

水工压力隧洞預应力襯砌

Г.Г. 左拉博夫、O.E. 布加叶娃 編

水利出版社

苏联电站部
电力设计总局

全苏水工科学研究所
水工建筑物研究所
野外实验室

水工压力隧洞預应力襯砌

Г.Г.左拉博夫、O.E.布加叶娃 編

左宗壁 譯

水利出版社

1958年5月

本書詳細地介紹了水工壓力隧洞幾種預應力度砌的主要類型、計算特點以及技術經濟比較。

本書可供從事水利工程的設計和施工人員參考，也可供水利院校的教師和學生作參考之用。

水工壓力隧洞預應力度砌

原書名	ПРЕДВАРИТЕЛЬНО-НАПРЯЖЕННЫЕ ОБЛИЦОВКИ НАПОРНЫХ ГИДРОТЕХ НИЧЕСКИХ ТУННЕЛЕЙ
原著者	Г.Г.ЗУРАВОВ、О.Е.БУГАЕВА
原出版處	ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕ- СКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
原出版年份	1955
譯者	左宗壁
出版者	水利出版社（北京西郊科學路二里溝） 北京市書刊出版業營業許可証出字第080號
印刷者	水利出版社印刷廠（北京西城成方街13號）
發行者	新華書店

41千字 插圖1頁 850×1168 1/32開 1 13/16印張
1958年5月第一版 北京第一次印刷 印數1—1,600
統一書號：15047·160 定價：（10）0.34元

目 錄

緒 論	5
第一章 压力隧洞預应力襯砌的主要类型	7
§1 压漿式襯砌	8
§2 拉筋式襯砌	13
§3 鋼籠式襯砌	22
第二章 預应力襯砌計算的特点	30
§1 概說	30
§2 压漿式襯砌	31
§3 拉筋式襯砌和鋼籠式襯砌	44
第三章 压力隧洞襯砌的技術經濟比較	50
結 語	52

緒 論

对于承受高水头及中水头的圓形压力隧洞而言，采用預应力襯砌在結構上是十分適宜的，在經濟上也是有利的。随着隧洞建筑位置的工程地質条件、隧洞断面的大小、内部水压力的数值以及其他因素的不同，預应力襯砌可以有几种不同的型式。

本报導将对压力隧洞的各种預应力襯砌的構造和靜力工作条件，以及这些襯砌在施工中的若干特点加以探討。

在中水头和高水头的情况下，無論是在軟弱的地層中或是在中等硬度的和中等以上硬度的地層中，对于水工隧洞都可采用預应力襯砌。采用預应力襯砌就有可能更充分地利用混凝土的抗压强度和鋼筋的抗拉强度，而在某些情况下还可使襯砌和它周圍的地層共同地工作。

混凝土与钢筋混凝土是水工隧洞襯砌中最常用的材料。由于混凝土的抗拉能力很低，同时在混凝土中又不容許有裂縫出現，故襯砌的厚度通常是根據混凝土受拉区域的工作情况决定的。因而就不能利用其較高的抗压强度。在钢筋混凝土襯砌中，鋼筋的抗拉强度也不可能完全利用，当混凝土發生裂縫的瞬間，鋼筋的拉应力尙未超过 300~400 公斤/平方公分。由于这个緣故，钢筋混凝土襯砌就得采用相当大的厚度了。

当隧洞的襯砌和它周圍的地層共同地工作时，襯砌厚度的增加（它的剛度也因而增加）会導致地層彈性抗力的减小和襯砌工作条件的惡化。同时，隧洞襯砌厚度增加以后，开挖面積要加大，工程总价也就要提高。

用人为的方法在襯砌中施以等于或接近于在运轉情况下由荷重

所產生的計算拉應力值的預加壓應力，可以使水工隧洞襯砌的厚度減薄，同時可使襯砌的抗裂性大大地增強，自然，襯砌的使用期限和不透水性也就提高了。預應力襯砌對於圓形斷面的壓力隧洞最為合適，在圓形隧洞中，由主要荷重——水壓力——在襯砌的各個斷面上所引起的拉應力是一樣的。同時，當壓力隧洞為圓形時，容易採取對襯砌預先施加均勻壓力的措施。

預應力的隧洞結構，不論是在蘇聯還是其他國家，都是不久以前才開始採用的。

在蘇聯，由科學技術副博士B.A.斯洛夫斯基建議，而在玄武岩內所進行的試驗性水工隧洞預應力襯砌是這類結構的最早形式中的一種。

建議者提出在混凝土澆入襯砌圈的時候利用特殊的設備將混凝土加以壓縮。由於這時周圍的地層也受到了壓縮作用，故在混凝土硬化之後，襯砌就將被來自地層的反壓力所壓緊。

根據這種想法，曾做過一套長2.75公尺、

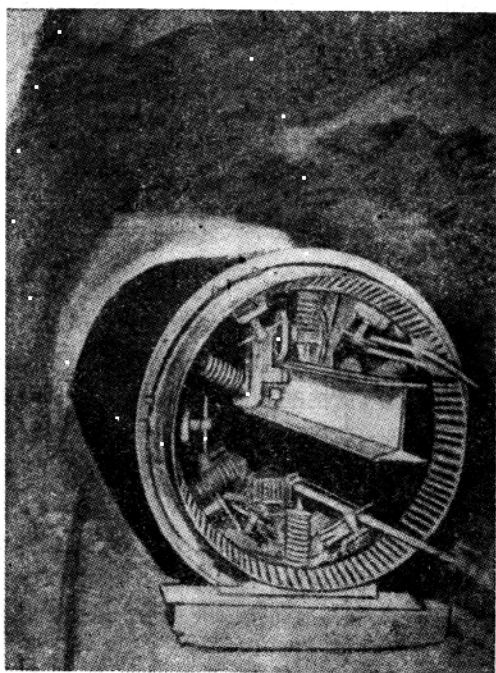


圖1 修建預應力襯砌用的設備

直徑 1.80 公尺、帶雙層鋼模壳的特殊設備(圖 1)。外層模壳仍是用來在它背後澆注混凝土的，在內壓力的作用之下它能够稍微向外移動一些。外層模壳和內層模壳的環形間隙里安置了通入壓縮空氣的橡皮囊。在空氣壓力的作用下，外層模壳向外移動，混凝土受到壓縮，同時地層也承受着擠壓作用。為了加速混凝土的硬化過程和提高它的質量，混凝土應該用循環于內、外兩層模壳間的環形間隙內的熱水來進行加熱。

目前在建造水工隧洞時，採用了各式各樣的預應力襯砌結構，其中利用地層反壓力使襯砌預先受到擠壓作用的這種想法得到了進一步的發展。

混凝土、鋼材、水泥砂漿和噴漿，都可以作為水工隧洞預應力襯砌用的材料。

預應力襯砌中的混凝土，既可以採用整澆的混凝土，也可以採用各種不同拼塊拼成的裝配式混凝土。襯砌用的混凝土必須符合國定全蘇標準水工混凝土一文中對於水工混凝土所提出的全部要求。

第 一 章

壓力隧洞預應力襯砌的主要類型

為了更好地分析襯砌的工作條件、評定它們的優缺點以及確定它們的靜力學計算的基本原則，下面將對壓力隧洞的預應力襯砌的各種型式進行分類。在襯砌中造成預加應力狀態的方式方法，應該被視為區分水工隧洞預應力襯砌類型的最好的標志。因此，目前壓力水工隧洞的預應力襯砌就可以分成三種主要的類型：

(I) 壓漿式襯砌，它的預加應力狀態是在襯砌後邊用高壓灌注水泥漿或水泥砂漿所形成的；

(II) 拉筋式襯砌，它的預加應力狀態是由拉張鋼筋所形成的；

(III) 鋼箍式襯砌，它的預加應力狀態是由分布在襯砌外面的鋼

箍的緊束作用所形成的。

以上三種襯砌，既可以是整澆式的，又可以是裝配式的。

§1 壓漿式襯砌

壓力隧洞壓漿式襯砌的預加壓應力狀態是用在高压下把水泥砂漿或水泥漿灌注到襯砌后邊專門留設的环形間隙里去的辦法而形成的。

壓漿式襯砌的特點在於：

(a) 在襯砌中不但沒有主要的鋼構件(鋼筋、鋼箍、錨筋等)，而且也沒有什麼輔助的鋼構件，因而降低了隧洞的工程造價，同時，通常容易發生的金屬腐蝕現象也因而免除。

(b) 襯砌的主要受力構件是混凝土內圈和它背后的水泥砂漿薄層，它們在預加應力之下僅承受着壓力；

(c) 環繞在襯砌周圍的地層也將起預先壓縮襯砌的作用，為此，它應具有彈性的性質，因而這種壓漿式襯砌只能用於十分堅硬的岩層中。

為了形成襯砌的預加應力狀態，並不需要採用專門設備或附加材料，因為當修建壓力隧洞時，為了使襯砌與岩層緊密相接，並使襯砌附近的地層得到加固，水泥灌漿工作[●]一般總是必須進行的。

但是平常所採用的壓力隧洞襯砌的結構形式和將水泥砂漿灌注於襯砌背后的方法都不能夠保證產生均勻的壓縮作用。在灌漿時，襯砌和地層之間有沒有間隙，這些間隙的大小與分布情形，以及灌漿管的位置等等，都將影響到沿襯砌外表的壓力分布情況。

為了保證砂漿壓力對於襯砌的壓縮作用是均勻的，必須在受壓的襯砌環周圍預留貫通的、厚 3~5 公分的环形間隙，砂漿即壓注於此环形間隙之內。所以這種壓漿式襯砌要做成好幾層。外層是用整澆式混凝土做成的，在大多數情況下，它並不是承壓結構，它的主

● 原注：水電站水工隧洞設計規範 1952 年第二版，第 70 條。

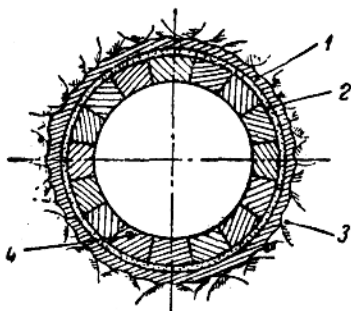


圖 2 帶裝配式內圈的壓漿式襯砌

1—混凝土修整層；2—灌注的水泥沙漿；
3—岩層；4—混凝土拼塊。

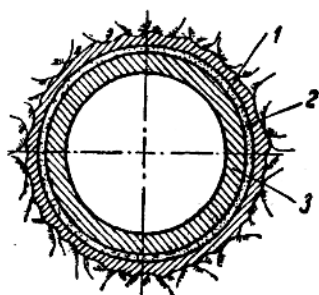


圖 3 帶整澆式內圈的壓漿式襯砌

1—混凝土修整面；2—灌注的水泥沙漿；
3—混凝土內圈。

要作用是將凹凸不平的岩石表面加以平整，並保證環形間隙有一定的厚度。在比較軟弱的地層中，這一層還用以承受地層壓力或預防

洞挖岩石發生意外的墜落。襯砌的里面一層叫作內圈，它可用裝配式混凝土或鋼筋混凝土塊做成（圖 2），也可以是整體澆筑的（圖 3）。

當在高压下把水泥砂漿灌注到襯砌背后的環形間隙中去時，外邊的混凝土修整層承受着拉力，可能形成裂縫。可是這並不致給整個建築物帶來嚴重的危害，因

剖面 1—1

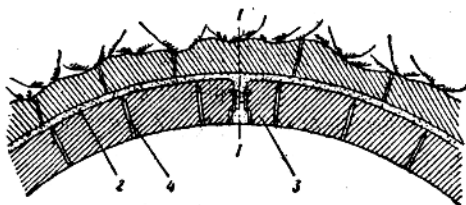
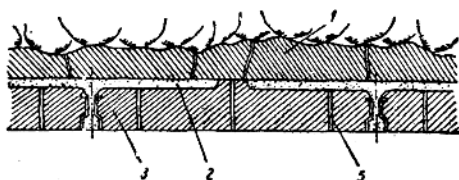


圖 4 裝配式的壓漿式襯砌細部圖

1—混凝土修整層；2—灌注的水泥沙漿；3—混凝土拼塊；4—縱向接縫；5—橫向接縫。

为在灌漿时所發生的裂縫將会被灌注的水泥砂漿所填实(圖4)。

內外圈之間的空隙厚度为一常数,乃是使襯砌均匀受压的一个非常重要的条件。当內圈为装配式結構时,拼塊外表面应設几个突出体(樺头),它們既能保持間隙有固定的大小,又不阻碍沙漿沿內圈的外表面自由流通。在圖5所表示的結構中,这些樺头用数字2表示。

沙漿經由拼塊中的辐射向孔道分区地進行灌注,而且每一拼塊都有突起的阻漿坎作为端緣(端坎),以阻止砂漿由一个区域流到另一个区域。

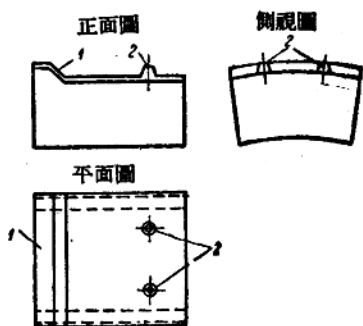


圖5 装配式的压漿式襯砌細部圖

1—端坎; 2—樺头。

如果內圈为整澆式結構时,內外圈之間用設置隔离环的办法來造成固定大小的环形空隙,隔离环系由有缺口的定型石塊或拼塊做成,水泥漿可以順暢地填滿間隙并均匀地挤压襯砌圈(圖6)。这种隔离环上半部的砌塊或者借助于露出的鉄絲头系挂在外層上,或者采用無模架砌拱法砌成。

里面的整澆式混凝土內圈可用一般方法修建之。

圖6所表示的是直徑为6公尺的压力隧洞的这种襯砌。襯砌里面的环圈(內圈)厚30公分。此处环形間隙是借助于隔离环混凝土砌塊外表面的許多缺口形成的。靠外边的混凝土層使开挖出來的凹凸不平的岩石表面变得平整光滑。

水泥砂漿在18个大气压(比隧洞所承受的內水头大50%)的压力下灌注到这些缺口里。

当向环形間隙灌漿时,砂漿压力的数值規定得高一些,这是考慮到混凝土和岩石的徐变,以及水泥砂漿凝固时的干縮(假如这种干縮是会發生的話),因为这些現象都可能引起压力的下降。环形

間隙的厚度和砂漿的干縮率愈小，砂漿凝固時襯砌上預加壓力的下降也愈少。關於這個問題的計算分析和有關圖表將在下面談到。根據上面所舉出的這個論點，在設計壓漿式襯砌時，必須採用尽可能小的環形間隙，只要不阻礙水泥砂漿充分地灌滿環形間隙就可以了。

採用特种水泥（膨脹水泥、

無干縮水泥、膨脹堵縫水泥）可以免除干縮的危險。同時，由於灌注砂漿和擠壓襯砌的過程需要很長的時間，故應採用凝固期長的水泥。

在實驗室和實地的試驗研究，乃是探求混凝土和岩石的徐變對於襯砌上預加壓力下降的影響最可靠的方法。

在不久以前建成的一條直徑 8.35 公尺帶有壓漿式襯砌的隧洞上，曾進行了長時期的觀測試驗，以驗證其實際的工作條件。將這些成果加以分析是很有意思的。這條隧洞穿過軟弱的岩層——砂岩、礫岩和泥灰岩。襯砌外圈厚 40~60 公分，內圈厚 35 公分，彈性模量 $E_6=370,000$ 公斤/平方公分。環形間隙厚度為 3 公分。在

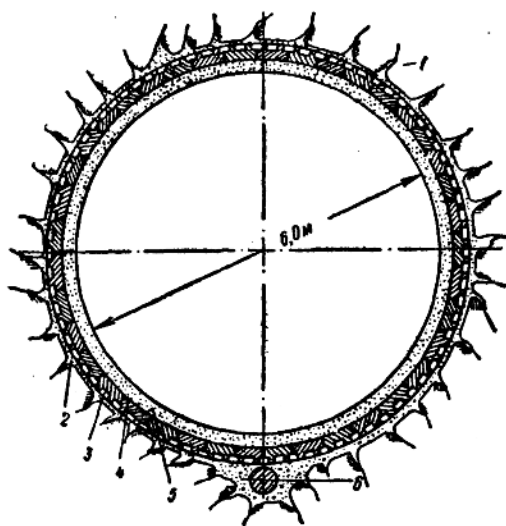


圖 6 帶有用定型砌塊做成的隔離環和整塊式內圈的襯砌

1—岩層；2—外面的混凝土層；3—為水泥灌漿所填實的缺口；4—定型的砌塊；5—厚30公分的整塊式內圈；6—用混凝土埋填的排水管。

內圈的混凝土齡期达到四个月之后就开始了預压工作。預加压力时砂漿压力为 8 个大气压。

为了測量襯砌中的应力，在隧洞的 A、B 兩断面按圖 7 所示設置了一些發送器。在第三个断面 C 上所設置的發送器系平行于隧洞中心綫的方向。总共設置了 76 具仪器。

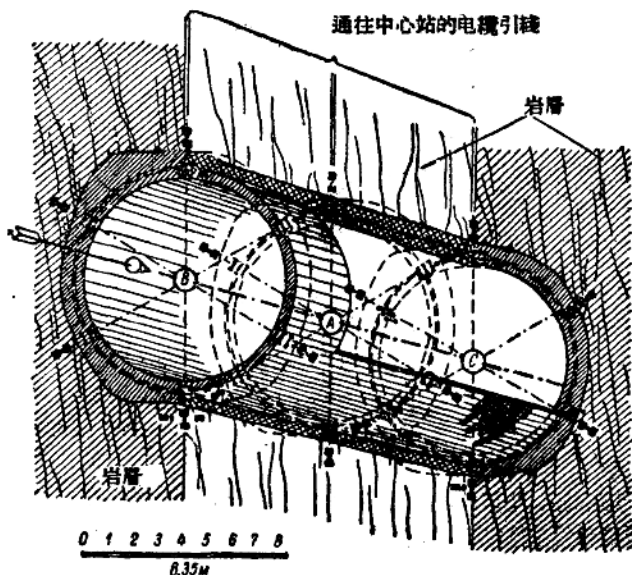


圖 7 測量仪表布置示意图 (透視圖)

圖例：○—●—● 測驗混凝土的仪器 ■—■ 測驗岩層的儀器
 ■ 測量溫度的儀器 - - - 測量地下水壓力的儀器

在測量應力的同时还進行了隧洞襯砌溫度的測量。

圖 8 所示者为下列数值在 15 个月的期間內的变化曲綫：(a)內圈中的应力 (以对于初始應力的百分比計)；(б)地層反作用力；(в)地下水水位；(г)襯砌的溫度；(д)隧洞內的水位。

由圖上的曲線可以看出，初始压力在头十五天这一段时间里發生了急剧的下降（有50%），然后开始逐漸的回升。經過一年以后，加在襯砌上的压力达到初始压力的100%，此后还逐漸有所增長，甚至比初始压力还要稍大一些。混凝土的徐变和周圍岩層的塑性变形会使加在襯砌上的压力發生顯著的降低这种顧慮未能从試驗中得到証实。

第二段时期內襯砌上压力的回升可能是因为水泥砂漿在潮湿的空气中凝固而不能自由地蒸發其中的水份时發生膨脹的緣故。在1952年4~8月这一段时期內，压力的增長肯定是与当时隧洞中的温度从 $+8^{\circ}\text{C}$ 增高到 $+16^{\circ}\text{C}$ 相適應的（曲線r），尽管以后在1~2月間温度降到 $+5^{\circ}\text{C}$ ，而襯砌上的压力并没有随着下降。

为了减小混凝土徐变对于降低初期挤压作用的影响，在混凝土达到尽可能長的齡期后再進行襯砌的挤压工作应当認為是合理的。此外，最好是在温度低的时候進行襯砌的挤压工作，以便在以后温度升高时可因襯砌外徑的加大而使它受到补充的挤压作用。

§2 拉筋式襯砌

拉筋式襯砌的預加应力不同于压漿式襯砌，是因分布于內圈外側的鋼筋受到拉張而形成，拉張完畢以后以一層噴漿或水泥砂漿將鋼筋加以复盖。

因此，在拉筋式襯砌中造成的預加应力状态，周圍的地層是不起作用的。所以这种襯砌形式就可用于低于中等硬度的地層及軟弱的地層里。

对襯砌主要構件（內圈）預先施加应力的工作，或者在生產它的工厂里進行，或者在將內圈安設于其应有位置之前在隧洞里面進行。在前一种情况下，拉筋式襯砌的內圈造成混凝土或鋼筋混凝土大直徑水管的形式。內圈在纏繞上預应力鋼筋以后就在它的外表面上复盖一層厚15~20公厘的水泥砂漿或噴漿的保护層（圖9）。制

妥的預应力管節在運送到隧洞里安設好以後，就利用混凝土泵將混凝土填入管筒外表面與洞挖內表面之間的空隙。

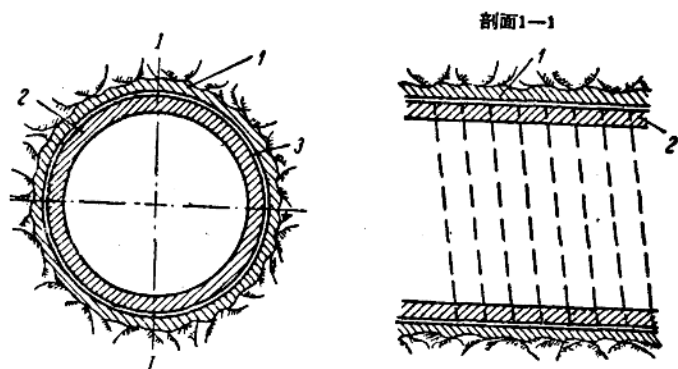


圖9 拉筋式襯砌示意圖

1—混凝土層；2—混凝土管筒；3—覆蓋了水泥砂漿或噴漿層的鋼筋。

在這種拉筋式襯砌中，內圈所起的作用正如設有鋼板襯砌的壓力隧洞中的鋼管一樣。在這裡鋼管用具有提高了抗拉強度的預应力鋼筋混凝土管代替了。

圖10所示的結構可以作為帶整澆式內圈的拉筋式隧洞襯砌的例子。

此隧洞的內圈係在工廠制成管段的形式，每段長4.5公尺，管壁厚19公分，內徑為2.55公尺。澆灌內圈的混凝土時它的軸線方向是豎直的，並以厚2公厘的鋼板作為里、外兩面的模殼，裡面的模殼在混凝土凝固後即行拆除，而外面的模殼仍須留下來作為隔離層，以防止內圈的混凝土遭受地下水的侵蝕作用。沿內圈的外表面纏繞上成螺旋狀的預应力鋼筋，螺旋間距35公厘，鋼筋直徑5公厘。為了使螺旋狀鋼筋所施加的壓力能夠均勻地分布起見，在管壁內每隔8公分設置一根縱向的分布鋼筋。

在螺旋狀鋼筋纏繞完畢之後，在管筒外表面用一層厚35公厘

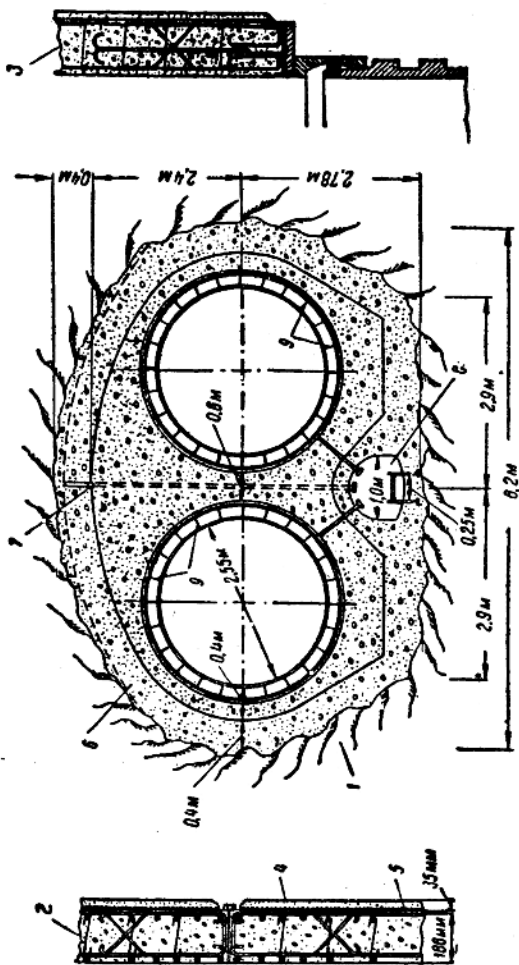


圖10 帶整流式內圈的拉筋式隧洞襯砌

1—岩層；2—隧洞分段的联接；3—隧洞與引水管的联接；4—噴漿層；5—鋼筋外殼；
6—混凝土回填層；7—灌溉孔；8—排水管；9—鋼箍。

的水泥噴漿复盖住。

內圈的管節做成后就送往隧洞，并在隧洞內敷成兩行，洞挖面應事先用混凝土層整平。新敷管節与相鄰的早先敷設好的管節之間的接头，在管筒裝上以后即應做好接合工作，并加以密封。然后利用混凝土泵將混凝土填入內圈的外表面与洞挖面的混凝土修整層之間的空隙。

上面所考慮的情况中，在一个洞挖面內修建了兩条水管。但是上述这类襯砌还可以完全用在單孔隧洞的建筑中。

圖11上所表示的是按120公尺水头設計的拉筋式隧洞襯砌的結構。襯砌內圈为厚12公分內徑2.85公尺的混凝土管筒，在它上面用高強度的螺旋鋼筋纏繞之。鋼筋上面复盖一層厚2.5公分的水泥砂漿。內圈在隧洞內安放妥當后，就在洞挖面与內圈表面之間厚度約5公分的空隙里進行高压水泥灌漿。

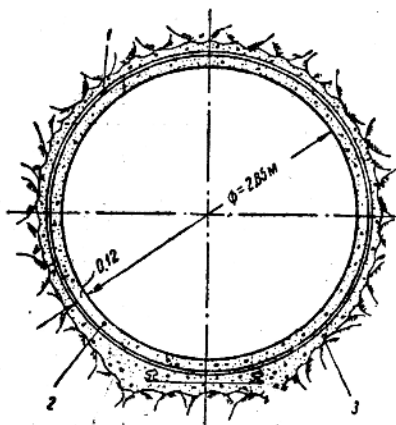


圖11 拉筋式襯砌

1—鋼筋；2—內圈；3—灌注的水泥漿。

这种重量相当重的大孔徑預应力管筒，在隧洞中有限的空間里搬运存在許多困难。由此看来，用拼塊做成內圈对于拉筋式隧洞襯砌的結構就有了相当的优越性。預应力鋼筋就在隧洞本身內纏繞到內圈上去，这个工作在內圈环業已拚好但尚未安裝到其应有位置上去之前進行。当繞好鋼筋的內圈安設于其設計位置以后，就在高压下將混凝土灌注到內圈与洞挖面之間的空隙里去，并压注水泥砂漿使其密实起來。修建这种襯砌需要采用特殊構造的机床在內圈上纏