

會長辭 - 埋立, 浚深, 및 人工섬 築造에 관련되는 土質工學的 問題  
 Geotechnical Problems Related to Dredging, Reclamation and Artificial Islands

김 상 규, Sang-Kyu Kim

한국지반공학회장, Head, Korean Geotechnical Society, Seoul, Korea

동국대학교 공과대학 토목공학과 교수, Prof. Civil Engineering Dept., Dongguk University, Seoul, Korea

1. 埋立工事의 現況과 展望

한국은 인구밀도가 높고 산이 全國土의 2/3를 차지하고 있어서 이용할 수 있는 土地는 크게 제한을 받고 있다. 농업국가로 발전해왔던 우리나라는 예로부터 農耕地를 확장하는 것이 무엇보다도 중요한 국가적 사업이었다. 다행이도 우리나라 西海岸과 南海岸은 해안선의 굴곡이 심하고 水深이 얕아서 지금의 농어촌진흥공사의 모체가 된 朝鮮土地改良協會가 1938년에 설립되면서 수심이 얇은 서해안을 따라 본격적인 매립공사가 시작되었다. 그러나 초기의 매립사업은 주로 人力에 의존하였으므로 큰 규모의 공사를 할 수 없었을 뿐만 아니라 특기할 만한 매립기술도 발전되지 않았다.

1970년대에 들어서면서 정부의 工業化政策으로 대규모 산업기지의 조성이 적극적으로 검토되기 시작하였다. 그 당시 정부는 마산일대를 自由輸出地域으로 정하고 여기에 인접한 적현지역을 기계공업단지로 지정하여 비교적 큰 규모의 매립공사가 건설부에 의해 시행되었다. 이 工業團地의 조성에 있어서는 매립지반에 대한 연약지반 처리로서 페이퍼 드레인이 최초로 도입되었다.

그 이후 포항으로부터 온산, 창원, 마산, 거제에 이르는 소위 東南海岸 공업 벨트는 대부분이 연안을 따라 매립지에 조성되었으며, 공업의 눈부신 발전과 더불어 증가된 荷役量을 처리하기 위해 부산과 인천의 港口는 매립과 준설에 의해 확장되고 개발되었다. 현재 시행되고 있는 매립공사는 干拓事業, 工業단지 조성, 주거단지 조성을 위해서뿐만 아니라 쓰레기 매립, 도시기반의 조성, 空港建設에 이르기까지 다양한 목적을 가지고 수행되고 있다.

水深이 깊어지면 海岸埋立은 점점 더 어려운 기술적인 문제에 부딪혀서 경제성이 떨어지게 된다는 것을 쉽게 짐작할 수 있다. 이런 경우에는 해안에서 가까운 섬을 중심으로 또는 수심이 얇은 위치를 골라 人工的으로 섬을 건설하는 것이 더 효과적일 수 있을 것이다. 인공섬은 내륙과 격리되므로 쾌적한 住居空間이나 위락시설의 기반으로 조성될 수도 있고, 내륙에서의 환경오염을 격감시킬수 있는 適地가 될 수도 있다.

해안매립이나 인공섬 건설은 앞으로도 계속해서 展望이 밝은 대규모의 토목 프로젝트로 脚光을 받을 것으로 예상된다. 내륙에서의 적절한 주거단지나 工業단지, 부속, 지가양동, 환경오염 등으로 인해 公有水面을 매립하여 이 문제를 해결하지 않을 수 없게 될 것이기 때문이다. 우리나라에서 해안매립은 여러가지 목적에 따라 여러 기관에서 수행하고 있는데 현재 진행되고 있는 중요공사를 적으면 표 1과 같다. 이 표에 나타난 바와 같이 우리나라에서 가장 큰 규모의 매립사업은 한국토지개발공사에서 시행하고 있는 群長地 區와 농어촌진흥공사에서 시행중인 새만금지구 개발사업이라고 할 수 있다. 금년부터 한국공항관리공단에서 시행되는 영종도의 공항건설은 지반공학적 측면에서도 가장 중요하고 흥미로운 프로젝트가 될 것이다.

우리는 현재까지 많은 매립공사를 수행하면서 埋立技術을 축적해왔지만 앞으로 工事條件이 더 나빠지기 때문에 더욱 어려운 기술적 문제에 부딪히게 된다는 것을 충분히 예상할 수 있다. 오늘 "준설, 매립, 인공섬"의 논제를 가

지고 우리나라에서 최초로 매립기술에 관한 세미나를 가지고 技術情報를 교환할 수 있게 된 것을 다행으로 생각한다. 이 주제에 관해서는 2일간에 걸쳐 여러가지 문제들이 심도있게 발표되고 토의되었지만 필자는 여기서 해안매립에 관련되는 어떤 土質工學的인 문제들이 있는가를 개략적으로 살펴보고자 한다.

표 1 현재 시행중인 중요 매립공사

매립단지	위 치	개발면적 (ha)	예산 (억원)	사업기간	시행청
군산-장항 공업단지					
제1단계	전북 군산시	692	1,710	1988 - 1992	토개공
제2단계	군산, 충남서천	12,742	34,610	1992 - 2021	토개공
새만금 간척사업	전북 무안군 - 군산시	40,100	13,000	1991 - 2004	농진공
영산강(II)지구 개발	전남 목포시, 안동군	20,700	2,980	1976 - 1995	농진공
시화지구 간척사업	경기 시흥군	17,300	5,124	1985 - 1994	한수공
화옹지구 간척사업	경기 화성, 용진군	12,570	4,635	1991 - 2001	농진공
석문지구 간척사업	충남 당진군	3,740	1,807	1987 - 1993	농진공
해남지구 간척사업	전남 해남군	3,105	1,431	1985 - 1994	농진공
고흥지구 간척사업	전남 고흥군	3,100	978	1991 - 1996	농진공
신국제공항 부지조성	인천 영종도	5,617		1992 - 2020	공관공

2. 우리나라 沿岸의 堆積 特性

지질학적으로 보면 홀로세(Holocene)의 海面上昇으로 黃海가 범람하였고, 해면상승과 더불어 주로 대하천에서 운반된 미세한 입자들이 한반도의 해안을 따라 퇴적되었다. 따라서 해성토의 퇴적년대는 10,000년을 넘지 않는다. 錦江河口인 群山을 중심으로 한 서해안 일대의 海成土에 대한 X선 回折分析에 의하면 하구에서 황해쪽으로 60km에 이르기까지 粘土礦物인 Kaolinite 가 10%이상으로 조사되었다. (Geological Society of Korea, 1987). 이로 미루

어 보아 해안을 따라 퇴적된 해성토는 대부분이 연약한 점성토로 이루어졌다고 추정할 수 있다.

干拓 또는 圍地造成을 목적으로 해안을 따라 지금까지 수 많은 시추조사가 행해졌는데, 그림 1은 조사결과로부터 얻은 堆積層의 대표적인 斷面을 보인다(Kim, 1975; 김, 1987). 이 그림을 보면 해안에서 퇴적된 土層깊이는 일반적으로 25m - 30m를 넘지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러나 落東江 河口的 퇴적층의 두께는 대단히 깊어서 전체 두께가 85m나 되고 가장 아래 모래층의 두께가 60m로 조사된 바 있다. 하부의 모래층은 충격층이라고 생각되므로 아마도 해수면 상승이전의 낙동강은 깊은 계곡이었을 것으로 짐작된다.

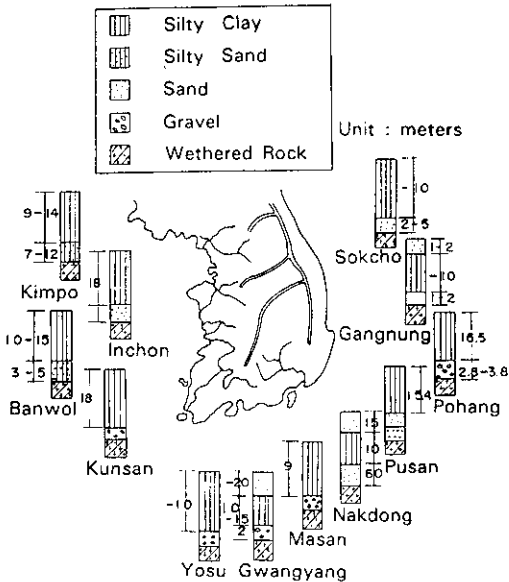


그림 1 南韓沿岸을 따라 퇴적된 土層層序

퇴적층의 層序는 해수면의 상승과 하강, 하천의 범람, 조류와 파랑의 작용 등 堆積環境과 깊이 관련된다. 그림 1의 柱狀圖를 정리하여 보면 우리나라 해안에서의 상부로부터 하부로 퇴적층의 층서는 다음의 4가지 類型으로 분류할 수 있을 것이다(그림 2).

- (1) 실트질 점토 - 실트질 모래 또는 모래질 실트 - 풍화암
- (2) 실트질 粘土 - 자갈 또는 모래 - 풍화암
- (3) 실트질 모래 - 실트질 점토 - 풍화암
- (4) 모래 - 실트질 점토 - 모래 또는 자갈 - 풍화암

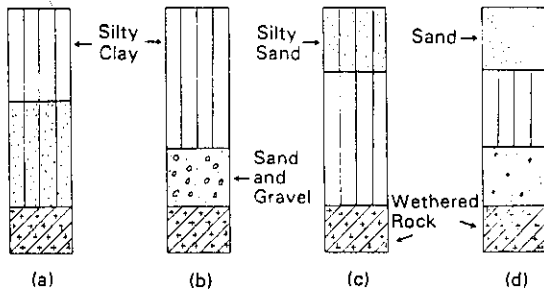


그림 2 우리나라 연안의 堆積特性的 4가지 類型

첫째 유형의 퇴적층은 김포 반월, 인천, 시화, 옥구, 군산, 목포 등 주로 서해안에 분포되어 있으며 우리나라 海成土의 대표적인 유형이다. 해수면의

상승이전에는 남해안과 서해안의 大河川은 지금의 해안에서 상당히 멀리까지 뻗어 있었을 것이므로 구하상을 따라 모래 및 자갈의 충격층이 존재하리라는 것을 충분히 짐작할 수 있다. 따라서 風化岩 위에 퇴적된 제2유형의 자갈 또는 모래층은 해수위의 상승 이전 구하도에 퇴적된 충격층이라고 생각된다. 인천 김포 지방의 干瀾地는 제3유형과 같은 퇴적특성을 나타낸다. 상부에 퇴적된 실트질 모래층은 주로 파랑과 큰 潮差로 인한 潮流에 의해 운반된 해성 퇴적층으로 추측된다. 섬진강 하구와 낙동강 하구에서 나타나는 퇴적특성은 제4의 유형을 보인다. 해수면의 상승이전 구하도를 따라 퇴적된 모래 또는 자갈층위에 해수면 상승이후 해성점토층이 퇴적되었고, 그 위에 두꺼운 모래층이 다시 퇴적되었다. 큰 하천을 통해 운반되는 堆積物의 양과 속도가 크면 이와 같이 粒子가 굵은 충격층의 퇴적물이 상부에 존재하게 될 것이다.

이상에서 언급한 퇴적층으로부터 관찰해보면 기초지반이 될 수 있는 상부의 퇴적층은 연약한 점성토 또는 느슨한 사질토로 형성되었으므로 이 위에 매립되는 지반은 과대한 沈下가 예상될 수 있고, 護岸 또는 防潮堤가 이 층에 놓일 때에는 지지력과 활동의 문제가 발생할 수 있다. 또한 낙동강하구와 섬진강 하구에는 淤深土(hydraulic fill)에 이용할 수 있는 충분한 모래가 있으나, 여기를 벗어나면 모래성분이 대단히 부족하다는 것도 아울러 짐작할 수 있다.

### 3. 埋立, 淤深을 위한 지반조사

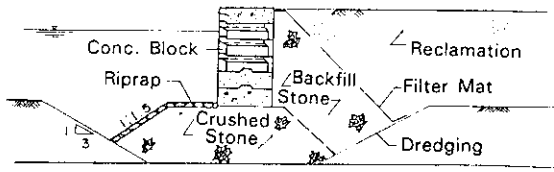
매립과 준설공사를 위해서 행해지는 지반조사는 대부분이 海上에서 행해진다. 해상에서의 試錐作業은 육상에 비해서 작업이 어렵고 많은 비용이 소요된다. 다시 말하면, 해상에서는 시추작업대를 물위에 설치하고 시추작업은 수중을 통해서 수행되어야 하며, 시추작업대가 해류, 파랑, 조차 등에 의해 흔들리지 않고 고정되어야 한다. 태풍이 자주 내습하고 조차가 큰 남해안과 서해안에서는 적절한 시추장비에 의한 作業이 어렵고 이러한 자연조건때문에 작업기간도 극히 제한을 받는다.

이러한 문제들을 극복하기 위해 오일 천공 작업대(oil drilling platform), 시추선 또는 작업대를 바다에 띄우고 다리를 내려 고정시키는 着地型 試錐作業臺 또는 작업대(self-elevated platform, SEP; jack-up platform), 시추를 목적으로 하는 천공탑(drilling tower), 육지로부터 작업위치까지 비계를 만들어가는 비계작업대(scaffold stage) 등이 외국에서는 효과적으로 사용되고 있다(GCO, 1987; Okusa, 1979). 우리나라에서는 새만금 防潮堤를 위한 시추조사시 SEP을 사용하여 시추한 경연이 있다. 이러한 시추장비는 수심이 깊은 경우에 바람직하나, 수심이 얕거나 간석지와 같은 지반조사시에는 바지를 집지시켜 干潮때만 가능한 간단한 장비도 개발할 수 있을 것이다.

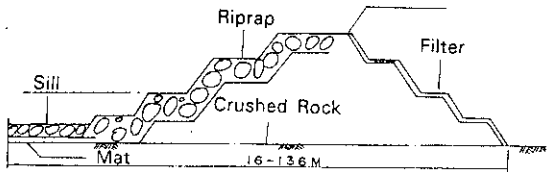
시추조사시에는 표준관입시험, 베인시험, 콘 시험 등의 현장시험을 시추와 병행하여 시행할 수 있고, 가장 보편적으로 행하고 있는 시험은 표준관입시험이다. 이따금 Dutch cone도 사용되지만 보편화되어 있지 않는 것 같다. 외국에서는 電子式 콘 관입시험기(electrical cone penetrometer)가 개발되어 현장조사시 많이 이용하고 있다. 특히 최근에 개발된 피조콘(piezokon)은 전자식 콘내에 간극수압 트랜스듀서가 있어서 지층내의 샌드시임(sand seam)이나 실트시임의 발견이 쉬워 현장조사를 위한 적절한 장비라고 생각되지만 우리나라에서는 아직 이용되고 있는 것 같지 않다.

### 4. 防潮堤의 設計와 施工上的 安定性問題

해안매립은 두가지 방식으로 수행된다. 첫째는 호안을 축소하여 매립하는 것이고, 둘째는 방조제를 축조한 다음 매립을 하거나 淡水湖를 만드는 것이다. 호안은 파랑 및 조류에 의한 매립토사의 流失防止 및 洗掘防止를 위해 매립에 앞서 축조하며 호안의 정상은 매립된 지표면과 일치되게 한다. 호안의 형식은 여러가지 있지만 매립해안을 항구로 이용하고자 하는 경우에는 直立式으로 하고 그렇지 않은 경우에는 傾斜式으로 한다. 호안의 기초가 연약할 때에는 준설을 한 다음 양질의 粒狀土로 치환하고 호안을 축조하는 방법이 일반적으로 시행되고 있다(그림 3).



(a)



(b)

그림 3 호안의 대표적 단면 (a)직립형 (b)경사형(광양재철소 부지 호안)

防潮堤는水深이 깊은 곳에 背面의 지표면보다 높게 축조하여 외해로 부터 오는 파랑을 막는 한편, 홍수위의 상승으로 내수면이 해수면보다 높을 때에는 水門을 통해 외해로 배수시킨다. 따라서 방조제는 수심이 비교적 깊은 곳에 축조되며, 방조제의 높이가 15m이상 되는 것도 많아 (새만금 방조제 최대높이 36m) 대담에 포함되기도 한다. 방조제의 기능은 차수를 목적으로 하는 지상에 건설되는 흙담과 동일하지만, 이들이 水中에서 시공되기에 지상에서 처럼 철저한 品質管理를 할 수 없다. 또한 이 방조제들이 연약지 반상에 놓여 있다면 여러가지 토질역학적 문제를 발생시킨다.

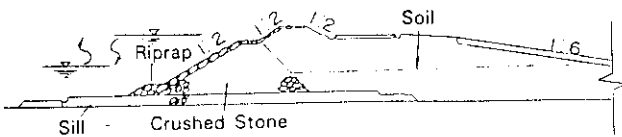


그림 4 방조제의 대표적 단면

다우기 우리나라 西海岸에 건설되는 방조제는 인천지방에서는 潮差가 10m나 되고 남해안에서도 4 - 5m나 되기때문에 방조제 건설에 관한 한 세계에서 가장 어려운 여건에 있다고 할 수 있을 것이다. 여기서 방조제의 安定性에 관해 어떤 문제들이 고려되어야 하는가를 살펴보기로 한다.

#### 4.1 堤體外力에 대한 안정성

방조제에 작용하는 중요한 외력은 조위, 파랑, 및 지진이다. 이 외력들은 기상학, 해양공학, 및 지진공학에 속하는 분야이므로 토질기술자가 깊이 간여할 수 있는 범위를 넘는다. 방조제나 호안의 높이는 設計高潮位와 設計波를 근거로 하여 결정된다. 토질기술자는 결정된 방조제와 호안단면에 대해서 활동, 전도, 지반의 지지력 등에 대한 안정성을 검토해야 한다.

#### 4.2 기초지반의 支持力과 제체의 滑動

우리나라에서 防潮堤를 축조할 때의 慣行을 보면, 먼저 床固石을 넓게 칸 다음 계획고에 도달할 때까지 사석을 계속적으로 투기하여 먼저 捨石堤를 만들고 그 다음에 내해쪽에 土砂를 추가로 투기하여 전단면을 완성시킨다(그림 4 참조). 사석제를 축조할 때 만일 基礎地盤이 연약하여 사석의 무게를 지지하지 못한다면 기초지반은 파괴된다. 기초지반의 지지력이 충분하지 못하다고 판단되면 지반개량을 하거나 연약토를 양질의 흙으로 치환해야 하나 경제적인 이유때문에 이러한 改良工法을 잘 적용하지 않고 과중한 사석의 중량에 의해 연약토가 배제되는 방법을 쓰고 있다. 이것을 強制置換工法이라고 말한다.

사석제의 하중이 증가함에 따라 기초지반에 가해지는 응력이 증가하면 마침

내 기초지반은 極限支持力에 이르게 된다. 이때의 파괴형상은 얇은 기초의 파괴시의 거동에서 나타나는 바와 같이 어떤 면을 따라 지반이 전단되고 전단된 흙은 횡방향으로 變位를 일으키면서 융기된다. Hough(1938)는 지반파괴 후의 변위를 알기 위해 모형모델을 만들어 荷重을 90lb에서 300lb까지 증가시키면서 파괴형상을 관찰하였다(그림 5). 이 그림에서 보는 바와 같이 하중의 증가에 따라 침하가 계속되면서 양쪽의 隆起量도 계속적으로 증가한다. 융기량의 증가는 上載荷重(surcharge)의 증가를 의미하므로 이에 상응하여 극한지지력도 증가하게 되어 평형이 유지될 수 있을 것이다. 그러나 이때의 지지력에 대한 안전율은 항상 1이라는 것을 유의해야 한다.

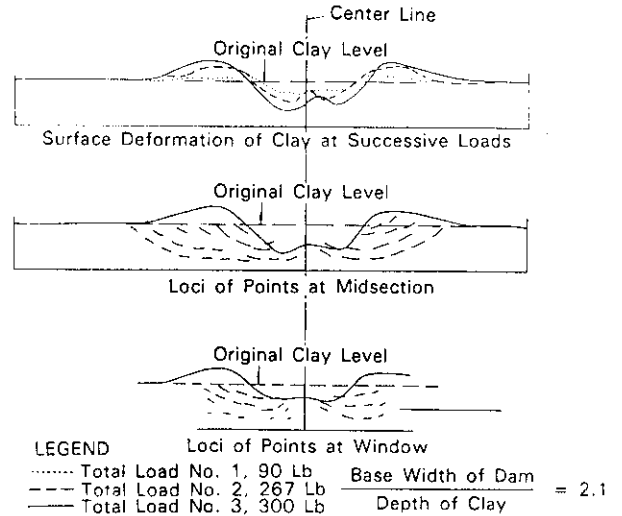


그림 5 지반파괴가 발생한 후의 變形特性을 보이는 模型試驗

만일, 융기가 더 이상 일어나지 않는 상태에서 하중의 증가가 있었다면 堤體는 滑動을 시작할 것이고 활동되는 재료는 멀리까지 운반될 것이다. Hough의 모형시험에서는 이 段階까지 시험을 하지 않았지만 실제로는 강제치환공법을 적용하였을때 이러한 경우를 많이 경험하였으며 거의 완성된 방조제가 일시에 水浸된 경우도 있다. 수심이 깊어지면 방조제의 높이가 증가하게 되므로 이 공법에 의한 방조제의 건설은 한계에 부딪히게 될 것이라는 것을 충분히 예상할 수 있다.

현재까지 많은 방조제 공사를 시행하면서 이 공법으로 성공한 事例도 대단히 많다. 이 공법이 성공할 수 있었던 이유는 방조제 축조이후 더 이상의 應力增加要因이 없었으며 기초지반은 압밀이 일어나서 전단강도가 증가되었기 때문이다. 그러나 이 공법으로서는 完工直後의 안전성을 확실히 보장할 수 없을 뿐더러 완성된 방조제는 당연히 예상되는 바와 같이 균열과 부동침하 등의 문제가 생긴다. 기초지반의 개량 없이 시공한 방조제에 대해 농진공(1984)에서 1983년부터 1984년까지 2개년에 걸쳐 조사한 침하기록은 표 2와 같다. 이 표에서 보는 바와 같이 築造後 수년동안에 상당한 부동침하가 발생하였다는 것을 알 수 있다.

표2 防潮堤別 最大沈下量(m)

방조제	제고(m)	완공년도	침하량 (m)*	
			제정부	축항부
아산	17	1973	0.35	0.39
남양	35	1973	0.28	0.27
삼교천	18	1979	0.30	0.21
영산강	20	1982	0.34	0.50
대불	19	1981	0.25	0.38

\* 위의 침하량은 全區域中 가장 큰 값임

#### 4.3 파이핑 現象

外海와 內海사이에서 수두차가 있으면 제체내 또는 제체 기초지반을 통해서 침투가 발생한다. 서해안에서와 같이 조차가 클때에는 시간에 따라 수두가 반복적으로 변하며, 또한 침투가 발생하는 방향이 외해에서 내해로 뿐만 아니라 내해에서 외해쪽으로도 발생한다. 이때 방조제의 안정을 검토하는데 가장 중요한 일은 파이핑의 가능성이다.

파이핑의 형태는 다음과 같이 두가지로 나눌 수 있다.

- 1) 内部浸蝕(internal erosion)
- 2) 逆方向浸蝕(regressive erosion)

여기서 전자는 침투가 발생할 때 새립자가 유실되어 침투의 집중을 초래하면서 전체적인 침식으로 발전하는 것이고, 후자는 浸透水力(seepage force)이 커서 모래를 상향으로 운반하면서 공동이 유선의 방향과 반대로 진행되는 침투현상이다. 물론 이 두가지 현상은 엄격히 구별되지 않으며, 복합적으로 발생하는 경우도 있다.

역방향침식에 대한 파이핑의 解析方法은 Terzaghi가 처음으로 제안하였다. 그는 流線網을 그려 상향의 침투압력을 구하고 이 압력이 흙의 무게를 초과하면 파이핑이 발생하는 것으로 생각하였다. 이 방법은 널밭쪽에 대한 파이핑 현상을 검토할 때 실제로 잘 적용이 될 수 있으나, 내부침식에 대해서는 적용할 수가 없다.

Lane(1935)은 流線이 구조물 아래 지반을 통하여는 최소거리와 水頭差의 비를 크리프 비(weighted creep ratio)로 정의하고 흙의 종류에 따라 경험적인 安全基準을 정하였다. 실제로 이 기준은 우리나라에서 방조제를 설계할 때 慣行的으로 사용하는 방법이다. 그러나 이것은 콘크리트 댐과 같이 구조물의 기초지반만을 통해 침투가 발생하는 경우에 대한 것이므로 방조제에 적용할 때에는 무리가 따른다.

Schmieder 등(1975)은 滲출을 통과하는 浸透水의 유속이 土粒子를 유동하게 하는 한계치를 정하여 파이핑이 일어나는 현상을 해석한 방법을 제안하였다. 유동하는 흙의 단위중량이 대표적인 값을 가질 때 限界流速  $V_{lim}$ 의 실용기준을 그는 다음과 같이 간단히 표시하였다.

$$V_{lim} = 5 \times 10^{-2} K^{1/4} \quad (1)$$

여기서 K는 투수계수이다. 실제로 제체를 유과하는 침투수의 유속은 數値解析 등으로 구한 유선망으로부터 얻을 수 있을것이다.

방조제에 있어서는 수위가 주기적으로 변화하는 非定常흐름(transient flow)이 발생할 뿐만 아니라 飽和領域으로부터 非飽和領域으로 또는 그 반대의 흐름도 발생한다. 농진공(1990)은 새단급 방조제의 대표적인 단면에 대하여 해수위면의 시간적인 변화와 비포화부분을 포함한 침투를 고려하여(transient seepage analysis for saturated-unsaturated soil) 침투해석을 하고, 이 해석에서 얻어진 제체내 유속을 식 (1)과 비교하여 파이핑의 가능성을 검토한 바 있다. 이 해석에서 얻어진 結論은 방조제 內側斜面보다 바다쪽에 접한 사석비탈면 끝지점과 기초지반 保護工의 관입부분에서 파이핑이 취약하다는 것이었다. 따라서 방조제와 같이 여러가지 재료로 형성되는 경우에는 방조제 내부에서도 침식이 발생하여 파이핑으로 발전될 수 있다는 것을 암시하고 있다.

유속에 의한 입자의 流動은 입자의 크기에 관계될 뿐만 아니라 다른 요인도 있을 수 있다. 특히 粘土粒子의 유동은 입자간의 결합 및 분산상태에 따라 현저한 차이를 보일것이라는 것을 짐작할 수 있다. Arulanadan(1975, 1978)은 실험적으로 전단응력과 연계시켜 점토의 침투특성을 限界剪斷應力으로 해석하여 파이핑을 해석하는 방법을 제안하였다. 그러나 이 방법은 실용하는데 어려움이 따른다.

#### 4.4 液狀化現象

방조제가 실트 또는 사질토 지반에 놓이거나 제체가 느슨한 砂質土로 형성되는 경우에는 액상화현상이 발생될 우려가 있다. 액상화현상은 시공중은 물론 시공이후의 오랜 기간에 걸쳐 地震과 파랑 등의 動荷重에 의해 유발된다. 우리나라에서 방조제 설계시 적용하였던 地震係數는 인정하지 않으나, 그동안의 예를 보면 영산강 2단계 하구쪽은 0.10g를 적용하였고 금강하구쪽에 대해

서는 0.12g를 적용하였다.

액상화에 대한 재래의 概念은 대단히 단순하다. 즉 포화된 사질토에 갑자기 충격이 가해질때 間隙水壓이 발생하면 유효응력의 원리에 의해 유효응력이 0이 될 수 있으므로 이때 그 흙은 전단응력을 완전히 잃는다. 이와 같은 간극수압의 급격한 증가현상은 변형시 체적이 減少하는 느슨한 사질토에서만 가능하다. 그러나 Seed and Lee(1966), Castro(1975) 등의 연구로부터 액상화 현상은 촘촘한 粗粒土에서도 발생할 수 있다는 사실을 알게 되었다. 즉, 액상화 현상은 反復動荷重에 의하여 발생하는 전단응력이 사질토의 반복전단 강도보다 클때 발생하며, 이 때에는 유효응력이 꼭 0이 아닐때에도 가능하다 는 것이다.

이와 같은 액상화의 개념으로부터 이에 대한 안전율은 다음과 같이 정의될 수 있다. 즉, 對象材料에 대한 동역학 시험을 하여 반복회수 n에서 액상화를 일으키는데 필요한 평균전단강도를 구하고 이것을 동하중에 의해 발생하는 전단응력으로 나눈다. 有效上載荷重을 포함하여 이것을 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$F_s = \frac{(\tau / \sigma)_i}{(\tau / \sigma)_d} \quad (2)$$

여기서,  $(\tau / \sigma)_d$  : 동가반복전단응력비(cyclic shear stress ratio)  
 $(\tau / \sigma)_i$  : 반복전단강도비(cyclic shear strength ratio)

等價反復剪斷應力比는 동하중에 의해 지반내에 발생된 불규칙전단응력을 동가의 규칙적인 전단응력으로 환산한 값이며 경험 공식 또는 지반응답해석으로 결정할 수 있다. 반복전단강도비는 표준관입시험치 N값으로 추정하거나 진동시험에 의해 결정된다. Seed and Idriss(1971)는 地震加速度와 N값을 근거로 한 경험공식을 써서 액상화를 간단히 평가할 수 있는 간편법을 제안하였다. 상세한 해석을 위해서는 유한요소해석에 의한 電算프로그램을 이용할 수 있으나 입력하는 자료를 얻기 위해서는 현장시험을 포함하여 여러 구성재료에 대한 실내 동적시험으로부터 얻은 결과가 요구된다. 상세한 해석을 하였다 하더라도 입력자료가 정확하지 않으면 해석결과의 신뢰성이 떨어진다 는 것은 두말 할 필요가 없다.

#### 4.5 最終締切

방조제의 축조는 일반적으로 兩岸으로부터 진행되고 마지막에 양쪽의 방조제를 연결시킨다. 방조제의 축조가 중앙으로 진행되면서 내수면과 외해의 수위차가 점점 커지다가 최종체질시에 최대가 되므로 그 부근에서 유속이 빨라져서 바닥에서는 새굴이 발생하며 이미 축조된 방조제의 先端을 침식시킨다. 더우기 우리나라와 같이 조차가 큰 경우에는 조위의 변화에 따라 유속이 순간적으로 변화하므로 방조제 축조의 성공여부는 최종체질에 달려 있다고 해도 과언이 아니다.

Agema(1974)는 최종체질을 할 때 고려사항으로서 (1) 潮汐資料, 파랑, 수문학적 영향, 하천유출과 같은 수리학적 자료의 획득을 위한 축조 (2) 최종체질구간에 대한 자세한 지반조사와 부하하는 재료의 조사 (3) 퇴적이나 새굴로 인해 해안선의 변화를 예견할 수 있는 形態學的 자료 (4) 풍향, 풍속, 빈도와 같은 氣象學的 자료 (5) 모델 시험 등을 들고 있다. 위에 적은 사항들을 충분히 고려하여 시공에 반영하였을 때 최종체질은 성공할 수 있을 것이다.

시공방법은 急造施工과 완속시공의 두가지 방법을 생각할 수 있으나 우리나라에서는 조류의 유속이 커서 양쪽에서 사석을 투기하는 漸縮式 工法(한국토지개발공사, 1990)으로 급하게 시공하는 방법이 보편적으로 행해지고 있다. 완속시공이 가능한 곳에서는 케이슨을 둔다든가 기타 여러가지 漸高式 工法이 가능할 것이다. 특별한 경우로서 瓏山防灘堤는 폐선막으로 체질구간을 막은 다음 사석을 투기하여 체질하였다.

5. 公有水面 埋立에 관련되는 土質力學的 問題

5.1 埋立地盤改良

방조제와 호안의 기초는 물론 매립되는 기초지반은 연약하므로 일반적으로 지반개량이 요구된다. 지반개량 공법은 프리로딩(preloading) 공법을 비롯하여 深層混合工法에 이르기까지 다양하므로 어떤 공법이 가장 효과적이고 경제적인가 하는 것은 개량지역의 지반공학적 특성뿐만 아니라 지반개량에 필요한 재료와 장비의 확보 가능성, 개량기술, 환경적 요인, 경제성 등 수많은 因子에 의해 좌우된다. 우리나라에서 일반적으로 많이 사용되고 있는 개량공법은 샌드 드레인 공법과 페이퍼 드레인 공법이고 최근에는 동다짐공법도 널리 사용되고 있다.

활발한 建設工事때문에 모래의 수요가 급증하여 샌드 드레인에 사용하는 모래는 점점 품귀해지고 있다. 더우기 매립현장 근처에서 모래를 쉽게 구할 수 없는 경우에는 샌드 드레인에 의한 지반개량 비용이 과다해진다. 이러한 문제 때문에 한국도로공사에서는 채석장에서 대량으로 생산되는 石粉으로 모래를 대체하여 시험시공을 하고 그 효과를 연구중에 있다.

페이퍼 드레인에 사용되는 드레인 보드는 세계적으로 여러 종류가 생산되고 있으며(Hansbo, 1987), 오래전부터 國産品도 개발되어 사용되고 있다. 드레인 보드는 배수되는 단면이 충분히 크지 못하므로 웰 레지스턴스(well resistance)의 문제가 있다. 최근에는 이 문제를 극복하기 위하여 동근모양의 드레인 보드가 개발되었다.

대규모의 지반개량공법은 광양만의 製鐵園地에서 행하여졌는데 여기서는 모래다짐말뚝과 모래말뚝이 사용되었다. 광양만의 연약지반 획적층서는 상부층에 모래층이 두껍게 놓여 있고 그 아래 연약한 실트층이 있어서 上部層을 뚫기 위해 모래다짐말뚝이 사용되었다(포항종합제철, 1990).

5.2 波濼盛土

매립에 대한 우리나라에서의 관행은 육지에서 土取場을 개발하고 여기로부터 방조제축측에 필요한 사석과 매립지에 소요되는 土砂가 공급된다. 그러나 매립공사가 활발해짐에 따라 육지에서 이용할 수 있는 토사는 점점 더 品貴해질 것으로 전망되므로 준설성토에 의한 매립방법의 개발이 앞으로 중요한 연구과제가 될 것으로 보인다.

준설성토에 있어서는 준설되는 재료의 粒度가 적절하지 않으면 안된다. 우리나라의 해안에서 획적된 흙은 대하천의 河口를 제외하고서는 점토 또는 실트가 대부분이고 모래성분의 상대적인 비율이 작기때문에 매립지에 인접하여 획적된 적절한 재료의 발견이 어렵다. 모래가 품귀한 경우에는 싱가포르에서 시험시공을 한 바 있는 얇은 모래층을 점토층사이에 두는 소위 샌드위치 공법(Lee 등, 1987)으로 시공할 수도 있다. 이 공법은 이론적으로 보면 연약한 埋立粘土의 암밀을 촉진시키면서 점성토를 이용할 수 있는 획기적인 아이디어이기는 하지만 경제적인 문제가 있는 것 같다.

준설성토는 긴 파이프라인을 통해서 운반된다. 따라서 파이프라인 끝에서 排出되는 입자는 굵거나 멀리갈 수록 가늘어진다. 이와 같이 分級되는 현상을 이용하여 시공관리를 잘하면 그림 6에 보인 바와 같은 준설성토에 의한 土質構造物을 축조할 수 있다(Morgenstern and Kupper, 1988). 준설성토에 관해서는 미국토목학회 발행의 준설성토 구조물(Van Zyl and Steven, 1988)이 좋은 참고문헌이 될 수 있을 것이다.

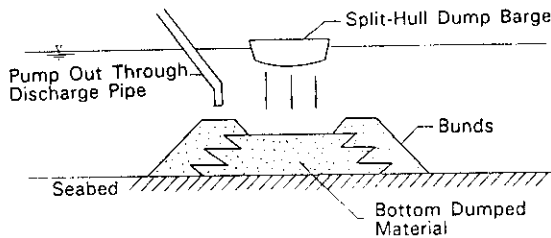


그림 6 준설성토에 의한 토질구조물의 축조

5.3 試驗施工

대규모의 토질공학의 프로젝트를 수행하는데 있어서 기술적으로 확신을 가질 수 있는 방법은 試驗施工을 하는 것이다. 시험시공을 성공적으로 수행했다면 토질구조물의 안정성에 대해서 확신을 가질뿐만 아니라 暴動을 예측할 수가 있으므로 특히 연약지반 개량을 위해서는 시험시공이 요구된다. 시험시공을 하면 가장 효과적인 개량공법을 실제의 거동을 근거로 해서 결정할 수가 있으므로 전체적으로 보면 가장 경제적인 시공방법이 될 수 있다.

시험시공을 할 때에는 목적이 분명하지 않으면 시험시공의 효과를 크게 기대할 수 없다. 다시 말하면 이론적으로 예측한 결과와 실제거동을 비교하여 이론적으로 정한 설계정수를 수정하는 경우도 있고 여러가지 공법으로 시공을 하여 공법을 비교하는 경우도 있다.

시험시공은 상당한 수준의 기술을 가진 사람에 의해 행해지지 않으면 안된다. 공법적용이나 이론적용에 있어서 문제점을 분명하게 알아야만 시험시공의 효과를 극대화할 수 있기때문이다. 따라서 시험시공은 학계가 주관되어 행해지고 그 결과가 논문으로서 발표된다.

시험시공은 시공시의 거동을 측정하는 계측과 구별되어야 한다. 전자는 그 결과를 시공에 이용하고자 하는 목적으로 수행하는 반면 후자는 시공시의 거동을 측정해서 거동을 살피고 시공후 발생하는 문제를 미리 예측하고자 하는데 있다. 우리나라에서는 미리 시험성토를 하여 그 결과를 시공에 이용하는 경우보다도 시공을 진행하면서 계측을 하는 경우가 많다. 대표적인 예가 그림 7에 보인 광양만 매립공사에서 시행한 제1기 원료야드의 프리로딩 결과에 대한 계측이다(포항종합제철, 1990).

원료야드는 석탄, 광석, 석회석 등의 원료를 최대 16.5m까지 쌓아(최대 설계 하중 39.6t/m<sup>2</sup>)저장하는 넓은 야외의 원료 저장소이다. 이 지반은 연약하여 미리 모래 다짐말뚝 (sand compaction pile, SCP)과 모래말뚝(sand pile, SP)을 박고 그 위에 그림과 같이 모래를 16.5m까지 쌓아 프리로딩을 하였다. 층별침하계, 간극수압계, 수평변위계 등으로 계측을 하였으며, 계측은 프리로딩의 안정관리와 불투별로 제하사의 철거시기를 정하는데 이용되었다.

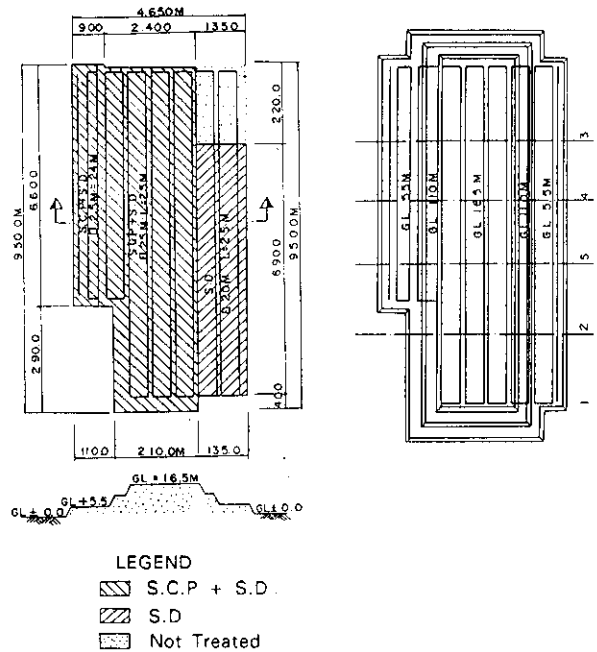


그림 7. 광양제철소 원료야드 프리로딩 계측

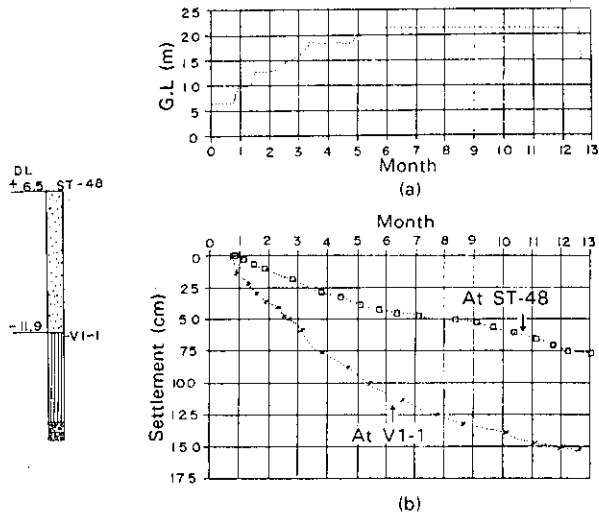


그림 8 프리로딩에 의한 침하기록 (a) 성로고 (b) 침하곡선

6. 결론

대략 20년전부터 본격적으로 시작된 매립과 준설에 관련되는 토목사업은 수 많이 수행되어 국토확장에 크게 기여하여 왔다. 그러나 현재까지 수행된 프로젝트들이 허다한 토질공학적인 문제를 포함하고 있음에도 불구하고 과거의 관행에 의존하여 경험만을 지나치게 중시한 경향이 있었다고 말할 수 있을 것 같다. 앞서 언급한 바와 같이 앞으로는 대규모의 공업단지 조성, 간척사업, 인공섬 축성 등의 사업이 장기계획으로 현재 추진되고 있다. 따라서 토질기술자는 준설과 매립에 관해 적극적인 관심을 가지고 이와 관련되는 기술을 발전시킬 책무가 있다는 것을 결론으로 말씀드리고자 한다.

참고문헌

김상규(1987). "우리나라 연약지반의 실태", 대한토목학회지, 제35권 6호, pp. 14-21.

농어촌진흥공사(1990). 새만금지구 방조제 단면 및 기초처리에 관한 설계검토, 한국지반공학회.

농업진흥공사(1984). 방조제기술개발 연구, 한국농공학회.

토지개발공사 (1990). 해안매립기술에 관한 연구, p.239.

포항종합제철주식회사(1990). 침하안정관리 종합보고서

Agema, J. F. (1974). "Final Closing the Gap of Estuary", Reports of International Symposium on Engineering Problems in Creating Coastal Industrial Sites, Industrial Sites and Water Resources Development Corporation and Korean Society of Civil Engineers, pp. 3-3-1 - 3-3-29.

Arulandan, K.(1974). " Pore and Eroding Fluid Influences on Surface Erosion of Soil", J. of Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol. 101, No. GT1, pp.51-66.

Arulandan, K.(1983). "Erosion in Relation to Filter Design Criteria in Earth Dams", J. of Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol. 109, No. GT5, pp.682-698.

Castro, G.(1975). " Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sands", J. of Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol. 101, No. GT6, pp. 551-570.

Geologica Society of Korea(1987). Geology of Korea, ed. by Lee Dae-Sung, Kyohaksa, Seoul. p.422.

Geotechnical Control Office(1987). Guide to Site Investigation, GCO, Civil Engineering Services Department, Hong Kong.

Okusa, S.(1979). "Submarine Soil Sampling in Japan", State-of-the-Art on Current Practice of Soil Samling, Subcommittee on Soil Sampling, ISSMFE, Singapore.

Hansbo, S. (1987). " Fact and Fiction in the Field of Vertical Drainage ", Proceedings, Int. Symposium on Prediction and Performance of Geotechnical Engineering(edited by Joshi, R. C. and Griffiths, F. J.), the University of Calgary, Alberta, pp.61-72.

Hough, B. K.(1938). "Stability of Embankment Foundation", Transactions, ASCE, Vol. 103, pp. 1415-1431.

Lee, S. L., Karynaratne, G. P., Yong, K. Y. and Ganeshan, V.(1987). "Layered Clay-Sand Scheme of Land Reclamation", J. of Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol. 113, No. 9, pp. 984-995

Morgenstern, N. R. and Kupper, A. A. G.(1988). "Hydalic Fill Structure - A Perspective", Proceedings, Hydraulic Fill Structures(edited by Van Zyl D.J.A. and Steven G. Vick), ASCE, pp. 1-31.

Kim, S. K. (1975). " Engineering Characteristics of Marines in Korea ", Proceedings, 5th Asian Regional Conf. on SMFE, Vol. 1, pp. 35-43.

Lane, E. W.(1935). "Security from Under-Seepage", Masonry Dams on Earth Foundation, Trans. ASCE, Vol 100, p.1235.

Schmieder, A., Kesseru, Zs, Juhasz, J., Willems, T. and Mortos, F.(1975). " Water - risk and Water Management in Mines (in Hungarian)", Muszaki Konyvkiado, Budapest.

Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971). " Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", J. of SMFE, ASCE, Vol.97, NO. SM 9, pp. 1249-1273.

Seed, H. B. and Lee, K. L.(1967). " Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading", J. of SMFD, ASCE, Vol. 92, No. SM6, pp. 105-134.