

水工管道和隧洞的 新 型 結 構

蘇聯 恩·勒·布爾德茲格拉著

水工管道和隧洞的 新 型 結 構

蘇聯工程師 伊·伊·科瓦列夫著



水工管道和隧洞的 新 型 結 構

蘇聯 恩·勒·布爾德茲格拉著

趙 國 藩譯

燃 料 工 業 出 版 社

內 容 提 要

本書敘述了水工管道和隧洞的新型結構，並闡明了這些結構的強度計算。

爲了使計算工作便於進行，在正文和附錄中載有輔助表，並作出鋼筋混凝土有壓管道的靜力計算的數字示例。

本書可供設計工程師和科學工作者之用。

* * *

水工管道和隧洞的新型結構

НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ
ВОДОВОДОВ И ТУННЕЛЕЙ

根據蘇聯國立建築工程與建築藝術出版社(СТР. И АРХ.)
1954年莫斯科俄文第一版翻譯

蘇聯Н. Л. БУРДЗГЛА著

趙 國 藩譯

燃料工業出版社出版

地址：北京東長安街燃料工業部

北京市書刊出版業登記證出字第012號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

編輯：孟慶法 校對：董文勤

書號399電175 * 850×1092 $\frac{1}{2}$ 開本 * 3 $\frac{1}{2}$ 印張 * 89千字 * 定價六角五分

一九五五年四月北京第一版第一次印刷(1—4,100冊)

序 言

蘇聯共產黨第十九次代表大會曾擬定了在一個五年之內建築巨型水力發電廠的遠大計劃。

在我國以前所未有過這樣的大規模地建設水力發電廠和灌溉建築物的條件下，特別尖銳地提出了必須研討在經濟方面切實可行的結構問題。

作者根據這些理由，認為有可能把自已在水工管道和隧洞方面設計與施工的經驗，提供交流參考，並向廣大的工程技術人員介紹作者所提議的結構，其中包括某些結構，現在已經在實際上加以採用了。

由於我國隧洞建築廣泛的發展，在各種地下建築物（水力發電廠隧洞、灌溉隧洞、通航隧洞、道路隧洞、地下鐵道、城市和居民區的給水隧洞管道以及專用的隧洞等）的設計和施工方面的許多寶貴的著作，豐富了祖國的文獻。

在這方面，有斯大林獎金獲得者工學博士斯·斯·達維多夫教授、工學碩士格·格·朱拉保夫、奧·耶·浦卡耶娃、工學博士姆·依·丹都洛夫教授、工學博士維·勒·尼古拉依教授、斯·恩·那烏莫夫講師、和維·波·瓦格科夫講師等人的著名著作。

上面提到的這些作者的著作，在隧洞和其他地下建築物的設計和施工方面，曾獲得廣泛的承認，並保證了我國在隧洞建築方面的技術文獻的無疑的先進地位。

本書討論一些新型的、合理的有壓和無壓水工隧洞和管道的結構，並演證了這些結構靜力計算的公式。

同時還提示計算岩石彈性抗力的方法。書末所附鋼筋混凝土有壓管道的計算示例，可使作者所建議的計算方法便於應用，此外還可幫助讀者了解水工隧洞和管道設計的步驟。

所得的公式適用於複合橢圓形的襯砌，但亦可以很容易地用來計算有水平插入直段的橢圓形有壓隧洞和管道的襯砌、有垂直插入直段的橢圓形無壓隧洞和管道的襯砌以及圓形和矩形的襯砌。

同時，爲了內容的敘述方便以及爲了更能便於應用這些內容，在演證計算公式時，未考慮土壤的反力。

對於土壤反力給有不考慮作用在襯砌上作用力的單獨計算式。

這種建立計算公式的方法，可以在任何荷重組合下作出襯砌的靜力計算。

作者認爲對工學博士姆·依·丹都洛夫教授和工學碩士姆·格·埃爾巴基德茲表示感謝是責無旁貸的。姆·依·丹都洛夫教授曾詳閱了初稿，並給予許多寶貴的指示，這些指示已考慮在書內。姆·格·埃爾巴基德茲曾對本書的完成給予極大的幫助。

讀者對改進本書的意見和願望，作者均將接受並致以深切的謝意。

目 錄

序 言

第一章 一般的問題..... 4

§ 1. 有壓和無壓水工管道和隧洞現有結構的簡述..... 4

§ 2. 水工管道和隧洞襯砌上作用的外力..... 6

§ 3. 現有計算隧洞襯砌的方法..... 9

第二章 水工管道和隧洞襯砌的靜力計算12

§ 4. 總則.....12

§ 5. 計算簡圖的選擇.....12

§ 6. δ_{zz} 及 δ_{xx} 之確定16

計算作用於襯砌上的主動外力

§ 7. 均佈的垂直山石壓力.....17

§ 8. 襯砌自重 g 的計算.....19

§ 9. 按無壓水重 ($\gamma = 1$) 計算襯砌.....21

§ 10. 按主動土壤側壓力計算襯砌.....22

§ 11. 按水頭的均勻內壓力計算襯砌.....23

§ 12. 按姆·姆·布洛托基亞可諾夫教授的壓力拱的荷重計算襯砌.....24

§ 13. 按土壤反力計算襯砌.....28

§ 14. 按照餘弦規律變化的土壤反力.....32

§ 15. 沿基底均佈的土壤反力.....36

§ 16. 按照三角形規律分佈的土壤反力計算襯砌.....39

§ 17. 土壤反力分佈為拋物線規律時之襯砌的計算.....43

§ 18. 在隧洞襯砌靜力計算時考慮岩石的彈性抗力.....50

§ 19. 確定均佈山石壓力作用下之 δ_a58

§ 20. 橢圓形有壓鋼筋混凝土管道計算示例.....60

§ 21. 按岩石彈性抗力的計算示例.....79

第三章 有壓和無壓水工管道和隧洞的合理結構.....86

§ 22. 平底懸臂式基礎的有壓和無壓水工管道.....86

§ 23. 內周界於水平弦段間的圓形有壓管道和隧洞.....88

§ 24. 荷重為均勻內水壓(水頭)時的計算公式的演導.....89

§ 25. 所建議形狀的襯砌的水力特性.....91

§ 26. 拱頂截面有鉸的無壓水工管道的襯砌.....92

§ 27. 在拱頂截面有縱向縫的無壓水工管道和隧洞.....94

附錄.....95

第一章 一般的問題

§ 1. 有壓和無壓水工管道和隧洞現有結構的簡述

有壓和無壓的引水建築物，可用露天的方法做成(管道)或用地下的方法做成(隧洞)。

在有壓的引水建築物中，靜水壓力是主要的荷重因素；在某些情況下，靜水壓力佔襯砌上的其他荷重的70—80%。

根據結構使用的條件，有壓隧洞的襯砌可做成鋼筋混凝土襯砌，與鐵絲網噴漿內圈組合而成的混凝土襯砌，有鋼板內圈的鋼筋混凝土襯砌(當水頭很高時)，有內圈襯砌為鐵絲網噴漿的天然或人工石料襯砌。在堅硬岩石中的隧洞常常做成無配筋的混凝土襯砌。

為了避免高水頭時水滲漏過襯砌，需有設置在內部的膠合防水層。

鋼筋混凝土襯砌用於7個大氣壓以下的水頭；再高的水頭，就需要加添鋼板內圈設置。

當有山石壓力時，有壓隧洞的混凝土襯砌有時與厚8—10公分的鐵絲網噴漿內圈組合而成。混凝土襯砌(厚25—35公分)承受山石壓力，而鐵絲網噴漿內圈則承受靜水壓力。

當地下水對混凝土有侵蝕作用時，在某些情況下，就用特別性能之水泥砂漿砌築的天然石料或人工石料的石砌體來代替混凝土。

組合式的襯砌是不經濟的，沒有保證結構的整體性，並且它們的工作條件使正確的靜力計算難於進行。這種結構在現在用得有限，混凝土襯砌是用於整體的堅硬岩石中用以將鑿面抹平，以增加隧洞的洩水能力。

直到現在，圓形有壓隧洞襯砌的結構使用得最為廣泛，因為在這種結構中水的內壓力只使其產生拉應力。但是，根據工學碩士

斯·克·夏西耶夫的研究，在鬆軟的岩石中且當水壓很大時，圓形襯砌宜用有水平插入直段的橢圓形襯砌(圖 3, 6)來代替。

管道結構可為木結構和鋼結構。木結構價格便宜，具有良好的洩水能力，但不耐久。鋼輸水管可很好地承受高水頭，但是需要大量的鋼鐵，其耐久性介於木結構和鋼筋混凝土結構之間。

無壓水工隧洞與管道和有壓的不同之處，是在正常使用條件下未被水完全充滿。根據標準的指示，這些結構中未充滿水的弓形高度不應超過 $0.3r_{B1}$ ，以避免阻水的危險和可能在結構中發生水錘。

穿過緊實堅硬岩石中的無壓隧洞一般做有混凝土襯砌，其厚度為15—20公分。這樣的襯砌不是承重的，而只是把鑿面抹平以保證很小的水頭損失。

當有很大的山石壓力時，無壓隧洞做成鋼筋混凝土的。在個別情況下，襯砌可用水泥砂漿砌人造塊石或天然塊石做成，隨後將砌體內表面用灰漿抹平。

根據建築物工作的靜力條件和所要求的截面洩水能力，無壓隧洞的形狀可做成馬蹄形、方圓形、圓形、卵形和其他形狀的斷面。

馬蹄形的無壓隧洞(圖 1, 6)用於山石壓力很大時，以及地基岩石可能膨脹時。這種斷面的特點是當水位由零變到隧洞高度的一半時，有很高的洩水能力。它可以在最後澆灌反拱混凝土，並能保證最大的淨空，因之使隧洞建築時的施工容易。

方圓形斷面的無壓隧洞(圖 1, a)用於土壤的垂直壓力大而主動側壓力小的情況下。

在施工方面方圓形斷面具有與馬蹄形斷面同樣的優點，並且常常由於施工的情由而被選用。

斷面的淨尺寸規定不得小於 1.40×1.90 公尺。方圓形斷面的拱圈部分常常做成鋼筋混凝土的。當斷面的底部及兩側部分為堅硬岩石時，襯砌的壁及底常由混凝土築成。

圓形襯砌較之其他斷面具有若干優點，可用於有壓及無壓的

引水建築物中。在四周土壤壓力作用下，襯砌的靜力工作條件最爲有利，洩水能力最好，當土壤開挖量不大時，材料用量經濟，地下施工機械化的廣泛可能性(鎧甲法)，爲這種襯砌型式最主要的優點。

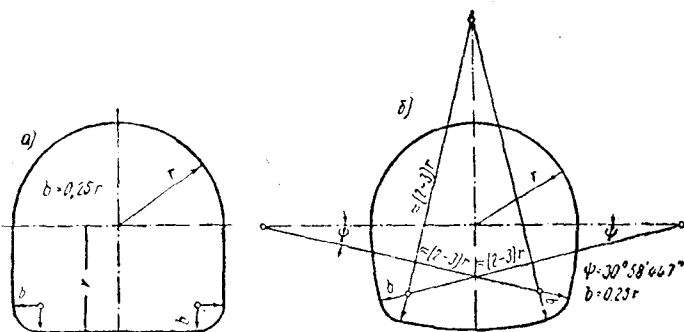


圖 1 無壓隧洞的斷面
a—方圓形；b—馬蹄形。

在城市和居民區的給水系統中，常採用卵形斷面的無壓隧洞和管道，其最小的淨尺寸爲 1.20×1.80 公尺。這種斷面的襯砌在有很強的垂直山石壓力時工作得很好。但是由於內部形狀的複雜及施工的困難，因而較少採用，而被其他斷面的隧洞襯砌所排擠替代。

卵形斷面的隧洞限制了施工機械化的可能，它主要是用於下水道的建築物中，因為在這些建築物中水的流速是不變的，且與積水的深度無關。

§ 2. 水工管道和隧洞襯砌上作用的外力

水工管道和隧洞襯砌可能承受下述主要外力的作用：

- 1) 自重；
- 2) 充滿至隧洞拱頂截面以下的水重；
- 3) 水的內壓力(水頭)；
- 4) 垂直的山石壓力；

5) 作用在襯砌側部的土壤主動側壓力或岩石的彈性抗力。

作靜力計算時，爲了保證建築物安全的使用，普通要考慮它的工作的最不利的條件。

譬如，在計算無壓水工隧洞時，是取山石壓力爲主要荷重，這種型式的隧洞一般是按垂直山石壓力，按水重及襯砌自重的荷重來進行分析。

考慮主動側壓力或岩石的彈性抗力可使襯砌的厚度減小，因此在每一具體情況下，考慮這些因素的必要性應由特殊的研究來確定。

截面較大的無壓隧洞，如建造在鬆軟的岩石裏，其襯砌受着很大的岩石壓力，在基礎未安排就緒，洞壁及拱圈的混凝土澆築以前，往往對於這種未閉合形狀的襯砌，也需作出靜力計算。

有壓隧洞及管道的結構，常常按下述兩種荷重組合進行分析：

1) 水的內壓力(水頭)，垂直山石壓力，襯砌自重和無壓水重；

2) 荷重同前，但山石壓力除外。

在用露天方法建築的管道中，係取填土重量作爲山石壓力，岩石的彈性抗力則不予考慮。

在任一荷重組合下，考慮土壤反力是必要的。襯砌截面按上述荷重組合計算結果，所得力矩和法向力疊合圖形的縱距之值就取作是力矩和法向力的計算值。

管道和隧洞襯砌進行靜力計算時，並不是所有的外力都可以用相同的準確度來計算的。

譬如，水頭、襯砌自重和無壓水重的荷重計算的準確度就大大地高過其他的作用力。

各個學者對根據隧洞座落深度而定的垂直山石壓力的計算各不相同。

在祖國隧洞建築的實踐中，布洛托基亞可諾夫教授所建議的山石壓力的計算方法使用得最爲廣泛，這個方法的特點是簡單且便於實用。

如果垂直山石壓力是與側向岩石彈性抗力同時作用在襯砌上時，則隧洞襯砌是處於最有利的靜力工作條件。

反力沿基礎底分佈的性質與基礎的幾何形狀和剛度以及建築物地基岩石的地質技術指標有很大的關係。

當襯砌為圓形截面時，某些學者們認為反力是沿水平直徑均勻地分佈，另外一些學者們則認為反力是沿着下面半個圓周按餘弦規律變化。

在地質技術指標較低的土壤中，反力沿下面半個圓周的分佈，根據我們的意見，宜取其按照餘弦規律變化的強度。這種反力的分佈在靜力方面是最有利的。

如果是平底時，反力的分佈可取其為均佈的，或者是按照三角形的規律或拋物線的規律。

現在我們來討論三種不同的土壤反力，當其與所有其他計算所用的原始數據組合時對襯砌的影響。

反力按三角形規律的分佈 可以想像，這種沿襯砌平底寬度的反力分佈在事實上是不會發生的。但是為了謹慎起見，在編製隧洞或管道的施工設計時，常常是按三角形規律分佈的反力來核算截面。這種反力分佈的性質使與襯砌垂直軸相重合的截面中發生很大的應力，因而建築材料的用量亦就過多。

反力按拋物線規律的分佈 在很多情況下，在地質技術指標較低的土壤中，反力沿襯砌平底寬度的變化取其按照沙多夫斯基教授拋物線的規律。這時靜力的效果是主要的。

當土壤反力的分佈是拋物線的性質時，結構截面應力的分佈比三角形分佈時大大地有利。

反力的均勻分佈 當反力的分佈是均佈性質時，結構處在較拋物線分佈性質繁重的工作條件中，同時亦處在較土壤反力分佈為三角形性質更為有利的條件中。

從我們的觀點看來，如果計算襯砌的原始數據是相同的，則土壤反力分佈為均佈性質是最正確地反映了建築物真實工作的條件。

§ 3. 現有計算隧洞襯砌的方法

蘇聯隧洞建築的理論和實踐是以蘇維埃科學和技術的成就為基礎的，是遠遠超過資本主義國家隧洞實踐的。下面討論在各個時期中蘇聯專家所提出的襯砌計算方法。

地下結構的計算理論在其發展初期是從不考慮周圍岩石的彈性性質的。

曲樑在荷重作用下受力問題的正確解答最早是在十九世紀的八十年代中由斯·哈·郭諾文教授給出的。這個方法後來在編定蘇拉姆鐵路隧洞設計時被用來計算襯砌（設計的擬定者為勒·弗·尼古拉依工程師），那時只考慮土壤的垂直壓力和主動側壓力。

地下結構靜力計算，進一步的使其準確是表現在斯·恩·洛然諾夫教授的著作中，他的著作考慮了沿襯砌側面土壤的被動抗力。

這些研究家們提出的隧洞襯砌的計算方法，基本上可歸納為把襯砌的整體結構分為幾個構件（拱圈及壁），而不考慮它們在建築物工作時的共同變形。

在科密爾列利的方法中，襯砌的壁作為是剛性構件來分析，在壁的上部假設有按三角形規律分佈的岩石被動壓力，並且還考慮了襯砌沿岩石的摩擦力。

在斯·恩·洛然諾夫教授的較準確的方法中，被動壓力是取其沿壁全高按三角形規律分佈的。襯砌沿土壤的摩擦力假設是沿壁的全部外周界分佈。

科密爾列利和洛然諾夫方法的主要缺點是忽略了考慮拱圈和壁身的相互變形以及岩石的彈性。

赫尤特在他的研究中，分析了在垂直和側向岩石壓力及土壤被動抗力作用下的圓形襯砌，但未考慮到襯砌在建築物水平軸方向的變形，這是這個方法的主要缺點。

裝配式圓形截面襯砌的計算方法，在地下鐵道設計院工程師

波得洛夫、馬特利和哥列利克的著作中得到了最完善的解答。

最先進的隧洞襯砌的計算方法，是由斯大林獎金獲得者工學博士斯·斯·達維多夫教授在1934—1935年研究出來的，他提出了把地下整體結構作為處於彈性介質作用下的結構的計算方法。介質的性質決定於地基係數 K 。

斯·斯·達維多夫教授在他自己進一步的研究中(1936—1939年)，不去採用地基係數，而提出了完全新的地下結構的計算方法，在計算中引用下述的數值：岩石體積力的水平分力，土壤的縱向變形模數 E_0 及橫向變形係數 μ_0 。

斯·斯·達維多夫教授將裝配式及整體的襯砌結構看作是處於周圍岩石作用下的超靜定彈性體系來進行分析。

按照斯·斯·達維多夫教授的方法，設計地下結構能有最大的經濟效果這件事可以認為是被確定了的。

在圓形截面地下結構靜力計算方面的一些研究家中，還有克·阿·瓦胡爾金講師(蘇聯)及得努克爾(國外)的工作是值得注意的，他們建議只考慮岩石彈性抗力的水平分力。克·阿·瓦胡爾金認為這些分力沿襯砌高度是按平方拋物線的規律變化，而得努克爾則認為是按立方拋物線變化。

比較的計算證明，克·阿·瓦胡爾金得出的結果幾乎是完全符合於按正確方法計算的結果，而得努克爾的方法却得出有40%以上的偏差。

1935年工學碩士斯·克·夏西耶夫提出了按垂直山石壓力並考慮岩石彈性抗力的計算隧洞的方法。彈性抗力作為是沿襯砌外周界作用的集中力。這些力在橫截面水平軸以下是沿輻射方向作用，在水平軸以上則為水平方向。夏西耶夫大大地簡化了他那相當複雜的結論，把它們編繪成便於實用的圖表。

其次，必須提到布·格·卡列爾金院士提出的襯砌，作為彈性介質中的圓環在均佈內水壓力作用下的計算方法。

這個方法是以彈性理論為基礎，在實用上是複雜的。為了簡化公式起見，經過把波·格·喀列爾金院士的公式改變以後，

斯·克·夏西耶夫得出了有實用意義的結論。

在計算馬蹄形和方圓形無壓水工隧洞時，考慮岩石彈性抗力的方法，是由高級科學研究員工學碩士格·格·朱拉保夫和工學碩士奧·耶·浦卡耶娃講師提出的，在水工建設中得到廣泛的採用。

這個方法把襯砌看作是一種閉合的圈，這圈是由上部聳起的拱圈，彈性地嵌固於基礎板上所組成者。基礎板亦作為是臥置於連續彈性地基上的直樑，分析時需考慮地基係數。

岩石彈性抗力 p 沿襯砌側部作用，其大小與變位 δ 成比例。 p 與 δ 之值有下列相互的關係：

$$p = K\delta,$$

式中 K ——岩石彈性壓縮係數。

岩石彈性抗力的圖形，對稱於襯砌的垂直軸，它的形態由三點來決定，其中兩點是零點，一點是相應於襯砌在水平軸方向的最大變形。

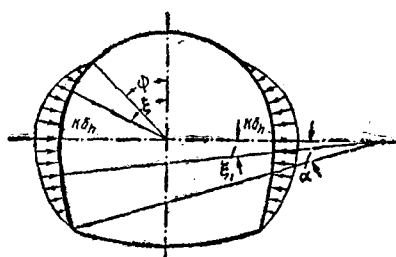


圖 2 格·格·朱拉保夫及奧·耶·浦卡耶娃的彈性抗力圖形

位於襯砌水平軸上面的零點的位置由試算法確定。馬蹄形襯砌的這段岩石彈性抗力的性質由下式決定：

$$K\delta = K\delta_h \left(1 - \frac{\cos^2 \xi}{\cos^2 \psi} \right), \quad (a)$$

式中 $K\delta$ ——與垂線成 ξ 角的傾斜截面處的岩石彈性抗力強度；

δ_h ——沿襯砌水平軸方向的最大變位；

ψ ——指示 $0 - \frac{\pi}{2}$ 區段零點位置的角度。

另一低零點的位置則取於拱址的高程處。

由襯砌水平軸至拱址這一段岩石側向彈性抗力的分佈由下式

決定：

$$K\delta = K\delta_h \left(1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \alpha_1}\right), \quad (6)$$

式中 α ——拱址截面與水平線所成傾斜角。

已知零點位置並算出了 δ_h 之值後，就可很容易地按照公式 (a) 及 (6) 的數據繪出所求岩石彈性抗力的曲線 (圖 2)。

通常在計算無壓隧洞的襯砌時，須知 ψ 角之值，即取 φ 等於 45° 。在岩石彈性抗力作用的地方要考慮摩擦力。

第二章 水工管道和隧洞襯砌的靜力計算

§ 4. 總 則

本章所列舉的公式，爲了便於應用起見，是根據在外力作用下，分析了結構的工作而建立的，並未計入土壤的反力。

土壤反力的計算是單獨進行的。

所採用的這種敘述程序，可以在作用於襯砌上的外力，和相應於這些外力的土壤反力的任何組合下採用計算的公式。

在演證計算公式時，曾採用贅力法，而在某些個別情況下亦曾採用位能法。

公式中引用下列符號：

Δ ——在任意外加荷重的作用下所考慮截面的變位；

δ ——在單位力作用下的變位；

Δ_{xP} ——在外加荷重 P 作用下，截面在未知力 X 方向的變位；

Δ_{zP} ——在相同荷重 P 作用下，截面在未知力矩 Z 方向的轉動；

δ_{zz} ——在單位力矩 $Z=1$ 作用下，截面在此單位力矩方向的轉動；

δ_{xx} ——在單位力 $X=1$ 作用下，截面在此單位力作用方向的變位。

§ 5. 計算簡圖的選擇

計算公式是爲不變厚度的橢圓形襯砌而建立的，此橢圓形由

兩對插入直段——水平段和垂直段連接的四個圓弧組成(圖3,a)。

求得的公式，可用來計算其他形狀的襯砌，譬如：

用於有壓引水建築物中的有水平插入直段的橢圓形襯砌($a \neq 0, b = 0$ 及 $r \neq 0$ ，見圖3,б)。

用於無壓隧洞及管道的有垂直插入直段的橢圓形襯砌($a = 0, b \neq 0$ ，及 $r \neq 0$ ，見圖4,a)。

用於有壓及無壓引水建築物中的圓形襯砌($a = 0, b = 0$ 及 $r \neq 0$)。

公式亦可以用來計算寬為 $2a$ 高為 $2b$ 的矩形截面的隧洞襯砌($a \neq 0, b \neq 0$ 及 $r = 0$ ，見圖4,б)。

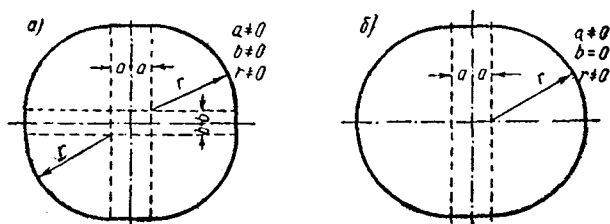


圖 3 有插入直段的有壓隧洞和管道的形狀
a—有水平和垂直的插入直段者；б—有水平插入直段者。

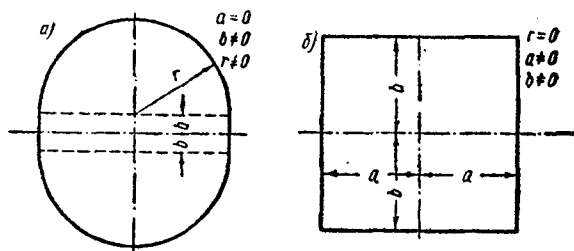


圖 4 無壓隧洞和管道的形狀 a—橢圓形；б—矩形。

為了進行襯砌的靜力計算，必須預先確定作用在拱頂的法向力 H (推力) 和力矩 M_0 之值。

為了上述的目的，將襯砌在拱頂以垂直平面截開，並將剛臂