

采场底板岩层破断规律的理论研究

钱鸣高 缪协兴 黎良杰

(中国矿业大学, 徐州, 221008)

文 摘 本文针对采场底板的层状结构特征, 建立了分析采场底板突水问题的结构模型。即, 将破断前的老底视作板结构, 破断后的块状体视作“砌体梁”结构。用板的极限分析理论求出了各种边界条件下底板的破坏极限荷载和形态及最大变形点位置。用 $S-R$ 稳定理论分析了破断后底板块状岩体结构的稳定条件及范围。通过这种对采场底板结构系统性的力学分析, 提出了治理底板突水的新的理论依据。

关键词 底板突水, 底板破坏, 砌体梁, $S-R$ 稳定, 断层突水。

1 引 言

采场底板突水的威胁一直在影响着煤矿生产和安全。从 40 年代起, 国际上就开始注意底板突水机理的研究了。近年来, 国内外更加重视该项工作。许多现场资料表明, 象采场顶板那样, 可将底板分为直接底和老底两类分层结构。其中, 老底是指采动破坏范围含水层以上的一层强度最大的岩层; 直接底则为老底之上的其它岩层。因此, 老底是抵抗水压的主体结构, 直接底是老底结构上抵抗水压的反向荷载。根据我国长壁开采的实际情况, 工作面长度一般在 80~200m 之间, 老底的厚度为 2~6m, 常在工作面推进 20~70m 时发生突水事故。这样, 一般情况下, 老底岩层在卸压区的宽厚比就大于 $1/5 \sim 1/7$, 符合力学中的薄板假设。因此, 从层状岩体结构特征出发, 现在较为集中的研究是把采场底板作为板结构处理, 这为理论研究提供了切实可行的力学模型。

对采场底板结构的力学分析, 象分析采场上覆岩层结构模型一样, 不仅要研究它破坏前和破坏时的各项力学指标, 更重要的是要研究其破坏后块状结构失稳或破坏规律及最大变形点的位置。大量的统计结果表明, 80% 左右的突水发生在底板有断层的情况。因此, 有断层底板结构的破坏规律有更为重要的研究意义。本文从采场老底的板结构和带断层的板结构破坏到破坏后块状体结构的稳定性问题展开了较为系统的理论研究。

2 无断层底板的破坏规律

2.1 底板的极限破坏

随采场工作面不断向前推进, 采空区越来越大, 垂直方向减压区的底板面积随之增加。由于受垂直方向向上水压和地压的共同作用, 底板作为承载结构而言, 将达到其强度极限。

类似于老顶岩层的板结构分析^[1,2],理论和试验都已证明,老底作为四周固支的矩形板,将以如下规律发生破坏(见图1)。首先在长边中部(最大弯矩处)出现裂纹,并沿长边方向向两端扩展(见图1(a));当这两条裂纹增至一定长度(随边长比 $k = a/b$ 而变化)时,短边中部将出现裂纹,并也向两端扩展(见图1(b));当长边和短边方向裂纹不断扩展,并在四个角处由弧形曲线贯通而呈O型封闭裂纹,随后O型封闭曲线内部将很快形成与四周贯通的X型裂纹(见图1(c))。此时,四边形固支超静定板就破裂成了四块几何可移岩块,用赤平投影法分析^[3],四块体均为潜在的关键块体。

根据四边固支板的O-X型破坏形状,采用板的极限分析方法^[4],能计算出最大变形点,即裂纹叉点D(或D')的位置和板所能承受的极限荷载。设板在变形破坏过程中外力所做功为 U_e ,内力所做功为 U_i ,则分别有

$$U_e = \frac{1}{6}qa(3b-2x)\delta W \quad (1)$$

$$U_i = 4M_p\delta W \frac{a^2 + 2bx}{ax} \quad (2)$$

其中 δW 为板的最大挠度; M_p 为岩层的极限弯矩; x 为破断最大变形点D到短边的距离; q 为作用在老底岩层上的分布载荷。

如果将水压和向上地压用 p 表示,板厚为 h ,总的负载岩层高 h_1 (即除老底外,煤层以下、含水层以上的其它岩层高为 h_1),岩体平均容重为 ρg ,则

$$q = p - \rho g(h + h_1) \quad (3)$$

由 $U_e = U_i$ 得

$$q = \frac{24M_p(a^2 + 2bx)}{a^2x(3b-2x)} \quad (4)$$

按式(4)求极值,则有

$$x = \frac{a^2}{4b} \left[\sqrt{1 + 3\frac{b^2}{a^2}} - 1 \right] = \frac{1}{2}k^2\beta b \quad (5)$$

这里, $k = \frac{a}{b}$, $\beta = \sqrt{1 + 3\frac{b^2}{a^2}} - 1$ 。由式(5)代入式(4)得板的极限荷载

$$q_{\max} = \frac{12M_p}{A} \cdot \frac{1 + \beta}{k\beta(3 - k^2\beta)} \quad (6)$$

其中 $A = a \cdot b$ 。式(5)中的 x 与 k 的关系可用图2表示。从图2中可以看到,随 k 值降低, x 值越来越小。这说明采场中部岩层的变形规律越来越接近梁模式。梁的平衡与否将直接影响由板破断后组成的块状结构的稳定性。

式(6)中的极限荷载 $q_{\max}$ 与 k 的关系可用图3表示,从图中可以看到,随 k 值降低, $q_{\max}$ 值越来越大。这说明,在同样面积的四周固支矩形板中, k 的比值越接近1,即越接近正方形,所能承受的极限荷载就越小。在工程中,我们称之为顶底板破坏的成方效应。

2.2 块状岩体结构的S-R稳定理论分析

底板发生O-X型破坏后,中部岩块就形成了类似于上覆岩层的“砌体梁”模式,而

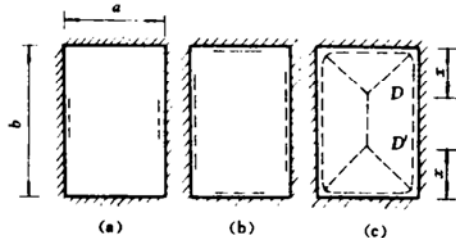


图1 老底板结构的极限破坏形式

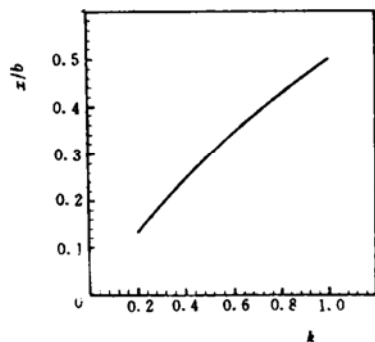
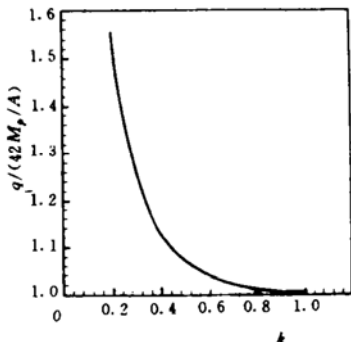
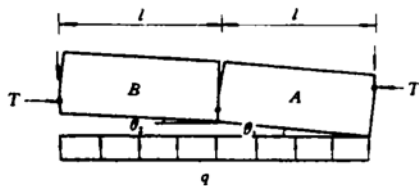
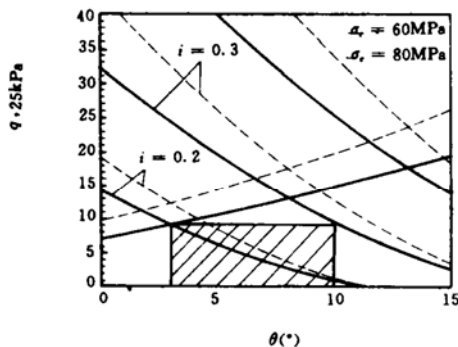
图2 x 与 k 的关系曲线图3 $q_{\max}$ 与 k 的关系曲线

图4 关键块体结构的形态与受力

图5 关键块体结构的承载能力 q 与 θ_1 的关系

临近工作面周围的块体为关键块体 (见图4), 它们靠在变形运动过程中形成的自然铰与周围互相联系在一起。一旦铰接处的摩擦和挤压平衡关系被打破, 关键块体结构就将失稳^[5]。

自然铰接处的基本失稳模式有两种: 一种是由于接触处的摩擦力不足, 块体之间发生相互滑动 (sliding) 型错开, 我们称之为滑动失稳, 或 S 型失稳; 另一种是当块体之间有较大相对转动 (rotation) 时, 接触面上的挤压应力超过岩块的挤压强度而使接触角被挤碎。我们称之为转动失稳, 或 R 型失稳。在自然条件下, 块体结构如要不发生滑动 (S) 型失稳, 必须要保持一定量的相对转角 (相对转角大, 水平挤压力 T 也大)。但如要不发生转动 (R) 型失稳, 它们的相对转角又必须小于某个极限值。因此, 关键块体结构仅在一定范围内才能保持 S-R 稳定的共存性。在此之外, 它们必将发生 S 或 R 失稳。这里, 引用文献 [5] 的成果, 分析图4关键块体结构的 S-R 稳定性。由文献 [5] 可知, 要使关键块体结构不发生滑动失稳, 必须要

$$q \leq \sigma_c (\tan \varphi + \frac{3}{4} \sin \theta_1)^2 \quad (7)$$

要使其不发生转动失稳, 必须要

$$q \leq 0.15 \sigma_c (i - \frac{3}{2} i \sin \theta_1 + \frac{1}{2} \sin^2 \theta_1) \quad (8)$$

上两式中 σ_c 为老底岩块的抗压强度; θ_1 为块体 A 的转角; i 为块体的高长比, 即 $i = h/l$; φ 为接触面上的摩擦角。

将式 (7) 和式 (8) 同时绘入图5, 就可得到关键块体结构 S-R 稳定的范围。例如,

图5中, 当 $i=0.3$, $\sigma_c=60\text{MPa}$, $q=25\text{kPa}$ 时, 块体A的S-R稳定范围为 $4^\circ < \theta_1 < 10^\circ$ 。反之, 如果块体要在某个范围内稳定, 则它承受的荷载不能超过与之相应的极限值, 这个极限值可以在图5中找出。此外, 当极限值确定后, 可以根据实际水压由式(3)求得必须的老底和负载岩层高度。否则, 结构将失稳。

2.3 三角形块稳定的块体理论分析

不能简化为梁式结构的三角形岩块, 必须用文献[3]块体理论的方法来分析其稳定性。由块体理论可知, 三角块稳定的条件为

$$q \leq h \sum_{i=1}^3 l_i \tan \varphi_i \quad (9)$$

其中 l_i 为三角块边长 ($i=1, 2, 3$); φ_i 为滑移面上的摩擦角。

3 有断层底板的破坏规律

3.1 倾向断层

见图6, 沿工作面方向的断层称之为倾向断层。断层的倾角方向对底板的破坏规律会产生很大影响, 见图6(b)(c)。图6(b)中, 由于B部变形量比A部大, 因而A, B两部分板互不约束, 我们称此断层为I型断层, 断层边界可以作为自由边处理。图6(c)中则相反, B部垂直方向变形要受到A部的约束, 我们称这种断层为II型断层, 断层边界可以作为简支边处理。

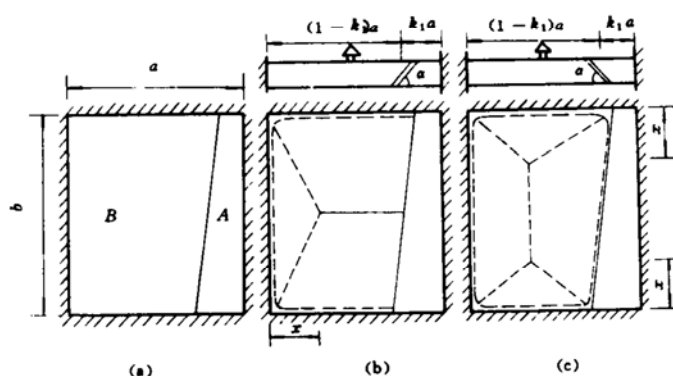


图6 倾向断层及底板结构破坏规律

理论和试验分析可知, 如图6(b)所示的三边固支, 一边自由的四边形板, 将以O-Y型规律破坏。类似于四边固支板极限分析方法, 可得到载荷计算公式

$$q_{\max} = \frac{12M_p(b^2 + 4a'x)}{b^2x(3a' - x)} \quad (10)$$

其中 $a' = (1 - k_1)a$, 并由式(10)求极值得

$$x = \frac{b^2}{4a'} \left(\sqrt{1 + 12 \frac{a'}{b^2}} - 1 \right) \quad (11)$$

如 $a'/b=1$, 由式(11)可求得 $x=0.65a'$, 代入式(10)可得 $q_{\max}=28.8M_p/A$ 。与四边固支板比较, 此极限荷载仅为它的0.68倍。说明有断层底板比无断层情况更容易破坏。

如图6(c)所示, 三边固支、一边简支的四边形板将以O-X型规律破坏。同样, 我们可求得

$$q_{\max} = \frac{12M_p(2a'^2 + bx + 4x^2)}{a'^2x(3b - 2x)} \quad (12)$$

$$x = \frac{2a'^2}{7b} \left[\sqrt{1 + \frac{21}{4} \frac{b^2}{a'^2}} - 1 \right] \quad (13)$$

如 $a'/b = 1$, 则有 $x = 0.43b$, $q_{\max} = 36.7M_p/A$ 。此时的极限载荷是三边固支、一边自由板的 1.28 倍, 是四边固支板的 0.87 倍。这说明三边固支、一边简支板的承载能力强于前者而弱于后者。

3.2 走向断层

见图 7, 沿工作面推进方向的断层称之为走向断层。与倾向断层相同, 走向断层也有断层倾角问题, 也须分为图 7 (b) I 型断层和图 7 (c) II 型断层两种情况讨论。这两种情况也分别对应于 O-Y 型和 O-X 型破坏。

对应图 7 (b) 有

$$q_{\max} = \frac{12M_p(a^2 + 4b'x)}{a^2x(3b' - x)} \quad (14)$$

$$x = \frac{a^2}{4b'} \left[\sqrt{1 + 12 \frac{b'^2}{a^2}} - 1 \right] \quad (15)$$

对应图 7 (c) 有

$$q_{\max} = \frac{12M_p(2a^2 + b'x + 4x^2)}{a^2x(3b' - x)} \quad (16)$$

$$x = \frac{2a^2}{7b'} \left[\sqrt{1 + \frac{21}{4} \frac{b'^2}{a^2}} - 1 \right] \quad (17)$$

其中 $b' = b - c$ 。

3.3 底板中有一边简支

在前面的讨论中, 我们都把底板简化为四边固支型矩形板。但在无煤柱开采情况下, 将其简化为三边固支, 一边简支更为合适。根据板的极限分析理论, 其破坏形状与四边固支板仍是相同的。只是根据能量原理分析, 形成这种破坏所需外能要少。因而形状参数 x 值有所不同。例如, 设图 6 的板中有一条短边是简支边, 则在 I 型断层情况下形成图 6 (b) O-Y 型破坏, 与公式 (10) 对应的荷载为

$$q_{\max} = \frac{12M_p(b^2 + 2a'x)}{b^2x(3a' - x)} \quad (18)$$

$$x = \frac{b^2}{2a'} \left[\sqrt{1 + \frac{3}{2} \frac{a'^2}{b^2}} - 1 \right] \quad (19)$$

如 $a'/b = 1$, 则可求得 $x = 0.29b$, $q_{\max} = 23.7M_p/A$ 。此极值仅为图 6 (b) 情况的 0.82 倍, 也即底板四边中有三边固支、一边简支时 (不计断层), 比四边固支情况更容易发生破坏。尽管两者破坏的类型相同, 但其折断时的最大变形点位置 x 是不同的。

4 断层的变形与受力

4.1 断层的张开位移

如图 6 (b) 中的 I 型断层, 由于 A, B 两部分挠度互相没有约束, 它们的挠度差就造成了断层之间产生张开位移。对于容易发生突水的底板来说, 这是一种最危险的情况。这

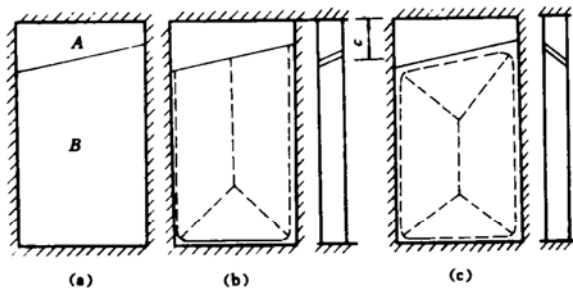


图 7 走向断层及底板破坏规律

里, 我们用图 6 (b) 上部两个悬臂梁模型来计算断层的张开位移量 Δ 。

设 A, B 梁在断层处的挠度分别为 δ_A 和 δ_B , 断层倾角为 α , 则

$$\Delta = (\delta_B - \delta_A) \cos \alpha \quad (20)$$

而

$$\delta_A = \frac{1}{8EI} q k_1^4 a^4 \quad (21)$$

$$\delta_B = \frac{1}{8EI} q (1 - k_1)^4 a^4 \quad (22)$$

其中 EI 为岩梁的弯曲刚度。由式 (22) 和 (21) 代入式 (20) 得

$$\Delta = \frac{qa^4 \cos \theta}{8EI} (1 - 4k_1 + 6k_1^2 - 4k_1^3) \quad (23)$$

根据上式可得到图 8 的 Δ 与 k_1 值的关系曲线。从图 8 中可以看到, k_1 值越小, 断层的张开位移量就越大。同时, B 梁在固定端处的最大弯矩值也越大。

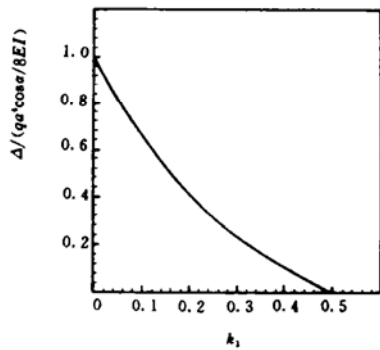


图 8 Δ 与 k_1 的关系曲线

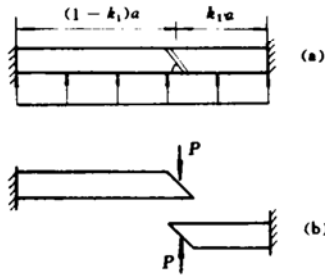


图 9 断层面上的约束力计算模式

4.2 断层的相互约束

如图 6 (c) 中的 II 型断层, 由于 B 部分的挠度要受到 A 部分的约束, 则在断层面上要形成约束反力。这里, 我们用图 9 两端固支, 断层处为铰接的连续梁模式来分析断层面上的约束力 p 。由图 9 (b) 可求得

$$\delta_A = \frac{qk_1^4 a^4}{8EI} + \frac{pk_1^3 a^3}{3EI} \quad (24)$$

$$\delta_B = \frac{q(1 - k_1)^4 a^4}{8EI} - \frac{p(1 - k_1)^3 a^3}{3EI} \quad (25)$$

由位移协调条件 $\delta_A = \delta_B$ 得

$$P = \frac{3}{8} qa \frac{(1 - k_1)^4 - k_1^4}{(1 - k_1)^3 + k_1^3} \quad (26)$$

根据上式可得到图 10 P 与 k_1 的关系曲线。从图 10 中可以看到, k_1 值越小, 断层处的约束力 P 就越大。在断层处会发生两种形式的破坏, 一是断层的剪断, 二是断层的相互错动, 也称断层的活化。断层的剪断极限 $\tau_{\max}$ 可由下式求得

$$\tau_{\max} = \frac{2P_{\max}}{h} = \frac{3qa}{4h} \quad (27)$$

断层的活化 (错动) 极限可由下式求得

$$\alpha \geq \varphi_1 \quad (28)$$

其中 φ_1 为断层面上的摩擦角。

4.3 断层上的突水危险点

显然, 当老底达到承载极限时, 开裂折断后的最大变形点处, 即 $O-X$ 或 $O-Y$ 型破坏的 X 或 Y 的交叉点处就成为突水危险点。但是, 当遇到断层时, 在老底还没有达到破坏状态, 断层就可能成为突水的自然通道。然而, 老底受力变形后, 断层上最具突水危险的点在哪? 这也是我们所关心的问题。

这里, 首先分析两直边固支, 斜边自由的直角三角形板, 在受均布荷载作用后的最大挠度点位置。我们知道, 最大挠度点一定发生在自由边上。设两条直角边长分别为 a 和 b , b 边的对角为 α_1 , 最大挠度点到 b 边的距离为 x , 则到 a 边为 $(a-x) \tan \alpha_1$ 。挠度的大小正比于荷载集度 q 和到两边距离的平方之积, 所以, 其挠度 $y_{\max}$ 为

$$y_{\max} = Kqx^2(a-x)^2 \tan^2 \alpha_1 \quad (29)$$

其中 K 为比例常数。由此式求极值得

$$x = \frac{a}{2} \quad (30)$$

即最大挠度点发生在斜边的中部。

根据以上分析可知, 如果是 I 型断层, 则 A, B 部分板变形互不约束, 在断层中部处产生最大张开位移。因此, 这是 I 型断层突水的最大危险处。如果是 II 型断层, 则 A, B 两部分板的弯曲变形会受到互相制约, 在断层中部形成最大的约束反力, 可能使斜面剪断破坏, 或断层活化, 因而也会形成突水危险处。值得说明的是, 这里没有考虑断层倾角 α 沿断层走向的变化。

5 结 论

(1) 如果底板无断层, 作为四边固支的矩形板达到承载极限后, 将形成 $O-X$ 型破坏。我们采用极限分析方法求出了极限荷载和破坏后的具体形状及最大变形点的位置。当矩形板面积一定, 极限荷载的大小与边长比有关。比值越接近 1, 承载能力越弱, 即所谓成方效应。

(2) 底板破坏后, 采场中部岩块形成砌体梁结构。滑动 (S) 和转动 (R) 失稳是此结构的两种基本失稳模式。通过 $S-R$ 稳定性分析, 得到了砌体梁关键块体结构的稳定范围。

(3) 带断层情况的底板发生突水危险更大。无论走向断层或倾向断层, 根据断层倾角的不同可分为 I 型和 II 型断层。I 型断层可简化为自由边, II 型断层可简化为简支边。断层简化为自由边时, 老底破坏形式为 $O-Y$ 型。简化为简支边时, 破坏形式为 $O-X$ 型。 $O-Y$ 型的极限破坏荷载小于 $O-X$ 型。有断层的极限荷载小于无断层者。

(4) 当为无煤柱开采时, 底板可视为一边简支、三边固支的矩形板。同样也形成 $O-X$ 型破坏, 但具体形状与四边固支情况是有区别的, 相应的极限破坏荷载也小。

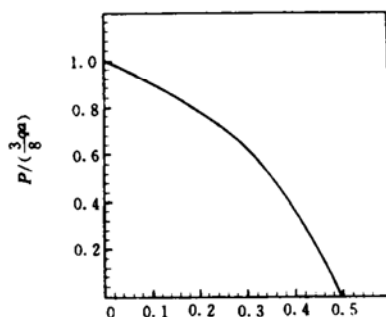


图 10 P 与 k_1 的关系曲线

(5) 通过梁式模型, 求出 I 型断层的最大张开位移和 II 型断层面的上的最大剪切力及断层活化条件。理论证明了断层将在采场中部处产生最大张开位移或最大剪切力, 因而此处可能成为断层突水的最危险点。

参 考 文 献

- 1 钱鸣高, 刘听成. 矿山压力及其控制. 修订本. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
- 2 钱鸣高, 朱德仁, 王作棠. 老顶岩层断裂形式及其对工作面来压的影响. 中国矿业大学学报, 1986 (2).
- 3 Goodman R E, Shi G H. Block Theory and its Application to Rock Engineering. Prentic-Hall, 1985.
- 4 徐秉业, 陈森灿. 塑性理论简明教程. 北京: 清华大学出版社, 1981.
- 5 钱鸣高, 缪协兴, 何富连. 砌体梁结构的关键块体分析. 煤炭学报, 1994, (6).

Mechanism for the Fracture Behaviours of Main Floor in Longwall Mining

Qian Ming-gao Miao Xie-xing Li Liang-jie

(China University of Mining & Technology)

Abstract A new calculating method for the mechanical behaviours of floors with underground water-inrush in longwall mining is proposed in this paper. The main floor under the influence of longwall mining can be considered as an elastic-plastic plate with various support conditions and the stability of the fractured plate can be analysed as a Voughier Beam. Using the plastic limit theory of plates, the limit load of main floor and its largest deformation point can be obtained. By S-R stability theory, the stability conditions for the key blocks of the Voughier Beam of the fractured main floor also can be determined. These theoretical results are also important for the study on the water-inrush from floor in longwall mining.

Key words water-inrush from floor, main floor fracture, voughier beam, S-R stability, water-inrush through fault.