

# 폐기물 매립지반에서의 PG Pile의 적용성에 관한 연구

천병식 · 최춘식  
한양대학교 토목공학과

## A Study on the Utilization of PG-Pile in Waste Landfill

Byung-Sik Chun, Choon-Sik Choi  
Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

**KEY WORDS:** PG Pile PG파일, Waste landfill 쓰레기매립장, Bearing capacity 지지력

**ABSTRACT:** Waste landfill consists of cover layer, glass, robber, sheet, food waste, etc and is in very loose state. So, the proper method must be applied to ground improvement of waste landfill according to its characteristics and conditions.

In this paper, analysis for field tests as static loading test, bearing capacity test were performed. In result, PG pile method proved to be effective and economic, because it affected increase of end bearing capacity, the prevention of differential settlement and over 20% increase of density by expansion of pile.

### 1. 서 론

경제성장에 따른 공업용지 및 주거용지의 지속적인 수요 증가와 교통 도로망의 확충, 공항 및 항만시설물에 대한 건설 수요의 증가 추세에 따라 해안과 내륙에 형성되어 있는 연약 지반 또는 폐기물 매립지반의 활용을 통한 국토의 효율적인 이용이 필요한 실정이다. 그러나 폐기물 매립지반은 구조물 건설 도중 및 완공후 발생하는 지반침하, 지반지지력, 환경문제 등으로 인해 설계 및 시공에 많은 어려움을 주고 있다. 현재 활용되고 있는 폐기물매립장 지반개량공법으로는 치환공법, 동다짐공법, 재하성토공법, 약액주입공법등이 있으나 폐기물 매립지의 처리방안은 환경 공학적인 측면으로 침출수, 가스 등에 유해성이 없어야 하며 지반 공학적인 측면으로서 지반침하, 지지력 부족 등에 대하여 안전성을 동시에 확보하여야 한다.(한국건설기술연구원, 1999) 또한 지반개량에 사용되는 주입재는 구입이 용이하여야 하며 산업폐기물을 재활용하여 소정의 목적을 이룰 수 있다면 환경적인 면과 경제적인 면에서 많은 효과를 볼 수 있을 것이다. PG Pile공법에 주재료로 사용되는 Fly ash나 Bottom ash는 화력발전소에서 발생하는 산업폐기물로서 일부를 제외하고 대부분이 ash pond에 고가의 비용으로 폐기처리되고 있는 바, PG Pile공법은 산업폐기물 재활용 차원과 경제적인 공법이며 또한 주입시 Pack내부에 주입된 주입재가 Pack외부로 유출되지 않아 환경공학적인 측면에서 효과적이며 저소음, 무진동공법으로 민원문제를 최소화할 수 있고 Pack에 의한 확실한 구근형성으로 지지력 증대, 침하량감소, 지반의 압밀효과등 지반공학적인 측면에도 효과를 발휘하는 공법임을 시험시공결과와 자료분석을 통하여 연구하고자 한다.

### 2. 난지도 폐기물매립지반의 특성

#### 2.1 지층상태

난지도 매립지의 지형 및 지질(김용우, 1995)은 한강 하도의 충적퇴적층과 서로 수리적으로 연결된 일종의 하천 충적층계로써 제 4기의 하도 퇴적층으로 이루어져 있다. 매립지의 최상부에는 현 쓰레기매립층이 분포되어 있고, 그 하위에 침출수에 의해 오염된 충적대수층과 기반암의 풍화대 및 기반암 순으로 구성되어 있다.

매립토층은 서울시 일원에서 발생한 각종 쓰레기와 복토재의 혼합으로 구성되어 있다. 매립토의 구성물질은 연탄재, 각종 플라스틱류, 비닐류, 유리편, 파손된 벽돌, 벽재, 슬러지 및 실트질 모래와 전석의 혼합층으로 이루어져 있으며 매우 느슨하다. 간혹 복토재(실트질 모래와 풍화토)구간은 보통조밀 내지 조밀하다.

매립지 내에서 확인된 매립토의 두께는 1.1~13.1m에 이르며, 샛강 쪽에서 평균 두께는 3.25m인데 반해, 한강변 쪽에서 평균 두께는 8.03m 정도이다. 쓰레기 매립지의 외곽 지역 중에서 쓰레기가 가장 두텁게 매립된 곳은 난지도 매립지 북서단의 한강변 부근으로 그 두께는 1.1~1.6m 정도이다.

매립토층의 하부에 존재하는 충적층은 한강 및 그 지류의 유수에 의해 운반 퇴적되어 형성된 미고결 상태의 하상 퇴적층으로 매립지 저변에서 기반암과 풍화대 상단면까지 분포한다.

## 2.2 폐기물 매립부지의 활용시 지반공학적 문제점

폐기물 매립부지의 활용을 위하여서는 폐기물 매립지는 다음과 같은 지반공학적 문제점들에 대하여 단기적 및 장기적인 거동이 검토되어야 한다. 검토 항목을 열거하면 다음과 같다.

- ① 지반 지지력의 부족
- ② 폐기물의 압축특성과 침하
- ③ 쓰레기의 부패 및 발생가스
- ④ 침출수의 발생 및 토양오염

## 2.3 쓰레기 매립지반의 압축특성

2.2절의 검토 항목 중 폐기물의 압축특성과 침하는 지지력과 더불어 폐기물 매립지반의 건설부지로서 활용을 위하여 매우 중요한 요소이다. 폐기물 지반은 수 개월에 걸쳐 작용하중에 의한 폐기물의 변형, 휨, 파쇄, 공간재배치 등의 역학적 과정의 결과로 초기침하가 발생한다. 장기적으로는 폐기물 구성요소(혹은 입자)의 해체 및 간극으로 이동, 생물학적 분해, 산화연소 등 물리화학적 반응, 용해성 물질의 용해, Creep 등의 복합적 작용에 의해 침하가 발생한다. Grisolia & Napoleon(1996)는 그림 1에 나타난 바와같이 폐기물 매립지반의 침하는

- ① 폐기물간의 재배치로 인한 즉시침하
- ② 체적변형이 큰 물질의 변형에 의한 침하
- ③ Creep과 유기성 물질 분해에 따른 침하
- ④ 분해가 완료되는 단계에서의 침하
- ⑤ 최종 잔류 침하

등 순차적으로 다섯단계로 구성된다. 폐기물 매립지반은 자연상태에서 초기 매립고의 2~20% 혹은 크게는 30~40%까지도 침하가 발생하며(Ling et al. 1998), 부등침하는 두께 8~10m의 매립지에서 횡방향 길이 30m 기준으로 약 25%정도 발생하는 것으로 조사된 바 있다(Linne et al. 1994). 그러나 폐기물 지반의 초기 및 장기침하를 예측하는 것은 매우 어렵는데 이는 폐기물의 무작위성, 분해특성, 매립방법, 폐기물 매립지반내 국소적 함몰 및 분해에 따른 불규칙 침하 등의 이유 때문이다. 더욱이 폐기물 매립지반이 지반공학에서 접근하는 전통적 침하예측은 탄성영역에서의 하중에 의한 즉시침하, 하중에 의한 입자간 간극수의 배출에 기인한 1차 압밀, 장기적 Creep에 의한 2차 압밀로 요약된다. Fasset et al.(1994)는 2차압밀부분을 통합하여 그림 2로부터

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} + C_a \log \frac{t_f}{t_i} \quad (1)$$

를 제안하였고, 여기에서  $t_i$ 와  $t_f$ (일)는 1차압밀 시간과 2차압밀

시간이다. 대표적 압축계수(혹은 침하계수)의 값은 표 1에 나타내었다. 압축계수를 사용하여 폐기물지반의 침하를 예측할 때에는 주의를 요한다. 그 이유로서는 다음과 같다.

- ① 1차 압축지수( $C_c$ )와 수정 재압축지수( $C_{cr}$ )가 폐기물매립지반이 받고있는 초기응력상태에 따라 변하며 시간에 따라 응력이 변함으로써 e-log P곡선이 직선이 아니다.
- ②  $C_c$ 와  $C_{cr}$ 은 초기 폐기물지반의 높이 혹은 간극비의 함수인데 신뢰성이 있는 이들의 값이 알려져 있지 않다.
- ③ 1차압밀에 의한 침하량은 유효 응력의 함수이고, 다시 유효응력은 변화의 폭이 큰 폐기물의 단위중량과 침출수양의 함수이다.
- ④ 폐기물은 압축성이 매우 커서 1차압밀과 2차압밀이 동시에 진행되는 특성을 지니므로 1차압밀에 의한 침하크기와 소요시간을 명확히 알기 어렵다.

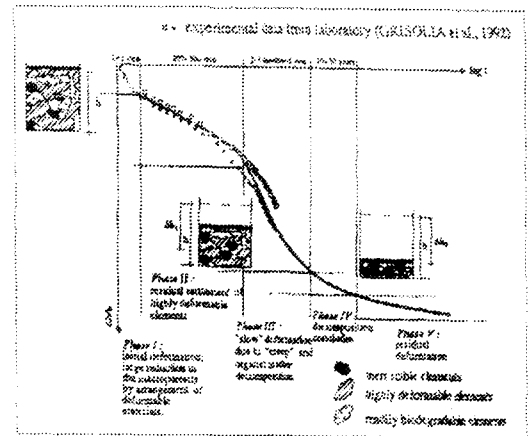


그림 1. 도시폐기물의 압축곡선 (Grisolia and Napoleon, 1996)

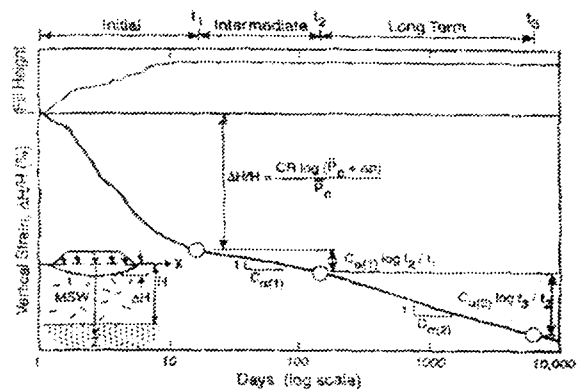


그림 2. 폐기물 매립지반의 침하 모델 (Stulis et al. 1995)

표 1. 폐기물 지반의 대표적 침하계수의 값(After Mitchell et al., 1995)

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

비고 : 압축지수는  $e$ -log P곡선의 기울기이며, 수정압축지수는  $\varepsilon$ -log P곡선의 기울기,  $e_0$ 는 해당폐기물지반의 하중 적용전 초기간극비

표 2. After Oweis and Khear(1998) ( $C_a=2$ 차 압축지수)

재 료	$C_c$	$C_{cr}$	$C_a$	재 료	$C_c$	$C_{cr}$	$C_a$
피트(pear)	$0.75e_0$			미국 미시건주 소재 15년 경과 매립지			0.08
미국 보스턴 소재 15년 경과 매립지		0.26		미국 뉴저지주 소재 10년 경과 매립지			0.21
미국 웨스트 버지니아주 소재 오래된 매립지		0.20		미국 뉴저지주 헤리슨 소재 매립지	$0.15e_0$		
유기물함량이 적은 경우	$0.15e_0$			토사혼입율이 높은 오래된 매립지			0.01 ~ 0.04
유기물함량이 많은 경우	$0.15e_0$			캐나다 매립지에 대한 실내실험 결과			0.17 ~ 0.36
호주 멜버른 소재 15년 경과 매립지	$0.15e_0$						

### 3. PG Pile 공법

#### 3.1 PG Pile 공법의 개요

쓰레기매립지반 개량공법에 적용하는 공법중 가장 신뢰성이 있는 PG Pile공법은 WGS Pack의 구근을 형성시켜 Pile의 역할을 동시에 Pack의 팽창으로 인한 압밀을 가속화하여 지반강도를 증대시켜 불균질한 폐기물 매립지반의 공극을 극소화함으로써 완벽한 개량효과를 얻을 수 있으며 산업폐기물인 Fly ash를 주재료(김영근, 박유신, 1997)로 활용하는 폐기물 재활용 효과 및 slime이 발생되지 않는 환경 친화적인 저소음·무진동 공법이다.

#### 3.2 PG Pile 공법의 특징

Pack을 선굴착공내에 건입하고 물탈을 주입하여 완벽한 파일 구근을 형성(쓰레기로 인한 파일의 절단을 방지하고 일체화된 파일이 형성됨)하고 그라우팅시 주입압으로 인하여 파일이 팽창됨으로서 주변지반이 방사방향으로 압밀됨으로 지반강도가 증대되는 개량효과가 있으며(상재하중에 의한 침하억제, 지시력 증대효과 등이 있다) 대상지층이 매우 불균질한 폐기물 매립지반이라는 특성 때문에 예상치 못한 공극속으로의 주입재가 유출되는 등 개량효과를 정량화 할 수 없는 문제점을

Pack을 이용함으로써 해결할 수 있다. 또한 시공시 Slime이 전혀 없어 환경친화적이며 저소음, 무진동이므로 주변지역의 환경문제 등 민원을 최소화할 수 있으며 화력발전소 부산물인 석탄회(연간 300만톤 부산)를 주재료로 사용함으로써 폐기물의 재활용이란 잇점이 있으며, 아울러 상당한 공사비가 절감될 수 있다.

### 4. PG Pile시공 결과 분석

본 현장은 서울시 상암동 난지도에 위치하고 있으며, 본 현장의 주변으로 도로와 산, 건설현장이 위치한 상태이므로 굴착 진행 및 현장시험에 따른 주변지반의 거동상태를 파악하여 필요 시 이에 따른 적절한 보강대책을 수립하기 위한 Data를 확보하기 위하여 계측과 압축강도시험, 정재하시험, 평판재하시험을 시행하였다.

#### 4.1 경사계 계측결과

파일 주변지반의 강도증대효과는 평판재하시험결과 뿐만 아니라 말뚝주변에 일정한 거리를 두고 설치한 경사계 측정결과 말뚝주변에서 10cm의 방사방향이 압축(반경 20cm  $\Rightarrow$  반경 30cm)이 진행된 PG파일에서 방사방향으로 팽창이 진행되었음을 확인할 수 있었다.

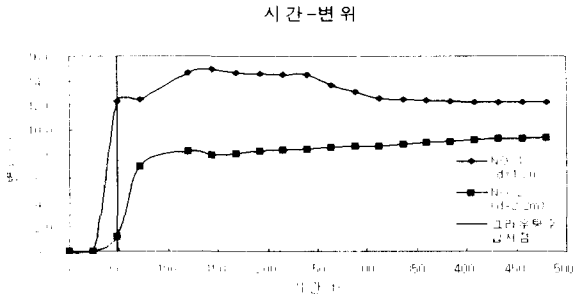


그림 3. 경사계 경시변화

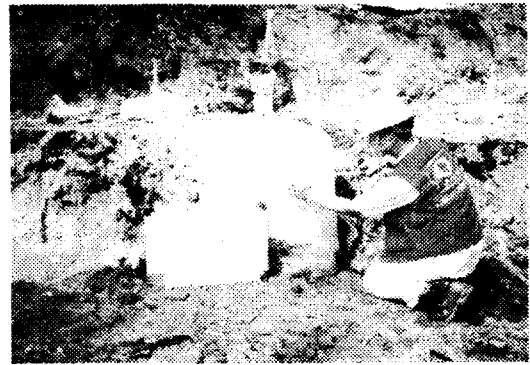


그림 4. Pile 구근형성확인

#### 4.2 정재하시험결과

본 연구에서 사용된 정재하시험 방법은 시공된 PG Pile두부에 정하중을 단계적으로 감소시키고, 하중지속 시간에 따른 침하량을 측정해서 하중-침하량, 침하량-시간, 시간-하중 관계를 해석한 결과 PG Pile의 극한지지력 및 항복지지력은 표 3 과 같다. 시험대상에 대한 하중은 300ton급 유압잭을 사용하였으며 최종침하량은 17.1mm로 극한하중에 대응하는 전 침하량은 허용범위 이내로 결과가 나타났다.

표 3. 정재하시험 결과

시험위치	재 하 최대 하중 (t/m)	항복하중에 의한 분석법						항 복 하 중 (t/m)	허 용 지지력 (t/m)
		P-S			LogP - LogS				
		항복 하중 (t/m)	허 용 지지력 (t/m)	최 종 침하량 (mm)	항복 하중 (t/m)	허 용 지지력 (t/m)	최 종 침하량 (mm)		
부지내	160.0	130.0	62.5	17.1mm	130.0	62.5	17.1mm	130.0	62.5
특기사항	1. 허용지지력은 항복하중 분석법 산정결과중 작은 값을 적용함. 2. 항복하중에 의한 분석법 적용 안전율은 2 이다.								

#### 4.3 평판재하시험결과

본 연구에서는 현장의 시험위치에 설치한 강성재하판을 단계적으로 하중을 가해서 측정한 결과 항복하중은 37t/m<sup>2</sup>~49.8t/m<sup>2</sup>, 허용지지력은 18.5t/m<sup>2</sup>~24.9t/m<sup>2</sup>, 최종침하량은 3.3mm~6.0mm로 허용침하량 이내의 결과가 나왔다. 표 4 는 평판재하시험에 의한 시험위치별 허용지지력을 나타내고 있다.

표 4. 평판재하시험 결과

시험 위치	시험 심도	시험 번호	재 하 최대 하 중 (t/m)	항복하중에 의한 분석법						항 복 하 중 (t/m)	허 용 지지력 (t/m)
				P - S			Log P - Log S				
				항복 하중 (t/m)	허 용 지지력 (t/m)	최 종 침하량 (mm)	항복 하 중 (t/m)	허 용 지지력 (t/m)	최 종 침하량 (mm)		
원지반	No.1 (G.L-0.2)	PBT-1	60.0	37.2	18.6	3.6	37.0	18.5	3.3	37.0	18.5
	No.1 (G.L-0.7)	PBT-2	60.0	41.8	20.9	6.3	40.1	20.5	6.0	40.1	20.5
개량지 반삼각 형내	No.1 (G.L-0.2)	PBT-3	60.0	50.0	25.0	4.7	49.8	24.9	4.6	49.8	24.9
	No.2 (G.L-0.7)	PBT-6	60.0	48.6	24.3	5.2	48.5	24.3	5.0	48.5	24.3
개량지 반사각 형내	No.1 (G.L-0.2)	PBT-4	60.0	46.2	23.1	3.4	46.1	23.0	3.2	46.1	23.0
	No.2 (G.L-0.2)	PBT-5	60.0	46.0	23.0	6.0	45.8	22.9	5.8	45.8	22.9

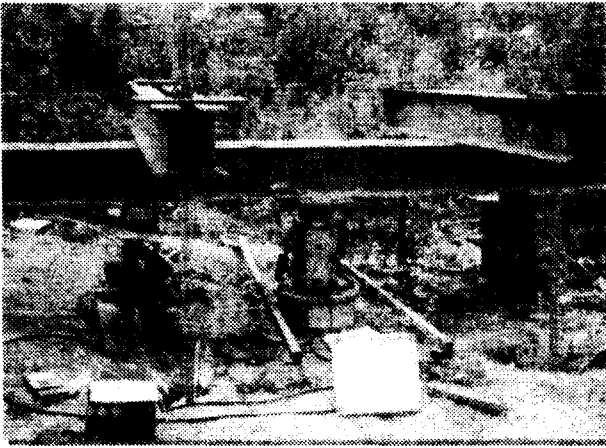


그림 5. 정재하시험

## 5. 결 론

본 연구에서는 폐기물 매립지반에서 PG Pile공법의 시험시공 결과의 자료분석을 통하여 다음과 같은 지반개량공법의 적용성 검토 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 대상지층이 매우 불균질한 폐기물 매립지반이라는 특성으로 예측하지 못한 매립층 내부의 공극속으로 주입재가 유출 우려가 있으며 개량효과를 정량화할 수 없는 문제점을 Pack을 사용한 주입으로 균일한 구근형성을 형성함으로써 선단지지말뚝 효과를 얻을 수 있었다.
- (2) 지내력시험 결과 원지반과 비교한 개량지반에서 PG Pile 주변지반의 지지력이 약 20%이상의 증대효과가 예상되어 말뚝과 주변지반의 상호복합지반 효과를 확인할 수 있었다.
- (3) 주입재의 구성비는 60%이상을 플라이애쉬가 차지하여 화력발전소 부산물인 석탄회를 주재료로 활용함으로써 폐기물 재활용이란 효과와 경제성 확보 또한 플라이애쉬 특유의 포졸란 반응으로 Pile의 장기강도 증진효과를 동시에 얻을 수 있다.
- (4) 상기와 같은 결과를 통해 PG Pile공법을 폐기물 매립지반 개량공법에 적용하는데 있어 지반공학적인 효과가 우수함을 알 수 있었고 또한 시공시 slim이었고 무진동 저소음으로 매립지 개발시 구체적인 문제가 되는 민원

문제등을 최소화할 수 있으며 산업폐기물을 주입재로 대체하며 환경 공학적인 측면에서도 효과적인 폐기물 매립지반 개량 공법임을 확인하였다.

## 감 사 의 글

본 논문은 1999년 건설교통부 지원(과제번호 R&D/98-0014 건설부지로서의 폐기물 매립지반의 활용연구)에 의한 연구성과의 일부임을 밝히며 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부 한국건설기술연구원(1999), 건설부지로서의 폐기물 매립지반의 활용 연구 보고서, pp.53~72.
2. 김용우(1995), "난지도 매립지의 지하수 오염 방지를 위한 침출수 적정 관리 방안에 관한 연구", 한국과학기술원, 박사학위논문, pp.47~49.
3. 김영근, 박유신(1997), "플라이애쉬의 건자재 활용화 방안", 건자재 가을호, 통권 11호, pp.255~269.
4. 박현일, 이승래, 라일용, 성상열(1997), "난지도 쓰레기 매립지의 침하특성", 한국지반공학회지, 제13권, 제2호, pp.65~75.
5. 서울시(1996), 난지도 매립지 안정화공사 실시설계 보고서, pp.42~63.
6. 한국지반공학회(1994), 폐기물 매립시설 세부설치기준 요약 보고서, pp.3~48.
7. Lo, K. Y. and Ho, K. S.(1991), "Field test of electroosmotic strengthening of soft sensitive clay", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 28, pp.74~83.
8. Toth, P. S., Chan, H. T. and Cragg, C. B.(1988), "Coal ash as structural fill, with special reference to Ontario experience", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 25, pp.694~704.