

싱가포르 Marina Coastal Expressway(Marina South 1) C482 Project 현장



임재승
쌍용건설(주) 토목기술부 부장



차승훈
쌍용건설(주) 토목기술부 대리

1. 서언

싱가포르는 말레이반도 남쪽 끝에 위치한 서울보다 조금 큰 면적을 가진 섬나라로 인구는 460만명(2008년) 정도이다. 싱가포르는 세계 최대의 컨테이너항, 세계3대 원유거래 시장, 세계 4위 외환거래시장 등 국제 물류, 교역, 금융의 중심지에서 교육, 의료 관광의 중심지로 새로운 도약을 준비중에 있다. 이를 위해 우선적으로 교통인프라(지하철, 고속도로 등)를 재정비 하고 있으며, Marina Coastal Expressway(Marina South 1)는 이러한 프로젝트 중 하나이다.

2. 현장 개요

당 현장은 기존 고속도로(AYE, KPE, ECP)의 교통량 분산의 일환으로 계획된 Marina Coastal Expressway

(MCE, 총 연장 약 5Km) 프로젝트 중 C482구간으로 연장 약 1Km 구간을 시공하는 공사이다. 표준관입저항치(N)가 2이하인 해상점토층을 매립한 연약지반에 10차선(폭 60m)의 대규모 지하구조물과 그 하부를 통과하는 MRT(Mass Rapid Transit, 지하철)를 동시에 시공하여야 한다. 평균굴착고 13.0m, 최대 굴착고 23.0m의 연약지반 굴착공사를 위해 흙막이 벽체는 40m 길이의 대구경 Pipe Pile(D=1,400mm)을 사용하며, 굴착중 허빙(Heaving) 방지와 굴착중 흙막이 벽체 변형을 0.5%H(H: 굴착고) 이하로 관리하기 위해 Marine Clay 층에 5~19.5m 두께(약 80만m³)의 지반개량(DCM, JGP)을 실시해야 한다. 또한 10차선 지하박스 구조물 기초로는 직경 1.5m~2.0m, 길이 40~60m의 현장타설말뚝 1,300여 본을 시공해야 한다. 이러한 프로젝트 특성상 국내보다 훨씬 고가인 m당 약 백만달러(싱가포르 달러, 약 8억원)의 공사비가 소요되며, LTA 사상 최대 규모의 토목공사

현장이다. 본 고에서에서는 흙막이 가시설, 지반개량공법 및 대규모 현장타설말뚝 시험에 대하여 소개하고자 한다.

2.1 공사 개요

- 프로젝트명 : Marina Coastal Expressway(Marina South 1) C482 Project
- 발 주 처 : 싱가포르 LTA (Land Transport Authority)
- 공사 금액 : SGD 929,899,570(약 8,062억원, 1S\$=867원 적용)
- 공사 기간 : 56개월 (2008년 10월 31 ~ 2013년 6월 28일)
- 하자 보수 : 18개월

2.2 과업 범위

- 2연 Box 구조물 : 10차선 (연장 1Km)
 - Depress Road : 330m
 - Main Tunnel : 670m

- Slip Road : 760m/590m (2개소)
- Future Stub : 110m
- Future Transit Tunnel (MRT) : 285m
- Trunk Sewer : 1,135m (D=1,800mm, Semi Shield : 972m)

3. 지층특성

당 현장이 위치한 Marina Bay는 1974년~1977년(1차), 1979~1985(2차) 두 차례에 걸쳐 매립되었으며, 상부로부터 Fill(매립층), Kallang Formation(점토층), Old Alluvium으로 구성되어 있다(표 1 참조). 매립층은 주로 Sandy soil이며, 부분적으로 Silt 및 Clay가 혼재되어 있다. 점토층(Kallang Formation)은 현재도 압밀이 진행 중이며, 향후 약 50년 후 압밀 완료가 예상된다.

Kallang Formation 중 F2 층은 조밀한 점토층으로 지반개량이 어려우며, F1 층은 매우 느슨하거나 보통 조밀한 사질토층으로 Bored Pile 시공 시 공벽 붕괴가 빈번히

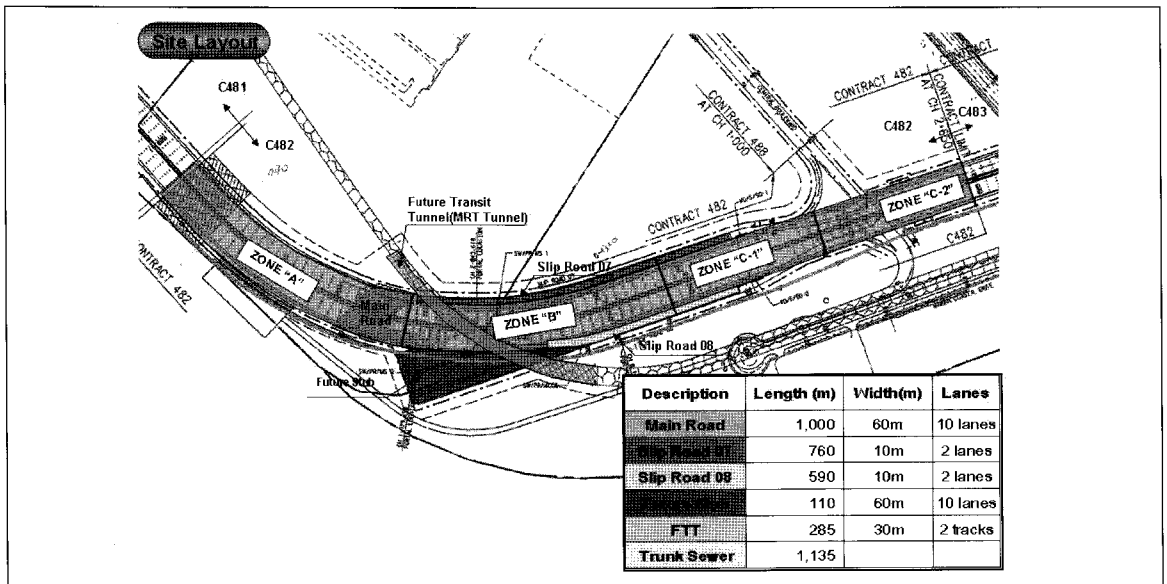


그림 1. 과업 현황 평면도

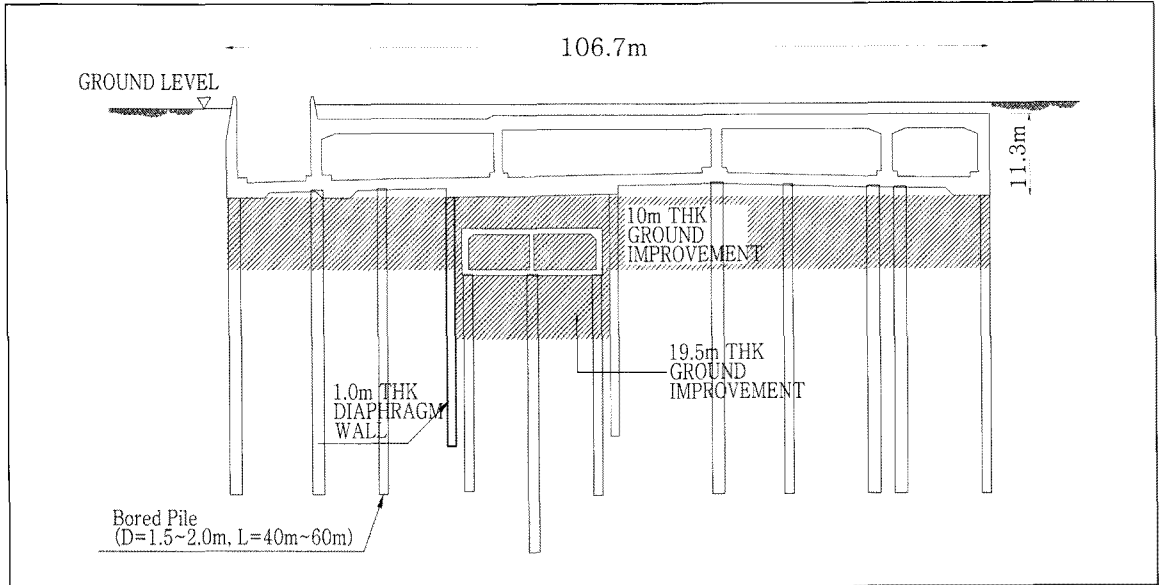
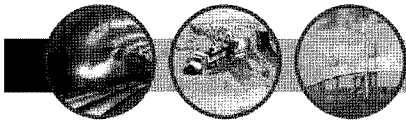


그림 2. Future Transit Tunnel(MRT Tunnel) 구간 구조물 단면도

표 1. 지층 구성

두께 (m)	지층	특성	
7.5 ~ 23.0	FILL	Very loose to medium-dense light grey and brown fine to medium silty SAND with occasional shell fragments	
11.0 ~ 40.5	KALLAANG FORMATION	Upper Marine Clay (UMC)	Very soft to soft greenish grey silty CLAY
		Fluvial Clay (F2)	Firm to very stiff yellowish brown slightly sandy CLAY
		Estuarin (E)	Very soft to soft dark brown and grey peaty CLAY
		Fluvial Sand (F1)	Very loose to medium-dense light grey clayey fine SAND
		Lower Marine Clay (LMC)	Soft greenish grey silty CLAY
0.0 ~ 8.0	OLD ALLUVIUM	Old Alluvium(D : 10(N)30)	Stiff to very stiff reddish brown mottled grey slightly sandy CLAY and medium-dense to dense light greenish grey silty fine to coarse clayey SAND
0.0 ~ 5.5		Old Alluvium(C : 30(N)50)	Hard brownish grey mottled red-brown slightly sandy CLAY/SILT and very dense greenish grey silty SAND
0.0 ~ 10.4		Old Alluvium(B : 50(N)100)	
19.25 max proven		Old Alluvium(A : N)100)	

일어나 주의가 요구되는 지층이다.

1차 Marina Bay 매립공사를 위해 설치했던 Seawall(제방)이 현장에 위치하고 있어 정확한 Seawall 위치 및 심도를 판단하기 위하여 Sheet Pile 근입과 시추조사를 실시하였다.

4. 흠막이 가시설

싱가포르 LTA(Land Transport Authority) 발주공사의 흠막이 벽체 변위 관리기준은 0.5%H(H:굴착고)로, 이는 Nicolle Highway 흠막이 가시설 붕괴 사고 이후 엄격

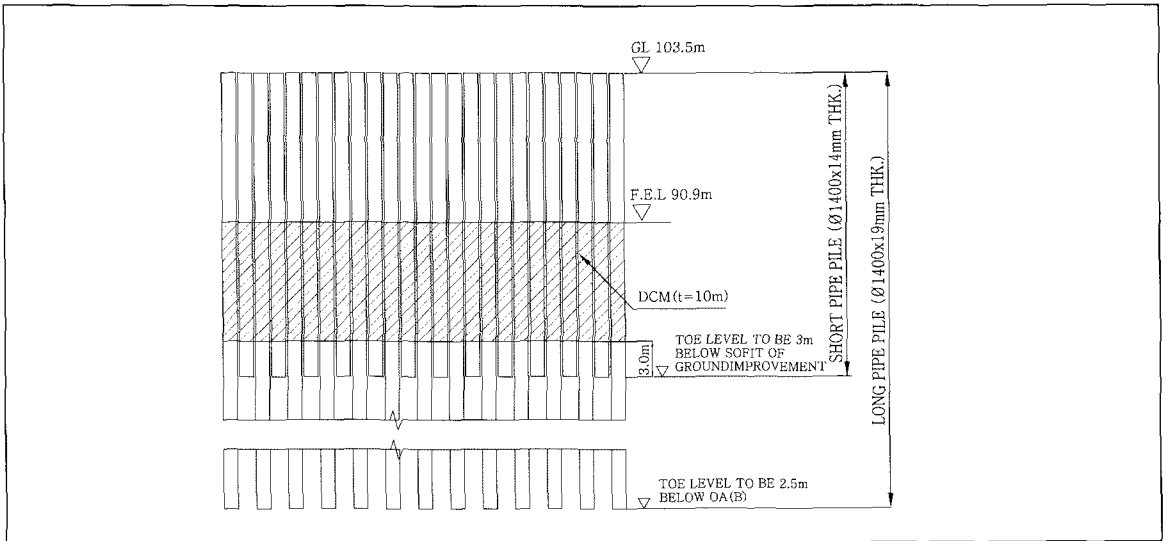


그림 3. Pipe Pile 설치 전개도

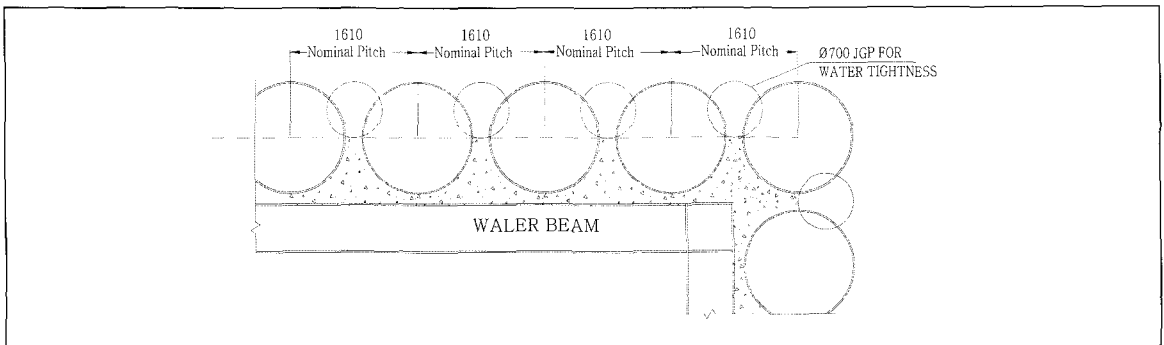


그림 4. Pipe Pile 및 차수공법 평면도

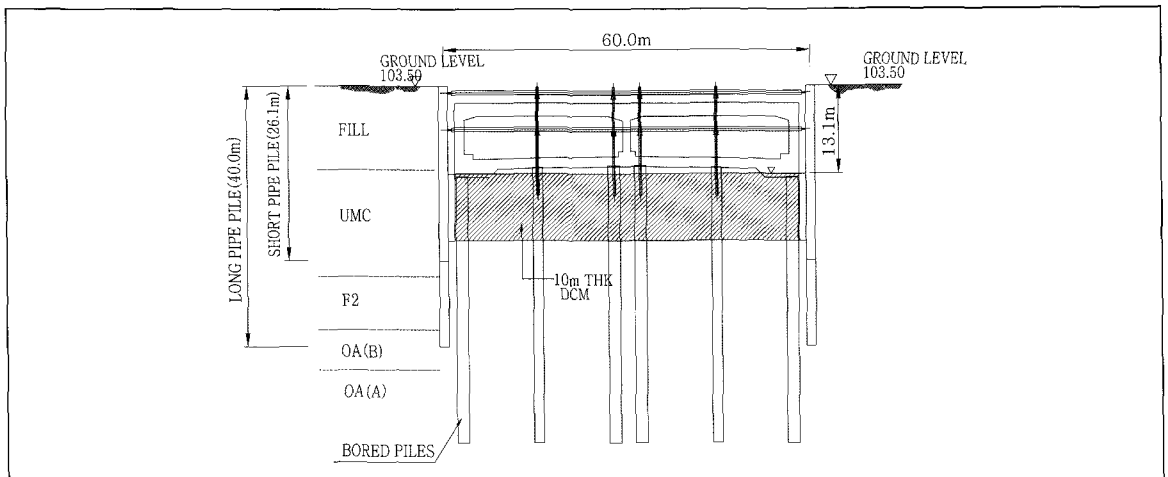


그림 5. 흙막이 가시설 단면도(본선구간)

표 2. 흙막이 가시설 제원

구분		제원	설치 간격	비고
벽체 (Pipe Pile)	상부	D : 1,400mm t=14mm(Short Pile) t=19mm(Long Pile)	1.61m	-
	하부	D : 1,400mm t=19mm(Long Pile)	3.22m	-
Strut(비팀보)		2UB 610×229	수평 : 6.0m수직 : 5.5m	일반 구간은 2단, Transit Tunnel 구간은 5단
Waler(띠장)		UB 800×300	-	-
Kingpost(중간발목)		UB 350×350UB 400×400	6.0m	-
차수 공법		D : 0.7m (JGP 공법)	1.61m	-



그림 6. 흙막이 가시설 굴착 전경

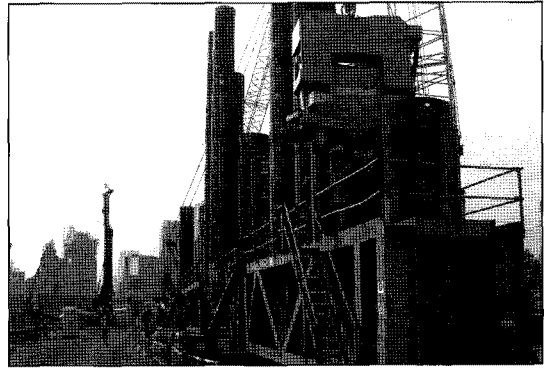


그림 7. Pipe Pile 사용 전경

하게 관리되고 있다.

왕복 10차선의 2연 Box 구조물(폭 60m)을 연약지반에 시공하기 위한 흙막이 가시설은 엄격한 변위 관리기준 만족 및 시공성 향상을 위하여 힘강성이 큰 대구경 Pipe Pile (D=1,400mm)을 벽체로 하고, 지보재로는 Strut(2/UB 610×229)를 적용하였다. Pipe Pile은 Short Pile (thk=14mm)과 Long Pile(thk=19mm) 두 종류로 구분하여 사용하고 있으며, Short Pile은 DCM 하부 3.0m까지 근입, Long Pile은 OA층에 2.5m 근입하도록 되어 있다(그림 3, 5 참조).

흙막이 벽체 차수공법으로는 현장이 바다와 접하여 지하수위가 지표면으로부터 2~3m 하부에 위치하여 굴착중 다량의 지하수 유입이 예상되어 Pipe Pile 배면에 JGP(Jet

Grout Pile, D=700mm)를 적용하였다(그림 4 참조).

흙막이 굴착공사는 굴착부 연약지반개량(DCM), Pipe Pile 시공, 배면 JGP 시공, Wale 설치, Strut설치, 굴착 순으로 진행된다. 흙막이 가시설의 평균 굴착고는 약 13.0m 정도이며, Transit Tunnel 구간의 굴착고는 약 23.0m 정도이다. 흙막이 가시설의 주요 제원은 표 2와 같다.

연약지반에 시공되는 싱가포르의 흙막이 가시설 특징은 큰 수평력(토압+수압)을 지지하기 위해 국내에서 일반적으로 사용하는 H-300×300(수평간격 3.0m 내외) 대신에 단면적이 큰 2H-610×229(수평간격 6.0m 이상) 부재를 사용하고 있다는 점이다(그림 6참조). 그리고 굴착전에 여러 단계의 까다로운 절차를 거쳐야만 굴착공사를 진행할 수 있다. 먼저 굴착하려는 구간보다 선행하여 50m

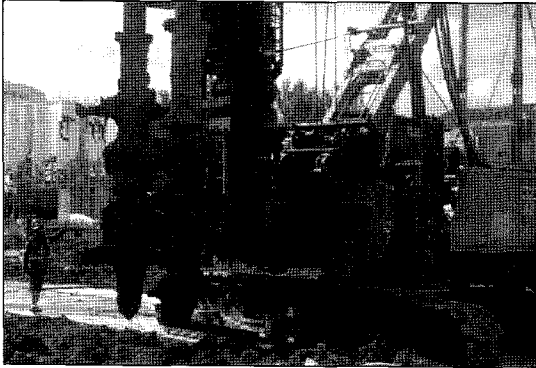


그림 8. DCM 시공 전경

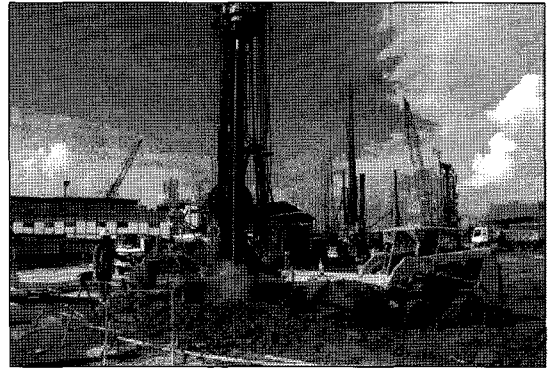


그림 9. JGP 시공 전경

표 3. DCM 제반 사항

시공장비	개량체적	설계강도	개량 두께	품질 확인
2축(D1,000(2축))	80만 ^m ³	400kPa	5~19.5m	1coring/1,000 ^m ² - 일축압축강도시험

까지 계측기가 설치되어야 하며, 첫 굴착을 위해서는 모든 계측기의 초기화가 필수이다. 또한, 각 구간별로도 굴착 순서를 정하여 굴착단계마다 시공감리와 설계감리의 승인이 필요하다. 굴착 승인을 위하여 계측 데이터, 굴착 현황, 향후 굴착 계획을 제출하는 등 굴착 승인을 위해 최소 2~3일이 시간이 소요된다.

3. 지반개량공법

연약지반(해성점토) 개량공법은 DCM(Deep Cement Method)과 JGP(Jet Grout Pile)가 적용되었으며, 일반 구간은 DCM 공법이 적용되었으며, DCM 공법 적용이 어려운 Seawall 구간은 선천공을 통한 JGP 공법이 적용되었다.

지반개량의 주목적은 굴착시 굴착면 heaving 방지와 가시설 벽체변위의 억제이며, 각 구간별로 5~19.5m 두께의 지반개량체를 최종굴착면 하부에 시공하도록 되어 있다. DCM 제반사항은 표 3에 나타내었으며, JGP의 설계강도 및 품질확인 방법은 DCM과 동일하다. 연약지반개량

은 흙막이 가시설을 적용한 굴착부 전체에 대해 실시되며, 치환율은 거의 100%로 육박한다. 지반개량 물량은 약 80만 ^m³이며, 이 물량은 상암월드컵 축구장 면적(117×78)을 1m 높이로 90여개를 채울 수 있을 만큼의 막대한 물량이며, 그림 8과 그림 9는 DCM 및 JGP 시공 전경이다.

4. Bored Pile Test

당 현장에 시공되는 대구경 현장타설말뚝(Bored Pile) 직경은 1.5~2.0m로 구성되어 있으며, 그 수량은 약 1,300여개 이다. 현장타설말뚝의 시험은 크게 시공전에 수행되는 PLT(Preliminary Test)와 시공중 수행되는 WLT(Working Load Test)로 구분된다.

PLT(Preliminary Test)는 설계시 적용된 설계정수를 검증하기 위하여 본 말뚝 시공전에 수행하도록 되어 있으며, 이 결과에 따라 전체 말뚝의 직경 및 길이가 변경되므로 PLT는 공사물량에 막대한 영향을 미친다. PLT는 3×WL(설계하중)을 적용하여야 하므로, 최대 압축시험(Compression Test) 하중은 3,500ton, 인장시험

표 4. 현장에 적용된 대구경 현장타설말뚝 시험

구분	Preliminary Test	Working Load	PDA	Sonic Coring Tube	Sonic Logging Tube
시험개수	Compression : 2 nos Tension : 2 nos	Compression : 6 nos Tension : 6 nos	27 nos	5 nos	9 nos



그림 10. Bored Pile 시공 전경

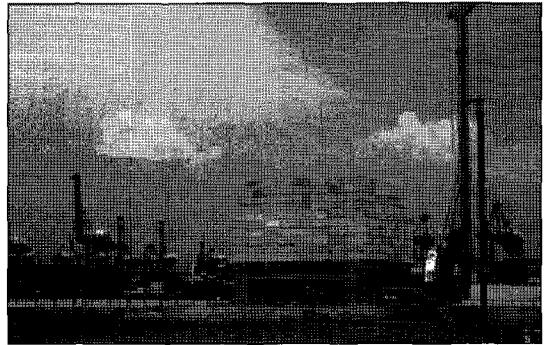


그림 11. Compression Pile Test 전경

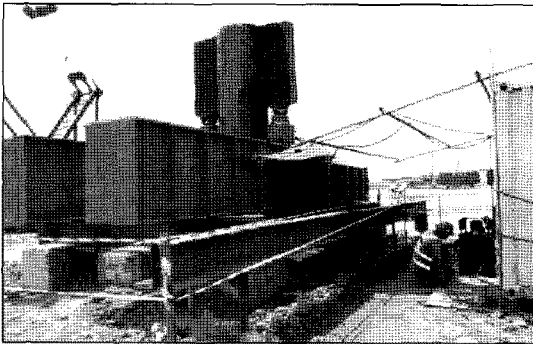


그림 12. Tension Pile Test 전경

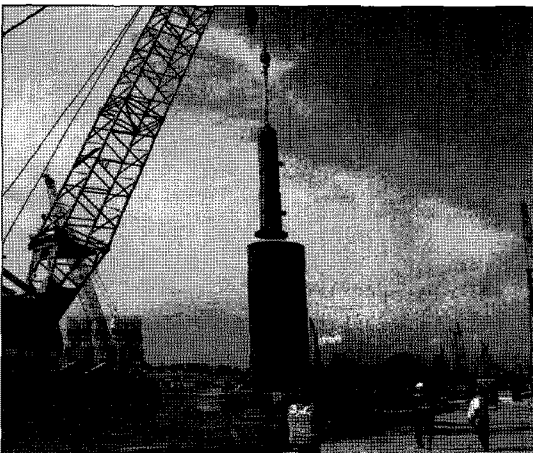


그림 13. PDA Test 전경

(Tension Test) 하중은 2,000ton 이상의 큰 하중을 재하하여야 한다(그림 11~12 참조). 특히, 싱가포르에서도 1,000ton 이상의 인장시험을 반력말뚝(Reaction Pile)을 이용하여 실시한 경우는 당 현장이 처음일 정도로 큰 하중으로 시험을 수행하였다.

PLT로 설계정수 검증을 마친 후 본 말뚝을 시공하며, 이때 WLT(Working Load Test)가 동시에 진행되며, WLT를 통한 말뚝의 지지력 재검증이 이루어지지 않으면 추가적인 말뚝시공은 불가능하다. WLT 종류는 크게 Compression, Tension, PDA, Sonic Coring Tube, Sonic Logging Tube Test 5 종류이며, 총 56 개의 시험을 수행하도록 되어 있다(표 4참조). 압축시험과 인장시험은 $1.5 \times WL$, PDA Test는 $2 \times WL$ 이 적용되며, 시험결과가 기준을 만족하지 못할 경우에는 시험을 통과하지 못한 말뚝 양 옆으로 2개의 말뚝에 추가 시험을 실시한다. 추가 2개 시험 중 하나의 말뚝에서 또 다시 불합격 판정을 받으면 추가 4개의 말뚝에 대한 검증이 필요하므로 이로 인한 공기지연이 불가피하여 말뚝시험(Pile Test)에 만전을 기하고 있다.

6. 맺음말

당 현장은 2008년 국내 건설사가 수주한 가장 큰 규모의 해외 토목 프로젝트이며, 당 현장은 35년전 시공한 Seawall을 제거하고 Marina Coastal Expressway 10차로 지하 고속도로와 그 하부를 통과하는 MRT(Mass Rapid Transport)도 동시에 시공하여야 하는 MCE 프로젝트 중 가장 어려운 공사 구간이다.

현재 공정 상황은 지반개량 작업은 완료되었고, Pipe pile과 Bored Pile 작업이 각 구간별로 진행되고 있다. 2010년 7월 31일부로 무재해 2백만 시간을 돌파하였고, RoSPA(The Royal Society for Prevention of

Accidents) Awards 2010, MOM WSH SHARP(Safety and Health Award Recognition for Projects) Awards 2010 등 안전부문 상을 2개나 수상하였으며, LTA에서 주관하는 싱가포르 최대의 건설안전상인 LTA ASAC (Annual Safety Award Convention) 2010에 당 현장이 최종 후보 4개사에 포함되는 등 안전관리 측면에서도 힘쓰고 있다.

마지막으로, 본 고에서 소개된 연약지반 흠막이 굴착공법, 지반개량공법 및 대구경 현장타설말뚝 시험방법 등이 당 현장과 유사한 공사를 수행할 때 작으나마 도움이 되길 기대한다.