

피사의 사탑

김 주 범 우리 협회 전문위원
토질 및 기초 기술사
건설안전기술사

1. 머리말

피사의 사탑은 근 800년 동안에 남측이 2.8m, 북측이 0.8m가 침하하여 침하의 차이는 무려 2m이고 기울기는 5° 11' 20"나 된다.

이 기울기의 대부분은 탑을 축조한 200년 동안에 일어났다.

탑의 기초조사 결과 토층은 균일한 두께이나 토질정수는 서로 다르게 나타났다. 상층 7m는 모래층이고 남측은 북측보다 더 압축성이어서 침하량의 차이가 크게 나타났다.

지지력 분석에서 등분포로 되어 있었으나 부등침하에 따라서 가중적인 모멘트의 증가로 불균일 응력이 작용한 결과가 되었다.

침하는 상부 7m 두께의 모래층 하부에 있는 점토층에서 발생하였으며 이러한 사실들은 1965년에 시추조사를 15~20m 함으로써 알 수 있었다.

2. 탑 건설의 역사

이 탑은 1173년 8월 9일에 착공하여 1178년에 3층반을 만들고 중단하였는데 이때의 하중이 9,480톤이었다. 중단된 이유는 정치적인 것과

중량물로 인한 공사의 어려움때문이었다.

그후 1272년부터 1278년 사이에 8층까지 건설하였는데 그 무게는 13,728톤이었다.

나머지 층은 1360년에서 1370년까지 사이에 완공하였으며 8층에서 탑의 중심선을 침하로 기울어진 만큼 수정변경하여 건설하였다.

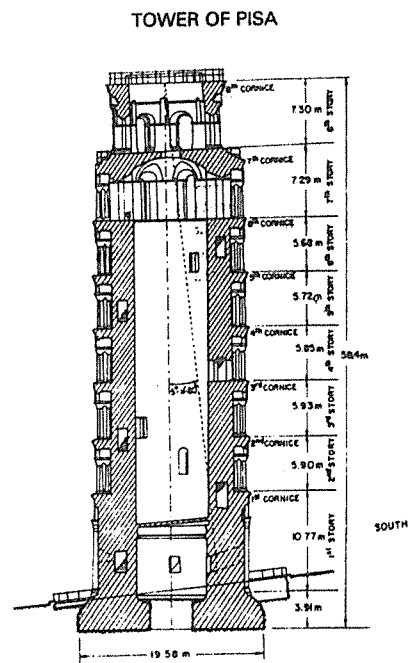


그림 1. 남북방향의 단면도

표 1. 점토층의 성질

토 층	표 고(m)	깊 이(m)	함수비(%)	액성한계%	소성지수%	Pc/Po	비 고
상부점토1	-7~-11	10~14	60	80~85	52	2.0	
" 2	-11~-13	14~16	46	50~63	25~30	1.1	
" 3	-13~-18	16~21	55	83~90	52	1.2	
중간점토	-18~-22	21~25	25	45	24	>>1	
하부점토	-24.5~-37	27.5~40	30~45	50~70	33~40	~1.0	

표 2. 지지력 결과(비배수)

연도	탑의 응력	상부점토의 수직응력	점토층의 최대응력	상부점토 Su ₁	하부점토 Su ₂	Nc	qult	안전율	극한전단 응력(점토)
1178	23 t/m ²	12.5 t/m ²	—	4.5	9.7	7.2	32.4	2.6	7.3
1278	42.3	23.0	—	6.6	9.7	7.2	47.5	2.1	13.5
1975	45.1	24.5	59.0	9.5	10.0	6.2	58.9	2.4	14.4

1970년 조사에서 탑의 바닥 직경은 19.58m, 탑의 높이 58.4m, 탑의 기울기는 5.2°이고 부 등침하량은 1.77m이며 기초는 지표면에서 3m 밑에 있는데 전체 무게는 14,453톤이다.

3. 토 질

1965년 기초조사에서 한 공은 60m, 다른 한 공은 30m를 탑 인근에 시추하였고 탑 밑에서 시료 채취를 위하여 2공을 하였으며, 그의 10개소에 원추관입시험을 하였다.

상부 모래층에서의 qc의 값은 20~60kg/cm²이나 대부분 20kg/cm² 내외의 값을 나타낸다.

기초의 응력은 상부모래층에서 탑의 평균 지지응력은 50.7t/m²인데 현재 작용하고 있는 응력은 북측에서 0.9t/m²이고 남측에서 100.5 t/m²로 큰 차이를 나타내고 있다.

표 2에서 상부점토층의 수직응력의 값은 극한 지지력에 비해 약 반 이상 적은 것으로 나타나 건설초기부터 단계별로 지지력에 대한 안전율은 2 이상으로 나타나고 있다.

4. 침 하

1) 모래층

원추관입시험결과에서 상부 7m 두께의 모래

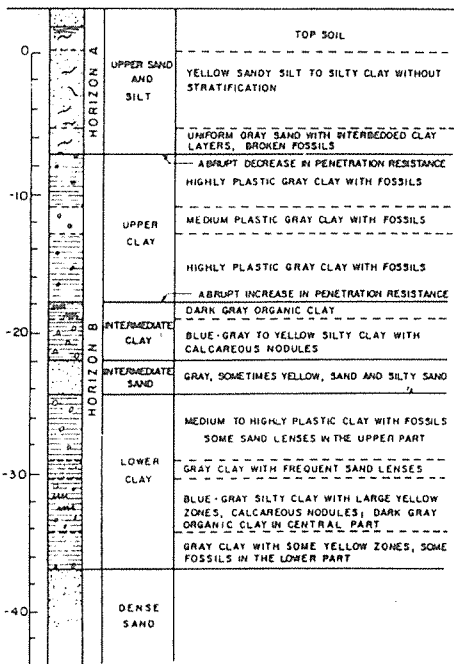


그림 2. 깊이별 흙의 성질

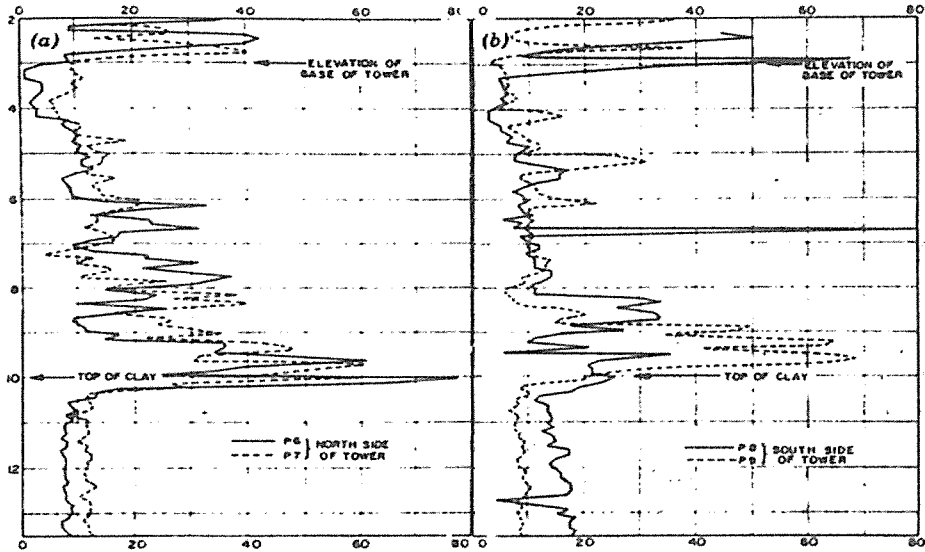


그림 3. 원추관입시험 a) 북측 b) 남측

및 실트층과 상부점토층으로 여겨진다.

원추관입조사에서 북측 P₆, P₇과 남측 P₈, P₉의 결과는 그림 3과 같다.

표 3에서 보는 바와 같이 남측이 북측에 비하여 탐에 가까운 위치에서 10cm의 차가 있고 먼 곳에서는 5cm 차가 나타남을 알 수 있다.

표 3

조사공번호	탐 중심부터의 거리(m)	침하량(m)
P ₆	25.37(북)	0.34
P ₇	14.65(북)	0.30
P ₈	15.65(남)	0.40
P ₉	25.35(남)	0.39
P ₁₁	18.17(동)	0.32

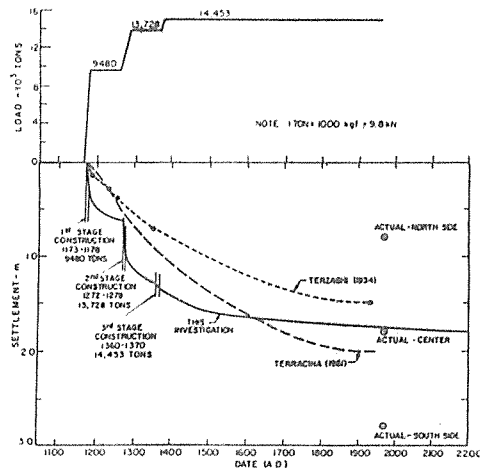


그림 4. 침하곡선도

표 4. 즉시침하량표

연 도	탐하중(ton)	모래층의 침하량(m)	점토층의 즉시침하(m)	즉시침하량의 합(m)	비 고
1178	9,480	0.18	0.08	0.26	총침하량 0.52m
1278	13,728	0.15	0.09	0.24	
1370	14,453	0.02	-	0.02	

표 5

하 중	Soed 상부점토	Scf= μ So 상부점토	Soed 하부점토	Scf= μ So 하부점토	총침하 Scf	비 고
1단계 하중 (1173~1178)	0.37	0.32	0.07	0.05	0.37	단위는 m
2단계 하중 (1272~1278)	0.44	0.38	0.07	0.05	0.43	
3단계 하중 (1360~1370)	0.06	0.05	0.01	0.01	0.06	
					0.86	

※ $\mu = A + \beta(1A) = 0.86$ (상부점토), 하부점토는 0.7

Soed : Oedometer 시험 결과

Scf : Skempton-Bjerrum에 의한 압밀침하량임

2) 점토층

11m 두께의 상부점토와 19m 두께의 하부점토와 중간층의 침하량 계산결과 1178년의 하중으로 0.08m, 1278년 2차 하중에 의하여 0.09m의 즉시 침하가 발생하였고 3차 하중시에는 적은 값을 보였다.

3) 압밀침하

Skempton-Bjerrum의 방법으로 압밀침하를 계산한 것은 표 5와 같다.

5. 결 언

- 1) 침하량에 대하여 모래층 7m 두께의 즉시 침하량과 30m 두께의 점토층에 대한 것이며,
- 2) 지반지지력은 초과하지 않고 600년 동안 견디었으나 결과적으로 지반파괴로 볼 수 있으며
- 3) 북측보다 남측의 침하량이 크게 나타났다.

※ 원문은 미국토목학회지(Vol.103, No GT3, 3월, 1977) 참조