

Piled Raft 기초 적용사례 분석 A Case Study of the Piled Raft Foundation

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 강인규²⁾, In-Kyu Kang, 최효범³⁾, Hyo-Pum Choi, 박시삼⁴⁾, Si-Sam Park

¹⁾ 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hongik University

²⁾ (주)브니엘컨설턴트 책임, Chief Engineer, Vniel Consultant Co., Ltd.

³⁾ 금호산업(주) 기술연구소 차장, Manager, Technical Lab, Kumho Industrial Co., Ltd.

⁴⁾ 홍익대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hongik University

SYNOPSIS : The piled raft foundation is an innovative design concept to reduce both the maximum settlement and differential settlements caused by concentrated building loads and load eccentricities, and also to reduce the bending moments of the raft. The main concern given in the design of piled raft foundations is proper judgments both of relative proportions of loads carried by the raft and piles, and of the effect of the pile support on the maximum and differential settlements. In the present study, the piled raft foundation used in the foundation system of Richensia Building at Youido, Seoul is introduced and is carried out analyzing the results of field tests such as plate load tests, large plate load test, pile load test, and piled raft load test.

Key words : piled raft foundation, micropile

1. 서 론

건축구조물의 기초시스템에 있어서 충분한 지지력을 확보하고 침하량을 줄이기 위한 방법으로 말뚝 기초를 주로 사용하고 있으나, 말뚝기초의 일반적인 설계에 있어서 말뚝상부의 콘크리트 Mat에 의한 지지효과는 무시하고 지지력의 관점에서 보수적으로 설계하고 있는 실정이다. 그러나 최근 말뚝기초의 설계시 기존의 지지력 관점에서의 설계보다 침하 관점에서의 설계가 신뢰성이 높다는 지적이 대두되면서 말뚝기초의 설계시 허용침하를 만족시키는 범위내에서 최소한의 말뚝만을 사용함으로써 비용과 거동을 최적화하는 piled raft 기초에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 주로 마찰말뚝기초로 설계된 고층 빌딩의 하부구조에 적용되고 있다.

본 연구에서는 서울시 영등포구 여의도에 위치한 리첸시아 빌딩 신축공사와 관련하여 기초보강에 사용된 piled raft 기초시스템(소구경 말뚝+MAT)의 현장적용사례를 소개하고 현장에서 실시된 현장시험 자료를 분석하였다. 본 연구에서 분석한 현장시험자료는 지반 및 말뚝의 거동특성을 파악하기 위해 실시된 평판재하시험 14개소, 대형평판재하시험 1개소, 말뚝재하시험 1개소 및 piled raft 재하시험 1개소이며, 본 연구를 통해 향후 piled raft 기초시스템의 해석 및 설계분야에 도움이 되고자 하였다

2. 이론적 배경

2.1 Piled raft 기초

Raft 기초는 단단한 점토층과 같은 지반조건에서 raft 기초만으로 충분한 지지력의 확보가 가능할 때 사용된다. Piled raft 기초시스템은 그림 1과 같이 과도한 침하가 발생하여 구조물의 사용성에 문제가 발생할 경우 주로 사용되는 기초시스템이다. Piled raft 기초시스템에서 raft는 상부 구조물의 하중을 분산시키고 충분한 지지력을 확보하는 역할을 하며, 말뚝은 raft의 과도한 침하를 억제시켜 상부 구조물을 지지하는 상호 보완적인 역할을 한다.

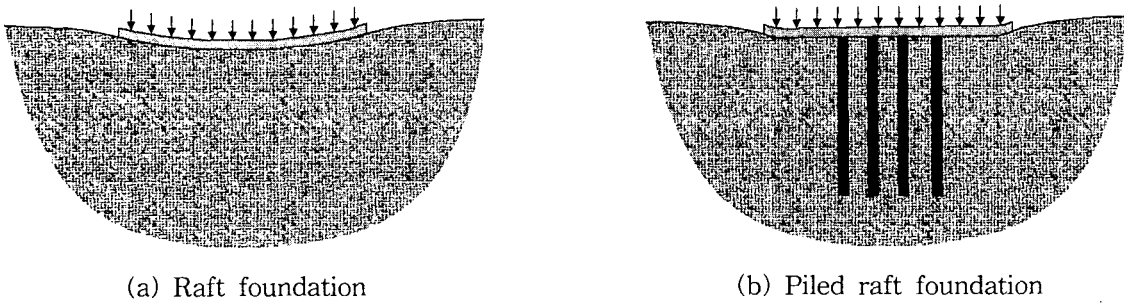


그림 1. Piled raft 기초시스템의 개념

piled raft 기초시스템에서 말뚝은 상부 구조물의 하중을 기초지반 하부의 견고한 지층으로 전달시킴으로써 침하를 감소시키는 역할을 하며, 동일한 응력수준에서 단일말뚝으로 지지력을 환산하면 raft의 구속압으로 인해 raft가 없는 단일말뚝의 경우와 비교해 볼 때 지지력이 증가하는 경향이 있다. Piled raft 기초시스템의 장점을 몇 가지 열거하면 다음과 같다.

- (1) 굴착으로 인한 허빙(heaving) 현상을 감소시킬 수 있다.
- (2) 전체침하 및 부등침하를 감소시킬 수 있다.
- (3) 큰 하중이 편심으로 작용할 경우에 대한 저항성이 우수하다.
- (4) Raft에 발생하는 휨모멘트를 감소시킬 수 있다.

Piled raft 기초시스템은 그림 2와 같이 말뚝, raft 및 기초지반 등 3개의 지지요소로 구성된 복합 구조체이며, piled raft 기초시스템의 상부 구조물에 작용하는 하중은 식(1)과 같이 raft와 말뚝이 동시에 지반에 전달하는 기초형태로 되어 있다(Katzenbach & Reul, 1997).

$$R_{tot} = R_{raft} + \sum R_{pile} \quad (1)$$

여기서, R_{tot} : 상부 구조물에 작용하는 전체하중
 R_{raft} : raft가 부담하는 지지력
 $\sum R_{pile}$: 말뚝이 부담하는 지지력의 총합

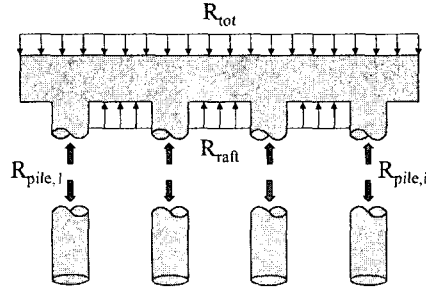


그림 2. 복합 구조체로서의 piled raft 기초시스템

Piled raft 기초시스템에서의 지지거동은 식(2)와 같이 상부 구조물의 전체하중에 대한 말뚝이 부담하는 지지력의 총합의 비로 정의되는 piled raft 계수 α_{pr} 를 이용하여 설명할 수 있다.

$$\alpha_{pr} = \frac{\sum R_{pile}}{R_{tot}} \quad (2)$$

식(2)에서 piled raft 계수 α_{pr} 가 0일 경우에는 상부 구조물의 하중을 raft가 전부 부담하는 얕은기초의 지지거동을 나타내며, piled raft 계수 α_{pr} 가 1일 경우에는 상부 구조물의 하중을 raft의 접지압이 작용하지 않은 상태에서 말뚝이 전부 부담하는 깊은기초의 지지거동을 나타낸다.

2.2 Piled raft 기초의 설계개념

Piled raft 기초시스템은 raft 기초만으로도 충분한 지지력이 확보되어 전체적인 안정성에는 문제가 없으나, 전체침하와 부등침하를 감소시키기 위한 목적으로 말뚝을 사용함으로써 상부 구조물의 하중을 raft 기초만에 의해 지지하도록 설계하거나 말뚝기초에 의해서 지지하도록 설계하는 전통적인 설계방법과 비교해 볼 때, 경제적이며 새로운 개념의 설계방법이다. 또한 piled raft 기초시스템은 그림 3과 같이 말뚝개수의 증가에 따라 piled raft 기초시스템의 하중-침하 특성이 양호해지므로 작용하중에 대해 구조물의 침하기준을 만족하는 최적의 말뚝개수를 결정하는 것이 설계에 있어서 중요한 부분이다.

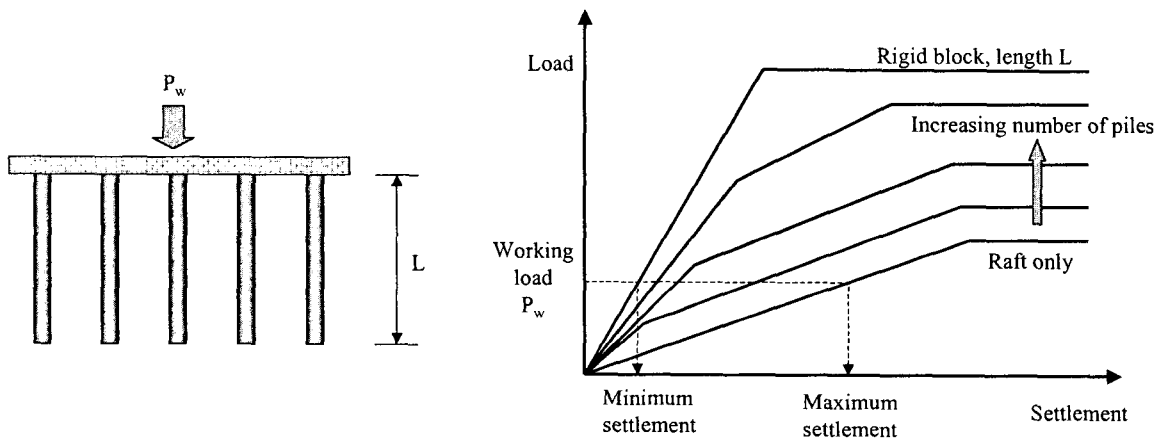


그림 3. Piled raft 기초시스템의 기본개념(Poulos & Davis, 1980)

2.3 Piled raft 기초의 설계절차

Piled raft 기초는 구조물의 전체침하량 또는 부등침하량을 줄이기 위한 보조적인 수단으로 말뚝을 사용하므로 말뚝의 소요개수 및 단면을 최소화하여 적정 위치에 배치하는 것이 설계의 기본방향이며, 최근 발표된 piled raft 기초의 설계절차를 소개하면 그림 4와 같다. 그림 4는 piled raft 기초에서의 각 설계변수들에 대한 매개변수변화연구(parametric study)를 통해 제안된 설계절차이며, 이를 간략히 설명하면 다음과 같다.

- (1) piled raft 기초의 설계에 적용할 허용평균침하량 및 허용부등침하량을 결정한다.
- (2) piled raft 기초의 설계를 허용평균침하량과 허용부등침하량을 동시에 만족하도록 설계할 것인가 아니면 허용평균침하량 또는 허용부등침하량 중에 하나만을 만족하도록 설계할 것인가를 정한다.
- (3) 먼저 허용평균침하량만을 만족하도록 설계할 경우 말뚝의 배치는 기초 전면적에 걸쳐 고루 분포하도록 배치하며, 허용부등침하량만을 만족하도록 설계할 경우 말뚝의 배치는 기초의 중앙부에서 기초폭의 0.4~0.6배 정도 말뚝을 배치하여 설계기준을 만족하는 말뚝의 소요길이(D)를 계산한다. 이 때 말뚝의 직경(B), 설치간격(S) 및 raft의 두께(t_r)는 적당히 가정한다. 다음으로 허용평균침하량과 허용부등침하량을 동시에 만족하도록 설계할 경우 말뚝의 배치는 기초의 중앙부에서 기초폭의 0.4~0.6배 정도 말뚝을 배치하여 설계기준을 만족하는 말뚝의 소요길이(D)를 계산한다. 이 때 말뚝의 배치범위를 점차 늘여가면서 말뚝의 소요길이를 계산하여 최적 말뚝의 배치범위와 말뚝의 소요길이를 결정한다.
- (4) 말뚝의 설치간격과 말뚝의 직경은 말뚝과 raft의 면적비($\Sigma A_p/A_r$) 및 침하기준에 따른 말뚝의 내력과 말뚝의 작용력과의 적정비를 참고하여 결정한다.
- (5) raft의 두께는 구조적으로 문제가 되지 않는 범위에서 최적의 두께로 결정한다.

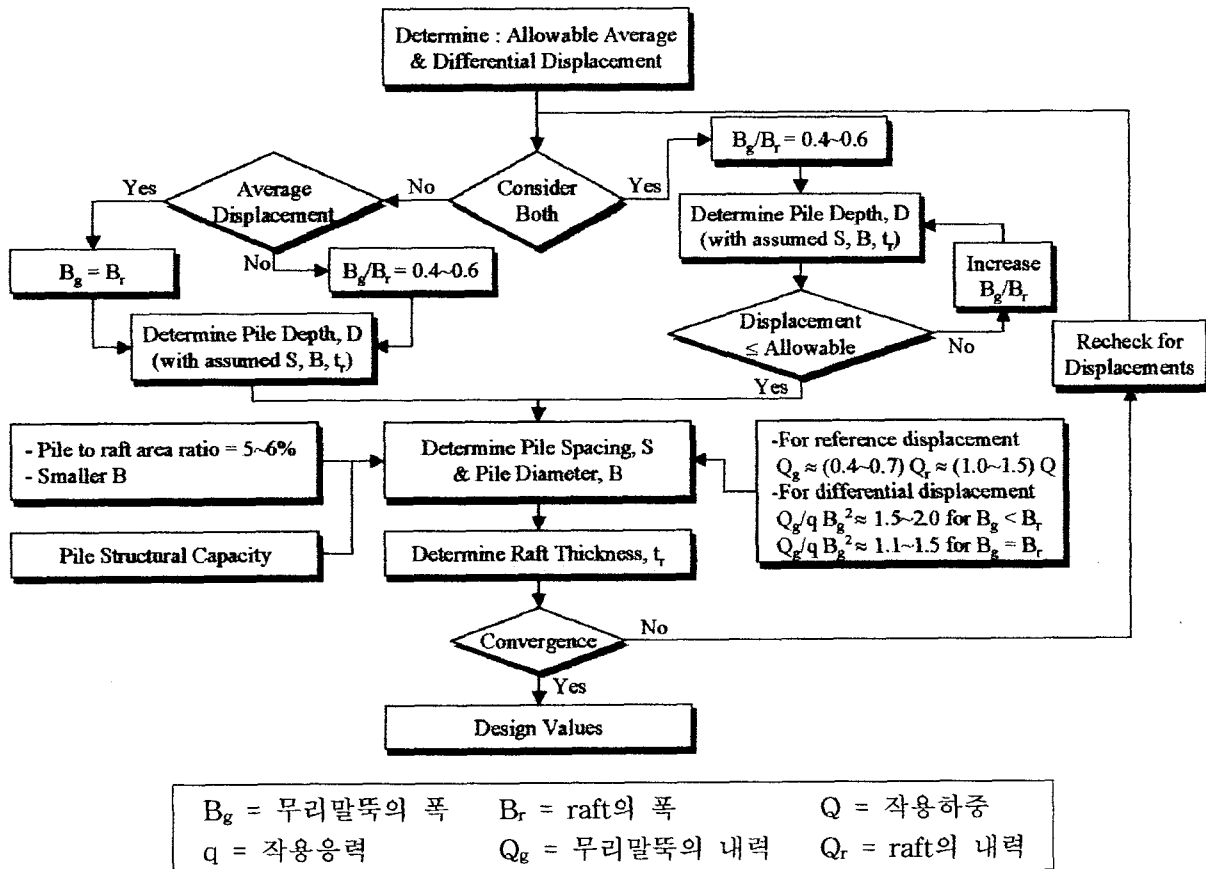


그림 4. Piled raft 기초의 설계절차(Prakoso & Kulhawy, 2001)

3. 분석 및 고찰

3.1 현장개요

여의도 리첸시아 빌딩은 철근철골콘크리트구조로 그림 5(a)와 같이 지상 40층 지하 6층으로 설계되어 있으며, 기초형식은 기초의 전체침하량을 줄이기 위해 소구경말뚝(천공 $\phi 300\text{mm}$, 강관 $\phi 244.5\text{mm}$, $t=12\text{mm}$)으로 보강된 MAT 기초로 그림 6과 같이 설계되었다. 또한 본 현장의 기초설계에 따른 지반 및 말뚝의 거동특성을 파악하기 위해 현장시험이 그림 5(b)와 같이 평판재하시험은 총 14개소, 대형평판재하시험은 1개소, 말뚝재하시험은 1개소에서 실시되었으며, 소구경말뚝으로 보강된 MAT기초의 전체적인 거동을 파악하기 위해 piled raft 재하시험(대형평판+말뚝재하시험)이 1개소에서 실시되었다.

계측은 기초구조물의 침하거동을 평가하고 소구경말뚝의 응력을 측정하여 기초구조물의 안정성 여부를 관리하기 위해 이루어졌으며, 빌딩의 시공중 및 시공완공 후의 장기적인 계측을 위해 현재 침하계 6개소와 변형율계(1개소당 6개), 하중계 및 토압계 각 6개소가 그림 5(b)와 같이 설치되어 있다.

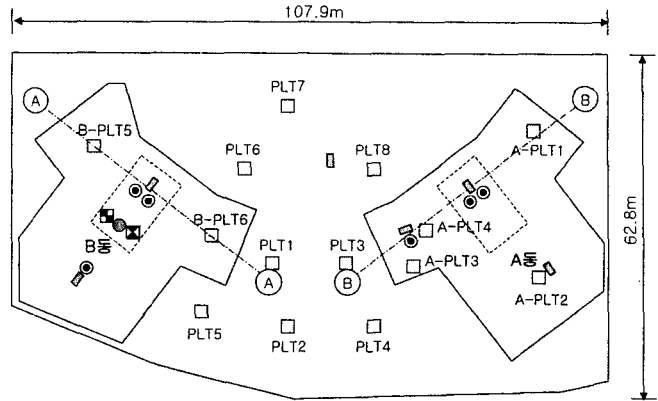
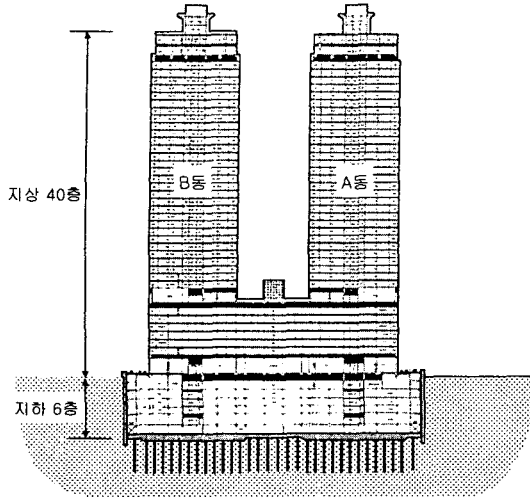
지층은 충적층(지표에서 G.L(-)20.4m~G.L(-)24.1m까지), 풍화토(G.L(-)24.1m~G.L(-)27.0m까지), 풍화암(G.L(-)25.2m~G.L(-)38.5m까지), 연암(G.L(-)36.4m~G.L(-)50.6m까지) 및 보통암순으로 형성되어 있으며, MAT기초는 A동의 경우 풍화암과 일부 연암층에 위치하며, B동의 경우는 풍화암층 상부에 위치하고 있다. 따라서 본 현장에서는 침하에 대한 대책방안으로 시공성과 경제성을 고려하여 소구경말뚝으로 MAT기초를 보강한 piled raft 기초시스템을 채택하게 되었다.

3.2 현장시험결과

여의도 리첸시아 빌딩 기초부지에서의 현장시험결과를 요약하면 표 1과 같다. 표 1에서 허용지지력은 항복하중의 1/2배 또는 극한하중의 1/3배에 해당하는 값 중 작은 값으로 결정하였으며, 예상침하량은 허용지지력에 해당하는 침하량값을 실제구조물의 기초폭을 감안하여 수정된 침하량을 나타낸 것이다. 또한 말뚝재하시험의 경우에 있어서 침하량은 허용지지력에 해당하는 침하량을 의미하며, 대형평판+말뚝재하시험의 경우에 있어서 침하량은 상부 콘크리트 블록을 무근으로 처리하여 최대시험하중 130tf에서 콘크리트 블록에 균열이 발생하여 시험이 중간에 종료된 관계로 최대시험하중 130tf에 해당하는 침하량을 표기한 것이다. 본 현장재하시험시 대형평판은 1m×1m×1m의 크기로 제작하였다.

표 1. 현장시험결과 요약

구 분	허용지지력 (tf/m ²)	예상침하량 (mm)	구 분	허용지지력 (tf/m ²)	예상침하량 또는 침하량 (mm)	
평판 재하시험	PLT1	50	평판 재하시험	A-PLT1	110이상	6.8
	PLT2	70		A-PLT2	110	30.6
	PLT3	62		A-PLT3	110이상	21.7
	PLT4	50이상		A-PLT4	110이상	21.4
	PLT5	62		B-PLT5	110이상	15.0
	PLT6	70		B-PLT6	90	23.9
	PLT7	70	대형평판재하시험	130이상	11.7	
	PLT8	70	말뚝재하시험	130	5.3	
			대형평판+말뚝재하시험	130이상	5.5	

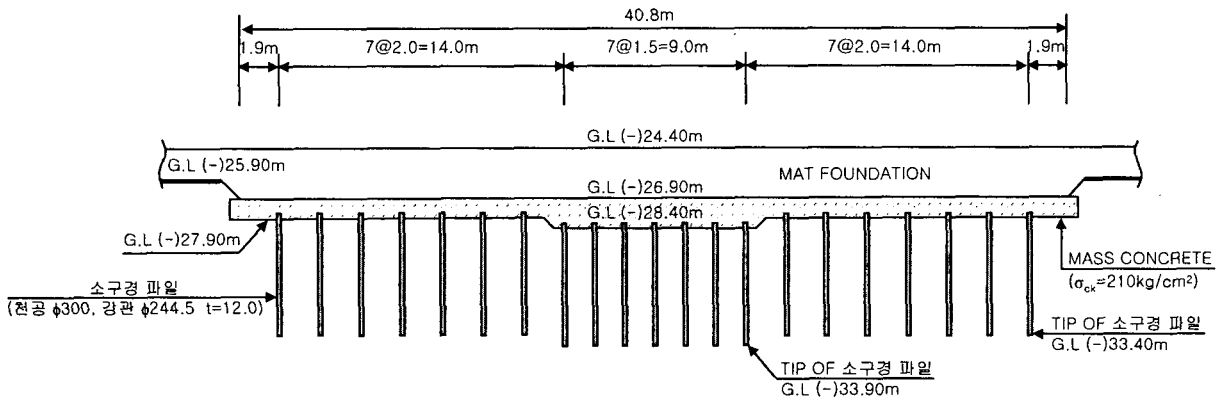


- 평판재하시험(14개소)
- ⊠ 대형평판재하시험(1개소)
- ▣ 침하계(6개소)
- ⊙ 말뚝재하시험(1개소)
- ⊠ 대형평판+말뚝재하시험(1개소)
- ⊙ 변형율계+하중계+토압계(6개소)

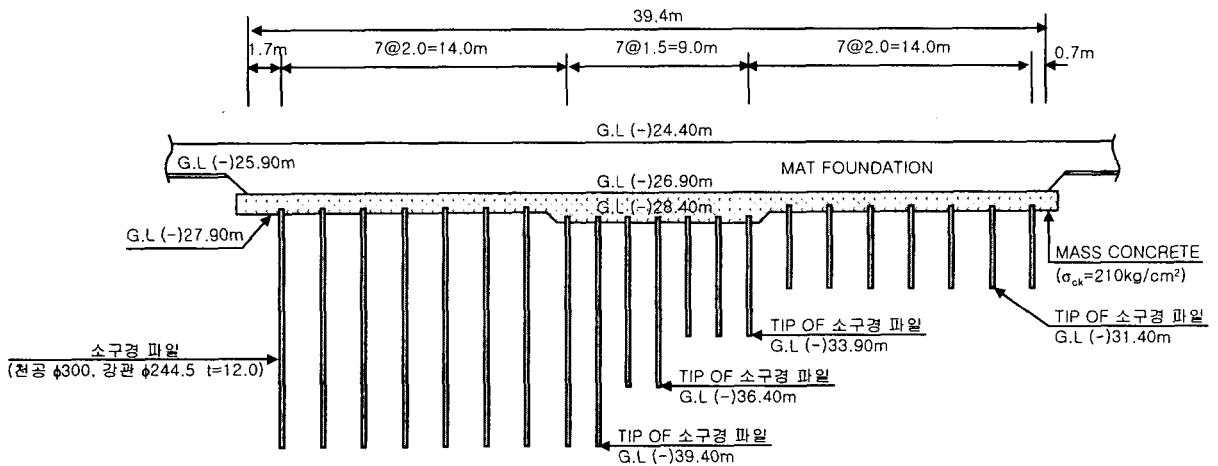
(a) 정면도

(b) 현장시험 및 계측 개요도

그림 5. 여의도 리첸시아 빌딩의 개요와 현장시험 및 계측 개요



(a) B동 기초상세도(단면 A-A)



(b) A동 기초상세도(단면 B-B)

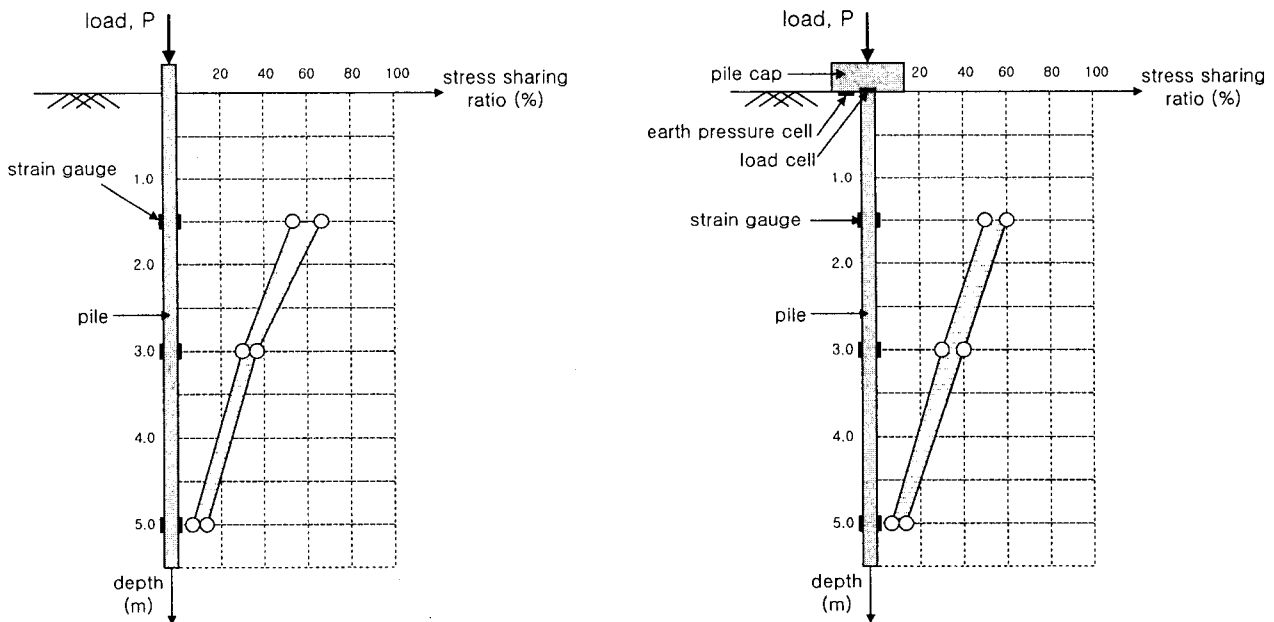
그림 6. 여의도 리첸시아 빌딩의 기초상세도

본 현장에 있어서 허용전체침하량은 20mm이며, 설계하중은 고층부의 경우 110t/m², 저층부의 경우 50t/m²이다. 표 1에서 알 수 있듯이 평판재하시험결과 설계하중을 모두 만족하는 것을 나타냈으나 예상 침하량이 일부 크게 평가되는 등 침하에 대한 대책이 필요한 것으로 나타났다. 또한 침하에 대한 대책으로 소구경말뚝으로 보강된 MAT 기초에서의 하중재하시험결과 침하량이 허용침하량 이내로 설계조건을 만족하는 것으로 나타났다.

3.3 말뚝의 깊이별 응력분담율 및 말뚝과 MAT의 하중분담율

말뚝재하시험시 말뚝의 길이방향으로 변형율계를 그림 7(a)와 같이 1.5m, 3.0m 및 5.0m 깊이에 각각 2개씩 설치하여 말뚝의 재하하중에 따른 깊이별 응력분담율을 분석한 결과 상부 1.5m지점에서는 말뚝에 작용하는 전체응력의 약 55~65%정도가 작용하며, 3.0m지점에서는 약 30~35%의 응력이 작용하고 있는 것으로 측정되었다. 또한 5.0m지점에서는 약 7~10%의 응력이 작용하는 것으로 나타났다.

대형평판+말뚝재하시험시의 경우에는 말뚝과 MAT의 하중분담 정도를 측정하기 위해 MAT 하부에 토압계를 설치하였으며, 말뚝 상부에는 하중계를 설치하였다. 또한 말뚝의 길이방향으로 변형율계를 그림 7(b)와 같이 1.5m, 3.0m 및 5.0m 깊이에 각각 2개씩 설치하여 말뚝의 재하하중에 따른 깊이별 응력분담율을 분석하였다. 분석결과 말뚝의 하중분담율은 상재하중이 증가함에 따라 상대적으로 줄어드는 경향으로 나타났으나 약 41~58%정도로 나타났다. 따라서 MAT 기초는 작용하중의 약 42~59%정도를 분담하는 것으로 볼 수 있으며, 말뚝의 재하하중에 따른 깊이별 응력분담율의 경우 상부 1.5m지점에서는 말뚝에 작용하는 전체응력의 약 50~60%정도가 작용하며, 3.0m지점에서는 약 30~40%의 응력이 작용하고 있는 것으로 측정되었다. 또한 5.0m지점에서는 10%내외의 응력이 작용하는 것으로 나타났다.



(a) 말뚝재하시험의 경우

(b) 대형평판+말뚝재하시험의 경우

그림 7. 현장시험시 측정된 말뚝의 깊이방향별 하중분담비

4. 결론

본 연구에서는 서울시 영등포구 여의도에 위치한 리첸시아 빌딩 신축공사와 관련하여 기초보강에 사용된 piled raft 기초시스템(소구경 말뚝+MAT)의 현장적용사례를 소개하고 현장에서 실시된 현장시험

자료를 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 현장에서는 MAT 기초의 바닥면이 풍화암층에 위치함에 따라 침하에 대한 대책방안으로 시공성과 경제성을 고려하여 소구경말뚝(천공 $\phi 300\text{mm}$, 강관 $\phi 244.5\text{mm}$, $t=12\text{mm}$)으로 MAT 기초를 보강한 piled raft 기초시스템을 채택하게 되었다.
- (2) 평판재하시험결과 설계하중을 모두 만족하는 것을 나타냈으나 예상침하량이 일부 크게 평가되는 등 침하에 대한 대책이 필요한 것으로 나타났다. 또한 침하에 대한 대책으로 소구경말뚝으로 보강된 MAT 기초에서의 하중재하시험결과 침하량이 허용침하량 이내로 설계조건을 만족하는 것으로 나타났다.
- (3) 말뚝의 재하하중에 따른 깊이별 응력분담율을 분석한 결과 상부 1.5m지점에서는 말뚝에 작용하는 전체응력의 약 50~60%정도가 작용하며, 3.0m지점에서는 약 30~40%의 응력이 작용하고 있는 것으로 측정되었다. 또한 5.0m지점에서는 10% 정도의 응력이 작용하는 것으로 나타났다.
- (4) 말뚝의 하중분담율은 상재하중이 증가함에 따라 상대적으로 줄어드는 경향으로 나타났으나 약 41~58%정도로 나타났다. 따라서 MAT 기초는 작용하중의 약 42~59%정도를 분담하는 것으로 나타났다.

본 현장에서는 침하계, 변형율계, 하중계 및 토압계가 설치되어 현재 주기적으로 계측되고 있으며, 향후 건물의 시공중 및 완공후의 거동 예측과 현장계측치와의 비교 연구가 이루어질 예정이다.

참고문헌

1. Katzenbach, R., Arslan, U., and Moormann, C.(1998), "Design and safety concept for piled raft foundations", *Proceedings of the 3rd International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, Ghent, Belgium, pp. 439-448.
2. Katzenbach, R. and Moormann, C.(1997), "Design of axially loaded piles and pile groups in Germany, Actual practice and recent research results", *Proceedings of the International Seminar on Design of Axially Loaded Piles-European Practice*, Brussels, Belgium, pp. 177-201.
3. Katzenbach, R. and Reul, O.(1997), "Theme Lecture: Design and performance of piled rafts", *Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 4, Hamburg, Germany, pp. 2253-2256.
4. Poulos, H. G. and Davis, E. H.(1980), *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley & Sons, Inc.
5. Poulos, H. G., Small, J. C., Ta, L. D., Sinha, J., and Chen, L.(1997), "Comparison of some methods for analysis of piled rafts", *Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, Hamburg, Germany, pp. 1119-1124.
6. Prakoso, W. A. and Kulhawy, F. H.(2001), "Contribution to Piled Raft Foundation Design", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No. 1, pp. 17-24.
7. Randolph, M. F.(1993), "Design methods for pile groups and piled raft", *Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 5, New Delhi, India, pp. 61-82.