

폐콘크리트 재생잔골재의 하수관거 모래기초 적용에 따른 침하 거동

오재일[†] · 안남규 · 이주영*

중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 · *중앙대학교 건설대학원 환경공학과

(2005년 1월 21일 접수, 2005년 5월 11일 채택)

Settlement of Fine Recycled-concrete Aggregates Foundation under Sewage Conduit System

Jeill Oh[†] · Nam-Kyu Ahn · Ju-Young Lee*

Department of Civil & Environmental Eng. Chung-Ang University · *Department of Environmental Engineering. Chung-Ang University

ABSTRACT : Fine recycled-concrete aggregates(RCAs) instead of natural sand were tested for a foundation material under sewage conduit system, which was evaluated based on foundation settlement at various conditions. To obtain this applicability of RCAs, the settlement behavior was simulated with FLAC program based on the difference of material properties, and immediate settlement behaviors and the change of material properties under the simulated drainage conditions also tested at the various loading conditions in the laboratory. Finally, large-scale settlement test in the field was conducted to prove the above feasibilities. Subsequently, the amount of settlement from the FLAC simulation was calculated under 5.0×10^{-6} m, and the extent of settlement and property changes (porosity, permeability and waster absorption) was not noticeable from the laboratory experiments. Also, settlement monitoring from the field experiment showed the consistent results with laboratory experiments except for the consolidation settlement(=5 mm) of the ground below the foundation. In summary, adopting fine RCAs as a foundation material for sewage conduit system was resonable based of geotechnical point of view.

Key Words : Recycled-Concrete Aggregates, Settlement, Sewage Conduit, Sand Foundation

요약 : 본 연구에서는 일반(천연)모래를 대체하여 폐콘크리트 재생잔골재(이하 재생모래)를 하수관거 모래기초용 재료로 활용하였을 경우 재생모래의 지반적 거동(침하)에 대한 다양한 적용성 평가를 실시하였다. 이를 위해 상대적 재료 특성 차이에 따른 침하량 전산모사(FLAC 사용)를 실시하였으며, 실내 재하 실험을 통한 즉시침하 평가, 우수에 의해 예상되는 재료특성 변화를 살펴본 후 실규모 현장 적용성 평가를 실시하였다. 그 결과 FLAC으로 예측된 재생모래기초의 침하량은 5.0×10^{-6} m 미만이었으며, 실내 침하실험에서는 침하가 발생되지 않았다. 또한 용출에 인한 재료특성(흡수율 등) 변화 역시 미미하였다. 마지막으로 실규모 현장 시공의 침하 모니터링 결과, 원지반의 압밀침하로 예상되는 5 mm의 침하만이 발생하였다. 이를 통해서 재생모래의 하수관 모래기초 적용성은 충분한 타당성을 가지는 것으로 판단된다.

주제어 : 폐콘크리트 재생골재, 침하, 하수관거, 모래기초

1. 서 론

지속가능한 자원순환형 사회 구축을 위해 자원절약 및 폐기물 재순환(활용)에 대한 중요성 인식이 지속적으로 고 양되고 있으며, 그의 일환으로 매년 꾸준히 증가하는 건설 폐기물에 대한 다양한 재활용 방안이 광범위하게 연구되고 있다.¹⁾ 특히 건설폐기물 가운데 60% 이상을 차지하는 폐 콘크리트로부터 얻어지는 재생골재를 다양한 용도로 재활 용하고자 하는 접근방안은, 부족한 천연골재 수급문제 해결 및 환경보존에 대한 건설산업의 이미지 제고 등 궁극적으 로는 친환경적 건설산업 경쟁력 확보에 긍정적인 효과가 기대된다.

현재 재생골재는 성토/복토용과 같은 단순 활용에서 구조

용 재생 콘크리트 제조에 이르기까지 다양한 재활용 적용 사례가 보고 되고 있으며, 점차 다양한 고부가가치 활용방 안으로의 전환을 모색 중이다.²⁻⁴⁾ 따라서 이러한 다각적인 활용방안을 구체적으로 보완하기 위하여 환경부는 “건설폐 기물재활용촉진법의 시행령과 규칙 개정(안)”을 마련, 2005 년부터 일정 규모 이상의 국도와 일반도로, 자전거전용도 로, 보행자전용도로, 주차장, 하수관거 등의 공사 시 재생 골재를 일정 비율 이상 의무적으로 사용토록 입법 예고한 상태에 있다.

본 연구는 입법 예고된 재생골재 활용 방안 중에서 하수 관거 공사용 재료로 활용하는 방안, 특히 일반(천연)모래를 대체하여 폐콘크리트 재생잔골재(이하 재생모래)를 하수관 거 모래기초용 재료로 활용하였을 경우⁵⁾ 재생모래의 지반 적 거동(침하)에 대한 적용성 평가를 목적으로 하고 있다. 이를 위해서 먼저 실내 실험실 규모로 하수관 매설 조건에 의한 즉시침하 여부, 우수에 의한 재생모래의 용출에 따른

[†] Corresponding author
E-mail: ohjeill@cau.ac.kr
Tel: 02-826-4528

Fax: 02-812-1834

재료특성 변화와 추후 침하 발생 여부를 살펴보고, 이러한 재생모래의 기본적인 침하특성에 대한 고찰이 이루어진 후 하수관 매설현장 시공방법과 동일하게 실규모급 현장시험을 실시하여 지반공학적인 관점에서 재생모래기초의 성능과 재생골재의 하수관거초 적용성을 보다 포괄적이고 객관적으로 연구하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 연구에서 사용된 재생모래는 경기도에 위치한 C사에서 3차 파쇄(Impact & Cone crusher)와 회전분류 및 골재 세척 공정을 거쳐 생산된 5 mm 미만의 재생모래를 실험재료로 사용하였다. 재생모래의 품질은 생산공정 및 원 폐콘크리트에 영향을 받으므로 공급처마다 그 품질 변화량이 다소 큰 것으로 알려져 있으며,⁶⁾ 본 연구에서 사용된 재생모래의 품질을 분석한 내용은 Table 1과 같다. Table 1은 현재 재생모래에 유일하게 적용가능한 품질 기준인 KS F 2573(콘크리트용 재생골재)으로 시험한 품질결과이다. 흡수율을 제외하면 모든 항목에서 일반모래와 비교적 유사한 재료 특성을 보이는 것을 알 수 있으며 실험대조군의 일반모래는 인천에서 채취된 바다모래(해사)를 사용하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 재생모래의 침하실험

재생모래/일반모래 비율(무게비)을 100%, 75%, 50%, 25%, 0%로 하여 지름 7 cm, 높이 70 cm 쪼렘 장치에 20 cm(일반적인 하수관 모래기초 높이) 높이로 다짐시험방법(KS F 2312의 A다짐)을 참고하여 동일하게 다져 채워 넣었다(Fig. 1 참고). 하수관기초(기초매설심도 1.5 m, Φ250 mm 덕타일주철관)의 하중조건을 Table 2와 같이 가정 분석하여 실험장치에 20 kg의 추로 하중을 재하시킨 후 1주일간의 침하 거동을 분석하는 실험을 실시하였다. 일반적으로 사질토는 즉시침하만이 발생하는 특성을 가지므로 장기 거동에 관한 실험은 수행하지 않았다.

즉시침하를 살펴본 이후 재생골재의 특성상 발생 가능한 용출에 의한 공극의 변화를 살펴기 위해서 침하 쪼렘 실험

Table 1. A comparison of physical properties of natural sand and recycled sand(fine recycled-concrete aggregates)

Item	Criteria from KS	Results	
		Recycled sand	Natural sand
Water absorption (%)	Under 10	7.85	0.26
Absolute dry density (g/cm ³)	Over 2.2	2.54	2.62
Solid content (%)	Over 53	56.8	60.3
Fineness modules	2.6~3.1	2.99	2.88
Amount of material finer than 0.08 mm sieve (%)	Under 5	4.61	3.22

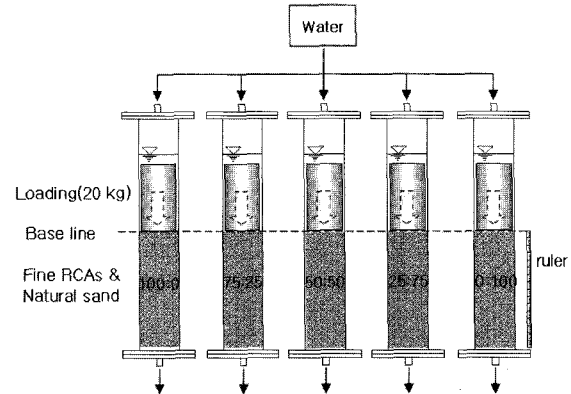


Fig. 1. A experimental setup of loading and settlement in recycled sand foundation.

Table 2. A calculation of loading in experiment

Calculation order	Stress (kg/cm ²)	Content of calculation
1. Dead loading(W _d)	0.270	$W_d = \gamma_s \times H$
2. Live loading(W _r)	0.216	Sewage facilities specification ⁷⁾
3. Weight of pipe	0.038	Ductile cast iron-pipe Φ 250 mm
Total loading	0.523	$0.523 \text{ kg/cm}^2 \times 38.47 \text{ cm}^2 \approx 20 \text{ kg}$

장치에 500 mL의 증류수를 반복적으로 주입하여 증력배수를 반복 실시하였다(Fig. 1 참고). 85회 반복용출 하여 10년간의 강수량(연강수량을 1,100 mm로 가정)을 모사하였다. 반복용출 중 침하량을 지속적으로 측정하였으며, 또한 장기적 강우(10년간)에 대한 모사 후 흡수율, 공극률, 투수계수를 용출 전과 비교하여 강우 작용에 의해 재생골재의 물성이 어떻게 변할 수 있으며 이로 인한 모래기초 시(혹은 뒷채움재, 성토재) 침하 등의 문제가 발생할 가능성에 대한 예측을 실시하였다.

2.2.2. 현장 침하실험

한강수계 하수관거정비사업의 협조를 받아 인근 공사용 나대지를 실험부지로 하여 하수관기초 공사에서 사용되는 동일한 재료, 인력, 장비 및 시공방법으로 1.5 m 깊이에 모래기초를 소형진동다짐기(Compactor)를 이용하여 20 cm 높이로 포설하고 덕타일주철관(6 m×2본)을 2 set 시공하였다. 이 때 모래기초 재료를 재생모래와 일반모래로 하여 각각 2 set으로 대조 설치하여 침하량을 측정하여 재생모래의 모래기초 적용성을 평가하고자 하였다. 기초의 성능이 제대로 발휘되는 것을 확인하기 위해서는 관 변형에 대한 계측도 필요할 수 있으나 현장시험에 적용된 덕타일 주철관은 변형이 거의 발생하지 않는 재료이므로 침하량만으로 기초 적용성을 확인하고자 하였다. 침하량의 계측은 모래기초 상층에 침하판을 설치하여 수준측량으로 침하판의 침하 정도를 측정하였다. Fig. 2는 현장시험의 평면과 측면을 도시한 것이다.

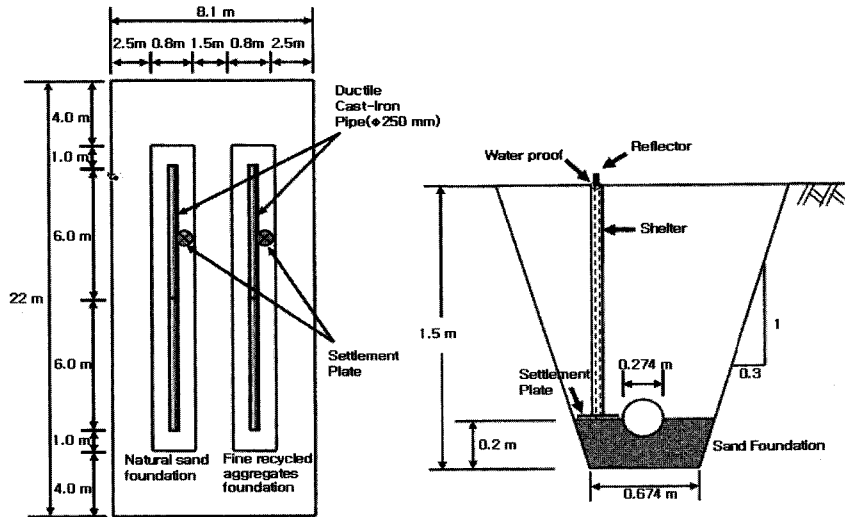


Fig. 2. The in-situ experiment of sand foundation using recycled and natural sand in sewage pipe.

3. 결과 및 고찰

3.1. 재료특성 분석을 통한 침하량 예측

먼저 다짐시험과 삼축압축시험을 실시한 기존 연구자료를 바탕으로 재생모래와 일반모래의 지반공학적 역학 재료 특성을 상호비교하여 침하량을 예측하였다.^{8,9)} Table 3은 재생모래와 일반모래의 최대건조밀도, 내부마찰각, 점착력을 나타낸 것으로 두 재료의 차이가 아주 낮은 범위를 알 수 있다. 이러한 역학적 특성은 재생모래기초와 일반모래기초의 지반공학적 거동(대표적으로 침하량)이 유사할 것임을 시사한다.

3.2. 현장실험 모사 FLAC 해석

하수관 모래기초는 하수관 및 주위 지반과 역학적으로 상호거동을 하게 되므로 재생모래로 일반모래를 대체할 경우, 이에 대한 역학적인 해석을 필요로 한다. 때문에 재생모래기초에 대한 실내/현장 실험에 앞서 우선적으로 수치모형 해석을 통한 적용성을 살펴보고자 하였다.

앞 실험에서 결정된 지반공학적 물성특성(Table 3)을 바탕으로 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)을 통한 모래기초의 기능적 성능 예측을 실시하였다. FLAC 모델은 유한차분법(Finite Difference Method)을 이용하는 2차원 범용 해석 프로그램으로 수천개의 요소(Element)를 포함하는 그리드 모델의 계산을 통해서 구동하며 토목 및 건축분야(엔지니어링 역학계산)에서 사용가능 하다.¹⁰⁾

Table 3. Mechanical properties of natural and recycled sand

Item	Recycled sand(RCAs*)	Natural sand
Maximum dry weight, $\gamma(g/cm^3)$	1.572	1.585
Internal friction angle, $\phi(^{\circ})$	41	42
Cohesion, $c(kg/cm^2)$	0	0

*RCAs : recycled-concrete aggregates

FLAC 해석은 본 연구의 최종 검증단계에서 수행될 현장 실험의 시공조건(한강수계 하수관거정비사업 참고)을 바탕으로 입력 Parameter와 단면을 Table 2, Fig. 3과 같이 설정한 후 지표면, 관상단, 모래 기초상단의 3지점(Fig. 3 참고)에서 발생하는 Y축 변위량을 계산하여 재생모래기초시 발생 가능한 침하량을 예측하였다. 하수관은 KS규격을 만족하는 K사의 덕타일주철관(내경 ϕ 250 mm, 강도 483 N/mm²)과 S사의 고강성 PVC관(내경 ϕ 250 mm, 강도 1.2 N/mm²)을 사용하였다.

FLAC 수치모형 해석을 통해서 Y축 변위 발생량을 살펴본 결과, Table 4와 같은 침하량을 산정할 수 있었다. 재생모래와 일반모래 모두 0.007 mm 미만의 미소 침하범위로

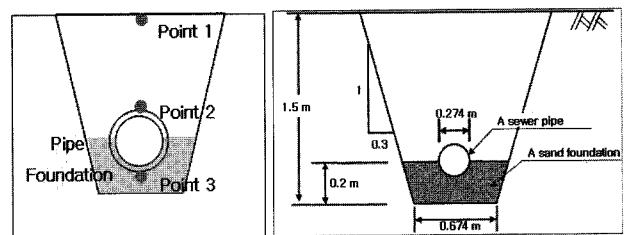


Fig. 3. Measuring point of displacement and sectional diagram in FLAC model.

Table 4. Result of displacement in FLAC analysis of sand foundation (unit : m)

Pipe and foundation	Ductile cast-iron pipe		Rigid PVC pipe	
	Natural sand	Recycled sand	Natural sand	Recycled sand
Displacement				
point 1 (the earth's surface)	-6.816E-6	-6.820E-6	-6.861E-6	-6.899E-6
point 2 (the upper of a pipe)	-5.775E-6	-5.757E-6	-5.824E-6	-5.869E-6
point 3 (the upper of a foundation)	-4.835E-6	-4.829E-6	-4.414E-6	-4.333E-6

예측되었다. 한편 재생모래는 일반모래기초와 6.0×10^{-6} mm (덕타일주철관) 및 8.1×10^{-5} mm(고강성 PVC관)의 침하량 차이를 보였으며, 이로써 재생모래가 일반모래를 충분히 대체할 수 있을 것이라는 역학적 계산이 성립되었다.

3.3. 즉시침하량 및 용출에 의한 영향

재생모래 무게비에 따른 5조건 모래기초에 20 kg의 하중을 재하하여 침하를 측정된 결과, 모든 조건에서 침하는 발생하지 않았다(침하량이 0이거나 최소측정범위 1 mm 미만의 침하 발생).

일반적으로 사질토(모래)인 경우 투수성이 일반적으로 $1.0 \times 10^{-1} \sim 1.0 \times 10^{-3}$ cm/sec으로 크기 때문에 간극수압의 증가에 따른 배수가 즉시 발생하여 흙의 체적 감소를 가져오며 그 결과 즉시침하 및 암밀침하가 동시에 일어나게 된다.¹¹⁾ 이러한 연유로 모래의 경우 즉시침하량이 전체침하량과 같으므로 실험장치의 모래다짐시 올바른 다짐을 통해서 즉시침하량을 모두 해소시켰기 때문에 시간 경과에 따른 침하가 발생하지 않은 것으로 판단된다.

지반공학적으로 무한 깊이의 탄성 물체 위에 있는 기초의 즉시침하는 재하와 동시에 전단변형에 의하여 일어나는 침하로서 일반적으로 탄성이론에 의하여 추정 가능하다. 실제 20 cm 높이의 모래기초에서 발생가능한 침하량을 계산하면 Table 5의 조건을 통해서 식 (1)과 같이 즉시침하량 S_i 를 구할 수 있다.¹²⁾

$$S_i = \sigma \times B \times \frac{1 - \mu^2}{E_s} \times I_s = 0.006294 \text{ cm} = 0.063 \text{ mm} \quad (1)$$

식 (1)을 통해 계산된 모래기초의 즉시침하량, 0.063 mm는 기초높이(20 cm)의 0.032%로 미소한 침하범위를 뜻한다.

식 (1)의 계산은 일반적인 사질토(모래)에 대한 가정에서 이루어졌기 때문에 그 타당성의 확인이 필요하나, 앞서 실시한 두 재료의 물성치가 비슷하였으며 또한 FLAC 해석의 기초부 침하량이 0.005 mm인 것, 그리고 침하실험에서도 침하가 발생하지 않을 것을 감안한다면 식 (1)을 재생모래 기초에 적용하는 것은 큰 무리는 아닐 것으로 판단된다.

한편 재생골재 표면에 부착된 시멘트모르타르성분이 물(특히 지하수, 우수)에 녹아나가는 용출특성으로 인한 침하 및 재료특성변화를 765시간(1회 9시간 소요) 동안 실험결과 실험조건 모두에서 침하는 측정되지 않았으며, 용출에

Table 5. Parameters of immediately settling calculation

Factor	Meaning	Value	Content of calculation
σ	Reaction force(kgf/cm ²)	0.52	(dead loads+live load+pipe weigh) = 20 kg
B	Width of foundation(cm)	7	7 cm (diameter of column)
μ	Poisson's ratio	0.3	0.2 ~ 0.4 (as sand)
E_s	Modulus(kgf/cm ²)	500	5,000 ton/m ² as dense sand (3,500 ~ 7,000 ton/m ²)
I_s	Influence coefficient	0.95	0.95 (as L/B = 1 : 1)

의한 재료특성은 Table 6과 같이 변화하였다. 흡수율과 공극률, 투수계수 모두 큰 변화가 없는 것은 용출에 의한 침하가 발생하지 않은 현상을 뒷받침해주는 자료가 될 것이며, 또한 강우수(혹은 지하수)에 의한 재생모래 표면의 시멘트모르타르의 용출과 재생모래의 재료특성변화 그리고 침하 발생은 별다른 상관관계를 가지지 않는 것을 확인할 수 있었다.

3.4. 현장 침하실험

앞서 살펴본 FLAC 시뮬레이션과 실내실험 결과를 바탕으로 Scale effect 및 시공적용성 검증을 위해 Pilot 규모의 현장 시공을 실시한 후 침하량을 모니터링(8월 10일부터 200일간)하여 결과를 Fig. 4로 나타내었다. Fig. 4를 살펴보면 시공 후 7일~19일 사이에 재생모래기초와 일반모래기초 모두 5 mm의 침하가 발생한 것을 알 수 있다.

실내 침하실험 결과와 식 (1)의 즉시침하량 계산결과(0.063 mm) 또한 FLAC 시뮬레이션의 침하 예측량(0.007 mm), 침하 발생시기(7일~19일) 마지막으로 재생모래기초 뿐 아니라 일반모래기초에서도 침하가 동일하게 발생한 것을 바탕으로 침하의 원인을 판단한다면, 5 mm의 침하량은 재생모래기초의 즉시침하량이기보다는 원지반이 모래기초와 관의 무게 등의 영향으로 암밀침하된 것으로 판단하는 것이 타당성을 가진다. 더구나 실험부지는 과거 논이었던 곳을 복토하여 현재 공사자재 부지로 활용중이기 때문에 일반적으로 논흙의 점토함유량이 높음을 감안하면 모래기초층의 다짐과 하수관 설치에 따른 무게로 점토질을 많이 함유한 원지반에 암밀침하가 발생한 것으로 볼 수 있다.

Table 6. A change of water adsorption, porosity and permeability by leaching of recycled sand and natural sand

Recycled sand ratio(%)	Water adsorption(%)		Porosity(%)		Permeability(cm/sec)	
	11.11	10.86	42.56	42.14	1.225E-03	1.218E-03
100	11.11	10.86	42.56	42.14	1.225E-03	1.218E-03
75	9.49	9.23	39.38	41.43	1.120E-03	1.114E-03
50	8.70	8.09	39.90	41.10	3.453E-03	3.507E-03
25	6.38	5.88	38.50	39.03	1.666E-02	1.709E-02
0	2.04	1.54	37.71	40.15	2.104E-01	2.161E-01

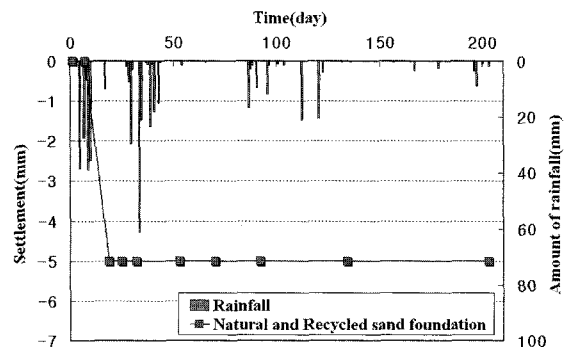


Fig. 4. The settlement of natural and recycled sand foundation.

한편, 5 mm의 침하가 발생된 이후 200일 측정결과까지 더 이상의 침하는 발생되지 않았다. 일반적으로 하수관기초 공 시공 후 약 30일 후 노면 포장에 이루어지는 것과 모래기초가 연신률이 높은 연성판에 적용되는 것을 감안할 때, 5 mm 침하량이 (원지반에서 발생한 것으로 판단되지만) 모래기초부에서 발생하였다고 하더라도 도로노면의 균열, 하수관의 파괴 등의 결과로 이어지는 않을 것으로 예상된다.

따라서 실규모급 현장시험까지 실시한 본 연구의 결과, 보다 장기적인 모니터링에 의한 장기거동의 분석에 대한 세부적인 연구가 더 필요하겠지만, 재생모래(재생잔골재)가 일반모래를 대체하여 하수관거용 모래기초 재료로 시공되는 것에 구조적인 문제는 없었으며 이에 지반공학적 관점에서는 충분한 타당성을 가지는 것으로 판단된다.

또한 만약, 재생모래 적용 기초에서 많은 양의 침하가 발생한다면 이는 모래기초의 성능 문제이기 보다는 다짐 불량이나 모래기초 하부의 원지반조건 등의 문제로 기인된 것으로 예상할 수 있다.

4. 결론

재생잔골재(재생모래)를 하수관거용 모래기초로 사용할 경우의 구조적(지반공학적) 적용타당성을 평가하기 위해 실내시험 및 현장시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 재생모래의 모래기초에 대해 FLAC 모델을 실시한 결과, 대표적인 연성판(덕타일주철관, 고강성 PVC)과 일반적인 지반조건에서 재생모래기초의 침하량은 일반모래기초와 최대 8.1×10^{-5} mm의 차이를 보이며 0.007 mm 미만으로 산출되었다.

2) 즉시침하 실험 결과, 가시적인 침하량은 측정되지 않았다. 이는 20 cm 모래기초에 대한 즉시침하 계산에서 구해지는 0.063 mm와 동일한 경향을 보인다고 판단된다.

3) 재생모래에 대해 10년간의 강우량을 모사하여 중력배수방식의 용출실험을 실시한 결과, 역시 침하가 측정되지 않았으며, 용출 전, 후의 흡수율, 공극률, 투수계수의 차이로 재생모래의 재료특성변화를 살핀 결과 그 차이 역시 미미하였다. 이를 통해 재생모래 표면의 용출특성과 기초의 기능저하(침하)는 별다른 상관관계가 없다는 것을 확인할 수 있었다.

4) 실규모급 현장 침하실험을 실시한 결과, 시공 후 7일~

19일 사이에 재생모래기초와 일반모래기초 모두 5 mm의 침하가 발생하였다. 5 mm의 침하량은 사질토(모래)의 즉시침하량보다 높은 원지반이 재생골재와 관의 무게 등의 영향으로 압밀침하된 것으로 판단되었다. 그 이후 더 이상의 침하는 발생하지 않았으며, 이를 통해 기능적 측면에서 재생잔골재 모래기초의 적용성이 타당하게 판단되었다.

사 사

이 논문은 2004학년도 중앙대학교 학술연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 환경부, "2000 전국폐기물 발생 및 처리현황,"(2001).
2. 김진만, 이세현, 윤현도, "콘크리트 리사이클링:페콘크리트 재활용," 한국콘크리트학회지, 15(2), 14~20(2003).
3. 김진철, 심재원, 조규성, "재생골재 콘크리트의 재활용 기술현황," 한국도로포장공학회지, 5(4), 21~35(2004).
4. 이진용, "페콘크리트의 재활용," 대한토목학회지, 46(16), 11~16(1998).
5. 오재일, "재생골재의 하수관 기초 활용성 평가," 건설폐기물 자원화 기술 및 정책 발표회, 국회환경포럼, 서울, pp. 16~28(2004).
6. 김진만, 이세현, "콘크리트용 골재로서 순환골재의 활용방안," 재생(순환)골재의 합리적 이해 및 활용방안 세미나, 서울, 한국건설신문(2004).
7. 환경부, 하수도시설기준, 한국수도협회, pp. 155~165 (1998).
8. 이광우, "단독캡을 사용한 성토지지말뚝의 하중분담효과에 관한 연구," 중앙대학교 석사학위논문, pp. 49~56 (1999).
9. 안남규, 김태형, 오재일, 이주영, "페콘크리트 재생잔골재를 활용한 개량 폐광미 매립지의 사면안정해석," 대한환경공학회지, 27(2), 145~150(2005).
10. Itasca Consulting Group, Inc., "FLAC version 3.23 manual,"(1993).
11. 김상규, 토질역학 이론과 응용, 청문각, pp. 117~118 (1999).
12. Braja M. Das 著, 서울대학교 토목공학과 토질공학연구실 譯, 토질역학원론, 구미서관, pp. 230~233(1993).