
水工結構应力分析丛书之一

压力鋼管

潘家錚編著

上海科学技术出版社

PDG



統一書號：15119·827

定 价：0.42 元

473

序

潘家铮同志从事于水工建筑物之设计工作有年，以长于力学，遇有疑难问题，常能参考有关书籍，融会贯通，得出具有理论根据的计算方法，使工程设计问题，得以迎刃而解。潘同志平日也善于利用閒余时间，钻研力学问题，日积月累，便对于很多种的水工结构问题，搜集不少资料，而且对于若干问题能从结构力学及弹性力学方面，得有独到的解答。为了提高其设计机关内同志的理论水平，他曾整理其中一部分，编成讲义，亲自讲授，获得好评。当时流通范围，只限于该设计院内。最近著者又重加整理，就下列十部分，分别写成独立小册，以供广大的教学者及设计者之参考。

1. 压力钢管；
2. 水工隧洞；
3. 渐变段襯砌；
4. 调压井襯砌；
5. 地基梁和框架；
6. 重力壩；
7. 壩內的孔口和廊道；
8. 連拱壩；
9. 拱壩；
10. 堤壩的温度控制。

最近党和政府提出鼓足干劲，力争上游，多快好省的建設方針，我國社会主义建設大躍進的形势，業已形成。工業農業同时并舉；大中小型相互結合。而工業化和电气化之發展，使得兴建电站更具有重大之意义。对于电力事業，中央也有水电为主，火电为輔

的明确指示。因而水电站建設的重要性今后將更为突出。建筑大型水电站, 水工結構的負載及应力情况, 都很复杂, 計算时需要較高深之理論基礎。但是一般有关力学的理論書籍, 涉及于水工建筑物的具体問題者很少。因之, 如何把一般理論联系到水工中的具体問題, 中間似乎需要一些补充, 而这些小册子之問世, 恰好彌補了这种欠缺。它們不但可以直接地用來解决工程問題, 而且对于讀者的深入鑽研也有啓發。

再者, 对于水工建筑物的应力情况, 如果分析得准确, 知道得清楚, 則于節約材料, 提高質量, 也可以起一定的作用。

本書是以个别的小册子的方式問世, 因而只能作为有关讀者的参考。希望著者再接再厉, 繼續努力, 不断地以工作中的經驗, 來丰富水工建筑物的結構分析內容。到了比較成熟时, 可以根据水工建筑物的种类, 或者根据力学学科的分类, 前后貫通成为有系統的結構計算專著, 則对于學習的人們, 当能有更大更多的帮助, 謹以此意希望于著者。

顧兆勳

1958年5月

自序

新中国成立以来，在偉大的中国共产党领导下，国家经济建设正以史无前例的速度向前突飞猛进，并且已取得了极其偉大的成就，尤其是在基本建设中的水利工程方面，我們已制訂了根治和开发黄河的方案，全流域四十多个水利枢纽將次第兴建，最大的三門峡枢纽即將在1960年完工，“黄河水清”已經是眼前必然出現的事，而黄河之患也將永远成为历史上的名詞了。在毛主席“一定要把淮河修好”的号召下，我們已修建了无数的水庫群，淮河流域正在恢复它美丽富饒的面貌。在水力資源方面，我們已經修建和新建了容量自数万到数十万瓩的小丰满、水丰、官厅、獅子灘、上犹、黄坛口、古田和流溪河电站；正在修建和設計容量自数十万至数百万瓩的大型水电站如三門峡、刘家峡、新安江、新丰江、桓仁、甌江、閩江、七里瀧、五强溪、柘溪、紫坪鋪、以礼河……等。这些电站的規模和技术水平，在世界上也是第一流的；結合遍地开花的中小型电站建设，我們的水電容量，將迅速的增長到数千万瓩的巨大数字。在灌溉工程方面，我們要在短短数年間，完成过去数千年才能完成的工作，真真实现一天等于二十年的奇迹。总之，在党中央发出庄严的全民工农业大跃进的号召后，在建设战线上已形成万馬奔腾銳不可当的浪潮，再看到我国丰富无比的水利資源，发展的前途实在无可限量。

随着水利建设的发展，我国在設計和修建水工結構物的技术上也获得巨大的进步，取得了很多的宝贵的經驗。例如，我們修建了80余公尺高的梅山及佛子嶺的連拱壩，流溪河和响洪甸的拱

壩，獅子灘的新型的堆石壩，上犹江的空心重力壩，官厅的土壩，以及高度在 100 公尺以上的三門峽及新安江的重力壩，開鑿了許多直徑達 10 余公尺的水工隧洞；至于在設計和施工中的巨型建築物更是不勝枚舉。這些建築物的規模，有許多都已達到國際水平，甚至超過國際水平。當然，這些從勞動中所獲得的經驗，還有待於總結和推廣。

所謂水工結構，或稱為水工建築物，乃指一切有關利用或限制水的建築物，種類非常繁多，大別可分為以下四類：

(1) 擋水建築物 其主要目的是攔蓄水流，抬高水位，貯藏水量；各種型式的堤壩堰閘，都是擋水建築物。

(2) 輸水、引水建築物 其主要目的是將水輸引到需要的地方去，例如渠道、水工隧洞、輸水管、進水口、調節塔等等。

(3) 泄水建築物 其主要作用是宣泄多余的水量，例如各種型式的溢洪道、放水孔、泄水洞和作為控制用的調節閘閥、作為消能用的護坦、消力池等等。

(4) 整治建築物 為了加固堤岸整治河道而建築的堤防、丁壩、海塘等，是這一類建築物。

此外，尚有一些專門性的水工建築物，例如水電站的廠房、輸送木材的筏道、通航用的船閘、魚業上應用的魚道等等。

普通一個水利工程往往不限於解決個別的問題，而是要求綜合的解決國民經濟中各部門的問題，因而在一個工程中就常常不只有個別的建築物，而是完整的建築物群。這種具有壩、水道、電廠、船閘等等的全部的建築，便稱為水力樞紐。

水工建築物與一般民用或工業用的建築物相比較，具有以下一些特點：首先是它的體積常極龐大。例如一個高 100 公尺的重力壩，其體積往往達到一百万或數百万立方公尺，而一個巨型的堆石壩或土壩的體積更會大到一千万公方。開鑿一條較長的運河時，挖除的土方往往需以億公方來計算。水工建築物所承受的荷

載也是十分龐大的，蓄水 100 公尺的壩，在每公尺壩面上要承受 5000 噸或 5 百萬公斤的壓力。其次由於建築物表面經常和高壓的水相接觸，因此對於水的一切損害作用——包括滲透、冰凍、化學侵蝕、季節剝蝕、機械管涌、氣蝕、洪流沖擊震動等等，都必須作詳盡的考慮。這也就是水工建築物對於建築材料和地質條件的要求特別嚴格的主因。由於建築物的體積龐大而施工期間一般又極急迫（建築工期經常受到洪水的影响），所以不能不採用具有極高生產效率的施工設備和先進的施工方法，施工設計也就成為水工建築物設計中的重要組成部分，有時甚至會影響建築物的型式和總布置。水工建築物通常是龐大的實體結構或複雜的地下結構，其分析計算遠較普通的杆件結構為難。最後，龐大的水工建築物的造價非常昂貴，而在國民經濟中的作用也極為重要。例如一個裝機容量為 100 萬瓩的水電站，在任何電力系統中將是主要的電站之一，一個蓄水一百億公方的水庫將擔負數百萬畝農田的灌溉工作。這些建築物當然不能允許發生任何的意外。

由於上述的特點，我們可以看出，要正確的勘測、選擇、布置和計算水力樞紐將是十分重大和複雜的問題。水利工程師們必須掌握以下一系列的科學知識：研究水量、泥沙、冰凍和風浪等水情現象的水文學，研究地面以下基礎情況的地質學，研究施工布置、設備和方法的施工科學，以及當建築物的型式選定後用以計算其水力及應力條件以便進行詳細設計所需的流體力學、結構力學及彈性力學等。當然，一個設計人員不可能完全掌握和精通這樣廣泛的科學知識，大型水工建築物總是在集體的力下設計出來的。這裡應該指出，水工建築物的計算，只是設計中的一部分，有些同志過分重視計算而忽略了設計工作的其他方面，顯然是不妥當的。

目前有關水工結構的教科書或參考書已不少見，大都寫得很好，對水利工程師們具有很大的參考價值；但這些書多數論述了建築物設計的全貌，而對個別部門就不可能敘述得十分詳細，尤其

是有关应力分析的方面,往往忽略或只簡單述及,不能滿足具体設計同志的要求。也有一些个别的研究水工結構应力分析的文章,散見于各种刊物,应用起来往往也不够方便。

著者編写这一部“水工結構应力分析叢書”的目的,是想略能弥补这一缺陷。全書就几种最常見和最主要的水工結構的应力分析问题,作了較詳細的叙述,以設計人員为对象,所以必要的理論,固然已尽量列入,俾讀者能更深入地了解計算原理,以收举一反三之效,而对于各种实际可用的計算資料、方法、曲綫和图表也尽量提供。全書暫分为十篇,即:压力鋼管、水工隧洞、渐变段襯砌、調压井襯砌、地基梁和框架、重力壩、壩內的孔口和廊道、連拱壩、拱壩、堤壩的温度控制。其中前四篇是一些主要的引水建筑物,后五篇是主要的擋水建筑物。至于地基梁和框架,虽然不完全是水工結構,但是在各水力樞紐的設計中几乎无不遇到这一新穎的問題,因此也把它列为一篇。当然,这些理論和資料还可以应用到其他建筑物的地基梁上去。

編写本書时,著者尽量参考了国内外的各种先进技术規範及資料,尤其注意吸收苏联的科学成就及我国的实际經驗。压力鋼管和水工隧洞两篇,基本上是按照苏联的有关規範編写的。書中除对規範中各种計算公式或規定的来源詳予闡述外,并且补充了許多規範中未录入的內容及著者所建議的計算方法;这样可使讀者們不但能熟悉規範,而且能够不为規範所囿,創造出更迅速合理的計算方法。关于渐变段及調压井襯砌,都是地下結構(隧洞也是这样)。計算这种結構所遇到的主要困难,还是在如何决定結構上所承受的力系,这一問題,即使在今天,也还未完全解决,本書中只能归納和整理了目前所常用的各种近似理論进行比較,以供選擇。例如在渐变段計算中,首先叙述了根据平衡条件估計所承受的力系的方法(并且介紹了著者認為最便应用的布尔德茲格拉的計算步驟,补充了若干情况及数表),然后叙述考虑彈性抗力的計

算方法；但是只限于应用簡單的文克尔假定，后一計算，經過多年来的发展，并經著者提供了一系列函数后，已完全可供实用。土壩或堆石壩的剛性斜牆的計算，在数学上为同一性質的問題，因此也附入这一篇內。在調压井襯砌的計算中，涉及到地基彈性抗力时，也都应用了文克尔假定。另外，在調压井这一篇中，特別詳細地介紹了各种圓筒和圓板的計算方法。由于这些構件經常在水工建筑物中遇到，著者深信若能將其計算方法及資料綜合在一本書中，一定会有参考价值的。

在地基梁的一篇內，着重于叙述郭尔布諾夫-波沙道夫的方法和介紹几种近似而簡單的計算法。此外，地基上的框架的計算，过去尙无很方便的計算方法，因此計算的工作量是非常巨大的。在本書中，还罗列了一系列的数表，使这个重要問題，在很大的程度上能够方便的解决。

擋水建筑物中，重力壩是最原始和主要的一种，其計算方法詳述于第六篇中，这里除供給了經典的計算公式、表格外，并列入一些新的工作方法，这些方法是在設計新安江工程时陸續为同志們发现和總結出来的。壩內的孔口和廊道，也是壩体設計中主要的計算內容之一，本書亦列为專篇詳加論述。除对圓孔的計算資料尽量录入外，并附入不少計算标准廊道及橢圓形等孔洞的資料。如果能够灵活运用这些資料，一般的小孔口計算問題都应可以解决。

垛壩（以連拱壩为代表）及拱壩为另外两种典型的壩型，我国已修建了不少这种新型的高壩。在編寫中，著者尽量参考了佛子嶺和流溪河工程的設計經驗及總結。拱壩的計算中，仍以試載法为主要方法，但也介紹了一些其他的簡捷和近似的方法。

最后一篇是涉及堤壩的温度控制計算問題。在大体积混凝土壩中，这显然是一个具有非常重要意义的問題。目前国内外所发表有关这一問題的文献已相当丰富。在本書中試圖做一个初步的

总结。这个总结是通过流溪河、新安江几个坝体的设计逐渐形成的,当然不够完整,但对于读者的学习和应用上来说,这样做是很有利的。

以上是本书各篇的大概内容。当然水工结构物的种类是十分繁多,其计算方法也各不相同,而本书全部的篇幅虽已不少,不免仍是挂一漏万。但是著者认为,任何型式的水工结构的计算必须根据基本的结构力学的原理和规则进行。因此,本书的资料和内容固然还有待于补充和修正,然更重要的是设计同志们应该能进一步熟悉和掌握本书内所介绍的各种计算方法的原理。能够掌握这些基本工具,就不难举一反三,解决更多和更复杂的问题。

本书各篇资料原系著者在 55~56 年中为上海水力发电设计院水工组同志所写的一些业务学习讲义,在广州工作时曾加以补充复印。有不少同志认为还有一定的参考价值,来索取者颇多。爰将讲义稿加以全面整理,编成本书。

由于作者水平的限制,书中不妥当的地方在所难免,希望读者们能随时予以补充指正。承华东水利学院水利系的几位教授们对本书作了全面的审查、特别是顾兆助教授还在百忙中宠赐序言;又承上海水力发电设计院刘世康工程师给本书提供了许多宝贵的材料;著者在此特表示深切的感谢。

潘 家 铨

目 录

序

自序

第一章	概述	1
第二章	鋼管的最小厚度及彈性穩定	3
第三章	鋼管應力的近似計算	14
第四章	用彈性理論計算鋼管	36
第五章	分叉管的近似計算	64
第六章	埋藏式鋼管的計算	79
参考文献		96

第一章 概 述

本集中所称的压力鋼管，系指水电站露天式高压輸水鋼管，这类鋼管的計算方法，一般并不适用于压力隧洞的鋼板护面及輪箍式的鋼管，但在有的情况下，可以適用到地下埋藏式的鋼管。

計算压力鋼管，需要大量和精細的工作。因为这一类結構所受的壓力是非常巨大的，尤其在高水头水电站中为然。此外，鋼管又是十分昂貴的材料，計算工作做得不好，不是招致工程的失事，便是意味着有巨大的浪費存在。压力鋼管主要承受的荷載是輻射狀的內水压力，其次为水的重量、金屬結構的重量、溫度应力、摩擦力、离心力、土压力、地震力等等，應該按照规范，將各种荷載，分別主次，組成各种設計情况、校核情况及特殊情况，一一加以核算。計算內水压力时，必須包括水輪机調速时所發生的最大水錘压力值在內。

鋼管在各种荷載作用下，其应力分布十分复杂，要精确的進行計算，存在着相当大的困难。特別是在分岔管，支管，支座附近区域更为复杂。本書中所述的計算法，是以一般結構力学及彈性薄壳理論为根据，而加以適當簡化以便应用的，在一般情况下，这些公式已够精确。

鋼管的結構計算，可以分成下列几部分來進行：

- (1) 鋼管彈性穩定的檢查，剛性环的配置；
- (2) 鋼管膜应力的計算；
- (3) 鋼管剛性环及支承环附近局部弯曲应力的計算；
- (4) 剛性环和支承环的計算；
- (5) 分岔管的計算。

以下所述，亦大致按照这个次序進行。

本書所述，主要参考，“苏联电站部，建筑安裝生產技术管理局 1950 年 11 月 2 日批准的技术规范及設計标准，水电站的压力鋼管”（以下簡稱规范）。规范中的公式及准则，一般在本書中都得到詳細導演和說明。

在直徑和跨度較小的鋼管中，可以用結構力学理論所導得的公式進行計算，这些公式簡單明了，既便導演又便应用。但它們忽略去一些次要应力，在直徑和跨度較大的鋼管中，便不能給出滿意的結果，必須应用更为嚴謹的彈性理論以处理之。

本書中將兩種理論都加以闡述，当然將彈性理論所得的結論簡化后就和結構力学所給出的成果一致。

分叉段、法蘭盤、及地下式、輪箍式鋼管的計算，还是远未得到滿意解決的問題，本書中只能对几种重要情况略作討論，其余情况有待繼續研究。

第二章 鋼管的最小厚度及彈性穩定

2-1 为什么要檢查彈性穩定

鋼管是一種薄壳結構，它的厚度和其他尺寸比較起來，是很小的，因此，在受壓力時很容易喪失彈性穩定而致失事，所幸鋼管所承受的主要荷載是內水壓力，這個荷載主要引起管壳的“箍拉力”，所以彈性穩定的問題，比較次要，而只是在下列情況下須要考慮：（規範 73, 74 及 75 條）

（1）當水管放空時，因為通氣管失靈，使管內發生真空，管壳便承受外面大氣壓力。

（2）當水管放在地下時，承受外面地下水作用或土壓力作用。

（3）當水管外面澆置混凝土時，水管承受未硬化的混凝土壓力。

（4）當水管在安裝時，受到沖擊、震動等安裝應力和運輸應力，或灌漿壓力。

為了使鋼管在上述情況中，不致喪失穩定，就要求管壁有一個最小厚度。當按照應力計算出來的厚度，小於最小厚度時，便必須採用最小厚度（規範第 4 條及第 1 表），此外，並規定沿鋼管每隔若干距離增設一個剛性環，以增強其穩定性（規範第 73 條及第 10 表）。鋼管的理論最小厚度及各種情況下的穩定計算詳見以下各節。

鋼管最小厚度表

外 徑(公厘)	870 以下	920~1530	1630~4040	4240~6040	6240~7050
最小厚度(公厘)	6	8	10	12	14

2-2 均匀和无限长圆筒的稳定

考虑图 1 中的圆环, 承受外压力 p , 当 p 值逐渐增加, 达到临界值 p_{kp} 时, 圆环便丧失稳定; 而能在 p_{kp} 作用下, 维持一定的变形状态, 如图 1 所示。

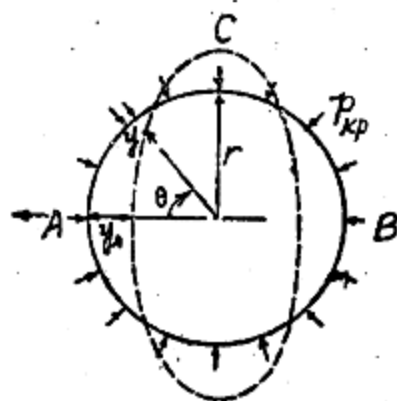


图 1

按圆环的弯曲方程式为

$$\frac{d^2 y}{d\theta^2} + y = -\frac{Mr^2}{EJ} \quad (1)$$

式中 y 为各点径向变形, M 为该点力矩, r 为环的半径, EJ 为环断面的弹性模量和惯性矩。圆环在变形后, 各点均有力矩 M 发生, M 可以表示为:

$$M = M_A - pr(y_A - y) \quad (2)$$

式中 M_A 及 y_A 为 A 点的力矩及变形, 因此, 将式(2)代入(1)得

$$\frac{d^2 y}{d\theta^2} + y = -\frac{r^2}{EJ} [M_A - pr(y_A - y)]$$

或

$$\frac{d^2 y}{d\theta^2} + y \left(1 + \frac{pr^3}{EJ}\right) = \frac{-M_A r^2 + pr^3 y_A}{EJ} \quad (3)$$

以 k^2 代表 $1 + \frac{pr^3}{EJ}$, 得

$$\frac{d^2 y}{d\theta^2} + k^2 y = \frac{-M_A r^2 + pr^3 y_A}{EJ} \quad (4)$$

上式之通解为

$$y = A \sin k\theta + B \cos k\theta + \frac{-M_A r^2 + pr^3 y_A}{EJ + pr^3} \quad (5)$$

在断面 A 及断面 C 处, $\frac{dy}{d\theta}$ 均必须为 0, 即:

$$\left(\frac{dy}{d\theta}\right)_{\theta=0} = \left(\frac{dy}{d\theta}\right)_{\theta=\pi} = 0$$

由此可以求出 A 的值, 和 B 的条件:

$$\begin{aligned} A &= 0 \\ B \sin \frac{k\pi}{2} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

因为 B 不能为 0, 故必 $\sin \frac{k\pi}{2} = 0$ 即 $k=2$, 于是得到

$$\begin{aligned} 4 &= 1 + \frac{pr^3}{EJ} \\ \text{或} \quad p_{kp} &= \frac{3EJ}{r^3} \end{aligned} \quad (7)$$

这是圆环临界压力的计算公式, 如果是圆筒, EJ 应该换以

$$\frac{1}{12} \times \frac{1}{1-\mu^2} E\delta^3,$$

其余完全一样, 即

$$\begin{aligned} p_{kp} &= \frac{3}{r^3} \times \frac{1}{12} \times \frac{1}{1-\mu^2} E\delta^3 = \\ &= \frac{E}{4(1-\mu^2)} \cdot \left(\frac{\delta}{r}\right)^3 = \frac{2E}{1-\mu^2} \left(\frac{\delta}{D}\right)^3 \end{aligned} \quad (8)$$

式中 D 为圆筒直径, 设 K 为安全系数, 则圆筒的允许压力 p 可由下式确定:

$$K \cdot p = \frac{2E}{(1-\mu^2)} \left(\frac{\delta}{D}\right)^3 \quad (9)$$

如果管壳所受最大压力情况为内部真空, 外部大气压力, 并设此值近似等于 1 公斤/平方公分。又取 $E=2\,200\,000$ 公斤/平方公分, 安全系数 $K=2$, $\mu=0$, 则代入上式后, 可以求出钢管的最小厚度:

$$\delta \geq \frac{D}{130} \quad (10)$$

可见为了保证管壳能抵抗真空压力, 保持稳定, 在直径等于 1.3 公尺时, 管壳厚度即需 1 公分以上, 这样求得的最小厚度自然嫌大。因此我们在管壳上每隔一定距离, 加一圈刚性环, 来增加管壁稳定

性,以减少管壁厚度,规范 89 条中明白地指出,薄壁水管管壁的稳定性,应当用刚性环来保证,而不是按采用增加管壁厚度的方法来保证。

2-3 有刚性环圆筒的稳定

圖 2 中所示一帶有刚性环的管壁剖面,令刚性环中距为 l , 由于对称关系,在断面 ① 和

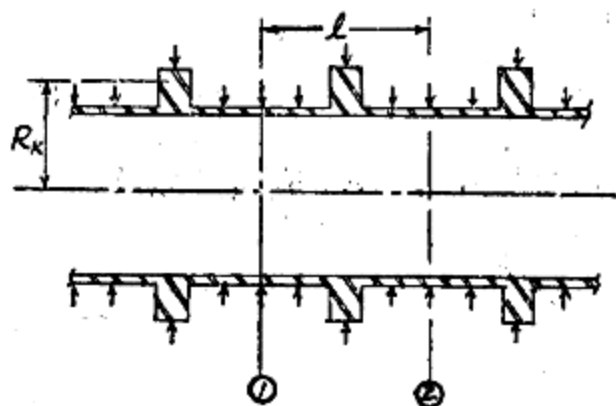


圖 2

于对称关系,在断面 ① 和 ② 上,沒有剪力,因此,① 和 ② 之間的一部分管壳(包括刚性环在內)可作为独立的圓环來看待,而仍能应用式 (7) 計算臨界荷載。这时,式中的 J 本应指在 l 这段範圍內全部刚

性环及管壳截面对其重心之慣矩,但事实上,因为管壁比較薄而長,在刚性环弯曲时,只有靠近刚性环附近一段管壁才和环同样变形,所起作用較著,因此 J 的計算,

只能以这块“相当的有效面積”为准。这块有效面積將如圖 3 所示,

a 为刚性环本身厚度,兩边“有效管壁”長度各为 $0.78 \sqrt{r\delta}$ ①, 因此組成一个有效断面, J 应该是这块面

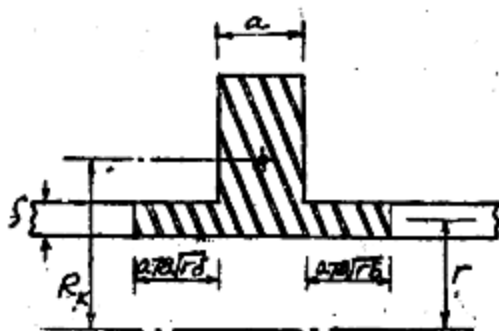


圖 3

積对它本身重心軸的慣性矩,另以 R_k 代表管道中心到这块有效面

積对它本身重心軸的慣性矩,另以 R_k 代表管道中心到这块有效面

① 有效管壁長度的物理意义如下。設在一無窮長的鋼管上,有一刚性环,当我們在刚性环上作用荷載时,鋼管管壁將随之变形。理論上言,刚性环的变形,会影响到無窮远处的管壁,实际上,它的影响局限于环的兩側。我們若割取一定長度的管壁与刚性环連在一起,使这个联合截面在外力下的变形与刚性环的实际变形相同,則此一長度的管壁即称为有效管壁,其長为 $0.78 \sqrt{r\delta}$ (推導可見参考文献 3、4、5,并參閱第 3-7 節)。