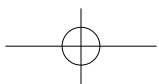
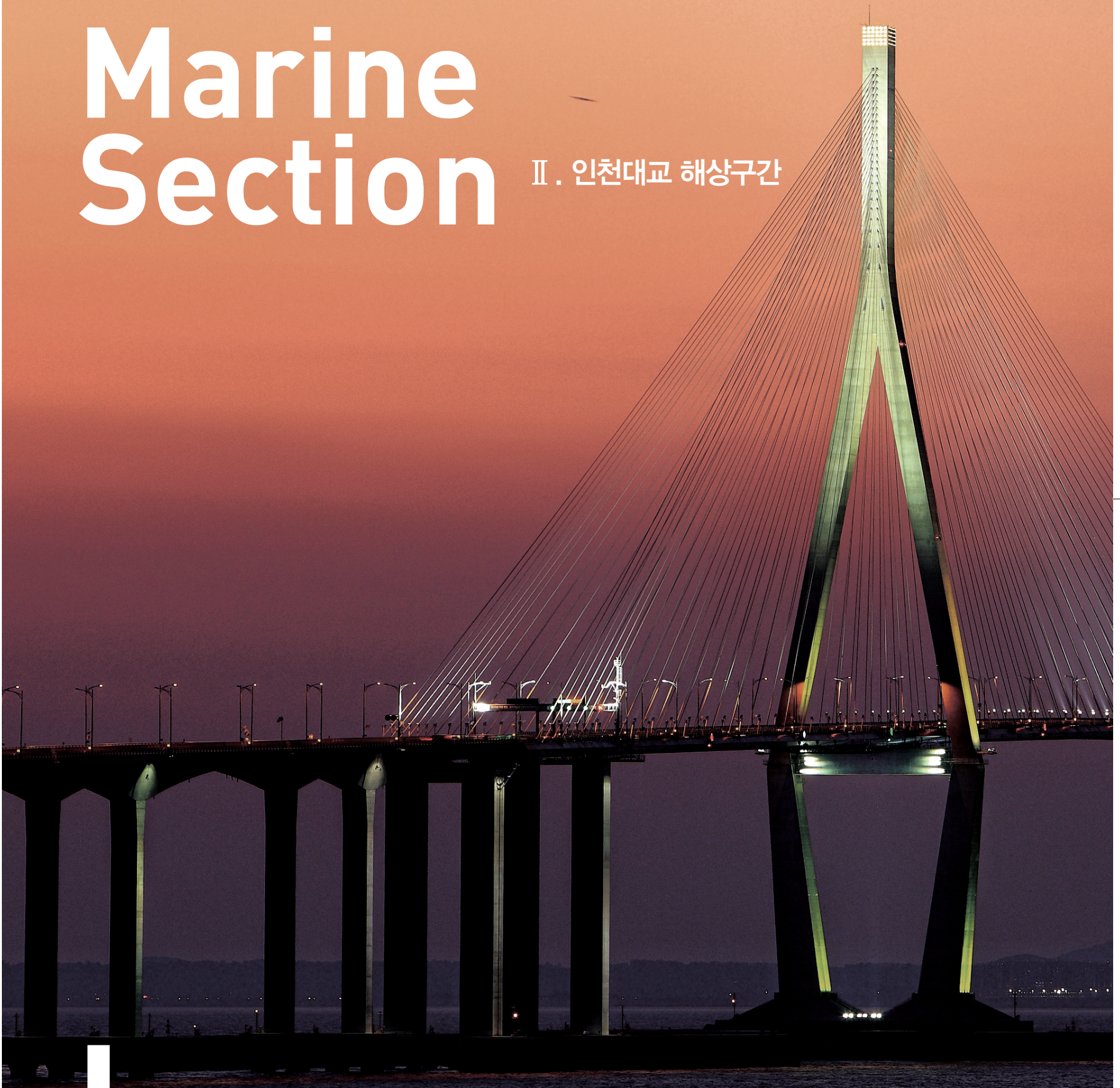


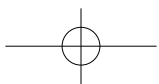


# Marine Section

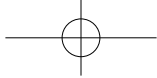
Ⅱ. 인천대교 해상구간



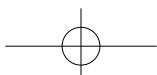


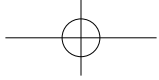






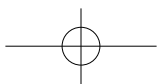
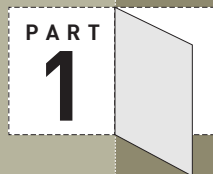
# Marine Section





해상구간

# 제 1장 해상하부공







## 제1절 | 설계 현황

### 1.1. 개요

인천대교의 해상 구간(민간투자사업구간에 해당) 교량 설계는 국내에서 처음으로 상부 및 하부 구조 모두에 하중·저항계수설계법(load and resistant factor design, LRFD)을 적용하였다. 설계기준은 미국의 “AASHTO LRFD Bridge Design Specification”이며, 세부 항목에 따라서는 일본의 “道路橋示方書”, 우리나라의 “도로교설계기준” 등을 부분적으로 혼용하였다.

특히, 기초구조물 설계에 LRFD를 적용하는 것은 우리나라에서는 유례가 없는 일로서, 국내 최장대 교량이자, 준공시점(2009년 10월 예정)에서 세계 5위 규모의 사장교가 될 인천대교는 설계기술면에서도 우리나라 교량 건설사에 큰 획을 그게 될 것이다.

현재 우리나라를 비롯한 대부분의 국가에서는 기초 설계에 허용응력법을 사용하고 있으나, 유럽 및 북미에서는 지반공학적 설계에 하중·저항계수설계법(LRFD)을 본격적으로 도입하고 있는 추세에 있다. 인천대교의 경우 민간자본을 투자하는 민자사업 구간에 우리나라 SOC 민자사업 최초로 외국인(영국 AMEC사)이 사업시행자로 참여하면서 외국 기준(AASHTO LRFD)의 적용이 불가피하였으며, 반면 전액 국가예산을 투입하는 국고구간은 국내 기준에 따라 허용응력설계법(ASD)을 적용하게 되어, 같은 노선의 교량을 구간별로 이원화된 설계를 하게 되었다. LRFD를 적용한 민자구간에서는 미국의 AASHTO 시방서를 근간으로 각 한계상태별로 다양한 하중조합에 대해 하중계수를 적용하여 상부하중을 산정하고, 기초의 지지력 평가시에는 조건별로 저항계수(resistance factor)를 적용하여 기초 설계를 진행하였다. 기본설계시에는 AASHTO LRFD 시방서(2판)의 저항계수를 그대로 반영하여 기초의 지지력을 평가하였으나, 실시설계시에는 해상에서 실시한 세계 최대하중의 연직재하시험 결과와 미국 TRB (2004) 등의 연구성과를 분석하여 별도의 저항계수 체제를 개발, 적용함으로써 현장의 지반 특성 및 시공 조건, 품질 수준의 영향을 반영하도록 노력하였다.

인천대교 민자구간의 지반 및 기초 설계는 사업수행요건(Project Performance Requirements, PPR)에 언급되어 있는 바에 따라 “AASHTO LRFD Bridge Design Specifications(교량설계기준), SI 단위, 2판, 1998(1998~2003 중간개정본)”을 따르며, 다음의 설계기준들을 추가적으로 적용하였다.

- FHWA-IF-99-025, Drilled Shafts : Construction Procedures and Design Methods(1999)
- NAVFAC, Design Manul 7.1, 7.2 (1982)
- 일본 도로교 시방서(2002, 일본도로협회)

또한, 설계의 세부항목에 따라서는 여러 가지 국내의 설계기준들을 참조하였다. 인천대교 민자구간의 교량 설계에 적용한 재료는 정부에서 사업시행자에게 제시한 과업수행요건(PPR, project performance requirements)에 따른다. 말뚝 콘크리트의 28일째 압축강도는 30 MPa 이상이며, 설계자가 별도로 규정할 수 있다. 철근은 ‘AASHTO M31(ASTM 615) grade 60 (400 MPa)’을 사용한다. 연성의 확보 또는 용접의 필요성이 있는 경우에는 ‘ASTM A706 grade 60 (400 MPa)’을 적용하거나, 설계자가 별도로 규정한다. 이와 동등한 한국의 재료표준이 있을 경우는 설계기준과 시공기준에 적용할 수 있다. 구조용 강재는 도면에서 별도로 규정한 경우 외에는 AASHTO LRFD 기준에 따르거나 동급 이상의 국내산 재료이어야 한다. 부재별 설계적용 강도는 다음과 같다.

#### (1) 현장타설말뚝 (drilled shaft)

- 콘크리트 : 압축강도( $f'_c$ ) = 30 MPa, 탄성계수( $E_c$ ) = 26.3 GPa, 골재 최대직경( $G_{max}$ ) = 20mm
- 철근 : 이형철근(deformed bar) SD40 등급, 항복강도( $f_y$ ) = 400 MPa
- 강관케이싱 : SS400 등급,  $f_y$  = 240 MPa

#### (2) 파일 캡 (pile cap, 푸팅)

- 콘크리트 :  $f'_c$  = 35 MPa,  $E_c$  = 28.4 GPa,  $G_{max}$  = 20mm
- 철근 : 이형철근(deformed bar) SD40 등급,  $f_y$  = 400 MPa



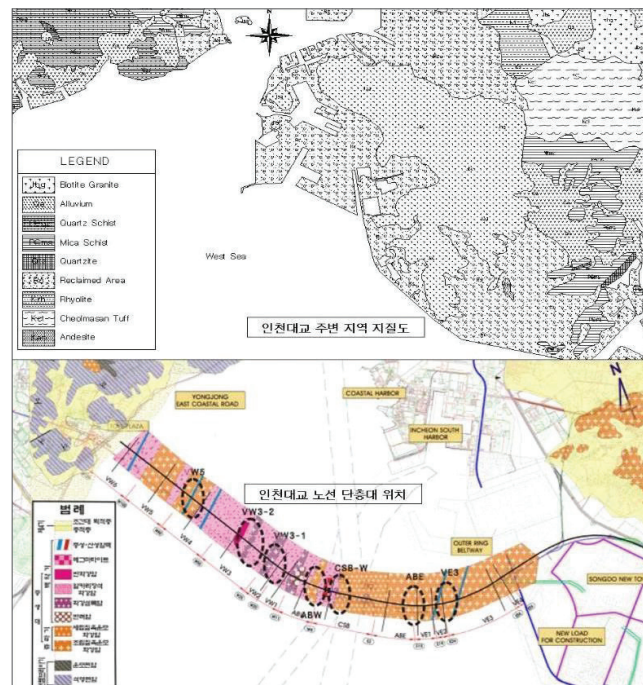


## 1.2. 지반 조건

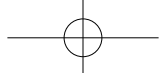
인천대교 건설 지역은 한반도 지체구조상 경기육괴에 속하며, 기반암은 선캄브리아기 경기편마암복합체에 해당하는 변성암류, 중생대 주라기의 퇴적암류 및 화성암류, 백악기의 화산암류로 구성되어 있다. 사장교 구간은 대부분 세립질의 흑운모화강암이 분포하고, 페그마타이트와 산성암 맥이 현재한다. 사장교 서측구간은 세립질 및 조립질 흑운모화강암과 화강섬록암, 알칼리장석화강암이 주를 이루고, 이들 암석을 페그마타이트, 산성 및 중성암맥이 관입한다. 풍화암층은 해저면 아래 18~35m 깊이 정도에서부터 나타나며, 그 두께는 지점에 따라 편차가 큰 편이다. 연암 및 경암 등의 기반암은 사장교 구간 및 동측 고가교 구간에서 해저면 아래 40~50m, 서측 고가교 일부 구간에서는 해저면 아래 100m 깊이 정도에 분포하여 풍화암의 발달상태 차이가 심하다.

한편 시추조사시에 다수의 단층구조가 인지되어 관찰된 단층관련 구조를 총 7개의 지점으로 구분하였다. 조사지역의 일부 시추공에서 소규모의 단층대 및 전단균열대가 관찰되었고, 단층구조는 단층각력암 및 단층점토 등이다. 단층운동과 관련되어 형성된 단면면에서는 단층조선이 관찰되었다. 기반암 상부에는 제4기에 형성된 천해 해성퇴적층이 해안지역에 퇴적되어 분포하고 있다.

이 지역은 경기만의 조간대에 속하여 조석간만의 차가 크다. 인천항을 기준으로 조석 간만의 차는 연평균 약 6.5m이며, 평균 최소 소조차는 3~3.5m, 평균 최대 대조차는 8~9m 가량이다. 넓은 중간 조간대가 만의 양쪽 측면을 따라서 분포하고 있다.







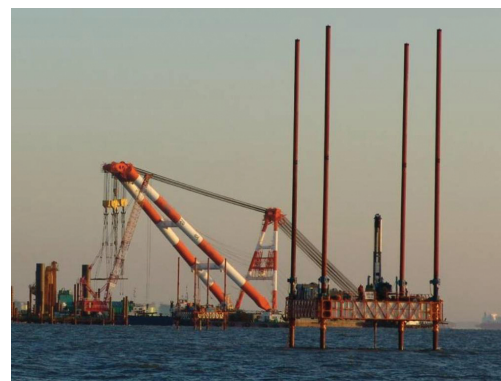
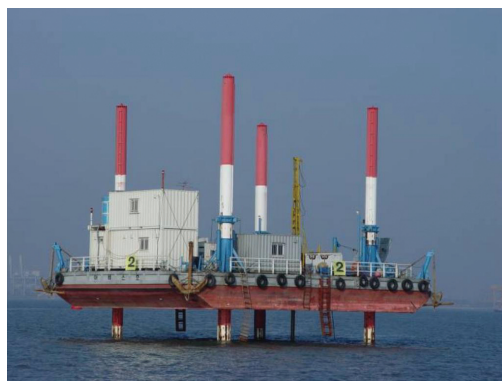
인천항의 입구인 황해를 지나는 인천대교 해상구간의 하부지반은 최대수심(주경간) 20m의 바다 아래 해저면부터 해성퇴적층, 풍화토, 풍화암, 연암 및 경암의 순으로 지층이 분포하며, 일부 구간(민자구간 제작장 등)은 해저면 상부에 매립층이 있다. 해성퇴적층은 육지로부터 해양으로 유수의 운반 및 퇴적작용과 조석간만의 차이로 인한 침식 및 운반작용 등의 과정을 통해 형성되어 복잡한 퇴적분포 양상을 보이며, 점토, 실트, 모래로 구성되어 있다. 풍화토는 기본 조직은 그대로 남아 있으나 모암이 완전히 풍화되어 화학적 조직 및 역학적 성질을 상실하고 실트 섞인 모래로 분해되어 원 위치에 그대로 잔류되어 있는 지층이다. 풍화암은 모암이 풍화작용에 의해 변질되어 형성된 지층으로 모암의 조직형태는 그대로 보존하고 있으나 모암이 토사로 변해가는 과정이고 암질이 부식된 상태여서 상부의 풍화토층과 명확히 구분하기에 어려움이 있어 시추조사시 표준관입시험에 의한 N값 50회/15cm를 기준으로 구분하는 것을 원칙으로 하였으며, 또한 암편 상태 및 굴진속도 등을 고려하였다.

연암은 풍화암보다 신선하고 높은 강도를 가지나 절리 및 균열 등을 따라 풍화 또는 변질작용을 받은 상태로써 시추조사시 코아회수율 및 암질비가 불량한 지층이다. 이 층의 지층경계 판단은 코어회수율(TCR), 암질지수(RQD), 현장강도, 풍화도, 절리발달 상태를 기본으로 굴진속도, 순환수의 누수 및 슬라임 등을 고려하여 구분하였다.

경암은 연암보다 상대적으로 강도가 크고, 절리 및 균열이 심하지 않으며, 지질구조를 따라 약간의 변질작용을 받은 상태로 시추조사시 코아회수율이 비교적 높은 편이다. 본 층의 지층경계 판단은 연암층과 마찬가지로 TCR, RQD, 현장강도, 풍화도, 절리발달 상태를 기본으로 하여 구분하였으며, 굴진속도, 순환수의 누수 여부 등을 고려하였다.

시추조사는 SEP(self elevating platform) 바지선을 이용하여 교각 위치마다 실시하였다. 특히 말뚝과 교각 기둥이 일체화된 파일벤트(pile-bent)의 경우는 모든 말뚝 위치마다 시추조사를 실시하고 암석코어를 채취하여 지반의 상태를 확인하였다. 시추조사 중에는 표준관입시험을 실시하였으며, 공내전단시험, 공내재하시험, 공내탄성파탐사 및 음파탐사(suspension PS 검층), 밀도 검층, 주사검층(BH-TV) 등을 수행하였다.

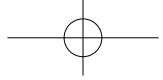
굴절법 및 반사법에 의한 해상 탄성파 탐사 및 탄성파 토모그래피 탐사를 수행하였으며, 토공 구간인 영업소 연약지반에서는 피에조콘관입시험과 베인전단시험을 실시하였다. 실내시험으로는 기본 물성시험과 삼축압축시험, 반복삼축압축시험, 압밀시험, 공진주시험 등을 수행하였다. 해상에서는 이 외에도 해상자력탐사(세습자력계로 해저의 불발탄 유무 탐사), 음향측심탐사(해저 지형 및 수심 분포 조사), 다중빔음향탐사(MBES, 해저지층 구조 및 층서 조사) 등의 특수한 지구물리학적 탐사를 실시하였다.



> SEP바지를 이용한 지반조사

지반공학 설계 항목		조사 내용
액상화 평가		○ 상부 20m 지층의 지반현황 및 지하수위 (지층분포 / N 값 / 전단파속도 / 기타 물리적 특성치)
말뚝 기초 설계	(a) 지지층	○ 지층분포 ○ N 값 ○ 강도, 변형 특성 ○ TCR, RQD
	(b) 연직지지력	○ 지층분포 및 강도, 물리적 특성 (암반포함) ○ N 값
	(c) 침하량 분석	○ 암반의 변형계수
	(d) 횡방향 안정	○ 지층분포 ○ 수평지반반력계수
연약지반 설계		○ 지층분포 ○ 실내역학시험 ○ CPT <sub>u</sub> 등 원위치 시험





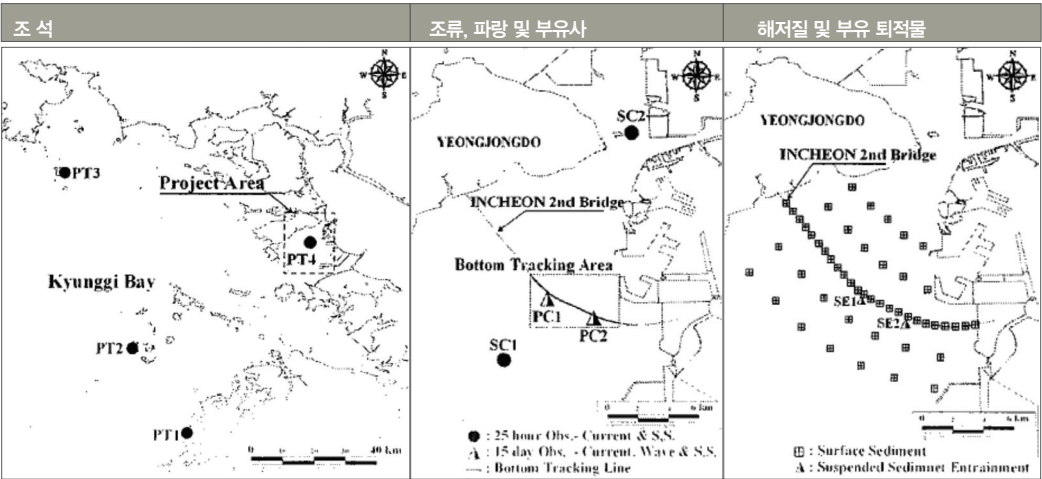
1.3. 해양 조사

(1) 조사 개요

> 해양조사 개요

조사 항목		조사기간	장점	조사목적 및 설계 반영 사항	조사 기기
조석		2004.12.22 ~2005. 1.22	4점 (PT1~PT4)	조석 특성 파악 수치모델 입력 및 보정 · 검증 자료	수압식 검조기 (XR-420-TG)
조류	연속조류	2004.12.22 ~2005. 1.10	2점 (PC1, PC2)	유동 특성 파악 수치 모델 보정 · 검증 자료	초음파식 다층 유속계(ADCP)
	층별조류	2004.12.26 ~2004.12.28	2점 (SC1, SC2)	유동 특성 파악 수치 모델 보정 · 검증 자료	
	단면 다층 조류	1측선×3회 (대 · 중 · 소 조기)	—	유동 특성 파악 수치 모델 보정 · 검증 자료	
파 랑		2004.12.22 ~2005. 1.10	2점 (PC1, PC2)	단기 파랑 특성 파악 부유사 이동 특성 파악	Grab Sampler SediGraph
해저질		2004.12.22 ~2005. 1.10	50점 (B01~B50)	퇴적 환경 파악 퇴적물 이동 수치모형 실험 입력 자료	
부유 퇴적물	연속 부유사	2004.12.22 ~2005. 1.10	2점 (PC1, PC2)	부유 퇴적물 이동 양상 파악	초음파식 다층 유속계(ADCP)
	층별 부유사	2004.12.26 ~2005.12.28	2점 (SC1, SC2)	부유 퇴적물 이동 양상 파악	
	부유 퇴적물 특성	2004.12.22 ~2005. 1. 6	2점 (SE1, SE2)	퇴적 환경 파악 퇴적물 이동 수치모형 실험 입력 자료	S.E.D Owen Tube SediGraph

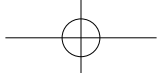
> 조사 정점도



(2) 조석(2004.12.22~2005. 1.22)

- 과업 대상 지역은 대조차 환경으로서 900cm 이상의 약최고조위를 나타냄.
- 인천항 기준조석과 전점 PT4의 비노화 상수에 큰 차이가 없으므로, 인천항 조위를 설계 조위로 사용





### > 조사 정점도

항목	조위(D.L. cm)		조위 면도
	인천항	PT4	
10,000 년 빈도 고조위	1,074		
100 년 빈도 고조위	1,013		
기왕고극조위(Obs. H.H.W.)	1,003		
약최고조위(Approx. H.H.W.)	927	923	
대조평균고조위(H.W.O.S.T.)	862	859	
평균고조위(H.W.O.M.T.)	750	743	
소조평균고조위(H.W.O.N.T.)	637	627	
평균해면(M.S.L.)	464	461	

### (3) 조류(2004.12.22~2005. 1.22)

- 조사 기간 동안 전반적으로 낙조시의 유속이 빠름.
- 조사 기간 동안 교량 건설 예정구간 서측에서의 유속이 상대적으로 크게 나타남.

### > 조류 조사 결과

구분	창조최강 유속(cm/s)			낙조최강 유속(cm/s)			단면 다층 조류(대조기)
	표층	중층	저층	표층	중층	저층	
PC1	85.4	74.8	74.8	107.9	90.4	90.4	
PC2	83.5	79.8	66.7	83.0	75.0	65.2	
SC1	67.6	66.8	58.0	83.8	75.1	56.2	
SC2	74.1	79.8	75.3	94	78.5	57.8	

### (4) 파랑(2004.12.22~2005. 1.22)

- 정점 PC1 : 조사 기간 동안 최대파고는 1.55m, 유의파고의 최대치는 0.87m 임.
- 정점 PC2 : 조사 기간 동안 최대파고는 1.29m, 유의파고의 최대치는 0.79m 임.

### > 파랑 조사 결과

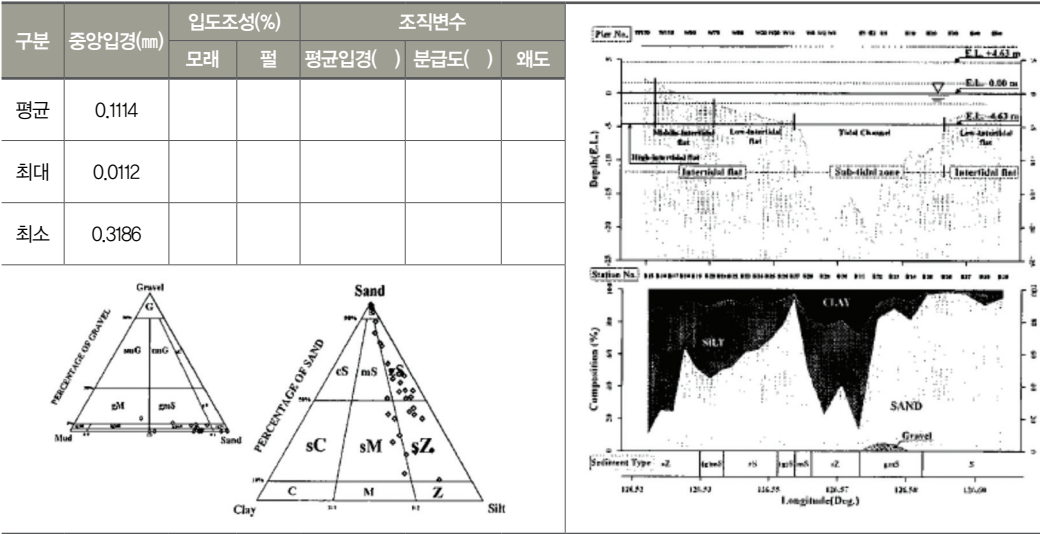
구분	PC1(m)		PC2(m)		단면 다층 조류(대조기)
	Hmax	Hs	Hmax	Hs	
평균	0.51	0.31	0.44	0.27	
최대	1.55	0.87	1.29	0.79	



(5) 해저질(2004.12.22~2005. 1.10)

- 조사 기간 동안 대상 해역의 해저질은 사질과 펄질의 혼합 토적상을 나타냄.
- 교각 건설 예정구간의 토적환경은 수심과 토적물의 특성을 기준으로 조간대와 조하대로 구분할 수 있음.

> 해저질 조사 결과



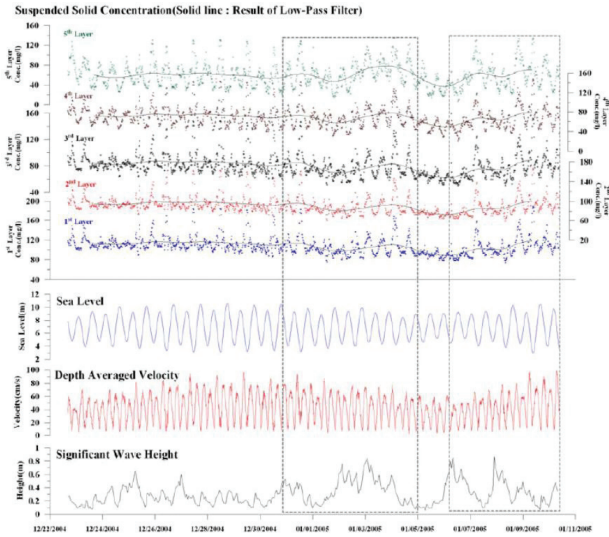
(6) 부유 퇴적물(2004.12.22~2005. 1.10)

- 조사기간 동안 정점 PC1의 부유사 농도는 파고의 영향이, 정점 PC2와 SC1에서는 조류속의 영향이 우세하게 나타남.
- 기존자료 분석 결과 부유 물질의 평균 농도가 겨울철에 가장 높게 나타남.

> 부유사 농도(mg/l)

구분		PC1	PC2	SC1	SC2
범위		5~189	11~190	46~173	23~197
평균농도	표층	60	45	59	57
	중층	80	66	86	73
	저층	108	68	119	99

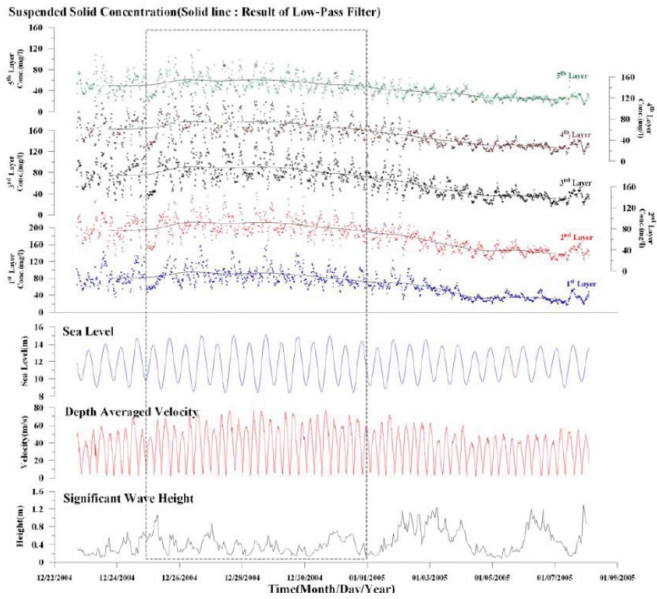
> 층별 부유사 농도와 조위, 수심평균유속 및 유의파고 시계열(정점 PC1)







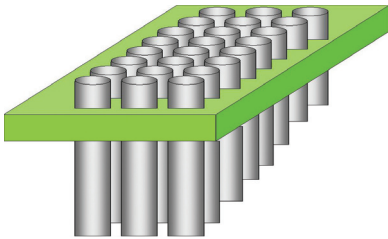
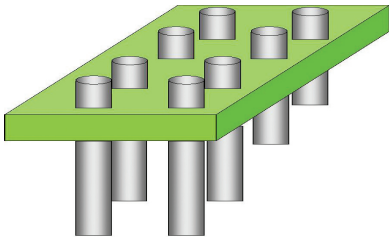
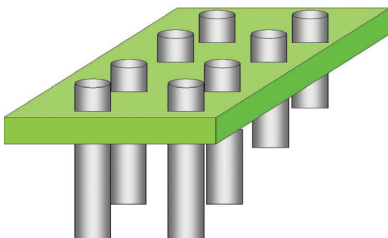
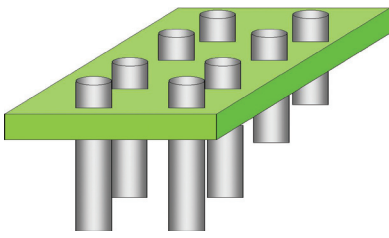
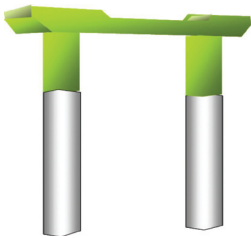
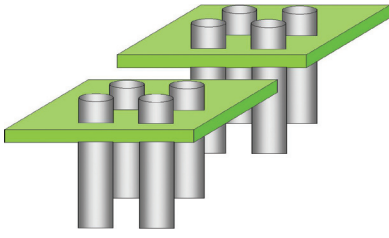
> 층별 부유사 농도와 조위, 수심평균유속 및 유의파고 시계열(정점 PC1)



1.4. 기초 설계 현황

구 분			교량형식 (가설방법)	경간 구성	교각번호	말뚝직경 D (mm)	교각별 말뚝 수	기초TYPE (Pc House)	말뚝선단 지지층
서 측	고 가 교	일반구간	PSC BOX 거더. (FSLM)	104@50=5,200m	W85~W128	2,400	1EA×2	PILE BENT	풍화암 또는 연암
					W41~W84	2,400	1EA×2		
					W25~W40	2,400	1EA×2		
		경사-2		5@50=250m	W20~W24	3,000	1EA×2		
	경사-1	10@50=500m	W11~W19	1,800	4EA×2	PILE CAP (11×11m)-2조			
접속교		PSC BOX 거더. (FCM)	82+5@145+82 =889m	W4~W10	2,400	8EA	PILE CAP (28.2×13m)-1조	연암 또는 경암	
사 장 교	단 부	강상판형교	80+260+800+260+80 =1,480m	W2,W3	3,000	8EA	PILE CAP (24×11m)-1조		
	주탑부			W1,E1	3,000	24EA	PILE CAP (70×25m)-1조		
	단부			E2,E3	3,000	8EA	PILE CAP (24×11m)-1조		
동 측	접 속 교		PSC BOX 거더 (FCM)	82+5@145+82 =889m	E4~E6	2,400	8EA	PILE CAP (28.2×13m)-1조	풍화암 또는 연암
					E7~E10	2,400	8EA		
	고 가 교	경사-1	PSC BOX 거더 (FSLM)  ※ 일부구간은 해상크레인 가설	10@50=500m	E11~E19	1,800	4EA×2	PILE CAP (11×11m)-1조	
		경사-2		5@50=250m	E20~E24	3,000	1EA×2	PILE BENT	
		일반구간		34@50=1,700m	E25~E59	2,400	1EA×2		



구 분		주 탑 부(E1, W1)	중간, 단부 교각(E2, E3, W2, W3)
사장교	배 치	<div>• 배치 : D3.0m×24본(전체 48본)</div> 	<div>• 배치 : D3.0m×8본(전체 32본)</div> 
	근입 조건	<div>• 최대 축하중 : 68.20 MN/본</div> <div>• 암반 평균소켓길이 : 10m</div> <div>• 말뚝 평균길이 : 61m (최대 73m)</div>	<div>• 최대 축하중 : 47.10 MN/본</div> <div>• 암반 평균소켓길이 : 10.2m</div> <div>• 말뚝 평균길이 : 57m</div>
구 분		서측 접속교 (W4 ~ W10)	동측 접속교 (E4 ~ E10)
접속교	배 치	<div>• 배치 : D2.4m×8본(전체 56본)</div> 	<div>• 배치 : D2.4m×8본(전체 56본)</div> 
	근입 조건	<div>• 최대 축하중 : 63.50 MN/본</div> <div>• 암반 평균소켓길이 : 15.2m</div> <div>• 말뚝 평균길이 : 55m</div>	<div>• 최대 축하중 : 57.10 MN/본</div> <div>• 암반 평균소켓길이 : 14.2m</div> <div>• 말뚝 평균길이 : 60m</div>
구 분		단일 현장타설말뚝 (pile bent)	다주식 현장타설말뚝 (pile cap)
고가교	배 치	<div>• 배치 : D2.4m×2본(일반구간)D3.0m×2본(경사구간)</div> 	<div>• 배치 : D1.8m×4본×2개소(파일캡)</div> 
		<div>• 총수량 : 300본(D3.0m=20본 포함)</div> <div>• 최대 축하중 : 35.40 MN/본</div>	<div>• 총 수 량 : 144본</div> <div>• 최대 축하중 : 15.77 MN/본</div>





### 1.5. 말뚝재하시험

인천대교의 말뚝재하시험은 연직방향 압축재하시험과 수평재하시험으로 구분하여 실시하였으며, 압축재하시험은 해상에서 4본, 육상에서 4본 등 총 8본의 시험말뚝을 대상으로 지지력 평가기준 수립을 위하여 실시설계 이전에 국한재하시험을 실시하였다. 시공 중에는 지층조건 변화에 따른 안정성 확인을 위하여 해상구간 동측 고가교 구간의 실제 사용말뚝을 대상으로 확인재하시험(proof test)을 추가로 실시하였다. 연직재하시험은 막대한 하중의 크기, 해상 조건임을 고려하여 말뚝의 선단에 설치한 유압잭을 이용하는 양방향 선단재하시험 방법을 적용하였다. 수평재하시험은 해상구간에서 축소 규격의 시험용 강관말뚝 3본을 대상으로 한 모형말뚝시험과 해상 및 육상 구간에서 사용말뚝을 대상으로 실시한 실규모 재하시험으로 나누어 시행하였다.

이 외에도 국내에서 최초로 시도하는 LRFD 기초설계인 점을 감안하여 상부 가설하중 재하시 기초의 안정성을 간접적으로 평가하기 위해 본말뚝에 계측기를 설치하여 시공 중 기초의 거동을 평가하고자 하였다.

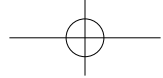
제작장 및 가벤트 등 가시설 기초, 토공구간의 교대 기초로 적용한 406mm, 508mm, 1.8m, 2.5m 등 다양한 직경의 강관말뚝에 대해서도 정재하시험과 동재하시험을 모두 실시하였다.

시험 구분	위치	시험일자	목적과 활용	말뚝제원
실규모 시험말뚝 연직재하시험	[해상구간] 주경간 교각 북단(4개소)	2005.2~3	지반의 실제 지지력을 확인하여 기초의 지지력 평가기준을 수립하고, 실시설계에 반영하거나 시공관리에 활용함	D3.0m 1본
	[육상구간] 3공구 유수지 (4개소)	2005.12~2006.3		D2.4m 3본
				D1.5m 1본
실물말뚝 연직재하시험	[육상구간] E57-2 교각	2006.10	지층 변화에 따른 연직 지지력 검증 (확인재하시험)	D2.0m 2본 D2.5m 1본
모형말뚝 수평재하시험	[해상구간] W107, W117 교각	2006.2~3	p-y 해석 결과 검증 및 말뚝의 횡방향 안정성 평가	D1.016mm 강관말뚝 3본
실물말뚝 수평재하시험	[해상구간] W108-1 교각	2006.5		D2.4m 1본
	[육상구간] 송도측 2,4,5공구	2006.6~2007.9		D1.5~2.4m 다수
시공 중 하중전이 계측	[해상구간] W75-1, W103-2 교각	2007.10 2008.2~3 2009.1	가설하중에 대한 파일-벤트 말뚝의 안정성 검토 하중전이 특성 분석	D2.4m 2본

해상구간의 경우 4본의 실규모 시험말뚝을 대상으로 최대 약 300 MN의 압축하중을 가하여 세계최대규모의 말뚝재하시험을 기록하였다. 시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

	TP-1 (E5교각) / (직경Ø3.0m)	TP-2 (W6교각) / (직경Ø2.4m)	TP-3 (W8교각) / (직경Ø2.4m)	TP-4 (E7교각) / (직경Ø2.4m)
시험 말뚝 시공 단면	해저면 EL-14.1m 외적출 Ø3,000 봉화암 EL-41.1m 연암 EL-48.1m EL-54.1m 경암 EL-55.4m	해저면 EL-11.6m 외적출 Ø2,400 봉화암 EL-48.6m EL-56.6m 연암 EL-59.6m EL-65.6m 경암	해저면 EL-5.5m 외적출 Ø2,400 봉화암 EL-36.0m 연암 EL-43.2m EL-41.2m 경암 EL-61.5m	해저면 EL-11.2m 외적출 Ø2,400 봉화암 EL-38.7m 연암 EL-48.2m EL-52.3m 경암 EL-54.7m
	경암의 선단저항력 봉화암, 연암의 주변마찰력	봉화암의 선단저항력 봉화암의 주변마찰력	연암의 선단저항력 봉화암, 연암의 주변마찰력	연암의 선단저항력 봉화암, 연암의 주변마찰력
	말뚝 선단 근입 조건 경암층 내 0.9m 근입	봉화암층 내 8.0m 근입	연암층 내 8.0m 근입	연암층 내 4.1m 근입
	예상 지지력 극한지지력 : 24,160 tonf 주변마찰력 : 7,520 tonf 선단저항력 : 16,640 tonf	극한지지력 : 3,590 tonf 주변마찰력 : 2,400 tonf 선단저항력 : 1,100 tonf	극한지지력 : 15,590 tonf 주변마찰력 : 7,560 tonf 선단저항력 : 8,040 tonf	극한지지력 : 9,730 tonf 주변마찰력 : 5,160 tonf 선단저항력 : 4,570 tonf
	O-cell의 설치위치 말뚝 선단 : 경암층 상단 (셀 수량 5개)	말뚝 선단 : 봉화암층 (셀 수량 2개)	말뚝 선단 : 연암층 (셀 수량 4개)	말뚝 선단 : 연암층 (셀 수량 3개)
	말뚝유효장 40.1 m	44.2 m	45.1 m	40.0 m
예상 하중	21,000 tonf	9,000 tonf	17,000 tonf	12,000 tonf
적용 하중	28,958 tonf	13,500 tonf	24,531 tonf	17,369 tonf

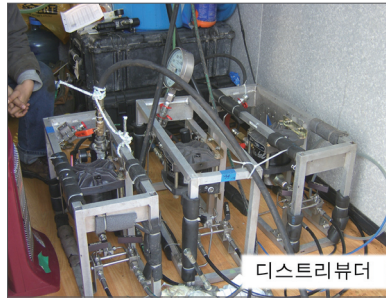
\* 말뚝유효장(effective pile length) : 말뚝 내 콘크리트 강단면(해저면 아래 90cm 깊이까지 타월)부터 하부의 선단까지 길이



철근망근입



건전도 시험

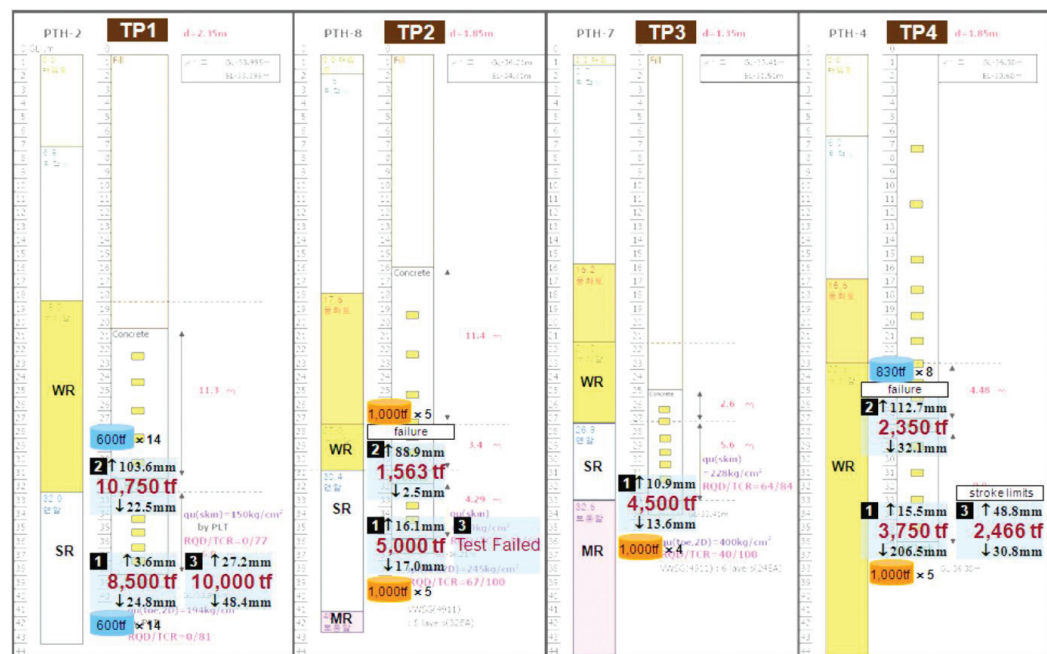


디스트리뷰터



재하시험 광경

> Osterberg cell을 이용한 해상의 연직재하시험 장면

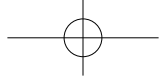


> 육상구간 연직재하시험 결과

재하시험을 통해 말뚝의 하중-변위 관계와 하중전이 특성을 분석하고, 지층 특성을 고려하여 암반별로 단위 지지력을 산정하였다. 수평재하시험의 목적은 말뚝의 횡방향 거동 설계에 적용한 p-y 모델을 검증하고 말뚝의 실제 횡방향 안정성을 검증하기 위한 것이다. 영종도측에 접한 가교 구간에서 강관말뚝을 이용한 축소모형 수평재하시험을 3회 실시하고, 서측 고가교 구간에서 시공 완료된 실물말뚝 1본을 대상으로 실물 수평재하시험을 수행하였다. 또한 송도측 국고구간 실물 수평재하시험을 공구별로 각 1회 이상씩 실시하였다.

수평하중-변위 분석 결과는 수평변위 실측값은 예측값보다 작게 나타났으며, 말뚝의 깊이별 변위는 하중단계별로 예측한 값과 시험 값이 유사한 경향을 보여, 설계시 적용한 p-y 해석모델과 지반 특성은 적절한 것으로 확인되었다. 말뚝 머리의 변위는 실측값이 예측값보다 작아 말뚝의 설계가 안전측인 것을 알 수 있었다. 측정된 변형률로부터 말뚝 본체의 응력과 모멘트를 산정하였다.





> 실물말뚝 수평재하시험 전경

실제 사용말뚝에 대한 수평재하시험시에는 말뚝의 불필요한 손상을 방지하기 위하여 사전에 균열응력 수준을 검토하고, 시험 중에는 말뚝 내에 설치한 변형률계를 통해 말뚝 본체의 응력을 측정하여 균열응력과 실시간으로 비교하였다. 그리고, 서측 고가교의 VW4 구간과 VW5 구간의 말뚝 각 1본씩, 총 2본(직경 2.4m)을 선정하여 동측 고가교 구간의 확인재하시험말뚝에 투입되는 계측기와 동일한 형식의 변형률계를 말뚝 종축을 따라 배치한 후, 시공 중 가설하중을 이용하여 하중전이시험을 실시하여 단일현장타설말뚝을 적용한 파일-벤트 기초에 대하여 안정성을 검증하였다.

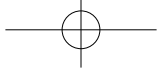
#### 1.6. 내구성 설계

인천대교 해상구간 구조물의 내구성 설계는 미국콘크리트학회 수명평가위원회에서 제안한 Life-365 모델을 적용하여 검토하였다. Life 365는 미국 콘크리트학회수명평가 위원회(Committee 365)에서 개발한 프로그램으로 2001년에 염소이온 침투에 의한 철근부식 발생에 따른 내구수명 평가를 위하여 개발되었으며, 현재까지 여러 프로젝트에 사용되고 있다.

설계 조건은 다음과 같다.

- 말뚝 : 해수중과 간만대, 설계기준강도 30MPa
- 교각 : 해상 대기중, 설계기준강도는 35MPa
- 거더 : 해상 대기중, 설계기준강도는 45MPa

적용 구조물			환경 조건	콘크리트 종류	피복두께 (mm)	강관내구수명 (강관두께)	구조물내구수명 (콘크리트내구수명)
사장교 말뚝	주탑 (D3.0m)	소켓부	해수중	30MPa (W/B 40%)	107	0년	105년
		강관부	간만대		115	55년(22mm)	158년(101)
	앵커교각 (D3.0m)	소켓부	해수중		107	0년	105년
		강관부	간만대		115	55년(22mm)	156년(101)
접속교 말뚝	(D2.4m)	소켓부	해수중		107	0년	105년
		강관부	간만대		115	45년(18mm)	146년(101)
고가교 말뚝	파일캡 (D1.8m)	소켓부	해수중		107	0년	105년
		강관부	간만대		115	35년(14mm)	136년(101)
	파일벤트 (D2.4m)	소켓부	해수중		107	0년	105년
		강관부	간만대		115	45년(18mm)	146년(101)
	파일벤트 (D3.0m)	소켓부	해수중		107	0년	105년
		강관부	간만대		115	55년(22mm)	156년(101)



적용 구조물	환경조건	콘크리트 종류		피복두께	구조물 내구수명
		설계강도	혼화재 종류		
모든 파일캡	간만대	35 MPa (W/B 38%)	BFS 50%	115 mm	101 년
교각	EL. 5.5			80 mm	104 년
고가교 피어캡	EL. 7.0			75 mm	124 년
사장교 주탑	EL. 13.0	45MPa (W/B 32%)	BFS 50%	60 mm	231 년
고가교 거더	EL. 10.0		BFS 50%	60 mm	180 년
접속교 거더	EL. 34.0		FA15%+BFS 35%	60 mm	191 년
			BFS 50%	45 mm	336 년
			FA15%+BFS 35%	45 mm	365 년

## 제2절 | 시공 계획 및 준비

### 2.1. 굴착공법

인천대교의 해상 대구경 말뚝은 역순환굴착(Reverse Circulation Drilling, RCD) 공법을 위주로 하여 토사층에는 해머 그래브 굴착을 병용하는 방식으로 시공한다. 역순환굴착공법은 현장타설말뚝의 기계식 시공을 위해 널리 적용되는 공법이다. 육상 구간에서는 오실레이터와 케이싱을 사용하는 베노토 공법, 비트가 부착된 케이싱을 로테이터로 회전압입하는 돛바늘 공법, 대구경 굴착이 가능한 어스드릴 공법을 병용하였다. 그러나 육상 구간에서도 암반층을 굴착 할 때에는 모두 RCD 공법을 적용하였다.

RCD 공법은 스탠드 파이프(케이싱)로 지반의 표층을 보호한 후 물을 사용하여 정수압으로 공벽을 안정시키고, 이후의 깊이에서는 케이싱 없이 나공 상태로 굴착이 가능한 공법이다. 굴착방법은 로타리 테이블의 회전력으로 드릴의 선단에 취부된 특수 비트를 회전시키면서 지반을 절삭하고, 석션 펌프나 에어 리프팅 방식으로 토사를 흡입하여 드릴파이프를 통하여 공외로 배출한다. 이때 배출된 니수는 침전지로 유도시켜 토사를 침전시키며, 토사가 어느 정도 침전된 후 상등수는 수중펌프 또는 자연압에 의하여 다시 굴착공 내로 순환시켜 재활용하는 역순환 니수 굴착공법이다. 인천대교는 바다에서 작업을 하므로, 공벽 보호를 위해 영구적인 강관 케이싱(희생강관)을 사용하고 해수를 그대로 사용하며, 이수는 적용하지 않았다.

### 2.2. 제작장 운영

현장타설말뚝에 사용되는 희생강관과 철근이 적기에 공급이 되도록 자동화시스템을 도입하여 육상 제작장에서 제작 및 가공, 조립한 후 해상으로 운반하여 설치하는 방법으로 해상에서 인력 작업을 최소화하여 품질 및 안전성 향상을 도모하였다.

제작장은 6개월의 공사기간과 VE의 개념을 도입한 경제성 등을 고려하여 Fast Track 방식에 부합하고, 작업 및 운영효율을 극대화하도록 계획하였다. 제작장의 효율적인 운영을 위하여 공사 진행순서에 따라 단계1, 단계2로 구분하여 운영한다. RCD 강관조립은 단계2의 고가교 및 접속교 생산라인을 활용하여 제작비용이 최소화되도록 하였다.

- 위치 : 중점부(송도측) 남단 7Km 지점(인천 LNG기지 북측 전면 매립지)
- 면적 : 132,000㎡ (FSLM 제작장 33,000㎡)
- 접안시설 : 안벽 400m

제작장에서는 우선 현장타설말뚝 케이싱에 소요되는 대구경 강관을 송도의 육상 제작장에서 직접 제작하여 품질을 확보하고, 다량의 소요물량을 원활히 공급하여 공기 준수에 차질이 없도록 하였다. SS 400 등급의 강관은 각 말뚝의 길이에 맞추어 제작하며, 운송 및 작업의 편의를 위하여 일부는 현장이음을 실시하였다. 강관의 길이는 양중시 크레인의 제원을 고려해서 30, 36, 40, 42m로 조절 생산하였다. 강관 길이가 짧으면 용접량이 많아져 작업 시간이 늘어나고, 길이가 너무 길어지면 크레인의 인양 능력이 문제가 된다. 현장에서 말뚝의 굴착 여건 변화에 따른 강관 길이의 변동이 발생할 경우는 현장이음으로 조절하였다.





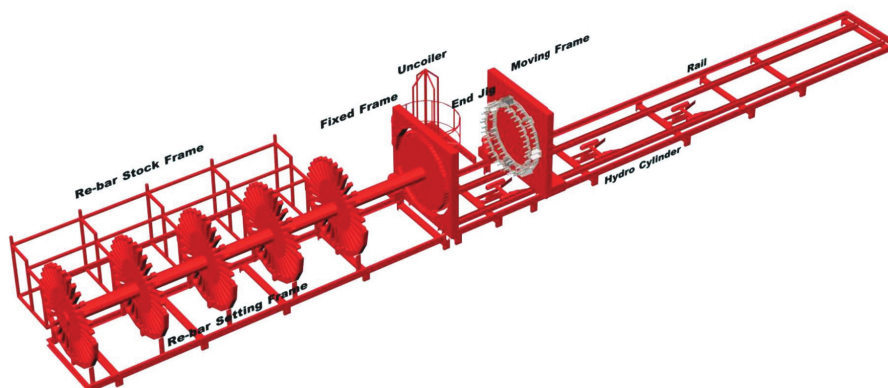
구 분		단위	수 량	비 고
제작수량	D3000mm×22t	본	100	사장교, 고가교 VW2, VE2
	D2400mm×18t	본	352	접속교, 고가교 파일벤트 구간
	D1800mm×14t	본	144	고가교 파일캡 구간
	계	본	636	총중량 42,000 tonf
제작기간		2005. 07 - 2006. 07		

	생산능력	생산방법
	3본(180톤)/1일 ※ 50m 완성본기준	6m 길이로 용접하여 이음한 후 기본 30m형으로 제작 (크레인 용량에 따라 탄력적 제작)

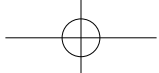
직경 3m(길이 6m 기준 소요 강판량 98.3 tonf), 2.4m(길이 6m 기준 소요 강판량 58.7tonf) 강관은 하루에 각각 10개(6m 길이 단품 기준) 정도씩 생산하였다. 지중에 타입시 큰 관입저항을 받게 되는 강관의 선단부는 내마모성이 큰 고강도의 강재를 이용하여 원형으로 보강하였다. 현장타설말뚝에 사용하는 철근망은 제작장에서 절단, 절곡, 가공, 조립 등의 과정을 거쳐 생산하였는데, 국내 최초로 철근망 자동제작 시스템을 개발하여 적용하여 기존의 인력 제작에 비해 품질을 향상하고 인력절감 및 자재 손실의 문제점을 개선하였다. 철근망의 자동 제작을 위하여 띠 철근 대신에 나선 철근(spiral bar)을 사용하였으며, 주철근으로 이용하는 51mm 직경 강봉의 단부 가공을 위해 별도의 공장 설비를 제작장에 갖추었다.

> 현장타설말뚝 철근망 생산 개요

구 분		단위	수 량	비 고
제작수량	D3000mm	본	100	
	D2400mm	본	352	
	D1800mm	본	144	
	계	본	636	32,000 tonf
제작기간		2005. 06 - 2006. 10		
특성		1. 국내 최대규모 해상 RCD 공사 2. 대구경(D3000mm) 적용 3. 국내 최대직경 철근(D51mm) 사용 4. 나선철근 사용		



> 철근망 제작 자동화 시스템 개요도(건설교통부 신기술 478호)



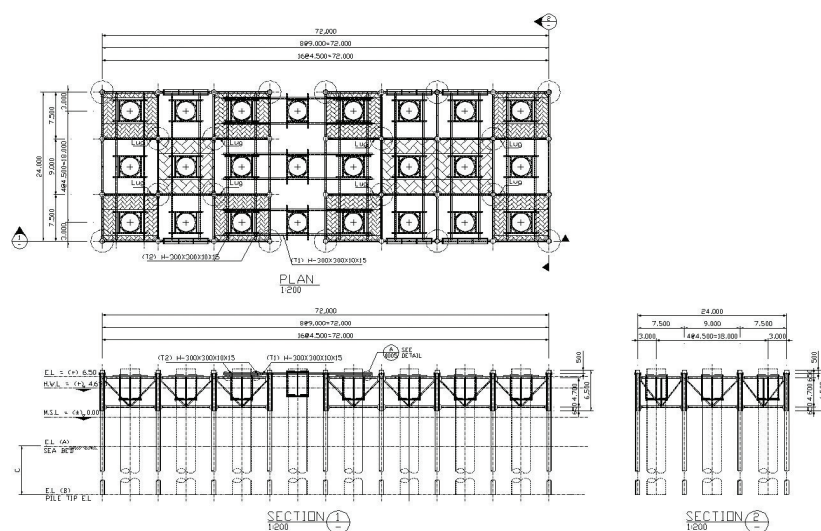
기계화 공정 도입에 의한 철근망의 자동 조립을 통해 장대교량의 엄청난 하중을 지지해야 하는 관계로 비교적 복잡한 구성으로 이루어진 말뚝 철근망의 가공 정밀도를 높이고, 인력 제작에 비해 3배 정도 빠른 공정 진행으로 작업 효율성을 극대화할 수 있었다.

작업의 주요 특징은 다음과 같다.

- 단위 길이인 12m를 기준으로 철근망 생산 (1일 15개 정도 생산)
- 커플러 연결을 위한  $\pm 3\text{mm}$  정밀도 유지
- 철근 손실을 최소화
- 제작장 공간 활용 극대화

인천항 주항로를 가로지르는 해상 장대교량인 인천대교는 조위차가 극심한 황해의 해상 조건에서 시공해야 하므로, 조류 및 수위에 관계없이 해수면에서 현장타설말뚝을 시공하기 위한 별도의 특수한 고정식 작업대가 필수적이다. 일반적인 플로팅 바지 작업대 형태로는 작업시 조류 및 항주파의 영향으로 말뚝 시공위치의 편차가 크게 발생할 수 있으며, 말뚝의 연직도 확보가 쉽지 않다. 또한 장비 손상 및 안전사고 등의 위험도 있다. 이에 따라 송도의 육상 제작장에서 작업대인 지그 재킷(jig jacket)과 가이드 프레임(guide frame)을 제작하여 해상으로 운반, 설치하였다.

기초 시공을 위한 해상 작업시에는 가이드 프레임을 부착한 작업대를 핀 파일로 해저면에 고정하여 사용하였으며, 낮낮이가 조절되는 고정식 바지인 중대형의 SEP 바지선과 대형 크레인을 함께 활용하였다. 사장교 구간의 작업대(jig jacket) 형태는 다음과 같다.



> 사장교 주탑부 기초 시공을 위한 해상 작업대

## 제3절 | 해상 시공

### 3.1. 시공 절차

인천대교 해상 구간 현장타설말뚝의 시공 기준과 주요 공정은 다음과 같다.

#### > 현장타설말뚝 주요 시공 기준

종 류	기 준
평면상 위치 편차	$\pm 75\text{ mm}$ 이내
철근망 스페이스 간격	3~5 m
말뚝(강관) 연직도	말뚝 길이의 1/100 이내
굴착 중 공내 수위	해수면보다 2m 이상 유지
트레미관 매입 길이	콘크리트 내 묻힌 깊이를 2 m 이상으로 유지





### ● 시공 준비

- ① 작업 실시 지반의 지지력 확보 및 보강. 해상에서는 해저면에 고정되는 SEP(self elevating platform) 바지선을 이용하여 작업함. 일부 구간은 부유식 바지선 이용.
- ② 소음, 진동에 대한 주변 환경을 조사하고 영향이 있는 경우 사전 대책을 강구함.
- ③ 말뚝 중심의 표시 및 확인

### ● 장비 거치

- ① 가설용 작업대(pile work platform, jig jacket) 설치
- ② 케이싱 강관 설치 위치 주변 및 장비 거치 위치의 안정성 확보
- ② 장비의 수평 보정 및 케이싱 강관의 연직도 동시 확인

### ● 내부 굴착

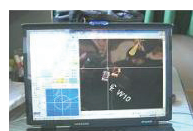
- ① 케이싱 강관 연직성에 유의하여 강관 타입을 신중하게 진행함.
- ② 해머 그레브로 굴착한 시료의 토질과 해당 깊이의 토질 주상도를 대비하여 확인
- ③ 지지층 깊이 확인 및 굴착 완료 후 근입 길이를 확인하고 굴착 최종 깊이 확인

### ● 공저 처리

굴착공 바닥면의 슬라임 처리는 에어 리프트(air lift) 방식 등으로 실시함

### ● 말뚝시공 및 완성

- ① 철근망 설치 및 트레미관 설치 ② 콘크리트 타설 및 타설 종료 후 높이 검측
- ③ 말뚝두부 정리 ④ 건전도 검사 실시 (공대공 초음파 검측)



1. 위치 측량  
• 해상위치 측량(GPS)



2. 작업대(Jig-Jacket) 설치  
• 핀-파일(Pin-Pile)을 타입하여 작업대 고정



3. 강관 1차 타입  
• 말뚝 중심위치 측량  
• 가이드 프레임 설치하여 정위치로 조정  
\*수평허용편차 75mm



4. 연직도 확인  
• 측량기와 수직추 활용  
\*연직도 1/100 이하



5. 해머 그레브 굴착(필요시)  
• 토사층 및 풍화암 일부는 해머-그레브를 이용하여 굴착 진행  
• 암반층에서 굴착으로 전환



6. 강관 2차 타입  
• Vibro-Hammer로 타입



7. RCD굴착  
• 강관 내부 및 나공부 (암반 소켓) 굴착 : 풍화암, 연암, 경암



8. 지지층 확인  
• 굴착된 암면 시료를 분석하여 지반조사 상과와 비교  
• 암층 두께 및 상태 확인



9. 철근망 제작 및 근입  
• 육상제작 철근망을 해상으로 운반  
• Roll-Up Frame으로 철근망을 세워 설치



10. 슬라임 제거  
• 맑은 물이 배출될 때까지 에어 리프팅 실시  
• 1차 : RCD굴착 종료시  
• 2차 : Con'C 타설 직전



11. 콘크리트 타설  
• 해상 배치플랜트(BP)와 트레미관으로 연속 타설  
• 말뚝 건전도 검사 (공대공 초음파 검측)



12. 두부 정리  
• 말뚝 상단 레이턴스를 제거하여 최종 품질 확보

### > 시공 순서



### 3.2. 작업대(Jig Jacket) 설치 및 케이싱 강관 타입

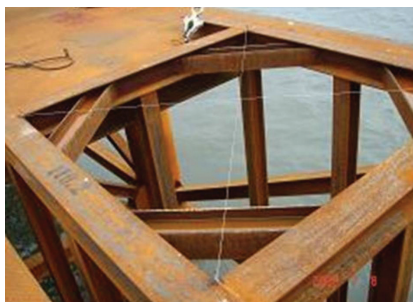
해상 작업용 지그재킷은 육상에서 제작하여 크레인선, 또는 바지선을 이용하여 해상으로 운반 설치한다. GPS를 이용한 위치 측량이 끝나면 지그 자켓의 골조 강관 내 핀 파일(pin pile)을 각 고정 위치마다 배치하여 계획된 깊이까지 바이브로해머(vibratory hammer)로 압입한다. 자켓에 임시로 거치한 가이드 프레임(guide frame)을 설치하기 위하여 크레인을 이용해서 말뚝을 시공해야 하는 정위치를 찾아 조절한다.



> 지그 자켓 설치



> Pin Pile 설치



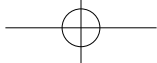
> 가이드 프레임 설치



> GPS 측량 검증

강관 근입시 연직도를 유지하며 용이하게 건입하기 위해 가이드 프레임 단부의 4방향 가장자리에 케이싱 강관과 프레임의 간격을 유지하고, 강관의 연직도를 원활하게 유지하기 위하여 롤러 스톱퍼(roller stopper)와 스톱퍼 플레이트(stopper plate)를 설치하였다.

작업대와 가이드 프레임을 설치한 후에는 말뚝용 케이싱 강관을 인양하여 프레임 내에 세우고 바이브로 해머(vibratory hammer)를 강관 상단에 거치하여 타입을 준비한다. 최초 근입은 강관은 자중에 의하며, 지반면(GL)에서 5~6m 깊이의 초기 근입이 말뚝의 연직도(수직도)를 좌우하므로 많은 주의를 기울였다. 자중 근입 후에는 바이브로 해머를 작동하여 연직도 1% (1/100) 이내 및 말뚝중심 편차  $\pm 75\text{mm}$  이내로 관리하여 강제 타입을 실시한다. 타입시 지반조건에 따른 리바운드량을 체크하고 RCD 장비를 거치 가능한 높이까지 관입한다. 이 때 과도한 항타(타입)로 강관 선단부의 변형이 발생하지 않도록 주의하여 계획된 지반까지 도달시킨다. 강관의 연직도 유지 및 정위치 확보를 위해 가이드 프레임에 설치한 스톱퍼를 활용하였다. 2차 항타는 강관 케이싱을 설계된 선단(풍화암 상단에서 -1.0m 이상)까지 타입하여 케이싱 설치를 완료하는 것이다. 지반이 연약할 경우에 강관의 자중 침하가 없을 때까지 타입하며, 지반이 단단할 경우 항타시 리바운드량을 체크하고 내부 굴착작업과 병행하여 강관 선단부에 과도한 저항이 걸리지 않도록 한다. 2차 타입은 말뚝의 굴착 단계와 밀접한 연관이 있으므로 타입시 관입량을 철저히 기록하였다. 말뚝의 연직도 관리를 위해서 말뚝중심과 굴착중심을 일치시키는 것이 중요하며, 특히 단일현장타설말뚝이 시공되는 Pile Bent 구간의 경우에는 말뚝에 이어 기둥을 연속 시공하게 되므로, 말뚝의 시공오차가 상부공에까지 영향을 미치므로 정위치 및 수직도 등이 정밀히 시공될 수 있도록 유의하였다.



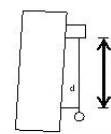
> 강관 타입 전경

강관이음은 항타 및 굴착 단계별로 현장에서 이루어진다. 강관 스톱퍼를 설치하여 좌우 균형을 유지하고, 전문 용접사가 CO<sub>2</sub>반자동 용접(FCAW)을 실시하였다. 용접열에 의한 불균형 변형이 발생하지 않도록 2인 이상이 동시에 실시하여 용접 균형을 맞추고, 바람이 심할 경우는 바람막이를 설치하였다. 용접 후에는 육안검사를 실시하고, 육안검사에 합격하면 용접장의 10% 범위에서 비파괴 검사(UT)를 실시하여 2급 이상시 합격처리한다. 시험 빈도는 현장 용접 10개소 당 1개소로 하였다.

> 강관 항타일지 : (고가교 W11-1 예)

Vibro Hammer 항타일지

Project	인천 대교	Pile No.	W11 #1	START	2005년 7월 25일
				FINISH	2005년 8월 10일
Design Unit	Via	POINT	X : 435689.463 Y : 160197.904	DESIGN	TOP : (+) BOT : (-)36.9
투입장비	Vibro Hammer 120KW / 240KW				
장비명	CM2-160/VM4-36000A				
장비제원	120KW*8,400KG/240KW*26,930KG				



심도		일시		작업내용			연속도		
E.L.	구상도	시간	항타깊이	항타시간	항타속도	ℓ	d	d/ℓ	
-18.600	퇴적토	2005-07-25	7.9m	0	0				
		2005-07-25	10.6m	3분	212.0 m/h	2000	8	1/250	
		2005-07-25							
-28.600	퇴적토	2005-07-25	10m	8분	75.0 m/h	2000	7	1/286	
		2005-07-25							
	-32.100								
-36.400	중화토	2005-07-25	6.9m	10분	41.4 m/h	2000	6	1/400	
-36.900	중화암	2005-08-10	1.5m	16분	5.6 m/h	2000	7	1/286	
						2000	6	1/400	
	-41.900								
	연암								





### 3.3. 굴착 및 철근망 설치

강관 케이싱 설치와 병행하는 내부 굴착은 1차 및 2차로 나누어 2단계로 계획하였다. 1차 굴착은 주로 해머 그레브(hammer grab)를 이용하며, 상층부의 연약한 지층 굴착이나, 해상에서 수심이 낮아 바닥이 드러나 자연수 공급이 곤란할 경우 효과적이다. 그레브 굴착이 끝나면 다음 굴착단계인 RCD 장비를 설치하고 굴착을 진행한다.

그레브 굴착시에는 바닥면이 강관 케이싱 선단보다 깊지 않도록 주기적으로 깊이를 측정하며 굴착을 진행한다. 시공 초기에는 2단계 굴착 계획에 따라 해머 그레브 등 단계별 굴착을 진행하였으나, 굴착 단계별 장비 운용의 효율성을 감안하여 수심이 낮은 가교구간을 제외한 해상 구간의 모든 굴착작업을 초기단계에서부터 종료시까지 RCD 장비를 이용하여 진행하는 것으로 변경하였다.

RCD 굴착은 스테빌라이저, 굴착 룯드, 드릴 비트 등으로 구성된 RCD 장비를 이용하여 정해진 심도까지 진행된다. 스테빌라이저와 드릴 비트의 직경은 강관 내경보다 150mm 작게 하였다. 공내에서 약 75mm의 틈을 두어야 비트회전이 원활하게 되고, 비트의 직경에 여유가 없으면 강관과의 틈이 너무 작게 되므로 장비의 손상 우려가 있고 공경이 커져서 강관 선단부에서 슬라임이 유입될 수 있다.

RCD 공법은 물을 사용하여 정수압으로 공벽을 안정시키고, 비트를 회전시키면서 지반을 절삭한 후 Air Lift 방식으로 토사를 흡입하여 Drill Pipe를 통하여 공외로 배출하는 개념이므로 기계를 가동하기 위해서는 굴착수 공급이 필수적으로 뒷받침되어야 한다.

물때 영향을 받는 고가교 구간은 조위표를 이용하여 굴착 작업을 계획하고 진행하였다. 그날의 조위가 양수기 가동선 아래인 시간에는 양수작업을 진행할 수 없으므로 RCD 장비를 가동할 수 없다. 또한, 선박의 운행이 불가능하므로 작업자의 투입도 불가능한 시간이 된다.

굴착니수는 배관 파이프를 통해 토운선으로 모아 침전시킨 후 토사는 지정된 매립지로 운반하여 처리하였다. 굴착 시료는 굴착단계별, 지층별로 토출구에서 적절한 망채를 이용하여 채집하여 시료통에 담아 표시하여 보관하였으며, 지지층을 육안 확인하고 암판정 시 검측 시료로 활용하였다.

굴착 작업의 종료는 말뚝선단의 암판정 절차 및 결과에 따라 감독원이 정하였으며, 절리, 파쇄대 등 선단 하부 지반여건을 고려하였다. 이 때 사전에 미리 수립한 『암판정 시행지침』에 따라 암판정위원회를 소집하여 모든 말뚝을 대상으로 암반층이 변화될 때마다 기초지반의 상태를 평가하고 시공관리에 반영하였다.

모든 말뚝은 강관 타입 및 굴착진행 상황을 실시간으로 기록하여 관리, 보관하였다.



> 굴착지반 암판정

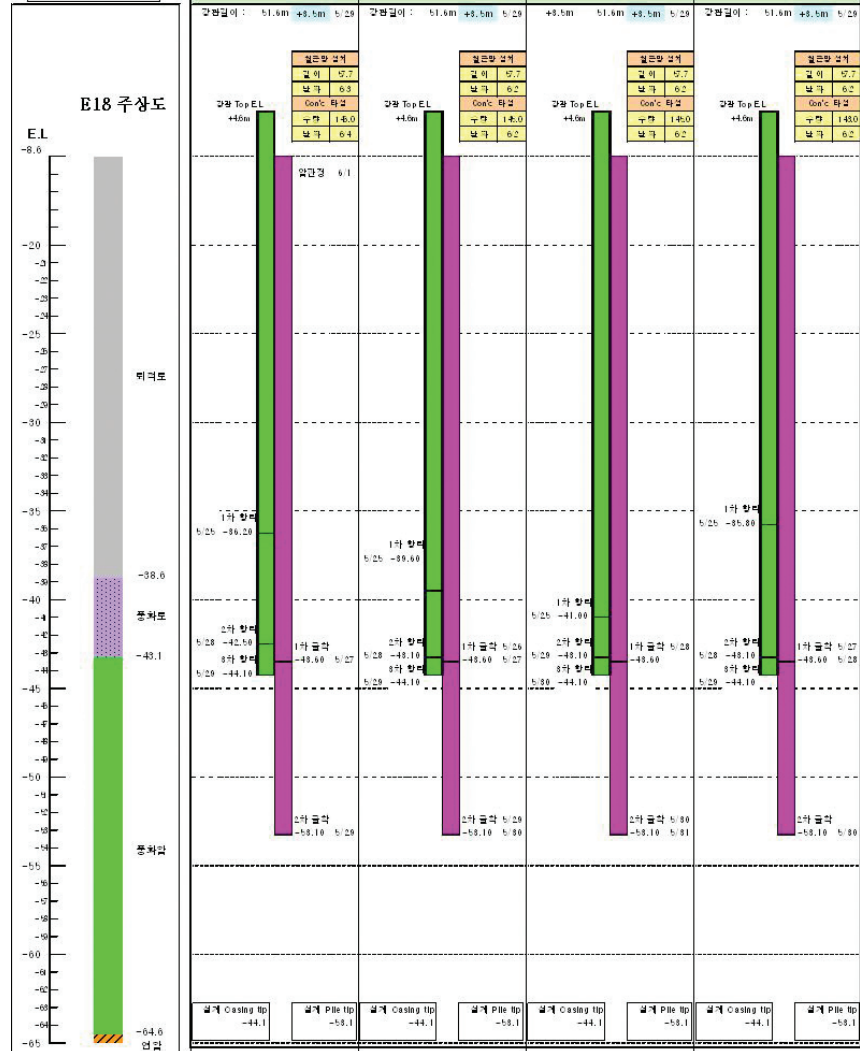


> RCD 굴착 일지

R.C.D. 굴 착 일 지

Project	인천대교	Pile No.	W11	#1	START	08월 08일	
Design Unit	Viaduct				FINISH	08월 11일	
		Design Bottom		-42.9			
					Const. Bottom		-42.9
투입장비	R.C.D			Power Pack			
장 비 명	SPD 200			SPP-260/410			
장비제원	Torque:160kNm / 0~47rpm			260HP/1800rpm			

심 도			일 시		작 업 내 용		
E.L.	주 상 도		날 짜	굴착 시간	압하압력	회전속도	굴착속도
-4.90	퇴적토	Grab 굴착					
-25.70							
-27.90			08-08	40 min	0	20	3.3 m/h
-32.10		-32.1	08-08	120 min	0	20	2.1 m/h
	풍화토	강관 Tip -36.90					
-33.90			08-08	50 min	0	20	2.2 m/h
-35.90	-35.9		08-08	26 min	0	20	4.6 m/h
-36.90	풍화암		08-08	13 min	40	20	4.6 m/h
-37.90			08-10	40 min	40	20	1.5 m/h
-41.90	-41.9		08-11	160 min	40	20	1.5 m/h
	연암						
-42.90		08-11	100 min	80	20	0.6 m/h	



굴착을 마치면 공내 말뚝선단에 쌓여 있는 슬라임(slime) 토사 및 암석 부스러기 등의 잔류물질을 두단계로 제거하였다. 1차 슬라임 제거는 굴착 예정심도에 도달한 후 굴착장비를 해체하기 전에 굴착 잔류토가 공내 바닥에서 완전히 제거될 때까지 계속해서 배토작업을 실시하는 것이다. 그 후에 철근망 근입 후 콘크리트 타설 전까지 소요되는 시간 동안 공내 부유물질이 선단에 침전되면 말뚝의 품질저하를 가져올 수 있으므로 타설 전에 컴프레서 호스를 선단까지 투입하여 슬라임을 불어내는 2차 슬라임 제거를 실시하였다. 굴착바닥의 청소가 불철저할 경우, 콘크리트 타설 직전에 실시하는 2차 슬라임 제거 단계에 많은 시간이 소모되며, 철근망이 근입된 상태에서의 청소 작업이므로 효율성도 크게 떨어지게 되고 완전한 슬라임 제거도 어렵게 된다. 따라서, RCD Machine에 의한 1차 슬라임 제거 작업을 철저히 시행하는 것이 말뚝의 품질확보 측면에서 매우 중요하다. 슬라임 제거에는 트레미관을 이용한 Air Lift 방법과 Air Blow 방법을 함께 이용하였다. 굴착 심도 및 선단 지반고는 굴착 직후 RCD Machine Bit의 근입 길이로 확인하고, 다시 출자를 이용하여 측정하였다.

제작장에서 제작하여 해상 운반한 철근망은 별도의 양중 장비(Roll-Up Jig Frame)로 들어 올려 굴착 공내로 삽입하였다. 운송길이를 고려하여 기본 24m 블록(상향, 중향, 하향)으로 제작, 반입된 철근망을 하향부터 역순으로 양중하여 공내에 근입하였다.





> 철근망 근입

### 3.4. 콘크리트 타설

철근망 근입후 다시 말뚝선단 상태(최종굴착심도 및 2차 슬라임 제거 여부)를 확인한 다음 이상이 없으면 콘크리트를 타설하였다.

먼저, 콘크리트 타설시 막힘이 없도록 충분한 구경의 트레미관을 확보하여 조립한다. 최대 6m 길이의 관을 굴착 깊이에 맞추어 조합한 후 굴착 선단까지 관입하며, 관의 이음에는 Flange형, 또는 Wire형을 이용하였다. 이음부는 특히 공기 유출이나 해수 유입이 없도록 주의하였다. 다음으로 최초 콘크리트 타설시 트레미관의 콘크리트 속 묻힘 깊이를 확보하고, 수중불분리 콘크리트를 담아 일시적으로 공내에 투하하기 위하여 적절한 규격의 호퍼(hopper)를 설치하였다. 플런저는 수중콘크리트 타설시 초기의 재료분리 방지를 위하여 수중에 삽입된 트레미관 속에 설치하게 되는데, 콘크리트 투하시 그 중량으로 물을 밀어내기 위한 것이다. 호퍼 속 타설구에 삽입(트레미관 상단부 공내)하며, 아연도금된 함석 재질과 플라스틱 재질로 제작된 제품을 사용하였다.

콘크리트 생산 및 타설을 위한 해상BP선은 굴착 종료후 철근망을 근입한 시점을 전후해서 타설 예정 말뚝공 위치에 투입하였다. 접안시점은 타설지점의 수심을 고려, 만조시에 이동하여 현장으로 접안하게 되는데, 조위표(물때)를 적절히 활용한 투입계획의 수립이 매우 중요하다.

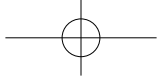


> 해상BP선 접안

#### 1) 수중 불분리 콘크리트 배합설계

##### (1) 조건

- 가. 설계기준강도 : 30Mpa
- 나. 굵은 골재 최대 치수 : 20mm
- 다. Flow값 : (KS 기준 : 450~550mm)
- 라. 공기량 : 4.0%이하



## (2) 배합 강도 결정

$$f_{cr1} = f_{ck} + 8.5 \text{ 압축강도 시험횟수가 14회 미만} = 30 + 8.5 = 38.5\text{Mpa}$$

## (3) W/C 결정

가. 시멘트 종류에 따른 W/C = 40.8% 여기서 : f : 38.5Mpa , k : 41.0Mpa

나. 시공사 내구연한 125년으로 정해진 W/C = 40% 결정

## 2) 수중 일반 콘크리트 배합설계

### (1) 조건

가. 설계기준강도 : 30Mpa

나. 굵은 골재 최대 치수 : 20mm

다. 슬럼프 : (KS 기준 180~210mm , LRRD 기준 127~225mm)

라. 공기량 : 5.0±1.5%

## (2) 배합 강도 결정

$$f_{cr1} = f_{ck} + 8.5 \text{ 압축강도 시험횟수가 14회 미만} = 30 + 8.5 = 38.5\text{Mpa}$$

$$f_{ck2} = f_{cr1}/0.8 \text{를 적용 수중 시공시 대기 중 시공시 강도비가 0.8배이므로} = 38.5/0.8 = 48.1 \text{ Mpa}$$

### > 인천대교 현장타설말뚝 배합설계 현황

구 분		W/B (%)	S/a (%)	단위 재료량 kgf/m <sup>3</sup>						
				W	Binder		S	G	S.P	증점제
					Cement	Slag				
수중일반	30Mpa	36.0	45.0	162	225	225	746	929	4,500 (0.95%)	
수 중 불분리	30Mpa	40.0	44.0	210	263	263	658	853	11,288 (2.15%)	1.68 (W*0.8%)

콘크리트는 일단 타설이 개시되면 종료될 때까지 중단됨이 없이 연속적인 타설이 이루어져야 한다. 이를 위해 타설전 해상 배치프랜트(B/P) 장비 점검, 타설 준비상황 등의 철저한 점검이 이루어져야 한다. 또한, 여건상 불가피하게 타설이 중단되는 상황에서의 조치계획을 미리 수립해 두어야 한다.

### (1) 수중 불분리 콘크리트 타설

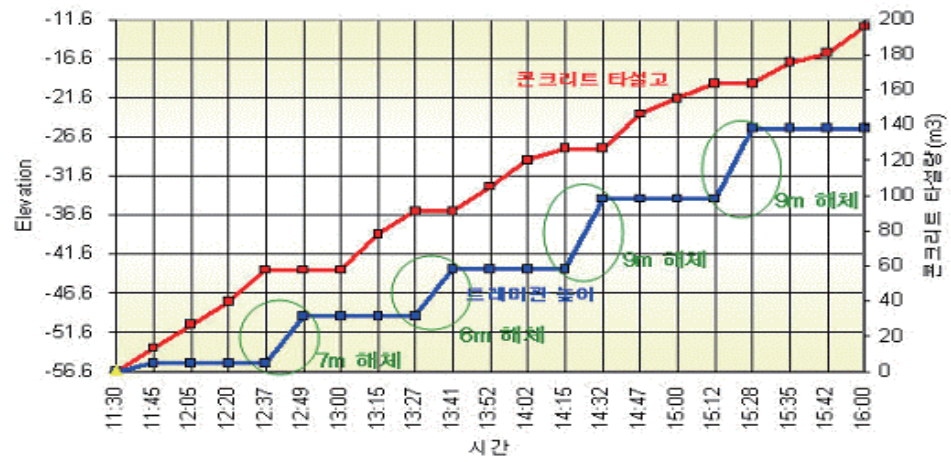
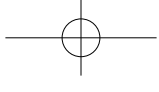
수면하에서 주로 시공되는 현장타설말뚝은 단위시멘트량이 많고 또한 트레미관을 이용하기 때문에 유동성이 풍부하고 슬럼프(Flow치)가 큰 것을 사용하여야 한다. 트레미관을 이용하는 본 공법의 특성상, 수중불분리 콘크리트의 가소성 점도가 높게 배합되어야만 트레미관 속을 유동하기가 쉽고 재료분리가 일어나지 않는다.

### > 말뚝직경별 수중불분리 콘크리트 타설량

규격(mm)	40m 기준 콘크리트 량(m <sup>3</sup> )	수중불분리 콘크리트 량 (m <sup>3</sup> )
D3000	283	12 (1.7m)
D2400	180	8 (1.8m)
D1800	102	4 (1.6m)

### (2) 수중 일반 콘크리트 타설

수중불분리 콘크리트의 타설이 끝남과 동시에 수중일반 콘크리트를 생산하여 끊김 없이 수중 일반 콘크리트를 타설하였다. 관리자는 타설 도중 수시로 내림추와 줄자를 이용, 타설높이를 측정하고 기록지에 기입하였으며, 콘크리트 속 트레미관 묻힘 깊이가 2~6m가 유지되도록 하였다.



#### > 타설고 관리도 예

콘크리트는 계획 높이보다 100cm 정도 더 높게 타설하여 레이트스 및 부유물질 등의 불량 콘크리트를 제거하였다. 트레미관을 완전 인발한 후에는 바이브레이터 작업 후 상단면 평탄 마감을 하고 양생 비닐과 양생포를 덮고 마무리하였다.

### 3.5. 건전도 검사

콘크리트 타설이 완료되고 나면 완성된 말뚝의 건전성 여부를 확인하기 위하여 공대공 초음파 검사(CSL)를 말뚝 전체 길이에 대하여 실시하게 된다. 건전도 시험은 미리 매입한 검사관을 이용한다.

검사용 튜브(검사관)는 철근 케이지 내에 말뚝직경별로 아래 표에 해당하는 수량을 결속하여 매설하며, 튜브의 내부는 부식, 막힘 등의 손상이 없어야 한다. 인천대교에서는 모든 말뚝을 대상으로 검사관을 100% 설치하였다. 공대공 초음파 검사는 콘크리트를 타설하고 7일 이상 경과한 후 실시하였다.

검사업체는 사전에 한국도로공사 도로교통연구원의 시험말뚝을 대상으로 능력 평가를 실시하여 품질관리에 만전을 기하였다.

#### > 말뚝 직경별 검사관 설치 수량

말뚝의 직경(D, m)	검사용 튜브의 수(개)	검측 경로 수	비고
1.5< D ≤2.0	5	10	D1800
2.0< D ≤2.5	7	21	D2400
2.5< D ≤3.0	8	28	D3000

#### > 인천대교 현장타설말뚝 공대공 초음파검사 수량

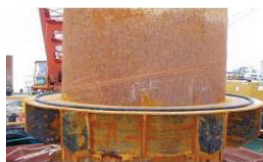
구분		검사관매입비율	시험비율	비고
고가교	Pile Cap 구간	100 %	30 %	사장교 구간 및 고가교 파일베нт 구간은 시공한 모든 말뚝을 대상으로 전수검사 실시. 나머지 구간은 표본검사(30%) 실시.
	Pile Bent 구간	100 %	100 %	
접속교		100 %	30 %	
사장교		100 %	100 %	

### 3.6. 파일캡 및 기둥 설치

#### (1) PC 하우스 설치

파일캡 방식 교각(사장교, 접속교, 고가교 일부)은 현장타설말뚝 시공 후에 파일캡 시공을 위한 가물막이 거푸집의 역할을 위한 PC 하우스(house)를 설치하였다. PC 하우스는 육상 제작장에서 미리 만들어 3,000톤급 해상크레인으로 시공 위치까지 운반하여 말뚝 위에 가설하였다.

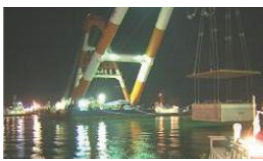




- 1. 하부 Bracket 설치**
- PC Hose(PCH)를 설치할 강관 케이싱에 스토퍼(stopper) 및 브라켓(bracket) 설치



- 2. Guide Cone 설치**
- 원활한 설치를 위해 말뚝 상단에 가이드 콘(guide cone) 설치



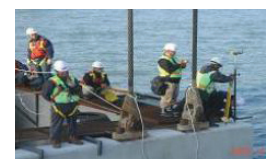
- 3. PC HOUSE 인양**
- 해상 크레인 접안, 앵커 설치 및 PCH 인양



- 4. PC HOUSE 운반**
- 인양된 PCH를 정박위치까지 해상 운반



- 5. PC HOUSE 거치**
- 기설치한 가이드 콘상부로 위치 크레인 조정 후 PCH거치



- 6. 확인 측량**
- GPS를 이용하여 PCH 정렬 확인



- 7. 급결 및 부상방지시설 설치**
- 부상방지용 가시설 설치 및 강관말뚝과 PCH 간 급결 콘크리트 타설



- 8. 상부 Bracket 설치**
- 부상방지 조치 및 누수 차단



- 9. 시험관 내 그라우팅**
- 그라우트재 주입으로 빈 공간 메움



- 10. 두부정리**
- 강관케이싱 절단 및 레이턴스 층 제거

## > PC 하우스 설치 과정

### (2) 파일캡(pile cap) 시공



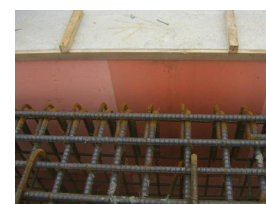
- 1. 철근조립**
- 파일캡의 하부 철근을 배근



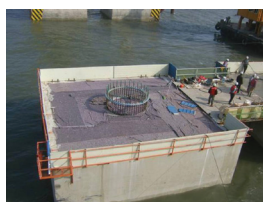
- 1-1. 철근조립**
- 파일캡 수직 철근, 스테럽, 상부철근배근 (4일/1개소)



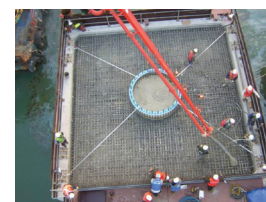
- 2. 지수제 설치**
- 강우시 우수의 침투를 차단하기 위하여 설치 (3hr/1개소)



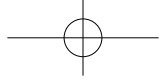
- 3. 완충재 설치**
- 수화열에 의한 콘크리트 팽창시 PCH 균열발생 억제위해 설치(1일/1개소)



- 4. 월파방지막 설치**
- 사리 만조시 혹은 파랑 발생시 월파방지위해 설치 (2hr/1개소)



- 5. 콘크리트타설**
- 높이 3.4m를 4단으로 분리타설(5hr/1개소)



**5-1. 콘크리트타설**  
• 한중콘크리트 타설 시 보온 양생용 House를 설치한 후 4단으로 분리타설 (6hr/1개소)



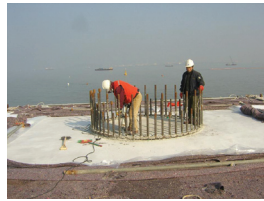
**6. 양생**  
• 비닐+양생포+스티로폴(50mm)  
+ 양생포 순으로 보온처리(7일간)



**6-1. 양생**  
• 34,000kcal/hr의 보일러를 가동하여 Steam 양생 실시(7일간)

> 파일캡 시공 과정

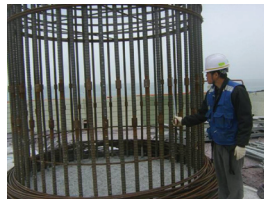
(3) 교각(pier) 시공



**1. Laitance 제거 및 치핑**  
• 신규 콘크리트 접착을 위해 콘크리트면 5cm 아래까지 깨기 작업(4hr/1개소)



**2. 철근망 제작**  
• 공기단축 및 품질확보를 위해 육상제작장에서 철근케이지화 (1.5일/1개소)



**3. 철근망 연결**  
• 해당 로트의 철근 망을 인양한 후 커플러 연결(2hr/1개소)



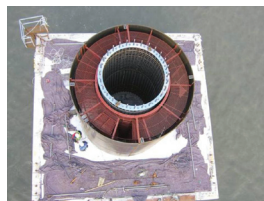
**3-1. 철근망 연결**  
• 후프 연결 및 현장 응접 (4hr/1개소)



**4. 거푸집 청소**  
• 거푸집 표면에 부착된 녹, 이물 질 등을 그라인더를 이용하여 제거(4hr/1개소)



**5. 거푸집 조립**  
• 바지선에서 볼트 연결 후 일괄 가설(1hr/1개소)



**5-1. 거푸집 조립**  
• 동절기 타설시 양생막을 거푸집 에 부착하여 가설 (2hr/1개소)



**6. 콘크리트 타설**  
• 해상 BP를 해당구간에 접안하여 타설(1.5hr/1개소)

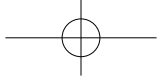


**7. 양생**  
• 동절기 콘크리트 타설 후 캡을 덮고 열풍기 가동. 일반적인 경우에는 습윤양생 실시 (5일/동절기, 3일/일반)

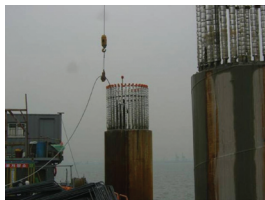


**8. 거푸집 해체**  
• 소정의 양생기간 종료후 거푸집을 탈영함(0.5일/1개소)

> 교각 시공 과정



#### (4) 코핑(coping, 피어캡) 시공



- 1. 소닉튜브내 그라우팅**  
• 파일벤트 구간 (0.5일/1개소)



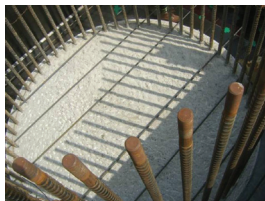
- 2. 브래킷 설치**  
• 파일캡 설치구간 (0.5일/1개소)



- 2-1. 브래킷 설치**  
• 파일벤트 구간에 한 함  
(2일/1개소)



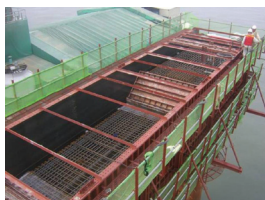
- 3. 거푸집 조립**  
• 바지상에서 거푸집을 청소한  
후 중앙부, 측면 캔틸레버부  
순으로 조립(2일/개소당)



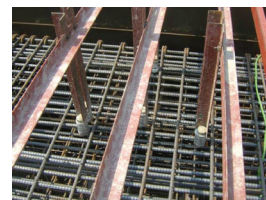
- 4. Laitance 제거 및 치핑**  
• 교각 또는 RCD 상단부  
콘크리트 표면을 치핑  
(0.5일/1개소)



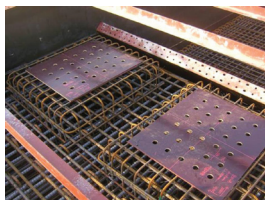
- 5. 철근 조립**  
• 전단철근, 벽체 철근, 하부철근  
순으로 조립함



- 5-1. 철근 조립**  
• 내부조립철근, 상 부철근의  
순으로 조립함(3~6일/개소당)



- 6. 매설물 설치**  
• 런칭거더 장비 지지점 접지선  
등의 매설물 설치  
(0.5일/개소당)



- 7. 슈 철근조립**  
• 위치측량 후 슈 설치지점에  
철근 배근(0.5일/개소당)



- 8. 콘크리트 타설**  
• 해상BP를 해당구간에  
접안하여 측면 →  
중앙 순으로 50cm 단위로타설  
(6hr/개소당)

#### > 교각 시공 과정