

构造应力面研究*

谭成轩¹ 石 玲¹ 孙炜锋¹ 雷伟志¹ 孙 叶² 王瑞江³ 吴树仁¹

(¹中国地质科学院地质力学研究所 北京 100081) (²中国地质科学院城市与工程场地稳定性研究中心 燕郊 065201)

(³中国地质调查局 北京 100035)

摘要 所定义的构造应力面的概念为三维空间不同地点非构造应力影响消失的深度点构成的曲面。为此,对似U形沟谷按不同沟谷宽度、山体坡度和山体高度建立三维模型,分别考虑重力、水平侧压力以及二者联合进行三维应力场有限元数值模拟,分析最大水平主压应力在空间的变化规律,并进行数学统计分析,给出构造应力面深度随上述因素变化的经验公式。研究结果表明水平侧压力和山体高度是影响构造应力面深度的主要因素,当水平侧压力随深度变化梯度与重力梯度之比等于1时,在沟谷谷底,构造应力面深度近似等于山体高度。

关键词 岩石力学, 非构造应力, 构造应力面, 三维应力场有限元模拟, 最大水平主压应力

分类号 TD 311

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)23-3970-09

RESEARCH ON TECTONIC STRESS PLANE

Tan Chengxuan¹, Shi Ling¹, Sun Weifeng¹, Lei Weizhi¹, Sun Ye², Wang Ruijiang³, Wu Shuren¹

(¹Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100081 China)

(²Urban and Engineering Site Stability Assessment Center, Chinese Academy of Geological Science, Yanjiao 065201 China)

(³China Geological Survey Bureau, Beijing 100035 China)

Abstract The concept of tectonic stress plane (TSP) is defined as an ideal curved plane drawn by the locations with different depths where the influence of non-tectonic stress disappears. Therefore, to U-like valleys, three-dimensional model with consideration of different factors, such as valley width, mountain slope, mountain height, gravity loading, and horizontal lateral compression, respectively, is made to conduct 3D finite element modeling research on the spatial variation law of the maximum horizontal principal compressive stress in crust. By mathematical statistics and analysis, the empirical formula is given to show the TSP depth changed with the above factors. The research shows that horizontal lateral compression and mountain height are the major factors to affect the TSP depth, and that when the ratio of the gradient of horizontal lateral compression varied with depth to the gravity gradient is obtained as one, the TSP depth is approximately equal to mountain height.

Key words rock mechanics, non-tectonic stress, tectonic stress plane, finite element modeling of 3D stress field, maximum horizontal principal compressive stress

1 引言

在各种工程建设和地应力测量过程中,由于地

形、区域构造活动强度(即区域构造应力作用大小)、构造类型、岩石力学性质、地表风化剥蚀和沉积速度以及人类活动等多种因素的影响,地表附近地应力受到不同程度的干扰,经常叠加着地形等因素引

2003年7月17日收到初稿,2004年3月31日收到修改稿。

* 国土资源部百名优秀青年科技人才计划和国家自然科学基金(49802017)资助课题。

作者 谭成轩 简介:男,1964年生,1996年于中国地质科学院研究生部地质力学专业获博士学位,现任研究员,主要从事三维构造应力场及其在地壳稳定性评价、工程地质、地质灾害等方面的应用研究工作。E-mail: tanchengxuan@163.net。

起的非构造应力,这种非构造应力往往在沟谷谷底、坡角引起明显的应力集中,并导致主应力方向发生变化,这种现象已为国内外实测资料所证实(图 1, 2, 表 1~3)^[1~13]。这种非构造应力干扰主要表现在两方面:一是实测应力值的显著增大即应力集中;二是实测主应力方向的变化。由于特定地区上述多种影响因素的不同组合,地应力受干扰的情形也不同。一般来说,构造活动强烈地区实测应力大小和方向都受影响(表 1, 图 1),而构造活动较弱地区主要发生主应力方向的变化(表 2, 3)。

图 1 为四川雅砻江二滩电站坝址区压磁应力解除地应力测量结果^[6~8]。从图 1 可见,坝址区河谷呈“V”型,左岸谷坡 25°~40°,右岸谷坡 30°~45°,且处于构造强烈活动的川滇经向构造带。应力测值在近谷底钻孔深度 30 m 以下快速增大,最大水平主压应力测值在钻孔深度 40 m 左右时高达 65 MPa,最小水平主压应力测值在钻孔深度 60 m 左右时超过 30 MPa,这是正常最大、最小水平主压应力在该深度测值的 8~10 倍,并且最大主压应力方向也发生变化(表 1)。另外,从水平探洞内实测到的最

大水平主压应力变化分析,在进入洞内一定深度测值达到最大值,然后又变小,这与人们固有的越往山体内部应力测值越大的常识恰好相反。由图 2 也可见这种现象,所不同的是如图 2 所示,由于存在一断层活动而使应力释放,造成应力测值在断层附近变小^[9, 14~20]。

表 2, 3 分别为长江三峡工程坝址附近的茅坪钻孔和坝址西北约 40 km 的秭归钻孔水压致裂地应力测量结果^[10~13]。秭归附近长江河谷呈似“V”型,谷坡 15°~25°;茅坪附近长江河谷较秭归要开阔,呈似“U”型,谷坡 10°~20°。由于长江三峡位于扬子准台地,构造活动较川滇经向构造带要明显减弱,从表 2, 3 可以看出,应力集中现象不明显,但应力方向变化很大。

综上所述,地壳中非构造应力在三维空间的分布,应该存在一个理想曲面,即构造应力面,是由三维空间不同地点非构造应力影响消失的深度点构成的曲面。在构造应力面之上,非构造应力和构造应力同时存在,而在构造应力面之下,仅构造应力存在。

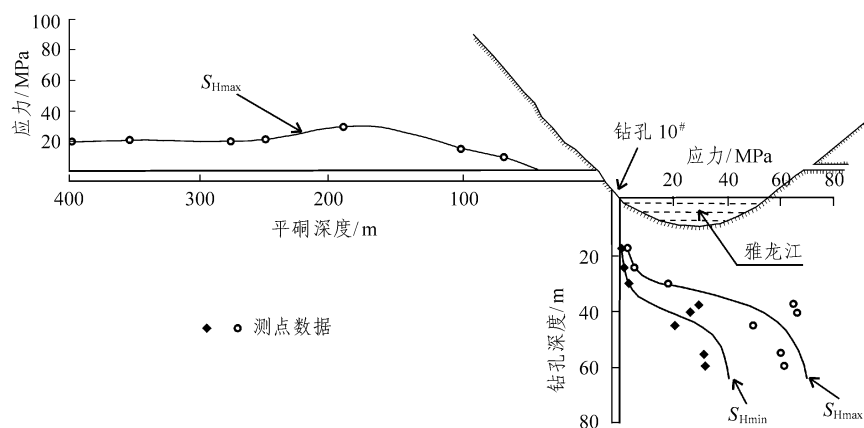


图 1 四川雅砻江二滩电站坝址区地应力测量结果

Fig.1 In-situ stress measurements at the dam site of Ertan Power Station on the Yalongjiang River, Sichuan province, China

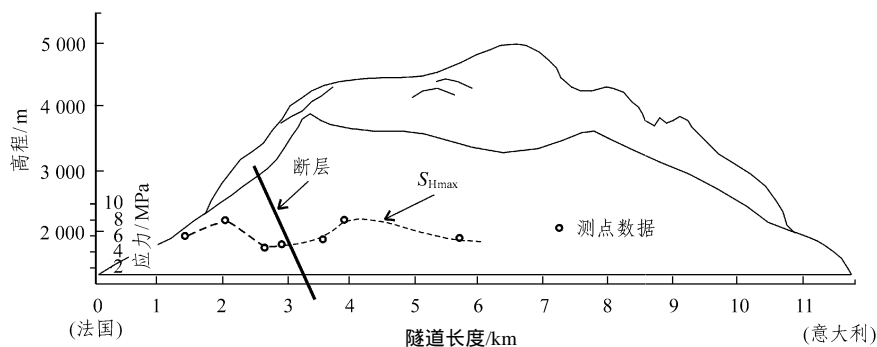


图 2 法国和意大利之间横穿勃朗峰山体隧道公路中地应力测量结果

Fig.2 Measured results of in-situ stresses in the tunnel passing Brown Hill between France and Italy

表 1 四川雅砻江二滩电站坝址区 10[#] 钻孔压磁应力解除地应力测量结果

Table 1 Results of in-situ stress measurements of drill 10[#] at the dam site of Ertan Power Station on the Yalongjiang River , Sichuan province ,China MPa

| 钻孔深度/m | 最大水平主压应力 S_{Hmax} | 最小水平主压应力 S_{Hmin} | 最大水平主压应力方向 | 岩石 |
|--------|---------------------|---------------------|------------|-------------|
| 17.6 | 1.8 | 0.5 | N78 °W | 正 长 岩 |
| 24.5 | 5.0 | 1.2 | N87 °E | |
| 30.0 | 18.0 | 3.0 | N80 °W | |
| 37.5 | 65.0 | 29.1 | N34 °E | |
| 40.5 | 65.9 | 25.9 | N50 °E | |
| 45.0 | 49.4 | 20.2 | N28 °E | |
| 55.3 | 60.0 | 31.5 | | |
| 59.4 | 61.0 | 32.0 | N50 °E | |

表 2 湖北茅坪水压致裂地应力测量结果

Table 2 Results of in-situ stress measurements by hydrofracturing at Maoping , Hubei province MPa

| 钻孔深度/m | 最大水平主压应力 S_{Hmax} | 最小水平主压应力 S_{Hmin} | 铅直应力 S_v | 最大水平主压应力方向 | 岩石 |
|-----------|---------------------|---------------------|------------|------------|-------------|
| 154 ~ 155 | 12.05 | 6.80 | 4.13 | N71 °E | 花 岗 岩 |
| 195 ~ 196 | 13.20 | 7.20 | 5.23 | | |
| 254 ~ 255 | 12.05 | 7.05 | 6.81 | N63 °E | |
| 273 ~ 274 | 12.15 | 7.10 | 7.31 | | |
| 331 ~ 332 | 13.17 | 8.05 | 8.87 | N56 °E | |
| 390 ~ 391 | 14.65 | 9.15 | 10.45 | N64 °E | |
| 419 ~ 420 | 16.21 | 9.58 | 11.23 | | |
| 470 ~ 471 | 16.80 | 10.07 | 12.60 | N17 °E | |
| 555 ~ 556 | 13.80 | 9.30 | 14.87 | N29 °W | |
| 639 ~ 640 | 18.60 | 11.90 | 17.13 | N60 °W | |
| 669 ~ 670 | 17.30 | 11.40 | 17.93 | N68 °W | |
| 696 ~ 697 | 22.50 | 14.64 | 18.65 | | |
| 736 ~ 737 | 17.67 | 11.96 | 19.72 | | |
| 755 ~ 756 | 20.55 | 13.05 | 20.23 | N70 °W | |
| 774 ~ 775 | 19.85 | 13.35 | 20.74 | N80 °W | |
| 790 ~ 791 | 21.10 | 13.80 | 21.17 | | |

表 3 湖北秭归水压致裂地应力测量结果

Table 3 Results of in-situ stress measurements by hydrofracturing at Zigui , Hubei province MPa

| 钻孔深度/m | 最大水平主压应力 S_{Hmax} | 最小水平主压应力 S_{Hmin} | 铅直应力 S_v | 最大水平主压应力方向 | 岩石 |
|--------|---------------------|---------------------|------------|------------|--------|
| 393.25 | 17.88 | 11.40 | 10.07 | N66 °E | 砂 岩 |
| 403.80 | 13.79 | 8.63 | 10.34 | | |
| 429.77 | 14.97 | 9.84 | 11.00 | | |
| 476.32 | 17.59 | 12.27 | 12.19 | N42 °E | |
| 495.67 | 22.37 | 13.99 | 12.69 | N46.5 °E | |
| 498.00 | 20.35 | 13.30 | 12.75 | N16 °E | |

由于构造应力面受错综复杂的多种因素影响，并且多数因素尚不能用模式化的形式表示之，需具体问题具体分析。地形因素相对较易模式化，国内外也有不少学者研究其对地应力的影响^[1~14]，故本文将考虑地形(包括山体坡度、沟谷宽度和山体高度)

对应力集中的影响，运用三维应力场有限元模拟分析的方法，配合已有实测资料，主要分析最大水平主应力大小在空间的分布，探讨构造应力面变化规律。进行构造应力面研究既具有理论意义，又具有重要的实际应用价值：

(1) 构造应力面是地壳中的一个理想连续曲面, 这是笔者近年来在地应力测量和工程实践中提出来的新的研究课题, 是实测地应力、构造应力场研究中必须首先考虑的基础要素, 否则无法在测值中排除非构造应力成份, 确定研究区中有区域代表性的实测应力状态, 进而影响构造应力场研究的可靠性。同时, 该课题的研究将改变目前世界各国原地应力测量的现状, 促进岩石力学与工程地质学的发展。

(2) 区分构造应力与非构造应力, 对工程建设具有重大现实意义。因为它们对工程建筑体的作用和危害不同, 对各种地质灾害的作用与危害程度也有根本区别。可以预见, 将来在正确区分构造应力与非构造应力的基础上, 并确定它们各自所含的比例、控制因素、分布规律等, 将可以合理使用建设投资, 有效地防治各种地质灾害等。

(3) 构造应力面是地壳表层附近的地质力学界面之一, 无疑对构造地质学、地球动力学的研究和发展以及探讨地壳运动问题等将产生推动作用。

2 研究方法

考虑地形为似 U 形沟谷非构造应力的主要影响因素为山体坡度 α 、山体高度 h 、沟谷宽度 w 以及水平侧压力随深度变化的梯度, 对似 U 形沟谷按不同沟谷宽度、山体坡度 ($0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ$) 和山体高度, 分别考虑重力、水平侧压力以及二者联合进行三维应力场有限元模拟, 分析构造应力面在空间的变化规律, 并进行数学统计分析, 给出构造应力面深度 H_T 随山体坡度 α 、沟谷宽度 w 、山体高度 h 等之变化的经验公式, 即

$$H_T = ka_1X(\alpha) + ka_2X(w) + ka_3X(h) + c \quad (1)$$

式中: k 为水平侧压力随深度变化的梯度与重力梯度之比值; a_1, a_2, a_3, c 为统计系数; H_T, w, h 单位为 m。需说明的是这里山体坡度和山体高度成正相关。

3 三维应力场有限元数值模拟分析

本文用三维有限元模拟方法, 运用美国 Algor 有限元软件, 依据上述研究思路和方法进行构造应力面的三维应力场数值模拟研究^[4, 6]。需说明的是, 模拟时水平侧压力随深度变化梯度与重力梯度按等值考虑, 即 $k = 1$ 。这样考虑的主要依据是地壳表层大部分地区水平侧压力随深度变化的梯度与重力梯度基本相等, 另外也是为了计算方便而给予的一种假设前提。经过大量的三维应力场有限元模拟分析, 似 U 形沟谷之构造应力面在三维空间的变化规律(见表 4, 图 3 ~ 7)及初步结论如下:

(1) 实验结果与国内外实测资料相吻合。所不同的是, 实际地壳表层由于谷坡卸荷和风化作用而使部分应力释放, 导致坡角或谷底的应力集中无论在水平方向还是在垂直方向皆向深部转移。

(2) 沟谷宽度影响非构造应力集中的范围大小和形状, 而不影响构造应力面的深度。从图 3 ~ 6 中可以看出, 当沟谷宽度较小时, 在谷底仅有一个应力集中范围; 当沟谷宽度较大时, 在两坡角分别有一个应力集中范围, 而在谷底无明显应力集中现象。

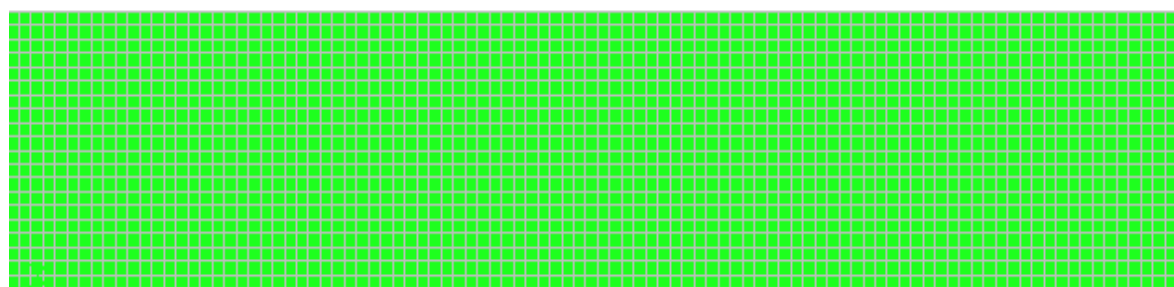
(3) 山体坡度或山体高度不仅影响非构造应力集中的范围大小和形状, 还影响构造应力面的深度。从图 3 ~ 6 中可以看出, 当山体坡度或山体高度增大时, 在沟谷或坡角的应力集中范围和程度增大, 构造应力面的深度也随之变深。

(4) 从图 3(c) ~ 6(c)中可以看出, 水平侧压力

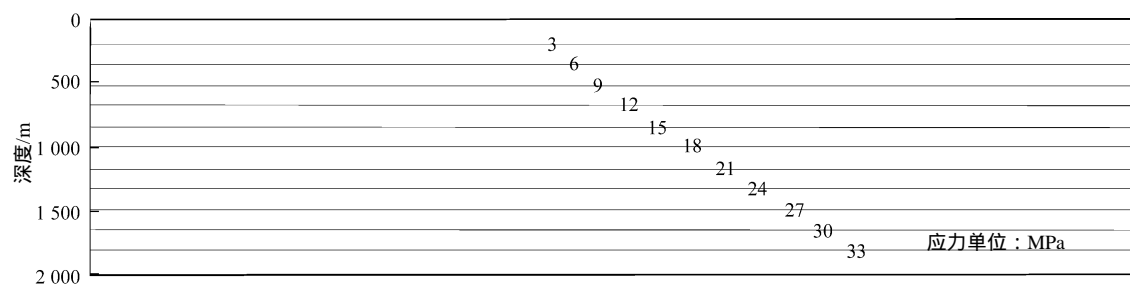
表 4 构造应力面有限元模拟研究基本数据

Table 4 Data of tectonic stress plane for finite element modeling research

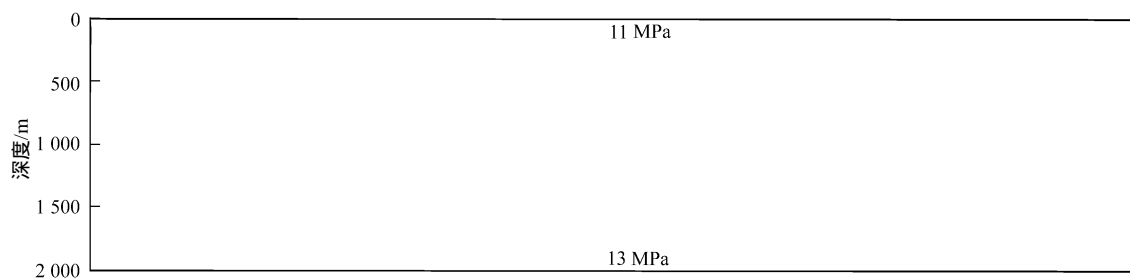
| 山体坡度/(°) | 山体高度/m | 模型单元数 | 模型节点数 | 构造应力面深度 |
|----------|--------|-------|-------|----------|
| 0 | 0 | 3 100 | 6 552 | 15 m 左右 |
| 5 | 44 | 3 170 | 6 678 | 50 m 左右 |
| 10 | 88 | 3 170 | 6 678 | 120 m 左右 |
| 20 | 182 | 3 240 | 6 804 | 210 m 左右 |
| 30 | 288 | 3 310 | 6 930 | 300 m 左右 |
| 40 | 420 | 3 380 | 7 056 | 420 m 左右 |
| 45 | 500 | 3 450 | 7 182 | 480 m 左右 |
| 50 | 596 | 3 520 | 7 308 | 610 m 左右 |
| 55 | 714 | 3 590 | 7 434 | 700 m 左右 |
| 60 | 866 | 3 660 | 7 560 | 800 m 左右 |



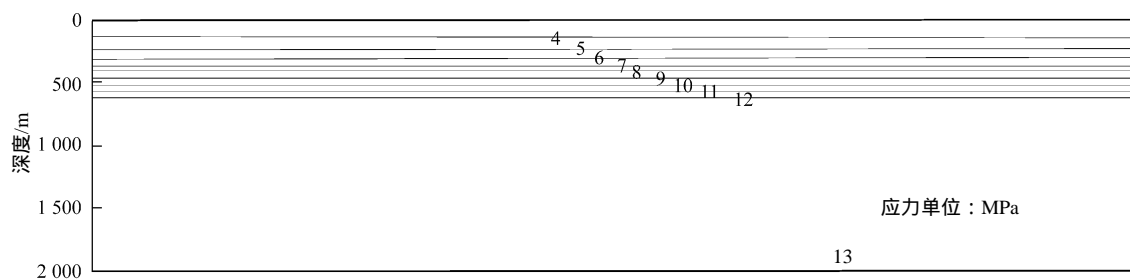
(a) 三维模型



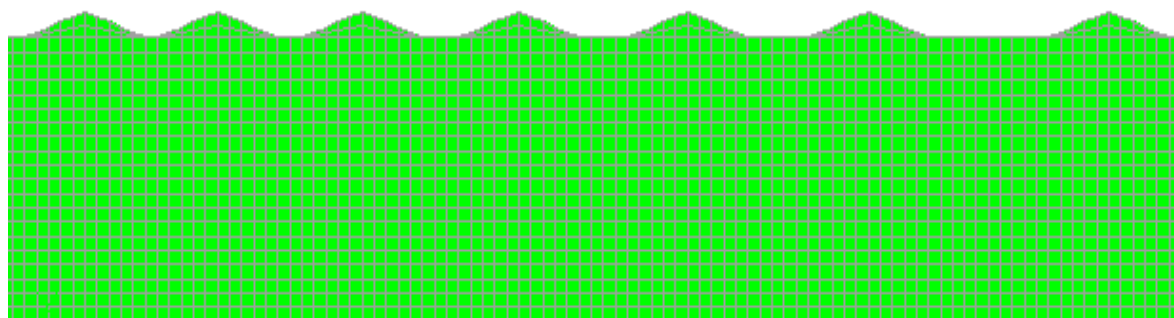
(b) 重力作用下最大水平主应力等值线



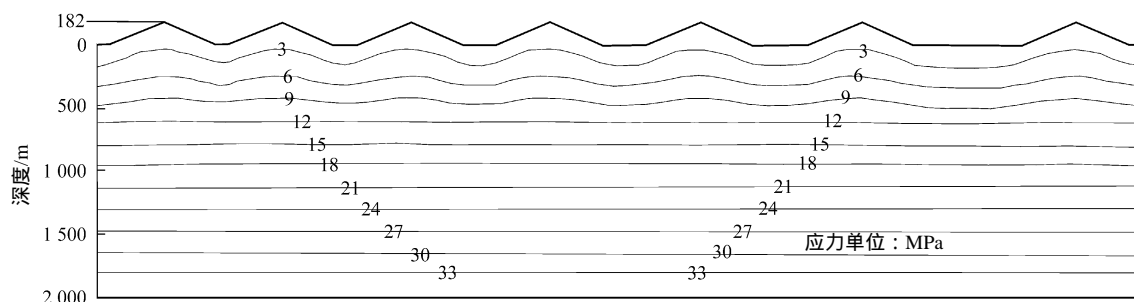
(c) 水平侧压力作用下最大水平主应力等值线



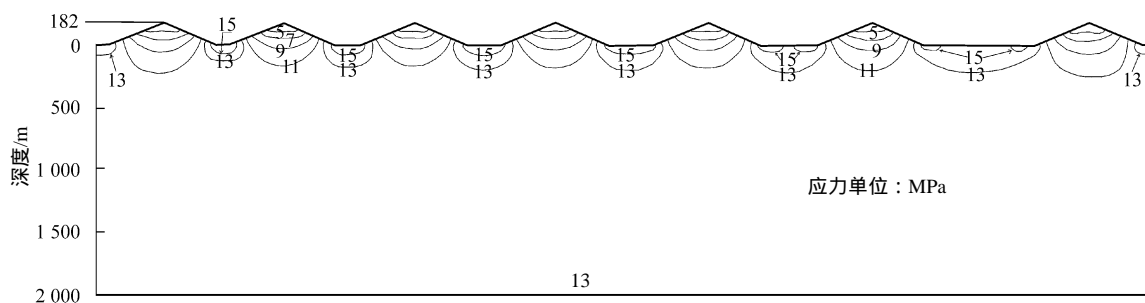
(d) 重力和水平侧压力联合作用下最大水平主应力等值线

图 3 山体坡度 0° (山体高度 0 m) 时构造应力面三维实验分析Fig.3 3D simulation analysis of H_T with a mountain slope of 0° and mountain height of 0 m

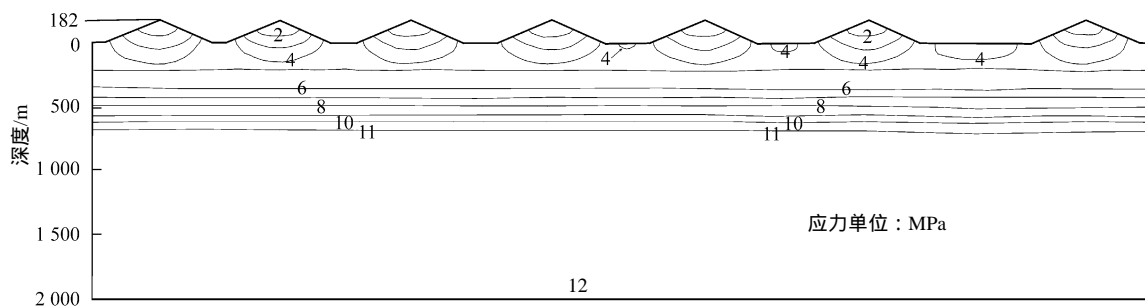
(a) 三维模型



(b) 重力作用下最大水平主应力等值线

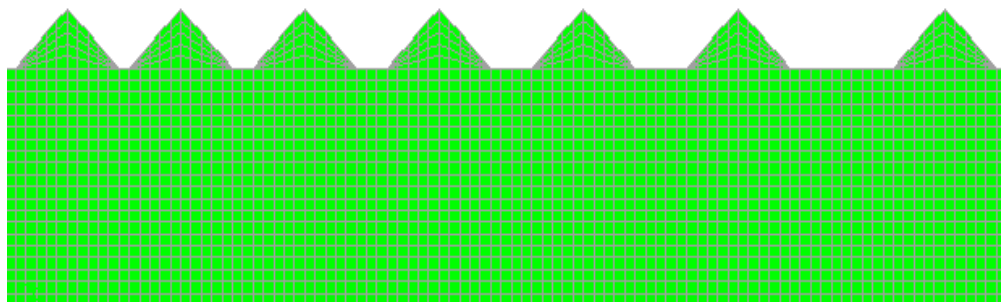


(c) 水平侧压力作用下最大水平主应力等值线

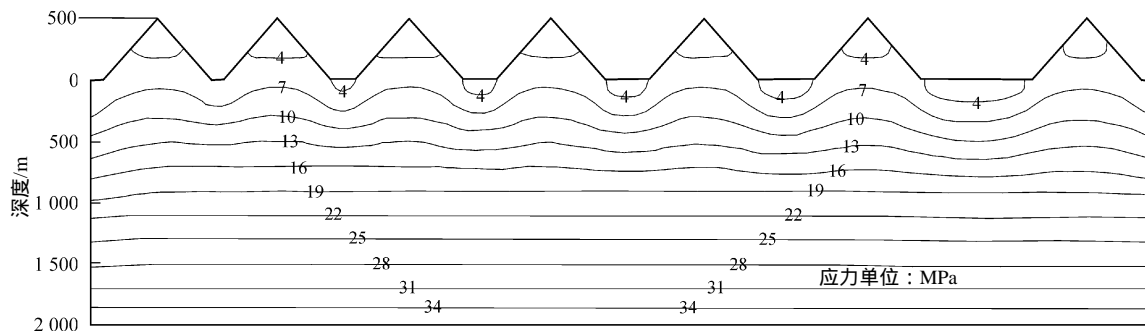


(d) 重力和水平侧压力联合作用下最大水平主应力等值线

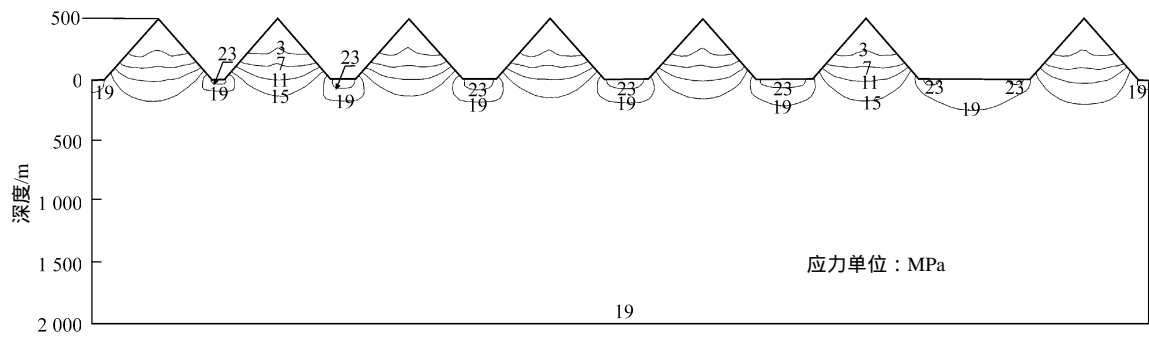
图 4 山体坡度 20 °山体高度 182 m)时构造应力面三维实验分析

Fig.4 3D simulation analysis of H_T with a mountain slope of 20 °and mountain height of 182 m

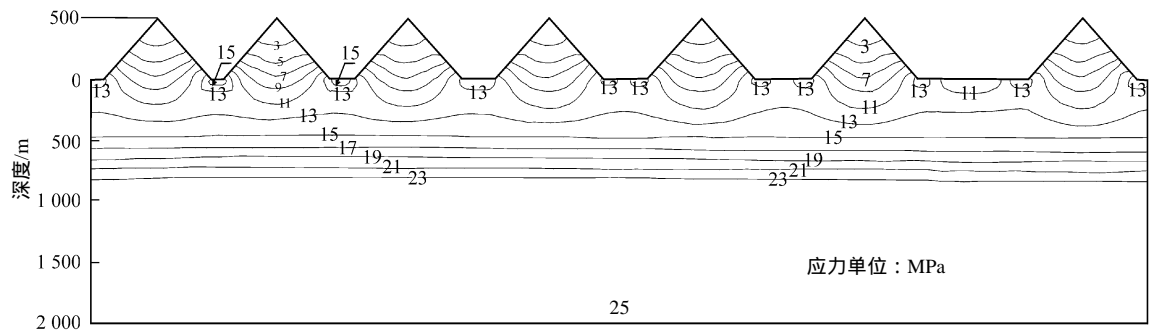
(a) 三维模型



(b) 重力作用下最大水平主应力等值线

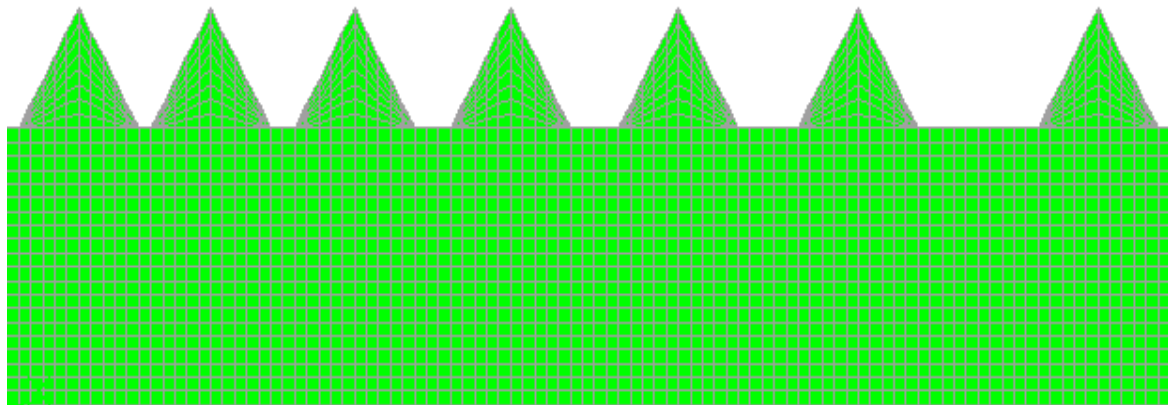


(c) 水平侧压力作用下最大水平主应力等值线

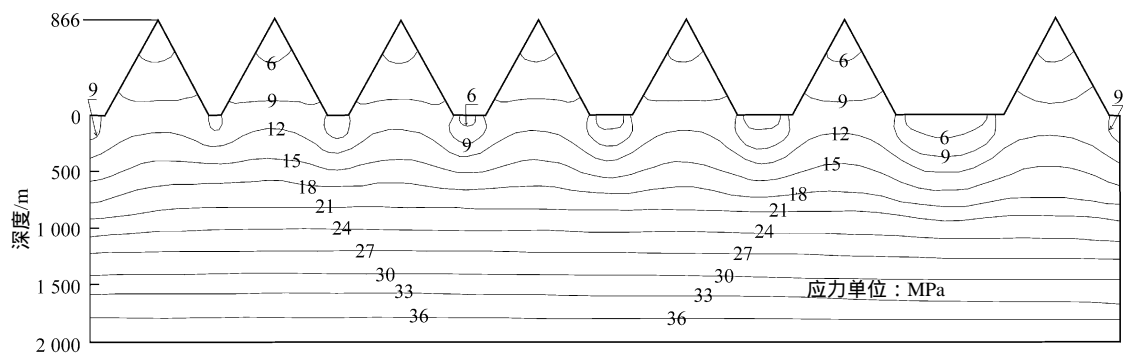


(d) 重力和水平侧压力联合作用下最大水平主应力等值线

图 5 山体坡度 45°(山体高度 500 m)时构造应力面三维实验分析

Fig. 5 3D simulation analysis of H_T with a mountain slope of 45° and mountain height of 500 m

(a) 三维模型



(b) 重力作用下最大水平主应力等值线

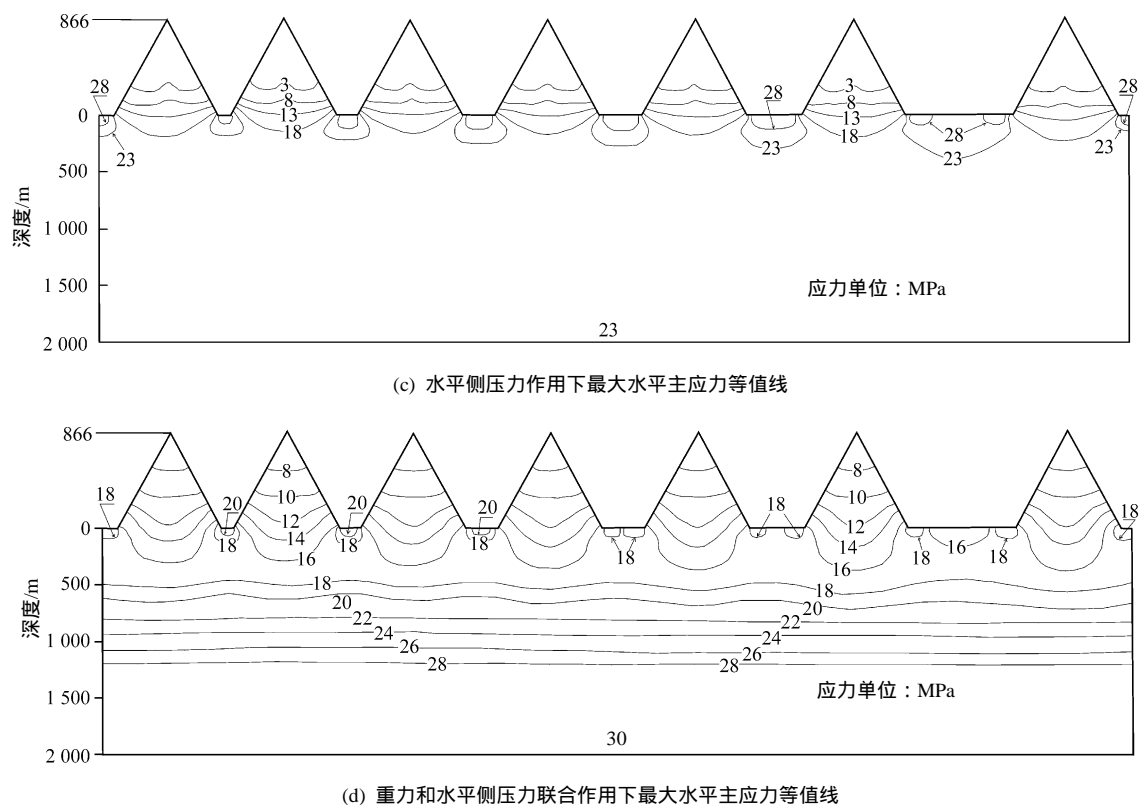


图 6 山体坡度 60°(山体高度 866 m)时构造应力面三维实验分析

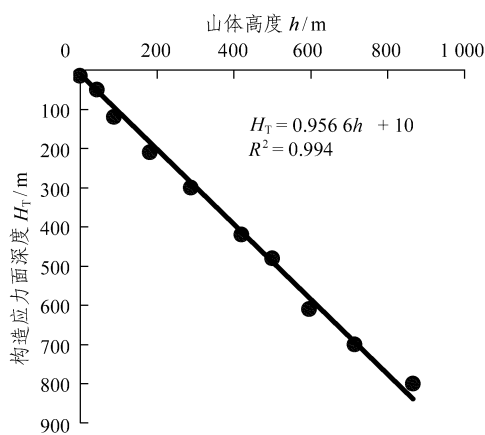
Fig.6 3D simulation analysis of H_T with a mountain slope of 60° and mountain height of 866 m

是引起非构造应力集中的主要因素。当山体坡度小于 40°时,重力作用不会在沟谷或坡角引起非构造应力集中;但当山体坡度大于 40°时,重力作用会在沟谷或坡角引起非构造应力集中,但应力集中程度远远没有水平侧压力那么强(图 5(b), 6(b))。

(5) 水平侧压力和山体高度(或山体坡度)是影响构造应力面深度的主要因素。当水平侧压力随深度变化的梯度与重力梯度相等时($k = 1$),在沟谷谷底,构造应力面深度近似等于山体高度(表 4)。考虑岩石地表风化因素,当地表水平(山体高度 $h = 0$)时,根据工程实践和经验,在地下 10 m 左右能够排除非构造应力的影响,故当限定 $c = 10$ 时,其回归方程为: $H_T = k \times 0.956 6h + 10$, $R^2 = 0.994$, 其中 R 为回归系数(图 7)。当水平侧压力随深度变化梯度增大时,构造应力面深度与其呈线性增加,同时在沟谷或坡角非构造应力集中程度加强。需要说明的是,基于山体坡度和山体高度正相关,上述回归方程选用山体高度作为变量,而没有选用山体坡度,主要是考虑实用的方便。

4 结 论

通过大量的三维应力场有限元数值模拟分析,

图 7 当 $k = 1$ 时,构造应力面随山体高度变化的回归方程Fig.7 The regression equation of H_T with mountain height h with $k = 1$

配合已有实测资料的分析讨论,认为构造应力面深度主要影响因素为水平侧压力和山体高度。当水平侧压力随深度变化的梯度与重力梯度相等时,构造应力面深度近似等于山体高度。当水平侧压力随深度变化梯度增大时,构造应力面深度与其呈线性增加,同时在沟谷或坡角非构造应力集中强度加强。沟谷宽度影响非构造应力集中的范围大小和形状,而不影响构造应力面的深度。

此外, 尚需对非对称 U 形沟谷按不同沟谷宽度、山体坡度以及山体高度分别进行三维应力场有限元数值模拟研究, 分析构造应力面在空间的变化规律, 并进行数学统计分析。有关最大水平主应力方向在空间的变化规律也有待研究。

关于本文所得的经验公式仅仅为一初步研究结果, 在具体实际应用过程中尚要考虑除地形以外的其他因素, 尤其是构造因素。不同构造部位差异很大, 需要在考虑本文实验结果的基础上, 结合其他因素进行综合分析, 以确定研究区的构造应力面的深度。这一研究结果也需要在实践和进一步研究中不断完善和发展。

致谢 本文得到陈庆宣院士、王连捷研究员的指导和帮助。此外, 中国地质科学院地质力学研究所所长赵 越和中国地质科学院院长董树文对本文提出了宝贵的建议。

参 考 文 献

- 1 Pan E, Amadei B, Savage W Z. Gravitational and tectonic stresses in anisotropic rock with irregular topography[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1995, 32(3): 201 ~ 214
- 2 Amadei B, Pan E. Gravitational stresses in anisotropic rock with inclined strata[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1992, 29(3): 225 ~ 236
- 3 Savage W Z, Swolfs H S, Powers P S. Gravitational stress in long symmetric ridges and valleys[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1985, 22(4): 291 ~ 302
- 4 Tan C, Sun Y, Wang R. Present activity of the Shenzhen fault zone and its impact on the safety of a planned diversion tunnel in Shenzhen, China[J]. *Engineering Geology*, 2000, 57(1/2): 73 ~ 80
- 5 安 欧. 构造应力场[M]. 北京: 地震出版社, 1992, 437 ~ 438, 469 ~ 476
- 6 白世伟, 李光煜. 二滩水电站岩体应力场研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1982, 1(1): 45 ~ 55
- 7 王连捷, 潘立宙, 廖椿庭等. 地应力测量及其在工程中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 1991, 148 ~ 168
- 8 陈庆宣, 王维襄, 孙 叶等. 岩石力学与构造应力场分析[M]. 北京: 地质出版社, 1998, 58 ~ 228
- 9 陈彭年, 陈宏德, 高莉青. 世界地应力实测资料汇编[M]. 北京: 地震出版社, 1990, 31 ~ 33
- 10 李方全, 张伯崇, 苏恺之等. 三峡坝区水库诱发地震研究——茅坪钻孔的现场测试与分析[M]. 北京: 地震出版社, 1993, 11 ~ 45
- 11 袁登维, 梅应堂, 秦兴黎等. 长江三峡工程坝区及外围地壳稳定性研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996, 76 ~ 113
- 12 高士钧. 长江三峡地区地壳应力场与地震[M]. 北京: 地震出版社, 1992, 15 ~ 32, 48 ~ 78
- 13 Tan Chengxuan, Sun Ye, Wang Ruijiang, et al. Assessment and zonation of regional crustal stability in and around the dam region of the Three Gorges Project on the Yangtze River[J]. *Environmental Geology*, 1997, 32(4): 285 ~ 295
- 14 苏生瑞, 王士天, 朱合华. 断裂对地应力场影响的研究[A]. 见: 中国岩石力学与工程学会. 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002, 649 ~ 654
- 15 李方全, 孙世宗, 李立球. 华北及郅庐断裂带地应力测量[J]. *岩石力学与工程学报*, 1982, 1(1): 73 ~ 86
- 16 Zoback M D, Tsukara H, Hickman S. Stress measurements at depth in the vicinity of the San Andreas Fault——implications for the magnitude of shear stress at depth[J]. *J. Geophys. Res.*, 1980, 85(11): 6 157 ~ 6 173
- 17 Martin C D. Characterizing in-situ stress domains at the AECL underground research laboratory[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1990, 27(3): 631 ~ 646
- 18 Evans K F. Appalachian stress study: regional scale stress variations and their relation to structure and contemporary tectonics[J]. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94(14): 17 619 ~ 17 645
- 19 Amadei B. Importance of anisotropy when estimating and measuring in-situ stresses in rock[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1996, 33(3): 293 ~ 325
- 20 朱以文, 韦庆如, 顾伯达. 微机有限元前后处理系统 ViziCAD 及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1993