

심층 혼합 처리 공법에 의한 연약지반상의 물양장 기초의 시공사례

도덕현*, 이인형**, 조현래***

1. 서론

최근 서남해안의 공업단지 조성 및 항만개발을 위해 해성 퇴적점성토 지반상에 구조물을 축조하는 사례가 늘고 있다.

자연함수비가 큰 해성퇴적 점성토를 자중압밀을 거쳐 안정화 시키기에는 장시간이 소요되므로 제 외국에서는 고화제에 의하여 고결시켜서 공사용 장비의 진입을 시도하는 사례가 많다. 해성점성토 지반이 장비 진입이 가능할 정도의 지지력만 가지면 산토 또는 양질 준설토로 성토에 의한 구조물의 축조가 가능하므로 연약 점성토를 대상으로 고화제를 혼합 또는 주입하여 소정의 심도까지 필요한 강도를 얻고자 시도하고 있다.

이와 같은 연약지반을 대상으로 한 고화제 혼합장비가 국내외에서 다양하게 개발되어 적재적소에 활용되고 있어 급후 이공법의 획기적인 발전이 기대된다.

해성점토의 지반조건은 N 치 0 - 2 범위의 초연약지반인 경우가 많은데 이는 점성토 지반의 자연함수비에 기인한다. 따라서 본 연구에서는 해성퇴적 점성토에 대하여 고화제 및 함수비와 고결강도와와의 관계를 구명하여 경제적인 지반처리를 하는데 필요한 기초 자료를 제공하고자 실내시험과 현장시공을 병행하여 해성점성토 지반의 고화제 처리에 의한 강도 발현 효과와 현장적용 가능성을 평가하고자 시도 하였다.

2. 공사개요

가. 현장상황

1977-1979 : 강진군에서 택지 및 공공용지 목적으로 수산청으로부터 허가를 받아 마량면 마량리에 석축식 물양장 345m를 설치하였으나 연약지반인 관계로 지반의 활동과 용기 현상이 발생하여 전면 붕괴됨에 따라 물양장 해상전면 50m 구간에 사석 크기 약 30cm, 두께 1.5m의 용기 방지용 압사석을 포설하여 현재에 이르고 있다.

나. 공사목적

본지구는 수산청 1종어항으로 섬지방 해상교통 및 생활의 요충지로서 중요한 역할을 하고 있는 어항이나 호안 붕괴 및 매립지가 계속 침하되고 있어 기존 시설보강과 어항으로 필요한 공공시설(도로, 주차장)을 확보하여 지역 발전을 도모하는데 있다. 시공 표준단면도는 <그림 1 (a)>, 지질주상도는 <그림 1 (b)>와 같다. 급회 공사규모는 총계획 242m중 26m(350m²)를 시공하였다.

3. 지반특성

본 지역에서 실시된 2개소의 시추조사 결과에 의하면 지층은 상부로부터 매립토층, 퇴적토층 및 기반암층으로 구분할 수 있는데 이들 지층에 대하여 기술하면 다음과 같다.

* 都 德 鉉 (DOH, DUK HYON) : 건국대학교 교수

** 李 仁 珩 (LEE, IN HYUNG) : 농어촌진흥공사 전남지사 부사장

*** 趙 玄 來 (JOH, HYUN LAE) : (주) 대동 기술연구소 선임연구원 (건국대학교 박사과정 재학)

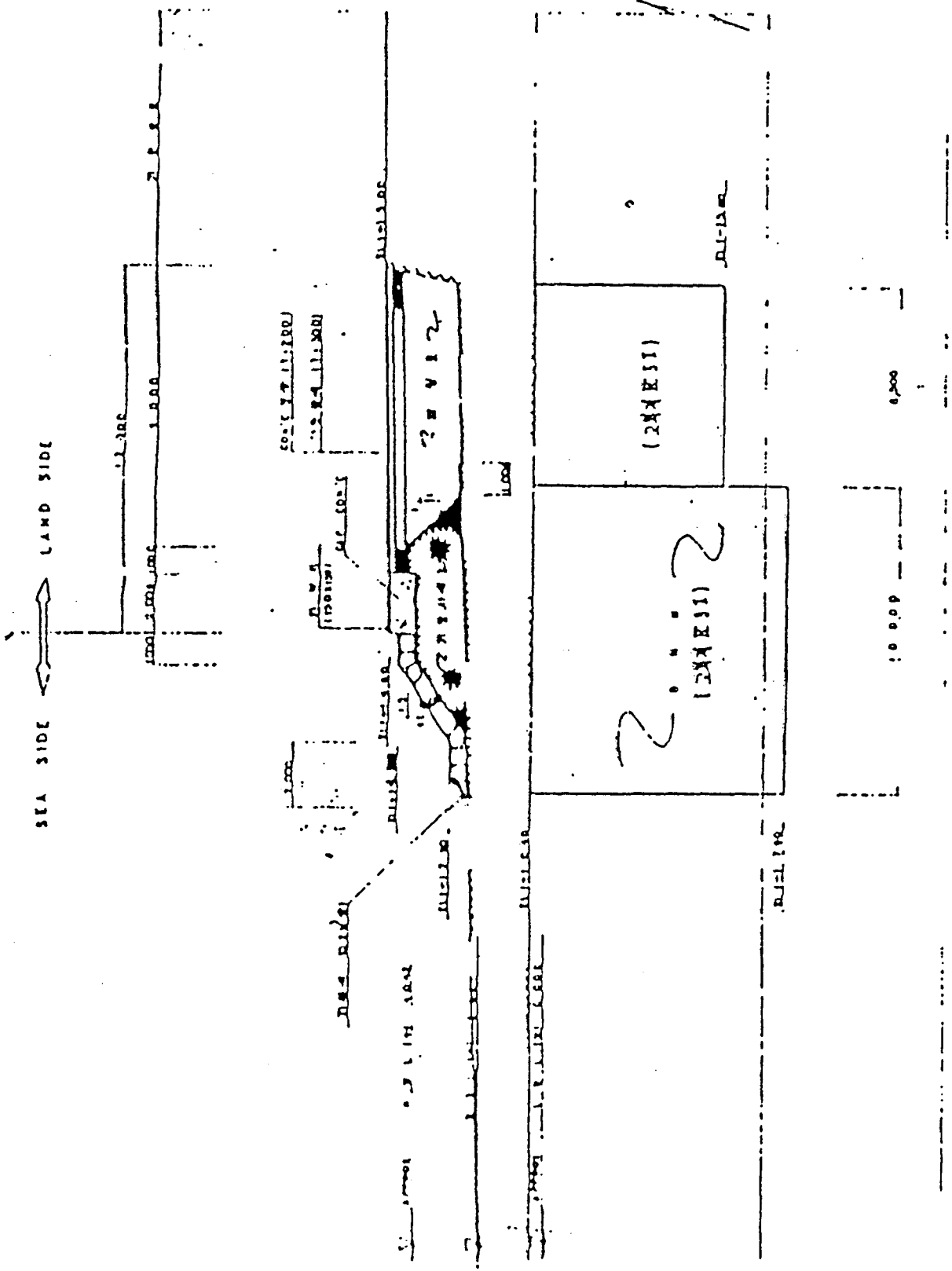


그림-1. (a) 시공표준단면도

1) 매립토층(FILL)

본 지층은 제방축조를 위한 매립과정에서 형성된 지층으로서 조사과정에서는 시추공 NO. B-1 및 B-2 위치에 1.70-2.00m 내외의 두께로 분포되어 있다. 지층의 구성성분은 실트 및 세립 내지 조립의 모래섞인 자갈, 자갈 및 세립 내지 조립의 모래섞인 전석으로 구성되어 있으며 통일 분류법에 의한 흙의 분류는 GM으로 분류되며 갈색을 나타내고 있다.

2) 퇴적토층(ALLUVIAL DEPOSIT)

본 지층은 유수의 운반퇴적작용에 의하여 형성된 지층으로서 시추공 NO. B-1 및 B-2 지역에 10.00 - 12.80m 내외의 두께로 분포되어 있다. 지층의 구성성분은 실트 및 세립내지 중립의 모래섞인 점토, 자갈 및 세립내지 조립의 모래섞인 실트로 구성되어 있으며 통일분류법에 의한 흙의 분류는 GH 및 ML로 분류되고 표준관입시험에 의한 N치는 1회/30cm - 11회/30cm 정도로 연약 내지 중간정도 조밀한 상태의 상대 밀도를 나타내고 있으며 황갈색 내지 암갈색을 띠고 있다.

3) 잔류토층(RESIDUAL SOIL)

본 지층은 모암인 안산암이 풍화되어 형성된 지층으로서 모암의 기본 조직은 그대로 남아 있으나 화학적 조성 및 역학적 성질을 상실하고 실트, 모래, 등으로 분해되어 원위치에 잔류되어 있는 지층으로서 본 조사지역에서는 시추공 NO. B-1 및 B-2 지역의 퇴적토층 하부에 3.00-5.50m 내외의 두께로 분포되어 있다. 지층의 구성성분은 세립내지 조립의 모래섞인 실트로 구성되어 있으며 통일분류법에 의한 흙의 분류는 ML로 분류되며 표준관입시험에 의한 N치는 12회/30cm-50회/30cm 정도로서 중간정도 조밀 내지 매우 조밀한 상태의 상대밀도를 나타내며 회갈색을 나타내고 있다.

4) 기반암층(BEDROCK)

본 조사지역의 기반암층은 풍화의 정도에 따라 풍화암층 및 연암층으로 구분 할 수 있는데 이 들 지층에 대하여 기술하면 다음과 같다.

가. 풍화암층(HIGHLY WEATHERED ROCK)

모암인 안산암이 풍화작용에 의하여 변질되어 형성된 지층으로서 모암의 조직과 형태를 그대로 보존하고 있으나 역학적 성질은 거의 상실한 상태로서 외력에 의하여 실트섞인 세립내지 조립의 모래 및 암편으로 분해되며 조사지역에서는 시추공 NO. B-1 및 B-2 지역의 잔류토층 하부 즉, 지표로부터 17.20-17.80m내외의 심도에서 확인되었으며 풍화암은 모암이 흙으로 변해가는 과정에 있고 암질이 부식된 상태여서 시추 작업시 코아회수는 대체로 불가능 하였다. 따라서 풍화암층은 상부의 잔류토층과 명확히 구분하기 어려우므로 조사과정에서는 표준관입시험에 의한 N치 50회/15cm를 기준으로 하였고 풍화암층의 하부에서 SAMPLER의 관입량이 극히 적어 표준관입 시험에 의한 시료 채취가 불가능한 경우에는 측정된 N치와 굴진과정에서 채취된 SLIME을 이용하여 지층을 판별하였으며 회갈색을 띠고있다.

나. 연암층(PARTLY WEATHERED ROCK)

본 지층은 모암인 안산암이 부분적인 풍화작용을 받아 형성된 지층으로서 시추공 NO.B-1 및 B-2 지역의 풍화암층 하부에 분포되어 있으며, 시추작업시의 코아회수율은 7-12% 정도로서 매우 저조한 상태이며 상부의 풍화암층에 비하여 기본조직 및 역학적 성질을 상실하지 않은 상태이고 회갈색을 띠고 있다(그림-1. (b) 지질주상도 참조)

4. 적용공법의 결정

본 지구의 연약지반은 연약지반 위층에 3.0-4.4m 범위의 매립층(사석 및 자갈층)이 있으며 종점방향으로 갈수록 알아지는 경향이 있다.

본 검토의 목적은 보링 주상도에서 자갈층 밑에 있는 연약 해성 퇴적점성토층을 처리하기 위하

여는 침층혼합처리공법의 적용은 곤란하므로 주입공법으로 검토코자 한다.

주입공법은 처음에는 유동성이 있고 소정의 시간이 경과한 후에 고결성을 나타내는 재료 즉,

그라우팅을 하는 관을 통하여 지반내의 소정의 위치에 압력으로 주입 및 교반하여 지반을 고결 강화시키는 공법이다. 주입의 일반적인 설계순서는 <그림-2>와 같다.

본지구는 N 치 0-2, $C=0.02\text{KG}/\text{CM}^2$, $\gamma=1.828$, $w_n = 68.3\%$ 의 초연약 지반으로서 현재도 SLIDING과 HEAVING의 발생을 억제하기 위하여 압사석(2-3:1)으로 이 현상을 임시 방지하고 있는 실정으로 타 기초처리방법보다 현지 여건을 그대로 유지하면서 견고한 기초로 처리하는 공법은 침층혼합 고결공법이 가장 적합하다고 판단하여 이 공법으로 결정하였다.

5. 침층혼합처리공법의 개요

가. 공법의 연혁

침층혼합처리공법은 1940년대부터 구미지역에서 연구개발되어 어느정도까지는 실용화되었던 것으로 알려지고 있으나 본격적인 개발은 1967년부터 일본 운수성 항만기술연구소를 중심으로 연구에 착수하면서 부터 이루어졌다. 그 후 1974년에는 침층혼합처리장비가 개발되면서 석회계 안정처리제를 사용하는 공법이 실용화되었고 여기서 소개하고자 하는 시멘트계 안정처리공법은 1975년 부터 실용화되어 현재에 이르고 있다.

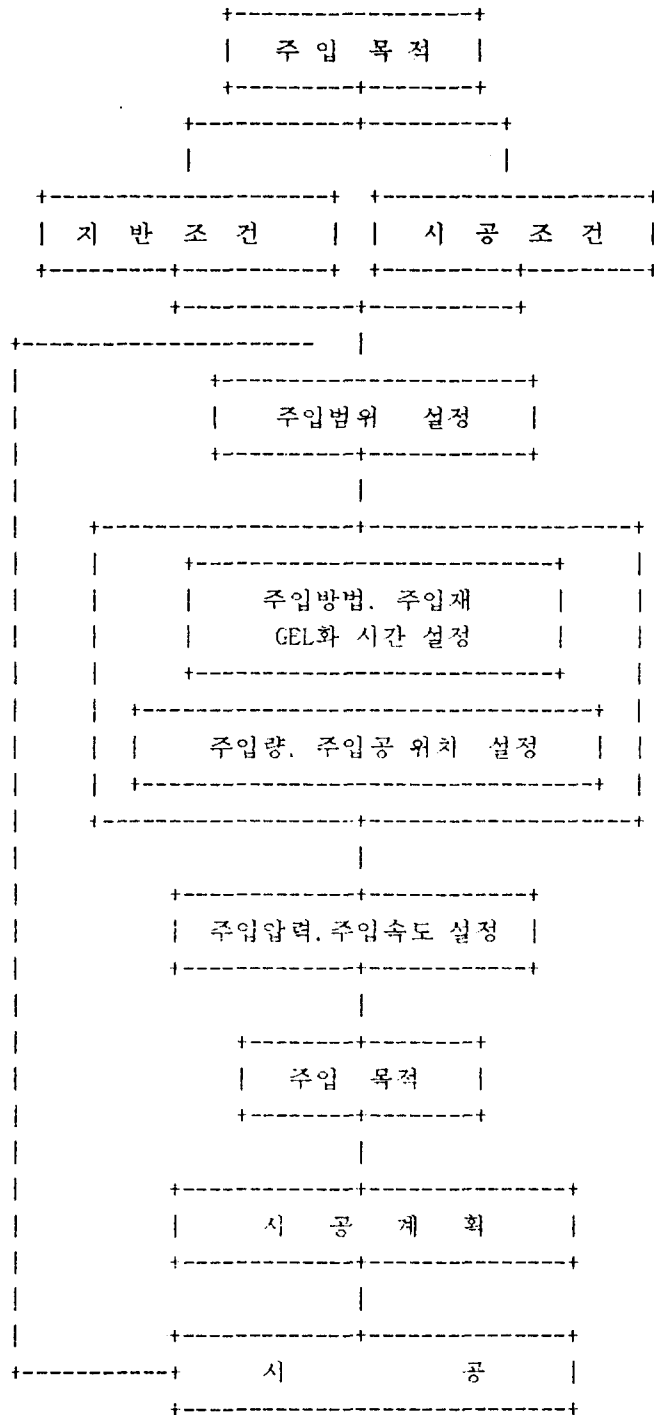


그림 2. 일반적인 설계의 순서

나. 공법의 원리

심층혼합처리공법은 연약토에 CEMENT계 경화제를 첨가하므로써 CEMENT와 연약토층내에 물이 반응하여 수화 GEL과 수산화칼슘(Ca(OH)₂) 등이 생성되고 CEMENT의 수화반응으로 생성된 수산화칼슘이 점토광물과 POZZOLAN반응을 일으키면서 연약토가 고결되는 원리를 응용

한 공법이다. 따라서 본공법의 경제성은 대상 연약토의 POZZOLAN 반응성 여하에 따라 변하게 된다. 즉, POZZOLAN 반응성이 크고, 유기물 함량이 적으며, 함수비가 적은 점토가 POZZOLAN 반응성이 작고, 유기물 함량이 많으며 함수비가 큰 점토에 비하여 경제적으로 고강도의 양질토를 얻을 수 얻을 수 있다.

다. 본 시공에 사용한 고화제

본공법에 사용된 고화제는 최근에는 EXCELLENT SOIL COMPOUND(ESC), EARTH STRENGTH CONTROLLING AGENT(ESCA)등이 국내에서 활용되고 있으나 본 시험시공에서는 EC를 사용하였다.

연약지반처리에 사용되는 고화제는 1938년 서구에서 점토 그라우팅 공법이 출현된 이래, 1950년 크롭리그닌계, 아크릴아미드계 등이 사용되었으며, 일본에서는 1945년 후반에서부터 규산계, 아크릴 아미드계, 1964년 리그닌계가 사용되었다. 1973년에는 안정제로서 리그닌계 수지의 특성을 연구한 결과, 유기질, 화산질토에 매우 효과가 높다는 것이 인정된 바 있고, 1974년에 매립지와 항만에 침전된 저질이토에 Beton을 혼합, 응결시켜 무해화에 성공한 바 있다.

최근 연약지반의 고화제는 아크릴아미드계, 시멘트계, 석회계, 아스팔트계, 수지계, 우레탄계, 페놀계 등으로 크게 나눌 수 있으며 경제적인 면에서 일반적으로 시멘트계 고화제가 가장 많이 사용되고 있다. 다만 시멘트계 유해물질에 대한 분쇄능력이 적고 첨가하였을 때 pH치가 높아짐으로 이에 각종 2차 첨가제를 첨가하여 이 결점을 개량하고 있다.

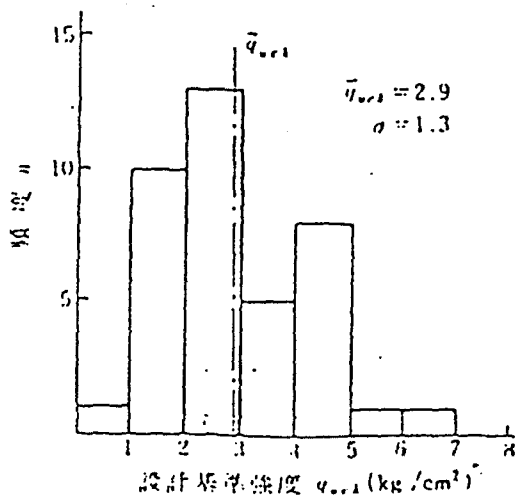
우리나라에서는 1976~1979년에 걸쳐 국립건설연구소에서 연약지반 처리공법은 물론이고, 국도포장의 보조기층 및 기층공법 등의 연구와 1986년 농어촌진흥공사에서 농업소득원 도로 포장공법 개발을 목적으로 물유리계, PC 및 OC, Fuji-beton, KAP, LAC 공법 등의 고화제의 효과시험을 실시한 사례가 있으며, 특히 연약지반을 대상으로한 주입장치, 침투속도 등에 관한 연구가 이루어진 후 창원 기계공업공단지내 연약지반을 대상으로 TBS공법이라는 지반 처리 공법이 시공된 바 있다.

다. 설계기준 강도 결정

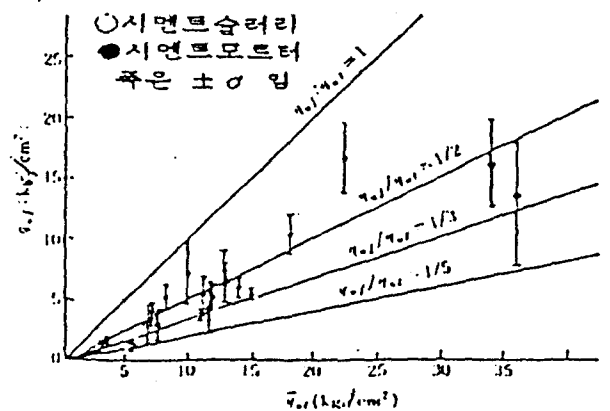
배합설계에서 고화제 EC의 배합비가 건조토의 9%까지는 거의 같은 비율로 강도가 증가되나 그 이상의 함유량에서는 강도의 증가가 둔화되므로 EC의 경제적 한계는 9%라고 판단되었다.

따라서 사석제 기초지반의 경우 경제적인 면을 고려하여 EC 9%를 선정하였다. 사석제 내측 매립지의 경우에는 파랑의 영향이 거의 없고 매립후 콘크리트 포장을 실시하며, 인접지에 기존 제방이 존재하는 등 안정성을 고려하여 EC 5%를 선정하였다. 즉, 경제적인 고화제 혼합량의 한계라고 볼 수 있는 EC 9% 혼합토에서는 $\sigma_{28}=2.89\text{Kg/cm}^2$ 로 나타났으며 한편 고화제 함량과 압축강도 발현의 추세로 보아 EC 5% 혼합토에서는 $\sigma_{28}=1.90\text{Kg/cm}^2$ 로 추정하였다. 이는 연약 해성점토가 64.5%의 고함수비를 지니고 있으며 건조 단위중량이 0.98 g/cm^3 에 불과하기 때문에 압축강도는 낮게 나타나는 것으로 판단된다. 다만 시공후의 안정성을 도모하기 위하여 설계기준강도는 일축압축강도의 60%를 적용하였다. 즉 σ_{28} 에서의 설계 압축강도는 2.89Kg/cm^2 (EC 9% 첨가시)의 60%인 1.73 (사석제 기초지반) 및 고화제 EC 5% 첨가시의 일축압축강도(σ_{28}) 1.90Kg/cm^2 의 60%인 1.14Kg/cm^2 (내측 매립 부분의 기초지반)를 채택하였다. 또한 동계 작업의 가능성에 대비하여 조기강도가 요구될 경우에는 물유리계(AL)1.5%를 제 2첨가제로 사용할 수도 있다. 제 외국에서는 일반적으로 지반의 간극율과 주입재의 종류에 따라서 다르나 <그림-5>에서 보는 바와 같이 설계기준 강도는 3Kg/cm^2 내외를 적용하고 있다. 설계기준강도 q_{uck} 는 일반적으로 $1.0\text{--}4.0\text{ Kg/cm}^2$ 를 취하고 있으며 실내배합강도 q_{ul} 와의 관계는 <그림-6>과 같으며 일반적으로 다음식이 성립된다고 한다.

$$q_{uck}=(1/2-1/5)q_{ul} \quad \dots \dots \dots (1)$$



<그림-5> 제외국에서의 설계기준강도



<그림-6> q_{uck} 와 q_{ul} 의 관계

7. 시공사례

가. 시공간격

- 1) 1개소 관입단면적 : 1.539 M²(직경 : 1.4M)
- 2) 유효 단면적 : 관입단면적의 60% (1.539×0.6=0.923M²)

<그림-7> 는 유효단면적을 나타낸것이다. 본 현장시공시험에서 사용된 주입장비는 <사진-1>과 같으며, 시공후 4개월후의 처리된 기초지반은 <사진-2>와 같다.

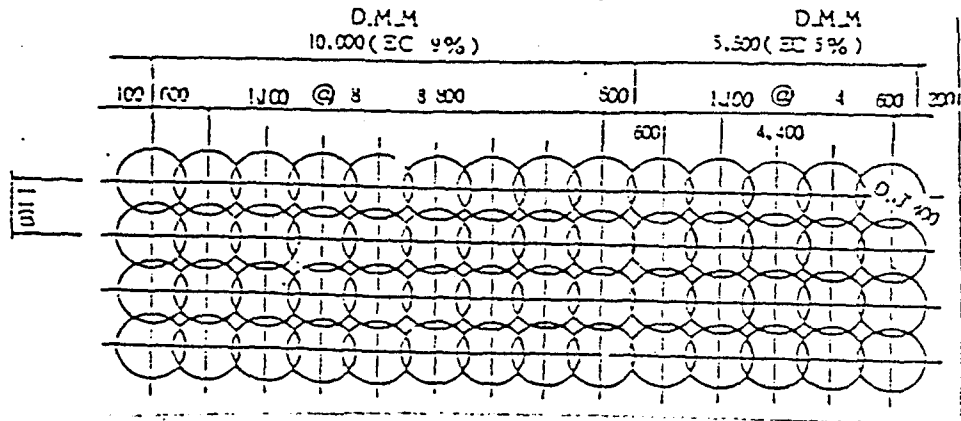


그림-7. 유효 단면적

나. 시공순서

일반적인 시공순서는 다음 <그림-8>과 같다.

- ① 관입개시
- ② 관입 주입 교반
- ③ 관입종료
- ④ 인발 교반
- ⑤ 시공종료

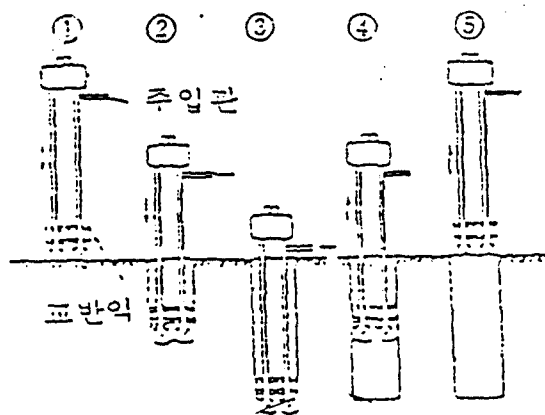


그림-8. 시공순서

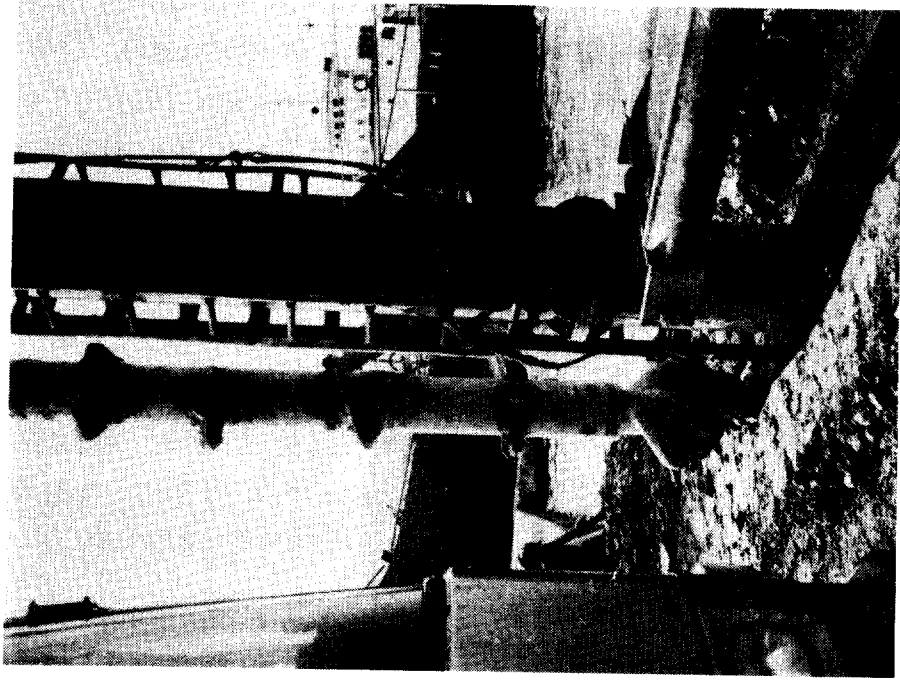


사진-1. 심층혼합처리공법의 시공장비



사진-2. 연약지반에 고화재처리 4개월후의 안정된 모습

다. 현지시험시공

현장시공은 해측(L=26.15M, B=10M)으로 부터 시공하여 내측(L=26.15M, B=4.5M)으로 진행하면서 시공하였으며 각공 시공단면이 OVERLAP 이 되도록 시공하였다. 약액주입후 주입효과는 전체 면적에 대해 균형있게 임의의 위치를 선정, 재령이 20일 이상인 부위에 대하여 보링기로 10개소(5%구간 3개소, 9% 구간 7개소)에서 N치 시험을 실시하였으며, 평면도는 <그림-9>와 같다. <표-1>은 시공현황을 나타낸 것이며, 총 1,200공을 시공하였다.

8. 심층혼합처리공법의 효과적 시공방법

이상의 시험시공에서 다음과 같은 문제점을 발견할 수 있었다.

연약지반으로 연속되어 있는 공사는 시공장비가 투입될 수 있는 작업로를 설치해야 한다. 또한 계획심도까지 처리가 선단이 도달후 룯트를 상하로 이동시켜 토사와 고화제 용액을 토출할때 인양속도는 저속으로 하여 충분한 교란과 약액주입을 하므로써 기준강도를 얻을수 있다.

작업장을 평탄하게 고른 후 고화처리기의 베이스머신 리더를 수직이 되도록 고정하고 1~2m까지 굴착이 되면 수직도 등을 재확인한 후 연속시공 하는것이 효과적이라고 판단 되었다. 고화제는 믹싱 프렌트에서 충분히 균일상태로 혼합 주입하여야 하며, 주입압은 $7\text{kg}/\text{cm}^2$ 내외가 적합하였다. 특히 자갈층이 연약지반 위에 매립되어 있지 않은 구간에 막자갈을 10~30cm 정도 포설하여 고화 처리를 하면 약액주입 효과 및 지지력 향상의 효과를 기대할 수 있다. 그러나 심도가 깊을수록 고화제의 강도가 일반적으로 작게 나타나는 점에 대하여는 시공기술적인 면에서 개선되어야할 것으로 생각된다.

이상의 결과를 종합하면 물량장의 기초처리에 있어서 현지여건에 따라서는 고화제를 이용하여 연약지반을 고결시키는 공법이 타공법에 비하여 경제적이일 수도 있다고 판단된다.

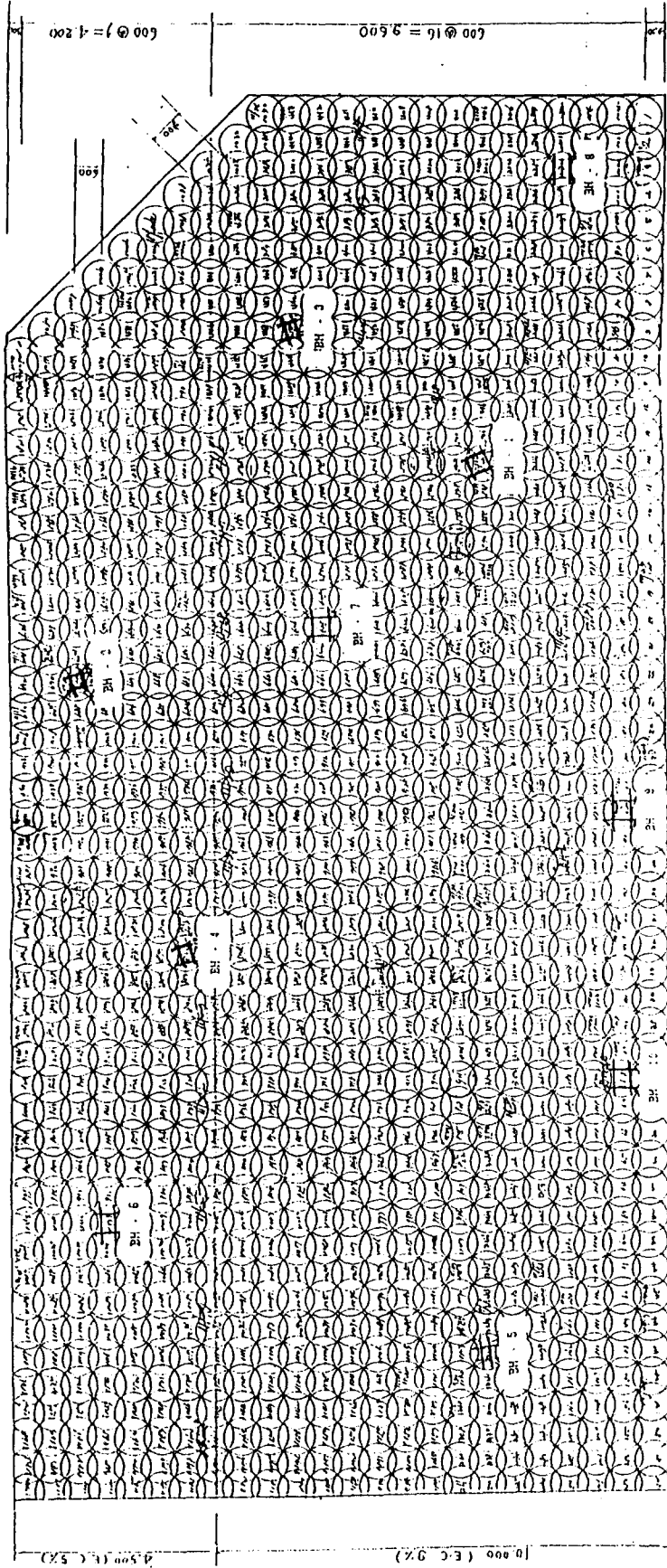


그림-9. 조사위치 평면도

표-1...시공현황과 효과

구분	구분										비고		
	BH - 1	BH - 2	BH - 3	BH - 4	BH - 5	BH - 6	BH - 7	BH - 8	BH - 9	BH - 10			
보통공법													
구입확박	EC 9 %	EC 5 %	EC 9 %	EC 5 %	EC 4 %	EC 5 %	EC 9 %	EC 9 %	EC 9 %	EC 9 %			
구입삼드	8.0	6.0	8.0	6.0	6.5	6.0	8.0	8.0	8.0	8.0			
시공일자	'93.11.16	'93.11.19	'93.11.14	'92.11.22	'93.11.9	'95.11.25	'93.11.18	'93.11.1	'93.10.28	'93.10.27			
조시일자	'93.12.7	'93.12.9	'92.12.10	'92.12.11	'93.12.15	'93.12.15	'94.1.4	'94.1.5	'94.1.6	'94.1.7			
재경 (원)	21	20	26	20	34	21	47	65	70	71			
기준 (원)	14	10	14	10	14	10	14	14	14	14			
조시결과 () : N치	0 ~ 3.5 m (30 ~ 50)	0 ~ 3.5 m (26 ~ 50)	0 ~ 5.0 m (50) 5.0 ~ 7.2 m (14 ~ 16)	0 ~ 2.4 m (34 ~ 50) 3.4 ~ 5.8 m (10 ~ 11)	5 ~ 2.5 m (29 ~ 51) 2.0 ~ 4.1 m (18 ~ 39)	0 ~ 7.7 m (23 ~ 35)	0 ~ 4.6 m (36 ~ 42) 4.6 ~ 6.8 m (14 ~ 25)	0 ~ 5.5 m (40) 5.3 ~ 8.0 m (14 ~ 15)	0 ~ 5.6 m (40) 5.6 ~ 8.6 m (14 ~ 19)	0 ~ 5.1 m (40) 5.1 ~ 8.7 m (14 ~ 18)			
등급	기준에 적합 (19 ~ 21)	기준에 적합 (10 ~ 13)	기준에 적합 (22 ~ 33)	기준에 적합 (16 ~ 25)	기준에 적합 (18 ~ 39)	기준에 적합 (23 ~ 35)	기준에 적합 (31 ~ 42)	기준에 적합 (22 ~ 59)	기준에 적합 (22 ~ 38)	기준에 적합 (21 ~ 50)			

9. 결론

마량지구에 연약점토를 대상으로 실험실에서 고화제 혼합량 변화에 따른 고화제의 강도 증진 효과와 현지 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 강도 증가 효과

고화제(EC) 함유량이 증가됨에 따라 일축압축강도는 증가되었으며 고화제 함유량을 건조토의 9% 혼합했을때 28일 강도는 대략 $1-2.5\text{kg/cm}^2$ 정도 였으며 자연함수비가 감소할 수록 강도 증진 효과가 컸다.

2) 해성퇴적 점토지반은 고화제(EC) 9%를 혼합하여 일축압축강도 2.89KG/CM^2 을 배합강도로 결정하였으며 이의 60%인 1.73KG/CM^2 을 설계 기준강도로 채택하였다. 또한 조기강도의

발현을 위하여 AL(물유리계) 1.5%를 제 2첨가제로 사용하였으며 현장시험의 혼합방식은 발독식 주입 및 교반공법을 적용 하였다.

3) 또한 고화제의 효과조정을 위하여 시험시공의 일환으로 현지시공을 실시한바에 의하면 실험실에서의 목표강도를 얻을수 있는 것으로 나타났다. 이때 처리심도는 사석층과 자갈층 밑에 퇴적된 해성 점성토의 심도 8M까지, 그리고 폭은 사석제 선단(TOE)에서 0.5M까지로 처리하는 것이 적합하였다.

4) 기존 사석층과 자갈층이 없이 해성퇴적 점토가 노출된 지반의 처리층 심도는 6M까지가 적합하였다. 다만 필요한 경우 트래피커빌리티를 고려하여 막자갈 10-30CM를 포설후 사석제를 시공하는것이 효과적인 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 한국지반공학회: 구조물설계기준, 1986
2. 도덕현, 김시원, 이경희: 연약지반상의 농도축조공법에 관한 연구, 건국대학교 부설 농업자원개발 연구소 논문집 제8집, 1983
3. 이병익, 이용구, 조중제, 이재현: 연약지반 처리공법 연구보고서(약액주입공법), 건설연구소 자료 No.385, 1979
4. Broms, B.B. and U. Anttikoski: Soil Stabilization, VIII ECSMFE Helsinki '83, Vol.3, 1983
5. Warner, J.: Strength Properties of Chemically Solidified Soils, ASCE SM11, 1972
6. Westwood, David D.C.: The construction of the Basement and Foundations to the Harbour Road Development, HKIE, 1986
7. 建設産業調査會: 最新軟弱地盤 Handbook, pp 365-372, 1981
8. 土質工學會 編: 土質工學 Handbook, pp 995-1076, 1982
9. 寺師 昌明, 化誥 昌樹, 小林 弘樹: 處理土-未改良土 境界面の 剪斷力, 第19回 土質工學 研究發表會 K-6, 1964
10. 岡部 次郎外 2人: 注入藥液의 固結에 關する モデル 試驗, 第13回土質工學研究發表會 1-31, 1968
11. 木賀一美, 井上廣胤: 複合土 わよひ 混合土의 剪斷特性에 關する 基礎的 研究, 土と基礎ぬ 18-11, 1968
12. 土質工學會: 軟弱地盤對策工法(조사·설계から施工まで), 1988
13. 中田與四郎, 小松 義郎: 軟弱地盤의 特殊工法, 日本 農業土木學會誌 第34卷 第4號, 1966
14. 吉田信夫: 超軟弱地盤(ヘトロ)의 土質改良工法と 載荷試驗·解析, 土と基礎, 24-6, 1976