

사질토에서 현장타설 팽이기초의 거동특성

The Behavior of In-situ Top Base Foundation in Granular Soil

김 학 문¹ Kim, Hak-Moon

김 찬 국² Kim, Chan-Kuk

Abstract

Numerical analysis for the in-situ top base foundation (In-situ TBF) was carried out in order to investigate the effect of bearing capacity and the load delivering mechanisms in granular soil. The input data for the numerical model was prepared from the result obtained from the plate load test and full size in-situ TBF field tests. According to the result of numerical analysis, the behavior of in-situ TBF showed that bearing capacity of the foundation increased by 50~100% and settlement was reduced up to 1/2~1/3 comparing to other types foundation. The effect of cone-shaped part of the in-situ TBF was as important as pile part for the improvement of foundation stability. The variation of the length of pile part indicated that the present length was proved satisfactory in terms of effectiveness.

요 지

본 논문에서는 기존 공장제작 콘크리트 팽이기초가 갖는 문제점들을 해결·보완하기 위해 개발된 현장타설 팽이기초의 거동특성을 검토하고자, 현장재하시험 결과를 근거로 팽이기초의 수치해석 모델링을 하였으며, 구성된 수치해석 모델을 이용하여 기초형식 및 형상 변화에 따른 거동특성을 비교·분석하였다. 수치해석 결과, 현장타설 팽이기초(In-situ TBF)는 전단활동파괴면이 더 깊고 넓게 형성되어 지반파괴에 대한 저항력이 증가하게 되고, 이로 인해 지지력이 향상되는 것을 확인 할 수 있었다. 기초의 형상에 따른 효과는 원추부에 의한 것 보다는 말뚝부에 의한 효과가 더 큰 것으로 나타났으며, 원추부와 말뚝부가 조합되어 이루어진 팽이기초 형상이 가장 큰 효과를 나타내는 것으로 나타났다. 말뚝부의 길이를 증가시키면서 해석을 수행한 결과, 현재 사용되고 있는 팽이기초말뚝부의 길이가 효율적 크기라는 것을 확인 할 수 있었다.

Keywords : Increasing bearing capacity, Numerical analysis, Restraining settlement, Top base foundation

1. 서 론

지지력증대와 침하억제를 목적으로 개발된 공장제작 콘크리트 팽이기초(PC-TBF)는 일본에서 개발되어 1980년대 말까지 6천여개소의 현장에 적용되어 그 효과가 입증된 기초공법으로 국내에는 1991년 도입되어 최근까지 사용되고 있다(에스트건설, 1998). 그러나 일

본에서 개발된 공장제작 콘크리트 팽이기초는 70~80kg의 중량구조체로서 형상을 제작하는데 따른 부지 및 플랜트 시설과 운반에 대한 부담이 크며, 시공시 장비 진입이 필요하므로 연약지반에서 운반, 설치시에 어려움과 정확도가 떨어지고, 현장설치 작업시간이 길게 소요되는 등의 문제점들을 가지고 있었다. 따라서, 이러한 종래의 공장제작 콘크리트 팽이기초가 갖는 여러

1 정회원, 단국대학교 토목환경공학과, 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Envir. Eng., Dankook Univ.)

2 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 박사수료 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Eng., Dankook Univ., cool7594@dankook.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

가지 문제점들을 해결·보완하기 위해 시공성 및 경제성이 고려된 현장타설 팽이기초공법(In-situ TBF)이 국내에서 개발되었다(단국대학교, 2004).

본 논문에서는 기존 공장제작 콘크리트 팽이기초와 달리 재활용 합성수지인 팽이형 용기(거푸집활용)를 이용하여 시공하는 현장타설 팽이기초(In-situ TBF)의 거동특성을 검토하기 위해 현장에서 수행된 재하시험 결과를 토대로 수치해석을 수행하였으며, 구성된 수치해석모델링을

이용하여 대상현장과 동일한 지반조건에서 기초형식 및 팽이기초의 형상 변화에 따른 결과를 비교·검토하였다.

2. 현장타설 팽이기초 공법

팽이기초(In-situ TBF)는 구조물의 설계하중이 크지 않으면서 지반의 지지력이 일부 부족한 경우에 지지력 증가와 침하억제를 목적으로 연약지반에 많이 활용되

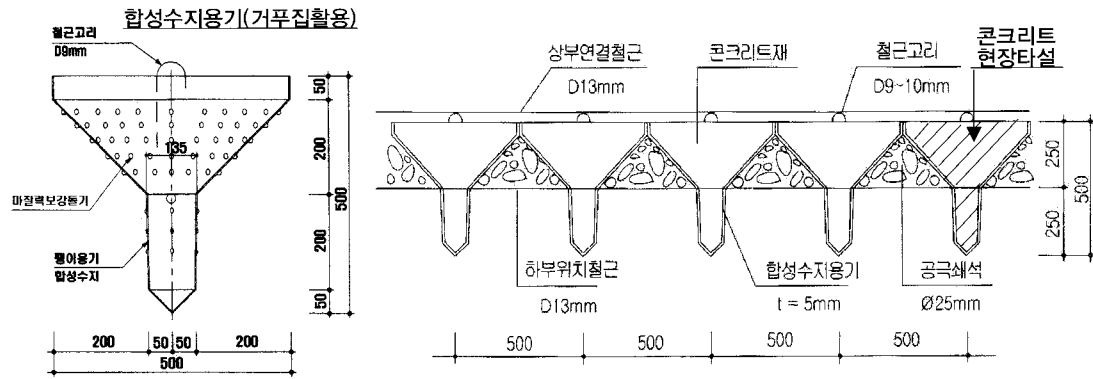


그림 1. 현장타설 팽이기초의 형상 및 시공단면도

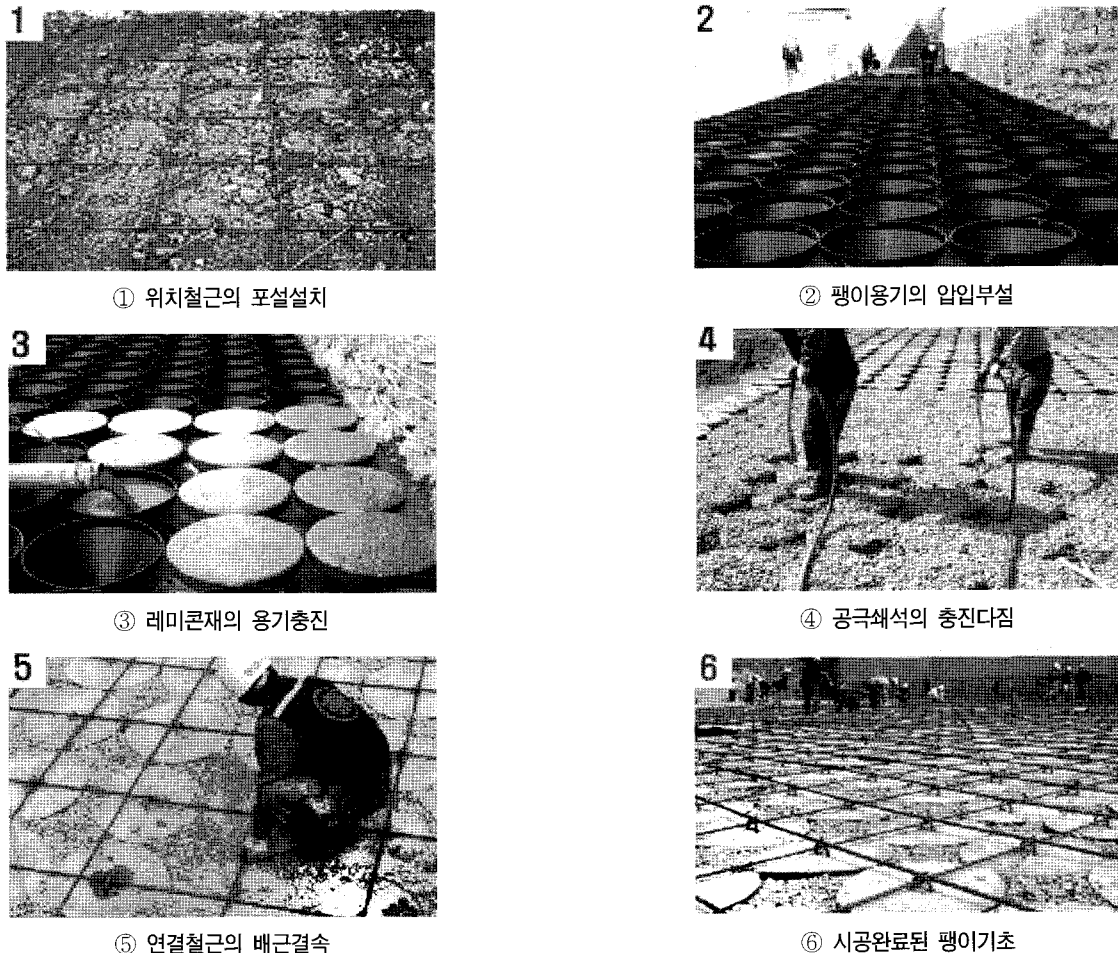


그림 2. 현장타설 팽이기초공법 시공순서

는 기초공법이다(山田 등, 1987). 현장타설 팽이기초(In-situ TBF)는 기존 공장제작 팽이기초(PC-TBF)의 시공적인 문제점을 해결하기 위하여 그림 1과 같이 D13 철근을 이용하여 지반 내에 위치철근을 설치한 후에 인력으로 설치가 가능한 약 2kg 무게의 재활용 합성수지 팽이형 용기(거푸집활용)를 지반에 압입하고, 용기에 레미콘을 타설한 다음, 잔여 공극부분을 쇠석으로 충전하는 것으로 팽이기초 시공절차는 그림 2와 같다. 현장타설 팽이기초는 기존 공장제작 팽이기초에 비해 소음이 나, 진동영향이 전혀 없고 산업폐기물로 재활용되는 팽이형 수지용기는 환경친화적이며, 팽이기초의 콘크리트 표면에 염분이나 화학적인 물질의 접촉으로 인한 내구성의 열화문제를 근본적으로 해결할 수 있다. 또한, 합성 압축 재료(팽이형 수지용기+콘크리트)를 이용하는 현장타설 팽이기초는 기존의 공장제작 콘크리트 팽이기초보다 재료의 강도가 향상되어 설계 접지압에 대한 저항력이 우수할 뿐만 아니라, 간편한 시공에 따른 시공기간의 단축과 공사비용의 절감효과가 있다(단국대학교, 2004).

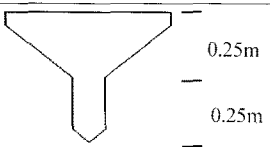
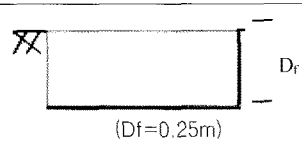

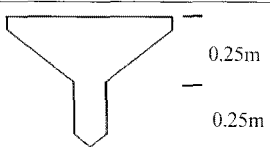

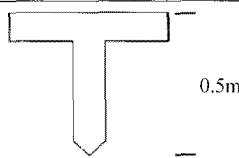
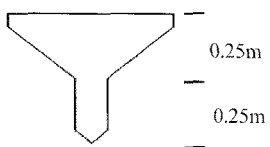
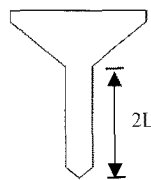
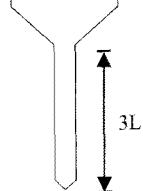
토하기 위하여 N치가 4~13 범위의 연약한 하상퇴적층(실트질 모래층(SM))에서 수행된 재하시험 결과를 입력 자료로 하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 원지반(무처리기초)에서 수행된 재하시험 결과를 역해석하여 기초 지반의 물성치를 산정하였으며, 결정된 지반 물성치를 팽이기초모델링시 적용하여 현장재하시험 결과와 비교·검토하였다. 이와 같은 방법으로 결정된 해석 자료를 근거로 기초형식, 팽이기초의 형상, 말뚝길이변화에 따른 거동특성을 검토하였으며, 기초크기 및 형상은 표 1과 같다. 설치조건은 팽이기초 및 팽이기초의 형상변화를 고려한 기초의 경우 3열로 배열된 기초 상부에 하중을 재하 하였으며, 기초의 근입깊이를 증가시켜 지지력을 향상시키는 전면매트기초는 팽이의 원추부 깊이와 동일하게 0.25m 증가시킨 기초를 모델링하였다. 또한 무처리기초는 원지반에 보강없이 전면매트기초가 설치된 경우를 의미하며 모든 기초의 재하폭은 1m로 동일하게 적용하였다. 팽이기초의 원추부가 거동에 미치는 영향을 고려하기 위해 팽이기초의 말뚝부를 제거한 원추형기초를 모델링하였으며, 팽이의 말뚝부 효과만을 고려하기 위하여 원추부를 제거한 T형기초를 모델링하였다. 또한, 말뚝부 길이에 따른 팽이기초의 향상효과를 확인하기 위하여 기존 팽이말뚝부 길이인 0.25m(L)의 2배, 3배 증가시킨 경우에 대해 수치해석을 수행하였다.

3. 연구방법 및 해석조건

3.1 연구방법

본 연구에서는 현장타설 팽이기초의 거동특성을 검

표 1. 수치해석조건 및 개요

구분	검토조건		
기초형식	팽이기초(Type-A) 	전면매트기초(Type-B) 	무처리기초(Type-C) 
	팽이기초(Type-A) 	원추형기초(Type-D) 	T형기초(Type-E) 
말뚝길이	팽이기초(Type-A) 	팽이기초2L(Type-F) 	팽이기초3L(Type-G) 
	설치조건	- Type-A, D, E, F, G 기초의 경우 3열로 배열된 기초 상부에 하중을 1m 폭으로 적용	

3.2 현장재하시험 개요

재하시험 현장은 부산OO지역에 위치한 곳으로 우리나라에서 가장 긴 낙동강이 흐르는 하구에 위치하고 있다. 대상지반의 지층상태는 그림 3에서와 같이 약 3m 정도의 매립층이 존재하고 그 아래 원지반인 연약 퇴적층(실트질 모래층(SM), N=4~13)이 약 15m의 깊이 까지 위치하고 있다. 재하시험시 무처리기초는 표준재하방법인 ASTM D 1143을 기준으로 실시하였으며, 현장타설 팽이기초의 경우에는 일본토목연구센터(1990)에서 제시한 팽이기초의 설계와 시공편람(에스트건설, 1990)

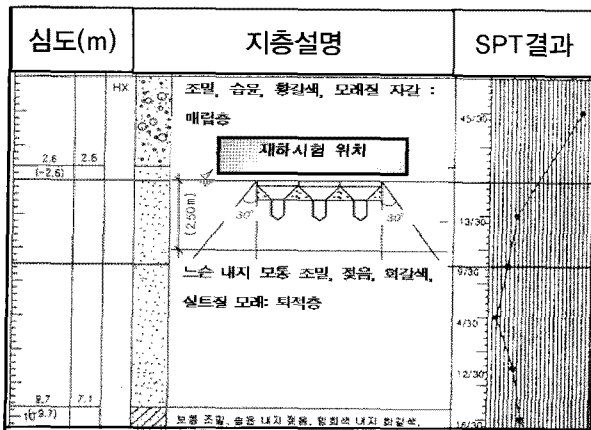


그림 3. 재하시험현장 지질주상도

의 팽이기초 재하시험법을 기준으로 하여 그림 4와 같이 시험을 수행하였으며, 현장재하시험 결과는 그림 5와 같다.

3.3 현장재하시험을 활용한 수치해석 입력모델

해석시 현장타설 팽이기초 거동을 실제조건과 유사하게 모사하기 위하여 유한차분 해석프로그램인 FLAC을 이용하여 현장재하시험 결과를 근거로 팽이기초의 수치해석을 수행하였으며, 수치해석에 사용된 요소망은 그림 6과 같이 모델링하였다. 지반의 좌우측 경계부는 수평변위를 구속하였으며, 하부경계는 수직변위를 구속

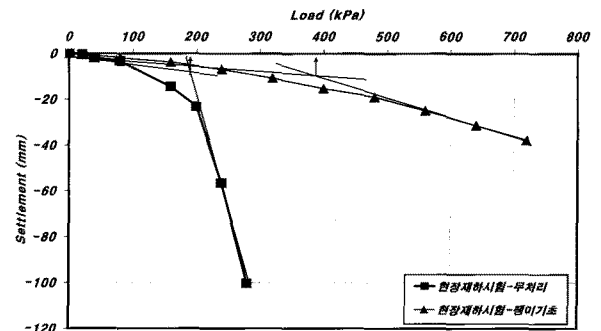
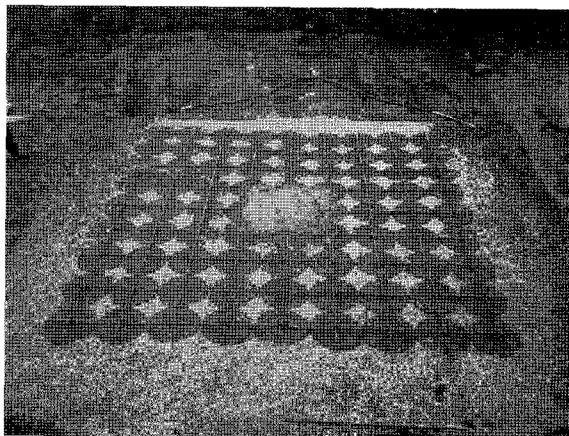


그림 5. 현장 재하시험 결과



(a) 현장타설팽이기초 시공 원료



(b) 하중재하

그림 4. 현장 재하시험

표 2. 역해석에 의해 선정된 지반정수

구분	단위중량 (kN/m^3)	점착력 (kPa)	내부마찰각 ($^\circ$)	탄성계수 (kPa)	포아송비 (ν)	모델
팽이기초	23	-	-	21,000,000	0.15	탄성
쇄석	19	0	42	100,000	0.33	탄소성
퇴적층	17	0	25	27,000	0.35	
매립층	18	0	26	28,000	0.35	

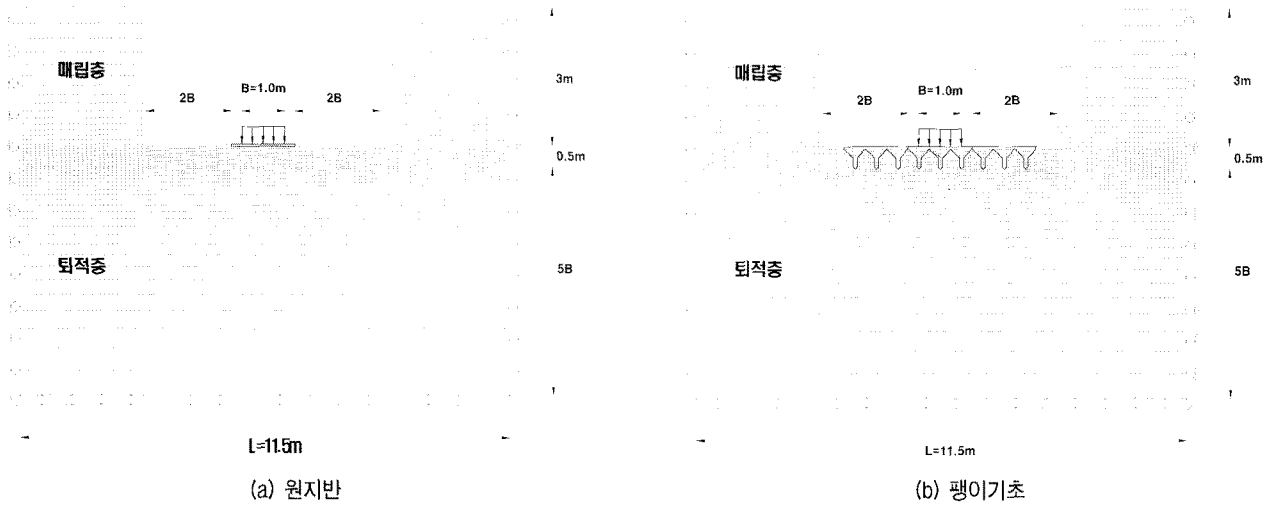


그림 6. 수치해석 요소망 및 경계조건

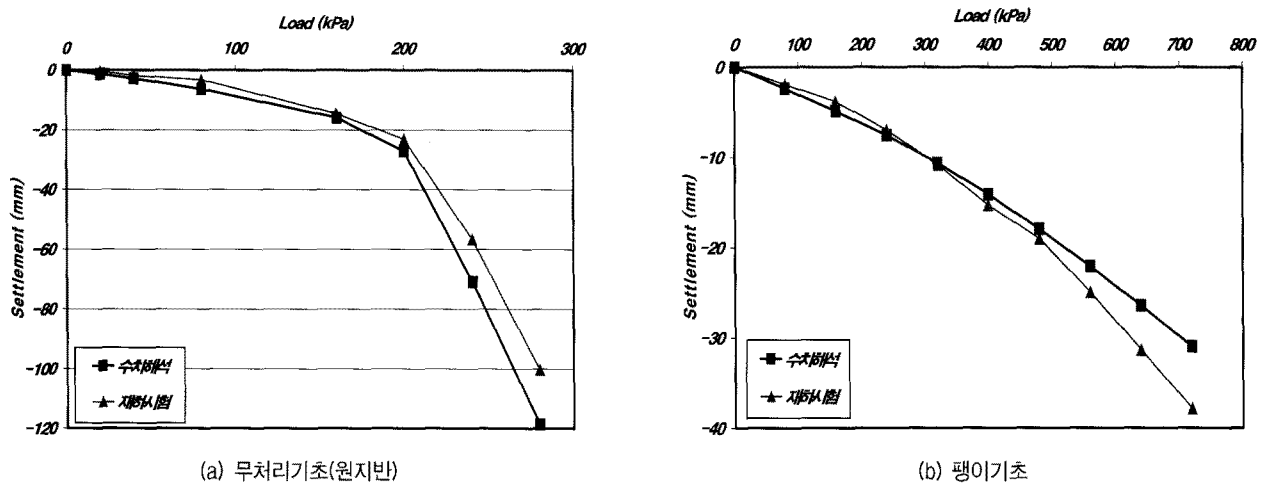


그림 7. 현장결과와 적용된 해석모델

표 3. 현장재하시험과 수치해석에 의한 결과 비교

구분	현장재하시험		수치해석	
	현장타설 팽이기초	무처리기초	현장타설 팽이기초	무처리기초
항복하중(kPa)	386	195	390	200
극한하중(kPa)	-	280	-	265
허용지지력(kPa)	193	93	195	88

※ 허용지지력 결정은 항복하중에 안전율 2, 극한하중은 안전율 3을 적용한 것 중 작은값으로 함

하였고, 팽이기초와 채움쇄석의 경계조건은 고려하지 않았다. 지반 및 채움쇄석은 Mohr-Coulomb 파괴규준을 따르는 탄소성모델을 사용하였으며, 팽이기초는 탄성모델로 모사하였다. 재하하중 및 재하폭(B=1m)은 현장재하시험과 동일하게 적용하였으며, 역해석을 통하여 결정된 물성치는 표 2와 같다. 그림 7 및 표 3과 같이 재하시험 결과와 수치해석 결과가 유사한 거동을 나타냄으로 최종 결정된 모델링을 이용하여 기초형식 및 형상변화에 따른 거동특성을 검토하였다.

4. 해설결과 및 분석

4.1 기초형식에 따른 거동

기초형식별 거동특성을 검토하기 위하여 전면매트기초에 보강이 이루어지지 않은 무처리기초(Type-C)와 근입깊이를 0.25m 증가시킨 전면매트기초(Type-B), 그리고 팽이기초(Type-A)로 구분하여 수치해석을 수행하였다. 기초형식별 허용지지력을 산정하기 위하여 하중(P)

- 침하(S), Log(P) - Log(S) 방법을 적용하여 항복하중을 결정한 후 안전율 2를 고려하여 허용지지력을 산정하였으며, 기초형식별 발생된 침하량을 비교·검토하기 위하여 팽이기초의 허용지지력인 200kPa 작용시 침하량에 대해 서로 비교하였다.

기초형식에 따른 하중-침하특성을 검토하면, 그림 8 과 같이 무처리기초(Type-C) 및 전면매트기초(Type-B)의 경우에는 작은 하중조건에서 항복되었으며, 지반이

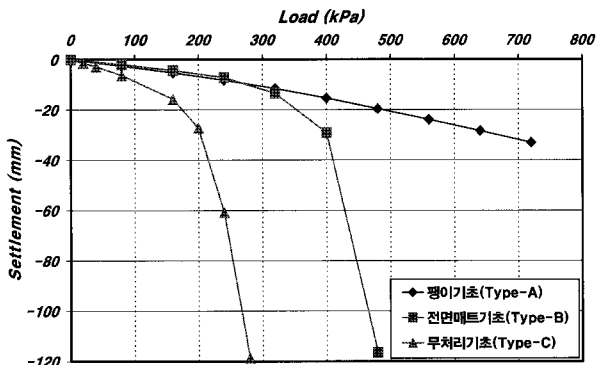


그림 8. 기초형식에 따른 하중-침하 곡선

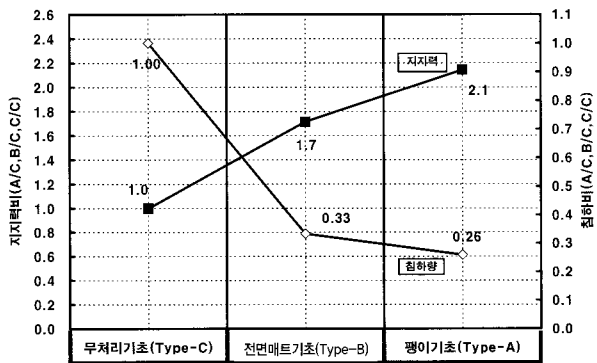


그림 9. 기초형식별 지지력 및 침하량 비교(무처리 기준시)

항복된 후에 급격한 침하가 발생하는 것으로 나타났으나, 팽이기초의 경우에는 급격한 파괴 없이 큰 하중까지 지지하는 것으로 나타났다. 또한 기초형식별 지지력 및 침하량을 비교·검토한 결과는 그림 9와 같으며, 지지력은 근입깊이를 0.25m 증가시킨 전면매트기초(Type-B)의 경우 무처리기초에 비하여 약 1.7배 증가하며, 팽이기초(Type-A)의 경우 약 2.1배 증가하는 것으로 나타났고, 동일하중(200kPa)에서 발생침하량을 비교하면, 무처리 기초(Type-C)에 비하여 전면매트기초의 경우 33%, 팽이기초(Type-A)의 경우 26% 정도 수준으로 감소하는 것으로 나타났다.

4.2 지중응력 분포

동일한 하중조건에서 무처리기초(Type-C)와 팽이기초(Type-A)의 지중응력분포를 비교·검토하였다. 재하하중이 작은(Type-C 허용하중 (80kPa) 적용시) 그림 10의 지중응력 분포를 비교하면 무처리기초(Type-C)는 심도 $1.0H_t$ (H_t =팽이기초 높이)에서 발생응력이 기초 중앙부에 집중되며, 기초 외측으로는 적게 발생하는 반면, 팽이기초의 경우 응력분포가 기초하부 전체에 비교적 균등하게 분포하는 것으로 나타났다. 또한, 심도 $2.0H_t$ 에서도 무처리기초(Type-C)에 비하여 팽이기초(Type-A) 설치시 지중응력이 균등하게 분포하며 작은 응력이 발생하는 것으로 나타나 팽이기초가 응력분산 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다. 재하하중이 큰(Type-C의 항복하중(160kPa) 적용시) 그림 11의 결과를 검토하면, 그림 10에서의 결과와 달리 전체적으로 무처리 기초(Type-C) 하부의 응력이 팽이기초(Type-A)의 응력보다

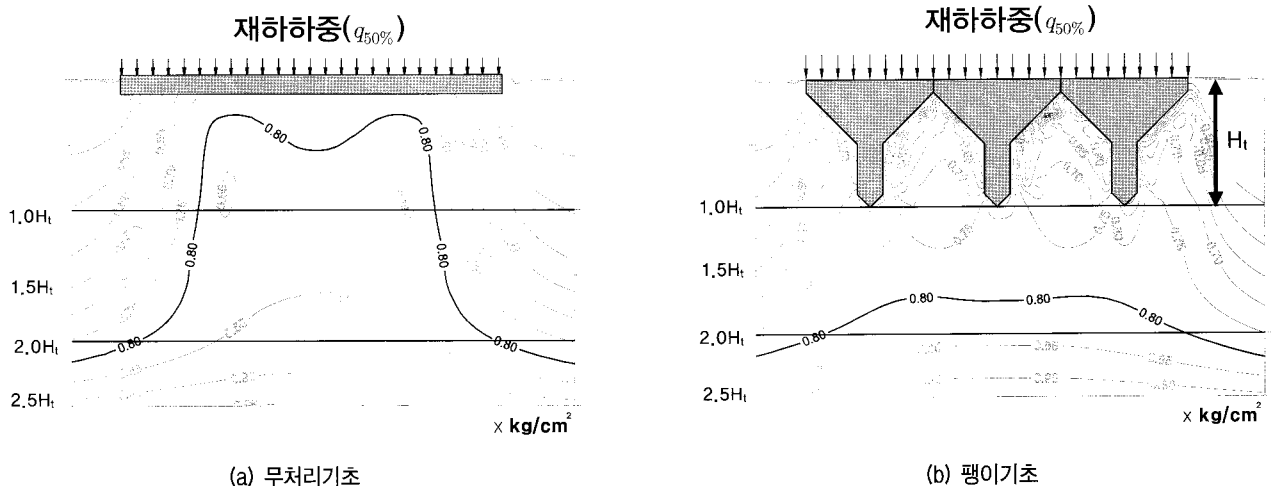


그림 10. 지중응력 분포(무처리기초 항복하중의 50%(80kPa) 적용시)

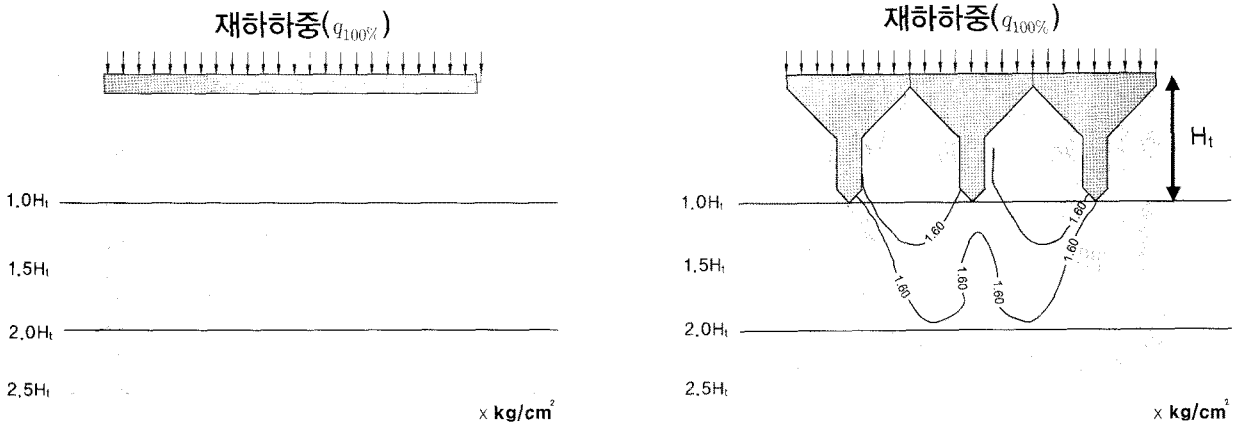


그림 11. 지중응력 분포(무처리기초 항복하중 적용시(160kPa))

적게 발생하고 있다. 이는 하중증가에 따른 기초지반의 큰 변위 발생으로 국부파괴가 이루어진 것으로 판단된다. 반면, 팽이기초의 경우 심도 1.0Ht에서 응력이 크게 발생하는 현상이 나타나고 있는데, 이는 하중이 증가함에 따라 채움쇄석과 팽이기초 말뚝부에 의한 측방변형 억제에 의하여 지반내 구속력이 증가하는 현상으로 판단되며, 이와 같은 현상으로 인하여 지지력향상 및 침하억제가 발생하는 것으로 판단된다.

4.3 항복하중 작용시 소성영역

작용하중이 항복하중 이상이 되면 기초 아래 지반의 소성영역이 점차 확대되고 활동면을 따라 전단파괴면이 발생한다. 본 수치해석에서는 그림 12와 같이 무처리기초(Type-C)와 팽이기초(Type-A)가 각각 파괴되었을 경우에 대한 지반의 소성상태를 비교하였다. 무처리 기초(그림 12(a))의 경우에는 하중재하에 따른 전단파괴면이 심도 0.7B(B=기초폭), 폭 3B 정도까지 형성되나 팽이기초(그림 12(b))의 경우에는 심도 1.2B, 폭 4B 깊이

까지 넓고 깊게 형성되어 지반의 전단저항면이 증가되었고 이로 인해 팽이기초의 지지력이 향상되는 것으로 판단된다.

4.4 팽이기초의 원추부와 말뚝부의 영향

팽이기초의 형상(원추부+말뚝부)이 거동에 미치는 영향을 검토하기 위하여 원추형기초(Type-D)와 T형기초(Type-E)에 대해 수치해석을 수행하였으며, 해석결과를 그림 13 및 14와 같다. 기초형상별 지지력 및 침하량 비교시 분석법은 4.1절에서와 동일하게 검토하였다. 검토 결과, 낮은 하중단계에서는 원추부의 응력분산효과에 의하여 침하억제효과가 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 재하하중의 크기가 커질수록 말뚝부의 효과가 커지는데, 이는 하중증가에 따른 말뚝부내의 구속력 증가에 의한 것으로 사료된다. 원추형기초(Type-D)는 무처리기초와 팽이기초의 중간정도의 거동을 보이고 있으며, 지지력은 무처리기초에 비하여 1.5배, 침하는 74% 수준으로 발생하였다. 또한, T형기초(Type-E)의 경우

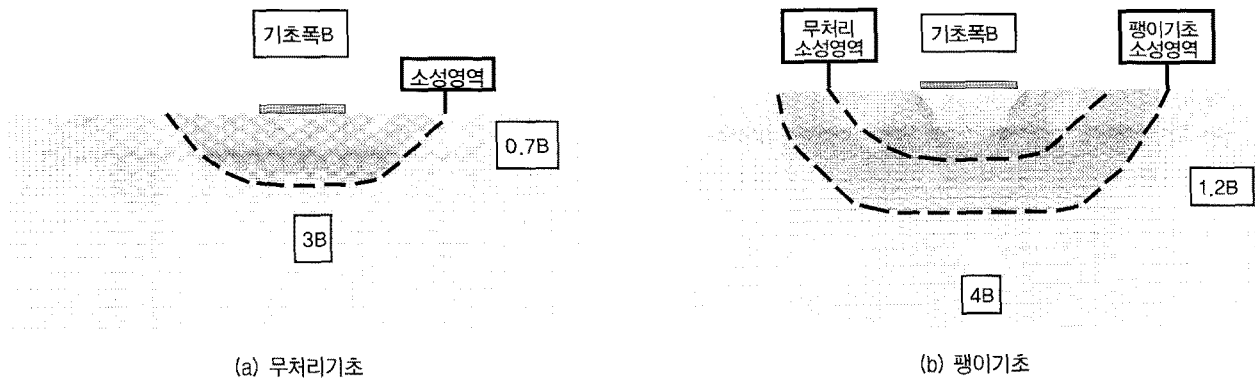


그림 12. 기초하부 지반의 소성상태

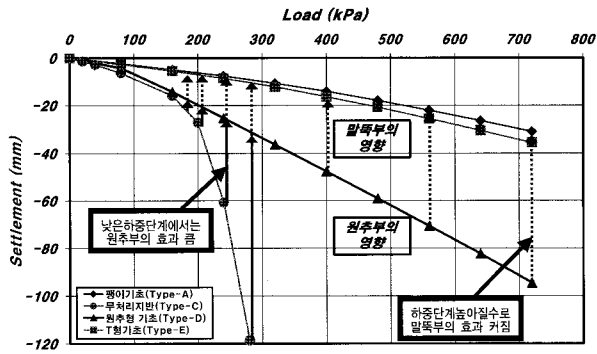


그림 13. 팽이기초 형상 변화에 따른 하중-침하곡선(Type-A 규격기준)

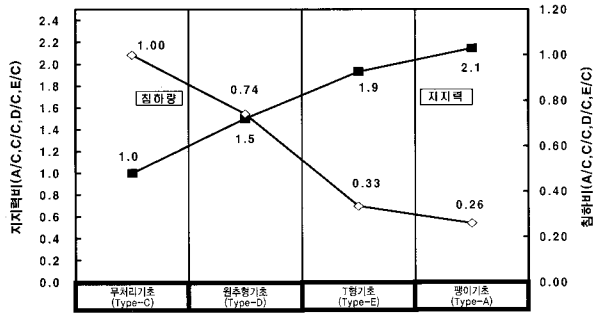


그림 14. 팽이기초 형상별 지지력 및 침하량 비교

전체적인 거동은 팽이기초와 유사한 거동을 보였으며, 지지력은 무처리기초에 비하여 지지력은 1.9배 침하는 33% 수준으로 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 고려할 때 팽이기초의 효과는 원추부와 말뚝부의 조합에 의해 팽이기초의 효과가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 하중단계가 커질수록 말뚝부 효과가 중요한 것으로 판단된다.

4.5 팽이기초 말뚝길이의 변화에 따른 거동

말뚝길이 변화에 따른 팽이기초의 거동특성을 분석하기 위하여 말뚝을 제거한(0L) 원추형기초(Type-D)와

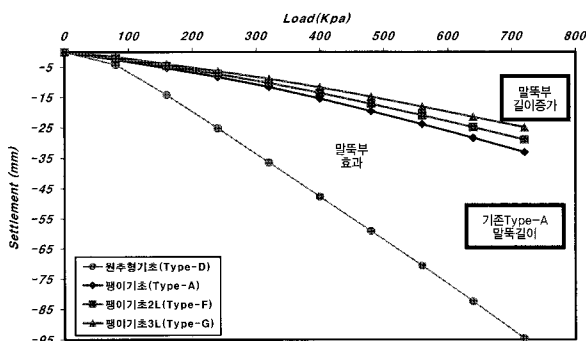


그림 15. 팽이기초 말뚝부 길이변화에 따른 하중-침하곡선

표 4. 팽이기초 말뚝부 길이 변화에 따른 지지력 및 침하량

종 류	허용지지력 (kPa)	침하량(mm) (200kPa일때)
원추형기초	140	20
팽이기초	200	7
팽이기초2L	222	6
팽이기초3L	245	5

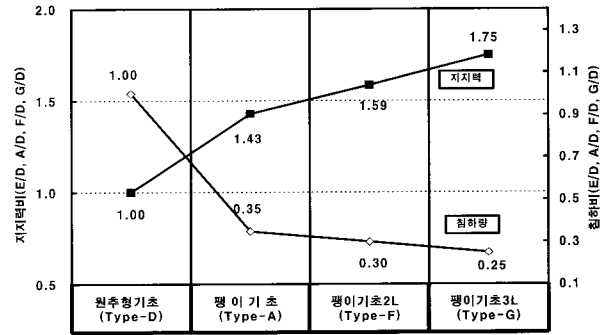


그림 16. 팽이기초 말뚝부 길이변화에 지지력 및 침하량 비교

표준형팽이기초(Type-A)의 말뚝길이(1L)에 대해 2배, 3배 증가시킨 경우 팽이기초의 거동을 비교·검토하였다. 검토결과, 그림 15와 같이 표준형팽이기초(Type-A)의 말뚝길이(1L)인 경우 가장 큰 효과를 나타냈으며, 말뚝부 증가에 따른 팽이기초의 효과는 일부 향상되는 것으로 나타났다. 따라서 말뚝부증가에 따른 시공적인 어려움 및 공기연장 등의 문제 등을 고려할 때 향상효과는 미미하게 나타나 기존의 말뚝부 길이가 합리적인 형상이라고 판단된다.

5. 결 론

현장타설 팽이기초의 거동메커니즘을 확인하기 위하여 N치가 4~13인 실트질모래(SM)층 현장에서 수행된 재하시험 결과를 입력 자료로 하여 Mohr-Coulomb 탄소성모델을 사용한 유한차분 수치해석을 시행한 후 기초 형식 및 형상변화에 따른 거동특성을 비교·검토하였다. 연구결과에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 동일한 하중조건에서 기초하부에 발생하는 지중응력을 비교·분석한 결과, 무처리기초는 발생응력이 기초 중앙부에 집중되어 작은 하중에서 국부파괴가 발생되나, 팽이기초는 채움쇄석과 팽이기초의 형상으로 인한 응력분산효과로 기초전체에 비교적 균등하게 응력이 분포하여 응력집중에 의한 지반파괴를

방지할 수 있을 것으로 판단된다. 본 지반조건인 경우에는 기초형식에 따른 수치해석을 수행한 결과, 무처리기초에 비해 현장타설 팽이기초의 지지력은 약 2배 증가하였으며, 침하는 약 1/3로 감소하는 것으로 나타났다.

- (2) 무처리기초는 하중재하에 따른 전단파괴면이 심도 0.7B(B=기초폭), 폭 3B까지 형성되나 팽이기초는 심도 1.2B, 폭 4B 깊이까지 넓고 깊게 형성되어 지반의 전단저항면이 증가됨으로 팽이기초의 지지력이 향상되는 것으로 판단된다.
- (3) 팽이기초의 형상(원추부+말뚝부)이 거동에 미치는 영향을 검토한 결과, 원추부와 말뚝부의 조합에 의해 팽이기초의 효과가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 낮은 하중단계에서는 원추부의 응력분산효과에 의하여 침하억제효과가 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 재하하중의 크기가 커질수록 말뚝부의 효과가 커지는데, 이는 하중증가에 따른 말뚝부내의 구속력 증가에 의한 것으로 사료된다.

- (4) 말뚝길이 변화에 따른 거동특성을 검토한 결과, 말뚝부의 증가에 따른 팽이기초의 효과는 일부 향상되는 것으로 나타났으나, 기존 팽이기초(Type-A)의 말뚝길이(1L)인 경우가 가장 큰 효과를 나타내어 합리적 형상이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2006학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

참 고 문 헌

1. 단국대학교 (2004), *현장타설형 팽이말뚝기초공법 적용에 따른 기초 및 지반거동에 관한 연구보고서*.
2. 에스트건설(주) (1998), *Top-base 공법 설계와 시공편람*.
3. 최치영, 김찬국, 김학분 (2007), “팽이기초의 형상변화에 따른 지반거동”, *한국지반공학회 2007년 봄 학술발표회 논문집*, pp.17-28.
4. 山田, 齊藤, 安川 (1987), “コマ型基礎の沈下抑制効果についての考察”, *第22回 土質工學研究發表會講演集*, pp.1833-1836.

(접수일자 2008. 7. 3, 심사완료일 2008. 10. 13)