

中国科学院綜合考察委員会資料

編 号:

密 級:

中国科学院治沙队第一次学术报告会文件

井用多孔砂滤水管的試驗研究

赵尔慧 刘大福

(西安交通大学水利系水改教研組)

緒 言

在伟大的祖国社会主义建設中,为了发展工业、农业、畜牧业以及为了提高城市和乡村人民生活水平,需要大量的水。地面水源如:江河、湖泊、水草等是其主要水源,但是仅靠地面水源,一方面在我国辽阔广大的土地上分布不均,多集中于东南和沿海各地,而在北方和西北諸地,其中有些地方要利用地面水源,常有很多困难。另一方面,在我国宏伟的建設和改造自然計劃中,地面水源是远不足需要的。但我国地下水利資源却非常丰富,几乎到处皆有,因之开采地下水就有着很重要的意义。

同时利用地下水源,不仅补充了地面水源的不足,而且还有其特殊的优点,距用水对象近,減短了輸水工程(管路或渠道),从而降低了取水投資費用;水质一般良好,对各种用途的給水,可无须或减少水质改良过程,因而更有其特別的意义。

在干旱和荒漠以沙漠地区,不仅降水量奇缺,而且地面水源也非常稀少。而在这些地区中,地下水源仍常是丰富的。故对这些地区,为了发展工业、农业、交通运输、畜牧业、林业等,开采地下水就有着决定性的意义。

开采地下水的建筑物,根据其水文地质特点可有多种如:垂直集水建筑物(管井和坑井)和水平集水建筑物(集水廊道,集水管道和坎儿井等)。而其中以管井和坑井应用最为普遍。祖国人民在这方面几千年来累积了很多宝贵經驗,尤其在大跃进的年代里,更丰富和創造了更多的經驗。因此管井和坑井对开采地下水來說,便为其主要型式的建筑物。

現今在生产中管井的进水部分(水下部分),所采用的滤水管的主要形式有:穿孔式、縫式、网式和砂砾式等数种。其中穿孔式和縫式滤水管仅适用于含水层为砾石的情况下;网式滤水管也仅能在含水层为粗砂或中砂的情况下采用。因之这几种滤水管不仅在使用范围中有很大的局限性,且須用高价和缺少的鋼管、銅絲网。不仅这样,而且易被地下水化学堵塞腐蝕和电化学腐蝕以及被含水砂微粒机械堵塞,常会使井出水量逐漸減少,或完全被破坏。尤其在地下水腐蝕性較強的情况下,根据我国陝西咸阳和苏联調查資料,約在2—4年后就会很快的被損坏。如改用不銹鋼,型料或玻璃絲制作,固然延長了其使用的寿命,但归根到底,其滤水能力是不高的,而且其造价就更为昂貴,在我国目前情况下还难于普遍采用。

砂砾滤水管为現今滤水能力最高的一种。也有各种形式,而其中最佳者应推苏联工程师 Ф. С. 保雅林采夫所創的所謂“金属綫式砂砾砾水管”,現陝西省水利厅地下水工作

队已广泛采用。但这种滤水管也存在着这样一些缺点:首先因为需要填充一定厚度(5—10厘米)的砂砾石滤料,井孔的开孔直径便随之而加大,从而增加了施工费用和时间,同时也增加了施工中的困难性;又因须从地面填充,便难于保证均匀。如有空洞时,井中便要发生砂涌现象,严重时,会使井很快被淤塞。当在施工抽水时,其水位降落和出水量一般要大于设计的1.2—1.5倍,更会引起严重的砂涌现象,如万一使含水砂产生空穴时,滤料便会随之塌陷而使井破坏。同时其綫式骨架须用大量的金属材料,故仍具有上述值昂易损的缺点。虽为较优的一种,但仍非理想的滤水管。

对于井(管井和坑井)滤水结构(滤水管)的要求应该是:既具有高度的滤水(或透水)能力和抗砂能力,又具有耐久,造价低廉,则作简单的特点。

多孔砼滤水管便能满足上述特点的要求,而且还有其他滤水管所不可能有的特点,即使用无局限性,可适用于任何松散的含水层中取水。对于一向被人们认为无水或无法取水的流砂层,也同样适用。这对于既无地面水源,地下水源仅为流砂层的干旱、荒漠和沙漠地区,就更有着独特的意义。

多孔砼亦可称粘結(或胶結)砂砾石,它与一般建筑上所用的輕质多孔砼或泡沫砼是不同的。前者仅用水泥浆作为胶結剂,而后者除水泥外,还须用特殊的泡沫剂。

关于多孔砼,苏联早在1952年在B. C. 奥沃多夫教授领导下,曾作过一些研究^{[2][8]}。B. P. 布尔金工程师在1952—1953年間,也曾对管井滤水管作过試驗设计和試制成品,并用在生产上,使用經过六月后,經检查得到十分令人满意的结果,发现并没有被淤积和被堵塞^[1]。M. Я. 叶里謝耶夫和И. Ф. 齐霍諾夫^[3]工程师对于多孔砼的配制和用于水井的结构形式,也曾作过一些試驗研究,在生产上也开始推广使用。但对于多孔砼的普遍使用和完整的定性定量分析还是不够的。

1957年作者在苏联农业供水和凿井专家И. П. 奥尔洛夫副教授在中国时的指导,結合克拉玛依城市供水为題的毕业設計需要,也作过初步試驗,但当时限于时间和設備不足,未能得到全部試驗結果。

这次試驗是在党的正确教育方針指导下和八届八中全会文件精神鼓舞下,与我組刘大福同志合作,重新进行了全面的試驗,作为1960年元旦向党献礼。

一、多 孔 砼

人們从生活經驗和生产实践中,早已发现砂砾石的滤水能力是很高的,故常作为一种良好的滤水材料。但砂砾石极为松散,必須借助其他材料构成合适的骨架时,始能应用,单独靠其本身,是难达到其滤水目的的。这样便造成砂砾石滤水结构的复杂性和施工装填的困难,尤其当用于水井时,此問題就更显得突出。因此人們企图如何将砂砾石胶結在一起,并保持原有的良好透水性,制成使用所要求的形状,减少或完全不用骨架,这样不仅可减小及进水阻力,而且可节省很多金属材料。多孔砼便是在这种思想主导下,并参照无砂砼試驗出来的。

多孔砼是用标准篩分析得优质粗砂和砾石的顆粒分为不同的需要級配如:0.5—1, 1—2, 2—3, 3—5, 5—7, 7—10毫米,或0.5—2, 1—3, 2—5, 3—7, 7—10毫米,洗淨并干燥后,掺入一定剂量的水泥浆,使砂砾石滤料外周被均匀的涂抹一薄层水泥浆,装于模內經震动或人力捣实后,便可使其紧密地粘結在一起。所掺入的水泥剂量要非常恰当,既要使原砂

砾滤料的孔隙度不要减少过多,即保持足够的透水能力,又要保证一定的抗压强度。同时还要考虑滤料级配粒径的大小,而相应的变更其水泥剂量,因级配粒径小者,表面面积大,颗粒之间粘结时,所需水泥剂量便多;反之,则需较少。另外,水灰比也要很合适,它不仅直接影响着多孔砼的强度,而且当过大时,便会产生水泥浆富裕,在震动或捣实时布下逸的缺点,这样常会使下部水泥浆过多,甚至可使下部的孔隙全部被水泥浆充塞;过小时便难于成形,对于制作2—3厘米厚的薄壁多孔砼管是有困难的。

多孔砼是用于松散的含水砂中作为滤水材料的,因之要求不仅滤水能力高,而且还要所谓抗砂能力强。即使水畅通透过尽量减小其进水阻力,同时还要使含水砂不要随水透过(少量极细微粒在施工抽水时是容许透过的)。这样就要求恰当的按照含水砂的主要颗粒,以选择制作适应某种含水砂的多孔砼的滤料颗粒,其间的关系可用式表示:

$$D_{\text{平均}} = Ad_{50},$$

式中 $D_{\text{平均}}$ ——作多孔砼砂砾石滤料的平均颗粒粒径(毫米);

d_{50} ——分析含水砂样时,占全部砂样重量50%的颗粒均小于该颗粒粒径(毫米);

A ——换算比例系数。

系数 A 对天然未曾胶结的砂砾石来说,与含水砂的不均匀系数和其几何形有关(球形光滑面或带棱角不规则形)。苏联学者 A. H. 帕特拉塞夫^[5]考虑一定安全后,提出该系数的极限值为:

$$A = 10-12.$$

天然未胶结者,因处于极松散的状态,孔隙较大。而加水泥浆胶结,并经震动或捣实后,一方面颗粒直径要较未胶结前略增大一些;另一方面因紧密挤实,孔隙便要减小一些。按斯力赫且尔^[5]的资料,对理想均质圆球形的颗粒,从松散到紧密,孔隙度由0.476—0.259时,颗粒直径与孔隙直径之比为:

$$\frac{D}{D_0} \approx 2.4-6.4,$$

式中 D ——砂砾石滤料的直径;

D_0 ——孔隙的直径(见图1)。

因之,对于胶结后的情况,系数 A 便有可能较未胶结前松散状者增大。同时砂砾石,尤其是砾石在胶结后,近似球形均质,且表面光滑,故按斯力赫且尔的资料比较,多孔砼的颗粒直径与孔隙直径的比值,应介于二极限值之间。根据我们试验的资料,多孔砼孔隙度的平均值约为0.35。此值可近似采取5,即得:

$$D \approx 5D_0.$$

又由穿孔式滤水管的孔眼直径可等于含水 d_{50} 砂的3—4倍,即:

$$D_0 \approx (3-4)d_{50},$$

因之,

$$D_{\text{平均}} = (15-20)d_{50},$$

式中符号同前。

根据 M. Я. 叶里谢耶夫的意见^[6], A 值可如表1所示(大致符合于上式计算者):

由表1可看出,多孔砼的换算比例系数 A 值,可较天然松散状态者提高约50—100%,这一点是肯定的。但是作者认为这仅是问题的一方面,而另一方面还应考虑到在制作

表1 系数 A 值表

含水砂的特征	細 砂	中 砂	粗 砂
均 质	16	18	20
非 均 质	18—20	20—22	22—25

2—3 厘米厚薄壁多孔砼滤水管时,如滤料颗粒过大,便会因粘結面过少,从而强度不佳更易破碎。在管的輻輳方向最少应有 3—5 个颗粒排列。不然便要增加管壁厚度,这是极不应该的。例如对粗砂言 $d_{50} \approx 0.8—1.0$ 毫米,如按表 1 計算則得:

$$D_{\text{平均}} = 20(0.8—1.0) = 16—20 \text{ 毫米。}$$

这样大的颗粒,对制作多孔砼管时,在其輻輳方向排列两个颗粒尚较困难,故是不合适的。因之,对于管中來說,虽有可能,而无此必要。故对系数 A 值,作者建議宜采用表 1a 值。

表 1a 系数 A 值表

含水砂的特征	細 砂	中 砂	粗 砂
均 质	16	13	10
非 均 质	16—18	14—16	12—14

在实际設計中,系数 A 值尚可具体情况略加变动。当用于坑井或其他用途管壁較厚时,可适当增加,或采用表 1 值。

实际多孔砼其砂砾滤料,并非理想的圆球状,且每一級配仍有一定的范围,即非均质等颗粒,还存在有不均匀系数。此系数約在 1.4—2.0 之間,最大可达 4.0。其紧密接合状态形成的孔隙,常近似为三角形(图 1b)。在三角形的頂端部分,被水泥浆所充填。因此可近似认为在颗粒之間所形成的孔隙,犹如圆形断面的微管。微管的直径随颗粒的大小和不均匀系数而变化。可近似按下式計算^[5]:

$$d_{\text{平均}} = \sqrt{\frac{96\nu K_{\text{平均}}}{gn_{\text{有效}}}},$$

式中 ν —— 水的动粘滯系数(随水的温度而变化);

$K_{\text{平均}}$ —— 多孔砼的平均渗透系数(米/秒);

g —— 重力加速度;

$n_{\text{有效}}$ —— 多孔砼的有效孔隙度;

关于多孔砼的孔隙度,按 A. Φ. 列別捷夫对多孔介质的見意,因多种原因其实际有效孔隙度总小于理論孔隙度(实测者),其修改計算公式如下:

$$n_{\text{有效}} = n(1 - 0.114 \frac{1-n}{n})$$

式中 n —— 理論孔隙度。

微管中的摩擦沿程水头損失可按式[5]近似計算:

$$h_{\text{損失}} = \frac{32\nu v_{\text{平均}}}{gd^2_{\text{平均}}},$$

式中 ν —— 多孔砼的平均渗透速度;

l ——微管的长度,决定于管壁厚度;

α ——沿微管长度变化断面粗糙管壁表面与固定断面光滑表面面积之比,可近似采用了;其余符号同上式。

微管的实际渗透速度为:

$$u = \frac{v}{n_{\text{有效}}},$$

式中 u ——多孔矽微管中的平均实际渗透速度;其余符号同上。

‘例’ 設 $v = v_{\text{容許}} = 0.01$ 米/秒, 管壁厚度 $\delta = 0.03$ 米 滤料級配直径为 3—5 毫米, 孔隙度 $n = 35\%$, 米/秒, $K_{\text{平均}} = 0.015$ 米/秒 水温 $t = 10^\circ\text{C}$, $\nu = 0.0131$ 厘米²/秒时, 試求在这种情况下, 多孔矽的孔隙微管直径和其水头损失。

解:
$$n_{\text{有效}} = n \left(1 - 0.114 \frac{1-n}{n} \right)$$
$$= 0.35 \left(1 - 0.114 \frac{1-0.35}{0.35} \right) = 0.275,$$
$$d_{\text{平均}} = \sqrt{\frac{96\nu K_{\text{平均}}}{gn_{\text{有效}}}} = \sqrt{\frac{96 \times 0.00000131 \times 0.015}{9.81 \times 0.275}}$$
$$= 0.000845 \text{ 米} = 0.8 \text{ 毫米}$$
$$h_{\text{損失}} = \frac{32\nu_{\text{有效}} l}{gd^2_{\text{平均}}} = \frac{32 \times 0.00000131 \times 0.01 \times 3 \times 0.03}{9.81 \times 0.0008^2}$$
$$= 0.06 \text{ 米} = 6.0 \text{ 厘米}.$$

由上例計算可看出, 虽然容許进水流速已达 0.01 米/秒, 但其水头损失仍很小, 故作为井的滤水管时, 不会招致发生很大的水面破隙。按 M.Я. 叶里謝耶夫的試驗資料[2], 多孔矽的水头损失根据渗透速度和滤料顆粒大小而不同, 約在数厘米到 0.8 米之間, 也同样說明了这一問題。

二、多孔矽的試驗方法和結果

我們对多孔矽进行了下面几种試驗:

- 1) 天然砂砾石滤料孔隙度的測定;
- 2) 多孔矽試件孔隙度的測定;
- 3) 天然砂砾石滤料渗透系数的測定;
- 4) 多孔矽試件渗透系数的測定;
- 5) 多孔矽抗压強度試驗;
- 6) 多孔矽抗砂能力試驗。

1. 天然砂砾石滤料孔隙度的測定

对該項試驗, 我們采用一般常用的比重、容重法进行的, 即按下式計算:

$$n = \left(1 - \frac{r_0}{r} \right) 100,$$

式中 n ——某一級配砂砾石的孔隙度(%);

r_0 ——試样的容重;

r ——試樣的比重。

測得結果如表 2 所列。

表 2 各種級配天然砂礫石濾料的孔隙度表

顆粒級配直徑 (毫米)	比重 r (仟克/公升)	容重 r_0 (仟克/公升)	孔隙度 n (%)
0.5—1	2.61	1.37	47.2
1—2	2.67	1.44	46.2
2—3	2.62	1.43	45.5
3—5	2.63	1.46	44.6
5—7	2.67	1.46	45.1
7—10	2.74	1.48	46.1

r 平均 = 2.66, r_0 平均 = 1.44 仟克/公升, n 平均 = 45.77%。

由表 2 示出,各種級配砂礫石濾料的孔隙度在 44.6—47.2% 之間,平均為 45.8%。平均比重 r 平均 = 2.66, 平均容重 r_0 平均 = 1.44 仟克/升。前面已知,在均質松散狀態理想圓球形顆粒的孔隙度為 47.6% 與我們所測的平均值很接近,近似均質且級配幅度不大時,其孔隙度接近理想狀態。當然也與所採用的砂礫石的性質有關,在我們所試驗的情況下,是採用石英、長石和石灰石混合而以石英為主的河砂礫石。同時,我們建議在可能的情况下,以採用河砂礫石較佳,因其形狀近似球形,較帶稜角的不規則形者,接觸面較大,從而粘結較為牢固。對其中夾雜的薄片和長柱狀者,最好能揀選出。

2. 多孔稱試件孔隙度的測定

我們考慮在測定試件的孔隙起時,如同用上法便較困難。因須將試件弄碎,需要很多試件。故改用 $10 \times 10 \times 10$ 厘米的抗压試件烘干求出試件容重,置于玻璃皿中,從皿下徐徐加水(水溫 $t = 20^\circ\text{C}$),直至與試件齊平為止,秤其總重量。其後取出試件,再加水等于前一水位,再秤其重量,利用下式便可計算求得:

$$n = \left\{ 1 - \left[\frac{W_{\text{水}+\text{容}} - (W_{\text{總}} - r_0)}{1000} \right] \right\} 100$$

式中 $W_{\text{水}+\text{容}}$ ——試件從皿中取出後,加水與原水位齊平的水量與容皿的重量;

$W_{\text{總}}$ ——試件置于容皿中,加水與試件齊平時,水量、試件與容皿的總重量;

r_0 ——試件的干容重。

此法的精確度可能要差一些(尚未經過鑑定),但考慮在實用上尚能滿足,而且較為方便。測定的結果如表 3 所列。

關於試件的配制,詳于試件滲透系數的測定。

由表 3 所列數值可看出,多孔礫在不同顆粒級配和水泥劑量下,其孔隙度大約在 30—40% 的範圍內。較天然未膠結者減少 7—15% (蘇聯試驗資料為 15—20%)。減少的百分數是不大的,也可說是完全容許的。這說明多孔礫在試驗的水泥劑量下,仍保持着大量孔隙,即很少影響到它原有的良好透水能力。在試驗的情況下,大約每增加水泥劑量 20 克/公升後,其孔隙度約減少約 3—4%。

3. 天然砂礫石濾料滲透系數的測定

滲透系數我們是用大顆粒集馬式滲透儀測定的,并按斯姆列克尔公式計算即:

表3 多孔砼試件孔隙度表

顆粒級配直徑 (毫米)	水泥劑量 (克/公升)	γ_0 (克)	$W_{\text{总}}$ (克)	$W_{\text{水+容}}$ (克)	孔隙度 n (%)
0.5—1.0	210	1568	4148	3206	37.4
	190	1520	4147	3226	40.1*
	170	1513	4129	3223	39.3
1—2	200	1685	4215	3226	30.4
	180	1612	4258	3262	38.4*
	160	1606	4198	3223	36.9
2—3	190	1680	4274	3260	33.4
	170	1698	4255	3247	31.0*
	150	1647	4246	3234	36.5
3—5	180	1711	4246	3224	31.1
	160	1704	4257	3204	34.9
	140	1690	4264	3246	32.8*
5—7	170	1708	4248	3219	32.1
	150	1708	4266	3215	34.3
	130	1691	4263	3196	37.6
7—10	160	1758	4313	3246	30.9
	140	1760	4302	3222	32.0
	120	1722	4301	3217	35.7

注：表中有*星標者，可能因攪拌不均或模子不正等而引起之差誤。

$$v = Ri^{1/m}$$

或

$$K = v \frac{1}{i^{1/m}} = \frac{p}{\omega i^{1/m}}$$

式中 K ——砂礫石濾料的滲透系數(米/秒)；

i ——滲透速度(米/秒)；

m ——水力坡度或梯度；指數，主要決定於水流經砂礫石濾料時的紊流程度，由試驗方法確定其數值；

q ——經滲透儀透過砂礫石濾料所流出的流量(米³/秒)；

ω ——滲透儀的截面面積(米²)。

上式中的水力坡度可近似令 $i = \frac{h}{l}$ [l ——滲透儀差壓計的高度差(米)， h ——由差壓計所測得的水頭損失(米)，]。

指數按斯姆列克爾的意見，在 1—2 的範圍內變化。伊茲巴什曾指出，當顆粒直徑由 5—10 毫米且水力坡度由 0.1—1 時，指數 m 值變化在 1—1.8 的範圍內。

斯姆列克爾另外還給出一公式：

$$v = Ki^{3/2},$$

或

$$v = Ki^{1/1.5}。$$

我們由于時間所限,不可能再同时測定指數 m 值。因之仅綜合上述条件和我們試驗的結果進行比較,选定 m 值進行計算。这样当然要存在一定的差誤,但可肯定要比采用达基綫性公式($v = Ki$)計算要近似准确的多(顆粒愈大其差誤也愈大)。选定的指數值相应于不同顆粒列如表4。

表4 选定的指数 m 值表

顆粒級配直径 (毫米)	0.5—1	1—2	2—3	3—5	5—7	7—10
指数 m 值	1.1	1.2	1.25	1.3	1.4	1.5

測定的結果列于表5中

表5 天然砂砾石滤料渗透系数 k 值表

顆粒級配直径 (毫米)	0.5—1	1—2	2—3	3—5	5—7	7—10
平均渗透系数 K 值(米/秒)	0.0024	0.011	0.018	0.033	0.048	0.062

表5所列試驗計算的渗透 K 系值与B.C. 奥沃多夫試驗者相似[7],可說明所选定的 m 值基本上是正确的。

4. 多孔砼試件渗透系数的測定

对于多孔砼渗透試件的配制(孔隙料度、抗压强度度和抗砂能力試件与渗透試件同样配制),参考了苏联現有的資料,B. P. 布尔金指出水泥与滤料的比例为:

$$\frac{\text{水泥剂量}}{\text{滤料重量}} = 1:6 \text{ 或 } 1:7,$$

水灰比为0.3—0.32。而M. Я. 叶里謝耶夫在先后二文献中^[2,8]指出不同水泥剂量和水灰比,茲列于表6中。

表6 M. Я. 叶里謝耶夫提出的水泥剂量与水灰比表

顆粒級配直径 (毫米)	1954 年 提出 者		1957 年 提出 者		水 灰 比
	水泥剂量 (克/公升)	水泥与滤 料的比列	水泥剂量 (克/公升)	水泥与滤 料的比列	
0.5—1	—	—	—	—	—
1—2	170	1:8.5	180	1:8	0.5
2—3	160	1:9	170	1:8.5	0.5
3—5	150	1:9.6	160	1:9	0.5
5—7	140	1:10.3	150	1:9.6	0.5
7—10	—	—	140	1:10.3	0.5
2—7	—	—	160	1:9	0.5

我們参考上面資料并按照苏联专家И. П. 奥尔洛夫的建議和我們初試的經驗,决定以M. Я. 叶里謝耶夫1957年所提出的資料作为基础,并扩大其水泥剂量的幅度,以能較广泛的进行試驗。由渗透系数和抗压强度对应比較,以确定最佳的水泥剂量。

对渗透试验的试件，我们采用 300# 矽酸盐水泥^①，水灰比基本采用 0.5。对级配为 7—10 毫米者，因在制作试件时，发现当震动台转速为 3200 转/分钟时，有水泥浆下逸之弊，故改用 0.4。所采用的水泥剂量和水灰比列于表 7 中。

表 7 多孔砼试件渗透试验所采用的水泥剂量与水灰比表

颗粒级配直径(毫米)	水泥剂量(克/公升)	水泥与滤料的比例	水 灰 比
0.5—1	210	1:6.85	0.5
	190	1:7.6	
	170	1:8.46	
1—2	200	1:7.2	0.5
	180	1:8	
	160	1:9	
2—3	190	1:7.6	0.5
	170	1:8.46	
	150	1:9.6	
3—5	180	1:8	0.5
	160	1:9	
	140	1:10.3	
5—7	170	1:8.46	0.5
	150	1:9.6	
	130	1:11.1	
7—10	160	1:9	0.4
	140	1:10.3	
	120	1:12	

渗透试件，我们作成平均直径为 77.5 毫米和长为 300 毫米的圆柱形。养护 5—7 天后，装于直径为 165 毫米的渗透仪中周围环形空隙外填充以优质粘土泥，并捣实以作绝渗。在差压计处附填以粗砂，使渗下之水能进入计中。试验所测得的结果列于表 8 中

从表 8 中可大致看出，在所试验的水泥剂量范围内，多孔砼较天然松散者，其渗透系数相应减少的倍数在 1.33—4.18 之间。此数量是不大且完全容许的。因为较所相应含水砂的渗透系数尚大 5—10 倍以上。

5. 多孔砼抗压强度试验

我们对抗压强度的试验分为两步。第一步试件的配制基本与渗透试件相同，即采用 300# 矽酸水泥，水泥剂量和水灰比均相同。又用 400# 和 500# 水泥配制了 3—5 毫米的同一级配的试件，以作比较和发现问题。

第二步试验是在第一步试验的基础上进行的，由第一步试验所得的资料，进行分析比较，并与渗透试验对照，定出可能最佳情况，以作进一步试验，从而证实。

因所制试件为 10 × 10 × 10 厘米，故试验所得极限抗压强度还应乘以 0.85 的改正系数。

① 因初试时缺乏高标号水泥。

表8 多孔砼試件渗透系数 K 值表

顆粒級配直徑 (毫米)	水 泥 剂 量 (克/公升)	試件渗透系数 K 值 (米/秒)	天然滤料渗透系 数 K 值(米/秒)	試件与天然滤料 K 值比較减少的倍数
0.5—1	210	0.00066	0.0024	3.64
	190	0.0017*		(2.75)1.41
	170	0.0013		1.85
1—2	200	0.0039	0.011	2.82
	180	0.0032*		(2.08)3.44
	160	0.0083		1.33
2—3	190	0.0043	0.018	4.18
	170	0.0069		2.61
	150	0.0084		2.14
3—5	180	0.0119	0.033	2.77
	160	0.0141		2.34
	140	0.0075*		(1.91)4.4
5—7	170	0.0143	0.048	3.36
	150	0.0160		3
	130	0.0223		2.15
7—10	160	0.0182*	0.062	(3.72) 3.4
	140	0.0180		3.45
	120	0.0195		3.18

注: 1.表中注有*星标者可能由于試件拌攪不均匀或絕滲不良而引起的差誤;
2.表中注有()括弧者,是近似插入补入的数值。

所采用的試驗机为瑞士出品,牌号为 AMSLER 抗折試驗机改装者,其精度較高感量灵敏。

我們第一步所試驗的結果,列于表9中。

由表9可以看出在第一步試驗中有如下的一些問題:

a) 多孔砼本身的抗压强度是不大的。在所試驗的情况下,当用 300* 水泥和水灰比为 0.5 时,极限抗压强度約在 6.3—17.4 仟克/厘米的范围内,且随顆粒的增大和水泥剂量的增加而增大。

b) 在相同顆粒和相同水泥剂量下,如减小水泥比,則抗压强度便可增加。如顆粒級配同为 7—10 毫米,水泥剂量为 160 克/公升,而水灰比由 0.5 減低到 0.4 时,則其极限抗压强度可由 12.3 仟克/厘米²增至 20.9 仟克/厘米²,即約增加 8.6 仟克/厘米²。

c) 在相同顆粒和相同水泥剂量下,如增大水泥标号,也同样可增加其抗压强度。如顆粒級配直徑为 2—3 毫米和水泥剂量为 170 克/公升,当水泥标号由 300* 增至 400* 时,則极限抗压强度由 14.4 仟克/厘米²增至 21.9 仟克/厘米²,約增加 6.5 仟克/厘米²;增至 500* 时,便可增加到 28.6 仟克/厘米²即約增加 14.2 仟克/厘米²。

由上面說明 3 欲企图增加多孔砼的抗压强度,也是多孔砼的一个最重要的問題,可以从三方面着手,即增加水泥剂量,降低水灰比和采用高标号水泥。

增加水泥剂量虽可增加多孔砼的抗压强度,但由試驗比較,在所試驗的情况下,每增加 20 克/公升水泥,极限抗压强度只不过增加 1—2 仟克/厘米。这就表明单纯增加水泥

表9 多孔砖极限抗压强度(仟克/厘米)表

颗粒级配 直径(毫米)	水泥剂量 (克/公升)	300# 水 泥		400# 水 泥		500# 水 泥	
		养 获 14 天 期 龄	养 获 28 天 期 龄	养 获 7 天 期 龄	推 算 28 天 期 龄	养 获 7 天 期 龄	推 算 28 天 期 龄
0.5—1	210	8.4	12.2				
	190	7.3	9.3				
	170	6.1	6.3				
1—2	200	11.5	15.3				
	180	11.0	14.0				
	160	8.3	11.0				
2—3	190	13.9	17.0				
	170	11.7	17.4*	12.8	21.9②	16.7	28.6②
	150	10.1	14.5				
3—5	180	13.3	16.1				
	160	12.0	15.1				
	140	9.6	14.9				
5—7	170	12.8	13.3				
	150	10.2	15.7*				
	130	9.3	12.1				
7—10	160	15.0	20.91				
	140	13.3	16.8*				
	120	10.8	16.8				
7—10①	160	10.0	12.3②				
	140	—	—				
	120	—	—				

* 可能因搅拌均匀而引起的误差;

① 水灰比为 0.5 者;

② 系用公式 $R_n = R_m \frac{\lg n}{\lg m}$ 推算的数值。

剂量,非但补益不大,且严重的影响了其透水能力,并增大了造价。因之,仅从这一面着手,看来是不适当的。

减小水灰比看来起效很大。B. P. 布尔金在采用水灰比 0.3—0.32 时,其抗压极限强度达到 100 仟克/厘米。不过他所用的滤料大部大于 10 毫米,且级配幅度很大(例如:15—20, 10—25, 10—15 毫米等),这样对创作滤水管是欠佳的。同时,对小颗粒(如 2—3 毫米以下)水灰比过小时,很难搅拌均匀,且难成形,要求工艺技术较高。因之对水灰比的降低也要适当,且对不同颗粒级配也不能同等对待。根据第一步试验的结果分析,其适宜的水灰比列如表 10。

增高水泥标号,对增加多孔砖的抗压强度起效亦很大。看来一般不宜低于 400#,且愈高愈佳。不过在我国当前情况下,优质高标号水泥常不易购得,故应以 400# 水泥为基本条件。条件允许时,以采用高于 400# 者为佳。不过在个别情况下,如仅有 300# 水泥时,对小孔井和临时井也可采用。

另外,适当加大滤料的不均匀系数,即在实用中选用滤料时,可适当按计算求得的平

均滤料直径增大其级配幅度,也可提高多孔砼的抗压强度。

根据以上分析,对于多孔砼的配制,其水泥剂量在保证足够的透水能力和一定的抗压强度的情况下,可根据不同情况和不同水泥标号予以适当的变动。茲建議在不同水泥标号下的水灰比和相应适宜的水泥剂量列于表 10。

表 10 多孔砼在不同水泥标号下的适宜水泥剂量和水灰比表

顆粒級配 直径(毫米)	水 灰 比	300#水泥的 适宜剂量 (克/公升)	400# 水泥的适宜剂量 (克/公升)		500#水泥的适宜剂量 (克/公升)*	
0.5—1	0.45	210	190	200	170	180
0.5—2	0.44	205	185	195	165	175
1—2	0.43	200	180	190	160	170
1—3	0.425	195	175	185	155	165
2—3	0.42	190	170	180	150	160
2—5	0.41	185	165	175	145	155
3—5	0.40	180	160	170	140	150
3—7	0.39	175	155	165	135	145
5—7	0.38	170	150	160	130	140
5—10	0.365	165	145	155	125	135
7—20	0.35	160*	140	150	120	130

* 水泥标号为 400* 与 500* 时,在表中给出两栏数值,大数量适于工艺条件较差的情况。

第二步多孔砼抗压强度試驗,是采用 400# 水泥和按照上面分析的情况进行的。其試驗的結果列于表 11 中。

表 11 采用 400# 水泥时,多孔砼极限抗压强度(仟克/厘米²)表

顆粒級配直径 (毫米)	水 泥 剂 量 (克/公升)	养 获 期 龄 28 天 时 极 限 抗 压 强 度	安 全 因 数	容 許 承 受 静 压 力[σ] (仟克/厘米 ²)
0.5—1	200			
0.5—2	195			
1—2	190			
1—3	185			
2—3	180			
2—5	175			
3—5	170			
3—7	165			
5—7	160			
5—10	155			
7—10	150			

当然一方面应该在允许的情况下,尽量增高多孔砼的抗压强度。但问题并不限于此,在另一方面还应考虑在实际使用中究竟需要多少。茲从应用最广泛的管井情况进行力学分析。

管井当在不抽水的情况下,井内外的水位或压力水头是相同的,故滤水管不受任何的静水压力。而当从井中抽水时,随着出水量和水位降落(抽水深度)的逐渐增加,井壁外地下水流入井中的进水阻力也随之加大,从而产生了水面破隙,即井壁内外的水位或压力水头之差(图 2)。井中水位降落的最大设计值常采用井水深的一半即:

$$S_{\max} = 0.5H,$$

式中 $S_{\max}$ ——最大設計水位降落(米);

H ——井中水深或所开采含水层的压力水头(米)。

1 而当施工抽水时,最大可能达到 $0.75H$ 。

如在井孔内形成水面破隙后,滤水管便要承受靜水压力。水面破隙可按 C. K. 阿布拉莫夫的經驗公式[6]計算即:

$$\Delta h = \alpha \sqrt{\frac{QS}{KF}},$$

式中 Δh ——水面破隙(厘米);

Q ——井的出水量(米³/昼夜);

S ——井中水位降落(米);

K ——所开采含水层的渗透系数(米/昼夜);

F ——滤水管的工作面积(米²);

α ——无定值系数,与井的完整情况和滤水管的结构形式有关。当为完整中时,对多孔砾滤水管可采用 15—20。在不完整井的情况下; α 值較前种須增大 1.25—1.5 倍。且井的不完整性愈大时,其值亦愈大。

井的水面破隙 Δh ,实际即为滤水管所承受的靜水外压力即:

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{h_1 - h_0}{10} = \frac{20}{1000} \sqrt{\frac{QS}{KF}} \\ &= 0.02 \sqrt{\frac{QS}{KF}} \text{ (仟克/厘米}^2\text{)}, \end{aligned}$$

式中 h_0 ——抽水时井中水深(米),

h_1 ——抽水时,井壁外側的水深(米)。

在松散的含水层中,滤水管还要承受所謂含水砂的“挤压力”,此压力可近似按甫拉几亚克諾夫公式[10]計算:

$$p_2 = r_{\text{含}} \frac{h}{10} \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \text{ (仟克/厘米}^2\text{)},$$

式中 p_2 ——含水层的挤压力;

$r_{\text{含}}$ ——含水层的平均比重;

h ——含水层的厚度或高度;

φ ——含水层的內摩擦角。

含水层的內摩擦角与其本身特征有关。一般砾石和粗砂 $\varphi = 40^\circ$; 細砂和粉砂 $\varphi = 25-30^\circ$; 流砂; $\varphi = 5-15^\circ$; 水 $\varphi = 0$ 。

这里要着重提出一点,即在計算滤水管的挤压力时,并未計及含水层以上的岩层压力或土压力,因为:

(1) 在含水层以上的各种岩层中,一般較坚固,其內摩擦角多在 60° 以上,且在天长日久的年代里,已被压实和稳定。在这样的情况下,穿钻一数十厘米的小孔,可說对岩层基本上并未搅动。况有天然拱的作用可行平衡消除相互的压力。同时还有套管以行支撑

防御。

(2) 如在含水层以上的岩层中, 夹有数薄层不稳定的松散层, 其出口已被套管所堵塞。因而不会形成移动, 从而引起整个岩层的稳定性破坏而塌陷。如在松散层中含有不被开采的水或其他液体时, 可由严密的隔离而被阻截, 故也不会形成塌塌的原因。

(3) 管井多开采深层承压水, 在承压含水层以上多系较坚固的不透水层, 犹如含水层的顶盖。此顶盖所受外荷重和自重, 一部分可由本身结构承受, 一部分由静水压力担负。如井中水位降落不超过设计容许值时, 因而也是不会塌陷时。

(4) 由现有滤水管的使用情况看, 检查破坏的原因, 多为多种原因腐蚀破坏, 罕有因承压强度不足而破坏者。

(5) 在西北高原, 农民有凿 30 丈(100 公尺) 以上的坑井, 毫无护衬, 尚可耐用数十年。此种情况, 尚非偶遇, 而是多不胜举。

(6) 苏联已初步试用, 经检查并未因抗压强度不足而破坏。

因之, 在这种情况下, 不需要也不应该将全部井深的土压力都令集中在滤水管上来考虑。只有当在无压潜水层中, 含水层上面的岩层均很松散时, 应适当考虑全部土压力。

故滤水管所承受的总外压力为:

$$p = p_1 + p_2 = 0.02 \sqrt{\frac{QS}{KF}} + 0.1r \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)。$$

含水层的平均比重常采用 $r_{\text{含}} = 2.4$ 时, 则上式可改写为:

$$p = 0.02 \sqrt{\frac{QS}{KF}} + 0.24 \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)。$$

关于多孔砾滤水管的承压应力可近似采用简单的薄壁圆环分析, 即用下式计算:

$$\sigma = \frac{pr}{\delta} (\text{仟克/厘米}^2),$$

式中 σ ——多孔砾滤水管的承压应力;

p ——总外压力;

r ——多孔砾滤水管的半径;

δ ——多孔砾滤水管的管壁厚度。

“例” 设某一装置多孔砾滤水管的管井, 其资料如下(参考图 2):

$$H = 80 \text{ 米}; \quad S_{\text{max}} = 0.5 H = 40 \text{ 米}, \quad S_{\text{施}} = 0.75 H = 60 \text{ 米};$$

$$D_{\text{滤}} = 150 \text{ 毫米}; \quad \delta = 25 \text{ 厘米}; \quad h = 10 \text{ 米};$$

$$K = 0.0002 \text{ 米/秒} = 9.3 \text{ 米/昼夜}; \quad Q = 480 \text{ 米}^3/\text{昼夜};$$

$$\text{含水层为流砂 } \varphi = 12^\circ$$

试求滤水管在这种情况的压应力

解: 设滤水管的工作面积占总面积的 80% 则:

$$F = 0.8\pi D_{\text{滤}} h = 0.8 \times 3.14 \times 0.15 \times 10 = 3.78 \text{ 米}^2。$$

$$p_1 = 0.02 \sqrt{\frac{QS}{KF}} = 0.02 \sqrt{\frac{480 \times 60}{9.3 \times 3.78}} = 0.19 \text{ 仟克/厘米}^2。$$

$$p_2 = 0.24 h \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \\ = 0.24 \times 10 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{12^\circ}{2} \right) = 2.4 \times 0.63 \text{ 仟克/厘米}^2$$

总压力 $p = p_1 + p_2 = 0.19 + 1.63 = 1.82 \text{ 仟克/厘米}^2$ 。

压应力为：

$$\sigma = \frac{pr}{\delta} = \frac{1.82 \times 7.25}{2.5} = 5.28 \text{ 仟克/厘米}^2 < [\sigma]$$

由上例可看出,虽假设的情况很严重,但其压应力仍小于容许压应力很多,且容许压应力尚按一级标准考虑,其安全因数采用 2.5—3。如按极限强度计算,则更为安全。也明显地表示出,多孔砂滤水管的抗压强度并不需要太高,能保证 30—40 仟克/厘米的极限抗压强度已足安全。不过多孔砂有一极大弱点,不能承受震动力和冲击力。在运输和搬运中要特别注意。为了减少破坏,在浇注时,可在其外周包裹一层 3×3 毫米或 5×5 毫米的铁丝网。

6. 多孔砂抗砂能力的试验

所谓多孔砂的抗砂能力,即是在一定水头下,在减小进水阻力和保证水流畅通的同时,不容许含水砂进入井中。而在施工抽水时,容许通过一部分含水砂的微粒。但有一定的限度,一般不容许超过试样的 30%。所进入井中的这一部分的含水砂的微粒,在施工抽水过程中完全被抽出井外,因而不会沉积于井内。最近有些苏联凿井专家建议井下不用沉砂管,也是基于此点的。

这次我们对于多孔砂的抗砂试验,是没有专门的抗砂仪器设备的。而是将普通砂的抗渗仪予以改装。当然在水流方向上与实际虽不相同(试验时为垂直,而实际为水平)。其精度会受到一定影响,但对实际应用和作为校核,尚是可以的。因为所加的水头压力要较实际大的多。

固然多孔砂的颗粒级配直径是根据含水砂的 d_{50} 决定的,但是二者之间的比值主要还是基于水力坡降不大,地下水在含水砂中以层流状态时而定的。因之当井中水位降落加大,即水力坡降增大,地下水流的层流状态被破坏时,含水砂层使会有少许的扰动。此时涌入井中的含水砂微粒的数量便可能从而增加。因之抗砂能力的校核作用便在于兹。

我们考虑,固然抗砂能力与所加的水泥剂量有关,但其主要决定因素为颗粒级配直径和试验时所加的水头。故为了简便起见,在每一颗粒级配组中只选取平均(或中间)水泥剂量,以配制试件。

试件的平均直径为 175 毫米,厚度为 55 毫米。

试验的结果列于表 12 中。

由表 12 的计算可看出,其涌砂量在试验的压力水头下,是完全容许的。因为试验压力水头要较实际井中所形成的水面破隙(静水压力)要大的多。但其最大涌砂量,只不过占其相应含水砂 d_{50} 以下的 52.4%。如再考虑加 d_{50} 以上的大颗粒部分的数量时,则其涌砂量便应较试验者小一倍。对最大值来说,只不过是 26.2% 仍小于容许值 30%。

М. Я. 叶里谢耶夫试验得出,当渗透速度达 0.01 米/秒时,对多孔砂并未发生堵塞现象^[2]。由我们的试验也得了同样的证明。表 12 示出,平均渗透速度为 0.013 米/秒,即说明

表12 抗砂能力試驗一覽表

顆粒級 配直徑 (毫米)	水泥劑 量(克 /公升)	儀內裝填的砂樣 的重量和直徑		涌 砂 量 (克)	涌砂量 占原砂 百分 數 (%)	量 測 水 量 (厘米 ³)	時 間 (秒)	壓 力 水 頭 (米)	流 量 (米 ³ /秒)	滲透速 度 (米/秒)
		直 徑 (毫米)	重 量 (克)							
0.5—1	190	0.1 ^a	904	172	19.1	6427	34	17	0.000189	0.00788
1—2	180	0.1	1200	629	52.4	9690	62	5	0.000373	0.0155
2—3	170	0.25	1375	655	47.6	7475	22	7	0.000340	0.0141
3—5	160	0.25	1500	743	49.6	8200	5.6	8	0.000320	0.0133
5—7 ^a	150	0.5	1800	287	15.9	—	—	3	—	—
7—10	140	1.0	1300	153	11.8	7919	23	3	0.000344	0.0143

$v_{\text{平均}} = 0.013 \text{ 米/秒}$

了在这样大的渗透速度下,不仅其涌砂量未超过容許值,而且未被堵塞,可保証安全使用。

在設計网式濾水管时, 常要用到 C. K. 阿尔拉莫夫的容許进水渗透速度公式^[6]即:

$$v_{\text{容許}} = \alpha \sqrt[3]{K},$$

式中 $v_{\text{容許}}$ ——容許进水渗透速度,即水透过滤水管的速度(米/昼夜);

K ——含水砂的渗透系数;

α ——系数,阿布拉莫夫确定为 65。

B. C. 奥沃多夫教授在推荐設計多孔砂潛水管时,也同样采用了此公式。

此公式主要考虑当进水渗透速度过大时,可能引起含水层稳定性的破坏和由此使一部分含水砂微粒进入井內。他是根据穿孔式、縫式、网式和砾石濾水管进行抽水試驗的,其中前三种占主要資料。很清楚前三种濾水管的缺点是很多的,涌砂和堵塞更是其严重缺点。砾石濾水管虽較佳,但难于装填均匀,故增加水力坡降后,便会有砂涌現象。而多孔砂濾水管較砾石濾水管要理想严密的多,因之,只要級配配合得当,在正常管理中,决不会发生砂涌現象。由我們实际試驗也充分說明了这一点。因此在設計多孔砂濾水管时。如仍按上式一成不变的計算,就显得有些保守和不够經濟。作者认为应将上式中的系数 α 作适当的修改。

我們针对下面的情况即:

細砂: $K = 0.0001—0.0005 \text{ 米/秒}$; $v_{\text{容許}} = 0.005 \text{ 米/秒}$;

中砂: $K = 0.0005—0.001 \text{ 米/秒}$; $v_{\text{容許}} = 0.0075 \text{ 米/秒}$;

粗砂: $K = 0.001—0.0025 \text{ 米/秒}$; $v_{\text{容許}} = 0.01 \text{ 米/秒}$ 。

进行多次計算,得出 α 值均在 120 以上,即在 120—190 之間。但为了考虑設計安全起見,采用 $\alpha = 80—100$ ^③, 大值适用于粗砂以上,小值适用于細砂,中砂可取中間值。

三、多孔砂使用方法推荐

多孔砂濾水管用于管井和坑井,苏联早在 1953 年就开始使用了。如 B. P. 布尔金、

① 此項水量漏測。

② 此处所指的直徑表示在仪器中所装填的砂样,均系該直徑以下者。

③ 此系数从这次試驗观察和計算,应是合适的。但还缺乏进一步的研究和实地抽水試驗。故如可需濾水管不多(不长)的井,仍可採用 $\alpha=65$ 計算。