DWM 심층혼합처리공법의 연약층 개량효과에 대한 고찰
A Consideration on the Soft Ground Improvement Effect by DWM

유 찬, Chan Yu[1], 도 덕 현, Duck-Hyun Doh[2], 한 우 선, Woo-Sun Han[3]

[1]건국대학교 대학원 농공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Agricultural Eng., Kun kuk Univ.
[2]전 건국대학교 농공학과 교수, Ex-Professor, Dept. of Agricultural Eng., Kun kuk Univ.
[3](주) 해공 대표이사, Principal, HAEKONG Engineering Co., Ltd.

개요(SYNOPSIS) : The DWM(deep wing mixing method) is the deep mixing method of soil stabilization and was developed to improve soft ground to a depth of about 20m. DWM was adapted to the repair of *u-ryang* river embankment. A result of treatment was very satisfaction. A solidfing agency of 8%(a ratio of Cement 93 : HEC 3) was combined with a water in a ratio of 1:1, then it was mixed with soft soils by DWM machine. An average Unconfined strength of sample, which was made in in-situ, was $q_u = 17.7 kg/cm^2$ after 28-day standard curing.

주요어(Key Word) : 연약지반, 심층혼합처리공법, 신기술, DWM, 고화제(HEC)

1. 서론

심층혼합처리공법은 석회, 시멘트 등의 안정제(고화제)를 심층의 연약층에 공급하여 균일하게 혼합하여 포조란반응 등의 고결작용에 의해 연약층을 강화하는 화학적 지반개량공법의 일종이다. 심층혼합처리공법은 연약층의 강도 증진뿐만 아니라 침하의 억제, 차수 등에도 효과가 있다. 이 공법의 가장 큰 장점은 심층의 연약토를 제거하지 않고 개량한다는데 있으며, 따라서 지금까지의 다른 공법과 비교하여 시공성, 안정성, 경제성 등에서 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 이미 1970년대부터 실용화되어 있는 외국에 비교해서 국내에서는 장비의 개발이 아주 저조한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 건설 시장 개방에 대응하기 위하여 순수 국내 기술로 개발되어 지난 1996년 8월에 건설신기술로 지정된 DWM(deep wing method)공법에 대해서 기간이 얼마 되지 않아 시공 실적은 적으나 우선 기 적용사례 결과를 분석•고찰하여 그 개량 효과를 검토하고, 이와 함께 앞으로의 자료들도 축적해 계속적인 장비의 개량과 추가적인 신 공법 개발에 적극 활용하고자 한다.

2. DWM공법의 특징

DWM공법은 기존의 무한궤도형 오거보링기를 개량한 장비에 금번에 개발한 롯드를 부착하여 사용하며, 롯드는 기존의 장비들이 순수 연약지반을 대상으로 하는데 반하여 느슨한 자갈 층이나 고결층이 있는 심층 연약지반의 처리가 가능하도록 선단 부에 고강도탄소강으로 제작된 굴착기와 국내에서는 처음으로 3개의 교반날개중 하나의 교반날개에서 안정제를 횡방향 뿐만 아니라 배면 방향으로 분사•혼합할 수 있도록 설계되었다. 교반날개의 회전 반경은 1.2m로써 처리 심도는 20m까지 가능하고, 특수 장비를 이용하여 해상 작업도 가능하다고 알려져 있다(그림 1. 참조). 또한 상단에는 가압판을 설치하여 재래장비에서는 주입량의 70~80%발생되는 시멘트 고화재 슬러리의 분출융기현상이 발생되지 않도록 하였다. 이와 같은 결과는 가압판의 억지효과외에도 톱니 모양의 교반날개의 축이 수평 방향에 대해서 약

15 °정도의 기울기를 유지하고 회전하므로 회전시 교반날개의 흔적에 의한 공간이 형성되어 이 공간에서 일부 흡수하게 됨으로써 가능하다고 예상된다.

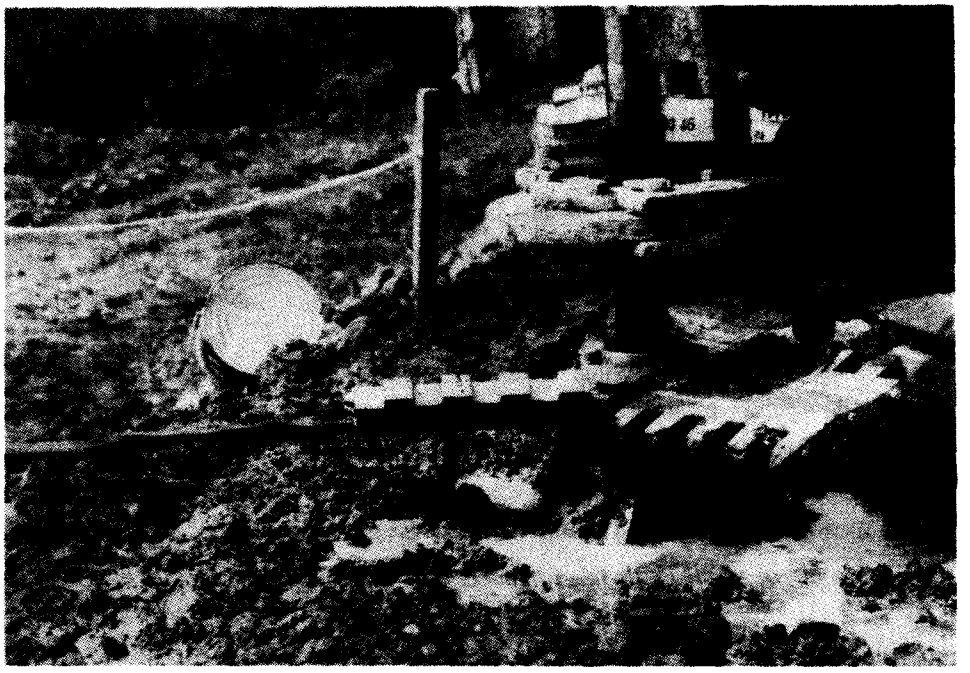

그림 1. 고화처리기

3. 시공 지역의 개황

DWM공법을 이용하여 처리된 지반은 전북 익산군 망성면 어량리 어량천 제방의 기초 부분으로써, 연약한 기초 지반의 지지력부족으로 인해 침하와 측방유동으로 제방에 활동이 발생하여 이에 대한 대책이 필요한 현장 이었다. 기존의 토질조사 결과보고서에 따르면 이 지역은 심도 1.5m정도까지는 평균 지반지지력은 $q_c = 7kg/cm^2$이나, 심도 1.5~8.0m까지는 매우 연약한 점토질씰트(CL)로서 평균 지반지지력은 $q_c = 3kg/cm^2$로 나타났다. 본 지구의 토질의 투수계수는 2.81~6.78×10-7cm/sec으로 과잉간극수압의 배출이 매우 불량한 상태로, 이로 인하여 습윤 포화상태가 되면 제방의 활동이 발생할 수 있는 여건이므로 보강대책이 필요하다고 판단되었다. 대책공법으로서 여러 가지 공법을 비교 검토한 결과 제방 및 수로의 형상을 유지하면서 보강이 가능하고 효과가 확실한 본 공법을 적용토록 결정되었다. 어량천 제방에 대해서 실시한 안정계산 결과는 현장강도 c = $2.0kg/cm^2$이상으로 제방의 사면 끝에서 폭 4.0m, 깊이 4.0m로 보강 처리하여야만 요구되는 최소 안전율(내측안전율(Fs)=1.345, 외측안전율=1.312)이상을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 연약층을 구성하는 흙의 기본적 물리적 • 역학적 성질은 다음의 표 1.과 같으며, 제방의 횡단면도와 처리 부분은 그림 2.에 나타내었다.

표 1. 어량천 제방기초 연약층의 물리적 • 역학적 성질

함수비 (%)	비 중	액성한계 (%)	소성지수 (%)	c (kg/cm^2)	내부마찰각 (°)	통일분류	#200 (%)	5μ (%)
47.3	2.63	41.0	18.7	0.13	0	CL	89.7	8.6

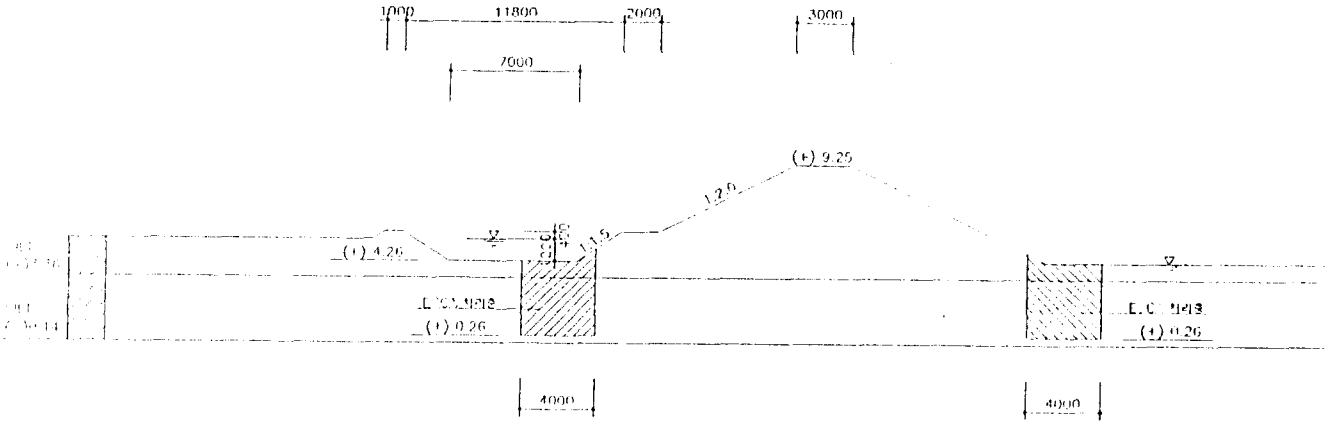

그림 2. 어량천 제방의 횡단면도와 처리부분

4. DWM공법에 의한 연약지반 심층혼합처리

4.1 사용된 고화제

DWM공법의 신기술 지정 당시에 사용한 약액은 ESCA였으나, 어량천 제방의 보강 처리에서는 HEC (실내배합설계에서는 EC 사용)를 사용하였다. HEC는 기존의 EC고화제를 개량한 것으로 고함수율 및 고염분함유 해성점토에 적용할 수 있도록 개발된 것으로서 사용 방법은 보통 포트랜트 시멘트 또는 고로 슬래그 시멘트에 중량비로 HEC원소를 1~5%(보통은 3%) 가하여 프리믹스한 후 이 안정제를 물과 1:1로 섞어 교반장비를 통하여 연약 토양에 5~15%투입시켜 혼합시키면 된다.

4.2 실내배합설계와 현장배합

시공시 배합강도와 설계기준강도의 결정은 현장에서 실내시험강도의 몇 %까지 얻을 수 있는가가 중요한 문제이며, 이는 현장 조건과 사용 장비, 시공자의 숙련 도와 밀접한 관계를 갖는다. 우리나라에서는 일반적으로 실내배합강도의 60%~70%를 설계기준강도로 적용하는 경우가 많다.

앞에서 언급한 바와 같이 안정계산 해석 결과는 현장강도 c = $2.0kg/cm^2$이상으로 제방의 사면 끝에서 폭 4.0m, 깊이 4.0m로 보강 처리하여야 요구되는 최소 안전율(내측안전율(Fs)=1.345, 외측안전율 =1.312)이상을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 실내시험에서는 일축압축강도가 $q_u = 7.0kg/cm^2$ 이상이 되어야 하는 것으로 계산되었다. 실내배합설계는 현장 토양에 안정제(보통 포틀랜트 시멘트 97 : EC 원소 3)를 7%, 9%, 11%를 혼합하여 공시체를 제작하였다. 공시체는 1일간 표준양생후 7일, 14일, 28일경과 후의 일축압축강도시험을 실시하였다. 그 결과를 요약하면 다음 표 2.와 그림 3.과 같다.

이 결과에 의해서 현장배합은 고화제 8%로 결정하였다.

표 2. 고화제 양과 재령에 따른 일축 압축강도의 관계

혼합율(%)	7	9	11
7일 양생 (kg/cm^2)	1.0	3.2	5.2
14일 양생 (kg/cm^2)	5.6	12.0	14.8
28일 양생 (kg/cm^2)	8.0	17.0	24.0

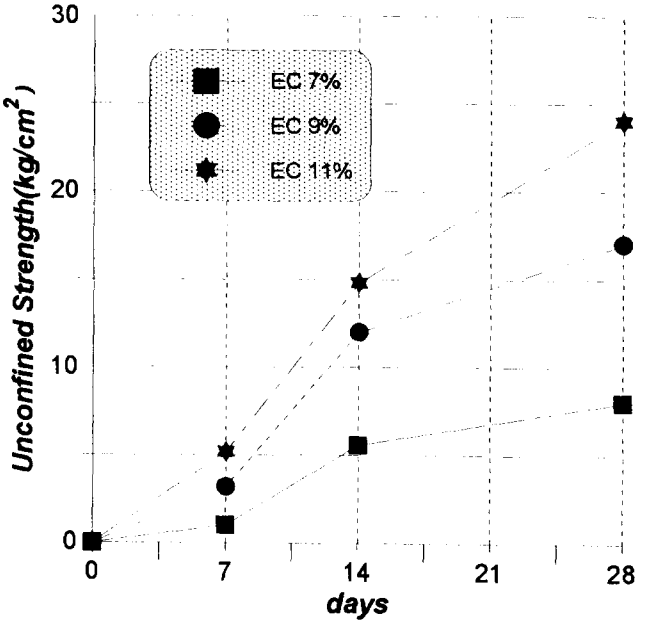

그림 3. 고화제 양과 재령에 따른 응력-변형관계

4.3 차수효과

기 시험자료에 의하면, 고화제로 ESCA를 사용해서 자연함수비 83.5%인 고소성점토(CH)에 안정제 9%를 혼합한 경우에는 평균투수계수가 1.06×10^{-8}cm/sec로 나타났다.

물론 현장지반에 따라서 다르게 지만 안정제를 9%정도에서 투수계수가 1.0×10^{-7}cm/sec이하로 저하됨으로 차수 목적으로도 이용이 가능하리라고 판단된다.

5. 시공 결과의 고찰 및 기존 공법과의 비교

DWM공법을 적용한 어량천 제방의 기초보강에서의 시공결과는 안정액 8%(보통 포틀랜드 시멘트 97 : HEC 원소 3)를 처리기를 통하여 원지반에 투입하여 교반•혼합한 후, 시공 결과의 확인을 위해 현장에서 압축강도와 투수시험 등에 필요한 공시체를 제작하였다. 제작된 공시체는 실내에서 1일 동안 표준양생시키고 그 후에는 수침시켜서 재령 7일과 28일에 대한 일축압축강도시험을 실시하였다. 평균일축압축강도는 $q_u=17.7kg/cm^2$로서 설계기준 $q_u=7.0kg/cm^2$은 물론 실내배합설계에서 안정액 9%를 혼합하여 28일 양생한 후 얻은 평균일축압축강도 $q_u=17.0kg/cm^2$보다 높은 것으로 나타났다. 이것은 현장의 시공조건이 양호하고, 실내배합에서 사용된 고화제 EC대신에 현장에서는 이의 개량형인 HEC를 사용하였기 때문이라고 판단된다. 그러나 고화제만에 의한 강도증진으로 판단하기보다는 장비의 교반능력에도 어느 정도의 원인이 있는 것으로 보인다. 그러나 장비의 성능을 입증하기 위해서는 앞으로 시험시공 등의 체계적인 연구가 필요할 것이며, 그 원인을 규명하면 보다 경제적인 설계도 가능하리라 판단된다. 그 결과를 요약하면 그림 4.와 같다.

한편 기존의 공법과 비교해 보면, 국내에서 본 공법과 유사한 공법으로 시공한 사례는 전남 강진군 마량면 마량리(마량항 물량장)에서 고화제 EC로 시공한 사례가 있다. 그 당시 기초 지반 상태는 N값이 2~4내외로 매우 연약하였으며, 물량장측면에 활동이 발생하여 이에 대한 처리가 요구되는 상황이었다. 여기서는 안정제 9%(시멘트 97 : EC 3)로 처리하였으며, 장비는 말뚝식 회전•교반장치를 사용하였다. 시공후 일축압축강도 $q_u=1.9\sim2.8kg/cm^2$인 것으로 나타났다.(참고문헌 2. 참조)

이 결과만으로 비교해 보면 고화제 사용량에서는 큰 차이가 나지 않는데도 처리 후의 강도에서는 큰

차이를 보였다. 이는 장비의 개량에서 얻어진 효과라고 판단되었다.

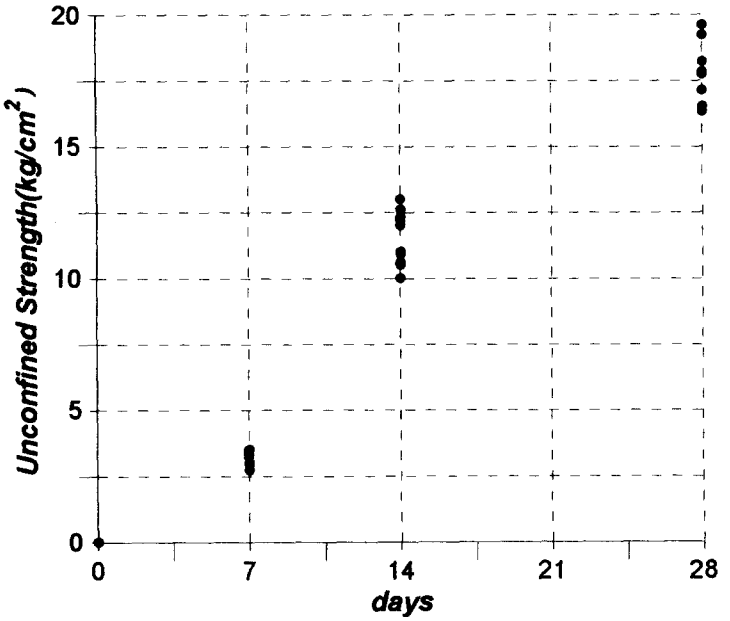

그림 4. 현장공시체의 일축압축강도

6. 결 론

어량천 제방의 연약 기초지반에 대해서 강도 증가를 목적으로 DWM공법을 적용한 경우에 대해서 그 개량효과를 분석하고, 기존 공법과의 비교도 실시하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 어량천 제방의 안정계산에서 현장강도 $c=2.0kg/cm^2$이상으로 제방의 사면 끝을 폭 4.0m, 깊이 4.0m 로 안정 처리해야 허용안전율을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.
2. 따라서 실내배합설계에서는 $q_u=7.0kg/cm^2$이상의 강도를 얻을 수 있도록, 시멘트 97 : 고화제 (EC) 3 의 비로 혼합하고 이를 물과 1:1로 섞어 공시체를 제작하였으며, 일축압축시험결과에 따라서 현장배합은 안정액 8%로 결정하였다.
3. 현장에서는 DWM장비를 이용하여 연약 토양에 안정액(시멘트 97 : 고화제 EC 3) 8%를 투입•교반하였으며, 이때 현장에서 제작된 공시체의 일축압축강도는 $q_u=17.7kg/cm^2$로 나타났다.
4. 기존 공법과의 비교에서는 현장조건에 따라서 다를 수 있으나, DWM공법이 적은 안정액을 사용하고도 강도증진 효과가 크므로 경제적이라고 판단되었다.

이상의 결론을 종합하면 기존에 외국에서 도입된 심층혼합처리공법도 각기 우수한 성능을 가지고 있으나, 국내 기술로 개발된 공법도 이에 못지 않은 좋은 결과를 나타내고 있다. 이는 외제와 비교해도 손색이 없는 고화제 품질, 확인되지는 않았으나 우리 나라의 지형에 맞게 개발된 교반장비 그리고 기술자가 현장의 상황을 적절히 파악하고 그에 맞도록 장비를 운용한 것이 주요 요인이라고 판단된다. 따라서

앞으로 계속적인 연구와 개발이 된다면 우리 나라의 실정에 맞는 더 우수한 공법이 더 많이 개발되리라 판단된다.

참고문헌

1. 김호인(1995), 심층혼합처리 공법의 농공기술 No47, 농어촌 진흥공사, pp33~46
2. 도덕현, 공길룡, 오창목, 유찬(1995), 고화제를 이용한 천층 및 심층혼합처리 공법의 현지적응성에 관한 연구, 대한 토목학회, 제15권, 제4호, pp. 1003~1014
3. 한국지반공학회(1995), - 지반공학시리즈 6 - 연약지반
4. 技寶堂(1990), Cement系 固化劑お利用する 地盤改良 Manual
5. 藤田 圭一(1993), 土木・建設技術者のための實用軟弱地盤對策技術總覽 (株)産業技術サ-ヒ"スセンタ-
6. 最新軟弱地盤ハント"フ"ック編輯委員會(1981), 最新軟弱地盤ハント"フ"ック, 建設産業調査會, pp. 287~299
7. Broms, B. B. and U. Anttikoski(1983), "Soil Stabilization", VIII ECSMFE Helsinki '83, Vol. 3
8. Brand E. W. and Branner R. P. (1981), Soft Clay Engineering
9. Varaksin S. (1981), Recent Development in Soil Improvement Techniques and their Practical Applications, SOLS SOILS No. 38/39, pp. 7~32
10. Waener, M. J.(1972), "Strength properties of chemically solidifide soils", Jour. of the soil Mechanics and Foundations Division SM11