

折线滑坡剩余下滑力的最大值与最小值

陈小平

2024年4月

陈小平 正高级工程师(勘察、岩土设计) 注册土木工程师(岩土)

电 话: 13883306175

党 派: 民主同盟

重庆设计集团市政院岩土总工

重庆大学、重庆交通大学师、重庆科技学院兼职硕士生导师

施工图审查专家

《山地岩土》撰稿人

本人在房屋勘察、水利水电勘察、隧道水文地质勘察、城市隧道勘察、越岭隧道勘察、城市轨道交通勘察等方面具有丰富的经验,在陡崖勘察、滑坡勘察和危岩勘察方面具有独到经验,在**岩土设计**、**场地咨询**、**施工图审查**等方面具有丰富经验,在**岩体力学**、**土力学**、**水文地质学**以及**边坡支挡设计**等方面有深厚的理论基础。工作足迹遍布重庆、四川、云南、广西、贵州、湖南、湖北、安徽、河南、西藏、宁夏、福建、陕西。

《重庆沙溪庙组地层岩石单桩抗压强度研究》 (岩土力学) (EI核心) 独著
《重庆沙溪庙组岩石抗剪强度的确定方法》 (工程勘察) (科技核心) 独著
《基于摩尔库伦准则的岩石地基极限承载力研究》 (地下空间与工程学报) (中文核心) 独著
《强度折减中滑坡启动阶段的动力分配原理》 (岩石力学与工程学报) (EI核心) 第一作者
《正常固结饱和粘性土抗剪强度-含水量-有效应力存在唯一性关系的证明》 (地下空间与工程学报) (中文核心) 第一作者
《粘性土的库伦土压力系数为负值的判定方法》 (建筑结构) (中文核心) 第一作者
《嵌岩桩基岩石单轴抗压强度检验方法》 (重庆大学学报) (中文核心) 第一作者

《山地岩土》: 1《追根溯源--相邻嵌岩桩的**刚性角**讨论》; 2《场坪设计与施工 你确定不是在给自己挖坑》; 3《若隐若显 滑坡的隐式解和显式解》; 4《抗震不利地段都有放大作用吗》; 5《设计变更 浅议项目建设中的地质风险》; 6《地下水与岩土工程》; 7《土体抗剪强度与坡率的关系》; 8《你强他自强,论岩石地基的临界围岩现象》; 9《浅析水土腐蚀性在地基与基础设计中的作用》; 10《基岩面起伏所带来的岩土工程问题》; 11《满足3倍桩径或5m无溶洞,嵌岩桩就是安全的吗?》; 12《拱效应在顺向坡支挡结构计算中取得重大突破》; 13《人工振动引起的塌陷问题初探》; 14《一般道路一定要换填吗》; 15《旋转挤压灌注桩在抛填土中的应用》; 16《重庆地区粘性土承载力特征值的估算方法》; 17《支挡结构的m值该如何查取?》; 18《一种检测压实填土抗剪参数的方法》; 19《滑坡稳定性系数与抗剪强度的关系》; 20《滑坡剩余推力计算中的一点新发现》; 21《抗滑桩的最小嵌固长度的探讨》; 22《楔形体对竖井的影响深度分析》; 23《质量通病中边坡部分新增问题的说明》; 24《滑坡的双参数折减法具有多解性》

获奖: 中国勘察设计协会优秀工程勘察二等奖 2次; 重庆市勘察设计协会优秀工程勘察一等奖 3次; 其他二等奖、三等奖, 4次。 **专利**: 1、一种无水钻孔声波检测装置, 实用新型, 第一发明人; 2、一种半H形抗滑桩和挡土板的联合支挡结构, 实用新型, 第一发明人; 3、一桩基检测的回弹仪, 发明专利, 第一发明人; 4、一种无水钻孔声波检测与压水渗透测试一体化装置, 发明专利, 第一发明人; 5、一种压实填土抗剪强度的检测方法, 发明专利, 第一发明人。 **规范**: 1《重庆市建设工程水文地质勘察规范》, 参编; 2、《重庆市工程地质勘察标准》, 主要编写; 3、《重庆市地基基础验收标准》, 主要编写; 4、《重庆市桩基设计标准》, 参编; 5、《重庆市地基基础设计标准》, 主要编写; 6、《重庆市地基处理标准》, 评审; **书籍**: 《注册岩土工程师执业资格考试专业案例》, 副主编。

重庆市第六届建设工程勘察设计专家
第四届超限高层建筑工程抗震设防审查专家
第二届重庆市市政公用设施抗震论证专家
重庆市勘察设计协会专家委员会成员
重庆市房屋市政工程安全和应急管理专家
重庆市土木建筑学会专家库专家
重庆市自建房安全专项整治工作专家
山地建筑场地咨询专家



Tel:13883306175



滑坡（边坡）的剩余下滑力的确定一直是滑坡防治工程中的核心问题。我国规范推荐采用传递系数法(又称不平衡推力法、剩余下滑力法等)进行滑坡剩余下滑力计算。传递系数法假定剩余推力传递方向平行于滑面，该方法计算的剩余下滑力是**最小值**，在滑坡防治时存在一定**安全隐患**。国内外的研究侧重于滑坡**稳定性分析**，通常认为稳定系数相等则剩余下滑力相等，这是一个**认识误区**。研究表明：相同的稳定系数时，剩余下滑力可能出现较大差值，甚至达50%以上，**传递系数法计算剩余下滑力存在安全隐患**。

方法1: $Fs = \frac{R}{T} = \frac{5.5}{5.0} = 1.1$, 取 $Fst = 1.35$, 剩余下滑力 $P = T - R / Fst = 5.0 - 5.5 / 1.35 = 0.92$	} 相差 20%
方法2: $Fs = \frac{R}{T} = \frac{6.6}{6.0} = 1.1$, 取 $Fst = 1.35$, 剩余下滑力 $P = T - R / Fst = 6.0 - 4.4 / 1.25 = 1.11$	

目 录

1

研究背景

2

国际通用方法

3

最大值与最小值

4

滑坡稳定系数

5

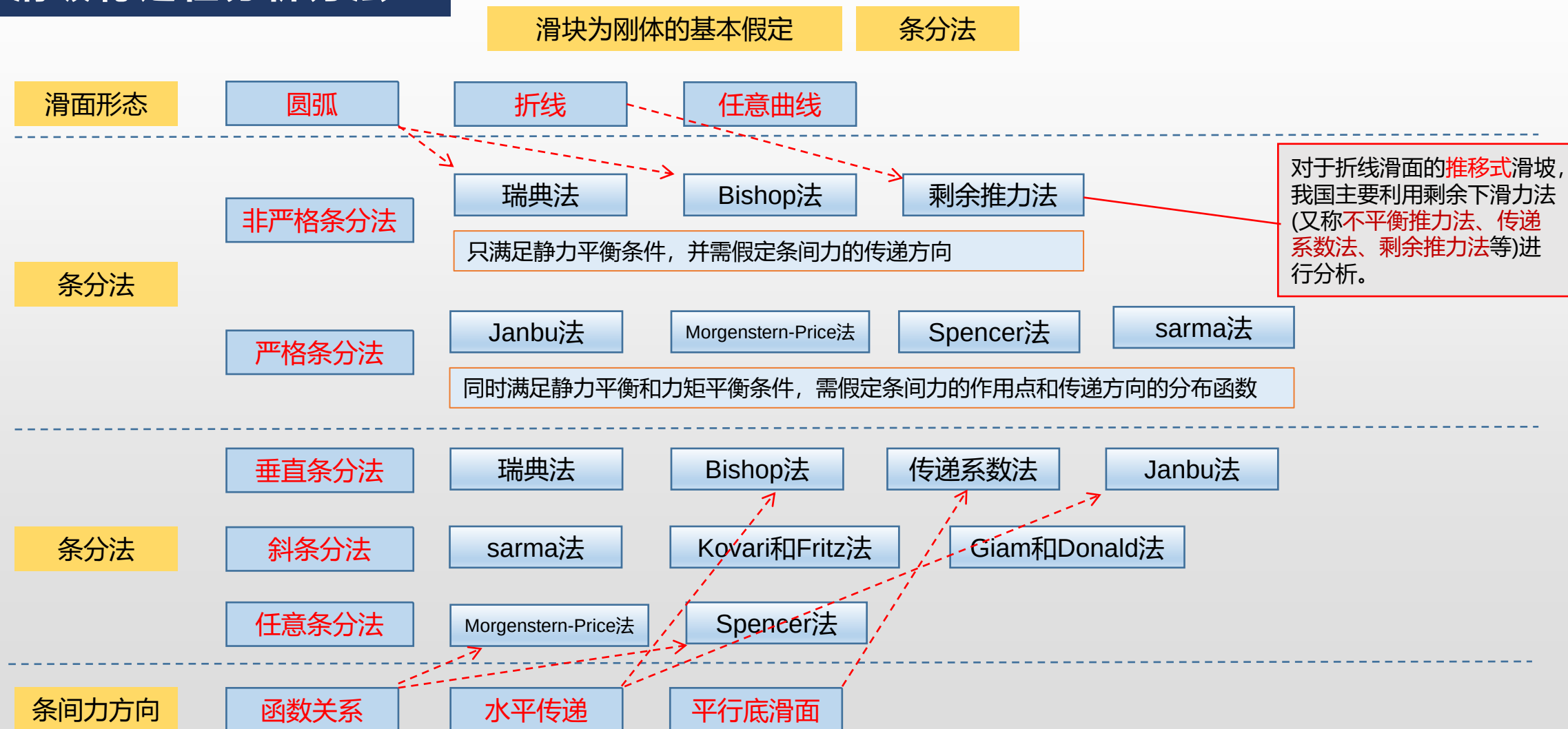
算法验证

6

结语与展望

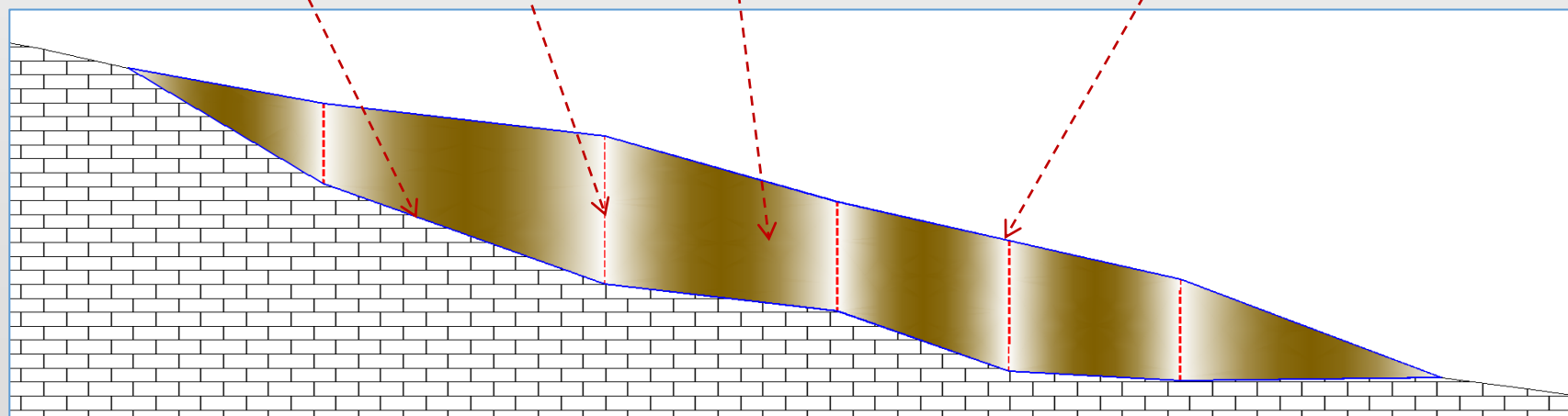
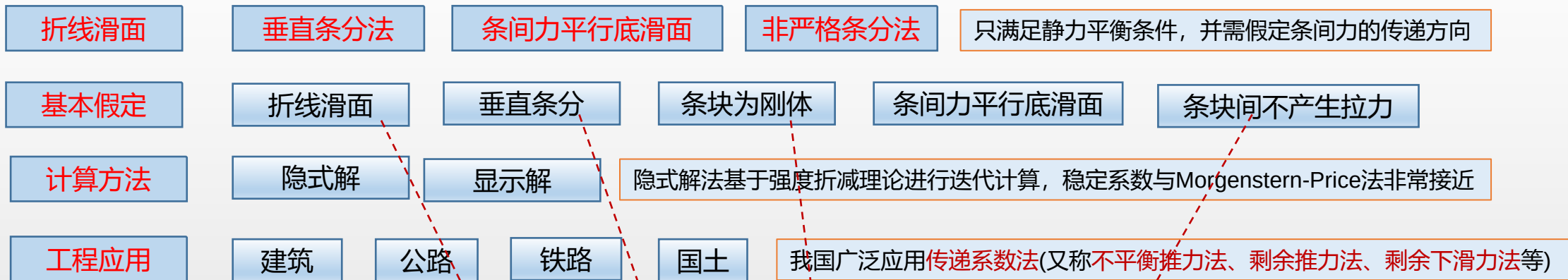
1 研究背景

1.1 滑坡稳定性分析方法



1.2 传递系数法

我国广泛应用传递系数法!



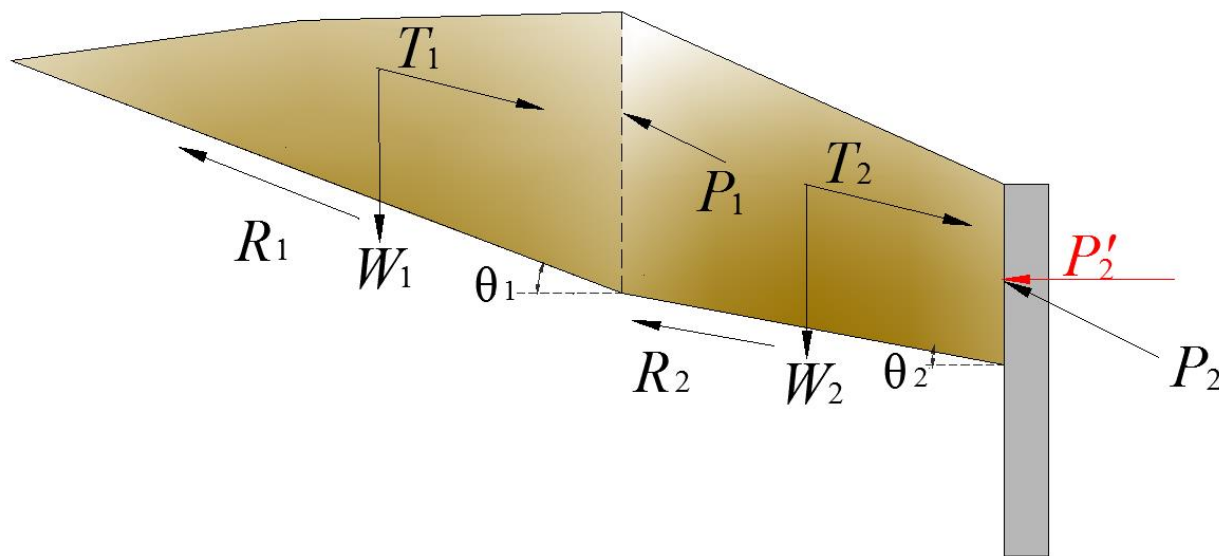
1 研究背景

重慶設計

1.3 传递系数法的剩余下滑力

传递系数法

隐式解



剩余下滑力平行滑面

$$T_1 = W_1 \sin \theta_1$$

$$R_1 = W_1 \cos \theta_1 \tan \phi + cL_1$$

$$P_1 = T_1 - R_1 / Fs$$

$$\text{第二块下滑力: } P_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) + T_2$$

$$\text{第二块抗滑力: } P_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) \tan \phi + R_2$$

$$\text{极限状态: } P_2 = P_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) + T_2 - [P_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) \tan \phi + R_2] / Fs$$

$$P_2 = P_1 [\cos(\theta_1 - \theta_2) - \sin(\theta_1 - \theta_2) \tan \phi / Fs] + T_2 - R_2 / Fs$$

$$P_2 = \psi_{1-2} (T_1 - R_1 / Fs) + T_2 - R_2 / Fs$$

$$\text{传递系数 } \psi_{1-2} = \cos(\theta_1 - \theta_2) - \sin(\theta_1 - \theta_2) \tan \phi / Fs$$

最后一块剩余下滑力水平

$$T_1 = W_1 \sin \theta_1$$

$$R_1 = W_1 \cos \theta_1 \tan \phi + cL_1$$

$$P_1 = T_1 - R_1 / Fs$$

$$\text{第二块下滑力: } P_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) + T_2 - P_2' \cos \theta_2$$

$$\text{第二块抗滑力: } P_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) \tan \phi + R_2 + P_2' \sin \theta_2 \tan \phi$$

$$\text{极限状态: } P_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) + T_2 - P_2' \cos \theta_2 = [P_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) \tan \phi + R_2 + P_2' \sin \theta_2 \tan \phi] / Fs$$

$$P_2' (\cos \theta_2 + \sin \theta_2 \tan \phi / Fs) = P_1 [\cos(\theta_1 - \theta_2) - \sin(\theta_1 - \theta_2) \tan \phi / Fs] + T_2 - R_2 / Fs$$

$$P_2' = \{ P_1 [\cos(\theta_1 - \theta_2) - \sin(\theta_1 - \theta_2) \tan \phi / Fs] + T_2 - R_2 / Fs \} / (\cos \theta_2 + \sin \theta_2 \tan \phi / Fs)$$

$$m_2 = (\cos \theta_2 + \sin \theta_2 \tan \phi / Fs) = 1 / (\cos \theta_2 + \sin \theta_2 \tan \phi / Fs)$$

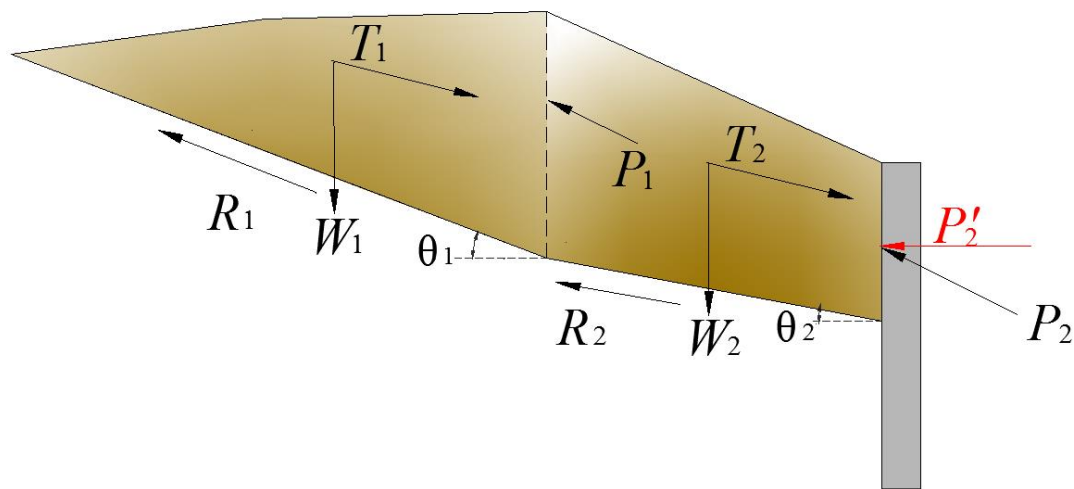
$$P_2' = \frac{P_1}{m_2} [\cos(\theta_1 - \theta_2) - \sin(\theta_1 - \theta_2) \tan \phi / Fs] + \frac{T_2}{m_2} - \frac{R_2}{m_2} / Fs$$

$$P_2' = \psi_{1-2} \frac{P_1}{m_2} + \frac{T_2}{m_2} - \frac{R_2}{m_2} / Fs$$

1.3 传递系数法的剩余下滑力

传递系数法

隐式解



剩余下滑力大小比较

$$\text{令: } tg\phi / Fs = tg\phi'$$

$$m_2 = (\cos\theta_2 + \sin\theta_2 tg\phi / Fs) = 1 / (\cos\theta_2 + \sin\theta_2 tg\phi')$$

$$= \cos(\phi' - \theta_2) / \cos\phi'$$

$$\psi_{1-2} = \cos(\theta_1 - \theta_2) - \sin(\theta_1 - \theta_2) tg\phi / Fs$$

$$= \cos(\theta_1 - \theta_2) - \sin(\theta_1 - \theta_2) tg\phi'$$

$$= \cos(\phi' + \theta_1 - \theta_2) / \cos\phi'$$

1/m的三种情况

$$\theta_2 = \phi'$$

$$1/m_2 = \cos\phi' / \cos(\phi' - \theta_2)$$

$$1/m_2 = \cos\phi'$$

$$1/m_2 < 1$$

$$\theta_2 < \phi'$$

$$1/m_2 = \cos\phi' / \cos(\phi' - \theta_2)$$

$$1/m_2 < 1$$

$$\theta_2 > \phi'$$

$$1/m_2 = \cos\phi' / \cos(\phi' - \theta_2)$$

$$\begin{cases} \theta_2 = 2\phi', 1/m_2 = 1 \\ \theta_2 > 2\phi', \theta_2 - \phi' > \phi', 1/m_2 > 1 \\ \phi' < \theta_2 < 2\phi', \theta_2 - \phi' < \phi', 1/m_2 < 1 \end{cases}$$

ψ 的三种情况

$$\theta_1 = \theta_2$$

$$\psi_{1-2} = 1$$

$$\theta_1 > \theta_2$$

$$\psi_{1-2} = \cos(\phi' + \theta_1 - \theta_2) / \cos\phi' > 1$$

$$\theta_1 < \theta_2$$

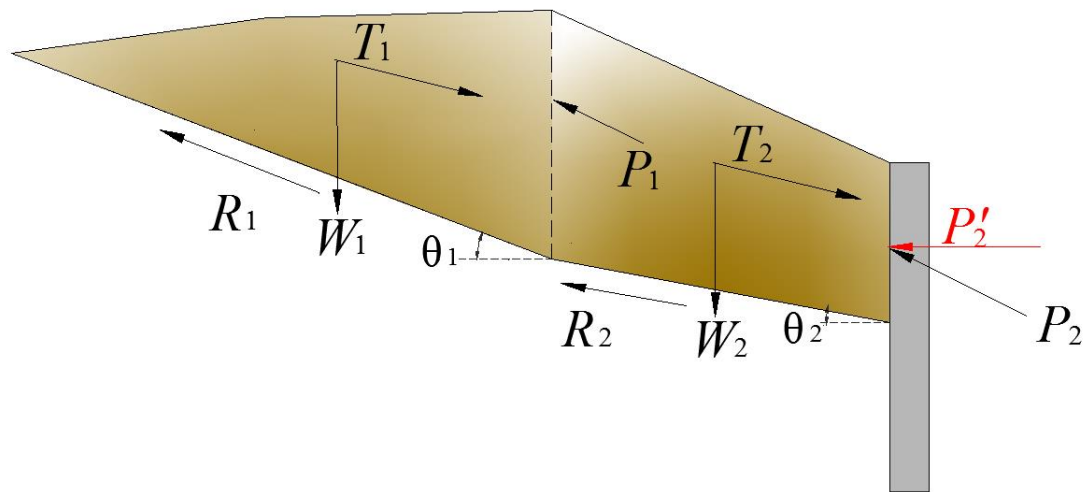
$$\psi_{1-2} = \cos(\phi' - (\theta_2 - \theta_1)) / \cos\phi'$$

$$\begin{cases} \theta_2 - \theta_1 = \phi', 1 / \cos\phi' > 1 \\ \theta_2 - \theta_1 = 2\phi', \cos(\phi' - (\theta_2 - \theta_1)) / \cos\phi' = 1 \\ \theta_2 - \theta_1 > 2\phi', \cos(\phi' - (\theta_2 - \theta_1)) / \cos\phi' > 1 \\ \phi' < \theta_2 - \theta_1 < 2\phi', \cos(\theta_1 - \theta_2 - \phi') / \cos\phi' > 1 \\ \theta_2 - \theta_1 = 3\phi', \cos 2\phi' / \cos\phi' < 1 \end{cases}$$

1.3 传递系数法的剩余下滑力

传递系数法

隐式解



设桩位置倾角陡，剩余下滑力计算是偏小的！通常 ϕ' 在 10° 以下，当 θ 大于 10° ，剩余下滑力偏小，存在安全隐患。

剩余下滑力大小比较

$$P_2 \cos \theta_2 = \psi_{1-2} P_1 \cos \theta_2 + \cos \theta_2 T_2 - \cos \theta_2 R_2 / Fs$$

$$P_2' = \psi_{1-2} \frac{P_1}{m_2} + \frac{T_2}{m_2} - \frac{R_2}{m_2} / Fs$$

$$\text{令: } tg \phi / Fs = tg \phi'$$

$$1/m_2 = 1 / (\cos \theta_2 + \sin \theta_2 tg \phi / Fs) = 1 / (\cos \theta_2 + \sin \theta_2 tg \phi')$$

$$= \cos \phi' / \cos(\phi' - \theta_2)$$

$$\cos \theta_2 - 1/m_2 = \cos \theta_2 - \cos \phi' / \cos(\phi' - \theta_2)$$

$$= \frac{\cos(\phi' - \theta_2) \cos \theta_2 - \cos \phi'}{\cos(\phi' - \theta_2)}$$

剩余推力的三种情况

当 $\theta_2 = \phi'$ 时，

$$\cos \theta_2 - 1/m_2 = 0$$

$$\cos \theta_2 = 1/m_2$$

$$P_2 \cos \theta_2 = P_2'$$

$\theta_2 < \phi'$

当 $2\theta_2 = \phi'$ 时，

$$\cos \theta_2 - 1/m_2 = \frac{\cos \theta_2 \cos \theta_2 - \cos 2\theta_2}{\cos \theta_2}$$

$$= \frac{\sin^2 \theta_2}{\cos \theta_2} > 0$$

$$\cos \theta_2 - 1/m_2 > 0$$

$$\cos \theta_2 > 1/m_2$$

$$P_2 \cos \theta_2 > P_2'$$

$\theta_2 > \phi'$

当 $\theta_2 = 2\phi'$ 时，

$$\cos \theta_2 - 1/m_2 = \frac{\cos \phi' \cos 2\phi' - \cos \phi'}{\cos \phi'}$$

$$= \cos 2\phi' - \cos \phi' < 0$$

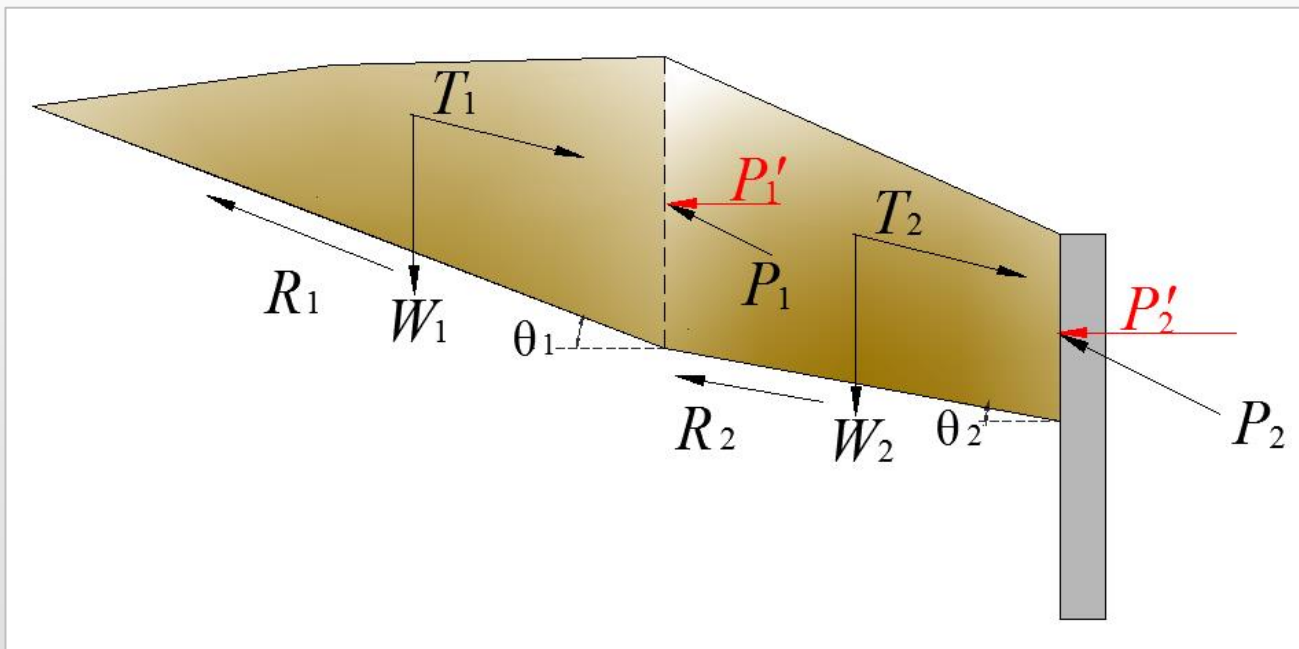
$$\cos \theta_2 - 1/m_2 < 0$$

$$\cos \theta_2 < 1/m_2$$

$$P_2' > P_2 \cos \theta_2$$

1 研究背景

1.4 水平传力法



剩余下滑力均水平方向

$$T_1 = W_1 \sin \theta_1$$

$$R_1 = W_1 \cos \theta_1 \tan \phi + cL_1$$

$$\text{第一块下滑力: } T_1 - P_1' \cos \theta_1$$

$$\text{第一块抗滑力: } P_1' \sin \theta_1 \tan \phi + R_1$$

$$\text{极限状态: } T_1 - P_1' \cos \theta_1 = (P_1' \sin \theta_1 \tan \phi + R_1) / Fs$$

$$P_1' (\cos \theta_1 + \sin \theta_1 \tan \phi / Fs) = T_1 - R_1 / Fs$$

$$m_1 = (\cos \theta_1 + \sin \theta_1 \tan \phi / Fs), \text{ Bishop 传递系数}$$

$$P_1' = T_1 / m_1 - R_1 / Fs / m_1$$

$$\text{第二块下滑力: } T_2 - (P_2' - P_1') \cos \theta_2$$

$$\text{第二块抗滑力: } (P_2' - P_1') \sin \theta_2 \tan \phi + R_2$$

$$\text{极限状态: } T_2 - (P_2' - P_1') \cos \theta_2 = \frac{(P_2' - P_1') \sin \theta_2 \tan \phi + R_2}{Fs}$$

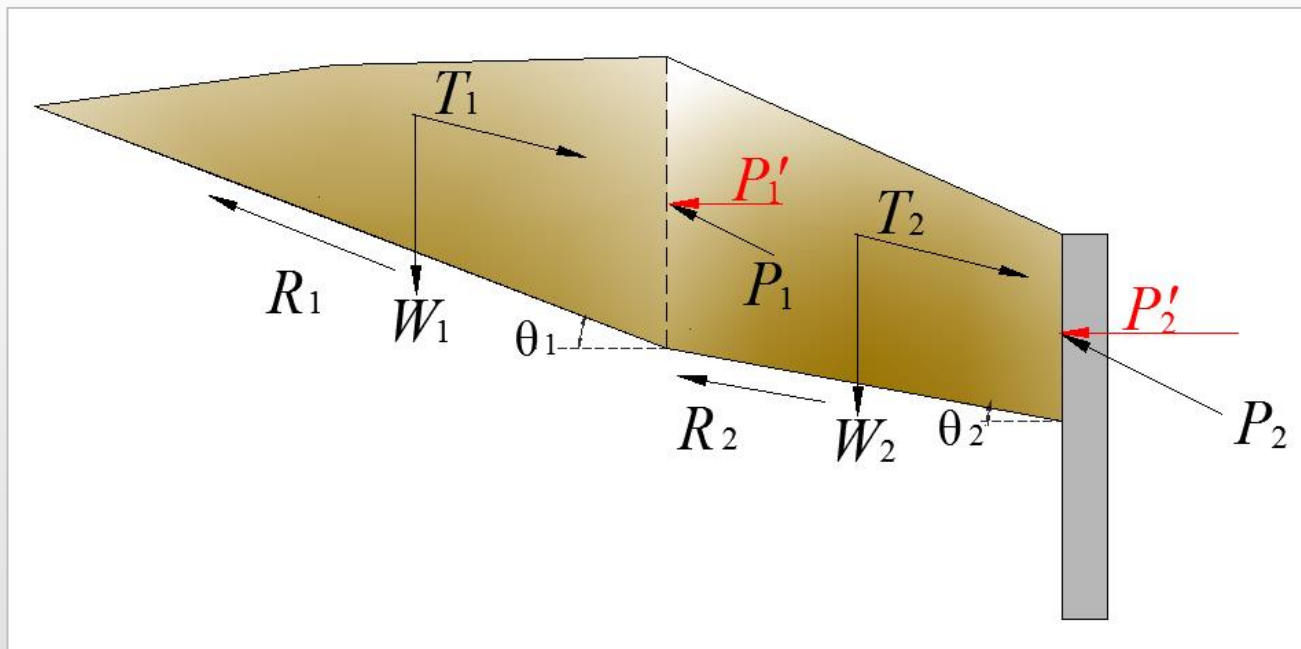
$$(P_2' - P_1') (\cos \theta_2 + \sin \theta_2 \tan \phi / Fs) = T_2 - R_2 / Fs$$

$$m_2 = (\cos \theta_2 + \sin \theta_2 \tan \phi / Fs)$$

$$P_2' = P_1' + T_2 / m_2 - R_2 / Fs / m_2$$

$$P_2' = \frac{T_1}{m_1} - \frac{R_1 / Fs}{m_1} + \frac{T_2}{m_2} - \frac{R_2 / Fs}{m_2}$$

1.5 剩余推力比较



传力方向水平

$$1/m_1 = 1/(\cos \theta_1 + \sin \theta_1 \tan \phi / Fs)$$

$$1/m_2 = 1/(\cos \theta_2 + \sin \theta_2 \tan \phi / Fs)$$

$$P_2' = \frac{T_1}{m_1} - \frac{R_1 / Fs}{m_1} + \frac{T_2}{m_2} - \frac{R_2 / Fs}{m_2}$$

传递系数法最后一块水平

$$1/m_2 = 1/(\cos \theta_2 + \sin \theta_2 \tan \phi / Fs)$$

$$\psi_{1-2} = \cos(\theta_1 - \theta_2) - \sin(\theta_1 - \theta_2) \tan \phi / Fs$$

$$P_2' = \frac{\psi_{1-2}(T_1 - R_1 / Fs)}{m_2} + \frac{T_2 - R_2 / Fs}{m_2}$$

$$P_2' = \frac{\psi_{1-2}T_1}{m_2} - \frac{\psi_{1-2}R_1 / Fs}{m_2} + \frac{T_2}{m_2} - \frac{R_2 / Fs}{m_2}$$

	T_1	R_1	T_2	R_2
系数	$1/m_1$	$1/m_1$	$1/m_2$	$1/m_2$
系数	ψ_{1-2}/m_2	ψ_{1-2}/m_2	$1/m_2$	$1/m_2$

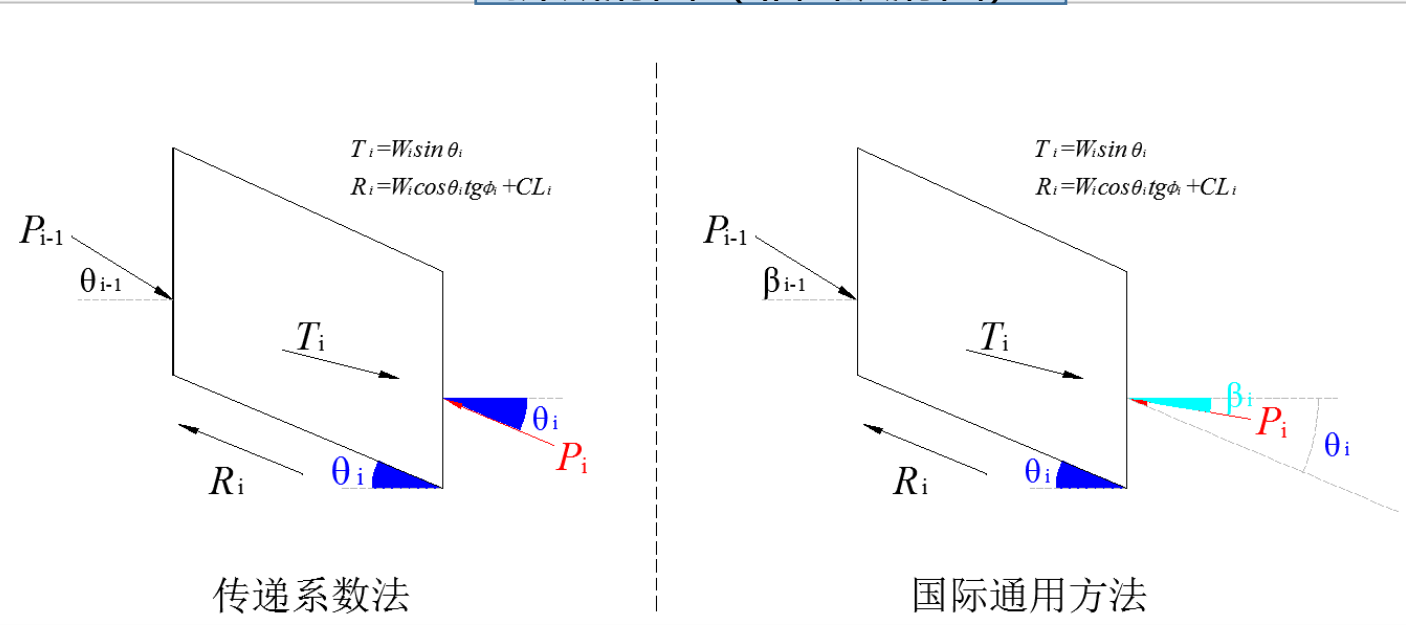
$1/m$ 一般小于1; ψ 一般小于1; ψ/m 一般小于m

当折减系数 Fs 相同时:

$$\text{水平推力法 } P_2' = \frac{T_1}{m_1} - \frac{R_1 / Fs}{m_1} + \frac{T_2}{m_2} - \frac{R_2 / Fs}{m_2} > \text{传递系数法 } P_2' = \frac{\psi_{1-2}T_1}{m_2} - \frac{\psi_{1-2}R_1 / Fs}{m_2} + \frac{T_2}{m_2} - \frac{R_2 / Fs}{m_2}$$

2.1 传力方向β假定

折减滑面（非圆弧滑面）

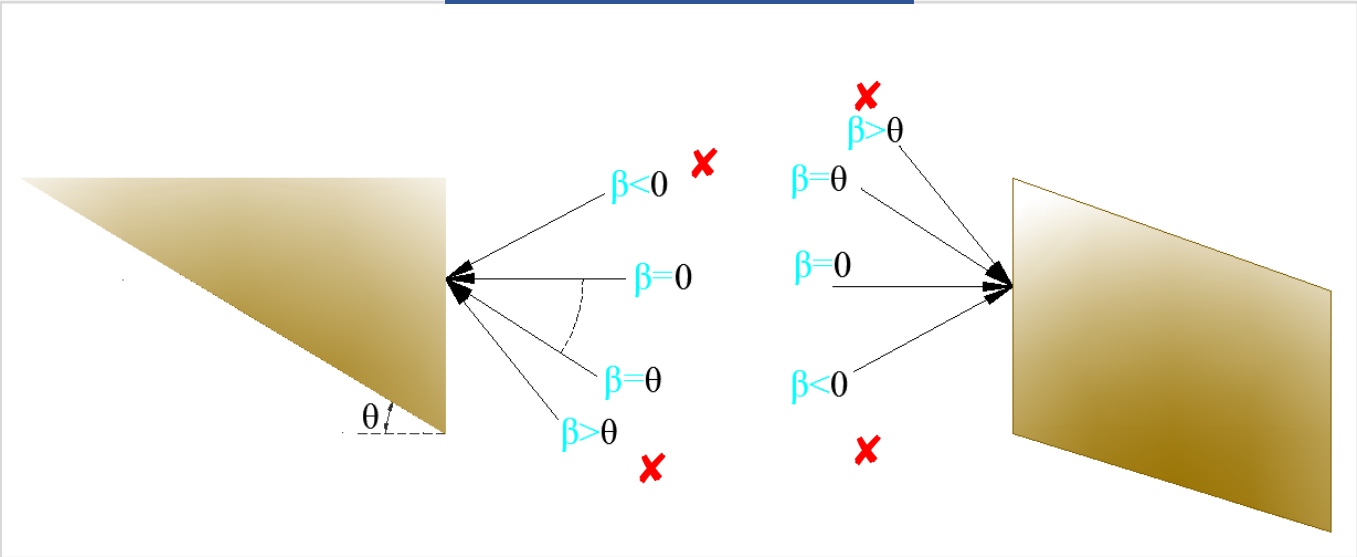


- M-P法
- Spencer法
- Janbu法

垂直条分法	Morgenstern-Price法	条间力方向	函数关系	β为函数
	Spencer法		固定值	β为常数
	Janbu法		水平传递	β=0
	传递系数法		平行滑面	β=0

2.1 传力方向 β 假定

$0 \leq \beta \leq \theta$



β 取值范围

$\beta < 0$, 为负值	不可能 $\times$, 不符合力学规律
$\beta > \theta$	不可能 $\times$, 不符合力学规律
$0 \leq \beta \leq \theta$	β 具有随机性

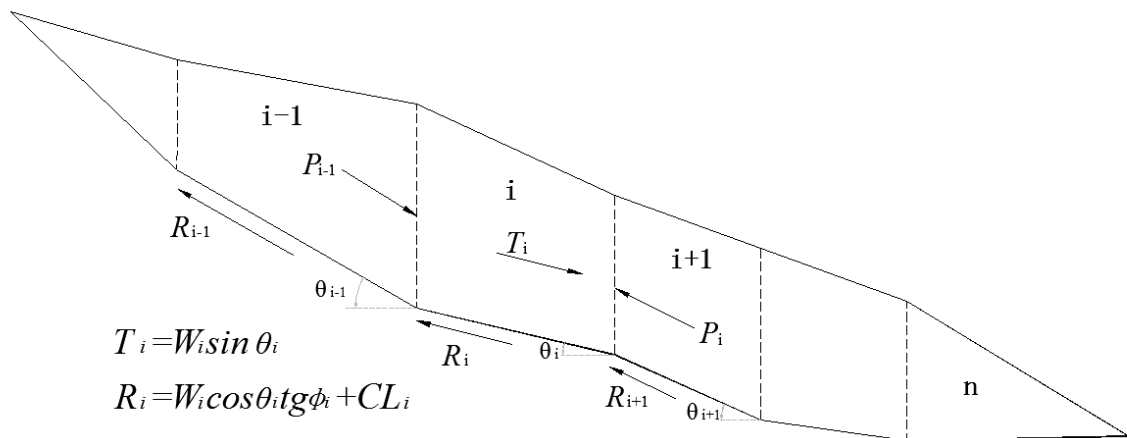
M-P法	$0 \leq \beta \leq \theta$	β 具有随机性, 很难确定
Spencer法	β 为常数	M-P简化处理方法
Janbu法	$\beta = 0$	M-P简化处理方法
传递系数法	$\beta = \theta$	M-P简化处理方法

2 国际通用方法

2.1 剩余下滑力计算公式

传递系数法

$$\beta = \theta$$



传递系数推导

$$P_i \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) + T_{i+1}$$

$$P_i \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \tan \phi + R_{i+1}$$

$$\text{极限状态: } P_{i+1} = P_i \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) + T_{i+1} - [P_i \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \tan \phi + R_{i+1}] / F_s$$

$$P_{i+1} = P_i [\cos(\theta_i - \theta_{i+1}) - \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \tan \phi / F_s] + T_{i+1} - R_{i+1} / F_s$$

$$\text{传递系数 } \psi_i = \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) - \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \tan \phi / F_s$$

$$P_1 = T_1 - R_1 / F_s$$

静力平衡条件

$$\begin{cases} P_2 = \psi_1 P_1 + T_2 - R_2 / F_s \\ \psi_1 = \cos(\theta_1 - \theta_2) - \sin(\theta_1 - \theta_2) \tan \phi / F_s \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_3 = \psi_2 P_2 + T_3 - R_3 / F_s \\ \psi_2 = \cos(\theta_2 - \theta_3) - \sin(\theta_2 - \theta_3) \tan \phi / F_s \end{cases}$$

$$\vdots$$

$$\begin{cases} P_n = \psi_{n-1} P_{n-1} + T_n - R_n / F_s \\ \psi_{n-1} = \cos(\theta_{n-1} - \theta_n) - \sin(\theta_{n-1} - \theta_n) \tan \phi / F_s \end{cases}$$

$\vdots$

$$\begin{cases} P_n = \psi_{n-1} P_{n-1} + T_n - R_n / F_s \\ \psi_{n-1} = \cos(\theta_{n-1} - \theta_n) - \sin(\theta_{n-1} - \theta_n) \tan \phi / F_s \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_n = \psi_{n-1} P_{n-1} + T_n - R_n / F_s \\ \psi_{n-1} = \cos(\theta_{n-1} - \theta_n) - \sin(\theta_{n-1} - \theta_n) \tan \phi / F_s \end{cases}$$

p_n 水平时:

$$\begin{cases} P_n = \psi_{n-1} P_{n-1} / m_n + T_n / m_n - R_n / F_s / m_n \\ \psi_{n-1} = \cos(\theta_{n-1} - \theta_n) - \sin(\theta_{n-1} - \theta_n) \tan \phi / F_s \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_n = \psi_{n-1} P_{n-1} / m_n + T_n / m_n - R_n / F_s / m_n \\ \psi_{n-1} = \cos(\theta_{n-1} - \theta_n) - \sin(\theta_{n-1} - \theta_n) \tan \phi / F_s \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_n = \psi_{n-1} P_{n-1} / m_n + T_n / m_n - R_n / F_s / m_n \\ \psi_{n-1} = \cos(\theta_{n-1} - \theta_n) - \sin(\theta_{n-1} - \theta_n) \tan \phi / F_s \end{cases}$$

剩余下滑力展开式

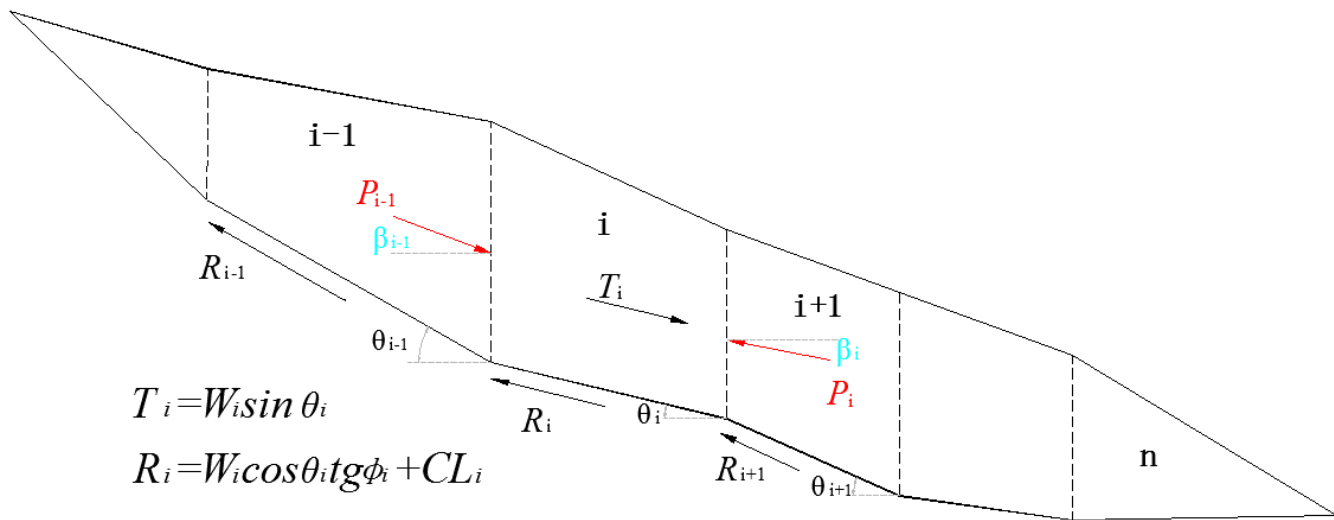
$$P_n = \psi_1 \psi_2 \psi_3 \psi_4 \cdots \psi_{n-1} (T_1 - R_1 / F_s) + \psi_2 \psi_3 \psi_4 \cdots \psi_{n-1} (T_2 - R_2 / F_s) \\ + \psi_3 \psi_4 \cdots \psi_{n-1} (T_3 - R_3 / F_s) + \psi_4 \cdots \psi_{n-1} (T_4 - R_4 / F_s) \\ + \cdots \psi_{n-1} (T_{n-1} - R_{n-1} / F_s) + T_n - R_n / F_s$$

2 国际通用方法

2.1 剩余下滑力计算公式

M-P法和Spencer法

$$0 \leq \beta \leq \theta$$



静力平衡条件

$$\begin{cases} m_1 P_1 = T_1 - R_1 / F_s \\ m_1 = \cos(\theta_1 - \beta_1) + \sin(\theta_1 - \beta_1) \tan \phi / F_s \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_2 P_2 = \psi_1 P_1 + T_2 - R_2 / F_s \\ \psi_1 = \cos(\beta_1 - \theta_2) - \sin(\beta_1 - \theta_2) \tan \phi / F_s \\ m_2 = \cos(\theta_2 - \beta_2) + \sin(\theta_2 - \beta_2) \tan \phi / F_s \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_3 P_3 = \psi_2 P_2 + T_3 - R_3 / F_s \\ \psi_2 = \cos(\beta_2 - \theta_3) - \sin(\beta_2 - \theta_3) \tan \phi / F_s \\ m_3 = \cos(\theta_3 - \beta_3) + \sin(\theta_3 - \beta_3) \tan \phi / F_s \end{cases}$$

$\vdots$

$$\begin{cases} m_n P_n = \psi_{n-1} P_{n-1} + T_n - R_n / F_s \\ \psi_{n-1} = \cos(\beta_{n-1} - \theta_n) - \sin(\beta_{n-1} - \theta_n) \tan \phi / F_s \\ m_n = \cos(\theta_n - \beta_n) + \sin(\theta_n - \beta_n) \tan \phi / F_s \end{cases}$$

$$P_n = \frac{\psi_{n-1}}{m_n} P_{n-1} + \frac{T_n}{m_n} - \frac{R_n / F_s}{m_n}$$

2.1 剩余下滑力计算公式

传递系数推导

下滑力: $P_{i-1} \cos(\beta_{i-1} - \theta_i) + T_i - P_i \cos(\beta_i - \theta_i)$

抗滑力: $P_{i-1} \sin(\beta_{i-1} - \theta_i) \tan \phi + R_{i+1} - P_i \sin(\beta_i - \theta_i) \tan \phi$

极限状态: $P_{i-1} \cos(\beta_{i-1} - \theta_i) + T_i - P_i \cos(\beta_i - \theta_i)$

$$= \frac{P_{i-1} \sin(\beta_{i-1} - \theta_i) \tan \phi + R_{i+1} - P_i \sin(\beta_i - \theta_i) \tan \phi}{F_s}$$

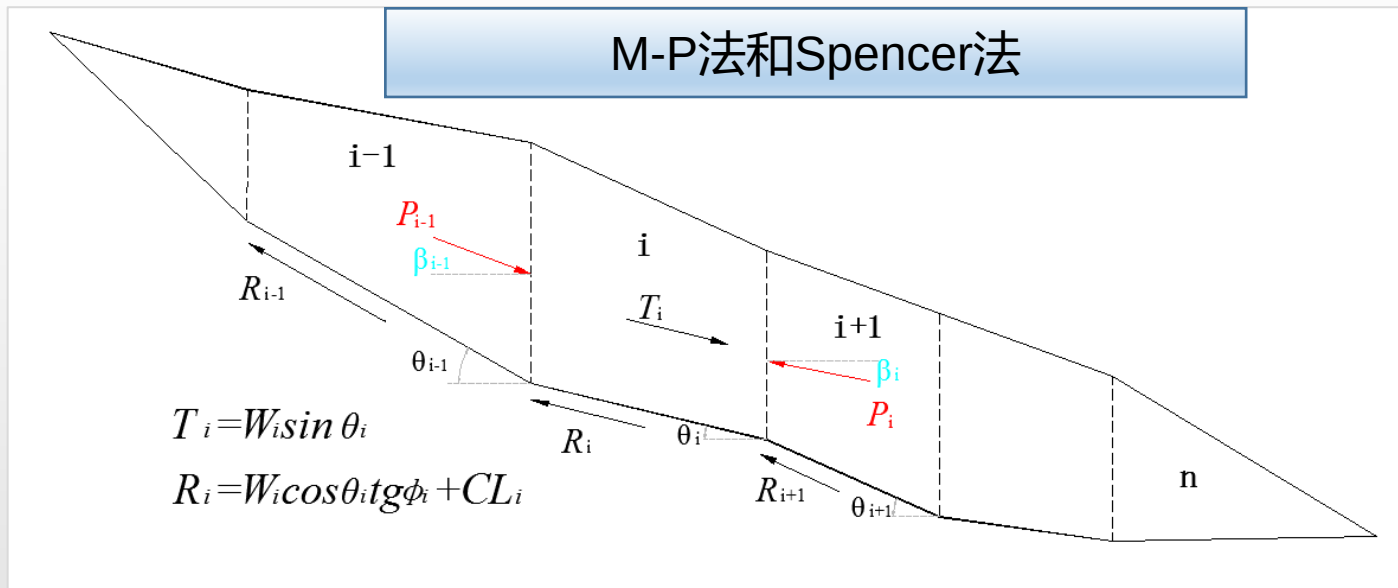
$$P_i [\cos(\beta_i - \theta_i) + \sin(\beta_i - \theta_i) \tan \phi / F_s] =$$

$$P_{i-1} [\cos(\beta_{i-1} - \theta_i) - \sin(\beta_{i-1} - \theta_i) \tan \phi / F_s] + T_i - R_i / F_s$$

$$\text{传递系数 } \psi_i = \cos(\beta_{i-1} - \theta_i) - \sin(\beta_{i-1} - \theta_i) \tan \phi / F_s \quad \leftarrow$$

$$\text{传递系数 } m_i = \cos(\beta_i - \theta_i) + \sin(\beta_i - \theta_i) \tan \phi / F_s \quad \leftarrow$$

M-P法和Spencer法



$$T_i = W_i \sin \theta_i$$

$$R_i = W_i \cos \theta_i \tan \phi_i + C L_i$$

剩余下滑力展开式

$$P_n = \frac{\psi_1 \psi_2 \psi_3 \psi_4 \cdots \psi_n}{m_1 m_2 m_3 m_4 \cdots m_n} (T_1 - R_1 / F_s) + \frac{\psi_2 \psi_3 \psi_4 \cdots \psi_n}{m_2 m_3 m_4 \cdots m_n} (T_2 - R_2 / F_s) \\ + \frac{\psi_3 \psi_4 \cdots \psi_n}{m_3 m_4 \cdots m_n} (T_3 - R_3 / F_s) + \frac{\psi_4 \cdots \psi_n}{m_4 \cdots m_n} (T_4 - R_4 / F_s) \\ \cdots + \frac{\psi_{n-1}}{m_{n-1}} (T_{n-1} - R_{n-1} / F_s) + \frac{\psi_n}{m_n} (T_n - R_n / F_s)$$

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/697133121142006106>