사용종료 매립장의 장기침하 모델 매개변수 상관성 및 지지력 보강효과 분석

Analysis of Long-Term Settlement Parameter Correlation and Bearing Capacity Reinforcement Effect for Closed Waste Landfill

조영권^{1*}, 채영수²

Young-Kweon Cho^{1*}, Young Su Chae²

¹Member, Chief Researcher, Seamangeum Research Team, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, 870, Hae-an-ro, Sangrok-gu, Ansan, 426-908, Republic of Korea

²Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, University of Suwon, 17, Wauan-gil, Bongdam-eup, Hwaseong, Gyeonggi-do, 445-743, Republic of Korea

ABSTRACT

Recently, the closed landfills are usually converted into parks or playground by the check the stability of landfill because they settle unevenly making them unsuitable for structures. When the closed landfill reuse, environmental and structural stability is important. To increase the bearing capacity and reduce the probable settlement of a foundation on waste disposal ground, a layer of geosynthetics(Geocell) is placed on the waste disposal ground. In this paper, the analysis of long-term settlement parameter correlation was performed, also the evaluation of bearing capacity reinforcement effect was conducted by field test. The settlement measured in the field, and input the same ground index when an integer to identify each model were compared by calculating the settlement. In addition, by adjusting the parameters of each model to identify the most similar to the value of field measurement parameters were calculated. Based on the analysis results, when the using the Park's model C(intermediate) = 0.0678, the expected settlement is similar to the field measurement results. Also, the bearing capacity of geocell reinforced ground is 1.193~1.554 times higher than that of unreinforced ground.

요 지

최근들어, 사용 종료된 폐기물 매립장을 공원 및 체육시설로 활용하는 사례가 증가하고 있으며, 사용종료 매립장 활용을 위해서는 일차적으로 환경영향 여부와 구조적 안정성이 중요하다. 특히 상부구조물 설치 시 지지력 및 침하에 대한 안정성을 확보하여야 하며 폐기물 매립지반의 침하에 대한 안정성 확보와 지지력 보강을 위하여 토목섬유(지오셀)를 포설하기도 한다. 본 논문에서는 사용 종료된 폐기물 매립장의 장기침하 예측결과 분석 및 매립지반에 대한 지오셀 보강 시 지지력 보강효과에 대하여 분석하였다. 장기침하 분석은 매립장의 현장계측 침하량과 쓰레기 침하 모델식별 산정된 침하량을 비교하였고, 각 모델식별로 침하량에 가장 큰 영향을 미치는 파라메타를 분석하였다. 본 연구결과에 따르면, Park 모델식에 따른 예측침하량($C_{intermediate} = 0.0678$)이 현장계측 침하량과 가장 유사한 경향을 나타내었다. 또한, 지오셀 보강에 따른 지지력 증가는 무보강 지반에 비하여 약 1.193~1.554배 증가되는 것으로 도출되었다.

Keywords : Closed waste landfill, Long-term settlement, Landfill stability, Geocell, Bearing capacity ratio

1. 서 론

현재 우리나라에는 약 1,300여개의 사용종료 매립장이

있으며, 도시지역의 확장으로 인하여 과거 도시 외곽에 위치하던 폐기물 매립장이 주거지역에 인접해지며, 다양한 형태의 토지활용이 요구되고 있다. 그러나, 사용 종료된 폐기물 매립시설은 그 시설로 인한 주민의 건강재산 또는 주변 환경의 피해를 방지하기 위하여 사후관리를 해야 하

Received 17 Sep. 2013, Revised 17 Oct. 2013, Accepted 18 Oct. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-31-400-1815; Fax: +82-31-400-1680

E-mail address: ykcho@ekr.or.kr (Y. K. Cho)

며, 사용종료 또는 폐쇄한 매립장이 점오염원으로 작용하여 주변지역에 영향을 미치고 있다고 판단되는 경우에는 토지활용을 일정기간 제한할 수 있다(Ministry of Environment, 2013). 토지이용의 제한기간은 폐기물 매립시설이 사용종료 되거나 폐쇄된 날부터 30년 이내로 하며, 30년 이전에 사후관리를 종료하고 토지를 활용하기 위해서는 주변환경영향 평가, 매립시설 안정화도 평가, 특히, 토지활용 시 적정성 여부에 대한 다양한 검토가 필요하다.

사용 종료된 폐기물 매립장은 일차적으로 그 시설로 인한 주변 환경의 피해가 없어야 하며, 토지이용에 따른 안정성을 분석하여 적정성 여부를 판단하여야 한다. 그러나 현재 사용종료 매립장 안정화 평가는 주변 환경영향 여부, 폐기물 분해정도 평가 등을 통하여 판단하고 있으나, 토지활용을 위한 안정성 평가는 차수시설, 침출수 집배수시설, 우수배제시설 등 매립장 시설물이 다양하여, 개별 시설물에 따른 검토가 요구된다. 특히, 매립장의 가장 기본적인 시설인 차수시설, 침출수 집배수시설의 적정 기능유지 여부를 평가하여 상부 토지이용 방안이 결정되어야 하며, 필요시 보강공법의 적용이 필요하다. 일반적으로 매립지반의 보강공법은 동다짐과 같은 다짐공법과 토목섬유 보강재를 활용하는 방법이 있다(Yee Ir Kenny, 1999). 본 논문에서는 사용종료 후 18년이 경과한 생활폐기물 사용종료 매립장의 토지활용 시 구조물의 안정적인 건설을 위하여 장기침하 및 지지력 보강효과를 분석하였다. 장기침하 예측은 연구대상 매립장의 침하계측 결과와 침하모델식별 침하특성을 비교 검토하였으며, 토목섬유(지오셀)를 시험 시공 및 현장지지력 시험을 실시하여 지오셀 보강방법에 따른 보강효과를 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 폐기물 매립지반의 장기침하 이론

매립장의 침하 메카니즘은 매우 복잡하며, 이러한 현상의 주원인으로 폐기물의 비 균질성과 시간에 따른 폐기물의 분해를 들 수 있다. 폐기물의 분해현상은 일반토질의 침하와 다르게 폐기물 매립장에서만 나타나는 현상으로 침하에 크게 영향을 미치는 요소로 작용한다. 폐기물 매립지반은 수개월에 걸쳐 작용하중에 의한 폐기물의 변형, 휨, 파쇄, 공간 재배치 등의 역학적 과정의 결과로 초기침하가 발생한다. 장기적으로는 폐기물 입자의 해체 및 간극

으로의 이동, 생물학적 분해, 산화연소 등 물리화학적 반응, 용해성 물질의 용해, 크리프 등의 요인들의 복합적 작용에 의해 침하가 발생한다. Grisolia and Napoleoni(1996)는 폐기물 매립지반의 침하는 폐기물간의 위치 재배열로 인한 즉시침하, 체적변형이 큰 물질의 변형에 의한 침하, 크리프와 유기성 물질 분해에 따른 침하, 분해가 완료되는 단계에서의 침하, 최종 잔류침하 등 순차적으로 다섯 단계로 구성된다고 하였다.

폐기물 매립지반의 장기침하량을 예측하는 산정식은 여러 식이 있으나 Sowers(1973)는 현재까지 많이 사용되는 방법으로 Terzaghi의 압밀이론에 기초하고 있다. 일차 압축이나 이차 압축을 계산하기 위하여 식 (1)과 (2)를 사용한다.

$$S = H_0 \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\bar{P}_0 + dP}{\bar{P}_0} \quad (1)$$

$$S = C_\alpha \frac{H}{1 + e_0} \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (2)$$

여기서, H_0 =초기층의 두께, e_0 =초기 간극비, $\bar{P}_0$ =스레기의 하중, C_c =스레기의 압축지수, dP = 하중 증가량, S = 시간 t_1 과 t_2 사이에서 발생하는 침하량, C_α =이차압축지수, H =일차압축이 끝난 상태에서의 스레기층 두께이다.

Yen and Scanlon(1975)은 매립이 완료된 캘리포니아의 여러 매립장들의 9년간 실측결과로부터 침하율(=매립장의 표고 변화(ΔH_f)/경과시간변화(Δt))를 평균 매립연한, 매립완료시의 매립높이, 매립기간과의 관계로 분석하여 식 (3)을 제안하였다.

$$m = a - b \cdot \log t_m \quad (3)$$

식 (3)에서 a , b 는 침하율 계수로 침하자료로부터 경험적으로 산정되었으며, t_m 은($(t - t_c)/2$) 로 정의된다. 식 (4)는 매립고에 따른 침하율이다.

$$m = 0.0268 - 0.0116 \log t_m \text{ (매립고 : 12m~24m)} \quad (4, a)$$

$$m = 0.038 - 0.0155 \log t_m \text{ (매립고 : 24m~30m)} \quad (4, b)$$

$$m = 0.0433 - 0.0183 \log t_m \text{ (매립고 30m이상)} \quad (4, c)$$

여기서, m 의 단위=m/month, t_m =매립고가 중간 정도될

때까지 걸리는 개월 수, t_c 는 매립 기간, t 는 매립이 시작된 이후로 총 경과시간이다. 따라서 일정기간동안 발생하는 침하량은 식 (5)와 같다.

$$S = \int m dt_m = \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} (a - b \log t_m) dt_m \quad (5)$$

Bjarngard and Edgers(1990)는 매립장의 실측자료를 근거로 하여 매립장의 침하예측을 위한 새로운 모델을 제안하였으며, Bjarngard and Edgers가 제안한 식은 식 (6)과 같다.

$$\frac{\Delta H}{H} = CR \cdot \log \frac{\bar{P}_0 + \Delta p}{P_0} + C_{amin} \log \frac{t_2}{t_1} + C_{amax} \log \frac{t_3}{t_2} \quad (6)$$

여기서, ΔH =침하량, H =매립장의 초기 두께, $\bar{P}_0$ =초기 수직 유효응력, Δp = 응력 증분, CR =압축비, C_{amin} =중간단계 이차압축지수, C_{amax} = 장기 이차압축지수이다.

Edil et al.(1990)은 일정하중이 작용하는 상태에서 유발되는 시간 의존적인 변형거동을 나타내는 가장 간단한 방법중의 하나이며 많은 공학적 재료의 크리프 거동 모사에 사용되는 Power Creep모형을 사용하여 쓰레기 매립장 침하거동을 예측하고자 하였으며 침하량 $S(t)$ 는 식 (7)과 같다.

$$S(t) = H\epsilon(t) = HdPm(t/t_r)^n \quad (7)$$

여기서, m =기준압축성, n =압축율, t_r =기준시간, dP =작용하중을 나타내며, 식 (8)의 양변에 지수 로그를 취하여 정리하면 식 (8)과 같다.

$$\log \epsilon = n \log(t/t_r) + \log dP + \log m \quad (8)$$

이로부터 $\log \epsilon$ 대 $\log t$ 가 직선관계를 나타내는 이차 압축 부분에서 직선의 기울기는 n 이고, 절점은 $(\log dP + \log m - n \log t_r)$ 이다. 즉, $\log \epsilon$ 대 $\log t$ 의 그래프로부터 m 과 n 을 구할 수 있다.

Park(1998)은 분해 가능한 유기성 고형물의 용액화 즉, 체적감소과정이 일차반응에 따른 것처럼 분해를 통해 유발되는 쓰레기 매립장의 압축과정도 일차반응 형태를 따른다고 가정하여 식 (9)와 같이 제안하였다.

$$\bar{\epsilon}_{dec}(t_{bio}) = \epsilon_{tot-dec} \cdot e^{-kt_{bio}}, t_{bio} = t - t_c \quad (9)$$

여기서, k =일차 분해압축율 계수(t^{-1}), t_c =분해에 의한 침하가 시작되는 시점, $\bar{\epsilon}_{dec}(t_{bio})$ 은 시간 t_{bio} 에서 존재하는 분해 가능한 유기성 고형물의 분해로 인하여 추후 발생할 수 있는 장기 압축량, k =분해에 의한 압축율, t_{bio} =분해에 의한 압축이 시작되는 시점으로부터 경과된 시간, t_c 값에 대해서 신선한 쓰레기 매립장의 경우 침하-대수시간관계에서 선형적인 침하양상을 보이다가 급한 경사를 가지면 침하가 발생하는 시점으로 간주하였다. 매립된 후 상당기간이 경과한 대부분의 매립장에서 침하계측이 시작되었을 때는 이미 분해에 의한 침하가 유발되고 있으므로, t_c 값은 침하가 계측되기 시작한 시점으로 결정하였다. 따라서 임의의 시간에 발생한 침하량은 식 (10)에서 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta S/H &= \Delta \epsilon_{mec} + \Delta \epsilon_{dec} \\ &= C_{\alpha, mec} \log[(t + \Delta t)/t] + \epsilon_{tot-dec}(1 - e^{-kt_{bio}}) \end{aligned} \quad (10)$$

2.2 토목섬유를 활용한 지반보강 이론

얇은기초의 지지력이론은 Terzaghi(1943)가 표면이 거친 얇은 강성 연속띠 기초에 대한 지지력이론을 발표한 이후, Meyerhof(1951) 등에 의하여 발전 되었다. 그러나 토목섬유 등으로 보강한 지반의 지지력은 이와 같은 지지력이론과는 여러 면에서 상이하다. Binquet and Lee(1975a, 1975b)의 띠기초에 대한 지지력 특성을 연구한 이래, 많은 학자들에 의해 보강토 지반에서의 지지력 특성 및 각종 매개변수를 이용한 연구 결과를 발표한 바 있다.

2.2.1 토목섬유 보강지반의 파괴 메카니즘

Binquet and Lee는 토목섬유로 보강된 얇은기초의 지지력 파괴에 관한 연구를 실시하였으며 토목섬유 보강지반에서의 파괴형태 세 가지로 정의하였다. 첫 번째 파괴유형은 파괴 시 활동면이 토목섬유 상부층에서 나타나는 경우로서, 지반 표면과 최상부 보강재와의 간격이 $2/3B$ 보다 클 때 파괴양상이며, 두 번째 파괴유형은 d/B 가 약 $2/3$ 보다 작고, 보강층 수가 약 2~3개 이하일 때의 발생할 수 있는 파괴로 정의하였다. 이러한 파괴는 보강재의 길이가 짧아 인발(Pull-out)되어 발생하는 경우이다. 세 번째 파괴유형은 d/B 가 약 $2/3$ 보다 작고, 보강층 수가 4이상 6~7 이하일

때 나타나는 파괴 형태로서 이와 같은 경우가 보강재 설치 시 극대의 효율을 얻을 수 있으며, 이때 보강재의 길이는 충분히 길어야 한다.

2.2.2 지오셀 보강효과

지오셀은 지반을 3차원적으로 구속하여 하중이 재하되면 강력한 횡 방향의 상호구속 강화 효과, Cell 벽간의 Hoop 강도와 인접한 Cell의 수동 반력, 채움재와 Cell 벽간의 전단저항력을 발생시킨다. 이러한 제반 거동들은 원지반의 지지력을 초 연역지반을 기준으로 할 때 최고 약 15배까지 향상시키는 역할을 한다. Fig. 1(a)는 지오셀에 의한 지반보강 원리 개념도이다(Koener, 1997). 지오셀에 의해 지지력이 향상된 지반은 지오셀 하부 원지반에 균등한 하중을 분포시키어 편심하중 및 국부하중으로 인한 원지반의 부등침하 및 편칭파괴를 근원적으로 차단시킬 수 있다. Fig. 1(b)는 지오셀에 의한 하중분포 개념도이다.

일반적으로 토목섬유 보강에 따른 지반의 지지력 증가 효과는 무차원 매개변수인 지지력비(BCR ; Bearing capacity ratio)로 나타낼 수 있다(Das and Shin, 1993). 지지력비는 임의의 기초 침하 시 보강한 경우와 보강하지 않은 단면에 대한 극한하중(q_u)의 비율 또는 허용하중(q_a)의 비율로 나타낼 수 있다. 이와 같은 개념을 바탕으로 지지력비는 다음 식 (11)과 같이 정의할 수 있다.

$$BCR_u = \frac{q_{u(R)}}{q_u} \quad (11)$$

여기서, BCR_u 는 극한하중에 대한 지지력비, $q_{u(R)}$ 은 보강시 극한하중, q_u 는 무보강시 극한하중을 나타낸다.

3. 사용종료 매립장의 침하계측 및 현장지지력 시험

3.1 사용종료 매립장 현황 및 장기침하 계측

연구대상 사용종료 매립장은 경상남도에 위치하고 있으며, 폐기물 매립은 1991년 1월부터 1995년 7월까지 약 4년 7개월간 4단계로 폐기물 매립을 실시하였다. 매립면적은 225,400m²으로 생활쓰레기를 매립하였으며, 사용종료 후 매립장 상부 부지를 농경지로 활용하였다. 사용종료 매립장은 총 4구간으로 매립장이 구분이 되어있으며, 1구간 면적 66,700m², 2구간 66,500m², 3, 4구간 92,200m², 매립고는 평균 8.0m로 조성되었다. 매립장 상부에 약 2m~3m의 최종 복토를 시행하였으며 수직가스 포집공, 지하수 검사정이 설치되어 있다(Masan City, 2007).

사용종료 매립장은 1,2 단계 매립장의 폐기물을 3,4단계 매립지반 위에 다시 적재하여 신규 매립장으로 사용하였으며, 1,2단계 매립장은 폐기물을 모두 제거하고 복토 후 산업단지로 활용하고, 3,4단계 매립장은 1,2단계의 폐기물을 적재한 다음, 지반이 안정화 된 후 공원으로 활용할 계획이다. 본 논문의 대상이 되는 구간은 3.4단계 매립장의 일부지역인 침출수 관측시설이 있는 구간으로 기존의 사용종료 매립장 위에 약 1.0~2.0m의 성토가 이루어진 지반이다. 매립폐기물 성상 조사결과는 Table 1과 같이 가연성분 13.7%~17.2%로 조사되었으며, 가연성분 중 가장 높은 함량은 비닐·플라스틱류로 8.9%~12.2%로 조사되었다. 불연성분은 82.8%~86.3%로 가장 높은 함량은 토사류로 59.4%~67.5%로 조사되었다(Korea Rural Community Corporation, 2012).

일반적으로 쓰레기 매립장은 하중증가에 따른 즉시침하가 수개월 이내에 완료되며, 이후 수십년 에 걸쳐 상당

Fig. 1. Schematic diagram of Geocell reinforcement

Table 1. Characteristics survey result for waste landfill

Division		TP-1 (%)	TP-2 (%)	TP-3 (%)
Flammable	Pabulum	0,0	0,0	0,0
	Wood	0,3	0,2	0,3
	Paper	0,3	0,4	0,4
	Rubber & Leather	2,8	3,2	3,1
	Vinyl & plastic	8,9	12,2	11,2
	Fiber	1,4	1,2	2,1
	Total	13,7	17,2	17,1
Nonflammable	Glass & Ceramics	2,3	3,8	3,5
	Metal	3,8	4,5	6,1
	Soil	67,5	62,5	59,4
	Etc.	12,7	12,0	13,9
	Total	86,3	82,8	82,9
Total		100	100	100

한 양의 침하가 장기적으로 발생하게 되고 쓰레기 입자의 장기적인 미끄러짐 및 재배 열, 압축성이 큰 구성 성분이 지체된 압축 등에 의하여 장기적으로 발생하는 역학적인 이차압축 침 하가 발생된다. 그리고 분해에 의한 침하는 매립이 완료된 이후 쓰레기에 포함된 분해 가능한 유기 성 고형물이 생물학적 반응에 의해 분해됨에 따라 발생하는 장기적인 압축량을 의미한다.

현장계측은 기존 매립장의 경우, 사용종료 이후 2003년, 2008년 주변 환경영향 종합보고서의 계측값을 활용하고 자료가 미비한 초기압축부분은 보간법에 의한 계산으로 산출 하였으며, 또한, 2010년부터 2012년 까지는 신규매립장 조성공사 시 계측한 자료를 사용하였다.

Fig. 2. Shape of Geocell

3.2 지지력 보강효과 분석을 위한 현장지지력 시험

본 연구에서는 기존 사용종료 매립장 상부에 신규 매립장을 조성할 경우, 기존시설의 안정성 확보 및 신규 매립장의 지지력을 확보를 위하여 제안된 격자형 토목섬유 보강재인 지오셀(Geocell)을 시공하고, 지오셀의 보강거동을 분석

하기 위하여 보강재 종류 및 보강유무에 따른 현장시험을 실시하였다. 본 연구의 현장지지력시험에 사용된 지오셀의 형상 및 물성값은 Fig 2와 Table 2에 나타난 바와 같다.

Fig. 3과 같이 시험시공 위치는 매립장 내 W10m×L30m 크기의 현장에서 지오셀 보강여부 등 여러 조건별로 부지

Table 2. Mechanical properties of Geocell

Item	Test method	Unit	Test result			
			#1	#2	#3	Average
Gravity	ASTM D 792-08		0,944	0,944	0,944	0,944
Tensile Strength	ASTM D 5035-95, C,R,E Strip	N/50mm	1,396,1	1,395,5	1,364,1	1,385,23
Tensile Elongation	ASTM D 5035-95, C,R,E Strip	%	15,4	15,7	15,6	15,57
Seaming Strength	ASTM D 4437-08	N/cm	81,5	77,9	86,4	81,93
Thickness	ASTM D 5199-01	mm	1,18	1,18	1,17	1,18

Fig. 3. A site of Field test

Table 3. Field bearing capacity test conditions

Division	Test condition	Ground condition	Test method
A	Unreinforcement (10mX10m)	Ground	Plate loading test($\phi 300, \phi 400$)
B	Unreinforcement (10mX10m)	Ground + Filling (44cm)	
C	Reinforcement (20mX10m)	Ground+Geotextile+Geocell+Filling (44cm)

(a) Settlement-Elapsed time (linear)

(b) Vertical strain-Elapsed time (log)

Fig. 4. Long-term results of monitoring settlement

를 조성한 다음 평판재하시험을 실시하였다. Table 3은 현장시험조건을 나타낸 것으로 무보강, 무보강+복토, 지오셀보강 지반에 대한 평판재하시험을 실시하였다. 무보강 구간은 원지반을 상부토사 계획고까지 제거하고 평판재하시험을 재하판의 크기($\phi 300, \phi 400$)에 따라 각각 시험을 실시하였으며, 무보강 복토구간은 원지반 상부에 토사를 44cm 두께로 포설하여 다진 지반에 재하판의 크기에 따라 각각 시험을 실시하였다. 마지막으로 지오셀 보강구간은 원지반위에 부직포를 포설하고 지오셀($H=24\text{cm}$)을 설치한 다음, 토사를 포설(지오셀 포함 44cm)하고, 10Ton 로울러를 이용하여 다짐한 후 재하판의 크기에 따라 각 재하시험을 실시하였다.

4. 침하계측 및 현장시험 결과분석

4.1 장기침하 계측 결과 및 분석

4.1.1 매립지반 압축지수 분석

사용종료 매립장의 초기압축 침하는 앞에서 언급한 환경영향평가 보고서의 자료와 보간법으로 산출한 누락부분의 자료를 취합하여 분석하였으며, 분석결과 2010년 초기 계측 이전에 약 1.25m의 초기압축 침하가 발생된 것으로 판단된다. 2010년 이후 외부성토(복토)에 의한 상재하중의 영향과 장기침하로 인해 발생하는 총 침하는 640일간에 0.29m~0.50m 정도 발생하였다. Fig. 4는 본 연구대상 기존매립장의 침하계측 결과를 변형율-Log(t)로 나타낸

것이며 침하량 변화에 따른 압축지수를 함께 도시하였다. 압축단계의 초기 압축지수는 0.026, 급격한 압축침하가 진행되는 중간 압축단계의 압축지수는 0.0678로 나타났다. 또한 사용종료 후 약 2년경과 후부터 장기적인 분해단계의 압축지수 값을 나타내었다. 본 연구대상지는 매립이 종료된 지 18년이 경과하여 초기 일차압축 및 이차압축에 의한 침하는 거의 종료되었으며, 현재 분해에 의한 장기적인 압축침하가 발생되고 있는 것으로 판단된다.

4.1.2 매립지반 침하모델 분석

본 연구에서는 기존 매립지반에 대하여 각각의 해석모델을 적용할 경우 20년간의 침하량을 분석하였으며 각각의 해석모델의 입력변수는 본 매립장에서 실측된 침하자료를 바탕으로 도출하였다. Table 4는 장기침하 분석에 적용한 입력변수이며, Fig. 5는 모델식에 의해 계산된 침하와 기존매립장 현장계측 결과 값을 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 폐기물 매립이력, 매립폐기물 특성조사 및 현장계측 결과에 따른 입력변수를 동일하게 적용할 경우, Sowers법, Yen & Scanlon법, Bjarngard & Edgers법은 실측값보다 침하량이 작게 산출되었고, Power Creep Law Method는 상당히 크게 산출되었다. 단기 압축침하 및 분해에 의한 장기침하를 고려한 Park모델에 의한 총 예측 침하량이 실측 침하량과 유사한 값을 나타내었다.

현장 실측 침하량과 변수값 변화에 따른 유사한 거동을

보이는 Sowers모델, Park모델 및 Bjarngard and Edgers모델에 대하여 침하량 변화를 분석하여 도시하였다. Fig. 6은 Sowers모델에 대하여 초기간극비 및 압축지수 변화에 따른 장기침하량 예측결과를 도시한 것이다. 각각의 그림에서 보는 바와 같이, 압축지수 0.06 조건일 때, 초기간극비가 0.5인 경우와 초기간극비 2.0 조건일 때, 압축지수 0.08인 경우가 현장 계측값 변화와 거의 동일한 거동을 보였다. Sowers모델은 단기침하 및 2차 압축침하량을 고려할 수 있는 모델이나 초기간극비와 압축지수 변화에 따른 총침하량 변화가 큰 것으로 판단된다. 또한, Fig. 7에서 보는바와 같이, Park 모델은 압축지수가 약 0.07일 경우, 총

Fig. 5. Field measurements and compare each model settlement

Table 4. Analysis of long-term settlement of waste landfill inputs

Items	initial void ratio (e_0)	Compression index			Filling height (m)	Compression ratio (n)
		Initial	Intermediate	Long-term		
Input	2.0	0.026	0.0678	0.00061	8.0	0.642

(a) Initial void ratio parameters

(b) Compression index parameters

Fig. 6. Comparison of the Sower's model

Fig. 7. Comparison of the Park's model

Fig. 8. Comparison of the Bjarngard & Edger's model

침하량은 현장 계측값과 유사한 값을 나타내나 분해단계에서의 장기침하량이 현장 계측값보다 크게 도출되었다. Park 모델은 분해에 의한 장기침하율을 고려한 모델로 장기침하 발생시점을 적정하게 선정여부에 따라 총침하량에 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 실측 침하량 분석에 따른 전 단계(일차압축, 이차압축, 장기압축)의 변형량을 고려한 Bjarngard & Edger 모델에 대하여 초기압축 침하량 변화에 따른 예측 침하량을 분석하였다. 초기 일차압축 침하량이 1.162m 일 경우 계측 침하량과 유사한 거동을 나타내었다. Bjarngard & Edger 모델은 매립 초기단계, 즉 매립폐기물의 성토단계에서부터의 침하량을 고려한 모델로 상기모델 적용을 위해서는 초기 압축량에 대한 정확한 산정이 필요하였다.

4.2 지지력 보강 효과분석

각각의 시험조건에 따른 하중-침하곡선은 Fig. 9~ Fig.

11과 같다. 또한, Table 5는 각각의 시험조건 및 재하판의 규격에 따른 항복하중, 극한지지력 및 허용지지력을 산정한 결과이다. Fig. 12의 BCR값은 무보강 원지반에 대한 성토 44cm, 지오셀 보강에 따른 지지력 증가비를 나타낸 것이다. 각각의 시험결과에서 보는 바와 같이, 원지반에 성토만 44cm 시행할 경우, 직경 300mm일 경우에 지지력이 약 1.193~1.22배 증가하며, 재하판 직경이 400mm 일 경우에 1.509~1.554배 지지력이 증가하는 것으로 도출되었다. 또한 재하판 직경이 증가할수록 지지력 증가비가 증가하였다. 지반반력계수 산정은 k_{75} 는 k_{30} 과 k_{40} 으로 구한 값의 평균값으로 산정하였으며, 그 결과는 Table 6에 나타난 바와 같다.

5. 결론

본 논문에서는 사용 종료된 생활폐기물 매립장의 토지 활용 시에 필요한 장기침하 분석 및 지지력 보강효과 분석

(a) Loading plate D=300mm

(b) Loading plate D=400mm

Fig. 9. Plate loading test results of ground

(a) Loading plate D=300mm

(b) Loading plate D=400mm

Fig. 10. Plate loading test results (Ground+filing)

(a) Loading plate D=300mm

(b) Loading plate D=400mm

Fig. 11. Plate loading test results (Ground+Geotextile+Geocell+filing)

Table 5. Bearing capacity ratio with yield stress

Test condition		Yield stress (MPa)	Ultimate bearing capacity (MPa)	Allowable Bearing Capacity (MPa)	BCR
Ground (Unreinforced)	D=30cm	5.31	7.965	2.655	1.0
	D=40cm	5.59	8.388	2.796	1.0
Ground+Filling (44cm)	D=30cm	6.34	9.510	3.170	1.193
	D=40cm	6.82	10.230	3.410	1.220
Ground+Geotextile+Geocell+Filling (44cm)	D=30cm	8.0	12.023	4.008	1.509
	D=40cm	8.67	13.034	4.345	1.554

Fig. 12. Analysis results of bearing capacity ratio

Table 6. Coefficient of subgrade reaction

Test condition	k_{30} (MPa)	k_{40} (MPa)	k_{75} (MPa)
Ground (Unreinforced)	26.59	87.93	35.35
Ground+Filling (44cm)	68.51	92.40	46.37
Ground+Geotextile+ Geocell+Filling (44cm)	89.35	131.35	64.09

을 실시하였으며 연구결과 도출한 총괄결론은 다음과 같다.

- (1) 폐기물 매립지반의 압축지수는 매립대상 폐기물의 종류, 기후조건, 안정화 촉진 여하에 따라 다양하게 발생되는데, 본 연구대상 매립장의 침하양상은 매립종료 후 1년~2년 사이에 약 72%의 역학적 압축침하($C_{intermediate}=0.0678$)가 발생되었으며, 매립종료 후 18년이 지난 현재시점은 분해에 의한 압축침하($C_{longterm}=0.00061$)가 진행되고 있는 것으로 판단된다.
- (2) 예측모델을 통한 장기침하량 분석결과, Power creep law모델은 과다예측 되었고, Sowers법, Bjarngard and Edgers 모델, 대수함수는 다소 작게 예측되었다. 반면, 매립폐기물의 성상, 역학적 침하와 분해 침하를 구분한 Park의 예측모델은 계측 침하량과 유사하였다.
- (3) Park모델의 분석결과 압축지수 $C(intermediate)=0.0678$ (계측 분석값 적용)을 쓸 경우, 전체적인 침하량 값은 계측결과와 유사하나, 분해단계의 침하속도에 차이가 있는 것으로 도출되었다. 반면, Sowers model은 매립지반 초기간극비와 $C(intermediate)$ 값 변동에 따라 계측값과 상당히 근접한 결과를 얻을 수 있었다. Bjarngard & Edgers model은 압축단계와 분해단계의 전환 시점을 변수로 하여 초기 압축침하량 $H_{initial}$ 을 변화시켰으며, 일차압축초기단계 침하량이 1.162일 경우 계측침하량과 유사한 거동을 보였다.
- (4) 현장에서 실험한 사안에 대하여 평가하면, 지오셀 보강지반의 지지력이 무보강 지반보다 약 1.193~1.554배 증가하였으며 재하판 직경증가에 따라 약 2.2~2.9% 증가 하는 것으로 나타났다.

References

1. Binquet, J., & Lee, K. L. (1975a), "Bearing Capacity on reinforced earth slabs", Journal of Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Vol.101 No.12, pp.1241-1255.
2. Binquet, J., & Lee, K. L. (1975b), "Bearing capacity analysis of reinforced earth slabs", Journal of Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Vol.101 No.12, pp.1257-1276.
3. Bjarngard, A., Edger, L., (1990), "Settlements of Municipal Solid Waste Landfills", Proceedings of the Thirteenth Annual Madison Waste Conference, Madison, WI.
4. Das, B. M. and Shin, E. C. (1993), Strip foundation on geogrid-reinforced clay: behavior under cyclic loading, Geotextiles and Geomembranes, 13(10), pp.657-661.
5. Edil, T. B. et al. (1990) Settlement of Municipal Refuse. ASTM STP 1070 Geotechnics of Waste Fills, p.225.
6. Grisolia, M., Napoleoni, Q., (1996), "Geotechnical Characterization of Municipal Solid Waste", Proceedings of the 2nd International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, Vol.2, pp.641-646.
7. Koerner, R. M. (1997), Designing with Geosynthetics, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 4th Ed., pp.315-386.
8. Korea Rural Community Corporation (2012), "Post management report on the Gunbuk & Sado Closed landfill"
9. Masan City (2007), "Comprehensive Environmental Impact Report on the Sado Closed landfill".
10. Meyerhof, G G (1951), "The ultimate bearing capacity of foundations", Geotechnique Vol.2, No.4, pp.301-332.
11. Ministry of Environment (2013), "Waste Management Law Enforcement Ordinance", Article 35, Land Use Restriction, Section 1.
12. Park Hyun Il, Lee Seung Rae, Koh Kwang Hoon (1998), "Long -Term Settlement Behavior of Landfills with Consideration of Refuse Decomposition", Journal of Korean Geotechnical Society, Vol.14, No.1, pp.5-14.
13. Sowers, G. G., (1973), "Foundation Problems in Sanitary Landfills", Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Vol.2, pp.207-210.
14. Terzaghi(1943), "Theoretical Soil Mechanics", Wiley and Sons.
15. Yee Ir Kenny. (1999), "Upgrading of existing Landfills by Dynamic Consolidation: A Geotechnical Aspect", Master Builders Journal, September. 201-215.
16. Yen, B. C., and B. Scanlon (1975). "Sanitary Landfill Settlement Rates", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, May, pp.475-487.