팽이기초공법(Top-Base Method)의 하중-침하량 분석

Load-Settlement Characteristics of Concrete TOP-BASE Foundation on Soft Ground

김재영[1], Jae-Young Kim, 정상섬[2], Sang-Seom Jeong, 이재환[3], Jae-Hwan Lee

[1] 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.
[2] 연세대학교 공과대학 토목공학과 정교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.
[3] 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

SYNOPSIS : A new foundation type which is called Top-Base method has been used frequently in engineering practices in Korea. In this study, the settlement behavior of concrete Top-Base foundation on soft ground is investigated since the consolidation settlement of the embedding depth and the effect of footing dimensions are not included in current Korean criterion (2007). To obtain detailed information, the model tests of the Top-Base foundation are performed using the PLAXIS 3D finite element analysis.

It is shown that in-situ measurements and finite element analysis of the behavior of foundations indicate that consolidation settlement is reduced up and bearing capacity of the foundation increases up to 50%~100%, compared to the primary non-treated ground.

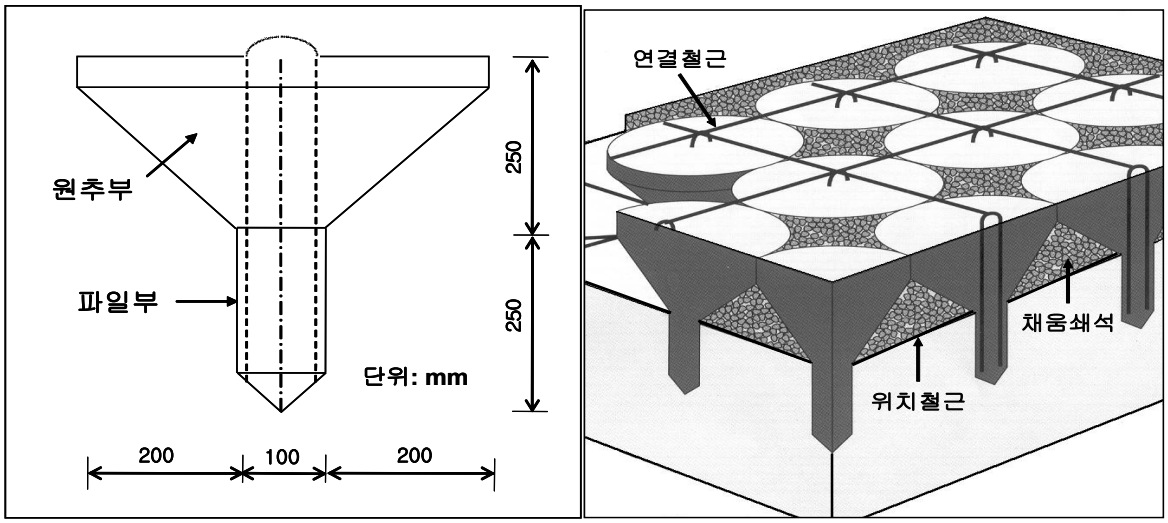
Based on this study, it is found that the Top-Base foundation prevents the lateral deformation of soft ground and reduces its negative dilatancy to the surface settlement, and that the foundation creates rather uniform stress distribution under it to increase its bearing capacity. It is also found that the total settlement of Top-Base foundation was highly dependent on the consolidation settlement and footing configurations..

Keywords : Top-Base method, soft ground, 3D finite element analysis, bearing capacity, consolidation settlement

1. 서 론

현재 국내에는 많은 연약지반이 분포하고 있지만, 이러한 지반의 보강에 있어서 깊은 기초나 그 이외 연약지반 처리공법 등의 과잉설계는 필요하지 않으며(김상규, 2007), 부지 개발에 있어 큰 걸림돌인 지지력 부족과 큰 침하량을 보이는 연약지반을 보강할 수 있는 공법이 필요한 실정이다. 따라서 연약지반 상에 지지력이 충분하지 않고, 침하발생의 우려가 있는 구조물을 설치하고자 할 경우에 대한 연약지반 보강공법의 관심과 연구가 점점 활발해지고 있으며, 그에 대한 대표적인 예로 팽이말뚝기초공법이 사용 가능하다.

팽이기초공법은 팽이모양의 원추부 접지면적의 극대를 통한 상재하중의 분산 및 지반에 근입된 파일부의 근입 저항으로 지지력을 증대시킴과 동시에, 침하감소의 효과를 기대한 공법이다. 그림 1.1 (a)와 같이 팽이말뚝의 구성은 원추부와 파일부로 구성되며, 팽이말뚝의 상부직경은 500mm이다. 또한 그림 1.1 (b)와 같이 팽이기초는 팽이파일, 위치철근, 연결철근, 채움쇄석으로 구성된다.



(a) 팽이말뚝 형상도 (b) 팽이말뚝 부설 단면도

그림 1.1 팽이기초(Top-base)공법(에스트건설, 2007)

팽이기초공법은 말뚝기초를 적용하기에는 경제적으로 너무 과대한 설계가 되는 경우에 유리하며, 협소한 공사부지에서 시공이 가능할 뿐 아니라 소요장비가 비교적 단순하고 소음이나 진동의 발생을 염려할 필요가 없는 친환경공법이다.

하지만, 현재 실무에서 사용되고 있는 팽이기초 침하량 산정법은 압밀침하를 고려하지 않으며, 이러한 방식으로 계산된 침하량은 실제 현장 침하량에 비해 과다하게 산정되고 있다. 또한, 어느 이상의 재하폭에서는 영향깊이가 수렴할 것으로 예상되지만, 현재 침하량 산정법은 재하폭에 비례하여 영향깊이를 고려하고 있다. 따라서 이를 실질적으로 확인할 수 있는 비교 데이터를 수치해석 및 현장계측을 통해 검증하는데 그 목적이 있다.

2. 계측현장 조건

2.1 점성토지반(인천 ○○ 현장)

본 연구에서 선정한 첫 번째 현장은 인천 ○○의 물류창고 공사현장으로서, 전체 MAT 기초를 적용하였으며, 지반조건은 그림 2.1과 같이 실트질 점성토로 이뤄진 연약지반이다. 구조물의 종류는 지하PIT층, 지상 1층의 물류창고로써 최대하중이 100 kN/m^{2}으로 구조물하중이 크지 않으며, 팽이기초가 적용되는 일반적인 연약지반에서 시공되었다. 본 현장의 지반조사를 통한 현장 물성은 표 2.1과 같다. 현장물성은 표준관입시험을 통해 얻어진 N치와 시료를 이용하여 추정 또는 산정(한국도로교시방서)하였다.

표 2.1 현장지반 물성치(인천 ○○현장)

구 분	단위중량 (kN/m^3)	탄성계수 (kPa)	포아송비	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)
매립토	20	1.5x10^4	0.3	10	32
실트질 점성토	16	7.3x10^3	0.3	35	0
풍화토	19	7.0x10^4	0.33	20	31
풍화암	22	3.8x10^5	0.25	30	35

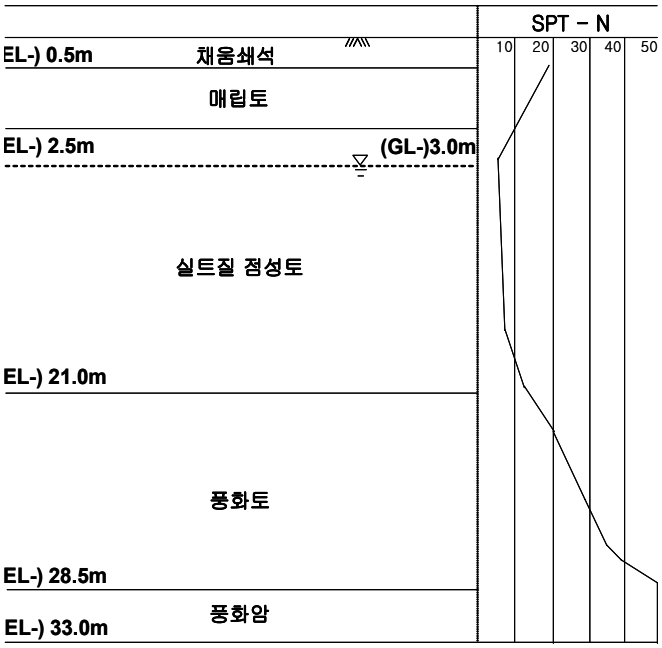


그림 2.1 지질주상도(인천 ○○현장)

2.2 점성토-사질토지반(경기 ○○ 현장)

두 번째 현장은 경기 ○○의 전체 MAT 기초를 사용한 아파트형 임대공장 공사현장으로 지반구성은 그림 2.2와 같이 실트질 점성토 및 실트질 모래로 이뤄졌다. 앞선 인천 ○○의 물류창고 공사현장에 비하여 다소 지반조건은 좋은 상태지만, 구조물이 지하PIT층, 지상 5층의 설계하중 150 kN/m^{2}정도로 보다 큰 형태였다. 본 현장의 지반 역시 팽이기초가 적용되는 일반적인 연약지반이다. 본 현장의 지반조사를 통한 현장 물성은 표 2.2와 같다. 현장물성은 표준관입시험을 통해 얻어진 N치와 시료를 이용하여 추정 또는 산정하였다.

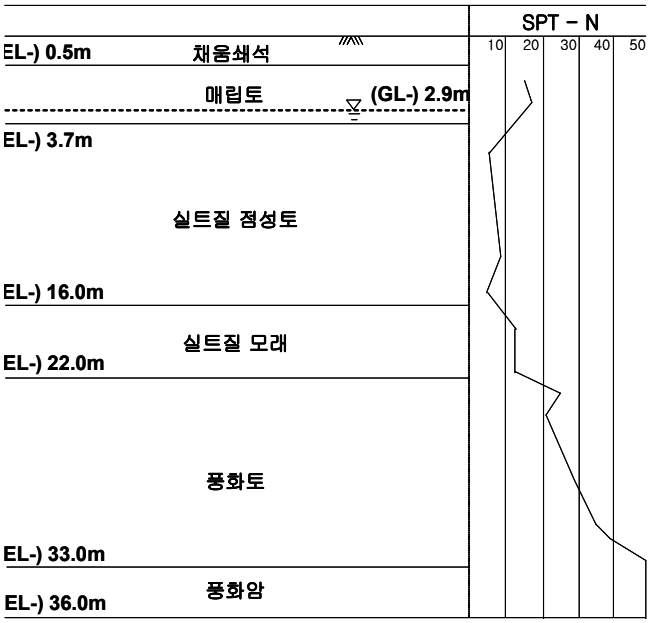


그림 2.2 지질주상도(경기 ○○현장)

표 2.2 현장지반 물성치(경기 ○○현장)

구 분	단위중량 (kN/m^3)	탄성계수 (kPa)	포아송비	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)
매립토	19	$1.5x10^4$	0.3	10	28
실트질 점성토	16	$8.45x10^3$	0.3	40	0
실트질 모래	16	$5.1x10^3$	0.3	5	28
풍화토	20	$7.0x10^4$	0.33	20	33
풍화암	22	$3.8x10^5$	0.25	30	35

3. 수치해석

본 연구에서는 팽이기초공법의 압밀과 재하폭의 영향을 확인하기 위하여, 대표적인 연약지반현장에 대하여 3차원 유한요소해석 기법을 이용한 PLAXIS 3D FOUNDATION ver.2 (2007) 프로그램을 통하여 현장 계측 결과와 비교·분석하였다.

팽이말뚝의 총 침하량을 평가하기 위하여 수치해석 시 팽이말뚝기초에 적용한 구조물의 하중은 팽이기초의 적용 가능한 최대하중을 적용하여 해석을 실시하였다. 팽이말뚝의 개수를 증가시키면서 재하폭의 증가에 따른 영향깊이 및 침하량의 영향을 확인하였으며, 또한 지반종류에 따른 압밀해석을 수행하여, 압밀에 대한 영향을 분석하였다.

수치해석모델의 경계는 직육면체(20m x 20m x 36m) 경계를 사용하였다. 해석모델의 경계는 팽이말뚝의 모델링에 대한 영향이 발생하지 않는 충분한 범위에 대하여 산정하였다. 그림 3.1은 지반의 경계조건을 나타낸 것으로 x, y, z방향에 대해서 변위를 발생시키지 않도록 구속하였다. 해석 단계는 구조물 시공단계에 따라 초기 원지반 상태를 반영하였으며, 팽이기초 시공 및 하중 재하와 압밀해석 순으로 수행하였다.

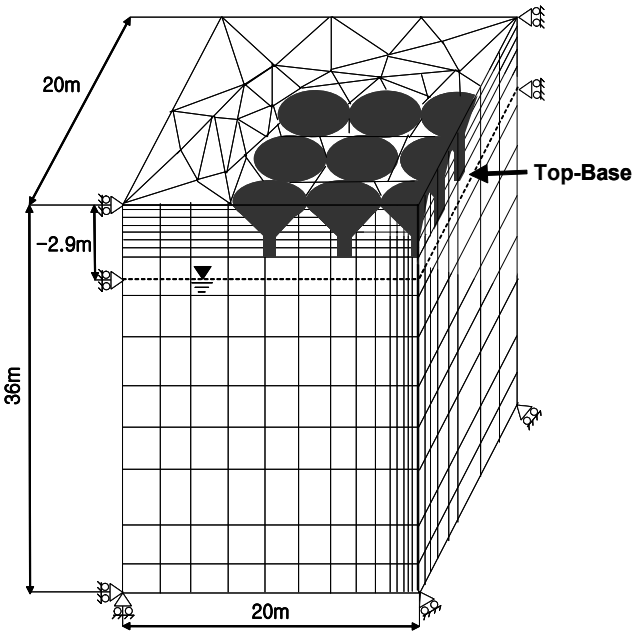


그림 3.1 해석대상 팽이말뚝과 지반의 Geometry

3.1 점성토지반(인천 ○○ 현장)

3.1.1 재하폭에 따른 침하량 분석

해석 시, 사용된 물성 및 지반조건은 표 3.1과 같이 계측 현장의 지반조사를 통해 얻어진 물성치 및 지반구성을 현장과 동일하게 적용하였으며, 해석 단계 및 적용하중(=100kN/m^2)도 시공일지와 현장조건을 바탕으로 최대한 동일한 조건에서 수치해석을 실시하였다. 또한, 본 현장은 점성토로 이루어진 연약지반이기 때문에, 구조물시공이 끝난 시점을 시작으로 압밀해석을 실시하였다.

본 현장의 해석방법은 그림 3.2와 같이 팽이말뚝의 개수를 증가시키면서 침하량이 수렴하는 배열을 확인하였다. 본 현장의 지반조건에 대한 수치해석을 실시한 결과, 팽이말뚝 개수가 증가함에 따라 침하량은 증가하였으며, 그 증가하는 비율이 급격히 감소하면서 7x7 배열 이상에서는 침하 증가량이 매우 미소하게 나타났다. 따라서 이와 같은 결과를 바탕으로 팽이기초의 수렴배열을 정의하였으며, 현재 산정법과 같이 재하폭 증가에 따라 침하량이 계속적으로 증가하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 이후의 수치해석 시, 7x7 배열의 팽이말뚝 모델링을 통하여 현장 전체의 팽이말뚝개수를 대체하여 해석하였다.

표 3.1 해석에 적용된 현장의 물성치 (인천 ○○현장)

구 분	적용모델	단위중량 (kN/m^3)	탄성계수 (kPa)	포아송비	점착력 (kPa)	내부마찰각 (deg)	투수계수 (m/day)
팽이말뚝	L.E	23	$2.010x10^7$	0.167	-	-	-
채움쇄석	M.C	19	$5.0x10^4$	0.35	0	42	0.2
매립토	M.C	20	$1.5x10^4$	0.3	10	32	0.1
실트질 점성토	M.C	16	$7.3x10^3$	0.3	35	0	0.0008
풍화토	M.C	19	$7.0x10^4$	0.33	20	31	0.01
풍화암	M.C	22	$3.8x10^5$	0.25	30	35	0.02

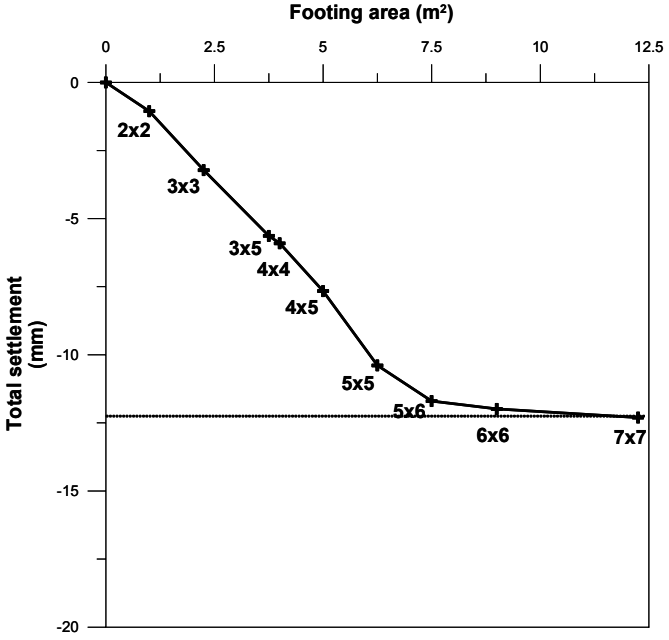


그림 3.2 재하폭 변화에 따른 침하량(인천 ○○현장)

3.1.2 재하폭에 따른 영향깊이 분석

재하폭 변화에 따른 영향깊이 분석도 앞서 수행한 재하폭-침하량과 같이, 어느 이상의 재하폭에서는 영향깊이가 수렴할 것으로 판단되기 때문에 이를 확인해보았다.

해석 시 사용 물성 및 지반조건은 앞의 해석과 동일하게 적용하였으며, 해석 단계도 동일한 조건에서 수치해석을 실시하였다. 해석방법은 팽이말뚝의 개수를 증가시키면서 각 팽이개수에서의 영향깊이를 배열을 확인하였다. 영향깊이는 응력구근을 통해 응력이 영향을 미치는 최대 깊이까지로 산정하였다. 해석결과, 팽이말뚝 개수가 증가함에 따라 영향깊이도 역시, 침하량이 계속적으로 증가하는 경향으로 증가하였지만, 증가량은 점차 감소하면서 13.63m 이상에서는 영향이 없었다. 이는 현재 산정법에서 적용한 영향깊이 15m와 유사하였다.

따라서 이 결과와 앞에서 해석한 침하량 결과를 토대로 역해석하여 본 현장에 대한 하중분산각을 확인하였다. 하중분산각을 제안한 역해석 방법은 실제 현장의 계측 침하량과 수치해석을 통한 영향깊이를 적용하여 각 분할층의 응력 및 침하량 계산 시의 하중분산각 w를 계산하였다. 또한, 각 분할층의 지중응력의 깊이별 응력비를 통하여 하중분산각을 검증하였다.

그림 3.3 및 3.4는 깊이별 축방향 변위와 팽이말뚝의 하중-영향깊이를 나타냈다. 팽이배열을 증가시킬수록 말뚝두부의 변위에서는 차이를 보였지만, 깊이가 깊어질수록 그 차이는 급격히 감소하여 약 13m이상에서는 변위가 발생하지 않았다. 이는 팽이기초의 특성상, 팽이말뚝 개수가 증가할수록 하중분산효과가 커져 침하량이 급격히 감소하는 것으로 볼 수 있다. 영향깊이도 팽이말뚝 개수가 증가할수록 그 증가폭이 급격히 감소하다, 7x7 배열에서는 수렴하는 것으로 나타났다. 따라서 이를 바탕으로 최대영향깊이를 산정하였다. 또한, 하중분산각은 실제 현장의 침하량과 산정식에서 고려된 깊이를 감안한 역해석을 통하여 검증하였다.

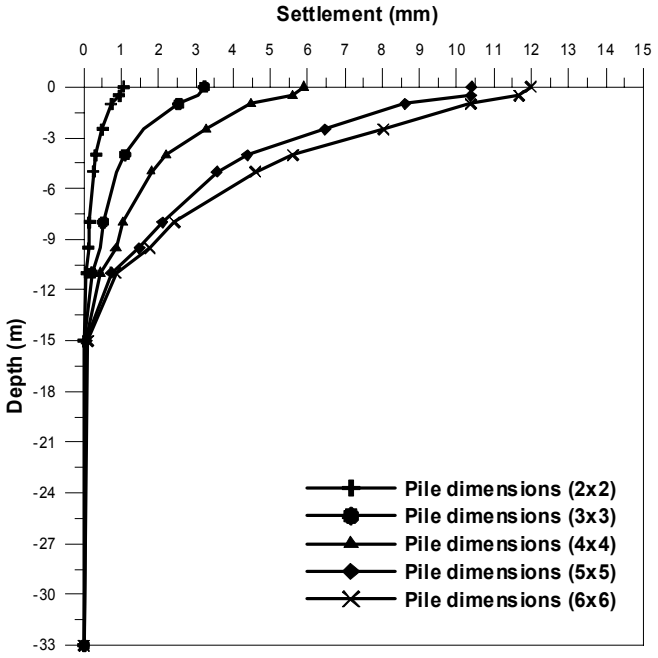


그림 3.3 각 깊이별 축방향 변위(인천 ○○현장)

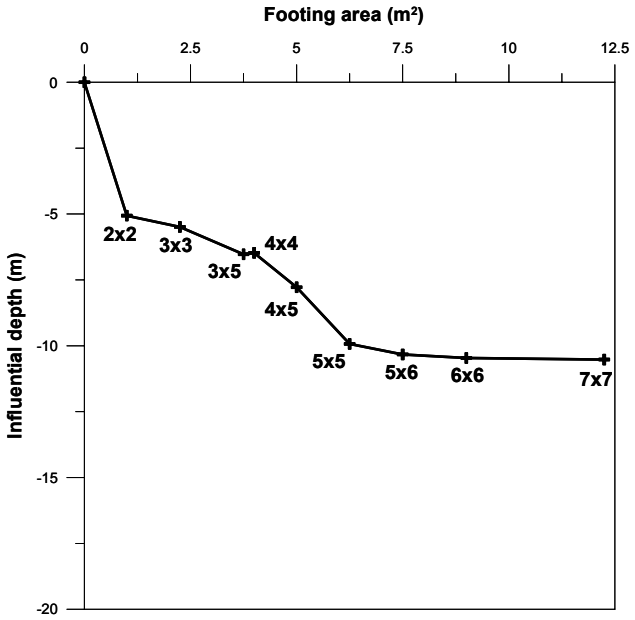


그림 3.4 재하폭 변화에 따른 영향깊이(인천 ○○현장)

표 3.2 결과 분석 (인천 ○○현장)

지반	N치	구분	영향깊이 (m)	총침하량 (mm)	제안분산각 (deg)	제안분산각을 통한 침하량 (mm)
실트질 점성토 (E_s =7.3x10^3)	4~9	현장계측	-	11.0	-	-
		기존 산정식	13.5	38.8	45	-
		수치해석	13.62	12.3	57.6	21.41

표 3.2는 N치 4~9인 점성토지반의 대표적인 인천 ○○현장에 대한 영향깊이 및 총침하량 등을 나타낸다. 현장계측 침하량(=11mm)과 수치해석을 통한 결과(=12.3mm)는 비슷하게 나타났다. 여기서 제안분산각에 대해서는 현재 팽이기초 산정법에서는 지반의 종류 및 작용하중과는 상관없이 45도 정도를 일정하게 적용하고 있다. 하지만 이럴 경우 침하량이 실제 발생 침하량에 비하여 과다하게 산정하게 되며, 따라서 본 연구에서는 현장의 지반조건에 맞는 하중분산각 57.6도를 현장계측치 및 수치해석을 통하여 확인하였다. 하중분산각을 제안한 근거는 현장계측 침하량과 수치해석을 통한 영향깊이를 이용하여, 현재 팽이기초 침하량 지중응력 계산식에 적용하여 확인하였다. 또한 이 결과를 적용하여 계산한 침하량(=21.41mm)이 기존 산정방식을 통한 값(=38.8mm)보다 현저히 작아짐과 동시에 실제 침하량(=11.0mm)에 훨씬 근접하게 계산됨을 확인할 수 있었다.

3.1.3 압밀을 고려한 현장 계측과의 비교 분석

수치해석 시, 기초시공완료부터 구조물 시공완료시점까지는 탄성해석, 그 이후 시점은 압밀해석을 실시하였다. 해석결과, 수치해석과 현장계측의 즉시 침하량은 유사하게 나타났으며, 이후 그림 3.5와 같이 구조물 시공이 완료된 시점부터 약 140일 동안, 수치해석과 현장계측의 압밀침하량을 비교하였다. 또한 현재 팽이기초공법의 침하량 산정법을 통한 허용 침하량과 약 50mm 정도의 일반적인 철근콘크리트 구조물의 허용 침하량을 최대기준으로 정하였다 (Terzaghi & Peck, 1948).

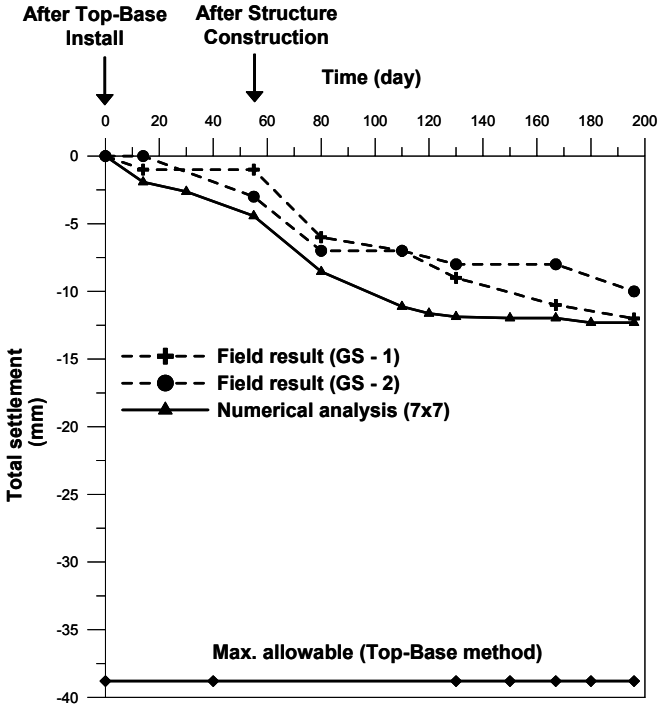


그림 3.5 현장 및 수치해석 결과(인천 ○○현장)

팽이기초의 압밀 분석결과, 그림 3.5와 같이 구조물시공이 완료되기까지의 55일 동안 1~3mm 정도의 즉시 침하가 발생하였다. 또한 이후 압밀 침하량도 수치해석과 현장 계측에서 미소한 차이는 보였으나, 압밀에 대한 영향이 존재함을 확인하였다.

하지만 수치해석 및 현장계측 결과 모두, 현재 팽이기초의 침하량 산정 기준에 비하여 25mm이상의 적은 침하량이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 현재의 침하량 산정방식이 팽이기초의 침하량을 과도하게 산정하고 있다고 볼 수 있다.

3.2 점성토-사질토지반(경기 ○○ 현장)

3.2.1 재하폭에 따른 침하량 분석

본 현장의 해석 시, 사용된 물성 및 지반조건은 표 3.3과 같이 적용하였으며, 해석 단계 및 적용하중(=150kN/m^2)도 시공일지와 현장조건을 바탕으로 최대한 동일한 조건에서 수치해석을 실시하였다. 또한, 구조물시공이 끝난 시점을 시작으로 압밀해석을 실시하였다.

해석방법은 그림 3.6과 같이 팽이말뚝의 개수를 증가시키면서 침하량이 수렴하는 배열을 확인하였다. 본 현장의 지반조건에 대한 수치해석을 실시한 결과, 팽이말뚝 개수가 증가함에 따라 침하량 증가비율이 점차 감소하면서 6x6 배열이상에서 침하 증가량이 매우 미소하게 나타났다. 따라서 이와 같은 결과를 바탕으로 팽이기초의 수렴배열을 정의하였으며, 이후의 수치해석 시, 6x6 배열의 팽이말뚝 모델링을 통하여 현장 전체의 팽이말뚝개수를 대체하여 해석하였다.

표 3.3 해석에 사용된 현장의 물성치 (경기 ○○현장)

구 분	적용모델	단위중량 (kN/m^3)	탄성계수 (kPa)	포아송비	점착력 (kPa)	내부마찰각 (deg)	투수계수 (m/day)
팽이말뚝	L.E	23	$2.010x10^7$	0.167	-	-	-
채움쇄석	M.C	19	$5.0x10^4$	0.35	0	42	0.2
매립토	M.C	19	$1.5x10^4$	0.3	10	28	0.1
실트질 점성토	M.C	16	$8.45x10^3$	0.3	40	0	0.0008
실트질 모래	M.C	16	$5.1x10^3$	0.3	5	28	0.004
풍화토	M.C	20	$7.0x10^4$	0.33	20	33	0.01
풍화암	M.C	22	$3.8x10^5$	0.25	30	35	0.02

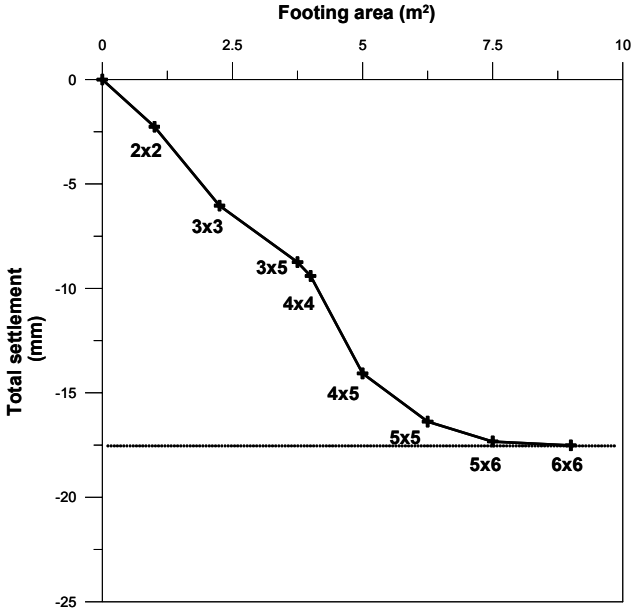


그림 3.6 재하폭 변화에 따른 침하량(경기 ○○현장)

3.2.2 재하폭에 따른 영향깊이 분석

해석 시 사용 물성 및 지반조건은 앞의 해석과 동일하게 적용하였으며, 해석 단계도 동일한 조건에서 수치해석을 실시하였다.

해석방법은 팽이말뚝의 개수를 증가시키면서 각 배열에서의 영향깊이를 배열을 확인하였다. 영향깊이는 응력구근을 통해 응력이 영향을 미치는 최대 깊이까지로 산정하였다. 해석 결과, 팽이말뚝 개수가 증가함에 따라 영향깊이는 계속적으로 증가하는 경향으로 증가하였지만, 증가량은 점차 감소하면서 16.12m 이상에서는 영향이 없었다. 이는 현재 산정법에서 적용한 영향깊이 15m와 유사하였으며, 따라서 이 결과와 앞서 해석한 침하량을 토대로 역해석하여 본 현장에 대한 하중분산각을 제시하였다.

그림 3.7 및 3.8은 경기 ○○현장의 깊이별 축방향 변위와 팽이말뚝의 하중-영향깊이를 나타냈다. 본 해석 결과 역시, 팽이배열을 증가시킬수록 말뚝두부의 변위에서는 차이를 보였지만 깊이가 깊어질수록 그 차이는 급격히 감소하여 약 16m이상에서는 더 이상 변위가 발생하지 않았다. 또한, 영향깊이도 팽이말뚝 개수가 증가할수록 그 증가폭이 감소하다, 6x6 배열에서는 수렴하는 것으로 나타났다.

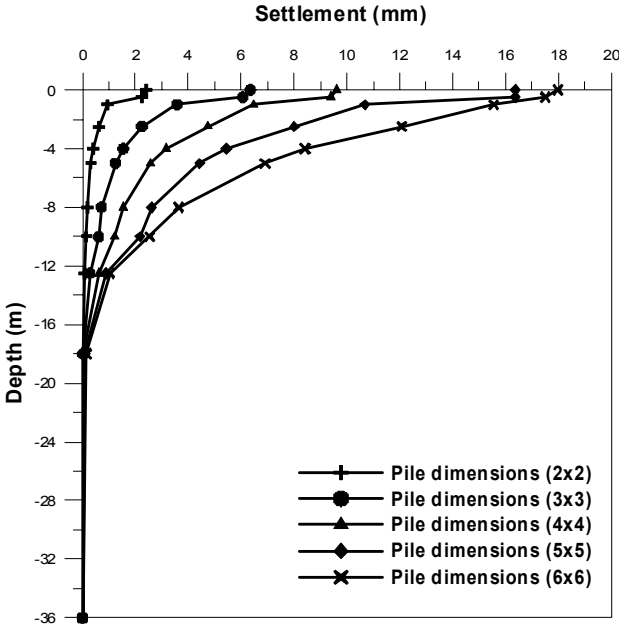


그림 3.7 각 깊이별 축방향 변위(경기 ○○현장)

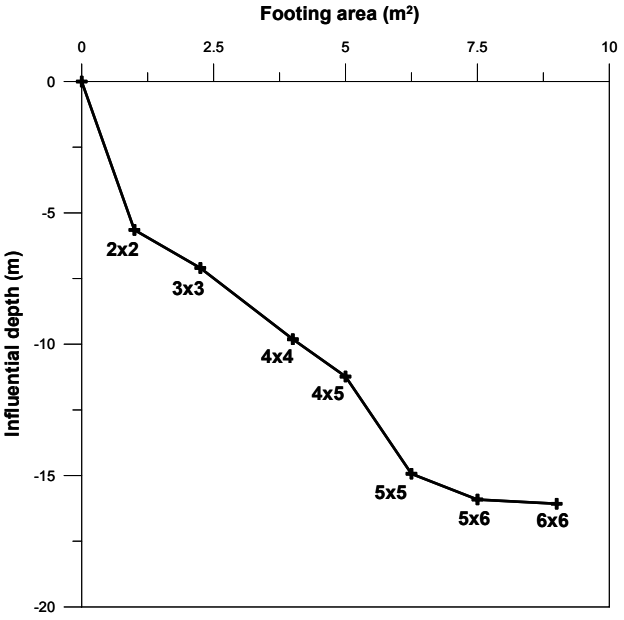


그림 3.8 재하폭 변화에 따른 영향깊이(경기 ○○현장)

따라서 이를 바탕으로 최대영향깊이를 산정하고, 축방향 변위 감소폭을 추세선으로 나타내어 하중분산각을 확인하였다. 또한, 하중분산각은 실제 현장의 침하량과 산정식에서 고려된 깊이를 감안한 역해석을 통하여 검증하였다.

표 3.4는 경기도 ○○현장에 대한 영향깊이 및 총침하량 등을 나타낸다. 여기서도 현장계측 침하량(=16.3mm)과 수치해석을 통한 결과(=17.51mm)는 비슷하게 나타났다. 하중분산각에 대해서는 앞에서 언급한 내용과 같은 의미를 가지며, 제안한 영향깊이와 하중분산각을 현재 팽이기초 침하량 산정식 중 지중응력 계산식에 적용하는 방식으로 기법을 제안하였다. 따라서 본 현장의 해석에 대해서는 현장의 지반종류에 맞는 하중분산각(=55.5도)을 제안하였다. 또한 이 값을 적용한 침하량(=25.3mm) 역시, 기존 산정방식을 통한 값(=39.4mm)보다 실제 발생하는 침하량(16.3mm)과 유사함을 알 수 있었다.

표 3.4 결과 분석 (경기 ○○현장)

지반	N치	구분	영향깊이 (m)	총침하량 (mm)	제안분산각 (deg)	제안분산각을 통한 침하량 (mm)
실트질 점성토 (E_s =8.45x10^3)	4~9	현장계측	-	16.3	-	-
		기존 산정식	15.0	39.4	45	-
		수치해석	16.12	17.51	55.5	25.3

3.2.3 압밀을 고려한 현장 계측과의 비교 분석

수치해석 시, 기초시공완료부터 구조물 시공완료시점까지는 탄성해석, 그 이후 시점은 압밀해석을 실시하였다. 해석결과, 수치해석과 현장계측의 즉시 침하량은 유사하게 나타났으며, 이후 그림 4.12와 같이 구조물 시공이 완료된 시점부터 약 120일 동안, 수치해석과 현장계측의 압밀침하량을 비교하였다. 또한 현재 팽이기초공법의 침하량 산정법을 통한 허용 침하량과 약 50mm 정도의 일반적인 철근콘크리트 구조물의 허용 침하량을 최대기준으로 정하였다 (Terzaghi & Peck, 1948).

경기 시화 현장의 분석결과, 그림 3.9와 같이 구조물시공이 완료되기까지의 120일 동안 10mm 정도의 즉시 침하가 발생하였으며, 이는 현장계측값 분석 시에도 유사하게 계측되었다. 또한 이후 발생하는 압밀 침하량도 수치해석과 현장 계측에서 미소한 차이는 보였으나, 압밀에 대한 영향이 존재함을 확인하였다.

하지만 수치해석 및 현장계측 결과 모두, 현재 팽이기초의 침하량 산정 기준에 비하여 20mm정도의 적은 침하량이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 현재의 침하량 산정방식이 팽이기초의 지지력을 과소평가하여 과도하게 산정하고 있다고 판단된다.

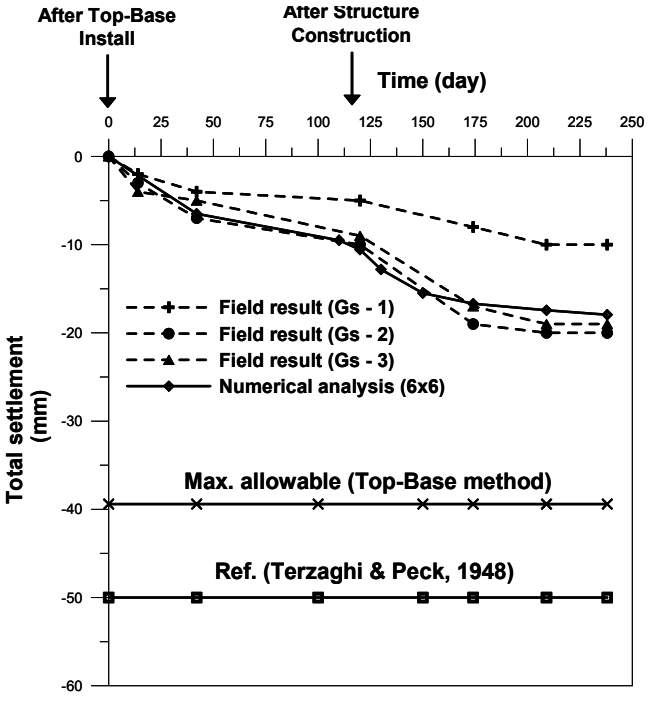


그림 3.9 현장 및 수치해석 결과(경기 ○○현장)

4. 결 론

본 연구에서는 현재 팽이기초의 침하량 산정법에서 고려되지 못하고 있는 재하폭과 압밀의 영향을 확인해보기 위하여 3차원 수치해석을 통한 대표적인 연약지반현장에 대한 영향깊이와 하중분산각을 해석 및 확인하였다. 그 결과, 현재 침하량 산정법은 침하량을 과다하게 산정하고 있음을 알 수 있었으며, 지반종류에 따른 특성을 전혀 반영하지 못하고 있었다. 따라서 실제 팽이기초가 시공된 현장의 계측을 통한 검증으로 현장 적용성을 확보할 수 있었다.

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 현재 팽이기초의 침하량 산정 시, 재하폭이 증가함에 따라 영향깊이도 비례적으로 증가하여 고려된다. 하지만 수치해석 결과, 재하폭에 따른 영향깊이의 증가는 존재하지만 그 증가폭은 급격히 감소하였으며, 최종적으로 팽이말뚝 배열이 7x7 이상인 재하폭에서는 영향깊이가 수렴하였다.

(2) 수치해석과 현장 계측을 통해, 팽이기초가 적용된 구조물 시공 이후의 압밀 침하량은 분명히 발생하였음을 알 수 있었다. 따라서 현재 지반종류와 상관없이 압밀침하가 고려되지 않는 팽이기초 침하량 산정법을 수정하여, 점성토지반에서는 압밀 침하량을 포함해야함을 알 수 있었다.

(3) 수치해석과 현장결과에서 볼 수 있듯이, 점성토지반에서는 압밀 침하량을 포함한 침하량이 현재의 산정식을 통해 계산된 침하량보다도 훨씬 작은 값을 나타남을 알 수 있었다. 따라서 점성토지반의 경우에는 구분적으로 즉시 침하와 압밀침하 계산을 유동적으로 적용하는 것이 효율적이라고 판단된다.

참고문헌

도로교표준시방서(2005), 건설교통부.

팽이기초공법설계와시공편람(1998), 에스트건설(주).

팽이말뚝기초(T.B.M)공법제안서(2007), 에스트건설(주).

Kim, Sang-Kyu. (2007), "Depositional Characteristic of Busan Clay, Effects of Artesian Pressure, and Experiences from Ground Improvement". ***KGS Fall National Geotechnical Engineering Conference2007***. pp. 3-38.

PLAXIS3D Foundation, User's manual, Ver.2(2007), R.B.J. Brinkgreve & W.M. Swolfs.

Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1948), ***Soil Mechanics in Engineering Practice***, ***Wiley***, New York.