

폐기물 매립지반에서 PG Pile의 지반지지력 특성

A Characteristics of Bearing Capacity by PG Pile on Waste Landfill

천병식¹, 최춘식²

Byung-Sik Chun, Choon-Sik Choi

Keywords : PG pile(PG 파일), Waste Landfill(폐기물 매립지반), Bearing Capacity(지지력)

Abstract

Waste landfill is so loose that it may cause the insufficient bearing capacity and the differential settlement. And so, characteristics and conditions of the ground should be considered in applications of ground improvement in waste landfill. In this paper, analysis of field tests as the static loading test and the bearing capacity test were performed. In result, PG(Pack Grouting) pile method is proved effective and economic, because it could bring about the increase of end bearing capacity, the prevention of differential settlement and increase of density by expansion of pile.

1. 서 론

최근 인구의 증가와 도시공간의 밀집화로 도시주변 지역의 개발영역이 계속적으로 확장되어 있어 과거에 주로 도시주변에 형성되었던 매립지역을 도시 생활공간의 일부로 활용하고자 하는 필요성이 점차 증대되고 있다. 현재 우리나라에서 발생하는 폐기물의 약 93 % 정도는 매립처분하고 있어 일반 폐기물 매립지는 전국에 600여 개소 이상이 산재해 있다. 폐기물 매립지반은 매우 느슨한 상태로 구성되어 있어서, 지반지지력의 부족 및 지반의 부등침하가 발생한다. 이로 인해, 폐기물 매립지반에 있어서 지반개량 공법은 지반의 특성과 조건에 맞는 공법이 적용되어야 한다. 본 논문에서는 쓰레기 매립장에서 적용한 PG 파일 공법의 시험시공에 대한 정제시험, 지반 지내력시험, 계측자료를 분석하여 PG 파일 공법이 폐기물 매립지반에서 요구하는 지

지력 확보와 부등침하 등을 방지할 수 있는 선단지지말뚝 효과와 파일 구조 팽창에 의한 주변 지반 밀도 증대 효과를 파악하고자 하였다.

2. PG 파일 공법

2.1 파일의 지지력

일반적으로 폐기물 매립지반의 개량 공법으로 고압분사 공법의 효과는 매립재료 특성에 따라 다르게 평가될 수 있으나 PG 파일의 경우 Pack 내부에 채워진 그라우팅 재료의 강도 특성을 그대로 반영하게 되므로 주입재의 재료특성을 고려한 말뚝 지지력의 정량적인 평가가 가능하다. 하부에 기반암층이 분포한다면 PG 파일의 선단 지지력 발휘효과는 더욱 크게 기대 될 수 있다. 이와 같은 결과는 PG 파일은 폐기물 매립지반의 층후가 두껍고, 간극비가 크며 상재하중의 재하에 의해 예상 침하량이 매우 커서 직접기초보다

*1. 정희원, 한양대학교 토목공학과 교수

*2 한양대학교 토목공학과 박사과정

는 말뚝기초의 기능이 발휘되어야 하는 폐기물 매립지반에서 적용성 있는 공법으로서 평가가 가능하다[1].

2.2 공동확장에 의한 주변지반 개량

PG 파일 공법은 오거 천공후 Pack을 지중에 넣고 주입시 압을 가하여 방사방향으로 공동확장 시킴으로 느슨한 주변지반이 압축되어 밀도가 개선되고 이에 따라 주변지반의 지지력을 개선시키는 공법이며 주입시 Pack의 주입압은 지반조건 및 개량 여건에 따라 변경 적용이 가능하며, 주입압은 5 ~ 10 kg/cm² 정도로 하여 천공체의 방사방향으로 전심도에 걸쳐 고르게 압축하중을 가하여 지반을 개량시킬 수 있는 장점을 갖게 되므로 느슨한 폐기물 매립지반에서의 개량 효과는 매우 우수하다. Ø400 mm 오거천공 후 Ø600 mm 확공시 PG 파일의 주입압에 의한 방사방향 압축거동을 평가하면 다음과 같다[3].

- 체적 팽창률 : 225 %
 - 단위 m 당 체적증가량
- $$\frac{\pi (0.6^2 - 0.4^2)}{4} = 0.157 \text{ m}^3 \quad (1)$$
- PG 파일의 설치간격을 고려한 단위 m 당 발생 침하량
 - PG 파일 배치 : 2.5 m × 2.5 m
 - 0.157 m³ / (2.5 m × 2.5 m) = 0.025 m = 2.5 cm
 - 전 폐기물 매립층에서의 예상 압축량
 - 13.8 m × 2.5 cm / m = 34.5 cm (파일 길이 : 13.8 m)

상기 검토 결과에서와 같이 PG 파일의 주입압에 의한 방사방향의 압축에 의해서 시공과정 중 압축량은 약 34.5 cm 정도(2.5 cm/m당) 발생하며 실제로 상재하중에 의한 부지의 침하가 아닌 현 상태 지반고를 유지하면서 폐기물 매립지반의 밀도를 개선하고 지지력을 증대시킬 수 있는 특성을 가지고 있다.

2.3 복합지반 효과에 의한 개량

PG 파일은 파일 설치 방사방향 전 구간에 동일한 개량 효과를 얻을 수 있으며, PG 파일 자체의 강성에 의해서 작용하중 범위내에서 변위 양상은 탄성적인 거동을 보이게 되므로 PG 파일 자체의 강성체 특성과 개량전 주변지반의 상호 복합거동의 예측이 가능하나 PG 파일과 개량된 주변지반은 Fig. 1과 같이 복합지반(Composite ground)의 효과를 얻을 수 있으므로 깊은 심도에 분포하는 폐기물 매립지반에서 PG 파일을 지반개량공법으로 적용할 경우 일반적인 주입공법과 비교하여 개량 효과가 크고 지반 개량 효과를 정량화할 수 있는 장점을 갖게 된다.

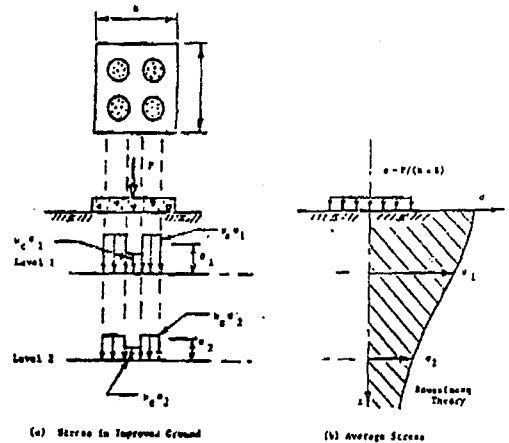


Fig. 1 유한 길이의 하중을 받는 지반 개량에서의 개략적 응력분포 계산 방법

3. 현장 시험시공

본 현장 시험시공은 난지도 폐기물 매립지반, 송파구 마천동 부지에서 실시하였으며, PG Pile 적용전·후 지반의 개량정도를 파악하기 위해 계측관리(토압계, 수평변위계) 및 현장시험(시추조사, 재하시험, 말뚝재하시험)을 실시하였다.

3.1 사용 재료 특성

PG 파일의 표준 시멘트 그라우트 재료는 보통 시멘트 페이스트로 하였으며, PG 파일 그라우트 재료는 플라이 애쉬 + 보통 포틀랜드 시멘트 + 팽창제를 사용하였다[2].

Table 1 PG Pile 그라우트 재료의 조성분

구 분	주 성 분	비율	W/C
그라우트 재료	보통 포틀랜드 시멘트 페이스트	100 %	64 %
PG Pile 그라우트 재료	플라이 애쉬	60 %	60 %
	보통 포틀랜드 시멘트	40 %	
	팽창제(WGS - E)	1 %	

3.2 지반특성

시험시공 대상 지반의 폐기물에 대하여 시료를 채취하여 실내토질시험을 실시하였으며, 시험결과를 요약 정리하면 Table 2와 같다.

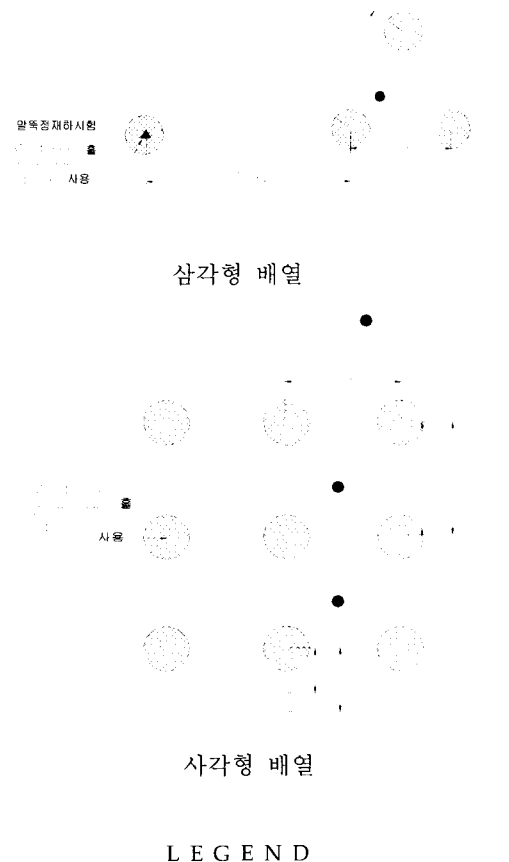
Table 2 대상 지반의 물리·역학적 특성

구분	1.0 ~ 8.0 m
자연함수비 (%)	15 ~ 30
통일분류	SP
비 중	2.14 ~ 2.8
액·소성한계	N.P
점착력 C (kg/cm ²)	0.0883 ~ 0.25
내부마찰각 ϕ (°)	34.34 ~ 41.99
유기물함량시험(%)	3.5 ~ 8.7

3.3 시험시공 계획

PG Pile의 시험시공은 삼각형 배열과 사각형 배열로 각각 3×3 m로 배치하였으며, 직경 400 mm를 천공후 팽 800 mm를 삽입하여 각각 3공

및 9공을 타설하였으며, 개량심도는 10 m로 하였다. PG Pile 배치도 및 현장시험 위치도는 Fig. 2와 같다.



구분	◎	□	●	⊞	▲
시험명수	경사계	토압계	표준관입시험	평판재하시험	말뚝정재하시험
수량	2	2	4	4	1
비고	· Pile 중심으로부터 1.2 m (심도 28 m) · Pile 중심으로부터 2.2 m (심도 22 m)	· 삼각형 배열 및 사각형 배열 (심도 7 m)	· 원지반 & 개량지반	· 원지반 (0.2 m) · 개량후 (0.2, 0.7 m)	· Pile 길이 16 m

Fig. 2 Pile 배치 및 계측기 설치 위치

4. 시험 결과

4.1 파일 정재하시험

Table 3의 PG 파일에 대한 정재하시험 결과에서와 같이 선단이 지지된 일반 토사지반의 경우 허용지지력이 80 ton/pile 이상으로 평가되었으며, N≒30 내외의 모래질 자갈층에 선단지지된 폐기물 매립지반에서의 허용지지력은 약 65 ton/pile 정도로의 평가가 가능하였다.

Table 3 PG 파일 정재하시험 결과

지반조건	일반 토사지반	폐기물 매립지반
시험 위치	송파구 마천동	서울 난지도
최대 작용하중 (ton/pile)	160	160
항복하중 (ton/pile)	160이상	130
허용지지력 (ton/pile)	80	65
비고	선단에 풍화암층 지지조건	선단에 모래질 자갈층 지지 (N≒30내외)

4.2 표준관입시험(SPT)

개량 전·후 실시한 시추조사 결과 폐기물 매립지반의 경우 PG 파일 주변지반에서의 N치는 4 ~ 11(평균 8)에서 8 ~ 15(평균 11)로 약 40 % 정도 증가 경향을 보이며, 일반 토사지반의 경우 N치는 13 ~ 33(평균 22)에서 16 ~ 34(평균 24)로 약 10 % 이상의 증가 경향을 보이는 것으로 나타났다.

4.3 평판재하시험

Table 4에 나타난 바와 같이 PG 파일 주변지반은 원지반과 비교하여 10.8 ~ 34.6 %(평균 20.8 %) 정도의 지지력 증대 효과를 보이는 것으로 나타났다.

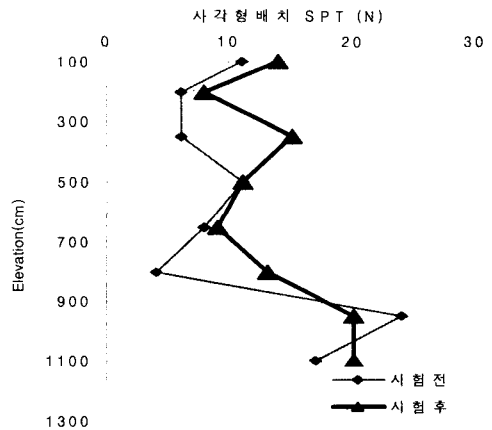


Fig. 3 폐기물 매립지반 SPT

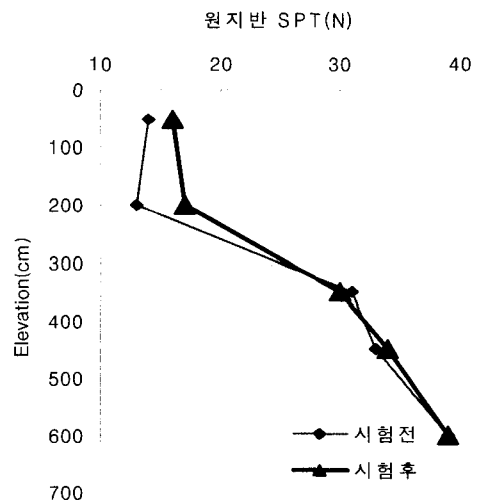


Fig. 4 일반 토사지반 SPT

4.4 계측결과

4.4.1 경사계 계측

말뚝주변에 일정한 거리를 두고 설치한 경사계(Inclinometer) 측정 결과 Fig. 5에서와 같이 말뚝주변에서 10 cm의 방사방향이 압축(반경 20 cm ⇒ 반경 30 cm)이 진행된 PG 파일에서 방사 방향으로 팽창이 진행되었음을 확인할 수 있다.

Table 4 파일 주변지반 평판재하시험 결과

지반조건	일반 토사지반						폐기물 매립지반					
	원지반	개량지반				원지반	개량지반					
		4각형 배치시	3각형 배치시	4각형 배치시	3각형 배치시							
시험조건	GL-0.2n	GL-0.2n	GL-0.7n	GL-1.2n	GL-0.2n	GL-0.7n	GL-0.2n	GL-0.7n	GL-0.2n	GL-0.7n		
항복강도 (t/m ²)	31.6	35.0	36.7	40.7	37.0	40.1	46.1	45.8	49.8	48.5		
발생 최종 침하량 (mm)	12.5	10.2	8.8	7.6	3.3	6.0	3.2	5.8	4.6	5.0		
허용 지지력 (t/m ²)	15.8	17.5	18.4	20.4	18.5	20.5	23.0	22.9	24.9	24.3		
지지력 증가율(%)	-	10.8	16.4	29.1	-	-	24.3	11.7	34.6	18.5		

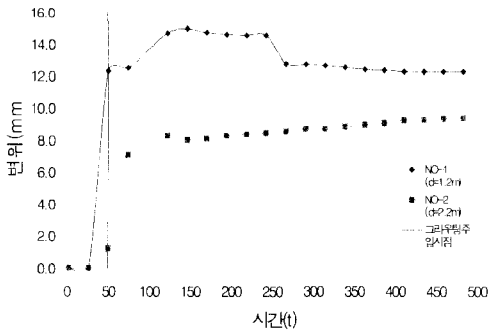


Fig. 5 경사계 경시 변화

4.4.2 토압계 계측

파일 사이 지반내 설치한 토압계 계측 결과 PG 파일 팽창과정중 0.1 ~ 0.2 t/m² 정도의 토압이 수평방향으로 작용하고 있는 것으로 나타나므로 PG 파일 직경의 3D 이상의 거리에서도 주입압에 의한 방사방향의 압력이 전달되었음을 확인할 수 있다.

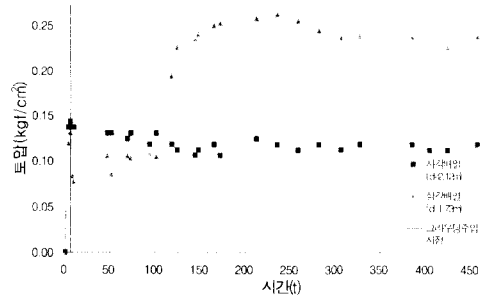


Fig. 6 토압계 경시 변화

5. 분석 및 고찰

5.1 파일의 지지력 특성

폐기물의 재료특성상 고압분사공법(JSP)과 같은 경우 균질한 파일 구근 형성이 어려우나 PG 파일의 경우 Pack을 선굴착공내에 견입하고 몰탈을 주입하여 완벽한 파일 구근을 형성하므로 주입재의 재료특성을 고려한 말뚝 지지력의 정량적인 평가가 가능하였다. 폐기물 매립층의 특성에 따른 불규칙적 방사방향 팽창으로 파일 주변부의 면적이 증가하므로 마찰말뚝의 증대 효과와 선단이 지지된 경우 선단지지 말뚝의 효과를 동시에 거둘 수 있다.

5.2 방사방향 압축 특성

경사계 계측 결과 공동확장이론에 의한 방사방향으로 공동확장이 되었음을 확인할 수 있었고 폐기물 매립층의 압축에 따른 지지력의 증대 효과는 표준관입시험과 평판재하시험에서 확인할 수 있다.

5.3 복합지반 효과

토압계의 계측 결과 PG 파일 주입시공사 발생하는 방사방향의 압축현상은 주변지반의 간극비를 크게 감소시키므로 상재하중 작용에 의한 압축침하를 크게 줄이는 효과를 거둘 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 폐기물 매립지반에서 PG Pile 공법의 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 개량 효과를 정량화할 수 없는 문제점을 Pack을 사용한 주입으로 균일한 구근형성을 형성함으로써 선단지지말뚝 효과를 얻을 수 있었다.

(2) PG파일의 팽창($\phi 400$ mm 천공 $\rightarrow \phi 600$ mm 파일 형성)에 의한 예상 압축량은 PG 파일 길이 13.8 m이고, 파일간격이 2.5 m \times 2.5 m일 경우에 약 34 cm(2.5 cm/m) 방사방향 압축 효과가 있었다.

(3) 정재하시험 결과에 의하면 62.5 ~ 80 ton/pile 정도의 지지력 확보가 가능하므로, 60 ton/pile 이상의 허용지지력 평가가 가능하여 말뚝지지 효과에 의해서만도 도로성토하중의 지지가 가능하다.

(4) 지내력시험 결과 원지반과 비교한 개량지반에서 PG Pile 주변 지반의 지지력이 약 20 % 이상의 증대 효과가 예상되어 말뚝과 주변지반의 상호복합지반 효과를 확인할 수 있었다.

(5) 주입재의 구성비는 60 % 이상을 플라이 애쉬가 차지하여 화력발전소 부산물인 석탄회를 주재료로 활용함으로써 폐기물 재활용이란 효과와 경제성 확보 또한 플라이 애쉬 특유의 포졸란 반응으로 Pile의 장기강도 증진 효과를 동시에 얻을 수 있다.

(6) 상기와 같은 결과를 통해 PG Pile공법을 폐기물매립 지반 개량공법에 적용하는데 있어 지반공학적인 효과가 우수함을 알 수 있었고 또한 시공시 slime 없고 무진동 저소음으로 매립지 개발시 구체적인 문제가 되는 민원 문제 등을 최소화 할 수 있으며 산업폐기물을 주입재로 대체하며 환경 공학적인 측면에서도 효과적인 폐기물 매립지반 개량 공법임을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 1999년~2000년 건설교통부 '98 연구개발사업(건설부지로서 폐기물 매립지반의 활용연구, 과제번호 : R&D/98-0014)에 의한 연구성과의 일부임을 밝히며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 한양대학교, "영양 우회도로 축조공사 구간 폐기물 매립지역 지반개량 조사연구", pp. 127~134, 137~220, 2000. 7.
2. 김영근, 박유신. "플라이 애쉬의 전자재 활용화 방안" 전자재 가을호, 통권 11호, pp. 255~269, 1997
3. 한국지반공학회, "폐기물 매립지의 공학적 특성과 개량기술", '92년도 지반환경·매립에 관한 학술발표회 논문집, 1992
4. 박현일, 이승래, 라일웅, 성상열. "난지도 쓰레기 매립지의 침하 특성" 한국지반공학회지, 제13권, 제2호, pp65~75, 1997
5. 서울시, "난지도 매립지 안정화공사 실시설계 보고서", 1996
6. 한국지반공학회, "폐기물 매립시설 세부 설치기준 요약보고서", 1994
7. 김용우, "난지도 매립지의 지하수 오염방지를 위한 침출수 적정 관리 방안에 관한 연구," 한국과학기술원, 박사학위논문, 1995
8. P. S. Toth, H. T. Chan and C. B. Cragg, "Coal Ash as Structural Fill, with Special Reference to Ontario Experience", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 25, pp. 694~704, 1988
9. 정하익, "지반환경공학", 유림, pp. 429~447, 1998.
10. 한국건설기술연구원, "건설부지로서의 폐기물 매립지반의 활용 연구보고서", pp. 191~206, 1999. 12.
11. K. Y. Lo and K. S. Ho, "Field Test of Electroosmotic Strengthening of Soft Sensitive Clay", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 28, pp. 74~83, 1991
12. R. Jeffrey Dunn, "Successful Development of Closed Landfill Sites", Waste Disposal by Landfill, Proceedings of the Symposium Green '93 - Geotechnics Related to the Environment, pp. 527~533, 1993