

DCM 공법을 적용한 방파제 기초 시공사례 Application to Breakerwater Foundation by DCM

이수길¹

Soo Kil Lee¹

1. 서 론

외해로부터 내습하는 파랑을 방지하여 항내의 정온을 유지시키는 방파제는 건설 목적상 외해에 시공되므로 기초지반이 연약한 경우가 많다. 국내의 경우 방파제 축조시 강제 또는 준설치환으로 연약지반처리를 해 왔으나, 최근에는 구조물의 대형화와 준설토 처리에 따른 환경문제로 인하여 DCM(Deep Cement Mixing) 공법과 같이 원지반 상태로 개량한 후 구조물을 축조하는 추세이다. DCM 공법의 국내 해상공사는 1988년을 시점으로 20여건의 실적을 쌓아 적용성이 입증된 공법이다. 도입 초기는 육상용 파일드라이브를 대선(Barge)에 탑재시킨 조합선을 이용하여 2축으로 시공하였으며, 2004년 중반기에 4축 1면으로 수중 End Leader를 장착하여 48m까지 시공하였다. 외해의 심도가 깊은 지반을 개량하기 위해 2005년에 4축 3면의 독자적인 한국형 DCM 전용선(동지 1호)을 개발하여 현재 울산 남방파제 현장에서 시공 중에 있으며, 국내에서 DCM 전용선을 처음 적용한 현장이기에 설계, 시공, 품질관리 및 시공 관리를 소개한다.

2. DCM 공법 설계

2.1 개요 및 검토항목

DCM기초는 표 1과 같은 항목을 검토하여 경제성과 시공성을 고려하여 적절한 단면과 개량형식을 선정하며, 또한 충분한 지반조사를 통하여 하단부 지지형식, 개량폭 및 개량을 산정하고 필요에

따라서 원호활동과 침하량을 검토한다.

표 1. 주요 검토사항

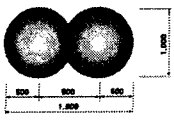
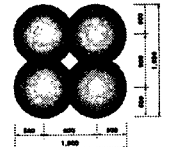
구 분	주 요 검 토 사 항
개량체 단면	시공성, 경제성에서 유리한 단면 선정
개량 형식	안정성, 시공성, 경제성 등을 충분히 파악하여 적절한 개량형식 선정
하단부 지지형식	외적안정(전도, 활동, 지반지력, 원호활동)에 대해 충분히 안정하도록 선정
개량폭	DCM 내적안정, 외적안정에 충분히 안정하도록 선정
개량을	상부하중에 대해 재료허용응력을 만족하는지 검토하여 선정

2.2 개량체 단면

기초용의 DCM 개량체 단면은 주로 $\phi 1,000 \times 2$ 축이 적용되었으나, $\phi 1,000 \times 4$ 축이 개발된 2004년 이후에는 품질이 좋고 경제성 높은 $\phi 1,000 \times 4$ 축의 적용이 증가추세에 있으며, 본 과업대상지역에서도 $\phi 1,000 \times 4$ 축을 적용하였다. 표 2는 $\phi 1,000 \times 2$ 축과 $\phi 1,000 \times 4$ 축 제원을 비교한 것이다.

¹ 발표자: ㈜대우건설 울산남방파제 2공구 부장

표 2. 개량체 단면제원

DCM 2축		
	개량체	φ 1,000×2rod
	개량단면적	1.541 m ²
	경제성	140%
DCM 4축		
	개량체	φ 1,000×4rod
	개량 단면적	3.024 m ²
	경제성	100%

2.3 설계기준강도

설계기준강도는 개량체의 허용응력을 설정할 때의 기준강도로, 원지반을 이용한 실내배합시험의 일축압축강도를 원칙으로 하는데, (조성태, 2006) 본 설계에서는 기 적용된 DCM현장의 실내배합시험 사례를 분석하고 적용지반에 대해 실내배합시험을 실시하여 배합비를 결정하였다. DCM 개량체의 배합강도는 원지반 강도가 일정하다고 가정할 때, 사용 시멘트량과 물-시멘트비의 영향을 받는데 통상적으로 물-시멘트비는 0.7~1.0의 범위로 실시하며 시멘트량은 개량목적과 목표강도에 따라 150~350 kg/m³ 범주로 다양하게 적용된다. 본 공사에서 규정한 DCM의 제원은 표3과 같다.

표 3. DCM 공시체의 제원

시멘트 배합량	재령 28일 (kgf/cm ²)			
	일축압축강도		허용일축 압축강도	전단 응력
	실 내	현 장		
300kg/m ³	30.0	15.0 ~ 20.0	5.3	2.6

주) 현장 일축압축강도는 평균 20kgf/cm²이상, 하한치를 15kgf/cm²로함

3. DCM 공법의 시공, 품질관리

3.1 시공관리

DCM공법은 개량체를 직접 확인하면서 시공할 수 없고, 재시공이 곤란하기 때문에 시공 중에 실시간으로 시공상황을 파악해야 한다. 따라서, 시공관리 시스템을 사용하여 시공관리를 수행하며, 주

요 시공 관리 항목으로는 교반기 승강속도 및 회전수, 고화재의 토출방식, 선단처리 방식, 착저층의 관리 등이 있다.

3.1.1 교반횟수

개량체의 품질을 좌우하는 가장 중요한 요소 중의 하나는 고화재와 개량대상지반의 혼합정도이며, 이를 위해 교반기의 교반횟수가 중요한 지표로 사용된다.

$$T = \Sigma M \times \left\{ \frac{N_d}{V_d} + \frac{N_u}{V_u} \right\} \quad (1)$$

T : 교반기의 회전수(회/m)

N_u : 승강시 날개 회전수(회/분)

ΣM : 교반기의 총 날개수

V_d : 교반기의 하강속도(m/분)

N_d : 하강시 날개 회전수(회/분)

V_u : 교반기의 승강속도(m/분)

교반기의 회전수는 식(1)과 같이 결정되며, 일본의 경우에는 교반횟수 350회/m 이상을 관리기준으로 하고 있다. 국내의 경우에는 DCM 교반기의 rpm(분당 회전수)이 일정하므로 대부분 하강 및 승강속도를 조절함으로써 교반횟수를 제어하고 있다.

3.1.2 고화재 토출방법

교반횟수와 더불어 고화재의 토출방법에 따라 개량체 품질의 차이가 있으며, 토출방법은 지층특성과 공사시간을 고려하여 결정한다. 일본의 경우는 관입시 토출방식과 인발시 토출방식을 구분하여 사용하는데, 슬러리게 DCM에서는 관입시 토출방식을 많이 사용한다. 관입시 토출방식은 흙과 고화재의 교반이 관입시와 인발시에 모두 가능하므로 교반의 균질성이 향상된다. 그러나, 토질조건에 따라서는 교반시간이 많이 소요되거나 교반기 인발시에 고화로 인해 시공성이 떨어지는 문제가 발생할 수 있는데, 불균질하거나 단단한 지층이 존재하는 경우와 대심도 시공인 경우에는 인발시 토출방식을 사용한다.

반면에 국내의 경우는 일본과 달리 관입시와 인발시에 모두 토출을 하는 방식을 사용하는데, 이것은 사용시멘트량, 교반횟수 등과 관련이 있으며, 향후 일본에서 사용하는 방식과의 비교검증이 필요하다.

3.1.3 선단처리방법 및 착저확인

교반횟수 및 고화재 토출방법과 더불어 DCM 시공관리에 빼놓을 수 없는 항목이 선단처리인데, 선단부 시공관리에 따라 DCM 개량체의 품질이 크게 좌우되기 때문이다. 선단처리를 위해 사용되는 일반적인 방법은 선단부에서의 교반속도를 관입 및 인발시의 속도보다 느리게 하는 방법, 선단부에 해당하는 길이만큼 관입 및 인발을 반복하여 교반하는 방법 등이 있으며, 두 가지 방법 모두 교반회수를 증가시켜 품질을 확보하는 방법으로 단주시공에도 적용할 수 있다.

이상과 같이 선단처리를 통해 품질을 확보하기 위해서는 DCM의 지지형식이 착저형인 경우 개량체 최하단이 지지층에 양호하게 착저되었는지를 판단해야 한다. 착저의 판정은 시공심도 및 현장의 토질 조건에 따라 결정되며, 교반기의 관입시간 및 부하량 등을 통해 결정된다.

3.2 환경 관리

D.C.M 시공시 고려하여야 할 환경관리에는 수질조사와 소음조사가 있다.

시험시공시 실시하는 수질조사 시험항목은 PH(수소이온농도), SS(부유물질), 탁도, 수온, 그리고 필요시 DO(용존산소량), COD(화학적 산소요구량), 투명도 조사를 실시한다.

상기 조사에는 일본 운수성 제2항만 건설국 시험공사 결과 D.C.M 공법에 의한 주변지역에 미치는 수질환경상의 영향은 무시해도 좋다는 결과를 얻었고, 국내에서도 서해안과 남해안 D.C.M 현장의 시험결과 동일한 결과를 도출하였다.

그리고 소음조사의 경우에는 D.C.M 전용선의 소리발생원이 발전기와 유압유닛인데 소음원에서 약 30M 이상 떨어지면 소음 레벨이 기준치인 85db 이하가 된다.

3.3 품질관리

시공관리를 통한 DCM 시공 후에는 설계시 결정된 품질확보 여부를 확인해야 한다. 이를 위해서는 현장확인조사를 통해 채취된 DCM 개량체 코어의 일축압축강도시험을 실시하여 설계시 목표한 강도기준에 만족하는지를 확인하고, 필요한 경우 개량체가 연속적으로 형성되어 있는지를 판단하기 위한 추가적인 조사를 수행한다.

DCM 시공 후에 개량효과를 검정하기 위해 실시

하는 확인조사시에는 물성시험 뿐만 아니라, DCM 개량체의 코어를 채취하고 일축압축강도시험을 실시하여 현장강도를 평가하여야 한다. 확인조사 위치 및 수량은 시공규모와 조사목적에 따라 결정할 수 있으며, 조사 시기는 개량체의 양생기간을 고려하여 개량 후 28일 이후에 실시하는 것이 바람직하다.

개량체의 강도확인 뿐만 아니라, 조사 과정에서 채취된 코어의 RQD나 TCR을 통해 개량체의 연속성을 확인할 수 있으며, 필요에 따라서는 BIPS(시추공내 영상촬영) 등을 수행한다.

3.4 부상토 처리방안

DCM 공사시에는 원지반 토사와 시멘트 슬러리가 혼합된 일부가 지중 내에서 상승하여 지표 부근에 일정한 두께로 형성되는데 이를 부상토라고 한다. DCM 공사에 의한 지반개량 후의 원지반 부상토량은 시공지역의 지층상태 및 DCM 개량층의 폭, 두께, 개량을 그리고 DCM공의 시공순서, 해저면 상태, DCM 공작공의 길이, 주변 기존구조물의 유무 등에 따라 다르지만, 설계시에는 일본의 「심층혼합처리공법 기술매뉴얼」에 따라 Cement Paste 주입량의 70%로 산정한다. DCM 부상토의 강도는 원지반의 토질상태 및 시멘트 배합량에 따라 영향을 받는데, 부상토 상부에서 약 40~50cm 아래의 강도가 5~20kgf/cm² 정도로 보고되고 있다. 일반적으로 부상토의 처리방법은 설계시 결정한 DCM 개량천단까지 준설·제거하는 방법, 표층부근까지 DCM 개량 후 표층부와 같이 준설하여 제거하는 방법, 그리고, 표층까지 DCM 개량 후 부상토를 제거하지 않고 그대로 기초사석을 시공하는 방법 등 세 가지로 구분할 수 있다. 부상토량을 줄이기 위해서는 물·시멘트 배합비를 낮추어 주입량을 감소시키는 방법을 채택하는 것이 바람직하며, 목표강도와와의 관련성을 염두에 두고 결정할 필요가 있다. 또한, 적극적인 부상토의 처리를 위하여 DCM 시공 직후에 발생한 부상토를 즉시 흡입처리(Suction)하는 방안이 있는데 처리심도의 제한을 받는 문제점이 있다. 마지막으로 사석제를 대체하는 방법으로 시공 전 예상되는 두께의 모래를 DCM 계획 상단에 부설하고 DCM 시공시 용기되는 부상토와 모래를 강제 교반시켜 사석제로 대체하는 방안도 생각할 수 있다.

4. DCM 공법의 향후 개선방향

4.1 설계법

일본의 경우 육상 및 해상공사에 대한 설계 매뉴얼을 별도로 제정하여 개량목적 및 형식에 맞는 설계를 수행하고 있고, 유럽의 지반공학 분야 설계는 Eurocode 7 ENV 1997-1을 따르는데, 그 중에서 DCM 설계는 prEN 14679 "Execution of special geotechnical works - Deep mixing" 을 기준으로 한다. 최근에는 일본과 유럽을 중심으로 설계법의 통합연구도 이루어지고 있다. 하지만, 국내의 경우에는 해상공사에 적용할 수 있는 일부 기준이 있지만 그마저도 특정 개량형식에 한정되어 있기 때문에 대부분의 설계가 일본의 설계 및 시공매뉴얼을 참고하고 있어 국내의 여건에 맞는 설계기준이 필요하다. 따라서, 국내조건에 맞는 설계법은 매뉴얼에 대한 자체 검증 및 최근의 해석경향을 참조하여 보완·연구할 필요가 있다.

그리고, 설계에 영향을 미치는 설계기준강도의 확립도 국내여건에 부합하도록 이루어져야 하는데 일본의 경우 실내배합강도와 현장강도와의 상호관련성에 근거하여 결정하므로 국내에서도 지반특성에 좌우되는 DCM 개량 후의 강도에 대한 객관적인 자료축적을 위해 여러 시공현장의 원지반 물성치, 사용 시멘트량, 실내배합강도, 현장강도 등에 대한 데이터의 수집·분석이 필요하다.

4.2 시공관리

DCM 시공에서 중요한 사항인 교반횟수, 고화재 토출방식, 그리고 선단처리방식 및 착저확인에 대해서는 현재 국내에서도 관심 높게 다루어지고 있지만, 이에 대한 연구성과 발표 및 확립은 아직 미진하다고 판단된다. 따라서, 교반횟수 및 고화재 토출방식은 현장강도의 확인에 따른 데이터베이스화를 통해서 국내여건에 적합한 형식을 선정할 필요가 있으며, 이로부터 시멘트의 사용량을 줄여 시공원가와 환경에의 영향을 줄이는 효과를 기대할 수 있다. 선단처리방식 및 착저확인은 DCM 기초로서의 기능에 영향을 줄 수 있고, 이에 대한 시공관리가 부족할 경우 상부구조물에 영향을 미칠 수 있다. 선단처리방식은 외국의 사례와 비교·분석하여 적합한 방식을 채택하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, 착저의 확인은 현재 여러 항목(관입저항, 모터의 토크 등)에 대해서도 향

후 장비의 시공시스템과 관련하여 과학적이고 합리적인 자동화 방식으로 개선할 필요가 있다.

4.3 품질관리

현재 사용되고 있는 DCM 장비에는 시공 중 실시간 확인을 통한 품질관리를 할 수 있는 시스템이 마련되어 운용되고 있지만, 이에 대한 지속적인 관리 및 개발이 병행되어야 한다. 그리고, 관리시스템 이외에도 국내여건에 맞는 실내배합시험 방법의 확립, 시추를 통한 확인조사를 보완할 수 있는 비파괴방식의 조사방법 도입에 대한 연구가 필요하다.

4.4 개량체의 특성규명

DCM은 시멘트(또는 석회 등)를 고화재로 사용한 화학적 고결공법으로서, 개량체를 형성하는 과정에서 고화재의 종류, 배합조건, 대상지반의 성질, 혼합방법, 양생환경 등에 의해 강도, 균질성 등의 개량효과가 영향을 받는다. 그 중에서 대상지반의 성질은 입도분포, 함수비 등의 물리적 성질과 pH, 유기물 함량 등의 화학적 성질에 따라 지역별로 다양한 특성을 가지기 때문에 지역별, 원지반 특성별로 데이터베이스를 구축할 필요가 있다. 그리고, DCM 공법은 고함수비의 연약지반에 적용하는 경우가 많기 때문에 개량체를 개량된 지반으로 취급할 때에는 전단과 압밀특성이 중요하지만, 현재는 DCM 개량체의 일축압축강도 평가에 한정되어 있기 때문에 삼축압축시험이나 압밀시험 등을 통한 관련 데이터의 축적이 필요하다. 뿐만 아니라, 실내배합시험과 현장시험과의 상관관계, 개량체의 내구성 및 장기강도특성에 대한 연구가 확대될 필요가 있으며, 시공지역의 지층상태, DCM 개량율, 공작공 길이 등에 따라 달라지는 부상토량과 강도특성에 대한 분석을 통해 향후 부상토의 처리방법 및 재활용방안에 대한 연구도 수행되어야 한다.