

매립지반에 적용된 쇄석말뚝의 보강효과

이봉직[†] · 배우석* · 이준대**

충주대학교 건설도시공학과 · *충북대학교 토목공학과 · **세명대학교 토목공학과
(1999. 12. 7. 접수 / 2000. 3. 22. 채택)

The Reinforcement Effect of Stone Columns on Refuse Landfill

Bong-Jin Lee[†] · Woo-Seok Bae* · Jun-Dae Lee**

Department of Construction & Urban Engineering, Chungju National University

*Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

**Department of Civil Engineering, Semyung University

(Received December 7, 1999 / Accepted March 22, 2000)

Abstract : This paper presents the design, construction and performance of ground treatment to support road embankment on refuse landfill. Long-term settlement of refuse landfill is analysed by Sower and Yen/scanlon. As a results of site test, predicting settlement excess the allowable settlement and ultimate bearing capacity is not satisfied. The effectiveness of DDR(Deep Dynamic Replacement) is monitored by field tests (SPT, PBT, PMT) before, during and after construction of the stone columns. The ultimate bearing capacity for reinforced landfill by stone columns obtained from the in-situ test results has been compared with the existing theories. In municipal wastes landfill, settlement after treatment using stone column is satisfied to allowable residual settlement. Therefore, long-term stability can be gain in these cases.

1. 서 론

최근 사용이 종료된 쓰레기 매립지의 활용에 대한 관심이 매우 높아지고 있으나 이러한 쓰레기 매립지반은 장기침하 및 부동침하문제와 지지력 부족 문제에 직면하게 된다.

현재 매립지반에 대한 지반보강 처리공법으로는 동다짐공법과 약액주입공법, 혼합처리 다짐공법 등이 제안되고 있으며 본 대상 지반의 경우 골재의 부족과 경제성, 시공성을 고려하여 쇄석 동치환공법을 채택하였다.

매립지반의 보강여부를 판단하기 위해 장기침하량을 산정하였으며 쇄석 말뚝체는 다짐에너지지를 이용한 쇄석동치환 공법을 적용하였다.

본 연구에서는 쓰레기 매립지반에 적용된 쇄석말뚝의 효율성을 검증하기 위해 확인시험(SPT, PMT, PBT)을 실시하여 개량 전후의 지지력의

변화와 관입저항치 및 탄성계수의 변화를 계측하였으며 지반처리 설계와 매립지반의 침하 특성 및 동다짐 효율을 확인하였다.

2. 지반조건

본 대상 매립장은 일정기간 동안 단순투기한 비위생 매립지로 매립종료 후 상당한 기간이 경과하여 일정 상태의 분해속도를 보이고 있다.

쓰레기 매립장지역에 대한 시추조사결과 매립토층은 0.5~2.6m의 층후로 분포하며 사질토(SM)와 자갈 및 암괴의 혼합물로 구성되고 N치는 7~25회 이상이며, 쓰레기층은 7.8~15.0m의 층후로 연탄재, 비닐, 형철, 목재류, 유기물의 혼합층으로 구성되고 N치는 5~50 이상으로 느슨내지 매우 조밀한 상태로 지역에 따라 다양하게 분포하고 있다. 풍화토층은 1.0~5.9m의 층후로 분포하며 N치는 17~50 이상으로 대체적으로 조밀한 상태를 보이고 있다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
bjlee@gukwon.chungju.ac.kr

매립쓰레기는 성분분석결과 탄소함유량이 25~38%대 범위로 분해속도가 상대적으로 느린 것으로 평가되었으며 유기질 함량이 타지역에 비해 상대적으로 큰 것으로 조사되었다¹⁾.

3. 쓰레기 지반의 장기침하

매립지반에서 유발되는 침하특성은 매립시 다짐효과에 의한 침하와 축적되는 쓰레기 하중에 의한 침하, 쓰레기지반 자체의 분해 또는 부패에 의한 침하 등에 의해 결정된다.

본 연구에서는 매립지반의 활용의 관점에서 중요한 장기침하특성을 파악하고 쓰레기 매립지반의 일반적인 침하메카니즘과 이용 가능한 여러 침하산정방법을 채택하여 침하량을 분석하였다.

3.1. 침하 이론

침하는 다짐, 압축 등의 기계적 과정에 의한 것과 분해, 부패 등의 물리 화학적, 생화학적 과정에 의한 것으로 나눌 수 있으며 다짐은 매립 과정에서 발생하는 동하중 또는 정적 하중에 의해 유발되는 즉시침하이며, 압축은 주로 쓰레기 지반자체의 자중 등으로 인한 정적 하중 증가로 유발되는 침하로 침하과정에서 나타나는 시간에 따른 침하특성에 따라 일차압축과 이차압축으로 나누어 질 수 있다.

본 매립장의 경우 매립이 시작된 1985년 이후 약 13년이 경과되어 1차 압밀침하는 어느 정도 진행된 것으로 보이며 현재 부패로 인한 추가적인 침하가 진행중인 것으로 보인다. 또한, 상재 하중 작용시 추가 압축이 발생될 것으로 보이며 장기압밀침하가 장기간에 걸쳐 나타날 것으로 판단되므로 침하량 산정시 이를 충분히 고려하여 산정하였다.

본 대상지반의 전체 침하량은 Terzaghi의 압밀 침하량 산정식을 이용하였으며 침하계측이 수행되지 않은 단순투기 매립장이므로 부패로 인한 2차압밀 침하량은 Sowers와 Yen/scanlon의 방법을 적용하였다.

(1) Sower 방법

압밀침하량 산정식의 2차 압밀 산정방법과 유사한 식으로 다음과 같다.

$$\frac{Ca}{1+e_0} H \log \frac{t_2}{t_1}$$

여기서, s : 2차압밀 침하량, H: 연약지반 두께

C_a : 2차 압축계수(0.03~0.09 e_0)

t_2 : 일차압밀 완료시간

t_1 : 일차압밀 완료이후의 시간

(2) Yen과 Scanlon

매립지반의 침하량을 예측하여 제안한 식으로 침하속도와 침하시간의 산정이 가능하며 다음식과 같다.

$$m = H/t$$

여기서, m : 침하율

평균매립경과시간은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$t_1 = t - t_c/2$$

t_c : 매립완료시까지의 경과시간

t_1 : 평균 매립경과 시간

t : 매립시간부터 자료점측까지의 경과시간

또한, 매립지 자중에 의한 부패침하량은 다음식과 같다.

$$sr = \int m dt = \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} (a - b \log t) dt$$

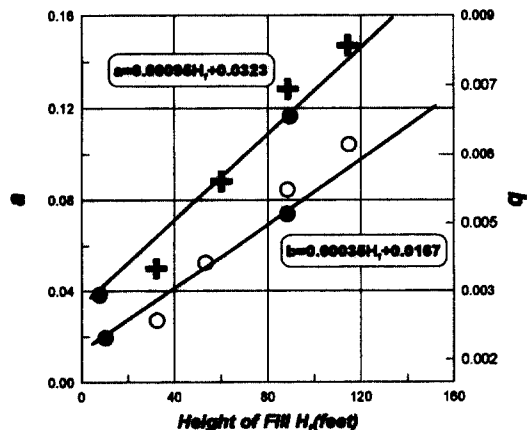


Fig. 1. Settlement rate parameter a and b

3.2. 침하량 검토 결과

매립 후 13년이 경과된 대상지반에 대한 침하 해석을 실시하기 위해 즉시침하량과 압밀침하량은 각각 Osterberg와 Terzaghi식을 사용하였으며 부패침하량은 Sower와 Yen/Scanlon의 제안식을 이용하여 경과시간별로 산정하였다.

해석결과는 Table 1과 같다.

대상지반의 침하량을 산정한 결과 1년 후 1.21/1.6m, 30년 후의 예상침하량은 1.48/2.36m로 일반적인 도로공사의 허용침하량 10cm를 훨씬 초과하는 침하가 발생할 것으로 예상된다. 이는 쓰레기층의 압밀침하 및 향후 30년간의 유기물의 부패로 인한 Creep 침하까지 고려한 값으로서 매립지반에 대한 근본적인 개량없이 대상지반의 침하가 허용기준을 만족시키지 못하는 것으로 나타났다.

Table 1. Total settlement with time

Proposed formula	Total settlement (m)					
	2000	2001	2002	2005	2010	2030
Sower	1.205	1.222	1.238	1.266	1.326	1.478
Yen/Scanlon	1.596	1.622	1.649	1.701	1.832	2.357

4. 쇄석말뚝의 설계 및 시공

연약지반 처리에 사용되는 여러가지 개량공법 중 쇄석말뚝공법은 쇄석이나 잡석, 폐건설골재 등을 이용한 지반침하 방지와 지지력 증진공법으로 공극수압의 소산효과로 점성토지반의 배수공법이나 액상화현상에 대한 대책방안으로 알려져 있다.

본 연구에 적용된 동치환 공법은 충격에너지에 의한 지반의 다짐효과를 이용한 것으로 동다짐에 의해 쇄석말뚝이 형성됨으로서 강제치환에 의한 지반의 전단력이 증가되기 때문에 그 개량효과면에서 다짐공법과 쇄석말뚝공법의 복합공법이라고도 할 수 있다. 대상지역의 경우 쓰레기 매립층의 장기침하 특성이 불분명한 지역에서는 공극수압의 소산효과와 더불어 충격하중에 의한 쓰레기층의 압축을 시공중에 유발시켜 향후 발생가능한 장기침하를 억제시키는데 효과를 얻을 수 있을 것이다.

쇄석동치환공법의 설계는 개량하고자 하는 쓰

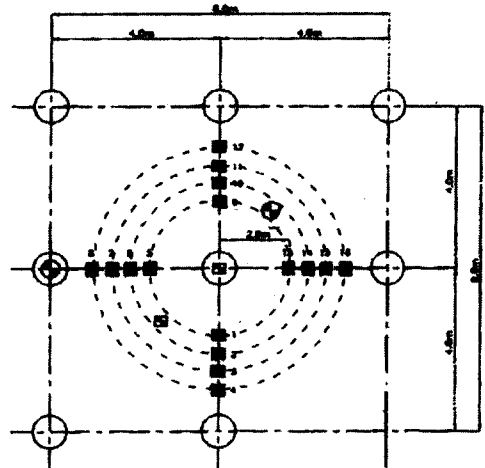


Fig. 2. Arrangement of stone columns for test program

레기 매립층의 심도 및 개량효과 등을 고려하여 Pounder의 무게, 낙하고, 타격횟수 및 관입체적 및 심도, 간격 등을 결정하여야 하며 시공설계도는 Fig. 2와 같다.

대상지반의 지반조사 성과로부터 쓰레기 매립층의 두께가 7.8~15.0m 정도로 보강 후 지반의 평균 관입저항치를 $N=15$ 로 설정하여 개량심도를 $D=10m$ 로 결정하였으며 지금까지의 시공사례를 근거로 타격점 간격을 쓰레기 매립층임을 감안하여 $L = 0.4D = 4.0m$ 로 결정하였다.

쇄석 타입시 요구되는 타격에너지 E 를 결정하기 위해 동다짐으로 인해 증가된 ΔN 과 단위체적당 타격에너지 E_v 와의 관계로부터 $\Delta N = 8$ 인 경우 단위체적당 타격에너지 $E_v = 50 \text{ ton} \cdot \text{m}/\text{m}^3$ 이므로 단위면적당 타격에너지 $E = D \times E_v = 10 \times 50 = 500 \text{ t} \cdot \text{m}/\text{m}^2$ 로 결정하였다. 이에 따라 개량심도가 10m인 경우 다음과 같이 낙하고 및 Pounder 무게를 결정하였다.

$$D = \alpha \sqrt{WH}$$

여기서, α 는 시공성 및 경제성을 감안하여 $\alpha = 0.6$ 적용하였고 Pounder 무게 $W = 15 \text{ ton}$, 낙하고 높이 $H = 20m$ 를 적용하여 10.4 m로 결정하였다.

타격단계수 n 는 3단계로 결정하였고 각 시공단계의 타격횟수 N_b 는 다음 식에 의하여 구한다.

$$N_b = \frac{EL^2}{WHn}$$

여기서, N_b : 1타격점당 타격횟수(회)

E : 타격에너지($t \cdot m^2$)

L : 1단계 타짐 간격(m), n^* : 시공 단계수

W : 추의 중량(ton), H : 낙하 높이(m)

또한 계산상으로 개랑면적당 총 타격횟수를 구할 경우는 다음 식에서 구한다.

$$\sum N_b \frac{EA}{WH}$$

여기서, N_b : 총 타격횟수, A : 개랑면적 (m^2)

따라서, $N_b = 500 \times (4 \times 4) / (15 \times 20) = 26.667$
회 \approx 27회로 설계하였다.

5. 시험결과분석

대상지반의 지반개랑 효과를 파악하기 위하여 표준관입시험, 평판재하시험 및 공내재하시험을 실시하고 동다짐 전·후의 지반고 및 지반의 거동상태를 확인하였다.

지반의 강도증진을 확인하기 위해 쇄석기둥상부와 기둥사이지반에 대해 다짐전후의 표준관입 저항치를 심도별로 비교하였으며, 비교결과 평균 관입저항치가 28~43회로 설계시 목표치로 설정한 $N=15$ 를 상회하는 것으로 나타났고 보강전보다 1.5배 이상 상승한 것으로 나타났다.

보강후의 지지력 증진 효과 및 침하량 확인을

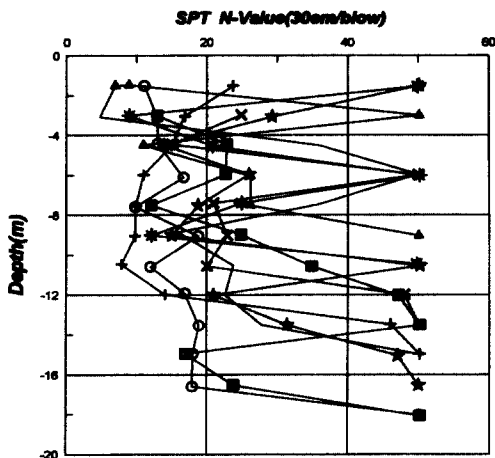


Fig. 3. SPT N -value before treatment

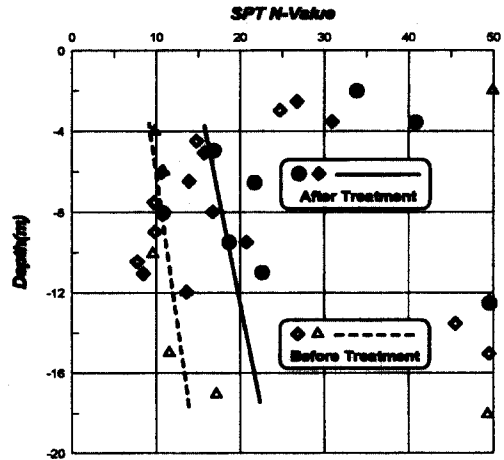


Fig. 4. Comparison among before and after treatment

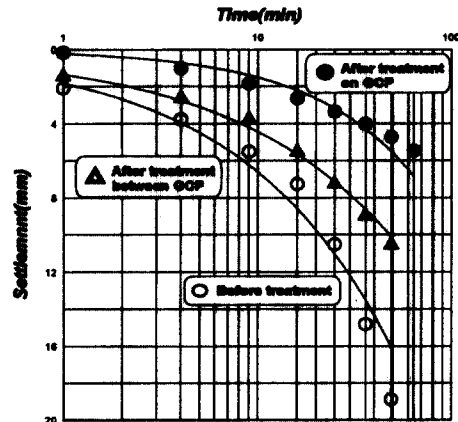


Fig. 5. Time-settlement curve

위해 실시한 평판재하시험 결과 보강전 지반의 지지력은 평균 $19.5t/m^2$ 로 나타났으나, 쇄석말뚝 시공후 기둥 사이와 기둥체 상부에서 실시한 시험결과 각각 $31.71 t/m^2$ 과 $33.23 t/m^2$ 으로 58.7%의 지지력 증진효과가 나타나 설계기준을 만족함을 알 수 있다.

공내재하시험은 각 시추공의 상하부에 대해 실시하였으며, 측정된 한계압을 이용하여 구간에 따른 말뚝체의 강도와 파괴형태를 확인하였다.

시험결과 쓰레기지반에 거처된 쇄석말뚝은 관입파괴 양상을 보이는 것으로 측정되었다. 그러나 이러한 파괴형태는 말뚝체의 근입깊이에 따라 달라지므로 많은 현장시험을 통해 증명해야 할 것이다.

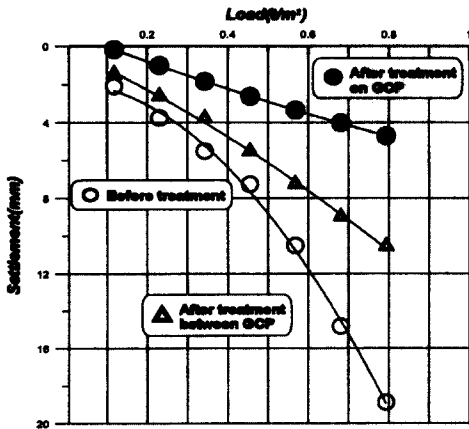


Fig. 6. Load-settlement curve

관입과괴시 말뚝체의 극한지지력은 Menard 식을 이용하였으며 산정결과 282.8~538.27t/cm²의 범위로 상당히 큰 지지력을 나타내고 있다.

Menard가 제안한 식은 다음과 같다.

$$q_{ult} = \Delta q + k(P_{lc} - u) \text{ (쇄석체의 지지력)}$$

$$q_{ult} = k(P_{lc} - u) \text{ (주변지반의 지지력)}$$

여기서, Δq : 해당 토체의 무게

k : 선단부 지지력계수

P_{lc} : 한계압, u : 지하수 수두압력

또한, 말뚝체에서의 탄성계수는 쇄석상부의

경우 평균 751kg/cm²로 설계기준을 만족하고 있으며 쇄석기둥 사이나 쇄석기둥 하부지반의 경우도 각각 평균 148.7, 204.3 kg/cm²를 보이고 있다. 여기서, 말뚝체와 주변지반의 탄성계수는 각각 420, 50kg/cm²를 설계기준으로 결정하였다.

보강 후 변형계수도 평균 546.7kg/cm²로 미개량 지반의 114kg/cm²에 비해 약 5배의 증가를 나타내 타격에너지에 의한 주변지반의 다짐효과를 확인할 수 있었다.

6. 결론

단순 투기형 쓰레기 매립장의 활용을 위해 대상지반에 동치환(DDC)공법을 적용하고 이에 대한 확인 시험을 실시하여 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 7.8~15.0m의 층후로 연탄재, 비닐, 형질, 목재류, 유기물의 혼합층인 쓰레기 매립층의 침하량은 1년 후 1.21/1.6m, 30년 후의 예상침하량은 1.48/2.36m로 허용침하량 10cm를 훨씬 초과하여 근본적인 지반보강 방안인 쇄석동치환 공법을 적용하였다.

(2) 쇄석기둥 상부와 기둥사이지반에 대한 보강 후 SPT N치를 비교한 결과 28~43회로 설계시 목표치 N=15를 상회하며 보강전보다 1.5배

Table 2. Summary of pressure meter test results

No.	Depth (M)	Yielding Pressure kg/cm ²	Limit Pressure kg/cm ²	Allowable Bearing Capacity	Allowable Bearing Capacity	Modulus of Deformation	Elastic Modulus	Remark
No. 1	3	5.9	11.8	-	31.47	125	171	Before treatment
	8	3.9	7.8	-	20.8	103	128	
No. 2	1.7	20.0	40.0	282.8	-	547	673	On GCP
	8	4.9	9.8	-	26.13	111	146	Below GCP
No. 3	1.7	40.0	80.0	538.27	-	638	1,007	On GCP
	8	4.9	9.8	-	26.13	123	166	Below GCP
No. 4	1.7	39.9	79.8	495.0	-	455	573	On GCP
	8	3.9	7.8	-	20.8	221	301	Below GCP
No. 5	2.7	4.9	9.8	-	26.13	105	140	Between GCP
	8	9.9	19.8	-	52.8	98	-	Between GCP
No. 6	3	5.9	11.8	-	31.46	136	146	Between GCP
	8	4.9	9.8	-	26.13	111	160	Between GCP

이상 상승한 것으로 나타났다.

(3) 평판재하시험 결과 보강전 지지력의 평균은 $19.5t/m^2$ 이었으나, 쇄석말뚝 시공후 기둥 사이와 기둥체 상부에서 각각 $31.71t/m^2$ 과 $33.23t/m^2$ 으로 58.7 %의 지지력 증진효과가 나타나 설계기준을 만족하고 있음을 알 수 있다.

(4) 파괴시 쇄석말뚝은 관입파괴 거동을 보이며 한계압은 $282.8\sim 538.27t/cm^2$ 의 범위를 보이며 탄성계수는 쇄석상부의 경우 평균 $751kg/cm^2$ 로 설계기준을 만족하고 있으며 쇄석기둥 사이, 쇄석기둥 하부지반의 경우도 각각 평균 $148.7, 204.3kg/cm^2$ 를 보이고 있다.

(5) 따라서, 쇄석말뚝공법은 매립지와 같은 압축성 지반에서도 효과적으로 적용이 가능한 공법임을 확인할 수 있다.

참고문헌

- 1) 임광토건, 쓰레기 매립장 동치환 공사 최종보고서, 1999.
- 2) 박현일, 이승래, 고팡훈, 분해가 고려된 쓰레기 매립지의 장기침하 거동, 한국지반공학회지 Vol. 14, No. 1, pp. 5~14, 1998.
- 3) 박현일, 이승래, 신선한 쓰레기 매립지의 장기침하 예측에 대한 분해효과 평가, 한국지반공학회지, Vol. 14, No. 6, pp. 127~138, 1998.
- 4) FHWA, Design and Construction of Stone Columns Vol. 1, Federal Highway Administration, Report No. FHWA/RD-83/026, 1983.
- 5) Mitchell and Huber, Stone Column Foundations for a Wastewater Treatment Plant, Geotechnical Engineering, Vol. 14 No. 2, 1983.