

홍콩의 준설, 매립 시공 및 개선 사례



홍 의
현대건설(주)
기술개발원(설계) 차장
(ehong@hded.co.kr)



심 동 현
현대건설(주)
기술개발원(설계) 부장

1. 서론

홍콩 컨테이너 터미널 공사(이하 CT-9)는 현대건설이 홍콩 컨테이너 터미널 3사(ACT, MTL, HIT)로부터 미화 5억1천만 달러에 수주하여 지난 2000년 5월 착공한 공사로, 총 2012m 규모의 컨테이너 터미널 부두를 비롯해 항로준설, 도로, 소방시설, 컨테이너 야적장, 건물, 전기 통신 시설, 오배수 시설 등 150ha 규모의 항만단지를 건설하는 공사이다.

본 공사는 지난 2003년 7월 22일 제 1부두를 준공하였으며, 2004년 11월 까지 전체 6개 부두와 배후 단지가 순차적으로 완공될 예정으로 공사 완공 후에는 연간 320만 TEU의 컨테이너 물동량을 처리하게 된다. 그림 1에 CT-9의 지정학적 위치를 보여주고 있다.

본 고는 홍콩 컨테이너 터미널 공사에 대한 개략적인 소개와 수행되었던 공사 내용 중 준설, 매립과

지반개량부분에 대하여 상술하면서 홍콩의 준설, 매립, 지반개량부분의 정부 규정 및 시방조항을 소개하고, 현대건설의 시공에 적용한 공법 그리고 품질 관리 및 공사중의 문제점과 해결과정을 소개 한다.



그림 1. CT-9의 위치

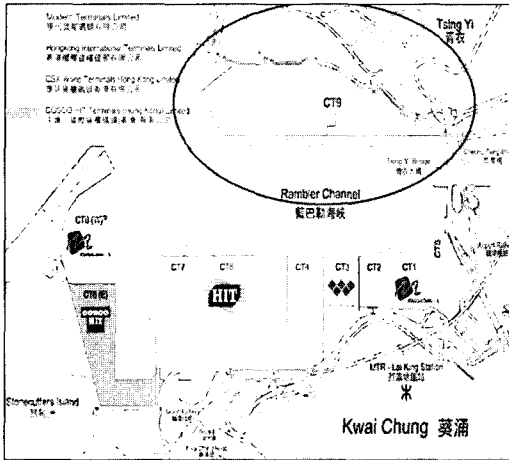


그림 2. Kwai Chung 컨테이너 터미널

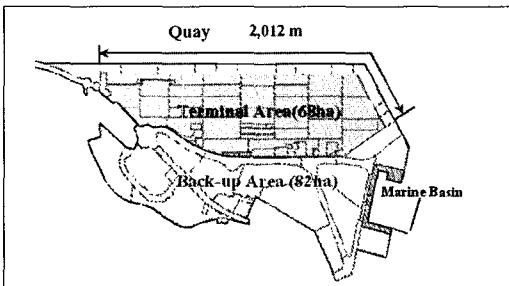


그림 3. CT-9 개황

특히 오염토 준설 부분에 대한 홍콩정부의 관리방법과 CT-9에서의 적용 예를 소개 하고자 한다.

2. 현장 개요

홍콩의 컨테이너 터미널은 구룡반도 북서쪽의 콰이쑹(Kwai Chung)지역에 그림 2에 보이는 바와 같이 현재 CT-1에서 CT-8까지 총 18개 선석을 운영 중이며, 본 CT-9은 콰이쑹 맞은편의 칭이(Tsing Yi) 섬 남동쪽 해안을 준설 매립하여 그림 3에서와 같이 총연장 2km의 신규 콘테이너 터미널 6선석과 배후

단지를 조성하는 공사이다.

주요 공종 및 물량은 먼저 부지 조성 공사가 약 24백만 m³의 준설과 33백만의 m³ 매립 그리고 2백만m³의 PBD와 6백만 m³의 심층다짐(Deep Compaction)과 여성토 등으로 구성되어 있으며, 안벽 구조물은 1906본의 강관 파일과 910본의 수동앵커(Typhoon Anchor) 및 33개 베이의 상판구조물과 아크로포드를 포함한 약 2.3백만 m³의 방파제등으로 구성된다. 또한 배후단지의 도로, 포장 및 기타 시설물등으로 구성되어 있다.

배후 단지는 68 ha의 터미널 지역과 82ha의 근린 시설 지역(Back-up Area)로 구성되며, 전체 공사구역이 124개의 단계적 준공이 요구되어 있어 전공사 기간을 통하여 매우 복잡하고 촉박한 공정관리를 요구하고 있으며, 또한 50년 기부 채납 조건부 민자발주 공사의 특성상 민간 발주처와 지정된 기술회사 그리고 정부 인허가 관청등을 포함한 대단히 복잡한 공사관리 조직체계가 형성 되어 있었다.

3. 현장 지반 조건

현장내의 지반상황은 그림 4의 대표 단면에서 보이는 바와 같이 기본적으로 해성점토, 충적층, 연암, 경암(화강암)으로 구성되어 있다.

해저면은 북서쪽에서 (-)3~(-)5mPD로 시작하여 남동쪽으로 완만한 경사를 이루며 (-) 16mPD까지 분포한다.

해성점토 역시 해안선 및 북쪽에서는 약 5m의 두께로 분포하다가 현장의 중간 및 남쪽 지역에서는 10m~20m 정도의 두께로 증가하며, 그 평균은 약 16m 정도 이다. 이는 토질분류상 소성도가 높은 연

홍콩의 준설, 매립 시공 및 개선 사례

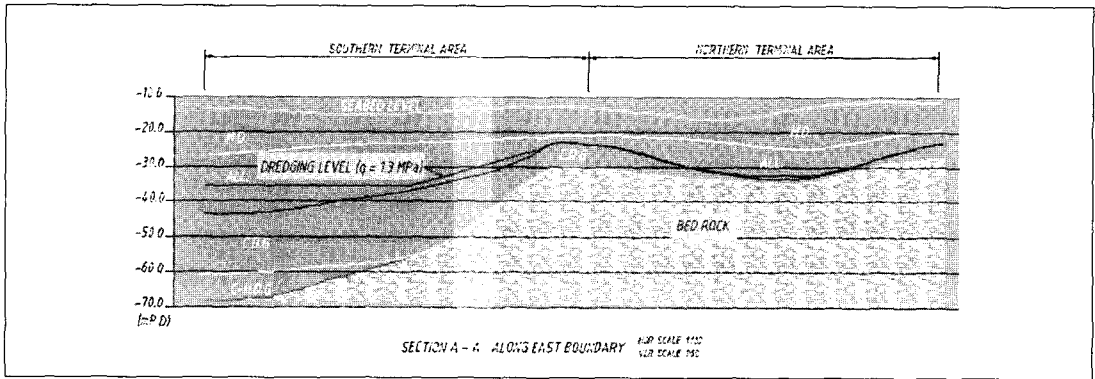


그림 4. 지반 대표 단면

약한 점토/점토질 실트로 분류되며, 곳에 따라서는 중간에 2~5m의 샌드 심이 발견되기도 한다.

해성점토층 아래에는 모래와 점토가 혼재된 총적층(alluvial layer)이 존재하며 그 두께는 0m~33m로 폭넓게 분포한다. 해성연약점토의 바로 아래에 총적점토는 해성연약점토의 바로 아래에 매우 연약-연약 상태로 존재하며 평균 두께는 0~8.5m이다. 총적모래 사이에 견고한 강도로 존재하기도 하는데 평균두께는 1.5m~11m이고, 총적 모래는 2~14m의 분포를 가진다. 모두 북쪽에서는 층이 얇으며 남쪽으로 갈수록 두꺼운 층을 구성한다.

붕적층(colluvium)은 거의 존재하지 않으며, 총적 퇴적물 하부는 풍화토 (completely decomposed granite)이며 실트질 모래나 중간소성의 모래질 실트로 분류될 수 있다. 이 아래에 화강 풍화암이 풍화도에 따라 존재한다.

이와 같은 층별 구분 및 공학적 특성은 표 1과 같다.

미널 지역은 완전준설로, 그리고 배후단지는 부분준설로 되어 있다. 터미널 지역 전역에 걸쳐 완전준설 공법을 채택한 것은 CT-9을 최단 시간내에 완공하여 운영하기를 원했던 발주처의 요구에 부응하기 위한 선택으로 알려져 있다. 그리고 컨테이너 터미널의 연속적인 운영을 위하여 유지관리로 인한 터미널 운영의 지장이 없도록 하겠다는 발주처의 강력한 의지가 초기 설계에 반영 되었기 때문이다. 이는 CT-8까지의 공사 경험과 기타 인근의 터미널 공사를 통하여 발생되었던 크고 작은 침하 관련 문제들에 대한 개선이 강력히 요구되어 점점 더 보수적인 설계와 과도한 품질관리 체계가 채택된 것으로 알려져 있다.

초기 타당성검토 보고서에 제시된 잔류침하 설계 기준은 완전준설지역은 2차 압밀을 포함하여 50~70mm, 비 준설지역은 1000mm로 제시 되어 있고, 공공도로의 잔류침하 규정은 100mm이다.

4. 준설 매립 - 기본 설계

홍콩 CT-9공사에서 준설 매립의 기본 설계는 터

5. 준설

5.1 준설 심도 결정

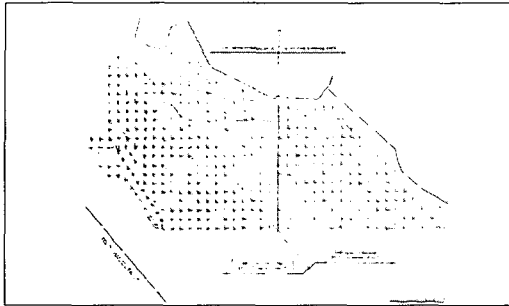


그림 5. CPT 결과

준설구역은 그림 2에 나타난 바와 같으며 준설 깊이는 CPT의 q_t (net cone resistance)의 값을 기준으로 하며 호안, 방파제 및 안벽지역은 $q_t=2.0\text{ MPa}$, 그리고 컨테이너 적하장 및 배후단지의 도로 및 배수박스 지역은 $q_t=1.3\text{ MPa}$ 를 기준으로 하고 있다.

준설 깊이 확정을 위한 상세 지반 조사는 해상 CPT (Piezocone)를 이용하였으며, Fugro의 Seacraft가 동원되었다. 조사 빈도는 호안 방파제 및 안벽지역은 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$, 기타 준설지역은 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ 를 기본으

로 하고 관입중 발생하는 과잉간극수압이 관찰되는 두께의 합이 3 m 를 넘을 경우 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ 으로 좁혀서 실시하도록 규정하고 있다. 이 규정에 의하여 실시된 해상 CPT의 물량은 약 1000여 회에 달한다.

그림 5에서 보여주는 바와 같이 현장 전체의 CPT의 결과를 검토하면, 크게 2부분으로 그 특성이 나누어짐을 알 수 있으며, 그 한부분인 북서쪽은 준설해야 할 연약층의 경계가 분명하게 나타나고 견고한 층적층의 두께가 얇은 반면, 남서쪽의 다른 부분은 준설 경계가 분명히 나타나지 않으며 견고한 층적점토층의 깊이가 또한 상당히 깊게 나타나고 있다.

위의 준설 깊이에 대한 판정기준은 책납복공항공사에서 적용하였던 호안지역 $q_t=0.68\text{ MPa}$ 과 활주로 지역을 포함한 일반매립지역의 $q_t=0.5\text{ MPa}$ 규정과 비교하면 약 2~3배의 보수적인 설계임을 볼 수 있다. 특히 일반 도로 및 컨테이너 적하장에 대한 $q_t=1.3\text{ MPa}$ 의 적용은 상당히 보수적인 규정이라 하겠다.

표 1. 지반설계상수

Parameters Used in the Design																		
Unit	Soil Description	Bulk Density (Mg/cm ³)	Moisture Content (%)	Liquid Limit %	Plastic Limit %	Plasticity Index %	C (kPa)	ψ' (Degree)	C_u (kN/m ²)	e_c	Compression Index		Re-compression Index		Coef. Of Consolidation			OCR
											Cc	Cc(1+eo)	Cr	Cr(1+eo)	C_c (m ² /yr)	C_a (m ² /yr)	C_s	
M1	CLAYSILT	1.50	87.0	58	29	29	5	24	0.9eZ	2.388	0.899	0.265	0.106	0.031	1.5	1.5	0.02	1.0
M2	Marine Sandy CLAY Sandy SILT	1.75	47.0	43	23	21	0	28	-	1.128	0.329	0.155	0.049	0.023	?	-	-	-
A1	Soil Alluvial CLAY	1.82	39.0	40	20	20	5	26	1.5eZ	1.182	0.442	0.186	0.061	0.026	1.5	1.5	-	1.0
A2	Fin to stiff Alluvial CLAY	1.90	21.0	39	21	18	0	31	<-30mPD =50 >-30mPD =80	0.558	0.121	0.077	0.019	0.012	15	-	0.003	1.5
A3	Alluvial SAND Very silty/clayey SAND	2.09	18.0	35	20	16	0	35	-	0.556	0.096	0.063	0.011	0.007	54	-	0.001	-
CDL	Colluvium	1.94	23.0	34	19	15	0	35	-	0.890	0.173	0.092	0.012	0.006	150	-	-	-
D/G	Completely Decomposed GRANITE	2.00	21.0	42	25	18	0	38	-	0.764	0.207	0.119	0.028	0.016	54	-	-	-

Note:
1.) For Sandfill $C_c=0.0025$

5.2 준설 - 시공시 문제점과 공법 개선

설계 준설량은 약 24,354,000 m³로, 준설작업은 터미널 및 배후단지 지역에 대해서는 기본적으로 그레브 준설선과 호퍼바지의 조합을 중심으로 진행하였으며, 항로 준설은 트레일러 준설선으로 진행되었다. 터미널 지역을 그레브 준설선을 이용한 준설 공법을 채택한 이유는 준설지역이 120여개의 각기 다른 단계 준공일이 설정되어 한꺼번에 준설지역을 넓게 진행할 수 없고, 국부적인 준설 매립을 실시하여야 하는 공정상의 고려사항이 있었고, 해저면 표면의 오염토 준설시 호퍼바지선 물량기준의 투기량 제한이 있어 벌킹(bulking)이 작은 공법이 요구되었으며, 셋째는 복잡한 해안선 및 부분 준설 지역이 상당부분 차지하여 트레일러 준설선의 적용이 불가하였고 또한 부분적으로 암석층을 준설할 필요가 있어서 그레브 준설선이 본 현장에서는 많은 장점을 갖는 공법으로 판단되어 적용하게 되었다.

그러나 반면, 준설 경계 심도에서 마지막 정리 작업시 준설 해저면이 흡입식 준설선을 적용한 경우에 비하여 불규칙적이고 이로 인하여 불규칙적인 요철된 해저면에 유동성 점토가 모이게 된다.

이러한 부분에 대하여 시방조항에 유동성 점토 및 해저면 교란 방지 조항 및 준설 후 주변점토의 인입의 처리에 대한 일반조항이 있으며, 검사 방법으로는 바이브로 코어링 과 dual frequency echo sounding을 적용하도록 되어 있다.

일반적으로 수심 30m 정도의 깊은 준설 심도하에서 그레브 준설을 수행할 경우 1-2m의 유동성 점토가 잔류하게 된다. 그 원인은 첫째, 심한 간만의 차이로 인한 조류의 이동이 부근의 점토를, 이미 준설되어 심도가 깊어진 지역으로 이동시키는 경우,

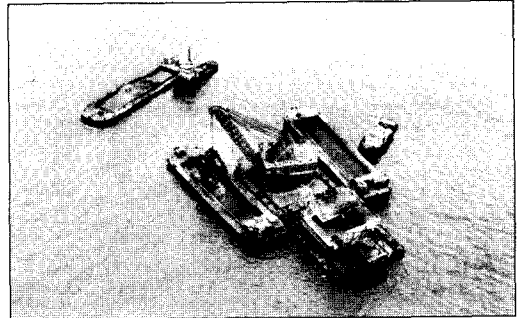


그림 6. Grab dredger, Hopper Barge

둘째는 그레브 작업시 떨어져 나간 점토 조각의 부스러기들이 잔류된 상황, 셋째는 특수한 경우로 인근 해저면에 대규모 하수 배수구가 있어 외부로 부터 유입되는 경우, 그리고 마지막으로 매립재에 상당량의 점토분이 함유되어 있을 경우 이를 펴핑하거나 레인보우잉할 경우 점토분이 물과 함께 매립지역의 경사끝 쪽으로 모이게 되는 경우 등을 생각할 수 있겠다.

CT-9의 경우 이러한 4가지의 경우가 혼합되어 3-4m의 유동성 점토가 잔류되고 있음이 나타나이에 대한 처리가 매립작업 진행에 중요한 걸림돌이 되었다. 이러한 상황은 준설 매립과정에서 항상 발생하지만, 사석재 포설 구역에서는 사석재가 이 유동성 점토를 관통하면서 포설 되기 때문에 크게 문제가 없다. 모래 매립지역에서는 매립 순서조정을 통하여 밀어내거나, 30-35m의 매립고와 surcharge를 통한 지반개량으로 처리하는 것이 일반적인 인식이고 홍콩의 다른 매립공사에서도 인정되었으나, 본 공사에서는 이에 대한 감독관의 중점 관리 및 검사가 이루어져 이 상황에 대한 대처가 필요하게 되었다. 결국 그레브를 이용한 일반 준설이후 에어리프트 준설선, 머드펌프 준설선 등을 현장 자체에서 제작하여 해저면 정리용 특수 장비로 투입하였다.

5.3 오염토 준설

5.3.1 오염토의 분류

CT-9의 준설 공종에서 특이사항이 될 수 있는 것 중의 하나는 오염토의 준설이다. 총 준설물량 약 24,770,000m³ 중 약 27%인 6,780,000m³이 오염토 (Contaminated Mud)로 분류되어 있어 준설 및 사토 과정에서 특별한 관리가 요구되었다.

홍콩 환경국(EPD; Environmental Protection Department)은 1992년 기술관보를 통하여 오염토의 분류기준을 제정하여 각종 관공사 및 민간공사의 인허가 관련 기준으로 사용하고 있다. 이 분류는 표 2와 같다.

CT-9 공사의 경우 대부분의 공사구역내의 해저면 1-4m 두께가 오염토 분류 Class B와 C에 해당되어 준설, 운반, 투기시 특별한 조치 및 주의가 요구되었다.

5.3.2 오염토 준설 관련 규정

이러한 오염토 분류 판정에 의하여 CT-9의 준설은 각종 규정에 근거한 규제 사항의 통제를 받게 되

었는데, 정부 공사 허가서 (Grant)에 규정되어 있는 준설 관련 규정들의 주요 내용은 다음과 같다.

- ① 홍콩내의 정부관리 오염토 투기장인 이스트사차오 투기장의 투기 물량은 24시간내에 16,700m³(호퍼 물량기준)를 넘지 못한다.
- ② 비오염토의 경우 월당 총준설 물량이 1,000,000 m³을 넘지 못한다(나중에 추가수질 계측을 통하여 1.5배 증가를 승인받음)
- ③ 트레일러 준설시 잉여수 배수 불가
- ④ ASMD(automatic self monitoring device)설치 의무화
- ⑤ 제 3자 수질 계측
- ⑥ 오염토를 그라브로 준설시 밀폐형 그라브 사용
- ⑦ 트레일러로 오염토 투기시 분산형 배출구 (Diffuser) 사용 및 배출량 통제

5.3.3 오염토의 투기-규정과 개선방법

정부 공사 허가서에 지정된 투기장은 이스트사차오 투기장으로서 홍콩 첵랍콕 공항 공사용 모래 채취 후 생겨난 해저 구덩이를 (-) 35.5mPD까지 추가 준설하여 만들었으며, 홍콩 정부 토목국 (CED)에서

표 2. 오염토 분류 기준

분류	구분	유의 사항
Class A	Uncontaminated Material	준설 운반 투기시 특별한 공법 필요 없음, EPD에서 요구하는 수질 기준만 만족하면 됨.
Class B	Moderately Contaminated Material	준설 운반 특별한 주의요, 투기시 오염물질의 용해(Solution) 및 재부유(Re-suspension) 최소화
Class C	Seriously Contaminated Material	준설 운반시 매우 주의요, 투기시 반드시 허가된 투기장을 이용하여야 하며, 투기된 오염토가 효과적으로 환경오염으로부터 격리 되어야 한다.

함유물에 따른 오염도 분류 기준 (dry weight ; mg/kg)

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Class A	0.0-0.9	0-49	0-54	0.0-0.7	0-34	0-64	0-149
Class B	1.0-1.4	50-79	55-64	0.8-0.9	35-39	65-74	150-199
Class C	>1.5	>80	>65	>1.0	>40	>75	>200

홍콩의 준설, 매립 시공 및 개선 사례

직접 관리하고 있다.

CED에서는 현장의 바지선 위에 관리 사무실을 설치 24시간 운영하고 있으며, 24시간의 투기 물량 제한 등을 관리하고 동시에 오염토가 일정 높이 이상에 이르면 관리 지침에 따라 해저복토를 실시하여 확산을 방지한다.

CED에서 허용하고있는 오염토의 투기 방법은 크게 두가지로 대별된다.

먼저 그레브 준설의 준설토 이동장비인 스프릿형 호퍼바지에 의한 직접 투기이다. 이는 그레브에 의한 준설시 부피팽창이 적어 스프릿형 호퍼바지로 투기할 경우 그 확산이 적어서 허용되는 방법이나, 이와 대별하여 트레일러에 의해 준설은 그 준설 특성상 부피팽창이 커서 직접투기(direct bottom dumping)시 오염토의 확산 가능성을 크므로, 반드시 분산형 배출구를 사용하도록 되어 있으며, 이 방법에 대한 구체적인 투기 규정은 다음과 같다.

- ① 배출구 심도: 해저면 1m 이내
- ② 최대 배출 속도 $1.5\text{m}/\text{sec}$
- ③ 배출율: $6,000\text{m}^3/\text{hr}$
- ④ 준설선 프로펠러 심도: (-) 7.4mPD

이 방법은 투기 지역에 미리 분산형 배출구와 배출관이 장착된 바지를 설치한 후 준설선의 배출관을 연결하여 관내의 압력, 유속, 유량등을 조절하면서

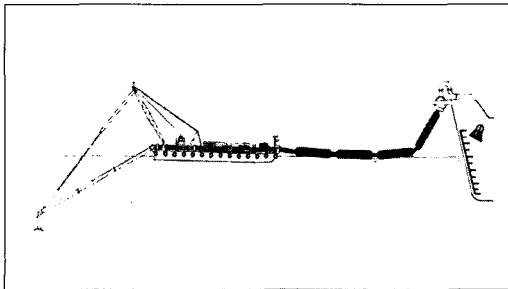


그림 7. Diffuser를 이용한 오염토 투기

배토하는 방법으로 오염토의 확산을 감소시키는 방법이다. 그림 7은 정치식 바지에 분산형 배출구가 장착되어 트레일러로부터 오염토를 배토하는 방법을 보여주는 모식도이다.

CT-9현장에서는 터미널 지역은 주로 그레브 준설을, 그리고 항로지역은 트레일러를 사용하였다.

그러므로 트레일러를 이용한 항로 준설시 분산형 배출구를 이용한 배토 공법을 적용하여야 하였다.

그러나 항만국 (Marine department)와 환경국 (EPD)간의 의견차이등 여러가지 이유로 정치식 분산형 배출구용 바지를 이용하는 방법을 대신하여 트레일러선의 준설용 흡입관을 배출관으로 이용한 배토 방법을 채택하였다.

6. 매립

6.1 시방 조건 - 설계 및 품질관리

CT-9에서는 약 $33,041,000\text{m}^3$ 의 매립이 요구되고 있다. 모래는 인근의 해저 토취장에서 상부의 점토층을 제거하고 모래를 채취하도록 되어 있으며, 이 상부 점토층의 제거가 시간 및 비용측면의 경제성과 하부 모래의 품질문제가 제기되어 이 모래와 함께 중국 본토에서 상당부분을 추가로 공급하기도 하였다.

모래에 대한 품질관리 조건은 점토/실트분 20% 이하로 규정되어 있으나, 다짐층에 대해서는 다짐이 가능하여야 한다는 조건을 추가하고 있다. 일반적인 바이브로 플로테이션을 이용한 심층다짐시 적용 가능 기준인 점토/실트분 10%를 고려할 때 문제가 예상되어, (-) 10mPD 를 기준으로 하부에는 해저 토취장의 모래를 상부는 중국 강모래로 매립하였다.

매립재의 품질관리에 대한 규정은 모래원 에서의 샘플링 및 입도분포 시험결과를 미리 제출하여 승인을 득한 뒤, 매 50,000m³마다 샘플링 및 시험을 하였다. 샘플링 조사 방법은 바이브로코어링으로 하였고 검사 두께는 6m를 넘지 않도록 되어 있다.

6.2 매립 공법

매립을 위한 시공 방법은 주로 트레일러 석션 호퍼 준설선 (TSHD, 그림 8)를 이용한 직접투기, 레인보우링, 파이프라인을 이용한 펌핑을 혼용하였으며, 여기에 펠리칸 바지를 이용하기도 하였다.

직접투기(Bottom dumping)은 TSHD가 흡입관을 통하여 취득한 모래를 선체 바닥을 열어 바로 투기하는 것으로서 적어도 15m이상의 수심이 확보 되어야 가능한 작업이어서 준설깊이가 (-)25~(-)35mPD인 CT-9에서는 무리없이 대부분의 초기 매립작업에 적용될 수 있었다.

레인보우링이란 TSHD의 선두에 장착된 토출관에서 공기 중으로 모래를 분사하여 배출하는 것으로 약 30~50m의 공기중 배송거리를 갖고 있어 해안선 가까이 모래를 배송할 경우 사용된다.

파이프라인을 이용한 펌핑은 TSHD가 접근 가능한 지점부터 배출구까지 파이프라인을 연결하여 모

래를 이동 매립하는 방법으로 주로 여성토 작업용으로 적용하였다.

펠리칸 바지는 한국에는 없는 중국의 독특한 장비로서 800~1200m³의 모래를 적재할 수 있는 중 소형 자항식 화물선박이다. 선박의 선두에 약 20m 길이의 컨베이어 벨트를 장착하여 대형 TSHD의 접근이 어려운 지역에 용이 하게 접근할 수 있고 고수위시 지반고 (+)10mPD까지 모래를 배출할 수 있는 많은 장점을 가진 장비다. 특히, 준설을 하지 않고 연약점토를 남겨두는 지역에 대하여 모래의 스프래딩 포설이 가능하여 성공적으로 적용한 바 있어, 본 장비의 한국 적용성을 검토해 볼만하다 하겠다.

7. 지반개량

CT-9에서의 대부분의 지역이 완전준설지역이므로 지반개량의 대상은 주로 모래의 다짐이며 이를 통하여 장기 크립 침하 가능성을 줄이는데 있으며 아울러 견고한 층적층의 압밀을 그 대상으로 하고 있어 여성토와 바이브로 플로테이션을 이용한 심층다짐을 적용한다. 아울러 터미널외 지역의 부분 준설과 비준설 지역은 PBD와 여성토를 이용한 연약지반 처리가 포함되어 있다. 여기서는 완전준설에 의한 완전지



그림 8. Trailer Suction Hopper Dredger

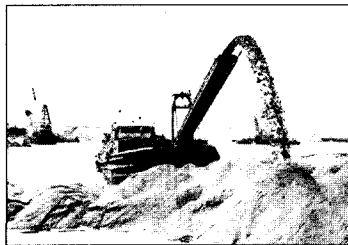
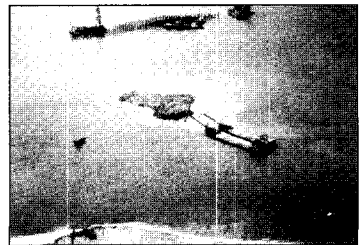


그림 9. Pelican Barge



홍콩의 준설, 매립 시공 및 개선 사례

환 공법을 적용한 경우에 대하여 상술 한다.

7.1 시방조건

지반개량에 대한 시방조건은 기본설계 사항을 시방서에 제시하여 “최소조건”이라 규정하고 부족한 부분에 대한 사항은 시공자가 추가 설계를 제시하도록 되어있다. 이 기본 규정에 대한 사항이 표 3에 나타난 바와 같다.

이 표에서는 총적층의 CPT 조사 결과 중 CPT 관입시 준설 심도 이하의 지층에서 과잉간극수압이 발생한 층을 “압축가능 층(Compressible Layer)”로 규정하고 이층을 3m, 6m, 9m,로 구분하여 여성의 높이와 기간을 규정하고 있으며, 준설 깊이에 따른 모래 매립 두께를 압축가능 층과 함께 고려하여 심층 다짐의 적용을 규정 하고 있다.

또한 지반개량의 정도를 침하속도(settlement

rate)로 규정하고 있어서, 지반개량에 대한 “최소조건”의 공사 작업량과 아울러 지반개량의 성과 요구 사항을 동시에 규정하고 있다.

공사 계약의 성격상 설계자가 상세 설계 내용을 제공하고 있지 않기 때문에 적용 안전율을 포함한 상세한 설계 과정을 파악할 수는 없었으나, 초기 검토결과 상당히 보수적인 설계로 판단 되어 “최소조건”에 추가하여 별도의 지반개량이 필요하지는 않은 것으로 판단 하였다.

7.2 여성토

도면상의 여성토의 기본 설계는 표 3의 Group 1,2,3 까지만 나타나 있었으며, 이러한 기본설계는 입찰 시 제시된 지반조사 자료를 근거로 할 때 타당성이 있었다. 이는 설계 하중이 50kPa임을 고려할 때, 1.5배의 여성토 하중을 재하하고 압밀도가 70-

표 3. 지반개량에 대한 시방조건(Minimum Requirement)

Group No	Sub Group No	Thickness (X) of Compressible Matenal Beneath Dredge Level (m)	Thickness (Y) of Sand Fill (m)	Surcharging						Deep Compaction Minimum Thickness of sand fill to be deep compacted (m)
				Minimum Pressure (kPa)	Specified Minimum Duration (Months)	Settlement Marker Type 1		Settlement Marker Type 2		
						Maximum Allowable Rate of Settlement		Maximum Allowable Rate of Settlement		
						Magnitude (mm)	Penod (Days)	Magnitude (mm)	Penod (Days)	
1	a	X≤1	Y≤32	75	3	6	28	8	14	0
	b		Y>32			6	28	10	14	13
2	a	1 < X ≤ 3	Y≤29	75	3	6	28	8	14	0
	b		Y>29			6	28	10	14	15
3	a	3 < X ≤ 6	Y≤26	111	3	5	14	11	14	0
	b		Y>26			5	14	14	14	15
4	a	6 < X ≤ 9	Y≤24	167	6	5	14	10	14	0
	b		Y>24			5	14	12	14	15
5	a	9 < X	Y≤22	167	9	5	14	8	14	0
	b		Y>22			5	14	11	14	15

80% 되면 지반개량이 충분히 달성되며, 압축가능 층 (A3, CDG)의 $C_v=30\text{--}50\text{ m}^2/\text{yr}$ 를 고려할 때 3개월이면 압밀도 70~80%달성이 전혀 문제가 없는 것으로 판단 되었다. 이러한 배경에서 Group 4 와 5는 만일의 상황에 대한 대책으로 간주 하였다.

그러나 전술한 약 1000여공의 CPT결과에 의하면 남쪽지역의 대부분이 6~9개월을 요구하는 Group 4 와 5의 범주에 들어가는 상황으로 나타나, 공사 전반의 공정에 막대한 지장을 주게 되었으며, 여성토 및 심층다짐의 물량 증가로 인한 막대한 비용의 증가가 요구 되었다. 이러한 상황은 추가 발생하는 비용은 차치하고 공기의 지연이 가장 큰 문제로 대두 되었다. 기술적으로는 지반개량의 성과에 대한 요구조건, 즉 침하속도만 만족된다면, 시방의 “최소시공조건”인 여성토의 높이와 기간은 더 이상 의미가 없을 것으로 생각되었으나, 발주처 및 감독관은 “최소시공조건”의 준수를 주장하여 Group 4, 5에 해당되는 여성토가 적용 되었다.

그러나, 실제 Group 4, 5의 여성토가 적용된 지역의 계측결과가 3~4개월시점에서 요구 침하속도를 만족하였으며, 이러한 실측 자료와 4공의 추가 지반조사 즉, 현장 CPT를 이용한 소산시험, 시추에 의한 샘플링을 통한 물성치 및 역학특성등을 상세하게 조사하여 “최소 시공조건”의 준수가 불필요함을 증명하고 여성토 재하기간의 완화를 제안하였다. 그 결과 위의 규정일부를 완화하여 9개월은 5개월로 6개월은 4개월로 하는 대안을 승인 받고 현장에 적용할 수 있었다.

7.3 심층다짐 (Deep Compaction)

모래층의 침하를 줄이기 위하여 심층다짐을 적용

하도록 규정하고 있으며, 개량 심도는 위의 표 3에 따르도록 되어 있다. 요구되는 개량 목표에 대한 시방상의 판정기준은 CPT의 q_c 값으로 그림 10의 선단 지지력과 유효 상재하중과의 관계 그래프로 되어 있으며, 제시하고 있는 공식은 식 1 과 같다.

$$q_c = \left[10.28 \times \left(\frac{\sigma_v}{100} \right)^{0.125} \right]^4 \text{ (kPa)} \quad (1)$$

이 판정식은 Shen 등 (1996)이 GEO 보고서에서 제안한 식으로, 홍콩의 대규모 매립공사 5곳의 매립재 특성을 조사하여 아래 식 2를 제안 하였고, 책략 록 매립재의 상수와 상대밀도는 70%를 적용하여 구성한 식이다.

$$D_r = C_3 + C_4 \cdot q_c^{0.28} \left(\frac{P_a}{P} \right)^{0.125} \quad (2)$$

여기서, $C_3 = -78.43$, $C_4 = 14.441$, $P_a = 100\text{kPa}$

이 식을 일반적으로 많이 사용하는 Baldi (1986)가 정규압밀 모래에 대하여 제시한 제안식 (3)과 비교한 결과, 그림 5와 같이 상대밀도 70%정도임을 확인할 수 있었다.

$$D_r = \frac{1}{C_2} \ln \left[\frac{q_c}{C_0 (\sigma_{v0}')^\alpha} \right] \quad (3)$$

여기서, $C_0 = 157$, $C_1 = 0.55$, $C_2 = 2.41$

CT-9현장에서의 적용상의 특징은 여성토위에서 심층다짐을 수행하도록 하여, 최고 높이 (+)14mPD에서 24m를 관입하여 (-)10mPD부터 (+)5.0mPD까지 15m를 다짐하였다. 품질관리를 위한 CPT는

홍공의 준설, 매립 시공 및 개선 사례

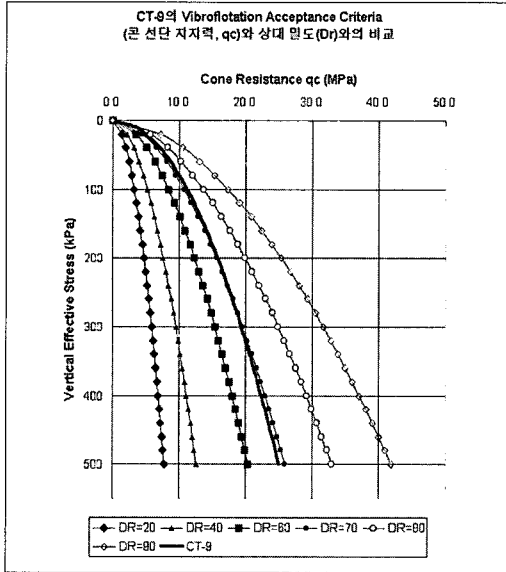


그림 10. Deep Compaction 시방 기준

2500m²당 1회를 규정하고 있다.

8. 지반개량의 성과 검토 및 토론

완전준설에 의한 완전치환공법을 채택한 CT-9 터미널 지역의 지반개량 성과는 구조물의 설계수명 동안 크립을 포함한 잔류침하가 얼마가 될 것인가 하는 점일 것으로, 모래 매립층의 장기침하특성 즉, 크립특성의 파악이 그 핵심이 될 것이다. 이 부분에 대하여 가장 먼저 완료된 북측 터미널 지역의 계측 결과를 이용하여 검토하여 본다.

이 지역의 지반조건은 모래매립층 25.6 ~ 33.0m 이고 준설바닥면의 잔류 압축가능 층은 3m 보다 작다. 지반개량의 기본설계는 해저용CPT 결과에 의하여 Group 1,과 2에 적용되는 구간으로 여성토 75kPa, 3개월 과심층다짐을 적용 하였다.

지반고(Formation Level)의 허용오차에 대한 시방규정은 (+)0mm ~ (+) 25mm 로써, 그 판정 시점을 하자보수 종료일로 규정하고 있다. 이러한 특정한 장래 시점에서의 지반고 판정규정은 잔류침하의 정확한 해석이 요구되는 규정으로서, 실제 부지조성 작업완료 시점부터 판정시점까지의 기간에 25mm 이상의 침하가 발생할 것으로 예상 된다면 실제 부지조성 작업완료 시점에서의 지반고는 그 예상 침하량만큼 올려서 설정하여야 함을 의미한다.

CT-9의 시방서는 이러한 개념을 Preset이라고 정의시공자가 계측자료에 의한 침하해석을 실시하여 Preset 값을 제안하고 감독관의 승인을 득한 후 현장에 적용토록 하고 있다.

이 Preset 제안을 위하여 육상 구조물의 설치 공사 기간 6개월과 하자보수기간 12개월을 합하여 18개월간의 잔류침하가 중점 검토되었다.

8.1 잔류침하의 예측

잔류침하 예측을 위한 방법은 일반적으로 로그법 과쌍곡선 법을 사용하며, CT-9에서 침하계는 준설 바닥면(Type-1)과 부지계획고의 1.5m 아래인 (+)3.5mPD에 설치(Type-2)하였다. 같은 지점에서 이와 같이 모래 매립재의 바닥과 설계 지반고 사이에 설치된 계측기들을 이용하면 매립 모래층의 침하량을 구할 수 있다.

대표적인 침하 그래프가 그림 11에 나타나 있다.

그림에서는 매립고 (+)5.0mPD에서 계측기가 설치되었고, 즉시 여성 작업이 수행 되었으며, 그 이후 (+)14mPD이상의 모래 적치가 생겨 나면서 일시적인 추가 여성토 하중이 발생하여 추가 침하가 발생된 것이 나타나며 마지막으로 심층다짐으로 인한 침

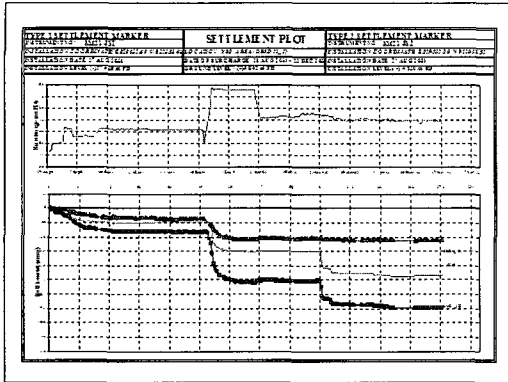


그림 11. 침하그래프

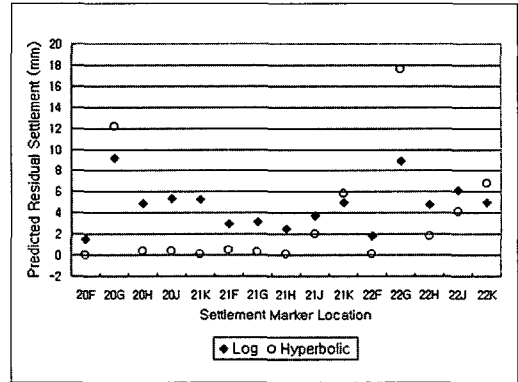


그림 12. 해석방법에 따른 Preset 차이

하가 나타나고 있다.

북 터미널의 침하계측 결과 중 최초 매립이 시작된 구간의 15개소의 결과에 대하여 침하해석을 수행하였으며, 먼저 preset의 제안을 위한 해석에서는 심층다짐과 추가 여성토의 영향을 제외한 초기 설계 여성고 부분까지의 침하경향을 분석하여 로그법과 쌍곡선법으로 시방에서 규정하는 Preset을 위한 분석을 수행하였으며 그 결과를 그림 12에 나타내었다.

이 결과에 의하면 20G와 22G의 예외적인 경우를 제외하고는 로그법이 쌍곡선법보다 큰 잔류침하 예상치를 보이고 있어 보다 보수적인 해석을 제공하고 있으나, 예상되는 모두 10mm 이내에서 예측되어, Preset를 허용 최대치인 25mm로 결정하였다.

구조물 수명기간에 대한 분석 및 Creep parameter를 구하기 위하여 4개소에 대한 구체적인 잔류침하 해석을 수행하였으며, 해석범위를 기본설계 여성토 구간과 추가 여성의 일시적인 재하영향을 받았던 구간, 그리고 심층다짐 이후의 구간으로 구분하였고 로그법만을 사용하였다. 그 결과가 그림 13에 나타나 있다.

이 결과에 의하면, 기본설계에 의한 지반개량의

결과는 약 30mm의 50년 잔류침하가 예상되며, 추가 여성토와 심층다짐에 의한 추가 지반개량작업이 수행된 이후에는 5mm의 잔류침하가 예상되는 것으로 분석되었다.

8.3지반개량 성과 검토 및 토론

잔류침하 해석 결과는 당초 타당성 검토 보고서에서 목표하였던 50~70mm의 잔류침하 예상치보다 상당히 감소하여 지반개량 성과가 성공적이었음을 보여준다.

이러한 상황을 Creep Parameter관점에서 분석하면, 당초 기본설계에서 가정한 모래매립층 $C\alpha$ 값이 0.25%이었으며, Michael S Hendy(2001)이 홍콩의 River Trade Terminal의 계측결과를 근간으로 정리 보고한 사례에서 모래층 두께가 20m 이내의 경우에 대하여 $C\alpha = 0.2\%$ 가 적당한것으로 제안하고 있으나 0.3~0.5%의 값도 함께 언급하고 있어 홍콩에서의 일반적인 $C\alpha$ 에 대한 이해는 0.25%정도라 볼 수 있겠다.

그러나 앞의 표 3에서 상대적으로 압밀침하영향

홍콩의 준설, 매립 시공 및 개선 사례

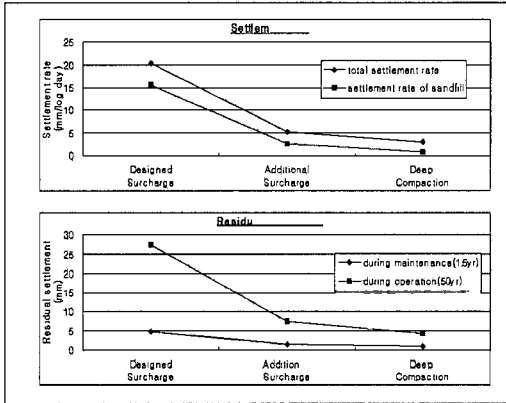


그림 13. 잔류침하 분석결과

이 적은 Group 1에 제시된 침하속도에서 유추해본 $C\alpha$ 값은 약 0.02%가 요구되고 있다. 즉, 지반개량을 통하여 매립 모래의 $C\alpha$ 값을 10배 줄이는 것을 목표로 하고 있는 것이 된다.

실제 지반개량 작업의 완료후 계측결과를 이용한 본 해석결과에 의하면 그 평균값이 심층다짐 적용 이전까지의 해석결과와 평균은 0.02%이고, 심층다짐 적용 이후 0.004%로 평가되어 목표치 대비 약 5배까지 작은 값을 보여주고 있다.

이러한 성공적인 지반개량 결과를 가져온 이유는 첫째로, 그림 13에서 보이는 바와 같이 추가 여성토 하중의 일시적인 재하 이후 $C\alpha$ 가 급격히 감소하였는데 이는 추가 여성토가 모래의 응력이력을 과압밀 상태로 만들면서 발생된 것으로 모래에서의 응력이력(P' , OCR)과 침하특성의 상관관계에서 설명할 수 있겠다.

즉, 기본설계에서 사용된 $C\alpha$ 는 홍콩의 주요 매립 공사에서 측정된 계측치를 근거로 제안된 값이나, 이 주요공사에서의 응력이력이 압축가능 층의 처리에 기준을 둔 CT-9의 응력이력과 상당한 차이가 있었을 것으로 사료된다.

Hendy(2001)등도 자신들의 자료분석에서 제안된 값의 적용범위를 모래층 두께를 20m 이내로 제한을 두었고 모래층의 두께가 증가할수록 $C\alpha$ 의 값이 감소하는 경향이 있는 것을 언급하면서 모래층의 깊이에 따른 크립 거동이 일정치 않을 것이라는 것과 이는 여성토에 의한 응력분포의 차이에서 기인됨을 언급한 바 있다.

두번째로는 심층다짐의 시방규준 또한 과도하였던 것으로 판단된다. 물론 여성토 및 모래의 응력이력이 크립 상수에 미치는 영향이 실제적으로 설계에 적용할 수 있을 정도까지 정량적인 상관관계로 확립되지 못한 현재 지반공학의 기술수준을 고려할 때, 크립침하 가능성을 줄이기 위한 목적의 공법으로는 심층다짐을 적용한 다짐을 수행하는 것은 가장 확실한 방법일 것이나, 본 분석결과를 근거로 제한적인 평가를 한다면, 단지 크립 침하 억제 목적으로 여성토와 병행하여 수행하는 심층다짐의 목표치로 상대밀도 70%는 너무 높은 수치로 판단된다.

9. 결론

현대건설이 수행하였던 홍콩 컨테이너 터미널-9의 준설, 매립 시공과 개선사례를 소개하면서 홍콩의 오염토 준설관련 사항과 지반개량의 성과를 아울러 소개 하였다. 향후 국내 유사공사와 관심있는 독자들에게 참고가 되길 바란다.

참고 문헌

1. C.K. Shen, K.M.Lee & X.S.Li (1996) "A study of

- Hydraulic Fill Performance in Hong Kong – Phase 2” GEO Report 64, GEO, CED HKSAR
2. S.T.Golbert & P.W.T.To (1992) “Review of Dredging Practive in the Netherland” Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering department , Hong Kong
 3. Baldi etal (1986) “Interpretation of CPTs and CPTUs: drained penetration of sands”. Proceedings of the Fourth International Geotechnical Seminar, Singapore, 143-156.
 4. T.Lunne, P.K.Robertson & J.J.M. Powell (1997) “Cone Penetration Testing In Geotechnical Practice” E & FN SPON
 5. Michael S Hendy, Peter P T Ching & Ian C. Muir(2001). “Creep Settlement In Reclamation Sand Fill : A Case Study”HKIE Geotechnical Division Annual Seminar.
 6. R.N. Bray, A.D Bates & J.M.Land (1997). “Dredging – A handbook for Engineers” ANOLD
 7. G.W.Plant, C.S.Covil & R.A.Hughes (1998). “Site preparation for the new Hong Kong International Airport” Thomas Telford.
 8. 심동현, 홍의 (2006), “완전준설 치환공법에 의한 컨테이너 부지조성 사례” Korean Association of Professional Engineers Soil Mechanics & Foundation Engineering 2006

2007 학술세미나 및 현장견학 안내

-연약지반기술위원회, 정보화시공기술위원회-

한국지반공학회 연약지반기술위원회와 정보화시공기술위원회에서는 다음과 같이 세미나 및 현장견학을 실시합니다. 관심있는 분들의 많은 참여 부탁드립니다.

- 주 최 : 한국지반공학회 연약지반기술위원회, 정보화시공기술위원회
- 일 시 : 2007년 8월 30일(목) 10:00 ~ 19:00
- 장 소 : 전남대 여수캠퍼스, 광양항 인근 연약지반 개량공사 현장(집합장소 및 상세 일정은 추후 알림)
- 참가비 : 정회원 20,000원 / 학생회원 10,000원 / 비회원 25,000원
- 연락처 : 한국지반공학회 T. 02-3474-4428, F. 02-3474-7379
연약지반기술위원회 위원장 남순성 011-265-5756
간 사 이명재 017-235-0209
정보화시공기술위원회 간 사 권형석 011-9948-3899