

연약지반에 시공된 팽이말뚝기초(Top-Base)의 하중-침하량 분석

Load-Settlement Characteristics of Concrete Top-Base Foundation on Soft Ground

김 재 영¹ Kim, Jae-Young
정 상 섭² Jeong, Sang-Seom
김 수 관³ Kim, Soo-Kwan

Abstract

The behavior of the Top-Base foundation was investigated by carrying out 3D finite element method. Special attention is given to the settlement behavior of concrete Top-Base foundation due to the consolidation settlement of the embedding depth and the effect of footing dimensions which are not included in the practical design. To obtain the detailed informations, a series of numerical analyses were performed for different pile configurations. It is shown that as the number of piles in a group increases, the calculated settlement also increases. However, for the 7×7 group, there is no further increase in settlement. Based on this study, it is found that the total settlement of Top-Base foundation is highly influenced by the consolidation settlement and footing configurations. It is also found that the current design method overestimates the settlement, and thus, needs to be modified and supplemented.

요 지

본 연구에서는 수치해석과 현장계측을 연계하여 압밀과 재하폭의 영향을 고려한 연약지반 상 팽이말뚝기초의 최적 침하량을 평가하여 기존의 침하량 산정법을 수정한 산정 기법을 제안하였다. 팽이기초공법이 적용되는 연약지반(점성토, 사질토)을 선정하고, 3차원 유한요소해석을 통해 현재 팽이기초공법에서 고려치 못하는 압밀과 재하폭의 영향을 분석하였다. 분석 결과, 7×7 이상의 팽이배열을 가지는 경우, 재하폭의 증가에 따라 영향깊이가 더 이상 증가하지 않는 것으로 나타났다. 이 때, 팽이말뚝 1개의 폭 $B_T(=0.5m)$ 에서, 최대 영향깊이는 점성토지반의 경우에 28BT 정도를 보였으며, 사질토지반은 최대 18BT로 나타났다. 본 연구 결과, 현재 재하폭과 압밀의 영향을 고려하지 못하는 팽이기초 침하량 산정식은 실제 계측 침하량과 비교하여 약 2배 이상 과다하게 산정하고 있음을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 연약 단일지반에 따른 bilinear 형태의 영향깊이 산정식과 하중분산각을 제안하였고, 이를 통해 산정된 침하량은 실제 침하량과 비교적 유사하게 나타나 국내 현장조건을 적절히 반영할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Keywords : 3D finite element method, Consolidation settlement, Embedding depth, Footing configurations, Soft ground, Top-Base method

1. 서 론

현재 국내에는 김해, 서낙동강, 양산, 포항 등의 해안

지역에 많은 연약지반이 분포하고 있다. 하지만 이러한 지역의 부지 개발에 있어 큰 걸림돌인 지지력 부족과 큰 침하량을 보이는 연약지반을 보강할 수 있는 공법이

1 연세대학교 토목환경공학부 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ.)

2 정회원, 연세대학교 토목환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ., soj9081@yonsei.ac.kr, 교신저자)

3 (주)에스트건설 대표이사 (President, EST Construction Co. Ltd.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

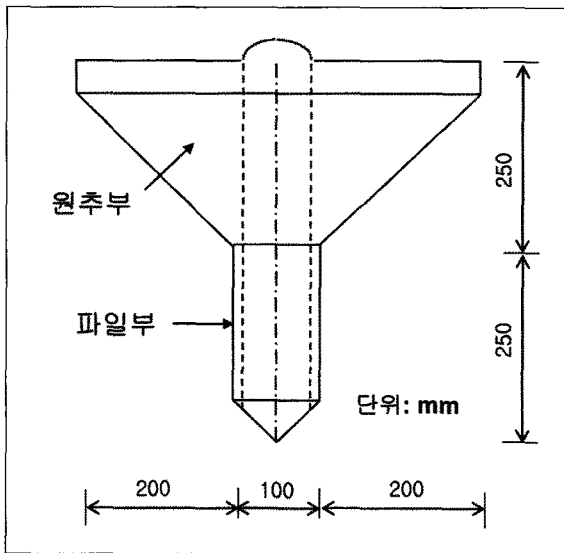
필요한 실정이다. 따라서 연약지반 상에 지지력이 충분하지 않고, 침하발생의 우려가 있는 구조물을 설치하고자 할 경우, 확대기초, 전면기초 등의 다양한 연약지반 보강공법을 고려할 수 있다. 이에 본 연구에서는 연약지반 보강공법의 일종으로써, 하중이 크지 않은 중소규모의 구조물 기초에 적용이 가능한 팽이말뚝기초공법을 연구대상으로 선정하였다.

팽이기초의 구성은 그림 1(a) 및 (b)와 같이 원추부와 파일부로 구성된 팽이말뚝과 위치철근, 연결철근, 채움쇄석 등으로 구성된다. 일반적으로 국내에서 사용되는 팽이말뚝의 상부직경은 500mm이며, 위치철근의 경우는 팽이말뚝을 일정한 위치에 설치하기 위한 보강근 역할을 하는 철근격자로서 D13을 사용한다. 연결철근은 팽이파일을 서로 연결하여 고정시키는 철근으로서 크기는 위치철근과 동일하며, 채움쇄석은 팽이말뚝 사이의 간격을 깎자갈 등으로 채운다. 이러한 팽이기초공법은 중·소규모의 하중이 크지 않은 구조물 축조에 말뚝기초 대신 사용함으로써, 팽이모양의 원추부 접지면적을 통한 상재하중의 분산 및 지반에 근입된 파일부의 근입 저항으로 지지력을 증대시킴과 동시에, 침하감소의 효과를 기대한 공법이다.

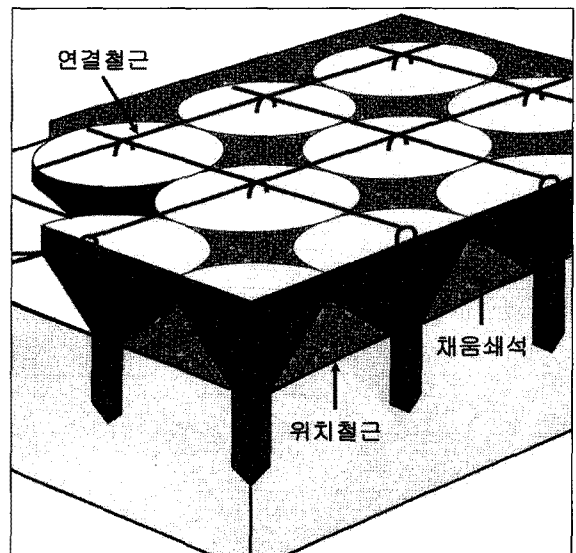
팽이기초공법은 일본에서는 Top-Base method라고 불리우며, 1980년대 말까지 이미 6,000여 개소에 달하는 다양한 기초시공실적을 가지고 있고, 설계방법은 1988년 팽이기초공법의 설계자료(일본전국마이고마공업회 편 개정, 1988)에 의하여 거의 확립되었으며, 1990년 공

인된 성격을 갖는 팽이기초공법 설계와 시공 편람이 편찬되었다. 또한, 이와 같은 자료들을 토대로 한 실내모형실험 및 수치해석을 통한 기초 및 지반거동 특성에 관한 연구가 수행되었다(Yasukawa et al., 1987; Arai et al., 1986; Horita et al., 1986; Yamada. et al., 1986; Arai et al., 1987; Yamada et al., 1987; Arai et al., 1988; Arai et al., 1989). 현장실험, 실내실험 및 수치해석에 의한 연구는 1986년부터 1988년 사이에 일본 토목연구센터의 팽이기초공법 검토위원회를 비롯하여 여러 기관에서 수행하고 발표하였다. 1987년 일본 지바현 지진과 1996년 일본 고베 대지진 발생하였을 때, 광범위한 액상화 현상 때문에 큰 피해가 발생하였지만 팽이기초공법을 사용한 구조물에 대해서는 피해가 거의 발생하지 않았으며, 이를 통해 팽이기초공법의 효과가 입증되었다.

국내에서는 일본에 비해 일반화되지 않았지만, 1992년 폐수관로공사를 시작으로 1,000여 개소 이상의 시공 사례를 가지고 있으며, 새로운 공업용지와 주거지, 간척매립지, 성토지 등에 적용되는 예가 증가하고 있다. 그만큼 팽이기초공법은 구조적 안정성이나 간편한 시공성, 저렴한 경제성 등의 많은 장점을 갖는 신공법인 만큼 더 많이 연구되고, 이용되고 있다. 또한 팽이기초공법은 한국지반공학회 학회지(1990)에 의하여 국내에 처음 소개되었으며, 현장계측 및 수치해석과 모형실험을 통해 팽이기초의 특성에 관한 연구가 많이 수행되었다(천병식, 1997; 김윤승 등, 1998; 최용규 등, 2002; 정상배, 2003; 강홍규, 2004; 김학문, 2004; 안민희, 2005; 이



(a) 팽이말뚝 형상도



(b) 팽이말뚝 부설 단면도

그림 1. 팽이기초(Top-base)공법

무철 등, 2006; Kim et al., 2008, 김재영 등, 2008; 김재영 등, 2009).

하지만 우리나라에서는 현재까지 팽이말뚝기초의 침하량 산정 시, 일본의 산정기준을 그대로 준용하고 있다. 그 내용을 보면, 재하폭만큼의 깊이까지를 침하량 계산 시에 영향깊이로 고려하고 있으며, 팽이기초 시공 완료후의 발생하는 압밀침하를 고려하지 않고 있는 실정이다. 그러나 이럴 경우 재하폭이 증가할수록 예상침하량 또한 계속적으로 증가하게 되어 과다하게 산정하는 결과를 보이며, 기초시공 후의 압밀침하로 인한 대책을 마련할 수 없다. 따라서 실제적으로는 어느 깊이 이상에서는 침하량이 더 이상 증감이 없는 것으로 예상되기 때문에, 본 연구에서는 팽이말뚝을 해석대상으로 선정하고 3차원 유한요소해석을 통해 재하폭과 압밀을 고려한 침하량 산정 기법을 제안하고자 한다.

2. 수치해석 및 검증

2.1 수치모델링

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

팽이말뚝의 총 침하량을 평가하기 위해, 수치해석 시에 적용한 구조물의 하중은 팽이기초에 적용 가능한 최

대하중이다. 팽이말뚝의 개수를 증가시키면서 재하폭의 증가에 따른 영향깊이 및 침하량의 영향을 확인하였다. 또한 지반종류에 따른 압밀해석을 수행하여, 압밀에 대한 영향을 확인하였다.

수치해석모델의 경계는 직육면체경계를 사용하였다. 수치해석모델의 경계(20m × 20m × 36m)는 팽이말뚝의 모델링 시, 변위영향이 발생하지 않는 약 6B정도의 충분한 범위에 대하여 고려하였다. 그림 2는 지반의 경계 조건을 나타낸 것으로 x, y, z방향에 대해서 변위를 발생시키지 않도록 구속하였다. 해석 단계는 구조물 시공단계에 따라 초기 원지반 자중상태를 반영하였으며, 팽이기초 시공 및 하중 재하와 압밀해석 순으로 수행하였다.

2.2 계측값과 비교를 통한 검증

계측현장은 인천 ○○의 물류창고 공사현장으로써, 지반조건은 그림 3과 같이 실트질 점성토(N치=4~9)로 이뤄진 연약지반이다. 구조물의 종류는 지하PIT층, 지상 1층의 물류창고로써, 최대하중은 100kN/m²의 하중이 크지 않으며, 팽이기초가 적용되는 일반적인 연약지반에 시공되었다. 계측은 그림 4와 같이 구조물 중심을 포함한 2곳에서 실시하였으며, 이는 수치해석과 비교하여 결과값을 검증하는데 이용하였다. 본 현장의 지반조사를 통한 현장 물성은 표 1과 같으며, 물성치는 표준관입시험을 통해 얻어진 N치와 시료를 이용하여 산정(한국도로교시방서)하였다.

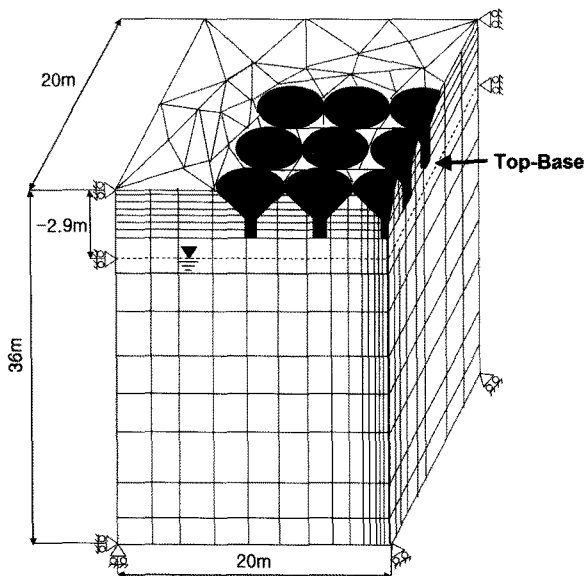


그림 2. 해석대상 팽이말뚝과 지반의 Geometry

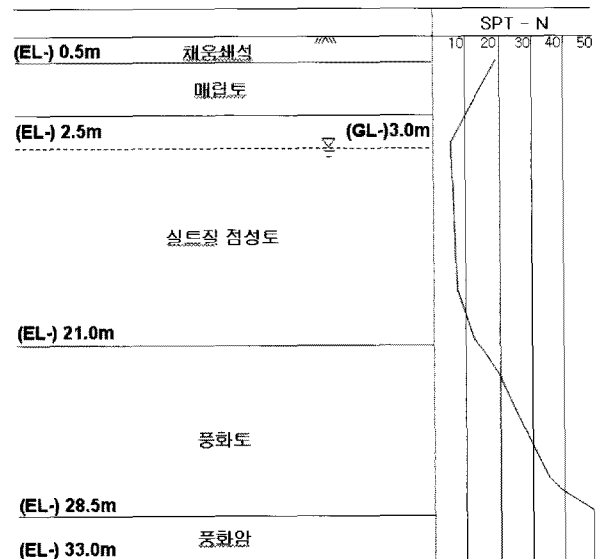


그림 3. 지질주상도(인천 ○○현장)

표 1. 현장지반 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	1x10 ⁻³	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	1x10 ⁻³	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

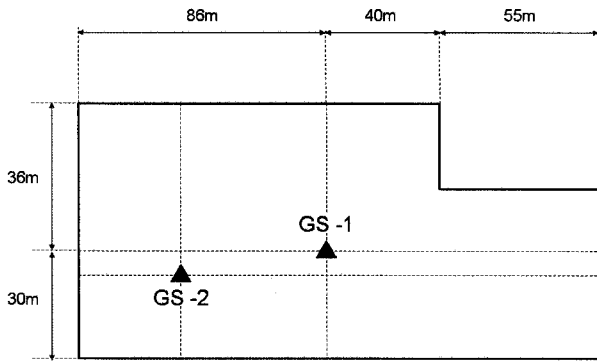


그림 4. 현장계측 위치도(인천 ○○현장)

수치해석 시, 기초 시공완료부터 구조물 시공완료시점까지는 탄성해석, 그 이후는 압밀해석을 실시하였다. 해석결과, 수치해석과 현장계측의 즉시 침하량은 유사하게 나타났으며, 이후 그림 5와 같이 구조물 시공이 완료된 시점부터 약 190일 동안, 수치해석과 현장계측의 압밀침하량을 비교하였다. 또한 현재 팽이기초공법의 침하량 산정법을 통한 허용 침하량과 약 50mm 정도의 일반적인 철근콘크리트 구조물의 허용 침하량을 최대 기준으로 정하였다(Terzaghi & Peck, 1948).

팽이기초의 압밀 분석결과, 그림 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 식 (1)~(3) 과정의 현재 팽이기초 침하량 산정법은 지반종류와 상관없이 동일한 하중분산각 w와 기초폭에 비례한 영향깊이 z를 적용함으로써, 팽이기초의 침하량을 과도하게 산정하고 있다고 볼 수 있다.

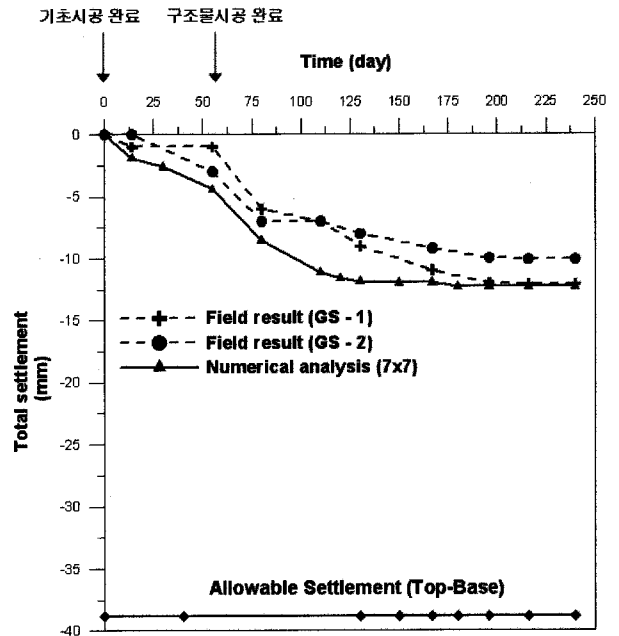


그림 5. 현장 및 수치해석 결과(인천 ○○현장)

$$\text{지반내 연직응력} : \Delta\sigma_{zi} = \frac{qB}{B+2z\tan(\omega)} \quad (1)$$

- 여기서, q : 기초 등분포하중(t/m²)
- B : 기초폭의 단변(m)
- L : 기초폭의 장변(m)
- w : 하중분산각(°)
- z : 지표면으로부터의 깊이(m)

$$\text{연직변형률} : \epsilon_{zi} = \frac{1}{E}(1-2\nu K_0)\Delta\sigma_i \quad (2)$$

- 여기서, ϵ_{zi} : 연직변형률
- E : 각 층의 탄성계수
- ν : 포아송비
- K_0 : 정지토압계수

$$\text{층별 침하량} : S_i = \epsilon_{zi} \times H_i \quad (H_i : i\text{층의 두께}) \quad (3)$$

2.3 결과 분석

2.3.1 재하폭에 따른 침하량 분석

해석 시, 사용된 물성 및 지반조건은 표 1과 같이 수치 해석 검증 시 적용한 물성치 및 지반구성을 동일하게 적용하였으며, 해석 단계 및 적용하중($=100\text{kN/m}^2$)도 시공일지와 현장조건을 바탕으로 동일한 조건에서 해석하였다. 또한, 본 현장은 점성토로 이루어진 연약지반이기 때문에, 구조물시공이 완료된 시점부터 압밀해석을 실시하였다.

본 현장의 해석방법은 그림 6과 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 이를 바탕으로 현재 산정법과 같이 재하폭 증가에 따라 침하량이 계속적으로 증가하지 않음을 알 수 있었으며, 팽이기초의 수렴배열을 정의하였다. 따라서 이후의 수치해석 시, 7x7의 팽이말뚝 배열로 현장 전체의 팽이말뚝개수를 대체하여 해석하였다.

2.3.2 재하폭에 따른 영향깊이 분석

재하폭 변화에 따른 영향깊이 분석 또한, 앞서 수행한 재하폭-침하량과 같이 7x7 배열 이상의 재하폭에서는 영향깊이가 수렴하는 것을 확인하였다.

적용물성 및 해석방법은 앞선 해석과 동일하게 수행

하여, 팽이말뚝 개수 증가에 따른 최대 영향깊이를 확인하였다. 영향깊이는 응력구근을 통해 응력이 영향을 미치는 최대 깊이까지 산정하였다. 해석 결과, 팽이말뚝 개수가 증가함에 따라 영향깊이는 계속적으로 증가하지 않고, 증가량은 점차 감소하면서 13.63m 이상에서는 더 이상 영향이 없었다. 이는 현재 산정법에서 적용한 영향깊이 15m와 유사하였다.

따라서 본 결과와 앞의 침하량 결과를 토대로 역해석하여 본 현장에 대한 하중분산각을 확인하였다. 하중분산각을 제한한 방법은 앞의 식 (1)~(3)에 실제 현장의

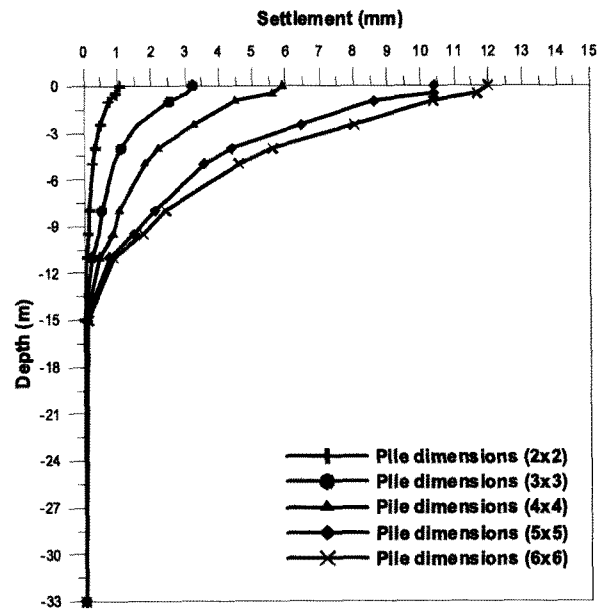


그림 7. 각 깊이별 축방향 변위(인천 ○○현장)

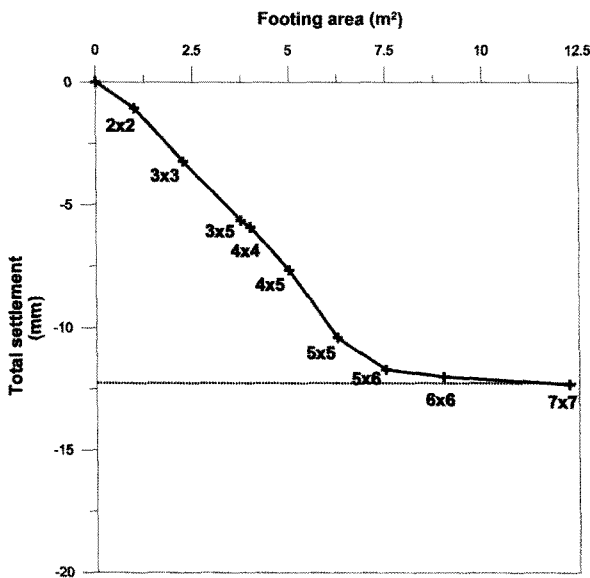


그림 6. 재하폭 변화에 따른 침하량(인천 ○○현장)

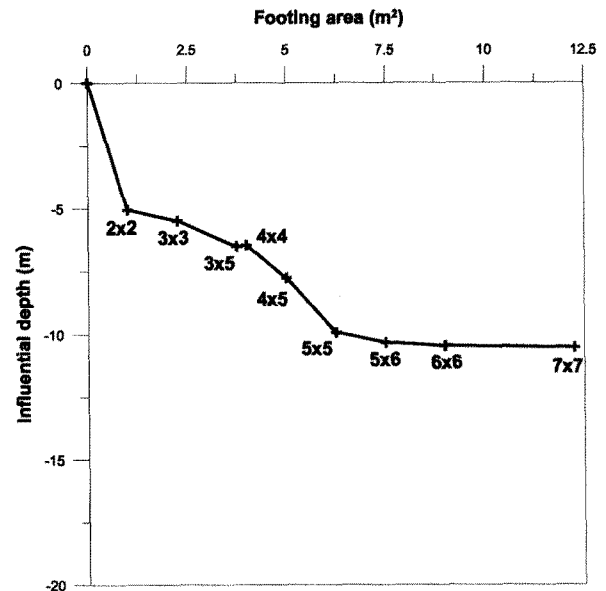


그림 8. 재하폭 변화에 따른 영향깊이(인천 ○○현장)

계측 침하량 S_t 와 수치해석을 통한 영향깊이 z 를 적용하여 각 분할층의 응력 $\Delta\sigma_{zi}$ 을 확인함으로써, 침하량 계산 시의 하중분산각 w 를 역계산하였다. 또한, 각 분할층의 지중응력의 깊이별 응력비를 확인함으로써, 제안한 하중분산각을 검증하였다.

그림 7 및 8은 깊이별 축방향 변위와 팽이말뚝의 하중-영향깊이를 나타냈다. 팽이배열이 증가할수록 말뚝 두부의 변위에서는 차이를 보였지만, 깊이가 깊어질수록 그 차이는 급격히 감소하여 약 13m 이상에서는 변위가 발생하지 않았다. 이는 팽이기초의 특성상, 팽이말뚝 개수가 증가할수록 하중분산효과가 커져 침하량이 급격히 감소하는 것으로 볼 수 있다.

표 2는 N치 4~9인 점성토지반의 대표적인 인천 ○○현장에 대한 영향깊이 및 총침하량 등을 나타낸다. 현장 계측 침하량(=11mm)과 수치해석을 통한 결과(=12.3mm)는 비슷하게 나타났다. 여기서, 현재 팽이기초 산정법에서는 지반의 종류 및 작용하중과는 상관없이 45도의 하중분산각을 동일하게 적용하고 있다. 하지만 이러한 경우, 허용 침하량이 실제 침하량에 비해 과다하게 산정되며, 따라서 본 연구에서는 현장 지반조건에 맞는 하중분산각 57.6도를 확인하였다. 하중분산각을 제안한 근거는 현장계측 침하량과 수치해석을 통한 영향깊이를 이용하여, 현재 팽이기초 침하량 지중응력 계산식에 적용하여

확인하였다. 또한 이 결과를 적용한 침하량(=21.41mm)이 기존 산정법을 통한 값(=38.8mm)보다 현저히 작아짐과 동시에 실제 침하량(=11.0mm)에 훨씬 근접하게 계산됨을 확인할 수 있었다.

3. 재하폭과 압밀을 고려한 침하량 산정기법 제안

본 연구에서는 팽이기초공법의 압밀과 재하폭의 영향을 고려한 총 침하량 산정 기법을 제안하기 위하여, 대표적인 연약지반에 대하여 3차원 유한요소 해석을 수행하였다.

앞서 기술한 현장의 지반 종류에 따른 영향거리와 침하량 결과를 토대로 팽이기초가 적용 가능한 6종류의 연약지반을 선정하여 해석하였다. 해석 지반은 점성토 지반 및 사질토 지반이며, 해석 시 적용된 물성치는 지반을 Mohr-Coulomb의 구성 법칙을 만족시키는 재료로 가정하여 탄성계수 및 점착력, 내부 마찰각을 달리하면서 해석하였다. 지반의 물성치는 팽이기초가 적용되는 지반의 최대 및 최소범위의 N치를 바탕으로 최대 및 최소 범위의 대표적인 연약 점성토와 연약 사질토의 물성값을 산정하였다. 단, 지반 종류에 따라 제안된 하중분산각의 경우에 수치해석 결과를 바탕으로 확인한 영향깊이를 반영하였으므로 오차를 포함할 수 있다.

이를 통해 산정한 물성치는 다음 표 3과 같다. 표 4는

표 2. 결과 분석(인천 ○○현장)

지반	N치	구분	영향깊이 (m)	총침하량 (mm)	제안분산각 (deg)	제안분산각을 통한 침하량 (mm)
실트질 점성토 ($E_s=7.3 \times 10^9$)	4~9	현장계측	-	11.0	-	-
		기존 산정식	13.5	38.8	45	-
		수치해석	13.62	12.3	57.6	21.41

표 3. 해석에 적용된 지반 물성치

구분	N치	단위중량 (kN/m^3)	탄성계수 (kPa)	포아송비	점착력 (kPa)	내부마찰각 (deg)	투수계수 (m/s)
점성토	2~12	13.5~19	1,100~3,300	0.2~0.35	12~78	1×10^{-3}	$10^{-8} \sim 10^{-7}$
사질토	4~20	17~20	4,520~16,670	0.2~0.35	1×10^{-3}	23~37.5	$10^{-5} \sim 10^{-4}$

표 4. 수치해석 case 요약

구분	N치	작용하중 (kPa)	적용물성
점성토지반 (15m)	2 ~ 5	100	최소
	6 ~ 9	200	평균
	10 ~ 12	300	최대
사질토지반 (15m)	4 ~ 6	150	최소
	7 ~ 15	200	평균
	16 ~ 20	400	최대

전체 수치해석 case를 나타냈다.

W : 팽이기초의 단변폭

B_T : 팽이말뚝 1개의 상부직경(=0.5m)

3.1 점성토 지반

점성토 지반에 대한 해석결과, 그림 9와 같이 약 12~14.5m 정도의 영향깊이가 나타났으며, 각 경우의 차이는 적용물성 및 하중에 따른 결과로 판단된다. 이를 바탕으로 재하폭 7B_T(=3.5m)이하인 경우에는 식 (4)를 통해 영향깊이를 산정할 수 있으며, 그 이상의 재하폭에서는 최대 영향깊이를 28B_T로 볼 수 있다. 하중분산각에 대해서는 앞서 수행한 현장 침하량 계측과 수치해석을 통한 침하량 및 영향깊이를 바탕으로 역해석하여 제안하였다.

해석 결과를 토대로, 가장 큰 영향깊이를 나타낸 N치 10~12 정도 지반에 하중 300kN/m²을 적용한 경우를 점성토지반의 대표 결과로 정하였다. 따라서 식 (4) 및 5와 같이 연약 점성토지반에 대한 대표 영향깊이 산정식 및 하중분산각을 제안하였다. 식 (4) 및 (5)는 최대 물성지반에 하중 300kN/m²을 적용한 경우의 결과 그림 9의 기울기로서, 그 형태가 bilinear형태를 보이므로 이중선형식으로 제안하였다.

$$(W \leq 7B_T) \quad Z = 4W \quad (4)$$

$$(W > 7B_T) \quad Z = 28B_T \quad (5)$$

여기서, Z : 영향깊이

3.2 사질토 지반

사질토 지반에 대한 해석결과, 그림 10과 같이 약 8.0~9.0m 정도의 최대영향깊이를 보였다. 이를 바탕으로 사질토지반의 경우, 재하폭 6B_T(=3.0m)이하인 경우에는 식 (6)을 통해 영향깊이를 산정할 수 있고, 그 이상의 재하폭에서는 최대 영향깊이를 18B_T로 볼 수 있다. 사질토지반의 제안된 하중분산각의 경우, 실제 계측 자료가 없기 때문에 수치해석을 통한 침하량 및 영향깊이를 바탕으로 역해석하여 제안하였으며, 임의의 깊이마다의 축방향 감소폭을 회귀분석하여 검증하였다. 또한, 응력구근 그래프에 제안된 하중분산각을 검토하여 재검증하였다. 그 결과, 각각의 응력분산각은 차이가 없었으며, 따라서 이를 사질토지반의 대표 하중분산각으로 산정하는 것에 무리가 없다고 판단된다.

해석 결과, 가장 큰 영향깊이를 보인 N치 16~20 정도 지반에 하중 400kN/m²을 적용한 경우를 사질토지반의 대표값으로 정하고, 따라서 식 (6) 및 (7)을 연약 사질토지반에 대한 대표 영향깊이 산정식 및 하중분산각으로 제안하였다. 식 (6) 및 (7)도, 최대 물성지반에 하중 400kN/m²을 적용한 경우의 그래프 기울기로서, 이중선형식으로 제안하였다.

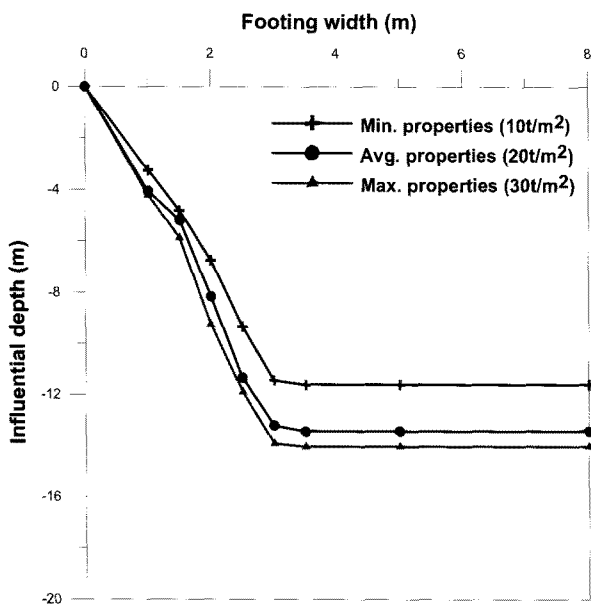


그림 9. 재하폭 변화에 따른 영향깊이(점성토지반)

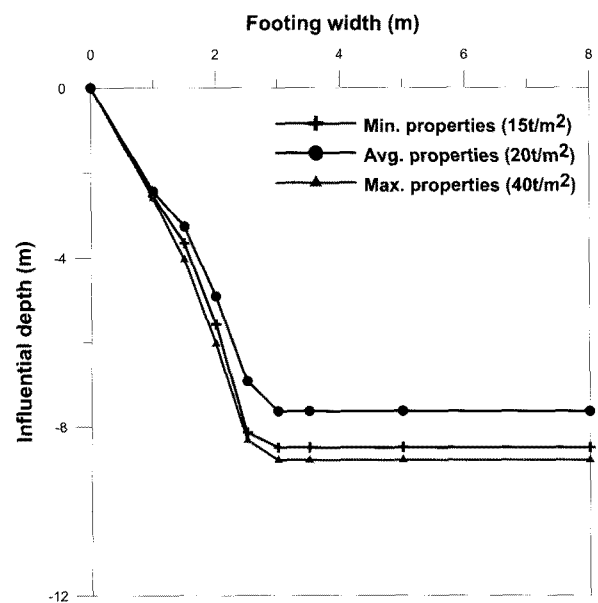


그림 10. 재하폭 변화에 따른 영향깊이(사질토지반)

표 5. 지반 종류에 따른 영향깊이 산정식 및 하중분산각

구 분	N치	작용하중 (kN/m ²)	영향깊이 산정식	제안 수평분산각 (deg)
점성토	2~5	100	$(W \leq 7B_T) Z = 4W$ $(W > 7B_T) Z = 28B_T$	65
	6~9	200		
	10~12	300		
사질토	4~6	150	$(W \leq 6B_T) Z = 3W$ $(W > 6B_T) Z = 18B_T$	55
	7~15	200		
	16~20	400		

표 6. 지반 종류에 따른 결과 적용을 통한 침하량 분석

구 분	N치	작용하중 (kN/m ²)	영향깊이 (m)	침하량 (mm)	제안 분산각 (deg)	제안분산각을 통한 침하량 (mm)
점성토	2~5	100	28BT	31.25	65	39.50
	6~9	200		36.10		41.53
	10~12	300		40.02		44.22
사질토	4~6	150	18BT	21.19	55	24.71
	7~15	200		17.71		22.36
	16~20	400		23.90		26.17

$$(W \leq 6BT) \quad Z = 3W \quad (6)$$

$$(W > 6BT) \quad Z = 18BT \quad (7)$$

여기서, Z : 영향깊이

W : 팽이기초의 단변폭

B_T : 팽이말뚝 1개의 상부직경(=0.5m)

표 5는 본 연구에서 실시한 점성토 및 사질토 지반에 따른 수치해석 결과와 이를 통해 제안한 영향깊이 산정식 및 하중분산각을 나타낸다. 또한, 표 6은 제안값을 적용하여 산정한 침하량과 수치해석 결과를 비교·분석하여 검증한 결과이다.

결론적으로 제안된 영향깊이 산정식과 하중분산각을 적용한 침하량은 기존의 산정법에 비해 실제 침하량과 비슷하게 나타나며, 따라서 훨씬 팽이기초의 효과를 반영하여 적용할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 현재 팽이기초의 침하량 산정법에 고려되지 못하고 있는 재하폭과 압밀의 영향을 평가하기 위하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 이를 바탕으로 영향깊이와 하중분산각을 산정하여, 각 지반종류에 따른 새로운 침하량 산정 기법을 제안하였다. 또한, 실제 팽이기초가 시공된 현장의 계측자료를 바탕으로 제안

식과의 비교를 통해 현장 적용성을 검증하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 수치해석 결과, 재하폭에 따른 영향깊이의 증가는 존재하지만 그 증가폭은 급격히 감소하였으며, 7×7 이상의 팽이말뚝 배열에서는 영향깊이가 18~28B_T 정도로 수렴하였다.
- (2) 수치해석 및 현장 계측을 통해, 구조물 시공후의 압밀 침하량이 발생하였음을 알 수 있었다. 따라서 압밀침하를 고려하지 않는 현재 침하량 산정법은 수정될 필요가 있다.
- (3) 점성토지반 및 사질토지반에서의 영향깊이 산정식 및 하중분산각을 제안하였으며, 현장 계측치와 비교·분석하여 적용성을 검증하였다. 그 결과, 점성토 지반의 경우, 최대 영향깊이 28B_T와 하중분산각 65도를 제안하였다. 또한, 사질토지반의 영향깊이는 약 18B_T, 하중분산각은 55도로 나타났다.
- (4) 본 연구를 통해, 상부 점성토 지반에 팽이기초가 적용될 경우, 사질토지반에 비하여 상대적으로 큰 영향깊이와 하중분산각을 나타남을 알 수 있었다. 반면, 사질토지반과 같이 상대적으로 좋은 지반에 팽이기초를 시공할 경우, 비교적 작은 영향깊이와 하중분산각을 보였으며, 하부층은 그 종류와 상관없이 하중의 영향을 크게 받지 않는 것을 알 수 있었다. 하지만 다층지반의 경우, 구성된 층의 두께가 제한

적이기 때문에 이에 대한 추가 연구 및 검토가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술 평가원이 시행하는 2009년도 첨단도시개발사업(과제번호:09CHUD-A052272-01)에 의해 수행되었습니다(This research is supported by a grant from High-Tech Urban Development Program (09CHUD-A052272-01) funded by the Ministry of Land, Transport and Maritime affairs.).

참고 문헌

1. 강홍규 (2004), “현장타설팽이말뚝기초공법의 지지력 증대효과에 관한 모형실험연구”, *단국대학교 일반대학원*.
2. 김윤승, 이승래, 정구영 (1998), “유한요소법을 이용한 침강-압밀 해석”, *한국지반공학회 98 봄 학술발표회 논문집*, pp.111-118(8).
3. 김재영, 정상섭, 김수관 (2008), “팽이기초공법(Top-Base Method)의 침하량 분석”, *2008 대한토목학회 정기 학술대회 논문집*.
4. 김재영, 정상섭, 이재환 (2009), “팽이기초공법(Top-Base Method)의 하중-침하량 분석”, *2009 한국지반공학회 정기 봄 학술발표대회 논문집*.
5. 김학문 (2004), “현장타설형 팽이말뚝 기초공법 적용에 따른 기초 및 지반거동에 관한 연구”, *단국대학교 일반대학원*.
6. 안민희 (2005), “실내모형실험 및 현장평판재하시험에 의한 현장타설형 팽이말뚝기초의 지지력 산정”, *인천대학교 석사학위 논문*.
7. 이무철, 정대열, 정효린, 이송 (2006), “불특형 부양팽이기초의 하중-침하 특성에 관한 연구”, *한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집*.
8. 정상배 (2003), “팽이말뚝기초공법”, *지질공학 단기실무강좌 - 지반개량 및 보강공법*.
9. 천병식 (1997), *기초공학*, pp. 284.
10. 최용규, 황근배, 정상배, 정성기 (2002), “연약지반 보강을 위한 팽이기초공법의 소개”, *한국지반환경공학회 2002 발표회*.
11. 팽이기초공법의 기술자료 (1990), *한국지반공학회 학회지*.
12. 팽이기초공법의 설계자료 (1988), 일본전국마이크로공업회.
13. Arai, K., Machihara, H., Horita, M. and Yasukawa, I. (1987), “Laboratory tests and analysis on settlement and bearing capacity of foundation with top-shaped concrete blocks”, *The proceedings of 32nd Symposium of JSSMFE on Foundation Procedures without Piles*, pp.55-60.
14. Arai, K., Machihara, H., Ohnishi, Y. and Shimizu, H. (1987), “Improvement in bearing capacity by employing the foundation with top-shaped concrete blocks (in Japanese)”, *The proceedings of Annual Conference of JSSMFE*, Vol.2, pp.55-60.
15. Arai, K., Ohnishi, Y., Machihara, H. and Kokubo, H. (1986), “Model Test of Top-Base Foundation on soft clay stratum (in Japanese)”, *The proceedings of Annual Conference of JSSMFE*, Vol.2, pp.1285-1286.
16. Arai, K., Yasukawa, I., Ohnishi, Y., Horita, M. and Nakaya, S. (1988), “Interpretation of concrete top base foundation behavior on soft ground by coupled stress flow finite element analysis”, *Numerical Methods in Geomechanics*, ISBN, 906191 809X.
17. Arai, K., Yasukawa, I., Ohnishi, Y. and Horita, M. (1989), “Measurement and Interpretation of Loading Test of Concrete Top Block on Soft Ground”, *The proceedings of 2nd International Symposium on Field Measurement in Geomechanics*, Vol.2, pp.919-926.
18. Horita, M., Ohnishi, Y., Kojima, K. and Arai, K. (1986), “Consolidation Analysis of Foundation with Top-Shaped Concrete Blocks (in Japanese)”, *The proceedings of Annual Conference of JSSMFE*, Vol.2, pp.1287-1290.
19. Kim, S. K., Lee, J. T., Jung, S. B., and Kim, J. Y. (2008), “Load - Settlement Characteristics of Concrete Top-Base Foundation on Soft Ground”, *International Symposium on Lowland Technology*.
20. *PLAXIS 3D Foundation, User's manual, Ver. 2* (2007), R.B.J. Brinkgreve & W.M. Swolfs.
21. Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Wiley, New York.
22. Yamada, K., Yasukawa, I. and Saitoh, M. (1986), “In-Situ plate Loading Test of Concrete Top Block on soft ground (in Japanese)”, *The proceedings of Annual Conference of JSSMFE*, Vol.2 (1986), pp.1281-1284.
23. Yamada, K., Yasukawa, I. and Saitoh, M. (1987), “Discussion on settlement control of soft ground by top base method (in Japanese)”, *The proceedings of Annual Conference of JSSMFE*, Vol.2, pp. 1833-1836.
24. Yasukawa I., Yamada, K., Ohnishi, Y. and Saitoh, M. (1987), “Settlement control of foundation on soft ground by concrete top blocks (in Japanese)”, *The proceedings of 32nd Symposium of JSSMFE on Foundation Procedures without Piles*, pp.49-54.

(접수일자 2009. 8. 17, 심사완료일 2010. 1. 11)