

三向受压状态下地壳岩体的张性变形和张性破裂

颜 玉 定

(广东省地震局, 广州)

摘 要 本文叙述了处于三向受压状态的地壳岩体产生张性变形和张性破裂的原理, 并以珠江三角洲地区为例说明: ①岩体内应力集中点的浅部, 可产生张性变形和张性破裂; ②地质考察所观察到的张性或张剪性断裂, 其断裂面上作用的正应力未必是拉应力, 极有可能是压应力, 但却一定是拉应变; ③张性破裂引起的地震, 震级较小, 一般在 4.5 级以下; ④地震引起的张性地裂缝的走向, 就是震源应力场的主压应力方向。

关键词 张性变形 张性破裂

1 前 言

通常情况下, 地壳岩体总是处于三向受压状态, 此状态随深度的增加愈显强烈。对于地壳内众多断裂的力学性质, 若以应力来认识, 大多属压剪性。然而, 现场的地质调查表明, 张性、张剪性断裂是普遍存在的, 且在特定的区域内常沿某一走向分布, 如广东境内的 NW 向断裂。本文从岩体变形的角度, 以珠江三角洲及其外围地区为例, 结合光弹实验所得的应力场^[1], 阐述三向受压的岩体和断裂内出现张性变形和张性破裂的力学机理。

2 原 理

设岩体为弹性体并处于三向受压状态。按岩体力学的习惯取压应力和压应变为正, 拉应力和拉应变为负。

根据广义虎克定律:

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu (\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (1)$$

式中 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为最大、中间和最小主应力, ϵ_3 为最小主应变, E 为弹性模量, ν 为泊松比。因岩体三向受压, 所以 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 都大于零。由 (1) 式可知, 当 $\sigma_3 < \nu (\sigma_1 + \sigma_2)$ 时,

本文收稿日期, 1991 年 12 月 19 日

[1] 颜玉定, 珠江三角洲及其外围地区未来地震的光弹实验予测, 1990

$\epsilon_3 < 0$, 即最小主应变为拉应变。此时, 岩体沿垂直 ϵ_3 方向发生以张性变形。如 $|\epsilon_3|$ 足够大, 以至于

$$|\epsilon_3| \geq |\epsilon_c| \quad (2)$$

(ϵ_c 为岩体的应变抗拉强度), 按力学的第二强度理论, 岩体将发生张性破裂。

由弹性理论可知, ϵ_3 引起的应变能

$$U = E \epsilon_3^2 V \quad (3)$$

式中 V 为应变体体积。设 V 即为破裂体体积,

$$V = l h_f b \quad (4)$$

式中 l 为破裂长度, h_f 为破裂深度, b 为应变集中宽度。

设岩体张性破裂时的应变能为 U_c , (3) 式变为

$$U_c = E \epsilon_c^2 l h_f b \quad (5)$$

取 U_c 的 1% 为地震波能量 (依多数学者观点), 代入地震波能量—震级公式

$$\lg E = 4.8 + 1.5 M \quad (E \text{ 单位 } J) \quad (6)$$

(式中 E 为地震波能量, M 为震级), 推出岩体破裂引起地震的震级

$$M = \frac{\lg U_c - 6.8}{1.5} \quad (7)$$

3 实 例

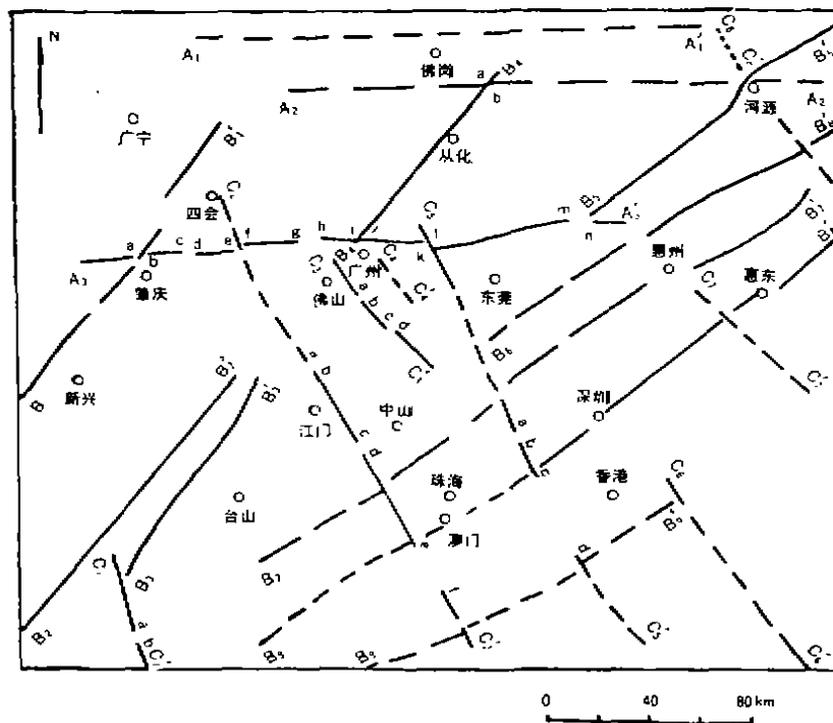


图1 研究区、断裂

Fig. 1 The studied region, and faults

图1为珠江三角洲及其外围地区(以下简称研究区)的主要断裂。图中AA'、BB'、CC'分别为NEE、NE和NW向系列的断裂。资料1)的结果表明:该区的岩体处于三向受压状态,即 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 都是压应力;区内所有断裂的断裂面上的正应力也都是压应力,以应力角度而论它们均属压剪性。然而野外的实际资料证明,本区CC'系列断裂中的多数属张性或张剪性断裂。以下利用岩体的应变原理,探讨研究区三向受压岩体主应力呈压剪性分布的断裂出现张性变形和张性破裂的可能和条件。

3.1 岩体的张性变形和张性破裂

据资料1)的结果,研究区各主应力的方向分别为 σ_1 —N($54^\circ \pm 3^\circ$)W, σ_2 —垂直水平面, σ_3 —N($36^\circ \pm 3^\circ$)E。主应力值由下式求得

$$\sigma_i = \sigma'_i + P_c - P_p \quad (i = 1, 2, 3) \quad (8)$$

式中 σ'_i 为外场力作用引起的主应力分量, P_c 为围压, P_p 为孔隙压力。代入本区的有关岩石参数并经推导[详见资料1)], (8)式变为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma'_1 + (25.31 - 9.81\beta)h \\ \sigma_2 &= \sigma_3 = (25.31 - 9.81\beta)h \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \left\{ \sigma \text{ 单位 MP}_a \right\} \\ \left\{ h \text{ 单位 km} \right\} \end{array} \quad (9)$$

式中 β 为孔隙压力系数, h 为深度。

取 $\beta=1$, 将(9)式代入(1)式, 并取本区构造岩的 $E=4.90 \times 10^4 \text{ MP}_a$, $\nu=0.23$ [据资料1)]代入, 得

$$\epsilon_3 = \frac{8.37h - 0.21\sigma'_1}{4.90 \times 10^4} \quad \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \sigma \text{ 单位 MP}_a \right\} \\ \left\{ h \text{ 单位 km} \right\} \end{array} \right. \quad (10)$$

当 $\epsilon_3 < 0$, 即最小主应变为拉应变时, 由(10)式可得产生拉应变部位的岩体深度 h_r ,

$$h_r < 0.27 \times 10^{-4} \sigma'_1 \text{ km} \quad (\sigma \text{ 单位 MP}_a) \quad (11)$$

研究区岩体内各断裂端点或闭锁点的应力集中系数最大, 等于9(完整岩体为1), 结合1962年3月19日河源6.1级地震的有关参数推算, 当时完整岩体内的 $\sigma'_1 \approx 31.2 \text{ MP}_a$, 断裂端点或闭锁点的 $\sigma'_1 \approx 280.5 \text{ MP}_a$ 。将 σ'_1 代入(11)式, 可得研究区内产生拉变的深度为:

应力集中点: $h_r < 7.5 \text{ km}$;

完整岩体: $h_r < 0.8 \text{ km}$ 。

拉应变方向与 σ_3 和 σ_2 方向一致, 即N36°E和垂直水平面。

由(5)式可得

$$h = \frac{4.90 \times 10^4 \epsilon_3 + 0.23\sigma'_1}{8.37} \text{ km} \quad (\sigma \text{ 单位 MP}_a) \quad (12)$$

按第二强度理论, 当(12)式中的 ϵ_3 等于拉伸强度 ϵ_r 时, h 便为张破裂深度 h_r 。

图2为新丰江花岗岩水压致裂实验所得不同围压下的 ϵ_r 曲线^[1]。图中可见, 饱水花岗岩的 ϵ_r 随围压的变化不大, 可近似取 $\epsilon_r = -275 \times 10^{-8}$ 作为研究

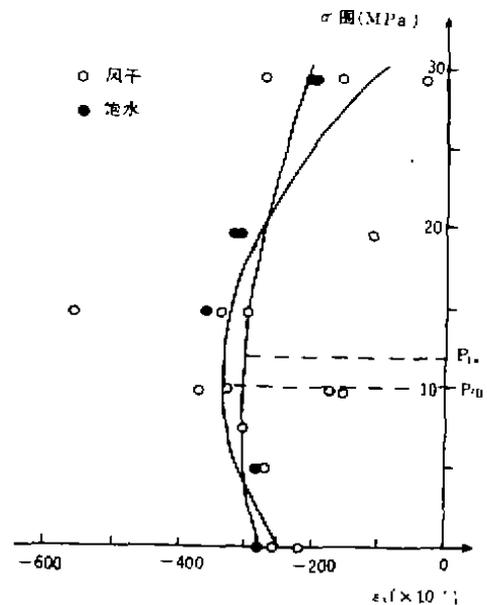


图2 花岗岩抗拉应变强度曲线

Fig. 2 Curve of tensile-strain strength in granite

区岩体的抗拉强度。将 $\varepsilon_3 = \varepsilon_c$ 和 $\sigma_1' = 280.5 \text{ MPa}$ 代入 (7) 式, 得研究区应力集中点上产生张裂的最大深度约为

$$h_f = 4.5 \text{ km}$$

破裂方向与 σ_1 方向一致, 为 $N54^\circ W$ 或平行水平面。

将 $\sigma_1' = 31.2 \text{ MPa}$ 代入 (12) 式得 $h > 0$, 说明完整岩体内不会发生张性破裂。

研究区的应力场反映出 [资料 1]), 应力集中点的范围约 10 km , 故取 $l = 10 \text{ km}$ 。再取 $b = 250 \text{ m}$, $h_f = 4.5 \text{ km}$, 由 (5)、(7) 二式求出应力集中点因张性破裂引起的地震震级

$$M = 3.9 \text{ (级)}$$

3.2 沿断裂面发生的张性变形和张性破裂

设定坐标如图 3, x 轴垂直断裂面。

按广义虎克定律

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)] \quad (13)$$

式中 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为正应力分量, ε_x 为 X 方向的正应变分量。

研究区各断裂面内

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_x' + P_c - P_f \\ \sigma_y &= \sigma_y' + P_c - P_f \\ \sigma_z &= P_c - P_f \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中 σ_x', σ_y' 为外场力引起的应力分量 ($\sigma_z' = 0$)。

设 P_c 和 P_f 分别为岩石和水的静压力, (14) 式可变为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_x' - (\rho_r - \rho_w)gh \\ \sigma_y &= \sigma_y' + (\rho_r - \rho_w)gh \\ \sigma_z &= (\rho_r - \rho_w)gh \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中 ρ_r, ρ_w 分别为岩石和水的密度, g 为重力加速度。本区的 $\rho_r = 2.58 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ [资料 (1)], 取 $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3, g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

将 (15) 式代入 (13) 式, 得

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x' - \nu \sigma_y' + (1 - 2\nu)(\rho_r - \rho_w)gh] \quad (16)$$

将 E, ν, ρ_r, ρ_w 和 g 的数据代入上式

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x' - 0.23\sigma_y' + 8.37h}{4.90 \times 10^4} \quad (\sigma \text{ 单位 MPa}, h \text{ 单位 km}) \quad (17)$$

如 ε_x 为拉应变, (17) 式等号右边的代数式小于 0, 加上 $h > 0$ 才有意义的条件, 由 (17) 式得到研究区内各断裂如出现拉应变的条件为

$$h < \frac{0.23\sigma_y' - \sigma_x'}{8.37} \text{ km} \quad (\sigma \text{ 单位 MPa}) \quad (18)$$

如由 (18) 式所得的 $h \leq 0$, 说明该处不会出现拉应变。显然, 由 (18) 式既可确定能否出现垂直断裂面的拉应变, 还可得出发生拉应变的深度。

将本区应力场中各断裂的 σ_x', σ_y' 值 (表 1) 代入 (18) 式, 计算结果表明, 研究区内只有 $C_2C_2', C_3C_3', C_4C_4'$ 和 C_7C_7' 4 条 NW 向断裂在浅部会出现拉应变。其深度列于表 1 的 h_f

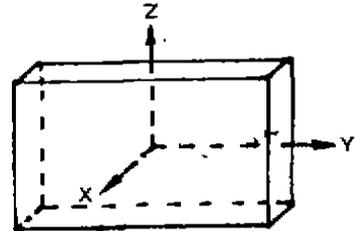


图 3 坐标系

Fig. 3 Coordinate system

栏内。

将 $\varepsilon_x = \varepsilon_y = -275 \times 10^{-6}$ 代入 (17) 式, 可得断裂出现张性破裂的深度

$$h_f = \frac{0.23\sigma_x' - \sigma_z' - 13.48}{8.37} \text{ km} \quad (\sigma \text{ 单位 MPa}) \quad (19)$$

由 (19) 式对上述 4 条断裂进行计算, 结果是: C_2C_2' 断裂虽在 0.9 km 深度内出现拉应变, 但应变小, 不足引起张破裂; 只有 C_3C_3' 、 C_4C_4' 和 C_7C_7' 断裂才有可能发生张性破裂, 它们的最大破裂深度列于表 1。

用 (5)、(7) 二式算出的 C_3C_3' 、 C_4C_4' 和 C_7C_7' 断裂岩由张性破裂引起的不同破裂长度所对应的地震震级列于表 1。

表 1 张应变和张破裂深度及震级

Tab. 1 Tensile strain depth of tensile crack and earthquake

断裂	σ_x' (MPa)	σ_y' (MPa)	h_1 (km)	h_f (km)	l (km)	M (级)
C_2C_2'					3	3.5
					5	3.7
C_3C_3'	14.3	266.2	5.6	4.0	10	3.9
					20	4.1
					30	4.2
					2	3.1
					3	3.3
C_4C_4'	29.9	250.6	3.3	1.7	5	3.4
					10	3.6
					15	3.7
					21	3.8
					3	3.6
C_7C_7'	4.4	276.2	7.1	5.5	5	3.7
					10	3.9
					20	4.1
					30	4.3

4 结 论

1、处于三向受压状态的地壳岩体, 在其应力集中点的浅部可产生张性变形和沿主压应力方向的张性破裂。因此, 因地震引起的张性地裂缝的走向, 就是该地震震源应力场的主压力方向。

2、地质考察所观察到的张性或张剪性断裂, 其断裂面上作用的正应力未必就是拉应力, 极有可能是压应力, 但却一定是拉应变。从地壳的受力状态而言, 除褶皱等弯曲地层的顶部外, 通常情况下断裂面或岩体内出现拉应力的现象是令人费解的。因此, 断裂的张性性质应视为张性变形。

3、张性变形和张性破裂只能发生在地壳浅部。

4、张性破裂引起的地震, 震级较小, 如震源破裂面的长度在 30 km 以下, 一般震级在

4.5级以下。

承蒙肖安予高级工程师在工作中给予指导，并为本文提供图1，特此致谢。

参 考 文 献

- 1 颜玉定，等．围压条件下岩石的抗拉强度．华南地震，1991，11（2）

TENSILE DEFORMATION AND TENSILE FRACTURE OF CRUSTAL ROCKS UNDER TRI—LATERAL COMPRESSION

Yan Yuding

(Seismological Bureau of Guangdong Province)

Abstract

In this paper, the principles of tensile deformation and tensile fracture of crustal rock under tri-lateral compression are described. the Pearl River delta area is taken as an example to illustrate; 1) Tensile deformation and tensile fracture can take place along the direction of principal compressive stress at their stress concentration site in the shallow part of crustal rock bodies; 2) For the tensile or shearing faults observed in geological survey, the positive stress applied upon the fault plane may not necessarily be a tensile stress but very likely be a compressive stress, while the strain must be tensional; 3) The earthquake caused by tensile fracture is of lower magnitude, usually lower than $M = 4.5$; 4) The orientation of the tensile ground fissures resulted from an earthquake is possibly the direction of principal compressive stress of the stress field on the seismic source.

Key words: Tensile deformation; Tensile fracture