

岩性对地电阻率前兆的影响

陈有发 董永德 康云生 丁卉·

(国家地震局兰州地震研究所)

从唐山7.8级和松潘—平武7.2级地震的地电阻率前兆中发现差异性很大,不仅表现在不同震中距的观测点,而且也表现在相同震中距的测点上。这种现象由何种原因所引起?经研究初步认为它是由浮土的结构构造和厚度以及下伏岩石结构的致密程度或力学性质不同所引起的。下面就具体讨论这些原因。

一、浮土的厚度对地电阻率异常的影响

第四纪松散沉积物—黄土、砂、砾石—在地质上称为浮土。它复盖着大陆的表面,其厚度相差甚大,可以从0到几千米,即使在局部范围内也是厚薄不均的。浮土最显著的特征是孔隙度和湿度都较大。浮土的平均孔隙率为41—56%,孔隙比(孔隙的体积与固体颗粒的体积之比)为72—150%。西北黄土的天然孔隙率平均为47.6%,变化范围为33.2—62.3%;天然孔隙比平均为92%,变化范围为45—165%;而天然含水量平均为18.63%,变化范围为3.33—41.4%。由此可见,浮土的结构是相当疏松的。再则,浮土不是弹性体,而是塑性体,它的应变和应力之间的关系不是线性的。因此,弹性理论的解不能应用于浮土。浮土的压缩性大,压缩系数为 0.0567 kg/cm^2 ,压缩弹性系数为 126.47 kg/cm^2 ,比岩石小得多。同时,浮土的坚实系数小,一般为0.3—2,是高度坚硬岩石(石英岩,玄武岩)的1.5—10%。这样,虽然浮土和岩石都是由固体、液体和气体组成的复杂的多相系统,但是,由于它们本身组成物质间的结构连结不同的原因,使得浮土和岩石在力学强度上很不一样。火成岩,变质和某些沉积岩由于牢固的结晶连结而使得本身具有较高的力学强度,压缩性小、孔隙率小,透水性差和较大容重等性质,而且,这种结晶连结不容易被破坏。浮土的结构构造则是完全与此相反。粗粒碎屑土及砂土中的颗粒,其结构连结具有一个个相互依靠着的特点,主要以重力及摩擦力相互作用着,卵石,砾石互相毫无连结。所以,浮土受力作用时主要为孔隙体积的变化,在小范围内浮土容易转化为致密状态;并且,由疏松转化为致密状态的过程是简单迅速的。

因此,松散的浮土是不利于应力和应变传递的。尽管在相同压力作用下浮土比岩石的变

• 淮淑琴、余存顺协助了有关工作。

形量要大得多,但是,由于浮土的固体颗粒被它的孔隙所容纳而变为小范围内的致密状态。所以,浮土的形变衰减得很快,传递不远,影响范围狭小;而中等坚硬程度以上的岩石则相反。虽然,它的形变量小一些,但是,它的形变量衰减缓慢,应力应变能传递很远,涉及范围大。因此,浮土在传递应力应变过程中有“吸收”或“软化”它们的作用;由应变引起的地电阻率异常量也受到相应的抑制,浮土越厚,这种“吸收”作用越显著。实验结果表明:在压力作用下岩石电阻率对应变的放大倍数为 10^2-10^3 ,而土体电阻率对应变的放大倍数约为5左右;二者相差2—3个数量级。由此可见,浮土对地电阻率异常的影响。

作为上述论点的图象说明,我们统计了唐山7.8级、炉霍7.9级和松潘—平武7.2级等地震周围地电阻率异常量 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 与浮土厚度 h 的关系如图1所示。在统计中没有考虑地震异常的方向性,震中距($0 \leq R \leq 150\text{Km}$)、供电极距($170 \leq AB \leq 3000\text{m}$)、测区地电断面以及地质构造、基底岩石性质等对异常量的影响。图中各点均为各台 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 的平均值。由图可以看出,地电阻率异常量 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 随着浮土厚度的增加而按幂函数迅速减少。在浮土厚度小的测点 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 量大,浮土厚度大的测点 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 量小。在浮土厚度小于180米时地电阻率异常量都大于2.0% (月均值),超过了观测误差;浮土的厚度超过250米时地电阻率异常就小于1.0%。只有位于极震区的唐山胜利桥台($h=250$ 米) $\Delta\rho_s/\rho_s$ 量才大于这个值。1976年7月28日唐山7.8级地震时胜利桥台($AB/MN=1000/200$ 米)位于震中、马家沟台($AB/MN=170/20-260/20$ 米)离震中13Km。二个台的岩性都大体差不多,前者为紫色页岩、后者为砂页岩。但是,由于马家沟台的厚度很薄(6m)和唐山胜利台浮土较厚(250米)的原因,所以,马家沟的 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 量比胜利桥的 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 大7倍左右。河北昌黎($AB/MN=900/200$ 米),天津宝坻($AB/MN=1000/200$ 米)和塘沽($AB/MN=2000/600$ 米)三台离震中均为80Km左右,它们浮土的厚度分别为70,180和300米以上,而它们地电阻率异常量的比例为1:0.5:0.18;实际上塘沽台的 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 只有0.9—1.1%,已经难于从干扰中分辨出来。它们 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 与浮土厚度 h 的关系服从下述统计规律

$$\Delta\rho_s/\rho_s = -0.021h + 7.3, \quad (1)$$

式中 h 的单位为米; $\Delta\rho_s/\rho_s$ 的单位为%。二者之间的相关关系为0.91。(1)式说明,浮土的厚度 h 越大,地电阻率 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 就越小,当浮土的厚度大于300米时 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 就趋近于零,没有地震异常。浮土厚度为180米以上的北京马坊和天津青光台对离它120Km左右的唐山7.8级地震都没有明显的反应,浮土厚度为80米的北京忠兴庄对离它150Km左右的唐山7.8级地震却有较好的反应。浮土厚度超过350米的北京徐庄子台对离它140Km的唐山地震没有任何趋势性反应。当然在相同浮土厚度时($h=70-80$ 米)地电阻率异常随着震中距的增大而衰减也是明显的。如离震中77Km的昌黎台地电阻率异常平均值为5.6%,而离它150Km的忠兴庄台却为2.7%。统计类似地震的 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 与震中距 R 的关系得到

$$\Delta\rho_s/\rho_s = 41.15R^{-1.5}, \quad (2)$$

式中 R 的单位为Km。浮土越薄地电阻率异常量就越大,它衰减到相同数量时所对应的震中距 R 就越大。

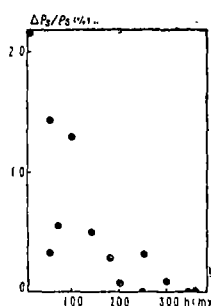


图1 地电阻率地震异常量 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 与浮土厚度的关系

1976年8月16日四川省松潘—平武7.2级地震时，松潘台离震中50Km，地电阻率异常不超过1.5%，而离震中102Km的甘肃武都台 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 量却在2.6—14.3%。同时，异常 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 随时间演变的阶段性特征也很明显，具有早期下降（1974年底至1975年9月），中期平稳（1975年10月至1976年6月），近期加速下降（1976年7月）、临震再加速下降并回升发震（1976年8月）和震后恢复的特征，即地电阻率异常时间长，幅度大，阶段性明显，临震异常显著如图2所示¹⁾。研究它们的台址条件发现是具有较大差异的。松潘台（AB/MN=800/200米）浮土的厚度为150—200米，下伏结构较为致密、电阻率较高的灰岩；武都台浮土较薄，反应地震最好的AB测线（AB/MN=900/300米， $\Delta\rho_s/\rho_s=14.3\%$ ）浮土的厚度只有35—50米，下伏结构疏松的低阻（岩石标本为 $100\times60\times60\text{mm}^3$ 的电阻是 0.18Ω ）碳质板岩和页岩。

综上所述，浮土的厚度对地电阻率异常的影响是很大的。它使得 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 在相同震中距上（如唐山7.8级地震 $R=80\text{km}$ 左右的昌黎、塘沽）和不同震中距上（如唐山7.8级地震 $R=0$ 的胜利， $R=83\text{Km}$ 的宝坻和 $R=150\text{Km}$ 的忠兴庄）的观测点差别悬殊。在相同测量装置和相同震中距的条件下浮土越薄地电阻率 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 就越大，阶段性特征就越明显。这样，唐山7.8级和松潘7.2级地震周围地电阻率异常存在的差异性就归结为各个具体地电台址浮土的厚度不同所引起的。并非“电性前兆不均匀性”的表现。因此，较厚的浮土是地电阻率法测量的最大干扰因素之一，在地电台址选择和台网合理布局上要特别注意浮土的厚度与它们的关系。浮土越薄（ $h<80\text{m}$ ）台网可以稍稀，浮土越厚（ $h<200\text{m}$ ）台网应该更密。如在 $h=80\text{m}$ 、 $R=150\text{Km}$ 时地电阻率异常 $\Delta\rho_s/\rho_s=1.1\text{—}4.3\%$ ，在 $h=200\text{m}$ 、 $R=50\text{Km}$ 时 $\Delta\rho_s/\rho_s=0.6\text{—}1.1\%$ ，亦即一个7—8级左右地震可以在它周围100—150Km左右范围内引起浮土厚度 h 小于100米的地电台有2—3年左右的地电阻率长趋势异常。

必须指出，浮土的厚度不仅影响地电阻率异常特征，而且也影响地电阻率年变化的幅度 $\Delta\rho_{s\text{年}}/\rho_{s\text{年}}$ 。这里所说的地电阻率年变化是在我们统计资料中占60%以上的正常年变化，其形态是1、2、3月分为极大值，7、8、9月分为极小值。地电阻率年变化幅度 $\Delta\rho_{s\text{年}}/\rho_{s\text{年}}$ 与浮土厚度的关系如图3所示。在统计时没有考虑地电阻率年变化幅度的方向性、基

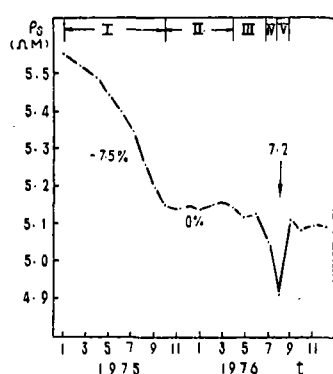


图2 武都台AB测线 ρ_s 阶段性变化



图3 地电阻率年变化幅度 $\Delta\rho_{s\text{年}}/\rho_{s\text{年}}$ 与浮土厚度的关系

1) 根据钱家栋的图件

底岩性和湿度、极距大小、电极埋深等对 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 年的影响。图中各点为每年地电阻率年变化幅度值。由图可以看出,随着浮土厚度 h 的增大,地电阻率年变化幅度 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 年值按幂函数迅速减少,与浮土厚度和地电阻率异常 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 的关系一样。浮土厚度大于80—400米时 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 年值一般都在0—3.0%以内变化。在相同的浮土厚度时地电阻率年变化幅度的变化范围也是很大的,尤其是在浮土厚度很小的时候,它可以从百分之零点几到30%以上。为何相差这样大,可能与下伏岩石的力学性质或电学性质和整个勘探体积内的湿度有关。在完全裸露的岩体上用60米到800米极距所测得地电阻率正常年变化幅度也不超过5.0%,如甘肃省通渭台和高台台的试验观测结果。

浮土的厚度同时影响地电阻率异常 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 和地电阻率正常年变化幅度 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 年。这样, $\Delta\rho_s/\rho_s$ 年和 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 在统计上也应该遵循一定的规律。统计结果说明,地电阻率正常年变化幅度较大的,地电阻率异常量也较大。 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 年小于1.5%的测点往往不能较好的反应地震。但是,虽然 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 年在8—21%的台站反应地震的异常幅度较大,可是次数太少,而且也仅仅只有马家沟。地电阻率年变化和地震异常之间的成因是否一致,我们正在研究。另外,这个统计关系也说明浮土的厚度对 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 的影响比震中距增大对 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 的影响要大得多。因此,事先选择固定地电台址作试验观测时,所测得的地电阻率一定要有幅度为3—4%左右的正常年变化才有可能在监视未来地震时有明显的异常。唐山7.8级地震时除胜利桥台外反应地震较好的都是具有正常年变化的台站(如昌黎、宝坻);松潘—平武7.2级地震时具有正常年变化的武都台比具有反常年变化的松潘台要大得多。

二、岩石的力学性质变化对地电阻率异常量的影响

在前面的统计分析中研究了浮土的厚度对地电阻率异常量的影响,定性地评价了浮土的结构,坚实性等物理性质变化对地震异常的可能影响。现在,我们对浮土下伏的成岩岩石的力学性质差异对 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 的影响进行讨论。这里所指的岩石力学性质是岩石在压力作用下它所呈现总的性质变化对 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 产生的影响,其中包括岩石解理,硬度,比重,脆性、延展性,弹性和挠性等变化;至于何为主要变化因素在此不作讨论。实际上,在总结唐山和松潘—平武地震电性前兆时,已经得到碳质板岩和页岩比灰岩容易反应地震,而灰岩又比花岗岩容易反应地震的概念^[1],也就是说,结构疏松、孔隙度大,湿度适中的成岩低阻岩石反应应力应变作用较好。三大类岩石中沉积岩(除个别岩石外)的结构疏松,孔隙度大、其变化范围为0.7—65%;变质岩结构稍致密、孔隙度变化范围为0.1—18.8%,火成岩结构最致密,孔隙度变化范围为0.2—6.0%^[2]。它们的坚实系数也依次增大,而压缩性却依次减小。因此,沉积岩和变质岩在压力作用下电阻率变化量肯定会比火成岩要大。苏联学者Э.И.帕尔霍敏柯(Э.И.Пархоменко(1965))的实验证明在1000kg/cm²围压条件下四块沉积岩的电阻率平均变化量为44.5%,变化范围为30—67%;砂质泥岩,页岩(片岩,板岩),砂岩和石灰砂岩的电阻率变化量分别为30, 33, 48和67%。三块火成岩的电阻率平均变化量为29.0%,其变化范为22—42%,铁道部建所隧道室(1977)作0—80kg/cm²单向压力实验得到致密长石砂岩,(夹黑色矿物微层理明显)长石砂岩,紫红色砂质泥岩和(含少量泥质矿物)紫红色砂质泥岩的电阻率变化量分别为4.4、13.9、21.3和33.3%。因此,在相同压力作用下致密岩石的电阻率变化量比疏松岩石的要小得多。

北京大学地球物理系作过 $0-500\text{kg/cm}^2$ 的单向压力实验，其有关数据如表 1。由表看出，在单向压力作用下岩石电阻率变化量 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 是随着岩石孔隙度 (K) 和矿物颗粒直径的增大而增大，随着岩石致密程度的降低和比重 D 的减小而增大，致密坚硬的岩石电阻率变化量比结构疏松的岩石电阻率变化量要小几倍。并且 $\Delta\rho_s/\rho_s/D$ 和 $\Delta\rho_s/\rho_s \cdot K$ 都与 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 或矿物颗粒直径大小成正比。因此，可以利用这个关系在受压岩体上测定 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 变化量来确定岩石比重 D 和它的孔隙度 K。

在此指出，岩石的致密程度和坚硬程度由地表向地下深处是随着深度的增大而增大，孔隙度或裂隙率却与此相反，它们是随着深度的增加而减小如表 2。所以，在相同压力作用下岩石电阻率变化量也是随着深度的增大而减少。这样，当地电的勘探深度 (或供电电极距 AB) 大到一定时，地电阻率的变化量可能削减到很小的量级。为了说明这个问题，我们统计了地电阻率年变化幅度大小与供电电极距 AB 之间的关系如图 4 所示。统计时未考虑浮土的厚度、地电阻率年变化的方向性^[8]、测区内地质构造、岩石的结构及湿度等因素对地电阻率年变化幅度与 AB 关系的影响。图中各点均为地电阻率年变化幅度值，在小极距时 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 年/ ρ_s 年大于 30% 的点没有画在图上。由图可知，地电阻率年变化幅度值 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 年/ ρ_s 年随着勘探深度 (或供电电极距 AB) 的增大而按幂函数减小，在 AB 大于 2000 米时地电阻率年变化幅度就在 0—4% 以内变化。

在 $0-500\text{kg/cm}^2$ 单向压力作用下岩

石电阻率 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 变化量 表 1

岩石	孔隙度 (K) (%)	比重 (D)	$\Delta\rho_s/\rho_s$ (%)	矿物颗粒直径 (mm)
龙山硅质白云岩	0.344	2.819	2.8	0.01-0.1
房山花岗岩	0.758	2.740	4.2	0.5-2.0
阳房花岗岩	0.867	2.636	7.6	
南口粗粒花岗岩	1.376	2.617	9.7	0.5-2.5

岩石裂隙率 (%) 随深度

的变化 表 2

深度 (m)	裂隙率	深度 (m)	裂隙率
10-20	0.33	40-50	0.23
20-30	0.35	50-60	0.15
30-40	0.31	60~	0.16

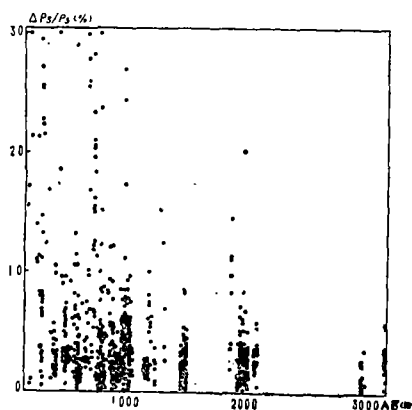


图 4 地电阻率年变化幅度与供电极距 AB 的关系

岩石力学性质的差异使得岩石本身在压力作用下形变程度不一样，结果导致电阻率变化量也不同，它们二者的比值为

$$\beta = \frac{\Delta\rho_s/\rho_s}{\Delta L/L}, \quad (3)$$

式中 $\Delta L/L$ 为岩石的应变变量， $\Delta\rho_s/\rho_s$ 为岩石的电阻率变化量， β 为岩石电阻率对应变的放大倍数，张同俊等 (1975) 在 100kg/cm^2 以内的压力作用下得到矽化灰岩 β 平均值为 $0.74 \cdot 10^3$ ，山崎良雄 (YAMAZAKI, Y.) (1965) 在 139kg/cm^2 量级的压力作用下油壶火山砾凝灰岩 β 值为 10^2-10^3 ，他用 1.6 米的四极对称装置测量相当潮汐应变 (10^{-6}) 量级的疏松岩石得到 β 值为 300

左右。成岩岩石的 β 值都在 10^2-10^3 以上，然而，力学性质与岩石完全不同的松散浮土 β 值却

小得多。国家地震局地质所李建国等(1978)作 $0-30\text{kg/cm}^2$ 的土体电阻率压力实验得到 β 值为 $1.5-4.8$,为岩石 $1/100-1/500$ 。所以,浮土是不利于传递应变的,它把地电值率异常量大大压抑了。

必须指出,岩石的 β 值除了与本身力学性质,受力大小及方式有关外,还与岩石的湿度有密切的关系。山崎良雄(1966)作过 150kg/cm^2 作用下湿度为 $0、18、25\%$ 的火山砾凝灰岩电阻率实验得到 β 值分别为 $400、250、25$,即湿度越大, β 值越小,岩石的电阻率变化量就越小, $\Theta \cdot \Pi \cdot$ 帕尔霍敏柯(1965)作过不同湿度的岩石在单向压力作用下得到电阻率变化最大者是湿度中等的岩石;李建国(1978)作过湿度为 $13、21、27\%$ 的土体电阻率压力实验得到 β 值为 $3.5、4.8、1.4$ 。因此,大湿度岩石的电阻率对应变变化的反应是不好的;地电勘探体积的岩石一定要有合适的湿度,供电电流应该集中通过部分饱和岩石的层位。

三、结 束 语

浮土的厚度,力学性质、孔隙度和湿度等决定了浮土对地电阻率异常特征量的影响,较厚的浮土成为地电的最大干扰因素之一。因此,在选择地电台址时一定要合适的浮土厚度。浮土层下伏的成岩岩石的致密程度(或力学性质)也影响地电阻率异常特征量,结构疏松的岩石比结构致密的岩石反应地震要好,即 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 量级大。由于岩石的致密程度由地表向地下是随着深度的增大而增大的,所以,在相同压力作用下岩石电阻率的变化量也是随深度的增大而减小的。

因此,地电勘探体内的岩性对地电阻率前兆有很大的影响,是震中周围地电阻率前兆呈现不均匀性分布的主要原因之一。

(本文1981年1月27日收到)

参 考 文 献

- [1]陈有发等,地下岩石视电阻率年变化,西北地震学报, № 3, 1979.
- [2]E.M.克维亚特柯夫斯基,电法勘探上册,地质出版社,1959.
- [3]陈有发等,地电阻率年变化的方向性与中国大陆构造应力场,地震学报,第三卷 第1期,1981.

INFLUENCES OF ROCK MECHANICAL PROPERTIES ON PRECURSOR OF APPARENT ELECTRICAL RESISTIVITY

Chen Youfa Dong Yongde Kan Yunshen Ding Hui
(*Seismological Institute of Lanzhou, State Seismological Bureau*)

Abstract

In this paper, based on the data of apparent electrical resistivity observed in the regions surrounding some large earthquake ($M \geq 7$) epicenters, the influences of rock mechanical properties in the observational region on precursor $\Delta\rho_s/\rho_s$ of apparent electrical resistivity are studied. The results obtained show that the thickness of quaternary covering soil can abate the precursor of apparent electrical resistivity, and the thicker the quaternary covering soil, the smaller the value of precursor $\Delta\rho_s/\rho_s$ of apparent electrical resistivity. Moreover, the rocks with loose structure reflect the earthquake precursor of apparent resistivity more obviously than that with compact structure. Therefore, the observational stations of apparent electrical resistivity must be installed on the thin soil layer covered the rock fundament with low electrical resistivity.