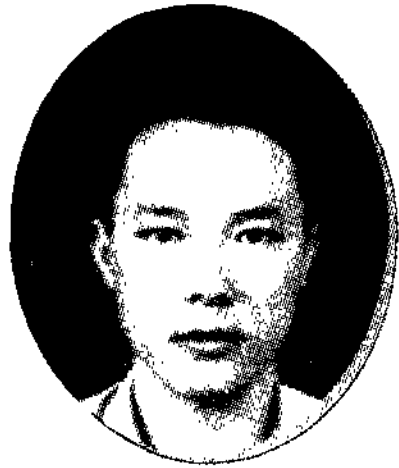
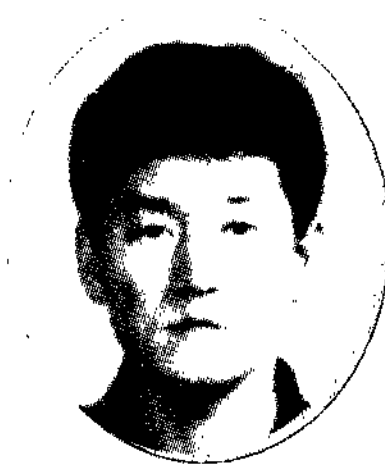


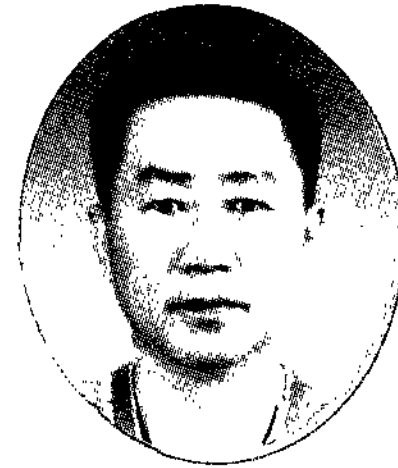
# 부산-거제간 연결도로 침매터널 지반보강공법 적용 사례



김민철  
(주)유신코퍼레이션  
부산-거제간 연결도로  
감리단 이사  
(y11108@yooshin.co.kr)



윤상철  
(주)유신코퍼레이션  
부산-거제간 연결도로  
감리단 이사



최준수  
(주)유신코퍼레이션  
부산-거제간 연결도로  
감리단 전무

## 1. 서론

우리나라에서는 하상이나 해상을 연결하는 방법으로 주로 교량이나 굴착터널을 적용하고 있으나 향후 지형조건을 고려한 구조물 연장의 최소화, 자연경관과의 조화, 경제성, 항공 장애 방지 및 기타 복합구조에 의한 사유로 침매터널 공법 도입을 고려해 볼 수 있다. 여기서 침매터널이란 하상이나 해상 준설후 Tube를 연결하는 공법으로 1894년 메사추세츠주의 보스턴에서 건설된 Shirley Gut Siphon 수로(L=79m, D=1.8m)가 최초이며, 이후 20세기말에는 덴마크와 스웨덴을 연결하는 Oresund 해협연결도로(175m의 함체 20개가 연결된 3.5km의 장대터널)가 시공될 정도로 그기술이 발전되었다.

본 공법은 국내에서는 그동안 시공사례가 없었으나 진해항과 부산신항의 지형적 특성, 환경적 요인,

경제성 등을 고려하여 부산-거제간 연결도로 일부 구간에 설계와 시공을 병행하는 Fast Track방식으로 2004년부터 최초로 시공되고 있으며, 2010년 완공을 목표로 공사를 진행하고 있다.

침매터널은 공사중 침설이 가능하고 완공후 부상에 대한 안정성을 확보하기 위하여 터널 내부에 발라스트(Ballast)가 필요할 정도로 상당한 부력이 작용하므로 침매터널 자중의 일부만이 지반에 하중으로 작용하게 되어 연약지반에서도 별도의 지반보강이 없이 Sand Flow, Sand Jet, Gravel Bed등 준설면기초만으로 시공이 가능하다. 그러나 당 현장의 경우 세계적으로 침매터널 시공사례가 없는 20~45m의 수심과 외해, 최대 33m인 연약지반 조건등 열악한 현장여건과 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 오프닝을 최소화하고자 지반보강을 계획하였다. 이에 본고에서는 해성점토 층의 물리, 역학적 특성 및 침매함체의 안정성을 확보 하기 위한 지반보강공법에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 부산-거제간 연결도로 침매터널

### 2.1 개요

부산-거제간 연결도로는 국가지원 지방도 58호선의 일부로서 경상남도 거제시 장목면 유희리와 부산광역시 강서구 천성동 가덕도를 총연장 8.2km의 왕복 4차로로 연결하는 노선이며, 주요시설로는 주항로 구간의 침매터널 3.7km와 예비항로 구간의 2주탑 사장교 및 3주탑 사장교, 접속교, 산악터널 일부로 구성되어 있다(그림 1참조).

이중 침매터널은 가덕도와 중죽도로 연결되는 해

저터널로서 침매터널과 육상부의 도로를 연결하기 위하여 침매터널 서측 끝단부에 대죽도와 중죽도 사이를 일부 매립하고 동측 끝단부에는 가덕도에 일부 매립을 하여 갯구부를 조성하는 것으로 계획하였다.

침매함체의 제원은 그림 2와 같이 26.5m×9.75m×180m(폭×높이×길이)로서 각 함체는 22.5m의 세그먼트 8개로 구성되며, 각 세그먼트는 지수판으로 연결하는 한편 함체간은 방수를 위해 Gina 조인트와 Omega 조인트로 연결한다. 침매함은 외부에 별도의 방수처리를 하지 않고 콘크리트만으로 방수를 기대하는 규모가 큰 콘크리트 구조물이므로 충분한 수밀성을 위하여 특별 조건에 따른 배합설계를 시행하였다.

### 2.2 침매터널 시공순서

침매공법은 지상 드라이도크에서 제작한 함체를 물에 띄운채 원하는 위치까지 이동하여 준설기에 의해

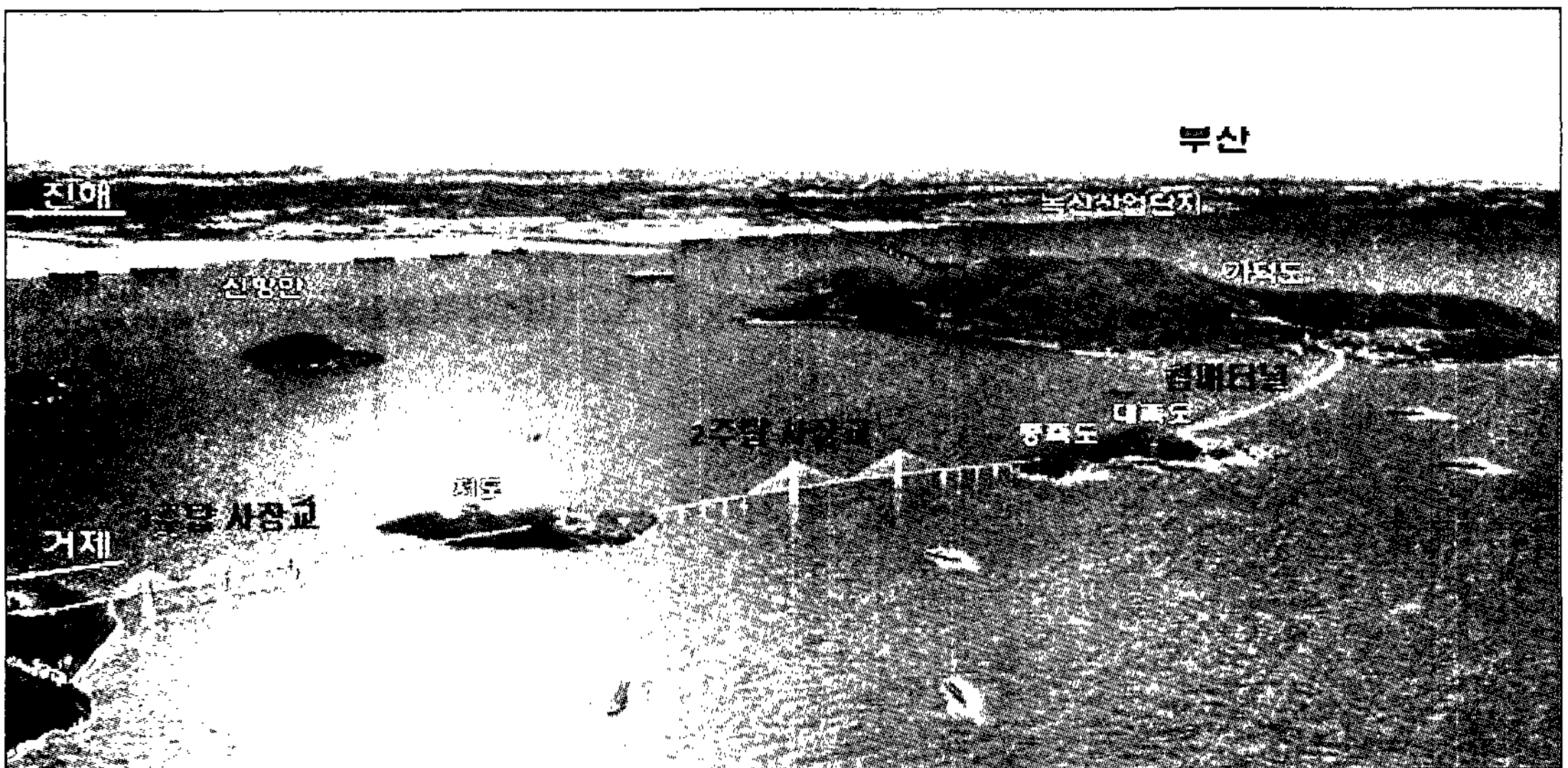


그림 1. 부산-거제간 연결도로 노선 현황

## 부산-거제간 연결도로 침매터널 지반보강공법 적용 사례

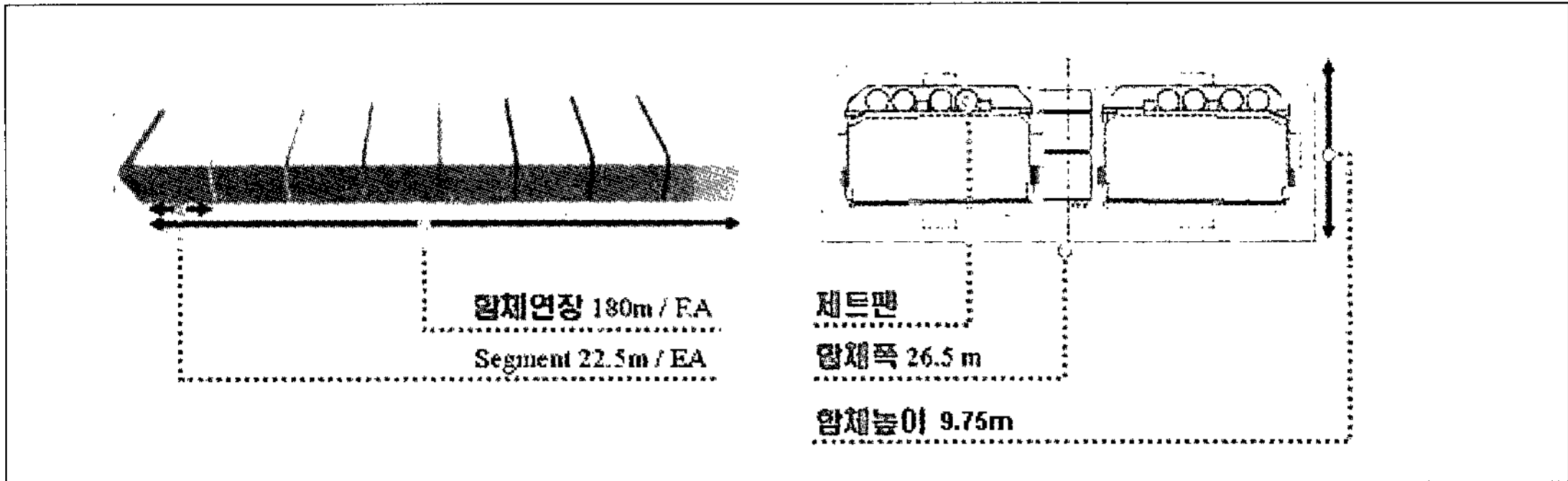


그림 2. 침매합체 제원

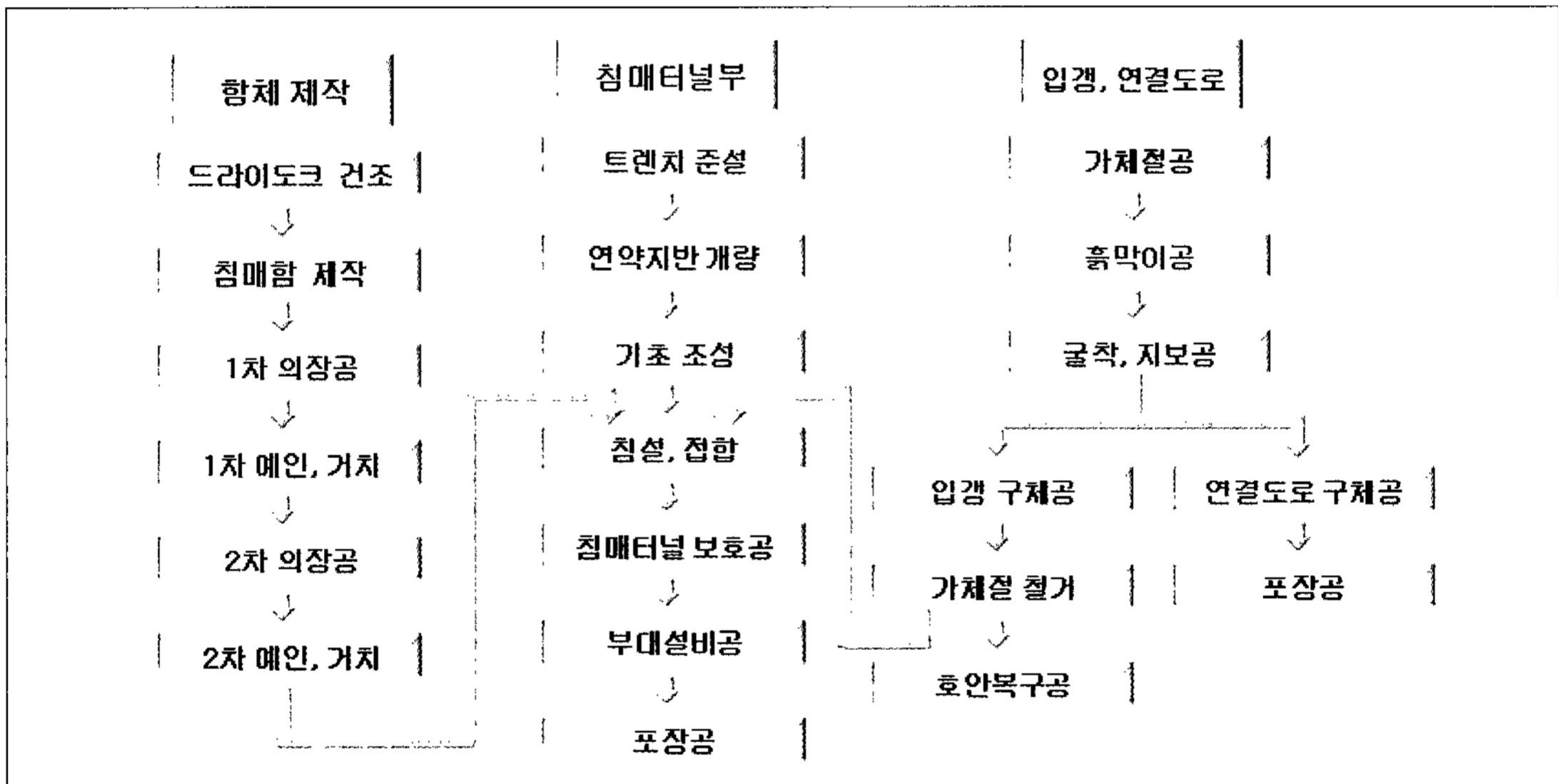


그림 3. 침매터널 시공순서

미리 수중굴착된 해저의 제 위치에 침설 시킨 후 수중에서 합체를 연결하고 그 위에 사석으로 되메우기 하여 터널을 완성하는 공법으로 시공 구분은 그림 3과 같이 크게 합체제작, 침매터널부, 입갱 및 연결도로로 분류할 수 있다.

현재 사석 치환구역 및 CDM(Cement Deep Mixing) 시공구역에 침설을 계획하고 있는 4개 합체(TE1~TE4) 중 TE1은 2월 16일부터 운송을 개시하여 2월 18일에 침설을 완료하였다(사진 1참조).

### 3. 침매터널 구간 지반 특성

#### 3.1 지반조사

##### 3.1.1 지반조사 수량

침매터널 구간에 대한 지반조사는 진입램프, 개착식터널 및 침매터널의 지반설계정수를 결정하기 위하여 표 1과 같이 단계별로 수행되었으며, 각 조사단계는 타당성 검토, 개념설계, 기본설계, 기본설계보

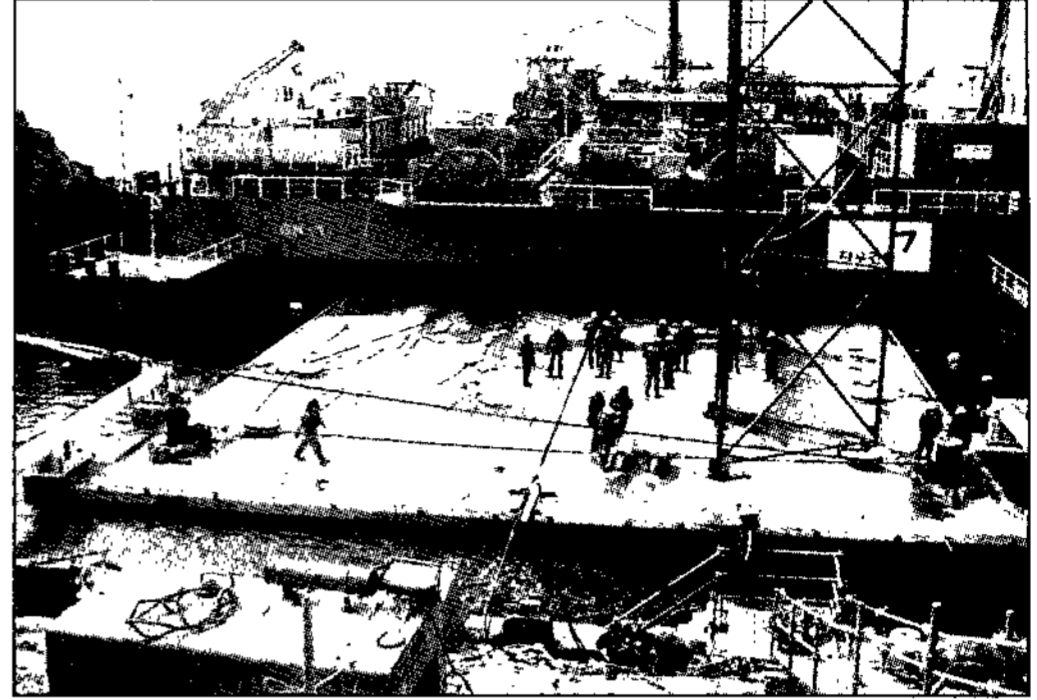
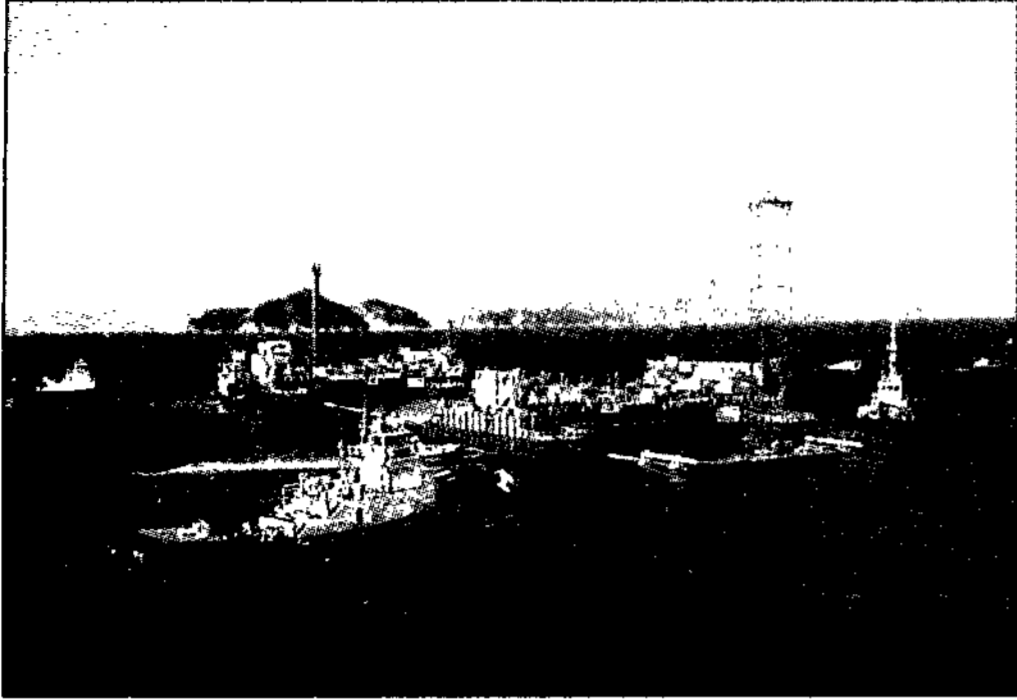


사진 1. 합체(TEI) 운송 및 침설전경

표 1. 대표적 지반조사 수량

구분	시추조사(개소)	불교란시료(회)	콘관입시험(개소)	토베인시험(개소)	수압시험(회)	투수시험(회)	비고
타당성 검토 단계(1997년)	6	10		-	-	-	물리탐사 및 수심측량
개념설계 단계(2000년)	4	31	10	-	-	-	
기본설계 단계(2003년)	35	146	29	98	7	4	
기본설계 보완 및 실시설계 단계(2004년)	5	42	30	-	-	-	

완 및 실시설계 단계 지반조사 과정으로 구분되었다.

### 3.1.2 지층 상태

침매터널구간의 원지반 해저면의 수심은 최대 37m에 이르고 트렌치 준설 후에는 최대 심도가 48m가 되며, 지형상으로는 가덕도 측이 심도가 낮고 중죽도 측이 심도가 깊다. 해저면으로부터 토질 특성과 기원에 따라 충적층(점토 및 자갈질점토층, 실트질모래 및 모래층, 자갈질모래 및 모래질자갈층), 풍화산류토층 및 암반층으로 분류할 수 있다. 충적층중 점토 및 자갈질점토층은 대부분 연약지반으로 0.9m~33m범위의 두께를 나타내며, 가덕도와 대죽도 사이의 중간부로 갈수록 깊어지는 경향을 나타낸다(그림 4 참조). 이는 심도에 관계없이 대부분 액성한계 80~110%의 범위에 있는 고압축성의 정규압밀된 해성점토이다. 충적층 하부에 놓여 있는 풍화산류토

및 암반은 백악기 유천층군의 응회질퇴적암 및 안산암류가 모암으로 구성되며, E.L.(-)42.6~(-)75.9m의 심도에서 나타나고 있다.

### 3.1.3 피에조콘 시험

해성점토층의 비배수전단강도 및 압밀특성(응력이력)을 평가하기 위해 본 현장에 시행된 피에조콘 관입시험은 깊은 수심과 조류의 영향을 받는 해상구간에서 SEP(Self Elevating Platform) Barge에 피에조콘 장비를 탑재하고 시험시 조류 및 파압의 유해한 영향을 줄이기 위해 다중 보호관을 설치 후 시험하였다. 본 현장에 분포하는 해성 점토 퇴적층의 비배수전단강도를 콘관입시험으로 평가하는 경우, 현장에서 측정된 콘저항( $q_c$ )은 관입간극수압( $u_{bv}$ )에 비해 그 신뢰성이 다소 낮은 것으로 판단되어 관입간극수압 측정결과를 우선 적용하였다.

## 부산-거제간 연결도로 침매터널 지반보강공법 적용 사례

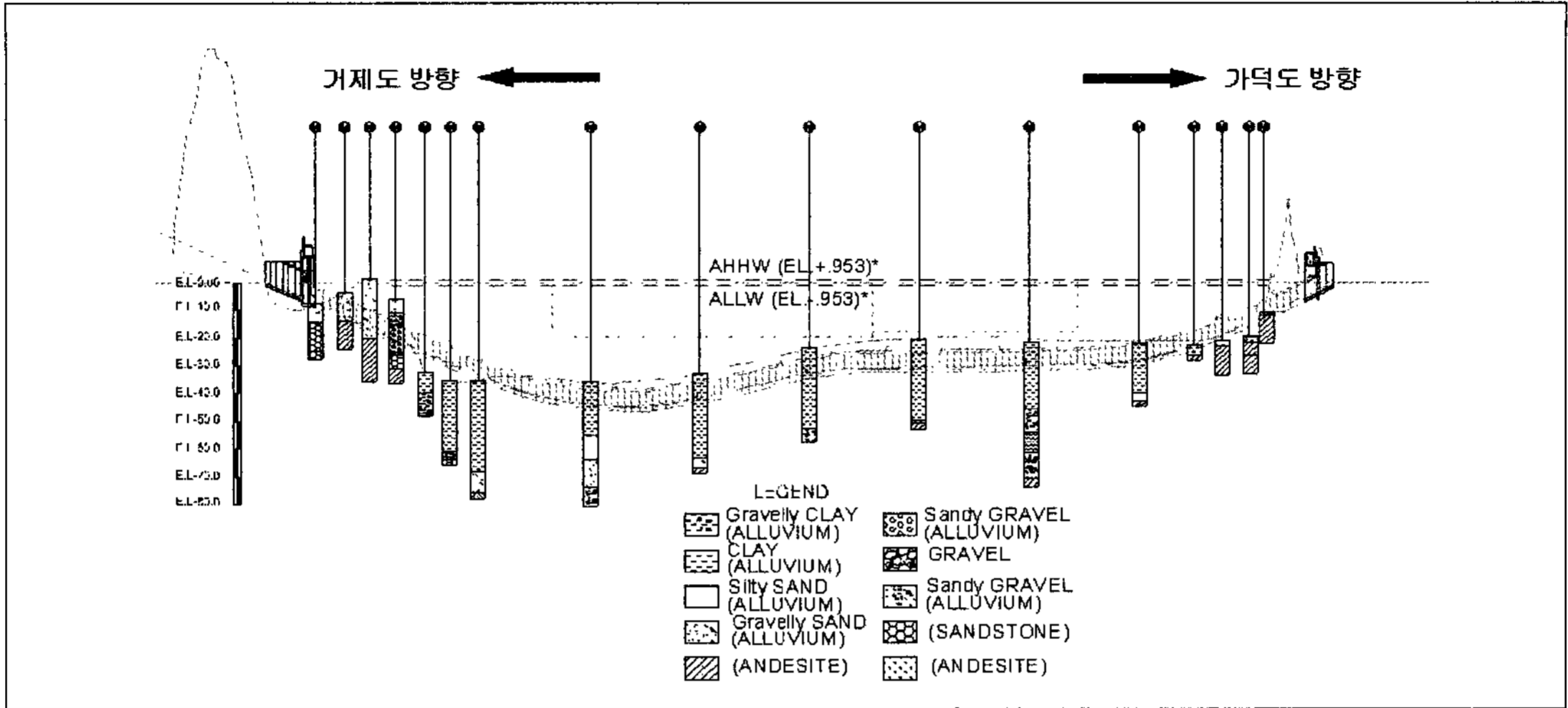


그림 4. 침매터널 구간 지층종단도

피에조콘시험 결과에서 해성점토층의 비배수전단 강도는 콘관입저항력에 의한 방법, 과잉간극수압에 의한 방법, 유효콘관입력에 의한 방법에 의해 평가할 수 있다. 콘계수는 일반적인 범위가  $N_{KT}=11\sim 19$ ,  $N_u=2\sim 20$ ,  $N_{ke}=6\sim 12$ 로 제안되어 있으나 현장의 특성이 반영되지 못하는 단점이 있으므로 실내강도시험 중 삼축시험(UU) 결과를 이용하여 콘계수를 평가하였으며, 그 결과  $N_{KT}=13$ ,  $N_u=8$ ,  $N_{ke}=5$ 로 산정된 콘계수를 대입하여 원지반 해성점토층의 깊이에 따른 비배수 전단강도의 분포를 그림 5와 같이 제시하였다.

피에조콘 관입시험 결과를 통한 해성점토층의 압밀특성(응력이력)은 아래 식 (1)과 같이 평가되며, 여기서  $k$ 값은 표준압밀시험으로 산정된 압밀항복응력을 이용하였다.

$$OCR = k \cdot \left( \frac{q_t - v_0}{v_0'} \right) \quad (1)$$

여기서,  $q_t$  : 간극수압에 의해 보정된 원추관입저항력

$v_0$  : 현장의 전 상재하중  
 $v_0'$  : 현장의 유효상재하중  
 $k$  : 비례상수

### 3.2 실내시험 결과

#### 3.2.1 물리적 특성

침매터널 구간내 해성점토층에 대한 교란 및 불교란시료의 물리적 특성치는 표 2와 같다.

침매터널 구간에 분포하는 대부분의 두꺼운 점토 퇴적층은 그림 6에서와 같이 CE 또는 CV로 분류된다. 가덕도와 대죽도 인근지역의 점토층은 CI, CH로 분류되고 점토퇴적층 하부심도에서는 일부 CH, MH로 분류된다. 액성한계에 비해 자연함수비는 약간 낮거나 비슷한 값을 보이며 CE 토질의 액성한계는 최대 116%까지 나타난다.

가덕도 및 대죽도 인근의 점토퇴적층 및 두꺼운 점토층 하부에 분포하는 일부 점토의 소성지수는 약 30% 정도의 낮은 값을 가지나 대부분의 점토는 소성

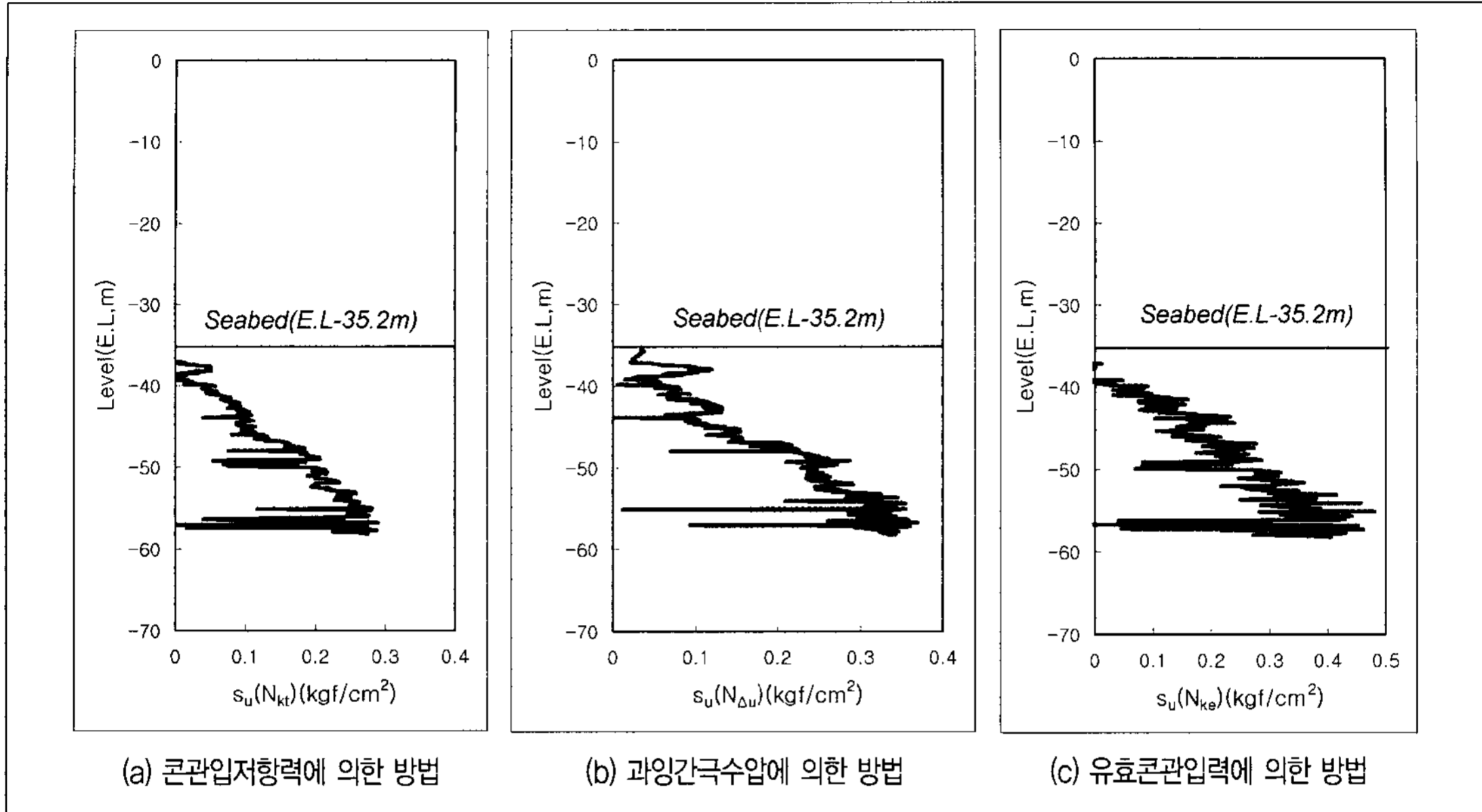


그림 5. 심도에 따른 비배수전단강도 산정 예

표 2. 침매터널 구간 물리적 특성

구분	자연함수비 wn(%)	액성한계 wL(%)	소성한계 wp(%)	소성지수 PI(%)	#200체 통과량	포화단위중량 $r_{sat}(tf/m^3)$
평균치	85.5	92.2	31.7	60.5	90.2	1.49
최대치	114.5	116.5	39.8	85.0	100.0	1.77
최소치	30.4	45.8	20.3	24.5	33.0	1.42

지수가 55%~85%의 값을 보인다(그림 7 참조). 비중은 점토층 전체에서 평균 2.7정도이며, 포화단위중량은 퇴적층 분포 깊이에 따라 증가하는 경향이 거의 없고 전체적으로는 1.42~1.77 $tf/m^3$ 범위(평균 1.5 $tf/m^3$ )내에 분포한다. 초기간극비는 전반적으로 2~3 범위의 큰 값이며, 해성점토 퇴적층의 채취시료의 시험 결과, 유기물 함유량은 6%이하였다.

### 3.2.2 역학적 특성

침매터널 구간의 해성점토층에서 채취한 자연 시료를 이용하여 표준압밀 시험 및 Rowe cell 압밀시험

을 수행하고 압밀항복응력을 평가하였으며, 산정된 압밀항복응력에 의해서 본 지역에 분포하는 해성점토층은 정규압밀 상태이거나 약간 과압밀된 상태로 평가하였다.

표준압밀시험 및 Rowe cell 압밀시험으로 구한 압축곡선은 Schmertmann(1955)의 제안방법을 이용하여 현장압축곡선으로 보정하였다.

수직압밀계수는 표준압밀시험(Oedometer Test)에서 Taylor의 logt법과 Casagrande의  $\sqrt{t}$ 법을 이용하여 평가하였으며, 수평압밀계수는 Rowe cell 시험 결과를 반영하였다. 점토퇴적층에서 1.5m 간격으로

## 부산-거제간 연결도로 침매터널 지반보강공법 적용 사례

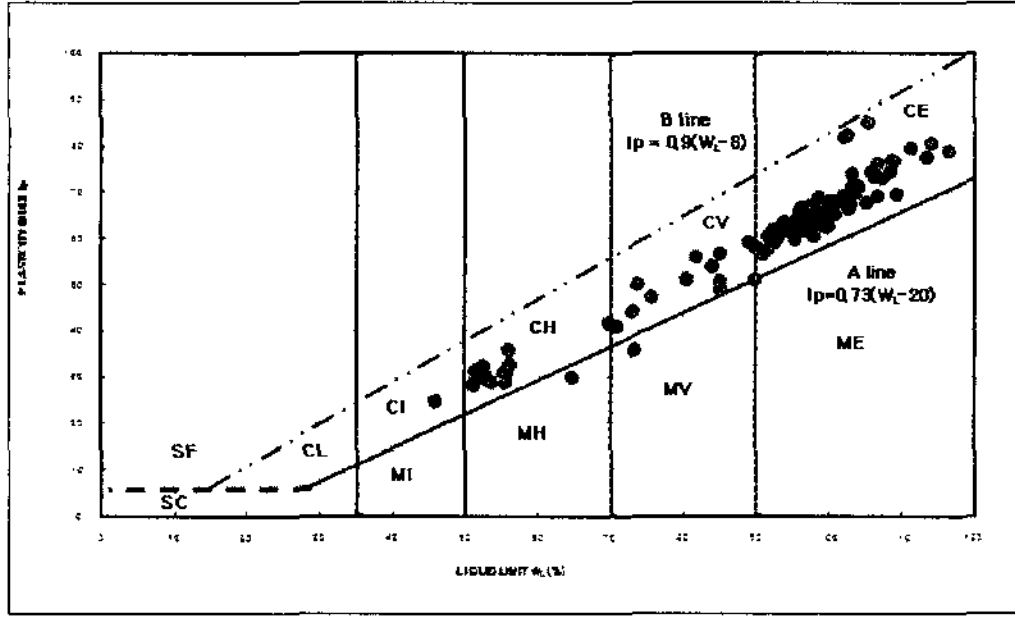


그림 6. 해성점토층의 소성도

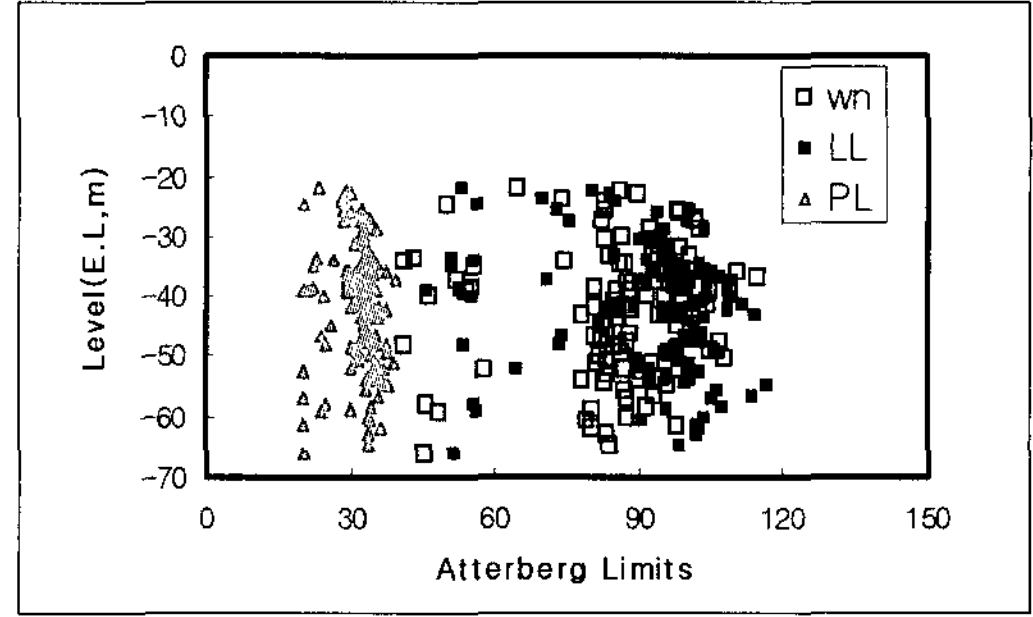


그림 7. 심도별 애터버그 한계

표 3. 침매터널 구간 설계 물성치

구분	수중 단위중량 $r'(tf/m^3)$	비배수 전단강도 $C_u(tf/m^2)$	압축지수 $C_c$	초기간극비 $e_0$	전단저항각 $\phi(^{\circ})$
Marine Clay	0.47	$0.028 \times 4.7 \times OCR^{0.76} \times Z$	1.28	2.46	0
Bed Rock	1.62	200	-	-	0
Rock fill	1.0	2	-	-	35

채취된 자연시료를 대상으로 토베인시험 및 삼축(UU)시험을 실시하여 해성점토층의 비배수전단강도를 평가하였다. 해성점토 퇴적층은 정규압밀상태로서  $c_w/p=0.35$ 로 비배수전단강도의 평가결과에서도 자연지반은 대부분 정규압밀된 상태로 평가되었다.

검토에 필요한 설계 물성치는 표 3과 같으며, 수평 압밀계수( $C_h$ )는  $43.2cm^2/day$ 를 적용하였다.

상당히 나빠 준설오차를 크게 할 수 있다. 이 경우 되메우기 사석하중의 증가에 의해 발생하는 장기침하량을 예상하기가 곤란하므로 E3~E14의 일부는 CDM 공법, E14일부~E17 구간은 SCP와 Preloading 공법으로 지반을 보강하는 것으로 결정하였으며, 현재 SCP, CDM 및 Preloading 시공은 기 완료하였고 SCP 시공구간에 Preloading에 의한 침하계측이 진행중이다.

### 4. 침매터널 지반보강공법

#### 4.1 개요

침매터널은 겉보기 비중이 1.1정도로서 기초지반에 작용하는 하중이 선행압밀하중보다 작아 이론적으로 침설후 침하가 발생하지는 않으나 부산-거제간 연결도로 침매터널의 경우는 최대 50m에 가까운 깊은 수심, 외해로부터의 파랑, 조류등 시공여건이

#### 4.2 CDM(Cement Deep Mixing) 공법

연약점성토를 대상으로 심층까지 시멘트, 석회등 화학적 안정재를 공급하면서 교반날개등으로 강제, 혼합하여 점성토를 고결시키는 CDM공법은 하중분담개념으로 구조물 하중을 지지요소와 지반에 분담시키므로서 총침하량 및 부등침하량을 저감시킨다. CDM 구간의 기초보강공법에는 부상형 CDM과 착저형 CDM으로 구분할 수 있는데 본 사업구역에 대해서는 다음과

같은 이유로 부상형 CDM으로 결정하였다.

- ① 정적, 동적 수평하중 저항에 유리
- ② 자체 하중 분배 가능
- ③ 유연한 CDM설계로 SCP공법 적용구간 연결에 유리

CDM 파일의 직경은 1.0m로서 4축 벽식구조로 시공되었으며, 치환율은 함체외측에서 51%, 함체 내측에서 32%로 적용되었다(그림 9 참조).

### 4.3 SCP(Sand Compaction Pile) 공법

침매터널 서측구간(E14 일부~E17)은 해저의 원지반보다 높은 곳에 침매함체가 설치되므로 수중 축제에 의한 하중, 함체 자중, 보호공 하중으로 압밀침하가 예상되어 SCP+Preloading 공법을 적용하였으며, 완성된 제체의 잔류침하를 제거하고 압밀침하를 촉진토록 하였다.

해저 원지반하상부 15m까지의 SCP 직경은 2.0m(치환율 40.3%)이며, 그 이하는 1.6m(치환율 25.6%)로서 치환율이 차이가 있으며, 함체와 사석 경계부는

치환율이 61%로서 이는 Preloading 성토시 사면안정을 위한 대책으로 계획되었다(그림 10 참조). SCP는 모래자갈층 하부 1m까지 타입되었으며, 시공된 모래말뚝의 길이는 17~30m 정도이다.

지반개량구역(Sand Compaction Pile + Preloading)에서 설계침하량은 단계별 성토고에 따라 SCP 치환율에 따른 강도저감을 고려하여 산정되었으며, Preloading 성토에 따른 침하량은 0.5~4.0m 정도로서 압밀도 90% 까지 방치한 후 제거하는 것으로 계획되었다.

본 지반보강구역에서 SCP와 CDM 개량체가 인접되어 급격한 지반변형 차이를 방지하고자 천이구간(Transition Zone)을 계획하였으며, 이 구간에서 본 선부는 CDM, 사면부는 SCP로 시공하였다.

### 4.4 계층 관리

침매터널 서측 SCP 시공구간, 시험시공구간 및 천이구간(Transition Zone)에서 Preloading 성토에 따른 지반의 침하, 측방유동 및 간극수압등을 측정하여

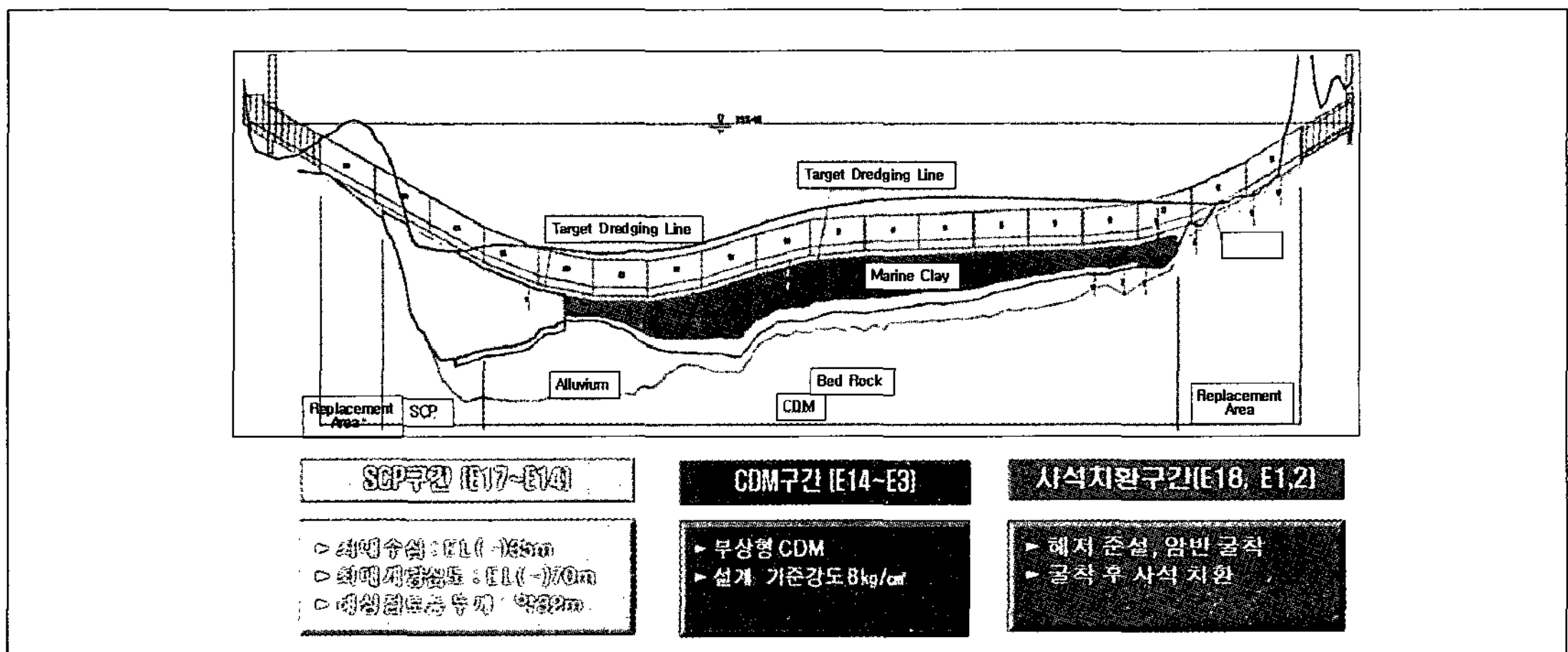


그림 8. 구간별 지반개량공법 적용



## 부산-거제간 연결도로 침매터널 지반보강공법 적용 사례

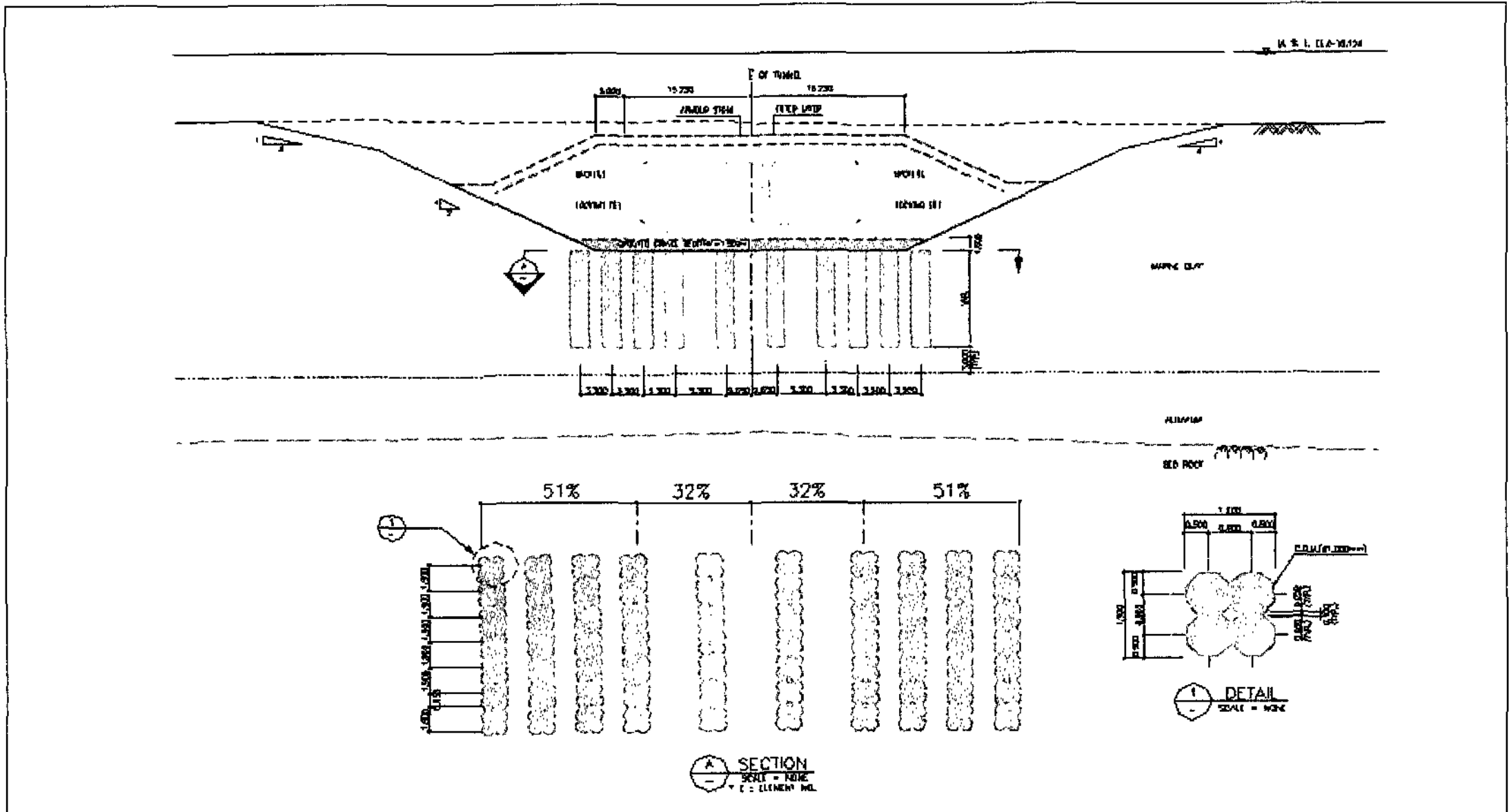


그림 9. 부상형 CDM 시공단면도

성토시의 지반거동과 SCP 시공후의 지반개량효과 등을 분석하고 역해석을 통해 설계조건을 검증하여 안정적이고 효율적인 시공을 수행하고자 아래와 같이 대표지점에 계측기를 설치하였다.

본 현장에서는 효율적인 침하 및 안정관리를 위하여 주요 지점에 계측기(지중경사계, 증별침하계, 간극수압계, 수압식 침하계)를 증점적으로 설치하였으며, 이외에 조위계, 해수온계, 기온계는 계측타워와 E.L(-)2.83m 지점에 풍향풍속계, 기압계는 중축도에 설치하였다. 현재 Preloading 성토가 완료되어 압밀 방지중이며, 계측기는 해저면에 유·무선으로 설치되어 있으므로 지중 무선시스템 및 Data logger를 이용한 자동화 시스템을 구축하여 각 계측기별 1일당 4회 계측빈도로 침하 및 안정관리를 수행하고 있다.

### 5. 결론

- 1) 부산-거제간 연결도로의 침매터널은 총연장 8.2km의 왕복 4차선으로서 주향로 구간의 침매터널 3.7km와 예비향로 구간의 2주탑 및 3주탑 사장교, 접속교 및 산악터널로 구성되어 있다.
- 2) 침매터널 해저 토질은 대부분 액성한계가 80~110%인 고압축성의 연약 해성 점토가 0.9~33m 두께로 분포하고 있으며, 해성점토의 비중은 2.7, 포화단위중량은 1.42~1.77tf/m<sup>3</sup>(평균 1.5tf/m<sup>3</sup>), 유기물 함유량은 6% 이하이다.
- 3) 해성점토층은 정규압밀 상태이거나 약간 과압밀된 상태로서 압축지수는 0.83~1.82(평균 1.28), 초기간극비는 1.99~3.24(평균 2.46)이며, 평균 투수계수( $K_v$ )  $280 \times 10^{-6}$  m/day, 평균 수평 압밀계수( $C_h$ ) 43.2cm<sup>2</sup>/day로 나타났다.
- 4) 해성점토의 정규화된 비배수전단강도는 SHANSEP(Stress History And Normalized Soil Engineering Properties) 및 CU삼축압축

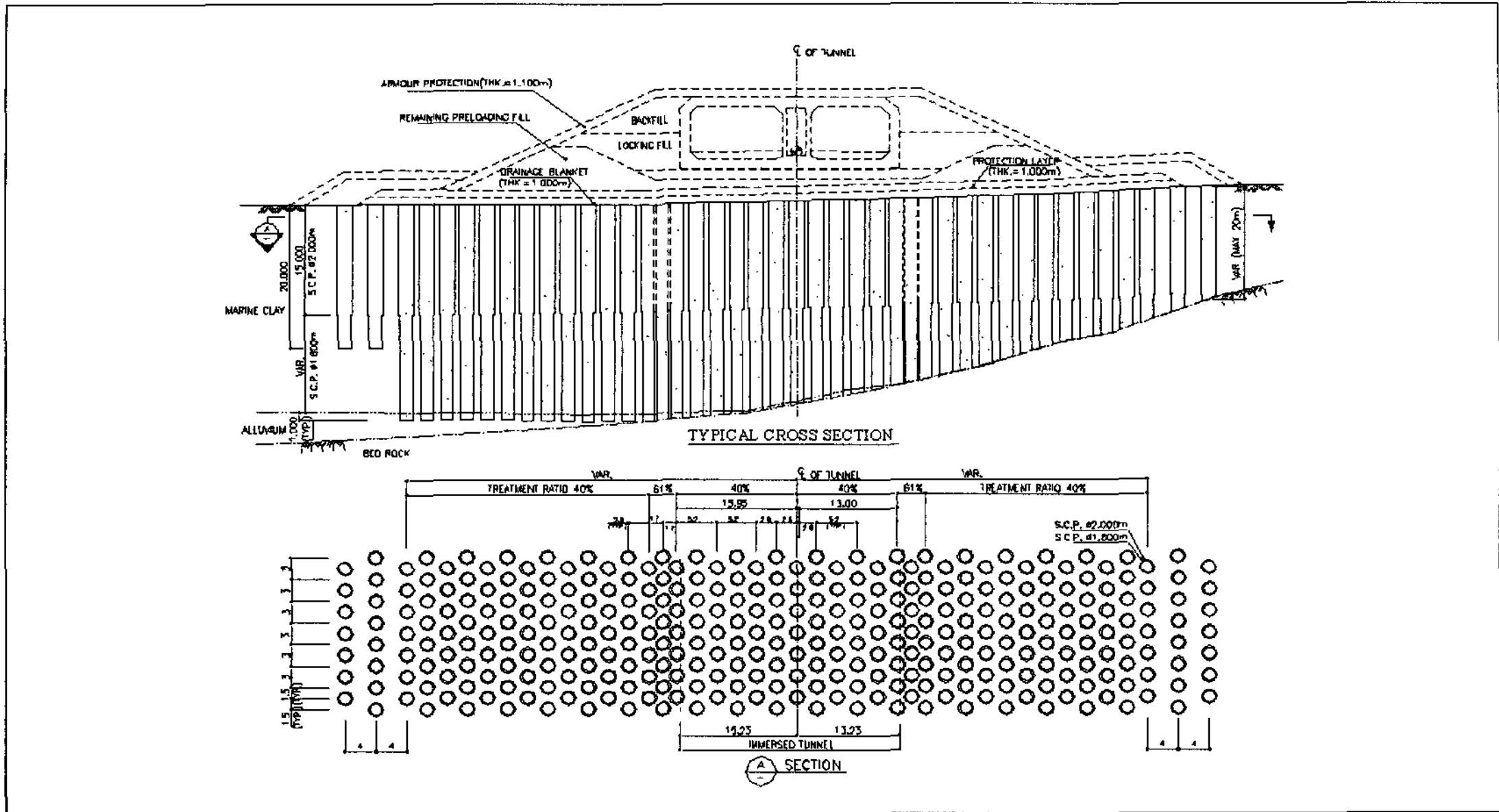


그림 10. SCP 시공평면 및 단면도

시험 결과를 통해 제시되었다.

- 5) 침매함체는 총 18개(TE1~TE18)로서 침매구간 중 E3~E14의 일부는 CDM공법, E14일부~E17 구간은 SCP와 Preloading 공법으로 지반을 보강하는 것으로 계획되어 SCP, CDM 및 Preloading 시공은 완료하였다.
- 6) 본 현장에서는 침하 및 안정관리를 위하여 주요 지점에 계측기(지중경사계, 층별침하계, 간극수압계, 수압식 침하계등)를 중점적으로 설치하였으며, 각 계측기별 1일당 4회 계측빈도로 침하 및 안정관리를 수행하고 있다.
- 7) 부산-거제간 연결도로 침매터널 사업을 성공적으로 수행하기 위하여 축적시킨 건설기술의 노하우는 대외적 위상을 높일 것으로 기대되며, 향후 지반보강 효과 확인에 대한 기술자료뿐만 아니라 침설기술에 대해서도 지면을 통해 소개하고자 한다.

### 참고문헌

1. 박래영(2005. 6) "침매터널의 소개", 터널기술 Vol.7 No.2
2. 장영, 조영기(2002. 2) "부산-거제간 연결도로 민자사업 침매터널 시공방법 소개", KTA 2003 Symposium
3. 김용일, 이정상, 윤영훈, 장현갑(2005.9) "대심도 연약지반에서의 침매터널 설계", SSMGE ATC-7 & KGS Joint Symposium
4. Daewoo Engineering&Construction Co. Ltd(2004) : Busan-Geoje Fixed Link Immersed Tunnel Geotechnical Interpretative Detailed design
5. GK Fixed Link Co. Ltd(2004) : Busan-Geoje Fixed Link 기본설계보고서
6. GK Fixed Link Co. Ltd(2006) : Busan-Geoje Fixed Link 실시설계보고서(10단계)