

폐콘크리트 순환골재의 단입자 파쇄 특성

Crushing Characteristics of Single Particle of Recycled Aggregate from Waste Concrete

박 성 식¹ Park, Sung-Sik
김 상 중² Kim, Sang-Jung
문 홍 득³ Moon, Hong-Duk

Abstract

A single particle crushing test was carried out for recycled aggregates from waste concrete while demolishing various structures. When the recycled aggregates were used for backfill or road subbase materials, load-displacement and crushing characteristics were analyzed. The recycled aggregates with hydrates and aggregates were sorted into 40 mm size (75-40 mm) and 20 mm size (40-20 mm). At initial loading, their irregular surface was closed to and then crushed by loading plate. Such first crushing stage was called 'Surface crushing'. Further loading, some hydrate was crushed and detached from aggregate, and such process repeated several times. This state is called 'hydrate crushing'. The final state is called 'aggregate crushing' in which aggregate crushed and following load suddenly dropped down. As the load increased, such crushing cycle is repeated several times. The shapes of aggregates are round or square, and triangle or long shaped. Depending on their shapes and surface conditions, they crushed in different ways. The 63% of aggregates showed more than 50% load reduction due to aggregate crushing. The 90% load reduction occurred at 15% of aggregates. The 40 mm aggregate crushed at maximum load between 3.05-4.38 kN and 70% of crushed aggregates were less than 20 mm.

요 지

본 연구에서는 각종 구조물 철거 시 발생하는 폐콘크리트를 파쇄 처리하여 발생한 순환골재를 각종 토공 및 보조기층용에 재활용 시 발생할 수 있는 하중-변위 및 파쇄 특성을 분석하기 위해 단입자 파쇄실험을 실시하였다. 수화물과 골재로 구성된 75mm 이하의 순환골재를 40mm 크기(75-40mm 사이)와 20mm 크기(40-20mm 사이)의 골재로 나누어 실험하였다. 순환골재에 하중이 증가할 경우 단입자의 파쇄 거동은 불규칙한 표면이 가압판에 밀착되면서 초기에 표면이 파쇄되는 '표면파쇄(Surface crushing)', 표면파쇄 이후 골재와 수화물이 분리되는 소규모 부분적 파쇄와 균열이 반복적으로 발생하는 '수화물파쇄(Hydrate crushing)', 수화물파쇄가 단계적으로 반복되다가 최대하중에서 골재가 파쇄되면서 하중이 급격히 감소되는 취성과괴인 '골재파쇄(Aggregate crushing)'의 순서로 파쇄 사이클(crushing cycle)이 진행되었다. 한편, 하중이 지속적으로 증가함에 따라 이러한 파쇄 사이클은 수 차례 반복되는 경향을 보였다. 순환골재의 형상은 둥글거나 사각형에 가깝거나, 삼각형 또는 길쭉한 형태로 표면상태나 형상에 따라 파쇄 형상이 다르게

1 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Eng., Kyungpook National Univ.)

2 비희원, 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 박사수료 (Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Eng., Kyungpook National Univ.)

3 정희원, 경남과학기술대학교 건설환경공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Gyeongsang National Univ. of Science and Technology, Tel: +82-55-751-3296, hmoon@gntech.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

나타났다. 골재파쇄(최대 파쇄)에서 취성파괴로 하중이 감소되는 비율인 파쇄하중 감소율은 50% 이상인 경우는 63% 정도이며, 90% 이상인 경우도 15% 정도로 나타났다. 40mm 단입자는 최대하중 3.05~4.38kN 정도에서 대부분 파쇄되어 작은 입자로 분리되며, 세립화된 단입자 개수를 기준으로 20mm 이하의 분포비율은 약 70% 정도였다.

Keywords : Recycled aggregate, Crushing, Hydrate, Strength

1. 서론

최근 콘크리트 제품에 순환골재를 사용하기 위한 다양한 연구(Lee et al., 2015; Kim, 2014b; Shin et al., 2015; Lee et al., 2016)가 수행되고 있다. Kim et al. (2014b)은 순환골재로 고로슬래그를 경화시키기 위한 자극제로 활용하는 연구를 수행한 바 있으며, 일부 연구자(Kim, 2016; Song et al., 2011; Lee et al., 2011)는 순환골재의 pH 특성이나 저감방안에 관해 연구하기도 하였다. 이와 같이 순환골재를 콘크리트 제품에 골재로 사용하기 위한 연구가 대부분이지만, Park et al.(2011), Wi et al.(2011), Kwon et al.(2013), Kang et al.(2015)은 순환골재를 옹벽 뒤채움재나 각종 관로 되메움 토사나 보조기층재로 사용하기 위한 다짐이나 열전달 특성을 연구한 바 있으며, Yoon et al.(2008)이나 Lee et al.(2008)은 연약지반 개량용으로 사용하기 위한 연구를 수행하기도 하였다.

순환골재를 도로 포장재료나 뒤채움재로 사용시 현장 다짐에 의한 외부하중으로 순환골재는 파쇄되어 작은 입자로 분리되며, 분리된 입자간에 발생하는 엇물림(Interlocking)으로 다시 작은 조각으로 세립화된 입자들은 간극을 메우게 된다. 지금까지 파쇄와 관련된 연구는 대부분 화강풍화토나 모래 그리고 각종 껍질류와 같은 탄산염이 포함된 탄산질 모래를 대상으로 단입자 파쇄 실험(Ham and Kim, 2008; Ham et al., 2004; Kwak, 1999; McDowell and Bolton, 1998)을 수행하거나, 각종 압축 및 전단시험을 수행한 사례이다(Kim, 2014a; Kim et al., 2014a; Lade et al., 1996; Lee and Farhoomand, 1967; Nakata et al., 2001). 또한 이러한 실내시험에서 관찰된 입자 파쇄 거동을 개별요소법과 같은 수치해석으로 해석한 사례도 다수 있다(Cho, 2009; Jeong, 2010;

Jeong et al., 2010; Lobo-Guerrero and Vallejo, 2005). 하지만, 콘크리트를 파쇄 처리하여 생산된 순환골재의 단입자 파쇄 형태나 특성에 관한 연구 사례는 거의 없는 실정이며, 이러한 단입자의 미시적인 거동을 분석함으로써 각종 토목현장에 사용되는 순환골재의 거시적인 거동을 예측할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 국내에서 폐콘크리트를 파쇄 처리하여 생산된 순환골재 단입자에 대한 파쇄 과정이나 반복적으로 이루어지는 파쇄 사이클을 분석하고, 국내 순환골재의 파쇄하중이나 파쇄로 인한 하중 감소율과 같은 파쇄 특성을 구하고자 하였다. 본 연구를 위해 울산 지역에서 순환골재를 무작위로 채취하였으며, 자연 건조된 상태에서 체가름하여 분류된 단입자에 대하여 일축압축시험기를 이용하여 순환골재의 단입자 파쇄실험을 실시하였다. 본 연구에서 ‘단입자’라 함은 폐콘크리트 파쇄 과정에서 최종적으로 생산된 하나의 순환골재로 천연 골재와 주변 수화물로 이루어진 입자를 일컫는다.

2. 단입자 파쇄실험

2.1 재료 특성

본 연구에서 사용한 순환골재는 울산지역의 순환골재생산지에서 채취하였으며, 건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률 규정에 근거 “순환골재 품질기준”(국토교통부, 2013)의 도로보조기층용(Road subbase)으로 적합한 시료로서 순환골재의 물성치는 Table 1과 같이 조성지수 NP, 수정 CBR 87%, 마모감량 19%, 모래당량 57%, 액성한계 NP, 최적함수비 7.3%, 그리고 최대건조밀도 19.81kN/m³이다.

Table 1. Material properties of recycled aggregate for road subbase (RSB)

Plasticity	Mod. CBR	Abrasion loss	Sand equivalent	Optimum water content	Max. dry density
N.P	87%	19%	57%	7.3%	19.81 kN/m ³

2.2 재료 규격 및 형상

건설현장에서 순환골재는 도로 보조기층재 포설 및 다짐 시 건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률 규정에 근거하여 순환골재 품질기준에 적합한 골재를 사용하여야 하며, 품질기준에 적합한 순환골재에 함유되어 있는 단입자의 파쇄 거동을 분석하기 위하여 골재 형상 및 크기와 관계없이 무작위로 채취하여 자연건조된 상태에서 골재의 체가름시험을 실시하였다. 체가름시험 결과 순환골재의 단입자 구분은 체가름시험 결과 40mm를 통과하고 20mm체에 잔류한 입자를 ‘20mm 단입자’, 75mm를 통과하고 40mm체에 잔류한 입자를 ‘40mm 단입자’로 분류하였으며, 20mm 단입자와 40mm 단입자를 각각 RSB 20, RSB 40으로 표시하여 시료를 각각 80개 이상씩 준비하였다. 단입자 크기가 20mm 이하인 경우 대부분의 순환골재가 굵은골재 또는 모르타르로 하나의 성분으로 구성되어 있다. 따라서 굵은골재, 잔골재, 시멘트가 함께 포함된 일반적인 단입자의 파쇄 특성을 분석하기에는 부적합하여 굵은골재와 모르타르가 혼합되어 있는 20mm 이상의 단입자를 실험 대상으로 하였다. 본 연구에 사용한 순환골재의 단입자 형상은 육안으로 Fig. 1과 같이 (i) 둥글거나(Type 1), (ii) 사각형에 가까운 형상(Type 2), (iii) 삼각형에 가까운 형상이거나(Type 3), (iv) 폭에 비하여 길이가 긴 형상(Type 4)으로 분류할 수 있으며, 일부 매우 불규칙한 형상의 단입자도 존재하였으나 본 실험에서는 제외하였다.

단입자의 무게는 입자 크기에 따라 RSB 20은 7~25g, RSB 40은 30~130g으로 다양하며, 여러 가지 불규칙한

모양과 크기를 보이고 있다. 둥글거나 사각형에 가까운 형상의 단입자는 입자표면이 가압판과 닿는 부분에 빈공간이 적어서 하중 작용 시 둥글거나 편평한 부분이 가압판에 밀착되기 쉬운 형상이다. 삼각형에 가까운 형상의 단입자는 꼭지점이 있는 부분은 가압판에 빨리 닿으면서 하중이 작용하고 꼭지점의 반대면은 가압판과 밀착되지 않고 공간이 있는 형태이며, 폭에 비하여 길이가 긴 형상의 단입자는 상, 하부면이 불규칙하게 휘어져 있거나 구부러져 있어서 가압면에 밀착되지 않고 공간이 떠있는 형상이 많다.

3. 단입자 파쇄실험 결과

순환골재의 단입자 파쇄실험은 두 종류의 단입자 RSB 20(20-40mm)과 RSB 40(40-75mm)을 일축압축시험기를 이용하여 1mm/min의 일정한 재하속도로 압축하여 실험을 진행하였다. 본 연구에서는 강도가 서로 다른 수화물과 천연골재로 이루어진 복합재료인 순환골재의 기본 파쇄 과정이나 주기적으로 반복되는 파쇄 사이클을 관찰하고 일정한 경향을 찾아내기 위해 재하속도를 일정하게 유지하였다. 하중 증가에 따른 단입자의 기본 파쇄 과정을 비롯하여 단입자의 표면상태나 형상에 따른 하중-변위 및 파쇄 형태는 다음과 같다.

3.1 순환골재의 기본 파쇄 과정

본 연구에서 수행한 수화물과 골재로 구성된 단입자의 파쇄 특성 또는 기본 파쇄 과정(mechanism)은 Fig.

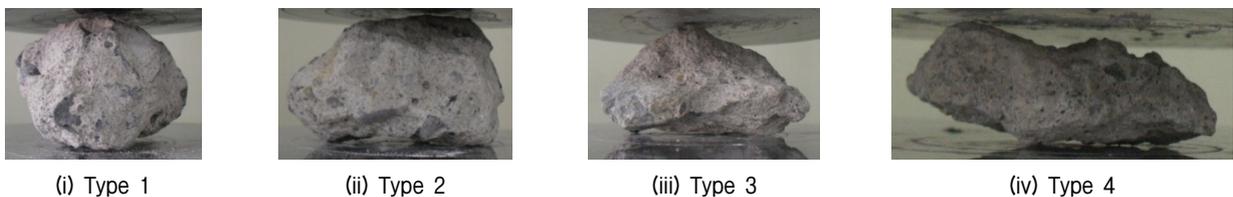


Fig. 1. Shape of single particle from recycled aggregate

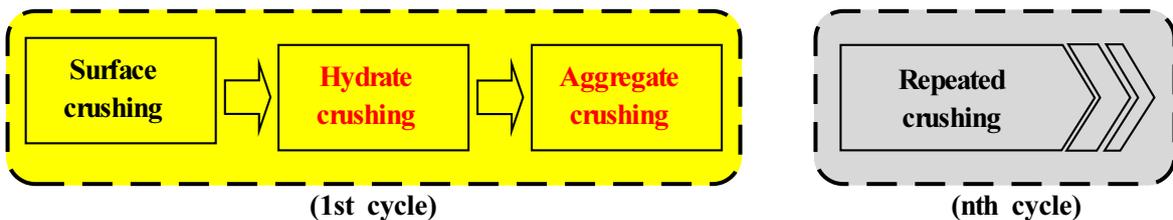


Fig. 2. Crushing process of single recycled aggregate

2와 같이 3단계로 구분할 수 있다. 즉, 1단계는 초기 하중작용 시 단입자의 불규칙한 표면이 가압판에 밀착되면서 파쇄되는 ‘표면파쇄(Surface crushing)’ 과정이다. 2단계는 골재와 수화물이 분리되면서 소규모 파쇄와 균열이 반복되는 ‘수화물파쇄(Hydrate crushing)’ 과정이다. 3단계는 최대하중에서 골재가 파쇄되어 하중이 급격히 감소되는 취성파괴로 나타나는 ‘골재파쇄(Aggregate crushing)’ 과정의 순으로 파쇄 사이클(cycle)이 진행된다. 한편, 이러한 파쇄 사이클은 반복적으로 나타나기도 한다.

Fig. 3은 각각의 단입자(RSB 20, RSB 40) 파쇄실험 결과에 대한 대표적인 하중-변위 곡선이다. 먼저, Fig. 3에서 ‘동그라미’로 표시된 표면파쇄는 가압판에 불규칙한 단입자의 표면이 밀착되면서 대부분 초기에 단입자 표면의 모르타르가 파쇄되는 과정이며, 이때의 하중을 ‘표면파쇄력’이라 정의하였다. Fig. 3에서 ‘세모’로 표시된 수화물파쇄는 표면파쇄로 하중을 받는 단입자 표면이 고르게 되어 가압판에 밀착된 이후 굵은골재를 둘러싸고 있는 수화물의 부분적 파쇄와 균열이 발생하는 과정이다. 이 과정은 한번 또는 여러 번에 걸쳐 반복되며 균열이 서서히 진행되면서 발생하는 연성파괴로 나타나며 이때의 하중을 ‘수화물파쇄력’이라 정의하였다. Fig. 3에서 ‘네모’로 표시된 골재파쇄는 단입자 내의 굵은골재가 파쇄되면서 단입자가 매우 빠르게 분리되어 하중이 급격히 감소되는 취성파괴로 이 때의 하중을 ‘골재파쇄력’이라 정의하였다. 즉, 초기 표면파쇄력을 P_i , 수화물파쇄력은 한번 또는 여러 번 발생할 수 있으므로 $P_{s(n)}$, 골재파쇄력은 P_f 로 정의하였다. 이러한 파쇄

과정에 따른 하중 변화는 $P_i \rightarrow P_{s(n)} \rightarrow P_f$ 의 1-cycle로 구분할 수 있으며, 1-cycle 이후에도 파쇄는 표면파쇄→수화물파쇄→골재파쇄의 여러 cycle이 반복되어 나타날 수 있으므로 n-cycle로 정의하였다. 이 때 n-cycle에서의 골재파쇄력 P_f 는 처음 1-cycle에서의 골재파쇄력 P_f 보다 감소하거나 또는 증가하다가 감소하는 다양한 경향을 보였다.

3.2 표면상태에 따른 파쇄 특성

초기 하중작용시 단입자는 표면이 고르지 못하므로 가압판에 하중이 균등하게 작용하기 위하여 단입자 표면에 돌출된 부분이 평탄화되는 초기 표면파쇄 현상이 발생하며, 파쇄되는 부분이 대부분 순환골재 생산 시 발생하는 표면의 돌출부분으로 굵은골재를 둘러싸고 있는 모르타르에 해당된다. 실험 결과 RSB 20과 RSB 40의 초기 표면파쇄는 하중 0.09~0.12kN에서 발생하였으며, 그 값은 단입자 크기에 관계없이 거의 유사한 초기 표면파쇄 특성을 보였다. 단입자 초기 파쇄시 변위는 입자모양이 둥글거나 사각형에 가까운 경우는 가압판이 밀착되기 쉬운 형태이므로 표면파쇄는 1.0mm 이내의 변위에서 발생한 다음 굵은골재를 둘러싸고 있는 수화물의 부분적 파쇄와 균열이 발생하는 수화물파쇄로 진행되었다. 하지만, 입자모양이 가압판과 공간이 많이 떠있는 삼각형 또는 폭에 비해 길이가 긴 형태는 상하부면이 불규칙하게 휘어지거나 구부러져서 가압판에 쉽게 밀착되지 않고 이격 공간이 있으므로 하중작용과 함께 1.0~2.5mm 변위에서 표면파쇄가 발생한 다음 수화

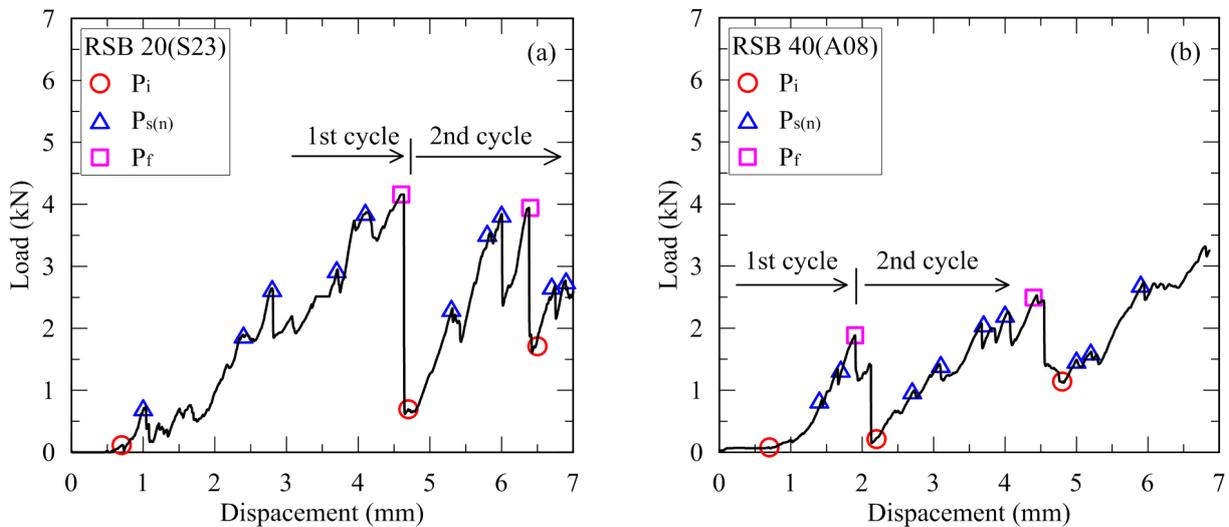


Fig. 3. Load-displacement curves from particle crushing test

물파쇄로 진행되었다.

Fig. 4는 각각의 단입자의 1-cycle에서의 초기 표면파쇄와 2-cycle에서의 표면파쇄 형상을 보여주고 있다. 1-cycle에서의 초기 표면파쇄는 Fig. 4(a)와 같이 초기하중에서는 밀착이 잘되는 경우는 1.0mm 이내의 변위에서 파쇄되고, Fig. 4(b)와 같이 밀착이 잘 안 되는 경우는 1.0mm 이상의 변위가 발생된 후에 파쇄되었다. 1-cycle 이후 2-cycle에서의 표면파쇄는 단입자가 분리된 이후에 깨진 입자가 제자리를 이동하여 움직이면서 발생하거나 입자간의 엇물림과 위치조정으로 발생하였다. 깨진 입자의 원위치 이동이 클 경우 Fig. 4(a)와 같이 큰 변형과 함께 표면파쇄되고, 분리된 입자간의 엇물림이 우선할 경우에는 Fig. 4(b)와 같이 비교적 작은 변형과 함께 표면파쇄가 발생하였다. 단입자 파쇄실험은 비구속상태에서 파쇄되므로 분리된 입자는 제자리에 있지 않고 하중 증가와 함께 위치가 이동하거나 분리된 입자간 엇물림이 작용하면서 파쇄가 진행되어 가압판과 밀착되는 표면파쇄는 1-cycle의 최대 파쇄 이후 2-cycle에서 다시 반복하여 발생하였다.

3.3 형상에 따른 파쇄 특성

3.3.1 Type 1 및 Type 2 형상의 단입자

Fig. 5와 같이 둥글거나 사각형에 가까운 형상(Type 1

및 Type 2)을 가진 단입자는 가압면과 떠있는 공간이 비교적 적은 경우이다. 재하 초기에 불규칙한 표면에 하중 집중으로 가압판에 고르게 밀착되어 작은 변위에서 표면파쇄가 빠르게 진행되며, 계속되는 하중 증가로 변형이 증가하다가 골재파쇄력(P_f)에 도달 후 급격히 하중이 저하되는 취성파괴로 단입자가 2개로 분리되었다. 분리된 단입자는 다시 파쇄가 진행되면서 하중이 집중되는 부분의 입자가 먼저 파쇄된 후 나머지 분리된 입자가 파쇄되었다. Fig. 5와 같이 파쇄되는 면은 대부분 하중작용 방향으로 파쇄되고, 여러 조각으로 분리되어 입자간에 엇물림이 작용하면서 파쇄되는 형태를 볼 수 있다.

Fig. 6은 하중-변위 곡선으로 초기 표면파쇄는 1.0mm 이내의 변형(그림에서 동그라미로 표시)에서 발생되며, 수화물파쇄와 골재파쇄로 1-cycle이 진행된다. 그 이후 분리된 입자의 영향으로 하중이 작용하는 면적은 초기에 비해 증가하며, 비구속된 방향으로 분리된 입자간의 엇물림으로 입자 사이에 약한 부분이 세분화되어 부서지면서 가압판에 밀착되는 표면파쇄, 수화물의 부분적 파쇄와 균열이 서서히 발생하는 수화물파쇄, 하중이 급격히 감소되는 골재파쇄의 n-cycle로 진행되었다.

3.3.2 Type 3 및 Type 4 형상의 단입자

삼각형에 가까운 형상의 단입자는 Fig. 7(a) & (b)와 같이 하부의 떠있는 부분이 커서 초기에는 상부 단입자의

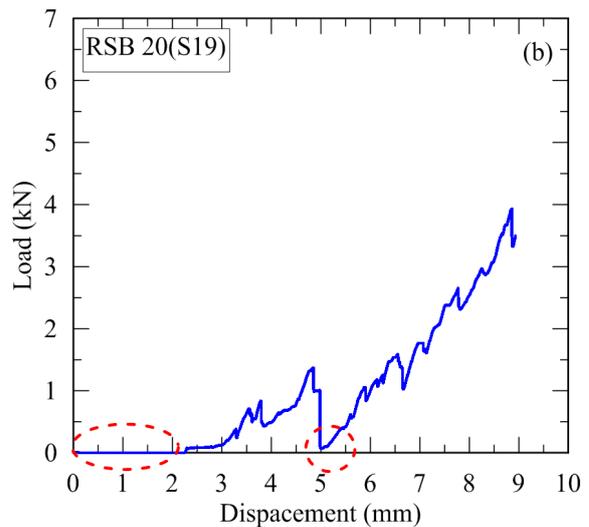
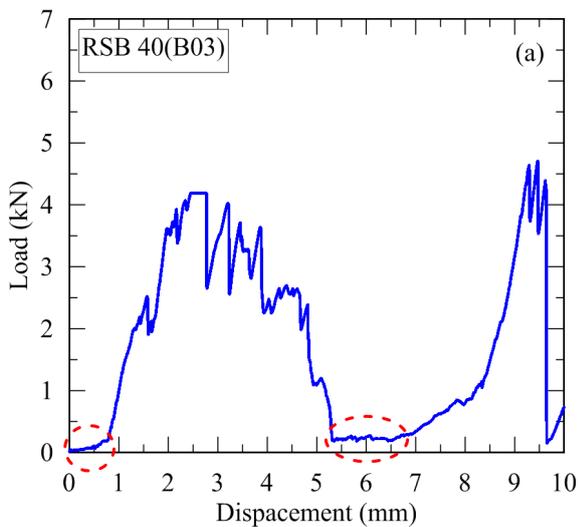
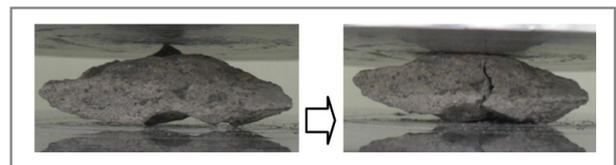
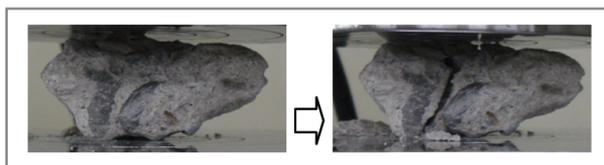


Fig. 4. Photo of surface crushing and its load-displacement curve

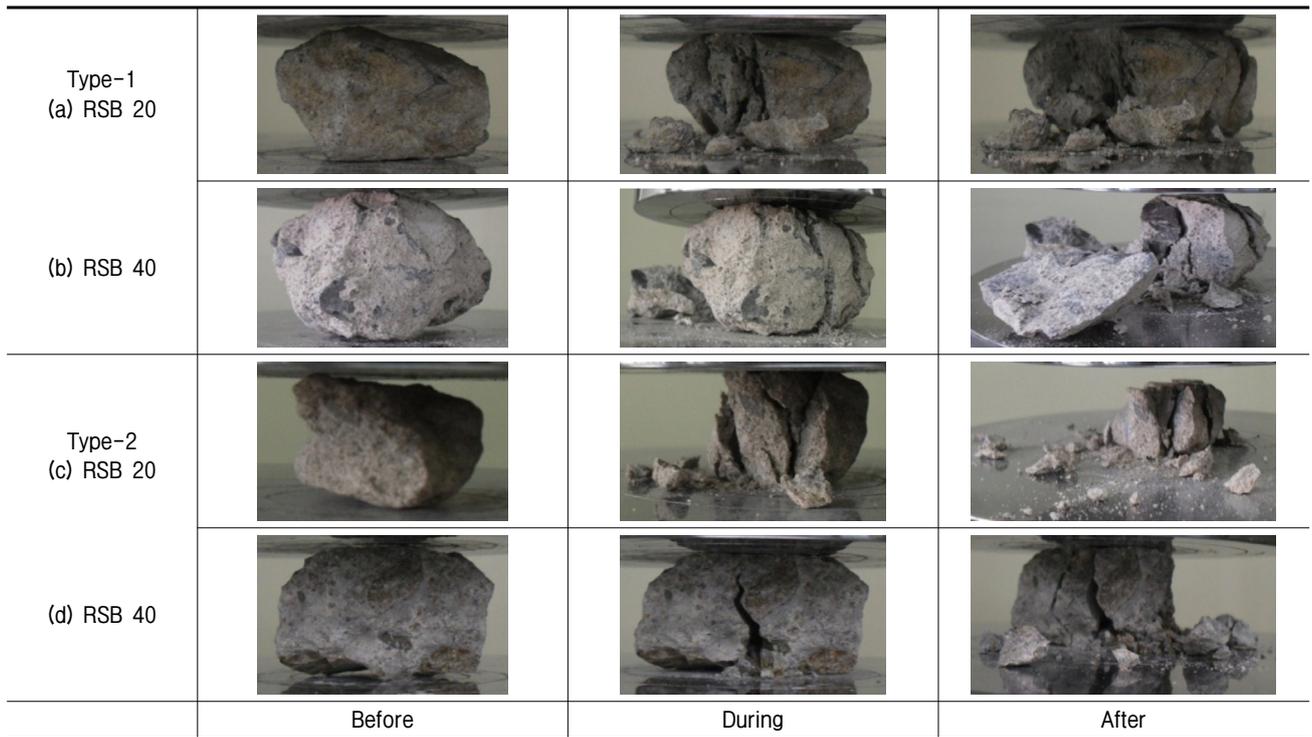


Fig. 5. Single particle crushing of Type-1 and Type-2

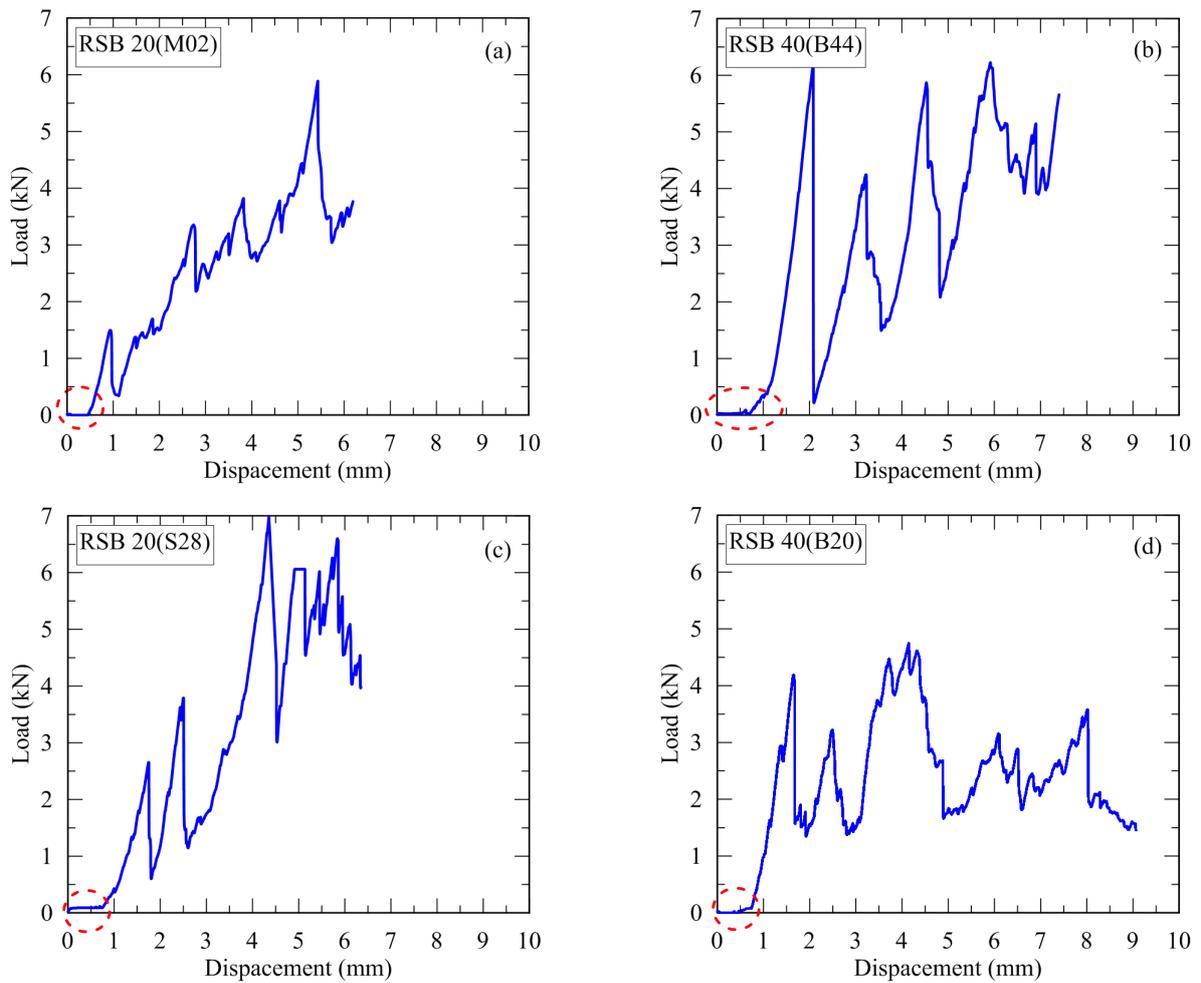


Fig. 6. Load-displacement curves for Type 1 ((a) & (b)) and Type 2 ((c) & (d))

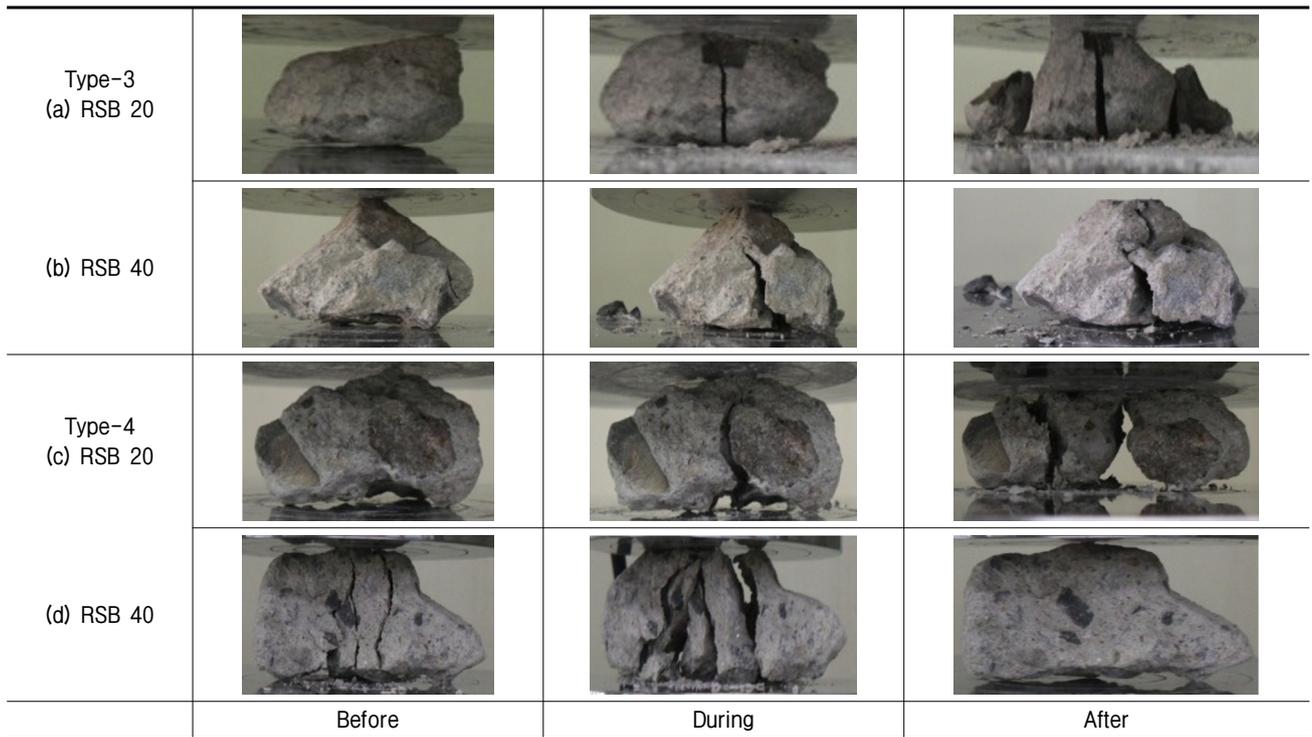


Fig. 7. Single particle crushing of Type-3 and Type-4

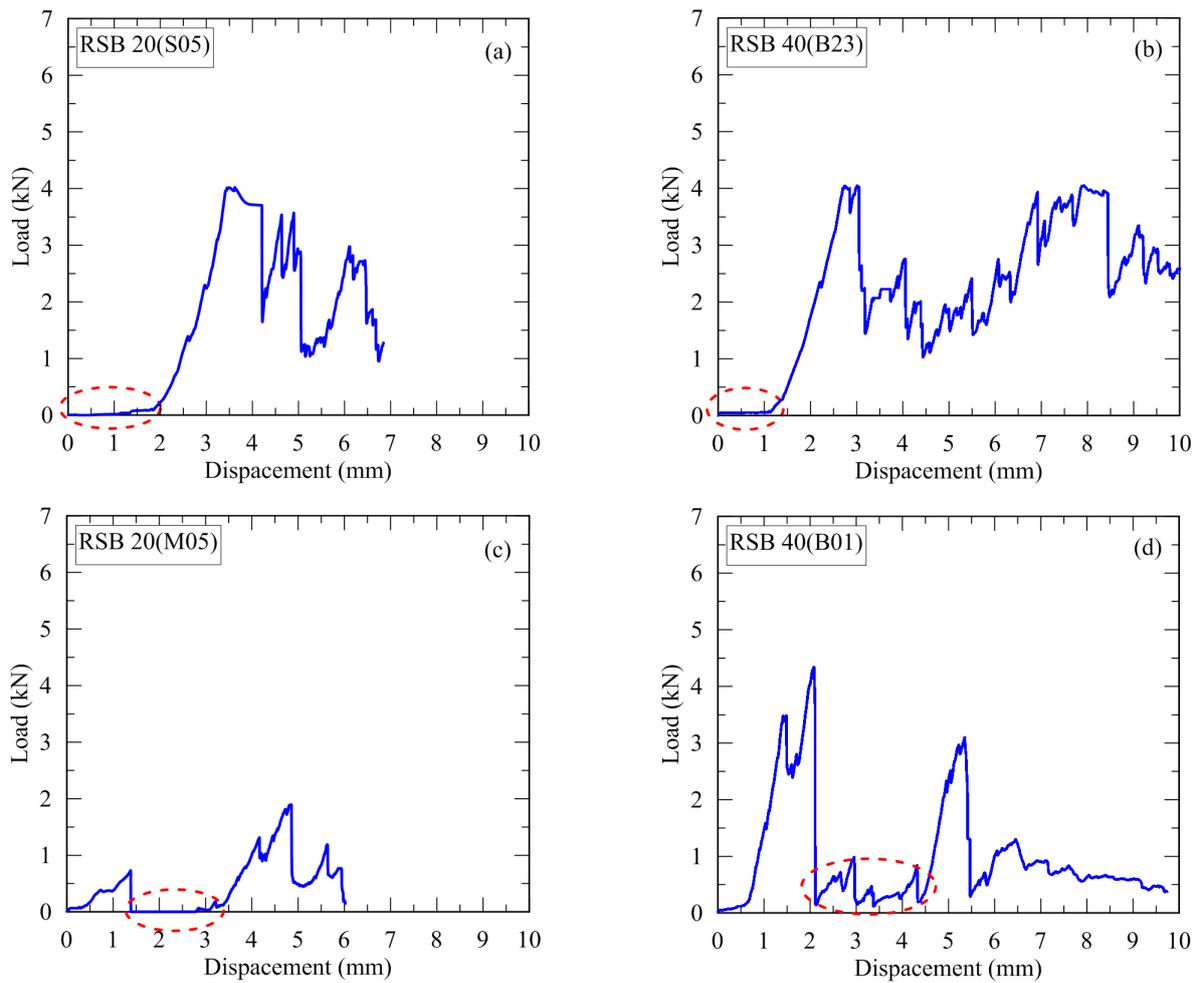


Fig. 8. Load-displacement curves for Type 3 ((a) & (b)) and Type 4 ((c) & (d))

꼭지점이 집중하중을 받고 차츰 하부의 불규칙한 표면도 가압판에 고르게 밀착된다. 이러한 과정에서 Fig. 8(a) & (b)와 같이 큰 변형(그림에서 동그라미로 표시) 후에 표면 파쇄가 일어나고 추가 하중 증가와 함께 변형이 계속 증가하다가 골재파쇄력에서 급격히 하중이 저하되는 취성파괴로 진행된다. 단입자는 하중이 집중되는 상부의 꼭지점에서 균열 발생과 함께 수직에 가까운 파쇄가 발생되어 2개로 분리되었으며 양분된 입자는 하중 증가에 따라 입자간 거리가 멀어지면서 파쇄되는 형상을 보였다.

폭에 비하여 길이가 긴 형상의 단입자는 Fig. 7(c) & (d)와 같이 상하부 가압면과 접하는 부분에 공간이 많아서 밀착이 안 된 상태이므로 초기에는 상하부면에 집중하중이 작용하는 면의 표면파쇄와 함께 하중 작용방향으로 변형이 증가하다가 급격히 하중이 저하되는 취성파괴로 진행되어 단입자가 2~3개의 작은 입자로 분리되는 형상을 보였다. 하중이 증가하면서 파쇄되어 분리된 입자는 Fig. 8(c) & (d)와 같이 제자리에 있지 않고 움직이면서 입자끼리의 간격은 조금 멀어지다가 표면파쇄로 입자표면이 작은 입자로 부서지면서 다시 간격이 조밀해지는 현상이 발생하였다. 이후 하중작용으로 분리된 입자간의 엇물림 현상이 나타나면서 엇물림되는 부분의 입자가 깨지고 다시 파쇄가 진행되어 입자간의 거리가 다시 멀어지는 현상을 반복하였다.

3.4 파쇄된 입자의 특성

3.4.1 파쇄하중 감소율 비교

단입자의 최대하중은 RSB 20인 경우 7.88~9.53kN,

RSB 40인 경우 8.56~11.19kN이었으며, 시험에 사용한 단입자 전체 개수에 대한 골재파쇄력은 평균최대하중을 기준하여 RSB 20인 경우 1.85~3.24kN, RSB 40인 경우 3.05~4.38kN에서 파쇄되었다.

골재의 파쇄로 단입자의 분리가 발생하며, 이때 골재 파쇄 시의 하중인 골재파쇄력에서 입자가 파쇄되면서 급격히 감소된 하중과의 차이와 골재파쇄력의 비를 ‘파쇄하중 감소율(crushing load reduction ratio)’로 식 (1)과 같이 정의하였다.

Crushing load reduction ratio

$$= \frac{\text{Aggregate crushing load} - \text{aggregate load after crushing}}{\text{Aggregate crushing load}} \quad (1)$$

본 연구에서 수행한 RSB 20과 RSB 40 단입자의 경우 취성파괴 정도를 나타내는 파쇄하중 감소율은 Table 2와 같이 일반적으로 20%에서 90% 범위 내에서 다양하게 나타났다. 예를 들면, 파쇄하중 감소율이 30% 이하인 경우는 전체의 3.4%이지만, 30~50%인 경우는 33.6%, 70~90%인 경우는 16.7%, 90% 이상인 경우도 14.5%로 나타났다. 파쇄하중 감소율이 50% 이상인 경우가 63%로 대부분의 순환골재가 수화물 내 골재가 파쇄되면서 큰 하중 감소가 발생하는 것을 알 수 있었다.

3.4.2 파쇄된 입자 크기 비교

단입자 파쇄실험 결과 파쇄되어 분리된 입자 크기에 따른 분포비율을 규격에 따라 수량으로 측정하였으며, 파쇄되어 분리된 입자의 형상은 Fig. 9와 같다. RSB 20



Fig. 9. crushed particle size after particle crushing test

Table 2. Distribution of crushing load reduction ratio

Crushing load reduction ratio	0~30%	30~50%	50~70%	70~90%	Over 90%
Percent	3.4%	33.6%	31.8%	16.7%	14.5%

Table 3. Distribution of crushed particle size

Size	10~15 mm	15~20 mm	20~25 mm	Over 25 mm	Total
Percent	49%	23%	19%	9%	100%

단입자는 파쇄실험 결과 분리된 입자의 크기가 대부분 10mm 이하로 세립화되어 본 측정에서 제외하였다. RSB 40 단입자를 대상으로 파쇄 후 분리된 입자의 크기를 측정한 결과는 Table 3과 같다. 본 연구에서는 파쇄된 입자의 개수를 기준으로 하였으며, 10mm 미만인 경우는 대부분 많은 양의 미세한 입자로 파쇄되어 굵은골재로 측정이 곤란하여 측정에서 제외하고 10mm 이상으로만 측정하였다. 즉, Table 3과 같이 10~15mm 입자의 분포비율은 49%, 15~20mm 입자의 분포비율은 23%, 20~25mm 입자의 분포비율은 19%, 25mm 이상 입자의 분포비율은 9%로 나타났다. 입자크기 20mm를 기준으로 10~20mm 입자인 경우 72%이며, 20mm 이상인 경우 28%로서 분포비율은 약 7:3으로 나타났다. 이러한 결과는 단입자에 하중이 작용할 때 n-cycle 반복파쇄의 영향으로 인하여 하나의 단입자는 여러 개의 작은 입자로 파쇄 분리되며, 대부분 20mm 이하의 입자로 되는 것을 알 수 있었다.

한편, 정적인 압축하중으로 인한 굵은골재의 저항성을 평가하기 위한 굵은골재의 파쇄시험(Testing Method of Determination of Aggregates Crushing Value)(KS F 2541, 2002)에서는 13mm체를 통과하고 10mm체에 잔류하는 시료를 준비한다. 준비한 시료는 파쇄시험기에 넣고 3층 25회로 붓다짐 한 후 재시험기에서 10분 동안 400kN에 이를 때까지 재하하여 파쇄한다. 파쇄된 시료는 2.5mm체 통과 백분율로 표시되는 ACV(Aggregate Crushing Value)를 사용하여 파쇄로 인한 입자 크기 변화를 표시하고 있다. 그러나, 본 연구에 적용한 단입자 골재크기는 75mm체를 통과하여 40, 20mm체에 잔류하는 골재이므로 굵은골재 파쇄시험법을 적용하는데 어려움이 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 하중작용시 순환골재 단입자의 파쇄 특성을 연구하기 위하여 일축압축시험기를 이용한 단입자 파쇄시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 순환골재 단입자는 가압면과 접하는 단입자표면의

상태, 입자형상, 단입자 내 하중을 받는 수화물과 굵은골재에 따라 단입자 파쇄거동이 다르게 나타났으며, 단입자에 하중작용시 초기 표면파쇄, 수화물파쇄, 골재파쇄의 1-cycle이 진행된 이후 하중의 지속적인 증가에 따라 반복 파쇄되는 n-cycle 과정을 보였다.

- (2) 단입자 표면파쇄는 하중 0.09~0.12kN에서 대부분 발생하였으며, 표면상태가 돌출된 부분이 적어서 가압면과 잘 밀착되는 경우는 하중작용시 표면파쇄는 1.0mm 이내 변위에서 발생하였다. 단입자 표면에 가압면과의 불규칙한 부분과 많은 돌출로 공간이 많은 상태인 경우는 하중작용시 표면파쇄는 1.0mm 이상 변위에서 발생하였다.
- (3) 단입자의 수화물파쇄 이후 최대하중에서 골재가 파쇄되면서 하중이 급격히 감소되는 취성파괴인 골재 파쇄에서 하중이 감소되는 비율인 파쇄하중 감소율은 50% 이하인 경우가 전체의 37%였다. 한편, 50~70%인 경우는 32%, 70~90%인 경우는 17%, 90% 이상인 경우는 15%로 파쇄하중 감소율이 50% 이상인 경우가 전체의 63%로 나타났다.
- (4) RSB 40 단입자에 하중 작용 시 파쇄되어 분리되는 입자크기를 분류한 결과 10~20mm 입자와 20mm 이상 입자 비율은 약 7:3의 비율로 나타났으며, 이러한 결과는 n-cycle 반복파쇄의 영향으로 인하여 하나의 단입자는 여러 개의 작은 입자로 파쇄 분리되므로 20mm 이하로 분리된 입자량이 증가하는 것으로 판단된다.

감사의 글

“이 논문은 2016년도 경남과학기술대학교 대학회계 연구비 지원에 의하여 연구되었음”

참고문헌 (References)

1. Cho, S. A. (2009), *Study on Shear Behavior and Particle Crushing with Respect to Particle Shape*, Master thesis, Konkuk University.
2. Ham, T. G., Cho, Y. S., and Kim, Y. S. (2004), “A Study on the Compression Characteristics of Decomposed Granite Soil Based

- on Single Particle Crushing Property”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.20, No.8, pp.103-111.
3. Ham, T. G. and Kim, U. G. (2008), “Influence of Water on Compression Characteristic of Decomposed Granite Soil Based on Single Particle Crushing Strength”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.11, pp.101-109.
 4. Jeong, S. A. (2010), *Characteristics of Shear Behavior according to State of Particle Bonding and Crushing*, Master thesis, Konkuk University.
 5. Jeong, S. A., Kim, E. K., and Lee, S. W. (2010), “Applicability of Particle Crushing Model by Using PFC”, *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol.9, No.1, pp.47-57.
 6. Kang, S. C., Kim, G. H., Wi, J. H., Ahn, T. B., Lee, D. S., and Choi, H. S. (2015), “Effect of Particle Breakage on Compaction and Thermal Resistivity of Concrete-based Recycled Aggregates”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.10, pp.17-28.
 7. Kim, H. U. (2014a), *Shear Strength Characteristics by the Particle Crushing in the Decomposed Pocheon Granite Soil*, Master thesis, Daejin University.
 8. Kim, J. H. (2016), *Study on the pH of Recycle Aggregates*, Master Thesis, Kumoh National Institute of Technology.
 9. Kim, S. J., Ji, W. B., Yi, C. T., and Han, H. S. (2014a), “A Change of Porewater Pressure under Particle Crushing of Carbonate Sand of Sabkha Layer”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.2, pp.19-32.
 10. Kim, Y. J. (2014b), *Quality Assessment of Recycled Aggregate Concrete using Microscopic Studies*, Ph.D thesis, Hanyang University.
 11. Kim, J. H., Han, M. C., and Han, C. G. (2014b), “Strength Development of the Concrete Incorporating Blast Furnace Slag and Recycled Aggregate as Alkali Activator”, *Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol.2, No.2, pp.107-114.
 12. KS F 2541 (2002), Testing method for determination of aggregates crushing value.
 13. Kwak, J. M. (1999), “A Basic Study on Crushability of Sands and Characteristics of Particle Strength”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.15, No.15, pp.193-204.
 14. Kwon, J. H., Kim, S. W., and Park, B. S. (2013), “Study on the Reinforced Retaining Wall using the Backfill of Recycled Aggregate”, *Journal of Korean Society of Environmental Technology*, Vol.14, No.2, pp.128-134.
 15. Lade, P. V., Yamamuro, J. A., and Bopp, P. A. (1996), “Significance of Particle Crushing in Granular Materials”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.122, No.4, pp.309-316.
 16. Lee, K. L. and Farhoomand, I. (1967), “Compressibility and Crushing of Granular Soil in Anisotropic Triaxial Compression”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.4, No.1, pp.68-86.
 17. Lee, W. K., Choi, J. O., and Jung, Y. W. (2015), “Effect of the Amount of Attached Mortar of Recycled Aggregates on the Properties of Concrete”, *Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol.3, No.2, pp.132-139.
 18. Lee, J. Y., Chun, H. P., Jeong, W. C., and Lim, H. S. (2008), “A Study on Utilization of Recycled Aggregates as Lateral Drain for Soft Ground Improvement”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.10, pp.5-15.
 19. Lee, J., Lee, B. C., Cho, Y. G., and Jung, S. H. (2016), “Chloride Diffusivity of Concrete using Recycled Aggregate by Strength Levels”, *Journal of the Korea Institute of Structural Maintenance and Inspection*, Vol.20, No.2, pp.102-109.
 20. Lee, J. C., Song, T. H., Lee, S. H., and Kim, J. B. (2011), “A Study on the Optimization of Recycled Aggregate Alkalinity Reducing Facility in the Field”, *Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol.6, No.3, pp.53-60.
 21. Lobo-Guerrero, S. and Vallejo, L. E. (2005), “Analysis of Crushing of Granular Material under Isotropic and Biaxial Stress Conditions”, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.4, pp.79-87.
 22. McDowell, G. R. and Bolton, M. D. (1998), “On the Micromechanics of Crushable Aggregates”, *Geotechnique*, Vol.48, No.5, pp.667-679.
 23. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2013), *Quality Standards for Recycled Aggregate*.
 24. Nakata, Y., Hyodo, M., Hyde, A. F. L., Kato, Y., and Murata, H. (2001), “Microscopic Particle Crushing of Sand Subjected to High Pressure One-Dimensional Compression”, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.1, pp.69-82.
 25. Park, B. S., Sim, D. S., Lee, H. K., and Jung, G. S. (2011), “Installation Resistance Test for the Reinforced Materials with Compaction of Recycled Aggregate”, *Proc. of Korean Society of Hazard Mitigation*.
 26. Shin, J. L., Kim, W. S., Baek, S. M., Kang, H. K., and Kwak, Y. K. (2015), “Structural Performance Evaluation of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams with Recycled Coarse Aggregates”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.27, No.3, pp.215-227.
 27. Song, T. H., Lee, J. C., and Lee, S. H. (2011), “A Study on the pH Characteristic of Recycle Aggregate According to Test Methods and Elapsed Time”, *Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol.6, No.3, pp.61-68.
 28. Wi, J. H., Hong, S. Y., Lee, D. S., Park, S. W., and Choi, H. S. (2011), “Evaluation of Compaction and Thermal Characteristics of Recycled Aggregates for Backfilling Power Transmission Pipelines”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.7, pp.17-33.
 29. Yoon, G. L., Yoon, Y. W., Kang, O. R., You, S. K., and Lee, K. H. (2008), “Shear Strength Characteristics of Recycled-aggregate Porous Concrete Pile for Soft Ground Improvement”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.12, pp.75-84.

Received : June 27th, 2016

Revised : September 28th, 2016

Accepted : November 2nd, 2016