

水利水电科学研究院

科学研究论文集

第 8 集

(岩土工程)

水利出版社



水利水电科学研究院

科学研究论文集

第 8 集

(岩土工程)

水利出版社

内 容 提 要

本书为岩土工程论文集，主要包括：坝基岩体工程特性，滑坡速度计算，砂砾土的液化，渗流和管涌特性，渗流计算，裂隙岩体的渗透性及灌浆材料和控制技术等方面的科研成果。

本书可供水利水电工程科研、设计、施工、运行单位的技术人员及大专院校有关专业的师生参考。

水利水电科学研究院
科学研究论文集
第8集
(岩土工程)
水利水电科学研究院编

*

水利出版社出版
(北京德胜门外六铺炕)
新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售
水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 12 $\frac{1}{2}$ 印张 290千字
1982年8月第一版 1982年8月北京第一次印刷
印数 0001—3050册 定价 1.35元
书号 15047·4204

目 录

坝基岩体中石膏夹层的工程特性的研究

.....陈凤翔 吴铭江 黄仁福 (1)

钻孔压磁应力计测量岩体初始应力.....吴铭江 何育才 (18)

大型滑坡及其速度计算.....郭崇元 (28)

密云水库白河主坝保护层地震破坏及砂砾料振动液化特性

.....刘令瑶 李桂芬 丙东屏 (46)

土的几种拉张仪.....柏树田 沈新慧 苏宝石 (55)

压实粘性土的抗拉特性.....沈新慧 (63)

论砂砾石土的管涌性.....刘宏梅 张静敏 (74)

爆破堆石坝的渗透稳定问题.....刘宏梅 (97)

无粘性土的孔隙直径及渗流特性.....刘杰 (106)

裂隙岩体各向异性渗透特性及其野外测定方法

.....周汾 浦苑华 (114)

用等参数单元分析排水井和沟的稳定渗流计算

.....黄俊 李春华 (137)

稳定渗流的有限元计算和决定自由表面位置的一种方法

.....李春华 (148)

裂隙岩基渗流各向异性的主渗透方向对坝底扬压力的影响

.....黄俊 (157)

水工聚氨酯灌浆.....刘嘉材 王宝常 崔文光 郭玉花 陈荷生 肖田元 (169)

填泥溶洞水泥灌浆研究.....张作瑁 何品寿 (177)

裂缝灌浆扩散半径研究.....刘嘉材 (186)

水泥粘土浆性能及其在岩基防渗灌浆中应用的研讨.....张作瑁 (196)

坝基岩体中石膏夹层的工程特性的研究

陈凤翔 吴铭江 黄仁福*

【提要】本文简要叙述坝基中存在石膏夹层对工程安全的影响。对黄河中游龙门地段基岩中石膏夹层的分布规律、成因、物质组分、溶解和溶滤特性,以及由于溶滤作用对岩体的力学强度和变形性质的影响,在室内和现场进行了试验研究。

研究结果表明,石膏的溶滤特性主要受水力梯度及其与围岩的胶结状态所控制。含石膏的岩体,当石膏溶滤后,其压缩和剪切变形有显著增大。因此,在坝基的变形和稳定分析时,应考虑石膏的分布状况和其力学性质。

一、前 言

坝基岩体中软弱夹层关系到工程安全,造价和建设速度,近年来已引起普遍的重视,国内外许多单位和学者已进行了大量的研究工作。但对坝基岩体中含有石膏的这种软弱夹层的工程特性,研究的还不多。苏联纳乌门科^[1]和普罗丘汉^[2],曾用人工制备试样在一定控制条件下,对厚层石膏的溶滤问题进行过室内试验研究。而对天然状态下薄层石膏夹层的溶滤特性,特别是在地下水长期作用下引起岩体力学性质的变化,却研究得很少。

石膏属于中溶盐类岩石,在渗流作用下,必将发生溶滤,使基岩中原有裂隙扩展或产生空洞,从而改变水文地质条件,增大坝下扬压力,并大大削弱地基的承载能力和抗滑能力,甚至会导致水工建筑物的破坏与失事。

我国青海省北山寺水电站,压力前池位于土状石膏地基上。由于前池渠道渗水,地基中石膏被溶滤,从而引起护坡混凝土块不均匀沉陷,伸缩缝扩大,使漏水进一步增加,影响到电站安全运行^①,在国外,美国圣·佛兰西斯坝的失事,原因之一就是坝肩泥质砾岩中所含脉状石膏发生溶滤所致^[3]。因在坝基岩体中发现石膏层而停止修建和设计工作的例子也是不少的,例如法国的相·彭连拱坝、利夫·托尔坝、达柳伊坝、拉沙彼柳坝等^[4]。此外,在地下工程建设中,也产生过一些问题,如我国的成昆铁路隧洞^②,德意志联邦共和国的地铁隧洞等^[5]。但是,在含有石膏的岩基上修建水工建筑物也不是不可能的,例

* 参加这项工作的还有余练、赵凤敏、张菊生,现场试验工作是与原北京勘测设计院试验室协作完成的。

① 西北勘测设计院,北山寺水电站厂房枢纽处理工程说明,1969年2月。

② 西南交通大学等,成昆铁路百家岭隧道石膏岩系的调查研究及病害整治,1978年9月。

如,苏联卡马水电站就是一个成功的实例^[4]。

综观含石膏岩体对工程建设,特别是对水利工程建设的影响,我们对黄河中游龙门地段基岩中石膏夹层的分布规律、成因、物质组分、溶解和溶滤特性及其对岩体力学强度和变形特性的影响,在室内和现场条件下进行了试验研究。

二、石膏夹层的分布及成因

龙门地段的基岩,根据地表测绘和钻孔、平洞、探槽等资料,查明在中奥陶、石炭及二迭等系岩层中,均有不同形态的石膏分布。其中尤以中奥陶系马家沟灰岩上部 O_2^{V-1} 及 O_2^{V-3} 两岩组内分布较为广泛,(该两岩组都将处于工程建筑物的应力影响范围之内)。它们呈层状、网状或树枝状互相连接或交截,并断续地延伸在这些岩层之间,其中大多数



图 1

①灰岩; ②附着在岩石表面的石膏薄膜; ③石膏夹层

具有明显可见的纤维状结晶。此外,也有呈土状出现在地面的。

层状分布的石膏,属于原生泻湖相沉积,主要分布在白云质泥灰岩及粘土质泥灰岩中。从地表露头及平洞、钻孔中发现,岩体中的石膏夹层,单层厚0.5~3毫米,沿层面为不连续分布。一般延伸约1~3米,延伸十几米的较少,个别可达100米以上,见图1。

在 O_2^{V-1} 及 O_2^{V-3} 两岩组内,石膏层数分别达147层及325层之多,其累积厚度分别为20.25及49.65厘米,

占各该岩组总厚度的1.46%及0.85%。

网状和树枝状分布的石膏,属于次生成因,主要由于后期地下水活动,将原生石膏溶滤后重新充填在岩体裂隙中所形成。它们常与原生的层状石膏在一起,但其延伸极不规则,厚度和数量也远不及原生层状石膏,有时可见其切穿原生的层状石膏与方解石脉共生。

根据区域地层对比,本段含石膏岩组的层位,与太原西山、运城富集的石膏矿床层位相当。由于沉积环境不同,石膏的厚度及分布范围远不及太原西山、运城一带。但是含有石膏夹层岩组的分布却是非常稳定的。

三、石膏的物质组分、水溶性及其溶滤特性

影响石膏水溶性及其溶滤性能的因素很多,诸如石膏的物质组分,组织结构;石膏夹层与围岩的接触与胶结状况;含石膏夹层岩体的裂隙发育程度;水的化学成分、矿化度;

水动力条件以及温度等。现按照石膏的物质组分、水溶性、溶滤特性三个方面将试验成果分述如后。

(一) 石膏的物质组分

龙门地段的石膏为白色、半透明、具有玻璃光泽,呈纤维状结晶。为了解组成石膏的化学元素和矿物成分,对4个样品进行了化学分析(表1),4个样品进行了光谱分析(表2),5个样品进行了镜下薄片鉴定。

表 1 石膏化学分析成果表

取样地点	分 析 项 目										备 注
	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	CO ₂	
	含 量										
O ₂ V ⁻¹ 7~9层	1.12	33.22	0.30	0.20	0.04	0.57	44.60	20.13	0.14	0.31	13号平洞
O ₂ V ⁻³ 35层	8.14	20.01	0.50	0.64	0.20	3.43	37.67	17.52	0.26	2.40	15号平洞
O ₂ V ⁻³ 40层	0.61	32.34	0.34	0.36	0.12	0.47	45.19	20.06	0.15	0.40	套 沟
O ₂ V ⁻³ 54~55层	6.43	35.48	0.30	1.00	0.12	2.40	31.19	14.19	0.22	8.75	套 沟

表 2 光谱分析成果表

取样地点	分 析 项 目																备 注
	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Cr	Ti	Mn	Zr	V	Mo	B	Ba	Be	Ga	Sr	
	含 量																
O ₂ V ⁻¹ 7~9层	0.0005	0	0	0	0	0.0001	0.1	0.1	0.005	0	0	0.003	0.005	0.0005	0	0.02	13号平洞
O ₂ V ⁻³ 35层	0.003	0	0	0	0	<0.003	0.1	0.1	0.03	0	0	0.005	>0.3	<0.001	0.001	0.02	15号平洞
O ₂ V ⁻³ 40层	0.002	0	0	0	0	0	0.05	0.1	0.005	0	0	0.013	>0.03	0.0003	0	0.02	套 沟
O ₂ V ⁻³ 54~55层	0.001	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.005	0	0	>0.003	0.05	0.0005	0	0.02	套 沟

注 Sb、Ge、As、Hg、Au、Cd、La、Li、Y、Yb、W、Bi、Sn、Hf、Nb、Tu、Tn等元素灵敏线未出现。

这些试验结果表明,所见石膏全部属于二水石膏(CaSO₄·2H₂O),无水化膨胀性质。石膏中所含其他物质约10%,说明该石膏质地较纯,是易于溶解的。

(二) 石膏的水溶性

根据石膏的物质组分,考虑水工建筑物的特点,着重研究了温度和不同水质对石膏水

溶性的影响。方法是：将当地石膏和纯石膏分别在黄河水和蒸馏水中，在温度约为5℃、9℃及19℃的条件下溶解直至饱和。在此期间，定时取样测定石膏溶液中浓度的变化，以了解在当地水温度变化范围内，不同水质、不同石膏的溶解度及溶解速度。试验结果见图2。试验结果说明，相同石膏在蒸馏水中的溶解度比在黄河水中为大。当地黄河水的主要化学成分为：

$$M_{0.013} \frac{HCO_{69.2}^3 SO_{15.8}^4 Cl_{15.0}}{(K+Na)_{50.1} Ca_{31.1} Mg_{19.0}} T_{21}^{+0}$$

这是由于黄河水中含有相当多的 Ca^{++} 和 SO_4^{--} 离子所致，因同离子效应而使石膏的溶解度降低。在相同的水中，当地石膏的溶解度比纯石膏为大，经分析认为可能是当地石膏中含有促使石膏溶解度增大的盐类所致。

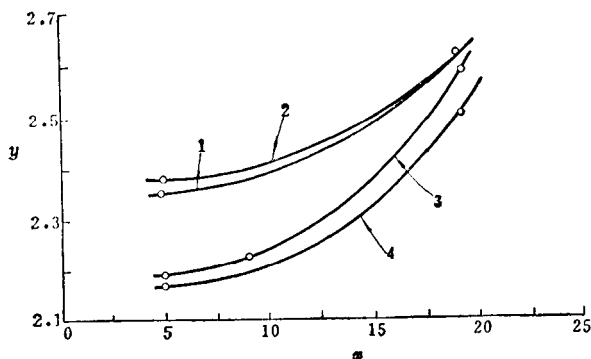


图2 不同石膏在不同水中的溶解度与温度的关系曲线
x—温度(°C); y—溶解度(克/升);
1—蒸馏水纯石膏; 2—蒸馏水当地石膏; 3—黄河水当地石膏; 4—黄河水纯石膏

由图2还可看出，在试验温度范围内，温度对石膏溶解度的影响是显著的。

(三) 石膏夹层的溶滤特性

在室内及现场分别进行溶滤试验，其装置见图3。试验方法是：以澄清后的黄河水，在预定水力梯度下沿石膏层通过试件，并定时地测量流过试件后的水温、水量及其 Ca^{++} 和 SO_4^{--} 离子的含量，以了解溶滤过程，直至试验结束。

考虑到天然情况下石膏夹层与围岩的结合情况比较复杂，因而室内试验仅采用了两组典型的试件，一组为石膏与围岩不胶结，但仍保持原位接触；另一组系石膏与围岩完全胶结。试件面积均为10×10厘米，厚约6~8厘米，岩石中夹有厚约2毫米的石膏层。

现场试验的试件，是在平洞内开挖成50×50×50厘米³的岩体，试件内断续分布有数层厚约1~2毫米的石膏层，它们有的与围岩胶结很好，有的与围岩没有胶结，试件中裂隙比较发育，但其底部为相对不透水层(图4)。

室内试验说明，石膏与围岩胶结的试件，水流只能通过石膏本身渗透。试验过程中，仅见石膏表面出现湿润(数分钟内)，局部出现米粒大小的水珠(数小时内)。经过半个多月的试验，透过的水量甚微(几至十几滴)，石膏夹层基本上没有溶滤。然而石膏与围岩没有胶结时，尽管它们保持原位接触，水流仍可通过石膏与围岩间的裂隙渗透。因此，试验一开始，水流就很快通过试件，在渗流水的作用下，溶滤相当强烈，如厚约2毫米，面积10×10厘米²的石膏层，在水力梯度*i*=1的条件下，约24小时即全部溶滤，但是随着水力梯度的减小，溶滤时间也相应地随之增加，在水力梯度为0.05时，需要200小时以上才能将石膏溶滤完。从溶滤试验过程中，可以看到其过水量、浓度及溶滤强度的关系，如图5、6、7所示(*i*=0.5的成果，由于供水系统的故障，对成果有影响，且试验未全部做

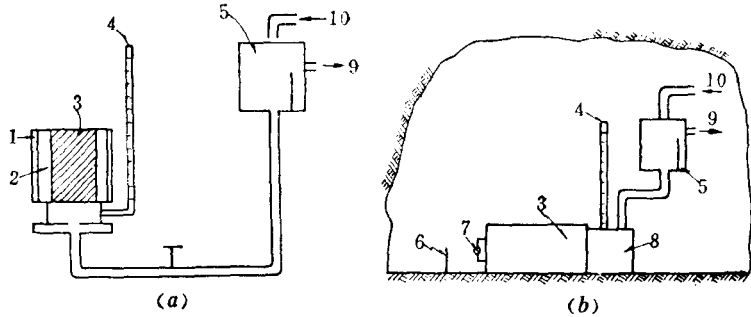


图 3 溶滤试验装置图

(a)室内溶滤试验装置；(b)现场溶滤试验装置

1—溶滤仪；2—密封填料；3—试件；4—测压管及排气管；5—水位稳定箱；6—三角堰出水槽；7—测表；8—注水槽；9—排水管；10—进水管

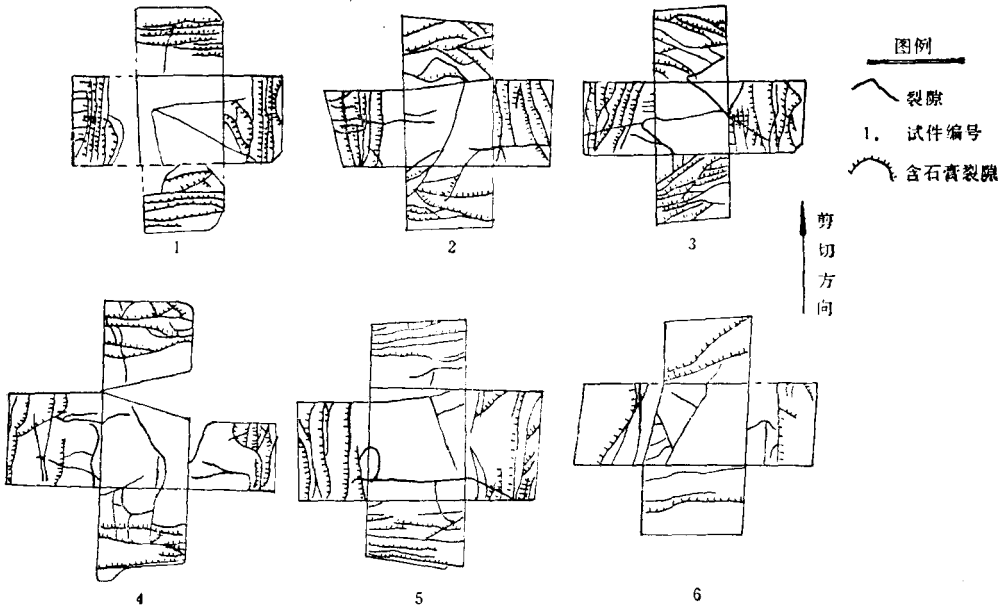


图 4 现场溶滤试验试件素描图

完，故未列出）。

由图5～图7可见：

（1）在试验的起始阶段，过水量缓慢的增加（曲线起始平缓段），溶滤液浓度由饱和或近于饱和状态急骤降低，溶滤强度则缓慢增加。

（2）在试验的中间阶段，过水量增加较快（曲线中间较陡段），溶滤浓度缓慢降低，而溶滤强度增加较快。

（3）在试验的末后阶段，过水量趋于最大，并趋于稳定，溶滤液浓度趋近于零，溶滤强度则急骤减小而趋近于零。

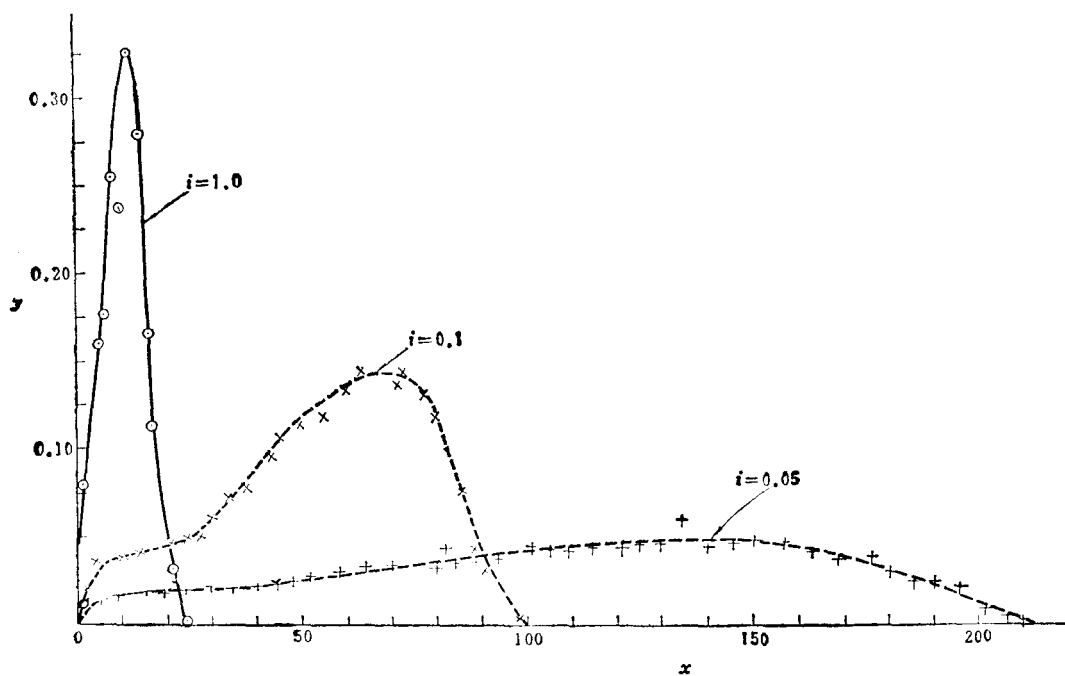


图 5 溶滤强度与时间关系曲线图(室内溶滤)

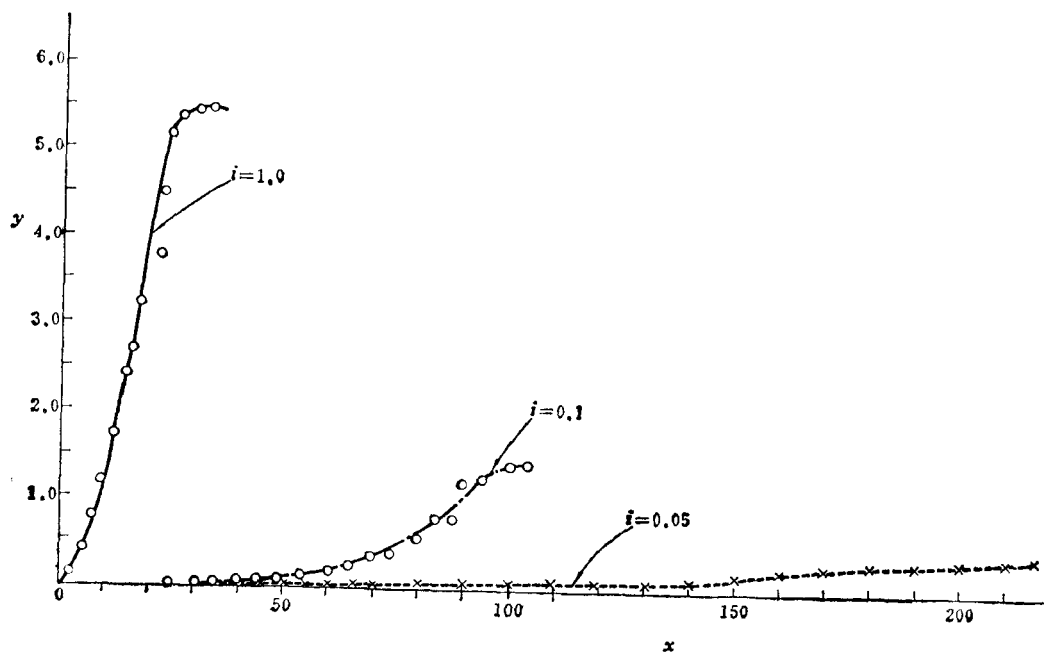
 x —时间(小时); y —溶滤强度(毫克/厘米²·分)

图 6 过水量与时间关系曲线图(室内溶滤)

 x —时间(小时); y —过水量(升/分)

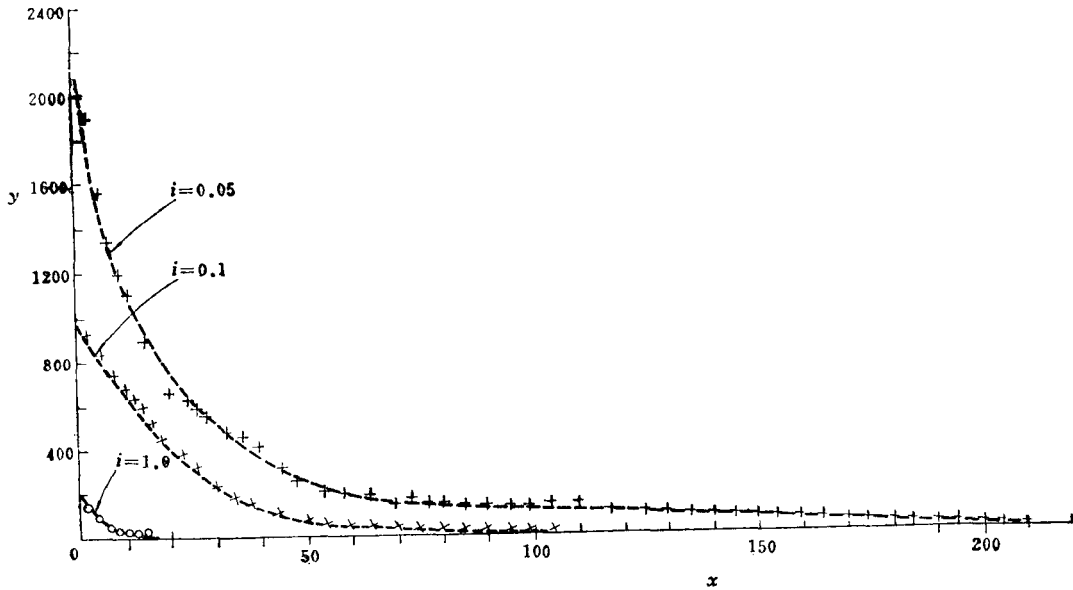


图 7 浓度与时间关系曲线图 (室内试验)

 x —时间(小时); y —浓度(毫克/升)

(4) 过水量的基本稳定阶段, 开始于石膏接近溶完的时刻。

在水力梯度达到1.0时, 过水量及溶滤强度不再是缓慢增加, 而是急骤增大, 与现场原位试验结果基本相似, 说明水力梯度达到一定值后, 溶滤状态将会改变。

现场溶滤试验, 由于试件状况远较室内试验的试件复杂, 试验开始后, 水流除从石膏本身及石膏与围岩之间的裂隙通过外, 尚有部分水流是从围岩裂隙中通过的, 因之它的溶滤试验结果与室内有所不同, 如图8、9、10所示。

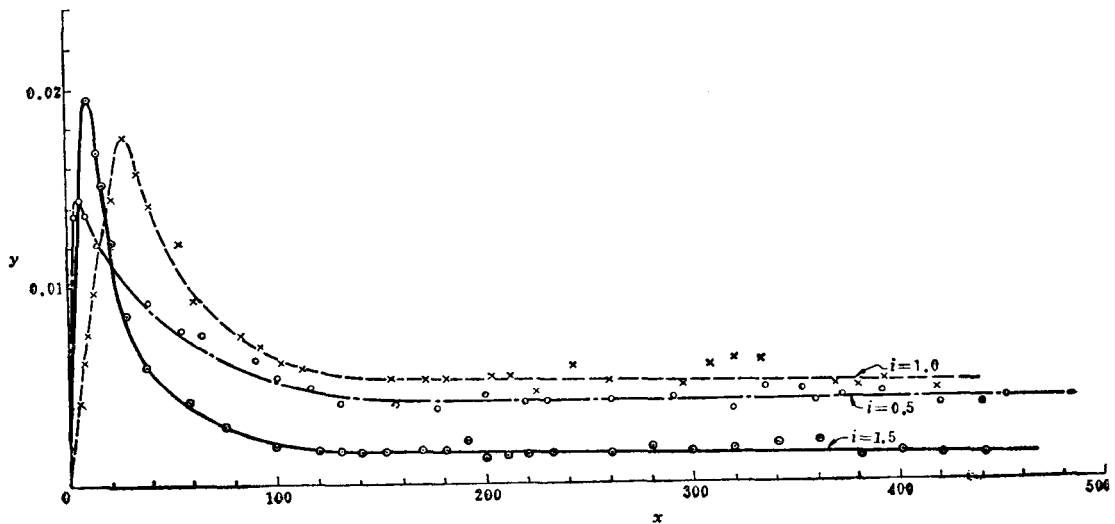


图 8 溶滤强度与时间关系曲线图 (现场溶滤)

 x —时间(小时); y —溶滤强度(毫克/厘米²·分)

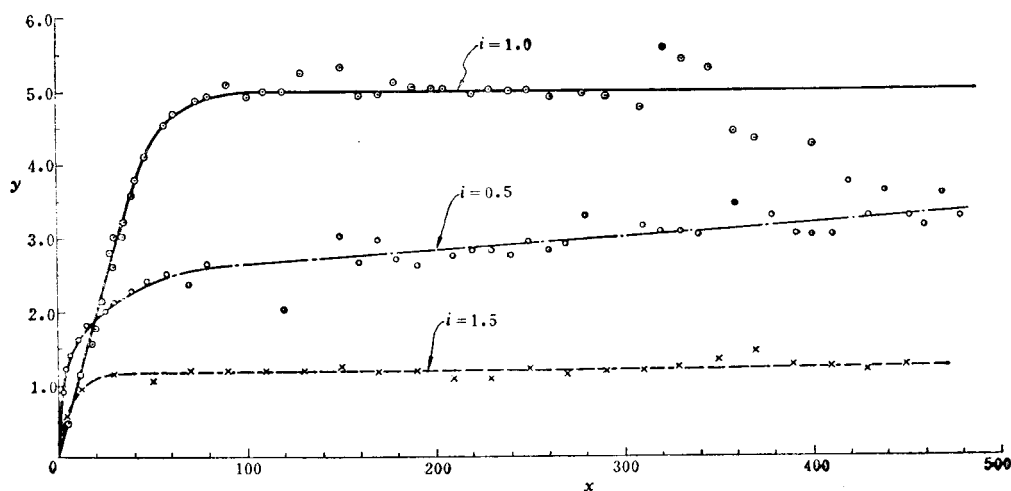


图9 过水量与时间关系曲线图(现场溶滤)

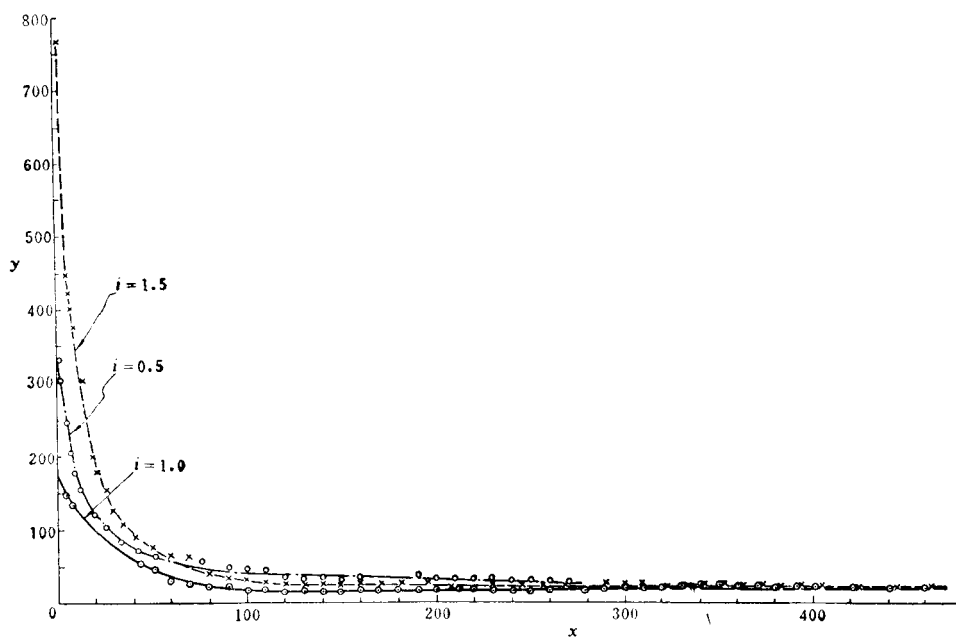
 x —时间(小时); y —过水量(升/分)

图10 浓度与时间关系曲线图(现场溶滤)

 x —时间(小时); y —浓度(毫克/升)

从图8~图10中可以看出, 试验起始后, 在各个水力梯度下均是过水量急骤增大, 溶滤浓度急骤降低, 溶滤强度则急骤增高(水力梯度 $i = 1.5$ 时, 反而流量较少, 浓度较大, 经检查分析, 主要是由于裂隙较不发育, 石膏与围岩的胶结较好所致); 而在试验的末后阶段, 从形式上看与室内试验结果有相似之处, 但这不是石膏接近溶完的象征, 而是由于所用黄河水澄清不够, 尚含有泥沙, 致使试件中因石膏溶滤而扩展的裂隙, 部分又被泥沙

重新堵塞所致。裂隙的扩展和堵塞是两种相反的过程，在一定的条件下，恰好达到动态平衡。以致过水量、浓度和溶滤强度在石膏尚未溶完的情况下就趋于稳定。试验结束后检查发现，经过400多个小时的溶滤，在试件内残存的部分石膏层面上，断续分布着一些泥沙，尤以靠近进水面为多，就是一个证明。

实际上，由于现场试验的试件内石膏的分布和胶结情况比较复杂，试验过程中，只有部分石膏能够与渗透水流接触而被溶滤，因此，溶滤范围的扩展过程是比较缓慢的。而作为表征溶滤强弱的溶滤强度又是以单位面积、单位时间内所溶滤的石膏量来表示的，加以试件中石膏的围岩裂隙也过水，因此，现场试验所得溶滤强度远较室内为小，见图11。从图11中还可以看出，在水力梯度小于1.0时，最大溶滤强度的变化率增大较快；而在水力梯度达到1.0以后，则增加缓慢，这一结果对考虑坝基防渗措施有着一定的意义。

(四) 双向压力作用下的溶滤试验

为了解地基中石膏在天然压力状态下的溶滤情况，在室内还进行了双向压力下的天然及人工试件的溶滤试验。试验是在双向压力溶滤仪中进行，见图12。

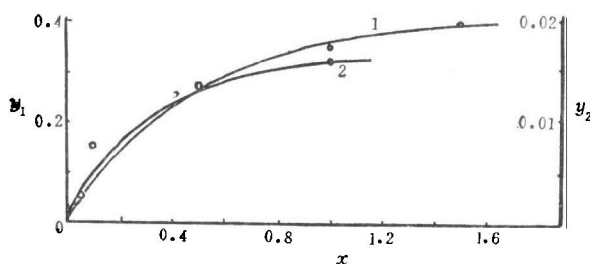


图 11 最大溶滤强度与水力梯度关系曲线图
 x —水力梯度； y_1 —室内最大溶滤强度(毫克/厘米²·分)；
 y_2 —现场最大溶滤强度(毫克/厘米²·分)
 1—现场；2—室内

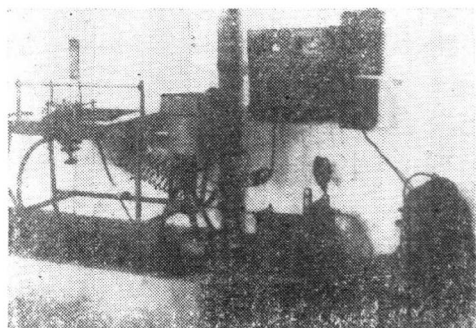


图 12 双向压力溶滤仪图

试件为边长10厘米的正立方体，天然试件系由岩心中切取含石膏部分加工制成。石膏层厚1~3毫米，有的试件沿石膏层裂开分为数块；有的胶结良好，俨若一体。人工试件是将石膏平行层面磨制成10×10×0.2厘米的薄板，夹于两块10×10×5厘米的石块之间，其一面以环氧树脂与石块粘结，另一面不加处理。试验时，将试件放在溶滤仪内，在两个互相垂直的方向上加压，压力之比为2:1。随后向试件压注自来水，并保持固定的水力梯度。在水通过试件流出后，定时量取水量，并先后采用化学分析和水质纯度仪（电导法）测定水中所含石膏数量。

天然试件由于石膏层的分布及开裂程度的不同，加以泥质灰岩浸水膨胀，以致成果颇为悬殊，如在水力梯度为0.2，最大压力为25公斤/厘米²情况下，试件由于石膏夹层与围岩接触紧密，胶结良好，经480小时试验仍未见水流通过，仅在表面上出现白色斑点，是经石膏层渗出的极微量石膏饱和溶液蒸发后遗留的石膏结晶；而水力梯度为1.0，最大压力为25公斤/厘米²的试件，由于裂隙发育且两条石膏脉相互交截，通水后立即有渗流水流出，经361小时，石膏层已全部溶滤完，而留下宽约1毫米的裂隙，从而说明，胶结状况

对石膏的溶滤起着重大作用。

人工试件则因条件比较接近,故显示出较有规律的变化,以压力17.5公斤/厘米²下的成果为例,如图13、14、15所示。试验结果说明,在受有压力的情况下,其溶滤过程的基本状态与无压的情况基本相似,从而进一步论证了石膏的溶滤特征主要由石膏与围岩的胶

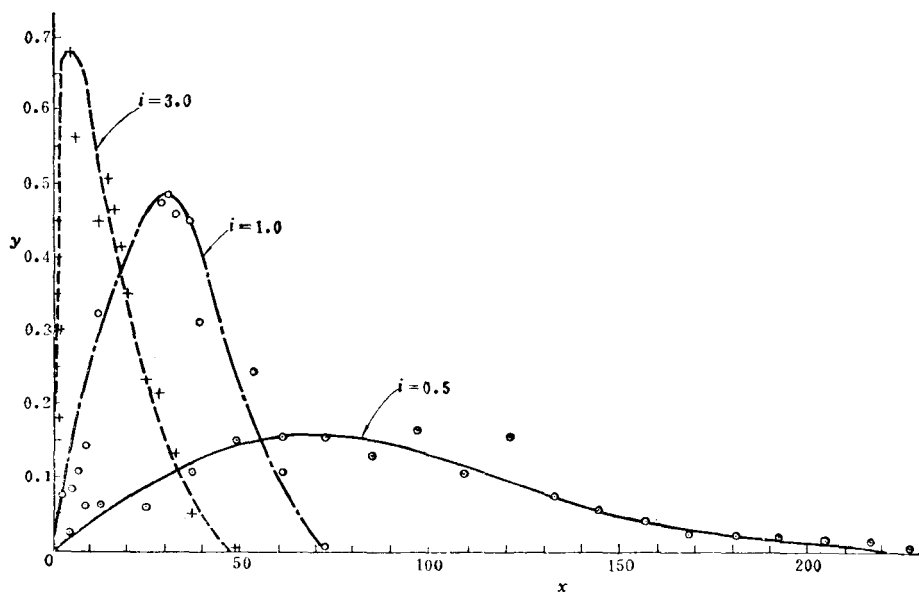


图 13 室内双向压力下溶滤、溶滤强度与时间关系曲线图

x —时间(小时); y —溶滤强度(毫克/厘米²·分)

(最大应力 $\sigma = 17.5$ 公斤/厘米²)

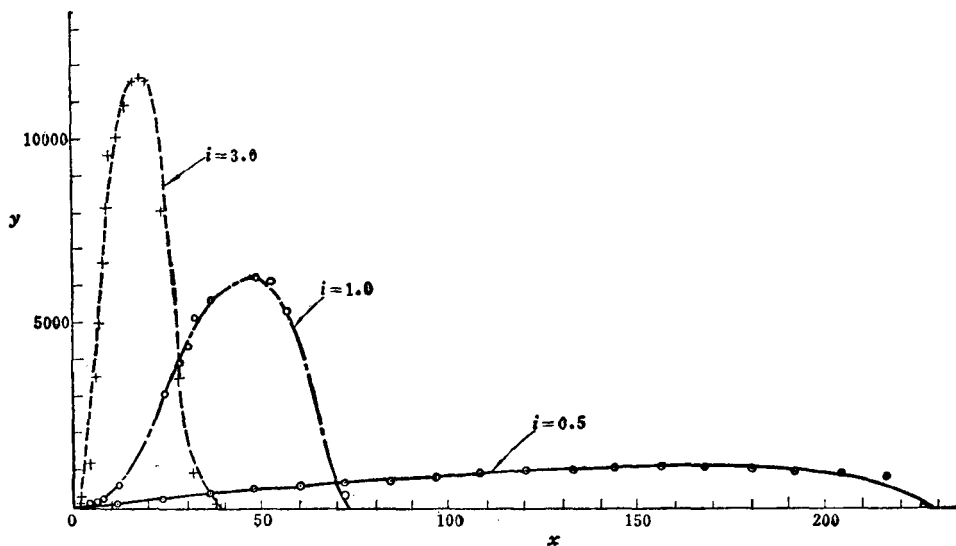


图 14 室内双向压力下溶滤过水量与时间关系曲线图

x —时间(小时); y —过水量(毫升/分)

(最大应力 $\sigma = 17.5$ 公斤/厘米²)

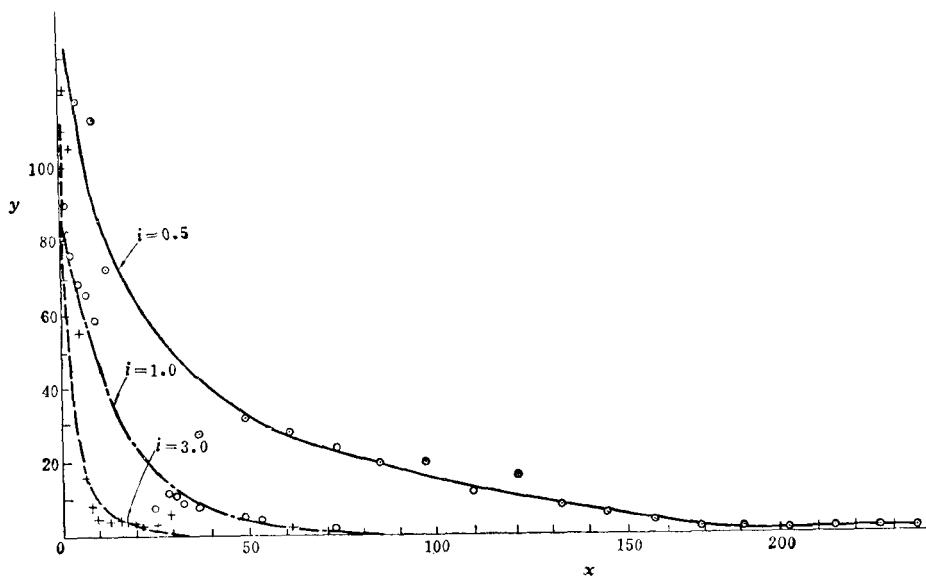


图 15 室内双向压力下溶滤浓度与时间关系曲线图

 x —时间(小时); y —浓度(毫克/升)(最大应力 $\sigma = 17.5$ 公斤/厘米²)

结状况和围岩裂隙发育程度以及水力梯度所控制。压力对溶滤强度的影响,只是在一定条件下才起作用:即当所受压力小于渗透压力时,或虽大于渗透压力而裂隙间有支撑点,以致受压后不能闭合时,则压力的影响是不明显的。如上述天然试件水力梯度为 1.0 的试验状况就是如此。至于对裂隙间无支撑点的情况,随着石膏被溶滤,裂隙将被压密闭合,使渗流减小或断绝,以致溶滤强度下降为零,见图16。从该图可以看出,这一受压闭合的过程,只是在石膏夹层接近溶完时才出现,这一结果对认识在压力作用下的溶滤特性有一定的意义。

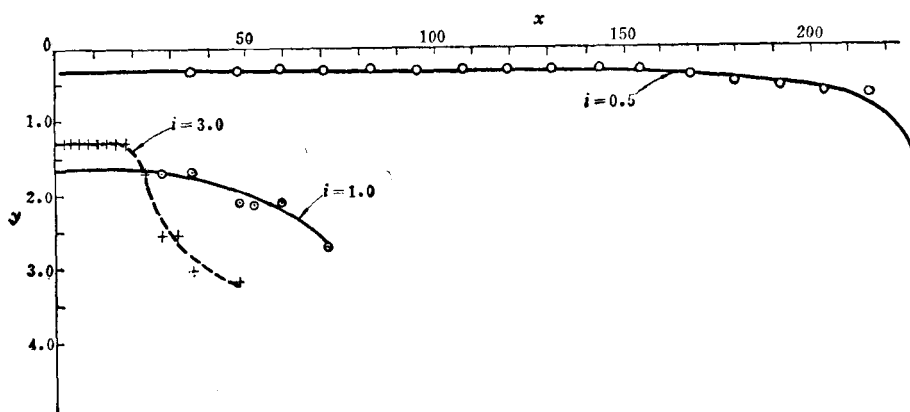


图 16 双向压力下溶滤过程中时间与位移关系曲线图

 x —时间(小时); y —位移(毫米)(最大应力 $\sigma = 17.5$ 公斤/厘米²)

四、石膏夹层的力学特性

由于石膏是存在于岩体层面间或裂隙中,起一定的支撑和胶结作用。因此,当石膏溶滤后,岩体的力学性能(变形和强度)必将有显著的改变。根据水工建筑物的特点,主要进行了现场大型试样溶滤前后的变形试验和抗剪强度试验,以及溶滤过程中变形量的观测。

试验方法,利用现场进行溶滤试验的三个试件,先进行变形试验,测表安装在试件的四侧垂直面上,并按以下两个原则布置:①尽量布置在试件中石膏最密集的部分;②测表的两个支撑点尽可能固定在试件侧面的中间三分之一以内。而后进行溶滤试验,待石膏溶滤后,再次进行变形试验以资比较。在做完上述试验后,于同一试件进行溶滤后的抗剪断强度试验。为了能比较出溶滤前后抗剪断强度的变化,于原来试件附近,另制备三个试件(50×50×50厘米,其中一个因故障无成果),进行溶滤前的抗剪断强度试验。

溶滤过程中的变形观测,则是在试件的出水面,利用变形试验的四个固定支点,安装两个测表,在顶面上安装四个测表,测定各个时段的变形量。

鉴于石膏均为薄片状夹于岩体中,因此,采用与本区层位相当的运城石膏,进行室内各项力学性质试验,作为分析对比的参考,其结果见表3及图17。

表 3

运城石膏室内力学试验成果表

岩石类别	压力方向	处理情况	弹性模量 (公斤/厘米 ²)	变形模量 (公斤/厘米 ²)	抗压强度 (公斤/厘米 ²)	抗拉强度 (公斤/厘米 ²)	抗切强度 (公斤/厘米 ²)
纤维状石膏岩	斜交层面	浸水24小时	30000	14000	40.8	1.48	8.0
纤维状石膏岩	垂直层面	浸水24小时	70000	29000	52.2	10.9	31.0
纤维状石膏岩	平行层面	浸水24小时	42000	19000	94.2	0.64	4.0
粒状石膏岩	任意	浸水24小时	24000	17500	17.8	17.5	13.2
试件尺寸(厘米)			$\phi 7.5 \times 7.5$	$\phi 7.5 \times 7.5$	$\phi 7.5 \times 7.5$	$\phi 7.5 \times 7.5$	5×5×10

注 石膏纤维垂直于层面。

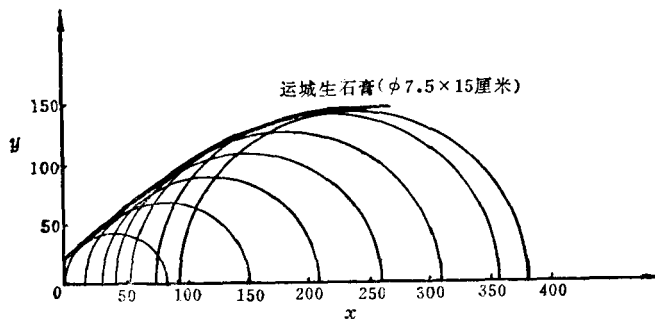


图 17 主应力与剪应力关系图

x —主应力(公斤/厘米²), y —剪应力 τ (公斤/厘米²)

(一) 现场石膏夹层的变形特性

石膏溶滤前后的力学性试验结果列于表 4。

同一试件石膏溶滤前后的变形试验结果绘成曲线, 三个试件的曲线基本相似, 三号试件的典型曲线示于图18。

表 4 石膏溶滤前后力学性试验成果表

试 验 条 件	当压力为18~20公斤/厘米 ² 时的变形模量 (1×10^4 公斤/厘米 ²)			抗 剪 断 强 度	
				φ	c
溶 滤 前	0.52 (2)	0.40 (3)	0.78 (5)		
溶 滤 后	0.48 (2)	0.38 (3)	0.78 (5)	0.76	1.0
溶滤后 溶滤前 比率(%)	92	95	100		

注 括号内数值为试件编号。

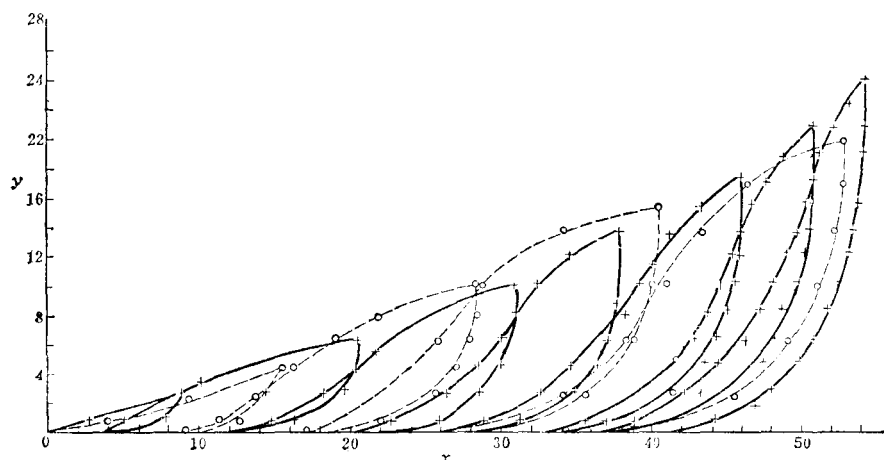


图 18 溶滤前后应力与应变关系曲线图
(3号试件水力梯度0.5)

x —应变(10^{-4}); y —垂直应力(公斤/厘米²)
——溶滤前; ----溶滤后

从整个变形的曲线形式来看, 这种含石膏且具有较多裂隙的岩体, 在不大的压力下就产生很大的残余变形, 而且仅在第一、二级小荷重下所产生的变形值即占整个变形值的1/3以上。在这些变形值中, 可以认为主要是由于裂隙受压闭合的结果, 其后压力增高时, 则主要为石膏及岩石的变形, 以及部分尚未完全闭合的裂隙进一步压密所致。

应当指出, 溶滤后的压缩变形, 从形式上看, 与溶滤前基本相似, 但应看到溶滤后在小压力下产生大变形的原因, 并不是天然状态下的裂隙压密闭合所致, 而是由于石膏溶滤后所造成的岩石空隙再次被压密的结果。压力增高时变形, 主要应是石膏及岩石软化特性的表现。同时还可看出, 此种含石膏且具有裂隙的岩体, 在加压和降压过程中的变形特