

# 義大利比薩斜塔的穩定

作者：John Burland

英國倫敦帝國學院

## 1. 簡介

義大利比薩斜塔並非是迪士尼樂園古怪的觀光景點，它是建築史上的瑰寶，是中世紀歐洲最重要的遺跡之一，即使它不傾斜。站立在神奇廣場，它是由大教堂（Duomo）、鐘塔（斜塔）、洗禮堂和墓地（墓場）四個主要的白色閃光的中世紀建築物構成的綜合建築的一部分。就廣場的其他建築，鐘塔象徵著富裕的比薩市市民的自豪和光榮，而它本身是優美的、獨特的、迷惑的。1990年，因害怕其安全性，塔對公眾關閉。同年，由義大利總理組建多科學委員會來實施塔的穩定措施。這樣一個對比薩、對義大利、對世界遺產的手術，其重要性是毫無疑問的。

## 2. 建築說明

塔八層，高 53.3m，重 14,500 公噸。塔的磚石地基的直徑為 19.6m，最大深度 5.5m。塔基向南傾斜，與地面成  $5.5^\circ$ ，第七層在南面突出 4.5m。塔是用柱廊圍成一個空心的圓柱體的形式建造的，圓柱體的內表面和外表面用密縫的白色大理石複面，但複面嵌縫的材料是由灰漿和石頭構成，發現其中有大量的空隙。在塔的牆內盤繞著螺旋形的樓梯。第二層南邊磚石結構的穩定性是問題的關鍵。

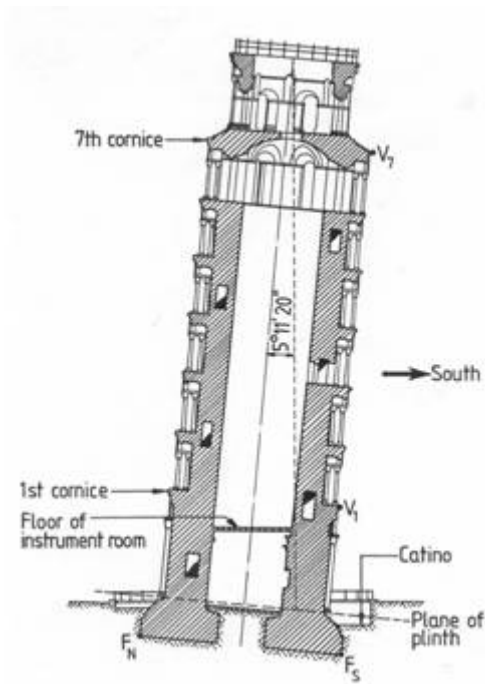


圖 1：透過塔的垂直剖面

鋪底部分由三個獨立層構成。A 層厚約 10m，由 10,000 年前的淺水區（環礁湖、河流和港灣）沉積的各種軟質粉土沉澱物構成。B 層由 30,000 年前沉積的非常軟的靈敏海相粘土組成，厚度達 40m。此斷層橫向非常均勻。C 層是密實甚深的砂石。A 層的地下水位深在 1m 和 2m 之間。塔四周甚至是地下的許多鑽孔顯示由於上面的塔的重量，B 層的表面是盆形的。從此現象可推斷出塔的平均沉降為 2.5m~3.0m，鋪底的土壤是非常可壓縮的。

### 3. 建築歷史

塔的建造始於 1137 年 8 月，約到 1178 年工程停止時，已造了四層，完成了 1/4。停工的原因不知道，但再繼續建造下去，B 層的土壤難以承重，塔可能會倒塌。約在 1272 年，建議繼續建造。那時，粘土由於在塔的重壓下強固（即使那時還不知道這）。約在 1278 年，再次停止建造，建築已造了七層。毫無疑問，如果在此階段將塔完工，塔會倒塌。約在 1360 年，鋪底的粘土再次強固時，開始鐘房的建造。約到 1370 年完成 — 距開始建造約 200 年。

另一個重要的歷史性細節是：在 1838 年，建築師 Alessandro della Gherardesca 在塔基周圍挖了一個走道（Catino）來揭示圓柱柱礎和地基臺階是否與原先設想的相同。結果

是由於挖掘的地方低於地下水位，在南邊有水流入，很顯然，在當時塔的傾斜已超過  $1/4^\circ$ 。1995 年發現 GherardescA 在走道的底下放了一個 0.7m 厚的混凝土環。

#### 4. 傾斜歷史

塔的中心線不是直的 — 它向北彎曲。爲了糾正傾斜，曾在每一層用錐形的磚石塊來改變塔中心線的彎曲。仔細分析磚石建築的相對傾斜揭示了塔的傾斜歷史。在第一階段結束時，塔實際上已向北傾斜約  $1/4^\circ$ ，然後隨著第四層以上的樓層的建造，開始向南移並慢慢增加，以致到 1278 年，第七層 造好後，向南傾斜了約  $0.6^\circ$ 。1360 年開始建造鍾房時，已增加到了  $1.6^\circ$ 。1817 年，二位英國建築師用一鉛垂線測量傾斜，那時已經是  $5^\circ$  了。這 樣，鍾房的建造對傾斜引起了顯著的增加。先進的電腦分析顯示在柔軟的地毯上的模型磚上直接類比建造塔，當到達第七層和增加鍾房時，傾斜快速增加。它只能 造到一定的臨界高度，不能再高，而且要注意的一點是 — 知道傾斜不穩定的現象。它正好在它的臨界高度且很容易倒塌。走道的開挖再一次使得塔非常容易倒塌。

從 1911 年開始的精確的測量結果顯示在 20 世紀期間，塔的傾斜每年都在不可抗拒的增加。從 1930 年中期，傾斜率成倍增長。1990 年，傾斜率相當於每年頂部水平移動約 1.5mm，加上一些對塔的干擾也導致了傾斜的明顯增加。例如，1934 年用灌漿方法來加固地基，結果突然向南移動了約 10mm；1970 年從低處的砂石中抽地下水，結果使移動增加了約 12mm。這些反應確定塔的平衡是多麼的敏感，塔的穩定要用怎樣細緻的方法。

#### 5. 塔的穩定

國際上可接受的珍貴歷史遺跡保護慣例要求要保留遺跡的本質特徵，以及其歷史、工藝和不可思議性。這樣，任何對塔的危害性的介入都要保持在絕對的小，永久性穩定計劃中有支柱或可見的支撐物是不可接受的。任何暫時的穩定措施應是非侵入性的和可逆的。

1993 年下半年，通過澆築在塔基周圍可移動的後應力式混凝土環將 600t 的鉛重放在地基的北邊使地基暫時穩定。這使傾斜減小了 1 弧分，更重要的是減小了約 10% 的傾覆力矩。

1995 年 9 月，在企圖用臨時的土錨來替換難看的鉛重結果不成功時，爲了控制塔的移動，負載增加到了 900t。1992 年著手解決磚石問題，在第一個簷口和到第二層の間隔，在塔的周圍綁了一些輕微後應力的鋼鏈。

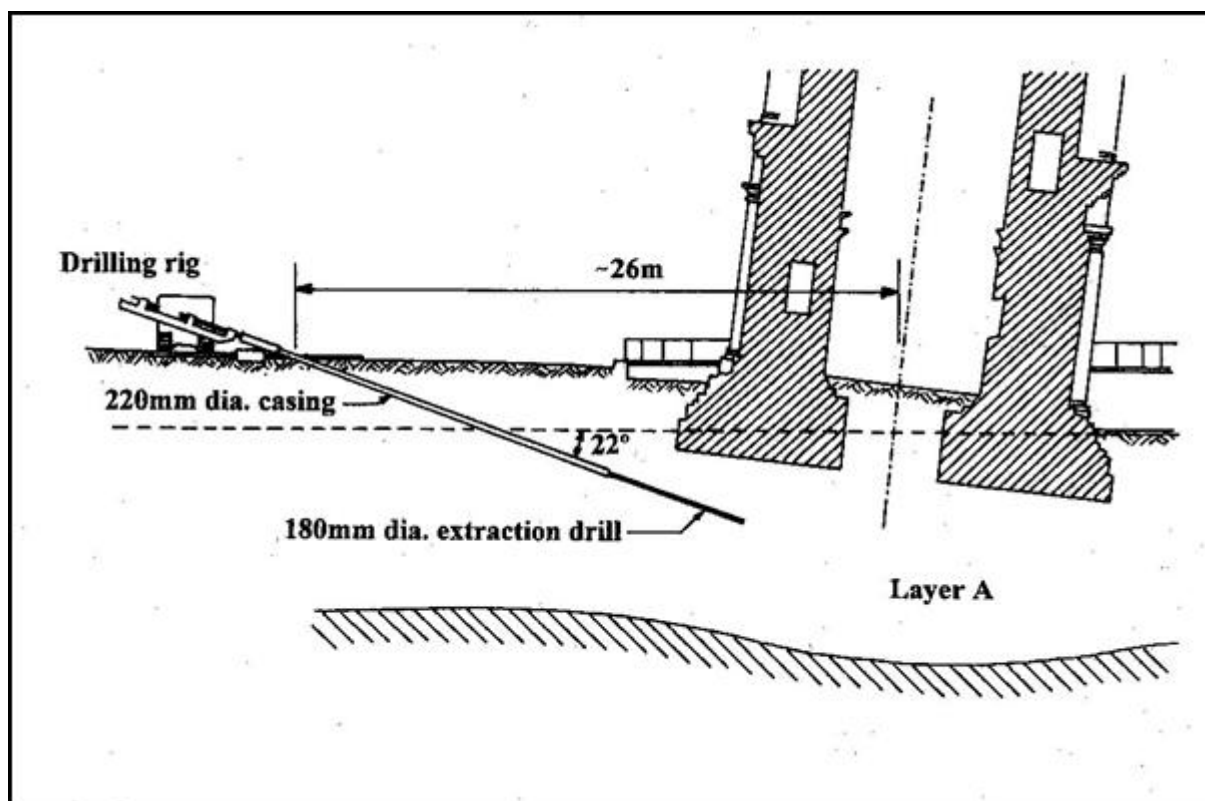


圖 2：塔下和塔附近抽土管的位置

找到了一個不顯眼只可稍微減小約  $0.5^\circ$  傾斜的永久解決方法，但要減小磚石建築的應力和地基的穩固。假設塔的地基處在不穩定點上，而且南邊的土地稍微地動一下就可能引起倒塌，委員會進行了激烈的討論，可還是找不到一個直截了當減小傾斜的方法。這些用井點降水、用電滲透法強固踏北土層和用地錨載入石板壓在塔北周圍土層等等，沒有一個是滿意的。

## 6. 抽土研究

一種已知的抽土方法逐漸形成，這要在地基的北邊的附近區域和地下安裝一些抽土管。在著名的減小墨西哥城大教堂的破壞性差異沉降中曾成功地使用過此方法。但是用在一個處於倒塌點的塔上則完全又是另一件事情。我們如何能確保抽取高側地下土而不會對塔

造成不穩定？數年前，此方法用物理模型進行了初步研究，然後通過數位模型，最後進行大規模的試驗。來自模型研究和資料分析的重要發現是從地基北邊  $1/2$  半徑處有一臨界線（即，遠離傾斜邊）。假設在此線的北邊進行地基地下抽土，顯示塔的反应是肯定的。但是，如果在此線的南邊抽土，它會向南移且變得不穩定，產生的不穩定性首先表現為地基南邊沉降加快，接著向南邊旋轉。此結果是在廣場北邊洗禮堂直徑為 7m 的偏心負載的試驗性地基上進行大規模的抽土試驗時得到的。最初是強調測量傾斜的變化，而不是絕對沉降。從臨界線南邊抽土會導致過分的鑽探，使南邊跟著試驗性地基向南旋轉，沉降加快。這花了 6 周時間來重新得到試驗性地基的穩定，得到了一個有益的教訓。

大規模試驗的主要目的是提高抽土的鑽探技術。開發的鑽頭是一個直徑為 180mm 的反轉的套筒，內裝空莖的連續螺旋推進器（或者是阿基米德螺旋槳）。當鑽杆退出形成一個洞穴，空莖處的測量探針留在適當的位置測量洞的密合性。試驗顯示在 A 層粉土中形成的洞柔和地密合，可在同一位置反復抽取，試驗地基可順利地旋轉  $0.25^\circ$ ，且保持方向控制，即使土壤條件不是很均勻。非常重要的一是開發了一個有效決策和執行決策的交流系統。

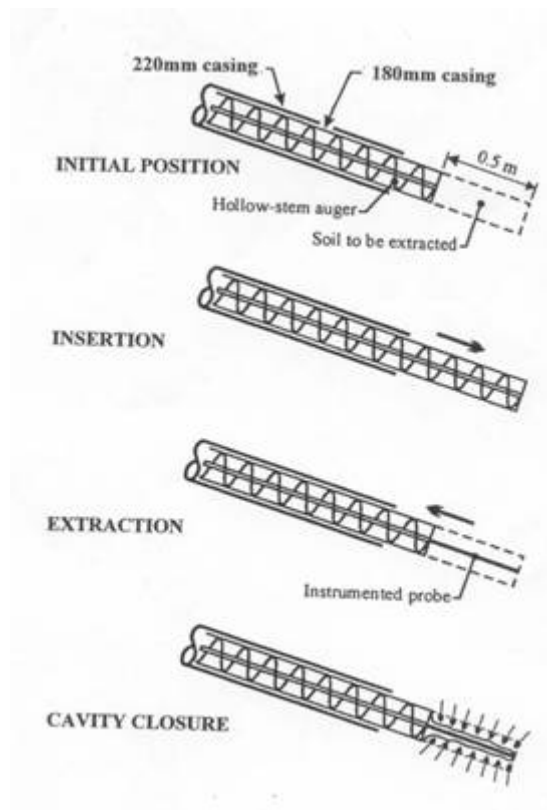


圖 3：抽土鑽探操作的順序

## 7. 初步的抽土

1996 年 8 月，委員會同意從塔下進行限制性抽土，並觀察其反應。由於官僚主義和行政管理的延誤，直到 1998 年年底才真正開始準備工作。

1998 年 12 月，在塔的第三層連接了一些暫時性的安全防護鋼索，向塔北邊延伸約 100m，穿過兩個巨大的 A 型架頂部的滑輪，用鉛重輕輕拉緊。萬一塔反向移動時，這些安全防護鋼索用由鉛垂拉緊來保持塔的穩定。但從沒打算真正用它來向北移動塔。

由 200mm 直徑襯套的 12 個鑽孔在有限的 6m 的寬度上進行初步抽土。中心線向西邊偏移 1m，這是為了引導西向分量的移動。引鑽器和旋轉套逐個在洞內工作，使操作很慢且很笨重，每天最多抽取 2 次。原先設定的最少減少傾斜 20 弧秒足夠能證明此系統是的確有效的。最初每天只能抽取 20 升土。

在現場和負責抽土的工程師之間建立通訊控制系統，包括從現場來的每天 2 次有關塔傾斜和沉降的即時資訊的傳真。總結了觀察到的反應，並對此作了評語，並提出了下次抽土指示的傳真每天由負責工程師簽發。



圖 4：防護鋼索

如果塔發生了不好的反應，就採用設置的綠色、琥珀色和紅色的觸發設定值，這些同時也包含傾斜和沉降變化率和大小。爲了避免超過嚴格的要求和錯誤的警報，對塔移動約 6 年的記錄作了仔細的分析後設置了觸發設定值。

1999 年 2 月 9 日，在高度緊張的氣氛下開始了第一次抽土。在開始的幾天，鑽孔朝地基的邊緣前進時，塔沒有顯示出明顯的反應，然後慢慢地向南旋轉。2 月 23 日，已在南邊旋轉了約 7 弧秒，突然在一天內開始朝南旋轉 2 弧秒。仔細檢查顯示這與南邊的沉降無關。結果來自阿爾卑斯山脈的北風和大雪使溫度驟降，從以前的記錄顯示這通常會引起向南有小小的移動。大風過後，溫度上升，塔又開始向北移動。這個小插曲說明在抽土期間要一直保持恒定的戒備狀態。

圖 5 所示的是初步抽土的結果。當到 1999 年 6 月初，向北旋轉達到 80 弧秒，抽土停止。然後繼續以遞減的比率向北旋轉，直到 1999 年 7 時，所有移動全部停止，三個嵌垂移除。從圖中可以看到兩個特性，第一，向西分量轉動按計劃發生；第二，在抽土期間，地基的南部邊緣上升。最滿意的是證實了抽土背離臨界線，在南邊發生了卸載。

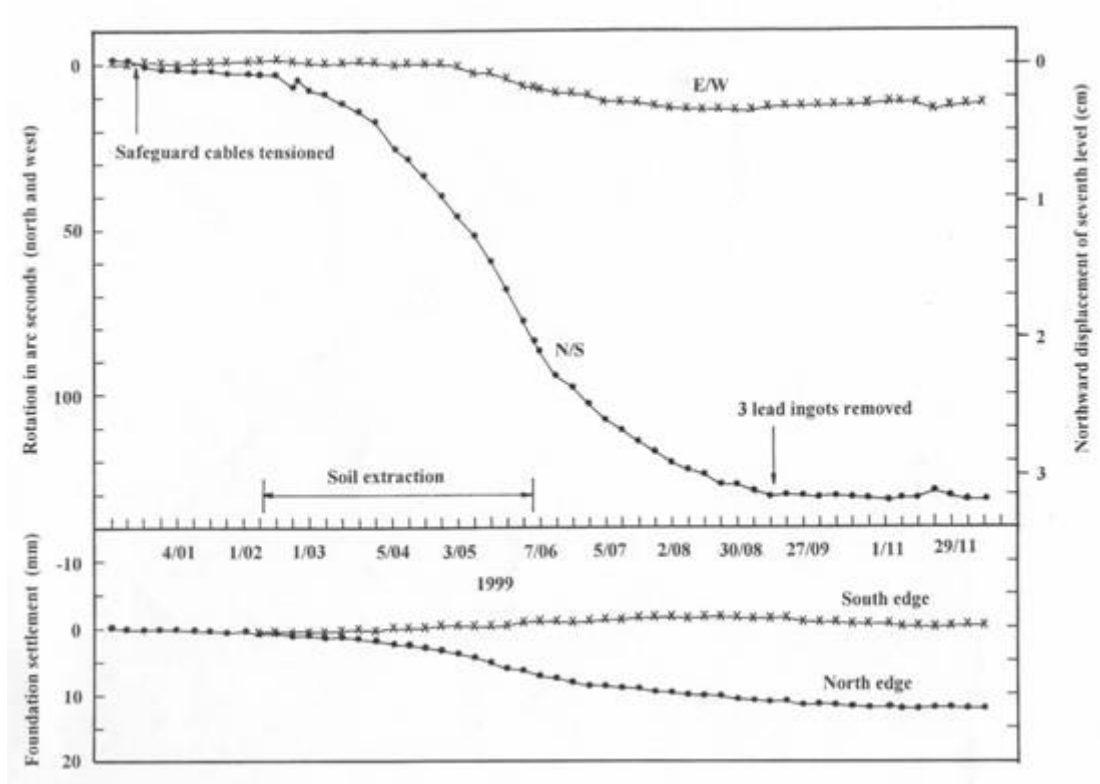


圖 5：初步抽土結果



## 8. 抽全部的土

初步抽土的成功使委員會相信在地基的整個寬度上進行全部抽土是安全的。相應地，在 1999 年 12 月和 2000 年 1 月之間，安裝了間隔為 0.5m 的 41 個抽土孔，每個孔裝有專用的引鑽器和套筒。2000 年 2 月 21 日開始全面抽土，初步抽土和全面抽土的結果如圖 6 所示。可以看出得到了一個比初步抽土高很多的向北的轉動率，如每天抽土約 120 升，造成每天平均約 6 弧秒轉動。塔有一向東移動的趨勢，為了控制這個趨勢就必須從西邊抽取比東邊多 20% 的土。不管這個趨勢的話，可看到塔會以一個相當直的路線向北。同時也讓人滿意的是地基的南邊發生了明顯的上升。

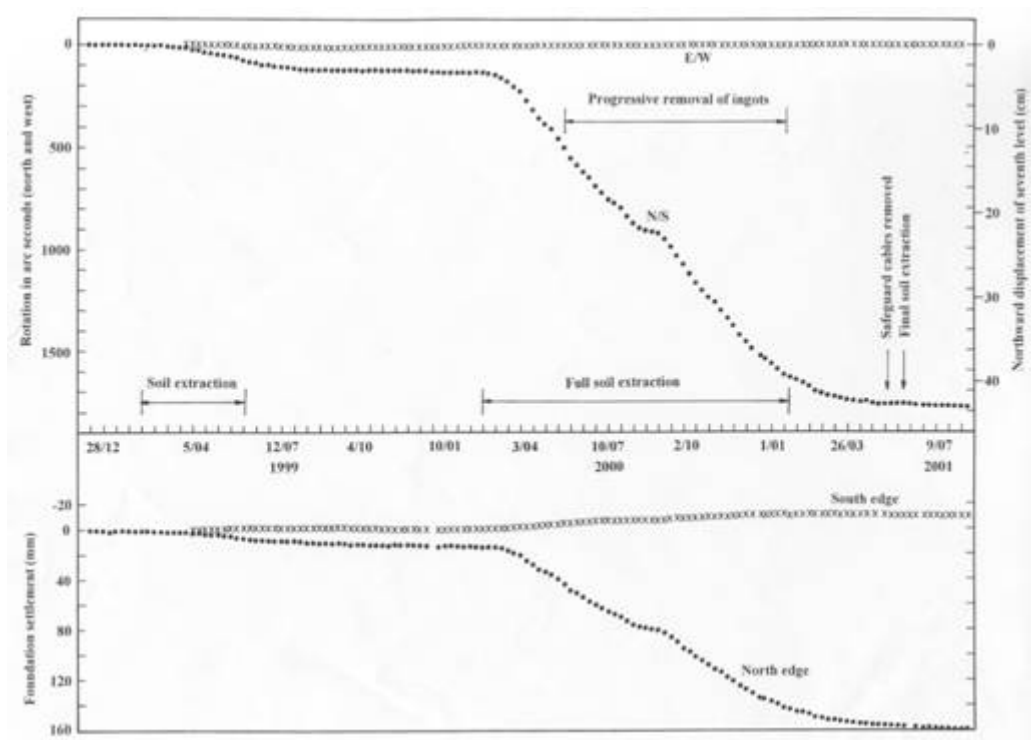


圖 6：抽取全部土的結果

到 2000 年 5 月底，開始逐漸地移走鉛錠。開始是每週 2 個（約 18t），2000 年 9 月增加到每週 3 個，2000 年 10 月是每週 4 個。取走鉛錠，傾覆顯著增加，但抽土繼續有效地進行。



**圖 7：鑽具和 41 個抽土管**

2001 年 1 月 16 日，最後一個從後應力混凝土環中取出，接下去只是進行限定土的抽取。在 2 月中旬，混凝土塊本身也移去。3 月初，開始逐漸移去引鑽器和套筒。孔用膨潤土泥漿填滿。最後，在 5 月中旬，從塔上拆除防護鋼索，產生了幾弧秒的向南移動。反制這個傾向，進行最後的抽土，抽取另外的少量土。2001 年 6 月 6 日除去引鑽器——這天塔解除了戒備看護。



**圖 8：2001 年 1 月 16 日，最後一個鉛錠取走**

另外，爲了塔傾斜減小  $0.5^\circ$ ，在磚石建築的最高壓應力部位進行了有限的加固工作，包括在大石塊的空隙處灌漿，使用不銹鋼加強筋加固覆蓋磚面外覆層有向外彎曲危險的地方，第一個簷口和第二層樓周圍環繞的鋼腱用較少的嵌入在樹膠的預應力鋼絲替換，由 Gherardesca 在 1838 年放置在走道底部的很老的混凝土環用不銹鋼加強件與塔地基牢固地相連，並用環向的後應力加固。這樣，地基的有效區域明顯地增加了。



圖 9：走道鑽孔插入加強鋼棒緊系磚石地基和老的混凝土環

## 9. 回到將來

減小傾斜  $0.5^\circ$  的目標，大致的觀察是看不出來的，但充分地穩定了地基，明顯減小了磚石地基的應力。2001 年 12 月記錄的時候，共減小了 1830 弧秒（包括鉛垂的影響）。這個在傾斜上的減小量相當於第七層向北水平推動了約 442mm。現在塔回到了 1380 年 Gherardesca 挖走道時塔突然向南傾前的狀態。

一個明顯的問題是這塔將來會怎樣？有二種情景，一種是悲觀的情景，塔將會保持一段時間的穩定，接著是以一個較小速率繼續向南轉動。對於這個情景，對地基再次干預之前會保持 300 年。另一個是樂觀的情景，塔將停止繼續轉動，除了由於季節而引起地下水位的變動而產生較小的週期性移動外，沉降差異的影響也會對整個比廣場有影響，在塔上會有反應。

## 10. 結論

已證實比薩塔的穩定對土木工程師是一個巨大的艱難的挑戰。塔建造在薄弱的高可壓縮性的土層上，且傾斜年復一年不可抗拒地增加，快達到一個不穩定的傾斜狀態。對南邊土地有任何的擾動是非常危險的，這就排除了常規的岩土工程的處理，如加固地基和灌漿。而且磚石高度受壓，有倒塌的危險。比薩塔是世界聞名的且是珍貴的，國際上公認的保護珍貴歷史遺跡的慣例要求保留塔原有的特性、歷史、工藝和迷惑性。因此對塔的侵入或可見的干擾要保持在絕對的小。

已證實抽土是一個增加塔穩定性極為柔和的方法，又完全符合建築保護要求。其實施要求先進的電腦模型、大規模的發展試驗、卓越的連續監測的水平和每天的通訊和控制等。