

풍화대지반에 지지된 건축구조물의 전면기초 적용에 관한 사례 연구

The Case Studies on Application of Mat Foundation System to Building Structure Founded on Weathered Ground

최 용 규[†] · 김 성 호¹⁾ · 이 민 희²⁾

Choi, Yongkyu · Kim, Sungho · Lee, Minhee

ABSTRACT : In construction of buildings in Korea, the buildings are frequently founded on the weathered ground (weathered soil/rock, fractured rock). In this case, to make a full use of a bearing capacity of a weathered ground for economic design, the shallow mat foundation system could be used. In this study, we have researched three cases of mat foundations on the weathered ground in Korea, and analyzed and considered the design procedures and the reinforcing methods. That is, we have considered the detail design, analysis proceedings, the ground settlement evaluation proceedings, the rock face mapping evaluations after excavation and reinforcing methods of the mat foundation on the weathered ground. And large scale plate load tests on the weathered ground supporting the mat foundation were performed and also load bearing capacity and settlement of actual mat foundation, considering the scale effect, were evaluated.

Keywords : Building structure, Mat foundation, Weathered ground, Reinforcing Method, Ground settlement, Rock face mapping

요 지 : 국내 건축구조물 건설시 풍화대 지반(풍화토, 풍화암, 파쇄대 지반 등) 위에 건설되는 경우가 흔하게 나타나며 이 경우 경제적인 설계방안으로 풍화대의 지반지지력을 활용하기 위하여 전면기초를 사용한다. 국내 풍화대(풍화암, 풍화파쇄대, 풍화토) 지반위에 축조된 전면기초의 3가지 사례를 분석하였으며 전면기초의 설계 및 해석 절차, 침하량 평가절차, 굴착후 암반면 평가 절차, 전면기초 하부 풍화대 지반의 보강방법 결정 등에 관하여 자세하게 고찰하였다. 건축물의 전면기초를 지지하는 풍화암 또는 풍화파쇄대지반에서 사전 조사에 의한 분석뿐만 아니라 암반 노출면에 대한 암반면 조사(face mapping) 분석을 통하여 암반의 지질 구조적 특성을 평가하였으며 암반면 조사 결과를 토대로 보강방법을 결정하였다. 그리고 전면기초를 지지하는 풍화토 지반에서 직경 1m의 대형평판재하시험을 실시하였으며 크기효과를 고려하여 실제 기초의 지지력과 침하량을 평가하였다.

주요어 : 건축구조물, 전면기초, 풍화대지반, 보강방법, 침하량, 굴착암반면

1. 서 론

최근 상당수의 초고층 건축물이 계획되고 있으며 이에 따라 높은 하중을 안전하게 지지할 수 있는 대형기초가 요구된다. 초고층 건축물의 대형 기초는 높은 하중으로 인하여 변위하며 이러한 거동이 다시 상부구조물에 영향을 미친다. 따라서 기초와 상부구조물의 구조적 상관관계가 필요하다. 이러한 기초와 구조물과의 상관관계의 문제는 과거에는 지반을 주로 스프링으로 모사하여 분석하는 Winkler 모델 형태가 일반적으로 실무에 적용되었으나 수치해석기법이 발전함에 따라 지반에 지지되는 구조물의 거동이 보다 현실적으로 파악되게 되었으며 이에 따른 잠재적 이득은 구조물의 효율성 향상과 건설 비용의 절감이다(Hemsley, 2000). 본 연구에서는 종래 지지력 중심의 설계에서 최근 변위에 기반을 두는 거동

중심의 설계로 전환하는 경향(Mandolini et al., 2005)을 고려하여 건축물 상부구조와 기초와의 관계를 살펴보았다.

국내 건축구조물은 풍화대 지반(풍화암, 풍화파쇄대, 풍화토 지반 등) 위에 건설되는 경우가 흔하게 나타나며 이 경우 경제적인 설계방안으로 풍화대의 지반지지력을 활용하기 위하여 전면기초를 사용한다.

본 연구에서는 풍화대 지반위의 전면기초 3가지 사례들을 대상으로 하였으며 각 사례에서 풍화대 기초지반의 설계 절차 및 보강방법을 자세하게 고찰하고 분석하였다.

2. 건축물의 전면기초의 설계 절차

2.1 건축물 기초에 대한 이해

초고층 건축물 전면기초의 연성적인 변위 특성은 상부

† 정희원, 경성대학교 건설환경공학부 교수(E-mail : ykchoi@ksu.ac.kr)

1) 정희원, 진영이앤씨 대표이사

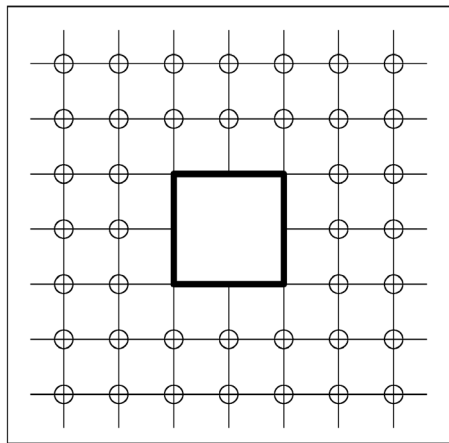
2) 정희원, (주)지텍 대표이사

구조물의 거동 및 응력 상태에 영향을 준다. 건축구조물의 하중 전달체계는 그림 1에서 보듯이 내부 코어와 주변 기둥을 통하여 높은 수직 하중이 전달되며 경우에 따라 건축물 내부의 공간을 보다 넓게 활용하기 위하여 주변기둥을 적은 수의 대형기둥으로 대체하여 매우 큰 하중을 집중적으로 전달시킨다. 또한 지진하중 및 풍하중은 지하층 또는 건축물의 바닥면을 전달 기준으로 설정하여 횡하중이 구조물을 통

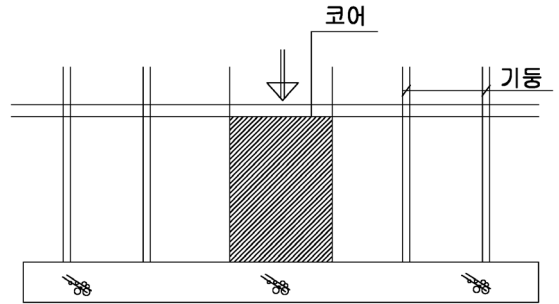
하여 지반으로 전달되도록 고려한다.

전면기초에 발생하는 부재의 응력은 외력에 대한 지반 또는 말뚝의 반력 분포와 관계가 있다. 이 반력은 그림 2와 같이 지반의 변형특성과 상부하중 작용위치 및 전면기초의 구조와 관계가 있다.

지반의 관점에서 보면 지반의 강성이 클수록 반력은 외력 위치에 집중되지만 강성이 낮을 수록 반력은 외력위치로

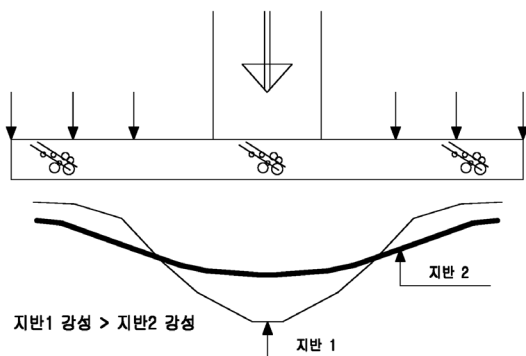


(a) 평면도

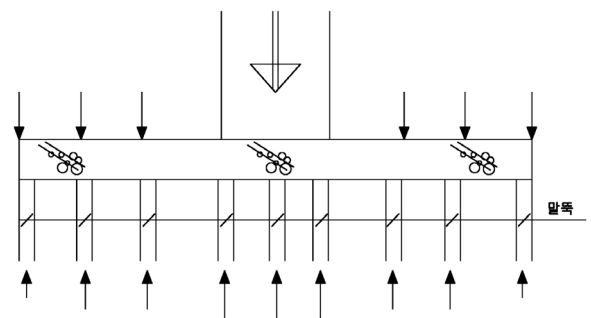


(b) 단면도

그림 1. 건축물의 전면기초

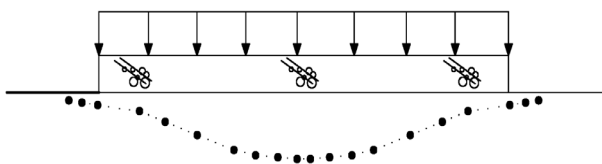


(a) 전면기초

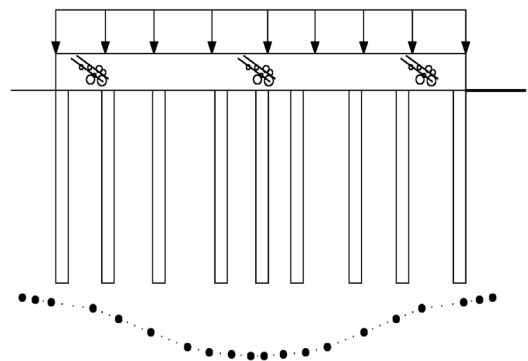


(b) 말뚝지지 전면기초

그림 2. 지반 반력 분포



(a) 전면기초



(b) 말뚝지지 전면기초

그림 3. 반무한 탄성체 침하

부터 전면기초 부재의 강성과 관계하여 분산이 되며 따라서 전면기초의 부재응력이 증가한다. 특히 기초가 말뚝인 경우 말뚝의 강성이 클수록 코어가 위치한 중앙부에 하중이 집중되지만 말뚝강성이 상대적으로 적어지면 중앙의 코어 하중은 주변부로 이동한다. 특히 중앙 코어부에서 지반 또는 말뚝에 하중이 지나치게 집중되는 경우 전면기초 구조의 강성을 증가시켜 하중을 주변부로 분산시킬 수 있다. 일반적으로 반무한 탄성체에서 연성기초판의 침하는 중앙부가 주변부보다 크고 이는 다시 지반과 구조물의 관계에

서 중앙부보다는 주변부의 지반강성이 크게 나타난다(그림 3). 중앙부의 하중은 지반의 반발강성이 상대적으로 큰 주변부로 이동하게 되며 이는 전면기초 부재응력 및 변형에 영향을 준다.

2.2 건축물의 전면기초 설계 절차

암반기초 상의 전면기초 설계 절차를 요약해 보면 그림 4와 같다. 그림 4에서 중요한 3가지 항목(암반지지력 산정, 변형계수 및 스프링계수 산정 및 암반굴착면 평가)에 대하여 설명하면 다음과 같다. 먼저 전면기초의 지지력은 지반조사 결과를 토대로 3가지 방법들(방법 1-경험표에 근거한 방법(New York City Building Code), 방법 2-지지력산정공식에 의한 방법(Bell의 방법), 방법 3-암석일축압축강도/공내재하시험에 의한 평가방법)에 의하여 평가할 수 있다.

풍화대기초지반의 변형계수 및 스프링 계수 산정 절차는 그림 5와 같다. 기초지반의 굴착 암반면 평가는 그림 6과 같은 순서로 진행한다.

2.3 건축물 기초의 최적화 설계절차

건축물 기초의 최적화 설계 절차의 한 예를 그림 7에 나타내었다. 여기서, 기초지반의 지지력이 충분한 경우 직접기초 또는 전면기초를 사용할 수 있으며, 이러한 유형의 기초 형식이 가장 저렴할 수 있다. 기초지반의 지지력이 약간 부족할 경우(즉, 지내력 > 0.75 × 사용하중) 기초지반을 보강그라우팅이나 마이크로파일 등으로 보강하여 사용할 수 있으며, 기초지반의 지지력이 크게 부족할 경우(즉, 지내력 < 0.75 × 사용하중) 강관말뚝, PHC말뚝, 현장타설말뚝 등과 같

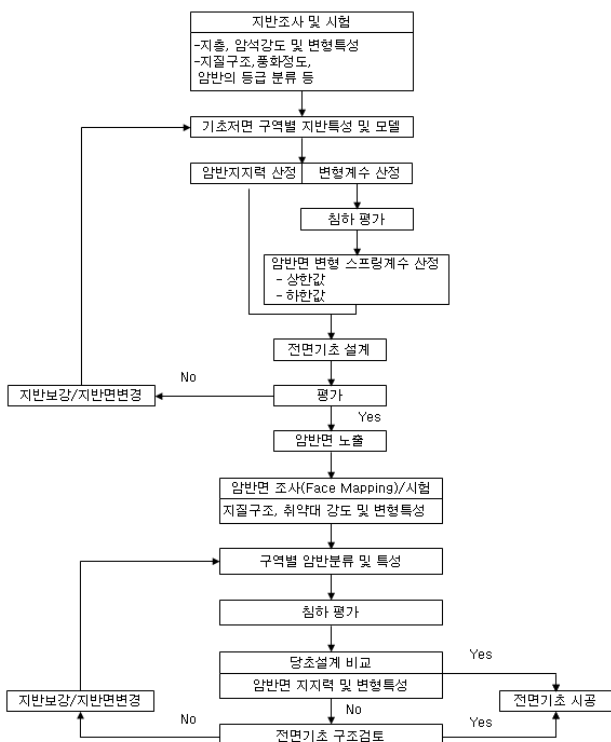
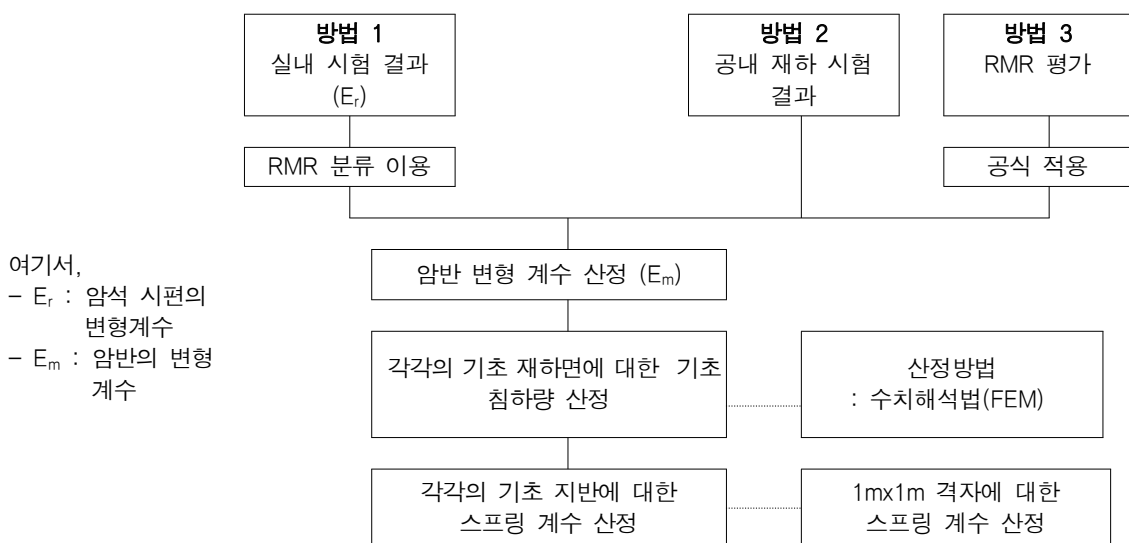


그림 4. 암반 위의 전면기초 설계 흐름도



여기서,
- E_r : 암석 시편의 변형계수
- E_m : 암반의 변형계수

그림 5. 기초지반의 스프링 계수 산정법 흐름도

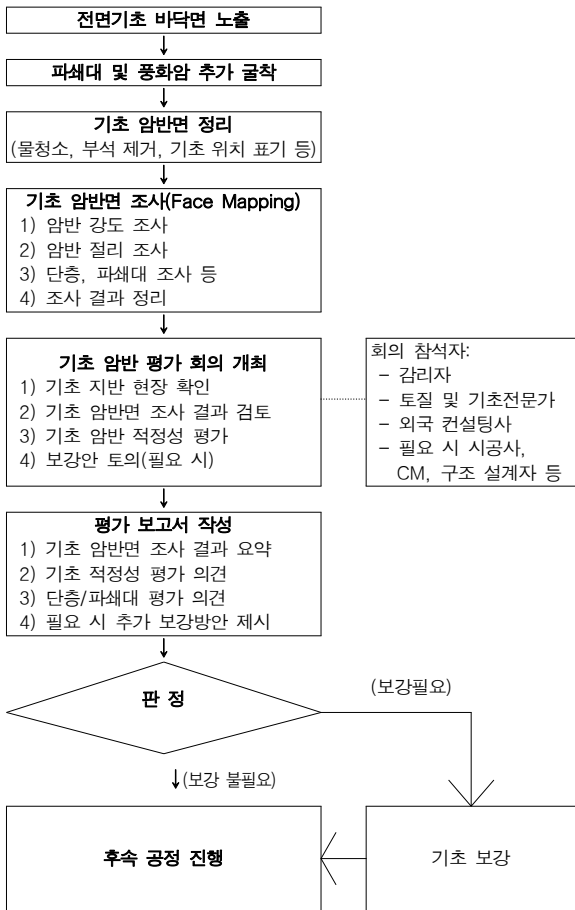


그림 6. 기초지반의 굴착압반면 평가 절차

은 깊은 기초에 의해 보장되어야 한다.

3. 풍화대 지반에 지지된 전면기초의 사례 분석

3.1 풍화암 지반상의 전면기초

3.1.1 지층 개요

경기도 화성시 동탄면에 위치한 ○○현장으로 지하 4층, 지상 66층을 지지하는 건축물의 전면기초 설계 사례를 분석하였다. 당초 5개소의 시추가 완료되어 있었으며, 본 설계를 위하여 3개소의 추가 시추와 압반 평가 시험을 시행하였다. 조사 결과 지층은 그림 8과 같으며, 지층 단면도상에 기초 설치 바닥고(-30.04m/E.L)가 표기되어 있어 기초와 지층간 상관관계를 알 수 있다. 지반조사 결과 건축 기초는 전반적으로 풍화암층(일부 연암층)에 위치하는 것으로 평가되었으며, 타워 기초 하부 풍화암층 두께는 약 0~5m로 조사되었다. 별도로, 연암층의 TCR/RQD가 83/10~100/45이며 연암층은 부분적으로 파쇄 및 절리를 포함하고 있는 것으로 조사되었다. 연암은 RMR 분류상 III~IV 등급으로 분류되었고, 그 하부는 II~III 등급의 경암이 위치하는 것으로 파악되었다(주)진영이엔씨, 2007A; 2007B). 연암층의 두께가 비교적 얇게 형성되어 있는 것이 특징이라고 할 수 있다.

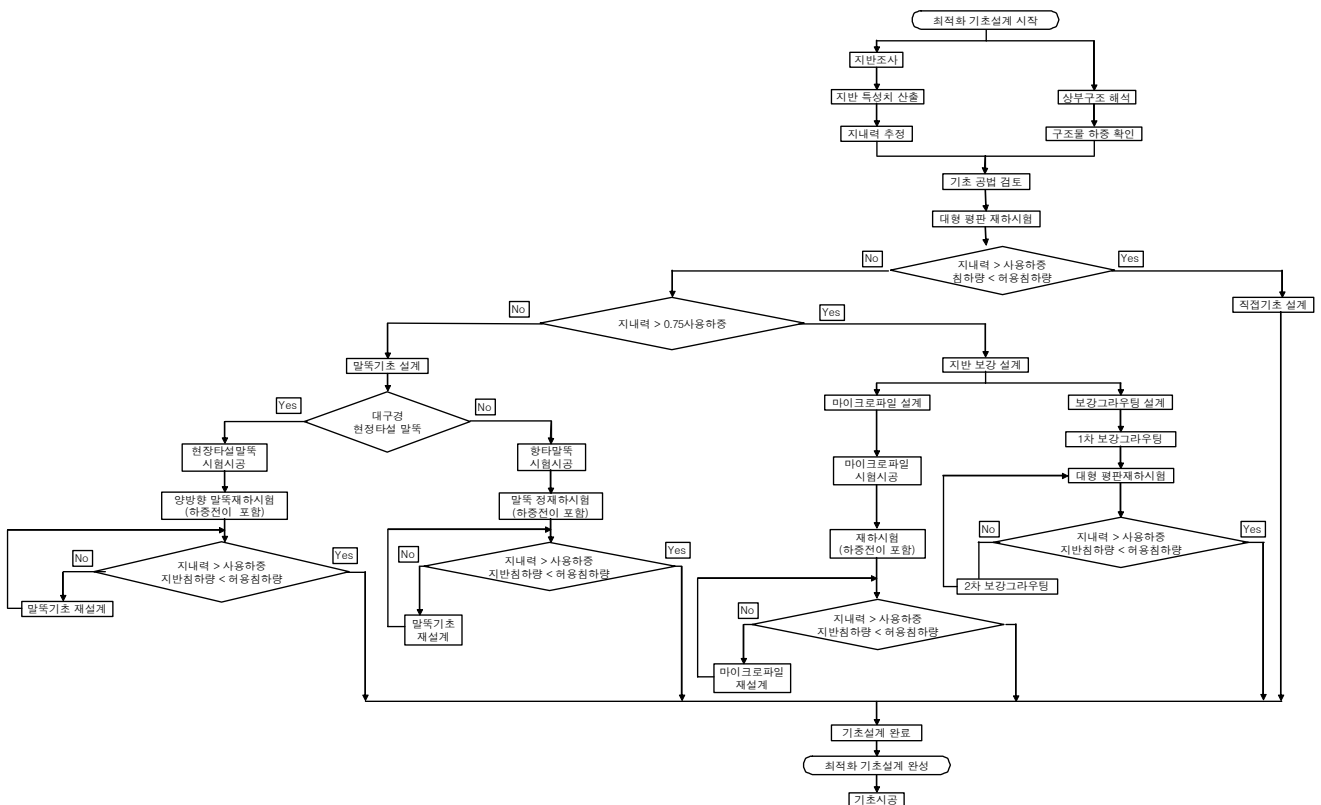
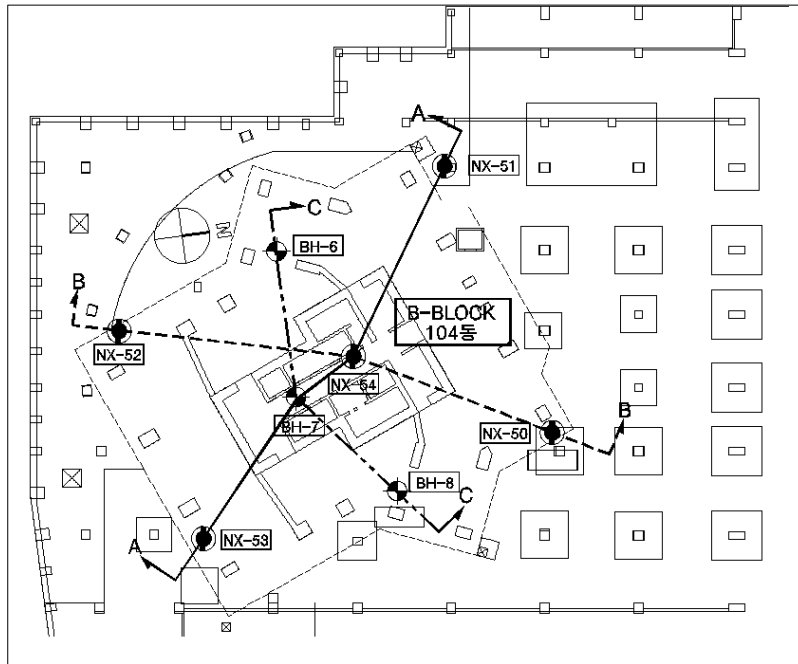
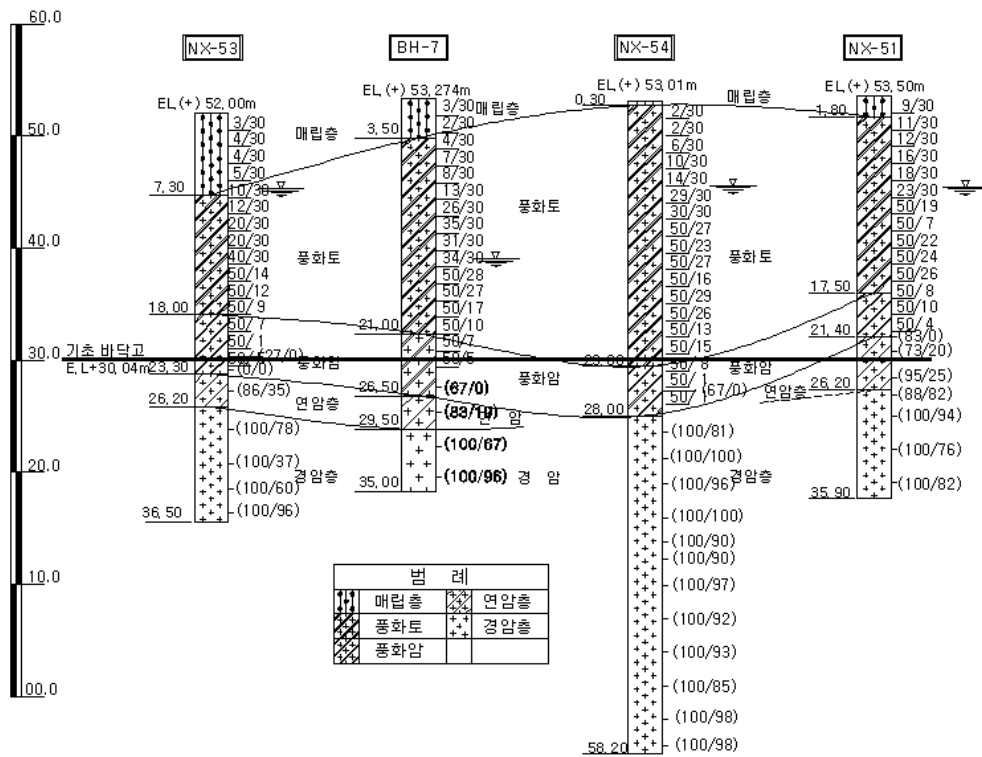


그림 7. 건축물 기초의 최적화 설계 절차



(a) 지반조사 위치 평면



(b) 지층 단면도

그림 8. 지반조사 위치 및 대표 지층 단면도

3.1.2 전면기초의 설계 및 해석

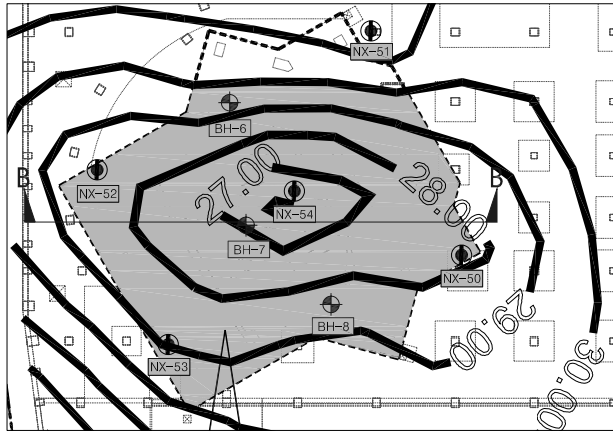
초고층 건축물의 기초 공법을 선정하기 위하여 우선 암반(연암) 출현 심도를 파악하였으며 그 결과는 그림 9에 나타내었다. 지지층으로 예상되는 암반(연암)은 기초 저면 아래 0~5m 깊이에 위치하였는데 여기서 전면기초의 하부 풍

화암(또는 심한 파쇄대)을 굴착 제거 후 매스콘크리트로 치환하는 얇은 기초 형식으로 계획하였다(표 1).

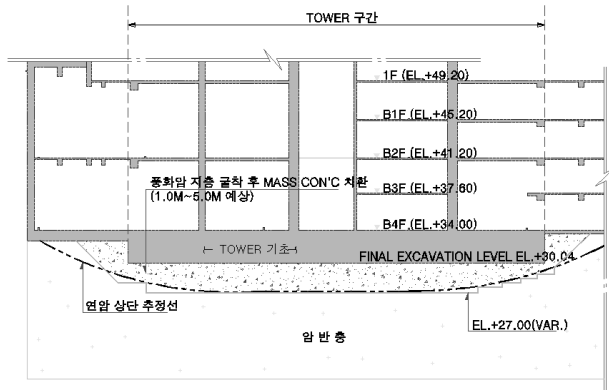
전면기초의 지지력을 앞에서 설명한 3가지 방법으로 구하였는데 연암지반 지지일 경우 설계 지지력(1,900kN/m²)의 확보가 가능한 것으로 평가되었으며, 풍화암(또는 파쇄

표 1. 건축물의 전면기초 설계 계획

건축물 규모	설계요구 지지력	기초 형식	풍화암지반의 보강 공법
지하 4층 지상 66층	1,900(kN/m ²)	얕은 기초 (전면 기초)	소요 지내력 이하 부분은 굴착 제거 후 매스콘크리트로 치환



(a) 연암출현 심도 맵핑



(b) 기초설치 계획도

그림 9. 연암출현 심도 맵핑 및 기초설치 계획도

표 2. 기초 지반의 변형 계수

지반종류 구분	풍화암	연 암	경 암
상한치 (MPa)	350	4,200	11,000
하한치 (MPa)	240	1,220	3,900

표 3. 설계지지력 1,900kN/m²일 경우 기초 지반의 스프링계수

스프링 계수 범위	보강 전		콘크리트 보강 후	
	침하량 (mm)	스프링계수 (MN/m ³)	침하량 (mm)	스프링계수 (MN/m ³)
상한치	20.5	90	4.2	450
하한치	31.8	55	10.9	170

대)지반 지지일 경우 다소 지지력이 미달될 것으로 예상되었고 풍화도에 따라 부등침하가 예상될 수 있었으므로 풍화암(또는 심한 파쇄) 구간은 콘크리트 치환 등 적절한 지반 보강이 필요할 것으로 판단하였다.

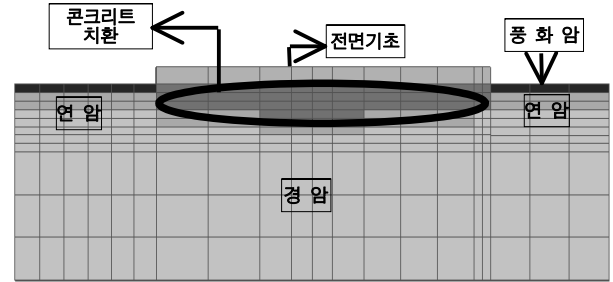


그림 10. 기초 해석 모델 예

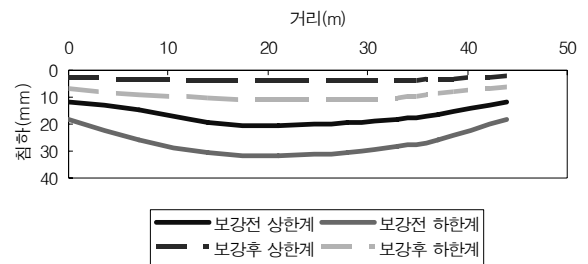


그림 11. 보강 전과 후의 침하 감소 효과

기초 지반의 변형 계수와 스프링 계수는 그림 5와 같은 순서로 평가할 수 있었는데, 먼저 지반 조사 및 실내 시험 결과를 토대로 풍화암, 연암, 경암 지반에 대한 변형계수를 산정하였으며(표 2) 이 값을 이용하여 수치해석에 의하여 침하량을 구한 후 설계하중 작용 시 보강 전·후의 기초지반에 대한 스프링계수를 산정하였다(표 3). 수치해석은 3D PENTAGON 프로그램을 사용하였으며 매트(2개소)기초와 지반은 탄성 모델을 적용하였다. 지반 스프링계수 산정은 수치해석결과 산정되는 매트(2개소)기초 하부에 발생하는 수직응력과 수직변위의 관계로부터 도출하였다.

풍화암 구간에 대해 매스콘크리트로 치환하여 보강하였으며, 보강 전과 보강 후 일련의 수치해석을 실시하여 침하량을 평가하였다. 수치해석 모델의 한 예를 그림 10에 나타내었다. 기초지반의 변형계수는 지반조사 결과를 분석하여 상한치(평균 변형계수+표준편차)와 하한치(평균 변형계수-표준편차)를 적용하였다.

건축물의 대형 전면기초에 대한 침하 평가에서 설계 하중작용 시 보강 전 지반의 최대 침하량은 약 20~30mm로 예상되었으며 보강 후 침하량은 4~10mm정도로 평가되었다. 이에 대하여 보강 전과 후의 침하양상을 전면기초 저면에 대하여 비교하였는데 약 65~80%의 침하량 감소가 있는 것으로 평가되었다(그림 11).

3.1.3 굴착시 기초지반의 암반면 평가(face mapping)

기초 암반 평가 결과 암반에서는 암석 강도 및 풍화상태에 따라 그림 12와 같이 암반 구역을 구분 설정하였으며, 구분 설정한 구역의 암반 상태를 조사하여 기술하였다. 조사 결과 암석 강도는 24.8~253.2MPa로 측정되어, 보통~매우 강한 강도의 암석으로 조사되었다. 또한 절리면은 약간~보통 풍화된 상태였으며, 암반 표면에 대한 지질 해머 타격 시 전반적으로 맑은 소리가 났으며, 1회 타격 또는 수회 타격으로 시편을 얻을 수 있는 상태였고, 지질 해머 타격 시 탁한 소리 또는 관입되는 구역이 일부 존재하였으나 그 규모는 크지 않은 것으로 조사 되었다. 기초면 전반적 암반 상태는 조사결과 변성암으로 지반운동에 따른 조밀한 습곡이 발달되었으며 암반에 변형이 발생되었음이 확인되었다. 특히 전단구간이 1~2m 폭의 띠 형태로 기초면 중앙을 가로지르며 발달되었으며 이를 따라서 차별풍화가 진행되었다. 지각운동 등에 의하여 기초 암반에 파쇄대 및 상대적으로 높은 풍화대가 존재하였으나 굴착 중 추가 지반 조사에 의한 암반 상태 파악 후

굴착을 진행하여 전반적으로 굴착 제거된 상태이었다. 조사 결과를 토대로 평가한 본 현장 암반은 II~IV의 평가등급(표 4 참조)으로 전반적으로 약간~보통 풍화된 암반으로 평가되었다((주)진영이엔씨, 2007a; 2007b).

3.1.4 기초지반의 암반면 평가를 통한 기초 설계 및 기초지반의 보강

기초 암반면 조사 결과(그림 12 및 표 4)를 활용하여 지반의 지지력과 침하량을 분석하였다. 지지력은 당초 설계에서 충분한 것으로 예측되었으므로 암반면 조사결과를 고려한 수치해석을 수행하여 침하량을 추정하였다. 침하량은 5mm 이내로 예측되었다. 수치해석은 사전해석과 동일하게 3D-PENTAGON 프로그램을 사용하였으며 지반은 현장조사시 구분된 구역에 준하여 모사하였다. 적용된 암반 변형계수는 암반면 조사에서 평가된 각 구획된 암반면의 RMR(표 4)을 토대로 아래 식 (1)~(2)를 준용하여 평가하였다.

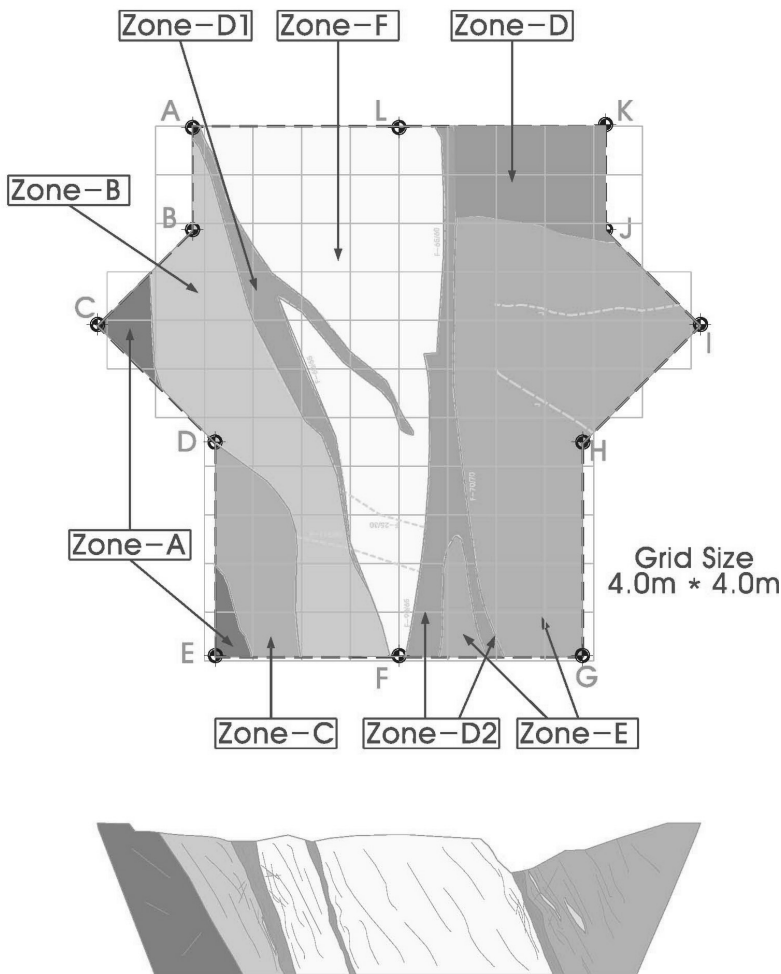


그림 12. 기초 암반 구역 설정

< Description >

1. Zone A
- Generally massive very strong to extremely strong, light grey slightly weathered biotite GNEISS with very widely spaced clean joints.
2. Zone B
- Generally strong to very strong, locally moderately strong, interbedded light grey and orange brown, thinly to moderately banded, moderately to slightly weathered, biotite GNEISS with medium to widely spaced iron stained joints.
3. Zone C
- Generally moderately strong to strong, interbedded light orange brown, dark grey and light grey, thinly to closely banded, moderately to slightly weathered, quartz rich biotite GNEISS with medium to widely spaced iron stained joints.
4. Zone D
- Generally moderately strong to strong, orange brown and light grey, thinly to closely banded, moderately to slightly weathered biotite GNEISS with closely to moderately spaced iron stained joints and frequent quartz veins.
5. Zone E
- Generally strong to very strong, interbedded orange brown and light grey, closely to moderately banded, moderately to slightly weathered quartz rich biotite GNEISS with moderately spaced iron stained joints and occasional quartz veins.
6. Zone F
- Generally strong very strong, locally moderately strong, light brown and orange brown, thinly to thickly banded, moderately to slightly weathered, quartz rich biotite GNEISS with medium to widely spaced, iron stained joints.
7. Zone D1, D2 (Shear Zone)
- Generally moderately weak to moderately strong, light and dark grey, closely to thinly banded and foliated, occasionally brecciated, moderately weathered biotite GNEISS.

표 4. 기초 지반의 R,M,R 분류표

구역	구분	일축압축 강도	RQD	절리간격	절리 면 상태					지하수	평점	등급
					연속성	간극	충전물	거칠기	풍화도			
1	평가	1847kg/cm ²	80%	2~6cm	>10m	0.1-1.0mm	None	Very Rough	No weathered	Dry	77	II
	점수	12	17	10	1	4	6	6	6	15		
2	평가	1422kg/cm ²	40%	20cm	>20m	1-5mm	None	Slightly Rough	Moderately weathered	Wet	50	III
	점수	12	8	10	0	1	6	3	3	7		
3	평가	309kg/cm ²	15%	6cm	>20m	1-5mm	None	Slightly Rough	Moderately weathered	Wet	35	IV
	점수	4	3	8	0	1	6	3	3	7		
4	평가	948kg/cm ²	25%	20cm	>20m	1-5mm	None	Slightly rough	Moderately weathered	Wet	45	III
	점수	7	8	10	0	1	6	3	3	7		
5	평가	1084kg/cm ²	25%	20cm	>20m	1-5mm	None	Slightly rough	Slightly weathered	Damp	55	III
	점수	12	8	10	0	1	6	3	5	10		
6	평가	1553kg/cm ²	65%	6cm	>20m	0.1-1.0mm	None	Slightly Rough	Moderately weathered	Wet	53	III
	점수	12	13	8	0	1	6	3	3	7		
D-1	평가	132kg/cm ²	15%	6cm	>20m	1-5mm	Hard filling <5mm	Slightly Rough	Highly weathered	Wet	29	IV
	점수	2	3	8	0	1	4	3	1	7		
D-2	평가	132kg/cm ²	15%	6cm	>20m	1-5mm	Soft filling <5mm	Slightly rough	Highly weathered	Dripping	20	IV
	점수	2	3	8	0	1	2	3	1	0		

$RMR > 50, E_M(GPa) = 2RMR - 100,$ (1)

$RMR < 50, E_M(GPa) = 10^{[RMR-100]/40}$
(Serafim & Pereira, 1983) (2)

기초 암반면 조사 결과(그림 12 및 표 4) 및 해석 결과를 토대로 초고층 건축물의 기초 지반에 대하여 평가를 도출할 수 있었으며 이를 고려하여 초고층 건축물의 전면기초 설계를 완성할 수 있었다. 즉 공사 전 시추 조사 결과와 금번 기초 암반면 조사 결과를 종합하여 볼 때 굴착된 기초 암반은 일부 풍화암 구간을 제외하면 전반적으로 연암~경암층으로 평가되었으며, 추가 굴착된 전면기초 바닥 위치 하부 일부 구간을 깊이 2~3m 정도까지 매스 콘크리트로 치환 보강한다면 본 기초 지반은 초고층 건축물의 기초 지반으로 적합할 것으로 평가되었다.

3.2 풍화파쇄대 구간위에 지지된 전면기초

3.2.1 대상 현장 및 지층 개요

부산시 해운대구 센텀시티 내에 위치하고 있으며, 지하 5층, 지상 51~60층 규모의 초고층건물 건설현장에서 3개 동의 초고층 빌딩과 저층 구조물이 계획되어 있으며, 그 중

1개 동에 대한 직접기초 설계 사례를 분석하였다.

초고층 건축물의 대형 기초 설계를 위하여 당초 5개소에 대한 지반조사(BH-1~5)((주)도화지질, 2003; 2004)가 실시되었으며, 설계 진행 중 풍화대에 대한 정밀검토를 수행하기

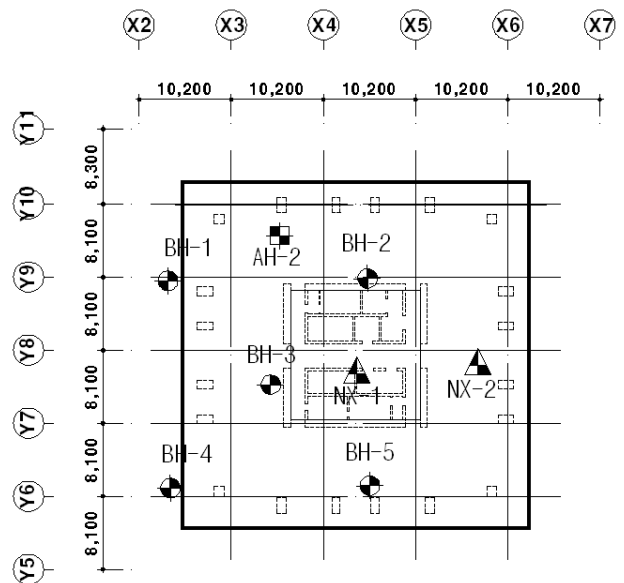


그림 13. 지반조사 위치도

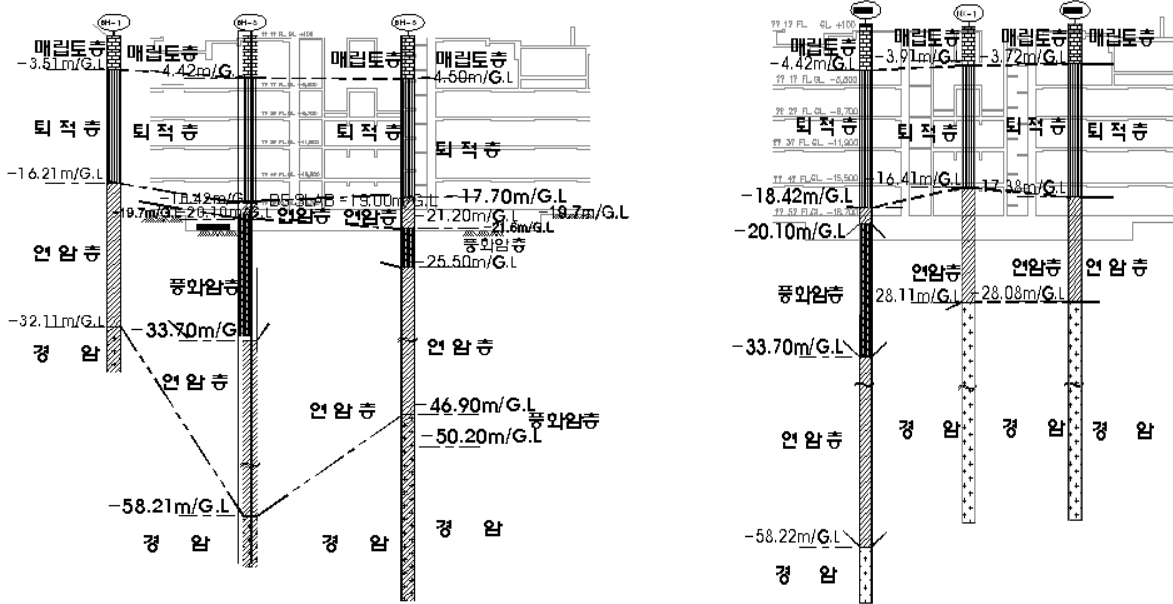


그림 14. 지반조사 위치 및 대표 지층 단면도

위하여 2개소의 지반조사(AH-2, NX-1, NX-2)((주)진영이엔씨, 2004a)를 추가하였다. 조사 위치 및 지층단면도는 그림 13과 14에 나타내었다. 대상 현장의 지층은 매립토층, 퇴적층 및 기반암(연경암)층 순으로 구성되어 있었으며, 연암의 예상 출현 심도는 약 -17.2m/G.L.이었다. 그러나 일부 구역에서 연암 하부에 풍화대가 나타나고 있는 것으로 파악되었다.

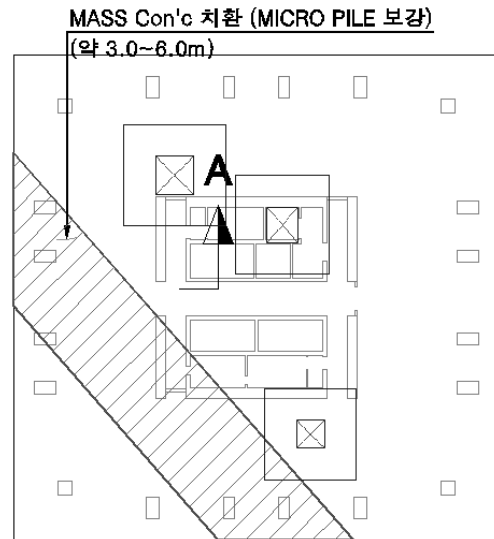
BH-3 및 BH-5 시추공의 조사 결과에 의하면 (-)16~20m/G.L. 깊이에서 연암층이 1.7~3.5m 두께로 분포하였으며 그 하부에 4.3~13.6m 두께의 풍화대가 나타나는 데 이 풍화대층 가운데 부분적으로 0.1~2.0m 두께의 파쇄대가 협재된 것으로 조사되었다.

기초의 바닥고(-21.6m/G.L.)와 지층 간 상관관계에서 알 수 있듯이 본 기초는 일부구역(BH-3 및 BH-5 시추공 부근)에서는 풍화암층에 위치하며, 나머지 구역에서는 연암층에 위치하는 것으로 평가되었다.

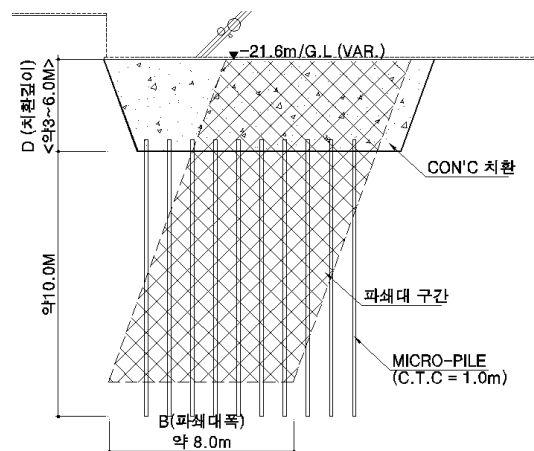
3.2.2 전면기초의 설계 및 해석

지반 조사 결과로 볼 때 초고층 건축물의 기초는 전반적으로 연암층에 위치하며 일부(BH-3 및 BH-5) 구간의 기초 하부에는 풍화암 또는 파쇄대가 존재하는 것으로 파악되었다. 그러므로 풍화암 또는 상부 파쇄대 구간에 대하여 적절하게 보강할 경우 대형 전면기초의 적용이 가능할 것으로 판단하였으며, 파쇄대 구간에 대한 보강은 시공 중 굴착 바닥면 확인 후 파쇄대 규모에 따라 보강 공법 및 그 범위를 결정하도록 설계하였다((주)진영이엔씨, 2004b).

파쇄대 규모에 따른 기초지반의 보강방안을 그림 15에 나타내었다. 파쇄대 폭(B)가 파쇄대의 치환깊이(D, 본 사

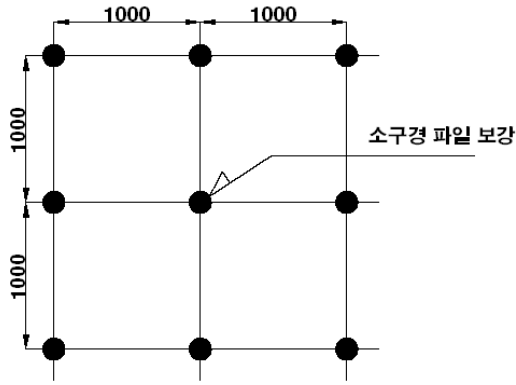


(a) 기초 지반의 보강 계획 평면도

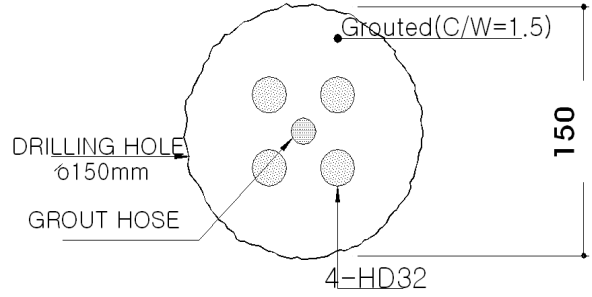


(b) 기초 지반의 보강 계획 단면도(단면 A-A)

그림 15. 설계 시 기초 지반 보강 계획



(a) 소구경 파일 보강 배치



(b) 소구경 파일 단면도

그림 16. 설계 시 파쇄대 구간의 마이크로 파일 보강 계획

표 5. 설계 시 초고층 건축물의 전면기초 방안

규모	설계 지지력 (kN/m ²)	기초 형식	기초 지반 보강 공법	
			B ≤ D	B > D
지하 5층 지상 52층	1,310	전면 기초 (두께 : 2.5m)	<ul style="list-style-type: none"> 상부 파쇄대층 → 굴착하여 제거 → 매스 콘크리트로 치환 	<ul style="list-style-type: none"> 상부파쇄대층 : 굴착하여 제거 하부파쇄대층 : 소구경 말뚝으로 보강 기 제거한 상부 파쇄대층 : 매스콘크리트로 치환

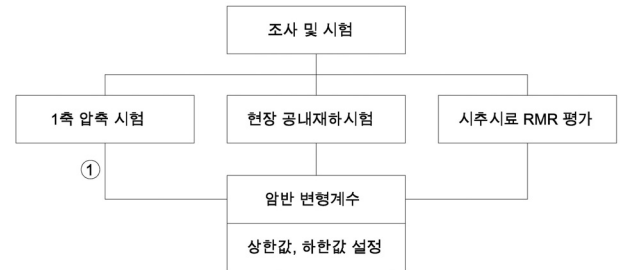
례의 경우 3~6m)보다 좁은 경우(즉, $B \leq D$)에는 상부 파쇄대층을 굴착하여 제거하고 매스 콘크리트로 치환하도록 하며, 파쇄대 범위가 넓은 경우(즉, $B > D$)에는 굴착에 의하여 제거 가능한 상부파쇄대는 제거하고 소구경 파일(그림 16 참조)로 하부파쇄대층을 보강한 후 굴착하여 제거한 상부 파쇄대층을 매스콘크리트로 치환하도록 계획하였다.

초고층 건축물의 기초 설계를 요약하면 표 5와 같다.

다양한 방법에 의하여 초고층 건축물의 대형 전면기초의 지지력을 평가한 결과 전반적으로 설계 지지력 확보가 가능할 것으로 평가 되었다. 다만 풍화암(또는 파쇄대) 지지일 경우 풍화도에 따라 부등침하가 예상될 수 있으므로 풍화암(또는 파쇄대) 구간에서는 매스콘크리트 치환 및 마이크로 파일 등에 의하여 지반의 강성 및 신뢰도를 높이는 적절한 지반 보강이 필요할 것으로 판단하였다.

지반조사는 해당 기초면 위치에 NX 시추 8공을 시행하였으며 암반의 물성치를 평가하기 위하여 1축압축시험, 현장공내재하시험 및 시추암석의 RMR 평가를 시행하였다(그림 17 및 표 6).

전면기초의 스프링계수는 지반의 상한 물성치와 하한 물성치를 각 지층 모델에 적용한 후 3D-PENTAGON 해석코드를 실행하여 산정되는 침하량과 지반상의 하중관계로부터 산정하였다. 여기서 풍화암(파쇄대)층이 협재된 구간에 대해서는 원지반의 물성치를 갖는 원모델과 별도로 파쇄대 폭을 10m로 가정하고 파쇄대 상부를 매스콘크리트로 치환



주 ① : 1축압축시험 값 변형계수 변환
 $E = 500\sigma \times \alpha$
 여기서, E = 지반 변형계수
 σ = 암석 1축강도
 $\alpha = E_{mass} / E_{rock}$, 0.15 적용

그림 17. 암반 변형계수 평가방안 수행도

표 6. 각 지층 암반 변형계수 평가 결과

시험 방법	암반 변형계수(E_m , GPa)			
	풍화암	연 암	경 암	
1축압축시험	-	2.2	2.7	
공내재하시험	0.39	2.4	9.0	
암반평가방법(RMR)	-	3.2	7.1	
설 계 적용값	상 한	0.39	2.4	9.0
	하 한	0.25	1.2	3.0

한 개량지반 모델을 설정하여 지반개량 전·후에 대한 비교를 평가하였다.

초고층 건축물의 대형 전면기초에 대한 침하 평가에서 설계 하중작용 시 보강 전 지반의 최대 침하량은 약 25~44mm로 예상되었으며, 보강 후 침하량은 14~26mm 정도로 평가되었다. 보강 전과 후의 침하양상을 전면기초 저면

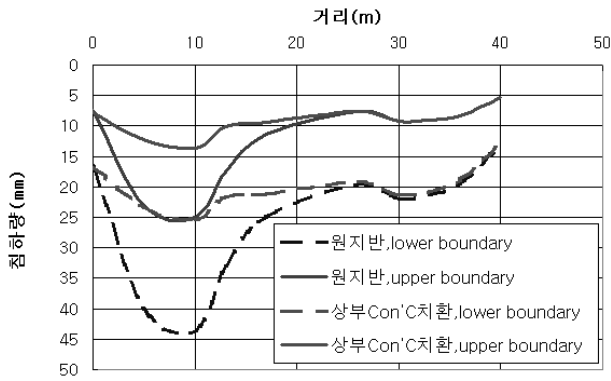


그림 18. 기초 지반 보강 전과 후의 침하 감소 효과

에 대하여 비교하였는데 약 41~44%의 침하량 감소가 있는 것으로 평가되었다(그림 18).

3.2.3 최종 굴착 후 굴착 암반면 상태에 따른 풍화대 지반의 보강방안 선정

최종 굴착 후 기초지반의 암반면 조사를 실시하였으며, 기초 암반면은 전반적으로 양호한 암반(연암 이상)으로 확인되었으며 당초 설계 시 예상하였던 파쇄대층도 소규모로 협재되어 있는 것으로 확인되었다.

파쇄대층은 기초 평면상 좌측하부에 위치하고 그 폭이 1.5m정도인 것으로 조사되었는데, 이는 지각 운동 등에 의하여 발생된 전단영역으로 지하수 등이 유입되어 차별 풍화된 것으로 추정되었다.

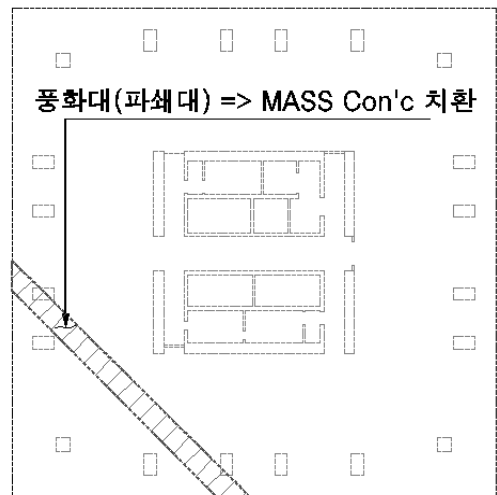
따라서 파쇄대 구간에서는 상부 구역을 굴착한 후 매스 콘크리트로 치환하여 보강하고 전면기초에 상부 하중이 재하될 때 하중이 견고한 인접 암반으로 전이되어 지지될 수 있도록 설계하였다(그림 19).

본 연구에서는 설계 전 지반조사, 설계 중 추가 지반 조사 결과를 활용하여 대형 전면기초에 대한 체계적인 분석 절차를 거쳐 적절한 기초 설계를 계획하였으며, 최종 굴착 후 기초 암반면 조사 결과를 통하여 예비 설계를 보정하여 시공함으로써 안전한 기초를 건설할 수 있었다.

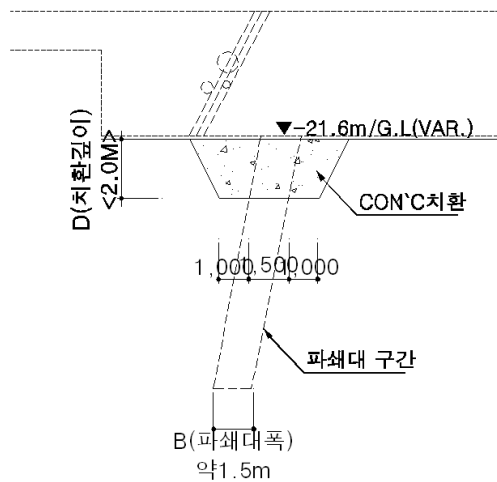
3.3 풍화토 지반위에 지지된 전면기초

3.3.1 개요

전면기초를 지지할 풍화대 지반에서 대형평판재하시험 ($\phi = 1,500\text{mm}$, 재하용량 3.9 MN)을 각 동당 좌·우에 1개 소씩 실시하였고, 재하시험결과를 이용하여 수치해석을 실시하여 풍화대 지반에 지지된 전면기초에 대한 최적화 설계를 수행하였다. 평판재하시험 위치는 그림 20과 같으며, OO 아파트 건축물 기초는 A, B동에 PHC 말뚝($\Phi 400$, L=10m)을 각각 318공을 시공하도록 계획되어 있었다.



(a) 풍화대(파쇄대) 위치



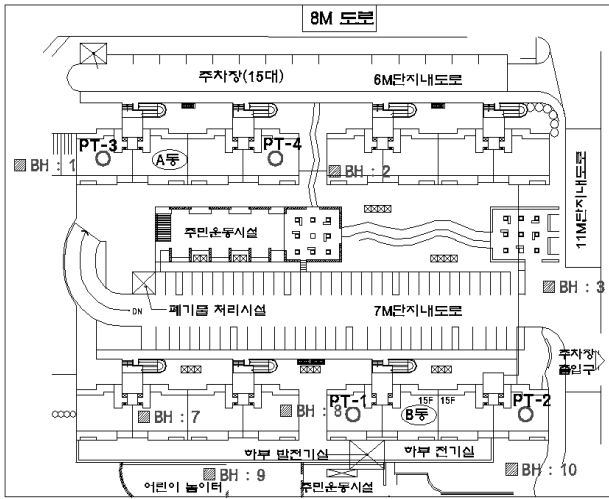
(b) 풍화대(파쇄대)구간 최종 보강 방안

그림 19. 굴착 확인 후 풍화대(파쇄대)의 최종 보강 방안

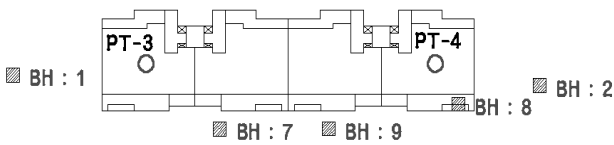
표 7. 기초 크기에 의한 영향을 고려한 지지력 및 침하량 결과

구분	재하시험결과		보정결과	
	최대지지력 (MPa)	최대지지력시 침하량(mm)	지지력 (MPa)	침하량 (mm)
PT3	2.2	84	23.5	254
PT4		68		206
PT1		132		399
PT2		263		795

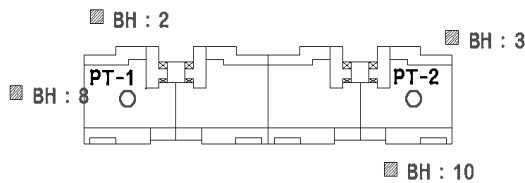
시험부지 내에서 대형평판재하시험을 수행한 지역의 지반조사에서 파악된 지층상태를 그림 21에 나타내었다. 대상 지반의 지층은 붕적층, 풍화토, 풍화암, 연암 순으로 분포하였으며, 기초저면의 N치가 16~50으로 다양하게 분포하지만 대부분 N치가 30이상으로 나타났다. 기초저면의 위치는 A동에서 붕적층, 풍화토인데 반해 B동의 기초저면 위치는 풍화토, 풍화암이었다.



(a) 현장개요



(b) A동 상세도



(c) B동 상세도

그림 20. 대형평판재하시험 및 지반조사 수행위치(■ : 지반조사, ○ : 평판재하시험)

3.3.2 대형평판재하시험 결과 분석

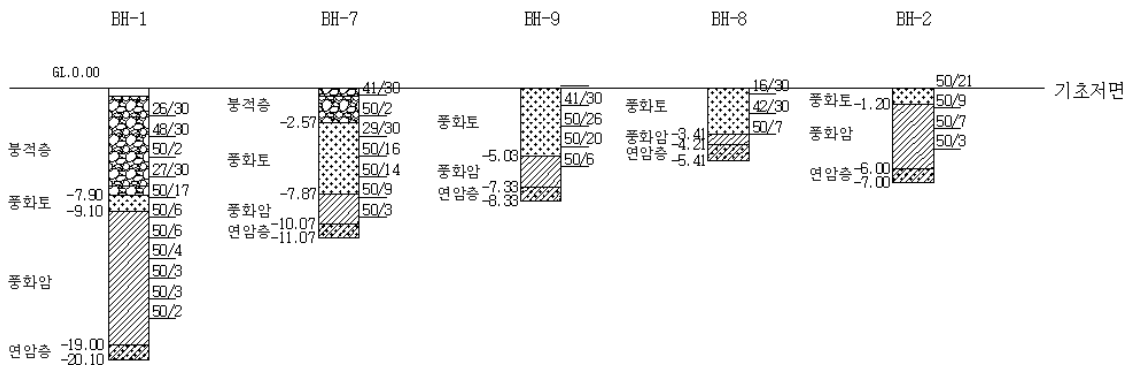
대형평판재하시험은 기초가 시공될 지반에 강성 대형재 하판을 설치하고 하중을 가하면서 하중과 침하량을 측정하는데, 재하판이 위치한 시험 지반면에서 재하판폭의 2배의 깊이까지의 지반에 대한 변형성이나 강도 등의 지지특성을 조사하기 위해서 실시하는 시험이다.

A, B동에 대한 대형평판재하시험 결과를 그림 22(a)에 나타내었다. A동의 경우 최대단위하중 2218kPa일 때의 침하량은 PT3과 PT4에서 각각 84mm, 68mm이었으며 허용지내력 294kPa일 때, PT3과 PT4에서 발생하는 침하량이 각각 10.7mm, 7mm이었다. B동의 경우 대 최대단위하중 2218 kPa일 때의 침하량은 PT1과 PT2에서 각각 132mm, 263mm이었으며 허용지내력 294kPa일 때, PT1과 PT2에서 발생하는 침하량이 각각 16.3mm, 19mm이었다.

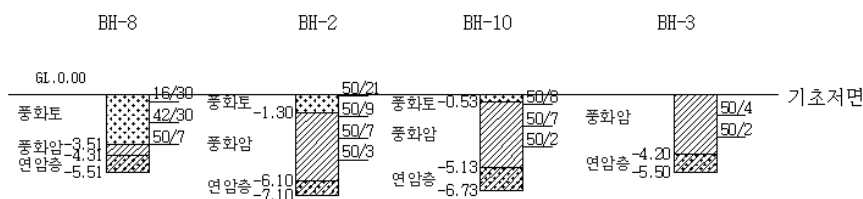
대형평판재하시험은 실제 전면기초보다 작은 크기의 재하판(직경 1.5m)으로 실시되었으므로 실제기초의 지지력 및 침하량은 기초의 크기에 의한 영향을 고려하여 대형평판재하시험 결과치를 보정할 필요가 있다.

모래지반에서의 실제기초의 극한지지력 $q_{u,B}$ 은 대형평판재하시험에서의 극한지지력 $q_{u,b}$ 을 식 (3)에 의하여 보정할 수 있다.

$$q_{u,B} = \frac{\beta_B B}{\beta_b b} q_{u,b} \quad (3)$$

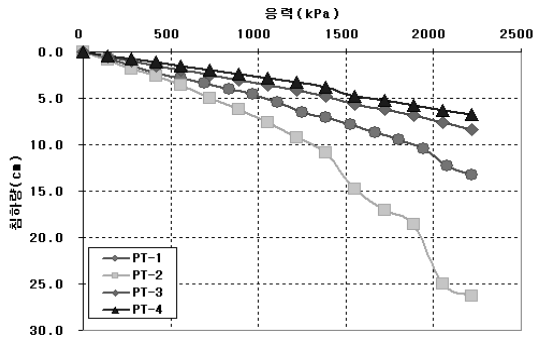


(a) A동의 지반주상도

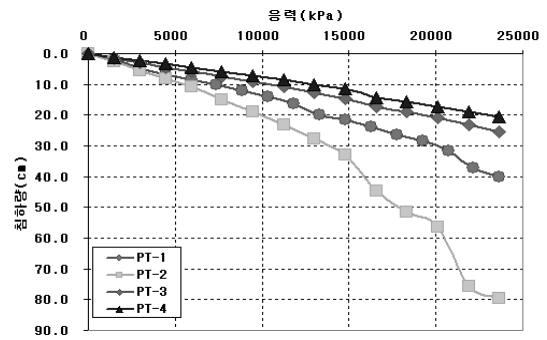


(b) B동의 지반주상도

그림 21. 아파트 시공 부지의 지층구분도 및 N치



(a) 대형평판재하시험 결과



(b) 크기효과로 보정한 결과

그림 22. 하중-침하량 곡선의 비교

여기서, α_B, β_B : 실제기초의 형상계수

α_b, β_b : 평판재하시험시 재하판의 형상계수

B : 실제기초의 폭

b : 평판재하시험시 재하판의 폭

모래지반에서 침하는 Terzaghi와 Peck(1967)이 제안한 식 (4)에 의하여 보정할 수 있다.

$$S_B = \left(\frac{2B}{B+b} \right)^2 \cdot S_b \quad (4)$$

여기서, S_B : 실제기초의 침하량

S_b : 평판재하시험시의 침하량

그림 22(b)에는 크기효과에 의한 보정결과를 나타내었다. 크기효과를 고려하는 보정식 (3) 및 (4)를 적용하여 구한 실제기초의 극한지지력 $q_{u,B}$ 는 PT3, 4, 1, 2에서 23.5MPa이며, 최대실제기초의 침하량 S_B 는 PT3, 4, 1, 2에서 각각 254, 206, 399, 795mm로 산정할 수 있었다. 또한 실제 전면기초에 작용하는 단위하중 294kPa일 때의 침하량은 2.47~5.16mm로 나타났는데 이는 허용침하량 기준 25.4mm이내에 들고 있어 설계기준을 만족하는 것을 알 수 있었다.

4. 결론 및 제언

- (1) 국내 풍화대(풍화암, 풍화파쇄대, 풍화토) 지반위에 축조된 전면기초의 3가지 사례를 분석하였으며 전면기초의 설계 및 해석 절차, 침하량 평가절차, 굴착후 암반면 평가 절차, 전면기초 하부 풍화대 지반의 보강방법 결정 등에 관하여 자세하게 고찰하였다.
- (2) 건축물의 전면기초를 지지하는 풍화암 또는 풍화파쇄대 지반에서 사전 조사에 의한 분석뿐만 아니라 암반 노

출면에 대한 암반면 조사 분석을 통하여 암반의 지질구조적 특성을 평가하였으며 암반면 조사 결과를 토대로 보강방법을 결정하였다.

- (3) 건축물의 전면기초를 지지하는 풍화토 지반에서 직경 1m의 대형평판재하시험을 실시하였으며 크기효과를 고려하여 실제크기의 지지력과 침하량을 평가하였다.
- (4) 본 연구에서 고찰한 3가지 사례에서는 전면기초 설계 시 사전 지반조사, 설계 중 추가 지반조사 등의 자료를 이용하여 체계적인 분석 절차를 거쳐 예비설계가 이루어졌으며, 시공초기에는 최종굴착시 암반면 조사결과를 통하여 예비설계를 보완함으로써 설계를 완성하고 이를 통하여 시공 시 안정성을 확보할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2009학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. (사)한국지반공학회 (2003), 구조물 기초 설계기준, 구미서관, pp. 477~478.
2. (주)도화지질 (2003), 부산피에스타 프레이스 센텀타워 신축 부지 지반조사보고서, pp. 2~5.
3. (주)도화지질 (2004), 센텀 피에스타 신축공사 지반조사보고서, pp. 5~7.
4. (주)지테크 (2006), 00 신축공사 건축물 기초의 안정성 검토, pp. 34~44
5. (주)진영이엔씨 (2004a), 포스코 the # 센텀스타 신축공사 부지 지반조사 보고서, pp. 2~12.
6. (주)진영이엔씨 (2004b), POSCO The # CENTUM STAR TOWER 기초 검토 보고서, pp. 27~33.
7. (주)진영이엔씨 (2007a), 화성동탄 복합단지 1단계 건설공사 고층부(102/104동) 기초암반 평가 보고서, pp. 14~15.

8. (주)진영이엔씨 (2007b), *화성동탄 복합단지 1단계 건설공사 고층부 (103/104동) 기초압반 평가 보고서*, pp. 14~18.
9. Emerald Soft Co. Ltd. (2001), *PENTAGON 3D Manual*.
10. Hemsley, J. A. (2000), *Design Application of Raft Foundation*, Thomas Telford, Preface.
11. Mandolini, A. and Russo & Viggiani (2005), *Pile Foundation : Experimental Investigations, Analysis and Design. 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka, Japan, p. 178.
12. Serafim, J. L. & Pereira, J. P. (1983), Considerations of the Geomechanics Classification of Bieniawski. *Proc. Intl. Symp. Eng. Geol. and Underground Construction.*, Lisbon, pp. 1133-44.
13. Terzaghi, K., and Peck, R. B. (1967), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Wiley, New York, pp. 393~395.

(접수일: 2009. 2. 10 심사일: 2009. 2. 16 심사완료일: 2009. 7. 14)