

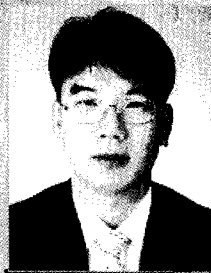
洛東江 주변의 체육센터시설물기초 軟弱地盤처리를 위한 DCMM 시공사례

The construction example of deep cement mixing method for the soil improvement of soft ground in sports center structure foundation work around the mouth of Nakdong River



글 | 曹圭永
(Cho, Kyo Yung)

- 건설안전·토목시공·토목품질시험기술사
- (주)상지엔지니어링건축사사무소 상무
- E-mail: kychope@naver.com



글 | 金振億
(Kim, Jin Eok)

- 건축사
- (주)상지엔지니어링건축사사무소 책임감리원
- E-mail: venmer@hanmail.net



글 | 鄭秉讚
(Jeong, Byeong Chan)

- 성지건설주식회사 현장대리인
- E-mail: jbc600811@naver.com

As the Deep Cement Mixing Method is composed of drilled natural soft soil structure and injected cement slurry to be mix together in it, the nature of excavated ground is influenced directly to the application of constructability. Also the nature of in situ soil is the main material, the mix design and construction work plan should be established before the investigation of soil which is performed through the whole site to confirm the soil parameter before construction. The nature of investigated soil and water level as well as should be performed accurately.

1. 개요

DCMM(Deep Cement Mixing Method, 심층혼합처리공법)은 연약지반처리를 위해 鑿孔된 토사와 주입재를 교반 혼합하여 조성함으로써 굴착지반의 성질이 직접 공법의 시공성에 큰 영향을 미치고 현 위치의 토사가 기초의 주재료로 되는 것이기 때문에 토질 조사에 의하여 시공전역에 걸쳐 토질조건을 충분히 파악한 후 배합설계 및 시공계획을 수립하여

시공하여야 하며 사전에 굴착지반의 토질 및 지하수 등의 조사가 정밀하게 수행되어야 한다. 당현장은 체육센터를 건설하기 위한 기초지반처리공사로서 토질조건은 <표 1>과같이 지층이 최상부로부터 매립층, 상부모래층, 점토층, 하부모래층, 자갈층, 연암층으로 구성되어있으며 상부모래층은 N치 4/30~8/30으로 느슨한 상태이고 중간점토층은 1/30~4/30으로 연약한 실트질 점토로 구성되어있으며 하부 층은 다시 느슨한 상태의 모래층으로 구성되어 있다.

〈표 1〉 지역별지반특성

구분	매립층	모래층1	점토층	모래층2	모래층3	자갈층	연암층
구성	자갈섞인 모래	실트질 세립질 모래	실트질 점토	세립~중립질 모래	잔자갈 섞인 중립질 모래	세립~중립 모래질 자갈	암편 및 단주상
층 후(m)	0.7~1.6	5.8~7.2	17.8~19.0	21.1~22.0	8.0~10.0	7.0~17.0	2.0
N치범위	11/30	4/30~8/30	1/30~4/30	12/30~50/19	50/24~50/9	50/11~50/3	-
상대밀도	보통 조밀	매우느슨~느슨	매우연약~연약	보통조밀~매우조밀	매우 조밀·포화	매우 조밀	-
T,C,R/R,Q,D(%)	-	-	-	-	-	-	18.0/0.0

2. 지형 및 지질과 DCMM선정

2.1. 지형 및 지질은 낙동강주변지역으로 지역의 산계로는 현장을 중심으로 근교에는 뚜렷하게 나타나지 않으며, 수계는 현장지역을 중심으로 동측으로 남해로 유입되는 낙동강이 흐르고 있다. 지질상으로는 기반암은 각섬석화강섬록암으로서 부산광역시 낙동강 일대에 가장 넓은 분포를 보이고 있다. 암은 구성광물의 입자크기나 함량비에 있어서 다양한 암상을 보여주며 비교적 큰 암체는 중립질로 유색광물의 함량도 적은 편이나 소규모 암주들은 훨씬 입자 크기가 작으며 유색광물의 함량은 많은 편이며 지질시대로는 중생대 백악기에 속한다.

〈표 2〉 DCM시공 W/C 및 CORE강도

시료량 (kg/m ²)	시멘트사용 량(kg/m ²)	W/C	흙 함수비	7일 강도	28일 강도
1,700	250	0.8:1.0	35%	22.7 kgf/cm ²	31.4 kgf/cm ²

2.2. 이러한 지반조건에서 본 신축건물의 하부기초 안정성 확보에 대하여 현장여건에 적합한 시공성 및 안정성을 확보할 수 있는 기초 및 대책공법의 검토결과 지반의 지층이 매우 연약하여 강관파일 및 PHC말뚝(SDA+직항타)을 시공할 경우 심도가 47.5m로 깊어지고 말뚝 선단의 지층의 N치가 작아 Pile의 본수 증가로 경제성에서 결여되므로 DCMM으로 시공하게 되었다.

3. 현장의 연약지반처리검토

3.1. 연약지반은 시공되는 구조물의 종류, 규모, 중요성 등에 의해 상대적으로 달라지나, 이탄이나 유기질토, 미고결점토, 실트로부터 형성되는 함수비가 높고 압축성이 크고, 지반반력이 작은 토층으로 구성된 지반으로서, 연약한 점성토 지반에 하중을 재하한 경우 지반은 압밀과 전단에 의해 침하와 측방변위를 발생시킨다. 표준관입시험을 수행시 N<4이면 연약한 점토, N<2이면 대단히 연약한 점토가 된다.

3.2. 그러나 점토지반에서 측정된 N은 점토의 굳기에 대한 판별뿐만 아니라 전단강도를 추정하는데 있어서도 극히 개략적인 추정치 밖에 제시하지 못하므로 다른 지반조사방법과 병행해야 한다. 토질조건은 이와같이 당현장에서 적용한 공사지반조사 보고서 시추주상도에 따라 연약지반으로 분류되어 이것을 기초로 하는 구조물에 대해 안전성과 침하의 문제가 발생할 수 있으므로 이에 대한 대책으로 DCMM이 채택되었다. 이 대책은 구조물의 하중의 크기, 연약지반의 전단 및 압밀특성, 진동하중에 대한 반응특성 등에 따라 달라진다.

4. DCMM 물성치에 따른 지지력산정

4.1. 지층 판단을 위해 4개소의 시추조사를 실시하여 지반분포상태 및 공학적 특성을 파악하였으며,

그 결과 지층 상태는 매립층, 모래층1, 점토층, 모래층2, 모래층3, 자갈층, 연암층의 순으로 이루어져 있으며, 각 심도별 지반특성 및 지층개요는 <표 1>과 같으며 표준관입시험 결과는 <표 3>과 같다. 기초의 지지력 검토결과 사용재료 및 허용응력은 DCM 개량체는 사용 시멘트 량에 따라 강도특성이 결정되며, 본 공사에서 기초용으로 적용한 시멘트 량 및 허용 CORE강도는 <표 2>와 같다.

4.2. DCM 착수전 현장배합을 실시하여 상기 값을 확인하였으며 현장강도 확인 후 CEMENT 주입량의 조정도 가능하였다. DCM개량 형상은 그림1과 같으며 DCM 기초 허용력 산정 과 DCM 말뚝체 재료의 허용응력 산정식은 아래와 같이,

$$Ra = \frac{fca \times Ap}{Fs} = \frac{50.0 \times 3.024}{1.0} = 151.2 = 151.2$$

$$\text{tonf/본} = 1,512\text{kN/본} \rightarrow 1,500\text{kN/본}$$

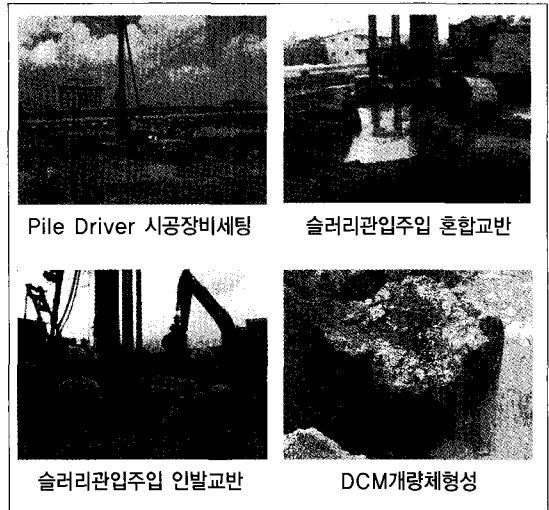
여기서, A_p : 개량체의 단면적 : 3.024m^2 , F_s : 안전율 = 1.0, fca : 개량체 허용압축응력 = $1/6Xq_{ul} = 5.0 \text{ kgf/cm}^2$ (q_{ul} : DCM 개량체의 실내 배합강도 : 30kgf/cm^2)이다.

<표 3> 표준관입시험의 실내토질시험결과

구분	심도 (m)	함수비 W(%)	비중 G	단위중량 γ	조기 관입비 e_s	ATTERBERG LIMIT			재분적		
						액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성지수 (%)	#200	2 μ	USCS
BH-2	10.0-10.8	50.16	2.719	1.699	1.402	52.0	22.3	29.7	81	33	CH

4.3. 지반의 허용 지지력 검토는 N치 25이상의 사질토 지반에 설치된 말뚝의 지지력을 표준관입시험의 N값을 이용하여 추정하였으며 주면마찰력을 무시하고 선단 지지력만으로 평가하며 Meyerhof(1976) 제안식을 적용하여 $Q_u = m \cdot N_{60} \cdot A_p = 15 \times 25 \times 3.024 = 1,134\text{tonf}$ 여기서, Q_u : 말뚝의 극한지지력(kN) A_p : 말뚝의 선단면적 : 3.024m^2 F_s : 안전율 = 1.0 N : 말뚝선단부 부근의 N값 = 25, m :15, $Q_B = \frac{Q_u}{F_s} = \frac{1,134}{3} = 378.0\text{tonf} = 3,780\text{kN}$ 여기서, F_s : 안전율 = 3.0 이며 기초의 허용지지력 산정은 기초에 적용하는

허용력은 재료의 허용지지력(1,500kN)과 지반의 허용지지력(3,780kN)중 작은값인 1,500kN/분을 적용하도록 하였다.



<사진 1> DCM 슬러리주입 및 개량체 형성

5. DCMM시공 및 감리업무 착안사항

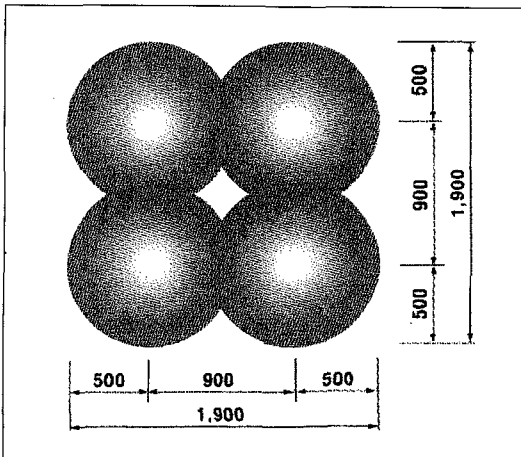
5.1. 공사 중 실제 지반상태와 상이 할 경우에는 시공심도등의 재검토와 정산 등을 협의하여야 하며 시공자는 시공에 앞서 설계도서 및 현장의 각종사항을 고려하여 공사순서, 공정, 방법 등에 대한 상세한 시공계획서를 작성하여 시공하며 DCM공법은 착공된 토사와 주입재를 교반 혼합하여 조성하여 굴착지반의 성질이 직접 공법의 시공성에 영향을 미치므로 굴착지반의 토질 및 지하수 등의 조사를 철저히 조사해야 한다.

5.2. 토질조건으로 현 위치의 토사가 기초의 주재료로 되는 것이기 때문에 토질 조사에 의하여 시공전역에 걸쳐 충분히 파악한 후 배합설계 및 시공계획을 수립하여 시공하여야 한다. DCM기초공법을 시공함에 있어서 시공기계의 전 장비 중량은 150ton이상으로 되어 접지하중은 순간부하를 포함하여 약 20tf/m²정도에 도달하기 때문에 작업 지반은 충분히 견디도록 고려하여야 한다.

5.3. 시공자는 본 작업 착수전 시험시공(개량공 Cement량 250kg/m³주입)을 실시하여 <표 5>와같은 현장코아 28일 설계기준강도(현장강도 fck=150kg/cm²)이상을 확보할 수 있는지에 대한 품질관리시험을 실시하여야 하며 DCM시공 완료 후 1분당 설계지지력이 1,500kN/본 이므로 소요의 설계지지력이 확보되는지 최소한 1개소 이상 정재하 시험을 실시하거나 현장에서 Core채취하여 일축압축강도시험을 3개소 이상을 실시하여 현장 28일 강도(f₂₈)가 15kg/cm²이상을 확보할 수 있도록 품질관리를 하여야한다.

6. DCMM의 품질확인

6.1본 시공구간에서는 N치 25이상인 모래층에 근입 함으로써 안정된 지지력을 확보하면서, 경제성에서 우수하고 시공경험이 많아 안정된 품질을 확보할 수 있는 DCM공법(Ø1,000m/mx4축)으로 기초에 적용하여 계획을 수립하였다. DCM기초 지지력 검토 결 N치 25이상의 사질토 지반에 근 입하는 것으로 <표 4>와같이 계획하였으며, 그에 따른 허용 지지력은 다음과 같이 산정하였다.



<그림 1> 개량체단면형상

<표 4> 기초용DCM개량 체의 사용시멘트량 및 허용응력도

구분	시멘트 종류	시멘트 배합량 (kg/m ³)	물 시멘트 증량비	실내 배합강도 Q _{ui} (kgf/cm ²)	허용설계 기준강도 Q _{ui} (kgf/cm ²)
기초	고로슬래그 시멘트	250	0.8:1.0	30.0	5.0

6.2.재료의 허용 지지력 : 1,500kN/본 2)지반 허용 지지력 : 3,780kN/본 ∴ 6.2.적용 허용 지지력 : 1,500kN/분으로 본 공사 건물 하부 기초 및 압밀침하 대책 검토에 따른 건축하중은 현장여건에 적합한 시공성 및 안정성을 확보할 수 있는 DCM 기초공법을 선정하여 안정성 검토를 수행한 결과 허용치에 대해 만족하는 것으로 검토되었으며 DCM시공수량은 <표 5>와같이 시공 전에 시험공(개량공 Cement량 250kg/m³주입)을 실시하여 현장Core채취 28일 설계기준강도(현장강도 fck=150kg/cm²)이상의 확보 여부를 확인토록 하고, DCM시공 완료 후 TCR(Total Core Recovery,코아회수율, 90%)등 품질시험등을 통하여 지지력을 확인하였다. DCM시공 후 설계시 결정된 품질의 확보여부를 확인해야 하며 품질확인방법으로 현장 확인 조사를 통한 개량체코어의 일축압축강도 시험 수행과 개량체가 연속적으로 형성되어 있는지 확인 하기 위한 추가 조사 수행하였다.

<표 5> DCM시공수량

사용량 (kg)	W/C (%)	설계기준강도 (kg/cm ²)	배합강도 (kg/cm ²)	공수 (공)	총시공 수량 (M)	시공 체적 (m ³)	비고
250	80	15 kgf/cm ²	30 kgf/cm ²	291 공	8421.26	0.756	단면적/공 /0.67m ²

6.3.현장시료CORE 시험 및 TCR 시험결과 <표 6>과 같이 28일 강도는 36.5kgf/cm²이 발휘되었으며, 현장 확인보링 후 TCR에 의한 심도별 일축강



〈사진 2〉 DCM 품질관리

도 시험결과 <표 6> 및 <그림 2>와같이 상중하의 3개소 시료채취 하여 압축강도 시험결과 모래층에서는 배합강도가 설계기준강도대비 증가계수가 123%를 달성했으나 중간부분은 점성토 에서는 15%로서 편차가 컸으며 이는 사질토와 점성토에서의 interlocking차이에 관계된 것으로서 설계기준 강도15kg/cm²는 적정한 것으로 확인하였다.

6.4. 실내배합과 현장 확인강도의 상관성으로 현장강도와 설계기준강도 관계에서 불량 발생률을 정의하며 확인조사로서 DCM시공후 개량효과 확인을 통해 채취한 코아의 일축압축강도 시험을 실시하는데 조사시기는 양생기간을 고려하여 개량 후 28일 이후에 실시하며 개량 체의 연속성 확인을 위해서 RQD, TCR, BIPS등을 수행하나 당현장은 TCR로 개량체에 대한 일축압축강도와 TCR을 수행하여 조사하였다.

〈표 6〉 CORE 압축강도시험결과

해성점도 (kg)	함수비 (%)	W/C(%)	재령일kgf/cm ²		
			3일	7일	28일
1,700	70	80	23.7	27.9	46.9
			16.9	21.6	45.9

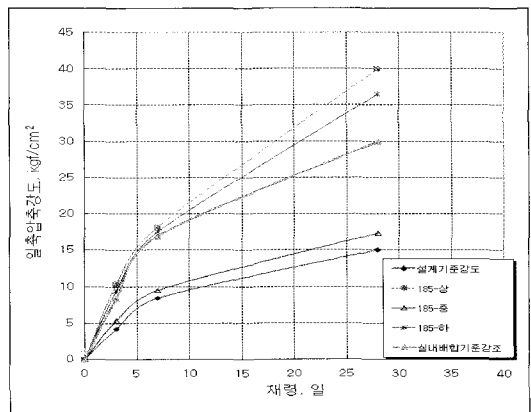
〈표 7〉 TCR CORE 압축강도시험결과

PILE NO.185-상	PILE NO.185-중	PILE NO.185-하	평균값
39.9kgf/cm ²	17.3kgf/cm ²	36.5kgf/cm ²	31.23kgf/cm ²

6.5. DCM시공관리는 대부분 관리시스템에 의해 이루어지며 주요 시공관리항목은 슬러리 배합, 굴진속도, 교반횟수, 시공위치 확보, 개량심도 확인, 착저지반의 판단 등을 실시하였으며 주요 시공관리 시스템으로 계근기록장치로서 DCM 주재료인 시멘트와 물의 배합량 기록과 심도기록장치로서 개량심도 및 시공깊이 확인과 경사계로 시공시 연직성 확보와 유압계, 하중계, 굴진속도계로 鑿底地盤의 확인을 실시하였다.

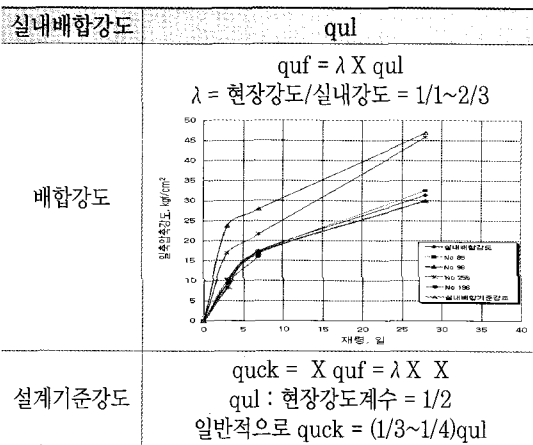
7. DCMM 설계기준

7.1. DCM설계에서 구조물 전체의 외적안정검토와 개량체 응력상태에 대한 내적안정검토가 필요하며 개량지반계에 작용하는 외력은 상재하중, 자중, 토압, 잔류수압, 파력, 선박 견인력 등을 고려하고 내적안정검토는 개량지반을 지중구조물로 간주, 내부응력이 허용응력 이내가 되도록 하며 설계기준강도는 개량체 허용응력 설정시 기준강도, 실내배합 시험의 일축압축강도를 원칙으로 한다.



〈그림 2〉 TCR에 의한 심도별 일축압축강도시험결과

7.2.개량체 단면이 국내 적용단면은 구조물 기초 용 및 자립식 벽체용으로 Ø1,000X2축 또는 Ø1,000X4축 사용하고, 엄지말뚝이 근입되는 흙막이 벽체나 차수벽체용은 Ø550X3축을 주로 사용하나 일본은 2축에서 8축까지 다양하게 적용하며 개량체 직경과 단면적이 국내에 비해 훨씬 다양하고 유럽은 한국과 일본에 비해 개량직경이 작고, 1축의 개량체가 많이 적용되는데, 이것은 고속회전에 의한 견식방법을 채택하는 것과 관련이 있다.



〈그림 3〉 설계기준강도결정

8. 개량체의 교반속도

8.1.설계기준강도의 선정상 DCM설계기준강도는 DCM공법은 개량체를 직접 확인할 수 없고, 재시공이 곤란하기 때문에 시공 중 관리가 필요하며 CORE압축강도 시험결과 <표 7>, <그림 3>과 같이 설계기준강도 15kgf/cm²을 상회하였다. 주요 시공관리 항목은 교반기 승강속도, 회전수, 고화재 토출방식, 선단처리 방식, 착저층의 관리가 중요하나 교반회수 T : 교반기의 회전수(회/m), ΣM : 교반기 총 날개수 $T = t = \sum M \times \left\{ \frac{N_d}{V_d} + \frac{N_u}{V_u} \right\}$, Nd : 하강시 날개 회전수(회/분), Nu : 승강시 날개 회전수(회/분),

Vd : 교반시 하강속도(m/분) Vu : 교반기 승강속도(m/분)으로 일본은 교반회수 350회/m이상을 관리 기준으로 하며 국내의 경우 교반기의 rpm(분당회전수)이 일정하므로 대부분 하강 및 승강속도를 조절하여 현장강도를 제어한다.

8.2.선단처리방법 및 착저확인으로 선단처리하는 선단부 시공관리에 따라 DCM개량체의 품질이 크게 좌우되며 선단처리 방법은 선단부에서의 교반속도를 관입 및 인발시의 속도보다 느리게 하는 방법과 선단부에 해당하는 길이만큼 관입 및 인발을 반복하여 교반하는 방법으로 선단처리 방법은 모두 교반회수를 증가시켜 품질을 확보하는 방법으로 단주시공에도 적용가능하며 착저확인은 DCM의 지지형식이 착저형인 경우 개량체 최하단이 지지층에 양호하게 착저 되었는지 판단이 필요하며 착저의 판정은 시공심도 및 현장의 토질조건에 따라 결정하며 교반기의 관입시간 및 부하량 등을 통해 결정한다.

9. 결론

9.1.교반회수관리 사례로 당초 시공시 인발속도는 심도에 관계없이 평균0.83m/sec로 시공하고 교반날개는 8개를 사용하였으나 상부층 모래층지반강도에 미흡하여 상부층 인발속도를 0.7m/sec로 조정하고 교반날개수를 10개로 하였으며 상부 층 교반회수는 368m/sec에서 520m/sec로 증가하였다.

9.2.TCR(Total Core Recovery,코아회수율)에 의한 심도별 일축강도 시험결과 상중하의 3개소의 시료를 채취하여 압축강도 시험결과 모래층에서는 f28 배합강도가 설계기준강도대비 증가계수가 123%를 달성했으나 점성토에서는 15%로서 편차가 컸으며 이는 사질토와 점성토에서의 interlocking^u 차이에 관계된 것으로서 설계기준강도15kg/cm²은 적절한 것으로 확인하였다.

1) 모래의 전단강도는 마찰저항과 엇물림의 2성분으로 이루어져 느슨한모래는 전단을 받을때 서로서로 활동하며 다져진모래는 활동과 회전과 엇물림이 생기게 되며 엇물림은 다져진 모래에서 영향이 큼