

論文

破碎碍子の鋭利度測定と 安全粒形骨材化について

佐野正典^{※)}
高橋修^{※※※)}

登日宣匡^{※※※)}
酒井研二^{※※※※)}

1. はじめに

社会生活の向上に付随して、多種類の材料による廃棄物の増加が顕著になっている。これらの産業廃棄物、産業副産物は処分地の枯渇や環境対策、あるいは貴重な資源の有効利用の観点から、再用途を検討する必要性が生じている。中でも、特にガラス、瓦、レンガ、タイル、碍子などの陶磁器類の廃棄材料は建設系材料を主眼においた再活用へ検討されることが多い。しかし、これらの材料は破碎処理後の粒子形状が鋭利に破碎される特異性から再活用時ではその作業上での危険性を伴い、また他材料との混合過程では低効率化を促す。さらに仕上がった部材では材質特性に影響を与えることなども懸念される。このような鋭利形状の材料特性に関しての報告は少なく、加えて危険性を保有する骨材粒子の形状評価に関する適切な判定基準は見当たらない。

本報は多様化する廃棄材料のリサイクルの視点に立脚して、多量に排出される絶縁器材である廃棄碍子の再利用を目的として検討を加えたものであり、まず破碎碍子の危険性の評価法を検討し、ついでその粒子端部の鋭利性の測定方法を提案した。さらに、この両判定結果を踏まえてこれらの判定値を満足する安全な粒子形状への加工手法を見出し、破碎碍子を安全な粒形へ骨材化して活用するための検討を加えた。

2. 破碎碍子の特性と比較材料

廃棄碍子を破碎したいわゆる破碎碍子はその粒子周辺部が鋭利な先端を有しており、再材料化時での作業性や取扱い上において極めて危険な形状である。顕微鏡によ

る碍子・碎石の先端形状を図1に示す。破碎粒子周辺部の特徴は碎石と比較して丸みがなく、刃物に匹敵する危険性の高い鋭利な形状を有している。加えて、粒子表面の粗密性には大きな相違が見られ、碍子は焼成物特有の緻密性が顕著である。試験粒子は碍子の外に比較材としての碎石や磁器製皿の破砕片など3種類を準備した。

一般的に排出される碍子と比較材としての碎石の基礎的な性状を表1に示す。

3. 碍子骨材粒形の危険度の評価

3.1 粒形危険度判定器の試作と構造

危険な形状の粒子先端部などの評価に関しては、僅かに風船破砕法¹⁾が見られる程度であり、危険性を評価する適切な方法は見当たらない。そのため、簡便な手法で粒子先端部の危険性を定量的に評価する新しい試験を試みた。試作した粒形危険度判定器(仮称)を図2に、その構造を図3に示す。

3.2 試験片の作成と測定方法

各粒子の危険度を評価することから、視覚的に粒子中の最も鋭利な箇所を測定対象の先端部と定めた。試験片

表1 碍子及び碎石の基礎性状^{*3)}

項目	碍子	碎石
絶乾比重(g/cm ³)	2.301	2.5以上
表乾比重(g/cm ³)	2.312	—
見掛比重(g/cm ³)	2.327	—
吸水率(%)	0.465	3.0以下
すり減り率(%)	17.6	40以下

※) 正会員 近畿大学 理工学部社会環境工学科

※※) 近畿大学 大学院総合理工学研究科環境系工学専攻

※※※) 関電L&A(株)

※※※※) 関西電力(株) 電力技術研究所

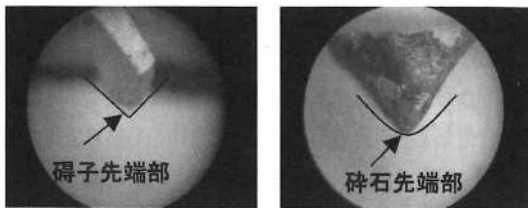


図1 顕微鏡による碓子・碎石の先端形状

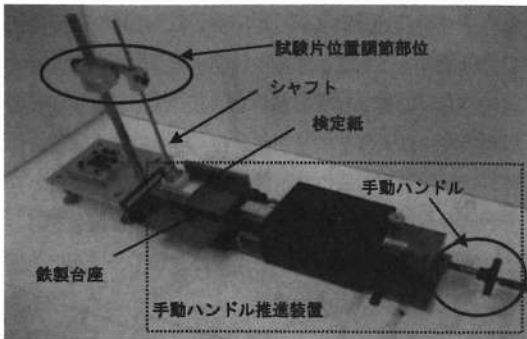


図2 粒形危険度判定器

は図4に示すように測定対象箇所の粒子端部を露出し、他方端部をジェットセメント中に埋設した粒子固定型の特殊試験片を作成した。

この固定試験片を図3に示すように上方にセメント部分、下方が碓子測定先端部となるように設置し、ガラス板上に貼り付けた検定紙上に先端部を接触させる。試験片上部には重錘シャフト及び所定の載荷板を押し当てた。つぎに、ベアリング機能を有した鉄製台座(200×100×32mm)を手動ハンドルの推進装置により0.1cm/sの一定速度で約15mm推進した後、検定紙(市販の折紙:大創産業、D-045、E2)の破損程度を評価した。測定時の試験片は不動状態であり、検定紙の鉄製台座が移動する構造のため、鉄製台座の推進軸方向に対して粒子の長辺端部を平行に設置することが重要である。すなわち、先端部の形状によっては粒子先端が引っかかり、切断ではなく検定紙が破れる現象を避ける必要がある。また、粒子先端が刃物の刃先に類似した迫上がり形状では、鋭利な切断が生じる。これらのことから、同様な端部形状でも設置状態の差異では検定紙の判定が異なるため、碓子先端部に対する検定紙の作動進入方向は図5に示すように迫上がっている先端部側からと定め、軸方向の設置には特に注意した。同一試験片での載荷重量は50g間隔

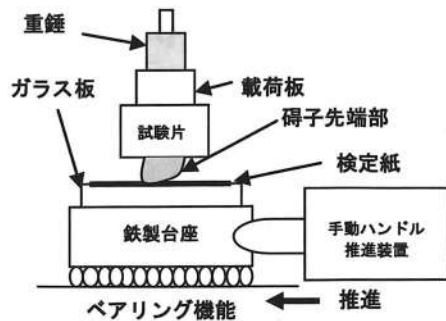


図3 評価試験器構造断面図

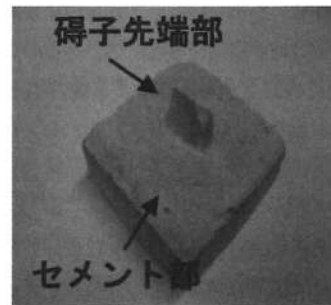


図4 試験片

で総重量400g～650gを測定範囲とした。

3.3 危険度の評価基準

試験終了後の検定紙に残された痕跡には、図6に示すように測定先端部に引きずられ破れながら切断されたもの、図7に示すように鋭利な刃物で切断されたような現象が生じる。これらの痕跡は視覚的な評価で判定し、表2に示す判定評価基準に照合して6段階でその危険性を評価分類した。

3.4 骨材粒形と危険度

碓子、碎石、磁器製皿の3種類の粒子について、載荷重量を変化したもとでの評価を判定した。各々10個の

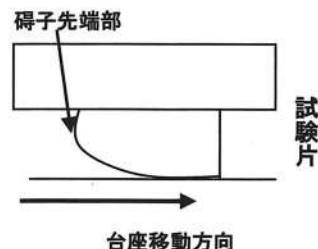


図5 検定紙移動方向

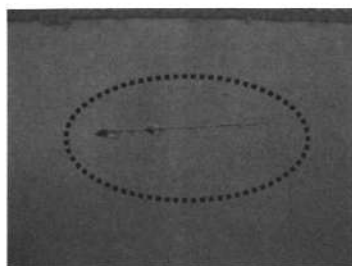


図6 評価3の状況

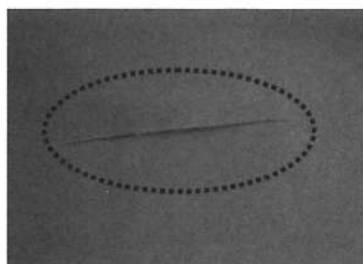


図7 評価1の状況

表2 危険性評価の基準

評価	判定評価基準	
1	鋭く	5mm以上鋭く切れている状態。
2	切れる	5mm未満切れている状態。
3	切れる 傷がつく	痕跡部分に引張力を加えると切れる。
4	破れる	痕跡部分が引きずられ破れる状態。
5	痕跡がつく	痕跡部分の軌跡が深い。
6		痕跡部分の軌跡が浅い。

粒子の平均評価値と載荷重量との関係を図8に示す。この結果から、碍子の最小載荷重量下の評価(3.2)は碎石の最大重量の評価(4.0)を大きく下回っており、碍子の粒子先端部形状は極めて危険性が高いことを示唆している。つぎに、全粒子の危険性粒子形状の評価分布を図9に示した。評価1～4の範囲は表2において危険な形状に属している。この領域の碎石は45%程度であるが、評価4に該当する40%を占める粒子の大半は評価5に近い分類に属する危険性のない先端形状のものである。すなわち、検定紙の痕跡状態も切れることなく特異な破れる現象であることからほぼ95%が安全な形状といえる。これに反して、磁器皿は評価1に62%が属し、77%が危

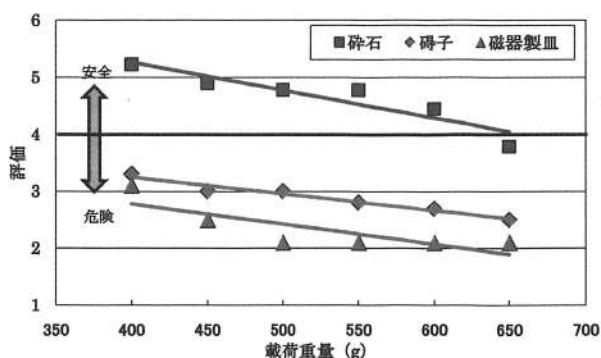


図8 危険性評価と載荷重量との関係

険域を占める。碍子のそれは磁器皿に比して35%でやや少ないが、危険領域では磁器皿とはほぼ同値の75%である。このことから、破砕碍子の粒子端部は磁器皿と同様に市販紙が切れる程度の危険性を伴う粒子形状であると評価され、作業上での取り扱いでは充分な注意を要すことを示唆している。

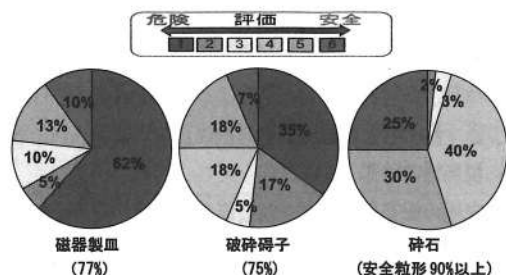


図9 骨材形状の含有率

4. 碍子骨材粒形の鋭利度の測定

破砕碍子の端部形状は検定紙が切断されるほどの危険性を有していることが判明した。この破砕碍子を再活用する場合、その粒子先端の形状は作業時の安全管理上や強度に及ぼす影響などの材料特性上の視点から、適切な加工程度を定量的な指標の上で管理する必要がある。

本節では碍子粒先端部の鋭利度の測定方法について検討した。

4.1 粒先端部鋭利度測定器の構造と試験法

破砕碍子の粒子先端部の最鋭利な箇所の鋭利度を判定する目的から図10に示す単粒の碍子に打撃を加える重錘落下式の粒先端部鋭利度測定器(仮称)を試作した。

この測定器の台座には硬質ゴム板を設置し、その上

に、転写紙、咬合紙の順に置き、ついでこれと接触するように碍子を設置する。設置上の注意点は、咬合紙上の測定対象碍子の先端部を保持して測定中での碍子の転倒を防ぐことである。そのため、弓形に形成したゴム粘土で碍子の両面を挟み込んだ。この碍子に所定の高さから重錘を落下し、この打撃力によって鋭利な碍子先端部は密着した咬合紙を介して転写紙上にその鋭利さを刻印する。同一粒子における重錘の落下高さは、5cm、10cm、15cm、20cm、25cmの5条件で測定した。

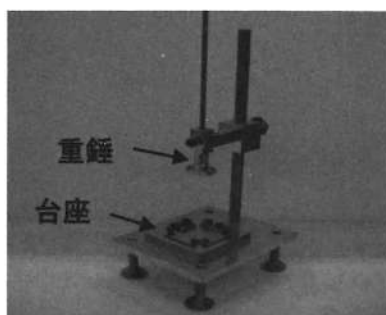


図10 粒形端部鋭利度測定器

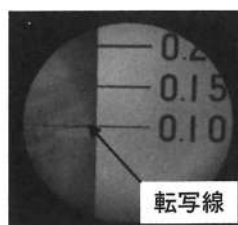
4.2 粒子端部の鋭利度

1) 鋭利幅の計測

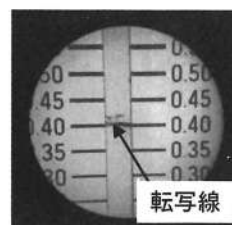
測定後の転写紙に刻印された線を転写線、碍子の転写線幅を鋭利幅、碎石の幅を端部幅と定義した。鋭利幅および端部幅は0.05～1.40mmの範囲内で0.05mm幅ごとに図11に示すクラックスケールで計測して粒形端部の鋭利性状を検討した。転写紙に刻印された転写線の計測箇所は、図12のように、a、b、cの3ヶ所に定め、計測条件として、鋭利幅の太い箇所、色の度合いが一定の箇所、滲んでいない箇所とした。各落下高さ条件下でのa、b、cの平均値をその条件の鋭利幅とした。落下高さ5cmと25cmを比較すると、転写線の幅や長さは変わるが、常に一定の箇所を計測することでこの問題に対処した。また、転写線が直線でない場合や破線の場合でも同様の計測方法で行った。

2) 試験条件の決定

試験に用いる碍子及び碎石の粒子径に関しては10mm以下、10mm～15mm、15mm～20mm及び20mm以上の4種類に分別した。この結果、10mm以下では粒子の安定的な設置が困難な場合が生じるが、10mm以上の粒



鋭利幅 0.1mm



端部幅 0.4mm

(左側：転写線の痕跡) (中央部：転写線の痕跡)

図11 鋭利幅の計測



図12 鋭利幅の計測箇所

径での測定は可能であることが確認できた。建設用骨材化の目的に対する粒径の多くは25mm以下であるため、10mm～20mmのものを測定対象の粒径とした。次に、重錘重量及び落下高さの決定においては重量の増加や落下高さが高い場合には転写線がぶれるなどの影響が表れることが分った。このことから、最適と判断された試験条件を重錘重量50g、落下高さは5cm～25cmと決定した。単粒の碍子及び碎石中の測定箇所の選択では粒子周辺部の任意の箇所3ヶ所を測定した結果、測定箇所の凹凸や粒子の固定方法などから3ヶ所を定めることが困難なものも多く存在すること、あるいは鋭利幅が大きく異なる端部が存在することなどから、総合的に判断して単粒子内の最も危険端部の1ヶ所を測定箇所にした。

3) 試験片の選択

碍子及び碎石の粒子径、重錘重量、落下高さ、測定箇所及び試験片の設置方法などに関する試験条件を定めた後、図13に示す単粒式と固定式による試験片での鋭利幅の精度を検討した。まず、碍子、碎石を単粒状態で測定した後、図14に示すように同一の測定箇所が露出するように、粒子の他方端部をセメント中に埋設した固定試験

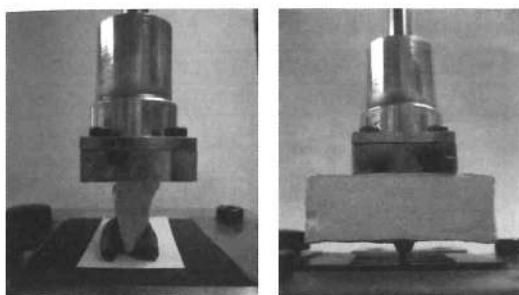


図13 単粒子と固定試験片での粒形端部評価測定

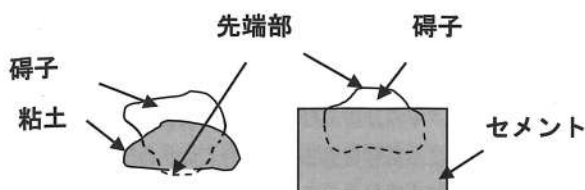


図14 同一粒子端部の単粒式と固定式の試験片作成手順

片に作成して、粒子の設置方法が異なることに起因する鋭利幅の相違を検証した。この単粒式と固定式の測定結果が図15である。これからも明らかに、同一粒子端部の測定結果では単粒式より固定式がやや大きい値を示している。すなわち、固定式は試験片に重錘の落下エネルギーが十分に伝達されるために、先端が硬質ゴム部に強く突き刺さり、転写の鋭利幅が大きくなったためと考えられる。しかし、図16に示すように碓子と碎石の異なる粒子材料でも、両試験片の傾向はほぼ類似している。このことから、危険性の評価では鋭利幅の選択が安全性の指標上は好ましいと考えられる。加えて、試験粒子をセメントで固定しない簡便で容易な試験手法を考慮すると単粒式が適していると判断され、以後の試験では、単

表3 粒子の鋭利幅

試料	測定対象粒子先端部の鋭利幅 (mm)
碎石	0.28～0.43
碓子	0.18～0.23
磁器製皿	0.10～0.22

粒式での測定を採用した。

4.3 破碎碓子の鋭利幅

測定対象とした粒子先端部の鋭利幅を粒形端部鋭利度測定器で測定して表3に示した。これより、碓子の鋭利幅は碎石の端部幅0.3mmに比して0.1～0.2mm程度小さく鋭いことが判明した。磁器製皿は碓子よりさらに0.1mm薄い鋭利幅であり、視覚的判断が難しい0.1～0.2mmの僅かな範囲の鋭利幅の相違でも図8の評価が意味する危険性には大きな影響を生じることが分った。いま、重錘の落下がない場合を真の鋭利幅とすると、エネルギーのない状態の碓子先端幅は10.132mm程度と想定され、極めて危険な鋭利幅と判断される。

4.4 危険度の判定

碓子及び碎石の平均鋭利幅を図17に示した。碎石の平均端部線より大きな鋭利幅を持つときは安全側であり、碓子の平均鋭利線より下方値は危険側と判断される。碓子の中には安全なものも含まれているが、その周辺部が全てそのような先端部を有していることは少なく、鋭利に尖っているものが多い。他方、碎石の中にも危険な形のものもあるが極めて少ない。この両者の比較からは、碓子の鋭利幅は碎石の端部幅0.3mm以上を保持すること

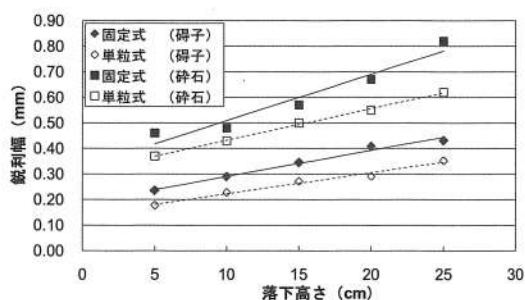


図15 単粒式と固定式の鋭利幅の測定結果

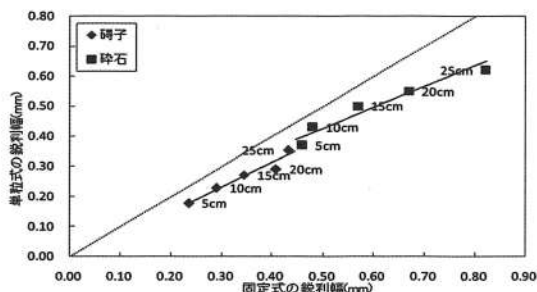


図16 単粒式と固定式の鋭利幅の相関関係

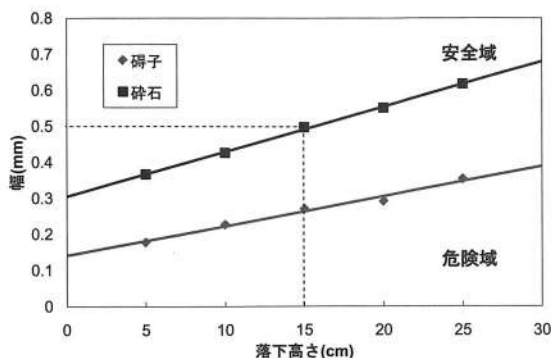


図17 粒子危険度の判定領域

が望ましい。この値は重錘50g、落下高さ15cmとした試験条件下での砕石値0.5mm以上に該当する。したがって、破碎碍子の端部形状の安全管理上からは、この試験条件下で0.5mmの判定値を満足する加工を施せば、安全な粒子として取り扱うことが可能になると考えられる。

5. 破碎碍子骨材の安全粒形化

実験に際しての搬入時碍子は一次破碎後であり、20～400mmに破碎された碍子はその大半を占めている。それゆえ、破碎碍子の安全骨材粒形化では室内用ジョークラッシャーによって30mm以下に再破碎を行った。これを骨材形状の定義⁴⁾に従い図18の形状分類機により、立方形の碍子と扁平形碍子（以下、扁平碍子）に分類した³⁾。つぎに、安全粒形化の加工過程で生じる碍子の粒形、すなわち立方形、扁平形の粒形産出状態、碍子粉末の発生量などについて検討した。

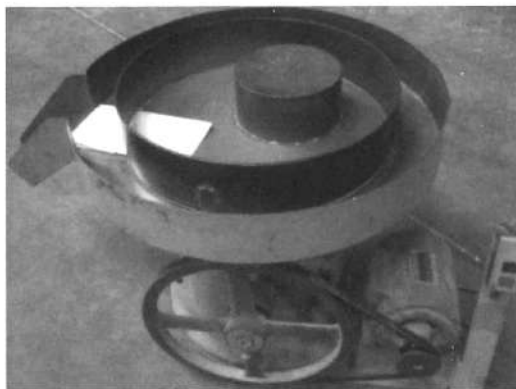


図18 骨材形状分類機

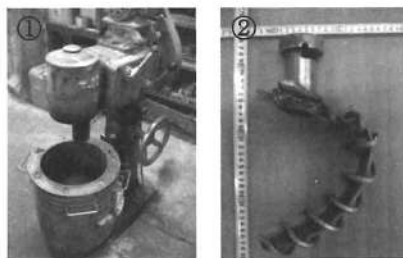
5.1 研磨試験機の検討

1) 骨材粒形の定義と分類³⁾

一般に碎石粗骨材の場合、扁平な形状の含有量は粗骨材全体の1割未満²⁾とされている。また、碎石骨材の粒形に関する表現法⁴⁾を碍子に適用して形状の判断をした。しかし、扁平・角張ったなどの形状についての境界領域の表現などには測定者の主観に依存する分類も避けられない。そのため、本実験では骨材の長径を(a)、短径(b)、高さ(c)として、 $a, b, c > 5\text{mm}$ を立方形、 $5 < a < 7\text{mm}$ 、 $5 < b < 7\text{mm}$ 、 $c < 5\text{mm}$ のとき細粒立方形、 $a > 7\text{mm}$ 、 $b > 5\text{mm}$ 、 $c < 5\text{mm}$ の粒子を扁平形として、試作の骨材形状分類器により研磨処理後の碍子を分類した。その分類工程では、特に網状ふるい目の対角線寸法による影響を加味して直径7.5mmの円形ふるい目のふるいで分類して、研磨後の碍子粒子形状について検討を加えた。

2) 碍子研磨機と研磨度

碍子の鋭利な端部を図19の攪拌羽根に研磨促進部材を施した混合攪拌式研磨機（以下、混合式）と図20に示す試作の六角型回転式研磨機（以下、回転式）を準備し、2種類の異なる研磨形式による破碎碍子の効率的な研磨性と安全粒形化を検討した。両研磨機の仕様を表4に示



研磨機①と攪拌羽根②

図19 混合攪拌式研磨機

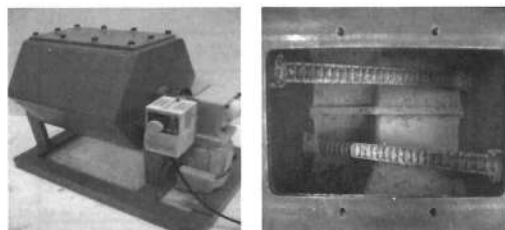


図20 六角型回転式研磨機と改良型内部の研磨促進部材

表4 研磨機の仕様

研磨機名称	六角回転式研磨機	混合攪拌式研磨機
回転速度 (rpm)	45	60
容器容量 (ℓ)	29	20
試料投入量 (kg)	15	12
機構	ドラム回転式	攪拌羽根

す。一回の研磨に対する碇子の投入量は、研磨機の試料容器に対して定め、研磨機の回転速度の影響も加味して定めた。ここでの試料投入量は混合式が12kg、回転式は15kg準備した。30mm以下に破碎した碇子の60分間研磨後の六角型回転式研磨機と混合攪拌式研磨機による鋭利幅の変化を図21に示した。この結果から、研磨機の種類は異なるが両研磨手法に共通して研磨は可能であることが確認できた。つぎに、適切な研磨時間を検討する目的から、個々に着色した5色の着色碇子を同時に投入したのち研磨時間15分毎に取り出して、予め写真映像に保存した同色碇子の鋭利幅の測定箇所を見出し、この測定端部と一致する箇所鋭利幅を粒形端部評価試験器で測

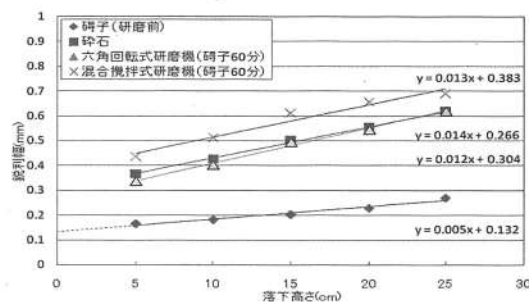


図21 異なる研磨方法による研磨後の鋭利幅

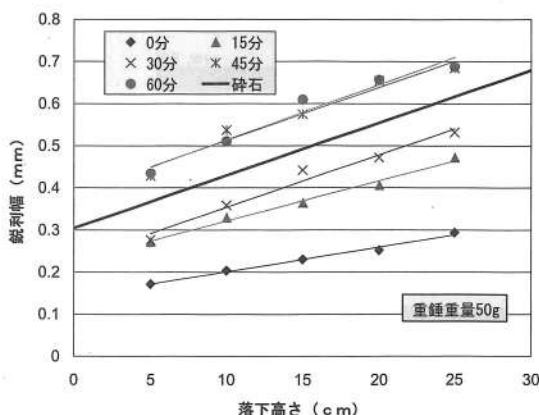


図22 混合攪拌式研磨機による研磨の推移

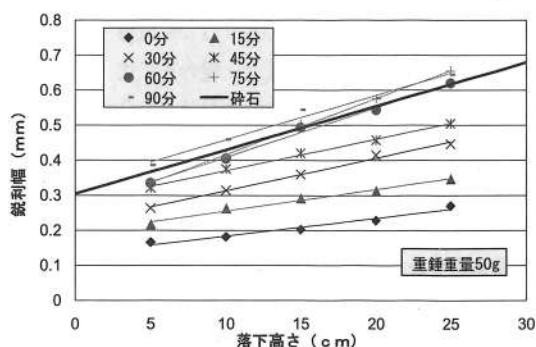


図23 六角回転式研磨機による研磨の推移

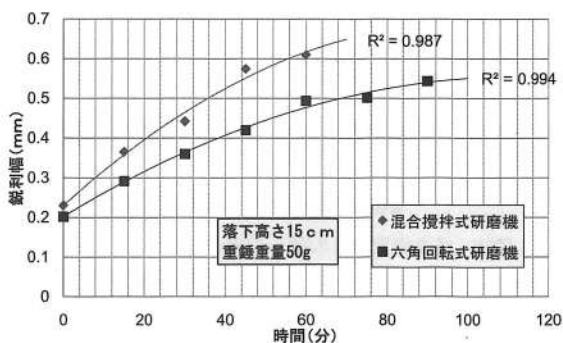


図24 研磨時間と鋭利幅との関係

定した。測定後はこれまでの研磨によりほぼ白色化した状態にある碇子を再着色した後、再度投入して継続研磨した。混合式研磨機と回転式研磨機による碇子端部の研磨推移過程を図22、図23に示した。両研磨方法ともに約30～40分程度で砕石の端部幅に近似するが、まだ十分な鋭利幅までは到達しない。いま、図24に粒形端部鋭利度測定器の重錘50g、落下高さ15cmでの研磨推移を示した。砕石の許容安全鋭利幅を0.5mmとすると混合式の45分研磨、回転式では混合式の約2倍に相当する90分間の研磨時間で砕石の端部幅に達することが分った。

5. 2 研磨碇子の粒形特性

1) 研磨機による粒形特性

搬入時の碇子は一次破碎機の相違により扁平碇子混入量が多少異なるため、これをA搬入、B搬入材料として取り扱い、研磨後に生じる立方形、扁平形、細粒分、碇子粉末の産出割合を検討した。図25でのA、B搬入に共通して研磨後に発生する細粒及び微粉の発生量は混合式が回転式よりも多量になる傾向を示している。これは混合式の特長な攪拌羽根による力学的な攪拌に依存するの

に対して、後者は粒子相互の擦り合わせ機構に起因すると考えられる。また、混合式に比して回転式による扁平碍子の発生量は少ない。本装置での回転速度は45回/分を採用したが、速度の増加によっては細粒化の促進や新たな破碎に起因する危険性碍子の発生、さらに粉末材の多量な産出なども懸念され、回転速度の影響も配慮すべき大切な要素と考えられる。

2) 回転式研磨機の改良

碎石の安全粒子端部幅に達するまでの2種類の研磨形式において、研磨時間の短縮から

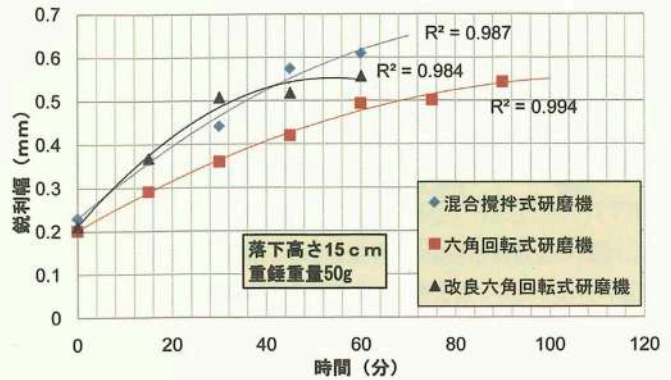


図26 研磨機の種類による研磨時間の相違

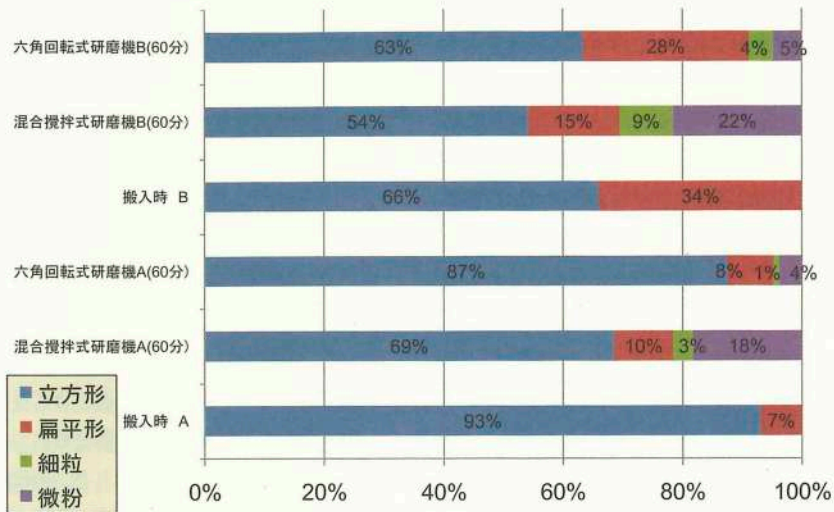


図25 異なる破碎碍子の研磨後の粒形分布

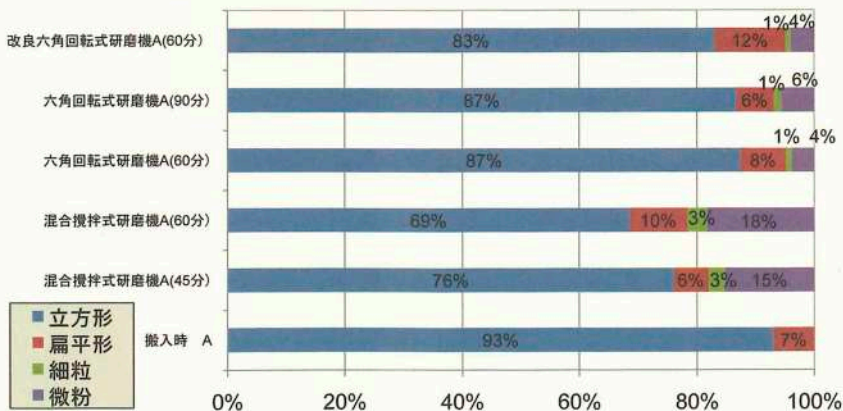
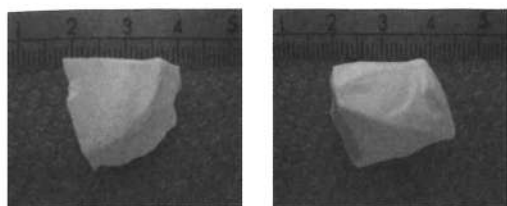


図27 研磨機の相違による発生碍子粒形分布



(鋭い粒子形状)

(砕石と同程度の粒子形状)

図28 破碎時と研磨後の碍子粒形

は混合式が回転式より優位であるが、粒子の細粒化や微粉末の発生量が多くなる傾向がある。これに反して、回転式では時間を要するが粉末材の発生は少ないことが判明した。この両特性から、回転式研磨機による粒子相互の研磨運動を促進させ研磨効率の向上から回転容器内部に十字交差した図20に示す特殊な研磨促進部材を取り付けた。この装置を施した研磨機での結果を図26および図27に示した。これからも明確のように、改良型の回転式研磨法は微粉末や扁平粒子の発生を抑制した上で、混合式と同程度の研磨時間で図28に示すように、砕石と同程度の安全性を有す碍子骨材の粒形化を可能とすることが判明した。このことは、困窮する碍子を含む多くの陶磁器類の再材料化へ一策をなすものと考えられる。

6. ま と め

本研究からは次のことを明らかにすることができた。

- (1) 粒径30mm未満の破碎碍子骨材の粒子端部は0.1～0.2mm程度の鋭利な形状で、市販紙が切断される程度の危険性を有している。しかしながら、六角型回転式研磨機などの研磨方法を適用することにより、扁平形や碍子粉の発生を抑制し、砕石と同程度の安全性を保有する骨材に加工可能である。また、研磨時間の短縮を図るうえで適切な研磨促進部材の設置は効果的と判断される。
- (2) 研磨機の回転数や破碎碍子の投入量の多少によっては研磨程度が異なるといえ、加工後の碍子端部の安全管理では砕石と同等の0.3mm以上の鋭利幅に、粒形端部鋭利度測定器では0.5mm以上を保持することが望ましい。

参考文献

- 1) 佐野茂：風船破碎法、粉体工学会論文集、2001.8
- 2) アスファルト舗装要綱：(社)日本道路協会 P.58、1992
- 3) 佐野正典：舗装、建設図書、No.11、pp.17～23、1995
- 4) (社)日本道路協会：舗装試験法便覧、pp.280-284、1988

Study on Recycling Crushed Insulator to Safe Shaped Aggregate

Masanori SANO, Nobutada TOBI,
Osamu TAKAHASHI, Kenji SAKAI