

연약지반에서 경량구조물 기초의 침하거동에 관한 연구 A Study on The Settlement Behavior of Foundations for Light-weight Structures on Clay Deposits

이광열¹⁾, Kwang Yeol Lee, 정진교²⁾, Chin-Gyo Chung, 윤성태³⁾, Sung Tae Yun

¹⁾ 동서대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor in Dongseo University

²⁾ 부산정보대학 공과대학 토목공학과 교수, Professor in Busan College of Information

³⁾ 동서대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Student in Dongseo University

SYNOPSIS : There are several types of foundations for light-weight structures, such as low story buildings, on soft clay deposits. Those foundations, such as piled raft, compensated foundation, mat foundation, floating foundation are commonly used rather than end-bearing piles to get more benefits on the construction and cost savings. In this study, settlement behaviors are computed and compared for several types of foundations on soft clay deposits. Also, theoretical expressions of parameters for piled raft system were provided with co-relations for design purposes. The predictions of settlements of piled rafts foundation are proposed based on the pile dimensions and design loads.

From this study, the piled raft foundations is more benefits for reducing the settlement of clay deposits, and it is found that the piled raft system is applicable and effective on thick clay deposits, and that differential settlements of the foundation should be managed by designing the configuration of pile lengths.

Keywords : piled raft, foundation, settlement, differential settlement, thick clay deposits, shallow foundation.

1. 서론

연약지반에서 구조물의 기초공법으로서 선단지지말뚝은 소요 지지력 확보와 기초침하에 의한 문제를 해결하는 데는 가장 안정적이다. 그러나 대심도의 연약지반이나 경량구조물의 기초공법으로서는 고려해야 할 문제점이 많이 있다. 특히, 연약지반에서 경량구조물의 기초공법으로는 과도한 설계가 되지 않을 수 없다. 이와 같은 점을 고려하여 경량구조물의 기초공법으로서 전면기초, piled raft system, 보상기초(compensated foundation), 마찰말뚝기초, 팽이기초 등의 다양한 기초공법이 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 연약지반의 특성 중에서 가장 주의 깊게 다루어져야 할 항목은 침하량이다. 연약지반의 절대 침하량은 연약지반 위의 기초하중에 의해 직접적인 영향을 받고 있으며, 침하속도나 기간은 연약지반의 압밀특성에 의해 영향을 받는다. 또한 연약지반의 압밀침하와 지지력과는 직접적인 상관관계가 성립되지 않으므로 독립적 분석과 대책안이 요구된다. 이러한 원리에 근거하면, 연약지반 상부층에 설치되는 기초공법은 압밀침하량 감소에 큰 도움이 되지 않는다. 그러나 대심도 연약지반에서 경량구조물의 기초공법으로 선단지지말뚝을 설계하는 과도설계, 기초지반의 지지력 확보를 전제로 한 설계로 장기적 지반 침하를 무시한 설계 등의 중대한 기술적 문제가 제기되고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 기술적 문제제기와 연약지반에서 경량구조물의 기초공법별 침하거동 특성을 분석하고 장기적 침하를 고려한 기초설계상의 영향인자들에 대한 상관관계를 이용한 설계상의 지침

을 제시하고자 하였다.

2. 경량구조물기초공법 비교

Piled raft 기초시스템은 말뚝, raft 및 기초지반 등의 3개의 지지요소로 구성된 복합구조체이며, piled raft 기초시스템의 상부구조물에 작용하는 하중은 raft와 말뚝이 동시에 지반에 전달하는 기초형태로 되어있다.(Katzenbach & Reul, 1997) 주로 raft 기초만으로는 과도한 침하가 발생하여 구조물의 사용성에 문제가 발생할 경우 사용되는 기초형으로써, Piled raft 기초시스템의 raft는 상부구조물의 하중을 분산시키고 충분한 지지력을 확보하는 역할을 하며, 말뚝은 raft의 과도한 침하를 억제시켜 상부구조물을 지지하는 상호보완적인 역할을 한다.(2002년, 김홍택)

전면기초(Mat Foundation)는 기초의 깊이가 기초의 최소 폭 보다 작은 얇은기초의 한 종류로써, 주로 하부에 압축성이 큰 지층이 없을 때, 설계 및 시공 시 기초지반의 전단파괴에 대한 안정성, 과다 침하 및 부등침하의 가능성 등에 대한 조건을 검토하여 시공을 결정한다. 기초지반의 파괴형식은 전반전단파괴, 국부전단파괴 관입전단파괴 등으로 나누어진다. 전반전단파괴는 그림 2. (a)의 대단히 촘촘한 모래에 대한 압력-침하량 곡선과 같이 압력이 커짐에 따라 침하량은 거의 직선적으로 증가하다가 흙속에서 국부적으로 전단파괴가 일어나면 침하량이 급격히 증가하는 곡선을 보인다(2004년도, 김상규). 전단파괴가 완전히 일어난 후에는 압력은 더 이상 증가하지 않는다. 압력을 받을 때 흙속에서 국부적으로 전단파괴가 생기는 것을 국부전단파괴라고 하고, 흙 전체가 전단 파괴되는 것을 전반전단파괴라고 한다. 대단히 chacha한 모래에서는 국부전단과 전반전단 파괴를 일으키는 압력의 차이는 크지 않다. 일반적인 흙의 압력-침하량 곡선은 그림 2. (b)와 같으며, 전반전단파괴 이후에도 압력이 증가하는 것은 기초가 흙 속으로 유입됨에 따라 생기는 토피하중의 증가 때문이다. 그림 2. (c)는 대단히 느슨한 모래에 대한 파괴 형태를 나타낸 것으로 흙이 가라앉기만 하고 부풀어오르는 현상은 나타나지 않는다 이와 같은 흙의 파괴를 관입전단파괴라고 한다.

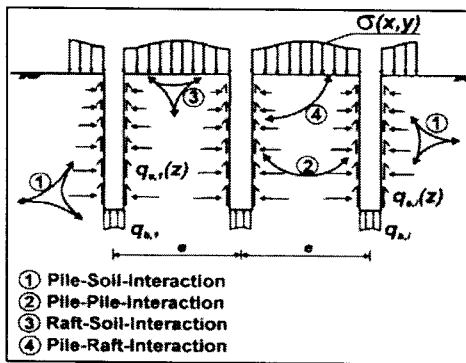


그림 1. piled raft 기초의 원리

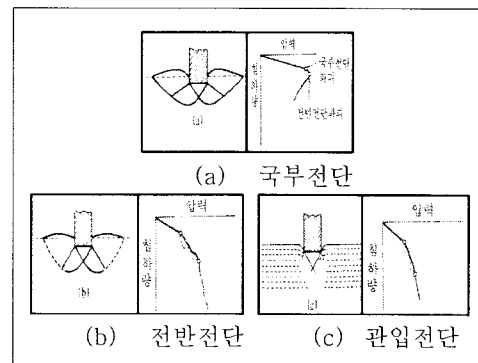


그림 2. 얇은기초의 파괴형태

3. 기초공법에 따른 기초지반침하거동 특성

3.1 설계하중 및 해석조건

piled raft기초공법, Top-base 기초공법, Mat 기초공법의 지반거동 특성을 비교하기 위해 네덜란드의 PLAXIS사에서 개발한 유한요소해석 범용프로그램인 PLAXIS 8.5ver을 이용하였다. 구조물설치에 따른 재하중은 15.0t/m²과 20.0t/m²을 설계하중으로 적용하였다. 지하수위는 상부점토층의 최상단에 있는 것으로 적용하였다. 그리고 매립층은 M/C모델, 상부점토층과 하부점토층은 SOFT SOIL 모델을 적용하였

다. 해석결과 공법별 최대 침하량 및 지반응력 분포를 비교 검토하였다. 기초의 규격과 제원은 다음의 표 1 와 같다.

표 1. 기초의 규격 및 제원

기초형식	설계 하중	슬래브 두께	슬래브 길이	파일의 수평간격	파일의 길이간격	파일의 배치		
						외곽	중간	중앙
Mat 기초공법	15t/m ²	0.8m	60m	-	-	-	-	-
	20t/m ²							
Piled raft 기초공법	15t/m ²	0.6m	60m	6m	2m	26m x 2본	28m x 4본	30m x 3본
	20t/m ²					36m x 2본	38m x 4본	40m x 3본

3.2 지층구조 및 해석단면

3.2.1 지층구조

연구에 적용된 기초지반은 부산 북 컨테이너 부두 배후단지 내의 국제물류센터 부지의 기초지반을 연구대상 지반으로 적용하였다. 지층구조는 매립층(두께 4.5m), 상부 점토층(두께 32.0m), 하부 점토층(두께 21.0m)로 3종의 지층구조로 구성되어 있다.

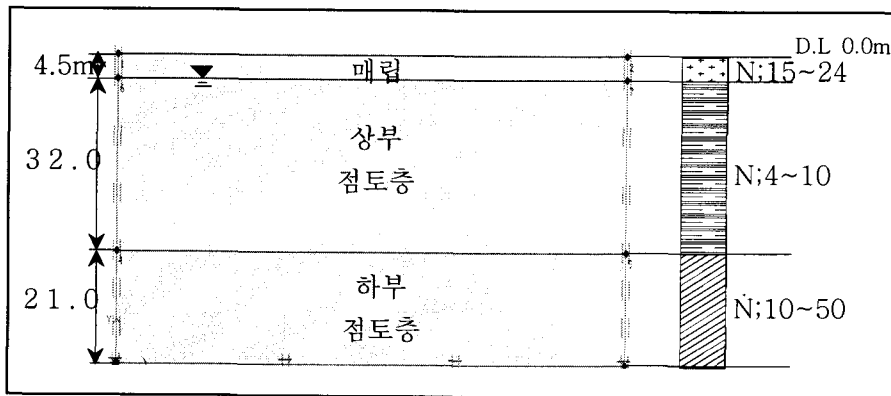


그림 3. 지층단면 및 시추주상도

3.2.2 해석단면

Mat 기초공법을 적용하는 경우는 매립층 상부에 0.8m 두께의 Mat 기초를 시공하는 것으로 설계하였다. Mat 기초의 폭은 60.0m이며, 해석에 적용된 상재하중은 15.0t/m², 20.0t/m²이다. 그림 3 은 Mat 기초공법의 해석단면을 나타내고 있다.

Piled raft 기초공법은 매립층 상부에 시공된 raft의 두께를 0.6m, 구조물 바닥 폭은 60m를 적용하였다. 파일의 배치는 길이방향으로 2.0m 간격, 폭 방향으로 6.0m간격으로 총 9본이 시공되었다. 기초의 폭을 단면으로 파일의 배치형식은 외곽부, 중간부, 중앙부 등 3개의 영역으로 구분하여 파일 길이를 2.0m 차등을 주어 배치하였다. 설계하중 20.0t/m²의 기초단면은 그림 4-a에 15.0t/m²의 기초단면은 그림 4-b에 제시한 바와 같다.

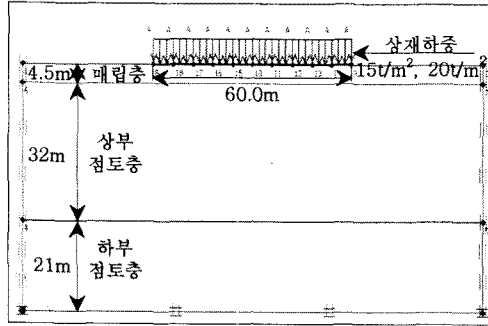


그림 3. Mat 기초형식 해석단면

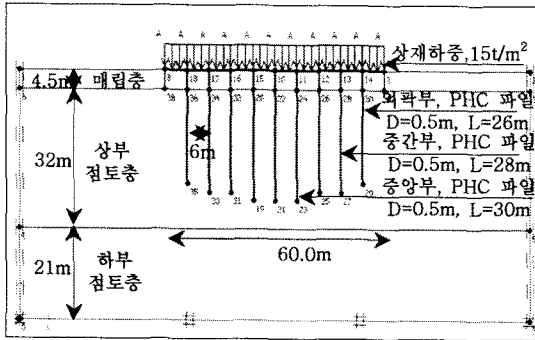


그림 4-(a). piled raft 상재하중 15t/m²의 기초단면

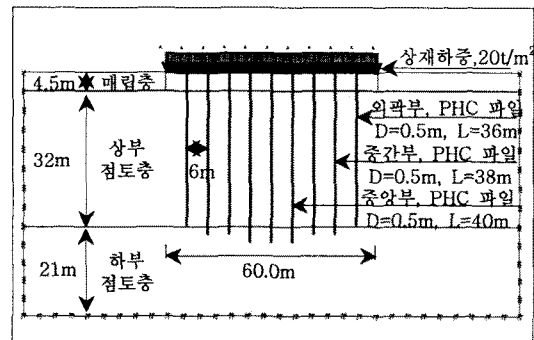


그림 4-(b). piled raft 상재하중 20t/m²의 기초단면

3.3 설계정수

NO	지층	두께(m)	N치	$r_t(t/m^3)$	$r_{sub}(t/m^3)$	$C(t/m^2)$	$\phi(^{\circ})$	$E(t/m^2)$	ν	$K(m/day)$	e	C_c	C_r
1	매립층	4.5	15-24	1.80	0.80	0.1	36.25	1,760	0.25	0.864	0.33	-	-
2	상부 점토층	32.0	4-10	1.68	0.68	1.6	23.9	530	0.20	2.57e-4	1.21	0.47	0.069
3	하부 점토층	21.0	10-50	1.86	0.86	4.0	29.14	1,060	0.20	2.57e-4	0.83	0.32	0.044

구분	t(m)	$f_{ck}(Kg/m^2)$	EA(KN/m)	EI(KNm ² /m)	ν
PILE	-	8.0e+6	1.504e+6	3.440E+04	0.15
슬래브	0.6 (Piled raft기초)	3.569e+6	1.545E+07	4.634E+05	0.15
	0.8 (Mat 기초)	3.569e+6	2.060E+7	1.099E+6	0.15

3.3 지반응력분포

Mat 기초공법의 경우 슬래브와 바로 접하는 부분의 매립층에서 주변 지층과 비교하여 상대적으로 응력이 크게 나타났다. Piled raft 기초공법의 경우에는 슬래브와 접하는 지반에서의 응력은 주변의 지층

과 큰 차이가 없으나 말뚝기초의 선단부에서 주변지반에 비해 상대적으로 응력 크게 나타났다. Piled raft 공법의 경우에는 raft, 말뚝기초, 지반저항력의 3요소가 상호보완적 거동에 의해 상재하중을 분담하여 상재하중을 지지하게 된다. 기초지반에 전달된 지반응력 최대 증가량은 상재하중 20.0t/m² 일때 전면기초인 경우 기초슬라브와 접하는 기초지반의 하부 4.5m 지점에서 -106.58t/m²가 발생하였고, 반면에 piled raft 기초의 경우는 기초슬라브와 접하는 기초지반의 하부 4.5m 지점에서 -74.93t/m²가 발생하였고, 파일의 선단부에서 -87.464t/m²가 증가하는 것으로 나타났다.

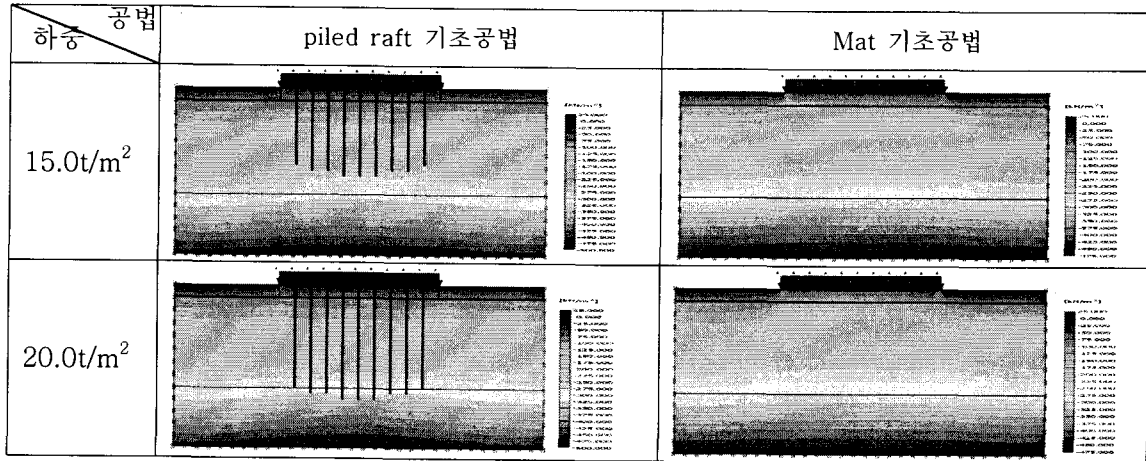


그림 5. 기초지반의 응력분포도

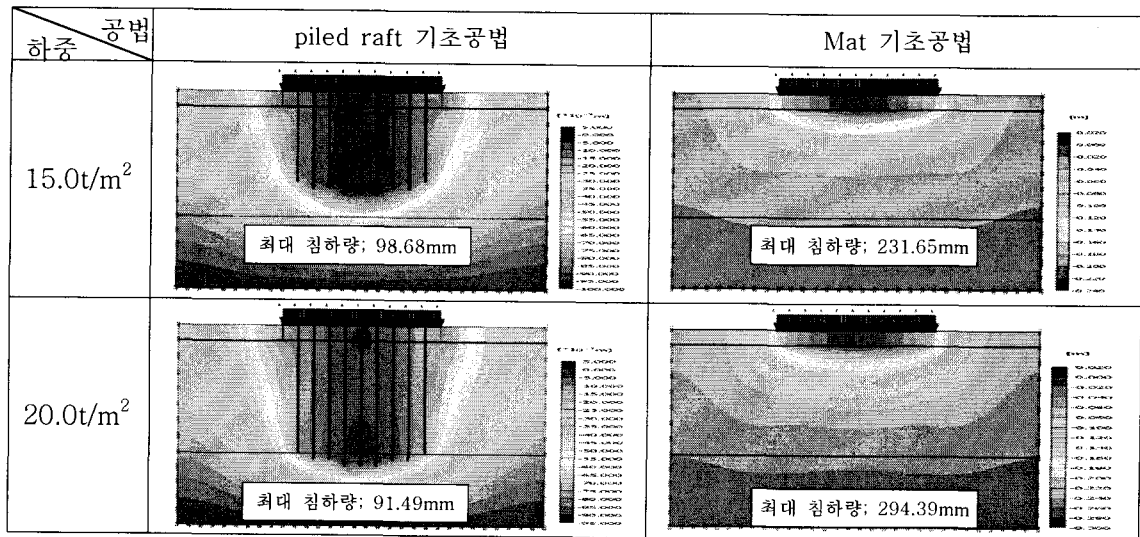


그림 6. 기초지반의 침하량분포도

3.4 침하량

상재하중 15.0t/m²가 작용할 때, 슬래브의 중앙부에서 최대침하량은 Mat 기초의 경우 231.65mm, Piled raft 기초의 경우 98.69mm로 산정되었다. 또한, 상재하중 20.0t/m²가 작용할 때, 슬래브의 중앙부에서 최대침하량은 Mat 기초의 경우 294.39mm, Piled raft 기초의 경우 91.49mm로 산정되었다.

3.5 기초별 평가

상재하중 15.0t/m², 20.0t/m² 일 경우 Piled raft 기초공법과 Mat 기초공법의 거동에 대하여 비교 검토

또한 결과 Mat 기초공법의 경우, 슬래브와 접하는 기초지반의 하부에서 전단응력이 높게 분포하는 것으로 나타났다. 특히, D.L -4.5m 지점의 경우, 상재하중 15.0t/m², 20.0t/m² 모두에서 Mat 기초가 25% 이상 높게 응력이 산정되었다. 이것은 Mat 기초에서는 상재하중을 슬래브와 기초에서만 지지하지만, Piled raft 기초에서는 상재하중에 대한 지지력을 말뚝부에서도 분담함으로써 슬래브에서 기초지반으로 전달되는 하중분담을 감소시킨 효과로 판단된다. 특히, 상재하중 15.0t/m²의 선단부(D.L -4.5m)와 20.0t/m²의 선단부(D.L -40.2m)의 응력을 비교해 보면 말뚝기초가 있는 Piled raft 기초에서 응력이 높게 산정되었다. 이는 piled raft 공법의 상재하중에 대한 말뚝의 하중분담 매커니즘을 더욱 극명하게 보여준다. 결과적으로, Piled raft 기초공법에서는 슬래브와 접하는 기초지반에서의 전단응력은 높은 분포를 나타내지 않았으며, 전체적인 전단응력이 낮게 분포하여 안정적인 것으로 나타났다. 침하량은 상재하중이 15.0t/m² 일 경우 Mat 기초가 Piled raft 기초에 비해 약 2.3배 크게 산정되었고, 상재하중 20.0t/m²일 경우에도 Mat 기초가 약 3.2배 크게 산정되었다. 해석결과, Piled raft 기초공법과 Mat 기초공법에 대한 지반응력분포 및 최대 침하량에 대한 비교 분석결과 Piled Raft 기초공법이 더욱 안정적인 공법으로 판단된다.

표 2. 기초별 평가 요약

상재하중	기초종류	최대 침하량	지반응력		
			D.L -4.5m	D.L -30.3m	D.L -40.2m
15.0t/m ²	Piled raft	98.69mm	74.51kN/m ²	297.32kN/m ²	-
	Mat	231.65mm	101.54kN/m ²	264.37kN/m ²	-
20.0t/m ²	Piled raft	91.49mm	74.93kN/m ²	-	403.65kN/m ²
	Mat	294.39mm	106.58kN/m ²	-	334.04kN/m ²

4. Piled Raft 기초의 적용성 평가

4.1 Piled Raft 기초의 특성

기존의 계측자료나 연구결과에 따르면 무리말뚝 raft의 지지력은 20.0% ~ 50.0%까지 발휘(Cook et al., 1981; Kuwabara, 1989, Yamashita et al., 1993)되는 것으로 보고되고 있다. 하지만 일반적인 무리말뚝의 설계에서는 이러한 raft의 지지력을 무시한 설계를 함으로써, 비경제적인 과다설계가 된다. 특히, piled raft 기초공법과 같이 raft, pile, 기초지반의 3요소가 유기적인 상호보완적 시스템으로 거동하는 경우에는 더욱 그러하다. 때문에 Piled raft 기초공법의 특성에 대한 다양한 연구가 진행되었다. Poulos(1994)는 수치해석을 통한 연구에서 말뚝 개수, 길이 및 직경이 증가하면 raft의 분담하중이 감소한다고 보고하였다. Yamashita 등(1993)은 수치해석과 실험을 통하여 공사초기에는 raft가 하중을 분담하지만, 공사의 진행에 따라 말뚝의 하중분담이 최대 49.0%로 증가한다고 보고하였다. Cooke 등(1991)은 현장계측을 실시하여 레프트가 공사초기에는 45.0%저도 하중을 부담하지만, 완료시에는 25.0%정도로 감소한다고 언급하였다. Horikoshi & Randolph(1996)는 점성토 지반에서 원심모형실험을 실시하여 말뚝의 개수의 시공기간 등에 따라 레프트의 하중분담이 변화한다고 보고하였다. 또한, Piled raft 기초시스템의 강성이 클수록 말뚝의 최적 성치위치는 중앙에 집중되는 것으로 보고되었다.

4.2 하중-침하량 상관관계

파일의 길이와 관계없이 상재하중의 증감에 따라 침하량이 비례하는 경향이 나타났다.

그리고 기초의 최대 허용 침하량을 100mm로 가정하였을 때, 상재하중 11.0t/m²미만의 경우에는 0.6m 두께의 전면기초만으로도 침하에 대한 안정성 확보가 가능한 것으로 나타났다.

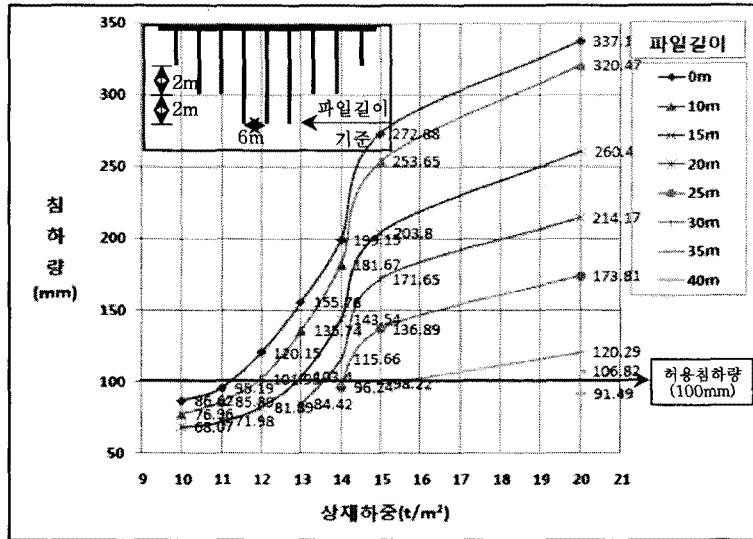


그림 7. 하중-침하량 상관관계

4.3 하중-파일길이 상관관계

piled raft 기초의 최대 허용침하량을 100mm로 가정할 경우, 이러한 평가기준을 만족하는 상재하중-파일길이 상관관계를 그림 8에 나타내었다. 그림에 나타난 파란색 실선은 상재하중에 따른 허용침하량 100mm를 만족하는 중앙부 파일의 최소길이를 나타낸 것으로써, 실선의 상단부는 허용침하량을 만족하는 파일 길이의 영역이며 piled raft 설계에 활용할 수 있다. 때문에 파란색 실선의 상단부 영역에 해당하는 상재하중에 대한 파일의 길이를 선정한다면 침하에 대한 안정성을 확보할 수 있는 설계를 할 수 있다.

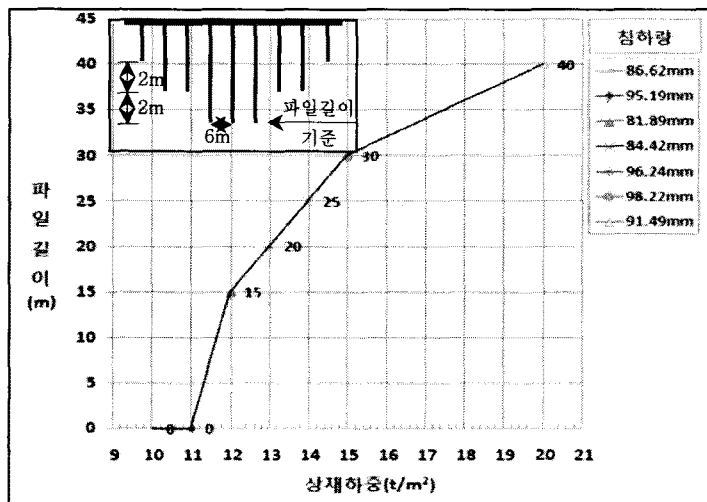


그림 8. 하중-파일길이 상관관계(허용침하량=100mm)

4.4 침하량-파일길이 상관관계

piled raft 기초공법의 상재하중에 따른 침하량-파일길이 상관관계를 그림 9에서 나타내고 있다. 기초의 최대 허용침하량을 100mm로 가정할 경우, 중앙부 파일 길이가 38.0m이면, 20.0t/m² 이하의 상재하중에서는 piled raft 기초의 침하량에 대한 안정성을 확보할 수 있다. 또한, 11.0t/m² 미만의 상재하중에 대해서는 두께 0.8m의 전면기초만으로도 침하에 대한 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 다음의 그림은 기초의 설계하중별 최소 파일길이를 선정할 수 있는 설계지표이다.

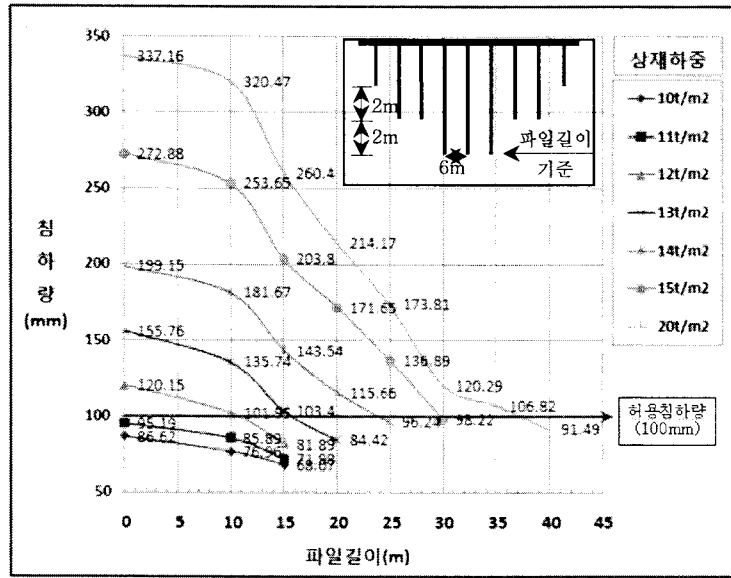


그림 9. 침하량-파일길이 상관관계

5. 결론

본 연구는 연약지반에서 침하량을 주요 설계기준으로 하는 경량구조물의 최적기초형식을 도출하기 위하여 전면기초와 piled raft 기초에 대한 침하거동을 비교하고 분석하였다. 또한 piled raft 기초설계를 위한 재하중-침하량-파일길이 등의 상관관계를 도시한 설계표를 제시하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 연약지반에서의 기초는 지지력을 고려한 설계보다는 장기적 침하거동을 고려한 기초설계가 필요하며, 기초의 침하량을 억제하기 위해서는 하부점토층에 전달되는 하중을 최대한 감소할 수 있는 기초공법을 선정함이 타당하며 이를 위해서는 piled raft 기초공법이 유리한 것으로 판단된다.
2. Piled raft 기초는 어느 정도 이상의 한계설계하중(본 연구에서는 11.0t/m²) 이상인 경우에 경제성이 있으므로, 설계하고자 할 때는 전면기초 등 다른 기초형식과 비교하여 한계 설계하중을 도출하고 경제성을 평가해볼 필요가 있다.
3. piled raft 기초의 소요 파일길이는 재하중이 증가함에 따라 점차 감소하기 때문에 재하중이 15.0t/m² 이상의 경량구조물인 경우에는 최적의 기초공법인 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김상규, (2004)“토질역학), 청문각 개정판
2. 권오균, 오세봉, 김진복(2005), “무리말뚝의 하중분담률에 관한 실험적 연구”, 한국지반공학회논문집 제 21 권, 제 5호, pp.51 ~ 58.
3. 김홍택, 강인규, 박정주, 박순규(2002), “사질토 지반에서 연직하중을 받는 Piled Raft 기초시스템의 하중분담특성에 관한 실내모형실험 연구”, 대한토목학회 논문집 제 22 호 pp.111 ~ 120.
4. Cooke, R.W., Bryden-Smith, D. W., Gooch, M. N., and Sillett, D. F. (1981), Some observations of the foundation loading and settlement of a multi-story building on apiled raft foundation in London Clay. Proc. Instn Civ. Engrs, Part 1. 70, 433-460.
5. Horikoshi, K. and Randolph, M. F. (1996), Centrifuge modeling of piled raft foundations on clay. Geotavhnique, 46(4), 741-752.
6. Kuwabara, F. (1989), An elastic analysis for piled raft foundations in a homogeneous soil, Soils and Foundations, 22(1), 82-92
7. Poulos, H. G. (1944), An approximate numerical analysis if pile-raft interaction. Internatiomal Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 18(20), 73-92.
8. Yamashita, K., Kakurai Yamada, T., and Kuwabara, F.(1993), Settlement behavior of a five-story building on a pileed raft foundation. Proceeding 2nd International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, 3(11), Rotterdam, 351-356.