

포항 이암층 해상 교량기초의 대구경 현장타설말뚝(RCD) 적용성 검토



박래진
(주)포스코건설 부장
(pnj@poscoenc.com)



최용희
(주)포스코건설 부장
(120128@poscoenc.com)



김영필
(주)포스코건설 차장
(feel75@poscoenc.com)



하태균
(주)포스코건설 과장
(hatg@poscoenc.com)



김명식
(주)화신엔지니어링 전문
(msk6619@hanmail.net)



차정일
(주)화신엔지니어링 이사
(cck0017@hanmail.net)

1. 개요

포항지역에 분포하는 이암은 일반적으로 점토광물의 영향으로 팽창성을 보이며 내구성이 크지 않고 암석의 일축압축강도가 작아 교량기초 지지층으로 적용시 면밀한 분석 및 검토가 요구된다.

해상교량은 선박통항의 필요성으로 인해 경간장이 길어 기초부 작용하중이 육상교량보다 크며, 해상작업의 시공성과 가설여건도 고려해야 하므로 교량기초 형식의 선정이 무엇보다 중요하다.

본 기술기사에서는 이암을 지지층으로 하는 해상교량의 기초로 대구경 현장타설말뚝을 적용한 설계사례를 소개하고자 한다.

2. 현황

효자~상원간 도로는 국가지원 지방도 20호선의 미연결구간인 경상북도 포항시 남구 송도동~경상북도 북구 항구동을 연결하는 왕복 4차선의 도시지역 보조간선도로(설계속도 $V=50\text{km/h}$)로 2025년 완공을 목표로 하며, 원활한 교통 소통과 지역 균형발전 등의 효과를 사업목적으로 하고 있다.

주요 구조물인 항구교($L=706\text{m}$)의 해상부 주경간교($L=395\text{m}$)는 경간장 150m의 비대칭 1주탑 사



그림 1. 효자~상원간 도로(항구교)

장교이며, 랜드마크 관광자원 개발을 위하여 주탑 상부에 상공형 전망시설을 계획하였다.

기초는 해상부 교각에 작용하는 큰 하중에 대하여 안정성을 확보하고자 대구경 현장타설말뚝(RCD)을 계획하였다. 해상 여건을 고려하여 현장타설말뚝 시공에는 희생강관+RCD공법을 적용하였고, 교각기초 슬래브는 바지선과 해상 크레인을 이용하여 시공하는 PC-House를 적용하여 수상작업을 최소화하였다.

3. 이암 특성 및 지층현황 분석

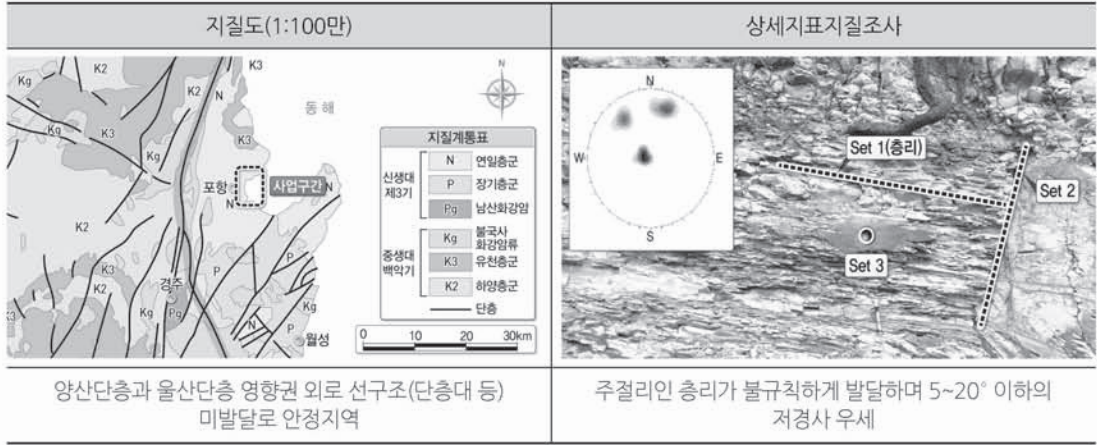
이암의 공학적 특성을 파악하고 지층현황을 분석하여 교량기초 지지층에 대한 적정성 여부를 판단을 하고자 하였다.

3.1 광역지질특성 분석

사업구간은 한반도 동남부 경상분지 퇴적층의 중동부에 해당하며, 양산단층대의 직접적인 영향권에서 벗어나 대규모의 단층이나 선구조, 파쇄대 등은 발달하지 않는 것으로 조사되었다. 기반암은 신생대 제3기 연일층군의 두호층에 해당하는 이암이 넓게 분포하며, 경사각 $5\sim 20^\circ$ 의 층리가 불규칙하게 발달하고 있다.



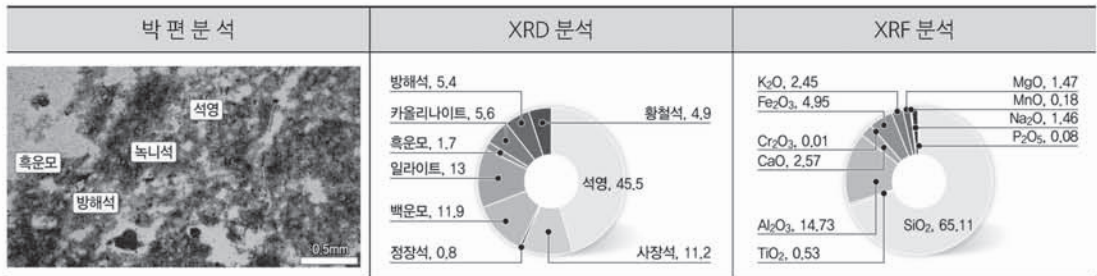
표 1. 사업구간 지질구조 분석



3.2 이암 광물특성 분석

사업구간의 이암은 백갈색이 우세하며 다수의 식물 및 유공층 화석이 포함되어 있고 석영(SiO₂)이 주성분을 이루며, 점토광물이 일부 포함되어 있으나 팽창성이 상대적으로 작은 일나이트(13%)와 카올리나이트(5.6%)로 구성되어 있다.

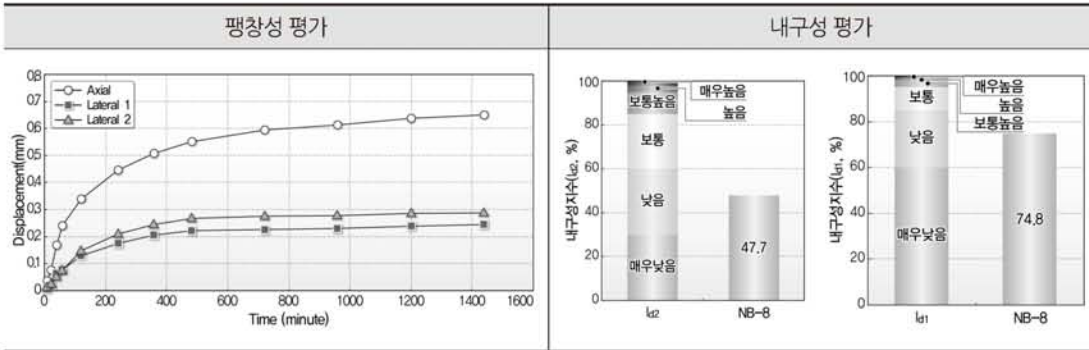
표 2. 광물특성 분석



3.3 팽창성 및 내구성 분석

퇴적암인 이암의 팽창변형률 지수(Swelling strain index)는 0.479~0.638%로 평가되었고, 내구성은 Slaking Test에서 낮음(Ld1=74.8%, Ld2=47.7%)으로 분석되었다. 상기 팽창성은 큰 하중이 작용하는 해상교량 기초에서 유의미한 수준으로는 판단되지 않으나, 내구성이 낮음은 원지반 RCD 굴진 후 조속한 말뚝시공이 필요함을 의미한다.

표 3. 팽창성 및 내구성 평가



3.4 지층현황 분석

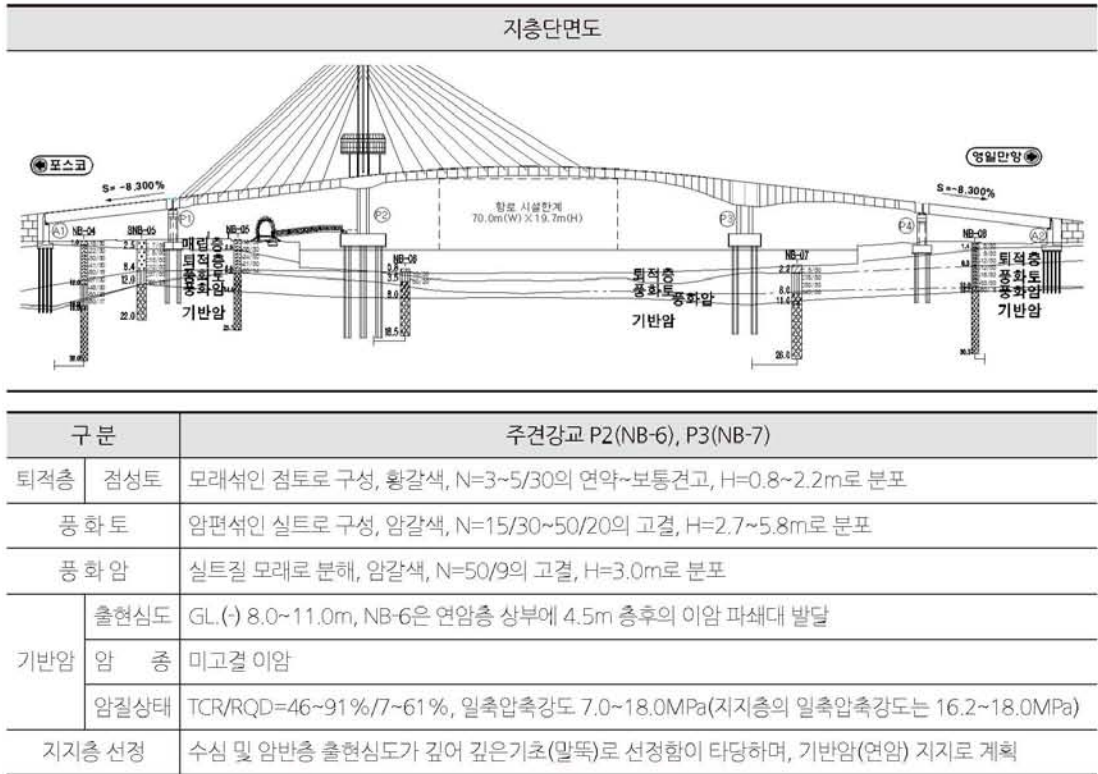
해상 교량구간의 수심은 3.5~5.7m이고, 지층현황은 모래섞인 점토의 연약~보통건고한 퇴적층이 층후 0.8~2.2m, 암편섞인 실트의 고결한 풍화토층이 층후 2.7~5.8m, 교각 P2(NB-6)에 이암파쇄대가 층후 4.5m, 교각 P3(NB-7)에 풍화암이 층후 3.0m, 보통풍화와 약함의 강도 및 심한균열을 보이는 미고결 이암의 연암층이 GL(-) 8.0~11.0m로 나타난다. 이암파쇄대 및 풍화암이 두께 3.0~4.5m로 나타나므로 교량기초 지지층 판단시 이 층을 관통하여 기반암(연암)에 정착함이 필요할 것이다. 또한, 현장타설말뚝의 근입심도에 해당하는 이암의 일축압축강도는 16.2~18.0MPa로 나타나며, 심도증가에 따른 일축압축강도의 뚜렷한 증가현상은 나타나고 있지 않으므로 지지력 산정시 평균 일축압축강도를 사용함이 타당할 것으로 판단된다. 기반암인 이암의 상태는 TCR 46~91%, RQD 7~61%로 연암에 해당하고, 부분적인 파쇄대와 불규칙한 층리가 발달한 파쇄상의 풍화된 암질을 보이며, 아래의 시추코어 사진에 잘 나타나고 있다.



그림 2. 해상 교량구간의 이암 시추코어

해상 교량구간의 지층현황과 공학적 특성을 분석하여 지지층 심도 파악 및 기초형식 선정과 안정성 검토에 활용하고자 하였다.

표 4. 지층현황분석



4. 해상 교량기초 형식 선정

다수의 해상 교량기초 적용사례 분석을 통하여 본 사업의 특성에 부합하는 최적의 교량기초 형식을 선정하고자 하였다.

4.1 적용사례 분석

기반암 심도와 수심의 상관성을 검토한 결과 당 현장처럼 기반암 심도가 평균 12m 이상이고 수심이 얇은 (3.5~5.7m) 경우에는 현장타설말뚝 적용 사례가 다수인 것으로 조사되었다. 또한, 국내 해상 교량기초를 상세 분석한 결과, 기초형식은 현장타설말뚝이 60%, 기초지지층은 연암층이 69%, 현장타설말뚝 직경은 ϕ 2,500mm가 45%로 조사되어 대부분의 해상 교량기초는 대규모 현장타설말뚝이 적용됨을 알 수 있었다.

표 5. 해상 교량기초 적용사례 분석

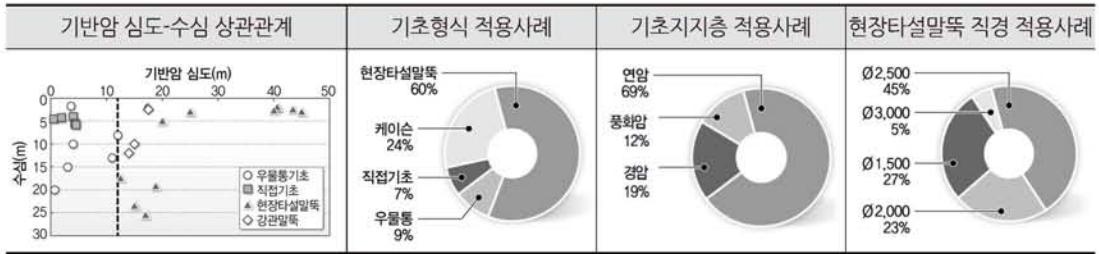


표 6. 해상 교량기초 형식 비교

구분	다주식 현장타설말뚝	우물통기초	직접기초
개요도			
특징	<ul style="list-style-type: none"> 대규모 하중 지지에 적합 PC-House 적용시 가시설 미설치로 경제성 및 시공성 우수 	<ul style="list-style-type: none"> 지지층 얇은 경우 경제성 우수 가시설 설치 및 해체시 부유사에 의한 환경피해 불가피 	<ul style="list-style-type: none"> 지지층이 깊은 경우 경제성 저하 해상준설 및 수중발파로 해양생태계 피해 발생
VE/LCC			
	기능(F) 90.4	기능(F) 77.0	기능(F) 82.0
	비용(C) 1.00	비용(C) 1.34	비용(C) 1.18
	가치(V) 90.4	가치(V) 57.5	가치(V) 69.5

4.2 교량기초 형식 선정

기반암(이암) 특성, 지지층 심도, 가설여건(해상시공, 환경성) 등을 종합적으로 분석한 결과, 지지층이 깊은 경우 대규모 하중지지가 가능하고, PC하우스 적용시 가시설 미설치로 시공성 및 경제성이 우수하며, 환경피해를 최소화할 수 있는 다주식 현장타설말뚝이 본 사업구간 해상 교량기초 형식에 가장 적합한 것으로 검토되었다.

5. 해상 교량기초 시공법 선정

해상 시공여건과 시공계획에 부합하는 최적의 확대기초 및 현장타설말뚝 시공법을 선정하였다. 희생강관 두께는 국내 최근 적용사례와 해석을 통해 결정하였으며, 선정된 RCD 공법의 해상시공 순서를 기술하였다.

5.1 현황 분석



표 7. 현장 시공 현황

구분	분석	구분	분석
기초형식	현장타설말뚝(φ2,500mm)	지반조건	기반암 GL(-)8.0~11.0m 이하
하중조건	연직하중(연직하중 및 모멘트 고려 필요)	환경조건	해양생태계 영향
현장조건	해상(수심 3.5~5.7m)	시공조건	해상시공으로 가물막이 검토 필요

표 8. 해상작업선 출수 검토

해상작업선 출수				주경간교 수심 분포	
바지선(부선)		예인선			
1,000P	1.8m	600HP	2.0m		
2,000P	2.1m	1,000HP	3.0m		
3,000P	3.0m	-			
바지선 및 예인선 운용을 위한 최소출수 3.0m 이상 필요				해상구간 P2~P3구간 수심은 3.5m~5.7m로 해상작업선 운용가능	

확대기초 및 현장타설말뚝의 시공계획 수립을 위해 현장 시공 현황을 분석한 결과는 다음과 같으며, 해상 작업과 해양생태계 영향이 중점 고려사항으로 판단되었다. 바지선 및 예인선의 출수와 해상 주경간교 수심을 분석한 결과 해상작업선의 운용이 가능한 것으로 검토되었다.

5.2 확대기초 시공법 선정

해상부 작업수심이 3.0m 이상 확보되므로 바지선+크레인을 이용한 PC-House 시공이 가능하다. PC-

표 9. 확대기초 시공법 비교

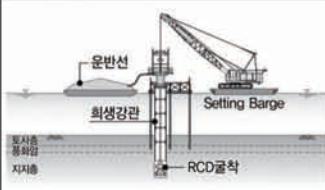
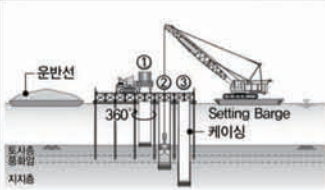
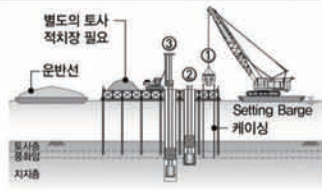



구분	PC-House	2열 강널말뚝	CT 가시설
개요도			
특징	<ul style="list-style-type: none"> 해상시공으로 가물막이 불필요 말뚝시공 후 PC-House 거치 해양생태계 교란 최소화 적용 양호 	<ul style="list-style-type: none"> 해상부 차수효과 및 안정성 확실 토사채움시 해상부로 유실 가능 해상저면 부지 교란 환경성 저하 	<ul style="list-style-type: none"> 기초저면 해수 유입량 과다 우려 굴착저면 별도의 차수대책 필요 근입부 기반암 발파로 환경성 저하
공법선정	2열 강널말뚝과 CT 가시설은 가물막이 시공 후 말뚝과 기초를 시공하여 공기증가 및 해양생태계 교란 우려 → 해상장비(바지선+크레인) 시공으로 해양생태계 교란 최소화와 공정 감소가 가능한 PC-House 적용성 우수		

House를 적용하여 확대기초를 시공할 경우 가물막이 배제로 수중작업을 최소화하여 작업 안정성을 확보하고 시공성 향상을 도모할 수 있다.

5.3 현장타설말뚝 시공법 선정

전선회식 올케이싱 공법은 장비가 대형으로 해상작업시 작업공간 확보가 곤란하며, 어스드릴 공법은 암반 굴착 효율이 낮아 기반암을 3.5~5.0D(D=말뚝직경) 굴진해야하는 당 현장에 적용이 불가하다. 이에, 장비중량이 적어 해상시공에 유리하며, RCD 장비로 효율적인 암반 굴진이 가능한 희생강관+RCD공법을 현장타설 말뚝 시공법으로 선정하였다. 희생강관 매몰시 상부 매립층 및 퇴적층 구간 공벽이 유지되어 품질관리가 용이하고 환경오염이 최소화되며, 케이싱 인발로 인한 철근망 부상 우려를 방지할 수 있다.

표 10. 현장타설말뚝 시공법 비교

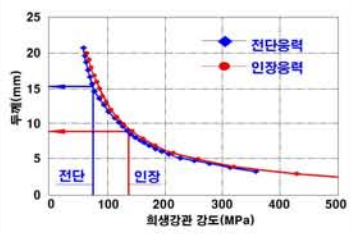
구분	희생강관 + RCD	전선회식 올케이싱	어스드릴																		
개요도																					
특징	<ul style="list-style-type: none"> · 바이브로 해머로 희생강관을 압입시켜 공벽유지하며 RCD로 굴착 · 암반층 굴진효율 우수 · 말뚝체 조성(희생강관 매몰) 	<ul style="list-style-type: none"> · 전선회(Rotator) 장비를 사용하여 케이싱을 360도 회전하여 선 굴진 · 별도의 공벽유지용 케이싱 불필요 · 장비가 대형으로 시공조합 복잡 	<ul style="list-style-type: none"> · 자주식으로 육상공사 적용성 우수 · 케이싱으로 공벽유지하며 드릴비켓으로 굴착도 배토 · 암반층 천공속도 및 천공효율 낮음 																		
VE/LCC	 <table border="1"> <tr> <td>기능(F)</td> <td>94.2</td> </tr> <tr> <td>비용(C)</td> <td>1.00</td> </tr> <tr> <td>가치(V)</td> <td>94.2</td> </tr> </table>	기능(F)	94.2	비용(C)	1.00	가치(V)	94.2	 <table border="1"> <tr> <td>기능(F)</td> <td>86.7</td> </tr> <tr> <td>비용(C)</td> <td>1.15</td> </tr> <tr> <td>가치(V)</td> <td>75.4</td> </tr> </table>	기능(F)	86.7	비용(C)	1.15	가치(V)	75.4	 <table border="1"> <tr> <td>기능(F)</td> <td>77.0</td> </tr> <tr> <td>비용(C)</td> <td>1.30</td> </tr> <tr> <td>가치(V)</td> <td>59.2</td> </tr> </table>	기능(F)	77.0	비용(C)	1.30	가치(V)	59.2
기능(F)	94.2																				
비용(C)	1.00																				
가치(V)	94.2																				
기능(F)	86.7																				
비용(C)	1.15																				
가치(V)	75.4																				
기능(F)	77.0																				
비용(C)	1.30																				
가치(V)	59.2																				

5.4 희생강관 두께 결정

희생강관 두께에 대하여 국내 설계기준에 제시된 규정은 없으며, 국외기준 적용시 최소 6mm 이상 확보가 요구된다. 시공 장비 작용력에 의한 희생강관 소요두께를 검토한 결과에서는 인장응력에서 9mm, 전단응력에서 15mm 이상이 필요한 것으로 산정되었다. 또한, 국내 설계 및 시공사례를 보면 직경 $\phi 2,500\text{mm}$ 의 현장타설말뚝에서 희생강관 두께는 16~28mm로 조사되었으며, 비교적 최근에 설계된 웅천~호소 해상교량과 새만금대교에서 희생강관 두께 16mm를 적용하였다. 특히, 새만금대교의 경우 직경 $\phi 3,000\text{mm}$ 에서는 $t=19\text{mm}$, $\phi 2,500\text{mm}$ 에서는 $t=16\text{mm}$ 의 희생강관을 적용하여 현장타설말뚝 57본을 시공 완료하였으며(2019년), 희생강관 변형에 의한 공정 중단은 1건도 발생하지 않았다. 이는 시방기준에 의거 수상시공 중 강관 내부수위를 외부수위보다 높게 유지한다면 상기 수준의 희생강관 두께로도 충분히 시공이 가능함을 의미



표 11. 희생강관 두께 검토

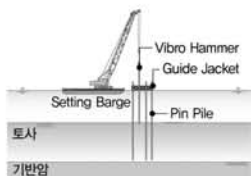

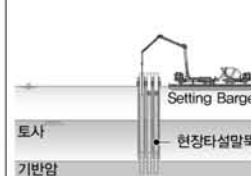

기준검토		작용력에 의한 두께 검토 	사례에 의한 구께 검토			
구분	설계기준		국내는 설계기준이 없으며, 국외는 최소 6mm 이상의 두께 기준 명시	교량명	직경	두께
국내	설계기준 없음	광안대교		2,500mm	28mm	46.0m
국외	<ul style="list-style-type: none"> 호주(Main Roads Australia) : 최소 6mm 이상 적용 미국(일리노이즈 도로국) : 어떤 경우에도 6mm 이상 	마창대교			24mm	25.5m
		신고리원자력		25mm	20.0m	
		웅천~호소	16mm	-		
			새만금대교	16mm	38.2m	
		$\phi 2,500\text{mm}$ 의 장비 작용력(전단/인장력)에 의한 희생강관 두께 검토결과 $t=16\text{mm}$ 이상 가능	국내 최근 시공사례의 현장타설말뚝 $\phi 2,500\text{mm}$ 희생강관 두께는 16mm 적용			

한다. 따라서 본 사업에서는 설계기준과 장비 작용력, 국내 사례 등을 종합적으로 검토하여 희생강관 두께를 16mm로 적용하였다.

5.5 해상 교각기초 시공순서

바지선에서 지그자켓 거치(핀파일 보강) 후 바이브로 해머를 이용하여 희생강관을 기반암 상단까지 설치하고, RCD 장비로 암반을 굴착하며, 철근망 건입과 콘크리트 타설로 현장타설말뚝을 시공한다. 이후 PC-House를 거치한 다음 콘크리트를 타설하여 확대기초를 완성한다.

표 12. 해상 RCD 시공순서

①지그자켓 및 희생강관 거치	②RCD 굴착	③철근망 건입 및 콘크리트 타설	④PC-House 설치 및 타설
			
핀파일 보강으로 확실한 지지	굴착 후 초음파 이용 공벽측정	슬라임처리(공회전, 펌프)	크레인으로 PC-House 시공

6. 이암층 현장타설말뚝 안정성 검토

현장타설말뚝의 예비적 안정성 검토(IGM 적용성, 하중전이 특성분석)를 수행하고 이를 바탕으로 연직지 지력, 연직침하 및 부등침하, 수평지지력 및 변위 등을 검토하여 이암을 지지층으로 하는 대구경 현장타설말뚝의 안정성을 확인하였다.

6.1 IGM 적용성 분석

IGM(Intermediate Geo-Material) 지반은 강도나 거동 측면에서 토사와 암의 경계에 있는 중간 특성을 가지는 지반으로 정의되며, 견질토사 및 연약한 암이 IGM에 해당한다. 본 사업구간의 이암은 지반종류에 따른 분류시 점성 IGM(Cohesive IGM)에 해당하나, 강도분류 기준에서 일축압축강도가 15MPa 이상이므로 IGM 적용기준을 상회한다. 따라서, 암반지지 기초를 적용하여 현장타설말뚝 안정성 검토를 수행하였다.

표 13. IGM 적용성 검토결과

구분	지반종류에 따른 분류(O'Neil 등, 1996)	강도에 따른 분류(FHWA, 1999)
IGM분류기준	과압밀점토, 세일, 백운석, 이암류(천공시 교란 쉬움)	점성 IGM(Cohesive IGM) ; $0.5 \leq q_u \leq 5.0$
조사 결과	이암	$q_u = 16.2 \sim 18.0 \text{MPa}$
검토 결과	사업구간 이암의 일축압축강도가 점성 IGM 분류기준의 강도보다 커 일반적 암반지지력으로 적용	

6.2 하중전이 특성분석

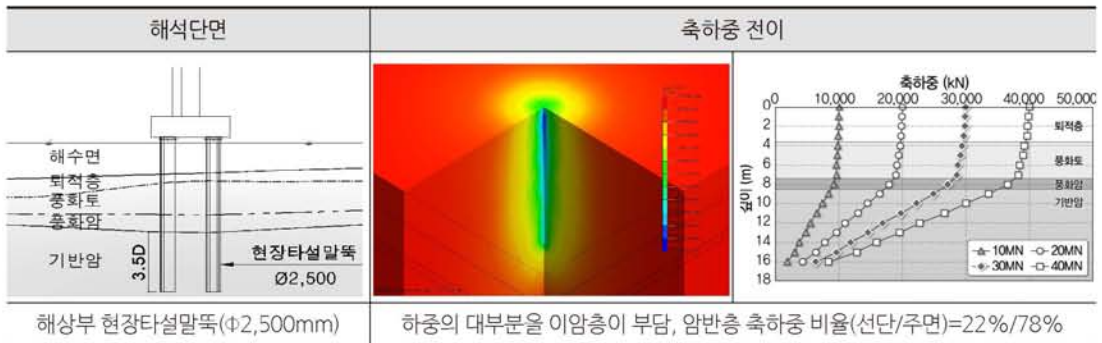
사업구간 이암은 국내 일반적인 암반에 비하여 일축압축강도가 작고($q_u=16.2 \sim 18.0 \text{MPa}$), 심층부로 깊어 지더라도 암반 강도의 증가가 거의 없어 현장타설말뚝의 하중전이 특성이 상이하다. 암반층 근입 길이에 따른 하중분배도(Pells & Turner, 1979)를 이용하여 검토한 결과, 상부하중에 대한 선단지지력 분담비율이 20%로 산정되었다. 또한 수치해석을 통해 축하중 전이특성을 검토한 결과 상부하중의 대부분을 암반층에서 분담하나, 선단지지력의 분담비율은 22%에 불과하고 주면마찰력이 78%를 분담하는 것으로 평가되었다. 따라서 상부하중을 지지하기 위해서는 암반 소켓부의 근입길이를 늘려 주면마찰력을 증가시켜야 한다는 결론에 도달하였다.

표 14. 축하중 전이특성 및 하중분배도 검토

하중전이 모식도			암반층 근입 길이에 따른 하중분배도(Pells & Tunnes, 1979)					
							<p>말뚝의 직경과 암반소켓 길이에 따른 하중 분배도를 이용하여 상부하중에 대한 선단지지력 분담비율 검토</p> <ul style="list-style-type: none"> - E_c : 콘크리트 탄성계수 - E_r : 지반의 탄성계수 - Q_i : 선단이 지지하는 하중 - Q : 총 작용하중 	
구분	말뚝직경(D, m)	E_c (MPa)	E_r (MPa)	E_c / E_r	근입깊이(m)	L / r	Q_i / Q	암 종
해상부	2.5	30,236	1,500	20.1	7.5	6.0	20.0	이암



표 15. 축하중 전이 검토



6.3 현장타설말뚝 안정성 검토

포항지역 이암 지반의 교량기초 안정성 확보를 위하여 암반 근입심도를 3.5~5.0D로 증가시켰다. 이는 국내 일반적인 암반의 현장타설말뚝 근입심도인 1.0~1.5D 보다 매우 크며, 이로 인해 시공시 희생강관과 RCD 굴착의 수직도 관리가 무엇보다 중요해졌다.

교각별 연직지지력, 연직침하 및 부등침하, 수평지지력 및 수평변위를 검토한 결과는 아래와 같으며, P2 교각에서 5.0D, P3 교각에서 3.5D의 근입깊이 적용시 안정성을 확보하는 것으로 확인되었다. 교량의 안정성에 가장 민감한 부등침하는 수치해석으로 검증한 결과 기준각변위 0.004rad 이내로 안정성이 확보되었다.

표 16. 연직지지력 검토 결과

구분	말뚝직경 (mm)	근입심도 (D, 말뚝직경)	극한한계상태(kN/본)		사용 및 극단상황한계상태(kN/본)			판정	
			작용하중	지지력	작용하중		지지력		
					사용한계	극단상황한계			
해상부 교각	P2	Φ2,500	5.0D	28,068	28,396	19,122	26,845	52,725	O.K
			3.5D	26,302	27,272	23,217	40,814	51,749	

표 17. 연직침하 및 부등침하 검토 결과

구분	P2	P3	판정	구분	부등침하량	이격거리	발생 각변위	허용각변위	판정
발생침하	2.38<12.7mm	3.31<12.7mm	O.K	P2~P3	0.93mm	150m	0.0000062rad	0.004rad	O.K

수치해석(부등침하)

구분	부등침하량	이격거리	발생 각변위	허용각변위	판정
P2~P3	0.2286mm	150m	0.0000015rad	0.004rad	O.K

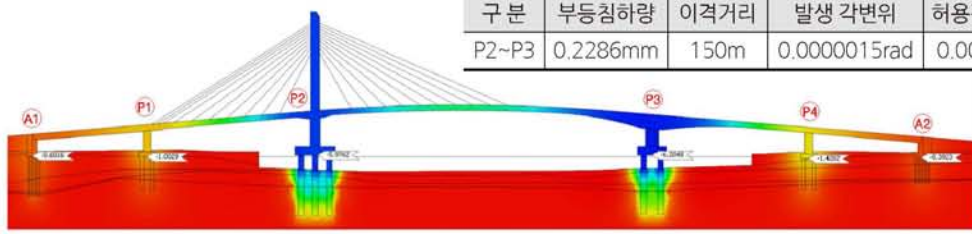


표 18. 수평지지력 및 수평변위 검토 결과

구분	말뚝직경 (mm)	수평지지력(kN/분)				수평변위(mm)			판정	
		극한한계상태		극단상황한계상태		외말뚝	무리말뚝	기준변위		
		작용하중	비선형해석법	작용하중	비선형해석법					
해상부 교각	P2	Φ2,500	1,091.0	6,947.5	2,984.0	8,684.4	2.6	2.04	38.0	O.K
	P3		1,339.0	6,883.2	4,325.0	8,604.0	7.54	3.89		

7. 결론

해상 교량기초의 지지층으로 포항 이암층에 대한 특성을 파악하고 대구경 현장타설말뚝 적용성에 대해 검토한 결과는 다음과 같다.

- 1) 지질도 및 현장조사(시추조사) 결과 신생대 제3기 이암이 기반암으로 형성되어 있다. 이암의 점토광물은 팽창성이 작은 일나이트와 카올리나이트로 구성되어 있으며, 내구성이 낮고 일축압축강도가 16.2~18.0MPa(이암 지지층의 일축압축강도)에 불과하여 현장타설말뚝 안정성 검토 및 시공시 고려되어야 할 사항으로 나타났다.
- 2) 해상 교량기초의 형식은 국내 적용사례를 검토한 결과 현장타설말뚝이 대다수이며, 직경은 Φ2,500mm가 45%로 파악되었다. 본 사업구간의 현장특성과 하중규모를 고려할 때 대구경 현장타설말뚝(Φ2,500mm)이 가장 적합한 것으로 검토되었다.
- 3) 해상 시공조건과 경제성 및 안정성을 종합적으로 고려한 결과 확대기초는 PC-House, 현장타설말뚝은 희생강관(t=16mm)+RCD 공법으로 시공함이 가장 적합하게 검토되었다.
- 4) 해상 교량기초 지지층으로 이암의 하중전이 특성을 분석한 결과, 상부하중에 대한 선단지지력 분담비율이 20~22%에 불과한 것으로 평가되었다. 이는 이암의 일축압축강도가 작고($q_u=16.2\sim18.0\text{MPa}$), 심층부로 깊어지더라도 암반 강도의 뚜렷한 증가가 없으므로 선단지지력에 한계가 있기 때문이다. 따라서, 현장타설말뚝의 암반 근입심도를 3.5~5.0D까지 상향시켜 암반부 주변마찰력을 증가시킴으로써 해상 교량기초의 안정성을 확보할 수 있었다.

[본 기사는 저자 개인의 의견이며 학회의 공식 입장과는 관련이 없습니다]