선단고결 쇄석 투입 공법에 의한 대심도 지하연속벽의 설계 및 시공

Design and Construction of very deep diaphragm wall by the method of end concrete hardening with crushed stone pouring

황학[1], Hak Hwang, 이완재[2], Wan-Jae Lee, 추석연[3], Seok-Yeon Choo, 조경연[4], Kyung-Yeon Cho, 김유석[5], Yu-Seok Kim

[1)~5)] LG건설 기술연구소 Institute of Construction Technology, LG Construction Co., Ltd

개요(SYNOPSIS) : In this paper, "Very deep Diaphragm wall by the method of end concrete hardening with crushed stone pouring method" was discussed, focusing on basic items of design and construction. First, We discussed analysis method in consideration of circular effect, and introduced horizontal and vertical directional analysis procedure and result of the slurry wall. We could control the vertical deviation under 1/1000 through the strict construction management based on reasonable and precise criteria. Also, It can be judged the bentonite control was done without problems in that ground soil collapse didn't occur and underwater concrete strength exceeded design strength.

주요어(Key words) : Diaphragm wall, Circular analysis, End concrete hardening, Crushed stone pouring method, Vertical deviation, Bentonite control

1. 서론

당사에서는 LPG지하저장을 위한 대규모 Shaft공사를 인공섬에 지하연속벽 공법으로 시공중에 있다. 지하연속벽공사의 경우 엘레멘트간의 이음부시공방식에 따라 다양한 구조 및 시공법이 개발되어 국내에서는 콘크리트 커팅공법이 널리 수행되고 있다. 그러나 당 현장은 지하구조물이 인공섬에 시공되는 관계로 해수침투에 따른 위험부담이 크며 대심도 굴착에 따른 연직도 및 콘크리트 커팅시의 편심발생 등의 문제로 인해 이음부시공이 용이하고 차수성도 용이한 선단고결쇄석투입공법(접합강판이음공법)을 국내 최초로 채택하였다. 본 논문은 상기 공법을 중심으로 설계에 대한 기본개념과 시공과 관련된 제반 결과를 소개하고자 한다.

2. 사업의 개요 및 공사 특성

본 공사는 지하 암반공동에 Propane, Butane을 저장하는 에너지 지하비축사업으로 표 1과 같이 지하연속벽 심도는 현재까지 국내연속벽 공사중 최장 심도이다.

3. 지형 및 지질특성

본 지역은 해상 매립공사로 축조된 인공섬으로 기반암인 선캠브리아기의 편마암류와 화강암 및 백악기의 맥암류를 제4기 해성퇴적층이 부정합으로 피복하고 있다. 해성 퇴적층은 매립층(11m) 하부에 약 40m~50m 두께로 상당히 두껍게 발달하고 있다.

표 1. Shaft 공사 내역 (지하연속벽공사)

Shaft	길이	외경	연속벽두께	Lining두께	내경
Construction	62m	15.5m	1.2m	1.0m	11.5m
Propane	62m	9.9m	1.0m	0.8m	6.3m
Butane	71m	9.9m	1.0m	0.8m	6.3m

4. 공법선정

1) Shaft 공법 검토

Shaft 시공공법을 비교·검토한 결과, 지하연속벽 공법은 대심도 시공실적이 국내에서 전무하다는 점과 연직도 문제 및 해수문제, 매립층 여굴등이 문제점으로 대두되었으나, 구조적 안정성 및 굴착능력, 차수성, 공기면등에서 상대적으로 우수한 지하연속벽공법을 채택하였다.

2) 지하연속벽 공법

표 2에는 연속벽 공법중 국내 시공실적이 풍부한 콘크리트커팅 이음공법과 접합강판공법을 비교·검토하였다. 콘크리트커팅공법은 국내 시공실적이 풍부하지만 Shaft 내경이 작은관계로 콘크리트 굴삭시 편심에 의한 연직성 확보가 어렵고, 이에 따른 차수성 확보에 어려움이 있을 것으로 판단되어 당 현장에서는 접합강판이음공법을 적용하였다.

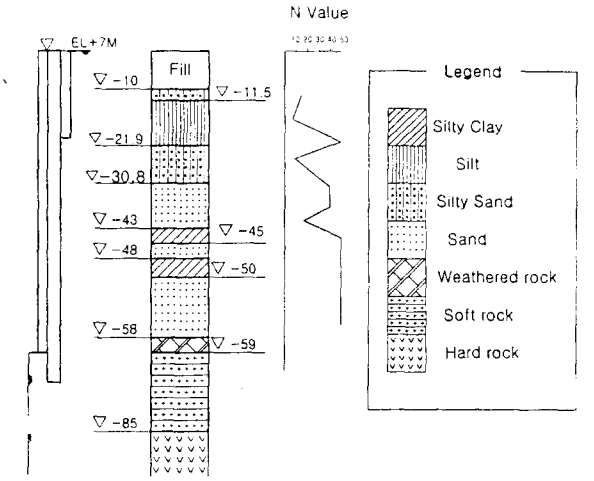
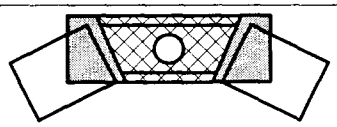
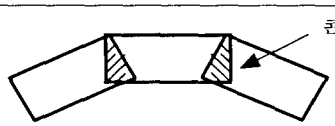


그림 1. 지층구성도 (Construction Shaft)

표 2. 접합강판공법(선단고결 쇄석 투입 공법)과 콘크리트커팅공법의 장단점

비교항목 \ 공법명	접합강판이음	콘크리트커팅이음
시공개요도		
장 점	· 콘크리트커팅이 없어 시공정밀도 확보가 용이 · 대심도 대단면 시공 가능, 접합면 차수성 양호 · 콘크리트커팅이 없어 공기 단축이 용이	· 대심도 대단면 시공이 가능하다. · 접합면의 차수성이 좋다. · 시공이 용이하다.
단 점	· 철근망의 하중증가 · 강판에 흡착된 슬라임의 청소가 요구된다. · 철근망 제작이 상대적으로 어렵다.	· 원형단면 시공시 콘크리트 커팅으로 인하여 굴삭기에 편심이 발생하여 시공정밀도의 확보가 어렵다. · 콘크리트강도가 큰 경우 공기지연의 원인이 된다.

5. 지하연속벽 설계

1) 설계조건의 검토

(1) 지질 및 지하수

지층구성은 그림 1과 같으며 지하수위는 매립지인점 및 안전율 증대 개념을 고려하여 GL±0m로 하였다.

(2) 토질정수

각 지층에 대한 토질정수를 표 3에 정리하였다.

(3) 설계하중

① 등분포하중 : Shaft 수평단면이 원형에 가까운 형상으로 시공될 경우 연속벽 수평변위량은 매우 작을 것으로 사료되므로 토압은 정지토압이 작

표 3. 지반물성치

지반	N	C (tf/m^2)	Φ	γ (tf/m^3)	K (tf/m^3)
Fill	-	0	28	1.9	2500
Silty Sand	15	0.5	25	1.7	2000
Silt	10	2.5	20	1.8	2000
Silty Clay	50	4.0	25	2.1	3000
Sand	50	4.0	25	2.1	7100
Weathered Rock	-	5.0	30	2.3	8000

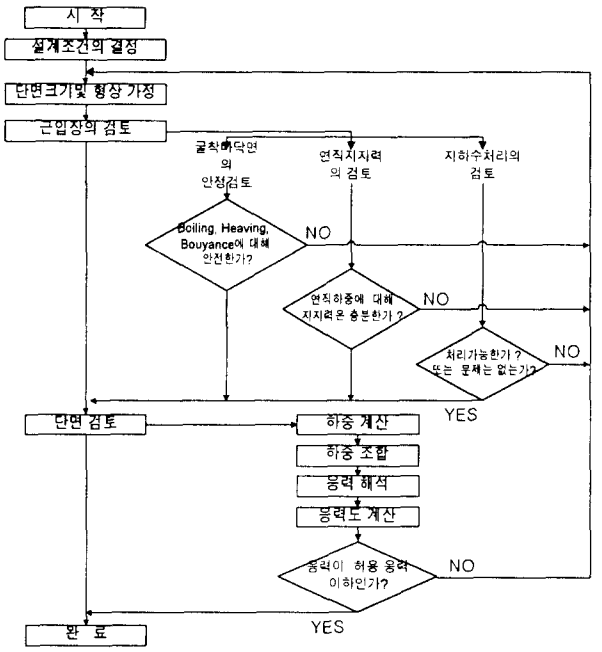


그림 2. 지하연속벽 설계 Flow

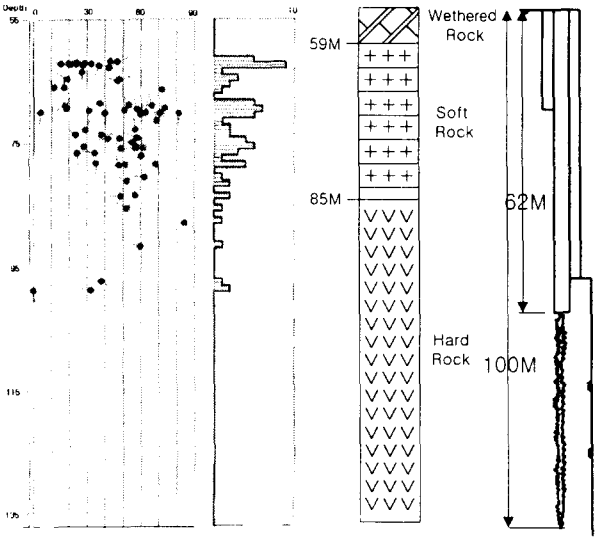


그림 3. 텔리뷰어 측정결과 및 그라우팅 개념도

용한다고 가정했으며,상재하중은 1.5tf/m^{2}으로 가정했다.

② 증가편토압 : 당 현장에서는 토압의 10%의 증가편토압을 양방향하중으로 작용시켰다.

2) 단면 형상 및 크기의 결정

기본적인 내공 원형단면의 반경은 Construction shaft를 5.75m로 Operation Shaft를 3.15m로 각각 계획하였다. 한편, 동일 단면적에 대한 Shaft 형상 및 크기에 따른 단면적 변화의 한 예를 그림 4에 나타내었다.

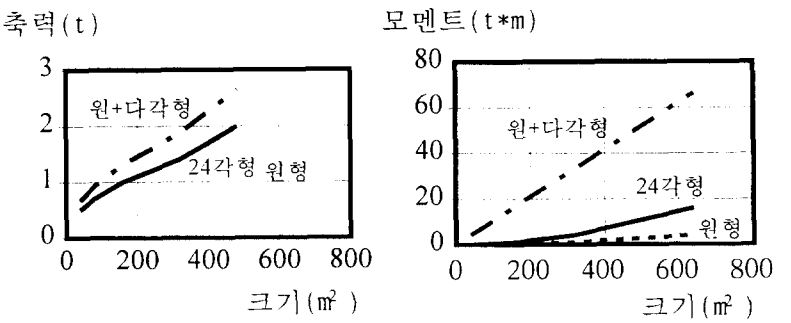


그림 4. 단면 형상에 따른 단면력의 변화 (각단면의 최대치)
(축력과 모멘트를 160m^{2}으로 정규화시킴)

3) 근입장의 검토

일반적으로 근입장을 검토하는데는 Boiling, heaving, 선단지지력 등에 대해 검토한다. 단 당 공사는 연속벽 하부 암반을 NATM공법에 의해 통과하므로 연속벽 선단이 연암 3m를 관입시켜 지지력을 확보토록하였으며, 지하수에 의해 발생되는 Boling, Heaving은 경암층 10m이상 Micro cement로 그라우팅을 실시하여 굴착중 지하수의 유입을 적극 억제시키는 방법으로 설계하였다. (연속벽 하단에서 30m~40m)

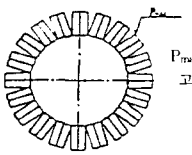
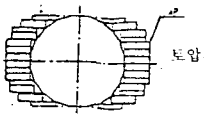
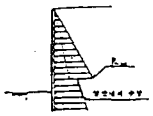
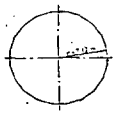
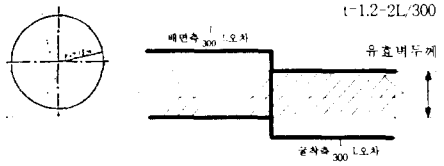
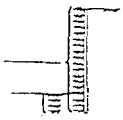
4) 단면력 검토 Flow

설계는 크게 수평방향 및 연직방향으로 나누어 수행하였으며 수평방향은 다각형 프레임해석을, 연직방향은 시공과정과 지반의 탄소성특성을 고려한 해석을 수행하였다. 표 4에는 단면력 검토방법 및 검토모델에 대해 정리하였다.

5) 검토 결과

구조검토 결과를 표 5에 나타내었다.

표 4. 단면력 검토방법 및 모델

검토방법	수평방향	연직방향
하중	 P_{max}를 등분포하중으로 고려  증가편토압 토압의 10%를 증가하여 토압을 고려	
검토모델	지중벽의 다각형 배치를 고려한 모델 다각형 Frame 벽 두께 : t=1.2m 	지중벽의 시공오차를 고려한 모델 원형 Frame 벽두께 :유효두께 t=1.2-2L/300 	지중벽과 지반의 관계를 고려한 모델 지중벽 : 보,원형 Ring의 성질을 고려 Inner Lining : Ring Panel 지반 : 탄소성모델 

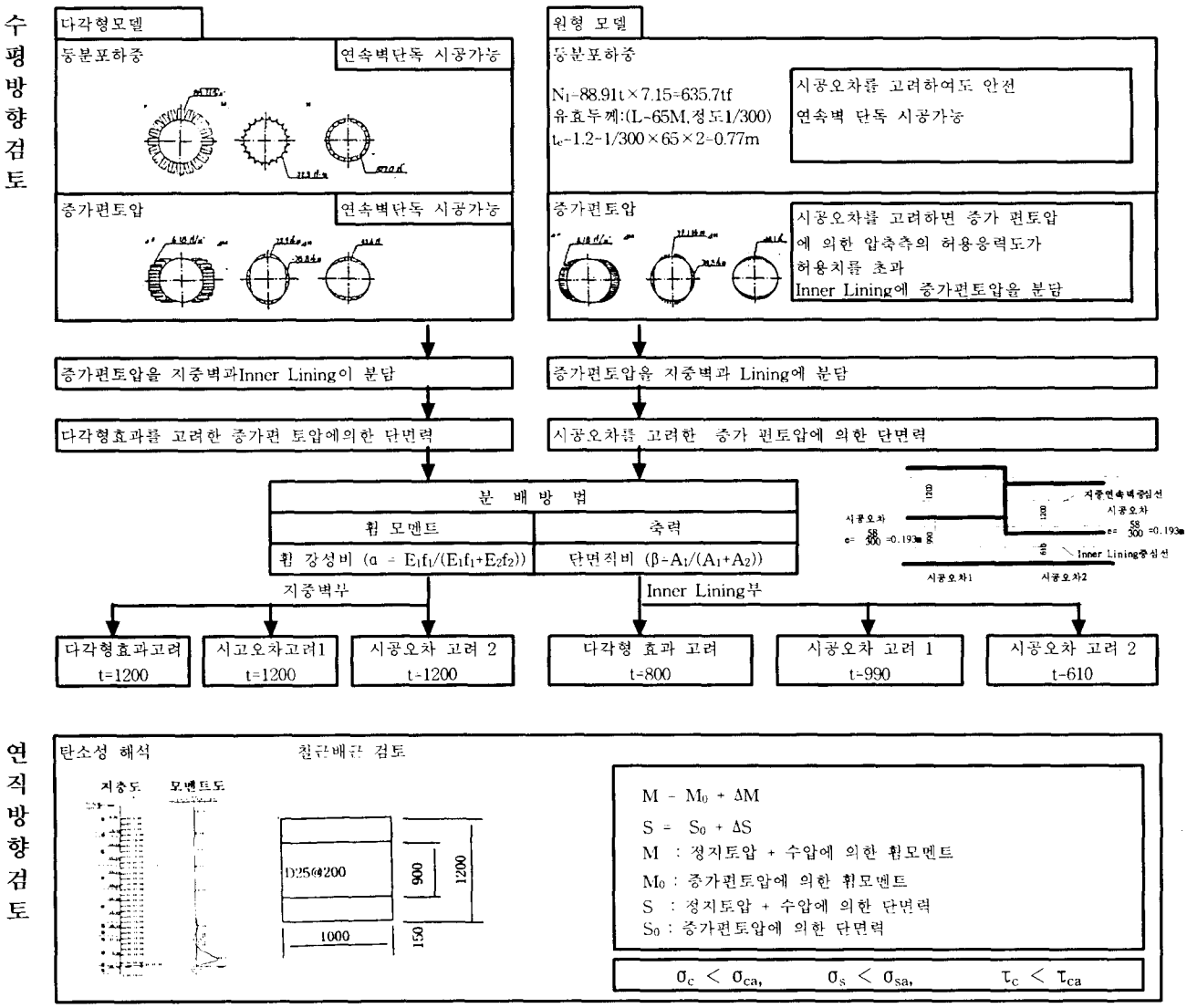


그림 5. 구조검토 결과

6. 지하연속벽 시공

6.1 시공순서

그림 6는 당현장에서 수행한 주요시공순서를 나타내었다.

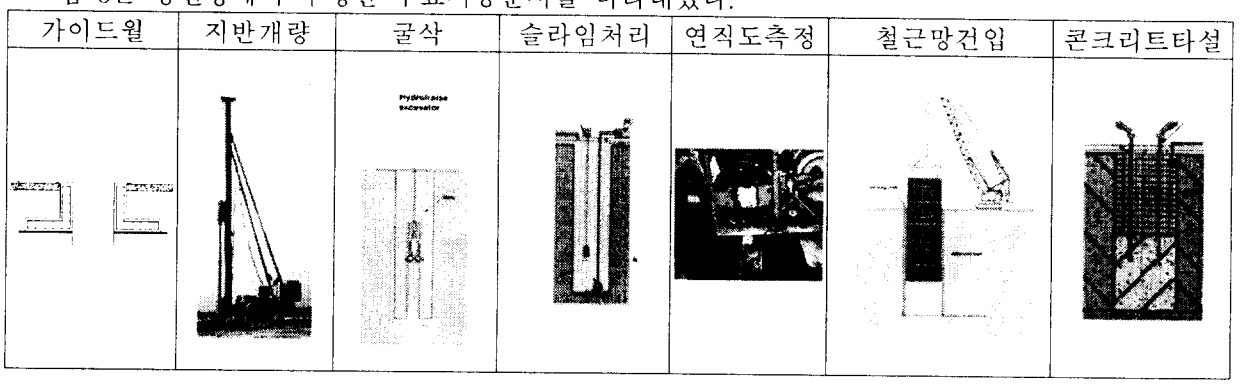


그림 6. 지하연속벽 시공순서

6.2 장비선정 및 특성

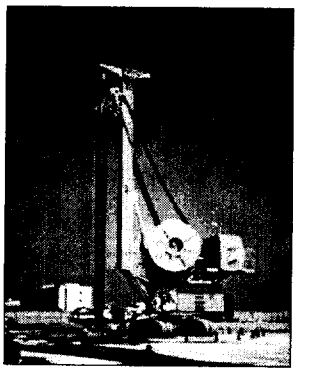


그림 7. BC30 굴삭기

연속벽 굴삭 장비 선정에 있어서는 당 공사가 대심도 굴삭인 점과 연암 3m를 굴착해야하므로 효율적인 연암 굴착 가능성과 벽 두께 등을 고려하여 수평다축회전커터 방식의 독일 바우어사의 BC30(HDS80)을 국내 최초로 도입하였다.

6.3 구벽 안정화 대책

1) 입력조건

(1) 지하수위 GL ± 0.0m　　(2) 굴삭폭(후행판넬 굴삭시) 9.0m

(3) 안정액 비중 1.02tf/m^3　　(4) 상재하중 : (1/2)×200/(0.9×9.0)=13tf/m^2

2) 지반개량

(1) 후행 엘레멘트 : 지반개량의 근입 깊이는 18m로 한다.

(2) 후행과 선행의 접촉부 : 지반개량 깊이를 11m로부터 2m관입시킨 13m로한다.

(3) 개량체의 일축압축강도 q_u = 10 kgf/cm^2 로 가정

3) 구벽 안정 계산 이론

구벽안정성 검토는 다음식에 따르는 안전율 Fs에 의해 판단한다.

$$F_s = \{P_w \cdot \cos(\alpha-\varphi)+C_1 \cdot \sin(\alpha-\varphi)+C_2 \cdot \cos(\varphi)\} / \{(WP_s) \cdot \sin(\alpha-\varphi)\}$$

여기서, F_s : 안전율, P_w : 수압 (안정액압에서 지하수압을 뺀 것)

C_1, C_2 : 측면 및 저면의 점착력, P_s : 상재하중

W : 토괴중량 (지하수에 의한 부력을 뺀것)

φ : 저면 평균내부마찰각, α : 저면 경사각

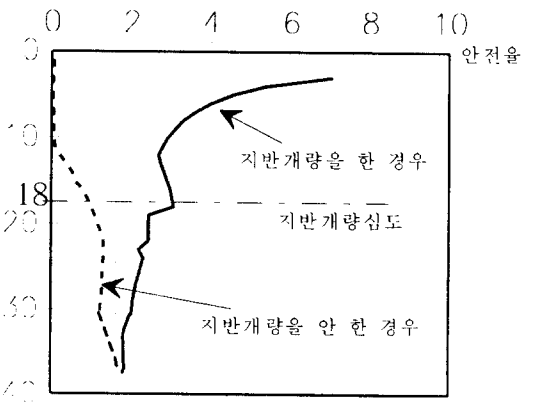


그림 8. 후행엘레멘트 계산결과

4) 계산결과

지반개량을 안할 경우, GL-35m까지 안전율 2.0 이하로 된 결과로 되었다. 지반개량을 행하면 전구간에 걸쳐 안전율은 2.0이상으로 되어서 구벽 안정성이 확보된다.

6.4 굴착공사 및 굴삭관리

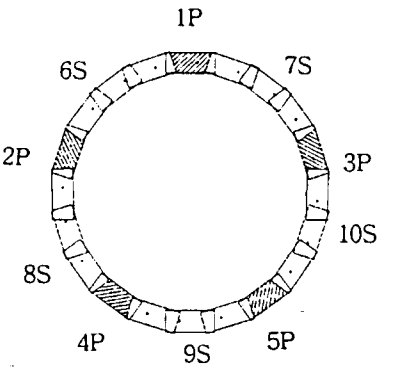


그림 9. 지하연속벽 평면도(Construction)

굴삭은 굴착관리기준을 토대로 먼저 선행 엘레멘트를 먼저 굴착하고 후행 엘레멘트를 굴착하는 순으로 수행하였다. 선행은 1Gut, 후행은 3Gut로 구성되어 있으며, 후행 엘레멘트의 굴삭순서는 슬라임 처리를 고려하여 중앙, 좌측, 우측의 순으로 수행하였다.

굴삭 정밀도관리는 벽두께, 심도, 연직도의 3개 항목에 대해 수행하였다.

굴착심도는 그림 10에 도시한바와 같이 설계심도까지 굴착하는 것을 원칙으로 하였으나 (선행 엘레멘트는 설계심도가 후행보다 0.5m 가 깊다), 시공중 설계심도에서도 연암3m가 확보되지 않을 경우에는 굴삭속도(30cm/h) 및 슬라임을 관찰하여 결정하였다.

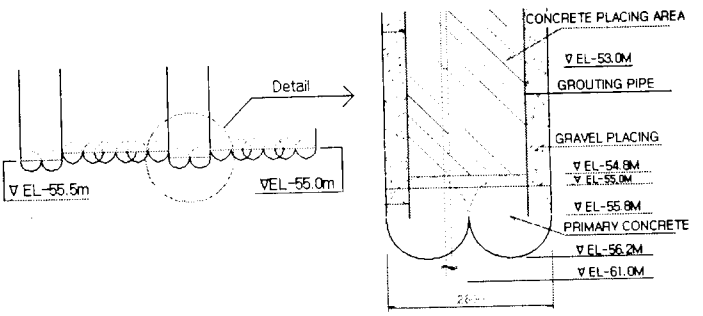


그림 10. 선행 및 후행 엘레멘트의 설계심도

당 공사에서는 설계 연직도를 대심도 굴삭에 따른 안정성확보 및 경제성, 철근망 건입 등의 이유로부터 1/1000(62m 지점에서 약 12cm)를 목표로 관리하였다. 연직도관리 및 시공에의 반영은 다음 그림과 같은 Flow에 의해 수행하였으며, 보다 정확한 연직도 관리를 위해 초음파측정기(KODEN DM684)를 사용하였다. 초음파 측정기에 의한 측정 위치 및 방법, 측정결과의 예를 다음그림에 도시하였다.

6.5 안정액 관리

안정액 배합에는 종래의 유사현장의 시공실적과 현장시험결과를 토대로 토사중의 염화이온, SCW 굴삭 및 콘크리트 타설시의 Ca^{2+} 이온 증가를 고려하여 표 5과 같이 결정하였으며, 관리치는 신액과 굴삭액, 양액으로 구분하여 관리하였다. 또한 콘크리트 타설시는 양액치환 후 사용하였다.

표 5. 물 1㎥당 안정액 (신액)

벤토나이트(GTC 4)	20kg
폴리머(Aqualon SC50)	0.7kg
분산제(Bentocryl 86)	0.5kg

표 6에는 굴삭시 측정한 안정액 시험결과의 예를 나타내었다. 본 결과는 관리기준치를 모두 만족하고 있다.

표 6. 굴착시 안정액 측정결과의 예

시험항목 / 경과 시간		점도(sec)	비중	여수량(㎖)	pH	케익두께(mm)	사분율(%)
		21~32	1.05~1.20	40㎖이하	7.5~10.5	10mm이하	15%이하
97/6/21		31.2	1.10	25.0	8.8	1	0.5
97/6/22		31.8	1.10	27.0	8.0	1	0.5
97/6/23		30.8	1.08	30.6	9.8	1	1.0
97/6/24		28.6	1.09	30.4	9.5	4	0.8
관리기준	굴착액	21~32	1.05~1.20	< 40	7.5~10.5	< 10	< 5
	양액	21~32	1.05~1.13	< 40	7.5~10.5	< 10	< 1

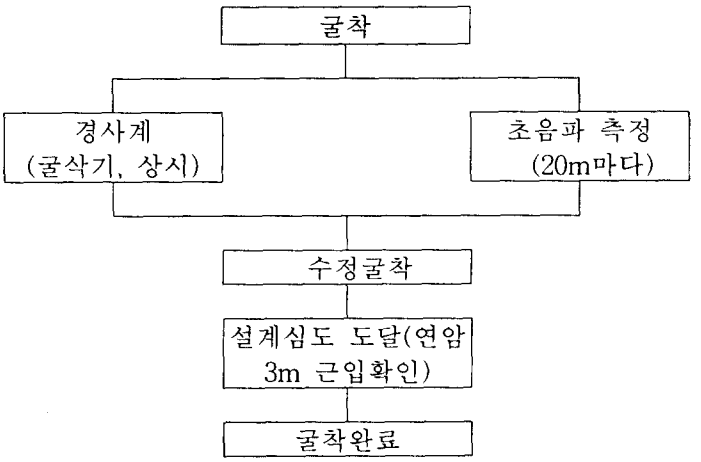
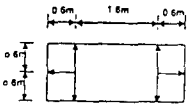
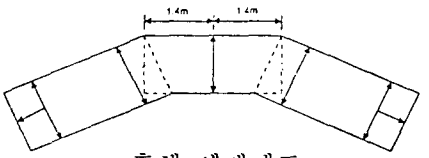


그림 11. 연직도 관리 Flow



선행 엘레멘트



후행 엘레멘트

그림 12. 초음파 측정 위치

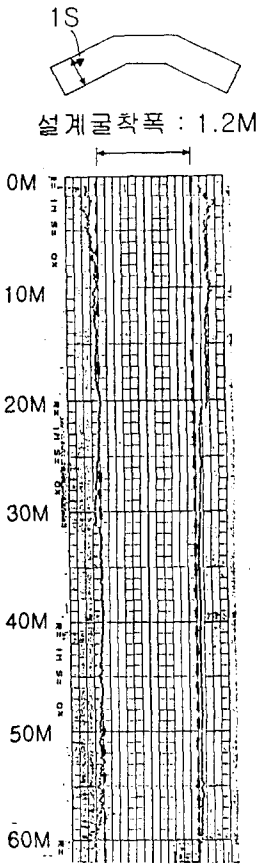


그림 13. 초음파 측정 결과의 예

6.6 철근망 제작 및 건입

1) 선행철근망

선행철근망의 기본 구조는 그림에서 보는 바와 같이 좌우측면에 12mm두께의 Plate를 설치하여 강판의 내부에는 콘크리트를 타설하고 외부에는 쇄석을 투입하도록 되어있다. 콘크리트 타설시 측압에 의한 강판의 변형을 방지하도록 프레임을 설치하고 강판의 상하부는 와이어메쉬 및 Sheet를 사용하여 콘크리트 타설시 콘크리트가 외부로 새어나가는 것을 방지하였다.

2) 후행철근망

후행철근망은 현장에서 제작하였으며, 후행철근망은 선행철근망과는 달리 강판이 사용되지 않았기 때문에 철근망 변형을 최소한으로 억제하기 위하여 주크레인과 보조크레인을 사용하여 양중하였다.

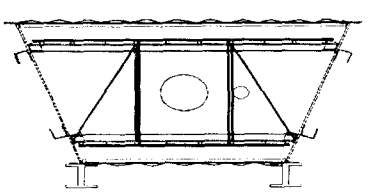


그림 14. 선행 철근망

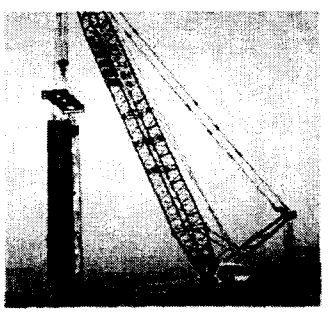


그림 15. 선행철근망 건입

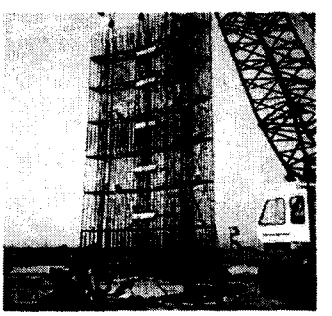


그림 16. 후행철근망 건입

6.7 수중콘크리트 타설

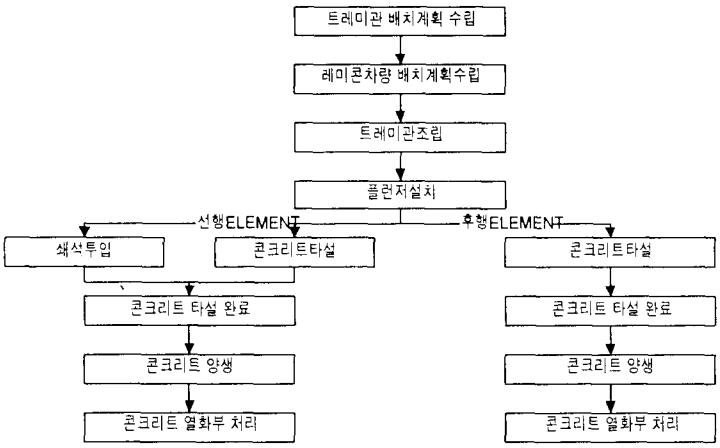


그림 17. 콘크리트 타설 Flow

콘크리트 배합비는 표 7과 같이 콘크리트 타설은 직경 25cm, 길이 2m의 트레미 파이프를 사용하였다. 선행 엘레멘트의 경우 선행 철근망의 고정의 목적으로 바닥콘크리트를 먼저 타설하고 시간이 충분히 경과된 후(약 12시간) 슬라임을 처리한 후 6m/h로 콘크리트를 타설하였다. 또한 트레미 파이프는 콘크리트 하부 1.5m정도 위치토록 하였다. 콘크리트 타설시에는 철근망 외부 좌우측에 직경 2~3cm의 쇄석을 쇄석용관을 통하여 투입하여 철근망을 보호하였다. 쇄석의 최상단은 타설 콘크리트 상부가 쇄석고에 비해 1m정도 상부에 위치하도록 관리하였다.

후행 엘레멘트의 경우에는 일반적인 지하연속벽공사와 유사하고, 콘크리트 타설은 각 Gut 중앙에 3개의 트레미 파이프를 사용하였다. 타설속도는 10m/h를 기준으로 관리하였다. 콘크리트 타설후 28일 경과한후 현장코아를 채취하여 강도시험을 수행한 결과를 표 8에 정리하였는데 설계기준강도를 초과하였다.

표 7. 콘크리트 배합표

	W/B(%)	S/a(%)	단위재료량(kg/m^3)						비고
			W	C	F.A	S	G	고성능감수제	
25-390-23	33.9	46.0	165	414	73	775	913	9.25	PHOENIX-R#1 1.9(%)

표 8. 수중 콘크리트 강도시험 결과 (설계강도 σ_{CK}=330kg/cm^2)

시료채취장소	1P	2P	3P	4P	5P	6P
σ_{28}일강도 (kg/cm^2)	504.8	388.5	469.4	433.7	462.3	369.4
Core채취위치	GL-62m지점	GL-62m지점	GL-62m지점	GL-62m지점	상단열화콘크리트지점	상단열화콘크리트지점

7. 맺음말

지하연속벽은 많은 장점을 내포하고 있어 앞으로 국내 각종 공사 현장에서 도입될 것으로 판단된다. 본 논문에서 소개한 쇄석 투입 방식의 지하연속벽 공법은 국내 최초로 도입된 공법이며 심도 또한 국내 시공실적이 전무한 대심도 공사인점에서 의의가 크다.

먼저 당현장의 연속벽은 원통의 형상효과를 최대로 이용한 해석기법에 대해 소개하고 각종 시공제반 사항에 대해 소개했다. 시공에 있어서는 수정굴착 등의 철저한 연직도관리를 통하여 연직도는 1/1000정도를 확보할 수 있었다. 지반개량의 유무도 보다 합리적이고 정량적인 방법을 통해서 검토되었으며 시공 결과 매우 효과적이라 판단되었다. 안정액관리 및 콘크리트품질 또한 관리 기준 및 Flow에 입각한 시공 결과 콘크리트 품질이 가장 염려된 개소에서도 콘크리트 강도가 설계기준 강도에 비해 최소 10% 이상 초과하였다.

한편 당 현장에서는 굴삭 시의 연속벽 안정성 확인 및 합리적인 시공을 수행할 목적에서 각종 계측기기를 설치하였다. 현재 많은 데이타가 축적되어 있으며 매우 흥미로운 계측 결과도 일부관찰되어 추후 이 점에 대해서도 공표할 예정이다.