

연약지반 개량을 위한 수평배수층 재료로 순환골재의 적용 방안에 대한 연구

A Study on Utilization of Recycled Aggregates as Lateral Drain for Soft Ground Improvement

이 중 윤¹ Lee, Jong-Yoon

전 해 표² Chun, Hae-Pyo

정 우 철³ Jeong, Woo-Chul

임 해 식⁴ Lim, Hae-Sic

Abstract

The purpose of this study is to examine the validity of recycled aggregates (RAs) as a substitute for Sand-Mat material for soft ground improvement in the housing site development. To evaluate the possibility of RAs as a substitute for sand mat material, first of all, the criteria and regulations related with the quality of lateral drain layer were collected and checked. Secondly, both of the properties of RAs were compared with the properties of natural sand for the lateral drain layer. The material properties related to coefficient of permeability, pressure at-rest state and so on satisfied most standards. On the basis of the test results, RAs were used to the construction site as lateral drain layer. Accordingly, if the quality of RAs can be managed well, the application of these RAs as lateral drain layer to replace natural sand was highly effective. Also, based on cost analysis of two materials, RAs are proved to be very competitive.

요 지

본 연구의 목적은 연약지반개량을 위한 수평배수층 재료로 순환골재의 적용가능성을 검증함에 있다. 최근 모래의 수급불균형이 초래되고 있으며, 이는 단순히 가격 상승의 문제에서 그치는 것이 아닌 전체 공정의 지연을 초래하게 되어 문제의 심각성이 크다. 이러한 상황에서 순환골재는 그 수요를 충족시킬 수 있는 적절한 대체재료로 인식되고 있으며, 이를 검증하기 위해 우선 이미 제정된 각종기준과 규정을 찾아 비교·정리하였고, 다음으로 기존의 수평배수층 재료인 모래와의 공학적 특성에 대한 비교 및 검토를 시행하였다. 결과로써 순환골재는 모래에 비해 큰 투수계수 및 단위중량으로 인해 수평배수층으로써의 대부분 기준을 만족하였으며, 클로킹에 대한 문제는 수평배수층 상부에 필터층을 추가 설치하는 방안으로 해결할 수 있어, 현장적용이 가능한 것으로 판단되었다. 또한 모래에 비해 순환골재의 구입단가가 상대적으로 낮아 공사비 절감이 가능하여, 수평배수층 재료로 순환골재는 매우 경쟁력있는 대체재료라 할 수 있다.

Keywords : Construction waste, Lateral drain layer, Recycled aggregate, Soft clay

1 정회원, 대한주택공사 대리 (Member, Assistant Manager, O-San New Town Project Division, KNHC, lly2253@naver.com, 교신저자)

2 삼두주식회사 이사 (Director, Samdu Corporation)

3 정회원, 에스케이건설 주식회사 GEOTASK팀 대리 (Member, Assistant Manager, Geotask Team, SK Construcion)

4 정회원, 대한주택공사 토목설계처 차장 (Member, Deputy Manager, Civil Design Division, KNHC)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

대규모 택지개발사업이 진행되면서 택지부족으로 인해 그간 제외대상이었던 연약지반에서도 개발사업이 진행되고 있다. 연약지반상의 택지개발은 택지공급의 일정상 지반개량의 신속성과 택지공급 이후에 시공되는 구조물의 안전성 및 지반 환경성을 충족시켜야 하는 등 난제가 많다. 더욱이 2000년 이후 어장과 환경파괴 등의 이유로 주민, 환경단체 등에서 골재채취 금지를 요구함에 따라 웅진군 등에서 모래채취 불허와 생산량의 제한으로 그림 1과 같이 단기간에 모래가격이 급등하여 연약지반 개량공법의 핵심인 배수층 재료로써의 모래 수급 불균형이 초래된바 있으며, 이는 단순한 가격 상승의 문제에서 그치는 것이 아니라, 전체 공정의 지연을 초래하여 택지 개발 사업의 비용증가에 따른 분양원가 상승 및 주변환경 저해에 따른 상당한 민원이 발생되므로 심각한 문제로 인식해야 하며, 근본적인 해결방안이 필요하다.

이와 같은 배경에서 정부에서는 2003년 12월 '건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률(이하 건설폐기물법)'을 제정하여, 건설현장 등지에서 발생하는 건설폐기물을 자원으로 활용할 수 있게 되었다. 건설폐기물의 재활용 용도는 성토, 복토용이 대부분을 차지하고 있으며, 도로기층용, 콘크리트용, 수평배수용 골재 등과 같이 대량소비 용도로의 재활용 실적은 매우 저조한 실정으로 건설폐기물 자원화를 위한 아이템 개발 및 현장적용 기술 확보가 필요하다.

본 연구에서는 모래가격 상승과 순환골재 활용이 필요한 두 가지 현장문제를 동시에 극복하고자, 골재가 대

량 소비되는 연약지반 개량시의 수평배수층 재료로써 모래를 사용하는 공법 대신 순환골재로 변경하여 적용해보았다. 이에 필요한 공학적 검증과 실제 적용사례를 통한 기존 공법과의 비교를 통해 향후 적용가능성을 판단해보았으며, 품질확보와 시공성 향상을 위한 기준을 제시함으로써 건설폐기물 자원화를 위한 토대를 마련코자 하였다.

2. 순환골재 활용의 필요성

2.1 골재수급상황 및 대체재료로써의 순환골재

택지개발 등의 대형 건설사업 증가에 따른 건설자재, 특히 모래 등의 골재 수급에 차질이 빚어지고 있으며, 모래의 수급이 가능하더라도 업자들간의 담합이나 원거리 골재원에 따른 운반비 상승 및 공기지연으로 전체 공사에 상당한 영향을 미치고 있는 실정이다. 또한, 한국건설산업연구원(2004)에 따르면, 증가추세에 있는 2004년 기준 골재 수요량(2.5억³)과 향후 20년간 천연골재의 개발가능량(55억³)을 고려할 때, 골재자원의 고갈현상이 우려되는 실정이다. 아울러 모래 및 골재의 무분별한 채취로 인한 어장감소에 따른 재산상의 피해와 생태계 파괴로 인한 자연경관 손상과 같은 2차적 피해가 발생되고 있다. 이러한 골재수급 상황을 해결하기 위해 환경친화적인 재료에 대한 연구가 진행되고 있으며, 그 대안으로 순환골재가 주목받고 있다.

더욱이 2002년 환경부와 건교부의 통합 고시에 의한 대형공사에서 건설폐기물의 재활용 의무화와, 2003년 제정된 건설폐기물법을 통해 건설폐기물을 자원으로

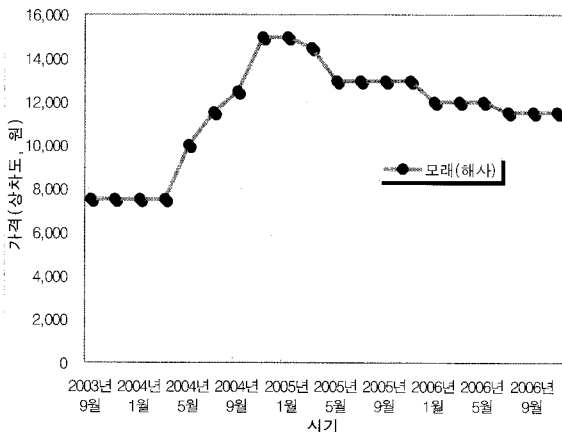


그림 1. 인천지역 모래(해사) 상차도 가격 비교

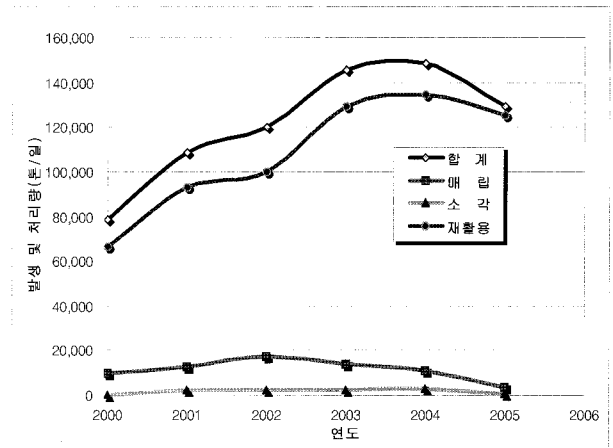


그림 2. 연도별 폐기물 발생 및 처리량(환경부 및 국립환경과학원, 2005)

활용할 수 있는 법적 토대가 마련되었으며, 일반국민의 환경에 대한 인식전환과 맞물려 건설폐기물을 재활용한 순환골재에 대한 과거의 부정적이었던 인식이 달라지고 있다. 그림 2의 연도별 폐기물 발생 및 처리량(환경부 및 국립환경과학원, 2005)을 보면, 국토개발 사업 증가에 따른 건설폐기물량 증가추세가 두드러지고, 건설폐기물법 제정에 따른 재활용 증가도 눈에 띈다. 2005년 폐기물량이 전년 대비하여 감소되고 있으나, 이는 폐기물 감량화와 건설폐기물 재활용에 대한 사회적인 인식 정착에 따른 것으로 판단되며, 지금까지 활용치 못하고 쌓여있는 잠재적인 건설폐기물량을 고려할 때 지속적인 폐기물 자원화를 위한 아이템 개발이 필요하다.

2.2 순환골재 관련 품질기준 및 법률

건설폐기물법 제정으로 순환골재 활용을 위한 법적 근거는 확보되었지만, 실제 활용을 위해서는 각종 품질 기준, 환경 및 재활용 관련 법률에 대한 이해가 필요하다. 표 1에는 순환골재를 현장에 적용할 수 있는 법적 근거를 정리하였다. 정부에서는 건설폐기물 자원화를 위해 건설폐기물법 제정 이전부터 각종 법률 제정을 통해 순환골재 등 건설폐기물을 현장에 활용할 수 있도록 기준을 마련하여, 공공기관의 순환골재 의무사용 권장과 친환경상품으로 순환골재를 등록하는 등 자원화를 위한 노력을 계속해 왔다.

표 1. 순환골재 활용을 위한 관련법률 검토

구분	주요항목	주요내용	비고
건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률	법률	제04조(국가 및 지방자치단체 등의 의무) 제05조(발주자의 의무) 제38조(순환골재의 사용 의무)	· 순환골재 사용 · 일정량이상 반드시 사용 · 도로보조기층용 10%이상 사용 건교부, 환경부 (2003)
	시행령	제04조(순환골재등의 재활용 용도) 제05조(순환골재 의무사용건설공사의 범위)	· 도로 및 건설공사용 순환골재 용도 · 대통령령이 정하는 일정구조 규모 용도의 건설공사 건교부, 환경부 (2004)
자원의절약과재활용촉진에 관한 법률	제32조(재활용품의 구매 촉진 등)	· 순환골재 의무 구매	환경부(1992)
공공기관의 폐기물 재활용 촉진을 위한 지침	제03조(공공기관의 책무) 제06조(재활용제품의 우선구매)	· 공공기관의 우선적 재활용촉진을 실천 · 공공기관의 재활용제품 우선구매 등	국무총리훈령 (1990)
친환경상품구매 촉진에 관한 법률	제06조(공공기관의 친환경 상품 구매의무)	· 친환경상품중 순환골재가 포함	환경부(2004)
토양환경보존 시행규칙	별표 3(토양오염우려기준)	· 법적기준 [가지역]	환경부(2001)
폐기물관리법	제24조(사업장폐기물배출자의 의무 등)	· 폐기물의 재활용 용도 및 방법과 폐기물 감량화	환경부(1986)
건축폐자재의 활용기준	제4조(건축기준의 완화)	· 건축 폐자재의 사용비율 및 기준완화에 대한 세부규정	건교부(1999)
건설기술 관리법	제26조의5(건설공사의 환경관리)	· 건설공사시 환경과 조화되는 기술개발 위한 건설폐자재의 재활용	건교부(1991)

표 2. 수명배수층용 모래대비 순환골재 재료 특성

구분	모래기준	순환골재	
		실내시험	현장시험
통일분류 ¹⁾	SP	GP	GP
균등계수 Cu ¹⁾	2.6	37.5	47
곡률계수 Cg ¹⁾	1.1	7.04	6.23
D15(mm) ²⁾	0.074~1.0	2	1.9
D85(mm) ²⁾	0.4~8	50	58
No.200체 통과율(%) ²⁾	15%이하	0.87	1.68
비중 ¹⁾	2.62	2.70	2.68
최대건조밀도(t/m ³) ¹⁾	1.70	1.92	1.91
투수계수(cm/s) ¹⁾	6.64×10 ⁻³	2.5~3.1×10 ⁻²	5.01×10 ⁻²
정지압(t/m ²) ¹⁾	15 × B	17 × B(*B는 장비의 폭, φ =30° 가정)	

¹⁾ 정경한 등(2006), ²⁾ 대한주택공사 지구시방서(2002)

현재까지 국내에서 규정되어 있는 순환골재의 기준은 용도에 따라 여러 가지로 분류할 수 있으나, 산업자원부 기술표준원 KS규격으로 콘크리트용 부순돌골재 기준(국립기술품질원, 1997)과 순환골재의 품질기준(건설교통부, 2005)으로 정리할 수 있다. 순환골재의 품질기준만이 순환골재의 품질을 유일하게 규정짓고 있으나, 고품질을 요구하는 콘크리트용 부순돌골재 기준을 통해 순환골재의 품질정도를 가늠해 볼 수 있다. 본 연구는 연약지반 샌드매트용 순환골재의 활용성을 검토하는 것이기 때문에 콘크리트용 부순돌골재의 적용을 통한 직접적인 판단에는 다소 무리가 있으나, 현재 연약지반 개량을 위한 샌드매트 대체재료로서의 순환골재의 품질기준이 정립되어 있지 않기 때문에, 보다 상세하고 높은 품질기준을 요구하는 콘크리트용 부순돌골재 기준과 성토용도로서의 순환골재 품질기준을 표 2와 같이 차용하여 비교해 보는 것이 현 상황에서 순환골재의 품질수준을 판단하기에 가장 적합하다.

3. 수평배수층 대체재료로서 순환골재 사용에 대한 검토

연약지반 개량시 수평배수층의 설치는 개량 대상인 점토층의 압밀에 따른 유출수를 상부로 원활하게 배수시키는 역할과 성토내의 지하 배수층으로서 지하수면

을 저하하고 성토시공을 위한 주행성을 확보하는 역할 및 모래말뚝이나 모래 다짐말뚝 등의 처리공의 시공에 필요한 시공기계의 통로 또는 지지층이 된다(윤여원, 2004). 아울러 모관현상에 의한 동결융해로 발생할 수 있는 피해를 방지 할 수 있는 역할도 수행한다. 여기서는 국내에서 생산되고 있는 순환골재의 수평배수층 재료로서의 대체여부를 환경, 지반공학 및 재료 특성 등을 고려한 그림 3과 같은 단계로 판단하였다.

3.1 순환골재의 환경 특성

순환골재는 다양한 유기물 및 무기물로 구성되어 물과 접촉시 화학반응에 의해 오염물질이 용출될 수 있다. 순환골재를 활용하기 위해서는 이러한 용출반응이 환경에 미치는 영향을 고려해야 하며, 일반적으로 용출정도의 환경기준 부합여부로 순환골재의 환경특성을 판단한다. 광기석 등(2005)에 따르면, 순환골재는 물과 접촉할 경우 환경위해성이 큰 미량원소들의 용출로 인한 수질오염 발생 가능성이 매우 낮으며, 실제 간극수의 배제로 인해 물의 흐름이 있는 배수층내에서 용출된 원소들 역시 분산, 이동하여 희석될 것으로 예상한 바 있어 환경적인 문제는 없을 것으로 판단한다. 최근 순환골재 품질인증 및 관리에 대한 규칙(건설교통부, 2006) 제정에 따라 순환골재의 생산과정은 크러셔에서 2~3회 가공이 된 이후, 유기물 및 이물질 제거를 위해 물로 세척하는 과정을 반복하게 되어있어 골재 표면의 유기물 및 무기물로 인한 초기 미량원소의 용출 가능성이 줄어든 상태로 순환골재의 활용이 더욱 용이한 상황이다.

본 연구에서는 순환골재의 환경에 유해한 용출특성 평가를 위하여 국내에서 일반적으로 적용되고 있는 폐기물공정시험법에 의한 용출시험을 실시하였다. 표 3에 국내외의 각종 규제기준을 비교하였고, 이를 통해 현장에 적용한 품질기준을 작성하여 순환골재에 대해 실험해본 결과, 기준치를 크게 밑도는 것으로 나타났다. 다만 pH의 경우, 알칼리 경향을 보였으나 특정한 순환골재 관련 기준치가 마련되어 있지 않으나, 폐기물관리법에 명시된 관리형 매립시설의 차수시설 및 침출수처리시설의 성능에 지장을 초래하지 않는 범위(폐기물관리법 시행령 제6조)와, 이용수 등(2001)이 시간경과에 따른 폐콘크리트의 pH 특성이 약 알칼리로 변한다는 연구 결과를 토대로하여, 실제 현장내 과잉간극수가 수평배수층을 통과하여 집수정내에 모여졌다가 펌핑을 통해서

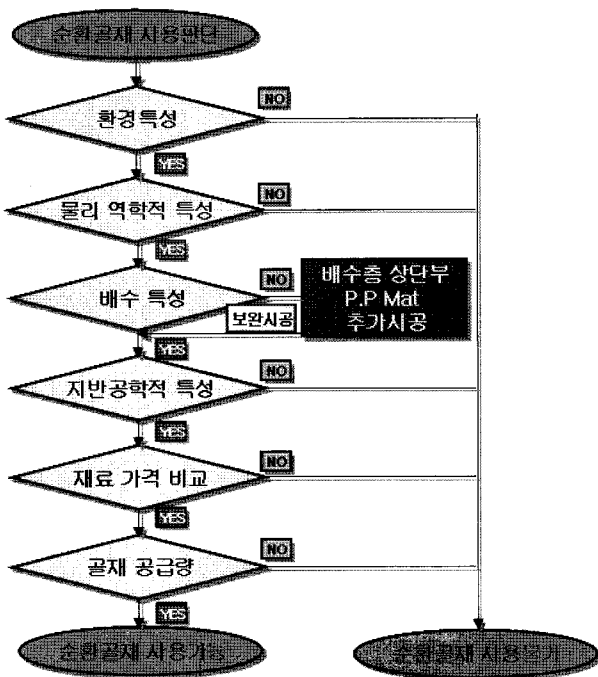


그림 3. 순환골재를 샌드매트 대체재료로의 활용가능 여부 검토 흐름도

표 3. 순환골재의 환경특성 분석 및 사용여부 판정

물 질 (단위 : mg/kg)	토양환경보전법 시행규칙[별표3] [가지역] ¹⁾	폐기물관리법 (폐기물 공정시험법)	미국 EPA (TCLP방법)	순환골재 품질기준 (복토용) ²⁾	현장적용 순환골재 품질기준	순환골재 (연구적용) 100mm이하	판정
pH	-	2<pH<12.5	-	-	2<pH<12.5	10.35	O
유기물	-	-	-	1.0	1.0	1.0	O
구리(Cu)	50	3.0	-	50	50	0.092	O
카드뮴(Cd)	1.5	0.3	1.0	1.5	1.5	0.006	O
납(Pb)	100	3.0	5.0	100	100	0.65	O
수은(Hg)	4	0.005	0.2	4	4	ND*	O
6가크롬(Cr ⁶⁺)	4	1.5	5.0	4	4	ND*	O
테트라클로로에틸렌(PCE)	4	0.1	-	4	4	ND*	O
시아니드(CN ⁻)	2	1.0	-	2	2	ND*	O
트리클로로에틸렌(TCE)	8	0.3	-	8	8	ND*	O
비소(As)	6	1.5	-	6	6	1.85	O
유기인화합물	10	1.0	-	10	10	ND*	O
아연(Zn)	300	-	-	300	300	33.1	O
니켈(Ni)	40	-	-	40	40	0.04	O
불소(F)	400	-	-	400	400	175	O
페놀	4	-	-	4	4	-	-

¹⁾택지개발 특성을 감안하여 가지역을 기준으로 함. ²⁾건설교통부(2005). *non detect

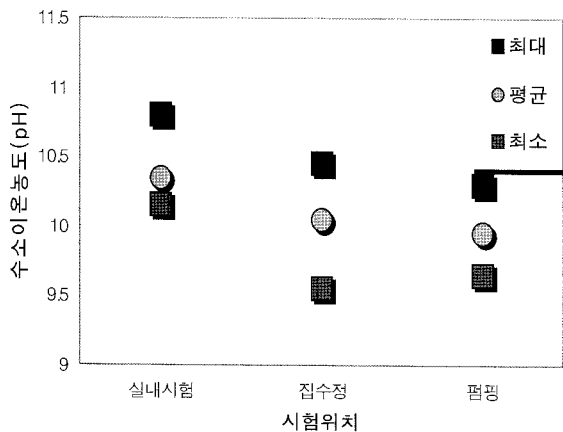


그림 4. 위치별 수소이온 농도 변화

자연 배수되는 단계별로 각 위치에 따른 pH의 변화를 판단해 보았다. 총 4회 시험을 실시한 결과 현장에서 최종 펌핑하는 과잉간극수의 pH가 평균 9.95로써 순환골재 사용으로 인한 pH 변화를 고려하였을 때 순환골재 현장 적용은 가능한 것으로 판단된다(그림 4). 비소의 경우에는 폐기물관리법상의 기준을 다소 상회하고 있으나, 건설폐기물법내에 순환골재 품질기준(복토용)이 별도로 제정된 바, 이 기준으로 판단할 경우 순환골재를 현장내 적용하는데 환경적 문제는 없을 것으로 판단된다.

3.2 순환골재의 물리 역학적 특성

순환골재를 사용하기 위한 물리적 역학적 특성을 분석하기 위해, 표 4와 같이 순환골재 자체의 특성 부분은 한국산업규격(KS) 부순돌골재의 평가기준인 KS F 2527을 사용하고, 순환골재의 활용부분은 건설교통부에서 2005년에 제정한 순환골재 품질기준(성토용)을 사용하여 활용가능성을 판단하였다. 건교부 순환골재 품질기준은 5mm체 통과율을 제외하고 모두 만족하고 있다. 순환골재의 성토용기준이 흙쌓기 최상부면으로부터 100cm를 기준으로 나누어 지고, 그 이상일 때에는 특정한 5mm체 통과율 기준이 없다. 일반적으로 선행재하 높이가 1m이상인바, 기준상 5mm체 통과율에 대한 문제는 없을 것으로 판단된다. 또한 이 규정이 골재의 입도와 관련된 것으로 불량한 입도에 따른 공극막힘 등에 대해서는 별도로 분석(3.4 순환골재의 공극막힘 현상 검토)하여 해결하였다. 한편 KS규격에는 다소 미달하는 것으로 나타났으며, 기준치를 밑도는 흡수율, 안정성, 마모율은 순환골재 사용목적이 포장 또는 철근콘크리트용 골재가 아닌 배수 및 성토용임을 감안할 때 사용에 지장이 없는바, 순환골재 사용은 가능한 것으로 판단하였다.

표 4. 순환골재의 물리 역학적 특성 및 사용여부 판단

구분	순환골재 (100mm이하)	기준	비고
굵은골재 최대치수(mm)	100	100 이하	건설교통부(2005) [순환골재 품질기준, 성토용기준<흙쌓기최상부면으로 부터 100cm 이내의 하부]
수정 CBR(시방다짐)	65	10이상	
5mm체 통과율(%)	20.48	25~100	
0.08mm체 통과율(%)	0.87	0~25	
소성지수(PI)	NP	10이하	
다짐후 건조밀도(t/m ³)	1.704	1.5 이상	
이물질 함유량(%) (유기이물질)	0.3	1.0 이하(용적)	
비중	2.70	2.5이상	KS규격 부순돌골재 [굵은골재] 기준
흡수율(%)	5.5	3.0이하	
안정성(%)	14	12이하	
마모율(%)	47.2	40이하	
실적률(%)	59.38	55이상	
0.08mm체 통과율(%)	0.87	1.0이하	

3.3 순환골재와 모래의 재료 특성 비교 및 수치해석

연약지반 수평배수층으로 순환골재가 모래를 대체할 수 있는지를 판단하기 위해 표 2에서 살펴본 바와 같이 수평배수층용 모래를 기준으로 한 순환골재의 재료 특성을 비교해 보았다. 결과로써 순환골재가 모래보다 투수계수가 약 10배 우수하며, 특히 모래에 비해 큰 단위중량으로 이와 관련된 수평배수층 포설시 정지압, 성토체 사면안정 등을 얻을 수 있을 것으로 판단된 바, 이를 수치해석을 통하여 검증하였다.

본 연구의 수치해석은 유한차분법을 이용한 상용 소프트웨어인 FLAC 2D를 사용하였다. FLAC 2D는 지반 해석용으로 쓰이며 지반공학 문제를 2차원적으로 모델링하여 수치해석할 수 있는바 이를 통해 해석을 실시하였다. 수치해석 방법은 실제 연약지반 개량시와 같이 지반을 모델링하고, 수평배수층 재료를 모래와 순환골재로 변화시키면서 허용안전율을 만족하는 한계성토고를 찾아보고자 하였다.

표 5와 같이 사면의 물성은 실시설계보고서(대한주택

공사, 2002) 및 현장실험 등을 통해 취득하였으며, 해석을 위해 사용한 구성방정식은 암반과 토질분야에서 일반적으로 활용하고 있는 Mohr-Coulomb 모델을 이용하였다. 안전율을 도출하는 수치해석 기법으로는 전단강도감소기법을 이용하였으며, 수치해석의 목적이 수평배수층으로 모래와 순환골재를 각각 적용할 경우에 대한 안전율의 변화인바, 두 재료에 대한 물성은 현장 및 실내 시험을 통해 검증된 단위중량, 내부마찰각 등에 대해서만 차이를 주는 방식으로 지반의 기본물성치를 반영하였으며, 내부 절리·불연속면·지하수위 등은 고려하지 않았다. 또한, 두 재료를 이용한 연약지반 개량을 위한 프리로딩 설계시 적용하는 단계별 성토에 대한 한계성토고 개념으로, 허용안전율 1.3을 상회하는 성토높이를 구하여 두 재료간 효용성을 판단해 보았다.

결과로써 표 6과 같이 사면안전율이 기준치를 상회하는 성토고가 본 연구의 수치해석 조건에서는 순환골재가 약 0.4m 추가 시공이 가능한 것으로 판단되어, 순환골재가 모래보다 프리로딩시 현장상황에 따른 고속성토 및 한계성토고 상향조정이 가능할 것으로 예상되는

표 5. 수치해석에 사용된 각 지층의 기본물성

지층구성	토질상태	두께 (m)	단위중량 (t/m ³)	내부마찰각 (°)	점착력 (t/m ²)	변형계수 (t/m ²)	포아송비	비고
연약지반	점 성 토	4.0	1.5	0	1.5	240	0.40	실시설계서
수평 배수층	모 래	0.6	1.7	30	0.0	10,000	0.32	실시설계서
	순환골재	0.6	1.91	37	0.0	10,000	0.32	현장 및 실내시험
프리로딩	양질토사	H ^(*)	1.9	25	1.5	4,000	0.36	실시설계서

(*)H는 허용안전율을 만족하는 한계성토고

표 6. 수치해석 결과

구 분	한계성토고(m)	안전율 기준
순환골재	2.3	1.3
모 래	1.9	

등 전반적인 시공성 향상에 기여할 수 있는 것으로 기대된다. 실제 적용시에는 Matuo-Kawamura 법 등을 이용하여 실제 계측자료 분석을 통한 단계 성토속도에 따른 측방변형 안정성 검토도 같이 수반되어야 한다.

3.4 순환골재의 공극막힘(Clogging) 현상 검토

수평배수층은 연약지반과 성토지반과의 중간에서 필터층으로써의 역할을 하며, 동기능을 적절히 수행하기 위해 시방화된 국내외 샌드매트의 입경범위(이광찬 및 이문수, 1999)를 제정하여 관리하고 있다. 그림 5에는 샌드매트의 입경범위 기준과 순환골재의 입도분포를 나타내었다. 순환골재가 샌드매트 상한과 하한치의 범위에 있지 않은 것을 알 수 있으며, 이에 따라 순환골재의 공극막힘에 대한 적절한 검토가 필요하다. 배수재의

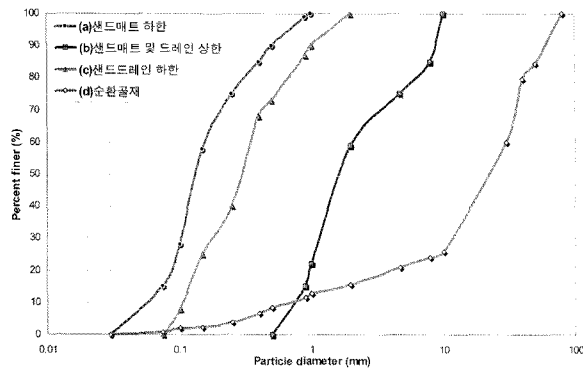


그림 5. 샌드매트 및 순환골재의 입도분포 범위

공극막힘의 가능성은 배수재 주변지반 토사의 입경과 배수재의 입경 혹은 Opening size의 관계에 의해서 추정할 수 있으므로, 공극막힘을 방지하기 위한 배수재의 선정시에 NAVFAC 기준(NAVFAC, 1986)을 적용하여 판단할 수 있다(표 7). 판단결과 순환골재의 공극막힘에 대한 문제가 있는 것으로 나타났으며, 특히 현장여건상 성토재가 양호한 토사가 아닌 세립분이나 함수비가 높은 토사가 섞일 가능성이 많은 상황이므로 안정한 시공을 위해 배수층 상부에도 P.P.Mat를 추가 시공하여 공극막힘 문제를 해결코자하였다.

3.5 순환골재의 모래 대비 가격과 골재원 확보

순환골재를 모래대체로 활용하기 위해서는 시공비용의 적정성 확보와 시공결과 불확실성 극복을 위해 기존의 모래보다 가격이 낮아야 한다. 그림 6과 같이 순환골재의 m³ 당 단가는 지역별 차이를 감안하더라도 통상 모래의 30%~40% 수준을 보이고 있으나, 골재 가격은 결국 운반비가 좌우하므로 골재원의 거리에 따라 사용 여부를 결정해야 한다. 표 8에서와 같이 동 연구지역에서는 순환골재 사용으로 공사비를 절감할 수 있었다. 아

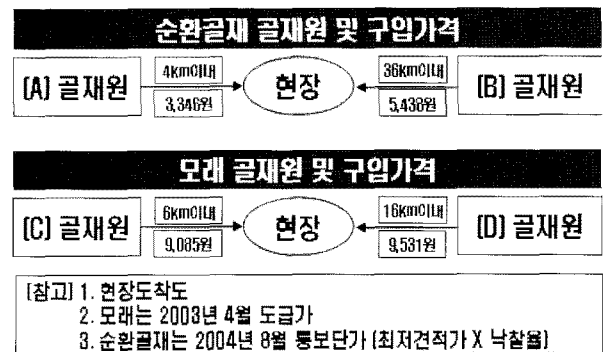


그림 6. 연구현장의 골재원 거리 및 구입가격

표 7. 순환골재의 Clogging 판단 결과

구분	식	1차	2차	3차	안정범위	판정
(a)	$\frac{D_{15(G)}}{D_{15(S)}}$	80	87	400	$4 < (a) < 20$	N.G.
(b)	$\frac{D_{15(G)}}{D_{85(S)}}$	1.11	0.36	5.09	$(b) < 5$	N.G.
(c)	$\frac{D_{50(G)}}{D_{50(S)}}$	96	104	82	$(c) < 20$	N.G.

여기서, $D_{15(G)}$: 배수층 재료의 15% 통과 직경, $D_{15(S)}$: 보호대상인 흙의 15% 통과 직경
 $D_{50(G)}$: 배수층 재료의 50% 통과 직경, $D_{50(S)}$: 보호대상인 흙의 50% 통과 직경
 $D_{85(S)}$: 보호대상인 흙의 85% 통과 직경

표 8. 연구현장의 공사내용 및 공사비 검토

공종	자재	당초	변경	증감	비고
연약지반 처리용 자재	모래 (m ³)	351,969	153,119	감 198,850	할증 6%
	순환골재 (m ³)	0	174,902	증 174,902	할증 4%
	골재소계 (m ³)	351,969	328,021	감 23,948	연약지반 일부위치 변경
	P.P. Mat (m ³)	553,409	801,333	증 247,924	
공사비 (천원)		5,028,590	4,043,100	감 985,490	제압비 포함

※ 수평배수층 포설두께 60cm

올려 연구지역의 경우 하루 2,000m³의 순환골재가 필요하였고, 원활한 골재의 공급을 위해 공급원을 5개소 확보하였다. 동 지구는 총 5개 구간의 연약지반이 위치하여 각 위치별 실명제를 도입해 순환골재의 품질을 확보코자 노력하였다.

동으로 인해 공정이 지연되는 심각한 문제를 겪고 있었다. 이를 극복하기 위해 순환골재에 대한 활용 가능성을 검토한 후 이를 토대로 동 현장에 적용하였다(그림 7). 순환골재를 이용한 연약지반 시공은 기존의 샌드매트 시공과 동일하나, Clogging 방지를 위해 수평배수층 상부에 P.P.Mat를 추가로 시공하였다(그림 8, 그림 9).

4. 순환골재의 현장적용 및 추진결과

4.1 대규모 택지개발 현장의 순환골재 적용

00 택지개발 사업지구는 총 사업면적이 2,545,174.9m²이고 약 30%가 연약지반으로 구성되어 있으며, 2004년부터 본격적인 지반개량 공사가 시작되었으나, 골재파

4.2 순환골재의 현장 적용 결과

연약지반 개량시 수평배수재로 순환골재를 적용한 결과를 표 9, 표 10에 나타내었다. 본 연구지역의 경우 모래와 순환골재가 구간별로 시공되어 상호 비교가 가능하였다. 표 9의 결과로써, 목표압밀도, 최종허용침하량 등을 고려할 때, 모래와 순환골재 모두 연약지반 개량효과가 있는 것으로 나타났다. 다만, 순환골재의 경우 모래보다 설계대비 계측침하량이 작게 나왔으며, 이에 대한 원인은 연약지반의 심도 등 지형적 특성과 시공환경 등 여러가지 차이에 의한 것으로 판단해 볼 수 있으나, 이를 명확히 판단하기 위해서는 동일조건의 두 재료간 비교와 같은 추가적인 연구가 필요하다.

시공 결과에 대한 두 재료간 상세한 비교를 위해, 그림 10, 그림 11 및 표 11에는 연약지반 심도가 8.3m와



그림 7. 구간별 개량공법 적용 현황도

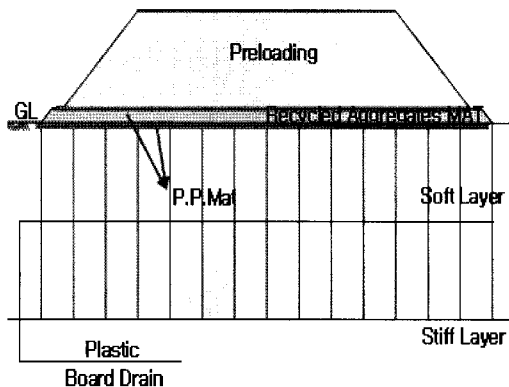


그림 8. 순환골재 매트 공법 모식도(프리로딩 + PBD 병행공법)

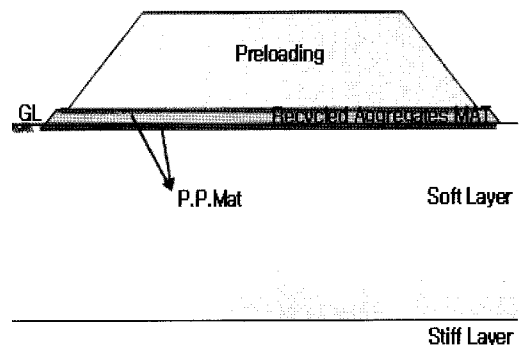


그림 9. 순환골재 매트 공법 모식도(프리로딩 공법)

표 9. 수평배수층 재료(모래, 순환골재)에 따른 연약지반 개량 결과 분석표

구 분	설계침하량 대비 계측침하량		연약지반 심도 평균(m)	목표 압밀도 (%)	총료 압밀도 (%)	허용잔류 침하량 (cm)	잔류 침하량 (cm)	자료수	
	평균(cm)								
연약지반 처리결과	58.44		4.39	90	94	10	1.2	64	
모래	소 계		3.66				92	1.3	27
	PBD&P/L	58.52	3.90				94	0.9	6
	P/L		3.60				91	1.4	21
순환 골재	소 계		4.84				95	1.2	37
	PBD&P/L	49.59	5.67				95	1.3	28
	P/L	48.05	3.76	94	1.1	9			

※ 1) 2차 압밀침하량은 미고려, 2) 잔류침하량은 Asaoka 법(Asaoka, 1984)으로 산정

표 10. 현장에 수평배수층으로 적용된 샌드매트공법과 순환골재매트 공법의 비교

구 분	순환골재매트(순환골재)	샌드매트(모래)	모래 대비 순환골재
공법개요	연약지반 처리시 수직배수층을 통해 유입된 간극수를 밖으로 배출할 때 수평방향으로 원활히 배수하기 위한 공법		
시공순서	1. 연약지반 상부 원지반 정리 2. P.P.Mat 설치 3. 순환골재 포설 4. 수직배수층 시공 또는 무처리 5. 상부 P.P.Mat 설치 6. 재하성토	1. 연약지반 상부 원지반 정리 2. P.P.Mat 설치 3. 모래 포설 4. 수직배수층 시공 또는 무처리 5. 재하성토	수평배수층 상부 P.P.Mat 추가시공
장 점	· 샌드매트에 비해 공사비 저렴 · 순환골재 활용으로 친환경적 · 모래보다 투수계수가 약 10배이상 큼	· 시공실적이 많음(침하 예측 정도 높음)	
단 점	· 시공실적이 적음 · 환경문제(비산먼지)에 대한 주의가 필요 · 골재원 확보 필요 · 순환골재의 별도 품질관리 필요 · 클로징 방지를 위한 P.P.Mat 추가 시공 · P.P Mat를 상하로 시공하여 침하량에 영향을 미칠 수 있음	· 골재매트에 비해 고가 · 모래파동시 가격 및 공기 문제 발생 · 비세척사로 인한 구조물 기초 염해 문제	순환골재 자체의 환경문제는 없으나 비산 먼지 발생으로 현장민원 발생가능
주 행 성 (정지압, t/m ²)	17 × B	15 × B	양 호
(2:1법을 이용한 결과)			

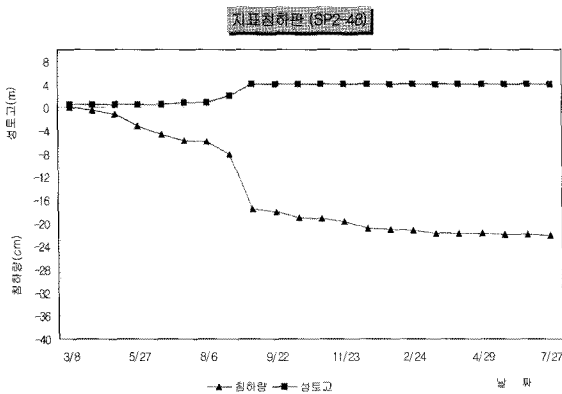


그림 10. 2구간 지표침하판(SP2-48, 수평배수층(순환골재)) 계측결과

5.3m로 비교적 두꺼운 연약층을 개량하기 위한 수평배수층 재료로 순환골재와 모래를 각각 적용한 결과를 예로 나타내었다. 즉, 순환골재를 적용했을 경우에도 모래

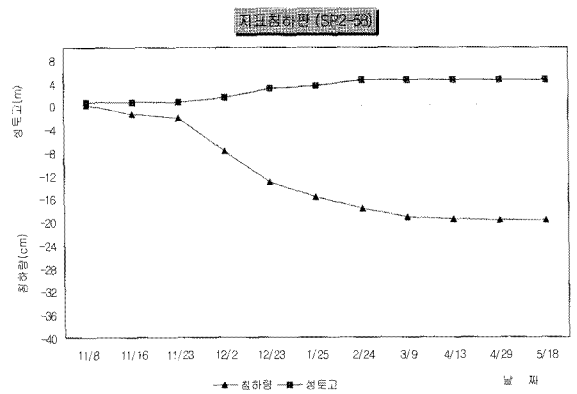


그림 11. 2구간 지표침하판(SP2-58, 수평배수층(모래)) 계측결과

의 경우와 유사하게 일정시간 경과후 계측침하량이 수렴하고 있으며, 표 11과 같이 잔류침하량이 허용잔류침하량보다 작았고, 계측총료 압밀도는 목표 압밀도보다

표 11. 2구간 지표침하판(SP2-48, 58) 설계 및 계측 결과 비교

구분			설계기준					계측 및 개량 결과				
위치	수평 배수층 재료	연약지반 심도(m)	설계 침하량 (cm)	허용잔류 침하량 (cm)	목표 압밀도 (%)	비배수 전단강도 (kg/cm ²)	설계지반 처리기간 (개월)	계측 침하량 (cm)	잔류 침하량 (cm)	계측종료 압밀도 (%)	비배수 전단강도 (kg/cm ²)	실제지반 처리기간
SP2-48	순환골재	8.3	58.97	10	90	0.65	7	22.1	0.9	96	9.2	9
SP2-58	모래	5.3	33.76			0.44	5.7	19.8	0.2	97	6.5	6

※ 1) 현장 토공 운영 계획에 따라 여성고 제거 가능일인 12월 8일 이후에도 제거 미실시
 2) 두 위치 모두 연약지반 개량을 위해 P/L과 PBD 병행시공

켰다. 그리고 개량후 비배수 전단강도가 크게 증가된 결과를 종합할 때, 수평배수층에 순환골재를 적용할 경우에도 지반개량 효과가 있음을 알 수 있다.

또한 설계시 지반처리기간은 재하기간에서 여성토를 제거하는 단계인 1차 압밀이 종료되는 시점까지를 기준으로 하고 있다(김상규, 2006). 그림 10에서 1차 압밀 종료시점을 12월 08일 경으로 판단할 수 있어, 실제 지반 처리기간이 약 9개월 소요된 것으로 이해할 수 있다. 따라서 순환골재 사용시에도 설계 지반 처리기간에 실제 지반 처리기간이 근접함을 알 수 있으며, 설계시 미고려한 수평배수관 및 집수정 설치 공사기간 등을 감안할 경우, 설계와 유사하게 되어 적절한 지반개량이 가능한 것으로 분석되었다.

4.3 순환골재의 현장 적용 결과에 따른 수평 배수관 간격 검토

순환골재 최초 적용에 따른 향후 배수 등의 불안정성을 보장하기 위해서 모래의 경우와 동일하게 시공이 진행되었다. 순환골재 적용시에도 지반개량 효과가 있는 바, 추가적인 고려사항으로 연약지반 시공시 설계에는 미반영되어 있으나 실제 공기가 소요되는 집수정 및 유공관 설치 등에 대해 검토할 경우, 순환골재의 상대적으로 큰 투수성을 이용하여 시공비용 및 공기를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

수평배수층의 두께 결정을 위해서는 장비주행성과 배

수가능 두 가지를 고려한다. 연구현장의 경우 배수가능 시 검토되는 압력수두가 수평배수층 두께보다 높지만, 경제성을 고려하여 수평배수층 두께는 장비주행성을 감안한 0.6m로 설정하였고, 압력수두를 수평배수층 내에서 처리하기 위해 내부에 수평배수관을 별도 설치하였다. 수평배수층내 순환골재 및 모래의 투수계수는 표 2에서 제시한 바와 같이, 각각 $5.01 \times 10^2 \text{cm/sec}$ (4,329cm/day)와 $6.64 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ (574cm/day)로 가정하였다. 압밀침하는 하중재하 초기에 빠르게 진행되며 시간이 경과할수록 침하속도는 줄어들면서 최종 침하량에 수렴하게 되므로 간극수의 배수에 대한 안정성을 고려하여, 평균침하속도를 설계시 추정된 압밀도 50%의 침하량 및 침하시간으로부터 평균값(0.633cm/day)을 적용하는 것으로 한다. 실제 평균침하속도는 모래와 순환골재가 상이하나 설계 당시를 기준으로 비교하기 위해 동일값을 적용하였다.

$$Q = L \times S = k \times i \times A = \frac{k \Delta H_w h}{L} \Rightarrow \Delta H_w = \frac{L^2 S}{k H} \quad (1)$$

여기서, Q : 배수량(cm³)

ΔH_w : 압력수두(cm)

L : Sand Mat 배수거리(집수정 간격/2, cm)

k : 투수계수(cm/day)

S : 평균침하속도(cm/day)

수평배수거리에 따른 지하수위의 상승(ΔH_w)은 간극

표 12. 수평배수관 설치간격 결정

재료	배수관 간격(m)	배수거리 (cm)	평균침하 속도(cm/day)	투수계수 (cm/day)	수평배수층 두께(cm)	ΔH_w (cm)	판정	비고	
순환골재	95	4,750	0.633	4,329	60	55	OK	적용	
	100	5,000				61	NG		
모래	35	1,750		574			56	OK	적용
	40	2,000					74	NG	

수의 배출량이 배수관에 집수되는 유량과 동일하다고 전제하여 식 (1)을 이용하여 산정한다. 수평배수관의 간격에 따른 재료별 지하수위 상승 높이는 표 12와 같다. 즉, 동일조건에서 순환골재를 활용할 경우 배수관 간격을 늘릴 수 있어 시공량 및 공기가 단축될 수 있으며 이에 따른 유무형의 공사비 감소도 기대할 수 있으므로 순환골재 적용시 이에 대한 검토를 간과하지 말아야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 연약지반 개량시 샌드매트의 대체재료로서 순환골재의 사용가능 여부와 현장 적용시의 모래와의 비교를 통한 대체가능성에 대해 알아보았으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 순환골재는 환경 및 각종 품질기준에 부합되어 연약지반 수평배수재의 대체재료로 현장에 적용할 수 있으며, 순환골재를 수평배수재로 사용한 결과, 허용잔류침하량과 목표압밀도 이내로 수렴하고 지반강도가 증진되는 등 지반개량 효과가 있는 것으로 나타나 연약지반 수평배수재로서 사용가능하다.
- (2) 기존의 수평배수층 재료로 이용된 모래보다 단위중량 및 내부마찰각이 큰 순환골재를 적용할 경우, 모래의 경우보다 단계별 성토시의 한계성토고가 상대적으로 높아, 시공성 향상이 기대된다.
- (3) 연약지반에 위치한 대규모 택지개발의 경우, 기존 지장물 철거와 이를 이용한 현장 생산 순환골재로 지반개량이 가능하며, 현장내 폐기물을 자원으로 재활용하는 친환경적 시공이 가능하다.
- (4) 모래보다 순환골재를 수평배수재로 활용할 경우, 장비 효율성 증가와 재료비 절감에 따른 유무형의 원가절감에 기여할 수 있다.
- (5) 순환골재의 최초 적용에 따른 시공 관련 불안정성을 해소코자 모래의 경우와 동일하게 시공하였으나, 시공결과 순환골재의 배수성이 모래보다 양호하여,

검토결과 수평배수층 내부 수평배수관 간격을 상대적으로 벌릴 수 있는 등 시공량 및 시공시간 단축이 가능하여 순환골재 사용에 의한 시공성 향상이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 대한주택공사의 연구지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (2005), "순환골재 품질기준", pp.1-77.
2. 건설교통부 (2006), "순환골재의 품질인증 및 관리에 관한 규칙", 건설교통부령 제534호, pp.1-4.
3. 박기석, 이주형, 박재현, 정문경 (2005), "재생골재를 이용한 지오백 세갈보호공법 개발", 한국건설기술연구원 지반연구'부 사이 버 연구성과 발표회, pp.1-14.
4. 국립기술품질원 (1997), "KS F 2527 콘크리트용 부순 골재", pp.3-35.
5. 김상규 (2006), "연약지반 침하관리에 있어서 잔류 침하량에 대한 올바른 이해", 한국지반공학회지, 지반 Vol.22, No.10, pp.17-21.
6. 대한주택공사 (2002), "인천 논현(2)지구 대지조성공사 및 도시기반시설공사 지구시방서", pp.657-658.
7. 윤여원 (2004), "인천 논현(2)지구 대지조성공사 연약지반처리에 있어서 Sand Mat의 대체 재료로서 재생골재 사용에 대한 검토서", pp.1-9.
8. 이광찬, 이분수 (1999), "재활용을 위한 전로슬래그 투수성 고찰 (I)", 한국지반공학회논문집, 제15권 4호, pp.69-83.
9. 이용수, 한재혁, 정하익, 정형식 (2001), "페콘크리트의 유효활용을 위한 환경특성 평가", 한국지반공학회논문집, 제17권, 제2호, pp.143-150.
10. 정경환, 이영근, 이시우, 김재성, 김병탁 (2006), "쇄석MAT를 이용한 수평배수공법 설계사례", 한국지반공학회지, 지반 Vol.22, No.7, pp.28-38.
11. 한국건설산업연구원 (2004), "바다모래의 단장기 수급 안정 방안", 한국건설산업연구원 보고서, pp.1-39.
12. 환경부, 국립환경과학원 (2005), "2005 전국폐기물 발생 및 처리 현황", pp.38-42.
13. Asaoka, A. (1984), "Observational Procedure of Settlement Prediction", Soil and Foundations, Vol.18, No.4, pp.87-101.
14. NAVFAC (1986), "Foundation and Earth Structures", Design Manual.

(접수일자 2007. 10. 8, 심사완료일 2008. 9. 17)