

폐기물 매립장과 지반공학

장	연	수*1
정	하	익*2
손	준	익*3

1. 서 론

산업발달의 가속화와 인구증가로 말미암아 부수적으로 많은 산업 및 도시폐기물이 발생하고 있으며 이를 처리하기 위하여 매립장이 증설되고 있다. 이러한 폐기물 매립장의 설계와 시공에 있어서는 지반 및 폐기물의 성질을 고려한 공학적 기준이 고려되어야 하는데 최근에는 환경지반공학(geoenvironmental engineering: environmental geotechnology)이 설립이 되어 매립장에 관련된 자료를 축적해가고 있다. 이 분야에서는 주로 폐기물 매립장의 주된 구성요소인 기초, 제방, 라이너 시스템의 설계와 시공을 위한 지침선정^{1), 2), 3)}, 매립물의 물리 역학적 특성을 고려한 매립장의 지반 특성 파악 및 매립지반 개량^{4), 5)}, 그리고 매립물로부터 주변환경으로의 오염물질 이동 예측 및 불량매립지의 정화 등의 연구^{6), 7)}가 이루어지고 있다.

본고에서는 폐기물 매립장을 지반공학과 관련하여 알아보았다. 먼저 국내 매립장의 설계 및 시공개요를 그 문제점과 함께 소개한 후 매립지반의 구성성분, 강도 및 침하특성, 매립지

반의 개량 및 기초설치 방안에 대하여 소개하였다. 매립장으로부터 주변환경에의 오염물 이동예측 및 조사시험방법, 매립지의 정화방안에 대하여는 본호의 “지하수흐름과 지반오염”에 소개되었다.

2. 국내 폐기물 매립장의 현황

우리나라의 폐기물 매립은 과거의 차폐시설이 없이 단순 투기하던 형식으로부터 최소한의 차폐시설을 설치하는 위생매립시스템으로 바뀌어가는 과정에 있으며 아직도 선진외국에 비하여 개선되어야 할 요소를 가지고 있다.

폐기물을 저장하게 되는 컨테이너인 매립장을 구성하는 설비로는 하부기초, 측면제방, 라이너 및 커버, 침출수 집수 및 개스포집시설 등이 있는데 방문 및 자료조사를 통하여 파악한⁸⁾ 국내 해안 및 육상 생활폐기물 매립장과 육상 산업폐기물 매립장의 구성설비의 현황은 다음과 같다.

1) 해안매립장

해안 매립장은 현재 김포 생활폐기물 매립

*1 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실, 선임연구원

*2 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실, 연구원

*3 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실, 수석연구원

장을 비롯 주로 서해안에 위치하고 있으며 향후 남해안과 동해안에도 설치될 것으로 예상된다. 서해안 매립장의 주요지층 구성은 지표면으로부터 퇴적토층, 풍화잔류토층, 풍화암층, 연암층 순으로 되어 있으며 조사지역의 평균 퇴적토층의 두께는 평균 15m 정도로서 대부분 다음에 소개하는 것과 같은 방식으로 설계 시공되어 있다.

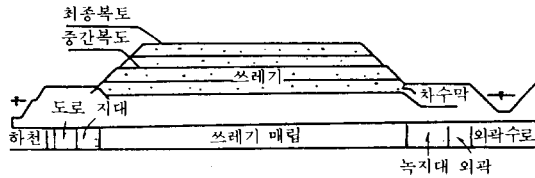


그림 1. 매립장 단면도

그림 1에 보이는 바와 같이 매립장의 주변은 높이 4~5m 정도의 가제방을 경사 1:2로서 축조하고 폐기물을 1:3의 경사로 매립하도록 되어 있다. 제방의 상부사면에는 침출수의 누수를 방지하고 외부의 해수의 유입을 방지하기 위하여 고무차수막으로 그 성능이 우수한 1.5mm 두께의 고밀도 폴리에틸렌(high density polyethylene) 시이트가 기초지반 하부 0.5m 깊이까지 설치되어 있다.(그림 2)

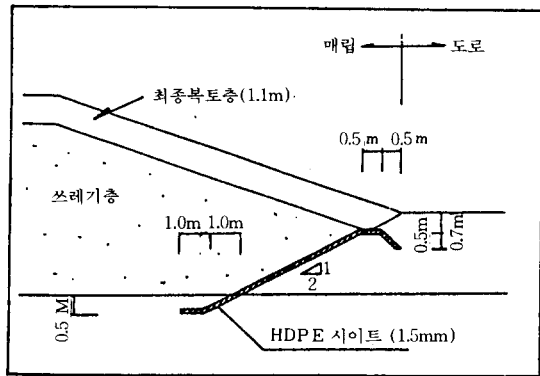


그림 2. HDPE 시이트 설치도

매립장의 바닥은 매립되는 쓰레기의 하중에 의한 압밀로 인하여 투수계수가 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/sec 까지 감소될 것을 설계에 감안하여 투수계수가 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ cm/sec 정도인 원지반에 별도의 라이너를 설치하지 아니하고 폐기물을 매립하였다. 침출수 집수관로는 중계 펌프장까지 자연 유하가 되도록 하고 내부지반의 종단구배는 0.2% 횡단구배는 0.4~0.6%의 경사를 주었다.(그림 3)

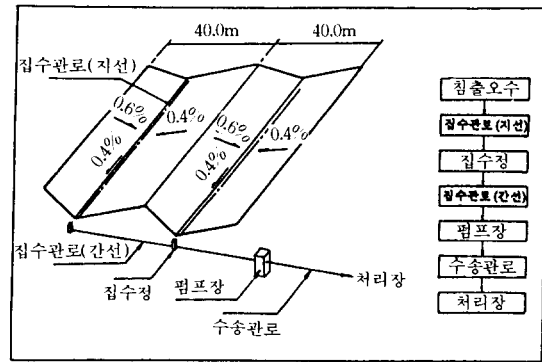


그림 3. 침출수 집수계획도

매립방식은 침출수관로의 침출수 집수 및 처리가 잘 되어질 경우 매립지내에 형성되는 자연 공기 순환으로 인하여 매립물의 안정화를 기하는 준호기성 매립방식을 택하였으며 가스포집은 쓰레기 매립 완료후에 매립 지반내에 포집성을 설치하고 포집된 가스를 연결관 및 수송관을 통하여 가스 소각설비로 이송할 수 있도록 계획하였다.

2) 육상매립장

육상매립장은 평지나 계곡에 설치되는데 과거로부터 단순투기(open dumping)가 행하여져 현재 매립장 주변 지반 및 지하수가 오염된 지역이 많다. 육상 매립장 중에서 평지매립장은 주로 들판의 불모지나 강가, 하천가에 설치되어 있고 매립물질은 가정쓰레기, 폐자재, 잔

토, 산업폐기물 등으로 혼합되어 있어 매립지층이 매우 다양하다. 내륙지역인 경우의 기초지반은 주로 화강토층으로 이루어져 있고 강가나 하천가인 경우는 세립질 모래, 자갈, 점토 등의 혼합재로 이루어져 라이너로서 적합한 소정의 투수계수를 나타내고 있지 않으나 최근에 건설되었거나 건설중인 매립장은 라이너를 설치하고 침출수 집수 및 처리 시스템도 병행, 설치하여 위생매립장으로서의 면모를 갖추어 가고 있다.

육상매립장 중에서 계곡 매립장은 평지에 매립장으로 활용할만한 부지가 없고 주민생활 환경과의 격리를 위해 선정되는데 자연지형을 이용하여 양측의 제방설치를 하지 않고 하단부에 제방만을 설치하여 매립하였다.(그림 4)

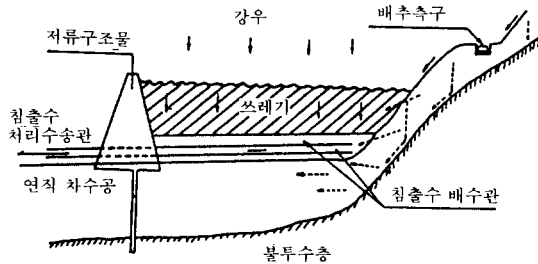


그림 4. 계곡 매립장 하단부 제방조성 단면도

매립장 바닥에는 우수배제용 암거나 흙관을 설치하며 바닥면에는 침출수 유출방지를 위하여 HDPE 시이트 등의 차수막을 포설하였다. 매립장내 침출수 집수용 지선의 간격은 40여 m로 하여 집수 및 배수하므로써 매립중 내부가 호기성 상태로 유지되도록 설계하였다. 우수배수 시설은 그림 5와 같이 설계하여 매립중에 매립지 상부의 우수배수는 물론 매립지 외곽부의 우수가 쓰레기 매립지로 유입되는 것을 방지토록 하였다.

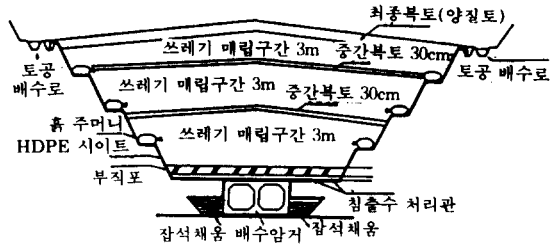


그림 5. 계곡 매립장 우배수관거 설치 및 복토 단면예

3) 산업폐기물 매립장

산업폐기물은 일반폐기물과는 달리 독성이 강하기 때문에 매립장 건설시 설계 및 시공관리가 엄격하여야 하며 외국의 경우에는 이중복합라이너를 사용하는 경우가 많다. 국내 산업폐기물 매립장도 몇년 전까지만 해도 단순투기 형식으로 처리되어왔기 때문에 인근 해안이나 지반이 오염되었으나 최근에는 매립지내에 라이너가 설치되고 침출수 집수 및 처리시스템이 강화된 위생매립이 실시되고 있다.

매립장 차수시설로는 HDPE 시이트 전면차수가 대부분이며, 특히 슬러지 매립장인 경우에는 HDPE 시이트 하부에 약 15cm 정도의 벤토나이트층을 두어 벤토나이트와 시이트를 병행한 복합라이너(composite liner) 시스템을 채택하고 있다.

침출수 집수관은 ϕ 200mm 정도의 유공관을 사용하며 발생한 침출수가 쉽게 유입되도록 관 주변에 잠석을 투수재로 사용하고 잠석에 의한 HDPE 시이트의 손실을 방지하기 위하여 잠석과 HDPE 시이트가 접하는 부위는 부직포를 포설하여 시이트를 보호하였으며 매립중이나 매립 완료후 매립장 주변 지반의 오염 상태를 검토하기 위한 지하수 모니터링 시스템을 설치한 곳도 있다.

산업폐기물 매립장 부지를 간척지에 설치할 경우 지하수위가 표면에 근접하여 있어 우기시 지하수위의 상승으로 인해 매립지 외곽에서 우

수가 침투하여 침수될 우려가 있으므로 부지 전체를 성토하여 외곽수의 침입을 방지토록 계획되었다.

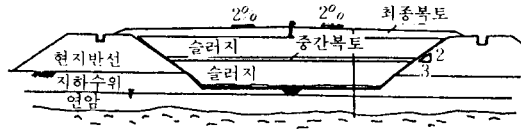


그림 6. 염색 공정 슬러지 매립장의 단면도

3. 설계 기준요건 및 국내매립장의 문제점

방문 및 자료 조사를 통하여 파악된 국내 매립장의 문제점을 매립장의 부지선정, 기초와 제방, 라이너와 커버, 침출수 집수시설 등을 대상으로 매립장에 적용되어야 할 기본 요건과 비교하여 생각하여 보았다.

1) 부지선정

매립지의 선정을 위해서는 매립지로서의 적합성 판단에 필요한 지형, 지질 및 수리지질(hydrogeology)을 조사하여야 한다. 현장의 지형정보는 매립시설의 형태, 유입 및 유출량 제어 등 배수시설의 설계에 영향을 주며, 지질조사는 현장토가 라이너 재료로서 적합한가의 여부와 적합치 않은 경우 소요재료의 조달원을 확인하고 조사하기 위하여 필요하다. 현장의 수리지질의 정보는 관측정(monitors well) 설치 지점의 선정과 지하수면까지의 깊이 그리고 계절별 변화를 결정하는데 중요하다.

국내 매립장의 경우 위치선정에는 대상지역의 상위기관의 허가 및 규정사항을 득하는 문제와 현재 건설중이거나 건설계획중인 매립장에 대한 인근주민들의 반대로 인한 위치선정에 어려움이 있다. 따라서 현재의 많은 매립장은 부지선정을 위한 기술적인 조사 보다 부지획득에

주력한 바 되어 하천에 가까운 지역이나 수자원 상류지역에 설치된 경우도 볼 수 있고 지하수면까지의 깊이가 1m 미만인 곳도 해안지방 등에서 찾아 볼 수 있다.

2) 기초 및 제방

매립장의 기초는 매립장의 침하를 제어하고 사면붕괴에 대하여 충분한 안전을 유지하여야 하며 침출수의 침투를 제어할 수 있는 보조적 역할도 담당하여야 한다. 지형의 기복이 심하고 흙이 연약하면 부등침하가 발생하여 커버 및 라이너의 파손이 일어날 수 있으므로 이와 같은 문제를 해결하기 위해 일차적으로 기초지반의 침하량을 예측할 수 있어야 하며 이차적으로 기초지반의 침하에 따른 매립 시스템의 안정문제를 분석하여야 한다.

기초 흙지반에 매끄러운 면(slickenside), 질리, 샌드렌즈, 샌드심과 같은 불균질 층은 침출수 이동에 대한 통로를 제공하며 파이핑 현상을 일으킬 수도 있으므로 기초지반의 침투량 제어를 위해서 별도의 기초처리가 필요하다. 이러한 투수문제에 대한 해결 방안으로 양수용 우물(pumping well), 슬러리 월(slurry wall), 트렌치 등의 배수 및 차수시설을 설치하여 라이너 내부의 동수경사를 줄이는 방법, 기초지반의 침투수를 조절하기 위하여 기초하부의 지반에 키 제방(keydike) 또는 제방 중심부에 불투수 벽체를 설치하는 방법, 기초지반의 균열이나 염리(fissure)를 그라우팅 하는 방법 등을 채택한다. 매립장 시설의 바닥은 매립장내 침출수의 집수 및 지표로부터의 배수를 용이하게 하여 라이너 시공시 진흙탕이 되거나 물이 고이지 않도록 설계되어야 하는데 국외 매립장 설계지침은 기초지반에 1% 내지 2%의 경사를 주도록 되어 있다.

국내 해안 매립장의 바닥은 해성 점토층으로 이루어져 지반이 연약하고 기초지반의 지지력이 작아 배수시설 시공에 어려움이 있으며 폐기물 매립시 장기적인 침하가 예상된다. 또한

매립장 바닥 지반의 구배는 0.2~0.4%로 원지반의 구배를 그대로 이용하여 하부지반에 부동침하가 발생할 경우 본래 경사도를 유지하기 어려워 집수가 용이하지 않은 문제점이 있다.

매립장의 제방은 저장되어진 매립물질에 의한 수평응력을 지탱할 수 있도록 설계되어야 하는데 토질공학적인 측면에서 매립물의 역학적 특성이 규명되어야 하고 시간이 경과됨에 따른 압밀, 침하, 포화도의 변화 그리고 매립물질과 라이너간 화학성분 반응도 평가되어야 한다.

국내 매립장의 경우 매립장 측면부 제방의 설계 및 시공시 성토재료의 선택과 배수시스템의 설치 등을 간과하여 폐기물의 자중 및 침출수의 유출에 의하여 제방이 붕괴된 사례가 발생된 바 제방 사면에 대한 안정해석에 대한 고려가 필요하다.

제방의 사면 안정해석은 단기 및 장기 안정해석으로 나누어 볼 수 있는데 단기안정 해석은 매립장 내부시설의 법면 시공후 빠른 시일 내에 매립물을 채울 경우에 필요하고, 장기 사면 안정해석은 매립이 완료된 후 지표위의 매립시설의 외곽 법면의 장기적인 안정을 고려할 때 사용한다.

3) 라이너 및 커버

오염물질이 주변환경으로 이동하는 것을 방지하기 위하여 매립장 바닥에는 라이너를 설치하고 매립물 상부에는 커버를 씌운다. 커버는 우수 등의 지표수가 매립장 내로 스며들어 오는 것을 방지하며 라이너는 매립 폐기물로부터 흘러나온 침출수가 주변 지하수층으로 이동하는 것을 방지하는 역할을 한다. 국내 매립장의 커버는 상부에 투수성이 낮은 물질을 복토하는 방식으로만 설치하고 있으나 국외의 경우 커버 시스템을 植樹영역, 배수 및 차수영역으로 구성 인공 토목섬유재의 사용을 활성화하였고 매립이 완료된 이후 커버시스템의 사면안정 및 침하에 관한 분석을 수행하고 있다.

유해폐기물에 대하여 비교적 우리나라보다

먼저 환경규제법을 실시한 미국의 경우 1984년 유해 고형폐기물에 대하여 라이너의 상부와 이중라이너의 경우 라이너의 사이에도 침출수 집수시스템을 설치하여 유해침출수가 매립장 폐쇄후 30년 동안은 우리가 주거하는 환경으로 이동하는 것을 최소화 할 수 있도록 규정하였다. 그림 7은 미국환경처(EPA: environmental protection agency)에 의해 규정된 유해폐기물에 대한 최소한의 시설 단면인 복합 이중라이너 시스템(composite double liner system)의 개요도이며 그림 8은 이에 대한 상세도를 나타낸 것이다. 여기에서 지오멤브레인은 유해한 폐기물의 성분을 대부분 차폐하는 것이 목적이며 낮은 투수계수의 점토라이너 층은 유해물질이 지오멤브레인을 통과하더라도 장기간 주변 환경에 도달하는 것을 지연시키고 점토와 침출수의 상호작용으로 인한 어느 정도의 침출수량의 감소를 목적으로 하고 있다.

매립장에 사용되는 라이너재료는 점토 및 지오멤브레인을 흔히 사용하는데 점토라이너는 균질성을 유지하고 흙덩어리의 크기를 최소화하기 위하여 잘게 파쇄토록 하고 최적함수비의 습윤층에서 다짐하여 투수계수를 최소화한다. 지오멤브레인 라이너는 설치되는 하부지반을 평평하고 고르게 다져 설치된 시이트가 손상되지 않도록 하며 라이너의 양단부는 앵커 시스템을 설치하여 폐기물의 자중이나 기타 하중에 의하여 라이너가 이동되지 않도록 한다. 점토라이너 상단에 지오멤브레인을 설치하는 복합라이너의 경우는 하부 점토라이너의 전면으로

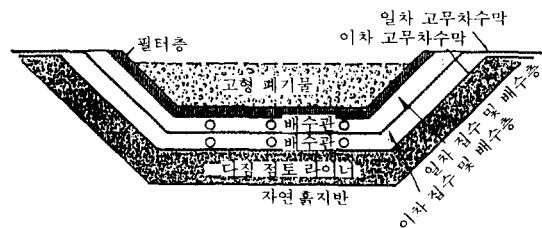


그림 7. 복합이중 라이너 시스템 개요도

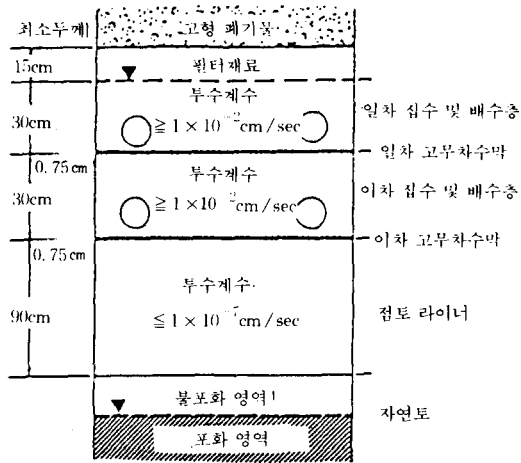


그림 8. 라이너 상세도

침출수가 침투되지 않고 지오멤브레인의 부실 봉합된 부분이나 손상된 부분으로만 침투되도록 지오멤브레인을 점토라이너의 상단에 밀착하여 시공한다. 지오멤브레인을 통한 침출수의 침투는 주로 시이트의 봉합부분으로 이루어지므로 시공감리자는 이러한 부분에 대하여 주의 깊게 관찰하여야 한다.

국내의 경우 폐기물 매립장에 라이너를 설치한 것은 80년대 후반으로서 대부분이 단일라이너(single liner)로 이루어져 있어 선진외국의 이중라이너(double liner)나 복합라이너(composite liner)에 비하면 미약한 편이다. 라이너 설치에 대한 국내 규정이나 지침이 마련되어 있지 않아 기존의 매립장중 라이너의 재료로 얇은 비닐이나 천막지 등이 사용되어 투수성 및 내구성이 우려되는 곳도 발견되었다.

4) 침출수 집수시스템

침출수 집수시스템중 집수관은 라이너 상부에 설치되어 폐기물에서 발생하는 오염수를 집수하고, 그 주변으로 설치되어 있는 배수층은 침출수가 집수관으로 흐르는 것을 원활하게 하여 매립장내에 침출수가 고이지 않도록 하는

기능을 갖는다. 배수층이 막히는 것을 방지하기 위해서는 폐기물과 배수층 사이에 설치되는 필터는 흙과 지오텍스타일이 사용되고 있다. 배수층에는 흙, 유공관, 지오투트 등이 사용되는데 흙배수층은 미국 환경처의 규정에 의하면 투수계수 10^{-2} cm/sec 이상, 최소 두께 30cm 이상이어야 하며, 유공관의 최소 직경은 30cm 이상이 추천되고 있다.

국내 해안매립장의 경우 매립하부지반이 매우 연약하여 쓰레기 자중에 의한 지반 침하로 침출수 집수 유공관 및 집수관이 굴곡, 파손되어 침출수의 처리가 원활하지 않는 경우가 많다. 이러한 경우 침출수가 외부로 유출될 가능성이 있어 주변지반 오염이 우려된다.

4. 도시폐기물 매립성토체의 지반공학적 특성

도시폐기물 매립 성토체는 비균질성이 크고 장기간에 걸쳐 부패하는 현상이 일어나기 때문에 일반 흙 성토체와는 다른 물리 역학적 성질을 지니게 된다. 본절에서는 폐기물 매립성토체 중 도시폐기물을 위주로 구성성분 및 물리 역학적 특성을 살펴보고자 한다.

1) 도시폐기물 구성성분

지반공학적 해석에 있어서 가장 중요한 사항중의 하나는 폐기물의 구성성분을 어떻게 분류하느냐 하는 것이다. 도시 폐기물은 주거 활동에 의한 가정쓰레기, 상가와 음식점 등으로부터 발생하는 상업쓰레기를 가리키는데 그 구성물질의 성분비는 월별 계절별로 조금씩 달라지는 양상을 보인다. 표 1에는 국내와 국외에서 발생하는 도시폐기물 성분의 중량비를 비교하였는데 국내폐기물의 특징을 보면 사용량이 줄고 있는 있으나 무연탄 사용으로 인한 연탄재 발생이 많고 우리나라만의 고유한 식생활 문화로 인하여 음식물류가 차지하는 비중이 높다는 것을 알 수 있다.

표 1. 국내 및 국외 도시폐기물의 비교

(단위: 중량비 %)

종 류	국 내 ⁽¹⁾			국 외		
	1986	1989	평균	1973 ⁽²⁾	1990 ⁽³⁾	평균
연 탄 재	44.5	38.9	41.7	-	-	-
음식물류	23.0	25.4	24.2	15.9	20.0	18.0
종 이 류	9.4	12.3	10.9	26.5	31.9	29.2
목 재 류	3.5	3.6	3.6	2.6	6.5	4.6
금속재류	4.0	4.8	4.4	11.1	8.9	10.0
기 타 ⁽⁴⁾	15.6	15.0	15.2	43.9	32.7	38.2

(1) 신항식 (1991)¹⁰⁾
 (2) G.F.Sowers (1973)¹⁰⁾
 (3) Landva and Clark (1990)¹¹⁾
 (4) 플라스틱고무, 섬유, 유리, 건설자재류 포함

음식물류와 종이류는 비교적 분해성이 높은 유기물질로서 매립지반의 공학적 특성에 영향을 미치는 중요한 성분 중의 하나이다. 이러한 물질의 공학적 분석을 위하여 유기물(organic)과 무기물(inorganic)로 나누고 유기물은 다시 부패성과 비부패성으로 나누어 분류한다. 표 2에는 국내 및 국외 도시폐기물의 유기 및 무기물질 구성비를 표시하였는데 국외의 유기물은 종이류 등 문화 활동으로부터 발생한 유기물 비율이 많고 국내에서는 음식물로 인한 유기물 비율이 많음을 알 수 있다.

표 2. 국내 및 국외 도시쓰레기의 유기 및 무기물질의 구성비

(단위: 중량비 %)

종 류	국 내			국 외		
	무기물질	유기물질		무기물질	유기물질	
		부패성	비부패성		부패성	비부패성
음식물류		24			18	
종 이 류		11	4		29	5
목 재 류						
금속재류	4					
연 탄 류	42			10		
기 타	15			38		
합 계	61	35	4	48	47	5

매립물의 물리적 특성은 구성성분, 재령기간, 다짐 그리고 기타 환경조건에 따라 매우 다양하며 그것을 정확하게 결정한다는 것은 매우 어려운 작업이다. 매립물의 물리적 특성에는 여러가지가 있겠으나 기본적 특성은 단위중량, 함수비, 공극비를 들 수 있다.

매립물의 단위중량은 매립장내에 일정한 크기의 구덩이를 파고 여기에서 채취한 매립물의 무게와 구덩이 부피와의 관계로부터 산정하는데 같은 매립장이라도 매립물의 위치에 따라 비균질하기 때문에 매립물의 단위중량의 분포와 분산정도는 매우 크다. 발표된 자료¹⁰⁾를 토대로 하여 매립된 도시폐기물의 평균단위중량을 살펴보면 불량한 다짐상태의 경우 0.4g/cm³, 양호한 다짐 상태의 경우 1.2g/cm³로 보고되어 있다. 또한 매립물의 함수비는 Landva와 Clark¹¹⁾의 경우 캐나다의 기 매립된 매립장에서 매립물의 함수비를 측정하여 그 크기가 약 10%~120% 이상까지 분포한다고 하였고, Sowers¹⁰⁾는 매립물의 함수비가 10~50% 정도의 범위에 있다고 보고하였다. 매립물의 공극비도 매립물 비중의 불확실함으로 인하여 정확하게 결정하는 것은 어려우나 Sowers¹⁰⁾는 다짐이 불량한 경우 공극비는 15 그리고 양호한 경우는 2로서 넓은 분산도를 갖는다고 하였다.

2) 강도특성

폐기물 매립장의 안정해석에 있어서 또하나의 문제점은 매립물의 적절한 강도정수를 결정하는 것이다. 매립물은 시간이 경과함에 따라 그 특성이 계속적으로 변화하는데 아직까지도 이러한 변화가 매립물의 강도정수에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 정량적으로 규명되어 있지 않다. 매립물의 강도를 측정하는 방법에는 실내시험, 현장시험 그리고 기존 매립장의 관측결과에 의한 역산방법(back calculation technique)을 사용한다.¹¹⁾

실내시험에서 가장 일반적인 시험방법은 매립장에서 채취한 원 시료를 대상으로 대형 전

단박스를 사용하는 직접전단 시험이다. 현장시험 방법에는 표준관입시험, 배인 전단시험, 콘관입시험 등이 있으나 실내 및 현장시험 방법 모두 매립장의 구성물질이 비균질성을 가지고 있기 때문에 그 적용성에 있어서 제한성이 크다. 매립물의 점착력과 내부마찰각을 정확하게 산정하기 위하여 평판재하시험 및 사면안정해석과 역산방법을 종합하여 판단하기도 한다.

Landva 와 Clark¹¹, Siegel 등¹²⁾에 의하면 도시폐기물에 대한 직접전단시험결과 대체적으로 내부마찰각은 35°~45°으로 크게 나타나며 상대적으로 점착력은 작아 0인 경우도 있다고 보고하였다. 폐기물 직접전단 시험특성을 보면 폐기물의 밀도가 낮고 느슨하며 전단되는 동안 시료가 내부적으로 구조배열이 서로 다른 상태에서 전단을 받게 되어 수직응력의 크기에 따라 강도에 많은 차이를 변화를 보인다. 강도곡선은 낮은 수직응력 범위에서는 곡선을 나타내어 내부마찰각은 크고 높은 수직응력 범위에서는 직선을 나타내며 내부마찰각은 작고 상대적으로 점착력이 크게 나타나게 된다.(그림 9) 따라서 직접전단 시험으로부터 얻은 강도데이터를 해석하는데는 매립물의 성상을 고려한 공학적 판단이 포함되어야 한다. 느슨한 매립물은 최대강도에 이르기까지 일반 흙보다도 더

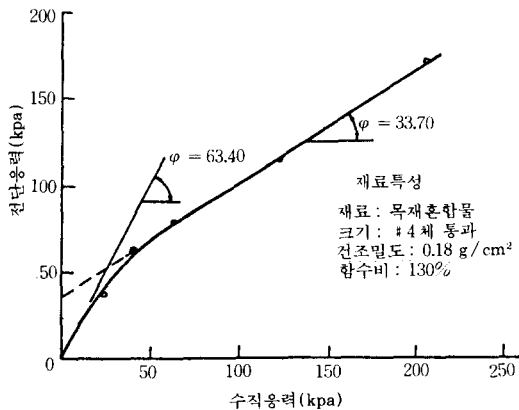


그림 9. 직접전단 시험결과의 예¹²⁾

큰 변형을 나타내게 되어 최대강도일 때의 변형률은 시료의 밀도에 따라 다르나 파괴시의 변형률은 보통 20~50% 정도가 된다.

3) 침하특성

매립지반의 침하를 일으키는 메카니즘에는 다짐 혹은 압밀에 의한 역학적 작용과 분해, 부패 등의 물리화학적 및 생화학적 작용이 있다. 즉 폐기물 매립지반은 매립초기 몇 달 동안에는 역학적 작용에 의해 상당히 큰 침하가 발생하고 그 이후에는 물리화학적 및 생화학적 작용에 의하여 어느정도 일정한 비율로 침하가 계속해서 일어난다. Sowers¹⁰⁾는 이러한 초기침하를 일차압축 그 이후의 침하를 이차압축이라 정하였다. 본절에서는 폐기물 매립지반의 침하량 산정에 제시된 방법들을 일반 토사의 침하량 산정식과 비교 소개하였다.

일반적으로 흙의 압축에 의한 침하량은 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$S = H_0 \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} = H_0 \frac{C_c}{1 + e_0} \log \left[\frac{P_1}{P_0} \right] \quad (1)$$

여기에서

H_0 = 초기층 두께 e_0 = 초기간극비

e_1 = 최종간극비 P_0 = 초기하중

P_1 = 최종하중 C_c = 압축지수

식(1)을 매립지에 적용함에 있어서의 문제는 매립물의 초기간극비의 신뢰성 있는 수치를 얻기가 어렵다는 것이며 이러한 문제점을 식(2)와 같이 재표현함으로써 소거시켰다.

$$S = H_0 \cdot Cr \cdot \log(P_1/P_0) \quad (2)$$

여기서 Cr 은 압축비로서 작용하중의 상용대수에 대한 변형률(strain) 관계를 나타내는 직선부의 경사이며 식(3)과 같이 표현되고 압밀시험의 결과로부터 산출된다.

$$Cr = C_c / (1 + e_0) \quad (3)$$

매립지반은 비균질하고 구성입자의 규모가 크기 때문에 매립물의 압밀시험시에는 직경이

큰 압밀링을 사용한다. Landva 와 Clark¹¹⁾은 캐나다의 수개의 매립장으로 부터 채취한 시료에 대하여 직경이 470mm인 압밀시험기로 압밀시험을 실시하여 압축비를 산정하였으며, 그 결과 오래된 매립장의 경우 압축비가 0.2, 그리고 목재폐기물로 구성된 매립물의 경우는 0.4에 가깝게 나타남을 알 수 있었다. 이 수치는 이들이 캘리포니아의 산 마테오에 있는 습지제방 하부에 놓인 오래된 점토퇴적물(건조밀도: 0.55~0.65g/cm³, 함수비: 100~200%)에서 얻은 평균치 0.5와 비슷한 크기를 나타내었다.

매립지반에서 침하량과 로그시간의 관계는 선형적이며 흙의 이차압축과 유사하고 다음과 같은 관계식으로 표현된다.¹⁰⁾

$$S = \alpha \frac{H}{1+e} \log \left[\frac{t_2}{t_1} \right] \quad (4)$$

여기에서,

S = 시간 t₁ 과 t₂ 사이에 발생하는 침하량

α = 간극비의 함수이고 생화학적 부패와 관계 있는 이차 압축지수

H = 간극비 e 상태에서 매립층의 두께

매립지반의 침하율 측정은 Yen 과 Scanlon¹³⁾에 의해서도 이루어졌는데 매립깊이 10~40m 범위인 3개의 매립장을 선정하여 매립이 완료된 후 9년 동안 매립지반의 침하량을 측정하여 그 측정 결과를 분석하였다. 침하율 해석에 있어서 매립 기간을 고려하기 위하여 총매립에 소요된 시간의 중간값을 매립의 시점으로 하여 매립이 경과되고 있는 시점까지의 시간을 t_m으로 정의하고 침하율(m)과 매립시간(t_m)의 상관관계를 다음과 같이 제시하였다.

$$m = a - b \log(t_m) \quad (5)$$

여기에서 매개변수 a, b는 매립깊이(H_f)의 함수로서 그림 10과 같은 관계를 갖는다고 보고하였다.

4) 수리적 특성

매립장과 관련한 수리특성은 매립물 자체내의 흐름 분석과 라이너나 바닥기초 지반을 통

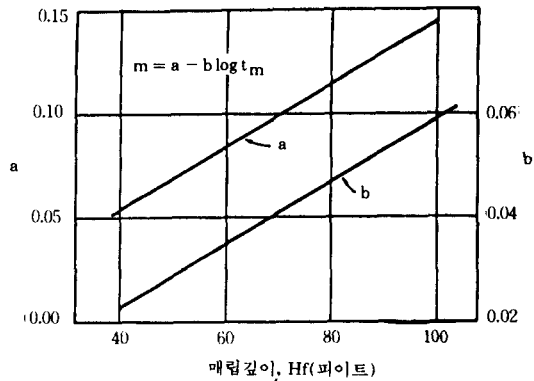


그림 10. 침하율 매개변수 a와 b¹⁴⁾

하여 주변으로 이동하는 흐름의 두가지로 나누어 볼 수 있는데 후자의 경우는 '지하수 흐름과 오염이동'편에 소개하였으므로 매립물 자체내의 흐름에 관하여 간략히 언급한다.

폐기물 매립지반내 물의 유동은 Darcy의 법칙으로 해석할 수 있으며 여기에는 투수계수가 중요한 요소가 된다. 투수계수에 영향을 미치는 요소로는 침투수의 밀도, 점도 및 매립물의 구조와 입도 분포 등이 있고 폐기물 매립지반의 경우는 이 요소가 매우 다양하게 분포되어 있다. 매립물에 대하여 측정된 투수계수의 사례를 표 3에 기록하였는데 보는 바와 같이 매립물 자체의 투수계수는 큰 편이며 분포범위가 폐기물 매립지반의 매립물 구성요소, 밀도, 함수비, 매립방법, 매립기간 등에 따라 다양하여 대표적인 투수계수를 찾는 데 어려움이 있다.

표 3. 매립 지반내의 투수계수 측정⁵⁾

발표자	투수계수(cm/sec)	시험종류	비 고
Fang(1983)	7×10 ⁻⁴	실내시험	폐기물 γ _s = 1.137g/cm ³
	1.5×10 ⁻²	실내시험	폐기물 γ _s = 0.617g/cm ³
Fungaroli 와 Steiner(1979)	10 ⁻² ~10 ⁻⁴	실내시험	불균질 생활 쓰레기
Oweis 와 Khera(1986)	10 ⁻³	현장양수 시험	New Jersey의 Hackensack Meadow 매립장

5. 폐기물 매립지의 개량 및 기초설치 방법 소개

폐기물 매립장을 활용하는 사례로는 구주제국 및 북미의 경우 산림이나 위락용지 등의 저급지로 사용할 것을 권장하고 있으나 우리나라와 같이 국토면적이 협소한 경우 주택이나 산업공단 부지로의 활용하려는 움직임도 많다. 제철폐기물인 슬래그나 화력발전소 폐기물인 플라이애쉬를 산업이나 주택용 부지의 매립재로서 사용하려 하고 있고 이러한 경우 지반공학에 관련한 역학적 문제외에 매립물이 포함하고 있는 여러 화학물질의 침출수가 주변환경으로 미치는 영향이 고려되어야 한다. 도시 폐기물 매립장의 경우 유기물질의 부패과정에서 발생하는 메탄가스의 처리문제가 지반활용 측면에서 문제가 되고 있어 일반적으로 도시폐기물 매립장을 활용하려는 경우 그 시기는 매립재의 화학적 천이과정이 끝나고 안정화가 이루어진 후가 된다. 고품폐기물 매립장의 경우 매립완료 후 2~5년이면 침출수 발생이 멎거나 최소량으로 안정되어 지지만 실제 매립지반이 사용되려면 보다 많은 기간이 지나야 한다.²⁾ 여러

가지 차폐시설이 설치되어진 매립지반에서의 지반개량 및 안정을 위한 기초 특히 파일 기초 등을 사용하는 문제는 이제까지의 사례가 없으나 기존의 차폐시설이 없이 매립되어진 지반의 개량 및 파일 기초설치 사례는 찾아 볼 수 있어 소개하였다.

1) 폐기물 매립지반의 개량

매립지반의 개량은 시공기간, 구조물의 허용침하, 매립물의 물리화학적 특성, 오염물질의 지하수와 토양으로의 누출 등의 문제에 대처하기 위하여 표 4¹⁾에 보인 바와 같은 방법이 사용되며, 매립지반을 건설부지로 사용할 경우에는 개량공법 적용을 위해 다음과 같은 사항이 결정되어야 한다.

- 매립지 정수의 결정 : 일반지반에 대한 토질정수 추정법과 동일한 방법으로 개량해야 할 매립지의 기본 토질정수 파악
- 구조물의 기초형식 : 지반개량효과와 부합된 기초형식, 특히 말뚝기초의 작용성과 합리성 파악
- 설계지지력의 추정 : 표준관입시험(N치)과 재하시험 결과로부터 지반의 물성

표 4. 폐기물 매립지반 개량공법¹⁾

공 법			장 점	단 점	비 고	
침하, 지지력 대책공	고밀도화 사전압축	기계적 압축	압축, 고결화 공법	30% 정도 체적이 감소하며 반영구적	플랜트 필요	
		재하, 충격력	등다짐공법	시공이 단순, 20~30% 체적감소	개량심도가 한정됨	개량공기가 짧을 때 유효
			여성토공법	시공이 확실	리바운드 가능성이 있음	
	치환, 압축	잔등다짐공법	심층개량가능, 말뚝효과	타입이 어려움	주 대책공으로는 취약	
	간 급 충 진	그라우트공법	개량심도 선택 가능	적용성 검토 필요	부분적 개량에 적합	
	무기화(無機化)	소각공법	안정화에 효과적	반출, 매립대책 필요	소각잔회처리방안 검토필요	
양 질 재 치 환	치환공법(반출)	공법이 확실	반출장소 필요	보조수단 고려		
환경대책공	용 출 방 지	압축, 고결화공법	침하, 지지력 대책효과 있음	시공이 복잡		
		주입공법	지반 강화에도 효과적	효과의 확인이 곤란	시험시공 필요	
	무 해 화	소각, 고결화공법	안정화면에 효과적	중금속의 유무 검토 필요		
		밀 봉	그라우트 커튼	저수효과 확실	부식에 약함	시험시공 필요
주입, 고화벽공법	시공성이 좋음		효과의 확인이 곤란			
지중연속벽공법	효과 확실	벽체의 장기안정이 불안				

을 평가하여 개량전후 지반의 지지력 파악

- d) 시공관리: 개량 후 폐기물 지반의 변형, 침하 대책과 발생가스, 침출수 처리 대책 수립

표 4에 제시된 공법 중 매립지반의 현장조건에 따라 동다짐, 선행재하, 그라우팅 및 치환공법 등이 사용되는데 이들 공법에 대한 적용예를 살펴보면 다음과 같다.

매립장에 사용되어진 동적다짐공법의 경우, Charles 등¹⁵⁾은 15년된 6m 깊이의 도시폐기물 매립장을 제방기초 부지로 사용하기 위하여 추 무게 15ton, 낙하 높이 20m의 동다짐을 실시하여 평균 0.5m의 침하 감소효과를 얻었으며, Welsh¹⁶⁾는 커버 두께가 1m인 6~12m 깊이의 매립장을 도로용지로 사용하기 위하여 추 무게 18ton, 낙하높이 20m의 동다짐을 실시하여 8%의 침하 감소효과를 얻었다. D'Appolonia¹⁷⁾는 6~9m 깊이의 상업용 건물부지 사용예정 매립장에 동다짐을 실시하여 0.7~1.5m의 침하감소와 2배의 탄성계수(E) 증가효과를 얻었다. 동다짐은 매립지반의 밀도를 증가시켜 생화학적 분해율과 이차 압축을 감소 시키므로 적절히 적용하면 초기침하의 70% 그리고 이차 침하의 50% 정도까지 감소시킬 수가 있고 동다짐과 병행하여 수직배수공법을 사용하면 더욱 큰 압밀효과를 얻을 수 있다.

그라우팅 공법은 매립물의 분해, 개스나 침출수 발생 그리고 매립지반 장기침하 억제 효과 등을 얻을 수가 있다. Moulton 등¹⁸⁾은 플라이애쉬로 그리우팅을 매립장에 실시하여 2년 경과 뒤 처리되지 않은 지역에 비하여 약 50% 정도의 침하량 감소효과를 얻었다. Blacklock¹⁹⁾은 석회와 플라이애쉬 혼합재로 도시폐기물 매립지반을 그라우팅하여 건물과 주차장 용지로 사용하도록 하였는데 이러한 매립지반을 그라우팅하기 전에 웰 포인트 등을 이용하여 침출수를 제거하는 것이 좋다.

국내의 경우 서울 상계지구 도시폐기물 매립장 주변에 대단위 택지개발을 시행한 바 연약

한 매립지반을 개량하기 위하여 외곽도로부 일부에는 동다짐을 그리고 기타지역은 소정의 심도까지 매립지반을 터파기 한 후 1층씩 시멘트 계열 고화재의 약품을 포설하여 혼합 다짐하는 약액처리 다짐공법을 채택하였다.²⁰⁾ 매립장의 폐기물 매립토층은 심도가 2~10m이고 복토층은 1~2m로 구성되었으며 동다짐은 추무게 10 ton, 낙하고 12m로 실시하여 동적 콘관입 시험치 (N)를 평균 4~22 정도 증가시켰고, 일단계 동다짐 실시 후 지반의 강제침하량 25~45cm를 얻게 되었다. 약액 처리 다짐공법을 실시한 지역은 공법실시 1개월 후에 일축 압축 강도가 3.26kg/cm², 10개월후 4.92kg/cm²로 증가하는 효과를 얻었다.

2) 매립지내 기초설치 방법

폐기물 매립지반의 기초 설계시에는 일반 흙지반에서의 지반 정수외에 오염종류, 전기저항치, pH, 이온농도, 박테리아 존재 등의 요소가 고려되어야 한다. 건설재료에 미치는 오염지반의 영향이 어느 정도인지는 정확하게 규명되어 있지는 않지만 황산염, 염화물, 칼슘 등의 이온의 경우는 철재료의 내구성에 영향을 미치며 알은기초, 말뚝, 피어 등과 같은 기초구조물과 가스포집공 파이프, 배수관 등과 같은 지하 건물요소도 폐기물 환경으로 인해 손상을 받기가 쉽다.

매립지반의 침하량이 클 것으로 예상되는 경우 알은 기초를 사용하기 보다는 말뚝기초를 사용하게 되는데 말뚝 설계의 지배요소는 관입성, 부주면 마찰력, 그리고 부식잠재력 등이다. 매립지반내에 말뚝을 설치하는 것은 부피가 크고 강도가 큰 이물질이 섞여 있는 비균질 지반이 많아 어려운 작업이며 말뚝 관입을 수월하게 하기 위하여 pre-augering 이나 pre-drilling 을 병행하여 실시하기도 한다. 무거운 말뚝의 경우에는 선단부에 텅을 장착하고 32,000 ft-lb 이상의 에너지를 발생시킬 수 있는 대형 햄머를 사용한다.

철재, 콘크리트 및 목재 등 기초재료는 부식에 의하여 손상을 입기 쉬우므로 말뚝 종류는 부식잡재력을 고려하여 선정되어야 한다. 폐기물 매립지반에 콘크리트충진 강관말뚝을 적용할 수가 있는데 이때 강관말뚝은 말뚝의 관입성을 증가시키고 콘크리트를 보호하는 역할을 하나 구조적인 지지재로서의 역할은 무시된다. 충진용 콘크리트는 산에 대한 저항력이 있는 낮은 물-시멘트비의 콘크리트가 보통 사용되며 강관말뚝만 사용할 경우에는 부식에 대한 허용성을 고려하여 구조물 지지에 필요한 이상의 큰 단면으로 설계하여야 한다.

폐기물 매립지반의 자체 침하로 인하여 말뚝의 부주면마찰력을 정확하게 예측하기는 어려우나 몇몇의 조사결과에 의하면 상재폐기물 중량의 10% 정도라고 한다. 폐기물 매립지반내의 수평토압에 대한 자료에 의하면 수동토압계수의 경우 수침된 경우 느슨한 모래지반에 대한 값의 약 0.3배, 수침되지 않은 폐기물에 대한 수동토압계수는 약 0.2 정도의 값을 갖는 것으로 보고되었다.

6. 결 론

국내 폐기물 매립장은 80년대 후반기를 전후로 하여 단순 투기형식의 매립에서 단일 라이너를 사용하는 위생 매립으로의 전환이 이루어져 현재는 많은 매립장이 위생 매립시스템으로 운영되고 있다. 그러나 국내 매립장 조사결과 아직도 매립장 위치선정, 기초지반 지지력, 제방안정, 라이너시스템 등에 많은 문제점이 있음을 알게 되었고 앞으로 이와 같은 문제점을 해결하게 위하여 보다 많은 투자와 연구가 수행되어야 할 것이다. 또한 우리나라는 국토가 협소하기 때문에 폐기물 매립장을 위락용지와 아울러 건설부지로 활용해야 할 필요성도 대두되고 있어 이와같이 매립장을 건설부지로 활용할 경우에 대비하여 국내 매립지반 여건에

부합된 매립물의 공학적 특성과 기초설치 방안이 강구되어야 할 것이다.

현재 국내에는 크고 작은 매립장이 600여개 이상이 건설되어 있으며 앞으로도 증가될 것으로 보이는데 매립장의 설계, 시공, 운영, 폐쇄 및 부지활용을 위한 적합한 지침마련과 매립물의 특성을 고려한 여러 토질정수의 재조명, 매립지반의 개량, 주변환경으로 오염물 이동모델 및 차폐시스템의 개발 등의 분야에 지반공학의 역할이 기대된다.

참고문헌

1. Bonaparte, Rudolph(1990), "Waste Containment System : Construction, Regulation and Performance", ASTM, Geotechnical Special Publication No.26, 1990, 266.pp.
2. EPA(1990), "How to Meet Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Construction and Closure", US Noyes Data Corporation, Park Ridge, N., 123.pp.
3. Goldman L.J., L.I. Greenfield, A.S. Damle, and L. Kingsbury(1987), "Design, Construction, And Evaluation of Clay Liners for Waste Management Facilities", EPA/530-SW-86-007-F.
4. Landva, A., and G. David Knowles(1990), "Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice", ASTM, 375.pp.
5. Oweis, Issa S., and Raj P. Khera(1990), "Geotechnology of Waste Management", Butterworths, 273.pp.
6. Rowe, R.K.(1987), "Pollutant Transport Through Barriers", Geotechnical Practice for Waste Disposal '87, Proc. Spec. Conf., Geotechnical Special Publication No.13, Ed. Woods, R.D., pp. 159-181.
7. Dogoshewski, P., H. Bryson, and K. Wagner (1983), "Remedial Action Technology for Waste Disposal Sites", Noyes Data Corporation, Park Ridge, N.
8. 손준익, 장연수, 정하익(1991), 폐기물 매립장의 건설부지 활용과 위생매립 시스템에 관한 연구, 중간보고서, 한국건설기술연구원, 160.pp

9. 신항식(1991), "폐기물관리 현황 및 방향", 대한토목학회지 Vol.39, No.5, pp.51-55.
10. Sowers, G.F.(1973), "Settlement of Waste Disposal Fills", Proc. 8th ICSMFE, Moscow, Vol. 2, pp.207-210.
11. Landva, A and J.I. Clark(1990), "Geotechnics of Waste Fill", ASTM Special Technical Publication 1070, pp.86-103.
12. Siegel, R.A., R.J. Robertson, and D.G. Anderson (1990), "Slope Stability Investigations at a Landfill in Southern California", ASTM Special Technical Publication, 1070, pp.259-289.
13. Yen, B.C. and B. Scanlon(1975), "Sanitary Landfill Settlement Rates", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.105, No. GT5, pp.475-487.
14. 嘉門雅史(1991), "廢棄物の締固め", 土と基礎, 39-4, pp.61-68.
15. Charles, J.A., D. Burford, and K.S. Watts(1981), "Field Studies of the Effectiveness of Dynamic Consolidation", Proc. 10th ICSMFE, Vol.3, Stockholm, pp.617-622.
16. Welsh, J.P.(1983), "Dynamic Compaction of Sanitary Landfill to Support Superhighway", Proc. Eighth European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki.
17. D'Appolonia, D.J.(1987), "Foundation Improvement by Dynamic Consolidation", ASCE, New York Metropolitan Section, Foundations and Soil Mechanics Group Seminar, Improving Poor Soil Conditions.
18. Moulton, L.K., S.K.Rao, and R.K. Seals(1976), "The Use of Coal Associated Waste in the Construction and Stabilization of Refuse Landfills", New Horizons in Construction Materials, Ed. Fang, H.Y., Envo Publishing Co., Vol.1, pp. 53-65.
19. Blacklock, J.R.(1987), "Landfill Stabilization for Structural Purpose", Geotechnical Practice for Waste Disposal '87, Proc. Spec. Conf. Geotechnical. Special. Publication. No.13, Ed., Woods, R.D., pp.275-294.
20. 임문호, 배철호(1987), "서울상계지구 도시폐기물 매립으로 인한 연약지반 개량공법 시공사례", 대한토목학회지 제35권 4호, pp.22~32.
21. Sohn, K.C. and A.M. Johnson(1991), "Factors Affecting Determination of Stability and Settlement of Sanitary Landfills", The 5th International Symposium on Solid Waste Management Technology, pp.207-241.