

재생골재를 활용한 지오백 세굴보호공법의 안정성 평가

Evaluation on stability of scour countermeasures using geobag and recycled aggregates

이주형¹⁾, Juhyung Lee, 박재현²⁾, Jaehyun Park, 정문경³⁾, Moonkyung Chung, 곽기석³⁾, Kiseok Kwak

¹⁾ 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

²⁾ 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

³⁾ 한국건설기술연구원 지반연구실 책임연구원, Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : A new bridge scour countermeasure using geobags and recycled aggregates which is more stable and economical than existing methods is proposed, and its stability was verified through material tests. PP short staple nonwoven geotextile and PET long staple nonwoven geotextile produced in Korea were selected, and a series of strength tests and a test of hydraulic characteristics were conducted to determine a suitable geotextile for geobags. A series of leaching test was also conducted to assess the potential environmental risk of recycled concrete produced in Korea when it is utilized as a material for protecting bridge piers against scour.

Keywords : scour, countermeasure, geobag, recycled aggregates, strength test, leaching test

1. 서론

교각 주변의 세굴로 인해 기초나 푸팅의 일부 또는 전부가 흐름에 노출되면 기초의 연직 방향 및 횡방향 지지력이 감소하여 과도한 침하 및 회전변위가 발생한다. 이러한 교량 하부구조의 불안정 요소인 세굴에 대한 적절한 대책이나 방지책이 마련되지 않는다면 기초 자체의 사용한계상태(Serviceability Limit State, SLS)를 넘어서 교각이 전도되거나 교량의 일부 또는 전구간이 유실되는 교량 전체의 파괴로까지 이어지게 된다. 이 경우 기초가 암반층에 근입되어 선단지지에 의해 지지력을 확보하더라도 홍수시 노출된 기초에 횡방향 유수압 및 그로 인한 모멘트 그리고 충격하중이 작용하여 과다 변위가 발생하면 기초는 물론이고 교량 전체의 안정성에 심각한 위협이 될 수 있다. 따라서 교량의 안전을 위협할 정도의 세굴이 예상되는 경우에는 교각 주변에 세굴방지공이 필요하다.

최근 토목섬유공법의 발달과 함께 지오콘테이너, 지오튜브, 지오백 등 다양한 토목섬유 콘테이너 공법이 개발되었으며, 시공성과 경제성이 우수하며 환경에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 장점을 바탕으로 선진외국에서 널리 적용되고 있다. 특히 지오백 공법은 토목섬유 콘테이너의 축소판으로 토목섬유 포대에 쇄석이나 모래 등의 채움재를 넣어 홍수시 제방이나 도로, 하천 등의 침식안정이나 파괴된 제방의 복구 및 축조 등의 신속하고 안전한 복구대책으로 널리 사용되고 있다. 최근에는 교각주위 하상의 침식을 방지하기 위하여 독일의 Heibaum(1999) 등에 의해 지오콘테이너와 그라우팅된 사석을 사용하는 새로운 공법이 제안하였으며, 이 공법은 지오콘테이너에 의해 보호공 사이로 원지반 입자의 유출을 막

는 필터효과가 뛰어나며 흐름에 대한 저항이 강한 장점이 있다(Heibaum, 1999).

본 연구에서는 지오백 공법을 활용하여 기존 세굴보호공에 비해 더 안정적이고 경제적인 세굴대책공법 개발을 목표로 지오백에 폐콘크리트로부터 얻어지는 재생골재를 채움재로 사용하는 새로운 개념의 세굴방지공법을 개발을 위한 기초연구를 수행하였다. 지오백 제작에 적합한 토목섬유를 결정하기 위하여 국내에서 생산되는 토목섬유 중 PP 단섬유 부직포와 PET 장섬유 부직포 두 종류를 선정하고 재료 시험 및 수리학적 특성시험을 수행하였으며, 지오백의 채움재로 사용할 재생골재에 대한 환경영향 평가를 실시하였다.

재생골재를 채움재로 이용한 지오백 세굴보호공법의 기본 개념은 그림 1에서 보는 바와 같이 부직포로 제작한 지오백 속에 재생골재를 채워 세굴이 발생한 교각주위에 일정한 범위만큼 채우는 것이다. 이 방법은 주로 매립에 의존하던 폐콘크리트를 재활용하는 환경친화적인 공법이며, 천연골재에 비해 매우 저렴한 재생골재를 사용하고 수심 및 유속 등 현장조건에 따라 지오백의 크기와 그 속의 재생골재의 양을 조절함으로써 세굴보호공의 경제적이고 합리적인 시공이 가능하다. 또한 지오백으로 사용되는 토목섬유의 필터효과에 의해 하상입자의 유출을 방지하여 세굴보호공의 파괴 가능성이 감소됨으로써 교량의 안정성을 증대시킬 것으로 판단된다.

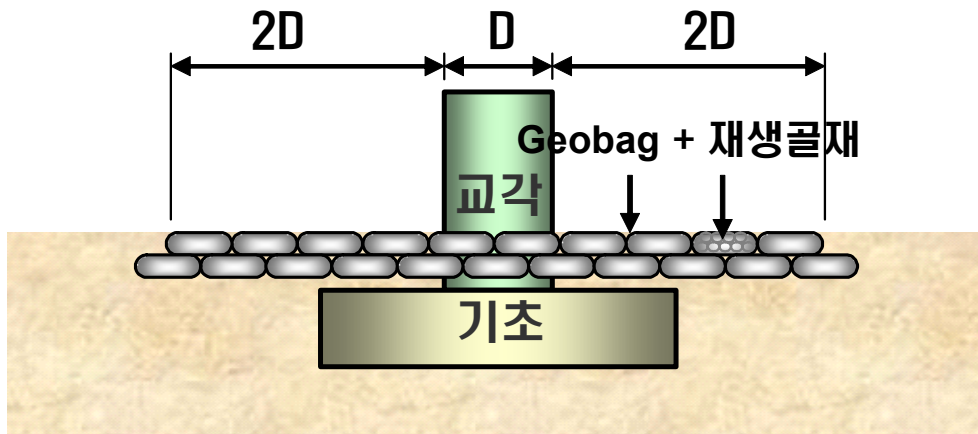


그림 1. 지오백과 재생골재를 이용한 세굴보호공 시공 모식도

2. 지오백 재료선정

2.1 토목섬유의 특성 및 선정기준

지오백 공법에 주로 사용되는 토목섬유로는 지오텍스타일(geotextile)이 있으며, 일반적으로 폴리프로필렌(polypropylene, PP) 혹은 폴리에스테르(polyester, PET)를 섬유 원료로 사용하여 제작된다. 그 형태는 크게 직포형(woven)과 부직포형(non-woven)으로 구분되는데 직포형 지오텍스타일은 필라멘트사 또는 방적사를 이용하여 경, 위사를 직각형태로 교차해서 제조한 제품이고, 부직포형 지오텍스타일은 장섬유 또는 단섬유 필라멘트를 니들펀칭 또는 열융착 등의 방법으로 결합하여 제조한다.

최근 독일의 Heibaum(1999)은 교각주위 하상의 침식을 방지하기 위하여 지오백 공법을 사용하였고, 지오백용 토목섬유 재료의 선정기준을 표 1과 같이 제시하였다. 본 연구에서는 세굴보호공용 지오백공법에 사용할 토목섬유 재료로 부직포형 지오텍스타일을 결정하고 기초적인 재료시험을 실시하여 Heibaum(1999)이 제안한 선정기준과 비교검토 하였다.

표 1. 세굴보호공용 지오백 공법을 위한 토목섬유 선정기준(Heibaum, 1999)

토목섬유 종류	최소 중량(g/m ²)	과단시 최소신율 (%)	최소 인장강도 (kN/m)
부직포형 지오텍스타일	500	50	25

2.2 지오백용 부직포 재료시험 항목

부직포는 제조방법에 따라 장섬유 부직포와 단섬유 부직포로 구분된다. 장섬유는 방사기의 구멍으로부터 압출·방사된 연속된 길이를 갖는 섬유이고, 단섬유는 중합탱크에서 직접 방사하여 경화·연신한 후 3 ~ 15cm 길이로 절단시켜 제조한 섬유이다. 일반적으로 부직포의 경우 m²당 중량으로 가격이 결정된다. 동일한 중량을 가지는 장섬유 부직포와 단섬유 부직포의 특성을 비교해 보면, 일반적으로 장섬유 부직포가 인장강도는 더 큰 반면에 인장신율은 더 작고, 제품의 가격은 장섬유 부직포가 상대적으로 고가이다.

국내의 경우 단섬유 부직포는 주로 폴리프로필렌(PP)을 원료로 제작하여 필터목적으로 사용되고, 필터기능 이외에 보강기능을 요하는 경우에는 인장강도 특성이 우수한 폴리에스터(PET) 장섬유를 주로 사용한다. 본 연구에서는 경제성과 안정성을 고려하여 Heibaum(1999)이 제시한 최소 중량기준과 동일한 500g/m²중량의 PP 단섬유 부직포와 PET 장섬유 부직포를 시험재료로 선정하였다. 앞서 언급했던 바와 같이, PP 단섬유 부직포는 경제성이 우수하고 PET 장섬유 부직포는 상대적으로 인장강도 특성이 우수하다.

지오백용 토목섬유는 사용 환경조건에서 안정된 상태를 유지해야 하며, 용도에 적합한 강신도를 가져야 한다. 또한 장기간 안정을 위해 박테리아 등의 미생물과 자외선, 화학약품 등에 의한 물성의 변화가 없어야 하고, 채움재의 유출을 방지할 수 있는 필터기능을 갖추어야 한다(한국건설기술연구원, 2004). 따라서 본 연구에서는 표 2에 나타낸 바와 같은 일련의 재료시험을 수행하여 선정된 부직포의 안정성을 평가하고자 하였다.

표 2. 부직포 재료시험 항목

시험항목		시험법 규정	시험항목		시험법 규정
강도특성시험	광폭인장강도시험	ASTM D 6637 ISO 10319	내구성시험	내후성시험	ASTM D 5970
	스트립인장강도시험	ASTM D 5035		내화학성시험	ASTM D 5322
	그래브인장강도시험	ASTM D 4632 KS K 0743		내미생물성시험	GRI-GG4
	인열강도시험	ASTM D 4533 KS K 0796	수리학적 특성시험	유효입경시험	ASTM D 4751 ISO 12956 KS K 0754
	깨끗림강도시험	ASTM D 4883			
	봉합강도시험	ISO 10321			

2.3 부직포의 재료시험 결과

2.3.1 인장강도시험

지오백용 부직포의 인장강도특성을 평가하기 위하여 스트립법, 그래브법 및 광폭인장강도시험을 수행하였다. 그래브법은 시험규정에 따라 다소 차이는 있으나 보통은 폭이 100mm, 길이가 150mm인 시험

편을 25.4mm의 클램프로 잡아서 시험한다.

표 3에 정리한 인장강도 시험결과는 시험법에 따라 각각 7회 이상씩 인장강도시험을 수행하여 결과가 상이한 2회의 시험결과를 제외하고 5개의 시험결과를 평균하여 나타낸 최대 인장강도 및 인장변형률이다. 여기서, MD는 주방향(Machine Direction), CD는 부방향(Cross Machine Direction)에 대한 시험결과이고, T와 ϵ 는 각각 인장강도와 변형률을 의미한다. 시험결과에서 알 수 있는 바와 같이 PET 장섬유 부직포만이 MD 및 CD 모두 표 2에 나타낸 Heibaum의 최소인장강도기준 2.55t/m(25kN/m)를 만족하는 것으로 평가되었다.

한편, 표 3에서 각 시험법별로 산정된 인장강도를 비교해 보면, 광폭인장강도와 스트립인장강도는 대체로 유사한 반면에 단위 m당으로 환산한 그레브인장강도는 광폭인장강도에 비해 대략 2.3배~2.9배 큰 것으로 나타났다. 그러나 통상 그레브인장강도는 필터 및 기반보강용으로 사용되는 부직포의 인장특성을 평가하기 위해 주로 사용되며, 본 연구에서와 같이 하상의 침식안정용 지오백의 인장강도 특성 평가에는 적합하지 않은 것으로 판단된다. 따라서 지오백용 부직포 선정시 그레브법에 의한 인장강도를 단위 m당으로 환산하여 적용하는 것은 안정성 측면에서 문제를 야기할 수 있으므로 주의해야 한다.

결론적으로 하상의 침식안정을 위한 적절한 지오백 재료는 Heibaum(1999)의 최소인장강도기준을 만족하는 PET 장섬유 부직포로 결정되었다.

표 3. 시험법에 따른 인장강도시험 결과

구 분		PP 단섬유 부직포		PET 장섬유 부직포	
		MD	CD	MD	CD
광폭인장강도	T_w (t/m)	1.86	1.15	4.86	3.11
	ϵ_w (%)	100.6	102.5	59.5	61.2
스트립인장강도	T_s (t/m)	-	1.20	4.72	-
	ϵ_s (%)	-	110.4	57.4	-
그레브인장강도	T_g (kg/in)	112.8	83.3	325.1	212.4
	T_g (t/m)	4.44	3.28	12.8	8.56
	ϵ_g (%)	118.4	131.2	101.1	75.4

2.3.2 인열강도시험 및 꿰뚫림강도시험

지오백의 내부 채움재로 모래 대신 쇄석 등을 사용할 경우 지오백 운반 및 거치 중에 쇄석 등의 모서리 부분에 의한 지오백의 손상이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 손상에 대한 저항력을 평가하기 위해 선정된 지오백용 부직포에 대한 인열강도시험 및 꿰뚫림강도시험을 수행하였다. 인열강도시험은 토목섬유를 폭 7.7cm × 길이 15.4cm로 재단한 후 길이방향 중간 부분을 폭방향으로 1.5cm 깊이로 절단한 후, 절단되어 있는 부분에 인장하중을 가함으로써 사전에 손상되어 있는 지점에 어느 정도의 힘이 가해졌을 때 찢겨지는지를 평가할 수 있다. 꿰뚫림강도시험은 직경이 7.5cm인 원형으로 시료를 재단한 후 직경 5mm의 봉으로 꿰뚫림강도를 측정하게 된다.

표 4의 인열강도시험 및 꿰뚫림강도시험 결과에서 알 수 있는 바와 같이, 인장강도시험결과와 마찬가지로 PET 장섬유 부직포의 인열강도 및 꿰뚫림강도가 PP 단섬유 부직포에 비해 대략 2배 이상 큰 것으로 나타났다. 또한 인장강도시험결과 Heibaum의 최소 인장강도기준을 만족하는 것으로 판명된 PET 장섬유 부직포의 경우, 인열강도가 강도가 약한 CD 방향에 대하여 75.4kg으로 나타났고, 꿰뚫림강도는 100.5kg으로 나타나, 지오백의 운반 및 거치 시 발생할 수 있는 지오백의 손상과 이로 인한 보호공의 안정성은 크게 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

표 4. 인열강도시험 및 꿰뚫림강도시험 결과

구 분	PP 단섬유 부직포		PET 장섬유 부직포	
	MD	CD	MD	CD
인열강도 (kg)	53.8	32	101.1	75.4
꿰뚫림강도 (kg)	43.6		100.5	

2.3.3 내구성시험

토목섬유의 내후성시험은 토목섬유가 흙 속에 묻혀 있지 않고 자연광 혹은 인공광원에 노출되어 있는 경우 인장강도 특성 변화를 평가하기 위한 시험으로 건물옥상에 토목섬유를 방치시키고 시간 경과에 따라 시료를 채취하여 광폭인장강도시험을 실시하고 원시료의 인장강도와 비교하였다. 그림 2는 태양광선, 바람, 강우, 기온 등에 대한 내후성을 평가하기 위하여 옥외에 일정시간 동안 방치한 시료를 대상으로 수행한 광폭인장강도시험 결과이다. 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이, 4개월 옥외 방치를 통한 내후성 시험 후 부직포의 인장강도는 PP 단섬유 부직포의 경우 대략 15%, PET 장섬유 부직포의 경우는 대략 14%의 인장강도 감소가 초래되는 것으로 나타났다. 따라서 지오백의 장기간 야외 노출시 강도손실 방지를 위한 자외선 차단 조치가 필요할 것으로 판단된다.

내미생물성시험(Biological Resistance Test)은 토목섬유 시공현장 주변의 세균이나 미생물이 토목섬유의 인장특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수행한다. 본 연구에서는 토목섬유의 내미생물성을 평가하기 위해 100cm×50cm×50cm 크기의 토조 내에 유기질이 풍부한 하수슬러지와 부직포를 채운 후, 시간 경과에 따라 시료를 채취하여 광폭인장강도시험을 수행하는 방법으로 부직포의 내미생물성을 평가하였다. 하수슬러지 사이에 묻은 채 방치한 후 시간경과에 따라 광폭인장강도를 측정된 결과는 그림 3과 같다. 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 하수슬러지에 매립된 부직포의 인장강도 손실은 4개월의 매립기간 동안 최대 4% 이내인 것으로 나타났다. 이러한 미소한 강도감소율은 제품편차 및 실험오차의 범위에 포함되므로 본 부직포의 내미생물성은 매우 우수한 것으로 판단할 수 있다.

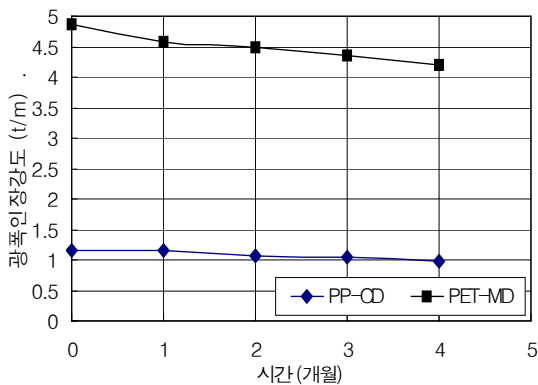


그림 2. 내후성시험

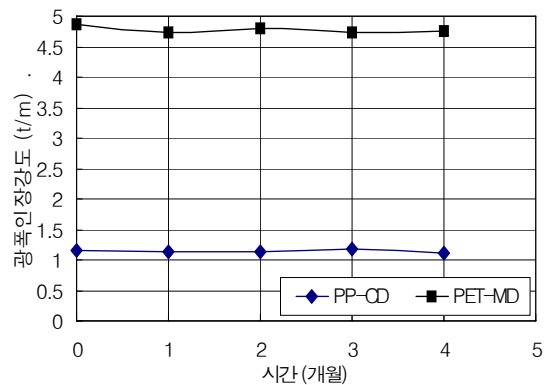


그림 3. 내미생물성시험

내화학성시험(Chemical Resistance Test)은 현장에 포설된 토목섬유 시료가 주위의 화학적 환경과 접촉되었을 때 토목섬유가 손상되는 정도 및 인장특성의 변화정도를 평가하기 위해 수행된다. 이 시험법은 ASTM D 5322-98 및 GRI-GG4(미국 Drexel 대학 토목섬유연구소의 시험방법)에 규격화되어 있다. 본 연구에서는 화학용액으로 강산성(pH=2), 약산성(pH=5), 중성(pH=7), 약알칼리성(pH=9) 및 강알칼리성(pH=13) 용액을 사용하였다. 온도조건은 23℃의 실온상태 및 50℃로 각각 유지하고 PP 단섬유와 PET 단섬유를 1, 2, 3, 4개월 침지시킨 후 1개월 간격으로 스트립인장강도를 측정하여 선정된 부직포의

내화학적 특성을 평가하였다. 그림 4는 온도조건 50℃의 PET 단섬유에 대한 실험결과이다. 실험결과 화학용액에의 침지시간 경과에 따라 부직포 시료의 인장강도감소율이 점차 증가하는 경향을 보이고, 이러한 경향은 침지온도를 50℃로 높게 유지한 경우에 더 명확하게 나타났다. 4개월 침지 후의 인장강도감소율은 약산성(pH=5) 및 중성(pH=7)에 대해서는 5% 이내로 안정적이고, 강산성(pH=2) 및 약알칼리성(pH=9)에 대해서는 최대 10% 정도까지 인장강도가 감소하는 것으로 나타나 이러한 영향을 고려한 지오백 공법 적용이 필요할 것으로 판단된다. 또한 강알칼리성(pH=13)에 대해서는 4개월 침지시 부직포 시료가 인장강도의 대부분을 상실하는 것으로 나타났다. 그러나 실제 지오백공법이 적용될 현장 상태에서는 강산성이나 강알칼리성에 지오백이 노출될 가능성이 거의 없으므로 내화학성으로 인한 문제는 발생하지 않을 것으로 판단된다.

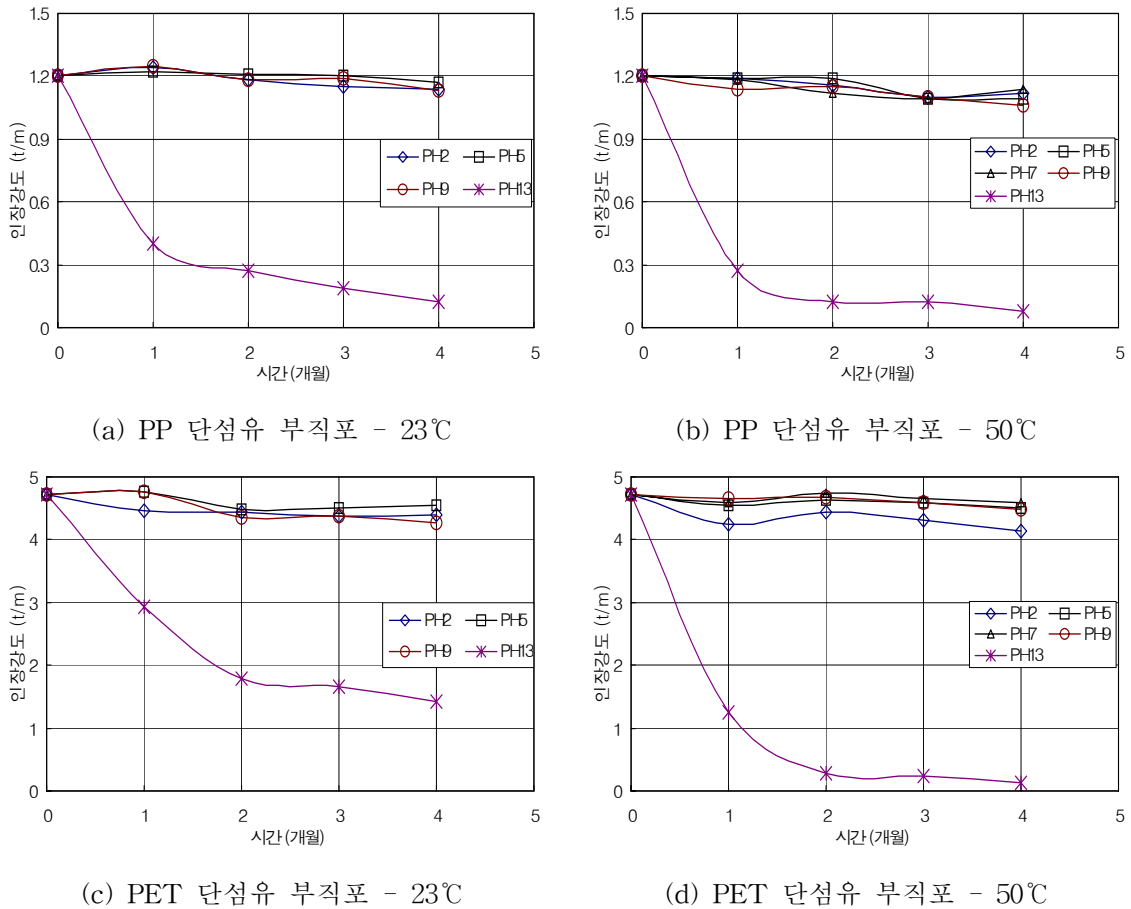


그림 4. 침지시간에 따른 인장강도 변화(내화학성시험)

2.3.4 수리학적 특성 시험

유효입경은 지오백의 채움재 선정 시 채움재의 입경 결정뿐만 아니라 지오백용 토목섬유의 필터기능을 평가하는데 중요한 요소가 된다. 토목섬유의 유효입경을 결정하는 방법에는 건식방법(ASTM D 4751), 습식방법(ISO 12956) 및 수리 동역학적 방법(KS F 2126)이 규정되어 있다. 본 연구에서는 ISO 12956 시험법(Effective Opening Size Test)을 준용하여 PP 단섬유 부직포와 PET 장섬유 부직포의 유효입경을 평가하였다(그림 5). 시험결과 PP 부직포와 PET 부직포의 유효입경 D90은 각각 106 μ m 및 89 μ m로 매우 작은 것으로 나타났다. 따라서 본 부직포를 지오백 재료로 사용할 경우 채움재의 유실로 인한 문제는 발생하지 않을 것으로 판단되며, 원지반 입자의 유출을 막는 충분한 필터효과를 가지는 것으로 보인다.

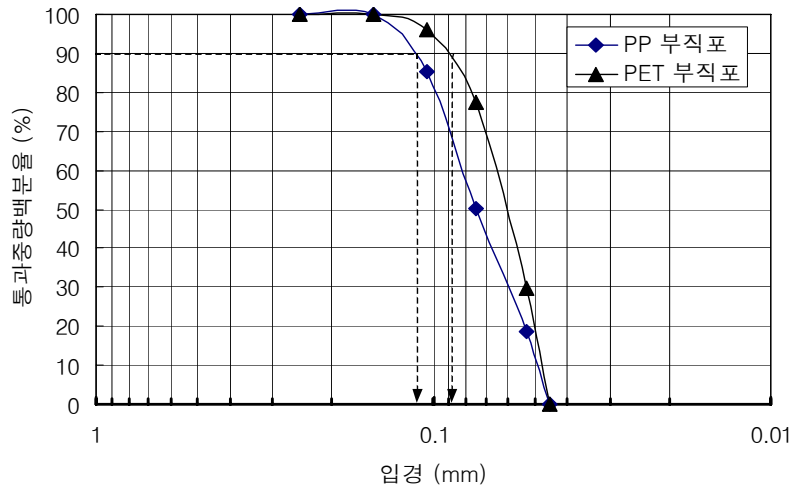


그림 5. 토목섬유 통과 시료의 입도 분포곡선

3. 재생골재 환경성평가

재생골재는 다양한 유기, 무기물을 함유하며 각 원소들은 물과 접촉할 경우 물 바깥으로 용출될 가능성을 가진다. 그러므로 재생골재를 재활용하고자 할 경우 재생골재내 원소들이 물에 녹아 수질 오염을 야기할 수 있는 정도를 반드시 확인한 후 현장에 적용하여야 한다. 특히 본 연구는 다양한 재활용 분야 중에서도 수십년 이상의 장시간을 물과 접촉하게 되는 세굴방지공용 골재로 재활용할 경우의 환경영향 평가이므로 재생골재의 원소용출특성을 정량, 정성적으로 분석하는 것이 가장 우선 연구되어야 할 것이다. 따라서 재생골재의 환경성평가에서는 1) 검증된 다양한 용출시험을 통하여 특정물질의 용출정도가 환경기준에 적합한지 여부를 평가하고, 2) 재생골재가 물과 접촉할 경우 다양한 물리, 화학 조건에 따른 용출특성을 규명하여 실제 현장에 적용할 경우 환경적으로 미칠 수 있는 영향을 정량적으로 판단하였다.

3.1 재생골재의 환경성 평가방법

일반적으로 용출시험의 목적은 1) 사용하고자 하는 물질이 환경기준에 적합한지의 판정, 2) 측정환경에서 잠재적 독성물질 방출가능성 평가, 3) 오염물질 이동성을 평가하기 위한 분배 및 동적변수 결정, 4) 야외에서의 실제 발생하는 용출량 측정 등이며, 미국 EPA의 TCLP(Toxicity Characteristic Leaching Procedure), 네덜란드의 가용용출시험(NEN 7341), 독일의 용출시험 등이 대표적인 것들이다. 네덜란드의 경우 비단 물과 지속적으로 접하는 것이 아니고 건물 외장재 등으로 사용할 경우에도 강우에 의해 일부 물질이 용출될 수 있음을 대비, 다양한 용출방법을 제정, 그 기준을 상정하고 있다. 용출시험은 크게 단기간에 이루어지는 회분식 시험(batch leaching test)과 비교적 장기적으로 이루어지는 주상용출(flow-through column test) 또는 라이시미터(lysimeter) 시험 등으로 구분할 수 있다.

고형폐기물의 용출특성을 평가할 때 가장 많이 사용하는 폐기물 공정시험법과 TCLP 방법은 저렴한 비용과 비교적 용이한 시험방법 등으로 단기간에 일어나는 영향을 정성적으로 평가할 수 있는 장점이 있으나 다양한 물리, 화학적 환경 변화에 따른 장기적이고 포괄적인 위해성 평가를 하기에는 제한이 많다. 이를 극복하기 위하여 본 연구에서는 다양한 환경에서의 용출반응을 모사할 수 있는 여러 가지 용출방법을 동시에 채택하여 보다 정량적이고 실제 현장에서 적용 가능한 모형을 도출하고자 하였다.

재생골재를 세굴보호공용 골재로 재활용할 경우 조건은 1) 물과 지속적으로 접촉하며, 2) 정지된 호수가 아닌 흐름이 있는 강수이므로 용출된 물질들은 축적되지 않고 희석, 확산된다. 그러므로 우선 가용용

출시험을 통하여 원소의 최대 용출 가능성을 구하였다. 이 때 원소용출 가능성 평가시 좀 더 가혹한 조건을 적용하기 위하여 재생골재를 125 μ m 이하 크기로 분쇄하였다. 입자 크기가 작을수록 단면적이 증가하여 더 많은 물질이 용출되기 때문이다. 분쇄시료를 이용한 가용용출시험과 함께 분쇄하지 않은 시료를 이용하여 연속회분식 시험도 실시하였다.

또한 하천수는 위치에 따라 다양한 pH를 띄며 또한 산성비나 주변 환경변화로 인한 하천수 자체의 pH 변화가 있을 것으로 예상되어 pH변화에 따른 용출특성변화를 알기 위하여 pH 유지 용출시험(pH-stat leaching test)을 시행하였다. 가용용출시험의 경우 입자크기를 조정하였으나 입자크기를 조정하지 않고 연속회분식 시험방법을 이용하여 다른 조건에서의 원소용출정도도 구하였다.

위 실험과 더불어 재생골재는 단일 괴상물질은 아니나 평균 입도가 크므로 (평균 5~10cm 이상) 물질의 용출은 표면적의 함수에 따른 확산영향을 많이 받을 것으로 판단된다. 따라서 장기간 물과 접촉할 때 표면확산에 따른 용출특성을 알아보기 위하여 탱크 확산시험(tank diffusion test) 방법을 이용하여 원소들의 누적용출특성을 알아보았다. 일반적으로 탱크 확산시험은 입자반경 40mm 이상부터 적용 가능하다.

3.2 재생골재의 환경성 평가결과

3.2.1 재생골재의 화학적 특성

재생골재의 화학조성은 표 5와 같다. 주원소중 Ca의 함량이 가장 높았으며, Mg, Fe, K, Na의 순서로 농도가 높았다. 미량원소로는 Zn 함량이 매우 높았으며 Cu, Pb의 함량이 비교적 높았다.

표 5. 재생골재의 화학조성 (단위: mg/kg)

Ca	Mg	Na	K	Cd	Pb	Cr
50800	2574	866	8720	7	33	<1ppb
Ni	Zn	Cu	As	Hg	Fe	
22	5852	17	<1ppb	<1ppb	3018	

3.2.2 연속 회분식 시험

증류수를 이용한 회분식 시험결과는 표 6과 같다. 연속회분식 시험은 세척, 비세척으로 나누어서 시행하였으며, 세척과정은 현장에서 골재 세척과정을 모사하여 흐르는 수돗물에 1분간 방치, 세척하였다. 실험결과 세척, 비세척 시료 모두에서 pH값은 10~11 사이로 높게 나타났다. 원소들의 농도는 세척하지 않은 시료중 특히 첫번째 용출 시료에서 차이가 날 수 있을 것으로 예상하였다. 즉, 입자 표면에 부착된 미립자들의 용해에 따라 초기 용출시 많은 원소가 용출될 경우 세척은 효과적인 오염저감 방법이 될 것이다. Ca, K, Na, Cl⁻, NO₃⁻가 비세척 시료에서 높은 초기 용출량을 보였으나 Mg와 SO₄²⁻의 경우 오히려 세척 시료에서 더 높은 농도를 나타내었다. 미량원소들의 경우 Cd, Cr는 비세척 시료에서 농도가 높으나 Ni, Cu는 세척시료에서 더 높은 농도를 보이며 Mn은 두 시료에서 비슷한 값을 보였다. 이러한 세척, 비세척 시료간의 차이는 원소 위치에 좌우될 것으로 판단된다. 즉, 표면에 분포한 경우라면 세척 여부에 따라 차이가 날 것이나 표면보다 안쪽에 분포한 경우라면 용출이 진행됨에 따라 더 많은 원소들이 방출될 수 있을 것이다.

표 6. 연속회분식 시험 결과 (비세척/세척, 단위: mg/ℓ, 전기전도도: μS/cm)

N*	Ca	Mg	Na	K	Cd	Pb	Cr	Al
1	17.6/9.1	0.05/0.16	12.2/18.3	22.2/20.6	0.01/<1 ppb	<1ppb/<1ppb	0.009/0.007	0.06/0.14
2	18.4/10.1	0.05/0.10	4.3/5.5	13.4/13.2	0.02/<1ppb	<1ppb/<1ppb	0.004/0.007	0.04/0.07
3	17.3/11.5	0.05/0.09	2.7/3.6	10.1/10.6	0.02/0.01	<1ppb/<1ppb	0.003/0.003	0.11/0.19
4	19.3/11.5	0.05/0.08	2.0/2.8	8.2/8.8	0.03/0.01	<1ppb/<1ppb	0.003/0.002	0.10/0.10
	Ni	Zn	Cu	As	Hg	Fe	Mn	
1	0.007/0.071	<1ppb/0.006	<1 ppb/0.437	<1ppb/<1ppb	<1ppb/<1ppb	<5 ppb/<5ppb	0.17/0.16	
2	0.009/0.080	<1ppb/<1ppb	<1 ppb/0.032	<1ppb/<1ppb	<1ppb/<1ppb	<5 ppb/<5ppb	0.17/0.16	
3	0.009/0.083	<1ppb/<1ppb	<1 ppb/0.030	<1ppb/<1ppb	<1ppb/<1ppb	<5 ppb/<5ppb	0.17/0.17	
4	0.011/0.077	<1ppb/<1ppb	<1 ppb/0.021	<1ppb/<1ppb	<1ppb/<1ppb	<5 ppb/<5ppb	0.18/0.17	
	pH	Conductivity	F ⁻	Cl ⁻	NO ³⁻	PO ³⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ³⁻
1	11.14/10.64	418.0/270.5	1.1/1.1	6.7/3.1	6.2/4.7	0.14/<10ppb	28.2/31.9	52.6/67.1
2	11.30/10.67	309.0/180.3	0.3/0.2	2.1/0.3	1.8/1.2	<10 ppb/<10ppb	5.3/7.7	39.2/38.9
3	11.20/10.68	325.0/178.6	0.2/0.2	1.3/0.5	0.9/0.7	<10 ppb/<10ppb	3.2/5.2	31.7/31.6
4	10.94/10.54	292.5/176.4	0.1/0.1	1.2/0.31	0.8/0.5	<10 ppb/<10ppb	2.9/2.9	29.1/28.2

[주] * 용출횟수

원소의 용출은 원소의 위치 뿐 아니라 원소자체의 용출도 영향을 받는다. 연속회분식 시험에서 용출 횟수에 따른 원소들의 용출과정은 용출횟수에 따라 농도가 1) 증가 (Ca, Cd, Ni)하거나 2) 초기에 최대 농도를 기록한 후 감소(Mg-세척, Na, K, Cr-세척, Cu-세척, F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)하는 경우, 그리고 3) 비교적 일정 농도를 유지하는 경우(Mn)로 구분된다. 용출횟수에 따라 원소농도가 급격히 감소하는 경우 원소들은 재생골재 표면에 주로 분포하며 이들은 용출 초기 이후 농도가 감소하므로 세척 등의 전처리 과정을 통하여 환경영향을 저감할 수 있을 것으로 판단된다. 반면 용출횟수가 증가하면 오히려 농도가 증가하거나 일정 농도를 유지하는 경우는 원소가 입자표면이 아닌 내부에 존재하거나 또는 원소의 용해도를 제한하는 고형물에 의해 평형농도를 유지하기 때문으로 생각된다. 원소용출 제어 고형물질은 지구 화학 모델링을 통해 구할 수 있다. 이같이 원소의 위치는 용출행태에 영향을 미치는 1차 요인이 되며 세척에 의한 저감 효과는 표면분포 원소에만 효과적일 것이다.

3.2.3 가용용출시험

가용용출시험은 용출 가능한 최대치를 산출하기 위한 시험이다. 대부분의 원소들이 회분식 시험 결과 보다 높은 농도를 보였다(표 7). 특히 Ca, Mg, Na와 Ni, Pb, Zn, Fe 등의 함량이 높은 반면 K, As, Hg, Mn, S, Cl, F 등은 회분식 시험에서 더 많이 용출되었다. 그러나 두 시험 모두 미량원소들의 경우 일부 원소를 제외하고는 대부분 농도가 분석한계 이하의 매우 낮은 값을 나타내었으며, 특별히 유의를 요할 정도로 과다 용출되는 원소는 없었다.

표 7. 가용용출시험 결과 (단위: mg/ℓ)

Ca	Mg	Na	K	Cd	Pb
209.60	2.71	28.1	35.6	<1ppb	0.01
Ni	Zn	Cu	As	Hg	Cr
0.12	0.95	<1ppb	<1ppb	<1ppb	<1ppb
Fe	Mn	F ⁻	Cl ⁻	PO ₃	SO ₄ ²⁻
0.13	<5 ppb	0.10	1.34	0.15	9.23

3.2.4 pH 유지 용출시험

미량원소를 포함한 금속원소들의 용해정도는 pH에 큰 영향을 받는다. 재생골재 이용한 시험에서도 pH 변화에 따라 용출도가 급격히 변화함을 보였다(표 8). 그러나 이 때 용출된 최대 용출농도 역시 국내 폐기물 용출시험이나 토양공정시험법 등의 기준에 못 미치는 낮은 농도를 나타내었다. 물론 실험 조건이 다르긴 하나 본 연구에서 채택한 시험방법들은 자연상태에서 일어날 수 있는 최악의 조건을 가정 한 방법이므로 모두 시간, 용출조건 등이 더 가혹하며, 가용용출시험과 pH 유지 용출시험 결과를 바탕으로 재생골재가 자연수와 접촉할 경우의 중금속 용출농도는 우려할 수준 이내일 것으로 판단된다.

표 8. pH 유지 용출시험 결과 (단위: mg/L, pH: no unit)

pH	Ca	Mg	Na	K	Cd	Pb	Cr
4	580.6	3.0	17.0	48.1	0.01	0.14	<1ppb
5	276.0	0.3	20.5	493.5	0.01	0.04	<1ppb
5.5	557.3	4.9	147.8	35.3	0.02	0.01	<1ppb
7	1003.3	23.8	26.8	75.4	0.02	0.04	<1ppb
8	977.3	22.8	17.1	85.4	0.03	<1ppb	<1ppb
9	666.6	4.8	21.2	63.2	0.04	<1ppb	<1ppb
10	555.6	2.3	32.1	57.7	0.00	<1ppb	<1ppb
11	292.4	0.3	6.8	40.0	0.01	<1ppb	<1ppb
12	172.9	0.1	23.0	48.1	0.02	<1ppb	<1ppb
pH	Ni	Zn	Cu	As	Hg	Fe	Mn
4	0.16	0.08	0.02	<1ppb	<1ppb	0.30	<5ppb
5	0.15	0.07	0.02	<1ppb	<1ppb	0.13	<5ppb
5.5	0.14	0.08	0.01	<1ppb	<1ppb	0.12	<5ppb
7	0.29	0.08	0.01	<1ppb	<1ppb	0.13	<5ppb
8	0.38	0.08	0.01	<1ppb	<1ppb	0.07	<5ppb
9	0.14	0.08	0.06	<1ppb	<1ppb	0.11	<5ppb
10	0.14	0.09	0.05	<1ppb	<1ppb	0.13	<5ppb
11	0.16	0.09	0.04	<1ppb	<1ppb	0.03	<5ppb
12	0.15	0.09	0.05	<1ppb	<1ppb	0.06	<5ppb

3.2.5 탱크 확산시험

총 64일에 걸쳐 반응 시킨 결과 반응기간에 따라 원소용출이 감소하는 경우와 일정한 경우 그리고 약간씩 증가하는 3가지 경우를 각각 나타내었다(표 9). 전자의 경우는 원소가 입자 표면에 주로 분포하여 물과 접촉하는 초기에 용출되어 점차 고갈되는 경우로 생각할 수 있으며, 일정한 것은 확산에 의해 원소 용출이 조정되는 것으로 판단된다.

각 원소들의 용출특성을 분류하면 1) 표면용출 : Na, Ni, NO³⁻, Cl⁻, 2) 용출가능 부분의 고갈 : Mg, K, Cu, Hg, Pb, 3) 확산용출 : Ca, Fe, F⁻, SO₄²⁻ 그리고 4) 용출조건의 변화 : Zn 등으로 나눌 수 있다. 대부분의 미량중금속들의 원소농도가 낮아 시간에 따른 누적 용출 특성 파악이 어려웠다.

탱크확산시험에서 SO₄²⁻를 제외한 대부분의 원소들이 가용용출시험에서 용출된 농도보다 훨씬 낮은 농도를 보였으며 이는 현재 수행된 각종 시험에서 용출된 결과 이상의 원소들이 용출될 수 있음을 의미한다. 그러나 환경적으로 위해성을 가지는 미량원소 (중금속 포함) 들의 경우 여전히 농도가 낮으며 주 원소에 비해서는 가용용출시험 결과에 거의 육박하는 양이 용출됨을 알 수 있어 재생골재의 용출로 인한 오염가능성은 매우 낮다고 판단된다.

표 9. 탱크 확산시험을 통한 확산용출 결과 용액농도 (단위: mg/L, conductivity: mS/cm)

Duration(hr)	Ca	Mg	Na	K	Cd	Pb	Cr
8	14.49	0.30	4.72	26.67	<1ppb	0.015	<1ppb
24	12.66	0.13	2.59	43.09	<1ppb	<1ppb	<1ppb
56	18.97	0.17	1.88	38.23	<1ppb	<1ppb	<1ppb
96 (4 days)	0.78	0.06	7.05	31.56	<1ppb	<1ppb	<1ppb
216 (9 days)	6.11	0.07	1.65	12.99	0.021	<1ppb	<1ppb
384 (16 days)	23.87	0.07	6.95	13.73	0.029	<1ppb	<1ppb
864 (32 days)	22.65	0.04	2.07	12.40	0.019	<1ppb	<1ppb
1536 (64 days)	54.89	0.01	1.32	7.42	0.023	<1ppb	<1ppb
	Ni	Zn	Cu	As	Hg	Fe	Mn
8	0.108	0.062	0.079	<1ppb	0.004	0.08	<5ppb
24	0.100	<1ppb	0.064	<1ppb	0.005	0.10	<5ppb
56	0.140	<1ppb	0.090	<1ppb	0.004	0.19	<5ppb
96	0.052	0.035	0.038	<1ppb	0.004	0.15	<5ppb
216	0.135	0.057	0.051	<1ppb	<1ppb	<5ppb	<5ppb
384	0.098	0.040	0.045	<1ppb	<1ppb	<5ppb	<5ppb
864	0.164	0.025	<1ppb	<1ppb	<1ppb	<5ppb	<5ppb
1536	0.168	0.024	<1ppb	<1ppb	<1ppb	<5ppb	<5ppb
	pH	Conductivity	F ⁻	Cl ⁻	NO ³	PO ³	SO ⁴
8	9.78	84.1	0.02	1.12	4.37	0.30	21.88
24	9.42	33.5	0.02	0.66	1.85	<10ppb	13.83
56	9.19	23.2	0.06	0.70	1.82	<10ppb	16.27
96	9.29	22.3	0.01	0.40	0.84	<10ppb	9.00
216	9.26	80.5	0.01	0.32	0.75	<10ppb	9.63
384	8.97	105.6	0.01	0.35	0.50	<10ppb	8.66
864	9.28	48.7	0.02	1.23	0.41	<10ppb	10.31
1536	9.42	33.5	0.01	0.13	0.59	<10ppb	10.00

4. 결론

본 연구에서는 페콘크리트를 재활용한 재생골재를 채움재로 사용한 지오백 세굴보호공법의 개발을 위하여 지오백 세굴보호공법에 사용되는 토목섬유와 재생골재에 대한 재료실험 및 안정성 평가를 실시하고 다음과 같은 결론들을 도출하였다.

- (1) Heibaum(1999)이 제시한 세굴방지용 토목섬유의 재료특성에 기준으로 국내에서 생산되는 4종의 부직포(PP 장섬유, PP 단섬유, PET 장섬유, PET 단섬유)를 선정하여 재료시험 및 수리학적 특성시험을 실시한 결과 PET 장섬유 부직포가 물리적 특성, 수리학적 특성, 화학적 특성 등이 가장 우수한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 개발한 지오백 세굴보호공법에 사용되는 지오백의 재료는 PET 장섬유 부직포가 가장 적합한 것으로 판단되며, 골재 채움이나 운반시 지오백 이음부의 안정성을 높이기 위하여 PET 장섬유 부직포보다 인장강도가 큰 고강력 재봉사를 사용하여 견고하게 재봉하는 것이 중요하다.
- (2) 다양한 시험방법을 이용한 시험결과를 볼 때 재생골재는 물과 접촉할 경우 환경위해성이 큰 미량원소들의 용출로 인한 수질오염 가능성이 매우 낮다고 판단된다. 적용한 시험방법에 따라 원소의 용출 범위는 다양하나 그 농도는 본 연구에서 채택한 실험보다 훨씬 덜 가혹한 조건에서 수행되는 TCLP 또는 폐기물 공정시험법의 기준에 못 미친다. 또한 본 실험에서 적용된 물과 재생골재의 비율이 3:1에서 100:1의 범위를 지나 실제 현장이 물이 흐르는 하천일 경우 물과 고체의 비율이 이보다 훨씬 커지며 거의 무한대에 이를 것으로 예상된다. 따라서 용출된 원소들 역시 하천수에서 분산, 이동하

며 희석될 것으로 예상된다. 다만 재생골재의 높은 pH은 우려할 만한 환경위해요소라고 판단된다. 그러나 물:재생골재 비율이 3:1이었던 연속회분식 시험에서 11 이상을 보이던 pH는 비슷한 물:폐기물 비율(5:1)인 tank test에서 9 정도로 떨어지는 것을 보였다. 이는 전자의 경우 360° 교반시키는 실험이었으나 후자는 교반없이 그대로 방치하는 차이가 있으며, 하천수에 세굴방지용 골재로 사용하는 경우 인위적인 교반과 마찰이 없으므로 실제 현장에서는 pH가 낮아질 가능성이 높다. 또한, 주 pH 공급원인 Ca와 S는 다른 원소에 비해 천천히 고갈되며 확산에 의해 용출이 제어되는 특성을 가지므로 pH는 비교적 완만하게 감소할 것으로 생각된다.

- (3) 재생골재를 지오백 세굴보호공의 채움재로 활용할 때 야기될 수 있는 환경문제 중 미량원소의 용출로 인한 환경위해성은 극히 낮아 보이며, 재생골재의 사용이 타당성을 가질 것으로 생각된다. 다만 환경기준에는 제시되지 않으나 Ca, Mg 등이 다량 용출될 때 이러한 무기염류로 인한 수생생태계 안전성 평가에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 지오백으로 사용되는 토목섬유의 필터효과에 의해 하상입자의 유출을 방지하여 세굴보호공의 파괴 가능성이 감소됨으로써 교량의 안정성을 증대시킬 것으로 판단되며, 향후 수리모형실험 및 현장 적용성 실험을 통하여 이에 대한 명확한 규명이 필요하다.
- (5) 본 연구에서 개발한 재생골재를 채움재로 이용한 지오백 공법은 폐콘크리트를 재활용하는 친환경적인 공법으로 천연사석에 비해 매우 저렴한 재생골재를 이용함으로써 국가적 차원의 예산절감이 기대되며, 양질의 골재가 절대적으로 부족하고 건설폐기물 발생량이 점점 증가하는 국내 현실을 고려해 볼 때 자원절약 및 자원재활용 측면에서 효과적인 공법으로 판단된다. 또한 기존 교량의 세굴로 인한 피해 대책 및 신설교량의 세굴보호공에 모두 활용 가능함으로써 교량의 세굴방지를 위한 합리적인 대안을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 강성호, 이상훈, 광기석, 이주형, 정문경 (2005), “용출특성규명을 통한 재생골재 환경성 평가”, 대한환경공학회지, 27권 3호, pp.293-301.
2. 한국건설기술연구원 (2006), 교량기초 장수명화 기술 개발, 연구보고서
3. Briaud, J.L., Ting, F., Chen, H.C., Gudavalli, S.R., Perugu, S. and Wei, G. (1999), “SRICOS: Prediction of Scour Rate in Cohesive Soils at Bridge Piers,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.125, No.4, ASCE, Reston, Virginia, U.S.A., pp.237-246
4. Heibaum, M.H. (1999), “Scour Countermeasures Using Geosynthetics and Partially Grouted Riprap”, Federal Waterways Engineering and Research Institute(BAW), Karlsruhe, Germany, proceeding of the Transportation Research Board, 5th International Bridge Engineering Conference, April 3-5, 2000, Tampa, FL.