

제 4 장 현장실험

4.1 현장개요

줄말뚝을 이용한 자립식 흙막이벽의 설계법에 대한 합리성을 검증하기 위하여 경기도 안산시 고잔지구에 P아파트가 건설되는 공사현장에서 현장실험을 실시하였다(홍원표, 1998 ; 홍원표 외 3인, 1998). 본 현장은 연약지반상에 실시되고 있는 지하굴착현장으로 굴착면적은 $500\text{m} \times 250\text{m}$ 이고 굴착깊이는 지표면으로부터 6.2m 이다. 그리고, 타지역경계면에서부터 시공경계면까지의 여유폭은 약 4 ~ 16m 정도이다. 그리고 현장주변은 대부분이 나대지 상태로서 근접시공에 대한 문제점이 거의 없으며, 공사현장진입을 위한 주도로만 시공되어 있다.

그림 4.1은 굴착시공 평면도 및 지층단면 위치도를 나타낸 것이다. 본 현장의 아파트 단지조성을 위한 흙막이공은 그림에 나타낸 바와 같이 A구역과 B구역으로 구분하여 시공하였다. 먼저 A구역에서 지하굴착을 실시하고 자립식 흙막이벽을 설치하여 기초 및 지하층 공사를 완료한 후 A구역의 시공상황과 계측결과를 토대로 하여 B구역의 지하굴착공사를 실시하였다.

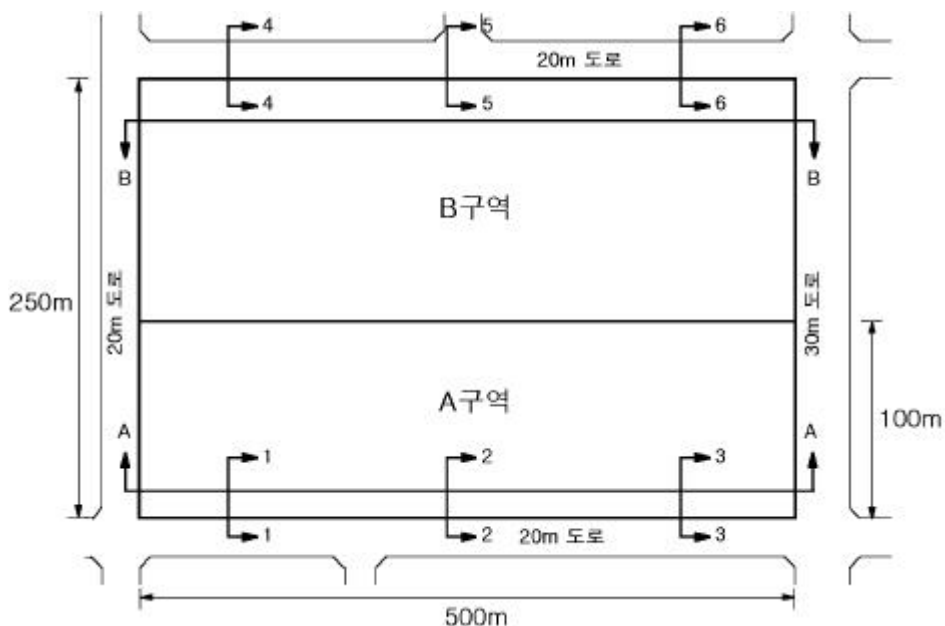


그림 4.1 굴착시공 평면도 및 지층단면 위치도

4.2 지반특성

4.2.1 지층구성

본 현장에 대한 지반조사는 2회에 걸쳐 실시되었다. 1차 지반조사는 1997년 12월에 실시되었고, 2차 지반조사는 1998년 2월에 실시되었다. 본 현장에 실시된 지반조사를 통하여 지층구성 및 지하수위 분포, 그리고 표준관입시험에 의한 N 치 등을 알 수 있다. 이를 토대로 현장지반의 지층깊이별 분포를 정리하여 보면 다음과 같다.

(1) 매립토층

최상부층에 분포하며 부지조성을 위해 매립한 층으로 암편 및 전석이 혼재되어 있다. 색깔은 황갈색을 띠며 0.7m ~ 1.6m의 두께로 분포하고 있다. N 치는 4 ~ 8이고 느슨한 상대밀도를 보이고 있다.

(2) 점토질실트층

해성점토층으로서 점토섞인 실트층이며 모래질이 중간정도 혼재되어 있다. 매립토층 아래 11.2m ~ 14.8m의 두께로 분포하며 암회색을 띠고 있다. 그리고, A구역의 중앙지점에는 1.8m ~ 2.7m 두께의 실트질모래층이 렌즈상으로 분포되어 있다. N 치는 1 ~ 32로 상부는 매우 연약하며 하부로 갈수록 굳은상태를 보이고 있다.

(3) 모래자갈층

해성퇴적층으로 자갈섞인 중립질 모래층으로 담회갈색을 띠며 점토질실트층 아래 1.8m ~ 7.1m의 두께로 분포하고 있다. A구역의 경우 비교적 두텁게 분포하고 있으며 보링의 위치에 따라 두께의 차이가 심한 편이다. N 치는 10 ~ 30으로 상대밀도는 조밀 또는 매우 조밀한 상태를 보이지만 자갈, 호박돌로 존재하는 경우가 많아 N 치의 신뢰도는 다소 떨어지며 부분적으로 N 치가 감소하는 지층 등이 포함되어 있다.

(4) 풍화토층

편마암의 풍화대로 풍화정도는 매우 심한 편이다. 모래자갈층아래 1.9m ~ 5.5m의 두께로 분포하며 황갈색 및 담갈색을 띠고 있다. N 치는 30 ~ 50이고 조밀 또는 매우 조밀한 상대밀도를 보이고 있다.

(5) 풍화암층

본 현장의 기반암으로 암종은 편마암이며 1.5m ~ 5.5m의 두께로 분포하고 있다. 중간정도의 풍화도를 보이고 있으며 절리 및 균열의 발달정도는 중간정도이고 황갈색을 띠고 있다.

4.2.2 지하수위 및 지층구성 단면

본 현장의 지반조사 결과를 토대로하여 그림 4.2 ~ 4.5에서와 같이 지층구성 단면과 지하수위 분포를 나타내었다.

먼저 지하수위 분포를 보면 A구역의 경우 GL(-)2.5 ~ 4.5m, B구역의 경우 GL(-)3.4 ~ 4.5m인 것으로 나타났다. 따라서, A구역이 다소 낮고 B구역이 다소 높게 위치하고 있으며 매립층과 실트질점토층의 상부에 위치하는 것으로 나타났다.

지층구성은 그림 4.1에 도시된 바와 같이 A구역을 횡방향으로 A-A 단면, 종방향으로 1-1, 2-2, 3-3 단면을 구분하였고, B구역을 횡방향으로 B-B 단면, 종방향으로 4-4, 5-5, 6-6 단면을 구분하였다. 이와같이 구분된 각각의 단면에 대한 지하수위와 지층구성은 그림 4.2 ~ 4.5에 나타내었다.

그림 4.2와 그림 4.3은 A구역과 B구역의 횡방향 단면인 A-A 단면과 B-B 단면을 도시한 것이다. 지층구성은 A구역의 경우 30층 고층아파트가 건설예정인 BO-1지역에서 점토질실트층의 두께가 두껍게 존재하고 있으며, BO-5지역으로 갈수록 그 두께가 얇아지는 경향이 있다. 또한, 모래자갈층은 BO-1지역에서 BO-5지역으로 갈수록 약간 두껍게 분포하고 있다. B구역의 경우 상부매립층은 1.2 ~ 1.5m 두께로 비교적 고르게 분포하며 점토질실트층 두께는 큰 차이가 없으나 BH-3지점에서 약간 두껍게 분포하고 있음을 알 수 있다. 그리고, 모래자갈층의 두께는 A구역과 반대 경향을 나타내고 있다.

한편, 그림 4.4와 4.5에서 보는 바와 같이 각 지점별 지층구성도를 살펴보면 A구역의 경우는 흙막이구조물 설치시 굴착으로 인한 지반의 활동방향으로 지층이 작은 편구배를 이루고 있다. B구역의 경우는 지반의 활동에 저항하는 방향으로 편구배를 이루고 있어 A구역과는 반대의 지층단면을 구성하고 있다.

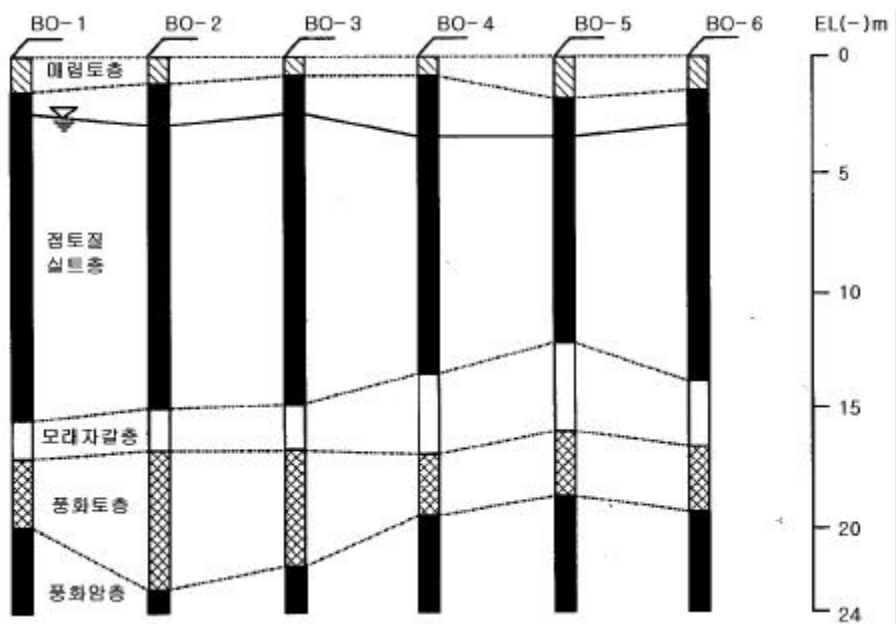


그림 4.2 A구역의 횡방향 지층구성도 (A-A단면)

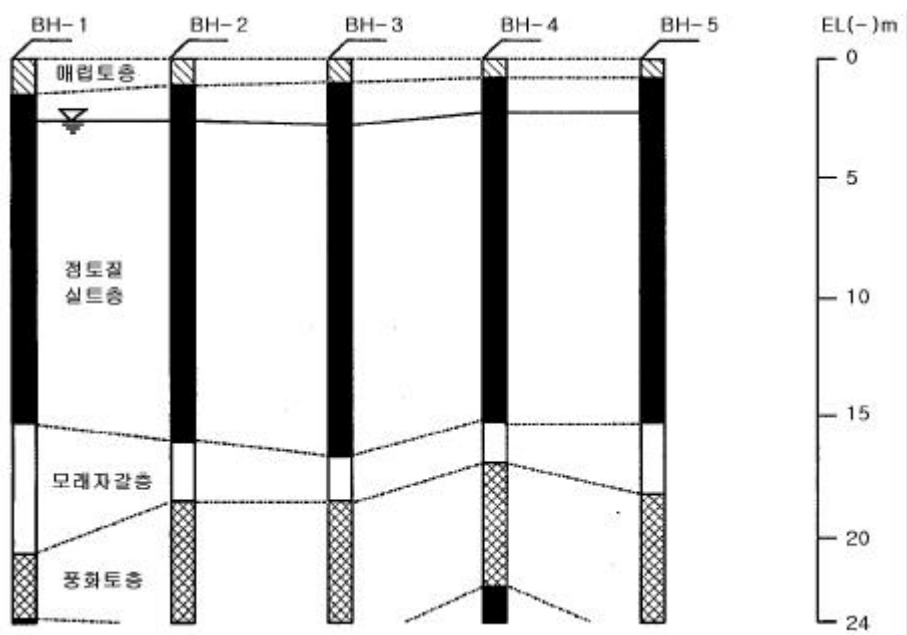


그림 4.3 B구역의 횡방향 지층구성도 (B-B단면)

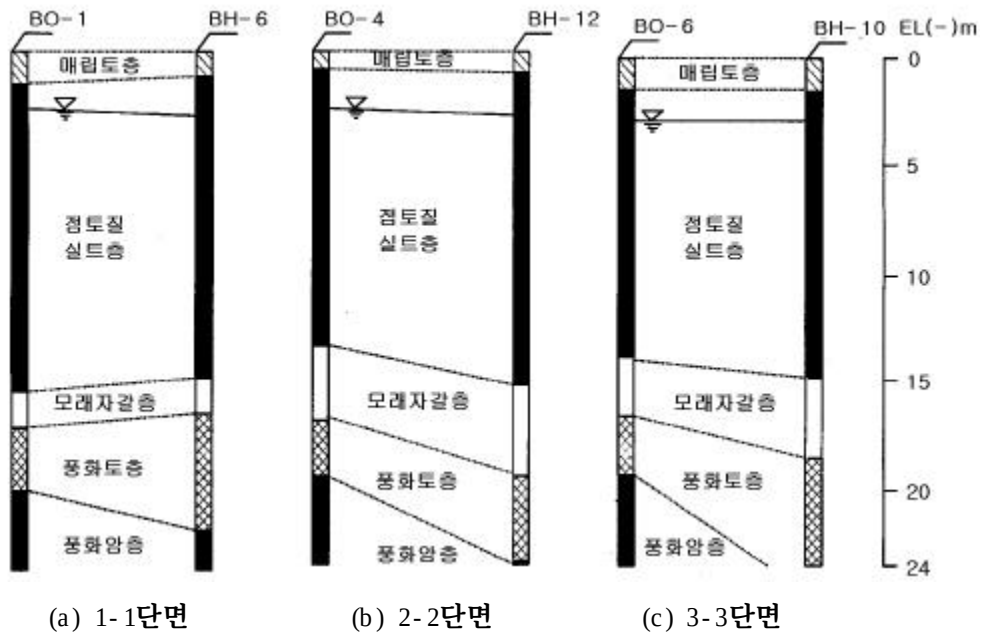


그림 4.4 A구역의 종방향 지층구성도

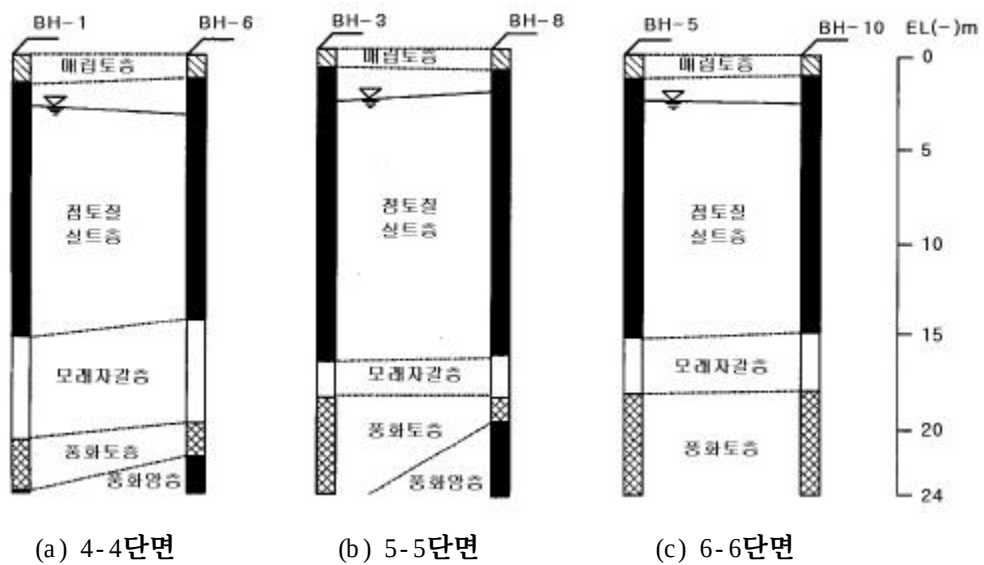


그림 4.5 B구역의 종방향 지층구성도

4.2.3 실내시험 결과

본 현장의 지반특성을 파악하고, 지하굴착시 흙막이공의 안정성 검토를 위하여 사용되는 해석모델의 정확한 토질정수를 얻기 위하여 점토질실트층의 깊이별 시료에 대한 실내시험을 실시하였다. 실내시험시 사용된 시료의 채취위치는 그림 4.1에서 A구역의 1-1, 2-2, 3-3단면 위치와 동일하게 하였다. 시료는 불교란 시료를 2.0 ~ 6.7m까지 채취하였으며 각 깊이별로 함수비시험, 비중시험, 애터버그한계 등의 물리적 특성시험과 일축압축시험, 삼축압축시험 등의 역학적 특성시험을 실시하였다. 상기와 같이 실시된 실내시험결과를 깊이별로 정리하면 표 4.1과 같이 나타낼 수 있다.

표 4.1 깊이별 실내시험결과

깊이(m)	함수비(%)	액성한계(%)	소성지수(%)	일축압축시험 (kg/cm ²)	삼축압축시험 (kg/cm ²)
2.0 ~ 2.7	56.53 ~ 59.41	42.67 ~ 45.80	22.55 ~ 28.65	0.27 ~ 0.41	-
4.0 ~ 4.7	51.91 ~ 64.67	43.60 ~ 47.60	23.37 ~ 26.85	0.33 ~ 0.46	0.32 ~ 0.38
6.0 ~ 6.7	52.25 ~ 56.45	42.40 ~ 46.45	19.70 ~ 26.55	0.50 ~ 0.64	-

표에서 보는 바와 같이 A구역에서 채취된 점토질실트는 액성한계가 42.7 ~ 47.6%이고 소성지수가 19.7 ~ 26.6%이므로 중간정도의 소성상태와 압축성을 가지는 것으로 나타났다. 그리고, 일축압축강도는 깊이가 깊어짐에 따라 지반의 강도가 증가하는 것으로 나타났다.

위의 실험결과를 토대로 해석시 사용하기 위한 토질정수는 점토질실트층의 경우 비배수전단강도 c_u 는 $2t/m^2$ 이고, 단위체적중량 γ_{sat} 는 $1.68t/m^3$ 로 결정하였다. 그리고, 모래자갈층은 내부마찰각이 34° 이고, 단위체적중량이 $1.9t/m^3$ 이며, 풍화토층은 내부마찰각이 38° 이고, 단위체적중량이 $2.0t/m^3$ 로 결정하였다.

4.3 시공단면의 선정

시공단면의 선정을 위하여 그림 4.1의 1-1단면을 대표적인 해석단면으로 선정 하였으며 시공여유폭에 따른 단면도는 그림 4.6에 보는 바와 같다.

4.3.1 무보강단면과 1열말뚝 보강단면

본 현장의 경우 여유폭의 범위가 4m 이상 20m 이하로 다양하므로 시 공여유폭의 변화에 따른 단면별 안정검토를 실시하였다. 즉, 전체여유폭의 범위를 고려하고 말뚝이 설치되지 않은 경우와 1열말뚝이 설치된 경우에 대하여 사면기울기를 그림 4.6과 같이 변화시키면서 사면의 안정성을 검토하여 보았다.

줄말뚝 설치시 가장 사면안정성이 좋은 위치에 1열의 말뚝을 배치하고 이때 시공여유폭을 고려하면 그림 4.6과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 모두 9가지 사면에 대한 사면안정검토를 실시할 수 있었으며 사면안전율은 표 4.2와 같다.

표에서 보는 바와 같이 무보강시에는 여유폭이 16m 이상인 경우 소요안전율을 만족하게 된다. 따라서, 말뚝을 설치하지 않는 경우 사면의 최고여유폭은 16m 이상이 되어야 할 것이다. 말뚝을 설치하지 않은 상태로 시공을 하는 경우, 최소한 사면의 기울기는 1:2.7 이상이 되어야만 할 것이다. 한편, 1열의 줄말뚝을 설치하는 경우, 소요안전율을 만족하는 경우의 여유폭은 6m 이상이 필요한 것으로 검토되었다.

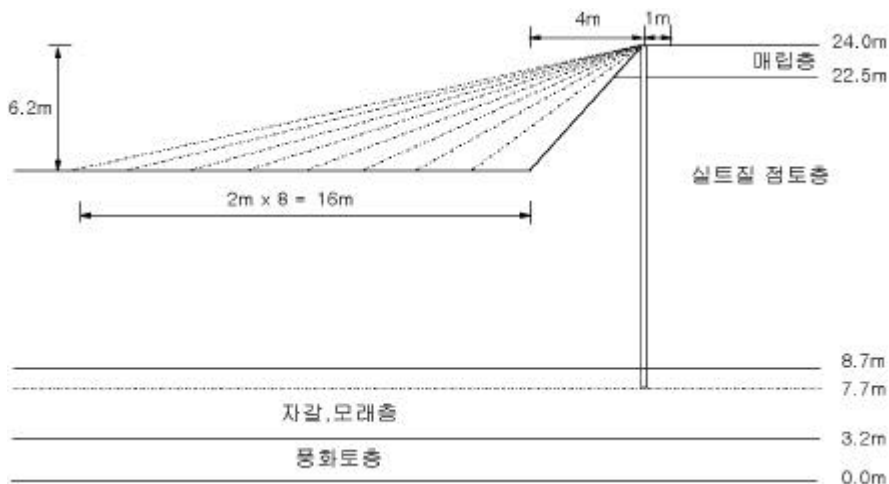


그림 4.6 사면기울기 변화에 따른 보강단면도

표 4.2 사면기울기 변화에 따른 사면안전율

여유폭 말뚝열수	4m	6m	8m	10m	12m	14m	16m	18m	20m
무보강시	0.80	0.92	0.96	0.99	1.02	1.04	1.09	1.14	1.21
1열 설치시	0.98	1.09	1.11	1.14	1.16	1.18	1.21	1.24	1.29

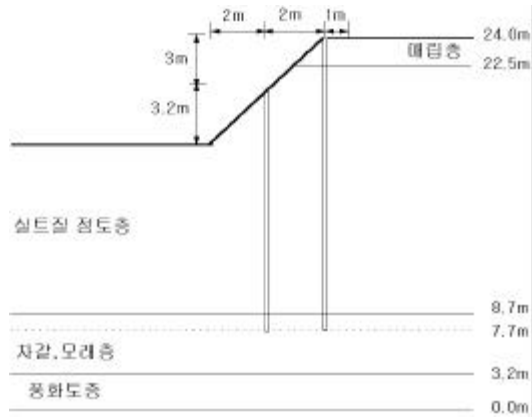
4.3.2 2열말뚝 보강단면

2열말뚝 보강시 현장에서 가장 쉽게 사용되는 재료 및 시공조건을 고려하여 말뚝열간의 간격은 2m, 각 말뚝열의 말뚝중심간격은 흙막이판을 사용하는 경우 기성재료의 크기를 고려하여 1.8m로 하였다. 그리고 합리적인 2열말뚝 보강단면을 마련하기위하여 그림 4.7에서와 같이 가장 효율이 좋은 대표단면을 제1안 제5안까지 제시하였다. 그림 4.7(a) 4.7(e)는 2열말뚝을 설치한 경우의 종단면도를 나타내고 있다.

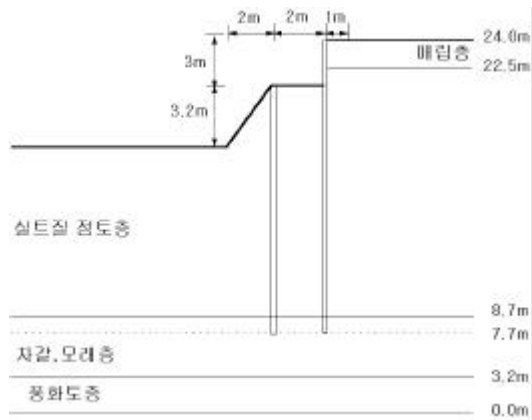
제시된 5가지 방안에 대한 사면안정을 검토한 결과와 합리적인 굴착방안을 표 4.3에 나타내었다. 표 4.3에서 보는 바와 같이 제시된 5가지 설계방안중 제2안과 제5안의 경우가 가장 합리적인 지하굴착방안으로 제시될 수 있다. 시공성을 고려하여 보면 제5안의 경우가 제2안보다 합리적인 것으로 제시될 수 있을 것이다. 반면에 제3안과 제4안은 말뚝을 설치하는 경우에도 안정성의 향상은 거의 기대되기가 힘든 것으로 나타났다.

따라서, 본 현장에 대한 지하굴착방안은 현장의 시공성을 고려한 가장 합리적인 설계방안으로 제5안이 채택됨이 바람직하다. 즉 그림 4.7(e)와 표 4.3에서 보는바와 같이 줄말뚝은 16.3m의 말뚝을 2m간격으로 2열 설치하고 1열말뚝의 GL(-)3.0m에서 굴착면까지 사면을 설치하도록 하였다.

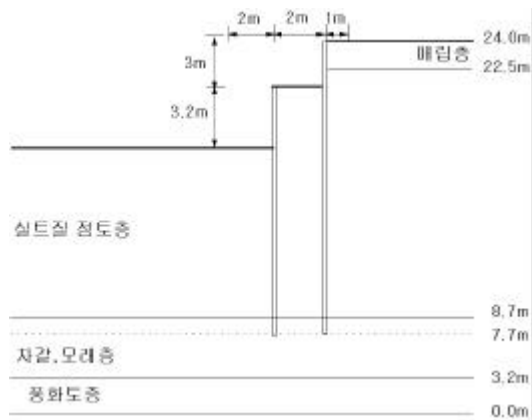
상기와 같이 제시된 제1안에서 제5안까지의 검토결과는 현장에서의 시공성과 안정성을 모두 고려한 결과이다. 다만 줄말뚝을 설치하는 경우 그림 4.7에서 보는 바와 같이 말뚝의 수평지지력을 확보하기 위하여 말뚝의 선단은 모래자갈층에 1m이상 관입되는 것으로 가정된 것이며 두부는 띠장으로 서로 연결되어 일체로 거동이 되도록 검토한 것이다.



(a) 제1안

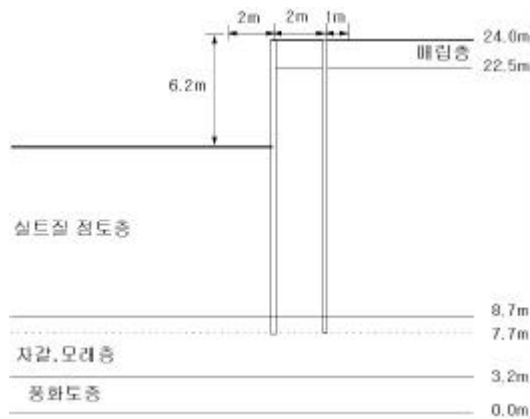


(b) 제2안

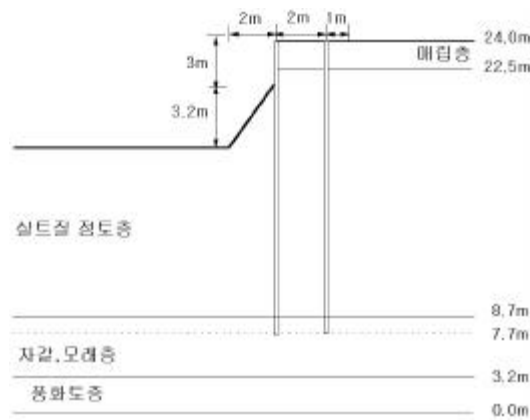


(c) 제3안

그림 4.7 선정된 2열말뚝보강 검토단면도



(d) 제4안



(e) 제5안

그림 4.7 선정된 2열말뚝보강 검토단면도(계속)

표 4.3 2열말뚝 보강단면의 사면안전율

	제1안	제2안	제3안	제4안	제5안
사면 안전율	1.14	1.24	0.86	0.90	1.18
말뚝열수	2열	2열	2열	2열	2열
말뚝치수	H-300×300×10×15	H-300×300×10×15	H-300×300×10×15	H-300×300×10×15	H-300×300×10×15
말뚝길이	1열 : 13.8m 2열 : 16.3m	1열 : 13.8m 2열 : 16.3m	1열 : 13.8m 2열 : 16.3m	1열 : 16.3m 2열 : 16.3m	1열 : 16.3m 2열 : 16.3m
시공순서	1) 2열말뚝두부에서 굴착면하부까지 사면설치 (그림 4.7(a)참조)	1) 2열말뚝에서 1열말뚝두부까지 3m는 연직으로 굴착후 흙막이판으로 보강 2) 1열말뚝에서 2열말뚝까지는 수평하게 시공 3) 1열말뚝두부에서 굴착면하부까지 사면설치 (그림 4.7(b)참조)	1) 제2안의 1),2)는 동일 2) 1열말뚝두부에서 굴착면까지 1)과 동일하게 시공 (그림 4.7(c)참조)	1) 1열말뚝과 2열말뚝을 먼저시공 2) 1열말뚝두부에서 굴착면까지 연직굴착후 흙막이판 설치 (그림 4.7(d)참조)	1) 제4안의 1)과 동일 2) 1열말뚝두부에서 GL(-)3m까지 굴착후 흙막이판 설치 3) 1열말뚝 GL(-)3m에서 굴착면까지 사면설치 (그림 4.7(e)참조)

4.3.3 시공단면 선정

본 현장은 위치에 따라서 건축물 시공부지와 사면정상부 사이에 시공가능한 여유폭이 차이가 있으므로 여러가지 굴착단면의 설계와 시공이 가능하였다. 따라서, 시공여유폭을 고려하여 말뚝을 보강하지 않은 굴착구간, 1열말뚝으로 보강한 굴착구간, 그리고 2열말뚝을 보강한 굴착구간을 구분하여 이들 구간에서 각각 현장실험을 수행하였으며 각 구간별 위치는 그림 4.8에 도시하였다. 제안된 설계법에 따라 각 구간별 보강대책을 마련하였으며, 현장의 시공여유폭을 고려한 굴착면의 기울기(L_V/L_H)에 대하여 각 구간별 사면안전율을 검토하면 표 4.4와 같으며, 이때 굴착단면도는 그림 4.9에서 보는 바와 같다.

표 4.4는 본 설계법에 의해 제안된 굴착면의 기울기와 그에 따른 사면안전율, 그리고 흙막이말뚝보강시 사면안전율을 나타낸 것이다. 시공경계면까지의 여유폭이 약 16m인 경우 굴착면의 기울기를 1:2.7로 하여 사면보강을 실시하지 않았으며, 여유폭이 약 6m인 경우 굴착면의 기울기를 1:1로 하여 1열의 흙막이말뚝 보강을 실시하였다. 그리고, 여유폭이 약 4m인 경우 굴착면의 기울기를 1:0.7로 하여 2열의 흙막이말뚝 보강을 실시하였다.

표 4.4 설계된 굴착면의 사면안전율

구 분	무보강	1열말뚝 보강		2열말뚝 보강	
굴착면기울기 (L_V/L_H)	1 : 2.7 (0.38)	1 : 1 (1.0)		1 : 0.7 (1.42)	
사면안전율	1.1	보강전	보강후		보강전
			간격비 0.83	간격비 0.67	
		0.9	1.1	1.3	0.7
					1.2

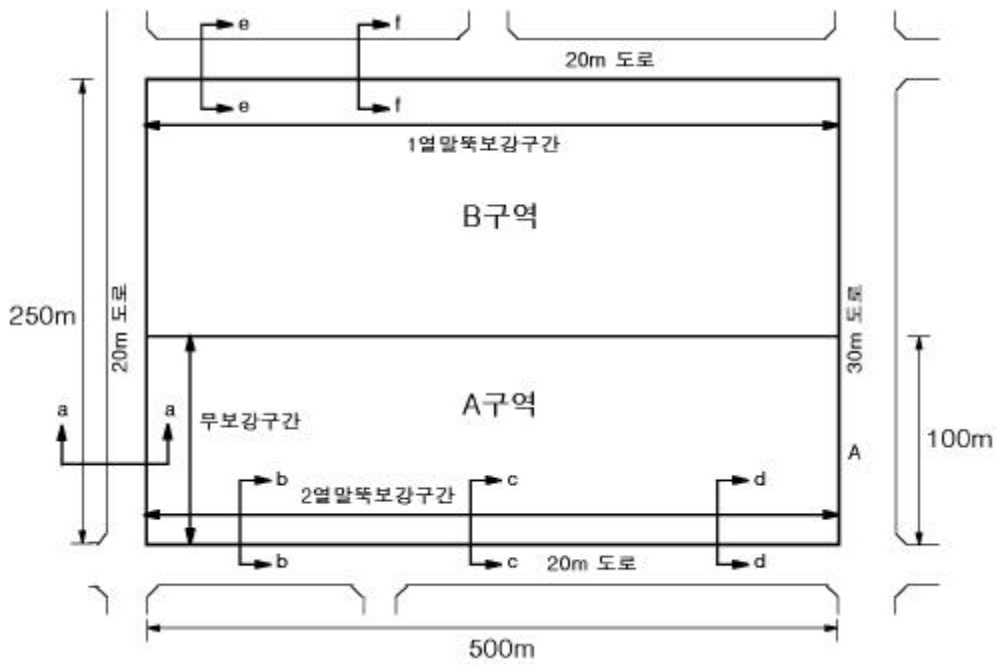
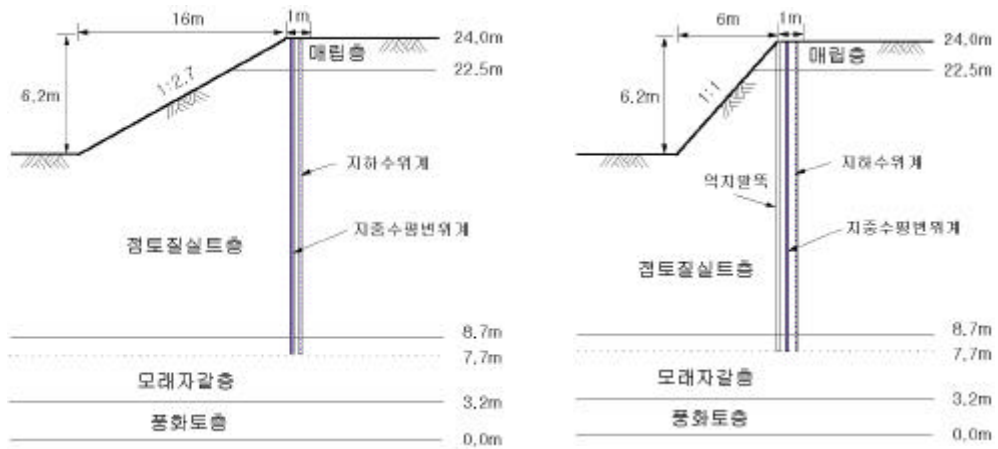


그림 4.8 각 구간별 현장실험의 위치

4.4 현장계측

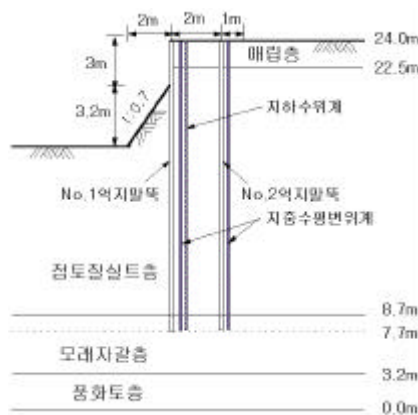
4.4.1 계측기 설치

본 현장에 설치된 흙막이말뚝과 배면지반의 거동을 파악하기 위하여 각 구간별 보강형태에 따라 적절한 계측장비를 활용하였으며, 시공중에 주기적으로 현장계측을 실시하였다. 즉, 굴착면에 보강된 흙막이말뚝에는 경사계를 설치하였고, 배면지반에는 경사계와 지하수위계를 설치하였으며 설치단면도는 그림 4.9에서 보는 바와 같이 무보강 굴착사면, 1열말뚝보강 굴착사면, 그리고 2열말뚝보강 굴착사면으로 구분하여 각각 도시하였다.



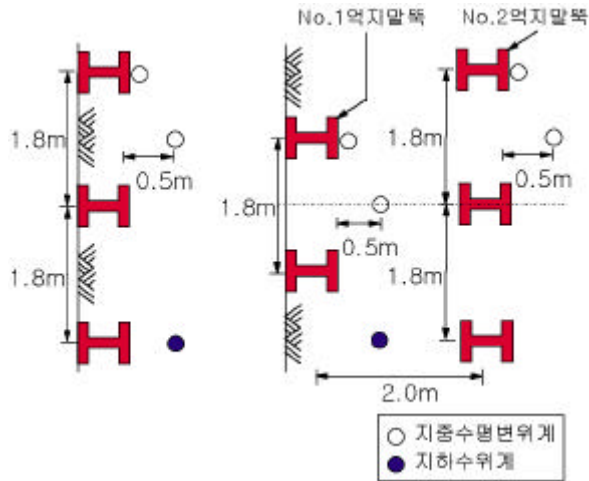
(a) 무보강사면

(b) 1열말뚝보강사면



(c) 2열말뚝보강사면

그림 4.9 보강단면도 및 계측기설치단면도



(a) 1열말뚝보강구간 (b) 2열말뚝보강구간

그림 4.10 계측기설치평면도

그림 4.10은 1열말뚝과 2열말뚝 보강구간에서의 계측기설치 평면도를 도시한 것이다. 흠막이말뚝의 거동을 관찰하기 위해서 흠막이말뚝에 밀착시켜 경사계를 설치하였고, 배면지반의 거동과 지하수위를 관찰하기 위해서 말뚝으로부터 0.5m 떨어진 소성영역지반내에 각각 경사계와 지하수위계를 설치하였다. 그리고, 경사계와 지하수위계는 지표면으로부터 약 15-17m 깊이까지 설치하였다.

4.4.2 시공단계

현장에서 계측된 결과를 분석하기 위해서는 모든 시공단계와 현장상황을 조사하는 것이 필수적이다. 시공단계에 따른 역지말뚝과 사면지반의 변형거동을 분석하기 위하여 각 구간별로 시공과정을 구분하였다.

먼저, 무보강 구간은 굴착면의 기울기를 1:2.7로 하여 제1단계에서는 GL(-) 3m까지 굴착, 제2단계에서는 GL(-) 6.2m까지 굴착을 실시하고, 제3단계에서는 굴착면정지작업을 실시하였다.

1열말뚝 보강구간의 제1단계에서는 굴착전 흠막이말뚝을 설치하고 말뚝상부를 띠장으로 연결한 후 굴착면의 기울기를 1:1로 하여 GL(-) 3m까지 굴착을 실시하였다. 그리고, 제2단계에서는 GL(-) 6.2m까지 굴착을 실시하고 제3단계에서 굴착면정지작업을 실시하였다.

또한, 2열말뚝 보강구간은 두단면에서 서로 다른 시공순서를 나타내고 있다. 먼저 c-c단면의 시공순서는 제1단계로 두열의 억지말뚝을 설치하고 No.1열말뚝에만 띠장을 설치하고 GL(-)3m까지 직립으로 굴착을 실시하였다. 그 다음 제2단계에서는 GL(-)6.2m까지 1:0.7 기울기의 사면을 두어 굴착을 실시하였다. 이때 제2단계 굴착완료후 억지말뚝과 사면지반의 수평변위가 급증하여 No.2열말뚝에도 띠장을 설치하였고 No.1열말뚝과 No.2열말뚝의 두부를 강제로 트러스모양이 되게 서로 결합시켰다. 이와 같은 결합시공작업 직후를 제3단계로 구분하고, 결합시공후 6개월동안을 제4단계로 구분하였다. 그러나, b-b단면의 시공순서는 제1단계에서 No.1말뚝열과 No.2말뚝열에 띠장을 설치하고 두열의 말뚝을 서로 결합을 실시한 후 GL(-)3m까지 직립으로 굴착을 실시하였다. 제2단계에서 GL(-)6.2m까지 1:0.7 기울기의 사면을 두어 굴착을 실시하였다. 굴착완료후 1개월동안을 3단계로 구분하였으며, 굴착완료후 6개월동안을 4단계로 구분하였다.