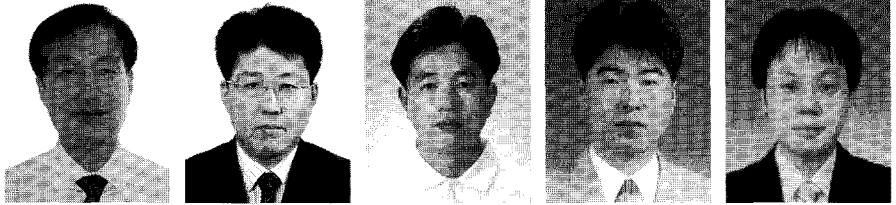


EPS시공을 통한 암거 기초 부마찰력 경감 사례



박 태 영 | 한국도로공사 냉정부산건설사업단 사업단장
 이 명 석 | 한국도로공사 냉정부산건설사업단 품질기술팀장
 최 영 철 | 한국도로공사 냉정부산건설사업단 책임연구원
 이 성 렬 | 정회원 · 한국도로공사 냉정부산건설사업단 토질차장
 최 형 석 | 한국도로공사 냉정부산건설사업단 토질대리

1. 추진 배경

한국도로공사 냉정-부산간 확장공사 노선 중 남해선의 경우 연약지반에 위치한 암거에 말뚝 기초가 적용되어 있다. 현행 도로교 설계기준 해설(2008) 및 구조물기초 설계기준 해설(2008)에 의하면 압밀토층 두께 15m를 초과하는 지점에 시공되는 말뚝 기초는 부마찰력을 검토하여 보완하도록 명시되어 있다.

말뚝이 포화된 점토층을 관통하여 지지층에 박혀 있는 경우 점토층이 압밀하는 과정에서 하향의 마찰력을 유발시키는데, 이것이 말뚝에 추가 하중으로 작용하는 것을 부마찰력이라 한다. 이러한 부마찰력은 말뚝의 침하를 지나치게 크게 하거나 극단적인 경우에는 말뚝의 파괴를 가져오기도 한다.

하지만 남해선 사전 설계시, 이러한 부마찰력의 영향이 고려되어 있지 않아, 시공 전 타공법 변경 가능 여부 및 말뚝 기초 적용시 부마찰력의 영향을 검토하여 기초 형식을 보완하고자 한다.

2. 공사 구간 특성

남해선 확장 공사 구간은 부산광역시와 김해시에 위치해 있어 민원 발생 및 교통량이 과다하고, 공사 구간의 대부분이 연약지반(두께 : 7.3~25m)으로 이루어져 있다.

또한 확장이 주로 편측 및 양측으로 이루어져, 계측을 통한 성토 관리가 이루어지지 않을 경우 기존 도로의 연동침하를 불러와 기존도로 안정성에 큰 문제점을 불러올 수 있다.

공사구간의 노선도를 그림 1에 나타내었다.

3. 주요 검토 사항

3.1 공법 변경 가능 여부 검토

연약지반에 시공되는 암거에 말뚝 기초를 적용할

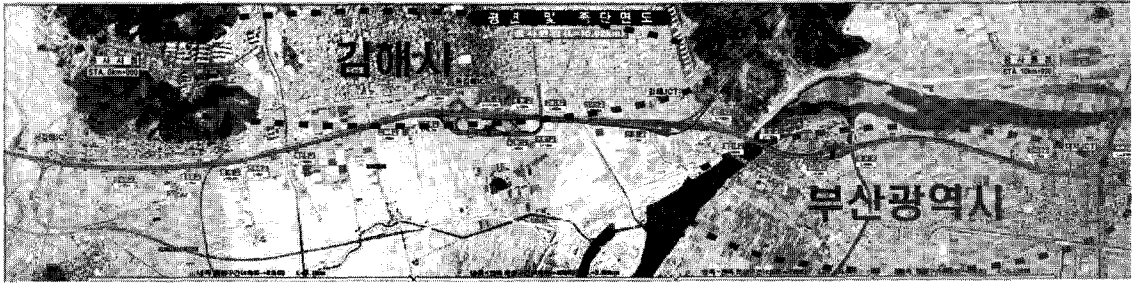


그림 1. 냉정~부산간 확장공사 남해선구간 노선도(L=10.92km)

경우 부마찰력 검토를 통한 보완이 필요하다. 이에 따라 연약지반상의 암거구조물 계획 시 가장 일반적인 방법인 Pre-Loading+연직배수공 공법으로 변경 가능 여부를 다음과 같이 3가지 방법으로 우선 검토 하였다. 그림 2는 Pre-Loading+연직배수공 공법의 개요도이다.

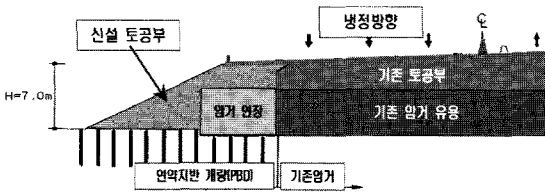


그림 2. Pre-Loading+연직배수공 공법

3.1.1 Pre-Loading 압밀기간 검토

대표 암거(Sta.7+823)에 대해 Pre-Loading +PBD 공법을 적용하여 해석한 결과 지반을 선개량 후 시공할 경우 단계성토가 필요하며, 한계 성토고까지 1단 쌓기 후 계획고까지 쌓기 위한 방치기간만 약 12개월이 필요한 것으로 예측되었다. 검토 결과는 표 1에 나타내었다.

표 1. 연약지반 개량시 Pre-Loading에 의한 압밀기간

Pre-Loading 높이	초기 비배수 강도	한계성토고	계획고까지 필요 압밀기간
7.0m	22kN/m ²	4.5m	12개월

3.1.2 통로암거 차단에 따른 민원

공사구간 특성에서 연급했듯이 해당노선이 시가지 를 관통하고 있어, 평상시 다수의 시민들이 통로암거 를 이용하고 있다. 이에 따라 하부지반의 연약지반 개량을 위해 필요 압밀기간까지 통로암거를 차단할 경우, 장기간 원활한 소통확보가 불가능하고 이로 인 해 이용객들의 빈번한 민원 제기가 예상되었다.

3.1.3 기존구조물 영향 및 결론

확장부 성토(Pre-Loading)에 따른 기존 구조물의 침하영향을 검토하였다. 검토 결과는 표 2와 그림 3

표 2. 기존 암거 구조물 부등침하 검토

거리 (m)	총침하량 (cm)	부등침하량 (cm)	각변위 (Rad)	각변위 기준 (Rad)	판정
0	52.075	-	-	1/300 (0.0033)	-
2	17.590	34.485	0.1724		N.G
		7.91	0.0396		N.G
4	9.680	4.085	0.0204		N.G
6	5.595	1.873	0.0094		N.G
8	3.722	0.807	0.0040		N.G
10	2.915	0.280	0.0014		O.K
12	2.635	0.074	0.0004		O.K
14	2.709	0.277	0.0014		O.K
16	2.986	0.570	0.0029		O.K
18	3.556	1.067	0.0053		N.G
20	4.623	2.079	0.0104		N.G
22	6.702	4.116	0.0206		N.G
24	10.818	8.049	0.0402	N.G	
26	18.867	-	-	-	

에 나타내었다. 이와 같이 해당 구간의 경우는 확장부 성토에 따른 압밀 기간의 문제와 기존 구조물의 부등침하에 대한 안정성을 확보하지 못하므로, 연약지반 개량 후 암거 구조물을 시공하는 일반적인 공법은 적용이 불가함을 알 수 있다.

3.2 원설계(말뚝 기초) 적정성 검토

3.2.1 확장구조물 기초 적정성 검토

지반개량 후 암거 구조물 시공이 불가함에 따라 필연적으로 말뚝기초 공법의 적용이 필요하였다. 이에 따라 표 3과 같이 강관말뚝공법과 그라우팅 공법을 비교 검토하였다.

해당구간 확장공사시 종단 선형이 준용됨에 따라, 기존구조물 하부의 침하량은 확장부성토에 따른 압밀의

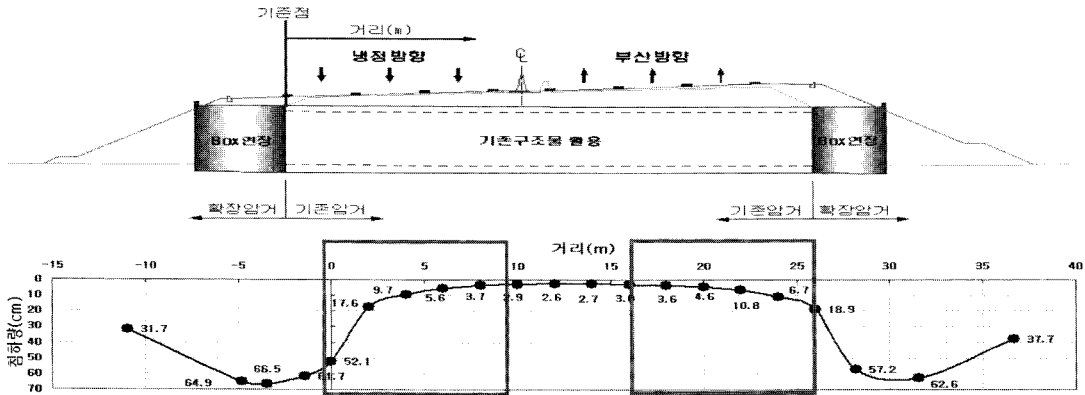


그림 3. 기존 구조물 파손 우려 구간

표 3. 확장구조물 기초 처리 공법 비교

구분	강관 말뚝 공법	그라우팅 공법
공법 개요		
장점	<ul style="list-style-type: none"> • 지지층이 깊어 직접기초가 곤란한 경우 말뚝을 사용하여 지지층에 근입시키는 공법 • 암거구조물의 확실한 지지로 침하량을 최소화시켜 기존 구조물과의 단차 발생 억제 가능 • 신속한 시공으로 통로 소통이 가능하여 민원발생 최소화 	<ul style="list-style-type: none"> • 저슬립프 석분 몰탈주입제를 주입하여 지반을 압축·강화시켜 지반을 다짐하며, 고결체를 형성하는 공법 • 주입 압력 및 속도에 따라 조성체 크기를 조절할 수 있음
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 선처리 공정이 필요없어 시공기간의 단축이 가능하나 공사비가 고가 • 구조물 하부 연약지반 미처리에 기인하여 토공부와 구조물부 접속부에 단차 가능성 있음(별도 대책을 통하여 보완 필요) 	<ul style="list-style-type: none"> • 고결체 분당 지지력이 작아 말뚝보다 본수가 증가하여 시공기간이 증가하며 공사비가 가장 고가임 • 지반을 압축·강화시켜 지반을 다짐하는 원리로, 원지반(연약층)의 교란이 발생할 수 있음
경제성	유리(당 현장 적용시)	불리(당 현장 적용시)
선정	◎	

표 4. 압거 현황 및 사전 안정성 검토(부마찰력 미고려)

No	구분	위치 (Sta.)	적용공법	허용지지력 (kN)	작용하중 (kN)	허용침하량 (mm)	발생침하량 (mm)	검토 결과	비고
1	통로압거	5+985	말뚝기초	695	488	25	9.5	OK	
2	통로압거	6+629	말뚝기초	600	259	25	6.0	OK	
3	통로압거	7+823	말뚝기초	737	389	25	7.0	OK	
4	통로압거	8+835	말뚝기초	874	401	25	9.5	OK	
5	수로압거	9+187	말뚝기초+EPS	750	316	25	5.4	OK	
6	통로압거	9+540	말뚝기초	736	388	25	8.5	OK	
7	통로압거	9+817	말뚝기초	611	397	25	7.2	OK	
8	통로압거	10+070	말뚝기초	741	430	25	8.8	OK	
9	수로압거	10+273	말뚝기초+EPS	785	282	25	8.6	OK	
10	통로압거	10+457	말뚝기초	747	370	25	7.5	OK	

영향이 절대적인 요소로 작용한다. 표 3에서 보는 것처럼, 강관말뚝 공법의 경우 압거구조물의 확실한 지지로 하부연약지반이 안정화된 기존구조물과의 단차 발생을 억제하며, 선처리 공정이 필요 없어 공사기간의 단축을 유도하여 민원발생의 우려를 줄일 수 있다.

현행 부마찰력 관련 기준을 표 5에 나타내었다. 관련 기준에 따라 압거별 연약점토층 두께를 고려하여 표 6과 같이 부마찰력 검토 대상을 선정하였다. 선정된 2개 압거에 대하여 β 계수법을 이용하여 표 7과 같이 부마찰력을 검토하였다. 결과를 통해 알 수 있듯

3.2.2 기초 안정성 및 부마찰력 검토

확장공사 구간의 압거 구조물 현황 및 설계 시 사전 안정성 검토 결과를 표 4에 나타내었다. 검토 결과 기준을 만족하는 것으로 나타났지만, 사전 안정성 검토시 부마찰력이 고려되지 않아 이에 대한 재검토가 요구되었다.

표 5. 현행 부마찰력 관련 기준

도로교 설계 기준 해설(2008)
부주면 마찰력이 발생하는 경우에는 말뚝의 연직지지력, 말뚝본체 응력, 말뚝머리 침하량에 대하여 부주면 마찰력이 미치는 영향을 검토하여야 한다.
단, 압밀침하 대상토층의 두께가 15m 이하인 경우 부주면 마찰력을 고려하지 않을 수 있다.

구조물 기초 설계 기준 해설(2008)
말뚝이 포화된 점토층을 관통하여 지지층에 박혀 있는 경우, 한 방향의 마찰력을 유발시키는데 이를 부주면마찰력이라고 한다.
외말뚝 부주면 마찰력의 경우 점토와 사질토의 장기거동해석은 β 계수법에 의한다.

표 6. 부마찰력 검토 대상 압거 선정

No	구분	위치(Sta)	연약점토층 두께 (m)	비고
1	통로압거	5+985	12.8	
2	통로압거	6+629	31.5	검토대상
3	통로압거	7+823	0.0	
4	통로압거	8+835	15.2	검토대상
5	수로압거	9+187	4.1	
6	통로압거	9+540	12.6	
7	통로압거	9+817	12.1	
8	통로압거	10+070	8.9	
9	수로압거	10+273	8.9	
10	통로압거	10+457	11.5	

표 7. 부마찰력 검토 결과

위치 (Sta)	연직방향 지지력(kN)		말뚝본체 응력(kN)		말뚝머리 침하량(mm)		검토 결과	비고
	허용 지지력	작용 하중	허용 응력	작용 응력	기준	침하량		
6+629	208	259	2,085	2,810	10	6.0	NG	
8+835	644	401	2,085	2,224	10	9.5	NG	

이 사전 검토에서는 안정한 것으로 나타났지만 부마찰력의 영향을 검토할 경우 기준을 만족하지 못하는 것을 확인 할 수 있었다.

여건 및 시공성을 감안하여 과제하중을 줄이는 것에 초점을 맞춰 표 8과 같이 대책 공법을 비교·검토 하였다.

3.2.3 대책공법 선정 및 적정성 검토

부마찰력의 원인인 하향력(downdrag) 현상은 연약지반 침하현상에 의해 발생하며 주로 지표면의 과제하중으로 인한 것과, 압밀시 지반과 말뚝 사이의 양상 차이에 원인이 있다고 하였다. 이에 현장

EPS 공법 적용시 쌓기고는 표 9와 같이 산정하였다. EPS 설계시에는 최상단과 최하단에 위치한 EPS블럭에 작용하는 하중이 허용기준 이내로 작용하여야 하고, EPS 최하단이 H.W.L보다 높게 위치해야 한다. EPS적용시 말뚝 안정성 검토 결과는 표 10에 나타내었다.

표 8. 대책공법 비교

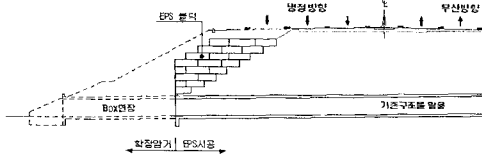
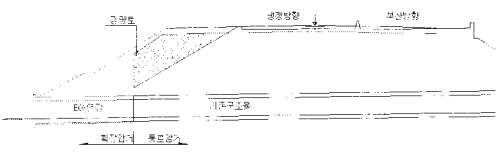
구분	EPS 공법	경량토 성토공법
공법 개요		
장점	<ul style="list-style-type: none"> 확장 성토부 하중을 경감(경량성토)하여 기존 구조물의 영향을 최소화하는 공법 기존 암거구조물의 연동침하를 최소화할 수 있어, 기존 구조물 활용 용이 공정이 간단하여 신속한 시공이 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 확장 성토부 하중을 경감(경량토 성토)하여 기존 구조물의 영향을 최소화하는 공법 잔류침하 최소화로 구조물과 토공부의 부등침하(단차) 경감 토압경감으로 측방유동 억제 및 구조물의 수평변위 최소화
단점	<ul style="list-style-type: none"> 시공시 화재에 대한 주의 요망 	<ul style="list-style-type: none"> B/P 설치에 따른 공사기간 과다소요 다짐도 확보곤란
경제성	유리(당 현장 적용시)	불리(당 현장 적용시)
선정	◎	

표 9. EPS 쌓기고 검토

Sta.	구 분		허용기준 (Kpa)	작용하중 (Kpa)	활하중 (Kpa)	사하중 (Kpa)	H.W.L	암거 하부EL	검토 결과	비고
	EPS	보조기층								
6+629	4.7m	1.31m	50 미만	45.18	14.18	31.00	1.160	1.060	OK	토목 3호
8+835	4.8m	1.30m	50 미만	45.18	14.38	30.80	1.880	0.490	OK	

* H.W.L까지 추가 성토 후 EPS 시공 (H.W.L: High Water Level)

표 10. EPS 적용시 말뚝 안정성 검토

Sta.	성토고	연직방향 지지력(kN)		말뚝분체 응력(kN)		말뚝머리침하량(mm)		검토 결과
		허용지지력	작용하중	허용응력	작용응력	기준	침하량	
6+629	6.41m	423	259	2,085	2,038	10	6.0	OK
8+835	7.4m	644	401	2,085	1,629	10	9.5	OK

3.2.4 기존 구조물 보완 방안

연약지반에 설치되는 암거 구조물을 확장하는 경우, 확장부 성토하중에 의하여 기존 구조물의 침하가 우려되었다. 이에 따라 기존 구조물에 작용하는 하중을 경감시키기 위하여 표 11과 같이 EPS공법과 그라우팅 공법을 비교·검토 하였다.

EPS공법은 성토부 하중을 경감시켜 기존 구조물의 영향을 최소화하는 공법으로 기존구조물의 연동침하를 줄일 수 있고, 공정이 간단하여 신속한 시공이 가능하다. 다만 시공 및 공용시 화재에 대해 각별히 주의하여야 한다.

그라우팅 공법은 저슬럼프 석분 몰탈주입재를 주

입하여 지반을 압축·강화시켜 지반을 다짐하며 고결체를 형성하는 공법으로, 주입압력 및 속도에 따라 조성체 크기를 조절 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 고결체 본당 지지력이 작아 말뚝보다 본수가 증가하여 시공기간 및 공사비가 증가하며 원지반의 교란 발생 우려가 있다. 또한 당 현장 적용시 경제성 측면에서 EPS 공법에 비해 다소 불리하게 나타났다.

다방면의 비교·검토 결과 기존 구조물 보완 방안으로 EPS 공법을 적용하였다. 다만, 종합적인 경제성을 분석하여 표 12와 같이, 규격이 작아 높은 피토고로 인해 토압이 크게 작용하는 수로암거에 한하여 EPS 공법을 적용하였다.

표 11. 기존 구조물 보완 방안

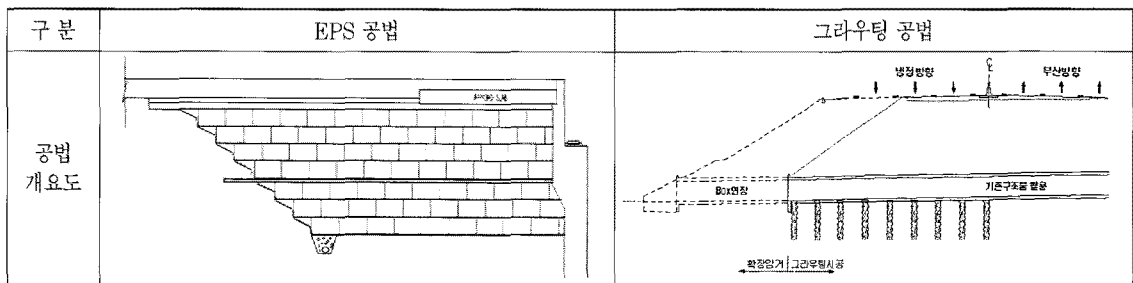


표 12. EPS 적용 여부 검토

No	구분	위치(Sta.)	규격(㎍×m)	피토고(m)	비고
1	통로암거	5+985	4.5×4.5	1.390	
2	통로암거	6+629	4.5×4.5	0.910	
3	통로암거	7+823	4.5×4.5	1.330	
4	통로암거	8+835	4.5×4.5	1.850	
5	수로암거	9+187	1.5×1.5	5.600	적용
6	통로암거	9+540	4.5×4.5	2.300	
7	통로암거	9+817	4.5×4.5	1.740	
8	통로암거	10+070	4.5×4.5	2.770	
9	수로암거	10+273	2.0×2.0	7.750	적용
10	통로암거	10+457	4.5×4.5	3.110	

입암거 구조물에 말뚝 공법을 적용시 토공부와 구조물부의 부등침하가 불가피하게 발생한다. 이를 예방하고자 그림 4와 같이 접속슬래브를 설치하여 토공부와 구조물부 단차발생 최소화를 유도하였다.

3.3.2 시공 순서에 의한 방법

토공부 선시공 후 암거구조물을 시공하는 경우, 뒤채움재 시공시 추가 하중으로 인한 침하로 토공부와 구조물부의 단차 발생이 우려되었다. 이에 그림 5와 같이 토공부와 뒤채움부를 동시 시공하여 단차 발생을 최소화 시켰다.

3.3.3 벽체 및 하부 일체화

기존 암거와 확장부 신설암거의 부등침하를 해소하기 위하여, 그림 6과 같이 구조물 벽체 및 하부 슬래브에 다웰바를 시공하였다.

3.3 말뚝 기초 시공시 부등침하 방지 대책

3.3.1 구조물 설치에 의한 방법

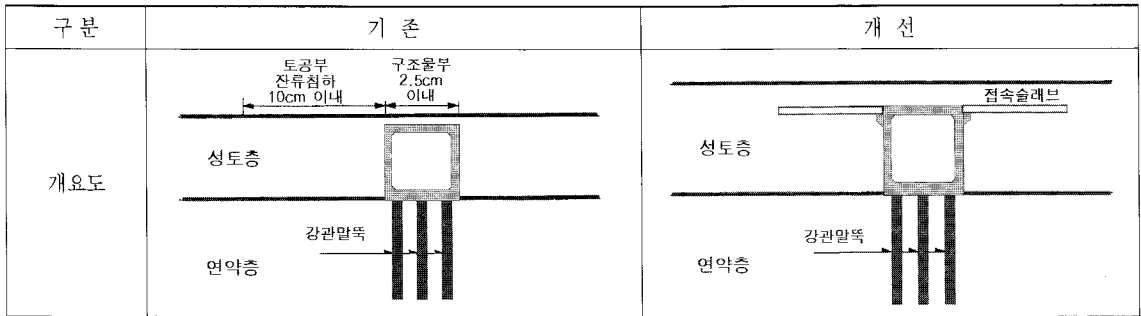


그림 4. 구조물 설치에 의한 방법

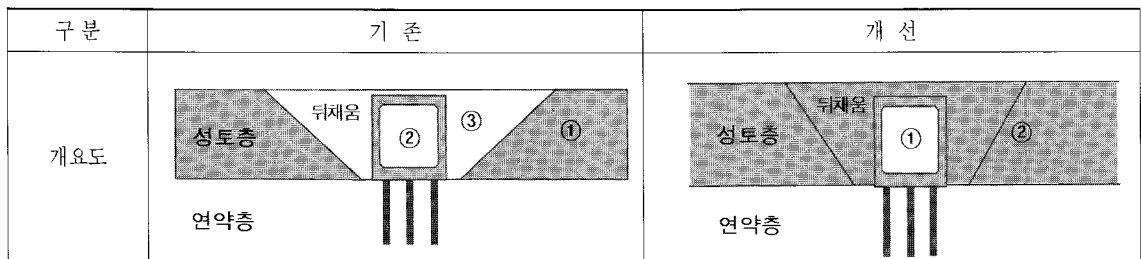


그림 5. 시공 순서에 의한 방법

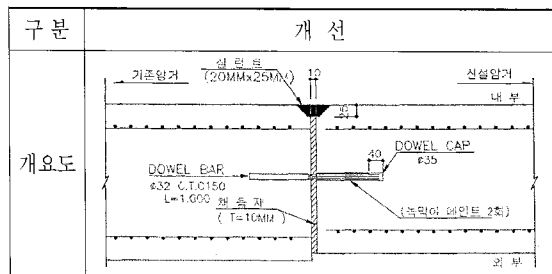


그림 6. 구조물 벽체 및 하부 슬래브 다웰바 시공

전 시공을 실시 중이다.

시공지역은 부산경남 물류이동의 중심지에 위치해 있어 서비스수준 "F"인 구간이 4개소이며, 최대 심도 53m, 최대 예상침하량 537cm에 달하는 연약지반을 고려해야 하는 등 어려움이 산재하고 있으나, 한국도로공사 냉정부산건설사업단은 IT 기반의 연약지반 통합계측시스템 구축 등 국내 연약지반 공사의 표준모델을 만들어 가고자 최선의 노력을 경주하고 있다.

4. 맺음말

연약지반에 시공하는 말뚝에 의해 발생하는 부마찰력은 말뚝과 주변지반의 상대변위에 따라 일어나는 것으로서 경우에 따라서는 말뚝체의 파괴를 유발할 수도 있다.

이에 한국도로공사 냉정부산건설사업단에서는 설계 오류를 사전 감지하여 이에 대한 대책 마련 후 안

참고문헌

1. 냉정-부산간 확장공사 제2공구 지반조사보고서 P.458~475
2. 윤여원(1999), 부마찰력을 고려한 말뚝설계, 한국지반공학회 말뚝기초위원회 워크샵 자료집 P.141~154
3. 박대순, 윤수진(2003), 말뚝 부마찰력 저감용 역청재료의 유변학적 특성, 한국지반공학회 논문집 제19권 4호 P.191~200