

■ 기술보고 ■

복합기초기술의 개발과 고층건물 기초공사의 적용에 관하여

1. 서 론

최근 지반처리기술의 발전에 따라 복합기초기술이 고층 건물의 기초공법으로 많이 적용되고 있다. 그러나 복합기초 이론의 발전에 비해 실무에서의 적용성이 많이 뒤떨어지고 있으며 현장적용사례들을 보면 종류가 다양하지 않으며 그 양 또한 적다.

건물기초의 형식은 크게 3가지 종류로서 얇은기초, 말뚝기초, 그리고 복합기초로 분류할 수 있다. 복합기초는 또 연직 보강 복합기초와 수평 보강 복합기초로 분류하며, 연직 보강 복합기초는 다음과 같은 형식이 있다.

- (1) 분산재료의 말뚝 복합기초로서는 쇠석 자갈 말뚝과 sand 말뚝이 있다.
- (2) 연성말뚝 복합기초로서는 심층 혼합 말뚝과 회전식 噴射 말뚝이 있다.
- (3) 강성말뚝 복합기초로서는 콘크리트 말뚝이 있다.

초기에는 복합기초에서 쇠석 말뚝의 복합기초만을 고려되었으며 나중에 분산재료 말뚝의 연구에 관심이 집중되었다. 한편 심층 혼합방법의 응용에 따라 흙-시멘트 말뚝 복합기초의 지지력과 침하량계산 연구도 이루어지게 되었다. 복합기초의 개념은 분산재료 말뚝에서 연성말뚝 복합기초로 확장되었다. 현재 복합기초, 얇은 기초, 말뚝기초는 실무에서 상용하는 기초형식으로 되었다.

현재 이웃나라 일본이나 중국에서는 많은 형식의 복합기초를 사용하고 있다. 예를 들면 쇠석 말뚝 복합기초, 흙-시멘트 말뚝 복합기초, 저장도 말뚝 복합기초, 생석회 말뚝 복합기초, 철근 콘크리트 말뚝 복합기초, 보강토 복합기초 등이다. 이들 복합기초는 건물, 야적장, 고속도로, 활주로 및 수공댐 등에 사용되어져 왔다.

2. 복합기초의 개념

2.1 복합기초의 재료

복합기초를 다음과 같이 정의한다. 즉 자연지반이 지반

처리과정에서 부분적 토체가 보강 또는 치환되며 때로는 자연지반에 보강재료를 설치하며, 보강영역은 지반(자연지반의 토체)과 보강재 두 부분으로 구성된 인공지반이다. 보강재는 전체적으로 볼 때 비균질 이방성이다. 지반에서 보강재의 방향에 따라 수평방향 보강 복합지반과 연직방향 보강 복합지반로 나눌 수 있다. 수평방향 보강 복합지반은 주로 각종 보강재료(예를 들면 토목섬유, 금속재료 격자망 등)로 이루어진다. 연직방향 보강재를 보통 말뚝 또는 기둥이라 한다. 연직방향 보강 복합지반을 통상 말뚝 복합지반이라 하며 그 작용 매커니즘에 따라 다음과 같이 분류한다.

$$\text{복합기초} \begin{cases} \text{연직 보강 복합기초} \\ \text{수평 보강 복합기초} \end{cases} \begin{cases} \text{분산재료말뚝 복합기초} \\ \text{연성말뚝 복합기초} \\ \text{강성말뚝 복합기초} \end{cases}$$

2.2 복합기초의 기본 특징

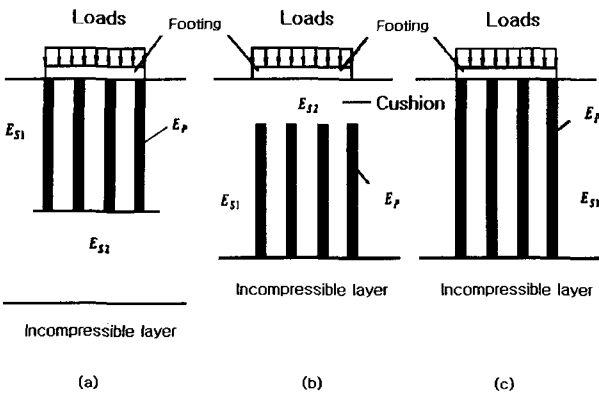
- (1) 보강영역은 자연상태의 원지반과 보강된 보강재(말뚝)지반 두 부분으로 구성되며 비균질 이방성이다.
- (2) 하중은 자연상태의 원지반과 보강재(말뚝)가 함께 지지한다.

여기서 (1)은 복합지반과 균질지반과의 다른점을 나타내고 있으며, (2)는 복합지반이 말뚝과 다른점을 나타낸다. 이러한 의미에서 볼 때 복합기초는 균질지반과 말뚝기초 사이에 있는 기초형식이다.

복합기초의 전제 조건은 자연상태의 원지반과 보강재(말뚝)가 공동으로 하중을 지지한다. 그림 1(a)와 그림 1(b)에서 $E_p > E_{s1}$, $E_p > E_{s2}$ 이며, 여기서 E_p 는 말뚝의 modulus이고 E_{s1} 는 지반의 modulus이며 E_{s2} 는 그림 1(a)에서는 보강재 아래 흙의 modulus이고, 그림 1(b)에서는 cushion의 modulus이다. 그림 1(a)와 그림 1(b)에서 쉽게 알 수 있는 바와 같이 지반과 보강재는 함께 변형과 조화를 이루면서 하중을 지지한다. 그림 1(c)에서도 $E_p > E_{s1}$ 이다. 재하 초기 보강재의 응력과 흙의 응력은 그들의 modulus와 비례한다. 하중의 증가에 따라 흙에서는 creep가 발생되며 흙의 응력이 감소되며 반면 보강재의 응력은 증가할 것이다. 만일 $E_p \gg E_{s1}$ 면 지반은 하중의 매우 작은 부분만을 지지할 것이다. 그림 1(b)에서의 cushion은 효과적으로 복합기초

* 양극영 / 원광대학교 건축공학과 교수
 * 정진섭 / 원광대학교 토목공학과 교수
 ** 李光范 / 延邊大學校 이공대학 교수

얇은 층의 응력 상태를 개량한다. 즉 말뚝과 토체의 응력비와 함께 보강제 주변 압력을 강화하여 더욱 큰 연직하중을 받을 수 있게 한다.



<표 1> Box 기초 아래에 위치한 토질의 특성

Soil layers and numbering	층두께 (m)	f_k (kPa)	E_s (MPa)	q_s (kPa)	q_p (kPa)
(4) silty	2.0	180	14.41	30	
(5) fine medium sand	4.0	210	32.00	40	
(6) silty clay	2.0	210	35.00	40	
(7) fine medium sand	0.7	220	35.00	45	
(8) silty clay	7.0	210	16.53	35	1800
(9) fine medium sand	0.7	220	35.50	30	2200
(10) silty clay	5.5	230	15.78		3200
(11) fine medium sand	3.5	220	42.90		
(12) fine medium sand	3.0	240	26.82		
(13) medium coarse sand	2.1	230	44.70		

3. 적용 사례

3.1 저장도 콘크리트 말뚝 복합기초의 응용(북경)

(1) 기본상황

본 공사는 중국 북경시 OO지역의 주거지 건축물 3개동 (3, 4, 5#)에 적용한 사례이다. 전단벽 구조에 지하 2층, 지상 25층 구조물로서 건물의 총 높이는 76.4m이고 총면적은 67,862 m²이다. 이들 3개동의 건축물 사이에 지하 1층, 지상 2층으로된 두 개의 상업용 건축물이 있다. 이들 총 면적은 6,264 m²이다. 고층빌딩 건물 기초의 설계에서 채용한 초기 형식은 box 기초이다. box 기초의 높이는 7.65m이고 그중 5.85m는 지하에 매립되었다. 기초의 면적은 900 m²이다.

지질조사에 의한 box 기초 아래의 지반특성은 표 1과 같다.

(2) 방법의 선정

Box 기초에서 지반으로 전달되는 하중은 442kPa이고 최종 침하량은 450mm이다. 시방서에 의하면 북경지역의 허용 침하량은 100mm로서 얇은기초를 사용할 수 없다. 저장도 콘크리트 말뚝의 복합기초는 본 공사에서 시공성과 간편성이 있으며 또한 기술적 신뢰성이 있는 공법이다. 본 공사에서는 여러 방안을 비교한 후 저장도 콘크리트 말뚝의 복합기초를 적용 하였다. Cement-fly ash-gravel pile (CFG pile)을 복합기초의 보강제로 한다.

저장도 콘크리트 말뚝의 복합기초는 저장도 콘크리트 말뚝, 지반, cushion 층으로구성된다. 저장도 콘크리트 말뚝 (CFG pile)은 진동 말뚝공법으로 타설되며 말뚝의 구성 재료는 자갈, 쇄석, 시멘트, fly ash, 물이다.

Cushion인 분산재료에는 양호한 입도분포를 가진 모래, 쇄석 등이다. cushion의 효과는 다음과 같다.

- 1) 복합기초는 cushion층을 통하여 footing과 연계되었기 때문에 말뚝과 토체가 함께 하중을 지지한다.
- 2) 말뚝과 토체 사이의 응력비가 footing의 응력 집중을 완화시킬 수 있다.
- 3) cushion층의 두께를 조절 함으로서 말뚝과 토체에 분포되는 연직하중 또는 수평하중을 조정할 수 있다.

Cushion층을 설치함으로서 말뚝만으로 연직하중 또는 수평하중을 지지한다는 전통적인 설계 방식의 변화를 가져왔다. 저장도 콘크리트 말뚝 복합기초에서 수평하중은 cushion층이 대부분을 지지하며 말뚝이 적은 수평하중을 지지한다. 또한 연직하중에 대해서는 지반이 먼저 부분적으로 지지하고 말뚝이 나머지 잔유 부분의 연직하중을 지지하게 된다. 이는 지반이 연직하중의 지지에 참여 함으로서 말뚝의 본 수를 줄일 수 있는 효과를 가져온다.

- (3) 저장도 콘크리트 말뚝의 복합기초(4호 동) 여러방안을 비교 후 CFG 말뚝을 채용하였다.

말뚝의 직경은 $\phi=400$ mm이고 길이는 19.0m이며 설계 강도는 200 kgf/cm²이다. 4호 동에서 이론적 말뚝 수요량은 406개이고 실제에서는 412개를 사용하였다.

Cushion의 두께는 20cm이고 자갈의 입경은 5mm~20mm이다. E_c 법(Composite modulus method)으로 계산한 결과 침하량은 39mm로 허용 침하량보다 적었다.

- (4) 실제 침하량

본 공사의 시공은 1996년 3월 하순~1996년 5월 중순까지 실시하였다. 침하량(현장 측정치)은 3호 동에서 31mm, 4호 동에서 26mm, 5호 동에서 26mm이므로서 설계추정 최

<표 2> 각 지층의 토질 특성

구 분	Name of soil layers	두께 (m)	함수량 w(%)	간극비 e	압축 modulus E_{s1-2}	f_k (kPa)
A	fill	2.30-3.80				
B	sandy silt	3.35-4.80	30.5	0.85	12.3	150
C	silt	8.80-9.70	29.8	0.85	12.6	200
D	clay silt	0.75-1.40	31.5	0.90	4.6	100
E	clay silt	8.50-9.70	31.6	0.90	5.5	190
F	clay silt	3.30-5.20	35.1	0.95	5.5	170
G	clay silt	8.00-10.30	27.2	0.77	5.5	230
H	clay silt and mixed pebble	0.30-0.80			23.0	300
I-1	Strong-efflorescence porphyrite of An mountain	0.70-4.80			5.3	350
I-2	Medium-efflorescence porphyrite of An mountain					5000 (q_p)

중 침하량 60mm보다 적었다.

(5) 공사비

Box 기초를 사용하였을 때 소요비용은 11.52억원이고 저항도 콘크리트 말뚝의 복합기초 방안을 적용하였을 때의 비용은 5.07억원이다. 따라서 저항도 콘크리트 말뚝의 복합기초를 사용하므로써 6.45억원의 비용 절감효과를 가져왔다.

위의 서술에서 보는 바와 같이 기술성(하중 배분, 지지력, 침하량 감소), 경제성, 시공성 등 여러 면에서 뚜렷한 감소효과를 나타내었다.

3.2 강성말뚝 복합기초의 적용(절강대 제1부속 병원)

(1) 기본상황

본 공사의 건축물 높이는 23층으로서 79.2m이다. 기초의 깊이는 5.9m이고 건축물의 총면적은 22,600 m²이다. 건물 기초 바닥의 폭은 17.1m이고 길이는 66.4m이다. 상부구조에서 전달되는 평균하중은 400kPa이고 말뚝 하나가 받는 최대 하중은 약 9000kN이다. 지반은 수평방향으로 균질인 정규퇴적층과 정규압밀층로 구성되었다. 표토층에서 H층까지 깊이는 -30.90~-32.34m이고 H층만의 두께는 8~

10m인 clay-silt층이다. 각 지층에 따른 토질의 특성을 표 2에 나타내었다.

(2) 방안비교

건축물의 상부구조, 말뚝의 지지력, 그리고 지반의 공학적 특성에 근거로 초기 설계에서는 대구경 천공기초를 사용하였다. 말뚝 하단부는 연암층에 1.0~1.5m 관입되도록 하였다. 설계에 의하면 96개의 말뚝을 사용하며 평균유효 길이가 39m이고 직경은 각각 80mm, 100mm, 120mm다.

강성말뚝 복합기초는 지반의 지지력을 완전히 활용할 뿐만 아니라 건축물의 침하량도 감소시킬 수 있다. 말뚝의 하단은 지반의 G층에서 H층에 1.0~2.0m로 관입하고 말뚝은 소구경 천공식 cast-in-place 말뚝을 사용한다.

(3) 강성말뚝의 복합기초

강성말뚝 복합기초의 설계에서는 말뚝의 길이, 단면적 및 강도등을 검증한 후 결정하여야 한다. 말뚝의 직경을 600mm로 하고 말뚝의 하단부를 G층에서 H층으로 1.5m 깊이를 관입시킨다. 본 공사에서 말뚝에 대한 해석결과 106개의 말뚝이 필요하였다. 위와 같은 조건으로 계산한 복합기초의 침하량은 120mm(자연지반에서의 최종 침하량은 450mm)이며, 그중 흙의 압축량은 58mm이고 말뚝의 압

<표 3> 설계에 따른 경제성 비교

Pile type	Diameter of pile (m)	Length of pile (m)	Concrete use level of piles (m ³)	Total manufacturing cost per (m ²)	Expenses of piles (원억)
Normal embedded-rock pile foundation	0.8~1.2	38.5	2896.74	17.6(만원)	5.10
Rigid pile composite foundation	0.6	31.5	943.94	17.6(만원)	1.66

측량은 11.9mm이며 관입변형량은 50mm이다. 구조물을 16층까지 시공하였을 때의 측정된 현장 침하는 균등하게 발생하였으며 최종 침하량은 30mm보다 작게 나타났다. 말뚝과 토체의 응력비는 각각 65%와 35%이다.

(4) 공사비

초기의 설계방안 즉 연암층까지 타설한 말뚝기초와 실제 적용된 강성말뚝 복합기초의 경제성 비교를 표 3에 나타냈다.

위 표에 보인바와 같이 비용절감효과는 약 3.44(억원)이다.

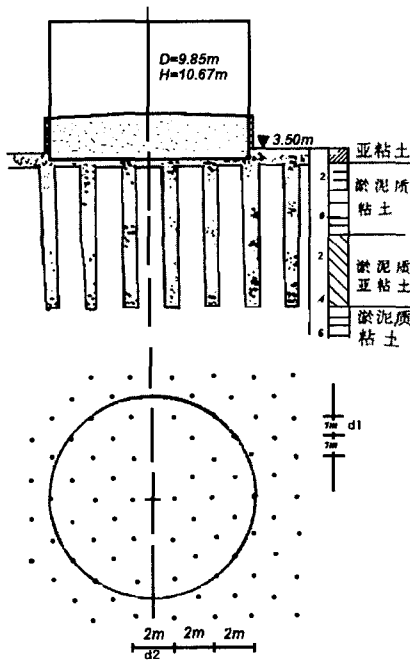
3.3 쇄석말뚝 복합기초의 적용(절강)

(1)기본상황

오일탱크의 용적은 700 m³이고 직경은 8.85m이며 높이는 10.67m이다. 지반에 전달되는 작용하중은 130kPa이다.

(2) 지질상황

지질상황은 그림 2에 나타냈다.

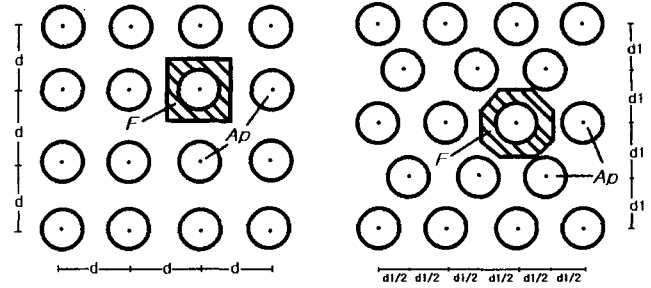


<그림 2> 오일탱크 쇄석말뚝의 복합기초

배인전단강도는 퇴적질 점토층에서 18.6kPa이고 평균두께는 4m이다. 그 아래층 퇴적질 silty clay층의 배인 전단강도는 25.5kPa이고 평균두께는 3.4m이다.

(3) 쇄석말뚝

쇄석말뚝의 길이는 8m로 하고 배치는 삼각형으로서 $d_1 = 1\text{m}$ 이고 $d_2 = 2\text{m}$ 이며 총 87개(그림 2)이다. 배치도는 그림 3과 같다.



<그림 3> 쇄석말뚝의 배치도

(4) 쇄석말뚝 복합기초의 지지력

쇄석말뚝 복합기초의 강도와 안전율이 재하 후 시간경과에 따라 변화하는 상황은 표 4에 나타냈다.

<표 4> 시간 변화에 따른 안전율

경과시간	신속 직후	경과시간 15일	경과시간 21일	경과시간 52일
배인 전단강도	21.5kPa	23.7kPa	26.0kPa	25.6kPa
안전계수	2.32	2.52	2.76	2.72

표 4에서 보는 바와 같이 안전율은 $k > 2.0$ 이므로 쇄석말뚝 복합기초는 안정할 뿐만 아니라 그 경제성과 기술성 및 시공성에서도 매우 효과적이다.

4. 결론

이상 세 가지 적용사례 가운데 북경지역의 고층 주거지 건물의 경우에는 지질조사에 의한 지강도 콘크리트 말뚝 복합기초형으로 Cushion층을 통한 Footing 연계로 파일과 토체가 공동으로 하중을 지지함으로써 말뚝의 소요량을 최소화하여 경제성 및 안전성을 도모하는 효과를 가져 왔다. 절강대 제 1부속병원의 경우에는 토질의 특성은 Clay-Silt 층임에도 불구하고 침하량을 극소화함으로써 안전성에 큰 효과가 가져왔을 뿐만 아니라 공사비 역시 절감효과를 보였다.

끝으로 쇄석 복합기초의 적용(절강)의 경우, 퇴적질 절토층으로 삼각형배치로 인한 말뚝의 본 수를 줄이면서 강도 및 시공성, 기술성, 경제성에도 크게 기여할 수 있었다.

이상과 같이 상기 사례들의 공통점은 시공성과 경제성이 높은 공법으로 파악되었음을 알 수 있다. 앞으로 국내건설 현장에서도 이러한 공법들을 채택하여 보다 한 차원 높은 기술 경쟁력이 있는 분기점이 될 수 있도록 염원하여 본다.