

不同土质条件下断层地表破裂对比研究¹

周庆 周本刚 冉洪流

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要 在莫尔-库仑理论中引用 Drucker-Prager 准则, 对于基岩断层及其上的覆盖土体建立相应的弹塑性模型, 观察在不同力学条件下(张应力、压应力、剪应力), 以及在基岩断层分别为正断或逆断作用下, 上覆粉砂质土体和粘土质土体的错动变形。结果表明: 在张应力作用下, 粘土比砂土更易变形; 在压应力作用下, 砂土更易变形; 而在剪应力作用下, 粘土比砂土更易变形, 且粘土抗剪强度越大, 变形越大。在正断层作用下, 在粉砂土与粘性土中所发生的变形并没有大的不同, 而在逆断层载荷作用下, 粉砂质土体比粘土质土体更容易变形位错。

关键词: 断层地表破裂 莫尔-库仑理论 Drucker-Prager 准则 土体变形

引言

在我国东部平原区, 大部分断层为隐伏断层。对于一项重大工程, 在用各种方法探测到一条隐伏断层之后, 工程技术人员面临的一个问题就是该断层未来是否将影响到地表的构筑物(如: 发生地震位错), 判断地震时破裂位错是否会到达地面。

目前对于覆盖土层的地震断层研究还处于起步阶段。在缺乏地震现场可靠资料的情况下, 为了了解发震断层上覆盖土层厚度对工程的影响, 北京市勘察设计研究院董津城等²1996年采用大型土工离心机进行了基岩垂直错动和水平错动两种离心机模拟实验。实验结果表明: 当位错量为 1.0—3.0m 时其最大破裂高度约 20m; 当位错量达到 4.0—4.5m 时其破裂最大高度约为 30m。日本的 Taniyama 和 Watanabe (2000) 做了砂箱试验, 并采用土的弹塑性模型对试验进行模拟, 其结论为: 当土层厚度 30—50m 时, 贯通破裂所需的断层竖向位移为覆盖土层厚度的 3%—5%; 当土层厚度为 75m 时, 贯通破裂所需的断层竖向位移为覆盖土层厚度的 7%。

中国地震局工程力学研究所的郭恩栋、邵广彪(2002)应用拟静力弹塑性计算方法对正、逆断层覆盖土层地震断裂进行了对比研究, 其结果表明: 随着土层厚度的增加, 贯通破裂所需断层位错随之增大; 而随断层倾角的增大, 所需断层位错正、逆断层变化情况有所不同。

1 中国地震局“十五”重点项目, “地震安全性评价与结构抗震技术研究”资助

2 董津城, 刘守华, 1996. 发震断层上覆土层厚度对工程影响研究报告.

[收稿日期] 2006-06-08

[作者简介] 周庆, 男, 生于1963年。博士, 副研究员。主要研究领域: 工程地震、GIS与人工智能应用。

E-mail: zqcsb@163.com

韩竹军等(2002)用 Yoshimitsu Okada 的理论(1992)模拟计算隐伏活断层未来地表破裂带宽度与位错量,得出下述结论:上断点埋深>60m 的隐伏活断层在未来突发性错动发生地震时,其破裂很难扩展到地表;在其它参数不变的情况下,隐伏倾滑断层倾角越小,地表破裂带越偏向下盘一侧,且宽度变小;隐伏走滑断层地表变形程度随上断点埋深迅速衰减;而位移量的增加会使地表破裂带宽度显著变宽。

本文试图从另一个角度观察:当上覆盖土层为不同土质时,在不同力学条件下,土层的错动变形情况。在进行有限元数值模拟时,上覆盖土层简化为单一土体,如粉砂土或粘性土。

1 岩土体的强度理论

1.1 莫尔-库仑破坏理论

土的强度特指抗剪强度,土体的破坏为剪切破坏。关于材料强度理论有多种,不同的理论适用于不同的材料。通常认为,莫尔-库仑理论最适合土体的情况(陈希哲,2004)。

莫尔-库仑强度理论认为材料破坏是剪切破坏,在破坏面上的剪应力 τ 是法向应力 σ 的函数:

$$\tau=f(\sigma) \quad (1)$$

由此函数关系所确定的曲线称为莫尔破坏包线,如图1所示。

库仑通过一系列土的强度实验,于1776年总结出土的抗剪强度规律:

$$\tau=c+\sigma \cdot \tan \phi \quad (2)$$

式中, τ 为土体破坏面上的剪应力,即土的抗剪强度,kPa; σ 为作用在剪切面上的法向应力,kPa; ϕ 为土的内摩擦角,(°); c 为土的粘聚力,kPa。

公式(2)为著名的库仑定律,如图2所示。此时破坏包线为一条直线。

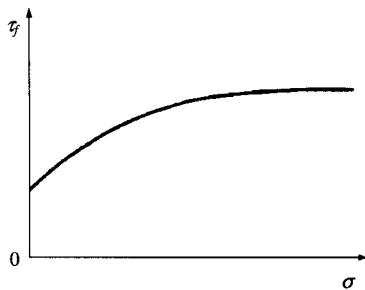


图1 莫尔破坏包线

Fig. 1 Mohr failure envelope

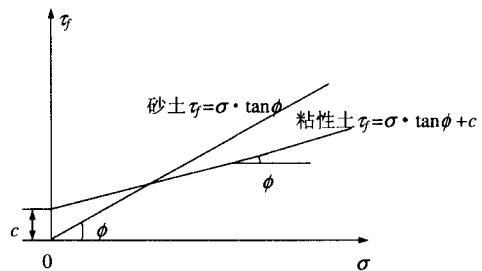


图2 库仑定律

Fig. 2 Coulomb Rule

1.2 德鲁克-普拉格(Drucker-Prager)准则

莫尔-库仑破坏理论体现了岩土材料压剪破坏的实质,所以获得广泛的应用,但没有反映中间应力的影响,不能解释岩土材料在静水压力下也能屈服或破坏的现象。

Drucker-Prager 准则,即 D-P 准则是在莫尔-库仑理论和塑性力学中著名的 Mises 准则基础上扩展和推广而得到的(杨桂通,2004):

$$f = \alpha \cdot I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0 \quad (3)$$

其中, $I_1 = \sigma_{ii} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ 为应力的第一不变量;

$$J_2 = \frac{1}{2} s_i s_i = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

$$= \frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zy}^2)]$$

为应力偏量第二不变量; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为主应力; α, K 为仅与岩土内摩擦角 ϕ 和粘聚力 c 有关的实验常数:

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}; \quad K = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}$$

Drucker-Prager 准则计入了中间主应力的影响, 又考虑了静水压力的作用, 克服了莫尔-库仑理论的主要弱点, 已在国内外岩土力学与工程的数值计算分析中获得广泛的应用。

2 单层土体不同应力条件下的变形分析

建立一个简单土体模型, 观察在不同力学条件下 (张应力、压应力、剪应力), 当底面在垂直或水平方向发生一定位移量 (如 1m) 时, 不同抗剪强度土体在顶面 (地表) 可能的垂直或水平位移量。

2.1 建立模型

几何形状为长方形, 其长: 400m; 高 (层厚): 100m。部分材料参数如表 1。

在土的大变形过程中, 弹性应变只有很小一部分, 为比较其抗剪强度在变形中的作用, 在此假设土体的弹性参数保持不变。土的弹性模量 E 取 5GPa, 泊松比取 0.35。边界条件设定为两侧固定, 网格单元取 4 节点四边形单元。

2.2 加载

加载过程分别以 3 种简化的载荷模式进行: ①张应力作用: 两侧固定、底面 3 节点向下位移 1m (上部土体层厚的 1%), 顶面为自由面; ②压应力作用: 两侧固定、底面单节点向上位移 1m (上部土体层厚的 1%), 顶面为自由面; ③剪应力作用: 两侧固定、整个底面向右平移 1m, 顶面为自由面。

2.3 结果分析

(1) 张应力作用

随抗剪强度逐渐增大, 顶面最大垂直位移也逐渐增大, 变形范围由小变大。在张应力作用下, 粘土比砂土更易变形 (图 3)。

(2) 压应力作用

随抗剪强度逐渐增大, 顶面最大垂直位移逐渐减小, 变形范围也逐渐减小。在压应力作用下, 砂土更易变形 (图 4)。

(3) 剪应力作用

随抗剪强度逐渐增大, 顶面最大水平位移逐渐增大, 变形范围由小变大。在剪应力作用下, 粘土比砂土更易变形; 抗剪强度越大, 变形越大 (图 5)。

表 1 不同土体的抗剪强度参数参考值

Table 1 Reference values of different soil mass under shear stress intensity

参 数	粉砂 1	粉砂 2	粘土 1	粘土 2	粘土 3	粘土 4
粘聚力 (c/kPa)	2	5	10	10	20	30
内摩擦角 (ϕ°)	35	35	35	20	20	20

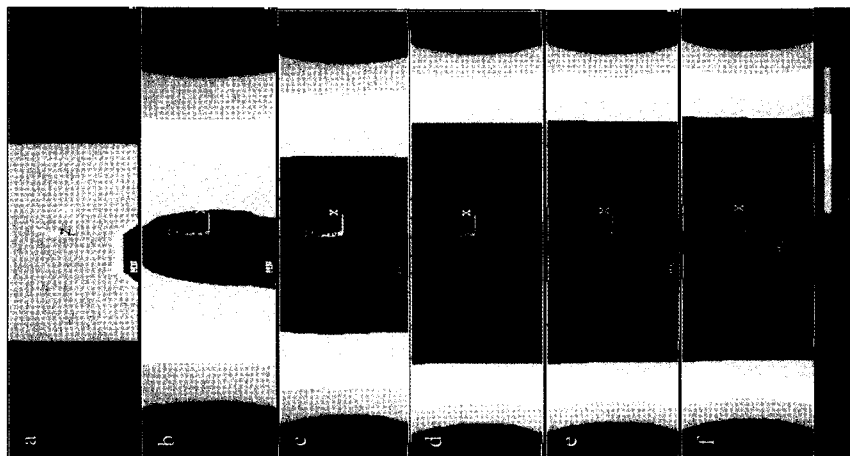


图3 张应力作用下不同土质土体的变形
(垂直方向位移分布图)

a. 中砂 $c=2, \phi=35$; b. 细砂 $c=5, \phi=30$;
d. 粘土 $c=7.5, \phi=20$; e. 粘土 $c=10, \phi=20$; f. 粘土 $c=20, \phi=20$
(两侧固定, 顶面自由; 底面3节点向下垂直位移=层厚的1%)

Fig. 3 Deformation in different soil mass under
tensile stress (vertical displacement)

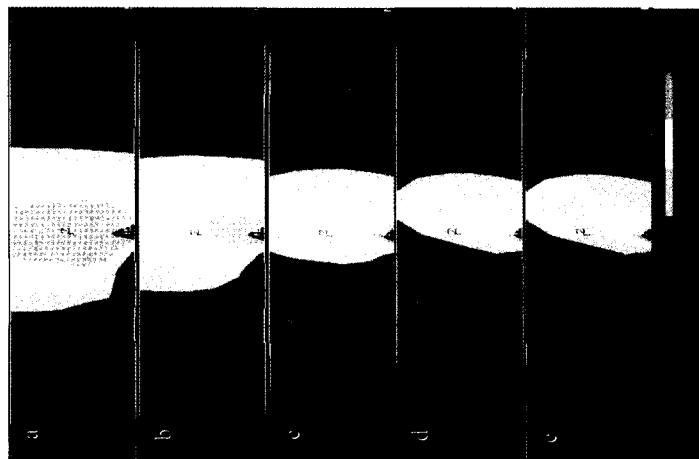


图4 压应力作用下不同土质土体的变形
(垂直方向位移分布图)

a. 中砂 $c=2, \phi=35$; b. 细砂 $c=5, \phi=35$; c. 粘土 $c=10, \phi=20$;
d. 粘土 $c=20, \phi=20$; e. 粘土 $c=30, \phi=20$
(两侧固定, 顶面自由; 底面单节点向上垂直位移=层厚的1%)

Fig. 4 Deformation in different soil mass under
compressive stress (vertical displacement)

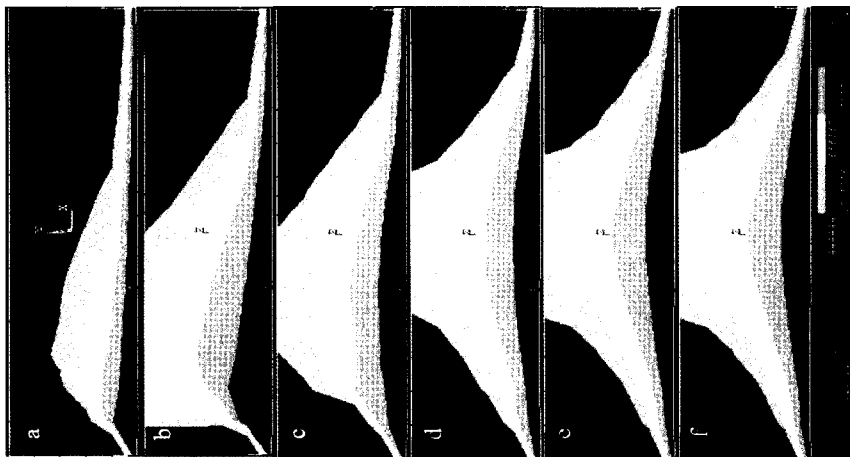


图5 剪应力作用下不同土质土体的变形
(水平方向位移分布图)

a. 中砂 $c=2, \phi=35$; b. 细砂 $c=5, \phi=35$; c. 粘土 $c=10, \phi=20$;
d. 粘土 $c=20, \phi=20$; e. 粘土 $c=30, \phi=20$;
f. 粘土 $c=40, \phi=20$
(两侧固定, 顶面自由; 底面向右水平位移=层厚的1%)

Fig. 5 Deformation in different soil mass under
shear stress (horizontal displacement)

3 双层断层模型

模型分两层，上层为厚 100m 的土层，下层为厚 50m 的砂岩层，长均为 400m。断层模型如图 6 所示。

上部土体用两种土作为比较对象：粉砂土 ($c=5, \phi=35$) 与粘性土 ($c=10, \phi=20$)。

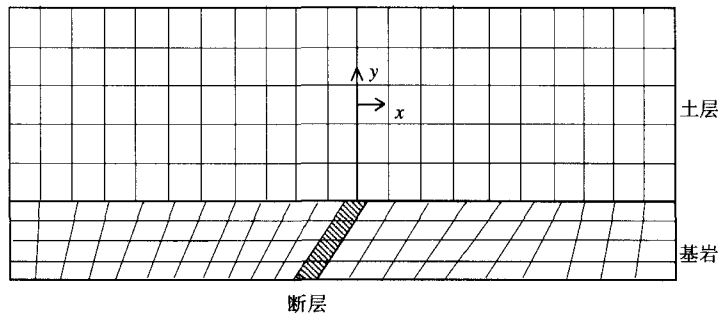


图 6 简单断层模型

Fig. 6 Simple fault model

3.1 正断层作用

(1) 边界条件与载荷

边界条件：土体两侧水平方向固定，垂直方向可以滑动。

载荷：上盘垂直下降 h (m)，顺倾向方向水平移动 $h \times \text{ctg} \alpha$ (m)， α 为断层倾角；下盘反向上升，土体顶面施加一个压力，其大小控制土体断错线的方向。

(2) 结果分析

粉砂土与粘性土在正断层载荷作用下所发生的变形并没有大的不同。正断层载荷作用后，上部土体发生变形，沿基岩断层错动线土体发生错动，在接近断层线处土体上下盘相对垂直位移差是基岩垂直位移差的 15% 左右，而基岩断层两盘的位移差最终反映在断层两侧的地形上 (图 7)。

在土体顶面断错对应处最大水平位移是基岩两盘相对水平位移的 50%—60% 左右，无论土体是粉砂土还是粘性土 (图 8)。粉砂土与粘性土在正断层载荷作用下所发生的变形并没有大的不同，原因可以解释为土的剪切强度在张应力环境中并不起主要作用。

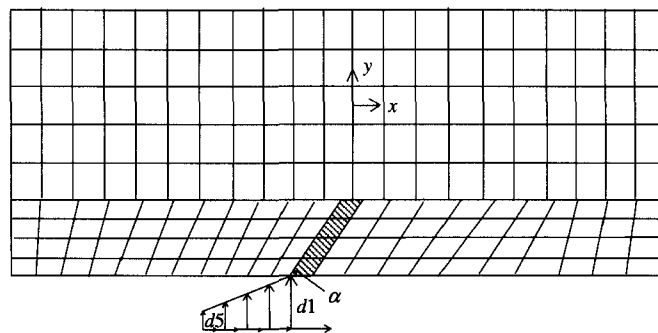


图 9 在基岩底面 5 个节点上施加坡度载荷示意图

Fig. 9 Slope loading on 5 nodes along bedrock baseplane

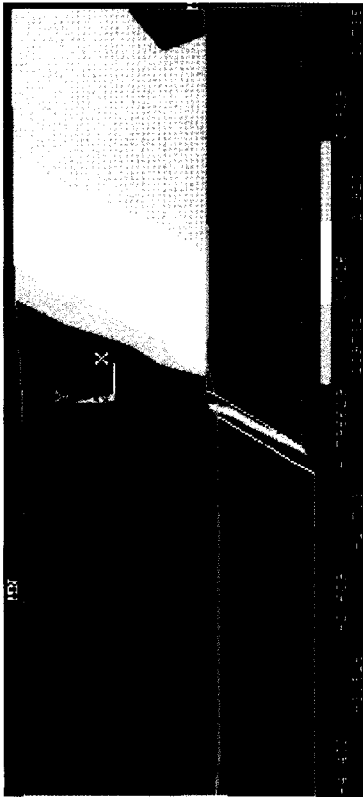


图 7 基岩上下盘沿倾向发生位错后的垂直位移分布图
 (上覆盖土体为粘性土, 基岩相对垂直位移 3m×2,
 土体发生相对垂直位错 0.9m)

Fig. 7 Vertical displacement after bedrock normal faulting

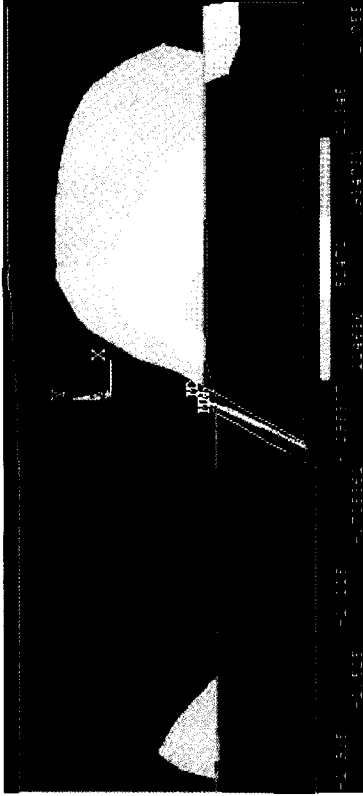


图 8 基岩上下盘沿倾向发生位错后的水平位移分布图
 (上覆盖土体为粘性土, 基岩上下盘相对水平位移 3m×2×ctg60°,
 土体顶面最大水平位移 1.9m)

Fig. 8 Horizontal displacement after bedrock normal faulting

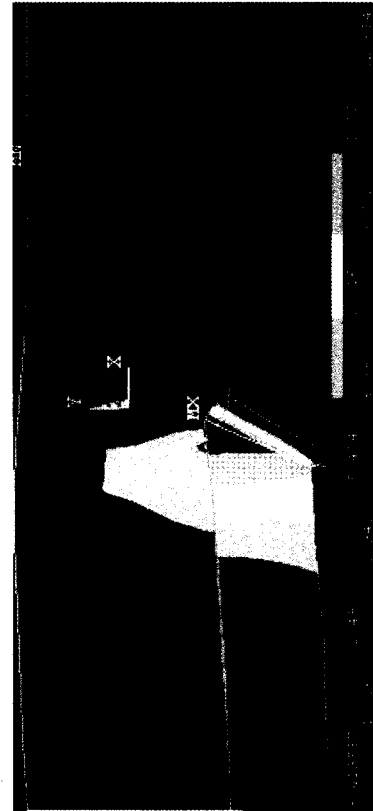


图 10 基岩上盘沿倾向逆冲向上发生位错后的垂直位移分布图
 (上覆盖土体为粘性土, 基岩最大垂直位移为 10m,
 土体顶面发生垂直相对位错 1.5m)

Fig. 10 Vertical displacement after bedrock reversal faulting

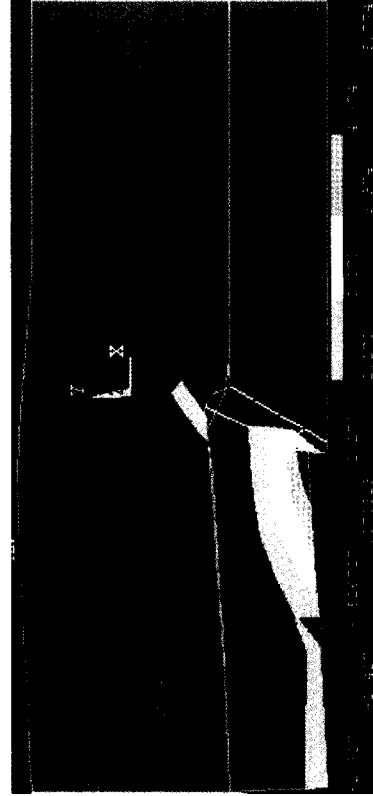


图 11 基岩上盘沿倾向逆冲向上发生位错后的水平位移分布图
 (上覆盖土体为粘性土, 基岩最大水平位移为 10m×ctg60°,
 土体顶面发生相对水平位错 1.4m)

Fig. 11 Horizontal displacement after bedrock reversal faulting

3.2 逆断层作用

(1) 边界条件与载荷

边界条件：土体两侧固定，下盘基岩底部位移为 0；

载荷：上盘单侧沿倾向逆冲向上，在基岩底面 5 个节点上施加坡度载荷，各点垂直上升 d_i m，顺倾向方向水平移动 $d_i \times \tan \alpha$ m， α 为断层倾角；土体顶面施加一个压力，其大小控制土体断错线的方向（图 9）。

(2) 结果分析

逆断层载荷作用后，上层土体发生变形，沿基岩断层错动线土层发生错动。在粉砂质土体内上下盘相对垂直位移差是基岩最大垂直位移的 19%—29%；在粘土质土体内上下盘相对垂直位移差是基岩垂直位移的 14%—16%左右（图 10）。

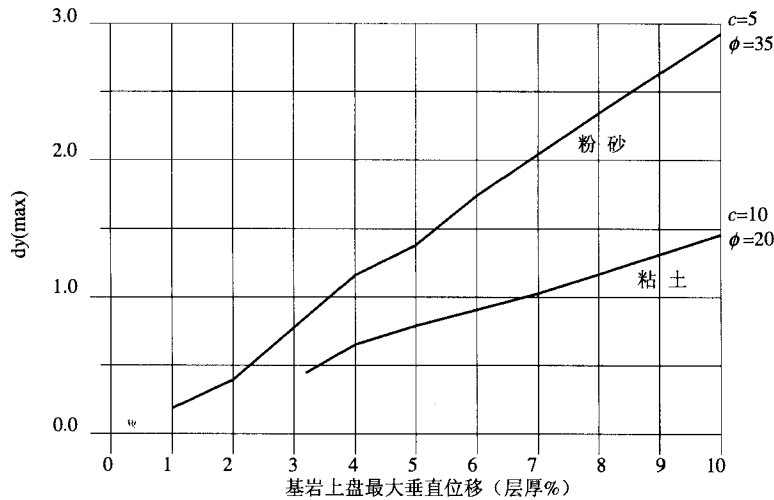


图 12 逆断层作用后土体断错最大垂直位移差随基岩上盘最大垂直位移变化曲线

Fig. 12 Curves of max vertical displacement for surface rupture of soil after bedrock reversal faulting

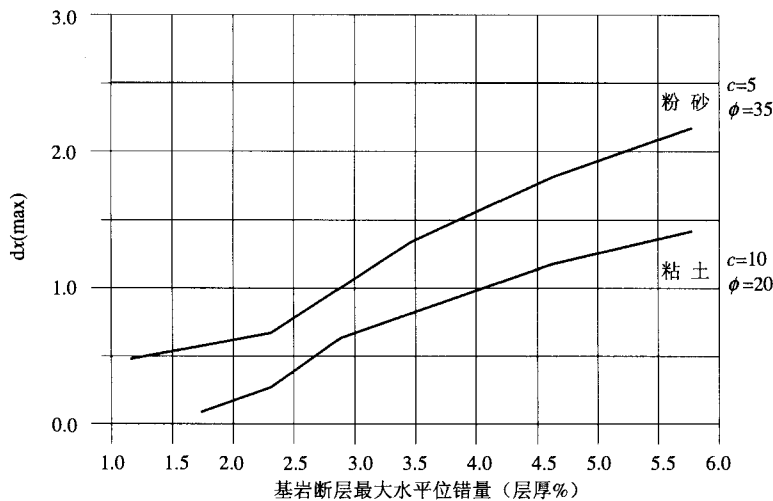


图 13 逆断层作用后土体顶面断错对应处最大水平位移随基岩上盘最大水平位移变化曲线

Fig. 13 Curves of maximum horizontal displacement for surface rupture of soil after bedrock reversal faulting

在粉砂质土体顶面断错对应处最大水平位移是基岩最大水平位移的 30%—40%；在粘土质土体顶面断错对应处最大水平位移是基岩最大水平位移的 5%—25%左右（图 11）。不同类型土体内的变形差异显然是由于剪切强度不同引起的。

图 12 为逆断层作用后土体断错最大垂直位移差随基岩上盘最大垂直位移变化曲线。图 13 为逆断层作用后土体顶面断错对应处最大水平位移随基岩上盘最大水平位移变化曲线。

4 结果与讨论

4.1 结果

(1) 单层土体不同应力条件下的变形分析。在张应力作用下，粘土比砂土更易变形；在压应力作用下，砂土更易变形；而在剪应力作用下，粘土比砂土更易变形，且粘土抗剪强度越大，变形越大。

(2) 正断层作用下，在粉砂土与粘性土中所发生的变形并没有大的不同。载荷作用后，上部土体发生变形，沿基岩断层错动线土体发生错动，在接近断层线处土体上下盘相对垂直位移差是基岩垂直位移差的 15%左右；在土体顶面断错对应处最大水平位移是基岩两盘相对水平位移的 50%—60%左右。

(3) 逆断层载荷作用后，沿基岩断层错动线土层发生错动，在粉砂质土体内上下盘相对垂直位移差是基岩最大垂直位移的 19%—29%；在粘土质土体内上下盘相对垂直位移差是基岩垂直位移的 14%—16%左右。

(4) 在粉砂质土体顶面断错对应处最大水平位移是基岩最大水平位移的 30%—40%；而在粘土质土体中变形位错就小许多，对应的数值是 5%—25%左右。不同类型土体内的变形差异显然是由于剪切强度不同引起的。

4.2 讨论

本文只是一次带有试验性质的二维弹塑性体静力分析，结果只能在定性分析隐伏断层地表破裂时参考使用。今后要得到工程实践可用的结果，数值模拟需更符合实际：如二维断层模型应发展到三维断层模型，应考虑断层瞬时破裂的动力过程，上覆盖土体也应采用多层模型等。

参考文献

- 陈希哲, 2004. 土力学地基基础. 北京: 清华大学出版社.
- 郭恩栋, 邵广彪, 2002. 正、逆断层覆盖土层地震断裂对比研究. 见: 新世纪地震工程与防震减灾. 北京: 地震出版社, 179—184.
- 韩竹军, 冉勇康, 徐锡伟, 2002. 隐伏活动断层未来地表破裂带宽度与位错量初步研究. 地震地质, **24** (4): 484—494.
- 杨桂通, 2004. 弹塑性力学引论. 北京: 清华大学出版社.
- Okada Y., 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bull. Seism. Soc. Amer., **82**: 1018—1040.
- Taniyama and Watanabe, 2000. Deformation of sandy deposits by fault movement. Proc. 12th WCEE (No. 2209), Vol. 6.

Comparative Study on Surface Rupture of Faults in Different Soil Mass

Zhou Qing, Zhou Bengang and Ran Hongliu

(Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

Abstract Elasto-plastic finite element model has been set up for the study on surface rupture of different soil mass above bedrock fault, using Drucker-Prager Rule in Mohr-Coulomb theory. Under compressive stress silt soil is easier to deform than clay soil, while clay soil has more deformation under tensile stress and shear stress. In normal faulting of underlied bedrock fault, surface rupture in silt soil and clay soil have no obvious dissimilitude. In reverse faulting, the smaller the shear strength, the larger the dislocation for soil mass, and vice versa. That means silt soil is easier to deform than clay soil in reverse faulting.

Key words: Surface rupture of faults; Mohr-Coulomb theory; Drucker-Prager rule; Soil mass deformation