

비위생 매립토의 역학적 물성

Mechanical Properties of Municipal Solid Wastes

목영진¹⁾, Young-Jin Mok, 김대일²⁾, Dae-Il Kim, 조은혁³⁾, Eun-Hyuk Cho

1) 경희대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyunghee Univ.

2) 경희대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyunghee Univ

3) 경희대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyunghee Univ

SYNOPSIS : Mechanical properties of Municipal Solid Wastes(MSW) and their influencing parameters were studied by using a series of triaxial compression tests and resonant column tests. The shear strength of MSW can be modeled by a bilinear failure criterion. As the unit weight increasing, cohesion and internal friction were increased linearly on semi-log scale. As the proportion of waste to soil increases, maximum shear moduli tend to decrease whereas minimum damping ratios increase. Shear moduli and damping of degradable waste are higher than those of non-degradable MSW.

Key words : Municipal solid wastes, Shear strength, Shear moduli, Triaxial Compression Tests, Resonant column tests

1. 서론

우리나라는 국토면적이 99,408m²에 불과하고 인구밀도는 473인/km²에 달하여 단위면적당 폐기물 발생량이 매우 높은 편이다. 또한 급속한 도시화로 인하여 총 인구의 80% 이상이 도시생활을 하고 있으며, 앞으로 생활폐기물 발생량은 제품의 Life-Cycle 단축, 경제규모 확대와 생활양식의 변화에 따른 포장폐기물의 지속적 증가 등의 요인에 의하여 2011년에는 하루 52,743t(1인당 1.04kg/일)이 발생할 것으로 전망되고 있다.(한국건설기술연구원, 1998) 인구 10-20만 명의 중소도시의 생활폐기물은 15만평 넓이에 높이 30-50m 정도의 매립장을 쉽게 채울 수 있다. 이와 같이 방대한 쓰레기 배출량과 매립지 확보의 어려운 현실을 감안할 때, 고층 아파트와 같은 맥락으로, 쓰레기 매립도 지하와 지상을 포함해 고층화(약 100m 이상)가 예상된다. 한편, 매립당시에는 도시 외곽에 있던 옛 비위생매립지가 도시의 확대에 도심에 있는 공한지가 되었고, 위생매립지도 가까운 장래에 재활용이 불가피하게 될 것으로 예상된다. 이미 서울의 상계동과 구의동 매립지에는 각각 대단위 주거시설과 상업시설이, 수원 권선동 매립지에는 농수산물 도매시장이 건설되었으며, 월드컵 상암구장 또한 대표적 활용 예이다. 국토가 비좁은 우리나라 실정에서는 이러한 매립지를 재개발하여 친환경적 놀이 공원, 산업단지 조성 등 국토의 효율적 활용이 요청되고 있다. 위생매립의 환경보호 차원의 설계 및 시공에 대한 지침 및 규제에 비해, 매립사면의 안정과, 매립지 재개발에 필요한 생활폐기물의 역학적 특성에 대한 이해와 연구는 미진한 상태이다. 우리나라의

쓰레기 배출량 추세와 국토의 비좁은 현실에서 고층쓰레기매립과 매립지 재활용이 예상될 때, 생활폐기물의 역학적 성질의 불확실성은 매립사면의 안정, 고층화 매립의 설계, 내진설계 및 매립지 재개발에 최대 걸림돌이 될 것이다.

생활폐기물은 여러 가지 잡다한 분해성(예, 종이, 음식물 쓰레기)물질, 비분해성(예, 토사, 플라스틱류)물질로 이루어진 복합물질이다. 생활폐기물의 역학적 거동에 미치는 인자는 폐기물 구성물질, 분해상태(state of waste degradation) 등이라고 막연하게 인식할 정도이지, 정역학 및 동역학적 해석에 필요한 물성이 종합적으로 검토된 적이 없었다. 한편 외국의 경우는, 폐기물 매립성토체에 대한 시험장비(Landva와 Clark, 1990)와 단위중량, 함수비, 수분보유능력, 다짐특성, 입도분포, 간극비의 변화에 따른 연구결과가 발표되었다(Sowers, 1973; Sharma, 1990; Oweis, 1990; Manassero, 1996).

본 논문에서는 폐기물 구성(쓰레기-토사 비), 단위중량, 폐기물종류(분해성-비분해성)가 전단강도와 동적거동특성에 미치는 영향을 삼축압축시험과 공진주시험을 통하여 연구하였다.

2. 시료 및 시험방법

2.1 시험시료

본 연구에서 사용한 시료는 대전 지역 모 비위생 매립지에서 채취하였다. 비위생 매립지는 유기물이 많이 포함되어 있는데, 유기질토(有機質土, Organix soil)로 70°C이상으로 가열하면 흙 조직(Fabric)이 손상될 수 있으므로 채취한 시료는 온도를 65±2°C로 유지하면서 3일 정도 서서히 건조시켜 자연함수비를 측정하였으며, 흙과 쓰레기의 구성비는 건조 후 분리하여 조사하였으며, 흙-쓰레기의 구성은 다음 표 1과 같다. 그리고 쓰레기와 분리한 흙에 대하여 입도시험, 액성한계시험을 수행하였다.

표 1. 시료의 구성비 및 특성

시료	토사류	유기물류	무기물류			기타
			플라스틱류	금속류	유리류	
중량 (kg)	19.350	0.373	0.623	0.068	0.226	0.170
중량비 (%)	92.98	1.79	2.99	0.33	1.09	0.82
USCS	CL-ML(실트질점토)					

삼축압축시험 공시체는 직경 5cm, 높이 10cm로 제작하였다. 또한 단위중량에 따른 강도 정수 변화를 파악하기 위해 단위중량을 1.2 t/m³ ~ 1.9 t/m³ 까지 변화시키면서 시험하였다. 쓰레기 시료의 함수비는 현장 평균 함수비인 20 %로 결정하였다.

공진주시험에서는 쓰레기-흙 구성비(중량비)을 실제 매립지반의 구성비율인 7%와 그 구성비율의 1.5배(10.5%), 2배(14%)로 하고, 단위중량은 1.60t/m³, 1.50t/m³, 1.40t/m³, 1.30t/m³, 1.20t/m³, 1.12t/m³, 1.04t/m³로 변화시켜가며 공시체를 성형하였다. 마지막으로 흙과 유기물만 혼합한 공시체(분해성)와 흙과 플라스틱, 유리, 금속류를 혼합한 공시체(비분해성)로 나누어서 시료를 성형하였다. 공시체의 함수비는 매립지의 자연함수비로 맞추었고, 시료는 Split몰드와 다짐봉을 사용하여 자유낙하법과 습윤다짐법을 병행하여 다짐, 성형하였다.

2.2 삼축압축시험

구속압과 단위중량에 따른 전단강도의 특성을 파악하기 위하여 단위중량을 1.2 t/m³ ~ 1.9 t/m³까지 0.1 t/m³씩 증가시켰으며, 구속압은 단위중량별로 10 kPa ~ 60 kPa 까지 변화시켜가며 배수조건에서 파괴실험을 수행하였다.

2.3 공진주시험

생활폐기물(MSW)의 역학적 특성을 살펴보기 위해 모두 15가지의 공시체를 가지고 공진주 시험을 수행하였다. 역학적 특성을 파악하기 위한 인자로는 많은 인자들 중에서 단위중량, 흙-쓰레기 구성비율, 폐기물종류(분해성/비분해성) 등이 있다. 흙-쓰레기 구성비율과 폐기물종류(분해성/비분해성)에 의한 실험은 각각 단위중량 1.04 t/m³와 1.30 t/m³에서 전단변형계수(G) 및 감쇠비(Damping Ratio) 경향을 살펴보았다. 시료의 전체 구속압은 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa의 세단계로 증가시키면서 시험을 실시하였고, 이때 진공압은 시료를 거치하면서부터 시험을 종료할때까지 50kPa을 유지하였으며, 각 시험단계의 구속압밀시간은 12시간으로 하였다.

3. 시험결과 및 분석

3.1. 전단강도

단위중량별 응력-변형 관계도는 그림 1과 같이 모든 단위중량에서 뚜렷한 파괴점이 없는 변형 특성을 보이고 있다. 이는 비닐류의 쓰레기가 보강섬유처럼 작용하여 연성을 보이기 때문이다.

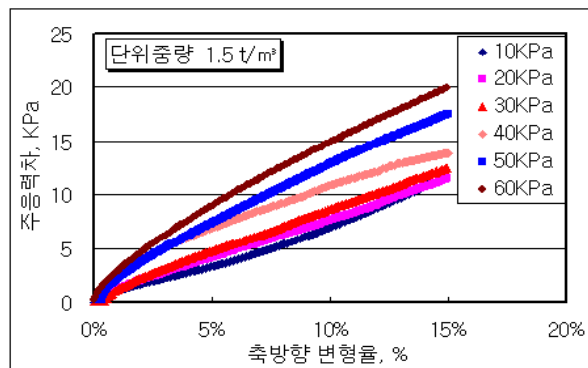


그림 1. 응력-변형 관계도

위의 응력-변형 관계도로부터 모아원을 그리면 그림 2와 같다. 비위생 매립지의 파괴포락선은 일반 토사의 파괴기준과는 달리 두 직선으로 표시된다는 점이다. 전단특성을 보면 파괴기준이 구속압 30 kPa을 전후로 파괴포락선이 쌍직선(bilinear)로 정의되고 있고 모든 단위중량에서도 같은 결과를 보였다. 이는 특정 구속압 이하에서는 쓰레기의 인장저항이 생활폐기물 매립지의 전단강도에 상당한 영향을 미친다는 것을 의미한다.

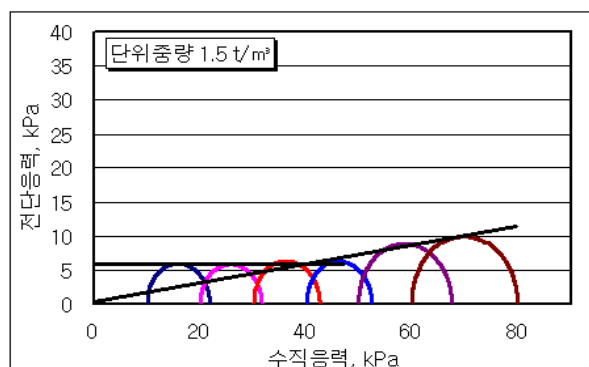


그림 2. 모아원과 파괴기준

한정된 시료에 대한 연구결과지만, 폐기물매립지의 전단특성은 쓰레기의 인장저항을 감안하면 파괴기준은 쌍직선(bilinear)으로 정의되고, 단위중량에 따른 전단강도를 유효등방구속압 30 kPa을 전후로 식(1), 식(2)와 같이 잠정적으로 제안하고 싶다

$$\tau_f = C \quad (\sigma_c \leq 30kPa) \quad \text{식(1)}$$

$$\tau_f = \sigma \tan \phi \quad (\sigma_c > 30kPa) \quad \text{식(2)}$$

여기서 C는 점착력이고, ϕ 는 내부마찰각이다.

단위중량에 따른 전단강도의 변화는 구속압 30 kPa 이하에서는 그림 3.1와 같고 점착력에 로그를 취하면 그림 3.2와 같이 선형적으로 나타난다. 그리고, 구속압 30 kPa 이상의 내부마찰각(ϕ)은 그림 4.1과 같으며, 마찰각에 로그를 취하면 4.2와 같이 선형적으로 나타난다. 이를 식으로 나타내면 식(3)과 식(4)와 같다.

$$\ln c = 4.089 \gamma_t - 4.4482 \quad (\sigma_c \leq 30kPa) \quad \text{식 (3)}$$

$$\ln \phi = 2.8815 \gamma_t - 2.1507 \quad (\sigma_c > 30kPa) \quad \text{식 (4)}$$

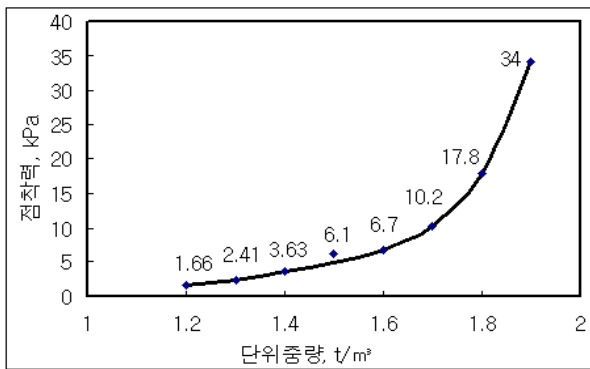


그림 3.1 구속압 30 kPa 이하에서 전단강도

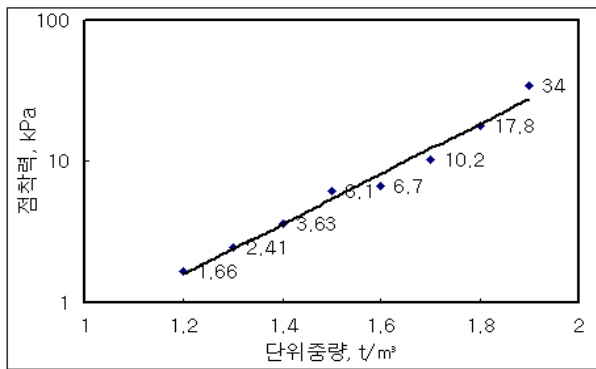


그림 3.2 구속압 30 kPa 이하에서 전단강도

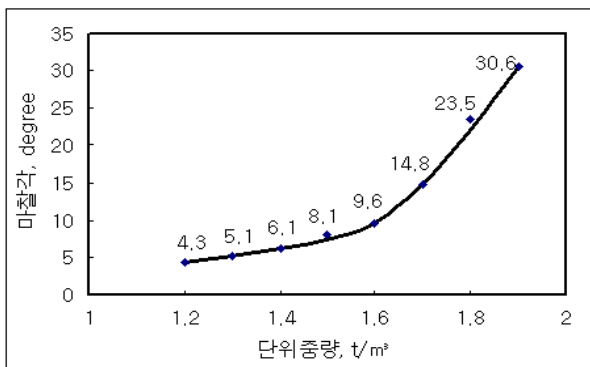


그림 4.1 구속압 30 kPa 이상에서 내부마찰각

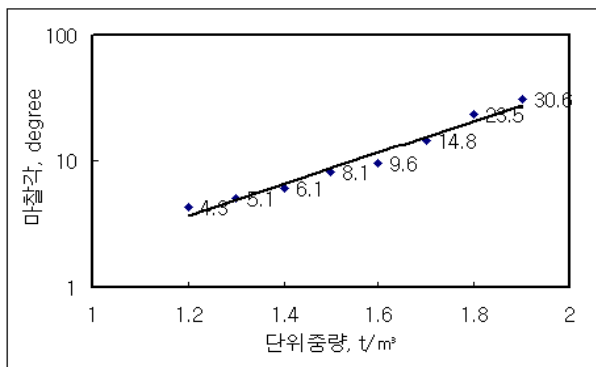


그림 4.2 구속압 30 kPa 이상에서 내부마찰각

3.2. 동적 변형 특성

3.2.1 단위중량

단위중량이 증가할수록 최대전단변형계수는 증가하고 최소감쇠비는 단위중량이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 정규화된 전단변형계수곡선은 쓰레기의 인장저항으로 인해 선형부분이 전단변형도 0.001%를 상회하여 섬유혼합토의 거동과 흡사하였으며(박철수 등, 2003), 소성지수(PI)가 15~50인 점

성토에 대한 Vucetic과 Dobry의 전단변형계수 감소곡선과도 잘 일치하였다(Vucetic과 Dobry, 1991). 비선형 영역의 감쇠비 곡선도 단위중량이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.

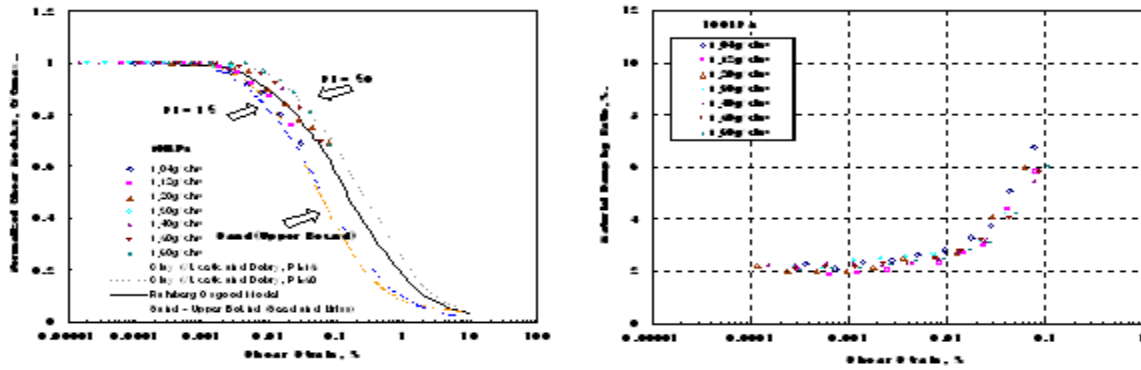


그림 5. 단위중량에 따른 정규화 전단변형계수 곡선 및 감쇠비 곡선

3.2.2 쓰레기-흙 구성비율

그림 6은 저변형률 영역의 쓰레기-흙 구성비에 따른 최대전단변형계수와 최소감쇠비의 경향을 보여 준다. 흙-쓰레기 구성비가 증가할수록 전단변형계수가 감소하는 이유는 다음 두 가지로 생각할 수 있다. 첫 째는 흙입자의 비중보다 쓰레기의 비중이 작아 쓰레기의 양이 증가할수록 시료의 밀도가 감소하기 때문이다. 두 째는 쓰레기의 양이 증가할수록 흙 입자 사이의 마찰저항이 작기 때문이다. 최소감쇠비는 쓰레기-흙 구성비가 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 그 이유는 쓰레기-흙 구성비가 증가할수록 에너지의 분산효과 및 흡수효과가 더 크기 때문이라고 볼 수 있다. 비선형 영역에서는 쓰레기-흙 구성비에 관계없이 전단변형계수와 감쇠비가 비슷한 경향을 보여준다(그림 7).

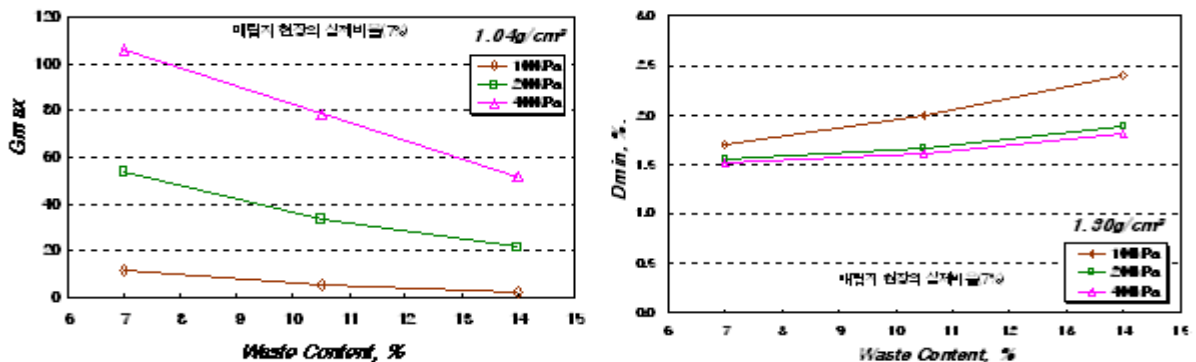


그림 6. 쓰레기-흙 구성비에 따른 최대전단변형계수 및 최소감쇠비

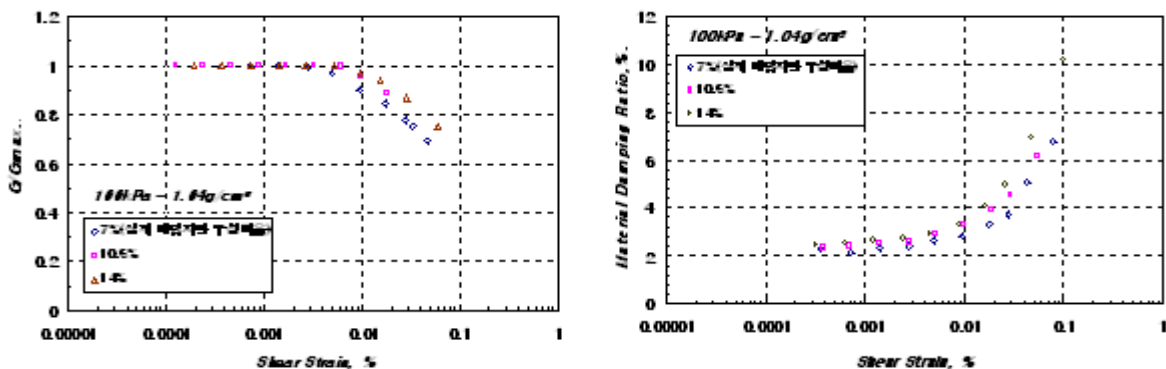


그림 7. 쓰레기-흙 구성비에 따른 정규화 전단변형계수 곡선 및 감쇠비 곡선

3.2.3 분해성 - 비분해성의 영향

분해성 시료의 전단변형계수가 모든 구속압에서 전단변형률의 크기에 관계없이 크게 나왔다. 이러한 이유는 분해성(흙+유기물) 시료가 비분해성(흙+플라스틱류+금속류+유리류) 시료보다 다짐성과 입자간의 유착성이 좋아서 비분해성 시료보다는 강성의 크기가 커진 것으로 판단된다. 또한 시간이 경과함에 따라 분해성 시료가 비분해성 시료보다 수분함유량이 커서 입자간의 점성토의 성질을 오래 유지하였다고 판단된다. 감쇠비는 선형영역에서 비분해성 시료의 감쇠비가 더 큰 것으로 결과가 나왔고, 전단변형률의 크기가 증가할수록 거의 같아졌다. 비분해성 시료의 감쇠비가 더 큰 이유는 분해성 재료보다 비분해성 재료의 에너지 흡수효과가 더 크기 때문으로 판단된다. 낮은 구속압의 분해성 시료와 비분해성 시료의 최대전단변형계수와 최소감쇠비의 차이가 높은 구속압의 것보다 상대적으로 크게 나타났다. 그 이유는 흙-쓰레기 구성비율에서와 같이 구속압이 낮을수록 흙입자보다 쓰레기들의 상호작용(Interaction)이 더 크게 작용하기 때문으로 판단된다.

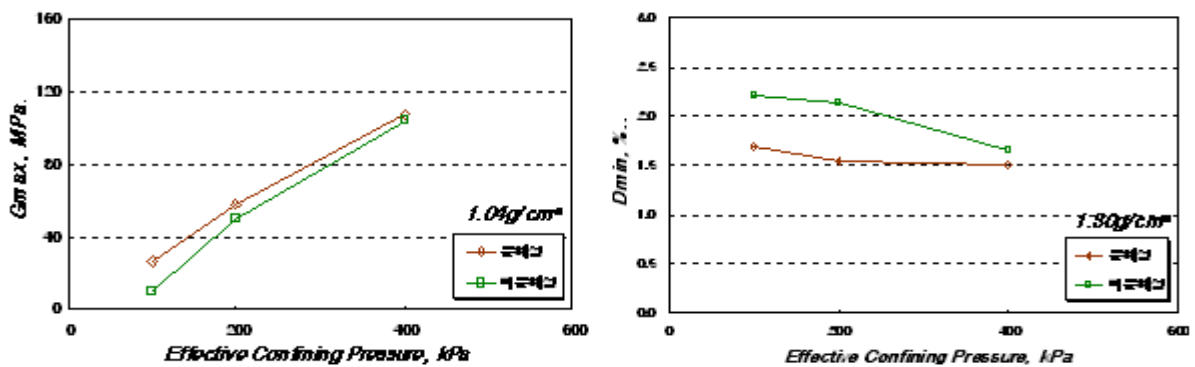


그림 8. 분해성 - 비분해성 구분에 따른 최대전단변형계수 및 최소감쇠비

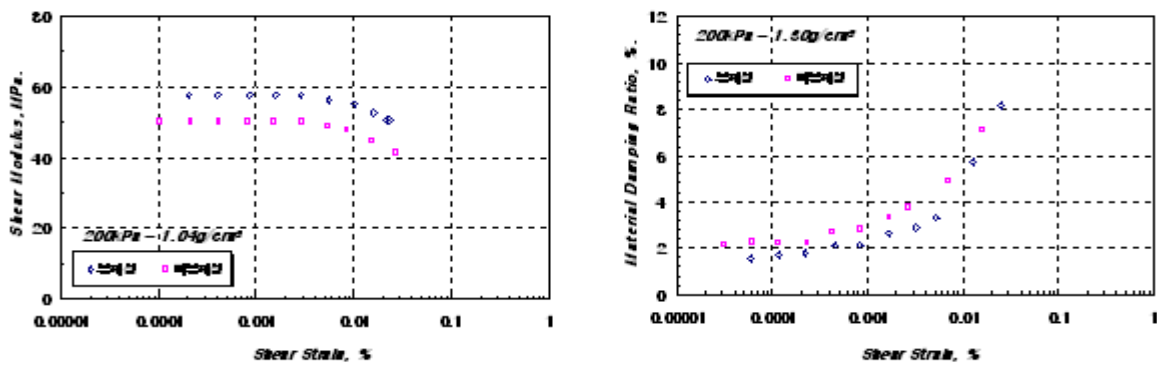


그림 9. 분해성-비분해성 구분에 따른 정규화 전단변형계수 곡선 및 감쇠비 곡선

4. 결 론

본 논문에서는 삼축압축시험과 공진주시험을 수행하여 생활폐기물(MSW)의 역학적 거동과 영향인자를 규명하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 생활폐기물의 전단강도는 특정 구속압을 경계로 쌍직선(bilinear) 파괴포락선 모델로 정의될 수 있다.
- 2) 점착력과 마찰각은 반대수상에서 단위중량에 따라 선형적으로 증가한다.
- 3) 정규화된 전단변형계수곡선은 쓰레기의 인장저항으로 인해 선형부분이 전단변형도 0.001%를 상회하여 섬유혼합토와 소성지수(PI)가 15~50인 점성토의 거동과 흡사하였다.

- 4) 흙-쓰레기 구성비가 증가할수록 최대전단변형계수가 감소하고, 최소감쇠비는 증가하는 경향을 보였다.
- 5) 분해성 생활폐기물의 전단변형계수는 비분해성 생활폐기물의 전단변형계수보다 크고, 분해성 생활폐기물의 감쇠비는 비분해성 생활폐기물의 감쇠비보다 작다.

참고 문헌

1. 박철수, 황선근, 목영진(2003), 섬유혼합토의 비선형 동적물성치. **한국지반공학회논문집**, 한국지반공학회, 제19권, 제2호, 2003, pp. 189-197.
2. 한국건설기술연구원(1998), 매립쓰레기의 전단특성. **건기연** 98-048.
3. Sowers, G.F.(1973), Settlement of Waste Disposal Fills. *Proceedings, The Eighth International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, Vol.2.2, pp. 207~210
4. Oweis, I.S. and Khera, R.P.,(1990), Geotechnology of Waste Management. *Butterworths*, pp. 171~273
5. Sharma H.D., Dukes, M.T. and Olsen, D.M.(1990), Field Measurements of Dynamic Moduli and Poisson's Ratios of Refuse and Underlying Soils at a Landfill Site. *ASTM Special Technical Publication*, 1990, pp. 57~70
6. Manassero, M., Van Impe, W.F. and Bouazza, A.(1996), Waste disposal and containment. *Second International Congress on Environmental Geotechnics*, ISSMFE and JSG, 1996.
7. Vucetic, M. and Dobry, R.(1991), "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.117, No.1, pp. 89-107.