

대심도 연약지반의 대단위아파트 지하주차장에 적용한 현장타설형 팽이기초공법의 시공사례



김 대 훈
(주)반석팽이기초
기술고문
(bstbeng@yahoo.co.kr)



김 태 완
(주)반석팽이기초
대표이사



이 봉 열
토질 및 기초기술사
공학박사



김 찬 국
단국대학교 토목공학과
박사수료



김 학 문
단국대학교 토목공학과
교수, 공학박사

1. 서론

부산광역시의 서부산권에 위치한 명지-신호지구의 주거단지는 국내 최대규모의 양산단층대가 분포되어 있는 낙동강 하구에 위치하고 있으며, 약 5,000~10,000년 전에 생성된 세계적으로도 희귀한 100m를 초과하는 대심도의 연약 퇴적층이 폭넓게 분포하고 있는 지역이다. 이 지역의 개발은 녹산산업단지의 개발을 시초로 하여 1990년대 말부터 시작된 부산신항만의 개발로 더욱 가속화되었으나, 이러한 연약 퇴적토지반에 최대 70~80m 깊이에 이르는 말뚝 기초 공사비의 과다한 부담으로 이미 개발된 단지에서의 주거 및 상업용 건축물의 건설이 지연되거나

개발 자체를 포기하고 있는 실정이다.

이번에 팽이기초공법을 적용한 건설현장 역시 그동안 기초공사비의 과다한 부담으로 오랫동안 개발이 미루어져 왔던 곳이다.

따라서, 여기서는 팽이기초공법의 간략한 소개와 함께 팽이기초공법의 구조적 안정성과 간편한 시공성 및 저렴한 경제성을 살펴보고자 한다.

2. 공사개요

- 공 사 명 : 부산 명지주거단지 A블록 퀸덤아파트 신축공사

대심도 연약지반의 대단위아파트 지하주차장에 적용한 현장타설형 팽이초공법의 시공사례

표 1. 팽이초공법의 기대효과

(1) 구조적 안정성	(2) 간편한 시공성	(3) 저렴한 경제성
1. 등분포재하와 응력분산으로 기초의 지지력이 증대된다. 2. 압밀침하를 억제하고 지반교란과 부등침하를 방지한다	1. 시공장소의 협소와 대형장비의 시설에 구애받지 않는다. 2. 진동소음등의 건설공해가 발생하지 않는다.	1. 간편한 시공성 등으로 공사기간이 단축된다. 2. 단순공법으로 공사비가 아주 저렴하게 된다.

- 현장위치 : 부산광역시 강서구 명지동 3230-11 번지 일원
- 공사규모 : 1) 대지면적 177,492m²
2) 건축연면적 523,330m²
3) 세대수 2,866세대 (지하2층, 지상12~15층)
4) 팽이초공사 83,330m² (지하2층 구조 지하주차장)

형 말뚝기초로 표 1과 같은 기대효과를 얻을 수 있다. 특히, 팽이초공법중 현장타설형 팽이초공법은 기존의 공장제작형 팽이초공법에 비하여 초경량의 팽이용기를 사용함으로써, 시공성이 탁월하고 자재비가 경감 될뿐만 아니라 공사기간도 상당기간 단축하게 되어 소규모 구조물에는 물론이고 대규모현장에도 적용되는 사례가 점차 증가하고 있는 추세이다.

3. 팽이초공법

3.1 팽이초공법의 개요

- 1) 팽이초(Top-Base)는 일본에서 개발되어 전 체침하의 억제 및 부등침하의 방지와 지지력의 증대효과를 얻을 수 있는 연약지반개량공법으로, 우리나라에서는 1995년 표준품셈(5-24기 초판)에 수록된 신기술, 신공법이다.
- 2) 팽이초(Top-Base)공법의 설계검토는 아래의 문헌을 기준으로 하여 시행한다.
 - 「톱-베이스공법의 설계와 시공 매뉴얼」 - 일본 토목연구센터 편찬
 - 「지반개량공법 편람 - 팽이형기초편」 - 일본 토목재료학회 편찬
- 3) 팽이초(Top-Base)는 소형의 콘크리트 팽이

3.2 팽이제품의 형상규격

- 팽이말뚝 Ø500형의 형상과 규격은 그림 1과 같이 합성수지로 성형된 마찰력보강의 현장타설형 콘크리트 제품으로 한다.
- 팽이말뚝에 사용되는 현장타설용 콘크리트는, KS표시의 품질인증을 획득하여 품질관리시스템이 갖춰진 공장의 레미콘 제품으로 팽이말뚝

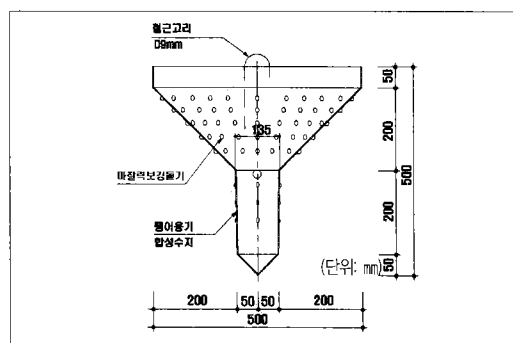


그림 1. 팽이말뚝의 규격

의 품질을 보증하여야 한다.

- 제품에 사용되는 콘크리트의 압축강도는 180 kg/cm² 이상으로 한다.
- 팽이기초(Ø500형)에 사용되는 위치철근과 연결철근의 규격은 D13mm로 한다.
- 팽이기초에 사용되는 공극쇄석의 규격은 25mm의 쇄석골재를 기준으로 한다.

3.3 팽이기초의 시공형태

팽이기초의 기본적인 시공 형태는 그림 2를 기준으로 한다.

3.4 팽이기초의 역학특성

팽이기초는 그림 2와 같이 팽이형말뚝의 원추부가 채움쇄석을 압축하여 구속함으로써 말뚝과 채움쇄석이 일체화되는 강성지반을 형성하고, 접지면적 극대화에 의한 하중분산으로 지반에 전달되는 응력을 감소시킴으로써 침하량을 억제하여 지반의 저항능력을 증대시키는 효과를 나타낸다. 또한, 강성지반구조임에도 불구하고 팽이말뚝사이의 잘 다짐된 채움쇄석 및 원추형 말뚝부와 지반의 마찰저항에 의한 조합작용으로 지반내 응력집중을 방지하고 응력분포

를 균등화시켜 지반의 측방변형을 구속하여 지반의 국부파괴를 방지하고, 압축변형에 의한 침하를 억제하는 효과를 얻게된다. 이와 같이 팽이기초의 응력분산효과와 측방유동억제효과는 결국, 지지력 증대와 침하량억제의 특성으로 나타나게 되는 것이다.

재하판중심에서의 지중연직응력을 살펴보면 그림 3과 같이 팽이기초의 응력분산효과와 측방유동억제 때문에 팽이기초를 적용한 경우가 원지반 및 매트기초를 적용한 경우보다 지반내연직응력의 영향범위가 짧아지고 응력이 감소한 것으로 나타났다

3.5 팽이기초의 설계자료

- 기초면원지반의 지지력 : Terzaghi의 지지력계산식을 사용한다.

$$q_{da} = (1/F) \{ \alpha(2/3)cN'_c + \beta\tau_1BN'\gamma + P_0N'_q \}$$

- 기초면원지반의 침하량 : 탄성침하와 압밀침하의 양침하량을 검토한다.

- 팽이기초의 지지력 : 팽이기초의 지지력계산식을 사용한다.

$$q_{ka} = (1/F) K_1 K_2 \{ \alpha c N_c + \beta \tau_1 B_k N_\gamma / 2 + P_0 N_q \}$$

- 팽이기초의 침하량 : 팽이기초의 침하량은 탄성침하량과 압밀침하량의 양침하를 포함하는 Boston Code법의 층별침하량계산식을 사용

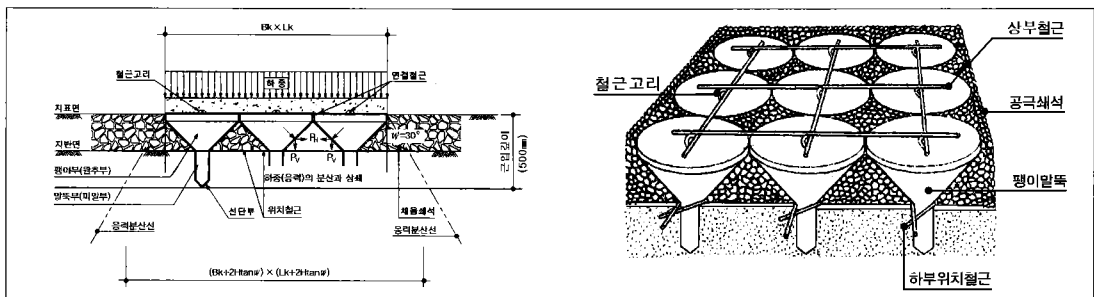


그림 2. 팽이기초의 시공형태(역학특성)

대심도 연약지반의 대단위아파트 지하주차장에 적용한 현장타설형 팽이기초공법의 시공사례

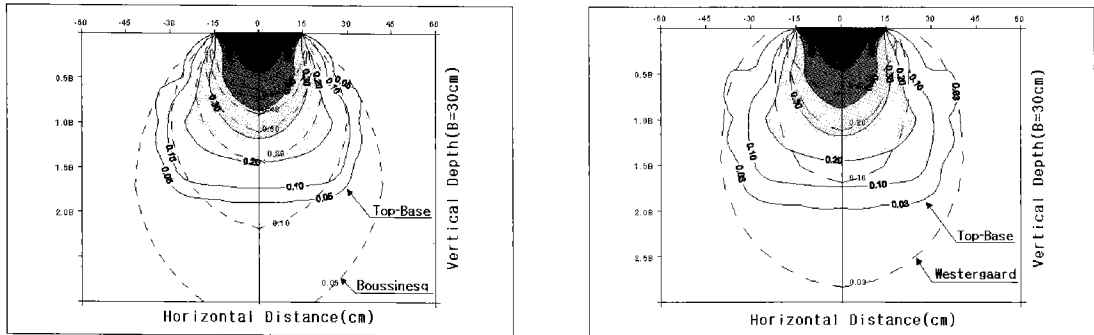


그림 3. 허용하중에서의 지중연직응력 분포도

한다.

$$\sum Si = \sum \varepsilon_{zi} \times Hi \quad \varepsilon_{zi} = (1/E)(1-2\nu K_0) \Delta \sigma_{zi}$$

여기서, Si : i 층의 침하량

Hi : i 층의 두께

ε_{zi} : i 층의 연직변형도

E : 지반의 탄성계수

ν : 포아송비(0.3)

K_0 : 정지토압계수(0.5)

$\Delta \sigma_{zi}$: i 층의 평균증가응력

래에 원지반인 하상퇴적층의 실트질 및 점토질모래 층이 약12m의 깊이까지 위치하고 있다. 그 아래에 약 40m의 깊이까지 실트질점토층이 존재하며 그 아래 5m깊이에서 점토질모래층 및 모래질자갈층이 나타났으므로 시추는 모래질자갈층이 존재하는 심도 62m까지 수행하였다.

대상현장의 지하수위는 재하시험 당시의 지반굴착시 GL(-)3.0m로 확인되었다.

4.2 설계자료에 의한 지지력과 침하량

4. 현장지반조건과 실물재하시험

4.1 현장지반조건

(주)영조주택의 대단위 쿼텀아파트 지하주차장에 대한 팽이말뚝기초의 타당성검토를 위한 실물재하시험은 명지-신호지구의 지반조사서 중 가장 불리한 신호지구의 2104단지를 선정하여, 단국대학교 지반공학 연구실에서 수행하였고 본 단지의 지반조사 자료인 그림 4의 시추주상도는 동아대학교 건설기술연구소에서 수행하였다.

본 단지의 경우 2~3m정도의 매립층과 그바로아

현장재하시험시 적절한 재하하중을 산정하기 위해 기초지반의 지지력 및 침하량을 예측하였다. 기초지반의 지지력 및 침하량 예측시 적용물성치는 동아대학교 건설기술연구소(2006. 1)에서 수행한 지반조사 자료를 기초로 하여 표 2와 같이 평가하였다.

지반물성치 산정시 고려한 지반조사공은 지반조건이 불리한 2104블록의 SO4-1의 시추조사 결과를 적용하였고, 기초지반의 지지력 및 침하량을 평가하기 위하여 적용한 N 치는 에너지 효율(60%)을 고려한 N 값(N_{60})중 평균값을 적용하였으며, 지반정수의 산정 근거로는 지반조사된 자료를 바탕으로 각종 문헌에 제시되어 있는 물성치 및 기존학자들의 제안식 등을

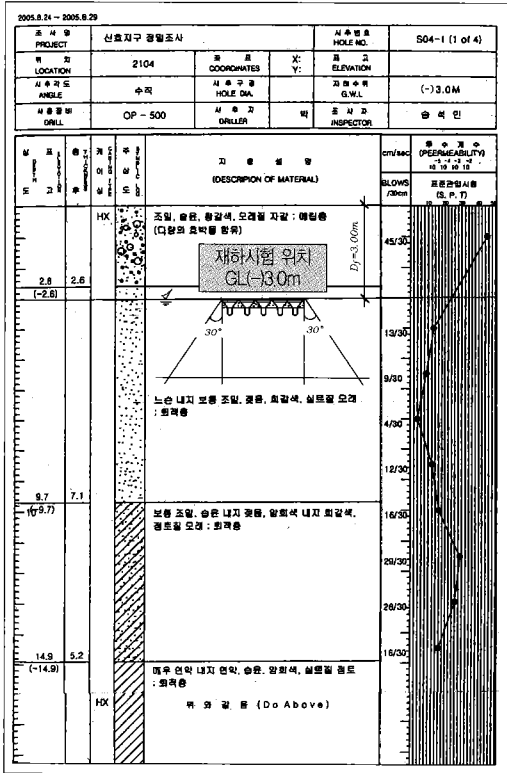


그림 4. 현장지반조사의 시추주상도

고려하여 평가된 지반정수 값 중 보수적인 값을 적용 하였다.

표 2. 기초지반의 지지력 및 침하량 평가시 적용된 지반물성치

물성치 지층	보정 N치 (γ_{1s} , tf/m ²)	습윤 단위중량 (γ_{sat} , tf/m ²)	포화 단위중량 (γ_s , °)	내부 마찰각	점착력 (c, tf/m ²)	탄성계수 (E_s , tf/m ²)	포아송비 (ν)
퇴적층(SM)	7	1.7	1.8	25	0	1300	0.35

표 3. 원지반과 팽이기초의 지지력 비교표 (F=3적용)

제안식	원 지 반 기 초					팽이기초 지지력 (tf/m ²)
	Terzaghi지지력(tf/m ²)		Meyerhof	Hansen	SPT에 의한 허용지지력 (침하량 25mm일때) (tf/m ²)	
	전반전단 파괴시	극부전단 파괴시	지지력 (tf/m ²)	지지력 (tf/m ²)		
극한지지력	29.49	9.34	36.36	23.08	-	90.89
허용지지력	9.83	3.11	12.12	7.69	9.86	30.30

이때에 B×L=8m×8m 스패의 기초형식에 대하여 여러가지 이론식으로 검토한 원지반과 팽이기초의 지지력 검토결과는 표 3과 같다.

실물재하시험시의 설계하중은 지하2층구조의 지하주차장에서 실하중이 10.03tf/m²이었으나 명지지구에 위치한 지상5층의 아파트기초로까지 감안하여 q=20tf/m²로 하였다. 이때에 B×L=8m×8m 스패의 기초형식에 대하여 여러가지 이론식으로 검토한 원지반과 팽이기초의 침하량은 표 4 및 표 5와 같다.

원지반의 허용지지력은 제안식에 따라 다소 차이는 있으나 약 9t/m²으로 예상되어 검토설계하중 20t/m²에 미치지 못하는 것으로 평가되었으며, 팽이기초로 보강된 경우는 허용지지력이 약 30tf/m²으로 예측되어 설계하중을 만족하는 것으로 나타났다.

또한 원지반의 경우 지중의 깊이에 대한 고려 없이 재하시험 및 기초크기만을 고려하여 산정된 표준관입시험을 이용한 즉시침하량 제안식은 약 38mm로 다소 적게 침하가 발생하는 것으로 예상되었으나 지층의 깊이 및 적용하중을 고려하여 산정된 De Beer 제안식을 적용한 경우 약 235mm까지 발생하는 것으로 예측되었다.

대심도 연약지반의 대단위아파트 지하주차장에 적용한 현장타설형 팽이기초공법의 시공사례

표 4. 각종 이론식에 의한 원지반과 팽이기초의 침하량

제안식	원지반기초의 침하량		팽이기초의 침하량
	표준관입시험을 이용한 즉시침하량	De Beer 제안식	
예상침하량 (mm) (B×L=8m×8m)	37.9 ~ 234.7mm		29.4mm

그러나 팽이기초의 경우 침하량은 29mm가 발생되는 것으로 예측되어 Mat기초의 허용침하량 기준인 50mm를 만족하는 것으로 나타났다.

4.3 현장재하시험에 의한 지지력과 침하량

1) 현장재하시험 시행계획

부산 명지-신호 주거단지내 건물기초의 안정과 경제적인 시공을 위한 현장타설형 팽이기초공법의 적용타당성을 검증하기 위하여 현장재하시험을 수

행하고 원지반 및 팽이기초 적용시의 지지력과 침하량을 예측하였다.

현장재하시험은 원지반 및 팽이기초 적용시의 지지력과 침하량을 비교·검토하기 위하여 각각의 경우에 대해 재하시험을 계획하였으며, 팽이기초하부의 응력분산효과를 검증하기 위하여 팽이말뚝 및 쇠석기초 하부에 토압계를 설치하였으며 팽이기초의 지지력 향상과 침하억제 효과를 검증하고자 하였다.

현장재하시험의 개요와 계측기 설치계획은 그림 5 및 그림 6과 같다.

2) 현장재하시험 실시결과

본 현장의 경우 지반조건 등 현장상황을 고려하여 각 계수를 결정하고 장기하중에 대하여 P-S 분석법, Log(P)-Log(S) 분석법, S-Log(t) 분석법을 비교하여 분석하였으며, 시험결과는 재하시 항복 및 극

표 5. 이론적 산정식에 의한 팽이기초의 침하량

심도 z(m)	접지분포면적 (B+2ztanα) ×(L+2ztanα)	작용하중 qBL (ton)	연직응력 Δσ _z (t/m ²)	평균 연직응력 Δz (t/m ²)	연직변형도 (1-2K ₀)/Es Δσ _z	층두께 (mm)	총 별 침하량 (mm)	총별누적 침하량 (mm)
	64.00	1280	20.00					
0.5	73.57	1280	17.40	18.699	0.0097523	500	4.8761	0.0000
1	83.81	1280	15.27	16.336	0.0085196	500	4.2598	2.1299
1.5	94.71	1280	13.51	14.394	0.0075069	500	3.7534	5.8833
2	106.28	1280	12.04	12.779	0.0066647	500	3.3323	9.2157
2.5	118.52	1280	10.80	11.421	0.0059567	500	2.9784	12.1941
3	131.43	1280	9.74	10.270	0.0053560	500	2.6780	14.8720
3.5	145.00	1280	8.83	9.284	0.0048417	500	2.4209	17.2929
4	159.23	1280	8.04	8.433	0.0043982	500	2.1991	19.4920
4.5	174.14	1280	7.35	7.694	0.0040130	500	2.0065	21.4985
5	189.71	1280	6.75	7.049	0.0036762	500	1.8381	23.3366
5.5	205.95	1280	6.22	6.481	0.0033802	500	1.6901	25.0267
6	222.85	1280	5.74	5.979	0.0031185	500	1.5593	26.5860
6.5	240.42	1280	5.32	5.534	0.0028861	500	1.4431	28.0290
7	258.66	1280	4.95	5.136	0.0026788	500	1.3394	29.3684
팽이기초의 지중응력분산효과를 고려한 심도=7m까지의 최종침하량 (mm)								29.37

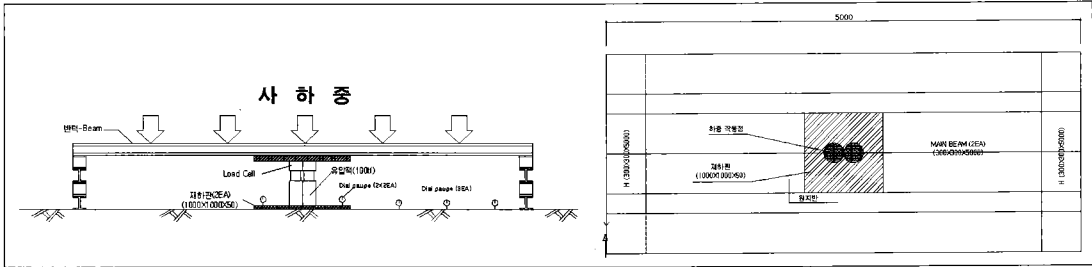


그림 5. 원지반의 재하시험 개요도

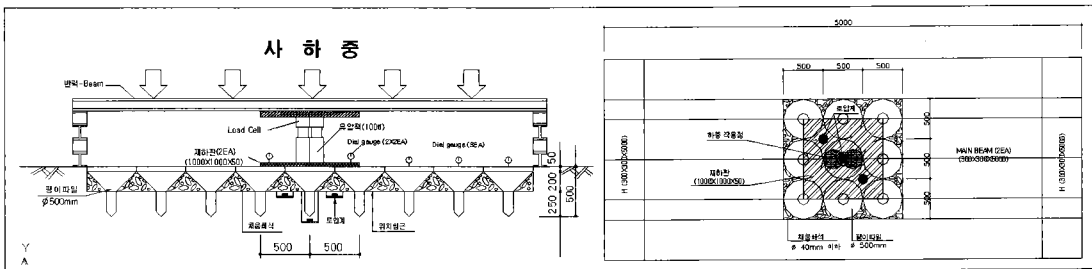


그림 6. 팽이기초의 재하시험 개요도

현상이 나타나 항복 및 극한하중 두 값을 비교하여 작은값으로 분석하였다.

평판재하시험 결과 하중-침하곡선은 그림 7과 같으며 여기에서 항복 및 극한하중을 정리하면 표 6과 같다.

평판재하시험을 통하여 안정성을 확인하고자 구조물 위치에 설계하중이 작용할 때의 예상침하량은 표 7과 같이 산정되었다.

4.4 현장재하시험에 의한 팽이기초의 특성 규명

1) 팽이기초의 응력분산효과

팽이기초의 하중분산효과를 확인하기 위하여 그림 8과 같이 팽이기초의 하부에 토압계를 설치한 후 하중단계에 따라 지반에 전달되는 하중을 측정하였다. 검토결과 팽이원추부 아래 설치된 토압계 B 및 C의

경우 작용하중에 비해 약 23%의 하중만이 지중으로 전달되었으며, 팽이말뚝부 아래 설치된 토압계 A의 경우 작용하중에 대해 약 41%의 하중만이 지중으로 전달되는 것으로 측정되었다. 이와 같은 결과를 고려할 때 팽이기초의 지지력향상 및 침하억제 효과의 원인인 팽이기초의 응력분산효과를 확인할 수 있었다.

2) 팽이기초의 측방유동억제효과

하중재하시험시 지반의 측방유동발생에 의한 기초 인접지반의 거동을 검토하기 위하여 기초판으로부터 1B, 2B, 3B 위치에 지표침하계를 설치하였으며, 동일하중조건($q=24t/m^2$)에서 팽이기초와 원지반의 지표침하 거동은 그림 9과 같다.

원지반의 경우, 하중증가에 따라 기초지반의 측방 유동 발생에 의하여 기초판 주변지반의 부풀어오름 현상이 과도하게 발생하는 것으로 나타났으나, 팽이기초의 경우는 팽이말뚝의 저항으로 인해 지반의 측

대심도 연약지반의 대단위아파트 지하주차장에 적용한 현장타설형 팽이기초공법의 시공사례

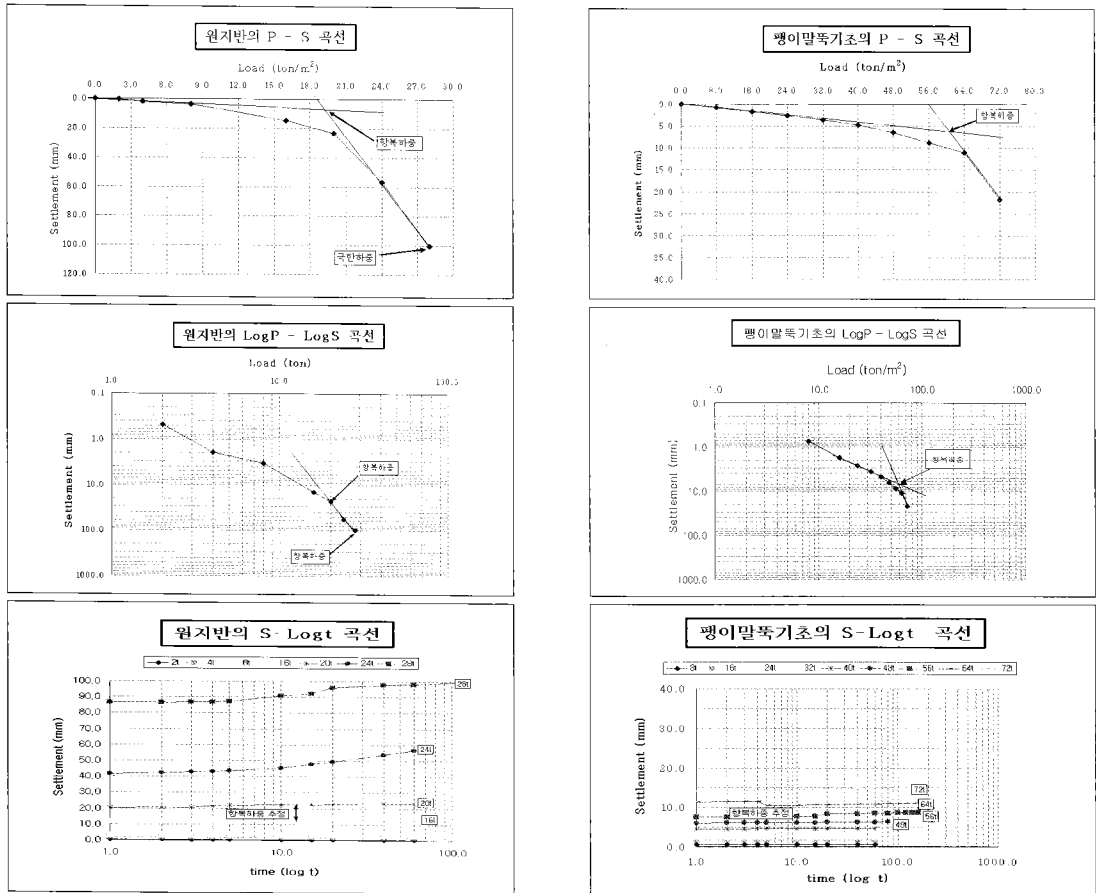


그림 7. 평판재하시험의 하중-침하 곡선

방유동이 억제됨으로써 기초주변지반의 부풀어오름 현상이 발생하지 않아 침하가 억제되는 효과를 나타내는 것으로 판단된다.

이 기초공법을 적용하였을 경우의 구조적 안정성을 정리하면 표 8과 같고, 간편한 시공성과 저렴한 경제성을 적산자료를 기준으로 PHC말뚝기초와 비교하여 검토하면 표 9와 같다.

5. 팽이기초의 안정성과 경제성

이상으로 지반이 대심도의 연약지반이라 할지라도 설계하중이 지반의 강성에 비하여 과히 크지 아니할 때, 팽이기초의 적용타당성을 살펴보았다. 팽

6. 맺음말

(주)영조주택의 명지주거단지 A블록 쿼텀아파트 지하주차장시설에서 팽이기초는 그 구조적안정성

표 6. 기초에 따른 항복하중 및 극한하중 (현장재하시험 결과)

구분	항복지지력 (tf/m ²)	극한지지력 (tf/m ²)	허용지지력 (tf/m ²)	설계하중 (tf/m ²)	비고
원지반	19.50	27.98	9.33	20.0	N.G
팽이기초	58.46	-	29.23		O.K

표 7. 기초에 따른 예상침하량 (설계하중: 20tf/m², 기초규격: 8m×8m)

구분	설계하중에서의 침하량산정		허용 침하량 기준	비고
	탄성이론	Boussinesq의 이론		
원지반	247.0mm	73.20mm	50mm	N.G
팽이기초	23.4mm	6.95mm		O.K

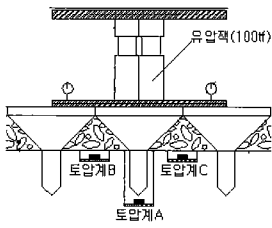
팽이기초의 지중토압계 설치위치	하중 (t/m ²)	토압계측값 ÷ 작용하중		
		토압계 A	토압계 B	토압계 C
	8.00	44 %	13 %	19 %
	16.00	34 %	20 %	20 %
	24.00	39 %	23 %	21 %
	32.00	41 %	26 %	22 %
	40.00	42 %	28 %	24 %
	48.00	43 %	30 %	26 %
	평균	41 %	23 %	22 %

그림 8 토압계의 설치위치와 토압계측값의 비

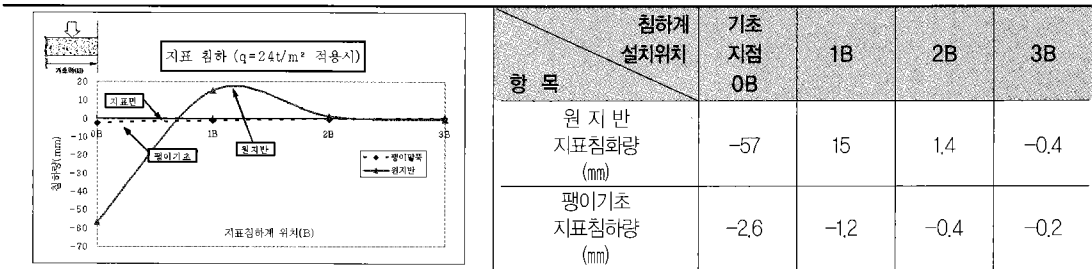


그림 9. 원지반과 팽이기초의 위치별 지표침하량

이 입증되었고, 종래의 관습적 기초공법인 PHC말뚝기초에 비하여 시공기간은 1/3로 줄어들었으며 공사비도 상당히 절감되었다. 그럼에도 불구하고 본 현장과 같은 도심도의 연약지반이나 상대적으로 시설물의 규모가 큰 현장에서는 안정성과 시공성 및 경제성등을 종합적으로 고려한 합리적인 기준보다는, 새로운 공법에 대한 막연한 불안감과 기술자

들의 시공경험 부재 및 기존의 공법에 대한 관습적인 선호 등으로 강관 또는 PHC말뚝 등을 이용한 기존의 공법을 채택하고 있는 것이 현실이다.

본 시공사례의 소개로 지반강성에 비하여 설계하중이 과히 크지 않은 모든 건설현장에서 팽이기초공법이 좀 더 폭넓고 친근하게 접해질 수 있는 계기가 되어, 동 공법의 일반화와 대중화에 조금이나마 기

대심도 연약지반의 대단위아파트 지하주차장에 적용한 현장타설형 팽이기초공법의 시공사례

표 8. 팽이기초의 구조적 안정성

구 분	이론식에 의한 산정치		재하시험에 의한 계측치	
	허용지지력	침 하 량	허용지지력	침 하 량
설 계 하 중	20tf/m ²	-	20tf/m ²	-
허용침하량	-	50mm	-	50mm
원 지 반	9.83tf/m ² N.G	234.7mm N.G	9.33tf/m ² N.G	247.0mm N.G
팽 이 기 초	30.30tf/m ² O.K	29.4mm O.K	29.23tf/m ² O.K	23.4mm O.K

표 9. 팽이기초의 시공성 및 경제성

구 분		PHC말뚝기초(Ø500mm)	팽이기초(Ø500형-1층)
시 공 수 량		372,320m	83,330m ²
시공기간	장 비	항타기등(대형장비) 10조	굴삭기등(소형장비) 10조
	인 력	40인	80인
	시공기간	248일(100%)	83일(34%)
	비 고	팽이기초의 시공은 터파기공도의 공정과 병행하므로 (굴토공정+1주일) 정도가 시공기간임.	

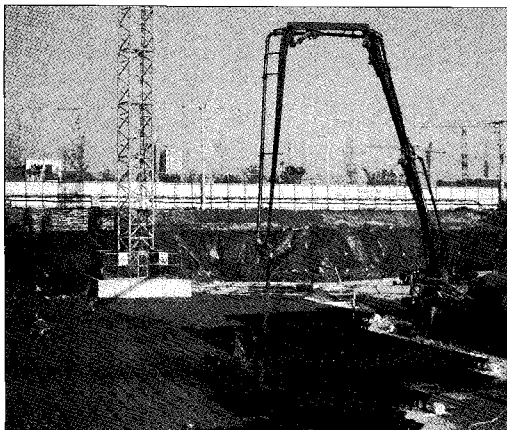


사진 1. 현장타설형 팽이말뚝기초의 시공전경

여가 되기를 기대한다.

아울러 이번엔 팽이기초공법의 원활한 설계검토와 시공시행에 도움을 주신 시행사(주)영조주택과 단국대학교 지반공학연구소 및 설계사 희림종합건축, 감리사 담종합건축의 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 단국대학교 토목환경공학과, 2006.02 : 부산 명지-신호 주거단지내 현장타설형 팽이말뚝기초 적용의 타당성 검토를 위한 재하시험
2. 단국대학교 토목환경공학과, 2004.10 : 현장타설형 팽이말뚝기초공법 적용에 따른 기초 및 지반거동에 관한 연구
3. 서울대학교 지반공학연구소, 1995.09 : 팽이형 파일공법 연구보고서
4. 일본재료학회 토질안전재료위원회, 1991.07 : 지반개량공법편람 - 팽이형 기초공법
5. 일본 (재)토목연구센터, 1990.03 : 톱-베이스공법 설계시공 매뉴얼
6. 일본 전국마이크로마공협회, 1988.09 : 톱-베이스공법 설계자료(개정판)