

87.108

RTC

21

060345

152080

一九五六年全國鐵道科學工作會議

論文報告叢刊

(21)

隧道的理論應用和技術設計



人民鐵道出版社

87.108



一九五六年全國鐵道科學工作會議
論文報告叢刊

(21)

隧道的理論應用和技術設計

一九五六年全國鐵道科學工作會議論文編審委員會編

人民鐵道出版社出版

(北京市霞公府17號)

北京市書刊出版業營業許可証出字第010號

新華書店發行

人民鐵道出版社印刷廠印

(北京市建國門外七聖廟)

書號: 799 開本787×1092 1/32 印張24 插頁2 字數59千

1957年7月第1版

1957年7月第1版第1次印刷

印數1,200冊

統一書號: 15043·356 定價(9)0.34元

前 言

1956年全国铁道科学工作会议征集了技术报告、总结、论文三百余篇。它的内容，包括铁路业务的各个方面，基本上显示着全体铁路技术人员和有关高等学校教师们几年来在科学技术方面辛勤劳动的成果。对现场实际工作有参考价值，对铁路新技术的采用和发展方向，有启示作用。为此，刊印丛刊，广泛流传，保存这一阶段内的科技文献，以推动科学研究的进一步开展。

会议以后，我们对全部文件进行一次整编工作，然后组织部内设计总局、工程总局、工厂管理局、人民铁道出版社、车务、商务、机务、车辆、工务、电务各局、铁道科学研究院、北京和唐山铁道学院、同济大学、大桥、定型、电务等设计事务所的有关专业同志对每篇内容仔细斟酌，选择其中对目前铁路业务有广泛交流意义，或是介绍铁路新技术方向和系统的经验总结，将性质相近的文件合订一册，单独发行。为了避免浪费，凡是其他刊物或是以其他方式刊印过的文件，除特殊必要外，一般都不再刊载。出版顺序根据编辑和定稿的先后，排定丛刊号码，交付印刷，并无主次之分。

苏联铁道科学代表团在会议期间曾经过九次学术报告，我们已将文字整理，编入了丛刊。

文件中的论点，只代表作者意见，引用或采用时，还应由采用人根据具体情况选择判断。

丛刊方式还是一种尝试，我们缺少经验，希望读者提供意见，逐步地改进。

铁道部技术局

1957年2月

目 录

1. 岩层形成的地層压力理論及其实际应用……………徐 愈
2. 丁字形拼装式隧道襯砌技术設計……………設計总局定型設計事務所
3. 宝蘭綫隧道改建工程技术設計……………設計总局第一設計院

一九五七年 九月卅十日

岩層形成的地層壓力理論及其实际应用

徐 愈

叙 言.....	(2)
1. 地層壓力的理論基礎.....	(2)
2. 各種地層壓力理論的分析研究.....	(4)
3. 根據岩層形成的過程來估計地層壓力.....	(8)
4. 岩層形成的地壓理論的实际应用.....	(16)
5. 隧道防護罩.....	(19)

叙 言

這個問題的提出，是由於我們接到第×工程局一位工程師在隧道施工的實踐中發現幾個有關襯砌負荷上的地層壓力問題，希望我們給他解釋。我於是根據舊的觀點作了答復。但自己也不滿意我所作的答案。於是進而研究，並細心學習了蘇聯的先進理論。在普洛托加可諾夫教授的壓力理論的基礎上，並綜合其他地層壓力的假說，發展成為這個「岩層形成的地層壓力理論」。它的特点是根據岩層形成和發展來估計它的壓力和作用的時間，並將某些範圍內的岩層在一定的限度下可認作是隧道建築正體的一部分，從而建立一個新的觀念，把有些襯砌（支撐襯砌）改為「防護罩」來設計、施工以節約水泥和挖方，並同時提高了工程質量。

我曾將這淺薄的見解，向許多有經驗的工程師請教，他們除了支持我這論點外，並提出很多有價值的建議，充實了這理論，並加強我個人的信心。特借這次全國鐵道科學工作會議，將這不成熟的意見提出來請專家們批評指正。在這兒我應感謝組織和同志們給予我的鼓勵和幫助。

為了說明這個問題，我首先要談一些有關地層壓力的理論，並作簡單地分析以供研究這問題時參考。

地層壓力的理論基礎

地球的表層是由各種岩石構成的，在坑道支撐或隧道襯砌上的壓力主要是岩石壓力，應稱為地層壓力。在坑道開挖之前地層的應力存在情形是處於平衡的狀態之中的，那就是作用於地層中的微粒上的外力與抵抗的內力是處於平衡狀態中，也就是由於岩層的自重所形成的壓力和相應發生的彈性力保持平衡。

为了说明这种地層应力的情况，可設每边等於 1 的直角平行六面体，如其离地面深度为 H 时，則將有 σ_x , σ_y , σ_z ，互相垂直的三个主应力存在，其中 $x-x$ 的方向与重力方向一致。因此应力等於： $\sigma_z = \tau H$ (τ ——上部地層平均土石單位体积的重量)。

如果地層由不同的土石層叠成，也可採用

$$\sigma_z = \tau_1 h_1 + \tau_2 h_2 + \dots + \tau_n h_n$$

式中： $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ 和 $h_1, h_2, \dots, h_n$ 为各層土石單位重量和厚度。应力 σ_y 和 σ_z 的数值可以彈性理論基本公式求得，且 $\sigma_y = \sigma_z$ 在同一水平处，如系散粒体的情形下，

$$\sigma_y = \sigma_z = \sigma_x \operatorname{tg}^2(45^\circ \pm \frac{\varphi}{2}), \quad (\text{註 1})$$

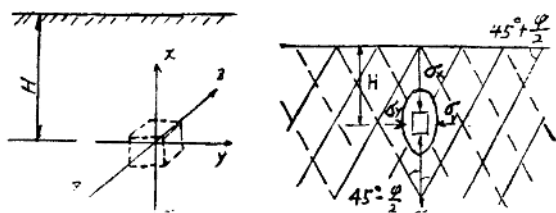
式中 φ 为內摩擦角。

在靜水力学的平衡条件下，內摩擦角 $\varphi = 0$ ，則

$$\operatorname{tg}^2(45^\circ \pm \frac{\varphi}{2}) = 1,$$

因此

$$\sigma_y = \sigma_z = \sigma_x.$$



(a) 第一圖 (b)

在开挖坑道之前地層中的应力狀況就如上面所說的情形保持一定的平衡。随着坑道的开挖，平衡就被破坏，导致地層应力的重新分配，以致可能引起开挖部分岩層的破坏。这些破坏在自然的情况下表现为坑道的变形，如岩層發生裂縫，剝落和坍塌；为了防止这种現象，隧道建筑一般用支撑或襯砌去支托坑道周围的岩石以阻止其变形或坍塌，这样就在支撑或襯砌上出現了岩層压力。若不支撑遇到恶劣的地層就会發生坍塌，潰崩，並可能引起地層开裂。如离地面不深，复盖層較小时，坑道的变形常引起地表面的沉陷，發生严重的危害。

坑道的变形，其初影响地帶常限制在坑道四周，同时也决定了这地帶以外的地層的平衡。但决定影响变形的因素及其程度是很困难的，因为它与岩石物理力学性質、水文地質情形、当地的地質構造等有密切的关系，而与坑道开挖的宽度、开挖部分的尺寸和形状以及和地表面的相互位置、开挖的方法和速度及支撑方法等也都有关系。

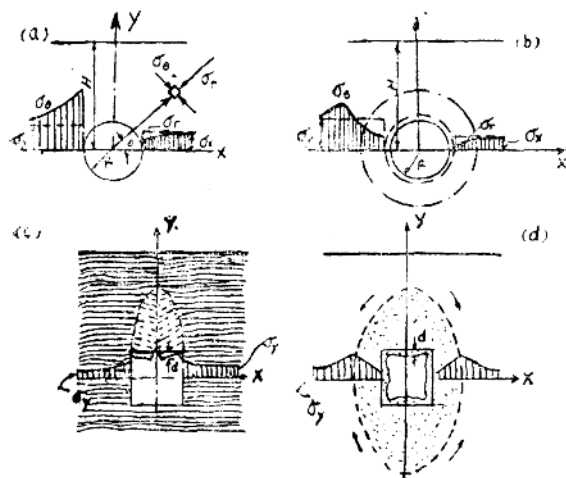
在地層深度增大时，上部地層的压力表现为各微粒間凝結力的破坏，及使內摩擦力減少到这样的程度，以致开始無破裂的成層移动，这样各种不同地層在达到一定的深度时都处於塑性状态中。此外，有些山洞开挖后，就發生「岩石射击」現象，这說明岩石在其以往全部生長过程中，因地壳破坏所引起的不平衡的剩余应力的結果。由於一旦开挖，这种被压折的岩層就有可能向坑道內的自由空間——最小抵抗力方面膨胀。因为地層向坑道方向的彈性膨胀，应認为是「岩石射击」最可能的原因，但却不能認为这种射击是与上面岩層厚度有关的，因为在各种不同深度的地層中都有这种射击現象發生。

一般說來，地層在开挖后無論如何支撑（或襯砌）都不可避免有若干变形的自由。这

(註 1) Б. П. 伏耳柯夫在公路隧道一書中把此种关系写成 $\sigma_y = k \sigma_x$ (k ——側压系数，普通 $1 > k > 0$) 側压系数的值依下列橫向压缩系数 σ_0 而定，即 $k = \frac{\sigma_0}{1 - \sigma_0}$ 。
 σ_0 的数值是由 0~0.5，如沙質頁岩为 0.12~0.14；黏質頁岩为 0.19~0.2；花崗岩为 0.2~0.25；砂岩（黃色的）为 0.4~0.44。

种变形視地層穩定性的不同，可能立即發生，或仅在很短的時間內不變，也可能在不定的很長時間內不變，若是襯砌得當就可以維持地層平衡狀態以致長久不變。甚至有些堅硬的，乾燥的穩定的岩石中開挖坑道，它的變形是如此緩慢和微不足道，以致可以認為是在很長的時間內沒什麼變形。對於這種坑道，實際可以考慮不用支撐和襯砌以資節約。

分析地層變形的原因，可以分為兩個階段來研究。在第一個階段中，當坑道開挖以後，由於應力的重新分佈，處於變形地帶的地層微粒，獲得了不同於坑道開挖前的應力。在第二個階段中，由於有了坑道的自由空間，地層微粒就有可能向抵抗力最小方面膨脹，同時失去了它本身的應力狀態。



第二圖

力的分佈圖式。在第一階段（彈性階段），支撐上產生的土石壓力就是最初的地層壓力，也稱為地層初壓力。圖c系方形坑道的地層應力分佈情況。

如果地層中的應力超過了彈性極限，那開挖部分周圍的土石發生破裂或在受應力最大的部分發生塑性變形。這樣一來高應力區就向地層內部移動，開挖部分附近就形成所謂低應力區域，這樣應力減少就可能使岩石發生變形及局部破壞，如第二圖b、d所示。有時向坑內方面膨脹，導致岩石的松碎，使低應力更向遠處擴大，以致坑道內部完全崩塌。若有牢靠的支撐時就進入平衡狀態。在這階段土石層對支撐上的壓力被稱為地層後壓力。

地層初壓力的強度是和上部後蓋層壓力壓縮所積蓄的位能成正比，時間長短則視地層穩定條件而決定，地層愈鬆軟初壓愈大，時間則愈短。當壓力增到最大數值時，可以維持若干時間不變，隨後，又逐漸減少，而在相當長的時間內維持不變，這就是後壓力，可以認為是確定的地層壓力，支撐上的壓力在多數情形下屬於這種狀態。只能根據地層壓力的假說來估定其數值。

2. 各種地層壓力理論的分析研究

現在已提出的地層壓力的理論可分為下列幾類：

一、地層壓力數值與隧道上復蓋層的高度成正比的理論。按照這個理論，地層壓力和

靜水压力相似，但与岩石的黏結力有关。这种理論只适用于位置很淺的隧道；和在不稳定的飽含水份的淤泥流沙等地層中才是正确的。^① 因此在隧道兩端进口处的岩層不厚时，或在明隧的情形下地層垂直压力强度才可用下式估計，即

(A) 在很薄的松散地層下（含砂的或不稳定的土壤），

$$P = \gamma \cdot H$$

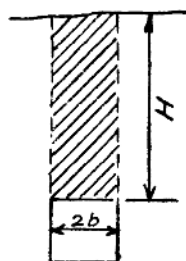
式中 H ——岩石复盖層的厚度以公尺計；

γ ——岩石單位重量，公吨/立方公尺。

(B) 在不深的塑性地層中，

$$P' = C \cdot \gamma \cdot H$$

式中 C ——是一个簡單的系数它的值小於 1。



第三圖

以上的理論用於堅硬地層或位置很深的隧道时是不符合实际情况的。

二、根据松散物体平衡規律的理論。按照这个理論，地層压力是和坑道寬度及地層的內摩擦角有关，等於坑道上面形成的拋物綫型的天然拱圈中的土石重量，拱圈的高度並不与坑道上复盖層有任何关系。

这种理論有人曾提出了一些如何决定那拋物綫形拱圈的高度計算公式。其中被採用的有下列一种經驗公式：

$$H = \frac{n d}{k}$$

式中： d ——由洞頂变形所發生的撓度（即木支撐的弯曲矢度）。

在同样矿物性質的岩層中，坑道愈寬，撓度愈大。

k ——系数，根据不同的岩石来确定其数值，約为 1~15：

細砂（干）.....	1.0	泥灰岩.....	4~5
普通砂、卵石.....	1.5	頁岩.....	6~7
黏土、土壤等.....	2~4	堅岩.....	8~15

n ——常数，由实验所得的平衡規律的数值，約为 100。

上述公式系根据洞頂沉落尺度与其寬度成正比而得出的，因而拋物綫形高度即系复盖岩層的黏結力与隧道寬的函数。但是，这个公式的缺点是只适合于松散物体，而不能用于堅岩，並缺乏理論的証明，且很难求得 d 的精确数值，故用于設計計算中是有困难的。

三、根据观察地層和支撐状态所得的資料，並考虑到地層微粒間的黏結力而推演出的理論，这理論的基础假定在坑道上面均形成平衡的天然拱圈。苏联学者普洛托加可諾夫首創这个理論，由于它对实际应用很方便，並給設計者足够的精确度，所以現在被廣泛的採用着。

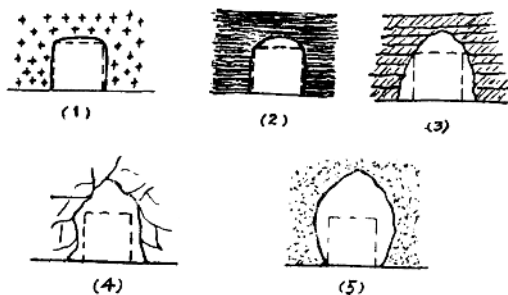
我們常遇到这种現象發生，在开挖坑道时由于地層压力引起頂部和兩側的变形，首先表現在頂部發生裂隙，以后便是个别岩塊的脫落，或規模較大的塌陷。結果使平面頂部逐

註① 苏联『鐵路隧道設計标准』（設計通訊34期中）

② C 的公式有多种，有的是等於：

$$\left\{ 1 - \frac{Z \cdot H}{\frac{ZH + W}{2} + \sqrt{\left(\frac{ZH - W}{2}\right)^2 + H \cdot t \cdot \lg^4 \left(45^\circ - \frac{\alpha}{2}\right)}} \right\}; \quad \text{或等於} \left\{ 2\alpha^2 \cdot H \lg^4 \left(45^\circ - \frac{\alpha}{2}\right) \right\}$$

漸變成具有拋物綫形斷面的圓拱，而這種圓拱形狀隨岩石的物理學性質的不同而有差別。例如，在地質堅硬的石英岩、玄武岩、花崗岩中變形極其緩慢而微乎其微；在整體的堅實岩層（花崗岩、砂岩、石灰岩）可形成有規則的拱形，如第四圖（2）；在成層的岩層中（石灰岩、有層理的砂岩、頁岩等）則生成一系列的階梯拱狀，如第四圖（3）所示；在裂隙岩層中，岩石則沿裂隙脫落如第四圖（4）；在塑性或松散地層中（粘土、沙粒、卵石），則形成尖拱或拋物綫形的圓拱，如第四圖（5）。這樣形成的拱圈是天然形狀的平衡面，因此不再繼續破裂。現在我們已確定圓拱破裂的規模幾乎與坑道的深度無關，而主要的是決定於岩石的物理力學性質。



第四圖

蘇聯學者普洛托加可諾夫根據觀察和試驗提出這樣的理論。他認為地層有時接近於整體，有時接近於松散物體。由於地層中裂隙、節理和其他破壞現象，而把它認為在一定限度之內都是松散的物體，可以採用散粒體的規律。他把顆粒間的黏結力參加到表現松散物體的特性摩擦係數之中，並採用所謂『似摩擦係數』來代替加大的摩擦係數。而以堅實係數 f 表示之。

$$f = \frac{f'N + C}{N}$$

式中： f' 為散粒體的內摩擦係數； N ＝壓力； C ＝顆粒間的黏結力。

普氏研究了在開挖空間上形成的自然拱圈的平衡條件，得出下列公式^①，即

$$h = \frac{b}{f},$$

式中： h ＝自然拱圈高， b ＝開挖斷面寬度之半

由分析證明自然拱是由岩層本身的物理力學性的平衡條件而形成的。因此某一類地層就有它一定的自然拱圈形狀，其高度 h 決定於該種地層的堅實係數 f ，而支撐或襯砌將僅僅承受在這個拱圈下面的土石重量的壓力。在拱上的土石的壓力則由自然拱本身承受，不再傳給支撐。

因此作用於開挖空間每一單位延長度所受的壓力將等於自然拱下的面積乘土石單位體積重量，即是

$$W = \frac{2}{3} \cdot 2b \cdot h \cdot \gamma = \frac{4}{3} b h \gamma$$

式中： W ——支撐或襯砌上每單位延長的壓力

γ ——土石單位體積重量。

在有黏結力的物體中，支撐所受的壓力只等於下墜顆粒重量和黏結力的差額，在實際計算上可取自然拱以下空間中土石的重量，拱高 h 則為開挖寬度之半 b 除以岩石堅實係數 f 。

普氏的理論曾在實驗中証實，並在施工中實際測量過的土壓也大多數証實了普氏關於松散物體以及顆粒間有黏結力的物體的各項結論。

但此學說的適用範圍以能形成自然拱的深度為限，換言之應行滿足的條件是：

$$H > \frac{b}{f}。$$

在實際計算上其適用限度可定為 $H = \frac{2b}{f}。$

若坑道上部地層的高度 H 小於或等於自然拱（陷落拱）高度 h 時，普氏認為為了簡便計算起見可以把拋物拱圈高度等於上部地層厚度，即採取

$$h = H, \text{ 及 } W = \frac{4}{3} \pi b H。$$

普氏並指出在散粒體與有黏結力的地層之間所表現的地層壓力，並無原則性的差別。僅在壓力的數量方面看到差別。因為考慮到摩擦力及各顆粒間黏結力的總作用，所以在有黏結力的地層中必須使用『似摩擦係數』，即岩石堅實係數，普氏根據觀察和實驗的結果將其值分別按不同種類的岩石列成一表^①。普氏所謂的地層強度係數其實是岩石堅實係數，僅代表着在開挖岩層時有關的各種特性的相對強度，如抗鑽性，抗爆性，破壞時的穩定性等。

但他的那個表中的數值是指在緊密狀態中的地層而言，所以當選擇強度係數，不可單純只憑它的一個名稱，應根據其實際物理性的狀態，並和其他地層的堅實情形加以比較方可斷定。風化了的，崩解的，因有節理及裂隙而分離的地層應歸入堅實係數較低的一類中去。由於他把風化的和未經風化的都混合在一起，這就難免和實際出入很大。因為經過複雜地質變化的堅岩有時是很脆弱，而原生的黃土層反而很穩定。這樣表中堅實係數 f 代入公式後對密實的粘土層就提出過大的地層壓力數值，對松散的崩解砂岩，各種不堅實頁岩以及風化的花崗岩又提出過小的數值。而且當地質構造有傾斜或層或垂直成層時，以及其他混合複雜地層時，公式 $h = \frac{b}{f}$ 的結果是與實際情況遠不相符的，因為普氏的理論及其強度係數 f 的值並沒考慮到地質構造所給予地層壓力的影響。

此外，普氏的理論所提出的計算自然拱高的公式，只是坑道中一個斷面的情形，並且 h 和 b 是直線關係。但事實上這個關係不是如此簡單的。這個理論沒有考慮到另一縱斷面存在的狀況，和壓力發生的過程與時間的關係。尤其對岩層形成的經歷和發展所給予地層壓力的影響缺乏估計。

並且對有些堅硬石質的岩層來說，一般沒什麼側壓力，即使有也非常的小，或須在很長時間經過地質變化或變動後才發生，所以有時也可以忽略不計。若有很穩固的支撐襯砌的話，就可避免這種壓力的出現。但照普氏的理論堅實係數與內摩擦角有關，實際不經常是這樣的。因為有以上一些缺點，在選擇堅實係數時就難免帶點主觀性。所以和實際情況不完全符合。雖然如此，由於普氏這個理論應用比較簡單方便，所以在設計方面仍被普遍的採用。

四、根據土壓動力學定理和彈性定理的理論。蘇聯學者 H. M. 格爾塞瓦夫，他分析了坑道外圍地層壓力形成的規律性，得出這樣的結論：當在粘土里開挖坑道時，地下水從周圍山嶺向坑道內流動，使坑道壁膨脹，因而坑道橫斷面尺寸逐漸減小。若坑道加以襯砌時，結構物最初不受到壓力，要過一些時間襯砌才逐漸被周圍土壤的骨架所壓縮，而在動

① 以上參考丹都洛夫「隧道」第一冊，或「鐵路隧道工程」，——人民鐵道出版社出版。

水力作用終了時，壓縮也達到了土壤骨架在天然成層條件下所具有的那種程度，這種壓縮也就是地層壓力所引起的。如隧道穿過不同的岩層時，那情形就更複雜。由於不同的沉陷或頂起（因土壤膨脹向上壓力所致），在這樣兩種不同性質的岩層接頭處，襯砌就可能發生裂縫。這方法所得出的結論，僅提供了變形與壓力之間為直線關係。在地層的最初形狀，常被開挖後的變形所破壞，因此對於確定地層內應力的值時也就失去它的意義。

五、在坑道中進行直接觀測來確定地層壓力的方法。現在已採用的是：根據支撐折裂來決定地層壓力，或用音響方法，測壓器等來確定地層壓力。但這類方法所得的結果還是有局限性，還不能完全解決問題，在此不贅。

3. 根據岩層形成的過程來估計地層壓力

一、地球的起源

在討論岩層形成的過程之前，首先我們要介紹一下關於地球起源的學說。過去一直認為太陽系的發展，是太陽與偶然從旁飛過的星體接近的結果，使太陽的一部分物質被從旁飛過的星體底引力吸離了太陽，分散成幾個部分，遂形成了行星——太陽的衛星。

但自蘇聯的科學家奧·尤·施密特院士於1951年在蘇聯『太陽系宇宙進化論的會議』上報告了他與許多蘇聯天文學者所創立的行星是由處在灰塵狀態的隕石物體凝結而成的學說後，改變了那陳舊的對太陽系的觀念。

『這些雲層般散佈的物體，在天空可以大量觀測到，特別是在光亮的銀河一帶。銀河是一大星系（銀河系）的主要星團，我們的太陽也在这星系之內。這些散佈的物體——「宇宙塵」，集成大團，起着「建築材料的作用，從這些「建築材料」產生行星。』^①

按照施密特的見解，行星是由大量小分子聯合而成，這些小分子在聯合之前是獨立地環繞太陽運轉的。處在太陽附近的分子，由於太陽熱度而熾熱，遂使這飛來的物體蒸發。因此接近太陽的地球類行星只保留了難熔化的物體——石質和鐵質的物體。

『現在讓我們來看一看地球的化學成分。今天已經可以認為地球的成分和隕星的成分相同是完全確定的事實。要特別強調指出，這裡所指的是原子成分一樣，而不是礦物成分。今天，在地球表面上的不是隕星物質，而是噴出的岩層，和這些噴出的岩層的進一步加工的沉積岩層。這樣，我們在地球表面有着進一步演化的結果。因此，從礦物學看來，隕星可能在某一方面不同於地球上的岩層。但是原子成分是一樣的。』

『從太陽、地球及隕星的成分相類似的這個事實，人們得出各種結論，甚至矛盾的結論。……很多從事於研究隕星成分的礦物學家這樣解釋地球和隕星一致性：隕星是由于在某一時期存在的行星的分裂和爆炸所形成。但是把這個論據反過來用，就是說地球是由隕星組成的，也是同樣地好。』^②

二、地球的構成

大多數的天體演化學說把形成後的地球設想為熱的液體甚至氣體的狀態。無疑的，這是關於火山起源的舊的觀念的反應。

註① 見1951年12月11日「真理報」發表的庫卡金教授的「宇宙發展科學中的新理論」。譯文載1952年1月29日「人民日報」。

② 見O. Ю.施密特院士著「地球起源學說四講」第四講行星地球。——諸國禎譯，中國科學院出版。

关于地壳形成的一般概念，認為地球在初生时期一切物質都呈溶解状态的。由于重力的作用地球内部的物質曾發生过大規模的重新分佈作用；最重的金屬液体佔据了地球的中心部分，在它上面分佈着由硫化物，氧化物以及容易与硫化合的金屬所組成的各种圈層，最上面的一層是溶解的矽酸塩層和在它上面由易於溶解的元素的蒸气所組成的气層。

根据地球冷却的程度，有一种說法，以为冷却是从輻射热的外表面开始，然后發生了逐漸形成地壳外層的結晶作用和硬化作用。整个地壳是由两个基本層——花崗岩和玄武岩層所組成。按照这个理論，在地壳下面的物質还处在液体状态，不过在高压下，它的粘度就显著地增大了。另一个理論却認為地球的溶解物体是从球心开始凝固，然后逐漸向外而达到外層。

施密特的理論与过去認為天体起初处在熾热气体状态和炎熱的液体状态恰好相反。它的結論是：地球及其他行星起初是冷的。这个結論为地球的構成、地球內起作用的力量和地球歷程問題提供了嶄新的基礎。

研究地球構成的科学——地質学，至今还是由地球过去是处在炎熱液体状态的观点出發。在这个基礎上形成了火山的理論，發展了山嶺構造的學說，認為火山的噴火多多少少証明地球內部熔化状态，而山嶺的構成是由於逐漸变冷和凝固的地球外壳縮皺的結果。隕石論号召拋棄这些陈旧的觀念。

『我們知道，很多地質学的數據，特別是地震波傳播的性質，早就指出，地球深处不可能完全处于液体状态。由于放射性蛻变的發現和它在地球內部放出的热的計算，人們早在廿世紀初期就已經指出这些热已經足够使得在地壳下面的个别区域变热和溶化，为了解釋溶岩無須假定地球最初状态是液体的。』②

『由于在地球內部放射性物質不均匀的分佈，完全可能产生局部的热的策源地，产生溶化物質的个别地区，这就足够解釋火山的噴發了。』③

地球的發展起初是由冷的行星逐漸轉热。地球热的來源是由于地球內部進行的放射性分离的过程。詳細的計算，使地球現在和过去高低不等的温度得以确定。按照新的理論，地球之变冷，只在儲蓄的放射現象大大減少之后才开始，这經過許多十万万年。所以，地球外壳的变冷不是山嶺構成的原因，而地球由於放射性分离而变热才是地面隆起山嶺所必需的力量源泉。因为地球內部物質的分異並未在地球發展的早期就終止，而是一直繼續到今天。这从大地槽內最近代的花崗岩侵入体或酸性融溶的溢出都和这分異过程有关，可以得到証明。

三、岩層的形成

因此施密特的假說，設想地球形成的开始就是固体，並且設想一个困难的，因而也是拖了很長時間的分異过程，是符合这些情况的。这样我們不是把地球看成是已經在發展上停滯的物体，而看成是活的繼續發展的。現在我們所看到的地壳的破坏現象，有时正可以用局部物質的繼續重新分佈来解釋。新理論把地球發展底「地質前阶段」和「地質阶段」联接起來。地質学家現在進而研究由於地球發展的結果，地球內部物体所遭遇的斷層現象。許多地質現象可能有些不同的解釋和新的發現。無論採取地壳形成的哪种理論，由于在高压下物質的凝固並不發生結晶的情形，而是直接过渡到非晶質(膠体)状态的，因此在压力才十分大的地球外部的凝固是可以保持晶态結構的，而較深的地層在凝固时就变成塑性状态。

晶态固体物質凝固时，易揮發的物質都消失了，溶解温度升高，並且升高得很大，所以即使以后有相当大的温度波动，也不致改变晶体的状态。

由此可知地球外壳比内部非晶态物質要稳定得多。所以我們可以推測到晶体的地球的外壳紧密包圍着地球内部的物質，並受其各种运动的影响而發生变形。但有一点是肯定的，岩層的形成大都是經過很長的时间才变成今天这样子，它的历程——形成的过程——确定了它的內容，岩層的構造、岩石的結構、礦物性質以及水文情形等。

地球究竟有多大的歲数，可以根据「地層学」法或「古生物学」法來找出它的相对年齡。最近根据放射性的蛻变現象來測定岩石的絕對年齡，由岩石所含的某种元素而蛻变成另一种元素所需的時間就可以測定那岩石的絕對地質年齡，大約为几十億年。在这样長的时间过程里，地球經過不少次的变动。例如沉積岩具有水平產狀，也是岩層的正常產狀，亦即岩層形成当时的產狀。在發生过造山运动及造陸运动的区域内，岩層原有產狀一般都被破坏。由於構造作用而引起岩層正常状态的一切破坏都叫变动。变动的形式很多，但基本可分为两种类型：岩層的完整性沒有破坏的变动，及完整性破坏的变动。

从沉積岩形成的时候起到現在已有30億年到35億年。

岩層一方面經常受到內力的作用，另一方面也不斷受到外力的地質作用，並不斷地改变着其本身的構造及外形。兩種本質不同的力量經常在斗争着。一方面竭力在地表上形成高低不平的地势，而另一方面，外力却企圖使地表趨於水平。

任何工程建筑的使用期限及其穩定性都与过去曾作用於地表的及現在仍繼續改变地表形态的那些作用有着密切联系。隧道建筑在这一問題上更是重要，因为沒有什么工程能比隧道和地質的关系更为密切，隧道的結構几乎全部是建筑在地層里，而且它本身就在地層不能分开。因此，为了正确地解决隧道工程問題，就必须了解地球的構造，了解岩層是由那些礦物構成，它的物理力学性質，它的結構和成層的情况，而且更應該了解这些岩層的存在过程及其所受到的变化。

四、岩石的分类

由於岩層是从地球的構成时起，經過許多变化和变动而形成的，所以地層压力就与岩層的形成有密切的关系。这样，地層压力不僅決定於它的物理力学性、抗压極限强度、壓縮性、坚实性、透水性、耐水性，同时还要根据它的結構，成層的情况，以及岩層的形成过程及其發展來估計。

为了進一步研究岩石压力問題，讓我們先把各种岩石分为下列几类：（1）岩質的（坚硬的）；（2）半岩質的（中等坚硬的）；（3）含黏土的（塑性的）；（4）含砂的（松散的）；（5）特殊的土石。

（1）岩質的（坚硬的）

这一类岩石有高度的抗压强度、小的透水性、小的壓縮性；有些岩石的耐水性很大（花崗岩、砂岩），有些因水分和化学作用使其性質变坏（如石灰岩、大理石等）。

开挖后，在坚硬的岩層中即使有不大的拉应力也能維持平衡。如發生很大的拉应力，岩石外表就可能發生裂縫，破碎，剝落，而对支撑產生压力。

(2) 半岩質的 (中等堅硬的)

这类岩石是較弱的或在某种程度上受到風化的火成岩，變質岩和沉積岩以及比較堅硬的密实的土，可稍微壓縮，極限抗压强度不太高（50—500公斤/平方公分），本身不透水，但沿裂隙透水。

(3) 含黏土的 (塑性的)

这类岩石成分，含有粘土，具有粘結力和不大的內摩擦力。粘土的湿度漲落很大，而在干涸过程中，經歷三种状态：流动状态、塑性状态、坚硬状态。黏土壓縮性很大变形進行緩慢。

在开挖后，可能引起膨脹或被挤出。

(4) 含砂的 (松散的)

这类土石具有很小的黏結力，因而它們的平衡主要是依靠摩擦力。水可改变其性質。砂在干涸时，粗砂就从流动状态轉变到散粒体，而細砂則从流动状态轉变到硬塊。砂的壓縮性小，变形進行得很快。含砂的岩層开挖后易走動，形成空洞而下陷。

(5) 特殊的土石 (不穩定的，和具有特殊形态的)

这类土石包括流沙、沼澤土、含水黏土、含水黃土等不穩定的土壤，此外對於黃土、永久冻结土、易風化的頁岩及具有各种不固定的物理力学性質的土壤等。它們的性質各有不同之处，須特別研究。

根据普洛托加可諾夫教授的强度系数表，並参考苏联『**水工隧洞技術规范及設計标准**』，和其他有关工程地質方面的資料，目前我們可以把上面的各种岩石分类列表於后，（第一表）以供研究参考。

五、岩層形成与地層压力的关系

从上面的岩層形成的过程和岩石分类的性質情况看来，我們可以發現一点事实，就是無論那一类土石，他本身就是一种「建筑材料」，在地球構成以及岩層形成的过程里，最初都起着「建筑材料」的作用。因此，岩層的構造实际就是一个自然的建筑結構。它本身就符合結構力学的規律。但地質構造要受到時間这一因素影响，也就是从远古到現在，地質变化不断地在進行着，內力和外力在斗争着，使得地層經常地發生变化和变动。从而影响到岩層的構造。於是岩層生成的过程也就直接影响地層压力。換言之，地層压力不是固定不变的，它要受到某一时期所遭遇的地質变化的影响。但它的过程有的是經過不知多少万年，才發展到今天这样情况，以至令我們在考慮那建筑結構的有效期間，对它的变化可以忽略不計，不僅可以不考慮它的变化，並可使我們對於某一类岩石增加依賴的成分，而把它当作是一个堅固的符合結構学的建筑体系來很好的去利用它，如上述的第一、二类岩

岩石分类, 等级和坚实

次序	类别	岩石坚硬程度		岩石名称	物理力学性质			原生或次生岩				
		代表性岩石、等级			单位 体积重 吨/公尺 ³	内摩擦角 φ	抗压强度 公斤/公分 ²	时代	成因			
1	岩質的	很坚硬的	火成質岩	I	最坚硬的石英岩, 玄武岩, 安山岩, 玢岩	2.9~3.0	87°	2,500	太古	噴發		
				I _a	最坚硬的花崗岩, 閃長岩, 輝長岩	2.8~2.9	85°	2,000	"	侵入		
			沉积岩	II	最坚硬的花崗岩类、片麻岩、砂質砂岩	2.7~2.8	83°	1,500	元古	變質		
				II _a	最坚硬的石灰岩, 砂岩, 礫岩	2.6~2.7	82°30'	1,200	中生代 古生代	沉积		
				坚硬的	III	坚硬的石灰岩, 砂岩, 大理石, 白云石	2.5~2.6	82°	1,000	古生代	變質	
					III _a	坚固的沙質頁岩, 普通沙岩, 鉄矿, 石膏	2.5	80°	800	"	沉积	
		IV	泥灰狀石灰岩, 粘土質砂岩, 沙質頁岩		2.4	75°	600	中生代	"			
		IV _a	泥質頁岩, 泥灰岩, 坚硬的粘板岩		2.5	72°30'	500	古生代	變質			
		2	半岩質的	中等坚硬的	較軟、沉 軟、火成 質岩	V	中等坚硬的泥灰岩, 頁岩, 軟礫岩	2.8	70°	400	中生代	沉积
						V _a	各种不坚硬的頁岩, 坚硬膠結粘土	2.5	70°	300	"	"
VI	軟片岩, 白堊, 凝灰岩, 浮石					2.4	65°	200	"	變質 噴發		
3	含粘土的	塑性的	有軟粘質結土性的	VI _a	膠結的卵石或砂礫, 硬煤	1.8~2.0	60°	150	中生代	沉积		
				VII	坚硬粘土, 板狀砂礫土	19.5	50°		"	"		
				VII _a	密实的粘土, 坚实的冲积土, 粘質土	18	45°		新生代	冲积		
				VIII	輕砂質粘土, 普通煤	18	40°		"	沉积		
4	含砂的	松散的	無散粒粘土性的	VII _a	密实的沙, 干淨的細砂礫	1.6	35°		"	冲积		
				IX	湿沙, 沙土, 种植土, 泥炭, 卵石	1.5	30°		"	沉积		
				IX _a	沙, 風化沉积物, 細粒礫石, 岩堆	1.7	27°		"	"		
5	特殊的	不稳定的	流动的土沙壤	X	流沙, 沼澤土, 含水粘土, 稀黃土 VII~IX 級中最弱的土壤	1.5~1.8	9°		"	冲积 沉积		
				X _a	黃土, 永久冻结土, 易風化頁岩等以及具有不固定的物理力学性岩石				"	風积 冰积		
附註												

系数与岩層形成关系

第一表

層的一般地質情况				岩石堅	原生岩層的地質特征	岩層經過完整性未	岩層經過完整性被破
产狀	層、 节理	結構	实系数 f_0		(岩石未經变动及風 化者)	破坏(單斜層)的 地質变动特征	坏等复杂地質变动的 特征(岩石風化严重)
岩脈 岩干 岩基	各成理 种內垂 力直形 节	斑狀	25		整体岩層坚硬穩固, 不 易風化, 沒有裂紋, 無 地下水或少量滲水, 一 般沒有地層压力。	岩層坚硬穩固, 有少 数节理, 滲水情况不 严重, 有局部岩石压 力, 岩石未經風化。	岩層有严重的風化情 况, 节理丰富, 滲水严 重, 有不均衡的垂直压 力, 可能有大塊岩石墜 落或崩塌。
		細粒	20				
		片狀	15				
成層	水平	細粒	12				
成層 状态 正常, 傾角 $1^\circ \sim 2^\circ$	水平、 緩斜 波狀 層理	沙粒、 地狀	10		岩層坚硬密实穩固, 不 易風化, 有小裂紋, 有 不大的局部垂直压力, 沒有側压力或全無地層 压力, 有少量滲水情 况。	岩層傾斜, 有裂紋滲 水情况, 有垂直及側 压力, 或微小的剪 力, 岩石風化不甚严 重。	岩層系折皺、斷層, 或 不整合情况, 構造复 杂, 滲水严重, 有剪力 及地層压力發生的可 能。
		化学有 机沉 积	8				
			6				
		碎屑	5				
全 上	全 上	碎屑 膠結 粘土	4		中等坚硬, 岩層尚穩 定, 有裂紋滲水, 易風 化, 有不大的垂直压力 和很小的側压力或沒有 側压力。	岩層傾斜, 有裂紋滲 水情况, 遇水多时岩 層膨脹發生向上压 力, 並有坍塌現象。	地層受化学作用及机械 作用而成喀斯特現象, 破碎沙岩, 崩塌頁岩以 及山坡浮积層有坍塌滑 坡的可能。
			3				
		粉土	2				
全 上	水平 傾斜 水平	膠結	1.8		軟質地層, 不甚穩定, 岩層不含水, 有地層压 力, 並有向上頂力, 滲 水情况。	岩層傾斜, 岩層間有 滲水情形, 不同性質 的岩層間有剪力及坍塌 發生的可能。	
		砂粒	1.5				
		碎屑	1.2				
		粘土	1.0				
全 上	水平 傾斜 "	圓形	0.8		岩層含水, 不穩定, 易 坍塌, 有垂直地層压 力、向上頂力及側压 力。		
		稜形粒	0.7				
		碎屑	0.5				
原始 产狀	水平	砂粒 粘土	0.1~ 0.3		不穩定, 流动有水压力。 在正常情况时岩層穩定 压力很小, 遇水、空气及 气候变化即發生变动。		
	水平	粉土	0.5~ 3.0				
					岩層强度系数 $f = f_0$ 。 与岩石堅实系数相同。	岩層强度系数 $f = f_0 - i$, i 約等于 $5 \sim 0.5$ 根据 岩層傾斜度、滲水 情况以及抗热抗冷性能 程度而定。	岩層强度系数 $f = f_0/n$, n 大約等於 $2 \sim 10$, 根据 地質变动經過及岩石風 化程度而定。

石以及原生的岩層如黃土層等。然而，也有一些土壤的變化是在不定的很長的時期內不變，而到某一程度就發生突然的變動，這就是由數變轉為質變的一種現象，那麼我們對這樣的岩層就須事先防止這種突變的發生，如易風化的頁岩和粘質土壤等；還有一種岩石在開挖後它就立即發生變形，然而若是很牢固地隨挖隨支撐，也可阻止它變形的擴大以達到平衡的狀態，如松散的濕沙和含水粘土。但有些岩層的形成是由于嚴重的地質變動，如風化的花崗岩，崩解的砂岩，也容易變形或崩塌。

總之，岩層壓力不是固定的，它隨岩層形成和地質作用以及施工迅速與否而發生變更，若是我們善於掌握它的成因及其發展，我們就可以把它作為一個建築物來利用它，減少它可能產生的壓力，避免岩層的內應力的重新分佈，以致引起嚴重的變形，而發生不可抗衡的地層壓力。

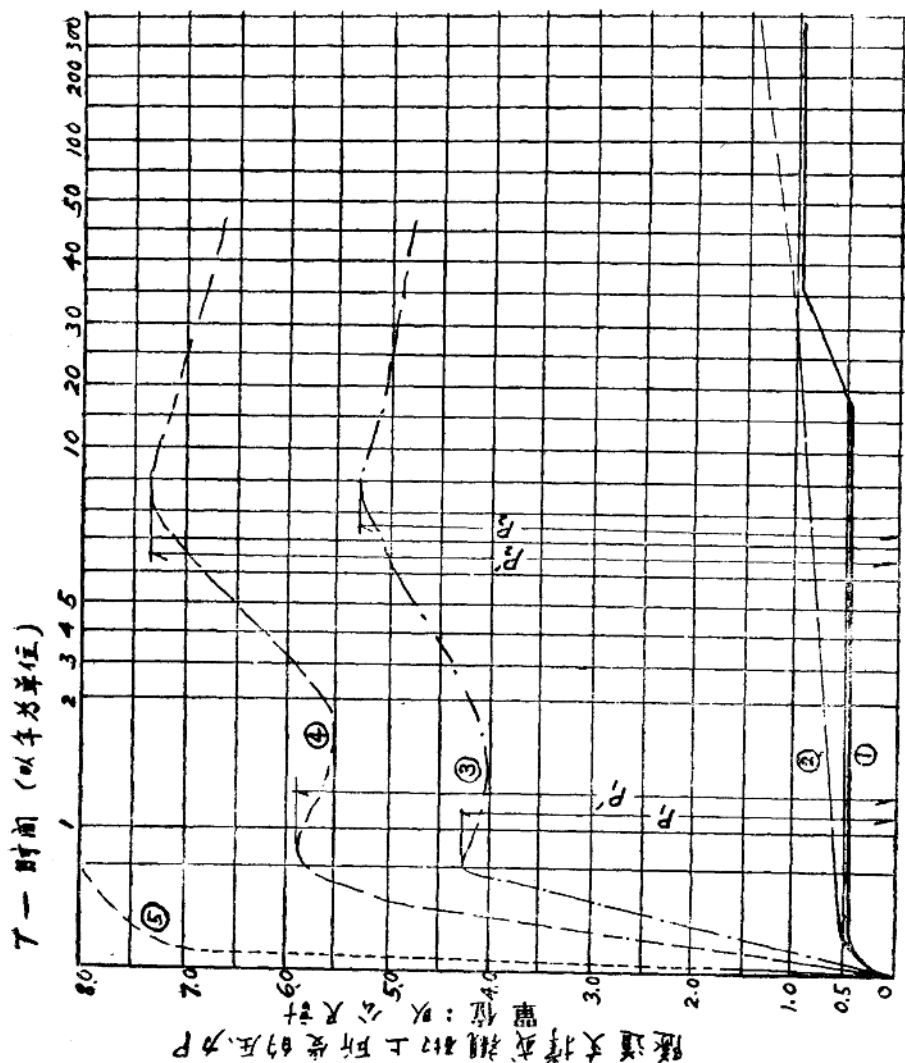
因此，我們在处理像隧道這樣的工程，我們必須要了解岩層存在的過程及其所受到或將發生的地質變化以及開挖後對自然建築的破壞影響。從而根據實際情況，來估計岩石壓力的大小和預計發生的時間以確定施工方法，建築構造的設計等，以資節約人力物力，而收到更好的效果。

六、什麼是「岩層形成的地層壓力理論」呢？

根據以上的分析研究，我們可以找出一個估計地層壓力的答案來，那就是地層壓力是在坑道開挖後一定的時間內所產生的存在於自然的建築體系中符合於物理（結構）力學中一般規律的應力，這種應力受到那岩層形成的影響，同時還要隨著地質的變化地層變形而變更。

關於開挖後的岩層斷面，它的應力重新分佈的情況已於第一節中敘述。根據普洛托加可諾夫教授的分析，任何岩層都能形成一種自然拱，以達到岩層本身的物理力學性的平衡。這一點是符合自然規律的。然而它是在一定時間，和一定的地質條件下，如岩層在正常的狀態（如原生岩層）下，才實現的。所以，這一理論有它的客觀的真實性，卻還不夠全面。在沒有進一步作有系統的觀察和實驗之前，它的那自然拱的公式以及其岩石堅實系數，仍然可供一般情形作為初步估計岩石壓力的依據。不過，我們更應進一步把所求出的地層壓力要和岩層的实际情形、岩石形成的過程及其發展相互印證起來，並須考慮到這應力的發生，變更和起作用的時間。無疑的，後一因素對於我們設計施工是有現實的意義。現在讓我們用一個簡單的圖（第五圖）表示壓力變更情形。

前邊說過，岩層壓力在若干時間內逐漸達到最大值，此後由於地層和支撐適應了新的平衡狀態而壓力減少下來，並維持到一定的時間不變。但若地層風化作用繼續進行，而引起新的變形，使兩側岩石崩解，則自然拱圈擴大，它的高度 h 也增加。然而這種變化進行有緩速不同的程度。從第五圖可以看出：（1）岩質的和（2）半岩質的，須經過幾十年甚至一二百年才達它的最大值，而（3）含粘土或（4）含砂的則只須幾月或幾年不等。若遇到（5）不穩定的流動土壤却隨開挖的過程，立即發生最大的壓力。



第五圖

隧道压力与作用
时间关系示意图

$$P_1 = \frac{b}{4}$$

$$P_2 = \frac{b}{4}$$

- ① 岩質的岩層
- ② 半岩質的 . . .
- ③ 含粘土的 . . .
- ④ 含沙的 . . .
- ⑤ 特殊的 . . .

七、岩層形成的地層压力論的特点

从隧道压力与時間变化的关系示意图，我們可以看出，各种岩石的地層压力与地質作用的时间是有密切关系的，当然与岩石成層和結構也有关联的。所以岩層形成的地压論有