
水工結構应力分析叢書之二

水工隧洞

潘家鏗編著

科技卫生出版社

水工結構应力分析叢書之二

水 工 隧 洞

潘家鏗 編 著

科 技 卫 生 出 版 社

內 容 提 要

本書中分析有压无压隧洞襯砌在堅固及松軟岩層中的應力計算，分，隧洞的工作條件，岩石的彈性抗力係數，單層多層襯砌在內水壓力下的計算，外水壓力及岩層應力，山石壓力及其他荷載，低拱型隧洞襯砌，馬蹄形襯砌等章，附有實用算表，可供水工結構設計工程師等參考。

水工結構應力分析叢書之二

水 工 隧 洞

編著者 潘家鏞

*

科技衛生出版社出版

(上海南京西路2004號)

上海市書刊出版業營業許可證出 003 號

大眾文化印刷廠印刷 新華書店上海發行所總經售

*

統一書號：15119·958

書本 850×1168 1/32 • 印張 3 3/8 • 字數 82,000

1958年10月第1版

1958年10月第1次印刷 • 印數 1~4,000

定價：(10) 0.60 元

0.60 元

目 录

第一章	隧洞的工作条件·····	1
第二章	論岩石的彈性抗力系数 k ·····	7
第三章	單层混凝土襯砌在內水压力下的計算·····	11
第四章	多层襯砌在內水压力下的計算·····	14
第五章	外水压力及岩层应力·····	30
第六章	山石压力及其他荷載的討論·····	34
第七章	山石压力及其他荷載所引起的应力的計算·····	44
第八章	低拱型隧洞襯砌的計算·····	60
第九章	馬蹄形襯砌的計算·····	71
参考文献	·····	104

第一章 隧洞的工作条件

水工隧洞是最常用的引水建筑物之一,可以分为有压隧洞及无压隧洞两大类。有压隧洞断面多做成圆形,主要的荷载是内水压力。无压隧洞多做成马蹄形或其他形状。

水工隧洞常常设有衬砌,衬砌可用混凝土、钢筋混凝土、钢板喷浆层等做成,其主要作用为:

- (1) 承受山石压力,以免坍陷;
- (2) 承受内水压力;
- (3) 封闭岩石裂缝,以防止漏水,和免除水及空气的破坏作用;
- (4) 减少隧洞的糙率。

隧洞是一种地下结构,要精确地计算它的应力,是非常困难的。主要的问题是:我们目前尚无法精确地求出作用在隧洞衬砌上的全部力量。因为作用在衬砌上的力,有衬砌自重、内水压力、地下水压力、温度及收缩力、灌浆压力、地震力和基岩对衬砌的作用力等几类。其中自重及内水压力是可以较精确地确定的。地下水压力、温度及收缩力、灌浆压力、地震力等则常须假定一些数据(例如地下水位、温度变化、地震加速度等),然后可作近似计算。但是对于基岩和衬砌间的接触应力,则十分复杂,千变万化,很难确定。

基岩和衬砌间的作用力,有各种不同的名称,并且有各种不同的意义。例如,作用在衬砌顶部的力,我们常称为山石压力,其意义是指:当隧洞开挖后,岩石中原有的平衡状态被破坏,洞顶一部

分岩石有落下的趨勢，因而壓在襯砌頂部，產生“山石壓力”。作用在兩側的力稱為岩石側壓力，這也是兩側岩石施加在襯砌側壁上的主動壓力。作用在底部的力稱為岩石的底部壓力。除此以外，尚有被動性質的岩石彈性抗力，這是指襯砌受力變形後，所引起的基岩彈性反力。這些基岩作用力的意義和求法，將在以後詳加討論。

基岩作用力和許多因素有關。它不但與基岩的岩性、力學性質、物理性質、地質條件、隧洞深度、隧洞尺寸和所受荷載等有關，而且和施工進度、施工方法都有關係。因此，我們不能希望找出一個簡單的公式來決定這種作用力。但是總的講來，我們可將基岩劃分為兩大類典型。第一類是堅固完整的岩石。在這類岩石中，開挖隧洞後，它基本上仍能維持穩定，不致發生大量崩坍倒毀的情況。因此，當襯砌完成後，它將不承受（或只承受極少的一部分）山石壓力及山石側壓力。襯砌將主要承受內水壓力，且當襯砌受內水壓力作用而變形時，還會受到外面基岩的彈性抗力，後者是被動性質，能改善襯砌的工作條件。

絕大部分的水工隧洞，都是在堅固的岩石中開挖出來的。這些岩石的“似摩擦係數”或“牢固係數”都很大^①，破壞拱很低小，開挖過程中基本上不必用襯砌，或只需略加支撐，這種都屬於第一類情況。在這種情況中，設計和計算隧洞襯砌比較簡易，在有壓隧洞中，一般只須計算內水压力的應力。例如隧洞規範 98 條中規定^②：寬度在 6 公尺以內的有壓隧洞襯砌，如岩石牢固係數 f 在 10 以上，可以僅計算其內水压力的作用。在這種岩石中建築無壓隧洞時，襯砌的強度幾乎不必復算。當基岩情況的確良好時，甚至可以完全不用襯砌。這種實例，也不難找出。

① 牢固係數的定義等詳後第六章。

② 本書所稱規範概指蘇聯電站部 1950 年批准的水工建築物技術規範及設計標準：水電站的水工隧洞（電力出版社有譯本）一書。

第二类情况則相反。隧洞建筑在松軟破碎的岩层中,甚至是在松散体(土基)中。这时,隧洞內非进行襯砌不可,否則四周的岩石將是无法稳定的。而隧洞頂部和兩側的山石压力乃成为襯砌最主要的荷載之一。有許多鐵路或公路的隧洞,是建筑在这种地区中的。至于水工隧洞,則除非确实无法避免,一般不应選擇在这种地区中。显然,这一种情况的計算,將較第一种情况为复杂。

本書中对两种情况下的襯砌計算都將加以敘述。在第二章到第四章中,我們主要討論第一种情况,即位于坚硬基岩中和承受內水压力的圓形隧洞襯砌。在第六章到第八章中,我們將分別討論其他型式的荷載和隧洞的計算。

我們將从最簡單的情况討論起,即是位于坚硬基岩中的圓形襯砌,承受均匀的內水压力。既然基岩是新鮮完整的,則可以作为連續的均匀的彈性介質来处理。因此,我們的問題便轉化成为計算承受均匀內水压力而且位于均匀彈性介質中的圓管应力。这时圓管內部承受內水压力,外部必定受到一定的基岩彈性抗力,計算中不計入彈性抗力作用,显然是不合理和不經濟的。

我們首先来解釋一下彈性抗力的意义。

各种荷載作用在襯砌上,將使襯砌发生变形,当襯砌向岩石变形时,一定遭遇到岩石的抵抗,即岩石发生一定的彈性抗力,必須先确定这些彈性抗力,始能进行襯砌的靜力計算,这是計算隧洞襯砌及任何地下結構的特点之一。

规范 86 条中指出,如襯砌发生离开基岩的变位时,則对岩石彈性抗力可以不加計算,但当襯砌发生向基岩的变位时,則应考虑其彈性抗力,抗力的大小,按下列假定分布:

$$p = ky \quad (1)$$

式中的 k 称为基岩的彈性抗力系数, y 为与襯砌表面正交的移位。

根据彈性力学理論,容易証实,只有当基岩中开挖了圓形的孔口、并在孔緣作用均匀的(軸对称的)压力时,上式始能成立;否則,

上式只为一近似公式。因此,根据式(1)导出的各种计算公式,只有在圆形断面受均匀压力作用时才为理论上准确的答案,此外都是近似的。当隧洞断面不是圆形或压力非轴对称时的精确计算方法,理论上可用弹性力学和结构力学原理及形变相容条件计算出来,但是根据这个原理推导的可供实用的计算方法,却还没有研究出来。

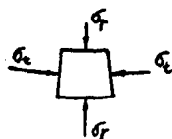
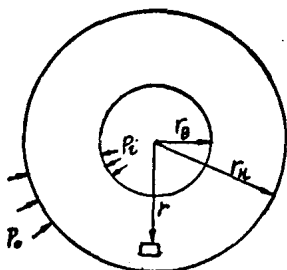


图 1

下面我们将根据弹性理论和建筑力学的公式进行粗略的计算,应用得最多的是弹性力学中的厚管公式,在这里我们先予以导证,以供下文采用。

图 1 中表示一个厚的圆筒,内径为 r_i ,外径为 r_o ,承受均匀的内压力 p_i ,外压力 p_o ,在极坐标为 r 处取出一块微分元素体出来,其上有切向应力(箍应力) σ_t 、径向应力 σ_r 及垂直纸面方向的应力 σ_z 作用。由于对称关系,各剪应力 τ

均为 0。将各应力投影到半径向上,则由平衡条件可写下:

$$\sigma_r \cdot r d\varphi + \sigma_t dr d\varphi - \left(\sigma_r + \frac{d\sigma_r}{dr} dr \right) (r + dr) d\varphi = 0$$

或忽略了高级微量后,可得

$$\sigma_t - \sigma_r - r \frac{d\sigma_r}{dr} = 0 \quad (2)$$

上式中含有两个未知值 σ_t 及 σ_r ,但两者之间存在着一定关系(变形相容关系)。例如令 u 代表各点的径向变形,则该元素体的径向单位应变

$$\epsilon_r = \frac{du}{dr}$$

切向单位应变

$$\epsilon_t = \frac{u}{r}$$

由广义虎克定律:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left(\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} \right) + \frac{E}{1+\mu} \frac{du}{dr} \\ \sigma_t &= \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left(\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} \right) + \frac{E}{1+\mu} \frac{u}{r} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

将以上两式代入式(2), 得到 u 的方程式

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0 \quad (4)$$

其解答为

$$u = C_1 r + \frac{C_2}{r} \quad (5)$$

代入应力公式

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= 2A + \frac{B}{r^2} \\ \sigma_t &= 2A - \frac{B}{r^2} \\ \sigma_\theta &= \mu(\sigma_r + \sigma_t) = 4\mu A \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 $2A$ 代表 $\frac{EC_1}{(1+\mu)(1-2\mu)}$, B 代表 $\frac{-EC_2}{(1+\mu)}$ 。

其边界条件为:

$$r = r_s, \quad \sigma_r = -p_i$$

$$r = r_n, \quad \sigma_r = -p_0$$

根据这两条件, 即可求得

$$\left. \begin{aligned} 2A &= \frac{r_s^2 p_i - r_n^2 p_0}{r_n^2 - r_s^2} = \frac{p_i - t^2 p_0}{t^2 - 1} \\ B &= (p_0 - p_i) \frac{r_s^2 r_n^2}{r_n^2 - r_s^2} = (p_0 - p_i) \frac{r_n^2}{t^2 - 1} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中

$$t = \frac{r_n}{r_s} \quad (8)$$

于是各应力值为

$$\begin{aligned}\sigma_r &= -\frac{2}{s} \frac{p_i - r_H^2 p_0}{r_H^2 - r_B^2} - (p_i - p_0) \frac{r_B^2 r_H^2}{r^2 (r_H^2 - r_B^2)} = \\ &= \frac{p_i - t^2 p_0}{t^2 - 1} - (p_i - p_0) \frac{r_H^2}{r^2 (t^2 - 1)}\end{aligned}\quad (9)$$

$$\begin{aligned}\sigma_t &= \frac{r_B^2 p_i - r_H^2 p_0}{r_H^2 - r_B^2} + (p_i - p_0) \frac{r_B^2 r_H^2}{r^2 (r_H^2 - r_B^2)} = \\ &= \frac{p_i - t^2 p_0}{t^2 - 1} + (p_i - p_0) \frac{r_H^2}{r^2 (t^2 - 1)}\end{aligned}\quad (10)$$

$$\sigma_z = \frac{2\mu (r_B^2 p_i - r_H^2 p_0)}{r_H^2 - r_B^2} = \frac{2\mu (p_i - t^2 p_0)}{t^2 - 1}\quad (11)$$

上列三式也可以写成：

$$\sigma_r = \frac{r^2 - r_H^2}{r^2 (t^2 - 1)} p_i - \frac{r^2 t^2 - r_H^2}{r^2 (t^2 - 1)} p_0\quad (12)$$

$$\sigma_t = \frac{r^2 + r_H^2}{r^2 (t^2 - 1)} p_i - \frac{t^2 r^2 + r_H^2}{r^2 (t^2 - 1)} p_0\quad (13)$$

$$\sigma_z = \frac{2\mu}{t^2 - 1} \cdot p_i - \frac{2\mu t^2}{t^2 - 1} \cdot p_0\quad (14)$$

而变位 u 的方程式为

$$\begin{aligned}u &= C_1 r + \frac{C_2}{r} = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{E} 2Ar - \frac{1+\mu}{E} \frac{B}{r} = \\ &= \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{E} \frac{(p_i - t^2 p_0)r}{(t^2 - 1)} - \frac{(1+\mu)}{E} \frac{(p_0 - p_i) r_H^2}{(t^2 - 1)r} = \\ &= \frac{1+\mu}{E} \left[\frac{(1-2\mu)r^2 + r_H^2}{r(t^2 - 1)} p_i - \frac{r_H^2 + (1-2\mu)t^2 r^2}{r(t^2 - 1)} p_0 \right]\end{aligned}\quad (15)$$

以上所述，均是指平面变形的問題而言（隧洞襯砌屬此情况），对平面应力情况，应力公式是一样的，但变形公式（15）則略有不同。

第二章 論岩石的彈性抗力系数 k

在計算隧洞襯砌時，如須考慮岩石彈性抗力，則必須應用基岩和襯砌變形的相容條件。在能夠應用相容條件之前，我們必須先確定基岩的變形特性常數，這個常數在水工結構中以系數 k 出現。

基岩彈性抗力系數 k 的定義如下：如果在基岩孔中作用一均勻的內水壓力 p_0 ，而使基岩孔的半徑增長一單位長度，這時所需的壓力強度 p_0 即為基岩的 k 。即

$$k = \frac{p}{y} \text{ [公斤/公分}^3\text{]}$$

k 的數值，最好通過工地試驗求出，隧洞規範 88 條中規定，對於一、二級隧洞的 k ，應在試驗段上測定，三、四級隧洞以及各級隧洞在初步設計中所用的 k 值，可按經驗估計。

k 的數值，隨隧洞四周岩石情況而變。倘隧洞位置深度小於三個直徑長度時， k 值為安全計一般已不能考慮了 ($k=0$)；因為這時隧洞上面的基岩可能已炸裂直至地面，岩石所起的抗力作用沒有保證。反之，若隧洞位置深度很深，襯砌就可按照無限彈性體中的厚壁圓管進行計算（規範 92 條）。

設我們把基岩視為一無窮厚的圓筒，在內部作用均勻水壓力 p ，則其在內徑處的相應變形可用式 (15) 計算：

$$\begin{aligned} y &= \frac{1+\mu_0}{E_0} \left[\frac{(1-2\mu_0)r_s^2+r_n^2}{r_s(t^2-1)} \right] p = \frac{1+\mu_0}{E_0} \frac{(1-2\mu_0)\frac{r_s^2}{r_n^2}+1}{r_s\left(\frac{1}{r_n^2}-\frac{1}{r_s^2}\right)} p = \\ &= \frac{1+\mu_0}{E_0} \frac{(1-2\mu_0)\times 0+1}{\frac{1}{r_s}-0} p = \frac{(1+\mu_0)r_s}{E_0} p \end{aligned} \quad (16)$$

式中 E_0 及 μ_0 指基岩的彈性模量及泊松比, r_s 指开挖半徑(相当于襯砌的外徑)。

根据抗力系数 k 的定义,得

$$k = \frac{E_0}{r_s(1 + \mu_0)} \quad (17)$$

但是根据实测的 k 值、和实测的 E_0 及 μ_0 值来看,它們并不符合上式。实测的 k 比計算得出的 k 要

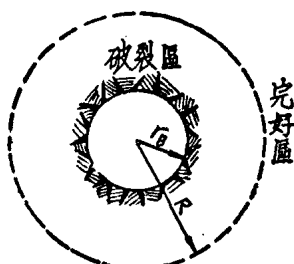


图 2

小得很多。这原因是:测定岩石的 E_0 时,是采取一块完整良好的基岩来試驗的,而在开挖后的隧洞基岩体中,存在着許多天然节理、裂隙和人工爆炸所生裂縫,特別以孔口附近处更厉害;而这些区域中的連續性对于 k 的影响

恰又特別重要。錢令希教授假定隧洞外圍有一个环形开裂区,厚度为 $R - r_s$,在半徑 R 以外的地区可视为完好,而裂縫区内只能依靠徑向抗压能力傳遞压力,不能起箍拉力作用。这样,在裂縫区内的总压缩值为

$$\Delta_{R-r_s} = \int_{r_s}^R \frac{p_0 r_s}{E_0 r} dr = \frac{p_0 r_s}{E_0} \ln \frac{R}{r_s} \quad (18)$$

在完好区内的半徑增量为

$$\Delta_{R-\infty} = \frac{-R(1 + \mu_0)}{E_0} \cdot \frac{p_0 r_s}{R} \quad (19)$$

故在 $r = r_s$ 处的半徑增量为

$$y = -\frac{p_0 r_s}{E_0} \left(1 + \mu_0 + \ln \frac{R}{r_s} \right) \quad (20)$$

而按定义

$$k = \frac{E_0}{r_s \left(1 + \mu_0 + \ln \frac{R}{r_s} \right)} \quad (21)$$

茲令希教授再根据 Шварцень, Амстег 等隧洞的实测資料代入得到这样的初步結論:对于坚固少縫的岩石,可取 $\frac{R}{r_s}=3$, 对于頁岩之类松軟的岩石可取 $\frac{R}{r_s}=300$ 。最有趣的是坚岩中 $\frac{R}{r_s}=3$, 和隧洞规范中規定隧洞中心深度須大于 3 倍直徑时才可考虑彈性抗力很相符。

此外我們可常注意 k 值和开挖半徑 r_s 成反比。因此, 不規定 r_s 、仅提出某类岩石的 k 值是不合理的。平常以 k_0 表示 $r_s=1$ 公尺时的抗力系数, 則

$$k = \frac{k_0}{r_s} \quad (22)$$

最后, 我們列下一些从教科書和文献中关于 k 、 E_0 、 μ_0 的資料如下:

(1) 葛立兴教授在水工結構教本中, 建議采用下列 k_0 值,

紧实粘土、泥灰岩 $k_0 = 10 \sim 50$ 公斤/公分²

半岩石 $k_0 = 50 \sim 500$ 公斤/公分²

岩石 $k_0 = 500 \sim 4000$ 公斤/公分²

(2) 在 Волков 的“隧洞”一書中, 及“Технический Справочник Железнодорожника, том. 4, 1951” 書中給出各种岩石的 E_0 及 μ_0 值。

表 1

砂質粘土	$\mu_0 = 0.3 \sim 0.37$
粘性土	$0.36 \sim 0.39$
重粘土	0.40
石灰岩	$0.25 \sim 0.33$
粘質泥灰岩	$0.29 \sim 0.38$
砂岩	$0.29 \sim 0.30$
粘質頁岩	0.30
頁岩	$0.15 \sim 0.20$
輝綠岩	0.28

表 2

土 壤 或 岩 石 种 类	E_0 (公斤/公分 ²)
自然状态的浮土层	145~511
細 砂 (河 底)	370~540
黄 色 沉 积 粘 土	195~7300
粘 土	1000~10,000
粘 質 泥 灰 岩	3000~83,000
砂 岩	100,000~278,000
砂 質 頁 岩	198,000~360,000
粘 質 頁 岩	256,000~550,000
石 灰 岩	440,000~1,470,000
玄 武 岩	430,000~1,063,000
砂 岩	466,000~543,000
花 崗 岩	543,000~690,000
云 斑 岩	656,000~700,000
輝 綠 岩	667,000~787,000

(3) 同書中,給出下列 k 值, 这些 k 值与半徑无关, 因此不甚适用于隧洞計算中:

表 3

土 壤 范 圍	k (公斤/公分 ²)
松土、浮砂、新填砂、很湿軟粘土	0.1~0.5
中实土、压实砂、塊礫石、潤湿粘土	0.5~5.0
实土、紧实砂、紧填礫石、微湿粘土	5~10
很实土、人工紧实砂質粘土、硬粘土	10~20
固性土、軟有裂縫的岩石、石灰岩、砂岩、冻土	20~100
固性土、良好坚岩	100~1500

(4) J. Muhlkofer 所介紹的数字 (这些数字也与 r 无关, 不甚适用)。

最坚实的岩石 $k=1,500$

坚岩 $k=500$

軟、有裂縫的岩石 $k=100$

(5) 实测資料

在 Шварценъ 隧洞 (坚固花崗岩) $k=1,330$

在 Амстер 隧洞 (黑云母片麻岩) $k=1,600$

在 Амстер 隧洞 (絹云母頁岩) $k=150$ (平均)

第三章 單层混凝土襯砌在 內水压力下的計算

图 3 中示一标准的單层混凝土襯砌, 与外面的基岩相固接。基岩的彈性抗力系数为 k 。襯砌的內徑为 r_s , 外徑为 r_n , 混凝土的彈性模量为 E , 泊松比为 μ , 又令 $t = \frac{r_n}{r_s}$, 及 r 代表襯砌中任意一点离开中心的距离。

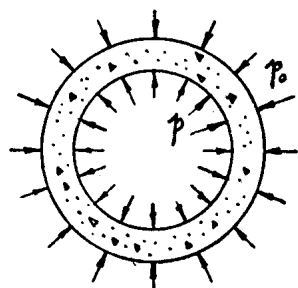


图 3

当襯砌在均匀內水压力 p 作用下, 將膨胀变形, 因此受到基岩彈性抗力 p_0 的作用。由上章, 襯砌在 p 及 p_0 作用下, 任何一点 r 处的徑向变形为

$$y = \frac{1+\mu}{E} \left[\frac{(1-2\mu)r^2 + r_n^2}{r(t^2-1)} p - \frac{t^2(1-2\mu)r^2 + r_n^2}{r(t^2-1)} p_0 \right] \quad (15')$$

特別在外半徑处, 以 $r=r_n$ 代入上式得

$$y_{r=r_n} = \frac{2r_n(1+\mu)(1-\mu)}{Et^2-1} p - \frac{r_n(1+\mu)[t^2(1-2\mu)+1]}{Et^2-1} p_0 \quad (23)$$

又基岩受到均匀压力 p_0 的作用, 將发生变形

$$y_{r=r_n} = \frac{p_0}{k} \quad (24)$$

由相容条件, 可得

$$p_0 \left[\frac{1}{k} + \frac{r_n}{E} \frac{(1+\mu)[t^2(1-2\mu)+1]}{t^2-1} \right] = \frac{2r_n(1+\mu)(1-\mu)}{Et^2-1} p \quad (25)$$

于是

$$\begin{aligned} \frac{p_0}{p} &= \frac{2(1+\mu)(1-\mu)kr_n}{E(t^2-1) + kr_n(1+\mu)[t^2(1-2\mu)+1]} = \\ &= \frac{2N(1-\mu)}{(t^2-1) + N[t^2(1-2\mu)+1]} \end{aligned} \quad (26)$$

上式中,

$$N = \frac{kr_n(1+\mu)}{E} \quad (27)$$

既然求出 p_0 , 便可代入厚管公式求任何一点的应力。

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \left[\frac{r^2 - r_n^2}{r^2(t^2-1)} - \frac{t^2 r^2 - r_n^2}{(t^2-1)r^2} \frac{2N(1-\mu)}{(t^2-1) + N[t^2(1-2\mu)+1]} \right] p = \\ &= \frac{1}{r^2(t^2-1)} \left[\frac{(r^2 - r_n^2) \{N[t^2(1-2\mu)+1] + (t^2-1)\} - (t^2 r^2 - r_n^2)(2N(1-\mu))}{N[t^2(1-2\mu)+1] + (t^2-1)} \right] = \\ &= \frac{1}{t^2-1} \left[\frac{-\left(t^2 - \frac{r_n^2}{r^2}\right)(2N)(1-\mu)}{N[t^2(1-2\mu)+1] + (t^2-1)} \right] = \\ &= \frac{1}{t^2-1} \left[\frac{N[t^2(1-2\mu)+1] + (t^2-1) - t^2 \cdot 2N(1-\mu) - \frac{r_n^2}{r^2} \{N[t^2(1-2\mu)+1] + t^2 - 1 - 2N(1-\mu)\}}{N[t^2(1-2\mu)+1] + (t^2-1)} \right] = \\ &= \frac{1}{t^2-1} \left[\frac{(t^2-1) - N(t^2-1) - \frac{r_n^2}{r^2} \{(t^2-1) + N(t^2-1) - 2\mu N(t^2-1)\}}{N[t^2(1-2\mu)+1] + (t^2-1)} \right] = \\ &= \frac{1 - N - \frac{r_n^2}{r^2} [1 + N(1-2\mu)]}{N[t^2(1-2\mu)+1] + (t^2-1)} p \text{ (压力)} \end{aligned} \quad (28)$$

同样我們可以求出圈張力 σ_t

$$\sigma_t = \left[\frac{r^2 + r_n^2}{r^2(t^2-1)} - \frac{t^2 r^2 + r_n^2}{(t^2-1)r^2} \frac{2N(1-\mu)}{(t^2-1) + N[t^2(1-2\mu)+1]} \right] p =$$

$$= \frac{1 - N + \frac{r_R^2}{r^2} [1 + N(1 - 2\mu)]}{N[t^2(1 - 2\mu) + 1] + (t^2 - 1)} p \text{ (拉力)} \quad (29)$$

由于我们的问题是属于平面变形情况, 因此还有一个 σ_z :

$$\sigma_z = \mu(\sigma_r + \sigma_t) = \frac{2(1 - N)\mu}{t^2 - 1 + N[t^2(1 - 2\mu) + 1]} \text{ (拉力)} \quad (30)$$

这些公式是苏联弹性力学大师 Б. Г. Галеркин 院士在 1929 年导出的 (見鋼管試驗研究所論文集, №. 100, 1929 年)。其中式 (29) 就是隧洞规范中附录 (3) 中的式 (1)。

Б. Г. Галеркин 的公式, 应该认为是准确的。如果内水压力很大, 而且基岩的 k 比较小时, 混凝土襯砌可能受拉开裂, 这时混凝土完全承受徑向压力 $\frac{2\sigma_r}{r}$, 如果不允許发生这种情况, 就必须加厚襯砌或配置鋼筋。