

모형토조실험을 통한 현장타설 팽이기초의 거동특성 연구

김학문¹, 김찬국^{1*}

Evaluation of In-situ Top Base Foundation Behavior using Calibration Chamber Test

Hak-Moon Kim¹ and Chan-Kuk Kim^{1*}

요 약 본 논문에서는 국내외에서 처음으로 시도되는 현장타설 팽이기초공법의 거동특성을 검토하기 위하여 기초형식을 현장타설 팽이기초(In-Situ TBF), 공장제작 콘크리트 팽이기초(PC-TBF), 전면기초, 무처리 원지반으로 나누어 모형토조실험을 수행하였다. 모형실험결과 현장타설 팽이기초와 공장제작 콘크리트 팽이기초의 거동특성은 거의 유사하게 나타났으며, 이들 팽이기초는 원지반 및 전면기초에 비하여 지지력 증대효과가 있는 것으로 나타났다. 또한, 기초형식에 따른 지중연직응력 분포를 검토한 결과 팽이기초 설치시 지중연직응력의 영향범위가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 지반이 조밀할수록 팽이기초의 응력분산효과가 감소하는 것을 알 수 있었으며, 향후 다양한 지반조건에서 모형실험과 수치해석을 통해 보다 많은 검토가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

Abstract In this research, model tests for in-situ Top-Base Foundation are carried out in other to investigate the load delivering mechanism and the incremental effect of bearing capacity. According to the result of model tests, the load-settlement curves of both in-situ Top-Base(In-situ TBF) and Precast Top-Base Foundation(PC-TBF) showed similar results in term of the ground movement and effect of bearing capacity. Also, the range of vertical stresses delivered into ground was decreased with Top-Base method regarding other types foundations.

Key words : top-base foundation, load delivering mechanism, effect of bearing capacity

1. 서 론

지반공학 분야에서 발생하는 문제점 중 기초의 지내력 및 침하는 구조물의 안전성과 사용성에 막대한 영향을 끼치고 있다. 적정 기초공법의 채택은 구조물의 안정성과 시공성 및 경제성에 큰 영향을 미치게 되는데 구조물의 설계하중이 지반의 지내력보다 과히 크지 않을 경우 일반적으로 말뚝기초를 풍화암층까지 연장 시공함으로써 과대한 설계가 이루어지고 있는 실정이다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 일본에서 개발된 콘크리트 팽이기초공법이 많이 적용되어 왔으나, 시공성 및 경제성 측면에서 많은 문제점이 발생되어 왔다.[2]

일반적으로 현재 사용되고 있는 공장제작형 콘크리트

팽이기초는 70~80kg의 중량 구조체로서 형상을 제작하는데 따른 부지 및 플랜트 시설과 운반에 대한 부담이 크며, 시공시 장비 진입이 필요하므로 연약지반의 경우 작업에 대한 어려움과 정확도가 떨어지고, 수평 작업 시간이 길게 소요되는 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 종래의 공장제작형 팽이기초가 갖는 여러 가지 문제점을 해결·보완하기 위해 현장타설 팽이기초공법이 개발되었다.

현장타설 팽이기초는 재활용 합성수지인 팽이형 수지용기를 지반에 압입하고 수지용기에 콘크리트를 타설한 다음, 잔여 공극부분에 쇄석을 충전하는 공정으로 이루어지며, 시공성 및 경제성에 있어서 기존 공장제작형 콘크리트 팽이기초공법을 한 단계 발전시킨 공법이다.[1] 따라서 본 연구에서는 기존 공장제작 콘크리트 팽이기초와 새로 개발된 현장타설 팽이기초의 거동특성을 비교 검토하며, 팽이기초공법의 하중전달메커니즘 및 지지력 증대효과를 평가하기 위하여, 기초형식과 지반조건을 달리하여 모형실험을 수행하였다.

이 연구는 2004학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

¹단국대학교 공학부 토목환경공학전공

*교신저자 : 김찬국(cool7594@dankook.ac.kr)

2. 공법의 개요

팽이기초공법은 그림 1에서 보여주는 바와 같이 구조물의 기초 지반면에 팽이기초시공을 위한 위치철근을 설치하고 그 위에 길이가 짧고 팽이모양의 합성수지용기를 연결하여 부설한 다음, 용기내에 콘크리트재를 충전후, 말뚝부 사이의 간극을 쇄석으로 채워서 다짐을 하고, 팽이기초 상부에 연결철근을 고정시키는 표면처리용 강성 매트 공법이다.[3][4]

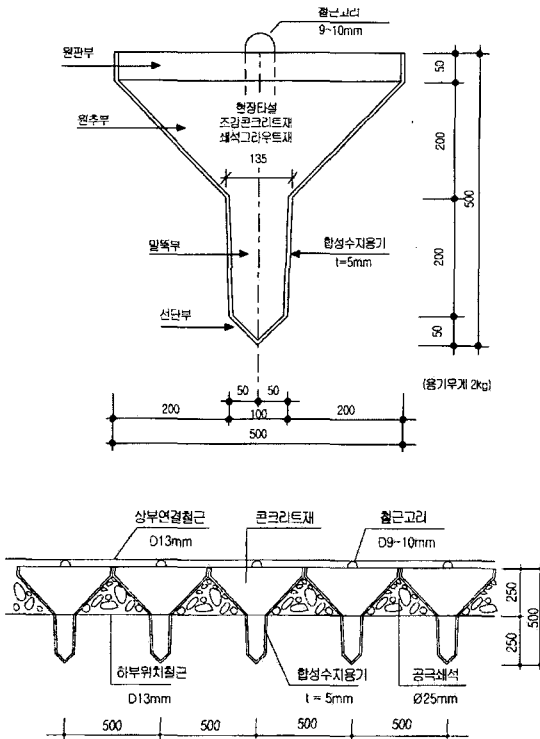


그림 1. 현장타설 팽이말뚝기초의 형상 및 시공단면도

팽이기초의 허용지지력은 얇은기초의 지지력 예측시 일반적으로 사용되는 Terzaghi의 지지력 이론식을 수정한 공식으로 팽이기초의 응력분산효과를 고려한 K_1 항과 점토지반에서 강성기초와 팽이기초의 접지압 분포의 상이함에 따른 팽이기초의 지지력 향상효과를 고려한 K_2 항이 추가된 수정공식이다.[3][5]

연속기초 :

$$q_{ka} = \frac{1}{F} K_1 K_2 [c N_c + p_o N_q + \frac{1}{2} \gamma B_k' N_r] \quad (1)$$

여기서,

K_1 : 팽이말뚝기초의 응력분산효과를 나타내는 계수 (그림 2 참조)

$$K_1 = (B_k' + 2H \tan \omega) / B \quad (2)$$

K_2 : 강성기초의 접지압 분포를 고려할 필요가 없는 부분만 허용지지력을 증가시키는 계수로 그림 3에서 얻어진다. (단, 사질토지반에서는 $K_2 = 1$ 을 적용한다.)

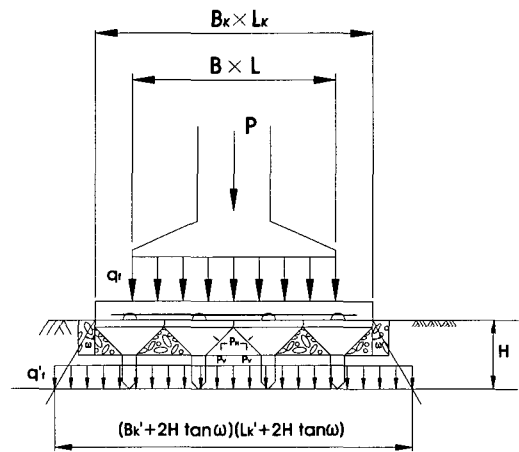


그림 2. 응력분산에 대한 지지력 향상효과(K_1)

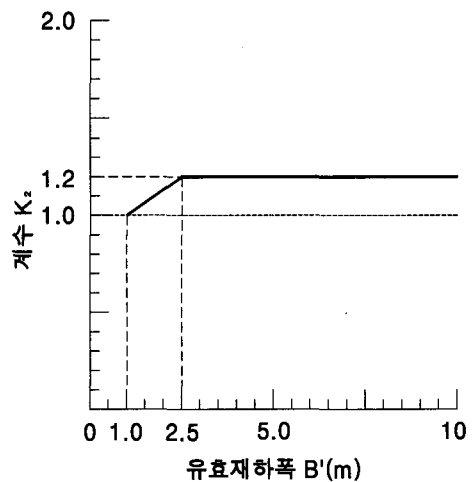


그림 3. K_2 의 도표(점성지반, $\phi 500$ 형 파일)

3. 모형실험

3.1 모형실험 개요

본 연구에서는 현장타설 팽이기초의 지지력 및 침하특성을 고찰하고자 모형토조실험을 수행하였다.[7] 지반의 조성은 상대밀도 변화에 따라 느슨한 경우(Loose Sand)와 중간 조밀한(Medium Sand) 경우의 사질토 지반으로 하였으며, 각 지반조건에서의 기초형태는 원지반 무처리, 전면기초, 공장제작 콘크리트 팽이기초(PC-TBF) 및 현장타설 팽이기초(In-situ TBF)로 변화시키며 재하시험을 실시하였다.

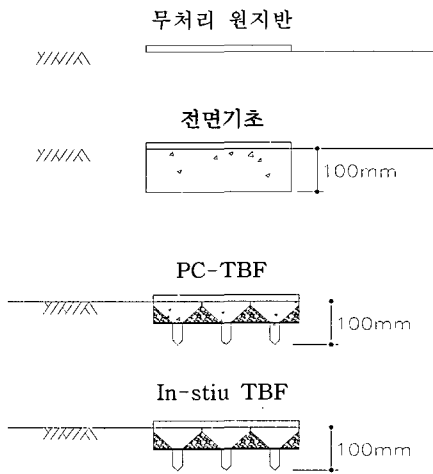


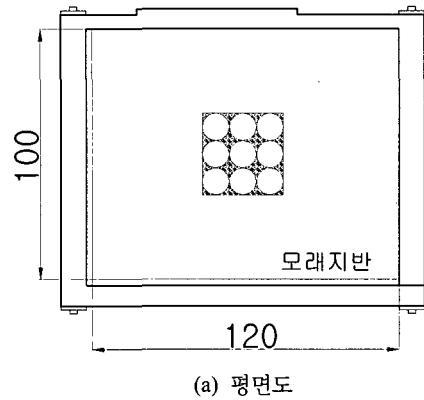
그림 4. 적용된 기초형식

본 모형실험에서 사용된 팽이기초는 실제 $\phi 500$ 형 현장타설 팽이기초 및 공장제작 콘크리트 팽이기초의 강도와 단위중량을 고려하여 1/5 Scale로 축소하였으며, 팽이기초의 재료 변화에 따른 거동차이를 검토하기 위하여 현장타설 팽이기초의 경우 실제 PE용기의 마찰특성이 나타나도록 제작하였다. 또한 모형 전면기초에 대하여는 콘크리트만으로도 재하하중에 대하여 충분한 강성을 가지므로 철근은 배제하였고, 팽이기초의 거동과 비교 검토하기 위하여 기초크기 및 근깊이를 동일하게 적용한 30cm×30cm×10cm 크기로 제작하였다.

3.2 모형실험 장치 및 실험방법

3.2.1 모형실험 장치

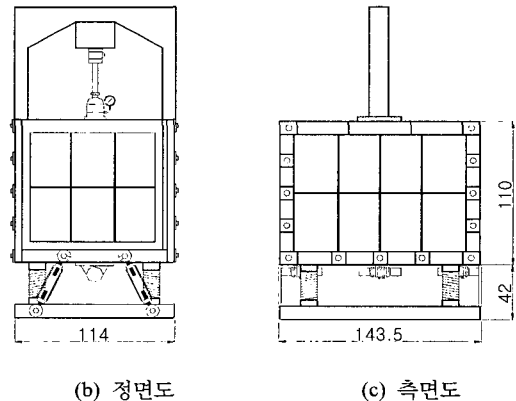
본 연구에 사용된 모형실험 장치는 토조, 강사장치, 하중재하장치, 계측기기로 분류되며, 모형실험장치의 개요도는 그림 5와 같다.



(a) 평면도

표 1. 모형실험의 개요

구분	지반조건	단위중량 (tf/m ³)	기초 형식
A	느슨한 모래지반 (Loose sand)	1.36	원지반 무처리
			전면기초
			공장제작형 콘크리트 팽이기초(PC-TBF)
			현장타설형 팽이기초(In-situ TBF)
B	중간 조밀한 모래지반 (Medium sand)	1.43	원지반 무처리
			전면기초
			공장제작형 콘크리트 팽이기초(PC-TBF)
			현장타설형 팽이기초(In-situ TBF)



(b) 정면도
그림 5. 모형실험장치(단위:cm)

모형실험에 사용된 토조의 크기는 가로 120cm, 세로 100cm, 높이 110cm이며, 외부하중에 의해 발생하는 지중 응력과 소성영역의 크기 및 변위 등이 토조벽체 영향을 받지 않는 크기여야 하므로 본 연구에서는 접지면적에 따른 응력구근(stress bulb)범위를 고려하여 기초크기를 결정하였으며, 토압계를 토조벽체에 설치하여 영향이 없음을 확인하였다. 또한 토조내 관찰을 용이하도록 두 면은 30mm의 아크릴 판으로 제작하였고, 토조의 변형이 없도록 I-형강으로 보강하였다.

모형지반조성은 균질한 지반을 조성하기 위해 강사장치를 사용하였으며 토조 전체에 모래가 고르게 강사 되도록 토조 상부에 레일(rail)을 설치하여 강사통 거치대(raining frame)를 정확하게 이동할 수 있도록 하였다. 또한 상대밀도를 균질하게 하기위해 각 층 5cm마다 강사되는 낙하고를 조정할 수 있도록 제작하였다.

하중재하는 하중지지대를 설치하고 기초위에 정사각형의 재하판과 3.0ton 용량의 유압잭을 거치시켜 재하를 실시하였다. 재하시 유압잭 위에 하중계(Load Cell)를 설치하여 하중재하에 정확성을 기하였다.

계측기기는 재하시험에 따른 기초의 침하 및 지중에 작용하는 토압 등을 측정하기 위해 기기의 용도 및 정밀도 등을 고려하여 선정하였으며 확실한 데이터의 검증을 위해 계측기마다 보정 및 검증실험을 계속적으로 실시하였으며, 지중응력, 기초의 침하량 및 지표침하량을 측정하기 위한 계측기기는 그림 6과 같이 토압계, 기초침하계, 지표침하계를 사용하였다.

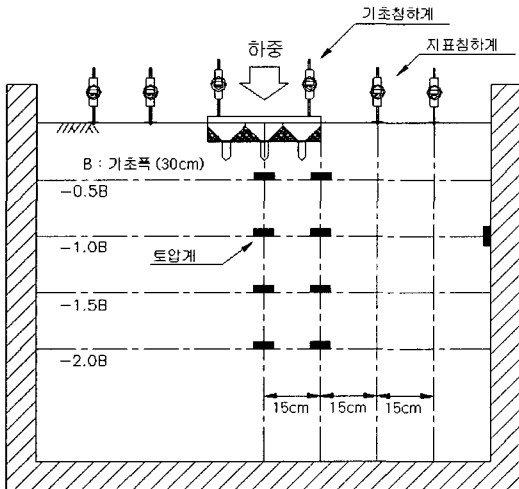


그림 6. 계측기기 설치위치도

3.2.2 모형실험 방법

모형지반은 원하는 균질한 모형지반을 조성하기 위하여 강사구 폭과 낙하고에 대한 반복실험을 통하여 일정한 상대밀도를 갖도록 하였으며, 본 실험에서는 건조단위중량이 1.36tf/m³의 느슨한 모래지반(A지반)과 1.43tf/m³의 중간조밀한 모래지반(B지반)으로 조성하였다. (그림 7 참조)

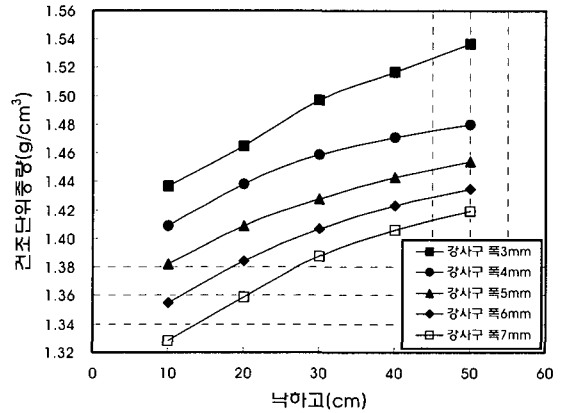


그림 7. 강사높이(낙하고)에 따른 건조단위중량 변화

팽이기초의 설치는 말뚝부 위쪽을 철사(D13철근의 1/5 scale)로 연결하고 팽이기초의 말뚝부 만을 사질지반 상에 관입시킨 다음, 최대직경 5mm의 쇠석을 팽이말뚝과 지반사이의 공극에 충분히 다져 넣어 설치하였다.

하중재하시험은 KS F2444-90(95), ASTM D1194-94, AASHTO T221의 시험기준에 따라 기초상에 균등한 하중을 가하기 위하여 30cm×30cm의 정사각형 재하판을 사용하였다. 매회의 하중은 예상되는 파괴하중의 1/5이하로 하였으며 각 하중의 침하량은 2분, 4분, 8분의 간격으로 Dial Gauge의 침하량이 0.01mm이하가 될 때까지 측정하였다.

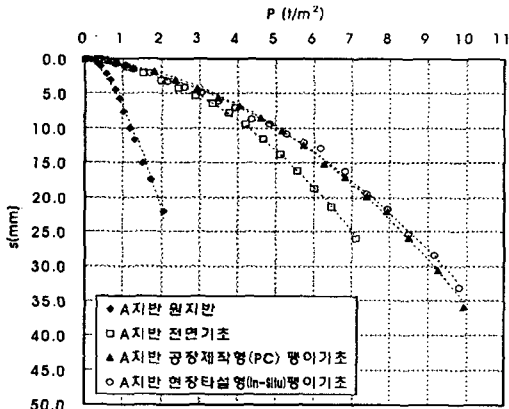
기초형식별 허용지지력은 재하시험 결과에 대해 P-s 분석, logP-logS 분석, logP-s 분석 및 P-ds/log(dt) 분석을 수행하여 이중 최소값을 항복지지력으로 결정하였으며, 항복지지력에 대해 안전율 2를 고려하여 기초의 허용지지력을 산정하였다.

4. 실험결과 및 분석

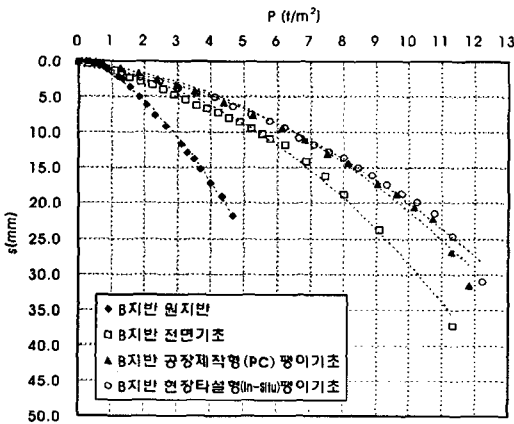
4.1 기초조건에 따른 하중-침하곡선

지반조건이 상대밀도 27.4%의 느슨한 모래지반(A지

반)과 상대밀도 52.5%의 중간조밀한 모래지반(B지반)인 경우 기초형식을 무처리원지반, 전면기초, 기존 공장제작형 콘크리트 팽이기초와 현장타설 팽이기초로 각각 모형재하실험을 실시하여 그림 8과 같은 하중-침하곡선 결과를 얻었다.



(a) 느슨한 모래지반(A지반, $D_r=27.4\%$)



(b) 중간 조밀한 모래지반(B지반, $D_r=52.5\%$)

그림 8. 기초조건에 따른 하중-침하곡선

느슨한 모래지반과 중간 조밀한 지반에 대하여 각각 현장타설 팽이기초를 설치하였을 때, 기존 콘크리트 팽이기초와 유사한 거동을 보이고 있으며, 원지반(무처리)과 전면기초 조건에 비하여 지지력이 향상되는 것으로 나타났다. 이는 팽이기초의 형상과 채움쇄석 내에서 발생하는 마찰저항 및 수평력 상쇄효과에 의해 지중으로 전달되는 하중이 감소하며, 인접팽이의 말뚝부 저항으로 인해 지반의 측방유동 억제 효과 등에 의한 것으로 판단된다.

4.2 기초조건에 따른 허용지지력 비교

그림 9는 기초조건에 따른 모형실험과 이론식에 대한 허용지지력을 비교·검토하였다. 원지반(무처리)과 전면기초조건일 경우에는 Terzaghi의 정역학적 지지력 이론식을 적용하였으며, 팽이기초의 지지력은 일본의 「토목연구센타」의 설계 매뉴얼[5]에서 Terzaghi의 지지력 이론식을 수정 제한한 팽이기초의 지지력 이론식을 적용하였다.

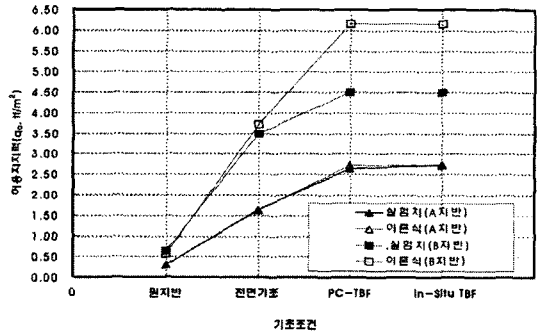


그림 9. 기초조건에 따른 허용지지력

기초조건별 모형토조실험 결과는 느슨한 모래지반(A지반)에서 현장타설 팽이기초는 원지반(무처리) 지반의 경우보다 9배, 전면기초의 경우보다 1.7배 증가된 허용지지력 값을 나타내었고, 중간 조밀한 모래지반(B지반)에서는 원지반(무처리)의 경우보다 7배, 전면기초의 경우보다 1.3배정도 증가된 허용지지력 값을 갖는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과로부터 현장타설 팽이기초 적용시 A, B의 두 지반에 대하여 허용지지력이 크게 증가한 것을 확인할 수 있으며, 느슨한 모래 지반의 경우가 중간 조밀한 모래지반의 경우보다 허용지지력 증대효과가 더 큼을 알 수 있다.

또한, 모형실험 및 이론식에 의한 허용지지력을 검토한 결과 느슨한 모래지반에서는 이론식에 의한 허용지지력 값과 거의 일치하는 것으로 나타났으나, 중간 조밀한 모래지반에서 원지반과 전면기초는 실험값과 이론지지력이 거의 유사한 값을 갖는 반면, 팽이기초에서는 이론식에 의한 허용지지력 값보다 40%정도 작게 나타났다. 이는 팽이기초 이론식에 적용된 지지력 증가계수의 변수인 응력분산각(ω)이 지반상대밀도가 클수록 작아지기 때문에 응력분산효과가 감소하는 것으로 판단된다.

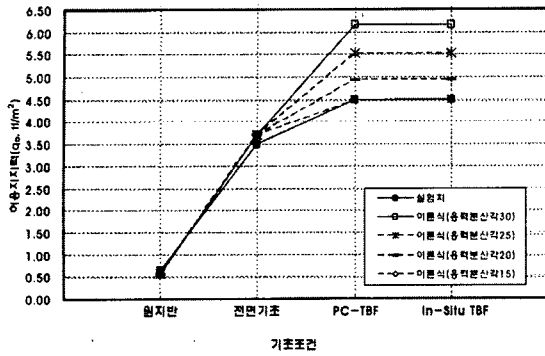


그림 10. K_1 값 변화에 따른 허용지지력의 이론식과 실험치 비교(B지반)

그림 10은 응력분산효과에 의한 지지력 증가계수 K_1 에서 변수가 되는 응력분산각(ω)을 변화시켜 나타낸 것이다. 팽이말뚝기초의 지지력공식에서 K_1 값 산정시 응력분산각은 30°로 정하고 있으나 중간 조밀한 모래지반에서는 그림 9에서 보는 바와 같이 응력분산각이 15°일때 실험치와 유사한 값으로 나타나 모래지반이 조밀할수록 지지력 증가계수 값이 감소하여 지지력 증대효과가 느슨한 모래지반에 비하여 반감하는 것으로 하는 것으로 판단된다. 그러나 본 실험에서는 두가지 지반조건에 대한 실험결과이므로 향후 추가 시험을 통하여 상대밀도 변화에 따른 지지력 향상효과를 검토되어야 할 것으로 판단된다.

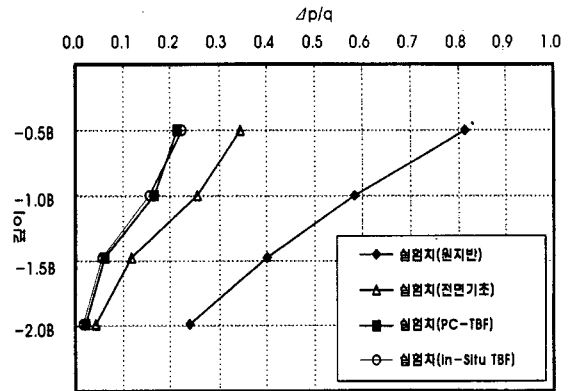
4.3 동일하중조건에서의 기초별 지중연직응력 분포

A, B지반에서 각 기초조건별로 재하하중에 따른 지반 내 연직응력을 측정하였으며, 측정위치는 기초의 중심부로부터 0.5B, 1.0B, 1.5B, 2.0B로 하였다.[6]

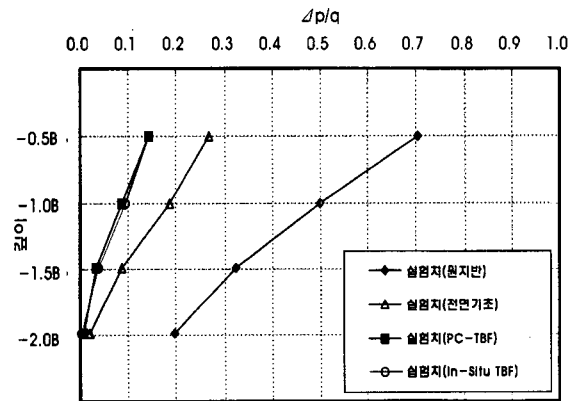
그림 11은 동일하중 조건에서의 각 기초조건에 따른 깊이별 증가된 지중연직응력 분포를 재하하중에 대한 응력증가량의 비로 나타 낸 것이다.

재하판 중심에서 동일하중에 대하여 지중연직응력을 살펴보면, 팽이기초를 적용한 경우가 원지반 및 전면기초를 적용한 조건보다 깊이별 지반내 응력이 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 팽이기초에 대한 실험결과를 통해 볼 때 전면기초를 적용한 경우에 비해 깊이에 따라 다소 차이는 있으나 약 0.67배 정도로 연직응력이 감소된 것으로 나타났다. 이러한 결과는 팽이기초 원추부의 45°형상 때문에 접지압이 수평분력과 수직분력의 응력으로 나누어지면서 수평분력은 서로 상쇄되고 하중을 넓게 분산시켜 깊은 지반까지 응력이 미치지 않는 것으로 판단된다

다.[7]



(a) A지반(재하하중 200kg기준)



(b) B지반(재하하중 200kg기준)

그림 11. 기초조건에 따른 깊이별 지중연직응력 분포

5. 결론

지금까지 시공되고 있는 공장제작형 콘크리트 팽이기초의 문제점을 해결하기 위하여 개발된 현장타설 팽이기초의 거동특성을 검토하기 위하여 모형실험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 모형실험결과에 의하면 현장타설 팽이기초(In-Situ TBF)와 공장제작 팽이기초(PC-TBF)의 하중-침하곡선은 거의 유사하게 나타났으며, 지반거동 및 지지력 증대효과에서도 거의 유사한 결과를 갖는 것으로 나타났다. 또한, 지지력은 전반 전단파괴의 지지력 값에 가까운 것으로 나타났으며, 원지반과 전면기초에 비하여 지지력 증대효과가 큰 것으로 나타났다.
2. 팽이기초의 지지거동 특성을 검토한 결과 중간 조밀한

모래지반보다 느슨한 모래지반에서 허용지지력 증대 효과가 큰 것으로 나타났으며, 중간 조밀한 모래지반에서 실험에 의한 허용지지력보다 팽이기초이론식에 의한 허용지지력이 크게 산정되었다. 이는 팽이기초 이론식에 적용된 지지력 증가계수(K_1)의 변수인 응력 분산각(ω)이 지반이 조밀할수록 작아지기 때문에 응력 분산효과가 감소하는 것으로 판단된다.

- 동일하중에서의 지중연직응력을 살펴보면, 팽이기초를 적용하는 경우가 원지반 및 전면기초를 적용하는 것에 비해서 지반내 전달되는 지중연직응력의 영향범위가 감소되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 팽이말뚝 원추면의 접지압이 수평 및 수직응력으로 나누어지면서 수평응력이 서로 상쇄되는 효과와 채움쇄석과 말뚝부가 조합을 이루어 기초아래 지반주변의 측방변형을 구속하기 때문에 팽이기초 적용시 주변지반 거동과 침하억제효과가 큰 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 단국대학교, “현장타설형 팽이말뚝기초공법 적용에 따른 기초 및 지반거동에 관한 연구보고서”, 2003.
- [2] 서울대학교 공과대학 토목공학과 지반공학연구실 연구보고서, 1995.
- [3] 에스트건설(주) “Top-base 공법 설계와 시공편람”1990.
- [4] 에스트 건설(주) “톱-베이스공법”, 1990.
- [5] 일본토목연구센터 “톱-베이스공법의 설계실무편람”, 1990
- [6] 山田, 安川, 齊藤, “軟弱地盤におけるコマ型コンクリートブロック基礎の現場載 試験”,第21回 土質工學研究發表會講演集, pp.1281~1284, 1986
- [7] 荒井, 町原, 小久保, 大西, 堀田, 安川, “軟弱地盤上コマ型コンクリートブロック基礎の沈下抑制効果”, 土質工學會-地盤の側方流動に關するシンポジウム發表論文集, pp.111~114, 1986.

김 학 문(Hak-Moon Kim)

[정회원]



- 1976년 2월 : Tesside 대학교 토목공학과 (공학사)
- 1981년 9월 : Sheffield 대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1985년 2월 : London 대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1988년 3월 ~ 현재 : 단국대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>

기초, 사면, 터널, 흙막이 굴착

김 찬 국(Chan-Kuk Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 단국대학교 토목공학과 (공학사)
- 2003년 2월 : 단국대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 단국대학교 토목환경공학과 박사수료

<관심분야>

기초, 사면, 터널, 흙막이 굴착