

苏联定向爆破筑坝不做防渗体的 试验和实践

水利水电科学研究院 金永堂

世界上建坝经验表明, 在施工条件困难、气候恶劣的山区, 利用当地材料筑坝是比较经济合理的。而定向爆破筑坝则是修建当地材料坝的一种投资省、工期短的有效法⁽¹⁾。在苏联已成功地采用大爆破建成了努力克(Нурек)电站的高围堰、美乔(Мелео)的防洪坝、瓦赫胥(Вахш)河上的巴帕静(Байпаэин)枢纽……等。可是过去对这样一种有效的, 广泛被采用的筑坝方法缺乏基础性研究。如堆石体的颗粒组成、密实度和渗透特性等指标的研究。对设计和建造更高的这种坝来说, 除了需要研究以上指标外, 还应探求增大爆破规模的新途径。这种新途径之一是大规模爆破的物理模型法。它不仅能解决有关爆破规模的问题, 而且可以模拟深峡谷的地形条件(包括峡谷的平面和断面形状)。

上述问题, 在设计吉尔吉斯共和国那伦河(Нарын)上300米高的康巴拉金(Камбаратин)电站大坝时, 根据计算, 该坝所需的炸药量大大超过以往完成的爆破工程。故东方水电建设总局和中亚水工建筑物设计分院等单位, 于1975年2月在布雷基亚(Бурлык-ия)河上完成了试验坝的爆破, 这是为实现康巴拉金坝大爆破总体计划的第一步⁽¹⁾。试验坝高50米, 坝体方量达30万米³。在工作条件极差、荒无人烟的地方, 仅用12个月就完成了。苏联爆破应用科学委员会水利建设爆破工程分会指出: 这次爆破实践, 再次证明这一方法的合理性; 同时, 根据大量观测试验资料认为, 用此法修建康巴拉金大坝是恰当的⁽¹⁾。

一、康巴拉金坝的设计概况⁽²⁾

1973年, 苏联国立水工建筑物设计院中亚分院开始那伦河上的康巴拉金电站的初设。电站装机200万千瓦。枢纽由均质堆石坝、两条发电隧洞、两条泄水隧洞和地下厂房组成。坝址位于一个急弯的河段上, 河段长4~5公里。河谷岸坡很陡, 两岸不对称。底部为深30~60米的峡谷, 两边山崖高出河岸800~900米(右岸)和1100~1200米(左岸)。河岸处谷宽60~180米, 坝顶高程处谷宽750~950米。基岩为中细粒花岗岩与石英岩, 裂隙比较发育。

设计坝高300米, 坝顶长750米, 坝顶宽250米, 坝底宽2600米, 上游面坝坡1:2, 下游面坝坡在离坝轴线1300米范围内为1:10, 下部则用1:2.5。采用大规模定向爆破筑坝技术, 不仅堆积体很密实, 而且坝体宽厚, 因此设计中决定不做昂贵的防渗体⁽²⁾。

根据设计的坝体轮廓和坝址的地形条件, 计划布置两条炸药室, 局部地区布置三条(图1)。

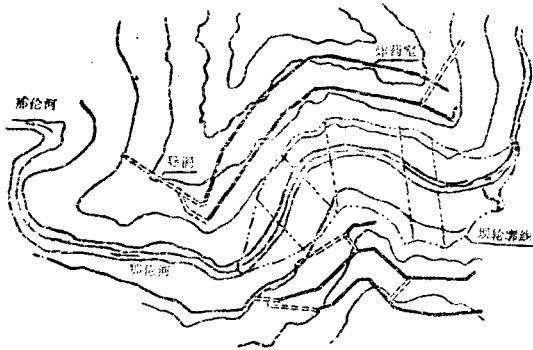


图1 康巴拉金坝枢纽布置略图

药室最小抵抗线长度：右岸为 90~190 米；左岸为125~220米。为了使爆破岩块堆积的坝体较均匀，采用条形药包。爆破经验表明，条形药包能较好地保证坝的断面形状、堆积体的均匀性与密实性。

条形药包的装药量可按以下公式计算：

1. 《能源建设爆破工程准则》⁽³⁾中推荐的公式

$$Q' = 1.2K\omega^2 (n^2 - n + 1) \sqrt{\frac{\omega}{25}} \quad (1)$$

2. 阿佛捷耶夫 (Авдеев Ф.А.) 公式⁽⁴⁾

$$Q' = \frac{2K\omega^2 (0.4 + 0.6n^2)}{n + 1} \omega^{-0.0032(\omega - 25)} \quad (2)$$

3. 波可罗夫斯基 (Покровский Г.И.) 公式⁽⁵⁾

$$Q' = K\omega^2 \frac{1}{n} \left(\frac{1 + n^2}{2} \right)^2 \sqrt{\frac{\omega}{25}} \quad (3)$$

4. 布尔希金 (Бурштейн М.Ф.) 公式

$$Q' = \frac{q\omega^2 n^2 \left[0.75 \left(\frac{1}{n} + n \right)^2 (1 + 0.02\omega) \right] \cos \alpha}{0.5 (n + 1)} \quad (4)$$

- 式中 Q' ——条形药包装药量 (公斤/米)；
 K ——单位体积耗药量 (公斤/米³) 对花岗岩 $K = 1.8$ 公斤/米³；
 ω ——最小抵抗线长 (米)；
 n ——爆破作用指数 (主药包 $n = 1.1$)；
 q ——松动爆破单位耗药量，近似值 $q = 0.33k$ 公斤/米³；
 α ——岸坡坡角。

条形药包装药量也可以用下列白雷斯可夫公式分别算出球形药包装药量而得。

$$Q' = \frac{K\omega^2 (0.4 + 0.6n^2) \sqrt{\frac{\omega}{25}}}{0.55 (n + 1)} \quad (5)$$

除公式 (2) 外，其它各式算得的总炸药量为60~90万吨。

为了验证堆积体形状、炸药量计算的准确程度与坝体的渗透特性。为此在康巴拉金坝址的花岗岩区域内的布雷基亚支流上找到了一个地形与地质条件相似的较小峡谷作为试验坝址 (其比尺约为1:7)⁽²⁾，为康巴拉金坝的设计提供可靠的依据。

二、布雷基亚河上試驗坝的建造〔6〕

試驗枢纽的主要任务是：爆破堆积体计算的准确性；岩石堆积体的工程地质和渗透稳定特性；爆破对附近岩体、枢纽建筑物和其它工程的影响等。参加試驗研究的有许多科学研究机构、设计单位、工程局和大专院校。

康巴拉金坝模型比尺的选择是个重要问题。根据以往对美乔爆破堆石坝堆积体密实度沿深度变化的研究，最大密实度稳定在深度25~30米，因此試驗爆破堆积体的高度不应低于40米，即合理的比尺为1:7~1:8。

经过勘探，試驗坝的地形和地质条件都与康巴拉金坝极为相似。坝段河床坡降为0.036，河弯长度为400米左右，河床宽5~7米，河岸宽20~30米，坝顶高程处宽70~80米。两岸谷坡45°~55°。岩层为花岗斑岩与辉绿岩。各种频率流量：P=5%为3.13米³/秒，P=50%为2.19米³/秒；洪水流量：千年一遇为54米³/秒，万年一遇为72.5米³/秒。平时在坝体渗漏的情况下能保证上游蓄到计算所需要的水头。

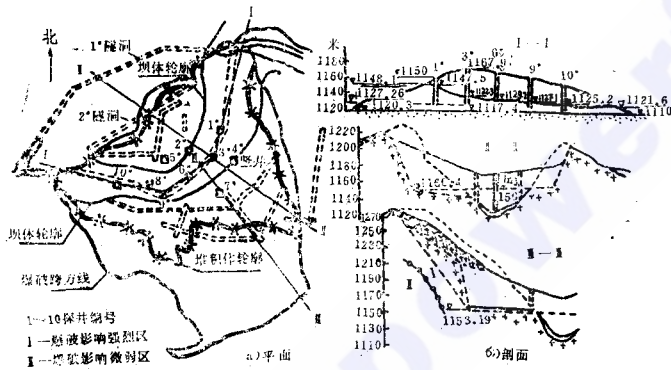


图2 布雷基亚河上爆破試驗坝

試驗枢纽于1974年4月动工，到11月完成了全部药室的平洞、一号隧洞和左岸主药室試驗洞的开挖任务。在整个勘探期间，国立水工建筑物设计院中亚分院完成了1200米的地下平洞开挖。仅2号隧洞邻近药室危险区的63米一段，是在爆破以后完成的。

1974年，除工程地质编录外，一年内还完成规定的全部岩体特性試驗，和大量的物探工作如地下和地表岩石的地震剖面、声波剖面和岩石穿透試驗，以及岩样的超声波試驗等。根据所得观测资料，结合美乔坝与其它工程的爆破实践经验，可以予测试驗坝坝体材料的颗粒组成。其计算的正确性为爆破試驗的实测资料所证实（见图3）。

1974年12月到1975年1月装完全部炸药，同时完成了位于危险区的1号隧洞出口段和2号隧洞距药室最近的10米长試驗段的混凝土衬

試驗枢纽根据坝轴线的地形，决定大部分堆积体来自左面凹岸，因此，那里装药量为整个爆破炸药量的90%。布置在右边凸岸的泄水建筑物，为了离开主药室远一些（见图2），按设计要求，建两条泄水隧洞。泄水能力为13米³/秒，保证万年一遇洪水不漫坝顶。

为增强爆破效果，减少药室开挖工作量和简化准备工作，设计采用条形药包，总炸药量为687吨，施工时增加到703吨。

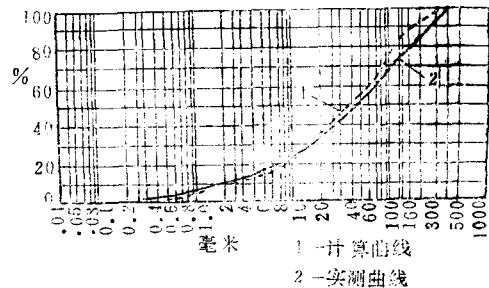


图3 試驗坝材料颗粒组成曲线

砌。所有准备工作在1975年1月底结束。2月8日当地时间13时起爆。

遗憾的是起爆前4天,天气突然转冷,河流结冰厚达1~1.5米。这一情况显然会降低坝体底部岩石堆积的质量,特别是靠下游一侧的河床部位。可以想象,大块岩石可以击穿冰层,而小颗粒就进不去,因此底部坝体空隙较大,增大了渗透性。

在爆破时进行了各种观测工作。观测了爆破发展过程;量测了岩体的运动参数、尘云、岩体内压缩波参数和空气冲击波等;试验了从0.1~1公里近处到5~150公里远处的地震波分布规律;记录了附近的居民区和督克督古列电站(Тоткогуль)的受震影响。

爆破后形成了一座50米高的坝,坝的底宽330米,坝体方量为30万米³。上游坝坡1:3,下游坝坡1:5和1:2.4。与原设计相比,坝高增加7米,向上游多延伸50米。坝的下游表面复盖了一层0.7~1.5米的大块石,这对抵抗水流冲刷是有利的。

爆破当时河中流量为0.55米³/秒,15小时后下游出现混浊的渗漏水,36小时后渗漏水变清;过两昼夜,渗漏量达0.25米³/秒,此时上下游水位差17米。到1976年3月,上游水位稳定后,渗漏量减少为0.2米³/秒。

爆破后立即布置对坝体和左岸岩体的水平向和垂直向的变形观测点。2月20日完成了14个观测点的第一组观测。到1976年7月,共进行了22组观测。测得坝中间部位坝顶最大沉陷值为11厘米,而上游和下游坡的中点,其沉陷值各为32和26厘米。这说明定向爆破堆石坝的沉陷规律不同于一般机械碾压或抛筑的堆石坝(笔者注:后者最大沉陷值一般在坝最高断面的坝顶)。

水库试验性蓄水在1976年3月到6月底进行,最高水头达35米。渗透流量为2.3米³/秒,相当于坝体平均渗透系数达600米/昼夜;但坝体中间部位的渗透系数不超过250~300米/昼夜。其后还继续观测坝体在长期高水头作用下的渗透变形情况。

三、爆破试验的准备工作和实施〔7〕

布雷基亚河上的爆破,主药室最小抵抗线:左岸为7~40米,右岸为9~24米。辅助药室的最小抵抗线为8~22米,用作图法确定。

每米洞长装药量(以公斤/米计)按下式计算:

$$Q = \frac{K \omega^2 (0.4 + 0.6n^3) e}{0.55(n+1)} \quad (6)$$

式中 K——单位体积耗药量,采用1.8公斤/米³;

ω ——最小抵抗线长(米);

n——爆破作用指数(主药包取n=1.1);

e——换算系数(取e=1.12)。

当最小抵抗线长大于25米时,增加埋深的修正系数为:

$$\sqrt{\omega/\phi/25}.$$

装炸药藉助于风动装药器。由于装药量大、地形复杂、工期紧以及安全要求,装药工作作为单项设计进行。按事先规定的爆破次序,左岸的1号药室最先起爆;过25毫秒起爆4号药室;再过75毫秒起爆2号药室;又过100毫秒起爆3号药室。药室布置见图4。

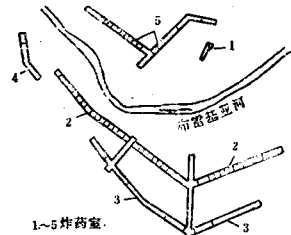


图4 实际药室布置

设计堆积在峡谷内的爆破体总方量为47.8万米³，形成高40米、长230米、坝体为18.8万米³。计算采用松散系数1.26。

根据岩石飞越距离确定对人的危险区半径为1600米；对机械设备为800米。2号隧洞洞身离药室40米，算得震速为28厘米/秒，对其混凝土衬砌不致出现较大的影响。

爆破试验前的地下开挖工程和药室装药指标见表1和表2。

表1 地下工程开挖

| 工程项目名称 | | 断面(米 ²) | 长度(米) |
|-----------|--------|---------------------|-------|
| 泄水 建筑物 | 1号隧洞 | 3.6 | 278 |
| | 2号隧洞 | 5.8~7.8 | 63* |
| 炸药 室 | 左 岸 | 1号 | 254 |
| | | 2号 | 182 |
| | | 3号 | 37 |
| | | 导洞 | 70 |
| | 右 岸 | 4号 | 169 |
| | | 4.号 | 15 |
| 试验平洞 | | 2.7 | 130 |

* 其余99米的洞身在爆破后开挖。

表2 各药室装药指标

| 药室(见图4) | 作用 | 位置 | 总长度(米) | 炸药量(吨) |
|---------|----|----|--------|--------|
| 集中药包1 | 辅助 | 右岸 | | 2.3 |
| 球形药包5 | 主要 | ” | 126 | 88.5 |
| 条形药包2 | 辅助 | 左岸 | 227 | 124.1 |
| ” 3 | 主要 | ” | 183 | 469.1 |
| ” 4 | 主要 | ” | 34 | 18.2 |
| 总计 | | | | 702.2 |

爆破的技术经济指标见表3：

表3 试验坝爆破技术经济指标

| 项 目 | 单 位 | 设计数 | 实际完成数 |
|-----------------------------|-------------------|------|----------|
| 坝 体 工 程 量 | 万 米 ³ | 18.8 | 33.8 |
| 松 散 系 数 | 表 层 | — | 1.45 |
| | 深 部 | 1.26 | 1.26~1.3 |
| 爆破岩体 (松散体) | 万 米 ³ | 60.3 | 90 |
| 上坝方量 | % | 31 | 38 |
| 药 室 数 | 条 | 5 | 5 |
| 总炸药量 | 吨 | 702 | 702 |
| 单位岩体耗药量 | 公斤/米 ³ | 3.73 | 2.08 |
| 每1000米 ³ 爆破体的开挖量 | 米 ³ | 4.35 | 2.8 |
| 每米 ³ 爆破体单价 | 卢布 | — | 0.44 |
| 每米 ³ 坝体单价 | 卢布 | — | 1.18 |

四、布雷基亚试验坝的颗粒组成、密实度和渗透性测验⁽⁸⁾

试验坝要求以下参数与康巴拉金坝符合相似准则：坝体外形与尺寸，爆破能量，岩体堆积体高度，块体尺寸，岩块的物理力学指标……等。

坝体的形成过程分为“爆破”与“堆成”两个阶段。如果两者工程地质条件近似的岩体，若炸药用量成比例，其爆破堆积体的颗粒组成和密实度也应当相是似的⁽⁹⁾。

为了分析测定坝体的颗粒组成、密实度和渗透性等指标，爆破后在10

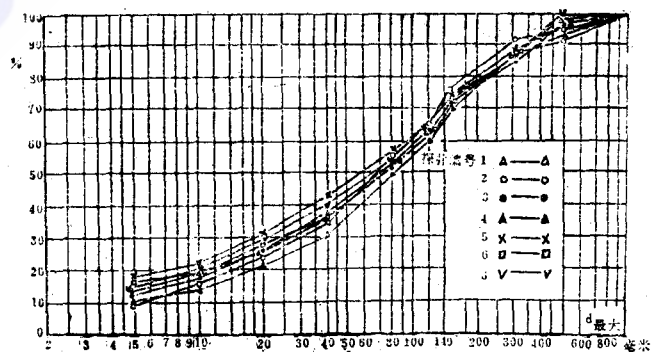


图5 坝体探井取样实测级配曲线

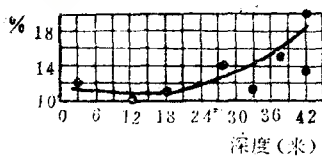


图6

个断面上开挖了 2.5 × 2 米的竖井 (见图 2)。其中 7 号与 5 号井挖在左右岸爆破漏斗区，目的是探明坝底准确的高程；2 号与 4 号井挖在坝体与岸边相邻地区，目的是评价爆破堆积体与岩基连接的质量；其余竖井位于河流轴向的 5 个断面上，彼此相距 30~40 米。对每个竖井都进行了坝体材料的颗粒级配、密实度与渗透系数的测定。

沿井深每米取样 1000~1200 公斤进行颗粒分析。不同探井的颗粒级配曲线见图 5。

这些曲线说明整个坝体材料是均一的，但坝体内的颗粒（粒径小于5毫米）含量有向下逐渐增多的趋势（见图6）。

卢希纳夫 (Лущинов Н.П.) 认为⁽¹⁰⁾：当坝体材料的颗粒组成，其不均匀系数 $\eta = d_{70}/d_{20} = 10 \sim 25$ 时，坝体可获得最大的密实度，渗透稳定性也最好，堆积体变形相应最小。布雷基亚试验坝的材料 $\eta = 12 \sim 15$ ，故其颗粒组成是很理想的。

由于细颗粒含量随坝深增大而增多，故300米高的康巴拉金坝下部细颗粒含量将比50米高的布雷基亚坝多。根据美乔坝体材料的颗粒分析，细颗粒含量的极限值（含量到达此值后不再随深度增加）为25~30%，在这种含量的情况下，细颗粒已充满全部大颗粒间的空隙，故渗透系数较小。

由于坝体颗粒组成很理想，所以整个坝体的密实度都很高，平均干容重为1.85~2.05吨/米³（见图7）。

从图7可以看出，坝的表层密实度为1.75~1.85吨/米³，40米深以下为2.0~2.1吨/米³。图8为坝体中心部位的等密实度线。

根据密实度和沉陷量的试验关系，当密实度 $\gamma = 1.9$ 吨/米³以后，沉陷量已很小。由此说明，试验坝的密实度为1.9~2.05吨/米³也是很理想。图9为试验坝的实测绝对沉陷值。

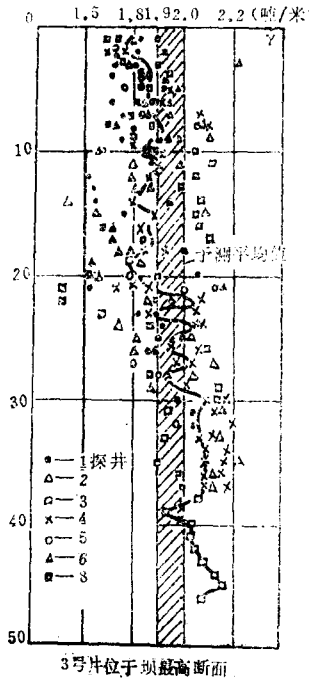


图7

图8为坝体中心部位的平均 K_ϕ 值为300米/昼夜。

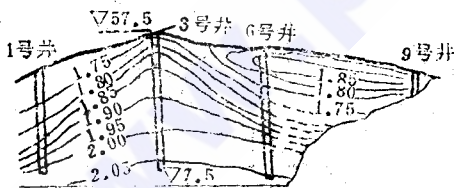


图8

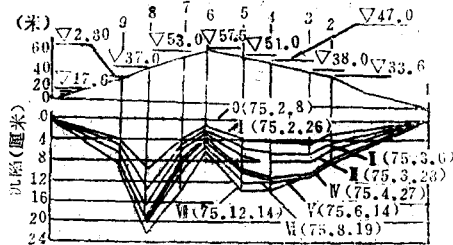


图9

渗透试样的直径为30~70厘米，高度150~300厘米，试验结果得 $v = KJ^\alpha$ ，式中 $\alpha = 0.6 \sim 0.8$ 。

K_ϕ 值与密实度的关系见图11。从图中曲线表明， $\gamma = 1.9$ 吨/米³是最合适的密实度，因为密实度再增加对 K_ϕ 值已影响极微了。

该试验坝底部粒径小于5毫米的含量为16~20%，对于高得多的康巴拉金坝来说，由于其底部细颗粒含量更多，其

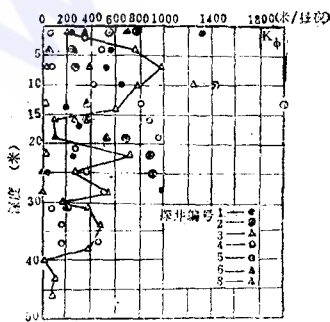


图10

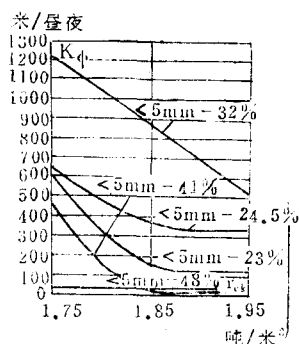


图11

$K\phi$ 值将更小。渗透试验表明,当细颗粒含量达35~40%时,即使水力梯度 $J=2$,坝体材料也是满足渗透稳定的。很明显,在渗透作用下,由于细颗粒逐步淤填块体间的空隙,使坝体固结,对渗透稳定将更有所改善。

五、結 語

通过试验坝的大量观测和试验成果,可以得出如下结论⁽⁸⁾和建议:

1. 定向爆破可以建成完全可靠的坝,其优越性随坝增高而增大。
2. 据实际爆破堆石坝看来,几乎全部是均质的,因此坝的结构计算明确。通过一般工程地质勘探方法,所得堆积体的特性指标,可以直接用到设计中去,得出与实际比较接近的结果。
3. 爆破堆石坝具有理想的颗粒组成、密实度和渗透稳定性,因此可以修建变形小,稳定性高的高坝。

4. 堆积体质量检查的方法是值得研究的问题。不仅要改善现有的检查方法,而且要研究新的检查方法,其中包括如何用机械开挖断面不大的探井问题。

笔者认为苏联对定向爆破筑坝不做防渗体的上述试验和实践,以及我国学者的试验和探讨^(11, 12),证明已故全国政协付主席张冲同志提出的“采用定向爆破方法,不做防渗体,在深谷江河上堆筑高厚堆石坝,修建大型水电站”的设想(详见《水力发电》1983年第1期“介绍张冲关于加快开发我国水电的设想”)是切实可行的。这种筑坝方法与常规筑坝方法比较,最大的特点是不做代价高昂的防渗体,同时可以省去修筑围堰和清基的任务。不做防渗体可大为减少施工困难,还减少大量器材设备和运输量,易于克服高山峡谷施工场地布置困难,从而可以节省大量投资并显著缩短工期等。这对加快我国水电建设具有很重要的现实意义。

苏联为了实施300米高的康巴拉金电站主坝,动员了全国十余个科学研究机构、设计和施工单位、大专院校,进行联合攻关,开展了大规模的科学研究工作和试验坝的实践。笔者认为,我们也应该在黄河上游拉西瓦电站(装机300万千瓦)和金沙江的支流牛栏江上的天花板电站(装机30万千瓦),组织有关科研、设计和施工单位,共同攻关为我国建坝技术开辟一条新途径,以加快水电建设的步伐。

参 考 文 献

- [1] М.А. Садовский и др. Развивать высокоэффективный способ возведения плотин направленными взрывами. 苏联《水工建设》1977年5期
- [2] А.Г. Багдасаров и др. Проектирование направленного взрыва в Камбарлагинском сговоре на р. Нарын. 苏联《水工建设》1977年5期
- [3] Технические правила взятия взрывных работ в энергетическом строительстве. М., «Энергик» 1972.
- [4] Технические правила взятия взрывных работ на дневной поверхности. М., «Недра» 1972.
- [5] Г.И. Покровский и др. Возведение гидротехнических земляных сооружений направленным взрывом. М., «Недра» 1971.
- [6] В.Л. Куперман и др. Возведение опытного шлюза на р. Бурлыкя. 苏联《水工建设》1977年5期
- [7] А.В. Коренистов и др. Подготовка и осуществление опытного взрыва на р. Бурлыкя. 苏联《水工建设》1977年5期
- [8] В.Ф. Коржевский и др. Геотехнические исследования опытной взрывонабросной плотины на р. Бурлыкя. 苏联《水工建设》1977年5期
- [9] Г.И. Покровский и др. Возведение гидротехнических земляных сооружений направленным взрывом. М., «Стройиздат» 1971.
- [10] Н.П. Лушнов Подбор плотности крупнообломочного материала в наброске. М., «Стройиздат» 1975.
- [11] 刘宏梅、张静敏 论砂砾石土的管涌性和爆破堆石坝的渗透稳定问题
水利水电科学研究院 1982年
- [12] 金永堂 透水堆石坝的研讨 《四川水利》1981年1期

~ ◇ ~

~ ◇ ~

~ ◇ ~

~ ◇ ~

(上接第79页)

参 考 文 献

- [1] T.L. Staely: “排论有用公式纲要” 复旦大学概率论教研组编译
- [2] S.I. Gass Linear Programming 1964.
- [3] R.M. Stark R. L. Nicholls Mathematical Foundations for Design Civil Engineering Systems.
- [4] M. Sasieni A. yaspan L. Friedman Operation Research—Methods and Problems.