

<제언>

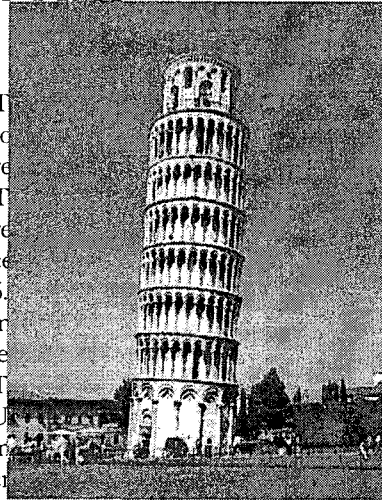
으로도 유명하나, 또한 부등침하의 허용한계를

넘은 대표적인 사례로써도 유명하다.

Leaning Tower of PISA



글 / 李 在 東
(Lee, Jae Dong)
토목시공기술사, 공학박사,
건설기술교육원 교육본부장.
E - m a i l : jidlee11@dreamwiz.com



The tower was opened to the public in 1810. It has been leaning since 1173. In 1997, it was declared a World Heritage Site. The tower is 55.863m high and leans 5.5 degrees. The tower was built by Bonanno Pisano. The tower is made of white marble. The tower is 15.487m wide and 7.368m deep. The tower is 1173-1250 North, 1272-1997 South. The tower has 7 floors. The tower weighs 14,700 tons. The tower is 240cm thick. The tower is 5.2m (1997).
- 공식명칭 : TOWER PENDENT DI PISA
- 용 도 : 종탑
- 최초설계자(건축가) : Bonanno Pisano
- 높 이 : 55.863m(185피트), 8층
- 탑의 외경 : 15.487m
- 탑의 내경 : 7.368m
- 경사 방향 : 1173~1250 북쪽,
1272~1997 남쪽
- 종 개 수 : 7(tuned to musical scale)
- 전체 무게 : 14,700톤
- 탑 벽두께 : 240cm
- 경사 정도 : 5.2m(1997)

1. 머리말

이태리에 있는 피사의 사탑은 2001년 4월, 10년간의 복구공사를 마치고 일반인에게 공개되었다.

그동안 관광객 관람이 중단되고 복구공사 내용이 일체 외부로 노출 되지 않아 많은 사람들의 궁금증을 유발시키기도 했다.

복구결과는 당초 5.5° 기울어졌던 것이 5° 기울어진 것으로 복구되어 19세기 초 수준이 되었다고 한다. 즉, 0.5°이동(43cm) 되었다.

이 공사에 투입된 공사비는 약 25,000만 불이며 공법은 기초지반 추출공법(soil extraction method)을 사용하였으며 향후 300년은 붕괴에 대한 위험은 없다고 한다. 그동안 보수공사에 관하여 국내외에 발표된 기사 내용을 취합 정리하여 소개코자 한다.

2. 피사의 사탑의 제원과 시공기록

대성당의 부속건물인 종탑으로써 갈릴레오가 탑의 꼭대기에서 물체의 자유낙하 실험을 했던 곳

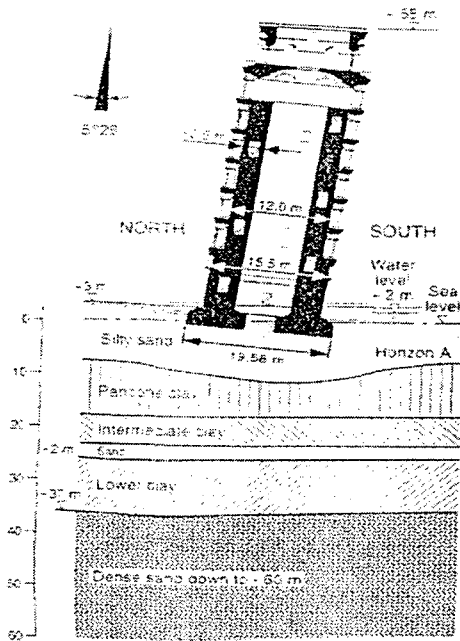
시공일지

- 1173년 : 착공(3층 시공)
- 1178년 : 중단(피렌체 전쟁)
- 1185년 : 중단(피렌체 전쟁)
- 1272년 : 공사재개
- 1278년 : 중단
- 1350년 : 완공(7층, 종탑시공)

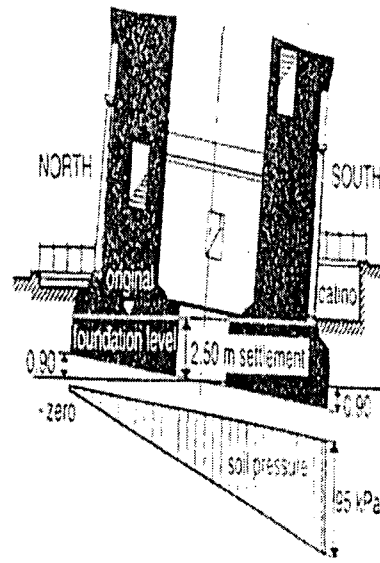
3. 침하 현황

탑의 부등침하의 원인은 14,700톤의 탑의 무게를 견디지 못한 기초지반에 있다고 판단되며 그나마 착공 후 5년 정도 시공 가능 했던 점은 지표부에 있는 실트질 모래층 때문이라고 생각한다. <그림 1> 참조(주상도)

보수 전의 침하상태는 <그림 2>(침하와 토압)와 같다.



<그림 1> 주상도



<그림 2> 침하와 토압

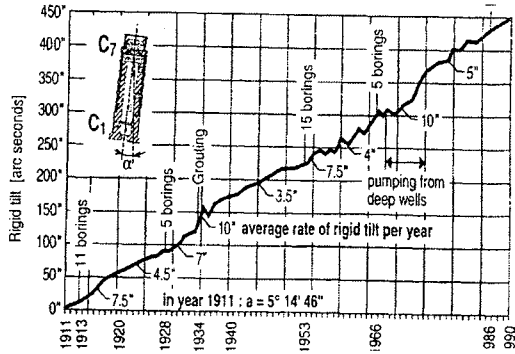
- 북 측 : 1.6m 침하
- 남 측 : 3.4m 침하
- 수평 기울기 : 9.19 %
- 연직 경사도 : 5°26'

4. 복구공사

1350년에 완공된 탑이 계속적으로 기울어지는 것을 막기 위하여 여러 차례에 걸쳐서 복구공사를 하였다.

대표적인 복구공사로써는 1943년에 실시한 Grouting 공법과 1966년에 실시한 Deep well 공법이 있으나 모두 실패로 끝나고 탑은 여전히 기울어져만 갔다.

1911년~1990년까지 탑의 기울어져가는 경사도를 측정한 자료로써 복구공사를 실시한 후, 더 많이 기울어짐을 알 수 있다. <그림 3> 참조



<그림 3> 기울기의 경사도 측정

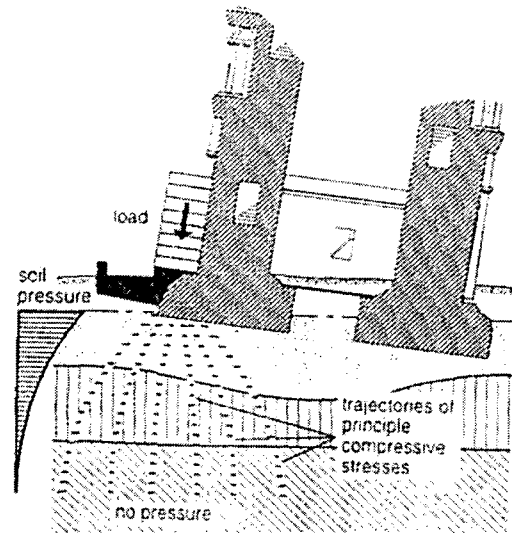
따라서, 붕괴위기를 느낀 이탈리아 정부는 1990년 2월 관광객 관람폐쇄 명령을 내리고 영국 런던 왕립대학 토질전공 존 버렌트 교수를 위원장으로 하는 16인 보수위원회를 구성하여 본격적인 복구공사를 진행시켰으며, 총 투입된 금액은 2,500만 불이며 2001년 4월에 복구공사를 준공하였다.

복구공사 일지

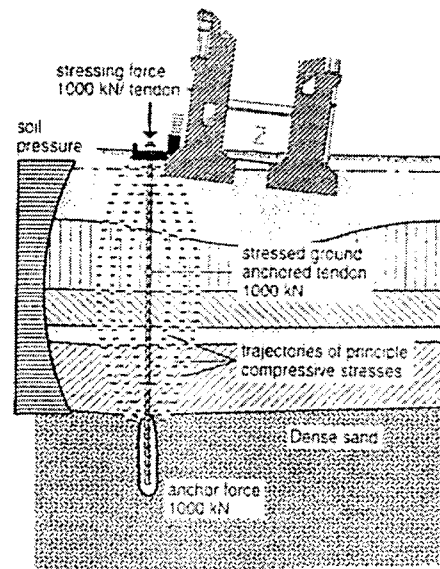
- 1993년 : 북쪽 기초부분에 600톤의 납덩이 상재
- 1995년 : 그라운드 앵커 작업 실시(100톤×10개)
- 1995년 9월 : 그라운드 앵커 작업 중단
- 1996년 : 대규모 모형실험 실시
- 1998년 : 탑 높이 20m 지점에 케이블로 감아 줌
- 1999년 2월 : 북쪽 기초지반 토사 예비 추출(12공 시공)
- 2000년 2월 : 북쪽 기초지반에 확대 실시 (41공 시공)
- 2001년 4월 : 복구공사 준공

1) 납덩어리의 상재

1993년 북쪽 기초부분에 600톤의 납덩어리를 적재하여 탑의 경사 진행을 멎게 하였고 2cm정도의 기울기가 회복되었다. 그러나 외관상 좋지 않아 납덩어리의 하중에 대체 할 수 있는 10개의 임시 그라운드 앵커를 지반에 관입시킬 계획을 세웠다. <그림 4> 참조, <그림 5> 참조



<그림 4> 납덩어리의 상재(600톤)



<그림 5> 그라운드 앵커 설치(100톤×10개)

2) 그라운드 앵커 작업의 중도포기

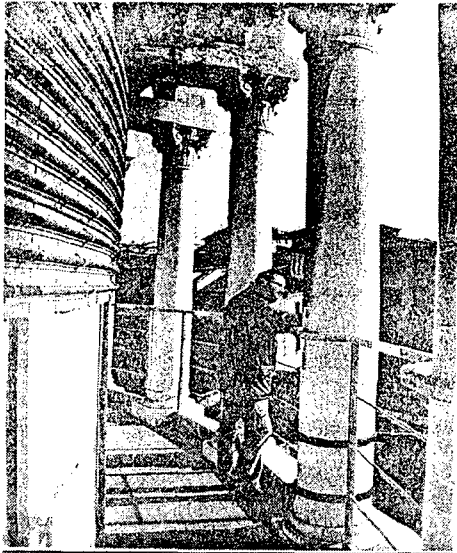
1995년에 그라운드 앵커를 설치하기 위한 콘크리트 받침대 공사를 시공하기 위하여 부분적으로

동결공법을 사용하였으나 기초주변을 굴착 중 160년 전에 타설 된 콘크리트가 기초와 연결되어 있어 이 경우 동결공법 사용이 오히려 결과적으로 불리하게 작용되어 그해 9월 작업을 중단포기할 수 밖에 없었다.

3) 대규모 모형실험 및 안전장치

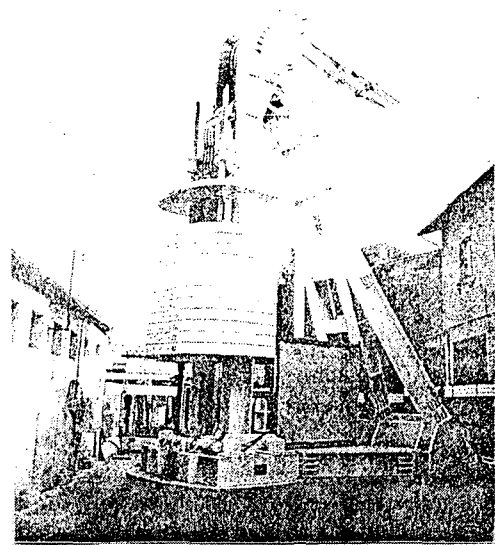
다음해 기초지반에서 토사를 추출하여 경사 진행을 막는 방법에 대한 컴퓨터 분석과 원심분리기를 사용한 모형테스트 결과를 갖고 대규모 실험을 추천하였으며 이에 따라 탑 근처에서 시험작업이 시행되었다.

탑이 다시 움직이는 것을 방지하기 위하여 탑의 높이 20m 부근을 케이블로 감아 탑 외부에 고정시켰다. <그림 6> 참조, <그림 7> 참조



<그림 6> 케이블 보강

PIEZOMETER (DOW) IN CASE OF SURFACE MOVEMENT.

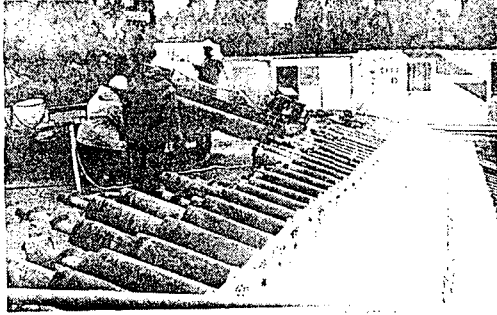


<그림 7> 케이블 고정장치

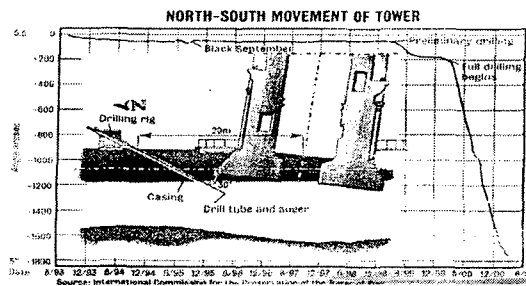
4) 예비추출시험 및 본 복구공사

오거로 기초지반의 토사를 추출하여 탑의 경사 진행을 막고 또한 복원하려는 공법이 1999년 2월 직경 20cm 강관을 50cm 간격으로 12공이 시험시공 되었다.

시험 후 만족할 만한 결과를 얻어서 2000년 2월 북쪽 전 지역에 41공을 탑의 중심선에서 20m 지점에 30° 경사각으로 천공 시공하여 2001년에 성공적으로 복구공사를 마쳤다. <그림 8> 참조, <그림 9> 참조



<그림 8> 41공 시공 전경



<그림 9> 천공단면 및 경사도 복원

<참 고 자 료>

1. E N R . APRIL - 2001년
2. S E I . MARCH - 1997년
3. 건설교통 . APRIL - 1998년
4. (주)하우엔지니어링 인터넷자료
(www.howeng.co.kr)
5. 조선일보. 6월8일자 - 2001년

<원고 접수일 2005년 9월 9일>