

인천지역 비위생 매립지반의 침하특성 연구

The Settlement Characteristics of Incheon Unsanitary Solid Waste Landfill

조 석 호¹ Cho, Seok-Ho
임 주 현² Lim, Ju-Hyun
김 학 문³ Kim, Hak-Moon

Abstract

This paper estimates the long-term settlement of Incheon unsanitary solid waste landfill, which is 20 years old. The unsanitary solid waste landfill was subjected to pre-loading system over a period of 1 year, and 300 settlement monitoring provided the long term settlement data. This landfill contains relatively small amount of organic component, and therefore the initial stage of settlement was very small. The existing settlement models were examined by comparing the observed behaviors of this site, and also they were used to predict the long-term settlement. Power Creep Law (PCL) model showed good agreement with the measured settlement obtained from the initial stage of the measurement, but other models showed satisfactory agreements after 50~70 days of measurement.

요 지

인천시 소재 OO지역 비위생 매립지를 대상으로 선행하중(pre-loading) 공법에 의한 성토시 폐기물층의 침하 계측을 바탕으로 기존에 제시된 경험적 침하 모델을 적용하여 침하 모델의 적용성과 타당성을 분석하였다. 매립 연한이 20년 이 지난 비위생 매립에서의 1년간의 성토기간 동안에 9개 지점의 지표면 침하판, 2개의 층별 침하계를 설치하고 약 300일간의 계측을 통해 비위생 매립지의 침하량을 측정하였다. 초기 침하 부분에서 기존의 침하 예측 모델과 본 현장의 침하량을 비교 분석한 결과 PCL(Power Creep Law)모델의 경우 실측 범위내에서 근접한 결과를 보였으나 쌍곡선(hyperbolic) 모델과 Bjarngard와 Edgers 모델의 경우 초기 실측 범위인 약 50~70일부터 300일까지 실측치와 근접하게 예측되었다.

Keywords : Landfills, Municipal solid waste, Settlement

1. 서 론

폐기물 매립지의 활용 측면에서 단기 혹은 장기 침하량을 산정하는 것은 무엇보다도 중요하며, 최근 매립지반에서 구조물 시공시 예측치 못한 침하로 인해 매우 곤란을 겪는 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 그러나

폐기물 매립지는 일반적인 토질 기초지반과는 공학적으로 상이한 재료의 차이로 인해 서로 다른 거동을 보이므로, 폐기물매립지의 공학적 거동은 예측시 지반공학 측면에서의 접근 방법은 많은 문제점들을 내포하고 있다.

폐기물 매립지의 침하량을 예측하는 기법으로는 현

1 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Dankook Univ.)

2 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 석사수료 (Member, Post Graduate Student, Dept. of Civil Eng, Dankook Univ.)

3 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof, Dept. of Civil Eng., Dankook Univ., khm1028@dankook.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

재 PCL, 쌍곡선(Hoe 등, 1998)모델 등의 방법에 의해서 침하량을 예측하고 있으나 이들 식이 필요로 하는 폐기물의 물성치의 산정은 쉬운 일이 아닐뿐더러 폐기물의 특성상 역학적 비균질성과 전체적인 비등방성, 크지 않은 하중에서의 급격한 침하, 쓰레기의 분해 과정에 따른 물리·화학적 성질의 변화와 더불어 최종적으로는 쓰레기의 형체가 해체되어 급격하고 많은 양의 침하를 유발하며 체적 감소시에 발생하는 가스에 의하여 연경도가 매우 다양한 물질로 변하는 등 많은 문제점들이 침하 예측시 많은 어려움을 주고 있다.

폐기물 매립지에서 침하를 유발하는 메커니즘은 그 형태에 따라서 크게 다음과 같이 나눌 수 있다(Sowers, 1973; Gordon 등, 1986). 첫째로, 역학적 압축(mechanical compression)은 하중증가에 따라 수개월 이내에 발생하는 일차 혹은 단기(short-term) 압축과 오랜 기간 동안 지속적으로 발생하는 역학적 이차 압축(mechanical secondary compression : $\Delta\epsilon_{mec}$)으로 구분될 수 있다.

일차 압축은 가스 혹은 공기로 채워진 간극의 압축, 느슨한 쓰레기의 압축, 입자의 미끄러짐 등에 의하여 발생된다. 반면 이차 압축은 크리프(creep) 특성과 유사하게 입자의 장기적인 미끄러짐 및 재배열, 쓰레기 구성성분의 지체된(delayed) 압축 등에 의하여 장기적으로 발생된다. 둘째로, 분해(decompression)에 의한 침하($\Delta\epsilon_{dec}$)는 폐기물에 포함된 분해 가능한 유기성 고형물이 생물학적 반응기작을 따라 분해됨으로써 발생하게 된다. 이상과 같이 쓰레기 매립지의 장기 침하 양상은 두 가지로 구분되며, 이를 식으로 표현하면 다음 식 (1)과 같다.

$$\Delta\epsilon(t)_{long-term} = \Delta\epsilon(t)_{mec} + \Delta\epsilon(t)_{dec} \quad (1)$$

Bjarngard와 Edgers(1990) 등은 침하변형률-대수시간과의 관계에서 대체로 초기 침하가 완료된 이후에는 작은 값의 기울기를 갖는 선형적인 관계를 보이다가 일정기간이 지난 후에 급격한 변화를 나타내는 기울기의 침하 양상을 보이며, 이러한 이유는 역학적 이차 압축만이 유발되는 단계에서 쓰레기에 포함된 유기성 고형물이 분해되기 시작함에 따라 발생하는 간극비의 변화로 압축률이 크게 증가되기 때문인 것으로 보고 있다(그림 1 참조).

폐기물 매립지반의 침하를 예측하기 위해 산정되는 폐기물 물성치의 결정을 위해서는 앞서 말한 것들과 같은 문제점들로 인해 많은 어려움이 있으며 산정방법에 따라 여러 차이점들이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 경험적으로 침하를 예측하는 기법인 쌍곡선 모델(Hoe 등, 1998), PCL(Edil 등, 1990), Bjarngard와 Edgers의 제안식(1990)을 통하여 인천시 소재 OO부지의 사용 종료 후 20년이 경과한 비위생 매립지에 대하여 1년여 간의 선행하중(pre-loading)공법에 의한 성토와 더불어 측정된 현장 계측자료를 바탕으로 각 경험식들에 의한 침하량과의 상호 비교, 검토하였다.

2. 현장 매립지 특성

본 매립장은 과거 1986~1989년에 걸쳐 4년여 동안 폐기물의 비위생 매립이 이루어진 사용종료 매립지로 과거 매립 현황만 기록되어져 있을 뿐 매립이력에 대한 기존 자료가 존재하지 않아, 개괄적인 폐기물의 매립현황 및 매립심도 등 구체적인 폐기물의 매립현황 파악이 어려운 실정이다. 따라서 매립 폐기물의 현황에 대한 기초 자료 조사를 위하여 시굴 조사 및 물리조사를 실시하였다.

매립지 주변의 동쪽과 남쪽에는 각각 도로가 위치하고 있으며, 북쪽 및 서쪽으로는 해상점으로 이루어진 연약지반이 위치하고 있는 총 매립 면적이 약 177,000m³의 비위생 사용 종료 매립지이다. 시굴 조사 결과에 의하면 매립부지 북쪽 경계부는 폐기물이 존재하지 않으며, 그 외 지역은 상부에 평균 60cm 이상의 복토층 아래 폐기물층이 존재하며, 매립 폐기물층의 심도는 2.5m~4.5m의 범위로 조사되었다. 조사된 폐기물의 매립심도와 범위를 기초로 계산한 조사 부지 내 매립된 폐기물은 약 548,000m³ 정도로 추정되었다. 본 비위생 매립지 내의 폐기물의 성상분

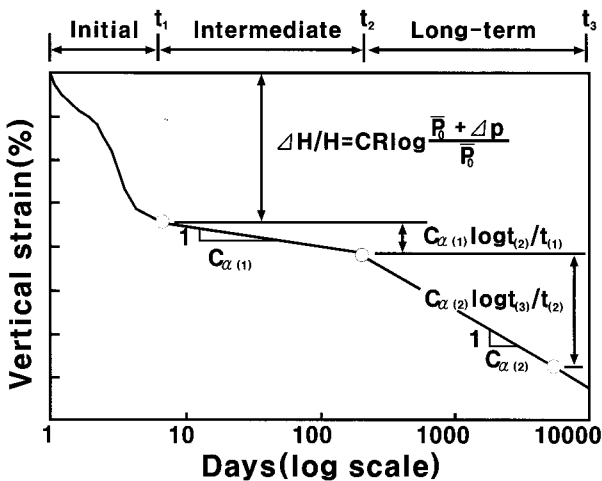


그림 1. Bjarngard와 Edgers(1990)의 침하모델

석을 위한 시추 위치도는 다음 그림 2와 같다.

매립 폐기물 성상 분석은 그림 2와 같이 매립 지반 내 4개 지점, 각 2개 심도에 대해 폐기물 공정 시험법에 준하여 채취한 뒤 원추 4분법에 의한 성상 분석 및 겉보기 밀도 측정을 병행하였다. 매립 폐기물은 2.5~4.5m의 폐기물 분포 심도를 고려하여 각 지점별로 2m, 4m정도 까지 굴착하여 채취하여 분석하였으며, 폐기물의 물리적 성상 분석은 다음 표 1에 나타 내었다.

GB 3, 4지점의 경우, 심도별 폐기물 조성이 다른 지점들에 비해 불규칙하게 나타나고 있는데, 이는 폐기물 매립이 계획적인 매립보다 무분별하게 단순투기 형식으로 매립이 이루어짐에 따른 지역적인 폐기물의 성상의 차이가 나타나는 것으로 판단된다. 폐기물 10성상 분석 결과, 토사류(51%), 비닐/플라스틱(25%), 섬유류(17%) 등의 순서로 이들의 구성비가 약 90% 이상을 차지하며, 종이류(0.93%), 음식류(0.04%)로 이러한 분해성 폐기물은 이미 상당 부분 분해가 진행되어 생물학적으로 안정화 상태에 도달한 것으로 판단된다.

2.1 폐기물 매립지반 침하 계측

침하량을 계측하기 위한 계측기의 설치 위치를 그림

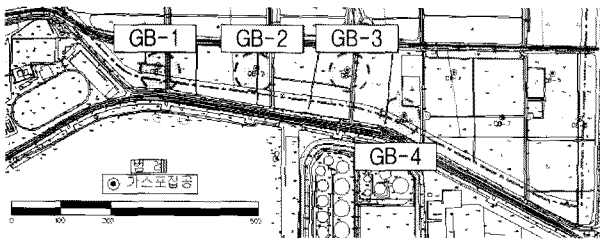


그림 2. 매립폐기물 성상분석 시추 위치도

표 1. OO부지 비위생 매립지 폐기물 물리적 성상 분석(10성상)

시추공번호 (심도)	GB-1 (2m)	GB-1 (4m)	GB-2 (2m)	GB-2 (4m)	GB-3 (2m)	GB-3 (4m)	GB-4 (2m)	GB-4 (4m)
가연성								
음식류(%)	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.10
종이류(%)	0.36	0.80	0.37	1.92	0.20	0.24	1.33	0.00
비닐/플라스틱(%)	1.91	3.50	22.84	28.98	38.32	32.45	18.33	22.91
목재류(%)	0.44	2.10	1.06	0.85	0.42	0.25	0.43	0.39
고무/가죽류(%)	7.17	7.80	8.93	9.83	17.54	2.57	2.76	3.05
섬유류(%)	7.17	7.80	8.93	9.83	17.54	2.57	2.76	3.05
기타가연물(%)	0.00	1.50	3.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85
불연성								
금속류(%)	4.83	1.90	0.49	0.25	0.00	0.40	0.04	0.02
유리/도자기류(%)	0.43	1.80	0.61	1.79	0.04	0.69	0.35	0.61
토사류(%)	77.69	80	63.63	55.79	41.74	60.56	62.1	60.1
합계(%)	100	100	100	100	100	100	100	100

3과 그림 4에 나타 내었으며 단기간내에 침하를 유발하기 위해 선행하중 공법을 적용하였다. 그림 4와 같이 토사를 3m이상(70,809m³)을 성토하여 하부의 폐기물층 및 해성토층에서 강제 침하를 유도하였으며, 성토체 단위중량은 19kPa이다. 계측기는 매립지반 내 9개의 구

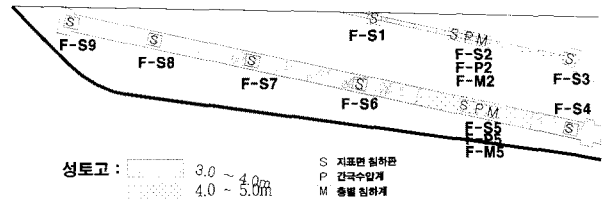


그림 3. 성토고 및 계측기 설치 현황 평면도

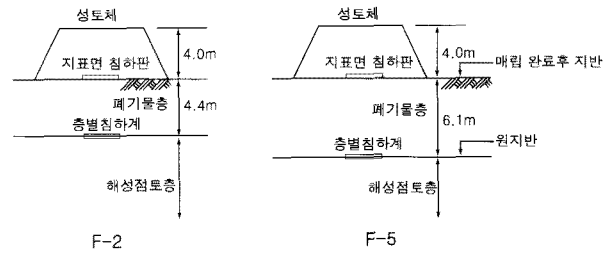


그림 4. 계측기 설치 단면도

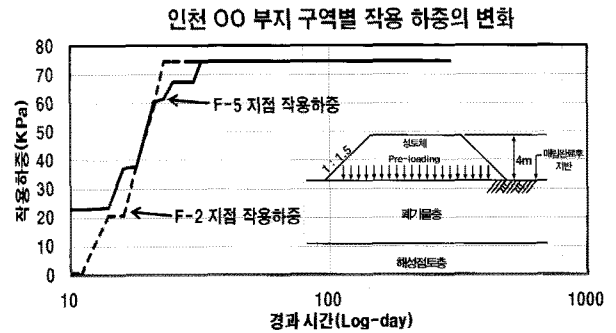


그림 5. 시간에 따른 작용하중의 변화

간에 지표면 침하판을 설치하였고 이 중 2개소에 층별 침하계를 설치하여 폐기물 매립층만의 침하량을 알 수 있도록 하였다. 계측 기간은 약 300일 동안 계측하였다. 성토체에 의해서 폐기물 매립지반에 작용하는 시간에 따른 하중의 변화는 그림 5와 같다.

3. 침하 계측 결과의 분석

3.1 경험 모델의 적용

3.1.1 계측 결과와 쌍곡선 모델의 비교

쌍곡선 모델은 연약지반 성토시 침하량 산정에 주로 이용되어 온 예측 방법으로써 Hoe 등(1998)이 쓰레기 매립지의 장기 침하 예측에 처음 적용 하였다. 본 OO부지 비위생 매립지에서 2개소의 계측 지점에 대하여 쌍곡선 모델을 적용하여 그 결과를 그림 6과 그림 7에 도시 하였다.

F-2지점의 쌍곡선 모델의 적용 결과 약 60일 이후

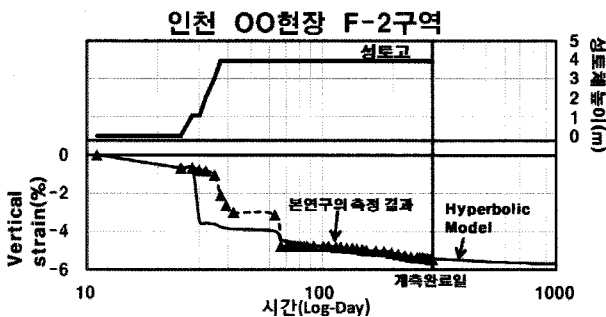


그림 6. F-2지점에 대한 쌍곡선 모델 적용 예측 결과

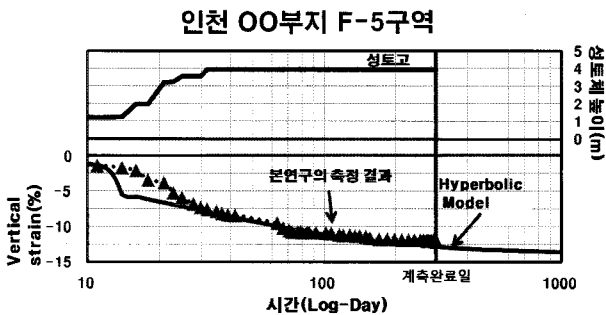


그림 7. F-5 지점의 쌍곡선 모델 적용 예측 결과

실제 침하량과 쌍곡선 모델에 의한 예측침하량은 매우 유사한 값을 보이지만 초기 성토체의 높이가 증가하고 하중이 점진적으로 증가하는 단계에서는 실측치 보다 과대 평가되는 경향을 나타냈다.

F-5지점에 대한 쌍곡선 모델의 적용 결과 성토 하중이 점진적으로 증가하는 약 30일 정도까지의 침하에 대하여 실측 침하량보다 다소 과대하게 예측되었으며, 성토가 마무리 되어진 시점인 약 30일 이후 부터 실측 침하량과 쌍곡선 모델에 의한 예측 침하량은 매우 근소하게 예측되었다.

그리고 약 300일 까지의 실측 침하량과의 쌍곡선 모델을 이용한 예측 침하량과의 비교를 통하여 쌍곡선 모델을 이용하여 1000일 후 장기 침하량을 추정시 표 2와 같이 F-2지점에 대하여 약 5.7%의 연직변형률(vertical strain)이 발생하였으며 침하값을 환산하였을시에 25.1cm 정도로 추정되었으며, F-5지점의 경우 약 13.6%의 연직변형률이 발생하였으며 침하값으로 환산시에는 약 82.8cm의 잔류 침하가 발생할 것으로 추정되었다.

3.1.2 계측 결과와 PCL 모델의 비교

PCL 모델은 일정한 하중의 작용 아래서 나타나는 시간 의존적인 거동의 모사를 하는 간단한 방법중의 하나로 공학적 재료의 크리프(creep)거동을 나타내기 위한 모델이다. PCL 모델을 각 지점에 적용하여 그림 8과 그림 9에 PCL 모델에 의한 침하량 예측을 도시 하였다.

F-2지점과 F-5지점에 대하여 PCL모델을 이용한 예측 결과 성토 하중의 증가에 따른 급격한 침하가 발생하는 초기 단계에서부터 실측 완료 시점인 300일까지의 실측 침하량과 유사한 값을 예측하였다.

PCL 모델의 경우 성토로 인해 하중의 증가하는 초기 단계에서의 실측 침하값에 대한 변화에 대하여 다른 모델들에 비해 좀 더 근사한 값을 예측하였다.

갑작스런 하중의 변화에 의해서 침하가 발생 할 경우 PCL 모델이 다른 모델들에 비하여 하중 변화에 따른 실측 침하량의 변화에 대한 좀 더 정확한 예측을 할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 성토가 끝난 시점에서

표 2. OO부지 비위생 매립지 장기 침하 예측

모델 종류	F-2 구역		F-5 구역		비 고
	변형률(%)	침하량(cm)	변형률(%)	침하량(cm)	
쌍곡선 모델	5.7	25.1	13.6	82.8	수렴
PCL 모델	7.5	33.0	18.8	114.8	발산
Bjarngard와 Edgers 모델	6.7	29.4	13.7	83.8	발산

부터 약 100일 정도까지 침하량 예측에서는 실측 침하량보다 조금 과소하게 예측되었다. 또한 장기 침하량을 예측할 경우 PCL 모델 함수의 특성에 의해 장기적으로 예측 침하량이 발산하는 경향이 나타난다.

약 300일까지의 실측 침하량을 바탕으로 PCL 모델을 이용하여 1000일 후 장기 침하량을 예측시 표 2와 같이 F-2지역에서 약 7.5%의 연직변형률과 33.0cm 정도의 침하량이 예측되었으며, F-5지점의 경우 약 18.8%인 114.8cm 정도의 장기 침하량을 예측하였다.

3.1.3 예측 결과와 Bjarngard와 Edgers 모델의 비교

Morris와 Woods(1990)가 제안한 폐기물의 장기 침하식의 이차압축 부분을 두 부분으로 나누어 제안한 Bjarngard와 Edgers의 모델은 초기(initial)침하, 중간(intermediate)침하와 장기(long-term)침하로 나뉘어진다. 본 OO부지 비위생 매립지에 Bjarngard와 Edgers 모델을 적용한 결과를 그림 10과 그림 11에 도시 하였다.

Bjarngard와 Edgers 모델을 이용하여 F-2지점과 F-5 지점에 대한 예측 결과 초기(initial)단계인 약 60일 정도까지의 침하량은 실측 침하량 보다 다소 과대하게 예측 되었으며, 중간(intermediate)단계와 장기(long-term)침하에 대한 예측에서는 실측치와 유사한 침하량을 예측하였다.

Bjarngard와 Edgers 모델의 적용시 그림 1에서 나타낸 바와 같이 중간(intermediate) 침하 단계와 장기(long-term)

침하 단계의 결정 및 중간(intermediate) 침하 단계 압축 계수($C\alpha_{(1)}$)값과 장기(long-term)침하단계 압축계수($C\alpha_{(2)}$) 값 결정이 침하량을 예측시 매우 중요한 요인으로 작용한다.

장기(long-term) 침하량의 예측에 있어서 Bjarngard와 Edgers 모델은 이차 압축 계수에 의해서 선형적으로 침하량이 증가하는 경향을 보이는데 이는 제안식의 특성에 따른 것이다.

본 매립지에 대하여 약 300일 까지의 실측 침하량을 바탕으로 Bjarngard와 Edgers의 모델을 이용하여 성토 이후 1000일 후의 침하량을 예측할 경우 표 2와 같이 F-2지점에 대하여 6.7%의 연직 변형률이 발생할 것으로 추정되어지며 침하량으로 환산시 약 29.4cm 예상되며, F-5지점에 대하여 연직변형률은 약 13.7%로 침하량으로 환산시 약 83.3cm정도이다.

4. 결 론

본 연구에서는 비위생 폐기물 매립지반의 하부 점토층에 대한 침하에 대하여서는 고려하지 않고, 단지 폐기물 매립층만의 침하발생을 대상으로 연구 하였다. 다음과 같은 결론을 얻었다. 폐기물 매립지의 침하량 예측을 위해 제안된 기존의 침하 모델들 중 쌍곡선 모델, Bjarngard와 Edgers 모델 및 PCL 모델을 적용하여 침하량을 예측 하였으며, 매립 후 20년 정도 경과하여 유기물의 함량이 거의 없는 것으로 판단하여, 유기물의 함량이 침하에 미

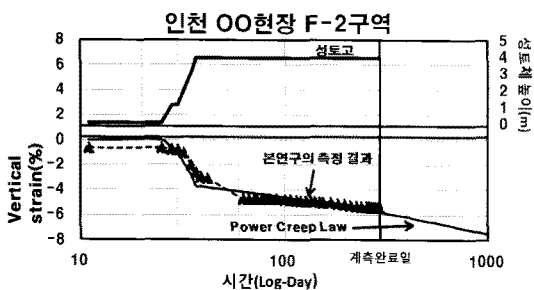


그림 8. F-2지점에 대한 PCL 모델 적용 예측 결과

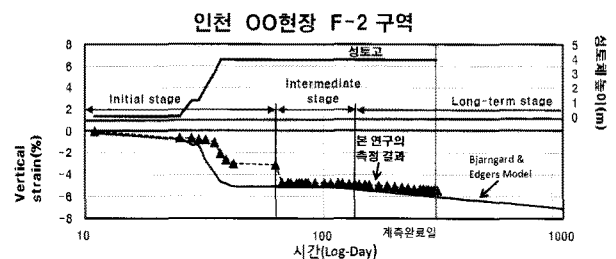


그림 10. F-2지점에 대한 Bjarngard와 Edgers 모델 적용 예측 결과

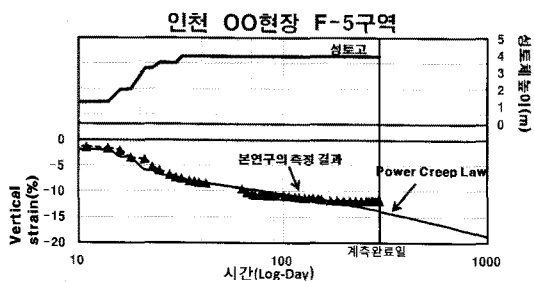


그림 9. F-5지점에 대한 PCL 모델 적용 예측 결과

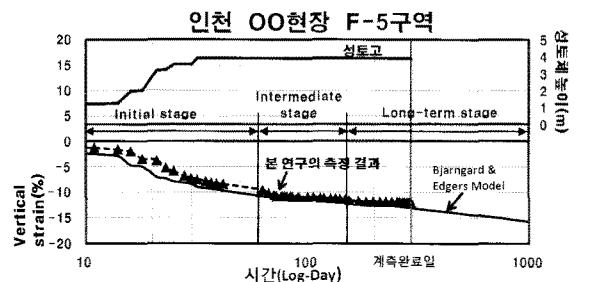


그림 11. F-5지점에 대한 Bjarngard와 Edgers 모델 적용 예측 결과

치는 영향에 대해서 무시하였으며, 다음과 같은 결론을 내렸다.

- (1) 선행하중 공법을 통해 성토 이후 매립지의 침하량 및 압축량을 분석한 결과 성토 이후 1년이 지난 시점에서의 침하는 안정적으로 수렴하는 경향을 나타내었다.
- (2) 본 OO부지 비위생 매립지의 침하 예측 결과 쌍곡선 모델과 Bjarngard와 Edgers 모델의 경우 성토하중이 점진적으로 증가하는 초기 약 50~70일 까지의 침하량 예측에서는 실측치와 차이를 보였으나, 그 후부터 약 300일까지의 실측 침하량은 예측치와 근접한 값을 보였다.
- (3) 실측 침하량을 바탕으로 1000일 이후의 장기 침하량을 예측 할 경우, PCL모델은 쌍곡선 모델과 Bjarngard와 Edgers 모델에 비하여 크게 발생 하였다. 그 이유는 공식 자체가 시간의 증가에 따라 발산하는 경향이 있기 때문이다.

참 고 문 헌

1. 박현일, 이승래, 고광훈 (1998), “분해가 고려된 쓰레기 매립지의 장기 침하 거동”, *한국지반공학회지*, 제 14권, 제 1호, pp.5-14.
2. 박현일, 이승래, 고광훈 (1998b), “매립연한이 서로다른 쓰레기 매립지의 장기침하거동”, *한국지반공학회지*, 제 14권, 제 2호, pp.21-30.
3. 박현일, 이승래 (2004), “쓰레기 매립지의 침하 유형에 따른 침하

모델들의 적용성 평가”, *대한토목학회 논문집*, 제 24권, 제 5C호, pp.289-296.

4. 박현일, 이승래 (2004), “유동학적 모델 및 유전자 알고리즘에 근거한 쓰레기 매립지 침하 모델의 제안”, *대한토목학회논문집*, 제 24권, 제 2C호, pp.135-145.
5. 이복수, 황규호, 이광렬, 이송 (1995), “도시쓰레기의 침하특성”, *대한토목학회논문집*, 제 15권, 제 6호, pp.1773-1782.
6. Bjarngard, A. (1989), “The Compressibility Characteristics of Landfills”, *Thesis Submitted in Partial Fulfillment of M.S. in C.E., Tuft University, Medford, MA, May 1989*, pp.213-222.
7. Bjarngard A., and Edgers, L. (1990), “Settlement of Municipal Solid Waste Landfills”, *The thirteenth Annual Madison Waste Conference*, September, pp.192-205.
8. Edil, T.B., Ranguette, V.J., and Wuellner, W.W. (1990), “Settlement of Municipal Refuse”, *Geotechnics of Waste Fills-Theory and Practice: ASTM STP 1070 ASTM*, Philadelphia, pp.225-239.
9. Gordon, D.L., Lord, J.A. and Twine, D. (1986), “The Stockley Park Project”, *Proc., Building on Marginal and Derelict Land: An Institution of Civil Engineers Conf., Glasgow, U.K.*, pp.359-381.
10. Hoe I. L., Leshchinsky D., Mohri Y., and Kawabata T. (1998), “Estimation of Municipal Solid Waste Landfill Settlement”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Edgrg.* Vol.124, No.1, January, pp.21-28.
11. Ling, Hoe I., Dov Leshchinsky, Yoshiyuki Mohri, Toshiniri Kawabata (1998), “Estimation of Municipal Solid Waste Landfill Settlement”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.124, No.1, pp.21-28.
12. Morris, D.V and Woods, C.E. (1990), “Settlement and Engineering Considerations in Landfill Final Cover Design”, *Geotechnics of Waste Fill-Theory and Practice, ASTM STP 1070. American Society for Testing and Materials, Philadelphia*, pp.9-21.
13. Sowers, G. F. (1973), “Settlement of Waste Diposal Fills”, *Proceedings, The Eight International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, 1973*, 207-210.

(접수일자 2008. 6. 5, 심사완료일 2008. 7. 21)