기술기사 1

부산-거제간 연결도로 침매터널 침하에 따른 조인트 거동 평가

김 민 철
(주)유신 부산-거제간
연결도로 감리단 이사

1. 서 론

부산-거제간 연결도로는 부산 가덕도와 거제 장목면를 해상으로 연결하여 주요 인프라를 구축하는 BTO(Build, Transfer & Operate) 방식의 민간투자 사업으로서 동쪽으로는 대구-부산간 고속도로와 연결되고, 서쪽으로는 대전-통영간 고속도로와 연결되어 거제도를 기준으로 남해안을 U자 형태로 연결하는 교통로의 중앙에 위치하여 향후 교통 요충지로서 중추적 역할을 수행하게 될 전망이다.

주요 시설로는 주항로 구간의 침매터널 3.7km와 예비항로 구간의 2주탑 사장교 및 3주탑 사장교, 접속교, 산악터널 일부로 구성되어 있으며, 이중 침매터널은 가덕도와 중죽도로 연결되는 해저터널로서 연장 3.24km의 침매터널과 대죽도와 중죽도 사이를 매립한 서측갱구부 및 가덕도의 동측 갱구부로 구성되어 있다. 침매터널 방식에 의한 도로건설은 국내에서 최초로 적용되는 공법으로서 세계에 유래를 찾아볼 수 없는 최대 48m의 대수심, 외해 및 최대 33m의 연약지반이란 현장여건에서 높은 기술수준을 요하는 고난이도 공사로 세계적인 주목을 받고 있다.

침매터널은 해저면에 미리 트렌치(Trench)를 조성하고, 육상 건선거(Dry Dock)에서 적당한 길이로 분할하여 제작, 계류한 침매함을 설치 지점까지 예인 운반한 후 트렌치내 자갈기초 포설면에 침설하며, 침매함 사이 공간을 배수하므로서 발생되는 수압차를 이용하여 접합한 후에

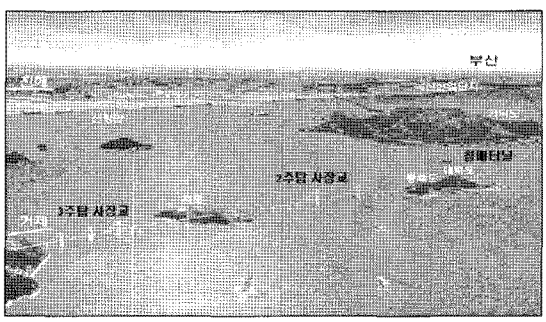

그림 1. 과업구간 위치도

되메우기 및 보호공으로 매설하여 터널을 완성하는 공법이다. 침매함 설치 후에 원지반에 작용하는 하중이 설치 전 원지반에 작용했던 하중보다 대부분 적으므로 침매터널은 연약지반에도 적용이 가능하나 본 사업에서는 함체 침설시 시공오차, 온도변화, 콘크리트의 크리프 및 수축, Gina의 이완, 지진에 의한 거동, 침몰선박, 침수에 의한 하중, 지반의 부등침하 등으로 인해 야기 될 수 있는 조인트 오프닝(Opening)을 최소화 하고자 해저 지반조건을 고려하여 지반개량이 시행되었다.

부산-거제간 연결도로 침매터널은 2008년 2월 침매함 E1 침설을 시작으로 2010년 5월 마지막 E18 함체의 침설을 완료하였으며, 그동안 침설된 함체에 대해서는 지속적인 모니터링을 통해 조인트 거동(Movement) 및 침하 관측을 시행하고 있다. 이에 본 고에서는 침매터널 개량지반의 침하 해석 결과와 부등침하가 조인트 거동에 영향을 미치는 정도를 소개하고 아울러 침설 및 세그먼트 조인트 거동의 설계치와 현재까지의 실측치를 비교, 제시하고자 한다.

2. 침매터널 지반개량 및 조인트 개요

2.1 침매터널 지반개량

침매터널은 겉보기 비중이 1.1정도로서 기초지반에 작용하는 하중이 선행압밀하중보다 작아 이론적으로 침설 후 침하가 발생하지는 않으나 본 과업구간의 경우는 최대 48m에 이르는 대수심, 외해로부터의 파랑, 조류등 시공여건이 상당히 나빠 준설오차를 크게 할 수 있다. 이 경우 되메우기 사석하중의 증가에 의해 발생하는 장기침하량을 예상하기가 곤란하므로 함체 E3~E14구간은 CDM(Cement Deep Mixing)공법, E14~E17 구간은 SCP(Sand Compaction Pile)와 프리로딩(Preloading) 공법으로 지반 개량하였다.

2.2 침매터널 조인트

침매함체 제원은 26.5m×9.75m×180m(폭×높이×길이)로서 각 함체는 22.5m의 세그먼트 8개로 구성되며, 각

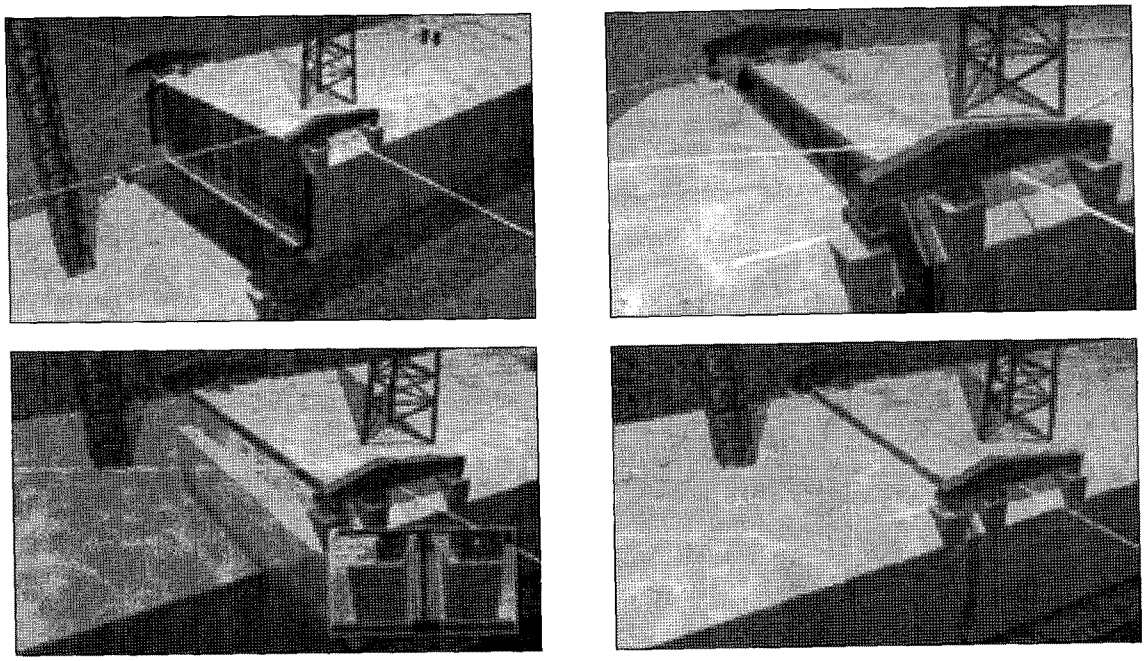

그림 2. 침매함 접합 개념도

기술기사 1

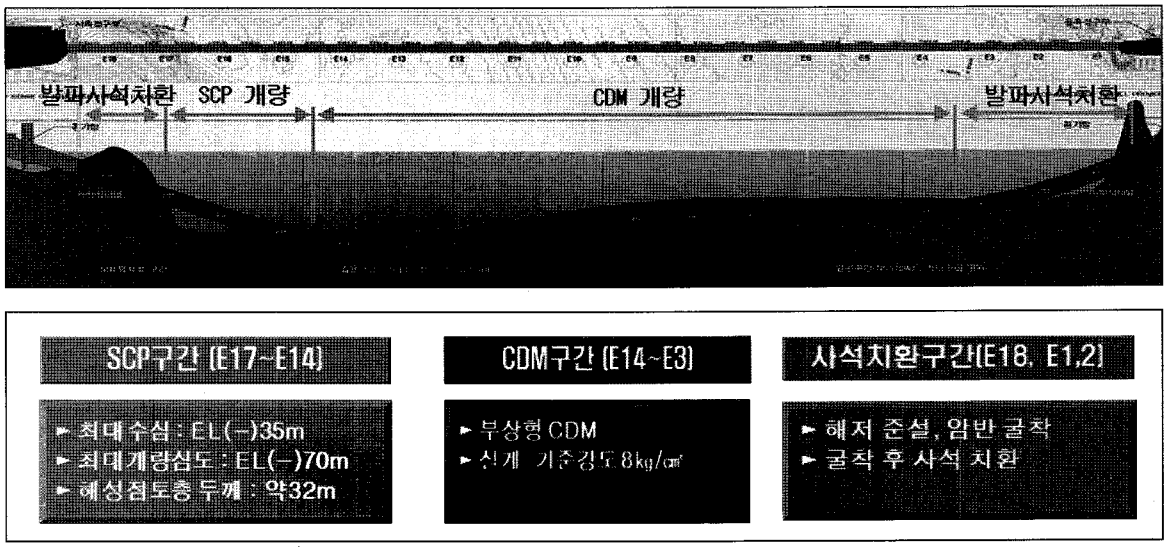

그림 3. 침매터널 지반개량공법 적용

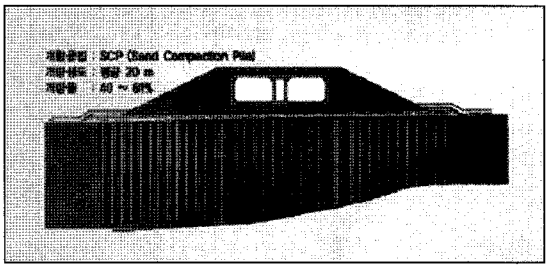

그림 4. SCP 지반개량 대표단면

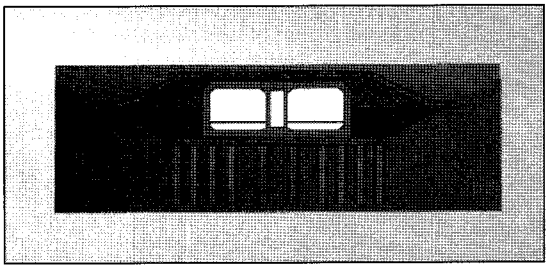

그림 5. CDM 지반개량 대표단면

세그먼트는 지수판으로 연결하는 한편 침설조인트는 지나 가스켓(Gina Gasket)과 오메가 씰(Omega Seal)로 연결한다. 침매함은 외부에 별도의 방수처리를 하지 않고 콘크리트 만으로 방수를 기대하는 규모가 큰 콘크리트 구조물이므로 충분한 수밀성을 위하여 특별 조건에 따른 배합설계를 시행하였다.

침매터널의 가장 중요한 구조적 특성 중 하나는 침매함을 연결하기 위해 필요한 연결 조인트이다. 조인트에 문

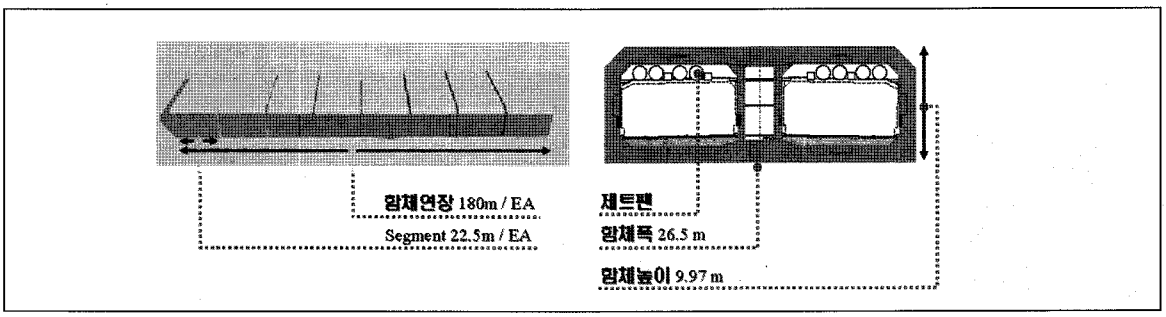

그림 6. 침매함체 제원

제가 발생하면 해수 유입이라는 심각한 결과를 초래하므로 조인트 거동은 매우 제한적으로 허용되고 조인트 거동에 영향을 미치는 인자에 대한 면밀한 해석과 이에 대한 대책이 필요하다. 침설 조인트는 기 침설된 선행 함체와 접합을 위한 조인트로서 Gina Gasket과 Omega Seal로 구성된 세계 최초의 이중차수 시스템으로 100년 내구년한 동안의 수밀성이 보장되도록 설계되었다. 또한 세그먼트 조인트는 침매함 제작과정에서 Injectable Waterstop을 세그먼트 콘크리트 타설 시 설치하고 추가적으로 Omega Seal을 보완하였으며, 세그먼트 사이는 철근으로 연결되지 않으므로 어느 정도의 거동은 허용하나 지수재가 허용할 수 있는 거동이 침설조인트에 비해 제한적이다.

3. 지반개량구간 침하해석

3.1 본선 CDM 개량구역의 침하 예측

침매터널 본선 침매함 E3의 일부에서 E14까지 CDM으로 지반개량 되어 있으며, 충적층에서 3m 이격되어 있는 완전한 부상형 CDM 개념으로 설계되었으나 E3, E4의 경우는 동측 발파사석치환구역과 부상형 CDM 구간과의 급격한 종방향 침하 차이를 저감시키고자 단계적으로 충적층과의 이격거리를 0.2~3.0m로 증가시킨 착저형 개념에 가깝다. 무처리 시 예상침하량은 Terzaghi 1차원 해석방법에 의해 30~35cm정도인 것으로 계산되었으나 CDM 개량후에는 그림 12, 13에 제시된 PLAXIS 2D 프로그램을 이용하여 해석한 결과, 정규압밀조건, 트렌치내 침전물의 단위중량, 평균 준설 계획고등 가정 조건하에서 표 1.과 같이 약 9.2~13.6cm가량 발생될 것으로 예측되었다. 예상침하량은 CDM 개량체 특성, 준설단면, Back Fill

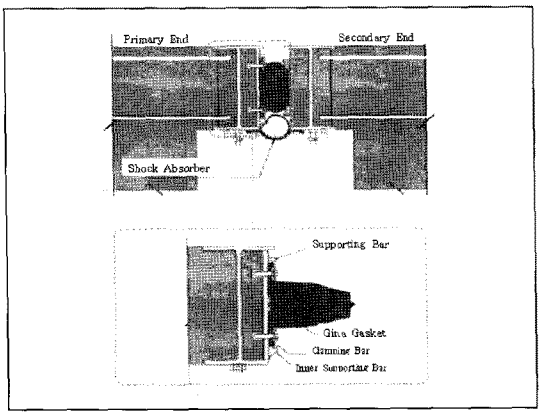

그림 7. 침설 조인트

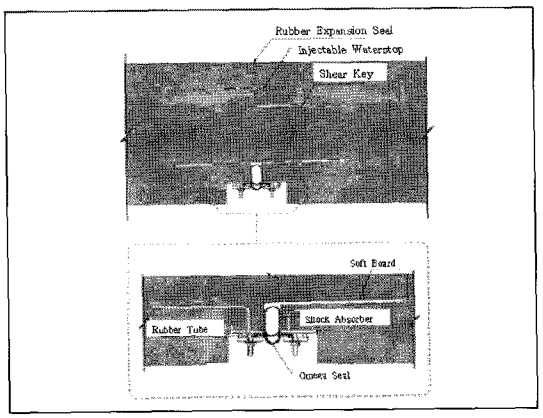

그림 8. 세그먼트 조인트

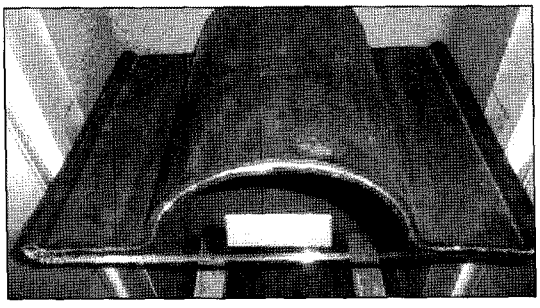

그림 9. Omega Seal

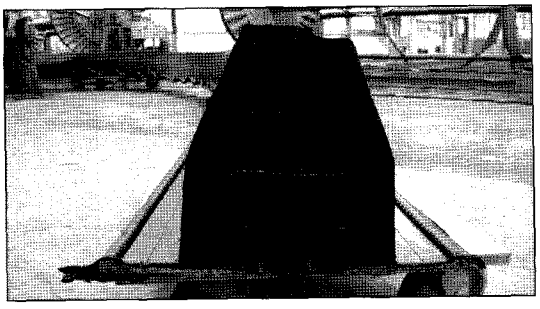

그림 10. Gina Gasket

기술기사 1

표 1. CDM 개량구역 예상침하량

Station	Element no.	Tunnel Settlement(mm)
7+360	E4	109
7+280	E5	115
6+800	E7	92
6+500	E9	107
6+180	E11	99
5+860	E13	112
5+700	E13	136

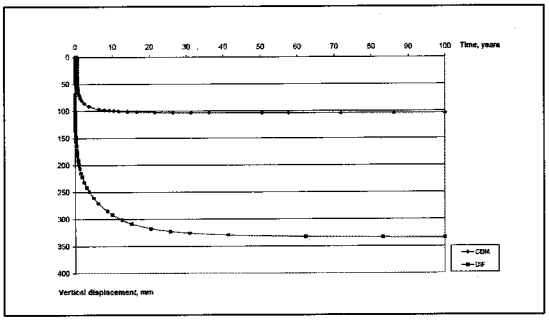

그림 11. 무처리와 CDM개량 침하-시간 비교

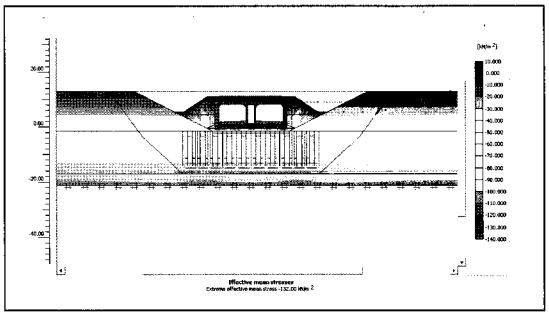

그림 12. 유효응력 해석 결과

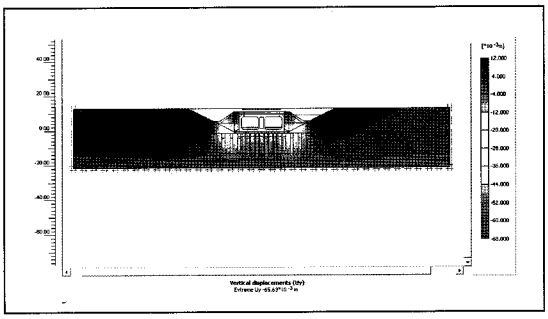

그림 13. 수직변위 해석 결과

단위중량 차이에 따라 증·감 할 수 있으며, 대표지점 침매함 E9(Station 6+500)를 대상으로 한 민감도 해석(Sensitivity Analysis) 결과에서는 최대 8cm까지 증가 가능한 것으로 해석되었다.

3.2 본선 SCP 개량구역의 침하 예측

침매터널 본선 서측 침매함 E14 에서 E17 일부까지는 함체 설치 계획고가 해저 원지반보다 높은 구간으로서 수중 축제에 의한 하중, 함체 자중, 보호공 하중으로 인해 재하하중이 크며, 시험시공 결과에서 SCP 타입깊이가 일부에서 60m에 이를 정도로 해성점토층의 두께가 깊어 큰 압밀침하가 예상되므로 완성된 침매터널의 잔류침하를 제거하고 압밀침하를 촉진토록 하기 위해 SCP와 프리로딩으로 지반개량 하였다. 해저 원지반하 상부 15m까지의

표 2. 항목별 민감도 해석 요약(Sta. 6+500)

검토 항목	민감도 해석 내용	침하량(mm)
시공순서	트렌치 굴착후 함체 침설하고 뒷채움사이의 기간 차이	5
준설단면	트렌치 준설단면의 차이	14
CDM 개량체 특성	CDM 개량체 길이와 강성의 차이 ① 개량체의 길이가 1m 짧을 경우 ② 개량체의 길이가 2m 짧을 경우 ③ 개량체의 강성 저하(E_{col} = 40,000kpa)	 22 38 14
Backfill 단위중량	Bckfill재의 단위중량의 차이 -. 1KN/m³이 증가할 경우	 9
합 계	개량체가 2m 짧을 경우	80mm

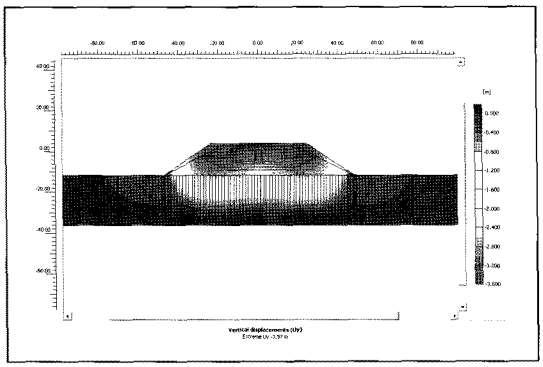

그림 14. 프리로딩 완료후 침하해석 결과

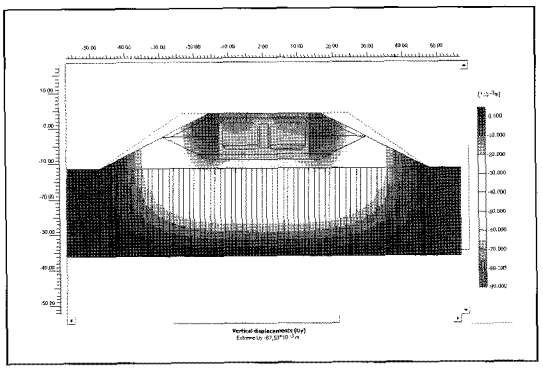

그림 15. 영구하중 재하시 장기 침하해석 결과

SCP 직경은 2.0m(치환율 40.3%)이며, 그 이하는 1.6m(치환율 25.6%)로서 치환율의 차이가 있으며, 함체와 사석 경계부는 치환율이 61%로서 이는 프리로딩 성토시 사면안정을 위한 대책으로 계획되었다. SCP는 모래·자갈층 하부 1m까지 타입되었으며, 시공된 모래말뚝의 길이는 주로 17~30m 정도 이다. 본 구간은 실시설계 단계에서 PLAXIS 2D 유한요소 프로그램을 이용하여 응력분포 및 변형 특성을 파악하였으며, 시간효과가 반영되지 않아 배수 및 비배수 단계에서 각각의 모델을 고려하여 해석되었다. 아래 그림 14, 15는 침매함 E16의 대표지점(STA. 5+185)에서의 프리로딩 재하후 예상침하량과 영구하중에서의 장기침하량 해석결과를 나타낸 것이다.

침매함 뒷채움 구역의 하중은 함체 영역에 비해 2.5배 정도 크므로 뒷채움 구역을 공용하중으로 계획하였으며, 잔류침하 저감과 압밀침하를 촉진하기 위하여 프리로딩 하중 수준을 공용하중보다 20~30% 증가시키고 압밀도 90% 이상이 될 때까지 재하시켜 장기하중에 의한 잔류침하를 제거하였다. 지반개량 완료후 프리로딩이 제거되면 리바운딩이 발생되는데 이는 설계침하량의 5% 수준으로 함체 침설 및 뒷채움 하중에 의해 약 10~15cm의 침하가 발생될 것으로 예상하였다.

4. 조인트 거동 해석 및 평가

4.1 조인트 구조해석 개요

침매터널 구조 해석은 AASHTO LRFD의 개념에 따라 수행되었으며, 이 기준은 구조물에 가해지는 하중, 구조물의 재료, 구조해석등 여러 변수들이 갖는 불확실성을 확률과 통계이론으로 해석하여 안전율이 적정 수준이상이 되도록 확보토록 하는 개념이다. 침매함 횡방향 해석은 부재 및 단면 설계를 위해서 수행되며, 종방향 해석은 각 조인트의 열림(Opening)과 닫힘량(Closing)을 계산하고 전단력을 산정하여 전단키(Shear Key)를 설계하는데 그 목적이 있다. 침매터널 2차원 종방향 FEM(비선형 SAP 2000)으로 해석시 본선 지반조건의 불확실성은 지반반력계수와 조인트 강성에 다양한 변화(Variation)를 주어 입력변수로 적용하는 것으로 해결하였다.

침설 및 세그먼트 조인트는 총 145개소로 구성되어 있어 균등 침하량이 조인트 거동에 미치는 영향은 미미하며, 침매함 종방향 해석시 입력변수는 다양한 하중조합을 기준으로 온도변화, 부등침하, 돌발하중(지진, 침몰선박, 침수)조건 등이 있으므로 부등침하의 경우, 함체의 조인트 안정성에 영향을 주는 요소로서 장기하중(영구하중)조건에서 해석될 수 있다.

4.2 침매함 종방향 구조해석 결과

종방향 구조해석은 단기 및 장기조건에서 사용한계상

기술기사 1

태(Service Limit State)와 극한한계상태(Extreme Limit State)의 하중조합으로 시행되며, 해석 결과를 통해 침설 및 세그먼트 조인트의 전단키에 작용하는 전단력, 조인트 열림 및 닫힘량이 결정된다. 조인트 거동량에는 시공오차(Steel Frame Tolerance) 및 안전여유치(Safety Margin)가 고려되었으며, 표 3.에 제시된 조인트 거동량은 허용한계를 나타내지는 않는다.

4.3 함체 침하 및 조인트 거동 측정 방법

함체 침설후 침하관리는 디지털 레벨장비를 이용하여 함체 일차 단부(Primary End)와 이차 단부(Secondary End)에 위치하는 브라켓 상단을 기준점으로 설정한 후 측정하며, 함체 내부공사중 브라켓이 제거되는 경우에는 기준점을 재설정하여 수준치를 보정한다. 함체간 침설조인트는 양측 벽체에 크랙게이지(Crack Guage)를 설치하고, 세그먼트 조인트는 양측 벽체 및 갤러리에 크랙게이지 및 삼각측정법을 활용하여 조인트 거동관리를 수행하고 있다. 여기서 삼각측정법은 세그먼트 조인트의 거동이 수직 및 수평방향으로 동시에 진행될 때 추가로 설치하며, 함체 상·하부, 측벽 Slab 및 Gallery 벽체의 Joint 거동을 측정하기 위해 6mm Bolt를 조인트 수평 및 수직방향으로 Triangle 형태로 설치하고 Bolt 간격을 측정하여 전체 거동을 측정하는 것으로 세그먼트 조인트의 회전 거동에 대해 0.1~1mm 정도의 정밀 측정이 가능하다.

4.4 침매함 침하 및 조인트 거동 측정 결과

함체 침설후 뒷채움 및 보호공 하중 재하에 따라 침하는 진행되며, 최종 보호공 완료후 침하는 점차 수렴하는 경향을 보인다. 함체 침설조인트는 50~150tf/m의 큰 압착력으로 연결되어 있어 함체 재하하중의 차이와 관계없

표 3. 침설 및 세그먼트 조인트 거동량(단기조건)

조인트		침설조인트(mm)				세그먼트조인트(mm)			
침설	세그먼트	열림량		닫힘량		열림량		닫힘량	
		사용한계	극한한계	사용한계	극한한계	사용한계	극한한계	사용한계	극한한계
C&C/1	1	-42	-46	47	63	-22	-22	NA	NA
1/2	2	-60	-59	56	68	-18	-25	NA	NA
2/3	3	-56	-65	55	71	-24	-46	NA	NA
3/4	4	-63	-73	51	62	-30	-51	NA	NA
4/5	5	-63	-62	51	60	-31	-40	NA	NA
5/6	6	-63	-66	51	59	-33	-41	NA	NA
6/7	7	-65	-61	51	59	-33	-34	NA	NA
7/8	8	-64	-61	52	59	-32	-35	NA	NA
8/9	9	-64	-61	51	58	-32	-37	NA	NA
9/10	10	-67	-65	51	58	-32	-36	NA	NA
10/11	11	-67	-64	49	58	-31	-33	NA	NA
11/12	12	-67	-64	48	56	-28	-35	NA	NA
12/13	13	-67	-63	48	58	-30	-36	NA	NA
13/14	14	-67	-68	48	54	-31	-43	NA	NA
14/15	15	-62	-75	47	54	-25	-33	NA	NA
15/16	16	-60	-68	51	59	-27	-53	NA	NA
16/17	17	-60	-71	55	62	-30	-48	NA	NA
17/18	18	-50	-58	62	66	-13	-19	NA	NA

※ 조인트 열림 및 닫힘량에는 시공오차 15mm와 안전여유치 10mm 포함

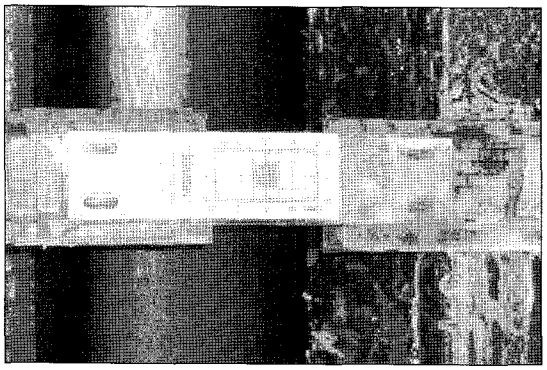

사진 1. 침설조인트 거동 측정

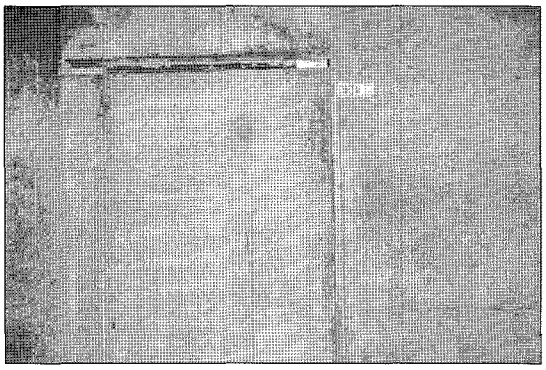

사진 2. 세그먼트 조인트 거동 측정

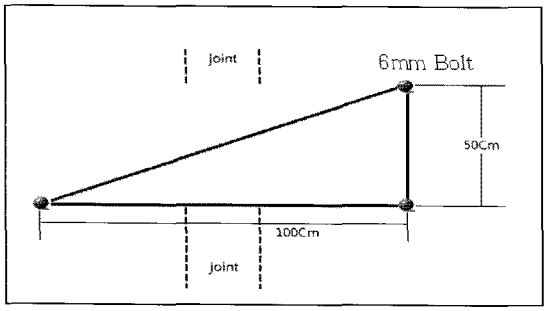

그림 16. 외측 벽체 삼각측정법

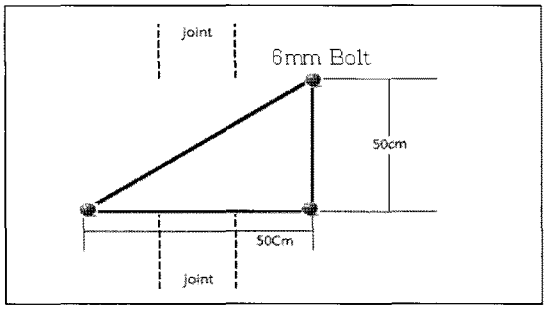

그림 17. 갤러리 벽체 삼각측정법

이 균등침하의 양상을 보이며, 함체 E1~E14 침설조인트의 부등침하량은 2010년 3월까지 4cm 이내로 것으로 측정되었다.

함체 침설조인트의 열림 및 닫힘량은 부산 및 거제방향 외측 벽체에 설치되어 있는 크랙게이지를 통해 관리되고 있으며, 세그먼트 조인트의 경우는 외측과 함께 갤러리 벽체에도 설치하여 회전 거동을 확인할 수 있도록 하였다. 크랙 게이지 측정 결과, 동시에 열림 및 닫힘거동을 보이거나 횡방향 회전 거동양상을 보이는 것으로 파악되었으며, 시공중 조인트 거동량은 현재 6mm이하로서 미미한 것으로 나타났다.

4.5 부등침하가 조인트 거동에 미치는 영향

함체 종방향 해석 결과에서 조인트 거동에 영향을 미치는 인자로는 콘크리트 등가온도효과, GINA의 릴렉세이션(Relaxation), 부등침하, 지진외 여러 가지가 있으며, 특히 극한한계상태에는 침몰선박, 터널침수 조건등이 포함되어 있다. 등가온도효과(Temparature Equivalent Effects)에 의해 발생되는 침설조인트 열림량은 사용한계상태에서 23~28mm, 극한한계상태에서는 17~20mm 정도이며, 부등침하에 따른 조인트 거동량은 암발파사석치환 구역에서 CDM 개량구간까지 종방향으로 1~11mm 정도로 예측되었다. 일반설계지진(Ordinary Design Earthquake, ODE)조건 에서는 대부분 조인트에서 3~7mm, 최대설계지진(Maximum Design Earthquake, MDE)에서는 15~21mm의 거동량을 예측하였으며, 특히 동측 및 서측 갱구부로 갈수록 지진가속도의 증가로 인해 조인트 거동량이 큰 것으로 나타났다. 함체 침설후 조인트 거동량을 확인한 결과, 현재까지 6mm이내로서 해수온도변화에 의한 계절별 조인트 열림 및 닫힘량의 차이는

기술기사 1

표 4. 함체간 부등침하 측정결과(2010년 3월 기준)

함체 구분	함체 침설 일자	함체침설후 침하량(cm)		침설조인트	함체간 부등침하 (cm)
		일차 단부(Primary End)	이차 단부(Secondary End)		
E1	2008.2.20	0.1	5.6	C&C/E1	0.1
E2	2008.4.3	3.4	16.6	E1/E2	2.2
E3	2008.4.28	16.2	18.9	E2/E3	0.4
E4	2008.6.1	19.8	17.2	E3/E4	0.9
E5	2008.11.14	18.1	15.5	E4/E5	0.9
E6	2008.12.12	19.1	13.1	E5/E6	3.6
E7	2009.1.17	14.6	8.7	E6/E7	1.5
E8	2009.2.17	11.1	9.9	E7/E8	2.4
E9	2009.3.27	11.3	12.9	E8/E9	1.4
E10	2009.4.18	16.6	13.2	E9/E10	3.7
E11	2009.5.13	17.1	9.8	E10/E11	3.9
E12	2009.6.27	6.6	5.9	E11/E12	3.2
E13	2009.10.16	6.8	8.1	E12/E13	0.9
E14	2009.11.15	7.6	4.2	E13/E14	0.5

표 5. 함체 외측벽체 조인트 거동 측정결과

조인트 구분		침설 조인트 거동량(mm)				세그먼트 조인트 거동량(mm)			
침설	세그먼트	열림량		닫힘량		열림량		닫힘량	
		부산방향	거제방향	부산방향	거제방향	부산방향	거제방향	부산방향	거제방향
E1/E2	E1	-	2.0	3.3	-	-	2.0	2.0	-
E2/E3	E2	-	2.5	2.0	-	3.0	2.5	-	-
E3/E4	E3	-	3.0	6.0	-	-	-	-	-
E4/E5	E4	-	5.0	4.0	-	-	-	-	-
E5/E6	E5	-	-	-	-	-	-	-	-
E6/E7	E6	-	-	1.0	1.0	-	-	-	-
E7/E8	E7	-	-	2.0	-	-	-	-	-
E8/E9	E8	-	-	2.0	2.0	-	-	-	-
E9/E10	E9	-	-	2.0	2.0	-	-	-	-
E10/E11	E10	-	-	2.0	2.0	-	-	-	-
E11/E12	E11	-	-	1.0	1.0	-	-	-	-
E12/E13	E12	-	2.0	2.0	-	-	-	-	-
E13/E14	E13	-	-	0.5	0.5	-	-	-	-

설계치보다 크지 않으며, 특히 함체 E1~E14는 전단키 시공이 기 완료되어 더 이상 부등침하가 발생되지 않으므로 부등침하에 따른 조인트 거동량은 설계치에 비해 적은 것으로 확인되었다.

5. 결 론

1. 부산-거제간 연결도로에서 침매터널은 가덕도와 중죽도로 연결되는 해저터널로서 연장 3.24km의 침매터널과 대죽도와 중죽도 사이를 매립한 서측갱구부 및 가덕도의 동측 갱구부로 구성되어 있으며, 세계에 유래를 찾아볼 수 없는 최대 48m의 수심, 외해 및 최대 33m의 연약지반의 현장여건에서 공사가 진행되고 있다.

2. 현장 시공여건은 상당히 나빠 준설오차에 따른 되메우기 사석하중의 증가에 의해 장기침하량을 예상하기가 곤란하므로 함체 E3~E14구간은 CDM공법, E14~E17 구간은 SCP와 프리로딩 공법으로 지반 개량하였다.
3. 침매함체 제원은 26.5m×9.75m×180m(폭×높이×길이)로서 각 함체는 22.5m의 세그먼트 8개로 구성되며, 각 세그먼트는 지수판으로 연결하는 한편, 함체간은 Gina Gasket과 Omega 조인트로 연결하여 100년간의 수밀성을 보장하였다.
4. 함체 E3~E14에서 CDM 개량후 PLAXIS 2D 프로그램을 이용하여 해석한 결과, 약 9.2~13.6cm의 침하가 발생될 것으로 예측되었으며, 함체 E15~E17에서는 프리로딩과 SCP 지반개량에 의해 잔류침하를 완전히 제거하였으나 프리로딩이 제거시 발생되는 리바운드에 의해 함체 침설 및 뒷채움 하중 재하시 약 10~15cm의 침하가 발생될 것으로 예상하였다.
5. 침매터널 종방향 구조해석은 단기 및 장기조건에서 사용한계상태(Service Limit State)와 극한한계상태(Extreme Limit State)의 하중조합으로 시행하여 침설 및 세그먼트 조인트의 전단키에 작용하는 전단력, 열림 및 닫힘량을 결정하였다.
6. 함체 침설후 침하관리는 디지털 레벨장비를 이용하여 함체 일차 단부(Primary End)와 이차 단부(Secondary End)에 기준점으로 설정한 후 측정하며, 침설 및 세그먼트 조인트의 거동은 크랙게이지(Crack Guage)와 삼각측정법을 활용하여 수행하고 있다.
7. 함체 침설후 뒷채움 및 보호공 완료후 침하는 점차 수렴하는 경향을 나타내며. 함체 E1~E14의 2010년 3월까지의 침하량은 4.2~19.8cm의 범위이나 함체간은 50~150tf/m의 큰 압착력으로 연결되어 있어 재하하중의 차이와 관계없이 함체 조인트의 부등침하량은 4cm 이내로 균등침하의 양상을 보이는 것으로 확인되었다.
8. 함체 침설후 조인트 거동량을 확인한 결과 현재까지 6mm이내이며, 특히 함체 E1~E14는 전단키 시공이 완료되어 더 이상 부등침하가 발생되지 않아 부등침하에 따른 조인트 거동량은 설계치에 비해 적은 것으로 확인되었다.
9. 부산-거제간 연결도로 침매터널은 2010년 12월 성공적인 준공을 위해 막바지 공사에 박차를 가하고 있으며, 2010년 5월 마지막 18번 함체의 침설을 완료하였다. 향후 침설된 함체의 거동을 확인하고 평가하여 설계자료의 재평가(Feed Back)는 물론 함체 수밀안정성을 확보하기 위한 일련의 노력을 침매터널 유지관리업무와 연계하여 지속적으로 진행할 것이다.

[참고문헌]

1. 김용일(2009. 4) "부산-거제간 연결도로 침매터널", 한국 지반공학회지 Vol.25, No.4
2. GK Fixed Link Co. Ltd(2005) : Busan-Geoje Fixed Link 실시설계보고서(8단계)
3. GK Fixed Link Co. Ltd(2006) : Busan-Geoje Fixed Link 실시설계보고서(11단계)
4. GK Fixed Link Co. Ltd(2006) : Busan-Geoje Fixed Link 실시설계 공사시방서(11단계)