

낙동강 퇴적층지역에서 하구둑 배수문의 기초설계 및 시공사례 - 대심도 · 대구경말뚝 중심으로 -



나 동 열
한국수자원공사
부산권관리단 공사차장



채 수 근
지에스이앤씨(주)
대표이사



김 재 홍
한국수자원공사
K-water연구원, 책임연구원
(kjhpmk@kwater.or.kr)



장 상 구
한국수자원공사
부산권관리단 공사대리

1. 서론

낙동강 하구둑 지점의 홍수량을 재산정한 결과, 1981년 당시 설계홍수량이 18,300 m³/s이었으나 최근 22,300 m³/s으로 크게 늘어난 것으로 나타났다.

이에 따라 낙동강 하류 지역의 치수안전 확보 대책이 필요하게 되어 기존 낙동강 하구둑 우안 토언제 구간에 배수문을 증설하여 낙동강 하류부의 홍수소통 개선 및 상류 수위 1.1m(200년 빈도 홍수 기준)의 저감을 통하여 제방 안정성과 재해지 침수피해를 예방하고 기존 배수문과 같이 해수의 침입을 방지하여 안정적인 용수를 확보하는 것으로 하였다. 또한, 배수문 증설시 국도 2호선인 낙동남로를 6차선에서 8차선의 확장된 교량으로 대체됨에 따라 서부산 지역의 교통난 해소와 지역경제 발전에 크게

기여할 것으로 예상된다. 낙동강 하구둑 증설 배수문의 주요시설은 표 1과 같다.

2. 지반 현황

2.1 지층 현황

배수문 구간은 토언제 축조로 인한 매립층이 상부에 존재하고, 그 하부에 상부모래층, 점성토층, 하부모래층, 자갈층 및 기반암 순으로 분포한다. 그림 2와 같이 구조물 지지층으로 볼 수 있는 자갈층은 EL(-)47.4~52.7m에 약 20m 두께로 분포한다.

표 1. 낙동강 하구둑 증설배수문 시설현황

수문	· 주수문 Lifting Gate W95.0m×8.5m×1문, W47.5m×8.5m×2문 · 조절수문 2단 Roller Gate W47.5m×8.5m×2문
갑문	· 상류갑문 2단 Roller Gate W14.7m×8.1m×2문 (상하류 각 1문)
어도	· 2개소 (계단식, 갑문식)
도로 및 교량	· 도로(1.65km), 교량(331m, Nielsen 아치교, Seg-beam 거더교, IPC 거더교)
호안공	· 2.9km
사업기간	· 2009년 11월 ~ 2012년 12월

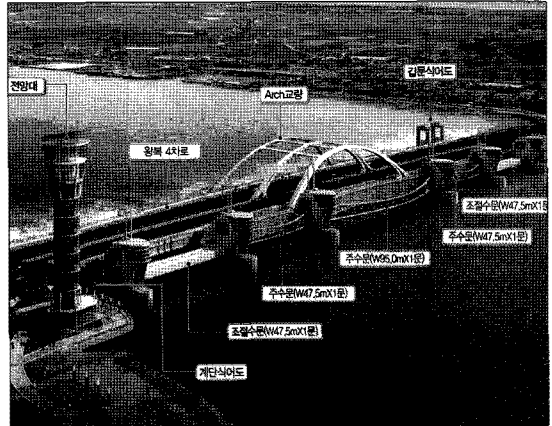


그림 1. 증설 배수문 조감도

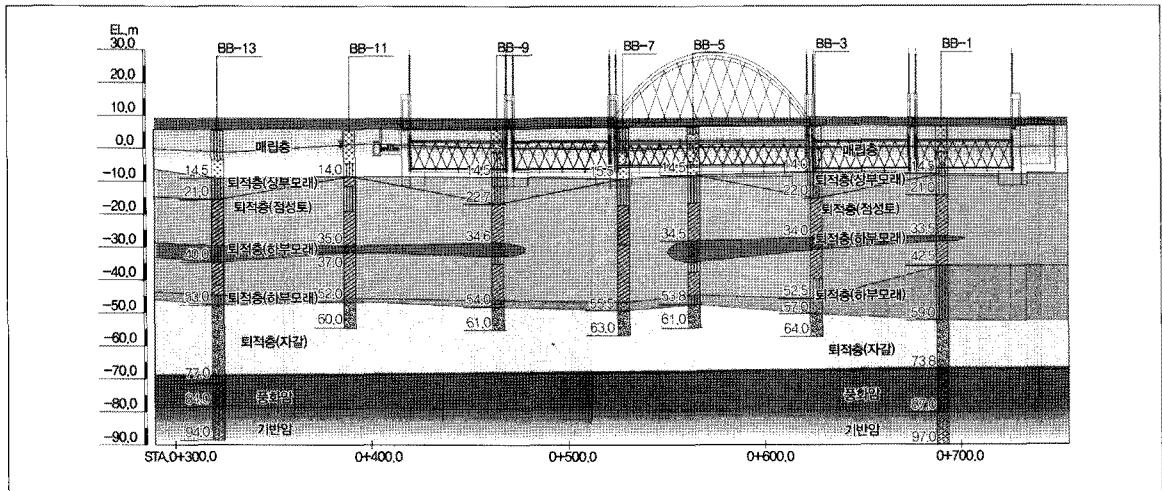


그림 2. 지층 단면도

2.2 지반 현황

기초지반의 물리적 특성은 자연함수비가 높고 액성한 계가 큰 편이다. 초기간극비는 심도에 따른 변화는 없으며, 심도에 따른 점성토의 소성도는 분류하는 것이 곤란한 것으로 조사되었다. 표 2와 같이 역학적 특성은 정규압 밀점토이며 비배수전단강도는 심도에 따라 증가하는 것으로 조사되었다. 또한 점성토의 압축성(C_c)이 크며 압밀 계수도 큰 편이다.

3. 강관말뚝 설계

배수문은 주수문 3문(95m(W)×8.5m(H) 1문, 47.5m(W)×8.5m(H) 2문)과 조절수문 2문(47.5m(W)×8.5m(H)×2문), 양 끝단에는 배수문 및 계단식 어도가 배치되었다. 증설 배수문 현장은 지하수위가 높고 연약지반이 매우 두껍게 분포하는 반면에 배수문의 특성상 수평력이 크게 작용한다. 시공성, 안정성, 경제성과 지반조건 및 하중조건등을 비교 검토하여 최적의 기초공법을 선정할 결과 대심도 적용실적이 많고 휨저항성이 크며 항타 관입성이 우수한 강관말뚝으로 선정하였다.

표 2. 퇴적 점성토의 강도 특성 및 압밀 특성

비배수전단강도(S_u , kPa)	강도증가율	압축지수(C_c)	압밀계수(C_v)
<ul style="list-style-type: none"> · $S_u = 1.73z + 11.0$ (kPa) · 심도에 따라 증가 	<ul style="list-style-type: none"> · 0.08~0.71(평균 0.25) · 심도에 따라 감소 경향 	<ul style="list-style-type: none"> · C_c: 0.3~1.1(평균 0.56) · 침하량 산정에 활용 	<ul style="list-style-type: none"> · C_v: 평균 $4.1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Sec}$ · 하중증가에 따라 감소

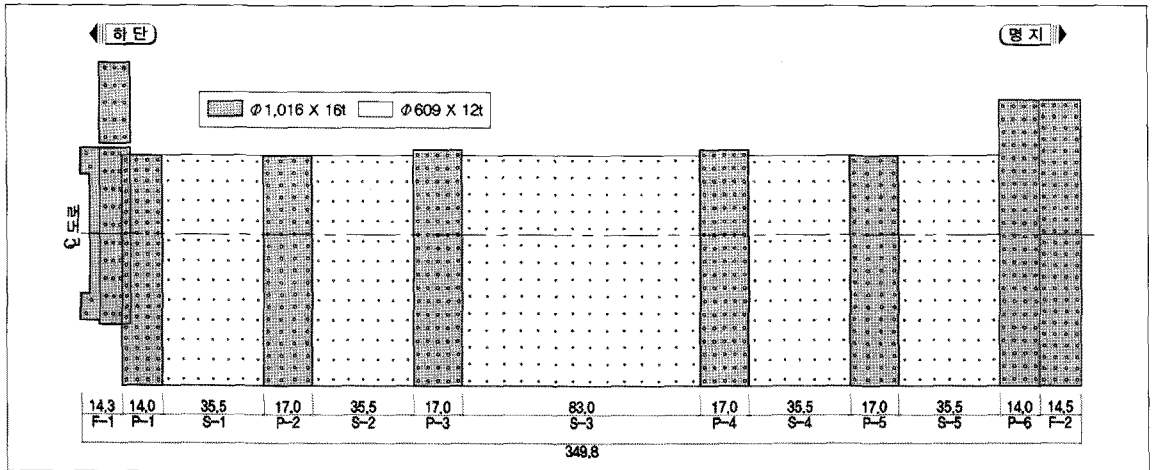


그림 3. 말뚝배치도(구조물 기초)

3.1 강관말뚝 적용현황

1) 기초말뚝 배치현황

말뚝의 배치결과는 교대, 교각 및 어도구간에는 $\text{Ø}1,016\text{mm}$, $t=16\text{mm}$ 의 강관말뚝 총 657본을 SIII구간(532본), 전망대(12본)에는 $\text{Ø}609\text{mm}$, $t=12\text{mm}$ 의 강관말뚝 총 544본이다.

2) 말뚝간격 및 배열

말뚝의 배열은 구조물 기초 설계기준 해설(2009)에서 제시한, 말뚝사이의 최소간격은 말뚝직경(D)의 2.5배 이상, 푸팅측면과 말뚝중심의 최소간격은 말뚝직경의 1.25배 이상으로 배치하였다(그림 3).

3.2 허용지지력 검토

1) 구간별 허용지지력(상시)을 검토 결과, 연직지지력 및 수평지지력 모두 만족한 것으로 검토되었다.

연직지지력은 일본 도로교시방서, 정역학적 지지력 공식, SPT결과를 이용한 추정법과 CPT결과를 이용한 추정법을 고려하여 검토하였다. 수평지지력은 Fixed Head Condition 및 군말뚝효과를 고려하여 Broms의 제안식과 Chang의 제안식을 이용하여 검토하였다. 검토결과 말뚝길이는 어도구조물은 39.8~49.9m, 교각과 교대구조물은 36.8~45.5m, SIII구조물은 37.8~47.5 m로써 대부분 말뚝은 모래 자갈퇴적층에 관입되도록 설계하였다(그림 4).

2) 구간별 허용지지력(지진시)을 검토하였으며 배수문

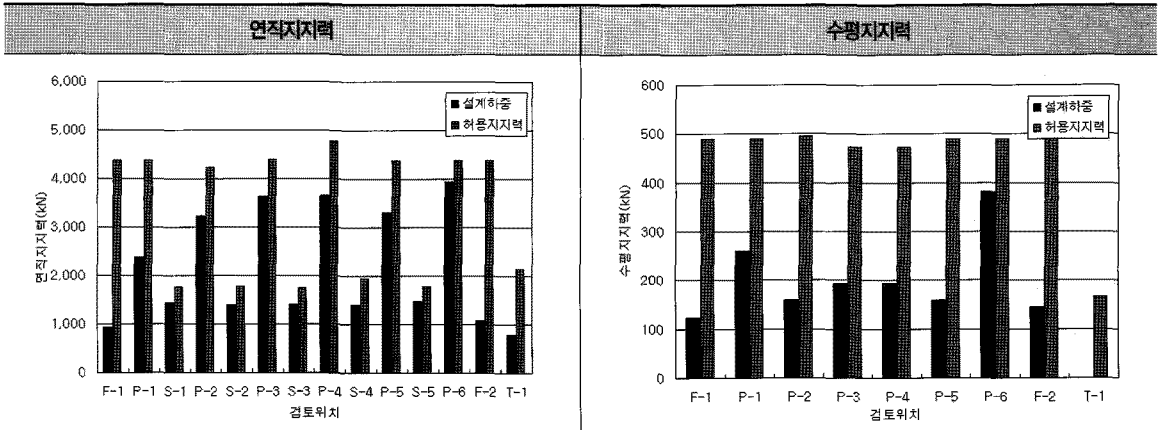


그림 4. 허용지지력 검토결과(상시)

구간 말뚝기초에 대한 허용지지력 검토 결과, 전 구간에서 연직 및 수평방향 허용지지력을 만족하는 것으로 검토되었다.

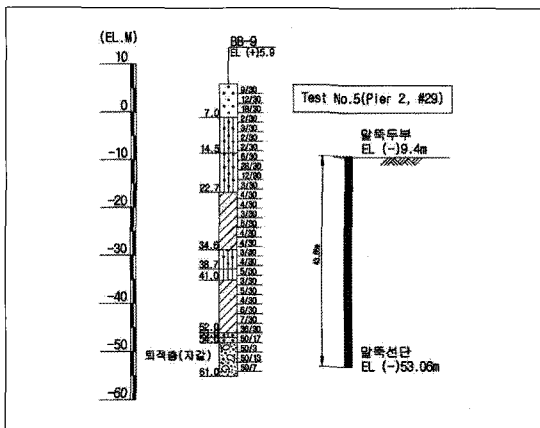
는 어도구조물에는 43.0~51.0m, 교각과 교대구조물에는 40.9~45.4m, Sill구조물에는 44.0~45.8m로써 대부분 말뚝은 그림 5에서 보는 바와 같이 하부자갈퇴적층에 관입시공하였다. 또한 시험시공말뚝에서 항타시공성분석을 위하여 항타(시험)과정에서 타격에너지, 항타응력 및 Case지지력을 측정하였다.

4. 기초말뚝 시공 및 시험자료 분석

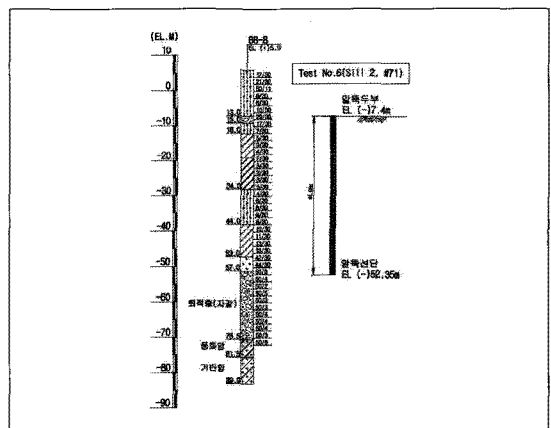
4.1 시험시공 및 재하시험 내용

1) 시험시공과 재하시험은 각 구조물(계단식어도, 갑문식어도, Pier-1 ~ Pier-6, Sill-1 ~ Sill-5) 기초말뚝 37개소에 대하여 실시하였다. 시험말뚝의 관입깊이

2) 동재하시험은 시험시공한 기초말뚝 37개소에 대하여 초기동재해(EOID, End of Initial Driving)시험 37회와 재항타동재해(Restrike)시험 19회를 KS F 2591 규정에 따라 실시하였다. 본 현장에서는 항타와 병행하는 EOID시험을 위주로 실시하였으며 이로부터 항타시공관입성, 항타종료시점에서의 지지



(a) Pier 2(#29)



(b) Sill 2(#71)

그림 5. 시험말뚝 관입깊이 및 지층현황



(a) 시험시공



(b) 동재하시험

그림 6. 시험시공 및 동재하시험

력을 평가하였다. 또한, 각 구조물 기초 말뚝에 대한 시공관리기준을 제언하기 위한 시험말뚝(각 구조물 별 1~2개소)에 대해서는 EOID시험 후 1일~23일 경과한 시점에서 Restrike시험을 실시하였으며 이로 부터 시간경과에 따른 지지력변화(set-up 또는 relaxation)를 확인하였다. 지지력 분석은 EOID시험 및 Restrike시험에 대한 CAPWAP(Case Pile Wave Analysis Program)분석을 실시하여 허용지지력을 판정하였다(그림 6).

3) 동재하시험을 시행한 말뚝중 10본의 말뚝에 대해서는 연직정재하시험을 ASTM D 1143 규정에 따라 실

시하였으며, 수평재하시험도 ASTM D 3966 규정에 따라 3회 실시하였다(그림 7).

4.2 향타시공관입성 분석(Driveability Analysis)

향타시공성분석을 위하여 향타(시험)과정에서 측정된 타격에너지, 향타응력, Case지지력을 관입깊이(penetration)나 향타수(blow number)와의 관계로 나타내는 도식화된 프로그램인 PDAPLOT으로 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.



(a) 연직정재하시험



(b) 수평재하시험

그림 7. 연직 및 수평재하시험

표 3. 시험시공 및 동재하시험 결과

시험 위치	말뚝 번호	관입 깊이 (m)	시험일자 (E/R)	최종 낙하고 (m)	타격당 관입량 (mm/1T)	CAPWAP 분석(kN)			항복 하중 (kN)	하중 지지력 (kN)
						주면 마찰력	산단 지지력	전체 지지력		
계단식 어도	No.7	51.0	2011.2.1	1.0	7.0	1,784	4,346	6,130	6,130	3,060
			2011.2.7	1.5	6.0	3,564	3,776	7,340	7,340	3,670
갑문식 어도	G-62	45.0	2011.2.18	1.0	11.0	1,175	4,106	5,280	5,280	2,640
Pier-1	P1-9	42.1	2011.4.16	1.0	8.3	1,289	4,091	5,380	5,380	2,690
			2011.4.18	1.5	5.0	2,664	3,226	5,890	5,890	2,940
Pier-2	P2-29	43.5	2011.4.5	1.2	7.5	1,240	5,359	6,599	6,599	3,290
			2011.4.28	1.5	2.0	5,802	2,698	8,500	8,500	4,250
Pier-3	P3-62	44.1	2011.3.31	1.2	5.0	1,590	5,769	7,360	7,360	3,680
			2011.4.1	1.3	4.7	2,386	5,162	7,548	7,548	3,770
Pier-4	P4-43	43.7	2011.2.25	1.1	6.0	2,029	5,731	7,760	7,760	3,880
			2011.2.26	1.2	2.4	2,638	5,533	8,170	8,170	4,080
Pier-5	P5-22	44.2	2011.3.5	1.4	4.3	1,988	5,413	7,400	7,400	3,700
			2011.3.7	1.4	1.5	2,893	5,204	8,097	8,097	4,040
Pier-6	P6-24	45.4	2011.3.11	1.4	3.3	2,002	6,148	8,151	8,151	4,070
			2011.3.16	1.5	1.5	2,622	5,754	8,376	8,376	4,180
Sill-1	Sill1-67	44.6	2011.4.26	1.0	9.0	1,095	2,445	3,540	3,540	1,770
			2011.5.3	1.1	2.6	2,303	2,059	4,362	4,362	2,180
Sill-2	Sill2-71	45.0	2011.4.9	0.9	5.7	997	2,673	3,670	3,670	1,830
			2011.4.12	1.1	2.0	2,451	2,069	4,521	4,521	2,260
Sill-3	Sill3-76	44.5	2011.2.22	1.0	7.8	966	2,574	3,540	3,540	1,770
			2011.2.23	1.2	4.7	1,785	2,106	3,890	3,890	1,940
Sill-4	Sill4-5	44.0	2011.3.11	1.0	10.1	973	2,471	3,444	3,444	1,720
			2011.3.16	1.2	6.2	1,681	2,168	3,850	3,850	1,920
Sill-5	Sill5-16	44.7	2011.3.28	1.1	11	1,362	2,281	3,644	3,644	1,820
			2011.3.29	1.2	8.2	2,389	1,730	4,120	4,120	2,060

1) 타격에너지

항타장비 1,2호기(램중량 20ton 유압해머)는 항타장비 1호기는 Pier1~Pier6 위치의 말뚝 시공 및 시험을 위하여 사용되었다. 해머의 램낙하고를 최대 1.3m~1.4m로 조정하였으며 이때 측정된 타격에너지(EMX)는 21.3~23.8t-m 로써 시험해머의 이론적 정격에너지 (28t-m=20ton×1.4m=W×H) 대비 81~85%의 에너지 전달율(ETR = EMX / (WH))을 나타내었다.

항타장비 3,4호기(램중량 16ton 유압해머)는 갑문식어도와 Pier1, Pier3~5 위치의 말뚝 시공 및 시험을 위하여

사용되었다. 해머의 램낙하고를 1.3m~1.5m로 조정하였으며 이때 측정된 타격에너지는 19.3~20.8t-m 로써 시험해머의 이론적 정격에너지 대비 80~91%의 에너지전달율을 나타내었다.

항타장비 5호기(램중량 13ton 유압해머)는 Sill1~5 위치의 말뚝 시공 및 시험을 위하여 사용되었다. 해머의 램낙하고를 최대1.1m로 조정하였으며 이때 측정된 타격에너지는 14.3t-m 로써 시험해머의 이론적 정격에너지 대비 85%의 에너지전달율을 나타내었다.

낙동강 퇴적층지역에서 하구둑 배수문의 기초설계 및 시공사례

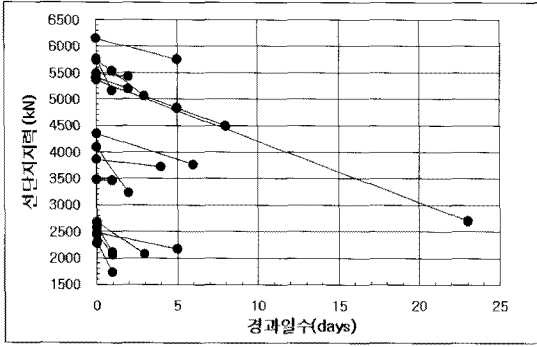


그림 8. 시간경과에 따른 신단지지력 변화

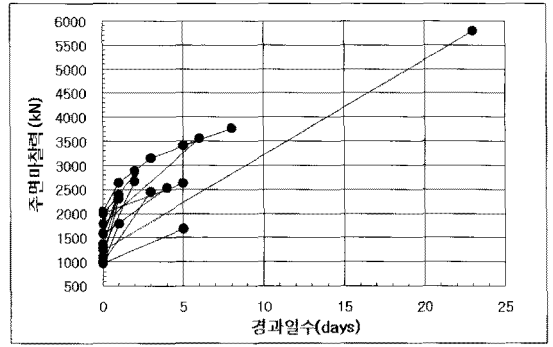


그림 9. 시간경과에 따른 마찰력 변화

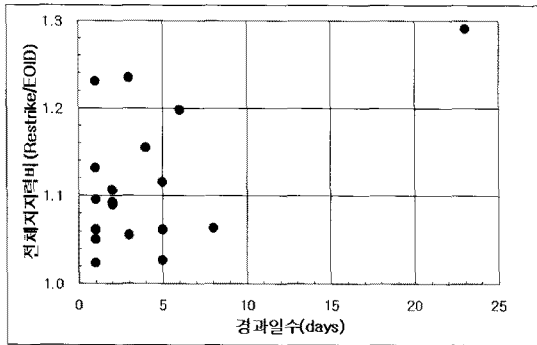


그림 10. 말뚝지지력의 시간경과 효과

2) 항타응력

어도, Pier1~6 및 Sill의 시험말뚝 항타시 말뚝 두부 및 선단부에 발생한 항타압축 응력(CSX, CSB, CSI)은 최대 183.4MPa~239.2MPa로 측정되어 일부말뚝에서 허용 타격응력(211.6MPa)을 다소 초과하는 것으로 나타났다. 이와 같이 일부 시험말뚝에서 항타응력이 초과한 것은 시험시 램 낙하고가 일시적으로 높게 작동하거나 팬타에 의한 것으로 말뚝재료 손상을 방지하기 위해서 시험시공에서 결정된 시공관리기준(램 낙하고)을 본 시공시 준수하고 해머와 말뚝의 alignment 및 수직도를 유지하도록 노력하였다.

표 4. 연직정재시험 결과

시험 위치	말뚝 번호	관입 길이 (m)	설계 하중 (kN)	연직정재시험 결과		
				최대시험하중 (kN)	허용하중 (kN)	침하량 (mm)
Pier	P-1(#54)	43.40	2,394	4,788	2,394 이상	17.12
	P-2(#29)	43.66	3,250	6,500	3,250 이상	20.89
	P-3(#62)	44.18	3,634	7,268	3,634 이상	25.99
	P-4(#43)	43.80	3,661	7,322	3,661 이상	21.58
	P-5(#22)	44.20	3,304	6,608	3,304 이상	17.95
	P-6(#24)	45.40	3,957	7,914	3,957 이상	22.18
Sill	P-2(#71)	44.95	1,447	2,894	1,447 이상	20.91
	P-3(#76)	44.87	1,397	2,794	1,397 이상	19.34
	P-5(#16)	44.60	1,447	2,894	1,447 이상	16.75
갑문식 어도	F-2(#16)	43.40	1,072	2,144	1,072 이상	4.66

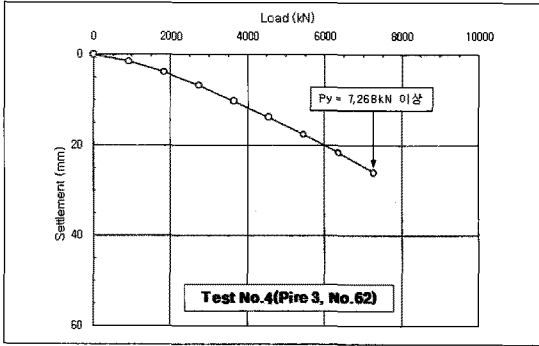


그림 11. 항복하중 분석(P-S curve)

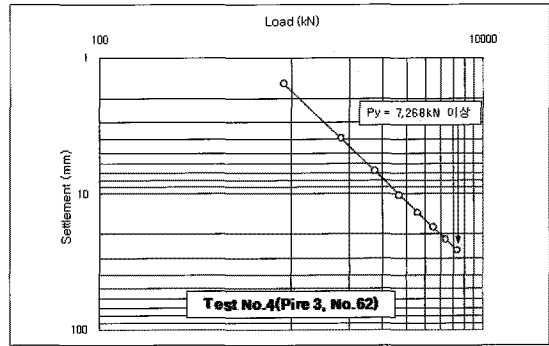


그림 12. 항복하중 분석(Log P-Log S)

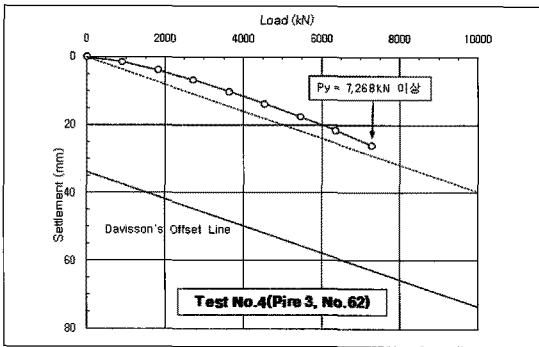


그림 13. Davisson분석 curve

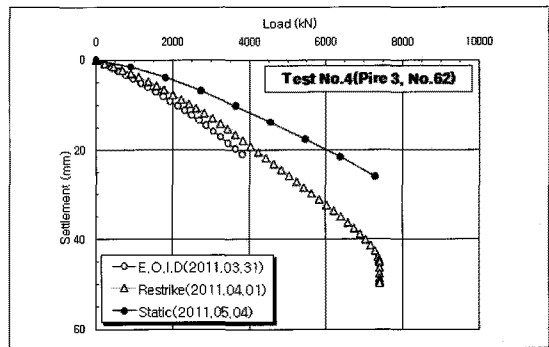


그림 14. 동·정재하시험 하중-침하량 곡선

3) Case 지지력

어도구간의 Case지지력(RMX)은 관입깊이 38~39m 정도부터 급격히 증가하는 것으로 나타났으며 시험종료시 RMX값은 480ton~600ton으로 측정되었다. Pier-1~6의 RMX는 관입깊이 39m 정도부터 급격히 증가하는 것으로 나타났으며 시험종료시 RMX값은 480ton~820ton으로 측정되었다. Sill1~5의 RMX는 관입깊이 38~42m 정도부터 급격히 증가하는 것으로 나타났으며 시험종료시 RMX값은 300ton~370ton으로 측정되었다.

4.3 말뚝 재하시험 분석결과

1) 동재하시험

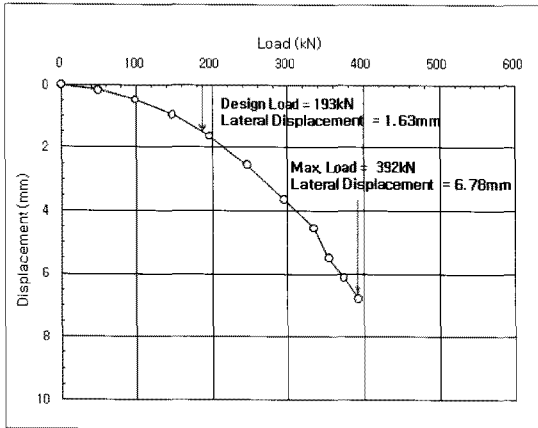
본 현장은 동재하시험에서 지반, 시험시점, 말뚝, 해머 등의 조건에 따라 모든 시험말뚝에서 극한지지력을 확인

하지 못하였기 때문에 CAPWAP분석으로부터 얻어진 전체지지력에 일정한 안전율(2.5)을 적용하는 방법을 이용하지 않았다. 따라서 시험말뚝의 허용지지력은 PDA측정 자료 중 적정 Data(blow no.)를 선정하여 CAPWAP방법으로 분석하고, 얻어진 하중-침하량 곡선에 Davisson판정법을 적용하여 항복하중을 산정한 후 안전율(2.0)을 적용하여 허용지지력을 산정하였으며, 결과는 표 3과 같다.

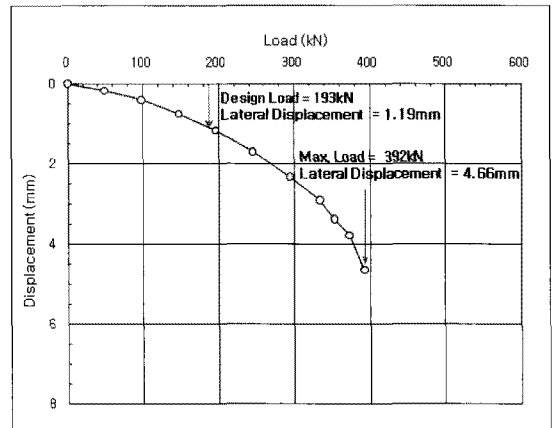
표 3과 그림 10에 의하면 Restrike시험을 실시한 대부분 시험말뚝에서 시간효과가 나타났다. 그림 8에서 CAPWAP분석에 의한 선단지지력 값을 EOID시험결과를 비교해 볼 때 시간경과에 따라 오히려 감소한 것으로 나타난 것은 그림 9에서 보는 바와 같이 시간경과에 따라 주변마찰력이 최소 1.16배(1일경과) 내지 최대 4.67배(23일 경과) 증가함으로써 시험시 타격에너지의 전달부족으로 인하여 말뚝이 충분히 변위(mobilize)되지 않았기 때문이다. 또한, 그림 10에 의하면 전체 지지력비(Restrike/EOID)가약 1.024~1.291 정도 되는 것으로 분석

표 5. 수평재하시험 결과

시험 위치	시험말뚝 번호	설계 기준		수평재하시험 결과		
		허용변위 (mm)	설계하중 (kN)	최대시험 하중(kN)	수평 변위량 (mm)	허용하중 (kN)
Pier-6	시험말뚝(#33)	15	382.5	477.6	17.97	428.5
	반력말뚝(#55)	15	382.5	477.6	20.45	392.0
Pier-3	시험말뚝(#82)	15	193.0	392.0	6.780	392.0이상
	반력말뚝(#64)	15	193.0	392.0	4.655	392.0이상
Pier-1	시험말뚝(#57)	15	260.0	521.0	9.38	521.0이상
	반력말뚝(#64)	15	260.0	521.0	11.60	521.0이상



(a) 시험말뚝(#82)



(b) 시험말뚝(#64)

그림 15. Pier-3(#82, #64) 수평재하시험 분석결과

되었으며, 말뚝시공후 8일 경과할 때 까지는 시간경과효과가 작은 것으로 나타났다. 반면에 23일 경과한 말뚝은 전체 지지력비가 1.291로써 매우 큰 것으로 확인되었으며, 이것은 연약한 점성토층이 18.0~37.5m로 매우 두껍게 분포되어 있어 과잉간극수압의 소산과 강도회복(Thixotropy)에 많은 시간이 소요되기 때문으로 판단된다.

2) 연직정재하시험

연직정재하시험 결과, 그림 11~14와 같이 모든 정재하시험말뚝의 하중-침하량 관계곡선은 거의 선형적으로써 항복하중이 확인되지 않아 시험 최대하중을 항복하중

으로 간주하여 허용하중을 평가한 결과, 표 4에서 보는바와 같이 압축하중에 대한 허용하중은 설계하중(1,072~3,957 kN/본) 이상으로 평가되었다. 시험말뚝은 설계하중에서 말뚝두부의 침하량은 2.41~10.22mm, 시험최대하중단계(2,144~7,914 kN/본)에서 침하량은 4.66~25.99mm, 잔류침하량은 1.31~8.84mm로 각각 측정되었다.

또한, 그림 14에서와 같이 시험말뚝에 대한 동재하시험과 정재하시험의 하중-침하량 관계곡선의 기울기는 두 시험의 시험시기 차이에도 불구하고 대체로 부합하는 양상을 보이는 것으로 볼 때 동재하시험 분석결과는 신뢰

성에 문제가 없는 것으로 판단된다. 다만 동재하시험 결과에서 도출된 하중-침하량 관계곡선보다 정재하시험의 하중-침하량 관계곡선이 위에 있는 것은 정재하시험이 동재하시험보다 약 1개월 이상 경과후 실시됨에 따라 시간경과효과(set-up) 영향으로 판단된다.

3) 수평재하시험

대부분의 말뚝기초는 말뚝두부 고정조건으로 보아 고정두부(Fixed head) 조건이지만 말뚝수평재하시험은 실제의 말뚝이 사용되는 상태와 같은 조건으로 수행하기 어려워 자유두부(Free head) 조건으로 시행하는 게 일반적이다. 따라서 당 현장에서 말뚝머리 자유조건인 상태에서 시험을 수행하였으므로 시험결과의 해석은 말뚝두부의 고정조건에 따라 상이할 수 있다. 수평재하시험에서는 허용변위량 기준 15mm 일 때의 수평력을 허용지지력으로 산정하였으며, 수평재하시험 결과는 표 5와 그림 15와 같다. 수평재하시험 분석결과, 시험말뚝과 반력말뚝은 시험 최대하중 392~521kN에서의 수평변위는 9.38~20.45mm로 측정되었으며, 허용하중 일 때의 수평변위는 허용변위 기준치(15mm) 이내로 측정됨에 따라 설계수평력(수평변위 15mm일 때의 설계하중)을 만족하는 것으로 나타났다.

5. 결론

- 1) 낙동강 하구둑은 느슨한 모래층과 연약한 점성토층이 교호로 분포하고 있으며, 말뚝의 선단지지층으로 이용할 수 있는 모래자갈층이 매우 두껍게 분포하고 있다. 특히 사질토층 사이에 연약한 점성토층이 있기 때문에 명지지구와 신호지구를 포함한 낙동강 하구둑 주변에서 구조물 기초말뚝의 설계와 시공에 어려움이 많다.
- 2) 하구둑 배수문은 각 구조물의 구조형식에 따라 상이하게 작용하는 하중조건, 불균질하고 이방성의 퇴적층과 연약한 지반에 시공되는 구조물은 수평방향으로 편하중을 받아 장기적으로 이동할 수 있기 때문에

배수문의 기초안정성이 확보되도록 설계하였다.

- 3) 이와 같이 당 현장의 복잡한 지층조건과 하중조건을 고려하여 기초말뚝에 대해 충분한 수량의 말뚝으로 시험시공과 재하시험을 실시하였다. 또한 시험시공 중 항타관입성 분석을 통해 효율적으로 항타장비를 운용하고 민원발생 없이 합리적으로 시공관리하여 기초말뚝공사의 공기를 단축할 수 있었다.
- 4) 제한된 공기문제로 인해 충분한 시간경과 후에 재하타시험을 실시하지 못한 아쉬움은 있지만 재하시험 결과 시간경과효과(set-up)가 큰 것을 확인할 수 있었으며, 이와 같은 자료가 앞으로 유사한 지반조건에서 구조물 기초공사할 때 도움이 될 수 있기를 바란다.

참고문헌

1. 김상규(1999) "김해 점토의 공학적 특성과 기초 설계와의 관련", proceedings of Sang-kyu Kim Symposium on Geotechnical Engineering, Seoul, pp.205~2730, April
2. 국토해양부(2009) "구조물 기초 설계기준 해설"
3. 한국수자원공사(2010) "낙동강 하구둑 배수문 증설공사 실시 설계 보고서, 제 4장 토질 및 기초" pp.4-61~68
4. 한국수자원공사(2010) "낙동강 하구둑 배수문 증설공사 지반조사 보고서" pp.1~120
5. 삼성물산 건설부문(2011) "낙동강 하구둑 배수문 증설공사 재하시험에 관한 용역보고서"
6. 삼성물산 건설부문(2011) "낙동강 하구둑 배수문 증설공사 동재하시험 보고서"
7. 한영철(2001) "낙동강 유역의 연약점성토 퇴적특성에 대한 고찰", 국내퇴적층의 토질 특성 및 지반개량 대책 학술발표회 논문집 pp.45~53