

초고층 건축물의 대형기초 설계 사례

A Case Study of The Design of Mega Foundations for High-rise Buildings

김성호¹⁾, Sung-ho Kim, 홍승현²⁾, Seung-hyeun Hong, 홍사면³⁾, Sa-myun Hong, 최용규⁴⁾, Yongkyu Choi

¹⁾ (주)진영이엔씨 대표, Principal, Jinyoung enc

²⁾ (주)진영이엔씨 부장, General Manager, Jinyoung enc

³⁾ (주)진영이엔씨 과장, Manager, Jinyoung enc

⁴⁾ 경성대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Kyungsoong University

SYNOPSIS : Currently a large number of high rise building projects are under plan and a mega foundation system to support this high load with safety is requiring. The foundation of a highrise building is displaced by the building load, which influence the behavior of a super structure in reverse. In this aspect, the structural interaction analysis between a foundation and a super structure is necessary. In this study, the relationship of a superstructure of building and a foundation has been reviewed, considering the tendency of design from a capacity driven design to a performance design. Two different case studies have been introduced to help understand this relationship in more specific, the first case is the high rise building founded on a mat system on rock and the second is that on large diameter bored piles on soft ground condition.

Keywords : high rise building, mega foundations, mat system, interaction analysis

1. 서론

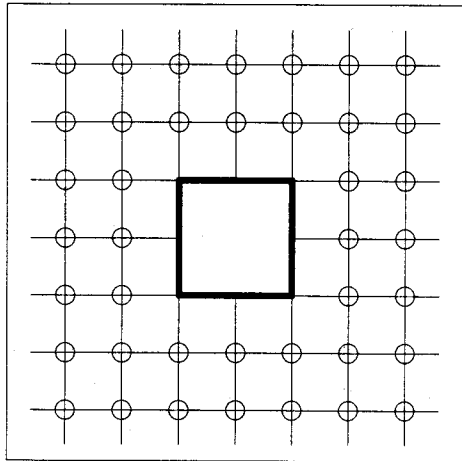
최근 상당수의 초고층 건물이 계획되고 있으며 이에 따라 높은 하중을 안전하게 지지할 수 있는 대형 기초가 요구된다. 초고층 건물의 기초는 높은 하중으로 인하여 기초는 변위하며 이러한 거동이 다시 상부구조물에 영향을 미친다. 따라서 기초와 상부구조물의 구조적 상관해석이 필요하다. 본 연구에서는 종래 지지력 중심의 설계에서 최근 변위에 기반을 두는 거동중심의 설계로 전환하는 경향을 고려하여 (Mandolini et al., 2005) 건축 상부구조물과 기초와의 관계를 살펴보았다. 이에 대한 구체적 이해를 돕기 위하여 실제 초고층 건축 구조물이 암반에 놓여 전면기초(Mat foundation)에 지지된 설계 사례와 연약 지반에 위치하여 대구경 말뚝기초를 기초로 설계된 사례에 대한 2가지 상이한 경우를 분석하여 초고층 건축물의 기초 설계에 대한 이해를 돕도록 하였다.

2. 초고층건물의 기초에 대한 이해

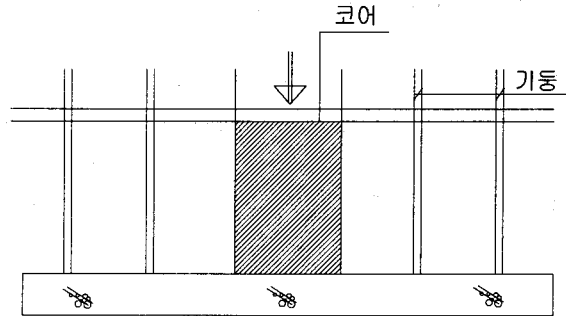
초고층 건물 기초의 선정은 지반이 견고한 경우 통상 전면기초를 사용하여 하부지반으로 직접 상부하중이 전달이 되도록 계획하며 지반이 연약한 경우 대구경 말뚝 기초를 전면기초에 결합하고 말뚝은 안정된 하부지층에 놓이도록 계획한다. 여기서 건물의 전면기초는 독립기초나 교량기초의 강성판 구조와는 달리 기초 폭에 대한 두께비가 적은 관계로 상대적으로 연성 거동을 한다.

이러한 전면기초의 연성적인 변위 특성은 상부 구조물의 거동 및 응력 상태에 영향을 준다. 건축구조

물의 하중 전달체계는 그림 1에서 보듯이 내부 코어(Core)와 주변 기둥을 통하여 높은 수직 하중이 전달되며 경우에 따라 건축 내부의 공간을 보다 넓게 활용하기 위하여 주변기둥을 적은 수의 대형기둥(Mega column)으로 대체하여 매우 큰 하중을 보다 집중적으로 전달시킨다. 또한 지진하중 및 풍하중은 지하층 또는 건축물의 바닥면을 전달 기준면(Base shear floor)으로 설정하여 횡하중이 구조물을 통하여 지반으로 전달되도록 고려한다.



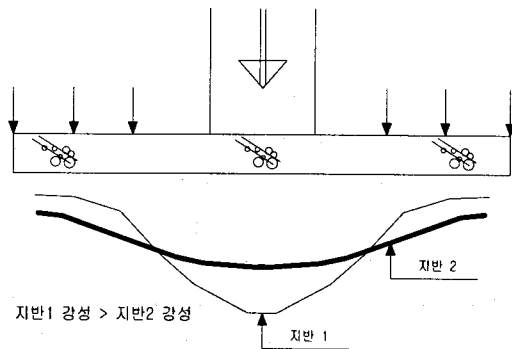
(a)평면도



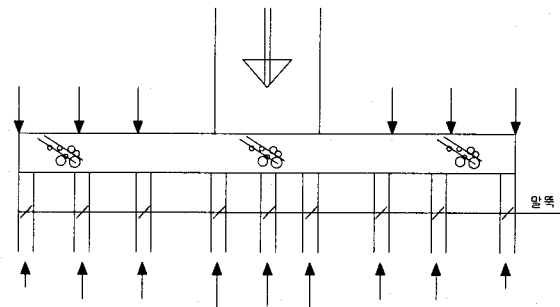
(b)단면도

그림 1. 건축물의 전면기초

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.



(a)전면기초



(b)말뚝지지 전면기초

그림 2. 지반 반력 분포

지반의 관점에서 보면 지반의 강성이 클수록 반력은 외력 위치에 집중되거나 강성이 낮을 수록 반력은 외력위치로부터 전면기초 부재의 강성과 관계하여 분산이 되며 따라서 전면기초의 부재응력이 증가한다. 특히 기초가 말뚝인 경우 말뚝의 강성이 클수록 코어가 위치한 중앙부에 하중이 집중되거나 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 탄성체(Elastic half space)에서 연성기초판의 침하는 중앙부가 주변부보다 크고 이는 다시 지반과 구조물의 관계에서 중앙부보다는 주변부의 지반강성이 크게 나타난다(그림 3). 중앙부의 하중은 지반의 반발강성이 상대적으로 큰 주변부로 이동하게 되며 이는 전면기초 부재응력 및 변형에 영향을 준다.

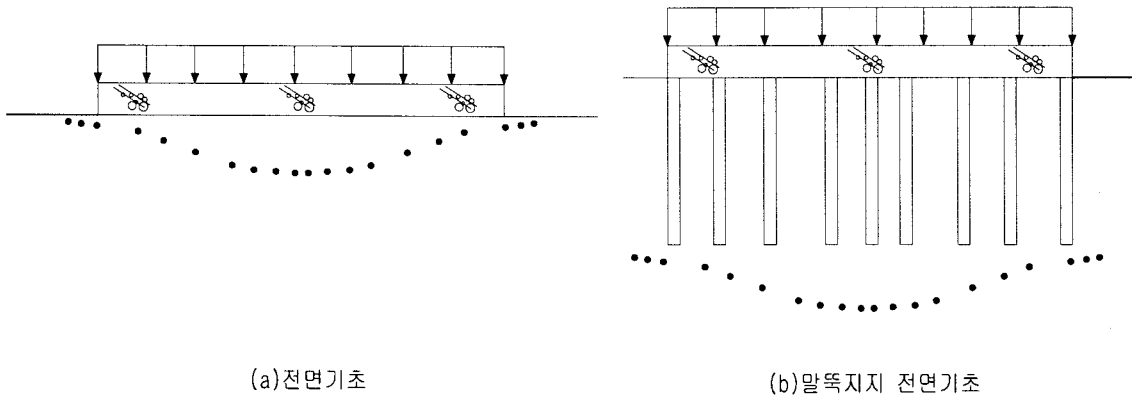


그림 3. 반무한 탄성체 침하

이러한 관계로부터 설계 시 설정된 지반 또는 말뚝의 강성이 실제의 값보다 큰 경우 반력이 하중 위치에 집중하므로 주하중이 위치하는 코어부의 반력은 실제보다 높게 평가되며 하중과 멀리 이격된 전면기초 위치의 기초는 과소평가된다. 반대로 강성이 실제보다 적게 설정된 경우 반력의 분포가 보다 균등하게 되어 코어 위치와 같이 작용 하중이 집중된 위치의 반력이 과소평가 될 수 있다. 그러므로 초고층 건물의 설계는 건물하중 및 전면기초 상태를 고려하여 일정부분 예측되는 지반 거동의 상한값과 하한값을 설정하여 실제 거동이 최대한 예상범위에서 작용하도록 하여 이러한 구조물과 지반과의 관계가 상부구조의 설계에 반영되도록 계획하는 것이 적절한 것으로 사료된다.

3. 초고층 전면기초의 설계 사례

3.1 전면기초 설계

초고층 기초 위치의 지반이 암반층에 위치하는 경우 통상 전면기초 형식이 채택된다. 암반층은 다양한 지각작용 및 풍화작용을 거쳐 형성된 관계로 여러 형태의 지질구조, 강도 및 변형 특성을 갖고 있다. 특히 건축물의 기초 저면은 상대적으로 넓은 관계로 지반의 상태가 불균질 할 수 있으며 이러한 특성은 상부 초고층 구조물의 거동에 영향을 미치게 되므로 이에 대한 상세한 지반조사 및 건축저면의 다양한 지층형태에 대한 개별적인 분석과 총체적인 해석이 요구된다. 그러나 실제 암반의 구조는 지반조사 분석에 의하여 상당부분은 예측이 가능하나 암반면이 노출되어야 복잡한 지질구조가 보다 명확히 이해되며 경우에 따라 지반조사 시 파악이 안된 취약 지질구조대 등이 확인된다. 따라서 암반 위의 전면기초 설계는 지반조사 후 자료를 분석하여 기초를 설계하는 단계 및 암반이 노출된 후 확인된 지층을 평가하여 기초

를 설계하는 단계 등의 구분이 필요하다. 이러한 암반기초상의 전면기초 설계 절차를 요약해 보면 그림 4와 같다.

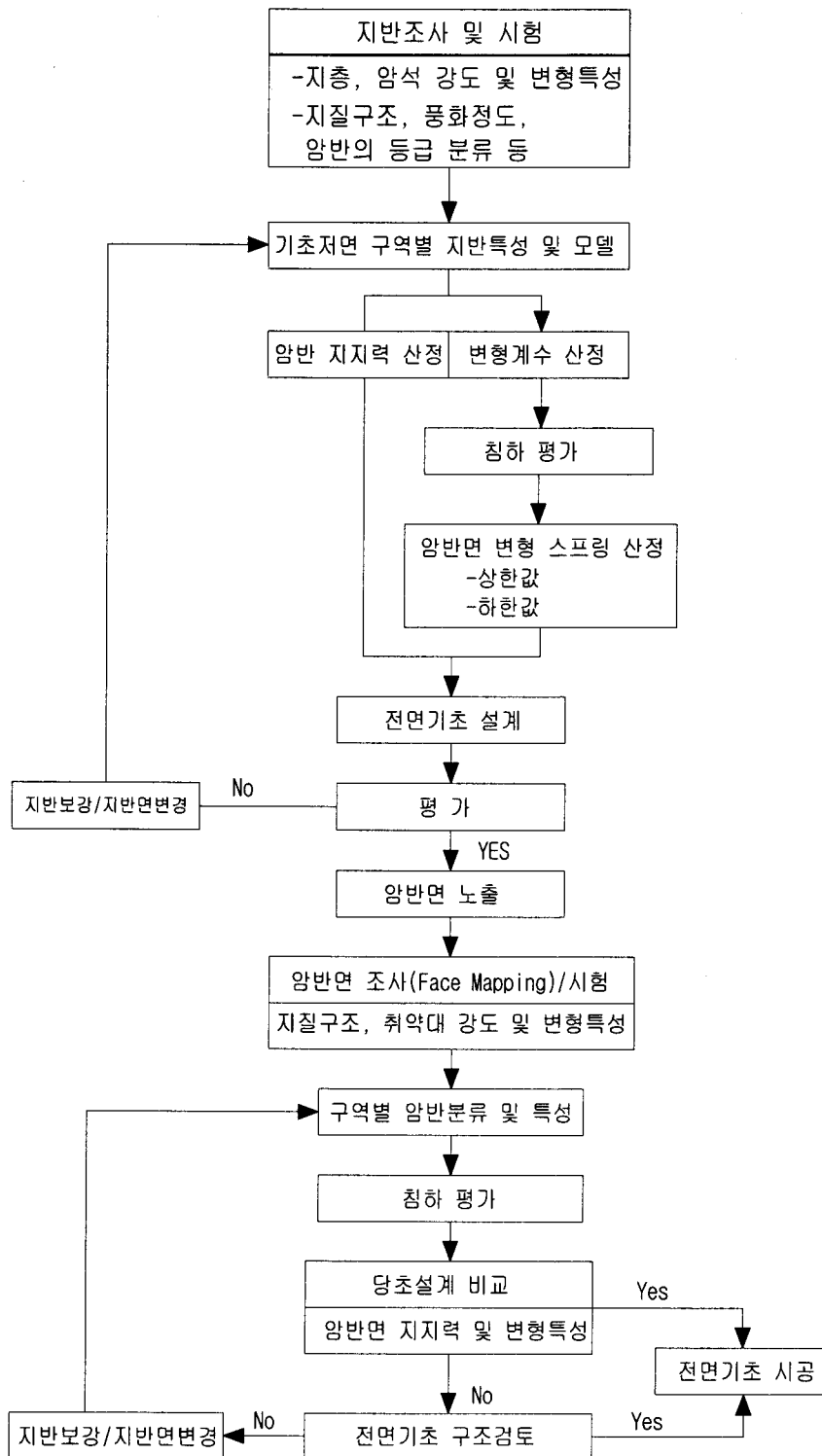


그림 4. 암반위의 전면기초 설계 흐름도

3.2 전면기초 설계 예

3.2.1 지층 개요

본 절에서 소개되는 현장은 경기도 화성시 동탄면에 위치한 ○○현장으로 지하 4층, 지상 66층을 지지하는 건축물의 전면기초 설계 사례를 소개하고자 한다. 당 현장은 당초 5개소 시추가 완료되어 있었으며, 본 설계를 위하여 3개소의 추가 시추와 암반 평가 시험을 추가 시행하였다. 조사 결과 당 현장의 지층은 그림 5와 같으며, 지층 단면도상에 기초 설치 바닥고(-30.04m/E.L)가 표기되어 있어 기초와 지층간 상관관계를 알수 있다. 지반조사 결과 당 현장의 건축 기초는 전반적으로 풍화암층(일부 연암층)에 위치하는 것으로 평가되었으며, 타워(Tower) 기초 하부 풍화암층 두께는 약 0~5m로 조사되었다. 별도로, 본 구간은 연암층에서 TCR/RQD가 83/10~100/45이며 부분적으로 파쇄 및 절리를 포함하고 있는 것으로 조사되었으며, 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.

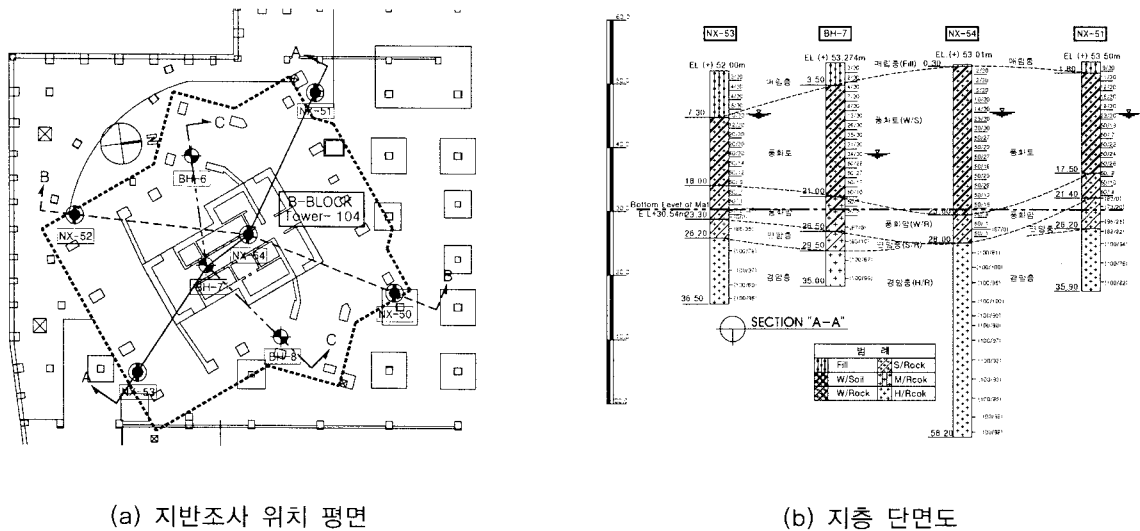


그림 5. 지반조사 위치 및 대표 지층 단면도

3.2.2 기초 공법 검토

당 구조물의 기초 공법을 선정하기 위하여 우선 암반(연암) 출현 심도를 파악하였으며 그 결과는 그림 6에 나타내었다. 지지층으로 예상되는 암반(연암)은 기초 하부 0~5m 지점에 비교적 얇은 심도에 위치하여 전면기초의 하부 풍화암(또는 심한 파쇄대)을 굴착 제거 후 매스콘크리트로 치환하는 얇은 기초 형식으로 검토하고자 계획하였다(표 1).

표 1. 건축물의 전면기초 설계 계획

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

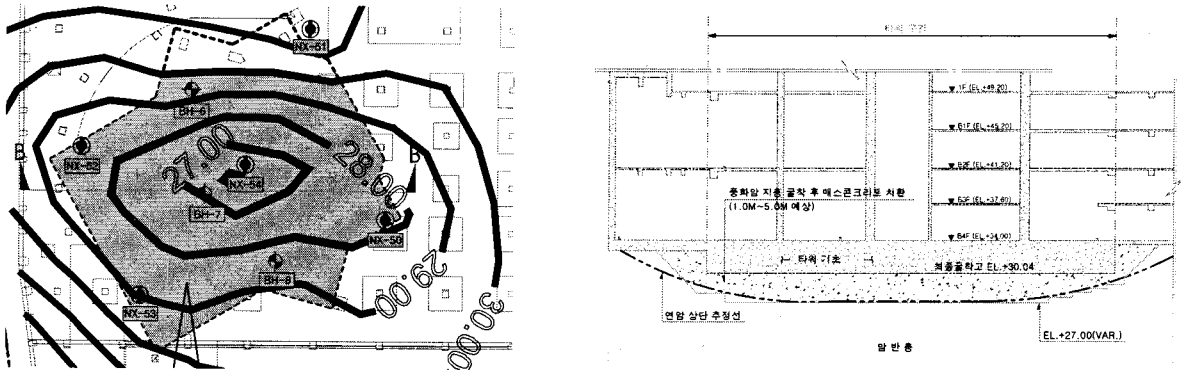


그림 6. 암반(연암) 출현 심도 및 기초 설치 계획도

3.2.3 지지력 검토

당 현장 전면기초의 지지력을 평가하기 위하여 지반조사 결과를 토대로 다양한 방법(그림 7)에 의하여 평가 하였으며, 그 결과는 표 2와 같다.

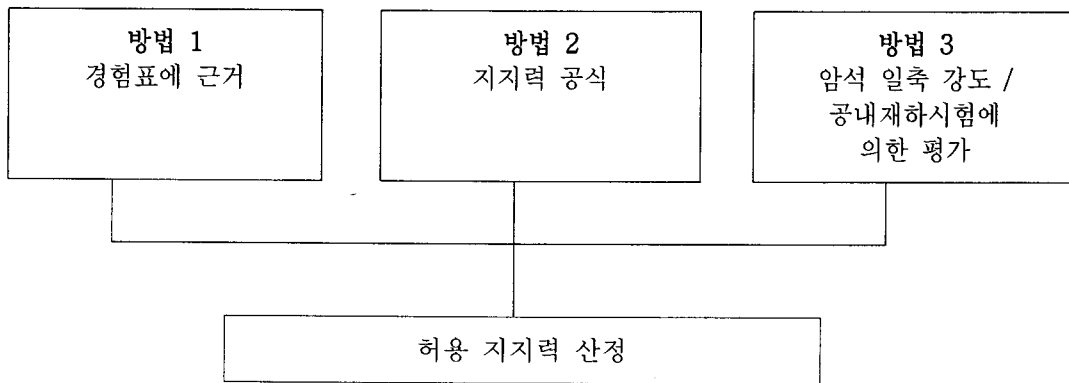


그림 7. 기초 지반의 허용 지지력 산정 방안

표 2. 기초 지반의 허용 지지력 추정치 요약

검토 방법	방법 구분	허용지지력 (kN/m ²)	
		풍화암 지지	연암 지지
설계지지력	-	1,900	
New York City Building Code	방법1	800~1,000	2,000~4,000
Canadian Foundation Engineer Manual	방법1	500~2,500	2,500~5,000
Bell의 지지력 공식에 의한 방법	방법2	1,550	2,250
암석일축강도에 의한 방법	방법3	-	4,600(평균)
공내재하시험에 의한 방법	방법3	2,400	2,800
본 현장 허용 지지력 예상	-	평균 1,500 (500~2,500)	평균 3,300 (2,000~4,600)
지지력 평가	-	N.G	O.K

여러 가지 평가 결과로 비추어 볼 때 연암 지지일 경우 설계 지지력 확보가 가능할 것으로 사료되었으며, 풍화암(또는 파쇄대) 지지일 경우 다소간 지지력이 미달될 것으로 예상되었고 풍화도에 따라 부등침

하가 예상될 수 있었으므로 풍화암(또는 심한 파쇄) 구간은 콘크리트 치환 등 적절한 지반 보강이 필요할 것으로 판단하였다.

3.2.4 수치해석에 의한 기초 침하 평가

기초 지반의 스프링 계수는 지반 조사 및 실내 시험 결과를 토대로 그림 8과 같은 순서로 평가할 수 있으며, 설계하중 작용 시 보강 전·후의 기초지반의 스프링 계수를 표 4와 같이 구할 수 있었다.

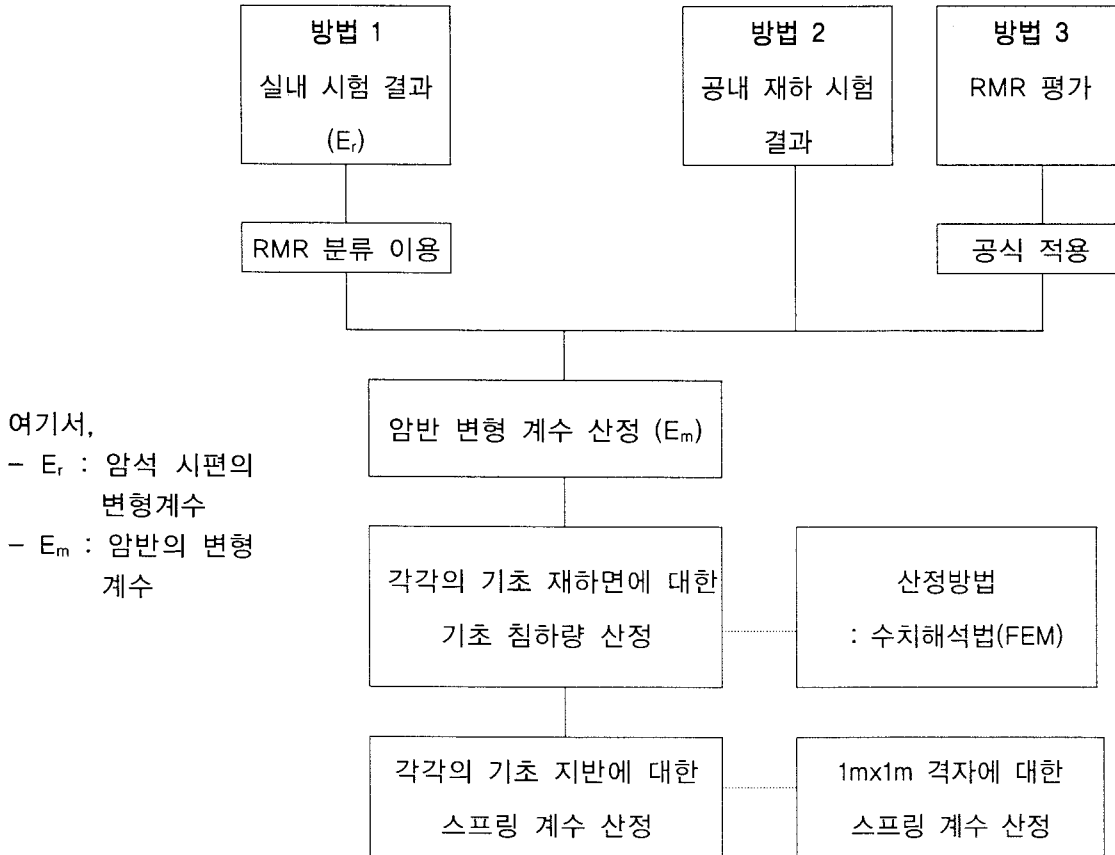


그림 8. 기초지반의 스프링 계수 산정법 흐름도

표 3. 기초 지반의 스프링계수

조건		보강 전		콘크리트 보강 후	
극한치	응력 (kN/m^2)	침하량 (mm)	스프링계수 (MN/m^3)	침하량 (mm)	스프링 계수 (MN/m^3)
상한치	1,900	20.5	90	4.2	450
하한치		31.8	55	10.9	170

당 현장의 구조물 기초 지반 변형 계수는 공내재하시험, RMR 분류, 일축압축강도로부터 산출된 값을 평균하여 적용하였으며 적용값은 표 4와 같다.

표 4. 기초 지반의 변형 계수

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

당 현장의 전면기초 지반은 풍화암 구간에 대해 매스콘크리트로 치환하여 보강하였으며, 보강 전과 보강 후 침하량을 일련의 수치해석을 실시하여 평가하였다. 수치해석 모델의 한 예를 그림 9에 나타내었다. 기초지반의 변형계수는 지반조사 결과를 분석하여 상한치(평균 변형계수+ 표준편차)와 하한치(평균 변형계수-표준편차)를 적용하였으며 해석결과를 그림 10~12에 나타내었다.

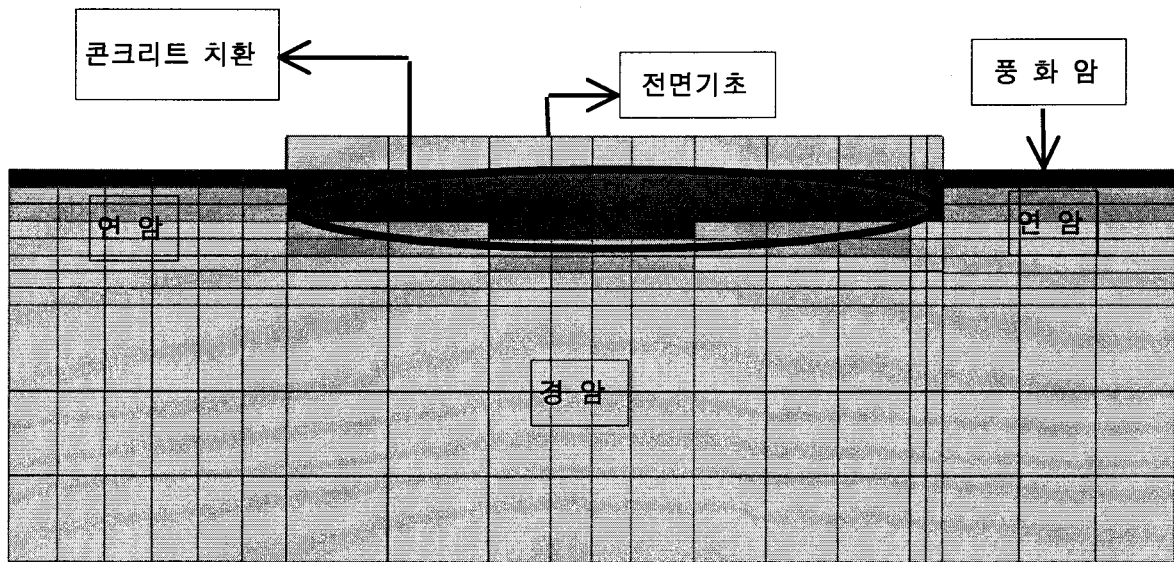
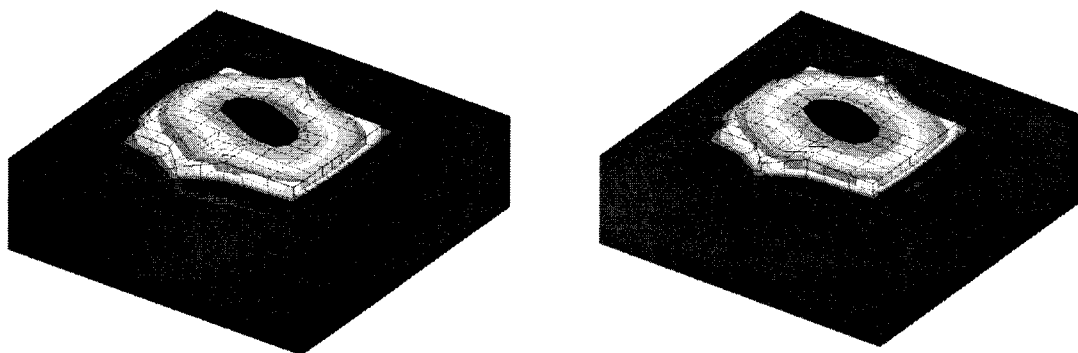


그림 9. 기초 해석 모델 예



(a) 상한치 결과 (최대침하량=20.5mm)

(b) 하한치 결과 (최대침하량 =31.8mm)

그림 10. 보강 전 기초침하 해석 결과

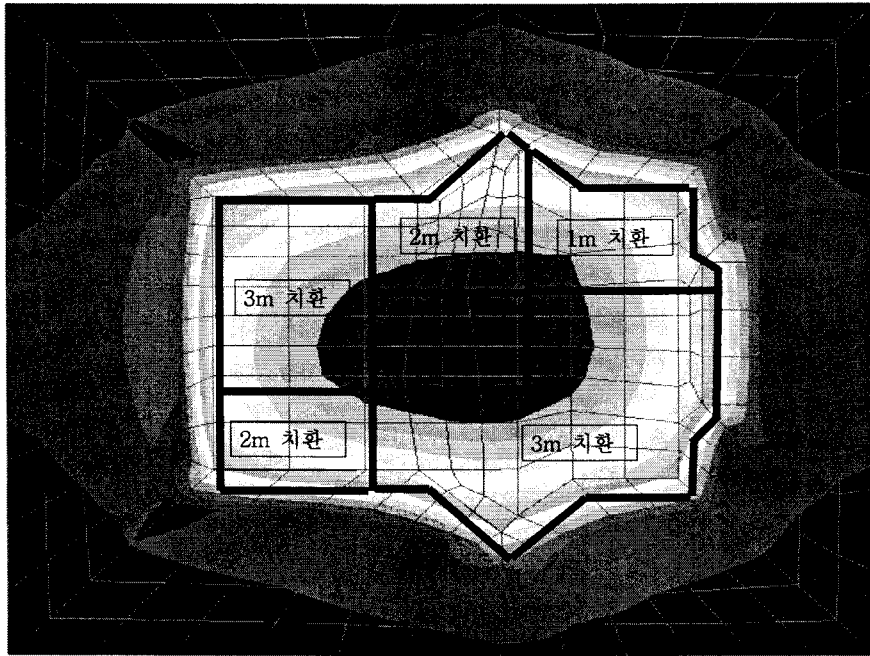


그림 11. 보강 후 상한치 해석 결과 (최대침하량=4.2mm)

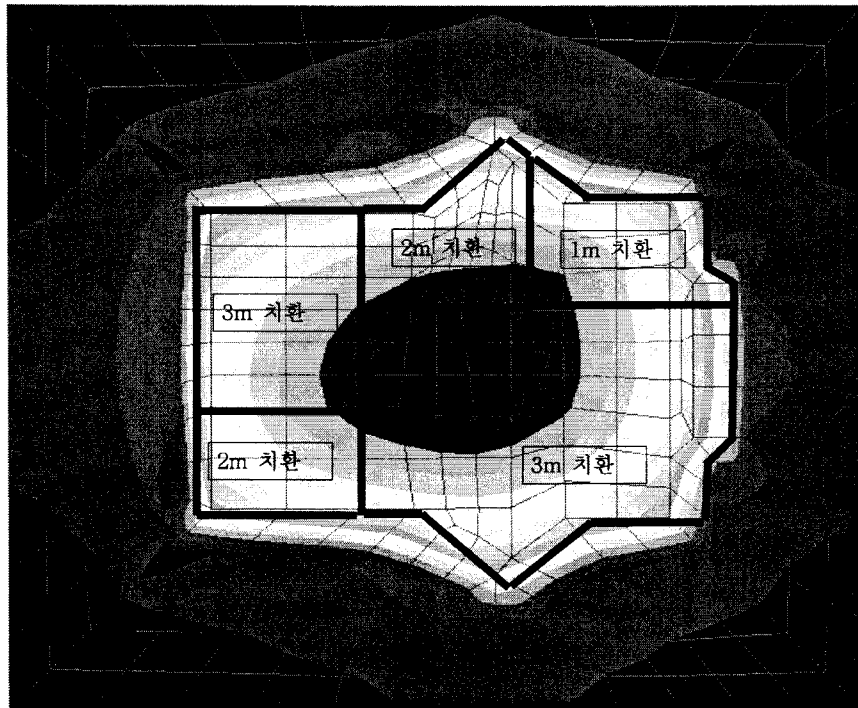


그림 11. 보강 후 하한치 해석 결과 (최대침하량=10.9mm)

본 현장 기초에 대한 침하 평가에서 설계 하중작용 시 그림 10~12에 나타난 바와 같이 보강 전 지반의 최대 침하량은 약 20~30mm로 예상되었으며 보강 후 침하량은 4~10mm 정도로 평가되었다. 이에 대하여 보강 전과 후의 침하양상을 전면기초 저면에 대하여 비교하였는데 약 65~80%의 침하량 감소가 있는 것으로 평가되었다(그림 12).

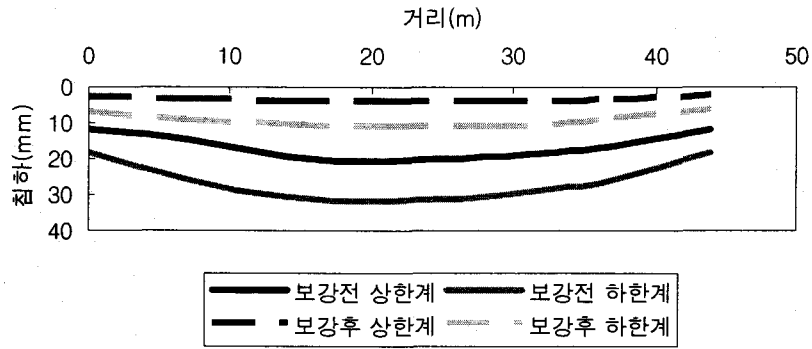


그림 13. 보강 전과 후의 침하 감소 효과

3.2.5 기초지반의 굴착 암반면 평가 (Face Mapping)

본 현장에서 공사 전 시추 조사 및 현장 시험을 토대로 설계 당시 기초 지반을 평가 하였으며, 시공 중 기초 암반 상태를 확인하기 위하여 최종 굴착 후 기초지반의 굴착 암반면 조사를 실시하고 기초 지반의 소요 지내력 확보 여부를 평가하였다. 본 현장의 경우 암반면 평가 시 굴착 상황은 구조물 기초 바닥고(E.L+ 30.54m)아래 2~8m 하부까지 굴착 완료된 상태(그림 14)이었으며, 기초 바닥고 아래의 풍화암 또는 심한 파쇄대는 대부분 기초 암반 평가를 위하여 제거된 상태이었다.

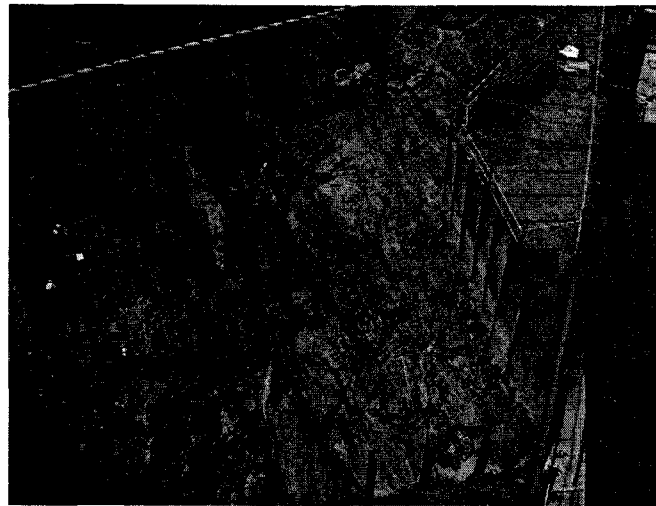
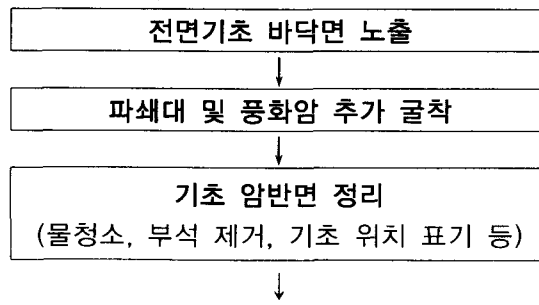


그림 14. 최종 굴착 후 기초 암반면 전경

기초지반의 굴착 암반면 평가는 그림 15와 같은 순서로 진행하였다.



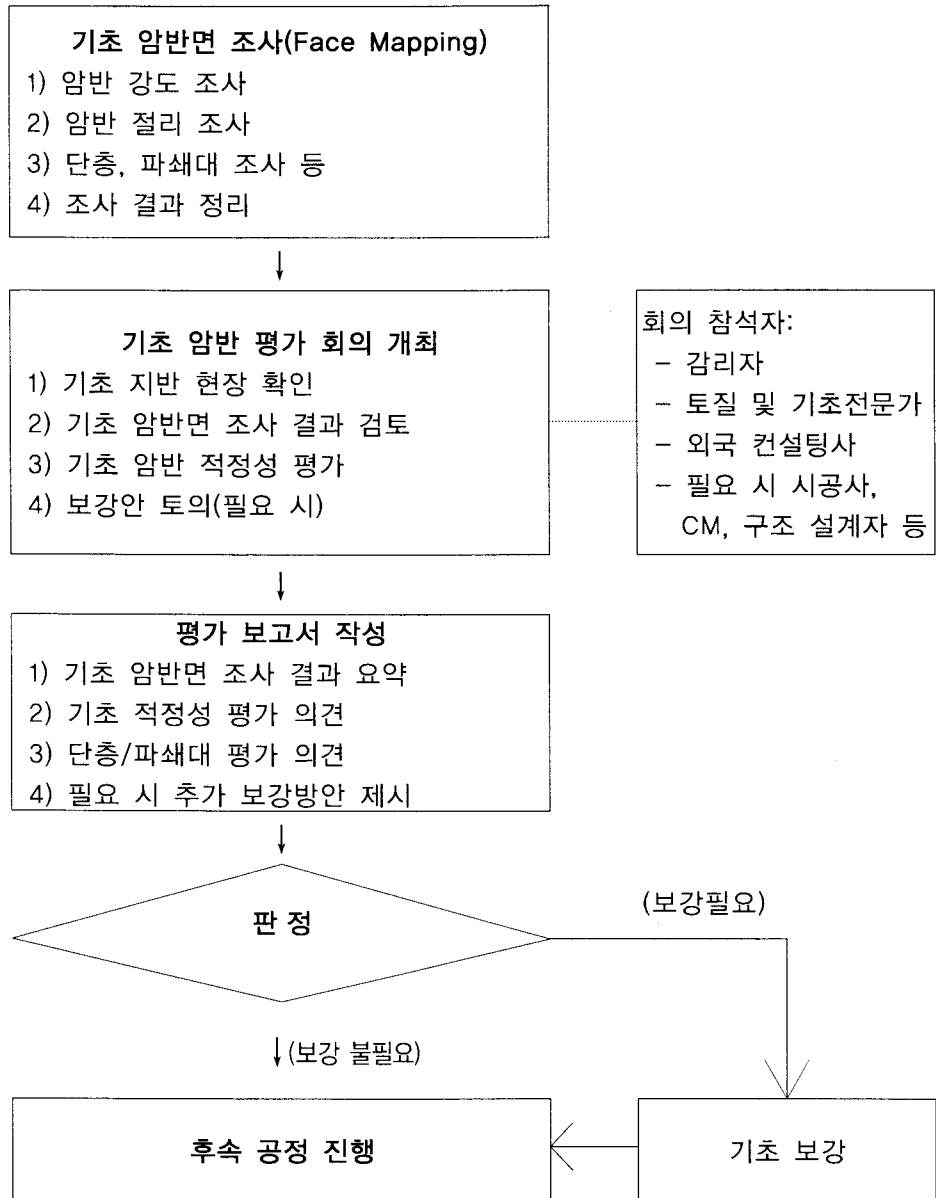
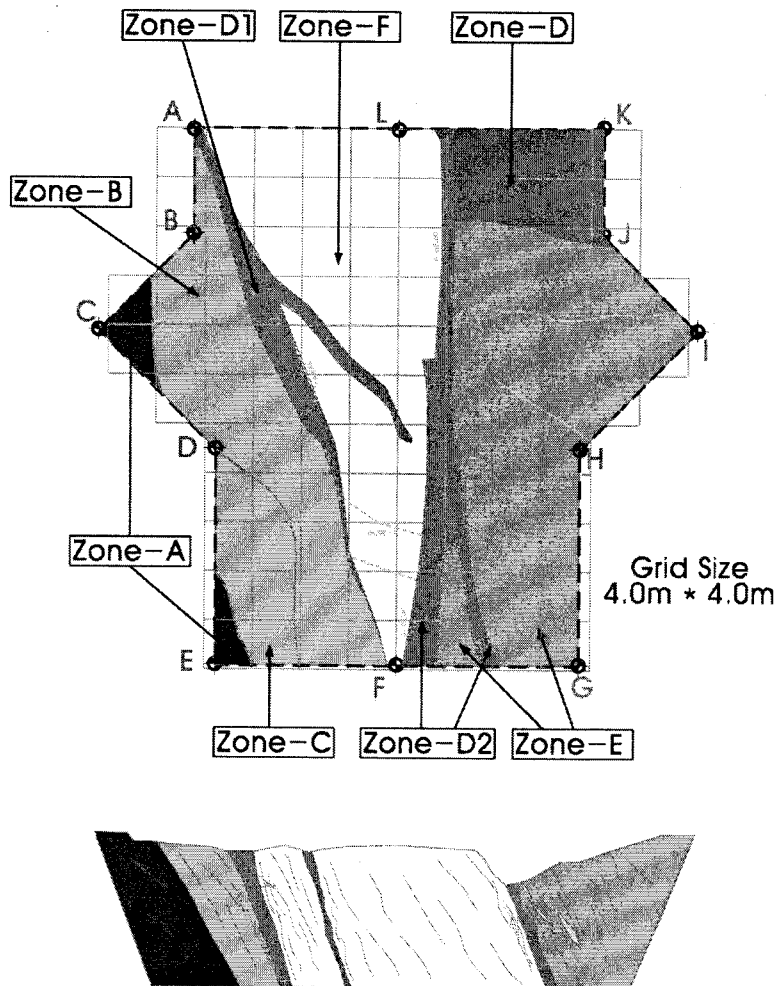


그림 15. 기초지반의 굴착 암반면 평가 흐름도

기초 암반 평가 결과 본 현장 암반은 암석 강도 및 풍화상태에 따라 그림 16과 같이 암반 구역을 구분 설정하였으며, 구분 설정한 구역의 암반 상태를 조사하여 기술 하였다. 조사 결과 본 현장 암석 강도는 24.8~253.2MPa으로 측정되어, 보통 내지 매우 강한 강도(Moderately~very strong)을 가지고 있는 것으로 조사되었다. 또한 절리면은 약간 또는 보통 풍화된 상태(Slightly~moderately weathered)이며, 암반 표면에 대한 지질 해머 타격 시 전반적으로 맑은 소리(Ring sound)가 나며, 1회 타격 또는 수회 타격으로 시편을 얻을 수 있는 상태이고, 지질 해머 타격 시 탁한 소리(Dull sound) 또는 관입되는 구역이 일부 존재하였으나 그 규모는 크지 않은 것으로 조사 되었다. 지각 운동 등에 의하여 기초 암반에 파쇄대 및 상대적으로 높은 풍화대가 존재하였으나(그림 17) 굴착 중 추가 지반 조사에 의한 규모 파악 후 굴착을 진행하여 전반적으로 굴착 제거된 상태이었다. 조사 결과를 토대로 평가한 본 현장 암반은 II~IV의 평가등급으로 전반적으로 연암 이상의 지반으로 평가되었다((주)진영이엔씨, 2007a; 2007b).



< 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 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.

그림 16. 기초 암반 구역 설정

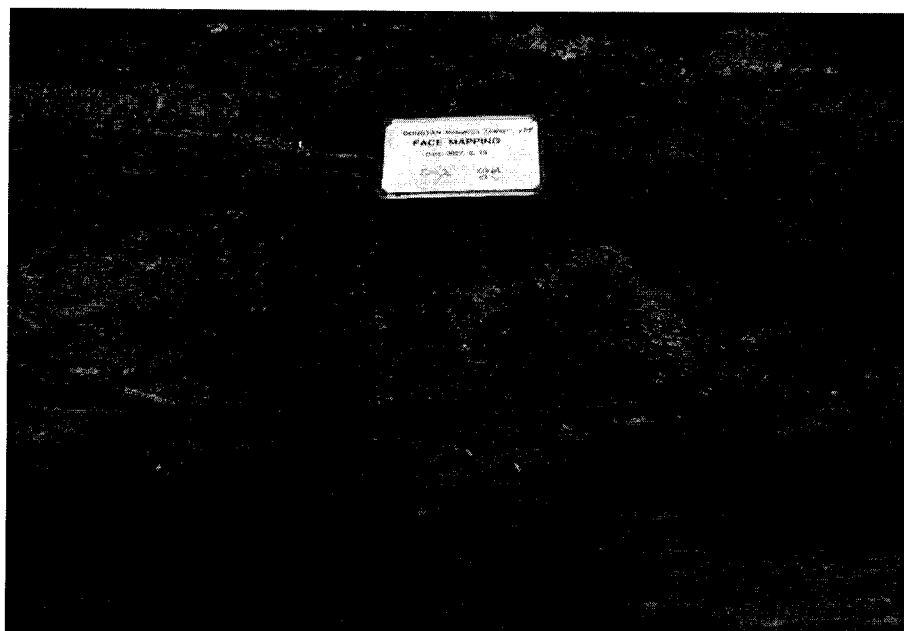


그림 17. 파쇄대 (풍화대)

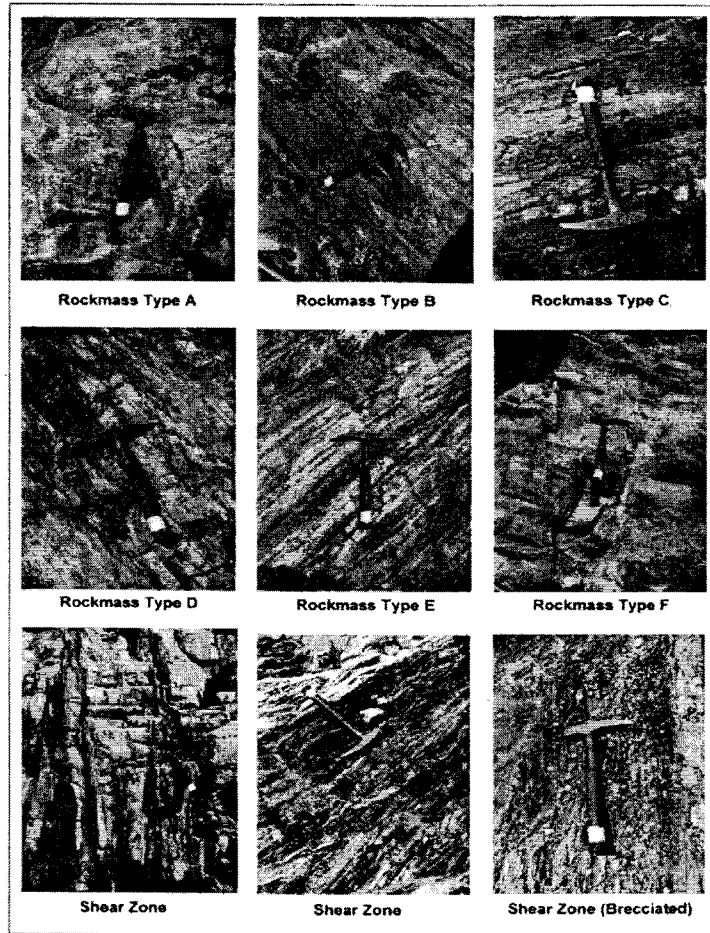


그림 18. 구간별 암반상태 예시

표 5. 기초 지반의 R.M.R 분류표

구역	구분	일축압축강도 (kg/cm ²)	RQD (%)	절리간격 (cm)	절리면 상태					지하수	평점	등급
					연속성 (m)	간극 (mm)	충전물 (mm)	거칠기	풍화도			
1	평가	1847	80	2~6	>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	1422	40	20	>20m	1~5mm	None	Slightly Rough	Moderately weathered	Wet	50	III
	점수	12	8	10	0	1	6	3	3	7		
3	평가	309	15	6	>20m	1~5mm	None	Slightly Rough	Moderately weathered	Wet	35	IV
	점수	4	3	8	0	1	6	3	3	7		
4	평가	948	25	20	>20m	1~5mm	None	Slightly rough	Moderately weathered	Wet	45	III
	점수	7	8	10	0	1	6	3	3	7		
5	평가	1084	25	20	>20m	1~5mm	None	Slightly rough	Slightly weathered	Damp	55	III
	점수	12	8	10	0	1	6	3	5	10		
6	평가	1553	65	6	>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	132	15	6	>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	132	15	6	>20m	1~5mm	Soft filling <5mm	Slightly rough	Highly weathered	Dripping	20	IV
	점수	2	3	8	0	1	2	3	1	0		

기초 암반면 조사 결과(그림 18 및 표 5)를 토대로 본 현장 기초에 대하여 다음과 같은 평가를 도출할 수 있었다.

1) 2개소의 주요 전단영역(Shear zone)이 1~2m 폭으로 전 타워(Tower)를 가로 지르는 것으로 확인되었으며 이로 인하여 해당구간의 풍화가 보다 많이 진행되어 주변 암반보다 취약하게 되었으며 취약부는 기초면 하부 최대 8m 정도까지 발달되었다.

2) 해당구간은 전단영역(Shear zone)의 영향으로 주변암반은 이와 평행하게 띠구조(Band structure)가 밀실하게 발달되었으며 경사 방향은 북동이고 경사는 50~70정도로 발달되었다. 일부 접힘(Fold) 또는 뒤틀림이 나타났으며 전반적인 암반의 상태는 양호하게 확인되었다.

3) 비교적 복잡한 지층 특성 및 국부적인 암반의 차별 풍화층으로 인하여 실제 신뢰성이 있는 기초 암반면은 시추조사 시 예상된 암반면과 부분적으로 상이하게 확인되었다.

4) 굴착 조성된 기초 암반은 건축 요구 지내력이상(허용지지력 $1,900\text{kN/m}^2$)으로 평가 되었으며, 기초 암반 평가 결과에 의하여 산출된 변형계수가 설계 시 적용된 변형계수의 상한값 정도로 평가되었고 수치해석(그림 19~20)에서 평가된 침하량은 5mm 정도로 예상되어 기초는 설계 시 평가된 침하량 범위에서 적정하게 거동할 것으로 분석되었다.

5) 일부 구간 약한 강도의 암이 협재되어 있으나 주변에 강한 암반이 존재하였다. 실제 해당구간의 깊이를 확인하기 위하여 5개소의 시추조사를 전단영역(Shear zone) 주변으로 시행하였는데 깊이는 2~3m 이내로 확인되었다. 또한 상당한 두께(8~9m)의 매스 콘크리트가 하중을 분산시키는 역할을 할 수 있었으므로 이에 대한 추가 굴착은 필요하지 않았다.

6) 공사 전 시추 조사 결과와 금번 기초 암반면 조사 결과를 종합하여 볼 때 굴착된 본 현장 기초 암반 상태는 전반적으로 연암~경암의 지반으로 평가되었으며, 추가 굴착된 전면기초 바닥 위치 하부 구간을 매스 콘크리트로 치환 보강한다면 본 기초 지반은 본 현장 구조물 기초 지반으로 적합할 것으로 평가되었다.

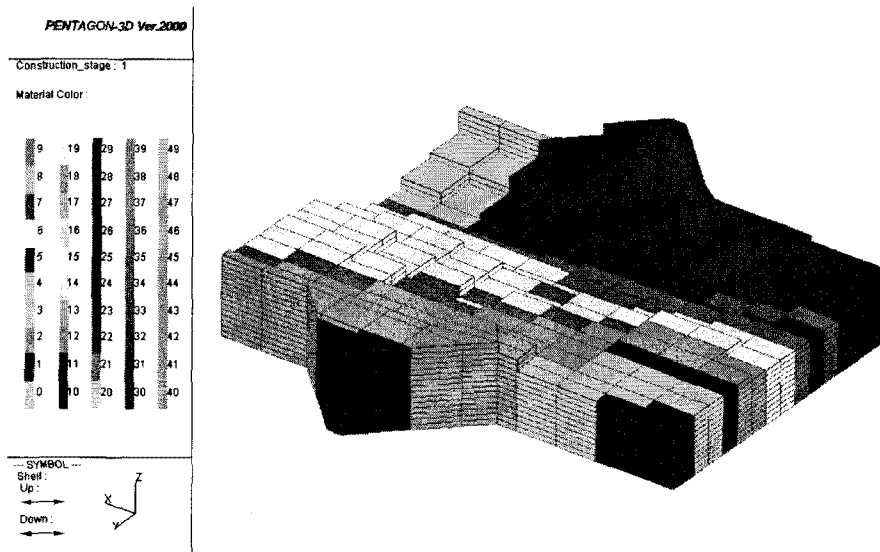


그림 19. 기초 암반면 조사 결과를 이용한 기초 암반 모델

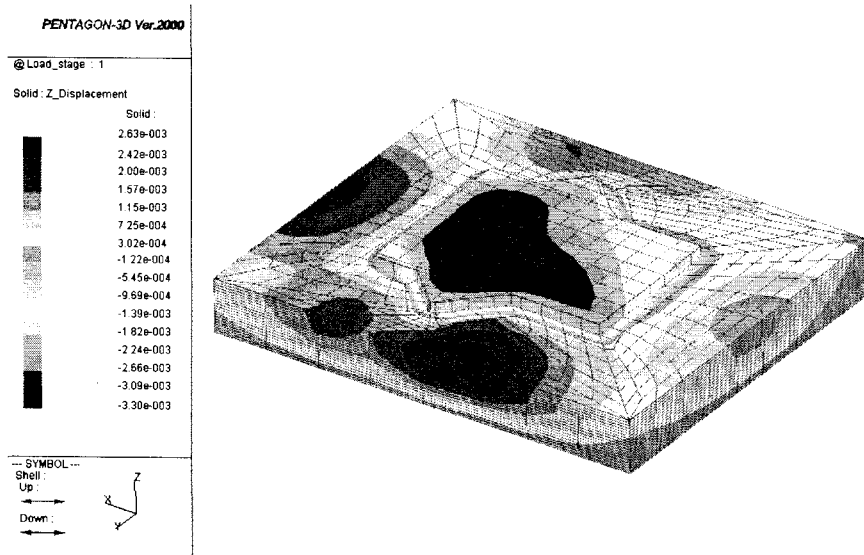


그림 20. 기초 암반면 조사 결과에 의한 기초 침하 해석 결과

4. 초고층건물의 대구경 말뚝 설계 사례

4.1 초고층건물의 대구경 말뚝 설계

초고층 건물의 말뚝기초로는 대체로 대구경 말뚝을 사용하며 국내에서는 RCD(Reverse circulation drill)공법에 의해 시공되는 암반소켓말뚝을 주로 사용한다. 말뚝기초의 설계는 크게 하중의 수직성분과 지진 또는 풍하중 등에 의한 수평성분으로 구분하여 이루어 지는데, 각각 외말뚝에 대한 분석과 군말뚝에 대한 분석도 수행되어야 한다. 전반적인 설계 흐름은 그림 21에 나타내었다.

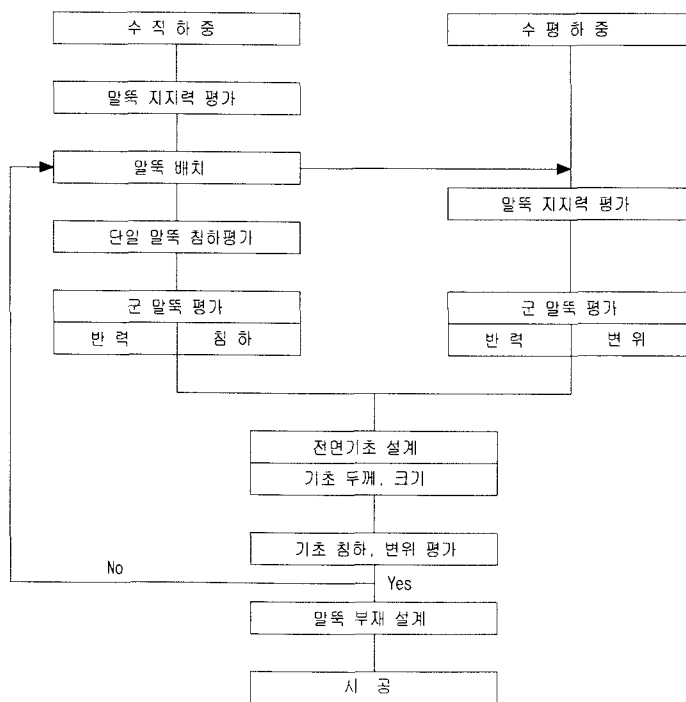


그림 21. 초고층 건물의 말뚝기초 설계 흐름도

말뚝의 거동(지지력, 침하 및 수평변위 등)은 상부구조물의 거동에 영향을 미치므로 이에 대한 평가가 건축설계에서 중요하다. 말뚝설계 방법은 이론 및 경험에 의한 해석적 방법과 말뚝재하시험에 의한 평가 방법이 있다(그림 22).

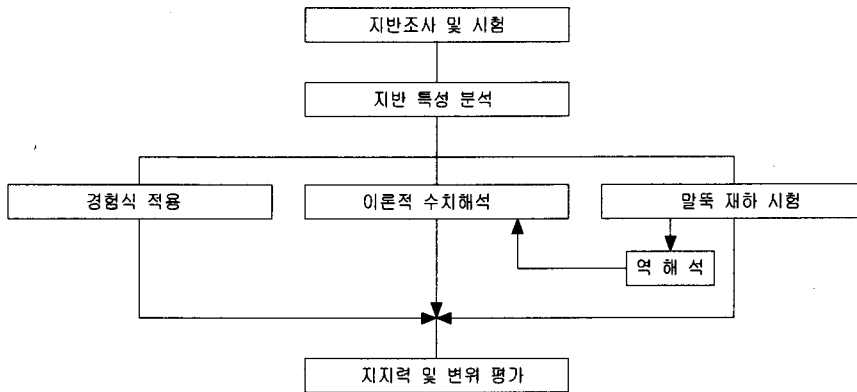


그림 22. 말뚝기초 해석 방법

말뚝재하시험은 경험적인 접근과 이론적 수치모델의 한계성을 극복하기 위하여 시험에 의한 실제의 하중-변위의 관계를 도출하여 말뚝설계를 보다 사실과 근접하게 하여 고층건물의 기초거동이 보다 사실적으로 예상되도록 매우 중요한 자료를 제시하며 기초의 신뢰도를 높일 수 있다. 또한 말뚝 재하시험결과를 역해석하여 보다 정밀한 지반의 하중-변형 특성을 도출하여 이론적 수치해석 시 지반의 물성자료로 사용하여 해석의 정확성을 향상시킬 수 있다. 말뚝재하시험방법에는 말뚝두부에서 재하하는 방법과 유압실린더를 말뚝내부에 설치하여 시행하는 양방향말뚝재하시험방법이 있으며 대구경 현장타설말뚝과 바레트말뚝의 경우 최근에는 간편하고 경제성이 높은 양방향말뚝재하시험이 주로 적용되고 있다(최용규 등, 2006). 말뚝재하시험은 설계에 적극 활용하기 위하여 설계단계에서 수행하는 것이 유리하며 시공단계에서는 설계된 말뚝의 거동을 확인하는 확인시험으로 시행된다(그림 23).

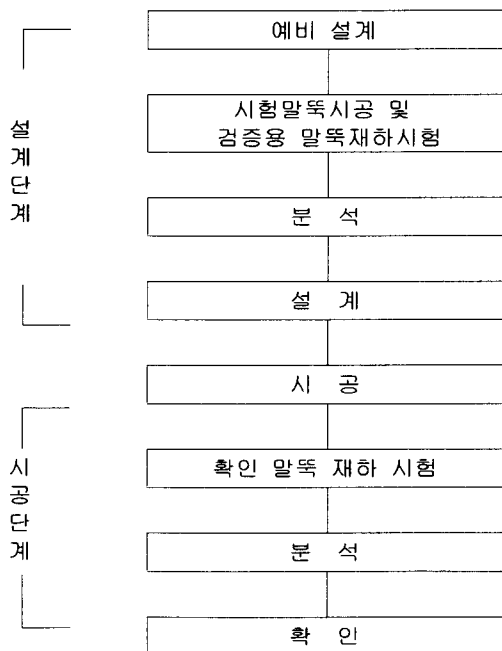


그림 23. 말뚝재하시험의 흐름도

4.2 초고층 건물의 말뚝기초 설계 예

4.2.1 지층 개요

송도 신도시는 해성 퇴적층 위에 준설 매립된 지반상에 현재 개발이 진행되고 있으며 이중 A2 단지에 68층의 OOOO가 건설되고 있다. 본 부지의 지층은 상부로부터 준설매립층(두께 6m), 실트 및 점토 성분이 주를 이루는 해성퇴적층(두께 22m), 풍화잔류토층(두께 7m), 풍화암층으로 분포하고 있었다(표 6). 지반은 흑운모 화강암을 근간으로 편암이 관입되어 있으며 화강암의 입자구성이 조립에서 세립까지 다양하게 관찰되었다. 관입접촉 지역 특성에 따라 파쇄대가 발달하였으며 강도 및 풍화도가 매우 불규칙한 상태로 조사되었다.

표 6. 지층 요약

시추위치	지층요약						
	준설매립	해성퇴적	풍화토	기반암			
				HWR	MWR	SWR	FSR
TB-1	5.7m	22.8m	7.0m	12.5m	14.3	11.7	7.0
TB-2	6.6m	22.2m	7.2m	9.1m	4.3	11.0	-
TB-3	6.5m	22.3m <td 4.8m	13.8m	30.7	-	-	

4.2.2 예비설계 단계의 시험말뚝 개요

본 부지에서는 설계를 위한 시험말뚝 시공 및 양방향 말뚝재하시험은 별도로 수행하지 않았고 지층조건이 당 부지와 유사한 인접 125 Block(그림 24)의 시험결과(경성대학교 지반공학연구실, 2006)를 이용하여 예비설계를 수행하였다. 그림 25는 말뚝 시험위치의 지층과 양방향말뚝재하시험 결과이다.

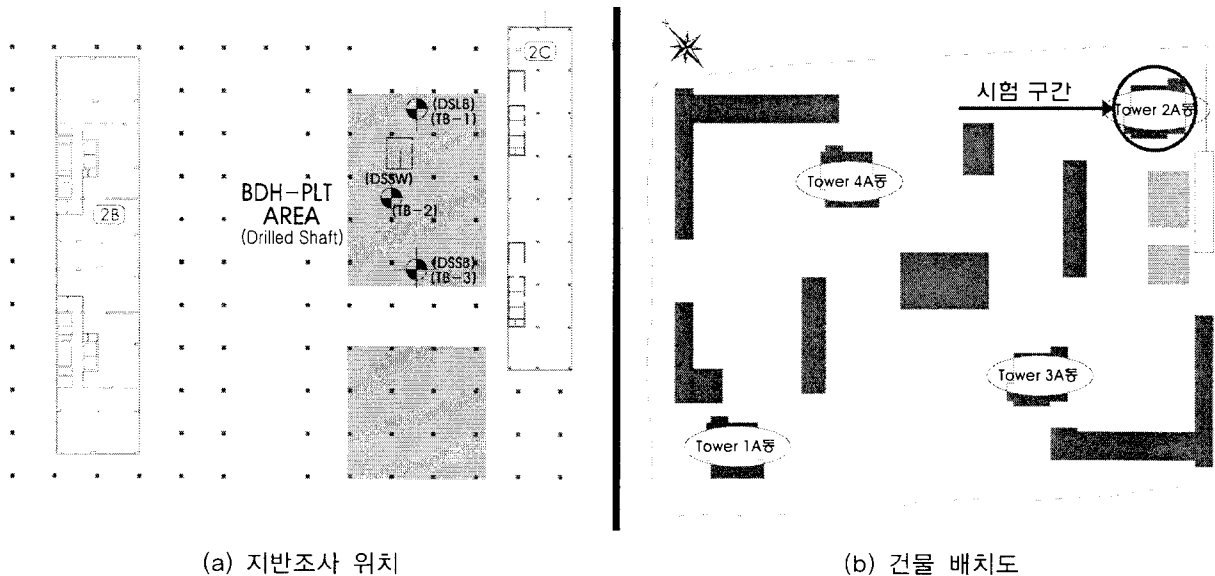
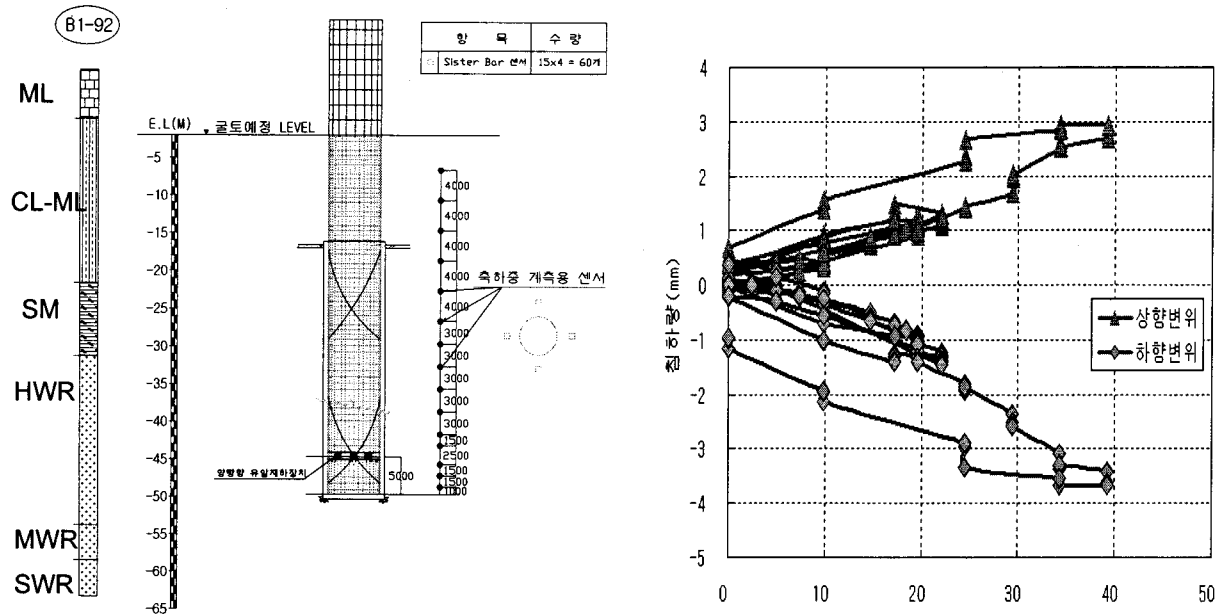


그림 24. 설계단계에서 참조한 시험말뚝의 시공 위치 및 지반조사 위치도(경성대학교 지반공학연구실, 2006)



(a) 지층 및 재하장치 설치도

(b) 재하시험 결과

그림 25. 예비설계 시 참고한 양방향 고유압 말뚝재하시험 결과 및 지층

4.2.3 시험말뚝에 대한 말뚝재하시험 결과의 역해석

본 논문의 분석에는 직접 사용하지는 않았지만 참고할 수 있도록 대상현장에서 측정된 풍화암에 대한 일축압축강도와 마모도에 대한 실험값을 표 7에 요약하였다.

표 7. 암석 시험결과 요약

	1축압축강도 (MPa)	마모율 (% , MWR)
평 균	37 (SWR) 4.9 (MWR)	36.4
표준편차	14 (SWR) 1.6 (MWR)	3.1

주) 마모도 시험 후 손실입자의 입도 시험결과 입경은 중간~굵은 모래이며 #200체 통과율은 4%임

설계하중 30MN에서 풍화암층에 소켓된 구간의 주변마찰지지에 의한 변위량은 2~4mm로 매우 작게 측정되었다. 이 하중-변위 관계를 역해석하면 소켓암반부의 평균 변형계수는 700~5,000 Mpa로 평가되었다. 역해석에 사용한 말뚝해석 프로그램은 Piglet으로 시험 시 발생하는 변위를 만족하는 지반 변형계수를 시행오차법으로 역산하였다. 또한 토사부의 말뚝 부재는 재하하중에 대하여 탄성거동을 한다고 가정하면 단일 말뚝의 강성은 표 8과 같이 평가되었다.

표 8. 단일말뚝의 수직강성 평가 결과

	상한값	하한값
단일말뚝 수직강성 (MN/m)	2,800	2,300

4.2.4 사용말뚝의 해석

0000의 말뚝 평면 및 지층 조건은 그림 26과 같다.

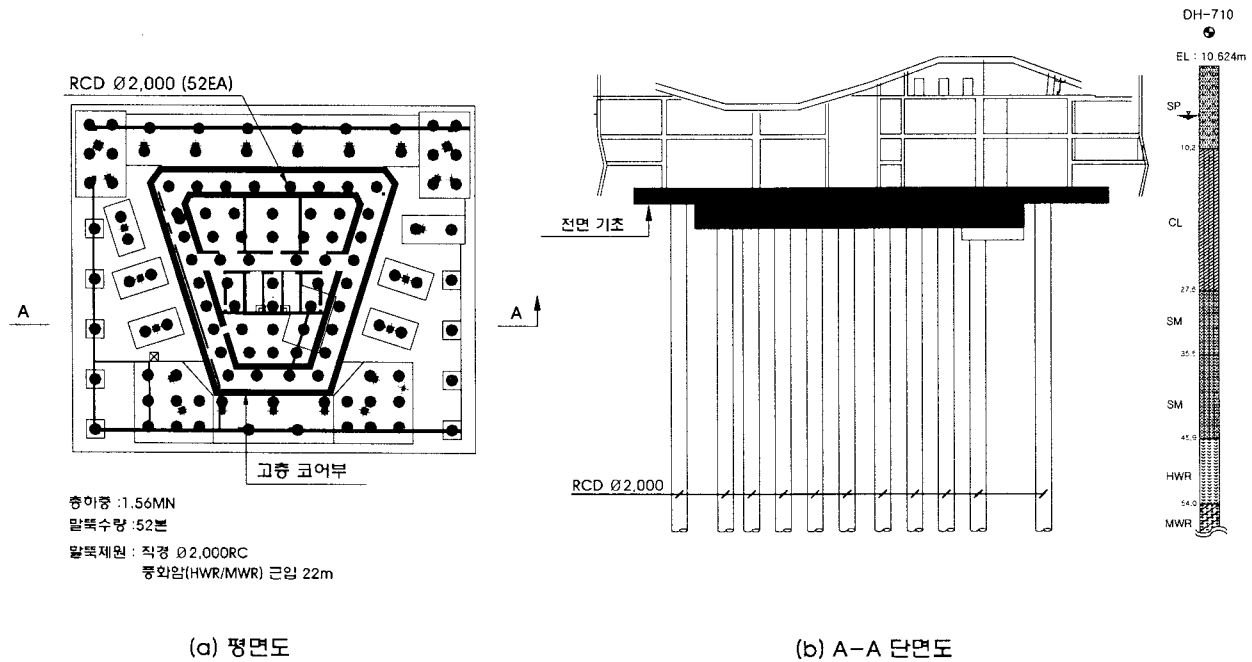


그림 26. 0000건물의 평면도 및 단면도

이와 같은 조건에 대하여 말뚝의 군효과를 고려하여 수치해석을 수행하였다. 일반적으로 암반에 근입된 말뚝에서 지지력은 군말뚝 영향을 받지 않는 것으로 고려하며 침하에서도 통상 군말뚝 검토가 수행되지 않는다. 이에 대하여 Tomlinson(1977)은 암반에 형성된 군말뚝의 침하는 군말뚝 폭의 0.01~0.05% 정도의 예측값을 제시하였다. 이러한 경우 본 건물의 군말뚝의 침하는 3~15mm 정도의 범위로 예측될 수 있었다. 본 설계에서는 상부구조물의 거동을 보다 넓은 범위의 기초 침하에 대하여 고려될 수 있도록 군말뚝 영향이 없는 외말뚝의 변위값을 말뚝 변위의 상한값으로 설정하고 군말뚝의 효과가 고려된 경우를 하한값으로 평가 하였다. 군말뚝 효과가 적용되는 반무한 탄성체 지반에서 말뚝 내부에서는 군효과로 말뚝의 침하강성이 작아지고 말뚝 모서리에서는 군효과가 적은 관계로 침하강성이 크게 되며 변에 위치하는 말뚝에서는 그 사이에 침하강성이 설정된다. 검토된 말뚝의 강성은 표 9와 같다.

표 9. 사용말뚝의 강성 검토 결과

		말뚝 강성 (MN/m)		
		모서리 위치	내부 위치	평균
그룹효과 고려한 경우	상한값	2,100	2,000	2,050
	하한값	1,250	1,050	1,150
그룹효과 고려하지 않은 경우	상한값	2,800		
	하한값	2,300		

타워부의 말뚝기초는 말뚝하중 32MN에 대하여 상한계는 10.5~13mm정도의 침하가 예상되었으며 하한계는 12.7~23mm 정도의 침하가 예상되었다. 말뚝의 허용지지력추정 시 토사근입부의 주변마찰력은 무시하고 암반 근입부의 주변 마찰력만 고려하였다. 근입된 암반은 풍화의 정도가 보통~심은 풍화암(MWR/HWR)으로 허용 설계 주변마찰력은 294kPa를 적용하였으며 말뚝의 길이는 이를 토대로 결정하였다.

4.2.5 사용말뚝의 양방향 고유압 말뚝재하시험

본 프로젝트에서는 0000 신축공사의 현장타설 말뚝(Pile No.6, No45)(그림 27)에 대하여 시공초기에 확인목적의 양방향 말뚝재하시험을 실시하고 이 결과를 토대로 예비설계를 수정하여 말뚝기초의 설계를 완성하였다. 즉, 직경 2,000mm의 현장타설말뚝이 최대 35MN의 설계하중을 지지하도록 설계하였으며 사용말뚝의 제원은 표 10과 같다. 여기서 재하 용량은 설계하중의 2배인 70MN으로 설정하는 것이 원칙이지만 본말뚝에 대한 확인시험이라는 조건을 고려하여 재하용량은 설계하중의 약 1.5배로 정하였다. 그러나 상향/하향 변위가 거의 비슷하게 발생할 수 있도록 고유압재하장치의 위치를 조정하여 시험효과를 극대화시킬 수 있도록 하였다. 그 결과 시험계획에서 예측하였던 바와 같이 상/하향 변위가 비슷하게 발생하여 설계하중의 지지여부에 대한 확인은 충분하게 이루어 졌다.

표 10. 시공초기 단계의 시험말뚝(사용말뚝)의 제원 및 재하용량

시험말뚝명	직경(mm)	길이(m)	설계하중(MN)	일방향 재하용량(MN)
No.6	2,000	70.6	35	50
No.45	2,000	70.6	35	50

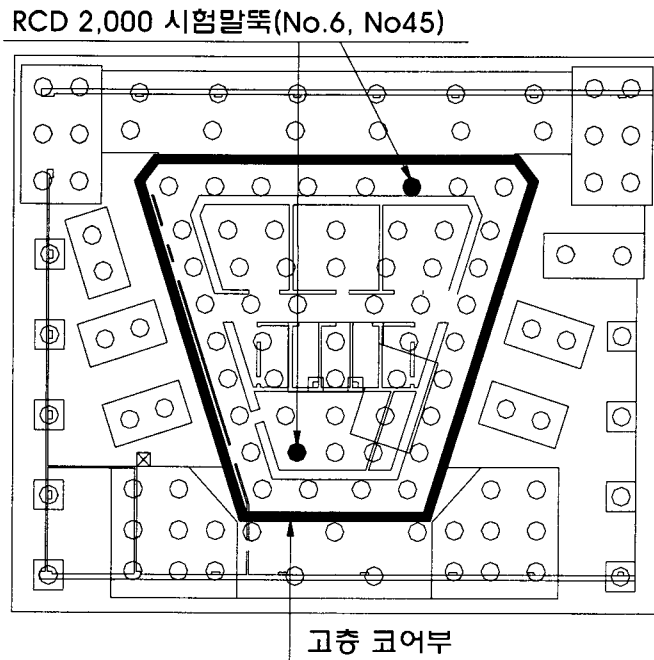


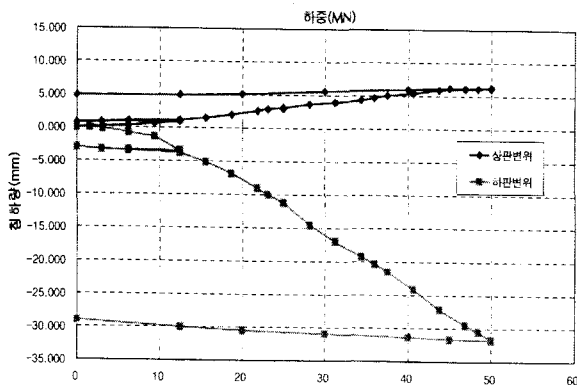
그림 27. 재하시험 말뚝 위치

본 양방향 말뚝재하시험에 사용된 고유압재하장치 제원은 표 11과 같으며, 계획최대재하하중이 10MN인 실린더 5개가 사용되었고, 재하장치를 말뚝선단으로부터 5.0m의 상부에 고정시키고 변위측정용 강봉을 상판에 2개, 하판에 2개를 설치하여 상판 및 하판의 변위를 측정하였다. 또 상판과 하판 사이에는 LVDT를 설치하여 재하장치의 팽창 변위를 측정하였다.

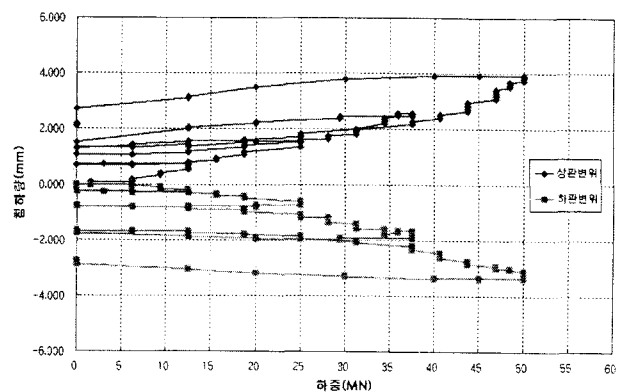
표 11. 시공초기 단계에서 사용한 양방향 고유압 재하장치 제원

장비명	규격	수량
1. 유압잭 및 펌프	- 고유압잭(사용압력 : 147MPa, 최대하중 : 19.8MN)	5개
	- 펌프(최대압력 : 177MPa)	1개
2. 유압호스	- 고압력 호스(177MPa) : 80m	1개
	- 저압력 호스(68.6MPa) : 80m	1개
3. 변위계(LVDT)	- 최대범위 : 0~200mm(6ea) - 정도 : 1/1000mm	6개
4. 마그네틱 베이스	- 영구 자석식	6개
5. 기준보 및 고정앵커	- H형 빔 : 6m	2개
	- H형 빔 : 4m	4개
	- H형 빔 : 2m	2개
6. 변위봉	- 변위봉 개당 길이 : 1.5m/ea (70m×6개소/1.5m=약 280ea)	1식
7. 유압 연결장치 및 부속장비	- 고압용 연결 장치, 멍키스패너, 바이스 플라이어, 렌치 등	1식
8. 자동화 측정 시스템	- 데이터 로그 (TDS 303) - 스위치박스(50채널 : 1개) - 노트북 컴퓨터 - 데이터 집적 프로그램	1식

사용말뚝에 대한 양방향 고유압 말뚝재하시험 결과를 그림 28에 나타내었다. 양방향고유압말뚝재하시험의 재하용량을 충분히 사용하기 위하여 상부반력(주면마찰력)과 하부반력(선단지지력)이 상호평형을 이루는 적절한 위치에 고유압재하장치를 설치하여야 한다. 본 프로젝트에서는 주면마찰력이 선단지지력보다 크다고 판단하여 하부에서 5m 떨어진 상부에 고유압재하장치를 설치하고 시험을 실시하였다. 시공 중 말뚝재하시험에서는 시험계획단계에서 예상하였던 바와 같이 상향변위 및 하향변위의 발현 양상이 비슷하였다 (그림 28 참조). 상향변위 및 하향변위가 각각 No.6 말뚝에서 6.8mm, 31.8mm, No.45 말뚝에서 3.909mm, 3.369mm 발생하였다. 예비설계 단계에서 참조한 말뚝재하시험 결과에서 주면마찰력이 더 크게 발휘되었으나 시공초기 단계의 사용말뚝에 대한 양방향 고유압 말뚝재하시험에서는 선단을 그라우팅으로 보강한 후 말뚝선단에서 상부로 5m 떨어진 위치에 고유압 재하장치를 설치하고 실시하였으므로 선단지지력도 크게 유발되었다.



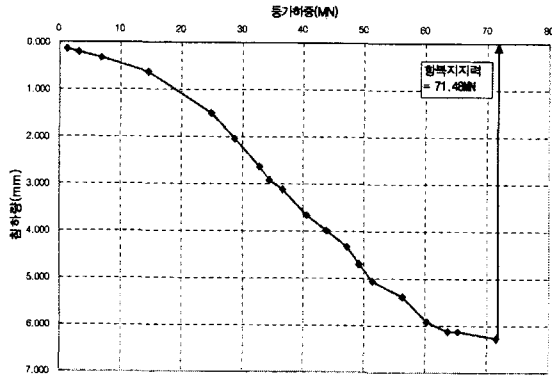
(a) No.6 시험 결과



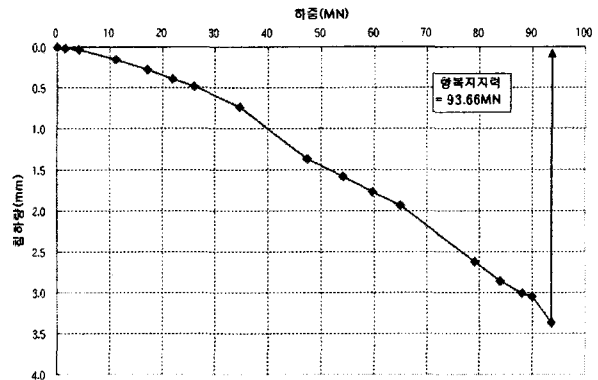
(b) No.45 시험 결과

그림 28. 시공초기 단계에서 사용말뚝에 대한 1방향 재하하중-변위 곡선(한국양방향말뚝재하시험협회 등, 2007a; 2007b)

그림 28의 1방향재하하중-침하곡선을 이용하여 말뚝머리 등가하중-침하량 곡선을 그림 29에 도시하였다.



(a) No.6 등가하중-침하량 결과



(b) No.45 등가하중-침하량 결과

그림 29. 시공초기 단계의 사용말뚝에 대한 말뚝머리 등가하중-침하량 곡선

5. 결론 및 제언

- 1) 초고층 건물의 기초 설계에서는 기초의 지지력뿐만 아니라 기초의 변위를 고려한 거동분석이 필요하다.
- 2) 초고층 건물의 기초 거동은 상부 구조물의 거동에 다시 영향을 미치므로 기초와 상부구조물과의 상관관계의 이해가 필요하다.
- 3) 초고층 건물의 기초의 수평 및 수직변위 검토는 변위의 상한값과 하한값을 평가하여 실제 건물의 거동이 이러한 가능 범위에서 적절히 거동하는가를 분석하여야 한다.
- 4) 양방향 말뚝재하시험은 초고층 건물 설계 시 기초의 지지력을 보다 명확히 하여 경제적이고 안전한 설계를 이룰 수 있는 유용한 수단이 될 수 있을 뿐만 아니라 말뚝기초의 거동을 보다 실제와 근접하게 평가할 수 있으므로 상부구조물 평가에 합리적으로 적용될 수 있다.
- 5) 초고층 건물이 전면기초를 통하여 직접 암반에 지지되는 경우 암반의 지질 구조적 특성이 기초 거동에 주요한 요소로 작용한다. 암반의 분석은 사전 조사에 의한 분석뿐만 아니라 암반 노출면에 대한 암반면조사(Face mapping) 분석도 이루어져야 한다. 이렇게 할 경우 기초 암반의 보다 확실한 거동 분석이 가능하며 당초 설계의 당위성이 검증될 수 있을 것이다.
- 6) 본 논문에서 제시한 말뚝기초의 설계 사례는 “예비설계-검증시험-예비설계의 보완”의 3단계를 거쳐 말뚝기초의 설계를 완성한 대표적인 사례로 볼 수 있으며 이와 같은 설계절차를 준수할 경우 말뚝기초의 경제적인 설계를 수행할 수 있으며 이를 통하여 말뚝기초 공사비의 대폭적인 절감을 이룰 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 경성대학교 지반공학연구소(2006), “송도 125블록 신축공사 내 현장타설말뚝에 대한 양방향고유압말뚝 재하시험 보고서(2A동)”, Report No. KSU/GT-06-02, 2006. 1.
2. 김성호, 이민희, 황근배, 최용규 (2006), “양방향 말뚝재하시험(BD PLT)를 이용한 초고층 건축구조물 기초 설계 및 시공 사례”, 2006 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. ~ .43.
3. (주)진영이엔씨(2007a), “화성동탄 복합단지 1단계 건설공사 고층부(102/104동) 기초암반 평가 보고서”
4. (주)진영이엔씨(2007b), “화성동탄 복합단지 1단계 건설공사 고층부(103/104동) 기초암반 평가 보고서”
5. 한국양방향말뚝재하시험 협회, (주)지오사이트,(재)한국건설시험소 (2006a), “송도신도시 블록 36 NATT(Northeast Asia Trade Tower) 신축공사구간 내 현장타설말뚝(Pile No. 6, $\Phi = 2,000\text{mm}$)에 대한 양방향 고유압 말뚝재하시험 보고서”, BD PLT Report No. KBDPLT-07-01
6. 한국양방향말뚝재하시험 협회, (주)지오사이트,(재)한국건설시험소 (2006b), “송도신도시 블록 36 NATT(Northeast Asia Trade Tower) 신축공사구간 내 현장타설말뚝(Pile No. 45, $\Phi = 2,000\text{mm}$)에 대한 양방향 고유압 말뚝재하시험 보고서”, BD PLT Report No. KBDPLT-07-02
7. Mandolini, A. and Russo & Viggiani(2005), “Pile foundation : Experimental investigations, analysis and design”, *16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
8. Tomlinson, M. J. (1977), "Pile Design and Construction Practice"