

## 부산-거제간 연결도로 침매터널의 연약지반개량 적용 사례 Case of Soil treatment on soft clay at Pusan-Geoje Fixed Link Project Immersed Tunnel

김창환<sup>1)</sup>, Chang-Whan Kim, 이정상<sup>2)</sup>, Jung-Sang Lee, 이동규<sup>3)</sup>, Dong-Gyu Lee, 하용봉<sup>4)</sup>, Yong-Bong Ha

<sup>1)</sup> (주)대우건설, 부장, General Manager, Construction Dept, Daewoo E&C Co., Ltd.

<sup>2)</sup> (주)대우건설, 과장, Manager, Construction Dept, Daewoo E&C Co., Ltd.

<sup>3)</sup> (주)대우건설, 대리, Assistant Manager, Construction Dept, Daewoo E&C Co., Ltd.

<sup>4)</sup> (주)대우건설, 대리, Assistant Manager, Construction Dept, Daewoo E&C Co., Ltd

### 1. 서론

부산-거제간 연결도로는 부산 가덕도와 거제 장목면을 해상으로 연결하여 주요 인프라를 구축하는 프로젝트이다. 본 연결도로의 총 연장은 8.2 km이고 사장교 2개소와 국내에서는 처음 적용되는 침매터널 1개소로 구성되어 있고, 2010년 완공을 목표로 현재 시공 중에 있다. 침매터널은 해저면에 미리 트렌치를 굴착해 놓고, 육상 Dry Dock에서 적당한 길이로 분할하여 제작한 침매함을 설치 지점까지 예인 운반하여, 트렌치에 차례로 침설시켜 침매함끼리 수압차를 이용하여 접합한 후에 되메우기 및 보호공으로 매설하여 터널을 완성하는 공법이다. 침매함 설치 후에 원지반에 작용하는 하중이 설치 전에 원지반에 작용했던 하중보다 적으므로 침매터널 공법을 적용하는 지반에 요구되는 조건은 크게 까다롭지 않은 것이 일반적이다. 하지만 부등침하에 매우 민감한 침매터널의 구조적 특성으로 인해 지반의 특성을 심도있게 검토하고 그 결과에 따라서 적절한 대책을 수립해야 하는 경우도 있다. 본 사업 침매터널의 경우 세계적으로 사례가 없는 최대 50m의 깊은 수심과 외해조건 그리고 최대 35m 두께의 연약지반에 적용된다. 이러한 깊은 수심과 외해조건으로 인해 부등침하에 영향을 미치는 트렌치 준설, 기초자갈 포설, 매설 등의 작업에 기대할 수 있는 정밀도가 매우 제한적일 수 밖에 없다. 또한 침매터널 전구간에 걸쳐 두껍게 분포하고 있는 매우 연약한 정규압밀 점토로 인해 부등침하가 지속적으로 발생할 가능성이 있다. 따라서 일 부구간에 하부기초 지반개량공으로 심층혼합처리(CDM:Cement Deep Mixing)공법이 적용되었다.

### 2. 지반조건

침매터널구간의 해저면 심도는 약 EL(-)20.0m에서 EL(-)35.0m까지 다양한 분포를 보이고 있고 지형상으로는 아래 횡단면과 같이 가덕도 측이 심도가 낮고 중죽도 측이 심도가 깊다. 해저면으로부터 연약한 점성토, 모래자갈층, 기반암의 순으로 분포하고 있다. 점성토층은 두께가 최대 약 30m 정도를 나타내며 심도에 관계없이 대부분 액성한계 80~110%의 범위에 있는 고압축성의 해성점토이다.

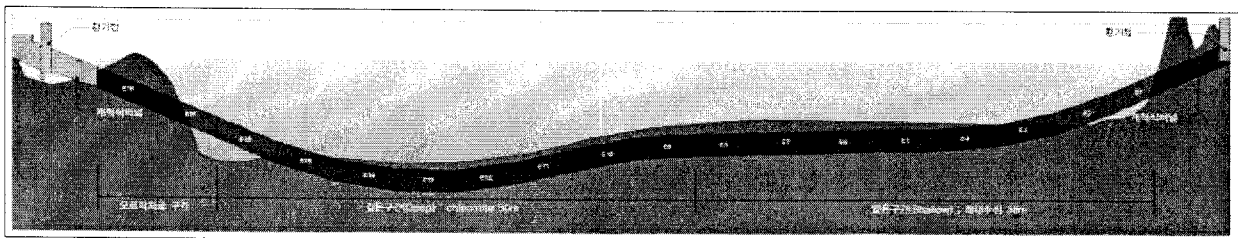


그림 1. 침매터널 종단면도

침매터널 전 구간에 걸쳐 시추된 점성토의 소성도를 그림 2.1과 같이 나타내었다. 전체적인 경향을 보면 소성도상의 점토층은 녹색으로 표현된 해성점토와 노란색으로 표현된 해성점토와 충전층 사이의 중간해성점토로 구분이 가능하다.

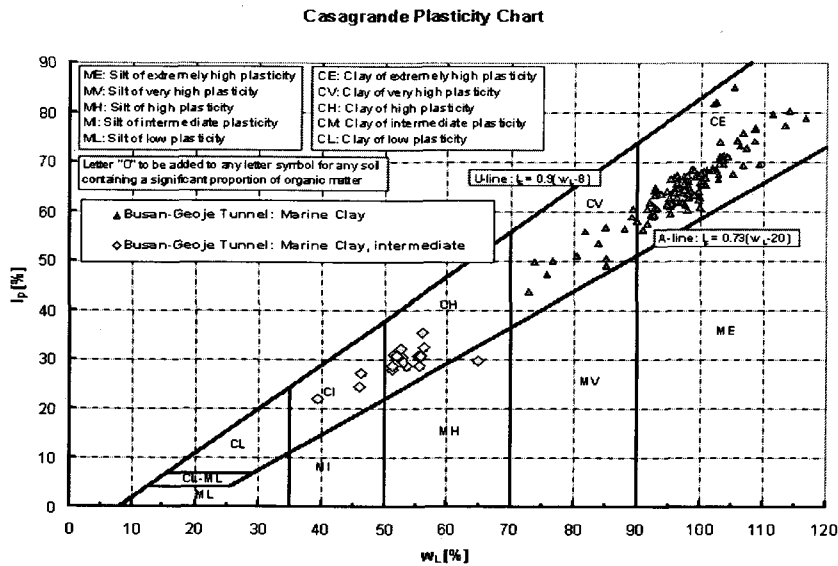


그림 2.1 침매터널 구간 점성토의 소성도

자연함수비는 그림 2.2와 같이 지반은 함수비 65%로 기준으로 해성점토와 중간 해성점토로 구분되며, 해성점토의 평균 함수비는 89%, 중간해성점토의 평균함수비는 44%이다.

포화단위중량은 그림 2.3과 같이 해저면에서 심도에 따라 다소 선형으로 증가하며, 이의 관계식은 다음과 같으며,  $\gamma_{sat} = 0.02kN/m^4d + 14.44kN/m^3$  평균 포화단위 중량은  $\gamma_{sat} = 14.7kN/m^3$ 이다.

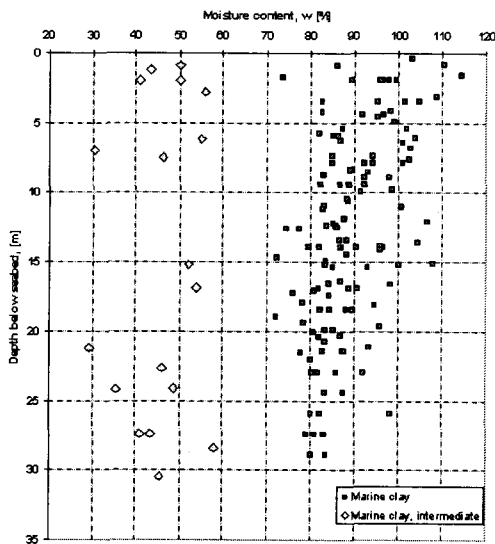


그림 2.2 자연함수비

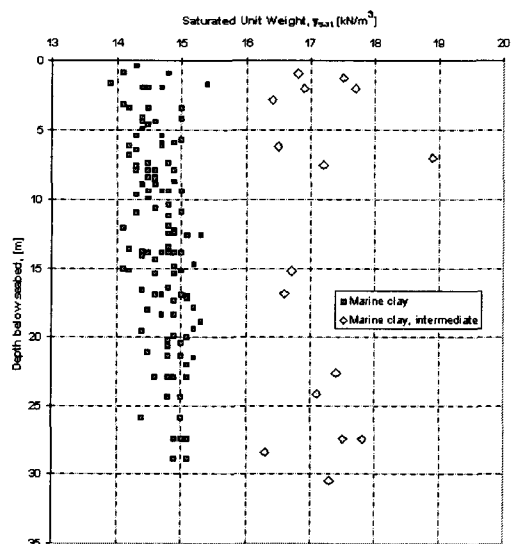


그림 2.3 포화단위중량

소성한계는 그림 2.4와 같이 해성점토에서는 평균 34%, 중간 해성점토에서는 평균 24%이다.

액성한계는 그림 2.5와 같이 해성점토에서 평균 96%, 중간 해성점토에서는 평균 55%이다.

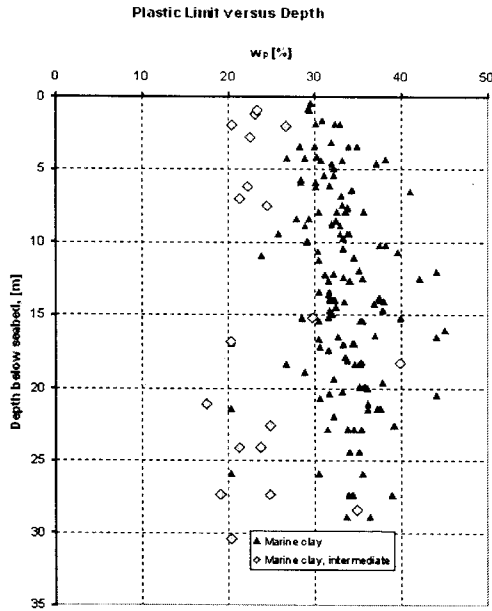


그림 2.4 소성한계

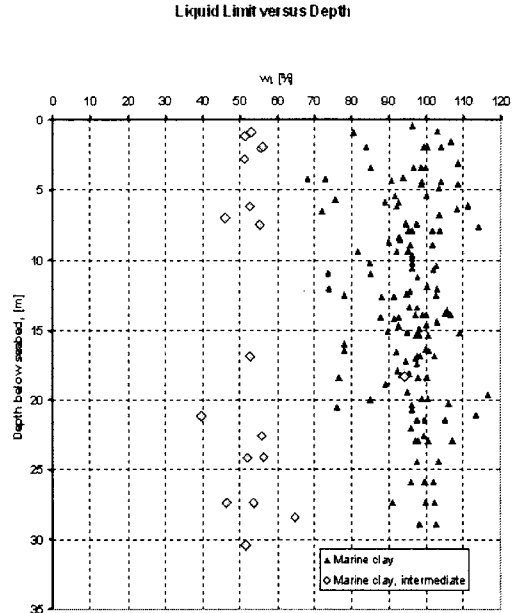
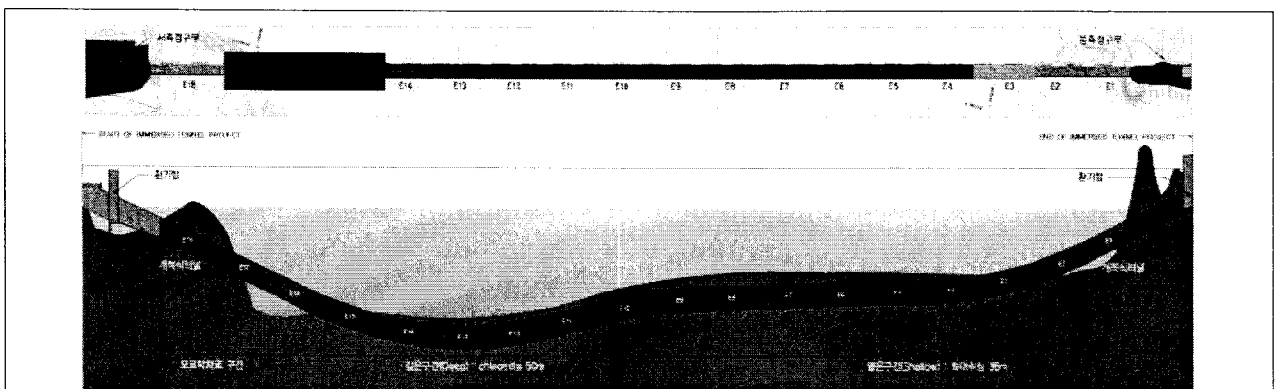


그림 2.5 액성한계

## 4. 지반개량 설계

### 4.1 침매터널 지반개량 현황

침매터널 전 구간을 함체가 설치되는 횡단면상의 위치로 구분하면 아래표와 같이 함체가 해지면 하부의 트렌치 저면에 설치되는 구간은 일반구간, 함체가 해지면 상부에 설치되는 구간은 서측과 동측구간으로 각각 나눌 수 있다. 침매터널의 경우 부력보다 약간 무거운 수준의 하중으로 지반에 내려 놓으므로 육상의 구조물에 비하면 상당히 적은 하중이 지반에 작용한다. 그래서 지반개량이 필요 없는 것이 일반적이지만 장기적인 압밀침하가 우려되는 등 필요한 경우 적절한 공법을 적용하여 지반을 개량한다. 일반구간의 경우 CDM 공법을 적용하였고, 서측구간은 침매터널이 해지면 상부에 설치되는 구간으로서 일반구간 보다는 큰 하중이 작용하므로 당초 기본설계 때부터 고려되었던 SCP(Sand Compaction Pile:모래다짐말뚝)개량 + 선행하중 공법을 적용하였다. 본 사례보고에서는 일반구간에 적용한 CDM 공법에 대해서만 언급하고자 한다. 다음 기회에는 SCP 공법이 적용된 서측구간에 대한 사례를 보고하고자 한다.



구분	서측구간	일반구간	동측구간
실시설계	SCP + 선행재하	CDM(Cement deep Mixing)	CDM(Cement deep Mixing)

그림 4.1 침매터널 각 구간별 지반개량 현황

## 4.2 일반구간 지반개량

### 4.2.1 CDM 공법 개요

침매터널 일반구간에 적용한 CDM을 이용한 지반개량의 기본 개념은 아래 개념도와 같이 CDM으로 개량된 블록을 구조물하부에 형성해서 구조물 하중을 이를 통해 강성이 큰 하부의 층으로 전달하고자 하는 것이다.

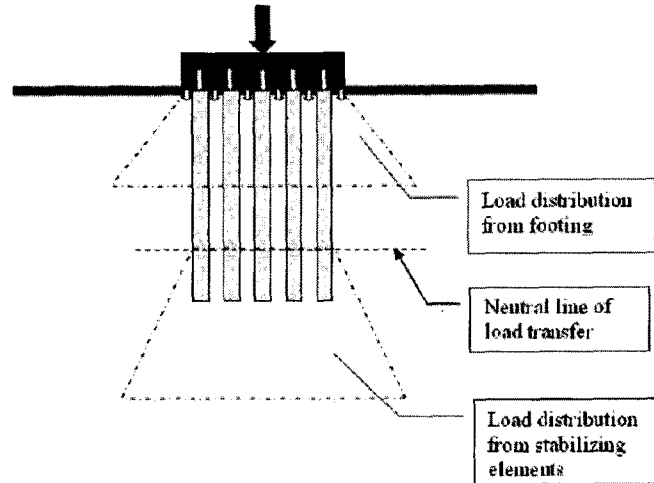


그림 4.2 지반개량의 기본 개념

CDM(심층혼합처리)공법은 연약지반을 고화재와 교반·혼합하고, 고화재와 연약지반의 간극수에 의한 수화작용, 수화생성물과 점토광물의 이온교환작용, 포졸란 반응을 주체로 하는 화학반응 및 흡과 시멘트의 치환작용 등으로 단시간에 말뚝형태로 개량체를 형성하여 연약지반의 강도를 증대시키는 개량공법으로, 연약지반에 시공되는 구조물의 기초지반을 개량하거나 흙막이 벽체로 사용하기 위해 개발되었다. 이 공법은 저소음·저진동 시스템으로서 단기간에 지반을 개량할 수 있으며, 토질특성에 따른 고화재의 종류와 양을 선택하여, 목표로 하는 강도를 확보할 수 있다. 원지반 상태에서 고화재개량하는 공법이므로 발생잔토(부상토)가 적으며, 시공 및 품질관리가 용이한 특징이 있다.

### 4.2.2 CDM 공법의 적용 내용

설계에서 CDM 개량체의 제원은 직경1.0m의 4개 기둥이 1.8m 간격으로 배치되어 사각기둥 모양을 취하고 있는 4축 형태이다. CDM 개량체로 보강된 점성토층은 터널 직하부에서 발생하는 연직하중을 개량체 선단 하부측으로 전달한다. 현재 설계는 부상기초(partial depth treatment)형식으로 계획되어 있으며 착저형 기초(full depth treatment)형식에 비해 많은 이점을 지니고 있다.

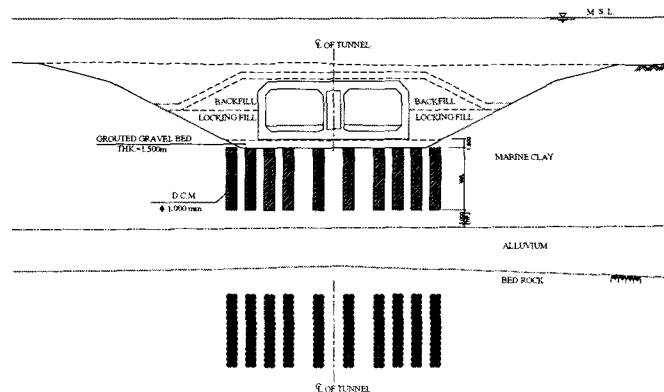


그림 4.3 CDM 개량 표준 횡단면도

## 5. 시험시공

### 5.1 시험시공 위치

시험시공은 본공사 시행 전에 CDM 개량체의 강도 및 현장지반상황에 맞는 주입량 및 시멘트 배합비를 결정하여 품질관리나 위치오차등의 부적합한 요인을 사전에 제거하기위하여 시험시공을 실시하였고 시행된 위치는 아래 그림과 같다.

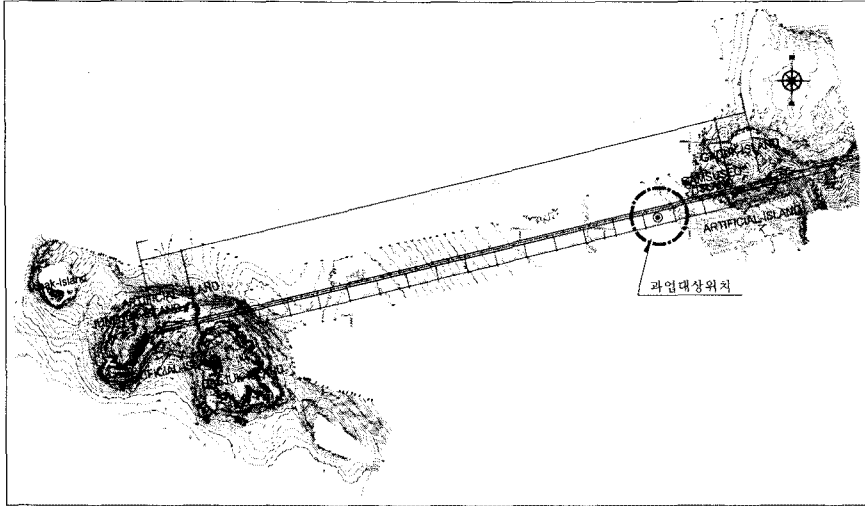


그림 5.1 CDM 시험시공 위치

### 5.2 확인조사 장비

시험시공이 수행된 위치는 수심과 연약지반의 심도가 각각 20m 이상으로 시추조사를 수행하는데 상당한 어려움이 있는 곳이다. 이러한 작업환경의 어려움을 극복하고자 국내 최대급의 SEP BARGE를 투입하여 시추조사를 수행하였다. 시추개념도에서 보는 바와 같이 개량체의 항두로부터 시추장비까지의 높이는 대략 40m로 BARGE 상단에서 약간의 위치오차가 발생할 경우 항두부근에서는 상당한 오차가 발생할 수 있으므로 여러번의 시행착오를 겪으면서 시추조사를 수행하였다.

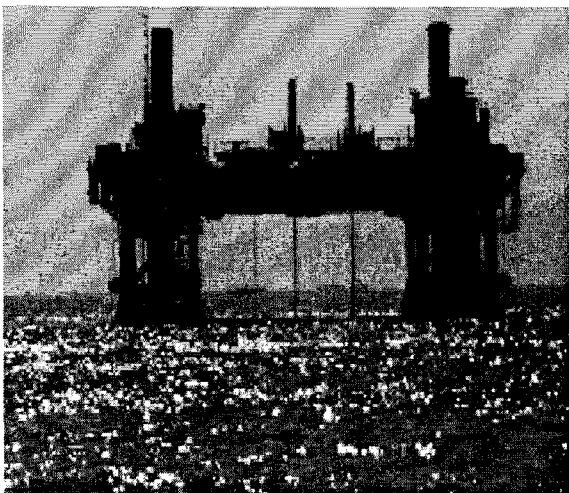


그림 5.2 SEP BARGE

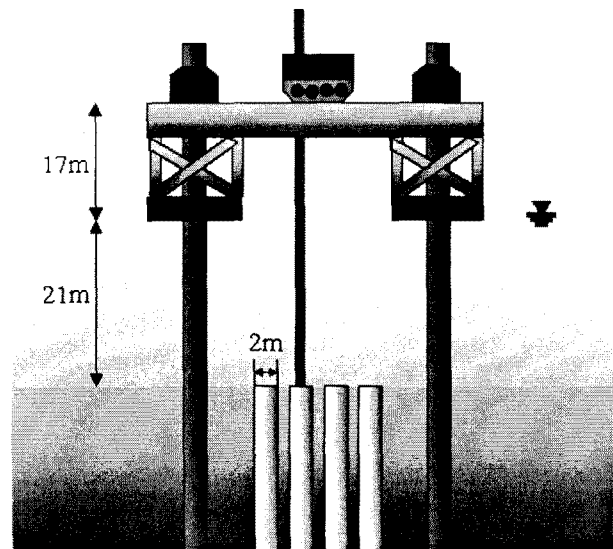


그림 5.3 시추조사 개념도

### 5.3 시험시공 및 확인조사

시험시공은 1차와 2차 두차례 수행되었다. 2차 시험시공은 1차 시험시공 수행시 겪은 시행착오에 대한 보완으로 수행된 것으로 본 사례보고에는 2차 시험시공에 대한 내용만 수록하고자 한다. 기회가 주어진다면 1차와 2차 시험시공을 비교 분석하여 평가하는 것도 좋은 사례보고가 될 것으로 생각된다. 시험시공 시 적용한 개량공의 개량현황은 아래표와 같다.

TYPE	구분	단위시멘트량 (kgf/m <sup>3</sup> )	계획된개량길이 (m)	비고
A-TYPE	2, 3열	175	10.0	• W/C=1:1, 0.8:1, 0.7:1
B-TYPE	2, 3열	200	10.0	
C-TYPE	3열	225	10.0	
D-TYPE	3열	250	10.0	
E-TYPE	3열	125	10.0	
G-TYPE	2열	175	10.0	

#### 5.2.1 시추조사결과

CDM 개량층의 T.C.R은 49~100%의 범위로 분포하며, B-2번 시추공의 하부 점토층과의 경계부로 갈수록 코아회수율이 67~49%로 비교적 낮게 평가되나 전반적으로 회수율이 90%이상으로 양호한 상태로 확인되었다.

개량체에 대한 물성시험과 일축압축강도시험을 위해서 시추조사에서 시료를 채취하였다.

공 번	상부 점토층(m)	C.D.M 개량층(m)	하부 점토층(m)	합계(m)
A-2	1.7	10.3	0.5	12.5
A-3	2.4	9.1	-	11.5
B-2	2.7	7.6	-	10.3
B-3	2.8	8.9	-	11.7
C-3	1.7	10.1	-	11.8
D-3	0.3	11.6	-	11.9
E-3	3.0	5.1	-	8.1
G-2	3.8	6.7	0.5	11.0

#### 5.2.2 물성시험결과

CDM개량체 확인조사시 채취된 시료를 이용하여 실내시험을 실시하였다. 물성시험은 함수비 및 단위중량시험을 실시하였으며 역학시험은 일축압축강도시험을 실시하였다.

개량체의 함수비는 40~95%의 범위로 확인되며 시추공별, 재령별로 함수비가 대체로 일정하게 확인되며 비교적 개량체 상부에서 함수비가 높은 것으로 확인되었다.

개량체의 단위중량은 1.45~1.60 tf/m<sup>3</sup>의 범위로 심도의 증가에 따라 일정한 경향을 나타낸다. 또한 개량체의 단위중량은 원지반의 단위중량과 유사한 경향을 보이고 있고 이는 기존의 문헌자료와 다르지 않은 것이다. 한편, 부분적으로 큰 값(C-3번 시추공 : E.L(-)29.97m)을 나타내는 것은 강도시험을 위한 시료 성형(Capping)시 사용된 석고의 영향이 포함된 것으로 판단된다.

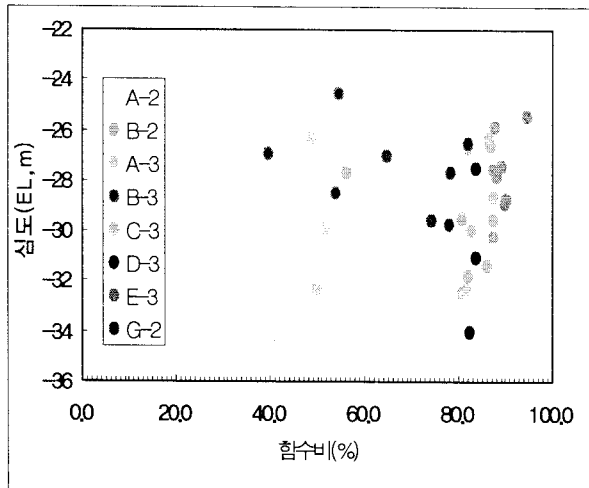


그림 5.4 개량체의 함수비

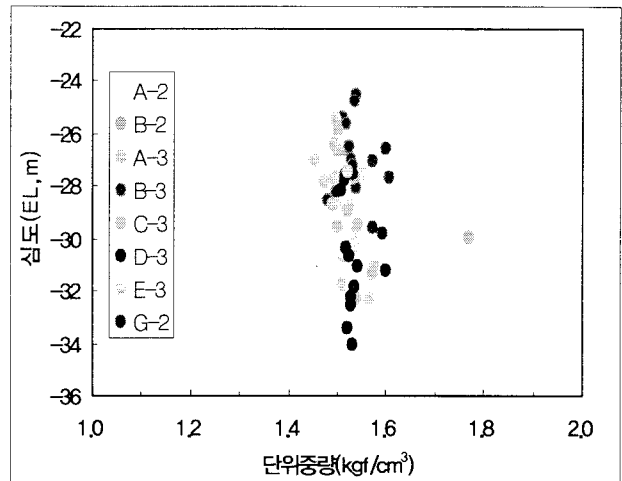


그림 5.5 개량체의 단위중량

### 5.2.3 일축압축강도시험결과

CDM 개량체 확인조사 시 채취된 시료를 이용하여 실시한 각 개량 Type별 일축압축강도시험 결과는 0.51~17.74(kgf/cm<sup>2</sup>)의 범위를 보인다. 한편, 시험시공 개량체의 기준 일축압축강도는 8kgf/cm<sup>2</sup>이며 양생기간은 39~61일의 범위이다.

면밀한 시험시공을 통해 결정된 단위체적당 시멘트량은 180 kg/m<sup>3</sup>로서 국내 CDM 시공경험에서는 상당히 낮은 수준의 시멘트량을 적용하였다.

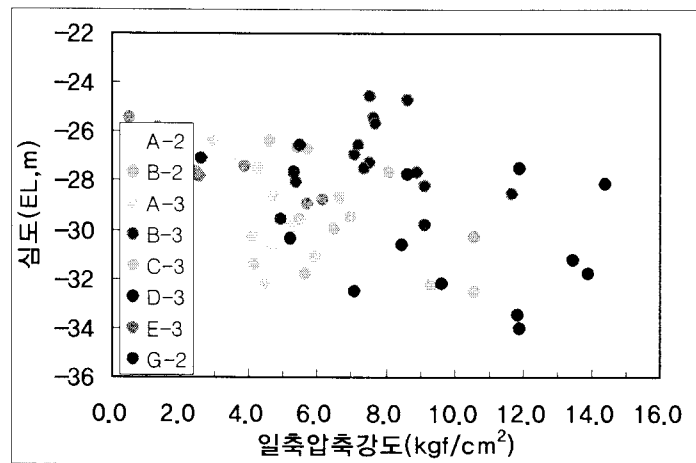


그림 5.6 개량체의 일축압축강도

## 7. 결론

1. 부산-거제간 연결도로의 침매터널이 설치되는 구간에는 최대 35m 두께로 고압축성의 연약 해성 점토가 분포하고 있다
2. 침매터널의 조인트에 허용되는 거동은 매우 제한적이고, 어떤 원인에 의해 조인트가 벌어지는 것을 조인트 오프닝(Joint opening)이라 한다. 시공오차, 온도변화, 콘크리트의 크리프 및 수축, Gina의 이완, 지진에 의한 거동, 침몰선박 또는 침수에 의한 하중, 지반의 부등침하 등이 조인트 오프닝을 야

기 시키는 원인 이다. 지반의 부등침하 등으로 인해 야기 될 수 있는 조인트 오프닝을 최소화하고자 지반개량을 계획하였다.

3. 적용한 CDM을 이용한 지반개량의 기본 개념은 아래 개념도와 같이 CDM으로 개량된 블록을 구조물 하부에 형성해서 구조물 하중을 이를 통해 강성이 큰 하부의 층으로 전달하고자 하는 것이다.
4. 본 공사 수행전에 설계 강도를 만족하는 개량체 조성을 위해 필요한 주입량 및 시멘트 배합비 등을 결정하기 위해 실내배합시험, 현장 시험시공 등을 수행하였다.
5. 실내배합시험과 시험시공을 통해 결정된 시멘트 배합비와 시공방법에 따라 본 시공을 수행중에 있고 시공완료 후 최종 시공결과가 보완된 시공사례를 보고할 계획이다

## 참고문헌

1. 김용일, 이정상, 윤영훈, 장현갑(2005.9) “대심도 연약지반에서의 침매터널 설계”, **SSMGE ATC-7 & KGS Joint Symposium**
2. 구임식, 윤영훈, 이정상, 정경환, 신민식, 한경태(2006.8) “DCM 공법에 의한 침매터널 하부지반의 개량 설계사례”, 한국지반공학회 매립준설기술위원회 학술발표회
2. 주식회사 대우건설(2006) : 부산-거제간 연결도로 침매터널 CDM 시험시공지반조사보고서
3. 연안개발기술연구센터(2000) : “해상공사에서 심층혼합처리공법 기술 매뉴얼”, (주)동아지질 번역자료
4. 유찬(2003. 12), “폐기물매립장 및 하천제방의 차수 및 보강공법”, **한국건설기술연구원 2003 지반환경**, pp.129~148.
5. 토목연구센터(2004) : “육상에서의 심층혼합처리공법 설계·시공 매뉴얼”, (주)동아지질 번역자료
6. CDM연구회(1996) : “시멘트계 심층혼합처리공법, 설계와 시공 매뉴얼(설계·시공편)”, (주)동아지질 번역자료
7. Daewoo Engineering&Construction Co. Ltd(2004) : Busan-Geoje Fixed Link Immersed Tunnel Geotechnical Interpretative Detailed design