但可以提高工作效率、确保安全, 而且可以获取更为充足和精准的地质信息。

3) 考虑到国际工程合作趋于紧密, 尚应从标准、规范、程序等多方面继续深入研究国内外工程异同, 取长补短, 以便更好地与世界接轨。

## 参考文献

- [1] 郑君长, 接道波. 复理石地层隧道 RMR 法围岩分级的特征参数取值分析[J]. 路基工程, 2017(2): 177-181.
- [2] Pollak, D., Buljan, R. and Toševski, A. (2008) General Engineering Geological Characteristics of the Kaštela (Croatia) Flysch Deposits. *II European Conference of International Association for Engineering Geology Madrid, Španjolska*, 15-19 September 2008, 90-95.
- [3] Hoek, E. and Brown, E.T. (1980) Empirical Strength Criterion for Rock Masses. *ASCE*, **106**, 1013-1035.
- [4] 宋建波, 张倬元, 于远忠, 等. 岩体经验强度准则及其在地质工程中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 12-22.
- [5] Arbanas, Ž., Grošić, M. and Briški, G. (2008) Behaviour of Engineered Slopes in Flysch Rock Mass. *1st Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium*, Perth, September 2008, 274-285.
- [6] AASHTO (2017) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. AASHTO, 1224-1230.
- [7] 张学东, 刘向飞, 衣雪峰, 等. 岩质边坡稳定性的运动学分析[J]. 水利水电工程设计, 2017, 36(2): 50-53.
- [8] 何怡, 陈学军, 王新刚. 某煤矿岩质台阶开挖边坡破坏类型分析[J]. 金属矿山, 2015(2): 151-154.
- [9] Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002) Hoek-Brown Failure Criterion—2002 Edition. *Proceedings of NARMS-TAC Conference*, Toronto, Vol. 1, 267-273.
- [10] Hoek, E. and Brown, E.T. (1997) Practical Estimates of Rock Mass Strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **34**, 1165-1186. [https://doi.org/10.1016/s1365-1609\(97\)80069-x](https://doi.org/10.1016/s1365-1609(97)80069-x)
- [11] Norrish, N. and Wyllie, D. (1996) Landslides—Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Academy Press, Washington DC, 395-415. <https://doi.org/10.1007/s00603-008-0020-2>
- [12] Amini, M., Majdi, A. and Aydan, O. (2009) Stability Analysis and the Stabilization of Flexural Toppling Failure. *Rock Mechanics Rock Engineering*, **42**, 751-782.
- [13] Goodman, R.E. and Bray, J.W. (1977) Toppling of Rock Slopes. *Proceedings Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes*, **2**, 201-234.
- [14] 高和斌. 钻探岩芯分级 Hoek-Brown 准则 GSI 在边坡工程中的应用[J]. 铁道建筑, 2016(12): 72-76.