文章编号：1000－7598 (2014) 10－2985－10

考虑水力作用的顺层岩质边坡稳定性图解分析

夏开宗[1]，陈从新[1]，鲁祖德[1]，宋娅芬[1]，周意超[1]，罗歆婷[2]

（1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室，武汉 430071；
2. 贵州大学 土木建筑工程学院，贵阳 550033）

摘 要：通过分析顺层岩质边坡中的水力作用，建立了出流缝未被堵塞和出流缝被堵塞两种情况下顺层岩质边坡的水力学模型；推导出了用无量纲参数（Q、P、S）形式表达的边坡稳定性安全系数 F_s 的表达式；绘制了边坡后缘张裂隙充满水后几何要素岩层倾角β、张裂缝高度 Z/边坡高度 H 与无量纲参数（Q、P、S）的关系曲线，能为分析不同的边坡几何要素、水深、不同抗剪强度对边坡稳定性的影响提供方便。选取宜巴高速公路典型顺层岩质边坡进行研究，结果表明：对于出流缝未被堵塞的情况，水力作用使边坡稳定性安全系数降低程度为 33.33%，是触发顺层岩质边坡滑移破坏的主要因素；出流缝被堵塞情况下边坡稳定性安全系数要比出流缝未被堵塞情况下约降低 0.458。其研究成果对顺层岩质边坡工程设计和施工优化具有重要指导意义。

关 键 词：边坡工程；顺层岩质边坡；水力作用；稳定性图解

中图分类号：TU 457 **文献标识码：**A

Analysis of stability diagram of rock bedded slope under hydraulic pressure

XIA Kai-zong[1]，CHEN Cong-xin[1]，LU Zu-de[1]，SONG Ya-fen[1]，ZHOU Yi-chao[1]，LUO Xin-ting[2]

（1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. College of Civil and Architecture Engineering, Guizhou University, Guiyang 550033, China）

Abstract: By analyzing the effect of groundwater on rock bedded slope, the hydraulic pressure model of rock bedded slope in both cases that the outflow seam is blocked or not are established. Then the slope stability is presented and organized into a dimensionless（Q、P、S）form of expression; curve of relationship between geometric elements and dimensionless variables（Q、P、S）is drawn when the splay fracture in the tailing edge of slope is filled with water, which can bring convenience for analyzing the influence of different geometric elements, water depth, different shear strengths of rock mass on the stability of the slope. By using the relation curve, the effect mechanism of hydraulic pressure on actual bedding rock slope stability is discussed. It is shown that: the effect of hydraulic pressure on slope stability is considerably significant. For example, the safety factor is reduced by 33.33% owing to the effect of hydraulic pressure in the case of the outflow seam unblocked, which is the main external factors triggering the failure of bedding slope；and the safety factor on rock bedded slope in the case of the outflow seam is blocked reduced by about 0.458 than that the outflow seam isn't blocked. The results can provide an important guide to engineering design and construction of rock bedded slope.

Key words: slope engineering; rock bedded slope; hydraulic pressure; stability diagram

1 引 言

岩质边坡稳定性问题在交通、水电及矿山等工程领域普遍存在，是制约工程建设进程与成败的重要因素之一。随着近年来我国高速公路网的建设，沿线岩质边坡的灾变问题正日益成为人们重点关注的对象，岩质边坡失稳机制研究已成为一个急需解决的重大科研与工程课题[1]。

大量工程实践表明，边坡失稳破坏大多与水的作用有密切关系。研究表明，90%的自然边坡和人工边坡的破坏与地下水的活动有关[2−3]。天然状态下，顺层岩质边坡由于岩层倾角小于层面内摩擦角且具有后缘张裂隙，边坡在坡脚开挖后仍能保持稳定状态[4−5]。但降雨条件下，边坡受后缘张裂隙和

收稿日期：2013-07-02
基金项目：西部交通科技项目(No. 2009353342540)；国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 41202225)。
第一作者简介：夏开宗，男，1988 年生，博士研究生，主要从事边坡稳定性、地下采矿稳定性等方面的研究工作。E-mail: xiakaizhong1988@sina.com

潜在滑面中的水压力驱动，将导致边坡滑移破坏发生，具有突发性和隐蔽性，常常因引不起人们的注意而造成大规模的地质灾害。所以，进行顺层岩质边坡稳定性分析时除了考虑地下水对边坡岩土体介质的物理化学作用外，还应考虑地下水的水力作用对边坡稳定性的影响[6−12]。目前，国内外学者对水力作用下的岩质边坡稳定性做了诸多研究：Hoek 等[7]采用传统的水力学理论，给出了典型岩质边坡的水力分布，认为饱水边坡比干燥边坡的滑动稳定系数减小 70%左右；吴恒滨等[8]探讨了在不同水压分布时水深、滑动面倾角、坡高、坡顶倾角等因子对边坡安全系数影响的动态演绎规律；罗强等[9]对坡顶张拉裂缝积水、地下水渗流作用、滑面出流缝被堵塞、地震影响效应下对岩石边坡抗滑稳定性进行了研究；刘才华[10−12]等推导了边坡在水力作用下的后缘张裂隙临界充水高度和临界降雨强度的计算公式，认为当张裂隙充水高度达到临界值后，边坡在水压力作用下发生滑移破坏。以上研究虽然给出了岩质边坡在水力作用下安全系数的诸多表达式，但有时需要分析不同的边坡几何要素、水深、不同抗剪强度对边坡稳定性的影响，此时用这些公式计算就显得相当麻烦。为此，本文绘制了顺层岩质边坡在后缘张裂隙充满水后，出流缝未被堵塞和出流缝被堵塞两种情况下边坡几何要素 β 、Z/H 与无量纲参数（Q、P、S）的关系曲线，为分析边坡稳定性影响提供方便。并选取湖北沪蓉国道主干线湖北宜昌至巴东高速公路上最为典型的彭家湾顺层岩质边坡进行分析，依据绘制的曲线分析了水力作用对边坡稳定性的影响。

2 边坡的力学模型

2.1 水对边坡的静水压力作用

静水压力是指液体对其接触面上所作用的压力。强降雨时，地下水在边坡后缘张裂隙和潜在滑动面形成的渗流通道中运动时，对滑体将产生 2 个方面的静水压力作用：张裂隙静水压力、潜在滑动面静水压力。

然而，这两种静水压力的大小均取决于滑动面上的水压分布假设，由于水在边坡中的实际运动状态是未知的，如土壤、杂草或其他原因等可能使得边坡的出流缝被堵塞，从而改变滑动面的水压分布假设。鉴于此，为了研究地下水力作用对顺层岩质边坡稳定性的影响，建立了出流缝未被堵塞和出流缝被堵塞两种情况下顺层岩质边坡的水力分析模型。对于出流缝被堵塞的情况，考虑静水压力的边坡水力模型是比较明确的，如图 1 所示。

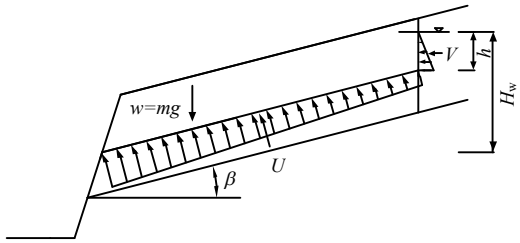


图 1 出流缝被堵塞的边坡静水压力分析模型
Fig.1 Hydrostatic pressure model of rock slope under the condition of blocked outflow seam

图 1 中 U 为边坡潜在滑动面等效静水压力，沿结构面法向作用；V 为边坡后缘张裂缝等效静水压力，其表达式分别为

$$\left.\begin{aligned} U &= 0.5\left(\gamma_{\mathrm{w}}h+\gamma_{\mathrm{w}}H_{\mathrm{w}}\right)\left(H_{\mathrm{w}}-h\right)/\sin\beta \\ V &= 0.5\gamma_{\mathrm{w}}h^2 \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

式中：h 为张裂缝充水高度；β 为岩层倾角；H_{w} 为从滑体剪出口算起的水位高度；γ_{w} 为水的重度。

对于出流缝未被堵塞的情况，其水压分布假设目前存在着不同的假设[10−16]。1977 年在 Hoek 等[13]提出最大水压在后缘竖直张裂缝底部的假设之后，刘才华[10−12]、何满潮等[14]等沿用了这一假设，如图 2 所示。

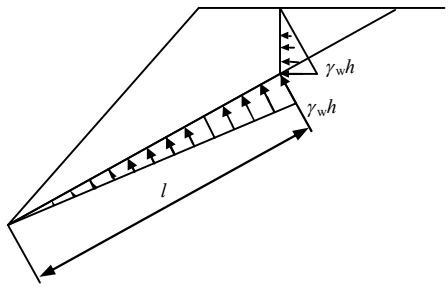


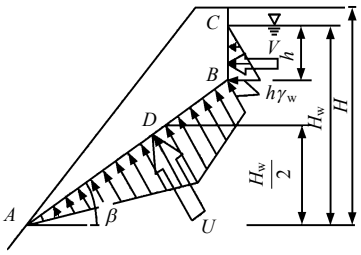
图 2 岩石边坡静水压力假设
Fig.2 Hydrostatic pressure hypothesis of rock slope

根据图 2 的假设，则岩层面上的静水压力表达式为

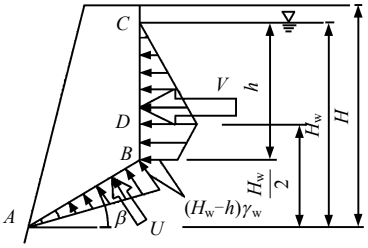
$$U=\frac{1}{2}\gamma_{\mathrm{w}}hl \quad (2)$$

式中：l 为潜在滑动面的长度。这样的假设存在明显的不合理之处。当后缘张裂缝中的水位高度 h 接近或等于 0 时，按照式（2）计算出岩层面上的静水压力 U 就接近或等于 0。而事实上，只要岩层面上水位不等于 0，U 就不会等于 0。舒继森等[15−16]给

出了比较合理的假设，如图 3 所示。



(a) $h<0.5H_w$



(b) $h>0.5H_w$

图 3　静水压力分布的新假设

Fig.3　New assumptions for hydrostatic distribution

新的水压分布假设是：A 点静水压力为 0；D 点是 1/2 水位高点，静水压力达到最大，为 $0.5H_w\gamma_w$；当 $h<0.5H_w$，B 点的静水压力为 $h\gamma_w$。

根据上述的假设，作用在岩层面上的静水压力为

$$U=\frac{\gamma_w}{4\sin\beta}H_w^2\left[1-2\left(\frac{h}{H_w}\right)^2\right] \tag{3}$$

当边坡后缘张裂缝深度很大，张裂缝中水高 $h>0.5H_w$，此时 B 点静水压力为 $(H_w-h)\gamma_w$，则后缘张裂缝上和岩层面上的静水压力分别为

$$\left.\begin{aligned} V&=\left(hH_w-\frac{H_w^2}{4}-\frac{h^2}{2}\right)\gamma_w \\ U&=\frac{(H_w-h)^2}{2\sin\beta}\gamma_w \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

舒继森等[16]对两种假设的结果进行了对比研究，证明了新的水压分布假设的合理性。本文对于出流缝未被堵塞的情况，采用新的水压分布假设。

2.2　水对边坡的动水压力作用

动水压力是指地下水在边坡中流动对岩土体介质产生的一种作用力。对于边坡岩层结构来讲，无论是否有充填物，地下水在岩层层面中流动时，对上下壁面上的动水压力为[10−12]

$$T_0=b\gamma_w i \tag{5}$$

式中：b 为岩层面的开度；i 为沿渗流方向的水力梯度。

由于动水压力是一种体积力，在用式（5）计算动水压力时，渗流的总体积可用给定范围内岩土体体积与其给水度的乘积值[17−18]。即

$$T=nlT_0=n\gamma_w lbi \tag{6}$$

式中：n 为岩层面壁岩体的给水度；l 为潜在滑动面的长度。对于如图 3(a)所示的水压分布，i 为[15]

$$i=\sin\beta+\frac{h}{l} \tag{7}$$

把式（7）带入式（6）可得

$$T=nb\gamma_w l\left(\sin\beta+\frac{h}{l}\right)=nb\gamma_w\left(l\sin\beta+h\right) \tag{8}$$

对于出流缝被堵塞的情况，由于岩层面上的水头损失为 0，所以 $T=0$。

可以看出，当张裂隙充水时，不管是出流缝被堵塞还是出流缝未被堵塞的情况，顺层岩质边坡后缘张裂缝上的静水压力、层面上的静水压力以及动水压力的大小均与张裂隙的充水高度有关。因此，在对边坡稳定性进行分析时，边坡后缘张裂隙充水高度是一个极其重要的参数。

2.3　边坡力学模型

从上述分析可知，由于出留缝被堵塞情况下的动水压力 $T=0$，所以，出流缝被堵塞情况下的水力学分析模型与考虑静水压力的分析模型相同，如图 1 所示；而出流缝未被堵塞情况下的边坡水力分析力学模型见图 4。

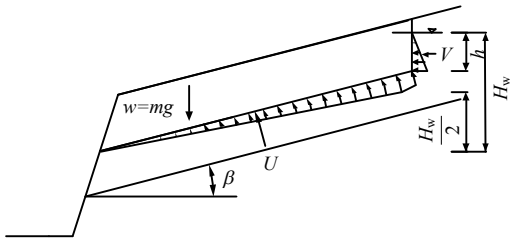


图 4　出流缝未被堵塞的边坡水力模型

Fig.4　Hydraulic pressure model of rock slope under the condition of unblocked outflow seam

3　边坡的稳定性系数图解

对于如图 1 和图 4 所示的边坡水力模型。设作用在边坡滑体上的力有自重 W、后缘张裂缝中的静

水压力V，岩层面上的静水压力U和动水压力T，岩层面的长度为l，岩层倾角为β，滑面黏聚力为c，摩擦角为φ。边坡平面滑动采用刚体滑移模型进行分析，则坡体在水力作用和重力作用下的抗滑力N和下滑力R分别为

$$\left.\begin{aligned} N &= \left(W\cos\beta - U - V\sin\beta\right)\tan\varphi + cl \\ R &= W\sin\beta + V\cos\beta + T \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

边坡稳定性系数定义为坡体抗滑力和下滑力的比值，则F_s可表示为

$$F_s = \frac{\left(W\cos\beta - U - V\sin\beta\right)\tan\varphi + cl}{W\sin\beta + V\cos\beta + T} \tag{10}$$

将U、V和T带入式（10），设$W=\gamma lZ\cos\beta=\gamma\left(H-Z\right)Z\cot\beta$（$\gamma$为岩体重度，$Z$为后缘张裂缝高度），对于出流缝未被堵塞的情况，可求得边坡的稳定性系数F_s（$h\leqslant 0.5H_w$）表达式为

$$F_s = \frac{\left\{\begin{aligned} &\gamma\left(H-Z\right)Z\cot\beta\cos\beta - \frac{\gamma_w}{4\sin\beta}H_w^2\cdot \\ &\left[1-2\left(\frac{h}{H_w}\right)^2\right] - \frac{1}{2}\gamma_w h^2\sin\beta \end{aligned}\right\}\tan\varphi + cl}{W\sin\beta + \frac{1}{2}\gamma_w h^2\cos\beta + nb\gamma_w\left(l\sin\beta + h\right)} \tag{11}$$

而当$h>0.5H_w$时，F_s为

$$F_s = \frac{\left\{\begin{aligned} &\gamma\left(H-Z\right)Z\cot\beta\cos\beta - \gamma_w\frac{1}{2\sin\beta} \\ &\left(H_w-h\right)^2\gamma_w - \left(hH_w - \frac{H_w^2}{4} - \frac{h^2}{2}\right)\sin\beta \end{aligned}\right\}\tan\varphi + cl}{W\sin\beta + \frac{1}{2}\gamma_w h^2\cos\beta + nb\gamma_w\left(l\sin\beta + h\right)} \tag{12}$$

对于出流缝被堵塞的情况，边坡的稳定性系数F_s为

$$F_s = \frac{\left(\begin{aligned} &\gamma\left(H-Z\right)Z\cot\beta\cos\beta - \frac{1}{2\sin\beta}\cdot \\ &\gamma_w\left(H_w^2-h^2\right) - \frac{1}{2}\gamma_w h^2\sin\beta \end{aligned}\right)\tan\varphi + cl}{W\sin\beta + \frac{1}{2}\gamma_w h^2\cos\beta} \tag{13}$$

式（11）～（13）计算边坡稳定性系数很简单，但是有时需要分析不同的边坡几何要素、水深、不同抗剪强度对边坡稳定性的影响，计算就相当麻烦。胡其志等[6]、夏开宗等[17]研究得出：由于层面开度b要比张裂隙充水高度h、滑面长度l要小2～5个数量级，所以对于顺层岩质边坡来说，边坡稳定性系数的降低主要与张裂缝中的静水压力和滑动面上的静水压力有关，而与滑动面上的动水压力很小，基本可以忽略不计。另外，当张裂缝积满水($h=Z$，$H_w=H$)时，边坡最可能发生失稳破坏，同时将式（11）～（13）的分子分母同除以H^2、γ_w，取$\gamma/\gamma_w=2.56$，此时可以将式（11）～（13）重新整理为如下的无量纲的形式：

$$F_s = \frac{\left(Q\tan^{-1}\beta - P - S\right)\tan\varphi + \left[c/\left(\gamma Z\cos\beta\sin\beta\right)\right]Q}{Q + S\tan^{-1}\beta} \tag{14}$$

对于出流缝未被堵塞的情况，当$h\leqslant 0.5H_w$时，式（14）中：

$$\left.\begin{aligned} Q &= 2.56\frac{Z}{H}\left(1-\frac{Z}{H}\right)\cos\beta \\ P &= \frac{1}{4\sin\beta}\left[1-2\left(\frac{Z}{H}\right)^2\right] \\ S &= \frac{1}{2}\left(\frac{Z}{H}\right)^2\sin\beta \end{aligned}\right\} \tag{15}$$

当$h>0.5H_w$时，式（14）中：

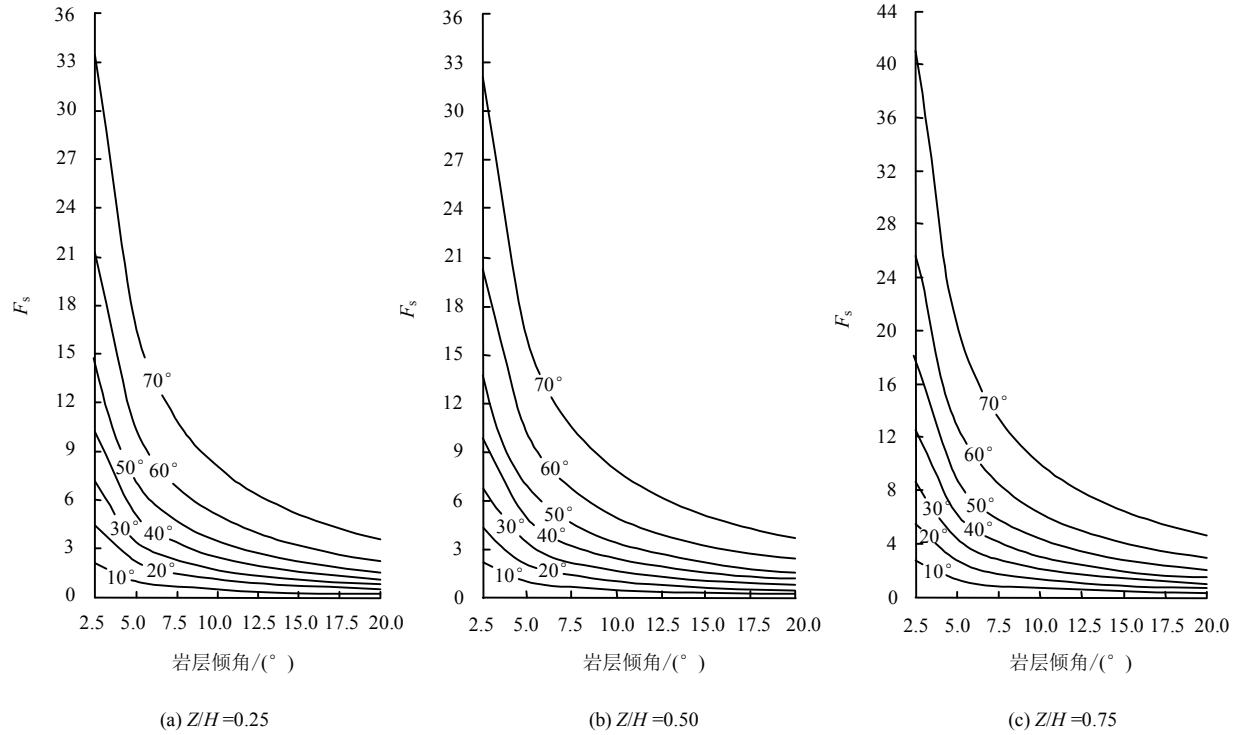
$$\left.\begin{aligned} Q &= 2.56\frac{Z}{H}\left(1-\frac{Z}{H}\right)\cos\beta \\ P &= \frac{1}{2\sin\beta}\cdot\left[1-2\frac{Z}{H}+\left(\frac{Z}{H}\right)^2\right] \\ S &= \left[\frac{Z}{H}-\frac{1}{4}-\frac{1}{2}\left(\frac{Z}{H}\right)^2\right]\sin\beta \end{aligned}\right\} \tag{16}$$

对于出流缝被堵塞的情况，式（14）中：

$$\left.\begin{aligned} Q &= 2.56\frac{Z}{H}\left(1-\frac{Z}{H}\right)\cos\beta \\ P &= \frac{1}{2\sin\beta}\left[1-\left(\frac{Z}{H}\right)^2\right] \\ S &= \frac{1}{2}\left(\frac{Z}{H}\right)^2\sin\beta \end{aligned}\right\} \tag{17}$$

Q、P、S均为无量纲参数，他们只取决于边坡的几何要素β，Z/H的函数，而不取决于边坡的尺寸大小。因此，当黏聚力$c=0$时，边坡的稳定性系数F_s不取决于边坡的具体尺寸（如图5、6所示，图中70°、60°和50°等表示内摩擦角）。此时，缓倾顺层岩质边坡在张裂缝充满水时的稳定性系数F_s可以根据各种几何要素直接利用图5、6

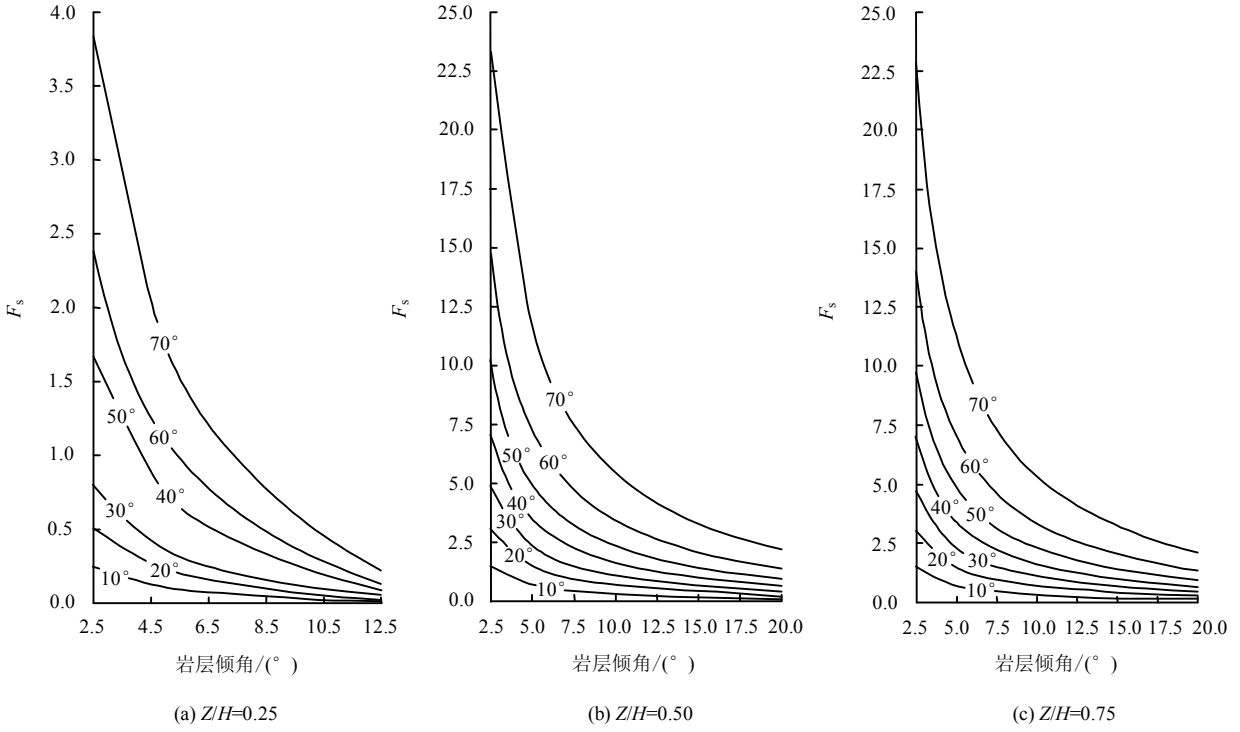
近似地查出，减少了很多计算。图 6(a)中，当岩层倾角 β 大于 12.5°时，边坡稳定性系数 F_s 出现了负值，与实际情况明显不符合，所以当 β 大于 12.5°时，可以认为 F_s=0。



(a) Z/H=0.25　　(b) Z/H=0.50　　(c) Z/H=0.75

图 5 张裂隙充满水后出流缝未被堵塞边坡稳定性系数与各要素的图表

Fig.5　Relationships between slope stability factor and each element in the case that the outflow seam isn't blocked when the splay fracture is filled with water



(a) Z/H=0.25　　(b) Z/H=0.50　　(c) Z/H=0.75

图 6　出缝被堵塞情况下的顺层岩质边坡稳定性系数与各要素的图表

Fig.6　Relationships between stability factor slope and each element in the case that the outflow seam is blocked when the splay fracture is filled with water

图 7～11 为两种情况下边坡在后缘张裂缝充满水时的各种几何要素与 Q、P、S 值的关系曲线。由此可根据边坡的各种几何要素，直接查出 Q、P、S。若要分析边坡后缘张裂缝中不同水深条件下水力作用对边坡稳定性的影响，部分 S 值（式（15）和式（17）中的）同样可以依据图 9 和图 11 查出，但 P 需要依据式（1），式（3）和式（4）计算出。

从图 7～11 可以看出，两种情况下的无量纲 P 值均随着岩层倾角 β 和 Z/H 值增大而减小，但随着岩层倾角 β 的增大，曲线的斜率是逐渐减小的，而随着 Z/H 值的增大曲线斜率是逐渐增大的(限于篇幅，图已省略)；S 值随着岩层倾角 β 和 Z/H 值的增大而增大，其斜率变化的规律与 P 值随着岩层倾角 β 和 Z/H 值的规律是一样的。从水力作用对边坡的稳定性方面来看，由于 P 值的存在直接降低了边坡的抗滑力，考虑 P 值时，边坡稳定性系数随岩层倾角 β 和 Z/H 值的增大而增大;而 S 值的存在一方面降低边坡的抗滑力，一方面增加边坡的下滑力，考虑 S 值时，边坡的稳定性系数随着边坡岩层倾角 β 和 Z/H 的增大而减小。可见，随着岩层倾角 β 和 Z/H 的增大，水力作用对边坡的稳定性是增大还是减小，取决于 P 值和 S 值对边坡稳定性的贡献程度，但从图 5、6 可以看出，随着边坡岩层倾角 β 的增大，水力作用对边坡的稳定性是逐渐减小的。从边坡稳定性系数对 P、S 值的敏感性方面来看，由于 P、S 值随着岩层倾角 β 的增大，曲线斜率是逐渐减小的，所以随着岩层倾角 β 的增大，边坡稳定性 F_s 对 P、S 值越来越不敏感，而随着 Z/H 值增大越来越敏感。即边坡稳定性系数在考虑水力作用时，随着岩层倾角 β 的增大是越来越不敏感的（从图 5、6 可以看出），而随着 Z/H 值的增大是越来越敏感的。

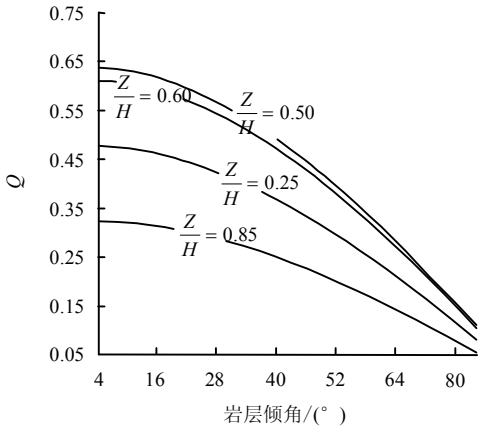


图 7 两种情况下的不同的边坡几何要素的 Q 值

Fig.7 The Q values of different geometric elements of rock slope in both cases

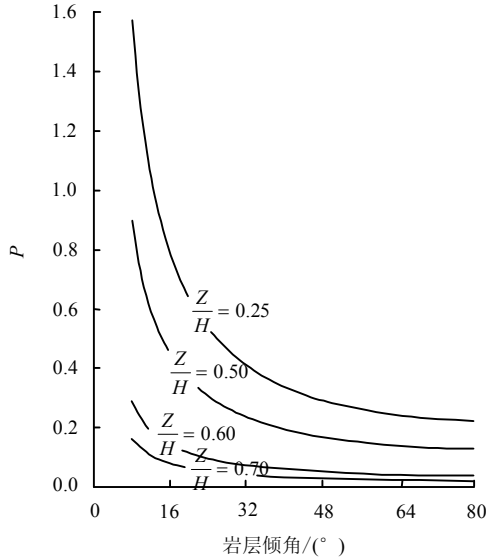


图 8 出流缝未被堵塞情况下的不同的边坡几何要素的 P 值

Fig.8 The P values of different geometric elements of rock slope in the case that the outflow seam isn't blocked

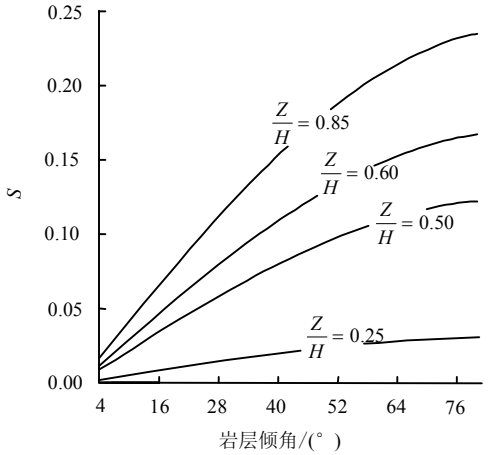


图 9 出流缝未被堵塞情况下的不同的边坡几何要素的 S 值

Fig.9 The S values of different geometric elements of rock slope in the case that the outflow seam isn't blocked

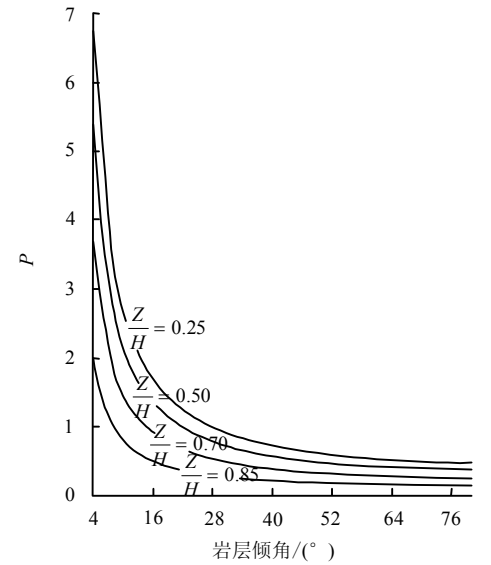


图 10 出流缝被堵塞情况下的不同边坡几何要素的 P 值

Fig.10 The P values of different geometric elements of rock slope in the case that the outflow seam that is blocked

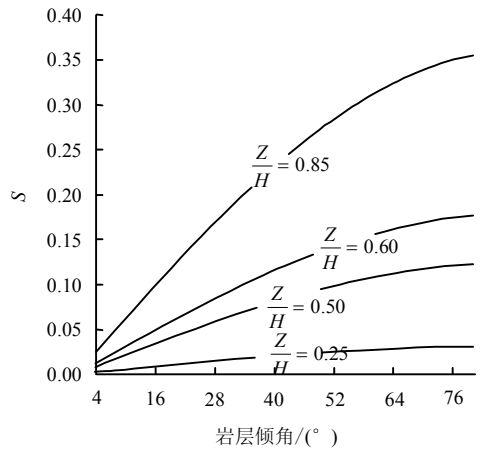


图 11　出流缝被堵塞情况下的不同的边坡几何要素的 *S* 值
Fig.11　The *S* value of different geometric elements of rock slope in the case that the outflow seam is blocked

限于篇幅，下面阐述如何利用图 7～11 分析岩体黏聚力 c 值和内摩擦角 φ 值对顺层岩质边坡稳定性的影响。设有一顺层岩质边坡，Z =49.6 m，H=99.4 m，β=24°，c=51.75 kPa，φ=21.89°。当 Z/H = 0.5 时，可由图 7～11 查得 Q、P、S 见表 1。

表 1　两种情况下的 *Q*、*P*、*S* 值
Table 1　The *Q*、*P*、*S* values in both cases

出留缝情况	Q	P	S
未被堵塞	0.58	0.31	0.051
缝被堵塞	0.58	0.92	0.051

依据表 1 所给出的 Q、P、S，改变 c 值（依次为 0、20、40、60、80、100 kPa）和 φ 值（依次为 0°、10°、20°、30°、40°、50°），得到出流缝未被堵塞情况下的边坡稳定性系数如表 2、3 所示，以及出流缝被堵塞情况下的边坡稳定性系数如图 12 所示。

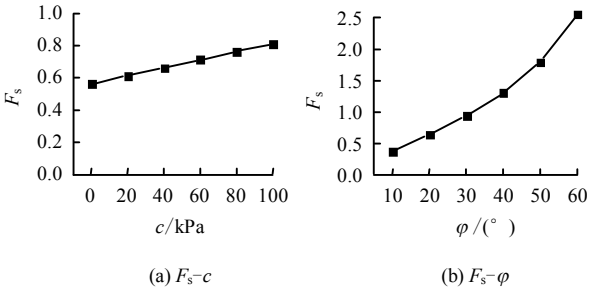
从表 2、3 和图 12 可以看出，层面内摩擦角 φ 值和黏聚力 c 值均对边坡稳定性有显著的影响，c、φ 值越大，F_s 越大。但从两者对边坡的稳定性影响来看，φ 值对边坡稳定性较为敏感，而 c 值不怎么敏感，如对出流缝未被堵塞的情况，当 c 每变化 10 kPa 时，F_s 仅改变 0.025；φ 每改变 10°，F_s 最小改变约 0.414，这为在进行边坡参数反演时提供思路，可以先根据经验类比法固定 c 值，然后反算 φ 值。

表 2　不同 *c* 值对应的 F_s 值
Table 2　Stability factor of slope under the condition of different cohesions

c/kPa	0	20	40	60	80	100
F_s	0.886	0.936	0.986	1.036	1.086	1.135

表 3　不同 φ 值对应的 F_s 值
Table 3　Stability factors of slope under the condition of different internal friction angles

φ/(°)	10	20	30	40	50	60
F_s	0.518	0.932	1.402	1.980	2.758	3.950



(a) F_s–c　　(b) F_s–φ

图 12　不同 *c*、φ 对应的 F_s 值
Fig.12　Stability factors of slope under the condition of different cohesions and internal friction angles

4　工程应用

通过对沪蓉国道主干线湖北宜昌至巴东高速公路上的沿线 20 多处规模较大的岩质边坡进行详细的地质调查，如妃台山滑坡、鹰咀岩滑坡、周家坡滑坡、彭家湾路段古崩滑坡等，这些区域植被杂草生长良好，大多数边坡表层有一层黏性土层，且发现边坡滑移破坏大多受坡体内很强的水力作用控制[19]。其中彭家湾路段的顺层岩质边坡是最为典型，严重地影响了公路的安全（如图 13 所示），由砂岩及泥岩组成，二者呈互层状，岩层倾角较缓（16°左右）。滑坡后缘形成了宽大拉裂缝，为雨水的渗入提供了有利条件，滑坡前缘为凉台河，成为地表水和地下水的排泄区。

图 13　滑坡全貌图
Fig.13　View of slope slide

各计算参数如下：岩体天然重度为 26.46 kN/m^3，饱和重度取 26.66 kN/m^3，后缘张裂缝高度 Z=43.6 m，剪出口到后缘张裂缝坡面的高度 H=87.4 m，岩层倾角 β=16°。另外，根据室内试验[20]，参数反

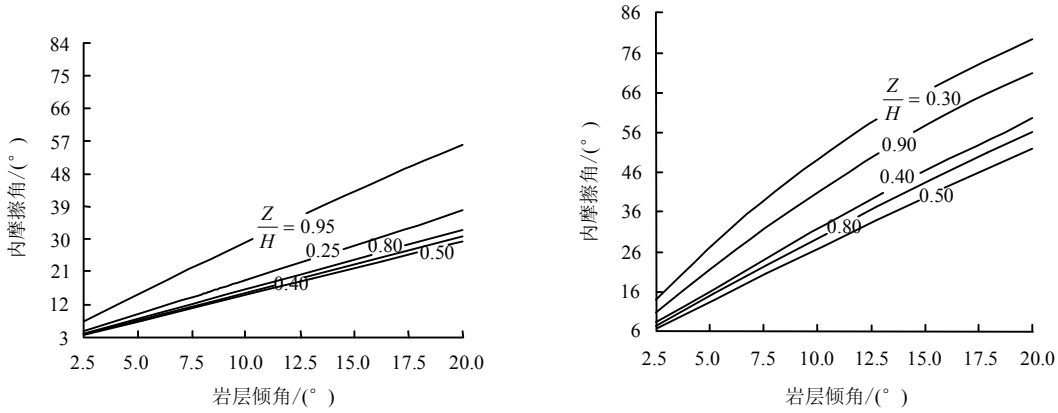
演[4−5]和工程类比综合确定滑动面的抗剪强度参数为：天然黏聚力 c =54.75 kPa，内摩擦角 φ =22.89°；饱和黏聚力 c =47.26 kPa，饱和内摩擦角 φ =20.38°。为了计算水力作用对边坡稳定性的影响，当 Z/H =0.5 时，首先由图 7～11 查得 Q、P、S 见表 4。

表 4 两种情况下的 Q、P、S 值

Table 4 The Q、P、S values in both cases

出流缝情况	Q	P	S
未被堵塞	0.62	0.45	0.034
被堵塞	0.62	1.36	0.034

又知 $c/(\gamma Z\cos\beta\sin\beta)$ =47.26/(26.66×43.6×0.961×0.276)= 0.153，在天然状态下（即 P 值和 S 值为 0），由式（14）计算得边坡的稳定性系数为 1.650，饱水状态下（仅考虑滑面力学参数取饱和值，不考虑 P 值和 S 值）的边坡稳定性系数为 1.449，比天然状态下降低了 0.201。在饱和状态+水力作用下（不仅考虑滑面力学参数取饱和值，而且还考虑 P 值和 S 值），计算出流缝未被堵塞情况下边坡稳定性系数为 0.966，水力作用使得边坡稳定性系数降低程度为 33.33%；而出流缝被堵塞情况下边坡稳定性系数为 0.508，水力作用使得边坡稳定性系数降低程度为 64.94%，比滑动面出留缝未被堵塞的情况降低约 0.458，边坡的稳定范围也应有所减小，一般为 20%～30%（如图 14 所示），在图中 Z/H 的曲线的左上方（F_s >1），边坡处于稳定状态；在 Z/H 的曲线的右下方（F_s <1），边坡可能发生失稳破坏。



(a) 滑动面出流缝未被堵 (b) 滑面出未缝被堵塞

图 14 张裂缝充满水后边坡失稳临界曲线（黏聚力 c =0 时）

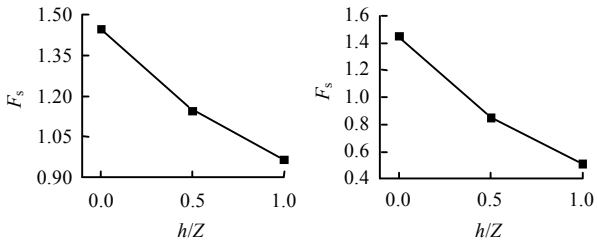
Fig.14 Critical curves for rock slope when the splay fracture is filled with water（c=0）

上述的讨论都是发生在强降水时，即后缘张裂缝中充满水后，地下水力作用对边坡稳定性的影响，而大多数情况下，边坡后缘的张裂缝中不一定都充满水。现在来讨论后缘张裂缝不同水深对彭家湾路段的顺层岩质边坡对边坡稳定性的影响。两种情况下，不同的 h/Z，P（由式（1）和式（3）或式（4）算得），S（由图 9 或图 11 查得）值见表 5 所示。再依据式（14）算得边坡稳定性系数 F_s 一同列于表 5，并将 F_s 值与 h/Z 的关系绘制成图 15 的曲线。

表 5 不同 h/Z 对应的 P 和 S 值

Table 5 The P and S values under the condition of different values of h/Z

h/Z	出流缝未被堵塞			出流缝被堵塞		
	P	S	F_s	P	S	F_s
1.0	0.45	0.034	0.966	1.36	0.034	0.508
0.5	0.40	0.009	1.148	0.91	0.009	0.854
0.0	0.0	0.000	1.449	0.00	0.000	1.449



(a) 出流缝未被堵塞 (b) 出流缝被堵塞

图 15 张裂缝中水深对边坡稳定性的影响

Fig.15 Influence of water depth in the tension crack on slope stability

从图 15 可以看出，边坡的稳定系数在水力作用的影响下随张裂缝中水深的变化而急剧下降，对顺层岩质边坡的稳定性影响很大。因此，采取措施防止水从顶部进入张裂缝，是提高边坡稳定性系数 F_s 的有效方法。另外，图中曲线斜率随着张裂缝水深的增大而斜率逐渐减小，而与文献[6，17]的研究结

果相反，这可能与边坡中的水压力分布假设有关。

综上所述，本文所绘制的边坡后缘在张裂隙充满水后各种几何要素与无量纲参数（Q、P、S）的关系曲线，能为分析边坡的不同几何要素、水深、不同抗剪强度对边坡稳定性的影响提供很多方便。依据绘制的关系曲线分析顺层岩质边坡在天然状态和饱水状态下，边坡的稳定性系数均大于安全系数 1.15，表明边坡现状稳定；而边坡在后缘张裂隙和潜在滑面中的水压力驱动下，边坡稳定性系数小于安全系数，导致了滑移破坏发生。可见，水力作用是触发顺层岩质边坡滑移破坏的主要因素。一般来说，这样计算得出的结果是偏于保守的，但所得结果能为此种类型的边坡的工程设计和施工优化提供依据，即应尽量避免坡顶裂隙的水流渗入，同时必须做好坡体内部的渗水出排工作。另外，若地下水不能正常通过滑体底部流出，边坡稳定性可能会超出计算结果的预期，这点值得岩土工程师们的关注。

5　结　论

（1）在分析顺层岩质边坡中的水力作用的基础上，建立了出流缝未被堵塞和出流缝被堵塞两种情况下顺层岩质边坡的水力学模型；推导出了用无量纲参数（Q、P、S）形式表达的边坡稳定性安全系数 F_s 的表达式。

（2）绘制了边坡后缘张裂隙充满水后几何要素 β、Z/H 与无量纲参数（Q、P、S）的关系曲线，能为分析不同的边坡几何要素、水深、不同抗剪强度对边坡稳定性的影响提供方便。

（3）工程应用表明：水力作用对边坡稳定性影响较为显著，对于出流缝未被堵塞的情况，水力作用使边坡稳定性安全系数降低程度为 33.33%，是触发顺层岩质边坡滑移破坏的主要因素；出流缝被堵塞情况下边坡稳定性安全系数要比出流缝未被堵塞情况下降低约 0.458。所以，若地下水不能正常通过滑体底部流出，边坡稳定性可能会超出计算结果的预期。

（4）顺层边坡受后缘张裂隙和潜在滑面中的水压力驱动下，将导致滑移破坏发生，水力作用是触发顺层岩质边坡滑移破坏的主要因素。工程处治和优化时，应尽量避免坡顶裂隙的水流渗入，同时必须做好坡体内部的渗水出排工作。

参 考 文 献

[1] 夏开宗, 陈从新, 鲁祖德, 等. 软硬岩互层边坡稳定性的敏感性因素分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 待刊.
XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, LU Zu-de, et al. Analysis of sensitivity factors to stability of inter-beddings of soft and hard rock slope[J]. **Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)**, to be published.

[2] 张作辰. 滑坡地下水作用研究与防治工程实践[J]. 工程地质学报, 1996, 4(4): 80－85.
ZHANG Zuo-chen. Mechanism of groundwater effect landslide stability and control construction[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1996, 4(4): 80－85.

[3] 汤平, 李刚, 徐卫军. 水及开挖卸荷对岩质边坡稳定性影响分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊 2): 21－24.
TANG Ping, LI Gang, XU Wei-jun. Influence of water and unloading on rocky slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(Supp. 2): 21－24.

[4] 中国科学院武汉岩土力学研究所. 宜巴高速公路软硬岩互层型滑坡（边坡）失稳机理与处治技术研究-数值计算报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2013.

[5] 中国科学院武汉岩土力学研究所. 宜巴高速公路软硬岩互层型滑坡（边坡）失稳机理与处治技术研究-物理模型试验[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2013.

[6] 胡其志, 周辉, 肖本林, 等. 水力作用下顺层岩质边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3594－3598.
HU Qi-zhi, ZHOU Hui, XIAO Ben-lin, et al. Analysis of stability rock bedded slope under hydraulic pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(11): 3594－3598.

[7] HOEK E, BRAY J W. Rock slope engineering[M]. London: Revised Second Edition, 1977.

[8] 吴恒滨, 何泽平, 曹卫文. 基于不同水压分布的平面滑动边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2493－2499.
WU Heng-bin, HE Ze-ping, CAO Wei-wen. Stability study of slope with planar failure based on different water pressure distributions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(8): 2493－2499.

[9] 罗强, 李亮, 赵炼恒. 水力和超载条件下锚固岩石边坡动态稳定性拟静力分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3585－3593.
LUO Qiang, LI Liang, ZHAO Lian-heng. Quasi-static analysis of seismic stability of anchored rock slope under surcharge and water pressure conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(11): 3585－3593.

下转第 3040 页