

사용종료 쓰레기 매립장 활용을 위한 지반공학적 접근

정 문 경
(鄭文景)

한국건설기술연구원
지반연구실
선임연구원(공학박사)



- I. 머리말
- II. 폐기물매립지반의 지반공학적 특성
- III. 폐기물지반의 개량
- IV. 폐기물 지반의 기초
- V. 결 론

I. 머리말

사용이 종료된 도시폐기물 매립장은 인구 밀집 지역과의 근접성, 개발시 경제적 가치 등의 이유로 활용 가능한 새로운 건설부지로서 많은 관심이 모아지고 있으며, 특히 도시지역에서 개발대상지

역의 확보 필요성이 큰 우리나라에서는 그 가치가 남다르다. 이미 서울의 상계동과 구의동 매립지에는 각각 대단위 주거시설과 상업시설이, 수원 권선동 매립지에는 농수산물 도매시장이 건설되었으며, 현재 전국적으로 개발이 진행 중이거나 예정된 사용종료 매립장은 다수에 이른다. 확인된 매립지 외에도 과거 중소규모의 불량매립지가 도시 지역에 산재했던 것을 감안하면 지금까지 폐기물 매립지를 건설부지로 활용하였던 예는 상당수에 이를 것으로 보인다.

1980년대 이후 사용종료 매립지는 확인된 것만 전국적으로 873개소 전체면적 15,600,000㎡에 이르며, 2011년 이후에는 사용종료 매립지가 1,302개소 전체면적 44,239,000㎡에 달할 것으로 전망된다(고윤화, 1997). 우리나라 사용종료 매립지의 현황과 사용실적은 <표 1> <표 2>에 나타나 있다.

지역별로는 서울, 부산, 대구, 충북도의 경우는 사용종료 매립지가 대규모이면서 수가 적은 반면, 대전, 경기, 충남, 전남 지역에는 상대적으로 소규모의 사용종료 매립지가 다수 산재되어 있다. 현재까지 전체 사용종료 매립지의 55%가 주택, 공

〈표 1〉 시도별 사용종료 매립지의 현황

서울	부산	대구	광주	인천	대전	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	제주	계
1	3	4	39	23	67	105	75	10	116	85	190	75	65	15	873

〈표 2〉 면적규모별 사용종료 매립지 현황

구 분	계	<1,000㎡	1~5,000㎡	5~20,000㎡	20~100,000㎡	100~500,000㎡	>500,000㎡
개 소	873 (100%)	95 (11%)	393 (45%)	268 (30.8%)	89 (10%)	24 (2.7%)	4 (0.5%)
매립면적 (㎡)	15,578 (100%)	42 (100%)	881 (5.7%)	2,500 (16%)	3,341 (21%)	5,275 (34%)	3,539 (23%)

장, 농경지 등으로 활용되었으며 나머지 45%는 안정화가 진행중이어 미사용되었다.

폐기물매립지에 구조물을 축조할 때 공학적 우려사항은 폐기물 매립지역의 오염 및 가스 발생 등의 환경적 문제와 본 고에서 논하게 될 안전한 구조물을 구축하기 위한 기초지반으로서의 지반공학 문제이다. 건설부지로서 폐기물매립지반의 활용은 지반공학의 또다른 적용처이다. 전통적 지반공학에서 다루던 전단강도와 압축성 등의 흙과 암반의 역학적 거동, 투수특성, 침투 등의 주제는 여전히 폐기물지반의 조사, 처리, 개량, 상부구조물을 위한 기초의 설계 및 시공에 핵심적인 역할을 할 것이나, 폐기물매립지반이 지니고 있는 구성요소의 불균질성과 흙과 암반 대비 매우 상이한 공학적 특성과 거동은 폐기물매립지반과 관련한 축적된 경험과 자료의 부족과 더불어 향후 지속적으로 연구되어야 할 것이다.

본 고에서는 폐기물매립지반의 공학적 특성과 건설부지로 활용하기 위한 지반의 처리방법을 문헌과 사례연구를 통하여 논하려 한다.

II. 폐기물매립지반의 지반공학적 특성

도시매립장의 고형폐기물은 음식쓰레기와 같이 부패가 가능한 유기성 폐기물에서부터 콘크리트 등의 건설폐기물과 같이 형태를 원형대로 유지하는 폐기물 등 다양한 성상으로 이루어져있다. 폐기물매립지반은 폐기물의 종류가 다양한 만큼 단위중량, 강도, 압축성, 투수특성, 동적특성 등의 지반공학적 물성은 편차가 심하고 그 값을 결정하는 것도 매우 어렵다. 그 이유는 ① 폐기물이 지닌 본질적 불균질성과 지역에 따른 성상의 차이, ② 현장조건을 대표하는 크기를 가진 시료 획득의 난이성, ③ 폐기물 관련하여 합의된 시료채취 및 시험

방법의 부재, ④ 시간에 따른 폐기물 물성의 변화에 기인한다. 따라서 개개 개발대상의 현장 물성은 반드시 실험을 통하여 얻어야 하며, 문헌에 보고된 폐기물 매립지반의 물성은 현장조사의 배경값으로 사용하는 것이 바람직하다.

1. 폐기물의 분류

폐기물 매립지에 반입되는 폐기물은 일반적으로 ① 유리, 금속과 같이 체적변화가 없는 물질, ② 섬유, 종이, 플라스틱과 같이 체적변형이 큰 물질, ③ 음식쓰레기와 같이 부패되는 유기성물질로 구분할 수 있다. 첫번째 부류의 물질은 그 역학적 거동이 불균질성이 높은 자연토사와 같다고 가정할 수 있으며, 두번째 부류의 물질은 과중하지 않은 하중하에서도 침하가 크게 발생하고 전체적으로 비등방성이라 할 수 있다. 세번째 부류의 물질은 분해과정에 의해 단기적으로는 물리·화학적 성질이 변하고 궁극적으로는 형체가 해체됨으로써 체적이 감소하고 가스가 발생하며 연경도가 매우 낮은 물질이라 하겠다.

Landva and Clark(1990)는 폐기물을 유기성 물질(O : Organics)과 무기성 물질(I : Inorganics)로 구분하였다. 다시 유기성 폐기물을 음식쓰레기와 축산폐기물과 같이 분해가 쉽게 일어나는 물질은 OP(Putrescible Organics), 폴리머, 고무, 종이, 섬유, 나무, 유류 등과 같이 분해가 더딘 물질을 ON(Non-putrescible Organics)로 구분하였고, 무기성 폐기물은 금속처럼 부식 등 화학적 풍화가 발생하는 물질을 ID(Degradable Inorganics), 유리, 자연토사, 콘크리트 등과 같이 분해가 전혀 일어나

지 않는 물질을 IN(Non-degradable Inorganics)으로 구분하였다. OP, ID, ON은 폐기물 매립지의 체적감소를 일으키는 간극형성요소이다.

흙에 대해서는 전세계적으로 통용되는 통일분류법(the unified classification system)이 있으며, 통일분류법에 의해 분류된 자연토사에 대해서는 공학적 특성과 적용방안을 쉽게 알 수 있도록 되어있다. 폐기물을 분류하는 목적 중의 하나는 일단 분류가 되면 구분에 상응하는 일관성을 가진 공학적 성질과 연계하는 것인데, 현재 수준으로는 상기한 분류 체계에 따른 축적된 자료가 많지 않고 분류하더라도 폐기물 매립지의 근본적인 이질성을 극복하기에는 앞으로 상당한 노력이 필요하다.

2. 단위중량, 함수비, 유기물 함량, 투수계수

폐기물의 단위중량은 $7 \sim 14 \text{ kN/m}^3$ 사이에 존재하는 것으로 알려져 있다(Mitchell et al., 1995). 단위중량은 폐기물매립과정에서 다짐정도에 따라 변한다. 다짐이 불량한 경우 $3 \sim 9 \text{ kN/m}^3$, 다짐이 적절히 이루어진 경우 $5 \sim 8 \text{ kN/m}^3$, 다짐이 잘 된 경우 $9 \sim 10.5 \text{ kN/m}^3$ 의 값을 보인다(Fissett et al., 1993). 한편 최초 매립시 다짐이 불량해도 폐기물 매립고가 10m 이상되면 단위중량은 증가하여 매립시 초기 다짐이 잘된 폐기물층의 단위중량과 유사한 것으로 보고되었다.

폐기물지반의 함수비는 미국의 경우 10~50% 사이에 존재하며 강수량보다 증발량이 많은 지역에서는 함수비가 25% 수준이다. 음식쓰레기가 차지하는 비율이 높은 우리나라의 경우 단위중량과

함수비는 위의 숫자보다 클 것으로 판단된다. 폐기물의 단위중량(즉 체적과 중량)과 함수비를 측정할 때 적지않은 폭의 측정오차가 발생하므로 표본크기와 측정방법에 주의가 필요하다.

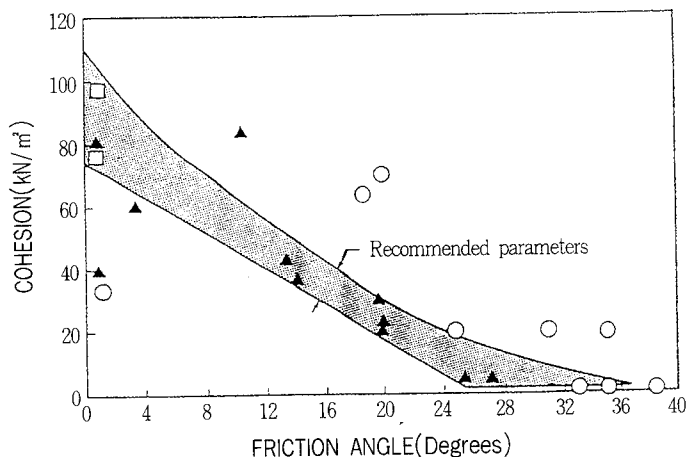
폐기물지반의 투수계수는 $1 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-4}$ 범주에 속하며 투수계수는 단위중량과 반비례적 관계를 보인다(Landva and Clark, 1990). 유기물 함량은 5%에서 크게는 95%까지 보고된 바 있으며, 폐기물내 함수비가 증가하면 유기물함량도 증가하는 경향을 보인다. 폐기물 함수비 측정을 위해서는 $90 \sim 100^{\circ}\text{C}$, 유기물 측정을 위해서는 $450 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 에서 가열한다.

3. 강도특성

폐기물지반의 전단강도는 자연토사와 마찬가지로 Mohr-Colomb 파괴도에서 마찰각(ϕ)과 점착력(C)으로 표시될 수 있으며, 직접전단 혹은 삼축

압축시험을 이용한 실내실험, 현장시험결과와 매립장 운영시 획득한 계측자료를 바탕으로한 역산, 현장실험 등의 방법으로 구할 수 있다. 실내실험의 경우 상대적으로 큰 시험시편(수십 cm)을 사용할 수 있고, 시험이 간편한 직접전단시험이 삼축 압축시험보다 보편화 되어 있다. 그러나 시험방법과 관계없이, 측정된 폐기물의 마찰각과 점착력은 일정하지 않으며 편차도 조건에 따라 매우 크다(Singh and Murphy, 1990). 폐기물의 역학적 거동은 ① 폐기물의 초기 성상, ② 매립방법, ③ 폐기물 전처리의 적용여부, ④ 매립경과시간, ⑤ 응력상태, ⑥ 기타 환경적 조건 등의 인자에 영향을 받는다.

역산과 현장실험을 통해 다양한 조건의 폐기물로부터 구한 강도정수는 <그림 1>에 나타나 있다. 점착력은 약 $75 \sim 110 \text{ kN/m}^2$, 마찰각은 $25 \sim 36^{\circ}$ 의 범주에 있으며, 점착력과 마찰각의 최대값은 대립



<그림 1> 폐기물의 마찰각과 점착력의 관계(Singh and Murphy, 1990)

적으로 나타나는 경향을 보인다. 점착력은 입자간의 결합(bonding)에 기인한 것을 고려할 때, 폐기물이 진정한 의미에서 점착력을 발현하는 것은 아니며 측정된 폐기물의 점착력은 폐기물 구성요소간의 결속(interlocking) 혹은 공간적 상치(overlapping)에 기인한다.

폐기물은 파괴에 이르기까지 변형률이 매우 크며, 변형이 30% 이상 발생하여도 파괴가 일어나지 않는 경향이 있다. 이는 폐기물 강도특성을 Mohr-Colomb 파괴론으로 설명하는 것이 적절하지 않다는 것을 의미하며, 동시에 폐기물매립시설의 설계의 경우에서와 같이 흙, 토목섬유 등과 함께 폐기물매립지를 구성할 때 폐기물 지반자체의 파괴는 다른 구성요소의 파괴에 비해 폐기물구조체의 안정측면에서 결정적이지 않음을 말한다(Mitchell et al, 1995).

4. 압축특성과 침하

폐기물의 압축특성과 침하는 지지력과 더불어 폐기물매립지반의 건설부지로서의 활용에 매우 중요한 요소이다. 폐기물지반은 수개월에 걸쳐 하중에 의한 폐기물의 변형, 휨, 파쇄, 공간재배치 등의 역학적 과정의 결과로 초기침하가 발생한다. 장기적으로는 폐기물 구성요소(혹은 입자)의 해체 및 간극으로의 이동, 생물학적 분해, 산화/연소 등 물리화학적 반응, 용해성물질의 용해, 크립, 이런 요인들의 복합적 작용에 의해 침하가 발생한다. Grisolia and Napoleoni(1996)는 <그림 2>에 나타난 바와 같이 폐기물매립지반의 침하를 ① 폐기물

간의 재배치로 인한 즉시침하, ② 체적변형이 큰 물질의 변형에 의한 침하, ③ 크립과 유기성 물질 분해에 따른 침하, ④ 분해가 완료되는 단계에서의 침하, ⑤ 최종 잔존침하 등 순차적으로 다섯단계로 나누어 해석하는 것을 제안하였다.

폐기물 지반은 자연상태에서 2~20% 혹은 그 이상의 침하가 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러나 폐기물지반의 초기 및 장기침하를 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 현재로서는 초기침하를 예측할 수 있는 신뢰성 있는 해석방법이 없고, 시간의 함수인 장기침하예측에도 하중에 의한 침하와 매립기간에 따라 변화하는 침하를 별도 예측하여 중첩하려는 시도(Sower, 1973 ; 박현일 등, 1998)는 있으나, 이 또한 일반적으로 적용될 수 있는 수준은 아니다. 침하예측이 어려운 것은 폐기물의 무작위성, 분해특성, 매립방법, 폐기물 지반내 국소적 함몰 및 분해에 따른 불규칙 침하 등의 이유 때문이다. 더욱이 폐기물지반이 연약지반위에 조성되었다면 침하거동의 예측은 더욱 복잡해지고 어려워진다.

지반공학에서 접근하는 전통적 침하예측은 탄성영역에서 하중에 의한 즉시 침하, 하중에 의한 입자간 간극수의 배출에 기인한 1차 압밀, 장기적 크립(creep)에 의한 2차 압밀로 요약된다. 1·2차 압밀량은 하중과 침하량의 관계를 소위 $e-\log \sigma$ 곡선에서 기울기로 구하며, 이때 1차와 2차 압밀부분의 기울기를 각각 압축지수 C_c 와 이차압축지수 C_{α} 로 정하였다. 폐기물에 대한 압축실험결과를 도시할 때, 압축량(e) 대신 압축비율(ϵ)을 사용하면

ϵ - $\log \sigma$ 곡선의 기울기를 수정압축지수 C_{cr} 와 수정 이차압축지수 C_{α} 이라 한다. 여기서 e 는 간극비로서 매체내 간극의 부피 대 골재입자부피의 비이며, ϵ 은 변형률로서 압축량 대 초기높이의 비이며,

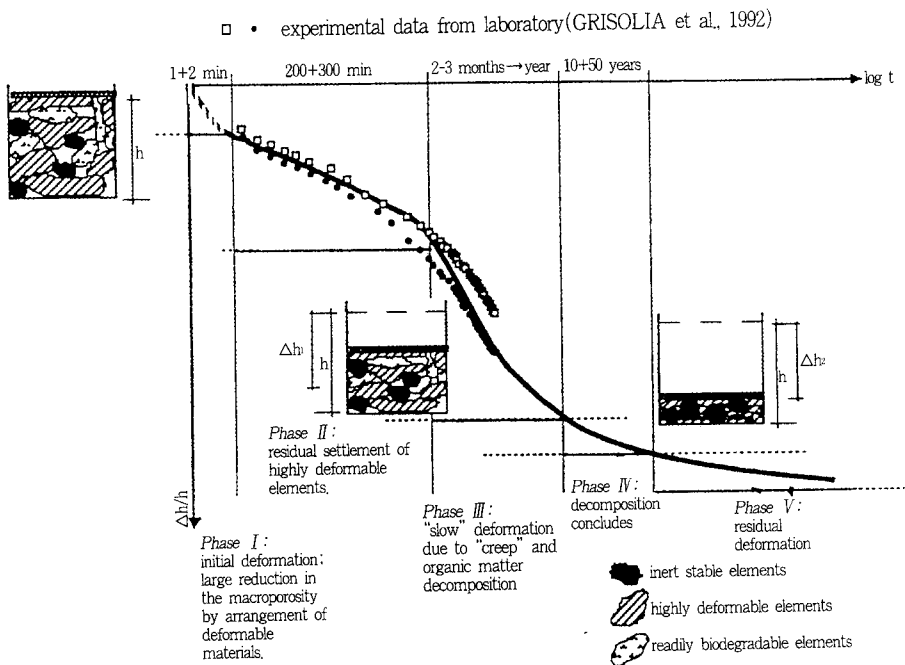
σ 는 kN/m^2 의 단위를 가지는 외부하중에 의한 압력이다.

대표적 압축지수의 값은 <표 3>에 나타나 있다. 폐기물지반의 침하예측을 위해 압축계수를 사용할

<표 3> 폐기물 지반의 대표적 압축지수의 값(Mitchell et al. 1995)

	압축지수	비고
1차 압밀	압축지수 $C_c = 0.15e_0 \sim 0.55e_0$	유기물 함량이 클수록 큰 값 적용
	수정압축지수 $C_{cr} = 0.10 \sim 0.41$	"
2차 압밀	2차압축지수 $C_{\alpha} = 0.03e_0 \sim 0.09e_0$	폐기물 분해가 활발한 조건일수록 큰 값 적용
	수정2차압축지수 $C_{\alpha r} = 0.01 \sim 0.03$	" 상한값 = 0.1

주 : 압축지수는 e - $\log \sigma$ 곡선의 기울기이며, 수정압축지수는 ϵ - $\log \sigma$ 곡선의 기울기, e_0 는 해당폐기물지반의 하중적용전 초기 간극비



<그림 2> 도시폐기물의 압축곡선(Grisolia and Napoleoni, 1996)

때 주의가 필요하다. 그 이유로서 첫째, 1차압축지수(Cc)와 수정1차압축지수(Ccr)가 폐기물지반이 받고 있는 초기응력상태에 따라 변하며 시간에 따라 응력이 변함으로써 $e-\log \sigma$ 곡선이 직선이 아니기 때문이다. 둘째, Cc와 Ccr은 초기 폐기물지반의 높이 혹은 간극비의 함수인데 신뢰성있는 이들의 값이 알려져있지 않기 때문이다. 셋째 1차압밀에 의한 침하량은 유효응력의 함수이고, 다시 유효응력은 변화의 폭이 큰 폐기물의 단위중량과 침출수의 량의 함수이기 때문이다. 폐기물매립지반의 침하예측이 매우 어려운 것은 사실이나, 폐기물지반의 압축성을 나타내는 지수의 값 중에서 안정축 값을

사용하여 사용이 종료된 시점에서부터 폐기물지반의 일반적인 침하의 범위를 산정할 수는 있다.

III. 폐기물지반의 개량

폐기물지반의 압축성과 강도를 개선하기 위해 상부구조물의 공정이 시작되기전 폐기물지반에 대한 개량조치가 필요하다. 폐기물매립지반은 원리적으로 다짐, 배수, 고결화, 보강 등의 공법으로 개량되어지며, 대표적인 공법은 <표 4>에 나타나 있다. 본 절에서는 개량공법 중 다른 방법에 비해 적용성이 뛰어나고 개량효과의 확인이 용이한 동다짐공법에 대하여 설명한다.

<표 4> 폐기물매립지 개량공법(嘉門雄史, 1991)

공 법			공 법 특 성
고 밀도화 사전압축	기계적압축	압축, 고결화공법	<ul style="list-style-type: none"> • 30% 체적감소하며 반 영구적 • 플랜트 필요
	재 하, 충 격 력	동 다 짐 공 법	<ul style="list-style-type: none"> • 간편하고 경제적인 시공방법 : 개량공기가 짧을 때 유효 • 20~30% 체적감소 • 개량심도가 한정적
		여 성 토 공 법	<ul style="list-style-type: none"> • 시공이 확실함 • 리바운드 가능성 있고 장기간의 개량기간 필요
	치환, 압축	진 동 다 짐 공 법	<ul style="list-style-type: none"> • 심층개량가능하며 말뚝효과 있음. • 타입이 어려우며 주대책공으로 취약
간 극 충 진		그 라 우 트 공 법	<ul style="list-style-type: none"> • 개량심도 선택 가능 • 적용성의 검토필요하며 부분적 개량에 적합
無 機 化		소 각 공 법	<ul style="list-style-type: none"> • 안정화에 효과적 • 반출, 매립대책 필요하며 소각잔회처리방안 필요
양 질 재 치 환		치 환 공 법	<ul style="list-style-type: none"> • 공법이 확실하고 공기가 짧음 • 반출장소 필요하며 보조수단으로 사용가능

동다짐공법은 폐기물매립지반의 개량에서 가장 빈번히 사용되는 공법 중의 하나이다. 동다짐공법은 수신통까지 달하는 물체를 공중에서 반복적으로 낙하시켜 개량대상지반의 압축성과 강도를 증진시키는 공법이다. 동다짐공법은 시공비가 다른 개량공법에 비해 저렴하고, 운영이 간단하며, 경사면에서도 시공이 가능하고, 물에 잠긴 지반의 개량에도 사용될 수 있다. 반면 중장비가 필요하고, 인접구조물에 진동피해를 줄 가능성이 있으며, 개량효과가 심도가 깊어질 수록 줄어드는 단점이 있다. 동다짐에 의한 최대개량심도(D, m)는 낙하하중의 크기(W, ton)와 낙하고(D, m)의 함수로서, 경험식을 사용하여 추정한다.

$$D = \sqrt{WD} : \text{Menard and Broise(1975)} \dots\dots\dots(1)$$

$$D = \frac{1}{2}\sqrt{WD} : \text{Leonard et al.(1980)} \dots\dots\dots(2)$$

$$D = (0.65 \sim 0.80)\sqrt{WD} : \text{Lukas et al.(1980)} \dots\dots\dots(3)$$

식 (1), (2), (3)은 자연토사지반에서 얻은 경험식이므로 폐기물지반에 그대로 적용되지 않을 수 있다.

동다짐을 수행하면 압밀 및 간극수의 감소, 큰 간극으로의 미세입자의 이동(ravelling), 속이 빈 폐기물의 함몰에 의한 침하는 현저히 줄일 수 있으며, 크립에 의한 침하양상에도 상당부분 변화를 줄 수 있다. 폐기물매립지반의 장기침하에 큰 영향을 주는 폐기물의 분해에 따른 침하에도 동다짐은 순기능을 한다. 동다짐으로 인해 폐기물의 밀도가 증가되면 폐기물내 산소의 양이 줄어들어 폐기물

의 분해속도는 늦어진다. 이는 폐기물의 분해가 호기성 상태보다는 혐기성 상태에서 빠르게 진행되며, 폐기물내 침출수의 양이 줄어들수록 분해의 속도가 늦어지기 때문이다. 동다짐은 적절히 적용되었을 때, 초기침하의 70%, 이차침하의 50% 정도까지 감소시킬 수 있다(한국건설기술연구원, 1992).

동다짐공법의 시공품질관리는 표면침하측정, 다짐분화구의 크기측정, 표준관입시험, 콘다짐시험, 평판재하시험, 관입저항측정, 비파괴시험 등의 방법으로 이루어진다.

표면침하와 다짐분화구 크기의 측정법은 현장에서 신속하게 이루어질 수 있는 품질관리 방법이나, 계측결과와 다짐에 의한 폐기물지반개량물성간의 상관관계를 구할 수 없는 단점이 있다. 동다짐에 의한 분화구의 크기가 클수록, 폐기물지반의 압축성이 크다는 것을 말하며 동다짐이 더 필요하다는 것을 의미한다.

표준관입시험과 콘관입시험은 가장 많이 사용되는 지반조사방법으로 개량된 지반의 종단방향의 개량정도를 알 수 있다. 그러나 표준관입시험의 경우 N치를 폐기물지반의 강도와 연계할 수 있는 경험과 자료가 축적되어 있지 않고, 두 방법 모두 폐기물지반을 관통하며 실험할 때, 폐기물내 콘크리트 등의 방해물을 지날 때 관입의 어려움이 있다.

평판재하시험은 도로에서 기초지반의 지지력 평가에 많이 사용되는 보편화되어 있고 간단한 현장 실험방법이다. 상부구조물에 의해 작용되는 것과 같은 크기의 응력으로 평판재하실험을 실시하더라도, 평판과 실제기초의 침하량은 하중영향범위가

다르므로 결과적인 침하량은 다르다는 것을 주목할 필요가 있다.

비파괴시험은 비교적 새로운 현장실험방법으로서 SASW(Spectral Analysis of Surface Wave), WAK(Wave Activated Stiffness Test) 등의 방법이 있다. 이들 방법은 표준관입시험, 콘관입시험에 비해 훨씬 큰 구역에 대해 개량대상지반의 평균개량정도를 구할 수 있는 반면, 시험결과 해석에는 숙련도가 높은 전문가가 반드시 필요하다. 동다짐 품질관리방법으로서 비파괴시험의 적용에는 Briaud et al.(1990)과 Bouazza et al.(1996)에 있다.

IV. 폐기물 지반의 기초

기초지반은 상부구조물의 중량에 의해 변형되므로 구조물의 형태나 지반조건 등에 따라 크고 작은 침하가 발생하며, 폐기물 매립지반의 경우 침하량이 매우 커서 구조물의 기능적, 심미적, 혹은 안정적 문제를 유발하기 쉽다. 이 문제의 접근은 연약지반에서 흔히 일어나는 구조물과 기초지반의 변형에 대한 지반공학적 경험을 활용할 수 있다. 부등침하로 인한 구조물의 피해를 극소화하기 위한 일반적인 방안으로는 (1) 구조물의 경량화, (2) 구조물 길이의 단축, (3) 구조물의 고강성화, (4) 구조물의 중량배분 고려, (5) 인접구조물과의 간격 확대, (6) 지반조건을 고려한 구조물의 방향 및 배치 결정 등이다. 이들 방법들의 핵심 아이디어는 침하가 발생하는 경우 부등침하보다는 균등침하를 유도하고, 어느정도 부등침하에 구조물

이 견딜수 있도록 기초 및 구조물의 강성을 높이거나 반대로 지반과 구조물이 조화롭게 침하하도록 연성구조물을 만드는 것이다. 또한 구조물의 손상에 많은 영향을 미치는 부등침하량 혹은 부등침하경사를 줄이기 위해 구조물을 일체형 장대구조물 보다는 소단위·분리형을 선택하는 것이다.

폐기물 표면에 구조물이 직접 지지될 경우 표토층 토사의 압축을 통한 편칭파괴(punching failure) 혹은 토사의 편칭과 아래부분 폐기물의 회전전단파괴를 일으킬 수 있다. 하중이 크지 않은 구조물에 사용되는 얇은기초는 예상하지 못한 연약지반에 대한 허용지지력을 고려하여 안전측으로 설계되어야 한다. 따라서 일방향으로 결합된 strap 기초나 이방향으로 결합된 mat 기초가 안전하며, 구조물은 부등침하를 견디기 위해 충분한 강성을 가지거나 반대로 침하에 적응하기 위하여 충분히 유연하여야 한다(한국건설기술연구원 1992).

바닥 슬라브는 부등침하에 대비하여 보강된 철근콘크리트 구조로 될 수 있으며, 바닥 슬라브의 길이가 긴 경우 중간에 키(key)로 연결된 시공이음부를 둘 수 있다(Gifford et al., 1990). 바닥 슬라브의 침하를 막기위한 다른 방법은 현장지반조사에서 나타난 침하우려지역에 부분적으로 고압 그라우팅을 실시할 수 있다. 슬라브와 슬라브하부의 설계개념도는 <그림 3>에 있다. 사전 다짐된 폐기물지반위에 표토정지를 위해 잠석층을 설치하였고 그 상부에 가스배출시설과 가스차단층을 두었으며 가스차단층의 보호층으로 토사를 설치하였다.

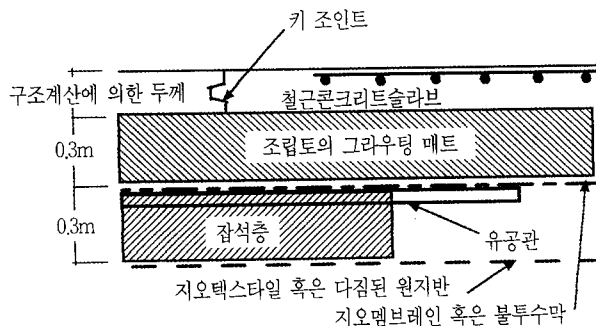
폐기물지반에 비교적 고층의 건물의 기초로는

폐기물층을 관통하여 견고한 지반에 설치하는 깊은기초가 적절하다. 이때, 고려할 사항은 깊은기초의 (1) 시공성, (2) 부식에 대한 대책, (3) 부마찰력을 고려한 깊은기초의 지지력이다. 폐기물지반 내 콘크리트 등의 건설폐기물이 존재하면 말뚝의 관입이 어려우며, 이를 해결하기 위해 말뚝관입위치에 사전 augering을 실시할 수 있다. 항타파일 외에 폐기물지반을 굴착한 후 견고한 원지반 층에 기초를 설치하는 open shaft나 pier등이 사용되기도 한다. 폐기물지반에 설치된 깊은기초는 부식으로부터 보호조치가 필요하다. 콘크리트 충전 강관 말뚝을 적용할 경우 강관은 부식보호막으로만 사용되고 하중지지역할을 하지 않는 것으로 설계된다. 강관말뚝으로만 기초가 설계될 경우 부식을 고려하여 강관말뚝에 여유두께가 필요하다. 사전 다짐이 실시된 폐기물 지반에 말뚝기초를 시공한 후에도 폐기물지반의 침하는 폐기물의 분해와 크립에 의해 발생하며, 이로 인해 말뚝기초에 부마찰력이 작용한다. 말뚝기초에 작용되는 부마찰력

은 말뚝 혹은 케이슨기초와 폐기물 간의 점착력과 폐기물지반의 전단강도를 추정 혹은 실험으로 구하여 결정한다. 미국 뉴욕주 알바니(Albany) 매립장의 시공사례보고(Gifford et al., 1990)에 의하면 부마찰력의 크기는 말뚝기초의 설계지지력에 15~20%에 달하였다.

배수 및 하수로의 경우 침하에 따른 역흐름 방지를 위하여 충분한 경사를 주고 파이프 자체는 부등침하에 유연하여야 하며, 매립물과 접촉하는 경우 부식에 강하여야 한다. 구조물간을 연결하는 차도, 보도, 파이프는 부등침하를 고려하여 충분히 유연하게 하며 향후 허용침하를 벗어난 불규칙면을 고려 설계 변경에 여지를 남겨두어야 한다. 가스관 등 중요한 구조물은 폐기물을 양질의 토사로 치환하고 다져 침하로 인한 피해를 방지해야 한다.

기초의 설계에 있어 기초 종류의 선택은 상부구조물의 특성에 따라 정해진다. 폐기물지반의 활용에 있어 충분한 현장조사와 실험은 반드시 선행되어야 하며, 구조물의 안정성과 경제성을 높이기위



〈그림 3〉 슬라브의 설계 개념도(Gifford et al., 1990)

해 현장조사의 결과에 따라 주요구조물, 도로, 설비관로, 공원부지 등의 배치가 이루어지는 것이 필요하다. 또한 폐기물매립지반은 구조물의 안정성과 더불어 가스, 침출수 등의 환경적 문제를 해결할 수 있는 대책도 함께 마련되어야 한다.

V. 결 론

폐기물매립지를 건설부지로 활용하는 사례가 국내외에서 증가하고 있으며, 특히 국토가 협소하고 도시지역에서 새로운 개발대상지역 확보가 어려운 우리나라에서는 사용종료된 폐기물매립지의 활용가치가 크다. 본 고에서는 폐기물매립지를 건설부지로 활용할 때, 상부구조물의 기초지반으로서 지반공학적 특성과 동다짐공법을 중심으로한 폐기물매립지반 개량공법과 적용가능 기초구조물에 관하여 논하였다. 폐기물매립지반은 지반공학에서 전통적으로 다루어오던 흙과 암반에 비해 전혀 새로운 재료이며, 비균질성과 폐기물 분해에 따른 장기적 침하의 발생이 특성이다. 또한 강도특성 또한 전통적인 지반공학적 접근방법으로 해석이 어려워, 폐기물과 자연토사를 직접적으로 동질화하는 것은 옳지 않으며 폐기물의 거동을 설명할 수 있는 새롭고 발전된 모델의 개발이 필요하다. 이를 위하여 신규 및 사용종료 폐기물매립지에 대한 계측 및 실험이 체계적으로 이루어져 한다. 폐기물 매립지반에서의 기초 선정의 예와 조치사항을 간략히 논하였다. 상부구조물의 위치와 기초의 선정은 폐기물 매립지반에 대한 충분한 현장조사결과에 기초하는 것이 바람직하다. **열린충남**

참 고 문 헌

- 고윤화, "매립지의 사후관리정책", 토양환경 관련 정책 세미나 논문집-우리의 토양 어떻게 보전할 것인가, 한국토양환경학회, 1997, pp.92~107.
- 박현일·이승래·고광훈, "분해가 고려된 쓰레기 매립지의 장기 침하 거동", 한국지반공학회지, 제14권 제1호, 1998, pp.5~14.
- 한국건설기술연구원, 도시폐기물 매립장의 건설부지활용과 위생매립 시스템에 관한 연구, 연구보고서 건기연 92-GE-112, 1992.
- 嘉門雄史, "廢棄物の 固め", 土と基礎, Vol.39, No.4, 1991, pp.61~68.
- Bouazza, A, van Impe, W.P., and Haegeman, W., "Quality Control of Dynamic Compaction in Municipal Solid Waste Fills", *Proc. of the 2nd Intl. Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, Japan, Vol.2, 1996, pp.635~640.
- Briaud, J.L., Liu, M.L., and Lepert, Ph., "The WAK Test to Check the Increase in Soil Stiffness due to Dynamic compaction", *Geotechnics of Waste Landfills~Theory and Practice*, ASTM STP 1070, 1990, pp.107~122.
- Fang, H.Y., "Engineering Behavior of Urban Refuse, Compaction Control and Slope Stability Analysis of Landfill", *Waste*

- Disposal by Landfill-Green '93*, R.W. Sarsby (ed), Balkema, Rotterdam, 1993, pp.47~72.
- Fasset, J.B., Leonards, G.A., and Repetto, P.C., "Geotechnical Properties of Municipal Solid Wastes and Their Use in Landfill Design", *Proc. of Waste Tech 93 Conference*, 1993.
- Gifford, G.P., Landva, A.O., and Hoffman, V.C., "Geotechnical Considerations when Planning construction on a Landfill", *Geotechnics of Waste Landfills-Theory and Practice*, ASTM STP 1070, 1990, pp.41~56.
- Grisolia, M., and Napoleoni, Q., "Geotechnical Characterization of Municipal Solid Waste", *Proc. of the 2nd Intl. Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, Japan, Vol. 2, 1996, pp.641~646.
- Landva, A.O., and Clark, J.I., "Geotechnics of Waste Fill", *Geotechnics of Waste Landfills-Theory and Practice*, ASTM STP 1070, 1990, pp.86~103.
- Leonards, G.A., Cutter, W.A., and Holtz, R.D., "Dynamic Compaction of Granular Soils", *J. of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.106, No.GT1, 1980, pp.35~44.
- Lucas, R.G., "Densification of Loess Deposits by Pounding", *J. of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.106, No.GT4, 1980, pp.435~446.
- Menard, L., and Broise, Y., "Theoretical and Practical Aspects of Dynamic Consolidation", *Geotechnique*, Vol.15, No.1, 1975, pp.3~18.
- Mitchell, J.K. (1981), "Soil Improvement : State-of-the-Art", *Proc. of the 10th Intl. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Sweden, June 15~19.
- Mitchell, J.K., Bray, J.D., and Mitchell, R.A., "Material Interactions in Solid Waste Landfills", *Geoenvironment 2000-Characterization, Containment, Remediation, and Performance in Environmental Geotechnics*, Geotechnical Special Publication No. 46, ASCE, 1995, pp.568~590.
- Singh, S., and Murphy, B., "Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills", *Geotechnics of Waste Landfills-Theory and Practice*, ASTM STP 1070, 1990, pp.240~258.
- Sower, G.G. (1973), "Foundation Problems in Sanitary Land Fills", *Proc. of the 8th Intl. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, Vol.2, pp.207~210.