

建築結構力學

Architectural Structures
Introduction to Structural Mechanics

原著者：Henry J. Cowan

譯述者：譚 天 珉

(SI 版)

科技圖書股份有限公司

初 版 序

近一世紀來，結構原理已成為建築教育中不可或缺的一環。但其重點則不斷改變。結構日趨複雜，計算的工作則因電算機的發明而多改進。建築師作初步設計，繪出結構物具體的形狀。工程師則從事結構計算及細部設計。如是，建築師所需要的結構課程內容將是怎樣的呢？

建築師所具的數理方面的知識，鮮能與工程師相提並論。因此，若干建築師將自己的作品局限於最基本的結構，這種結構對工程師而言，是輕而易舉的問題。對於希望在設計中能運用範圍較廣的結構理論的人們，就無法滿足其需求。除非結構課程可應用到建築設計上，並使其不需工程師（或教師）的指導即能自由運用，否則這種教育就不算成功。

此外，吾人也常忽略數學的知識。結構課程的範圍很廣，它包括複雜的空間構架及薄殼結構等，學工程的學生也只有在較高深階段才能接觸到。但吾們常忽略它的原理及計算。雖然這樣學起來很容易，但這並不能幫助學生真正了解結構。除非他懂得力學原理，否則他無法選擇不同的結構。若不經計算，也無法判斷結構所需的尺寸。形狀特殊的建築物，若高度 6 m，屋頂跨度 6 m，也許不成問題，但若高到 60 m，屋頂跨度 60 m 時，就不是那麼簡單了。

我相信，只有學習結構原理之後，才能瞭解結構的行為。而建築師必須學習所有有用的結構才夠，並且要了解結構的主要尺寸，因為結構物尺寸不同時，差別就很大。細部設計及詳細的計算過程可不必太注意，那是工程師的職責。為了達到這個目的，本書中刪除了一些不重要的部份，而以最簡單的方法，並參考結構的物理性質，來說明其原理。

本書中的第一章到第六章適合大三課程使用，其中標有星號(*)的章節可以略去不教。至於大四或研究所的學生，必須全部講授。此外，第三章為靜力學問題，若以前已經學過，可略去不教。

在此要特別感謝 Dr. Carolyn Mather 及 Mr. Graham Morris，他們幫我繪製精細的圖表；Mrs. Rita Arthurson 的原稿打字；Day Ding, Peter Smith 及 John Gero 諸教授容許引用他們的習題，我的

2 建築結構力學

女兒 Judy 幫忙校正。最後，我要感謝四十餘所大學的建築學院院長及結構課程的教授們，他們花費了許多時間與我討論結構課程的教學方法；以及過去及現在我的學生們善意的討論與建議。

澳洲·雪梨大學建築系教授

H. J. Cowan 柯 漢

原 序

自從第一版發行以來，高樓設計逐漸引起大家的注意。因此將第一章及第八章的內容加以補充，並引入這類新的結構系統。1971年ACI規範用極限強度作為鋼筋混凝土的主要根幹，本書第七章亦據此改寫。此外，書中某些部份的內容也經重新安排，使其更清晰明瞭。

英國、澳洲、紐西蘭及南非等國家，已將其結構規範修改為公制單位；加拿大也正在更換中。美國試驗及材料協會（American Society for Testing and Materials）亦已按公制單位編定一實施指針。本書中例題與習題均用公制單位重新演算。

在此要特別感謝Arlington德州大學的Dr. E. L. Buckley及Mr. R. Powell及蒙大拿州立大學的Dr. G. S. McLure的指正，Dr. Valerie Havyatt為本新版校稿，Mrs. Rita Arthurson女士打字。

澳洲·雪梨

H. J. Cowan 柯 漢

建築結構力學

目 錄

第一章 結構的選擇

1-1	問題	1
1-2	支柱與樑	3
1-3	索線	6
1-4	拱	10
1-5	平面桁架	15
1-6	剛架	19
1-7	水平格樑	23
1-8	空間構架	25
1-9	版	27
1-10	充氣薄膜	29
1-11	薄殼	30
1-12	摺版	33
1-13	高樓建築物	36

第二章 設計規範

2-1	建築法規	39
2-2	結構材料的超限應力	41
2-3	軟弱接點的破壞	42
2-4	過度之變形與裂縫	43
2-5	結構物的整體傾倒	45
2-6	挫屈	45
2-7	載重	46

第三章 靜力學

3-1	力的定義	51
-----	------	----

2 建築結構力學

3-2	力的合成與分解.....	52
3-3	槓桿原理.....	57
3-4	靜力平衡之條件.....	61
3-5	重心.....	65
3-6	簡易基礎及擋土牆上的力.....	68
3-7	中三分規則.....	71
習題		74

第四章 靜定桁架中之力

4-1	靜定桁架、超靜定桁架及不穩定結構.....	77
4-2	蒲氏符號法及桁架應力圖.....	79
4-3	斷面法.....	83
4-4	接點法.....	86
*4-5	拉力係數.....	88
*4-6	用矩陣法及電算機求解桁架.....	91
*4-7	空間構架.....	93
*4-8	屋頂曲面的三角構架.....	96
習題		97

第五章 靜定樑及構架的彎矩與剪力

5-1	靜定樑、超靜定樑及不穩定結構.....	101
5-2	懸臂樑的彎矩圖及剪力圖.....	105
5-3	彎矩及剪力的符號規則.....	109
5-4	簡支樑的彎矩圖及剪力圖.....	110
*5-5	外伸懸臂樑.....	118
*5-6	蓋勃樑.....	124
*5-7	矩形三鉸橋門.....	127
*5-8	三鉸人字構架.....	132
*5-9	三鉸拱.....	134
習題		140

第六章 彈性及應力

6-1	載重作用下結構物材料的行爲	145
6-2	應力及應變的概念	147
6-3	純拉力及純壓力的應力與應變	150
6-4	彎曲理論	151
*6-5	樑的斜度及撓度	156
*6-6	樑中剪應力的分佈	161
*6-7	扭力	163
*6-8	應力分析	164
*6-9	應力軌跡、應力集中及實驗應力分析	171
習題		174

第七章 結構材料對設計之影響

7-1	挫屈問題	177
*7-2	歐拉細長柱定理	180
7-3	壓力桿件的實際設計	182
7-4	接點問題	184
7-5	木、鋼及鋁製簡單結構物的設計	190
7-6	空腹鋼樑	191
7-7	薄型鋼及鋁製的結構材料	192
7-8	應力分級木與膠合木	193
*7-9	鋼筋混凝土柱	194
*7-10	矩形鋼筋混凝土樑及樓板設計	196
*7-11	鋼筋混凝土樑版	204
*7-12	柱的偏心載重	206
*7-13	預力混凝土	208
習題		214

第八章 建築構架之設計

8-1	鉸接構架的觀念	217
8-2	樓版固定的觀念	218
*8-3	三力矩理論	220
8-4	樓版固定的混凝土結構設計	223

4 建築結構力學

8-5	剛結構架理論近似解	230
*8-6	力矩分配法	233
8-7	混凝土及鋼的剛架結構設計	240
8-8	矩形構架的一些變化	242
8-9	溫度變化、收縮、潛變及沉陷影響	245
習題		250

第九章 曲面屋頂設計

9-1	索線	252
9-2	拱	257
*9-3	圓頂結構	258
*9-4	圓筒薄殼	263
*9-5	鞍形薄殼	266
*9-6	摺板	269
習題		270

附錄A 初步結構估計用圖表

A-1	水平支撐圖表	273
A-2	垂直支撐圖表	274

附錄B 表

B-1	第一章至第九章的參考表	297
B-2	英制、公制 (c.g.s) 單位及國際制 (S.I) 單位換算表	297
B-3	圓鋼筋及竹節鋼筋斷面積表 (mm^2)	298
B-4	等間距安置圓鋼筋與竹節鋼筋斷面積 (mm^2/m)	299

附錄C 符號及縮號

C-1	符號	300
C-2	數學記號	302
C-3	縮寫	302

附錄D 習題問答

304

結構的選擇

我的腦海中，除了建築物以外，就沒有其它的東西了，它真是一件奇妙的事。

Samuel Pepys

在本章中，將描述一些主要的結構形式。以後幾章將再予詳細討論，並推導公式以決定主要的結構尺寸。力分佈圖在本章中只用來說明原理。以後的幾章將考慮一些較簡單實例的力學性質。

1-1 問題

建築設計的目的，在於提供人類活動所需的空間。除了一些像露天劇場之外，所有建築物都必須有屋頂，而且大部份也都有地板設在地面上。結構設計中比較困難的部份是如何連結牆或柱之間的間隔；除高樓外（參閱 1-13 節），牆與柱的設計通常都比較簡單。

間隔的長度，具有決定性的重要性。一個缺乏理論知識的優秀工匠，在設計結構時可能會超過跨度長好幾公尺。建造一座淨跨度超過一百公尺長的屋頂，需要很好的技術以及詳細的計算。因此，在本章中將專注重於屋頂及樓版，亦即討論支柱間的水平間隔的各種連結方法。長跨度的連結，是比較特殊的問題，很短跨度的連接在結構上則完全不成問題。

結構設計的目的，在於承擔載重。首先，必須承擔其本身的自重，而在設計中型或長跨度屋頂時，結構本身的重量為最重要的因素。其次，又須承擔外加在結構上的載重，包括屋頂、樓版、天花板、傢俱，以及使用

2 建築結構力學

建築物的人們。所有這些載重均為垂直作用的。目前，將暫時不考慮風力對高樓所造成的水平載重，以及由地震或具振動性的機器所造成的水平載重。這些對某類結構物來說可能非常重要；但大部份的設計都由結構本身及其所包含事物的垂直載重來支配。

現在考慮一座結構物橫跨在兩座支承上，並承受垂直載重（見圖 1.1）。兩個支承防止結構物及載重落下，因此每個支承上都有反力。假想結

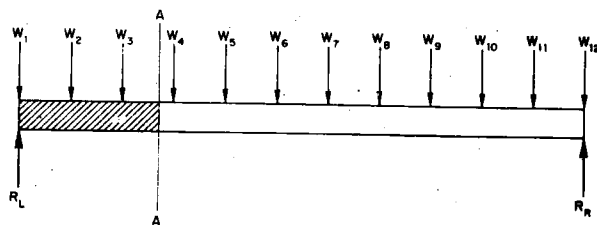


圖 1.1 水平間隔之連結。此問題在於如何承擔在右兩端反力 R_L 及 R_R 之間的載重 $W_1, W_2, W_3, \dots$ 等

構物在垂線 A—A 處被切開。切口左邊（斜線部份）的結構物將會(1)在左端反力 R_L 及載重 W_1, W_2 及 W_3 作用下有轉動的傾向，(2)有向上或向下移動的傾向，端視 R_L 與三個載重 W 何者為大而定。

若結構物有足夠的強度，而且並未坍塌時，它將抵抗這兩種傾向。使結結構物斜線部份產生轉動傾向的載重，在 A—A 斷面上造成彎矩 M (bending moment 見圖 1.2)，此彎矩可使樑向下彎曲，並造成可測得

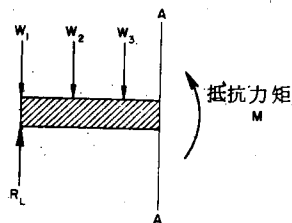


圖 1.2 載重 W_1, W_2, W_3 及左端反力 R_L 所造成的彎矩，等於樑在 A—A 斷面的大小相等方向相反的抵抗力矩 M ，此力矩只與載重有關，與結構的形式無關

的撓度 (deflection) (見圖 1.3)。使結構物斜線部份與非斜線部份

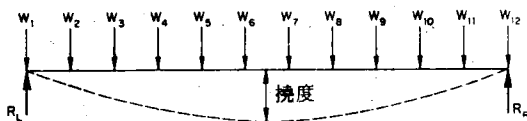


圖 1.3 彎矩不可大到使脆性飾面，如灰泥，產生危險，或使人感覺到建築物的位移

產生相對移動的傾向。造成了剪力 (shear force) V (圖 1.4)。此剪力足使樑被切斷或剪斷。

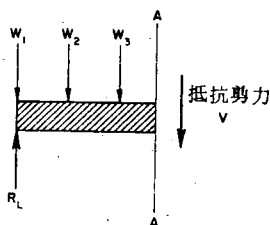


圖 1.4 載重 W_1 、 W_2 及 W_3 ，加上左端反力 R_L 所造成的向上的淨力，由樑在 A-A 斷面的剪力 V 來抵抗；此剪力只與載重有關，而與結構的形式無關

作用於連結水平間隔的結構物上的垂直載重，可使結構物產生彎矩及剪力，其大小則依結構物的形式而異。當彎矩及剪力愈大，結構物承擔的能力，就與其形式愈有關係。故當跨度很大時，結構形式的選擇尤為重要。

1-2 支柱與樑 (參閱第五章)

最簡單的結構為將一根樑 (beam)，支承在兩根支柱上。它的建造方法很簡單，只須將一條石塊橫放在另外兩塊石塊上，或將一根樹幹放在兩根支柱上即可。這種結構大都建於史前時代。雖然用木材建造的都不存在，但有些幾千年前用石塊造的大型建築目前仍保存着 (見圖 1.5)。埃及和希臘的神廟都是由這種支栓與樑所構成的 (圖 1.6 及 1.7)。

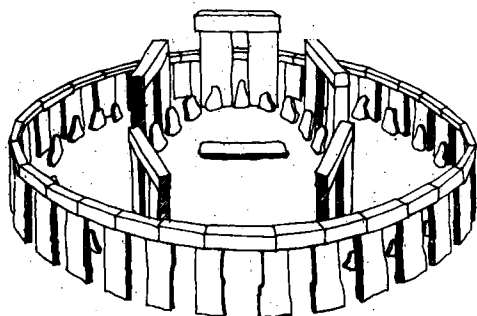


圖 1.5 石柱群 (Stonehenge)。兩千年至三千年前，在南英格蘭所建造的巨大的支柱與樑結構

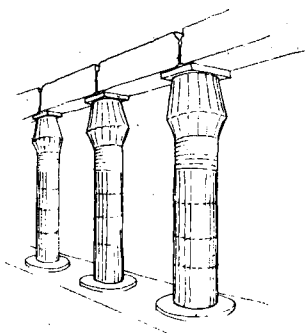


圖 1.6 埃及神廟的柱廊，支柱與樑結構在埃及建築上被使用了超過三千年的歷史

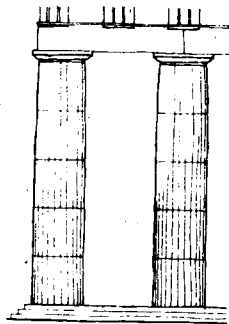


圖 1.7 古希臘神廟的柱廊。希臘的支柱與樑結構起源於西元前七百年，經過一連串的模仿及復興後，至今廿世紀時代仍被使用

由樑的自重，樑上載重以及支柱反力所造成的彎矩，是由樑中的大小相等方向相反的穩定力矩 (stabilizing moment) 來抵抗。再考慮圖 1.2 中樑的 A—A 斷面 (見圖 1.8)。彎矩 M 使樑向下彎曲，使樑的上部壓縮下部伸長。頂部的壓力 C 與底部的拉力 T 之間由力臂 a 分開 (其值將於第七章中討論)。這些力及力臂形成了抵抗力矩 (resistance moment

), 其值等於 M , 因而使樑不致折斷。

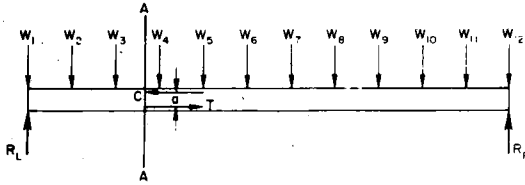


圖 1.8 支柱與樑結構中樑的抵抗力矩，載重 W 及反力 R 在 $A-A$ 斷面造成彎矩 M 。這使樑內上部產生壓力 C ，下部產生拉力 T 。此兩力之間有一力臂 a ，故形成了一個抵抗力矩，其值與 M 相等

石塊的抗壓能力很強，但抵抗能力很弱。顯而易見，當拉一塊軟弱的石塊時（譬如軟弱的砂石或石灰石），很容易就被拉斷了。但要壓碎它，必須費很大的力量。因此，石塊不能作跨度較大的樑，因為它無法承擔抵抗力矩中的拉力分量。

木材的抗壓能力不如石塊，但它的抗拉及抗壓強度大致相等。因此，它是建造短樑的良好材料。至今仍常使用它。譬如房屋的木樓板。

鋼材，像木材一樣，其抗拉及抗壓強度大致相等，但它的強度更高。當鋼材在十九世紀中葉開始大量生產時，鋼樑就取代了木樑在大型建築物中的地位。

石塊的低抗拉強度問題，可用在混凝土中加入鋼筋的方法來解決。鋼筋混凝土（參閱 7-10 節）價廉、耐用，並且防火性大。因此成為除了一些小建築物外，成為所有樓版結構的主要材料。使混凝土承擔壓力 C ，鋼筋承擔拉力 T （圖 1.9）。

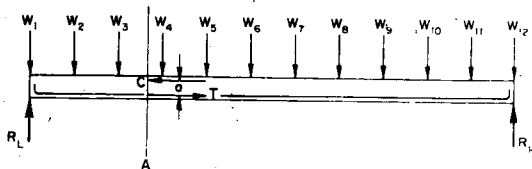


圖 1.9 鋼筋混凝土，由於混凝土的抗拉能力很差，故必須以鋼筋加強，才能抵抗彎曲。在鋼筋混凝土中，混凝土承受彎曲所造成的壓力，而鋼筋則承受彎曲所造成的拉力

在現代結構設計中，將樑連續跨過數個支柱的建造方法更為經濟。這種方法使最大彎矩降低甚多（參閱8-3節），因此連續樑所需的材料，要比圖1.5至圖1.9的末端不固定的簡支型結構，要省得多。

1-3 索 線（參閱9-1節）

支柱與樑的構造物，很適合於中小跨度。直線型的桿件容易製造與裝配，完成後的結構物是呈水平的，對樓板而言，這一點是絕對必要的。

但對較長的跨度，必須尋找其它的解決辦法。對中型跨度，用別的方法可能更為經濟。由圖1.8可知，樑必須有足夠的深度，以提供適當的距離或力臂，此距離介於彎矩的拉力分量 T 及壓力分量 C 之間。跨度愈長，則桿件愈大而且愈重。但長跨度桿件的主要承受的重量，就是本身的自重。故當樑無法再承受其自重時，就達到其長度的極限。但它必須有相當大的深度，深度愈大，所須承受的載重亦愈重。實際上，經濟效用的極限，在這以前，早就超過了。

吾人可將桿件彎曲，使形成較大的力臂，而不必用較厚的材料。考慮一條索線（cable）在自重作用下自由懸掛着（見圖1.10）。索線由兩根垂直彈簧及兩根水平彈簧支承着，前者代表一根樑承受同樣載重所需的

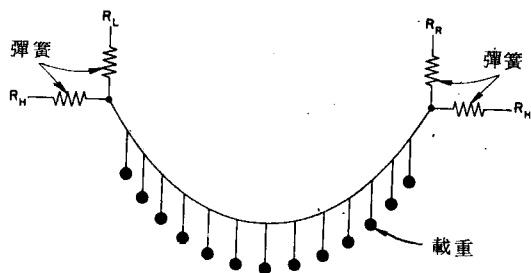


圖1.10 索線結構，若索線只承受自重，則其垂直反力 R_L 及 R_R 與同跨度的樑相同。但由於其彎曲的形狀會使索線往內拉，故另需兩個水平反力 R_H 。此模型中，在索線上懸掛許多鉛塊增加重量，如此才便於利用兩端的水平及垂直彈簧秤測出反力

垂直反力，後者代表另外所需的水平反力，這反力係由索線彎曲，使其有向內拉的傾向所造成的。

考慮索線跨度中央點的平衡。由於對稱的關係，故為水平的（見圖 1.11）。索線拉力 T 及水平反力 R_H 間的距離，為索線的垂度（sag） s 。它比樑的力臂 a 大得很多（見圖 1.8）。故抵抗力矩亦相對的增加。此外，另有幾項原因使索線應用於長跨度時特別有效：

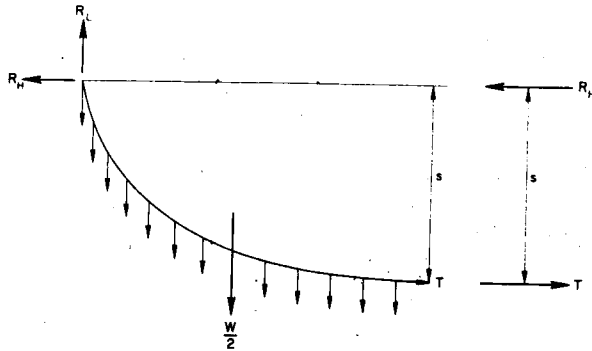


圖 1.11 索線的垂度形成抵抗力臂。抵抗力矩是由水平反力 R_H ，索線拉力 T 及垂度 s 所造成。由於垂度 s 比圖 1.8 中的樑的力臂 a 要大得多，故在同樣的拉力 T 的作用下，索線的跨度可大得多。

- (1) 樑的力臂必須包含在樑內。增大力臂就必須增加深度，因而加重了樑的自重。索線的垂度，在索線斷面之外，故增大垂度並不會增加索線的深度。
- (2) 索線所用的鋼料其強度可比樑所用的大。樑所用的鋼料其應力可達 140 至 240 MPa 之間。若用拉線模（wire-drawing die）來拉鋼線，其應力可高達 1,400 MPa。鋼料內晶體的畸變（distortion）不僅使其強度增加，也使其硬度變硬，這種材料由於很難被切斷，故適用於造索線。它是由數股鋼線絞在一起做成的。由於這種鋼索強度很大，故同重量的鋼料可承受更多的載重。而長跨度的結構，其自重常為其所承受的最大載重。
- (3) 承受拉力的材料會被拉直，承受壓力的材料若其形狀長而細者，則在輪重作用下會挫屈（buckle）。一張紙或一根細桿在受拉下可

承受相當大的載重。但若將其兩端相向擠壓，則會產生側傾向屈曲（見 7-1 節）。同樣，一段繩索在受拉狀況下可承擔相當大的載重，但受壓時就會折斷（見圖 1.12）。

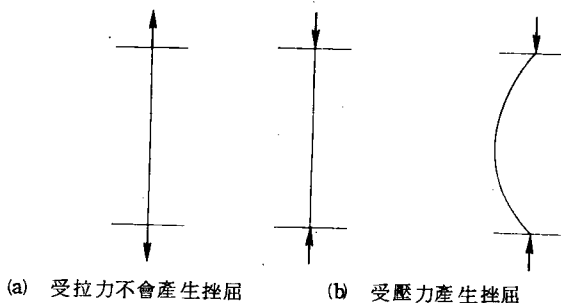


圖 1.12 壓力桿件可能會挫屈，拉力桿件則不會

因此，索線常用在跨度很長的橋樑（見圖 1.13）。紐約的范拉若諾峽（Verrazano - Narrows）橋的跨度長 1,300 公尺。今世界最長的 12 座橋樑都是用索線造的吊橋（suspension bridge）。

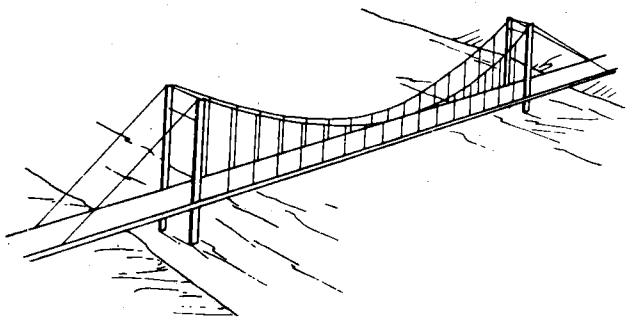


圖 1.13 長跨度吊橋

索線在長跨度的建築物上則不很有用。但索線的可撓性在橋樑設計上是一大優點。因為索線可隨載重位置不同而改變其形狀。在建築物中，索線需要支承屋頂，而屋頂必須能排除雨水，實際上撓性屋頂不易防水。面積很大的撓性屋頂可能會起振動或搖動。除非有防止的措施才行（見 9-1

節)。

再者，建築物的跨度很小超過數百m的，而吊橋的跨度則可能有100m以上。因此跨度較小的建築物，若用剛性曲線結構作屋頂較為經濟。

因此，懸索式屋頂，雖然能在對其性質了解增加後，可能會變得普遍，但目前仍然很少使用它。懸索式屋頂最普通的一種型式，如吊橋上用的索線一樣，是平行的(圖1.14)。索線的數目若很多，且都錨定在地面上，會浪費寶貴的空間，而每條索線分別裝置錨定物也很費錢。若用撐牆

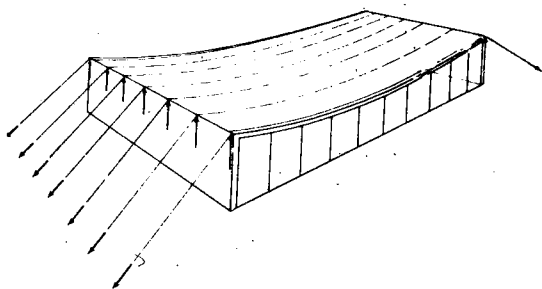


圖1.14 錨定於地上的平行索線所組成的懸垂屋頂

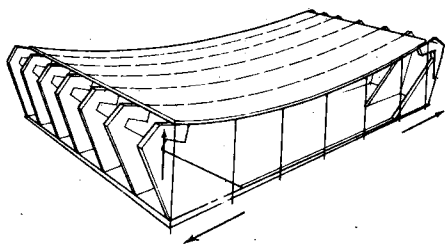


圖1.15 由平行索線所構成的懸索屋頂，索線錨定於看台

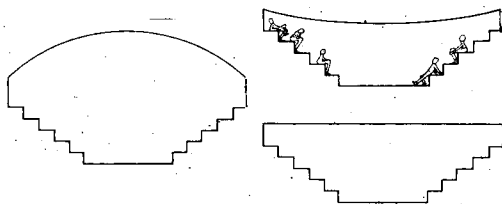


圖1.16 用懸索屋頂覆蓋運動場四周的看台，比用平頂或圓頂要好