

科學高中教材

力和運動

建築物力學：歷史回顧

[學生筆記]

主辦機構

香港建築師學會
The Hong Kong Institute of Architects

贊助機構

CREATEHK

研究團隊

THE UNIVERSITY OF HONG KONG 香港大學
faculty of architecture 建築學院
Community Project Workshop 社區項目工作坊

目錄

前言

教案 i

第一課：建築物力學——歷史回顧

1.1 歷史建築的力學概念 02

1.2 歷史建築的結構系統 02

1.2.1 塞加拉的「階梯金字塔」（公元前 2600年） 02

1.2.2 邁錫尼的獅子門（公元前 1200年） 03

1.2.3 塞哥維亞的水道橋（公元50年） 04

1.2.4 羅馬競技場（公元 80 年） 04

1.2.5 羅馬萬神殿（公元 126 年） 05

1.2.6 羅馬式建築（公元 500 -1100年） 06

1.2.7 哥德式建築（公元 1100 -1400年） 07

1.2.8 文藝復興建築（公元 1300 -1600年） 09

總結、關鍵字及延伸閱讀 13

免責聲明
香港特別行政區政府創意香港僅為本項目提供資助，除此之外並無參與項目。在本刊物／活動內（或由項目小組成員）表達的任何意見、研究成果、結論或建議，均不代表香港特別行政區政府的觀點。
© 2012 香港建築師學會

專題 01
建築物力學——歷史回顧

重點學習範疇

物理科：第二章：力和運動

- 力和運動

跨學科元素

設計及應用科技

- 範疇二 科技原理
- 範疇三 價值與影響

課程目標

- 欣賞歷史建築的結構性能
- 了解力在基本結構構件的傳遞
- 了解古代建築工人如何改進基本結構構件，以滿足不同的需求

課程大綱

課節	內容
第一課 建學力學—— 歷史回顧	• 1.1 回顧牛頓運動定律 • 1.2 古代建築中的力學原理和基本結構構件（按時序列出） 1. 塞加拉的「階梯金字塔」（公元前 2600年） 2. 邁錫尼的獅子門（公元前 1200年） 3. 塞哥維亞的水道橋（公元50年） 4. 羅馬競技場（公元 80 年） 5. 羅馬萬神殿（公元 126 年） 6. 羅馬式建築（公元 500 -1100年） 7. 哥德式建築（公元 1100 -1400年） 8. 文藝復興建築（公元 1300 -1600年）

第一課
建築物力學——歷史回顧

「熱情可使沒有生命的石頭變得有動感」
—— 柯比意

1.1 歷史建築的力學概念

艾薩克・牛頓（1643-1727）在1687年發表對力、運動 、慣性和萬有引力的理論。 自此， 牛頓的運動定律廣泛應用於物理科學中。 然而，牛頓定律出現之前，建築師，工程師和建築工人早就按當時已有的材料和方法，想出不同的創新結構方案，解決各樣建築結構問題。

當物體處於平衡狀態，所有淨力的總和等於零。這概念適用於建築物以及較小的物件上。 一個穩定的建築結構承受三種負荷：活負荷、 靜負荷和環境負荷。透過發展不同的結構系統，建築結構能以最有效的方法承受各種負荷。有些結構系統還能付合美感的要求。

[討論]

1 你能概述艾薩克・牛頓所提出的三條運動定律嗎？

第一定律：

第二定律：

第三定律：

1.2 歷史建築的結構系統

1.2.1 塞加拉的「階梯金字塔」公元前 2600年）

塞加拉的「階梯金字塔」（金字形神塔） 為埃及第三王朝法老左塞爾的陵墓。在人類歷史上第一次用石塊建造了巨大的墳墓。塔高 62 米，底部為109米 x 125米。 古時墓室一般是用泥磚砌成的，這次是首次以石塊代泥磚用作墓葬建築的結構。墓室外部呈斜坡面和平頂，這形體通常稱為 mastabas，是一種早期新形體的方形墓葬建築。金字塔是非常有效的收斂三角形結構。 聯合國教科文組織把 「階梯金字塔」 列為世界文化遺產，其中包括埃及最著名的金字塔。

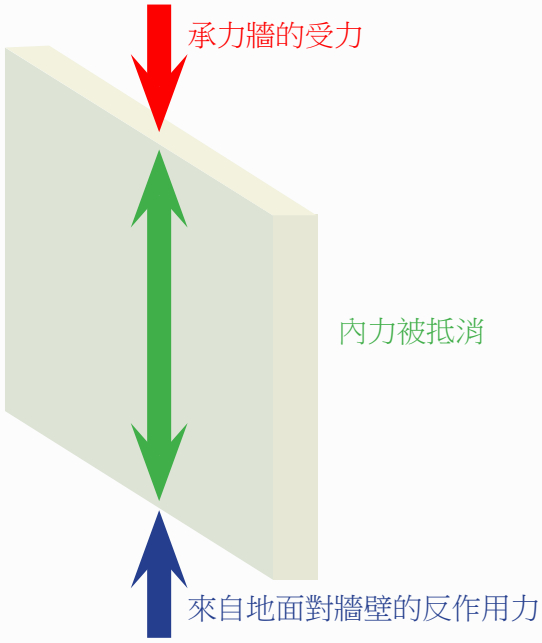
承力牆

金字塔的牆壁是承力牆。石塊疊在一起成為金字塔的結構和用砂漿作「膠水」，使建築結構更加堅固。

構建良好的承力牆的耐壓性能非常好，可是石頭結構抗拉力卻相對弱。



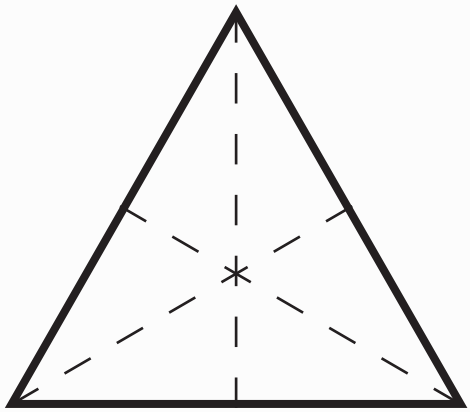
▲ 塞加拉的「階梯金字塔」
© Tentoila — 維基百科用戶



▲ 承力牆的力圖

[討論]

1 傾斜建築表面是為了減少建築物的負荷。下面的圖表說明力如何在金字塔的斜面上分解為垂直和橫向分力，及傳至地面。這個幾何形狀有甚麼優點和缺點？



1.2.2 邁錫尼的獅子門（公元前 1200年）

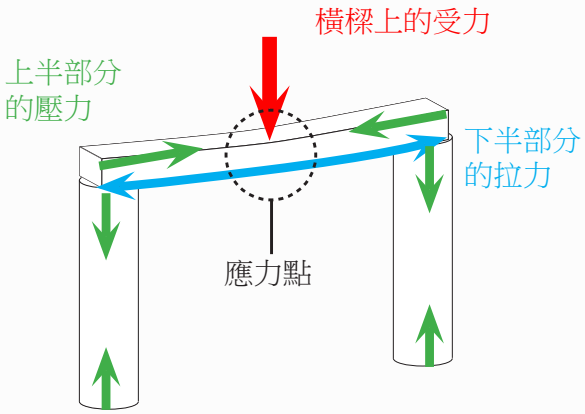
獅子門是在邁錫尼古希臘城堡的主要入口。這是簡單的承力牆例子。這牆可容納3.10米x2.95米大的開口。入口的兩側立了兩座單石雕刻成的巨大柱子，封端為同樣巨大的4.5 米x2.0 米x0.8 米門楣。（Bong, 2008）

門楣（樑柱結構）
門楣 — 門口頂上橫向構件 — 橫跨兩個垂直支架（直柱）。古代的門楣，通常用石或木製成。

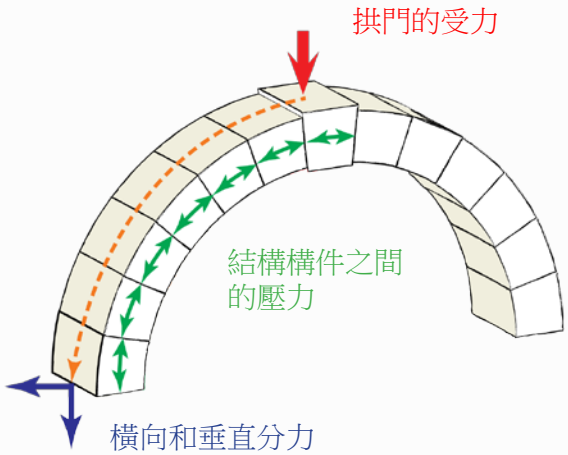
拱門
如樑柱結構一樣，拱門橫跨一個開口／通道口，並要承托重量。然而，拱門構件內部所有的力均拆分成壓應力；壓應力能穩定拱門結構，維持結構的平衡狀態。



▲ 邁錫尼的獅子門
© David Monniaux — 維基百科用戶



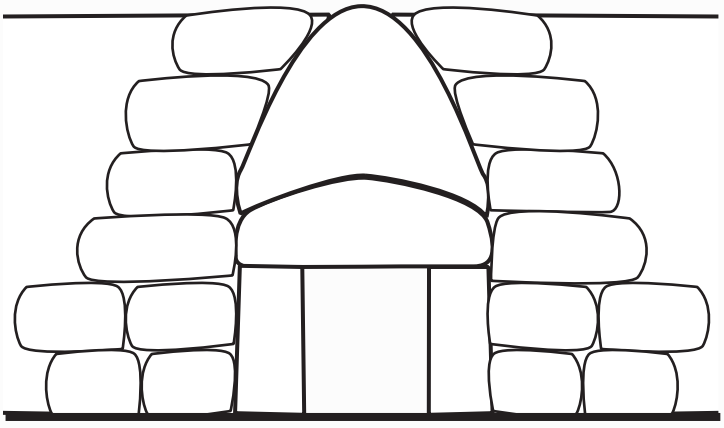
▲ 樑柱結構的內力圖



▲ 在拱門的內力和荷載路徑圖

[討論]

1 你能區分這城門入口哪部分是樑柱結構？哪部分是拱門結構？
2 你認為為什麼在門楣上的中間位置會是較厚的呢？



1.2.3 塞哥維亞的水道橋（公元50年）

在塞哥維亞的古老羅馬水道橋不斷把潔淨的水運到城中。水僅靠重力從18公里外的地方流到城中；水道橋以平均坡度1%建成，水只是沿山坡流下來。這巧妙的民間工程解決了當時整個羅馬帝國面對的基礎建設問題。 這道有名的水道橋歷史悠久，位於世界上最美麗的城市之一，是歐洲境內保存得最好的水道橋。

為了能夠到達城市當中多岩石的垛子，他們建造了一個巨大的高達813米的磚石建築，分成四段成直線的部分，由128支柱承托的兩個疊加的拱形遊廊。在山谷的最低點，水道處於地面28.5米以上的高度。（資料來源：聯合國教科文組織網頁）

多行重複的拱門
在塞哥維亞的水道橋建有兩層拱門。每個拱門的基台外向力跟旁邊的拱門相互抵銷，形成一個非常穩定的結構。

《建築十書》
（公元前100年）

維特魯威是羅馬建築師。他的《建築十書》訂定了三項重要標準：「firmitas, utilitas, venustas 」，則譯為「 持久、有用、美觀 」或作「 結構 、 功能 、 美感」。 他還建議所有的建築比例應該要依照人體比例設計。



▲ 塞哥維亞的水道橋
© Agamemnus — 維基百科用戶

[討論]

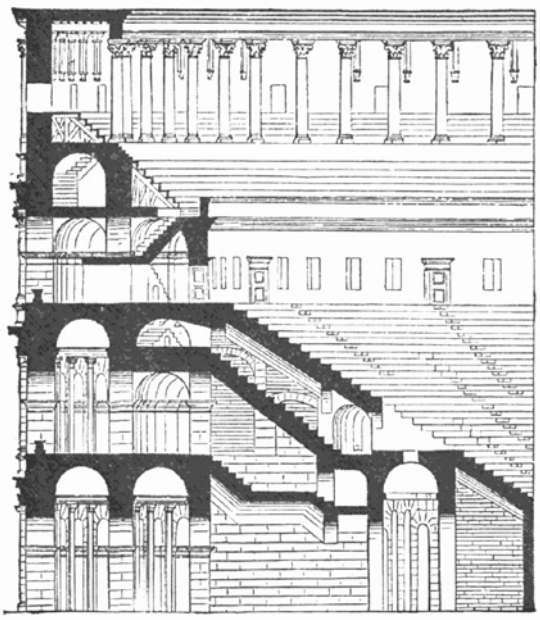
1 重複拱門結構上有甚麼的好處？

1.2.4 羅馬競技場（公元 80 年）

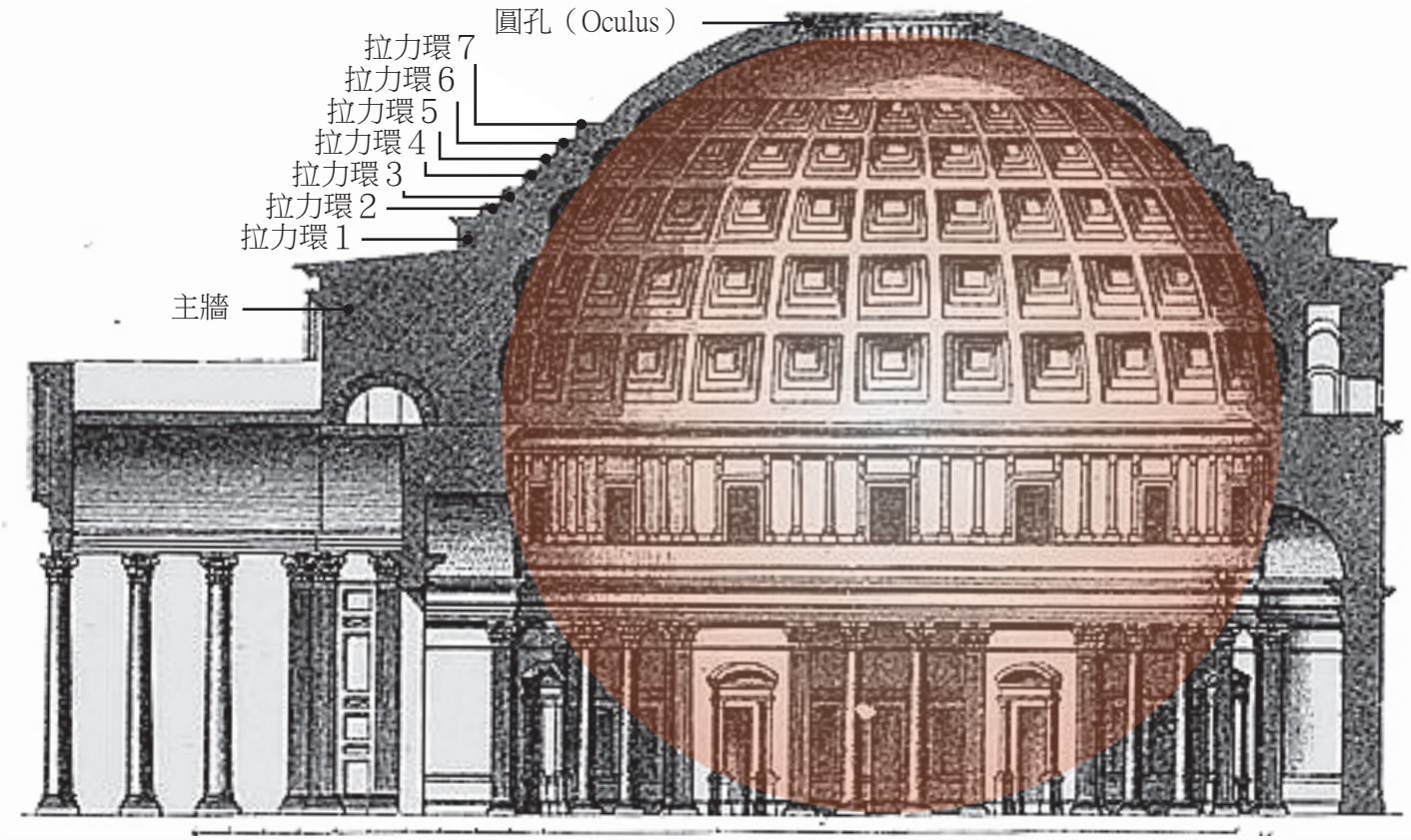
羅馬競技場是古羅馬人有史以來所建的最大的圓形劇場。競技場是公共娛樂活動場地，可容納數萬觀眾。競技場的建築結構採用拱頂和拱門，形成多層次的橢圓空間。競技場的長軸為189米，基地面積為24000平方米，中央為表演場地，外面圍著層層看臺。外牆是48米高的實牆，估計需要超過10萬立方米的石灰華石塊砌成。這結構沒有用砂漿，而是用了300噸的鐵鉗來加固拱門之間的聯繫。建築物原本的周長是545米。

拱頂
拱頂可視為延長的拱門。（數個拱門繫在一起或被拉成長形） 它的結構特徵與拱門相同，是非常有效的建築結構，因為這結構同時也成為了建築的遮蓋面。





▲ 羅馬競技場的剖面圖。拱頂形成建築物的走廊。（資料來源: 《Lexikon der gesamten Technik》, 1904 ）



▲ 萬神殿的剖面圖。殿內可放進直徑43.3米的球體。（資料來源:《Meyers Konversationslexikon》, 1885)

1.2.5 羅馬萬神殿（公元 126 年）

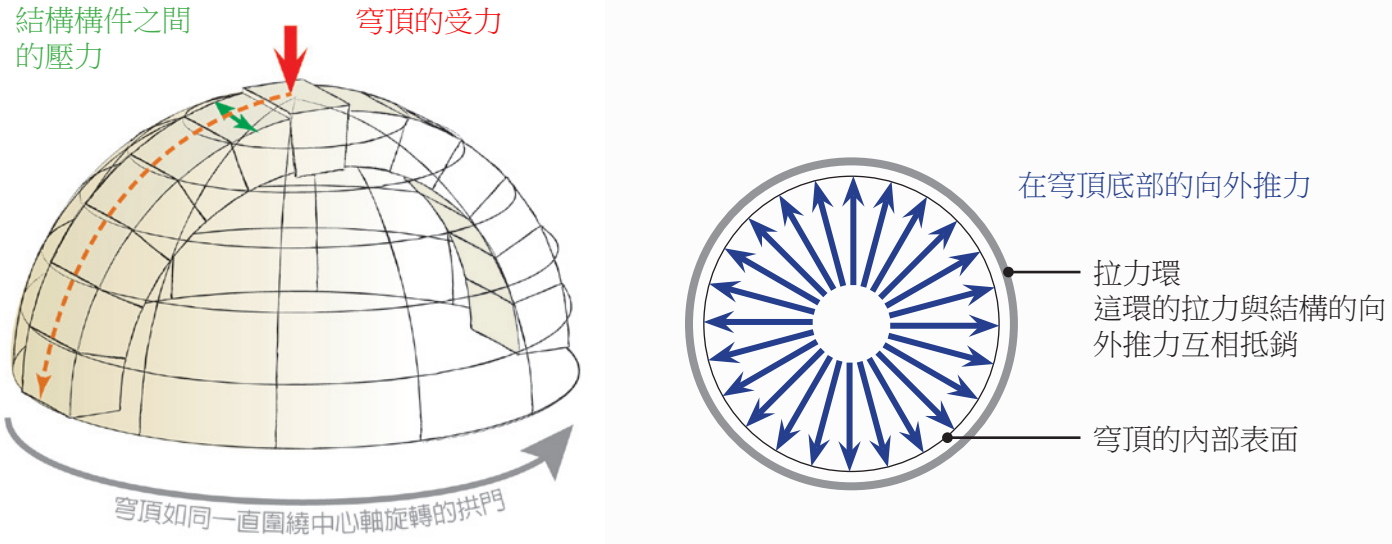
萬神殿，又譯萬神廟是世界上最大的無筋混凝土穹頂。古代混凝土是由火山灰砂漿，再混入凝灰岩等多種骨料製成的。結構中有七個拉力環，以承受在不同的層次的向外推力，以及防止下部支柱倒塌。穹頂的厚度也逐漸削薄，從穹頂根部的 6.4 米一直減少到頂部的1.2 米。這設計不但減少結構的總重量，也不會影響建築物的穩定性。

穹頂

穹頂是一個半球形的屋頂結構。在結構上，它可以分析為一個拱門圍繞中軸旋轉而成的圓頂。如同拱門，穹頂能增加室內空間而無需室內的支撐。拉力環可用於承受穹頂的向外推力。



▲ Oculus（圓孔）為萬神殿的唯一採光點 © 許思堂



▲ 穹頂的力圖

1.2.6 羅馬式建築 （公元 500 -1100年）

羅馬式建築的結構特點

半圓拱門

羅馬式建築中的拱門通常為半圓形。這些半圓形拱門可用作門窗，或作拱頂和拱廊。它們能構成高大和寬敞的空間，通常教堂內的中殿和側廊也以拱門覆蓋。

拱廊

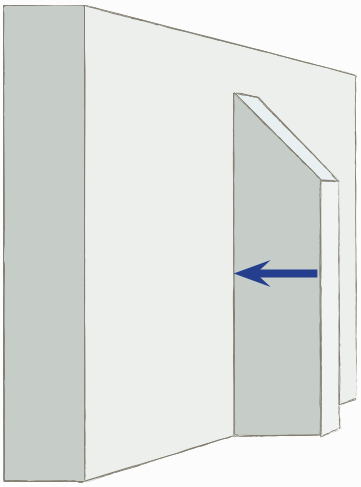
拱廊是一排由墩或柱支撐的拱門 ，形成一條有蓋行人道。在羅馬式建築，粗大的墩或柱被用來承托拱門。小規模的拱廊通常用於裝飾，而規模較大的則有結構性的功能。

筒形拱頂

在羅馬式教堂中，筒形拱頂是一種簡單的弧形拱頂，常常建在中殿兩側。它們抵銷建築物中的側向力以支撐中央空間的結構，並為會眾提供能上蓋的集會空間。

牆壁和扶壁

羅馬式建築的牆比較厚，因為他們都是承力牆。扶壁往往添加於牆的外部，針對側向力作牆身的支撐。



▲ 承力牆附加扶壁作支撐



▲ 比薩大教堂以比薩拱門作室內和室外的主要建築元素。



▲ 在德國施派爾大教堂的圓形的穹頂。於1030年開始建築此教堂。整座教堂長134米，中殿高33米和寬14米。 © Berthold Werner

1.2.7 哥德式建築 （公元 1100 -1400年）

哥德式建築的結構特點

哥德式建築從羅曼式建築的基本結構構件發展出來，改善了室內的空間質素和自然採光。

尖肋拱頂

從羅曼式建築的圓筒拱頂普遍改為尖肋拱頂 。

肋架拱頂

兩個拱頂相交成直角，形成肋架拱頂。在相交線中加上肋架，能加固結構的穩定性外，還能建立更輕型的天花。

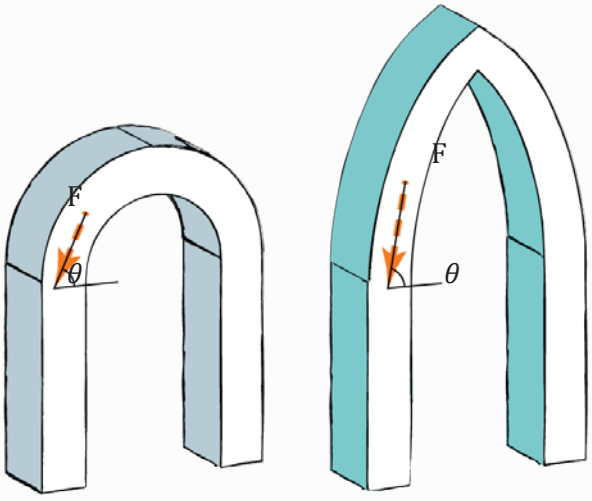




▲ 約克大教堂裝飾用的肋架拱頂 。

[討論]

1 尖形拱頂較圓形拱頂有何優點？





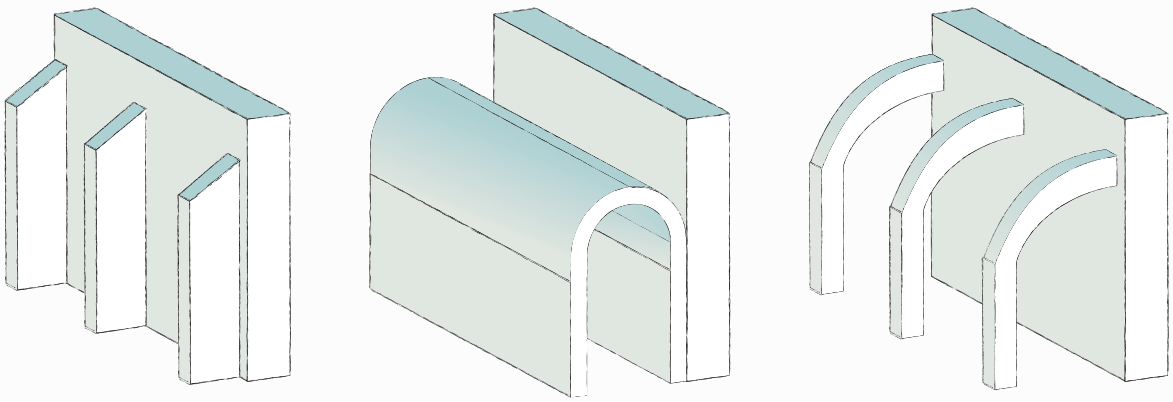
▲ 坎特伯雷大教堂結合了飛扶壁和典型扶壁作為其結構。飛扶壁下面的空間形成中殿兩旁的通道。地面上的扶壁則無需要那麼巨大。

飛扶壁

在承力牆旁的扶壁，體積龐大，製造了無法使用和黑暗的空間。發明飛扶壁是為了把大殿中央結構的側向力轉移到側面的結構。飛扶壁也能提供一道圍繞大堂的遊客通過，而且自然光亦可以滲入室內空間。

[討論]

1 討論為何飛扶壁比早期使用的典型扶壁和筒形拱頂優勝。



▲ 針對側向力的不同解決方案：典型扶壁，筒形拱頂和飛扶壁 （左至右）

1.2.8 文藝復興建築（公元 1300 -1600年）

文藝復興建築的特點

- 對稱
- 比例
- 幾何
- 組合的規律



▶ 位於佛羅倫斯的斯特羅齊宮中庭院採用簡單的幾何形狀設計，如：半圓、圓形和矩形。這種設計手法 被認為是呼應神的完美特性。

意大利聖彼得大教堂（公元1506年）

龐大的聖彼得大教堂是教皇和天主教會的所在地，由文藝復興時期建築師米高安哲羅設計。及後增加了一個柱廊和廣場，是由著名巴洛克風格的建築師和雕塑家貝尼尼所設計的。



▲ 聖彼得大教堂和其廣場

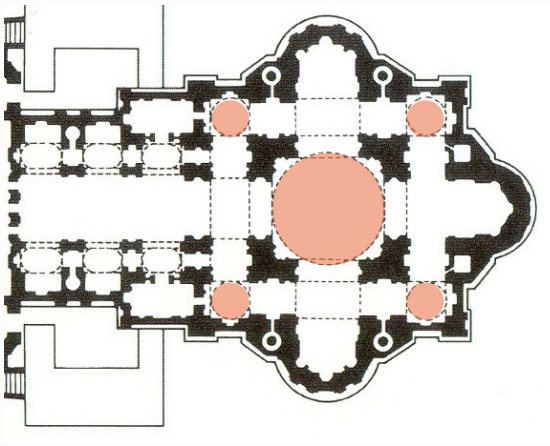


▲ 在穹頂的底部加上的圓柱形壁，稱之為鼓座。它的作用是以拉力鞏固穹頂的底部。 © 許思堂

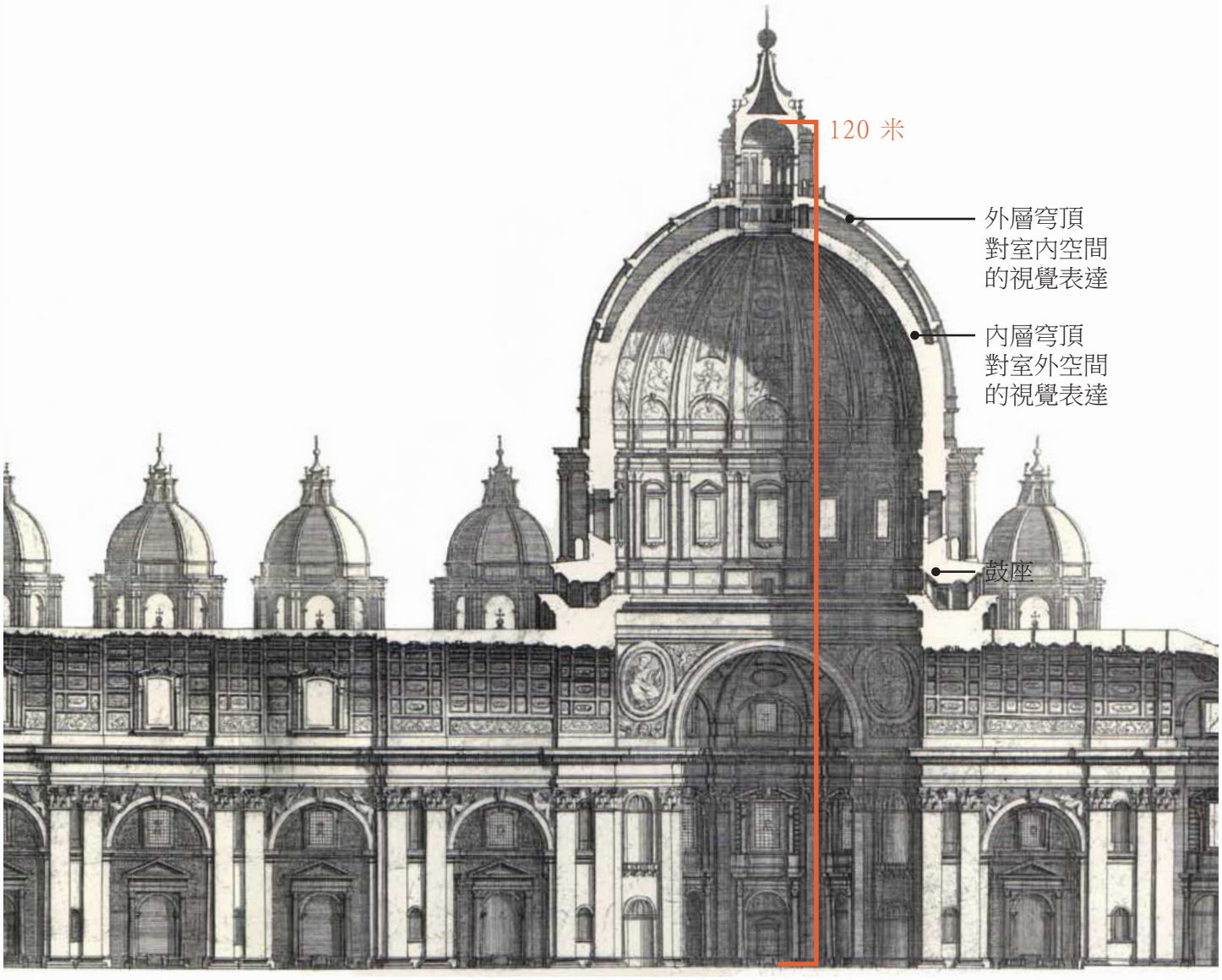
[討論]

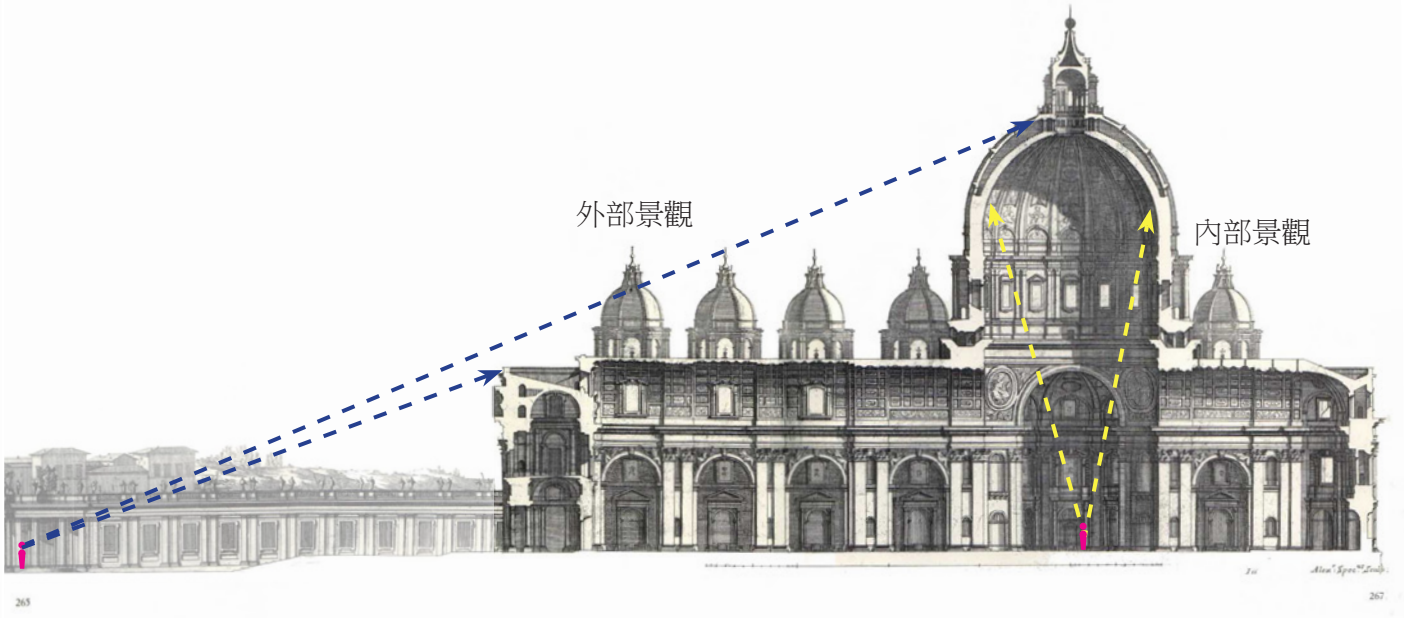
1 教堂構建盡可能高，有著從而達到天堂的用意。為什麼聖彼得大教堂的穹頂建於兩層？

▼ 米高安哲羅設計的聖彼得大教堂有五個穹頂，以下平面圖顯示它的對稱設計。

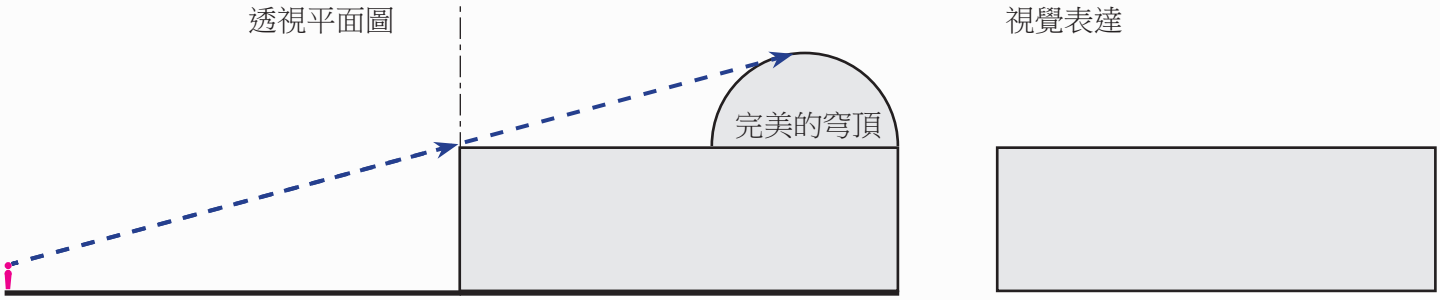


▼ 聖彼得大教堂的剖面圖

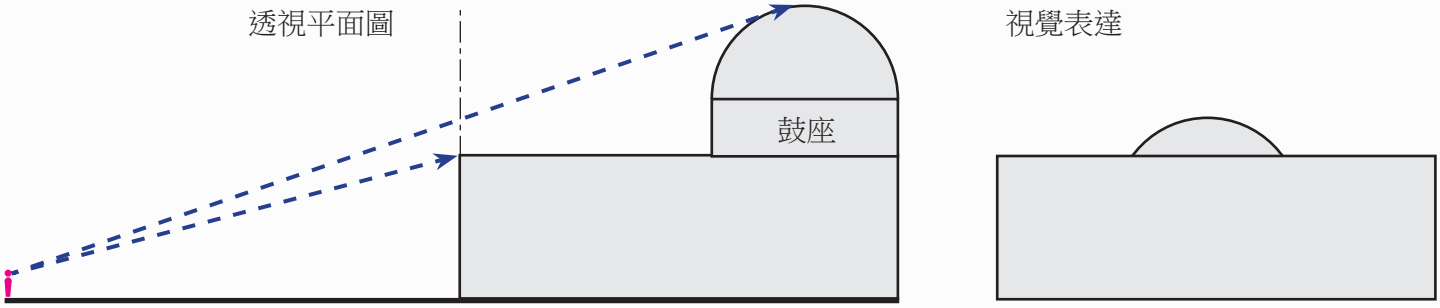




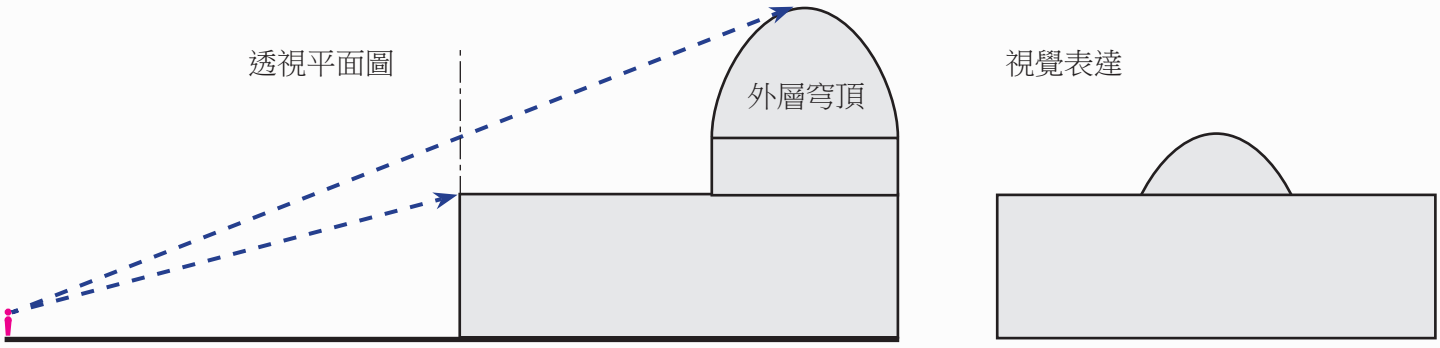
1　當一個完美的穹頂被建立時...



2　當鼓座被加建時...



3　當較高的外層穹頂被加建時...



▲　不同穹頂結構的方案：從遠處觀察（左）和視覺表達（右）

[討論]

1 古老而歷史悠久的建築中，常見的建築材料是什麼？其結構的優點和局限是什麼？

2 這些建築材料與拱門的結構限制是如何配合的？有什麼其他結構系統源自拱門結構？

3 拱門結構有什麼不足的地方？建築師、工程師和建築工人如何解決這些結構問題？

4 現代建築如何處理結構上的挑戰？



總結

1. 在牛頓的力和運動定律發表以前，建築師、工程師和建築工人早就根據他們的智慧、經驗及當時的材料和技術，尋找不同的結構方案，以解決各樣的建築結構問題。
2. 結構系統的形體不斷改善，提升了結構的穩定性、空間的質素和建築的美感。
3. 在歷史建築裏常用的結構系統，包括：承力牆、樑柱结構 、拱門、拱頂、扶壁和穹頂。

關鍵字

承力牆
樑柱结構
拱門
拱頂
扶壁
穹頂
橋礅

延伸閱讀

1. 《建築施工圖釋》,Ching,FrancisD.K.,第四版,NewJersey：JohnWiley&SonsInc,2008.
2. Bong,WunChok.TheGods’ Machines：From Stonehenge to Crop Circles. Berkeley,California：FrogBoks,2008.
3. Semper,G.StyleintheTechnicalandTectonicArts;or,PracticalAesthetics.LosAngelos ： Getty Research Institute,2004

主辦機構

香港建築師學會
The Hong Kong Institute of Architects

贊助機構

CREATEHK

研究團隊

THE UNIVERSITY OF HONG KONG 香港大學
faculty of architecture 建築學院
Community Project Workshop 社區項目工作坊